



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Σχεδιασμός και κατασκευή Φωτοβιοαντιδραστήρα
για παραγωγή βιομάζας**

ΟΥΡΑΝΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ε. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ

Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Σχεδιασμός και κατασκευή Φωτοβιοαντιδραστήρα
για παραγωγή βιομάζας**

ΟΥΡΑΝΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ε. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ

Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020

Περίληψη

Το αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας αφορά τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός φωτοβιοαντιδραστήρα για την παραγωγή βιομάζας μικροφυκών.

Στο θεωρητικό μέρος γίνεται εκτενής αναφορά στα μικροφύκη, τα συστήματα καλλιέργειάς τους, ανοιχτά και κλειστά, καθώς και στις συνθήκες καλλιέργειάς τους.

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι κατηγορίες των φωτοβιοαντιδραστήρων, όπως και οι παράμετροι σχεδίασης και σωστής λειτουργίας τους.

Στο πειραματικό μέρος αρχικά γίνονται οι υπολογισμοί των διαστάσεων του φωτοβιοαντιδραστήρα, ακολουθεί ο σχεδιασμός του στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SOLIDWORKS, και η συναρμολόγησή του, η οποία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του, έγινε σύνδεση με ένα σύστημα ελέγχου, για τον ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της πίεσης και του ποσοστού διοξειδίου του άνθρακα μέσα στο φωτοβιοαντιδραστήρα.

Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία του πειράματος, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της οπτικής πυκνότητας.

Abstract

The subject of this postgraduate thesis concerns the design and construction of a photobioreactor for the production of microalgae biomass. The theoretical part makes extensive analysis of microalgae, their cultivation systems, open and closed, as well as their cultivation conditions. Subsequently, there is a detailed description of the categories of photobioreactors, as well as their design and proper operation parameters.

In the experimental part, the dimensions of the photobioreactor are calculated, followed by its design in the design software SOLIDWORKS, and its assembly, which took place in the Electronic Sensor Laboratory of the School of Electrical Engineering, at the National Technical University of Athens.

Upon completion, the photobioreactor was connected to a control system, for the precise control of temperature, relative humidity, pressure and carbon dioxide inside the reactor.

The thesis concludes with the description of the process of the experiment, and the presentation of the results using the method of optical density.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ε.Μ.Π κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την ανάθεση του θέματος της μεταπτυχιακής εργασίας καθώς και για την βοήθειά και στήριξή του.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π κ. Γεώργιο Μπάνη για την πολύτιμη βοήθεια του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την συνεχή υποστήριξη και βοήθεια τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
Abstract	v
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα.....	ix
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αυξημένες ανάγκες	1
1.2.Νέες μορφές πόρων.....	2
1.3 Βιομάζα.....	3
1.3.1. Βιομάζα μικροφυκών	4
Κεφάλαιο 2. Φύκη (Άλγες)	7
2.1. Τι είναι.....	7
2.2. Δομή κυττάρου φυκών.....	8
2.3. Τύποι μεταβολισμού φυκών.....	12
2.4. Κατηγορίες φυκών	13
2.5. Μικροφύκη	14
2.6. Ο ρόλος των φυκών στην ζωή των ανθρώπων	15
Κεφάλαιο 3. Συστήματα καλλιέργειας φυκών	17
3.1 Γενικά	17
3.2. Ανοικτά συστήματα	18
3.3. Κλειστά συστήματα	20
3.3.1 Στατικές- συνεχείς καλλιέργειες	21
3.3.2 Φωτοβιοαντιδραστήρες	22
3.4. Σύγκριση μεταξύ συστημάτων παραγωγής βιομάζας μικροφυκών	23
Κεφάλαιο 4. Συνθήκες καλλιέργειας.....	25
4.1 Γενικά	25
4.2 Κατηγορίες καλλιεργειών	26
4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των μικροφυκών	27

4.3.1 Φως	27
4.3.2 Θερμοκρασία.....	28
4.3.3 pH και αλατότητα	28
4.3.4 Θρεπτικά συστατικά	29
4.4 Επίδραση του φωτός στα συστήματα καλλιέργειας	29
4.4.1 Ο ήλιος σαν πηγή φωτός	29
4.4.2 Τεχνητές πηγές φωτός	29
4.4.3 Ανάπτυξη τεχνητών πηγών φωτός στην καλλιέργεια μικροφυκών	30
Κεφάλαιο 5. Φωτοβιοαντιδραστήρες για καλλιέργεια μικροφυκών	31
5.1 Γενικά	31
5.2 Παράμετροι σχεδίασης και λειτουργίας φωτοβιοαντιδραστήρα	31
5.2.1 Φωτισμός- Απορρόφηση φωτός	32
5.2.2 Θερμοκρασία.....	33
5.2.3 pH	33
5.2.4 Σύστημα μεταφοράς CO ₂	33
5.2.5 Απομάκρυνση οξυγόνου	34
5.2.6 Παροχή θρεπτικών ουσιών	34
5.2.7 Σύστημα ανάδευσης/ ανάμιξη	34
5.2.8 Η διαφάνεια και η ανθεκτικότητα του υλικού κατασκευής	35
5.3 Κατηγορίες φωτοβιοαντιδραστήρων	35
5.3.1 Κυλινδρικοί σωληνοειδείς φωτοβιοαντιδραστήρες (Tubular photobioreactors).....	35
5.3.2 Επίπεδοι φωτοβιοαντιδραστήρες (Flat panel photobioreactors).....	36
5.3.3 Φωτοβιοαντιδραστήρες στήλης (Column photobioreactors).....	37
Κεφάλαιο 6. Πειραματικό μέρος	39
6.1 Γενικά	39
6.2 Υπολογισμοί	39
6.3 Σχεδιασμός	41

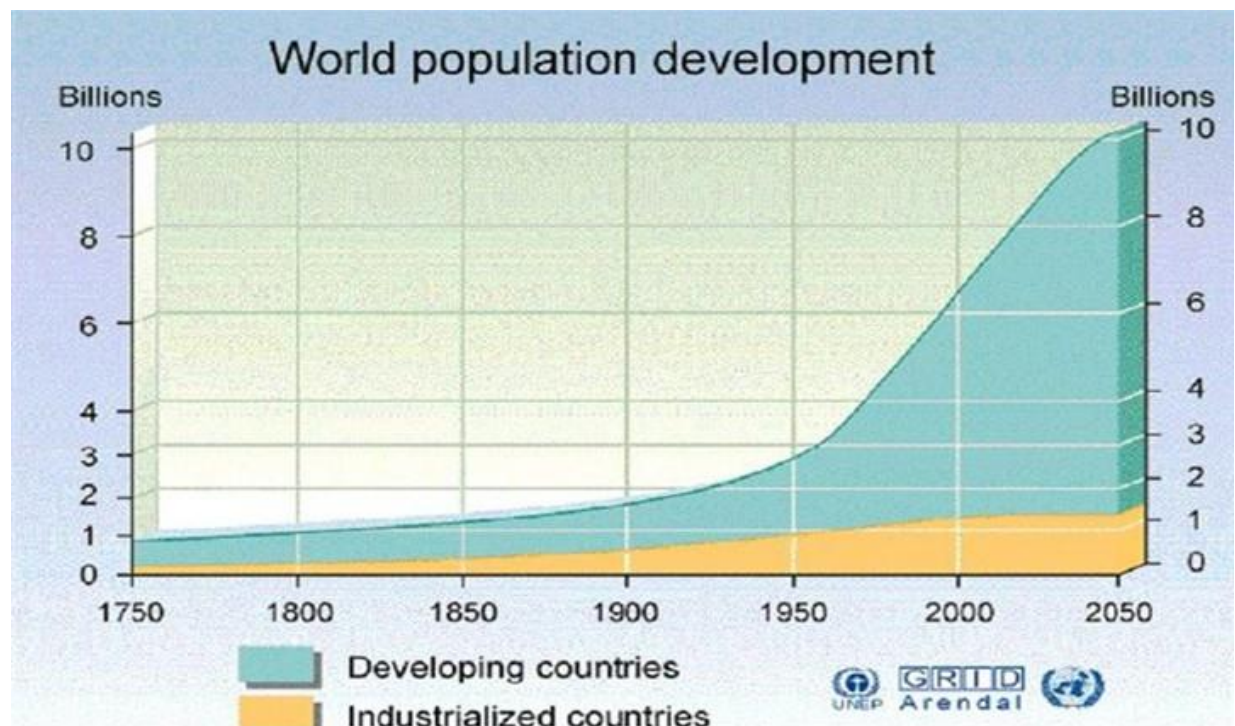
6.4 Κατασκευή	54
6.4.1 Υλικό	54
6.4.2 Επεξεργασία υλικού και δημιουργία εξαρτημάτων	55
6.4.3 Συναρμολόγηση	59
6.5 Σύστημα ελέγχου	62
6.5.1 Αισθητήρας θερμοκρασίας & υγρασίας DHT 11.....	63
6.5.2 Αισθητήρας πίεσης MPX4250.....	64
6.5.3 Αισθητήρας CO2 MH-Z16	66
6.5.4 Μικροελεγκτής Arduino.....	67
6.6 Διαδικασία πειράματος	74
6.7 Αποτελέσματα	75
6.7.1 Οπτική πυκνότητα	75
6.7.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	76
6.7.3 Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι	77
Κεφάλαιο 7. Βιβλιογραφία.....	79

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Αυξημένες ανάγκες

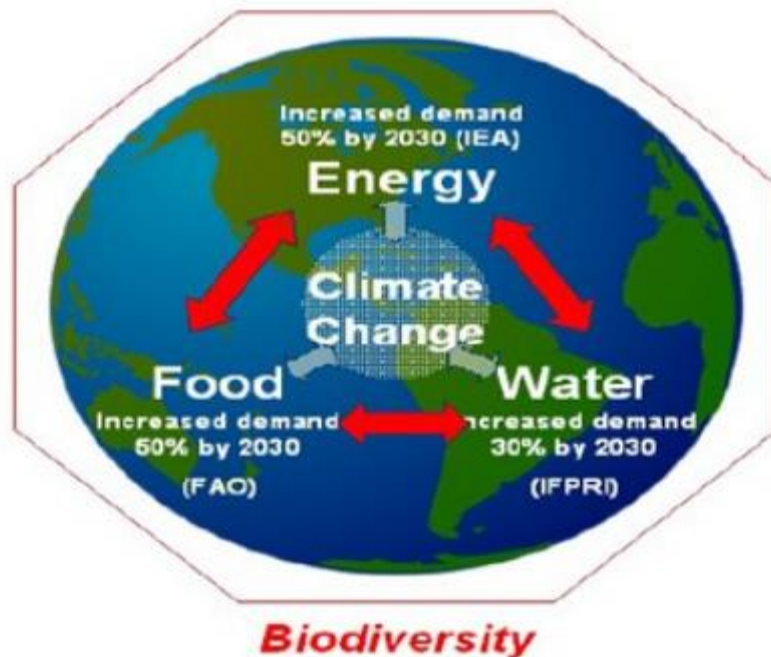
Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών, ο ανθρώπινος πληθυσμός αυξάνεται κατά 83 εκατομμύρια κάθε χρόνο, φτάνοντας σήμερα περίπου τα 7,7 δισεκατομμύρια.

Ο ανθρώπινος πληθυσμός αναμένεται να φτάσει τα 8 δισεκατομμύρια έως το 2024, ενώ το 2050 θα αγγίξει τα 10.



Σχήμα 1.1: Αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού [3]

Όπως είναι λογικό, η αύξηση του πληθυσμού συνεπάγεται την αυξημένη ανάγκη σε νερό, τρόφιμα, φάρμακα, ενέργεια και γενικά σε είδη πρώτης ανάγκης, καθώς και σε πρώτες ύλες.



Σχήμα 1.2: Αύξηση των αναγκών για νερό, τρόφιμα και ενέργεια [5]

Οι διαθέσιμοι πόροι του πλανήτη μας είναι σχετικά περιορισμένοι, και είναι επιτακτική η ανάγκη να βρεθούν εναλλακτικοί τρόποι και λύσεις για να μην εξαντληθούν, ειδικά στα επόμενα χρόνια θα υπάρξει μεγάλο πρόβλημα για την ικανοποίηση των ανθρώπινων αναγκών [1,2,4].

1.2 Νέες μορφές πόρων

Όπως γίνεται αντιληπτό, είναι απαραίτητη η μείωση της σπατάλης των φυσικών πόρων του πλανήτη, η εύρεση και προσθήκη σε αυτά νέων πρώτων υλών για τη δημιουργία αγαθών πρώτης ανάγκης, αλλά και η πιο αποδοτική εκμετάλλευση και αξιοποίηση αυτών των πόρων, όπως η καλλιέργεια ανεκμετάλλευστων εδαφών, η προστασία των δασών από καταστροφές και πυρκαγιές κτλ.

Ένα από τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία της κοινωνίας, απαραίτητο για τη δημιουργία αγαθών από φυσικούς πόρους αλλά και για τη ζωή μας γενικά, είναι η ενέργεια.

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια έκανε επιτακτική την ανάγκη αξιοποίησης των πάσης φύσεων μορφών ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια και η βιομάζα [6,7,8].

