



**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ



Πτυχιακή Εργασία

**ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

Energy recovery of residues from primary treatment of wastewaters

Φάνης – Αλέξανδρος Καλλαράς

Αικατερίνη – Αλεξάνδρα Δέδε

Επιβλέπων καθηγητής : Πέτρος Σαμαράς

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2020.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων υποχρεούνται από την νομοθεσία να εναποθέτουν τα υγρά απόβλητα στους υδάτινους αποδέκτες απαλλαγμένα από ρύπους. Για να επιτευχθεί ο καθαρισμός των λυμάτων, αυτά υφίστανται διάφορα στάδια επεξεργασίας τα οποία απαιτούν υψηλά ποσά ενέργειας. Η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας ωθεί τους φορείς που διαχειρίζονται τις ΕΕΛ στην αναζήτηση φθηνότερων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα εσχαρίσματα που συλλέγονται κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία των αποβλήτων ενδεχομένως να είναι καλή πηγή ενέργειας εφόσον υποστούν αναερόβια χώνευση με σκοπό την παραγωγή μεθανίου.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας διερευνήθηκε η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας κατά την επεξεργασία υγρών αποβλήτων αξιοποιώντας ενεργειακά τα παραπροϊόντα της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, συγκεκριμένα εσχαρίσματα συγκεκριμένου μεγέθους. Η εργασία επικεντρώθηκε στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αυτών των εσχαρισμάτων και στην προοπτική που αυτά έχουν για παραγωγή μεθανίου. Για αυτό τον σκοπό συλλέχθηκαν δείγματα εσχαρίσματος από 4 διαφορετικές κλάσεις μεγέθους από την ΕΕΛ Θεσσαλονίκης τα οποία αναλύθηκαν ως προς διάφορα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και έπειτα ακολούθησε αναερόβια χώνευση για διάστημα 52 ημερών σε σφραγισμένους περιέκτες με δείγμα εσχαρίσματος και καλλιέργεια εμβολιασμού με σκοπό τον υπολογισμό του δυναμικού μεθανίου. Τελικά διαπιστώθηκε ότι το εσχάρισμα υγρού αποβλήτου από ρεύμα εισόδου της μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων που συγκρατήθηκε από φίλτρα ανοίγματος πόρων 1000-1250 μ m απέδωσε περισσότερο ως προς την παραγωγή μεθανίου και αξίζει να διερευνηθεί περαιτέρω, αναερόβια χώνευση του συγκεκριμένου κλάσματος με ιλύ λυμάτων σε βιοαντιδραστήρα. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η συγκέντρωση εσχαρισμάτων σε αμμωνιακά ιόντα επηρεάζει θετικά την παραγωγή μεθανίου, ενώ η συγκέντρωση των εσχαρισμάτων στις υπόλοιπες φυσικοχημικές παραμέτρους που μελετήθηκαν δεν φάνηκε να παρουσιάζει σαφή συσχέτιση με την παραγωγή μεθανίου.

Abstract

Wastewater Treatment Plants (WWTPs) are required by law to dispose of liquid waste in water receivers, free of pollutants. In order to achieve wastewater treatment, they undergo various treatment stages which require high amounts of energy. The need for energy saving pushes the administrators of WWTP to look for cheaper and renewable energy sources. Screenings collected during primary waste treatment may be a good source of energy, as long as they are submitted to anaerobic digestion for methane production.

In the context of this study the possibility of energy savings was investigated during the treatment of liquid waste by utilizing by-products of the primary treatment (screenings of a specific size) for energy production. The study focused on the analysis of physicochemical characteristics of these effluents and the prospect these screenings have for methane production. For this purpose, screening samples were collected from 4 different size classes from WWTP of Thessaloniki, which were analyzed for various physicochemical characteristics. Then they were submitted to anaerobic digestion for 52 days in sealed containers with screening sample and inoculation culture to calculate the potential of methane production.

Eventually it was found that the screening that was held by filters of 1000-1250 μ m pore opening was more efficient in terms of methane production and it is suggested that anaerobic co-digestion of this fraction with sewage sludge is worth to be investigated further. It was also observed that the concentration of fractions in NH_4^+ ions positively affects methane production, while the concentration of fractions in other physicochemical parameters studied were not clearly correlated with the methane production

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1. Επεξεργασία υγρών αποβλήτων.....	7
1.2. Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.....	8
1.3. Στάδια επεξεργασίας λυμάτων.....	10
1.3.1. Προεπεξεργασία.....	10
1.3.2. Εσχάρωση.....	11
1.3.3. Εξάμμωση – Λιποσυλλογή.....	12
1.3.4. Πρωτοβάθμια καθίζηση.....	14
1.3.5. Δευτεροβάθμια επεξεργασία.....	15
1.4. Ενεργειακή κατανάλωση στις Ε.Ε.Λ.....	17
1.4.1. Ενεργειακή κατανάλωση σε Ε.Ε.Λ. Διεθνώς.....	18
1.5. Αναερόβια χώνευση.....	22
1.5.1. Στάδια μηχανισμού ανερόβιας χώνευσης.....	24
1.6. Ιλύς λυμάτων.....	31
1.7. Αναερόβια χώνευση λιπιδίων & εσχαρισμάτων.....	32
2. Στόχος πτυχιακής εργασίας.....	35
3. Υλικά και μέθοδοι.....	36
3.1. Συλλογή των δειγμάτων.....	36
3.2. Αναλύσεις εσχαρισμάτων.....	37
3.3. Μελέτη παραγωγής βιοαερίου.....	40
4. Αποτελέσματα και συζήτηση.....	42
4.1. Χαρακτηρισμός των εσχαρισμάτων.....	42
4.2. Παραγωγή βιοαερίου.....	50
5. Συμπεράσματα και προτάσεις.....	57
Βιβλιογραφία.....	58

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ:

ΕΕΛ : Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων

ΔΔΚ : Δεξαμενή δευτεροβάθμιας Καθίζησης

ΒΑ : Βιολογικός Αντιδραστήρας

ΤS : Ολικά στερεά

VS : Πτητικά στερεά

ΕΕ : Ευρωπαϊκή ένωση

ΜΒR : Βιοαντιδραστήρες Μεμβρανών

LCFA : Λιπαρά οξέα μακράς αλύσου

COD : Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει γίνει ευρέως γνωστή η ανάγκη της ανθρωπότητας για ενέργεια προκειμένου να καλύπτονται οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες του πληθυσμού. Καθώς οι ορυκτοί πόροι αφενός εξαντλούνται προοδευτικά και αφετέρου αφήνουν κατά την επεξεργασία και χρήση τους υψηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, δημιουργείται η ανάγκη για πηγές ενέργειας που να είναι ανανεώσιμες και λιγότερο επιβλαβείς για το φυσικό περιβάλλον.

Ως εκ τούτου η επεξεργασία της αναερόβιας χώνευσης των αποβλήτων με σκοπό την παραγωγή βιομεθανίου είναι μια διεργασία με αυξανόμενη αξία από την οπτική της ανανεωσιμότητας, του οικονομικού κόστους και της προστασίας του περιβάλλοντος.

Κατά την διάρκεια της προεπεξεργασίας των αποβλήτων παράγονται κάποια παραπροϊόντα όπως λιπαρά συστατικά που συγκρατούνται στους λιποσυλλέκτες και εσχαρίσματα που συγκρατούνται στα φίλτρα εισόδου, των οποίων η προσθήκη στην περίσσεια ιλύος που υφίσταται επεξεργασία με αναερόβια χώνευση, μπορεί να αυξήσει δυνητικά την παραγωγή βιομεθανίου, αυξάνοντας την αποδοτικότητα της διεργασίας.

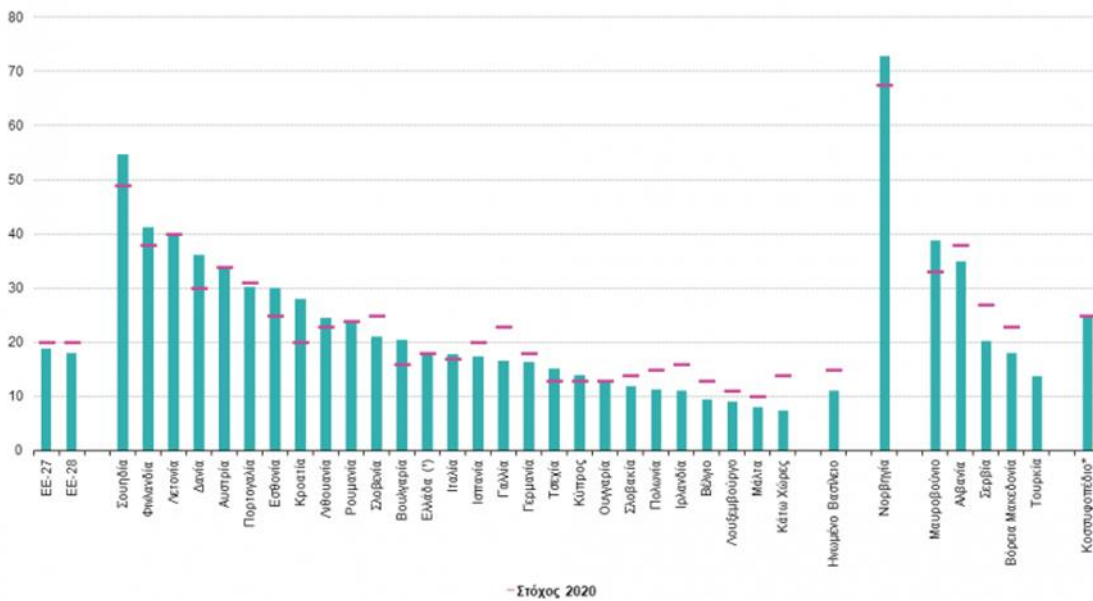
Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η αξιοποίηση αυτών των παραπροϊόντων με τέτοιο τρόπο ώστε να εξοικονομείται ενέργεια προς όφελος του περιβάλλοντος και των εσόδων των επιχειρήσεων ή των φορέων που δραστηριοποιούνται στην επεξεργασία αποβλήτων.

Στο κεφάλαιο 1 της εισαγωγής γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση ζητημάτων που περιλαμβάνουν βασικές πληροφορίες : για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων (1.1), για τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και την λειτουργία τους (1.2), για τα στάδια της επεξεργασίας των αποβλήτων με ανάλυση ανά στάδιο (1.3), για την ενέργεια που καταναλώνεται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (1.4), για την αναερόβια χώνευση (1.5), την ιλύ λυμάτων (1.6) και την αναερόβια χώνευση των λιπιδίων και των εσχαρισμάτων (1.7). Στο κεφάλαιο 2 αναφέρεται ο στόχος της εργασίας. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται συνοπτικά η δειγματοληψία και η πειραματική διαδικασία αυτής της μελέτης, καθώς επίσης αναπτύσσονται οι αρχές των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις. Τέλος στο κεφάλαιο 4 αναφέρονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας της εργασίας σε σχέση με παρόμοιες επιστημονικές μελέτες.

1.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Η διασφάλιση οικονομικής και καθαρής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι παγκόσμια πρόκληση στις μέρες μας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, το ποσοστό ενέργειας ανά χώρα της Ε.Ε. που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το 2018 και το ποσοστό που ορίστηκε ως στόχος για το 2020, υπάρχει στόχευση η ενέργεια που καταναλώνεται στην Ε.Ε. να προέρχεται όλο και περισσότερο από ανανεώσιμες πηγές.

Μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, 2018
(Ποσοστό % επί της ακαθάριστης τελικής ενεργειακής κατανάλωσης)



* Η ονομασία αυτή χρησιμοποιείται με επιφύλαξη των θέσεων ως προς το καθεστώς και συνάδει με την απόφαση 1244/1999 του Συμβουλίου Ασφαλείας των Ηνωμένων Εθνών και τη γνωμοδότηση του Διεθνούς Δικαστηρίου σχετικά με τη διακήρυξη της ανεξαρτησίας του Κοσσυφοπέδιου.
(*) Εκτίμηση.

Πηγή: Eurostat (κωδικός ηλεκτρονικών δεδομένων: iic_l_vho05a)

eurostat

Σχήμα 1 : Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στις Ευρωπαϊκές χώρες για το 2018 και στόχος κάθε χώρας για το 2020. (πηγή Eurostat : <https://ec.europa.eu/eurostat/>, 2020)

Η αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης έχει ως αποτέλεσμα μία αλλαγή προτύπων σε πολλούς τομείς της οικονομίας συμπεριλαμβανομένου και του τομέα διαχείρισης οργανικών αποβλήτων. Η συμβατική αντιμετώπιση των αποβλήτων ως διασπώμενων υλικών δεν είναι πλέον κατάλληλη. Σε μία κυκλική οικονομία, τα οργανικά απόβλητα είναι μία πηγή ενέργειας και ανάκτησης θρεπτικών υλών. Πράγματι, ο άνθρακας, το άζωτο, ο φώσφορος και η ενέργεια μπορούν με ανανεώσιμο και οικονομικό τρόπο να εξαχθούν από οργανικά απόβλητα όπως απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων, απόβλητα από το αποχετευτικό δίκτυο. Σε αυτό το πλαίσιο αναζητούνται μέθοδοι και τεχνικές για τη μείωση τόσο της ρύπανσης όσο και της ενεργειακής κατανάλωσης των μονάδων. Μία διεθνώς

αναδυόμενη πρακτική είναι να προσδωθεί αξία στα οργανικά απόβλητα μέσω αναερόβιας χώνευσης προς παραγωγή βιοκαυσίμου σε μονάδες διαχείρισης υγρών αποβλήτων. (Nguyen et al.,2020)

1.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

Η κύρια λειτουργία των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) είναι η επεξεργασία των αποβλήτων, για την μείωση του φορτίου των ρύπων που περιέχονται στα λύματα, σε περιεκτικότητες ανεκτές ώστε να αποτεθούν στους φυσικούς υδάτινους αποδέκτες χωρίς να διαταράσσουν την ισορροπία του οικοσυστήματος ή την ποιότητα των υδάτων για τον άνθρωπο και τους υδρόβιους οργανισμούς. Οι διεργασίες που απαιτούνται και ο βαθμός επεξεργασίας ορίζονται από την οδηγία 91/271/ΕΟΚ, η οποία καθιστά τη συλλογή και την επεξεργασία των λυμάτων υποχρεωτική σε όλες τις χώρες της Ε.Ε. για οικισμούς με περισσότερους από 2.000 κατοίκους. Κατά συνέπεια, υπάρχει απαίτηση ανά τον κόσμο για την κατασκευή όλο και περισσότερων και πιο σύγχρονων ΕΕΛ που να εξυπηρετούν τον περιορισμό της ρύπανσης των υδάτων από τα αστικά λύματα. Οι ΕΕΛ ωστόσο είναι ιδιαίτερος ενεργοβόρος εγκαταστάσεις, με την κατανάλωση ενέργειας σε μία ΕΕΛ να κυμαίνεται μεταξύ 1500 και 1700 kWh για την επεξεργασία 1 εκατομμυρίου γαλονιών υγρού αποβλήτου και την διαχείριση της παραγόμενης ιλύος και των υπολειμάτων (Pakenas, 1995) ενώ στην Γερμανία υπολογίζεται ότι οι ΕΕΛ καταναλώνουν (4.200 GWh/a) περισσότερη ενέργεια από τα σχολεία (3000GWh/a) (Antakyali & Rolle.2010)

Στις ΕΕΛ χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων κατά τις οποίες η απομάκρυνση των ρυπογόνων ουσιών επιτυγχάνεται μέσω φυσικών δυνάμεων ή χημικών και βιολογικών διεργασιών. Αυτές οι φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες ομαδοποιούνται σε στάδια ώστε να προσφέρουν διάφορους βαθμούς επεξεργασίας γνωστά ως προεπεξεργασία (προκαταρκτική επεξεργασία), πρωτοβάθμια, προχωρημένη πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και προχωρημένη ή τριτοβάθμια επεξεργασία. Τα στάδια επεξεργασίας που εΐθισται να λαμβάνουν χώρα σε μια ΕΕΛ παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

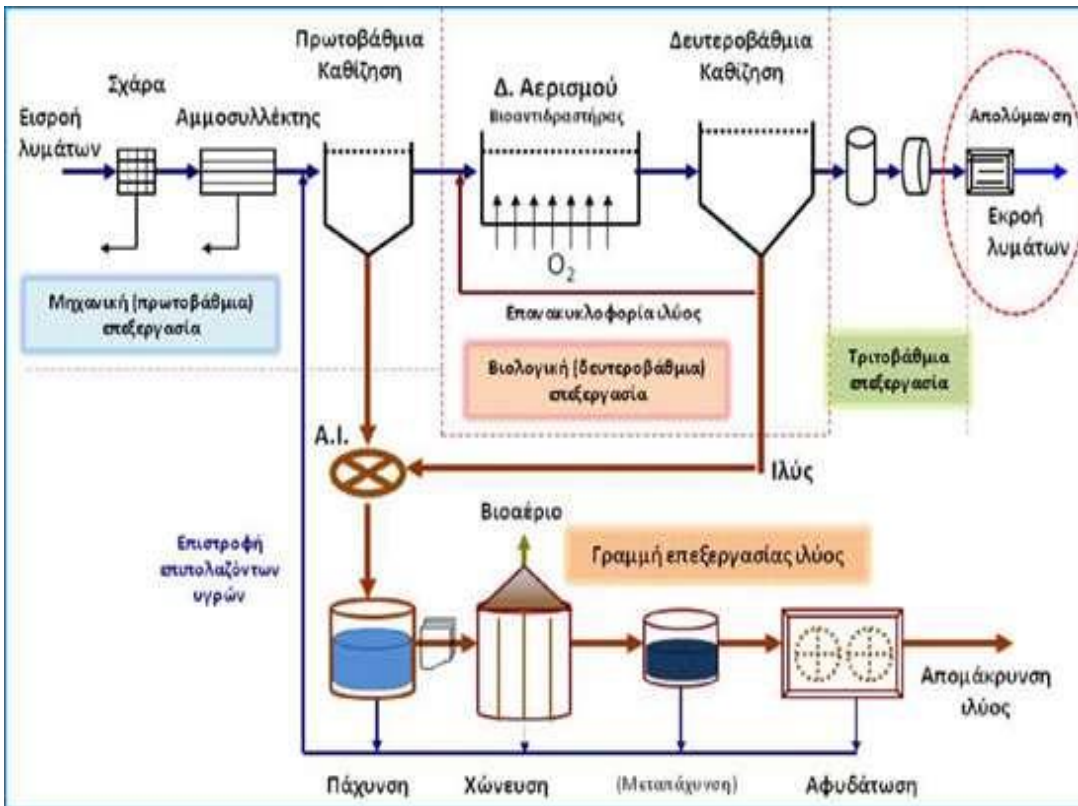
Πίνακας 1. Στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Στάδια	Περιγραφή
Επεξεργασίας	
Προεπεξεργασία	Απομάκρυνση των υλικών που περιέχονται στα απόβλητα όπως κουρέλια, ξύλα, επιπλέοντα υλικά, χαλίκια, άμμος και γράσο.
Πρωτοβάθμια	Απομάκρυνση μέρος των αιωρούμενων στερεών και του οργανικού υλικού από τα υγρά απόβλητα.
Προχωρημένη Πρωτοβάθμια	Ενισχυμένη απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών και του οργανικού υλικού από τα υγρά απόβλητα. Τυπικά πραγματοποιείται με προσθήκη χημικών και διήθηση.
Δευτεροβάθμια	Απομάκρυνση των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών υλικών και των αιωρούμενων στερεών. Η απολύμανση περιλαμβάνεται επίσης στον τυπικό ορισμό της συμβατικής δευτεροβάθμιας επεξεργασίας.
Δευτεροβάθμια με απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών	Απομάκρυνση των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών υλικών, των αιωρούμενων στερεών και των θρεπτικών ουσιών (άζωτο, φώσφορος, ή και τα δύο μαζί).
Τριτοβάθμια	Απομάκρυνση των υπολειπόμενων αιωρούμενων στερεών συνήθως μέσω διήθησης ή μικροσχάρας. Η απολύμανση είναι επίσης μέρος της τριτοβάθμιας επεξεργασίας.
Προχωρημένη	Απομάκρυνση των διαλυμένων και αιωρούμενων υλικών που παραμένουν μετά την συνηθισμένη βιολογική επεξεργασία, όταν απαιτείται εφαρμογή επαναχρησιμοποίησης του νερού.

(Metcalf & Eddy, 2005)

Μια τυπική διάταξη επεξεργασίας λυμάτων φαίνεται επίσης στο Σχήμα 2. Όλα τα διαδοχικά στάδια επεξεργασίας (πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια ή και τριτοβάθμια επεξεργασία) περιλαμβάνουν διαχωρισμό των αιωρούμενων στερεών από το υγρό ρεύμα και το σχηματισμό μιας υδαρούς ιλύος της οποίας η συγκέντρωση είναι της τάξης μερικών γραμμάρων ανά λίτρο και είναι εύκολα βιοδιασπώμενη. Όλη η ποσότητα της παραγόμενης ιλύος πρέπει αρχικά να διατηρηθεί στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας για ξεχωριστή

επεξεργασία και ύστερα να αποτεθεί ή να χρησιμοποιηθεί εξωτερικά των εγκαταστάσεων αυτών (Φίλιππας, 2009).



Σχήμα 2. Διάταξη επεξεργασίας λυμάτων.

1.3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

1.3.1 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στις ΕΕΛ παράγονται παραπροϊόντα, όπως τα εσχάρισματα, η άμμος και η ιλύς, τα οποία πρέπει να υποστούν επεξεργασία/ανακύκλωση και να αποτεθούν στον τελικό τους προορισμό με σκοπό να αποφευχθούν οποιεσδήποτε περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η πιο συνήθης μέθοδος για απόθεση εσχарισμάτων και άμμου στην Ευρώπη είναι η ταφή η οποία όμως προτείνεται ως τελευταία επιλογή στην ιεραρχία διαχείρισης αποβλήτων.

Με τον όρο προεπεξεργασία εννοούνται οι φυσικές και μηχανικές διεργασίες που λαμβάνουν μέρος κατά την επεξεργασία των λυμάτων όπως η εσχάρωση, η εξάμμωση και ο διαχωρισμός των ελαίων και των λιπών. Ο κύριος ρόλος των εσχάρων είναι να μην επιτρέπουν τη διέλευση στερεών μεγαλύτερων από περίπου 20 mm. Με την εξάμμωση απομακρύνεται η άμμος και τα μικρά «πετραδάκια» που έχουν διαπεράσει από την εσχάρωση, ώστε να προστατευθούν οι αγωγοί και οι δεξαμενές (ανοικτές ή κλειστές) από αποθέσεις άμμου και οι αντλίες από μηχανική διάβρωση (Ανδρεαδάκης, 2000). Τα εσχάρισματα και η άμμος της προκαταρκτικής επεξεργασίας δεν

θεωρούνται ιλύς και αποτίθενται σε ΧΥΤΑ ή άλλες αδειοδοτημένες μονάδες (Commission of European Communities, 2002).

