



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Παραγωγή αερίου σύνθεσης από αεριοποίηση
πρωτοβάθμιων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών**

Διπλωματική εργασία

του

Φαρμάκη Ευάγγελου

Χανιά, Ιούλιος, 2025

«Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης ».



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Παραγωγή αερίου σύνθεσης από αεριοποίηση
πρωτοβάθμιων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών**

Διπλωματική εργασία

του

Φαρμάκη Ευάγγελου

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής: Γκίκας Πέτρος (Επιβλέπων)

Καθηγητής: Γιαννής Απόστολος

Καθηγητής: Γουρνής Δημήτριος

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια λόγω της αύξησης του πληθυσμού και την συγκέντρωσή του στις πόλεις παρατηρείται αύξηση των υγρών αποβλήτων που χρήζουν επεξεργασίας. Αποτέλεσμα αυτού είναι ο τομέας της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων να δέχεται μεγάλες πιέσεις ως προς την επεξεργασία τους. Οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων, απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας για να πραγματοποιηθούν, αυξάνοντας σημαντικά τα λειτουργικά κόστη των εγκαταστάσεων συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου μέσω των αυξανόμενων εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Έτσι αναζητούνται καινοτόμες λύσεις που στοχεύουν στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας με την μετατροπή των αποβλήτων σε ενεργειακούς πόρους. Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ποιότητας του αερίου σύνθεσης (syngas) που προκύπτει από την αεριοποίηση πρωτοβάθμιων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Στην υφιστάμενη ΕΕΛ Ρεθύμνου έχει εγκατασταθεί η πιλοτική διάταξη με μέγιστη δυναμικότητα $5.000 \text{ m}^3/\text{d}$ και αποτελείται από τρία διακριτά στάδια. Αρχικά πραγματοποιείται η μικροκοσκίνηση των υγρών αποβλήτων, στη συνέχεια, τα παραγόμενα βιοστερεά υποβάλλονται σε ξήρανση, ενώ έπειτα, μέσω της διαδικασίας της αεριοποίησης παράγεται το τελικό προϊόν, δηλαδή το αέριο σύνθεσης (syngas), το οποίο τροφοδοτεί έναν ηλεκτροκινητήρα εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η μέση θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η αεριοποίηση κυμαίνεται μεταξύ 500 και 800°C , εύρος που διαπιστώθηκε ότι είναι ιδανικό για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της διαδικασίας. Στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης (syngas) μελετήθηκαν τα κύρια συστατικά του, τα οποία είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το υδρογόνο (H_2) και το οξυγόνο (O_2). Οι μέσες συγκεντρώσεις για το καθένα αναλυτικά, μετά τον καθαρισμό του, είναι για το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) 5,9%, για το μεθάνιο (CH_4) 3,4%, για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) 17,7%, για το υδρογόνο (H_2) 15,6% και τέλος, η μέση τιμή για το οξυγόνο (O_2) είναι 2%. Συμπερασματικά, η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε τη δυνατότητα αξιοποίησης των βιοστερεών από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων ως πολύτιμη ενεργειακή πηγή μέσω της αεριοποίησης, συμβάλλοντας τόσο στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης όσο και στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας. Η παραγωγή αερίου σύνθεσης με ικανοποιητική περιεκτικότητα σε καύσιμα συστατικά, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο, επιβεβαιώνει τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας και τη συμβολή της σε ένα πιο βιώσιμο και ενεργειακά αποδοτικό σύστημα διαχείρισης αποβλήτων.

Λέξεις-κλειδιά: «ΕΕΛ», «βιοστερεά», «μικροκοσκίνηση», «αεριοποίηση», «ενέργεια», «syngas».

Abstract

In recent years, due to population growth and urban concentration, there has been an increase in wastewater requiring treatment. As a result, the wastewater treatment sector is under significant pressure to process these effluents. Conventional wastewater treatment methods require large amounts of energy, significantly increasing the operational costs of facilities and contributing to the greenhouse effect through rising greenhouse gas emissions. Therefore, innovative solutions are being sought that aim to reduce energy consumption and promote the circular economy by converting waste into energy resources. The aim of this thesis is to investigate the quality of syngas produced from the gasification of primary sieved biosolids at the Rethymno Wastewater Treatment Plant (WWTP). A pilot unit has been installed at the existing Rethymno WWTP with a maximum capacity of 5,000 m³/d, consisting of three distinct stages. Initially, microsieving of the raw wastewater takes place. Then, the produced biosolids undergo drying. Subsequently, through the process of gasification, the final product—syngas—is produced, which is used to fuel an internal combustion engine for the generation of electrical and thermal energy. The average temperature at which gasification takes place ranges between 500 and 800°C, a range found to be ideal for maximizing the efficiency of the process. The main components of the produced syngas were studied, namely carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), carbon monoxide (CO), hydrogen (H₂), and oxygen (O₂). The average concentrations of each component after purification are as follows: carbon dioxide (CO₂) 5.9%, methane (CH₄) 3.4%, carbon monoxide (CO) 17.7%, hydrogen (H₂) 15.6%, and oxygen (O₂) 2%. In conclusion, this thesis highlighted the potential of utilizing biosolids from wastewater treatment plants as a valuable energy source through gasification, contributing to both reduced energy consumption and the promotion of the circular economy. The production of synthesis gas with satisfactory concentrations of combustible components such as carbon monoxide and hydrogen confirms the viability of the technology and its role in a more sustainable and energy-efficient waste management system.

Keywords: “WWTPs”, “biosolids”, “microsieving”, “gasification”, “syngas”.

Πρόλογος και Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Παραγωγή αερίου σύνθεσης από αεριοποίηση πρωτοβάθμιων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών» εκπονήθηκε στο εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, υπό την επίβλεψη του Κοσμήτορα και Καθηγητή Πέτρου Γκίκα.

Αρχικά θα ήθελα να απευθύνω την βαθιά μου εκτίμηση στον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Πέτρο Γκίκα ο οποίος με την καθοδήγηση του και την αμέριστη βοήθεια του καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου συνέβαλε τα μέγιστα στο να κατανοήσω απόλυτα το αντικείμενο στο οποίο είχα επικεντρωθεί.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Δρ. Κωνσταντίνο Τσαμουτσόγλου για την πολύτιμη βοήθεια του και φυσικά για τον χρόνο που αφιέρωσε για να με καθοδηγήσει και να με συμβουλέψει στην διάρκεια της συνεργασίας μας. Η αφοσίωση του, η υπομονή του όπως επίσης και η υποστήριξη του συνέβαλαν να επιτύχω τους στόχους μου.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την τεράστια ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και στους δικούς μου ανθρώπους που πάντα με την υποστήριξη τους και βεβαίως την βοήθεια τους ήταν συνοδοιπόροι σε αυτό το όμορφο και ενδιαφέρον ταξίδι των σπουδών μου.

Περίληψη.....	4
Abstract	5
Πρόλογος και Ευχαριστίες.....	6
Κατάλογος εικόνων	9
Κατάλογος πινάκων	10
Κατάλογος διαγραμμάτων	10
Εισαγωγή.....	11
Κεφάλαιο 1 : Επεξεργασία και περιγραφή των υγρών αποβλήτων και βιοστερεών	13
1.1. Υγρά Απόβλητα.....	13
1.2. Βιοστερεά	15
1.3. Ποιοτικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων.....	16
1.3.1. Φυσικά Χαρακτηριστικά.....	16
1.3.1.1. Ολικά στερεά	16
1.3.1.2 Ολικά Πτητικά στερεά	17
1.3.1.3. Ολικά Αιωρούμενα στερεά	17
1.3.1.4. Θερμοκρασία	17
1.3.1.5 Χρώμα	17
1.3.2 Ανόργανα χημικά χαρακτηριστικά	18
1.3.2.1. Άζωτο.....	18
1.3.2.2 Νιτρώδη και νιτρικά.....	18
1.3.2.3 Φώσφορος.....	18
1.3.3 Οργανικά χημικά χαρακτηριστικά.....	19
1.3.3.1 BOD	19
1.3.3.2 COD	20
1.3.4 Βιολογικά χαρακτηριστικά	20
1.3.4.1 Μικροοργανισμοί.....	20
1.4. Μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	21
1.4.1. Προεπεξεργασία	21
1.4.2. Πρωτοβάθμια επεξεργασία	22
1.4.3. Δευτεροβάθμια επεξεργασία	23
1.4.4. Τριτοβάθμια επεξεργασία	23
1.4.5. Απολύμανση.....	24

1.4.6. Παραγωγή, επεξεργασία και διάθεση Ιλύος.....	25
1.5. Απαιτήσεις ενέργειας σε μια ΕΕΛ	26
1.6. Επεξεργασία Ιλύος	29
1.6.1. Αποτέφρωση.....	29
1.6.2. Πυρόλυση.....	30
Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή ΕΕΛ Ρεθύμνου	32
2.1 Γενικές πληροφορίες εγκατάστασης.....	32
2.2 Αναλυτική περιγραφή των σταδίων επεξεργασίας λυμάτων	34
2.2.1. Φρεάτιο και μονάδα υποδοχής βοθρολυμάτων	34
2.2.2. Μονάδα εσχάρωσης.....	35
2.2.3. Μονάδα εξάμμωσης.....	35
2.2.4. Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας	37
2.2.5. Μονάδα απολύμανσης και διάθεσης λυμάτων	39
2.2.6. Χώρος επεξεργασίας ιλύος.....	40
2.2.7. Μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων.....	42
2.2.8. Μονάδα καθαρισμού νερού	44
Κεφάλαιο 3 : Περιγραφή του πιλοτικού συστήματος μικροκοσκίνισης-αεριοποίησης στην ΕΕΛ Ρεθύμνου	45
3.1. Σκοπός του έργου.....	45
3.2. Περιγραφή σχεδιασμού συστήματος αεριοποίησης	45
3.3. Μικροκοσκίνιση.....	47
3.4. Ξήρανση	50
3.5. Αεριοποίηση	52
Κεφάλαιο 4 : Πειραματική Διαδικασία	57
Κεφάλαιο 5 : Αποτελέσματα και συζήτηση	62
5.1.Ανάλυση διαγράμματος θερμοκρασίας-χρόνου.....	62
5.2.Ανάλυση αποτελεσμάτων και συζήτηση ποιότητας αερίου	67
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα	72
6.1 Συμπεράσματα.....	72
6.2 Μελλοντική Έρευνα.....	74
Κεφάλαιο 7 :Βιβλιογραφία	75

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1 Διάγραμμα ροής συμβατικού συστήματος ενεργούς ιλύος (Νταράκας 2010).	15
Εικόνα 1.2 Μορφές αζώτου στα αστικά λύματα (Νταράκας, 2010).....	18
Εικόνα 1.3 Καμπύλη BOD (Henze, 2008).....	19
Εικόνα 1.4.Ορθογώνια δεξαμενή οριζόντιας ροής (Sonune & Ghate, 2004).....	22
Εικόνα 1.5.Δεξαμενή με πυθμένα χοάνης (Sonune & Ghate, 2004).....	23
Εικόνα 1.6 Ενεργειακές και θερμικές απαιτήσεις (Capodaglio & Callegari, 2023) ...	28
Εικόνα 2.1 ΕΕΛ Ρεθύμνου.....	32
Εικόνα 2.2 Διάγραμμα ροής της ΕΕΛ Ρεθύμνου	34
Εικόνα 2.3 Μονάδα εξάμωσης (Γκίκας 2020).....	36
Εικόνα 2.4 ΔΔΚ κυκλικής διατομής μίας τυπικής ΕΕΛ (Γκίκας, 2020).	38
Εικόνα 3.1 Σημείο εγκατάστασης της πιλοτικής μονάδας του LIFE B2E4SustWWTP στην ΕΕΛ Ρεθύμνου	45
Εικόνα 3.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP (Manali and Gikas, 2022; Manali et al., 2022a).....	46
Εικόνα 3.3 Διάγραμμα ροής του πιλοτικού συστήματος του έργου LIFE B2E4SustWWTP	47
Εικόνα 3.4 Πειραματικό πιλοτικό μικροκόσκινο	48
Εικόνα 3.5 Συστήματος μικροκοσκίνισης με φίλτρο περιστρεφόμενου ιμάντα (RBF) (Gupta, 2018).	49
Εικόνα 3.6 Σύστημα μικροκοσκίνισης με φίλτρο περιστρεφόμενου τυμπάνου (RDF).	49
Εικόνα 3.7 Σχηματική απεικόνιση (αριστερά) και φωτογραφία (δεξιά) συστήματος μικροκοσκίνισης με φίλτρο δίσκου (DF) (Morling, 2019).....	50
Εικόνα 3.8 Διάταξη ξηραντή.....	51
Εικόνα 3.9 Σχηματική απεικόνιση του αεριοποιητή καθοδικής ροής (Takahashi et al., 1988).....	52
Εικόνα 3.10 Απεικόνιση του πολυκυκλώνα.....	54
Εικόνα 3.11 Φίλτρο βιομάζας.....	54
Εικόνα 3.12 Πυρσός καύσης.....	55
Εικόνα 3.13 Σύστημα καθαρισμού του αερίου	55
Εικόνα 3.14 Ο αεριοποιητής του προγράμματος LIFE B2E4SustWWTP	56
Εικόνα 4.1 Ο αεριοποιητής του προγράμματος LIFE B2E4SustWWTP	57
Εικόνα 4.2 Σύστημα καταγραφής θερμοκρασίας πειράματος	58
Εικόνα 4.3 Σύστημα καθαρισμού και φιλτραρίσματος αερίου.....	59
Εικόνα 4.4 Πυρσός καύσης και εμφάνιση φλόγας.....	60
Εικόνα 4.5 Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.....	60

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1 Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης των μεθόδων (ΕΡΑ, 1999α; ΕΡΑ 1999β; ΕΡΑ1999c).	24
Πίνακας 1.2 Ενεργειακή κατανάλωση ΕΕΛ.(Panepinto et al., 2016).	27
Πίνακας 2.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά εξόδου μονάδας (Πηγή: http://astikalimata.ypeka.gr ΑΕΠΟ της ΕΕΛ Ρεθύμνου)	33
Πίνακας 2.2 Μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις μετάλλων στο τελικό προϊόν διάθεσης compost. (Πηγή: http://astikalimata.ypeka.gr ΑΕΠΟ της ΕΕΛ Ρεθύμνου).	33
Πίνακας 2.3 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά εξάμμωση (Κεχαγιαδάκη, 2019).	36
Πίνακας 2.4 Βασικά χαρακτηριστικά δεξαμενών αερισμού (Ματσούκα, 2003).	37
Πίνακας 2.5 Βασικά χαρακτηριστικά ΔΔΚ (Ματσούκα, 2003)	38
Πίνακας 2.6 Χαρακτηριστικά δεξαμενής χλωρίωσης (Κεχαγιαδάκη, 2019)	39
Πίνακας 2.7 Χαρακτηριστικά μονάδας βιομηχανικών αποβλήτων.(Πηγή: http://astikalimata.ypeka.gr ΑΕΠΟ της ΕΕΛ Ρεθύμνου)	43

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1:Κύρια χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων	16
Διάγραμμα 1.2: Σχηματικό διάγραμμα συμβατικού εργοστασίου αποτέφρωσης, το οποίο είναι εξοπλισμένο με ατμοσφαιρικό θάλαμο καύσης ρευστοποιημένης κλίνης με φυσαλίδες (Murakami et al., 2009).	30
Διάγραμμα 1.3:Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ρευστοποιημένης κλίνης για πυρόλυση ιλύος λυμάτων.....	31
Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου (20-9-2024).....	63
Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου (26-10-2024).....	64
Διάγραμμα 5.3:Διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου (9-11-2024)	65
Διάγραμμα 5.4:Διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου (13-11-2024).....	65
Διάγραμμα 5.5: Διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου (20-11-2024).....	66
Διάγραμμα 5.6: Διάγραμμα συγκεντρώσεις του παραγόμενου καθαρισμένου αερίου σύνθεσης (20-9-2024)	67
Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα συγκεντρώσεων του παραγόμενου καθαρισμένου αερίου σύνθεσης (26-10-2024)	68
Διάγραμμα 5.8: Διάγραμμα συγκεντρώσεων του παραγόμενου αερίου σύνθεσης αερίων (9-11-2024)	69
Διάγραμμα 5.9: Διάγραμμα συγκεντρώσεων του παραγόμενου αερίου σύνθεσης αερίων (13-11-2024)	69
Διάγραμμα 5.10: Διάγραμμα συγκεντρώσεων του παραγόμενου αερίου σύνθεσης αερίων (20-11-2024)	70

Εισαγωγή

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων τα τελευταία χρόνια είναι μια αναγκαιότητα σε κάθε σύγχρονη πόλη ή και ακόμα και ένα μικρό οικισμό (Gikas, 2020). Σκοπός της επεξεργασίας των λυμάτων είναι η ελαχιστοποίηση των συνεπειών της διάθεσης λυμάτων στο περιβάλλον με απώτερο στόχο την προστασία του. Η επεξεργασία των λυμάτων συμβάλει στην πρόληψη της μόλυνσης των ποταμών και λιμνών διατηρώντας τα υδάτινα οικοσυστήματα και προστατεύοντας την υγεία των ανθρώπων.

Οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) λόγω των πολλών διεργασιών που πραγματοποιούν έχουν σαν αποτέλεσμα την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει εκτιμηθεί πως πάνω από το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας από υπηρεσίες κοινής ωφελείας αντιστοιχεί στις ΕΕΛ. Συγκεκριμένα οι μικρότερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων λειτουργούν με συστήματα παρατεταμένου αερισμού χωρίς πρωτοβάθμια καθίζηση. Στα συστήματα αυτά, το λύμα εισέρχεται απευθείας στη δεξαμενή αερισμού χωρίς να γίνεται πρωτοβάθμια καθίζηση γεγονός που επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Ο αερισμός είναι μια από τις διεργασίες με την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας που φτάνει σε ποσοστό έως και 53% της συνολικής ενέργειας μιας ΕΕΛ. Η εύρεση νέων μεθόδων αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του ενεργειακού αποτυπώματος καθώς όχι μόνο μειώνει τα λειτουργικά κόστη της εγκατάστασης αλλά συμβάλει επίσης στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που έχουν άμεση σχέση με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας λυμάτων (Tchobanoglous, 2009).

Η συμβατική επεξεργασία αστικών λυμάτων στις ΕΕΛ επικεντρώνεται στην απομάκρυνση ρύπων όπως οργανική ύλη, αιωρούμενα στερεά και θρεπτικά συστατικά, προκειμένου να αποφευχθεί η ρύπανση των επιφανειακών υδάτων. Η πλειονότητα των ΕΕΛ στην Ελλάδα χρησιμοποιεί τη μέθοδο της ενεργού ιλύος, ενώ μικρός αριθμός εγκαταστάσεων χρησιμοποιεί κατασκευασμένους υδροτόπους ή μεμβρανικούς βιοαντιδραστήρες (MBRs) (Bertrand et al., 2015). Σε όλες τις διεργασίες παράγεται αξιόλογη ποσότητα ιλύος γνωστή ως βιοστερεά, που αποτελεί παραπροϊόν και απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία. Η επαναχρησιμοποίηση ή η ενεργειακή αξιοποίηση τους θεωρείται η προτιμότερη και φιλικότερη ως προς το περιβάλλον συγκριτικά με την διάθεση τους σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Η αναερόβια χώνευση είναι μία από τις μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί για τη διαχείριση των βιοστερεών και θεωρείται η πιο αποτελεσματική.

Πρόσφατη μελέτη δείχνει ότι η αυξημένη φόρτιση των ΕΕΛ –σε συνδυασμό με την κλιματική κρίση– αναμένεται να αυξήσει περαιτέρω την ενεργειακή κατανάλωση μέχρι το τέλος του αιώνα. Η παγκόσμια παραγωγή λυμάτων προβλέπεται να αυξηθεί κατά 24% έως το 2030 και κατά 51% έως το 2050 (Khalkhali and Mo, 2020). Αντιθέτως, δίδεται ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG).

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει θεσπίσει νέα Οδηγία (2022/0345 (COD)) που απαιτεί τη λειτουργία ενεργειακά αυταρκών ΕΕΛ (European Commission, 2022). Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως το συνθετικό αέριο (syngas) που παράγεται μέσω αεριοποίησης και η υιοθέτηση τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας, θα συμβάλουν

σημαντικά στη μείωση των ενεργειακών αναγκών. Ο στόχος είναι η μετατροπή των ΣΕΛ από καταναλωτές ενέργειας σε ενεργειακά ουδέτερες ή και θετικές εγκαταστάσεις (Tsalas et al., 2025). Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ποιότητας του αερίου σύνθεσης (syngas) που προκύπτει από την αεριοποίηση πρωτοβάθμιων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.

Κεφάλαιο 1 : Επεξεργασία και περιγραφή των υγρών αποβλήτων και βιοστερεών

1.1. Υγρά Απόβλητα

Στις μέρες μας η κοινωνία χαρακτηρίζεται από την έντονη αύξηση του πληθυσμού στις πόλεις με αποτέλεσμα η παραγωγή αποβλήτων από τις ανθρώπινες δραστηριότητες να είναι αναπόφευκτη. Ένα σημαντικό μέρος αυτών καταλήγει τελικά ως λύματα., των οποίων η ποσότητα και η ποιότητα επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες. Ενδεικτικά, καθοριστικό ρόλο παίζουν τα αστικά απόβλητα, τα οποία προέρχονται από οικιακές δουλειές, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων είναι υγρά και εξαρτώνται από το επίπεδο διαβίωσης. Εξίσου σημαντικός είναι ο τρόπος ζωής του πληθυσμού, ενώ σημαντικότερο παράγοντα όλων αποτελούν τα εκάστοτε νομοθετικά πλαίσια και τα συγκεκριμένα νομοθετικά όρια που έχουν θεσπιστεί (Treviño Arjona & Rodríguez Cisneros, 2005).

Επειδή ο ανθρώπινος οργανισμός είναι ευάλωτος στην παρατεταμένη έκθεση στην πλειοψηφία των αποβλήτων, η οποία θεωρείται επιζήμια για την υγεία του, καθίσταται αναγκαία η επεξεργασία των λυμάτων και η τελική τους διάθεση σε κάποιον αποδέκτη (Treviño Arjona & Rodríguez Cisneros, 2005).

Ως υγρά απόβλητα χαρακτηρίζονται τα απόβλητα που προέρχονται από το νερό που τροφοδοτεί έναν οικισμό αφού πρώτα χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών. Ανάλογα με την πηγή προέλευσης τους τα υγρά απόβλητα ορίζονται ως το σύνολο των υγρών απορροών ή των ρύπων που μεταφέρονται από την υγρή φάση και απομακρύνονται από κατοικίες, ιδρύματα, εμπορικές, και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μαζί με υπόγεια ύδατα, επιφανειακά νερά και όμβρια ύδατα που πιθανώς υπάρχουν στην περιοχή (George Tchobanoglous, 2003).

Τα υγρά απόβλητα χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την πηγή προέλευσης τους.

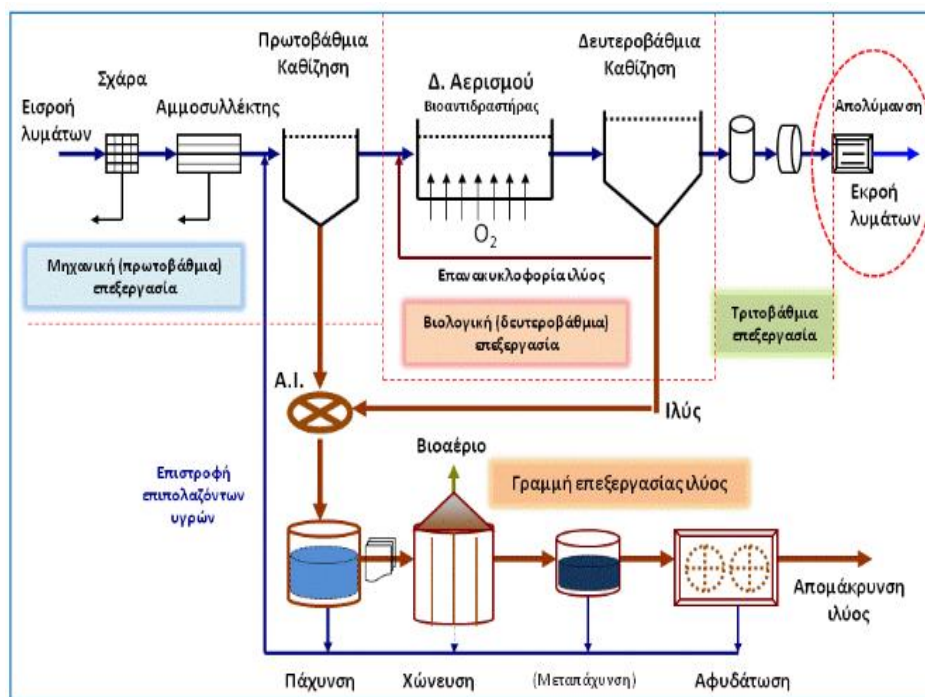
- **Οικιακά λύματα:** Προέρχονται από κατοικημένες περιοχές και είναι αποτέλεσμα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.
- **Βιομηχανικά λύματα:** Προέρχονται από βιομηχανίες και γενικά βιομηχανικές και εμπορικές δραστηριότητες και δεν ανήκουν στα αστικά λύματα.
- **Αστικά λύματα:** Προέρχονται από την ένωση των οικιακών, των βιομηχανικών και των ομβρίων υδάτων.
- **Γεωργικά λύματα:** Προέρχονται από γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες.

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία αλλά απαραίτητη για την ανθρώπινη υγεία. Μελέτες έχουν δείξει ότι το 40% του πληθυσμού, δηλαδή 3 δισεκατομμύρια άνθρωποι, δεν διαθέτουν τις απαραίτητες εγκαταστάσεις υγιεινής για την ασφαλή διάθεση και επεξεργασία των υγρών αποβλήτων (Li et al., 2024).

Οι τρόποι που πραγματοποιείται η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι ποικίλοι και διαφέρουν ανάλογα την ποιότητα των αποβλήτων. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει μεθόδους όπως βιολογική και χημική επεξεργασία και άλλες όπως επεξεργασία με χρήση μεμβρανών. Η τελευταία μέθοδος θεωρείται μάλιστα η πιο πρωτοποριακή σε σχέση με τις υπόλοιπες προσφέροντας υψηλής ποιότητας επεξεργασία. Κατά την επεξεργασία αυτήν παράγονται ορισμένα παραπροϊόντα όπως εσχαρίσματα, άμμος, και λίπη που απαιτούν συγκεκριμένη διαδικασία απομάκρυνσης. Συγκεκριμένα το παραπροϊόν που βγαίνει σε μεγαλύτερη ποσότητα και χρήζει την περισσότερη επεξεργασία είναι η ιλύς (Τζιώτζιος, 2015).

