



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

**ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΩΝ  
ΜΙΚΡΟΚΟΣΚΙΝΙΣΜΕΝΩΝ ΒΙΟΣΤΕΡΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΗΣ  
ΠΟΘΟΥΛΑΚΗ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ**

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Γκίκας Πέτρος, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Γιαννής Απόστολος, Επίκουρος Καθηγητής

Γεντεκάκης Ιωάννης, Καθηγητής

Χανιά, Φεβρουάριος, 2024

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

## Περίληψη

Αυξανόμενες ανησυχίες έχουν προκύψει σχετικά με την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας των λυμάτων σε συνδυασμό με την εκθετική αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Στα πλαίσια της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, προκύπτει ένα αναπόφευκτο υποπροϊόν, τα βιοστερεά ή αλλιώς η ιλύς λυμάτων, που απαιτεί επεξεργασία προτού διατεθεί στο περιβάλλον.

Η αναερόβια χώνευση, μια περίπλοκη βιολογική διεργασία που αναγνωρίζεται για τη χρησιμότητά της στην παραγωγή ενέργειας, εφαρμόζεται ως κύριο μέσο επεξεργασίας των βιοστερεών. Ωστόσο, μια εναλλακτική επιλογή για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τα βιοστερεά έγκειται στη θερμοχημική επεξεργασία τους. Διεργασίες όπως η πυρόλυση, η αεριοποίηση και η αποτέφρωση, που αξιοποιούν την αξιόλογη θερμογόνο δύναμη των βιοστερεών, αποτελούν εναλλακτικό τρόπο για την παραγωγή ενέργειας ή άλλων πολύτιμων προϊόντων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην τεχνολογία της αεριοποίησης βιοστερεών. Έμφαση δίνεται στους υπολογισμούς ισοζυγίων μάζας και ενέργειας με σκοπό την ολοκληρωμένη εξέταση του σχεδιασμού, της κατασκευής και των λειτουργικών πτυχών μίας μονάδας αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας που λειτουργεί εντός της ΔΕΥΑ Ρεθύμνου. Η μονάδα αυτή, η οποία αποτελεί στοιχείο ενός καινοτόμου πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας αποβλήτων και διαχείρισης βιοστερεών, διαθέτει δυναμικότητα 5.000 m<sup>3</sup>/d εισερχόμενου αποβλήτου. Το σύστημα χρησιμοποιεί μια σειρά από διαδοχικές διαδικασίες για το διαχωρισμό των βιοστερεών μέσω μικροκοσκίνισης, την ξήρανσή τους, την αεριοποίησή τους για τη δημιουργία αερίου σύνθεσης και, στη συνέχεια, τη χρήση μίας μηχανής εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ενεργειακές ανάγκες ολόκληρου του συστήματος καλύπτονται κατά ένα μεγάλο βαθμό από αυτή την παραγωγή ενέργειας.

Οι θεωρητικοί υπολογισμοί ισοζυγίων θερμικής ενέργειας δείχνουν ότι υπάρχει επάρκεια παραγωγής ενέργειας για την κάλυψη των απαιτήσεων της μονάδας. Ωστόσο, η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου ξηραντηρίου απαιτεί μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, με αποτέλεσμα να προκύπτει ελαφρά αρνητικό ισοζύγιο θερμικής ενέργειας. Βέβαια, το αποτέλεσμα προκύπτει θετικό με μικρές προσαρμογές σε μεταβλητές παραμέτρους, γεγονός που δείχνει τη δυνατότητα λειτουργίας της μονάδας θερμικά αυτόνομα.

**Λέξεις – κλειδιά:** υγρά απόβλητα, βιοστερεά, θερμοχημικές μέθοδοι, αεριοποίηση, παραγωγή ενέργειας.

## Abstract

Growing concerns have arisen about the effectiveness of wastewater treatment in combination with the exponential growth of the world population. In the context of wastewater treatment, it creates an unavoidable by-product, biosolids or sewage sludge, which requires treatment before it can be released into the environment.

Anaerobic digestion, a complex biological process recognised for its usefulness in energy production, is used as the main means of treating biosolids. However, an alternative option to address the environmental impact of biosolids is thermochemical treatment. Processes such as pyrolysis, gasification, and incineration, which exploit the considerable thermogenic potential of biosolids, are an alternative way of producing energy or other valuable products.

This thesis focuses on the technology of biosolids gasification. Emphasis is placed on mass and energy balance calculations to comprehensively examine the design, construction, and operational aspects of a gasification-energy production plant operating within the Rethymno WWTP. This plant, which is an element of an innovative pilot waste treatment and biosolids management system, has a capacity of 5,000 m<sup>3</sup>/d of incoming waste. The system uses a series of sequential processes to separate the biosolids through micro-screening, drying, and gasification to create synthesis gas and then use an internal combustion engine (ICE) to generate heat and electricity. The energy needs of the entire system are largely covered by this energy production.

The theoretical calculations of thermal energy balances show that there is sufficient energy production to meet the plant's requirements. However, the operating principle of this dryer requires higher amounts of energy, resulting in a slightly negative thermal energy balance. The result is, of course, positive with minor adjustments to variable parameters, which indicates the possibility of operating the plant in a thermally autonomous way.

**Keywords:** wastewater; biosolids; thermochemical methods; gasification; energy production.

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Πέτρο Γκίκα, για την εμπιστοσύνη και τη συνεργασία του καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γιαννή Απόστολο και τον Καθηγητή κ. Γεντεκάκη Ιωάννη που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής και να αξιολογήσουν αυτή την εργασία.

Την Δρ. Ανθούλα Μάναλη για την καθοδήγηση και την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε σε αυτή μου την προσπάθεια.

Και τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Μανώλη και Αιμιλία, στην αδερφή μου Ναταλία και στους φίλους μου Μαρία Α., Μιχαέλα, Μαρία Κ., Νικολέτα, Γεωργία, Δημήτρη και Κωστή, γιατί χωρίς αυτούς, δεν θα είχα καταφέρει τίποτα.

Ποθουλάκη Αικατερίνη  
Χανιά, Φεβρουάριος, 2024

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	2
Abstract .....	3
Ευχαριστίες.....	4
Κατάλογος Πινάκων .....	7
Κατάλογος Εικόνων .....	7
Κατάλογος Διαγραμμάτων .....	8
Κεφάλαιο 1: Επεξεργασία υγρών αποβλήτων και ιλύος .....	9
1.1 Εισαγωγή .....	9
1.2 Επεξεργασία υγρών αποβλήτων .....	10
1.2.1. Προ-επεξεργασία .....	10
1.2.2. Πρωτοβάθμια επεξεργασία .....	14
1.2.3. Δευτεροβάθμια επεξεργασία .....	15
1.2.4. Τριτοβάθμια επεξεργασία.....	17
1.3 Επεξεργασία ιλύος .....	19
1.3.1. Ομογενοποίηση – πάχυνση .....	20
1.3.2. Αναερόβια Χώνευση .....	21
1.3.3. Αφυδάτωση.....	22
1.3.4. Κομποστοποίηση .....	23
Κεφάλαιο 2: Θερμοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας ιλύος .....	25
2.1 Πυρόλυση.....	25
2.2 Αποτέφρωση .....	26
2.3 Αεριοποίηση.....	28
2.4 Σύγκριση των θερμοχημικών μεθόδων .....	29
Κεφάλαιο 3: Αεριοποίηση.....	33
3.1 Η τεχνολογία της αεριοποίησης .....	33
3.2 Οι κυριότεροι τύποι αεριοποιητών .....	35
3.2.1. Αεριοποιητής σταθερής κλίνης (fixed-bed) .....	35
3.2.2. Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized-bed) .....	36
3.2.3. Αεριοποιητής συμπαρασυρόμενης ροής (entrained-flow).....	37
3.3 Διαχείριση των παραπροϊόντων της αεριοποίησης .....	38
3.4 Επεξεργασία αερίου σύνθεσης .....	39
3.5 Εφαρμογές της αεριοποίησης στην διεθνή βιβλιογραφία .....	40
Κεφάλαιο 4: Σκοπός της εργασίας.....	44
Κεφάλαιο 5: Αεριοποίηση στα πλαίσια του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP .....	45
5.1 Περιγραφή - στόχοι - προσδοκώμενα αποτελέσματα του έργου .....	45

5.2 Σύστημα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας.....	46
5.2.1. Σχεδιασμός - περιγραφή .....	46
5.2.2. Εγκατάσταση - συναρμολόγηση – διασύνδεση.....	48
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα και συζήτηση .....	52
6.1 Μεθοδολογία υπολογισμών ισοζυγίων μάζας και ενέργειας.....	52
6.2 Αποτελέσματα των υπολογισμών και συζήτηση .....	55
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις .....	65
Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία .....	66
8.1 Ελληνική.....	66
8.2 Ξενόγλωσση.....	66
Κεφάλαιο 9: Παράρτημα.....	78

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1 Τα θετικά και τα αρνητικά χαρακτηριστικά της πυρόλυσης, της αποτέφρωσης και της αεριοποίησης. ....	31
Πίνακας 3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αεριοποιητή σταθερής κλίνης.....	36
Πίνακας 3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης. ....	37
Πίνακας 3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αεριοποιητή συμπαρασυρόμενης ροής. ....	38
Πίνακας 6.1 Οι εξισώσεις υπολογισμού της απαιτούμενης ενέργειας ( $Q_{total}$ ) για ξήρανση. ....	52
Πίνακας 6.2 Παράμετροι υπολογισμού για την ηλεκτρική και την θερμική ενέργεια. ....	53
Πίνακας 6.3 Η εξίσωση της συνολικής παρεχόμενης θερμικής ενέργειας. ....	54
Πίνακας 6.4 Υπολογισμοί των παραμέτρων των ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας. ....	55
Πίνακας 6.5 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας με περιεχόμενη υγρασία 65% αντί για 70%. ....	58
Πίνακας 6.6 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας με θερμογόνο δύναμη βιοστερεών 22,5 MJ/kg αντί για 21,5 MJ/kg. ....	59
Πίνακας 6.7 Υπολογισμοί των ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας με 15% απώλειες αντί για 20%. ....	60
Πίνακας 6.8 Υπολογισμοί ισοζυγίων ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας. ....	63
Πίνακας 9.1 Εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών, που δημοσιεύθηκαν εντός της περιόδου 2010-2022, με ρυθμό τροφοδοσίας $\geq 1\text{ kg/h}$ , με χρήση αέρα/ατμού/ $\text{O}_2$ ως μέσων αεριοποίησης. ....	78
Πίνακας 9.2 Εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών, δημοσιευμένες εντός της περιόδου 2010-2022, με ρυθμό τροφοδοσίας $< 1\text{ kg/h}$ , με χρήση αέρα/ατμού/ $\text{O}_2$ ως μέσων αεριοποίησης. ....	80
Πίνακας 9.3 Εφαρμογές της αεριοποίησης βιοστερεών, που δημοσιεύθηκαν κατά την περίοδο 2010-2022, με χρήση υπερκρίσιμου νερού ως μέσο αεριοποίησης. ....	83

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1 Η τεχνολογία της εσχάρωσης (Thajudeen, 2017). ....	10
Εικόνα 1.2 Χειροκαθαριζόμενη σχάρα (Hill, 2020). ....	11
Εικόνα 1.3 Μηχανικά καθαριζόμενη σχάρα (Thajudeen, 2017). ....	11
Εικόνα 1.4 Μικροκόσκινα εγκατεστημένα στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....	13
Εικόνα 1.5 Τύποι εξαμμωτών: σταθερής ροής, αεριζόμενος και τύπου δίνης (Γκίκας, 2020). ....	14
Εικόνα 1.6 Τρισδιάστατη απεικόνιση κυκλικής ΔΠΚ (Rifka, 2019). ....	15
Εικόνα 1.7 Δεξαμενή Αερισμού (Theobald, 2017). ....	16
Εικόνα 1.8 Δεξαμενή Χλωρίωσης (Eawag, 2013). ....	18
Εικόνα 1.9 Σύστημα Απολύμανσης με UV (Reynolds Culligan, 2019). ....	18
Εικόνα 1.10 Σύστημα Οζονισμού (Γκίκας, 2020). ....	19
Εικόνα 1.11 Αναερόβια Χώνευση (CivilDigital, 2013). ....	22
Εικόνα 1.12 Κάτοψη φυγόκεντρου αφυδάτωσης (Dolphin Centrifuge, 2022). ....	23
Εικόνα 1.13 Ταινιοφιλτρόπρεσα (Longzhong Machinery, 2015). ....	23
Εικόνα 1.14 Κομποστοποίηση ιλύος (Compost Turners, 2022). ....	24
Εικόνα 2.1 Κάτοψη αποτεφρωτήρα ρευστοποιημένης κλίνης (Suez, 2021). ....	28
Εικόνα 3.1 Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα είδη αεριοποιητών (H2 4U Pty Ltd., 2022). ....	35



Εικόνα 5.1 Η πιλοτική μονάδα που έχει κατασκευαστεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου για την προ επεξεργασία των λυμάτων και τη χρήση των βιοστερεών που παράγονται από το έργο LIFE B2E4sustainable-WWTP (Μάναλη, 2023). ....	46
Εικόνα 5.2 Το ξηραντήριο της μονάδας (Μάναλη, 2023). ....	49
Εικόνα 5.3 Το σύστημα αεριοποίησης του προγράμματος LIFE B2E4sustainable-WWTP. ....	50
Εικόνα 5.4 Το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος (Μάναλη, 2023). ....	51

## Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1 Διάγραμμα ροής διεργασιών πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας (Britannica, 2023). ....	17
Διάγραμμα 2.1 Τα προϊόντα της πυρόλυσης ιλύος και οι χρήσεις τους (Oraléου, et al., 2020). ....	26
Διάγραμμα 2.2 Τα 4 στάδια της αεριοποίησης βιομάζας ( Infinite Energy Pvt. Ltd., 2011). ....	29
Διάγραμμα 5.1 Η ροή των βιοστερεών, της θερμότητας και της ηλεκτρικής ενέργειας στο πρόγραμμα LIFE B2E4sustainable-WWTP. ....	45
Διάγραμμα 5.2 Διάγραμμα ροής του πιλοτικού συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (Pothoulaki, et al., 2022). ....	48

## Κεφάλαιο 1: Επεξεργασία υγρών αποβλήτων και ιλύος

### 1.1 Εισαγωγή

Τα υγρά απόβλητα μπορούν να οριστούν ως ένας συνδυασμός υγρών ή υδατομεταφερόμενων αποβλήτων που προέρχονται από οικίες, θεσμικές, εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μαζί με τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα και την απορροή της βροχής. Τα υγρά απόβλητα αποτελούνται από θρεπτικά συστατικά, οργανικά υλικά, παθογόνους μικροοργανισμούς και οξυγόνο. Ενδέχεται επίσης, να βρεθούν στα υγρά απόβλητα και τοξικές ουσίες (Sonune & Ghate, 2004).

Τα υγρά απόβλητα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις ομάδες με βάση τις πηγές προέλευσης τους (Sonune & Ghate, 2004):

- ❖ Οικιακά: Απόβλητα που παράγονται και απορρίπτονται από νοικοκυριά, εμπορικές εγκαταστάσεις και παρόμοιες εγκαταστάσεις.
- ❖ Βιομηχανικά: Απόβλητα που αποτελούνται κυρίως από βιομηχανικές απορρίψεις.
- ❖ Διήθηση/ροή: Εξωτερικό νερό που εισέρχεται στο σύστημα αποχέτευσης με έμμεσο ή άμεσο τρόπο, όπως μέσω διαρροών, ρωγμών ή πορώδους τοίχου. Η εισροή περιλαμβάνει το νερό της βροχής που εισέρχεται στο σύστημα αποχέτευσης μέσω συνδέσεων όμβριων υδάτων, αεραγωγών οροφής, θεμελίων και υπόγειων αποχετεύσεων ή μέσω καλυμμάτων φρεατίων.
- ❖ Νερό της βροχής: Απορροή που προκύπτει από πλημμύρες που προκαλούνται από βροχοπτώσεις.

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν προκύψει ορισμένα σημαντικά θέματα που έχουν προβληματίσει τόσο το ευρύ κοινό όσο και την επιστημονική κοινότητα. Ανάμεσα σε αυτά συγκαταλέγονται η ακραία αύξηση του πληθυσμού, η οποία αυξάνει την ανάγκη για διαχείριση υγρών αποβλήτων, καθώς και η έκταση των αστικών περιοχών, η οποία επηρεάζει πολύ περιοχές με περιορισμένες φυσικές πηγές νερού. Η ανάγκη για τη σωστή χρήση και ανακύκλωση του νερού έχει γίνει ουσιαστική προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της ανθρώπινης κοινότητας (Segneanu, et al., 2013).

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ακολουθεί συγκεκριμένα στάδια με στόχο την αποτελεσματική μεταποίησή τους. Κατά τη διαδικασία αυτή, παράγονται προϊόντα που είναι είτε επαναχρησιμοποιήσιμα είτε μπορούν να επιστραφούν στο περιβάλλον. Διασφαλίζεται η αποφυγή παθογόνων μικροοργανισμών ή βλαβερών ουσιών, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία (Metcalf & Eddy, 2003).

Η διαδικασία αυτή αναπτύσσεται σε διάφορες φάσεις, με κάθε μία να έχει διαφορετικό στόχο (Χρυσικόπουλος, 2018). Η προ-επεξεργασία περιλαμβάνει την ανύψωση, την απόσμηση, την εσχάρωση, την εξάμμωση, τη λιποσυλλογή και τη μέτρηση της παροχής των αποβλήτων. Ακολούθως, η πρωτοβάθμια φάση αφορά στην απομάκρυνση ενός ποσοστού των αιωρούμενων στερεών και οργανικών υλικών από τα υγρά απόβλητα. Η δευτεροβάθμια φάση στοχεύει στην απομάκρυνση των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών υλικών με τη χρήση χημικών και διήθησης. Τέλος, η τριτοβάθμια φάση αφορά στην απομάκρυνση των υπολειμμάτων αιωρούμενων στερεών, συνήθως μέσω διήθησης ή μικροσχάρας. Στην τριτοβάθμια επεξεργασία συμπεριλαμβάνεται επίσης η απολύμανση,

κατά την οποία πραγματοποιείται η αφαίρεση των θρεπτικών ουσιών (Metcalf & Eddy, 2003).

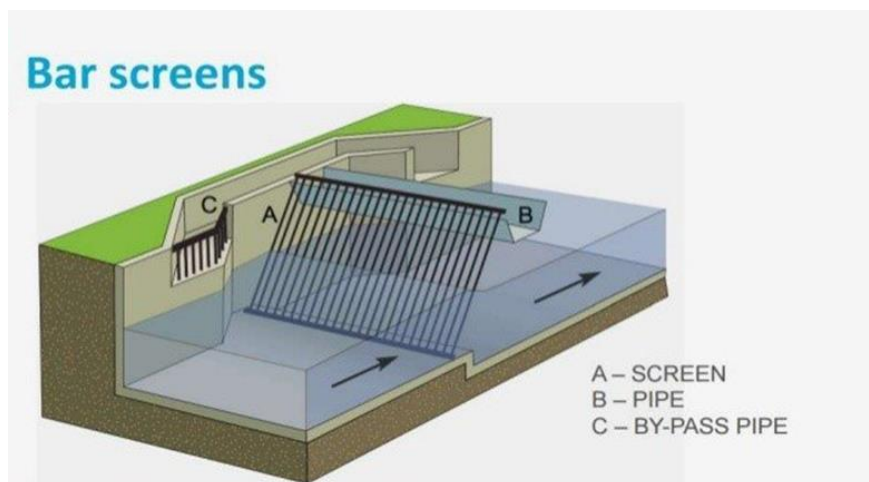
## 1.2 Επεξεργασία υγρών αποβλήτων

### 1.2.1. Προ-επεξεργασία

Η προ-επεξεργασία αποτελεί μια σειρά απαραίτητων σταδίων για την ομαλή ροή των διεργασιών σε μια Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ). Αρχικά, τα υγρά απόβλητα που προέρχονται από το υπόγειο αποχετευτικό δίκτυο χρειάζονται ανύψωση, συνήθως με τη χρήση αντλιών, προκειμένου να φτάσουν στο κατάλληλο ύψος για την έναρξη της επεξεργασίας. Επιπλέον, απαιτείται η απόσμηση, δηλαδή η απομάκρυνση των έντονων οσμών που παράγονται από τα λύματα, καθώς φέρουν έντονη δυσοσμία λόγω της αναερόβιας διαδικασίας αποσύνθεσης. Ο δυσάρεστος αέρας χρειάζεται να συλλεχθεί και να διευθετηθεί για περαιτέρω επεξεργασία (Χρυσικόπουλος, 2018).

Τα επόμενα στάδια της προ-επεξεργασίας αποσκοπούν στην απομάκρυνση ογκωδών αντικειμένων και μικρότερων σωματιδίων, προτού η ροή συνεχίσει προς τα επόμενα στάδια. Η διαδικασία της εσχάρωσης (Εικόνα 1.1) αποτελεί μια φυσική διεργασία, όπου τα ογκώδη αντικείμενα παγιδεύονται για να μην προχωρήσουν στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Η μη απομάκρυνσή τους μπορεί να οδηγήσει σε ζημιές στον μηχανολογικό εξοπλισμό, μείωση της απόδοσης των διεργασιών και αποφράξεις σε σωληνώσεις, αεριστήρες και αντλίες (Χρυσικόπουλος, 2018). Αυτό ενδέχεται να προκαλέσει αμφιβολίες για την αξιοπιστία της εγκατάστασης ή ρύπανση των υδάτων (Metcalf & Eddy, 2003).

Η επιλογή του σχεδιασμού της εσχάρωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πρώτον, την ανάγκη για απομάκρυνση των εσχαρισμάτων έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η ομαλή λειτουργία των υπόλοιπων σταδίων, την δυνητική εκπομπή δυσάρεστων οσμών και τον πιθανό κίνδυνο στην υγιεινή και ασφάλεια των εργαζόμενων, πιθανώς από την παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις για απομάκρυνση οργανικών ουσιών, μείωση της υγρασίας και οι δυνατότητες διάθεσης. Για την αφαίρεση των μικρότερων σωματιδίων, όπως άμμος, χώμα και άλλα ανόργανα σωματίδια, υπάρχει η διεργασία της εξάμμωσης. Τα παραπάνω είναι απαραίτητο να απομακρυνθούν διότι έτσι αποφεύγονται η καταβύθιση τους στους πυθμένες των δεξαμενών, η καταστροφή των αντλιών και αναδευτήρων και τέλος, η αύξηση της ιλύος που παράγεται (Metcalf & Eddy, 2003).



Εικόνα 1.1 Η τεχνολογία της εσχάρωσης (Thajudeen, 2017).

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις εσχάρωσης που χρησιμοποιούνται στο στάδιο προεπεξεργασίας. Δύο βασικές κατηγορίες σχαρών είναι οι χονδρές και οι λεπτές (Metcalf & Eddy, 2003). Οι σχάρες αυτές διακρίνονται με βάση το μέγεθος των οπών, με τις χονδρές να έχουν διαμέτρους ανοίγματος 6-150mm και τις λεπτές να έχουν μικρότερες από 6mm. Οι χονδρές σχάρες συνήθως χρησιμοποιούνται για την προστασία αντλιών, βαλβίδων, αγωγών και άλλων μηχανικών συστημάτων. Μπορούν να χωριστούν σε χειροκαθαριζόμενες (Εικόνα 1.2), που χρησιμοποιούνται συνήθως πριν από αντλίες σε μικρές εγκαταστάσεις, και μηχανικά καθαριζόμενες (Εικόνα 1.3), οι οποίες στοχεύουν στη μείωση των προβλημάτων λειτουργίας και συντήρησης, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση των εσχαρισμάτων.



*Εικόνα 1.2 Χειροκαθαριζόμενη σχάρα (Hill, 2020).*



*Εικόνα 1.3 Μηχανικά καθαριζόμενη σχάρα (Thajudeen, 2017).*

Οι λεπτές σχάρες έχουν διάφορες χρήσεις, ειδικά στην προ-επεξεργασία μετά τις χονδρές σχάρες με ράβδους. Στην πρωτοβάθμια επεξεργασία, χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν τους πρωτοβάθμιους διαιυγαστήρες και επίσης χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία υπερχειλίσεων από δίκτυα αποχετεύσεων. Συμβάλλουν επίσης στην απομάκρυνση στερεών από την πρωτοβάθμια ροή, προκειμένου να αποφευχθούν εμπόδια προτού φτάσουν στα βιολογικά φίλτρα. Αυτές οι διατάξεις είναι συνήθως στατικές, αποτελούμενες από μικρές ράβδους από ανοξείδωτο ατσάλι, με το προφίλ της ράβδου να ακολουθεί τη ροή. Οι σχάρες μπορεί να περιλαμβάνουν επίσης περιστρεφόμενο τύμπανο, όπου το μέσο της εσχάρωσης τοποθετείται πάνω σε έναν κύλινδρο που περιστρέφεται μέσα σε ένα κανάλι ροής. Επιπλέον, υπάρχουν τύποι σχαρών που λειτουργούν ως κλίμακες, αποτελούμενες από δύο λεπτές κάθετες πλάκες που τοποθετούνται μεταξύ τους σε διάταξη κλίμακας (Metcalf & Eddy, 2003).

Τα μικροκόσκινα (Εικόνα 1.4), ένας εναλλακτικός καινοτομικός τύπος σχαρών, λειτουργούν σε μεταβλητές χαμηλές ταχύτητες με συνεχή πλύση, σε συνθήκες βαρυτικής ροής. Τα στερεά που συλλέγονται υφίστανται αντίστροφο καθαρισμό που διευκολύνεται από ακροφύσια υψηλής πίεσης εντός μιας διάταξης συλλογής τοποθετημένης στο υψηλότερο σημείο του τυμπάνου. Αυτοί οι μικροσυσσωρευτές απομακρύνουν αποτελεσματικά τα αιωρούμενα στερεά από τα δευτερογενή λύματα και τις λίμνες σταθεροποίησης. Το Φίλτρο Περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filter, RBF), το Φίλτρο Περιστρεφόμενου Τυμπάνου (Rotating Drum Filter, RDF) και το Φίλτρο Δίσκου (Disc Filter, DF) είναι οι τρεις βασικοί τύποι μικροκόσκινων που χρησιμοποιούνται συνήθως (Lema & Martinez, 2017).

Το RBF αποτελείται από έναν υπό κλίση περιστρεφόμενο ιμάντα με λεπτό πλέγμα, σχεδιασμένο για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών από τα απόβλητα. Κατά τη διέλευση των λυμάτων από τον περιστρεφόμενο ιμάντα, τα αιωρούμενα στερεά προσκολλώνται στο πλέγμα. Ταυτόχρονα, ένα αυτόματο σύστημα καθαρισμού τοποθετείται στο άνω άκρο του φίλτρου, εξασφαλίζοντας τον συνεχή καθαρισμό του πλέγματος και την απομάκρυνση τυχόν συσσωρευμένων βιοστερεών. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τον ταυτόχρονο καθαρισμό και τη διήθηση των λυμάτων κατά την πλήρη περιστροφή του κόσκινου. Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων μικροδιαλογής που χρησιμοποιούν RBF εξαρτάται από παράγοντες όπως η κοκκομετρική κατανομή των εισερχόμενων λυμάτων, το μέγεθος του ανοίγματος των πόρων του φίλτρου (συνήθως κυμαίνεται από 50 έως 500  $\mu\text{m}$ , με τα 350  $\mu\text{m}$  να είναι το πιο συνηθισμένο για εφαρμογές πλήρους κλίμακας σε αστικά υγρά απόβλητα) και η εισερχόμενη παροχή (Lema & Martinez, 2017).

Στο RDF, η βαρυτική διέλευση των αποβλήτων μέσα σε ένα τύμπανο χρησιμοποιείται ως μηχανισμός για την εξαγωγή των αιωρούμενων στερεών από τα λύματα. Το RDF χαρακτηρίζεται από μέγεθος ανοίγματος πόρων που κυμαίνεται από 10 έως 500  $\mu\text{m}$ , με μεταβλητή επιφάνεια που κυμαίνεται μεταξύ 0,35 και 22,5  $\text{m}^2$ , ανάλογα με τις ειδικές λειτουργικές απαιτήσεις του. Κατάλληλο για ροές υγρών αποβλήτων από 2 έως 1.000 L/s, το RDF διευκολύνει τη μικροκοσκίνιση, όπου τα μεγαλύτερα στερεά συγκρατούνται στους πόρους του φίλτρου, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης διήθησης και τη συνακόλουθη αύξηση των επιπέδων νερού στο φίλτρο. Για τον περιορισμό αυτών των περιστάσεων, το RDF υποβάλλεται σε περιστροφή και ξεκινά μια διαδικασία πλύσης υψηλής πίεσης όταν η στάθμη του νερού φτάσει το προκαθορισμένο μέγιστο όριο (Lema & Martinez, 2017).

Στο πλαίσιο του συστήματος DF, η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών πραγματοποιείται μέσω της χρήσης ενός φίλτρου δίσκου. Συγκεκριμένα, τα απόβλητα



εισάγονται στο φίλτρο μέσω σωλήνων τροφοδοσίας ή μέσω ενός καναλιού που τροφοδοτείται με βαρύτητα. Η εσωτερική δομή του φίλτρου περιλαμβάνει διαδοχικούς περιστρεφόμενους κυκλικούς δίσκους, καθένας από τους οποίους είναι εξοπλισμένος με μικρά κόσκινα με ανοίγματα πόρων που κυμαίνονται από 20 έως 35  $\mu\text{m}$ . Πραγματοποιείται συνεχής παρακολούθηση της στάθμης των αποβλήτων και, όταν κρίνεται απαραίτητο, μεταδίδεται σήμα ενεργοποίησης για την έναρξη της περιστροφής των κυκλικών δίσκων και την ενεργοποίηση ενός συστήματος αντίστροφης πλύσης. Το επεξεργασμένο απόβλητο προχωρά κατά μήκος της γραμμής επεξεργασίας αποβλήτων, ενώ τα βιοστερεά που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας με μικροκοσκίνιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες εφαρμογές (Lema & Martinez, 2017) .



**Εικόνα 1.4 Μικροκόσκινα εγκατεστημένα στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.**

Οι βασικοί στόχοι σχεδιασμού των μικροκόσκινων περιλαμβάνουν τον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων στερεών όσον αφορά τη συγκέντρωση και τα επίπεδα συσσωμάτωσης. Η διασφάλιση της σωστής επιλογής των παραμέτρων σχεδιασμού είναι ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση της ικανότητας να ανταποκρίνεται στα μέγιστα υδραυλικά φορτία σε κρίσιμα σημεία και να εκπληρώνει τις λειτουργικές απαιτήσεις εντός του αναμενόμενου εύρους υδραυλικών και οργανικών φορτίων. Τέλος, η εγκατάσταση ρυθμίσεων καθαρισμού και αντίστροφης έκπλυσης είναι επιτακτική ανάγκη για τη διατήρηση της αποτελεσματικότητας της σχάρας (Metcalf & Eddy, 2003).

Μετά την αφαίρεση των μεγάλων αντικειμένων, ακολουθεί η εξάμμωση για την απομάκρυνση μικρότερων σωματιδίων όπως χαλίκια, άμμος, τέφρα και άλλα. Αυτή η διαδικασία τοποθετείται μεταξύ των σταδίων της εσχάρωσης και της πρωτοβάθμιας καθίζησης με σκοπό να προστατεύσει τον εξοπλισμό από φθορές, να μειώσει τη δημιουργία αποθέσεων σε αγωγούς και σωληνώσεις, και να αποτρέψει τον συχνό καθαρισμό των χωνευτών από πιθανή περίσσεια άμμου (Metcalf & Eddy, 2003).

Υπάρχουν τρεις τύποι εξαμμωτών σταθερής ροής (Εικόνα 1.5): οριζόντιες, ορθογώνιες και τετράγωνες δομές, οι οποίες σχεδιάζονται έτσι ώστε τα ελαφρύτερα σωματίδια να καθιζάνουν στον πυθμένα πριν εξέλθουν. Αν και χρησιμοποιούνται εδώ και χρόνια,

παραμένουν σε δεύτερο πλάνο λόγω της προτίμησης σε αεριζόμενους και τύπου δίνης. Οι αεριζόμενοι εξαμμωτές δημιουργούν ελικοειδή ροή με εισαγωγή αέρα, επιτρέποντας στα βαρύτερα σωματίδια να κινηθούν προς τα κάτω, ενώ τα ελαφρύτερα παραμένουν σε αιώρηση και περνούν μέσα από τη δομή. Τέλος, στους εξαμμωτές δίνης, η άμμος απομακρύνεται με ροή σειρών δίνης (Metcalf & Eddy, 2003).



**Εικόνα 1.5 Τύποι εξαμμωτών: σταθερής ροής, αεριζόμενος και τύπου δίνης (Γκίκας, 2020).**

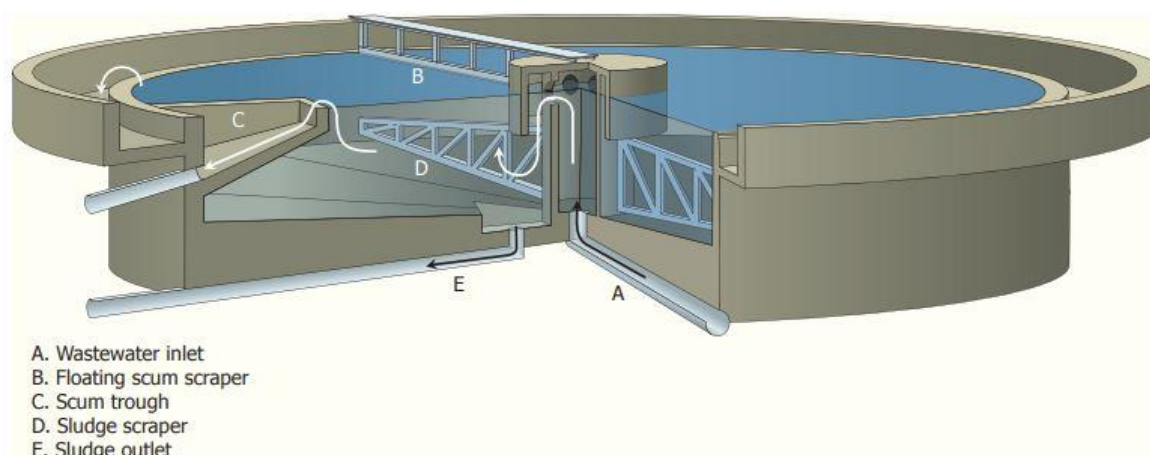
Παράλληλα ή πριν από την εξάμμωση πρέπει να γίνει και η λιποσυλλογή, η απομάκρυνση δηλαδή ελαιωδών και λιπαρών προσμίξεων που βρίσκονται στην επιφάνεια των λυμάτων για να μην προκαλέσουν προβλήματα στην βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων (Χρυσικόπουλος, 2018). Επιπροσθέτως, η εξισορρόπηση της ροής αναδεικνύεται ως κρίσιμο στάδιο πριν από πολλές διεργασίες, καθώς συμβάλλει στην πρόληψη πιθανών διακυμάνσεων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα. Αυτή η προληπτική προσέγγιση στη ροή συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης των επακόλουθων διεργασιών, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος και το μέγεθος των απαιτούμενων εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Μέσω αυτής της διαδικασίας, υπάρχει η δυνατότητα να επιτευχθεί μια σχεδόν σταθερή ροή κατά μήκος όλων των διεργασιών, προωθώντας έτσι τη συνοχή και την ομοιομορφία της διαδικασίας επεξεργασίας (Metcalf & Eddy, 2003).

