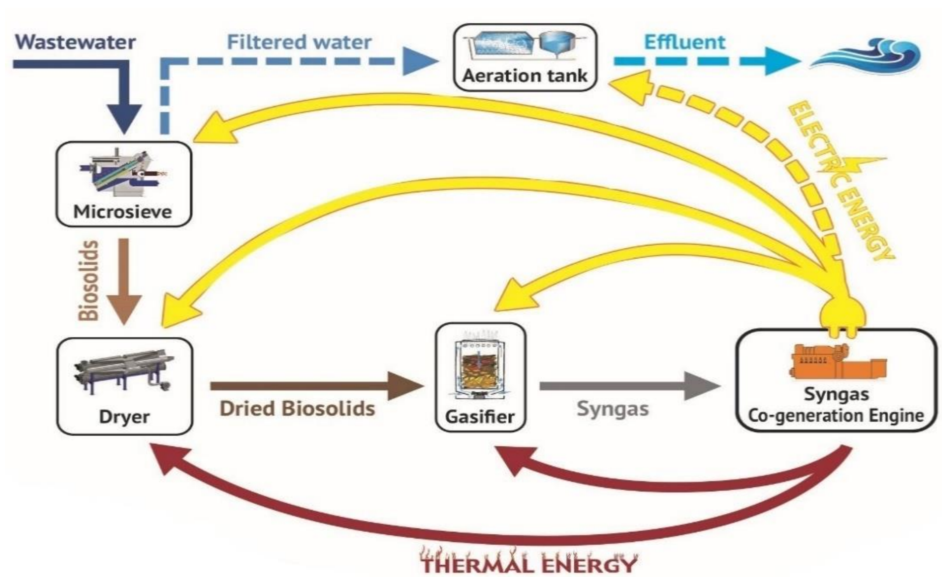
Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών περιβάλλοντος
Εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών

ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΣΤΕΡΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΤΣΑΜΟΥΤΣΟΓΛΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:
Αναπληρωτής Καθηγητής, Γκίκας Πέτρος (Επιβλέπων)
Καθηγητής, Καλογεράκης Νικόλαος
Επίκουρος Καθηγητής, Στεφανάκης Αλέξανδρος

Χανιά, Οκτώβριος, 2020

Πρόλογος και Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Ισοζύγια μάζας και ενέργειας του καινοτομικού συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης» εκπονήθηκε στο εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Πέτρου Γκίκα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Πέτρο Γκίκα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή της γνωριμίας μας και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ, να μελετήσω και να αγαπήσω ακόμα περισσότερο το αντικείμενο το οποίο είχα στοχεύσει. Επίσης, είμαι ευγνώμων για τις πολύτιμες συμβουλές και τις γνώσεις που μου προσέφερε όλο αυτό τον καιρό. Με την επιστημονική του αρτιότητα, αλλά και το ακαδημαϊκό του ύφος υπήρξε ένας από τους σημαντικότερους ανθρώπους καθ’ όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτωρ Ανθή Μάναλη για την πολύτιμη συνεισφορά της σε όλα τα στάδια της διπλωματικής μου. Την ευχαριστώ από καρδίας για την άψογη συνεργασία μας, αλλά και για τη βοήθεια, την καθοδήγηση, τον χρόνο, την αμέριστη συμπαράσταση και υπομονή της καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές της όλον αυτό τον καιρό.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Καλογεράκη Νικόλαο και τον Επίκουρο Καθηγητή Στεφανάκη Αλέξανδρο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και για την ευγενική διάθεση τους να μελετήσουν και να αξιολογήσουν την εργασία μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τη συμφοιτήτρια μου Μαριάννα Παλατσίδου για την υπομονή και την αμέριστη συμπαράσταση της καθ΄ όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους ανθρώπους που ήταν πάντα δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια.

Κωνσταντίνος Τσαμουτσόγλου
Χανιά, Οκτώβριος, 2020

Περίληψη

Οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) ανάλογα με τις ανάγκες σχεδιασμού δημιουργούν άμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της χρήσης ενέργειας, της κατανάλωσης χημικών ουσιών και της πλεονάζουσας παραγωγής ιλύος. Συνεπώς, ολοένα και αυξάνεται το ενδιαφέρον για τη βελτιστοποίηση της σχέσης μεταξύ ενέργειας και ποιότητας λυμάτων και για την εύρεση καινοτόμων τεχνολογιών που έχουν ως στόχο τη μετατροπή των αποβλήτων σε ενεργειακούς πόρους.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της βιωσιμότητας και της ενεργειακής αυτονομίας ενός καινοτομικού συστήματος αξιοποίησης βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης και ο υπολογισμός ισοζυγίων μάζας και ενέργειας με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος. Στην υφιστάμενη ΕΕΛ Ρεθύμνου θα εγκατασταθεί μία πιλοτική διάταξη, η οποία θα περιλαμβάνει 3 στάδια επεξεργασίας (μικροκοσκίνιση, ξήρανση, αεριοποίηση) και θα επεξεργάζεται περίπου το ένα τρίτο (5,000m^3) της μέσης ημερήσιας παροχής λυμάτων της ΕΕΛ. Κατά το στάδιο της αεριοποίησης θα παράγεται το αέριο σύνθεσης (syngas), το οποίο μέσω ενός ηλεκτροκινητήρα εσωτερικής καύσης θα χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγόμενη ενέργεια αναμένεται να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της πιλοτικής διάταξης και κατά συνέπεια να προκαλέσει σημαντική μείωση των συνολικών ενεργειακών αναγκών της ΕΕΛ και κατ’ επέκταση ελάττωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Ο προσδιορισμός των ισοζυγίων μάζας του συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά την ανάλυση ισοζυγίων μάζας του συστήματος μικροκοσκίνισης, ενώ στο δεύτερο στάδιο έγινε η ανάλυση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας των μονάδων ξήρανσης και αεριοποίησης με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

Η επίλυση των ισοζυγίων του συστήματος μικροκοσκίνισης αποσκοπούσε στην εύρεση των εκτιμώμενων απομακρύνσεων των παραμέτρων του Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου των πέντε ημερών, (BOD_5), του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD), των Ολικών Αιωρούμενων στερεών (TSS), αλλά και στον προσδιορισμό της αναμενόμενης ποσότητας βιοστερεών που θα χρησιμοποιηθεί ως υλικό τροφοδοσίας στον αεριοποιητή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εκτιμώμενες συγκεντρώσεις εξόδου των TSS, BOD_5, και COD από το σύστημα μικροκοσκίνισης θα κυμαίνονται μεταξύ 55-164 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$, 290-309 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$, και 520-558 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$, αντίστοιχα, ενώ η παραγωγή βιοστερεών (σε ξηρή βάση) αναμένεται από 7 έως 18 $\frac{\mathrm{kg-PSS}}{\mathrm{h}}$. Από την άλλη, η επίλυση των ισοζυγίων του δευτέρου σταδίου αποσκοπούσε στον έλεγχο της ενεργειακής αυτονομίας της μονάδας. Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν δύο πιθανά σενάρια (χείριστη και βέλτιστη περίπτωση). Για το πρώτο σενάριο διαπιστώθηκε ότι η παραγόμενη ενέργεια θα καλύπτει οριακά τις ανάγκες για ξήρανση και για αυτό τον λόγο προτάθηκαν δύο εναλλακτικές λύσεις για να διασφαλιστεί η αυτονομία του συστήματος (επαναχρησιμοποίηση θερμού αέρα και κατανάλωση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας). Ωστόσο, για το δεύτερο σενάριο η περίσσεια θερμική ενέργεια υπολογίστηκε 61 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{h}}$ και η

ηλεκτρική 21.5kW, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των υπόλοιπων τμημάτων της μονάδας, διατηρώντας την ενεργειακή αυτονομία της.

Λέξεις-κλειδιά: «ΕΕΛ», «ισοζύγια μάζας», «ισοζύγια ενέργειας», «ενεργειακή αυτονομία», «βιοστερεά», «αεριοποίηση», «μικροκοσκίνιση», «ενέργεια».

Abstract

Wastewater Treatment Plants (WWTPs) cause according to their planning requirements direct environmental impacts due to energy use, chemical consumption and excess sludge production. Consequently, there is a growing interest in optimizing the relationship between energy and wastewater quality, as well as in finding innovative technologies aiming to convert waste into energy resources.

The scope of this thesis is to assess the sustainability and energy self-sufficiency of a novel system for the exploitation of the energy content of biosolids through gasification, as well as to calculate the mass and energy balances with the view of protecting the environment. The system will be installed at the WWTP of Rethymnon, comprising of 3 stages (microscreening, drying and gasification) and it will treat about 1/3 (5,000m^3) of the inlet flowrate of the above WWTP. The synthesis gas (syngas) which will be produced during gasification, will be used for the production of thermal and electric energy through an internal combustion engine. The produced energy is expected to cover the energy needs of the pilot plant, thus further reducing the net energy consumption of the WWTP, and consequently eliminating the greenhouse gases emissions.

The determination of the balances of the system has been carried out in two stages. The first stage is referred to the analysis of mass balances of the microscreen, while the second one to the analysis of mass and energy balances of the drying unit and gasification plant with simultaneous production of electric and thermal energy.

The solution of the microscreen balances aimed to find the estimated removal rates of Biochemical Oxygen Demand over five days (BOD_5), Chemical Oxygen Demand (COD), and Total Suspended Solids (TSS), as well as to determine the expected amount of produced biosolids which will be used as gasification feedstock. The results showed that the estimated effluent concentrations of TSS, BOD_5 and COD from the microsieve range from 55-164 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$, 290-309 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$, and 520-558 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$, respectively, while the production of biosolids (on a dry basis) is expected from 7 to 18 $\frac{\mathrm{kg-PSS}}{\mathrm{h}}$. On the contrary, the solution of the balances of the second stage aimed to check the energetic self-sufficiency of the demonstration plant. In this case, two scenarios were considered (worst and best case scenario). For the first scenario, it was found that the energy produced would marginally cover the drying needs and for this reason two alternatives were proposed to ensure the energy self-sufficiency of the system (recycling of hot air and consumption of generated electricity). However, for the second scenario the excess thermal energy was calculated 61 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{h}}$ and the electricity 21.5kW, which will be both used to cover the energy needs of the other parts of the plant, maintaining its energetic self-sufficiency.

Keywords: “WWTPs”, “mass balances”, “energy balances”, “self-sufficiency”, “biosolids”, “gasification”, microscreening”, ”energy”.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος και Ευχαριστίες iii

Περίληψη iv

Abstract v

Πίνακας περιεχομένων vii

Κατάλογος συντομογραφιών x

Κατάλογος πινάκων xi

Κατάλογος εικόνων xiii

Κεφάλαιο 1: Επεξεργασία υγρών αποβλήτων και τρόποι διαχείρισης βιοστερεών 1

1.1 Υγρά Απόβλητα – Βιοστερεά (Biosolids) 1

1.2 Συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων 2

1.2.1 Προ-επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία 2

1.2.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία 4

1.2.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία 4

1.2.4 Απολύμανση 4

1.2.5 Γραμμή επεξεργασίας ιλύος 5

1.3 Ενεργειακές απαιτήσεις και σχηματισμός GHG στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων 6

1.3.1. Ενεργειακές απαιτήσεις 6

1.3.2. Σχηματισμός GHG στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων 8

1.4 Προηγμένες μέθοδοι στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων 9

1.4.1 Διεργασίες μεμβρανών με ωθούσα δύναμη την διαφορά πίεσης 9

1.4.2 Διεργασία ANaerobic AMMOnium OXidation (ANAMMOX) 10

1.5 Απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων μέσω μικροκοσκίνισης και σύγκριση με συμβατική επεξεργασία 11

1.5.1 Rotating Belt Filters (RBFs) 11

1.5.2 Rotating Drum Filters (RDFs) 12

1.5.3 Disc filters 13
1.5.4 Σύγκριση RBFs με συμβατική επεξεργασία 13
1.6 Μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας της ιλύος.. 14
1.6.1 Αποτέφρωση.. 15
1.6.2 Πυρόλυση 16
1.6.3 Αεριοποίηση... 17
1.6.4 Συγκριτικός συσχετισμός θερμικών μεθόδων επεξεργασίας ιλύος......... 19
Κεφάλαιο 2: Ισοζύγια μάζας και ενέργειας... 22
2.1 Ισοζύγια μάζας 22
2.1.1 Ο νόμος διατήρησης της μάζας.. 22
2.2 Ισοζύγια ενέργειας... 23
2.2.1 Ισοζύγιο ενέργειας - 1ος Θερμοδυναμικός Νόμος 24
2.3 Βήματα ανάλυσης ισοζυγίων... 26
2.4 Ο συσχετισμός των ισοζυγίων με την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ)........ 28
2.5 Σκοπός της εργασίας 30
Κεφάλαιο 3: Περιγραφή της ΕΕΛ Ρεθύμνου.. 31
3.1 Παράμετροι σχεδιασμού της εγκατάστασης 31
3.2 Περιγραφή της υφιστάμενης ΕΕΛ... 32
3.2.1 Φρεάτιο άφιξης λυμάτων... 34
3.2.2 Μονάδα εσχάρωσης... 34
3.2.3 Μονάδα εξάμμωσης... 34
3.2.4 Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας... 35
3.2.5 Μονάδα απολύμανσης και διάθεση λυμάτων.. 37
3.2.6 Μονάδα επεξεργασίας ιλύος 37
3.2.7 Μονάδα υποδοχής - εξισορρόπησης βοθρολυμάτων 39
3.2.8 Μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων ... 40
3.2.9 Μονάδα βιομηχανικού νερού.. 41

Κεφάλαιο 4: Περιγραφή συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης (LIFE B2E4SustWWTP) 42

4.1 Σκοπός του έργου..42

4.2. Περιγραφή του συστήματος 42

4.2.1 Μικροκοσκίνιση...45

4.2.2 Ξήρανση 46

4.2.3 Αεριοποίηση 47

Κεφάλαιο 5: Ισοζυγία μάζας και ενέργειας του συστήματος βιοστερεών....52

5.1 Μεθοδολογία: ανάλυση ισοζυγίων 52

5.1.1 Μεθοδολογία επίλυσης ισοζυγίων μάζας μικροκοσκίνισης 52

5.1.2 Μεθοδολογία επίλυσης ισοζυγίων μάζας και ενέργειας ξηραντή 52

5.1.3 Μεθοδολογία επίλυσης ισοζυγίων μάζας και ενέργειας αεριοποιητή με ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας..............................54

5.2 Αποτελέσματα: υπολογισμοί ισοζυγίων 58

5.2.1 Υπολογισμοί ισοζυγίων μικροκοσκίνισης 58

5.2.2 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και ενέργειας ξηραντή.............................62

5.2.3 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και ενέργειας αεριοποιητή με ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας 66

5.3 Συζήτηση αποτελεσμάτων: σχολιασμός ισοζυγίων του συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών...76

5.3.1 Συζήτηση αποτελεσμάτων ισοζυγίων μικροκοσκίνισης...........................76

5.3.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων ισοζυγίων των μονάδων ξήρανσης και αεριοποίησης...81

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα.....................................85

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία 87

Κεφάλαιο 8: Παράρτημα...95

8.1 Παράρτημα πινάκων 95

8.2 Παράρτημα εικόνων 100

Κατάλογος συντομογραφιών

ANAMMOX:	ANaerobic AMMOnium OXidation
BOD:	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand)
COD:	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand)
DAF:	Επίπλευση Διαλυμένου Αέρα (Dissolved Air Flotation)
EPA:	Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency)
EPRI:	Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας (Electric Power Research Institute)
GHG:	Αέρια του Θερμοκηπίου (Greenhouse Gases)
GSD:	Καθορισμός του Σκοπού και Πλαισίου Μελέτης (Goal and Scope Definition)
HHV:	Υψηλότερη Θερμογόνο Δύναμη (Higher Heating Value)
HV:	Θερμογόνος Δύναμη (Heating Value)
LCI:	Απογραφική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory)
LCIA:	Ανάλυση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment)
LHV:	Χαμηλότερη Θερμογόνος Δύναμη (Lower Heating Value)
MC:	Περιεχόμενο Υγρασίας (Moisture Content)
MF:	Μικροδιήθηση (Microfiltration)
MWCO:	Μοριακό Βάρος Αποκοπής (Molecular Weight Cut Off)
NF:	Νανοδιήθηση (Nanofiltration)
NSIT:	Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology)
PCDDs:	Πολυχλωριωμένες Διβενζο-Διοξίνες (Polychlorinated Dioxins)
PCDFs:	Πολυχλωριωμένα Διβενζο-Φουράνια (Polychlorinated Dibenzofurans)
PCU:	Μονάδα Ελέγχου Ισχύος (Power Control Unit)
PSS:	Πρωτοβάθμια Κοσκινισμένα Στερεά (Primary Sieved Solids)
RBF:	Φίλτρο Περιστρεφόμενης Ζώνης (Rotating Belt Filter)
RDF:	Φίλτρο Περιστρεφόμενου Δίσκου (Rotating Belt Disk)
RO:	Αντίστροφη Ώσμωση (Reverse Osmosis)
SS:	Αιωρούμενα Στερεά (Suspended Solids)
TKN:	Ολικού Άζωτο κατά Kjeldahl (Total Kjeldahl Nitrogen)
TP:	Ολικός Φώσφορος (Total Phosphorus)
UF:	Υπερδιήθηση (Ultrafiltration)
UV:	Υπεριώδης Ακτινοβολία (Ultra Violent)
WRF:	Ίδρυμα Έρευνας Νερού (Water Research Foundation)
TSS:	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (Total Suspended Solids)
ΑΕΠΟ:	Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων
ΑΚΖ:	Ανάλυση Κύκλου Ζωής
ΔΔΚ:	Δεξαμενή Δευτεροβάθμιας Καθίζησης
ΔΕΥΑΡ:	Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Ρεθύμνου
ΔΠΚ:	Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης
ΕΕΛ:	Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων
ΙΚ:	Ισοδύναμοι Κάτοικοι
ΥΠΕΚΑ:	Υπουργείο Περιβάλλοντος Και Ενέργειας

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1 Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων απολύμανσης (Δελήμπαση, 2001)................ 5
Πίνακας 1.2 Ενεργειακή κατανάλωση ανάλογα με την δυναμικότητα των ΕΕΛ (Panepinto, et al., 2016).. 6
Πίνακας 1.3 Ενεργειακή κατανάλωση τεχνολογιών αφυδάτωσης ιλύος (Soares, et al., 2017). 8
Πίνακας 1.4 Δείκτης GWP που σχετίζεται με τα GHG στις ΕΕΛ (IPCC, 2001). 9
Πίνακας 1.5 Κατηγορίες διαχωρισμού των GHG σύμφωνα με ΚΥΑ 1023/2018. 9
Πίνακας 1.6 Χαρακτηριστικά μεμβρανών με διαφορά πίεσης (Valdez, 2012; Eyvaz & Yüksel, 2018)..10
Πίνακας 1.7 HV των βιοστερεών από ιλύ αστικών λυμάτων (Burrowes & Bauer, 2008).......14
Πίνακας 1.8 Συγκριτικός συσχετισμός Αποτέφρωσης- Πυρόλυσης Αεριοποίησης (Shakorfow, 2016; Σπερέζη, 2007)...21
Πίνακας 2.1 Βασική περιγραφή των σταδίων της ΑΚΖ σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040:14043. 29
Πίνακας 3.1 Ρυπαντικά και υδραυλικά φορτία σχεδιασμού ΕΕΛ Ρεθύμνου.........................32
Πίνακας 3.2. Ποιοτικά χαρακτηριστικά εξόδου της ΕΕΛ. 32
Πίνακας 3.3 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά εξάμμωση (Κεχαγιαδάκη, 2019). 35
Πίνακας 3.4 Βασικά χαρακτηριστικά δεξαμενών αερισμού (Ματσούκα, 2003). 36
Πίνακας 3.5 Βασικά χαρακτηριστικά ΔΔΚ (Ματσούκα, 2003)...36
Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά δεξαμενής χλωρίωσης (Κεχαγιαδάκη, 2019)..........................37
Πίνακας 3.7 Επιμέρους τμήματα της μονάδας ηλιακής ξήρανσης – κομποστοποίησης (Δανδόλου, 2010; Κεχαγιαδάκη, 2019)...39
Πίνακας 3.8 Χαρακτηριστικά μονάδας βιομηχανικών αποβλήτων.......................................40
Πίνακας 4.1 Σύσταση αποβλήτων αεριοποιητή (Μαυράκης, 2018)......................................44
Πίνακας 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά και ενεργειακή κατανάλωση της μικροεσχάρας (Μαυράκης, 2018). 46
Πίνακας 5.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές απόδοσης πιλοτικής μικροεσχάρας. 52
Πίνακας 5.2 Περιγραφή των όρων των εξισώσεων (5.1. και 5.2). 53
Πίνακας 5.3 Παράμετροι υπολογισμού της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας κατά την ψύξη του syngas. 57
Πίνακας 5.4 Παράμετροι υπολογισμού της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας από τα καυσαέρια της μηχανής. 57
Πίνακας 5.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου για τα έτη 2017-2019. ...58
Πίνακας 5.6 Προδιαγραφές απόδοσης πιλοτικής μικροεσχάρας..58
Πίνακας 5.7 Εκτιμώμενες απομακρύνσεις της μικροεσχάρας. 77
Πίνακας 5.8 Αποδόσεις διαφορετικών τεχνολογιών πρωτοβάθμιας επεξεργασίας...............77
Πίνακας 5.9 Ποσοστά απομακρύνσεων των παραμέτρων BOD5, COD και TSS της πειραματικής μικροεσχάρας στην ΕΕΛ Ρεθύμνου (Μπατιστάτος, 2017). 78
Πίνακας 5.10 Εκτιμώμενη παραγωγή βιοστερεών. 78
Πίνακας 5.11 Αποτελέσματα ισοζυγίων μάζας και ενέργειας του συστήματος βιοστερεών. .82

Πίνακας 5.12 Συγκριτικός συσχετισμός του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος βιοστερεών. 83
Πίνακας 8.1 Στοιχεία εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου για τα έτη 2017-2019. 95
Πίνακας 8.2 Μέσες θερμοκρασίες του μήνα Δεκέμβρη από επιλεγμένους σταθμούς. 98
Πίνακας 8.3 Υπολογισμός μίγματος τροφοδοσίας της μηχανής εσωτερικής καύσης. 98
Πίνακας 8.4 Υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίων της μηχανή εσωτερικής καύσης. 99
Πίνακας 8.5 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των PSS (Gikas, 2014). 99

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1 Σχηματική απεικόνιση διαγράμματος ροής μιας ΕΕΛ (Wongburi, 2018). 1
Εικόνα 1.2 Εικόνα ΔΠΚ κυκλικού σχήματος (Monroeenvironmental, 2020). 3
Εικόνα 1.3 ΔΠΚ ορθογωνικού σχήματος (Jabbar & Al-Baidhani, 2005). 4
Εικόνα 1.4 Ποσοστιαία κατανομή ενέργειας σε ΕΕΛ (Soares, et al., 2017). 7
Εικόνα 1.5 RBF (Gupta, 2018). 12
Εικόνα 1.6 RDF (Väänänen, 2017). 12
Εικόνα 1.7 Disc filters (Morling, 2019). 13
Εικόνα 1.8 Σχηματική απεικόνιση αποτέφρωσης ιλύος (Oladejo, et al., 2019). 16
Εικόνα 1.9 Σχηματική απεικόνιση πυρόλυσης ιλύος (Oladejo, et al., 2019). 17
Εικόνα 1.10 Σχηματική απεικόνιση αεριοποίησης ιλύος (Oladejo, et al., 2019). 18
Εικόνα 1.11 Μονάδα αεριοποίησης στο Τόκιο (Kawasaki, 2010). 19
Εικόνα 2.1 Σύστημα περιβάλλον και οριακή επιφάνεια (όριο) συστήματος (Ashrafizadeh & Tan, 2018; Skogestad, 2008; Cengel & Boles, 2014). 22
Εικόνα 2.2 Ενεργειακές αλληλεπιδράσεις κλειστού συστήματος (Ghasem & Henda, 2014). 25
Εικόνα 2.3 Τυχαίος όγκος ελέγχου (Πηλίνης & Στασινάκης, 2018). 27
Εικόνα 2.4 Στάδια ΑΚΖ (Eula, 2020). 28
Εικόνα 2.5 Γενικό πλαίσιο μεθοδολογίας ΑΚΖ (ISO, 2006). 29
Εικόνα 3.2 Άποψη της ΕΕΛ Ρεθύμνου. 31
Εικόνα 3.2 Διάγραμμα ροής της ΕΕΛ Ρεθύμνου. 33
Εικόνα 4.1 Σημείο εγκατάστασης της πιλοτικής μονάδας του LIFE B2E4SustWWTP στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. 43
Εικόνα 4.2 Διάγραμμα ροής του πιλοτικού συστήματος του έργου LIFE B2E4SustWWTP. .44
Εικόνα 4.3 Απεικονίσεις (πάνω) και φωτογραφία (κάτω) της μικροεσχάρας. 45
Εικόνα 4.4 Διάταξη ξηραντή (Μαυράκης, 2018) 46
Εικόνα 4.5 Απεικονίσεις αριστερά και δεξιά (Takahashi & Koshijima, 1988) του αεριοποιητή καθοδικής ροής. 47
Εικόνα 4.6 Δεξαμενή απομάκρυνσης τέφρας εντός του αεριοποιητή. 48
Εικόνα 4.7 Απεικόνιση (αριστερά) (Cburnett, 2019) και φωτογραφία (δεξιά) του πολυκυκλώνα. 48
Εικόνα 4.8 Φίλτρο βιομάζας. 49
Εικόνα 4.9 Πυρσός καύσης. 50
Εικόνα 4.10 Πλυντηρίδα αποθείωσης (scrubber). 50
Εικόνα 4.11 Αεριοποιητής παρόμοιος του LIFE B2E4SustWWTP. 51
Εικόνα 5.1 1^o Σενάριο - Ισοζύγιο μάζας μικροεσχάρας (ελάχιστη απόδοση). 59
Εικόνα 5.2 2^o Σενάριο - Ισοζύγιο μάζας μικροεσχάρας (μέση απόδοση). 61
Εικόνα 5.3 3^o Σενάριο - Ισοζύγιο μάζας μικροεσχάρας (μέγιστη απόδοση). 62
Εικόνα 5.4 Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας του ξηραντή (χείριστο σενάριο). 64
Εικόνα 5.5 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας του ξηραντή (βέλτιστο σενάριο). 65
Εικόνα 5.6. Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας αεριοποιητή (χείριστο σενάριο). 68
Εικόνα 5.7 Παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (χείριστο σενάριο). 69

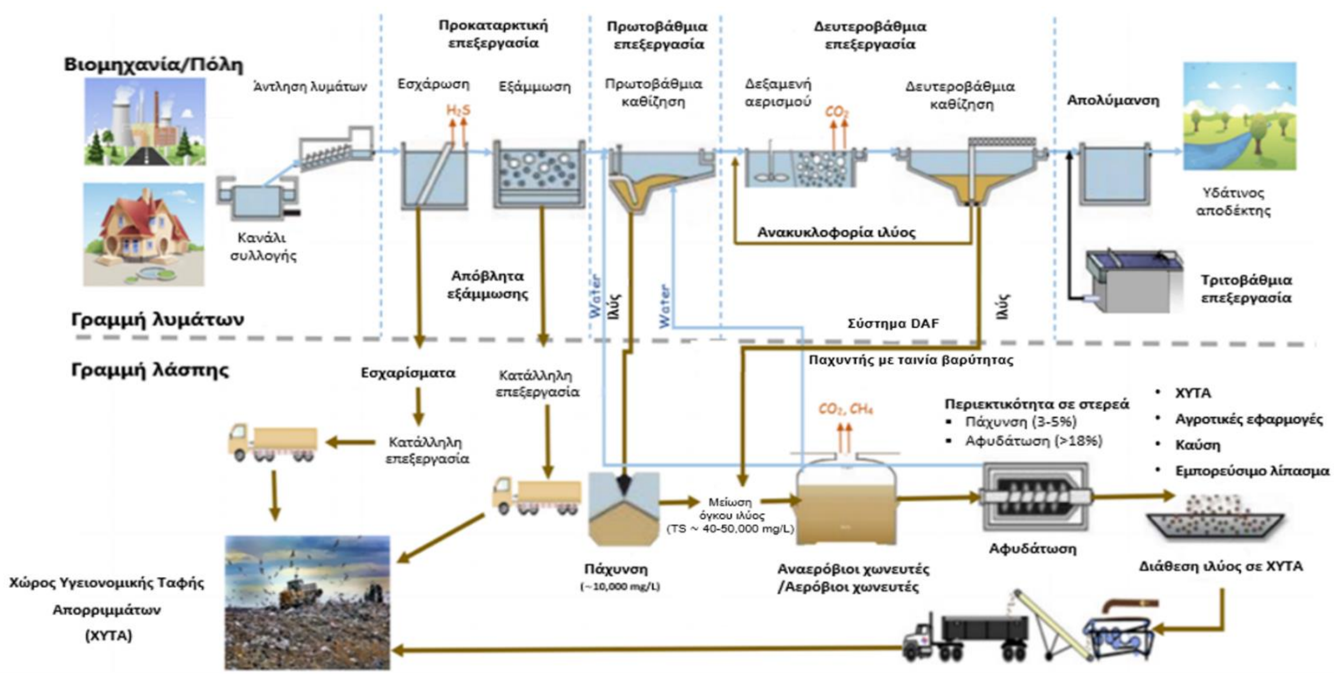
Εικόνα 5.8 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας αεριοποιητή με ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (χείριστο σενάριο). 71
Εικόνα 5.9 Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας αεριοποιητή (βέλτιστο σενάριο). 73
Εικόνα 5.10 Παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας από το παραγόμενο syngas (βέλτιστο σενάριο). 74
Εικόνα 5.11 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας αεριοποιητή με ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (βέλτιστο σενάριο). 75
Εικόνα 5.12 Μικροεσχάρα (Jansen, 2016). 80
Εικόνα 5.13 Ποσοστά απομάκρυνσης των TSS χωρίς (μπλε στήλη) και με (κόκκινη στήλη) τη προσθήκη κροκιδωτικού μέσου (Rusten, et al., 2017). 81
Εικόνα 8.1 Κάτοψη της διάταξης μικροκοσκίνισης. 100
Εικόνα 8.1 Πλαινή όψη διάταξης μικροκοσκίνισης. 101
Εικόνα 8.2 Μικροεσχάρα του LIFE B2E4SustWWTP. 101
Εικόνα 8.3 Σημείο εισόδου και σημείο εξόδου σε περίπτωση υπερχείλισης της μικροεσχάρας. 102
Εικόνα 8.4 Σχηματική απεικόνιση α) του μηχανισμού πάχυνσης της ιλύος και β) του ιμάντα της μικροεσχάρας. 103
Εικόνα 8.5 Σχηματική απεικόνιση του α) μηχανισμού αφυδάτωσης β) του σημείου εξόδου των PSS γ) του σημείου εξόδου των φιλτραρισμένων αποβλήτων της μικροεσχάρας. 103

Κεφάλαιο 1: Επεξεργασία υγρών αποβλήτων και τρόποι διαχείρισης βιοστερεών

1.1 Υγρά Απόβλητα – Βιοστερεά (Biosolids)

Η διάθεση μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων, βεβαρημένων με οργανικές ή τοξικές ουσίες στους φυσικούς αποδέκτες, δημιουργεί έντονα προβλήματα ρύπανσης, όπως ελάττωση της ικανότητας αυτοκαθαρισμού των νερών, ευτροφισμό και επηρεασμό των βιοσυστημάτων τους. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτά τα ζητήματα, αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι καθαρισμού των αστικών λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων. Παράλληλα, θεσπίστηκαν νόμοι σχετικοί με την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης των νερών και των εδαφών, και καθορίστηκαν όρια απόρριψης αποβλήτων καθώς και πρότυπα ποιότητας αποδεκτών (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, ΚΥΑ 80568/4225/91, ΚΥΑ 145116/201) (Κουϊμτζής, et al., 1994).

Η κάθε μέθοδος ή το κάθε σύστημα καθαρισμού υγρών αποβλήτων περιλαμβάνει διάφορα στάδια επεξεργασίας (πρωτοβάθμιας, δευτεροβάθμιας αλλά και τριτοβάθμιας επεξεργασίας) (Εικόνα 1.1). Το κάθε στάδιο επεξεργασίας περιλαμβάνει συγκεκριμένες διεργασίες που εξαρτώνται από την φύση των εισερχόμενων αποβλήτων, και όλες μαζί συντελούν στον επιδιωκόμενο βαθμό καθαρισμού. Τελικά, επιλέγουμε τον καταλληλότερο συνδυασμό μεθόδων και τεχνικών με βάση τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός βαθμός καθαρισμού του με το χαμηλότερο δυνατό κόστος (Κουϊμτζής, et al., 1994). Κατά την διάρκεια επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων μαζί με την τελική εκροή αποβλήτων, η οποία διατίθεται κατάλληλα, παράγονται ορισμένα παραπροϊόντα, όπως εσχαρίσματα, άμμος, ιλύς και άλλα, τα οποία απαιτούν κατάλληλη επεξεργασία πριν την τελική διάθεσή τους.



Εικόνα 1.1 Σχηματική απεικόνιση διαγράμματος ροής μιας ΕΕΛ (Wongburi, 2018).

Η διαχείριση της ιλύος είναι η πιο απαιτητική συγκριτικά με τα υπόλοιπα παραπροϊόντα. Η κατάλληλη επεξεργασία της ιλύος οδηγεί στη παραγωγή βιοστερεών. Με τον όρο βιοστερεά εννοούμε κυρίως το οργανικό, ημιστερεό προϊόν των υγρών αποβλήτων το οποίο παραμένει ως υπόλειμμα, μετά τη βιολογική ή χημική σταθεροποίηση των στερεών έτσι ώστε να γίνει κατάλληλα για αποδοτική χρήση (Tchobanoglous, et al., 2003). Η διαχείριση των βιοστερεών αποτελεί μια μεγάλη περιβαλλοντική και οικονομική πρόκληση. Εξαιτίας της ταχείας αύξησης του πληθυσμού, η ποσότητα των υγρών αποβλήτων καθώς και η ποσότητα της λάσπης πρόκειται να αυξηθούν τα επόμενα χρόνια (Seiple, et al., 2017).

Η επεξεργασία των λυμάτων αλλά και της ιλύος απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την επεξεργασία λυμάτων θα αυξηθεί κατά 20% τα επόμενα 15 χρόνια στις ανεπτυγμένες χώρες, προκαλώντας σημαντική αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και της κατανάλωσης πόρων. Ως εκ τούτου, πρέπει να αναπτυχθούν βιώσιμες μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων στοχεύοντας στη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και των Αερίων του Θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHG) (Li, et al., 2015).

1.2 Συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

1.2.1 Προ-επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία

Η προ-επεξεργασία των υγρών αποβλήτων περιλαμβάνει τα στάδια της ανύψωσης, της απόσμησης, της εσχάρωσης, της εξάμμωσης, της λιποσυλλογής και της εξισορρόπησης της ογκομετρικής παροχής των αποβλήτων (Χρυσικόπουλος, 2013).

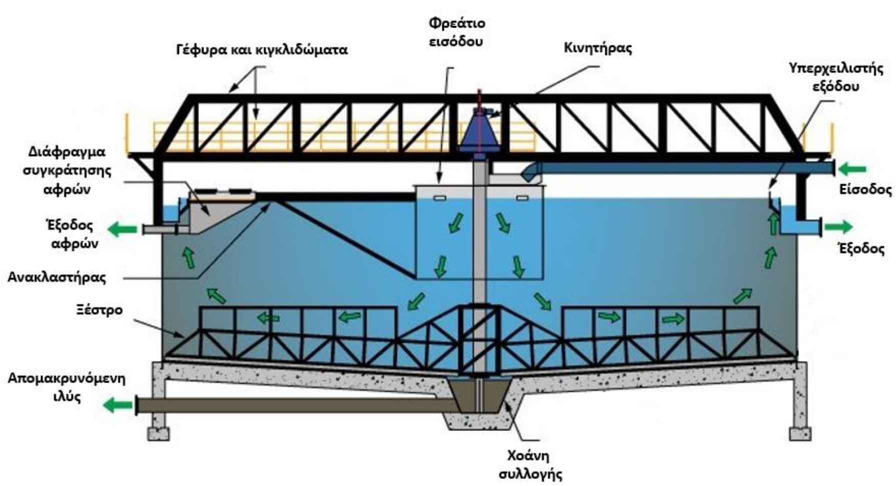
Αρχικά, τα υγρά απόβλητα που φθάνουν μέσω του αποχετευτικού δικτύου σε μια ΕΕΛ είναι πολύ πιθανό να χρειάζονται ανύψωση αν οι σωλήνες του αποχετευτικού είναι υπόγειοι. Η ανύψωση των λυμάτων στην επιφάνεια και στο ύψος των ΕΕΛ συνήθως γίνεται με αντλίες. Στην συνέχεια, λαμβάνει χώρα η απόσμηση των λυμάτων. Τα υγρά απόβλητα που φθάνουν σε μια ΕΕΛ είναι αρκετά έως και πάρα πολύ δύσοσμα λόγω της αναερόβιας σήψης κατά τη διαδρομή τους μέσα στο αποχετευτικό δίκτυο. Επομένως, οι ΕΕΛ πρέπει να διαθέτουν στην είσοδο ένα σύστημα απόσμησης, όπου ο απαγόμενος δύσοσμος αέρας συλλέγεται και μεταφέρεται σε ένα σύστημα απόσμησης (Χρυσικόπουλος, 2013).

Έπειτα, πραγματοποιείται η φυσική διεργασία της εσχάρωσης. Η εσχάρωση στοχεύει στην απομάκρυνση των ογκώδων στερεών των αποβλήτων που μπορεί να φράξουν και να καταστρέψουν τις αντλίες και τον λοιπό μηχανολογικό εξοπλισμό των ΕΕΛ. Επίσης, σκοπός της εσχάρωσης στα άλλα στάδια επεξεργασίας είναι η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, η οποία επιτυγχάνεται με τη συγκράτησή τους σε σχάρες κατά τη διέλευση των αποβλήτων από αυτές (Στάμος & Βογιατζής, 1994).

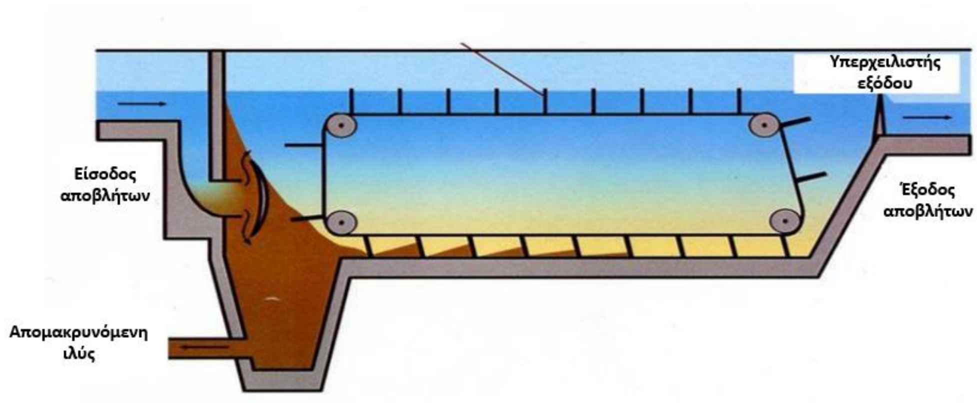
Στη συνέχεια, τα λύματα οδηγούνται στην μονάδα εξάμμωσης. Σκοπός της εξάμμωσης είναι η απομάκρυνση κόκκων άμμου, σωματιδίων αργίλου ή άλλων σωματιδίων γεωλογικής ή όχι υφής, διαμέτρου μεγαλύτερης από 200 μm, που δεν είναι οργανικά, και έχουν ταχύτητες καθίζησης αρκετά μεγαλύτερες από εκείνες των οργανικών στερεών. Η απομάκρυνση αυτών των σωματιδίων κρίνεται απαραίτητη, γιατί η παρουσία τους δημιουργεί προβλήματα, όπως εναπόθεση φερτών υλών στον πυθμένα αγωγών, φράξιμο σωληνώσεων, φθορά του μηχανολογικού εξοπλισμού και μείωση της απόδοσης σημαντικών μονάδων επεξεργασίας (Στάμος & Βογιατζής, 1994).

Εξαιτίας των ελαιωδών και λιπαρών προσμίξεων που επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού ή των λυμάτων, το στάδιο της λιποσυλλογής είναι απαραίτητο. Τα λίπη και έλαια δημιουργούν προβλήματα στη βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Η λιποσυλλογή μπορεί να πραγματοποιηθεί πριν την εξάμμωση, αλλά πολλές φορές γίνεται και ταυτόχρονα με την εξάμμωση (Χρυσικόπουλος, 2013). Επίσης, μέρος της προ-επεξεργασίας αποτελεί και η εξισορρόπηση ογκομετρικής παροχής των αποβλήτων, η οποία είναι απαραίτητη για την εξομάλυνση της παροχής λυμάτων από τις διακυμάνσεις που οφείλονται σε καθημερινές ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες έχουν μια σχετική περιοδικότητα, ή σε τυχαίες απρόβλεπτες εισροές υγρών αποβλήτων (π.χ. βιομηχανικά υγρά) (Χρυσικόπουλος, 2013).

Τέλος, η πρωτοβάθμια επεξεργασία αποτελεί το επόμενο στάδιο επεξεργασίας των αποβλήτων και πραγματοποιείται στις λεγόμενες Δεξαμενές Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (ΔΠΚ). Στις ΔΠΚ απομακρύνονται τα αιωρούμενα στερεά μεγέθους $(10^{-1} - 10^{-3}\,\mathrm{mm})$ και επιτυγχάνεται από 50% έως 70% απομάκρυνση των Ολικά Αιωρούμενων Στερεών (Total Suspended Solids, TSS) και 25% έως 40% απομάκρυνση του Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (Biochemical Oxygen Demand, BOD) (Tchobanoglous, et al., 2003). Υπάρχουν δύο τύποι ΔΠΚ, κυκλικού (Εικόνα 1.2) και ορθογωνικού σχήματος (Εικόνα 1.3). Η επιλογή του σχήματος και του μεγέθους των ΔΠΚ εξαρτάται από το κόστος, τον διαθέσιμο χώρο, τις ειδικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης, τον επιθυμητό εξοπλισμό συλλογής της λάσπης και τους υπάρχοντες κανονισμούς. Όσον αφορά τον αριθμό των ΔΠΚ πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες λειτουργίας – συντήρησης να επαρκούν για τις ανάγκες της εγκατάστασης (Στάμος & Βογιατζής, 1994).



Εικόνα 1.2 Εικόνα ΔΠΚ κυκλικού σχήματος (Monroeenvironmental, 2020).



Εικόνα 1.3 ΔΠΚ ορθογωνικού σχήματος (Jabbar & Al-Baidhani, 2005).

1.2.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Ο κύριος στόχος της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας είναι η οξείδωση των διαλυμένων και σωματιδιακών βιοαποικοδομήσιμων συστατικών σε αποδεκτά τελικά προϊόντα, η συσσωμάτωση και απομάκρυνση των μη καθιζόμενων κολλοειδών στερεών, και η απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών (αζώτου και φωσφόρου). Για να επιτευχθούν αυτά, είναι αναγκαία η παρουσία των μικροοργανισμών, οι οποίοι διασπούν, σταθεροποιούν την οργανική ύλη και την χρησιμοποιούν ως τροφή για την απόκτηση ενέργειας με σκοπό την αναπαραγωγή τους (Tchobanoglous, et al., 2003).

1.2.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία

Ως τριτοβάθμια επεξεργασία ορίζεται η επιπρόσθετη επεξεργασία που απαιτείται για την απομάκρυνση αιωρούμενων, κολλοειδών και διαλυμένων συστατικών τα οποία παραμένουν στα υγρά απόβλητα μετά από την πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία. Τα διαλυμένα συστατικά μπορεί να είναι σχετικά απλά ανόργανα ιόντα (όπως ασβέστιο, κάλιο, θεϊκά, νιτρικά, φωσφορικά) έως ιδιαίτερα πολύπλοκες σύνθετες οργανικές ενώσεις (Tchobanoglous, et al., 2003). Στην συνέχεια, ακολουθεί η απολύμανση των αποβλήτων, ενώ η τελική διάθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων μπορεί να γίνει σε κάποιο υδάτινο αποδέκτη ή στο έδαφος (επιφανειακά ή υπεδάφια) και πέρα από την απλή απόρριψη τους στο περιβάλλον μπορεί να αποβλέπει και στην επαναχρησιμοποίηση τους (πχ. άρδευση) (Αντωνιάδης, 2006).

1.2.4 Απολύμανση

Η απολύμανση έχει ως στόχο την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών ή ακόμη και την αδρανοποίηση τους, ώστε να προστατευτεί η δημόσια υγεία από μικροοργανισμούς που είναι φορείς ασθενειών. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι απολύμανσης τω υγρών αποβλήτων, όπως χλωρίωση, απολύμανση με Υπεριώδη Ακτινοβολία (Ultra-Violent, UV) και οζόνωση (Πίνακας 1.1). Η επικρατέστερη και συχνότερη μέθοδος απολύμανσής στις ΕΕΛ είναι η χλωρίωση, παρόλα αυτά αρκετές ανησυχίες έχουν υπάρξει σχετικά με τα παραπροϊόντα της (Davis & Cornwell, 2008).

Πίνακας 1.1 Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων απολύμανσης (Δελήμπαση, 2001).