1.3 Βιομάζα

Ως βιομάζα ορίζεται η ύλη που έχει βιολογική (οργανική) προέλευση. Πρακτικά περιλαμβάνεται σε αυτήν οποιοδήποτε υλικό προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από τον φυτικό κόσμο.

Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο βιομάζα εννοούμε τα φυτικά και δασικά υπολείμματα (καυσόξυλα, κλαδοδέματα, άχυρα, πριονίδια, ελαιοπυρήνες, κουκούτσια), τα ζωικά απόβλητα (κοπριά, άχρηστα αλιεύματα), τα φυτά που καλλιεργούνται στις ενεργειακές φυτείες για να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας, καθώς επίσης και τα αστικά απορρίμματα και τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων, της αγροτικής βιομηχανίας και το βιοαπικοδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων.

Η βιομάζα χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών (θέρμανσης, ψύξης, ηλεκτρισμού κτλ) και ακόμα για την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων (βιοαιθανόλη, βιοντήζελ κτλ) [9].



Σχήμα 1.3: Πηγές βιομάζας [10]

Όπως γίνεται κατανοητό, η σημασία της βιομάζας είναι τεράστια για τον άνθρωπο, καθώς, σε αντίθεση με πολλούς πόρους όπως το πετρέλαιο, οι οποίοι είναι περιορισμένοι και πιθανόν να στερέψουν, η βιομάζα θα είναι ανεξάντλητη για όσο υπάρχει ζωή στον πλανήτη. Αξίζει να σημειωθεί πως η βιομάζα είναι η παλαιότερη πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο.

Η βιομάζα είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης.

Τα χερσαία συστήματα παραγωγής βιομάζας είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένα και αποτελούν βασικά συστατικά της καθημερινότητας, μέσα από την γεωργία, την κτηνοτροφία, την βιομηχανία κτλ.

Υπολογίζεται πως η χερσαία βιομάζα αποτελεί το 72% της συνολικής παραγωγής βιομάζας, ωστόσο η δυνατότητα περαιτέρω ανάπτυξης της είναι περιορισμένη, ενώ από μόνη της δεν φτάνει να καλύψει τις απαιτήσεις του ανθρώπινου πληθυσμού.

Η υδρόβια παραγωγή βιομάζας από την άλλη έχει πολύ μεγάλα περιθώρια βελτίωσης, ενώ παράλληλα ερευνώνται διάφορες μέθοδοι για την καλύτερη αξιοποίηση της. Μία από αυτές τις τεχνικές είναι η παραγωγή βιομάζας από μικροφύκη [11,12].

1.3.1 Βιομάζα μικροφυκών

Τα μικροφύκη είναι ικανά να παράγουν βιομάζα μεγαλύτερη από 50000 kg/στρέμμα/έτος, παρόλο που χρειάζεται ακόμα πρόοδος σε αρκετά τεχνολογικά κομμάτια.

Η εμπορική καλλιέργεια μικροφυκών ξεκίνησε πριν από πολλά χρόνια, όταν τα κύρια είδη ήταν η *Chlorella* και η *Spirulina* που χρησιμοποιήθηκαν ως τρόφιμα, η *Dunaliella salina*, που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή β-καροτενίου, ο *Haematococcus pluvialis* για την εξαγωγή ασταξανθίνης και διάφορα άλλα είδη που χρησιμοποιήθηκαν ως ζωοτροφές σε υδατοκαλλιέργειες.

Η βιοτεχνολογία μικροφυκών αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία τριάντα περίπου χρόνια, με αποτέλεσμα τη χρησιμοποίησή τους για την παραγωγή τροφίμων, φαρμάκων, ζωοτροφών και λιπασμάτων, ενώ έχουν προταθεί και ως πηγή βιοκαυσίμων.

Για την παραγωγή των μικροφυκών σε μεγάλη κλίμακα χρησιμοποιούνται κυρίως δύο μέθοδοι: τα ανοικτά συστήματα, όπως οι επιμήκεις λεκάνες, και τα κλειστά συστήματα, όπως είναι οι φωτοβιοαντιδραστήρες. Η βιομάζα φυκών μπορεί επίσης να παραχθεί και να συλλεχθεί από το περιβάλλον.

Τα μικροφύκη καλλιεργούνται κυρίως σε νερά, αλμυρά ή γλυκά, με απαραίτητα για την επιβίωση τους την ηλιακή ενέργεια και το διοξείδιο του άνθρακα. Δεν απαιτείται λίπασμα για την ανάπτυξη τους, ενώ έχουν μεγάλο ρυθμό ανάπτυξης και ωρίμανσης. Η καλλιέργεια τους σε ορισμένες περιπτώσεις αποτελεί πολύπλοκη διαδικασία, καθώς διαφοροποιείται ανάλογα με το σκοπό που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν [13,14,15].

Χώρες όπως οι ΗΠΑ επενδύουν μεγάλα ποσά στην βιομάζα μικροφυκών, για την παραγωγή προϊόντων, για υδατοκαλλιέργειες, για διατροφή ανθρώπων και ζώων, για λιπάσματα, αλλά και σε φαρμακευτικά προϊόντα, καθώς η αντιοξειδωτική τους δράση ενισχύει το ανοσοποιητικό και νευρικό σύστημα των ανθρώπων.

Επιπλέον, τα μικροφύκη τρέφονται με τοξικά απόβλητα και διοξείδιο του άνθρακα, βοηθώντας έτσι στην προστασία του περιβάλλοντος.

Η βιομάζα μικροφυκών παρουσιάζει τεράστιες προοπτικές για το μέλλον, ωστόσο πρέπει να γίνουν βελτιώσεις στην υπάρχουσα τεχνολογία ούτως ώστε η λύση αυτή να γίνει οικονομικά και τεχνικά αποδεκτή [16,17,18].

Κεφάλαιο 2 Φύκη (Άλγες)

2.1 Τι είναι

Τα φύκη (και όχι φύκια), ή άλγες, είναι φωτοσυνθετικοί φυτικοί οργανισμοί που δεν έχουν βλαστούς, φύλλα και ρίζες, ενώ δεν σχηματίζουν σπέρματα, άνθη ή καρπούς, όπως τα ανώτερα φυτά. Αντίθετα, έχουν πρωτόγονη οργάνωση, πολύ απλή στις κατώτερες ταξινομικά ομάδες, πιο πολύπλοκη στις ανώτερες.

Σχηματίζουν σπόρια αντί σπέρματα. Ορισμένα έχουν πολύπλοκους βιολογικούς κύκλους (κύκλους ζωής). Διαφέρουν πολύ από τα Σπερματοφύτα, τόσο από τα χερσαία όσο και από τα θαλάσσια, αυτά, που οι περισσότεροι Έλληνες από άγνοια, τα αποκαλούν «φύκια».

Από πλευράς μορφολογίας υπάρχει εξαιρετική ποικιλία. Υπάρχουν απλές μονοκύτταρες μορφές, αποικιακές, μικροσκοπικές, νηματοειδείς έως πολύπλοκες διακλαδισμένες ή όχι. Ορισμένα μοιάζουν με μικροσκοπικούς θάμνους, με τσαμπιά σταφυλιού, άλλα μοιάζουν με φύλλα, με δίκτυο, με σωλήνες, κ.ά.

Υπάρχουν φύκη μικροσκοπικά, αόρατα με γυμνό μάτι, όπως για παράδειγμα αυτά που συμμετέχουν στο φυτοπλαγκτόν, και αποκαλούνται συλλογικά μικροφύκη. Άλλα είναι ορατά με γυμνό μάτι, αυτό που βλέπουμε το ονομάζουμε θαλλό, ή και μεγάλων διαστάσεων που φθάνουν αρκετά μέτρα μήκος, όπως για παράδειγμα τα μεγάλα Φαιοφύκη, συλλογικά τα αποκαλούμε μακροφύκη[19].

Τα φύκη για να ευδοκιμήσουν χρειάζονται αεριζόμενο και υγρό περιβάλλον, με πρόσβαση σε φως, διοξείδιο του άνθρακα και σε άλλα θρεπτικά συστατικά. Κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης καταναλώνουν διοξείδιο του άνθρακα και παράγουν μεγάλες ποσότητες οξυγόνου.

Τα φύκη αναπτύσσονται και σε αλμυρό και σε γλυκό νερό, καθώς τα συναντάμε σε θάλασσες, λίμνες και ποτάμια.

Τα μακροφύκη αναπτύσσονται κυρίως στη θάλασσα, όπου μπορούν να φτάσουν σε πολύ μεγάλα μεγέθη. Τα μικροφύκη τα συναντάμε είτε σε αλμυρό είτε σε γλυκό νερό, ενώ μπορούν επίσης να αναπτυχθούν στο έδαφος, σε πέτρες, ξύλα, ακόμα και σε ερημικές περιοχές.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο για τα φύκη είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φυσικό μέσο για τον καθαρισμό βρώμικων υδάτινων εκτάσεων, καθώς τρέφονται από τις τοξίνες και τα υπόλοιπα απόβλητα που περιέχονται σε αυτά τα νερά.

Τα φύκη αρχικά προορίζονταν για καρκεύματα και υδατοκαλλιέργειες, ωστόσο τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στην παραγωγή πρώτων

υλών, οι οποίες μετά από επεξεργασία θα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διαφόρων προϊόντων, τα οποία θα καλύπτουν βασικές ανθρώπινες ανάγκες.

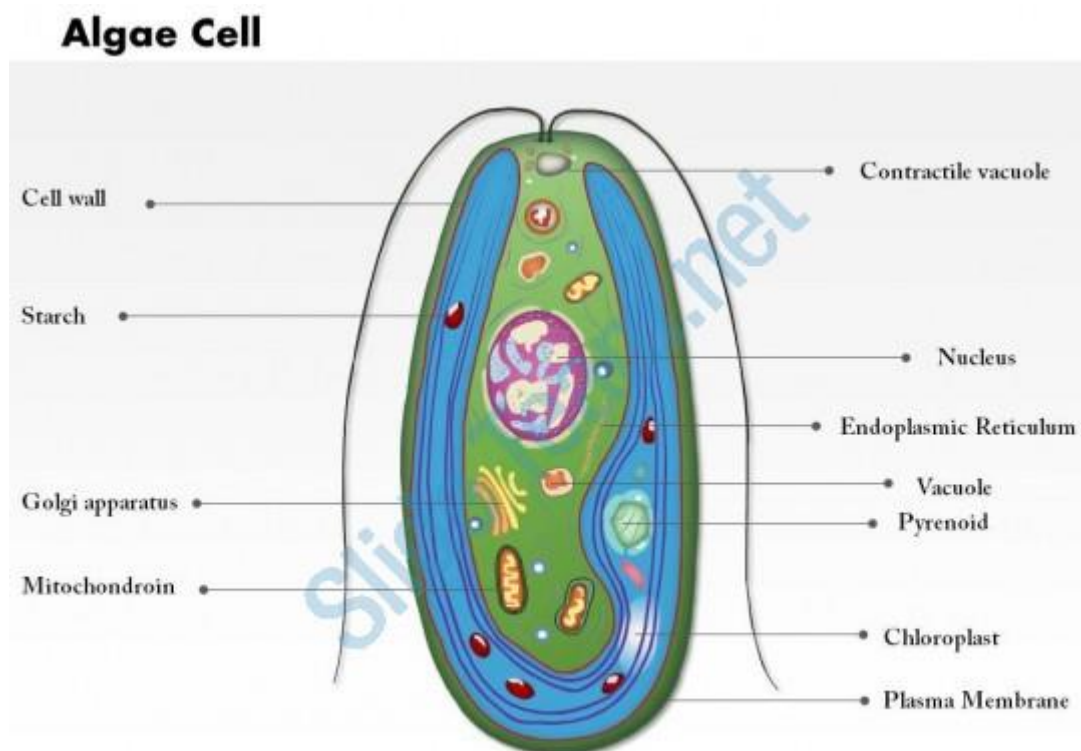
Στις μέρες μας αρκετές εταιρείες ασχολούνται με την καλλιέργεια άλγης, δαπανώντας αρκετά μεγάλα ποσά, ενώ την ίδια ώρα πληθώρα πανεπιστημίων ανά τον κόσμο έχουν δημιουργήσει ερευνητικό έργο πάνω στο αντικείμενο αυτό[19,20,21].

2.2 Δομή κυττάρου φυκών

Τα φύκη είναι μονοκύτταροι οργανισμοί, των οποίων ο κύκλος ανάπτυξης γίνεται μέσα σε λίγες μέρες. Υπάρχουν διάφοροι τύποι καθώς και διαφορετικές συνθήκες για την ανάπτυξη τους.

Κύρια φωτοσυνθετική χρωστική τους ουσία είναι η χλωροφύλλη, ενώ χαρακτηριστικό είναι ότι τα αναπαραγωγικά τους κύτταρα δεν περιβάλλονται από άγονα επικαλυπτικά κύτταρα. Γενικά, η ανάπτυξη τους διαφέρει, καθώς ποικίλει ανάλογα με το είδος.

Όλα τα ευκαρυωτικά φύκη μοιράζονται τα ίδια κυτταρικά συστατικά, καθώς και μερικές βασικές δομές.