Η διαχείριση και η απόρριψη της ιλύος που μένει σαν κατάλοιπο από μία Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) είναι ένα πολύ σημαντικό περιβαλλοντολογικό πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί σε παγκόσμια κλίμακα. Οι πιο κοινές μέθοδοι διάθεσης περιλαμβάνουν την υγειονομική ταφή σε κάποια χωματερή και την χρήση της για γεωργικές δραστηριότητες. Παρόλα αυτά η υγειονομική ταφή δεν θεωρείται η καταλληλότερη βραχυπρόθεσμη, πόσο μάλλον μακροπρόθεσμη λύση λόγω των τεράστιων ποσοτήτων που παράγονται καθημερινά στις Εγκαταστάσεις. Η εφαρμογή της ιλύος σαν εδαφοβελτιωτικό βοηθάει και βελτιώνει την γονιμότητα του εδάφους και μειώνει την χρήση φωσφορικών λιπασμάτων. Ωστόσο κατά την χρήση της απελευθερώνονται επικίνδυνα συστατικά όπως βαρέα μέταλλα και οργανικοί ρύποι (Wong et al. 1999).

Η ενεργειακή αξιοποίηση της ιλύος είναι μια πρωτοπόρα λύση που θα αντικαταστήσει την ανεξέλεγκτη διάθεση σε χώρους ταφής. Η χρήση της ενέργειας που θα παραχθεί θα χρησιμοποιείται για της ενεργειακές ανάγκες της διαχείρισης και επεξεργασίας της ιλύος αλλά και των λυμάτων (Βλυσίδης, Α., 22 Μαρτίου 2010). Συγκεκριμένα η ηλεκτρική ενέργεια που θα απαιτείται για την επεξεργασία τα επόμενα 20 χρόνια θα αυξηθεί κατά είκοσι τοις εκατό και αυτό θα οδηγήσει και στην αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Για τον λόγο αυτό, σκοπός μας είναι η μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και ταυτόχρονα μείωση των Εκπομπών των Αερίων του Θερμοκηπίου (Greenhouse Gases GHG) (Wen-Wei Li, 2015).



Εικόνα 1.1 Διάγραμμα ροής συμβατικού συστήματος ενεργούς ιλύος (Νταράκας 2010).

1.2. Βιοστερεά

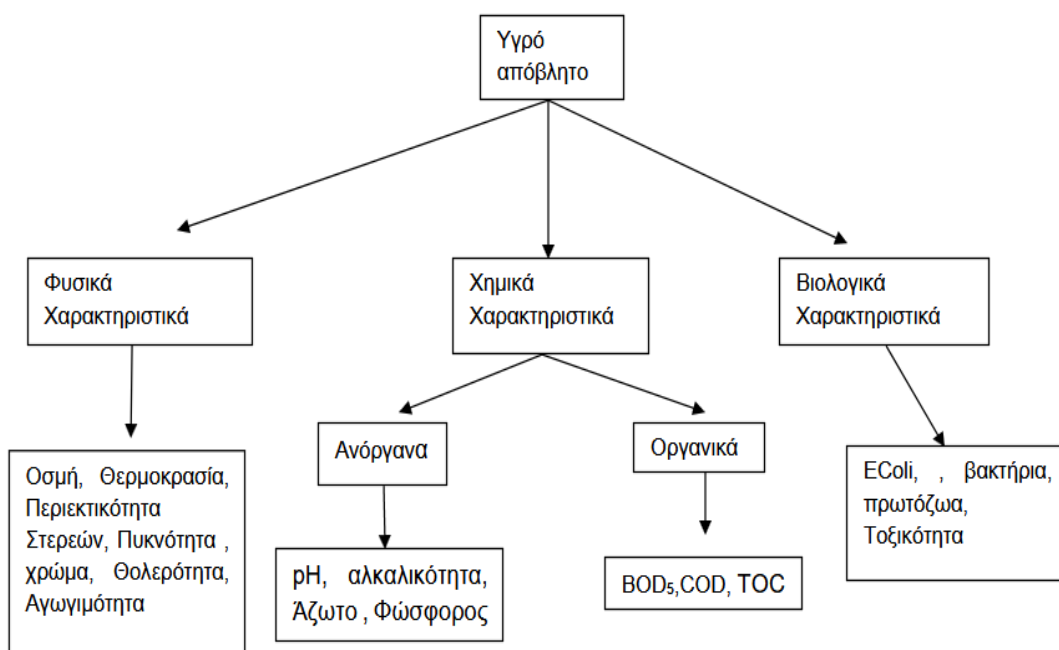
Βιοστερεά ορίζονται κυρίως οργανικά ημιστερεά προϊόντα των υγρών αποβλήτων το οποίο παραμένει ως υπόλειμμά μετά την βιολογική ή χημική σταθεροποίηση των στερεών έτσι ώστε να γίνουν κατάλληλα για αποδοτική χρήση (George Tchobanoglous, 2003). Όπως είναι αναμενόμενο η μεγάλη παραγωγή βιοστερεών αποτελεί ένα μεγάλο περιβαλλοντικό και οικονομικό πρόβλημα. Το κυριότερο πρόβλημα που προκύπτει από την φυσική αποσύνθεση των βιοστερεών είναι η παραγωγή του ισχυρότερου αερίου που οδηγεί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και κατ' επέκταση και στην υπερθέρμανση του πλανήτη, του μεθανίου (Basta & Sloan, 1999).

Οι σημερινές πρακτικές επεξεργασίας των βιοστερεών περιλαμβάνουν την διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής διότι ο τρόπος επεξεργασίας αλλά και η χρήση των βιοστερεών ως λιπάσματα ελλοχεύει σημαντικούς κινδύνους που συσχετίζονται με την παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών και βαρέων μετάλλων (International Aluminum Institute, 2003).

Αρκετές βαριές βιομηχανίες που καταναλώνουν πολύ μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα βιομηχανίες τσιμέντου, γυαλιού και αλουμινίου, προσπαθούν να βρουν διάφορες φθηνότερες εναλλακτικές για την παραγωγή ενέργειας. Μια τέτοια λύση αποτελεί η χρήση αυτών των βιοστερεών για την παραγωγή ενέργειας (Dole, 2003).

1.3. Ποιοτικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων

Η κατανόηση της φύσης και των χαρακτηριστικών των υγρών αποβλήτων συνιστά μία εξαιρετικά απαραίτητη γνώση για να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός και η λειτουργία των συστημάτων συλλογής, επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων. Ο τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η μελέτη των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους. Τα κύρια χαρακτηριστικά παρουσιάζονται αναλυτικά στο Διάγραμμα 1.1.



Διάγραμμα 1.1:Κύρια χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων

1.3.1. Φυσικά Χαρακτηριστικά

1.3.1.1. Ολικά στερεά

Τα υγρά απόβλητα περιέχουν μια ποικιλία στερεών υλικών από ογκώδη στερεά μέχρι και κολλοειδή στερεά. Για να μπορέσει να γίνει ένας χαρακτηρισμός των υγρών αποβλήτων, τα ογκώδη στερεά απομακρύνονται πριν το δείγμα αναλυθεί ως προς την περιεκτικότητά του σε στερεά. Η ανάλυση γίνεται με την εισαγωγή αποβλήτου σε μια κωνική φιάλη Imhoff 1L για την εύρεση του όγκου των στερεών μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (1h) σε millimeters (George Tchobanoglous, 2003). Συγκεκριμένα τα ολικά στερεά ορίζονται ως το υπόλειμμα που απομένει κατά την εξάτμιση και ξήρανση ενός δείγματος υγρών αποβλήτων στους 103-105°C (Muttamara, 1996).

1.3.1.2 Ολικά Πτητικά στερεά

Το υλικό που εξατμίζεται και οξειδώνεται κατά την καύση ενός δείγματος στους 500 ± 50 °C χαρακτηρίζεται ως πτητικό στερεό. Σε γενικές γραμμές, τα πτητικά στερεά (Volatile Solids, VS) θεωρούνται ότι αποτελούνται κυρίως από οργανική ύλη, αν και κάποια οργανικά συστατικά ενδέχεται να μην οξειδωθούν πλήρως στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες, ενώ ορισμένα ανόργανα στερεά είναι δυνατόν να καούν μερικώς σε αυτές τις συνθήκες (George Tchobanoglous, 2003).

1.3.1.3. Ολικά Αιωρούμενα στερεά

Σαν αιωρούμενα στερεά ορίζεται η ύλη που μπορεί να αφαιρεθεί από το νερό μέσω της διαδικασίας της διήθησης χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα είδη μεμβρανών. Η παρουσία των αιωρούμενων στερεών μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στον υδάτινο αποδέκτη, όπως θολότητα ή ακόμα και έντονη συσσώρευση ιλύος (Sperling, 2007).

1.3.1.4. Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι μια σημαντική παράμετρος των υγρών αποβλήτων η οποία μελετήθηκε προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η σύστασή τους. Για να καθοριστεί η μέση ετήσια θερμοκρασία των λυμάτων μελετήθηκε η γεωγραφική τοποθεσία, διότι ανάλογα με αυτήν, η μέση ετήσια θερμοκρασία διαφέρει και οι τιμές κυμαίνονται από 10 έως 27°C. Η θερμοκρασία επιδρά επιπλέον και στην ζωή των υδρόβιων οργανισμών όπως στους ρυθμούς των χημικών και βιολογικών αντιδράσεων τους. (Muttamara, 1996). Τέλος επηρεάζει ακόμα και την διαλυτότητα των αερίων όπως επίσης και το ιξώδες του υγρού (Sperling, 2007).

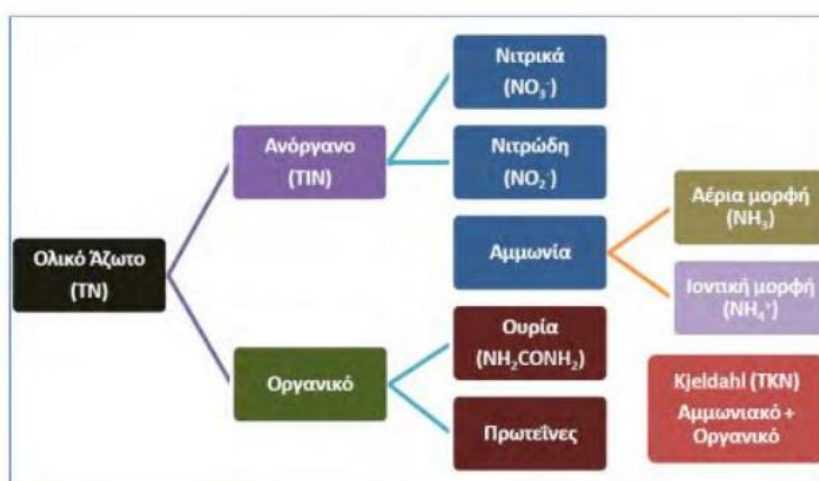
1.3.1.5 Χρώμα

Ένα άλλο ποιοτικό χαρακτηριστικό των υγρών αποβλήτων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τα χαρακτηρίσει είναι το χρώμα. Συγκεκριμένα όταν το χρώμα που παρουσιάζουν είναι ανοιχτό καφέ συνήθως είναι ηλικίας μικρότερης των 6 ωρών ενώ στην περίπτωση που είναι ανοιχτό έως ήπιο γκρι σημαίνει ότι έχουν υποστεί κάποιο βαθμό αποσύνθεσης. Τέλος, αν το χρώμα είναι σκούρο γκρι και τείνει προς μαύρο τα λύματα χαρακτηρίζονται σηπτικά έχοντας υποστεί σε μεγάλο βαθμό κάποια βακτηριακή αποσύνθεση υπό αναερόβιες συνθήκες. Τέλος όταν παρουσιάζουν έντονο μαύρισμα είναι αποτέλεσμα παρουσίας διάφορων θειούχων ενώσεων και ιδιαίτερα του θειούχου σιδήρου (Munter, 2003).

1.3.2 Ανόργανα χημικά χαρακτηριστικά

1.3.2.1. Άζωτο

Το άζωτο είναι το κυρίαρχο συστατικό που συναντιέται στα υγρά απόβλητα, καθώς είναι το σημαντικότερο συστατικό για την σύνθεση των πρωτεϊνών. Όσον αφορά το άζωτο που περιέχεται στα υγρά απόβλητα, είναι απαραίτητο να είναι γνωστές πληροφορίες όπως η συγκέντρωση του και η μορφή με την οποία απαντάται κατά την διάρκεια των διεργασιών επεξεργασίας. Το ολικό άζωτο όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στην εικόνα 1.2 χωρίζεται σε οργανικό και ανόργανο και στην συνέχεια το οργανικό χωρίζεται σε 3 άλλες μικρότερες κατηγορίες, στις οποίες ανήκουν τα νιτρικά, τα νιτρώδη, και τέλος η αμμωνία. Αντίστοιχα το ανόργανο άζωτο χωρίζεται και αυτό σε άλλες 2 μικρότερες κατηγορίες στις οποίες ανήκουν η ουρία και οι πρωτεΐνες. Τέλος η τιμή του αζωτούχο φορτίου στα αστικά ανεπεξέργαστα λύματα κυμαίνεται από την τιμή 35 έως 100 mg/L (Νταρακάς, 2010).



Εικόνα 1.2 Μορφές αζώτου στα αστικά λύματα (Νταρακάς, 2010).

1.3.2.2 Νιτρώδη και νιτρικά

Τα νιτρώδη (NO₂) είναι ανόργανες ενώσεις που περιέχουν το ιόν νιτρώδους και αποτελούν το ενδιάμεσο στάδιο στην οξείδωση της αμμωνίας (NH₃) κατά την διαδικασία της νιτροποίησης. Τα νιτρικά, είναι ανόργανες ενώσεις που περιέχουν το ιόν νιτρικού και είναι το τελικό προϊόν της οξείδωσης της αμμωνίας ολοκληρώνοντας την διαδικασία της νιτροποίησης (Muttamara, 1996).

1.3.2.3 Φώσφορος

Ο φώσφορος είναι ένα από τα κυριότερα συστατικά των ζωντανών οργανισμών και στα υγρά απόβλητα περιέχονται με τις 2 εξής μορφές:

1) Ανόργανος φώσφορος κυρίως ορθοφωσφορικός(PO_4^{-3} , HPO_4^{-3} , $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$) η ως πολυφωσφορικά ($\text{P}_2\text{O}_7^{-4}$).

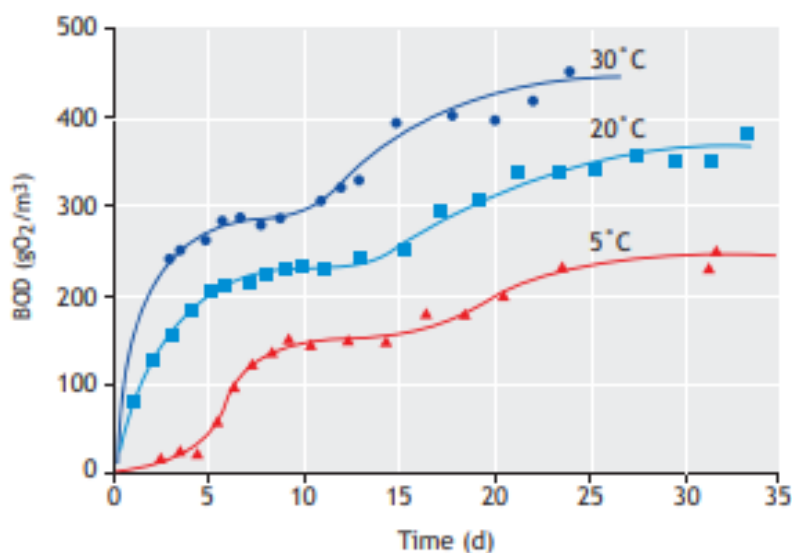
2) Οργανικός φώσφορος, σε μικρότερες ποσότητες συγκριτικά με τον ανόργανο

Η παρουσία του φωσφόρου είναι απαραίτητη και χρησιμοποιείται συνήθως στις βιολογικές διεργασίες. Από άποψη ρύπανσης του περιβάλλοντος η διοχέτευση αποβλήτων σε υδάτινους αποδέκτες που περιέχουν φώσφορο οδηγεί στην ανάπτυξη του φαινομένου του ευτροφισμού, δηλαδή της υπερβολικής ανάπτυξης φυκιών και άλλων υδρόβιων οργανισμών (Λεγόντης Ανέστης, 2010).

1.3.3 Οργανικά χημικά χαρακτηριστικά

1.3.3.1 BOD

Η οργανική ύλη είναι ο κυριότερος ρυπαντής στα λύματα και μετριέται σε BOD (Biochemical Oxygen Demand) και COD (Chemical Oxygen Demand). Αρχικά το BOD ορίζεται ως η συγκέντρωση της οργανικής ύλης, όσον αφορά το οξυγόνο που απαιτείται από τους μικροοργανισμούς για την πλήρη οξείδωση των αποβλήτων. Επειδή η βιοχημική αντίδραση είναι μια βραδεία διαδικασία για την οποία απαιτούνται μεγάλα χρονικά διαστήματα για να ολοκληρωθεί, μετριέται συνήθως το οξυγόνο που καταναλώνεται εντός των 5 ημερών (Woodard & Curran, Inc., 2006). Στην εικόνα 1.3 παρουσιάζεται η συγκέντρωση του BOD συναρτήσει του χρόνου.



Εικόνα 1.3 Καμπύλη BOD (Henze, 2008)

1.3.3.2 COD

Το COD είναι ένας σημαντικός δείκτης μελέτης των υγρών αποβλήτων όπως αντίστοιχα και το BOD. Ο προσδιορισμός του COD πραγματοποιείται με την κατανάλωση διχρωμικού καλίου. Το διχρωμικό κάλιο αποτελεί ένα πολύ ισχυρό οξειδωτή που έχει σαν αποτέλεσμα και την οξείδωση και των μη βιολογικά αποδόσιμων ενώσεων (Woodard & Curran, Inc., 2006). Ένα πλεονέκτημα της μέτρησης του COD σε αντίθεση με την μέτρηση του BOD είναι ο χρόνος της ανάλυσης. Στην πρώτη περίπτωση ολοκληρώνεται σε 120 λεπτά ενώ στη δεύτερη διαρκεί έως και 5 μέρες (George Tchobanoglous, 2003).

1.3.4 Βιολογικά χαρακτηριστικά

1.3.4.1 Μικροοργανισμοί

Τα ακατέργαστα λύματα περιέχουν παθογόνους μικροοργανισμούς που αποβάλλονται από τους ανθρώπους και τα ζώα. Εξαιτίας αυτού, είναι πιθανή η διάδοση ορισμένων ασθενειών στους ανθρώπους. Κατά την διαδικασία της επεξεργασίας ένα μεγάλο ποσοστό των μικροοργανισμών απενεργοποιείται και συγκεκριμένα το 50%-90% των βακτηρίων (Sheridan K Haack et al., 2009).

Οι μικροοργανισμοί χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την πηγή άνθρακα που χρησιμοποιούν σαν τροφή και δεύτερον ανάλογα με την παρουσία οξυγόνου στο περιβάλλον που αναπτύσσονται. Στην πρώτη κατηγορία οι μικροοργανισμοί χωρίζονται σε αυτότροφους, δηλαδή σαν πηγή τροφής χρησιμοποιούν το διοξείδιο του άνθρακα και σε ετερότροφους οι οποίοι χρησιμοποιούν τον οργανικό άνθρακα. Στην δεύτερη κατηγορία, ανάλογα με την παρουσία οξυγόνου στο περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται οι μικροοργανισμοί, χωρίζονται σε αερόβιους και αναερόβιους. Οι πρώτοι χρειάζονται οξυγόνο για την λειτουργία τους ενώ οι δεύτεροι δρουν και σε περιβάλλον απουσίας οξυγόνου (George Tchobanoglous, 2003).

Τα βασικότερα είδη μικροοργανισμών που συναντάμε σε μία ΕΕΛ είναι:

1) Μύκητες: Είναι ετερότροφοι, αερόβιοι, μη φωτοσυνθετικοί, χημειότροφοι οργανισμοί. Συνήθως οι μύκητες εμφανίζονται σε όλα τα περιβάλλοντα ακόμη και σε δυσμενείς συνθήκες όπως σε συνθήκες χαμηλού pH και μικρές συγκεντρώσεις θρεπτικών.

2) Βακτήρια: Είναι μονοκύτταροι οργανισμοί, οι οποίοι αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την αποδόμηση και σταθεροποίηση την οργανικής ύλης, τόσο στη φύση όσο και στις ΕΕΛ. Ένα από τα πιο γνωστά βακτήρια είναι η *Escherichia coli*. Τέλος όπως και οι μύκητες έτσι και τα βακτήρια είναι υπεύθυνα για την σήψη του οργανικού φορτίου.

3) Ιοί: Είναι ανθεκτικοί οργανισμοί οι οποίοι αναπαράγονται εύκολα εφόσον βρεθούν σε κατάλληλες συνθήκες. Υπάρχουν πάνω από 100 είδη εντερικών ιών που μπορούν

να προκαλέσουν λοιμώξεις ή ασθένειες και απεκκρίνονται καθημερινά από τον άνθρωπο. Σε περίπτωση επαφής με αυτόν, προκαλούν προβλήματα υγείας. (Sheridan K Haack et al., 2009).

1.4. Μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

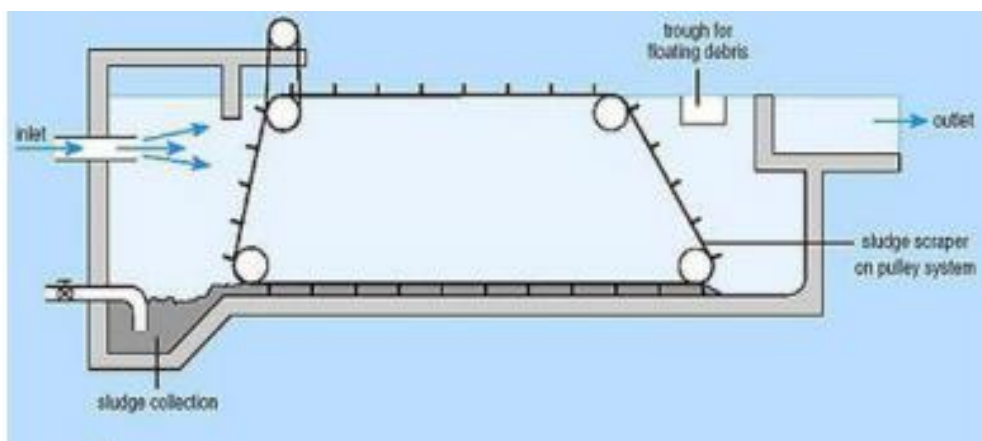
1.4.1. Προεπεξεργασία

Η προεπεξεργασία των υγρών αποβλήτων περιλαμβάνει τα στάδια της ανύψωσης της απόσμησης, της εσχάρωσης, της εξάμμωσης, της λιποσυλλογής και τέλος της μέτρησης της παροχής (Χρυσικόπουλος Κωνσταντίνος, 2018).

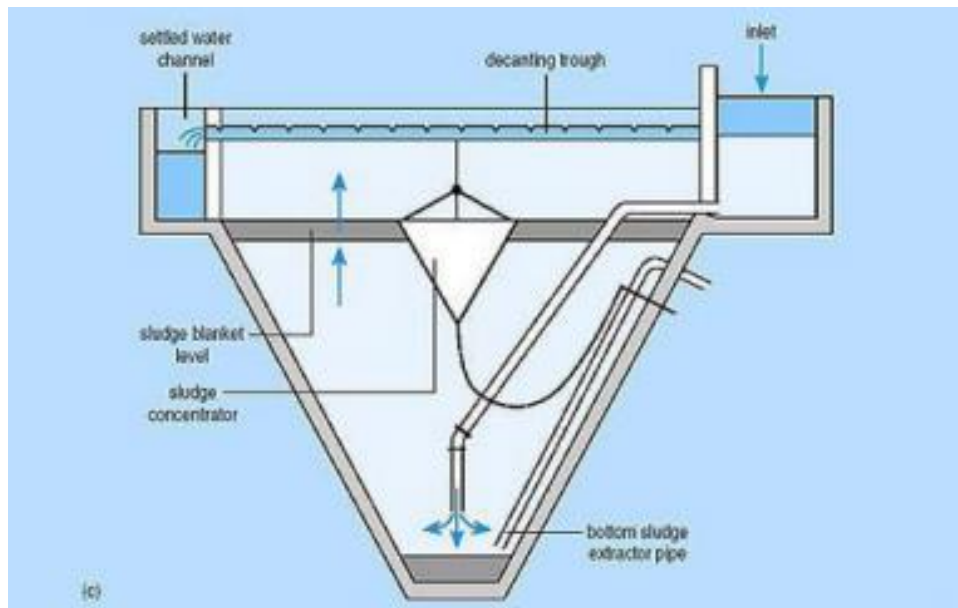
Αρχικά τα υγρά απόβλητα φθάνουν στην μονάδα επεξεργασίας λυμάτων. Εκεί είναι πολύ πιθανό να χρειάζονται ανύψωση εάν οι σωληνώσεις του αποχετευτικού δικτύου είναι υπόγειες. Στην περίπτωση αυτή συνήθως η ανύψωση γίνεται με αντλίες. Στην συνέχεια η επόμενη διεργασία που πραγματοποιείται είναι η απόσμηση. Όπως είναι λογικό τα υγρά απόβλητα που φτάνουν στην μονάδα επεξεργασίας είναι ιδιαίτερα δύσσομα λόγω της αναερόβιας σήψης κατά την διαδρομή στο αποχετευτικό δίκτυο. Για τον λόγο αυτό οι μονάδες επεξεργασίας οφείλουν να διαθέτουν στην είσοδο τους ένα σύστημα απόσμησης, όπου ο δύσσομος αέρας συλλέγεται και μεταφέρεται σε ένα σύστημα απόσμησης. Αφού πραγματοποιηθεί η απομάκρυνση του δύσσομου αέρα ακολουθούν οι φυσικές διεργασίες της εσχάρωσης και της εξάμμωσης. Αρχικά η εσχάρωση αποτελεί τη διαδικασία, όπου μεγάλες σχάρες συγκρατούν τα ογκώδη αντικείμενα (π.χ. ξύλα, πλαστικά μπουκάλια, σακούλες) και δεν επιτρέπουν να εισέλθουν στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Τα είδη των σχαρών που χρησιμοποιούνται είναι δύο. Το πρώτο είδος είναι οι χειροκίνητες εσχάρες που για τον καθαρισμό χρειάζονται τσουγκράνα, ενώ το δεύτερο είδος είναι οι μηχανικές εσχάρες που διαθέτουν αυτόματο σύστημα καθαρισμού. Μετά την διεργασία της εσχάρωσης ακολουθεί η εξάμμωση. Η διαδικασία αυτήν έχει σκοπό την απομάκρυνση των χαλικιών της άμμου και γενικά ανόργανων στερεών διαμέτρου μεγαλύτερη από 200 μm, με αποτέλεσμα να αποτρέπει το φράξιμο των σωληνώσεων. Τέλος πραγματοποιείται η διεργασία της λιποσυλλογής και της συνεχούς μέτρησης της παροχής. Σκοπός είναι η απομάκρυνση των ελαιωδών και των λιπαρών προσμίξεων που επιπλέουν στην επιφάνεια των λυμάτων ή του νερού. Η λιποσυλλογή υπάρχει περίπτωση να πραγματοποιηθεί και πριν ή ακόμη και ταυτόχρονα με την διαδικασία της εξάμμωσης. Με σκοπό να μπορέσουν να λειτουργούν ομαλά και χωρίς προβλήματα όλες οι προαναφερθείσες διαδικασίες, είναι απαραίτητο να γίνεται συνεχής προσδιορισμός της παροχής με ειδικά και κατάλληλα μέσα (Χρυσικόπουλος Κωνσταντίνος, 2018).