### **1.2.2. Πρωτοβάθμια επεξεργασία**

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία (Διάγραμμα 1.1) αποτελεί τη θεμελιώδη διεργασία της καθίζησης, κατά την οποία πραγματοποιείται πρόσθετη απομάκρυνση των υλικών καθίζησης και των επιφανειακών στερεών. Κατά συνέπεια, παρατηρείται σημαντική μείωση της περιεκτικότητας σε αιωρούμενα στερεά, συμβάλλοντας σημαντικά στην αποτελεσματικότητα όλων των συναφών διεργασιών (Metcalf & Eddy, 2003). Συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα μείωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών κατά 50 έως 70%, του Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (Biochemical Oxygen Demand, BOD) κατά 25 έως 40% και των ελαίων και λιπών κατά 65% (Sonune & Ghate, 2004). Η φάση αυτή περιλαμβάνει την αποτελεσματική απομάκρυνση των μικρότερων σωματιδίων μέσω φυσικών και χημικών μηχανισμών καθίζησης.

Χρησιμεύει ως μέσο για την απομάκρυνση των βαρύτερων αιωρούμενων στερεών, επιτρέποντας στα απόβλητα να παραμείνουν αποκλειστικά στη Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (ΔΠΚ) για περίπου 2-6 ώρες. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, τα βαρύτερα σωματίδια έλκονται προς τα κάτω, σχηματίζοντας αυτό που είναι γνωστό ως πρωτοβάθμια ιλύς (Gandhi & Shah, 2021). Ωστόσο, τα λεπτότερα και κολλοειδή σωματίδια παραμένουν στο απόβλητο ακόμη και μετά τη διαδικασία φυσικής καθίζησης. Ως εκ τούτου, χημικά πηκτικά, όπως κροκιδωτικά, χλωριούχος σίδηρος, και θειικός σίδηρος, χρησιμοποιούνται στη διαδικασία χημικής καθίζησης για την εξάλειψη των μη καθιζόντων στερεών. Συγκεκριμένα, η προσθήκη ενός πηκτικού προκαλεί κροκίδωση, σχηματίζοντας συσσωματώματα που δεσμεύουν μικροσκοπικά σωματίδια τα οποία συνέχεια γίνονται βαρύτερα, καθιζάνοντας στον πυθμένα της ΔΠΚ.

Όταν εφαρμόζονται οι συνιστώμενες δόσεις πηκτικού, αυτή η διαδικασία επεξεργασίας αναμένεται να απομακρύνει το 45-65% του BOD και το 60-80% των αιωρούμενων στερεών (Gandhi & Shah, 2021). Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες ΔΠΚ που χρησιμοποιούνται ευρέως: μηχανικά επαγόμενες κυκλικές (Εικόνα 1.6) ή ορθογώνιες δεξαμενές. Η επιλογή καθορίζεται από τη χωρητικότητα της εγκατάστασης, την τήρηση των κανονισμών και των διατάξεων των τοπικών αρχών, τις τοπικές συνθήκες και την τεχνογνωσία και την κρίση του μηχανικού (Metcalf & Eddy, 2003).



**Εικόνα 1.6 Τρισδιάστατη απεικόνιση κυκλικής ΔΠΚ (Rifka, 2019).**

### **1.2.3. Δευτεροβάθμια επεξεργασία**

Η δευτεροβάθμια επεξεργασία των υγρών αποβλήτων (Διάγραμμα 1.1) είναι ένα κρίσιμο στάδιο στη διαδικασία επεξεργασίας των λυμάτων. Ενώ η πρωτοβάθμια επεξεργασία απομακρύνει αποτελεσματικά τους στερεούς ρύπους, η δευτεροβάθμια επεξεργασία επικεντρώνεται στην περαιτέρω μείωση της διαλυμένης και αιωρούμενης οργανικής ύλης, των θρεπτικών ουσιών και των παθογόνων μικροοργανισμών (Metcalf & Eddy, 2003). Η φάση αυτή περιλαμβάνει κυρίως βιολογικές διεργασίες που αποσκοπούν στη διάσπαση των βιοδιασπώμενων ουσιών (Gandhi & Shah, 2021). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη δευτεροβάθμια επεξεργασία περιλαμβάνουν τη διεργασία της ενεργού ιλύος, τα φίλτρα διαρροής, τους αντιδραστήρες διαδοχικής δέσμης και τους βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (Gandhi & Shah, 2021). Στη διαδικασία της ενεργού ιλύος, οι μικροοργανισμοί εισάγονται σε δεξαμενές αερισμού όπου καταναλώνουν οργανικούς ρύπους παρουσία οξυγόνου. Τα φίλτρα διαρροής χρησιμοποιούν πορώδη μέσα για να διευκολύνουν την ανάπτυξη μικροβιακών κοινοτήτων που αποικοδομούν την οργανική ύλη, καθώς τα λύματα



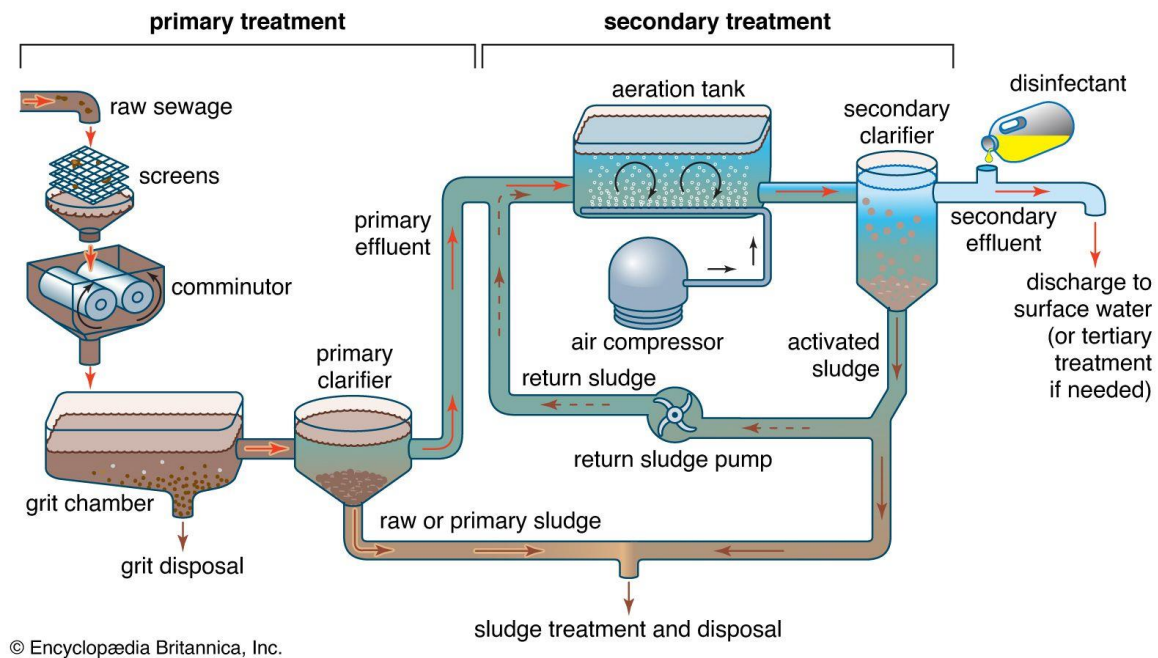
διαρρέουν. Οι αντιδραστήρες διαδοχικής δέσμης λειτουργούν σε κύκλους, εκτελώντας διάφορα στάδια επεξεργασίας σε μία μόνο δεξαμενή, ενώ οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών ενσωματώνουν βιολογικές διεργασίες με διήθηση μεμβρανών για ενισχυμένο καθαρισμό (Gandhi & Shah, 2021).

Στις διαδικασίες δευτεροβάθμιας επεξεργασίας, οι δεξαμενές αερισμού (Εικόνα 1.7) αποτελούν βασικό στοιχείο της βιολογικής επεξεργασίας. Τα λύματα αερίζονται σε αυτές τις δεξαμενές, γεγονός που δημιουργεί ένα περιβάλλον πλούσιο σε οξυγόνο, το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για τους μικροβιακούς πληθυσμούς. Υπό αυτές τις συνθήκες, μικροοργανισμοί όπως βακτήρια και πρωτόζωα ευδοκούν και αποικοδομούν τους οργανικούς ρύπους που βρίσκονται στα λύματα. Αυτά τα βακτήρια ενθαρρύνονται να πολλαπλασιάζονται με τη διαδικασία της ενεργού ιλύος, η οποία είναι μια δημοφιλής τεχνική που χρησιμοποιείται στις δεξαμενές αερισμού και διευκολύνει την αποτελεσματική διάσπαση των οργανικών υλικών (Gandhi & Shah, 2021).



**Εικόνα 1.7 Δεξαμενή Αερισμού (Theobald, 2017).**

Επιπλέον, η δευτεροβάθμια επεξεργασία μπορεί να περιλαμβάνει φυσικές διεργασίες όπως η διαύγαση και η διήθηση για την απομάκρυνση των εναπομεινάντων αιωρούμενων στερεών. Ο στόχος της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας είναι να μειωθεί σημαντικά η συγκέντρωση των ρύπων και των παθογόνων μικροοργανισμών στα λύματα, διασφαλίζοντας ότι το επεξεργασμένο νερό πληροί αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα πριν από την απόρριψή του πίσω στο περιβάλλον ή τη δυνητική επαναχρησιμοποίησή του για διάφορους σκοπούς (Metcalf & Eddy, 2003).



**Διάγραμμα 1.1 Διάγραμμα ροής διεργασιών πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας (Britannica, 2023).**

#### 1.2.4. Τριτοβάθμια επεξεργασία

Έπειτα, από την απομάκρυνση των περισσοτέρων στερεών και θρεπτικών, ακολουθεί η χημική επεξεργασία, ώστε να πραγματοποιηθεί περαιτέρω απορρύπανση των αποβλήτων (Gandhi & Shah, 2021). Μπορεί να επιτευχθεί με περίπλοκες μεθόδους όπως η διήθηση με μεμβράνες, η χημική κατακρήμνιση, οι Προηγμένες Διεργασίες Οξείδωσης (Advanced Oxidation Process, AOPs) και το φιλτράρισμα. Στη διήθηση χρησιμοποιούνται συχνά φίλτρα άμμου, ενεργού άνθρακα ή μεμβράνης, τα οποία εξαλείφουν αποτελεσματικά τα εναπομείναντα αιωρούμενα στερεά, μικροσκοπικά σωματίδια και ίχνη οργανικών ενώσεων που δεν απομακρύνθηκαν σε προηγούμενα στάδια επεξεργασίας (Gandhi & Shah, 2021).

Ακολούθως, τα τριτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα οδηγούνται είτε προς εναπόθεση σε έναν τελικό υδάτινο αποδέκτη, είτε προς περαιτέρω απολύμανση για επαναχρησιμοποίηση του νερού για άρδευση (ή σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις και ύδρευση). Η απολύμανση νερού γίνεται σε τέτοιο βαθμό ώστε να ικανοποιούνται οι τιμές των ποιοτικών χαρακτηριστικών που ορίζονται από την νομοθεσία κάθε χώρας (Χρυσικόπουλος, 2018).

Η απολύμανση αποσκοπεί στην εξάλειψη ή την αδρανοποίηση τυχόν βακτηρίων, ιών, παρασίτων και άλλων παθογόνων μικροοργανισμών που μπορεί να έχουν παραμείνει μετά από προηγούμενες φάσεις της επεξεργασίας. Με τη συγκεκριμένη διαδικασία, ο κίνδυνος ασθενειών που μεταδίδονται μέσω του νερού μειώνεται σημαντικά και το νερό που καταναλώνεται ή διοχετεύεται στο περιβάλλον εγγυάται ότι τηρεί τους αυστηρούς κανονισμούς υγείας και ασφάλειας (Metcalf & Eddy, 2003).

Οι τρεις πιο διαδομένοι τρόποι απολύμανσης περιγράφονται παρακάτω (Gandhi & Shah, 2021; Metcalf & Eddy, 2003):

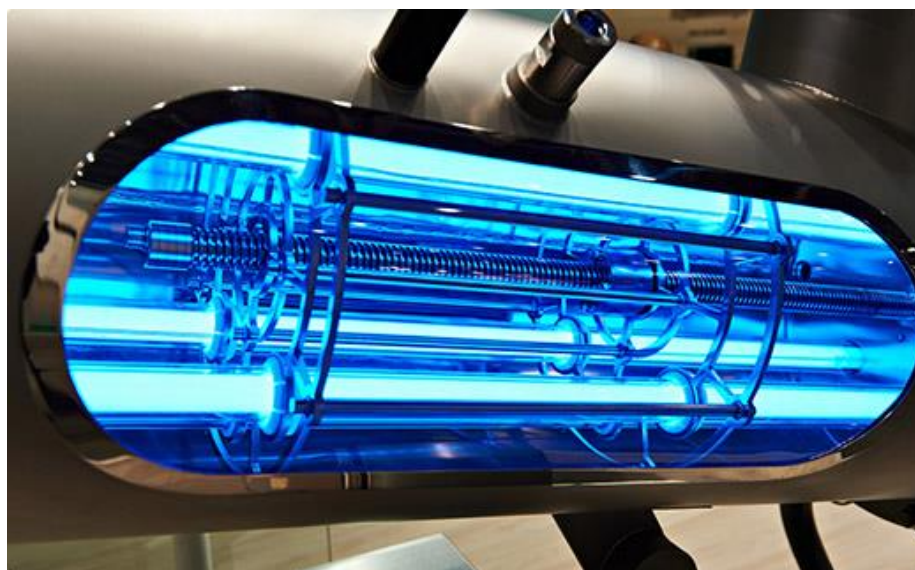
- ❖ **Χλωρίωση:** Η χλωρίωση (Εικόνα 1.8) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος απολύμανσης όπου ενώσεις χλωρίου, όπως αέριο χλώριο, υποχλωριώδες νάτριο

(χλωρίνη) ή χλωραμίνες, προστίθενται στο νερό. Το χλώριο εξοντώνει αποτελεσματικά ένα ευρύ φάσμα βακτηρίων, ιών και άλλων παθογόνων μικροοργανισμών διαταράσσοντας τις κυτταρικές τους δομές και τις μεταβολικές τους διαδικασίες. Χρησιμοποιείται συνήθως σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού και για την απολύμανση πισινών.



*Εικόνα 1.8 Δεξαμενή Χλωρίωσης (Eawag, 2013).*

- ❖ Ακτινοβολία: Η υπεριώδης (Ultraviolet, UV) ακτινοβολία (Εικόνα 1.9) είναι μια μη χημική μέθοδος απολύμανσης που χρησιμοποιεί υπεριώδες φως για την εξάλειψη των μικροοργανισμών. Όταν το νερό διέρχεται από έναν θάλαμο υπεριώδους ακτινοβολίας, η έκθεση στο υπεριώδες φως καταστρέφει το γενετικό υλικό των βακτηρίων, των ιών και των παρασίτων, καθιστώντας τα ανίκανα να αναπαραχθούν, καθιστώντας τα έτσι αβλαβή. Η απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία είναι αποτελεσματική έναντι ευρέος φάσματος παθογόνων μικροοργανισμών και χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους επεξεργασίας.



*Εικόνα 1.9 Σύστημα Απολύμανσης με UV (Reynolds Culligan, 2019).*



- ❖ Οζονισμός: Το όζον ( $O_3$ ) (Εικόνα 1.10) είναι ένας ισχυρός οξειδωτικός παράγοντας που χρησιμοποιείται για απολύμανση στην επεξεργασία νερού. Λειτουργεί διασπώντας τα κυτταρικά τοιχώματα των μικροοργανισμών και οξειδώνοντας τις οργανικές ενώσεις, καταστρέφοντας αποτελεσματικά τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Ο οζονισμός είναι γνωστός για την ταχεία δράση του και την αποτελεσματικότητά του στην εξάλειψη μιας ποικιλίας μολυσματικών παραγόντων.



*Εικόνα 1.10 Σύστημα Οζονισμού (Γκίκας, 2020).*

### 1.3 Επεξεργασία ιλύος

Η βιομάζα έρχεται με ταχείς ρυθμούς να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα, δεδομένου ότι μπορεί να παραχθεί σε τεράστιους αριθμούς και είναι ένα κλιματικά ουδέτερο καύσιμο (Premalatha, et al., 2009; Rulkens, 2008). Ένα ανεπιθύμητο παραπροϊόν της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που έχει αρκετά υψηλή θερμογόνο δύναμη είναι τα βιοστερεά. Η αναερόβια χώνευση, μια πολύπλοκη βιολογική διαδικασία που χρησιμοποιεί μεταξύ 50 και 60 % του οργανικού άνθρακα των βιοστερεών, είναι ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται συχνά για την παραγωγή ενέργειας (Oladejo, et al., 2019). Εναλλακτικά, τα βιοστερεά μπορούν να υποστούν θερμοχημική επεξεργασία για την παραγωγή ενέργειας ή άλλων χρήσιμων προϊόντων μέσω διεργασιών όπως η πυρόλυση, η αεριοποίηση ή η αποτέφρωση (Gao, et al., 2020).

Τα βιοστερεά, γνωστά και ως ιλύς λυμάτων, είναι τα ημιστερεά υπολείμματα που παράγονται ως το κύριο υποπροϊόν των διεργασιών πρωτοβάθμιας, δευτεροβάθμιας και τριτοβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Bodzek, et al., 1997; Edwards, et al., 2017; Raheem, et al., 2018). Τα βιοστερεά είναι ένα αρκετά ομοιογενές υλικό που αποτελείται κυρίως από οργανική ύλη (ξηρή βάση: 40% πρωτεΐνες, 10-25% λιπίδια, 14% υδατάνθρακες,

λιγνίνη και 30-50% τέφρα), ανόργανη ύλη και μικροοργανισμούς (Harrison, et al., 2006; Manara & Zabaniotou, 2012; Youssef, et al., 2011). Πολλοί παράγοντες, όπως το είδος των λυμάτων, το είδος της ΕΕΛ και το τοπικό κλίμα, επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά τους (Fytli & Zabaniotou, 2008; Oladejo, et al., 2019). Τα βιοστερεά μπορεί να περιλαμβάνουν παθογόνους μικροοργανισμούς, βαρέα μέταλλα και επίμονους οργανικούς ρύπους που είναι κακοί για το περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων (Rulkens, 2008).

Ανάλογα με την προέλευσή τους, τα βιοστερεά συχνά χωρίζονται σε πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και επεξεργασμένα (Pathak, et al., 2009; Syed-Hassan, et al., 2017; Verlicchi & Zambello, 2015). Αρχικά, τα καθιζάνοντα στερεά εξαλείφονται στους πρωτοβάθμιους διαυγαστήρες μετά την προ-επεξεργασία των ακατέργαστων λυμάτων (Oladejo, et al., 2019; Syed-Hassan, et al., 2017). Τα λίπη και τα έλαια ανεβαίνουν στην κορυφή κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας ως αποτέλεσμα των βαρυτικών διαφορών και στον πυθμένα των διαυγαστήρων σχηματίζεται μια ημιστερεά ιλύς, γνωστή ως πρωτοβάθμια (Oladejo, et al., 2019; Syed-Hassan, et al., 2017).

Περίπου το 3-7% των στερεών στα πρωτοβάθμια βιοστερεά είναι οργανικά, ενώ το υπόλοιπο 30% είναι ανόργανα (Pathak, et al., 2009; Verlicchi & Zambello, 2015). Τα υγρά απόβλητα υποβάλλονται σε αερόβια επεξεργασία σε δεξαμενή για να επιτραπεί η οξείδωση των υπολειπόμενων οργανικών υλικών μετά τη βασική επεξεργασία. Η δευτεροβάθμια καθίζηση απομακρύνει την παραγόμενη βιομάζα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία δευτεροβάθμιων βιοστερεών (Syed-Hassan, et al., 2017; Metcalf & Eddy, 2003). Τέλος, οι εξελιγμένες διαδικασίες επεξεργασίας παράγουν επεξεργασμένα βιοστερεά, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν, ως χωνευμένα, κομποστοποιημένα, αποξηραμένα, πυκνωμένα ή αφυδατωμένα (Cantinho, et al., 2016; Verlicchi & Zambello, 2015; Pathak, et al., 2009).

### 1.3.1. Ομογενοποίηση – πάχυνση

Η διαδικασία της επεξεργασίας ιλύος ξεκινάει με την ομογενοποίηση, δηλαδή την συγκέντρωση ιλύων από όλα τα στάδια επεξεργασίας και εξισορρόπηση της ροής ιλύος πριν η ιλύς οδηγηθεί στην πάχυνση παρέχοντας την με την ανάλογη σταθερή παροχή που χρειάζεται (Metcalf & Eddy, 2003). Η υψηλής πίεσης ομογενοποίηση έχει αναδειχθεί ως μια εξαιρετικά πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την επεξεργασία της ιλύος με στόχο να διευκολύνει την αναερόβια χώνευση. Αυτή η τεχνική συμβάλλει στη βελτίωση της παραγωγής βιοαερίου, το οποίο αποτελεί προϊόν της αναερόβιας χώνευσης (Nabi, et al., 2019).

Η διαδικασία της πάχυνσης, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης του όγκου της ιλύος, έχει σημαντικά δυνητικά οφέλη σε διάφορες διεργασίες, όπως η αναερόβια χώνευση, η αφυδάτωση, η ξήρανση και οι θερμοχημικές μέθοδοι. Η ενίσχυση αυτή επηρεάζει σημαντικά τη χωρητικότητα των δεξαμενών και του εξοπλισμού, την ποσότητα των απαιτούμενων χημικών πρόσθετων και την ποσότητα της απαιτούμενης θερμότητας.

Οι διάφοροι τύποι παχυντών περιλαμβάνουν την πάχυνση με καθίζηση, την πάχυνση με βαρύτητα, την πάχυνση με επίπλευση διαλυμένου αέρα και τη φυγοκεντρική πάχυνση (Metcalf & Eddy, 2003). Η πάχυνση με καθίζηση χρησιμοποιεί δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης όπου δημιουργείται ένα στρώμα ιλύος για τη συμπίεση των στερεών. Η ιλύς παραμένει εκεί για σημαντική διάρκεια (συνήθως 12 έως 24 ώρες) προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η συμπίεση. Η πάχυνση με βαρύτητα, που είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος,

διεξάγεται με παρόμοιο τρόπο με την καθίζηση, αλλά εδώ η ιλύς συμπυκνώνεται σε μια δεξαμενή και διαχωρίζεται από τον πυθμένα μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Στη μέθοδο πάχυνσης με επίπλευση διαλυμένου αέρα, εισάγεται αέρας υψηλής πίεσης σε ένα διάλυμα. Κατά την απελευθέρωση της πίεσης, ο αέρας σχηματίζει μικρές φυσαλίδες που ανεβάζουν την ιλύ προς την επιφάνεια για αφαίρεση.

Τέλος, η φυγοκεντρική πάχυνση συμπεριλαμβάνει την καθίζηση των σωματιδίων ιλύος με φυγόκεντρες δυνάμεις, με την κύρια μέθοδο να είναι η διάταξη περιστρεφόμενου τυμπάνου. Η πάχυνση με ιμάντα βαρύτητας περιλαμβάνει έναν ιμάντα που κινείται με τη βαρύτητα πάνω σε κυλίνδρους που λειτουργούν με κινητήρα μεταβλητών στροφών. Ο τελευταίος τύπος, η πάχυνση με περιστρεφόμενο τύμπανο, περιλαμβάνει ένα σύστημα που περιλαμβάνει πολυμερή τροφοδοσία και κυλινδρικά κόσκινα. Το σύστημα αυτό διευκολύνει την ανάμιξη του πολυμερούς με αραιωμένο πολτό, που εισέρχεται στο στάδιο της βελτίωσης. Η ιλύς κινείται προς το περιστρεφόμενο τύμπανο με κυλινδρικό κόσκινο, όπου πραγματοποιείται ο διαχωρισμός στερεών-υγρών. Συνοπτικά, η ποικιλία των μεθόδων πάχυνσης παρουσιάζει κάθε μία από αυτές μοναδικές προσεγγίσεις για τη μεταβολή της συνοχής της ιλύος, με σημαντικές επιπτώσεις σε πολλαπλές βιομηχανικές εφαρμογές και διεργασίες επεξεργασίας. (Metcalf & Eddy, 2003).

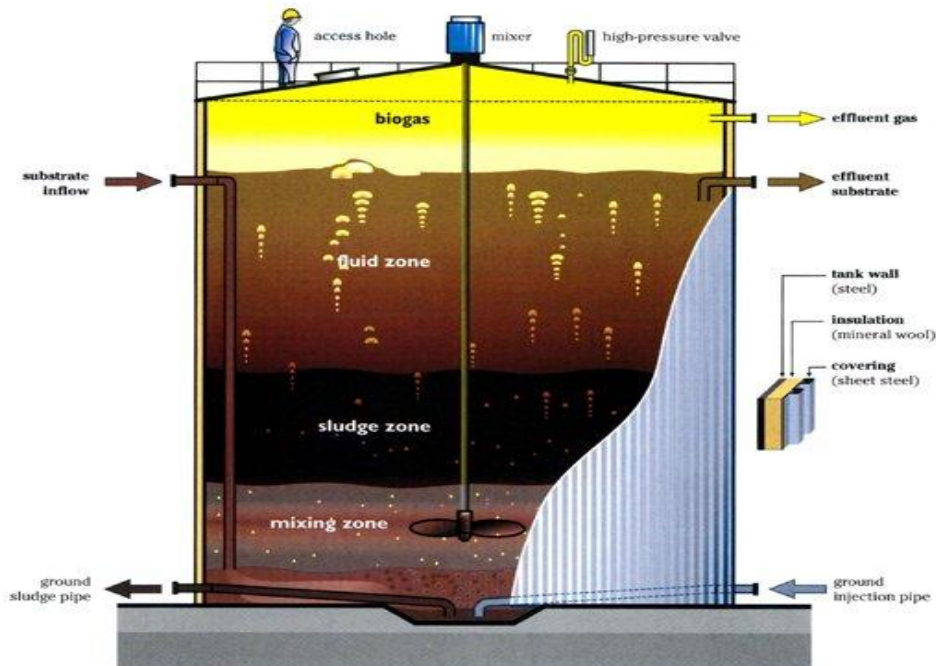
### 1.3.2. Αναερόβια Χώνευση

Η αναερόβια χώνευση (Εικόνα 1.11) είναι μία από τις παλαιότερες διεργασίες για την σταθεροποίηση της ιλύος (Metcalf & Eddy, 2003). Με φυσικό τρόπο γίνεται η διάσπαση των οργανικών συστατικών από μικροοργανισμούς απουσία αέρα, σταθεροποιείται η ιλύς και παράγεται βιοαέριο ( $\text{CO}_2$  &  $\text{CH}_4$ ) (Khawer, et al., 2022). Χρησιμοποιώντας βιοαέριο, μειώνεται και η ανάγκη για άλλου είδους ενέργεια και επίσης οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου είναι πολύ λιγότερες (Adar, et al., 2016). Το βιοαέριο απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία για να μπορεί να αξιοποιηθεί (Khawer, et al., 2022). Επίσης, το σταθεροποιημένο στερεό υλικό, που είναι ένα από τα τελικά προϊόντα της διεργασίας, είναι αξιοποιήσιμο ως λίπασμα (Adar, et al., 2016). Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι ότι ο χρόνος παραμονής είναι πολύ μεγάλος (10-30 ημέρες) για την μετατροπή μόνο του 30 με 60% των οργανικών ουσιών (Adar, et al., 2016).

Η αναερόβια χώνευση χωρίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια. Πρώτο στάδιο είναι η υδρόλυση, όπου οι αδιάλυτες οργανικές ουσίες και οι υψηλού μοριακού βάρους ουσίες (πολυσακχαρίτες, λιπίδια και πρωτεΐνες) ανάγονται σε αμινοξέα και λιπαρά οξέα (Nguyen, et al., 2021). Στο δεύτερο στάδιο, την οξεογένεση, οι ουσίες που προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο διαλύονται και παράγονται  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , πτητικά λιπαρά, οξέα και άλλα παραπροϊόντα από τα οξεογόνα βακτήρια. Το τρίτο στάδιο είναι η ακετογένεση, όπου οι αλκοόλες και τα ανώτερα οργανικά οξέα διασπώνται για να δημιουργηθούν  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  και  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ . Κατά την μεθανογένεση, το τελικό στάδιο, παράγεται  $\text{CH}_4$ .

Δύο τύποι μεθανογόνων βακτηρίων δημιουργούν αέριο  $\text{CH}_4$ . Χρησιμοποιώντας  $\text{H}_2$  και  $\text{CO}_2$ , το πρώτο βακτήριο διασπά το  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$  σε  $\text{CO}_2$  και  $\text{CH}_4$ , ενώ το δεύτερο παράγει μεθάνιο χρησιμοποιώντας υδρογόνο (δότης ηλεκτρονίων) και διοξείδιο του άνθρακα (δέκτης) (Nguyen, et al., 2021). Ανάλογα με την περιεκτικότητα των αποβλήτων σε στερεά, η αναερόβια χώνευση χωρίζεται σε στερεή ή υγρή. Η στερεή αφορά ιλύ που περιέχει παραπάνω από 15% στερεά, ενώ η υγρή ανάμεσα σε 0,5% και 15%. Το βιοαέριο που είναι το κύριο προϊόν της μεθόδου, θεωρείται πολύ θετικός παράγοντας για την μείωση του

κόστους διαχείρισης αποβλήτων. Μπορεί να αξιοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή θερμότητας, ενέργειας και ηλεκτρισμού. Το γεγονός ότι αποτελείται από 50-75% CH<sub>4</sub> και 25-50% CO<sub>2</sub>, το καθιστά αξιόλογη επιλογή για εναλλακτικό καύσιμο (Nguyen, et al., 2021).



**Εικόνα 1.11 Αναερόβια Χώνευση (CivilDigital, 2013).**

### 1.3.3. Αφυδάτωση

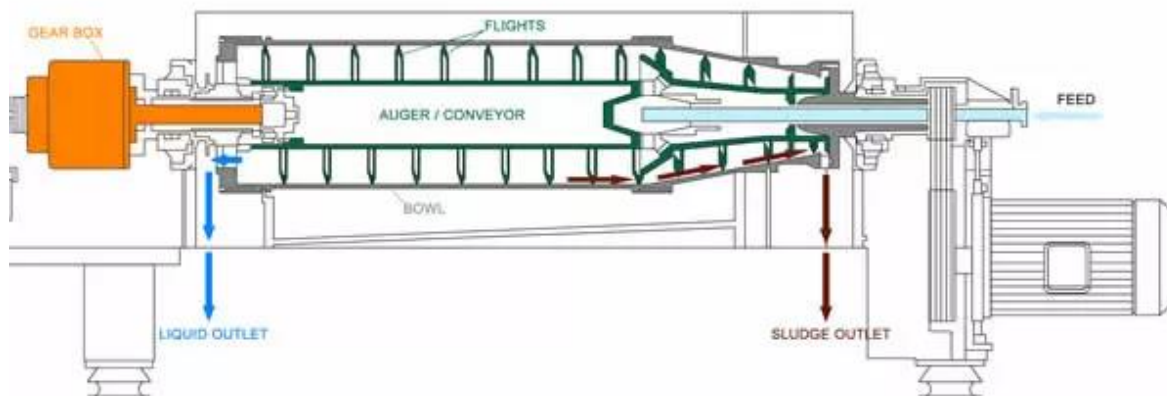
Η διαδικασία αφυδάτωσης αποσκοπεί στην απομάκρυνση σημαντικής ποσότητας υγρασίας από την ιλύ, κυρίως για να μειωθεί το κόστος διαχείρισης της ιλύος και των βιοστερεών στα τελικά στάδια πριν από τη διάθεση. Η αφυδάτωση είναι απαραίτητη πριν από την κομποστοποίηση για την αποφυγή πρόσθετων παραγόντων και, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, για την εξάλειψη των οσμών και την αποτροπή του να φτάσουν τα βιοστερεά στα στάδια αποσύνθεσης (Metcalf & Eddy, 2003). Αφού περάσει από τα στάδια της αφυδάτωσης και της ξήρανσης, η ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (Jiang, et al., 2023). Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται για ενέργεια, η αφυδατωμένη ιλύς παράγει λιγότερη θερμότητα από την ποσότητα που απαιτείται για ένα σύστημα ξήρανσης (Jiang, et al., 2023).

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την αφυδάτωση περιλαμβάνουν μηχανικές μεθόδους, οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Η φυγοκέντρωση (Εικόνα 1.12) περιλαμβάνει το διαχωρισμό υγρών με βάση τις διαφορές πυκνότητας, την πύκνωση της ιλύος ή την απομάκρυνση των στερεών. Οι δύο βασικοί τύποι είναι τα τύμπανα φυγοκέντρωσης στερεών και η φυγοκέντρωση υψηλών στερεών. Οι ταινιοφιλτρόπρεσες (Εικόνα 1.13), χρησιμοποιώντας τις αρχές της χημικής βελτίωσης, της αποστράγγισης με βαρύτητα και της μηχανικής πίεσης, αφυδατώνουν συνεχώς την ιλύ. Οι πρέσες φίλτρων απομακρύνουν την υγρασία της ιλύος υπό υψηλή πίεση (Metcalf & Eddy, 2003).

Ακόμη και μετά την αφυδάτωση, τα επίπεδα υγρασίας της ιλύος παραμένουν σχετικά υψηλά (>50%), απαιτώντας περαιτέρω ξήρανση για ειδικές εφαρμογές, όπως οι θερμοχημικές μέθοδοι. Η περαιτέρω μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία απαιτεί ξήρανση της ιλύος,



μια διαδικασία που περιλαμβάνει θέρμανση και απομάκρυνση της υγρασίας. Οι μέθοδοι ξήρανσης περιλαμβάνουν άμεσες, έμμεσες και συνδυασμένες διαδικασίες. Η ηλιακή ξήρανση χρησιμοποιείται περιστασιακά, αν και η αποτελεσματικότητά της ποικίλλει λόγω διαφόρων παραγόντων και συνθηκών, οδηγώντας ενδεχομένως σε παρατεταμένες διεργασίες (Rao, Wang, & Xu, 2022).