1.3.2 ΕΣΧΑΡΩΣΗ

Η απομάκρυνση των εσχαρισμάτων και της άμμου κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία των αποβλήτων στις ΕΕΛ είναι κομβικής σημασίας για να προστατευθεί και να παραταθεί η διάρκεια ζωής των εξοπλισμών που έρχονται σε επαφή με τα ρεύματα εισόδου και περιλαμβάνουν αντλίες, βαλβίδες, αναδευτήρες και φυσητήρες αέρα. Επίσης απαιτείται για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα των επεξεργασιών. Οι διατάξεις εσχάρησης αποτελούνται από παράλληλες μπάρες οι οποίες αφήνουν άνοιγμα μεγέθους που ποικίλει από μεγάλο ως μεσαίο ή από έναν διάτρητο δίσκο με διάφορες γεωμετρίες και μεγέθη οπών. Τα υλικά που απομακρύνονται από αυτές τις συσκευές είναι γνωστά σαν εσχαρίσματα. Η ονοματολογία των στοιχείων εσχάρησης συνήθως βασίζεται στην συγκεκριμένη λειτουργία που επιτελούν και στο μέγεθος των οπών/ανοιγμάτων τους. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται μία ταξινόμηση των εσχαρισμάτων και προϊόντων κοσκίνισης ανάλογα με το μέγεθος τους (Fechen et al, 2006).

Πίνακας 2 : Κατανομή εσχαρισμάτων ανάλογα με το μέγεθος και πιθανή διεργασία που ακολουθεί.

Τύπος Εσχαρισμάτων	Άνοιγμα Βροχίδων (mm)	Επεξεργασία σε ΕΕΛ
Εσχάρισμα μεγάλου μεγέθους	60-20	Ενεργός Ιλύς
Εσχάρισμα μεσαίου μεγέθους	20-10	
Εσχάρισμα μικρού μεγέθους	10-2	Βιοφιλτράρισμα
Κοσκίνισμα μεγάλου μεγέθους	≥ 1	MBR
Κοσκίνισμα μεσαίου μεγέθους	< 1	
Κοσκίνισμα μικρού μεγέθους	≤ 0.05	

(R.Le Hyaric et al.2009)

Τα εσχαρίσματα αποτελούνται από ένα μείγμα χονδροειδών στερεών όπως: χαρτί, πανιά, προϊόντα υγιεινής, οργανικά υλικά και περιττώματα, πλαστικά, ξύλο και άλλα. Αυτά τα απόβλητα επικαλύπτονται συχνά με περιττώματα και έχουν απροσδιόριστες και δυσάρεστες οσμές. Τα τελευταία χρόνια, το μέγεθος ανοίγματος των εσχαρών μειώνεται από μερικά cm σε μερικά mm ή λιγότερο, κυρίως σε ΕΕΛ με βιοαντιδραστήρα μεμβράνης (MBR). Ως αποτέλεσμα των μειώσεων στα μεγέθη ανοίγματος, ο όγκος των εσχαρισμάτων που παράγονται έχει αυξηθεί. Η ποσότητα και ποιότητα των εσχαρισμάτων εξαρτάται από το είδος των εξοπλισμών, τις συνθήκες λειτουργίας, το αποχετευτικό σύστημα (χωριστικό ή παντοροϊκό), την τοποθεσία και τις συνήθειες των καταναλωτών.

Σκοπός των εσχαρών όπως προαναφέρθηκε είναι η συγκράτηση και στη συνέχεια απομάκρυνση υλικών και αντικειμένων τα οποία περιέχονται στα απόβλητα, για την προστασία του μηχανισμού της ΕΕΛ από φθορές και εμφράξεις.

Τα βασικά είδη των εσχαρών για την επίτευξη αυτών, είναι δύο, οι απλές χειροκίνητες που καθαρίζονται με τα χέρια και οι μηχανικές - αυτοκαθαριζόμενες οι οποίες είναι αυτές που προτιμώνται κατά κύριο λόγο. Αναλόγως του μεγέθους της ΕΕΛ, τοποθετούνται μηχανικές εσχάρες ώστε να καλύπτεται η παροχής αιχμής, εφεδρικές που λειτουργούν σε περίπτωση αστοχίας κάποιας από τις κύριες καθώς και παρακαμπτήριες εσχάρες που συνήθως έχουν μεγαλύτερο διάκενο εσχάρωσης.

Τα εσχαρίσματα έχουν πυκνότητα $600-1000\text{kg/m}^3$, υγρασία 75-90%, περιεκτικότητα σε VSS 80-90% και αποδίδουν κατά τη καύση τους $13.000 - 18.000 \text{ kJ/kg}$. Οι ποσότητες των εσχαρισμάτων ποικίλλουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εσχάρας, το είδος του αποχετευτικού συστήματος καθώς επίσης και την παρουσία βιομηχανικών αποβλήτων (Κάνουλας, 2008).

Η μεταφορά των εσχαρισμάτων προς τους κάδους συλλογής τους γίνεται με μεταφορική ταινία ή με κλειστό μεταφορικό κοχλία. Στο μεταφορικό κοχλία γίνεται επίσης μερική ή ακόμα και πλήρης αποστράγγιση των εσχαρισμάτων. Τα στραγγίδια επιστρέφουν στην κύρια ροή των υγρών αποβλήτων με βαρύτητα ή με αντλίες στραγγιδίων.

1.3.3 ΕΞΑΜΜΩΣΗ-ΛΙΠΟΣΥΛΛΟΓΗ

Σκοπός της εξάμμωσης είναι η απομάκρυνση της άμμου, των σωματιδίων αργίλου ή των άλλων σωματιδίων γεωλογικής φύσης ή όχι, με διάμετρο μεγαλύτερη από 2 mm τα οποία δεν είναι οργανικά και έχουν ταχύτητα καθίζησης ουσιαστικά μεγαλύτερη από τα οργανικά στερεά (το σύνολο αυτών ονομάζεται άμμος). Η παρουσία των σωματιδίων αυτών στην ροή δημιουργεί προβλήματα

στον εξοπλισμό (όπως εναπόθεσή τους στους αγωγούς), έμφραξη των σωληνώσεων, φθορά του ηλεκτρο-μηχανολογικού εξοπλισμού (αντλίες κ.λ.π.) και συνεπώς μείωση της απόδοσης των μονάδων επεξεργασίας. Υπάρχουν διάφοροι πιθανοί τρόποι να απομακρυνθεί η άμμος από το υγρό απόβλητο όπως μία δεξαμενή τύπου δινών, μία δεξαμενή βαρυτικής ροής ή μία δεξαμενή αερισμού. Όπως και τα εσχαρίσματα, η ποσότητα και η ποιότητα της άμμου εξαρτάται από τον τύπο του εξοπλισμού, τις συνθήκες λειτουργίας και το είδος του αποχετευτικού συστήματος, την τοποθεσία και τις καταναλωτικές συνθήκες. Η άμμος που απομακρύνεται θα περιέχει μεγάλες ποσότητες υγρασίας και κάποια οργανικά στερεά. Σε ένα μη αποδοτικό σύστημα απομάκρυνσης άμμου, το οργανικό περιεχόμενο ακαθάριστης άμμου μπορεί να φθάσει ως το 50%. (Varela et al.2015)

Οι εξαμμωτές που χρησιμοποιούνται συνήθως χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

Εξαμμωτές με σταθερή ταχύτητα ροής

Είναι επιμήκη και ρηχά κανάλια στα οποία η ταχύτητα ροής παραμένει σταθερή (περίπου 0,3m/s) και ανεξάρτητη από την παροχή λυμάτων.

Εξαμμωτές με αερισμό

Οι αεριζόμενοι εξαμμωτές είναι ορθογωνικές αεριζόμενες δεξαμενές στις οποίες ο αέρας εισάγεται με διαχύτες χοντρής φυσαλίδας από τη μία πλευρά με αποτέλεσμα τη δημιουργία ελικοειδούς ροής. Η άμμος καθιζάνει στον πυθμένα και συλλέγεται σε χοάνη (ή χοάνες) απ' όπου απομακρύνεται με αντλίες. Σε αυτή την περίπτωση εξαμμωτή υπάρχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας συλλογής των λιπών, αφού παράλληλα και κατά μήκος των εξαμμωτών κατασκευάζονται περιοχές ηρεμίας - λιποσυλλογής (πλάτους 0.8 - 1.2 m), όπου συγκεντρώνονται στην επιφάνεια τα λίπη, οι αφροί και οι άλλες επιπλέουσες ουσίες.

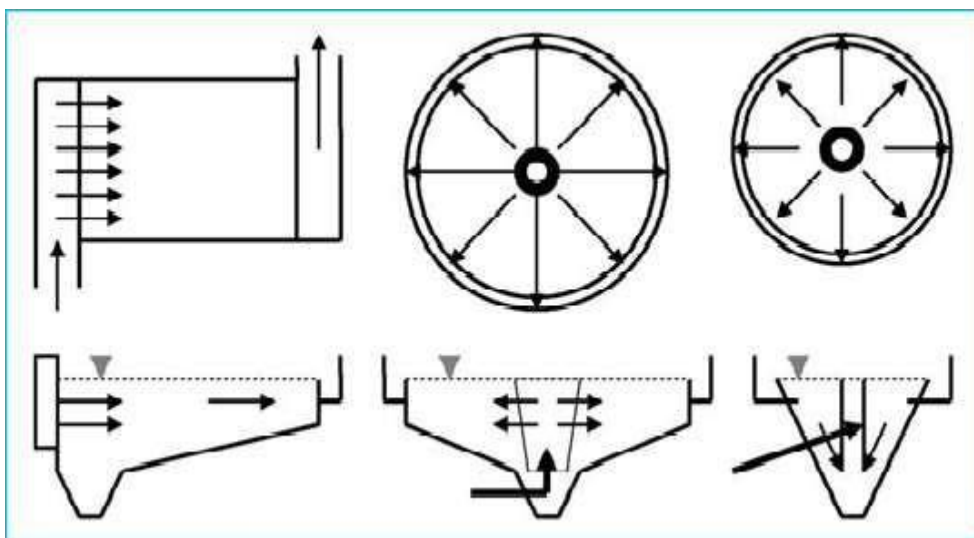
Η παροχή του απαιτούμενου αέρα για την λειτουργία αυτών, λαμβάνεται συνήθως από λοβοειδείς φυσητήρες θετικής εκτόπισης των οποίων η λειτουργία είναι συνεχής. Η παροχή του αέρα είναι συνήθως 9-18 m³/h (τυπική τιμή ίση με 10 m³/h) ανά μέτρο μήκους εξαμμωτή.

1.3.4 ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑ ΚΑΘΙΖΗΣΗ

Με την καθίζηση επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός από τα λύματα των ουσιών που καθιζάνουν και αυτών που επιπλέουν. Πρόκειται για μια φυσική διεργασία διαχωρισμού των αιωρούμενων σωματιδίων, το ειδικό βάρος των οποίων είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του νερού. Για σωματίδια με μέσο μέγεθος μεγαλύτερο από 100 μm και συγκέντρωση μεγαλύτερη από 50 mg/L, η καθίζηση είναι η κατ' εξοχήν εφαρμοζόμενη μέθοδος διαχωρισμού. Στηρίζεται στο φαινόμενο της βαρύτητας και εφαρμόζεται για την απομάκρυνση διαφόρων στερεών που καθιζάνουν.

Η τεχνική της καθίζησης εφαρμόζεται στις ΕΕΛ για την απομάκρυνση της άμμου στους αμμοσυλλέκτες, για την απομάκρυνση των ολικών αιωρούμενων στερεών (πρωτοβάθμια καθίζηση). Όπως επίσης σε δεύτερο στάδιο για την απομάκρυνση των βιολογικών κροκίδων μετά από βιολογική επεξεργασία (δευτεροβάθμια καθίζηση), για την απομάκρυνση των χημικών κροκίδων (μετά από χημική κροκίδωση), για την πάχυνση (πύκνωση) των στερεών στους παχυντές ιλύος.

Τα σωματίδια καθιζάνουν με την βαρύτητα και η ταχύτητα καθίζησης σε ηρεμία εξαρτάται από το μέγεθος, το ειδικό βάρος και το σχήμα των σωματιδίων καθώς και την κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού, η οποία είναι συνάρτηση και της θερμοκρασίας. Η ευρεία χρήση της καθίζησης οφείλεται στην απλότητα της μεθόδου, παρά τις περιπλοκές που παρουσιάζουν πολλές φορές διάφορες δεξαμενές καθίζησης, και στη μικρή κατανάλωση ενέργειας. Με την πρωτοβάθμια καθίζηση είναι δυνατό να επιτευχθεί μείωση αιωρούμενων σωματιδίων (TSS) κατά 40 - 50 % όπως επίσης και μείωση οργανικού φορτίου ως BOD₅ κατά 25 - 30 %. Η πρωτοβάθμια καθίζηση γίνεται σε ορθογώνιες, ή κυκλικές δεξαμενές όπου τα στερεά καθιζάνουν σε συνθήκες ηρεμίας κάτω από την επίδραση της βαρύτητας (Σχήμα 3). Ο χρόνος παραμονής κυμαίνεται από 1,5 - 3,0 ώρες, με βάση τη μέση παροχή των λυμάτων.



Σχήμα 3 : Δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης (άνω : κάτοψη, κάτω : τομή)

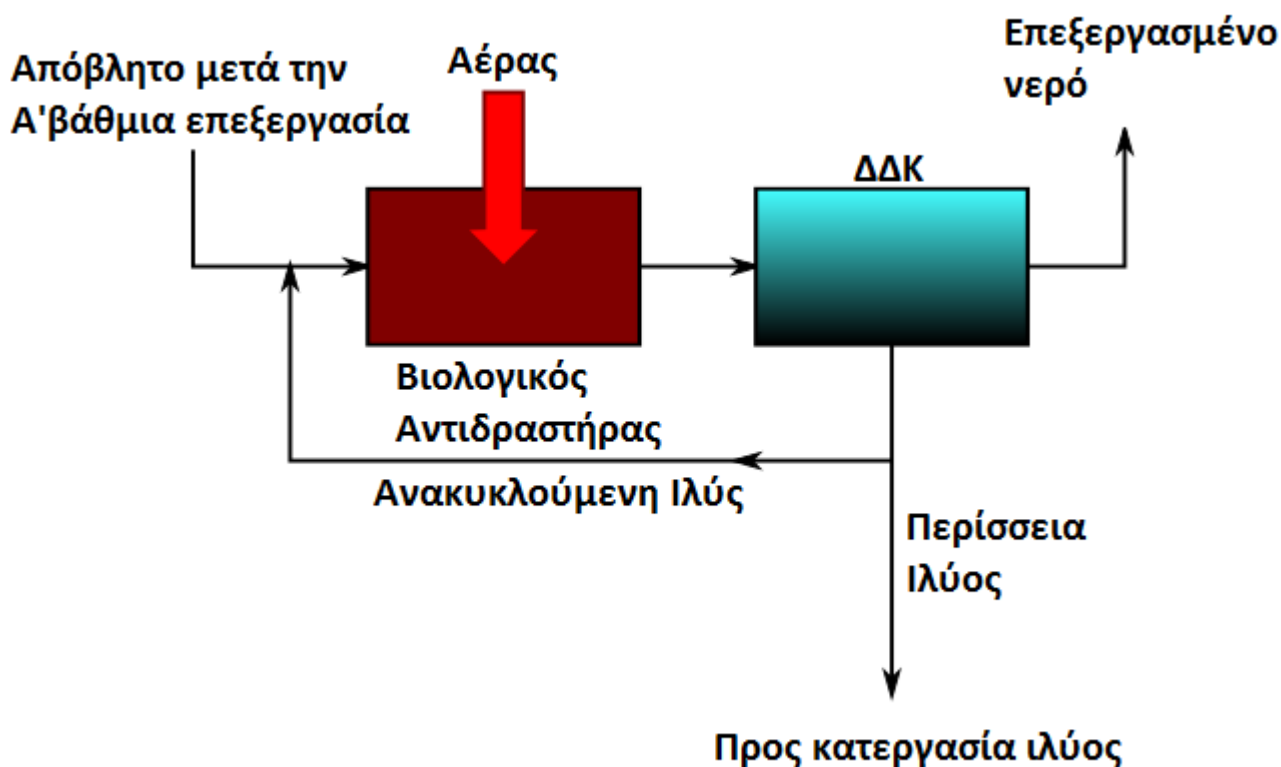
1.3.5 ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η δευτεροβάθμια επεξεργασία περιλαμβάνει το βιολογικό αντιδραστήρα (ΒΑ) ή δεξαμενή αερισμού (ΔΑ) και τη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (ΔΔΚ). Σε μερικές περιπτώσεις, οι δύο αυτές λειτουργίες πραγματοποιούνται στην ίδια δεξαμενή που εργάζεται περιοδικά ως ΒΑ και ΔΔΚ (Ανδρεαδάκης, 2000). Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται μία γραφική απεικόνιση των διαφόρων ροών που συντελούνται σε μία δεξαμενή αερισμού και μία δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης.

Ο κύριος ρόλος της βιολογικής επεξεργασίας είναι η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου που σε όρους BOD5 μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει το 95%. Παράλληλα απομακρύνονται, κατά παρόμοια σχεδόν ποσοστά, αιωρούμενα στερεά (SS) και μικροοργανισμοί. Μεγάλο μέρος της οργανικής ύλης βρίσκεται στα λύματα με διαλυμένη και κολλοειδή μορφή που δεν μπορεί να καθιζάνει ακόμη και με τη χρήση κροκιδωτικών. Τη λύση στο πρόβλημα δίνει η βιολογική επεξεργασία ως εξής (Φίλιππας, 2009):

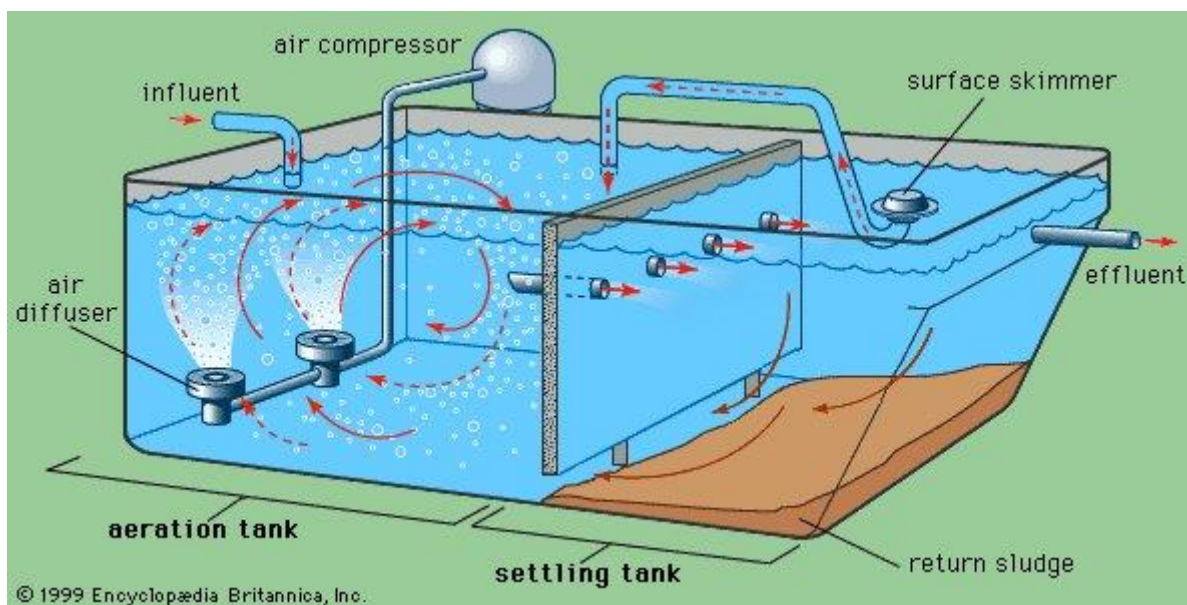
Ο βιολογικός αντιδραστήρας είναι μια δεξαμενή από την οποία διέρχονται τα λύματα. Το βάθος των λυμάτων είναι σχεδόν σταθερό, μερικά μέτρα, πράγμα που εξασφαλίζεται με έναν υπερχειλιστή εξόδου μεγάλου μήκους τοποθετημένο στο κατάλληλο ύψος από τον πυθμένα του βιολογικού αντιδραστήρα. Στα λύματα του βιολογικού αντιδραστήρα παρέχεται συνεχώς οξυγόνο είτε με τη μορφή εμφυσούμενου αέρα, είτε με έντονη ανάδευση που επιτυγχάνουν επιφανειακοί αεριστήρες, έτσι ώστε να υπάρχει πάντα διαλυμένο οξυγόνο 1 -2 mg/l (Ανδρεαδάκης, 2000).

Τα λύματα του βιολογικού αντιδραστήρα περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις οργανικής ύλης και αρκετό οξυγόνο, δηλαδή υπάρχουν όλες οι τροφικές και περιβαλλοντικές προϋποθέσεις για μια πλούσια ανάπτυξη αερόβιων ετερότροφων, χημικοσυνθετικών μικροοργανισμών, κυρίως βακτηριδίων. Οι μικροοργανισμοί οξειδώνουν ένα τμήμα της οργανικής ύλης για απόληψη ενέργειας με κύρια προϊόντα τα CO₂ και H₂O. Το υπόλοιπο τμήμα της οργανικής ύλης, συχνά το μεγαλύτερο, το μετατρέπουν σε κυτταρική μάζα νέων μικροοργανισμών, δηλαδή στην ουσία το μεγάλο μέρος της αρχικής οργανικής ύλης μετατρέπεται πάλι σε (ζωντανή) οργανική ύλη. Η μεγάλη διαφορά βρίσκεται στο ότι η νέα οργανική ύλη είναι εύκολα συσσωματώσιμη και καθιζήσιμη σε αντίθεση με την αρχική που δεν ήταν καθιζήσιμη (Φίλιππας, 2009).



Σχήμα 4 : Σχηματική απεικόνιση των ροών και των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μία διάταξη Δευτεροβάθμιας επεξεργασίας αποβλήτων.

Το μεγαλύτερο μέρος της ιλύος ανακυκλώνεται στην δεξαμενή αερισμού, ώστε να διατηρείται σταθερή η συγκέντρωση των μικροοργανισμών στον αντιδραστήρα, ενώ ένα τμήμα της ιλύος, ίσο με την καθαρή παραγωγή της, οδηγείται προς κατεργασία. Οι μικροοργανισμοί μαζί με ανόργανα στερεά αλλά και μη διασπώμενα οργανικά στερεά συσσωματώνονται και καθιζάνουν στον πυθμένα της ΔΔΚ δημιουργώντας αυτό που ονομάζεται «ενεργός ιλύς» λόγω ακριβώς της υψηλής περιεκτικότητας της σε ζωντανούς μικροοργανισμούς. Τμήμα της ενεργού ιλύος επιστρέφει με άντληση (επανακυκλοφορία) στον βιολογικό αντιδραστήρα, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 5, ώστε να μεταφερθεί εκεί η επιθυμητή συγκέντρωση μικροοργανισμών, ενώ άλλο μέρος της (περίσσεια ιλύος) απομακρύνεται προς τα έργα επεξεργασίας της ιλύος. Χωρίς την απομάκρυνση αυτή η συγκέντρωση των μικροοργανισμών στον βιολογικό αντιδραστήρα θα αυξάνονταν απεριόριστα (Ανδρεαδάκης, 2000).