1.4.2. Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Σκοπός της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας είναι η απομάκρυνση των οργανικών και ανόργανων στερεών μέσω φυσικών διεργασιών, όπως είναι η καθίζηση και η επίπλευση. Ο χώρος που πραγματοποιούνται οι διεργασίες είναι ορισμένες δεξαμενές, οι λεγόμενες Δεξαμενές Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (ΔΠΚ). Οι ΔΠΚ χωρίζονται σε 2 κατηγορίες. Η ορθογωνική δεξαμενή (Εικόνα 1.4) και η δεξαμενή με πυθμένα χοάνης (Εικόνα 1.5). Κατά την διάρκεια της διαδικασίας πραγματοποιείται απομάκρυνση περίπου του 25-50% του BOD₅, δηλαδή του βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου και 50-70% των συνολικών αιωρούμενων στερεών(SS). Τέλος γίνεται η απομάκρυνση των ελαίων και των λιπών σε ποσοστό έως και 65% . Επιπρόσθετα κατά την διαδικασία αυτήν πραγματοποιείται και η απομάκρυνση του οργανικού αζώτου, του οργανικού φωσφόρου και των βαρέων μετάλλων. Το απόβλητο που εξέρχεται από τις μονάδες πρωτοβάθμιας καθίζησης ονομάζεται πρωτοβάθμια εκροή (Sonune & Ghate, 2004).



Εικόνα 1.4.Ορθογώνια δεξαμενή οριζόντιας ροής (Sonune & Ghate, 2004)



Εικόνα 1.5. Δεξαμενή με πυθμένα χοάνης (Sonune & Ghate, 2004)

1.4.3. Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Μετά την πρωτοβάθμια καθίζηση στην συνέχεια ακολουθεί η διεργασία της δευτεροβάθμιας καθίζησης. Σκοπός της είναι η περαιτέρω επεξεργασία της εκροής από την πρωτοβάθμια επεξεργασία για την απομάκρυνση των υπολειπόμενων οργανικών ουσιών και αιωρούμενων στερεών. Συγκεκριμένα η ποσοστιαία κατανομή είναι περίπου 30% αιωρούμενων στερεών, 6% κολλοειδή και περίπου 65% διαλυμένα στερεά. Η διαδικασία της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας περιλαμβάνει την βιολογική επεξεργασία των λυμάτων χρησιμοποιώντας τους μικροοργανισμούς. Χρησιμοποιούνται αερόβιες βιολογικές διεργασίες και οι διαφορές τους είναι κυρίως στον τρόπο παροχής οξυγόνου στους μικροοργανισμούς και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβολίζουν την ύλη (Sonune & Ghate, 2004).

1.4.4. Τριτοβάθμια επεξεργασία

Ως τριτογενής επεξεργασία ορίζεται η διαδικασία της επεξεργασίας κατά την οποία προστίθενται και άλλες μονάδες λειτουργίας μετά την συμβατική δευτερογενή επεξεργασία καθώς και η απομάκρυνση των αιωρούμενων, κολλοειδών και διαλυμένων συστατικών. Οι εν λόγω προσθήκες μπορεί να αφορούν απλές παρεμβάσεις όπως η προσθήκη ενός φίλτρου για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών ή και πιο σύνθετες όπως η προσθήκη ουσιών (πχ κροκιδωτικών) για την απομάκρυνση του αζώτου και φωσφόρου. Στην συνέχεια η διάθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων μπορεί να γίνει σε κάποιον υδάτινο αποδέκτη ή στο έδαφος (Sonune & Ghate, 2004).

1.4.5. Απολύμανση

Απολύμανση είναι η διαδικασία στην οποία πραγματοποιείται απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών όπως τα βακτήρια και οι ιοί πριν καταφέρουν να αναπαραχθούν ή ακόμα και των μικροοργανισμών που παρουσιάζουν μολυσματική ικανότητα ή έχουν την δυνατότητα να εξελιχθούν σε τέτοιους. Στόχος της απολύμανσης είναι η καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών, ώστε όταν θα γίνει η τελική διάθεση στων υγρών αποβλήτων στον υδάτινο αποδέκτη να μην υπάρξει κίνδυνος για την δημόσια υγεία. Για να γίνει σωστά η διαδικασία της απολύμανσης πρέπει να αναλυθούν τα χαρακτηριστικά των υδάτινων αποδεκτών και να γίνει σωστή αξιολόγησης της κάθε περίπτωσης (Crini & Lichtfouse, 2018).

Οι μέθοδοι απολύμανσης ποικίλλουν, ενώ η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου. Κάποιες από τις μεθόδους περιλαμβάνουν την χλωρίωση, την απολύμανση με Υπεριώδη Ακτινοβολία (Ultra-Violet, UV) και τέλος την οζόνωση. Η χλωρίωση αποτελεί την επικρατέστερη και πλέον αποτελεσματική μέθοδο απολύμανσης. Παρόλα αυτά έχει διαπιστωθεί ότι κατά την χρήση της δημιουργούνται παραπροϊόντα, τα οποία εγείρουν ανησυχίες σχετικά με την ανθρώπινη υγεία (Protection Agency, 1986). Στον πίνακα 1.1 αναφέρονται αναλυτικά οι διαφορές των τριών απολυμαντικών.

Πίνακας 1.1 Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης των μεθόδων (EPA, 1999a; EPA 1999b; EPA1999c).

Χαρακτηριστικό	Μέθοδος απολύμανσης		
	Οζόνωση	Υπεριώδης Ακτινοβολία (UV)	Χλωρίωση
Ικανότητα απομάκρυνσης κολοβακτηριδίων	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή
Ικανότητα απομάκρυνσης ιών	Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια
Πιθανότητα επανεμφάνισης βακτηρίων μετά το πέρας της απολύμανσης	Καμία	Σημαντική	Ελάχιστη
Δυσμενείς επιδράσεις στο υδατικό περιβάλλον και στους υδρόβιους οργανισμούς	Καμία	Καμία	Αύξηση Διαλυτών Στερεών

Εμφάνιση παραπροϊόντων	Όχι	Όχι	Αλογονοφόρμια
Επικίνδυνα παραπροϊόντα	Μηδενική	Μηδενική	Μεγάλη
Κόστος λειτουργίας και κόστος συντήρησης	Μέσο	Μεγάλο	Μέσο
Κόστος Εγκατάστασης	Μεγάλο	Μεγάλο	Μέσο
Έκταση που απαιτείται για εγκατάσταση απολύμανσης	Μέση	Μικρή	Μεγάλη

1.4.6. Παραγωγή, επεξεργασία και διάθεση Ιλύος

Η παραγωγή και διαχείριση της ιλύος στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα. Η Ιλύς είναι ένα σύνθετο υλικό που αντιμετωπίζεται κυρίως με μεθόδους βιολογικής σταθεροποίησης, όπως η αναερόβια και αερόβια πέψη. Όμως η παρουσία συνθετικών οργανικών ενώσεων, μικροβίων συσσωματωμάτων και εξ κυτταρικών πολυμερικών ουσιών αλλά και διαφόρων ανασταλτικών ενώσεων, δυσχεραίνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών (Crini & Lichtfouse, 2018).

Στόχος της ΕΕΛ είναι η επεξεργασία και η διάθεση της ιλύος. Αρχικά η επεξεργασία της, αποσκοπεί στην παραγωγή ενός τελικού σταθεροποιημένου προϊόντος, ενώ πρωταρχικός στόχος της διαδικασίας διάθεσης της ιλύος είναι η αποφυγή σοβαρών κινδύνων για την δημόσια υγεία. Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία της ιλύος με σειρά είναι:

- 1) Προκαταρκτικές διαδικασίες (Preliminary Operations)
- 2) Πάχυνση (Thickening)
- 3) Σταθεροποίηση (Conditioning)
- 4) Αφυδάτωση. (Dewatering)

Αρχικά το πρώτο στάδιο αφορά διαδικασίες όπως ο τεμαχισμός, η εξάμμιση, η ανάμιξη και η αποθήκευση. Στόχος αυτών των διαδικασιών είναι η δημιουργία μιας ομογενοποιημένης τροφοδοσίας για τα επόμενα στάδια επεξεργασίας της ιλύος. Ο τεμαχισμός της ιλύος γίνεται έτσι ώστε να μην υπάρξουν εμφράξεις στα επόμενα στάδια της επεξεργασίας. Στην συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της εξάμμισης, σε περίπτωση που δεν έχει προηγηθεί ήδη, ενώ έπειτα ακολουθεί η ανάμιξη, στοχεύοντας

στην ομοιομορφία της ιλύος. Τέλος, μέσω της αποθήκευσης της, επιδιώκεται η σταθερή συσσώρευση στερεών κατά τις περιόδους στις οποίες δεν λειτουργούν οι διεργασίες πάχυνσης, σταθεροποίησης και αφυδάτωσης (George Tchobanoglous, 2003).

Αφού αποθηκευτεί η ιλύς στην συνέχεια θα πραγματοποιηθεί η πάχυνση της. Σκοπός της πάχυνσης είναι η μείωση του όγκου με απομάκρυνση του νερού που περιέχεται σε αυτήν. Έτσι η ιλύς που προκύπτει είναι μικρότερη σε όγκο ώστε η διαδικασία της διαχείρισης να πραγματοποιηθεί ευκολότερα. Οι βασικοί μέθοδοι πάχυνσης είναι τρεις. (Αθανάσιος Γ. Κούγκολος, 2007):

- 1) Πάχυνση βαρύτητας
- 2) Πάχυνση με επίπλευση
- 3) Πάχυνση με μηχανικά μέσα

Στην συνέχεια σειρά έχει η διαδικασία της σταθεροποίησης. Εδώ στόχο αποτελεί η μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών, όπως επίσης η απομάκρυνση των δυσάρεστων οσμών και της εξάλειψης του δυναμικού σήψης της ιλύος (George Tchobanoglous, 2003). Τέλος η αφυδάτωση της ιλύος είναι μια διαδικασία που στοχεύει στην αύξηση της συγκέντρωσης των στερεών σε υψηλά επίπεδα, με την απομάκρυνση της υγρασίας. Η ιλύς μετά την αφυδάτωση βρίσκεται σε στερεη-ημιστερεή κατάσταση έχοντας μειωμένο όγκο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η μεταφορά της να καθίσταται ευκολότερη και σε περίπτωση επεξεργασίας (πχ αποτέφρωση) η διαδικασία να είναι φθηνότερη (Γρηγόρης Μαρκαντωνάτος, 1990).

1.5. Απαιτήσεις ενέργειας σε μια ΕΕΛ

Η επεξεργασία των λυμάτων είναι μια ενεργοβόρα διαδικασία και ως εκ τούτου η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων κρίνεται κομβική τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη. Διαπιστώθηκε επίσης πως η ηλικία κατασκευής των εγκαταστάσεων επηρεάζει αρνητικά την ενεργειακή απόδοση. Οι ΕΕΛ που κατασκευάστηκαν πρόσφατά εμφάνισαν μέσο δείκτη ενεργειακής απόδοσης 0,469 ενώ οι παλαιότερες ήταν εμφανώς πιο αναποτελεσματικές με μέσο όρο 0,340. Πρέπει να σημειωθεί ότι η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχει διπλασιαστεί με σχέση με τον προηγμένο αιώνα με τον ενεργειακό τομέα να αποτελεί τον δεύτερο μεγαλύτερο σε συνεισφορά στις παγκόσμιες εκπομπές μεθανίου, συγκεκριμένα σε ποσοστό 28,65%. Μελέτες τεκμηριώνουν ότι η επεξεργασία λυμάτων αντιπροσωπεύει το 30% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του αστικού κύκλου του νερού. Επιπλέον έρευνες στις Ηνωμένες Πολιτείες αποδεικνύουν ότι το 3-4% της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την παροχή νερού και τις δραστηριότητες που σχετίζονται με την επεξεργασία λυμάτων, ενώ αντίστοιχα μελέτες στην Κίνα διαπίστωνουν ότι η διαδικασία επεξεργασίας νερού και λυμάτων αντιπροσωπεύει το 0,7% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, μελέτες αναφορικά με ευρωπαϊκές χώρες όπως η Γερμανία η Ιταλία και η Ισπανία καταγράφουν

ότι ο αστικός κύκλος νερού απαιτεί έως και 4% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας (Molinos-Senante & Maziotis, 2022).

Η μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μια ΕΕΛ έχει διττή σημασία. Απο την μια πλευρά το ηλεκτρικό ρεύμα συνιστά τον βασικότερο παράγοντα για την λειτουργία της μονάδας και κυμαίνεται από 2% έως 60% του λειτουργικού κόστους. Ωστόσο από την άλλη, όταν η χρησιμοποιούμενη ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αυτό συνεπάγεται την έκλυση αερίων θερμοκηπίου (GHG), με επιπτώσεις στο περιβάλλον (Molinos-Senante & Maziotis, 2022). Στον πίνακα 1.5 παρουσιάζονται τα στοιχεία της ενεργειακής κατανάλωσης σε σχέση με τον ισοδύναμο πληθυσμό.

Πίνακας 1.2 Ενεργειακή κατανάλωση ΕΕΛ.(Panepinto et al., 2016).

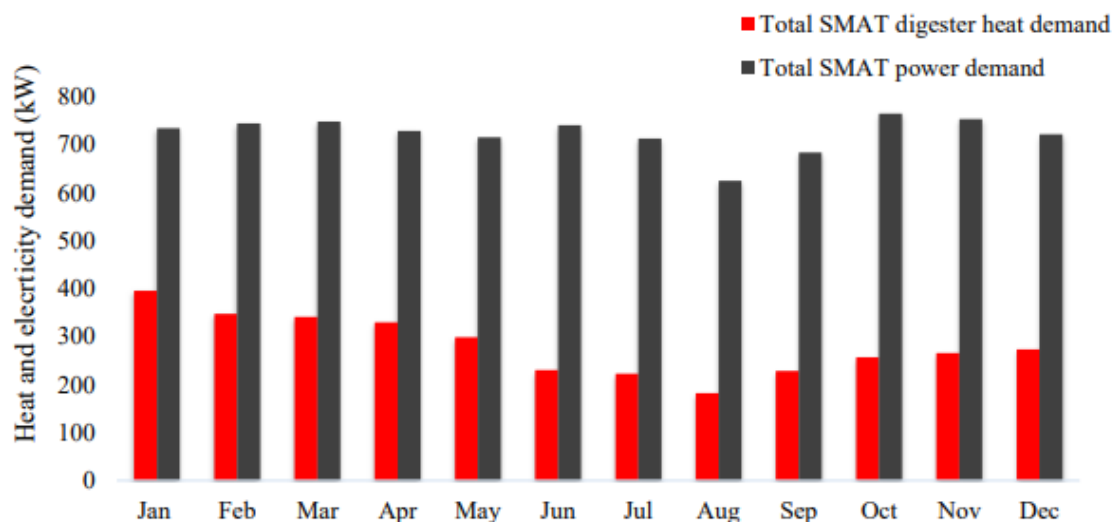
ΕΕΛ	Δυναμικότητα (IK)	Ενεργειακή κατανάλωση ($\frac{kWh}{PE \cdot y}$)
SMAT Castiglione (IT)	2,700,000	24.73
Folgaria (IT)	24,000	73
<u>Mancasale (IT)</u>	280,000	47.20
Dutch communal water sector (NL)	24,400,000	23.89
Sidney WWTP (Australia)	4,400,000	46.82
Oslo WWTP (NO)	600,000	65.28
<u>Alvaeiro (P)</u>	78,000	47.20
Spanish WWTPs (small)	40,000-84,000	34.12
Spanish <u>WWTPs (large)</u>	117,000-265,000	24.87

Αναλυτικότερα στοιχεία έδειξαν ότι σε μια τυπική μονάδα ΕΕΛ το 25-40% του λειτουργικού κόστους οφείλεται στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η τιμή αυτή κυμαίνεται από περίπου 0,3 έως 2,1 kWh/m³ των επεξεργασμένων λυμάτων. Ακόμη, ένας σημαντικός παράγοντας που παίζει ρόλο, αποτελεί και το μέγεθος της εγκατάστασης και πιο συγκεκριμένα για ΕΕΛ μεγάλης δυναμικότητας η τιμή της ηλεκτρικής κατανάλωσης κυμαίνεται από 0,413 έως 0,87 kWh/m³ (Electric Power Research Institute and Water Research Foundation, 2013).

Επιπρόσθετα οι εργασίες με την μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαδικασία του αερισμού της ύλης (55-70%), η πρωτογενής και δευτερογενής καθίζηση με άντληση ύλης (15,6%) και τέλος η αφυδάτωση της ύλης (7%) (Gandiglio et al., 2017).

Εκτός από την ηλεκτρική ενέργεια η ποσότητα της θερμικής δεν είναι αμελητέα. Ένα μεγάλο μέρος της θερμικής ενέργειας παγιδεύεται μέσα στα λύματα και συνήθως μένει ανεκμετάλλευτη. Σε πολλές αναφορές της Water Research Foundation (WERF) αναφέρονται ότι τα λύματα περιέχουν σχεδόν 5-10 φορές την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για τη διαδικασία επεξεργασίας τους. Τέλος στοιχεία από την WERF για τις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου οι ΕΕΛ αντιπροσωπεύουν το 17% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν την δυνατότητα να επενδύσουν περίπου 4,8

δισεκατομμύρια δολάρια ώστε να τις μετατρέψουν σε ηλεκτρικά ουδέτερες και να μπορέσουν να εξοικονομήσουν 41 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου, με αποτέλεσμα να αποφευχθούν εκπομπές 18 εκατομμυρίων τόνων CO₂ (Gandiglio et al., 2017). Όπως προαναφέρθηκε η διαδικασία του αερισμού είναι μια αρκετά ενεργοβόρα διαδικασία. Συγκεκριμένα η κατανάλωση ενέργειας για αυτή κυμαίνεται από 0,8-0,18 kWh/m³ (Εικόνα 1.6) και συνήθως αντιπροσωπεύει το 45-75% των ενεργειακών δαπανών της μονάδας. Άλλοι σημαντικοί καταναλωτές ενέργειας είναι οι αντλίες που χρησιμοποιούνται με ποσοστό 18,9% , το οποίο μπορεί να αυξηθεί στην περίπτωση που υπάρχουν υψομετρικές διαφορές στις γεωγραφικές θέσεις. Παρόλα αυτά στοιχεία έχουν δείξει ότι με μια μικρή μείωση στην ταχύτητα του κινητήρα της αντλίας μπορεί να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας κατά 50%. Τέλος όσον αναφορά την επεξεργασία της ιλύος το λειτουργικό κόστος που χρησιμοποιείται είναι 30 %. Παρόλα αυτά με τη χρήση της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να ανακτηθεί περίπου το 30-40% της συνολικής τρέχουσας κατανάλωσης ενέργειας επειδή το 48% της συνολικής ροής λυμάτων επεξεργάζονται με την συγκεκριμένη διαδικασία (Gandiglio et al., 2017).



Εικόνα 1.6 Ενεργειακές και θερμικές απαιτήσεις (Capodaglio & Callegari, 2023)

1.6. Επεξεργασία Ιλύος

Η διαχείριση της αστικής ιλύος αποτελεί σημαντικό μέρος της επεξεργασίας λυμάτων, καθώς, παρότι αντιπροσωπεύει μόλις το 1-2% του συνολικού όγκου, μπορεί να φτάνει έως και το 50% του κόστους λειτουργίας των ΕΕΛ, ενώ ευθύνεται για πάνω από 40% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η ασφαλής και αποτελεσματική διάθεση της είναι επομένως κρίσιμη για τη βιώσιμη λειτουργία των εγκαταστάσεων. Συνεπώς, για τον μετριασμό των παραπάνω, οι τεχνολογίες αποτέφρωσης και πυρόλυσης αποτελούν μερικές από τις βασικές μεθόδους θερμικής επεξεργασίας της ιλύος (Li et al., 2024).

1.6.1. Αποτέφρωση

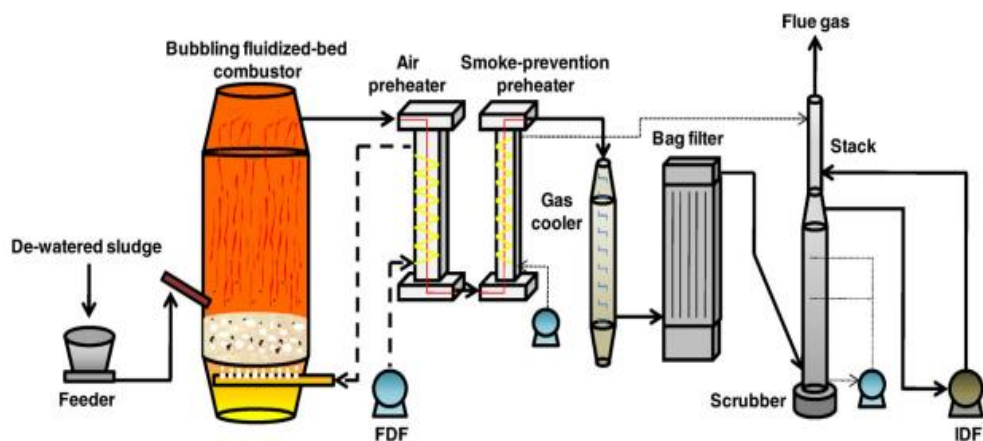
Η καύση (αποτέφρωση) με την χρήση ατμοσφαιρικού αέρα αποτελεί μια καθιερωμένη μέθοδο διάθεσης της ιλύος για την ανάκτηση θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται είναι η μείωση του όγκου που θα οδηγηθεί για διάθεση κατά 90%. Η διαδικασία της αποτέφρωσης πραγματοποιείται είτε ως μονοαποτέφρωση δηλαδή αφορά εγκαταστάσεις μόνο για την ιλύ την λυμάτων είτε ως συνεποτέφρωση η οποία γίνεται μαζί με τα αστικά απόβλητα. Κατά την διαδικασία της αποτέφρωσης οι ρύποι που εκπέμπονται περιλαμβάνουν σωματίδια όπως:

- Αιωρούμενα στερεά
- Πτητικά στερεά(Hg και Pb)
- CO
- SO₂
- Διοξίνες και
- Φουράνια

Λόγω αυτών των επικίνδυνων καυσαερίων πριν την απελευθέρωση τους στην ατμόσφαιρα απαιτείται κάποια επεξεργασία. Διατίθενται υψηλής ποιότητας τεχνολογίες επεξεργασίας καυσαερίων και τα στοιχεία που έχουν αναλυθεί δείχνουν ότι η αποτέφρωση της ιλύος επεξεργασμένων λυμάτων (EBSS) δεν θέτει σε κίνδυνο την δημοσία υγεία όταν έχει σχεδιαστεί σωστά (Capodaglio & Callegari, 2023).

Η ιλύς των λυμάτων έχει περιεκτικότητά σε νερό 80%. Για τον λόγο αυτό, πρώτο βήμα αποτελεί η αφυδάτωση της ιλύς ώστε να μειωθεί ο όγκος της. Στην συνέχεια με την θερμική ξήρανση η περιεκτικότητα της αφυδατωμένης ιλύος μειώνεται από 80% σε 40-70% ανάλογα με την οργανική σύσταση της. Όσον αφορά τη θερμική αξία της ιλύος των λυμάτων η τιμή κυμαίνεται από 1500-2750 kJ/kg h η οποία θεωρείται χαμηλής θερμικής αξίας σε ξηρή βάση, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η ενεργειακή ανάκτηση από την αποτέφρωση της ιλύος λυμάτων είναι μικρή (Xiao et al., 2022).

Τέλος η θερμότητα που παράγεται κατά την διεργασία αποτέφρωσης προορίζεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ατμού. Έτσι, επειδή η καύση της ιλύος περιέχει επιβλαβή στοιχεία, οι εγκαταστάσεις είναι υποχρεωμένες να έχουν σύστημα καθαρισμού αερίων πριν την τελική διάθεση της παραγόμενης τέφρας (Oladejo et al., 2019). Στο διάγραμμα 1.2 παρουσιάζεται ένα συμβατικό εργοστάσιο αποτέφρωσης.



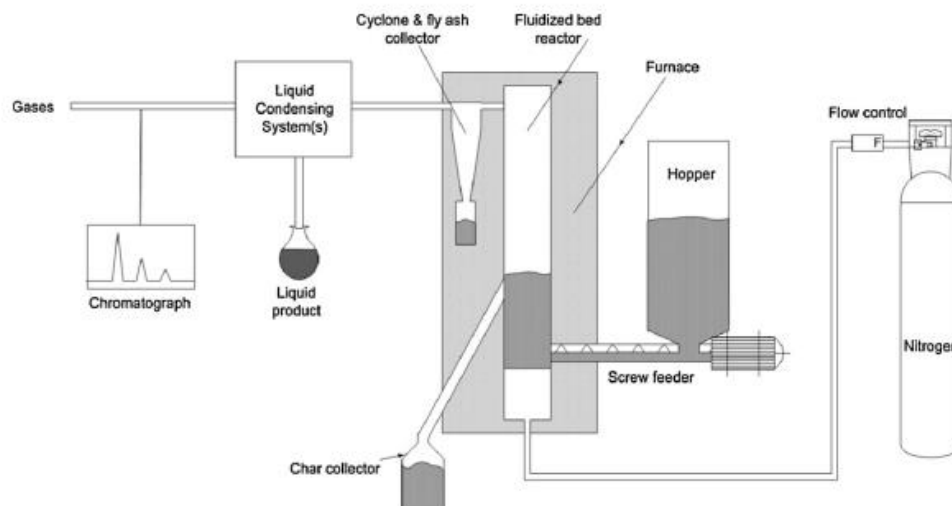
Διάγραμμα 1.2: Σχηματικό διάγραμμα συμβατικού εργοστασίου αποτέφρωσης, το οποίο είναι εξοπλισμένο με ατμοσφαιρικό θάλαμο καύσης ρευστοποιημένης κλίνης με φυσαλίδες (Murakami et al., 2009).

1.6.2. Πυρόλυση

Η πυρόλυση είναι μια σημαντική θερμοχημική διαδικασία η οποία συνδέεται με την βιώσιμη παραγωγή θερμότητας και ενέργειας. Συγκεκριμένα η διαδικασία της πυρόλυσης είναι η θερμική απόδοση των οργανικών υλών σε ατμόσφαιρα χωρίς οξυγόνο που οδηγεί στην παραγωγή υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ενέργειας, όπως αέρια βιοκαύσιμα. Υπάρχουν διάφορα είδη πυρόλυσης όπως η αργή, η ταχεία και η πυρόλυση υποβοηθούμενη με μικροκύματα (Gao et al., 2014).

Καθώς η ιλύς έχει σχετικά υψηλή θερμαντική αξία η μέθοδος της πυρόλυσης παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον. Η διαδικασία αυτή είναι ικανή να μετατρέψει το υπόλειμμά της ιλύς και να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή καυσίμων διαφόρων τύπων όπως αέρια και έλαια. Η τεχνική αυτή φαίνεται να είναι λιγότερο ρυπογόνα από την συμβατική καύση, διότι τα περισσότερα επικίνδυνα υλικά παραμένουν στο υπόλειμμα άνθρακα (char). Ακόμα η πυρολυμένη ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν προσροφητικό υλικό με στόχο την απομάκρυνση τοξικών αερίων, όπως το NO_2 (Folgueras et al., 2013).