Χαρακτηριστικό	Οζόνωση	UV	Χλωρίωση
Απομάκρυνση κολοβακτηριδίων	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή
Απομάκρυνση ιών	Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια
Επίδραση στο υδάτινο περιβάλλον του αποδέκτη	Καμία	Καμία	Αύξηση διαλυτών στερεών
Παραπροϊόντα απολύμανσης	Κανένα	Κανένα	Αλογονοφόρμια
Επικινδυνότητα παραπροϊόντων	Μηδενική	Μηδενική	Μεγάλη
Κόστος εγκατάστασης	Σημαντικό	Σημαντικό	Μέσο
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης	Μέσο	Σημαντικό	Μέσο
Απαιτούμενη έκταση	Μέση	Μικρή	Μεγάλη

1.2.5 Γραμμή επεξεργασίας ιλύος

Ο κυριότερος στόχος της επεξεργασίας της ιλύος είναι η παραγωγή ενός τελικού σταθεροποιημένου προϊόντος, έτσι ώστε η διάθεσή του στο περιβάλλον να μην εγκυμονεί κινδύνους για τη δημόσια υγεία. Τα πιο συνηθισμένα στάδια επεξεργασίας της ιλύος σε μια ΕΕΛ είναι τα εξής (Tchobanoglous, et al., 2003):

- Προκαταρκτικές Διεργασίες (Preliminary Operations)
- Πάχυνση (Thickening)
- Σταθεροποίηση (Conditioning)
- Αφυδάτωση (Dewatering)

Προκαταρκτικές Διεργασίες (Preliminary Operations)

Ο τεμαχισμός (grinding), η εξάμμωση (grit removal), η ανάμιξη (blending) και η αποθήκευση (storage) των στερεών και των βιοστερεών είναι απαραίτητες προκαταρκτικές διεργασίες που πραγματοποιούνται στοχεύοντας την επίτευξη ενός ομογενοποιημένου ρυθμού τροφοδοσίας για τα επόμενα στάδια επεξεργασία της ιλύος. Ο τεμαχισμός της ιλύος γίνεται έτσι ώστε να μην προκληθούν διάφορα προβλήματα, όπως εμφράξεις στα επόμενα στάδια επεξεργασίας της ιλύος, εξαιτίας της παρουσίας μεγάλων και ινωδών υλικών. Σε περιπτώσεις, όπου δεν χρησιμοποιούνται μονάδες για την απομάκρυνση της άμμου πριν από τις ΔΠΚ ή όταν οι ήδη υπάρχουσες δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν σε παροχές αιχμής και φορτία αιχμής είναι απαραίτητη η διεργασία της εξάμμωσης. Στην συνέχεια, λαμβάνει χώρα η ανάμιξη της ιλύος που έχει συλλεχθεί από τα διάφορα στάδια επεξεργασίας. Η ανάμιξη στοχεύει στην ομοιομορφία της λάσπης στα επόμενα στάδια επεξεργασίας της. Το τελευταίο βήμα του πρώτου σταδίου της επεξεργασίας της ιλύος είναι η αποθήκευση της έτσι ώστε, να εξομαλυνθούν οι διακυμάνσεις στο ρυθμό παραγωγής των στερεών, και να καταστεί εφικτή η συσσώρευση των στερεών σε περιόδους που δεν λειτουργούν οι διεργασίες πάχυνσης, σταθεροποίησης και αφυδάτωσης της ιλύος (Tchobanoglous, et al., 2003).

Πάχυνση – Σταθεροποίηση - Αφυδάτωση

Η πάχυνση (thickening) της ιλύος στοχεύει στην αύξηση των στερεών της ιλύος με την απομάκρυνση υγρού κλάσματος. Μετά το στάδιο της πάχυνσης ακολουθεί το στάδιο της σταθεροποίησης (conditioning). Η σημασία του σταδίου αυτού εντοπίζεται στην μείωση των παθογόνων, στην απομάκρυνση των δυσάρεστων οσμών, αλλά και την εξάλειψη του δυναμικού σήψης της ιλύος. Τέλος, το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας της ιλύος είναι αφυδάτωση (dewatering). Η αφυδάτωση της ιλύος αποτελεί μια φυσική διεργασία που στοχεύει στην μείωση του περιεχομένου της ιλύος σε υγρασία (Tchobanoglous, et al., 2003).

1.3 Ενεργειακές απαιτήσεις και σχηματισμός GHG στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

1.3.1. Ενεργειακές απαιτήσεις

Οι ΕΕΛ εκτιμάται ότι απαιτούν περίπου το 1% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μιας χώρας (Cao, 2011). Πρόσφατες μελέτες, διαπίστωσαν ότι η μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των ΕΕΛ κυμαίνεται μεταξύ 0.3 - 2.1 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^3}}$ (Gandiglio, et al., 2017), ενώ οι Electric Power Research Institute (EPRI) and Water Research Foundation (WRF) αναφέρουν παρόμοια κατανάλωση ενέργειας, η οποία κυμαίνεται από 0.413 έως 0.87 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^3}}$ και, εξαρτάται από το μέγεθος των ΕΕΛ (Πίνακας 1.2) (EPRI, 2013).

Πίνακας 1.2 Ενεργειακή κατανάλωση ανάλογα με την δυναμικότητα των ΕΕΛ (Panepinto, et al., 2016).

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

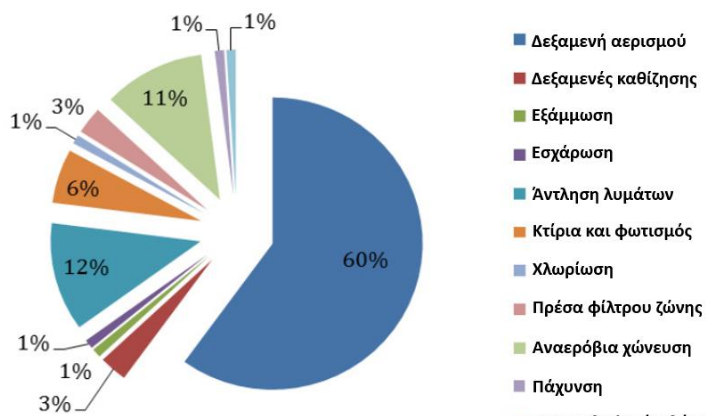
Ενδεικτικό παράδειγμα σχετικά με την κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων των ΕΕΛ αποτελεί η πρόσφατη μελέτη ενεργειακής αξιολόγησης που δημοσιεύτηκε το 2020 για 17 ΕΕΛ ενεργού ιλύος στην Ελλάδα. Οι ΕΕΛ που εξετάστηκαν, με μέση παροχή λυμάτων μεταξύ 300 - 27,000 $\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{d}}$, είναι σχεδιασμένες για να εξυπηρετούν τις ανάγκες 1,100 – 56,000 Ισοδύναμων Κατοίκων (ΙΚ). Τα αποτέλεσμα της μελέτης έδειξαν ότι η κατανάλωση ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 0.128 - 2.280 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^3}}$ πράγμα που επισημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση των ενεργειακών απαιτήσεων, γεγονός που δημιουργεί λόγους βελτίωσης της ενεργειακής κατανάλωσης των ΕΕΛ (Siatou, et al., 2020).

Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Ο μέσος όρος ή το εύρος της κατανάλωσης ενέργειας ποικίλλει σύμφωνα με την βιβλιογραφία από χώρα σε χώρα. Γενικά, η άντληση ιλύος θεωρείται ως η διεργασία με τη μεγαλύτερη χρήση ενέργειας στην πρωτοβάθμια επεξεργασία. Η ενεργειακή απαίτηση της συλλογής και άντλησης λυμάτων κυμαίνεται από 0.020 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m}^3}$ έως 0.100 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m}^3}$ στον Καναδά, μεταξύ 0.045 - 0.140 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m}^3}$, στην Ουγγαρία και από 0.100 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m}^3}$ έως 0.370 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m}^3}$ στην Αυστραλία (Gu, et al., 2017).

Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Η κατανάλωση ενέργειας στην δεξαμενή αερισμού καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του ενεργειακού κόστους των ΕΕΛ. Στις περισσότερες ΕΕΛ, ο αερισμός καταλαμβάνει περίπου το 50-60% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 1.4), ενώ η επεξεργασία της ιλύος καταναλώνει 15-25% της ηλεκτρικής ενέργειας, ακολουθούμενη από δευτεροβάθμια καθίζηση, συμπεριλαμβανομένων των αντλιών ανακυκλοφορίας (≅15%) (Mamais, et al., 2015).



Εικόνα 1.4 Ποσοστιαία κατανομή ενέργειας σε ΕΕΛ (Soares, et al., 2017).

Προηγμένες διεργασίες

Η προηγμένη επεξεργασία λυμάτων επιφέρει τις περισσότερες φορές μεγάλες ενεργειακές καταναλώσεις. Οι ενεργειακές απαιτήσεις προηγμένων διεργασιών κυμαίνονται μεταξύ 0.39-3.7 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m}^3}$ στην Ιαπωνία, σε αντίθεση με τις ΕΕΛ που χρησιμοποιούν συμβατική τεχνολογία και κυμαίνονται περίπου 0.43 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m}^3}$ στην Αμερική, στο Ταϊβάν 0.41 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m}^3}$ στη Νέα Ζηλανδία 0.49 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m}^3}$ και στην Ουγγαρία 0.45-0.75 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m}^3}$ (Plappally, 2012; Bodik & Kubaska, 2013; Pitas, et al., 2010; Mizuta & Shimada, 2010).

Από την άλλη πλευρά, οι ενεργειακές ανάγκες σε διεργασίες νιτροποίησης και απονιτροποίησης με συμβατικές μεθόδους είναι 2.3 $\frac{kWh}{kg\ N_{removed}}$ (Henze, et al., 1996), ενώ με την καινοτόμα τεχνολογία ANaerobic AMMOnium OXidation (ANAMMOX) είναι μικρότερες, περίπου 0.9 $\frac{kWh}{kg\ N_{removed}}$ (Jetten, et al., 2001; Capodaglio, et al., 2016; Mulder, et al., 1995).

Απολύμανση

Οι τιμές σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση για την απολύμανση των λυμάτων εξαρτώνται από τις εφαρμοζόμενες τεχνολογίες. Για παράδειγμα, η απολύμανση με UV κυμαίνεται μεταξύ 0.03 - 0.15 $\frac{kWh}{m^3}$, για τον μηχανικό εξοπλισμό που απαιτείται για τη δοσολογία των χημικών η ενεργειακή κατανάλωση αντιστοιχεί σε 0.009 - 0.015 $\frac{kWh}{m^3}$και για την διήθηση 0.0074-0.0027 $\frac{kWh}{m^3}$ (Longo, et al., 2016; Cao, 2011; Gikas, 2017a).

Επεξεργασία λάσπης

Οι ενεργειακές ανάγκες μιας ΕΕΛ για αναερόβια χώνευση ιλύος, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ενεργού ιλύος, είναι περίπου 0.52 $\frac{kWh}{m^3}$. Οι ενεργειακές ανάγκες που αφορούν μονάδες αφυδάτωσης κυμαίνονται από 0.82 $\frac{kWh}{kg}$ έως 1.1 $\frac{kWh}{kg}$ ξηρής λάσπης και είναι άμεσα εξαρτώμενες από τον τύπο της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται (Πίνακας 1.3) (Arjona & Cisneros, 2005).

Πίνακας 1.3 Ενεργειακή κατανάλωση τεχνολογιών αφυδάτωσης ιλύος (Soares, et al., 2017).

Technology	Total energy *$\left(\frac{kWh}{kg}\right)$
Band dryer ™	0.82
Paddle dryer ™	0.95
Flash dryers	1.05
Rotary dryers	1.05
Drum	1.07
Fluid bed	1.10
Greenhouse	1.53

*Sum of thermal (between 95% to 99%) electric (1% to 5%)

1.3.2. Σχηματισμός GHG στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Μαζί με την κατανάλωση ενέργειας, οι ΕΕΛ αποτελούν πηγή εκπομπής των GHG που ευθύνονται για την κλιματική αλλαγήκαι την υπερθέρμανση του πλανήτη (Koutsou, et al., 2018). Η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency, EPA) των ΗΠΑ εκτίμησε ότι ο τομέας της επεξεργασίας λυμάτων ήταν υπεύθυνος για πάνω από το 5% των non - CO_2 GHG, το έτος 2005 και προέβλεψε αύξηση των GHG κατά 27% έως το 2030 (EPA, 2012). Αρκετές μελέτες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και το μεθάνιο (CH_4) είναι τα κύρια αέρια (Πίνακας 1.4), τα οποία μπορούν να παραχθούν και να εκλυθούν στην ατμόσφαιρα από μια ΕΕΛ (IPCC, 2013; Arnell, et al., 2013; Foley, et al., 2011).

Πίνακας 1.4 Δείκτης GWP που σχετίζεται με τα GHG στις ΕΕΛ (IPCC, 2001).

Αέριο	Χημικός τύπος	GWP σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών
Διοξείδιο του άνθρακα	CO_2	1
Μεθάνιο	CH_4	28
Υποξείδιο του αζώτου	N_2O	296

Όπως φαίνεται στον πίνακα 1.4, ο δείκτης Global Worming Potential (GWP) ποικίλει σημαντικά, ανάλογα με τον τύπο του αερίου. Ως εκ τούτου, μια μικρή ποσότητα αερίου που εκπέμπεται με υψηλό δείκτη GWP έχει μεγαλύτερη επίδραση στην ατμόσφαιρα από ένα αέριο με χαμηλό δείκτη GWP. Για παράδειγμα, ένα χιλιόγραμμο (kg) εκπεμπόμενου N_2O θα έχει το ίδιο GWP ίσο με 296 kg CO_2.

Για την αναφορά εκπομπών των GHG χρησιμοποιείται συχνά ο όρος "αποτύπωμα άνθρακα" (Wiedmann & Minx, 2008; Wright, et al., 2011). Σύμφωνα με το άρθρο 1 της ΚΥΑ 1023/2018 (ΦΕΚ 42/Β/17-1-2018), ανάλογα με το αντικείμενο της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και της ευθύνης καταγραφής των GHG, υπάρχουν τρεις κατηγορίες διαχωρισμού των GHG (Πίνακας 1.5).

Πίνακας 1.5 Κατηγορίες διαχωρισμού των GHG σύμφωνα με ΚΥΑ 1023/2018.

Α/Α	Κατηγορίες	Περιγραφή
1	**Άμεσες εκπομπές**	Αφορά εκπομπές από δραστηριότητες υπό τον πλήρη έλεγχο της εταιρείας, δηλαδή αυτή η ίδια προβαίνει στην αγορά και καύση καυσίμου για την μεταφορά και αποθήκευση.
2	**Έμμεσες εκπομπές ενέργειας**	Αφορά εκπομπές από τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.
3	**Άλλες έμμεσες εκπομπές**	Αφορά εκπομπές από δραστηριότητες που δεν βρίσκονται υπό τον πλήρη έλεγχο της εταιρείας αλλά από συνεργαζόμενους φορείς.

1.4 Προηγμένες μέθοδοι στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

1.4.1 Διεργασίες μεμβρανών με ωθούσα δύναμη την διαφορά πίεσης

Ως μεμβράνη μπορεί να ορισθεί μια δομή που διαθέτει πολύ μεγαλύτερες πλευρικές διαστάσεις σε σχέση με το πάχος της, και μέσω της οποίας δύναται να λάβει χώρα μεταφορά μάζας υπό την επίδραση μιας ποικιλίας από ωθούσες δυνάμεις (Koros, et al., 1996). Οι διεργασίες μεμβράνης με ωθούσα δύναμη την διαφορά της πίεσης (Πίνακας 1.6) διακρίνονται στις εξής κατηγορίες (Chollom, 2014):

- Μικροδιήθηση (Microfiltration, MF)
- Υπερδιήθηση (Ultrafiltration, UF)
- Νανοδιήθηση (Nanofiltration, NF)
- Αντίστροφη Ώσμωση (Reverse Osmosis, RO)

Πίνακας 1.6 Χαρακτηριστικά μεμβρανών με διαφορά πίεσης (Valdez, 2012; Eyvaz & Yüksel, 2018).

Διεργασίες μεμβρανών	MWCO[a]	Ανοίγματα πόρων(μm)	Πίεση (bar)	Περιγραφή
MF	100-500	$10^{-1}-10$	1-3	Η MF χρησιμοποιείται πρωταρχικά για τον διαχωρισμό σωματιδίων και βακτηριών από μικρότερες διαλυμένες ουσίες (Conidi, et al., 2020).
UF	20 - 150	$10^{-3}-1$	2-5	Με την UF μπορούν να συμπυκνωθούν μόρια όπως πεπτίδια, πρωτεΐνες ή άλλα σωματίδια (Rosenberg, 1995).
NF	2 - 20	$10^{-3}-10^{-2}$	5 - 15	Η NF είναι η διεργασία μεμβρανών κατά την οποία λαμβάνει χώρα απόρριψη μόνο των πολλαπλά φορτισμένων ανιόντων, όπως θειικών ή φωσφορικών, ενώ τα μονοφορτισμένα ανιόντα διέρχονται μέσω της μεμβράνης. Επιπλέον, κατά τη NF λαμβάνει χώρα απόρριψη μη φορτισμένων διαλυμένων συστατικών και θετικά φορτισμένων ιόντων, σε ποσοστό που εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα των εκάστοτε μορίων (Koros, et al., 1996).
RO	0.2 - 2	$10^{-3}-10^{-4}$	15-75	Η RO είναι ευρέως γνωστή για την υψηλή αποτελεσματικότητά της στο διαχωρισμό μικρών σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων βακτηρίων και μονοσθενικών ιόντων όπως ιόντα νατρίου και ιόντων χλωρίου έως 99,5% (Muro, et al., 2012).

[a] Molecular Weight Cut Off (MWCO)

1.4.2 Διεργασία ANaerobic AMMOnium OXidation (ANAMMOX)

Η καινοτόμα διεργασία στην οποία το αμμώνιο μετατρέπεται σε αέριο άζωτο κάτω από ανοξικές συνθήκες, όπου τα βακτήρια χρησιμοποιούν τα νιτρώδη ως δέκτη ηλεκτρονίου, ονομάστηκε ANAMMOX. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διεργασία αυτή 1 mol αμμωνίου οξειδώνεται με 1 mol νιτρωδών για την παραγωγή αέριου αζώτου N_2, απουσία οξυγόνου (Εξ. 1.1) (Strous, et al., 1997).

$$\mathrm{NH_4}^+ + \mathrm{NO_2}^- \rightarrow \mathrm{N_2} + \mathrm{H_2O} \qquad 1.1$$

Ο γενικός στόχος της τεχνολογίας αυτής είναι να επιτρέψει την αυξημένη χρήση βακτηρίων ικανών για αναερόβια οξείδωση του αμμωνίου για τη βελτίωση της απομάκρυνσης του αζώτου από τα λύματα, όσον αφορά την αποδοτικότητα απομάκρυνσης, τη χρήση ενέργειας και το αποτύπωμα άνθρακα (Ali & Okabe, 2015). Ο πρώτος αντιδραστήρας ANAMMOX πλήρους κλίμακας στον κόσμο ξεκίνησε σε μια ΕΕΛ στο Ρότερνταμ, στην Ολλανδία και αντιμετωπίζει πάνω από 750 $\frac{\mathrm{Kg-N}}{\mathrm{d}}$ (Van der Star, et al., 2007). Η διεργασία ANAMMOX προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα για την απομάκρυνση του αμμωνίου από τα λύματα. Η αναερόβια οξείδωση του αμμωνίου είναι μια αυτότροφη διεργασία, λόγω της αυτοτροφικής φύσης της νιτροποίησης, που καταναλώνεται CO_2 αντί της παραγωγής και δεν απαιτείται προσθήκη μεθανόλης ως πηγή άνθρακα. Επιπροσθέτως, η εφαρμογή τεχνολογίας ANAMMOX οδηγεί σε υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης του αζώτου και χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις από εκείνες με τη συμβατική απομάκρυνση. Από την άλλη πλευρά, οι σταθεροί και υψηλοί ρυθμοί απομάκρυνσης του αζώτου μπορούν να επιτευχθούν μόνο εάν ελέγχονται σε κατάλληλα επίπεδα συγκεκριμένες λειτουργικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία, το pH, το DO, η συγκέντρωση αζώτου και η συγκέντρωση άνθρακα. Υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, η απόδοση απομάκρυνσης του αζώτου των διαφόρων συστημάτων ANAMMOX θα μπορούσε να διαφέρει λόγω της διαφοράς στα κυρίαρχα είδη ANAMMOX, επειδή ο μεταβολισμός κάθε κοινότητας ANAMMOX είναι διαφορετικός. Ως εκ τούτου, οι συνθήκες λειτουργίας κάθε τεχνολογίας ANAMMOX θα πρέπει να διερευνώνται μεμονωμένα για τον προσδιορισμό των ακριβών βέλτιστων συνθηκών (Van der Star, et al., 2007).

1.5 Απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων μέσω μικροκοσκίνισης και σύγκριση με συμβατική επεξεργασία

<u>Μικροκοσκίνιση</u>

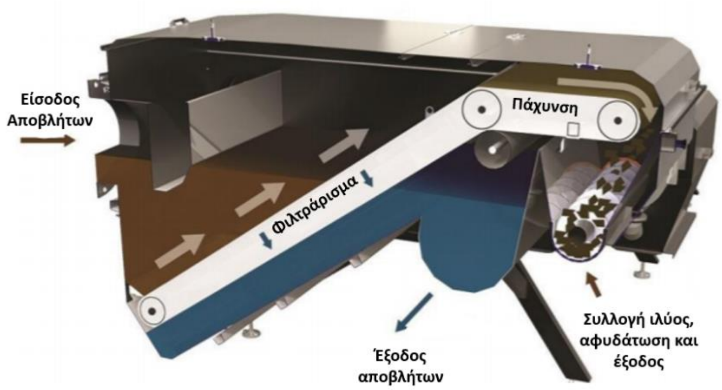
Η μικροκοσκίνιση με μικροεσχάρες είναι μια αποδοτική καινοτόμα μέθοδος απομάκρυνσης στερεών (Koliopoulos & Gikas, 2013). Η μικροκοσκίνιση είναι μια τεχνολογία φυσικού διαχωρισμού και σε παγκόσμια κλίμακα υπάρχουν πάνω από 300 εγκατεστημένα συστήματα μικροκοσκίνισης στον Καναδά και στις ΗΠΑ (Harrelson & Cravens, 1982; Grabbe, et al., 1998; Bourgeous, et al., 2003). Μερικά από τα συστήματα μικροκοσκίνισης που βρίσκονται εμπορικά διαθέσιμα είναι τα παρακάτω (Lema & Martinez, 2017):

- Rotating Belt Filters (RBFs)
- Rotating Drum Filters (RDFs)
- Disc filters

1.5.1 Rotating Belt Filters (RBFs)

Το RBF συχνά χρησιμοποιείται και με την ονομασία RBS (Rotating Belt Sieves). Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο όρος RBF. Ένα RBF αποτελείται από εσχάρα περιστρεφόμενου κόσκινου, λεπτού πλέγματος, τοποθετημένο σε κλίση που στοχεύει στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών από τα λύματα (Εικόνα 1.5). Καθώς τα λύματα εισρέουν διαμέσου του περιστρεφόμενου κόσκινου, τα αιωρούμενα στερεά προσκολλώνται πάνω στο πλέγμα. Παράλληλα, ένα αυτόματο σύστημα καθαρισμού είναι εγκατεστημένο στο άνω άκρο του φίλτρου για να καθαρίζει συνεχώς το πλέγμα του φίλτρου και να αφαιρεί τυχόν συσσωρευμένη λάσπη, έτσι ώστε με την πλήρη περιστροφή του κόσκινου να επιτυγχάνεται παράλληλα ο καθαρισμός και το φιλτράρισμα των αποβλήτων. Το φιλτραρισμένο απόβλητο μεταφέρεται μέσω βαρύτητας στο σημείο εξόδου συνεχίζοντας την επεξεργασία, ενώ τα συλλεγόμενα στερεά συμπιέζονται και οδηγούνται και αυτά προς επεξεργασία.

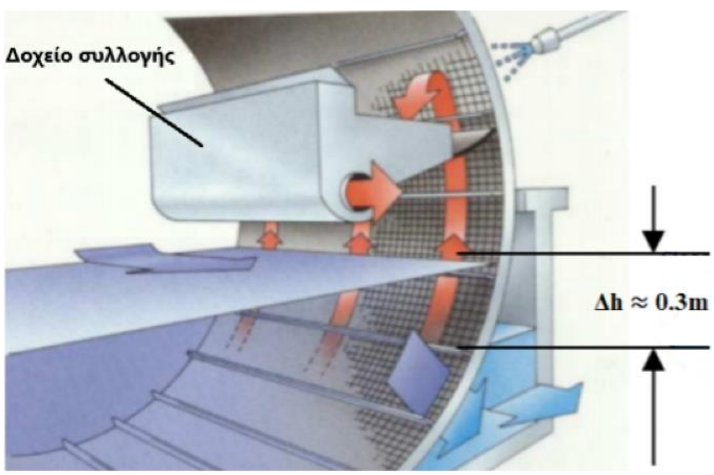
Η ταχύτητα και το ύψος της ροής των αποβλήτων στο εσωτερικό του φίλτρου εξαρτάται από την παροχή εισόδου και ρυθμίζεται αναλόγως. Η απόδοση του RBF εξαρτάται από την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων στην ροή εισόδου των αποβλήτων, το μέγεθος των πόρων του φίλτρου και την παροχή των εισερχόμενων αποβλήτων (Lema & Martinez, 2017). Το μέγεθος των πόρων του RBF κυμαίνεται από 50 μm έως 4000 μm (Ng, 2012), ωστόσο το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέγεθος σε εφαρμογές αστικών λυμάτων πλήρους κλίμακας είναι 350 μm (Paulsrud, et al., 2014).



Εικόνα 1.5 RBF (Gupta, 2018).

1.5.2 Rotating Drum Filters (RDFs)

Το απόβλητο διέρχεται μέσω βαρύτητας στο εσωτερικό του RDF (Εικόνα 1.6), στοχεύοντας όπως και το RBF στην απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών από τα λύματα. Το μέγεθος των πόρων του RDF κυμαίνεται μεταξύ 10 – 500 μm. Η επιφάνεια που καταλαμβάνει κυμαίνεται από 0.35 – 22.5 m^2, ανάλογα με τις ανάγκες που εξυπηρετεί και είναι κατάλληλο για παροχές λυμάτων που κυμαίνονται μεταξύ 2 – 1,000 $\frac{L}{s}$ (Lema & Martinez, 2017).

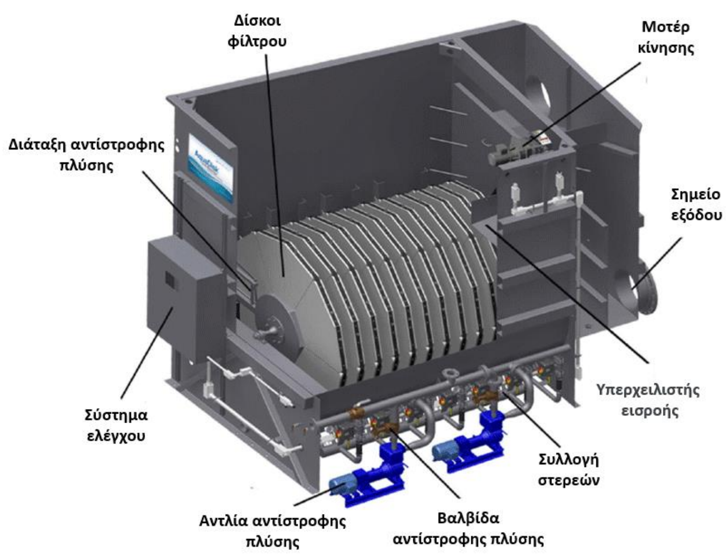


Εικόνα 1.6 RDF (Väänänen, 2017).

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του, τα ευμεγέθη στερεά κατακρατούνται στους πόρους του φίλτρου, προκαλώντας αύξηση της αντίστασης διήθησης και τελικά μια αύξηση της στάθμης ύδατος στο εσωτερικού του. Όταν η στάθμη του νερού, φτάσει σε μέγιστη τιμή $\Delta h \cong 0.3m$ (όπως φαίνεται στην (Εικόνα 1.6), το RDF αρχίζει να περιστρέφεται και ξεκινάει η πλύση υψηλής πίεσης. Το νερό πλύσης που διαπερνά τους πόρους φίλτρων απελευθερώνει τα στερεά που διατηρούνται στην εσωτερική πλευρά του φίλτρου και συλλέγονται σε ένα δίσκο που τοποθετείται στο εσωτερικό του. Η διήθηση δεν σταματά κατά τη διάρκεια της πλύσης και το διήθημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο έκπλυσης (Carles, et al., 2015).

1.5.3 Disc filters

Η τεχνολογία των Disc filters (Εικόνα 1.7) στοχεύει, όπως και τα RBFs και RDFs στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών. Στην περίπτωση των Disc filters, το απόβλητο εισέρχεται δια μέσω σωλήνων τροφοδοσίας ή καναλιού στο εσωτερικό του τυμπάνου διήθησης, μέσω βαρύτητας. Το εσωτερικό του τυμπάνου διαθέτει ξεχωριστούς διαδοχικούς περιστρεφόμενους κυκλικούς δίσκους, οι οποίοι αποτελούνται από μικρά κόσκινα με ανοίγματα πόρων 20–35 μm (Tchobanoglous, et al., 2003). Καθώς το απόβλητο ρέει εντός του τυμπάνου η ύπαρξη σωματιδίων μεγάλου μεγέθους φράζει τα μικροκόσκινα και η στάθμη του αποβλήτου αυξάνεται σταδιακά. Τότε, πραγματοποιείται ο έλεγχος στάθμης του αποβλήτου στο εσωτερικό του τυμπάνου. Αυτό σηματοδοτεί την έναρξη της περιστροφής των κυκλικών δίσκων και ταυτόχρονα ενεργοποιείται και το σύστημα έκπλυσης “backwash”. Η εκροή του επεξεργασμένου αποβλήτου συνεχίζει την πορεία της στην γραμμή επεξεργασίας των αποβλήτων, ενώ το ποσοστό των αιωρούμενων σωματιδίων που κατακρατούνται, επεξεργάζεται κατάλληλα.



Εικόνα 1.7 Disc filters (Morling, 2019).

1.5.4 Σύγκριση RBFs με συμβατική επεξεργασία

Η μικροκοσκίνιση θεωρείται μια νέα, πολλά υποσχόμενη μέθοδος που στοχεύει απομάκρυνσης στερεών από τα λύματα (Gupta, 2018). Παρόλο που με την συμβατική επεξεργασία επιτυγχάνεται 50% έως 70% απομάκρυνση TSS και 25% έως 40% απομάκρυνση BOD, ενώ 30% έως 50% απομάκρυνση TSS και 20% απομάκρυνση BOD με τα RBFs, αντίστοιχα (Franchi & Santoro, 2015), η μικροκοσκίνιση απαιτεί λιγότερο από το 5% του χώρου που καταλαμβάνει η συμβατική επεξεργασία, ενώ συνήθως παράγεται παρόμοια ή ακόμα και καλύτερη ποιότητα λυμάτων (Gikas, 2017a).

Επιπλέον, από την μικροκοσκίνιση παράγονται βιοστερεά, κοινώς αποκαλούμενα Πρωτοβάθμια Κοσκινισμένα Στερεά (Primary Sieved Solids, PSS), με περιεκτικότητα σε στερεά μεταξύ 40-45% (Koliopoulos & Gikas, 2013; Franchi, et al., 2012) η οποία είναι διπλάσια σε σχέση με την συμβατική επεξεργασία. Τα PSS θεωρούνται ιδανική πρώτη ύλη για την αεριοποίηση, καθώς απαιτούν περιορισμένη περαιτέρω αφυδάτωση, ενώ έχουν Υψηλότερη Θερμογόνο Δύναμη (Higher Heating Value, HHV) (περίπου 23 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg}}$) από εκείνη των βιοστερεών που προκύπτουν από συμβατική επεξεργασία (τα οποία έχουν HHV περίπου 16 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg}}$) (Gikas, 2017b).

Επίσης, σε αντίθεση με τις ΔΠΚ όπου τα στερεά αφαιρούνται κυρίως ως συνάρτηση της ταχύτητας καθίζησής τους, ο διαχωρισμός των RBFs πραγματοποιείται ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο τα RBFs είναι σε θέση να αφαιρούν αποτελεσματικότερα τις ίνες, όπως η κυτταρίνη που προέρχεται από το χαρτί τουαλέτας (Ruiken, et al., 2013).

Τέλος, τα RBFs αυξάνουν την παραγωγή μεθανίου (περίπου 10%) και μειώνουν τις απαιτήσεις ενέργειας στη δεξαμενή αερισμού (κατά 8%) σε σύγκριση με τις ΔΠΚ (Behera, et al., 2018). Αξιοσημείωτο είναι το κόστος των RBFs το οποίο είναι 30-50% χαμηλότερο από εκείνο των ΔΠΚ, ενώ παράλληλα στα RBFs δεν εμφανίζονται προβλήματα θερμικής διαστρωμάτωσης σε αντίθεση με τις ΔΠΚ (Franchi & Santoro, 2015).

1.6 Μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας της ιλύος

Το κόστος της αστικής ιλύος προς διάθεση μπορεί να ανέρχεται έως και στο 50% του συνολικού κόστους λειτουργίας των ΕΕΛ και να συνεισφέρει σε περισσότερο από το 40% των συνολικών εκπομπών GHG που συνδέονται με τη λειτουργία τους (Liu, et al., 2013). Η ασφαλής διάθεση της ιλύος είναι σημαντικό ζήτημα στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, διότι ναι μεν η ιλύς μπορεί αντιπροσωπεύει μόνο το 1-2% του όγκου των λυμάτων, αλλά τα έξοδα για την διαχείρισής της κυμαίνονται μεταξύ 20–60% του συνολικού λειτουργικού κόστους (Silva, et al., 2016). Συνεπώς, για τον μετριασμό των παραπάνω, οι τεχνολογίες αποτέφρωσης, πυρόλυσης και αεριοποίησης αποτελούν μερικές από τις βασικές μεθόδους θερμικής επεξεργασίας της ιλύος, στοχεύοντας στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου, τη μέγιστη δυνατή ελάττωση του όγκου της και τη μετατροπή της σε προϊόντα μη επιβλαβή για το περιβάλλον, με ταυτόχρονη αξιοποίηση του ενεργειακού της περιεχομένου (Oladejo, et al., 2019).

Η αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των βιοστερεών για την ανάκτηση ενέργειας μέσω των θερμικών διεργασιών είναι άμεσα εξαρτώμενη των ιδιοτήτων της ιλύος. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει μία αρνητική σχέση μεταξύ του περιεχομένου σε υγρασία των βιοστερεών και της Θερμογόνου Δύναμης (Heating Value, HV) τους (Πίνακας 1.7).

Πίνακας 1.7 HV των βιοστερεών από ιλύ αστικών λυμάτων (Burrowes & Bauer, 2008).

Βιοστερεά	HV $\left(\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg\ VS}}\right)$	VS %	DS%	HV $\left(\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg\ υγρή}}\right)$
Χωνεμένη/δευτεροβάθμια ιλύς	22.1	55	25	3.1
Χωνεμένη/δευτεροβάθμια ιλύς	22.1	55	30	3.6
Χωνεμένη/δευτεροβάθμια ιλύς	22.1	65	30	4.3
Πρωτοβάθμια/δευτεροβάθμια ιλύς	24.4	70	25	4.3
Πρωτοβάθμια/δευτεροβάθμια ιλύς	23.3	70	28	4.6

Πρωτοβάθμια/δευτεροβάθμια ιλύς	24.4	70	30	5.1

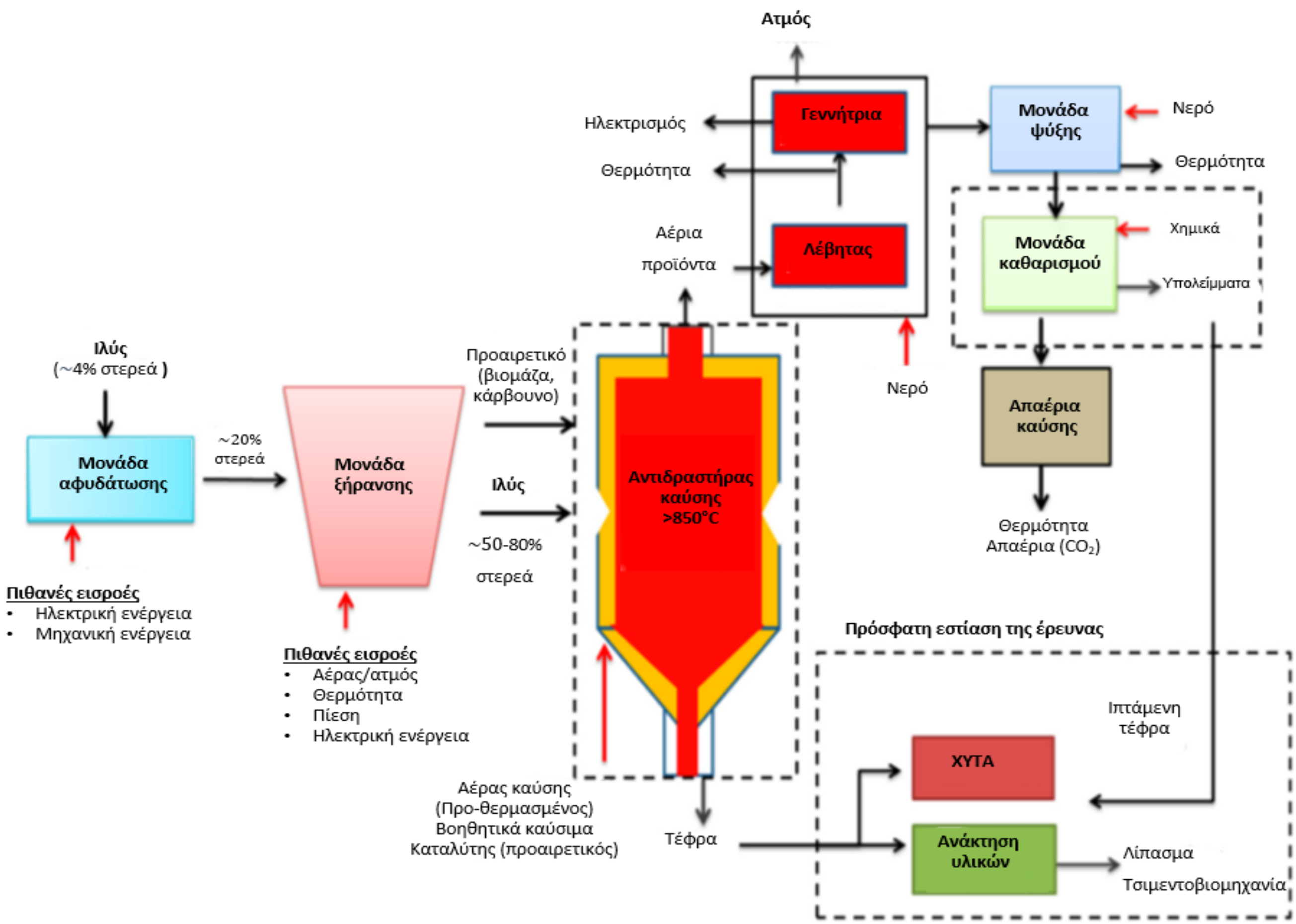
1.6.1 Αποτέφρωση

Η διεργασία της αποτέφρωσης είναι η πιο ευρέως διαδομένη μέθοδος θερμικής επεξεργασίας της ιλύος και περιλαμβάνει το στάδιο της μηχανικής αφυδάτωσης, της θερμικής ξήρανσης και της εισαγωγής της ιλύος στον αποτεφρωτήρα, με σκοπό την πλήρη καύση της (Hao, et al., 2020). Στην πλήρη καύση της ιλύος πραγματοποιείται ταχεία εξώθερμη οξείδωση των οργανικών στοιχείων της με τελικά προϊόντα CO_2, H_2O και αδρανή τέφρα. Η αφυδατωμένη ιλύς παρουσιάζει θερμοκρασίες ανάφλεξης μεταξύ 420 και 500°C παρουσία οξυγόνου, ενώ για την πλήρη καύση απαιτούνται θερμοκρασίες από 760 έως 820°C (Turovskiy & Mathai, 2006).

Αρχικά, εφαρμόζεται το στάδιο αφυδάτωσης της ιλύος με στόχο την μείωση της περιεκτικότητας της σε υγρασία από 90% σε 80% και παράλληλα τη μείωση του όγκου έως και 99%. Στην συνέχεια, με τη θερμική ξήρανση, η περιεκτικότητα σε υγρασία της αφυδατωμένης ιλύος μπορεί μειωθεί από 80% σε 40%-70% (ανάλογα με την οργανική σύσταση της ιλύος) και είναι απαραίτητη έτσι ώστε, κατά την καύση να παραχθεί σημαντική ποσότητα θερμότητας από την οξείδωση των οργανικών ουσιών που να είναι ικανή να συντηρήσει την καύση (αυτοσυντηρούμενη καύση, self-supporting combustion) (Brechtel & Eipper, 1990).

Σαν συνέπεια των προκαταρτικών διεργασιών για την εισαγωγή της ιλύος στον αποτεφρωτήρα, τα οργανικά συστατικά της ιλύος που περιέχονται στην αποξηραμένη ιλύ μετατρέπονται κυρίως σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, ενώ παράλληλα παράγονται και άλλες ενώσεις, όπως οξείδια του αζώτου και του θείου, αμμωνία, υδροχλώριο, αλογονωμένα οξέα (Chen, 2019; Rong, et al., 2017).

Τέλος, η θερμότητα που παράγεται κατά την διεργασία της αποτέφρωσης προορίζεται για θέρμανση ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ατμού. Οι εγκαταστάσεις αποτέφρωσης μπορούν ενίοτε να χρησιμοποιούν την παραγόμενη θερμότητα, δεδομένου ότι κύριος σκοπός τους είναι η καύση επιβλαβών στοιχείων από απόβλητα πριν από την τελική διάθεση ή την επαναχρησιμοποίηση υπολειμματικής τέφρας. Εν κατακλείδι, οι εγκαταστάσεις αποτέφρωσης πρέπει να είναι εξοπλισμένες με συστήματα καθαρισμού απαερίων για την εξουδετέρωση των περιεχόμενων επικίνδυνων ρύπων. Αντίστοιχη επεξεργασία είναι δυνατόν να απαιτεί και η παραγόμενη στάχτη, η οποία ενδέχεται να περιέχει σημαντικούς ανόργανους ρύπους (Oladejo, et al., 2019).

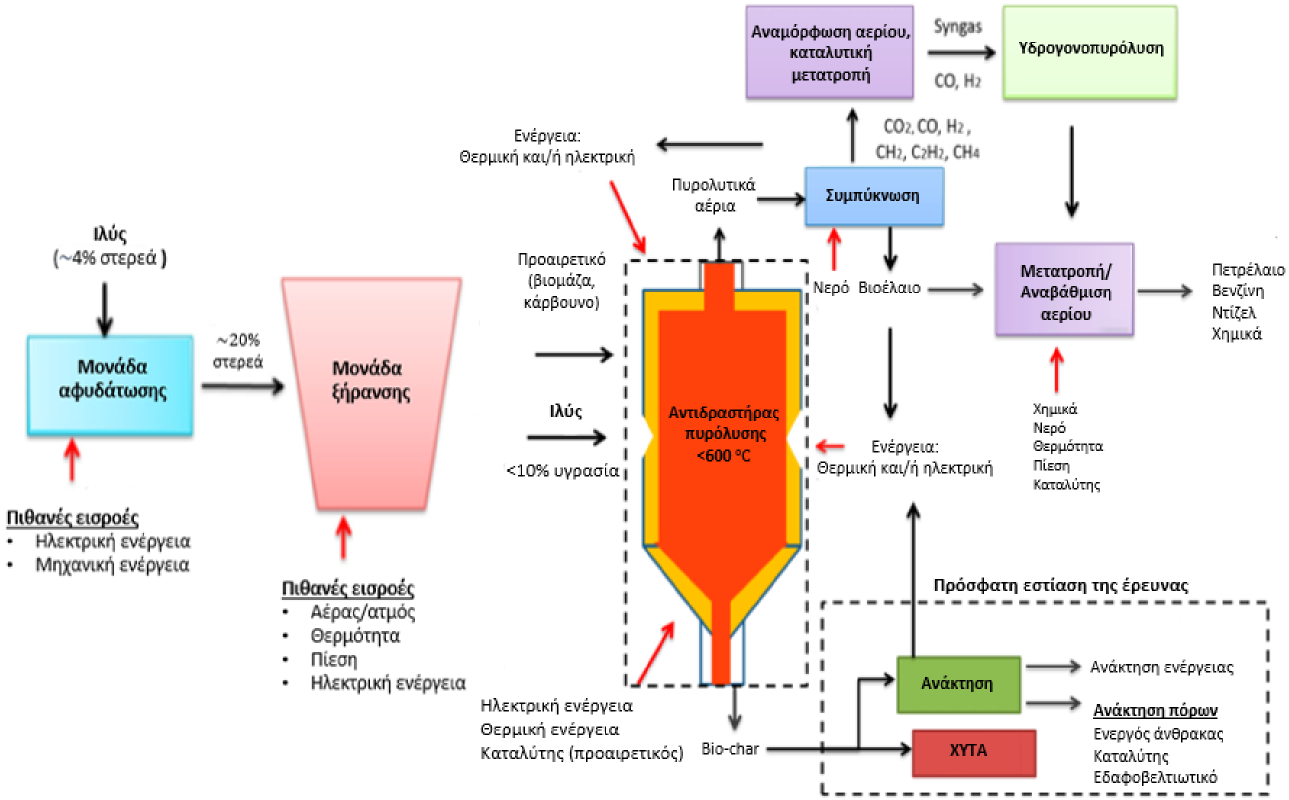


Εικόνα 1.8 Σχηματική απεικόνιση αποτέφρωσης ιλύος (Oladejo, et al., 2019).

1.6.2 Πυρόλυση

Η πυρόλυση (Εικόνα 1.9) είναι η διαδικασία θερμικής διάσπασης της ιλύος και πραγματοποιείται υπό την απουσία οξυγόνου, ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται μια εξωτερική πηγή θερμότητας για να ενεργοποιήσει τις ενδόθερμες αντιδράσεις θερμικής διάσπασης των στερεών αποβλήτων (Freeman, 1989).

Η διεργασία της πυρόλυσης λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 350-600℃, ενώ παράλληλα υπάρχουν ορισμένοι αντιδραστήρες πυρόλυσης που λειτουργούν σε θερμοκρασίες άνω των 900℃ (Zhang, et al., 2010; Ruiz, et al., 2013). Η πυρόλυση προϋποθέτει την μηχανική αφυδάτωση και την θερμική ξήρανση της ιλύος, πριν την εισαγωγή της στον αντιδραστήρα, όπως και στην περίπτωση της αποτέφρωσης. Τα προϊόντα που προκύπτουν από την πυρόλυση είναι τα εξής: αέρια προϊόντα πυρόλυσης (H_2, CO, CO_2,CH_4, και ελαφροί υδρογονάνθρακες), βιοέλαιο (bio – oil) και βιο-εξανθράκωμα (bio – char) (Zhang, et al., 2010). Οι σχετικές αποδόσεις και τα χαρακτηριστικά των προϊόντων πυρόλυσης εξαρτώνται από τις συνθήκες της διεργασίας, όπως την θερμοκρασία, το ρυθμό θέρμανσης και τη λειτουργία αντιδραστήρα, καθώς και τις ιδιότητες της πρώτης ύλης (Oladejo, et al., 2019).



Εικόνα 1.9 Σχηματική απεικόνιση πυρόλυσης ιλύος (Oladejo, et al., 2019).