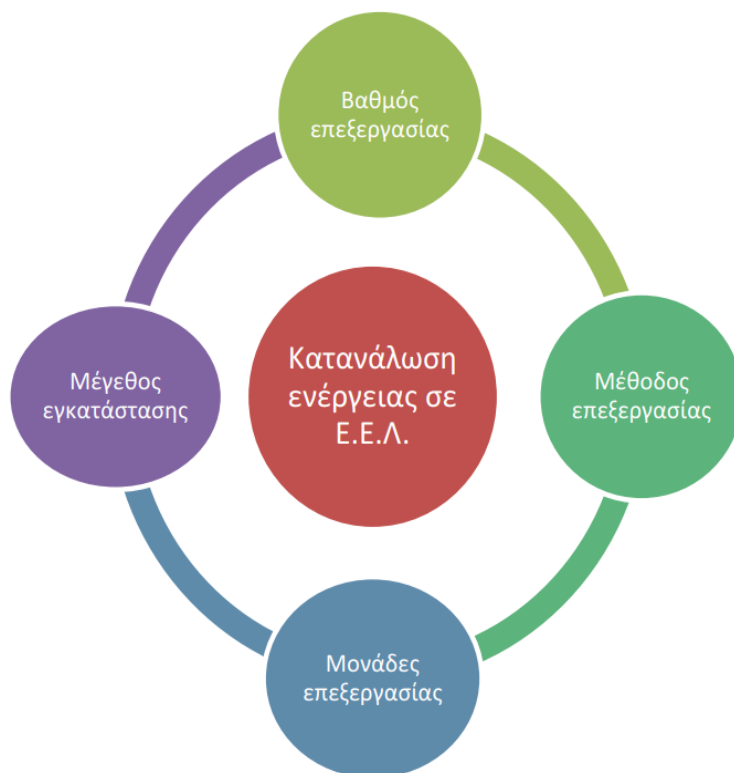
Σχήμα 5 : Τομή Δεξαμενής Αερισμού και Δεξαμενής Δευτεροβάθμιας Καθίζησης σε λειτουργία.

Πηγή:(<https://www.britannica.com/technology/>, 2021)

1.4 Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΤΙΣ ΕΕΛ

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων χρησιμοποιούνται για τη μείωση των επιβλαβών εκπομπών στα υδάτινα σώματα. Ωστόσο, οι περισσότερες έχουν σχεδιαστεί για να καλύψουν τις συγκεκριμένες απαιτήσεις εκροής, χωρίς επαρκή μέριμνα για την ενεργειακή διαχείριση. Η κατάσταση αυτή αλλάζει τα τελευταία χρόνια, καθώς η ενέργεια ως πόρος αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία αυτής.

Το κόστος λειτουργίας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων περιλαμβάνει ένα αριθμό στοιχείων, τα οποία κατατάσσονται σε μεταβλητά (κατ' εξοχήν) και σταθερά έξοδα. Τα μεταβλητά έξοδα αποτελούνται από τις πρώτες και τις βοηθητικές ύλες, τη διάθεση της επεξεργασμένης ιλύος, καθώς και την καταναλισκόμενη ενέργεια, και τα μεταβάλλονται ανάλογα με τη λειτουργία της Ε.Ε.Λ.. Σε αντίθεση, τα σταθερά έξοδα, όπως τα εργατικά και η συντήρηση, δεν εξαρτώνται από την δυναμικότητα λειτουργίας της. Οι ενεργειακές ανάγκες μιας Ε.Ε.Λ. εξαρτώνται κυρίως από την τοποθεσία της εγκατάστασης, τον τύπο των διεργασιών επεξεργασίας, το σύστημα αερισμού, τις απαιτήσεις ποιότητας των αποβλήτων, την εμπειρία των διαχειριστών, την ηλικία της εγκατάστασης και το μέγεθος της βάσει του ισοδύναμου πληθυσμού ή του οργανικού ή υδραυλικού φορτίου (Σχήμα 6).



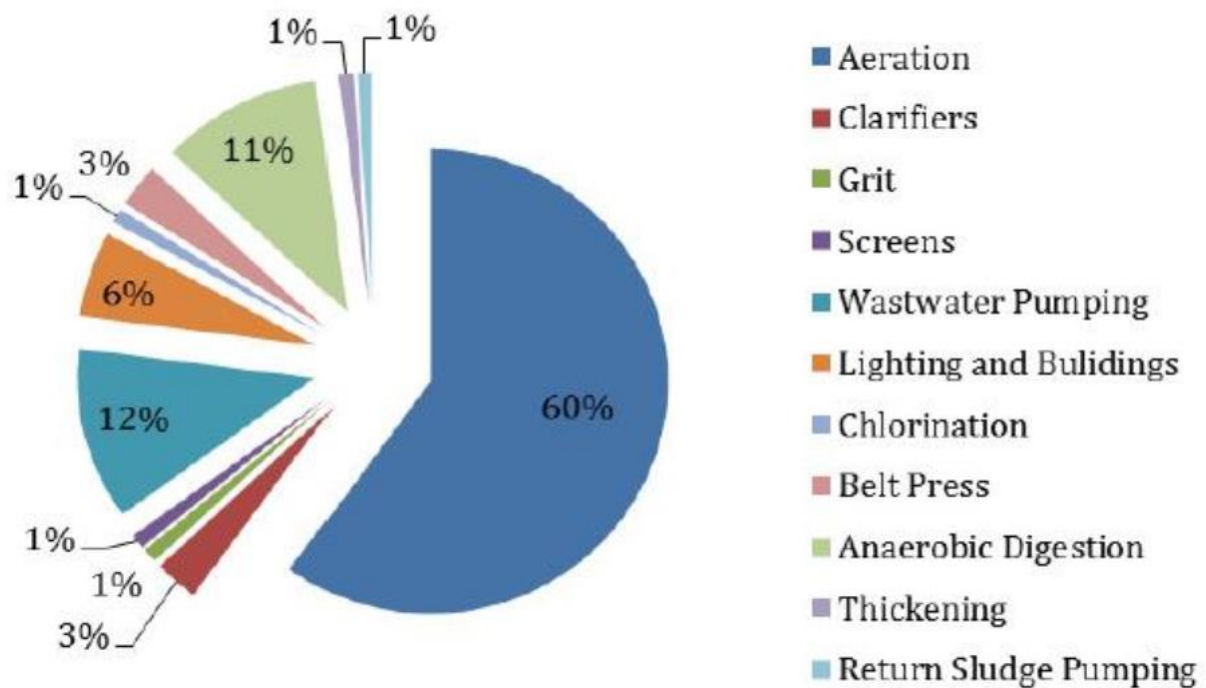
Σχήμα 6 : Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση στις Ε.Ε.Λ.

Οι μορφές της ενέργειας που μπορούν να ανακτηθούν από τα λύματα περιλαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια, βιοαέριο, ατμό και ζεστό νερό (Maktabifard et al, 2018). Το εκτιμώμενο ενεργειακό δυναμικό ενσωματωμένο στα λύματα εκτιμήθηκε στα 9.72 kWh/m³, με τα 2.72 kWh/m³ (28%) να μπορούν να ανακτηθούν άμεσα. Ειδικά για το παραγόμενο βιοαέριο, θεωρείται ότι μπορεί να καλύψει το 39-76% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε μία Ε.Ε.Λ.. Η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από την συγκέντρωση του οργανικού φορτίου στα ανεπεξέργαστα λύματα, ενώ η κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται κύρια από το την μέθοδο ενεργού ιλύος. Η μεγιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου, μέσω της διεργασίας της συν-χώνευσης με παραπροϊόντα προεπεξεργασίας αποτελεί την αποδοτικότερη στρατηγική (Silvestre et al, 2015).

1.4.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΕ ΕΕΛ ΔΙΕΘΝΩΣ

Μία τυπική εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων συνήθως περιλαμβάνει τα στάδια της προεπεξεργασίας, της δευτεροβάθμιας και της τριτοβάθμιας επεξεργασίας. Η δευτεροβάθμια επεξεργασία των λυμάτων αποτελεί τη διεργασία με τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, περίπου 50-60% σε CAS (συμβατικά συστήματα επεξεργασίας), ενώ η επεξεργασία ιλύος καταλαμβάνει το 15-25% ακολουθούμενη από τη δευτεροβάθμια καθίζηση (με το αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας) 15%. Στο παρακάτω Σχήμα 7 παρουσιάζεται η τυπική ποσοστιαία κατανομή της ενεργειακής

χρήσης σε μία Ε.Ε.Λ. με συμβατικό σύστημα επεξεργασίας .



Σχήμα 7 : Κατανομή ενεργειακής χρήσης σε μία ΕΕΛ. (Yifan Gu et al, 2017)

Στην προεπεξεργασία η ειδική κατανάλωση ενέργειας κυμαίνεται από 0.02-0.1 kWh/m³ στον Καναδά, 0.045-0.14 kWh/m³ στην Ουγγαρία και 0.1-0.37 kWh/m³ στην Αυστραλία. Σε συμβατικά συστήματα επεξεργασίας υπολογίστηκαν ειδικές καταναλώσεις 0.46 kWh/m³ (Αυστραλία), 0.269 kWh/m³ (Κίνα), 0.33–0.60 kWh/m³ (ΗΠΑ) and 0.30-1.89 kWh/m³ (Ιαπωνία). Συγκρινόμενη με τα CAS οι οξειδωτικές τάφροι (OD) παρουσιάζουν υψηλότερη απαίτηση ενέργειας. 0.5-1.0 kWh/m³ (Αυστραλία), 0.302 kWh/m³ (Κίνα), 0.43-2.07 kWh/m³ (Ιαπωνία), εξαιτίας του μεγαλύτερου χρόνου παραμονής και της μεγαλύτερης κατανάλωσης ενέργειας (υψηλότερη ειδική κατανάλωση οξυγόνου) (Gu et al, 2017).

Με βάση αποτελέσματα που δημοσιεύτηκαν στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ENERWATER (ENERWATER PROJECT, 2015-2018), το οποίο αναπτύσσει μία τυποποιημένη μεθοδολογία για τη συνεχή εκτίμηση και συγκριτική αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας σε σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων, μονάδες με βιολογική απομάκρυνση θρεπτικών (αζώτου και φωσφόρου) παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση, ακολουθούμενες από αντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), τον παρατεταμένο αερισμό και το συμβατικό σύστημα επεξεργασίας ενεργού ιλύος (CAS). Οι μονάδες αυτές έχουν ειδική ενεργειακή κατανάλωση 80.8

kWh/P.E.y*(*ισοδύναμο πληθυσμό,ετησίως) ή 1.71 kWh/kgCODrem. Ακολουθούν τα συστήματα MBR με 50.7 kWh/P.E. y ή 0.96 kWh/kg CODrem. Τα συστήματα παρατεταμένου αερισμού έχουν 40.46 kWh/P.E. y ή 0.85 kWh/kg CODrem. Το λιγότερο ενεργοβόρο σύστημα είναι το συμβατικό σύστημα με καταναλώσεις 27.28 kWh/P.E.y. Τα συστήματα με βιολογική απομάκρυνση θρεπτικών περιλαμβάνουν τις οξειδωτικές τάφρους και τις διατάξεις A/O (ανοξική/αερόβια δεξαμενή), A2/O (αναερόβια/ανοξική/αερόβια δεξαμενή). Η επεξεργασία της ιλύος αποτελεί επίσης μία ενεργοβόρα διεργασία, με ποσοστό περίπου 8% επί της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας (Δημοπούλου Αργυρή, 2011). Σε μία πρόσφατη έρευνα οι Maktabifard, Zaborowska και Makinia τον Οκτώβριο του 2018, παρουσίασαν αναλυτικά στοιχεία κατανομής κατανάλωσης ενέργειας σε Ε.Ε.Λ. τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

2018).

Αναφορές	kWh/m ³	Αερισμός(%)	Επεξεργασία λάσπης (%)	Αντλήσεις(%)	Άλλο(%)	Παρατηρήσεις
Gans et al. (2007)	0,26	57	5	-	38	2.4 εκατ. PE σε Ε.Ε.Λ.προχωρημένης επεξεργασίας στην Κίνα(Πεκίνο)
Nouri et al. (2006)	0,3	77	7	11	7	Ε.Ε.Λ. στο Ιράν (Ταμπρίζ)μετά από αναβαθμίσεις
Panepinto et al. (2016)	0,3	51	29	-	20	2.7 εκατ. PE (615 km ³ /day)σε Ε.Ε.Λ. προχωρημένης επεξεργασίας στην Ιταλία(Τορίνο)
Jonasson (2007)	0,3	70	13	4	13	Μελέτη συγκριτικής αξιολόγησης σε σύγχρονες Ε.Ε.Λ. στην Αυστρία
Jonasson (2007)	0,32	57	13	9	21	250 k PE σε σύγχρονες Ε.Ε.Λ. στην Αυστρία
Mizuta and Shimada (2010)	0,32	46	31	18	5	81 km ³ /day σε συμβατικές Ε.Ε.Λ. στην Ιαπωνία(Β. Κουμαμότο)
Gu et al. (2017)	0,37-1,6	60	12	12	16	Μονάδες MBR μεσαίου μεγέθους στην Σιγκαπούρη
Jonasson (2007)	0,48	48	14	9	29	500 k PE σε συμβατικές Ε.Ε.Λ. στην Σουηδία (Στοκχόλμη)
Aymerich et al (2015)	-	42	31	20	7	115 k PE (18 km ³ /day) σε Ε.Ε.Λ. στην Ισπανία, προχωρημένης επεξεργασίας

1.5 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ

Η αναερόβια χώνευση ιλύος λυμάτων έχει εφαρμοστεί σε ΕΕΛ επί δεκαετίες. Είναι ευρέως γνωστή, αποδοτική και περιβαλλοντικά ανανεώσιμη τεχνολογία η οποία επιτρέπει την παραγωγή ενέργειας διαφόρων τύπων και χρήσεων όπως θέρμανσης, ηλεκτρική και ενέργεια κίνησης οχημάτων καθώς και την σταθεροποίηση και την μείωση όγκου της ιλύος. Συνήθως η ιλύς των λυμάτων χωνεύεται μόνη παρά το γεγονός ότι κοινή χώνευση της με άλλα υποστρώματα θα ήταν επωφελής ως προς την αύξηση παραγωγής βιοαερίου και ως προς την αύξηση των εσόδων από τέλη εισόδου.

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διεργασία που πραγματοποιείται σε κλειστές δεξαμενές, οι οποίες συνήθως βρίσκονται πλησίον της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων, και χαρακτηρίζεται από πλήρη έλλειψη οξυγόνου, με συνεχή ανάμιξη που επιτελείται με ανακυκλοφορία (εμφύσηση βιοαερίου ή μηχανική ανάμιξη) και με συνεχή έλεγχο της θερμοκρασίας, του pH και των αιωρούμενων στερεών. Η βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης των αναερόβιων βακτηριδίων είναι η μεσόφιλη περιοχή (30°C έως 35°C) ή η θερμόφιλη περιοχή (55°C έως 60°C) (Φίλιππας, 2009). Η επεξεργασία αυτή είναι αρκετά πιο αργή σε σχέση με την αερόβια επεξεργασία και ενδείκνυται για λύματα με υψηλό BOD. Με την αναερόβια χώνευση επιτυγχάνεται μείωση των οργανικών στερεών της ιλύος κατά 40 έως 60%. Η διάρκεια της επεξεργασίας κυμαίνεται μεταξύ δύο και τριών εβδομάδες ενώ εμφανίζει και ένα ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα, την παραγωγή μεθανίου. Πιο συγκεκριμένα, κατά την αναερόβια επεξεργασία οι οργανικές ουσίες μειώνονται με μετατροπή του 30-40% των στερεών σε αέρια, κυρίως μεθάνιο. Το μεθάνιο που παράγεται χρησιμοποιείται πολλές φορές από την ίδια την εγκατάσταση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ως καύσιμο, προκειμένου να καλύψει μέρος των ενεργειακών της αναγκών (Φίλιππας, 2009). Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων όπως η θερμοκρασία, το pH, ο χρόνος παραμονής, η χημική σύσταση των λυμάτων και η παρουσία τοξικών ουσιών. Πολλές φορές κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας εφαρμόζεται θέρμανση προκειμένου να επιταχυνθούν οι βιοχημικές αντιδράσεις σε μεσόφιλες θερμοκρασίες (25°C - 40°C). Ο βαθμός ελάττωσης της συγκέντρωσης των παθογόνων μικροοργανισμών κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του χρόνου επεξεργασίας. Υψηλές θερμοκρασίες (50°C - 60°C) και μεγάλοι χρόνοι παραμονής ευνοούν την καταστροφή των παθογόνων. Μειονέκτημα της αναερόβιας χώνευσης είναι το υψηλό κόστος επένδυσης, με αποτέλεσμα η παραπάνω επιλογή να εφαρμόζεται σε σχετικά μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Αγγελάκης κ.α., 2005).

Με την αναερόβια χώνευση παράγεται ενεργειακά αξιοποιήσιμο βιοαέριο, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται οι ανεπιθύμητες οσμές, ελαττώνεται ο όγκος της ιλύος, άρα και το κόστος διάθεσης της, και βελτιώνεται η αφυδάτωση της ιλύος, καθώς η ικανότητα δέσμευσης νερού της οργανικής ύλης μειώνεται αισθητά μέσω των αναερόβιων βακτηρίων. (Antakyali & Rolle, 2010) Το βιοαέριο από την αναερόβια αποικοδόμηση των βιολογικών στερεών λυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λέβητες ή ξηραντήρες για παραγωγή θερμότητας με τη μορφή νερού υψηλής θερμοκρασίας ή ατμού ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρο-τροβίλους ή κινητήρες εσωτερικής καύσης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (J.Hunter Long et al.2012)

Η ανάκτηση βιοαερίου από τη χωνεμένη ιλύ θεωρείται το σπουδαιότερο πλεονέκτημα της αναερόβιας χώνευσης, καθώς το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για την παραγωγή ενέργειας στην ίδια τη ΕΕΛ και τα οικονομικά οφέλη είναι αξιοσημείωτα, είτε ως εξοικονόμηση είτε ως κέρδος.

Τα βασικά συστατικά του βιοαερίου είναι μεθάνιο (60-70%) και διοξείδιο του άνθρακα (30-40%). Επίσης υπάρχει άζωτο και οξυγόνο σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, περί τα 4 και 1% αντίστοιχα. Εκτιμάται ότι με έναν μέσο χρόνο παραμονής 15 ημερών μπορεί να παραχθεί βιοαέριο μέσω της αναερόβιας χώνευσης μεταξύ 380 και 450 L/DMorg* (*kg ξηρής οργανικής ύλης) (Antakyali & Rolle, 2010)

Η ανάμιξη της ιλύος είναι μία λειτουργία απαραίτητη σε όλα τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης καθώς εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργία της διεργασίας, αυξάνει την καταστροφή των πτητικών στερεών και βελτιώνει την παραγωγή βιοαερίου. Η ανάμιξη μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους. Στις περισσότερες εφαρμογές η ανάμιξη γίνεται με την έγχυση μίας ποσότητας βιοαερίου στο κάτω μέρος του χωνευτή και την εξαναγκασμένη κυκλοφορία της διαμέσου του περιεχομένου της δεξαμενής. Επίσης, μπορεί να εφαρμοστεί μηχανική ανάμιξη ή ανάμιξη με συνεχή άντληση του περιεχομένου των χωνευτών. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να αξιολογείται η ενεργειακή και οικονομική σκοπιμότητα κάθε μεθόδου ανάμιξης ούτως ώστε να επιλεγεί η καταλληλότερη μέθοδος. Η ενεργειακή εξοικονόμηση που θα προκύψει από την εγκατάσταση ενός συστήματος ανάμιξης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε ΕΕΛ. Η περίοδος απόσβεσης εξαρτάται από το αν το σύστημα ανάμιξης είναι μία καινούρια κατασκευή ή αν εξυγχιονίζει ένα ήδη υπάρχον σύστημα. Ο χρόνος απόσβεσης για τον εκσυγχρονισμό ενός υφιστάμενου συστήματος είναι μεγαλύτερος (NYSERDA, 2010).

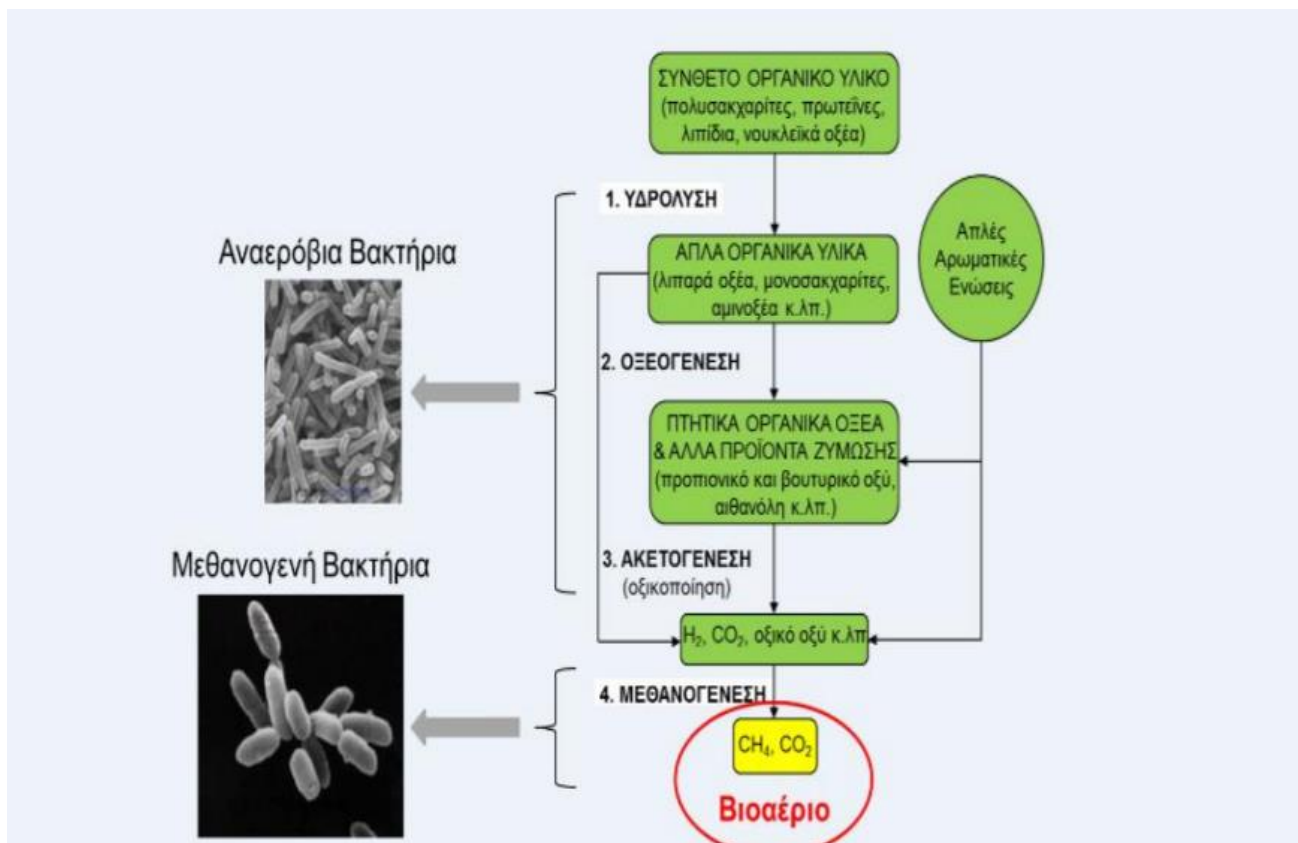
Η εμπειρία όσον αφορά τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις χώνευσης βιοστερεών έχει δείξει ότι υπάρχουν δυνατότητες λειτουργικής βελτιστοποίησης της παραγωγής βιοαερίου και στις

περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της παραγωγής. Η βελτιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου είναι σημαντική διότι συμβάλλει στην ενεργειακή αυτάρκεια των ΕΕΛ και στην ελαχιστοποίηση των εξωτερικών δαπανών για την αγορά φυσικού αερίου και άλλων καυσίμων, καθώς ανακτάται και χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση μεγαλύτερη ποσότητα βιοαερίου.