Η διεργασία της πυρόλυσης λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 300-1200°C. Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία αυτή, αρχικά προϋποθέτει να έχει γίνει θερμική ξήρανση της ιλύος πριν την εισαγωγή της στον αντιδραστήρα. Κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης, παράγονται κυρίως τρία είδη προϊόντων: αέρια, όπως υδρογόνο – H_2 , μονοξείδιο του άνθρακα – CO και διοξείδιο του άνθρακα – CO_2 , στερεά υπολείμματα όπως το βιοανθρακώμα (bio-char), καθώς και υγρά προϊόντα όπως το βιοέλαιο (bio-oil). Οι αποδόσεις της διαδικασίας της πυρόλυσης εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία, ο ρυθμός θέρμανσης καθώς και οι ιδιότητες της πρώτης ύλης (Joo et al., 2021). Στο διάγραμμα 1.3 παρουσιάζεται σύστημα ρευστοποιημένης κλίνης πυρόλυση ιλύος λυμάτων.



Διάγραμμα 1.3: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ρευστοποιημένης κλίνης για πυρόλυση ιλύος λυμάτων.

Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή ΕΕΛ Ρεθύμνου

2.1 Γενικές πληροφορίες εγκατάστασης

Η ΕΕΛ Ρεθύμνου (Εικόνα 2.1) βρίσκεται στην τοποθεσία Μύτη Γρύντα σε απόσταση περίπου 3km δυτικά της πόλης του Ρεθύμνου και 2 km βορειοανατολικά του οικισμού Ατσιπόπουλου. Η συνολική έκταση που καταλαμβάνει η εγκατάσταση της μονάδας του βιολογικού καθαρισμού υπολογίζεται περίπου στα 35 στρέμματα. Στην ΕΕΛ οδηγούνται τα λύματα και τα βοθρολύματα του δήμου Ρεθύμνης. Ακόμα ο βιολογικός καθαρισμός δέχεται και τα λύματα βιομηχανιών που βρίσκονται δυτικά και ανατολικά των περιοχών του Ρεθύμνου τα οποία πρώτα έχουν υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία ώστε η σύστασή τους να είναι ίδια με αυτήν των αστικών λυμάτων.

Η μονάδα ΕΕΛ Ρεθύμνου κατασκευάστηκε με σκοπό να εξυπηρετεί πληθυσμό 90.000 ισοδύναμων κατοίκων. Συγκεκριμένα σύμφωνα τα στοιχεία τα οποία μελετήθηκαν αναφέρεται ότι η μονάδα εξυπηρετεί τον χειμώνα 96.000 ισοδύναμο πληθυσμό ενώ κατά την θερινή περίοδο εξυπηρετεί για 130.000 με αιχμή τους 153.000 ισοδυνάμους κάτοικους. Σύμφωνα με την Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων, ΑΕΠΟ της ΕΕΛ Ρεθύμνου, Α.Π. οικ.175133/26-09-2014, η οποία είναι αναρτημένη στην ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος Και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ) τα δεδομένα σχεδιασμού (τελική φάση σχεδιασμού, έτος 2028) περιγράφονται στον πίνακα 2.1 όπως επίσης και ένα αναλυτικό διάγραμμα ροής στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.1 ΕΕΛ Ρεθύμνου

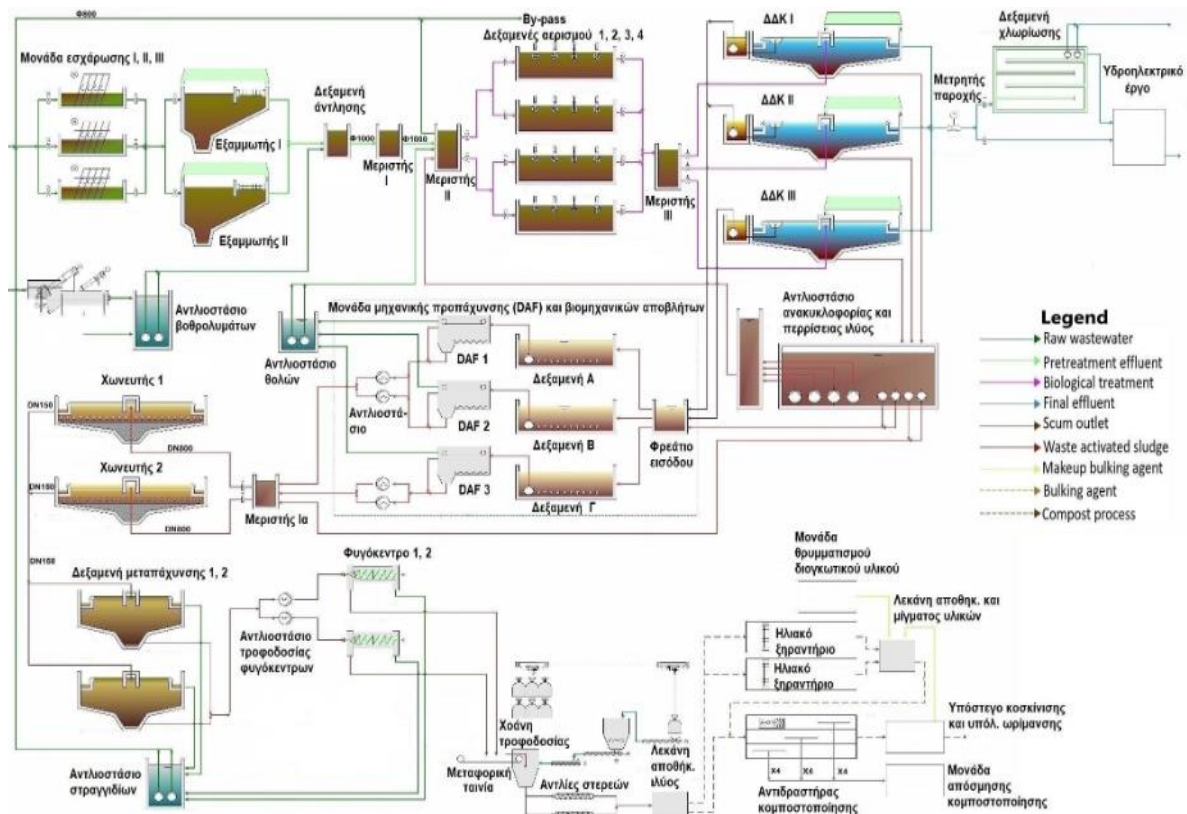
Πίνακας 2.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά εξόδου μονάδας (Πηγή: <http://astikalimata.ypeka.gr> ΑΕΠΟ της ΕΕΛ Ρεθύμνου)

Παράμετρος	Τιμή
BOD ₅ , (mg/L)	< 20
COD, (mg/L)	< 75
SS, (mg/L)	< 20
NO ₄ -N, (mg/L)	< 2
NO ₃ -N, (mg/L)	< 8
Ολικό άζωτο, (mg/L)	< 10
Φώσφορος, (mg/L)	< 10
Κολοβακτηρίδια, (mg/L)	< 500
Χλώριο, (mg/L)	< 0.5
DO, (mg/L)	> 5

Οι μέγιστοι αποδεκτοί μέσοι όροι των συγκεντρώσεων (σύνθετο 24ωρο δείγμα) σχετικά με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εξόδου της εγκατάστασης παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2

Πίνακας 2.2 Μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις μετάλλων στο τελικό προϊόν διάθεσης compost. (Πηγή: <http://astikalimata.ypeka.gr> ΑΕΠΟ της ΕΕΛ Ρεθύμνου)

Μέταλλο	Μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση (mg/kg ξηράς ουσίας)
Cd	5
Cr	250
Cu	800
Hg	5
Ni	100
Pb	500
Zn	2000
As	40
Na	2000



Εικόνα 2.2 Διάγραμμα ροής της ΕΕΛ Ρεθύμνου

2.2 Αναλυτική περιγραφή των σταδίων επεξεργασίας λυμάτων

2.2.1. Φρεάτιο και μονάδα υποδοχής βοθρολυμάτων

Στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, τα υγρά απόβλητα διοχετεύονται μέσω δικτύου αποχέτευσης σε φρεάτιο άφιξης. Ο τρόπος που γίνεται η μεταφορά είναι ο δίδυμος κεντρικός καταθλιπτικός αγωγός, ο οποίος συνδέεται με το κεντρικό αντλιοστάσιο λυμάτων του Δήμου Ρεθύμνου. Στο φρεάτιο εισόδου καταλήγουν επίσης και τα στραγγίδια από όλες τις μονάδες της εγκατάστασης, καθώς και τα προ επεξεργασμένα βιομηχανικά υγρά απόβλητα (Κεχαγιαδάκη 2019).

Η μονάδα υποδοχής- εξισορρόπησης των βοθρολυμάτων της ΕΕΛ Ρεθύμνου έχει δυναμικότητα $90 \text{ m}^3/\text{h}$ και αποτελείται από τα εξής 5 τμήματα (Κεχαγιαδάκη, 2019).

- 1) Χονδροεσχάρα για την αφαίρεση των ογκωδών αντικειμένων.
- 2) Λεπτή σχάρα (λεπτοσχάρα) αυτοκαθαριζόμενη με διάκενα 6mm
- 3) Αεριζόμενο εξαμμωτή.
- 4) Δεξαμενή εξισορρόπησης και προ αερισμού ενεργού όγκου 53 m^3

5) Αντλιοστάσιο κατάθλιψης προς το φρεάτιο εισόδου

Τέλος μετά την ολοκλήρωση της εξισορρόπησης, με την χρήση της βαρύτητας, οδηγούνται στην δεξαμενή άντλησης και από εκεί μέσω 2 υποβρυχίων αντλιών με δυναμικότητα $82,3 \text{ m}^3/\text{h}$ η καθεμία, οδηγούνται στον μεριστή II (Κεχαγιαδάκη, 2019).

2.2.2. Μονάδα εσχάρωσης

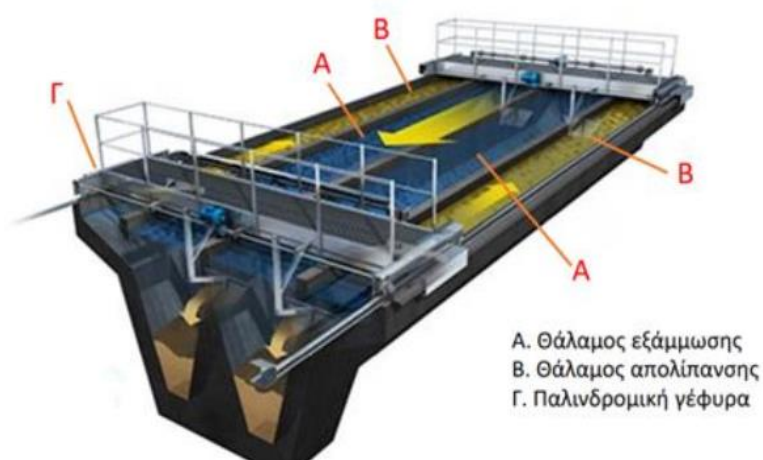
Η μονάδα εσχάρωσης στην μονάδα ΕΕΛ έχει τοποθετηθεί σε κλειστό κτήριο. Εντός του κτηρίου υπάρχει πλήρες σύστημα εξαερισμού για την απόσμιση του αέρα και περιλαμβάνει το φρεάτιο εισόδου καθώς και 3 διώρυγες πλάτους 0,80 m η καθεμία. Είναι μεταλλικές και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους είναι πλάτος 0,80 m όπως προαναφέρθηκε διάκενου 10 mm και πάχος ράβδων 8 mm κλίσεως 75° .

Τα εσχαρίσματα στην συνέχεια, που παράγονται με την χρήση ταινιόδρομου οδηγούνται σε κάδους αποθήκευσης όπου στην συνέχεια απορρίπτεται στις χωματερές. Η λειτουργία των αυτόματων εσχάρων γίνεται με 2 τρόπους είτε μέσω ελέγχου διαφορικής στάθμης, είτε μέσω προγράμματος που λειτουργεί με χρονοδιακόπτη (Κεχαγιαδάκη 2019).

2.2.3. Μονάδα εξάμμωσης

Τα λύματα αφού υποστούν την διαδικασία της εσχάρωσης δηλαδή της απομάκρυνσης των ογκωδών αντικειμένων, στην συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της εξάμμωσης. Στην μονάδα ΕΕΛ Ρεθύμνου τα λύματα μετά την εσχάρωση οδηγούνται στον δίδυμο διπλό εξάμμοτη (Εικόνα 2.3). Όπως και στην εσχάρωση έτσι και στην εξάμμωση ο χώρος στον οποίο στεγάζεται η όλη διαδικασία έχει κατάλληλους αεραγωγούς για την απόσμιση του αέρα. Συγκεκριμένα για να επιτευχθεί ο ιδανικός αερισμό υπάρχουν 2 φυσητήρες με δυναμικότητα $330 \text{ Nm}^3/\text{d}$ σε μανομετρικό 400mbar. Ο αέρας παρέχεται στο δίδυμο αεριζόμενο εξάμμοτη από διαχυτήρες χονδρής φυσαλίδας οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε βάθος 2m. Τα χαρακτηριστικά του εξάμμοτη παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3.

Τέλος, η άμμος σαρώνεται με κινητή γέφυρα και με την βοήθεια υποβρυχίων αντλιών και στην συνέχεια οδηγείται στο αυτόματο σύστημα διαχωρισμού όπου γίνεται και η συλλογή της σε δοχεία συλλογής. Σε συνδυασμό με την διεργασία αυτή υπάρχει και κανάλι όπου πραγματοποιείται η συλλογή των λιπών, με την βοήθεια ξέστρου κινητής γέφυρας, τα οποία στην συνέχεια θα οδηγηθούν για συλλογή και θα απορριφθούν σε ειδικό φρεάτιο (Κεχαγιαδάκη 2019).



Εικόνα 2.3 Μονάδα εξάμμιωσης (Γκίκας 2020)

Πίνακας 2.3 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά εξάμμιωσης (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Παράμετρος	Τιμή
Μήκος	18,6 m
Πλάτος(ολικό)	3.20 m
Πλάτος εξαμμωτή	2 m
Πλάτος απολυμαντή	1,05 m
Βάθος	2,70 m
Ενεργός όγκος εξαμμωτή	75 m ³
Ποσότητα άμμου	6,513 m ³ /d

2.2.4. Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας

Η επεξεργασία των λυμάτων στην ΕΕΛ Ρεθύμνου πραγματοποιείται με την μέθοδο του παρατεταμένου αερισμού. Με την συγκεκριμένη μέθοδο επιτυγχάνεται η βιολογική απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου, οι συγκεντρώσεις των οποίων βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες στα λύματα. Τα λύματα με την επίδραση της βαρύτητας οδηγούνται στον μεριστή Ι και στην συνέχεια στον ΙΙ όπου γίνεται υπερχειλίση στις δεξαμενές αερισμού (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Ι) Δεξαμενή Αερισμού

Στην δεξαμενή αερισμού ο κύριος σκοπός είναι να υποβληθούν σε συνδυασμό βιολογικής αερόβιας και αναερόβιας επεξεργασίας που θα οδηγήσει στην αποικοδόμηση και στην αδρανοποίηση του οργανικού φορτίου, όπως επίσης και των αζωτούχων και φωσφορικών ρυπαντών. Στη διαδικασία που ακολουθεί η κάθε δεξαμενή χωρίζεται σε 2 ζώνες σε μία αερόβια ζώνη και σε μία αναερόβια ζώνη. Στην πρώτη σκοπός είναι η μετατροπή των μικροοργανισμών σε νιτρικά και αέριο άζωτο ενώ αντίθετα στην αναερόβια με την παρουσία αέρα οι αζωτούχες ενώσεις διασπώνται από τους μικροοργανισμούς και μετατρέπονται σε νιτρικά. Στην μονάδα ΕΕΛ Ρεθύμνου υπάρχουν και λειτουργούν 3 δεξαμενές και την παρούσα στιγμή η τέταρτη βρίσκεται υπό κατασκευή. Ο τύπος των δεξαμενών που χρησιμοποιούνται είναι οξειδωτικής τάφρου και τα χαρακτηριστικά τους διακρίνονται στον πίνακα 2.4. Τέλος για να επιτευχθεί σωστός αερισμός χρησιμοποιούνται 16 επιφανειακοί βραδυστροφοί αεριστές οριζοντίου άξονα με ισχύ 30kW ο καθένας ενώ η εκροή των αποβλήτων γίνεται με ηλεκτρονικό υπερχειλιστή (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Πίνακας 2.4 Βασικά χαρακτηριστικά δεξαμενών αερισμού (Ματσούκα, 2003).

Παράμετρος	Τιμή
Μέση παροχή	6400 m ³ /d
Βάθος υγρού	3 m
Πλάτος	6,95 m
Μήκος	45 m
Όγκος δεξαμενής	1600 m ³
Χρόνος παραμονής	5 d
Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού (Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS)	6000 mg/L
Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids, MLVSS)	3900 mg/L
Λόγος εσωτερικής ανακυκλοφορίας	2
DO	2 mg/L

ΔΔΚ

Στην συνέχεια το μικτό υγρό οδηγείται στον μεριστή ΙΙ και μέσω υπόγειου αγωγού οδηγείται στις 3 δεξαμενές κυκλικού σχήματος, τις δεξαμενές ΔΔΚ (Εικόνα 2.4) των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 2.5. Αφού γίνει υπερχείλιση των επεξεργασμένων λυμάτων οδηγούνται σε φρεάτια εξόδου ενώ η ιλύς από τις ΔΔΚ συγκεντρώνεται στον θάλαμο του αντλιοστασίου ανακυκλοφορίας και η περίσσεια ιλύς μέσω υπογείου θαλάμου. Ένα μέρος της καθιζάνουσας ιλύος επανακυκλοφορεί στον μεριστή Ι, ενώ το υπόλοιπο αντλείται προς την μονάδα μηχανικής προ-πάχυνσης μέσω υποβρύχιων αντλιών, με τα επιπλέοντα στερεά, τέλος να απομακρύνονται με ξέστρο.

Πίνακας 2.5 Βασικά χαρακτηριστικά ΔΔΚ (Ματσούκα, 2003)

Παράμετρος	Τιμή
Μέση παροχή	6400 m ³ /d
Μέγιστη παροχή	7500 m ³ /d
Διάμετρος	32 m
Μέσο βάθος	3,13 m
Πλευρικό βάθος	2,65 m



Εικόνα 2.4 ΔΔΚ κυκλικής διατομής μίας τυπικής ΕΕΛ (Γκίκας, 2020).

Αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος

Στην συνέχεια η καθιζάνουσα ιλύς από τις ΔΔΚ συγκεντρώνεται σε έναν υγρό θάλαμο που βρίσκεται στο αντλιοστάσιο. Εκεί ένα μέρος της ανακυκλοφορεί προς τις δεξαμενές που πραγματοποιείται ο αερισμός δηλαδή τις δεξαμενές αερισμού, διαμέσου του μεριστή I, με την βοήθεια 4 υποβρυχίων αντλιών. Σύμφωνα με τα δεδομένα η δυναμικότητα των αντλιών είναι 800 m³/d και ισχύος 15 kW η κάθε μια. Τέλος η απομάκρυνση της περίσσειας ιλύος γίνεται με 3 υποβρύχιες αντλίες παροχής 46 m³/d και ισχύος 3 kW, εκ των οποίων η μια είναι εφεδρική (Κεχαγιαδάκη, 2019).

2.2.5. Μονάδα απολύμανσης και διάθεσης λυμάτων

Μετά τις διεργασίες στην ΔΔΚ, τα λύματα οδηγούνται με την βοήθεια της βαρύτητας στην μονάδα μέτρησης παροχής σε ένα κανάλι τύπου Parshall και στην συνέχεια οδηγούνται στην μονάδα απολύμανσης. Σκοπός είναι τα λύματα να υποστούν χλωρίωση, να γίνει απομάκρυνση του μικροβιακού φορτίου και στη συνέχεια να ακολουθήσει η διαδικασία της αποχλωρίωσης για την εξουδετέρωση του υπολειμματικού χλωρίου.

Αρχικά τα λύματα οδηγούνται με αγωγό στην δεξαμενή χλωρίωσης όπου τα χαρακτηριστικά της φαίνονται στον πίνακα 2.6 και στην συνέχεια γίνεται τροφοδοσία διαλύματος NaOCl περιεκτικότητας 12 % . Η παροχή της αντλίας γίνεται με βάση τις ενδείξεις του μετρητή παροχής. Ο τύπος της δεξαμενής που χρησιμοποιήθηκε είναι μαιανδρικού τύπου και βοηθάει ώστε να γίνεται πλήρης επαφή των λυμάτων με το διάλυμα NaOCl. Στην συνέχεια τα λύματα οδηγούνται σε φρεάτιο αποχλωρίωσης, όπου με την χρήση του όξινου θειώδους νατρίου (NaHSO₃), δεσμεύει το υπολειμματικό χλώριο.

Τέλος η διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων γίνεται με αγωγό εκβολής 580 m και σε βάθος 20 m στην γύρω θαλάσσια περιοχή (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Πίνακας 2.6 Χαρακτηριστικά δεξαμενής χλωρίωσης (Κεχαγιαδάκη, 2019)

Παράμετρος	Τιμή
Μέγιστη Παροχή	28170 m ³ /d
Όγκος δεξαμενής	560 m ³
Αριθμός λωρίδων	6
Μήκος λωρίδας	16,90 m
Πλάτος λωρίδας	2 m
Χρόνος επαφής	28,6 min

2.2.6. Χώρος επεξεργασίας ιλύος

Μηχανική προ-πάχυνση

Η περίσσεια ιλύς που παράγεται στην ΕΕΛ οδηγείται από το αντλιοστάσιο περίσσειας και ανακυκλοφορίας της ιλύος μέσω του καταθλιπτικού αγωγού στην μονάδα μηχανικής προ-πάχυνσης. Η μονάδα απαρτίζεται από 2 συστήματα Επίπλευσης Διαλυμένου Αέρα και 3 αεριζόμενες δεξαμενές, στις οποίες γίνεται η προσωρινή αποθήκευση ιλύος (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Οι δεξαμενές αποθήκευσης- αερισμού της ιλύος είναι κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα, ορθογωνικού σχήματος συνολικού ωφέλιμου όγκου 410 m^3 . Ο αέρας που απαιτείται για τον αερισμό παρέχεται από 3 φυσητήρες. Στις δεξαμενές έχουν εγκατασταθεί μετρητές διαλυμένου οξυγόνου [DO] όπως επίσης και μετρητές αιωρούμενων στερεών [MLSS] (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το συγκρότημα επίπλευσης είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας με την κύρια δεξαμενή να έχει ενεργή επιφάνεια 23 m^2 . Η δεξαμενή έχει αυτόματο ξέστρο και η ανακυκλοφορία επιτυγχάνεται με αντλία παροχής $5,5 \text{ m}^3/\text{d}$ και ισχύος 4 KW ενώ για την έξοδο χρησιμοποιούνται 3 αντλίες παροχής $10 \text{ m}^3/\text{h}$ η καθεμία (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Αναερόβια χώνευση

Στην συνέχεια για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης γίνεται χρήση των 2 πρώην ΔΠΚ δηλαδή των χωνευτών 1 και 2 κυκλικού σχήματος. Σύμφωνα με τα στοιχεία οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα με κυκλικό σχήμα διαμέτρου 22 m , επιφάνειας 380 m και βάθους υγρού 3 m και ωφέλιμου όγκου 1150 m^3 η καθεμία. Επίσης η πυκνότητα της ιλύος στις δεξαμενές αερόβιας χώνευσης είναι 22000 mg/l και η θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει τους 35 C° τους καλοκαιρινούς μήνες σε αντίθεση με τους χειμερινούς, κατά τους οποίους φτάνει τους 32 C° με αποτέλεσμα την μείωση των πτητικών στερεών περίπου κατά 50% . Τέλος σε κάθε δεξαμενή έχει εγκατασταθεί ένα θερμομέτρο και ένας μετρητής αιωρούμενων στερεών [MLSS] όπως επίσης και ένας μετρητής pH (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Μεταπάχυνση και αφυδάτωση ιλύος.

Η μονάδα μεταπάχυνσης αποτελείται από 2 κυκλικούς παχυντές βαρύτητας, με διάμετρο 10 m , βάθος $4,5 \text{ m}$ και όγκο 520 m^3 . Η τροφοδοσία της ιλύος γίνεται κεντρικά μέσω του τυμπάνου εισόδου του κινητού ξέστρου και μέσω ειδικών κατακόρυφων ράβδων διευκολύνεται η άνοδος του υγρού και στην συνέχεια η καθίζηση της συμπτυκνωμένης ιλύος. Η παχυμένη ιλύς κατευθύνεται προς την μηχανική αφυδάτωση

με αντλίες θετικής εκτόπισης ενώ τα νερά τα όποια έχουν υψηλό δείκτη θολερότητας επιστρέφουν στην είσοδο της ΕΕΛ μέσω υπερχειλίσσης (Τσαμουτσόγλου, 2020).

Στο κτήριο της μονάδας αφυδάτωσής υπάρχει και ο εξοπλισμός για την μεταφορά των στραγγισμάτων της ιλύος στην μονάδα προ-επεξεργασίας λυμάτων όπου εκεί με την χρήση των παχυντών, η ιλύς που έχει σταθεροποιηθεί μεταφέρεται με την βοήθεια φυγόκεντρων διαχωριστών για αφυδάτωση. Όπως και στην μονάδα μεταπάχυνσης έτσι και στην μονάδα αφυδάτωσης τα στραγγίδια συγκεντρώνονται στο φρεάτιο και από εκεί καταλήγουν στην ΕΕΛ (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Μονάδα ηλιακής ξήρανσης- κομποστοποίησης

Στην συνέχεια η αφυδατωμένη ιλύς μεταφέρεται από τις λεκάνες αφυδάτωσης στην επόμενη διεργασία που είναι η μονάδα ηλιακής ξήρανσης. Σκοπός της διεργασίας είναι η ξήρανση και κομποστοποίηση της αφυδατωμένης ιλύος με στόχο την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση για γεωργικές δραστηριότητες. (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Αρχικά η ηλιακή ξήρανση είναι μια θερμική διεργασία κατά την οποία μεταφέρεται στην ιλύς θερμότητα, είτε με διοχέτευση θερμού αέρα είτε με επαφή με θερμές επιφάνειες, ώστε να επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του όγκου του τελικού προϊόντος. Στην μονάδα ΕΕΛ Ρεθύμνου έχει επιλεγεί η ηλιακή ακτινοβολία με σκοπό την ξήρανση της ιλύος. Για τον σκοπό αυτό έχει χτιστεί δίδυμο ηλιακό ξηραντήριο, μήκους 95 m και πλάτους 25,5 m και το ελάχιστο ύψος 4 m (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Η αφυδατωμένη ιλύς αφού τοποθετηθεί σε ένα άκρο του ξηραντηρίου και διαστρωθεί στο δάπεδο με την βοήθεια του αναστροφέα, με πάχος 200 mm έως 400 mm, στην συνέχεια θερμαίνεται στο θερμοκήπιο και επιτυγχάνεται μείωση της υγρασίας. Παράλληλα η κίνηση του αναστροφέα ιλύος έχει σαν αποτέλεσμα να γίνει πλήρης αναμόχλευση της ιλύος προκειμένου να επικρατούν συνεχώς αερόβιες συνθήκες. Στο τέλος παράγεται ένα ξηρό προϊόν με χαμηλό ποσοστό σωματιδίων και πολύ καλής κοκομετρίας για περαιτέρω χρήση ενώ τέλος με την χρήση ιμάντα γίνεται η μεταφορά στο κτήριο κομποστοποίησης (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Το ξηραντήριο διαθέτει μηχανή αναστροφής αυτόματης λειτουργίας που αποτελείται από μηχανισμό ο οποίος κινεί την γέφυρα αναστροφής όπως επίσης και το ξέστρο. Επιπλέον υπάρχουν θερμομέτρα τα οποία μετράνε την θερμοκρασία στον θάλαμο καθώς και την υγρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος. Υπάρχουν ακόμα 10 αξονικοί ανεμιστήρες που είναι υπεύθυνοι για την απαγωγή του υγρού αέρα σε κάθε ξηραντήριο που συνήθως ελέγχονται με αυτοματοποιημένο σύστημα (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Κομποστοποίηση

Η επόμενη διεργασία είναι η κομποστοποίηση, η μονάδα της οποίας έχει κατασκευαστεί λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραμέτρους που χρειάζεται καθώς και τα αποτελέσματα της ηλιακής ξήρανσης όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Για την κομποστοποίηση έχουν κατασκευαστεί ειδικοί χώροι όπως αναφέρονται παρακάτω:

1) Αντιδραστήρας κομποστοποίησης με πλήρες σύστημα αερισμού και ανάδευσης όπως επίσης και συστήματα ελέγχου της υγρασίας. Αποτελείται από 3 κανάλια τα οποία έχουν πλάτος 3 m μήκος 70 m, ύψος ιλύος 2 m και ενεργό όγκο 1260 m³ (Κεχαγιαδάκη, 2019).