**Εικόνα 1.12 Κάτοψη φυγόκεντρου αφυδάτωσης (Dolphin Centrifuge, 2022).**



**Εικόνα 1.13 Ταινιοφιλτρόπρεσα (Longzhong Machinery, 2015).**

#### **1.3.4. Κομποστοποίηση**

Η διαδικασία της κομποστοποίησης αναδεικνύεται ως μία από τις αποτελεσματικότερες διαδικασίες για την επίτευξη σταθεροποίησης της ενεργού ιλύος με χαμηλή παρουσία οργανικών ρύπων. Τα προϊόντα που προκύπτουν από αυτήν τη διαδικασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εδαφοβελτιωτικά και λίπασμα, με τις επιπτώσεις της χρήσης της να περιλαμβάνουν τη βελτίωση της ποιότητας του εδάφους και την αύξηση των επιπέδων φωσφόρου, αζώτου και οργανικής ύλης (Jia, et al., 2023). Επιπλέον, η διαδικασία αυτή διασφαλίζει τη σταθεροποίηση της ενεργού ιλύος και επιτρέπει την ανάκτηση των θρεπτικών και οργανικών συστατικών. Περίπου το 20-30% των πτητικών στερεών



προϊόντων μετατρέπονται σε CO<sub>2</sub> και νερό, ενώ η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης φτάνει τα 50-70°C. Αυτό οδηγεί στην παστερίωση του κομπόστ και στην εξολόθρευση των εντερικών παθογόνων μικροοργανισμών (Metcalf & Eddy, 2003).

Η εφαρμογή αναερόβιων και αερόβιων συνθηκών στην κομποστοποίηση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, με σημαντικότερους την ημερήσια παραγωγή βιοστερεών, τη φύση των βιοστερεών και την προηγούμενη σταθεροποίηση που εφαρμόστηκε πριν την κομποστοποίηση (Metcalf & Eddy, 2003). Η χρήση διογκωτικών υλικών για την αύξηση της πρόσβασης σε οξυγόνο, καθώς και οι διαφορετικές τεχνικές παροχής αέρα, αερισμού και περιστροφής αποτελούν σημαντικές μεταβλητές (Chang, et al., 2023).

Η κομποστοποίηση αποτελεί έναν ευέλικτο και αποτελεσματικό τρόπο ανακύκλωσης, αποδίδοντας προϊόντα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση της υγείας του εδάφους και την ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών. Ωστόσο, η αποτελεσματική διαχείριση και η χρήση κατάλληλων τεχνικών, λαμβάνοντας υπόψη τα πολυάριθμα στοιχεία που επηρεάζουν τη διαδικασία ανακύκλωσης της ενεργού ιλύος, είναι απαραίτητα για την επιτυχία της διαδικασίας.



**Εικόνα 1.14 Κομποστοποίηση ιλύος (Compost Turners, 2022).**

## Κεφάλαιο 2: Θερμοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας ιλύος

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες συγκριτικές αναλύσεις θερμοχημικών διεργασιών μετατροπής. Σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες, οι εναλλακτικές τεχνολογίες έχουν γενικά βελτιώσει την αποδοτικότητα με ένα ευρύ φάσμα τελικών εφαρμογών. Σημαντικά οφέλη, όπως η παραγωγή ενέργειας, η γρήγορη επεξεργασία, τα προϊόντα υψηλής ποιότητας και η μεγάλη μείωση του όγκου των βιοστερεών είναι αυτά που τις καθιστούν μοναδικές (Raheem, et al., 2018; Xu & Lancaster, 2009).

Η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία της πρώτης ύλης (όπως τα βιοστερεά), η οποία απαιτεί ξήρανση ή αφυδάτωση, η απαίτηση για κλιμάκωση και καθαρισμό του παραγόμενου αερίου και η ανάγκη αποκατάστασης των ρύπων στα τελικά προϊόντα είναι τα κύρια εμπόδια που πρέπει να ξεπεράσουν οι θερμοχημικές μέθοδοι παρά τα οφέλη τους (Fytilli & Zabaniotou, 2008; Raheem, et al., 2018; Syed-Hassan, et al., 2017; Xu & Lancaster, 2009). Οι ισχύοντες αυστηροί κανονισμοί, η αυξανόμενη παραγωγή βιοστερεών, η περιορισμένη έκταση, το υψηλό ενεργειακό κόστος και οι ανησυχίες για την ασφάλεια του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας λόγω των επικίνδυνων ουσιών έχουν καταδείξει την αναποτελεσματικότητα των παραδοσιακών μεθόδων επεξεργασίας και διάθεσης των βιοστερεών (Lewis & Gattie, 2002; Syed-Hassan, et al., 2017).

Η εφαρμογή νέων, βιώσιμων και εναλλακτικών μεθόδων ευρέως για τη διαχείριση των βιοστερεών κρίνεται επειγόντως αναγκαία (Schaum, et al., 2016). Τα βιοστερεά θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για τη μείωση της ανισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας στις ΕΕΛ, καθώς είναι χρήσιμα για την ανάκτηση πόρων και την παραγωγή ενέργειας (Sansaniwal, et al., 2017; Tyagi & Lo, 2013). Είναι αξιοσημείωτο ότι τα βιοστερεά περιέχουν περίπου το ήμισυ του αρχικού ενεργειακού περιεχομένου των υγρών αποβλήτων (Cano, et al., 2015). Η θερμογόνο δύναμη των βιοστερεών, γνωστή και ως ανώτερη θερμογόνο δύναμη (Higher Heating Value, HHV), είναι ένας άλλος δείκτης του ενεργειακού τους δυναμικού. Ανάλογα με το είδος των βιοστερεών, οι μετρήσεις της τιμής αυτής κυμαίνονται από 11 έως 23 MJ/kg (ξηρή βάση) (Schaum, et al., 2016; Syed-Hassan, et al., 2017; Manali & Gikas, 2019).

Τα βιοστερεά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, καθώς η θερμογόνο δύναμή τους είναι παρόμοια με εκείνη πολλών καύσιμων πόρων, όπως το ξύλο (Syed-Hassan, et al., 2017; Manali & Gikas, 2019). Οι θερμοχημικές μέθοδοι είναι οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές για την αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των βιοστερεών και έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν πολύτιμα προϊόντα (Sansaniwal, et al., 2017; Syed-Hassan, et al., 2017).

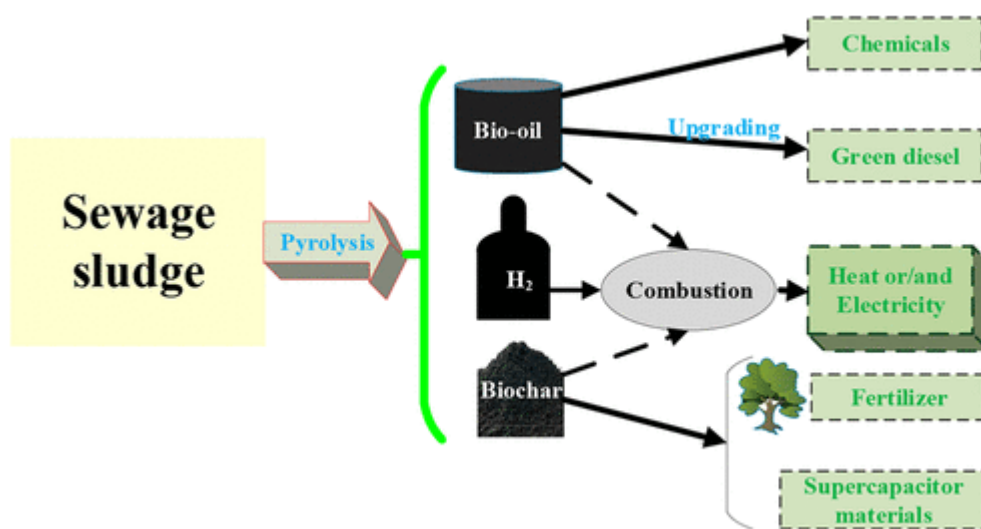
### 2.1 Πυρόλυση

Η πυρόλυση (Διάγραμμα 2.1) αναφέρεται στη θερμική μετατροπή της ιλύος σε θερμοκρασίες μεταξύ 350°C και 900°C υπό αναερόβιες συνθήκες (Raheem, et al., 2018). Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, παράγονται προϊόντα σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις: αέρια, υγρά και στερεά (Zahariou, et al., 2021). Το αέριο προϊόν απαρτίζεται κυρίως από H<sub>2</sub>, CO και άλλα συστατικά και μπορεί να λειτουργήσει ως καύσιμο, απελευθερώνοντας θερμική ενέργεια που ανέρχεται στα 1500 kJ/kg αερίου. Τα υγρά προϊόντα περιλαμβάνουν ένα υδατικό υγρό πυρόλυσης (Aqueous Pyrolysis Liquid, APL) με

απροσδιόριστη χρησιμότητα, καθώς και ένα ελαφρύ μη υδατικής φάσης, γνωστό ως έλαιο πυρόλυσης (Pyrolysis Oil, PYOil), το οποίο μπορεί να επεξεργαστεί και να χρησιμοποιηθεί ως υγρό καύσιμο. Όσον αφορά τα στερεά προϊόντα, το βιοεξανθράκωμα, που προκύπτει από την πυρόλυση, είναι ένας τύπος ξυλάνθρακα που μπορεί να αποτελέσει πηγή άνθρακα, να ενισχύσει τη φυτική ανάπτυξη και να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές (Liu, et al., 2021).

Η διαδικασία της πυρόλυσης διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: την ταχεία και την βραδεία πυρόλυση. Η ταχεία πυρόλυση επιτυγχάνεται με τη χρήση υψηλών ρυθμών θέρμανσης σε μέτριες θερμοκρασίες (περίπου 500 °C), σύντομες περιόδους παραμονής των αερίων (περίπου 2 δευτερόλεπτα) και γρήγορη απόσβεση των ατμών. Το κύριο αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι το υγρό πυρόλυσης, το οποίο χρησιμοποιείται τόσο ως καύσιμο όσο και ως πηγή πολύτιμων χημικών ενώσεων. Από την άλλη πλευρά, η βραδεία πυρόλυση συνήθως λαμβάνει χώρα σε αδρανή περιβάλλοντα (χωρίς παρουσία οξυγόνου) και χαρακτηρίζεται από σχετικά ήπιες θερμοκρασίες (από περίπου 350°C έως 600°C) και ρυθμούς θέρμανσης (Samolada & Zabaniotou, 2014).

Κάποια από τα κύρια πλεονεκτήματα που παρουσιάζονται είναι η μείωση του όγκου της ιλύος, η ελαχιστοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών και των βαρέων μετάλλων, καθώς και η αποφυγή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Liu, et al., 2021). Αναφέρεται επίσης η πιθανή χαμηλή εκπομπή CO<sub>2</sub> για τον ενεργειακό τομέα, καθιστώντας την τεχνολογία αυτή εφικτή για μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα όπως η ανάγκη αφυδάτωσης της ιλύος, οι περίπλοκες αντιδράσεις, το πρώιμο στάδιο στο οποίο βρίσκεται η τεχνολογία, και το υψηλό κόστος επενδυτικού κεφαλαίου (Zaharioiu, et al., 2021).



**Διάγραμμα 2.1 Τα προϊόντα της πυρόλυσης ιλύος και οι χρήσεις τους (Oraléou, et al., 2020).**

## 2.2 Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση ορίζεται ως μία θερμοχημική, οξειδωτική μέθοδος δια μέσου της οποίας παράγεται επαναχρησιμοποιούμενη ενέργεια (Hoang, et al., 2022). Επιτυγχάνει μείωση της μάζας της ιλύος και βοηθάει στην παραγωγή ενέργειας (Vilakazi, et al., 2023). Επίσης,

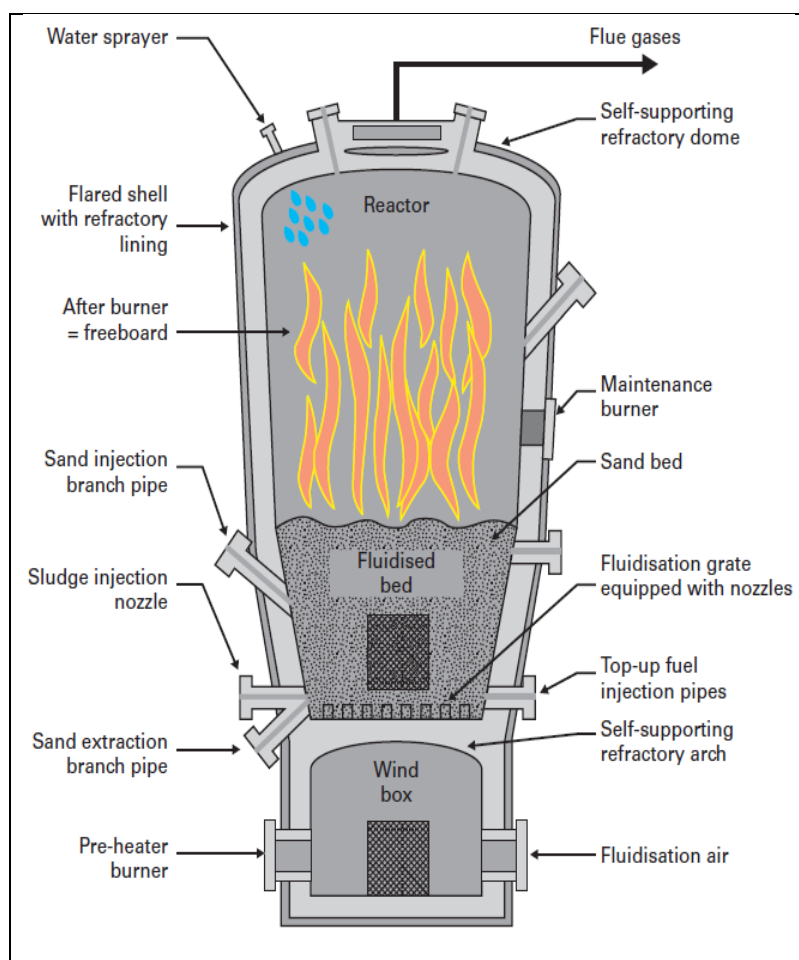
απομακρύνονται παθογόνοι μικροοργανισμοί και μικρορυπαντές. Η αποτέφρωση χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: ρευστοποιημένης κλίνης και μη ρευστοποιημένης κλίνης, με πιο διαδεδομένη να είναι η πρώτη (Chang, et al., 2022).

Στον αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης (Εικόνα 2.1), ο αέρας και η λάσπη εισάγονται από τον πυθμένα του αποτεφρωτήρα. Η ιλύς διαλύεται σε ένα ανερχόμενο ρεύμα αέρα με άμμο και τέφρα. Μια μικρή ποσότητα τέφρας μπορεί ενδεχομένως να παραμείνει εντός της κλίνης- ωστόσο, η πλειονότητα θα κινηθεί προς την κορυφή του αντιδραστήρα. Η απομάκρυνση γίνεται με τη χρήση πολλαπλού εξοπλισμού κυκλώνων. Ο χρόνος παραμονής των στερεών επηρεάζεται από τη ροή του αέρα και το σχεδιασμό του εξοπλισμού (Chang, et al., 2022). Υπάρχουν τρία διακριτά σχέδια αποτέφρωσης ρευστοποιημένης κλίνης: ρευστοποιημένη κλίνη με φυσαλίδες, περιστρεφόμενη ρευστοποιημένη κλίνη και ρευστοποιημένη κλίνη εξωτερικής κυκλοφορίας. Κάθε σχεδιασμός διαθέτει μοναδικά χαρακτηριστικά, που διέπουν τη συμπεριφορά της ιλύος και την κίνηση των στερεών μέσα στο σύστημα του αντιδραστήρα.

Ο αποτεφρωτήρας μη ρευστοποιημένης κλίνης περιλαμβάνει πολλαπλές εστίες, οι οποίες διαθέτουν ένα κατακόρυφο κυλινδρικό πυρίμαχο κέλυφος με περιστρεφόμενο άξονα τοποθετημένο στο κέντρο του. Η λάσπη εισέρχεται από την κορυφή και κινείται προς τα κάτω, προωθούμενη από τον περιστρεφόμενο άξονα. Τα μικρά σωματίδια ταξιδεύουν με τα αέρια καύσης και απομακρύνονται στο σύστημα καθαρισμού αερίων όταν εισάγεται αέρας από κάτω. Η τέφρα από τον πυθμένα απομακρύνεται από την λάσπη με την κίνησή της από την πλευρά εισόδου στην αντίθετη πλευρά χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό κεκλιμένης σχάρας που χρησιμοποιείται στους αποτεφρωτήρες με βαθμιδωτή σχάρα (Chang, et al., 2022).

Για να επιτευχθεί πλήρης καύση, ο πρωτογενής αέρας παρέχεται μέσω της σχάρας από κάτω, ενώ ο δευτερογενής αέρας παρέχεται μέσω ακροφυσίων που είναι τοποθετημένα πάνω από τη σχάρα. Ο πρωτογενής αέρας ξεκινά τη διαδικασία καύσης παρέχοντας το αρχικό απαιτούμενο οξυγόνο για την ανάφλεξη, ενώ ο δευτερογενής αέρας εισάγεται αργότερα για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της καύσης και τη μείωση της παρουσίας ρύπων στα εκπεμπόμενα αέρια (Li, 2015). Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει τον αποτελεσματικό έλεγχο της καύσης και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας αποτέφρωσης εντός της δομής του αποτεφρωτήρα μη ρευστοποιημένης κλίνης (Chang, et al., 2022).

Η ιλύς περνάει από το στάδιο της αφυδάτωσης, η υγρασία ωστόσο παραμένει σε υψηλά ποσοστά (80-85 wt.%), και συνεπώς απαιτείται επιπλέον ξήρανση, ώστε τα επίπεδα υγρασίας να μειωθούν σε 10-30 wt.% (Liang, et al., 2021). Ακολουθεί η αποτέφρωση σε θερμοκρασίες 750-950 °C. Η επιλογή θερμοκρασίας εξαρτάται από το είδος του κλιβάνου. Η διαδικασία της αποτέφρωσης παράγει CO<sub>2</sub> ως κύριο αέριο μαζί με άλλα αέρια (όπως NO<sub>x</sub>) (Hoang, et al., 2022). Επίσης, παράγονται τέφρα πυθμένα, ιπτάμενη τέφρα και θερμότητα. Η τέφρα που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη γεωργία, αν οι ποσότητες σε ρύπους πληρούν τα νομοθετικά όρια. Είναι σημαντικό να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ποσότητα των βαρέων μετάλλων, η οποία αν είναι μεγάλη μπορεί να είναι καταστροφική και σε αρκετές περιπτώσεις χρειάζεται επιπλέον επεξεργασία (Hušek, et al., 2022).

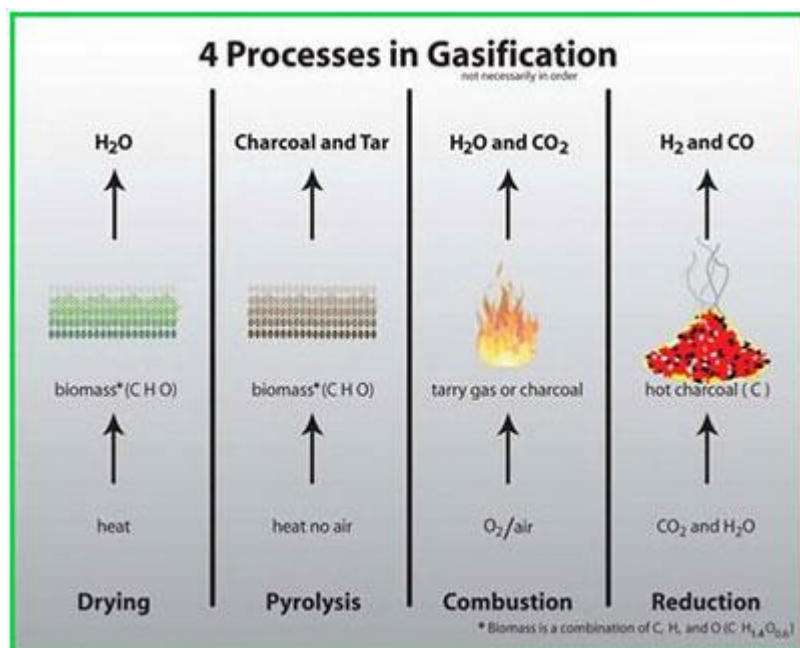


**Εικόνα 2.1 Κάτοψη αποτεφρωτήρα ρευστοποιημένης κλίνης (Suez, 2021).**

## 2.3 Αεριοποίηση

Η διεργασία της αεριοποίησης (Διάγραμμα 2.3) είναι η μετατροπή ξηραμένης ή αφυδατωμένης ιλύος σε ένα εύφλεκτο αέριο, το αέριο σύνθεσης, το οποίο αποτελείται κυρίως από υδρογόνο ( $H_2$ ), μονοξείδιο του άνθρακα ( $CO$ ), διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) και μεθάνιο ( $CH_4$ ) (Raheem, et al., 2018). Αυτό συμβαίνει μέσω μερικής οξείδωσης, σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσία ενός μέσου αεριοποίησης (αέρα,  $O_2$ , ατμός, υπερκρίσιμο νερό, πλάσμα ή υδρογόνο). Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση της διεργασίας, πρέπει να χρησιμοποιηθεί σημαντική ποσότητα ενέργειας για την ξήρανση της ιλύος, μειώνοντας την περιεκτικότητα σε υγρασία σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα - σίγουρα κάτω από 35%, και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και κάτω από 20%. Πριν από τη χρήση του, το αέριο σύνθεσης πρέπει να καθαριστεί διεξοδικά για να αποφευχθεί η διάβρωση και η δημιουργία προβλημάτων στο περιβάλλον και στην δημόσια υγεία. Μεταξύ των πολλών πλεονεκτημάτων της αεριοποίησης είναι η υψηλή ανάκτηση ενέργειας (Raheem, et al., 2018), η έλλειψη ανάγκης για επιπλέον καύσιμα κατά τη λειτουργία και η φιλικότητα προς το περιβάλλον (Samolada & Zabaniotou, 2014). Στο κεφάλαιο 3 θα εξεταστεί διεξοδικά η διαδικασία της αεριοποίησης.





**Διάγραμμα 2.2 Τα 4 στάδια της αεριοποίησης βιομάζας ( Infinite Energy Pvt. Ltd., 2011).**

## 2.4 Σύγκριση των θερμοχημικών μεθόδων

Οι θερμοχημικές μέθοδοι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Η μείωση του όγκου της ιλύος, καθώς και η απομάκρυνση τοξικών οργανικών ενώσεων κι η ανάκτηση ενέργειας καθιστούν τις διεργασίες αυτές ως αρκετά αποδοτικές (Raheem, et al., 2018; Xu & Lancaster, 2009). Ανεξάρτητα από τα πλεονεκτήματά τους, οι θερμοχημικές διεργασίες αντιμετωπίζουν προκλήσεις, κυρίως λόγω της υψηλής περιεκτικότητας της πρώτης ύλης σε υγρασία (π.χ. βιοστερεά), η οποία απαιτεί αφυδάτωση ή ξήρανση, την ανάγκη για την επεξεργασία και τον καθαρισμό του παραγόμενου αερίου και την αποκατάσταση των ρύπων στα τελικά προϊόντα (Fyttili & Zabaniotou, 2008; Raheem, et al., 2018; Syed-Hassan, et al., 2017; Xu & Lancaster, 2009).

Οι θερμοχημικές μέθοδοι θεωρούνται εναλλακτικές και ικανοποιητικές λύσεις για τη διαχείριση της βιομάζας, καθώς μειώνουν τον όγκο της ιλύος. Από τις τρεις βασικές θερμοχημικές μεθόδους - πυρόλυση, αποτέφρωση και αεριοποίηση - προκύπτει η δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας και παραγωγής χρήσιμων προϊόντων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για διαφορετικές λειτουργίες (Zaharioiu, et al., 2021).

Η διαδικασία της πυρόλυσης μετατρέπει την ιλύ σε βιοεξανθράκωμα, βιοέλαιο και αέριο υπό αδρανείς συνθήκες. Τα προϊόντα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάκτηση ενέργειας και υλικών, παρουσιάζοντας πολλά υποσχόμενες δυνατότητες. Τα βασικά πλεονεκτήματα της πυρόλυσης περιλαμβάνουν τη μείωση του όγκου της ιλύος, την παραγωγή χρήσιμων αερίων, υγρών καυσίμων και στερεών υλικών. Επιπλέον, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με την αποτέφρωση λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών και της έλλειψης οξυγόνου (Raheem, et al., 2018). Επιπροσθέτως, η πυρόλυση απενεργοποιεί τα γονίδια ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά. Αποτελεί μια μοναδική θερμοχημική διαδικασία που δεν περιλαμβάνει καύση και αναγνωρίζεται ως διαδικασία μηδενικών αποβλήτων (Raheem, et al., 2018). Ωστόσο, προκύπτουν ανησυχίες σχετικά με την ανάγκη αφυδάτωσης και ξήρανσης της ιλύος, ενώ

ορισμένα απόβλητα μπορεί να μην είναι κατάλληλα για επεξεργασία. Ο έλεγχος των ρύπων όπως το CO και το CO<sub>2</sub>, καθώς και η γενική ατμοσφαιρική ρύπανση, απαιτεί περιορισμένη και δαπανηρή διαχείριση (Raheem, et al., 2018).

Η αποτέφρωση, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει την καύση της ιλύος σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και, όπως και η πυρόλυση, χρησιμοποιείται για την ανάκτηση ενέργειας (Adar, et al., 2016). Πρόκειται για μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία (Liu, et al., 2020) ωστόσο υπάρχει ανεπαρκής νομοθεσία (Adar, et al., 2016). Η οργανική ύλη εξαλείφεται σχεδόν εξ ολοκλήρου, τα παθογόνα και οι τοξικές ενώσεις καταστρέφονται κατά 70%-90% (Adar, et al., 2016); Zaharioiu, et al., 2021). Με την αποτέφρωση, υπάρχει η δυνατότητα μείωσης του όγκου της ιλύος έως και 90% (Samolada & Zabaniotou, 2014), ενώ οι στάχτες που προκύπτουν από την καύση μπορούν να αξιοποιηθούν. Οι δυσάρεστες οσμές μειώνονται σημαντικά και όσον αφορά τους ρύπους του θερμοκηπίου, οι εκπομπές αερίων ελαχιστοποιούνται και υπάρχουν συστήματα ελέγχου της ρύπανσης. Η ανάγκη για χώρους υγειονομικής ταφής μειώνεται κατά 90-95% (Adar, et al., 2016). Στόχος της αποτέφρωσης, όπως και άλλων θερμοχημικών μεθόδων, είναι η μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων (Adar, et al., 2016). Επιδεικνύει ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση, παράγοντας 0,85 MW h/y ανά τόνο αποβλήτων (Adar, et al., 2016).

Ωστόσο, σε αντίθεση με την πυρόλυση, η αποτέφρωση παράγει σημαντικά απόβλητα που απαιτούν πρόσθετη επεξεργασία (Adar, et al., 2016; Samolada & Zabaniotou, 2014). Προκύπτουν προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, διοξίνες και φουράνια) που οδηγούν σε περιβαλλοντικές ανησυχίες (Adar, et al., 2016; Samolada & Zabaniotou, 2014). Παρά τα συστήματα ελέγχου της ρύπανσης, η τήρηση των περιβαλλοντικών πρωτοκόλλων είναι δαπανηρή (Adar, et al., 2016). Η προ-επεξεργασία, όπως η αφυδάτωση ή η ξήρανση, είναι απαραίτητη για την αποτελεσματικότητα, θέτοντας προκλήσεις με ετερογενή απόβλητα για ομοιόμορφες πρώτες ύλες (Adar, et al., 2016). Η αποτέφρωση δεν μπορεί να είναι οικονομικά βιώσιμη για εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας (Samolada & Zabaniotou, 2014). Παράγει εκπομπές χλωριωμένων χημικών ουσιών και αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>). Η αυξανόμενη ζήτηση για καθαρισμό των καυσαερίων οδηγεί σε υψηλό κόστος. Τα προβλήματα με τη διάθεση της τέφρας (βαρέα μέταλλα) καθιστούν τη διαδικασία αποτέφρωσης δυνητικά ενεργειακά μη αποδοτική (Samolada & Zabaniotou, 2014).

Η αεριοποίηση της ιλύος είναι μια πολλά υποσχόμενη ολοκληρωμένη τεχνολογία με πλεονεκτήματα στη διαχείριση των αποβλήτων και την ανάκτηση ενέργειας (Adar, et al., 2016; Samolada & Zabaniotou, 2014). Σημαντικό πλεονέκτημα είναι η υψηλότερη αποδοτικότητά της στην εξαγωγή ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους, επιτρέποντας την παραγωγή αερίου σύνθεσης για συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας ή ως καύσιμο δεύτερης γενιάς (Raheem, et al., 2018; Samolada & Zabaniotou, 2014). Η τεχνολογία αυτή επιδεικνύει μειωμένες περιβαλλοντικές εκπομπές με τη διαχείριση των περισσότερων ανόργανων ενώσεων της ιλύος, συμβάλλοντας στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (Adar, et al., 2016). Ακόμη, η παραγωγή ενός αδρανούς στερεού αποβλήτου αντιμετωπίζει τις ανησυχίες σχετικά με τη διάθεση της τέφρας, αμβλύνοντας τις ανησυχίες σχετικά με τη ρύπανση από βαρέα μέταλλα. Με τη δυνατότητα παραγωγής εμπορεύσιμων προϊόντων και συν-τροφοδότησης με βιομάζα, η αεριοποίηση της ιλύος παρουσιάζει υψηλή ενεργειακή απόδοση, υψηλό ισοζύγιο άνθρακα και διαθεσιμότητα πρώτων υλών. Η θερμογόνο δύναμη του αερίου σύνθεσης φτάνει τα 4MJ/m<sup>3</sup>, επαρκής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, δημιουργώντας ένα ενεργειακά αυτόνομο σύστημα (Raheem, et al., 2018).

Ωστόσο, διάφορα μειονεκτήματα εμποδίζουν την ευρεία υιοθέτηση της αεριοποίησης της ιλύος. Η τεχνολογική της πολυπλοκότητα απαιτεί εκτεταμένο καθαρισμό του αερίου για εφαρμογές αερίου σύνθεσης (Raheem, et al., 2018). Η αφυδάτωση και η ξήρανση της ιλύος αποτελούν βασικές προϋποθέσεις, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της διαδικασίας (Liu, et al., 2020; Raheem, et al., 2018). Επιπλέον, παρά την υφιστάμενη νομοθεσία που υποστηρίζει την παραγωγή ενέργειας από απόβλητα, το υψηλό επενδυτικό και λειτουργικό κόστος, σε συνδυασμό με την ανάγκη για οικονομίες κλίμακας και αυτοματοποίησης που ευνοούν τη λειτουργία μεγάλης κλίμακας, αποτελούν σημαντικά εμπόδια στην εφαρμογή των θερμοχημικών μεθόδων (Samolada & Zabaniotou, 2014). Συνοψίζοντας, στον Πίνακα 2.1 συγκεντρώνονται τα κύρια θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά των θερμοχημικών μεθόδων (Adar, et al., 2016; Gao, et al., 2020; Raheem, et al., 2018; Samolada & Zabaniotou, 2014; Xu & Lancaster, 2009; Ponsa, et al., 2017)..

**Πίνακας 2.1 Τα θετικά και τα αρνητικά χαρακτηριστικά της πυρόλυσης, της αποτέφρωσης και της αεριοποίησης.**

<b>Πυρόλυση</b>	
<b>Θετικά</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Αυξημένη αποδοτικότητα ανάκτησης ενέργειας</li> <li>➤ Παραγωγή άνθρακα, ελαίου και εξανθρακώματος- τα οποία έχουν ευρύ φάσμα χρήσεων</li> <li>➤ Μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ως αποτέλεσμα των χαμηλών θερμοκρασιών και των χαμηλών επιπέδων οξυγόνου</li> <li>➤ Λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών, δεν υπάρχουν βαρέα μέταλλα στο αέριο πυρόλυσης</li> <li>➤ Για να πληρούν τους κανονισμούς εκπομπών, το αέριο πυρόλυσης πρέπει να υποβληθεί σε μια μικρή επεξεργασία</li> <li>➤ Συμπαγείς διατάξεις</li> </ul>	
<b>Αρνητικά</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Αναγκαία μερική ξήρανση των βιοστερεών</li> <li>➤ Μη εγκαθιδρυμένη αγορά για τα προϊόντα πυρόλυσης</li> <li>➤ Περιορισμένοι τύποι αποδεκτών αποβλήτων</li> <li>➤ Το έλαιο περιέχει ενώσεις N, οπότε είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο</li> <li>➤ Το εξανθράκωμα περιέχει βαρέα μέταλλα, οπότε απαιτεί δαπανηρή επεξεργασία πριν από την υγειονομική ταφή</li> <li>➤ Εκπομπές CO και CO<sub>2</sub></li> <li>➤ Χαμηλή οικονομική αξία του παραγόμενου ελαίου</li> <li>➤ Ασταθής σύνθεση και αποτελεσματικότητα των προϊόντων, ανάλογα με τις παραμέτρους λειτουργίας</li> <li>➤ Αποδεδειγμένη βιωσιμότητα μόνο σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας</li> <li>➤ Ανεπαρκής νομοθεσία</li> <li>➤ Τεχνολογική πολυπλοκότητα</li> <li>➤ Περιορισμένες εμπορικές εφαρμογές</li> <li>➤ Υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας</li> </ul>	
<b>Αποτέφρωση</b>	
<b>Θετικά</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι αποβλήτων</li> <li>➤ Δυνατότητα συν-τροφοδότησης με άλλα συμβατικά καύσιμα</li> <li>➤ Πιθανή αξιοποίηση της παραγόμενης τέφρας</li> <li>➤ Ελαχιστοποίηση της παραγωγής οσμών</li> <li>➤ Καμία εκπομπή μεθανίου</li> <li>➤ Υφιστάμενα συστήματα ελέγχου εκπομπών</li> <li>➤ Σχεδόν πλήρης καταστροφή τοξικών οργανικών συστατικών και παθογόνων</li> <li>➤ Διαθέσιμο για χρήση σε τρέχοντα συστήματα καύσης</li> <li>➤ Θεμελιωμένη και εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία</li> <li>➤ Καλά αναπτυγμένο νομοθετικό πλαίσιο</li> <li>➤ Χαμηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας</li> </ul>	
<b>Αρνητικά</b>	



<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Χαμηλή ενεργειακή απόδοση</li> <li>➤ Ανάγκη για πρόσθετο καύσιμο</li> <li>➤ Αναγκαία μερική ξήρανση των βιοστερεών</li> <li>➤ Παραγωγή μεγάλου όγκου υποπροϊόντων</li> <li>➤ Προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης λόγω των επικίνδυνων εκπομπών (αέρια του θερμοκηπίου, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, διοξίνες, φουράνια)</li> <li>➤ Εκπομπή χλωριωμένων ενώσεων</li> <li>➤ Πολυδάπανος έλεγχος των εκπομπών λόγω της αυξημένης ζήτησης για επεξεργασία αερίου και τέφρας</li> <li>➤ Δευτερεύουσα τεχνολογία</li> <li>➤ Οικονομικά συμφέρουσα μόνο για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές</li> <li>➤ Ισχυρή δημόσια αντίθεση</li> </ul>
<b>Αεριοποίηση</b>
<b>Θετικά</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Υψηλή απόδοση ανάκτησης ενέργειας</li> <li>➤ Χαμηλή απαίτηση για εισαγόμενη ενέργεια</li> <li>➤ Δυνατότητα συν-τροφοδότησης με βιομάζα</li> <li>➤ Καμία ανάγκη για συμπληρωματικό καύσιμο</li> <li>➤ Παραγωγή συνθετικού αερίου υψηλής ποιότητας, πλούσιου σε ενέργεια, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολυάριθμες εφαρμογές</li> <li>➤ Μειωμένες περιβαλλοντικές εκπομπές</li> <li>➤ Υφιστάμενη νομοθεσία</li> <li>➤ Αποδεδειγμένη τεχνολογία</li> </ul>
<b>Αρνητικά</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Απαραίτητη μερική ξήρανση των βιοστερεών</li> <li>➤ Ανάγκη για ομοιογενείς πρώτες ύλες</li> <li>➤ Αναγκαία επεξεργασία του αερίου σύνθεσης πριν από τη χρήση</li> <li>➤ Εκπομπές CO και CO<sub>2</sub></li> <li>➤ Προβλήματα διάθεσης τέφρας λόγω τοξικότητας</li> <li>➤ Πιθανή απόφραξη/διάβρωση του συστήματος και θέματα ασφάλειας λόγω υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων</li> <li>➤ Πολύπλοκη τεχνολογία</li> <li>➤ Περιορισμένες εμπορικές εφαρμογές</li> <li>➤ Υψηλό κόστος επένδυσης</li> </ul>

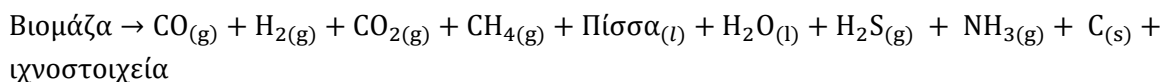
## Κεφάλαιο 3: Αεριοποίηση

### 3.1 Η τεχνολογία της αεριοποίησης

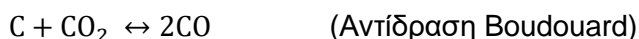
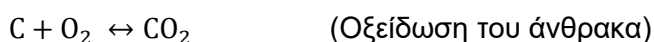
Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.3 η αεριοποίηση είναι μία θερμοχημική διεργασία που μετατρέπει την στερεή οργανική ιλύ σε ένα αέριο καύσης (Buragohain, et al., 2010; Sansaniwal, et al., 2017b; Zhang, et al., 2014). Η διεργασία λαμβάνει χώρα σε έναν αντιδραστήρα που ονομάζεται αεριοποιητής κάτω από υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 375 °C για αεριοποίηση υπερκρίσιμου νερού, 700-1200 °C για αεριοποίηση με μέσα αεριοποίησης αέρα /O<sub>2</sub> / ατμό, 3000-6500 °C για αεριοποίηση με πλάσμα) στις περισσότερες περιπτώσεις κάτω από ατμοσφαιρική πίεση (Sansaniwal, et al., 2017b; Zhang, et al., 2014).