Οι κυριότεροι τρόποι βελτίωσης της απόδοσης της αναερόβιας χώνευσης και ενίσχυσης της παραγωγής βιοαερίου είναι (1) η βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας της διεργασίας, (2) η προεπεξεργασία της ιλύος πριν τη χώνευση και (3) η συν- χώνευση της ιλύος μαζί με άλλα απόβλητα. Οι τρόποι αυτοί προσφέρουν το επιπλέον όφελος της βελτίωσης της ποιότητας της χωνεμένης ιλύος για τις διεργασίες επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος που ακολουθούν (NYSERDA, 2010).

1.5.1 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ -ΣΤΑΔΙΑ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

Η αναερόβια χώνευση αποτελείται από 4 διαδοχικά στάδια όπως φαίνεται στο Σχήμα 8, σε κάθε ένα από τα οποία συμμετέχουν εξειδικευμένοι μικροοργανισμοί. Το προϊόν κάθε σταδίου χρησιμοποιείται σαν υπόστρωμα από το επόμενο στάδιο μέχρι να παραχθούν τα τελικά προϊόντα της διεργασίας που είναι το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Λόγω της συμβιωτικής σχέσης μεταξύ των διαφορετικών ειδών των μικροοργανισμών, η εισαγωγή στο σύστημα κάποιας ουσίας που παρουσιάζει τοξική δράση σε μια ομάδα μικροοργανισμών είναι πολύ πιθανόν να προκαλέσει γενικευμένα προβλήματα σε ολόκληρη την παραγωγική διαδικασία.



Σχήμα 8 : Σχηματική απεικόνιση των σταδίων, των προϊόντων τους και των μικροοργανισμών που συμμετέχουν στην αναερόβια χώνευση.

Αρχικά, σύνθετες πολυμερικές ενώσεις όπως είναι οι υδατάνθρακες, οι πρωτεΐνες και τα λίπη υδρολύονται από εξωκυτταρικά ένζυμα σε διαλυτά προϊόντα μικρότερου μεγέθους έτσι ώστε να μπορούν να εισχωρήσουν διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης στο εσωτερικό του κυττάρου. Αυτές οι σχετικά απλές διαλυτές ενώσεις ζυμώνονται ή οξειδώνονται αναερόβια σε πτητικά λιπαρά οξέα, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και αμμωνία. Τα πτητικά λιπαρά οξέα μετατρέπονται σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Στη συνέχεια, παράγεται μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, είτε από την αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα από το υδρογόνο είτε απευθείας από το οξικό οξύ. Οι κύριες ομάδες βακτηρίων που παίρνουν μέρος σε αυτές τις αντιδράσεις χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες: (1) βακτήρια ζύμωσης, (2) οξικογόνα βακτήρια που παράγουν υδρογόνο, (3) οξικογόνα βακτήρια που καταναλώνουν υδρογόνο, (4) μεθανιογόνα βακτήρια που ανάγουν το διοξείδιο του άνθρακα, (5) ακετοκλαστικά μεθανιογόνα βακτήρια. Ένα γενικό κριτήριο κατάταξης των μικροοργανισμών είναι η σχέση της κυτταρικής τους λειτουργίας με το οξυγόνο.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται η κατάταξη των μικροοργανισμών ανάλογα με την ικανότητα τους να χρησιμοποιούν το οξυγόνο καθώς και τον τρόπο του το επιτυγχάνουν.

Πίνακας 4 : Κατάταξη μικροοργανισμών με κριτήριο τη σχέση της κυτταρικής τους λειτουργίας (Αγγελής, 2000)

Μικροοργανισμοί	Ιδιότητα
1.Αερόβιοι (aerobes)	Χρησιμοποιούν το μοριακό οξυγόνο.
2.Προαιρετικά αναερόβιοι (facultative anaerobes)	Χρησιμοποιούν το μοριακό οξυγόνο, αλλά μπορούν να επιβιώσουν και με ζυμωτικό.
3.Υποχρεωτικά αναερόβιοι (obligate anaerobes)	Δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν το μοριακό οξυγόνο.
3α.Αδιάφοροι αναερόβιοι (indifferent anaerobes)	Μπορούν να επιβιώσουν και σε αερόβιες συνθήκες.
3β.Ανθεκτική στον αέρα αναερόβιοι (aerotolerant anaerobes)	Έχουν κάποιο όριο ανοχής στη συγκέντρωση οξυγόνου στο περιβάλλον τους
3γ.Αυστηρά αναερόβιοι (strict anaerobes)	Πεθαίνουν ακόμα και με ίχνη ελεύθερου οξυγόνου στο περιβάλλον τους.

Υπάρχουν δύο κύριες ομάδες μικροοργανισμών που συμμετέχουν στην αναερόβια χώνευση. Αυτή που μετατρέπει τις πρωτεΐνες, τους υδατάνθρακες και τα λίπη, κυρίως σε λιπαρά οξέα και αυτή που μετατρέπει τα προϊόντα μεταβολισμού του προηγούμενου σταδίου σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, όπου αυτή η ομάδα μικροοργανισμών είναι αυστηρά αναερόβιοι.

Μικροβιολογία της μη μεθανιογόνου φάσης

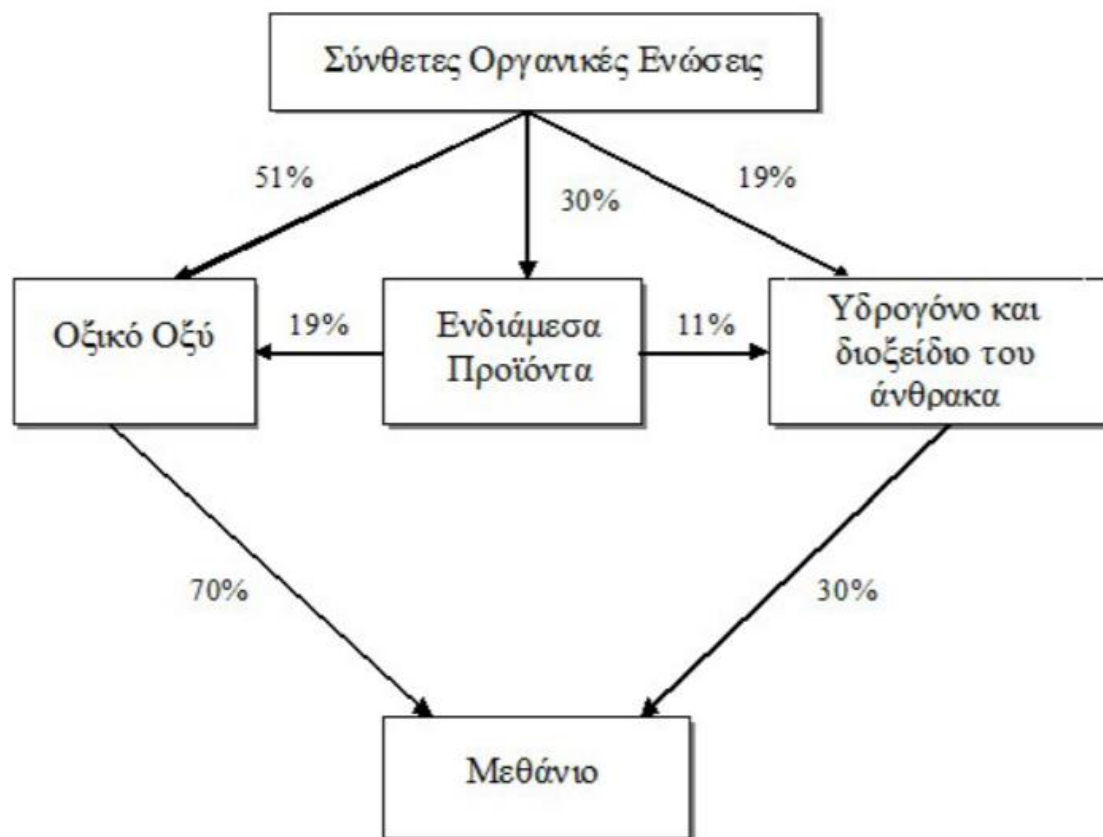
Κατά τη διάρκεια της μη μεθανιογόνου φάσης στην αναερόβια χώνευση, έχει παρατηρηθεί η παρουσία διάφορων ομάδων μικροοργανισμών όπως βακτήρια, πρωτόζωα και μύκητες. Η ύπαρξη, ο αριθμός, ο τύπος και το είδος των μικροοργανισμών αυτών κάτω από αναερόβιες συνθήκες εξαρτάται από τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των προς επεξεργασία αποβλήτων. Η κύρια κατηγορία μικροοργανισμών που απαντώνται στους αναερόβιους αντιδραστήρες είναι τα βακτήρια.

Στη μη μεθανιογόνο φάση υπάρχουν είτε προαιρετικά αναερόβια είτε υποχρεωτικά αναερόβια βακτήρια. Ωστόσο η πλειονότητα των βακτηρίων είναι αυστηρά αναερόβια. Έχει βρεθεί ότι τα υποχρεωτικά αναερόβια βακτήρια παίζουν σημαντικό ρόλο στην υδρολυτική ενεργότητα του αναερόβιου αντιδραστήρα, ιδιαίτερα όταν επεξεργάζονται αστικά λύματα. Επίσης έχει βρεθεί ότι τα υποχρεωτικά αναερόβια βακτήρια αποτελούν την κύρια ομάδα μικροοργανισμών για την παραγωγή οξέων. Σημαντικό ρόλο σε αυτή τη φάση, εκτός από τα διάφορα βακτήρια, διαδραματίζουν τα εξωκυτταρικά ένζυμα όπως η κελοβιάση, η πρωτεάση και η αμυλάση, τα οποία διασπούν το σύνθετο οργανικό υπόστρωμα (πρωτεΐνες, λίπη, υδατάνθρακες) σε μικρότερα μόρια. Ειδικότερα, οι πρωτεΐνες διασπώνται εξωκυτταρικά σε

πολυπεπίδια και αμινοξέα από την πρωτεάση. Περαιτέρω διάσπαση των αμινοξέων γίνεται με τη βοήθεια πολλών διαφορετικών μηχανισμών, ανάλογα με τους μικροοργανισμούς που εμπλέκονται κάθε φορά. Τα τελικά προϊόντα της αποδόμησης των πρωτεϊνών είναι τα οργανικά οξέα. Η αποδόμηση των λιπιδίων αρχίζει με τη βοήθεια του ενζύμου λιπάση προκαλώντας β-οξείδωση. Διάφορα ένζυμα συμμετέχουν στην αποδόμηση των υδατανθράκων παράγοντας προϊόντα όπως υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα, αιθανόλη καθώς και διάφορα οξέα και τα προϊόντα αυτά της ζύμωσης διαφέρουν ανάλογα με το είδος ή το γένος των βακτηρίων καθώς επίσης και με τις συνθήκες που αναπτύσσονται. Τα τελικά προϊόντα της μη μεθανιογόνου φάσης χρησιμοποιούνται έπειτα από τους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς, για την τελική μετατροπή του σύνθετου οργανικού υλικού σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Μικροβιολογία της μεθανιογόνου φάσης

Τα μεθανιογόνα βακτήρια είναι αυστηρά αναερόβιοι μικροοργανισμοί. Μέχρι πρόσφατα υπήρχε η πεποίθηση ότι όλοι οι μεθανιογόνοι μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα να παράγουν μεθάνιο μόνο από το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα. Διαπιστώθηκε όμως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9, ότι η πιο σημαντική πηγή μεθανίου κατά την αναερόβια επεξεργασία είναι το οξικό οξύ και ότι αυτό χρησιμοποιείται σαν υπόστρωμα για το 70% του παραγόμενου μεθανίου ενώ το υπόλοιπο 30% παράγεται από το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα. Εκτός αυτών σαν υπόστρωμα, από κάποιες κατηγορίες μικροοργανισμών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το μονοξείδιο του άνθρακα. Τέλος, όλοι οι μεθανιογόνοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν NH_4^+ ως πηγή αζώτου, ενώ σε όλα τα είδη είναι απαραίτητα το νικέλιο, ο σίδηρος και το κοβάλτιο ως ιχνοστοιχεία .



Σχήμα 9 : Μεταβολή του άνθρακα σε αναερόβιο περιβάλλον (Ahring, 2003)

Υδρόλυση

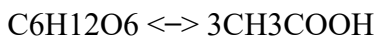
Η υδρόλυση αποτελεί το πρώτο στάδιο της αναερόβιας επεξεργασίας και στην οποία πολυμερείς ενώσεις όπως οι υδατάνθρακες, οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια υδρολύονται σε μικρότερα μόρια όπως σάκχαρα, αμινοξέα και λιπαρά οξέα αντίστοιχα, με τη βοήθεια υδρολυτικών ενζύμων που εκκρίνονται από τα υδρολυτικά βακτήρια που βρίσκονται στο υπόστρωμα. Πρόκειται για μια διαδικασία που απαιτεί χρόνο και αποτελεί το περιοριστικό βήμα στην αναερόβια χώνευση. Η υδρόλυση των σύνθετων αυτών οργανικών ενώσεων καταλύεται από εξωκυτταρικά ένζυμα που εκκρίνονται από μικροοργανισμούς. Οι πολυσακχαρίτες μεταβολίζονται σε μόρια γλυκόζης, όπως και η κυτταρίνη, η οποία υδρολύεται ενζυματικά από την κυτταρινάση. Οι πρωτεΐνες υδρολύονται σε αμινοξέα από εξωκυτταρικά ένζυμα, τις πρωτεάσες. Ο τρόπος δράσης της πρωτεάσης είναι με διάσπαση των πεπτιδικών δεσμών των αμινοξέων στην πρωτεΐνη και διακρίνονται σε ενδοπρωτεάσες και εξωπρωτεάσες ανάλογα με τη θέση των πεπτιδικών δεσμών που διασπών στην πρωτεϊνική αλυσίδα. Τα λιπίδια μεταβολίζονται από τις λιπάσες σε λιπαρά οξέα μεγάλης

ανθρακικής αλυσίδας και γλυκερόλη. Ο ρυθμός αποικοδόμησης των λιπιδίων είναι αρκετά μικρότερος από τον αντίστοιχο των πρωτεϊνών

Οξεογένεση

Στο δεύτερο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης, τα προϊόντα της υδρόλυσης χρησιμοποιούνται σαν υπόστρωμα από τους οξεογόνους μικροοργανισμούς, παράγοντας πτητικά λιπαρά οξέα (οξικό οξύ, προπιονικό οξύ), αιθανόλη, μεθανόλη, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Αρχικά, κατά το μεταβολισμό των λιπαρών οξέων μεγάλου μοριακού βάρους, παράγονται λιπαρά οξέα μικρότερου μοριακού βάρους. Ο ρυθμός διάσπασης αυτών των ενώσεων μειώνεται με την αύξηση του μήκους της ανθρακικής αλυσίδας ή με ελάττωση του βαθμού κορεσμού των ακόρεστων λιπαρών οξέων. Παρόλα αυτά η οξεογένεση αποτελεί το ταχύτερο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης και τα προϊόντα της (οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα) μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας από τους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς.

Παρακάτω παρατίθενται τυπικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την οξεογένεση, όπου η γλυκόζη μεταβολίζεται σε αιθανόλη, προπιονικό οξύ και οξικό οξύ αντίστοιχα :



Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στη συγκέντρωση των λιπαρών οξέων, η οποία όταν είναι μεγάλη παρεμποδίζεται η ορθή λειτουργία του συστήματος και αναστέλλονται οι βιολογικές αντιδράσεις καθώς τα λιπαρά οξέα σε μεγάλες συγκεντρώσεις καθίστανται τοξικά για τους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς.

Οξικογένεση

Στο τρίτο στάδιο της αναερόβιας επεξεργασίας, την οξικογένεση, τα υπόλοιπα προϊόντα της οξεογένεσης (προπιονικό, n-βουτυρικό και βαλερικό οξύ) μετατρέπονται από τους οξικογόνους μικροοργανισμούς σε υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα και οξικό οξύ. Το υδρογόνο διαδραματίζει πολύ σημαντικό μεσολαβητικό ρόλο στη διεργασία αυτήν, καθώς η αντίδραση θα πραγματοποιηθεί μόνο αν η μερική πίεση του υδρογόνου είναι αρκετά χαμηλή ώστε να επιτρέπεται θερμοδυναμικά η μετατροπή των οξέων. Η μείωση αυτή της μερικής πίεσης πραγματοποιείται από τα βακτήρια του υδρογόνου και συνεπώς η συγκέντρωση του υδρογόνου στο χωνευτή αποτελεί ένδειξη της υγείας του. Στον Πίνακα 5 φαίνονται όλες οι

αντιδράσεις διάσπασης των λιπαρών οξέων προς οξικό οξύ. Όπως είναι φανερό, είναι όλες ενδόθερμες και απαιτούν μεγάλα ποσά ελεύθερης ενέργειας. Για να είναι δυνατή η διάσπαση των λιπαρών οξέων μικρού μοριακού βάρους είναι απαραίτητη η απομάκρυνση της παραγόμενης ποσότητας του υδρογόνου. Αυτό απομακρύνεται από τους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς, οι οποίοι το καταναλώνουν επιτρέποντας τη δράση των οξικογόνων μικροοργανισμών.

Πίνακας 5 : Χημικές αντιδράσεις παραγωγής οξικού οξέος και η ενεργειακή τους απόδοση(Angelidaki et al., 2002)

Υπόστρωμα	Αντίδραση	ΔG^o (kJ / αντίδραση)
H ₂ , HCO ₃ ⁻	4H ₂ + CO ₂ ⇒ CH ₄ + 2H ₂ O	-130.4
Προπιονικό οξύ C	CH ₃ CH ₂ COOH + 2H ₂ O ⇒ CH ₃ COOH + 3H ₂ + CO ₂	+76.1
Βουτυρικό οξύ	CH ₃ CH ₂ CH ₂ COOH + 2H ₂ O ⇒ CH ₃ COOH + 3H ₂	+48.1
Παλμιτικό οξύ	C ₇ H ₅ O ₂ - + 7H ₂ O ⇒ 53 3CH ₃ COOH + 3H ₂ + CO ₂ + OH ⁻	

Μεθανιογένεση

Η μεθανιογένεση αποτελεί το τελευταίο στάδιο της αναερόβιας αποικοδόμησης. Το στάδιο αυτό πραγματοποιείται από τα μεθανιογόνα βακτήρια, τα οποία είναι αυστηρά αναερόβιοι μικροοργανισμοί.

Η μεθανιογένεση αποτελεί το καθοριστικό στάδιο της διεργασίας, καθώς οι μεθανιογόνοι μικροοργανισμοί είναι εκείνοι που αναπτύσσονται με τον πιο βραδύ ρυθμό και είναι πολύ ευαίσθητοι στις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών, καθώς και σε αρκετές οργανικές και ανόργανες ενώσεις οι οποίες δρουν είτε παρεμποδιστικά είτε αναστέλλουν την παραγωγή μεθανίου. Έχει διαπιστωθεί ότι υποστρώματα για τους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς είναι το διοξείδιο του άνθρακα μαζί με το υδρογόνο, το οξικό οξύ, η μεθανόλη, οι μεθυλαμίνες και το διμεθυλσουλφίδιο. Ωστόσο, το μεθάνιο παράγεται κυρίως μέσω του οξικού οξέος, του διοξειδίου του άνθρακα και του υδρογόνου. Σε αναερόβιους αντιδραστήρες που επεξεργάζονται ιλύ, το 65-70% του παραγόμενου μεθανίου προέρχεται από την κατανάλωση οξικού οξέος ενώ το υπόλοιπο 30-35% του μεθανίου προέρχεται από την αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα από το υδρογόνο. (Ζαχαρίου, 2016)

1.6 ΙΛΥΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

Το υπόλειμα που συσσωρεύεται κατά την επεξεργασία των αποβλήτων και είναι πλούσιο σε στερεά καλείται ιλύς. Η τυπική ιλύς λυμάτων περιλαμβάνει πρωτογενή λάσπη διαχωρισμένη από λύματα κατά την πρωτοβάθμια καθίζηση και τη βιολογική περίσσεια ιλύος από το σύστημα ενεργούς ιλύος (δευτερογενής λάσπη). Τα χαρακτηριστικά της ιλύος λυμάτων διαφέρουν κάπως ανά διαφορετική χώρα και περιοχή π.χ. λόγω νερού, κατανάλωσης και τοπικής βιομηχανίας. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι μέσες συγκεντρώσεις κύριων συστατικών της πρωτογενούς ιλύος λυμάτων. Τα ολικά στερεά (TS) είναι συνήθως χαμηλά και ο όγκος λάσπης υψηλός, εκτός εάν αφαιρεθεί λίγο νερό πριν από την επεξεργασία ιλύος. Η βιολογική σταθεροποίηση της ιλύος στοχεύει στην αποσύνθεση των πτητικών στερεών (VS), το οργανικό περιεχόμενο της ιλύος και επακόλουθη μείωση του όγκου της λάσπης. (Luostarinen et al.2009)

Πίνακας 6 : Μέση συγκέντρωση κύριων συστατικών πρωτογενούς ιλύος λυμάτων.

Παράμετρος / Συστατικό	Συγκέντρωση (mg/L)
TS (ολικά στερεά)	700
TDS (ολικά διαλυμένα στερεά)	500
SS (αιωρούμενα στερεά)	200
N (Άζωτο)	40
P (Φώσφορος)	10
Αλκαλικότητα (ως CaCO ₃)	100
Λίπος	100
BOD ₅	200

Πηγή : (<http://www.thewatertreatments.com>, 2021)

Η ιλύς λυμάτων περιέχει υψηλό ποσοστό οργανικής ύλης (60-70% της ξηράς ύλης) και θρεπτικά συστατικά όπως φωσφόρο και άζωτο, τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν για γεωργική χρήση εάν δεν περιέχονται στην λάσπη βάρεια μέταλλα και άλλοι ρύποι. Η διαδικασία αναερόβιας πέψης είναι μια πολύ γνωστή τεχνολογία που βελτιώνει την ποιότητα των στερεών για γεωργική χρήση, ενώ παράλληλα παράγει βιοαέριο που μπορεί να τροφοδοτήσει μεταξύ 40-60% της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία ενός ΕΕΛ. Έχουν προταθεί διαφορετικές στρατηγικές για την αύξηση της παραγωγής βιοαερίου και τη βελτιστοποίηση της αναερόβιας πέψης ιλύος λυμάτων. Μια από αυτές είναι η συγχώνευση της με άλλα οργανικά απόβλητα, αυξάνοντας παράλληλα το φορτίο βιοαποικοδομήσιμης οργανικής ύλης και βελτιώνοντας τις βιοχημικές συνθήκες των διαφόρων πληθυσμών μικροοργανισμών που αναπτύσσονται. (Silvestre et al 2011)

Η ιλύς χαρακτηρίζεται συνήθως από τη χαμηλή ικανότητα χώνευσης και χαμηλή απόδοση σε παραγωγή βιοαερίου. Ως εκ τούτου, η απόδοση των συστημάτων της αναερόβιας χώνευσης (AD)

μπορεί να είναι περιορισμένη από μία μόνο τροφοδοσία. Η συνδυασμένη χώνευση της ιλύος μαζί διαφορετικές πηγές αποβλήτων οργανικής προέλευσης έχει αποδειχθεί πλεονεκτική στην παραγωγή του βιοαερίου (Davidson et al., 2013). Η ιλύς συνήθως χαρακτηρίζεται από χαμηλό λόγο C: N (μικρότερο από 10) και σχετικά χαμηλό ποσοστό αναερόβιας βιοαποικοδομησιμότητας. Η προσθήκη πλούσιου σε άνθρακα υλικού συγχώνευσης μπορεί δυνητικά να βελτιώσει την αναλογία C: N της πρώτης ύλης, σε σχέση με το ιδανικό εύρος (20-30) για τη βέλτιστη απόδοση της αναερόβιας χώνευσης (Luostarinen et al.2009)

1.7 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΛΙΠΙΔΙΩΝ & ΕΣΧΑΡΙΣΜΑΤΩΝ

Προκειμένου να μπορέσει να προσδώσει ενεργειακή και οικονομική αξία στην ιλύ που παράγεται στις ΕΕΛ, πολλοί ερευνητές δοκίμασαν πιλότικα προγράμματα αναερόβιας συγχώνευσης της ιλύος με τα λίπη που συλλέγονται στην πρωτοβάθμια επεξεργασία.