2) Υπάρχει υπόστεγο κοσκίνισης- ωρίμανσης και αποθήκευσης συνολικής επιφάνειας 1200 m² το οποίο χωρίζεται στους επιμέρους χώρους. Αρχικά βρίσκεται ο χώρος του κοσκινού με διαστάσεις 12,35 m x 9 m. Στην συνέχεια υπάρχει ο χώρος αποθήκευσης χονδρόκοκκου υλικού διαστάσεων 12,35 m x 9,50 m και τέλος υπάρχει ο χώρος ωρίμανσης και αποθήκευσης 45,50 m x 18,80 m, ενεργού όγκου 1.200 m³ (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης, που λαμβάνει χώρα η βιολογική αποικοδόμηση της οργανικής μάζας από τους μικροοργανισμούς, πραγματοποιείται η αύξηση της θερμοκρασίας ενώ αυτή με την σειρά της παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στην καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών όσο και στην εξάτμιση μεγάλων ποσοτήτων νερού. Επίσης πραγματοποιείται συνεχή ανάμειξη του υλικού διότι η διαδικασία της κομποστοποίησης εξαρτάται από παραμέτρους όπως είναι η παροχή του οξυγόνου, η υγρασία και η μάζα του υλικού. Η διεργασία της ανάμειξης γίνεται με την χρήση του αναστροφέα (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Η ισχύς του αναστροφέα είναι 150 KW ενώ η δυναμικότητα του είναι 500 m³/h και η μέγιστη ταχύτητα κίνησης είναι τα 20 m/min. Τέλος για να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες στον αντιδραστήρα κομποστοποίησης έχει εγκατασταθεί σύστημα αερισμού με μέγιστη παροχή αέρα τα 15000 m³/h στα 5000 Pa με τη θερμοκρασία να ελέγχεται από τους 12 αισθητήρες θερμοκρασίας (Κεχαγιαδάκη, 2019).

2.2.7. Μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων

Στην μονάδα υποδοχής και επεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων εισέρχονται τα απόβλητά από τα βυρσοδεψία, τα τυροκομεία και από τα σφαγεία, δραστηριότητες δηλαδή με απόβλητα που έχουν υψηλό δείκτη BOD. Τα χαρακτηριστικά σχεδίασης φαίνονται στον πίνακα 2.7 (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Πίνακας 2.7 Χαρακτηριστικά μονάδας βιομηχανικών αποβλήτων.((Πηγή: <http://astikalimata.ypeka.gr> ΑΕΠΟ της ΕΕΛ Ρεθύμνου)

Χαρακτηριστικά	Βυρσοδεψία	Σφαγεία	Τυροκομία
Ημερήσια παροχή m ³ /h	240	200	15
BOD ₅ (kg/d)	360	240	450
COD (kg/d)	960	500	975
SS (kg/d)	360	300	60
Θειούχα (S) (kg/d)	36	-	-
Χρώμιο (Cr ₂ O ₃) (kg/d)	9,6	-	-
Χλωριούχα,(kg/d)	480	20	15
Ολικό Άζωτο, (kg/d)	33,6	40	25,8
Λίπη- έλαια,(kg/d)	43,2	100	-

Η μέθοδος προ-επεξεργασίας των αποβλήτων που προέρχονται από τις βιομηχανίες των τυροκομειών και των σφαγείων, περιλαμβάνει την χημική κροκίδωση των TSS, του χρωμίου και των λιπών, αλλά και την αφαίρεση των λιπών με επίπλευση. Η επεξεργασία των αποβλήτων για τις δύο αυτές βιομηχανίες διαφέρει. Αρχικά για τα τυροκομεία η επεξεργασία των αποβλήτων είναι η εξής: (Κεχαγιαδάκη, 2019).

- 1) Εξισορρόπηση σε αεριζόμενη δεξαμενή και διόρθωση pH με διάλυμα καυστικής σόδας.
- 2) Διβάθμιο αεριζόμενο βιολογικό αντιδραστήρα.
- 3) Τέλος υπάρχει η αεριζόμενη δεξαμενή των σφαγείων με σκοπό την διοχέτευση των αποβλήτων ενώ στην συνέχεια πραγματοποιείται η διαδικασία της κροκίδωσης και της επίπλευσης για περαιτέρω επεξεργασία.

Η γραμμή επεξεργασίας των αποβλήτων από τα σφαγεία περιλαμβάνει διαφορετικά στάδια: (Κεχαγιαδάκη, 2019).

- 1) Αρχικά υπάρχουν 2 περιστρεφόμενα κόσκινα τα οποία είναι τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου δυναμικότητας 50 m³/h
- 2) Μέτρηση παροχής ηλεκτρομαγνητικού τύπου
- 3) Εξισορρόπηση σε αεριζόμενη δεξαμενή και κροκίδωση που λαμβάνει χώρα με χλωριούχο πολυαργίλιο
- 4) Τέλος η διαδικασία περιλαμβάνει επίπλευση με διαλυόμενο αέρα

Εξίσου σημαντική είναι και η προ-επεξεργασία των βιομηχανικών αποβλήτων των βυρσοδεψείων. Η προ-επεξεργασία περιλαμβάνει την οξείδωση των θειούχων και την χημική κροκίδωση του χρωμίου, των αιωρούμενων σωματιδίων και την αφαίρεση των ελαίων με επίπλευση. Η γραμμή επεξεργασίας περιλαμβάνει τα εξής: (Κεχαγιαδάκη, 2019).

1) Δυο περιστρεφόμενα κόσκινα που είναι τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου δυναμικότητας 50 m³/h όπως και στην γραμμή επεξεργασίας των αποβλήτων των σφαγείων.

2) Μέτρηση παροχής ηλεκτρομαγνητικού τύπου

3) Διόρθωση pH με διάλυμα καυστικής σόδας εξισορρόπησης και οξείδωσης θειούχων με την μέθοδο του αερισμού.

4) Επίπλευση με διαλυμένο αέρα και κροκίδωση

Τέλος τα προ-επεξεργασμένα απόβλητα οδηγούνται στην είσοδο της ΕΕΛ που θα υποστούν περαιτέρω επεξεργασία ενώ η παχυμένη ιλύς πηγαίνει με αντλία εκτόπισης στον μεριστή Ι και στους 2 αερόβιους χωνευτές της ΕΕΛ.

2.2.8. Μονάδα καθαρισμού νερού

Η τελική διεργασία πριν την τελική διάθεση είναι ο καθαρισμός του νερού. Αρχικά μετά την μέτρηση της παροχής το υγρό καταλήγει στην είσοδο και συγκεκριμένα στο φρεάτιο εισόδου της μονάδας απολύμανσης που είναι κατασκευασμένο με τρόπο ώστε να παρέχει την δυνατότητα εκτροπής των λυμάτων προς την έξοδο της ΕΕΛ.

Η μονάδα χλωρίωσης της ΕΕΛ Ρεθύμνου αποτελείται από μια δεξαμενή της οποίας το υλικό κατασκευής είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα όγκου 560 m³ και φέρνει διαχωριστικά τοιχία που δημιουργούν συνολικά 6 διαδρόμους με συνολικό μήκος 16,90 m και πλάτους 2m. Σημαντική παράμετρος διαστασιολόγησης είναι η μέγιστη ωριαία παροχή θέρους και χρόνο επαφής 28,6 min.

Η απολύμανση γίνεται με την χρήση διαλύματος υποχλωριώδους νατρίου (NaOCl) με περιεκτικότητα σε χλώριο 12 % και προστίθεται σε σημείο που υπάρχει καλύτερη ανάμειξη. Ο σταθμός της μονάδας αποτελείται από δοχείο 1000L και 2 δοσομετρικές αντλίες μέγιστης παροχής 70 l/h. Τέλος το νερό που απολυμαίνεται τροφοδοτεί όλα τα τμήματα της ΕΕΛ και χρησιμοποιείται για την κάλυψη αναγκών όπως είναι η άρδευση χώρων πρασίνου.

Κεφάλαιο 3 : Περιγραφή του πιλοτικού συστήματος μικροκοσκίνισης-αεριοποίησης στην ΕΕΛ Ρεθύμνου

3.1. Σκοπός του έργου

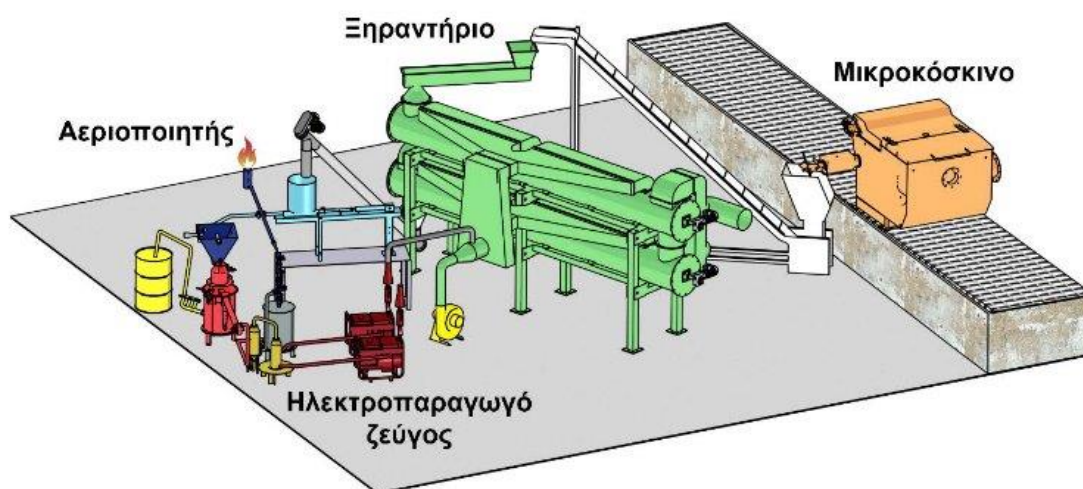
Το έργο LIFE B2E4Sust-WWTP αποτελεί μια καινοτόμα προσπάθεια που στοχεύει στη βελτίωση της απόδοσης του παρατεταμένου αερισμού σε μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, συμβάλλοντας παράλληλα στην προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος από τα απόβλητα των ΕΕΛ. Στο πλαίσιο του έργου εφαρμόζεται μια καινοτόμα διαδικασία αφαίρεσης στερεών πριν από τη δεξαμενή αερισμού, η οποία χαρακτηρίζεται από μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις. Επιπλέον, τα παραγόμενα βιοστερεά αξιοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της διαδικασίας της αεριοποίησης. Ως εκ τούτου, μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, και κατά συνέπεια περιορίζονται οι GHG (Biosolids2energy, 2018, Μαυράκης, 2018).

3.2. Περιγραφή σχεδιασμού συστήματος αεριοποίησης

Η πιλοτική διάταξη έχει εγκατασταθεί στην υφιστάμενη ΕΕΛ Ρεθύμνου (Εικόνα 3.1) και αρχικά περιλαμβάνει το στάδιο της μικροκοσκίνισης στην συνέχεια την ξήρανση και τέλος την αεριοποίηση των βιοστερεών. Η δυναμικότητα της μονάδας είναι 5000 m³/d με το νούμερο αυτό να αντιστοιχεί στο ένα τρίτο της μέσης ημερήσιας παροχής λυμάτων της ΕΕΛ. Το καθαρισμένο αέριο σύνθεσης (syngas) τροφοδοτείται σε μηχανή εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, τα παραγόμενα βιοστερεά παρουσιάζουν υψηλή θερμογόνο δύναμη, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για ενεργειακή αξιοποίηση μέσω θερμικών μεθόδων διαχείρισης υλός (M. A. Manali et al., 2021)



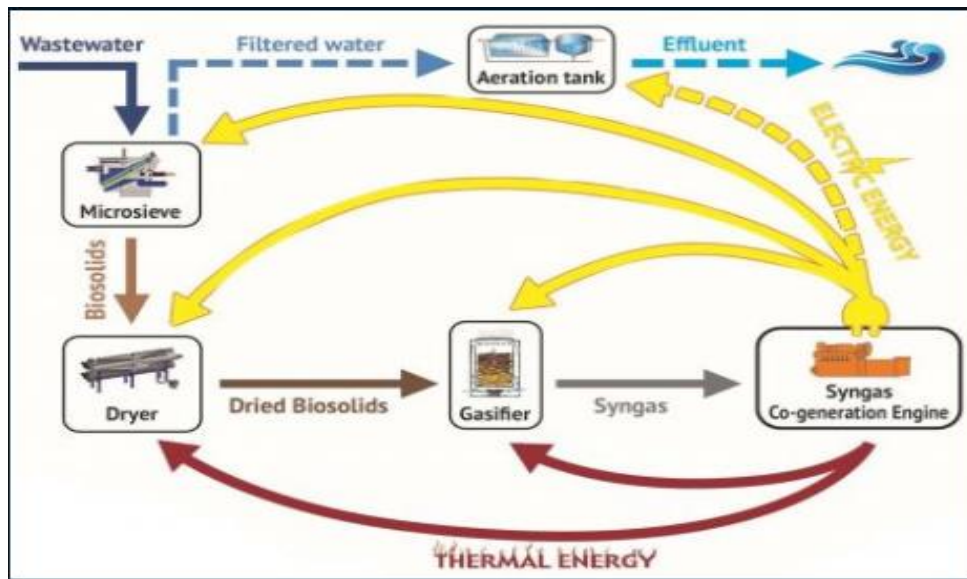
Εικόνα 3.1 Σημείο εγκατάστασης της πιλοτικής μονάδας του LIFE B2E4SustWWTP στην ΕΕΛ Ρεθύμνου



Εικόνα 3.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας προ-επεξεργασίας των λυμάτων και αξιοποίησης των παραγόμενων βιοστερεών του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP (Manali and Gikas, 2022; Manali et al., 2022a).

Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά το διάγραμμα ροής του συστήματος όπως και επίσης η τρισδιάστατη απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας (Εικόνα 3.1 και Εικόνα 3.2).

Αναλυτικότερα με την μικροκοσκίνιση πραγματοποιείται η απομάκρυνση επιμέρους των στερεών προτού εισέλθουν στην δεξαμενή αερισμού. Τα παραγόμενα PSS περιέχουν περίπου 35-45% περιεκτικότητά σε ξηρά στερεά και HHV 23 MJ/kg, ενώ υπόκεινται σε ξήρανση με 85% περιεκτικότητα σε στερεά πριν την εισαγωγή τους στον αεριοποιητή. Στην συνέχεια μέσω του ξηραντήριου πραγματοποιείται η αφαίρεση της υγρασίας των παραγόμενων μικροκοσκινισμένων στερεών. Τέλος εκτελείται η διεργασία της αεριοποίησης προς τον σχηματισμό αερίου σύνθεσης για να οδηγηθεί σε μηχανή εσωτερικής καύσης προς παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για την ξήρανση των PSS, ενώ αντίστοιχα η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για να ηλεκτροδοτήσει αρχικά της ανάγκες της πιλοτικής μονάδας ενώ στην συνέχεια για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας ΕΕΛ Ρεθύμνου όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2 (Manali and Gikas, 2019a; Manali and Gikas, 2019b).



Εικόνα 3.3 Διάγραμμα ροής του πιλοτικού συστήματος του έργου LIFE B2E4SustWWTP (Manali & Gikas, 2018).

3.3. Μικροκοσκίνιση

Η διεργασία της μικροκοσκίνισης είναι μια αποδοτική και καινοτόμα μέθοδος της απομάκρυνσης στερεών από λύματα. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται εδώ και αρκετά χρόνια σε χώρες όπως ο Καναδάς και οι ΗΠΑ (Juan M. Lema & Sonia Suarez, 2017). Επίσης η τεχνολογία της μικροκοσκίνισης είναι μια από τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στην μεμβρανική διήθηση και περιγράφεται ως η τεχνολογία ακριβείας για απολυτή διήθηση. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα μικροκόσκινα υπερτερούν των συμβατών μεμβρανών κατά 50-100 φορές. Στον τομέα της απομάκρυνσης λυμάτων η μέθοδος της μικροκοσκίνισης μπορεί να αφαιρέσει το 73% των στερεών από τα λύματα, γεγονός που βελτιώνει την απόδοση της απολύμανσης με υπεριώδη ακτινοβολία (UV) κατά 18% (Kieppert, 2009).

Αρχικά η είσοδος των αποβλήτων στο σύστημα πραγματοποιείται μέσω μικροεσχάρας με την υποβοήθηση φυγοκεντρικής αντλίας εγκαταστημένης εντός του καναλιού. Το μέγεθος των βιοστερεών, που είναι ικανή να συγκρατεί η μικροεσχάρα, κυμαίνεται από 150-200 μm . Το μηχανικό ξέστρο είναι από τους βασικούς μηχανισμούς που περιέχονται στην μικροεσχάρα καθώς υπάρχει και μηχανισμός στον οποίο γίνεται η εισαγωγή αέρα και είναι υπεύθυνος για τον καθαρισμό της ταινίας. Τέλος υπάρχει σύστημα το οποίο είναι υπεύθυνο για την αφυδάτωση της παραγόμενης ιλύς με αποτέλεσμα μέσω ενός κοχλιωτού συμπιεστή να παράγονται τα PSS. Τα PSS που παράγονται είναι περιεκτικότητας σε στερεά 35-45% και HHV που κυμαίνεται μεταξύ 23.5-24.4 MJ/kg. Η απόδοση που μελετήθηκε για την απομάκρυνση των SS για τα αστικά λύματα είναι μεταξύ 30-50% και η μείωση του BOD₅ μετρήθηκε περίπου στο 20-30% (Manali et al., 2024).



Εικόνα 3.4 Πειραματικό πιλοτικό μικροκόσκινο

Μερικά από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα μικροκοσκίνισης είναι τα ακόλουθα (Juan M. Lema & Sonia Suarez, 2017).

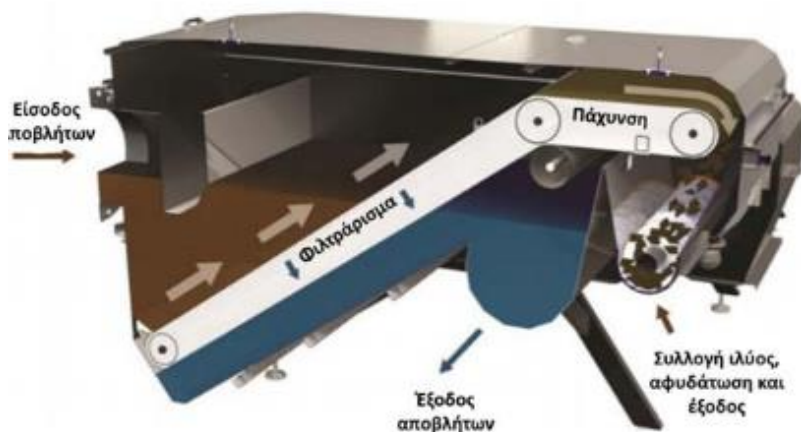
- 1) Φίλτρο περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filter, RBF)
- 2) Φίλτρο περιστρεφόμενου Τυμπάνου ((Rotating Drum Filter, RDF)
- 3) Φίλτρο Δίσκου (Disc Filter, DF)

Τα πλαίσια του προγράμματος LIFE B2E4SustWWTP χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένο είδος μικροκοσκίνισης το οποίο ονομάζεται RBF.

Φίλτρο περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filter, RBF)

Ένας RBF (Εικόνα 3.3) αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο ιμάντα με λεπτό πλέγμα που έχει σκοπό την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών. Η διαδικασία ξεκινάει όταν τα λύματα διαπεράσουν τον περιστρεφόμενο ιμάντα και τα αιωρούμενα στερεά προσκολλώνται πάνω στο πλέγμα, ενώ το αυτόματο σύστημα καθαρισμού είναι εγκατεστημένο στο πάνω μέρος του φίλτρου και αφαιρεί τυχόν συσσωρευμένα βιοστερεά. Το απόβλητο που έχει υποστεί την διαδικασία εκρέει μέσω βαρύτητας στο σημείου εξόδου για περαιτέρω διαδικασία. Τέλος η παροχή και το ύψος της ροής που βρίσκονται στο εσωτερικό του τυμπάνου εξαρτώνται από την παροχή εισόδου και η απόδοση του συστήματος εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων που εισέρχονται στο σύστημα (Juan M. Lema & Sonia Suarez, 2017).

Η μικροκοσκίνηση με χρήση RBF έχει εφαρμογές κυρίως σε περιπτώσεις που γίνεται αφαίρεση πρωτοβάθμιων στερεών σε ΕΕΛ που δεν διαθέτουν πρωτοβάθμια καθίζηση όπως επίσης και σε περιπτώσεις που γίνεται επαναχρησιμοποίηση νερού. (Juan M. Lema & Sonia Suarez, 2017).



Εικόνα 3.5 Συστήματος μικροκοσκίνισης με φίλτρο περιστρεφόμενου ιμάντα (RBF) (Gupta, 2018).

Φίλτρο περιστρεφόμενου Τυμπάνου (Rotating Drum Filter, RDF)

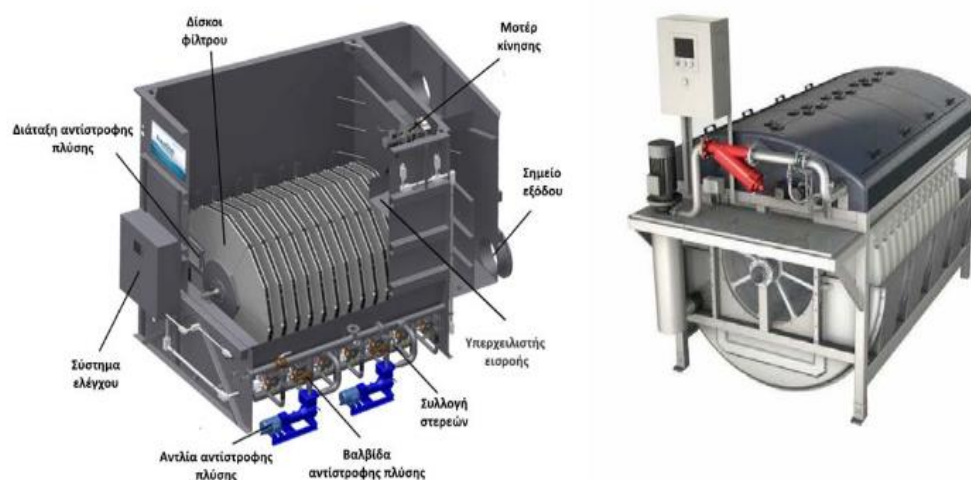
Στο συγκριμένο σύστημα μικροκοσκίνισης το απόβλητο διέρχεται μέσω της βαρύτητας στο εσωτερικό του τυμπάνου (Εικόνα 3.4). Τα ανοίγματα των πόρων του RDF κυμαίνονται μεταξύ 10-500 μm ενώ η επιφάνεια που καταλαμβάνει κυμαίνεται από 0,35 έως 22,5 m. Κατά την διαδικασία αυτήν τα μεγαλύτερα σε μέγεθος στερεά συγκρατούνται από τους πόρους του φίλτρου με αποτέλεσμα να προκαλείται αύξηση της στάθμης του ύδατος. Στην συνέχεια όταν η στάθμη του ύδατος φτάσει στο ανώτατο επιτρεπτό όριο, το RDF αρχίζει να περιστρέφεται ενώ ταυτόχρονα γίνεται και πλύση του συστήματος. Παρόλη τη διαδικασία της πλύσης, η διαδικασία της διήθησης δεν σταματάει (Juan M. Lema & Sonia Suarez, 2017).



Εικόνα 3.6 Σύστημα μικροκοσκίνισης με φίλτρο περιστρεφόμενου τυμπάνου (RDF).

Φίλτρο Δίσκου(Disc Filter, DF)

Στην συγκεκριμένη τεχνολογία μικροκοσκίνισης η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών γίνεται με την βοήθεια φίλτρου (Εικόνα 3.5). Η διαδικασία ξεκινάει όταν το απόβλητο εισέρχεται μέσω του σωλήνα τροφοδοσίας με την χρήση της βαρύτητας. Το εσωτερικό του φίλτρου περιέχει περιστρεφόμενους κυκλικούς δίσκους που περιέχουν μικρά ανοίγματα 20-35 μm . Η στάθμη του αποβλήτου αυξάνεται καθώς τα μεγάλου μεγέθους σωματίδια φράζουν το φίλτρο. Τέλος γίνεται συλλογή των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ποικίλλους τρόπους.



Εικόνα 3.7 Σχηματική απεικόνιση (αριστερά) και φωτογραφία (δεξιά) συστήματος μικροκοσκίνισης με φίλτρο δίσκου (DF) (Morling, 2019).