Η αεριοποίηση είναι μία ατελής καύση. Αυτό προκύπτει, διότι η αναλογία αέρα/καύσιμου δεν φτάνει τα αναγκαία επίπεδα για μία τέλεια καύση (Buragohain, et al., 2010; Sansaniwal, et al., 2017b; Martínez, et al., 1983). Η αεριοποίηση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί είτε με βάση το μέσο αεριοποίησης (αέρα, οξυγόνο, ατμός, υπερκρίσιμο νερό, πλάσμα ή υδρογόνο) είτε με βάση την ενθαλπία της (ενδόθερμη ή εξώθερμη) (Thamavithya & Dutta, 2008).

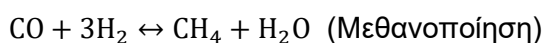
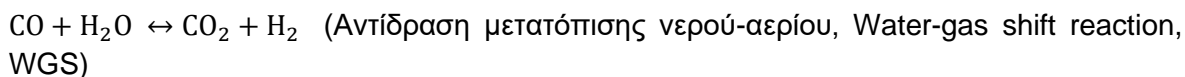
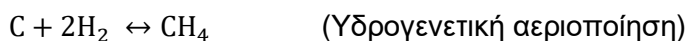
Η διεργασία της αεριοποίησης αποτελείται από αρκετά περιπλοκές χημικές αντιδράσεις, άλλα μπορεί να γίνει μία σύνοψη αυτών, με την παρακάτω εξίσωση (Bridgwater et al., 1999; Sikarwar, et al., 2017):



Τα στάδια, καθώς και οι βασικότερες αντιδράσεις της αεριοποίησης είναι οι παρακάτω:



Γίνονται, όμως και αρκετές δευτερεύουσες χημικές αντιδράσεις κατά την διάρκεια της διεργασίας. Κάποιες από αυτές είναι:



Το αέριο σύνθεσης, επίσης γνωστό και ως αέριο παραγωγής, είναι το κύριο αέριο παράγωγο της αεριοποίησης. Αποτελείται κυρίως από H<sub>2</sub> και CO (ο λόγος H<sub>2</sub>/CO κυμαίνεται από 0,4 έως 1,0, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας), μαζί με CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, υδατμούς και ορισμένους ελαφρούς υδρογονάνθρακες (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> κ.λπ.) (Burbano, et al., 2011; Zhang, et al., 2014). Δεδομένου ότι το αέριο σύνθεσης που εξέρχεται από τον αεριοποιητή είναι θερμό και περιλαμβάνει διάφορους ρύπους, πρέπει να υποστεί επεξεργασία και καθαρισμό (Martínez, et al., 2012). Η θερμογόνο δύναμη του αερίου σύνθεσης ποικίλλει

ανάλογα με το μέσο αεριοποίησης, κυμαίνεται από 4 έως 7 MJ/m<sup>3</sup> για αεριοποίηση με αέρα έως πολύ υψηλότερες τιμές (12-28 MJ/m<sup>3</sup>) για αεριοποίηση με καθαρό O<sub>2</sub> (Sikarwar, et al., 2016).

Το αέριο σύνθεσης είναι κατάλληλο για ποικίλες εφαρμογές, όπως η παραγωγή καθαρού CO, H<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub>, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω καύσης, η παραγωγή θερμότητας για την ξήρανση βιοστερεών, η παραγωγή καυσίμων μεταφοράς και η εξαιρετικά εκλεκτική σύνθεση χημικών ουσιών και καυσίμων (καύσιμα Fischer-Tropsch, μεθανόλη, αμμωνία, διμεθυλαιθέρας κ.ο.κ.) (Chacartegui, et al., 2012; Lv, et al., 2007; Rostrup-Nielsen & Christiansen, 2011; Sansaniwal, et al. 2017b; Werle & Wilk, 2010; Zhang, et al., 2014).

Μια σειρά από διαφορετικούς παράγοντες μπορεί να επηρεάσουν τη διεργασία και τη σύνθεση των προϊόντων της (Basu, 2010; Heidenreich & Foscolo, 2015; Huang & Yuan, 2016; Premalatha, et al., 2009; Ni, et al., 2006; Reed & Das, 1988; Watson et al., 2018). Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία αεριοποίησης είναι: το σχέδιο αεριοποιητή, τα υλικά κλίνης, ο τύπος πρώτης ύλης (χημική σύσταση και θερμοχημικές ιδιότητες), το μέσο αεριοποίησης, η ροή μέσου, το μέγεθος σωματιδίων βιομάζας, η θερμοκρασία αντίδρασης, ο ρυθμός θέρμανσης, η πίεση, η περιεκτικότητα σε υγρασία, ο χρόνος παραμονής του αερίου, οι τεχνικές ψύξης-καθαρισμού αερίου, ο λόγος ισοδυναμίας αέρα/καύσιμου (Equivalence Ratio, ER) και η προσθήκη καταλύτη. Τα προαναφερθέντα στοιχεία μπορούν να ρυθμιστούν ιδανικά ώστε να επιτευχθεί ποσοστό μετατροπής άνθρακα μεγαλύτερο από 90% και καλή ποιότητα αερίου παραγωγής.

Η αεριοποίηση έχει μια σειρά από τεχνολογικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της αεριοποίησης έναντι ανταγωνιστικών διεργασιών, όπως η καύση, είναι τα εξής: μετατροπή των αποβλήτων σε χρήσιμη ενέργεια, δυνατότητα αξιοποίησης διαφόρων πρώτων υλών (ξύλο, βιομάζα, φυσικό αέριο, άνθρακας, οργανικά απόβλητα κ.λπ.), υψηλή ενεργειακή απόδοση, αποτελεσματική παραγωγή αερίου σύνθεσης με πολλαπλές εφαρμογές (HHV περίπου 4 MJ/m<sup>3</sup>), πολύ χαμηλές εκπομπές SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub>, μη ανάγκη για συμπληρωματικό καύσιμο, ενεργειακή αυτάρκεια, χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Babu & Whaley, 1992; Fytli & Zabaniotou, 2008; Gil-Lalaguna, et al., 2014; Heidenreich & Foscolo, 2015; Pfeifer & Hofbauer, 2008; Syed-Hassan et al., 2017, Wang, et al., 2019; Raheem, et al., 2018; Vassilev, et al., 2010).

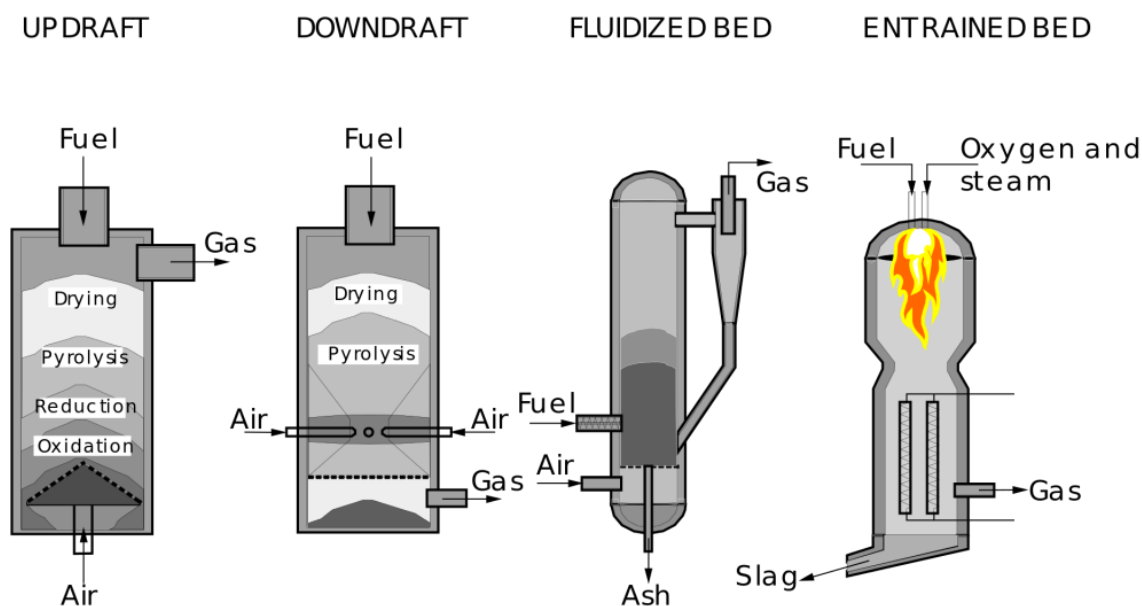
Ορισμένα γνωστά μειονεκτήματα της διεργασίας αεριοποίησης περιλαμβάνουν την έλλειψη εκπαιδευμένου εργατικού δυναμικού, την φτωχή αγορά, τη χαμηλή κοινωνική προσαρμογή και τους απαρχαιωμένους κυβερνητικούς κανονισμούς (Sansaniwal, et al., 2017b). Οι ανεπιθύμητες ουσίες στο αέριο σύνθεσης (βαριοί οργανικοί ρύποι, τέφρα, κ.λπ.) που παράγονται από το σύστημα τροφοδοσίας ή τον αεριοποιητή αποτελούν ένα από τα πιο διαδεδομένα τεχνικά προβλήματα (Raheem, et al., 2018; Sansaniwal, et al., 2017b; Syed-Hassan, et al., 2017). Η πίσσα, η οποία είναι ένας συνδυασμός αρωματικών υδρογονανθράκων και άλλων οργανικών ενώσεων, είναι η πιο ανησυχητική από όλους τους ρύπους.

Τα προαναφερθέντα προβλήματα μειώνονται με τον καθαρισμό και την επεξεργασία του αερίου σύνθεσης, ωστόσο η διαδικασία αυτή είναι συχνά περίπλοκη, δαπανηρή και γεμάτη τεχνολογικές προκλήσεις. Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι η πρώτη ύλη πρέπει να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό (το πολύ 30%). Αυτό το κριτήριο ικανοποιείται συχνά με την προ-ξήρανση της πρώτης ύλης με τη χρήση της θερμικής ενέργειας που παράγεται από την καύση του αερίου σύνθεσης (Gil-Lalaguna, et al., 2014; Raheem, et al., 2018). Το κόστος

κατασκευής μιας ολοκληρωμένης μονάδας αεριοποίησης αποτελεί βασικό εμπόδιο για την ανάπτυξη εφαρμογών μεγάλης κλίμακας και καθορίζεται από την απόδοση του αεριοποιητή, την ικανότητα παραγωγής ενέργειας και άλλους παράγοντες (Sansaniwal, et al., 2017b; Watson, et al., 2018). Ανεξάρτητα από όλες τις δυσκολίες, η αεριοποίηση έχει μια σειρά από ξεχωριστά πλεονεκτήματα που την καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την αξιοποίηση της βιομάζας.

### 3.2 Οι κυριότεροι τύποι αεριοποιητών

Η διάταξη του αεριοποιητή είναι μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για την ποιότητα των προϊόντων αεριοποίησης. Οι αντιδραστήρες αεριοποίησης ταξινομούνται με βάση διάφορα κριτήρια, όπως το μέσο αεριοποίησης (αεριοποιητές με αέρα, οξυγόνο ή ατμό), την πηγή θερμότητας (αυτοθερμική/άμεση, όταν η θέρμανση παρέχεται από μερική καύση, ή αλλοθερμική/έμμεση, όταν η θέρμανση παρέχεται από εξωτερική πηγή), την πίεση (ατμοσφαιρική ή υπό πίεση) και τον σχεδιασμό (σταθερής κλίνης, ρευστοποιημένης κλίνης, ροής με συμπαγή ροή, μεταφοράς ή πλάσματος) (Puig-Arnavat, et al., 2010; Rauch, 2003; Samiran, et al., 2016). Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι σχεδιασμοί αεριοποιητών είναι οι σταθερής κλίνης, ρευστοποιημένης κλίνης και συμπαρασυρόμενης ροής. Καθένας έχει ξεχωριστά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσον αφορά τον τύπο καυσίμου, την εφαρμογή και τη λειτουργία. Για την επίτευξη των καλύτερων αποτελεσμάτων, είναι κρίσιμη η επιλογή του κατάλληλου σχεδιασμού για κάθε περίπτωση.



Εικόνα 3.1 Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα είδη αεριοποιητών (H2 4U Pty Ltd., 2022).

#### 3.2.1. Αεριοποιητής σταθερής κλίνης (fixed-bed)

Το καύσιμο σε έναν αεριοποιητή σταθερής κλίνης υποστηρίζεται από μια σχάρα. Επειδή το καύσιμο ενεργεί ως έμβολο και κατεβαίνει στο εσωτερικό του αεριοποιητή, αυτό το είδος είναι γνωστό ως κινούμενη κλίνη. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των αεριοποιητών σταθερής κλίνης είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής τους όταν κατασκευάζονται για μικρότερες παρτίδες. Εξαιτίας αυτού, υπάρχουν πολλοί αεριοποιητές βιομάζας κινούμενης

κλίνης μικρής κλίμακας σε λειτουργία σε όλο τον κόσμο. Τόσο η ανάμιξη όσο και η μεταφορά θερμότητας της κινούμενης (σταθερής) κλίνης θα μπορούσαν να βελτιωθούν, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ομοιόμορφη κατανομή του καυσίμου, της θερμοκρασίας και της σύνθεσης του αερίου στη διατομή του αεριοποιητή. Οι αεριοποιητές σταθερής ή κινούμενης κλίνης διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: ανοδική ροής, καθοδική ροής και εγκάρσιας ροής (Basu, 2010). Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αεριοποιητή σταθερής κλίνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 (Beenackers, 1999; Bridgwater A. , 1995; Kishore, 2009; Samiran, et al., 2016).

**Πίνακας 3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αεριοποιητή σταθερής κλίνης.**

Χαρακτηριστικό	Επεξήγηση
<b>Πλεονεκτήματα</b>	
Απλότητα	Χρησιμοποιεί οικονομικά αποδοτική, αποδεδειγμένη τεχνολογία.
Οικονομικός σε μικρότερες κλίμακες	Αποδεικνύεται οικονομικά αποδοτικός ακόμη και σε μικρότερες εγκαταστάσεις.
Προσαρμοστικότητα στη βιομάζα	Ανοχή σε ευρύ φάσμα βιομάζας, ενισχύοντας την ευελιξία.
Αποτελεσματική μετατροπή άνθρακα	Εξαιρετικά αποτελεσματικός στη μετατροπή του άνθρακα.
<b>Μειονεκτήματα</b>	
Ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας	Προκαλεί ακανόνιστες επιδόσεις.
Μεγαλύτερος χρόνος παραμονής	Μειώνει τη συνολική παραγωγικότητα και την ταχύτητα λειτουργίας.
Πολύπλοκες διαδικασίες καθαρισμού αερίου	Απαιτούνται για το χειρισμό τεράστιων εκροών πίσσας και άνθρακα, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της συντήρησης και το κόστος.
Ανεπαρκής παραγωγή τελικού ψυχρού αερίου σύνθεσης	Μειώνει τη συνολική απόδοση, επηρεάζοντας αρνητικά την απόδοση του συστήματος.

### 3.2.2. Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized-bed)

Οι αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης έχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά, την σταθερή και ενιαία θερμοκρασία και την ανώτερη δυνατή ανάμιξη. Η ρευστοποιημένη κλίμη απαρτίζεται από υλικά κλίνης, τα οποία είναι κοκκώδη σωματίδια που διατηρούνται σε ημιαιωρούμενη κατάσταση από το μέσο αεριοποίησης που διέρχεται από πάνω τους με τις κατάλληλες ταχύτητες. Αυτού του είδους οι αεριοποιητές είναι λιγότερο ευαίσθητοι στην ποιότητα του καυσίμου λόγω της εξαιρετικής ανάμιξης αερίου-στερεού και της υψηλής θερμικής αδράνειας της κλίνης. Επιπλέον, η ομοιογένεια της θερμοκρασίας μειώνει σημαντικά την πιθανότητα συσσώρευσης του καυσίμου. Οι δύο κύριες μορφές ρευστοποιημένων κλινών είναι η κυκλοφορούσα και με φυσαλίδες (Basu P. , 2010). Ορισμένα από τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2 (Beenackers, 1999; Bridgwater A. , 1995; Kishore, 2009; Samiran, et al., 2016).



**Πίνακας 3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης.**

Χαρακτηριστικό	Επεξήγηση
<b>Πλεονεκτήματα</b>	
Σταθερή λειτουργία	Εξασφαλίζεται από την ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας.
Μειωμένη απαίτηση καθαρισμού με αέριο	Χαμηλές εκπομπές πίσσας και άνθρακα μειώνουν την ανάγκη για ουσιαστικό καθαρισμό του αερίου, ενισχύοντας την αποδοτικότητα της λειτουργίας.
Γρήγορος χρόνος παραμονής	Μεγιστοποιεί την ταχύτητα λειτουργίας.
Υψηλή ικανότητα επεξεργασίας	Επεξεργάζεται αποτελεσματικά ένα ευρύ φάσμα πρώτων υλών.
Καταλυτική επεξεργασία στην κλίνη	Επιτρέπει τον περαιτέρω εξευγενισμό των υλικών.
Επεκτασιμότητα	Δυνατότητα κλιμάκωσης σε τεράστιες χωρητικότητες (έως 1MW ή περισσότερο) λόγω της εξαιρετικής κλιμάκωσης.
Υψηλοί ρυθμοί αντίδρασης	Εξασφαλίζονται από ισχυρά συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας, συμβάλλοντας στη συνολική αποδοτικότητα.
Προσαρμοστικότητα στις βιομηχανικές συνθήκες	Το σύστημα προσαρμόζεται καλά στις βιομηχανικές συνθήκες.
Μεγάλο εύρος εφαρμόσιμων πρώτων υλών	Αποδοτικότητα στην επεξεργασία διαφόρων πρώτων υλών.
<b>Μειονεκτήματα</b>	
Προκλήσεις καθαρισμού αερίου	Παραμποδίζεται από τη μεγάλη ποσότητα σωματιδιακού υλικού στο αέριο σύνθεσης, περιπλέκοντας τον καθαρισμό του αερίου.
Περιορισμοί προσαρμοστικότητας	Τα συγκεκριμένα μεγέθη σωματιδίων που απαιτούνται για καλύτερη απόδοση καυσίμου περιορίζουν την προσαρμοστικότητα.
Προβλήματα διάβρωσης	Επαναλαμβανόμενο πρόβλημα που μειώνει τη διάρκεια ζωής του συστήματος και απαιτεί συνεχή συντήρηση για την ελαχιστοποίηση της φθοράς και της καταπόνησης.
Οικονομική βιωσιμότητα σε μικρότερες κλίμακες	Η τεχνολογία αντιμετωπίζει εμπόδια στην επίτευξη οικονομικής βιωσιμότητας σε μικρότερες κλίμακες.

### 3.2.3. Αεριοποιητής συμπαρασυρόμενης ροής (entrained-flow)

Για την αεριοποίηση της βιομάζας, οι αεριοποιητές ροής δεν συνιστώνται για διάφορους λόγους. Πρώτα απ' όλα, λόγω του απαραίτητου μεγέθους των σωματιδίων, η διαδικασία απαιτεί πολύ αλεσμένη βιομάζα, πράγμα που είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Δεδομένου ότι το σημείο τήξης της τέφρας της βιομάζας που περιέχει CaO αλλά δεν περιέχει αλκάλια είναι υψηλό, απαιτούνται υψηλότερες συγκεντρώσεις οξυγόνου για την αποτελεσματική αεριοποίηση. Από την άλλη πλευρά, η βιομάζα με υψηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια έχει χαμηλότερο σημείο τήξης τέφρας από τον άνθρακα, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται λιγότερο οξυγόνο για την αύξηση της θερμοκρασίας της τέφρας. Παρ' όλα αυτά, η επιθετική και καυστική φύση της τετηγμένης τέφρας βιομάζας μειώνει τη διάρκεια ζωής της πυρίμαχης επένδυσης του αεριοποιητή (Basu, 2010). Ορισμένα από τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αεριοποιητή σταθερής κλίνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3 (Beenackers, 1999; Bridgwater A. , 1995; Kishore, 2009; Samiran, et al., 2016).

**Πίνακας 3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αεριοποιητή συμπαρασυρόμενης ροής.**

Χαρακτηριστικό	Επεξήγηση
<b>Πλεονεκτήματα</b>	
Εξαιρετικά χαμηλή απόδοση πίσσας	Μειώνει τα ανεπιθύμητα υποπροϊόντα.
Υψηλότερη ποιότητα παραγωγής αερίου	Ανταποκρίνεται στα αυστηρά πρότυπα καθαρότητας καυσίμου.
Αποτελεσματική επαφή και ανάμιξη αερίου-στερεού	Βελτιστοποιεί τη μετατροπή με υψηλή απόδοση άνθρακα.
Οικονομικά βιώσιμο για μεγαλύτερες χωρητικότητες	Κατάλληλο για δυναμικότητες που υπερβαίνουν το 1MW.
Εντυπωσιακό δυναμικό κλιμάκωσης	Προσαρμογή στις ποικίλες ανάγκες παραγωγής.
Ενισχυμένος περιβαλλοντικός αντίκτυπος	Μειώνει σημαντικά τη ρύπανση του περιβάλλοντος.
<b>Μειονεκτήματα</b>	
Πολύπλοκη κατασκευή και λειτουργία	Απαιτεί εξειδικευμένη τεχνογνωσία και υψηλή συντήρηση.
Υψηλό λειτουργικό κόστος	Αυξημένες δαπάνες λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος.
Περιορισμοί με τη διαχείριση της βιομάζας	Περιορισμοί στην εφαρμογή του για τη βιομάζα.
Προβλήματα ανθεκτικότητας με τα υλικά κατασκευής	Επιπτώσεις στην ανθεκτικότητα του συστήματος σε υψηλές θερμοκρασίες.
Ειδικότητα καυσίμου - ευαισθησία στο μέγεθος των σωματιδίων	Περιορισμένη ανοχή σε συγκεκριμένα μεγέθη σωματιδίων, ιδίως χονδροειδών σωματιδίων.
Προκλήσεις στην αποδοτική ψύξη του ακατέργαστου αερίου	Συνεχείς ανησυχίες που απαιτούν βελτιστοποίηση για ιδανική λειτουργία.

### 3.3 Διαχείριση των παραπροϊόντων της αεριοποίησης

Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης που προκύπτει από τον αεριοποιητή λόγω προσμίξεων στην πρώτη ύλη ή ανεπαρκούς αεριοποίησης, περιέχει διάφορα ανεπιθύμητα δευτερογενή προϊόντα (Woolcock and Brown, 2013). Ειδικότερα, η πίσσα, τα σωματίδια και οι ανόργανες ουσίες (αλκαλικά μέταλλα, ενώσεις αζώτου, θείου και χλωρίου) μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα κατά τη διαδικασία αεριοποίησης και τις μεταγενέστερες εφαρμογές αναβάθμισης (Huber, et al., 2006; Luque, et al., 2012; Richardon, et al., 2015; Sansaniwal, et al., 2017b).

Τα βασικά ζητήματα και οι ρύποι που συνδέονται με αυτά συνοψίζονται εδώ (Martínez, et al., 2012; Richardon, et al., 2015; Stevens, 2001). Η πίσσα, η οποία αποτελείται από σύνθετους υδρογονάνθρακες υψηλού μοριακού βάρους, είναι γνωστή για την παραγωγή φραξίματος, ρύπανσης, συσσωμάτωσης και διάβρωσης σε ζωτικό εξοπλισμό όπως οι τουρμπίνες και οι κινητήρες. Τα προβλήματα αυτά επιδεινώνονται από την τάση της να πολυμερίζεται σε πιο περίπλοκες ενώσεις και να παράγει αερολύματα, τα οποία απενεργοποιούν περαιτέρω τους καταλύτες και θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία.

Ένα ξεχωριστό σύνολο προβλημάτων παρουσιάζουν τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε μόλυνση του περιβάλλοντος, συσσωμάτωση, διάβρωση, διάβρωση και ρύπανση. Επιπλέον, τα αλκαλικά μέταλλα, ιδίως το κάλιο (K) και το νάτριο (Na), προκαλούν προβλήματα όπως η απενεργοποίηση του καταλύτη, η διάβρωση της μεταλλικής επιφάνειας και η συσσωμάτωση. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διάφοροι ρύποι στις διεργασίες αεριοποίησης παρουσιάζουν ποικίλες προκλήσεις λόγω του ρόλου τους στη διάβρωση, τη δηλητηρίαση των καταλυτών με βάση τα μέταλλα και τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Αυτές περιλαμβάνουν ενώσεις αζώτου ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCN}$ ), ενώσεις θείου ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ) και ενώσεις χλωρίου ( $\text{HCl}$ ).

### 3.4 Επεξεργασία αερίου σύνθεσης

Τα επίπεδα ρύπανσης του αερίου σύνθεσης παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα και επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ακαθαρσίες της πρώτης ύλης καθώς και από τη μέθοδο παραγωγής αερίου σύνθεσης (Woolcock & Brown, 2013). Για να επιτευχθεί η αποτελεσματικότητα της διεργασίας και να ληφθεί πολύτιμο βιοκαύσιμο, το αέριο σύνθεσης πρέπει πάντα να περνάει από μια δαπανηρή διαδικασία καθαρισμού πριν χρησιμοποιηθεί (Kosstrin, 2017; Raheem, et al., 2018; Sansaniwal, et al., 2017b). Με βάση τη θερμοκρασία του αερίου στην έξοδο του συστήματος καθαρισμού, οι μέθοδοι καθαρισμού κατηγοριοποιούνται σε ψυχρές ( $T < 100^\circ\text{C}$ ), ζεστές ( $T > 300^\circ\text{C}$ ) και θερμές (ενδιάμεσες θερμοκρασίες) (Bermudez & Fidalgo, 2016; Courson & Gallucci, 2009; Woolcock & Brown, 2013).

Η ψυχρή οδός είναι η πλέον καθιερωμένη για τον καθαρισμό του αερίου σύνθεσης, χρησιμοποιώντας απορρόφηση νερού/υγρού μέσω διαφόρων τύπων μηχανών πλύσης (πλυντηρίδων), οι οποίες έχουν αποδειχθεί επιτυχείς στην απομάκρυνση σχεδόν όλων των ακαθαρσιών του αερίου σύνθεσης (Bermudez & Fidalgo, 2016; Woolcock & Brown, 2013). Οι υγρές μηχανές πλύσης απομακρύνουν την πίσσα και τα σωματιδιακά υπολείμματα από το αέριο σύνθεσης. Οι ατμοί αλκαλικών μετάλλων συμπυκνώνονται ως αποτέλεσμα της μείωσης της θερμοκρασίας, σχηματίζοντας μικροσκοπικά σωματίδια με συσσωμάτωση ή συνδυαζόμενα με πίσσες, τα οποία στη συνέχεια απομακρύνονται μαζί με τα σωματίδια και τις πίσσες (Hirohata, et al., 2008; Woolcock & Brown, 2013).

Ενώ οι ενώσεις χλωρίου μπορούν επίσης να απομακρυνθούν επιτυχώς με υγρές πλυντηρίδες με την εναπόθεση  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ή την απορρόφηση ατμών  $\text{HCl}$ , η απομάκρυνση των αζωτούχων ρύπων επιτυγχάνεται συχνά με απορρόφηση στο νερό. Για τον ψυχρό καθαρισμό του θείου χρησιμοποιούνται διάφορες προσεγγίσεις με χημικούς, φυσικούς ή φυσικοχημικούς διαλύτες, χημικές διαδικασίες οξειδοαναγωγής και βιολογικές διεργασίες (Woolcock & Brown, 2013; Yeo, et al., 2019). Παρά την τεχνολογική τους ωριμότητα και την ευρεία εφαρμογή τους, τα συστήματα ψυχρού καθαρισμού μπορεί να οδηγήσουν σε απώλειες θερμικής ενέργειας και σε πρόσθετο κόστος λόγω της απαίτησης επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων των πλυντηρίδων προκειμένου να πληρούνται οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί (Woolcock & Brown, 2013).

Μια πιο σύγχρονη εφεύρεση, η ζεστή οδός αντιμετωπίζει ζητήματα ψύξης και αναθέρμανσης για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης (Bermudez & Fidalgo, 2016). Οι τεχνολογίες θερμού καθαρισμού λειτουργούν καλύτερα για την απομάκρυνση των σωματιδίων (με αδρανειακό διαχωρισμό, διήθηση με φράγματα, ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση), της πίσσας (με θερμική πυρόλυση, καταλυτική πυρόλυση, μη θερμικά

πλάσματα και φυσικό διαχωρισμό) και των ενώσεων του θείου (με προσρόφηση σε τρία στάδια: αναγωγή, θείωση και αναγέννηση) (Woolcock & Brown, 2013). Τα αλκαλικά μέταλλα μπορούν επίσης να εξαλειφθούν μαζί με άλλες ακαθαρσίες μέσω θερμής προσρόφησης σε στερεά απορροφητικά υλικά ή συμπύκνωσης. Η χημική απομάκρυνση του χλωρίου είναι μια άλλη κοινή χρήση της προσρόφησης (Dou, et al., 2006; Woolcock & Brown, 2013).

Οι τεχνολογίες θερμού καθαρισμού, οι οποίες λειτουργούν σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες και μπορούν να παρακάμψουν τα μειονεκτήματα τόσο των ζεστών όσο και των ψυχρών μεθόδων, χρησιμοποιούνται συχνά για την απομάκρυνση του χλωρίου και της πίσσας (Woolcock & Brown, 2013). Αξιοσημείωτο είναι ότι η πίσσα θεωρείται ως ο πιο προβληματικός από όλους τους ρύπους (Abu El-Rub, et al., 2004; Courson & Gallucci, 2009; Shen & Yoshikawa, 2013; Valderrama Rios, et al., 2018). Συμπερασματικά, κάθε μία από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες καθαρισμού έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ως αποτέλεσμα, η καλύτερη διαδικασία καθαρισμού και προετοιμασίας θα πρέπει να επιλέγεται με βάση την προβλεπόμενη χρήση του αερίου σύνθεσης, τους κανονισμούς εκπομπών και τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής (Basu, 2010; Richardson, et al., 2015; Woolcock & Brown, 2013).

### 3.5 Εφαρμογές της αεριοποίησης στην διεθνή βιβλιογραφία

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η αεριοποίηση είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία με πολλά πλεονεκτήματα. Έχουν δημοσιευτεί πολυάριθμες μελέτες και σχετικά άρθρα. Πολλές από αυτές τις δημοσιεύσεις διαβάστηκαν και ταξινομήθηκαν με βάση ορισμένα κριτήρια σε μια εργασία ανασκόπησης που βρίσκεται υπό αναθεώρηση και θα δημοσιευθεί σύντομα. Οι κυριότερες εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ 2010 και 2022 παρουσιάζονται στους πίνακες 9.1, 9.2 και 9.3 (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ). Στον πίνακα 9.2 παρουσιάζονται εφαρμογές μικρότερης κλίμακας που χρησιμοποιούν αέρα, ατμό ή  $O_2$  ως μέσα αεριοποίησης, με ρυθμούς τροφοδοσίας κάτω του 1 kg/h. Ο πίνακας 9.1 επικεντρώνεται σε εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας με ρυθμούς τροφοδοσίας που υπερβαίνουν το 1 kg/h.

