



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΩΝ & ΔΙΕΘΝΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑ, ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ &
ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»**

**ΧΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ
ΛΥΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΠΡΟΪΟΝΤΩΝ**

Γκουγκουγιάννη Μαρία

Πειραιάς, Μάρτιος, 2024

“Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίο προϊόντων”



**UNIVERSITY OF PIRAEUS SCHOOL OF ECONOMICS,
BUSINESS AND INTERNATIONAL STUDIES DEPARTMENT OF
ECONOMICS**

**MSc. in Bioeconomy, Circular Economy & Sustainable
Development**

**USE OF MICROALGAE IN WASTEWATER TREATMENT
FOR THE PRODUCTION OF BIO-ENERGY AND BIO-
PRODUCTS**

Gkougkougiani Maria

Piraeus, March ,2024

“Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίο προϊόντων”



ΤΜΗΜΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΒΕΒΑΙΩΣΗ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

«Δηλώνω υπεύθυνα ότι το έργο που εκπονήθηκε και παρουσιάζεται στην υποβαλλόμενη διπλωματική εργασία, για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών, στη «*Βιοοικονομία, Κυκλική Οικονομία και Βιώσιμη Ανάπτυξη*» με τίτλο:

«Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίοπροϊόντων» έχει γραφτεί από εμένα αποκλειστικά στο σύνολό της. Δεν έχει υποβληθεί ούτε εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού προγράμματος ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό, ούτε είναι εργασία ή τμήμα εργασίας ακαδημαϊκού ή επαγγελματικού χαρακτήρα.

Δηλώνω επίσης υπεύθυνα ότι οι πηγές στις οποίες ανέτρεξα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας αναφέρονται στο σύνολό τους, κάνοντάς πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.»

Υπογραφή Μεταπτυχιακού Φοιτητή

ΓΚΟΥΓΚΟΥΓΙΑΝΝΗ ΜΑΡΙΑ

Ονοματεπώνυμο

ΓΚΟΥΓΚΟΥΓΙΑΝΝΗ ΜΑΡΙΑ

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών «Βιο-οικονομία, Κυκλική Οικονομία και Βιώσιμη Ανάπτυξη» του Τμήματος Οικονομικής Επιστήμης, του Πανεπιστημίου Πειραιώς.

Στις σπουδές μου ήταν καθοριστική η συμβολή των καθηγητών μου στα γνωστικά αντικείμενα που παρακολούθησα, στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για τη συμβολή τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Ιδιαίτερα επιθυμώ να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα την παρούσα διπλωματική εργασία, κο Ανέστη Βλυσίδα για την επιστημονική και συμβουλευτική καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας με τις εύστοχες και πολύ εποικοδομητικές παρατηρήσεις του.

Οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς συναδέλφους μου, χωρίς τη βοήθεια των οποίων δε θα ήταν δυνατή η διεκπεραίωση της έρευνας.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για τη συμπαράσταση και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και στην μετέπειτα περίοδο εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Η ρύπανση των υδάτινων πόρων και η παραγωγή ενέργειας αποτελούν μείζονες περιβαλλοντικές προκλήσεις. Οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά πολλούς ρύπους, αλλά μπορεί να είναι δαπανηρές, ενεργοβόρες και έχουν περιορισμούς στην απομάκρυνση ορισμένων αναδύμενων ρύπων. Τα μικροφύκη είναι μια ποικιλόμορφη ομάδα φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών που μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα χρησιμοποιώντας θρεπτικά συστατικά και CO₂ από υγρά απόβλητα ως πηγή ενέργειας. Μπορούν να απομακρύνουν ρύπους όπως άζωτο και φώσφορο, βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις μέσω διαφόρων μηχανισμών και να παράγουν πολύτιμα βιοπροϊόντα όπως βιοκαύσιμα, πρόσθετα τροφίμων και χημικές ουσίες υψηλής αξίας. Η χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων έχει πρόσφατα αναδειχθεί ως μια πιθανή βιώσιμη λύση που μπορεί να ξεπεράσει ορισμένους από τους περιορισμούς των συμβατικών μεθόδων. Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στη διερεύνηση της δυνητικής χρήσης των μικροφυκών για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης μπορούν να παράσχουν πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τη χρήση των μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων και να συμβάλουν στην ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων για τη ρύπανση των υδάτων, την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και την κυκλική οικονομία. Επιπλέον, η παρούσα μελέτη μπορεί να χρησιμεύσει ως βάση για μελλοντική έρευνα στον τομέα, ενημερώνοντας τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και τους ενδιαφερόμενους φορείς σχετικά με τις δυνατότητες των τεχνολογιών με βάση τα μικροφύκη για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων.

Λέξεις Κλειδιά: μικροφύκη, επεξεργασία υγρών αποβλήτων, συμβατικές μέθοδοι, ενεργός ιλύς, βιολογική απομάκρυνση, διήθηση με μεμβράνες, μικροοργανισμοί, βιοαποικοδόμηση, βιοκαύσιμα, βιοντίζελ, μεθανογένεση, ζύμωση, βιοσύνθεση, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυκλική οικονομία, παραγωγή ενέργειας.

Abstract

The pollution of water resources and energy production are major environmental challenges. Conventional methods for liquid waste treatment can effectively remove many pollutants, but can be costly, energy-intensive, and have limitations in removing certain emerging pollutants. Microalgae are a diverse group of photosynthetic microorganisms that can rapidly grow using nutrients and CO₂ from liquid waste as an energy source. They can remove pollutants such as nitrogen and phosphorus, heavy metals, and organic compounds through various mechanisms and produce valuable bio-products such as biofuels, food additives, and high-value chemicals. The use of microalgae in liquid waste treatment has recently emerged as a potential sustainable solution that can overcome some of the limitations of conventional methods. This study aims to explore the potential use of microalgae for liquid waste treatment and the production of bioenergy and bio-products. The findings of this study can provide valuable knowledge on the use of microalgae in liquid waste treatment and contribute to the development of sustainable solutions for water pollution, renewable energy production, and the circular economy. Additionally, this study can serve as a basis for future research in the field, informing policymakers and stakeholders about the potential of microalgae-based technologies for bioenergy and bio-product production.

Keywords: microalgae, wastewater treatment, conventional methods, activated sludge, biological removal, membrane filtration, microorganisms, biodegradation, biodegradation, biofuels, biodiesel, methanogenesis, fermentation, biosynthesis, renewable energy, circular economy, energy production.

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή	8
1.1 Σκοπός	10
1.2 Ερευνητικά ερωτήματα	10
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
2.1 Μικροφύκη	11
2.2 Κατηγορίες αποβλήτων	13
2.3 Μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων	14
2.3.1 Φυσικές διεργασίες	15
2.3.2 Χημικές διεργασίες	16
2.3.3 Βιολογικές	17
2.3.4 Περιορισμοί των συμβατικών μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	18
2.3.5 Επεξεργασία λυμάτων με Μικροφύκη	18
2.4 Βιοενέργεια και Βιοπροϊόντα	21
2.4.1 Επισκόπηση της παραγωγής βιοενέργειας και βιοπροϊόντων	22
Βιοενέργεια από Στερεά	24
Παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων	27
Αέρια βιοενέργεια	30
Πολυμερή / βιοπλαστικά	33
Χημικά προϊόντα	36
Σύνθετα βιο-υλικά	40
2.5 Τα μικροφύκη ως πηγή βιομάζας για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων	46
Παραγωγή Βιοντίζελ από μικροφύκη	47
Παραγωγή βιοαερίου από μικροφύκη	51
Παραγωγή υδρογόνου από μικροφύκη	55
2.5.1 Μέθοδοι παραγωγής βιοενέργειας με χρήση μικροφυκών	62
2.5.2 Μέθοδοι παραγωγής βιοπροϊόντων με χρήση μικροφυκών	64
2.5.3 Οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής βιοενέργειας και βιοπροϊόντων με βάση τα μικροφύκη	66
3. Μεθοδολογία	69
4. Ανάλυση	71

Συζήτηση	87
5. Συμπεράσματα.....	97
6. Βιβλιογραφία.....	101

1. Εισαγωγή

Η ρύπανση των υδάτινων πόρων και η παραγωγή ενέργειας αποτελούν μείζονες περιβαλλοντικές προκλήσεις. Οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων, μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά τους περισσότερους ρύπους, ωστόσο, μπορεί να είναι κοστοβόρες, ενεργοβόρες και έχουν περιορισμούς στην απομάκρυνση ορισμένων ρύπων, όπως τα μικροπλαστικά, τα φαρμακευτικά προϊόντα και άλλους αναδυόμενους ρύπους (Emerging Organic Contaminants, EOCs) (Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2017).

Τα μικροφύκη είναι μια ποικιλόμορφη ομάδα φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών που μπορούν να αναπτυχθούν ταχύτατα υπό ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες, αξιοποιώντας τα θρεπτικά συστατικά και το CO₂ που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα ως πηγή ενέργειας (Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012). Έχουν την ικανότητα να απομακρύνουν ρύπους όπως άζωτο και φώσφορο, βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις από τα υγρά απόβλητα, μέσω διαφόρων μηχανισμών όπως η προσρόφηση, η βιοαπορρόφηση και η βιοαποικοδόμηση. Επιπλέον, μπορούν να παράγουν μια σειρά από πολύτιμα βιοπροϊόντα, όπως βιοκαύσιμα, πρόσθετα τροφίμων και ζωοτροφών και χημικές ουσίες υψηλής αξίας. Η χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων έχει πρόσφατα αναδειχθεί ως μια πιθανή βιώσιμη λύση που μπορεί να ξεπεράσει ορισμένους από τους περιορισμούς των συμβατικών μεθόδων.

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στη διερεύνηση των δυνατοτήτων χρήσης μικροφυκών για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων. Η μελέτη διαρθρώνεται σε έξι κύριες ενότητες: I. Εισαγωγή, II. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, III. Μεθοδολογία, IV. Ανάλυση, V. Συμπεράσματα και VI. Παραπομπές.

Η εισαγωγή παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη σημασία της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και το ρόλο των μικροφυκών στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση προσφέρει μια διεξοδική εξέταση των υφιστάμενων μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, της εφαρμογής των μικροφυκών στο πλαίσιο αυτό και της παραγωγής βιοενέργειας και βιοπροϊόντων από αυτά. Το τμήμα μεθοδολογίας αναλύει την προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την ανασκόπηση και την ανάλυση της βιβλιογραφίας. Στην ενότητα της ανάλυσης, εξετάζονται τα ευρήματα από τις αναλυθείσες πηγές για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την παραγωγή βιοενέργειας/βιοπροϊόντων. Στα συμπεράσματα συνοψίζονται οι βασικές γνώσεις που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία, και εξετάζονται οι συνέπειες αυτών των ευρημάτων, και παράλληλα παρέχονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης παρέχουν πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τη χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την παραγωγή βιοπροϊόντων και να συμβάλουν στην ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων για τη ρύπανση των υδάτων, την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και την κυκλική οικονομία. Επιπλέον, η μελέτη αυτή μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μελλοντική έρευνα στον τομέα συμβάλλοντας την ενημέρωση των υπεύθυνων χάραξης πολιτικής και τους ενδιαφερόμενους φορείς σχετικά με τις δυνατότητες των τεχνολογιών με βάση τα μικροφύκη στην παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων.

1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση της χρήσης μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων. Συγκεκριμένα, η παρούσα διατριβή αποσκοπεί στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μικροφυκών στην παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων, στη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό των μικροφυκών στα λύματα και στην ανάλυση της οικονομικής απόδοσης και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας της επεξεργασίας λυμάτων και της παραγωγής βιοπροϊόντων από τα μικροφύκη.

1.2 Ερευνητικά ερωτήματα

Τα ερωτήματα που καλείται να απαντήσει η παρούσα εργασία συνοψίζονται στα παρακάτω:

1. Ποιες είναι οι βέλτιστες συνθήκες καλλιέργειας για την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό των μικροφυκών σε λύματα;
2. Ποιες είναι οι αποδόσεις και η ποιότητα της βιοενέργειας και των βιοπροϊόντων που παράγονται από μικροφύκη σε λύματα;
3. Ποιες είναι οι οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και της παραγωγής βιοπροϊόντων από τα μικροφύκη;

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Μικροφύκη

Τα φύκη (algae) είναι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί που βρίσκονται σε διάφορα υδάτινα περιβάλλοντα, όπως οι ωκεανοί, οι λίμνες και τα ποτάμια. Τα φύκη μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες ομάδες με βάση τη μορφολογία, τον χρωματισμό και τις στρατηγικές αναπαραγωγής τους (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015). Μια ομάδα φυκών είναι τα μικροφύκη, τα οποία είναι μονοκύτταρα ή πολυκύτταρα με μεγέθη που κυμαίνονται από μερικά μικρόμετρα έως μερικά χιλιοστά. Τα μικροφύκη είναι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί που χρησιμοποιούν το ηλιακό φως και τα θρεπτικά συστατικά για να παράγουν οργανική ύλη μέσω της φωτοσύνθεσης (Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012). Είναι γνωστά για τους υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης τους και την ικανότητά τους να παράγουν ένα ευρύ φάσμα βιοδραστικών ενώσεων, όπως λιπίδια, πρωτεΐνες και υδατάνθρακες. Τα μικροφύκη έχουν πολυάριθμες εφαρμογές σε διάφορους τομείς όπως τα τρόφιμα, η ιατρική και η ενέργεια. Στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων, τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση ρύπων όπως το άζωτο, ο φώσφορος και η οργανική ύλη μέσω της φωτοσύνθεσης και να παράγουν βιομάζα ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας και βιοπροϊόντων (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. (2015).

Τα μικροφύκη είναι μια ποικιλόμορφη ομάδα οργανισμών που έχουν μια σειρά μορφολογιών, συμπεριλαμβανομένων των σφαιρικών, ραβδοειδών και νηματοειδών. Μπορούν επίσης να έχουν διαφορετικό χρωματισμό, που κυμαίνεται από πράσινο έως καφέ και κόκκινο, ανάλογα με τον τύπο της χλωροφύλλης και άλλων χρωστικών που περιέχουν (Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012).

Τα μικροφύκη είναι κατάλληλα για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, επειδή μπορούν να αναπτύσσονται γρήγορα και να χρησιμοποιούν θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο και ο

“Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίο προϊόντων”

φώσφορος, τα οποία είναι άφθονα στα υγρά απόβλητα. Κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, τα μικροφύκη απομακρύνουν το διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα και παράγουν οξυγόνο, το οποίο μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ποιότητας του νερού των υγρών αποβλήτων. Επιπλέον, τα μικροφύκη παράγουν βιομάζα που μπορεί να συγκομιστεί και να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας ή να μετατραπεί σε βιοπροϊόντα (Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012).

Η καλλιέργεια μικροφυκών για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων μπορεί επίσης να συνδυαστεί με άλλες τεχνολογίες επεξεργασίας, όπως η αναερόβια χώνευση ή η χημική καταβύθιση, ώστε να επιτευχθούν υψηλότερες αποδόσεις επεξεργασίας για συγκεκριμένους ρύπους (Bioeconomym, 2017).

Μια από τις προκλήσεις της καλλιέργειας μικροφυκών για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι η αποτελεσματική και οικονομικά αποδοτική συγκομιδή της βιομάζας τους. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τη συγκομιδή βιομάζας, συμπεριλαμβανομένων της καθίζησης, της κροκίδωσης και της φυγοκέντρωσης. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι μπορεί να είναι ενεργοβόρες και απαιτούν περαιτέρω βελτιστοποίηση για να γίνουν πιο αποδοτικές (Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012).

Συμπερασματικά, τα μικροφύκη αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων λόγω της ικανότητάς τους να απομακρύνουν γρήγορα ρύπους όπως άζωτο, φώσφορο και οργανική ύλη και να παράγουν βιομάζα ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας και βιοπροϊόντων.

2.2 Κατηγορίες αποβλήτων

Η χρήση των μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων έχει κερδίσει όλο και μεγαλύτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια, καθώς μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση για την επεξεργασία διαφόρων τύπων λυμάτων (Fernández, 2012).

Τα οικιακά λύματα, για παράδειγμα, περιέχουν υψηλά επίπεδα οργανικής ύλης και θρεπτικών συστατικών, γεγονός που τα καθιστά ιδανική πηγή για την καλλιέργεια μικροφυκών. Τα μικροφύκη μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά ρύπους όπως το άζωτο και ο φώσφορος από τα οικιακά λύματα, ενώ παράλληλα παράγουν βιομάζα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιοκαυσίμων, ζωοτροφών και άλλων βιοπροϊόντων υψηλής αξίας (Fernández, 2012).

Από την άλλη πλευρά, τα βιομηχανικά λύματα μπορεί να περιέχουν μια σειρά από ρύπους, όπως βαρέα μέταλλα, οργανικές ενώσεις και τοξικές χημικές ουσίες. Τα μικροφύκη έχουν δείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα στην επεξεργασία των βιομηχανικών λυμάτων, απομακρύνοντας αποτελεσματικά τους ρύπους και παράγοντας παράλληλα βιομάζα (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

Τα γεωργικά λύματα είναι ένας άλλος τύπος λυμάτων που μπορεί να επωφεληθεί από την επεξεργασία με μικροφύκη. Τα υψηλά επίπεδα θρεπτικών συστατικών και φυτοφαρμάκων στα γεωργικά λύματα μπορούν να προωθήσουν την ανάπτυξη μικροφυκών, οδηγώντας σε αποτελεσματική απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών και παραγωγή βιομάζας (Fernández, 2012).

Τα όμβρια ύδατα, τα νοσοκομειακά λύματα και τα δημοτικά λύματα μπορούν επίσης να υποβληθούν σε επεξεργασία με συστήματα που βασίζονται σε μικροφύκη. Τα μικροφύκη μπορούν

να απομακρύνουν ρύπους όπως ιζήματα, παθογόνα και φαρμακευτικά προϊόντα, ενώ παράλληλα παράγουν βιομάζα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων (Sivakumar, P., Loh, K. C., Sahu, J. N., & Kjelleberg, S. (2015).

Συνολικά, η χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων έχει τη δυνατότητα να προσφέρει μια βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική λύση για διάφορους τύπους υγρών αποβλήτων (Fernández, 2012). Χρησιμοποιώντας τα μικροφύκη ως φυσικό και ανανεώσιμο πόρο, μπορούμε να αντιμετωπίσουμε τις προκλήσεις της ρύπανσης των υδάτων και της ενεργειακής ασφάλειας, εμποδώνοντας τις βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

2.3 Μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων

Η επεξεργασία λυμάτων είναι μια βασική διαδικασία που προστατεύει το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Τα λύματα παράγονται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των οικιακών, βιομηχανικών και γεωργικών δραστηριοτήτων, και περιέχουν ρύπους όπως οργανική ύλη, θρεπτικά συστατικά, βαρέα μέταλλα και μικροπλαστικά. Εάν δεν υποβληθούν σε κατάλληλη επεξεργασία, τα λύματα μπορούν να μολύνουν τα υδάτινα σώματα, να βλάψουν την υδροβία ζωή και να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία (Sivakumar, P., Loh, K. C., Sahu, J. N., & Kjelleberg, S. (2015).

Οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, όπως φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες για την απομάκρυνση των ρύπων από τα λύματα. Οι μέθοδοι αυτές έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές στην απομάκρυνση των περισσότερων ρύπων από τα λύματα και έχουν συμβάλει στη σημαντική βελτίωση της ποιότητας των υδάτων παγκοσμίως. Ωστόσο, οι συμβατικές μέθοδοι έχουν περιορισμούς στην απομάκρυνση ορισμένων ρύπων, και είναι δαπανηρές και ενεργοβόρες (Ashfaq et. al (2021).

Η χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων έχει αναδειχθεί ως μια πιθανή βιώσιμη λύση που μπορεί να ξεπεράσει ορισμένους από τους περιορισμούς των συμβατικών μεθόδων. Τα μικροφύκη είναι φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί που μπορούν να απομακρύνουν ρύπους από τα λύματα μέσω διαφόρων μηχανισμών, όπως η προσρόφηση, η βιοαπορρόφηση και η βιοαποικοδόμηση. Επιπλέον, τα μικροφύκη μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα και να αξιοποιήσουν τα θρεπτικά συστατικά και το CO₂ που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα ως πηγή ενέργειας και άνθρακα (Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012).

Σε αυτή την επισκόπηση των μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, θα διερευνήσουμε τις διαφορετικές φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται στη συμβατική επεξεργασία υγρών αποβλήτων, τους περιορισμούς τους και τις δυνατότητες της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με βάση τα μικροφύκη ως βιώσιμη λύση. Αυτή η ανασκόπηση θα παράσχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη σημασία της επεξεργασίας λυμάτων και τις δυνατότητες των μικροφυκών στην αντιμετώπιση ορισμένων από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων (Sivakumar, P., Loh, K. C., Sahu, J. N., & Kjelleberg, S. (2015).

2.3.1 Φυσικές διεργασίες

Οι φυσικές διεργασίες αποτελούν σημαντικό στοιχείο της συμβατικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και περιλαμβάνουν την απομάκρυνση των αιωρούμενων και καθιζάνοντων στερεών. Οι φυσικές διεργασίες αποτελούν συνήθως το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και είναι απαραίτητες για την προστασία των μονάδων επεξεργασίας από φράξιμο και ρύπανση στα επόμενα βήματα επεξεργασίας απομακρύνοντας μεγάλα υπολείμματα και στερεά. Οι φυσικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων περιλαμβάνουν τη διαλογή, την καθίζηση και τη διήθηση (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

Η απομάκρυνση των μεγάλων θραυσμάτων είναι σημαντική για την προστασία των μεταγενέστερων μονάδων επεξεργασίας, όπως οι αντλίες και οι διεργασίες βιολογικής επεξεργασίας, από βλάβες ή αστοχίες. Οι φυσικές διεργασίες χρησιμοποιούνται επίσης για την απομάκρυνση των καθιζάνοντων στερεών, τα οποία μπορεί να συσσωρευτούν στον πυθμένα των δεξαμενών και να συμβάλλουν στη συσσώρευση ιλύος. Τα καθιζάνοντα στερεά μπορούν επίσης να μειώσουν τη χωρητικότητα των μονάδων επεξεργασίας και να αυξήσουν τη συχνότητα της συντήρησης (Sivakumar, P., Loh, K. C., Sahu, J. N., & Kjelleberg, S. (2015).

Οι φυσικές διεργασίες είναι σχετικά απλές και οικονομικά αποδοτικές, αλλά έχουν περιορισμούς στην απομάκρυνση ρύπων όπως το άζωτο και ο φώσφορος. Οι φυσικές διεργασίες συνήθως ακολουθούνται από χημικές και βιολογικές διεργασίες για την απομάκρυνση των διαλυμένων ρύπων και την περαιτέρω επεξεργασία των λυμάτων. Οι φυσικές διεργασίες είναι απαραίτητες για την προστασία των μεταγενέστερων μονάδων επεξεργασίας από την απόφραξη και τη ρύπανση και αποτελούν σημαντικό στοιχείο της συμβατικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

2.3.2 Χημικές διεργασίες

Οι χημικές διεργασίες αποτελούν σημαντικό στοιχείο της συμβατικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και περιλαμβάνουν την απομάκρυνση διαλυμένων και κolloειδών ρύπων. Οι χημικές διεργασίες χρησιμοποιούνται συνήθως μετά τις φυσικές διεργασίες για την περαιτέρω επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και την απομάκρυνση ρύπων όπως η οργανική ύλη, τα θρεπτικά συστατικά και τα βαρέα μέταλλα (Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2017). Οι χημικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων περιλαμβάνουν την πήξη, την κροκίδωση και τη χημική οξειδωση. Οι χημικές διεργασίες περιλαμβάνουν την προσθήκη χημικών ουσιών στα υγρά απόβλητα για τη διευκόλυνση της απομάκρυνσης των

ρύπων. Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στις χημικές διεργασίες μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τους συγκεκριμένους ρύπους που στοχεύουν. Οι χημικές διεργασίες χρησιμοποιούνται συνήθως για την απομάκρυνση διαλυμένων και κolloειδών ρύπων που δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά με φυσικές διεργασίες (Henze, M., Harremoes, P., Jansen, J. L. C., & Arvin, E. (2008).

Συμπερασματικά, οι χημικές διεργασίες αποτελούν σημαντικό στοιχείο της συμβατικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση διαλυμένων και κolloειδών ρύπων. Οι χημικές διεργασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη στόχευση συγκεκριμένων ρύπων και την ενίσχυση της συνολικής αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας. Οι χημικές διεργασίες είναι συνήθως ακριβότερες και απαιτούν περισσότερη ενέργεια από τις φυσικές διεργασίες και απαιτούν προσεκτική παρακολούθηση και έλεγχο. Η πήξη, η κροκίδωση και η χημική οξείδωση χρησιμοποιούνται συνήθως (Ashfaq et. al (2021).