3.4. Ξήρανση

Όπως έχει προαναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο η αφυδατωμένη ιλύς από τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) αντιμετωπίζει ολοένα και περισσότερα προβλήματα σχετικά με την διάθεσή της. Η ιλύς περιέχει μεγάλο ποσοστό σε νερό περίπου (70-75% κατά βάρος) ακόμα και όταν υποστεί μηχανική επεξεργασία (Bianchini et al., 2015). Οι κύριες μέθοδοι ξήρανσης που εφαρμόζονται είναι τρεις:

- 1) Συναγωγική ξήρανση
- 2) Αγωγήμη ξήρανση
- 3) Ηλιακή ξήρανση

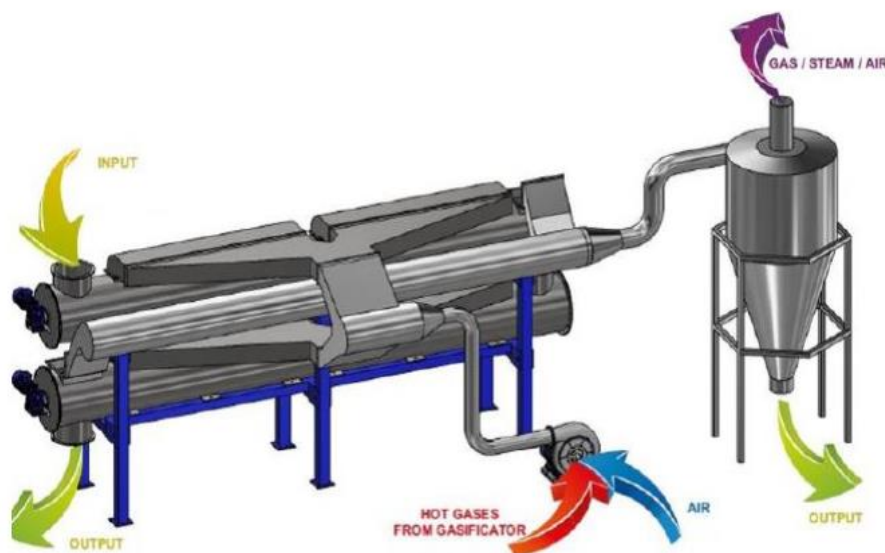
Για την πρώτη μέθοδο κατά την εφαρμογή της διακρίνονται 3 φάσεις: φάση προσαρμογής, φάση σταθερού ρυθμού ξήρανσης και φάση φθίνοντος ρυθμού ξήρανσης. Μελέτες που έχουν στηριχθεί σε πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι αρκετές παράμετροι επηρεάζουν την κινητική της ξήρανσης κατά την διεργασία όπως η προέλευση της ιλύος και οι λειτουργικές συνθήκες (Bennamoun et al., 2013).

Για την δεύτερη μέθοδο με βάση τις μεταβολές της ροπής στρέψης το υλικό περνά από τις εξής φάσεις: πλαστική φάση, φάση με σβώλους και κοκκώδη φάση.

Αποτέλεσμα αυτών είναι το ακανόνιστο σχήμα και οι υψηλές τιμές ρυθμού ξήρανσης όπως επίσης και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας κατά την πρώτη φάση (Bennamoun et al., 2013).

Τέλος η τρίτη μέθοδος είναι μια φυσική μέθοδος και εξαρτάται πλήρως από τις κλιματικές συνθήκες όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία του αέρα. Τέλος οι υπάρχουσες μελέτες για την ηλιακή ξήρανση της ιλύς περιορίζονται στις μεταβολές των θερμοκρασιών αέρα και στην θερμοκρασία του υλικού (Bennamoun et al., 2013).

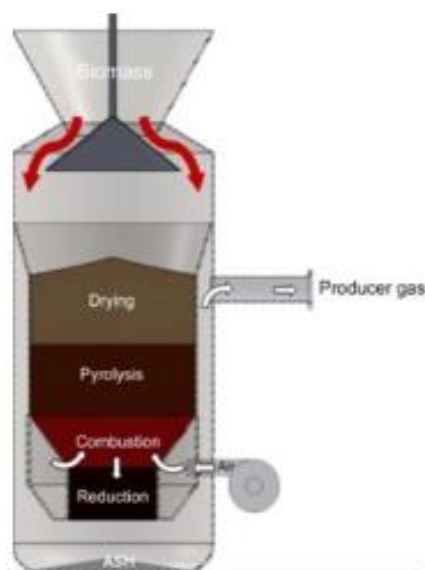
Ο μηχανισμός του ξήραντή που χρησιμοποιείται στην πιλοτική μας (Εικόνα 3.6) μονάδα λειτουργεί με βάση την ταυτόχρονη ανάδευση και την ταυτόχρονη παροχή θερμού αέρα που είναι αποτέλεσμα της αεριοποίησης η οποία παίρνει μέρος στον αεριοποιητή. Συγκεκριμένα, υπάρχουν ειδικοί αγωγοί μεταφοράς και ταυτόχρονης συνεχούς ανάδευσης που διασφαλίζουν την σταθερή ροή του υλικού όπως επίσης και του θερμού αέρα κατά μήκος του σωλήνα μήκους 12 m. Συγκεκριμένα το σύστημα αποτελείται από 2 γραμμές ξήρανσης, με 6 m η κάθε μια, στις οποίες πριν από το τέλος κάθε γραμμής, αναρροφάται υγρός αέρας από το σύστημα ενώ σε κάθε γραμμή πραγματοποιείται και η εισαγωγή του ξηρού αέρα από το σύστημα διανομής θερμού αέρα. Τέλος η δεύτερη γραμμή που οδηγεί στην έξοδο του κατεργασμένου υλικού συλλέγεται από τον κυκλώνα και οδηγείται στον αεριοποιητή (Biosolids2energy, 2018).



Εικόνα 3.8 Διάταξη ξηραντή

3.5. Αεριοποίηση

Τα ξηραμένα βιοστερεά στη συνέχεια τροφοδοτούν τον αεριοποιητή. Η πλήρης ξήρανση των βιοστερεών δεν είναι απαραίτητη, καθώς η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία για την αεριοποίηση είναι μεταξύ 15-20%. Αρχικά, μετά την ξήρανση, οδηγούνται στη μπρικετομηχανή, όπου διαμορφώνονται σε μπρικέτες, οι οποίες στη συνέχεια τροφοδοτούν τον αεριοποιητή μέσω κοχλίας. Ο αεριοποιητής της μονάδας λειτουργεί με σύστημα καθοδικής ροής (downdraft), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.7. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου έγινε επειδή θεωρείται ιδιαίτερα φιλικός προς το περιβάλλον, καθώς οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων που περιέχουν πίσσα και κυρίως τέφρα από το παραγόμενο αέριο σύνθεσης (syngas) είναι ελάχιστες. Ακόμη μια σημαντική λεπτομέρεια που αφορά την αεριοποίηση συγκριτικά με την μέθοδο της αναερόβιας χώνεψης είναι η απόδοση σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μέθοδος της αεριοποίησης αποδίδει έως και 190% περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια σε σύγκριση με την αναερόβια χώνεψη και αυτό οφείλεται στο γεγονός της αξιοποίησης 100% του οργανικού άνθρακα που περιέχεται στην λάσπη ενώ αντίθετα η αναερόβια χώνεψη αξιοποιεί μόνο το 50-60%. Τέλος, ο αεριοποιητής μπορεί να τροφοδοτείται έως και 15 kg/h βιομάζας, με ηλεκτρική απόδοση κυμαίνεται από 12 έως 15 kW. (Biosolids2energy, 2018).



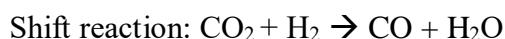
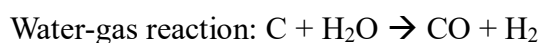
Εικόνα 3.9 Σχηματική απεικόνιση του αεριοποιητή καθοδικής ροής (Takahashi et al., 1988)

Σύμφωνα με την εικόνα 3.7 η διεργασία της αεριοποίησης περιλαμβάνει μια σειρά από θερμοχημικές διεργασίες που συμβαίνουν κατά στρώματα καθώς το καύσιμο, δηλαδή τα βιοστερεά, μετακινούνται μέσα στο σύστημα. Τα στρώματα αυτά στα οποία χωρίζεται είναι: στο στάδιο της ξήρανσης (drying zone), το στάδιο της πυρόλυσης (pyrolysis zone), το στάδιο της καύσης (oxidation zone) και το στάδιο της αναγωγής (reduction zone) (Patra & Sheth, 2015).

Αρχικά στο στάδιο της ξήρανσης μειώνεται η περιεκτικότητα της βιομάζας σε υγρασία σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 100-200 °C. Το ποσοστό της μείωσης αυτής φτάνει έως και το 5%. Στην συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της πυρόλυσης κατά το οποίο πραγματοποιείται θερμική αποδόμηση των βιοστερεών απουσίας οξυγόνου ή αέρα σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 200-450°C. Πραγματοποιείται επίσης και απελευθέρωση πτητικών συστατικών, λόγω της θερμικής διάσπασης των βιοστερεών. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία ενός μείγματος αερίων που περιέχουν μονοξειδίου του άνθρακα, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα ενώ τα βιοστερεά μετατρέπονται σε στερεό άνθρακα. Οι υδρογονάνθρακες αυτοί συμπυκνώνονται σε χαμηλές θερμοκρασίες και σχηματίζουν υγρά πίσσας (tars). Αφού πραγματοποιηθεί η πυρόλυση ακολουθεί η καύση. Η καύση είναι μια αντίδραση μεταξύ του στερεού ανθρακοποιημένου υλικού των βιοστερεών και του οξυγόνου του αέρα με αποτέλεσμα το σχηματισμό CO₂ ενώ ταυτόχρονα οξειδώνεται το υδρογόνο που περιέχεται στην βιομάζα με αποτέλεσμα τον σχηματισμό νερού. Η χημική αντίδραση είναι η παρακάτω :



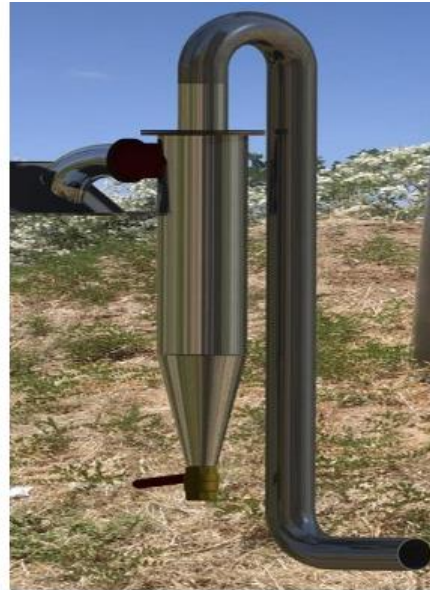
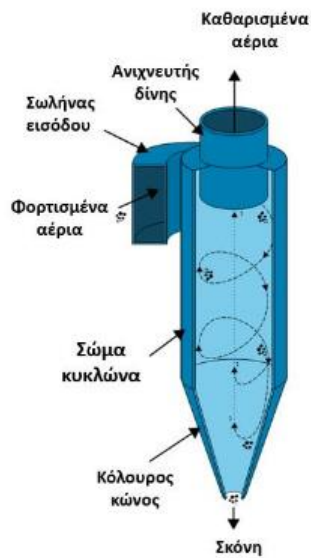
Κατά την οξείδωση του άνθρακα και του υδρογόνου απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα θερμότητας που αξιοποιείται για της αντιδράσεις ξήρανσης, πυρόλυσης και αεριοποίησης. Τέλος το τελικό στάδιο είναι η αναγωγή κατά την οποία λαμβάνουν χώρα διάφορες αναγωγικές αντιδράσεις με την θερμοκρασία να κυμαίνεται μεταξύ 800 και 1000 °C. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται και η παραγωγή του syngas. Οι αναγωγικές αντιδράσεις είναι (Patra & Sheth, 2015) :



Σύστημα φιλτραρίσματος, ψύξης και αποθήκευσης του αερίου

1) Καθαρισμός του συστήματος από υπολείμματα πίσσας και σωματιδίων λόγω αερίου:

Για να πραγματοποιηθεί ο καθαρισμός και η απομάκρυνση των σωματιδίων και της πίσσας από το αέριο σε πρώτη φάση γίνεται χρήση του πολυκυκλώνα συγκράτησης (Εικόνα 3.8). Συγκεκριμένα στο κάτω μέρος τοποθετείται φιάλη για την συλλογή της πίσσας και των άλλων βρώμικων σωματιδίων. Τέλος σε πολλές περιπτώσεις η πίσσα του κυκλώνα οδηγείται στον πυρήνα του αεριοποιητή για να γίνει διάσπαση.



Εικόνα 3.10 Απεικόνιση του πολυκυκλώνα.

2)Φίλτρο βιομάζας: Στην συνέχεια το επόμενο βήμα είναι το φιλτράρισμα του αερίου από το φίλτρο βιομάζας που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.9. Ενώ γίνεται η διαδικασία του φιλτραρίσματος η πίσσα και οι λοιπές ακαθαρσίες συγκρατώνται με σκοπό την προστασία του κινητήρα από την δημιουργία πίσσας στο εσωτερικό του. Τέλος επειδή χρησιμοποιήθηκε φίλτρο βιομάζας, η θερμοκρασία του αερίου δεν πρέπει να ξεπερνά τους 180-200 °C, διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος πυρόλησης (Biosolids2energy, 2018).



Εικόνα 3.11 Φίλτρο βιομάζας

3) Πυρσός καύσης ακατάλληλου αερίου: Στο φίλτρο βιομάζας υπάρχει ο πυρσός ο οποίος χρησιμοποιείται για να γίνει η καύση του ακατάλληλου αερίου. Στην εικόνα 3.10 παρουσιάζεται αναλυτικά ο πυρσός.



Εικόνα 3.12 Πυρσός καύσης

4) Πλυντηρίδα αποθείωσης (scrubber) και σύστημα ανάλυσης αερίου: Το αέριο που παράγεται από την διεργασία της αεριοποίησης περιέχει μεγάλες ποσότητες θείου και ενώσεων του. Με σκοπό την απομάκρυνση τους υπάρχει κατάλληλη πλυντηρίδα (Εικόνα 3.11). Τέλος έπειτα από τον καθαρισμό και την ψύξη του οδηγείται στο σύστημα που γίνεται κατάλληλη ανάλυση ρύπων και σε περίπτωση που κριθεί κατάλληλο οδηγείται στον κινητήρα.



Εικόνα 3.13 Σύστημα καθαρισμού του αερίου

5) Σύστημα αυτομάτου ελέγχου και μηχανή εσωτερικής καύσης: Για την καλύτερη ασφάλειας της μονάδας ώστε να αποφευχθεί κάποιο ατύχημα έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες μέτρησης πίεσης και θερμοκρασίας όπως επίσης και αισθητήρες μέτρησης της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και του οξυγόνου που παρακολουθούνται από την Μονάδα Ελέγχου Ισχύος (Power Control Unit, PCU), η οποία ελέγχει αυτόματα όλες τις λειτουργίες της εγκατάστασης.

Αρχικά αφού έχει υποστεί όλη την παραπάνω διαδικασία το αέριο οδηγείται σε μηχανή εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ενέργειας.



Εικόνα 3.14 Ο αεριοποιητής του προγράμματος LIFE B2E4SustWWTP

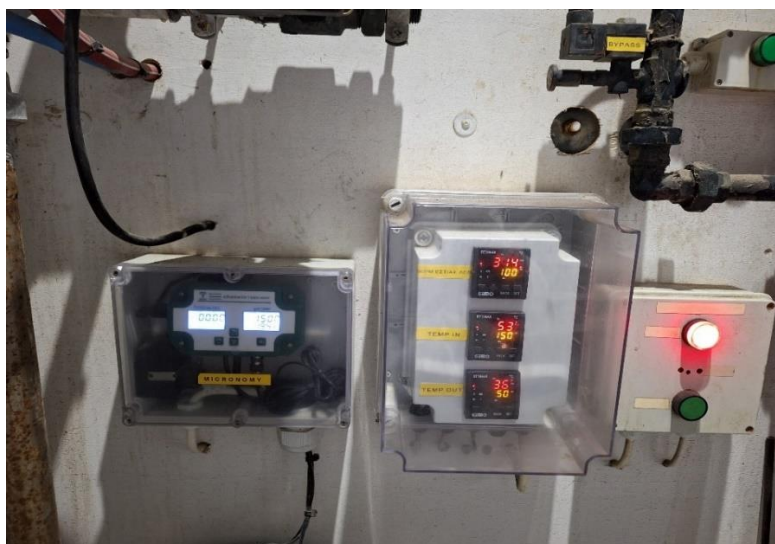
Κεφάλαιο 4 : Πειραματική Διαδικασία

Σκοπός του πειράματος είναι η μελέτη της ποιότητας του αερίου σύνθεσης που παράγεται μέσω της αεριοποίησης των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Το πείραμα και οι σχετικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εντός των εγκαταστάσεων της ΕΕΛ Ρεθύμνου. Τα παραγόμενα βιοστερεά από τη μονάδα μικροκοσκίνισης υφίστανται ξήρανση και κατόπιν οδηγούνται στη μπρικετομηχανή, όπου διαμορφώνονται σε μπρικέτες (Εικόνα 4.1), κατάλληλες για τροφοδοσία στον αεριοποιητή. Οι μπρικέτες αυτές τροφοδοτούνται στον αεριοποιητή, όπου πραγματοποιείται η θερμική επεξεργασία τους για την παραγωγή του αερίου σύνθεσης με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η μέγιστη δυναμικότητα του αεριοποιητή ανέρχεται σε 15 kg/h βιοστερεών.



Εικόνα 4.1 Ο αεριοποιητής του προγράμματος LIFE B2E4SustWWTP

Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας αεριοποίησης, πραγματοποιούνται συνεχείς μετρήσεις μέσω του μετρητή (Εικόνα 4.2), με στόχο την παρακολούθηση κρίσιμων θερμοκρασιακών ενδείξεων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη θερμοκρασία της εστίας του λέβητα, την εσωτερική θερμοκρασία του συστήματος (Temp in) και τη θερμοκρασία εξόδου (Temp out). Η θερμοκρασία της εστίας, η οποία παρουσιάζει και τις υψηλότερες τιμές, αντιστοιχεί στην εσωτερική θερμοκρασία όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση της αεριοποίησης και παράγεται θερμική ενέργεια. Ακολουθεί η θερμοκρασία εισόδου (Temp in), η οποία αναφέρεται στη θερμοκρασία του αερίου κατά τη διαδικασία ψύξης του μέσω του εναλλάκτη θερμότητας. Τέλος, η θερμοκρασία εξόδου (Temp out) αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία του καθαρισμένου αερίου σύνθεσης (syngas) που οδηγείται προς τη μηχανή εσωτερικής καύσης.



Εικόνα 4.2 Σύστημα καταγραφής θερμοκρασίας πειράματος

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διεργασίας που καταλήγει στην παραγωγή του τελικού προϊόντος, δηλαδή του αερίου σύνθεσης (syngas). Αρχικά μέσω του θαλάμου εισροής πραγματοποιείται η είσοδος του αποβλήτου στο μικροκόσκινο με την βοήθεια υποβρύχιας φυγοκεντρικής αντλίας. Στη συνέχεια το απόβλητο εισέρχεται στον θάλαμο μικροκοσκίνισης στον οποίο δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα βιοστερεών πάνω στον μάντα, το οποίο αφαιρείται με την βοήθεια μηχανικού ξέστρου και νερού. Τέλος τα συλλεγμένα βιοστερεά μεταφέρονται στον θάλαμο συμπύκνωσης όπου αφαιρείται η επιπλέον υγρασία με αποτέλεσμα την δημιουργία των μικροκοσκινισμένων βιοστερεών. Τα βιοστερεά τροφοδοτούνται στον ξηραντήρα μέσω ενός συνδυαστικού συστήματος από χοάνες και μεταφορικούς κοχλίες με την χωρητικότητα του δοχείου να φτάνει τα 60 kg. Η διεργασία της ξήρανσης πραγματοποιείται με ειδικούς κοχλίες μεταφοράς και ταυτόχρονης συνεχούς ανάδευσης και παροχής θερμού αέρα. Το ξηραντήριο είναι εφοδιασμένο με σύστημα διανομής θερμού αέρα μέσω του οποίου εισάγεται και θερμός και ξηρός αέρας στην γραμμή ξήρανσης. Στη συνέχεια μέσω του συστήματος εισόδου πραγματοποιείται η σύνδεση του ξηραντήριου με το σύστημα αεριοποίησης με σκοπό την τροφοδοσία των βιοστερεών. Ακολουθεί η μετατροπή των βιοστερεών σε μπρικέτες, μια διαδικασία η οποία θεωρείται απαραίτητη για να εισαχθεί το υλικό στον αεριοποιητή. Με την είσοδο του υλικού στον αεριοποιητή, τύπου καθοδικής ροής και δυναμικότητας 15kg/h, πραγματοποιείται η διεργασία της αεριοποίησης με δυνατότητα παραγωγής αερίου σύνθεσης έως και 30 m³/h. Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι η ποσότητα υλικού που εισέρχεται στον αεριοποιητή δεν είναι σταθερή καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Αυτό συμβαίνει διότι η ποσότητα των βιοστερεών είναι από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας και συγκεκριμένα τον λόγο ER. Ο λόγος ER (Equivalence Ratio) ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ποσότητας αέρα που εισάγεται στον αεριοποιητή σε σχέση με την θεωρητικά απαιτούμενη ποσότητα αέρα για πλήρη καύση. Η ιδανική τιμή για σε έναν αεριοποιητή καθοδικής ροής είναι η τιμή 0,2-0,3. Για να επιτευχθεί αυτό κατά την πειραματική διαδικασία

τοποθετήθηκαν στον αεριοποιητή ποσότητες 5,6,8,9 και 12 kg/h με ταυτόχρονες ρυθμίσεις στην παροχή του αέρα. Οι ποσότητες αυτές ζυγίζονταν με τη χρήση ειδικού συστήματος μέτρησης που ήταν ενσωματωμένο στην πιλοτική μονάδα αεριοποίησης, εξασφαλίζοντας ακρίβεια και επαναληψιμότητα στις δοκιμές. Με την εισαγωγή των βιοστερεών στον αεριοποιητή και την εκκίνηση του καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας αεριοποίησης πραγματοποιούνται συνεχείς μετρήσεις μέσω του μετρητή (Εικόνα 4.2), με ιδιαίτερη έμφαση στις ενδείξεις της θερμοκρασίας της εστίας του λέβητα, της εσωτερικής θερμοκρασίας του συστήματος (Temp in) και της θερμοκρασίας εξόδου (Temp out). Για να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα οι ενδείξεις της θερμοκρασίας καταγραφόντουσαν κάθε 10 λεπτά, όπως επίσης και η χρονική περίοδος των μετρήσεων αλλάζει από μέρα σε μέρα, σε αντίθεση με το χρόνο λειτουργίας του αεριοποιητή που ορίζεται στις 6 ώρες. Αφού η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 500°C, ξεκινά η διεργασία της αεριοποίησης, με στόχο τον σχηματισμό αερίου σύνθεσης (syngas). Το παραγόμενο αέριο περιέχει διάφορες ακαθαρσίες, όπως σωματίδια, πίσσες (tars), υδρατμούς, καθώς και αέρια όπως υδρόθειο (H_2S), υδροχλωρικό (HCl), αμμωνία (NH_3) και κυανιούχες ενώσεις (HCN). Οι ακαθαρσίες αυτές προέρχονται κυρίως από τη θερμική αποδόμηση της βιομάζας και ενδέχεται να προκαλέσουν διαβρώσεις ή βλάβες στον εξοπλισμό. Για τον λόγο αυτό, το syngas καθαρίζεται μέσω ειδικού συστήματος καθαρισμού, το οποίο έχει εγκατασταθεί στην πιλοτική μονάδα και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3. Η παραγόμενη φλόγα από την καύση του αερίου σύνθεσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4. Κατόπιν το επεξεργασμένο αέριο σύνθεσης οδηγείται σε μηχανή εσωτερικής καύσης προς την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (Εικόνα 4.5). Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή τέφρας η οποία απομακρύνεται χωρίς να επηρεάζει την διαδικασία της αεριοποίησης και συλλέγεται σε μεταλλικά βαρέλια.



Εικόνα 4.3 Σύστημα καθαρισμού και φιλτραρίσματος αερίου



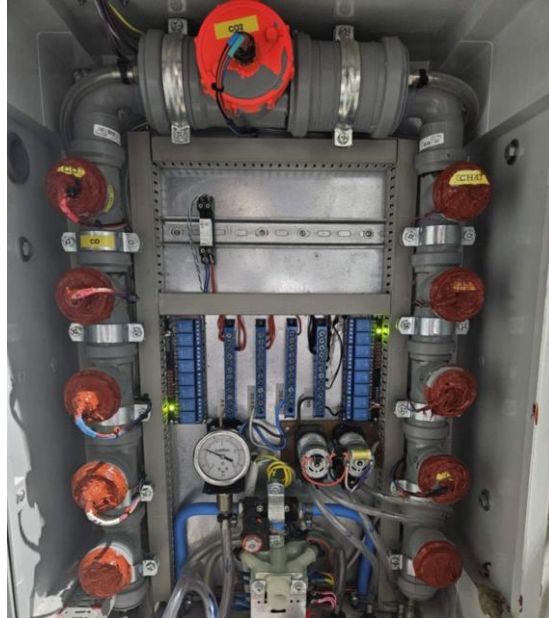
Εικόνα 4.4 Πυρσός καύσης και εμφάνιση φλόγας

Τέλος γίνεται μέτρηση για τις συγκεντρώσεις των διάφορων συστατικών στο αέριο για να αναλυθεί η σύσταση τους και στη συνέχεια να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των αερίων του οξυγόνου (O_2), διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), μεθανίου (CH_4), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), και του υδρογόνου (H_2) με το αυτόματο σύστημα που είναι εγκατεστημένο στην μονάδα.



Εικόνα 4.5 Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος

Η Εικόνα 4.6 παρουσιάζει το σύστημα μέτρησης των συστατικών του αερίου σύνθεσης (syngas), το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάλυση της σύστασής του κατά την αεριοποίηση των πρωτοβάθμιων βιοστερεών.