1.6.3 Αεριοποίηση

Η θερμοχημική μετατροπή του οργανικού περιεχομένου της ιλύος σε αέρια υψηλής αξίας, όπως H_2 και CO, γνωστό ως αέριο σύνθεσης (syngas), καθώς και CO_2, CH_4, H_2O και άλλους υδρογονάνθρακες αποτελεί την βάση της αεριοποίησης (Εικόνα 1.10). Αυτή η αντίδραση λαμβάνει χώρα σε μερικώς οξειδωμένη ατμόσφαιρα, όπου κυριαρχούν υψηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 800 - 1200 ℃ (Roche, et al., 2014; Damartzis & Zabaniotou, 2011; Ferrasse, et al., 2003).

Η κύρια διαφοροποίηση της αεριοποίησης από την πυρόλυση είναι η απαίτηση της παρουσίας περίσσειας υδρατμού, που οδηγεί στην πλήρη μετατροπή του περιεχομένου άνθρακα σε καύσιμο αέριο, πλούσιο σε H_2 (Fytili & Zabaniotou, 2008). Η αεριοποίηση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ως οξειδωτικά μέσα τον αέρα, το διοξείδιο του άνθρακα, το οξυγόνο, τον ατμό, ή μείγματα αυτών των αερίων. Κατά την αεριοποίηση λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω αντιδράσεις (Εξ.1.2 – Εξ.1.7) (Gikas, et al., 2015):

$$\mathbf{C} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\mathbf{O_2} \leftrightarrow \mathbf{CO} \text{ (Gasification with Oxygen)} \quad 1.2$$

$$\mathbf{C} + \mathbf{CO_2} \leftrightarrow \mathbf{2CO} \text{ (Gasification with Carbon Dioxide)} \quad 1.3$$

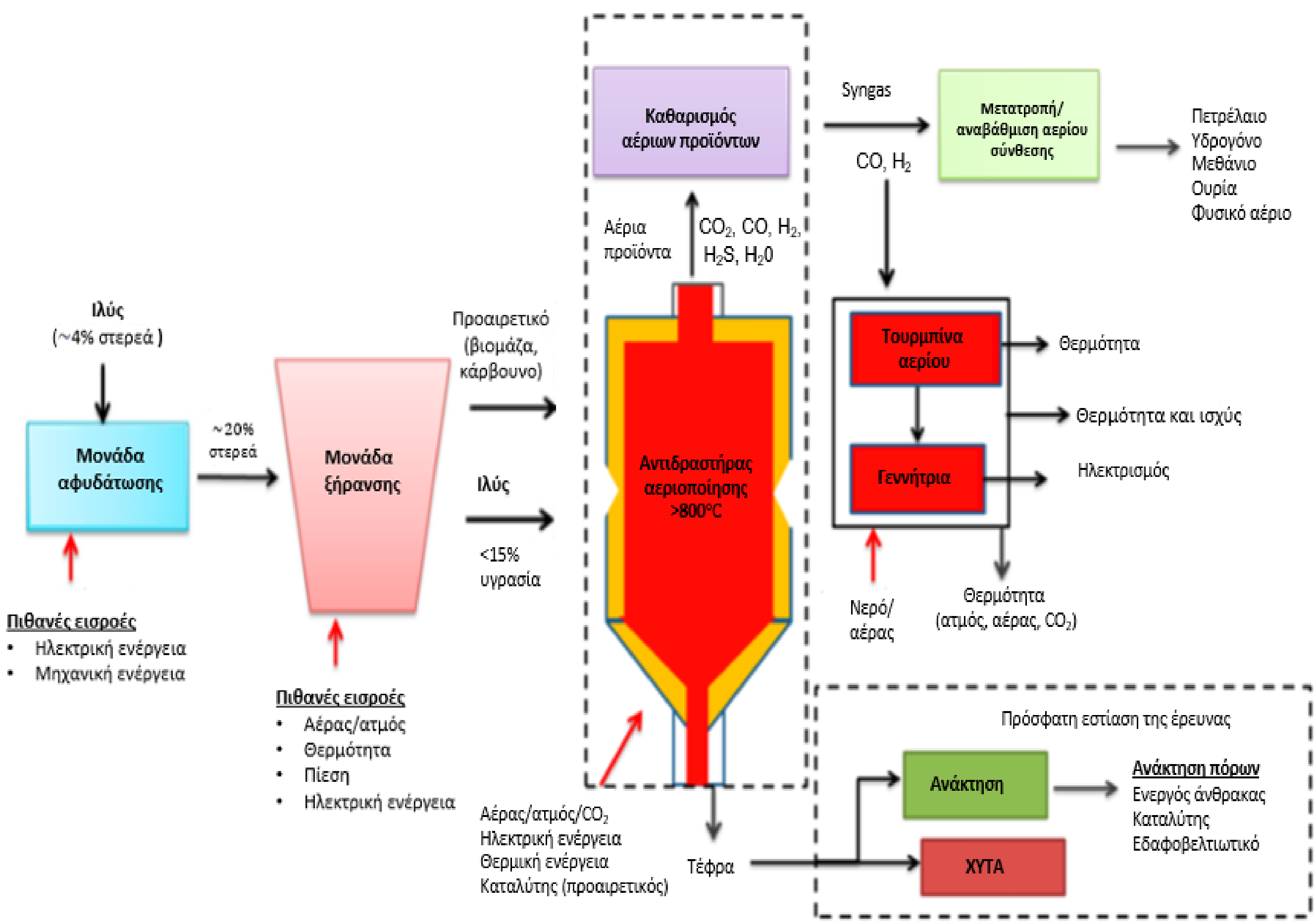
$$\mathbf{C} + \mathbf{H_2O} \leftrightarrow \mathbf{CO} + \mathbf{H_2} \text{(Gasification with Steam)} \quad 1.4$$

$$\mathbf{C} + \mathbf{2H_2} \leftrightarrow \mathbf{CH_4} \text{ (Gasification with Hydrogen)} \quad 1.5$$

$$\mathbf{C} + \mathbf{H_2O} \leftrightarrow \mathbf{H_2} + \mathbf{CO_2} \text{ (Water − Gas shift Reaction)} \quad 1.6$$

$$\mathbf{S} + \mathbf{H_2} \leftrightarrow \mathbf{H_2S} \text{ (Suflur forms } H_2S - \text{not } SO_x) \quad 1.7$$

Τα κύρια προϊόντα της αεριοποίησης είναι το αέριο σύνθεσης και η τέφρα. Η τέφρα που παράγεται από τη διαδικασία αυτή μπορεί είτε να απορριφθεί στον χώρο υγειονομικής ταφής είτε να χρησιμοποιηθεί σε κατασκευαστικές εφαρμογές. Το αέριο σύνθεσης απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία και καθαρισμό για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (Oladejo, et al., 2019).



Εικόνα 1.10 Σχηματική απεικόνιση αεριοποίησης ιλύος (Oladejo, et al., 2019).

Αέριο σύνθεσης (Syngas)

Το αέριο προϊόν της διαδικασίας αεριοποίησης είναι γνωστό ως αέριο σύνθεσης (syngas) (Gikas, 2014). Η σύνθεση του αερίου σύνθεσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος καυσίμου, ο τύπος και η ποσότητα του οξειδωτικού παράγοντα για την αεριοποίηση, ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα αεριοποίησης, η θερμοκρασία του αντιδραστήρα, η χρήση καταλυτών και οι συνθήκες πίεσης στον αντιδραστήρα. Η Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (Lower Heating Value, LHV) του αερίου σύνθεσης κυμαίνεται μεταξύ 4-6 $\frac{MJ}{m^3}$, και τότε το αέριο σύνθεσης εμφανίζει περιεκτικότητα 15% σε H_2, 20% σε CO και 25% σε CO_2. Από την άλλη, η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (Higher Heating Value, HHV) κυμαίνεται μεταξύ 15-20 $\frac{MJ}{m^3}$ με το αέριο σύνθεσης να εμφανίζει υψηλότερη περιεκτικότητα 40% σε H_2, 25% σε CO και 25% σε CO_2 (Parthasarathy & Narayanan, 2014). Το αέριο σύνθεσης αποτελεί σημαντικό δομικό στοιχείο στις βιομηχανίες χημικών προϊόντων, πετρελαίου και ενέργειας λόγω των εφαρμογών του και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εξής:

- Ως πρώτη ύλη για την παραγωγή διαφόρων χημικών ουσιών όπως υδρογόνο, αμμωνία, μεθανόλη και προϊόντα ” Fischer-Tropsch”, τα οποία σχετίζονται με παραγωγή υγρών καυσίμων.
- Ως καύσιμο σε αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου.
- Ως παροχή αερίου στη βιομηχανία, όπως τσιμεντοβιομηχανία.
- Ως πηγή υδρογόνου, αφενός για την παραγωγή της αμμωνίας, αφετέρου σε διυλιστήρια σε διάφορες διεργασίες όπως η υδρογονοπυρόλυση.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής της αεριοποίησης ιλύος, αποτελεί η εγκατάσταση KIYOSE Water Reclamation Plant (372,000 $\frac{m^3}{d}$) στο Τόκιο (Εικόνα 1.11). Η μονάδα της αεριοποίησης διαχειρίζεται 100 τόνους ιλύος σε καθημερινή βάση (50% αφυδατωμένη ιλύ) και η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω της αεριοποίησης κυμαίνεται μεταξύ 150-200 kW (Shi, 2011).

Εικόνα 1.11 Μονάδα αεριοποίησης στο Τόκιο (Kawasaki, 2010).

1.6.4 Συγκριτικός συσχετισμός θερμικών μεθόδων επεξεργασίας ιλύος

Αρχικά, η αποτέφρωση της ιλύος επιτρέπει μια μεγάλη ελάττωση του όγκου και του βάρους της, μετατρέποντας την σε αέρια, θερμότητα και σταθεροποιημένα αδρανή υλικά. Η ελάττωση αυτή μπορεί να φτάσει έως 96% (Vesilind & Ramsey, 1996) και 62% (Hwang, et al., 2007), αντίστοιχα. Στην Γερμανία, η κατάλληλα επεξεργασμένη ιλύς έχει αντικαταστήσει τον άνθρακα που χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας (Mills, et al., 2014). Η αντικατάσταση του άνθρακα από βιοστερεά έχει τεράστιο θετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον λόγω της μείωσης των εκπομπών CO_2. Πιο συγκεκριμένα, ένας τόνος βιοστερεών με 10% υγρασία μπορεί να παράγει 700 kWh, πράγμα που σημαίνει ότι η αντικατάσταση του άνθρακα από βιοστερεά μπορεί να αποφύγει περίπου 0.7 τόνους εκπομπών CO_2 στην ατμόσφαιρα (Darvodelsky & Bridle, 2012).

Από την άλλη πλευρά, η διεργασία της αποτέφρωσης προκαλεί σοβαρά προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η αποτέφρωση δεν οδηγεί απαραίτητα στην καθαρή καταστροφή των οργανικών ρύπων. Οι Dai et al., 2014 διαπίστωσαν ότι αποτέφρωση σε διάφορες θερμοκρασίες 700-900 ℃ παρήγαγε 2 έως 13 φορές περισσότερα/ες Πολυχλωριωμένα Διβενζο- Φουράνια/Διοξίνες (Polychlorinated Dibenzofurans/ Dioxins, PCDFs/PCDDs) σε εκπομπές αερίων από την ποσότητα που υπάρχει στην μη επεξεργασμένη ιλύ. Η αποτέφρωση αποτελεί αφενός μία διαδεδομένη μέθοδο θερμικής επεξεργασίας της ιλύος, αφετέρου όμως δημιουργεί αρκετά προβλήματα με σημαντικότερα την εκπομπή PCDFs/PCDDs και για αυτό αντικαθίσταται από πιο αποτελεσματικές και σύγχρονες μεθόδους θερμικής επεξεργασίας, όπως την αεριοποίηση και την πυρόλυση που εμφανίζουν πολλαπλά πλεονεκτήματα.

Όσον αφορά την πυρόλυση, πραγματοποιείται σε διαφορετικό θερμοκρασιακό εύρος σε σχέση με την αποτέφρωση και βέβαια χωρίς την παρουσία οξυγόνου. Επίσης, οδηγεί σε ελάττωση του όγκου της ιλύος κατά 63% (Hwang, et al., 2007) και βάρους της κατά 35-50% (υγρασία ιλύος 5.3% κ.β) (Inguanzo, et al., 2002), αντίστοιχα. Η πυρόλυση είναι μία διεργασία που παράγει εκτός από αέρια προϊόντα, το βιοέλαιο και το βίο-εξανθράκωμα τα οποία εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Τέλος, εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας οι εκπομπές των ρύπων είναι μικρότερες σε σχέση με την αποτέφρωση (Gao, et al., 2017).

Στην περίπτωση της αεριοποίησης, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της έναντι της αποτέφρωσης είναι η ενεργειακή αξιοποίηση του αερίου σύνθεσης. Το αέριο σύνθεσης έχει πολλαπλές εφαρμογές, σε αντίθεση με τα καυσαέρια από την αποτέφρωσης που μπορούν να αξιοποιηθούν μόνο σε τουρμπίνες ατμού (Rubin, et al., 2007). Επίσης, η αεριοποίηση απαιτεί μόνο ένα κλάσμα της στοιχειομετρικής ποσότητας οξυγόνου που είναι απαραίτητη για την αποτέφρωση. Ως αποτέλεσμα, ο σχηματισμός των PCDFs/PCDDs, των οξειδίων του θείου (SOx) και των οξειδίων του αζώτου (NOx) είναι περιορισμένος και ο όγκος των παραγόμενων αερίων είναι χαμηλός, απαιτώντας έτσι μικρότερο και λιγότερο ακριβό εξοπλισμό καθαρισμού των αέριων προϊόντων (Oladejo, et al., 2019). Επιπλέον, η θερμότητα που απαιτείται για τις συνολικές ενδοθερμικές αντιδράσεις αεριοποίησης μπορεί να παρέχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τις εξώθερμες αντιδράσεις μερικής οξείδωσης (Xu, et al., 2008). Στην αποτέφρωση απαιτούνται μεγαλύτερες ποσότητες οξυγόνου και οι απώλειες θερμότητας είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές στην αεριοποίηση. Τα ποσοστά παραγωγής ενέργειας στην αεριοποίηση είναι καλύτερα σε σύγκριση με εκείνα που συναντώνται και λαμβάνονται από την αποτέφρωση (Lisý, et al., 2009).

Εν κατακλείδι, οι τεχνολογίες αποτέφρωσης, πυρόλυσης και αεριοποίησης απαιτούν την κατάλληλη επεξεργασία της ιλύος σε προηγούμενα στάδια, δαπανηρό έλεγχο εκπομπών, στρατηγικές διάθεσης ή επαναχρησιμοποίησης τέφρας και περαιτέρω επεξεργασία των παραγόμενων αερίων για τον μετριασμό των ρύπων. Τα μειονεκτήματα αυτά αυξάνουν την πολυπλοκότητα, το κόστος των επενδύσεων και μειώνουν την ενεργειακή απόδοση αξιοποίησης αυτών των τεχνολογιών. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στη θερμική επεξεργασία της ιλύος, όσον αφορά τη βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας και την αποτελεσματική τεχνολογική κλιμάκωση για τη μεγιστοποίηση της ενέργειας που ανακτάται, μειώνοντας παράλληλα το κόστος και τις εκπομπές. Πρέπει να σημειωθεί ότι, όλες αυτές οι διεργασίες πρέπει να είναι προσαρμοσμένες στις επιμέρους τοποθεσίες και απαιτούν λεπτομερή τεχνική, οικονομική αξιολόγηση και αξιολόγηση του κύκλου ζωής για την πρόβλεψη της βιωσιμότητάς τους στο μέλλον (Oladejo, et al., 2019). Στον πίνακα 1.8 παρουσιάζεται ο συγκριτικός συσχετισμός των μεθόδων θερμικής επεξεργασίας της ιλύος.

Πίνακας 1.8 Συγκριτικός συσχετισμός Αποτέφρωσης- Πυρόλυσης Αεριοποίησης (Shakorfow, 2016; Σπερέζη, 2007).

Παράμετρος	Αποτέφρωση	Πυρόλυση	Αεριοποίηση
Προϊόντα	Θερμότητα, καυσαέρια και αέρια: CO_2, H_2O, N_2	Βιοέλαιο, πίσσα (υγρό / ατμός), CO_2, H_2O, εύφλεκτα αέρια όπως: CO, H_2, CH_4, και τέφρα	Αέρια: CO_2, H_2O, N_2 (οξειδωτικό μέσο: αέρας), θερμότητα, πίσσα. εύφλεκτα αέρια όπως: CO, H_2, CH_4
Θερμοκρασία	800 - 1200 °C (Fytili & Zabaniotou, 2008)	350-600°C (Zhang, et al., 2010; Ruiz, et al., 2013)	800 - 1200 °C (Roche, et al., 2014; Damartzis & Zabaniotou, 2011; Ferrasse, et al., 2003)
Ατμόσφαιρα	Οξειδωτική	Αναγωγική	Αναγωγική
Μείωση Όγκου/ Βάρους	Μείωση όγκου έως 96% (Vesilind & Ramsey, 1996), βάρους 62% (Hwang, et al., 2007)	Μείωση όγκου 63% (Hwang, et al., 2007), βάρους 35-50% (υγρασία ιλύος 5.3% κ.β) (Inguanzo, et al., 2002)	Παρόμοια με της πυρόλυσης
Είδος αντιδράσεων που κυριαρχούν	Εξώθερμες	Ενδόθερμες	Εξώθερμες
Οξειδωτικό μέσο	Αέρας	Κανένα	Αέρας, καθαρό οξυγόνο, ατμός ή άλλοι συνδυασμοί
Παραγωγή διοξινών	Υψηλή	Χαμηλότερη	Χαμηλότερη
Καθαρισμός απαερίων	Δύσκολος	Απλούστερος από την αποτέφρωση	Απλούστερος από την αποτέφρωση
Αιωρούμενα σωματίδια	Περισσότερα	Λιγότερα	Λιγότερα
Ατμοσφαιρική ρύπανση	Υψηλή	Χαμηλότερη	Χαμηλότερη
Ρυπαντές	Σωματίδια, και ενώσεις χλωρίου, αζώτου και θείου	Σωματίδια, πίσσα και ενώσεις χλωρίου, αζώτου και θείου	Σωματίδια, πίσσα και ενώσεις χλωρίου, αζώτου και θείου

Κεφάλαιο 2: Ισοζύγια μάζας και ενέργειας

2.1 Ισοζύγια μάζας

Τα ισοζύγια μάζας (υλικών) αποτελούν τη λογιστική απεικόνιση μίας διεργασίας ή μίας ενότητας διεργασιών (Himmelblau & Riggs, 2012). Οποιαδήποτε χημική διεργασία όπου υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ δύο ή περισσότερων υλικών μπορεί να αναλυθεί με βάση τα ισοζύγια μάζας (Γκαϊντατζής, 2012).

Σε γενικό πλαίσιο, υπάρχουν δύο περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση των ισοζυγίων μάζας. Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται στο στάδιο του σχεδιασμού όπου εκτιμάται η απόδοση των διεργασιών μέσα από έναν θεωρητικό υπολογισμό των ισοζυγίων μάζας. Η δεύτερη περίπτωση αναφέρεται στο στάδιο λειτουργίας. Εκεί, ο στόχος είναι ο έλεγχος και η εκτίμηση της απόδοσης ενός συστήματος, όπου τα ισοζύγια μάζας βασίζονται σε δειγματοληψίες και μετρήσεις των διαφόρων συστατικών των ρευμάτων εισόδου και εξόδου (Γκαϊντατζής, 2012).

2.1.1 Ο νόμος διατήρησης της μάζας

Ο νόμος διατήρησης μάζας έχει διατυπωθεί με πολλές παραλλαγές όπως: «η μάζα ούτε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται», «η μάζα του σύμπαντος είναι σταθερή», «η μάζα κάθε απομονωμένου συστήματος είναι σταθερή». Ως γνωστό, η αρχή διατήρησης της μάζας ισχύει για τις περιπτώσεις εκείνες που δεν υφίστανται πυρηνικοί μετασχηματισμοί. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να επεκταθεί ο νόμος διατήρησης της μάζας και να περιλαμβάνει συγχρόνως τη μάζα και την ενέργεια (Γκαϊντατζής, 2012).

Για να παρουσιάσουμε τη ροή ενός υλικού μέσα και έξω από ένα σύστημα, εκφράζουμε το γενικευμένο νόμο της διατήρησης της μάζας σαν ένα ισοζύγιο. Ένα σύστημα (Εικόνα 2.1) ορίζεται ως μια ποσότητα της ύλης ή μια περιοχή μελέτης που επιλέγεται προς μελέτη. Οι μάζες ή οι περιοχές που βρίσκονται εκτός του συστήματος ονομάζονται περιβάλλον. Η πραγματική ή φανταστική επιφάνεια που διαχωρίζει το σύστημα ονομάζεται οριακή επιφάνεια ή όριο (Cengel & Boles, 2014).

Εικόνα 2.1 Σύστημα περιβάλλον και οριακή επιφάνεια (όριο) συστήματος (Ashrafizadeh & Tan, 2018; Skogestad, 2008; Cengel & Boles, 2014).

Τα συστήματα μπορούν να θεωρηθούν ως κλειστά ή ανοιχτά, ανάλογα με το εάν έχει επιλεχθεί προς μελέτη μία σταθερή ποσότητα μάζας ή ένας σταθερός όγκος στο χώρο. Ένα κλειστό σύστημα (επίσης γνωστό και ως μάζα ελέγχου) αποτελείται από μια σταθερή ποσότητα μάζας στην οποία δεν είναι επιτρεπτή η μεταφορά μάζας διαμέσου της οριακής επιφάνειας του συστήματος. Ωστόσο, η ενέργεια μπορεί να διαπεράσει την οριακή επιφάνεια με τη μορφή θερμότητας ή έργου. Από την άλλη, ένα ανοιχτό σύστημα ή ένας όγκος ελέγχου, όπως αποκαλείται συχνά, ορίζεται ως μία κατάλληλα επιλεγμένη περιοχή του χώρου που περικλείει συνήθως μια συσκευή που περιέχει ροή μάζας. Η ροή διαμέσου αυτών των συσκευών μελετάται καλύτερα επιλέγοντας την περιοχή της συσκευής ως όγκο ελέγχου (Cengel & Boles, 2014).

Ένα ισοζύγιο μάζας δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας ισολογισμός ποσοτήτων μάζας που υφίστανται αλλαγές ή ρέουν μέσα από κάποιο σύστημα. Η μαθηματική έκφραση (Εξ. 2.1) της αρχής του ισοζυγίου μάζας που ισχύει για διεργασίες με ή και χωρίς χημική αντίδραση είναι (Franses, 2014; Ashrafizadeh & Tan, 2018; Schlesinger, 1996; Ghasem & Henda, 2014):

$$\left\{\begin{matrix} \text{συσσώ} - \\ \text{ρευση} \\ \text{στο} \\ \text{σύστημα} \end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix} \text{είσοδο δια} \\ \text{μέσου των} \\ \text{ορίων του} \\ \text{συστήμα} \\ -\text{τος} \end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix} \text{έξοδος δια} \\ \text{μέσου των} \\ \text{ορίων του} \\ \text{συστήμα} \\ -\text{τος} \end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix} \text{παραγωγή} \\ \text{μέσα} \\ \text{στο σύστημα} \end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix} \text{κατανάλωση} \\ \text{μέσα} \\ \text{στο σύστημα} \end{matrix}\right\} \quad 2.1$$

Με τον όρο διεργασία ορίζεται μια σειρά φυσικών επεμβάσεων ή φυσικές ή χημικές αλλαγές σε κάποιο ορισμένο υλικό. Στην εξίσωση 2.1 οι όροι «παραγωγή» και «κατανάλωση» αναφέρονται στη δημιουργία ή απώλεια από χημική αντίδραση. Η συσσώρευση μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εξίσωση 2.1 αναφέρεται σε ένα χρόνο (Skogestad, 2008). Αν δεν υπάρχει παραγωγή ή κατανάλωση υλικού μέσα σε ένα σύστημα για μια συνεχή διεργασία, η εξίσωση 2.1 μετασχηματίζεται στην εξίσωση 2.2 (Franses, 2014; Ashrafizadeh & Tan, 2018; Schlesinger, 1996; Ghasem & Henda, 2014):

$$\frac{\text{συσσώρευση}}{\text{μονάδα χρόνου}} = \frac{\text{είσοδος}}{\text{μονάδα χρόνου}} - \frac{\text{έξοδος}}{\text{μονάδα χρόνου}} \quad 2.2$$

Όταν δεν υπάρχει ούτε συσσώρευση στο σύστημα, λαμβάνεται υπόψη η εξίσωση 2.3 (Franses, 2014; Ashrafizadeh & Tan, 2018; Schlesinger, 1996; Ghasem & Henda, 2014):

$$\frac{\text{είσοδος}}{\text{μονάδα χρόνου}} = \frac{\text{έξοδος}}{\text{μονάδα χρόνου}} \quad 2.3$$

Σε μια συνεχή διεργασία, ως σταθερή κατάσταση ορίζεται η κατάσταση κατά την οποία δεν υπάρχει αλλαγή οποιασδήποτε παραμέτρου της διεργασίας σε συνάρτηση με το χρόνο. Στις παραμέτρους αυτές περιλαμβάνονται η ποσότητα και η σύσταση των ρευμάτων, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συσσώρευση ενός συστατικού (Εξ. 2.3) (Γκαϊντατζής, 2012).

2.2 Ισοζύγια ενέργειας

Η σύγχρονη κοινωνία εξαρτάται από τη χρήση ενέργειας, η οποία απαιτεί μετασχηματισμούς στην επιθυμητή μορφή ενέργειας ανά περίπτωση και έλεγχο των ενεργειακών ροών. Για παράδειγμα, όταν ο άνθρακας καίγεται σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας, η χημική ενέργεια που υπάρχει στον άνθρακα μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, οι ροές ενέργειας και ο μετασχηματισμός αποτελούν αιτίες περιβαλλοντικών προβλημάτων, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Συνεπώς, για να γίνει εφικτή η παρακολούθηση της κίνησης των ροών ενέργειας και των αλλαγών της μορφής της, χρησιμοποιούνται τα ενεργειακά ισοζύγια. Η χρήση των ισοζυγίων ενέργειας είναι βασισμένη στο νόμο διατήρησης της ενέργειας που ορίζει ότι η ενέργεια δεν μπορεί ούτε να παραχθεί, ούτε να καταστραφεί (Honrath, 1995).

2.2.1 Ισοζύγιο ενέργειας - 1^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος

Ο 1^{ος} νόμος της θερμοδυναμικής εξετάζει τις μεταβολές ενέργειας μέσα σε ένα σύστημα και αποτελεί μία έκφραση της αρχής διατήρησης της ενέργειας. Η προσθήκη ή απελευθέρωση ενέργειας από το σύστημα είναι ένας από τους πολλούς τρόπους ανταλλαγής ενέργειας. Για παράδειγμα, όταν ένα υγρό μεταπίπτει σε στερεή κατάσταση απελευθερώνεται θερμότητα, ενώ για την μετατροπή ενός υγρού σε αέριο απαιτείται η λήψη θερμότητας. Οι μεταβολές ενέργειας μπορεί να συνοδεύονται ή όχι από μεταβολές της μάζας του συστήματος. Επειδή δεν υπάρχει η δυνατότητα άμεσης μέτρησης της ενέργειας, οι μεταβολές ενέργειας μετρούνται με βάση τις μεταβολές των ιδιοτήτων του συστήματος (Γκαϊντατζής, 2012).

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος αποτελεί το μέσο για τον υπολογισμό των μεταβολών ενέργειας και για την ανάπτυξη σχέσεων μεταξύ των μεταβολών ενέργειας και των ιδιοτήτων ενός συστήματος. Η απλούστερη διατύπωση του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου είναι ότι η ενέργεια διατηρείται (Ghasem & Henda, 2014; Schlesinger, 1996; Ashrafizadeh & Tan, 2018). Η μαθηματική του διατύπωση (Εξ. 2.4) για οποιοδήποτε σύστημα μπορεί να είναι (Franses, 2014):

$$\text{Εισροή ενέργειας} = \text{Εκροή ενέργειας} + \text{Συσσώρευση ενέργειας} \qquad 2.4$$

Η εξίσωση 2.4 αποτελεί το γενικευμένο ισοζύγιο ενέργειας ενός συστήματος. Το ισοζύγιο αυτό μπορεί να γίνει είτε μικροσκοπικά (για κάποιο στοιχειώδη όγκο) ή μακροσκοπικά. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μπορεί να υπάρχει παραγωγή ή και κατανάλωση ενέργειας μέσα σε ένα σύστημα τότε με βάση την εξίσωση 2.4 μπορεί να γίνει το μακροσκοπικό ισοζύγιο ενέργειας (όμοιο με το μακροσκοπικό ισοζύγιο μάζας, εξίσωσης 2.1) (Εξ. 2.5):

$$\begin{Bmatrix} \text{συσσώ}- \\ \text{ρευση} \\ \text{στο} \\ \text{σύστημα} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{είσοδο δια} \\ \text{μέσου των} \\ \text{ορίων του} \\ \text{συστήμα} \\ -\text{τος} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \text{έξοδος δια} \\ \text{μέσου των} \\ \text{ορίων του} \\ \text{συστήμα} \\ -\text{τος} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \text{παραγωγή} \\ \text{μέσα} \\ \text{στο σύστημα} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \text{κατανάλωση} \\ \text{μέσα} \\ \text{στο σύστημα} \end{Bmatrix} \qquad 2.5$$

Η ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται από και προς ένα σύστημα με τρεις μορφές: θερμότητα, έργο και ροή μάζας. Οι ενεργειακές αλληλεπιδράσεις αναγνωρίζονται στα όρια του συστήματος καθώς τα διαπερνούν και αναπαριστούν την ενέργεια που προσλαμβάνεται ή αποβάλλεται από ένα σύστημα κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας (Cengel & Boles, 2014).

Παρατηρώντας ότι η ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας και ότι η καθαρή μεταφορά θερμότητας μιας ποσότητας ισούται με τη διαφορά μεταξύ των ποσοτήτων που μεταφέρονται από και προς το σύστημα, το ενεργειακό ισοζύγιο ενός συστήματος (Εξ. 2.6) μπορεί να παρουσιαστεί αναλυτικότερα ως εξής (Cengel & Boles, 2014):

$$E_{in} - E_{out} = Q_{in} - Q_{out} + W_{in} - W_{out} + E_{mass,in} - E_{mass,out} = \Delta E_{system} \qquad 2.6$$

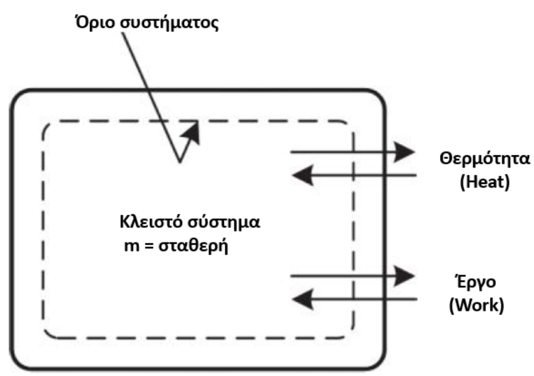
Όπου, οι δείκτες “in” και ”out” αντιπροσωπεύουν ποσότητες που εισέρχονται και εξέρχονται από το σύστημα, αντίστοιχα. Και οι έξι ποσότητες στο δεξί μέλος της εξίσωσης αναπαριστούν ποσά και επομένως είναι θετικές ποσότητες. Η κατεύθυνση οποιασδήποτε ενεργειακής μεταφοράς περιγράφεται από τους δείκτες “in” και ”out” (Cengel & Boles, 2014).

Ο όρος Q της εξίσωσης 2.6 αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας από και προς το σύστημα και σε αδιαβατικά συστήματα ισούται με το μηδέν. Ο όρος W αντιπροσωπεύει τη μεταφορά έργου, η οποία είναι μηδενική για συστήματα που δεν εμπεριέχουν αλληλεπιδράσεις έργου και ο όρος E_{mass} τη μεταφορά ενέργειας μέσω μάζας που είναι μηδενική για κλειστά συστήματα (Cengel & Boles, 2014).

Ο όρος ΔE_{system} αναφέρεται στη μεταβολή της συνολικής ενέργειας του συστήματος. Η ενέργεια μπορεί να έχει πολλές μορφές, όπως εσωτερική (λανθάνουσα, αισθητή, χημική και πυρηνική), κινητική, δυναμική, μαγνητική και ηλεκτρική, με το άθροισμα όλων αυτών να αποτελεί την συνολική ενέργεια ενός συστήματος (E_{system}). Όταν δεν υπάρχουν ηλεκτρικές, μαγνητικές και επιφανειακής τάσης επιδράσεις, τότε η μεταβολή στην συνολική ενέργεια ενός συστήματος κατά τη διάρκειας μιας διεργασίας, είναι το άθροισμα των μεταβολών στην εσωτερική (ΔU), δυναμική ($\Delta E_{δυν}$) και κινητική ενέργεια ($\Delta E_{κιν}$) του συστήματος και μπορεί να εκφραστεί με την εξίσωση 2.7 (Cengel & Boles, 2014).

$$\Delta E_{system} = \Delta U + \Delta E_{κιν} + \Delta E_{δυν} \qquad 2.7$$

Οι μόνες δύο μορφές ενεργειακών αλληλεπιδράσεων που σχετίζονται με σταθερή μάζα ή ένα κλειστό σύστημα είναι η μεταφορά θερμότητας (heat) και το έργο (work) (Εικόνα 2.2) (Cengel & Boles, 2014).



Εικόνα 2.2 Ενεργειακές αλληλεπιδράσεις κλειστού συστήματος (Ghasem & Henda, 2014).

Το ενεργειακό ισοζύγιο για ένα κλειστό σύστημα περιγράφεται με την εξίσωση 2.8 (Ghasem & Henda, 2014):

$$Q - W = \Delta U + \Delta E_{\kappa\iota\nu} + \Delta E_{\delta\upsilon\nu} \qquad 2.8$$

Παρατηρώντας ότι η ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας, το ενεργειακό ισοζύγιο για ένα ανοιχτό σύστημα διατυπώνεται με την εξίσωση 2.9 (Ghasem & Henda, 2014):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Delta\dot{U} + \Delta\dot{E}_{\kappa\iota\nu} + \Delta\dot{E}_{\delta\upsilon\nu} + \Delta(P\dot{V}) \qquad 2.9$$

Η ενθαλπία (H) ορίζεται ως το άθροισμα (Εξ. 2.10) της εσωτερικής ενέργειας (U) και του γινομένου της πίεσης με τον όγκο (PV) (Franses, 2014):

$$H = U + PV \qquad 2.10$$

Η μεταβολή του ρυθμού μεταφοράς ενθαλπίας (Εξ. 2.11) (Franses, 2014):

$$\Delta\dot{H} = \Delta\dot{U} + \Delta(P\dot{V}) \qquad 2.11$$

Συνεπώς, η εξίσωση 2.9 με τη βοήθεια των εξισώσεων 2.10 και 2.11 ανάγεται στην εξίσωση 2.12, η οποία περιγράφει το ισοζύγιο ενέργειας ενός ανοιχτού συστήματος (Franses, 2014):

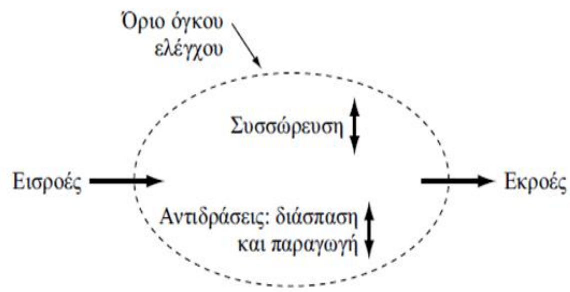
$$\dot{Q} - \dot{W} = \Delta\dot{U} + \Delta\dot{E}_{\kappa\iota\nu} + \Delta\dot{E}_{\delta\upsilon\nu} + \Delta\dot{H} \qquad 2.12$$

2.3 Βήματα ανάλυσης ισοζυγίων

Το ισοζύγιο ενέργειας και μάζας είναι μια διαδικασία υπολογισμού που ελέγχει ουσιαστικά εάν οι άμεσα ή έμμεσα μετρούμενες ροές ενέργειας και μάζας συμφωνούν με τις αρχές διατήρης της μάζας και της ενέργειας (Chakrabarti, 2018). Για να γίνει σωστή και ακριβής εκτίμηση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ακόλουθη διαδικασία (Chakrabarti, 2018) :

- Προσδιορισμός του προβλήματος που πρέπει να μελετηθεί.
- Ορισμός του ορίου που περικλείει ολόκληρο το σύστημα ή το υποσύστημα που πρόκειται να αναλυθεί. Οι ροές μάζας και ενέργειας που εισέρχονται και εξέρχονται πρέπει να μετρώνται στο όριο.
- Το όριο πρέπει να επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε:
    - Όλες οι σχετικές ροές πρέπει να το διασχίζουν, όλες οι μη σχετικές ροές να βρίσκονται εντός των ορίων.
    - Οι μετρήσεις στο όριο πρέπει να είναι δυνατές με εύκολο και ακριβή τρόπο.
- Επιλογή κατάλληλης περίοδου δοκιμής ανάλογα με τον τύπο της διαδικασίας και του προϊόντος.
- Πραγματοποίηση μετρήσεων.
- Υπολογισμός ροών ενέργειας και μάζας.
- Επαλήθευση του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας.
- Η απελευθέρωση ή η χρήση ενέργειας σε ενδόθερμες και εξώθερμες διεργασίες πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο ενεργειακό ισοζύγιο.

Η ανάλυση του ισοζυγίου μάζας προϋποθέτει να ορίσουμε μια συγκεκριμένη περιοχή στον χώρο, η οποία πρόκειται να αναλυθεί. Αυτή η περιοχή ονομάζεται όγκος ελέγχου (control volume). Για παράδειγμα, ο όγκος ελέγχου μπορεί να περιλαμβάνει οτιδήποτε, από ένα ποτήρι νερό ή μία απλή δεξαμενή χημικής ανάμιξης έως έναν ολόκληρο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με καύση γαιάνθρακα, μια λίμνη, το τμήμα ενός ποταμού, την ατμοσφαιρική λεκάνη επάνω από μια πόλη, ή και ολόκληρο τον πλανήτη. Με την διευθέτηση ενός νοητού ορίου γύρω από την περιοχή (Εικόνα 2.3) είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε ποσοτικά τη ροή των υλικών μέσω του ορίου, καθώς και τη συσσώρευση των υλικών και τις μεταξύ τους αντιδράσεις μέσα στην περιοχή (Πηλίνης & Στασινάκης, 2018).



Εικόνα 2.3 Τυχαίος όγκος ελέγχου (Πηλίνης & Στασινάκης, 2018).

Σε όλους τους υπολογισμούς ισοζυγίων μάζας απαραίτητη προϋπόθεση είναι η επιλογή μιας βάσης υπολογισμού που συνήθως επιλέγεται αυθαίρετα, λαμβάνοντας υπόψη όμως τις ανάγκες του προβλήματος και τα διαθέσιμα δεδομένα. Για παράδειγμα, έστω ότι το πρόβλημα αναφέρεται σε έναν αντιδραστήρα ρευστοστερεής κλίνης όπου γίνεται φρύξη χαλκοπυρίτη προς παραγωγή $FeSO_4$ και $CuSO_4$ με χρήση αέρα. Ως βάση στην περίπτωση αυτή μπορεί να ληφθεί ο «τόνος χαλκοπυρίτη τροφοδοσίας», ο «τόνος του αέρα που εισάγεται» ή η «ημέρα λειτουργίας» (Γκαϊντατζής, 2012).

Τέλος, προκειμένου να γίνει η επίλυση του ισοζυγίου μάζας απαιτείται η δημιουργία συστήματος εξισώσεων. Για κάθε άγνωστη ποσότητα που πρέπει να προσδιορισθεί, είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας ανεξάρτητης εξίσωσης που περιέχει τον άγνωστο αυτό. Κατά κανόνα το σύστημα εξισώσεων που πρέπει να λυθεί περιλαμβάνει την εξίσωση ισοζυγίου μάζας για το σύνολο των υλικών που μπαίνουν ή βγαίνουν από το σύστημα (ολικό ισοζύγιο) και μια εξίσωση για κάθε ένα συστατικό (χωριστά), που μπαίνει ή βγαίνει από το σύστημα (Daham, 2014). Τα ισοζύγια ενέργειας εφαρμόζονταιμε τον ίδιο τρόπο όπως και τα ισοζύγια μάζας, και είναι βασισμένα στο ίδιο μεθοδολογικό πλαίσιο.

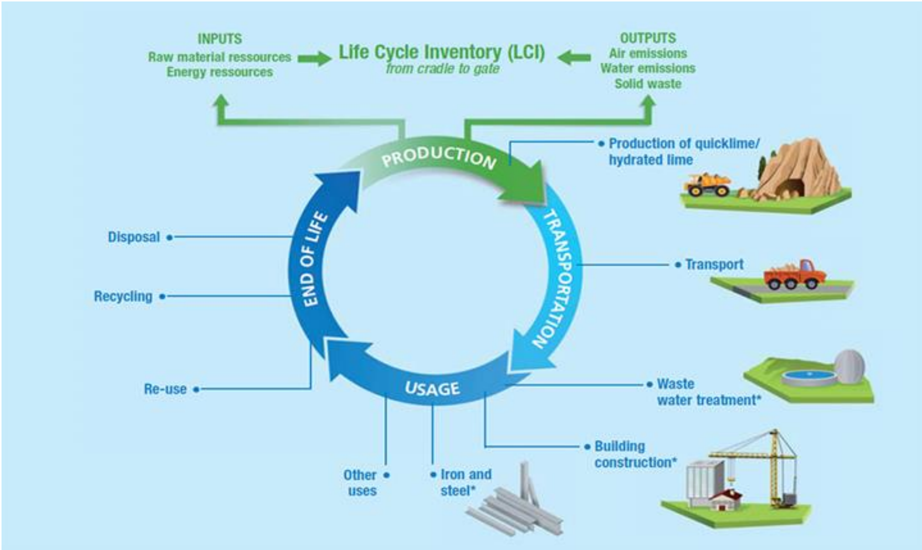
Κατόπιν έρευνας στην βιβλιογραφία, παρατηρήθηκε πληθώρα μεθόδων υπολογισμού των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο τρόπος υπολογισμού εξαρτάται από το είδος και τα χαρακτηριστικά του προς μελέτη συστήματος, τα διαθέσιμα δεδομένα, τις εκάστοτε συνθήκες μελέτης και τις διάφορες υποθέσεις που λαμβάνονται υπόψη (Jha, 2015; Benallou, 2018; Schlesinger, 1996; Ghasem & Henda, 2014; Chakrabarti, 2018).

2.4 Ο συσχετισμός των ισοζυγίων με την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ)

Ο υπολογισμός των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας που είναι βασισμένος σε θεμελειώδεις αρχές των φυσικών επιστημών αποτελεί βασικό και αναπόσταστο μέρος μίας ολοκληρωμένης μελέτης που λέγεται ΑΚΖ.

«Η ΑΚΖ είναι μία τεχνική για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών πτυχών και των πιθανών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα προϊόν με την κατάρτιση καταλόγου των σχετικών εισροών και εκροών ενός συστήματος προϊόντων, την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με τις εν λόγω εισροές και εκροές και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, των φάσεων ανάλυσης απογραφής και επιπτώσεων, σε σχέση με τους στόχους της μελέτης» (ISO, 1997).

Η ΑΚΖ αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στη δουλειά του Μηχανικού Περιβάλλοντος, διότι προσφέρει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο απογραφής, εκτίμησης, ποσοτικοποίησης και αξιολόγησης όλων των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας διαδικασίας, δραστηριότητας, ενός προϊόντος σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους (Εικόνα 2.4).

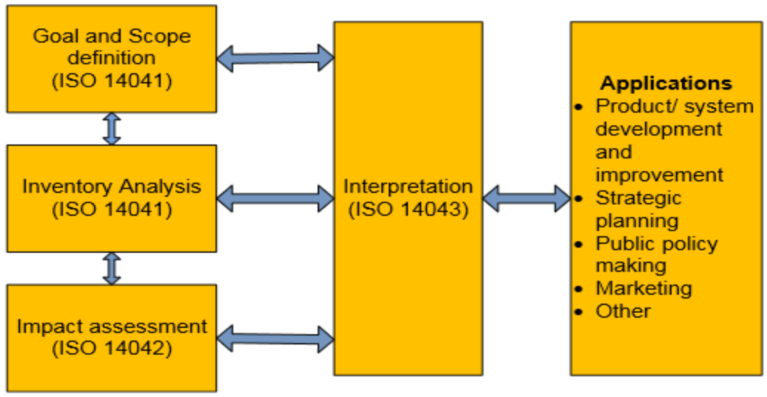


Εικόνα 2.4 Στάδια ΑΚΖ (Eula, 2020).

<u>Μεθοδολογία ΑΚΖ σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040:14043</u>

Η μεθοδολογία για την ΑΚΖ των προϊόντων (αγαθών και υπηρεσιών) σύμφωνα με τον ISO διακρίνεται σε 4 στάδια που είναι τα εξής και παρουσιάζονται στην εικόνα 2.5. Τα προτεινόμενα στάδια είναι τα εξής:

1. Ο Καθορισμός του Σκοπού και Πλαισίου Μελέτης (Goal and Scope Definition, GSD) (ISO, 1998).
2. Η Απογραφική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory, LCI) (ISO, 1998).
3. Η Ανάλυση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) (ISO, 2000a).
4. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων (interpretation) (ISO, 2000b).



Εικόνα 2.5 Γενικό πλαίσιο μεθοδολογίας ΑΚΖ (ISO, 2006).

Η αναγκαιότητα της εύρεσης μιας επιστημονικής μεθόδου, η οποία να είναι σε θέση να αξιολογεί και το σημαντικότερο να αποσκοπεί στην ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας δραστηριότητας, ενός προϊόντος ακόμη και ενός κύκλου διεργασιών από την αρχή έως το τέλος της ζωής τους οδήγησε στη γέννηση της ΑΚΖ. Η ΑΚΖ είναι ένα εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης και λήψης αποφάσεων, εναρμονιζόμενο με την λογική της αειφόρου ανάπτυξης που στοχεύει στην πρόληψη της ρύπανσης του περιβάλλοντος, στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων, αλλά και στην αντιμετώπιση σύγχρονων οξυμένων περιβαλλοντικών προκλήσεων. Στον πίνακα 2.1 περιγράφονται συνοπτικά τα στάδια της ΑΚΖ σύμφωνα με τα ISO 14040:14043.

Πίνακας 2.1 Βασική περιγραφή των σταδίων της ΑΚΖ σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040:14043.

