

## ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΓΡΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ FUELGAE

**Α. Παύλου<sup>1,\*</sup>, Γ. Πενλόγλου<sup>1</sup>, Κ. Κυπαρισσίδης<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), ΙΔΕΠ, Θέρμη, Ελλάδα

<sup>2</sup>Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

(\*[alexpavlou@certh.gr](mailto:alexpavlou@certh.gr))

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δεσμευτεί, μέσω του European Green Deal (EGD), να επιτύχει κλιματική ουδετερότητα και να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα έως το 2050<sup>[1]</sup>. Για τον σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η υιοθέτηση από τις ευρωπαϊκές βιομηχανίες αιεφόρων τεχνολογιών και βιώσιμων αλυσίδων αξίας. Ο πιο επιβαρυντικός για το περιβάλλον τομέας είναι σήμερα οι μεταφορές, καθώς οι σχετιζόμενες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) αυξάνονται συνεχώς, σε πλήρη αντίθεση με τη μειούμενη τάση των εκπομπών τόσο των άλλων οικονομικών δραστηριοτήτων, όσο και των συνολικών GHG. Σχετικές προβλέψεις αναφέρουν ότι ο στόχος μείωσης των εκπομπών για το 2030 δεν θα ικανοποιηθεί<sup>[2]</sup>. Παράλληλα, η αναγκαία αύξηση της παραγωγής και χρήσης υγρών βιοκαυσίμων μεταφορών δεν μπορεί να υποστηριχθεί πλήρως από τις διαθέσιμες τεχνολογίες και πρώτες ύλες. Η χρήση τεχνολογιών μικροφυκών αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη λύση στο συγκεκριμένο ζήτημα, επιτρέποντας τη μετατροπή υφιστάμενων μονάδων παραγωγής σε προηγμένα βιοδιυλιστήρια 3<sup>ης</sup> γενιάς (3G), αξιοποιώντας τόσο βιογενείς όσο και μη βιογενείς πηγές CO<sub>2</sub>. Στόχος του ερευνητικού έργου FUELGAE<sup>[3]</sup> είναι να αναβαθμίσει μία μονάδα βιοαιθανόλης 2G και μία συμβατική μονάδα παραγωγής χάλυβα, χρησιμοποιώντας πιλοτικά έναν καινοτόμο φωτό-βιοαντιδραστήρα (PBR) για την επί-τόπου καλλιέργεια επιλεγμένων και βελτιστοποιημένων μικροφυκών. Αναλυτικότερα, ένα στέλεχος-παραγωγός πολυσακχαριτών και ένα στέλεχος-παραγωγός λιπιδίων χρησιμοποιούνται για την άμεση δέσμευση και μετατροπή σε βιομάζα μικροφυκών των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τις αντίστοιχες μονάδες παραγωγής. Η παραγόμενη βιομάζα ενσωματώνεται στις εκάστοτε υφιστάμενες και νέες αλυσίδες αξίας παραγωγής υγρών βιοκαυσίμων, μέσω ενζυμικής υδρόλυσης και ζύμωσης των πολυσακχαριτών σε βιοαιθανόλη 2G/3G, και υδρογονοεπεξεργασίας των λιπιδίων για την παραγωγή υδρογονανθράκων 3G. Συμπληρωματικά, η υπολειπόμενη βιομάζα μετατρέπεται σε βιοέλαιο μέσω υδροθερμικής υγροποίησης (HTL), προσφέροντας μία επιπλέον τροφοδοσία προς αναβάθμιση. Η FUELGAE τεχνολογία βασίζεται σε μία εναλλακτική μονάδα αρνητικών εκπομπών CO<sub>2</sub> και μηδενικών αποβλήτων για τη βιώσιμη παραγωγή προηγμένων βιοκαυσίμων, όπως επαληθεύεται από ένα εργαλείο πολυεπίπεδης τεχνικό-οικονομικής ανάλυσης και περιβαλλοντικής μελέτης αιεφορίας.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Μικροφύκη, Βιοκαύσιμα, Βιομάζα, Βιοδιυλιστήρια, Φωτό-βιοαντιδραστήρες