Η αναερόβια κοινή χώνευση της ιλύος λυμάτων με άλλα θρεπτικά υποστρώματα έχει αναφερθεί ότι προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με την ξεχωριστή χώνευση κάθε υλικού, όπως μειωμένο κόστος (μία μονάδα για αρκετά υλικά) αυξημένη αποσύνθεση των επεξεργασμένων υλικών εξαιτίας συνεργιστικών επιδράσεων, καλύτερη υγρασία και θρεπτικό περιεχόμενο και διάλυση περιοριστικών ενώσεων όπως η αμμωνία και αποσύνθεση προϊόντων από λιπίδια, καθώς και αυξημένη παραγωγή βιομεθανίου. (Luostarinen et al.2009)

Η ιλύς από λιποπαγίδες αποτελείται από λιπαρές ύλες οι οποίες διαχωρίζονται από λύματα για παράδειγμα εστιατορίων ή κουζινών ιδρυμάτων. Παλαιότερα, κατά κύριο λόγο ενταφιάζονταν αλλά εξαιτίας της αυστηροποίησης της περιβαλλοντικής νομοθεσίας, όπως η οδηγία της ΕΕ για τον ενταφιασμό βιοδιασπώμενων αποβλήτων (31/1991/EU), αυτή η πρακτική πλέον απαγορεύεται. Μία άλλη διαδεδομένη πρακτική για παρόμοια υλικά προς αποσύνθεση είναι η κομποστοποίηση. Σε ότι αφορά όμως την αποσύνθεση ιλύος από λιποπαγίδες δεν είναι μία τεχνικά κατάλληλη λύση καθώς υπάρχει υψηλό ποσοστό υγρασίας που δυσκολεύει την χρήση αυτής της μορφής επεξεργασίας. Η αναερόβια χώνευση είναι καλύτερη επιλογή καθώς επιτρέπει την επεξεργασία υγρών υλικών. (Luostarinen et al.2009)

Εργαστηριακές αναλύσεις εσχαρισμάτων από διάφορες ΕΕΛ απεκάλυψαν ένα υψηλό κλάσμα από πολύ εύκολα βιοδιασπώμενο οργανικό υλικό. Πειράματα πιλοτικής κλίμακας έδειξαν την εφικτότητα της αναερόβιας χώνευσης εσχαρισμάτων με ισχυρή προοπτική παραγωγής μεθανίου περίπου 600 NI βιοαερίου (στο 60-62 % CH₄ v/v) ανά kg VS που προστέθηκαν, αλλά απεκάλυψαν επίσης την ευαισθησία της διεργασίας στην υπερφόρτωση κατά την προκαταρκτική περίοδο. Εξαιτίας της σχετικά μικρής παραγωγής εσχαρισμάτων ωστόσο, η προσθήκη ενός χωνευτήρα αποκλειστικά για τα εσχαρίσματα θα ήταν πιθανότατα απρόσφορη οικονομικά σε βιομηχανικό επίπεδο. Συγχώνευση σε

υπάρχουσες μονάδες χώνευσης, για παράδειγμα με ιλύ λυμάτων και/ή άλλα απόβλητα θα ήταν πιο ρεαλιστική εφόσον τα εσχαρίσματα είχαν υποστεί κατάλληλη προ-επεξεργασία. (Le Hyaric et al.2010)

Στερεά απόβλητα όπως τα εσχαρίσματα και τα απόβλητα από λιποπαγίδες δημιουργούνται από τις διεργασίες προεπεξεργασίας των αστικών λυμάτων. Εξαιτίας της σχετικά χαμηλής παραγωγής εσχαρισμάτων στις υφιστάμενες ΕΕΛ σε σύγκριση με την παραγωγή ιλύος, λίγη προσοχή έχει δοθεί ως τώρα σε αυτό το είδος αποβλήτου. Ωστόσο, η αυξανόμενη παραγωγή η οποία αναμένεται χάρη στις τεχνολογικές εξελίξεις στις ΕΕΛ (συγκεκριμένα βιοαντιδραστήρες μεμβρανών MBR) απαιτεί επεξεργασία για τα λεπτά εσχαρίσματα (προϊόντα κοσκίνισης) που αναμένεται να παράγονται σε όλο και μεγαλύτερες ποσότητες.(Le Hyaric et al,2010)

Οι πρωτεΐνες και οι υδατάνθρακες μπορούν να μετατραπούν σε βιοαέριο με 50–58% μεθάνιο ενώ τα λίπη μπορούν να μετατραπούν σε βιοαέριο με 66–73% μεθάνιο. Τα αποτελέσματα από μελέτες πλήρους, εργαστηριακής και πιλοτικής κλίμακας δείχνουν ότι η προσθήκη αποβλήτου από λιποσυλλέκτες σε αντιδραστήρες όπου χωνεύεται ιλύς λυμάτων προκαλεί αύξηση του δυναμικού παραγωγής αερίου της πρώτης ύλης χώνευσης. Αυτή η αύξηση της παραγωγής αερίου, ωστόσο, μπορεί να ποικίλει δραστικά ανάλογα με την ποσότητα λιπαρών υλών που προστίθεται, τη διαμόρφωση του αντιδραστήρα, την ένταση ανάμιξης και πιθανώς άλλες μεταβλητές (Hunter Long et al.2012)

Τα αποτελέσματα για παράδειγμα της εργασίας των C.Wan et al(2011) έδειξαν ότι η ημερήσια απόδοση μεθανίου σε σταθερή κατάσταση ήταν 598 L / kg VS όταν προστέθηκαν ταυτόχρονα ιλύς λυμάτων και λίπη-έλαια (64% του συνολικού VS), το οποίο ήταν 137% υψηλότερο από αυτό που προέκυψε από την πέψη της ιλύος μόνης. Με υψηλότερη προσθήκη FOG* (74% του συνολικού VS), η χώνευση αρχικά απέτυχε, έπειτα -αργά αυτοανακτήθηκε. (*Λίπη, λάδια και γράσο) Ωστόσο, η απόδοση μεθανίου ήταν μόνο περίπου 50% ενός υγιούς αντιδραστήρα με τον ίδιο ρυθμό οργανικής φόρτωσης. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7 τα δείγματα λίπους (GW) αν και είχαν διαφορετική σύσταση(38%, 70%, 38%, και 24% λίπος επί τοις εκατό των VS), όλα είχαν υψηλότερο περιεχόμενο οργανικής ύλης (COD και VS) και αναλογία C / N από την κοινή ιλύ (SS).

Πίνακας 7 : Χαρακτηρισμός λάσπης από λιποσυλλέκτες (GW, 4 δείγματα) και συμβατικής ιλύος λυμμάτων (SS). (Silvestre et al.2011)

Παράμετροι	Μονάδες	GW1	GW2	GW3	GW4	SS
TS	g/kg	146 ± 1	160 ± 4	126 ± 1	75 ± 3	32 ± 5
VS	g/kg	123 ± 1	143 ± 3	101 ± 1	63 ± 2	23 ± 4
VS	%TS	84%	89%	80%	84%	70%
COD	g/kg	298 ± 20	321 ± 30	258 ± 37	177 ± 5	44 ± 8
Λίπος	g/kg	47 ± 1	100 ± 4	38 ± 2	15 ± 2	0,2 ± 0.05
Λίπος	%VS	38%	70%	38%	24%	1%
SO ₂	mg/kg	61 ± 4	37 ± 1	42 ± 3	127 ± 1	19 ± 0
TKN	mg/kg	4287 ± 47	3556 ± 51	3166 ± 53	3428 ± 53	2000 ± 294
NH ₄ ⁺	mg/kg	659 ± 12	348 ± 4	377 ± 8	353 ± 24	841 ± 109
NH ₄ ⁺	%TKN	15%	10%	12%	10%	42%
C/N	g/g	20	39	23	10	10

Η ανησυχία για την αναερόβια συγχώνευση είναι ότι τα λιπαρά οξέα μακράς αλύσου (LCFA) μπορεί να έχουν επιζήμια επίδραση στα μεθανογόνα βακτήρια όταν εισάγονται σε επαρκώς υψηλές συγκεντρώσεις ή ρυθμούς φόρτωσης. Ωστόσο, οι ερευνητές πρότειναν ότι ο μηχανισμός για την αναστολή των LCFA των μεθανογενών και ακετογονικών βακτηρίων οφείλεται σε επιφανειοδραστική επίδραση που προκαλεί τα LCFA να επηρεάσουν την κυτταρική μεμβράνη. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι ακόμη και όταν η μεθανογενής δραστηριότητα αναστέλλεται σοβαρά λόγω της φόρτισης LCFA, τα αναερόβια βακτήρια ήταν ακόμη σε θέση να συγχωνεύσουν το προσροφημένο LCFA. (Long et al.2012) Τα αποτελέσματα μίας έρευνας δείχνουν ότι μια αργή αύξηση της δόσης των αποβλήτων λιπών θα μπορούσε να είναι μια στρατηγική που ευνοεί τον εγκλιματισμό της βιομάζας σε πλούσιο σε λίπος υπόστρωμα, αυξάνει την αποικοδόμηση των λιπαρών οξέων μακράς αλυσίδας και μειώνει το ανασταλτικό αποτέλεσμα του τελευταίου. Συνεπώς η συγκεκριμένη περιοριστική δράση θεωρούνταν για καιρό μη αναστρέψιμη, αλλά πλέον γνωρίζουμε ότι μπορεί να αναστραφεί. (Silvestre et al.2011)

2. Στόχος της πτυχιακής

Οι ΕΕΛ είναι ιδιαιτέρως ενεργοβόρες εγκαταστάσεις. Το περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος της ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία μιας ΕΕΛ μπορεί να μειωθεί με αναερόβια χώνευση παραπροϊόντων της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας αποβλήτων με σκοπό την παραγωγή ενέργειας (βιοαέριο). Σε αυτό το πλαίσιο στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης των σωματιδίων που μπορούν να ανακτηθούν από αστικά λύματα, από τα αρχικά στάδια μιας εγκατάστασης επεξεργασίας αποβλήτων.

Αναλυτικότερα, οι επιμέρους στόχοι της εργασίας ήταν:

1. Ο διαχωρισμός και η συλλογή σωματιδίων διαφορετικού μεγέθους από το ρεύμα τροφοδοσίας μιας εγκατάστασης επεξεργασίας αστικών λυμάτων.
2. Ο χαρακτηρισμός των δειγμάτων για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητάς τους σε συστατικά τα οποία ευνοούν την παραγωγή βιοαερίου.
3. Η διερεύνηση του δυναμικού παραγωγής μεθανίου κατά την αναερόβια χώνευσή τους και ο συσχετισμός με τη σύσταση των δειγμάτων.
4. Η ταυτοποίηση των συγκεκριμένων μεγεθών σωματιδίων που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο δυναμικό για ενεργειακή αξιοποίηση.

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

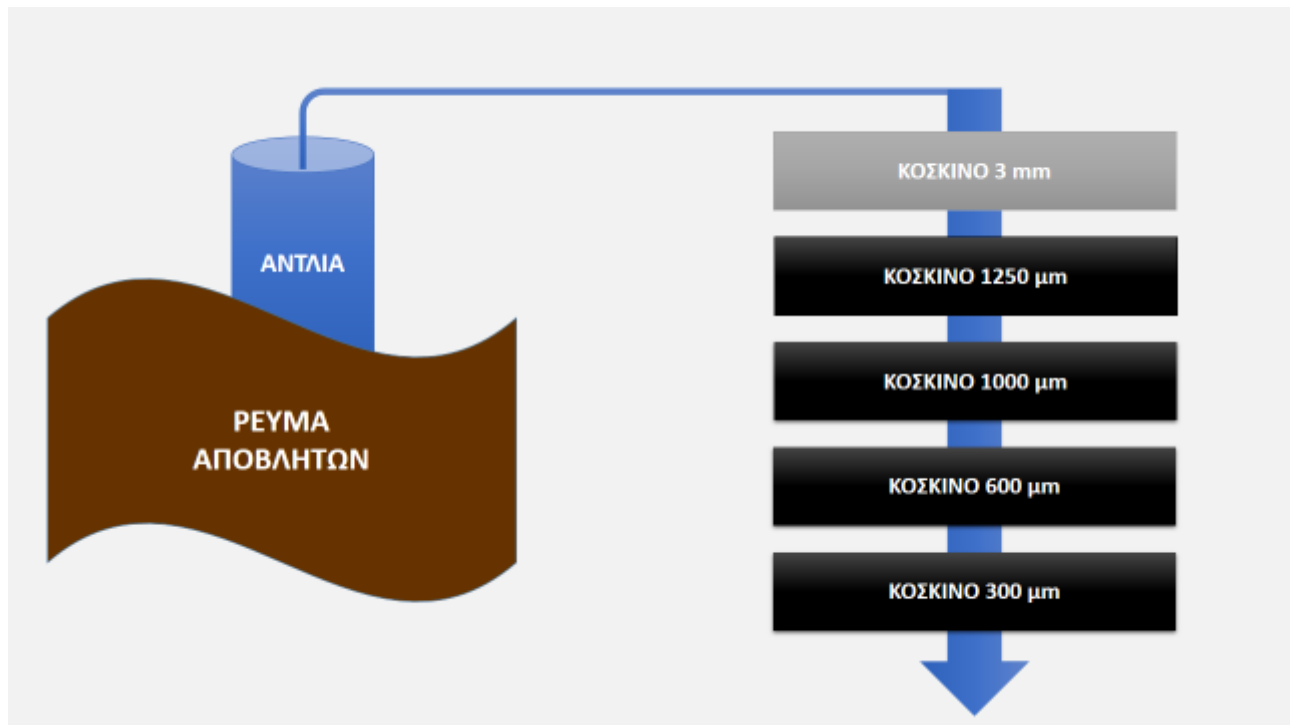
Το πειραματικό μέρος της έρευνας μας περιλάμβανε συλλογή δειγμάτων από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Θεσσαλονίκης, διαχωρισμό των δειγμάτων ανάλογα με την τάξη μεγέθους των, αναλύσεις για την διακρίβωση της σύστασης των δειγμάτων ως προς διάφορες παραμέτρους και τέλος αναερόβια χώνευση και μετρήσεις του παραγόμενου βιοαερίου.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται όλες οι δραστηριότητες που αφορούν την πειραματική διαδικασία καθώς και οι βασικές αρχές των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται σε πίνακες και διαγράμματα και σχολιάζονται στο κεφάλαιο Αποτελέσματα και Συζήτηση.

3.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Για τη συλλογή του δείγματος των στερεών υλικών τοποθετήθηκε μία υποβρύχια αντλία με ικανότητα άντλησης 40 L υγρών αποβλήτων το λεπτό, στο ρεύμα εισόδου της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλονίκης. Απόβλητα τροφοδοτούνταν σε μία διάταξη με διαδοχικά κόσκινα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 10. Η διάταξη αυτή κατασκευάστηκε προκειμένου να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός των σωματιδίων του ρεύματος, ως προς τις διαστάσεις τους και στην συνέχεια να διερευνηθούν οι διαφορές αυτών ως προς τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά και την δυνατότητα παραγωγής βιομεθανίου. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκαν κόσκινα με μέγεθος πόρων 3000-1250-1000-600-300 μm και παραλήφθηκαν οι εξής ποσότητες από τις διάφορες κατανομές σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις :

- 1) <1250 μm (22,14g)
- 2) 1000-1250 μm (21,46g)
- 3) 600-1000 μm (28,93g)
- 4) 300-600 μm (25,62g)



Σχήμα 10 : Σκαρίφημα διάταξης άντλησης και κοσκίνησης υγρου αποβλήτου.

Τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων που μετρήθηκαν περιελάμβαναν τον προσδιορισμό της συγκέντρωσής τους σε οργανικό φορτίο, άζωτο και φώσφορο με φασματοφωτόμετρο Hack-Dr Lange DR2800, αλλά και τον χαρακτηρισμό της περιεκτικότητάς τους σε υγρασία, πτητικά στερεά, λίπη και ίνες.

3.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΣΧΑΡΙΣΜΑΤΩΝ

Προσδιορισμός COD

Προκειμένου να προσδιοριστεί το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος δοκιμής της εταιρίας Hack (LCK114, με εύρος προσδιορισμού O₂ 150-1000 mg/L). Σύμφωνα με τη μέθοδο, οι οξειδωτικές ενώσεις αντιδρούν με διάλυμα θειικού οξέος - διχρωμικού καλίου παρουσία καταλύτη θειικού αργύρου από όπου παράγεται το ιόν Cr⁶⁺ του οποίου η συγκέντρωση προσδιορίζεται φωτομετρικά. Για το σκοπό αυτό, σε 20 mL απιονισμένου νερού προστίθενται 2 g από το κάθε δείγμα και ακολουθεί φυγοκέντριση του μίγματος για 20 min. Στη συνέχεια λαμβάνεται όγκος 2 mL του υπερκείμενου υγρού, το οποίο διαβιβάζεται στο διάλυμα της αντίδρασης. Ακολουθεί ήπια ανακίνηση και θέρμανση στους 148°C για δύο ώρες. Μόλις το διάλυμα ψυχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ανακινηθεί, προσδιορίζεται η συγκέντρωση του COD φωτομετρικά.

Προσδιορισμός αμμωνιακών ιόντων

Για τη μέτρηση των αμμωνιακών ιόντων χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη δοκιμή της εταιρίας Hack LCK303, με εύρος προσδιορισμού NH_4^+ 2,5-60 mg/L. Τα αμμωνιακά ιόντα αντιδρούν σε τιμή $\text{pH}=12,5$ με υποχλωριώδη και σαλικυλικά ιόντα για να σχηματίσουν το κυανό ινδοφαινόλιο. Έτσι, σε 20 mL απιονισμένου νερού προστίθονται 2 g από το κάθε δείγμα και ακολουθεί φυγοκέντριση για 20 min. Στη συνέχεια λαμβάνεται όγκος 0,2 mL του υπερκείμενου υγρού και διαβιβάζεται στο διάλυμα της αντίδρασης. Ακολουθεί ήπια ανακίνηση του διαλύματος της αντίδρασης και μετά την πάροδο χρόνου 15 min η συγκέντρωση των NH_4^+ μπορεί να προσδιοριστεί φωτομετρικά.

Προσδιορισμός φωσφορικών ιόντων

Προκειμένου να προσδιοριστεί η συγκέντρωση των φωσφορικών ιόντων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της εταιρίας Hack LCK 348, με εύρος προσδιορισμού PO_4^{3-} 6-60 mg/L. Τα φωσφορικά ιόντα αντιδρούν με μολυβδαινικά και ιόντα αντιμονίου σε όξινο διάλυμα για να σχηματίσουν το αντιμονυλ-φωσφομολυβδαινικό σύμπλοκο το οποίο παρουσία ασκορβικού οξέος ανάγεται σε κυανό φωσφομολυβδαίνιο. Σύμφωνα με τη μέθοδο, σε 20 mL απιονισμένου νερού προστίθονται 2 g από το κάθε δείγμα, ακολουθεί φυγοκέντριση για 20 min και στη συνέχεια λαμβάνεται όγκος 0,5 mL του υπερκείμενου υγρού που διαβιβάζονται στο διάλυμα της αντίδρασης. Ακολουθεί έντονη ανάδευση και θέρμανση του διαλύματος της αντίδρασης για 30 min στους 120°C ακολουθεί ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου για να προστεθούν τελικά τα αντιδραστήρια B και C της δοκιμής, σύμφωνα με το προτεινόμενο πρωτόκολλο. Μετά την πάροδο χρόνου 10 min ακολουθεί ανακίνηση του διαλύματος και η συγκέντρωση των PO_4^{3-} μπορεί να προσδιοριστεί φωτομετρικά.

Προσδιορισμός ολικών στερεών (Total Solids, TS) και πτητικών στερεών (Volatile Solids, VS)

Σε πορσελάνινες κάψες οι οποίες έχουν ξηρανθεί στους 105°C για μία ώρα και προζυγιστεί προστίθεται ποσότητα αεροξηρανθέντος δείγματος περίπου 5g. Στη συνέχεια ακολουθεί ξήρανση του δείγματος για 24 ώρες στους 105°C και τελικά το δείγμα ψύχεται σε ξηραντήρα ώστε να ζυγιστεί τελικά. Αφού αφαιρεθεί η μάζα της πορσελάνινης κάψας το υπόλειμμα που παραμένει ανήκει στα ολικά στερεά (TS).

$$(\%)\text{TS} = (\text{W}_{\text{total}} - \text{W}_{\text{dish}} / \text{W}_{\text{sample}} - \text{W}_{\text{dish}}) * 100$$

Ακολούθως το δείγμα τερφοποιείται σε κατάλληλο φούρνο σε θερμοκρασία 600°C για 2 ώρες. Η πορσελάνινη κάψα που περιέχει το δείγμα ψύχεται σε ξηραντήρα ώστε να ζυγιστεί τελικά και αφού

αφαιρεθεί η μάζα της πορσελάνινης κάψας το υπόλειμμα που παραμένει ανήκει στα πτητικά στερεά (VS).

$$(\%)VS = (W_{\text{total}} - W_{\text{volatile}}/W_{\text{sample}} - W_{\text{dish}})*100$$

Προσδιορισμός λίπους με τη μέθοδο Soxhlet

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης σε λιπαρά συστατικά χρησιμοποιείται συσκευή Soxhlet,, όπου πραγματοποιείται η εκχύλιση των λιπαρών συστατικών του κάθε δείγματος με πετρελαϊκό αιθέρα. Σε κατάλληλο περιέκτη (thimble holder) προστίθονται 10g δείγματος και σε προζυγισμένη σφαιρική φιάλη που έχει ξηραθεί προηγουμένως στους 105°C για μία ώρα τοποθετούνται περίπου 170 mL πετρελαϊκού αιθέρα. Το μίγμα θερμαίνεται και πραγματοποιούνται 18 κύκλοι εκχύλισης. Αφού αφαιρεθεί ο πετρελαϊκός αιθέρας από τη σφαιρική φιάλη και απομείνει το λίπος που εκχυλίστηκε από το δείγμα, ακολουθεί ξήρανση της φιάλης στους 105°C μέχρι να απομακρυνθούν και τα τελευταία υπολείμματα του πετρελαϊκού αιθέρα. Η μάζα των λιπαρών συστατικών προσδιορίζεται κατόπιν ζύγισης και υπολογίζεται η % περιεκτικότητα τους σύμφωνα με τη σχέση:

$$(\%) F = [(m' - m)/E]*100$$

όπου:(%) F: % περιεκτικότητα του δείγματος σε λίπος,

m': μεικτό βάρος φιάλης κατόπιν της εκχύλισης,

m: βάρος της φιάλης πριν την εκχύλιση,

E: μάζα δείγματος

Σε κατάλληλη συσκευή πραγματοποιείται η εκχύλιση των λιπαρών συστατικών του κάθε δείγματος από πετρελαϊκό αιθέρα, εφόσον σε κατάλληλο περιέκτη (thimble holder) διαβιβάζονται 10g δείγματος.