Σχήμα 2.1 : Κυτταρική δομή άλγης [20]

- **Κυτταρικό τοίχωμα:** Το κυτταρικό τοίχωμα των περισσότερων φυκών είναι κυτταρινικό, το οποίο μετά από μελέτες με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο προέκυψε ότι αποτελείται από μικροϊνίδια κυτταρίνης, ποικίλου πάχους και διαφορετικού προσανατολισμού. Το κυτταρικό τοίχωμα περιέχει επίσης ημικυτταρίνη, βλεννώδη, πηκτίνη και άλλες ουσίες, όπως το αλγινικό οξύ, η φουκοϊδίνη, η φουκίνη, το ανθρακικό ασβέστιο, το διοξείδιο του πυριτίου κ.α., σε διαφορετικούς συνδυασμούς και σύσταση.
- **Μαστίγια:** Πρόκειται για κινητά ή φυτικά αναπαραγωγικά κύτταρα, τα οποία υπάρχουν σε όλες τις ομάδες φυκών, εκτός από τα κυανοφύκη και τα ροδοφύκη. Ανάλογα με την ομάδα που βρίσκονται, παρουσιάζουν διαφορές στο μήκος και στη θέση τους, αλλά και στον αριθμό, ο οποίος συνήθως είναι από ένα έως τέσσερα. Η κίνηση τους επιτυγχάνεται με τη δράση χτυπήματος μικρών νηματοειδών που ονομάζονται μαστίγια.
- **Πρωτοπλάστης:** Είναι το πρωτοπλασματικό περιεχόμενο ενός κυττάρου. Στα ευκαρυωτικά φύκη περιβάλλεται από ένα εξωτερικό λιποπρωτεϊνικό τοίχωμα, το οποίο ονομάζεται κυτταρική μεμβράνη, η οποία αποτελείται από κυτταρόπλασμα και από έναν ή περισσότερους πυρήνες, σφαιρικούς ή ελλειψοειδείς.

Η **κυτταρική μεμβράνη** είναι λεπτή, ελαστική και επιλεκτικά διαπερατή, ώστε να ελέγχει τη διέλευση των υλικών μέσα και έξω από τα κύτταρα.

Σε όλο το εσωτερικό μέρος του κυττάρου, από την εξωτερική πλευρά του πυρήνα μέχρι την εσωτερική πλευρά της κυτταρικής μεμβράνης υπάρχει ένα παχύρρευστο υλικό, που ονομάζεται **κυτταρόπλασμα**, το οποίο συγκρατεί να υπόλοιπα οργανίδια που περιέχονται μέσα στο κύτταρο, τα προστατεύει και αναπληρώνει τον κενό χώρο του κυττάρου.

Στο εσωτερικό των ευκαρυωτικών κυττάρων των φυκών βρίσκονται πολύ σημαντικά οργανίδια, τα οποία συνδέονται με τη μεμβράνη τους, όπως:

- **Πυρήνας:** Ένα σφαιρικό ή ελλειπτικό σώμα που βρίσκεται στο κέντρο των ευκαρυωτικών κυττάρων. Περιβάλλεται από μια ξεχωριστή μεμβράνη που αποτελείται από δύο στρώματα, την **πυρηνική μεμβράνη**. Η πυρηνική μεμβράνη διαθέτει πυρηνικούς πόρους, με την βοήθεια των οποίων επιτυγχάνεται η επικοινωνία του πυρήνα με το κυτταρόπλασμα. Το εξωτερικό κομμάτι της πυρηνικής μεμβράνης είναι συνέχεια του ενδοπλασματικού δικτύου.

Στο εσωτερικό κάθε πυρήνα βρίσκονται ένας ή περισσότεροι πυρηνίσκοι, ανάλογα με την ομάδα φυκών στην οποία βρίσκεται. Αντίστοιχα ποικίλει και ο αριθμός των χρωμοσωμάτων που περιέχει, με τον μικρότερο αριθμό να είναι 2 και τον μεγαλύτερο 592.

- **Χλωροπλάστες:** Ίσως το πιο σημαντικό μέρος των κυττάρων των φυκών, καθώς περιέχουν όλα τα ένζυμα που απαιτούνται για τη φωτοσύνθεση. Η δομή τους είναι διπλής μεμβράνης, με διαστάσεις από

3 έως 6 μm, ενώ το σχήμα τους μεταβάλλεται ανάλογα με την ομάδα φυκών στην οποία βρίσκονται, με κυριότερη τη μορφή σε σχήμα κυπέλλου.

Η βασική του δομή είναι σχεδόν παρόμοια σε όλους τους φυτικούς οργανισμούς, ενώ έχει τρεις κύριες δομικές περιοχές:

1. Μια διπέταλη μεμβράνη με κενό χώρο ανάμεσα στα δύο πέταλα.
2. Ένα κινητό στρώμα όπου βρίσκονται τα διαλυτά ένζυμα για το μεταβολισμό, τη σύνθεση των πρωτεϊνών και την αποθήκευση αμύλου.
3. Οι εσωτερικές ελασματοειδείς μεμβράνες που περιέχουν χρωστικές και εμπλέκονται στην δέσμευση ενέργειας και τη μεταγωγή.

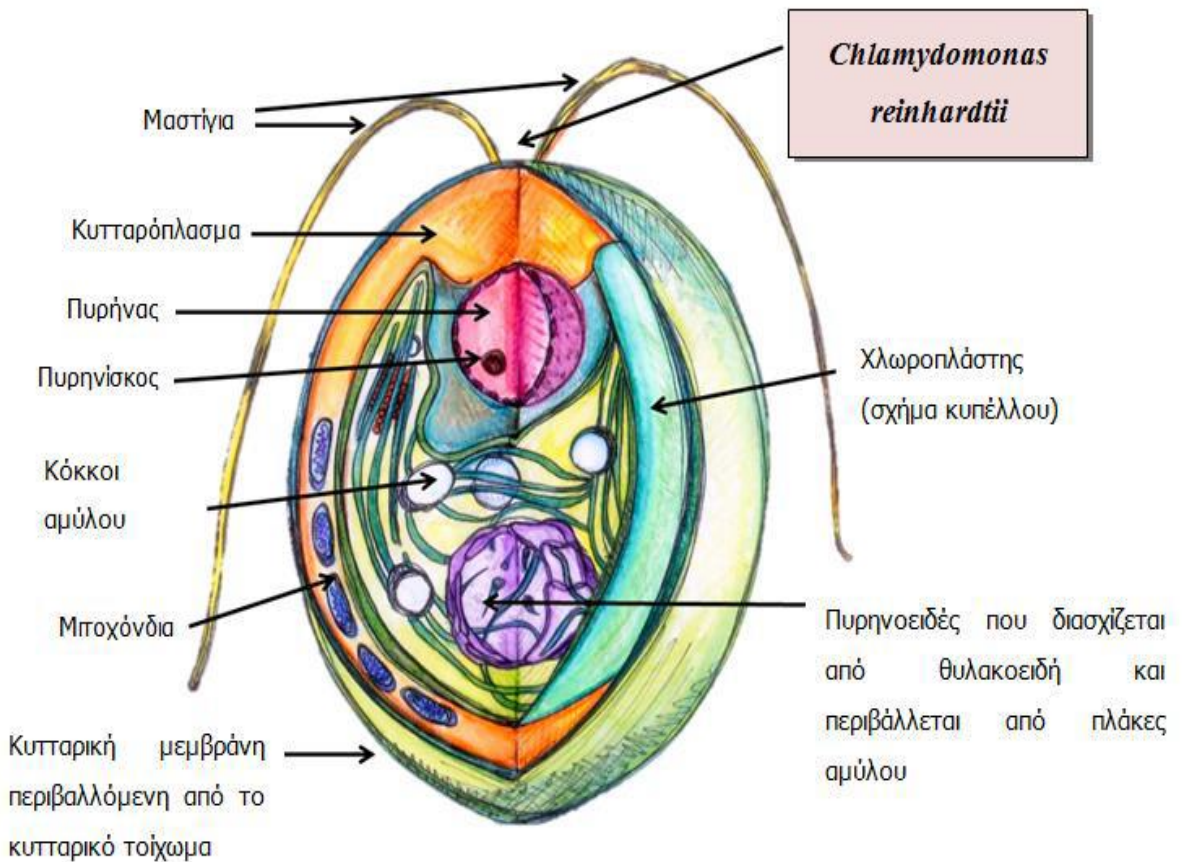
Στο εσωτερικό σχηματίζονται δίσκοι σε στοίβες που ονομάζονται θυλακοειδή. Το σύστημα αυτό χωρίζεται από το στρώμα μέσω της θυλακοειδούς μεμβράνης. Τα απαραίτητα χρωστικά συστήματα για τη φωτοσύνθεση βρίσκονται μέσα στις μεμβράνες αυτές.

Στα κυανοφύκη, τα θυλακοειδή τα θυλακοειδή δεν περικλείονται σε δεσμευμένες ομάδες, αλλά βρίσκονται ελεύθερα στο κυτταρόπλασμα, για να σχηματίσουν χλωροπλάστες. Αντίθετα η χλωροφύλλη και οι διάφορες βοηθητικές χρωστικές περικλείονται στα θυλακοειδή.

- **Πυρηνοειδές σωματίο:** Πρωτεϊνούχα σώματα, μέρη των χλωροπλάστων, που σχετίζονται με την σύνθεση και αποθήκευση του αμύλου. Σε κάθε χλωροπλάστη βρίσκεται ένα ή και περισσότερα πυρηνοειδή.
- **Μιτοχόνδρια:** Τα μιτοχόνδρια είναι επιμήκη, με σφαιρικό ή ωοειδές σχήμα, ενώ περιβάλλονται από διπλή μεμβράνη. Υπάρχουν σε όλα τα φύκη, εκτός από τα κυανοφύκη. Σε ορισμένες ομάδες, όπως στα χλωροφύκη, κάθε κύτταρο περιέχει ένα μόνο μιτοχόνδριο, ενώ στις υπόλοιπες υπάρχουν συνήθως περισσότερα από ένα.
- **Ενδοπλασματικό δίκτυο:** Ένα δίκτυο μεμβρανών από αλληλοσυνδεόμενα σωληνάκια και δεξαμενές, το οποίο βρίσκεται στα κύτταρα των φυκών.
- **Δικτυόσωμα ή συσκευή Golgi:** Ένα συστατικό του ενδομεμβρανικού συστήματος του κυττάρου. Βρίσκεται σε όλα τα είδη φυκών, εκτός από τα κυανοφύκη, και λειτουργεί ως ένα ενδιάμεσο μεταξύ του ενδοπλασματικού δικτύου και της κυτταρικής μεμβράνης. Αποτελείται από 2 έως 20 επίπεδα κυστίδια σε στοίβες, και η κάθε στοίβα να καλείται δικτυόσωμα. Όλα τα δικτυώματα μαζί σχηματίζουν τη συσκευή Golgi. Συνήθως βρίσκεται στον πυρήνα, σε πλαστίδια ή γενικά οπουδήποτε μέσα στο κύτταρο. Βασική λειτουργία τους είναι η επεξεργασία και το «πακετάρισμα» των υλικών που εξέρχονται από το κύτταρο, ενώ

ταυτόχρονα είναι υπεύθυνα για τη φροντίδα της κυτταρικής μεμβράνης, και το σχηματισμό νέας.

- **Eye Spot ή Στίγμα:** Χρωστικές κηλίδες, που μετέχουν άμεσα ή έμμεσα στην αντίληψη του φωτός. Βρίσκονται στο πρόσθιο, μεσαίο ή οπίσθιο τμήμα των κινητήριων φυτικών ή αναπαραγωγικών κυττάρων των φυκών.
- **Κενοτόπια:** Σχεδόν όλα τα κύτταρα των φυκών, εκτός από τα κυανοφύκη, έχουν τουλάχιστον ένα κενοτόπιο. Κάθε κενοτοπίο περιορίζεται από μια διακριτή μεμβράνη που ονομάζεται τονοπλάστης [22,23].