2.2.3 ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ

Οι βιολογικές διεργασίες αποτελούν βασικό συστατικό της συμβατικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και περιλαμβάνουν τη χρήση μικροοργανισμών για την απομάκρυνση των ρύπων. Οι βιολογικές διεργασίες χρησιμοποιούνται συνήθως μετά από τις φυσικές και τις χημικές διεργασίες για την περαιτέρω επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και την απομάκρυνση ρύπων όπως οργανική ύλη, θρεπτικά συστατικά και παθογόνα (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015). Οι βιολογικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων περιλαμβάνουν την ενεργό ιλύ, τη βιολογική απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και την αναερόβια χώνευση (Bioeconomym, 2017).

Οι βιολογικές διεργασίες περιλαμβάνουν τη χρήση μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, μύκητες και φύκια, για την απομάκρυνση ρύπων από τα λύματα. Οι μικροοργανισμοί συνήθως

αναπτύσσονται σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, όπως αντιδραστήρες, και λίμνες. Οι βιολογικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση ρύπων που δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά με φυσικές και χημικές διεργασίες (Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J. L. C., & Arvin, E. (2008).

Οι βιολογικές διεργασίες είναι συνήθως πιο οικονομικά και ενεργειακά αποδοτικές από τις χημικές διεργασίες και μπορούν να επιτύχουν υψηλότερη αποτελεσματικότητα επεξεργασίας για ορισμένους ρύπους. Οι βιολογικές διεργασίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοαερίου ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Ωστόσο, οι βιολογικές διεργασίες είναι συνήθως πιο αργές από τις χημικές διεργασίες και απαιτούν προσεκτική παρακολούθηση και έλεγχο για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

2.3.4 Περιορισμοί των συμβατικών μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Συμπερασματικά, ενώ οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι αποτελεσματικές στην απομάκρυνση πολλών ρύπων από τα λύματα, έχουν περιορισμούς στην απομάκρυνση ορισμένων ρύπων και μπορεί να είναι δαπανηρές και ενεργοβόρες. Εναλλακτικές μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, όπως η επεξεργασία με βάση τα μικροφύκη, προσφέρουν πιθανά πλεονεκτήματα όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας, την κατανάλωση ενέργειας και την παραγωγή βιομάζας. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για τη βελτιστοποίηση των εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας και την αντιμετώπιση ορισμένων από τις προκλήσεις που σχετίζονται με αυτές τις τεχνολογίες (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

2.3.5 Επεξεργασία λυμάτων με Μικροφύκη

Η επεξεργασία λυμάτων με μικροφύκη προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση που μπορεί να ξεπεράσει ορισμένους από αυτούς τους περιορισμούς (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y.

2015). Η επεξεργασία λυμάτων με μικροφύκη περιλαμβάνει τη χρήση μικροφυκών για την απομάκρυνση ρύπων όπως το άζωτο, ο φώσφορος και η οργανική ύλη από τα λύματα. Τα μικροφύκη μπορούν να αναπτυχθούν σε λύματα ή σε άλλες πηγές νερού χαμηλής ποιότητας, γεγονός που μπορεί να μειώσει τη ζήτηση για γλυκό νερό στην επεξεργασία λυμάτων (Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019). Επιπλέον, μπορεί να ενσωματωθεί με άλλες τεχνολογίες επεξεργασίας για την επίτευξη υψηλότερης απόδοσης επεξεργασίας για συγκεκριμένους ρύπους (Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012).

Τα μικροφύκη απομακρύνουν τους ρύπους από τα λύματα μέσω της φωτοσύνθεσης. Κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, τα μικροφύκη αφομοιώνουν θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο και φώσφορο και τα μετατρέπουν σε βιομάζα. Χρησιμοποιούν επίσης την οργανική ύλη ως πηγή άνθρακα και ενέργειας, γεγονός που συμβάλλει στην απομάκρυνση της οργανικής ύλης από τα λύματα. Επιπλέον, μπορούν να απομακρύνουν ρύπους όπως βαρέα μέταλλα και αναδύμενους ρύπους μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως βιοσυσσωμάτωση, όπου οι ρύποι προσροφώνται στην επιφάνεια των κυττάρων των μικροφυκών (Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019).

Έχουν διεξαχθεί αρκετές ερευνητικές μελέτες για την επεξεργασία λυμάτων με βάση τα μικροφύκη, οι οποίες έχουν δείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Οι Li κ.ά. (2019) μελέτησαν τη χρήση μικροφυκών σε φωτοβιοαντιδραστήρα μεμβράνης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων που περιέχουν άζωτο και φώσφορο. Η μελέτη διαπίστωσε ότι τα μικροφύκη μπορούσαν να απομακρύνουν αποτελεσματικά το άζωτο και τον φώσφορο από τα λύματα και να παράγουν βιομάζα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πηγή βιοκαυσίμων.

Οι Wu κ.ά. (2019) διερεύνησαν τη χρήση μικροφυκών για την επεξεργασία οικιακών λυμάτων σε φωτοβιοαντιδραστήρα. Η μελέτη διαπίστωσε ότι τα μικροφύκη μπορούσαν να απομακρύνουν

αποτελεσματικά το άζωτο, τον φώσφορο και την οργανική ύλη από τα λύματα και ότι η παραγόμενη βιομάζα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πηγή βιολίπανσης.

Οι Zhang et al. (2021) μελέτησαν τη χρήση μικροφυκών για την επεξεργασία βιομηχανικών λυμάτων που περιέχουν βαρέα μέταλλα. Η μελέτη διαπίστωσε ότι τα μικροφύκη μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά τα βαρέα μέταλλα από τα υγρά απόβλητα μέσω βιοαπορρόφησης και ότι η παραγόμενη βιομάζα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πηγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων (Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019).

Οι Chen et al. (2017) διερεύνησαν τη χρήση μικροφυκών για την επεξεργασία στραγγισμάτων από χωματερές. Η μελέτη διαπίστωσε ότι τα μικροφύκη μπορούσαν να απομακρύνουν αποτελεσματικά το άζωτο, τον φώσφορο και την οργανική ύλη από τα στραγγίσματα των χώρων υγειονομικής ταφής και να παράγουν βιομάζα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πηγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων.

Οι Craggs et al. (2011) μελέτησαν τη χρήση μικροφυκών για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων γαλακτοκομικών μονάδων. Η μελέτη διαπίστωσε ότι τα μικροφύκη μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά τα θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο και ο φώσφορος από τα υγρά απόβλητα γαλακτοπαραγωγικών μονάδων και να παράγουν βιομάζα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ζωοτροφών (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

Άλλες μελέτες έχουν επίσης δείξει τη δυνατότητα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με βάση τα μικροφύκη να απομακρύνουν άλλους ρύπους, όπως αναδυόμενους μολυσματικούς παράγοντες και μικροπλαστικά. Για παράδειγμα, οι Peng κ.ά. (2018) διερεύνησαν τη χρήση μικροφυκών για την απομάκρυνση φαρμακευτικών ουσιών από λύματα. Η μελέτη διαπίστωσε ότι τα μικροφύκη μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά φαρμακευτικές ουσίες από τα λύματα μέσω

προσρόφησης και βιοαποικοδόμησης. Επιπλέον, η επεξεργασία με βάση τα μικροφύκη μπορεί επίσης να απομακρύνει τα μικροπλαστικά από τα υγρά απόβλητα, καθώς τα μικροφύκη μπορούν να λειτουργήσουν ως καταβόθρα για τα μικροπλαστικά μέσω της βιοαπορρόφησης.

Η επεξεργασία υγρών αποβλήτων με μικροφύκη μπορεί επίσης να παράγει βιομάζα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας ή να μετατραπεί σε βιοπροϊόντα, και να αντισταθμίσει το κόστος της επεξεργασίας, γεγονός που μπορεί να αυξήσει την οικονομική απόδοση της επεξεργασίας με μικροφύκη. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις, όπως το υψηλό κόστος κεφαλαίου που συνδέεται με την κατασκευή και τη λειτουργία συστημάτων επεξεργασίας με βάση τα μικροφύκη, η ανάγκη προσεκτικής διαχείρισης της παραγόμενης βιομάζας μικροφυκών, καθώς η περίσσεια βιομάζας μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα όπως η ρύπανση και η εξάντληση του οξυγόνου στο νερό.

Συμπερασματικά, η επεξεργασία λυμάτων με βάση τα μικροφύκη προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στις συμβατικές μεθόδους για την απομάκρυνση των ρύπων από τα λύματα, μπορεί να επιτύχει υψηλότερες αποδόσεις επεξεργασίας για ορισμένους ρύπους, να παράγει βιομάζα ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας ή βιοπροϊόντων και να μειώσει τη ζήτηση γλυκού νερού για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση της.

2.4 Βιοενέργεια και Βιοπροϊόντα

Η βιοενέργεια αναφέρεται στην ενέργεια που προέρχεται από ανανεώσιμες βιολογικές πηγές, όπως τα φυτά, τα ζώα και οι μικροοργανισμοί. Η βιοενέργεια μπορεί να παραχθεί μέσω διαφόρων διεργασιών, όπως η καύση, η αεριοποίηση, η ζύμωση και η αναερόβια χώνευση. Ορισμένα παραδείγματα βιοενέργειας περιλαμβάνουν τα βιοκαύσιμα (όπως το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη), το βιοαέριο και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα (Abdel-Raouf, N., Al-

Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012). Τα βιοπροϊόντα, είναι υλικά, χημικά και άλλα προϊόντα που προέρχονται από ανανεώσιμες βιολογικές πηγές. Τα προϊόντα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια σειρά εφαρμογών, όπως πρόσθετα τροφίμων και ζωοτροφών, φαρμακευτικά προϊόντα, καλλυντικά και βιομηχανικά υλικά. Ορισμένα παραδείγματα βιοπροϊόντων περιλαμβάνουν βιοπλαστικά, λιπαντικά βιολογικής βάσης, κόλλες βιολογικής βάσης και διαλύτες βιολογικής βάσης (Bioeconomy, 2017).

2.4.1 Επίσκόπηση της παραγωγής βιοενέργειας και βιοπροϊόντων

Η παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων περιλαμβάνει τη μετατροπή της βιομάζας, όπως τα φυτά και τα οργανικά απόβλητα, σε διάφορες μορφές ενέργειας και χρήσιμων προϊόντων. Πρόκειται για μια βιώσιμη και ανανεώσιμη προσέγγιση που συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας και στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας (Vílchez, & Garbayo, 2017).

Βιοενέργεια

Η βιοενέργεια αναφέρεται στη μετατροπή της βιομάζας σε χρήσιμες μορφές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της θερμότητας, της ηλεκτρικής ενέργειας και των βιοκαυσίμων. Χρησιμοποιεί βιολογικά υλικά, όπως γεωργικά υπολείμματα, ειδικές ενεργειακές καλλιέργειες και δασική βιομάζα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας.

Στερεά βιοενέργεια: Η βιομάζα μπορεί να καεί απευθείας για την παραγωγή θερμότητας ή να μετατραπεί σε στερεά βιοκαύσιμα όπως πέλλετ ξύλου, μπρικότες ή κάρβουνο. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη θέρμανση οικιστικών ή βιομηχανικών χώρων.

Υγρή βιοενέργεια: Η βιομάζα μπορεί να υποστεί διεργασίες όπως ζύμωση, πυρόλυση ή υδροθερμική υγροποίηση για την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων όπως αιθανόλη, βιοντίζελ ή

βιοέλαιο. Αυτά τα καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις μεταφορές ή ως πρόσθετο στα ορυκτά καύσιμα (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

Αέρια βιοενέργεια: Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε βιοαέριο μέσω αναερόβιας χώνευσης, η οποία περιλαμβάνει την αποσύνθεση της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς. Το βιοαέριο περιέχει κυρίως μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως καύσιμο οχημάτων (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

Βιοπροϊόντα

Τα βιοπροϊόντα είναι υλικά ή χημικές ουσίες που προέρχονται από βιομάζα και μπορούν να αντικαταστήσουν ή να συμπληρώσουν τα συμβατικά προϊόντα με βάση το πετρέλαιο. Προσφέρουν μια πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα:

Πολυμερή βιολογικής προέλευσης: Η βιομάζα μπορεί να υποστεί επεξεργασία για την παραγωγή βιοπλαστικών, όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) ή τα πολυϋδροξυαλκανοειδή (PHA), τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά πλαστικά σε διάφορες εφαρμογές.

Χημικές ουσίες βιολογικής προέλευσης: Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών ουσιών, όπως οργανικά οξέα, διαλύτες και ένζυμα. Αυτές οι χημικές ουσίες βιολογικής προέλευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες παραγωγής, μειώνοντας την εξάρτηση από χημικές ουσίες που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα (Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012).

Υλικά βιολογικής προέλευσης: Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε δομικά υλικά, όπως βιοσύνθετα υλικά, βιοδιασπώμενα υλικά συσκευασίας ή μονωτικά υλικά. Αυτά μπορούν να

χρησιμοποιηθούν στις κατασκευές, στη συσκευασία και σε άλλες βιομηχανίες (Vílchez, & Garbayo, 2017).

Λιπάσματα βιολογικής προέλευσης: Τα οργανικά απόβλητα και τα γεωργικά υπολείμματα μπορούν να μετατραπούν σε λιπάσματα πλούσια σε θρεπτικά συστατικά μέσω διαδικασιών όπως η κομποστοποίηση ή η αναερόβια χώνευση. Αυτά τα λιπάσματα βιολογικής προέλευσης μπορούν να αντικαταστήσουν τα συνθετικά λιπάσματα, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Συνολικά, η βιοενέργεια και η παραγωγή βιοπροϊόντων προσφέρουν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις στις παραδοσιακές πηγές ενέργειας και στα προϊόντα με βάση το πετρέλαιο. Συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας και στη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας και υλικών. Ωστόσο, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί η υπεύθυνη και βιώσιμη προμήθεια βιομάζας για την αποφυγή αρνητικών περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων.

2.4.2 Βιοενέργεια από Στερεά

Η βιοενέργεια από στερεά περιλαμβάνει την άμεση καύση βιομάζας ή τη μετατροπή της βιομάζας σε στερεά βιοκαύσιμα με σκοπό την παραγωγή θερμότητας ή ενέργειας. Ακολουθούν ορισμένες βασικές πτυχές της στερεάς βιοενέργειας (Ashfaq et. al (2021).

Η βιομάζα, όπως ροκανίδια ξύλου, γεωργικά υπολείμματα ή ειδικές ενεργειακές καλλιέργειες, μπορεί να καεί απευθείας σε ειδικούς κλιβάνους ή λέβητες για την παραγωγή θερμότητας. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων σε οικιστικά ή βιομηχανικά κτίρια, καθώς και για θέρμανση νερού ή βιομηχανικές διεργασίες (Vílchez, & Garbayo, 2017).

Στερεά βιοκαύσιμα: Η βιομάζα μπορεί να υποστεί επεξεργασία και να μετατραπεί σε συμπυκνωμένα στερεά βιοκαύσιμα, τα οποία έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και βελτιωμένα χαρακτηριστικά χειρισμού. Οι πιο συνηθισμένες μορφές στερεών βιοκαυσίμων είναι:

a. Πέλετ ξύλου: Τα pelet ξύλου είναι μικρά, κυλινδρικά σφαιρίδια βιομάζας που παράγονται με συμπίεση πριονιδιών, τεμαχίων ξύλου ή άλλων ξυλωδών υλικών. Έχουν σταθερό μέγεθος, περιεκτικότητα σε υγρασία και ενεργειακό περιεχόμενο, καθιστώντας τα κατάλληλα για οικιακά συστήματα θέρμανσης, παραγωγή ενέργειας και ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές.

b. Μπρικέτες: Οι μπρικέτες βιομάζας είναι συμπαγείς όγκοι υλικών βιομάζας, όπως ξυλοτεμαχίδια, γεωργικά υπολείμματα ή σκόνη ξυλάνθρακα, που συμπιέζονται υπό υψηλή πίεση. Αποτελούν μια βολική και αποτελεσματική πηγή καυσίμου για σκοπούς θέρμανσης, παρόμοια με τα pellets ξύλου.

c. Κάρβουνο: Ο ξυλάνθρακας είναι ένα στερεό βιοκαύσιμο που παράγεται με τη θέρμανση βιομάζας απουσία οξυγόνου μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται πυρόλυση. Έχει υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο σε σύγκριση με την ακατέργαστη βιομάζα και χρησιμοποιείται συνήθως για μαγείρεμα, θέρμανση και βιομηχανικές εφαρμογές (Bioeconomym, 2017).

Οφέλη της στερεάς βιοενέργειας: Η χρήση στερεάς βιοενέργειας προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα:

a. Ανανεώσιμη και ουδέτερη ως προς τον άνθρακα: Η βιομάζα προέρχεται από οργανικά υλικά, γεγονός που την καθιστά ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Όταν η βιομάζα συγκομίζεται και διαχειρίζεται με βιώσιμο τρόπο, η καύση στερεών βιοκαυσίμων απελευθερώνει περίπου την ίδια ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) με αυτή που απορρόφησε η βιομάζα κατά την ανάπτυξή της, με αποτέλεσμα σχεδόν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

b. Τοπική και καταναμημένη ενέργεια: Η στερεή βιοενέργεια μπορεί να παραχθεί και να χρησιμοποιηθεί τοπικά, μειώνοντας την εξάρτηση από κεντρικές πηγές ενέργειας και υποδομές μεταφοράς. Προωθεί την ενεργειακή αυτάρκεια και μπορεί να συμβάλει στην αγροτική ανάπτυξη και τη δημιουργία θέσεων εργασίας (Vílchez, & Garbayo, 2017).

c. Διαχείριση αποβλήτων και κυκλική οικονομία: Η αξιοποίηση γεωργικών υπολειμμάτων, δασικών υπολειμμάτων ή βιομάζας αποβλήτων για στερεή βιοενέργεια συμβάλλει στη μείωση των προκλήσεων διάθεσης αποβλήτων και προωθεί την κυκλική οικονομία, μετατρέποντας τα απόβλητα σε πολύτιμο ενεργειακό πόρο (Ashfaq et. al (2021).

Προβληματισμοί και προκλήσεις: Ενώ η στερεά βιοενέργεια έχει πολλά οφέλη, υπάρχουν ορισμένες εκτιμήσεις και προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν:

a. Βιώσιμη προμήθεια βιομάζας: Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί η βιώσιμη προμήθεια βιομάζας για την αποφυγή της αποψίλωσης των δασών, της υποβάθμισης των οικοτόπων και του ανταγωνισμού με την παραγωγή τροφίμων. Η βιομάζα θα πρέπει να συγκομίζεται και να διαχειρίζεται με τρόπο που να διατηρεί την υγεία του οικοσυστήματος και τη βιοποικιλότητα (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

b. Αποδοτικότητα και έλεγχοι εκπομπών: Τα συστήματα καύσης θα πρέπει να σχεδιάζονται και να βελτιστοποιούνται ώστε να εξασφαλίζεται υψηλή απόδοση μετατροπής ενέργειας και να ελαχιστοποιούνται οι εκπομπές. Οι προηγμένες τεχνολογίες, όπως η αεριοποίηση της βιομάζας και τα συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΘ), μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα και να μειώσουν περαιτέρω τις εκπομπές (Vílchez, & Garbayo, 2017).

c. Διάθεση τέφρας και διαχείριση υπολειμμάτων: Η τέφρα που παράγεται κατά την καύση στερεών βιοκαυσίμων χρειάζεται κατάλληλο χειρισμό και διάθεση. Επιπλέον, η διαχείριση των υπολειμμάτων βιομάζας, όπως ο φλοιός ή τα γεωργικά υπολείμματα, απαιτεί προσεκτική εξέταση για την αποφυγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η στερεή βιοενέργεια, μέσω της καύσης βιομάζας ή της παραγωγής στερεών βιοκαυσίμων, παρέχει μια ανανεώσιμη και βιώσιμη επιλογή για την παραγωγή θερμότητας και ενέργειας σε οικιστικές, εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στην προώθηση της τοπικής παραγωγής ενέργειας και στην υποστήριξη στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων.

2.4.3 Παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων

Η υγρή μορφή βιοενέργεια περιλαμβάνει τη μετατροπή της βιομάζας σε υγρά βιοκαύσιμα μέσω διαφόρων διεργασιών όπως η ζύμωση, η πυρόλυση ή η υδροθερμική υγροποίηση. Αυτά τα υγρά βιοκαύσιμα, όπως η αιθανόλη, το βιοντίζελ ή το βιοέλαιο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικές λύσεις των ορυκτών καυσίμων στις μεταφορές ή ως πρόσθετα στα συμβατικά καύσιμα. Ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση της υγρής βιοενέργειας (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015):

2.4.3.1 Παραγωγή αιθανόλης

Η βιομάζα, που αποτελείται κυρίως από σάκχαρα ή άμυλα, μπορεί να ζυμωθεί για την παραγωγή αιθανόλης. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη διάσπαση σύνθετων υδατανθράκων σε απλά σάκχαρα, τα οποία στη συνέχεια ζυμώνονται από μικροοργανισμούς, συνήθως μαγιά, για να μετατραπούν σε αιθανόλη. Η αιθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο μεταφοράς στην καθαρή της μορφή (E100) ή να αναμειχθεί με βενζίνη για τη δημιουργία διαφόρων μειγμάτων αιθανόλης-βενζίνης όπως E10 (10% αιθανόλη) ή E85 (85% αιθανόλη). Η αιθανόλη προέρχεται συνήθως από

καλλιέργειες όπως το καλαμπόκι, το ζαχαροκάλαμο ή η κυτταρινούχα βιομάζα (Ashfaq et. al (2021).

2.4.3.2 Παραγωγή βιοντίζελ

Το βιοντίζελ παράγεται με μετεστεροποίηση, μια χημική αντίδραση που μετατρέπει τα φυτικά έλαια ή τα ζωικά λίπη σε μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων (FAME). Η μετεστεροποίηση περιλαμβάνει την επεξεργασία των ελαίων ή των λιπών με μια αλκοόλη, όπως η μεθανόλη, παρουσία καταλύτη. Το παραγόμενο βιοντίζελ μπορεί να αναμιχθεί με πετρελαϊκό ντίζελ και να χρησιμοποιηθεί σε συμβατικούς κινητήρες ντίζελ χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις. Το βιοντίζελ μπορεί να παραχθεί από μια ποικιλία πρώτων υλών, όπως το σογιέλαιο, το κραμβέλαιο, το φοινικέλαιο, τα απόβλητα μαγειρικών ελαίων και τα φύκη (Bioeconomy, 2017).

2.4.3.3 Οφέλη και προκλήσεις της υγρής βιοενέργειας

Ανανεώσιμες και μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα: Τα υγρά βιοκαύσιμα που προέρχονται από βιομάζα θεωρούνται ανανεώσιμα, δεδομένου ότι οι πόροι βιομάζας μπορούν να αναγεννηθούν ή να αναπληρωθούν. Όταν παράγονται με βιώσιμο τρόπο, έχουν χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας στον μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα του τομέα των μεταφορών (Fernández, 2012).

Ενεργειακή ασφάλεια και διαφοροποίηση: Τα υγρά βιοκαύσιμα προσφέρουν μια εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα, μειώνοντας την εξάρτηση από τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων και διαφοροποιώντας το ενεργειακό μείγμα.

Οικονομικές ευκαιρίες και αγροτική ανάπτυξη: Η παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων μπορεί να δημιουργήσει νέες οικονομικές ευκαιρίες, ιδίως στις αγροτικές περιοχές, μέσω της καλλιέργειας βιομάζας, των εγκαταστάσεων επεξεργασίας και της δημιουργίας θέσεων εργασίας.

Διαθεσιμότητα και ανταγωνισμός πρώτων υλών: Η διαθεσιμότητα κατάλληλων πρώτων υλών βιομάζας σε κλίμακα αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη βιώσιμη παραγωγή υγρής βιοενέργειας. Η εξισορρόπηση της χρήσης της βιομάζας για βιοκαύσιμα με άλλες εφαρμογές, όπως η παραγωγή τροφίμων ή πρώτων υλών για άλλες βιομηχανίες, απαιτεί προσεκτική διαχείριση για την αποφυγή του ανταγωνισμού και τη διασφάλιση της βιώσιμης προμήθειας (Vílchez, & Garbayo, 2017).

Τεχνολογικές εξελίξεις: Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη είναι απαραίτητες για τη βελτίωση της αποδοτικότητας, της επεκτασιμότητας και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των διαδικασιών παραγωγής υγρής βιοενέργειας. Οι εξελίξεις στην επιλογή πρώτων υλών, στις τεχνολογίες μετατροπής και στη χρήση των υποπροϊόντων μπορούν να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα και τη βιωσιμότητα της υγρής βιοενέργειας.