Εκτίμηση του περιεχόμενου σε άπεπτες φυτικές ίνες- Μέθοδος Gerhardt

Για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας των δειγμάτων σε ίνες, χρησιμοποιείται η μέθοδος Gerhardt για τον προσδιορισμό ιών κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και λιγνίνης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η διάταξη Gerhardt και εφαρμόζεται η παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά προζυγισμένη ποσότητα δείγματος τοποθετείται σε δειγματοφορέα (fibrebag) που προηγουμένως έχει υποστεί ξήρανση για μία ώρα στους 105°C. Δείγματα με περιεκτικότητα σε λίπος πάνω από 10% πρέπει προηγουμένως να υφίστανται απολίπανση με πετρελαϊκό αιθέρα (πλύσεις 3x). Ο δειγματοφορέας στη συνέχεια τοποθετείται σε διάταξη βρασμού και ακολουθούν τα εξής στάδια επεξεργασίας:

Φάση 1: Βρασμός των δειγμάτων σε 360 mL H₂SO₄ (0,13 mol/L) για μισή ώρα και στη συνέχεια απομάκρυνση των υπολειμμάτων οξέος με ζεστό νερό (πλύσεις 3x).

Φάση 2: Βρασμός των δειγμάτων σε 360 mL NaOH (0,313 mol/L) για μισή ώρα και στη συνέχεια απομάκρυνση των υπολειμμάτων της βάσης με ζεστό νερό (πλύσεις 3x).

Φάση 3: Ο δειγματοφορέας απομακρύνεται από το σύστημα, ζυγίζεται μετά την πέψη και την ξήρανση στους 105°C για 4 ώρες (ή overnight). Στη συνέχεια το δείγμα με τον δειγματοφορέα τοποθετούνται σε προξηραμένη κάψα και ακολουθεί αποτέφρωση για 4 ώρες στους 550°C.

Μετά την αποτέφρωση μετράται το βάρος της κάψας και της τέφρας. Η περιεκτικότητα του κάθε δείγματος σε φυτικές ίνες δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\% \text{ ίνες} = (m_3 - m_1 - m_4 - m_5) * 100 / m_2$$

όπου:

m₁, βάρος δειγματοφορέα (fibrebag)

m₂, βάρος δείγματος, g,

m₃, βάρος δειγματοφορέα και δείγματος μετά τον βρασμό με οξέα και ξήρανση στους 105°C , g,

m₄, βάρος δειγματοφορέα και δείγματος μετά την αποτέφρωση, g,

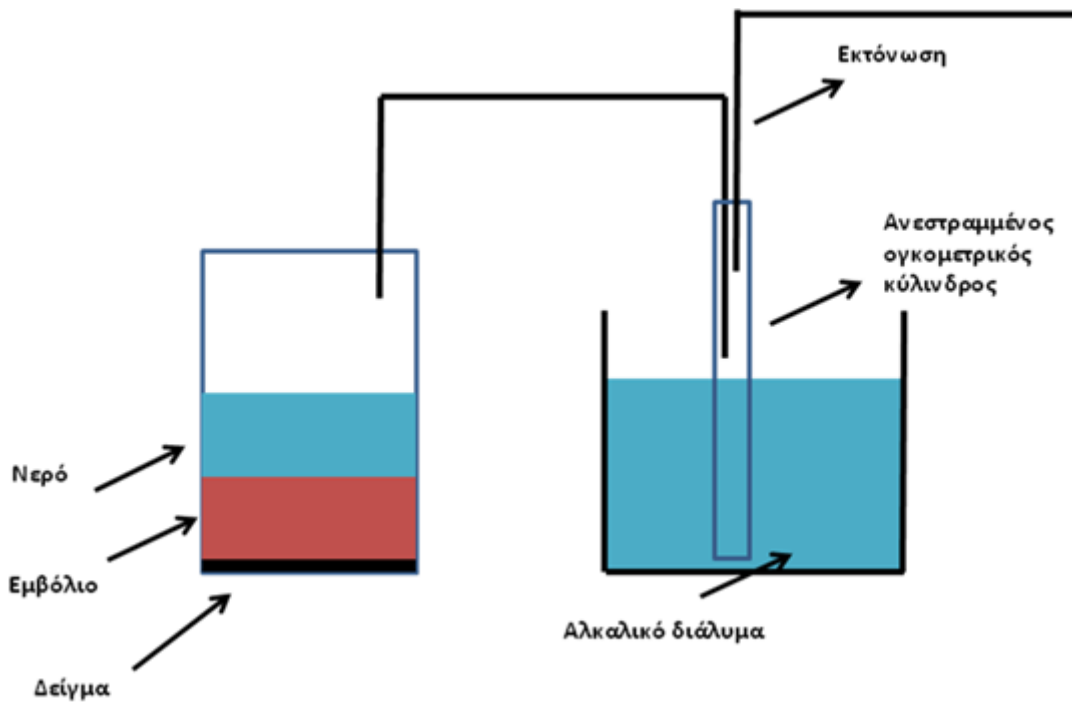
m₅, βάρος δειγματοφορέα μετά την αποτέφρωση, g.

3.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

Για την μελέτη της παραγωγής αερίου μια συγκεκριμένη ποσότητα κάθε δείγματος τοποθετήθηκε σε φιάλη 250 mL με κατάλληλη ποσότητα εμβολίου σε αναλογία που αντιστοιχούσε σε 1 gr πτητικών στερεών / 75 gr εμβολίου. Σε κάθε φιάλη στη συνέχεια προστέθηκαν 75 gr ύδατος. Ως εμβόλιο χρησιμοποιήθηκε δείγμα από τη δεξαμενή αναερόβιας χώνευσης της ιλύος στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων από την οποία συλλέχθηκαν τα δείγματα των στερεών σωματιδίων.

Οι φιάλες τοποθετήθηκαν σε θάλαμο σταθερής θερμοκρασίας που ρυθμίστηκε στους 37°C. Το παραγόμενο βιοαέριο μετρούνταν καθημερινά με τη μέθοδο εκτόπισης του ύδατος. Κάθε φιαλίδιο συνδέθηκε με ένα σύστημα που περιελάμβανε ένα ανεστραμμένο ογκομετρικό κύλινδρο 200 mL εντός δοχείου που περιείχε υδατικό διάλυμα NaOH. Το παραγόμενο αέριο προκαλούσε εκτόπιση ισοδύναμης ποσότητας ύδατος και αντίστοιχη πτώση της στάθμης του ύδατος εντός του ογκομετρικού σωλήνα. Γραφική απεικόνιση της διάταξης του πειράματος δίνεται στο Σχήμα 11.

Η στάθμη του ύδατος καταγραφόταν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και ακολουθούσε εκτόνωση του αερίου εντός του σωλήνα προκειμένου να επανέλθει η στάθμη στην αρχική της θέση και να συνεχιστεί η διαδικασία. Τα μίγματα εντός των φιαλιδίων ανακινούταν μια φορά την ημέρα. Η καταγραφή του παραγόμενου αερίου συνεχίστηκε για διάστημα 52 ημερών προκειμένου να ολοκληρωθεί η παραγωγή του.



Σχήμα 11 : Απεικόνιση διάταξης πειράματος εκτόπισης του ύδατος.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης ενότητας είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης των παραπροϊόντων που προκύπτουν κατά τα στάδια επεξεργασίας των λυμάτων σε μια ΕΕΛ με έμφαση στα προϊόντα εκείνα που παράγονται στα στάδια της προεπεξεργασίας όπως είναι η εσχάρωση και η λιποσυλλογή.

4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΣΧΑΡΙΣΜΑΤΩΝ

Προκειμένου να είναι εφικτή η αξιολόγηση της παραγωγής μεθανίου είναι σημαντικό να είναι γνωστές οι συστάσεις του αποβλήτου προς χώνευση ως προς διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης :

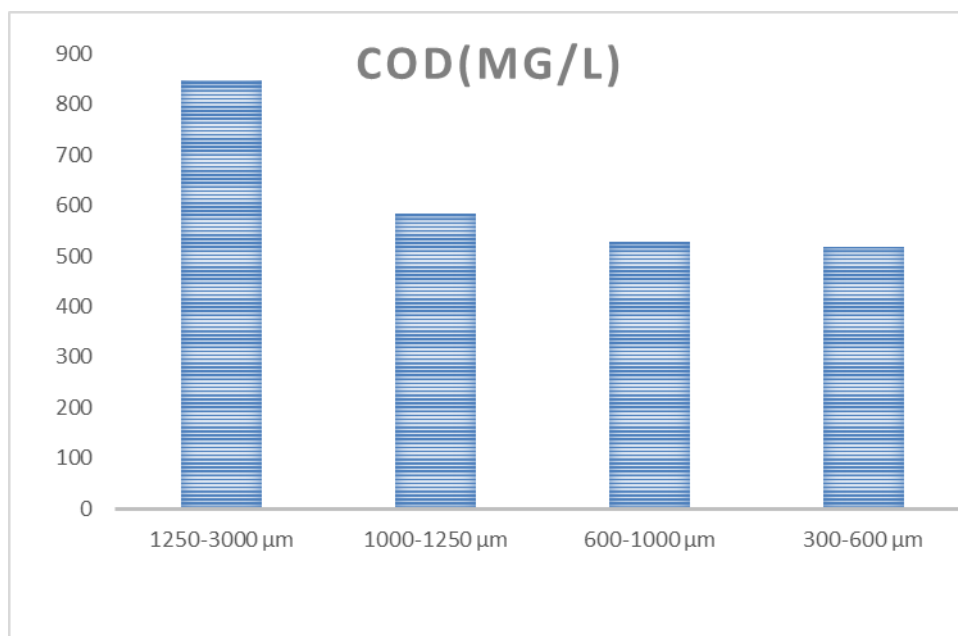
Το COD (Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο, Chemical Oxygen Demand) αποτελεί ίσως τον χαρακτηριστικότερο μακροσκοπικό δείκτη ρύπανσης και αναφέρεται στο σύνολο των ενώσεων/ρύπων (οργανικών και ανόργανων), που η οξείδωση τους θα προκαλέσει κατανάλωση του περιεχομένου οξυγόνου και επομένως οδηγεί σε ρύπανση. Στον Πίνακα 8 και το Σχήμα 12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης COD που διενεργήθηκε στα δείγματα που ελήφθησαν από τον βιολογικό καθαρισμό Θεσσαλονίκης.

Πίνακας 8 : Περιεκτικότητα COD των δειγμάτων αποβλήτου ΕΕΛ Θεσσαλονίκης.

Δείγματα	COD(mg/L)
1250-3000 μm	847
1000-1250 μm	583
600-1000 μm	527
300-600 μm	517

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 8 το οργανικό φορτίο αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος των σωματιδίων με το μεγαλύτερο κλάσμα να έχει την υψηλότερη τιμή COD (847mg/L) και το μικρότερο την χαμηλότερη (517mg/L). Πολλοί ερευνητές έχουν διεξάγει παρόμοιες αναλύσεις που αφορούν τα χαρακτηριστικά υγρών απόβλητων, ακολουθεί μία σύντομη ανασκόπηση των αποτελεσμάτων τους.

Σε αντίστοιχες μελέτες που διενεργήθηκαν αναλύσεις σύστασης COD εσχαρισμάτων, όπως στην εργασία των Rusten & Lundar,(2006) συλλέχθηκαν δείγματα υγρού αποβλήτου από 3 διαφορετικές δημοτικές ΕΕΛ στην Νορβηγία και έπειτα το υγρό απόβλητο διηθήθηκε. Το εσχάρισμα από υγρό απόβλητο που συγκρατήθηκε από φίλτρα με άνοιγμα από 55 ως 550 μm βρέθηκε να έχει μέση τιμή COD 128 mg/L στοιχείο που συμφωνεί με τα ευρήματα της παρούσας εργασίας καθώς το κλάσμα μεγέθους αυτής της μελέτης ήταν αισθητά μικρότερο και κατεπέκταση είχε χαμηλότερες τιμές COD. Σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων της Αυστρίας η περιεκτικότητα σε COD εκτιμήθηκε σε 547 mg/L (Malin et al., 2007) πολύ κοντά στις τιμές που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία. Επιπλέον σε μονάδες διαχείρισης λυμάτων του Cramlington το COD υπολογίστηκε σε 718,4 mg/L, ενώ σε αντίστοιχες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων του Hendon το COD υπολογίστηκε σε 562,2 mg/L (Heidrich et al., 2011).



Σχήμα 12 : Ραβδόγραμμα συγκέντρωσης COD ως προς το μέγεθος των σωματιδίων.

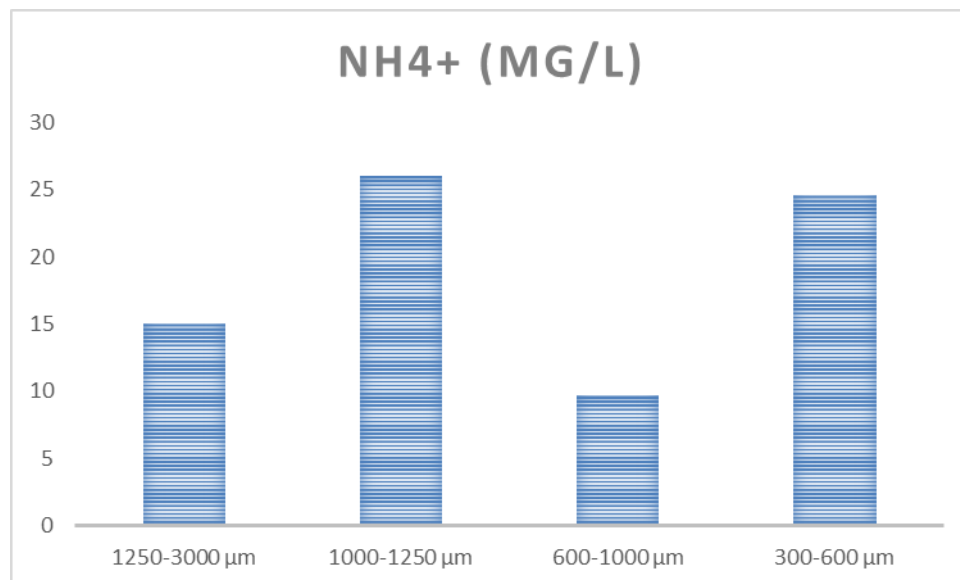
Το περιεχόμενο των αποβλήτων σε διαλυτά ανόργανα ιόντα (αμμωνία, νιτρικά, νιτρώδη, φωσφορικά) αναλύεται καθώς η παρουσία αυτών των στοιχείων είναι αναγκαία για την εύρυθμη ανάπτυξη και λειτουργία των αναερόβιων μικροοργανισμών, κατά το στάδιο της ενεργειακής αξιοποίησης των δειγμάτων. Θα πρέπει επιπλέον να τονιστεί ότι ο λόγος C:N αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την αυξημένη παραγωγή βιοαερίου.

Στον Πίνακα 9 και το Σχήμα 13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης αμμωνιακών ιόντων και στον Πίνακα 10 και το Σχήμα 14 τα αποτελέσματα της ανάλυσης φωσφορικών ιόντων.

Πίνακας 9 : Περιεκτικότητα σε αμμωνιακά ιόντα των δειγμάτων αποβλήτου ΕΕΛ Θεσσαλονίκης.

Δείγματα	NH ₄ ⁺ (mg/L)
1250-3000 μm	15,1
1000-1250 μm	26
600-1000 μm	9,72
300-600 μm	24,6

Παρατηρείται στον Πίνακα 9 όπως και στο διάγραμμα του Σχήματος 13 ότι η συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων δεν παρουσιάζει συσχέτιση με το μέγεθος των σωματιδίων των εσχαρισμάτων.



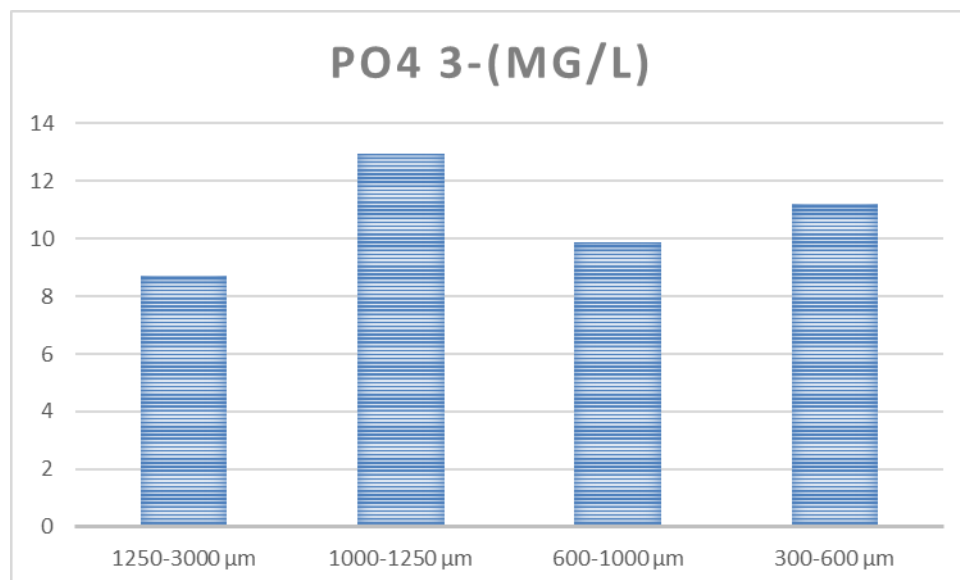
Σχήμα 13 : Ραβδόγραμμα συγκέντρωσης αμμωνιακών ιόντων ως προς το μέγεθος των σωματιδίων.

Αντίστοιχα, παρατηρείται στον Πίνακα 10 όπως και στο διάγραμμα του Σχήματος 14 ότι η συγκέντρωση φωσφορικών ιόντων δεν παρουσιάζει συσχέτιση με το μέγεθος των σωματιδίων των εσχαρισμάτων.

Πίνακας 10 : Περιεκτικότητα σε φωσφορικά ιόντα των δειγμάτων αποβλήτου ΕΕΛ Θεσσαλονίκης.

Δείγματα	PO ₄ ³⁻ (mg/L)
1250-3000 μm	8,72
1000-1250 μm	12,96
600-1000 μm	9,86
300-600 μm	11,2

Οι τιμές αμμωνιακών και φωσφορικών ιόντων συμφωνούν σε γενικές γραμμές με ευρήματα αναλύσεων από αντίστοιχες επιστημονικές εργασίες. Ενδεικτικά μπορεί να αναφερθεί ότι σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων της Αυστρίας υπολογίστηκε η περιεκτικότητα σε ολικό άζωτο 44 mg/L, φώσφορο σε 7.5 mg/L και το αμμωνιακό άζωτο σε 26 mg/L, ενώ οι αντίστοιχες μετρήσεις σε μονάδες της Σουηδίας έδειξαν περιεκτικότητα σε, ολικό άζωτο 40 mg/L, φώσφορο 6,4 mg/L και αμμωνιακό άζωτο 24 mg/L (Malin et al.,2007) Σε μονάδες διαχείρισης λυμάτων του Cramlington υπολογίστηκε το αμμωνιακό άζωτο με τη μέθοδο Kjeldahl 92,4 mg/L, ενώ σε αντίστοιχες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων του Hendon βρέθηκε το αμμωνιακό άζωτο με τη μέθοδο Kjeldahl 71,9 mg/L (Heidrich et al., 2011).



Σχήμα 14 : Ραβδόγραμμα συγκέντρωσης φωσφορικών ιόντων ως προς το μέγεθος των σωματιδίων.

Η εύρεση της συγκέντρωσης των περιεχομένων στερεών (αιωρούμενων- suspended solids, ανόργανων, πτητικών ή βιολογικών --volatile solids) προσδιορίζουν τον απαιτούμενο βαθμό κατεργασίας της παραγόμενης λάσπης. Στον Πίνακα 11 και το

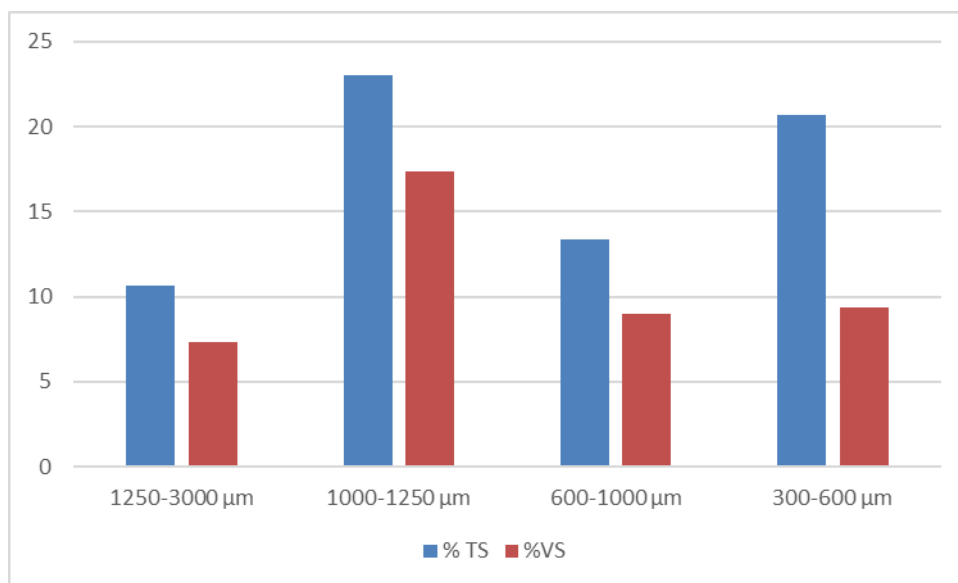
Σχήμα 15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης TS και VS που διενεργήθηκε στα ίδια δείγματα.

Πίνακας 11 : Περιεκτικότητα % σε ολικά (TS) και πτητικά (VS) στερεά των δειγμάτων αποβλήτου ΕΕΛ Θεσσαλονίκης.

Δείγματα	% TS	%VS
1250-3000 μm	10,67	7,33
1000-1250 μm	23,00	17,33
600-1000 μm	13,33	9,00
300-600 μm	20,67	9,33

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 11 και το Σχήμα 15 δεν εμφανίζεται συσχέτιση ανάμεσα στην συγκέντρωση πτητικών και ολικών στερεών και το μέγεθος των σωματιδίων των εσχαρισμάτων.

Σε έρευνα που διεξήχθη στην Νορβηγία ελήφθησαν δείγματα από 19 διαφορετικές Ε.Ε.Λ. και αναλύθηκε η περιεκτικότητα της λάσπης σε DS*, VS (*διαλυτά στερεά). Τα φιλτραρισμένα δείγματα φαίνεται να είχαν περιεκτικότητα σε DS 13,6-36,9%, με μέσο όρο 27,3% ποσοστά που μπορούν να συγκριθούν με τα ευρήματα TS της παρούσας εργασίας. Το περιεχόμενο VS της λάσπης κυμαινόταν από 84,4-96,5% των DS με μέσο όρο 80,8%. Όλα τα ποσοστά είναι αισθητά μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα δείγματα πρωτογενούς λάσπης με διακυμάνσεις για τα αντίστοιχα DS, VS, 0,5-6,6% και 73,7-90,1%. (Rusten et al, 2006)



Σχήμα 15 : Ραβδόγραμμα συγκέντρωσης % σε ολικά (TS) και πτητικά (VS) στερεά ως προς το μέγεθος των σωματιδίων.