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής προσπάθεια αξιοποίησης διαφορετικών τύπων βιομάζας, τόσο από την ερευνητική κοινότητα όσο και τη βιομηχανία, έχει απώτερο στόχο την αιεφόρο παραγωγή διαφορετικού τύπου βιοπροϊόντων, όπως είναι για παράδειγμα τα βιοκαύσιμα, τα βιοπλαστικά και τα βιοχημικά υψηλής προστιθέμενης αξίας. Συγκεκριμένα, η βιομάζα που προέρχεται από μικροφύκη χρησιμοποιείται ήδη, κυρίως λόγω της υψηλής περιεκτικότητας της σε λιπίδια, ως πρώτη ύλη για

την παραγωγή βιοκαυσίμων (κυρίως βιοντίζελ μέσω μετεστεροποίησης)<sup>[4]</sup>. Παράλληλα, τα μικροφύκη προσλαμβάνουν και μετατρέπουν με φυσικό τρόπο, μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), πολύ πιο αποτελεσματικά από τα ανώτερα χερσαία φυτά. Έτσι, τα μικροφύκη, ως φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί, μπορούν να λειτουργήσουν ευεργετικά και ενάντια στην περιβαλλοντική ρύπανση, δεσμεύοντας σημαντικές ποσότητες CO<sub>2</sub> που προέρχονται από βιομηχανικά καυσαέρια, και οι οποίες σε διαφορετική περίπτωση θα κατέληγαν στο περιβάλλον, μολύνοντας τον ατμοσφαιρικό αέρα και επιδεινώνοντας το πρόβλημα υπερθέρμανσης του πλανήτη μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου<sup>[5]</sup>.

Στο πλαίσιο αυτό, το ερευνητικό έργο FUELGAE αντιπροσωπεύει μία νέα προσέγγιση για τη σημαντική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και τη μετατροπή τους σε προηγμένα υγρά βιοκαύσιμα και άλλα βιοπροϊόντα, μετατρέποντας έτσι έναν από τους πιο σημαντικούς ρύπους σε βιώσιμα προϊόντα. Παρέχει παράλληλα μία περιβαλλοντικά φιλική λύση για τις αεροπορικές και θαλάσσιες μεταφορές, καθώς και για τα βαρέα οχήματα, δηλαδή για τους τομείς των μεταφορών που είναι δύσκολο να λειτουργήσουν με (ανανεώσιμη) ηλεκτρική ενέργεια. Για τον σκοπό αυτό, το έργο στοχεύει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών με βάση την άμεση δέσμευση CO<sub>2</sub> από μικροφύκη, στη βελτίωση επιλεγμένων στελεχών μικροφυκών μέσω μελετών εξελικτικής εργαστηριακής προσαρμογής σε μη ευνοϊκές συνθήκες καλλιέργειας, στην εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων παραγωγής και επεξεργασίας της βιομάζας μικροφυκών για την ανάκτηση και απομόνωση λιπιδίων και σακχάρων, καθώς και στη σύνθεση πολυλειτουργικών καταλυτών υψηλής απόδοσης για τη παραγωγή βιοκαυσίμων μέσω υδρογονοεπεξεργασίας. Αυτές οι τεχνολογίες θα εξελιχθούν για μεταγενέστερη κλιμάκωση και μελλοντική εμπορευματοποίηση τους στο τέλος του έργου<sup>[3]</sup>.