Η υγρή βιοενέργεια προσφέρει μια ανανεώσιμη και δυνητικά πιο φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα στον τομέα των μεταφορών. Επιτρέπει μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ενεργειακή διαφοροποίηση και οικονομικές ευκαιρίες. Ωστόσο, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί η βιώσιμη προμήθεια βιομάζας, να ελαχιστοποιηθεί ο ανταγωνισμός με την παραγωγή τροφίμων και να συνεχιστούν οι προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας.

2.4.4 Αέρια βιοενέργεια

Η αέρια βιοενέργεια περιλαμβάνει τη μετατροπή της βιομάζας σε βιοαέριο μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται αναερόβια χώνευση. Η αναερόβια χώνευση είναι μια βιολογική διαδικασία κατά την οποία μικροοργανισμοί διασπών οργανική ύλη απουσία οξυγόνου. Η διαδικασία αυτή παράγει ένα μείγμα αερίων γνωστό ως βιοαέριο, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Ακολουθεί μια πιο λεπτομερής εξήγηση της αέριας βιοενέργειας (Ahmed Mahdy, H., García-González, M.C., Maity, S. et al. (2014):

2.4.4.1 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα σε ελεγχόμενο περιβάλλον, συνήθως εντός ενός αναερόβιου χωνευτήρα. Η διαδικασία περιλαμβάνει τέσσερα κύρια στάδια:

a. Προετοιμασία της πρώτης ύλης: Η πρώτη ύλη βιομάζας, όπως γεωργικά υπολείμματα, οργανικά απόβλητα ή ενεργειακές καλλιέργειες, συλλέγεται και προετοιμάζεται για χώνευση. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τεμαχισμό, ανάμιξη ή ρύθμιση της περιεκτικότητας σε υγρασία για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

b. Υδρόλυση: Πολύπλοκες οργανικές ενώσεις στη βιομάζα διασπώνται σε απλούστερα μόρια από υδρολυτικά βακτήρια, ένζυμα ή άλλους μικροοργανισμούς. Το στάδιο αυτό μετατρέπει τις πρωτεΐνες, τους υδατάνθρακες και τα λίπη σε μικρότερες ενώσεις.

c. Οξεογένεση: Τα προϊόντα της υδρόλυσης διασπώνται περαιτέρω σε πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs), αλκοόλες και άλλα οργανικά οξέα από οξεογόνα βακτήρια. Το στάδιο αυτό παράγει υποπροϊόντα όπως το οξικό οξύ, το προπιονικό οξύ και το βουτυρικό οξύ.

d. Μεθανογένεση: Τα μεθανογόνα βακτήρια καταναλώνουν τα VFAs και άλλα οργανικά οξέα που παράγονται στα προηγούμενα στάδια, μετατρέποντάς τα σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα

μέσω μιας σειράς βιοχημικών αντιδράσεων. Αυτό το πλούσιο σε μεθάνιο αέριο είναι το κύριο συστατικό του βιοαερίου (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

2.4.4.2 Οφέλη της αέριας βιοενέργειας

Η αέρια βιοενέργεια προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα:

- a. **Ανανεώσιμη πηγή με μειωμένες εκπομπές:** Το βιοαέριο προέρχεται από οργανικά απόβλητα και θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η αξιοποίησή του συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς το μεθάνιο που παράγεται κατά την αναερόβια χώνευση μπορεί να συλλεχθεί και να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας αντί να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα.
- b. **Διαχείριση αποβλήτων:** Η αέρια βιοενέργεια παρέχει μια λύση για τη διαχείριση οργανικών υλικών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των γεωργικών υπολειμμάτων, των αποβλήτων τροφίμων και των υγρών αποβλήτων. Συμβάλλει στην εκτροπή αυτών των αποβλήτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής και μειώνει τη ρύπανση του περιβάλλοντος (Vílchez, & Garbayo, 2017).
- c. **Τοπική παραγωγή ενέργειας:** Η παραγωγή βιοαερίου μπορεί να είναι αποκεντρωμένη, επιτρέποντας την τοπική παραγωγή ενέργειας και μειώνοντας την εξάρτηση από τις κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας και τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων. Αυτή η αποκέντρωση μπορεί να συμβάλει στην ενεργειακή ασφάλεια και ανθεκτικότητα (Ashfaq et. al (2021)).
- d. **Χωνεμένο υλικό ως λίπασμα:** Το υποπροϊόν της αναερόβιας χώνευσης, που ονομάζεται χωνεμένο υπόλειμμα, είναι ένα υλικό πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα. Μπορεί να εφαρμοστεί σε γεωργικές εκτάσεις, παρέχοντας πολύτιμα θρεπτικά συστατικά και οργανική ύλη για τη βελτίωση της υγείας και της γονιμότητας του εδάφους (Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012)).

2.4.4.3 Προκλήσεις και προβληματισμοί

Ενώ η αέρια βιοενέργεια προσφέρει πολυάριθμα οφέλη, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν (Vilchez, & Garbayo, 2017):

- a. Διαθεσιμότητα και σύνθεση των πρώτων υλών: Η επαρκής και συνεπής προμήθεια πρώτων υλών είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική παραγωγή βιοαερίου. Η εξασφάλιση επαρκούς ποσότητας και ποιότητας πρώτης ύλης βιομάζας, καθώς και η διαχείριση της σύνθεσης και της μεταβλητότητας της πρώτης ύλης, αποτελούν σημαντικά ζητήματα.
- b. Αποδοτικότητα και βελτιστοποίηση της διαδικασίας: Η αναερόβια χώνευση απαιτεί προσεκτική διαχείριση και βελτιστοποίηση της διεργασίας για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων βιοαερίου και περιεκτικότητας σε μεθάνιο. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, τα επίπεδα pH, ο υδραυλικός χρόνος κατακράτησης και η σύνθεση του υποστρώματος πρέπει να παρακολουθούνται και να ελέγχονται προσεκτικά (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).
- c. Ακαθαρσίες και καθαρισμός αερίων: Το βιοαέριο μπορεί να περιέχει ακαθαρσίες όπως υδρόθειο (H_2S), υγρασία, σιλοξάνες και ίχνη ρύπων. Αυτές οι ακαθαρσίες μπορούν να διαβρώσουν τον εξοπλισμό, να μειώσουν την παραγωγή ενέργειας και ενδεχομένως να προκαλέσουν περιβαλλοντικά ζητήματα. Για ορισμένες εφαρμογές ενδέχεται να απαιτούνται τεχνικές καθαρισμού και καθαρισμού του αερίου, όπως αποθείωση και απομάκρυνση της υγρασίας.
- d. Υποδομή και διανομή: Η αξιοποίηση του βιοαερίου απαιτεί κατάλληλη υποδομή, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης, των δικτύων αγωγών και των σταθμών ανεφοδιασμού για το βιομεθάνιο ως καύσιμο οχημάτων. Η επέκταση της υποδομής διανομής και η εξασφάλιση της συμβατότητας με τα υπάρχοντα συστήματα μπορεί να αποτελέσει πρόκληση.

e. Βιωσιμότητα και περιβαλλοντικές εκτιμήσεις: Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί η βιώσιμη προμήθεια πρώτων υλών, λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση γης, τη βιοποικιλότητα και τον ανταγωνισμό με την παραγωγή τροφίμων. Θα πρέπει να αξιολογηθεί ολόκληρος ο κύκλος ζωής των συστημάτων αέριας βιοενέργειας για να εξασφαλιστεί η συνολική περιβαλλοντική βιωσιμότητα και να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανές επιπτώσεις (Vílchez, & Garbayo, 2017).

Η αέρια βιοενέργεια, μέσω της αναερόβιας χώνευσης και της παραγωγής βιοαερίου, προσφέρει μια ανανεώσιμη και βιώσιμη πηγή ενέργειας που αντιμετωπίζει ζητήματα διαχείρισης αποβλήτων και μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Με την κατάλληλη διαχείριση και τις τεχνολογικές εξελίξεις, η αέρια βιοενέργεια μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε ένα βιώσιμο ενεργειακά μέλλον.

2.4.5 Πολυμερή / βιοπλαστικά

Τα πολυμερή βιολογικής προέλευσης, γνωστά και ως βιοπλαστικά, παράγονται από βιομάζα ως εναλλακτική λύση στα συμβατικά πλαστικά που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα. Αυτά τα πολυμερή προσφέρουν μια πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον επιλογή για διάφορες εφαρμογές. Ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση των πολυμερών βιολογικής προέλευσης (Bioeconomy, 2017):

2.4.5.1 Πολυγαλακτικό οξύ (PLA)

Το PLA είναι ένα πολυμερές βιολογικής βάσης που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως άμυλο καλαμποκιού, ζαχαροκάλαμο ή άλλες πρώτες ύλες βιομάζας. Η διαδικασία παραγωγής περιλαμβάνει τη ζύμωση των σακχάρων που προέρχονται από τη βιομάζα για την παραγωγή γαλακτικού οξέος, το οποίο στη συνέχεια πολυμερίζεται σε PLA. Το PLA είναι βιοδιασπώμενο υπό ορισμένες συνθήκες και έχει εφαρμογές σε συσκευασίες, μαχαιροπήρουνα μίας χρήσης, υφάσματα και ιατρικές συσκευές (Vílchez, & Garbayo, 2017).

2.4.5.2 Πολυϋδροξυαλκανοϊκοί εστέρες (PHA)

Τα PHA είναι μια ομάδα βιοπολυμερών που παράγονται με μικροβιακή ζύμωση πρώτων υλών βιομάζας, όπως φυτικά έλαια, σάκχαρα ή ρεύματα αποβλήτων. Το PHA είναι βιοδιασπώμενο και προσφέρει ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων ανάλογα με τη σύνθεσή του. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υλικά συσκευασίας, γεωργικές μεμβράνες, προϊόντα μιας χρήσης και ως υποκατάστατο των συμβατικών πλαστικών.

Πολυαιθυλένιο (PE) και πολυπροπυλένιο (PP) βιολογικής προέλευσης: Το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα συμβατικά πλαστικά που μπορούν να αναπτυχθούν από εναλλακτικές πηγές βιολογικής βάσης. Αυτές οι εκδόσεις βιολογικής βάσης παράγονται από πρώτες ύλες που προέρχονται από βιομάζα, όπως ζαχαροκάλαμο ή απόβλητα φυτικών υλικών, χρησιμοποιώντας παρόμοιες διαδικασίες με τις αντίστοιχες που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Το PE και το PP με βιολογική βάση μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε παρόμοιες εφαρμογές με τα συμβατικά πλαστικά, συμπεριλαμβανομένων των συσκευασιών, των δοχείων και των εξαρτημάτων αυτοκινήτων (Vilchez, & Garbayo, 2017).

2.4.5.3 Πλεονεκτήματα των πολυμερών βιολογικής προέλευσης

Τα πολυμερή βιολογικής προέλευσης παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά πλαστικά:

- a. **Ανανεώσιμα:** Τα πολυμερή βιολογικής βάσης προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές βιομάζας, μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και προωθώντας τη βιωσιμότητα των πόρων.
- b. **Μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα:** Η παραγωγή πολυμερών βιολογικής βάσης οδηγεί γενικά σε χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα πολυμερή που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής (Ashfaq et. al (2021).
- c. **Βιοδιασπασιμότητα:** Ορισμένα πολυμερή βιολογικής προέλευσης, όπως το PLA, το PHA και

ορισμένοι πολυεστέρες βιολογικής προέλευσης, είναι βιοδιασπώμενα υπό κατάλληλες συνθήκες. Αυτό επιτρέπει μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και δυνητικά οφέλη από τη διαχείριση αποβλήτων.

d. Δυνατότητα για συστήματα κλειστού κύκλου: Τα πολυμερή βιολογικής βάσης μπορούν να συμβάλουν στην κυκλική οικονομία επιτρέποντας τη δημιουργία συστημάτων κλειστού κύκλου, όπου τα προϊόντα ανακυκλώνονται ή κομποστοποιούνται στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

e. Ζήτηση στην αγορά και προτίμηση των καταναλωτών: Υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση στην αγορά για πιο βιώσιμα και φιλικά προς το περιβάλλον προϊόντα, συμπεριλαμβανομένων των πολυμερών βιολογικής βάσης. Οι καταναλωτές αναζητούν ολοένα και περισσότερο εναλλακτικές λύσεις στα συμβατικά πλαστικά, οδηγώντας σε αυξημένη υιοθέτηση προϊόντων πολυμερών βιολογικής βάσης (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

2.4.5.4 Προκλήσεις και προβληματισμοί

Ενώ τα πολυμερή βιολογικής βάσης παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015):

a. Κόστος: Η παραγωγή πολυμερών βιολογικής βάσης μπορεί να είναι ακριβότερη σε σύγκριση με τα συμβατικά πλαστικά λόγω παραγόντων όπως η διαθεσιμότητα πρώτων υλών, οι τεχνολογικοί περιορισμοί και οι οικονομίες κλίμακας. Ωστόσο, καθώς η παραγωγή αυξάνεται και η τεχνολογία εξελίσσεται, το κόστος αναμένεται να μειωθεί.

b. Διαθεσιμότητα πρώτων υλών και ανταγωνισμός: Η εξασφάλιση βιώσιμης και επαρκούς προσφοράς πρώτων υλών βιομάζας χωρίς να ανταγωνίζεται την παραγωγή τροφίμων ή να προκαλεί αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι ζωτικής σημασίας. Η ανάπτυξη πολυμερών βιολογικής βάσης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την υπεύθυνη προμήθεια πρώτων υλών (Vílchez, & Garbayo, 2017).

c. Απόδοση και συμβατότητα: Τα πολυμερή βιολογικής προέλευσης μπορεί να έχουν διαφορετικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα συμβατικά πλαστικά και η απόδοσή τους μπορεί να διαφέρει σε διαφορετικές εφαρμογές. Πρέπει να εξεταστεί η συμβατότητα με τις υπάρχουσες διαδικασίες παραγωγής, τις υποδομές ανακύκλωσης και τις απαιτήσεις τελικής χρήσης (Bioeconomym, 2017).

d. Ανακύκλωση και διαχείριση αποβλήτων: Ενώ ορισμένα πολυμερή βιολογικής προέλευσης είναι βιοδιασπώμενα, άλλα μπορεί να μην είναι εύκολα ανακυκλώσιμα ή κομποστοποιήσιμα. Η ανάπτυξη κατάλληλων συστημάτων ανακύκλωσης και διαχείρισης αποβλήτων για τα πολυμερή βιολογικής βάσης είναι σημαντική για τη μεγιστοποίηση των πλεονεκτημάτων βιωσιμότητάς τους.

e. Ευαισθητοποίηση του κοινού και υιοθέτηση από την αγορά: Η ενημέρωση των καταναλωτών και των επιχειρήσεων σχετικά με τα οφέλη και τις εφαρμογές των πολυμερών βιολογικής προέλευσης είναι ζωτικής σημασίας για την υιοθέτηση από την αγορά και τη δημιουργία μιας βιομηχανίας που θα βασίζεται στη ζήτηση.

Τα πολυμερή βιολογικής βάσης, όπως το PLA, το PHA και οι εκδόσεις συμβατικών πλαστικών βιολογικής βάσης, προσφέρουν μια πιο βιώσιμη εναλλακτική λύση σε σχέση με τα συμβατικά πλαστικά. Έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής πλαστικών, να μειώσουν την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και να προωθήσουν μια κυκλική οικονομία. Η συνεχής έρευνα, η τεχνολογική πρόοδος και οι συνεργασίες μεταξύ των βιομηχανιών αποτελούν το κλειδί για την αντιμετώπιση των προκλήσεων και την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού των πολυμερών βιολογικής προέλευσης.

2.4.6 Χημικά προϊόντα

Τα χημικά προϊόντα βιολογικής προέλευσης, γνωστά και ως βιοχημικά ή πράσινα χημικά προϊόντα, είναι χημικά προϊόντα που προέρχονται από πρώτες ύλες βιομάζας μέσω διαφόρων

βιολογικών διεργασιών ή διεργασιών ζύμωσης. Τα χημικά αυτά προσφέρουν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση σε σχέση με τα συμβατικά χημικά που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα. Ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση των χημικών ουσιών βιολογικής προέλευσης:

2.4.6.1 Οργανικά οξέα

Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή διαφόρων οργανικών οξέων, όπως:

Γαλακτικό οξύ: Το γαλακτικό οξύ παράγεται συνήθως με τη ζύμωση σακχάρων που προέρχονται από πρώτες ύλες βιομάζας. Βρίσκει εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών, καθώς και στην παραγωγή βιοδιασπώμενων πολυμερών όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA).

Σουκκινικό οξύ: Το σουκκινικό οξύ παράγεται μέσω μικροβιακής ζύμωσης και έχει εφαρμογές στην παραγωγή βιοδιασπώμενων πλαστικών, διαλυτών και χημικών.

Κιτρικό οξύ: Το κιτρικό οξύ παράγεται συνήθως με τη ζύμωση σακχάρων που προέρχονται από βιομάζα με τη χρήση μικροοργανισμών όπως ο *Aspergillus niger*. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών ως συντηρητικό, ενισχυτικό γεύσης και οξυντικό.

Διαλύτες:

Η βιομάζα μπορεί να χρησιμεύσει ως πηγή για διαλύτες βιολογικής προέλευσης, όπως:

Αιθανόλη: Η αιθανόλη, που παράγεται μέσω ζύμωσης σακχάρων βιομάζας, είναι ένας ευέλικτος διαλύτης βιολογικής βάσης που χρησιμοποιείται σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των φαρμακευτικών προϊόντων, των προϊόντων προσωπικής φροντίδας και των χρωμάτων.

Γλυκερίνη: Η γλυκερόλη, παραπροϊόν της παραγωγής βιοντίζελ από φυτικά έλαια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διαλύτης βιολογικής βάσης σε φαρμακευτικά προϊόντα, καλλυντικά και χημικές διεργασίες (Ashfaq et. al (2021).

2.4.6.2 Ένζυμα

Τα ένζυμα που παράγονται από βιομάζα έχουν εφαρμογές σε πολυάριθμες βιομηχανίες, όπως:

Βιομηχανικά ένζυμα: Τα ένζυμα που προέρχονται από βιομάζα, όπως οι αμυλάσες, οι πρωτεάσες και οι κυτταρινάσες, χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, όπως η ζυθοποιία, η παρασκευή απορρυπαντικών, η επεξεργασία κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων και η παραγωγή βιοκαυσίμων (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015).

Βιοκατάλυση: Τα ένζυμα με βάση τη βιομάζα χρησιμοποιούνται ως καταλύτες σε βιοκαταλυτικές αντιδράσεις για την παραγωγή χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων, επιτρέποντας πιο φιλικές προς το περιβάλλον και αποδοτικές οδούς σύνθεσης (Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019).

Άλλες χημικές ουσίες βιολογικής προέλευσης:

2.4.6.3 Οφέλη των χημικών ουσιών βιολογικής προέλευσης

Βιωσιμότητα και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Οι χημικές ουσίες βιολογικής προέλευσης μειώνουν την εξάρτηση από χημικές ουσίες που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα, οδηγώντας σε χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Bioeconomym, 2017).

Ανανεώσιμες πρώτες ύλες: Η βιομάζα είναι ένας ανανεώσιμος πόρος που μπορεί να προέλθει με βιώσιμο τρόπο, παρέχοντας μια μακροπρόθεσμη και φιλική προς το περιβάλλον πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών προϊόντων (Vílchez, & Garbayo, 2017).

Αυξημένη βιοδιασπασιμότητα: Πολλές χημικές ουσίες βιολογικής προέλευσης είναι βιοδιασπώμενες, διευκολύνοντας την ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον και βιώσιμων προϊόντων.

Διαφοροποίηση και αποδοτικότητα πόρων: Τα χημικά προϊόντα βιολογικής προέλευσης προσφέρουν εναλλακτικές λύσεις και διαφοροποίηση στη χημική βιομηχανία, μειώνοντας την εξάρτηση από τους περιορισμένους πόρους ορυκτών καυσίμων και επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη χρήση των πρώτων υλών βιομάζας (Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019).

2.4.6.4 Προκλήσεις και προβληματισμοί

Διαθεσιμότητα και σύνθεση των πρώτων υλών: Η διαθεσιμότητα κατάλληλων πρώτων υλών βιομάζας και η διαχείριση της σύνθεσης και της μεταβλητότητάς τους είναι ζωτικής σημασίας για τη βιώσιμη παραγωγή χημικών προϊόντων βιολογικής προέλευσης (Vílchez, & Garbayo, 2017).

Τεχνολογική ανάπτυξη: Απαιτείται συνεχής έρευνα και ανάπτυξη για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της επεκτασιμότητας και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των διαδικασιών παραγωγής χημικών προϊόντων με βάση τη βιολογική βάση.

Υιοθέτηση από την αγορά και οικονομική βιωσιμότητα: Η υιοθέτηση των χημικών προϊόντων βιολογικής προέλευσης μπορεί να επηρεαστεί από τη ζήτηση στην αγορά, την ανταγωνιστικότητα των τιμών και το ρυθμιστικό πλαίσιο. Η διασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας και της αποδοχής από την αγορά είναι ουσιώδεις για την ευρεία υιοθέτηση των χημικών προϊόντων με βάση τη βιολογική βάση.

Αειφορία και αξιολόγηση του κύκλου ζωής: Ολόκληρος ο κύκλος ζωής των χημικών προϊόντων βιολογικής προέλευσης, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής πρώτων υλών, της επεξεργασίας,

της χρήσης και της διαχείρισης στο τέλος του κύκλου ζωής τους, θα πρέπει να εξετάζεται για την αξιολόγηση της συνολικής βιωσιμότητας και των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων.

Τα χημικά προϊόντα βιολογικής προέλευσης που προέρχονται από βιομάζα προσφέρουν μια βιώσιμη και ανανεώσιμη εναλλακτική λύση σε σχέση με τα χημικά προϊόντα που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα. Συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στην προώθηση της αποδοτικότητας των πόρων και στη διαφοροποίηση της χημικής βιομηχανίας. Η συνεχής έρευνα, η τεχνολογική πρόοδος και η συνεργασία μεταξύ βιομηχανίας, ακαδημαϊκών και φορέων χάραξης πολιτικής είναι ζωτικής σημασίας για την περαιτέρω ανάπτυξη και εμπορική αξιοποίηση των χημικών προϊόντων από βιολογική βάση (Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019).

2.4.7 Σύνθετα βιο-υλικά

Τα υλικά βιολογικής προέλευσης προέρχονται από βιομάζα και προσφέρουν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τα συμβατικά υλικά σε διάφορες βιομηχανίες. Τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις κατασκευές, στη συσκευασία, στα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα και σε άλλες εφαρμογές, παρέχοντας περιβαλλοντικά οφέλη και μειώνοντας την εξάρτηση από υλικά που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα. Ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση των υλικών βιολογικής προέλευσης (Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019):

Βιοδιασπώμενα υλικά συσκευασίας:

Η βιομάζα μπορεί να υποστεί επεξεργασία για την παραγωγή βιοδιασπώμενων υλικών συσκευασίας ως εναλλακτική λύση στις συμβατικές πλαστικές συσκευασίες. Τα υλικά αυτά προέρχονται συνήθως από πολυμερή βιολογικής προέλευσης, όπως PLA, PHA ή μείγματα αμύλου. Τα βιοδιασπώμενα υλικά συσκευασίας προσφέρουν το πλεονέκτημα της μείωσης των

πλαστικών αποβλήτων και της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Μπορεί να περιλαμβάνουν μεμβράνες συσκευασίας, δίσκους, δοχεία, σακούλες και άλλα είδη μιας χρήσης. Τα υλικά αυτά αποικοδομούνται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, όπως η βιομηχανική κομποστοποίηση ή το εδαφικό περιβάλλον.

2.4.7.1 Υλικά μόνωσης

Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μονωτικών υλικών για κτίρια. Για παράδειγμα:

Μονωτικό υλικό από αφρό βιολογικής προέλευσης: Οι αφροί βιολογικής προέλευσης μπορούν να παραχθούν με τη χρήση πολυολών που προέρχονται από βιομάζα, όπως το σογιέλαιο ή το καστορέλαιο, ως υποκατάστατο των πολυολών με βάση το πετρέλαιο. Αυτοί οι αφροί έχουν εφαρμογές στη θερμική και ακουστική μόνωση για κατασκευές (Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019).

Μόνωση από φυσικές ίνες: Οι φυσικές ίνες που προέρχονται από βιομάζα, όπως η κάνναβη, το λινάρι ή η κυτταρίνη, μπορούν να μεταποιηθούν σε μονωτικές πλάκες ή υλικά χαλαρής πλήρωσης. Παρέχουν θερμομονωτικές ιδιότητες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τοίχους, οροφές και δάπεδα (Vílchez, & Garbayo, 2017).

2.4.7.2 Άλλα υλικά βιολογικής προέλευσης

Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε διάφορα άλλα υλικά βιολογικής προέλευσης, όπως

Κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα και ίνες βιολογικής προέλευσης: Οι ίνες που προέρχονται από βιομάζα, όπως το μπαμπού, η κάνναβη ή το λινάρι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υφάσματα, ενδύματα, ταπετσαρίες και οικιακά έπιπλα ως βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τις συνθετικές ίνες (Vílchez, & Garbayo, 2017).