Σχήμα 2.2 Κυτταρική δομή του *Chlamydomonas reinhardtii* [22]

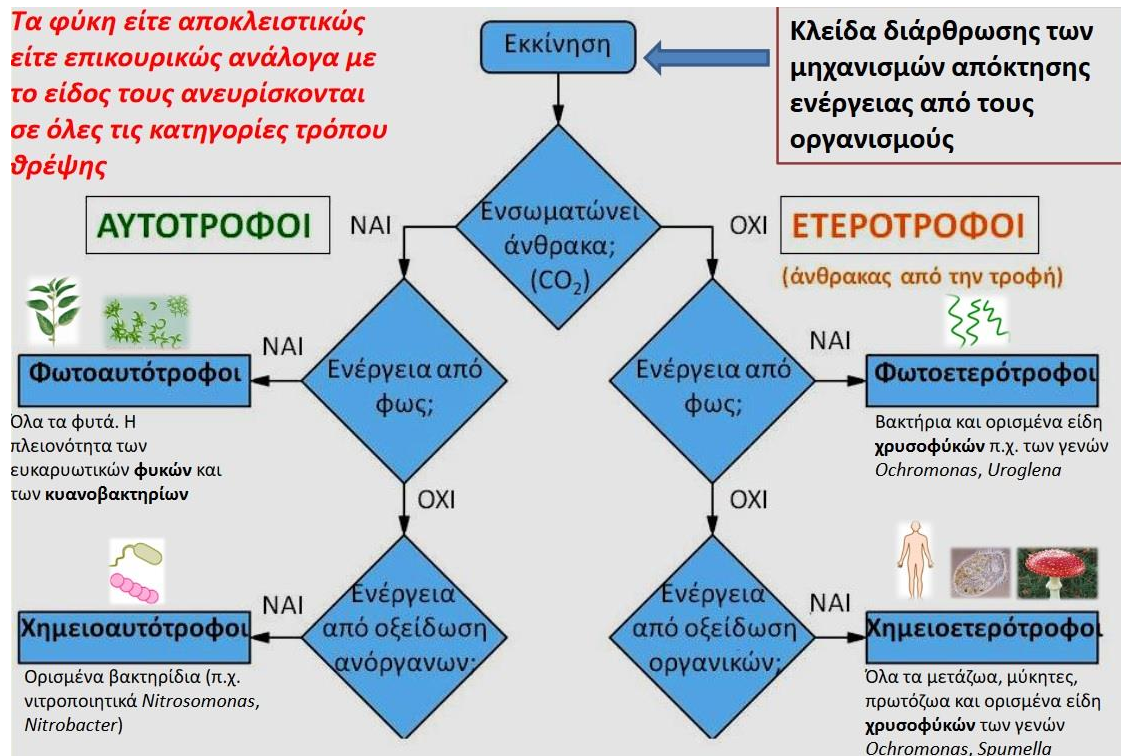
2.3 Τύποι μεταβολισμού φυκών

Όπως όλα τα φυτά, έτσι και τα φύκη στην πλειοψηφία τους είναι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί, έχουν δηλαδή πηγή ενέργειας τον ήλιο και πηγή άνθρακα το διοξείδιο του άνθρακα.

Έχουν παρατηρηθεί διάφοροι τύποι μεταβολισμού ανάμεσα στις ομάδες φυκών, ενώ ορισμένες ομάδες έχουν την δυνατότητα να εναλλάσσουν τον μεταβολισμό τους ανάλογα με τη μορφή της διαθέσιμης ενέργειας και του άνθρακα.

Τα φύκη αναπτύσσονται με τους παρακάτω τύπους μεταβολισμού:

- **Φωτοαυτότροφος:** Τα φύκη αναπτύσσονται απορροφώντας ηλιακή ενέργεια και διοξείδιο του άνθρακα. Αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τρόπο ανάπτυξης των φυκών.
- **Ετερότροφος:** Στον τύπο αυτό τα φύκη δεν χρησιμοποιούν ηλιακή ενέργεια και διοξείδιο του άνθρακα, αλλά απορροφούν την ενέργεια και τον άνθρακα που χρειάζονται από διάφορες οργανικές ουσίες, όπως γλυκόζη, γλυκερίνη κ.α
- **Μιξότροφος:** Ο τύπος αυτός πρόκειται ουσιαστικά για μία μίξη των φωτοαυτότροφων και ετερότροφων τύπων, καθώς τα φύκη απορροφούν την απαιτούμενη ενέργεια είτε από τον ήλιο, είτε από τις διάφορες οργανικές ουσίες, και τον απαιτούμενο άνθρακα είτε από το διοξείδιο του άνθρακα, είτε από τις οργανικές ουσίες.
- **Φωτοετερότροφος:** Στον τύπο αυτό τα φύκη χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τον ήλιο, ενώ ως πηγή άνθρακα τις οργανικές ουσίες.



Σχήμα 2.3: Οι διαφορετικοί τύποι μεταβολισμού φυκών[81]

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο ετερότροφος και ο μιξότροφος τύπος μεταβολισμού είναι ιδανικοί για την καλλιέργεια φυκών, γιατί έτσι αντιμετωπίζεται ο μεγάλος περιορισμός που έχουν οι άλλοι δύο τρόποι, το πρόβλημα της αξιοποίησης του φωτός σε καλλιέργειες με μεγάλη πυκνότητα ή σε καλλιέργειες με φωτοπαρεμπόδιση (κατά τους καλοκαιρινούς μήνες). Σε αυτές τις περιπτώσεις μεγάλο μέρος της καλλιέργειας δεν έχει πρόσβαση σε ηλιακή ενέργεια, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ολοκληρώσει τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης.

Πιο συγκεκριμένα, ο μιξότροφος τύπος μεταβολισμού φαίνεται να είναι ο ιδανικός, καθώς έχει ταχύτερο ρυθμό ανάπτυξης και μεγαλύτερη τελική παραγωγή βιομάζας [24,25,26,27,28,29].

2.4 Κατηγορίες φυκών

Γενικά τα φύκη έχουν μεγάλη ποικιλία, καθώς ανάλογα με την ομάδα διαφέρουν στη μορφή, στον τρόπο αναπαραγωγής και στις χρωστικές που έχουν, γεγονός που κάνει ιδιαίτερα δύσκολη την κατηγοριοποίησή τους. Έτσι, οι μεγάλες ομάδες συνήθως διακρίνονται με βάση διάφορα βιοχημικά κριτήρια. Παραδείγματος χάριν, τα **Ροδοφύκη** έχουν ένα χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα, τα **Δινοφύκη** έχουν καστανά κύτταρα με αυλάκια και κυτταρικό τοίχωμα από πλάκες, και τα **Διάτομα** χαρακτηρίζονται από κύτταρα με καστανή χροιά και τοιχώματα από πυρίτιο.

Οι κύριες ομάδες φυκών είναι:

- **Κυανοφύκη ή κυανοβακτήρια:** Είναι προκαρυωτικοί φωτοσυνθετικοί οργανισμοί, που δεν φέρουν τα χαρακτηριστικά των ευκαρυωτικών κυττάρων, όπως χλωροπλάστες. Αποτελούν βασική ομάδα του φυτοπλαγκτού, ενώ έχουν κυανοπράσινο χρώμα. Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε οικολογικές έρευνες, καθώς έχουν την ικανότητα να συγκρατούν ατμοσφαιρικό άζωτο. Τα κυανοφύκη περιλαμβάνουν περίπου 2.000 είδη.
- **Διάτομα:** Ευκαρυωτικοί, μονοκύτταροι οργανισμοί πολύ μικρού μεγέθους, με χαρακτηριστικό πυριτικό κυτταρικό τοίχωμα. Τα Διάτομα χαρακτηρίζονται από ακτινωτή ή αμφίπλευρη συμμετρία, ενώ περιλαμβάνουν περίπου 16.000 είδη.
- **Δινοφύκη, Δινομαστιγωτά, Πυροφύκη:** Ευκαρυωτικοί, μονοκύτταροι οργανισμοί, οι οποίοι κινούνται με τη βοήθεια μαστιγίων. Περιλαμβάνουν περίπου 800 είδη, με τα 100 να ζουν αποκλειστικά σε γλυκά νερά.
- **Χλωροφύκη:** Μια από τις μεγαλύτερες ομάδες φυκών, με περισσότερα από 500 γένη και 8.000 είδη. Περιλαμβάνουν μικροφύκη και μακροφύκη, με ορισμένα να είναι μονοκύτταρα και άλλα πολυκύτταρα. Είναι ευκαρυωτικοί οργανισμοί, με σχηματοποιημένο πυρήνα και τουλάχιστον ένα χλωροπλάστη. Συνήθως έχουν πράσινο χρώμα, ενώ υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί μορφολογικοί τύποι.
- **Χαροφύκη:** Τα χαροφύκη παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τα Χλωροφύκη, αλλά έχουν διαφορές από μορφολογικής πλευράς. Σχηματίζουν νήματα που στερεώνονται στο υπόστρωμα, ενώ διαθέτουν πολύπλοκα αναπαραγωγικά όργανα. Συναντώνται σε καθαρά νερά, λίμνες και ρυάκια.
- **Φαιοφύκη:** Τα Φαιοφύκη ξεχωρίζουν από το καστανό τους χρώμα, που οφείλεται στην χρωστική ουσία φουκοξανθίνη. Περιλαμβάνουν περίπου 2.000 είδη και 250 γένη, από τα οποία μόνο τα τρία αναπτύσσονται σε γλυκά νερά, και τα υπόλοιπα σε θαλάσσια.
- **Ροδοφύκη:** Τα ροδοφύκη έχουν χαρακτηριστικό ρόδινο χρώμα και αρκετά πολύπλοκη δομή, ενώ είναι ορατά με γυμνό μάτι. Περιλαμβάνουν περίπου 4.000 είδη, και αναπτύσσονται κυρίως σε θαλάσσια νερά, όπως τα Φαιοφύκη [19,20,23].

2.5 Μικροφύκη

Τα μικροφύκη είναι μονοκύτταροι μικροοργανισμοί που ανήκουν στην κατηγορία των φυκών. Χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τον ήλιο, μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα σε τρόφιμα, ενέργεια, βιοκαύσιμα και σε διάφορα άλλα βιοενεργά μόρια.

Το μέγεθος τους κυμαίνεται ανάλογα την ομάδα τους από 0,2 έως και 2.000μm, και αναπτύσσονται μεμονωμένα ή σε ομάδες.

Τα μικροφύκη αναπτύσσονται πολύ γρηγορότερα από τις υπόλοιπες ομάδες φυτών, καθώς έχουν αυξημένη φωτοσυνθετική ικανότητα. Πιο συγκεκριμένα, καταφέρνουν να διπλασιάσουν τη βιομάζα τους σε δύο με πέντε μέρες, την ώρα που τα περισσότερα φυτά χρειάζονται μήνες [14].

Ο λόγος που τα μικροφύκη έχουν τόσο αυξημένη φωτοσυνθετική ικανότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα φυτά, είναι ότι δεν χρειάζονται αγγειακό σύστημα για τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών. Άξιο αναφοράς είναι και το γεγονός πως η καλλιέργεια τους γίνεται χωρίς τη χρήση φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων.

Τα μικροφύκη χωρίζονται σε κατηγορίες, με βάση το χρώμα τους, τον κύκλο ζωής, τον μεταβολισμό και την κυτταρική δομή τους. Οι βασικές κατηγορίες είναι:

- Διάτομα
- Χλωροφύκη
- Κυανοφύκη
- Χρυσοφύκη
- Ροδοφύκη [30,31,32,33,34].

2.6 Ο ρόλος των φυκών στην ζωή των ανθρώπων

Τα φύκη παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς έχουν μεγάλη επίδραση στη διαμόρφωση του κλίματος και την εξέλιξη της ζωής. Η ικανότητα τους να απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα και να απελευθερώνουν οξυγόνο είναι τεράστιας σημασίας για το περιβάλλον, διότι βοηθούν στον καθαρισμό της ατμόσφαιρας, και γενικότερα στην ανάπτυξη της ζωής.

Τα φύκη επίσης παίζουν το ρόλο των φυτών στο υδάτινο περιβάλλον, αποτελώντας ουσιαστικά τη βάση της τροφικής αλυσίδας σε γλυκά και αλμυρά νερά.

Τα φύκη σήμερα χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές για την κάλυψη ανθρώπινων αναγκών:

- Ως τροφή σε αρκετές χώρες, κυρίως στις Ασιατικές. Τα φύλη περιέχουν πολύτιμα συστατικά, όπως Ωμέγα 3 λιπαρά οξέα, βιταμίνες και ιχνοστοιχεία. Ορισμένα είδη φυκών είναι ιδιαίτερα δημοφιλή, όπως το Ροδοφύκος *Porphyra*, από το οποίο φτιάχνεται το σουσί, και το Κυανοφύκος *Spirulina*, που συγκαταλέγεται στις τροφές του μέλλοντος.
- Στην φαρμακοβιομηχανία, ως πρώτη ύλη για την παραγωγή φαρμάκων, αντιβιοτικών και εμβολίων.

- Στην γεωργία ως λιπάσματα.
- Στην κτηνοτροφία και στις ιχθυοκαλλιέργειες σαν συμπληρώματα διατροφής, καθώς περιέχουν πολλές πρωτεΐνες.
- Στην παραγωγή διάφορων κολλοειδών προϊόντων, που έχουν εφαρμογές στην ιατρική, στην φαρμακευτική και σε άλλους κλάδους.
- Στην παραγωγή προϊόντων που βοηθούν στην ανάπτυξη των φυτών, καθώς τα φύκη περιέχουν αυξητικές ορμόνες.
- Στην κοσμετολογία, για σύσταση καλλυντικών για ενυδάτωση της επιδερμίδας.
- Για την παραγωγή χρωστικών ουσιών. Αυτές οι ουσίες παράγουν υλικά τα οποία λειτουργούν σαν πρόδρομες ουσίες της βιταμίνης Α, και σαν αντιοξειδωτικά συστατικά στη βιομηχανία χρωμάτων.
- Για τον καθαρισμό της ατμόσφαιρας κοντά σε βιομηχανικές περιοχές.
- Για τον καθαρισμό υδάτων σε λίμνες και ποτάμια που καταλήγουν τα απόβλητα διαφόρων εργοστασίων και πόλεων.
- Ορισμένα φύκη χρησιμοποιούνται σαν βιοδείκτες, δείχνουν δηλαδή την ποιότητα του νερού.
- Ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοκαυσίμων και για νέες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ όταν καίγονται παράγουν ηλεκτρική ενέργεια [15,30,31,32].