Στάδια ΑΚΖ	Βασική Περιγραφή
Στάδιο 1: Ο Καθορισμός του Σκοπού και Πλαισίου Μελέτης (Goal and Scope Definition, GSD)	Το GSD περιλαμβάνει τον καθορισμό του σκοπού αυτής της μελέτης, περιλαμβάνει την προβλεπόμενη εφαρμογή της μελέτης, το κοινό στο οποίο προορίζεται, την επιδιωκόμενη χρήση αποτελεσμάτων και τις συγκρίσεις ανάμεσα στα συστήματα εάν βέβαια πραγματοποιούνται (ISO, 2006).
Στάδιο 2: Η Απογραφική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory, LCI)	Στο LCI γίνεται απογραφή όλων των ροών υλικών και ενέργειας που εισέρχονται και εξέρχονται καθ' όλη την διάρκεια ζωής τους. Η απογραφή δεδομένων, είναι μια ποσοτική περιγραφή των συνολικών ισοζυγίων μάζας και ενέργειας μέσα στα όρια του συστήματος ή υποσυστημάτων) (ISO, 2006).
Στάδιο 3: Η Ανάλυση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)	Στο LCIA πραγματοποιείται η περαιτέρω επεξεργασία του συνόλου των αποτελεσμάτων της απογραφής δεδομένων από πλευράς περιβαλλοντικών επιπτώσεων και κοινωνικών προτιμήσεων. Η εκτίμηση επιπτώσεων είναι μια ποσοτική ή/και ποιοτική διαδικασία που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει και να ερμηνεύσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προσδιορίστηκαν κατά το στάδιο της απογραφής (Guinée & Lindeijer, 2002).
Στάδιο 4: Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων (interpretation)	Στο τελευταίο στάδιο όλα τα αποτελέσματα της προηγηθείσας ανάλυσης, όλες οι επιλογές που πραγματοποιήθηκαν και όλες οι υποθέσεις που έγιναν αξιολογούνται ως προς τη συνέπεια, την πληρότητα, την ορθότητα και την ευρωστία τους και εξάγονται συμπεράσματα και υποδείξεις για τη λήψη αποφάσεων αναφορικά με το εξεταζόμενο σύστημα (Van Oers, et al., 2002).

2.5 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο την ανάλυση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας ενός συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών που πρόκειται να εγκατασταθεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Απώτερος σκοπός ήταν ο έλεγχος της βιωσιμότητας του συγκεκριμένου συστήματος, καθώς επίσης και της ενεργειακής του αυτονομίας.

Ο προσδιορισμός των ισοζυγίων του συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά την ανάλυση ισοζυγίων μάζας του συστήματος μικροκοσκίνισης, ενώ στο δεύτερο στάδιο έγινε η ανάλυση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας των μονάδων ξήρανσης και αεριοποίησης με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή της ΕΕΛ Ρεθύμνου

Η ΕΕΛ Ρεθύμνου (Εικόνα 3.1) βρίσκεται στην τοποθεσία Μύτη Γρύντα σε απόσταση περίπου 3km δυτικά της πόλης του Ρεθύμνου και 2km βορειοανατολικά του οικισμού Ατσιπόπουλου, καταλαμβάνοντας έκταση περίπου 35 στρεμμάτων. Στην ΕΕΛ οδηγούνται τα λύματα και τα βοθρολύματα του δήμου Ρεθύμνης και λύματα βιομηχανιών των δυτικών και ανατολικών περιοχών του Ρεθύμνου, τα οποία έχουν υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία, έτσι ώστε να έχουν ομοειδή σύσταση με εκείνη των αστικών λυμάτων.

Εικόνα 3.2 Άποψη της ΕΕΛ Ρεθύμνου.

3.1 Παράμετροι σχεδιασμού της εγκατάστασης

Σύμφωνα με την Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων, ΑΕΠΟ της ΕΕΛ Ρεθύμνου, Α.Π. οικ.175133/26-09-2014, η οποία είναι αναρτημένη στην ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος Και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ) τα δεδομένα σχεδιασμού (τελική φάση σχεδιασμού, έτος 2028) περιγράφονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Ρυπαντικά και υδραυλικά φορτία σχεδιασμού ΕΕΛ Ρεθύμνου.

Παράμετρος	Χειμώνας	Θέρος	Αιχμή θέρους
Ισοδύναμος πληθυσμός	96,000	126,200	151,750
Μέση ημερήσια παροχή, $\left(\frac{m^3}{d}\right)$	19,200	22,120	28,170
Παροχή αιχμής, $\left(\frac{m^3}{h}\right)$	1,600	1,760	2,170
Παροχή βοθρολυμάτων, $\left(\frac{m^3}{d}\right)$	100	150	200
Παροχή βιομηχανικών αποβλήτων, $\left(\frac{m^3}{d}\right)$	440	300	100
BOD_5, $\left(\frac{kg}{d}\right)$	5,760	7,392	9,105
Suspended Solids (SS), $\left(\frac{kg}{d}\right)$	6,144	5,914	7,284
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), $\left(\frac{kg}{d}\right)$	768	885	1,147
Total Phosphorus (TP), $\left(\frac{kg}{d}\right)$	288	370	455
Θερμοκρασία λυμάτων, (℃)	15	24	28

(Πηγή: http://astikalimata.ypeka.gr, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου)

Οι μέγιστοι αποδεκτοί μέσοι όροι των συγκεντρώσεων (σύνθετο 24ωρο δείγμα) σχετικά με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εξόδου της εγκατάστασης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

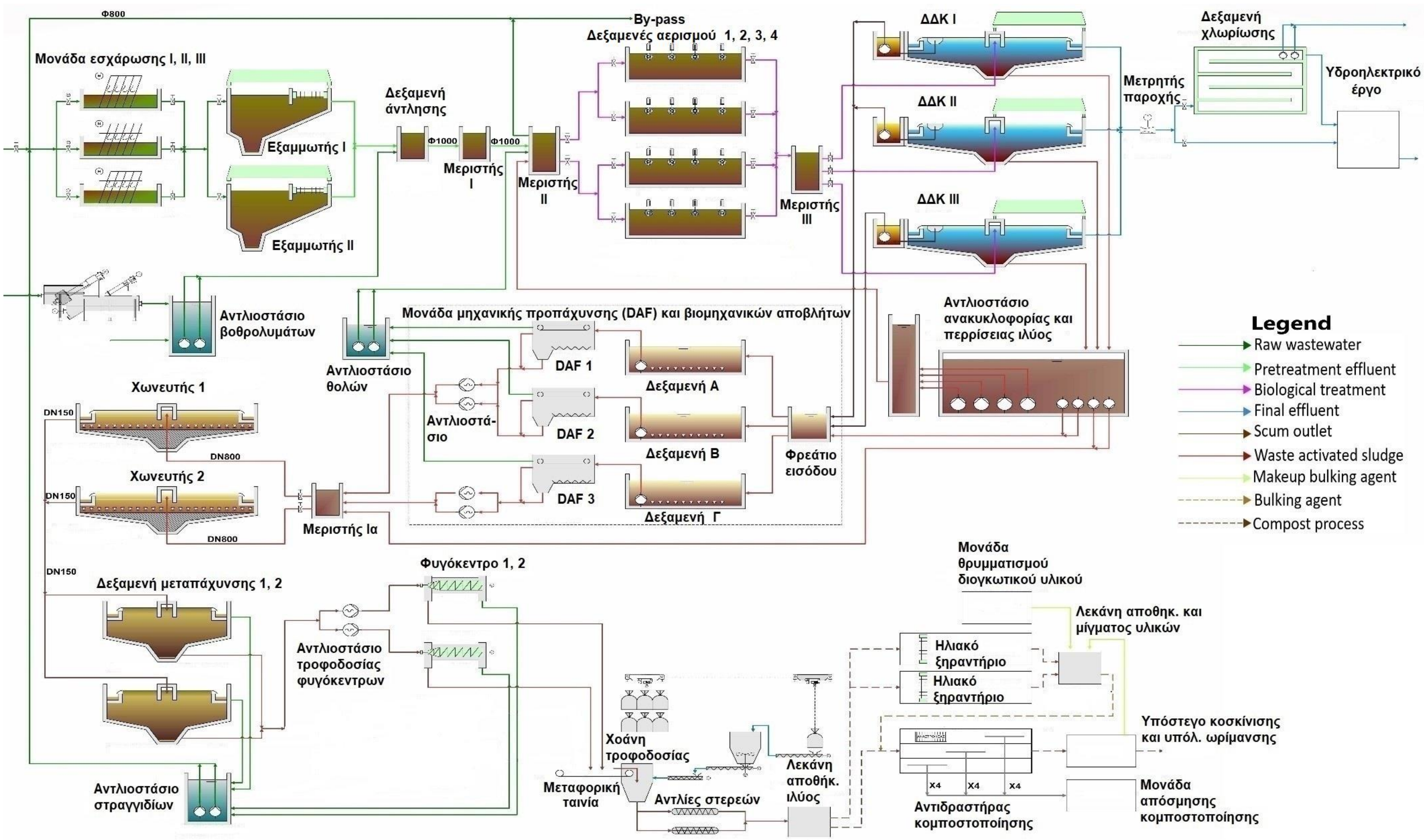
Πίνακας 3.2. Ποιοτικά χαρακτηριστικά εξόδου της ΕΕΛ.

Παράμετρος	Τιμή
BOD_5, $\left(\frac{mg}{L}\right)$	< 20
COD, $\left(\frac{mg}{L}\right)$	< 75
SS, $\left(\frac{mg}{L}\right)$	< 20
NO_4-N, $\left(\frac{mg}{L}\right)$	< 2
NO_3-N, $\left(\frac{mg}{L}\right)$	< 8
Ολικό άζωτο, $\left(\frac{mg}{L}\right)$	< 10
Φώσφορος, $\left(\frac{mg}{L}\right)$	< 10
Κολοβακτηριοειδή, $\left(\frac{cfu}{100mL}\right)$	< 500
Χλώριο, $\left(\frac{mg}{L}\right)$	< 0.5
DO, $\left(\frac{mg}{L}\right)$	> 5

(Πηγή: http://astikalimata.ypeka.gr, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου)

3.2 Περιγραφή της υφιστάμενης ΕΕΛ

Σύμφωνα με την υπ΄ αριθμόν 175133/26-10-2014 ΑΕΠΟ, η προσαγωγή των λυμάτων στην ΕΕΛ Ρεθύμνου γίνεται μέσω δικτύου κεντρικών αποχετευτικών αγωγών, κεντρικών αντλιοστασίων και συλλεκτήριων αγωγών. Πιο συγκεκριμένα, τα λύματα μέσω συλλεκτήριων αγωγών καταλήγουν στο κεντρικό αντλιοστάσιο της Αγίας Φωτεινής και έπειτα με δύο παράλληλους καταθλιπτικούς αγωγούς προσαγωγής μήκους 2m καταλήγουν στην ΕΕΛ. Όλες οι επιμέρους μονάδες της ΕΕΛ παρουσιάζονται αναλυτικά στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα ροής της ΕΕΛ Ρεθύμνου.

Η υφιστάμενη ΕΕΛ Ρεθύμνου περιλαμβάνει τις εξής μονάδες επεξεργασίας των αποβλήτων:

- Φρεάτιο άφιξης λυμάτων
- Μονάδα εσχάρωσης
- Μονάδα εξάμμωσης
- Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας
    - Δεξαμενές αερισμού
    - Δεξαμενές Δευτεροβάθμιας Καθίζησης (ΔΔΚ)
    - Αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος
- Μονάδα απολύμανσης και αγωγός διάθεσης
- Μονάδα επεξεργασίας ιλύος
    - Μηχανική προ-πάχυνση
    - Αερόβια χώνευση
    - Μετά-πάχυνση και μονάδα αφυδάτωσης ιλύος
    - Συνδυασμένη μονάδα ηλιακής ξήρανσης – κομποστοποίησης
- Μονάδα υποδοχής-εξισορρόπησης βοθρολυμάτων
- Μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων
- Μονάδα βιομηχανικού νερού

3.2.1 Φρεάτιο άφιξης λυμάτων

Στην υφιστάμενη ΕΕΛ, τα λύματα καταλήγουν μέσω δικτύου αποχέτευσης στο φρεάτιο άφιξης παράλληλα με τα στραγγίδια από όλα τα υφιστάμενα τμήματα της ΕΕΛ και τα προ-επεξεργασμένα βιομηχανικά απόβλητα. Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης υπάρχει η διάταξη παράκαμψης (by-pass) που οδηγεί τα λύματα απευθείας στον αγωγό εκβολής (Κεχαγιαδάκη, 2019).

3.2.2 Μονάδα εσχάρωσης

Η μονάδα εσχάρωσης έχει τοποθετηθεί μέσα σε κλειστό κτίριο (κτίριο προ-επεξεργασίας). Εντός του κτιρίου υπάρχει πλήρες σύστημα εξαερισμού, απόσμησης και περιλαμβάνεται το φρεάτιο άφιξης των λυμάτων, όπου διαθέτει τρία κανάλια (το ένα είναι εφεδρικό). Τα κανάλια αποτελούνται από ανοξείδωτα ηλεκτροκίνητα θυροφράγματα ανάντη και κατάντη των εσχάρων. Η μονάδα εσχάρωσης περιλαμβάνει ευθύγραμμες αυτοκαθαριζόμενες εσχάρες (πλάτος καναλιού 0.8m, πάχος ράβδων σχάρας 8mm και πάχος διακένων σχάρας 10mm) (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Η ενεργοποίηση του μηχανισμού απομάκρυνσης των εσχαρισμάτων γίνεται μέσω ελέγχου διαφορικής στάθμης (ανάντη και κατάντη) των εσχάρων, είτε μέσω χρονοπρογράμματος. Από τη χοάνη τα εσχαρίσματα μεταφέρονται μέσω μεταφορικού ιμάντα σε ειδικούς κάδους αποκομιδής (Κεχαγιαδάκη, 2019; Δανδόλου, 2010).

3.2.3 Μονάδα εξάμμωσης

Τα λύματα μετά την εσχάρωση οδηγούνται σε δίδυμο αεριζόμενο εξαμμωτή, του οποίου τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3. Η εξάμμωση στεγάζεται εντός κλειστού κτιρίου με κατάλληλους αεραγωγούς για την απόσμηση του αέρα. Για να επιτευχθεί ο αερισμός των λυμάτων, υπάρχουν δύο φυσητήρες (ένας εφεδρικός) δυναμικότητας 330 $\frac{Nm^3}{d}$ σε μανομετρικό 400mbar. Ο αέρας παρέχεται στο δίδυμο αεριζόμενο εξαμμωτή από διαχυτήρες χονδρής φυσαλίδας, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε βάθος περίπου 2m (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Τέλος, η άμμος σαρώνεται με κινητή γέφυρα και με τη βοήθεια υποβρύχιων αντλιών οδηγείται στο αυτόματο σύστημα διαχωρισμού της, όπου γίνεται η συλλογής της σε ειδικά δοχεία αποκομιδής. Παράλληλα με τον εξαμμωτή υπάρχει το κανάλι ηρεμίας ροής, όπου συλλέγονται τα λίπη με τη βοήθεια ξέστρου κινητής γέφυρας και οδηγούνται σε ειδικό φρεάτιο προς αποκομιδή (Κεχαγιαδάκη, 2019; Δανδόλου, 2010).

Πίνακας 3.3 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά εξάμμωση (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Παράμετρος	Τιμή
Μήκος	18.60m
Πλάτος (ολικό)	3.20m
Πλάτος εξαμμωτή	2.00m
Πλάτος απολιπαντή	1.05m
Βάθος	2.70m
Ενεργός όγκος εξαμμωτή	$75m^3$
Ποσότητα άμμου	6,513 $\frac{m^3}{d}$

3.2.4 Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας

Η βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων πραγματοποιείται με τη μέθοδο του παρατεταμένου αερισμού με την οποία επιτυγχάνεται η βιολογική απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου. Τα λύματα μετά το στάδιο της προ-επεξεργασίας οδηγούνται με βαρύτητα στο μεριστή I και έπειτα στο μεριστή II, όπου υπερχειλίζουν στις δεξαμενές αερισμού (Κεχαγιαδάκη, 2019).

<u>Δεξαμενή αερισμού</u>

Στη δεξαμενή αερισμού τα λύματα υποβάλλονται σε συνδυασμένη βιολογική αερόβια κα αναερόβια επεξεργασία για την αποικοδόμηση και αδρανοποίηση του οργανικού υλικού, καθώς και αζωτούχων και φωσφορούχων ρυπαντικών τους φορτίων. Η κάθε δεξαμενή αερισμού χωρίζεται σε μία αναερόβια και μια αερόβια ζώνη. Στην αναερόβια ζώνη, οι μικροοργανισμοί μετατρέπουν τα νιτρικά άλατα σε αέριο άζωτο και στην αερόβια ζώνη παρουσία αέρα οι αζωτούχες ενώσεις διασπώνται από τους μικροοργανισμούς και μετατρέπονται σε νιτρικά άλατα.

Στην παρούσα φάση της ΕΕΛ λειτουργούν τρεις δεξαμενές αερισμού, ενώ η τέταρτη δεξαμενή βρίσκεται υπό κατασκευή. Οι δεξαμενές αερισμού είναι τύπου οξειδωτικής τάφρου και τα χαρακτηριστικά τους διακρίνονται στον πίνακα 3.4. Ο αερισμός των λυμάτων πραγματοποιείται με 16 επιφανειακούς βραδύστροφους αεριστήρες οριζόντιου άξονα, ισχύος 30kW ο καθένας. Η εκροή των αποβλήτων από κάθε δεξαμενή πραγματοποιείται με ηλεκτροκίνητο υπερχειλιστή (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Πίνακας 3.4 Βασικά χαρακτηριστικά δεξαμενών αερισμού (Ματσούκα, 2003).

Παράμετρος	**Τιμή**
Μέση παροχή	6,400 $\frac{m^3}{d}$
Βάθος υγρού	3m
Πλάτος	6.95m
Μήκος	45m
Όγκος δεξαμενής	1,600m^3
Χρόνος παραμονής μ/ο (SRT)	5d
Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού (Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS)	6,000 $\frac{mg}{L}$
Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids, MLVSS)	3,900 $\frac{mg}{L}$
Λόγος εσωτερικής ανακυκλοφορίας	2
DO	2 $\frac{mg}{L}$

ΔΔΚ

Στη συνέχεια, το μικτό υγρό οδηγείται στο μεριστή III και μέσω υπογείου αγωγού, κατανέμεται στις τρεις ΔΔΚ κυκλικού σχήματος, των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 3.5. Τα επεξεργασμένα λύματα υπερχειλίζουν από περιμετρικούς τριγωνικούς υπερχειλιστές και οδηγούνται στο φρεατίου εξόδου, ενώ η ιλύς που απάγεται από τις ΔΔΚ συγκεντρώνεται στον θάλαμο του αντλιοσταστίου ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος, μέσω υπόγειου αγωγού. Ένα μέρος της καθιζάνουσας ιλύος επανακυκλοφορεί προς το μεριστή I, ενώ το υπόλοιπο μέρος αντλείται προς τη μονάδα μηχανικής προ-πάχυνσης μέσω υποβρύχιων αντλιών. Όσον αφορά τα επιπλέοντα στερεά απομακρύνονται μέσω ακτινικού ξέστρου επιφανείας και διοχετεύονται στα φρεάτια επιπλεόντων (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Πίνακας 3.5 Βασικά χαρακτηριστικά ΔΔΚ (Ματσούκα, 2003).

Παράμετρος	**Τιμή**
Μέση παροχή	6,400 $\frac{m^3}{d}$
Μέγιστη παροχή	7,500 $\frac{m^3}{d}$
Διάμετρος	32m
Μέσο βάθος	3.13m
Πλευρικό βάθος	2.65m

Αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος

Η καθιζάνουσα ιλύς από τις ΔΔΚ συγκεντρώνεται σε έναν υγρό θάλαμο του αντλιοστασίου. Ένα μέρος της ανακυκλοφορεί προς τις δεξαμενές αερισμού, διαμέσου του μεριστή I, με τη βοήθεια τεσσάρων υποβρύχιων αντλιών. Η δυναμικότητα των αντλιών είναι 800 $\frac{m^3}{d}$ και ισχύος 15kW, έκαστη (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Η απομάκρυνση της περίσσειας της ιλύος πραγματοποιείται με τρεις υποβρύχιες αντλίες (μία εφεδρική) παροχής 46 $\frac{m^3}{d}$ και ισχύος 3kW, η κάθε μία. Ένα μέρος της περίσσειας ιλύος οδηγείται με καταθλιπτικό αγωγό στη μονάδα προ-πάχυνσης, ενώ το υπόλοιπο μέρος διοχετεύεται στους αερόβιους χωνευτές (Κεχαγιαδάκη, 2019).

3.2.5 Μονάδα απολύμανσης και διάθεση λυμάτων

Μετά τις ΔΔΚ, τα λύματα οδηγούνται μέσω βαρύτητας στη μονάδα μέτρησης παροχής σε κανάλι Parshall και από εκεί στη μονάδα απολύμανσης. Τα διαυγασμένα λύματα υφίστανται χλωρίωση για την απομάκρυνση του μικροβιακού φορτίου και στη συνέχεια αποχλωρίωση για την εξουδετέρωση του υπολειμματικού χλωρίου.

Αρχικά, τα επεξεργασμένα λύματα οδηγούνται με αγωγό στο φρεάτιο εισόδου της δεξαμενής χλωρίωσης, όπου τα χαρακτηριστικά της φαίνονται στον πίνακα 3.6 και από εκεί υπερχειλίζουν σε αυτή. Η τροφοδοσία του δ/τος NaOCl (περιεκτικότητας 12%) γίνεται μέσω δοσομετρικής αντλίας δυναμικότητας 70 $\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{h}}$ στο φρεάτιο εισόδου, όπου η παροχή της αντλίας ρυθμίζεται βάσει των ενδείξεων του μετρητή παροχής. Η δεξαμενή χλωρίωσης μαιανδρικού τύπου καθιστά εφικτή την πλήρη επαφή των λυμάτων με το διάλυμα NaOCl (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Στη συνέχεια τα λύματα οδηγούνται στο φρεάτιο αποχλωρίωσης όπου χρησιμοποιείται όξινο θειώδες νάτριο ($NaHS0_3$), το οποίο δεσμεύει το υπολειμματικό χλώριο. Στην έξοδο της δεξαμενής χλωρίωσης υπάρχει εγκατεστημένος μετρητής υπολειμματικού χλωρίου, ο οποίος ρυθμίζει τη δόση των δοσομετρικών αντλιών. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υδροστροβίλου, που συνδέεται με γεννήτρια 60kW (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Τέλος, η διάθεση των λυμάτων πραγματοποιείται με αγωγό εκβολής 580m σε βάθος 20m στη θαλάσσια περιοχή του κόλπου Γρύντα σύμφωνα με την υπ’ αριθμ. 4603/12-9-1989 Απόφαση του Νομάρχη Ρεθύμνου.

Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά δεξαμενής χλωρίωσης (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Παράμετρος	Τιμή
Μέγιστη παροχή	28,170 $\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{d}}$
Όγκος δεξαμενής	560m^3
Αριθμός λωρίδων	6
Μήκος λωρίδας	16.90m
Πλάτος λωρίδας	2m
Χρόνος επαφής	28.6min

3.2.6 Μονάδα επεξεργασίας ιλύος

<u>Μηχανική προ-πάχυνση</u>

Η περίσσεια ιλύος που παράγεται στην ΕΕΛ οδηγείται από το αντλιοστάσιο περίσσειας και ανακυκλοφορίας της ιλύος μέσω καταθλιπτικού αγωγού στη μονάδα μηχανικής προ-πάχυνσης. Η μονάδα περιλαμβάνει δύο συστήματα Επίπλευσης Διαλυμένου Αέρα (Dissolved Air Flotation, DAF) και τρεις αεριζόμενες δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης της ιλύος (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Αρχικά, η ιλύς αποθηκεύεται στις δεξαμενές Α, Β, Γ ωφέλιμου όγκου 410m^3, που είναι ορθογωνικές και κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η παροχή του αέρα εντός των δεξαμενών πραγματοποιείται με διαχυτές λεπτής φυσαλίδας. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια τριών αντλιών δυναμικότητας 30 $\frac{m^3}{h}$ και 2.6kW, έκαστη, η ιλύς οδηγείται στα δύο συστήματα DAF. Το κάθε σύστημα DAF, ενεργής επιφάνειας 23m^2, είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα και τα βασικά του μέρη είναι τα εξής (Κεχαγιαδάκη, 2019):

- Δεξαμενές κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα, οι οποίες φέρουν διάταξη ξέστρου επιφανείας τύπου αλυσίδας.
- Αντλίες τροφοδοσίας, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την κάλυψη των μονάδων σε νερό. Για την κάλυψη των αναγκών χρησιμοποιείται ένα μέρος της δευτεροβάθμιας εκροής, το οποίο αντλείται από το κανάλι εκροής των ΔΔΚ.
- Αυτόματο σύστημα παρασκευής και δοσομέτρησης πολυηλεκτρολύτη συνολικού όγκου 1000L και δυναμικότητας δοσομέτρησης μεταξύ 100 – 2000 $\frac{g}{h}$.
- Τρεις αντλίες εξόδου λάσπης δυναμικότητας 10 $\frac{m^3}{h}$. Οι τρεις αντλίες θετικής εκτόπισης αναρροφούν την λάσπη από την χοάνη των μονάδων DAF.
- Δύο αντλίες εξόδου θολών νερών δυναμικότητας 80 $\frac{m^3}{h}$ και ισχύος 6.5kW, έκαστη.

<u>Αερόβια χώνευση</u>

Για τη διεργασία της αερόβιας χώνευσης χρησιμοποιούνται οι δύο πρώην ΔΠΚ (χωνευτές 1 και 2) κυκλικού σχήματος. Από τα 2 συστήματα DAF και από το αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περίσσειας της ιλύος, η ιλύς καταλήγει στο μεριστή 1α και από εκεί διαμοιράζεται στους 2 χωνευτές (διαμέτρου 22m, επιφάνειας 380m^2, βάθους 3m, ωφέλιμου όγκου 1,150m^3) (Κεχαγιαδάκη, 2019).

<u>Μετά-πάχυνση και μονάδα αφυδάτωσης ιλύος</u>

Η μετά-πάχυνση της ιλύος στην ΕΕΛ Ρεθύμνου περιλαμβάνει δύο παχυντές βαρύτητας κυκλικού σχήματος (διαμέτρου 10m, βάθος 4.5m, ωφέλιμου όγκου 520 m^3). Η τροφοδοσία της ιλύος γίνεται κεντρικά μέσω του τυμπάνου εισόδου του κινητού ξέστρου, ενώ μέσω των ειδικών κατακόρυφων ράβδων διευκολύνεται η άνοδος των υγρών και η καθίζηση της συμπυκνωμένης ιλύος. Η παχυμένη ιλύς αντλείται προς την μηχανική αφυδάτωση με αντλίες θετικής εκτόπισης, ενώ τα θολά νερά μέσω περιμετρικού καναλιού υπερχείλισης και υφιστάμενης εγκατάστασης απαγωγής επιστρέφουν στην είσοδο της ΕΕΛ (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Το κτίριο που περιλαμβάνει τη μονάδα αφυδάτωσης της ιλύος στεγάζει τον εξοπλισμό για την αφυδάτωση της ιλύος και τη μεταφορά των στραγγισμάτων της στα έργα προ-επεξεργασίας των λυμάτων. Η σταθεροποιημένη ιλύς από τους παχυντές βαρύτητας οδηγείται για αφυδάτωση με τη χρήση δύο φυγόκεντρων διαχωριστών δυναμικότητας 450 $\frac{kg}{h}$. Για τη μεταφορά του διαλύματος πολυηλεκτρολύτη στο δοχείο ανάμιξης με την ιλύ χρησιμοποιούνται δύο αντλίες θετικής εκτόπισης. Τα στραγγίδια της μονάδας συγκεντρώνονται στο φρεάτιο των στραγγιδίων και από εκεί στην είσοδο της ΕΕΛ (Κεχαγιαδάκη, 2019).

Η αφυδατωμένη ιλύς οδηγείται μέσω μεταφορικού κοχλία στη μονάδα προσθήκης ασβέστη για την σταθεροποίηση της και στη συνέχεια μέσω αντλιών μεταφέρεται στις λεκάνες αφυδατωμένης ιλύος και μίγματος υλικών (Δανδόλου, 2010).

<u>Συνδυασμένη μονάδα ηλιακής ξήρανσης – κομποστοποίησης</u>

Από τις λεκάνες αφυδατωμένης ιλύος και μίγματος υλικών ένα μέρος της ιλύος οδηγείται στη μονάδα ηλιακής ξήρανσης. Το μίγμα που προκύπτει από την ανάμιξη του υπόλοιπου μέρους της αφυδατωμένης ιλύος, του διογκωτικού υλικού και της ξηραμένης ιλύος οδηγείται στη μονάδα κομποστοποίησης (Κεχαγιαδάκη, 2019). Τα επιμέρους τμήματα της συνδυασμένης μονάδας παρουσιάζονται στον πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7 Επιμέρους τμήματα της μονάδας ηλιακής ξήρανσης – κομποστοποίησης (Δανδόλου, 2010; Κεχαγιαδάκη, 2019).

Τμήματα	Περιγραφή
Αντιδραστήρας κομποστοποίησης-βιοξήρανσης	• Αποτελείται από τρία κανάλια ενεργού πλάτους 3m, μήκους 70m και ύψους ιλύος 2m. Ο ενεργός όγκος του αντιδραστήρα είναι 1,260m^3. • Το σύστημα αερισμού αποτελείται από δίκτυο αγωγών και σύστημα διοχέτευσης αέρα δυναμικότητας 15,000 $\frac{m3}{h}$.
Δύο Ηλιακά ξηραντήρια	• Τα ξηραντήρια είναι τύπου θερμοκηπίου. Το κάθε ηλιακό ξηραντήριο έχει ενεργό πλάτος 24.50m, μήκος 95m και ελάχιστο ύψος ιλύος 4m.
Μονάδα ωρίμανσης	Η μονάδα ωρίμανσης περιλαμβάνει τα εξής: • Χώρος κόσκινου διαστάσεων:12.35m x 9m. • Χώρος αποθήκευσης χονδρόκοκκου υλικού διαστάσεων:12.35m x 9m. • Χώρος ωρίμανσης και αποθήκευσης διαστάσεων: 45.50m x 18m. • Υπόστεγο κοσκίνισης και υπολειπόμενης ωρίμανσης επιφάνειας 1,200m^2.
Μονάδα απόσμησης κομποστοποίησης (πλυντηρίδα)	• Εγκατεστημένη χημική πλυντηρίδα διασταυρούμενης ροής, με διαστάσεις 95.65m x 12.85m (ελεύθερο ύψος).
Λεκάνες αφυδατωμένης ιλύος και μίγματος υλικών	• Το εμβαδόν επιφάνειας των λεκανών ισούται με 450m^2.
Υπόστεγο θρυμματισμού	• Το υπόστεγο θρυμματισμού έχει επιφάνεια 450 m^2 και στο εσωτερικό του βρίσκεται θρυμματιστής διογκωτικού υλικού 5,050 $\frac{tn}{h}$.

3.2.7 Μονάδα υποδοχής - εξισορρόπησης βοθρολυμάτων

Η μονάδα υποδοχής - εξισορρόπησης των βοθρολυμάτων της ΕΕΛ Ρεθύμνου έχει δυναμικότητα 90 $\frac{m^3}{h}$ και περιλαμβάνει τα εξής τμήματα (Κεχαγιαδάκη, 2019; Δανδόλου, 2010):

- Χονδροεσχάρα για την αφαίρεση ογκωδών αντικειμένων.
- Λεπτοεσχάρα αυτοκαθαριζόμενη διακένων 6mm.

- Αεριζόμενο εξαμμωτή (χωρίς λιποσυλλέκτη).
- Δεξαμενή εξισορρόπησης και προ-αερισμού, ενεργού όγκου $53m^3$.
- Αντλιοστάσιο κατάθλιψης προς το φρεάτιο εισόδου.

Μετά την ολοκλήρωση της εξισορρόπησης τα βοθρολύματα οδηγούνται με βαρύτητα στη δεξαμενή άντλησης και από εκεί μέσω δύο υποβρύχιων αντλιών δυναμικότητας 82.3 $\frac{m^3}{h}$, η κάθε μία στο μεριστή ΙΙ (Κεχαγιαδάκη, 2019).

3.2.8 Μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων

Η μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων δέχεται απόβλητα από βυρσοδεψεία, σφαγεία και τυροκομία. Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της μονάδας διακρίνονται στον πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8 Χαρακτηριστικά μονάδας βιομηχανικών αποβλήτων.

Χαρακτηριστικά	**Βυρσοδεψεία**	**Σφαγεία**	**Τυροκομία**
Ημερήσια παροχή, $\left(\frac{m^3}{d}\right)$	240	200	15
BOD_5 $\left(\frac{kg}{d}\right)$	360	240	450
COD, $\left(\frac{kg}{d}\right)$	960	500	975
SS, $\left(\frac{kg}{d}\right)$	360	300	60
Θειούχα(S^{-2}), $\left(\frac{kg}{d}\right)$	36	-	-
Χρώμιο (Cr_2O_3), $\left(\frac{kg}{d}\right)$	9.6	-	-
Χλωριούχα, $\left(\frac{kg}{d}\right)$	480	20	15
Ολικό άζωτο, $\left(\frac{kg}{d}\right)$	33.6	40	25.8
Λίπη – έλαια, $\left(\frac{kg}{d}\right)$	43.2	100	-

(Πηγή: http://astikalimata.ypeka.gr, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου)

Η μέθοδος προ-επεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων από τα βυρσοδεψεία περιλαμβάνει οξείδωση των θειούχων και χημική κροκίδωση χρωμίου, αιωρούμενων στερεών και λιπών, ενώ η αφαίρεση των ελαίων γίνεται με επίπλευση. Η γραμμή επεξεργασίας των αποβλήτων από τα βυρσοδεψία αποτελείται από (Κεχαγιαδάκη, 2019):

- Δύο περιστρεφόμενα κόσκινα, τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου δυναμικότητας 50 $\frac{m^3}{h}$.
- Μέτρηση παροχής ηλεκτρομαγνητικού τύπου.
- Διόρθωση pH με διάλυμα καυστικής σόδας, εξισορρόπηση και οξείδωση θειούχων με αερισμό παρουσία θειικού μαγγανίου σε δίδυμη δεξαμενή εναλλασσόμενης λειτουργίας.
- Κροκίδωση και επίπλευση με διαλυμένο αέρα.

Η μέθοδος προ-επεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων από τα τυροκομία και τα σφαγεία περιλαμβάνει τη χημική κροκίδωση των TSS, χρωμίου και λιπών, αλλά και την αφαίρεση των λιπών με επίπλευση. Η γραμμή επεξεργασίας των αποβλήτων από τα τυροκομία αποτελείται από: (Κεχαγιαδάκη, 2019)

- Εξισορρόπηση σε αεριζόμενη δεξαμενή και διόρθωση pH με διάλυμα καυστικής σόδας.
- Διβάθμιο αεριζόμενο βιολογικό αντιδραστήρα.
- Διοχέτευση στην αεριζόμενη δεξαμενή των σφαγείων και στη συνέχεια στη μονάδα κροκίδωσης και επίπλευσης για περαιτέρω επεξεργασία.

Η γραμμή επεξεργασίας των αποβλήτων από τα σφαγεία αποτελείται από (Κεχαγιαδάκη, 2019):

- Δύο περιστρεφόμενα κόσκινα, τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου δυναμικότητας 50 $\frac{m^3}{h}$.
- Μέτρηση παροχής ηλεκτρομαγνητικού τύπου.
- Εξισορρόπηση σε αεριζόμενη δεξαμενή και κροκίδωση που λαμβάνει χώρα με χλωριούχο πολυαργίλιο.
- Επίπλευση με διαλυμένο αέρα.

Τέλος, τα προ-επεξεργασμένα βιομηχανικά απόβλητα οδηγούνται στην είσοδο της ΕΕΛ για την περαιτέρω επεξεργασία τους, ενώ η παχυμένη ιλύς οδηγείται με αντλίες εκτόπισης μέσω του μεριστή Ι στους δύο αερόβιους χωνευτές της ΕΕΛ.

3.2.9 Μονάδα βιομηχανικού νερού

Η μονάδα βιομηχανικού νερού της ΕΕΛ είναι δυναμικότητας 50 $\frac{m^3}{h}$ και αποτελείται από τις μονάδες διήθησης, απολύμανσης και αποθήκευσης. Η διήθηση των επεξεργασμένων λυμάτων λαμβάνει χώρα με αμμοδιυλιστήρια καθοδικής ροής. Τα νερά που προκύπτουν από τη διαδικασία της αντίστροφης πλύσης υπερχειλίζουν σε πλευρικά κανάλια και καταλήγουν στο αντλιοστάσιο αφρών. Στη συνέχεια, τα επεξεργασμένα απόβλητα καταλήγουν στη δεξαμενή απολύμανσης χωρητικότητας περίπου 200m^3. Η μονάδα βιομηχανικού νερού τροφοδοτεί όλα τα υφιστάμενα τμήματα της ΕΕΛ, καθώς χρησιμοποιείται και για την κάλυψη των εξωτερικών αναγκών, όπως άρδευση χώρων πρασίνου και άλλα (Δανδόλου, 2010).

Κεφάλαιο 4: Περιγραφή συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης (LIFE B2E4SustWWTP)

Το σύστημα ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών υλοποιείται υπό την αιγίδα του Ευρωπαϊκού προγράμματος LIFE, με τίτλο έργου “New concept for energy self-sustainable wastewater treatment process and biosolids management / Νέα μέθοδος ενεργειακά αυτόνομης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και διαχείρισης βιοστερεών» (LIFE B2E4SustWWTP)”, LIFE16 ENV/GR/000298. Το έργο αυτό χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το Πράσινο Ταμείο.

Στα πλαίσια της υλοποίησης του έργου πραγματοποιήθηκε και εγκρίθηκε Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, ΜΠΕ (Α.Π. 98320/23-04-2019) με τίτλο «Πιλοτική διάταξη αεριοποίησης στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, Δήμου Ρεθύμνου», με φορέα υλοποίησης την Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Ρεθύμνου, ΔΕΥΑΡ.

4.1 Σκοπός του έργου

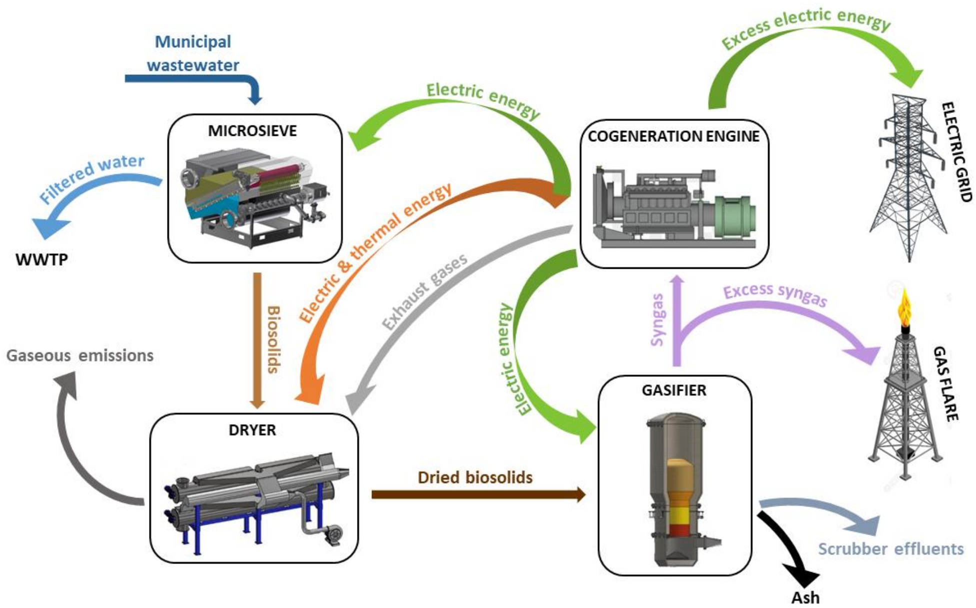
Το LIFEB2E4Sust-WWTP είναι ένα έργο επίδειξης, στοχεύοντας στην βελτίωση της απόδοσης του παρατεταμένου αερισμού σε ΕΕΛ και στην προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος από τη ρύπανση που προκαλείται από τα απόβλητα των ΕΕΛ. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω μιας καινοτομικής διαδικασίας που στοχεύει στην αφαίρεση των στερεών πριν από τη δεξαμενή αερισμού, η οποία θα έχει μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις. Επίσης, θα προταθεί η αξιοποίηση των παραγόμενων βιοστερεών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (μέσω της αεριοποίησης), περιορίζοντας έτσι περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας της ΕΕΛ και κατά συνέπεια τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Τέλος, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα είναι επαρκής ώστε να λειτουργεί αυτοσυντηρούμενα όλη η μονάδα (Biosolids2energy, 2018; Μαυράκης, 2018).

4.2. Περιγραφή του συστήματος

Η πιλοτική διάταξη θα εγκατασταθεί στην υφιστάμενη ΕΕΛ Ρεθύμνου (Εικόνα 4.1) και θα περιλαμβάνει το στάδιο της μικροκοσκίνισης, της ξήρανσης και της αεριοποίησης των βιοστερεών. Η μονάδα θα έχει δυναμικότητα 5,000 $\frac{\mathrm{m^3 αποβλήτων}}{\mathrm{d}}$ που αντιστοιχεί περίπου στο ένα τρίτο της μέσης ημερήσιας παροχής λυμάτων της ΕΕΛ. Επιπρόσθετα, θα παράγονται περίπου 0.5 - 1 $\frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{d}}$ βιοστερεά με σκοπό την παραγωγή ενέργειας (Manali & Gikas, 2019b).

Εικόνα 4.1 Σημείο εγκατάστασης της πιλοτικής μονάδας του LIFE B2E4SustWWTP στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.

Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του συστήματος. Αρχικά, τα βιοστερεά θα αφαιρούνται κατάντη της δεξαμενής αερισμού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της μικροκοσκίνισης. Τα παραγόμενα PSS θα έχουν περίπου 35-45% περιεκτικότητα σε ξηρά στερεά και HHV 23 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg}}$, ενώ θα υπόκεινται σε ξήρανση με 85% περιεκτικότητα σε στερεά πριν την εισαγωγή τους στον αεριοποιητή (Gikas & Manali, 2019a; Manali & Gikas, 2019b). Το αέριο σύνθεσης (syngas) θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω ενός ηλεκτροκινητήρα εσωτερικής καύσης. Η παραγομένη θερμική ενέργεια θα χρησιμοποιηθεί για την ξήρανση των PSS, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια αφενός θα οδηγήσει στην κάλυψη των συνολικών αναγκών της πιλοτικής μονάδας, αφετέρου θα χρησιμοποιηθεί για να καλύψει εν μέρει τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕΛ Ρεθύμνου.



Εικόνα 4.2 Διάγραμμα ροής του πιλοτικού συστήματος του έργου LIFE B2E4SustWWTP.

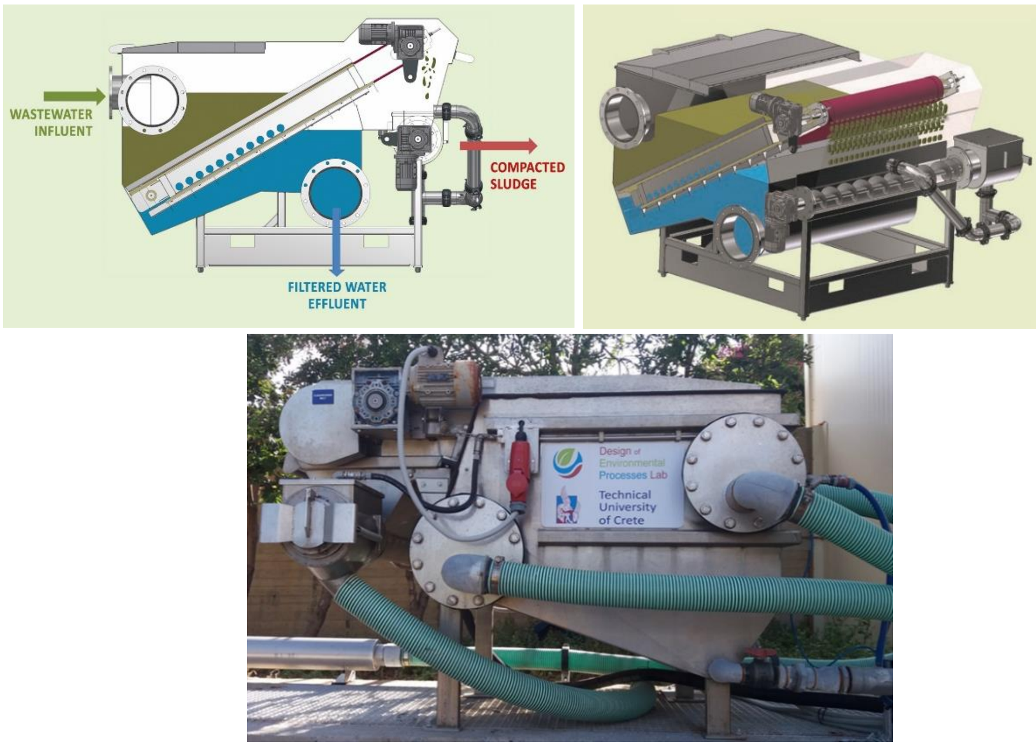
Από την άλλη πλευρά, ο ατμός ξήρανσης που θα προκύψει από την διαδικασία της ξήρανσης, προβλέπεται να έχει κάποιες οσμές, οι οποίες θα ανιχνευθούν σύμφωνα με εργαστηριακές αναλύσεις και θα αντιμετωπιστούν με φίλτρα ενεργού άνθρακα. Όσον αναφορά τον αεριοποιητή, το υγρό απόβλητο (scrubber effluent) που προέρχεται από την πλύση του αερίου σύνθεσης θα απορριφθεί στον υδάτινο αποδέκτη καθώς δεν θεωρείται επικίνδυνο, όπως φαίνεται και από τα συστατικά του που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1. Τέλος, για την πτητική (ιπτάμενη) τέφρα θα πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες εργαστηριακές αναλύσεις και εάν η σύστασή της χαρακτηριστεί επικίνδυνη, θα γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες που καθορίζονται από την νομοθεσία για την διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων.

Πίνακας 4.1 Σύσταση αποβλήτων αεριοποιητή (Μαυράκης, 2018).