Βιοδιασπώμενα και βιολογικά πλαστικά: Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιοδιασπώμενων πλαστικών ή πλαστικών βιολογικής βάσης, προσφέροντας εναλλακτικές λύσεις στα συμβατικά πλαστικά σε διάφορες εφαρμογές.

Συγκολλητικά και ρητίνες βιολογικής βάσης: Η βιομάζα μπορεί να υποστεί επεξεργασία για την παραγωγή συγκολλητικών και ρητινών βιολογικής βάσης, οι οποίες βρίσκουν εφαρμογές σε προϊόντα ξύλου, στην κατασκευή επίπλων και στις κατασκευές.

2.4.7.3 Οφέλη των υλικών βιολογικής προέλευσης

Βιωσιμότητα και περιβαλλοντικά οφέλη: Τα υλικά βιολογικής προέλευσης μειώνουν την εξάρτηση από υλικά που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα, μειώνουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ανανεώσιμα και βιοδιασπώμενα: Η βιομάζα είναι ένας ανανεώσιμος πόρος και πολλά υλικά βιολογικής βάσης είναι βιοδιασπώμενα υπό συγκεκριμένες συνθήκες, υποστηρίζοντας μια κυκλική οικονομία και μειώνοντας τα απόβλητα.

Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση: Ορισμένα υλικά βιολογικής βάσης, όπως η μόνωση βιολογικής βάσης, μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Μειωμένη εξάρτηση από περιορισμένους πόρους: Η χρήση πρώτων υλών βιομάζας για την παραγωγή υλικών συμβάλλει στη διαφοροποίηση της χρήσης πόρων και μειώνει την εξάρτηση από τους πεπερασμένους πόρους ορυκτών καυσίμων.

2.4.7.4 Προκλήσεις και προβληματισμοί

Κλιμάκωση και κόστος: Η κλιμάκωση της παραγωγής υλικών βιολογικής προέλευσης και η επίτευξη ανταγωνιστικότητας κόστους σε σχέση με τα συμβατικά υλικά μπορεί να είναι πρόκληση

λόγω της διαθεσιμότητας των πρώτων υλών, των τεχνολογιών επεξεργασίας και των οικονομικών κλίμακας (Vílchez, & Garbayo, 2017).

Επιδόσεις και πρότυπα: Τα υλικά βιολογικής προέλευσης πρέπει να πληρούν τα πρότυπα επιδόσεων, τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας και τη συμμόρφωση με τις κανονιστικές διατάξεις για διάφορες εφαρμογές.

Αποδοχή από την αγορά και ζήτηση από τους καταναλωτές: Η ευαισθητοποίηση, η εκπαίδευση και η αποδοχή των υλικών βιολογικής προέλευσης από την αγορά είναι σημαντικές για την ευρεία υιοθέτησή τους σε διάφορες βιομηχανίες και από τους καταναλωτές.

Βιώσιμη προμήθεια πρώτων υλών: Η εξασφάλιση βιώσιμης και υπεύθυνης προμήθειας πρώτων υλών βιομάζας για υλικά βιολογικής βάσης είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή δυσμενών επιπτώσεων στα οικοσυστήματα, συγκρούσεων στη χρήση γης και ανταγωνισμού με την παραγωγή τροφίμων.

Διαχείριση του τέλους του κύκλου ζωής: Θα πρέπει να αναπτυχθούν κατάλληλα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων και υποδομές για τη διάθεση, την ανακύκλωση ή την κομποστοποίηση των υλικών βιολογικής προέλευσης, ώστε να μεγιστοποιηθούν τα περιβαλλοντικά τους οφέλη και να ελαχιστοποιηθούν τα απόβλητα.

Τα βιολογικά υλικά που προέρχονται από βιομάζα προσφέρουν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τα συμβατικά υλικά στις κατασκευές, τις συσκευασίες, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα και άλλες βιομηχανίες. Συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, στην προώθηση της αποδοτικότητας των πόρων και στην προώθηση μιας πιο κυκλικής και φιλικής προς το περιβάλλον οικονομίας. Η συνεχής έρευνα, η τεχνολογική πρόοδος και οι συνεργασίες μεταξύ των τομέων αποτελούν το κλειδί για την περαιτέρω ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της

“Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίο προϊόντων”

παραγωγής, των επιδόσεων και της διαχείρισης στο τέλος του κύκλου ζωής των υλικών βιολογικής προέλευσης.

2.4.8 Λιπάσματα βιολογικής προέλευσης

Τα λιπάσματα βιολογικής προέλευσης προέρχονται από οργανικά απόβλητα και γεωργικά υπολείμματα μέσω διεργασιών όπως η κομποστοποίηση ή η αναερόβια χώνευση. Αυτά τα λιπάσματα παρέχουν βασικά θρεπτικά συστατικά στα φυτά και μπορούν να αντικαταστήσουν ή να συμπληρώσουν τα συνθετικά λιπάσματα που χρησιμοποιούνται συνήθως στη γεωργία. Ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση των λιπασμάτων βιολογικής προέλευσης (Bioeconomy, 2017):

2.4.8.1 Κομπόστ

Το κομπόστ είναι ένα λίπασμα βιολογικής προέλευσης που βελτιώνει τη δομή του εδάφους, ενισχύει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών και προάγει την υγιή ανάπτυξη των φυτών. Εμπλουτίζει το έδαφος με οργανική ύλη, ωφέλιμους μικροοργανισμούς και βασικά θρεπτικά συστατικά, όπως άζωτο, φώσφορο και κάλιο.

2.4.8.2 Αναερόβιο χωνευτικό υλικό

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διαδικασία κατά την οποία οργανικά υλικά αποβλήτων, όπως κοπριά ζώων, απόβλητα τροφίμων ή ενεργειακές καλλιέργειες, αποσυντίθενται από μικροοργανισμούς απουσία οξυγόνου. Η διαδικασία παράγει βιοαέριο, ένα μείγμα μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και ένα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά χωνεμένο υπόλειμμα. Το χωνεμένο υπόλειμμα είναι ένα βιολογικό λίπασμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπλήρωση των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους. Περιέχει άζωτο, φώσφορο, κάλιο και άλλα ιχνοστοιχεία που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών. Το χωνεμένο υπόλειμμα μπορεί

“Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίο προϊόντων”

να εφαρμοστεί απευθείας στους αγρούς ή να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία για την παραγωγή συμπυκνωμάτων θρεπτικών ουσιών ή στερεών οργανικών λιπασμάτων (Converti, et. al 2009).

2.4.8.3 Υγρά λιπάσματα βιολογικής προέλευσης

Τα υγρά λιπάσματα βιολογικής βάσης παράγονται με την εξαγωγή θρεπτικών συστατικών από οργανικά απόβλητα ή βιομάζα μέσω διαφόρων διεργασιών. Αυτά τα λιπάσματα μπορούν να προέρχονται από το τσάι κομπόστ, το οποίο είναι ένα υγρό εκχύλισμα που λαμβάνεται με εμβάπτιση του κομπόστ σε νερό (Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. 2015). Μπορούν επίσης να ληφθούν από το υγρό κλάσμα του αναερόβιου χωνεμένου υπολείμματος. Τα υγρά λιπάσματα βιολογικής προέλευσης είναι συνήθως πλούσια σε διαλυτά θρεπτικά συστατικά και μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στα φυτά ή να χρησιμοποιηθούν ως ψεκασμός φυλλώματος. Παρέχουν μια άμεσα διαθέσιμη πηγή θρεπτικών συστατικών για την υποστήριξη της ανάπτυξης των φυτών και μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν μέσω συστημάτων άρδευσης (Converti, et. al 2009).

2.4.8.4 Οφέλη των λιπασμάτων βιολογικής προέλευσης

Ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων και αποδοτικότητα πόρων: Τα λιπάσματα βιολογικής προέλευσης συμβάλλουν στην ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων από οργανικά απόβλητα και υπολείμματα, μειώνοντας την εξάρτηση από συνθετικά λιπάσματα και ελαχιστοποιώντας τις απώλειες θρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον.

Υγεία και γονιμότητα του εδάφους: Τα λιπάσματα βιολογικής προέλευσης, όπως το κομπόστ και το χωνεμένο υλικό, βελτιώνουν τη δομή του εδάφους, ενισχύουν την ικανότητα συγκράτησης νερού και προωθούν την ανάπτυξη ωφέλιμων μικροοργανισμών του εδάφους. Συμβάλλουν στη μακροπρόθεσμη γονιμότητα και υγεία των γεωργικών εδαφών.

Μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Μειώνοντας τη χρήση συνθετικών λιπασμάτων, τα λιπάσματα βιολογικής προέλευσης συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της απορροής θρεπτικών ουσιών στους υδάτινους αποδέκτες, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση των υδάτων και ευτροφισμό. Συμβάλλουν επίσης στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που συνδέονται με την παραγωγή και τη χρήση συνθετικών λιπασμάτων (Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019).

Βιώσιμη γεωργία: Η χρήση λιπασμάτων βιολογικής προέλευσης ευθυγραμμίζεται με τις βιώσιμες γεωργικές πρακτικές, προωθώντας την ανακύκλωση της οργανικής ύλης, τη διατήρηση του εδάφους και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας.

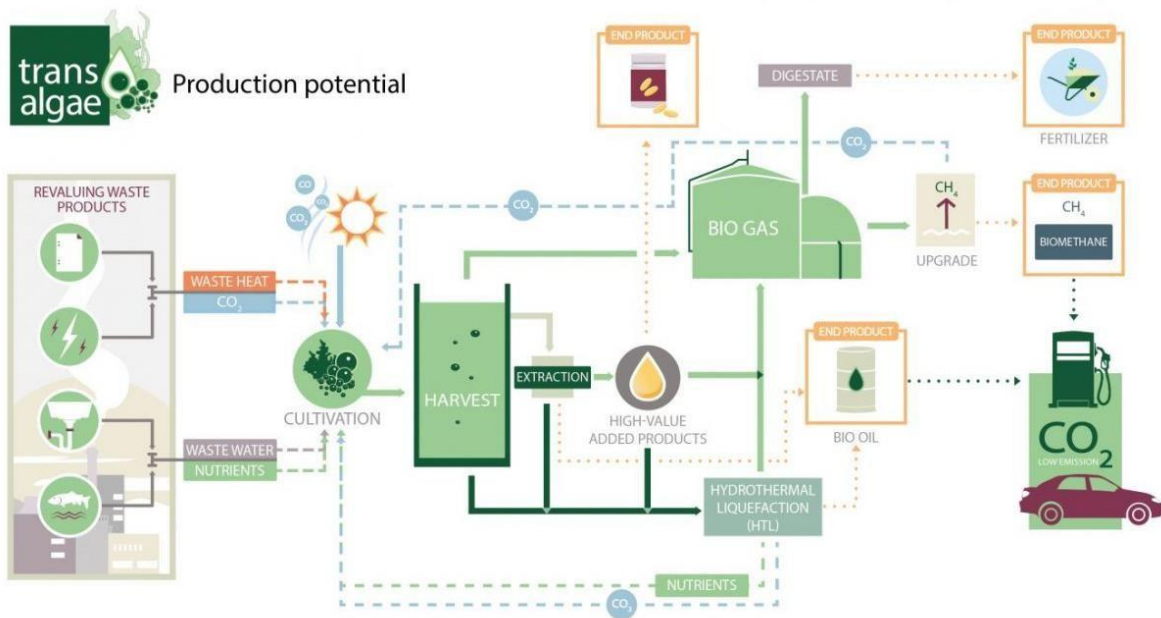
Τα λιπάσματα βιολογικής προέλευσης προσφέρουν μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στα συνθετικά λιπάσματα. Ανακυκλώνοντας οργανικά απόβλητα, συμβάλλουν στην ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων, στην υγεία του εδάφους και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η συνεχής έρευνα, ανάπτυξη και υιοθέτηση λιπασμάτων βιολογικής προέλευσης είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών και τον μετριασμό των αρνητικών επιπτώσεων των συμβατικών λιπασμάτων στα οικοσυστήματα και τους υδάτινους πόρους.

2.5 Τα μικροφύκη ως πηγή βιομάζας για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων

Η παραγωγή βιοενέργειας από μικροφύκη έχει κερδίσει σημαντική προσοχή ως μια πολλά υποσχόμενη και βιώσιμη λύση για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών μας με ταυτόχρονη άμβλυνση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Τα μικροφύκη προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών πηγών ενέργειας λόγω των υψηλών ρυθμών ανάπτυξής τους, της ικανότητάς τους να δεσμεύουν διοξείδιο του άνθρακα και της πλούσιας σύνθεσης βιομάζας. Μπορούν να καλλιεργηθούν σε ποικίλα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων των

“Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίο προϊόντων”

υγρών αποβλήτων, των αλατούχων υδάτων και των μη καλλιεργήσιμων εδαφών, γεγονός που τα καθιστά μια ευέλικτη πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοενέργειας (Converti, et. al 2009).



Πηγή: bioeconomy, (2017)

2.5.1 Παραγωγή Βιοντίζελ από μικροφύκη

Το βιοντίζελ, μια ανανεώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στο συμβατικό καύσιμο ντίζελ, έχει κερδίσει σημαντική προσοχή ως βιώσιμη πηγή βιοενέργειας. Τα μικροφύκη, μικροσκοπικοί φωτοσυνθετικοί οργανισμοί, προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη οδό για την παραγωγή βιοντίζελ λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε λιπίδια και των γρήγορων ρυθμών ανάπτυξής τους. Το παρόν άρθρο διερευνά τις δυνατότητες του βιοντίζελ που παράγεται από μικροφύκη, επισημαίνοντας τα οφέλη του, τις διαδικασίες παραγωγής και τις τρέχουσες εξελίξεις (Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009).

2.5.1.1 Διαδικασία παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη

Η παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη περιλαμβάνει διάφορα βασικά στάδια:

Επιλογή στελέχους: Το πρώτο βήμα είναι η επιλογή κατάλληλων στελεχών μικροφυκών με υψηλή περιεκτικότητα σε λιπίδια και γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης. Διάφορα είδη, όπως η *Chlorella*, η *Nannochloropsis* και η *Scenedesmus*, έχουν μελετηθεί για την παραγωγικότητα των λιπιδίων και το προφίλ των λιπιδίων τους (Ashfaq et. al (2021)).

Καλλιέργεια: Η καλλιέργεια μικροφυκών μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ανοικτές λίμνες, κλειστούς φωτοβιοαντιδραστήρες ή άλλα συστήματα καλλιέργειας. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ένταση του φωτός, η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών και το pH πρέπει να βελτιστοποιούνται για να επιτευχθεί η βέλτιστη ανάπτυξη των μικροφυκών και η συσσώρευση λιπιδίων.

Συγκομιδή: Μόλις τα μικροφύκη φθάσουν στη μέγιστη ανάπτυξη και περιεκτικότητά τους σε λιπίδια, πρέπει να συγκομιστούν από το μέσο καλλιέργειας. Οι μέθοδοι συγκομιδής περιλαμβάνουν τη φυγοκέντρωση, τη διήθηση, την κροκίδωση και την επίπλευση, με κάθε μέθοδο να έχει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα.

Εκχύλιση λιπιδίων: Η βιομάζα μικροφυκών που συλλέγεται υποβάλλεται σε εκχύλιση λιπιδίων για τον διαχωρισμό των λιπιδίων από την υπόλοιπη βιομάζα. Οι συνήθεις μέθοδοι εκχύλισης λιπιδίων περιλαμβάνουν την εκχύλιση με διαλύτη, την εκχύλιση με υπερκρίσιμο ρευστό και τη μηχανική συμπίεση. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από παράγοντες όπως η αποτελεσματικότητα, το κόστος και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. **Μετεστεροποίηση:** Τα λιπίδια που εξάγονται μετατρέπονται σε βιοντίζελ μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται μετεστεροποίηση. Η μετεστεροποίηση περιλαμβάνει την αντίδραση των λιπιδίων

με μια αλκοόλη, συνήθως μεθανόλη ή αιθανόλη, παρουσία καταλύτη (συνήθως υδροξείδιο του νατρίου ή του καλίου). Αυτή η χημική αντίδραση διασπά τα λιπίδια σε μεθυλικούς ή αιθυλικούς εστέρες λιπαρών οξέων, που αποτελούν τα κύρια συστατικά του βιοντίζελ (Ashfaq et. al (2021).

2.5.1.2 Τρέχουσες εξελίξεις και προκλήσεις

Οι προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης συνεχίζονται για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της εμπορικής βιωσιμότητας της παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη. Ορισμένες από τις τρέχουσες εξελίξεις περιλαμβάνουν (Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019):

Γενετική μηχανική: Οι επιστήμονες διερευνούν τεχνικές γενετικής μηχανικής για τη βελτίωση της παραγωγικότητας των λιπιδίων των στελεχών μικροφυκών. Με τη χειραγώγηση των μεταβολικών οδών που εμπλέκονται στη σύνθεση λιπιδίων, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν στελέχη μικροφυκών με υψηλότερη περιεκτικότητα σε λιπίδια και βελτιωμένα χαρακτηριστικά ανάπτυξης (Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009).

Βελτιστοποίηση της καλλιέργειας: Οι ερευνητές διερευνούν τις βέλτιστες συνθήκες καλλιέργειας, όπως η ένταση του φωτός, η θερμοκρασία, η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και η συμπλήρωση CO₂ για τη μεγιστοποίηση της ανάπτυξης των μικροφυκών και της συσσώρευσης λιπιδίων. Διερευνώνται προηγμένα συστήματα καλλιέργειας, όπως οι κάθετοι φωτοβιοαντιδραστήρες και η ολοκληρωμένη καλλιέργεια φυκιών με επεξεργασία λυμάτων, για τη βελτίωση της παραγωγικότητας και της αξιοποίησης των πόρων.

Τεχνικές συγκομιδής: Καταβάλλονται προσπάθειες για την ανάπτυξη οικονομικά και ενεργειακά αποδοτικών μεθόδων συγκομιδής και εξαγωγής λιπιδίων. Διερευνώνται νέες προσεγγίσεις, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτροσυγκόλλησης, της εκχύλισης με τη βοήθεια υπερήχων και της βιο-κροκίδωσης, για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας αυτών των διαδικασιών.

Αναβάθμιση και ποιοτικός έλεγχος: Το βιοντίζελ που παράγεται από μικροφύκη μπορεί να απαιτεί περαιτέρω εξευγενισμό και καθαρισμό για να πληροί τα πρότυπα ποιότητας καυσίμου. Τεχνικές όπως η εστεροποίηση, η γλυκερόλυση και ο διαχωρισμός με μεμβράνες διερευνώνται για τον καθαρισμό και τη βελτίωση της ποιότητας του βιοντίζελ.

Παρά το δυναμικό του βιοντίζελ που παράγεται από μικροφύκη, πρέπει να αντιμετωπιστούν διάφορες προκλήσεις για την ευρεία εμπορική αξιοποίηση:

Κόστος: Το κόστος παραγωγής βιοντίζελ με βάση τα μικροφύκη εξακολουθεί να είναι υψηλότερο σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ λόγω παραγόντων όπως τα έξοδα καλλιέργειας, συγκομιδής, εξαγωγής λιπιδίων και επεξεργασίας. Οι οικονομίες κλίμακας, οι τεχνολογικές εξελίξεις και η βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας.

Κλίμακα: Η κλιμάκωση της καλλιέργειας μικροφυκών από εργαστηριακή κλίμακα σε εμπορική κλίμακα παραγωγής παραμένει πρόκληση. Η επίτευξη σταθερής παραγωγικότητας βιομάζας και λιπιδίων και η εξασφάλιση σταθερών λειτουργιών σε μεγαλύτερα συστήματα καλλιέργειας αποτελούν τομείς εστίασης για τους ερευνητές και τους επαγγελματίες του κλάδου.

Απαιτήσεις γης και πόρων: Η καλλιέργεια μικροφυκών απαιτεί γη, νερό και θρεπτικά συστατικά. Ο εντοπισμός κατάλληλων εδαφικών πόρων, η διαχείριση της διαθεσιμότητας νερού και η ανάπτυξη βιώσιμων συστημάτων παροχής θρεπτικών ουσιών είναι απαραίτητα για την καλλιέργεια μικροφυκών σε μεγάλη κλίμακα χωρίς να διακυβεύεται η περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009).

Αειφορία: Ενώ τα μικροφύκη έχουν χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, θα πρέπει να εφαρμόζονται βιώσιμες πρακτικές καλλιέργειας για την ελαχιστοποίηση

των πιθανών αρνητικών επιπτώσεων στα οικοσυστήματα και τους υδάτινους πόρους. Η εξισορρόπηση των απαιτήσεων σε ενέργεια και πόρους με την περιβαλλοντική διαχείριση είναι ζωτικής σημασίας (Converti, et. al 2009).

Η παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη υπόσχεται πολλά ως ανανεώσιμη και βιώσιμη λύση βιοενέργειας. Με τη δυνατότητά του να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, να μειώσει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και να αξιοποιήσει περιθωριακά εδάφη, το βιοντίζελ από μικροφύκη προσφέρει μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση για τις μεταφορές και άλλους τομείς που εξαρτώνται από το ντίζελ. Η συνεχιζόμενη έρευνα και οι τεχνολογικές εξελίξεις συνεχίζουν να αντιμετωπίζουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα της καλλιέργειας, την αποδοτικότητα και την επεκτασιμότητα, φέρνοντάς μας πιο κοντά στην αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού των μικροφυκών ως πρώτης ύλης βιοενέργειας. Καθώς προχωρούν αυτές οι εξελίξεις, το βιοντίζελ από μικροφύκη έχει τη δυνατότητα να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη ενός καθαρότερου και πιο βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος.

2.5.2 Παραγωγή βιοαερίου από μικροφύκη

Η αξιοποίηση των μικροφυκών στην παραγωγή βιοαερίου παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης, ποικίλη αξιοποίηση θρεπτικών συστατικών και δυνατότητες δέσμευσης άνθρακα. Το παρόν άρθρο διερευνά τις δυνατότητες των μικροφυκών στην παραγωγή βιοαερίου, εστιάζοντας στα οφέλη, τις διαδικασίες παραγωγής και τις τρέχουσες εξελίξεις (Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009).

2.5.2.1 Διαδικασία παραγωγής βιοαερίου από μικροφύκη

Η παραγωγή βιοαερίου από μικροφύκη περιλαμβάνει τα παρακάτω βασικά στάδια (Shousong et. al, 2023):

Καλλιέργεια μικροφυκών: Τα μικροφύκη καλλιεργούνται σε εξειδικευμένα συστήματα, όπως ανοικτές λίμνες, κλειστούς φωτοβιοαντιδραστήρες ή κλειστά συστήματα. Οι συνθήκες καλλιέργειας, συμπεριλαμβανομένης της έντασης του φωτός, της θερμοκρασίας, της παροχής θρεπτικών συστατικών και του pH, βελτιστοποιούνται ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη ανάπτυξη και παραγωγικότητα της βιομάζας των μικροφυκών.

Συγκομιδή και προεπεξεργασία: Μόλις τα μικροφύκη φθάσουν στο επιθυμητό στάδιο ανάπτυξης, συλλέγονται και διαχωρίζονται από το μέσο καλλιέργειας. Για τη συγκέντρωση της βιομάζας των μικροφυκών χρησιμοποιούνται τεχνικές συγκομιδής, όπως φυγοκέντρωση, διήθηση ή κροκίδωση. Στάδια προεπεξεργασίας, όπως η ξήρανση ή η διάσπαση των κυττάρων, μπορούν επίσης να εφαρμοστούν για τη βελτίωση της προσβασιμότητας της βιομάζας μικροφυκών για την επακόλουθη αναερόβια χώνευση (Shousong et. al, 2023).

Αναερόβια χώνευση: Η συμπυκνωμένη βιομάζα μικροφυκών υποβάλλεται σε αναερόβια χώνευση, μια βιολογική διαδικασία που λαμβάνει χώρα απουσία οξυγόνου. Κατά την αναερόβια χώνευση, οι μικροοργανισμοί διασπούν την οργανική ύλη που υπάρχει στη βιομάζα μικροφυκών και παράγουν ως αποτέλεσμα βιοαέριο. Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να λάβει χώρα σε διάφορα συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των αναερόβιων χωνευτήρων ή των βιοαντιδραστήρων (Ashfaq et. al (2021).

Αξιοποίηση βιοαερίου: Το βιοαέριο που παράγεται από την αναερόβια χώνευση των μικροφυκών περιέχει μεθάνιο (CH_4), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και ίχνη άλλων αερίων. Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για άλλες εφαρμογές, όπως συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΘ), συμπαραγωγή ή έγχυση σε δίκτυα φυσικού αερίου (Converti, et. al 2009).