Σε αντίθεση με την αεριοποίηση που χρησιμοποιεί αέρα,  $O_2$  ή ατμό ως αεριοποιητικά μέσα, ο Πίνακας 9.3 επικεντρώνεται σε εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών που χρησιμοποιούν υπερκρίσιμο νερό (Supercritical Water, SCW) ως μέσο αεριοποίησης. Αυτή η τεχνική θεωρείται ότι έχει μια διαφορετική φιλοσοφία σε σύγκριση με τις υπόλοιπες που χρησιμοποιούν άλλα μέσα αεριοποίησης, γι' αυτό και παρουσιάζεται ξεχωριστά. Στους πίνακες, δίνονται το έτος δημοσίευσης της έρευνας, οι τεχνικές λεπτομέρειες (η πρώτη ύλη, ο τύπος αεριοποιητή, η θερμοκρασία, το μέσο αεριοποίησης, ο ρυθμός τροφοδοσίας, ο λόγος ισοδυναμίας αέρα/καυσίμου (Equivalence Ratio, ER), ο καταλύτης και ο τύπος φόρτωσης) και τα βασικά αποτελέσματα από κάθε δημοσίευση. Επίσης, δεν έχουν ληφθεί υπόψη μελέτες που δεν προσδιορίζουν το μέγεθος της εφαρμογής (δηλαδή το ρυθμό τροφοδοσίας) (Hantoko, et al., 2019; Hernández, et al., 2013; Lee, et al., 2018; Yan, et al., 2021) ή που επικεντρώνονται στη μοντελοποίηση της διαδικασίας (Carotenuto, et al., 2022; Gabbar, et al., 2020; Qian, et al., 2021; Quan, et al., 2022; Sanaye, et al., 2022; Shi, et al., 2022; Viswanathan, et al., 2022; Zhang, et al., 2021).

Το είδος της πρώτης ύλης, ο ρυθμός τροφοδοσίας, ο τύπος φόρτωσης και ο τύπος αεριοποιητή είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες για την κατηγοριοποίηση και την αξιολόγηση των υπό μελέτη εφαρμογών. Ένα κυρίαρχο πρόβλημα σε κάθε εφαρμογή

βιοστερεών ήταν η απομάκρυνση του περιττού νερού πριν από την αεριοποίηση. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τεχνικές αφυδάτωσης ή/και ξήρανσης, με τον ήλιο, τον αέρα και την ξήρανση σε φούρνο να είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι. Η διαμόρφωση της διεργασίας, η οποία κατηγοριοποιεί τη μελέτη ως εργαστηριακή ή πιλοτικής κλίμακας, αποφασίστηκε επίσης από την κλίμακα της εφαρμογής.

Στις υπό μελέτη εφαρμογές, ο ρυθμός τροφοδοσίας κυμαινόταν από 4 g/h έως 1 tn/h. Με εξαίρεση ορισμένες εφαρμογές, οι οποίες έτρεχαν σε συνεχή λειτουργία (Arjhar, et al., 2013; Manali & Gikas, 2019; Wnukowski, et al., 2020), όλες οι υπό μελέτη εφαρμογές ήταν σε λειτουργία παρτίδας. Ο κύριος όγκος των εφαρμογών χρησιμοποίησε αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης, ωστόσο ορισμένες έρευνες χρησιμοποίησαν διαφορετικά σχέδια αεριοποιητών (σταθερής κλίνης, περιστροφικού κλιβάνου, καθοδικού ρεύματος).

Με βάση τα βασικά αποτελέσματα των εφαρμογών αεριοποίησης βιοστερεών με χρήση αέρα/ατμού/O<sub>2</sub> ως αεριοποιητικών μέσων (Πίνακες 9.1 και 9.2), η αποτελεσματικότητα της διεργασίας της αεριοποίησης επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, οι κυριότερες από τις οποίες είναι η θερμοκρασία, το μέσο αεριοποίησης, ο λόγος καύσιμου/αέρα (ER) και η προσθήκη καταλύτη. Γενικότερα, η θερμοκρασία αεριοποίησης θα πρέπει να επιλέγεται όσο το δυνατόν υψηλότερη είναι πρακτικά εφικτό για να υπάρχει επαρκώς υψηλή απόδοση σε αέριο σύνθεσης, υψηλή απόδοση ψυχρού αερίου και χαμηλή παραγωγή πίσσας και άνθρακα (Khan, et al., 2021; Nipattumakul, et al., 2010; Schmid, et al., 2021; Zaccariello & Mastellone, 2020). Υπήρξε εφαρμογή, στην οποία αποδείχθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας αεριοποίησης οδήγησε σε σημαντική μείωση της πίσσας και του άνθρακα (11,4 σε 9,7 g και 9,1 σε 0,7 g, αντίστοιχα), αλλά και σε αύξηση της απόδοσης των ψυχρών αερίων από 11% σε 50% (Zaccariello & Mastellone, 2020). Ενώ, σε μία άλλη διαπιστώθηκε η μέγιστη απόδοση H<sub>2</sub> στην υψηλότερη θερμοκρασία αεριοποίησης (φτάνοντας τα 0,076 g<sub>αερίου</sub>/g<sub>δείγμα</sub> στους 1000 °C) (Nipattumakul, et al., 2010).

Γενικά, η απόδοση H<sub>2</sub> ακολουθεί θετική τάση με τη θερμοκρασία αεριοποίησης. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί και η αντίθετη τάση (Zaccariello & Mastellone, 2020; Chen, et al., 2017), ενώ διαπιστώθηκε ότι καθώς αυξανόταν η θερμοκρασία, οι συγκεντρώσεις των δευτερευόντων στοιχείων (As, Cd, Co, Sb και V) μειώνονταν και η πλειοψηφία των κύριων στοιχείων (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P και Si) αυξανόταν στο στερεό υπόλειμμα (Ronda, et al., 2019). Σε μία άλλη έρευνα, εξετάστηκαν οι ιδιότητες μεταφοράς οξυγόνου της σκωρίας φούρνου ηλεκτρικού τόξου και βασικού φούρνου οξυγόνου σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (700, 800 και 900 °C) (Zhang, et al., 2022). Διαπιστώθηκε ότι οι υψηλότερες τιμές επιτεύχθηκαν στους 700 °C μετά από δέκα κύκλους οξειδοαναγωγής και ότι και οι δύο σκωρίες λειτούργησαν ως φορείς οξυγόνου κατά την αεριοποίηση με χημικό βρόχο στους 800 °C.

Κατά τη σύγκριση των μέσων αεριοποίησης (αέρα, ατμού και O<sub>2</sub>), διαπιστώθηκε ότι ο αέρας είναι η πιο αποδοτική επιλογή, αποδίδοντας υψηλής ποιότητας αέριο σύνθεσης (H<sub>2</sub>, CO και CH<sub>4</sub>, προστιθέμενο σε 40,7-44%) με επαρκή θερμογόνο δύναμη (8,42-9,33 MJ/Nm<sup>3</sup>), χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα (0,6 g/m<sup>3</sup>) και συγκριτικά υψηλή απόδοση ψυχρού αερίου (57%) (Calvo, et al., 2013). Παρόλα αυτά, αποτελέσματα άλλων εφαρμογών δείχνουν ότι η αντικατάσταση του αέρα με ατμό βελτίωσε τα χαρακτηριστικά του συνθετικού αερίου (παραγωγή περισσότερου H<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>, λιγότερου CH<sub>4</sub>, CO, αύξηση της θερμογόνου δύναμης του αερίου σύνθεσης και απομάκρυνση της παραγωγής πίσσας) (De Andrés, et al., 2011a; De Andrés, et al., 2011b). Τα ευρήματα αυτά συμφωνούν και με άλλη μελέτη (Nipattumakul, et al., 2010), όπου διαπιστώθηκε ότι το αέριο σύνθεσης που παράγεται με



αεριοποίηση με ατμό περιείχε περίπου τρεις φορές περισσότερο  $H_2$  από το αέριο σύνθεσης που παράγεται με αεριοποίηση με αέρα.

Επιπροσθέτως, προτάθηκε ότι ο συνδυασμός ατμού και αέρα ως μέσο αεριοποίησης μπορεί να είναι ένα οικονομικά αποδοτικό υποκατάστατο του καθαρού αέρα, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει την ποιότητα του αερίου σύνθεσης (Roche, et al., 2014). Καθώς επιταχύνει την αντίδραση οξειδωσης και μειώνει τη δημιουργία ρύπων, η αύξηση του λόγου καυσίμου/αέρα έχει γενικά αποδειχθεί ότι βελτιώνει την απόδοση της αεριοποίησης (βελτίωση της ποιότητας και της απόδοσης του αερίου σύνθεσης, απομάκρυνση πίσσας) (Choi, et al. 2017; Khan, et al., 2021; Migliaccio, et al., 2021). Σημειώθηκε ακόμη, ότι η θερμοκρασία και ο λόγος αέρα/καύσιμου έχουν γραμμική σχέση και ότι η θερμογόνο δύναμη του αερίου σύνθεσης (που μετρήθηκε μεταξύ 4,20 και 4,87 MJ/Nm<sup>3</sup>) τείνει να μειώνεται με την αύξηση του λόγου (που κυμαίνεται μεταξύ 0,24-0,34) (Arjhar, et al., 2013).

Πολυάριθμα παραδείγματα που παρουσιάζονται στους πίνακες 9.1 και 9.2 έχουν καταδείξει τις ευεργετικές επιδράσεις της παρουσίας καταλύτη στην απόδοση της αεριοποίησης. Οι καταλύτες αποτελούνται κυρίως από ασβεστόλιθο, αλουμίνα, δολομίτη, ολιβίνη, ενεργό άνθρακα και CaO. Η χρήση ενεργού άνθρακα μείωσε τον σχηματισμό ρύπων και αύξησε την παραγωγή αερίου σύνθεσης κατά 12% (Choi, et al., 2018). Επιπλέον, υπήρξε βελτίωση κατά 10 και 26% στην αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης πίσσας και της μετατροπής άνθρακα, αντίστοιχα. Επίσης, παράχθηκε αέριο σύνθεσης πλούσιο σε  $H_2$  (29 vol.%) και χαμηλό σε ρύπους όταν η αναλογία ενεργού άνθρακα/βιοστερεών αυξήθηκε σε 3:1 (τα επίπεδα πίσσας,  $NH_3$  και  $H_2S$  στο αέριο σύνθεσης ήταν 27 mg/Nm<sup>3</sup>, 443 και 470 ppmv, αντίστοιχα) (Choi, et al., 2017).

Η παραγωγή πίσσας μειώθηκε σημαντικά όταν χρησιμοποιήθηκε ασβεστόλιθος ως προσθήκη στην κλίνη, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα μικρότερο αποτύπωμα για τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας στα κατάντη που απαιτούνται για την απομάκρυνση της πίσσας (Schmid, et al., 2018). Διαπιστώθηκε ότι η επαρκής απομάκρυνση της πίσσας μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τη χρήση αλουμίνας, δολομίτη και ολιβίνη ως καταλύτες (ο δολομίτης είναι ο πιο αποτελεσματικός και ο ολιβίνης ο λιγότερο αποτελεσματικός). Αυτό μπορεί να γίνει παράλληλα με την παραγωγή περισσότερου αερίου σύνθεσης με υψηλότερη θερμογόνο δύναμη, γεγονός που θα βελτιώσει την απόδοση του ψυχρού αερίου και τη μετατροπή του άνθρακα (De Andrés, et al., 2011a; De Andrés, et al., 2011b).

Αναγνωρίστηκαν, επίσης τα πλεονεκτικά χαρακτηριστικά του δολομίτη, αποδεικνύοντας ότι η χρήση του βελτίωσε την αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης της πίσσας και αύξησε την παραγωγή  $H_2$  (Roche, et al., 2014). Επιπλέον, η προσθήκη Ni και Fe προώθησε την πυρόλυση πίσσας, την αναμόρφωση μεθανίου και τη μετατροπή του άνθρακα σε αέρια, με αποτέλεσμα τη βελτίωση του κλάσματος  $H_2$ , της απόδοσης αερίου και της απόδοσης ψυχρού αερίου. Η εισαγωγή του CaO αύξησε το κλάσμα όγκου  $H_2$  και τη συνολική παραγωγή αερίου σύνθεσης (Chen, et al., 2017).

Διάφορες μορφές βιοστερεών (ακατέργαστα, χωνεμένα, αφυδατωμένα, δευτεροβάθμια και αποξηραμένα) με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 300 έως 750 °C έχουν χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών με υπερκρίσιμο νερό (Πίνακας 9.3). Η πλειονότητα των ερευνητικών μελετών εξέτασε τις επιδράσεις της θερμοκρασίας, της πίεσης, του χρόνου παραμονής, της περιεκτικότητας σε υγρασία, της περιεκτικότητας σε οργανική ύλη και της προσθήκης καταλύτη στην απόδοση αεριοποίησης, στην απόδοση αεριοποίησης του άνθρακα, στη σύνθεση και την απόδοση του αερίου σύνθεσης και στις ιδιότητες των υγρών και στερεών προϊόντων. Όλες οι μελέτες

καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα, δηλαδή ότι η διαδικασία αεριοποίησης βελτιώνεται με υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας. Ειδικότερα, η αύξηση της θερμοκρασίας από 480 σε 540°C μείωσε ελαφρώς τη συνολική απόδοση σε υγρό από 99,19 σε 99,05 % κατά βάρος (Chen, et al., 2022b). Αντίθετα, προέκυψε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας από 350 σε 450 °C βελτίωσε την ποιότητα του υγρού προϊόντος παρατηρώντας μείωση του συνολικού οργανικού άνθρακα στο υγρό υπόλειμμα κατά 68,50 % (Yan, et al., 2021; Adar, et al., 2019).

Περαιτέρω, η θερμοκρασία επηρεάζει τόσο την απόδοση της αεριοποίησης όσο και την απόδοση της αεριοποίησης του άνθρακα (Adar, et al., 2020). Αυτό επιβεβαιώνεται και σε μελέτη, όπου διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας από 350 σε 450 °C αύξησε σημαντικά την απόδοση αεριοποίησης (από 1,29 σε 19,61%) (Yan, et al., 2021) και σε άλλη περίπτωση επιτεύχθηκε υψηλή απόδοση αεριοποίησης άνθρακα (0,73) στους 600 °C (Amrullah & Matsumura, 2018).

Όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε από 350 σε 450°C, η παραγωγή αερίου σύνθεσης αυξήθηκε από 0,06 σε 1,91 mol/kg, και όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε από 480 σε 540°C, η απόδοση του H<sub>2</sub> αυξήθηκε επίσης από 0,39 σε 0,51 % wt. (Yan, et al., 2021; Chen, et al., 2022b). Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι η απόδοση του αερίου σύνθεσης αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 450 °C σε 650 °C βελτιώνει επίσης τη σύνθεση του αερίου σύνθεσης. Χωρίς να συμπεριληφθεί καταλύτης, η παραγωγή αερίου αυξήθηκε τρεις φορές και η συγκέντρωση H<sub>2</sub> αυξήθηκε από 24% σε 43%.

Μελέτες έχουν αποδείξει τις ευεργετικές επιδράσεις των καταλυτών στην αεριοποίηση με υπερκρίσιμο νερό. Όταν χρησιμοποιείται K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ως καταλύτης, η απόδοση αεριοποίησης και αεριοποίησης άνθρακα είναι σχεδόν τέσσερις φορές μεγαλύτερες (25,26% και 20,02%, αντίστοιχα) από ό,τι όταν δεν προστίθεται καταλύτης (Zhai, et al., 2013). Επιπλέον, η προσθήκη καταλύτη αύξησε την απόδοση αεριοποίησης σε υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά (Adar, et al., 2020), αν και απαιτήθηκε KOH για την παραγωγή του μεγαλύτερου μοριακού κλάσματος (37,28%) και της μεγαλύτερης παραγωγής H<sub>2</sub> (1,60 mol/kg) (Yan, et al., 2021). Παρ' όλα αυτά, (Chen, et al., 2022a) διαπίστωσα ότι, υπό ιδανικές συνθήκες, η προσθήκη καταλυτών δεν είχε διακριτή επίδραση στην παραγωγή H<sub>2</sub> (20,66 mol/kg), στην απόδοση αεριοποίησης (73,49%) ή στην απόδοση αεριοποίησης άνθρακα (61,16%).

Τέλος, τρεις μελέτες επικεντρώθηκαν στη συμπεριφορά του φωσφόρου (Amrullah & Matsumura, 2018; Amrullah & Matsumura, 2019; Wang, et al., 2019). Σε δύο από αυτές υποστηρίζεται ότι ενώ κάποιος ανόργανος φώσφορος καθιζάνει στον αεριοποιητή, ο οργανικός φώσφορος μετατρέπεται σε ανόργανο φώσφορο σε λιγότερο από δέκα δευτερόλεπτα (Amrullah & Matsumura, 2019; Amrullah & Matsumura, 2018). Έχουν αναφερθεί ενέργειες ενεργοποίησης 19,1 και 18,7 kJ/mol για τη μετατροπή του οργανικού σε ανόργανο φώσφορο και του ανόργανου φωσφόρου σε υπολειμματικό ανόργανο φώσφορο, αντίστοιχα. Ο φώσφορος μετακινήθηκε από το στερεό υπόλειμμα στο υγρό προϊόν όταν προστέθηκαν αλκαλικά πρόσθετα σε ποσοστό 2-8% του βάρους, αυξάνοντας το επίπεδο φωσφόρου του υγρού προϊόντος από 41,0 σε 2.214,5 mg/L (Wang, et al., 2019).

## Κεφάλαιο 4: Σκοπός της εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διενέργεια μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης (μέσω ισοζυγίων) που επικεντρώνεται στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τις λειτουργικές πτυχές της μονάδας αεριοποίησης-παραγωγής ενέργειας που βρίσκεται εντός της ΔΕΥΑ Ρεθύμνου. Η μονάδα αυτή αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο ενός καινοτόμου πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας αποβλήτων και διαχείρισης βιοστερεών, με δυναμικότητα 5000 m<sup>3</sup>/d. Το σύστημα περιλαμβάνει μια σειρά από διαδοχικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένου του διαχωρισμού των βιοστερεών μέσω μικροκοσκίνισης, της ξήρανσης, της αεριοποίησης για την παραγωγή αερίου σύνθεσης και της επακόλουθης παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μέσω μιας μηχανής εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Αυτή η παραγωγή ενέργειας αποσκοπεί στην ικανοποίηση των εκτεταμένων ενεργειακών απαιτήσεων ολόκληρου του συστήματος. Η έρευνα αυτή διεξάγεται στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Έργου "New concept for energy self-sustainable wastewater treatment process and biosolids management, LIFE B2E4Sustainable-WWTP".

## Κεφάλαιο 5: Αεριοποίηση στα πλαίσια του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP

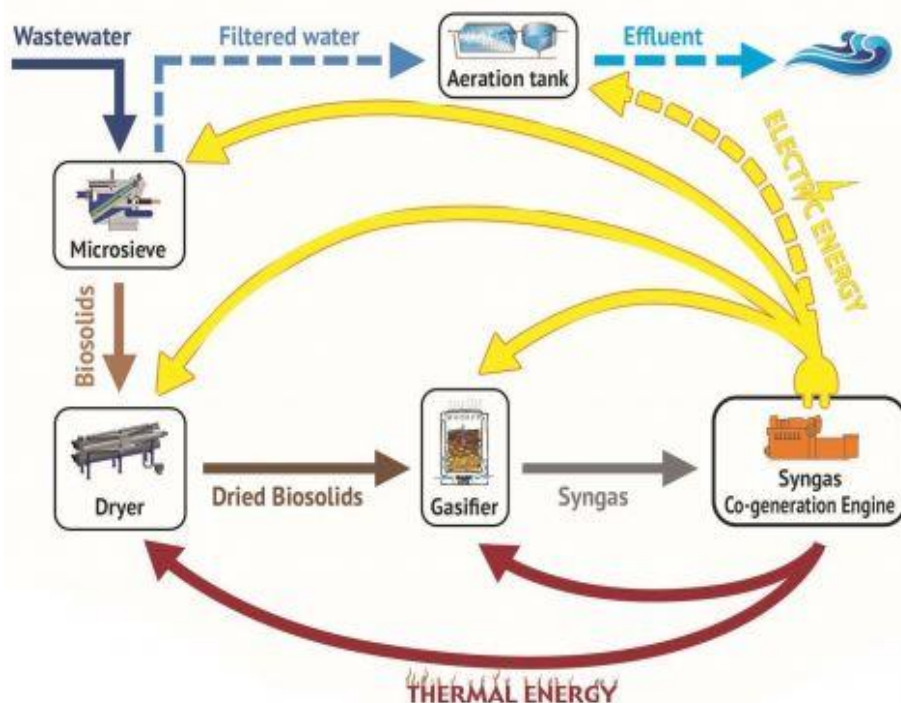
### 5.1 Περιγραφή - στόχοι - προσδοκώμενα αποτελέσματα του έργου

Το πιλοτικό έργο LIFE B2E4sustainable-WWTP βρίσκεται εγκατεστημένο στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Αποτελεί μία καινοτόμα μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, στην οποία υπάρχει η δυνατότητα να αξιοποιηθούν 5000 m<sup>3</sup>/d απόβλητα (Μάναλη, 2023).

Έχει ως βασικό στόχο να βελτιωθούν οι αποδόσεις του παρατεταμένου αερισμού στις ΕΕΛ και κατά συνέπεια να προστατευτεί και το υδάτινο περιβάλλον από την ρύπανση εξαιτίας των ΕΕΛ. Αυτό θα επιτευχθεί με μία πρωτοπόρα μέθοδο που χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια για την απομάκρυνση των στερεών πριν την δεξαμενή αερισμού.

Η χρήση των παραγόμενων βιοστερεών για τη παραγωγή ενέργειας μέσω αεριοποίησης προβλέπεται ότι θα μειώσει ακόμη περισσότερο την ενέργεια που χρησιμοποιείται από την ΕΕΛ και, κατά συνέπεια, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Διάγραμμα 5.1).

Η μονάδα συντίθεται από συγκεκριμένα βήματα και είναι διαδοχικά τα ακόλουθα (Εικόνα 5.1): (I) το μικροκόσκινο, στο οποίο αφαιρούνται κάποια από τα στερεά πριν την είσοδο τους στην δεξαμενή αερισμού, (II) το ξηραντήριο, για να απομακρυνθεί ένα μεγάλο μέρος της υγρασίας των βιοστερεών που παράγονται από το μικροκόσκινο, (III) ο αεριοποιητής, όπου παράγεται αέριο σύνθεσης από τα βιοστερεά, και (IV) η Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ), όπου καίγεται το αέριο που παράχθηκε στον αεριοποιητή. Παράγονται ηλεκτρική και θερμική ενέργεια ικανές να καλύψουν τις ανάγκες της μονάδας σε ενέργεια



**Διάγραμμα 5.1 Η ροή των βιοστερεών, της θερμότητας και της ηλεκτρικής ενέργειας στο πρόγραμμα LIFE B2E4sustainable-WWTP.**



**Εικόνα 5.1 Η πιλοτική μονάδα που έχει κατασκευαστεί στην ΕΕΛ Ρεθύμνου για την προ επεξεργασία των λυμάτων και τη χρήση των βιοστερεών που παράγονται από το έργο LIFE B2E4sustainable-WWTP (Μάναλη, 2023).**

## **5.2 Σύστημα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας**

Η διαδικασία της αεριοποίησης, η οποία αναλύεται σχολαστικά στο κεφάλαιο 3, περιλαμβάνοντας μια λεπτομερή παρουσίαση της τεχνολογίας, της επεξεργασίας του παραγόμενου αερίου σύνθεσης και των αντίστοιχων εφαρμογών τους που έχουν μελετηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, διενεργείται στο πλαίσιο του έργου LIFE B2E4sustainable-WWTP. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση βιοστερεών που προέρχονται από το στάδιο της μικροκοσκίνισης ως κύρια πρώτη ύλη. Χρησιμοποιώντας έναν αεριοποιητή καθοδικής ροής, η προσέγγιση αυτή αξιοποιεί αυτά τα βιοστερεά, ενώ η επεξεργασία του παραγόμενου αερίου έγινε με την εφαρμογή της μεθοδολογίας "ψυχρής οδού" (Μάναλη, 2023).

### **5.2.1. Σχεδιασμός - περιγραφή**

Το σύστημα αεριοποίησης-παραγωγής ενέργειας (Διάγραμμα 5.2) έχει εγκατασταθεί σε περιβάλλον προστατευμένο από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Αρχικά, η διεργασία ξεκινά στο σύστημα εισόδου όπου το ξηραντήριο συνδέεται με τον αεριοποιητή. Τα πρωτοβάθμια μικροκοσκονισμένα και αποξηραμένα βιοστερεά περιλαμβάνουν ένα μείγμα θραυσμάτων, κόκκων και κονιοποιημένου υλικού. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η επίτευξη πλήρους ξηρότητας των βιοστερεών είναι περιττή, καθώς η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία για την αεριοποίηση των βιοστερεών κυμαίνεται μεταξύ 10-15% (Pothoulaki, et al., 2022).

Τα αφυδατωμένα βιοστερεά διατηρούνται σε μια δεξαμενή με κάλυμμα, ώστε να μην εισέρχεται υγρασία. Κατόπιν, οδηγούνται σε μια μηχανή μπρικετοποίησης που τα συμπιέζει,



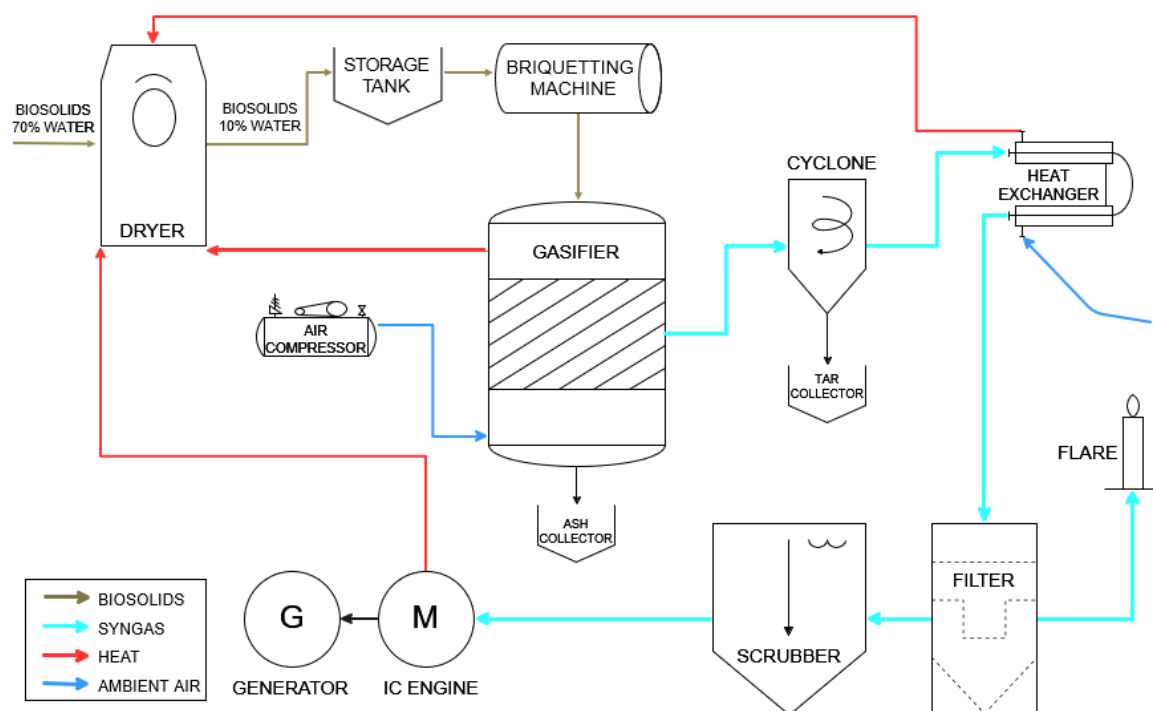
δημιουργώντας μπρικετοποιημένα βιοστερεά. Στη συνέχεια, τροφοδοτούνται στο σύστημα αεριοποίησης μέσω ενός συστήματος μεταφοράς. Η βασική διεργασία αεριοποίησης λαμβάνει χώρα σε έναν αεριοποιητή με καθοδική ροή, ο οποίος χωρίζεται σε διακριτές ζώνες: τις ζώνες ξήρανσης, πυρόλυσης, καύσης, αναγωγής και στάχτης (που προορίζεται για την απομάκρυνση της στάχτης χωρίς να διαταράσσεται η διεργασία αεριοποίησης).

Κατά την έξοδο του από τον αεριοποιητή, το ακατέργαστο αέριο σύνθεσης περιλαμβάνει τα κύρια συστατικά του ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  και  $\text{CH}_4$ ) μαζί με ανεπιθύμητες ακαθαρσίες, όπως σωματίδια, πίσσα, θείο, άζωτο και χλώριο. Η διαδικασία καθαρισμού του ακατέργαστου αερίου σύνθεσης, πριν από την εισαγωγή του στον κινητήρα συμπαραγωγής, ακολουθεί την "ψυχρή οδό" και περιλαμβάνει την εξής μέθοδο επεξεργασίας (Pothoulaki, et al., 2022):

1. Έναν κυκλώνα για την απομάκρυνση των σωματιδίων και της πίσσας.
2. Έναν εναλλάκτη θερμότητας με ευθύγραμμο σωλήνα για την ψύξη του αερίου σύνθεσης.
3. Ένα φίλτρο κοκκώδους βιομάζας για περαιτέρω απομάκρυνση των σωματιδίων και της πίσσας.
4. Χρήση καυστικής ή ασβεστολιθικής πλυντηρίδας για την εξάλειψη του θείου και του χλωρίου.
5. Μία πλυντηρίδα νερού για την εξάλειψη του θείου, της αμμωνίας και της υπολειμματικής πίσσας.

Μετά την επεξεργασία, ενσωματώνεται αναλυτής αερίου σύνθεσης για να διασφαλιστεί ότι το εξευγενισμένο αέριο σύνθεσης πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές για τον κινητήρα συμπαραγωγής. Τα όργανα μέτρησης της ροής τοποθετούνται στρατηγικά στις εξόδους του κυκλώνα και της πλυντηρίδας για την ακριβή παρακολούθηση της ροής του αερίου σύνθεσης. Επιπλέον, μεταξύ του κυκλώνα και του εναλλάκτη θερμότητας έχει εγκατασταθεί ένα σύστημα που διευκολύνει την πολλαπλή διανομή του αερίου σύνθεσης. Αυτό το σύστημα επιτρέπει την κατευθυνόμενη κατανομή του αερίου σύνθεσης για διάφορους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης πυρσού καύσης για πλεονάζον ή ακατάλληλο αέριο σύνθεσης, της άμεσης καύσης στο ξηραντήριο και της προετοιμασίας στη συσκευή καθαρισμού του αερίου σύνθεσης.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο πυρσός καύσης είναι εξοπλισμένος με σύστημα παρακολούθησης της φλόγας που περιλαμβάνει λειτουργία συναγερμού. Οι βαλβίδες αντεπιστροφής ενσωματώνονται σε όλες τις εισόδους αέρα και τις εξόδους αερίου που συνδέονται με τον αεριοποιητή και από αυτόν, περιλαμβάνοντας το τμήμα παροχής καυσίμου, τον κυκλώνα και τον πυρσό καύσης. Επιπλέον, έχουν θεσπιστεί πρωτόκολλα απενεργοποίησης έκτακτης ανάγκης, τα οποία επιτρέπουν τη διακοπή της παροχής βιοστερεών στον αεριοποιητή, τη διακοπή της παροχής αέρα στον αεριοποιητή και την ανακατεύθυνση του αερίου σύνθεσης στον πυρσό καύσης.



**Διάγραμμα 5.2 Διάγραμμα ροής του πιλοτικού συστήματος αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (Pothoulaki, et al., 2022).**

### 5.2.2. Εγκατάσταση - συναρμολόγηση – διασύνδεση

Η εγκατάσταση αεριοποίησης της πιλοτικής μονάδας (Εικόνα 5.3) πρέπει να πληροί συγκεκριμένα τεχνικά κριτήρια για την επίτευξη όλων των προκαθορισμένων στόχων. Το αρχικό καθήκον ήταν να δημιουργηθεί ένα σύστημα εισόδου που να συνδέει το ξηραντήριο (Εικόνα 5.2) της μονάδας με τον αεριοποιητή.

Τα αποξηραμένα βιοστερεά αποθηκεύονται σε μία κλειστή δεξαμενή ώστε να αποφεύγεται η διεσόδου υγρασίας. Στη συνέχεια, μεταφέρονται σε μια μηχανή μπρικετοποίησης, η οποία τα συμπιέζει για να σχηματίσει μπρικέτες βιοστερεών. Αυτές οι μπρικέτες μεταφέρονται στη συνέχεια με σύστημα ιμάντων στον αεριοποιητή. Το αποθηκευμένο και διαθέσιμο αποξηραμένο υλικό για αεριοποίηση διατηρεί περιεκτικότητα σε υγρασία περίπου 10-15% (Μάναλη, 2023). Η μηχανή μπρικετοποίησης μπορεί να παράγει έως και 100 kg μπρικέτες ανά ώρα με κατανάλωση ενέργειας 15 kWh. Δημιουργεί μπρικέτες με διάμετρο 4 cm.

Ο αεριοποιητής καθοδικής ροής παράγει έως και 30 m<sup>3</sup>/h αερίου σύνθεσης και 15 kg/h τροφοδοσίας βιομάζας. Ο αεριοποιητής είναι κατασκευασμένος από πυρίμαχα υλικά ικανά να αντέχουν σε θερμοκρασίες έως 1200 °C και να λειτουργούν σε υποπίεση έως 5 kPa. Ο αέρας, που είναι απαραίτητος για τις αντιδράσεις αεριοποίησης, εισάγεται με φυσητήρα για παραγωγή 10-30 m<sup>3</sup>/h αερίου σύνθεσης, ενώ το σύστημα διαθέτει κατάλληλο μετατροπέα ρύθμισης των στροφών και είναι ηλεκτρονικά προγραμματιζόμενο. Περιλαμβάνει επίσης, συνδέσεις συγκόλλησης (ειδικά για σωλήνες και εξαρτήματα) κατάλληλες για υψηλές θερμοκρασίες. Σε περιπτώσεις που υπερβαίνουν τους 800°C, πρέπει να χρησιμοποιούνται φλάντζες (με κατάλληλο στεγανωτικό υλικό φλάντζας ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες και διαβρώσεις) (Pothoulaki, et al., 2022).

Συνοπτικά, ο αεριοποιητής και το σύστημα καθαρισμού του αερίου σύνθεσης αποτελούνται από τα ακόλουθα εξαρτήματα:

- Χώρος αποθήκευσης μπρικέτας.
- Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου.
- Αντιδραστήρας αεριοποίησης.
- Σύστημα διαχείρισης τέφρας.
- Σύστημα εισαγωγής αέρα.
- Κυκλώνας.
- Πολλαπλό σύστημα διανομής αερίου σύνθεσης.
- Φλογοθάλαμος για την καύση ακατάλληλου ή πλεονάζοντος αερίου σύνθεσης.
- Σύστημα ψύξης του αερίου.
- Συστήματα ασφαλείας.
- Φίλτρο βιομάζας.
- Καθαριστής.
- Όργανο για τον προσδιορισμό της σύνθεσης και τη μέτρηση της ροής του αερίου.