Κεφάλαιο 3 Συστήματα καλλιέργειας φυκών

3.1 Γενικά

Τα πρώτα συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών άρχισαν να αναπτύσσονται την δεκαετία του 1950, με αρχικό σκοπό την εκμετάλλευσή τους σαν πηγή πρωτεΐνης. Περίπου 20 χρόνια αργότερα άρχισε να διερευνάται η πιθανότητα η βιομάζα μικροφυκών να χρησιμοποιηθεί και ως πηγή ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια η παραγωγή βιομάζας από μικροφύκη έχει αναπτυχθεί αρκετά, αν και έχει ακόμα πολλά περιθώρια περαιτέρω ανάπτυξης, που θα φέρει επανάσταση σε τομείς όπως η φαρμακευτική και η διατροφή.

Για να γίνει αυτό, είναι σημαντικό το σύστημα καλλιέργειάς τους να είναι οικονομικά αποδοτικό, και να ικανοποιεί κάποιες άλλες συνθήκες, όπως η επαρκής σύνδεση της καλλιέργειας με νερό, η παροχή θρεπτικών συστατικών και οι σωστές κλιματολογικές και γεωφυσικές συνθήκες.

Σημαντική επίσης είναι η ταχύτητα παραγωγής βιομάζας. Είναι σαφές πως θα υπάρχει μεγαλύτερη παραγωγή βιομάζας αν η φωτοσύνθεση γίνεται όλο το εικοσιτετράωρο, αντι για τις φωτεινές μόνο ώρες. Γι' αυτό είναι απαραίτητη η τροφοδοσία των μικροφυκών με ηλιακή ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες είναι η θερμοκρασία, ιδανικά μεταξύ 20 και 30 βαθμών Κελσίου, και η ανταλλαγή αερίων.

Τα συστήματα καλλιέργειας διαφέρουν αρκετά ανάμεσα σε μικροφύκη και μακροφύκη, ενώ διαφορές εντοπίζονται και ανάμεσα στα είδη μικροφυκών, καθώς έχουν διαφορετικές ανάγκες σε διάφορα συστατικά.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες συστημάτων καλλιέργειας, τα ανοικτά και τα κλειστά συστήματα, και η επιλογή τους είναι το πρώτο πράγμα που πρέπει να προσεχθεί στην καλλιέργεια μικροφυκών. Μετά από την επιλογή γίνεται σχεδιασμός του συστήματος ανάλογα το είδος μικροφυκών, ενώ τα συστήματα εγκαθίστανται τόσο σε χερσαίο έδαφος όσο και σε υδάτινο [33,34].

Εκτός από τα παραπάνω, ιδιαίτερα σημαντική είναι και η σωστή επιλογή των μικροφυκών που θα καλλιεργηθούν, ώστε να είναι αποδοτικότερη η καλλιέργεια, με το μικρότερο δυνατό κόστος. Σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν είναι:

- Η παραγωγικότητα βιομάζας.
- Η περιεκτικότητα σε διάφορα θρεπτικά στοιχεία.
- Η αντοχή σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Η ικανότητα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα.
- Η ευκολία διαχωρισμού της παραγόμενης βιομάζας.
- Η πιθανότητα επιπλέον χρήσεων [14,34,35].

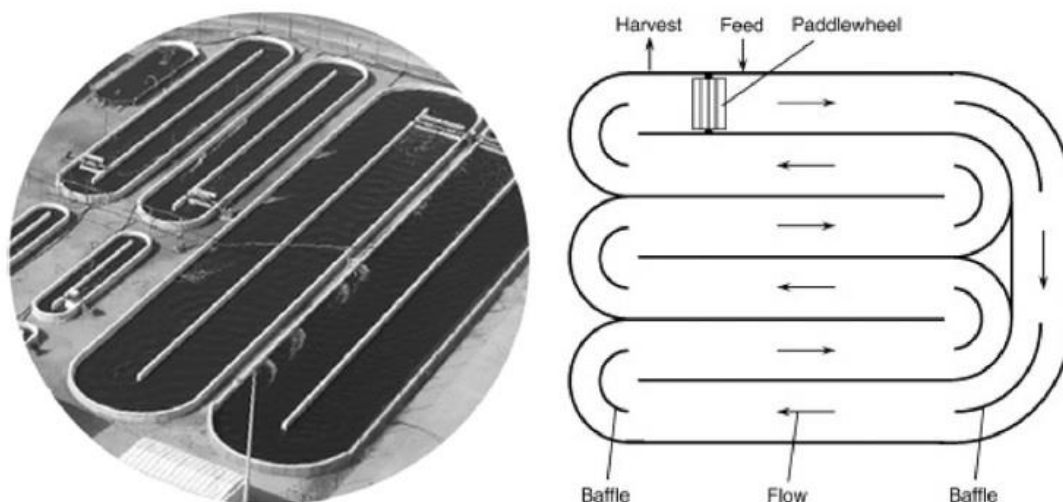
3.2 Ανοικτά συστήματα

Τα ανοικτά συστήματα είναι τα πρώτα που κατασκευάστηκαν για μαζική καλλιέργεια φυκών. Έγιναν ιδιαίτερα δημοφιλή από την αρχή, καθώς έχουν ευκολίες στην κατασκευή και έχουν λιγότερες απαιτήσεις από τα κλειστά, άρα είναι και πιο οικονομικά, ειδικά τα θαλάσσια[36].

Ανοικτού τύπου καλλιέργειες αναπτύσσονται σε φυσικά συστήματα, όπως λίμνες και θάλασσες, ή σε τεχνητές δεξαμενές.

Τα ανοικτά συστήματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. **Ελλειψοειδείς δεξαμενές**, όπου μετακινούμενα μηχανικά συστήματα προκαλούν συνεχόμενη ανάδευση.
2. **Κυκλικές δεξαμενές**, όπου μια νοητή κινούμενη ακτίνα προκαλεί συνεχόμενη ανάδευση.
3. **Επικλινείς δεξαμενές**, όπου μέσω της άντλησης και στη συνέχεια της βαρύτητας επιτυγχάνεται η ανάδευση.



Σχήμα 3.1: Σχεδιάγραμμα ανοικτής δεξαμενής [37]

Στις καλλιέργειες ανοικτού τύπου, τη μεγαλύτερη σημασία έχει το σύστημα της ανάδευσης, το οποίο αποτρέπει τη δημιουργία συσσωμάτωσης και καθίζησης των μικροφυκών, και βοηθά στην ομογενοποίηση του υποστρώματος, άρα και στην καλύτερη αξιοποίηση του φωτός [38].

Εκτός από πλεονεκτήματα όμως, οι καλλιέργειες ανοικτού τύπου έχουν ορισμένα μειονεκτήματα. Τα μικροφύκη βρίσκονται εκτεθειμένα στο

περιβάλλον, ευάλωτα σε ακραίες καιρικές συνθήκες, ενώ την ίδια ώρα είναι πιθανό να επιμολυνθούν από άλλα είδη μικροφυκών, βακτηρίων ή άλλων μικροοργανισμών.

Τέτοιες επιμολύνσεις διαφοροποιούν τη σύσταση των μικροφυκών, υποβαθμίζουν την ποιότητα τους, και μπορεί να μειώσουν την παραγωγή καθώς ταυτόχρονα με το προσδοκώμενο είδος μικροφύκης θα παραχθούν και άλλα. Έχουν υπάρξει περιπτώσεις πολύ έντονης επιμόλυνσης όπου η καλλιέργειες απέτυχαν, είτε λόγω εμφάνισης παρασιτικών ασθενειών, είτε λόγω επικράτησης άλλου είδους. Τέλος, αυτές οι επιμολύνσεις μπορεί να αποτελέσουν κίνδυνο για την υγεία των καταναλωτών.

Ένα ακόμα πρόβλημα σε τεχνητές δεξαμενές ανοικτού τύπου είναι η εξάτμιση του νερού, καθώς αυτό πρέπει διαρκώς να ανανεώνεται. Σε περιπτώσεις υψηλής εξάτμισης αυξάνεται η συγκέντρωση αλάτων στο νερό, η οποία μετά από κάποιο λορίο δρα ανασταλικά στην ανάπτυξη των μικροφυκών [35,39,40].

Ένας τρόπος αντιμετώπισης των προβλημάτων αυτών είναι ο σχεδιασμός ειδικού συστήματος, διαφορετικών συνθηκών για κάθε είδος μικροφυκών. Παραδείγματος χάριν, μικροφύκη με υψηλές απαιτήσεις σε αλατότητα δεν κινδυνεύουν από την παρουσία άλλων ειδών. Σημαντικό είναι επίσης να επιλέγονται μικροφύκη με υψηλό ρυθμό ανάπτυξης, ώστε να μην μειονεκτήσουν έναντι άλλων ειδών [41,42].

Τα συστήματα αυτά είναι είτε κυκλικές δεξαμενές, είτε υδατοδιάδρομοι ή επιμήκεις λεκάνες. Οι δεξαμενές αυτές αποτελούν τα συστήματα που προτιμώνται περισσότερο σε τέτοιου τύπου καλλιέργειες. Πρόκειται για ένα κλειστό κύκλωμα καναλιών ανακύκλωσης με ωειδές σχήμα στο οποίο παρέχεται με συνεχή τρόπο ανάμειξη και κυκλοφορία. Οι δεξαμενές αυτές κατασκευάζονται συνήθως από σκυρόδεμα, το οποίο επενδύεται από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Οι διαστάσεις τους κυμαίνονται μεταξύ 10-100 μέτρα μήκος, 1-10 μέτρα πλάτος και 10-50 εκατοστά βάθος. Στις δεξαμενές αυτές η ανάδευση επιτυγχάνεται μέσω ενός τροχού με πτερύγια, ενώ στις κυκλικές δεξαμενές μέσω ενός κινούμενου βραχίονα [35,43].



Σχήμα 3.2: Επιμήκης λεκάνες στη Cyanotech, Χαβάη [44]

Το βάθος των δεξαμενών αυτών είναι υψίστης σημασίας για την απόδοση του συστήματος. Αν είναι πολύ μεγάλο, το ηλιακό φως δεν θα μπορεί να φτάσει στον βυθό, ενώ αν είναι πολύ μικρό θα αλλάζει εύκολα η συγκέντρωση των ιόντων με την εξάτμιση του νερού. Το ιδανικό βάθος εξαρτάται επίσης από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, και το είδος μικροφύκης. Απαραίτητη είναι και η επαρκής αναπλήρωση του διοξειδίου του άνθρακα που χάνεται στην ατμόσφαιρα [41].

Οι καλλιέργειες ανοικτού τύπου όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό ευδοκιμούν σε χώρες με καλό κλίμα και αρκετή ηλιοφάνεια, όπως η Ελλάδα, ενώ είναι περιορισμένες σε κρύες χώρες, όπως στις Σκανδιναβικές.

Οι μεγαλύτερες βιομηχανικές εγκαταστάσεις μικροφυκών σήμερα χρησιμοποιούν συστήματα ανοικτού τύπου για παραγωγή βιομάζας. Κύριοι λόγοι είναι το χαμηλό κόστος επένδυσης και συντήρησης, και το γεγονός ότι η παρακολούθηση για τον έλεγχο της βιομάζας και των θρεπτικών συστατικών γίνεται σε εβδομαδιαία βάση [37,43].

3.3 Κλειστά συστήματα

Τα κλειστά συστήματα σχεδιάστηκαν για την αντιμετώπιση των προβλημάτων στα ανοικτά συστήματα. Στα συστήματα αυτά, τα φύκη καλλιεργούνται σε κλειστούς χώρους, από απλές γυάλινες ή πλαστικές φιάλες, μέχρι πολύπλοκες κατασκευές που ονομάζονται φωτοβιοαντιδραστήρες.



Σχήμα 3.3: Αυλωτός φωτοβιοαντιδραστήρας για την παραγωγή υψηλής αξίας συμπληρωμάτων διατροφής από μικροφύκη (IGV-Biotech). [13]

Στα κλειστά συστήματα τα φύκη προστατεύονται από ακραία καιρικά φαινόμενα που θα μπορούσαν να απειλήσουν την παραγωγή, καθώς δεν έρχονται σε επαφή με τις εξωτερικές συνθήκες. Οι στεγασμένες καλλιέργειες πραγματοποιούνται μέσα σε φωτοβιοαντιδραστήρες, με συνθήκες πλήρως ελεγχόμενες. Οι φωτοβιοαντιδραστήρες χρησιμοποιούνται περισσότερο για ερευνητικούς σκοπούς σε μικρή κλίμακα ή για την παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας καθώς αυξάνεται αισθητά το κόστος παραγωγής και συντήρησης.

Εκτός από τις στεγασμένες καλλιέργειες κλειστού τύπου υπάρχουν και οι υπαίθριες καλλιέργειες, όπου παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η ένταση του φωτός δεν μπορούν να ελεγχθούν.

Τέλος, υπάρχουν κλειστά συστήματα από πλεξιγκλάς, με κατασκευή παρόμοια με των θερμοκηπίων. Στα συστήματα αυτά είναι πιο εύκολο να ελεγχθούν οι συνθήκες καλλιέργειας, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα να καλλιεργηθούν περισσότερα είδη μικροφυκών [45,46,47].