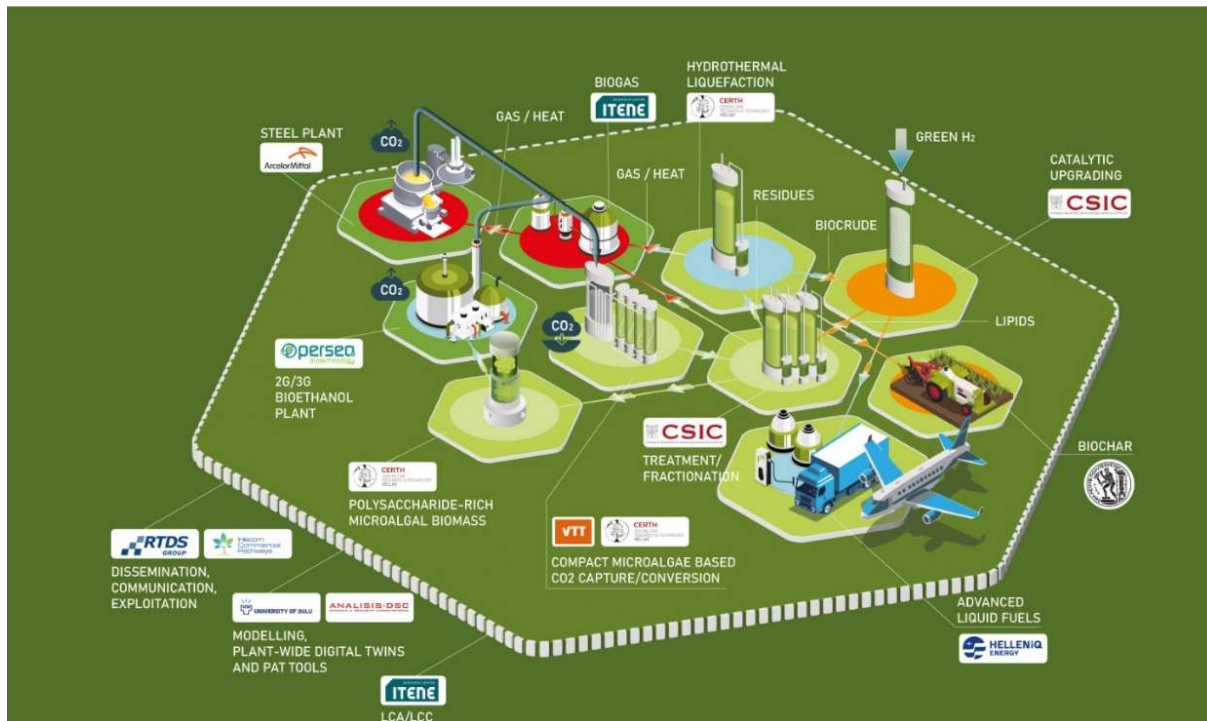
Στόχος του FUELGAE είναι η ανάπτυξη και επαλήθευση ενός νέου μοντέλου παραγωγής προηγμένων υγρών βιοκαυσίμων από ρεύματα εκπομπών CO<sub>2</sub> δύο σημαντικών βιομηχανικών τομέων, μέσω ενός καινοτόμου πιλοτικού φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR) καλλιέργειας μικροφυκών. Ο PBR θα χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα με βελτιστοποιημένα στελέχη μικροφυκών, σε κάθε μία από τις βιομηχανικές μελέτες περίπτωσης. Έτσι, η πιλοτική μονάδα καλλιέργειας μικροφυκών θα κατασκευαστεί και δοκιμαστεί αρχικά στην Ελλάδα, και στη συνέχεια θα αξιολογηθεί σε μελέτες πεδίου, συγκεκριμένα σε δύο βιομηχανικές εγκαταστάσεις, η πρώτη στην Ισπανία (βιοδιυλιστήριο παραγωγής βιοαιθανόλης) και η δεύτερη στη Ρουμανία (μονάδα παραγωγής χάλυβα). Επιπλέον, το έργο περιλαμβάνει στάδια υδροθερμικής υγροποίησης (HTL) και αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή βιοελαίου προς αναβάθμιση σε προηγμένα βιοκαύσιμα μέσω υδρογονοεπεξεργασίας και βιοαερίου, αντίστοιχα. Για την πλήρη αξιοποίηση όλων των ρευμάτων, ο βιοάνθρακας (biochar) που παράγεται κατά την υδροθερμική διεργασία θα δοκιμαστεί ως ενισχυτικό γεωργικών εδαφών. Οι τεχνολογίες του έργου θα αξιολογηθούν περαιτέρω μέσω ανάλυσης κύκλου και κόστους ζωής (LCA/LCC) για να επιβεβαιωθούν οι χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η μειωμένη χρήση πόρων και οι αρνητικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG). Απώτερος στόχος είναι όλες οι τεχνολογίες να επεκταθούν σε Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας 5 (TRL5).