*Εικόνα 5.2 Το ξηραντήριο της μονάδας (Μάναλη, 2023).*



**Εικόνα 5.3 Το σύστημα αεριοποίησης του προγράμματος LIFE B2E4sustainable-WWTP.**

Το αέριο σύνθεσης, μετά τον καθαρισμό του, τροφοδοτείται σε ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (Εικόνα 5.4), το οποίο έχει τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιεί αέριο σύνθεσης ως κύρια πηγή καυσίμου.
- Η μέγιστη συνεχής ισχύς λειτουργίας της εκτιμάται σε περίπου 6 kVA, με τάση 220 Volt.
- Ο ρυθμιστής στροφών είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενος.
- Ο πίνακας είναι πλήρως αυτοματοποιημένος και ψηφιακός.
- Είναι εξοπλισμένος με σταθεροποιητή τάσης για σταθερή παραγωγή τάσης.
- Διαθέτει ηχομονωτικό κάλυμμα για την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού θορύβου.
- Περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου και προστασίας που διασφαλίζει την αυτόματη λειτουργία. Το σύστημα αυτό διευκολύνει την αυτόματη απενεργοποίηση του κινητήρα με ειδικές ενδείξεις για διάφορα σενάρια, όπως:
- Διακοπή λειτουργίας που ενεργοποιείται από πτώση της πίεσης λαδιού.
- Διακοπή λειτουργίας λόγω αυξημένων θερμοκρασιών.



*Εικόνα 5.4 Το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος (Μάναλη, 2023).*



## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα και συζήτηση

### 6.1 Μεθοδολογία υπολογισμών ισοζυγίων μάζας και ενέργειας

Τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας είναι αναγκαία για τον προσδιορισμό της απόδοσης των προτεινόμενων τεχνολογιών και την αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης της πιλοτικής μονάδας. Οι έννοιες της διατήρησης μάζας και του ενεργειακού ισοζυγίου αποτέλεσαν τη βάση για τους υπολογισμούς των ισοζυγίων ενέργειας (για τη θεωρητική τους αξιολόγηση) και για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των τμημάτων της πιλοτικής μονάδας. Στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικοί τύποι που χρησιμοποιήθηκαν στους θεωρητικούς υπολογισμούς και η συλλογιστική που χρησιμοποιήθηκε (Τσαμουτσόγλου, 2020).

Οι υπολογισμοί ξεκινούν με την εύρεση της ενέργειας που απαιτείται για την ξήρανση, χρησιμοποιώντας τους τύπους που παρουσιάζονται λεπτομερώς στον Πίνακα 6.1 (Μάναλη, 2023).

**Πίνακας 6.1 Οι εξισώσεις υπολογισμού της απαιτούμενης ενέργειας ( $Q_{total}$ ) για ξήρανση.**

$Q_{total} = \dot{Q}_l + \dot{Q}_s$	
$\dot{Q}_l = m \times L$	$\dot{Q}_l$ : λανθάνουσα θερμότητα (J) m: μάζα του νερού (kg) L: ειδική λανθάνουσα θερμότητα (100,1 atm) ίση με 2.256,4 kJ/kg
$\dot{Q}_s = m \times C \times \Delta T$	$\dot{Q}_s$ : Η αισθητή θερμότητα (J) m: Η μάζα της ουσίας (kg) C: Η ειδική θερμοχωρητικότητα της ουσίας (kJ/kg·K) ( $C_{H_2O} = 4,284$ kJ/kg·K) $\Delta T$ : μεταβολή θερμοκρασίας (K ή °C)

Οι εξισώσεις του Πίνακα 6.2 αποτέλεσαν τη βάση για τους υπολογισμούς της διεργασίας αεριοποίησης για την παραγωγή ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι ορισμένες παράμετροι είναι μεταβλητές. Η ανώτερη θερμογόνο δύναμη (HHV) του αερίου σύνθεσης υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αεριοποιητής έχει απόδοση μεταξύ 70 και 90 % και ότι για κάθε 1 kg βιομάζας που τροφοδοτείται σε αυτόν παράγονται 2 m<sup>3</sup> αερίου σύνθεσης. Με βάση την παραγόμενη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια, η MEK έχει απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας 20% και απόδοση θερμικής ενέργειας 50%. Το υπόλοιπο 30% περιλαμβάνει τις απώλειες (Μάναλη, 2023).

**Πίνακας 6.2 Παράμετροι υπολογισμού για την ηλεκτρική και την θερμική ενέργεια.**

$\dot{Q}_{\text{biosolids}} = \dot{m}_{\text{biosolids in gasifier}} \times \text{HHV}_{\text{biosolids}}$	<p><math>\dot{Q}_{\text{biosolids}}</math>: Το ενεργειακό περιεχόμενο των βιοστερεών (MJ/h).</p> <p><math>\dot{m}_{\text{biosolids in gasifier}}</math>: Η μαζική παροχή της τροφοδοτούμενης βιομάζας στον αεριοποιητή (kg/h).</p> <p><math>\text{HHV}_{\text{biosolids}}</math>: Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών (MJ/kg).</p>
$n = \frac{\Delta H_{\text{syngas}} \times \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}\right) \times 2(\text{m}^3)}{\Delta H_{\text{biosolids}} \times \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right) \times 1\text{kg}} \rightarrow$ $\Delta H_{\text{syngas}} = \frac{n \times \Delta H_{\text{biosolids}}}{2}$	<p><math>\Delta H_{\text{biosolids}}</math>: Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) των βιοστερεών (MJ/kg).</p> <p><math>\Delta H_{\text{syngas}}</math>: Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) του αερίου σύνθεσης (MJ/m<sup>3</sup>).</p> <p>n: Ο βαθμός απόδοσης του αεριοποιητή.</p>
$\dot{Q}_{\text{syngas}} = \dot{V}_{\text{syngas yield}} \times \text{HHV}_{\text{syngas}}$	<p><math>\dot{Q}_{\text{syngas}}</math>: Το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου σύνθεσης (MJ).</p> <p><math>\dot{V}_{\text{syngas yield}}</math>: Η ογκομετρική παροχή του αερίου σύνθεσης (m<sup>3</sup>/h).</p> <p><math>\text{HHV}_{\text{syngas}}</math>: Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) του αερίου σύνθεσης (MJ/m<sup>3</sup>).</p>
$E_{\text{engine-electric}} = n_{\text{electric}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$	<p><math>E_{\text{engine-electric}}</math>: Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MJ).</p> <p><math>n_{\text{electric}}</math>: Ο βαθμός απόδοσης της ΜΕΚ σε ηλεκτρική ενέργεια.</p> <p><math>\dot{Q}_{\text{syngas}}</math>: Το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου σύνθεσης (MJ).</p>
$\dot{Q}_{\text{engine-thermal}} = n_{\text{thermal}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$	<p><math>\dot{Q}_{\text{engine-thermal}}</math>: Η θερμική ενέργεια από την ΜΕΚ (MJ).</p> <p><math>n_{\text{thermal}}</math>: Ο βαθμός απόδοσης της ΜΕΚ σε θερμική ενέργεια.</p> <p><math>\dot{Q}_{\text{syngas}}</math>: Το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου σύνθεσης (MJ).</p>
$\dot{Q}_{\text{engine-losses}} = n_{\text{losses}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$	<p><math>\dot{Q}_{\text{engine-losses}}</math>: Οι απώλειες από την ΜΕΚ (MJ).</p> <p><math>n_{\text{losses}}</math>: Οι απώλειες της ΜΕΚ.</p> <p><math>\dot{Q}_{\text{syngas}}</math>: Το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου σύνθεσης (MJ).</p>

Ο Πίνακας 6.3 παρέχει την εξίσωση και τις παραμέτρους που συνθέτουν τη συνολική θερμική ενέργεια που παρέχεται στο ξηραντήριο από το σύστημα αεριοποίησης-παραγωγής ενέργειας (Μάναλη, 2023).

**Πίνακας 6.3 Η εξίσωση της συνολικής παρεχόμενης θερμικής ενέργειας.**

$\dot{Q}_{\text{total to dryer}} = \dot{Q}_{\text{engine-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas cooling}} + \dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} + \dot{Q}_{\text{gasifier-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas combustion}}$	
$\dot{Q}_{\text{engine-thermal}} = n_{\text{thermal}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$	$\dot{Q}_{\text{engine-thermal}}$ : Η θερμική ενέργεια από την MEK (MJ). $n_{\text{thermal}}$ : Ο βαθμός απόδοσης της MEK σε θερμική ενέργεια. $\dot{Q}_{\text{syngas}}$ : Το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου σύνθεσης (MJ).
$\dot{Q}_{\text{syngas cooling}} = \rho_{\text{syngas}} \times \dot{V}_{\text{syngas}} \times C_{p_{\text{syngas}}} \times (T_f - T_i)$	$\dot{Q}_{\text{syngas cooling}}$ : Η θερμική ενέργεια από την ψύξη του αερίου σύνθεσης (MJ). $\rho_{\text{syngas}}$ : Η πυκνότητα του αερίου σύνθεσης (kg/m <sup>3</sup> ). $\dot{V}_{\text{syngas}}$ : Ο όγκος του αερίου σύνθεσης (m <sup>3</sup> ). $C_{p_{\text{syngas}}}$ : Η ειδική θερμοχωρητικότητα του αερίου σύνθεσης (KJ/kg·K). $T_f$ : Η θερμοκρασία του αερίου σύνθεσης μετά την ψύξη του (K ή °C). $T_i$ : Η θερμοκρασία του αερίου σύνθεσης στην έξοδο του αεριοποιητή (K ή °C).
$\dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} = \rho_k \times \dot{V}_k \times C_{p_k} \times (T_f - T_i)$	$\dot{Q}_{\text{exhaust fumes}}$ : Η θερμική ενέργεια από τα καυσαέρια της MEK (MJ). $\rho_k$ : Η πυκνότητα των καυσαερίων(kg/m <sup>3</sup> ). $\dot{V}_k$ : Η ογκομετρική παροχή των καυσαερίων σε m3/h, που βασίστηκε το γεγονός ότι η αναλογία air/ syngas είναι 1:1 (m <sup>3</sup> /h). $C_{p_k}$ : Η ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων (KJ/kg·K). $T_f$ : Η θερμοκρασία των καυσαερίων μετά την ψύξη τους (K ή °C). $T_i$ : Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την μηχανή (K ή °C).
$\dot{Q}_{\text{gasifier-thermal}}$	Η θερμική ενέργεια από τον αντιδραστήρα του αεριοποιητή (5% του ενεργειακού περιεχομένου του παραγόμενου αερίου σύνθεσης).
$\dot{Q}_{\text{syngas combustion}}$	Η θερμική ενέργεια που διοχετεύεται κατευθείαν στον ξηραντήριο μετά την καύση του 10% του παραγόμενου αερίου σύνθεσης.
$\dot{Q}_{\text{total to dryer}}$	Η συνολική θερμική ενέργεια που λαμβάνει το ξηραντήριο από το σύστημα παραγωγής αεριοποίησης.

## 6.2 Αποτελέσματα των υπολογισμών και συζήτηση

Με βάση τη μεθοδολογία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 6.1, πραγματοποιήθηκαν οι αναγκαίοι υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και ενέργειας. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το αέριο σύνθεσης περιλαμβάνει την ενέργεια που απαιτείται για τον στόχο της ξήρανσης των βιοστερεών. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι οι πραγματικές ενεργειακές απαιτήσεις υπόκεινται στην αποδοτικότητα του συστήματος εναλλαγής θερμότητας και στην απόδοση του ξηραντηρίου. Επιπλέον, η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος ασκούν επίδραση στην αποδοτικότητα της διαδικασίας ξήρανσης (Μάναλη, 2023).

Στη μονάδα αεριοποίησης για το αέριο σύνθεσης, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μια μηχανή ψύξης, με σκοπό τη μεταφορά των καυσαερίων απευθείας στο ξηραντήριο, αποφεύγοντας έτσι πιθανές ενεργειακές απώλειες λόγω της χρήσης εναλλάκτη θερμότητας. Επιπλέον, χρησιμοποιείται ένας επιπλέον εναλλάκτης θερμότητας αερίου-αερίου για την ανάκτηση θερμότητας από το ζεστό αέριο σύνθεσης. Συμπληρωματικά, εφαρμόζεται ένα σύστημα που επιτρέπει την καύση περίπου 10% του παραγόμενου αερίου σύνθεσης, με σκοπό την παροχή επιπλέον θερμότητας στο ξηραντήριο (Μάναλη, 2023). Οι υπολογισμοί βρίσκονται συγκεντρωμένοι στον Πίνακα 6.4.

**Πίνακας 6.4 Υπολογισμοί των παραμέτρων των ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας της πιλοτικής μονάδας.**

Παράμετροι	Τιμές	Σημειώσεις
<b>Η θερμική ενέργεια που απαιτείται θεωρητικά για την ξήρανση</b>		
Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (kg/d)	920,0	
Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (kg/h)	38,3	
Περιεχόμενη Υγρασία (%)	70,0	<b>Εύρος: 60 - 70</b>
Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/d) (0% υγρασία)	276	
Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/h) (0% υγρασία)	11,5	
Επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση (%)	10,0	<b>Εύρος: 10 - 15</b>
Ξηραμένα βιοστερεά (kg/h) (10% υγρασία) Εξατμισμένο νερό (kg/h)	12,7	
Εξατμισμένο νερό (kg/h)	25,7	
Απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για ξήρανση (MJ)	58,0	$\dot{Q}_l = \dot{m} \times L$
Απαιτούμενη αισθητή θερμότητα για ξήρανση (MJ)	12,8	$\dot{Q}_s = \dot{m} \times C \times \Delta T$
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ /kWh)	70,8/19,7	$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_l + \dot{Q}_s$
<b>Τα χαρακτηριστικά του ξηραντηρίου της πιλοτικής μονάδας</b>		
Παροχή αέρα (m <sup>3</sup> )	95,8	
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ/kWh)	105,4/ <b>29,3</b>	
<b>Η παροχή θερμότητας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας</b>		
Θερμογόνος δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)	21,5	<b>Εύρος: 21 - 22,5</b>
Ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών (MJ/h)	247,3	$\dot{Q}_{\text{biosolids}} = \dot{m}_{\text{biosolids in gasifier}} \times HHV_{\text{biosolids}}$

Παραγόμενο αέριο σύνθεσης (m <sup>3</sup> /h)	23,0	
Απόδοση αεριοποιητή (%)	80	<b>Εύρος: 70-80</b>
Θερμογόνος δύναμη αερίου σύνθεσης (MJ/m <sup>3</sup> )	8,6	$\Delta H_{\text{syngas}} = \frac{n \times \Delta H_{\text{biosolids}}}{2}$
Ενεργειακό περιεχόμενο αερίου σύνθεσης (MJ/h)	197,8	$\dot{Q}_{\text{syngas}} = \dot{V}_{\text{syngas}} \times \text{HHV}_{\text{syngas}} \times \text{yield}$
Ποσοστό αερίου σύνθεσης για καύση προς το ξηραντήριο (%)	10	
Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς το ξηραντήριο (MJ)	19,8	
Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς την MEK (MJ)	178,0	
Απόδοση MEK (ηλεκτρική ενέργεια, %)	20	
Απόδοση MEK (θερμική ενέργεια, %)	50	<b>Εύρος: 45 - 50</b>
Απόδοση MEK (απώλειες, %)	30	<b>Εύρος: 30 - 35</b>
Ηλεκτρική ενέργεια από MEK (MJ)	35,6	$E_{\text{engine-electric}} = n_{\text{electric}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$
Θερμική ενέργεια από MEK (MJ)	89,0	$\dot{Q}_{\text{engine-thermal}} = n_{\text{thermal}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$
Απώλειες από MEK (MJ)	53,4	$\dot{Q}_{\text{engine-losses}} = n_{\text{losses}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$
Θερμική ενέργεια από καυσάεiria της MEK (MJ)	0,5	$\dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} = \rho_k \times \dot{V}_k \times C_{p_k} \times (T_f - T_i)$
Θερμική ενέργεια από ψύξη αερίου σύνθεσης (MJ)	3,9	$\dot{Q}_{\text{syngas cooling}} = \rho_{\text{syngas}} \times \dot{V}_{\text{syngas}} \times C_{p_{\text{syngas}}} \times (T_f - T_i)$
Θερμική ενέργεια από αεριοποιητή (MJ)	9,9	
Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας (MJ/kWh)	123,1 / <b>34,2</b>	$\dot{Q}_{\text{total to dryer}} = \dot{Q}_{\text{engine-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas cooling}} + \dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} + \dot{Q}_{\text{gasifier-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas combustion}}$
<b>Το ισοζύγιο θερμικής ενέργειας</b>		
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση θεωρητικά (kWh)	19,7	
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο (kWh)	29,3	
Εκτιμώμενο ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας (%)	20	<b>Εύρος: 15 - 30</b>
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών (kWh)	35,1	
Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (kWh)	34,2	
Καθαρή θερμική ενέργεια (kWh)	<b>-0,9</b>	<b>ΑΡΝΗΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ</b>

Το αποτέλεσμα της καθαρής θερμικής ενέργειας υπολογίζεται ως αρνητικό, υποδηλώνοντας έλλειψη επαρκούς ενέργειας. Σε συνέχεια αυτού, κατά τη διαδικασία υπολογισμού των ισοζυγίων, συζητήθηκε η εναλλακτική προσέγγιση της τροποποίησης του ξηραντηρίου, με στόχο τη λειτουργία του μέσω κενού. Αυτό θα εξασφάλιζε την



απομάκρυνση της υγρασίας από τα βιοστερεά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, δεδομένου ότι η θερμοκρασία εξάτμισης του νερού μειώνεται υπό συνθήκες υποπίεσης, με αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η λειτουργία του ξηραντηρίου στη μονάδα παραμένει υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, και γι' αυτό πραγματοποιήθηκαν βελτιώσεις στις συνθήκες και στη συσκευή προκειμένου να επιτευχθεί θετικό αποτέλεσμα.

Στο πλαίσιο του Κεφαλαίου 6.1, αναπτύχθηκε μια λεπτομερής αναφορά σε παραμέτρους που εκδηλώνουν κυμαινόμενη φύση και επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Η κατανόηση και η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων αποτελεί ουσιαστική διαδικασία για την αποτελεσματική εκτέλεση της διαδικασίας. Ανάμεσα σε αυτές τις παραμέτρους, είναι οι εξής (Μάναλη, 2023):

- Συγκέντρωση TSS στο Εισερχόμενο Απόβλητο (150 - 400 mg/L): Η ποσότητα των στερεών σωματιδίων στο εισερχόμενο απόβλητο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας.
- Περιεχόμενη Υγρασία στα Βιοστερεά (60 - 70%): Η ποσότητα υγρασίας στα παραγόμενα μικροκοσκινισμένα βιοστερεά επηρεάζει την απόδοση της διαδικασίας.
- Επιθυμητή Περιεχόμενη Υγρασία των Βιοστερεών για Αεριοποίηση (10 - 15%): Η επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία είναι καθοριστική για την αποτελεσματική αεριοποίηση των βιοστερεών.
- Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη των Βιοστερεών (21 - 22,5 MJ/kg): Η ενεργειακή τιμή των βιοστερεών είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική χρήση τους.
- Απόδοση Αεριοποιητή (70 - 80%): Η απόδοση του αεριοποιητή επηρεάζει τη μεταφορά της ενέργειας στο σύστημα.
- Απόδοση της MEK (Θερμική Ενέργεια 45 - 50%, Απώλειες 30 - 35%): Η απόδοση της MEK είναι σημαντική για τον υπολογισμό της ενέργειας.
- Εκτιμώμενες Απώλειες Μεταφοράς Θερμότητας (15 - 30%): Οι προβλεπόμενες απώλειες λόγω μεταφοράς θερμότητας είναι παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη στη συνολική αξιολόγηση του συστήματος.

Στους παρακάτω πίνακες πραγματοποιήθηκαν αλλαγές σε σημαντικές παραμέτρους, με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασής τους στα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 6.5, η περιεχόμενη υγρασία επιλέγεται να είναι 65% αντί για το αρχικό 70%. Η αλλαγή αυτή οδηγεί σε αντιστροφή του αρνητικού αποτελέσματος, καθώς η καθαρή θερμική ενέργεια υπολογίζεται τώρα σε 7 kWh, θεωρούμενη αποτελεσματική.

Στους Πίνακες 6.6 και 6.7, η τιμή της καθαρής θερμικής ενέργειας είναι 0,6, ωστόσο αυτή η τιμή είναι τυχαία, καθώς η παράμετρος που αλλάζει σε κάθε πίνακα είναι διαφορετική. Στον Πίνακα 6.6, αλλάζει η θερμογόνος δύναμη των βιοστερεών και επιλέγεται το μέγιστο όριο του εύρους της τιμής (22,5 MJ/kg). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτει ένα οριακά θετικό αποτέλεσμα. Το ίδιο ισχύει και για το αποτέλεσμα του Πίνακα 6.7, όπου αλλάζει το ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας από 15% σε 20%.

**Πίνακας 6.5 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας με περιεχόμενη υγρασία 65% αντί για 70%.**

Παράμετροι	Τιμές	Σημειώσεις
<b>Η θερμική ενέργεια που απαιτείται θεωρητικά για την ξήρανση</b>		
Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (kg/d)	920,0	
Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (kg/h)	38,3	
Περιεχόμενη Υγρασία (%)	<b>65,0</b>	<b>Εύρος: 60 - 70</b>
Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/d) (0% υγρασία)	276,0	
Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/h) (0% υγρασία)	13,4	
Επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση (%)	10,0	<b>Εύρος: 10 - 15</b>
Ξηραμένα βιοστερεά (kg/h) (10% υγρασία)	14,7	
Εξατμισμένο νερό (kg/h)	23,6	
Απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για ξήρανση (MJ)	53,2	$\dot{Q}_l = \dot{m} \times L$
Απαιτούμενη αισθητή θερμότητα για ξήρανση (MJ)	12,8	$\dot{Q}_s = \dot{m} \times C \times \Delta T$
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ /kWh)	66,0 / <b>18,3</b>	$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_l + \dot{Q}_s$
<b>Τα χαρακτηριστικά του ξηραντηρίου της πιλοτικής μονάδας</b>		
Παροχή αέρα (m <sup>3</sup> )	95,8	
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ/kWh)	96,6 / <b>26,8</b>	
<b>Η παροχή θερμότητας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας</b>		
Θερμογόνος δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)	21,5	<b>Εύρος: 21 - 22,5</b>
Ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών (MJ/h)	288,2	$\dot{Q}_{biosolids} = \dot{m}_{biosolids} \times HHV_{biosolids} \text{ in gasifier}$
Παραγόμενο αέριο σύνθεσης (m <sup>3</sup> /h)	26,8	
Απόδοση αεριοποιητή (%)	80	<b>Εύρος: 70-80</b>
Θερμογόνος δύναμη αερίου σύνθεσης (MJ/m <sup>3</sup> )	8,6	$\Delta H_{syngas} = \frac{n \times \Delta H_{biosolids}}{2}$
Ενεργειακό περιεχόμενο αερίου σύνθεσης (MJ/h)	230,6	$\dot{Q}_{syngas} = \dot{V}_{syngas} \times HHV_{syngas} \text{ yield}$
Ποσοστό αερίου σύνθεσης για καύση προς το ξηραντήριο (%)	10	
Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς το ξηραντήριο (MJ)	23,1	
Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς την MEK (MJ)	207,5	
Απόδοση MEK (ηλεκτρική ενέργεια, %)	20	
Απόδοση MEK (θερμική ενέργεια, %)	50	<b>Εύρος: 45 - 50</b>
Απόδοση MEK (απώλειες, %)	30	<b>Εύρος: 30 - 35</b>
Ηλεκτρική ενέργεια από MEK (MJ)	41,5	$E_{engine-electric} = n_{electric} \times \dot{Q}_{syngas}$
Θερμική ενέργεια από MEK (MJ)	103,8	$\dot{Q}_{engine-thermal} = n_{thermal} \times \dot{Q}_{syngas}$
Απώλειες από MEK (MJ)	62,3	$\dot{Q}_{engine-losses} = n_{losses} \times \dot{Q}_{syngas}$
Θερμική ενέργεια από καυσαέρια της MEK (MJ)	0,6	$\dot{Q}_{exhaust\ fumes} = \rho_k \times \dot{V}_k \times C_{p_k} \times (T_f - T_i)$

Θερμική ενέργεια από ψύξη αερίου σύνθεσης (MJ)	4,6	$\dot{Q}_{\text{syngas cooling}} = \rho_{\text{syngas}} \times \dot{V}_{\text{syngas}} \times C_{p_{\text{syngas}}} \times (T_f - T_i)$
Θερμική ενέργεια από αεριοποιητή (MJ)	11,5	
Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας (MJ/kWh)	143,5 / 39,9	$\dot{Q}_{\text{total to dryer}} = \dot{Q}_{\text{engine-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas cooling}} + \dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} + \dot{Q}_{\text{gasifier-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas combustion}}$
<b>Το ισοζύγιο θερμικής ενέργειας</b>		
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση θεωρητικά (kWh)	18,3	
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο (kWh)	26,8	
Εκτιμώμενο ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας (%)	20	<b>Εύρος: 15 - 30</b>
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών (kWh)	32,2	
Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (kWh)	39,9	
Καθαρή θερμική ενέργεια (kWh)	7,7	<b>ΘΕΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ</b>

**Πίνακας 6.6 Υπολογισμοί ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας με θερμογόνο δύναμη βιοστερεών 22,5 MJ/kg αντί για 21,5 MJ/kg.**

Παράμετροι	Τιμές	Σημειώσεις
<b>Η θερμική ενέργεια που απαιτείται θεωρητικά για την ξήρανση</b>		
Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (kg/d)	920,0	
Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (kg/h)	38,3	
Περιεχόμενη Υγρασία (%)	70,0	<b>Εύρος: 60 - 70</b>
Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/d) (0% υγρασία)	276,0	
Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/h) (0% υγρασία)	11,5	
Επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση (%)	10,0	<b>Εύρος: 10 - 15</b>
Ξηραμένα βιοστερεά (kg/h) (10% υγρασία)	12,7	
Εξατμισμένο νερό (kg/h)	25,7	
Απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για ξήρανση (MJ)	58,0	$\dot{Q}_l = m \times L$
Απαιτούμενη αισθητή θερμότητα για ξήρανση (MJ)	12,8	$\dot{Q}_s = m \times C \times \Delta T$
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ /kWh)	70,8 / 19,7	$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_l + \dot{Q}_s$
<b>Τα χαρακτηριστικά του ξηραντηρίου της πιλοτικής μονάδας</b>		
Παροχή αέρα (m <sup>3</sup> )	95,8	
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ/kWh)	105,4 / 29,3	
<b>Η παροχή θερμότητας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας</b>		
Θερμογόνο δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)	22,5	<b>Εύρος: 21 - 22,5</b>

Ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών (MJ/h)	258,5	$\dot{Q}_{\text{biosolids}} = \dot{m}_{\text{biosolids in gasifier}} \times \text{HHV}_{\text{biosolids}}$
Παραγόμενο αέριο σύνθεσης (m³/h)	23,0	
Απόδοση αεριοποιητή (%)	80	<b>Εύρος: 70-80</b>
Θερμογόνος δύναμη αερίου σύνθεσης (MJ/m³)	9,0	$\Delta H_{\text{syngas}} = \frac{n \times \Delta H_{\text{biosolids}}}{2}$
Ενεργειακό περιεχόμενο αερίου σύνθεσης (MJ/h)	206,8	$\dot{Q}_{\text{syngas}} = \dot{V}_{\text{syngas}} \times \text{HHV}_{\text{syngas}} \times \text{yield}$
Ποσοστό αερίου σύνθεσης για καύση προς το ξηραντήριο (%)	10	
Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς το ξηραντήριο (MJ)	20,7	
Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς την MEK (MJ)	186,1	
Απόδοση MEK (ηλεκτρική ενέργεια, %)	20	
Απόδοση MEK (θερμική ενέργεια, %)	50	<b>Εύρος: 45 - 50</b>
Απόδοση MEK (απώλειες, %)	30	<b>Εύρος: 30 - 35</b>
Ηλεκτρική ενέργεια από MEK (MJ)	37,2	$E_{\text{engine-electric}} = n_{\text{electric}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$
Θερμική ενέργεια από MEK (MJ)	93,1	$\dot{Q}_{\text{engine-thermal}} = n_{\text{thermal}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$
Απώλειες από MEK (MJ)	55,8	$\dot{Q}_{\text{engine-losses}} = n_{\text{losses}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$
Θερμική ενέργεια από καυσαέρια της MEK (MJ)	0,5	$\dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} = \rho_k \times \dot{V}_k \times C_{p_k} \times (T_f - T_i)$
Θερμική ενέργεια από ψύξη αερίου σύνθεσης (MJ)	3,9	$\dot{Q}_{\text{syngas cooling}} = \rho_{\text{syngas}} \times \dot{V}_{\text{syngas}} \times C_{p_{\text{syngas}}} \times (T_f - T_i)$
Θερμική ενέργεια από αεριοποιητή (MJ)	10,3	
Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας (MJ/kWh)	128,5/ <b>35,7</b>	$\dot{Q}_{\text{total to dryer}} = \dot{Q}_{\text{engine-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas cooling}} + \dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} + \dot{Q}_{\text{gasifier-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas combustion}}$
<b>Το ισοζύγιο θερμικής ενέργειας</b>		
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση θεωρητικά (kWh)	19,7	
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο (kWh)	29,3	
Εκτιμώμενο ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας (%)	20	<b>Εύρος: 15 - 30</b>
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών (kWh)	35,1	
Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (kWh)	35,7	
Καθαρή θερμική ενέργεια (kWh)	<b>0,6</b>	<b>ΘΕΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ</b>

**Πίνακας 6.7 Υπολογισμοί των ισοζυγίων μάζας και θερμικής ενέργειας με 15% απώλειες αντί για 20%.**

Παράμετροι	Τιμές	Σημειώσεις
<b>Η θερμική ενέργεια που απαιτείται θεωρητικά για την ξήρανση</b>		
Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (kg/d)	920,0	
Μικροκοσκινισμένα βιοστερεά (kg/h)	38,3	

Περιεχόμενη Υγρασία (%)	70,0	<b>Εύρος: 60 - 70</b>
Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/d) (0% υγρασία)	276,0	
Πλήρως ξηρά βιοστερεά (kg/h) (0% υγρασία)	11,5	
Επιθυμητή περιεχόμενη υγρασία βιοστερεών για αεριοποίηση (%)	10,0	<b>Εύρος: 10 - 15</b>
Ξηραμένα βιοστερεά (kg/h) (10% υγρασία)	12,7	
Εξατμισμένο νερό (kg/h)	25,7	
Απαιτούμενη λανθάνουσα θερμότητα για ξήρανση (MJ)	58,0	$\dot{Q}_l = m \times L$
Απαιτούμενη αισθητή θερμότητα για ξήρανση (MJ)	12,8	$\dot{Q}_s = m \times C \times \Delta T$
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ /kWh)	70,8 / 19,7	$Q_{total} = \dot{Q}_l + \dot{Q}_s$
<b>Τα χαρακτηριστικά του ξηραντηρίου της πιλοτικής μονάδας</b>		
Παροχή αέρα (m <sup>3</sup> )	95,8	
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση (MJ/kWh)	105,4/ 29,3	
<b>Η παροχή θερμότητας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας</b>		
Θερμογόνος δύναμη βιοστερεών (MJ/kg)	21,5	<b>Εύρος: 21 - 22,5</b>
Ενεργειακό περιεχόμενο βιοστερεών (MJ/h)	247,3	$\dot{Q}_{\text{biosolids}} = \dot{m}_{\text{biosolids}} \times \text{HHV}_{\text{biosolids in gasifier}}$
Παραγόμενο αέριο σύνθεσης (m <sup>3</sup> /h)	23,0	
Απόδοση αεριοποιητή (%)	80	<b>Εύρος: 70-80</b>
Θερμογόνος δύναμη αερίου σύνθεσης (MJ/m <sup>3</sup> )	8,6	$\Delta H_{\text{syngas}} = \frac{n \times \Delta H_{\text{biosolids}}}{2}$
Ενεργειακό περιεχόμενο αερίου σύνθεσης (MJ/h)	197,8	$\dot{Q}_{\text{syngas}} = \dot{V}_{\text{syngas}} \times \text{HHV}_{\text{syngas yield}}$
Ποσοστό αερίου σύνθεσης για καύση προς το ξηραντήριο (%)	10	
Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς το ξηραντήριο (MJ)	19,8	
Ενέργεια από το αέριο σύνθεσης προς την MEK (MJ)	178,0	
Απόδοση MEK (ηλεκτρική ενέργεια, %)	20	
Απόδοση MEK (θερμική ενέργεια, %)	50	<b>Εύρος: 45 - 50</b>
Απόδοση MEK (απώλειες, %)	30	<b>Εύρος: 30 - 35</b>
Ηλεκτρική ενέργεια από MEK (MJ)	35,6	$E_{\text{engine-electric}} = n_{\text{electric}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$
Θερμική ενέργεια από MEK (MJ)	89,0	$\dot{Q}_{\text{engine-thermal}} = n_{\text{thermal}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$
Απώλειες από MEK (MJ)	53,4	$\dot{Q}_{\text{engine-losses}} = n_{\text{losses}} \times \dot{Q}_{\text{syngas}}$
Θερμική ενέργεια από καυσαέρια της MEK (MJ)	0,5	$\dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} = \rho_k \times \dot{V}_k \times C_{p_k} \times (T_f - T_i)$
Θερμική ενέργεια από ψύξη αερίου σύνθεσης (MJ)	3,9	$\dot{Q}_{\text{syngas cooling}} = \rho_{\text{syngas}} \times \dot{V}_{\text{syngas}} \times C_{p_{\text{syngas}}} \times (T_f - T_i)$
Θερμική ενέργεια από αεριοποιητή (MJ)	9,9	
Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας (MJ/kWh)	123,1 / 34,2	$\dot{Q}_{\text{total to dryer}} = \dot{Q}_{\text{engine-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas cooling}} + \dot{Q}_{\text{exhaust fumes}} + \dot{Q}_{\text{gasifier-thermal}} + \dot{Q}_{\text{syngas combustion}}$



Το ισοζύγιο θερμικής ενέργειας		
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξήρανση θεωρητικά (kWh)	19,7	
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο (kWh)	29,3	
Εκτιμώμενο ποσοστό απωλειών λόγω μεταφοράς θερμότητας (%)	15	Εύρος: 15 - 30
Απαιτούμενη συνολική θερμότητα για ξηραντήριο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών (kWh)	33,6	
Συνολική παροχή θερμικής ενέργειας από μονάδα αεριοποίησης - παραγωγής ενέργειας (kWh)	34,2	
Καθαρή θερμική ενέργεια (kWh)	0,6	ΘΕΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ

Όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια, πραγματοποιήθηκε αρχικός υπολογισμός για την πιλοτική μονάδα στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Η μονάδα έχει δυναμικότητα 5.000 m<sup>3</sup>/ημέρα εισερχόμενου αποβλήτου και υλικό τροφοδοσίας του ξηραντηρίου αποτελούμενο αποκλειστικά από μικροκοσκινισμένα βιοστερεά. Κατά τους υπολογισμούς, λαμβάνεται υπόψη η συνεχής λειτουργία της πιλοτικής μονάδας για 24 ώρες την ημέρα. Ωστόσο, διάφορες καταναλώσεις δεν συμπεριλήφθηκαν στο ισοζύγιο. Αυτό έγινε καθώς κάποιες καταναλώσεις θεωρούνται μέρη της ΕΕΛ (αντλίες τροφοδοσίας μικροκόσκινου) ή δεν θα χρησιμοποιηθούν ξανά, όπως η δοσομετρική αντλία κροκιδωτικού, γιατί διάφορες δοκιμές που έγιναν δεν ήταν επιτυχημένες. Επιπλέον, υπάρχουν και εκείνες που δεν θεωρούνται βασικές καταναλώσεις, επειδή δεν είναι από τα βασικά λειτουργικά μέρη της πιλοτικής μονάδας (ο κλιματισμός του οικίσκου και ο φωτισμός της πιλοτικής μονάδας), και τέλος οι καταναλώσεις έναρξης λειτουργίας της μονάδας, γιατί συμβαίνουν μόνο στην έναρξη της λειτουργίας και όχι συνεχώς, άρα είναι αμελητέες. Συγκεκριμένα, οι καταναλώσεις που δεν συνυπολογίζονται είναι οι παρακάτω (Μάναλη, 2023):

- ❖ Οι αντλίες τροφοδοσίας μικροκόσκινου με εγκατεστημένη ισχύ 6,9 kW.
- ❖ Η δοσομετρική αντλία κροκιδωτικού με εγκατεστημένη ισχύ 0,18 kW.
- ❖ Ο κλιματισμός του οικίσκου με εγκατεστημένη ισχύ 1 kW και ο φωτισμός της πιλοτικής μονάδας με εγκατεστημένη ισχύ 0,60 kW.
- ❖ Οι καταναλώσεις έναρξης λειτουργίας, που περιλαμβάνουν το κομπρεσέρ αέρα (10 min λειτουργίας και 2,50 kW εγκατεστημένη ισχύς) για δημιουργία κενού, το κομπρεσέρ για αρχική ανάφλεξη αεριοποιητή (10 min λειτουργίας και 2,60 kW εγκατεστημένη ισχύς), και την ανάφλεξη πυρσού (5 min λειτουργίας και 0,15 kW εγκατεστημένη ισχύς).