Συστατικά	**Ποσοστό**
Θειικό αμμώνιο $(NH_4)_2SO_4$	17.1%
Χλωριούχο νάτριο (NaCl)	7.8%
Θειικό νάτριο (Na_2SO_4)	3.4%
Θειώδες νάτριο (Na_2SO_3)	2.2%
Κυανιούχο νάτριο (NaCN)	2.2%
Ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3)	2.2%
Νερό	65.05%
Στερεά σωματίδια	0.05%

4.2.1 Μικροκοσκίνιση

Το επιλεγμένο σύστημα μικροκοσκίνισης, στα πλαίσια του έργου LIFE B2E4SustWWTP είναι το RBF (Εικόνα 4.3). Ο τρόπος λειτουργίας της μικροεσχάρας, αλλά και οι ποσοστιαίες αποδόσεις απομάκρυνσης των BOD_5 και TSS περιγράφονται αναλυτικά στην υποενότητα 1.5.



Εικόνα 4.3 Απεικονίσεις (πάνω) και φωτογραφία (κάτω) της μικροεσχάρας.

Η είσοδος των αποβλήτων στη μικροεσχάρα πραγματοποιείται με τη βοήθεια υποβρύχιας φυγοκεντρικής αντλίας, που έχει εγκατασταθεί εντός καναλιού. Η μικροεσχάρα κατακρατά βιοστερεά άνω του μεγέθους 150-200 μm, τα οποία συμπιέζονται στην έξοδο και συνεχίζουν στα επόμενα στάδια επεξεργασίας.

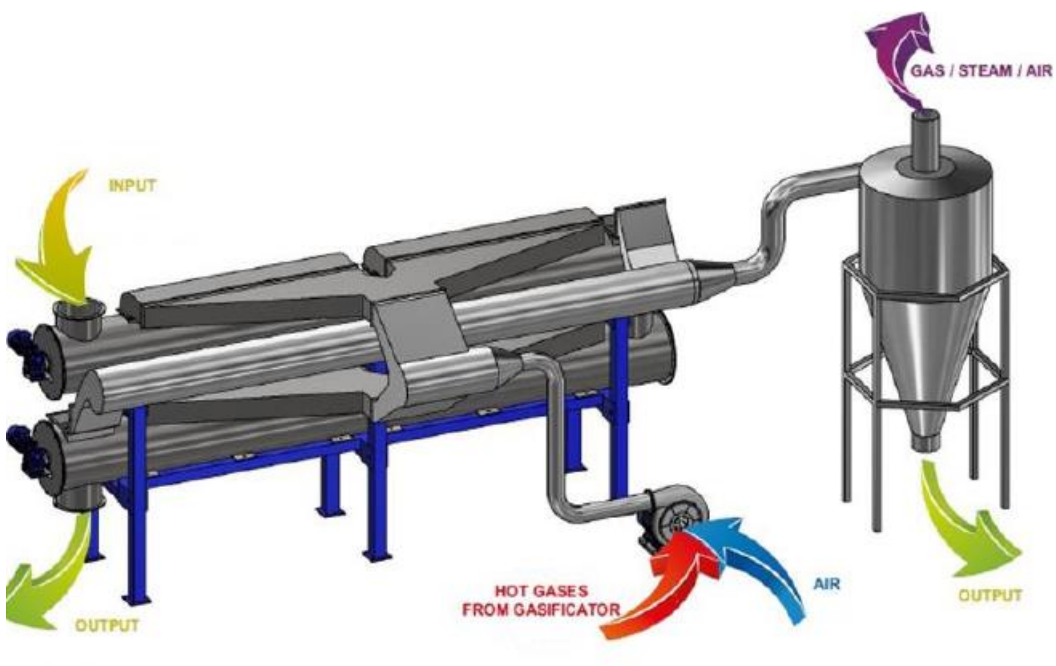
Η μικροεσχάρα περιλαμβάνει μηχανικό ξέστρο (mechanical scrapper) καθώς και μηχανισμό εισαγωγής αέρα που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό της ταινίας της. Επίσης, είναι εγκατεστημένο στο εσωτερικό της σύστημα εισαγωγής ζεστού νερού για αποτελεσματικότερο καθάρισμα της ταινίας της, ενώ για την ρύθμιση της ταχύτητας υπάρχει αυτόματος ρυθμιστής στροφών. Τέλος, υπάρχει σύστημα αφυδάτωσης της παραγόμενης ιλύος, όπου μέσω ενός κοχλιωτού συμπιεστή (screw - compactor) παράγονται PSS. Τα PSS με περιεκτικότητα σε στερεά 35-45% και HHV που κυμαίνεται μεταξύ 23.5-24.4 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg}}$ οδηγούνται μέσω μια χοάνης στα επόμενα στάδια επεξεργασίας (Gikas & Manali , 2018a; Gikas & Manali, 2018b). Η απόδοση απομάκρυνσης των SS, για τα αστικά λύματα έχει μετρηθεί μεταξύ 30-50%, με παράλληλη μείωση του BOD_5 περίπου 20-30% (Gikas & Manali , 2018a). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η ενεργειακή κατανάλωση της μικροεσχάρας παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά και ενεργειακή κατανάλωση της μικροεσχάρας (Μαυράκης, 2018).

Υλικό κατασκευής	• Ανοξείδωτος χάλυβας AISI 304
Μέγιστη υδραυλική παροχή λυμάτων	• 200 $\frac{m^3}{h}$
Διαστάσεις	• Μήκος: 2.1m • Πλάτος: 2.0m • Ύψος: 1.5m
Ενεργειακή κατανάλωση	• Ισχύ ηλεκτροκινητήρα κίνησης ταινίας: -0.37kW • Ισχύ ηλεκτροκινητήρα screw- compactor: -0.37kW • Ισχύ φυσητήρα λοβών για την παροχή αέρα: -4.5kW

4.2.2 Ξήρανση

Ο ξηραντής του έργου (Εικόνα 4.4) βασίζει τη λειτουργία του στην ταυτόχρονη ανάδευση και παροχή θερμού αέρα. Ο θερμός αέρας παράγεται από τον αεριοποιητή (Biosolids2energy, 2018; Μαυράκης, 2018).



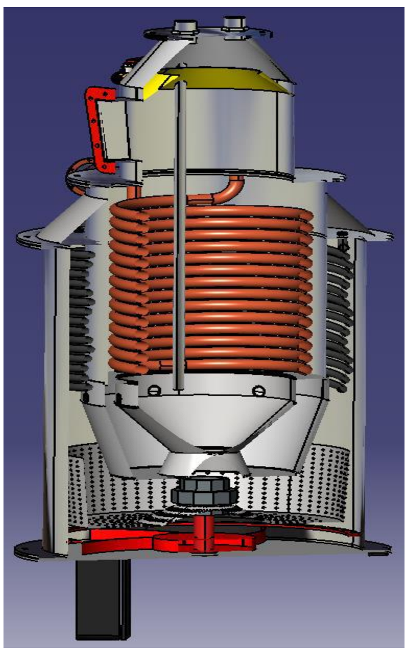
Εικόνα 4.4 Διάταξη ξηραντή (Μαυράκης, 2018)

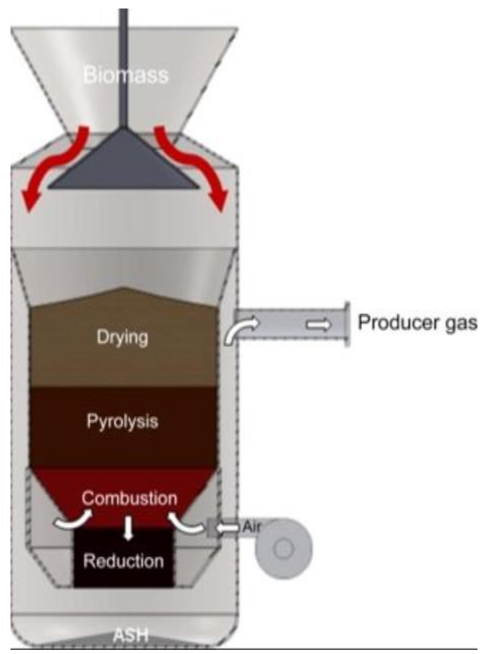
Αναλυτικότερα, ειδικοί αγωγοί μεταφοράς και ταυτόχρονης συνεχούς ανάδευσης εξασφαλίζουν τη σταθερότητα του υλικού στη ροή θερμού αέρα σε όλη τη διαδρομή των 12m (2 γραμμές ξήρανσης x 6m η κάθε μία). Πριν από το τέλος κάθε γραμμής, αναρροφάται υγρός αέρας από το κύκλωμα αναρρόφησης. Σε κάθε γραμμή εισάγεται ζεστός και ξηρός αέρας από το σύστημα διανομής θερμού αέρα. Το κύκλωμα αναρρόφησης εκκενώνεται σε κυκλώνα για να δεσμεύσει πτητικά και ελαφρά σωματίδια.

Η έξοδος της δεύτερης γραμμής, η οποία θα ήταν η τελική έξοδος του κατεργασμένου υλικού, αναμιγνύεται με το υλικό που συλλέγεται από τον κυκλώνα και κατόπιν οδηγείται στον αεριοποιητή (Biosolids2energy, 2018; Μαυράκης, 2018).

4.2.3 Αεριοποίηση

Το ξεραμένο υλικό πριν τροφοδοτηθεί στον αεριοποιητή (Εικόνα 4.5) μπρικετοποιείται σε ειδική μηχανή μπρικετοποίησης και αποθηκεύεται σε δοχείο. Η τροφοδοσία στον αεριοποιητή γίνεται μέσω κοχλία. Ο αεριοποιητής λειτουργεί με σύστημα αεριοποίησης καθοδικού (downdraft) ρεύματος. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός τεχνολογιών θεωρείται ιδιαίτερα ευνοϊκός περιβαλλοντικά αφού επιτρέπει ελάχιστες ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων από πίσσα κυρίως και τέφρα, στο παραγόμενο «αέριο syngas». Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των σωματιδίων αυτών στο παραγόμενο αέριο, τόσο λιγότερο αποδοτικό καθίσταται αυτό ενεργειακά. Ο αεριοποιητής μπορεί να τροφοδοτηθεί με έως 15 $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}}$ βιομάζας, θερμικής απόδοσης 50kW και ηλεκτρικής απόδοσης από 12-15kW.

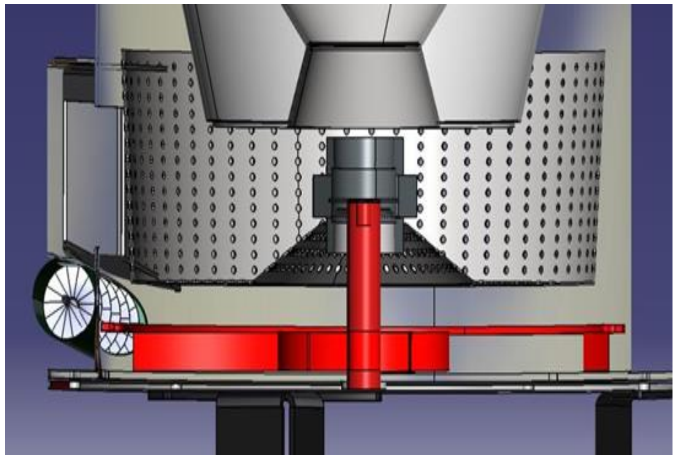




Εικόνα 4.5 Απεικονίσεις αριστερά και δεξιά (Takahashi & Koshijima, 1988) του αεριοποιητή καθοδικής ροής.

Η πρώτη ύλη διασπάται σταδιακά περνώντας από σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας της μέχρι να φτάσει στους 600°C όπου πυρολύεται. Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα η αεριοποίηση της σε θερμοκρασίες 800 - 1200°C. Από τη διεργασία αυτή παράγεται το «αέριο syngas» το οποίο εξέρχεται από τον αεριοποιητή, έχοντας θερμοκρασία 400 έως 500C°.

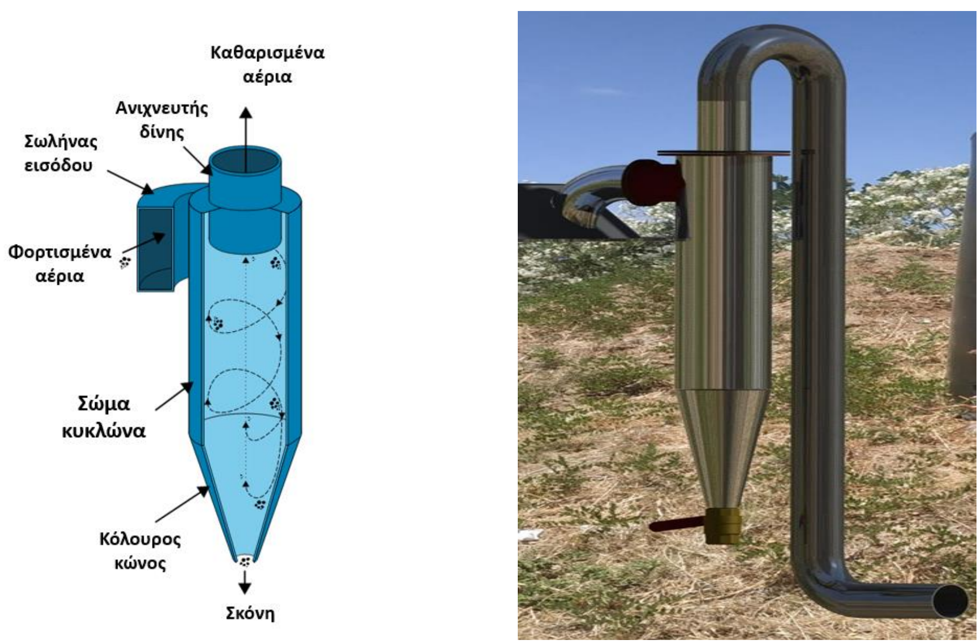
Ως υπόλοιπο αυτής της διαδικασίας παράγεται τέφρα (στάχτη) από την καύση των πρώτων υλών, η οποία καταπίπτει σε ειδική στεγανή μεταλλική δεξαμενή (ash container). Η δεξαμενή (Εικόνα 4.6) αυτή βρίσκεται στη βάση του αεριοποιητή, γεγονός που διευκολύνει τη διαδικασία απομάκρυνσης της.



Εικόνα 4.6 Δεξαμενή απομάκρυνσης τέφρας εντός του αεριοποιητή.

<u>**Σύστημα καθαρισμού (φιλτραρίσματος), ψύξης και αποθήκευσης του αερίου**</u>

Εξαγωγή σωματιδίων και υπολειμμάτων πίσσας από το αέριο: Η απομάκρυνση των σωματιδίων και υπολειμμάτων πίσσας από το αέριο πραγματοποιείται σε πρώτη φάση με πολυκυκλώνα συγκράτησης (Εικόνα 4.7). Στο κάτω μέρος του κυκλώνα τοποθετείται φιάλη για την συλλογή της πίσσας και ακαθαρσιών. Πολλές φορές βλέπουμε η πίσσα του κυκλώνα να οδηγείται στον πυρήνα του αεριοποιητή για γίνει διάσπαση της.



Εικόνα 4.7 Απεικόνιση (αριστερά) (Cburnett, 2019) και φωτογραφία (δεξιά) του πολυκυκλώνα.

Φίλτρο βιομάζας: Επόμενο στάδιο φιλτραρίσματος είναι το πέρασμα του αεριού από φίλτρο βιομάζας (Εικόνα 4.8). Εδώ φιλτράρεται πίσσα και άλλες ακαθαρσίες έτσι ώστε να προστατευτεί ο κινητήρας από το σχηματισμό πίσσας στο εσωτερικό του. Το φίλτρο χρησιμοποιεί ροκανίδια διάφορων μεγεθών καθώς και σίτες για να αποτραπεί η είσοδος κοκών στη ροή του αεριού. Όταν αλλάζεται το φίλτρο μπορεί να χρησιμοποιηθούν τα ροκανίδια στην τροφοδοσία του αεριοποιητή.

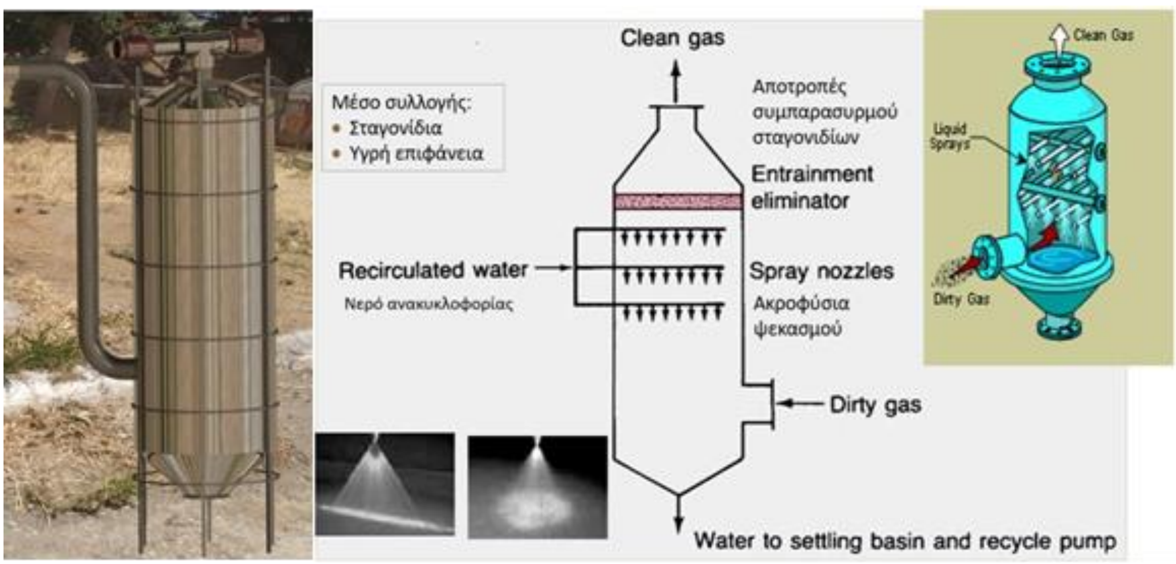
Εικόνα 4.8 Φίλτρο βιομάζας.

Επειδή χρησιμοποιείται βιομάζα για φιλτράρισμα η μέγιστη θερμοκρασία του αερίου που εισέρχεται στο φίλτρο πρέπει να μην πλησιάσει την θερμοκρασία πυρόλυσης. Αν η θερμοκρασία εισόδου στο φίλτρο είναι μεγαλύτερη των 180 - 200°C υπάρχει κίνδυνος πυρόλυσης.

Πυρσός καύσης ακατάλληλου ή περισσευούμενου αερίου: Στο φίλτρο βιομάζας υπάρχει πυρσός (Εικόνα 4.9) μέσω του οποίου γίνεται καύση περισσευούμενου ή ακατάλληλου αεριού.

Εικόνα 4.9 Πυρσός καύσης.

Πλυντηρίδα αποθείωσης (scrubber): Το παραγόμενο αέριο θα είναι πλούσιο σε ενώσεις του θείου (S). Χρησιμοποιείται κατάλληλη πλυντηρίδα (Εικόνα 4.10) για την απομάκρυνση των ενώσεων αυτών.



Εικόνα 4.10 Πλυντηρίδα αποθείωσης (scrubber).

Σύστημα ανάλυσης αερίου: Έπειτα από τον καθαρισμό και την ψύξη το αέριο οδηγείται στο σύστημα ανάλυσης ρύπων και όταν κριθεί κατάλληλο οδηγείται στον κινητήρα.

Μηχανή εσωτερικής καύσης σε συνδυασμό με γεννήτρια: Το αέριο αφού έχει υποστεί όλη την παραπάνω διαδικασία, οδηγείται σε μηχανή εσωτερικής καύσης για παραγωγή ενέργειας.

Σύστημα αυτομάτου ελέγχου: Σε όλη την εγκατάσταση είναι τοποθετημένοι αισθητήρες μετρήσεις της πίεσης, της θερμοκρασίας της έντασης του ρεύματος και αισθητήρες μετρήσεις του οξυγόνου και άλλοι οι οποίοι παρακολουθούνται από τη

Μονάδα Ελέγχου Ισχύος (Power Control Unit, PCU). Η PCU ελέγχει αυτόματα όλες τις λειτουργίες της εγκατάστασης για να διατηρείται ομαλή η λειτουργία του συστήματος. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων :

- Ενεργοποίηση του μηχανισμού απομάκρυνσης της τέφρας από τον αεριοποιητή.
- Αύξηση της τροφοδοσίας βιομάζας του αεριοποιητή όταν απαιτείται.
- Ρύθμιση του μείγματος αέρα-syngas του κινητήρα ώστε να διασφαλιστεί πλήρης καύση.
- Ενεργοποίηση του πυρσού σε περίπτωση ακατάλληλου ή περισσευούμενου αεριού.
- Ενεργοποίηση συναγερμού σε περίπτωση δυσλειτουργίας ή όταν οι μετρήσεις είναι πάνω από προκαθορισμένα όρια.

Στην Εικόνα 4.11 φαίνεται ένας παρόμοιος αεριοποιητής με αυτόν που θα χρησιμοποιηθεί στο LIFE B2E4SustWWTP:

Εικόνα 4.11 Αεριοποιητής παρόμοιος του LIFE B2E4SustWWTP.

Κεφάλαιο 5: Ισοζυγία μάζας και ενέργειας του συστήματος βιοστερεών

5.1 Μεθοδολογία: ανάλυση ισοζυγίων

5.1.1 Μεθοδολογία επίλυσης ισοζυγίων μάζας μικροκοσκίνισης

Στην υφιστάμενη ΕΕΛ Ρεθύμνου έχει εγκατασταθεί πειραματική διάταξη μικροκοσκίνισης η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.2.1. Για τις ανάγκες του LIFE B2E4SustWWTP, μία νέα πιλοτική μικροεσχάρα κατασκευάστηκε και βρίσκεται υπό εγκατάσταση. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η ενεργειακή της κατανάλωση παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1, ενώ η σχηματική απεικόνιση της παρουσιάζεται στις εικόνες 8.1-8.5 (Κεφάλαιο 8: Παράρτημα).

Πίνακας 5.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές απόδοσης πιλοτικής μικροεσχάρας.

Υλικό κατασκευής	• Ανοξείδωτος χάλυβας AISI 304 και 316
Παροχή λυμάτων	• $\cong 200\ \frac{m^3}{h}$
Διαστάσεις	• Μήκος: 2.477m • Πλάτος: 1.400m • Ύψος: 1.758m
Ενεργειακή κατανάλωση (8.35kW)	• Ισχύ ηλεκτροκινητήρα κίνησης ταινίας: -0.3 kW • Ισχύ ηλεκτροκινητήρα screw- compactor: -0.25 kW • Αντλία για την απομάκρυνση των επεξεργασμένων αποβλήτων: -0,9 kW • 2 Αντλίες για την είσοδο των λυμάτων: 3.45kW, η μία

Ο υπολογισμός των ισοζυγίων μάζας για τη διάταξη μικροκοσκίνισης που πρόκειται να εγκατασταθεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου έγινε για τρία διαφορετικά σενάρια. Ο υπολογισμός των ισοζυγίων μάζας βασίστηκε στις μέσες τιμές των ποιοτικών παραμέτρων εισόδου της ΕΕΛ για τα έτη 2017-2019 και στις προδιαγραφές απόδοσης της μικροεσχάρας όπως προβλέπονται από την εταιρία κατασκευής.

5.1.2 Μεθοδολογία επίλυσης ισοζυγίων μάζας και ενέργειας ξηραντή

Η πραγματοποίηση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας του ξηραντή (dryer) έχει ως στόχο την εύρεση της απαιτούμενης ενέργειας για ξήρανση, έτσι ώστε τα βιοστερεά να εξέλθουν από τον ξηραντή με περιεκτικότητα σε υγρασία ίση με 10%. Για το υπολογισμό των ισοζυγίων κατασκευάστηκαν δύο πιθανά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο η απαιτούμενη ενέργεια, για λόγους προσεγγιστικούς και ασφαλείας, υπολογίστηκε για την πλέον δυσμενή περίπτωση όπου η θερμοκρασία του αέρα είναι η χαμηλότερη (χείριστο σενάριο), ενώ στο δεύτερο σενάριο η απαιτούμενη ενέργεια υπολογίστηκε για κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (1atm, 20℃) σύμφωνα με τα πρότυπα της National Institute of Standards and Technology (NIST), που αποτελεί και το βέλτιστο σενάριο.

Ο υπολογισμός όλων των ισοζυγίων του ξηραντή βασίστηκε στη παραδοχή ότι η παραγωγή βιοστερεών ισούται με 20 $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}}$ (ξηρή βάση), λαμβάνοντας υπόψη τις προοπτικές βελτίωσης οι οποίες περιγράφονται παρακάτω (στην υποενότητα 5.3.1). Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των ισοζυγίων μάζας του ξηραντή είναι η ακόλουθη:

Αρχικά, από την εξίσωση 5.1 βρέθηκε η ποσότητα των βιοστερεών που θα εισέρχονται στον ξηραντή έχοντας 70% υγρασία:

$$\dot{m}_{\substack{\mathrm{PSS} \\ \mathrm{in\ dryer} \\ (\mathrm{w.b.})}} = \frac{\dot{m}_{\substack{\mathrm{PSS} \\ (\mathrm{d.b})}}}{1 - \mathrm{MC}_{\mathrm{in\ dryer}}} \qquad 5.1$$

Έπειτα, υπολογίστηκε από την εξίσωση 5.2. η ποσότητα των βιοστερεών που θα εξέρχονται στον ξηραντή έχοντας 10% υγρασία:

$$\dot{m}_{\substack{\mathrm{PSS} \\ \mathrm{out\ dryer} \\ (\mathrm{d.b.})}} = \dot{m}_{\substack{\mathrm{PSS} \\ (\mathrm{d.b})}} \cdot \frac{1}{1 - \mathrm{MC}_{\mathrm{out\ dryer}}} \qquad 5.2$$

Στον πίνακα 5.2 περιγράφονται οι όροι των εξισώσεων 5.1. και 5.2.

Πίνακας 5.2 Περιγραφή των όρων των εξισώσεων (5.1. και 5.2).

Παράμετρος	**Περιγραφή**
$\dot{\mathbf{m}}_{\substack{\mathbf{PSS} \\ (\mathbf{d.b})}}$	Αναφέρεται στη ποσότητα των βιοστερεών σε ξηρή βάση και έχει θεωρηθεί ίση 20 $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}}$ (ξηρή βάση).
$\dot{\mathbf{m}}_{\substack{\mathbf{PSS} \\ \mathbf{in\ dryer} \\ (\mathbf{w.b.})}}$	Αναφέρεται στην μαζική παροχή εισόδου του ξηραντή.
$\dot{\mathbf{m}}_{\substack{\mathbf{PSS} \\ \mathbf{out\ dryer} \\ (\mathbf{d.b.})}}$	Αναφέρεται στην μαζική παροχή εξόδου του ξηραντή.
$\mathbf{MC}_{\mathbf{in\ dryer}}$	Δείχνει την περιεκτικότητα σε υγρασία των βιοστερεών στην είσοδο του ξηραντή, η οποία είναι ίση με 70%.
$\mathbf{MC}_{\mathbf{out\ dryer}}$	Δείχνει την περιεκτικότητα σε υγρασία των βιοστερεών στην έξοδο του ξηραντή, η οποία είναι ίση με 10%.

Όπου,

- d.b: dry basis (ξηρή βάση)
- w.b.: wet basis (υγρή βάση)
- MC: Moisture Content (Περιεκτικότητα σε υγρασία)

Η ποσότητα του νερού που προκύπτει από τη μείωση της υγρασίας των βιοστερεών από 70% σε 10% υπολογίστηκε με τη βοήθεια της σχέσης 5.3 ως εξής:

$$\dot{m}_{\substack{H_2O \\ eva}} = \dot{m}_{\substack{PSS \\ \text{in dryer} \\ (w.b.)}} - \dot{m}_{\substack{PSS \\ \text{out dryer} \\ (d.b.)}} \quad 5.3$$

Στη συνέχεια, για την επίλυση του ισοζυγίου ενέργειας και των δύο σεναρίων προσδιορίστηκε η απαιτούμενη ενέργεια για ξήρανση, η οποία υπολογίστηκε από το άθροισμα της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης και της αισθητής θερμότητας του νερού.

Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης εκφράζει το ποσό της θερμότητας που απαιτείται να προστεθεί στη μονάδα της μάζας, όταν γίνεται αλλαγή της κατάστασής της από υγρή σε αέρια υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία (Εξ. 5.4). Για παράδειγμα το νερό παραμένει στους 100 ℃ ενώ βράζει. Η θερμότητα που προστίθεται για να συνεχίσει η εξάτμιση του νερού είναι λανθάνουσα θερμότητα (Cengel & Boles, 2014).

$$\dot{Q}_l = m \cdot L \quad 5.4$$

Όπου,

- m: η μάζα του νερού εκφρασμένη συνήθως σε kg.
- L: η λανθάνουσα θερμότητα. Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού στους 100 ℃ και πίεση 1 atm ισούται με 2256.4 $\frac{kJ}{kg}$ (Varzakas & Tzia, 2014).

ενώ, ως αισθητή ορίζεται η θερμότητα που προκαλεί αλλαγές στη θερμοκρασία ενός αντικειμένου και προσδιορίζεται από τον νόμο της θερμιδομετρίας ο οποίος περιγράφεται με την εξίσωση 5.5 (Cengel & Boles, 2014).

$$\dot{Q}_s = m \cdot C \cdot \Delta T \quad 5.5$$

Όπου,

- m: η μάζας της ουσίας εκφρασμένη συνήθως σε kg.
- C: η ειδική θερμοχωρητικότητα της ουσίας εκφρασμένη συνήθως σε $\frac{kJ}{kg\ K}$. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού είναι ίση με 4.184 $\frac{kJ}{kg\ K}$ $(\text{Fredlund, et al., 2012})$.
- ΔT: η μεταβολή της θερμοκρασίας εκφρασμένη σε K ή ℃.

Συνεπώς, από το άθροισμα της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης (Εξ.5.4) και της αισθητής θερμότητας του νερού (Εξ.5.5) υπολογίστηκε η απαιτούμενη ενέργεια για ξήρανση (Εξ.5.6) (Cengel & Boles, 2014).

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_l \quad 5.6$$

5.1.3 Μεθοδολογία επίλυσης ισοζυγίων μάζας και ενέργειας αεριοποιητή με ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας

Ο υπολογισμός των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας του αεριοποιητή (gasifier) αποσκοπεί στην εύρεση του ενεργειακού περιεχόμενου των παραγόμενων βιοστερεών και του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (syngas) με τελικό στόχο την παραγωγή θερμικής (thermal) και ηλεκτρικής ενέργειας (electric energy). Η επίλυση των ισοζυγίων πραγματοποιήθηκε για δύο πιθανά σενάρια.

Στο πρώτο σενάριο υπολογίστηκαν τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας του αεριοποιητή για τη δυσμενέστερη δυνατή περίπτωση (χείριστο σενάριο), όπου όλοι οι υπολογισμοί των ισοζυγίων έγιναν με βάση την LHV των παραγόμενων βιοστερεών και του syngas, αλλά και την μικρότερη εκτιμώμενη απόδοση του αεριοποιητή και της μηχανής εσωτερικής καύσης. Αντιθέτως, στο δεύτερο σενάριο υπολογίστηκαν τα ισοζύγια του αεριοποιητή για τη βέλτιστη δυνατή περίπτωση (βέλτιστο σενάριο), όπου όλοι οι υπολογισμοί έγιναν με βάση την HHV των παραγόμενων βιοστερεών και του syngas, αλλά και την μεγαλύτερη εκτιμώμενη απόδοση του αεριοποιητή και της μηχανής εσωτερικής καύσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνθήκες ύπαρξης των δύο σεναρίων δεν αντιπροσωπεύουν απόλυτα τις εκάστοτε συνθήκες που θα επικρατούν μετά την ολοκλήρωση του έργου, αλλά δύο ακραίες καταστάσεις. Στην πραγματικότητα, οι συνθήκες αυτές μπορεί να μην συμβαίνουν ταυτόχρονα και να υπάρχει ανάμιξη. Όμως, η μεθοδολογία υπολογισμού των ισοζυγίων θα είναι ίδια με αυτή που περιγράφεται στην παρούσα υποενότητα, απλά θα γίνεται η προσαρμογή της για τις εκάστοτε επικρατούσες συνθήκες. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των ισοζυγίων παρουσιάζεται ως εξής:

Εμπειρικά γνωρίζουμε ότι από 1 kg εισερχόμενης βιομάζας παράγονται 2 m^3 syngas ("Modeling Gasifier Mass", 2010). Πρέπει να σημειωθεί ότι τα 2 m^3 syngas προέρχονται από εμπειρικό τύπο και δεν μπορούν να γίνουν περαιτέρω υπολογισμοί με την πυκνότητα του syngas , διότι εκείνη αποτελεί συνάρτηση του οξειδωτικού μέσου που χρησιμοποιείται για την αεριοποίηση (Liu, et al., 2019) και υπολογισμοί ισοζυγίων με τη χρήση της πυκνότητας θα δώσουν εσφαλμένα αποτελέσματα για την περίπτωση του συγκεκριμένου έργου το οποίο βρίσκεται υπό κατασκευή.

Αρχικά, το ενεργειακό περιεχόμενο των βιοστερεών (με 10% υγρασία) για τα δύο σενάρια υπολογίστηκε από το γινόμενο (Εξ. 5.7) της εκάστοτε HV και της μαζικής παροχής της τροφοδοτούμενης βιομάζας στον αεριοποιητή.

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{bm}} = \dot{\mathrm{m}}_{\substack{\mathrm{PSS} \\ \text{in gasifier}}} \cdot \mathrm{HV}_{\mathrm{PSS}} \tag{5.7}$$

Έπειτα, δεδομένης της εμπειρικής αναλογίας 1:2 και δεδομένης της εμπειρικής απόδοσης του αεριοποιητή, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 70-90% (Kreith & Krumdieck, 2014), ο υπολογισμός της εκάστοτε HV του syngas υπολογίστηκε και για τα δύο σενάρια ως εξής (Εξ. 5.8) (Rajvanshi, 1986):

$$\mathrm{n} = \frac{\Delta\mathrm{H}_{\mathrm{gas}} \cdot (\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{m}^3}) \cdot 2(\mathrm{m}^3)}{\Delta\mathrm{H}_{\mathrm{biomass}} \cdot (\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg}}) \cdot 1\mathrm{kg}} \rightarrow \Delta\mathrm{H}_{\mathrm{gas}} = \frac{\mathrm{n} \cdot \Delta\mathrm{H}_{\mathrm{biomass}}}{2} \tag{5.8}$$

Όπου,

- ΔH_{gas}: η τιμή της εκάστοτε HV του syngas.
- $\Delta H_{biomass}$: η τιμή της εκάστοτε HV της τροφοδοτούμενης βιομάζας.
- n: βαθμός απόδοσης του αεριοποιητή.

ενώ, η εύρεση του ενεργειακού περιεχομένου του syngas για τα δύο σενάρια προέκυψε από το γινόμενο της ογκομετρικής παροχής και της εκάστοτε HV του, όπως φαίνεται στην εξίσωση 5.9.

$$\dot{Q}_{syngas} = \dot{V}_{\substack{syngas \\ yield}} \cdot HV_{syngas} \tag{5.9}$$

Στο τελευταίο στάδιο επίλυσης των ισοζυγίων του αεριοποιητή υπολογίστηκε η παραγόμενη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια, η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών. Για το πρώτο σενάριο, έγινε η υπόθεση ότι ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 20%, σε θερμική ενέργεια 30% και στο 50% είναι οι απώλειες (losses), ενώ για το δεύτερο σενάριο ότι ο βαθμός απόδοσης σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 20%, σε θερμική ενέργεια 40% και στο 40% οι απώλειες.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει από το ενεργειακό περιεχόμενο του syngas και για τα δύο σενάρια υπολογίστηκε από την εξίσωση 5.10.

$$P_{el,engine} = n_{electric} \cdot \dot{Q}_{syngas} \tag{5.10}$$

Η παραγόμενη θερμική ενέργεια που προκύπτει υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση 5.11.

$$\dot{Q}_{\substack{useful \\ thermal}} = n_{thermal} \cdot \dot{Q}_{syngas} \tag{5.11}$$

ενώ, οι απώλειες υπολογίστηκαν ως εξής (Εξ.5.12):

$$\dot{Q}_{losses} = n_{losses} \cdot \dot{Q}_{syngas} \tag{5.12}$$

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την ψύξη του syngas, αλλά και από τα καυσαέρια της μηχανής εσωτερικής καύσης ανακτάται μία σημαντική ποσότητα εκμεταλλεύσιμης θερμικής ενέργειας (heat recovery). Ο υπολογισμός της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας κατά την ψύξη του syngas (cooling-syngas) προκύπτει σύμφωνα με την εξίσωση 5.13 (Doherty, et al., 2015).

$$\dot{Q}_{cooling-syngas} = \rho_{syngas} \cdot \dot{V}_{syngas} \cdot C_{P_{syngas}} \cdot (T_f - T_i) \tag{5.13}$$

Στον πίνακα 5.3 περιγράφονται οι όροι της εξίσωσης 5.13.

Πίνακας 5.3 Παράμετροι υπολογισμού της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας κατά την ψύξη του syngas.

Παράμετρος	Περιγραφή
$\boldsymbol{\rho_{syngas}}$	Αναφέρεται στην πυκνότητα του syngas.
$\mathbf{\dot{V}_{syngas}}$	Ο όγκος του syngas προέκυψε από τα 22kg βιομάζας, με το εμπειρικό 1:2 syngas ("Modeling Gasifier Mass", 2010) και από την πυκνότητα του.
$\mathbf{C_{P_{syngas}}}$	Αναφέρεται στη ειδική θερμοχωρητικότητα του syngas.
$\mathbf{T_f}$	Αναφέρεται στη θερμοκρασία του syngas μετά την ψύξη του.
$\mathbf{T_i}$	Αναφέρεται στη θερμοκρασία του syngas στην έξοδο του αεριοποιητή.

Ο υπολογισμός της εκμεταλλεύσιμης θερμικής ενέργειας των καυσαερίων (exhaust-fumes) από τη μηχανή έγινε σύμφωνα με την εξίσωση 5.14 (Vijay, et al., 2016).

$$\dot{Q}_{exhaust-fumes} = \rho_{\kappa} \cdot \dot{V}_{\kappa} \cdot C_{P_{\kappa}} \cdot (T_f - T_i) \qquad 5.14$$

Στον πίνακα 5.4 περιγράφονται οι όροι της εξίσωσης 5.14.

Πίνακας 5.4 Παράμετροι υπολογισμού της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας από τα καυσαέρια της μηχανής.

Παράμετρος	Περιγραφή
$\boldsymbol{\rho_{syngas}}$	Αναφέρεται στην πυκνότητα των καυσαερίων.
$\mathbf{\dot{V}_{\kappa}}$	Η ογκομετρική παροχή των καυσαερίων βασίστηκε το γεγονός ότι η αναλογία air/ syngas είναι 1:1 (Reed & Das, 1988).
$\mathbf{C_{P_{\kappa}}}$	Αναφέρεται στη ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων.
$\mathbf{T_f}$	Αναφέρεται στη θερμοκρασία των καυσαερίων μετά την ψύξη τους.
$\mathbf{T_i}$	Αναφέρεται στη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την μηχανή.

Συνεπώς, από το άθροισμα της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας από τη ψύξη του syngas και από τα καυσαέρια) της μηχανής υπολογίστηκε η συνολική ανακτώμενη θερμική ενέργεια (Εξ. 5.15).

$$\dot{Q}_{heat\ recovery} = \dot{Q}_{cooling-\ syngas} + \dot{Q}_{exhaust-fumes} \qquad 5.15$$

5.2 Αποτελέσματα: υπολογισμοί ισοζυγίων

5.2.1 Υπολογισμοί ισοζυγίων μικροκοσκίνισης

Η ΔΕΥΑΡ πραγματοποιεί μετρήσεις σχετικά με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου των ανεπεξέργαστων αποβλήτων. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου από το έτος 2017 έως το 2019 παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου για τα έτη 2017-2019.

$\left(\frac{mg}{L}\right)$	BOD_5	COD	TSS	NH_4-N	TN	TP
Εύρος τιμών	180-920	272-1317	115-666	13-79	45-105	3-24
Μέση τιμή	386	743	274	44	65	10
Τυπική απόκλιση	± 126	± 237	± 124	± 14	± 13	± 4

Στη συνέχεια, με βάση τις προδιαγραφές απόδοσης (Πίνακας 5.6) της πιλοτικής μικροεσχάρας όπως προβλέπονται από την κατασκευαστική εταιρία, υπολογίστηκαν τα ισοζύγια μάζας για τρία διαφορετικά σενάρια.

Πίνακας 5.6 Προδιαγραφές απόδοσης πιλοτικής μικροεσχάρας.

Παροχή εξόδου	~250 $\left(\frac{m^3}{h}\right)$
Παροχή εισόδου	~200 $\left(\frac{m^3}{h}\right)$
Απομάκρυνση BOD_5	20-25 %
Απομάκρυνση COD	25-30 %
Απομάκρυνση TSS	40-80 %
Περιεκτικότητα παραγόμενης λάσπης σε στερεά	30-40 %

1^{O} Σενάριο - Ισοζύγιο μάζας μικροεσχάρας (ελάχιστη απόδοση)

Όσον αφορά το πρώτο σενάριο θα εισέρχονται περίπου 200 $\frac{m^3}{h}$ λυμάτων στη μικροεσχάρα και τα ισοζύγια μάζας υπολογίζονται με βάση τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου της ΕΕΛ ως προς τις εξής τρεις παραμέτρους: BOD_5, TSS και COD. Για το πρώτο σενάριο γίνονται οι εξής υποθέσεις:

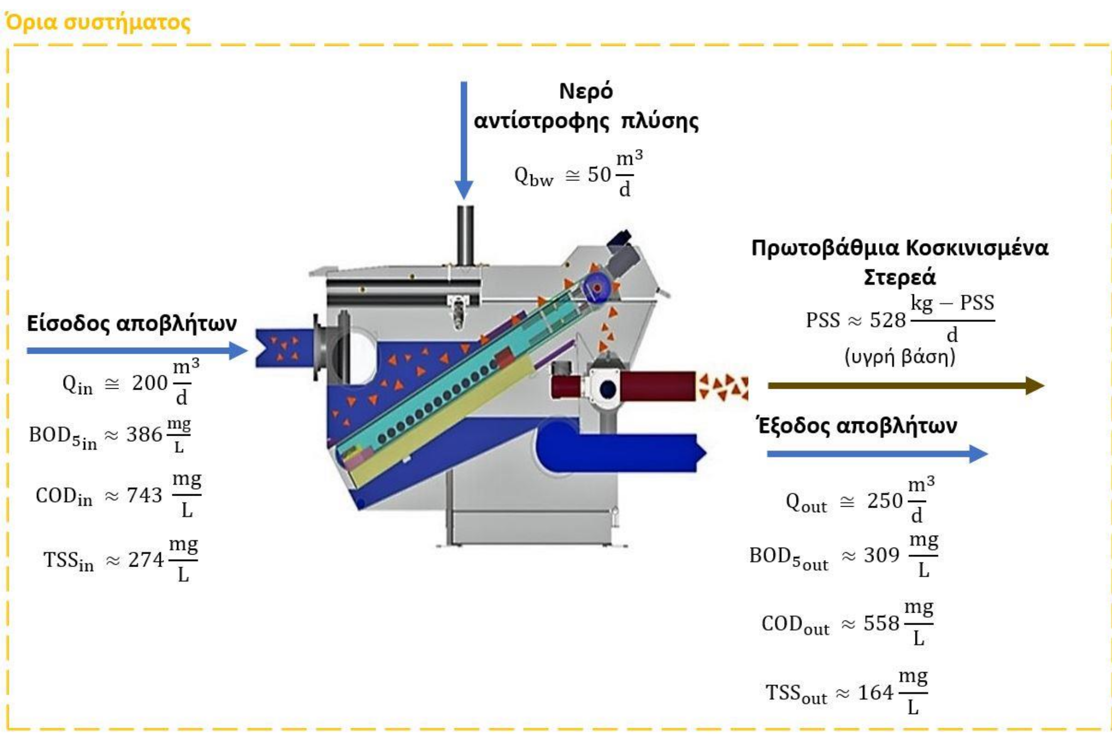
- Απομάκρυνση BOD_5: 20%
- Απομάκρυνση COD: 25%
- Απομάκρυνση TSS: 40%
- Περιεκτικότητα παραγόμενης λάσπης σε στερεά: 30%

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα ισοζύγια μάζας ως εξής:

- Τα 200 $\frac{m^3}{h}$ εισερχομένων λυμάτων αντιστοιχούν σε 4,800 $\frac{m^3}{d}$ημερησίως.

- Με μέση συγκέντρωση εισροής BOD_5 386 $\frac{mg}{L}$ και ποσοστό απομάκρυνσης 20%, η συγκέντρωση του BOD_5 στην έξοδο της μικροεσχάρας αντιστοιχεί περίπου σε 309 $\frac{mg}{L}$.
- Με μέση συγκέντρωση εισροής COD 743 $\frac{mg}{L}$ και ποσοστό απομάκρυνσης 25%, η συγκέντρωση του COD στην έξοδο της μικροεσχάρας αντιστοιχεί περίπου σε 558 $\frac{mg}{L}$.
- Με μέση συγκέντρωση εισροής TSS 274 $\frac{mg}{L}$ και ποσοστό απομάκρυνσης 40%, η συγκέντρωση των TSS στην έξοδο της μικροεσχάρας αντιστοιχεί περίπου σε 164 $\frac{mg}{L}$ και στο ρεύμα βιοστερεών που συλλέγεται στον κοχλιωτό συμπιεστή σε 110 $\frac{mg}{L}$ TSS.
- Αντίστοιχα, για την ημερήσια παροχή λυμάτων, η ποσότητα των παραγόμενων βιοστερεών ανέρχεται περίπου σε (110 $\frac{mg}{L}$ · 4,800 $\frac{m^3}{d}$) = 528 $\frac{kg-PSS}{d}$ (σε υγρή φάση, με 30% στερεά) ή 159 $\frac{kg-PSS}{d}$ (σε ξηρή βάση).

Το ισοζύγιο μάζας για το πρώτο σενάριο παρουσιάζεται στην εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1 1^{ο} Σενάριο - Ισοζύγιο μάζας μικροεσχάρας (ελάχιστη απόδοση).