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα αρχικά στάδια του έργου FUELGAE περιλαμβάνουν τη διαλογή και τελικά την επιλογή και προσαρμογή δύο στελεχών μικροφυκών για τις δύο μελέτες περίπτωσης: ένα στέλεχος που παράγει αποτελεσματικά πολυσακχαρίτες για το εργοστάσιο βιοαιθανόλης (Μελέτη Περίπτωσης I), και ένα στέλεχος που παράγει αποτελεσματικά λιπίδια για το εργοστάσιο χάλυβα (Μελέτη Περίπτωσης II). Η αρχική διαλογή λαμβάνει χώρα μέσω της διερεύνησης διαφορετικών στελεχών μικροφυκών σε εργαστηριακή κλίμακα, μελετώντας τη φυσιολογία και τα χαρακτηριστικά

καλλιέργειας τους σε σχέση με τη βιωσιμότητα, την ανάπτυξη βιομάζας και τη στοχευμένη παραγωγή των συγκεκριμένων βιοπροϊόντων (πολυσακχαρίτες και λιπίδια). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μελέτη λειτουργίας ενός καινοτόμου αυλωτού PBR σε μικρή κλίμακα για την άμεση μετατροπή CO<sub>2</sub> σε βιομάζα μικροφυκών με ελεγχόμενη σύσταση, ενώ ακολουθεί η εφαρμογή βιομηχανικών συνθηκών για την παραγωγή βιοπροϊόντων κάτω από υψηλή πυκνότητα κυττάρων. Οι διαφορετικές εγκαταστάσεις και τοποθεσίες (στην Ισπανία και στη Ρουμανία) των δύο μελετών περιπτώσεων παρέχουν ένα εύρος από αέριες τροφοδοσίες για τα μικροφύκη, ώστε να αποδειχθεί η ευελιξία και η ευρωστία της νέας προτεινόμενης τεχνολογίας.

Παράλληλα, έπειτα των δοκιμών στον καινοτόμο PBR με τα επιλεγμένα και βελτιστοποιημένα στελέχη μικροφυκών και της παραγωγής επαρκούς ποσότητας βιομάζας, θα εφαρμοστούν καινοτόμες τεχνικές επεξεργασίας της βιομάζας, με σκοπό την επίτευξη χαμηλότερου κόστους και την αύξηση της απόδοσης παραγωγής. Ακολουθώντας, χρησιμοποιώντας καλά σχεδιασμένες και βελτιστοποιημένες καταλυτικές τεχνολογίες θα παραχθούν έτοιμα προς χρήση προηγμένα βιοκαύσιμα, μέσω χρήσης «πράσινου» υδρογόνου. Όλα τα βιογενή υπολείμματα και παραπροϊόντα που θα παραχθούν στη μονάδα θα αξιοποιηθούν στις μονάδες HTL και αναερόβιας χώνευσης, παρέχοντας συμπληρωματικά προϊόντα και ικανοποιώντας την πολιτική μηδενικών αποβλήτων στην οποία στοχεύει κεντρικά το έργο FUELGAE. Ολόκληρη η αλυσίδα αξίας θα προσομοιωθεί με τη χρήση νέων εργαλείων μαθηματικής μοντελοποίησης, ενσωματωμένων με τη μορφή ψηφιακού δίδυμου (digital twin). Τέλος, η ολοκληρωμένη ανάλυση LCA/LCC θα παρέχει αναλυτικές πληροφορίες για τη βιωσιμότητα και τις πιθανές περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την παραγωγή προηγμένων βιοκαυσίμων μεταφορών από μικροφύκη. Αναλυτικά, το μοντέλο παραγωγής και το οργανόγραμμα του έργου FUELGAE, συμπεριλαμβάνοντας και τους Εταίρους του, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Σχήμα παραγωγής, οργανόγραμμα και εταίροι του έργου FUELGAE.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το έργο FUELGAE στοχεύει άμεσα στην προώθηση της ευρωπαϊκής επιστημονικής βάσης και της ηγετικής θέσης της ΕΕ σε παγκόσμιο επίπεδο, όσον αφορά τον τομέα των ανανεώσιμων καυσίμων, καθώς και στην αύξηση της ανταγωνιστικότητας των ευρωπαϊκών βιομηχανιών και στην ενίσχυση του ρόλου της ΕΕ στον μετασχηματισμό του ενεργειακού μίγματος. Το έργο αναμένεται να συνεισφέρει σημαντικά στη σταδιακή επίτευξη μίας οικονομίας πλήρως απαλλαγμένης από ορυκτά καύσιμα και πρώτες ύλες έως το 2050, ιδίως σε τομείς μεταφορών όπως η αεροπλοΐα και η ναυτιλία, υποστηρίζοντας παράλληλα τους στόχους της ΕΕ για ενεργειακή ανεξαρτησία.