2.5.2.2 Τρέχουσες εξελίξεις και προκλήσεις

Οι ερευνητές και οι επαγγελματίες του κλάδου προσπαθούν συνεχώς να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα της παραγωγής βιοαερίου από μικροφύκη. Ορισμένες από τις τρέχουσες εξελίξεις και προκλήσεις στον τομέα αυτό περιλαμβάνουν:

Επιλογή και βελτιστοποίηση στελεχών: Η επιλογή στελεχών μικροφυκών με υψηλή παραγωγικότητα βιομάζας και ευνοϊκή βιοχημική σύνθεση, όπως υψηλή περιεκτικότητα σε λιπίδια, είναι απαραίτητη. Οι τεχνικές γενετικής μηχανικής και η βελτιστοποίηση των συνθηκών καλλιέργειας μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω τους ρυθμούς ανάπτυξης και την παραγωγικότητα της βιομάζας των μικροφυκών, οδηγώντας σε αυξημένη παραγωγή βιοαερίου.

Συν-χώνευση με οργανικά απόβλητα: Η συν-χώνευση της βιομάζας μικροφυκών με οργανικά απόβλητα, όπως γεωργικά υπολείμματα, απόβλητα τροφίμων ή ιλύ λυμάτων, μπορεί να βελτιώσει τη συνολική απόδοση βιοαερίου και την αποτελεσματικότητα της χρήσης των θρεπτικών συστατικών. Η προσέγγιση αυτή προωθεί τη διαχείριση των αποβλήτων, ενισχύει την παραγωγή βιοαερίου και συμβάλλει στην ανακύκλωση των πόρων.

Βελτιστοποίηση της διαδικασίας: Οι ερευνητές διερευνούν τεχνικές βελτιστοποίησης της διαδικασίας για τη βελτίωση της απόδοσης της αναερόβιας χώνευσης με μικροφύκη. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, ο έλεγχος του pH, ο υδραυλικός χρόνος κατακράτησης και η αναλογία υποστρώματος προς μικροοργανισμούς διερευνώνται για την επίτευξη βέλτιστης παραγωγής βιοαερίου και μικροβιακής δραστηριότητας (Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009).

Ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών: Η αποτελεσματική διαχείριση και ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών στα συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών και παραγωγής βιοαερίου είναι

ζωτικής σημασίας για τη βιωσιμότητα. Οι στρατηγικές ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης θρεπτικών ουσιών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, από το χωνεμένο υπόλειμμα μπορούν να μειώσουν τις εξωτερικές εισροές θρεπτικών ουσιών και να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Κλιμάκωση και εμπορική βιωσιμότητα: Η κλιμάκωση της καλλιέργειας μικροφυκών και της παραγωγής βιοαερίου από συστήματα εργαστηριακής κλίμακας σε συστήματα εμπορικής κλίμακας παραμένει πρόκληση. Για την επίτευξη εμπορικής βιωσιμότητας είναι απαραίτητη η αντιμετώπιση ζητημάτων που σχετίζονται με την καλλιέργεια σε μεγάλη κλίμακα, τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και την ανάπτυξη υποδομών.

Η παραγωγή βιοαερίου από μικροφύκη προσφέρει μια βιώσιμη ενεργειακή λύση με διάφορα περιβαλλοντικά οφέλη. Το βιοαέριο με βάση τα μικροφύκη χρησιμεύει ως ανανεώσιμη και πλούσια σε μεθάνιο πηγή ενέργειας, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη δέσμευση και τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Οι πρόοδοι στην επιλογή στελεχών, τη βελτιστοποίηση της καλλιέργειας, τη συν-χώνευση και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας οδηγούν στην αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα της παραγωγής βιοαερίου από μικροφύκη. Η αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την επεκτασιμότητα, την αποδοτικότητα, την ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών και την εμπορική βιωσιμότητα θα διευκολύνει περαιτέρω την ευρεία εφαρμογή της παραγωγής βιοαερίου από μικροφύκη. Αξιοποιώντας το δυναμικό των μικροφυκών, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια βιώσιμη διαδρομή για την ενέργεια και να μειώσουμε την εξάρτησή μας από τα ορυκτά καύσιμα, με ταυτόχρονο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και προώθηση μιας κυκλικής οικονομίας.

2.5.3 Παραγωγή υδρογόνου από μικροφύκη

Η μοναδική ικανότητα των μικροφυκών να δεσμεύουν την ηλιακή ενέργεια και να χρησιμοποιούν το νερό μέσω της φωτοσύνθεσης τα καθιστά πολύτιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου. Στη συνέχεια αναλύεται η διαδικασία παραγωγής υδρογόνου από μικροφύκη, επισημαίνοντας τα βασικά βήματα που εμπλέκονται και τις τρέχουσες εξελίξεις στον τομέα αυτό (Shousong et. al, 2023).

2.5.3.1 Διαδικασία παραγωγής υδρογόνου από μικροφύκη

Καλλιέργεια μικροφυκών: Το πρώτο βήμα στην παραγωγή υδρογόνου από μικροφύκη είναι η καλλιέργεια της βιομάζας μικροφυκών. Τα μικροφύκη μπορούν να καλλιεργηθούν σε διάφορα συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των ανοικτών λιμνών, των κλειστών φωτοβιοαντιδραστήρων ή των κλειστών συστημάτων. Για την προώθηση της ανάπτυξης των μικροφυκών και της παραγωγικότητας της βιομάζας διατηρούνται βέλτιστες συνθήκες καλλιέργειας, όπως η ένταση του φωτός, η θερμοκρασία, η παροχή θρεπτικών ουσιών και τα επίπεδα pH (Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009).

Συγκομιδή βιομάζας: Μόλις τα μικροφύκη φθάσουν στο επιθυμητό στάδιο ανάπτυξης, συλλέγονται από το σύστημα καλλιέργειας. Για τον διαχωρισμό της βιομάζας των μικροφυκών από το μέσο ανάπτυξης χρησιμοποιούνται τεχνικές συγκομιδής όπως φυγοκέντρηση, διήθηση ή κροκίδωση. Οι αποτελεσματικές μέθοδοι συγκομιδής είναι απαραίτητες για την επίτευξη υψηλής ανάκτησης βιομάζας και την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Διαταραχή των κυττάρων: Μετά τη συγκομιδή, η βιομάζα μικροφυκών υφίσταται κυτταρική διάσπαση για την απελευθέρωση των ενδοκυτταρικών συστατικών, συμπεριλαμβανομένων των ενζύμων υδρογενάσης που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή υδρογόνου. Για τη διάσπαση των κυττάρων των μικροφυκών και την πρόσβαση στα ένζυμα υδρογενάσης χρησιμοποιούνται

μέθοδοι κυτταρικής διάσπασης, όπως η μηχανική διάσπαση, ο ηχητικός καθαρισμός ή η χημική επεξεργασία (Converti, et. al 2009).

Παραγωγή υδρογόνου: Η διαδικασία κυτταρικής διάσπασης ακολουθείται από την παραγωγή υδρογόνου, η οποία πραγματοποιείται μέσω της φωτοβιολογικής διαδικασίας διάσπασης του νερού. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα μικροφύκη χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να διασπάσουν τα μόρια νερού (H_2O) σε αέριο υδρογόνο (H_2) και αέριο οξυγόνο (O_2) μέσω της δράσης των ενζύμων υδρογενάσης. Αυτή η διαδικασία παραγωγής υδρογόνου λαμβάνει χώρα σε εξειδικευμένες δομές εντός των κυττάρων των μικροφυκών που ονομάζονται υδρογονοσώματα ή χλωροπλάστες (Ashfaq et. al (2021).

Εξαγωγή και καθαρισμός υδρογόνου: Το παραγόμενο αέριο υδρογόνο πρέπει να εξαχθεί και να καθαριστεί για περαιτέρω χρήση. Για την εξαγωγή υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι, όπως ο διαχωρισμός με μεμβράνες, η προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης ή οι διαδικασίες απορρόφησης. Αυτές οι μέθοδοι βοηθούν στο διαχωρισμό του αερίου υδρογόνου από άλλα αέρια και ακαθαρσίες, εξασφαλίζοντας ένα ρεύμα υδρογόνου υψηλής καθαρότητας.

2.5.3.2 Τρέχουσες εξελίξεις και προκλήσεις

Οι ερευνητές και οι επαγγελματίες του κλάδου εργάζονται ενεργά πάνω σε εξελίξεις στην παραγωγή υδρογόνου με βάση τα μικροφύκη για να ξεπεράσουν τις προκλήσεις και να βελτιώσουν την αποδοτικότητα (Shousong et. al, 2023):

Επιλογή στελεχούς και γενετική μηχανική: Η επιλογή στελεχών μικροφυκών με υψηλό δυναμικό παραγωγής υδρογόνου και η βελτιστοποίηση των γενετικών χαρακτηριστικών τους μέσω τεχνικών γενετικής μηχανικής μπορούν να βελτιώσουν τις αποδόσεις υδρογόνου. Οι γενετικές τροποποιήσεις αποσκοπούν στη βελτίωση της αποδοτικότητας της παραγωγής

υδρογόνου και στη βελτίωση της συνολικής οικονομίας της διαδικασίας (Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009).

Βελτιστοποίηση καλλιέργειας: Η βελτιστοποίηση των συνθηκών καλλιέργειας, όπως η ένταση του φωτός, η θερμοκρασία, η παροχή θρεπτικών ουσιών και η διαθεσιμότητα διοξειδίου του άνθρακα, είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της ανάπτυξης των μικροφυκών και της παραγωγής υδρογόνου. Διερευνώνται προηγμένα συστήματα καλλιέργειας, συμπεριλαμβανομένων των κάθετων φωτοβιοαντιδραστήρων και των ολοκληρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης των μικροφυκών και της αξιοποίησης των πόρων.

Συγκαλλιέργεια και συμβιωτικές σχέσεις: Η συγκαλλιέργεια μικροφυκών με άλλους μικροοργανισμούς, όπως βακτήρια, μπορεί να ενισχύσει την παραγωγή υδρογόνου. Ορισμένα βακτήρια καταναλώνουν το οξυγόνο που παράγεται από τα μικροφύκη κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, δημιουργώντας ένα αναερόβιο περιβάλλον που ευνοεί την παραγωγή υδρογόνου.

Κλιμάκωση και εμπορική βιωσιμότητα: Η κλιμάκωση της καλλιέργειας μικροφυκών και της παραγωγής υδρογόνου από εργαστηριακή κλίμακα σε συστήματα εμπορικής κλίμακας αποτελεί σημαντική πρόκληση. Η αντιμετώπιση ζητημάτων που σχετίζονται με την καλλιέργεια σε μεγάλη κλίμακα, την αποδοτικότητα, την ανάπτυξη υποδομών και την αποδοχή από την αγορά είναι ζωτικής σημασίας για την ευρεία εφαρμογή της παραγωγής υδρογόνου με βάση τα μικροφύκη (Shousong et. al, 2023).

Η παραγωγή υδρογόνου από μικροφύκη υπόσχεται πολλά ως βιώσιμη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η διαδικασία παραγωγής περιλαμβάνει την καλλιέργεια μικροφυκών, τη συγκομιδή βιομάζας, τη διάσπαση των κυττάρων, την παραγωγή υδρογόνου μέσω φωτοβιολογικής

διάσπασης του νερού και την εξαγωγή και τον καθαρισμό του υδρογόνου. Οι εξελίξεις στην επιλογή στελεχών, τη γενετική μηχανική, τη βελτιστοποίηση της καλλιέργειας και τις τεχνικές συνκαλλιέργειας οδηγούν σε βελτιώσεις στην παραγωγή υδρογόνου με βάση τα μικροφύκη.

Η υπέρβαση των προκλήσεων που σχετίζονται με την κλιμάκωση, τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και την εμπορική βιωσιμότητα είναι ζωτικής σημασίας για την ευρεία υιοθέτηση της παραγωγής υδρογόνου με βάση τα μικροφύκη. Απαιτούνται συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης, συνεργασία μεταξύ των ερευνητών και των ενδιαφερομένων φορέων της βιομηχανίας και υποστηρικτικές πολιτικές για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού των μικροφυκών ως βιώσιμης πηγής υδρογόνου. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες των μικροφυκών, μπορούμε να ανοίξουμε το δρόμο για ένα καθαρότερο, πιο πράσινο και πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον (Converti, et. al 2009).

Τα μικροφύκη, οι μικροσκοπικοί φωτοσυνθετικοί οργανισμοί, προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα βιοπροϊόντων με ποικίλες εφαρμογές σε διάφορες βιομηχανίες. Αυτοί οι ευπροσάρμοστοι οργανισμοί κεντρίζουν το ενδιαφέρον ως βιώσιμη και ανανεώσιμη πηγή για την παραγωγή μιας σειράς πολύτιμων βιοπροϊόντων. Από τις ζωτροφές έως τα τρόφιμα και τα διατροφολογικά προϊόντα, τα καλλυντικά και την προσωπική φροντίδα, τα φαρμακευτικά προϊόντα και τα βιοπλαστικά, τα μικροφύκη επιδεικνύουν τεράστιες δυνατότητες για βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις. Το παρόν άρθρο διερευνά τις εκτεταμένες δυνατότητες των μικροφυκών στην παραγωγή αυτών των βιοπροϊόντων και τις πολλά υποσχόμενες εξελίξεις σε κάθε τομέα.

Ζωοτροφές:

Η βιομάζα μικροφυκών παρουσιάζει μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη βιομηχανία ζωοτροφών.

Η υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες, τα απαραίτητα αμινοξέα, οι βιταμίνες, τα μέταλλα και τα

ωμέγα-3 λιπαρά οξέα που βρίσκονται στα μικροφύκη τα καθιστούν ιδιαίτερα θρεπτικά και πολύτιμα συστατικά ζωοτροφών. Με την ενσωμάτωση των μικροφυκών στα σκευάσματα ζωοτροφών, είναι δυνατή η βελτίωση της υγείας των ζώων, των ρυθμών ανάπτυξης και της συνολικής παραγωγικότητας. Επιπλέον, οι ζωοτροφές με βάση τα μικροφύκη μειώνουν την εξάρτηση από τις παραδοσιακές πηγές ζωοτροφών, όπως το ιχθυάλευρο ή η σόγια, οι οποίες μπορεί να συμβάλουν στην υπεραλίευση και την αποψίλωση των δασών. Χρησιμοποιώντας τα μικροφύκη ως βιώσιμη εναλλακτική λύση, οι βιομηχανίες κτηνοτροφίας, υδατοκαλλιέργειας και πουλερικών μπορούν να μετριάσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να προωθήσουν τη βιώσιμη παραγωγή τροφίμων. Επιπλέον, τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή πολύτιμων πρόσθετων ζωοτροφών, όπως χρωστικές ουσίες, αντιοξειδωτικά και προωθητές ανάπτυξης, ενισχύοντας την υγεία των ζώων και την ποιότητα των προϊόντων (Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009).

Τρόφιμα και φάρμακα:

Ορισμένα είδη μικροφυκών, όπως η *Spirulina* και η *Chlorella*, καλλιεργούνται ειδικά για την υψηλή διατροφική τους αξία, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές σε τρόφιμα και διατροφικά φάρμακα. Τα μικροφύκη είναι πλούσια σε πρωτεΐνες, βιταμίνες, μέταλλα, αντιοξειδωτικά και απαραίτητα λιπαρά οξέα, προσφέροντας μια σειρά από οφέλη για την υγεία. Ως συμπληρώματα διατροφής, τα προϊόντα με βάση τα μικροφύκη παρέχουν μια συμπυκνωμένη πηγή θρεπτικών συστατικών, προάγοντας τη συνολική ευεξία και υποστηρίζοντας τη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος. Αυτά τα συστατικά που προέρχονται από μικροφύκη βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορα προϊόντα διατροφής, όπως σκόνη πρωτεΐνης, ενεργειακές μπάρες, ποτά και συμπληρώματα υγείας. Με την ενσωμάτωση των μικροφυκών στη διατροφή μας, μπορούμε να αγκαλιάσουμε μια βιώσιμη και πλούσια σε θρεπτικά συστατικά πηγή διατροφής, μειώνοντας

παράλληλα την εξάρτησή μας από τις παραδοσιακές γεωργικές πρακτικές. Επιπλέον, τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φυσικές χρωστικές τροφίμων, παρέχοντας ζωντανές και υγιεινές εναλλακτικές λύσεις στις συνθετικές χρωστικές τροφίμων (Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009).

Καλλυντικά και προσωπική φροντίδα:

Οι ενώσεις που προέρχονται από μικροφύκη έχουν κερδίσει την αναγνώριση στη βιομηχανία καλλυντικών και προσωπικής φροντίδας για τις ευεργετικές τους ιδιότητες. Οι χρωστικές ουσίες, τα λιπίδια, οι πολυσακχαρίτες και τα βιοδραστικά μόρια που υπάρχουν στα μικροφύκη προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα για την περιποίηση του δέρματος, την περιποίηση των μαλλιών και τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας. Τα εκχυλίσματα μικροφυκών χρησιμοποιούνται για τις ενυδατικές τους ιδιότητες, τα αντιγηραντικά τους αποτελέσματα, την προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία και την ικανότητά τους να βελτιώνουν την υφή και την ελαστικότητα του δέρματος. Επιπλέον, η ενσωμάτωση συστατικών με βάση τα μικροφύκη σε καλλυντικά σκευάσματα προωθεί την ανάπτυξη φυσικών και φιλικών προς το περιβάλλον προϊόντων, μειώνοντας την εξάρτηση από συνθετικές και δυνητικά επιβλαβείς χημικές ουσίες. Τα μικροφύκη χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή βιοδραστικών ενώσεων για προϊόντα στοματικής φροντίδας, διεγερτικά της ανάπτυξης των μαλλιών και σκευάσματα επούλωσης πληγών. Αξιοποιώντας τη δύναμη των μικροφυκών στα καλλυντικά και την προσωπική φροντίδα, μπορούμε να υιοθετήσουμε βιώσιμες και περιβαλλοντικά συνειδητοποιημένες ρουτίνες ομορφιάς.

Φαρμακευτικά προϊόντα:

Τα μικροφύκη παράγουν ένα τεράστιο φάσμα βιοδραστικών ενώσεων με πιθανές φαρμακευτικές εφαρμογές. Οι ενώσεις αυτές περιλαμβάνουν αντιοξειδωτικά, αντιφλεγμονώδεις παράγοντες,

αντιμικροβιακές ουσίες, ακόμη και πιθανές αντικαρκινικές ενώσεις. Η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται στον εντοπισμό και τον χαρακτηρισμό αυτών των βιοδραστικών ενώσεων για τη διερεύνηση του θεραπευτικού τους δυναμικού. Τα φαρμακευτικά προϊόντα με βάση τα μικροφύκη προσφέρουν τη δυνατότητα εναλλακτικών θεραπευτικών επιλογών, αντιμετωπίζοντας την ανοτοχή στα αντιβιοτικά και συμβάλλοντας στην ανάπτυξη νέων φαρμάκων για διάφορες ασθένειες και καταστάσεις υγείας. Για παράδειγμα, τα ωμέγα-3 λιπαρά οξέα που προέρχονται από μικροφύκη, όπως το εικοσιπεντανοϊκό οξύ (EPA) και το δοκοσαεξανοϊκό οξύ (DHA), χρησιμοποιούνται στην παραγωγή συμπληρωμάτων ωμέγα-3, τα οποία έχει αποδειχθεί ότι έχουν πολλά οφέλη για την υγεία, συμπεριλαμβανομένης της υποστήριξης της καρδιαγγειακής υγείας και της λειτουργίας του εγκεφάλου. Επιπλέον, τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πλατφόρμα για την παραγωγή εμβολίων, αντισωμάτων και βιοδραστικών πεπτιδίων, συμβάλλοντας στην πρόοδο στον τομέα των βιοφαρμακευτικών προϊόντων. Αξιοποιώντας το βιοδραστικό δυναμικό των μικροφυκών, μπορούμε να ξεκλειδώσουμε καινοτόμες λύσεις για την υγειονομική περίθαλψη και να συμβάλουμε στην πρόοδο των ιατρικών θεραπειών (Shousong et. al, 2023).

Βιοπλαστικά:

Βιομάζα μικροφυκών: Η βιομάζα μικροφυκών αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση για την παραγωγή βιοδιασπώμενων βιοπλαστικών. Ορισμένα είδη μικροφυκών διαθέτουν την ικανότητα να παράγουν βιοπολυμερή, όπως τα πολυυδροξυαλκανοειδή (PHA), τα οποία χρησιμεύουν ως ανανεώσιμες εναλλακτικές λύσεις στα συμβατικά πλαστικά. Τα βιοπλαστικά με βάση τα μικροφύκη προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά πλαστικά, συμπεριλαμβανομένης της βιοδιασπασιμότητας, του μειωμένου αποτυπώματος άνθρακα και της μειωμένης εξάρτησης από πόρους που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Αυτά τα βιοπλαστικά έχουν δυναμικές εφαρμογές σε διάφορες βιομηχανίες, όπως η

συσκευασία, η γεωργία και ο ιατρικός τομέας, συμβάλλοντας στις παγκόσμιες προσπάθειες για τη μείωση των πλαστικών αποβλήτων και της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες των μικροφυκών, μπορούμε να προωθήσουμε την ανάπτυξη και την υιοθέτηση βιώσιμων βιοπλαστικών, ανοίγοντας το δρόμο για μια πιο περιβαλλοντικά ευαίσθητοποιημένη και κυκλική οικονομία.

Τα μικροφύκη προσφέρουν τεράστιες δυνατότητες ως βιώσιμη και ανανεώσιμη πηγή για την παραγωγή ευρέος φάσματος βιοπροϊόντων. Από τις ζωοτροφές έως τα τρόφιμα και τα διατροφικά προϊόντα, τα καλλυντικά και την προσωπική φροντίδα, τα φαρμακευτικά προϊόντα και τα βιοπλαστικά, τα μικροφύκη αποδεικνύουν την ευελιξία και την αξία τους σε διάφορες βιομηχανίες. Η συνεχής έρευνα, η τεχνολογική πρόοδος και η αποδοχή από την αγορά είναι ζωτικής σημασίας για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού των μικροφυκών ως βιώσιμης πηγής για αυτά τα βιοπροϊόντα. Αξιοποιώντας τις μοναδικές ιδιότητες των μικροφυκών, μπορούμε να προωθήσουμε ένα πιο πράσινο και βιώσιμο μέλλον, προς όφελος τόσο της ανθρώπινης υγείας όσο και του περιβάλλοντος. Η υιοθέτηση των βιοπροϊόντων με βάση τα μικροφύκη μας επιτρέπει να μεταβούμε προς μια πιο βιώσιμη και κυκλική οικονομία, μειώνοντας το περιβαλλοντικό μας αποτύπωμα και καλύπτοντας παράλληλα τις ανάγκες διαφόρων βιομηχανιών. Η αξιοποίηση των μικροφυκών ανοίγει έναν κόσμο δυνατοτήτων για βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις, ανοίγοντας το δρόμο για ένα πιο πράσινο και βιώσιμο μέλλον.

2.5.1 Μέθοδοι παραγωγής βιοενέργειας με χρήση μικροφυκών

Οι μέθοδοι παραγωγής βιοενέργειας με τη χρήση μικροφυκών περιλαμβάνουν μια σειρά καινοτόμων και βιώσιμων προσεγγίσεων που αποσκοπούν στην αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού αυτών των μικροοργανισμών. Τα μικροφύκη προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα για την παραγωγή βιοενέργειας, όπως ο ταχύς ρυθμός ανάπτυξής τους, η υψηλή περιεκτικότητά

“Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίο προϊόντων”

τους σε λιπίδια και η ικανότητά τους να ευδοκιμούν σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ακολουθούν ορισμένες βασικές μέθοδοι παραγωγής βιοενέργειας με χρήση μικροφυκών:

Υδροθερμική Υγροποίηση: Μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται υδροθερμική υγροποίηση (HTL), τα μικροφύκη μπορούν να μετατραπούν σε βιο-ρευστό πετρέλαιο. Η HTL περιλαμβάνει την υποβολή βιομάζας μικροφυκών σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις παρουσία νερού. Η διαδικασία αυτή μιμείται τον φυσικό σχηματισμό των ορυκτών καυσίμων, αποδίδοντας ένα υγρό βιοκαύσιμο που μπορεί να διυλιστεί περαιτέρω.

Άμεση καύση: Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αποξηραμένη βιομάζα μικροφυκών μπορεί να καεί απευθείας για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η προσέγγιση είναι σχετικά απλή και μπορεί να είναι κατάλληλη για στελέχη μικροφυκών με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε λιπίδια, καθώς αξιοποιεί ολόκληρη τη βιομάζα (Shousong et. al, 2023).

Συνδυασμένες προσεγγίσεις: Τα ολοκληρωμένα συστήματα που συνδυάζουν την επεξεργασία λυμάτων με την παραγωγή βιοενέργειας κερδίζουν έδαφος. Τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, αφαιρώντας ρύπους και θρεπτικά συστατικά, ενώ ταυτόχρονα παράγουν βιομάζα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιοενέργειας.