Σύμφωνα με τον ακόλουθο Πίνακα 6.8, η λειτουργία των διαφόρων μερών δεν είναι συνεχής καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Συγκεκριμένα (Μάναλη, 2023):

- ❖ Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα: Λειτουργεί για 10 δευτερόλεπτα κάθε 2 λεπτά.
- ❖ Κοχλίας από μικροκόσκινο προς ξηραντήριο: Λειτουργεί για 120 δευτερόλεπτα μία φορά ανά ώρα.
- ❖ Αναβατόριο τροφοδοσίας ξηραντηρίου: Λειτουργεί για 150 δευτερόλεπτα τέσσερις φορές ανά ημέρα.
- ❖ Βαλβίδα μεταξύ γραμμών ξηραντηρίου: Λειτουργεί για 1 δευτερόλεπτο κάθε 10 λεπτά.
- ❖ Κοχλίας από ξηραντήριο προς μπρικετομηχανή: Λειτουργεί για 300 δευτερόλεπτα μία φορά ανά ώρα.

- ❖ Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή: Λειτουργεί για 60 δευτερόλεπτα δύο φορές ανά ώρα.
- ❖ Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας: Λειτουργεί για 10 δευτερόλεπτα έξι φορές ανά ώρα.
- ❖ Ηλεκτροβάνες: Λειτουργούν για 40 δευτερόλεπτα δύο φορές ανά ημέρα.

Σε αυτή την περίπτωση, το ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρνητικό (-63,03 kWh), αφού η αναλώμενη ενέργεια (300,39 kWh) υπερβαίνει την παραγόμενη ενέργεια (237,36 kWh).

**Πίνακας 6.8 Υπολογισμοί ισοζυγίων ηλεκτρικής ενέργειας της πιλοτική μονάδας.**

Περιγραφή	Εγκατεστημένη ισχύς (kW)	Χρόνος (h/d)	Αναλώμενη ενέργεια (kWh)
<b>Μικροκοσκίνιση</b>			
Σύστημα ανακυκλοφορίας νερού	1,10	24,00	26,40
Διάταξη πλύσης φίλτρου ιμάντα	0,90	2,00	1,80
Φίλτρο ιμάντα	0,75	24,00	18,00
Κοχλίας εξόδου	0,25	24,00	6,00
<b>Άθροισμα</b>	<b>3,00</b>		<b>52,20</b>
<b>Τροφοδοσία ξηραντηρίου</b>			
Κοχλίας από μικροκόσκινο προς ξηραντήριο	0,55	0,80	0,44
Αναβατήριο τροφοδοσίας ξηραντηρίου	0,55	0,17	0,09
<b>Άθροισμα</b>	<b>1,10</b>		<b>0,53</b>
<b>Ξήρανση</b>			
Γραμμή αποθήκευσης και ανάμιξης	2,20	24,00	52,80
Γραμμή ξήρανσης	2,20	24,00	52,80
Βαλβίδα μεταξύ γραμμών	1,00	0,03	0,03
Ανεμιστήρας (είσοδος αέρα)	2,00	24,00	48,00
Ανεμιστήρας (έξοδος αέρα)	2,00	24,00	48,00
<b>Άθροισμα</b>	<b>9,40</b>		<b>201,63</b>
<b>Τροφοδοσία αεριοποιητή</b>			
Κοχλίας από ξηραντήριο προς μπρικετομηχανή	1,20	2,00	2,40
Μπρικετομηχανή	0,80	24,00	19,20
Αναμικτήρας βιοστερεών μπρικετομηχανής	0,08	24,00	1,92
<b>Άθροισμα</b>	<b>2,08</b>		<b>23,52</b>
<b>Αεριοποίηση - παραγωγή ενέργειας</b>			
Αναμικτήρας βιοστερεών αεριοποιητή	0,25	0,80	0,20
Σύστημα απομάκρυνσης τέφρας	0,55	0,40	0,22
Αντλία πλυντηρίδας	0,35	24,00	8,40
ΜΕΚ	0,12	24,00	2,88

PLC και αισθητήρια	0,25	24,00	6,00
Ηλεκτροβάνες	0,06	0,02	0,00
Η/Υ	0,20	24,00	4,80
<b>Άθροισμα</b>	<b>1,78</b>		<b>22,50</b>
<b>Ισοζύγιο ισχύος - ηλεκτρικής ενέργειας</b>			
Παραγόμενη ισχύς (kW)	9,89	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)	237,36
Αναλωμένη ισχύς (kW)	12,52	Αναλωμένη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)	300,39
Καθαρή ισχύς (kW)	<b>-2,63</b>	Καθαρή ηλεκτρική ενέργεια (kWh)	<b>-63,03</b>

Κατά την διάρκεια των υπολογισμών των ισοζυγίων ηλεκτρικής ενέργειας, η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια φέρει αρνητικό αποτέλεσμα (- 63,03 kWh). Αυτό δημιουργεί έναν προβληματισμό ως προς την επιλογή του υλικού τροφοδοσίας. Αλλάζοντας, το υλικό τροφοδοσίας από 100% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά σε 50% μικροκοσκινισμένα βιοστερεά και 50% ηλιακά ξηραμένη δευτεροβάθμια ιλύς, άλλα διατηρώντας τις ίδιες συνθήκες, επιτυγχάνεται ο στόχος του θετικού αποτελέσματος (134,03 kWh). Η χρήση ηλιακά ξηραμένης δευτεροβάθμιας ιλύος είναι εφικτή, δεδομένου ότι στην ΕΕΛ Ρεθύμνου λειτουργεί ηλιακό ξηραντήριο για τις ανάγκες της εγκατάστασης (Μάναλη, 2023).

## Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο να προβεί σε μια ολοκληρωμένη ανάλυση, εξετάζοντας το σχεδιασμό, την κατασκευή και τις λειτουργικές πτυχές μίας μονάδας αεριοποίησης-παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκεται στη ΔΕΥΑ Ρεθύμνου. Ενσωματωμένη σε ένα καινοτόμο πιλοτικό σύστημα επεξεργασίας αποβλήτων και διαχείρισης βιοστερεών με ημερήσια δυναμικότητα επεξεργασίας 5000 m<sup>3</sup>, η μονάδα αυτή είναι κομβικής σημασίας για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας του παρατεταμένου αερισμού στη ΕΕΛ. Πρωταρχικός στόχος είναι η προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος από τη ρύπανση που προέρχεται από τη ΕΕΛ. Η βελτίωση αυτή επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μιας καινοτομικής μεθόδου που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας μέσω της απομάκρυνσης μέρους των στερεών πριν από την είσοδό τους στη δεξαμενή αερισμού. Επιπλέον, η αξιοποίηση των βιοστερεών για την παραγωγή ενέργειας μέσω αεριοποίησης αναμένεται να περιορίσει σημαντικά τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις της ΕΕΛ, περιορίζοντας έτσι και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Ως προς την ενέργεια και τους υπολογισμούς αυτής μέσω ισοζυγίων, ενώ η παραγόμενη θερμική ενέργεια προβλέπεται να είναι θεωρητικά επαρκής για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της μονάδας, από τους υπολογισμούς λαμβάνοντας υπόψη και τις πραγματικές ενεργειακές απαιτήσεις, φαίνεται ότι η θερμική ενέργεια είναι τελικά οριακά ανεπαρκής (-0,9 kWh). Αυτό εγείρει ανησυχίες σχετικά με την αρχή λειτουργίας του ξηραντηρίου, δεδομένου όμως ότι αυτή δεν είναι δυνατόν να αλλάξει, προκύπτει η ανάγκη για βελτίωση του συστήματος. Ταυτόχρονα, υπολογισμοί που επαναλήφθηκαν και περιλαμβάνουν μικρές αλλαγές σε μεταβλητές παραμέτρους, όπως μειωμένη υγρασία, διαφορετική τιμή θερμογόνου δύναμης των βιοστερεών και μειωμένα ποσοστά απωλειών, έδωσαν θετικές τιμές (7,7 kWh, 0,6 kWh, 0,6 kWh, αντίστοιχα). Τα ευρήματα αυτά δείχνουν ότι μπορούν να αντιμετωπιστούν πιθανές προκλήσεις και να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της μονάδας. Οι υπολογισμοί για την ηλεκτρική ενέργεια έδειξαν επίσης έλλειμμα (-63,03 kWh), το οποίο θα μπορούσε να αντισταθμιστεί χρησιμοποιώντας μείγμα δύο ή περισσότερων τύπων βιοστερεών (π.χ. ξηραμένα μικροκοσκινισμένα μαζί με ηλιακά ξηραμένα και αφυδατωμένα δευτεροβάθμια βιοστερεά, που υπάρχουν ήδη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου).

Είναι προφανές ότι οι θεωρητικές τιμές αποκλίνουν σημαντικά από τα πρακτικά αποτελέσματα. Για να γεφυρωθεί αυτό το χάσμα, οι μελλοντικές ενέργειες θα πρέπει να δώσουν προτεραιότητα στη διεξαγωγή πρόσθετων δοκιμών στον αεριοποιητή. Οι δοκιμές αυτές είναι απαραίτητες όχι μόνο για την επικύρωση των θεωρητικών αποκλίσεων, αλλά κυρίως για τη διαμόρφωση πρακτικών λύσεων που συνάδουν με τις πραγματικές εφαρμογές.

## Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία

### 8.1 Ελληνική

- Γκίκας, Π. (2020). *Σημειώσεις Μαθήματος Σχεδιασμός Χημικών και Περιβαλλοντικών Περιπτώσεων, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μάναλη, Α. (2023). *Αξιοποίηση βιοστερεών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συνδυασμό των μεθόδων μικροκοσκίνισης - αεριοποίησης*. Χανιά: Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Τσαμουτσόγλου, Κ. (2020). *Ισοζύγια μάζας και ενέργειας του καινοτομικού συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης βιοστερεών με τη μέθοδο της αεριοποίησης*, Χανιά: Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Χρυσικόπουλος, Κ. (2018). *Εισαγωγή στις διεργασίες καθάρσιμου νερού και λυμάτων* (2η εκδ.). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

### 8.2 Ξενόγλωσση

- Abu El-Rub, Z., Bramer, E., & Brem, G. (2004). Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 43(22), pp. 6911-6919. doi:10.1021/ie0498403
- Adar, E., Ince, M., & Bilgili, M. (2019). Characteristics of Liquid Products in Supercritical Water Gasification of Municipal Sewage Sludge by Continuous Flow Tubular Reactor. *Waste and Biomass Valorization*, 11(11), pp. 6321-6335. doi:10.1007/s12649-019-00858-9
- Adar, E., Ince, M., & Bilgili, M. S. (2020). Supercritical water gasification of sewage sludge by continuous flow tubular reactor: A pilot scale study. *Chemical Engineering Journal*, 391. doi:10.1016/j.cej.2019.123499
- Adar, E., Karatop, B., Ince, M., & Bilgili, M. S. (2016). Comparison of methods for sustainable energy management with sewage sludge in Turkey based on SWOT-FAHP analysis. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 62, pp. 429-440. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.007.
- Amrullah, A., & Matsumura, Y. (2018). Supercritical water gasification of sewage sludge in continuous reactor. *Bioresource Technology*, 249, pp. 276-283. doi:10.1016/j.biortech.2017.10.002
- Amrullah, A., & Matsumura, Y. (2019). Sewage Sludge Gasification under a Hydrothermal Condition: Phosphorus Behavior and Its Kinetics. *Energy and Fuels*, 33(3), pp. 2301-2307.

- Arjhar, W., Hinsui, T., Liplap, P., & Raghavan, G. (2013). Evaluation of an energy production system from sewage sludge using a pilot-scale downdraft gasifier. *Energy and Fuels*, 27(1), pp. 229-236. doi:10.1021/ef3012728
- Babu, S., & Whaley, T. (1992). IEA Biomass Thermal Gasification Project. *Biomass and Bioenergy*, 2(1-6), pp. 299-306.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis, Chapter 6 - Design of Biomass Gasifiers*. doi:10.1016/b978-0-8155-2049-8.10004-x
- Basu, P. (2010). Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. In *Biomass Gasification and Pyrolysis* (pp. 167-228). Boston: Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-374988-8.00006-4
- Beenackers, A. (1999). Biomass gasification in moving beds, a review of European technologies. *Renewable Energy*, 16, pp. 1180-1186.
- Bermudez, J., & Fidalgo, B. (2016). Production of bio-syngas and bio-hydrogen via gasification. In *Handbook of Biofuels Production* (2 ed., pp. 431-494). Sawston, Cambridge, UK: Woodhead Publishing. doi:10.1016/B978-0-08-100455-5.00015-1
- Bodzek, D., Janoszka, B., Dobosz, C., Warzecha, L., & Bodzek, M. (1997). Determination of polycyclic aromatic compounds and heavy metals. *Journal of Chromatography*, 774, pp. 177-192. Retrieved from papers2://publication/uuid/80F68069-2C26-4B58-84B1-E8681FC8CD39
- Bridgwater, A. (1995). The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. *Fuel*, 74(5), pp. 631-653.
- Bridgwater, A., Meier, D., & Radlein, D. (1999). An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*, 30, pp. 1479-1493. doi:10.1016/j.jinorgbio.2016.11.027
- Britannica. (2023). *Primary and secondary treatment of sewage, using the activated sludge process*. Retrieved from <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment/Primary-treatment>
- Buragohain, B., Mahanta, P., & Moholkar, V. (2010). Thermodynamic optimization of biomass gasification for decentralized power generation and Fischer-Tropsch synthesis. *Energy*, 35(6), pp. 2557-2579. doi:10.1016/j.energy.2010.03.003
- Burbano, H., Pareja, J., & Amell, A. (2011). Laminar burning velocities and flame stability analysis of H<sub>2</sub>/CO/air mixtures with dilution of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(4), pp. 3232-3242. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.11.089
- Calvo, L., García, A., & Otero, M. (2013). An experimental investigation of sewage sludge gasification in a fluidized bed reactor. *The Scientific World Journal*. doi:10.1155/2013/479403
- Cano, R., Pérez-Elvira, S., & Fdz-Polanco, F. (2015). Energy feasibility study of sludge pretreatments: A review. *Applied Energy*, pp. 176-185. doi:10.1016/j.apenergy.2015.03.132
- Cantinho, P., Matos, M., Trancoso, M., & Correia dos Santos, M. (2016). Behaviour and fate of metals in urban wastewater treatment plants: a review. *International Journal*



of *Environmental Science and Technology*, Volume 13(Issue 1), pp. 359-386.  
doi:10.1007/s13762-015-0887-x

- Carotenuto, A., Di Fraia, S., Massarotti, N., Uddin, M., & Vanoli, L. (2022). Combined Heat and Power Generation from Mechanically Dewatered Sewage Sludge: Numerical Modelling. *Chemical Engineering Transactions*, 92, pp. 283-288.  
doi:10.3303/CET2292048
- Chacartegui, R., Sánchez, D., De Escalona, J., Monje, B., & Sánchez, T. (2012). On the effects of running existing combined cycle power plants on syngas fuel. *Fuel Processing Technology*, 103, pp. 97-109. doi:10.1016/j.fuproc.2011.11.017
- Chang, H., Zhao, Y., Li, X., Damgaard, A., & Christensen, T. (2023). Review of inventory data for the biological treatment of sewage sludge. *Waste Management*, 156, pp. 66-74. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.027.
- Chang, H., Zhao, Y., Zhao, S., Damgaard, A., & Christensen, T. (2022). Review of inventory data for the thermal treatment of sewage sludge. *Waste Management*, 146, pp. 106-118. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.05.002.
- Chen, S., Sun, Z., Zhang, Q., Hu, J., & Xiang, W. (2017). Steam gasification of sewage sludge with CaO as CO<sub>2</sub> sorbent for hydrogen-rich syngas production. *Biomass and Bioenergy*, 107, pp. 52-62. doi:10.1016/j.biombioe.2017.09.009
- Chen, Y., Yi, L., Wei, W., Jin, H., & Guo, L. (2022b). Hydrogen production by sewage sludge gasification in supercritical water with high heating rate batch reactor. *Energy*, 238. doi:10.1016/j.energy.2021.121740
- Chen, Y., Yi, L., Yin, J., Jin, H., & Guo, L. (2022a). Sewage sludge gasification in supercritical water with fluidized bed reactor: Reaction and product characteristics. *Energy*, 239. doi:10.1016/j.energy.2021.122115
- Choi, Y., Ko, J., & Kim, J. (2017). A new type three-stage gasification of dried sewage sludge: Effects of equivalence ratio, weight ratio of activated carbon to feed, and feed rate on gas composition and tar, NH<sub>3</sub>, and H<sub>2</sub>S removal and results of approximately 5 h gasification. *118*, 139-146. doi:10.1016/j.energy.2016.12.032
- Choi, Y., Ko, J., & Kim, J. (2018). Gasification of dried sewage sludge using an innovative three-stage gasifier: Clean and H<sub>2</sub>-rich gas production using condensers as the only secondary tar removal apparatus. *Fuel*, 216, pp. 810-817.  
doi:10.1016/j.fuel.2017.12.068
- CivilDigital. (2013). *Anaerobic Sludge Digestion*. Retrieved from <https://civildigital.com/anaerobic-sludge-digestion/>
- Compost Turners. (2022). *Sewage Sludge Composting Process, Biosolids Compost Benefits. Affordable Compost Turner for Sale*. doi:https://compost-turner.net/composting-technologies/municipal-sludge-composting-treatment-method.html
- Courson, C., & Gallucci, K. (2009). *Substitute Natural Gas from Waste-Gas cleaning for waste applications (syngas cleaning for catalytic synthetic natural gas synthesis)* (Vol. 8). doi:10.1016/B978-0-12-815554-7.00008-8

- De Andrés, J., Narros, A., & Rodríguez, M. (2011a, 433-440). Air-steam gasification of sewage sludge in a bubbling bed reactor: Effect of alumina as a primary catalyst. *Fuel Processing Technology*, 92(3). doi:10.1016/j.fuproc.2010.10.006
- De Andrés, J., Narros, A., & Rodríguez, M. (2011b). Behaviour of dolomite, olivine and alumina as primary catalysts in air-steam gasification of sewage sludge. *Fuel*, 90(2), pp. 521-527. doi:10.1016/j.fuel.2010.09.043
- Deliverable: B.3.1 Selection and purchase-modification of the cogeneration engine & B.3.2 Design of the sludge management system interfaces.* (n.d.).
- Dolphin Centrifuge. (2022). *Dewatering Centrifuge | Operation, Animation, Uses, Benefits*. doi:https://dolphincentrifuge.com/dewatering-centrifuge/
- Dou, B., Chen, B., Gao, J., & Sha, X. (2006). HCl Removal and Chlorine Distribution in the Mass Transfer Zone of a Fixed-Bed Reactor at High Temperature. *Energy and Fuels*, 20(3), pp. 959-963. doi:10.1021/ef060018g
- Eawag. (2013). *Disinfection and Tertiary Filtration*. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. doi:https://sswm.info/factsheet/disinfection-and-tertiary-filtrati
- Edwards, J., Othman, M., Crossin, E., & Burn, S. (2017). Anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludge: A comparative life cycle assessment in the context of a waste service. *Bioresource Technology*, 223, pp. 237-249. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.044.
- Fytili, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 12(Issue 1), pp. 116-140. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014.
- Gabbar, H., Lisi, D., Aboughaly, M., Damideh, V., & Hassen, I. (2020). Modeling of a plasma-based waste gasification system for solid waste generated onboard of typical cruiser vessels used as a feedstock. *Designs*, 4(3), pp. 1-19. doi:10.3390/designs4030033
- Gandhi, V., & Shah, K. (2021). *Advances in Wastewater Treatment I*. doi:https://doi.org/10.21741/9781644901144-1
- Gao, N., Kamran, K., Quan, C., & Williams, P. T. (2020). Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review. *Progress in Energy and Combustion Science*. doi:https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100843.
- Gil-Lalaguna, N., Sánchez, 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, pp. 652-662. doi:10.1016/j.energy.2014.08.061
- H2 4U Pty Ltd. (2022). *Types of Gasifiers-H24u.com*. Retrieved from https://h24u.com/types-of-gasifiers/
- Hantoko, D., Antoni, Kanchanatip, E., Yan, M., Weng, Z., Gao, Z., & Zhong, Y. (2019). Assessment of sewage sludge gasification in supercritical water for H<sub>2</sub>-rich syngas

- production. *Process Safety and Environmental Protection*, 131, pp. 63-72. doi:10.1016/j.psep.2019.08.035
- Harrison, E., Oakes, S., Hysell, M., & Hay, A. (2006). Organic chemicals in sewage sludges. *Science of The Total Environment*, 367( 2–3), pp. 481-497. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.04.002.
- Heidenreich, S., & Foscolo, P. (2015). New concepts in biomass gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, pp. 72-95. doi:10.1016/j.pecs.2014.06.002
- Hernández, A., Ferrasse, J., & Roche, N. (2013). Limiting the pollutant content in the sewage sludge producer gas through staged gasification. *Chemical Engineering and Technology*, 36(11), pp. 1985-1996. doi:10.1002/ceat.201300103
- Hill, P. (2020). *lagoons.com*. Retrieved from https://lagoons.com/blog/sludge/lagoon-screens/
- Hirohata, O., Wakabayashi, T., Tasaka, K., Fushimi, C., Furusawa, T., Kuchonthara, P., & Tsutsumi, A. (2008). Release behavior of alkali and alkaline earth metals during biomass steam gasification. *Energy and Fuels*, 22(6), pp. 4235-4239.
- Hoang, S., Madhubashani, A., Vithanage, M., Perera, V., Wijesekara, H., Wang, H., . . . Bolan, N. (2022). Treatment processes to eliminate potential environmental hazards and restore agronomic value of sewage sludge: A review. *Environmental Pollution*, 293. doi:https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118564
- Huang, H., & Yuan, X. (2016). The migration and transformation behaviors of heavy metals during the hydrothermal treatment of sewage sludge. *Bioresource Technology*, 200, pp. 991-998. doi:10.1016/j.biortech.2015.10.099
- Huber, G., Iborra, S., & Corma, A. (2006). Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering. *Chemical Reviews*, 106(9), pp. 4044-4098. doi:10.1021/cr068360d
- Hušek, M., Moško, J., & Pohořelý, M. (2022). Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art. *Journal of Environmental Management*, 315. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115090
- Jia, Y., Chen, Y., Qi, G., Yu, B., Liu, J., Zhou, P., & Zhou, Y. (2023). Molecular insight into the transformation of dissolved organic matter during sewage sludge composting: An investigation of a full-scale composting plant. *Environmental Research*, 233. doi:https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116460.
- Jiang, Y., Gao, F., Zhang, N., Li, J., Xu, M., & Jiang, Y. (2023). Dehydration Performance of Municipal Sludge and Its Dewatering Conditioning Methods: A Review. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 62, pp. 11337-11357. doi:https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01553
- Khan, M., Naqvi, S., Taqvi, S., Shahbaz, M., Ali, I., Mehran, M., . . . Juchelková, D. (2021). Air gasification of high-ash sewage sludge for hydrogen production: Experimental, sensitivity and predictive analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.11.192
- Khawer, M., Naqvi, S., Ali, I., Arshad, M., Juchelková, D., Anjum, M., & Naqvi, M. (2022, July 30). Anaerobic digestion of sewage sludge for biogas & biohydrogen

- production: State-of-the-art trends and prospects. *Fuel*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125416>
- Kishore, V. (2009). *Renewable energy engineering and technology: a knowledge compendium*. New Delhi, India: The Energy and Resources Institute, TERI
- Kosstrin, H. (2017). *Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies-Wet scrubbing and gas filtration of syngas in IGCC systems*. doi:10.1016/B978-0-08-100167-7.00010-X
- Lee, U., Dong, J., & Chung, J. (2018). *Energy Conversion and Management*, 158, pp. 430-436. doi:10.1016/j.enconman.2017.12.081
- Lema, J., & Martinez, S. (2017). *Innovative wastewater treatment & resource recovery technologies: impacts on energy, economy and environment*, (Τόμ. 1st). London.: IWA.
- Lewis, D., & Gattie, D. (2002). Pathogen Risks From Applying Sewage Sludge to Land. *Environmental Science and Technology*, pp. 287-293. doi:10.1021/es0223426
- Li, X. (2015). The Application of Fluidized Bed Incineration for Sludge Innocuous. *International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering* (pp. 366-369). Changsha, China: Atlantis Press. Retrieved from <https://www.atlantispress.com/proceedings/ism3e-15>
- Liang, Y., Xu, D., Feng, P., Hao, B., Guo, Y., & Wang, S. (2021, February 21). Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control. *Journal of Cleaner Production*, 295. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126456>
- Liu, Z., Mayer, B., Venkiteshwaran, K., Seyedi, S., Raju, A., Zitomer, D., & McNamara, P. (2020). The state of technologies and research for energy recovery from municipal wastewater sludge and biosolids. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 14, pp. 31-36. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.12.004>.
- Liu, Y., Tan, C., Gao, B., Ruihong, M., Ping, Z., Ganyu, C., Chen, Y., Zhan; W., Lu; Hongtao, W. (2021) Comparison between hydrogen-rich biogas production from conventional pyrolysis and microwave pyrolysis of sewage sludge. Is microwave pyrolysis always better in the whole temperature range? 23322-23333. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.165>
- Longzhong Machinery. (2015). *Sludge Disposal Methods in Wastewater Treatment*. doi:<https://www.lzzgchina.com/solutions/project-case/sludge-disposal-methods-in-wastewater-treatment.html>
- Ltd., I. E. (2011). Biomass Gasifiers, Gasifiers Pellets Supplier, Biomass Uses, Bio Fuel. Retrieved from <https://www.infiniteenergyindia.com/biomass-gasifiers.html>
- Luque, R., De La Osa, A., Campelo, J., Romero, A., Valverde, J., & Sanchez, P. (2012). Design and development of catalysts for Biomass-To-Liquid-Fischer-Tropsch (BTL-FT) processes for biofuels production. *Energy and Environmental Science*, 5(1), pp. 5186-5202. doi:10.1039/c1ee02238e

- Lv, P., Yuan, Z., Wu, C., Ma, L., Chen, Y., & Tsubaki, N. (2007). Bio-syngas production from biomass catalytic gasification. *Energy Conversion and Management*, 48(4), pp. 1132-1139. doi:10.1016/j.enconman.2006.10.014
- Manali, A., & Gikas, P. (2019). Utilization of primary sieved solids for gasification and energy production.
- Manali, A., Mavrakis, N., & Gikas, P. (2021). *Environmental Impact Assessment for an integrated microsieving-drying-gasification pilot plant for biosolids to electric energy in Rethymno, Greece 8th International Conference on Sustainable Solid Waste Management Thessaloniki, Greece, 23 - 25 June 2021*. Thessaloniki.
- Manara, P., & Zabaniotou, A. (2012). Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, Volume 16(Issue 5), pp. 2566-2582. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.074.
- Martínez, J., Mahkamov, K., Andrade, R., & Lora, E. (2012). Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. *Renewable Energy*, 38, pp. 1-9. doi:10.1016/j.renene.2011.07.035
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). Boston: McGraw-Hill Education Inc.
- Migliaccio, R., Brachi, P., Montagnaro, F., Papa, S., Tavano, A., Montesarchio, P., Papa, S., Tavano, A., Montesarchio, P., Ruoppolo, G., Urciuolo, M. (2021). Sewage Sludge Gasification in a Fluidized Bed: Experimental Investigation and Modeling. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 60(13), pp. 5034-5047. doi:10.1021/acs.iecr.1c00084
- Nabi, M., Zhang, G., Zhang, P., Tao, X., Wang, S., Ye, J., Zhang, Q., Zubair, M., Bao, S., Y. (2019). Contribution of solid and liquid fractions of sewage sludge pretreated by high pressure homogenization to biogas production. *Bioresource Technology*, 286. doi:10.1016/j.biortech.2019.121378
- Nguyen, V., Chaudhary, D., Dahal, R., Trinh, N., Kim, J., Chang, S., Hong, Y., Duc La, D., Nguyen, X. C., Ngo, H. H., Chung, W., Jin Nguyen, D. (2021). Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Fuel*, 285. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119105.
- Ni, M., Leung, D., Leung, M., & Sumathy, K. (2006). An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology*, 87(5), pp. 461-472.
- Nipattummakul, N., Ahmed, I. I., Kerdsuwan, S., & Gupta, A. K. (2010). Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(21), pp. 11738-11745. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.08.032
- Oladejo, J., Shi, K., Yang, G., & Wu, T. (2019). A Review of Sludge-to-Energy Recovery Methods. *Energies*, 12(1), pp. 1-38. doi:https://doi.org/10.3390/en12010060
- Oraléou, S. D., Zhi-Cong, W., Feng, W., Yu-Ping, X., & Pei-Gao, D. (2020). Pyrolysis of Municipal Sewage Sludge for Biofuel Production: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. doi:10.1021/acs.iecr.0c01546

- Pathak, A., Dastidar, M., & Sreekrishnan, T. (2009). Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review. *Journal of Environmental Management*, 90, pp. 2343-2353. doi:10.1016/j.jenvman.2008.11.005
- Pfeifer, C., & Hofbauer, H. (2008). Development of catalytic tar decomposition downstream from a dual fluidized bed biomass steam gasifier. *Powder Technology*, 180(1-2), pp. 9-16. doi:10.1016/j.powtec.2007.03.008
- Ponsa, S., Bolzonella, D., Colon, J., Deshusses, M., Fonts, I., Gil-Lalaguna, N., . . . Sánchez, J. (2017). Recovering energy from sludge. In *Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies*. London, UK: IWA Publishing. doi:10.2166/9781780407876
- Pothoulaki, A., Manali, A., & Gikas, P. (2022, 31 August-4 September). Gasification-energy production system for the management of wastewater primary sieved solids 1st International Conference on Sustainable Chemical and Environmental Engineering 31Aug-04 Sept. *SUSTENG 2022*.
- Premalatha, M., Sekar, T., Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan, V., Subramanian, P., & Nalini, R. (2009). A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 179–186. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.001
- Puig-Arnabat, M., Bruno, J., & Coronas, A. (2010). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp. 2841-2851. doi:10.1016/j.rser.2010.07.030
- Qian, L., Wang, S., Wang, S., Zhao, S., & Zhang, B. (2021). Supercritical water gasification and partial oxidation of municipal sewage sludge: An experimental and thermodynamic study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(1), pp. 89-99. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.09.200
- Quan, L., Kamyab, H., Yuzir, A., Ashokkumar, V., Hosseini, S., Balasubramanian, B., & Kirpichnikova, I. (2022). Review of the application of gasification and combustion technology and waste-to-energy technologies in sewage sludge treatment. *Fuel*, 316. doi:10.1016/j.fuel.2022.123199
- Raheem, A., Singh Sikarwar, V., He, J., Dastyar, W., & Dionysiou, D. (2018). Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. *Chemical Engineering Journal*(volume 337). doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149.
- Rao, B., Wang, G., & Xu, P. (2022). Recent advances in sludge dewatering and drying technology, *Drying Technology*. 40(15), pp. 3049-3063. doi:https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2043355
- Rauch, R. (2003). Biomass gasification to produce synthesis gas for fuel cells, liquid fuels and chemicals. *IEA Bioenergy Agreement, Task 33: Thermal Gasification of Biomass*.
- Reed, T., & Das, A. (1988). *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. doi:10.2172/5206099



- Reynolds Culligan. (2019). *Culligan Commercial & Industrial Ultraviolet Water Treatment*. Retrieved from <https://www.reynoldsculligan.com/culligan-commercial-industrial-ultraviolet-water-treatment/>
- Richardon, Y., Drobek, M., Julbe, A., Blin, J., & Pinta, F. (2015). Biomass Gasification to Produce Syngas. *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*, pp. 213-250. doi:10.1016/B978-0-444-63289-0.00008-9
- Rifka, A. (2019). <https://missrifka.com/>. Retrieved from <https://missrifka.com/utility-system/waste-water-treatment-plant/primary-treatment-of-wastewater.html>
- 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, pp. 54-61. doi:10.1016/j.fuel.2013.07.003
- Ronda, A., Gómez-Barea, A., Haro, P., de Almeida, V., & Salinero, J. (2019). Elements partitioning during thermal conversion of sewage sludge. *Fuel Processing Technology*, 186, pp. 156-166. doi:10.1016/j.fuproc.2019.01.001
- Rostrup-Nielsen, J., & Christiansen, L. (2011). Routes to Syngas. In *Concepts in Syngas Manufacture*. London, UK.: Imperial College Press.
- Rowell, R. (1983). The Chemistry of Solid Wood. : Based on short course and symposium sponsored by the Division of Cellulose, Paper, and Textile Chemistry at the 185th meeting of the American Chemical Society.
- Rulkens, W. (2008). Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options. *Energy & Fuels*, Volume 22, pp. 9–15. doi:10.1021/ef700267m
- Samiran, N., Jaafar, M., Ng, J., Lam, S., & Chong, C. (2016). Progress in biomass gasification technique - With focus on Malaysian palm biomass for syngas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1047-1062. doi:10.1016/j.rser.2016.04.049
- Samolada, M., & Zabaniotou, A. (2014). Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Management*, 34(2), pp. 411-420. doi:10.1016/j.wasman.2013.11.003
- Sanaye, S., Alizadeh, P., & Yazdani, M. (2022). Thermo-economic analysis of syngas production from wet digested sewage sludge by gasification process. *Renewable Energy*, 190, pp. 514-539. doi:10.1016/j.renene.2022.03.086
- Sansaniwal, S., Pal, K., Rosen, M., & Tyagi, S. (2017). Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, pp. 363-384. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.038>.
- Sansaniwal, S., Rosen, M., & Tyagi, S. (2017b). Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(May), pp. 23-43. doi:10.1016/j.rser.2017.05.215