2^{Ο} Σενάριο - Ισοζύγιο μάζας μικροεσχάρας (μέση απόδοση)

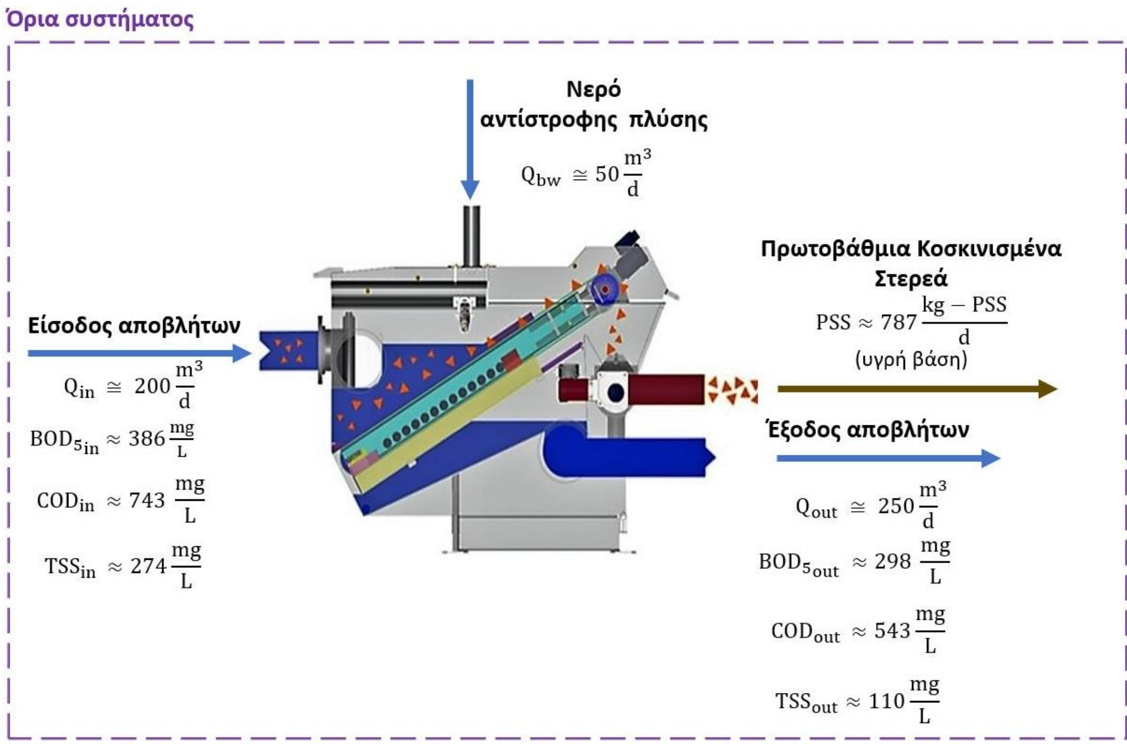
Όσον αφορά το δεύτερο σενάριο θα εισέρχονται περίπου 200 $\frac{m^3}{h}$ λυμάτων στη μικροεσχάρα και τα ισοζύγια μάζας υπολογίζονται με βάση τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου της ΕΕΛ ως προς τις εξής τρεις παραμέτρους: BOD_5, TSS και COD. Για το δεύτερο σενάριο γίνονται οι εξής υποθέσεις:

- Απομάκρυνση BOD_5: 23%
- Απομάκρυνση COD: 27%
- Απομάκρυνση TSS: 60%
- Περιεκτικότητα παραγόμενης λάσπης σε στερεά: 35%

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα ισοζύγια μάζας ως εξής:

- Τα 200 $\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{h}}$ εισερχομένων λυμάτων αντιστοιχούν σε 4,800 $\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{d}}$ημερησίως.
- Με μέση συγκέντρωση BOD_5 386 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$ και ποσοστό απομάκρυνσης 23%, η συγκέντρωση του BOD_5 στην έξοδο της μικροεσχάρας αντιστοιχεί περίπου σε 298 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$.
- Με μέση συγκέντρωση COD 743 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$ και ποσοστό απομάκρυνσης 27%, η συγκέντρωση του COD στην έξοδο της μικροεσχάρας αντιστοιχεί περίπου σε 543 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$.
- Με μέση συγκέντρωση εισροής TSS 274 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$ και ποσοστό απομάκρυνσης 60%, η συγκέντρωση των TSS στην έξοδο της μικροεσχάρας αντιστοιχεί περίπου σε 110 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$ και στο ρεύμα βιοστερεών που συλλέγεται στον κοχλιωτό συμπιεστή σε 164 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$ TSS.
- Αντίστοιχα, για την ημερήσια παροχή λυμάτων, η ποσότητα των παραγόμενων βιοστερεών ανέρχεται περίπου σε (164 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$ · 4,800 $\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{d}}$)= 787 $\frac{\mathrm{kg-PSS}}{\mathrm{d}}$(σε υγρή φάση, με 35% στερεά) ή 276 $\frac{\mathrm{kg-PSS}}{\mathrm{d}}$ (σε ξηρή βάση).

Το ισοζύγιο μάζας για το δεύτερο σενάριο παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2 2^{o} Σενάριο - Ισοζύγιο μάζας μικροεσχάρας (μέση απόδοση).

3^{O} Σενάριο - Ισοζύγιο μάζας μικροεσχάρας (μέγιστη απόδοση)

Όσον αφορά το τρίτο σενάριο θα εισέρχονται περίπου 200 $\frac{m^3}{h}$ λυμάτων στη μικροεσχάρα και τα ισοζύγια μάζας υπολογίζονται με βάση τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου της ΕΕΛ ως προς τις εξής τρεις παραμέτρους: BOD_5, TSS και COD. Για το τρίτο σενάριο γίνονται οι εξής υποθέσεις:

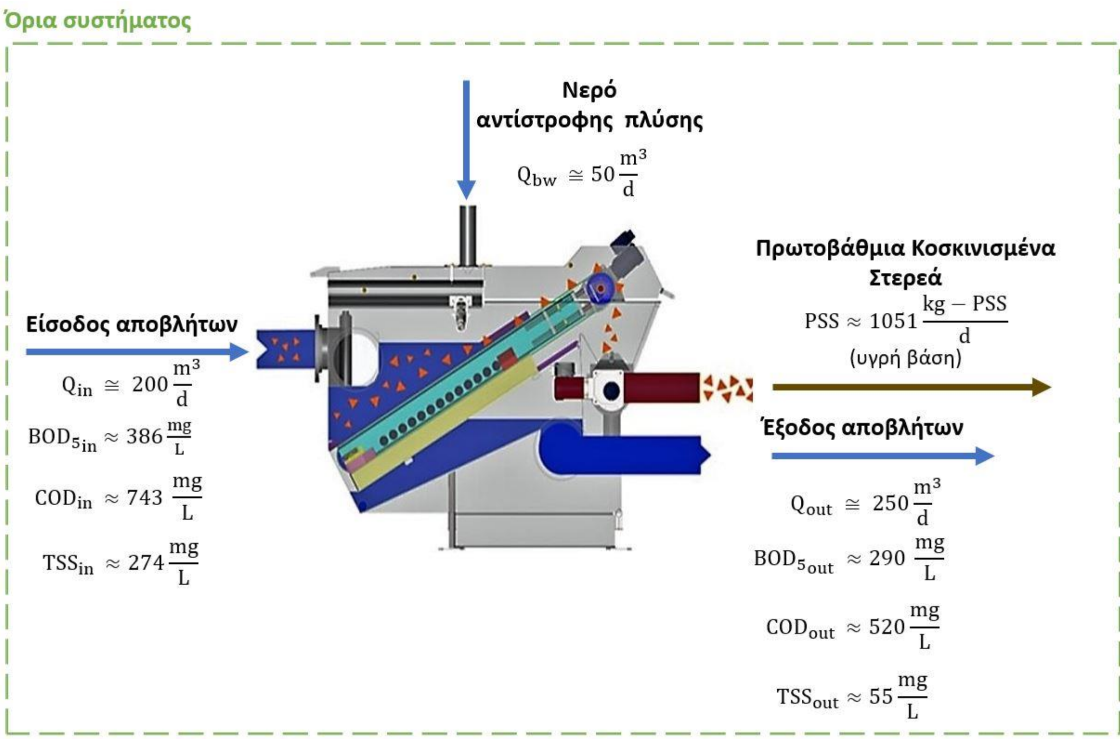
- Απομάκρυνση BOD_5: 25%
- Απομάκρυνση COD: 30%
- Απομάκρυνση TSS: 80%
- Περιεκτικότητα παραγόμενης λάσπης σε στερεά: 40%

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα ισοζύγια μάζας ως εξής:

- Τα 200 $\frac{m^3}{h}$ εισερχομένων λυμάτων αντιστοιχούν σε 4,800 $\frac{m^3}{d}$ ημερησίως.
- Με μέση συγκέντρωση BOD_5 386 $\frac{mg}{L}$ και ποσοστό απομάκρυνσης 25% η συγκέντρωση του BOD_5 στην έξοδο της μικροεσχάρας αντιστοιχεί περίπου σε 290 $\frac{mg}{L}$.
- Με μέση συγκέντρωση COD 743 $\frac{mg}{L}$ και ποσοστό απομάκρυνσης 30%, η συγκέντρωση του COD στην έξοδο της μικροεσχάρας αντιστοιχεί περίπου σε 520 $\frac{mg}{L}$.

- Με μέση συγκέντρωση εισροής TSS 274 $\frac{mg}{L}$ και ποσοστό απομάκρυνσης 80%, η συγκέντρωση των TSS στην έξοδο της μικροεσχάρας αντιστοιχεί περίπου σε 55 $\frac{mg}{L}$ και στο ρεύμα βιοστερεών που συλλέγεται στον κοχλιωτό συμπιεστή σε 219 $\frac{mg}{L}$ TSS.
- Αντίστοιχα, για την ημερήσια παροχή λυμάτων, η ποσότητα των παραγόμενων βιοστερεών ανέρχεται περίπου σε (219 $\frac{mg}{L}$ · 4,800 $\frac{m^3}{d}$)= 1051 $\frac{kg-PSS}{d}$ (σε υγρή φάση, με 40% στερεά) ή 421 $\frac{kg-PSS}{d}$ (σε ξηρή βάση).

Το ισοζύγιο μάζας για το τρίτο σενάριο παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3 3^o Σενάριο - Ισοζύγιο μάζας μικροεσχάρας (μέγιστη απόδοση).

5.2.2 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και ενέργειας ξηραντή

1^o Σενάριο ισοζυγίων μάζας και ενέργειας ξηραντή (χείριστο σενάριο)

Τα παραγόμενα νωπά βιοστερεά θα εισέρχονται με υγρασία 70% στον ξηραντή και θα εξέρχονται με υγρασία 10%. Έχοντας ως δεδομένη παράμετρο υπολογισμού των ισοζυγίων την παραγωγή βιοστερεών ίση με 20 $\frac{kg}{h}$ (ξηρή βάση), υπολογίστηκε με τη βοήθεια της εξίσωσης 5.1 η ποσότητα των βιοστερεών (με 70% υγρασία) που θα εισέρχονται στον ξηραντή:

$$\dot{m}_{\substack{\text{PSS}\\ \text{in dryer}\\ (\text{w.b.})}} = \frac{\dot{m}_{\substack{\text{PSS}\\ (\text{d.b})}}}{1-\text{MC}_{\text{in dryer}}} \rightarrow \dot{m}_{\substack{\text{PSS}\\ \text{in dryer}\\ (\text{w.b.})}} = \frac{20\ \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{1-0.70} \rightarrow$$

$$\rightarrow \dot{\mathbf{m}}_{\substack{\mathbf{PSS}\\ \mathbf{in\ dryer}\\ (\mathbf{w.b.})}} = \mathbf{67}\ \frac{\mathbf{kg}}{\mathbf{h}}$$

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε με τη βοήθεια της εξίσωσης 5.2 η ποσότητα των βιοστερεών που θα εξέρχονται από τον ξηραντή έχοντας 10% υγρασία.

$$\dot{m}_{\substack{\text{PSS}\\ \text{out dryer}\\ (\text{d.b.})}} = \dot{m}_{\substack{\text{PSS}\\ (\text{d.b})}} \cdot \frac{1}{1-\text{MC}_{\text{out dryer}}} \rightarrow \dot{m}_{\substack{\text{PSS}\\ \text{out dryer}\\ (\text{d.b.})}} = 20\ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{1-0.1} = 22.22\frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\rightarrow \dot{\mathbf{m}}_{\substack{\mathbf{PSS}\\ \mathbf{out\ dryer}\\ (\mathbf{d.b.})}} \cong \mathbf{22}\ \frac{\mathbf{kg}}{\mathbf{h}}$$

Έπειτα, η αναμενόμενη ποσότητα νερού που προκύπτει, υπολογίστηκε με τη βοήθεια της σχέσης 5.3 ως εξής:

$$\dot{m}_{\substack{\text{H}_2\text{o}\\ \text{eva}}} = \dot{m}_{\substack{\text{PSS}\\ \text{in dryer}\\ (\text{w.b.})}} - \dot{m}_{\substack{\text{PSS}\\ \text{out dryer}\\ (\text{d.b.})}} \rightarrow \dot{m}_{\substack{\text{H}_2\text{o}\\ \text{eva}}} = 67\ \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 22\ \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 45\frac{\text{kg}}{\text{h}}\text{H}_2\text{o} \rightarrow$$

$$\rightarrow \dot{\mathbf{m}}_{\substack{\mathbf{H_2o}\\ \mathbf{eva}}} = \mathbf{45}\frac{\mathbf{kg}}{\mathbf{h}}\mathbf{H_2o}$$

Στη συνέχεια, έγινε ο υπολογισμός των ισοζυγίων ενέργειας του ξηραντή. Αρχικά, η λανθάνουσα θερμότητα για την εξάτμιση 45kg H_2O υπολογίστηκε ως εξής (Εξ.5.4):

$$\dot{\text{Q}}_{\text{l}} = \text{m} \cdot \text{L} \rightarrow \text{Q} = 45\frac{\text{kg}}{\text{h}}\text{H}_2\text{o} \cdot 2256.4\frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \rightarrow\ \dot{\text{Q}}_{\text{l}} = 101538\frac{\text{KJ}}{\text{h}} \rightarrow$$

$$\dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{l}} \cong \mathbf{102}\frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}}$$

ενώ, η αισθητή θερμότητα από τους 11.2°C (ο πίνακας 8.2 στο παράρτημα δείχνει ότι είναι η χαμηλότερη μέση τιμή του αέρα για το Ρέθυμνο σύμφωνα με τα δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας) έως τους 100°C για 45kg H_2O υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση 5.5.

$$\dot{\text{Q}}_{\text{s}} = \text{m} \cdot \text{C}_{\text{p}} \cdot \Delta\text{T} \rightarrow\ \dot{\text{Q}}_{\text{s}} = 45\text{kg} \cdot 4.184\frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 88.8\text{K} \rightarrow\ \dot{\text{Q}}_{\text{s}} = 16719.3\text{KJ}$$

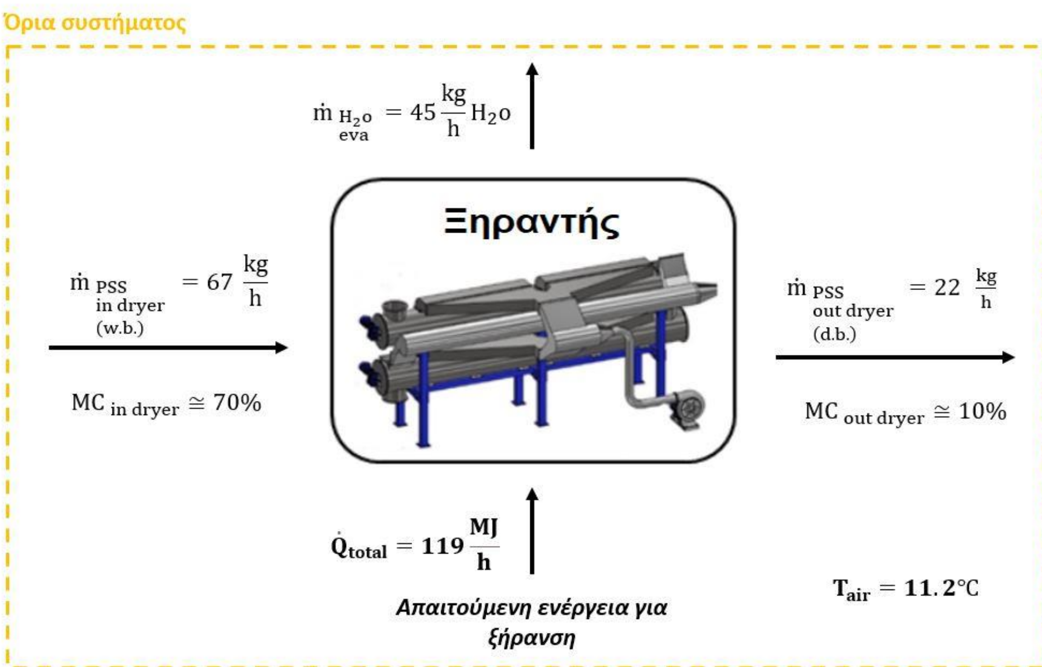
$$\dot{Q}_s \cong 17\frac{MJ}{h}$$

Τέλος, η απαιτούμενη θερμότητα για να εξατμιστούν 45kg H_2O από τους 11,2°C είναι η εξής (Εξ. 5.6):

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_l \rightarrow \dot{Q}_{total} = 17\frac{MJ}{h} + 102\frac{MJ}{h} = 119\frac{MJ}{h} \rightarrow$$

$$\dot{Q}_{total} = 119\frac{MJ}{h}$$

Το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας του ξηραντή για το πρώτο σενάριο παρουσιάζεται στην εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4 Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας του ξηραντή (χείριστο σενάριο).

2ο Σενάριο ισοζυγίων μάζας και ενέργειας ξηραντή (βέλτιστο σενάριο)

Όσον αφορά το δεύτερο σενάριο, τα ισοζύγια μάζας του ξηραντή και η λανθάνουσα ενέργεια εξάτμισης του νερού δεν θα μεταβληθούν εξαιτίας της αλλαγής στην θερμοκρασία του αέρα. Η μόνη παράμετρος που θα επηρεαστεί θα είναι η αισθητή θερμότητα του νερού. Συνεπώς, η αισθητή θερμότητα από τους 20°C έως τους 100°C για 45 kg H_2O υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση 5.5 ως εξής:

$$\dot{Q}_s = m \cdot C_p \cdot \Delta T \rightarrow \dot{Q}_s = 45kg \cdot 4.184\frac{KJ}{kg \cdot K} \cdot 80K \rightarrow \dot{Q}_s = 15062.4KJ$$

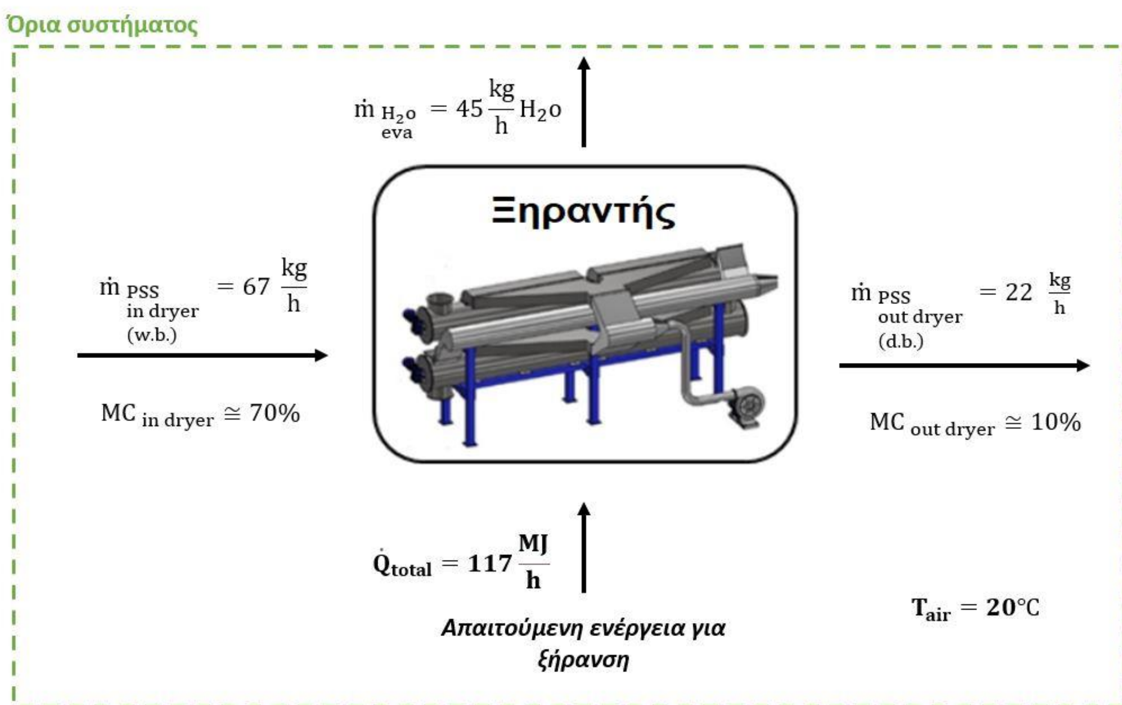
$$\mathbf{\dot{Q}_s \cong 15\frac{MJ}{h}}$$

Τέλος, η απαιτούμενη θερμότητα για να εξατμιστούν 45 kg H_2O από τους 20°C είναι η εξής (Εξ.5.6):

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_l \rightarrow \dot{Q}_{total} = 15\frac{MJ}{h} + 102\frac{MJ}{h} = 117\frac{MJ}{h} \rightarrow$$

$$\rightarrow \mathbf{\dot{Q}_{total} = 117\frac{MJ}{h}}$$

Το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας του ξηραντή για το δεύτερο σενάριο παρουσιάζεται στην εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας του ξηραντή (βέλτιστο σενάριο).

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι οι υπολογισμοί των ισοζυγίων του ξηραντή και των δύο σεναρίων πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ενέργειας για ξήρανση που θεωρήθηκε ότι ισούται με την απαιτούμενη ενέργεια εξάτμισης των 45kg H_20. Σε πραγματικές συνθήκες, ο ολοκληρωμένος υπολογισμός του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας του ξηραντή απαιτεί την εισαγωγή και άλλων παραμέτρων εκτός του προσδιορισμού της απαιτούμενης ενέργειας εξάτμισης. Πιο συγκεκριμένα, τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας ενός ξηραντή εξαρτώνται από το υλικό τροφοδοσίας, την επιθυμητή μείωση της υγρασίας, τη θερμοκρασία του υλικού τροφοδοσίας, τη θερμοκρασία του αέρα, το είδος του παράγοντα ξήρανσης, αλλά και τις απώλειες θερμότητας του εξοπλισμού (Vigants, et al., 2015). Έτσι, στην ανάλυση των ισοζυγίων στις υποενότητες 5.2.2 και 5.2.3 δεν περιλαμβάνονται στον υπολογισμό οι ενεργειακές ανάγκες του ξηραντή για την έναρξη της διεργασίας της ξήρανσης, η αισθητή θερμότητα των βιοστερεών και οι πιθανές απώλειες του ξηραντή, που αποτελούν παράγοντες διαμόρφωσης ενός ολοκληρωμένου ισοζυγίου μάζας και ενέργειας (Schwarz, 1988). Αυτός ο τρόπος ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία διότι ο ξηραντής βρίσκεται σε στάδιο κατασκευής, οπότε είναι αδύνατον να υπολογιστούν οι συγκεκριμένοι παράγοντες. Εξάλλου, θεωρούνται αμελητέοι στον υπολογισμό των ισοζυγίων, εφόσον οι κύριες ενεργειακές ανάγκες συνδέονται κατεξοχήν με την απαιτούμενη ποσότητα εξάτμισης του νερού.

Τέλος, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι εξαιτίας της διαφορετικής θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου των βιοστερεών στον ξηραντή, υπάρχει ένα μικρό ποσό αισθητής θερμότητας το οποίο εμπεριέχεται στα βιοστερεά και παρόλο που δεν υπολογίζεται στο ισοζύγιο ενέργειας προσδίδει θετικό πρόσημο στην διεργασία της αεριοποίησης. Αυτό συμβαίνει, διότι με την αύξηση της θερμοκρασίας των βιοστερεών κατά την έξοδο τους από τον ξηραντή ευνοείται η διεργασία της αεριοποίησης, απαιτώντας μικρότερη ενεργειακή δαπάνη για την έναρξη της διεργασίας.

5.2.3 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και ενέργειας αεριοποιητή με ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας

1^{ο} Σενάριο- Ισοζύγια μάζας και ενέργειας αεριοποιητή (χείριστο σενάριο)
Για την επίλυση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας του αεριοποιητή για το πρώτο σενάριο έγιναν οι εξής υποθέσεις και παραδοχές:

- Εμπειρικά γνωρίζουμε ότι από 1 kg εισερχόμενης βιομάζας παράγονται 2 m^3 syngas ("Modeling Gasifier Mass", 2010).
- Επιλέχθηκε ο βαθμός απόδοσης του αεριοποιητή ίσος με 70%. Πρέπει να σημειωθεί ότι μέσα στις απώλειες του αεριοποιητή συμπεριλαμβάνονται η περιεκτικότητα της υγρασίας (10%) του υλικού τροφοδοσίας, αλλά και η ενέργεια που περιέχεται στην τέφρα (βλ. παράρτημα για τον υπολογισμό του ενεργειακού περιεχομένου της τέφρας κατά προσέγγιση).

<u>Ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων βιοστερεών</u>
Η ποσότητα των βιοστερεών που εισέρχεται στον αεριοποιητή θεωρήθηκε ίση με 22 $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}}$(με 10% υγρασία), ενώ παράλληλα η LHV των βιοστερεών έχει υπολογιστεί πειραματικά και είναι ίση με 19 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{kg}}$**.** Άρα, το ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων βιοστερεών υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση 5.7 ως εξής:

$$\dot{Q}_{bm} = \dot{m}_{\substack{PSS \\ \text{in gasifier}}} \cdot LHV_{PSS} \rightarrow \dot{Q}_{bm} = 22\frac{kg}{h} \cdot 19\ \frac{MJ}{kg} \rightarrow$$

$$\rightarrow \dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{bm}} = \mathbf{418}\frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}}$$

<u>Ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (syngas)</u>

Εφόσον εμπειρικά γνωρίζουμε ότι από 1 kg εισερχόμενης βιομάζας παράγονται 2 m^3 syngas, τότε για 22 kg βιομάζας θα παραχθούν 44 m^3 syngas. Άρα, θεωρώντας την απόδοση του αεριοποιητή ίση με 70% ο υπολογισμός της LHV του syngas έγινε ως εξής (Εξ.5.8) (Rajvanshi, 1986):

$$n = \frac{LHV_{syngas} \cdot (\frac{MJ}{m^3}) \cdot 2(m^3)}{LHV_{PSS} \cdot (\frac{MJ}{kg}) \cdot 1kg} \rightarrow\ LHV_{syngas} = \frac{n \cdot LHV_{PSS}}{2} = \frac{0.7\ \cdot 19\frac{MJ}{kg}\ \cdot 1kg}{2\ m^3} =\ 6.65\frac{MJ}{m^3}$$

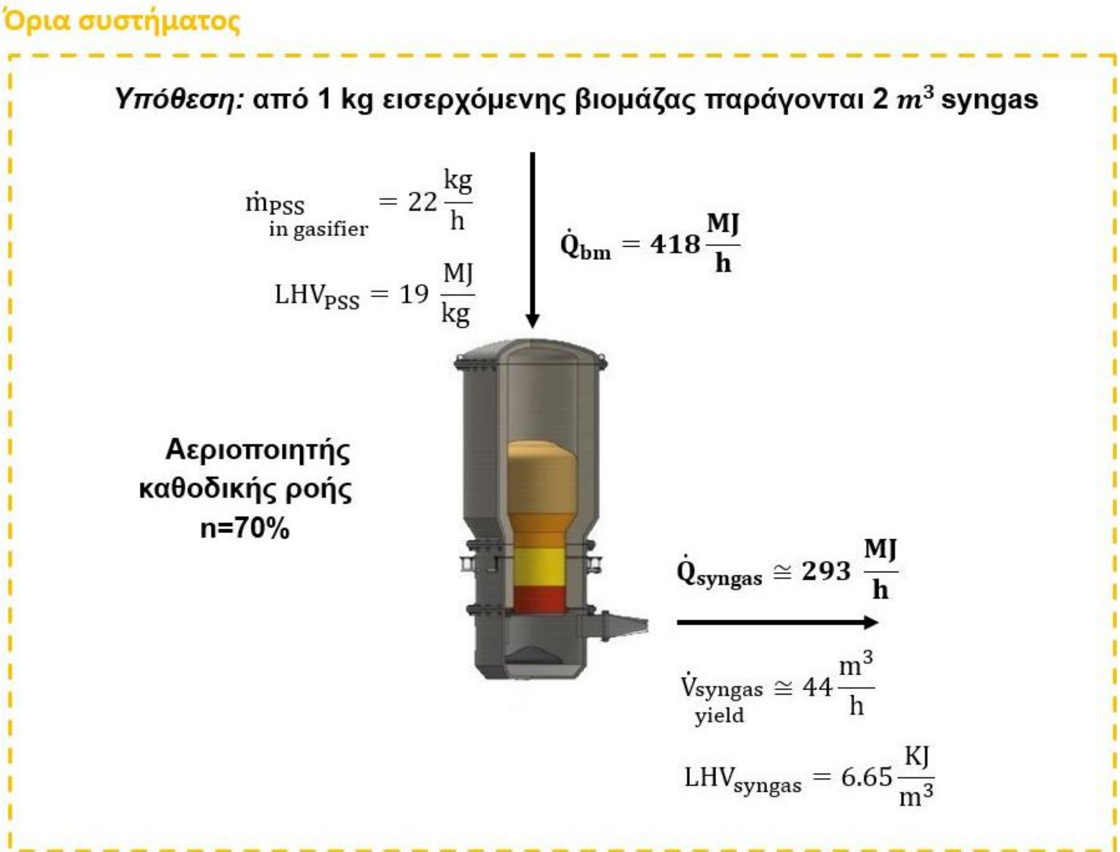
Έχοντας υπολογίσει την LHV του syngas, το ενεργειακό περιεχόμενο του syngas προσδιορίστηκε ως εξής (5.9):

$$\dot{Q}_{syngas} = \dot{V}_{\substack{syngas \\ yield}} \cdot LHV_{syngas} \rightarrow$$

$$\dot{Q}_{syngas} = 44\ \frac{m^3}{h} \cdot 6.65\frac{MJ}{m^3} = 292.6\ \frac{MJ}{h} \rightarrow$$

$$\rightarrow \dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{syngas}} \cong \mathbf{293}\ \frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}}$$

Τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας του αεριοποιητή παρουσιάζονται για το πρώτο σενάριο στην εικόνα 5.6.



Εικόνα 5.6. Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας αεριοποιητή (χείριστο σενάριο).

Παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας

Το αέριο αφού έχει υποστεί όλη την απαιτούμενη διαδικασία καθαρισμού που αναλύεται στο υποκεφάλαιο 4.2.3, τροφοδοτεί το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, που αποτελείται από μηχανή εσωτερικής καύσης και ηλεκτρογεννήτρια. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 20%, σε θερμική ενέργεια 30% και στο 50% είναι οι απώλειες, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

Η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει από το θερμικό περιεχόμενο του syngas σύμφωνα με την εξίσωση 5.10 έχεις ως εξής:

$$\dot{P}_{el,engine} = n_{electric} \cdot \dot{Q}_{syngas} \rightarrow \dot{P}_{el,engine} = 0.2 \cdot 293\,\frac{MJ}{h} = 58.6\,\frac{MJ}{h} \cong 16.3kW \rightarrow$$
$$\rightarrow \boldsymbol{\dot{P}_{el,engine} = 58.6\,\frac{MJ}{h} \cong 16.3kW}$$

Η ανακτώμενη θερμική ενέργεια που προκύπτει από το θερμικό περιεχόμενου του syngas υπολογίστηκε ως εξής (Εξ.5.14):

$$\dot{Q}_{\substack{useful \\ thermal}} = n_{thermal} \cdot \dot{Q}_{syngas} \rightarrow \dot{Q}_{\substack{useful \\ thermal}} = 0.3 \cdot 293\,\frac{MJ}{h} = 87.9\,\frac{MJ}{h} \rightarrow$$

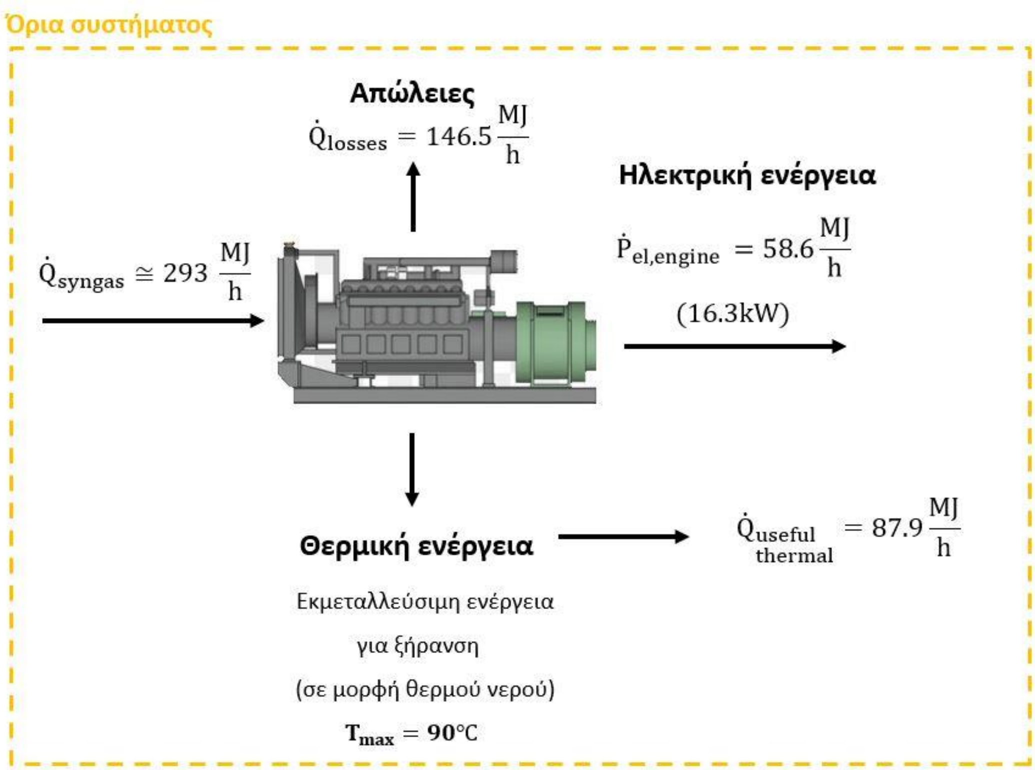
$$\rightarrow \dot{\mathbf{Q}}_{\substack{\mathbf{useful}\\ \mathbf{thermal}}} = \mathbf{87.9}\,\frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}}$$

Η γεννήτρια θα παράγει από το σύστημα υδρόψυξης περίπου 87.9 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{h}}$ εκμεταλλεύσιμη θερμική ενέργεια, σε μορφή θερμού νερού, στους 90 ℃, ενώ οι απώλειες που προκύπτουν υπολογίστηκαν ως εξής (Εξ.5.11):

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{losses}} = \mathrm{n}_{\mathrm{losses}} \cdot \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{syngas}} \rightarrow \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{losses}} = 0.5 \cdot 293\,\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{h}} = 146.5\,\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{h}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{losses}} = \mathbf{146.5}\,\frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}}$$

Στην εικόνα 5.7 παρουσιάζεται η παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει από το ενεργειακό περιεχόμενο του syngas.



Εικόνα 5.7 Παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (χείριστο σενάριο).

<u>Ανακτώμενη ενέργεια από την ψύξη του syngas και από τα καυσαέρια της μηχανής εσωτερικής καύσης</u>

Ο υπολογισμός της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας από τη ψύξη του syngas έγινε γνωρίζοντας τα εξής:

- $\boldsymbol{\rho}_{\mathbf{syngas}}$ = 0.44 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ στους 400 ℃ (Dogru, et al., 2002)
- $\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{syngas}}$ = 44 m^3 από τα 22kg βιομάζας, με το εμπειρικό 1:2 syngas ("Modeling Gasifier Mass", 2010)
- $\mathbf{C}_{\mathbf{P}_{\mathbf{syngas}}}$= 1.34 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ στους 400 ℃ (Dogru, et al., 2002)
- $\mathbf{T}_{\mathbf{f}}$ = 150 ℃
- $\mathbf{T}_{\mathbf{i}}$ = 400 ℃

Έτσι, η ανακτώμενη θερμική ενέργεια κατά τη ψύξη του syngas υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση 5.13 ως εξής:

$\dot{\text{Q}}_{\text{cooling- syngas}}$ = 0.44 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ · 44 m^3 · 1.34 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ · (150-400)℃ = -6486 $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ ή **-7** $\frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}}$ (το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει απελευθέρωση)

Ο υπολογισμός της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας από τα καυσαέρια της μηχανής έγινε γνωρίζοντας τα εξής:

- $\boldsymbol{\rho}_{\boldsymbol{\kappa}}$ **=** 0.56 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, υπολογίστηκε αποκλειστικά για τις ανάγκες του συστήματος βιοστερεών (βλ. πίνακες 8.3 και 8.4 του παραρτήματος).
- Η αναλογία air/ syngas είναι 1:1→ $\dot{\mathbf{V}}_{\boldsymbol{\kappa}}$ = $\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{syngas}}$ + $\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{air}}$ → $\dot{\mathbf{V}}_{\boldsymbol{\kappa}}$**=** 88m^3 (Reed & Das, 1988)
- $\mathbf{C}_{\mathbf{P}_{\boldsymbol{\kappa}}}$= **=** 1.1 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ (Jadhao & Thombare, 2013)
- $\mathbf{T}_{\mathbf{f}}$ = 100 ℃
- $\mathbf{T}_{\mathbf{i}}$ = 400 ℃

Η ανακτώμενη θερμική ενέργεια που θα προκύψει εάν εκμεταλλευτούμε τα απαέρια της μηχανής θα είναι (Εξ. 5.14):

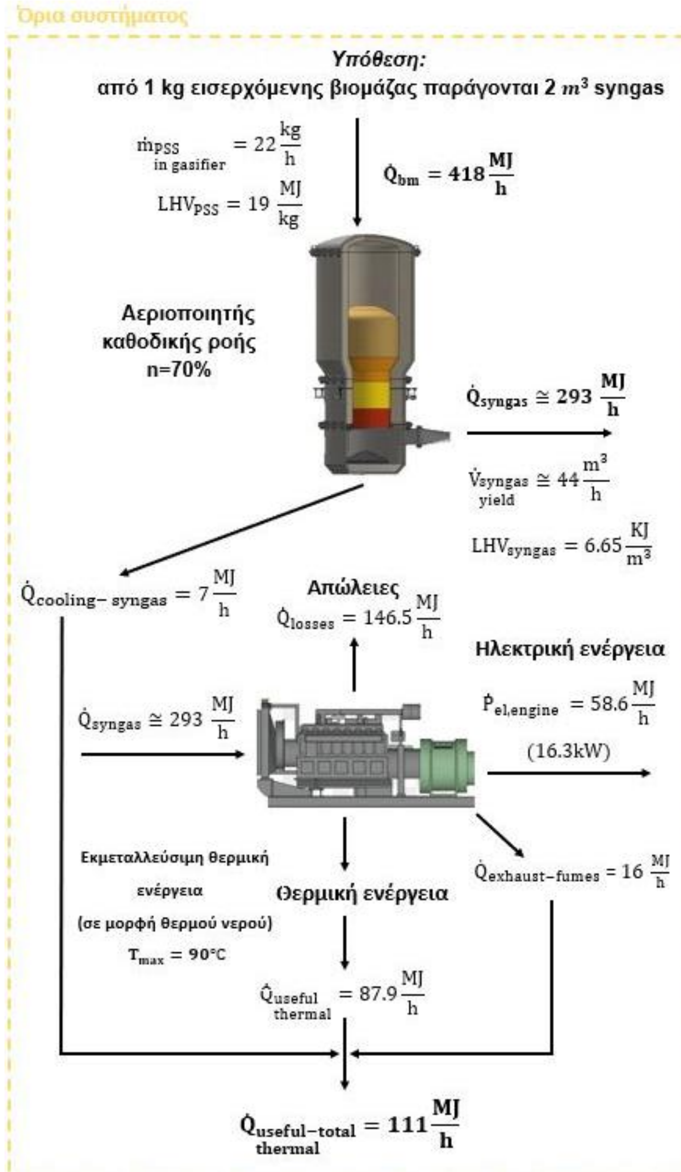
$\dot{\text{Q}}_{\text{exhaust-fumes}}$= 0.56 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ · 88m^3 · 1.1 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ · (100-400)℃ = -16262.4 $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ ή **-16** $\frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}}$

Άρα, η συνολική ανακτώμενη θερμική ενέργεια υπολογίστηκε με τη βοήθεια της εξίσωσης 5.15 ως εξής:

$$\dot{\text{Q}}_{\text{heat recovery}} = \dot{\text{Q}}_{\text{cooling- syngas}} + \dot{\text{Q}}_{\text{exhaust-fumes}} \rightarrow$$

$$\dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{heat\ recovery}} = \mathbf{7}\ \frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}} + \mathbf{16}\ \frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}} = \mathbf{23}\ \frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}}$$

Συνεπώς, το συνολικά ισοζύγια μάζας και ενέργειας της αεριοποίησης βιοστερεών με ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας για το πρώτο σενάριο παρουσιάζονται στην εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας αεριοποιητή με ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (χείριστο σενάριο).

2ο Σενάριο- Ισοζύγια μάζας και ενέργειας αεριοποιητή (βέλτιστο σενάριο)

Για την επίλυση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας του αεριοποιητή για το δεύτερο σενάριο έγιναν οι εξής υποθέσεις και παραδοχές:

- Εμπειρικά γνωρίζουμε ότι από 1 kg εισερχόμενης βιομάζας παράγονται 2 m^3 αερίου syngas ("Modeling Gasifier Mass", 2010).
- Επιλέχθηκε ο βαθμός απόδοσης του αεριοποιητή ίσος με 80%. Πρέπει να σημειωθεί ότι μέσα στις απώλειες του αεριοποιητή συμπεριλαμβάνονται η περιεκτικότητα της υγρασίας (10%) του υλικού τροφοδοσίας, αλλά και η ενέργεια

που περιέχεται στην τέφρα (βλ. παράρτημα για τον υπολογισμό του ενεργειακού περιεχομένου της τέφρας κατά προσέγγιση).

Ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων βιοστερεών

Η ποσότητα των βιοστερεών που εισέρχεται στον αεριοποιητή είναι ίση με 22 $\frac{kg}{h}$ (με 10% υγρασία), ενώ παράλληλα η HHV των βιοστερεών έχει υπολογιστεί πειραματικά και είναι ίση με 22 $\frac{MJ}{kg}$. Άρα, το ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων βιοστερεών υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση 5.7 ως εξής:

$$\dot{Q}_{bm} = \dot{m}_{\underset{\text{in gasifier}}{PSS}} \cdot HHV_{PSS} \rightarrow \dot{Q}_{bm} = 22\frac{kg}{h} \cdot 22\,\frac{MJ}{kg} = 484\frac{MJ}{h} \rightarrow$$

$$\rightarrow \mathbf{\dot{Q}_{bm} = 484\frac{MJ}{h}}$$

Ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (syngas)

Εφόσον εμπειρικά γνωρίζουμε ότι από 1 kg εισερχόμενης βιομάζας παράγονται 2 m^3 syngas, τότε για 22 kg βιομάζας θα παραχθούν σε 44 m^3 syngas. Άρα, θεωρώντας την απόδοση του αεριοποιητή ίση με 80% ο υπολογισμός της HHV του syngas έγινε ως εξής (Εξ.5.8) (Rajvanshi, 1986):

$$n = \frac{HHV_{syngas} \cdot (\frac{MJ}{m^3}) \cdot 2(m^3)}{HHV_{PSS} \cdot (\frac{MJ}{kg}) \cdot 1kg} \rightarrow HHV_{syngas} = \frac{n \cdot HHV_{PSS}}{2} = \frac{0.8\ \cdot 22\frac{KJ}{kg}\ \cdot 1kg}{2\ m^3} = 8.80\frac{MJ}{m^3}$$

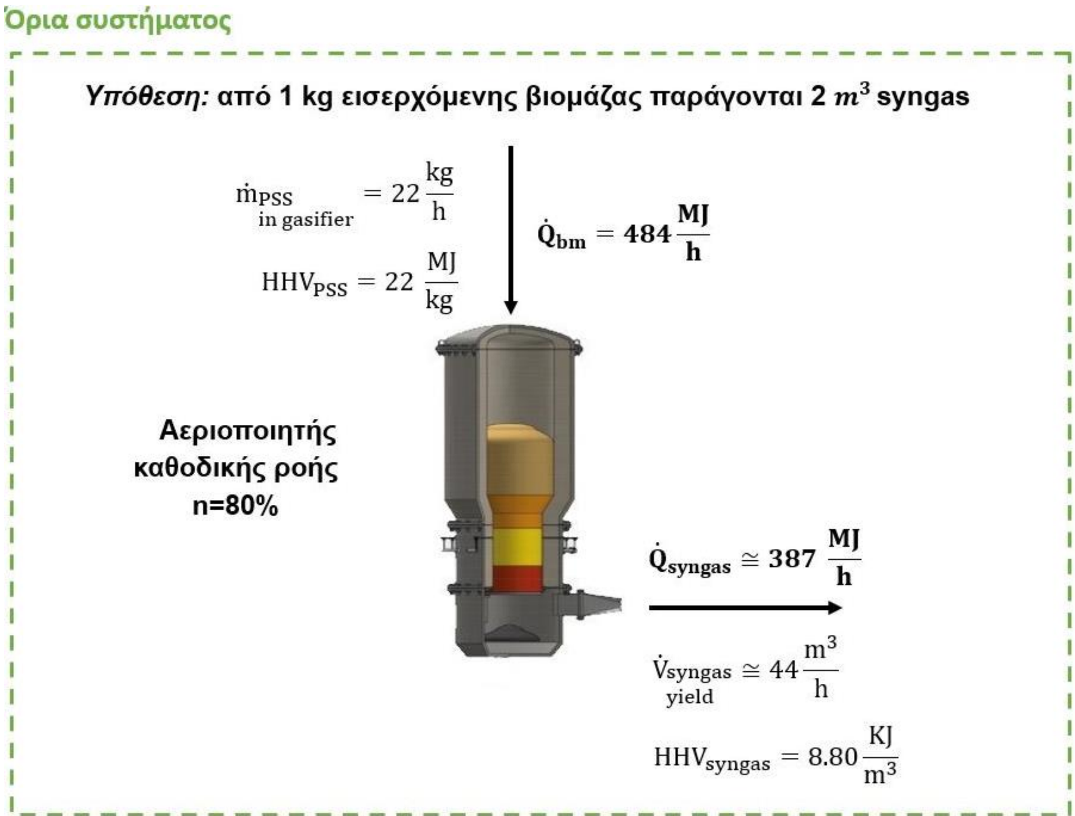
Έχοντας υπολογίσει την HHV του syngas, το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου syngas προσδιορίστηκε ως εξής (5.9):

$$\dot{Q}_{syngas} = \dot{V}_{\underset{\text{yield}}{\text{syngas}}} \cdot HHV_{syngas} \rightarrow$$

$$\dot{Q}_{syngas} = 44\ \frac{m^3}{h} \cdot 8.8\frac{KJ}{m^3} = 387.2\ \frac{MJ}{h} \rightarrow$$

$$\rightarrow \mathbf{\dot{Q}_{syngas} \cong 387\ \frac{MJ}{h}}$$

Τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας του αεριοποιητή του δεύτερου σεναρίου παρουσιάζονται στην εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.9 Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας αεριοποιητή (βέλτιστο σενάριο).

__Παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας__

Το αέριο αφού έχει υποστεί όλη την απαιτούμενη διαδικασία καθαρισμού που αναλύεται στο υποκεφάλαιο 4.2.3, τροφοδοτεί το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, που αποτελείται από μηχανή εσωτερικής καύσης και ηλεκτρογεννήτρια. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 20%, σε θερμική ενέργεια 40% και στο 40% είναι οι απώλειες, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

Η ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει από το θερμικό περιεχόμενου του syngas σύμφωνα με την εξίσωση 5.10 υπολογίστηκε ως εξής:

$$\dot{P}_{el,engine} = n_{electric} \cdot \dot{Q}_{syngas} \rightarrow \dot{P}_{el,engine} = 0.2 \cdot 387\ \frac{MJ}{h} \cong 77.4\frac{MJ}{h} \cong 21.5kW \rightarrow$$
$$\rightarrow \mathbf{\dot{P}_{el,engine} = 77.4\frac{MJ}{h} \cong 21.5kW}$$

Η ανακτώμενη θερμική ενέργεια προσδιορίστηκε ως εξής (Εξ.5.11):

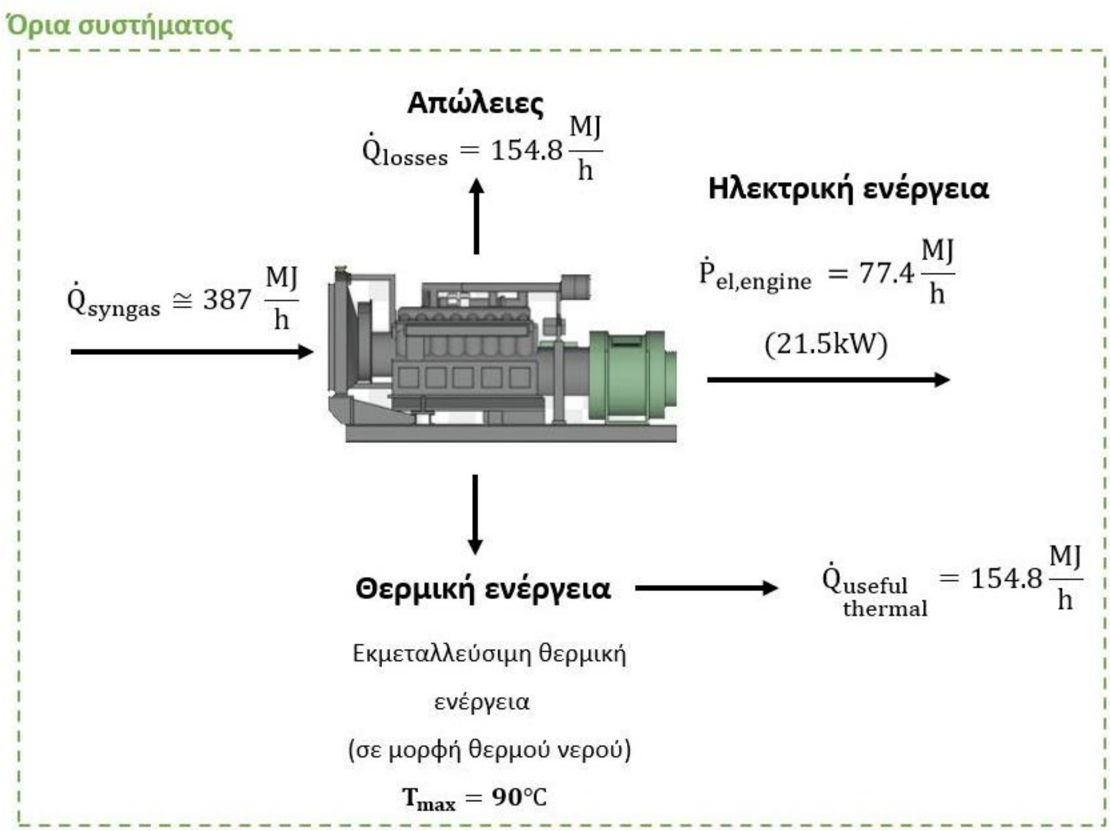
$$\dot{Q}_{\substack{useful\\ thermal}} = n_{thermal} \cdot \dot{Q}_{syngas} \rightarrow \dot{Q}_{\substack{useful\\ thermal}} = 0.4 \cdot 387\ \frac{MJ}{h} = 154.8\frac{MJ}{h} \rightarrow$$

$$\rightarrow \dot{\mathbf{Q}}_{\substack{\mathbf{useful} \\ \mathbf{thermal}}} = \mathbf{154.8} \frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}}$$

Η γεννήτρια θα παράγει από το σύστημα υδρόψυξης περίπου 154.8 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{h}}$ εκμεταλλεύσιμη θερμική ενέργεια, σε μορφή θερμού νερού, στους 90 ℃, ενώ οι απώλειες που προκύπτουν υπολογίστηκαν ως εξής (Εξ. 5.12)

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{losses}} = \mathrm{n}_{\mathrm{losses}} \cdot \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{syngas}} \rightarrow \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{losses}} = 0.4 \cdot 387 \frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{h}} \cong 154.8 \frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{h}} \rightarrow$$
$$\rightarrow \dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{losses}} \cong \mathbf{154.8} \frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}}$$

Στην εικόνα 5.10 παρουσιάζεται η παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει από το ενεργειακό περιεχόμενο του syngas.



Εικόνα 5.10 Παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας από το παραγόμενο syngas (βέλτιστο σενάριο).

<u>Ανακτώμενη ενέργεια από την ψύξη του syngas και από τα καυσαέρια της μηχανής εσωτερικής καύσης</u>

Τέλος, η συνολική εκμεταλλεύσιμη θερμική ενέργεια που προκύπτει από τον από τη ψύξη του syngas και από τα απαέρια της μηχανής θα ισούται με 23 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{h}}$, όπως υπολογίστηκε στο 1^{o} σενάριο-Ισοζύγια μάζας και ενέργειας αεριοποιητή (χείριστο σενάριο).

Συνεπώς, το συνολικά ισοζύγια μάζας και ενέργειας της αεριοποίησης βιοστερεών με ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας για το δεύτερο σενάριο παρουσιάζονται στην εικόνα 5.12.

Εικόνα 5.11 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας αεριοποιητή με ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (βέλτιστο σενάριο).

Κατόπιν έρευνας στη βιβλιογραφία, η θερμική ενέργεια που ανακτάται από την ψύξη του syngas αντιπροσωπεύει το 8-9% του ενεργειακού του περιεχομένου (Occhinero, 2019; Elsner, et al., 2017).

Πιο συγκεκριμένα, οι Elsner, et al., 2017 υπολόγισαν, σε αεριοποιητή καθοδικής ροής, ότι η ανακτώμενη θερμική ενέργεια από την ψύξη του syngas αποτελεί το 8-9% του ενεργειακού του περιεχομένου. Επίσης, κατά την αεριοποίηση πλάσματος με ανοδική ροή η ανακτώμενη θερμική ενέργεια από τον καθαρισμό του syngas αποτελούσε το 9% του ενεργειακού του περιεχομένου (Occhinero, 2019).

Στην παρούσα εργασία η ανακτώμενη θερμική ενέργεια από την ψύξη του syngas αποτελεί το 2.4% και το 1.8% του ενεργειακού του περιεχομένου για το χείριστο και βέλτιστο σενάριο αντίστοιχα. Η σημαντική απόκλιση των ποσοστών της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας σε σύγκριση με τις βιβλιογραφικές τιμές οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα βιοστερεών υλοποιείται σε πιλοτική βάση και σε μεγαλύτερα συστήματα το ποσοστό ανάκτησης θερμικής ενέργειας κατά την ψύξη του syngas είναι μεγαλύτερο.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι υπολογισμοί των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας του αεριοποιητή πραγματοποιήθηκαν μόνο για τον προσδιορισμό του ενεργειακού περιεχομένου των βιοστερεών και του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό δεν συμβαίνει, διότι ο ολοκληρωμένος υπολογισμός των ισοζυγίων για τη διεργασία της αεριοποίησης απαιτεί εκτενή και λεπτομερή ανάλυση, βασισμένη στη μοριακή αναλογία της τροφοδοτούμενης βιομάζας στα λειτουργικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του αεριοποιητή. Εφόσον όμως ο αεριοποιητής του έργου βρίσκεται σε στάδιο κατασκευής, δεν είναι εφικτό να υπάρξουν τέτοιες πληροφορίες και έτσι για την αποφυγή σφαλμάτων στους υπολογισμούς η διεργασία της αεριοποίησης μελετήθηκε ως κλειστό σύστημα (Ferreira, et al., 2019; Li, et al., 2001). Αγνοήθηκε λοιπόν η επίδραση του οξειδωτικού μέσου που θα χρησιμοποιηθεί για τη διεργασία καθώς και οι ποσότητες των υγρών αποβλήτων και των στερεών υπολειμμάτων (πτητική και ιπτάμενη τέφρα) που θα προκύψουν.

5.3 Συζήτηση αποτελεσμάτων: σχολιασμός ισοζυγίων του συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών

Ο προσδιορισμός των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας του συστήματος βιοστερεών πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά την ανάλυση ισοζυγίων μάζας του συστήματος μικροκοσκίνισης, ενώ στο δεύτερο στάδιο έγινε η ανάλυση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας των μονάδων ξήρανσης και αεριοποίησης με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

5.3.1 Συζήτηση αποτελεσμάτων ισοζυγίων μικροκοσκίνισης

Η επίλυση των ισοζυγίων του πρώτου σταδίου βασίστηκε στις μέσες τιμές των ποιοτικών παραμέτρων εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου για τα έτη 2017-2019 και στις προδιαγραφές απόδοσης της μικροεσχάρας όπως προβλέπονται από την εταιρία κατασκευής.

Η επίλυση των ισοζυγίων αποσκοπεί στην εύρεση των εκτιμώμενων απομακρύνσεων των παραμέτρων BOD_5, COD και TSS και στον προσδιορισμό της αναμενόμενης ποσότητας βιοστερεών που θα χρησιμοποιηθεί ως υλικό τροφοδοσίας στον αεριοποιητή. Τα ισοζύγια πραγματοποιήθηκαν για τρία πιθανά σενάρια και στον πίνακα 5.7 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Πίνακας 5.7 Εκτιμώμενες απομακρύνσεις της μικροεσχάρας.

1ο Σενάριο (χαμηλή απόδοση)			
Παράμετροι	**Είσοδος**	**Έξοδος**	**Απομάκρυνση %**
BOD_5 $\left(\frac{mg}{L}\right)$	386	309	20
COD $\left(\frac{mg}{L}\right)$	743	558	25
TSS $\left(\frac{mg}{L}\right)$	274	164	40
2ο Σενάριο (μέση απόδοση)			
Παράμετροι	**Είσοδος**	**Έξοδος**	**Απομάκρυνση %**
BOD_5 $\left(\frac{mg}{L}\right)$	386	298	23
COD $\left(\frac{mg}{L}\right)$	743	543	27
TSS $\left(\frac{mg}{L}\right)$	274	110	60
3ο Σενάριο (υψηλή απόδοση)			
Παράμετροι	**Είσοδος**	**Έξοδος**	**Απομάκρυνση %**
BOD_5 $\left(\frac{mg}{L}\right)$	386	290	25
COD $\left(\frac{mg}{L}\right)$	743	520	30
TSS $\left(\frac{mg}{L}\right)$	274	55	80

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 5.7 η εκτιμώμενη συγκέντρωση εξόδου των TSS κυμαίνεται μεταξύ 55-164 $\frac{mg}{L}$, η συγκέντρωση του BOD_5 κυμαίνεται μεταξύ 290-309 $\frac{mg}{L}$, η συγκέντρωση του COD μεταξύ 520-558 $\frac{mg}{L}$.

Το εύρος των εκτιμώμενων απομακρύνσεων αποτελεί συνάρτηση του βαθμού απομάκρυνσης των παραμέτρων BOD_5, COD και TSS. Με την ολοκλήρωση του συστήματος βιοστερεών θα μετρηθούν και θα αξιολογηθούν όλες οι εκτιμώμενες απομακρύνσεις σε πειραματική βάση. Με βάση τον πίνακα 5.7 και με βάση τα βιβλιογραφικά δεδομένα (Πίνακας 5.8) τα συστήματα μικροκοσκίνισης αποτελούν μία νέα και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την πρωτοβάθμια επεξεργασία των ΕΕΛ, χωρίς να επηρεάζουν τις διεργασίες νιτροποίησης και απονιτροποίησης στο βαθμό που παρατηρείται συνήθως με τις ΔΠΚ (Gupta, 2018). Τα παραγόμενα βιοστερεά των συστημάτων μικροκοσκίνισης εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά αποτελούν ιδανική πρώτη ύλη για την ανάκτηση ενεργειακών πόρων μέσω της αεριοποίησης, προκαλώντας μείωση των ενεργειακών αναγκών της δεξαμενής αερισμού (Gikas & Manali, 2019c) που είναι ο βασικός καταναλωτής ενέργειας στις ΕΕΛ (Siatou, et al., 2020).

Πίνακας 5.8 Αποδόσεις διαφορετικών τεχνολογιών πρωτοβάθμιας επεξεργασίας.

Τεχνολογία	BOD_5 (%)	COD (%)	TSS (%)	TN (%)	TP (%)	Παραγωγή βιοστερεών $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Βιβλιογραφικές αναφορές

ΔΠΚ	25-40	25-35	40-70	< 10	15-20	10-40	(Lema & Martinez, 2017; Tchobanoglous, et al., 2003)
RDFs και DFs	15-30	60	40-60	5-10	< 40	5 - 15	(Lema & Martinez, 2017; Libhaber & Orozco-Jaramillo, 2012)
RBFs	15-30	15-40	40-60	< 10	15-20	30 - 200	(Lema & Martinez, 2017; Franchi & Santoro, 2015; Rusten & Ødegaard, 2006)

Σύμφωνα με τον πίνακα 5.9 η επεξεργασία των λυμάτων με τη χρήση της πειραματικής μικροεσχάρας στην ΕΕΛ Ρεθύμνου είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των TSS, BOD_5 και COD κατά 29,2 ± 9%, 14,0 ± 6% και 16,5 ± 6%, αντίστοιχα (Μπατιστάτος, 2017; Gikas & Manali, 2019c).

Πίνακας 5.9 Ποσοστά απομακρύνσεων των παραμέτρων BOD5, COD και TSS της πειραματικής μικροεσχάρας στην ΕΕΛ Ρεθύμνου (Μπατιστάτος, 2017).

Παράμετρος	Είσοδος	Έξοδος	Απομάκρυνση %
BOD_5 Τυπική απόκλιση	210.5 ±85.24, n=10	163.95 ±91.07, n=10	14.0 ± 6, n=10
COD Τυπική απόκλιση	530.4 ±48.85, n=10	180.6 ±42.28, n=10	16.5 ± 6, n=10
TSS Τυπική απόκλιση	223.7 ±111.77, n=10	444.3 ±103.98, n=10	29.2 ± 9, n=10

n: ο αριθμός των δειγμάτων

Όπως παρατηρείται, τα ποσοστά απομάκρυνσης των παραμέτρων BOD_5, COD και TSS εμφανίζουν κάποια απόκλιση από τα ποσοστά των πινάκων 5.7 και 5.8, γεγονός που δημιουργεί διάφορους προβληματισμούς. Μία πιθανή εξήγηση έγκειται στη σύσταση των εισερχόμενων λυμάτων, καθώς η κατανομή των σωματιδίων επηρεάζει αρκετά το ποσοστό απομάκρυνσης των παραμέτρων BOD_5, COD και TSS. Δείγματα με αρκετά χονδρόκοκκη σύσταση εμφανίζουν υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης, ενώ σε δείγματα με λεπτόκοκκη σύσταση η μικροκοσκίνιση εμφανίζει μειωμένες αποδόσεις απομάκρυνσης (Μπατιστάτος, 2017; Gupta, 2018).

Κατά συνέπεια, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι οι μετρήσεις του πίνακα 5.9 αποτελούν ένα πρώτο δείγμα για την πραγματική απόδοση του συστήματος μικροκοσκίνισης, όμως απαιτείται συστηματικός έλεγχος παρακολούθησης, με στόχο την ελαχιστοποίηση των παραγόντων διαμόρφωσης μειωμένης απόδοσης και την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα των ισοζυγίων μάζας της μικροεσχάρας των τριών σεναρίων για τη παραγωγή των βιοστερεών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10 Εκτιμώμενη παραγωγή βιοστερεών.

Σενάρια	PSS (w.b.) $\left(\frac{kg}{d}\right)$	PSS (d.b.) $\left(\frac{kg}{d}\right)$
1^o Σενάριο (χαμηλή απόδοση)	528	159
2^o Σενάριο (μέση απόδοση)	787	276
3^o Σενάριο (υψηλή απόδοση)	1051	421

Παρατηρώντας τα 3 πιθανά σενάρια (Πίνακας 5.10) για τον υπολογισμό των ισοζυγίων μάζας της μικροεσχάρας, διαπιστώνουμε ότι η ημερήσια παραγωγή βιοστερεών (σε ξηρή βάση) κυμαίνεται περίπου από 7 έως 18 $\frac{kg-PSS}{h}$.

Αυτό το μεγάλο εύρος τιμών μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις των ποσοτικών χαρακτηριστικών εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου παρουσιάζουν αρκετές διακυμάνσεις, όπως φαίνεται στον πίνακα 8.1 (Κεφάλαιο 8: Παράρτημα). Εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν έχει ακόμα εγκατασταθεί η πιλοτική μικροεσχάρα, ο καλύτερος τρόπος επίλυσης των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας τόσο της μικροεσχάρας όσο και των μονάδων ξήρανσης και αεριοποίησης είναι να βασίσουμε τους υπολογισμούς στις πληροφορίες από τις πειραματικές δοκιμές της ήδη υπάρχουσας-πειραματικής μικροεσχάρας.

Ο ολοκληρωμένος προσδιορισμός των ισοζυγίων μάζας της μικροεσχάρας εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Μια από τις βασικότερες παραμέτρους λειτουργίας της μικροεσχάρας είναι η ταχύτητα περιστροφής του ιμάντα. Αναλυτικότερα, με τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του ιμάντα, δημιουργείται ένα στρώμα στερεών που δύναται να λειτουργήσει ως ένα επιπλέον φίλτρο, απομακρύνοντας ένα μεγαλύτερο εύρος στερεών. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, παράλληλα με τη διατήρηση της σταθερής παροχής έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της απομάκρυνσης του BOD_5, TSS και COD (Μπατιστάτος, 2017).

Επίσης, ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά σχεδιασμού και καθοριστικής σημασίας παράμετρος για την επίλυση των ισοζυγίων ενέργειας των μονάδων ξήρανσης και αεριοποίησης είναι η ημερήσια παραγωγή βιοστερεών σε ξηρή βάση. Οι λανθασμένες εκτιμήσεις στην ημερήσια παραγωγή βιοστερεών μπορεί να οδηγήσουν όχι μόνο στην εσφαλμένη εκτίμηση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας των μονάδων ξήρανσης και αεριοποίησης αλλά και στην υπέρ/υπό-διαστασιολόγηση τους. Κατόπιν έρευνας στη βιβλιογραφία, η χρήση ιμάντα με μικρότερα διάκενα μπορεί να αυξήσει σε κάποιο βαθμό την παραγωγή των βιοστερεών (Razafimanantsoa , et al., 2014; Razafimanantsoa, 2020; Ramos Barragán, 2014; Franchi & Santoro, 2015).

Σύμφωνα με τις έως τώρα μετρήσεις έχει υπολογιστεί ότι για παροχή λυμάτων στην πειραματική μικροσχάρα 5,000 $\frac{m^3}{d}$, η ημερήσια παραγωγή στερεών (ξηρή βάση) είναι 276 $\frac{kg}{d}$. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε περίπου 11.5 $\frac{kg}{h}$. Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω, αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τις προοπτικές βελτίωσης που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους και θεωρώντας ένα συντελεστή ασφαλείας ίσο με 10%, ο υπολογισμός των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας των μονάδων ξήρανσης και αεριοποίησης πραγματοποιήθηκε για παραγωγή βιοστερεών ίση με 20 $\frac{kg}{h}$ (ξηρή βάση).

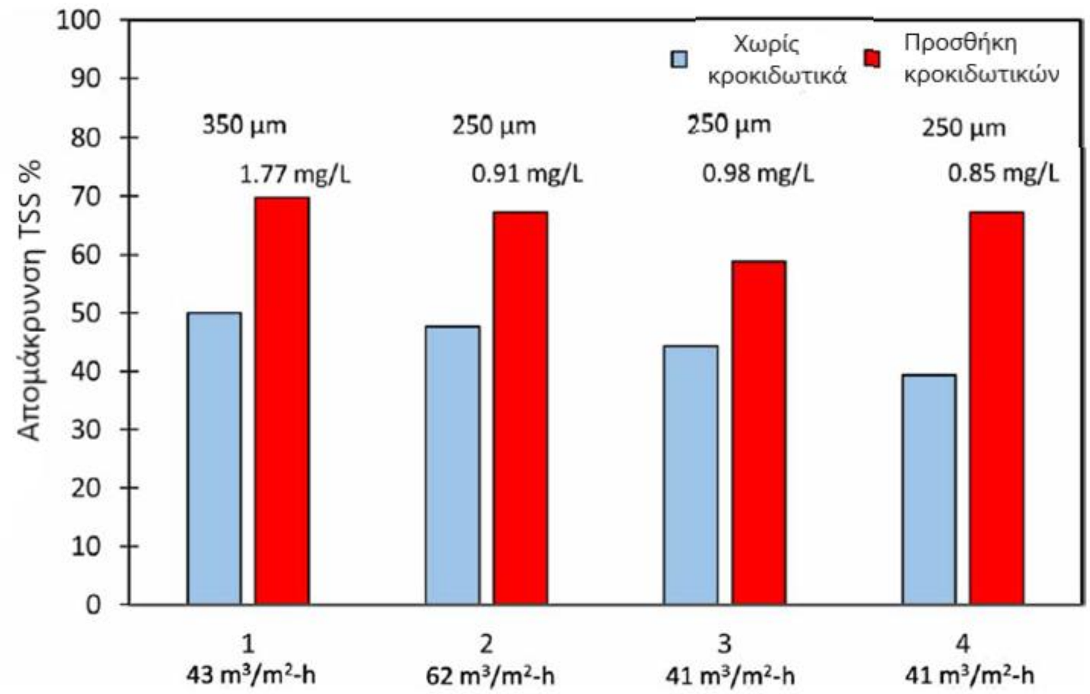
Σε αρκετές περιπτώσεις, τα συστήματα μικροκοσκίνισης αντικαθιστούν και εκσυγχρονίζουν τις συμβατικές μεθόδους απομάκρυνσης στερεών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ΕΕΛ “The Dalles Wastewater Treatment Plant (WWTP), Oregon, USA” που η επεξεργασία των αποβλήτων πραγματοποιείται με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος, χωρίς να υπάρχει πρωτοβάθμια συμβατική επεξεργασία. Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών έδειξαν ότι η μικροεσχάρα (Εικόνα 5.12) μπορούσε να επιτύχει ποσοστό απομάκρυνσης άνω του 60% για TSS και ποσοστό απομάκρυνσης για COD και BOD_5 ίσο με 39%, και 20% αντίστοιχα (άνοιγμα πόρων του ιμάντα 350μm) (Jansen, 2016).

Εικόνα 5.12 Μικροεσχάρα (Jansen, 2016).

Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής συστημάτων μικροκοσκίνισης με χρήση της μικροεσχάρας σε πραγματικής κλίμακας πειράματα πραγματοποιήθηκε το 2006 στην ΕΕΛ “Breivika WWTP in Tromsø”. Τα αποτελέσματα 19 δειγμάτων έδειξαν ότι κάθε δείγμα εκροής πληρούσε τα νομοθετικά όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης για πρωτοβάθμια επεξεργασία. Στην πρωτοβάθμια επεξεργασία, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία (Οδηγία 2000/60/ΕΚ), απαιτείται η απομάκρυνση τουλάχιστον του 20% του BOD_5, ενώ για τα TSS τουλάχιστον το 50%. Σε εγκαταστάσεις μεταξύ 2,000-9,999 με ΙΚ από τα 12 δείγματα ελέγχου το χρόνο, 10 από αυτά πρέπει να συμβαδίζουν με τα παραπάνω όρια κατ’ ελάχιστο. Σε εγκαταστάσεις άνω των 50,000Ο ΙΚ από τα 24 δείγματα ελέγχου το χρόνο, τα 21 από αυτά πρέπει κατ’ ελάχιστο να συμβαδίζουν.

Οι μέσες συγκεντρώσεις εισροής για 19 δείγματα ήταν 331 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$ TSS και 176 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$ BOD_5, ενώ οι μέσες συγκεντρώσεις εξόδου ήταν 34 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$ TSS και 36 $\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{L}}$ BOD_5. Αυτό αντιστοιχεί σε ποσοστό απομάκρυνσης 90% για τα TSS και 80% για τα BOD_5. Αυτά τα εξαιρετικά αποτελέσματα μπορούν να εξηγηθούν από το γεγονός ότι το σύστημα μικροκοσκίνισης λειτουργούσε με άνοιγμα πόρων του ιμάντα 350μm και υδραυλικό φορτίο 25 $\frac{m^3}{m^2 h}$ (Rusten & Ødegaard, 2006).

Επίσης, αρκετές φορές εξαιτίας της αραιής σύστασης των λυμάτων ως προς τα στερεά απαιτείται η προσθήκη κροκιδωτικών μέσων. Πειραματικές δοκιμές του συστήματος μικροκοσκίνισης πραγματοποιήθηκαν στην ΕΕΛ (the Nordre Follo WWTP, Norway) με και χωρίς τη χρήση κροκιδωτικών (Εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.13 Ποσοστά απομάκρυνσης των TSS χωρίς (μπλε στήλη) και με (κόκκινη στήλη) τη προσθήκη κροκιδωτικού μέσου (Rusten, et al., 2017).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μια μικρή ποσότητα πολυακρυλαμιδίου αύξησε το ποσοστό απομάκρυνσης κατά περίπου 20% από 40-50% TSS (χωρίς πολυμερές) σε 60-70% TSS (με πολυμερές). Αυτή η αύξηση του ποσοστού απομάκρυνσης των TSS είναι πολύ σημαντική όταν τα συστήματα μικροκοσκίνισης χρησιμοποιούνται ως κατεξοχήν πρωτοβάθμια επεξεργασία (Rusten, et al., 2017).

5.3.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων ισοζυγίων των μονάδων ξήρανσης και αεριοποίησης

Η επίλυση των ισοζυγίων του δευτέρου σταδίου αποσκοπεί στον έλεγχο της ενεργειακής αυτονομίας του συστήματος βιοστερεών. Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν δύο πιθανά σενάρια (χείριστο και βέλτιστο σενάριο).

Αναλυτικότερα, ο προσδιορισμός των ισοζυγίων του ξηραντή για το πρώτο σενάριο (χείριστο σενάριο) για λόγους προσεγγιστικούς και ασφαλείας, υπολογίστηκε για την πλέον δυσμενή περίπτωση όπου η θερμοκρασία του αέρα είναι η χαμηλότερη, ώστε να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τις απαιτούμενες ενεργειακές ανάγκες για ξήρανση σε περίπτωση ύπαρξης μιας τέτοιας ακραίας κατάστασης. Βασισμένοι στην ίδια λογική, τα ισοζύγια της αεριοποίησηςμε την ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας προσδιορίστηκαν με βάση την LHV, και την ελάχιστη εκτιμώμενη απόδοση αεριοποιητή και ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Στο δεύτερο σενάριο (βέλτιστο σενάριο) αντίστοιχα, υιοθετήθηκαν οι βέλτιστες δυνατές συνθήκες.

Έτσι, σε κάθε περίπτωση μπορούμε να εκτιμήσουμε το εύρος της παραγόμενης ενέργειας και να διαπιστώσουμε εάν θα καταστεί δυνατή ή όχι η ενεργειακή αυτονομία του συστήματος. Πρέπει να σημειωθεί, ότι σε πραγματικές συνθήκες, μπορεί να υπάρξει ανάμιξη των δύο ακραίων συνθηκών και να μην συμβαίνουν σε ταυτόχρονη βάση. Παρόλα αυτά, σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξασφαλιστεί η ενεργειακή αυτονομία της μονάδας.

Στον πίνακα 5.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας του συστήματος βιοστερεών.

Πίνακας 5.11 Αποτελέσματα ισοζυγίων μάζας και ενέργειας του συστήματος βιοστερεών.

Παράμετρος	1ο Σενάριο (Χείριστο σενάριο)	2ο Σενάριο (Βέλτιστο σενάριο)
$\dot{m}_{PSS\,(d.b)}$	$22\ \frac{kg}{h}$	$22\ \frac{kg}{h}$
Ξηραντής		
T_{air}	11.2 ℃	20 ℃
$\dot{m}_{PSS\ in\ dryer\ (w.b.)}$	$67\ \frac{kg}{h}$	$67\ \frac{kg}{h}$
$\dot{m}_{PSS\ out\ dryer\ (d.b.)}$	$22\ \frac{kg}{h}$	$22\ \frac{kg}{h}$
$\dot{m}_{H_2o\ eva}$	$45\ \frac{kg}{h} H_2o$	$45\ \frac{kg}{h} H_2o$
$MC_{in\ dryer}$	70%	70%
$MC_{out\ dryer}$	10%	10%
Ενεργειακές ανάγκες για ξήρανση	**$119\ \frac{MJ}{h}$**	**$117\ \frac{MJ}{h}$**
Αεριοποιητής		
HV_{PSS}	$19\ \frac{MJ}{kg}$	$22\ \frac{MJ}{kg}$
$\dot{m}_{PSS\ in\ gasifier}$	$22\ \frac{kg}{h}$	$22\ \frac{kg}{h}$
$\dot{Q}_{bm}$	$418\ \frac{MJ}{h}$	$484\ \frac{MJ}{h}$
n	0.7	0.8
HV_{syngas}	$6.65\ \frac{MJ}{m^3}$	$8.80\ \frac{MJ}{m^3}$
$\dot{V}_{syngas\ yield}$	$44\ \frac{m^3}{h}$	$44\ \frac{m^3}{h}$
$\dot{Q}_{syngas}$	**$293\ \frac{MJ}{h}$**	**$387\ \frac{MJ}{h}$**
Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας		
$\dot{P}_{el,engine}$	$58.6\ \frac{MJ}{h}$ (16.3 kW)	$77.4\frac{MJ}{h}$ (21.5kW)
$\dot{Q}_{useful\ thermal}$	$87.9\ \frac{MJ}{h}$	$154.8\ \frac{MJ}{h}$
$\dot{Q}_{losses}$	$146.5\ \frac{MJ}{h}$	$154.8\ \frac{MJ}{h}$

$\dot{Q}_{\text{heat recovery}}$	$23\ \frac{MJ}{h}$	$23\ \frac{MJ}{h}$
$\dot{Q}_{\text{useful-total thermal}}$	**$111\ \frac{MJ}{h}$**	**$178\ \frac{MJ}{h}$**

Σύμφωνα με τον πίνακα 5.11 η παραγόμενη θερμική ενέργεια που προέκυψε για το πρώτο σενάριο είναι ίση με 111 $\frac{MJ}{h}$ και η ηλεκτρική ίση με 58.6 $\frac{MJ}{h}$ (16.3 kW). Από την άλλη πλευρά, για το δεύτερο σενάριο η θερμική ενέργεια υπολογίστηκε ίση με 178 $\frac{MJ}{h}$ και η ηλεκτρική ίση με 77.4 $\frac{MJ}{h}$ (21.5kW). Συνεπώς, έχοντας υπολογίσει την παραγόμενη ενέργεια και γνωρίζοντας τις ανάγκες για ξήρανση και τις τελικές καταναλώσεις της μικροεσχάρας και του αεριοποιητή, κατασκευάστηκε ο πίνακας 5.12 που αξιολογεί την ενεργειακή αυτονομία του συστήματος βιοστερεών. Τις τελικές καταναλώσεις της μονάδας ξήρανσης και των υπόλοιπων τμημάτων της πιλοτικής μονάδας δεν τις γνώριζουμε, διότι βρίσκονται ακόμα σε στάδιο κατασκευής και για αυτό δεν αναφέρονται στον πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.12 Συγκριτικός συσχετισμός του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος βιοστερεών.

Παράμετρος	1^{o} Σενάριο (Χείριστο σενάριο)	2^{o} Σενάριο (Βέλτιστο σενάριο)
Παραγόμενη θερμική ενέργεια	$111\ \frac{MJ}{h}$	$178\ \frac{MJ}{h}$
Απαιτούμενη ενέργεια για ξήρανση	$119\ \frac{MJ}{h}$	$117\ \frac{MJ}{h}$
Περίσσεια θερμική ενέργεια	-	**$61\ \frac{MJ}{h}$**
Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια	16.3 kW	21.5 kW
Ενεργειακές ανάγκες μικροεσχάρας	8.35 kW	8.35 kW
Ενεργειακές ανάγκες αεριοποιητή	1 kW	1 kW
Περίσσεια ηλεκτρική ενέργεια	**6.95 kW**	**12.15 kW**

Παρατηρώντας τον πίνακα 5.12 διαπιστώνουμε για το πρώτο σενάριο δεν υπάρχει περίσσεια θερμικής ενέργειας, διότι η παραγόμενη θερμική ενέργεια καλύπτει οριακά την απαιτούμενη ενέγεια για ξήρανση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πινάκων 5.11, 5.12 η παραγόμενη θερμική ενέργεια ισούται με 111 $\frac{MJ}{h}$. Εφόσον, οι ενεργειακές ανάγκες για ξήρανση υπολογίστηκαν ίσες με 119 $\frac{MJ}{h}$, η παραγόμενη θερμική ενέργεια καλύπτει οριακά τις ανάγκες για ξήρανση, αλλά δεν θα προσδίδει ενεργειακή αυτονομία στη μονάδα. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αυτονομία του συστήματος, υπάρχουν δύο εναλλακτικές προτάσεις που ακόμη και στην ύπαρξη του 1^{o} του σεναρίου (χείριστο σενάριο), η μονάδα θα λειτουργεί αυτοσυντηρούμενα.

Η πρώτη εναλλακτική πρόταση προϋποθέτει την επαναχρησιμοποίηση θερμού αέρα ο οποίος έχει ήδη χρησιμοποιηθεί μία φορά για να καλύψει τις ανάγκες της ξήρανσης, εφόσον πρώτα καθαριστεί και απαλαχθεί από την υγρασία. Στην περίπτωση αυτή, οι ενεργειακές ανάγκες για ξήρανση πρόκειται να μειωθούν σημαντικά, προσδίδοντας περίσσεια ποσότητα θερμικής ενέργειας ικανή για την ενεργειακή αυτονομία της μονάδας. Οι Iguaz, et al., 2002 μελέτησαν την επίδραση της επαναχρησιμοποίησης θερμού αέρα σε ξηραντή στρεφόμενου τυμπάνου και διαπίστωσαν ότι η μπορεί να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ 21–38.5 % των συνολικών αναγκών. Από την άλλη, η δεύτερη εναλλακτική πρόταση περιλαμβάνει την υπάρξη αντιστάσεων στο ξηραντή, έτσι ώστε να μπορεί να δέχεται εκτός από θερμική ενέργεια και ηλεκτρική για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών.

Σύμφωνα με τους πίνακες 5.11, 5.12 η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ισούται με 16.3kW. Γνωρίζοντας ότι η κατανάλωση της μικροεσχάρας είναι ίση με 8.35kW και του αεριοποιητή ίση με 1kW, θα υπάρξει περίσσεια ενέργειας ίση με 6.95kW, η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των υπόλοιπων τμημάτων της μονάδας.

Τέλος, όσον αφορά το δεύτερο σενάριο, παρατηρούμε από τον πίνακα 5.12 ότι η περίσσεια θερμική ενέργεια ισούται με 61 $\frac{\mathrm{MJ}}{\mathrm{h}}$, έχοντας καλύψει τις συνολικές ανάγκες για ξήρανση. Επίσης, υπολογίζοντας την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ίση με 21.5kW και λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση της μικροεσχάρας και του αεριοποιητή (συνολικά 9.35kW), θα υπάρξει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας ίση με 12.15kW. Οι περίσσειες ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των υπόλοιπων τμημάτων της μονάδας, διατηρώντας την ενεργειακή αυτονομία της.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική είχε ως στόχο την ανάλυση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας του συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών που πρόκειται να εγκατασταθεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Απώτερος σκοπός ήταν ο έλεγχος της βιωσιμότητας του συγκεκριμένου συστήματος, καθώς επίσης και της ενεργειακής του αυτονομίας.

Η μελέτη των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας αποτελεί αναγκαίο εργαλείο για να εξεταστεί η απόδοση τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων που στοχεύουν στην ανάκτηση ενεργειακών πόρων. Πιο συγκεκριμένα, η ποσοτικοποίηση των ροών μάζας και ενέργειας προσφέρει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων στο σχεδιασμό, την αξιολόγηση και τον έλεγχο της βιωσιμότητας και της ενεργειακής αυτονομίας καινοτόμων τεχνολογιών που βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο.

Όσον αφορά τις διαφορετικές διεργασίες που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσίασαν η μικροκοσκίνιση και η αεριοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, η μικροκοσκίνιση αποτελεί μία νέα τεχνολογική προσέγγιση για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών από τα υγρά απόβλητα. Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν αλλά και βιβλιογραφικών πηγών, συμπεραίνεται ότι η μικροκοσκίνιση μπορεί να αντικαταστήσει τη συμβατική πρωτοβάθμια καθίζηση, πετυχαίνοντας ικανοποιητικά ποσοστά απομάκρυνσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών των λυμάτων (BOD_5, COD, TSS).

Είναι αξιοσημείωτο ότι τα παραγόμενα βιοστερεά των συστημάτων μικροκοσκίνισης λόγω της υψηλής τους περιεκτικότητας σε στερεά (έως 40%), αποτελούν ιδανική πρώτη ύλη για την ανάκτηση ενεργειακών πόρων μέσω της αεριοποίησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των ενεργειακών αναγκών της δεξαμενής αερισμού, που είναι ο βασικός καταναλωτής των ΕΕΛ.

Ωστόσο, η διεργασία της αεριοποίησης μπορεί ναι μεν να αποτελεί μια πιθανώς βιώσιμη εναλλακτική μέθοδο θερμικής επεξεργασίας βιοστερεών, αλλά δεν παύει να είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνει χώρα μία σειρά φυσικών μετασχηματισμών και χημικών αντιδράσεων εντός του αεριοποιητή, που οδηγούν στην παραγωγή του αερίου σύνθεσης. Επομένως, πολλές παράμετροι όπως το υλικό τροφοδοσίας, η τεχνολογία του αεριοποιητή, ο παράγοντας αεριοποίησης, η θερμοκρασία και η πίεση μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση λειτουργίας του αεριοποιητή, αλλά και την ποιότητα του αερίου σύνθεσης. Επίσης, η αξιολόγηση της διεργασίας της αεριοποίησης είναι εφικτή προς το παρόν μόνο μέσω άμεσης μέτρησης σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις πιλοτικής και πλήρους κλίμακας. Επομένως, η μεταβλητότητα και η έλλειψη πληροφοριών αυτών των μονάδων, καθιστούν δύσκολη την αξιολόγηση του συστήματος, χωρίς εμπειρικά δεδομένα και τη διασφάλιση ολοκληρωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τη βιωσιμότητα της μεθόδου.

Τέλος, σε μελλοντική έρευνα θα μπορούσαν να εξεταστούν και να αξιολογηθούν τα παρακάτω θέματα:

- Να πραγματοποιηθεί η ανάλυση κύκλου ζωής, ώστε να εξεταστεί η ορθή και συστηματική αξιολόγηση του συγκεκριμένου συστήματος βιοστερεών για τον εντοπισμό των τομέων βελτίωσης και να υποστηριχθεί η διαδικασία λήψης περιβαλλοντικά υπεύθυνων αποφάσεων.

- Να συνυπολογιστεί η επίδραση της ανάμιξης των βιοστερεών από πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία στην απόδοση του συστήματος και να εξαχθούν τα ανάλογα συμπεράσματα.
- Να προσδιοριστεί η τύχη των βαρέων μετάλλων και να διεξαχθούν αναλύσεις σχετικά με τα απόβλητα της αεριοποίησης.
- Να γίνει οικονομική μελέτη, για να αποδειχθεί αν είναι βιώσιμο το προτεινόμενο σύστημα σαν μελλοντική επένδυση σε ΕΕΛ.
- Η υφιστάμενη νομοθεσία και η έλλειψη κατανόησης των καινοτόμων τεχνολογιών καθιστούν την κατασκευή τέτοιων εγκαταστάσεων αρκετά δαπανηρή και χρονοβόρα. Συνεπώς, το κράτος μπορεί να υιοθετήσει μια ξεχωριστή διαδικασία αδειοδότησης νέων έργων για τις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν προηγμένες *τεχνολογίες ενεργειακής* αξιοποίησης αποβλήτων.
- Να διενεργείται συνεχής αξιολόγηση των αναδυόμενων τεχνολογιών πριν από ευρεία εφαρμογή, και ταυτόχρονα να διασφαλιστεί ότι λαμβάνονται υπόψη τόσο οι θετικές όσο και οι αρνητικές επιπτώσεις των πρώιμων τεχνολογιών *ενεργειακής* μετατροπής αποβλήτων.

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

"Modeling Gasifier Mass". (2010). *Modeling gasifier mass flow*. Retrieved 09 13, 2020, from http://wiki.gekgasifier.com/w/page/6123785/Modelling%20Gasifier%20Mass%20Balance

Ali, M., & Okabe, S. (2015). Anammox-based technologies for nitrogen removal: advances in process start-up and remaining issues. *Chemosphere, 141*, 144-153.

Arjona, B., & Cisneros, R. (2005). Analysis of Drying Technologies for Wastewater Treatment Plant Sludge as an Alternative Source of Energy. *Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET'2005).* Cartagena de indias: Center for Water Studies - ITESM.

Arnell, M., Sehlen, R., & Jeppsson, U. (2013). Practical use of wastewater treatment modelling and simulation as a decision support tool for plant operators-case study on aeration control at Linköping wastewater treatment plant. Στο *13th Nordic Wastewater Treatment Conference (NORDIWA2013).* Malmö: Helsinki .

Ashrafizadeh, S., & Tan, Z. (2018). *Mass and Energy Balances: Basic Principles for Calculation, Design, and Optimization of Macro/Nano Systems* (1 ed.). Cham: Springer.

Behera, C., Santoro, D., Gernaey, K., & Sin, G. (2018). Organic carbon recovery modeling for a rotating belt filter and its impact assessment on a plant-wide scale. *Chemical Engineering Journal, 334*, 1965-1976.

Benallou, A. (2018). *Energy and Mass Transfers* (1 ed.). London,Hoboken: Wiley-ISTE.

Biosolids2energy. (2018, 4 28). *biosolids2energy*. Retrieved 07 01, 2020, from biosolids2energy: http://www.biosolids2energy.eu/archiki.html

Bodik, I., & Kubaska, M. (2013). Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. *Environment Protection Engineering, 39*(2), 15-24.

Bourgeous, K., Riess, J., Tchobanoglous, G., & Darby, J. (2003). Performance Evaluation of a Cloth-Media Disk Filter for Wastewater Reclamation. *Water Environment Research, 75*(6), 532–538.

Brechtel, H., & Eipper, H. (1990). Improved efficiency of sewage sludge incineration by preceding sludge drying. Water Science and Technology. *Water Science and Technology, 22*(12), 269-276.

Burrowes, P., & Bauer, T. (2008). Energy Considerations with Thermal Processing of Biosolids. Illinois: WEFTEC.

Cao, Y. (2011). *Mass Flow and Energy Efficiency of Municipal Wastewater Treatment Plants, London.* London: IWA Publishing.

Capodaglio, A., Hlavínek, P., & Raboni, M. (2016). Advances in wastewater nitrogen removal by biological processes: state of the art review. *Revista ambiente & agua, 11*(2), 250-267.

Carles, P., Petter, O., & Pille, K. (2015). *www.powerstep.eu.* Westewitz, Sjölunda: Horizon 2020 Framework Programme.

Cburnett. (2019, 04 28). *Wikimedia Commons.* Retrieved 07 27, 2020, from https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Cyclone_separator.svg

Cengel, Y., & Boles, M. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8th Edition In SI Units ed.). Singapore: McGraw Hill Higher Education.

Chakrabarti, A. (2018). *Energy Engineering and Management* (1 ed.). Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd.

Chen, Y. (2019). Estimation of greenhouse gas emissions from a wastewater treatment plant using membrane bioreactor technology. *Water Environment Research, 91*(2), 111-118.

Chollom, M. (2014). *Treatment and reuse of reactive dye effluent from textile industry using membrane technology.* Durban: Durban University of Technology.

Conidi, C., Castro-Muñoz, R., & Cassano, A. (2020). Membrane-Based Operations in the Fruit Juice Processing Industry: A Review. *Beverages, 6*(1), 18.

Daham, A. (2014, 12 19). *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineeringof material balance equations can be formulated.* Retrieved 08 2020, 06, from https://ceng.tu.edu.iq/ched/images/lectures/chem-lec/st1/c3/basic-1.pdf

Dai, Q., Jiang, X., Jin, Y., Wang, F., Chi, Y., Yan, J., & Xu, A. (2014). Investigation into advantage of pyrolysis over combustion of sewage sludge in PCDD/Fs control. *Fresenius Environmental Bulletin, 23*(2a), 550-557.

Damartzis, T., & Zabaniotou, A. (2011). Thermochemical conversion of biomass to second generation biofuels through integrated process design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*(1), 366-378.

Darvodelsky, P., & Bridle, T. (2012). *BIOSOLIDS SNAPSHOT.* Canberra: Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities.

Davis, M., & Cornwell, D. (2008). *Introduction to environmental engineering* (4 ed.). New York: McGraw-Hill.

Dogru, M., Midilli, A., & Howarth, C. (2002). Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis. . *Fuel Processing Technolog, 75*(1), 55-82.

Doherty, W., Reynolds, A., & Kennedy, D. (2015). Process simulation of biomass gasification integrated with a solid oxide fuel cell stack. *Journal of Power Sources*, 292-303.