Κυψέλες καυσίμου με βάση τα μικροφύκη: Τα μικροφύκη μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε μικροβιακές κυψέλες καυσίμου (MFC) ή κυψέλες καυσίμου φυκών (AFC). Σε αυτά τα συστήματα, τα μικροφύκη παράγουν ηλεκτρόνια μέσω της φωτοσύνθεσης, τα οποία μπορούν να συλλεχθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στρατηγικές καλλιέργειας: Διερευνώνται βιώσιμες στρατηγικές καλλιέργειας, όπως η μικότροφη και η ετερότροφη καλλιέργεια, για τη βελτίωση της ανάπτυξης των μικροφυκών και

της παραγωγής λιπιδίων. Η μιξοτροφική καλλιέργεια συνδυάζει τη φωτοσύνθεση με τη συμπλήρωση οργανικού άνθρακα, ενώ η ετεροτροφική καλλιέργεια βασίζεται σε πηγές οργανικού άνθρακα για την ανάπτυξη (Converti, et. al 2009).

Συγκομιδή και επεξεργασία: Οι αποτελεσματικές μέθοδοι συγκομιδής και μεταγενέστερης επεξεργασίας είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής βιοενέργειας από μικροφύκη. Τεχνολογίες όπως η κροκίδωση, η φυγοκέντρωση και η διήθηση με μεμβράνες χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση και την εξαγωγή πολύτιμων συστατικών από τη βιομάζα μικροφυκών.

Η παραγωγή βιοενέργειας με τη χρήση μικροφυκών ενέχει τεράστιες δυνατότητες για την αντιμετώπιση των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών, ενώ παράλληλα μετριάξει τις περιβαλλοντικές ανησυχίες. Αυτοί οι ευπροσάρμοστοι μικροοργανισμοί εξακολουθούν να αποτελούν αντικείμενο εντατικής έρευνας και ανάπτυξης, με στόχο τη βελτιστοποίηση των μεθόδων παραγωγής βιοενέργειας και την προώθηση της βιωσιμότητας στον τομέα της ενέργειας.

2.5.2 Μέθοδοι παραγωγής βιοπροϊόντων με χρήση μικροφυκών

Η παραγωγή βιοπροϊόντων με τη χρήση μικροφυκών περιλαμβάνει μια ποικιλία μεθόδων και διεργασιών για την εξαγωγή πολύτιμων ενώσεων και υλικών από αυτούς τους μικροοργανισμούς. Τα μικροφύκη είναι πλούσιες πηγές βιοδραστικών ενώσεων, θρεπτικών ουσιών και βιώσιμων πρώτων υλών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες βιομηχανίες. Ακολουθούν ορισμένες βασικές μέθοδοι παραγωγής βιοπροϊόντων με τη χρήση μικροφυκών:

Εκχύλιση και απομόνωση:

Εκχύλιση με διαλύτη: Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη χρήση οργανικών διαλυτών για την εξαγωγή λιπιδίων, χρωστικών ουσιών και άλλων πολύτιμων ενώσεων από τη βιομάζα μικροφυκών. Συνήθως χρησιμοποιούνται διαλύτες όπως το εξάνιο, η αιθανόλη ή το χλωροφόρμιο.

Εκχύλιση με υπερκρίσιμα υγρά (SFE): Η SFE χρησιμοποιεί υπερκρίσιμα ρευστά (π.χ. υπερκρίσιμο CO₂) για την εξαγωγή λιπιδίων, αντιοξειδωτικών και βιοδραστικών ενώσεων από μικροφύκη. Προσφέρει μια πιο φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση σε σχέση με την παραδοσιακή εκχύλιση με διαλύτες.

Εκχύλιση με υγρά υπό πίεση (PLE): Η PLE συνδυάζει υψηλή πίεση με αυξημένες θερμοκρασίες για την ενίσχυση της εκχύλισης λιπιδίων και βιοδραστικών ενώσεων. Μειώνει την ανάγκη για τοξικούς διαλύτες.

Επεξεργασία βιομάζας:

Διαταραχή κυττάρων: Για την πρόσβαση σε ενδοκυτταρικές ενώσεις, τα κύτταρα των μικροφυκών πρέπει να διασπαστούν. Τεχνικές όπως ο ηχητικός καθαρισμός, η άλεση με σφαιρίδια και η ομογενοποίηση υψηλής πίεσης χρησιμοποιούνται για τη διάσπαση των κυτταρικών τοιχωμάτων και την απελευθέρωση πολύτιμων υλικών.

Ξήρανση: Μετά τη συγκομιδή, η βιομάζα μικροφυκών συνήθως ξηραίνεται για να μειωθεί η περιεκτικότητα σε υγρασία. Η ξήρανση με ψεκασμό, η ξήρανση με κατάψυξη και η ηλιακή ξήρανση είναι κοινές μέθοδοι για τη διατήρηση της βιομάζας.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοπροϊόντων με τη χρήση μικροφυκών μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τη συγκεκριμένη ένωση ή υλικό-στόχο και το χρησιμοποιούμενο στέλεχος μικροφυκών. Οι ερευνητές συνεχίζουν να διερευνούν και να βελτιστοποιούν αυτές τις

μεθόδους για να αξιοποιήσουν το πλήρες δυναμικό των μικροφυκών για τη βιώσιμη ανάπτυξη βιοπροϊόντων σε διάφορες βιομηχανίες.

2.5.3 Οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής βιοενέργειας και βιοπροϊόντων με βάση τα μικροφύκη

Οι οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής βιοενέργειας και βιοπροϊόντων με βάση τα μικροφύκη είναι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την αξιολόγηση της σκοπιμότητας και της βιωσιμότητας αυτών των διεργασιών. Τα μικροφύκη έχουν κερδίσει την προσοχή για τις δυνατότητές τους να συμβάλουν στην ανανεώσιμη ενέργεια, στη βιώσιμη αξιοποίηση των πόρων και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Εδώ, θα εμβαθύνουμε στις βασικές οικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές της παραγωγής βιοενέργειας και βιοπροϊόντων με βάση τα μικροφύκη (Shousong et. al, 2023):

Οικονομικές επιπτώσεις:

Κόστος-αποτελεσματικότητα: Η καλλιέργεια μικροφυκών για βιοενέργεια και βιοπροϊόντα μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτική, κυρίως λόγω των υψηλών ρυθμών ανάπτυξής τους και των ελάχιστων απαιτήσεων σε γη και νερό. Το χαμηλότερο κόστος παραγωγής μπορεί να συμβάλει σε πιο ανταγωνιστικές τιμές αγοράς για τα τελικά προϊόντα.

Αξιοποίηση αποβλήτων: Τα βιοδιωλιστήρια με βάση τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιούν ρεύματα οργανικών αποβλήτων, όπως γεωργικές απορροές και λύματα, ως πηγές θρεπτικών ουσιών. Αυτή η προσέγγιση της μετατροπής αποβλήτων σε πόρους μπορεί να μειώσει το κόστος διαχείρισης αποβλήτων.

Δημιουργία εσόδων: Η πώληση βιοπροϊόντων με βάση τα μικροφύκη μπορεί να δημιουργήσει έσοδα για τις βιομηχανίες και τις κυβερνήσεις μέσω της φορολογίας και των ευκαιριών εξαγωγής.

Ενεργειακή ασφάλεια: Η βιοενέργεια με βάση τα μικροφύκη μπορεί να ενισχύσει την ενεργειακή ασφάλεια παρέχοντας μια ανανεώσιμη και εγχώρια πηγή καυσίμων, μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και τις εισαγωγές πετρελαίου από το εξωτερικό.

Δημιουργία θέσεων εργασίας: Η βιομηχανία μικροφυκών έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει θέσεις εργασίας σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της έρευνας, της καλλιέργειας, της μεταποίησης και της ανάπτυξης προϊόντων. Αυτή η δημιουργία θέσεων εργασίας μπορεί να τονώσει τις τοπικές οικονομίες.

Διαφοροποίηση της αγοράς: Η παραγωγή βιοκαυσίμων, βιολογικών λιπασμάτων, βιοδραστικών ενώσεων και άλλων βιοπροϊόντων διαφοροποιεί τις γεωργικές και βιομηχανικές αγορές, μειώνοντας την εξάρτηση από ένα μόνο εμπόρευμα.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:

Εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα: Τα βιοκαύσιμα με βάση τα μικροφύκη προσφέρουν μια ανανεώσιμη εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και μετριάζοντας την κλιματική αλλαγή.

Δέσμευση άνθρακα: Η φωτοσύνθεση των μικροφυκών απομακρύνει το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) από την ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας στον μετριασμό των αερίων του θερμοκηπίου. Ο άνθρακας που δεσμεύεται από τα μικροφύκη μπορεί να αποθηκευτεί ή να μετατραπεί σε βιοκαύσιμα.

Μειωμένο περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα: Η καλλιέργεια μικροφυκών απαιτεί σημαντικά λιγότερη γη από τις παραδοσιακές καλλιέργειες, διατηρώντας τα φυσικά οικοσυστήματα και μειώνοντας την αποψίλωση των δασών.

Αποδοτικότητα νερού: Η καλλιέργεια μικροφυκών μπορεί να χρησιμοποιήσει λύματα ή υφάλμυρο νερό, μειώνοντας την πίεση στους πόρους γλυκού νερού. Η αποδοτική χρήση των υδάτινων πόρων είναι ζωτικής σημασίας σε περιοχές με λειψυδρία.

Ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών: Τα βιοδυλιστήρια με βάση τα μικροφύκη μπορούν να ανακτήσουν θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο και φώσφορο από τα λύματα, μειώνοντας τη ρύπανση από θρεπτικά συστατικά και τον ευτροφισμό των υδάτινων σωμάτων.

Διατήρηση της βιοποικιλότητας: Οι βιώσιμες πρακτικές καλλιέργειας μικροφυκών μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τη διατάραξη των οικοτόπων και να προστατεύσουν την υδάτινη βιοποικιλότητα.

Μειωμένες επιβλαβείς εκπομπές: Τα βιοκαύσιμα που παράγονται από μικροφύκη εκπέμπουν λιγότερους επιβλαβείς ρύπους σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής βιοενέργειας και βιοπροϊόντων με βάση τα μικροφύκη μπορεί να επηρεάζεται από παράγοντες όπως τα συγκεκριμένα στελέχη μικροφυκών που χρησιμοποιούνται, οι μέθοδοι καλλιέργειας, η γεωγραφική θέση και οι συνθήκες της αγοράς. Οι συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης είναι απαραίτητες για τη βελτιστοποίηση αυτών των διεργασιών για μέγιστη βιωσιμότητα και οικονομική βιωσιμότητα. Επιπλέον, η πολιτική στήριξη και τα κίνητρα μπορούν να

διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην προώθηση της ανάπτυξης της βιομηχανίας μικροφυκών, εξασφαλίζοντας παράλληλα θετικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα.

3. Μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η συστηματική προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της συνολικής ανασκόπησης και ανάλυσης της βιβλιογραφίας σχετικά με τη "Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων". Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη περιλαμβάνει διάφορα βασικά βήματα που αποσκοπούν στη διασφάλιση της αυστηρότητας, της συνάφειας και της αξιοπιστίας της ερευνητικής διαδικασίας.

Η ερευνητική διαδικασία ξεκίνησε με μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο τον εντοπισμό σχετικών μελετών, επιστημονικών άρθρων και ερευνητικών δημοσιεύσεων που σχετίζονται με τη χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων. Αναζητήθηκαν συστηματικά διάφορες βάσεις δεδομένων και ακαδημαϊκά περιοδικά, συμπεριλαμβανομένων των PubMed, Scopus, Google Scholar και αναγνωρισμένων δημοσιεύσεων με κριτές. Για να καταγραφεί ένα ολοκληρωμένο φάσμα πηγών, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός σχετικών λέξεων-κλειδιών και τελεστών Boolean.

Κριτήρια επιλογής

Για τη διαλογή και το φιλτράρισμα της συλλεγόμενης βιβλιογραφίας θεσπίστηκε ένα αυστηρό σύνολο κριτηρίων συμπερίληψης και αποκλεισμού. Τα κριτήρια ένταξης περιλάμβαναν μελέτες που επικεντρώνονταν κυρίως στην επεξεργασία λυμάτων με βάση τα μικροφύκη, την παραγωγή βιοενέργειας και τη σύνθεση βιοπροϊόντων. Μόνο άρθρα και ερευνητικές εργασίες με κριτές που δημοσιεύθηκαν στην αγγλική γλώσσα ελήφθησαν υπόψη για συμπερίληψη, διασφαλίζοντας την

ποιότητα και την προσβασιμότητα των επιλεγμένων πηγών. Από την ανάλυση αποκλείστηκαν οι μελέτες που στερούνταν ουσιαστικών πληροφοριών ή συνάφειας με τους ερευνητικούς στόχους.

Τα δεδομένα που εξήχθησαν κατηγοριοποιήθηκαν σχολαστικά σε σχετικές ενότητες, διευκολύνοντας μια συστηματική και δομημένη ανάλυση. Οι ενότητες αυτές περιλάμβαναν είδη μικροφυκών, εφαρμογές, πτυχές βιωσιμότητας, προκλήσεις που αντιμετωπίστηκαν και σημαντικά ευρήματα. Η διαδικασία κατηγοριοποίησης επέτρεψε μια συνεκτική και οργανωμένη διερεύνηση της βιβλιογραφίας και διευκόλυε τον εντοπισμό επαναλαμβανόμενων θεμάτων και μοτίβων.

Πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση για τον εντοπισμό κοινών σημείων και διακρίσεων μεταξύ των επιλεγμένων μελετών. Αυτό περιελάμβανε την αξιολόγηση της ποικιλίας των ειδών μικροφυκών που χρησιμοποιήθηκαν, των εφαρμογών που διερευνήθηκαν και των προβληματισμών βιωσιμότητας που εξετάστηκαν σε όλη τη βιβλιογραφία. Η συγκριτική ανάλυση ενίσχυσε την πληρότητα των ερευνητικών ευρημάτων.

Ανάπτυξη συμπερασμάτων

Με βάση την ολοκληρωμένη ανάλυση των επιλεγμένων μελετών, διατυπώθηκαν συστηματικά συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα αυτά παρέχουν μια συνολική κατανόηση της τρέχουσας κατάστασης, των βασικών προκλήσεων και των ευκαιριών στον τομέα της επεξεργασίας λυμάτων και της παραγωγής βιορευστών με βάση τα μικροφύκη.

4. Ανάλυση

#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
1	Ahmed Mahdy κ.ά. (2014)	Βελτιωμένη Παραγωγή Μεθανίου από το <i>Chlorella vulgaris</i> με Προσθήκη Ενζύμων	<i>Chlorella vulgaris</i>	Βελτιωμένη Παραγωγή Μεθανίου	Δεν καθορίστηκε	Βελτιωμένη παραγωγή μεθανίου με την προσθήκη ενζύμων.	10.8 mL H ₂ /g VS)
2	Sabry Oraby κ.ά. (2023)	Αυξημένη Αποδοτικότητα Υδρόλυσης του <i>Chlorella vulgaris</i> μέσω Προεπεξεργασίας με Νανοσωματιδίων	<i>Chlorella vulgaris</i>	Αυξημένη Αποδοτικότητα Υδρόλυσης	Βελτίωση της Παραγωγής Βιοαερίου	Αυξημένη αποδοτικότητα υδρόλυσης και αύξηση της παραγωγής βιοαερίου με προεπεξεργασία νανοσωματιδίων.	595 mL/g VSin

#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
3	Ayesha Aslam κ.ά. (2023)	Ανασκόπηση Διαφόρων Τεχνικών για την Παραγωγή Υδρογόνου μέσω Βιολογικών Μεθόδων	Δεν καθορίστηκε	Διάφορες Τεχνικές Παραγωγής Υδρογόνου	Παραγωγή Υδρογόνου	Ανασκόπηση διάφορων τεχνικών παραγωγής υδρογόνου με βιολογικές μεθόδους.	Δεν καθορίστηκε
4	Quanliang Wang κ.ά. (2022)	Εξερεύνηση της Παραγωγής Βιοαερίου από τη Βιομάζα και Καθαρότερες Εναλλακτικές Τεχνολογίες	Δεν καθορίστηκε	Παραγωγή Βιοαερίου από τη Βιομάζα	Καθαρότερες Εναλλακτικές	Εξερεύνηση της παραγωγής βιοαερίου από τη βιομάζα και καθαρότερες εναλλακτικές τεχνολογίες.	Δεν καθορίστηκε

“Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίο προϊόντων”

#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
5	Mercedes Llamas κ.ά. (2021)	Ερευνώντας την Παραγωγή Καρβοξυλικών Οξέων μέσω Αναερόβιας Ζύμωσης του <i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	Παραγωγή Καρβοξυλικών Οξέων	Δεν καθορίστηκε	Ερευνήθηκε η παραγωγή καρβοξυλικών οξέων μέσω αναερόβιας ζύμωσης.	168.9 mL CH ₄ /g COD _i
6	Ana F. Miranda κ.ά. (2017)	Εφαρμογές των Βιομηχανικών Βιομεμβρανών των Μικροφυκών για την Επεξεργασία Υδάτων και την Παραγωγή Βιοενέργειας	Δεν καθορίστηκε	Βιομηχανικές Βιομεμβράνες για Επεξεργασία Υδάτων και Παραγωγή Βιοενέργειας	Δεν καθορίστηκε	Εξερεύνηση του δυναμικού των βιομηχανικών βιομεμβρανών για την επεξεργασία υδάτων και την παραγωγή βιοενέργειας.	Δεν καθορίστηκε

#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
7	Ikumi Umetani, Michał Sposób & Olga Tiron (2023)	Ιθαγενής Πράσινη Μικροφύκη για την Επεξεργασία Υδάτων: Απομάκρυνση Θρεπτικών Συστατικών και Ανάκτηση Πόρων για Βιοκαύσιμα και Βιοπροϊόντα	Tetrademus wisconsinensis, Lobochlamys segnis, Klebsormidium flaccidum	Απομάκρυνση Θρεπτικών Συστατικών	Δυνατότητα Ανάκτησης Πόρων	Τα μικροφύκη απομάκρυναν αποτελεσματικά αζώτο, φώσφορο, βαρέα μέταλλα και πρόσφεραν δυνατότητα ανάκτησης πόρων.	193 ± 12 mg/g
8	N. Abdel-Raouf, A.A. Al-Homaidan, I.B.M. Ibraheem (2012)	Μικροφύκη και Επεξεργασία Υδάτων	Δεν καθορίστηκε	Μείωση του BOD, Απομάκρυνση του N και/ή του P, Καταπολέμηση των κολιφόρμων,	Πιθανή χρήση των υδάτων αποβλήτων ως φθηνής πηγής θρεπτικών ουσιών για την παραγωγή βιομάζας από		Δεν καθορίστηκε

#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
				Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων	μικροφύκη για διάφορες χρήσεις.		
9	Hareb Al-Jabri, Probir Das, Shoyeb Khan, Mahmoud Thaher, Mohammed AbdulQuadir (2021)	Επεξεργασία Υδάτων από Μικροφύκη και οι Δυνητικές Εφαρμογές της Παραγόμενης Βιομάζας - Μια Ανασκόπηση	Δεν καθορίστηκε	Καθαρισμός Ρύπων, Αξιοποίηση Βιομάζας	Δεν καθορίστηκε	Η βιολογική επεξεργασία με μικροφύκη μπορεί να καθαρίσει αποτελεσματικά τα υπολείμματα και να χρησιμοποιήσει τους ρύπους για την ανάπτυξη της βιομάζας. Οι προκλήσεις περιλαμβάνουν την ανάγκη για μεγαλύτερο χώρο, εποχικές αλλαγές φωτός και	Δεν καθορίστηκε

#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
						<p>Θερμοκρασίας και προσαρμογή στις ενώσεις-στόχους. Η επιπλέον παροχή CO₂, η βέλτιστη βάθος καλλιέργειας και η προσέγγιση με μικτό μικροοργανισμό μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα. Η αξιοποίηση της βιομάζας είναι απαραίτητη για την οικονομική βιωσιμότητα.</p>	

#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
10	Merrylin Jayaseelan, Mohamed Usman, Adishkumar Somanathan, Sivashanmugam Palani, Gunasekaran Muniappan, Rajesh Banu Jeyakumar (2021)	Παραγωγή Βιοκαυσίμων από Μικροφύκη Ενσωματωμένη με Επεξεργασία Υδάτων	Δεν καθορίστηκε	Ταυτόχρονη Επεξεργασία Υδάτων και Παραγωγή Βιοκαυσίμων	Βελτιωμένη Βιωσιμότητα και Οικονομική Αποδοτικότητα	Τα μικροφύκη μπορούν να επεξεργαστούν αποτελεσματικά τα υδάτα ενώ παράλληλα παράγουν βιοκαύσιμα, μειώνοντας το κόστος και την περιβαλλοντική επίπτωση. Συζητούνται αρκετοί τρόποι παραγωγής βιοκαυσίμων από μικροφύκη, όπως το βιουδρογόνο, η βιοαιθανόλη και το βιοντίζελ. Η χρήση ανθρακοδιογόνων μικροφυκών είναι προνομιούχα, και εξετάζονται στρατηγικές για τη βελτιωμένη σύνθεση υδρογόνου.	Δεν καθορίστηκε

#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
11	Fahed Javed, Zufishan Shamair, Muhammad Aslam, Naim Rashid, Asim Laeeq Khan, Muhammad Yasir, Tahir Fazal, Ainy Hafeez, Fahad Rehman, Muhammad Saif Ur Rehman, Zakir Khan, Javed Iqbal, Aqeel Ahmed Bazmi (2019)	Βιοκαύσιμα βασισμένα σε μικροφύκη, ανάκτηση πόρων και επεξεργασία υδάτων: Μια προς την κατεύθυνση μιας βιώσιμης βιο-εργοστασίου	Δεν καθορίστηκε	Ανάκτηση Πόρων, Παραγωγή Βιοκαυσίμων, Επεξεργασία Υδάτων	Ενισχυμένη Βιωσιμότητα και Τεχνοοικονομική Ανάλυση	Τα μικροφύκη δείχνουν δυνατότητες για την επεξεργασία υδάτων, την παραγωγή ενέργειας και την ανάκτηση πόρων. Οι θρεπτικές ουσίες από τα υδάτα αποβλήτων μπορούν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη των μικροφυκών, και η μεικτική καλλιέργεια είναι ελπιδοφόρα για υψηλότερη παραγωγικότητα. Η αυτο-απόσταση, η στερέωση και οι μεμβρανικοί φωτοβιοαντιδραστήρες μπορούν να βελτιώσουν τη συλλογή. Οι μέθοδοι πυρόλυσης και	Δεν καθορίστηκε

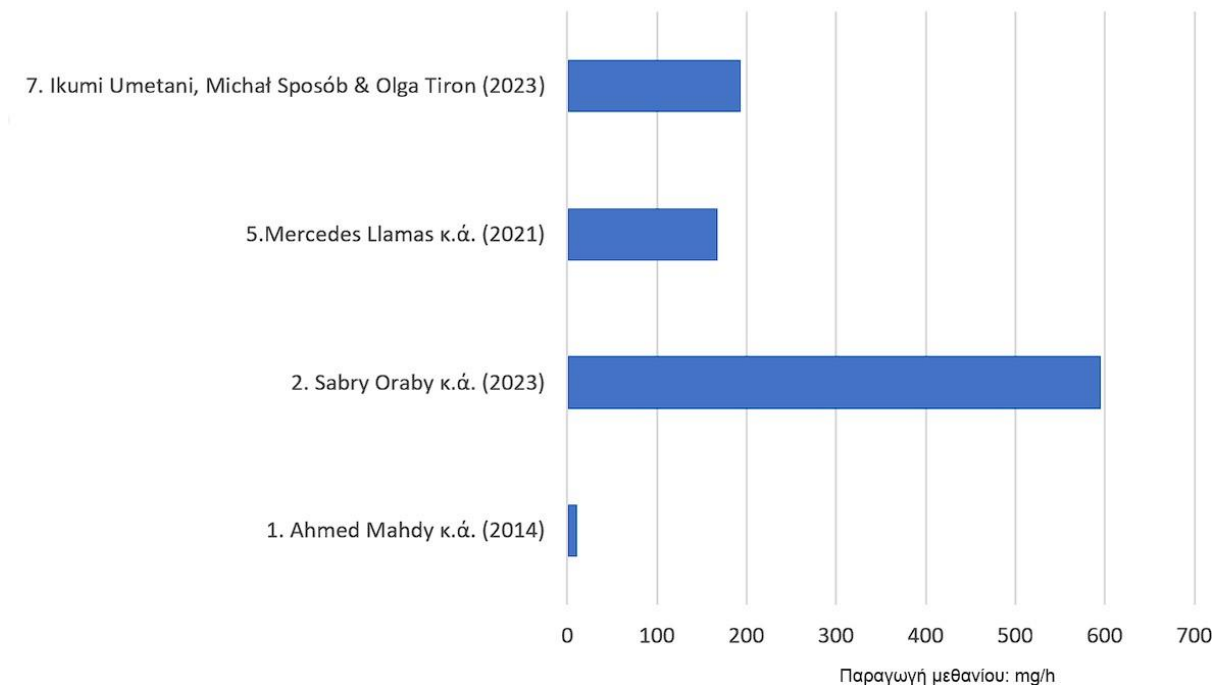
#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
						υγροποίησης είναι αποτελεσματικές για την εξαγωγή βιο-προϊόντων. Η προσοχή πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάκτηση πόρων και τα προϊόντα με αυξημένη αξία.	
12	Ashfaq Ahmad, Fawzi Banat, Habiba Alsafar, Shadi W Hasan (2021)	Βιοτεχνολογία Φύκων για την Επεξεργασία Βιομηχανικών Υδάτων, την Παραγωγή Βιοενέργειας και την Παραγωγή Υψηλής Βιοποικιλότητας Βιο-προϊόντων	Δεν καθορίστηκε	Τα φύκη στην Επεξεργασία Βιομηχανικών Υδάτων, την Παραγωγή Βιοενέργειας, την Παραγωγή Υψηλής Βιοποικιλότητας Βιο-προϊόντων	Δεν καθορίστηκε	Τα φύκη έχουν δυνατότητες στην επεξεργασία υδάτων, την παραγωγή βιοενέργειας και την παραγωγή υψηλής βιοποικιλότητας βιο-προϊόντων. Οι προκλήσεις περιλαμβάνουν τεχνολογικούς και οικονομικούς φραγμούς, αλλά η ταυτόχρονη	Δεν καθορίστηκε