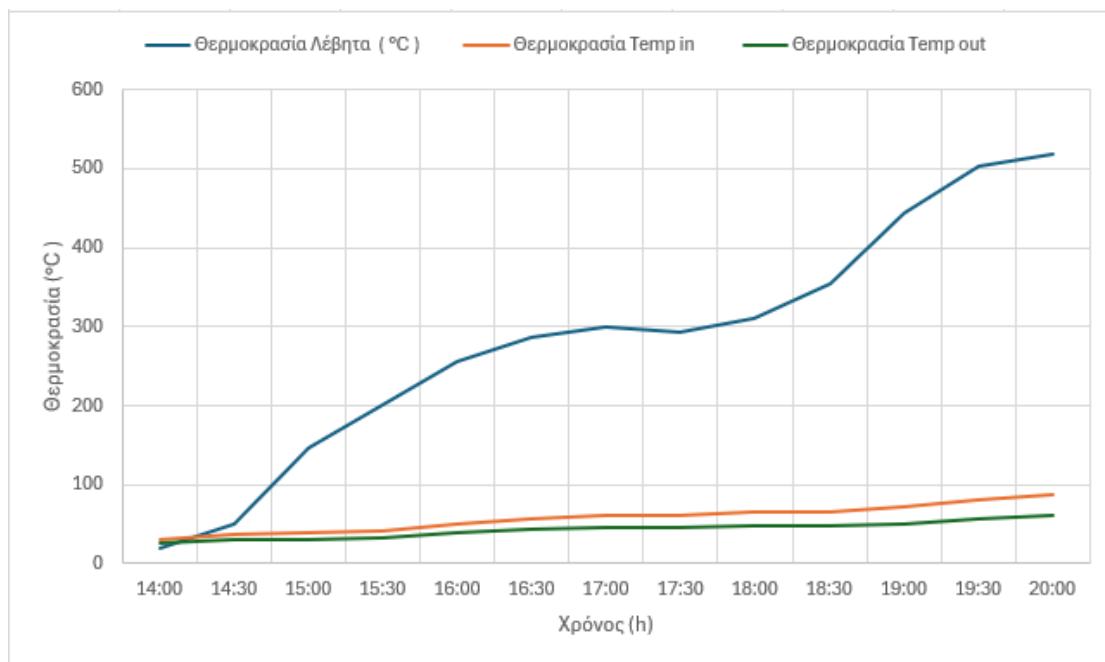
Εικόνα 4.6 Σύστημα μέτρησης των συστατικών του syngas

Κεφάλαιο 5 : Αποτελέσματα και συζήτηση

5.1.Ανάλυση διαγράμματος θερμοκρασίας-χρόνου

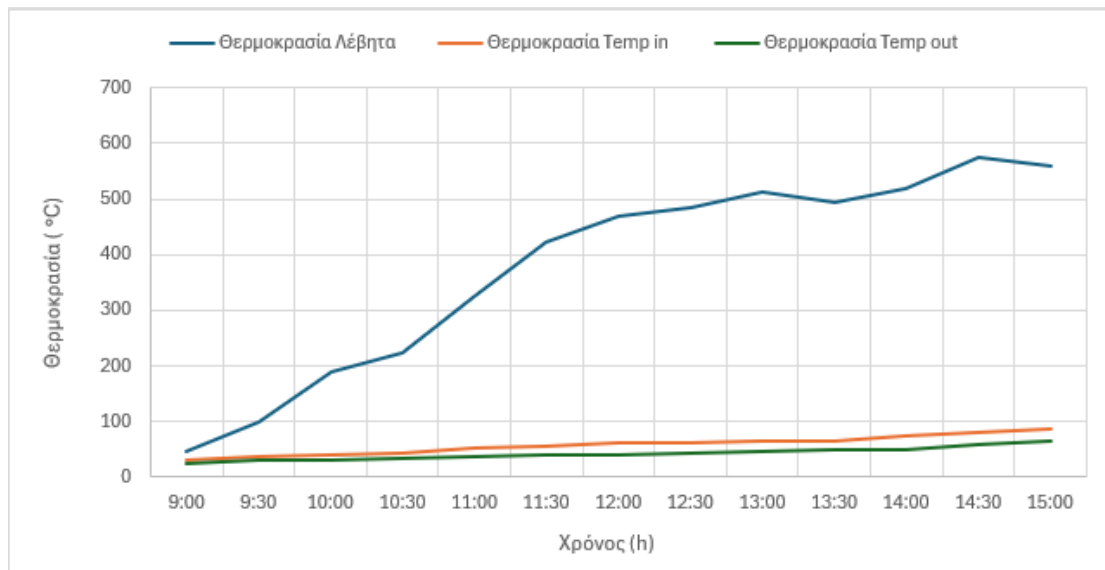
Αρχικά, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας ως συνάρτηση του χρόνου για το χρονικό διάστημα 20/9/2024-13/11/2024. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα δεδομένα της θερμοκρασίας του λέβητα, της εσωτερικής θερμοκρασίας του συστήματος (Temp in) και της θερμοκρασίας εξόδου (Temp out). Από την ανάλυση των διαγραμμάτων προκύπτει ότι η ιδανική θερμοκρασία λειτουργίας του αεριοποιητή κυμαίνεται μεταξύ 500°C και 800°C, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρούνται ακόμη υψηλότερες τιμές. Σύμφωνα με τους Kirubakaran et al. 2009 η θερμοκρασία άνω των 500°C επιλέγεται για την σωστή μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα σε μονοξείδιο μέσω αναγωγής με άνθρακα. Η πλήρης αεριοποίηση επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία άνω των 500°C με την χρήση αέρα. Στα διαγράμματα 5.1-5.5 παρουσιάζονται τα δεδομένα της θερμοκρασίας του λέβητα, της εσωτερικής θερμοκρασίας του συστήματος (Temp in) και της θερμοκρασίας εξόδου (Temp out).

Ο έλεγχος των θερμοκρασιών αυτών παίζει καθοριστικό ρόλο στην εισαγωγή του παραγόμενου αερίου σύνθεσης στην μηχανή εσωτερικής καύσης. Η θερμοκρασία του λέβητα σημαντικό είναι να διατηρείται πάνω από 500 °C για ιδανική αεριοποίηση και παραγωγή καθαρού syngas με αποτέλεσμα την παραγωγή μικρότερων ποσοστών πίσσας (tar) που διευκολύνει την χρήση του στην μηχανή εσωτερικής καύσης. Ακόμα, οι ιδανικές συνθήκες αεριοποίησης οδηγούν στην παραγωγή syngas, με τα κύρια εύφλεκτα συστατικά που είναι το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο σε υψηλές συγκεντρώσεις με αποτέλεσμα να οδηγούν στην αύξηση της θερμογόνου δύναμης και στην καλύτερη απόδοση. Η θερμοκρασία του αερίου σύνθεσης (syngas) κατά την είσοδό του στη μηχανή εσωτερικής καύσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη βέλτιστη λειτουργία και απόδοση του συστήματος. Αν και η διαδικασία αεριοποίησης απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 500 °C) για την παραγωγή καθαρού syngas με υψηλή θερμογόνο δύναμη και χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα, το παραγόμενο αέριο πρέπει να υποστεί ελεγχόμενη ψύξη πριν την είσοδο στον κινητήρα. Θερμοκρασίες εισόδου της τάξης των 30–70 °C θεωρούνται κατάλληλες για την αποφυγή φαινομένων όπως η θερμική καταπόνηση ή η ασταθής καύση. Αντιθέτως, θερμοκρασίες άνω των 150 °C ενδέχεται να αυξήσουν την πιθανότητα ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως το "χτύπημα" (engine knocking), εξαιτίας της αύξησης της πίεσης και θερμοκρασίας εντός του θαλάμου καύσης. Συνεπώς, η θερμική διαχείριση του syngas αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ασφαλή και αποδοτική του χρήση ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης (Gikas, 2014).



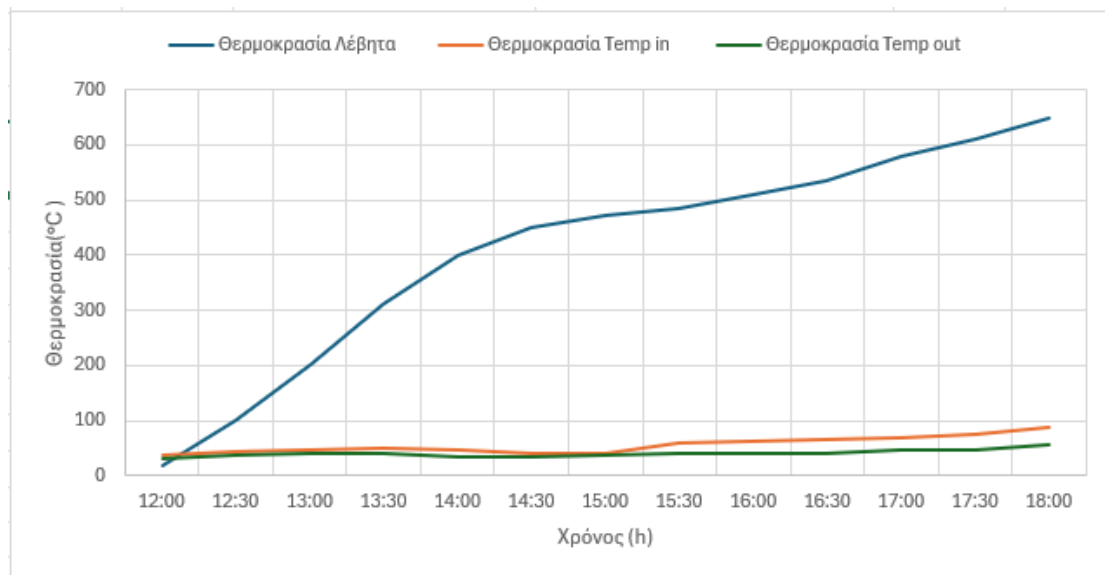
Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου (20-9-2024)

Αρχικά για την πρώτη μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στις 20-9-2024 τοποθετήθηκαν στον αεριοποιητή 6 kg βιοστερεών. Όπως προαναφέρθηκε οι ποσότητες αυτές ζυγίζονταν με τη χρήση ειδικού συστήματος μέτρησης που ήταν ενσωματωμένο στην πιλοτική μονάδα αεριοποίησης, εξασφαλίζοντας ακρίβεια. Από την ανάλυση του διαγράμματος 5.1 προκύπτει ότι κατά την διάρκεια της πρώτης μέρας μετρήσεων (20-9-2024) το εύρος των θερμοκρασιών της διεργασίας της αεριοποίησης κυμάνθηκε από τους 20°C έως τους 580 °C. Σύμφωνα με τους Ismail & El-Salam, 2017 ένα τυπικό εύρος της θερμοκρασίας κυμαίνεται από τους 500 °C έως τους 850 °C. Αντίστοιχα, το εύρος των θερμοκρασιών της εσωτερικής θερμοκρασίας του συστήματος (Temp in) κυμαίνεται από 30-90°C ενώ αντίστοιχα για την θερμοκρασία εξόδου (Temp out) από 25-60°C.



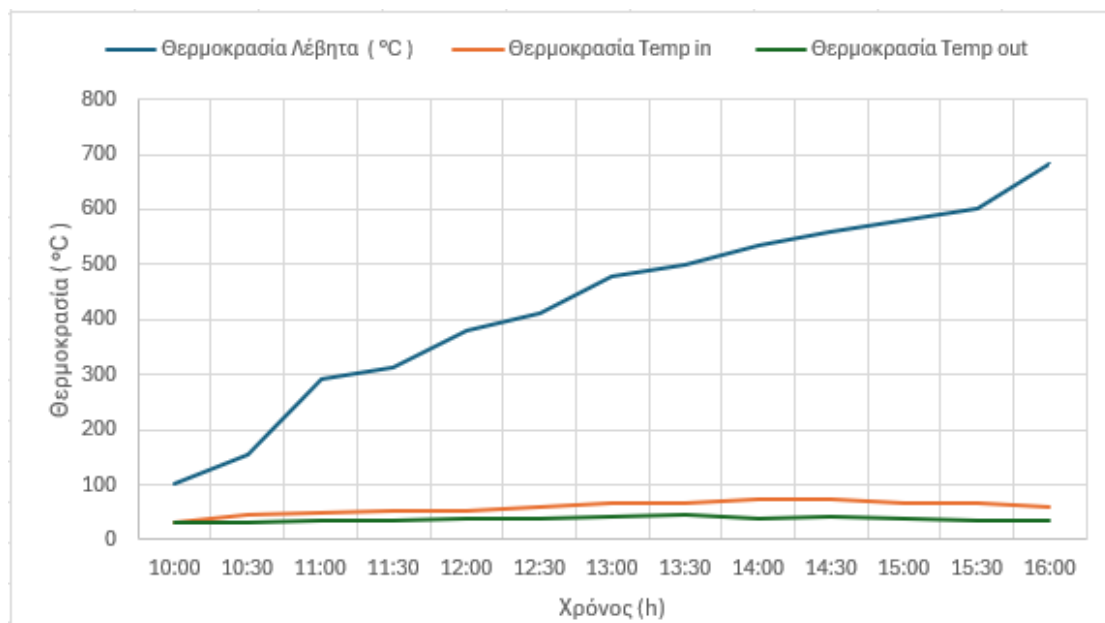
Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου (26-10-2024)

Η δεύτερη μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στις 26-10-2024 τοποθετήθηκαν στον αεριοποιητή 5 kg βιοστερεών. Στην συνέχεια αναλύοντας το διάγραμμα 5.2 για την 2^η μέτρηση προκύπτει και εδώ το συμπέρασμά ότι το εύρος των θερμοκρασιών για την διεργασία της αεριοποίησης κυμαίνεται από 45°C έως τους 600 °C. Αναλυτικότερα η αρνητική κλίση στο διάγραμμα (πτώση από 510 °C-470 °C) υποδηλώνει την τροφοδοσία περισσότερου υλικού στην μονάδα αεριοποίησης λόγω και της χαμηλής ποσότητας βιοστερεών που τοποθετήσαμε. Τέλος το εύρος των θερμοκρασιών της εσωτερικής θερμοκρασίας του συστήματος (Temp in) είναι από 30-90°C και για την θερμοκρασία εξόδου (Temp out) από 25-70 °C.



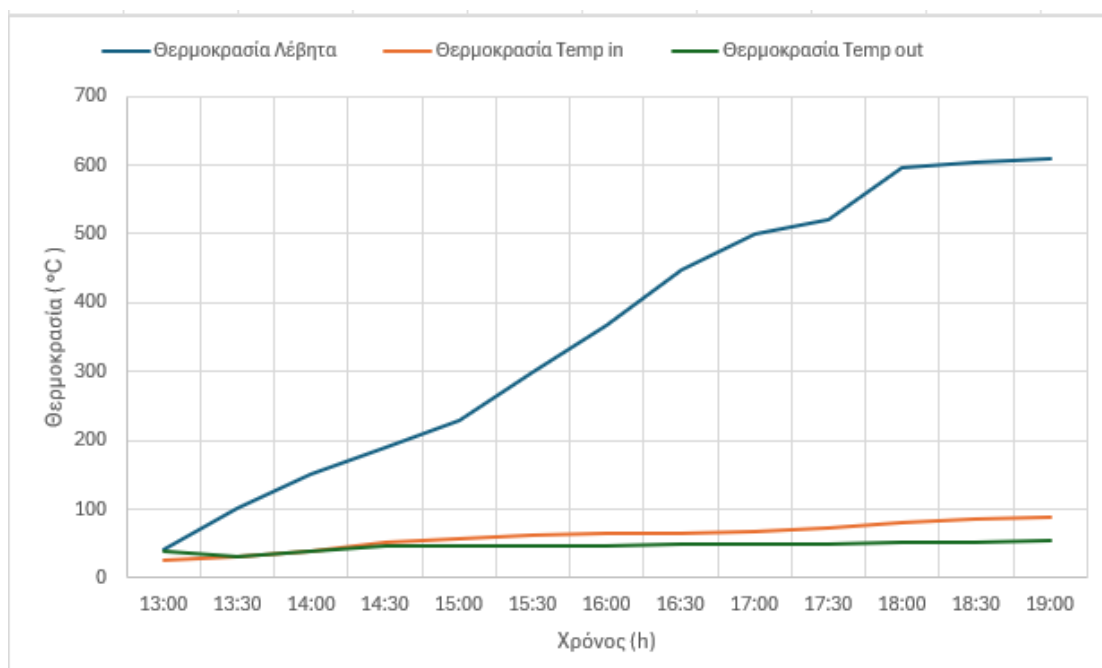
Διάγραμμα 5.3: Διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου (9-11-2024)

Κατά την διάρκεια της τρίτης μέτρησης τοποθετήσαμε 8 kg βιοστερεών στον αεριοποιητή. Στο διάγραμμα 5.3 παρουσιάζονται εκ νέου οι μεταβολές των τριών θερμοκρασιών που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια της διεργασίας της αεριοποίησης βιοστερεών. Αρχικά για την θερμοκρασία του λέβητα, αυξάνεται σταδιακά μέχρι 650 °C γεγονός που υποδηλώνει ιδανικές συνθήκες που οδηγούν στην διάσπαση των βιοστερεών. Στην συνέχεια μελετήθηκε και καταγράφηκε το εύρος για την εσωτερική θερμοκρασία του συστήματος (Temp in) και της θερμοκρασίας εξόδου (Temp out). Τα αντίστοιχα εύρη των τιμών είναι από 30-90 °C και 30-55°C.



Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου (13-11-2024)

Στην τέταρτη μέτρηση τοποθετήθηκαν 12 kg βιοστερεών. Συνεχίζοντας με τις αναλύσεις των διαγραμμάτων θερμοκρασίας παρατηρήθηκε για το διάγραμμα 5.4 ότι το εύρος της τιμής της εσωτερικής θερμοκρασίας του συστήματος (Temp in) βρίσκεται στα όρια μεταξύ 30-75°C ενώ η θερμοκρασία εξόδου (Temp out) από 30-40 °C. Από την άλλη η θερμοκρασία του λέβητα κυμαίνεται και σε αυτήν την περίπτωση από 100°C-700°C. Η απουσία μεγάλων διακυμάνσεων (κλίσεων) υποδηλώνει ότι το σύστημα τροφοδοτείται σταθερά με υλικό (βιοστερεά).



Διάγραμμα 5.5: Διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου (20-11-2024)

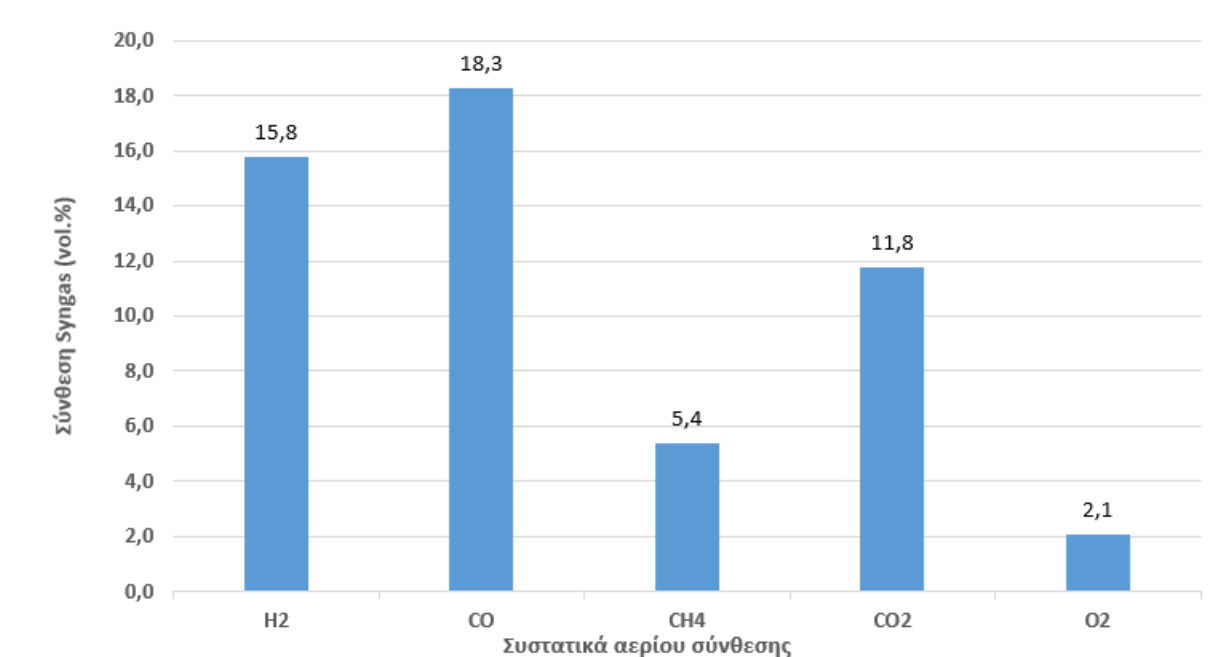
Τέλος για την τελευταία μέτρηση ζυγίστηκαν και τοποθετήθηκαν στον αεριοποιητή 9 kg βιοστερεών. Στο διάγραμμα 5.5, η θερμοκρασία κυμαίνεται από 20°C έως 700 °C ιδανική θερμοκρασία για την διαδικασία της αεριοποίησης καθώς από εκεί και πάνω ξεκινάει η πλήρης αναγωγή του CO₂ σε CO. Αντίστοιχα το εύρος των θερμοκρασιών της εσωτερικής θερμοκρασίας του συστήματος (Temp in) κυμαίνεται από 25-90°C ενώ αντίστοιχα για την θερμοκρασία εξόδου (Temp out) από 35-60°C. Όσον αφορά το υλικό τροφοδοσίας διαπιστώθηκε από την μορφή του διαγράμματος ότι δεν παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση κάποια εξωτερική τροφοδοσία στο σύστημα. Συγκεκριμένα δεν χρειάστηκε η προσθήκη βιοστερεών από την μπρικετομηχανή που είναι συνδεδεμένη με τον αεριοποιητή.

Ο αέρας παρέμεινε σταθερά παρών καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας αεριοποίησης. Η συνεχής και ελεγχόμενη παροχή του αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος, καθώς η ποσότητά του επηρεάζει άμεσα τις συνθήκες αντίδρασης, την αποδοτικότητα της μετατροπής και τελικά, την ποιότητα των παραγόμενων αερίων. Όπως προαναφέρθηκε σημαντική παράμετρος που καθορίζει

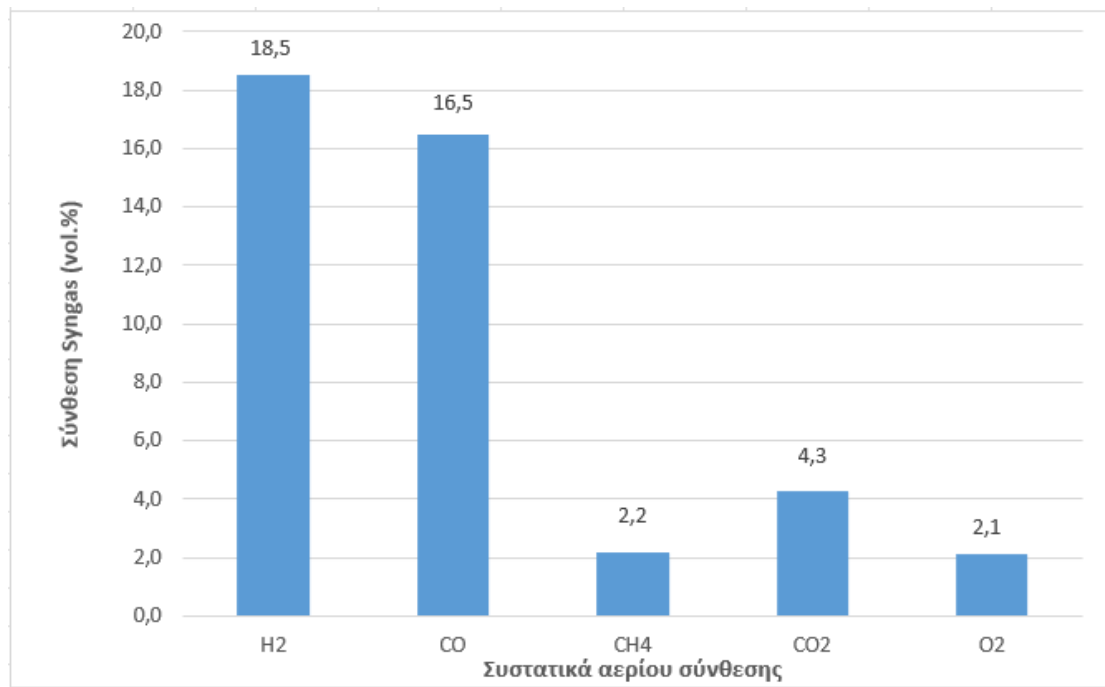
την ποσότητα του αέρα είναι ο λόγος ER. Σε όλα τα διαγράμματα (5.1-5.5) παρατηρήθηκαν θερμοκρασίες άνω των 500 °C ιδανικές για αεριοποίηση σύμφωνα με τους Ismail & El-Salam (2017), γεγονός που μας δείχνει ότι ο λόγος ER κυμαινόταν από 0,19-0,43 σύμφωνα με τους Ismail & El-Salam (2017), καθώς η αύξηση του λόγου ER ενισχύει τις εξώθερμες αντιδράσεις.