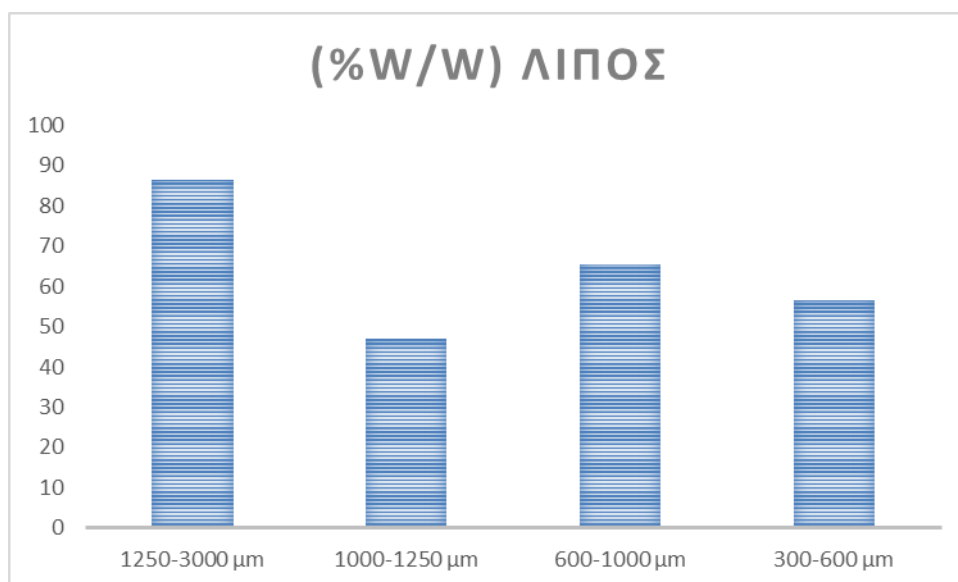
Αντίστοιχα αποτελέσματα αναλύσεων με την παρούσα εργασία βρέθηκαν επίσης σε έρευνα που έγινε από τους Heidrich et al,(2011) όπου τα πτητικά στερεά βρέθηκαν 9,53 % σε μονάδες του Cramlington ενώ σε αντίστοιχες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων του Hendon υπολογίστηκαν τα ολικά στερεά 30,4% και τα πτητικά στερεά 19,2% mg/L.

Τα λίπη αποτελούν ένα πολύ καλό υπόστρωμα για συνδυασμένη αναερόβια επεξεργασία τους με την περίσσεια ιλύος, προσφέροντας δύο πλεονεκτήματα την ελαττωμένη απόθεση τους στο περιβάλλον (έδαφος και ύδατα) αλλά και την ενισχυμένη παραγωγή βιοαερίου. Τα λίπη συνήθως εμφανίζουν υψηλότερο δυναμικό παραγωγής μεθανίου σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο συστατικό. Η αναερόβια χώνευση του λίπους έχει θεωρητική απόδοση που μπορεί να φτάνει στα 1450 mL/g σε σχέση με το αντίστοιχο δυναμικό παραγωγής βιοαερίου από πρωτεΐνες που μπορεί να φτάνει τα 950 mL/g και από υδατάνθρακες που φτάνει μέχρι και 850 mL/g. (Davidson et al., 2008). Τα αποτελέσματα αυτά. Στον Πίνακα 12 και το Σχήμα 16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης λίπους.

Όπως προκύπτει από τα δεδομένα που παρουσιάζονται τον Πίνακα 12 και το Σχήμα 16 δεν εμφανίζεται συσχέτιση ανάμεσα στην συγκέντρωση λίπους και το μέγεθος των σωματιδίων των εσχαρισμάτων.

Πίνακας 12 : Περιεκτικότητα % σε λίπος των δειγμάτων αποβλήτου ΕΕΛ Θεσσαλονίκης.

Δείγματα	(%w/w) Λίπος
1250-3000 μm	86,3
1000-1250 μm	47
600-1000 μm	65,6
300-600 μm	56,6



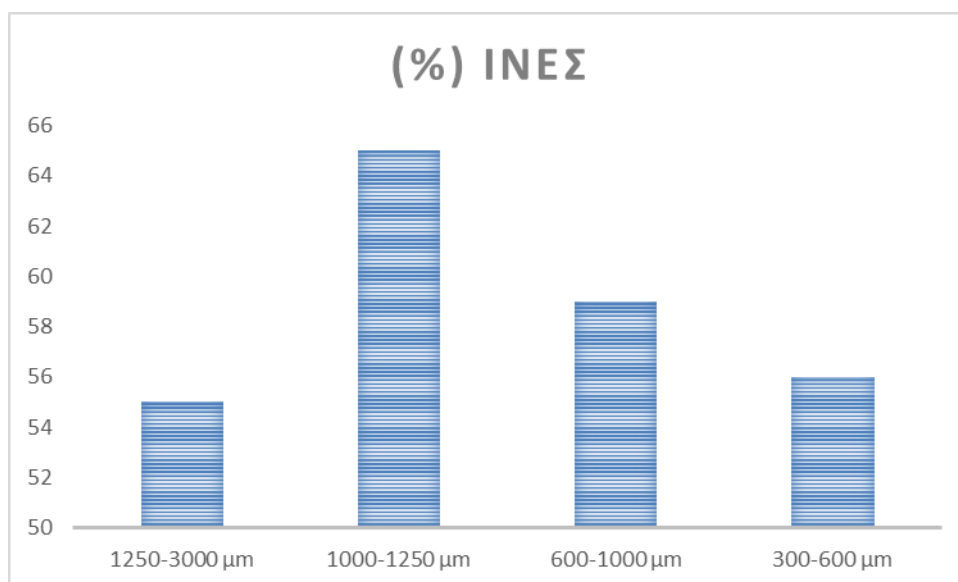
Σχήμα 16 : Ραβδόγραμμα συγκέντρωσης % σε λίπος ως προς το μέγεθος των σωματιδίων.

Η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε ινώδεις ουσίες αποτελεί σημαντικό παράγοντα που μπορεί να επηρεάσει το βαθμό ενεργειακής τους αξιοποίησης, αφού οι ινώδεις ουσίες αντιστοιχούν συνήθως σε συστατικά όπως η κυτταρίνη και η λιγνίνη που διασπώνται δύσκολα και επομένως έχουν μικρή απόδοση ως προς την παραγωγή μεθανίου, υπό κανονικές συνθήκες. Ως εκ τούτου διακριβώθηκε η περιεκτικότητα σε άπεπτες φυτικές ίνες. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης σύστασης φυτικών ιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 13 και το Σχήμα 17.

Πίνακας 13 : Περιεκτικότητα % σε άπεπτες ίνες των δειγμάτων αποβλήτου ΕΕΛ Θεσσαλονίκης.

Δείγματα	(%) Ίνες
1250-3000 μm	55,00
1000-1250 μm	65,00
600-1000 μm	59,00
300-600 μm	56,00

Από τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 13 και το Σχήμα 17 δεν εμφανίζεται συσχέτιση ανάμεσα στην συγκέντρωση φυτικών ινών και το μέγεθος των σωματιδίων των εσχαρισμάτων.

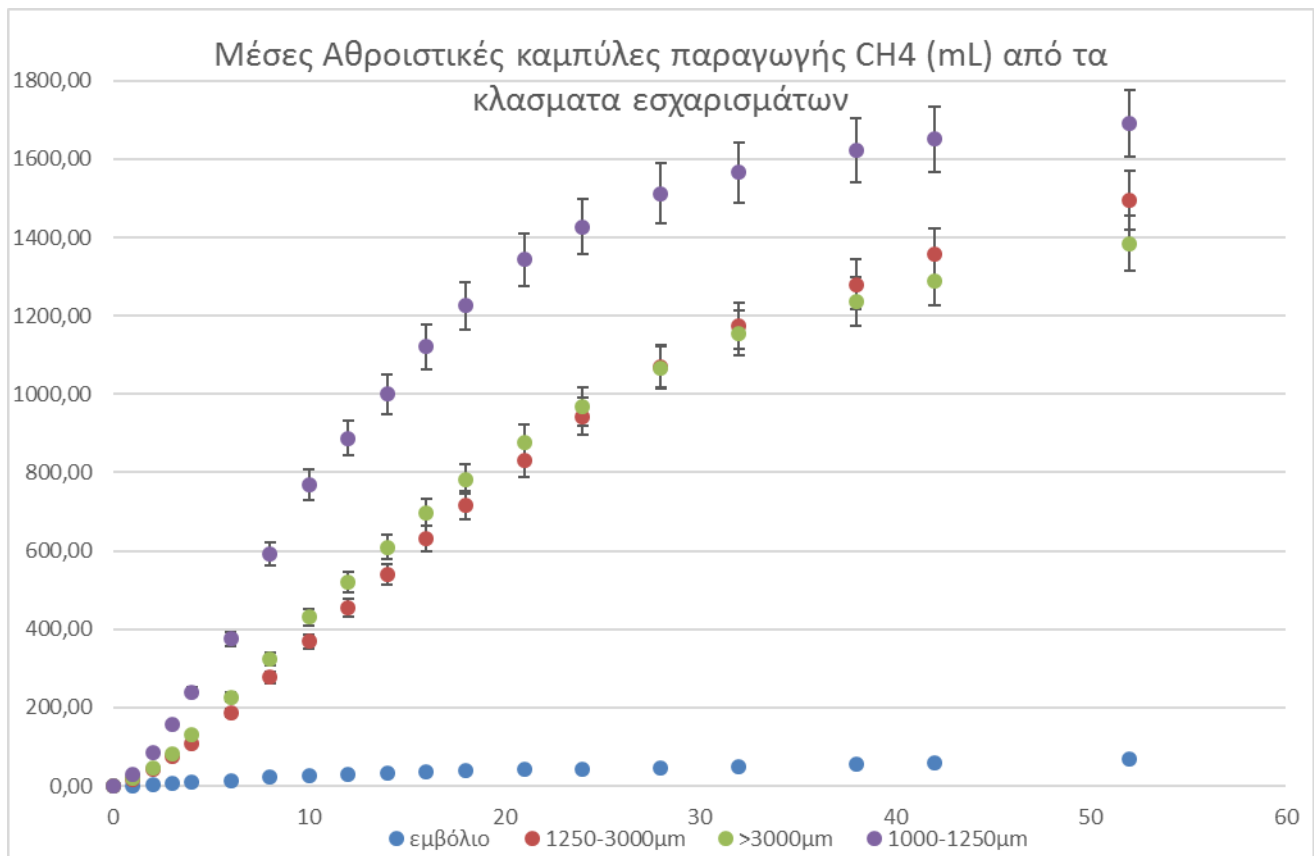


Σχήμα 17 : Ραβδόγραμμα συγκέντρωσης % σε άπεπτες ίνες ως προς το μέγεθος των σωματιδίων.

4.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

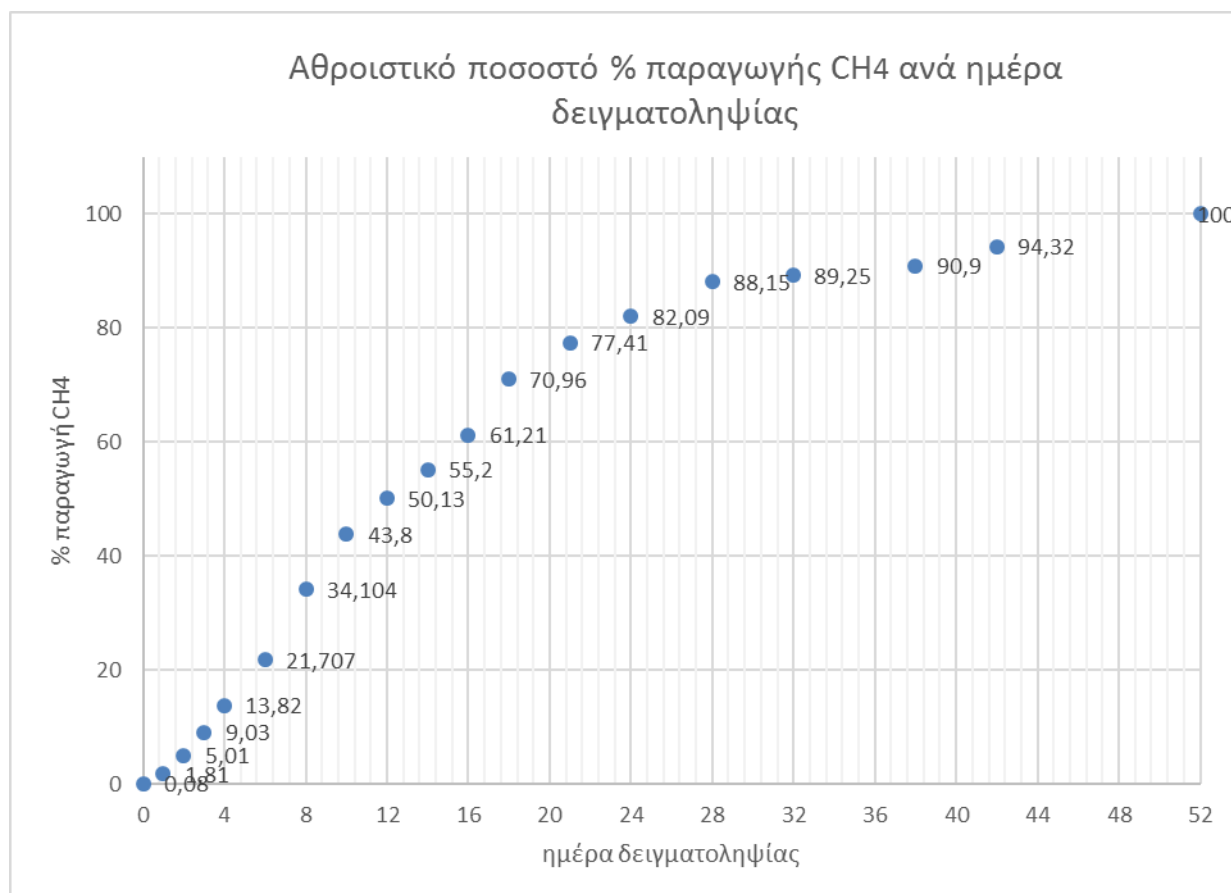
Μετά την διεκπεραίωση των αναλύσεων σύστασης, δείγματα αποβλήτων από κάθε τάξη μεγέθους τοποθετήθηκαν σε φιάλες 250 mL με κατάλληλη καλλιέργεια εμβολιασμού που συλλέχθηκε από μια εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου από απόβλητα εκτροφής ζώων. Οι φιάλες τοποθετήθηκαν σε θάλαμο σταθερής θερμοκρασίας στους 37°C και μελετήθηκε η παραγωγή αερίου με το χρόνο, με μετρήσεις του όγκου του παραγόμενου αερίου για μία περίοδο συνολικά 52 ημερών. Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται η αθροιστική παραγωγή μεθανίου σε όλη την διάρκεια της περιόδου 52 ημερών, που προέκυψε ως μέση τιμή μεταξύ δύο ίδιων δειγμάτων.

Παρατηρείται στο Σχήμα 18 ότι το κλάσμα 1000-1250 μ m απέδωσε την μεγαλύτερη ποσότητα σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα κλάσματα. Επίσης φαίνεται ότι το συγκεκριμένο κλάσμα είχε όπως όλα τα δείγματα πλην του εμβολίου την μεγαλύτερη αύξηση τις πρώτες 30 περίπου ημέρες και μετά η καμπύλη παραγωγής μεθανίου ισορροπεί σταδιακά. Την δεύτερη καλύτερη απόδοση ως προς την συνολική παραγωγή μεθανίου επέδειξε το κλάσμα μεταξύ 1250 μ m και 3000 μ m και έπειτα ακολουθούν το κλάσμα άνω των 3000 μ m και το κλάσμα 300-1000 μ m.



Σχήμα 18 : Μέση αθροιστική παραγωγή μεθανίου ανά ημέρα.

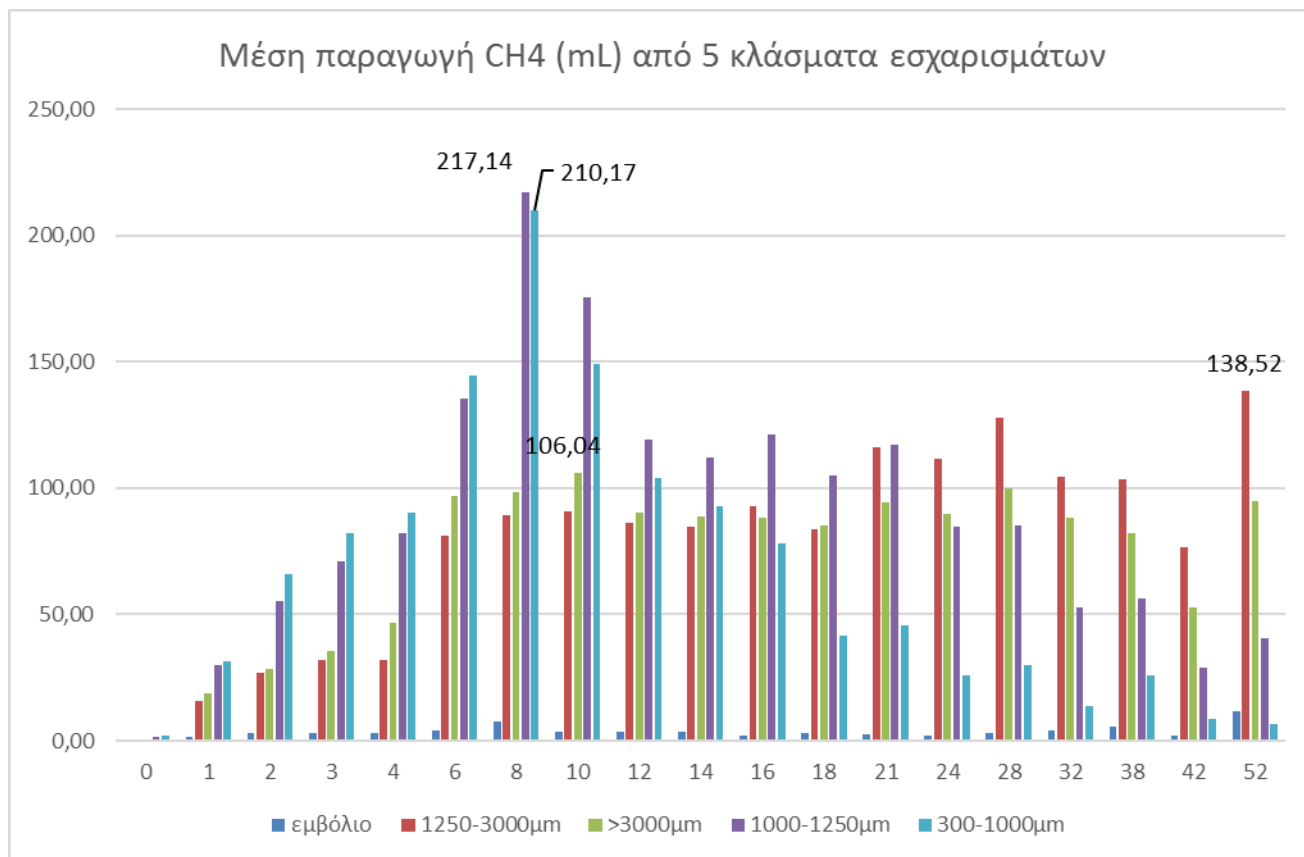
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα διασποράς της μέσης αθροιστικής παραγωγής CH₄ για το κλάσμα μεγέθους από 1000 ως 1250 μm που παρουσιάζεται στο Σχήμα 19 η καμπύλη παραγωγής μεθανίου για το πιο παραγωγικό κλάσμα εσχαρισμάτων έφθασε στο 50% της συνολικής παραγωγής την 12^η ημέρα της αναερόβιας χώνευσης, ενώ έδειξε σημαντική αύξηση μέχρι την 32^η ημέρα της αναερόβιας χώνευσης, όταν είχε παραχθεί το 89,25% της συνολικής παραγωγής μεθανίου, δηλαδή τις πρώτες 32 ημέρες παρήχθη σχεδόν το 90% της συνολικής παραγωγής μεθανίου ενώ τις τελευταίες 20 ημέρες παρήχθη μόνο 10%.



Σχήμα 19 : Διάγραμμα διασποράς μέσης αθροιστικής % παραγωγής μεθανίου του κλάσματος 1000-1250μm σε 52 ημέρες χώνευσης.

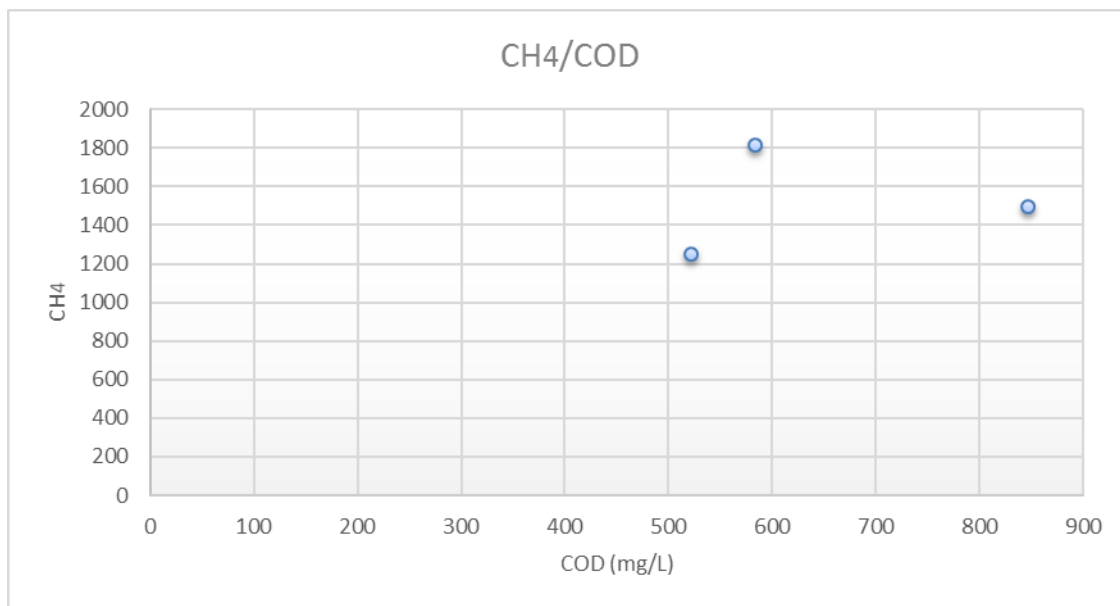
Στο διάγραμμα του Σχήματος 20 παρουσιάζεται η μέση παραγωγή μεθανίου ανά ημέρα δειγματοληψίας για τα 4 κλάσματα εσχαρισμάτων και το εμβόλιο. Παρατηρείται ότι η μέση παραγωγή μεθανίου του κλάσματος 1000-1250μm έφτασε την κορύφωση της (217,14 mL) την 8^η ημέρα της αναερόβιας χώνευσης και από εκεί και μετά ακολούθησε πτωτική πορεία. Παρόμοια συμπεριφορά είχε το κλάσμα 300-1000μm το οποίο επίσης είχε την κορυφαία τιμή παραγόμενου μεθανίου την 8^η ημέρα και έπειτα η τιμή παραγωγής μεθανίου έφθινε. Το κλάσμα <3000μm έφθασε την κορυφαία τους τιμή την 10^η ημέρα αναερόβιας χώνευσης και έμεινε σε αντίστοιχα υψηλές τιμές με σχετική σταθερότητα ως το τέλος της αναερόβιας χώνευσης. Το κλάσμα 1250μm-3000μm έπιασε

υψηλές τιμές επίσης την 10^η ημέρα και παρέμεινε σχετικά σταθερό μέχρι το τελευταίο δεκαήμερο όπου έφθασε στην κορυφαία του τιμή.