#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
						χρήση των μικροφυκών για την επεξεργασία υδάτων και την παραγωγή βιοκαυσίμων θεωρείται ως μια υποσχόμενη προσέγγιση. Η εστίαση πρέπει να είναι στην ανάκτηση πόρων και τα προϊόντα με αυξημένη αξία.	
13	Maria Georgakoroulou (Έτος δεν καθορίστηκε)	Η χρήση των μικροφυκών σε βιοτεχνολογικές εφαρμογές: Περιπτώσεις μελέτης	Δεν καθορίστηκε	Διάφορες Βιοτεχνολογικές Εφαρμογές	SWOT Ανάλυση, Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Τα μικροφύκη και τα κυανοβακτήρια έχουν τεράστιο δυναμικό σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων τροφίμων, ενέργειας, υγείας, καλλυντικών, φαρμάκων, βιοκαυσίμων, βιοπλαστικών,	

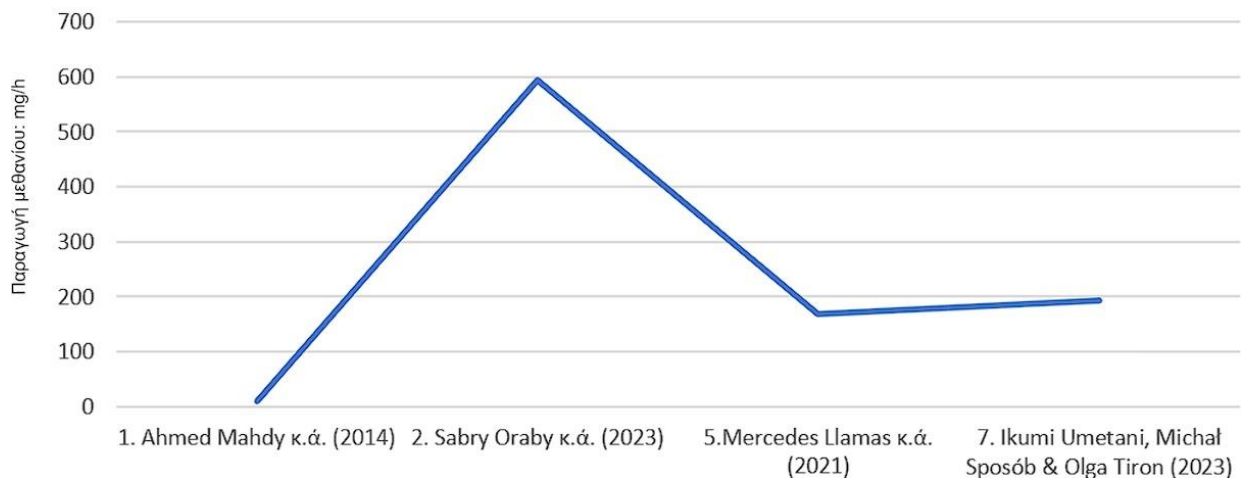
#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
						επεξεργασίας υδάτων και αντιμετώπισης του CO ₂ . Ωστόσο, η βιομηχανική εκμετάλλευση σε μεγάλη κλίμακα περιορίζεται από το υψηλό κόστος παραγωγής. Είναι αναγκαία αποδοτικά συστήματα παραγωγής και τεχνολογικές εξελίξεις για να εκμεταλλευτούμε πλήρως το δυναμικό των μικροφυκών. Προτείνεται ένα βιώσιμο μοντέλο επιχείρησης.	
14	Shousong Zhu, Lauren Higa, Antonia Barela, Caitlyn Lee,	Συνθέτες μικροφυκών για την επεξεργασία αποβλήτων και	Δεν καθορίστηκε	Επεξεργασία Αποβλήτων, Παραγωγή Βιομάζας,	Προκλήσεις στη Συλλογή Βιομάζας, Χαμηλή Παραγωγικότητα,	Οι συνθέτες μικροφυκών δείχνουν υποσχόμενα αποτελέσματα στην	Δεν καθορίστηκε

#	Συγγραφείς και Έτος Δημοσίευσης	Τίτλος	Είδος Μικροφυκών	Εφαρμογές	Βιωσιμότητα και Προκλήσεις	Αποτελέσματα	Απόδοση
	Yinhua Chen, and Zhi-Yan Du (2023)	την παραγωγή αξιόλογων βιο-προϊόντων		Εξαγωγή Βιοκαυσίμων	Τεχνικές Εξαγωγής	επεξεργασία αποβλήτων και την παραγωγή βιομάζας, αντιμετωπίζοντας τις προκλήσεις της χαμηλής παραγωγικότητας, της δαπανηρής συλλογής της βιομάζας και των ανεπαρκών μεθόδων εξαγωγής. Η συνεργατική συμβίωση ενισχύει την απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και την παραγωγή βιομάζας. Υπάρχει δυνατότητα για διάφορες περιβαλλοντικές και βιοτεχνολογικές εφαρμογές.	

Συγκριτική απόδοση αναλυθέντων ερευνών



Συγκριτική απόδοση αναλυθέντων ερευνών



Συμπερασματικά, η παρούσα συστηματική ανασκόπηση παρέχει μια εκτενή και βαθιά διερεύνηση των πολύπλευρων εφαρμογών των μικροφυκών. Ενώ αναγνωρίζει τις υπάρχουσες προκλήσεις, όπως η παραγωγικότητα και τα ζητήματα που σχετίζονται με το κόστος, η ανασκόπηση δίνει μια

αισιόδοξη εικόνα της συνεχιζόμενης έρευνας και της καινοτομίας στον τομέα. Η αξιοποίηση της δύναμης των συμβιωτικών κοινοπραξιών μικροφυκών, η υιοθέτηση βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων και η προώθηση τεχνολογικών εξελίξεων προσδιορίζονται ως βασικές στρατηγικές για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού των μικροφυκών σε βιοτεχνολογικές εφαρμογές. Αυτό, με τη σειρά του, προάγει μια βιώσιμη και κυκλική προσέγγιση για την αντιμετώπιση σύνθετων παγκόσμιων προκλήσεων, αξιοποιώντας παράλληλα αξιοσημείωτες δυνατότητες αυτών των μικροσκοπικών οργανισμών.

Ευέλικτες εφαρμογές μικροφυκών

Η συστηματική ανασκόπηση αποκαλύπτει την αξιοσημείωτη ευελιξία των μικροφυκών, αναδεικνύοντας τους πολύπλευρους ρόλους τους που εκτείνονται πολύ πέρα από το να αποτελούν απλή πρώτη ύλη για βιοκαύσιμα. Τα μικροφύκη αναδεικνύονται ως ισχυροί παράγοντες ικανοί να αντιμετωπίσουν ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών και βιομηχανικών προκλήσεων. Οι εφαρμογές τους καλύπτουν ποικίλους τομείς, περιλαμβάνοντας την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, την παραγωγή βιοδραστικών ενώσεων, τη σύνθεση βιοπλαστικών, τις φαρμακευτικές χρήσεις, ακόμη και τα καλλυντικά. Αυτό το ποικιλόμορφο χαρτοφυλάκιο υπογραμμίζει τις τεράστιες δυνατότητες των μικροφυκών στο ευρύτερο βιοτεχνολογικό τοπίο.

Καινοτόμες στρατηγικές παραγωγής βιοκαυσίμων

Αρκετές μελέτες στο πλαίσιο της ανασκόπησης παρουσιάζουν καινοτόμες προσεγγίσεις για την αύξηση της παραγωγής βιοκαυσίμων μέσω μικροφυκών. Για παράδειγμα, οι Ahmed Mahdy et. al (2014) (Μελέτη 1) υπογραμμίζουν τον καθοριστικό ρόλο των ενζύμων, ρίχνοντας φως στο πώς η στρατηγική εφαρμογή τους μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της υδρόλυσης, οδηγώντας κατά συνέπεια σε αυξημένη παραγωγή μεθανίου. Οι Sabry Oraby et. al

(2023) στην διερεύνηση τους αναφορικά με την χρήση της προεπεξεργασίας νανοσωματιδίων ως καταλύτη για βελτιωμένη απόδοση βιοαερίου. Επιπλέον, οι Merrykin et. al 10 παρουσιάζει ολοκληρωμένες προσεγγίσεις που συνθέτουν την επεξεργασία υγρών αποβλήτων με την παραγωγή βιοκαυσίμων, καταδεικνύοντας τις δυνατότητες μείωσης του κόστους και μετριασμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτές οι καινοτόμες στρατηγικές υπογραμμίζουν τη δυναμική φύση της έρευνας των μικροφυκών.

Αποτελεσματική απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και ανάκτηση πόρων

Τα μικροφύκη είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών από τα λύματα. Παρουσιάζουν την αξιοσημείωτη ικανότητα να μειώνουν σημαντικά τη βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (BOD), να εξαλείφουν το άζωτο και το φώσφορο και ακόμη και να απομακρύνουν τα βαρέα μέταλλα. Επιπλέον, τα μικροφύκη εμφανίζουν τη μοναδική ικανότητα να χρησιμοποιούν τους ρύπους εντός των υγρών αποβλήτων ως πηγές θρεπτικών ουσιών, συμβάλλοντας στην ανάκτηση πόρων και στην αξιοποίηση της βιομάζας. Αυτός ο διπλός ρόλος στον έλεγχο της ρύπανσης και την αξιοποίηση των πόρων τοποθετεί τα μικροφύκη ως κεντρικούς παράγοντες σε βιώσιμες βιοτεχνολογικές εφαρμογές.

Προκλήσεις και αναζήτηση λύσεων

Ενώ υπογραμμίζει τις τεράστιες δυνατότητες των μικροφυκών, η συστηματική ανασκόπηση δεν αποφεύγει να αναγνωρίσει τις επίμονες προκλήσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονται η χαμηλή παραγωγικότητα της βιομάζας, οι δαπανηρές μέθοδοι συγκομιδής βιομάζας και οι αναποτελεσματικές τεχνικές εξαγωγής βιοκαυσίμων. Για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις, είναι επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν αποτελεσματικότερα συστήματα παραγωγής και να αξιοποιηθούν οι τεχνολογικές εξελίξεις. Οι ερευνητές τονίζουν την ανάγκη για καινοτόμες λύσεις

ώστε τα συστήματα που βασίζονται στα μικροφύκη να καταστούν οικονομικά βιώσιμα σε μεγάλη κλίμακα.

Συμβιωτικές κοινοπραξίες μικροφυκών

Η ανασκόπηση υπογραμμίζει την αποτελεσματικότητα των συμβιωτικών κοινοπραξιών μικροφυκών, όπου τα μικροφύκη συνδυάζονται στρατηγικά με άλλους μικροοργανισμούς, όπως βακτήρια, μύκητες ή ζύμες. Οι εν λόγω κοινοπραξίες παρουσιάζουν αυξημένη ανοχή στους ρύπους, βελτιωμένα ποσοστά επιβίωσης, ανώτερες ικανότητες απομάκρυνσης θρεπτικών ουσιών και αυξημένες αποδόσεις βιομάζας και βιοενέργειας. Η εγκαθίδρυση συμβιωτικών σχέσεων μεταξύ μικροοργανισμών αναδεικνύεται ως μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική για την υπέρβαση των περιορισμών και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των βιοτεχνολογικών συστημάτων.

Προς βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα

Για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού των μικροφυκών σε βιοτεχνολογικές εφαρμογές, οι ερευνητές προτείνουν βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά υποστηρίζουν τη συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων μερών σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας με βάση τα μικροφύκη, που περιλαμβάνει την καλλιέργεια, την ανάπτυξη προϊόντων και τη διαχείριση των αποβλήτων. Επιπλέον, συνιστάται η ευθυγράμμιση αυτών των μοντέλων με τις ευρωπαϊκές αρχές της βιοοικονομίας και της κυκλικής οικονομίας, τονίζοντας τη σημασία της ενσωμάτωσης των εφαρμογών μικροφυκών σε ευρύτερα πλαίσια βιωσιμότητας.

Τεχνολογικές εξελίξεις για αυξημένη αποδοτικότητα

Οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις κρίνονται απαραίτητες για την αντιμετώπιση των σημερινών περιορισμών στα συστήματα με βάση τα μικροφύκη. Οι ερευνητές τονίζουν τη σημασία της βελτιστοποίησης των συνθηκών καλλιέργειας, της διερεύνησης προσεγγίσεων μεικτών

μικροοργανισμών, της βελτίωσης των τεχνικών συγκομιδής βιομάζας και της ανάπτυξης ισχυρών κοινοπραξιών μικροφυκών. Αυτές οι εξελίξεις αναμένεται να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των εφαρμογών μικροφυκών, φέρνοντάς τες πιο κοντά στην εμπορική βιωσιμότητα μεγάλης κλίμακας.

Ανάκτηση πόρων και προϊόντα προστιθέμενης αξίας

Ένα επαναλαμβανόμενο θέμα στις μελέτες που εξετάστηκαν είναι η μετατόπιση της εστίασης από τις προσεγγίσεις που επικεντρώνονται στα βιοκαύσιμα στην ανάκτηση πόρων και στην παραγωγή βιοπροϊόντων προστιθέμενης αξίας. Αυτή η στρατηγική στροφή έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει σημαντικά την οικονομική βιωσιμότητα και τη βιωσιμότητα των συστημάτων με βάση τα μικροφύκη. Η ικανότητα μετατροπής ροών αποβλήτων σε πολύτιμους πόρους υπογραμμίζει το μετασχηματιστικό δυναμικό των μικροφυκών όσον αφορά τη συμβολή τους σε μια κυκλική οικονομία και την αντιμετώπιση πιεστικών περιβαλλοντικών προκλήσεων.

Συζήτηση

Οι μελέτες που περιλαμβάνονται στον πίνακα παρέχουν συλλογικά πολύτιμες πληροφορίες για τις ποικίλες εφαρμογές των μικροφυκών στη βιοτεχνολογία, ιδίως στους τομείς της επεξεργασίας αποβλήτων, της παραγωγής βιομάζας και της εξαγωγής βιοκαυσίμων. Οι μελέτες αυτές αναδεικνύουν τόσο τα δυνητικά οφέλη όσο και τις προκλήσεις που συνδέονται με την αξιοποίηση των μικροφυκών για διάφορους σκοπούς.

Η μελέτη των δίνει έμφαση στη δυνατότητα των μικροφυκών, συγκεκριμένα της *Chlorella vulgaris*, να ενισχύουν την παραγωγή μεθανίου όταν προστίθενται ένζυμα. Τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι η προσθήκη ενζύμων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την παραγωγή μεθανίου, γεγονός που αποτελεί πολλά υποσχόμενο αποτέλεσμα για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να εξεταστεί η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της προσθήκης ενζύμων σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

Στην έρευνα Sabry Oraby et. al (2023) Αυτή η έρευνα διερευνά τη χρήση νανοσωματιδίων για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της υδρόλυσης της *Chlorella vulgaris*. Η μελέτη δείχνει ότι η προεπεξεργασία με νανοσωματίδια μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματικότητα της υδρόλυσης, γεγονός που έχει επιπτώσεις στη βελτίωση της παραγωγής βιοαερίου. Ωστόσο, η επεκτασιμότητα και ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της χρήσης νανοσωματιδίων θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω.

Αναφορικά με τις διάφορες βιολογικές τεχνικές παραγωγής υδρογόνου που εξέτασαν οι Ayesha Aslam et. al (2023) παρέχουν μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των τεχνικών βιολογικής παραγωγής υδρογόνου που περιλαμβάνουν μικροφύκη. Επισημαίνει την ευελιξία των μικροφυκών σε αυτό το πλαίσιο. Η συζήτηση υποδηλώνει ότι οι ερευνητές διερευνούν ενεργά διάφορες μεθόδους για την αποτελεσματική παραγωγή υδρογόνου, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας.

Στην έρευνα των Quanliang Wang et. al (2022) αναφορικά με την παραγωγή βιοαερίου από βιομάζα και καθαρότερες εναλλακτικές τεχνολογίες, η μελέτη επικεντρώνεται στην παραγωγή βιοαερίου από βιομάζα και καθαρότερες εναλλακτικές τεχνολογίες. Υπογραμμίζει τις δυνατότητες των συστημάτων με βάση τα μικροφύκη για την παραγωγή βιοαερίου με ταυτόχρονη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι τα μικροφύκη μπορούν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο σε καθαρότερες και βιώσιμες διαδικασίες παραγωγής βιοαερίου.

Η μελέτη των Mercedes Llamas et. al (2021) διερευνά την παραγωγή καρβοξυλικών οξέων μέσω αναερόβιας ζύμωσης της *Chlorella vulgaris*. Η έρευνα αναδεικνύει τις δυνατότητες των

“Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίο προϊόντων”

μικροφυκών για την παραγωγή πολύτιμων βιοχημικών ουσιών. Αυτό θα μπορούσε να έχει εφαρμογές στην παραγωγή βιοπλαστικών και άλλων βιοπροϊόντων υψηλής αξίας.

Εφαρμογές των βιομεμβρανών μικροφυκών τωβ Ana F. Miranda κ.ά. (2017) όπου η μελέτη αυτή διερευνά τη χρήση βιοϋμενίων μικροφυκών για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την παραγωγή βιοενέργειας. Υπογραμμίζει την ευελιξία των μικροφυκών σε αυτές τις εφαρμογές. Τα βιοϋμένια μικροφυκών προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την παραγωγή βιοενέργειας, μειώνοντας δυνητικά το αποτύπωμα των συστημάτων αυτών.

Μελέτη Ikumi Umetani, Michał Sposób & Olga Tiron (2023) εξετάζει τη χρήση των αυτόχθονων πράσινων μικροφυκών για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την ανάκτηση πόρων. Η έρευνα καταδεικνύει ότι αυτά τα στελέχη μικροφυκών απομακρύνουν αποτελεσματικά τους ρύπους και προσφέρουν δυνατότητες ανάκτησης πόρων. Αυτό ευθυγραμμίζεται με τους στόχους της βιώσιμης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και της αξιοποίησης των πόρων. Η μελέτη N. Abdel-Raouf, A.A. Al-Homaidan, I.B.M. Ibraheem (2012) επικεντρώνεται στο ρόλο των μικροφυκών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Επισημαίνει πολλαπλά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης του BOD, της απομάκρυνσης θρεπτικών ουσιών και βαρέων μετάλλων και της αναστολής των κολοβακτηριδίων. Η μελέτη υποδηλώνει ότι τα λύματα μπορούν να χρησιμεύσουν ως οικονομικά αποδοτική πηγή θρεπτικών συστατικών για την παραγωγή βιομάζας φυκών.

Η μελέτη των Hareb et. al, (2021) παρέχει μια επισκόπηση της βιοεξυγίανσης με μικροφύκη για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την αξιοποίηση της βιομάζας. Συζητείται η

αποτελεσματικότητα της βιοεξυγίανσης με μικροφύκη και η ανάγκη βελτιστοποίησης των συνθηκών καλλιέργειας και αξιοποίησης της βιομάζας για οικονομική βιωσιμότητα.

Με βάση τους Merrylin et. al, η μελέτη αυτή δίνει έμφαση στις δυνατότητες των μικροφυκών στην ταυτόχρονη επεξεργασία υγρών αποβλήτων και στην παραγωγή βιοκαυσίμων. Υποδηλώνει ότι τα μικροφύκη μπορούν να επεξεργαστούν αποτελεσματικά τα υγρά απόβλητα μειώνοντας παράλληλα το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η μελέτη διερευνά διάφορες διαδρομές παραγωγής βιοκαυσίμων από μικροφύκη.

Η μελέτη Javed et. Al, (2019) υπογραμμίζει τα πολλά υποσχόμενα χαρακτηριστικά των μικροφυκών για τη βιώσιμη βιοδιύλιση, συμπεριλαμβανομένων των βιοκαυσίμων, της ανάκτησης πόρων και της επεξεργασίας λυμάτων. Συζητά τις προκλήσεις όπως η παροχή θρεπτικών ουσιών και το κόστος καλλιέργειας, προτείνοντας στρατηγικές όπως η μιξοτροφική καλλιέργεια και η κλιμακωτή καλλιέργεια για τη βελτίωση της αποδοτικότητας.

Οι Ashfaq et. al, υπογραμμίζει τις δυνατότητες των φυκών στην επεξεργασία βιομηχανικών λυμάτων, την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων υψηλής αξίας. Αναγνωρίζει τα τεχνολογικά και οικονομικά εμπόδια, αλλά προτείνει ότι η ταυτόχρονη χρήση μικροφυκών για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την παραγωγή βιοκαυσίμων είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση.

Η Μελέτη της Georgakopoulou (n.d) διερευνά διάφορες βιοτεχνολογικές εφαρμογές των μικροφυκών και των κυανοβακτηρίων, συμπεριλαμβανομένων των τροφίμων, της υγείας, των καλλυντικών, των φαρμακευτικών προϊόντων, των βιοκαυσίμων, των βιοπλαστικών, της επεξεργασίας λυμάτων και του βιο-μετριάσμου του CO₂. Τονίζεται η ανάγκη για πιο αποδοτικά συστήματα παραγωγής για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού των μικροφυκών.

Αναφορικά με τις κοινοπραξίες μικροφυκών για την επεξεργασία αποβλήτων όπου εξετάζει Shousong et.al, (2023) εξετάζει τη χρήση κοινοπραξιών μικροφυκών για την επεξεργασία αποβλήτων και πολύτιμων βιοπροϊόντων. Επισημαίνει τις προκλήσεις της χαμηλής παραγωγικότητας της βιομάζας, της δαπανηρής συγκομιδής βιομάζας και των αναποτελεσματικών μεθόδων εξαγωγής. Η μελέτη τονίζει τις δυνατότητες της συνεργατικής συμβίωσης σε κοινοπραξίες μικροφυκών για τη βελτίωση της απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών και της παραγωγής βιομάζας.

Ευρήματα:

Οι μελέτες καταδεικνύουν συλλογικά ότι τα μικροφύκη υπόσχονται πολλά σε διάφορες βιοτεχνολογικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, της παραγωγής βιοκαυσίμων και της παραγωγής βιοπροϊόντων υψηλής αξίας.

Η προσθήκη ενζύμων μπορεί να ενισχύσει την παραγωγή μεθανίου από μικροφύκη, προσφέροντας δυνατότητες για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Η προεπεξεργασία με νανοσωματίδια μπορεί να αυξήσει την απόδοση της υδρόλυσης, συμβάλλοντας στη βελτίωση της παραγωγής βιοαερίου.

Οι ερευνητές διερευνούν ενεργά ποικίλες βιολογικές τεχνικές παραγωγής υδρογόνου με τη χρήση μικροφυκών.

Τα συστήματα με βάση τα μικροφύκη υπόσχονται καθαρότερη και πιο βιώσιμη παραγωγή βιοαερίου από βιομάζα.

Τα μικροφύκη έχουν τη δυνατότητα να παράγουν πολύτιμα βιοχημικά, όπως καρβοξυλικά οξέα, τα οποία μπορούν να βρουν εφαρμογές σε βιοπλαστικά και άλλα προϊόντα υψηλής αξίας.

Τα βιοϋμένια μικροφυκών προσφέρουν μια αποτελεσματική προσέγγιση για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την παραγωγή βιοενέργειας, μειώνοντας δυνητικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Τα αυτόχθονα στελέχη πράσινων μικροφυκών απομακρύνουν αποτελεσματικά τους ρύπους από τα λύματα και προσφέρουν δυνατότητες ανάκτησης πόρων.

Τα μικροφύκη διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων μειώνοντας το BOD, απομακρύνοντας θρεπτικά συστατικά και βαρέα μέταλλα και αναστέλλοντας τα κολοβακτηρίδια. Τα λύματα μπορούν να χρησιμεύσουν ως οικονομικά αποδοτική πηγή θρεπτικών ουσιών για την παραγωγή βιομάζας φυκών.