5.2.Ανάλυση αποτελεσμάτων και συζήτηση ποιότητας αερίου

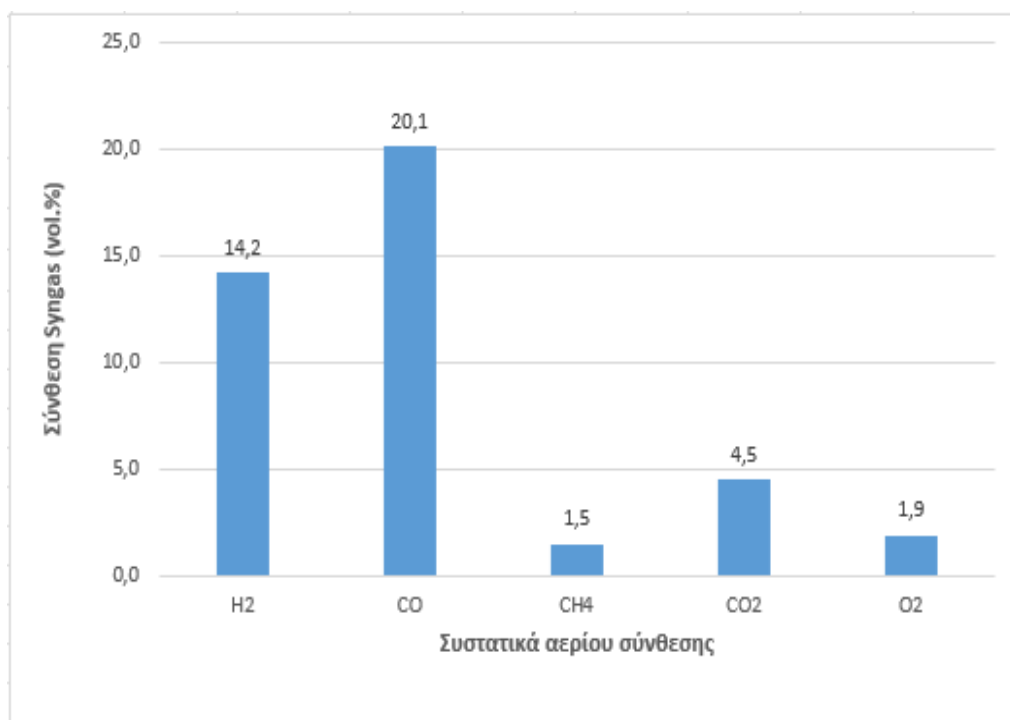
Ακολουθώντας, με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, μελετήθηκε η ποιότητα του αερίου σύνθεσης που παρήχθη κατά τη διεργασία της αεριοποίησης των πρωτοβάθμιων βιοστερεών στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Οι τιμές των συγκεντρώσεων των βασικών συστατικών του καθαρισμένου από ακαθαρσίες παραγόμενου αερίου που προκύπτει είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το υδρογόνο (H_2) και το οξυγόνο (O_2) όπως παρουσιάζονται στα διαγράμματα 5.6 έως 5.10. Αρχικά για το διάγραμμα 5.6 τα αποτελέσματα που προέκυψαν αναφέρονται για ποσότητα βιοστερεών στον αεριοποιητή 6 kg. Στην συνέχεια στα διαγράμματα 5.7 και 5.8 η ποσότητα των βιοστερεών που τοποθετήθηκε ήταν 5 kg και 8 kg αντίστοιχα. Τέλος για τα διαγράμματα 5.9 και 5.10 η παροχή των βιοστερεών είναι 12 kg και 9 kg



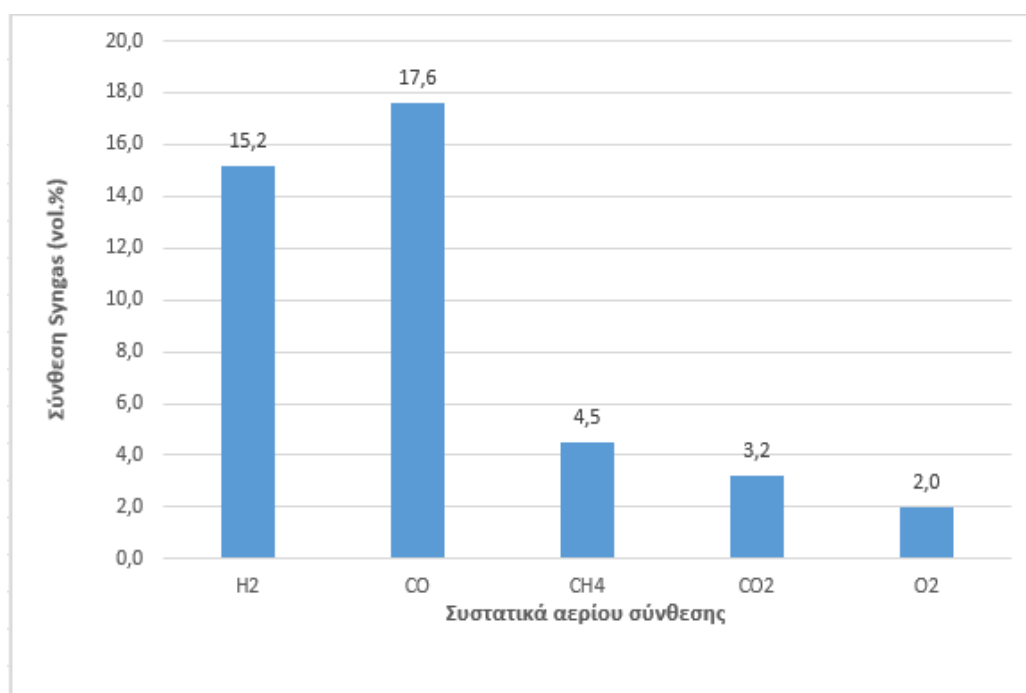
Διάγραμμα 5.6: Διάγραμμα συγκεντρώσεις του παραγόμενου καθαρισμένου αερίου σύνθεσης (20-9-2024)



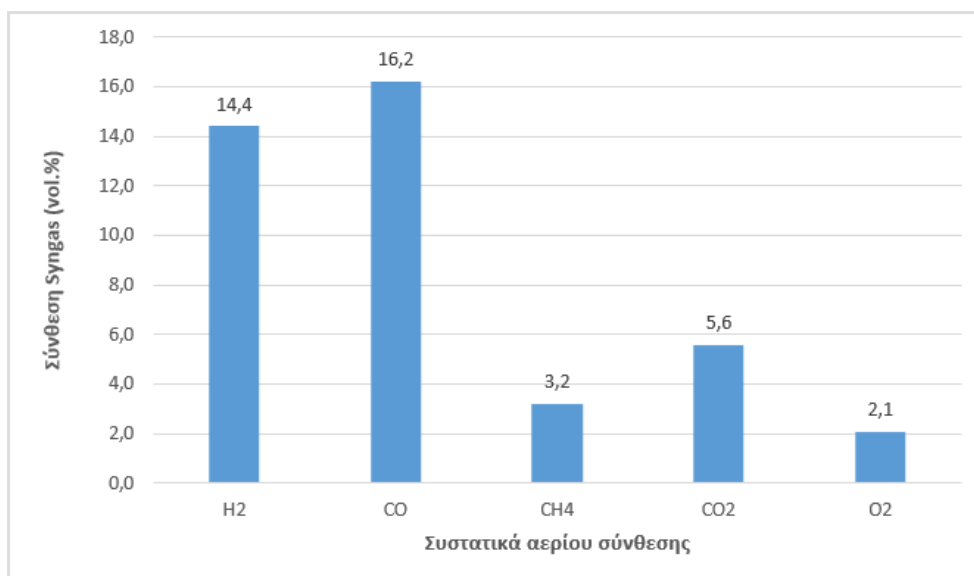
Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα συγκεντρώσεων του παραγόμενου καθαρισμένου αερίου σύνθεσης (26-10-2024)



Διάγραμμα 5.8: Διάγραμμα συγκεντρώσεων του παραγόμενου αερίου σύνθεσης αερίων (9-11-2024)



Διάγραμμα 5.9: Διάγραμμα συγκεντρώσεων του παραγόμενου αερίου σύνθεσης αερίων (13-11-2024)



Διάγραμμα 5.10: Διάγραμμα συγκεντρώσεων του παραγόμενου αερίου σύνθεσης αερίων (20-11-2024)

Αναλυτικά, από τα διαγράμματα 5.6 έως 5.10 προκύπτουν οι μέσες τιμές συγκέντρωσης των βασικών συστατικών του αερίου σύνθεσης. Συγκεκριμένα, για το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) η μέση τιμή είναι 5,9%, για το μεθάνιο (CH₄) 3,4%, για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) 17,7% και για το υδρογόνο (H₂) 15,6%. Τέλος, η μέση τιμή για το οξυγόνο (O₂) είναι 2%.

Αρχικά το είδος του αεριοποιητή που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμά μας είναι τύπου καθοδικής ροής και είναι σημαντικό να αναφερθεί, διότι οι τιμές των συγκεντρώσεων αλλάζουν με έναν αεριοποιητή ανοδικής ροής. Όπως θα προκύψει και από τις τιμές των διαγραμμάτων και συγκεκριμένα για το διάγραμμα 5.6, το διοξείδιου του άνθρακα (CO₂) είναι 11,8%, το μεθάνιο (CH₄) 5,4% το μονοξείδιου του άνθρακα (CO) 18,3%, το υδρογόνου (H₂) είναι 15,8% και το οξυγόνο (O₂) 2,1%. Οι τιμές αυτές υποδεικνύουν ότι αναφερόμαστε σε αεριοποιητή καθοδικής ροής συγκρίνοντάς τα με την βιβλιογραφία. Παρόμοιες τιμές έχουν και τα διαγράμματα 5.7, 5.8, 5.9 και 5.10. Σύμφωνα με αυτήν οι τιμές κυμαίνονται για το διοξείδιου του άνθρακα (CO₂) από 6-13% για το μεθάνιο (CH₄) από 1-5%, για το μονοξείδιου του άνθρακα (CO) από 10-22% για το υδρογόνου (H₂) από 15-21%. Μία τυπική σύσταση αερίου σύνθεσης (syngas) το οποίο έχει προκύψει από αεριοποίηση βιοστερεών σύμφωνα με τους Couto et al., 2013 είναι: 13% CO₂, 21% CO, 1% CH₄, 17% H₂.

Η αύξηση που παρατηρείται στις τιμές του H₂ και του CO σύμφωνα με τους Ramos & Rouboa, et al. 2020 μπορεί να αποδοθεί στην εμφάνιση της αντίδρασης αερίου-νερού λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας της αντίδρασης. Η θερμοκρασία της αντίδρασης αποτελεί βασική παράμετρο και είναι σημαντικό να καθοριστεί η βέλτιστη συνθήκη

κατά την αεριοποίηση της βιομάζας καθώς η αύξηση της δεν ευνοεί πάντα την αύξηση των τιμών του H_2 και του CO (Ramos & Rouboa, 2020).

Μια επισκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας έδειξε ότι η εφαρμογή της αεριοποίησης βιοστερεών τα οποία προέρχονται από μείγμα αποξηραμένης πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύς για την παραγωγή αερίου σύνθεσης (syngas) οι τιμές για τα κύρια αέρια τα οποία το αποτελούν αναλύονται σε διαγράμματα και παρουσιάζουν τα εξής αποτελέσματα. Όπως προαναφέρθηκε η κατάλληλη θερμοκρασία για να πραγματοποιηθεί η διεργασία της αεριοποίησης είναι από 500 μέχρι $800^\circ C$. Σύμφωνα με τους Chen et al., 2022 πραγματοποιήθηκε αεριοποίηση σε 4 διαφορετικές θερμοκρασίες ξεκινώντας από $700^\circ C$ στην συνέχεια στους $800^\circ C$ μετά στους $850^\circ C$ και τέλος στους $900^\circ C$. Από τις μετρήσεις του πειράματός μας προκύπτει ότι η μέση θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε η αεριοποίηση ήταν στους $700^\circ C$ οπότε η σύγκριση θα γίνει για τις αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας για τους $700^\circ C$ δηλαδή με την πρώτη. Ξεκινώντας με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) η βιβλιογραφική τιμή είναι $12,5\%$ ενώ αντίστοιχα η μέση πειραματική τιμή είναι $5,9\%$. Η τιμές αυτές μας υποδεικνύουν την υψηλή συγκέντρωση βιοστερεών όπως προκύπτει από τα διαγράμματα 5.7 έως 5.10 σε αντίθεση με το διάγραμμα 5.6 όπως και στην βιβλιογραφική τιμή το CO_2 είναι υψηλό. Συνεχίζοντας με το επόμενο αέριο το μεθάνιο (CH_4) η πειραματική μέση τιμή μας είναι $3,4\%$ ενώ αντίστοιχα η βιβλιογραφική τιμή είναι στο $3,2\%$ η οποία είναι παρόμοια με την πειραματική και δηλώνει καλή απόδοση στην αεριοποίηση αν και η παρουσία του μεθανίου (CH_4) εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η αναλογία οξυγόνου. Για το μονοξείδιου του άνθρακα (CO) η μέση τιμή είναι $17,7\%$ και αντίστοιχα η βιβλιογραφική τιμή είναι στο $12,6\%$. Οι τιμές αυτές υποδεικνύουν ότι η διεργασία της αεριοποίησης είναι αποτελεσματική διότι δείχνει πολύ καλή μετατροπή του άνθρακα σε CO όπως επίσης το syngas που παράγεται είναι πλούσιο σε καύσιμο και ειδικά για την τιμή $20,1\%$ που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.8, η οποία παρόλο που υπερβαίνει ελάχιστα το όριο δηλώνει πολύ καλή προώθηση Boudouar reaction και πιθανή χαμηλή παροχή οξυγόνου. Τέλος για την τιμή του υδρογόνου (H_2) η πειραματική μέση τιμή που καταγράφηκε είναι $15,6\%$, ενώ η αντίστοιχη βιβλιογραφική είναι $7,8\%$ αρκετά χαμηλότερη από την πειραματική. Συγκρίνοντας τις τιμές $15,6\%$ δηλώνει πολύ καλή ποιότητα syngas (οι ιδανικές τιμές κυμαίνονται από $14\%-18,5\%$) ενώ η τιμή της βιβλιογραφίας υποδηλώνει ότι η ποιότητα του αερίου είναι μέτρια, γεγονός που πιθανά οφείλεται στην ποσότητα του οξυγόνου που παροχετεύεται (Chen et al., 2022).

Σύμφωνα με τους Haryanto et al. 2009 οι τιμές των κύριων αερίων που αποτελείται το syngas είναι αρχικά για το υδρογόνου (H_2) $19,6\%$ για το μονοξείδιου του άνθρακα (CO) $22,86\%$ για το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) $26,40\%$ και τέλος για το μεθάνιο (CH_4) $6,44\%$ για υλικό τροφοδοσίας πρωτοβάθμια ιλύς λυμάτων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με τα πειραματικά μας προκύπτει συγκεκριμένα για την τιμή του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), το οποίο βρίσκεται αρκετά εκτός ιδανικών ορίων, ότι η αεριοποίηση πραγματοποιήθηκε σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία $<600^\circ C$ και υψηλή πίεση η οποία επηρεάζει αρνητικά την παραγωγή αναγωγικών αερίων, αλλά παρόλα αυτά δεν αναιρεί την μέτρια ποσότητα αερίου σύνθεσης. Σε αντίθεση με τις

πειραματικές μετρήσεις που η τιμή του διοξειδίου του άνθρακα κυμαίνεται από 3%-12% προκύπτει ότι η διεργασία της αεριοποίησής είναι πολύ καλή όπως και η ποιότητα του αερίου και συγκεκριμένα για την μικρότερη τιμή του 3,2% που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.9 προκύπτει το συμπέρασμα ότι το syngas που παράγεται είναι καθαρό δηλαδή δεν περιέχει άκαυστα αέρια (Haryanto et al., 2009).

Τέλος από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα διαγράμματα και την παρατήρηση των τιμών των κύριων εύφλεκτων συστηματικών του syngas του μονοξειδίου του άνθρακα και του υδρογόνου, παρατηρήθηκε ότι οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων είναι 17,7% και 15,6%. Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι υψηλές βγάζοντας το συμπέρασμα ότι ο λόγος ER της αντίδρασης είναι χαμηλός και μέσα στο εύρος των τιμών (0,19-0,43) διότι αντίθετα υψηλές τιμές ER οδηγούν σε χαμηλές τιμές συγκεντρώσεων CO και H₂ και υψηλότερη συγκέντρωση CO₂ στο παραγόμενο αέριο (Ismail & El-Salam, 2017).

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

6.1 Συμπεράσματα

Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται σε μια ΕΕΛ έχουν σαν αποτέλεσμα την υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες GHG. Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ποιότητας του αερίου σύνθεσης (syngas) που προκύπτει από την αεριοποίηση πρωτοβάθμιων μικροκοσκινισμένων βιοστερεών στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Επιπρόσθετα αναλύθηκαν και αξιολογήθηκαν οι συγκεντρώσεις των επιμέρους αερίων που αποτελούν το αέριο σύνθεσης (syngas) με αποτέλεσμα να εξαχθούν συμπεράσματα για την ποσότητα του.

Ο τομέας της επεξεργασίας των λυμάτων και οι διεργασίες που πραγματοποιούνται για να επιτευχθεί αυτό είναι διαδικασίες με μεγάλο ενεργειακό αποτύπωμα. Συγκεκριμένα ο αερισμός είναι η πιο ενεργοβόρα διεργασία σε μια ΕΕΛ και η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται αντιστοιχεί έως και στο 50-70% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας μιας ΕΕΛ. Στην ΕΕΛ Ρεθύμνου δεν προηγείται πρωτοβάθμια καθίζηση και έτσι τα λύματα εισέρχονται κατευθείαν στην δεξαμενή αερισμού μετά τις διεργασίες προ-επεξεργασίας. Αυτό όπως προαναφέρθηκε έχει μεγάλη επίπτωση στην κατανάλωση ενέργειας, καθώς τα TSS θα μπορούσαν να έχουν απομακρυνθεί με διαχωρισμό αλλά αποδομούνται από αερόβιους μικροοργανισμούς. Η αποτελεσματική αφαίρεση των αιωρούμενων στερεών καθώς και της οργανικής ύλης κατά το στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των ΕΕΛ.

Η μέθοδος της μικροκοσκίνισης των βιοστερεών έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ιλύος με περιεκτικότητα σε στερεά που φτάνει το 45% και λόγω αυτής της συγκέντρωσης το προϊόν αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υλικό τροφοδοσίας στον αεριοποιητή που θα οδηγήσει στην παραγωγή του αερίου σύνθεσης (syngas). Ακόμα,

επιτυγχάνει μείωση του όγκου της ύλης που προορίζεται για διάθεση, το οποίο μεταφράζεται σε μείωση εξόδων αναφορικά με τη τελική διάθεσή της ύλης.

Τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν στην παρούσα διπλωματική υποδεικνύουν την ποιότητα του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (syngas), δίνοντας έμφαση στις συγκεντρώσεις των κύριων συστατικών του: διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), μεθάνιο (CH_4), υδρογόνο (H_2) και οξυγόνο (O_2). Οι αντίστοιχες μέσες συγκεντρώσεις για καθένα από αυτά είναι: 5,9%, 17,7%, 3,4%, 15,6%, 2% αντίστοιχα.

Τα κύρια εύφλεκτα συστατικά του syngas είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (17,7%) και το υδρογόνο (15,6%), τα οποία ενισχύουν σημαντικά τη θερμαντική του αξία και καθιστούν το αέριο κατάλληλο για χρήση ως καύσιμο σε εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ελάχιστη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) (5,9%) που θεωρείται αδρανές και άκαυστο αέριο, υποδηλώνει ότι το παραγόμενο syngas είναι συγκριτικά «καθαρό», δηλαδή περιλαμβάνει μια περιορισμένη ποσότητα μη αξιοποιήσιμων αερίων. Αυτό το χαρακτηριστικό αυξάνει την ικανότητά του να χρησιμεύει ως αξιοποιήσιμη πηγή ενέργειας. Τέλος από την χαμηλή τιμή της συγκέντρωσης του O_2 (2%) είναι σημαντικό να τονιστεί και η κρισιμότητα της ποσότητας του αέρα που εισάχθηκε στο σύστημα πριν και κατά την διάρκεια της αεριοποίησής. Όπως προαναφέρθηκε σημαντική παράμετρος που καθορίζει την ποσότητα του αέρα είναι ο λόγος ER. Σε όλα τα διαγράμματα (5.1-5.5) παρατηρήθηκαν θερμοκρασίες άνω των 500 °C ιδανικές για αεριοποίηση σύμφωνα με τους (Ismail & El-Salam, 2017) γεγονός που μας δείχνει ότι ο λόγος ER κυμαινόταν από 0,19-0,43 σύμφωνα με τους Ismail & El-Salam, (2017), καθώς η αύξηση του λόγου ER ενισχύει τις εξώθερμες αντιδράσεις οι οποίες με την σειρά του αυξάνουν την θερμοκρασία του αεριοποιητή. Ακόμα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το οξυγόνο καταναλώθηκε πλήρως κατά την διεργασία της αεριοποίησης.

Τέλος προκύπτει το συμπέρασμα ότι η εναλλακτική διεργασία της αεριοποίησης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι βιώσιμη και με σημαντικά μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα συγκριτικά με την καύση. Η αεριοποίηση, και συγκεκριμένα των βιοστερεών, είναι μια διαδικασία υψηλής συνολικής ενεργειακής απόδοσης. Ακόμα μέσω του καθαρισμού του syngas πραγματοποιείται καλύτερος έλεγχος εκπομπών και μείωση των GHG και άλλων επιβλαβών αερίων όπως διοξίνες, NO_x , SO_2 , και βαρέα μέταλλα.

Η διεργασία της αεριοποίησης αν και χαρακτηρίζεται από πολυπλοκότητα αναδεικνύεται ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, ικανή να αντικαταστήσει σταδιακά τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Σκοπός είναι η ελάττωση της καύσης των ορυκτών καυσίμων και για αυτό η αεριοποίηση ύλης αποδεικνύεται η ιδανικότερη εναλλακτική λύση συνδυάζοντας τη διαχείριση αποβλήτων με την παραγωγή ενέργειας, συμβάλλοντας έτσι στην κυκλική οικονομία. Παρότι η τεχνολογία εφαρμόζεται σε πιλοτική κλίμακα απαιτώντας περαιτέρω έρευνα για την ευρεία εφαρμογή σε ΕΕΛ μεγάλης κλίμακας, οι προοπτικές της είναι ιδιαίτερα

ενθαρρυντικές καθώς προσφέρει μια βιώσιμη και αποδοτική εναλλακτική στις παραδοσιακές ενεργειακές πρακτικές.

6.2 Μελλοντική Έρευνα

Ένας βασικός στόχος στον τομέα της επεξεργασίας των αστικών λυμάτων είναι η ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των ΕΕΛ, αξιοποιώντας καινοτόμες τεχνολογίες που προάγουν την κυκλική οικονομία. Η πιλοτική μονάδα στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, η οποία αξιοποιεί τα βιοστερεά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αεριοποίησης, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της προσέγγισης και έχει δείξει, μέσα από τα αρχικά πειράματα, ότι μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία της εγκατάστασης. Ωστόσο, για την εξαγωγή πιο ασφαλών και γενικεύσιμων συμπερασμάτων, κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή πειραμάτων μεγαλύτερης διάρκειας, ώστε να αξιολογηθεί η σταθερότητα, η αποδοτικότητα και η βιωσιμότητα της λειτουργίας της μονάδας σε βάθος χρόνου.

Κεφάλαιο 7 :Βιβλιογραφία

- Basta, N. T., & Sloan, J. J. (1999). Bioavailability of Heavy Metals in Strongly Acidic Soils Treated with Exceptional Quality Biosolids. *Journal of Environmental Quality*, 28, 633–638. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:96054237>
- Bennamoun, L., Arlabosse, P., & Léonard, A. (2013). Review on fundamental aspects of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 29–43. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.07.043>
- Bianchini, A., Bonfiglioli, L., Pellegrini, M., & Saccani, C. (2015). Sewage sludge drying process integration with a waste-to-energy power plant. *Waste Management*, 42, 159–165. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.04.020>
- Capodaglio, A. G., & Callegari, A. (2023). Energy and resources recovery from excess sewage sludge: A holistic analysis of opportunities and strategies. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 19, 200184. <https://doi.org/10.1016/J.RCRADV.2023.200184>
- Chen, G. B., Wu, F. H., Lin, S. P., Hsu, Y. T., & Lin, T. H. (2022). A study of sewage sludge Co-gasification with waste shiitake substrate. *Energy*, 259, 124991. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.124991>
- Couto, N., Rouboa, A., Silva, V., Monteiro, E., & Bouziane, K. (2013). Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas. *Energy Procedia*, 36, 596–606. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2013.07.068>
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2018). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Folgueras, M. B., Alonso, M., & Díaz, R. M. (2013). Influence of sewage sludge treatment on pyrolysis and combustion of dry sludge. *Energy*, 55, 426–435. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.03.063>
- Gandiglio, M., Lanzini, A., Soto, A., Leone, P., & Santarelli, M. (2017). Enhancing the energy efficiency of wastewater treatment plants through co-digestion and fuel cell systems. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 5). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00070>
- Gao, N., Li, J., Qi, B., Li, A., Duan, Y., & Wang, Z. (2014). Thermal analysis and products distribution of dried sewage sludge pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.002>
- George Tchobanoglous, F. L. B. H. D. S. M. & E. I. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4η εικονογραφημένη). McGraw-Hill Education, 2003.
- Gikas, P. (2014). Electrical energy production from biosolids: A comparative study between anaerobic digestion and ultra-high-temperature gasification. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 35(17), 2140–2146. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.895049>

- Haryanto, A., Fernando, S. D., Pordesimo, L. O., & Adhikari, S. (2009). Upgrading of syngas derived from biomass gasification: A thermodynamic analysis. *Biomass and Bioenergy*, 33(5), 882–889. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2009.01.010>
- Ismail, T. M., & El-Salam, M. A. (2017). Parametric studies on biomass gasification process on updraft gasifier high temperature air gasification. *Applied Thermal Engineering*, 112, 1460–1473. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.10.026>
- Joo, J., Kwon, E. E., & Lee, J. (2021). Achievements in pyrolysis process in E-waste management sector. *Environmental Pollution*, 287, 117621. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.117621>
- Juan M. Lema, & Sonia Suarez. (2017). *Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies: Impacts on Energy, Economy and Environment* (1st ed.). London.
- Kiepper, B. H. (2009). Effects of tertiary microsieving on the composition of poultry processing wastewater. *Journal of Applied Poultry Research*, 18(4), 716–724. <https://doi.org/10.3382/JAPR.2009-00035>
- Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan, V., Nalini, R., Sekar, T., Premalatha, M., & Subramanian, P. (2009). A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 179–186. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2007.07.001>
- Li, X., Zhang, X., Zhao, M., Zheng, X., Wang, Z., & Fan, C. (2024). Application of Decentralized Wastewater Treatment Technology in Rural Domestic Wastewater Treatment. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 16, Issue 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su16198635>
- Manali, A., & Gikas, P. (n.d.). *Mass and energy balances for gasification of primary sieved solids*.
- Manali, A., Pothoulaki, A., & Gikas, P. (2024). The state of the art in biosolids gasification. *Journal of Environmental Management*, 364, 121385. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.121385>
- Manali, A. and Gikas, P., 2019a. Thermal and electric energy production using primary sieved solids from municipal wastewater, as gasification feedstock, 5th distance education e-learning International Summer School and Workshop on “Wastewater and Biosolids Management” (WWSS19), 22-27 July, Patras, Greece
- Manali, A. and Gikas, P., 2019b, Utilization Of Primary Sieved Solids For Gasification And Energy Production, 17th International Waste Management and Landfill Symposium, 30 Spetember-4 October, Cagliari, Sardinia

- Manali, M. A., Xanthi, M., Manaroli, E., Makaroglou, M. G., & Konstantinos Tsamoutsoglou, M. (2021). *Proceedings of the 1 st International Conference on Sustainable Chemical and Environmental Engineering*. www.susteng.eu
- Manali, Tsamoutsoglou, K. and Gikas, P., 2022a. Gasification of wastewater primary sieved solids for the production of thermal and energy, *9 th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation (WasteEng2022)*, 27-30 June, Copenhagen, Denmark.
- Molinos-Senante, M., & Maziotis, A. (2022). Evaluation of energy efficiency of wastewater treatment plants: The influence of the technology and aging factors. *Applied Energy*, 310, 118535. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.118535>
- Munter, R. (2003). 8. *INDUSTRIAL WASTEWATER CHARACTERISTICS*.
- Muttamara, S. (1996). Wastewater characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, 16(1–4), 145–159. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00052-6](https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00052-6)
- Oladejo, J., Shi, K., Luo, X., Yang, G., & Wu, T. (2019). A review of sludge-to-energy recovery methods. In *Energies* (Vol. 12, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en12010060>
- Patra, T. K., & Sheth, P. N. (2015). Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 583–593. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.05.012>
- Protection Agency, E. (1986). *EPA 625/1-86/021 Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection*.
- Ramos, A., & Rouboa, A. (2020). Syngas production strategies from biomass gasification: Numerical studies for operational conditions and quality indexes. *Renewable Energy*, 155, 1211–1221. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.03.158>
- Sheridan K Haack, Joseph W Duris, Lisa R Fogarty, & Michael T Meyer. (2009). *Comparing Wastewater Chemicals, Indicator Bacteria Concentrations, and Bacterial Pathogen Genes as Fecal Pollution Indicators*.
- Sonune, A., & Ghate, R. (2004). Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167(1–3), 55–63. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2004.06.113>
- Sperling, M. von. (2007). *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. IWA Publishing.
- Takahashi, N., Koshijima, T., & Kyoto, J. (1988). Wood Science and Technology Molecular properties of lignin-carbohydrate complexes from beech (*Fagus crenata*) and pine (*Pinus densiflora*) woods. In *Wood Sci. Technol* (Vol. 22).
- Treviño Arjona, B., & Rodríguez Cisneros, J. (2005). *Analysis of Drying Technologies for Wastewater Treatment Plant Sludge as an Alternative Source of Energy*.
- Wen-Wei Li, H.-Q. Y. (2015). *Chemistry: Reuse water pollutants*.

- Woodard & Curran, Inc. (2006). Waste Characterization. *Industrial Waste Treatment Handbook*, 83–126. <https://doi.org/10.1016/B978-075067963-3/50007-2>
- Xiao, H., Li, K., Zhang, D., Tang, Z., Niu, X., Yi, L., Lin, Z., & Fu, M. (2022). Environmental, energy, and economic impact assessment of sludge management alternatives based on incineration. *Journal of Environmental Management*, 321, 115848. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115848>
- Αθανάσιος Γ. Κούγκολος. (2007). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ* (ΤΖΙΟΛΑΣ).
- Γρηγόρης Μαρκαντωνάτος. (1990). *Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων*. Μαρκαντωνάτου.
- Λεγόντης Ανέστης. (2010). *ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ Ι: ΜΟΝΑΔΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΠΛ ΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ ΧΑΜΠΟΥ*.
- Χρυσικόπουλος Κωνσταντίνος. (2018). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΛΥΜΑΤΩΝ*, (2η Έκδοση). ΤΖΙΟΛΑ.