Egorov, V., & Karpushkin, L. (1988). Determination of airhumidity over evaporating surface inside a leaf by a compensationmethod. . *Photosynthelica, 22*, 394-404.

Elsner, W., Wysocki, M., Niegodajew, P., & Borecki, R. (2017). Experimental and economic study of small-scale CHP installation equipped with downdraft gasifier and internal combustion engine. *Applied energy, 202*, 213-227.

EPA. (2012). *Summary Report: Global Anthropogenic Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions: 1990–2030.* Washington: U.S. Environmental Protection Agency.

EPRI. (2013). *Electricity Use andManagement in theMunicipalWater Supply and Wastewater.* Palo Alto: EPRI.

Eula. (2020). *The steps of an LCA*. (T. s. LCA, Producer) Retrieved 4 30, 2020, from The steps of an LCA: //www.eula.eu/environmental-impact-assessment-lca-life-cycle-assessment.

Eyvaz, M., & Yüksel, E. (2018). *Desalination and Water Treatment* (1 ed.). Österreich: BoD--Books on Demand.

Ferrasse, J., Seyssiecq, I., & Roche, N. (2003). Thermal gasification: A feasible solution for sewage sludge valorisation. *Chemical Engineering \& Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology, 26*(9), 941-945.

Ferreira, S., Monteiro, E., Brito, P., & Vilarinho, C. (2019). A holistic review on biomass gasification modified equilibrium models. *Energies, 12*(1), 160.

Foley, J., Yuan, Z., Keller, J., Senante, E., Chandran, K., Wills, J., . . . Voorthuizen, E. (2011). *N2O and CH4 emission from wastewater collection and treatment systems: technical report.* London: Global Water Research Coalition.

Franchi, A., & Santoro, D. (2015). Current status of the rotating belt filtration (RBF) technology for municipal wastewater treatment. *Water Practice and Technology, 10*(2), 319-32.

Franchi, A., Stedman, K., & Gikas, P. (2012). Enhanced primary solids removal from municipal wastewater by two steps filtration. Heraklion: IWA Regional Conference on Wastewater Purification & Reuse.

Franses, E. (2014). *Thermodynamics with Chemical Engineering Applications* (1 ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Fredlund, D., Rahardjo, H., & Fredlund, M. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice* (1 ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

Freeman, H. (1989). *Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal.* (1 ed.). New York: McGraw-Hill Book Co.

Fytili, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—a review. *Renewable and sustainable energy reviews, 12*(1), 116-140.

Gandiglio, M., Lanzini, A., Soto, A., Leone , P., & Santarelli, M. (2017). Enhancing the energy efficiency of wastewater treatment plants through co-digestion and fuel cell systems. *Frontiers in Environmental Science, 5*, 70.

Gao, N., Quan, C., Liu, B., Li, Z., Wu, C., & Li, A. (2017). Continuous pyrolysis of sewage sludge in a screw-feeding reactor: products characterization and ecological risk assessment of heavy metals. *Energy & Fuels, 31*(5), 5063-5072.

Ghasem, N., & Henda, R. (2014). *Principles of chemical engineering processes: material and energy balances* (2 ed.). Boca Raton: CRC Press.

Gikas , P., & Manali , A. (2018a). Electric energy production from primary sieved solids through gasification. Dubai: 6th International Conference On Recycling And Waste Management.

Gikas, P. (2014). Gasification of Municipal Wastewater Primary Sieved Solids in a Rotary Drum Reactor. Athens: 2nd Intl. Conf. on Sustainable Solid Waste Management.

Gikas, P. (2017a). Towards energy positive wastewater treatment plants. *Journal of environmental management, 203*(2), 621-629.

Gikas, P. (2017b). Ultra high temperature gasification of municipal wastewater primary biosolids in a rotary kiln reactor for the production of synthesis gas. *Journal of environmental management, 203*, 688-694.

Gikas, P., & Manali, A. (2018b). Mass And Energy Balances For Gasification Of Primary Sieved Solids. *5th International Conference on Small And Decentralized Water and Wastewater Treatment Plants (SWAT)* (σ. 1). Thessaloniki: 5th SWAT Conference.

Gikas, P., & Manali, A. (2019a). Thermal And Electric Energy Production Using Primary Sieved Solids From Municipal Wastewater, As Gasification Feedstock. Patra: Summer School on Wastewater and Biosolids Management (WWSS19).

Gikas, P., & Manali, A. (2019c). Utilization Of Primary Sieved Solids For Gasification And Energy Production. Sardinia: 17th International Waste Management and Landfill Symposion.

Gikas, P., Ventafrintas, E., & Farazaki, M. (2015). Potential for Gasification and Electric Energy Production from Biosolids [PowerPoint presentation]. Chania: School of Environmental Engineering, Technical University of Crete. Ανάκτηση 5 15, 2020

Gil-Lalaguna, N., Sánchez, J. L., J., Murillo, M., Atienza-Martínez, M., & Gea, G. (2014). Energetic assessment of air-steam gasification of sewage sludge and of the

integration of sewage sludge pyrolysis and air-steam gasification of char. *Energy, 76*, 652-662.
Grabbe, U., Seyfried, C., & Rosenwinkel, K. (1998). Upgrading of waste water treatment plants by cloth-filtration using an improved type of filter-cloth. *Water science and technology, 37*(9), 143-150.
Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Wang, X., & Li, F. (2017). Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges. *Energy Procedia, 105*, 3741-3751.
Guinée, J., & Lindeijer, E. (2002). *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards* (1 ed., Vol. 07). Dordrecht: Springer Science & Business Media.
Gupta, M. (2018). *Microsieving as a primary treatment for biological nitrogen removal from municipal wastewater.* Ontario: The University of Western Ontario .
Hao, X., Chen, Q., van Loosdrecht, M., & Li, J. (2020). Sustainable disposal of excess sludge: Incineration without anaerobic digestion. *Water research, 170*, 115298.
Harrelson, M., & Cravens, J. (1982). Use of microscreens to to Polish Lagoon Effluents. *Water Pollution Control Federation, 54*(1), 36–42.
Henze, M., Harremoës, P., La Cour Jansen, J., & Arvin, E. (1996). *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes* (2nd ed. ed.). Heidelberg: Springer.
Himmelblau, D., & Riggs, J. (2012). *Basic principles and calculations in chemical engineering.* (1 ed.). New Jersey: FT press.
Honrath, R. (1995, 01 20). *pages.mtu.edu.* Retrieved 08 06, 2020, from https://pages.mtu.edu/~reh/courses/ce251/251_notes_dir/node3.html
Hwang, L., Ouchi, Y., & Matsuto, T. (2007). Characteristics of leachate from pyrolysis residue of sewage sludge. *Chemosphere, 68*(10), 1913-1919.
Iguaz, A., Lopez, A., & Vırseda, P. (2002). Influence of air recycling on the performance of a continuous rotary dryer for vegetable wholesale by-products. *Journal of Food Engineering, 54*(4), 289-297.
Inguanzo, M., Domínguez, A., Menéndez, J., Blanco, C., & Pis, J. (2002). On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 63*(1), 209-222.
IPCC. (2001). The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom*, 881.
IPCC, T. (2013). Climate change 2013: The physical science basis. *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 1535*.
ISO, E. (1997). *ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment-Principles and Framework.* Geneva: International Standards Organization.
ISO, E. (1998). *ISO 14041: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Goal and Scope Definition and Inventory Analysis.* Geneva: International Organization for Standardization.
ISO, E. (2000a). 14042. Life cycle assessment-Life cycle impact assessment. *International Organisation for Standardisation (ISO)*.
ISO, E. (2000b). 14042. Life cycle assessment-Life cycle impact assessment. *International Organisation for Standardisation (ISO)*.
ISO, E. (2006). *14040: 2006. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework.* Geneva: European Committee for Standardization.

Jabbar, H., & Al-Baidhani, J. (2005). Design of Sedimentation Basins. Hillah: University of Babylon.

Jadhao, J., & Thombare, D. (2013). Review on exhaust gas heat recovery for IC engine. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), 2*, 8.

Jansen, R. (2016). Successful pilot test of rotating belt filters. *Filtration+ Separation, 53*(4), 26-27.

Jetten, M., Wagner, M., Fuerst, J., van Loosdrecht, M., Kuenen, G., & Strous, M. (2001). Microbiology and application of the anaerobic ammonium oxidation ('anammox') process. *Current opinion in biotechnology, 12*(3), 283-288.

Jha, N. (2015). *Green design and manufacturing for sustainability* (1 ed.). Boca Raton: CRC Press.

Kawasaki, M. (2010). *Sewage Sludge Gasification.* Kiyose: SSWM Toolbox .

Koliopoulos, G., & Gikas, P. (2013). Fine Mesh Sieving of Raw Municipal Wastewater for TSS and COD removal. Στο *13th International Conference on Environmental Science and Technology* (σσ. 5-7). Athens: G. Koliopoulos and P. Gikas, 2013, Fine Mesh Sieving of Raw Municipal Wastewater for TSS and COD removal, 13th International Conference on Environmental Science and Technology, 5-7 September, Athens, Greece.

Koros, W., Ma, Y., & Shimidzu , T. (1996). Terminology for membranes and membrane processes (IUPAC Recommendations 1996). *Pure and Applied Chemistry, 68*(7), 1479-1489.

Koutsou, O., Gatidou, G., & Stasinakis, A. (2018). Domestic wastewater management in Greece: Greenhouse gas emissions estimation at country scale. *Journal of Cleaner Production, 188*, 851-859.

Kreith, F., & Krumdieck, S. (2014). *Principles of sustainable energy systems* (1 ed.). Boca Raton: CRC press.

Lema, J., & Martinez, S. (2017). *Innovative wastewater treatment & resource recovery technologies: impacts on energy, economy and environment* (1 ed.). London: IWA publishing.

Li, W., Yu, H., Rittmann, B., & Li W. W., Yu H. Q., Rittmann B. E., 2015, "Chemist. (2015). Chemistry: Reuse water pollutants. *Nature, 528*(7580), 29-31.

Li, X., Grace, J., Watkinson, A., Lim, C., & Ergüdenler, A. (2001). Equilibrium modeling of gasification: a free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier. *Fuel, 80*(2), 195-207.

Libhaber, M., & Orozco-Jaramillo, A. (2012). *Sustainable treatment and reuse of municipal wastewater* (1 ed.). London: IWA Publishing,.

Lisý, M., Baláš, M., Moskalík, J., & Pospíšil, J. (2009). Research into biomass and waste gasification in atmospheric fluidized bed. Greece: Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Energy Planning, Energy Saving, Environmental Education, EPESE.

Liu, B., Wei, Q., Zhang, B., & Bi, J. (2013). Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China. *Science of the Total Environment,, 447*, 361-369.

Liu, Q., Hu, C., Peng, B., Liu, C., Li, Z., Wu, K., & Xiao, R. (2019). High H2/CO ratio syngas production from chemical looping co-gasification of biomass and polyethylene with CaO/Fe2O3 oxygen carrier. *Energy Conversion and Management, 199*(111951), 199.

Longo, S., d'Antoni, B., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., & Hospido, A. (2016). Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater

treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Applied Energy, 179*, 1251-1268.
Mamais, D., Noutsopoulos, C., Dimopoulou, A., Stasinakis, A., & Lekkas, T. (2015). Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions. *Water Science and Technology, 71*(2), 303-308.
Manali, A., & Gikas, P. (2019b). Utilization Of Primary Sieved Solids For Gasification And Energy Production. *17th International Waste Management and Landfill Symposium* (σ. 6). Cagliari: 17th International Waste Management and Landfill Symposium.
Mills, N., Pearce, P., Farrow, J., Thorpe, R., & Kirkby, N. (2014). Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. *Waste management, 34*(1), 185-195.
Mizuta, K., & Shimada, M. (2010). Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan. *Water Science and Technology, 62*(10), 2256-2262.
Monroeenvironmental. (2020). *Monroeenvironmental*. Retrieved 5 18, 2020, from http://www.monroeenvironmental.com/water-and-wastewater-treatment/circular-clarifiers-and-thickeners/primary-clarifiers/
Morling, S. (2019). Swedish Experience and Excellence in Wastewater Treatment Demonstrated Especially in Phosphorus Removal. *Journal of Water Resource and Protection, 11*(03), 333.
Mulder, A., Van der Graaf, A., Robertson, L., & Kuenen, J. (1995). Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. *FEMS microbiology ecology, 16*(3), 177-183.
Muro, C., Riera, F., & del Carmen Díaz, M. (2012). Membrane separation process in wastewater treatment of food industry. Στο *Food industrial processes--methods and equipment* (σσ. 253-280). Rijeka: InTech.
Ng, H. (2012). *Removal of MBBR biofilm solids by Salsnes filter fine mesh sieves.* Stavanger: University of Stavanger.
Occhinero, M. (2019). *Hydrogen production from automotive waste via integrated plasma gasification and water gas shift.* Stockholm: School of Industrial Engineering and Management.
Oladejo, J., Shi, K., Luo, X., Yang, G., & Wu, T. (2019). A review of sludge-to-energy recovery methods. *Energies, 12*(1), 60.
Panepinto, D., Fiore, S., Zappone, M., Genon, G., & Meucci, L. (2016). Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. Applied Energy. *Applied Energy, 16`1*, 404-411.
Parthasarathy, P., & Narayanan, K. (2014). Hydrogen production from steam gasification of biomass: influence of process parameters on hydrogen yield–a review. *Renewable Energy, 66*, 570-579.
Paulsrud, B., Rusten, B., & Aas, B. (2014). Increasing the sludge energy potential of wastewater treatment plants by introducing fine mesh sieves for primary treatment. *Water Science and Technology, 69*(3), 560-565.
Pitas, V., Fazekas, B., Banyai, Z., & Karpati, A. (2010). Energy efficiency of the municipal wastewater treatment. *Journal of Biotechnology, 150*, 163-164.
Plappally, A. (2012). Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(7), 4818-4848.
Rajvanshi, A. (1986). Biomass gasification. *Alternative energy in agriculture, 2*(4), 82-102.

Ramos Barragán, G. (2014). *Performance of salsnes water to algae treatment (swat) technology in a continuous mode for high algae recovery.* Stavanger: University of Stavanger.

Razafimanantsoa , V., Ydstebø, L., Bilstad, T., Sahu, A., & Rusten, B. (2014). Effect of selective organic fractions on denitrification rates using Salsnes Filter as primary treatment. *Water Science and Technology, 69*(9), 1942-1948.

Razafimanantsoa, V. (2020). *Energy optimization of biological wastewater treatment using rotating belt filters upstream BNR.* Stavanger: University of Stavanger.

Reed, T., & Das, A. (1988). *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems.* Pine Ridge: Biomass Energy Foundation.

Roche, E., de Andrés, J., Narros, A., & Rodríguez, M. (2014). Air and air-steam gasification of sewage sludge. The influence of dolomite and throughput in tar production and composition. *Fuel, 115*, 54-61.

Rong, H., Wang, T., Zhou, M., Wang, H., Hou, H., & Xue, Y. (2017). Combustion Characteristics and Slagging during Co-Combustion of Rice Husk and Sewage Sludge Blends. *Energies, 10*(4), 438.

Rosenberg, M. (1995). Current and future applications for membrane processes in the dairy industry. *Trends in Food Science & Technology, 6*(1), 12-19.

Rubin, E., Berkenpas, M., Frey, H., Chen, C., McCoy, S., & Zaremsky, C. (2007). *Technical documentation: Integrated gasification combined cycle systems (igcc) with carbon capture and storage (ccs).* Pittsburgh: Carnegie Mellon University.

Ruiken, C., Breuer, G., Klaversma, E., Santiago, T., & van Loosdrecht, M. (2013). Sieving wastewater–Cellulose recovery, economic and energy evaluation. *Water research, 47*(1), 43-48.

Ruiz, J., Juárez, M., Morales, M., Muñoz, P., & Mendívil, M. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18*, 174-183.

Rusten, B., & Ødegaard, H. (2006). Evaluation and testing of fine mesh sieve technologies for primary treatment of municipal wastewater. *Water Science and Technology, 54*(10), 31-38.

Rusten, B., Rathnaweera, S., Rismyhr, E., Sahu, A., & Ntiako, J. (2017). Rotating belt sieves for primary treatment, chemically enhanced primary treatment and secondary solids separation. *Water Science and Technology, 75*(11), 2598-2606.

Schlesinger, M. (1996). *Mass and energy balances in materials engineering* (1 ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.

Schwarz, S. (1988). *An Economic Evaluation of Sewage Sludge Drying and Incineration Processes.* Clemson: the Graduate School of Clemson University.

Seiple, T., Coleman, A., & Skaggs, R. (2017). Municipal wastewater sludge as a sustainable bioresource in the United States. *Journal of environmental management, 197*, 673-680.

Shakorfow, A. (2016). Gasification of a solid dry waste (biomass). *International Journal of Engineering Research, 5*(8), 704-708.

Shi, C. (2011). *Mass flow and energy efficiency of municipal wastewater treatment plants.* (1 ed.). London - New York: IWA Publishing.

Siatou, A., Manali, A., & Gikas, P. (2020). Energy Consumption and Internal Distribution in Activated Sludge Wastewater Treatment Plants of Greece. *Water, 12*(4), 1204.

Silva, C., Saldanha Matos, J., & Rosa, M. (2016). Performance indicators and indices of sludge management in urban wastewater treatment plants. *Journal of environmental management, 184*, 307-317.

Skogestad, S. (2008). *Chemical and Energy Process Engineering* (1 ed.). Boca Raton: CRC Press.

Soares, R., Memelli, M., Roque, R., & Gonçalves, R. (2017). Comparative analysis of the energy consumption of different wastewater treatment plants. *International Journal of Architecture, Arts and Applications, 3*, 79.

Strous, M., Van Gerven, E., Zheng, P., Kuenen , J., & Jetten, M. (1997). Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (anammox) process in different reactor configurations. *ater Research, 31*(8), 1955-1962.

Takahashi, N., & Koshijima, T. (1988). Molecular properties of lignin-carbohydrate complexes from beech (Fagus crenata) and pine (Pinus densiflora) woods. *Wood Science and Technology, 22*(2), 177-189.

Tchobanoglous, G., Burton , F., & Stensel, H. (2003). *Metcalf & Eddy wastewater engineering: treatment and reuse* (4 εκδ.). New York: McGraw-Hill.

Turovskiy, I., & Mathai, P. (2006). *Wastewater sludge processing* (1 ed.). New York City: ohn Wiley \& Sons.

Väänänen, J. (2017). *Microsieving in municipal wastewater treatment: Chemically enhanced primary and tertiary treatment .* Lund: Lund University.

Valdez, B. (2012). *Food Industrial Processes: Methods and Equipment* (1 ed.). Österreich: BoD--Books on Demand.

Van der Star, W., Abma, W., Blommers, D., Mulder, J., Tokutomi, T., Strous, M., & van Loosdrecht, M. (2007). Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam. *Water research, 41*(18), 4149-4163.

Van Oers, L., De Koning, A., Guinée, J., & Huppes, G. (2002). Abiotic resource depletion in LCA. *Road and Hydraulic Engineering Institute, Ministry of Transport and Water*.

Varzakas, T., & Tzia, C. (2014). *Food Engineering Handbook* (1 ed.). Boca Raton: CRC Press.

Vesilind, P., & Ramsey, T. (1996). Effect of drying temperature on the fuel value of wastewater sludge. *Waste management & research, 14*(2), 189-196.

Vigants, E., Vigants, G., Veidenbergs, I., Lauka, D., & Blumberga, D. (2015). Analysis of energy consumption for biomass drying process. Rezekne: In Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference.

Vijay, V., Bhat, A., Shetty, S., Gurudatta, n., & Sequeira, R. (2016). Design and fabrication of heat exchanger for waste heat recovery from exhaust gas of diesel engine. *Journal of mechanical engineering and automation, 6*(5A), 131-137.

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of 'carbon footprint'. *Ecological economics research trends, 1*, 1-11.

Wongburi, P. (2018). *Sustainable Wastewater Treatment Technologies for Thailand (Doctoral dissertation).* Madison: University of Wisconsin – Madison.

Wright, L., Kemp, S., & Williams, I. (2011). Carbon footprinting': towards a universally accepted definition. *Carbon Management, 2*(1), 61-72.

Xu, G., Murakami, T., Suda, T., Tani, H., & Mito, Y. (2008). Efficient gasification of wet biomass residue to produce middle caloric gas. *Particuology, 65*(5), 376-382.

Zhang, L., Xu, C., & Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management, 51*(5), 969-982.

Αντωνιάδης, Α. (2006). *Φωτοκαταλυτικές μέθοδοι επεξεργασίας αστικών λυμάτων.* Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Γκαϊντατζής, Γ. (2012, 04 19). *Eclass.duth.* (1, Επιμ.) Ανάκτηση 08 06, 2020, από https://eclass.duth.gr/modules/document/?course=TME112

Δανδόλου, Ε. (2010). *Έλεγχος και αξιολόγηση λειτουργίας Μονάδας Επεξεργασίας Λυμάτων Ρεθύμνου.* Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Δελήμπαση, Κ. (2001, 11 20). Το όζον στην Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων. *e-telescope*, σ. 6.

Zhu, Q. (2015). *High temperature syngas coolers.* London: IEA Clean Coal Centre.

Κεχαγιαδάκη, Δ. (2019). *Τοξικές ουσίες στην Ιλύ της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων Ρεθύμνου.* Πάτρα: Ελληνικό Ανοιχτό Πανεπιστήμιο.

Κουϊμτζής, Θ., Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Κ., Φυτιανός, Κ., & Βουτσά, Δ. (1994). *Έλεγχος ρύπανσης περιβάλλοντος.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.

Ματσούκα, Β. (2003). *Σχεδιασμός και προσομοίωση Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων.* Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Μαυράκης, Ν. (2018). *Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για το έργο «Πιλοτική Διάταξη Αεριοποίησης στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Ρεθύμνου».* Ρέθυμνο: Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Ρεθύμνου (ΔΕΥΑΡ).

Μπατιστάτος, Ν. (2017). *Διαφοροποίηση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων υγρών αστικών αποβλήτων μετά από επεξεργασία με μικροκοσκίνιση.* Χανιά : Πολυτεχνείο Κρήτης.

Πηλίνης, Χ., & Στασινάκης, Α. (2018). *Εισαγωγή στην περιβαλλοντική μηχανική και επιστήμη* (3 Αμερικάνικη έκδοση εκδ.). Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Σπερέζη, Χ. (2007). *Θερμική επεξεργασία στερεών αποβλήτων Καύση- Πυρόλυση - Αεριοποίηση.* Χανιά: Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Στάμος, Α., & Βογιατζής, Ζ. (1994). *Βασικές αρχές και σχεδιασμός συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων* (2 εκδ.). Αθήνα: Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος.

Χρυσικόπουλος, Κ. (2013). *Εισαγωγή στις διεργασίες καθαρισμού, νερού και λυμάτων.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.

Κεφάλαιο 8: Παράρτημα

8.1 Παράρτημα πινάκων

Στον **Πίνακα 8.1** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων που διεξάγει το Τμήμα Περιβάλλοντος της ΔΕΥΑΡ. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αφορούν 6 ποσοτικές παραμέτρους εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου για τα έτη 2017-2019.

Πίνακας 8.1 Στοιχεία εισόδου της ΕΕΛ Ρεθύμνου για τα έτη 2017-2019.

Date	COD	BOD_5	NH_4-N	TN	TP	TSS
10/1/2017	281	180	33	51	5	120
17/1/2017	361	200	35	58	5	134
31/1/2017	362	220	35	58	5	131
7/2/2017	385	240	31	48	6	140
21/2/2017	411	260	33	53	6	150
3/3/2017	595	380	49	63	7	169

21/3/2017	583	400	47	63	8	171
3/4/2017	821	650	51	77	9	289
25/4/2017	615	360	49	65	7	141
8/5/2017	720	400	52	73	9	248
16/5/2017	1306	920	60	105	15	461
23/5/2020	697	380	64	83	11	310
7/6/2017	1124	780	44	80	20	480
26/6/2017	1071	400	51	79	14	442
4/7/2017	770	420	52	82	10	287
13/7/2017	899	420	36	60	10	315
18/7/2017	761	340	17	49	7	261
25/7/2017	576	440	35	52	8	198
1/8/2017	682	300	31	54	10	267
9/8/2017	585	360	34	55	10	231
24/8/2017	742	480	56	72	8	275
5/9/2017	1040	480	40	71	17	500
11/9/2017	987	340	41	55	16	333
18/9/2017	860	320	43	52	11	385
20/9/2017	903	300	42	63	8	444
26/9/2017	792	360	43	77	8	238
29/9/2017	926	380	25	53	8	435
2/10/2017	734	280	27	76	7	195
9/10/2017	856	300	79	87	13	666
11/10/2017	698	320	26	60	6	215
25/10/2017	712	320	29	58	7	250
29/10/2017	718	340	30	49	6	224
1/11/2017	742	280	21	55	7	133
6/11/2017	1158	440	40	61	14	450
9/11/2017	793	360	19	51	10	120
13/11/2017	1317	860	22	45	9	375
20/11/2017	1282	540	23	54	8	130
22/11/2017	890	400	21	50	6	295
27/11/2017	801	260	13	50	4	177
5/11/2017	1174	480	15	51	5	247
12/11/2017	798	320	13	49	3	175
11/1/2018	295	180	38	55	9	131
22/1/2018	330	200	36	58	9	140
8/2/2018	481	280	42	63	9	185
20/2/2018	531	360	45	67	9	220
5/3/2018	587	380	49	65	8	190
26/3/2018	595	400	47	64	10	195
17/4/2018	765	440	50	71	9	291
30/4/2018	681	400	49	68	9	258

10/5/2018	735	400	59	80	12	310
17/5/2018	814	420	56	78	11	323
25/5/2018	1158	500	61	83	13	487
6/6/2018	985	460	56	78	14	485
21/6/2018	1056	480	60	85	11	437
10/7/2018	868	440	55	77	15	410
24/7/2018	791	400	58	81	11	391
1/8/2018	931	420	60	79	16	384
16/8/3018	815	380	50	66	12	309
27/8/2018	1018	480	59	74	16	507
7/9/2018	988	420	61	87	17	476
27/9/2018	959	480	69	86	19	556
8/10/2018	748	400	68	91	24	464
19/10/2018	834	380	72	90	18	491
6/11/2018	751	360	56	70	13	375
20/11/2018	851	380	44	61	12	378
5/12/2018	787	360	35	57	9	284
18/12/2018	680	340	32	55	6	214
10/1/2019	272	180	35	52	4	115
24/1/2019	345	200	32	50	6	129
7/2/2019	364	220	34	50	6	131
21/2/2019	351	200	34	52	5	135
8/3/2019	415	240	42	59	7	141
20/3/2019	462	260	43	59	6	145
5/4/2019	447	260	37	51	7	147
18/4/2019	483	280	42	57	7	151
7/5/2019	585	380	48	62	7	153
21/5/2019	637	420	51	62	7	181
11/6/2019	731	480	56	70	8	231
26/6/2019	791	460	55	71	9	219
9/7/2019	856	500	56	72	12	235
24/7/2019	823	440	60	78	12	227
2/8/2019	871	480	65	80	11	271
23/8/2019	739	480	57	73	9	275
10/9/2019	961	460	52	68	15	335
24/9/2019	785	380	49	62	14	281
8/10/2019	848	480	61	77	13	295
23/10/2019	725	400	55	68	10	277
7/11/2019	680	420	55	63	8	185
19/11/2019	570	380	46	61	9	171
9/12/2019	700	400	58	65	9	235
23/12/2019	655	380	57	63	9	197
MIN	**272**	**180**	**13**	**45**	**3**	**115**

MAX	1317	920	79	105	24	666
AVERAGE	743	386	44	65	10	274
STDVP (Τυπική απόκλιση)	237	126	14	13	4	124

Στον **Πίνακα 8.2** παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες, μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες σύμφωνα με τα δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Η μέση ελάχιστη θερμοκρασία στην περιοχή του Ρεθύμνου είναι 11.2.

Πίνακας 8.2 Μέσες θερμοκρασίες του μήνα Δεκέμβρη από επιλεγμένους σταθμούς.

Κρήτη	Μέση Θερμοκρασία (°C) Μηνιαία	Μέση Θερμοκρασία (°C) Μέγιστη	Μέση Θερμοκρασία (°C) Ελάχιστη
Ηράκλειο	13.7	17.0	10.8
Ιεράπετρα	14.5	17.7	10.6
Ρέθυμνο	**14.5**	**17.2**	**11.2**
Σητεία	13.8	17.0	11.1
Σούδα Χανιά	13.1	17.8	10.8
Τυμπάκι	13.2	17.5	9.2

Υπολογισμός ενεργειακού περιεχομένου των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης κατά προσέγγιση

Οι πίνακες 8.3. και 8.4 παρουσιάζουν τη μεθοδολογία υπολογισμού της πυκνότητας των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης που πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο (Πίνακας 8.3) υπολογίστηκε το μίγμα τροφοδοσίας (syngas-air) στη μηχανή εσωτερικής καύσης, θεωρώντας ότι η αναλογία air/syngas είναι 1:1 (Reed & Das, 1988) και γνωρίζοντας τα κύρια συστατικά του syngas και του αέρα.

Πίνακας 8.3 Υπολογισμός μίγματος τροφοδοσίας της μηχανής εσωτερικής καύσης.

Κύρια συστατικά syngas	Σύσταση syngas (%v/v) (Dogru, et al., 2002)	Σύσταση αέρα (%v/v) (Egorov & Karpushkin, 1988)	Μίγμα τροφοδοσίας 1:1 (%v/v)
H_2	11.0	0.0	5.50
CO	8.5	0.0	4.25
O_2	0.5	21	10.75
N_2	64.0	79	71.50
CO_2	13.0	0.0	6.50
H_20	3.0	0.0	1.50
Σύνολο	100.0	100.0	100.00

Στο δεύτερο στάδιο, υπολογίστηκε η πυκνότητα των καυσαερίων της μηχανής εσωτερικής καύσης. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

Οι υπολογισμοί του πίνακα 8.4. βασίστηκαν στην παραδοχή ότι το syngas είναι ιδανικό αέριο και ακολουθεί την καταστατική εξίσωση. Παρόλου που το νερό αποτελεί το

7% της σύστασης των καυσαερίων δεν συνυπολογίστηκε στον υπολογισμό της πυκνότητας των καυσαερίων, διότι δεν θεωρείται ιδανικό αέριο.

Αρχικά, κατά τη λειτουργία της μηχανής εσωτερικής καύσης λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω αντιδράσεις καύσης:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \qquad 8.1$$

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 \qquad 8.2$$

Έτσι, η σύσταση των καυσαερίων (Πίνακας 8.4) υπολογίστηκε από τη στοιχειομετρία των αντιδράσεων 8.1 και 8.2 για το μίγμα τροφοδοσίας του πίνακα 8.3.

Πίνακας 8.4 Υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίων της μηχανή εσωτερικής καύσης.

Κύρια συστατικά καυσαερίων	**Σύσταση καυσαερίων (%v/v)**	**Σύσταση καυσαερίων (%v/v) στο 100%**	**Μοριακό βάρος $\left(\frac{g}{mol}\right)$**	**Μάζα (g)**	**Σύσταση καυσαερίων (%w/w)**	**Κλάσμα μάζας**	**Πυκνότητα στους 400°C $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$**
H_2	0.0	0.0	2	0.0	0.0	0,0	0
CO	0.0	0.0	28	0.0	0.0	0,0	0
O_2	5.88	6.18	32	197.6	7.1	0.071	0.6
N_2	71.50	75.16	28	2104.6	75.2	0.752	0.5
CO_2	10.75	11.30	44	497.2	17.8	0.178	0.8
H_20	7.00	7.36	18	0.0	0.0	0.0	0
Σύνολο	95.13	100.00		2799.5	100.0	1.000	**0.56**

Θεωρώντας ότι η αναλογία των όγκων είναι ίδια με την αναλογία των moles, υπολογίστηκε από το γινόμενο του μοριακού βάρους του κάθε συστατικού και της σύστασης των καυσαερίων (%v/v) στο 100% η μάζα των συστατικών των καυσαερίων (%w/w). Τέλος, από το γινόμενο του κλάσματος μάζας και της πυκνότητας στους 400°C του κάθε συστατικού των καυσαερίων υπολογίστηκε η πυκνότητα των καυσαερίων ίση με **0.56 $\frac{kg}{m^3}$.**

Υπολογισμός ενεργειακού περιεχομένου της τέφρας κατά προσέγγιση

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των PSS διακρίνονται στον **πίνακα 8.5.**

Πίνακας 8.5 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των PSS (Gikas, 2014).

Παράμετρος (%)	**PSS** (Gikas, 2014)
Ολικός άνθρακας	45.8
Υδρογόνο	6.54
Οξυγόνο	40.1
Άζωτο	1.57
Θείο	0.22
Τέφρα	**5.79**

Το ενεργειακό περιεχόμενο της παραγόμενης τέφρας (ash) από τον αεριοποιητή καθοδικής ροής προσδιορίστηκε γνωρίζοντας τα εξής:

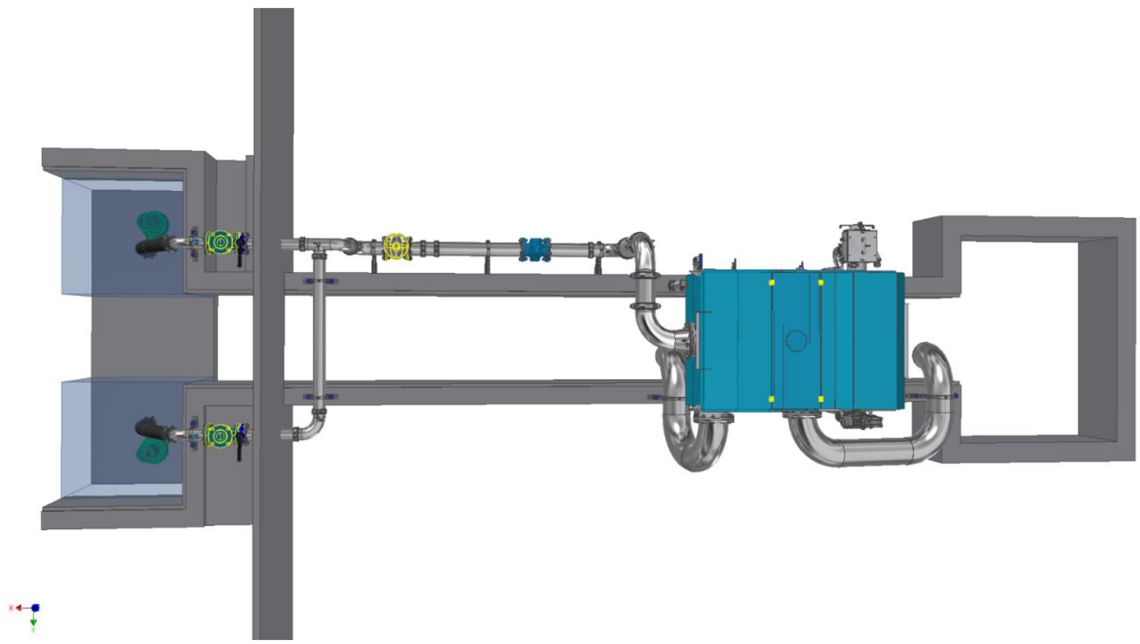
- $\dot{m}_{\substack{PSS \\ in\ gasifier}}$ = 22 $\frac{kg}{h}$
- **Ποσοστό τέφρας στην τροφοδοτούμενη βιομάζα:** 5.79% (Πίνακας 8.5)
- **Cp_{ash}** = 1.07 10^{-3} $\frac{MJ}{kg\ K}$ στους 499.85 ℃ (Gil-Lalaguna, et al., 2014)
- **T_f** = 400 ℃
- **T_i** = 1000 ℃

Έτσι, το ενεργειακό περιεχόμενο της παραγόμενης τέφρας υπολογίστηκε ως εξής:

$$\dot{Q}_{ash} = 22\ \frac{kg}{h} \cdot 0.0579 \cdot 1.07\ 10^{-3}\ \frac{MJ}{kg\ K} \cdot (400\text{-}1000)℃ = \mathbf{-0.818}\ \frac{\mathbf{MJ}}{\mathbf{h}} \text{ ή } \mathbf{-0.23}\ kW$$

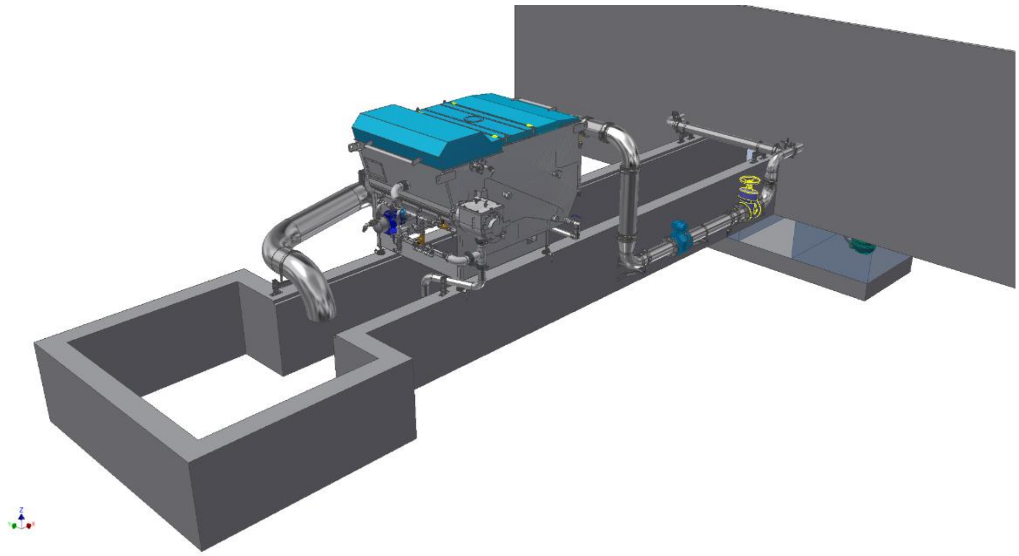
8.2 Παράρτημα εικόνων

Στην **εικόνα 8.1** παρουσιάζεται η κάτοψη της διάταξης μικροκοσκίνισης, η οποία κατασκευάστηκε και πρόκειται να εγκατασταθεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.



Εικόνα 8.1 Κάτοψη της διάταξης μικροκοσκίνισης.

Στην **εικόνα 8.2** παρουσιάζεται η πλαινή διάταξη της μικροκοσκίνισης, η οποία κατασκευάστηκε και πρόκειται να εγκατασταθεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.

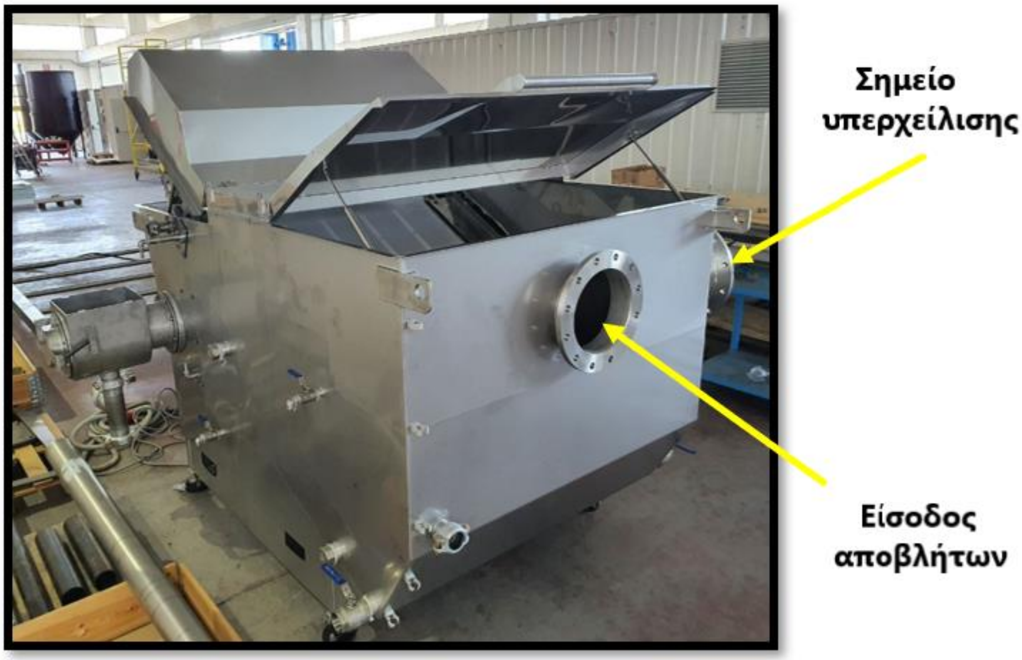


Εικόνα 8.1 Πλαινή όψη διάταξης μικροκοσκίνισης.

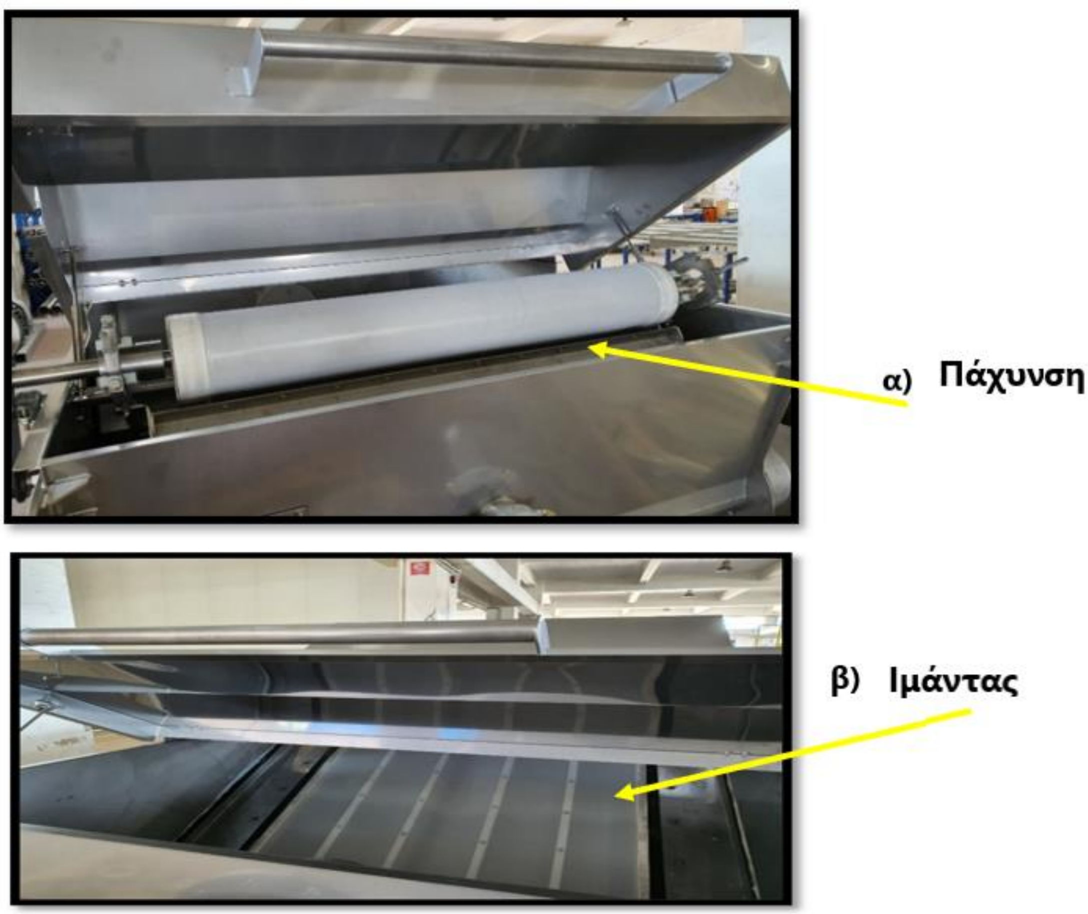
Στην **εικόνα 8.3** παρουσιάζεται η πιλοτική μικροεσχάρα.

Εικόνα 8.2 Μικροεσχάρα του LIFE B2E4SustWWTP.

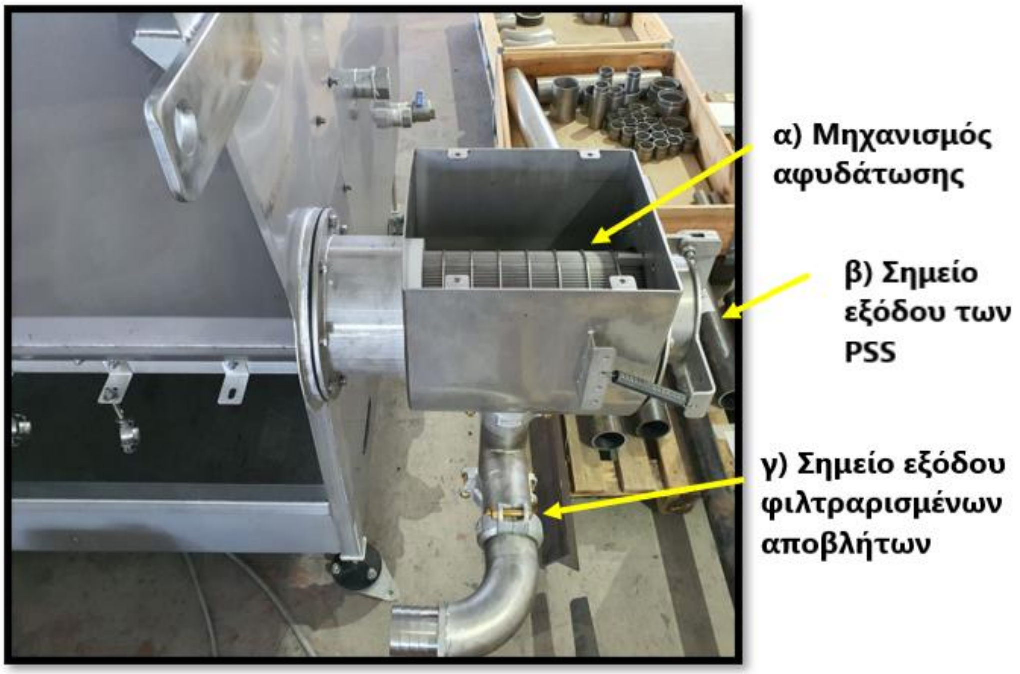
Στις **εικόνες 8.3, 8.4 και 8.5** παρουσιάζονται μερικά από βασικά τμήματα της πιλοτικής μικροεσχάρας.



Εικόνα 8.3 Σημείο εισόδου και σημείο εξόδου σε περίπτωση υπερχείλισης της μικροεσχάρας.



Εικόνα 8.4 Σχηματική απεικόνιση α) του μηχανισμού πάχυνσης της ιλύος και β) του ιμάντα της μικροεσχάρας.



Εικόνα 8.5 Σχηματική απεικόνιση του α) μηχανισμού αφυδάτωσης β) του σημείου εξόδου των PSS γ) του σημείου εξόδου των φιλτραρισμένων αποβλήτων της μικροεσχάρας.