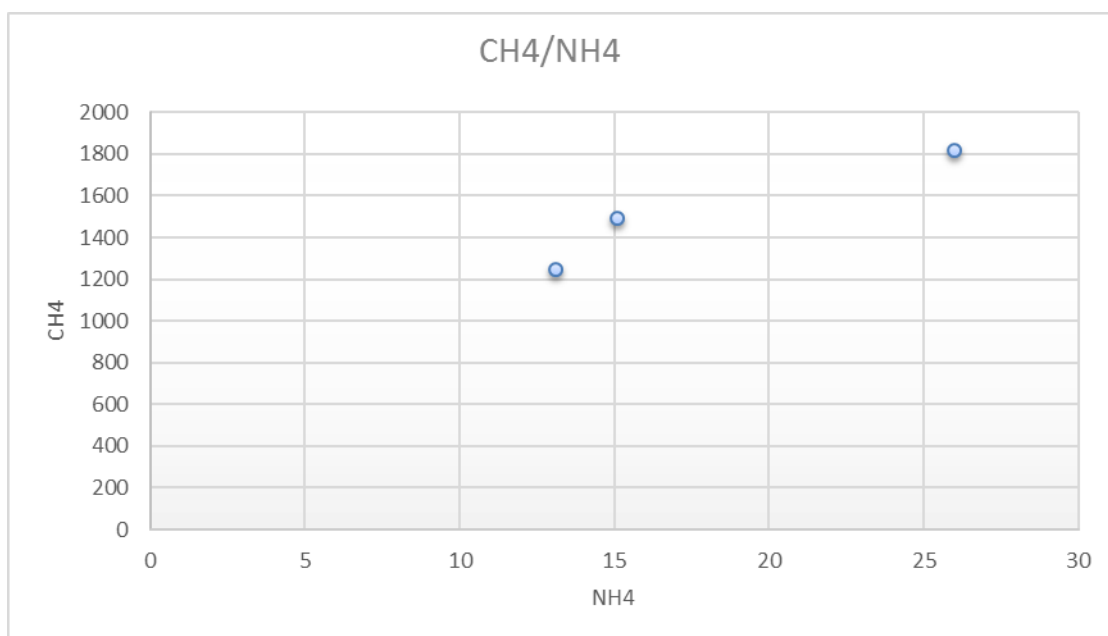
Σχήμα 20 : Μέση παραγωγή μεθανίου ανά κλάσμα εσχαρίσματος για διάστημα 52 ημερών.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τις φυσικοχημικές αναλύσεις με αυτά των μετρήσεων δυναμικού βιομεθανίου μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για πιθανή συσχέτιση των συστατικών του εσχαρίσματος με την παραγωγή μεθανίου. Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή μεθανίου σε 52 ημέρες αναερόβιας χώνευσης ως προς την περιεκτικότητα σε COD του αντίστοιχου δείγματος. Οπώς προκύπτει από το διάγραμμα (Σχήμα 21) δεν υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στην περιεκτικότητα σε COD και την παραγωγή μεθανίου.



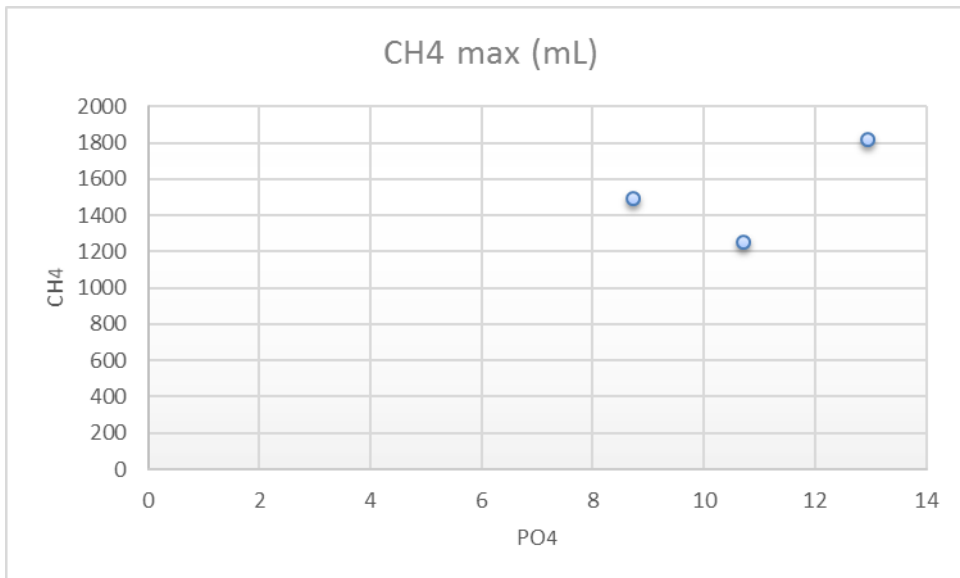
Σχήμα 21 : Συνολική παραγωγή μεθανίου (mL) σε διάστημα 52 ημερών ως προς την συγκέντρωση COD (mg/L).

Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή μεθανίου σε 52 ημέρες αναερόβιας χώνευσης ως προς την περιεκτικότητα σε αμμωνιακά ιόντα του αντίστοιχου δείγματος. Οπώς προκύπτει από το διάγραμμα (Σχήμα 22) υπάρχει θετική συσχέτιση ανάμεσα στις δύο παραμέτρους, όσο αυξάνει η συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων αυξάνεται η παραγωγή μεθανίου.



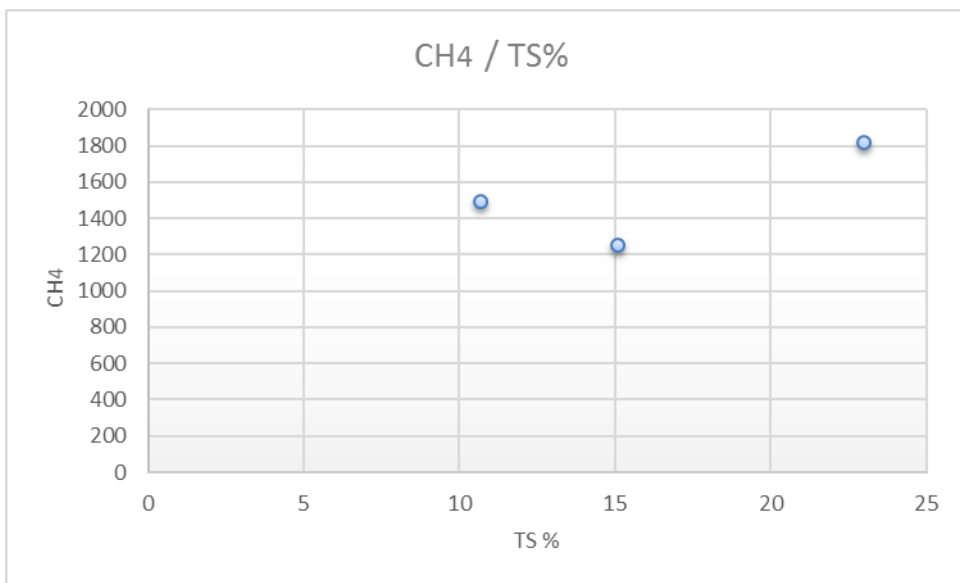
Σχήμα 22 : Συνολική παραγωγή μεθανίου (mL) σε διάστημα 52 ημερών ως προς την συγκέντρωση NH_4^+ (mg/L).

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή μεθανίου σε 52 ημέρες αναερόβιας χώνευσης ως προς την περιεκτικότητα των αντίστοιχων δειγμάτων σε φωσφορικά ιόντα. Οπώς προκύπτει από το διάγραμμα (Σχήμα 23) δεν υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στην περιεκτικότητα σε φωσφορικά ιόντα και την παραγωγή μεθανίου.



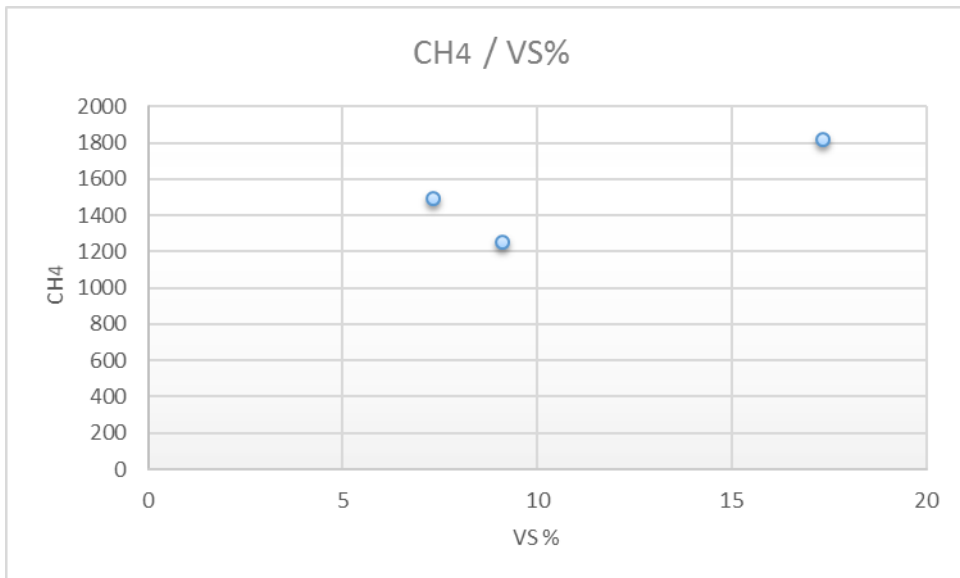
Σχήμα 23 : Συνολική παραγωγή μεθανίου (mL) σε διάστημα 52 ημερών ως προς την συγκέντρωση PO_4^{3-} (mg/L).

Στο Σχήμα 24 παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή μεθανίου σε 52 ημέρες αναερόβιας χώνευσης ως προς την περιεκτικότητα των αντίστοιχων δειγμάτων σε ολικά στερεά. Οπώς προκύπτει από τα δεδομένα στο Σχήμα 24 δεν υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στην περιεκτικότητα σε ολικά στερεά και την παραγωγή μεθανίου.



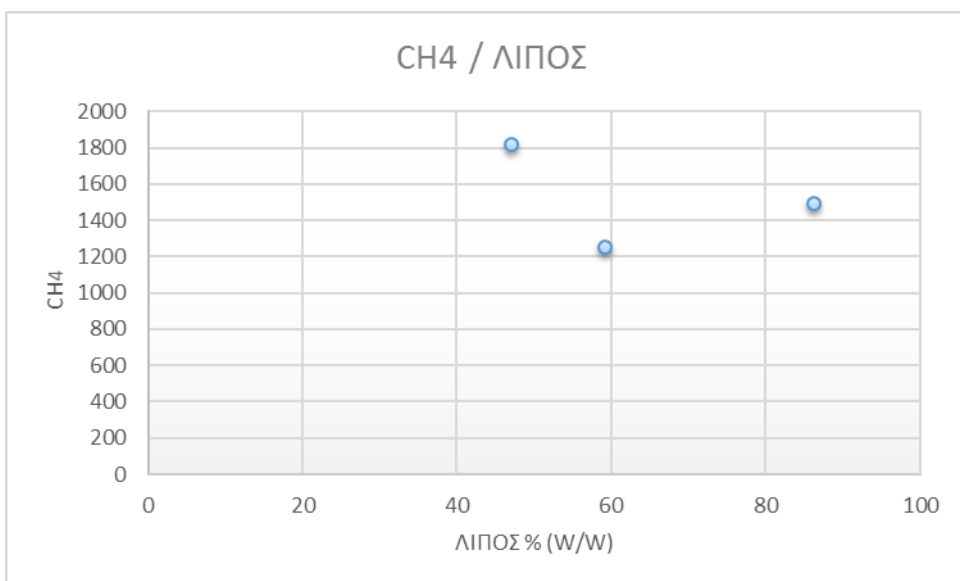
Σχήμα 24 : Συνολική παραγωγή CH_4 (mL) σε διάστημα 52 ημερών ως προς την συγκέντρωση TS%.

Στο Σχήμα 25 παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή μεθανίου σε 52 ημέρες αναερόβιας χώνευσης ως προς την περιεκτικότητα των αντίστοιχων δειγμάτων σε πτητικά στερεά. Οπώς προκύπτει από το διάγραμμα (Σχήμα 25) δεν υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στην περιεκτικότητα σε πτητικά στερεά και την παραγωγή μεθανίου.



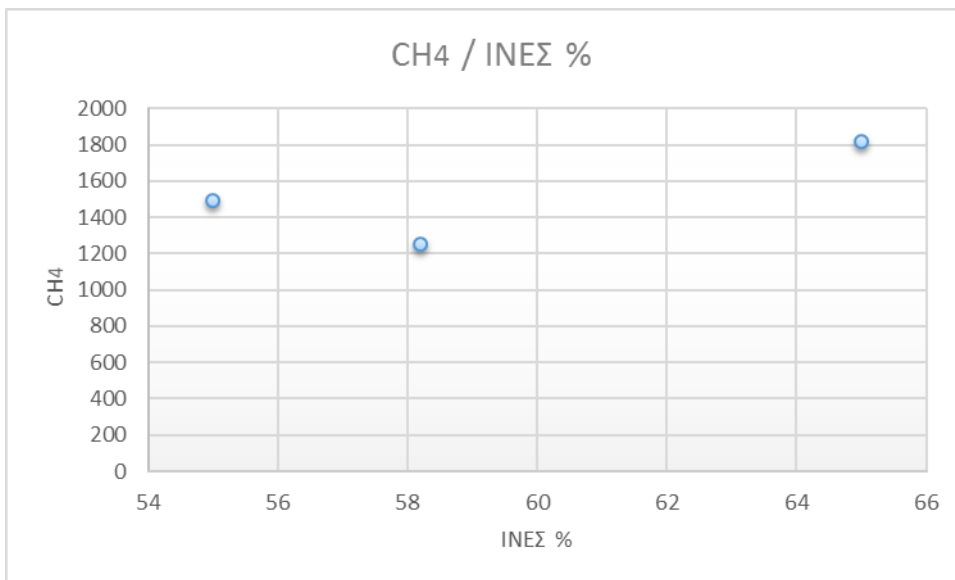
Σχήμα 25 : Συνολική παραγωγή CH₄ (mL) σε διάστημα 52 ημερών ως προς την συγκέντρωση VS%.

Στο Σχήμα 26 παρουσιάζεται η παραγωγή μεθανίου ως προς την συγκέντρωση σε λίπος. Η μεγάλη περιεκτικότητα σε λίπος φαίνεται να μην επηρέασε θετικά την παραγωγή μεθανίου, αντίθετα στο Σχήμα 26 φαίνεται πως τα εσχαρίσματα με το λιγότερο λίπος (47%) είχαν την υψηλότερη παραγωγή μεθανίου χωρίς να προκύπτει ωστόσο σαφής συσχέτιση περιεκτικότητας σε λίπος και παραγωγής μεθανίου



Σχήμα 26 : Συνολική παραγωγή CH₄ (mL) σε διάστημα 52 ημερών ως προς την συγκέντρωση λίπους % (w/w).

Τέλος στο Σχήμα 27 παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή μεθανίου σε 52 ημέρες αναερόβιας χώνευσης ως προς την περιεκτικότητα των αντίστοιχων δειγμάτων σε φυτικές ίνες. Έχει επιβεβαιωθεί από πειράματα αναερόβιας χώνευσης με κυτταρινούχα υποστρώματα ότι το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου δεν υπερέβη τα 300 NmL CH₄/g, κατόπιν διεργασίας που διήρκησε 850 ημέρες (Davidson et al., 2008). Από τα δεδομένα του Σχήματος 27 γίνεται φανερό ότι η περιεκτικότητα των στερεών στα δείγματα σε ίνες κυμαινόταν από 55 έως 65,1% επί ξηρής βάσης, χωρίς να διακρίνεται μια τάση συσχέτισης με το είδος των δειγμάτων, τη διάταξη συλλογής τους ή την προέλευση.



5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας μελετήθηκαν δείγματα εσχαρισμάτων από 4 κλάσματα μεγέθους σωματιδίων ως προς τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες και ως προς το δυναμικό παραγωγής μεθανίου. Από τα 4 κλάσματα που μελετήθηκαν το κλάσμα μεγέθους σωματιδίων 1000-1250 μm απέδωσε την μεγαλύτερη ποσότητα μεθανίου (1815mL) μετά από αναερόβια χώνευση που διήρκησε 52 ημέρες. Το 50% του μεθανίου που παρήγαγε το συγκεκριμένο κλάσμα είχε παραχθεί ήδη την 12^η ημέρα της αναερόβιας χώνευσης, ενώ το 89% της τελικής ποσότητας μεθανίου είχε παραχθεί μέχρι την 32^η ημέρα. Το κλάσμα 1250-3000 μm επίσης απέδωσε υψηλή ποσότητα μεθανίου, με μία τελική ποσότητα 1494 mL να έχει παραχθεί μετά από 52 ημέρες αναερόβιας χώνευσης. η μέση ημερήσια παραγωγή μεθανίου του κλάσματος 1000-1250 μm έφτασε την κορύφωση της (217,14 mL) την 8η ημέρα της ανερόβιας χώνευσης και από εκεί και μετά ακολούθησε πτωτική πορεία. Παρόμοια συμπεριφορά είχε το κλάσμα 300-1000 μm το οποίο επίσης είχε την κορυφαία τιμή παραγόμενου μεθανίου την 8η ημέρα και έπειτα η μέση τιμή παραγωγής μεθανίου έφθινε. Από την σύγκριση των δεδομένων των αναλύσεων σύστασης των εσχαρισμάτων και των μετρήσεων παραγωγής μεθανίου προκύπτει ότι η συγκέντρωση σε αμμωνιακά ιόντα επηρεάζει θετικά την παραγωγή μεθανίου ενώ οι συγκεντρώσεις σε COD, TS%, VS%, PO_4^{3-} , λίπος % και φυτικές ίνες % που επίσης αναλύθηκαν δεν βρέθηκε να παρουσιάζουν σαφή αρνητική ή θετική συσχέτιση με την παραγωγή μεθανίου.

Προτείνεται σε μελλοντικές έρευνες να μελετηθεί περαιτέρω η παραγωγή μεθανίου από κλάσμα εσχαρίσματος μεγέθους 1000-1250 μm καθώς και η παραγωγή μεθανίου από εσχαρίσματα πλούσια σε αμμωνιακά ιόντα για να επιβεβαιωθούν με περισσότερα εργαστηριακά δεδομένα τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Επίσης θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω σε πείραμα συνεχής διεργασία αναερόβιας χώνευσης σε βιοαντιδραστήρα, εσχαρίσματος 1000-1250 μm σε συνδιασμό με ιλύ λυμάτων για να διακριβωθεί αν θα ήταν σκόπιμο να εφαρμόζεται ως διεργασία σε ΕΕΛ με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας.

Βιβλιογραφία :

Pakenas, L.J. (1995), Energy Efficiency in Municipal Wastewater Treatment Plans: Technology Assessment, New York State Energy Research and Development Authority.

N.Luong N . Nguyen , , Jeevan Kumar , Minh T. Vu , Johir A.H. Mohammed , Nirenkumar Pathak , Audrey S. Commault , Donna Sutherland , Jakub Zdarta , Vinay Kumar Tyagi , Long D. Nghiem. (2020) Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques. Journal of Science of the Total Environment. 142753.

Metcalf, Eddy (2005) Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4th edition, McGraw-Hill Companies, Inc., New York, pp 14-15

Ronan Le Hyaric, Jean-Pierre Canler, Bruno Barillon, Pascale Naquin, Rémy Gourdon. (2009) Characterization of Screenings from Three Municipal Wastewater Treatment Plants in the Region Rhone-Alpes. Journal of Water Science and Technology.

E. S. Varela, M. T. Santos, A. M. Barreiros. (2015) Screenings and grit production from Portuguese WWTP. Conference: TINOS 2015 - 3rd Conference on Sustainable Solid Waste Management

J. Hunter Long, Tarek N. Aziz, Francis L. de los Reyes III, Joel J. Ducoste. (2012) Anaerobic co-digestion of fat, oil, and grease (FOG): A review of gas production and process limitations. Journal of Process Safety and Environmental Protection 90 (2012) 231-245

Caixia Wan, Quancheng Zhou, Guiming Fu, Yebo Li. (2011) Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease. Waste Management 31 (2011) 1752–1758

Davidsson, E., Løvstedt, C., la Cour Jansen, J., Gruvberger, C., Aspergen, H., 2008. Codigestion of grease trap sludge and sewage sludge. Waste Management 28, 986–992.

G. Silvestre, A. Rodríguez-Abalde, B. Fernández, X. Flotats, A. Bonmatí. (2011) Biomass adaptation over anaerobic co-digestion of sewage sludge and trapped grease waste. Bioresource Technology 102 (2011) 6830-6836

Διπλωματική Εργασία «Μελέτη της αναερόβιας χώνευσης υγρού αποβλήτου ελαιοτριβείου εστιάζοντας στην επίδραση της πηγής αζώτου στην τελική παραγωγή μεθανίου.» Ζαχαρίου Σταύρος, Θεσσαλονίκη 2016

Ronan Le Hyaric, Jean-Pierre Canler, Bruno Barillon, Pascale Naquin, Rémy Gourdon. (2010) Pilot-scale anaerobic digestion of screenings from wastewater treatment plants. *Bioresource Technology* 101 (2010) 9006-9011

S. Luostarinen , S. Luste, M. Sillanpää. (2009) Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant. *Bioresource Technology* 100 (2009) 79–85

Φίλιππος Άγγελος (2009), «Διαχείριση ιλύων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων στην Ευρώπη με έμφαση στην Ελλάδα», Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο «Περιβάλλον και Ανάπτυξη».

A. Ανδρεαδάκης (2000) “Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων”, 1ο κεφάλαιο του Τόμου Τεχνολογία Αντιμετώπισης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, Έκδοση Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, Αθήνα.

New York State Energy Research & Development Authority, NYSERDA (2010), «Water and Wastewater Energy Management - Best Practices Handbook».

Demet Antakyali, Reinhold Rolle (2010), «Energetic aspects regarding sewage and sludge treatment process of wastewater treatment plants», International Sustainable Water and Wastewater Management Symposium.

Maktabifard M., Zaborowska E., Makinia J. (2018). Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants. *Rev. Environ Sci Biotechnology*, 17, pp. 655-689.

Malin, J., 2007 Energy Benchmark for Wastewater Treatment Processes - a comparison between Sweden and Austria

Silvestre G., Fernandez B., Bonmati A. (2015). Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants. *Energy conversion and management*, 101, pp. 255- 262.

Yifan Gu, Yue Li, Xuyao Li, Pengzhou Luo, Hongtao Wang, Xin Wang. (2017). Energy self-sufficient wastewater treatment plants: Energy Procedia, 105, pp. 3741-3751.

Bjorn Rusten, Arne Lundar. (2006) How a Simple Bench-Scale Test Greatly Improved the Primary Treatment Performance of Fine Mesh Sieves. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 11, pp 1919-1935

Heidriche S., Curtist P., Dolfing J., 2011. Determination of the Internal Chemical Energy of Wastewater *Environ. Sci. Technol.* 2011, 45, 827–832

ENERWATER PROJECT. (2015-2018). Assessing, labelling and improving the overall energy performance of Wastewater Treatment Plants (WWTPs).

Αναφορές από διαδικτυακούς ιστότοπους :

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/el,

Νοέμβριος 2020.

(<https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment/Sludge-treatment-and-disposal>)

Ιανουάριος 2021

<http://www.thewatertreatments.com/wastewater-sewage-treatment/typical-characteristics-wastewater/>)

Ιανουάριος 2021