Η βιοεξυγίανση με μικροφύκη μπορεί να επεξεργαστεί αποτελεσματικά τα υγρά απόβλητα, ενώ παράλληλα αξιοποιεί τους ρύπους για την ανάπτυξη της βιομάζας, αλλά παραμένουν προκλήσεις στη βελτιστοποίηση των συνθηκών καλλιέργειας και στην αξιοποίηση της βιομάζας.

Τα μικροφύκη παρουσιάζουν δυνατότητες για ταυτόχρονη επεξεργασία υγρών αποβλήτων και παραγωγή βιοκαυσίμων, μειώνοντας το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Διερευνούνται διάφορες διαδρομές παραγωγής βιοκαυσίμων.

Τα βιώσιμα βιοδωλιστήρια με βάση τα μικροφύκη υπόσχονται βιοκαύσιμα, ανάκτηση πόρων και επεξεργασία λυμάτων. Οι προκλήσεις περιλαμβάνουν την παροχή θρεπτικών ουσιών και το κόστος καλλιέργειας.

Τα φύκια έχουν δυνατότητες για την επεξεργασία βιομηχανικών λυμάτων, την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων υψηλής αξίας. Η υπέρβαση των τεχνολογικών και οικονομικών εμποδίων είναι απαραίτητη.

Τα μικροφύκη και τα κυανοβακτήρια έχουν τεράστιες δυνατότητες σε διάφορους τομείς, αλλά απαιτούνται οικονομικά αποδοτικά συστήματα παραγωγής για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους.

Οι κοινοπραξίες μικροφυκών, με συνεργατική συμβίωση, προσφέρουν λύσεις σε προκλήσεις όπως η χαμηλή παραγωγικότητα, η δαπανηρή συγκομιδή βιομάζας και οι αναποτελεσματικές μέθοδοι εξαγωγής. Ενισχύουν την απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών και την παραγωγή βιομάζας στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων.

Συμπερασματικά, οι μελέτες αυτές αναδεικνύουν συλλογικά την ευελιξία και τις δυνατότητες των μικροφυκών στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών, ενεργειακών και βιοτεχνολογικών προκλήσεων. Παρόλο που υπάρχουν εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν, όπως η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και η επεκτασιμότητα, οι λύσεις με βάση τα μικροφύκη υπόσχονται ένα πιο βιώσιμο και βιολογικά βασισμένο μέλλον. Οι συνεργατικές συμβιωτικές σχέσεις στο πλαίσιο κοινοπραξιών μικροφυκών προσφέρουν μια ιδιαίτερα συναρπαστική οδό για τη μελλοντική έρευνα και την ανάπτυξη εφαρμογών.

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν κρίσιμες γνώσεις που προέρχονται από τέσσερις διαφορετικές μελέτες οι οποίες είναι οι μόνες εκ των 14^{ων} που αναφέρουν συγκεκριμένη απόδοση, και εξετάζουν τη χρήση της *Chlorella vulgaris* για την παραγωγή ενέργειας. Οι Ahmed Mahdy κ.ά. (2014) ανέφεραν ρυθμό παραγωγής μεθανίου 10,8 mg/h, εστιάζοντας στη βελτιστοποίηση της παραγωγής μεθανίου μέσω της στρατηγικής προσθήκης ενζύμων στη *Chlorella vulgaris*. Η παρούσα μελέτη ρίχνει φως στις δυνατότητες ενίσχυσης των αποδόσεων βιοενέργειας από μικροφύκη, συμβάλλοντας στην ευρύτερη συζήτηση για τις βιώσιμες πηγές ενέργειας.

Στην περίπτωση των Sabry Oraby κ.ά. (2023), επισημάνθηκε μια αξιοσημείωτη συνολική παραγωγή μεθανίου 595 mg/h, υπογραμμίζοντας την πρόοδο στην απόδοση της υδρόλυσης που επιτεύχθηκε μέσω ενός σταδίου προεπεξεργασίας που περιλαμβάνει νανοσωματίδια. Ο σημαντικός ρυθμός παραγωγής μεθανίου υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης τους στην αξιοποίηση της ενέργειας από τη *Chlorella vulgaris*, προσφέροντας πολλά υποσχόμενες συνέπειες για πρακτικές εφαρμογές σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Οι Mercedes Llamas κ.ά. (2021) διερεύνησαν την αναερόβια ζύμωση για την παραγωγή ξυλικών οξέων, παρουσιάζοντας ρυθμό 168 mg/h. Η έρευνα αυτή όχι μόνο αποτελεί παράδειγμα των δυνατοτήτων της *Chlorella vulgaris* στη σύνθεση πολύτιμων ενώσεων, αλλά υπογραμμίζει επίσης την ευελιξία της ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών προϊόντων βιολογικής βάσης. Τα ευρήματα συμβάλλουν στον επεκτεινόμενο τομέα των προσεγγίσεων βιοδιυλιστηρίων με βάση τα μικροφύκη, προσφέροντας διεξόδους για τη βιώσιμη χημική σύνθεση.

Από την άλλη πλευρά, οι Ikumi Umetani, Michał Sposób & Olga Tiron (2023) διερεύνησαν την εφαρμογή αυτοφυών πράσινων μικροφυκών, συμπεριλαμβανομένης της *Chlorella vulgaris*, για την επεξεργασία νερού. Ωστόσο, η έλλειψη συγκεκριμένων ποσοτήτων για την *Chlorella vulgaris* και τις παραγόμενες ουσίες στα παρεχόμενα δεδομένα υποδηλώνει την ανάγκη για λεπτομερέστερη αναφορά για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων τέτοιων εφαρμογών στην επεξεργασία νερού και την ανάκτηση πόρων.

Στην ουσία, οι μελέτες αυτές υπογραμμίζουν συλλογικά τις πολύπλευρες δυνατότητες της *Chlorella vulgaris* να συμβάλει σε διάφορες πτυχές της παραγωγής ενέργειας, από την παραγωγή μεθανίου έως τη σύνθεση πολύτιμων χημικών ουσιών. Τα δεδομένα υπογραμμίζουν επίσης τη σημασία της ενδεδειγμένης αναφοράς στις ερευνητικές μελέτες για τη διευκόλυνση μιας πιο

ολοκληρωμένης κατανόησης της αποτελεσματικότητας και της πρακτικότητας των διαφόρων προσεγγίσεων στην αξιοποίηση της ενέργειας από τα μικροφύκη.

Διάφοροι παράγοντες θα μπορούσαν να συμβάλουν στις διακυμάνσεις της παραγωγής που παρατηρούνται στις διάφορες μελέτες που επικεντρώνονται στη *Chlorella vulgaris*. Οι διαφορές αυτές μπορεί να οφείλονται σε συνδυασμό πειραματικών συνθηκών, μεθοδολογιών και εγγενών παραλλαγών στα στελέχη μικροφυκών. Ακολουθούν ορισμένοι πιθανοί λόγοι:

Πειραματικές συνθήκες: Οι διαφορές στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, η ένταση του φωτός, η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών και το pH, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό των μικροφυκών. Διαφορετικές μελέτες μπορεί να υιοθετούν διαφορετικές περιβαλλοντικές παραμέτρους, οδηγώντας σε διαφοροποιήσεις στην ανάπτυξη της *Chlorella vulgaris* και την επακόλουθη παραγωγή ενέργειας.

Μεταβλητότητα στελεχών: Η *Chlorella vulgaris* περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα στελεχών, το καθένα με μοναδικά χαρακτηριστικά. Οι διαφορές στα συγκεκριμένα στελέχη που χρησιμοποιούνται σε διάφορες μελέτες μπορεί να οδηγήσουν σε διαφοροποιήσεις στους ρυθμούς ανάπτυξης, στη σύνθεση της βιομάζας και, κατά συνέπεια, στις δυνατότητες παραγωγής ενέργειας.

Συστήματα καλλιέργειας: Η επιλογή των συστημάτων καλλιέργειας, όπως ανοικτές λίμνες, κλειστοί φωτοβιοαντιδραστήρες ή άλλες διαμορφώσεις, μπορεί να επηρεάσει τις συνθήκες ανάπτυξης και τη συνολική παραγωγικότητα της *Chlorella vulgaris*. Οι διαφοροποιήσεις στα συστήματα καλλιέργειας μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορές στις εκροές παραγωγής ενέργειας.

Διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών: Η διαθεσιμότητα και η σύνθεση των θρεπτικών συστατικών στο μέσο ανάπτυξης παίζουν καθοριστικό ρόλο στην καλλιέργεια μικροφυκών. Οι

διαφορετικές συνθέσεις και συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών σε διάφορες μελέτες μπορεί να επηρεάσουν την ανάπτυξη και τη βιοχημική σύνθεση της *Chlorella vulgaris*, επηρεάζοντας την παραγωγή ενέργειας.

Τεχνικές συγκομιδής: Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη συγκομιδή των μικροφυκών μπορεί να επηρεάσει τη συγκέντρωση και τη σύνθεση του τελικού προϊόντος. Οι αποκλίσεις στις τεχνικές συγκομιδής μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορές στις αναφερόμενες εκροές παραγωγής ενέργειας.

Πειραματική διάρκεια: Η διάρκεια των πειραμάτων ή οι περίοδοι καλλιέργειας σε διαφορετικές μελέτες μπορεί επίσης να συμβάλει σε αποκλίσεις στα αναφερόμενα αποτελέσματα. Οι μεγαλύτερες περίοδοι καλλιέργειας μπορεί να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη συσσώρευση βιομάζας και, κατά συνέπεια, σε αυξημένη παραγωγή ενέργειας.

Αναλυτικές μέθοδοι: Οι διαφορές στις αναλυτικές μεθόδους για τον ποσοτικό προσδιορισμό των προϊόντων που σχετίζονται με την ενέργεια, όπως το μεθάνιο ή τα ξυλικά οξέα, μπορεί να εισάγουν διαφορές στις αναφερόμενες τιμές. Η τυποποίηση των τεχνικών μέτρησης είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ακρίβειας και της συγκρισιμότητας μεταξύ των μελετών.

Βιολογικές αντιδράσεις: Τα μικροφύκη, συμπεριλαμβανομένης της *Chlorella vulgaris*, παρουσιάζουν πολύπλοκες αντιδράσεις στις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών. Βιολογικοί παράγοντες, όπως οι προσαρμοστικές αποκρίσεις ή οι διακυμάνσεις στις μεταβολικές δραστηριότητες, μπορούν να συμβάλουν στις παρατηρούμενες διαφορές στην παραγωγή ενέργειας.

Συνοπτικά, η ποικιλομορφία στις αναφερόμενες εκροές παραγωγής για τη *Chlorella vulgaris* σε διάφορες μελέτες πιθανόν να οφείλεται σε συνδυασμό αυτών των παραγόντων. Υπογραμμίζει τη σημασία της τυποποίησης των πειραματικών συνθηκών και των αναλυτικών μεθόδων για τη

διευκόλυνση ουσιαστικών συγκρίσεων και την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων σχετικά με τις δυνατότητες της *Chlorella vulgaris* σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας.

Αναφέρθηκαν αρκετές μελέτες χωρίς συγκεκριμένες λεπτομέρειες σχετικά με την ακριβή ενέργεια που παράγεται. Σε αυτές τις περιπτώσεις, προκύπτουν περιορισμοί λόγω της απουσίας ολοκληρωμένων πληροφοριών σχετικά με τη συνολική παραγωγή ενέργειας και τις συγκεκριμένες ποσότητες και ποικιλίες μικροφυκών και των σχετικών μεθόδων. Χωρίς αυτές τις λεπτομέρειες, καθίσταται δύσκολη η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και των πρακτικών συνεπειών των αντίστοιχων μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις μελέτες. Η σαφής αναφορά των αποτελεσμάτων είναι ζωτικής σημασίας για τη διευκόλυνση της ενδεδειγμένης σύγκρισης των διαφόρων προσεγγίσεων και την εξαγωγή ουσιαστικών συμπερασμάτων σχετικά με τη σκοπιμότητα και την αποτελεσματικότητα της αξιοποίησης της ενέργειας από τα μικροφύκη.

5. Συμπεράσματα

Η ενσωμάτωση μικροφυκών σε διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοπροϊόντων αποτελεί μια πρωτοποριακή προσέγγιση με πολύπλευρες επιπτώσεις στην αντιμετώπιση ορισμένων από τις πιο πιεστικές περιβαλλοντικές, ενεργειακές και αειφορικές προκλήσεις της εποχής μας. Τα μικροφύκη, μικροσκοπικοί φωτοσυνθετικοί οργανισμοί που απαντώνται σε διάφορα υδάτινα περιβάλλοντα, έχουν αναδειχθεί ως ευέλικτα και βιώσιμα εργαλεία στην προσπάθεια για καθαρότερη και αποτελεσματικότερη επεξεργασία υγρών αποβλήτων με ταυτόχρονη παραγωγή πολύτιμων πόρων βιομάζας και βιοενέργειας. Αυτή η μετασχηματιστική αλλαγή παραδείγματος στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων όχι μόνο συμβάλλει στον έλεγχο της ρύπανσης, αλλά και αξιοποιεί το παραγωγικό δυναμικό των μικροοργανισμών, οδηγώντας σε μια πιο κυκλική και αποδοτική ως προς τους πόρους προσέγγιση.

Η ενσωμάτωση των μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων σηματοδοτεί μια βιώσιμη λύση στο παγκόσμιο ζήτημα της διαχείρισης και επεξεργασίας των λυμάτων. Τα μικροφύκη παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ικανότητα να απομακρύνουν αποτελεσματικά ρύπους, θρεπτικά συστατικά και βαρέα μέταλλα από τα λύματα, μειώνοντας έτσι σημαντικά την περιβαλλοντική ρύπανση και τον επιβλαβή ευτροφισμό των φυσικών υδάτινων σωμάτων. Ταυτόχρονα, μέσω των αξιοσημείωτων φωτοσυνθετικών τους ικανοτήτων, τα μικροφύκη συλλαμβάνουν και μετατρέπουν αυτούς τους ρύπους σε πολύτιμη βιομάζα, ενσαρκώνοντας αποτελεσματικά τις αρχές της κυκλικής οικονομίας με την ανακύκλωση των αποβλήτων σε πολύτιμο πόρο.

Η ανάκτηση πόρων αποτελεί κεντρική πτυχή της επεξεργασίας λυμάτων με βάση τα μικροφύκη. Τα μικροφύκη εξάγουν και συσσωρεύουν αποτελεσματικά βασικά στοιχεία όπως άζωτο, φώσφορο και βαρέα μέταλλα από τα λύματα, μετατρέποντας αποτελεσματικά αυτές τις κατά τα άλλα επιβλαβείς ενώσεις σε πολύτιμους πόρους βιομάζας. Αυτή η βιομάζα μπορεί να μεταποιηθεί περαιτέρω σε μια σειρά βιοπροϊόντων υψηλής αξίας (βιοπλαστικά και βιοδραστικές ενώσεις) και βιοενέργειας (βιοντίζελ, βιοαέριο, βιοαιθανόλη και βιοϋδρογόνο). Η ενσωμάτωση τέτοιων διεργασιών ανάκτησης πόρων όχι μόνο συμβάλλει στη μείωση της ρύπανσης αλλά και ενισχύει τη συνολική βιωσιμότητα των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.

Στον τομέα της βιοενέργειας, τα μικροφύκη αποτελούν μια ανανεώσιμη και βιώσιμη οδό για την κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών. Η ικανότητά τους να συσσωρεύουν υψηλά επίπεδα λιπιδίων πλούσιων σε ενέργεια και η ανώτερη φωτοσυνθετική τους απόδοση τα καθιστούν πολλά υποσχόμενη πρώτη ύλη για διάφορα βιοκαύσιμα. Σε αυτά περιλαμβάνονται το βιοντίζελ, το οποίο προσφέρει μια καθαρότερη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, και το βιοαέριο, η βιοαιθανόλη και το βιοϋδρογόνο, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν την εξάρτησή μας από πεπερασμένες και περιβαλλοντικά επιβλαβείς πηγές ενέργειας. Η ικανότητα των μικροφυκών

να αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια και το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα για την παραγωγή ενώσεων πλούσιων σε ενέργεια υπογραμμίζει το ρόλο τους στην προώθηση της παγκόσμιας μετάβασης προς καθαρότερη και φιλικότερη προς το περιβάλλον παραγωγή ενέργειας.

Ωστόσο, παρά τις τεράστιες δυνατότητες των μικροφυκών, πρέπει να αντιμετωπιστούν διάφορες προκλήσεις για την πλήρη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων τους σε μεγάλη κλίμακα. Το υψηλό κόστος παραγωγής, η σχετικά μέτρια παραγωγικότητα της βιομάζας σε συστήματα ανοικτών λιμνών και τα έξοδα που σχετίζονται με τις τεχνικές συγκομιδής βιομάζας είναι μεταξύ των εμποδίων που απαιτούν καινοτόμες λύσεις. Τόσο οι ερευνητές όσο και οι βιομηχανίες ασχολούνται ενεργά με την ανάπτυξη τεχνολογιών αιχμής, προηγμένων μεθόδων καλλιέργειας (όπως οι φωτοβιοαντιδραστήρες) και εξορθολογισμένων τεχνικών μεταγενέστερης επεξεργασίας για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια και να «ξεκλειδωθεί» το πλήρες δυναμικό των συστημάτων που βασίζονται στα μικροφύκη.

Η συμβίωση, ιδίως οι συνεργιστικές σχέσεις μεταξύ μικροφυκών και άλλων μικροοργανισμών, έχει αποδειχθεί καθοριστική για την ενίσχυση της παραγωγής βιομάζας, της απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών και της συνολικής αποδοτικότητας του συστήματος. Αυτές οι συνεργατικές συμπράξεις προσφέρουν νέες λύσεις τόσο σε τεχνικούς όσο και σε οικονομικούς περιορισμούς, παρουσιάζοντας ένα μονοπάτι για πιο βιώσιμη και αποτελεσματική επεξεργασία υγρών αποβλήτων και παραγωγή βιοενέργειας.

Η βιωσιμότητα και η αποδοτικότητα των πόρων είναι πρωταρχικής σημασίας για την υιοθέτηση συστημάτων με βάση τα μικροφύκη. Η καθιέρωση βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων, η μεγιστοποίηση της ανάκτησης πόρων και η ανάπτυξη προϊόντων προστιθέμενης αξίας είναι κεντρικής σημασίας όχι μόνο για την οικονομική βιωσιμότητα αλλά και για τη διασφάλιση ότι οι

“Χρήση μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων για την παραγωγή βίο ενέργειας και βίο προϊόντων”

διεργασίες με βάση τα μικροφύκη είναι περιβαλλοντικά βιώσιμες και συμβάλλουν θετικά σε μια κυκλική οικονομία.

Κοιτάζοντας μπροστά, οι προοπτικές των μικροφυκών για την επανάσταση στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων και την παραγωγή βιοενέργειας παραμένουν εξαιρετικά ελπιδοφόρες. Οι συνεχιζόμενες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης συνεχίζουν να επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογής, να βελτιώσουν την αποδοτικότητα και να μειώσουν το κόστος. Αυτή η πρόοδος είναι απαραίτητη για την επιτάχυνση της παγκόσμιας υιοθέτησης τεχνολογιών με βάση τα μικροφύκη, συμβάλλοντας τελικά σε ένα καθαρότερο περιβάλλον, μια πιο βιώσιμη διαχείριση των πόρων και ένα πιο ασφαλές και φιλικό προς το περιβάλλον ενεργειακό μέλλον.

6. Βιβλιογραφία

Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257-275.

Ahmed Mahdy, H., García-González, M.C., Maity, S. et al. (2014) 'Enhanced Methane Production from *Chlorella vulgaris* with Enzyme Addition', *BioEnergy Research*, 7(3), pp. 924-932.

Ana F. Miranda, A., Ramkumar, N., Montesinos, T. et al. (2017) 'Applications of Microalgal Biofilms for Wastewater Treatment and Bioenergy Production', *Algal Research*, 28, pp. 182-190.

Ashfaq Ahmad, A., Fawzi Banat, F., Habiba Alsafar, H., Shadi W Hasan, S.W.H. (2021) 'Algae biotechnology for industrial wastewater treatment, bioenergy production, and high-value bioproducts', *The Science of the Total Environment*, 806, 150585.

Ayesha Aslam, M., Ahmad, Z., Iqbal, H.M.N. et al. (2023) 'Review of Various Biological Hydrogen Production Techniques', *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(11), pp. 8000-8023.

Bioeconomym, (2017) <https://www.bioeconomy.fi/production-of-algae-in-waste-streams-for-a-fossil-free-future/>

Converti, A., Casazza, A. A., Ortiz, E. Y., Perego, P., & Del Borghi, M. (2009). Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(6), 1146-1151.

Fahed Javed, F., Zufishan Shamair, Z., Muhammad Aslam, M., Naim Rashid, N., Asim Laeeq Khan, A.L., Muhammad Yasir, M.Y., Tahir Fazal, T.F., Ainy Hafeez, A.H., Fahad Rehman, F.R.,

Muhammad Saif Ur Rehman, M.S.U.R., Zakir Khan, Z.K., Javed Iqbal, J.I., Aqeel Ahmed Bazmi, A.A.B. (2019) 'Microalgae-based biofuels, resource recovery and wastewater treatment: A pathway towards sustainable biorefinery', *Fuel*, 255, 115826.

Fernández, F. G., López, F. G., & Grima, E. M. (2012). Photobioreactor design for microalgae cultures. *Journal of Biotechnology*, 162(1), 20-33.

Hareb Al-Jabri, H., Probir Das, P., Shoyeb Khan, S., Mahmoud Thaher, M., Mohammed AbdulQuadir, M. (2021) 'Treatment of Wastewaters by Microalgae and the Potential Applications of the Produced Biomass—A Review', *Sustainability*, 13(18), 10148.

Henze, M., Harremoes, P., Jansen, J. L. C., & Arvin, E. (2008). *Wastewater treatment: biological and chemical processes* (3rd ed.). Springer Science & Business Media.

Ikumi Umetani, I., Michał Sposób, M., Olga Tiron, O. (2023) 'Indigenous Green Microalgae for Wastewater Treatment: Nutrient Removal and Resource Recovery for Biofuels and Bioproducts', *Bioresource Technology*, 350, 126633.

Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009). Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Environmental Science & Technology*, 43(17), 6475-6481.

Maria Georgakopoulou (Year not specified) 'The use of microalgae in biotechnological applications: Case Studies', Dissertation, MSc in Bioeconomy Law, Regulation, and Management, International Hellenic University.

Maurya, R., Singh, N., & Pandey, A. (2019). Microalgae-based wastewater treatment for nutrient removal and value-added product generation: A review. *Bioresource Technology*, 284, 272-282.

Mercedes Llamas, M., Garcia-Gen, S. (2021) 'Investigating Carboxylic Acids Production via Anaerobic Fermentation of *Chlorella vulgaris*', *Algal Research*, 58, 102419.

Merrylin Jayaseelan, M., Mohamed Usman, M., Adishkumar Somanathan, A., Sivashanmugam Palani, S., Gunasekaran Muniappan, G., Rajesh Banu Jeyakumar, R.B. (2021) 'Microalgal Production of Biofuels Integrated with Wastewater Treatment', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110766.

Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater engineering: treatment and reuse* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2017). *Environmental engineering: fundamentals, sustainability, design* (2nd ed.). Wiley.

N. Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A.A., Ibraheem, I.B.M. (2012) 'Microalgae and wastewater treatment', *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), pp. 257-275.

Quanliang Wang, Q., Yu, Y., Yao, Y. et al. (2022) 'Exploring Biogas Generation from Biomass and Cleaner Alternative Technologies', *Bioresource Technology*, 351, 126633.

Sabry Oraby, S., Ramadan, A.E.M., Abd El-Ghany, M.S. et al. (2023) 'Elevated Hydrolysis Efficiency of *Chlorella vulgaris* via Nanoparticle Pretreatment', *Bioresource Technology*, 350, 126635.

Shousong et. al, (2023), 'Microalgal Consortia for Waste Treatment and Valuable Bioproducts', *Energies*, 16(2), 884.

Sivakumar, P., Loh, K. C., Sahu, J. N., & Kjelleberg, S. (2015). Fouling and cleaning of membrane bioreactor by microalgae in wastewater treatment: A review. *Bioresource Technology*, 184, 149-158.

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., & Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater engineering: treatment and resource recovery (5th ed.)*. McGraw-Hill Education.

Vílchez, C., & Garbayo, I. (2017). Optimization of microalgal production for wastewater treatment and biofuel synthesis: A review. *Journal of Cleaner Production*, 147, 341-353.

Wang, L. K., Hung, Y. T., Shamma, N. K., & Kumar, K. (Eds.). (2019). *Handbook of environmental engineering (2nd ed.)*. Springer.

Wu, Z., Zhang, X., & Wang, Y. (2015). Use of microalgae *Chlorella vulgaris* for the bioremediation of piggery wastewater and simultaneous lipid production. *Bioresource Technology*, 184, 106-113.