3.3.1 Στατικές-συνεχείς καλλιέργειες

Στατικές ονομάζονται οι καλλιέργειες που έχουν σταθερό ρυθμό ανάπτυξης, και πραγματοποιούνται χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση καθ'όλη τη διάρκεια τους. Κυρίως χρησιμοποιούνται για συντήρηση ή περαιτέρω έρευνα στον τομέα της παραγωγής βιομάζας μικροφυκών. Οι καλλιέργειες τέτοιου

τύπου λαμβάνουν χώρα σε δοκιμαστικούς σωλήνες, κωνικές φιάλες, σάκους πολυαιθυλενίου και άλλα.

Η διαδικασία μεταφοράς ζωντανών κυττάρων στο μέσο ανάπτυξης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα της καλλιέργειας, ενώ μεγάλης σημασίας επίσης είναι ο τρόπος και η ποσότητα της απόθεσης, και οι κατάλληλες εγκαταστάσεις.

Ο τρόπος αύξησης των φυκών με το χρόνο συνδέεται μη γραμμικά με το χρόνο και εκφράζεται από την σχέση :

$$\mu = \frac{\ln \left(\frac{N_1}{N_0} \right)}{t_1 - t_0} \quad , \text{ Εξίσωση 3.1}$$

όπου N είναι μια παράμετρος, π.χ. αριθμός κυττάρων, συγκέντρωση χλωροφύλλης a , οπτική πυκνότητα κ.λπ.,

N_0 η παράμετρος στο χρόνο $t = t_0$

N_1 η παράμετρος στο χρόνο $t = t_1$

Ο χρόνος που απαιτείται για το διπλασιασμό της καλλιέργειας δίνεται από τη σχέση :

$$G = \frac{\ln 2}{\mu} \quad , \text{ Εξίσωση 3.2}$$

Συνεχείς ονομάζονται οι καλλιέργειες όπου αφαιρούνται κατά διαστήματα ποσότητες καλλιέργειας, οι οποίες αντικαθίστανται από θρεπτικά συστατικά, οδηγώντας έτσι σε μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης.

Χρησιμοποιούνται συνήθως σε πειραματικές εγκαταστάσεις για χρήση στη φαρμακοβιομηχανία, και βοηθούν τη μετάβαση από μια μικρότερη σε μια μεγαλύτερης κλίμακας καλλιέργεια [12,15].

3.3.2 Φωτοβιοαντιδραστήρες

Το μεγαλύτερο μέρος των καλλιεργειών κλειστού τύπου πραγματοποιείται σε κλειστούς περιέκτες, που ονομάζονται **φωτοβιοαντιδραστήρες**. Οι φωτοβιοαντιδραστήρες σχεδιάστηκαν για την αντιμετώπιση των προβλημάτων της μόλυνσης και της εξάτμισης που εμφανίζονται στα ανοικτά συστήματα. Τα πιο διαδεδομένα συστήματα φωτοβιοαντιδραστήρων είναι οι αυλωτοί ή σωληνοειδείς και οι επίπεδοι.

Τα σχήματα των φωτοβιοαντιδραστήρων μπορεί να ποικίλλουν, ενώ κατασκευάζονται από διαφανή υλικά, συνήθως γυαλί ή πλαστικό. Υπάρχουν φωτοβιοαντιδραστήρες επίπεδοι, κατακόρυφοι ή κεκλιμένοι που μοιάζουν με ηλιακούς συλλέκτες, κυλινδρικοί με επιμήκης αγωγούς, και ελικοειδούς μορφής [17,45,46,47].

Ο σχεδιασμός των φωτοβιοαντιδραστήρων είναι δύσκολος, καθώς απαιτεί καλή γνώση φυσικής και βιολογίας. Τα υποσυστήματα από τα οποία αποτελείται ένας φωτοβιοαντιδραστήρας είναι:

- Σύστημα φωτισμού.
- Σύστημα εμπλουτισμού CO₂.
- Σύστημα ανάδευσης.
- Σύστημα απομάκρυνσης αερίων.
- Σύστημα θέρμανσης/ψύξης.
- Σύστημα παροχής θρεπτικών συστατικών.

Οι φωτοβιοαντιδραστήρες παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.

3.4 Σύγκριση μεταξύ συστημάτων παραγωγής βιομάζας μικροφυκών

Τα διάφορα συστήματα παραγωγής βιομάζας που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα.

Τα ανοικτά συστήματα έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, ευκολία στην συντήρηση και τον καθαρισμό, δεν χρειάζονται καθημερινή παρακολούθηση και δεν καταλαμβάνουν καλλιεργήσιμες εκτάσεις γης, καθώς τα μικροφύκη μπορούν να αναπτυχθούν σε διάφορα μέρη.

Από την άλλη, οι καλλιέργειες είναι απροστάτευτες από τις εξωτερικές συνθήκες, και από ενδεχόμενες μολύνσεις από άλλα μικροφύκη, μικροοργανισμούς ή παράσιτα.

Οι φωτοβιοαντιδραστήρες έχουν υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, ενώ δεν μπορούν να κατασκευαστούν σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας. Έχουν ωστόσο αρκετά θετικά στοιχεία σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών, όπως:

- Υψηλή απόδοση ανάπτυξης της καλλιέργειας.
- Ευκολία στην εγκατάσταση.
- Καλύτερος έλεγχος των συνθηκών.

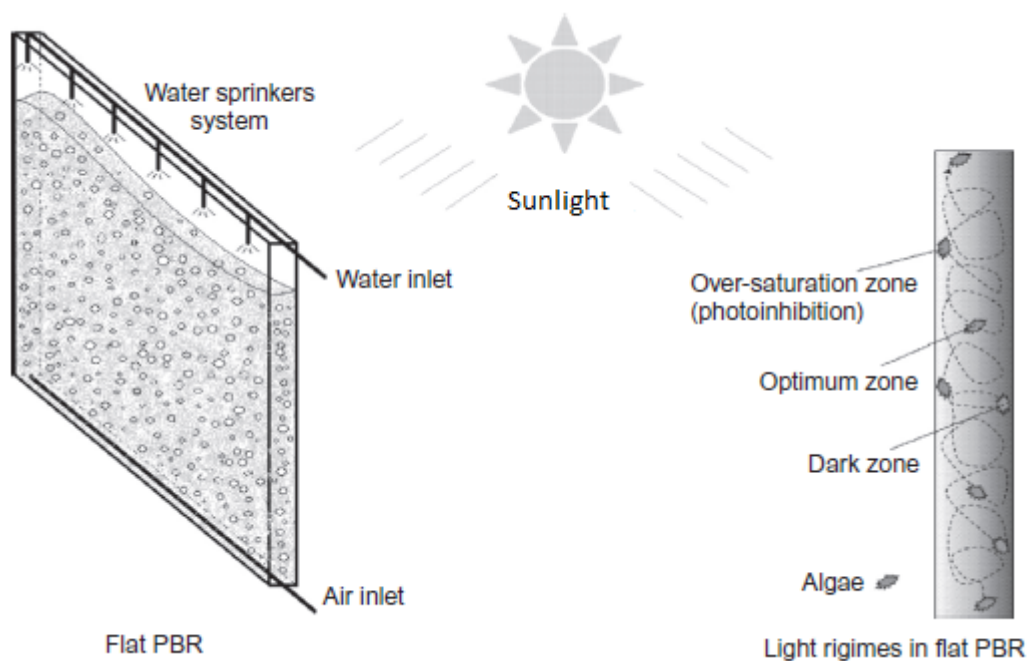
- Δυνατότητα καλλιέργειας διαφορετικών τύπων μεταβολισμού.
- Καλύτερος έλεγχος κίνησης των αερίων.
- Περιορισμός της εξάτμισης του νερού.
- Καλύτερη θερμική κατανομή.
- Μεγαλύτερος λόγος επιφάνειας/όγκου.
- Προστασία από μολύνσεις.

Ένας κλειστός φωτοβιοαντιδραστήρας παρουσιάζει έως και 13 φορές μεγαλύτερη παραγωγικότητα συγκριτικά με μία επιμήκη λεκάνη, επομένως θα παράγει περισσότερη βιομάζα ανά επιφάνεια, με ίδια ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα [13,25,48,52].

Κεφάλαιο 4 Συνθήκες καλλιέργειας

4.1 Γενικά

Η επιτυχία της καλλιέργειας και ο ρυθμός ανάπτυξης των μικροφυκών εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες καλλιέργειας.



Σχήμα 4.1: Παράδειγμα φωτοβιοαντιδραστήρα που λειτουργεί σε εξωτερικό χώρο. [53]

Οι σημαντικότεροι παράγοντες σε ένα σύστημα καλλιέργειας είναι η ηλιακή ενέργεια, τα σωστά θρεπτικά συστατικά και η θερμοκρασία. Δευτερεύοντες είναι το pH, η αλατότητα, το σύστημα ανάδευσης, ο επαρκής αερισμός και η παρουσία ή όχι άλλων μικροοργανισμών. Οι ιδανικές συνθήκες καλλιέργειας διαφέρουν ανάλογα με το είδος μικροφυκών και τον μεταβολισμό που αυτό έχει.

4.2 Κατηγορίες καλλιέργειών

Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι συνθηκών καλλιέργειας μικροφυκών:

- **Φωτοτροφική καλλιέργεια:** Φωτοτροφική είναι η καλλιέργεια στην οποία τα μικροφύκη χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας την ηλιακή ακτινοβολία, και ως πηγή άνθρακα το διοξείδιο του άνθρακα. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στα υπαίθρια συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών μεγάλης κλίμακας, καθώς δεν επιτρέπει εύκολα μολύνσεις.
- **Ετερότροφη καλλιέργεια:** Η καλλιέργεια στην οποία τα μικροφύκη χρησιμοποιούν οργανικό άνθρακα, τόσο για ενέργεια όσο και για πηγή άνθρακα. Είναι ο τύπος καλλιέργειας με τη μεγαλύτερη παραγωγή βιομάζας, καθώς δίνει λύση στο πρόβλημα του φωτισμού, επομένως δεν διακόπτεται καθόλου η φωτοσύνθεση των μικροφυκών. Ωστόσο, επειδή είναι αρκετά ευάλωτη σε μολύνσεις, δεν προτιμάται ιδιαίτερα.
- **Μιξότροφη καλλιέργεια:** Είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός φωτοτροφικών και ετερότροφων καλλιέργειών, καθώς τα μικροφύκη υποβάλλονται σε φωτοσύνθεση με ταυτόχρονη χρήση οργανικών ουσιών και ανόργανου άνθρακα. Σε αυτές τις καλλιέργειες το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται μέσω της αναπνοής μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ νέου σαν πηγή άνθρακα. Οι μιξότροφες καλλιέργειες χρησιμοποιούνται σπάνια, και κατά κύριο λόγο για ερευνητικούς σκοπούς.
- **Φωτοετερότροφη καλλιέργεια:** Στην φωτοετερότροφη καλλιέργεια τα μικροφύκη απαιτούν φως για την χρησιμοποίηση οργανικών ουσιών ως πηγή άνθρακα. Απαιτείται ταυτόχρονη χρήση σακχάρων και φωτός για την παραγωγή βιομάζας μικροφυκών. Η φωτοετερότροφη καλλιέργεια, όπως και η μιξότροφη, χρησιμοποιείται σπάνια.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η ετερότροφη καλλιέργεια έχει μεγαλύτερη παραγωγικότητα από τα υπόλοιπα είδη καλλιέργειών. Ωστόσο, η χρησιμοποίηση άνθρακα σαν πηγή ενέργειας, που ανεβάζει σημαντικά το κόστος, και τα προβλήματα μολύνσεων που αντιμετωπίζει, την καθιστά ασύμφορη.