- Schaum, C., Lensch, D., & Cornel, P. (2016). Evaluation of the energetic potential of sewage sludge by characterization of its organic composition. *Water Science and Technology*, 73(12), pp. 3072-3079. doi:10.2166/wst.2016.188
- Schmid, M., Beirow, M., Schweitzer, D., Waizmann, G., Spörl, R., & Scheffknecht, G. (2018). Product gas composition for steam-oxygen fluidized bed gasification of dried sewage sludge, straw pellets and wood pellets and the influence of limestone as bed material. *Biomass and Bioenergy*, 117, pp. 71-77. doi:10.1016/j.biombioe.2018.07.011
- Schmid, M., Hafner, S., Biollaz, S., Schneebeil, J., Waizmann, G., & Scheffknecht, G. (2021). Steam-oxygen gasification of sewage sludge: Reduction of tar, H<sub>2</sub>S and COS with limestone as bed additive. *Biomass and Bioenergy*, 150. doi:10.1016/j.biombioe.2021.106100
- Segneanu, A., Orbeci, C., Lazau, C., Sfirloaga, P., Vlazan, P., Cornelia, B., & Grozescu, I. (2013). *Waste Water Treatment Methods*. doi:http://dx.doi.org/10.5772/53755
- Shen, Y., & Yoshikawa, K. (2013). Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis - A review. 21, 371-392. doi:10.1016/j.rser.2012.12.062
- Shi, T., Liu, Y., Yang, A., Sun, S., Shen, W., & Ren, J. (2022). Developing a novel gasification-based sludge-to-methanol utilization process and exergy-economic-environmental (3E) analysis. *Energy Conversion and Management*, 260. doi:10.1016/j.enconman.2022.115600
- Sikarwar, V., Zhao, M., Clough, P., Yao, J., Zhong, X., Memon, M., Shah, N., Anthony, E. J., Fennell, P. (2016). An overview of advances in biomass gasification. *Energy and Environmental Science*, 9(10), pp. 2939-2977. doi:10.1039/c6ee00935b
- Sikarwar, V., Zhao, M., Fennell, P., Shah, N., & Anthony, E. (2017). Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, pp. 189-248. doi:10.1016/j.pecs.2017.04.001
- Sonune, A., & Ghate, R. (2004). Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167, pp. 55-63. doi:10.1016/3.desal.2004.06.113
- Stevens, D. (2001). *Hot Gas Conditioning: Recent Progress with Larger-Scale Biomass Gasification Systems*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Suez. (2021). Suez. Retrieved from suezwaterhandbook.com: <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/dewatered-sludge-treatment/thermal-processes-used-to-destroy-the-organic-matter-contained-sludge/dedicated-fluidised-bed-incineration-the-degremon-R-thermylis-htfb-incinerator>
- Syed-Hassan, S., Wang, Y., Su, S., & Xiang, J. (2017). Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 80, pp. 888-913. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.262

- Thajudeen, A. (2017). <https://engineeringcivil.org/>. Retrieved from <https://engineeringcivil.org/articles/environmental-engineering/wastewater-screening-classification-screens-complete-list-wastewater-treatment/>
- Thamavithya, M., & Dutta, A. (2008). An investigation of MSW gasification in a spout-fluid bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 89(10), pp. 949-957. doi:10.1016/j.fuproc.2008.03.003
- Theobald, D. (2017). *Aerated activated sludge basics*. *Watertechonline.com*; *Water Technology*. Retrieved from <https://www.watertechonline.com/wastewater/article/15550311/aerated-activated-sludge-basics>
- Tyagi, V., & Lo, V. (2013). Sludge: A waste or renewable source for energy and resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25(71), pp. 708-728. doi:10.1016/j.rser.2013.05.029
- Valderrama Rios, M., González, A., Lora, E., & Almazán del Olmo, O. (2018). Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. *Biomass and Bioenergy*, 108, pp. 345-370. doi:10.1016/j.biombioe.2017.12.002
- Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L., & Vassileva, C. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, pp. 913-933. doi:10.1016/j.fuel.2011.09.030
- Verlicchi, P., & Zambello, E. (2015). Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated. *Science of the Total Environment*, Volume 538, pp. 750-767. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.108>
- Vilakazi, S., Onyari, E., Nkwonta, O., & Bwapwa, J. (2023). Reuse of domestic sewage sludge to achieve a zero waste strategy & improve concrete strength & durability - A review. *South African Journal of Chemical Engineering*, 43, pp. 122-127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.10.012>
- Viswanathan, K., Abbas, S., & Wu, W. (2022). Syngas analysis by hybrid modeling of sewage sludge gasification in downdraft reactor: Validation and optimization. *Waste Management*, 144, pp. 132-143. doi:10.1016/j.wasman.2022.03.018
- Wang, C., Zhong, J., Zhu, W., Chen, C., Zhang, H., Fan, Y., & Mu, B. (2019). Behavior of Phosphorus in Catalytic Supercritical Water Gasification of Dewatered Sewage Sludge: The Conversion Pathway and Effect of Alkaline Additive. *Energy and Fuels*, 33(2), pp. 1290-1295. doi:10.1021/acs.energyfuels.8b04054
- Watson, J., Zhang, Y., Si, B., Chen, W., & de Souza, R. (2018). Gasification of biowaste: A critical review and outlooks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 83, pp. 1-17. doi:10.1016/j.rser.2017.10.003
- Werle, S., & Wilk, R. (2010). A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renewable Energy*, 35(9), pp. 1914-1919.
- Wnukowski, M., Kordylewski, W., Łuszkiewicz, D., Leśniewicz, A., Ociepa, M., & Michalski, J. (2020). Sewage Sludge-Derived Producer Gas Valorization with the Use of Atmospheric Microwave Plasma. *Waste and Biomass Valorization*, 11(8), pp. 4289-4303. doi:10.1007/s12649-019-00767-x

- Woolcock, P., & Brown, R. (2013). A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass and Bioenergy*, 52, pp. 54-84.  
doi:10.1016/j.biombioe.2013.02.036
- Xu, C., & Lancaster, J. (2009). Treatment of Secondary Sludge for Energy Recovery. *Energy Recovery*, pp. 187-211.
- Yan, M., Feng, H., Zheng, R., Yu, C., Hantoko, D., Zhou, Z., . . . Kanchanatip, E. (2021). Sulfur conversion and distribution during supercritical water gasification of sewage sludge. *Journal of the Energy Institute*, 95, pp. 61-68.  
doi:10.1016/j.joei.2021.01.002
- Yeo, T., Ashok, J., & Kawi, S. (2019). Recent developments in sulphur-resilient catalytic systems for syngas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, pp. 52-70. doi:10.1016/j.rser.2018.10.016
- Youssef, E., Nakhla, G., & Charpentier, P. (2011). Oleic acid gasification over supported metal catalysts in supercritical water: Hydrogen production and product distribution. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 36(Issue 8), pp. 4830-4842. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.116.
- Zaccariello, L., & Mastellone, M. (2020). Gasification of sewage sludge in a bench-scale reactor. *Chemical Engineering Transactions*, 80, pp. 175-180.  
doi:10.3303/CET2080030
- Zaharioiu, A., Bucura, F., Ionete, R., Marin, F., Constantinescu, M., & Oancea, S. (2021). Opportunities regarding the use of technologies of energy recovery from sewage sludge. *SN Applied Sciences*. doi:10.1007/s42452-021-04758-3
- Zhai, Y., Wang, C., Chen, H., Li, C., Zeng, G., Pang, D., & Lu, P. (2013). Digested sewage sludge gasification in supercritical water. 31(4), 393-400.  
doi:10.1177/0734242X12471097
- Zhang, F., Wang, S., Li, Y., Chen, W., & Qian, L. (2021). Thermodynamic analysis of a supercritical water gasification – oxidation combined system for sewage sludge treatment with cool wall reactor. *Energy Conversion and Management*, 247.  
doi:10.1016/j.enconman.2021.114708
- Zhang, L., Xu, C., Champagne, P., & Mabee, W. (2014). Overview of current biological and thermo-chemical treatment technologies for sustainable sludge management. *Waste Management and Research*, 32(7), pp. 586-600.  
doi:10.1177/0734242X14538303
- Zhang, S., Wang, F., Mei, Z., Lukai, L., & Chi, Y. (2020). Status and Development of Sludge Incineration in China. Waste and Biomass Valorization. *Waste and Biomass Valorization*, 12(7), pp. 3541–3574. doi:https://doi.org/10.1007/s12649-020-01217-9
- Zhang, Z., Wang, X., Zhang, L., Zhou, H., Ju, R., Rao, P., Guo, X., Han, Y., Chen, H. (2022). Characteristics of steel slag as an oxygen carrier for chemical looping gasification of sewage sludge. *Energy*, 247. doi:10.1016/j.energy.2022.123534

## Κεφάλαιο 9: Παράρτημα

*Πίνακας 9.1 Εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών, που δημοσιεύθηκαν εντός της περιόδου 2010-2022, με ρυθμό τροφοδοσίας  $\geq 1 \text{ kg/h}$ , με χρήση αέρα/ατμού/ $\text{O}_2$  ως μέσων αεριοποίησης.*

Year	Reference	Technical aspects	Main outcomes
2013	(Arjhan et al., 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: sun-dried biosolids</li> <li>Gasifier type: pilot-scale downdraft</li> <li>Temperature= <math>800^\circ\text{C}</math></li> <li>Gasifying agent: air</li> <li>Feeding rate= <math>67.25\text{-}99.13 \text{ kg/h}</math></li> <li>ER= <math>0.24\text{-}0.34</math></li> <li>Loading type: continuous</li> </ul>	The relationship between internal reactor temperatures and ER was linear. Calorific values of syngas ranged from $4.20$ to $4.87 \text{ MJ/Nm}^3$ , with a tendency to decrease as the ER increased from $0.24$ to $0.34$ . In an engine generator set, the syngas flow rates of $150$ and $180 \text{ Nm}^3/\text{h}$ could be utilized to generate electricity with electrical outputs of $21$ and $47 \text{ kW}$ , respectively, while the syngas flow rate of $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ could be used to operate the engine without electrical load. Gasification efficiency maximized at $150 \text{ Nm}^3/\text{h}$ syngas flow rate.
2013	(Calvo et al., 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: dried granulated biosolids</li> <li>Gasifier type: fluidized-bed</li> <li>Gasifying agent: air (<math>15\text{-}20 \text{ L/min}</math>)</li> <li>Feeding rate (wet fuel) = <math>32.18\text{-}45.07 \text{ kg/h}</math></li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	Gasification of biosolids was conducted using air, which is cheaper than pure $\text{O}_2$ . A high-quality syngas ( $\text{H}_2$ , $\text{CO}$ , and $\text{CH}_4$ summed up to $40.7\text{-}44\%$ ) with a heating value of $8.42\text{-}9.33 \text{ MJ/Nm}^3$ , low in tar content ( $0.6 \text{ g/m}^3$ ) and cold gas efficiency of $57\%$ was obtained.
2017	(Töre and Kar, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: industrial dried biosolids</li> <li>Gasifier type: pilot-scale downdraft fluidized bed</li> <li>Gasifying agent: air</li> <li>Feeding rate= <math>1000 \text{ kg/h}</math></li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	The HHV of biosolids samples ranged from $800$ to $13,000 \text{ kcal/kg}$ . Ash concentration of char waste and cyclone dust produced from all combinations were estimated to be between $80$ and $90\%$ . HHVs for char waste were reported to be in the range of $2,300\text{-}3,500 \text{ kcal/kg}$ . The gasification efficiency ranged between $94$ and $97\%$ . Also, the biosolids combination with high calorific value and low ash ratio had the highest energy efficiency of $97\%$ compared to the other combinations.
2017	(Trabelsi et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: sun-dried biosolids</li> <li>Gasifier type: downdraft fixed-bed</li> <li>Temperature= <math>900^\circ\text{C}</math></li> <li>Gasifying agent: air</li> <li>Feeding rate= <math>2\text{-}8 \text{ kg/h}</math></li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	The produced syngas (yield reaching $82 \text{ wt.}\%$ ) presented high calorific value ( $8.02 \text{ MJ/kg}$ ), because of its high contents of $\text{H}_2$ ( $7.32\%$ ) and $\text{CH}_4$ ( $5.36\%$ ). The generated syngas should be used as a fuel or as a raw material for producing liquid fuels and chemicals.
2018	(Choi et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: dried digested biosolids</li> </ul>	The use of activated carbon increased syngas yield by $12\%$ , while reducing tar, $\text{H}_2\text{S}$ and ammonia content in the syngas. In addition, the carbon conversion and tar removal efficiency

		<ul style="list-style-type: none"> <li>Gasifier type: auger, fluidized bed, tar cracking reactor</li> <li>Temperature= 650-815 °C</li> <li>Gasifying agent: air</li> <li>Feeding rate= 1 kg/h</li> <li>ER= 0.3</li> <li>Catalyst: activated carbon</li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	increased by 10 and 26%, respectively. The use of Fe- and Ni-impregnated activated carbon reduced the H <sub>2</sub> S and NH <sub>3</sub> , respectively. Increasing the gasification time (8h) effectively removed tar in output.
2018	(Schmid et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: dried biosolids</li> <li>Gasifier type: bubbling fluidized bed</li> <li>Temperature= 850 °C</li> <li>Gasifying agent: steam, O<sub>2</sub></li> <li>Feeding rate= 7 kg/h</li> <li>ER= 0.25</li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	The produced syngas contains high mole percentages of H <sub>2</sub> (40%) and CO (20%), making it appropriate for a wide range of synthesis applications. The use of limestone as bed additive caused severe reduction of tar, indicating the potential to reduce the effort of downstream tar removal units significantly. Additionally, the elemental composition of tar from biosolids found to be different than tar from wood gasification, due to the different elemental composition and molecular structure of biosolids.
2019	(Manali and Gikas, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: dried primary sieved biosolids</li> <li>Gasifier type: downdraft</li> <li>Temperature= 800-1200 °C</li> <li>Gasifying agent: air</li> <li>Feeding rate= 41.67 kg/h</li> <li>Loading type: continuous</li> </ul>	The project's goal is to remove biosolids upstream of the aeration tank to reduce energy requirements for downstream treatment at the aeration tank. The HHV of dried microsieved biosolids has been measured as 23±0.7 MJ/kg, which is higher than the other types of biosolids or common fuels. It is expected that approximately 1800-2400 Nm <sup>3</sup> syngas per day will be produced.
2019	(Wnukowski et al., 2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: dried pelletized biosolids</li> <li>Gasifier type: downdraft</li> <li>Temperature= 400-775 °C</li> <li>Gasifying agent: air</li> <li>Feeding rate= 20 kg/h</li> <li>ER= 0.4</li> <li>Loading type: continuous</li> </ul>	Atmospheric microwave plasma was applied as a method for syngas processing, which caused significant reduction at the concentration of residual tar compounds (around 80%) and positive influence at syngas composition (increase in H <sub>2</sub> and CO concentration due to the conversion of CO <sub>2</sub> and hydrocarbons).
2021	(Schmid et al., 2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: thermally dried biosolids</li> <li>Gasifier type: fluidized bed</li> <li>Temperature= 650-900 °C</li> <li>Gasifying agent: steam, O<sub>2</sub></li> <li>Feeding rate= 6.4-13.9 kg/h</li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	The gasification temperature should be chosen as high as practically feasible (considering the ash melting behavior), as the syngas yield was increased, and the tar yield was decreased with increasing gasification temperature.
2022	(Bubalo et al., 2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: dried biosolids</li> <li>Gasifier type: rotary kiln</li> <li>Temperature= 900 °C</li> <li>Gasifying agent: air</li> <li>Feeding rate= 10 kg/h</li> <li>ER= 0.2-0.4</li> </ul>	The syngas produced is characterized by high quality, as it was found to have high content of H <sub>2</sub> and low content of contaminants. Specifically, it contained 41.5 vol.% of H <sub>2</sub> , 25.3 vol.% of CO, 3.2 vol.% CH <sub>4</sub> , and 10.6 vol.% CO <sub>2</sub> , while its Lower Heating Value (LHV) founded to be 8.8 MJ/Nm <sup>3</sup> , which corresponds to 2.45 kWh/Nm <sup>3</sup> .



2022	(Jeong et al., 2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried digested biosolids</li> <li>• Gasifier type: fluidized bed, tar-cracking reactor</li> <li>• Temperature= 800 °C</li> <li>• Gasifying agent: steam, O<sub>2</sub></li> <li>• Feeding rate= 1.8 kg/h</li> <li>• ER= 0.67-0.44</li> <li>• Loading type: batch</li> </ul>	Steam/O <sub>2</sub> gasification using several bed materials (olivine, dolomite, and limestone) and ER of 0.67 produce syngas high in H <sub>2</sub> content (38-39 vol.%). Olivine notably reduced the NH <sub>3</sub> and tar contents. The tar and NH <sub>3</sub> contents obtained from air gasification were only 3-10 mg/Nm <sup>3</sup> and 60-90 ppmv, respectively.
------	----------------------	---	--

**Πίνακας 9.2 Εφαρμογές αεριοποίησης βιοστερεών, δημοσιευμένες εντός της περιόδου 2010-2022, με ρυθμό τροφοδοσίας < 1kg/h, με χρήση αέρα/ατμού/O<sub>2</sub> ως μέσων αεριοποίησης.**

Year	Reference	Technical aspects	Main outcomes
2010	(Nipattummakul et al., 2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: sun-dried biosolids</li> <li>• Gasifier type: laboratory scale fixed bed</li> <li>• Temperature= 700-1000 °C</li> <li>• Gasifying agent: steam (3 g/min)</li> <li>• Feeding rate= 0.18-0.88 g/min</li> <li>• Loading type: batch</li> </ul>	The effect of temperature and of steam (as gasifying agent) on syngas characteristics were investigated, concluding that H <sub>2</sub> yield was increased with the increase in temperature (reaching 0.076 g <sub>gas</sub> /g <sub>sample</sub> at 1000 °C). Poor reaction rates at 700 °C indicated that biosolids gasification should be carried out at higher temperatures (>800 °C). Also, steam gasification generated approximately three times more H <sub>2</sub> compared to air gasification.
2011	(de Andrés et al., 2011a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried biosolids</li> <li>• Gasifier type: laboratory scale bubbling fluidized bed</li> <li>• Temperature= 750-850 °C</li> <li>• Gasifying agent: air, steam</li> <li>• Feeding rate= 1.1-2.2 g/min</li> <li>• ER= 0.2-0.4</li> <li>• Catalyst: alumina</li> <li>• Loading type: batch</li> </ul>	The combined influence of steam and alumina (as primary catalyst) on the gasification products has been investigated, resulting to the following conclusions: (i) without catalyst, the introduction of steam increases H <sub>2</sub> production, enhances the LHV of syngas and reduces tar production, (ii) the combination of alumina and air favors the production of H <sub>2</sub> and CO at high temperatures and the reduction of CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> and tar, and (iii) if steam is introduced in the presence of alumina, tar production is further reduced. So, steam improves the quality of the produced syngas.
2011	(de Andrés et al., 2011b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried biosolids</li> <li>• Gasifier type: laboratory scale bubbling fluidized bed</li> <li>• Temperature= 750-850 °C</li> <li>• Gasifying agent: air, steam</li> <li>• Feeding rate= 1.4 g/min</li> <li>• ER= 0.3</li> <li>• Catalysts: dolomite, olivine, and alumina</li> <li>• Loading type: batch</li> </ul>	The investigation of the influence of several primary catalysts on biosolids gasification products concluded that tar production is significantly reduced in the presence of catalysts (with dolomite being the most active, and olivine the least effective), while syngas production and LHV increase (leading to improvement in cold gas efficiency and carbon conversion). The combined use of a catalyst and steam results in H <sub>2</sub> and CO <sub>2</sub> increase and CH <sub>4</sub> , CO decrease, while further tar elimination was observed, fact that indicates the enhancement of syngas quality.
2013	(Roche et al., 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: thermally dried biosolids</li> </ul>	Increase of throughput caused H <sub>2</sub> content decrease and tar production increase. The air-steam gasification showed increased H <sub>2</sub> and

		<ul style="list-style-type: none"> <li>Gasifier type: laboratory scale fluidized bed</li> <li>Temperature= 800 °C</li> <li>Gasifying agent: air, steam</li> <li>Feeding rate= 1.2-3.7 g/min</li> <li>ER= 0.3</li> <li>Catalyst: dolomite</li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	CO <sub>2</sub> content, and decreased CO and tar production, compared to air gasification. The use of dolomite (especially in combination with air-steam as gasifying agent) enhanced tar removal efficiency and increased the H <sub>2</sub> yield.
2017	(Chen et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: thermally dried biosolids</li> <li>Gasifier type: laboratory scale fixed bed</li> <li>Temperature= 650-850 °C</li> <li>Gasifying agent: steam (0.2 g/min)</li> <li>Feeding rate= 0.07 g/min</li> <li>Catalysts: calcium oxide (CaO), Ni- and Fe-impregnated CaO</li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	The CaO sorbent improves H <sub>2</sub> volume fraction and total syngas yield in biosolids gasification. Also, higher temperature increases the total syngas yield and cold gas efficiency in the gasification, but the H <sub>2</sub> fraction in the syngas is reduced. The addition of metal elements (Ni and Fe) could enhance the tar cracking, methane reforming and char conversion into gases. Even though the surface area and pore volume decrease with the addition of metal elements in the sorbent, the H <sub>2</sub> fraction, gas yield and cold gas efficiency still increase.
2017	(Choi et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: thermally dried digested biosolids</li> <li>Gasifier type: auger, fluidized bed, tar-cracking</li> <li>Temperature= 810-830 °C</li> <li>Gasifying agent: air</li> <li>Feeding rate= 8.2-13.3 g/min</li> <li>ER= 0.22-0.50</li> <li>Catalyst: active carbon</li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	The increase of ER was found to lower syngas impurities. Also, the increase of activated carbon/biosolids ratio increased H <sub>2</sub> production and decreased syngas impurities. The maximum H <sub>2</sub> content (29 vol.%) was obtained at activated carbon/biosolids ratio of 3:1 and at ER of 0.35. The minimum tar, NH <sub>3</sub> , and H <sub>2</sub> S contents in syngas were 27 mg/Nm <sup>3</sup> , 443, and 470 ppmv, respectively.
2018	(Freda et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: oven-dried biosolids</li> <li>Gasifier type: bench scale rotary kiln</li> <li>Temperature= 750-850 °C</li> <li>Gasifying agent: air</li> <li>Feeding rate= 2.83-4.33 g/min</li> <li>ER= 0.05-0.24</li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	Syngas having a HHV of 6-9 MJ/Nm <sup>3</sup> and a tar content of 4-6 g/Nm <sup>3</sup> was obtained at temperature 800-850 °C, with an ER ranging between 0.15-0.24. The gas yield was about of 1 Nm <sup>3</sup> <sub>dry</sub> /kg <sub>biosolids</sub> , while maximum cold gas efficiency of 67% was obtained at 850 °C with ER= 0.16.
2019	(Ronda et al., 2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: dried granulated biosolids</li> <li>Gasifier type: fluidized bed, fixed bed</li> <li>Temperature= 800-900 °C</li> <li>Gasifying agent: hot air</li> <li>Feeding rate= 0.15-0.3 g/min</li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	The effect of temperature and oxidizing conditions proved to be important for the concentration of several elements in the solid residue. The concentrations of most of main elements (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P and Si) increased with temperature, whereas those of most of minor (As, Cd, Co, Sb, and V) elements followed the opposite trend. Also, the concentration of minor elements in the residue was lower in fixed bed than in fluidized bed, due to higher dilution caused by the lower

			degradation of the fuel sample in fixed bed conditions.
2020	(Zaccariello and Mastellone, 2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried biosolids</li> <li>• Gasifier type: bench-scale fixed bed</li> <li>• Temperature= 700-850 °C</li> <li>• Gasifying agent: superheated steam (2 g/min)</li> <li>• Feeding rate= 1 g/min</li> <li>• Loading type: batch</li> </ul>	Biosolids steam gasification at 700 °C produced the highest concentration of H <sub>2</sub> (58.2%), enhancing the quality of the produced syngas. Also, the increase of temperature caused significant char and tar reduction (from 11.4 to 9.7 g and from 9.1 to 0.7 g, respectively), while the cold gas efficiency increased from 11 to 50%.
2021	(Khan et al., 2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: air-dried biosolids</li> <li>• Gasifier type: bubbling fluidized bed</li> <li>• Temperature= 700-850 °C</li> <li>• Gasifying agent: preheated air (2.71 L/min)</li> <li>• Feeding rate= 16.6 g/min</li> <li>• ER= 0.2-0.35</li> </ul>	Increase of temperature enhanced H <sub>2</sub> and CO composition. The optimum temperature was found to be 850 °C at which maximum secondary cracking occurred to produce syngas. The cold gas efficiency was also highest at this temperature (at ER= 0.35). The increase in ER boosted up oxidation reaction, hence increasing the syngas yield.
2021	(Migliaccio et al., 2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried biosolids</li> <li>• Gasifier type: bench-scale fluidized bed</li> <li>• Temperature= 850 °C</li> <li>• Gasifying agent: air</li> <li>• Feeding rate= 1.13-2.3 g/min</li> <li>• ER= 0.1-0.2</li> </ul>	Higher gasification performance (lower tar production) was achieved at greater ER values. Also, the ER plays important role at the nature of heavy metals that tend to concentrate in biosolids gasification ash.
2022	(Jin et al., 2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried secondary biosolids</li> <li>• Gasifier type: fixed bed</li> <li>• Temperature= 600-1000 °C</li> <li>• Gasifying agent: steam (0.2 g/min)</li> <li>• Feeding rate= 0.25 g/min</li> <li>• Loading type: batch</li> </ul>	This study clarified how the Fenton-CaO composite conditioning affected the As chemistry during the processes of biosolids dewatering, thermal drying, and steam gasification. Only 59.1% of the As in raw biosolids was fixed in biosolids cake throughout the dewatering process. Dewatered raw biosolids As (III) could not be oxidized at any temperature during the drying process. 26.8-57.3% of the remaining As in the dry raw biosolids escaped with flue gas emission during the steam gasification process.
2022	(Zhang et al., 2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried biosolids</li> <li>• Gasifier type: fluidized bed</li> <li>• Temperature= 700-900 °C</li> <li>• Gasifying agent: air, steam (0.15 g/min)</li> <li>• Feeding rate= 0.17g/min</li> <li>• Loading type: batch</li> </ul>	The oxygen transport capabilities of basic oxygen furnace slag and electric arc furnace slag at 700 °C were higher after ten redox cycles than those at 800 °C and 900 °C. At 800 °C, both slags served as oxygen carriers on chemical looping gasification. The cold gas efficiency found to be at its highest value, when the steel slag/biosolids mass ratio was 3 and 4, for basic oxygen furnace and electric arc furnace slag respectively, and the steam flow rate was 0.15 g/min.

**Πίνακας 9.3 Εφαρμογές της αεριοποίησης βιοστερεών, που δημοσιεύθηκαν κατά την περίοδο 2010-2022, με χρήση υπερκρίσιμου νερού ως μέσο αεριοποίησης.**

Year	Reference	Technical aspects	Main outcomes
2013	(Zhai et al., 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: digested biosolids</li> <li>Gasifier type: batch reactor</li> <li>Temperature= 400 °C</li> <li>Gasifying agent: SCW</li> <li>Feeding rate= 0.6-3 L/h</li> <li>Catalyst: K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	Influences of temperature, pressure, dry matter content, and catalyst were studied regarding digested biosolids gasification with SCW. 10 wt.% dry matter content, at a temperature of 425 °C, with residence time of 50 min and a pressure of 25 MPa resulted to the highest biosolids and carbon gasification efficiencies. Also, with the addition of 2.6 g of catalyst (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) a gasification efficiency of 25.26% and a carbon gasification efficiency of 20.02% were achieved, which were almost four times as much as the efficiencies without catalyst.
2014	(Gong et al., 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: dewatered biosolids</li> <li>Gasifier type: high-pressure autoclave</li> <li>Temperature= 400 °C</li> <li>Gasifying agent: SCW</li> <li>Feeding rate= 0.07-0.2 g/min (dry basis)</li> <li>Loading type: batch</li> </ul>	Biosolids with various water contents (73.48-88.51%), organic matter contents (29.25-73.02%) and inorganics can be directly gasified in SCW. However, the conversion efficiency of organics is not high with approximately 30% of organic matter remained in the liquid and solid residues. The total gas and phenol production increased linearly with the increasing of organic matter content. Differences in H <sub>2</sub> content in syngas may be related to differences in the inorganic compounds, moisture content and pH value of the biosolids. The char formed in the solid residue increased with decrease of water content.
2018	(Amrullah and Matsumura, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: raw biosolids</li> <li>Gasifier type: continuous</li> <li>Temperature= 500-600 °C</li> <li>Gasifying agent: SCW</li> <li>Feeding rate= 1.3-15 mL/min</li> <li>Loading type: continuous</li> </ul>	After 50 s at 600 °C, a carbon gasification efficiency as high as 0.73 was achieved. In a short amount of time (10 s), organic phosphorus was successfully converted into inorganic phosphorus. In the SCW gasification of biosolids, the activation energies for the conversion of organic to inorganic phosphorus and inorganic phosphorus to residual inorganic phosphorus were roughly 19.1 and 18.7 kJ/mol.
2019	(Amrullah and Matsumura, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: raw biosolids</li> <li>Gasifier type: continuous</li> <li>Temperature= 300-600 °C</li> <li>Gasifying agent: SCW</li> <li>Feeding rate= 1.3-15 mL/min</li> <li>Loading type: continuous</li> </ul>	The behavior of phosphorus during SCW gasification at the pressure of 25 MPa under varied temperatures (300-600 °C) and reaction times (5-30 s) was studied. At a short residence time (10 s), organic phosphorus was quickly transformed into inorganic phosphorus, and a portion of inorganic phosphorus was then precipitated in the reactor.
2019	(Wang et al., 2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feedstock: dewatered biosolids</li> <li>Gasifier type: batch autoclave</li> <li>Temperature= 400 °C</li> <li>Gasifying agent: SCW</li> <li>Feeding rate= 0.27 g/min (dry basis)</li> </ul>	The behavior of phosphorus during SCW gasification of dewatered biosolids with alkaline additive was studied. Without additives, phosphorus is enriched in a solid residue. The phosphorus transferred from the solid residue to the liquid product, and the phosphorus content in the liquid product increased from 41.0 to 2214.5 mg/L in the presence of 2-8 wt.% alkaline additives.

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Loading type: batch</li> </ul>	
2019	(Adar et al., 2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried biosolids</li> <li>• Gasifier type: continuous flow tubular</li> <li>• Temperature= 450-650 °C</li> <li>• Gasifying agent: SCW</li> <li>• Feeding rate= 1.5 L/h</li> <li>• Catalyst: KOH (0.5-2 %w/w)</li> <li>• Loading type: continuous</li> </ul>	The characteristics of the liquid products in function with operating conditions (temperature, solid matter content and catalyst) and raw material properties were analyzed. Based on the results, the quality of the liquid product increases with the increase of temperature and the addition of catalyst.
2020	(Adar et al., 2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried biosolids</li> <li>• Gasifier type: continuous flow tubular</li> <li>• Temperature= 450-650 °C</li> <li>• Gasifying agent: SCW</li> <li>• Feeding rate= 1.5 L/h</li> <li>• Catalyst: KOH (0.5-2 %w/w)</li> <li>• Loading type: continuous</li> </ul>	The role of temperature, solid matter content and catalyst addition was studied. The gasification efficiency was found to be temperature dependent, while catalyst addition caused increase of the gasification efficiency at high solids content. Temperature increases from 450 °C to 650 °C increased H <sub>2</sub> content from 24% to 43% and the gas yield increased three times without catalyst addition. The produced gas contained 60% of H <sub>2</sub> and 22% of CH <sub>4</sub> at optimal conditions (650 °C, 2% solid matter content, 2% KOH) with H <sub>2</sub> S and CO below detection limits.
2020	(Yan et al., 2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried grounded and sieved biosolids</li> <li>• Gasifier type: batch reactor</li> <li>• Temperature= 350-450 °C</li> <li>• Gasifying agent: SCW</li> <li>• Feeding rate= 0.2 g/min (dry basis)</li> <li>• Catalysts: alkali (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, KOH and NaOH)</li> <li>• Loading type: batch</li> </ul>	The effects of reaction temperature and water-soluble additives as catalysts on gas yield, gas composition, and gasification efficiency were examined. The increase of temperature from 350 to 450 °C (without catalysts) increased the yield of H <sub>2</sub> from 0.06 to 1.91 mol/kg, respectively, enhanced the gasification efficiency (1.29 to 19.61%), and decreased total organic carbon by 68.50% in liquid residue. In the case of catalytic SCW gasification (400 °C), the highest molar fraction (37.28%) and yield of H <sub>2</sub> (1.60 mol/kg) were obtained in the presence of KOH.
2021	(Chen et al., 2022b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: dried activated biosolids</li> <li>• Gasifier type: fluidized bed</li> <li>• Temperature= 480-540 °C</li> <li>• Gasifying agent: SCW</li> <li>• Feeding rate= 1.5 kg/h</li> <li>• Loading type: continuous</li> </ul>	The effect of temperature on the distribution of products and gas compositions were researched. At 480 °C, the organic matter of biosolids was completely dissolved and hydrolyzed in water. The increase of temperature from 480 °C to 540 °C enhanced the total gas yield from 0.39 to 0.51 wt.% and caused reduction of the total liquid yield from 99.19 to 99.05 wt.%, while the solid products yield did not change significantly.
2022	(Chen et al., 2022a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feedstock: raw biosolids</li> <li>• Gasifier type: high heating rate batch reactor</li> <li>• Temperature= 750 °C</li> <li>• Gasifying agent: SCW</li> <li>• Feeding rate= 0.05-0.5 g/min</li> <li>• Loading type: batch</li> </ul>	Effect of temperature, pressure, residence time and catalyst were investigated. The maximum H <sub>2</sub> yield, gasification efficiency, carbon gasification efficiency, and hydrogen yield potential values were 20.66 mol/kg, 73.49%, 61.16%, and 41.34%, respectively, without catalyst, at 750 °C and for 30 min of residence time.