Καθώς ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια στην ολιστική εμπορευματοποίηση των διεργασιών και τεχνολογιών που βασίζονται σε μικροφύκη είναι η μεγάλη ενεργειακή τους κατανάλωση, η οποία παραδοσιακά περιόριζε και την οικονομική τους βιωσιμότητα, σκοπός του έργου είναι να χρησιμοποιηθούν καινοτόμες μέθοδοι που διευκολύνουν την παραγωγή και επεξεργασία βιομάζας μικροφυκών, αλλά και τον διαχωρισμό των συστατικών τους προς κάθε χρήση. Αυτές οι μέθοδοι θα μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας την τεχνολογία κερδοφόρα τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική σκοπιά. Τέλος, θα αναπτυχθούν και καταλυτικές-χημικές τεχνολογίες για τη μετατροπή λιπιδίων και βιοελαίου (ενός πολύπλοκου μίγματος ενώσεων βιολογικής προέλευσης) σε προηγμένα βιοκαύσιμα, ως απολύτως απαραίτητες διεργασίες για τη μετατροπή δύσχρηστων και χαμηλής αξίας υποστρωμάτων σε υψηλής ποιότητας καύσιμα. Οι προτεινόμενες τεχνολογίες θα μπορούν, έπειτα της επιτυχούς κλιμάκωσης τους, να χρησιμοποιηθούν σε τομείς που ιστορικά προκαλούν μεγάλη ρύπανση και είναι δύσκολο να απανθρακοποιηθούν, όπως είναι οι τομείς των αεροπορικών και θαλάσσιων μεταφορών.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου FUELGAE, που χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), βάσει της Συμφωνίας Επιχορήγησης με αριθμό 101122151. Ωστόσο, οι απόψεις και οι γνώμες που εκφράζονται είναι μόνο των συγγραφέων και δεν αντικατοπτρίζουν απαραίτητα εκείνες της ΕΕ ή του CINEA. Ούτε η ΕΕ ούτε η χορηγούσα αρχή μπορούν να θεωρηθούν υπεύθυνες για αυτές.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Commission: The European Green Deal. [Πρόσβαση στις 11/04/2024]. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- [2] European Environment Agency, New EEA report: Meeting EU environment policy targets by 2030 will be challenging. [Πρόσβαση στις 11/04/2024]. <https://www.eea.europa.eu/en>
- [3] FUELGAE: Innovative sustainable on-site technologies for using microalgae to capture CO<sub>2</sub> and produce advanced biofuels – HE/RIA: G.A. 101122151. [Πρόσβαση στις 11/04/2024]. <https://fuelgae.eu/>
- [4] Sotiroudis, T. G., & Sotiroudis, G. T. (2013). *J. Serb. Chem. Soc.* 78(3): 395-405.
- [5] British Geological Survey, The greenhouse effect. [Πρόσβαση στις 12/04/2024]. <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/climate-change/how-does-the-greenhouse-effect-work/>



This work has been developed in the frame of the FUELGAE research project, funded by the European Union's Horizon Europe research and innovation program under Grant Agreement number 101122151. Views and opinions expressed are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or CINEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