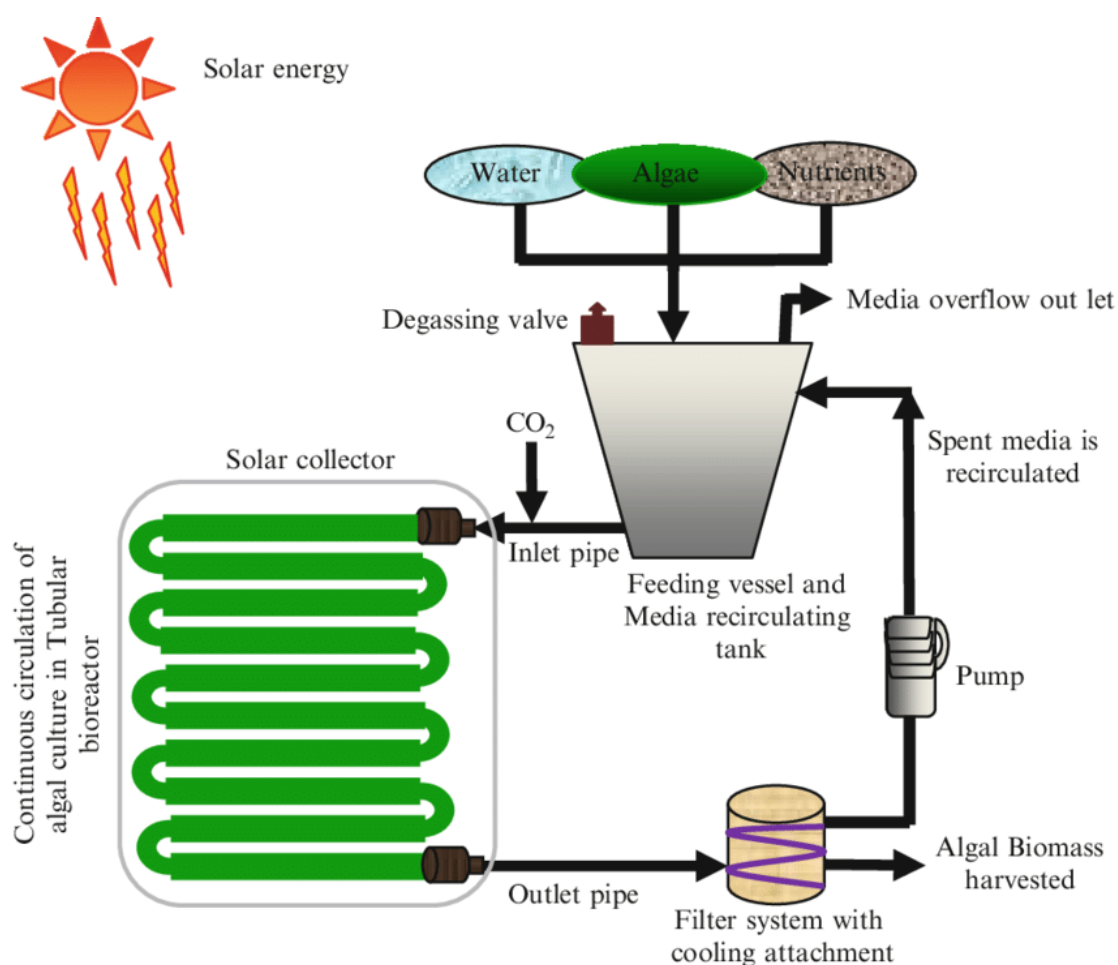
Έτσι, ο πιο διαδεδομένος τύπος καλλιέργειας είναι η φωτοτροφική καλλιέργεια, καθώς το χαμηλό κόστος της, και η μειωμένη πιθανότητα μόλυνσης σε σχέση με τις υπόλοιπες, την καθιστά ως πλέον κατάλληλη για την παραγωγή βιομάζας μικροφυκών [13,24,54,55].

4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των μικροφυκών

4.3.1 Φως

Η πηγή και η ένταση του φωτός είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας στην ανάπτυξη των μικροφυκών, καθώς είναι απαραίτητος για την διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Ωστόσο, ο ανεξέλεγκτος φωτισμός μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα στην ανάπτυξη της καλλιέργειας.

Στις καλλιέργειες ανοικτού τύπου, όπου πηγή φωτός είναι ο ήλιος, οι συνθήκες δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν. Το χειμώνα και κατά τη διάρκεια της νύχτας δεν υπάρχει φωτισμός, οπότε η ανάπτυξη των μικροφυκών επιβραδύνεται.



Σχήμα 4.2: Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας όπως προσπίπτει στην επιφάνεια ενός φωτοβιοαντιδραστήρα. [56]

Τα διάφορα είδη μικροφυκών αξιοποιούν καλύτερα, διαφορετικά μήκη κύματος του φωτός. Το φάσμα που αξιοποιούν τα μικροφύκη για τη φωτοσύνθεσή τους κυμαίνεται από 400 έως 700 nm. [50],[52]

Ο ρυθμός ανάπτυξης διαφέρει ανάλογα με το είδος μικροφύκους και την πυκνότητα της καλλιέργειας, αλλά συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 200 – 400 $\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ [56,57].

4.3.2 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι ο δεύτερος πιο σημαντικός παράγοντας στην ανάπτυξη των μικροφυκών.

Τα περισσότερα μικροφύκη αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες από 20 έως 30 βαθμούς Κελσίου, παρόλο που υπάρχουν ορισμένα είδη που αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες μέχρι και τους 40 °C ή άλλα που αντέχουν σε θερμοκρασίες έως 15 °C.

Όπως εύκολα αντιλαμβανόμαστε, η εύρεση της ιδανικής θερμοκρασίας για κάθε είδος μικροφυκών, αλλά και η διατήρησή της, είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επίτευξη του ιδανικού ρυθμού παραγωγής βιομάζας. Σε ορισμένα μικροφύκη, αύξηση της θερμοκρασίας ακόμα και κατά 2 °C μπορεί να προκαλέσει μεγάλη ζημιά στην παραγωγή.

Τα κλειστά συστήματα καλλιέργειας έχουν σύστημα ψύξης, το οποίο ενεργοποιείται σε περίπτωση ανάγκης, ενώ στα ανοικτά συστήματα η ψύξη επιτυγχάνεται μέσω εξάτμισης. Η υπερβολική ψύξη συνήθως μειώνει το ρυθμό ανάπτυξης των μικροφυκών, δεν υπάρχει όμως κατάπτωση της καλλιέργειας εκτός και αν παγώσει το νερό [58,59,60,61].

4.3.3 pH και αλατότητα

Τα μικροφύκη αναπτύσσονται και σε αλμυρά και σε γλυκά νερά, ανάλογα με το είδος τους. Ορισμένα είδη αντέχουν σε μεγάλες συγκεντρώσεις αλάτων, χωρίς αυτές να συμβάλλουν στην ανάπτυξη τους, ενώ άλλα είδη δεν μπορούν να αναπτυχθούν σε τέτοιες συνθήκες. Γενικά, κάθε είδος έχει μια διαφορετική ιδανική τιμή συγκέντρωσης αλάτων.

Τα μικροφύκη συνήθως αναπτύσσονται με pH 7 έως 9, αν και υπάρχουν ορισμένα είδη που αναπτύσσονται σε πιο ακραίες τιμές.

Υπάρχουν διάφορες διεργασίες που μπορούν να γίνουν για να αλλάξει η τιμή του pH μιας καλλιέργειας, ωστόσο απότομες αλλαγές μπορεί να προκαλέσουν καταστροφές. Γι'αυτό το λόγο συνήθως χρησιμοποιούνται ρυθμιστικά διαλύματα.

Σε πολλές καλλιέργειες προτιμώνται μικροφύκη που αντέχουν σε ακραίες τιμές αλατότητας ή pH, καθώς είναι πολύ δύσκολο να μολυνθούν και να κυριαρχήσει κάποιος άλλος μικροοργανισμός [32,46,62,63].

4.3.4 Θρεπτικά συστατικά

Όπως τα περισσότερα ανώτερα φυτά, έτσι και τα μικροφύκη χρειάζονται ορισμένα θρεπτικά συστατικά για την σωστή ανάπτυξη τους. Τα κυριότερα στοιχεία που απαιτούνται είναι ο άνθρακας (C), το άζωτο (N) και ο φώσφορος (P). Σε ορισμένες περιπτώσεις χρειάζονται ακόμα το πυρίτιο (Si), το κάλιο (K), το θείο (S), το σίδηρο (Fe), το μαγνήσιο (Mg), το ασβέστιο (Ca) και μερικά ακόμα μέταλλα.

Όπως με όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των μικροφυκών, έτσι και οι ποσότητες και αναλογίες των θρεπτικών συστατικών διαφέρουν ανάλογα με το είδος του μικροφυκού που καλλιεργείται.

4.4 Επίδραση του φωτός στα συστήματα καλλιέργειας

4.4.1 Ο ήλιος σαν πηγή φωτός

Η κυρίαρχη πηγή φωτός σε καλλιέργειες μικροφυκών είναι το ηλιακό φως, καθώς παρέχεται ελεύθερα σε μεγάλες ποσότητες χωρίς κανένα κόστος. Την ίδια ώρα, το ηλιακό φως παρέχει το πλήρες φάσμα της φωτεινής ενέργειας, και με τη χρήση ενός φίλτρου υπεριώδους ακτινοβολίας επιλέγεται το κατάλληλο μήκος κύματος για το κάθε είδος μικροφυκού.

Ωστόσο, δεν έχουν όλα τα μέρη του πλανήτη την ίδια αφθονία σε ηλιακό φως. Ορισμένα μέρη έχουν πολύ μικρή περίοδο ηλιοφάνειας μέσα στο χρόνο, ενώ άλλα όπως η Ελλάδα έχουν μεγάλη. Επίσης, η ένταση του ηλιακού φωτός διαφέρει ανάλογα με την ώρα της ημέρας, και την εποχή.

4.4.2 Τεχνητές πηγές φωτός

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων από την ελλιπή ηλιακή ακτινοβολία, δημιουργήθηκαν οι τεχνητές πηγές φωτός. Η πηγή φωτός πρέπει να είναι αποδοτική, ανθεκτική και αξιόπιστη ώστε να επιτυγχάνεται ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της καλλιέργειας.

Για την καλλιέργεια μικροφυκών, δύο επιλογές που χρησιμοποιούνται είναι οι λαμπτήρες LED και η διέγερση μέσω οπτικών ινών.

Οι **λαμπτήρες LED** έχουν μια στενή φασματική εκπομπή φωτός στα 20-30 nm. Το φάσμα αυτό ταιριάζει στις ανάγκες της φωτοσύνθεσης, ενώ έχει παρατηρηθεί ότι διαφορετικό χρώμα καλύπτει καλύτερα τις ανάγκες συγκεκριμένων ειδών μικροφυκών. Παράλληλα, είναι αρκετά μικρά για να

χωράνε σε όλα τα είδη φωτοβιοαντιδραστήρων, έχουν αρκετά μεγάλο κύκλο ζωής, μεγάλη αντοχή και παράγουν πολύ μικρές ποσότητες ενέργειας.

Οι **οπτικές ίνες** έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την μετάδοση της ακτινοβολίας από άκρη σε άκρη, ενώ αν τροποποιηθούν μηχανικά μετατρέπονται σε **οπτικές ίνες πλευρικού φωτισμού**, οι οποίες ενισχύουν σε μεγάλο βαθμό την ένταση του φωτός, μέσω της ομοιόμορφης κατανομής του. Παράλληλα οι οπτικές ίνες πλευρικού φωτισμού με την κατάλληλη διέγερση μπορούν δώσουν ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος για εσωτερική πηγή φωτός σε φωτοβιοαντιδραστήρες. [35]

4.4.3 Ανάπτυξη τεχνητών πηγών φωτός στην καλλιέργεια μικροφυκών

Η πηγή του φωτός, και η ένταση της, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα των φωτοβιοαντιδραστήρων. Υπάρχουν όμως ορισμένα προβλήματα τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν.

Η ένταση του φωτός μέσα στο σωλήνα αρχίζει να μειώνεται πολύ γρήγορα, είτε λόγω της πυκνότητας των φυκών είτε λόγω διαφόρων στρωμάτων που σχηματίζονται. Την ίδια ώρα, οι σωλήνες αυτοί έχουν μικρή διάμετρο, το οποίο τελικά δυσκολεύει την τοποθέτηση τεχνητών πηγών φωτός στην καλλιέργεια, καθώς εκλύεται θερμότητα.

Η παρακάτω εξίσωση συνδέει την ένταση του φωτός με την απόσταση των τοιχωμάτων και τις συγκεντρώσεις των κυττάρων του παραγόμενου προϊόντος :

$$\frac{I_L}{I_0} = e^{-\gamma L} \quad , \text{Εξίσωση 4.1}$$

Όπου I_L είναι η ένταση του φωτός σε μήκος L ,

I_0 η πραγματική ένταση,

Γ η θολερότητα.

Παρόλο που έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί αρκετοί φωτοβιοαντιδραστήρες με διαφορετικούς τρόπους φωτισμού ώστε να ξεπεραστούν τα προβλήματα αυτά, υπάρχουν ακόμα σημαντικά εμπόδια όπως το υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας και η κλιμάκωση μεγέθους για μεγαλύτερη παραγωγή [13,64].

Κεφάλαιο 5 Φωτοβιοαντιδραστήρες για καλλιέργεια μικροφυκών

5.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, ένας φωτοβιοαντιδραστήρας είναι ένα κλειστό, φωτεινό δοχείο το οποίο έχει σχεδιαστεί για ελεγχόμενη παραγωγή βιομάζας. Οι φωτοβιοαντιδραστήρες είναι κλειστά συστήματα, δηλαδή δεν έχουν άμεση ανταλλαγή αερίων και ρύπων με το περιβάλλον. Παρά το κόστος τους, έχουν πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των ανοικτών συστημάτων, όπως:

- Ελαχιστοποίηση των μολύνσεων της καλλιέργειας.
- Καλύτερος έλεγχος των συνθηκών που επικρατούν.
- Λιγότερη απώλεια σε διοξείδιο του άνθρακα.
- Εμποδίζουν την γρήγορη εξάτμιση του νερού.
- Επιτρέπουν υψηλότερες συγκεντρώσεις κυττάρων.
- Επιτρέπουν την παραγωγή σύνθετων βιοφαρμακευτικών προϊόντων.

Κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβιοαντιδραστήρα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν ορισμένα σημεία, όπως:

- Ο φωτοβιοαντιδραστήρας πρέπει να είναι κατάλληλος για την καλλιέργεια διαφόρων ειδών μικροφυκών.
- Ο σχεδιασμός του πρέπει να εξασφαλίζει τον ομοιόμορφο φωτισμό στην επιφάνεια της καλλιέργειας, καθώς και τη γρήγορη μεταφορά οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα.
- Ο σχεδιασμός πρέπει να αποτρέπει ή να ελαχιστοποιεί τη μόλυνση και τη ρύπανση του φωτοβιοαντιδραστήρα.
- Πρέπει να έχει ένα ελάχιστο μή φωτιζόμενο μέρος. [65]

5.2 Παράμετροι σχεδίασης και λειτουργίας φωτοβιοαντιδραστήρα

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την ανάπτυξη και την λιπιδική περιεκτικότητα (lipid content) της άλγης. Ορισμένοι από αυτούς είναι ο φωτισμός, η ανάμιξη, η παροχή νερού, η παροχή διοξειδίου του άνθρακα, η θερμοκρασία, η υγρασία, το pH και η παροχή θρεπτικών ουσιών. Η συντήρηση και ο καθαρισμός του φωτοβιοαντιδραστήρα παίζει επίσης σημαντικό ρόλο, καθώς αποτρέπει πιθανές μολύνσεις της καλλιέργειας.

5.2.1 Φωτισμός- Απορρόφηση φωτός

Ένας βέλτιστος αντιδραστήρας ενισχύει την ένταση και την διεύθυνση του φωτός, καθώς και το μήκος κύματος του και τη συχνότητα της κυτταρικής έκθεσης στο φως.

Το επίπεδο της έντασης του φωτός είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για την καλλιέργεια, καθώς σε ένα ορισμένο επίπεδο η άλγη αντιμετωπίζει κορεσμό, μετατρέποντας την περίσσεια ενέργεια σε θερμότητα. Ο κορεσμός αυτός μπορεί να μετριαστεί από τη χωρική αραίωση του φωτός, δηλαδή την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας σε μεγαλύτερη επιφάνεια φωτοσύνθεσης. Η αραίωση αυτή μειώνει επίσης την αμοιβαία σκίαση των κυττάρων στην καλλιέργεια, το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης. Γι αυτό το λόγο, προτείνεται να μεγιστοποιείται η αναλογία της επιφάνειας προς τον όγκο.

Η γεωμετρία του αντιδραστήρα επίσης επηρεάζει την κατανομή του φωτός. Σε ένα σωληνοειδή αντιδραστήρα, για παράδειγμα, η κλίση του φωτός καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τη διάμετρο του σωλήνα και την πυκνότητα της βιομάζας στη μέση. Η πυκνότητα της βιομάζας επηρεάζει τόσο την ένταση του φωτός όσο και την διεύθυνση του.

Το μήκος κύματος του φωτός είναι ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας, καθώς έρευνες έχουν δείξει ότι τα φυτά μεγαλώνουν διαφορετικά όταν εκτίθενται σε διαφορετικά χρώματα φωτός. Η βελτιστοποίηση του μήκους κύματος του φωτός είναι πιο δύσκολη σε συστήματα που φωτίζονται από φυσικό φως σε σχέση με το τεχνητό φως. Υπολογίζεται ότι περισσότερο από το 50% της ηλιακής ακτινοβολίας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την φωτοσύνθεση.

Οι κύκλοι φωτός και σκότους επηρεάζουν με τη σειρά τους έντονα την ανάπτυξη των φυκών. Το φυσικό φως υπόκειται σε αλλαγές ανάλογα με την γεωγραφία, την εποχή, την ώρα της ημέρας και τις καιρικές συνθήκες. Όλοι οι αντιδραστήρες που λειτουργούν με φυσικό φως έχουν απουσία φωτός κατά τη διάρκεια της νύχτας, μειώνοντας την παραγωγή βιομάζας μέχρι και 25%.

Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, χρησιμοποιούνται ως κύρια ή συμπληρωματική πηγή φωτός οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED – Light-emitting diodes). Η χρήση LED αυξάνει το λειτουργικό κόστος, το οποίο όμως αντισταθμίζεται από την μεγάλη αύξηση της παραγωγικότητας [66,67].

5.2.2 Θερμοκρασία

Η σωστή θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα σημαντική στην καλλιέργεια μικροφυκών. Παρόλο που τα φύκη είναι σε θέση να αναπτυχθούν σε ποικίλες θερμοκρασίες, η βέλτιστη ανάπτυξη τους περιορίζεται σε ένα μικρό εύρος, συγκεκριμένο για κάθε είδος.

Σε ένα κλειστό φωτοβιοαντιδραστήρα χωρίς εξοπλισμό ελέγχου θερμοκρασίας η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει έως και 30 βαθμούς κελσίου παραπάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τεχνικές εξάτμισης, ψύξης και σκίασης χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση θερμοκρασιών τέτοιου μεγέθους. Επιπλέον, χαμηλότερες θερμοκρασίες φαίνεται να μειώνουν τις απώλειες βιομάζας λόγω αναπνοής κατά τη διάρκεια της νύχτας [68,69].

5.2.3 pH

Κάθε είδος άλγης έχει ένα στενό βέλτιστο εύρος του pH. Το pH του μέσου συνδέεται με τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα. Έρευνες αναφέρουν ότι το pH του μέσου αυξάνεται σταθερά όσο το διοξείδιο του άνθρακα καταναλώνεται. Το pH επηρεάζει την διαθεσιμότητα των θρεπτικών ουσιών, όπως ο σίδηρος, τα οργανικά οξέα και ακόμη και το διοξείδιο του άνθρακα. Επειδή το pH έχει σημαντική επηροή στην καλλιέργεια, προτείνεται να χρησιμοποιούνται ελεγκτές για την σωστή μέτρηση του, και την βελτιστοποίηση της ανάπτυξης της καλλιέργειας [68,70].

5.2.4 Σύστημα μεταφοράς CO₂

Εκτός από το φως και το νερό, το διοξείδιο του άνθρακα είναι απαραίτητο για να συμβεί η φωτοσύνθεση. Ωστόσο, υπερβολική ποσότητα μπορεί να είναι επιζήμια για την φωτοσύνθεση και την κυτταρική ανάπτυξη.

Επειδή η συνεχόμενη παροχή διοξειδίου του άνθρακα είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα και μπορεί να αποβεί μοιραία για την καλλιέργεια, είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας συσκευής που θα ενεργοποιεί την παροχή όταν είναι απαραίτητο.

Το CO₂ μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω διαπερατής από αέριο μεμβράνης, ώστε να παρασχεθεί επαρκής ποσότητα σε όλη την καλλιέργεια. Συγκεντρώσεις CO₂ από 1% έως 5% (κατ όγκον) οδηγούν συχνά σε μέγιστη ανάπτυξη. Επιπλέον, απαιτείται αναλογία περίπου 1,7-1,8 gr CO₂ ανά γραμμάριο ξηρής βιομάζας.

Το καυσαέριο είναι μια επιθυμητή πηγή CO₂. Απόβλητα από τυπικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα περιέχουν έως και 13% CO₂. Σχετικές έρευνες έχουν αποδείξει ότι η παροχή καυσαερίων έχει παρόμοια παραγωγικότητα και φωτοσυνθετική απόδοση με την παροχή καθαρού CO₂.

Επιπλέον, διαπίστωσαν ότι η παρουσία οξειδίων του αζώτου στα καυσαέρια δεν ανέστειλε την ανάπτυξη των μικροφυκών [71].

5.2.5 Απομάκρυνση οξυγόνου

Η υψηλή παρουσία οξυγόνου γύρω από τα κύτταρα των φυκών είναι ανεπιθύμητη, καθώς ο συνδυασμός έντονου ηλιακού φωτός και υψηλής συγκέντρωσης οξυγόνου έχει ως αποτέλεσμα φωτοοξειδωτική βλάβη στα κύτταρα.

Ως γενική κατευθυντήρια γραμμή, οι συγκεντρώσεις οξυγόνου θα πρέπει να διατηρούνται κάτω από το 400% της τιμής κορεσμού του αέρα. Επειδή σε ανοιχτούς χώρους το οξυγόνο δεν συσσωρεύεται, αυτή είναι μια πτυχή όπου οι ανοικτές δεξαμενές υπερτερούν σε σχέση με τους φωτοβιοαντιδραστήρες.

Η συσσώρευση στο μέσο της καλλιέργειας είναι ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν στους φωτοβιοαντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας, ενώ σε πιο μικρούς επίπεδους το πρόβλημα είναι σχεδόν ανύπαρκτο [72,73].

5.2.6 Παροχή θρεπτικών ουσιών

Προκειμένου να αναπτυχθούν, τα φύκη απαιτούν ορισμένες θρεπτικές ουσίες. Δύο σημαντικά θρεπτικά συστατικά είναι το άζωτο και ο φώσφορος, τα οποία παίζουν ρόλο στον έλεγχο του ρυθμού ανάπτυξης και της παραγωγής λιπιδίων. Άλλα θρεπτικά συστατικά είναι ο άνθρακας, το υδρογόνο, το θείο, το ασβέστιο, το νάτριο, το κάλιο κ.α. Επίσης χρειάζονται άλλα συστατικά σε μικρές ποσότητες, τα οποία περιλαμβάνουν σίδηρο, βόριο, μαγγάνιο, χαλκό, κοβάλτιο, νικέλιο, πυρίτιο, σελήνιο κ.α.

Σε υψηλές συγκεντρώσεις κυττάρων έχει παρατηρηθεί έλλειψη σιδήρου, μαγνησίου, θείου και αζώτου. Πειράματα έδειξαν ότι η μεμονωμένη προσθήκη καθενός από τα τέσσερα αυτά στοιχεία δεν βελτίωσε την παραγωγή, αλλά η ελεγχόμενη και ισορροπημένη παροχή και των τεσσάρων μαζί οδήγησε σε βελτιωμένες επιδόσεις[74].

5.2.7 Σύστημα ανάδευσης/ ανάμιξη

Η σωστή ανάμιξη σε ένα φωτοβιοαντιδραστήρα είναι υψίστης σημασίας για την πορεία της καλλιέργειας. Οι Suh και Lee αναφέρουν ότι, εφόσον οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν περιορίζουν τον ρυθμό ανάπτυξης, η ανάμιξη είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για την ανάπτυξη των φυκών.

Η ανάμιξη βελτιώνει την παραγωγικότητα αυξάνοντας τη συχνότητα της έκθεσης των κυττάρων στο φως, και αυξάνοντας τη μεταφορά μάζας μεταξύ των θρεπτικών ουσιών και των κυττάρων.

Η ανάμιξη επίσης προσπαθεί να κατανείμει την ηλιακή ακτινοβολία ομοιόμορφα σε όλα τα κύτταρα. Η ανάμιξη και ο φωτισμός είναι άμεσα συνδεδεμένοι, καθώς η ανάμιξη είναι συχνά υπεύθυνη για την πρόκληση των ωφέλιμων κύκλων φωτός και σκοταδιού στην ανάπτυξη της άλγης. Ομοίως, η ανάμιξη προσφέρει βοήθεια σε περίπτωση που ο φωτισμός είναι ανεπαρκής.

Μία ανασκόπηση που έγινε παραθέτει ορισμένους από τους παράγοντες που επηρεάζουν το συνολικό συντελεστή μεταφοράς μάζας (kLa) σε ένα φωτοβιοαντιδραστήρα, που αποτελεί βασική παράμετρο σύγκρισης μεταξύ τους. Τέτοιοι παράγοντες είναι ο ρυθμός ανάδευσης, ο τύπος του διαλύτη, η θερμοκρασία και οι αντιαφριστικοί παράγοντες.

Το επίπεδο ανάμιξης πρέπει να βελτιστοποιηθεί προσεκτικά, καθώς τα υψηλά επίπεδα ανάμιξης θα έχουν ως αποτέλεσμα τον θάνατο των κυττάρων από τη διάτμηση [75].

5.2.8 Η διαφάνεια και η ανθεκτικότητα του υλικού κατασκευής

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του φωτοβιοαντιδραστήρα είναι σημαντικά για την πορεία της καλλιέργειας, αλλά και για το κόστος της αρχικής επένδυσης και της συντήρησης. Τα υλικά αυτά πρέπει να είναι καλής ποιότητας με μεγάλη αντοχή, και να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Να είναι διαφανές.
- Να είναι εύκαμπτο.
- Να μην είναι τοξικό ως προς τα κύτταρα.
- Να έχει αντοχή σε χημικές ουσίες.
- Αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες.
- Να είναι χαμηλού κόστους.

Ο φωτοβιοαντιδραστήρας πρέπει επίσης να είναι αεροστεγής, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα μόλυνσεων από το περιβάλλον, και να είναι αρθρωτό, ώστε να είναι εύκολος ο καθαρισμός και η συντήρηση ανάμεσα στα πειράματα [68,69,70].

5.3 Κατηγορίες φωτοβιοαντιδραστήρων

5.3.1 Κυλινδρικοί σωληνοειδείς φωτοβιοαντιδραστήρες (Tubular photobioreactors)

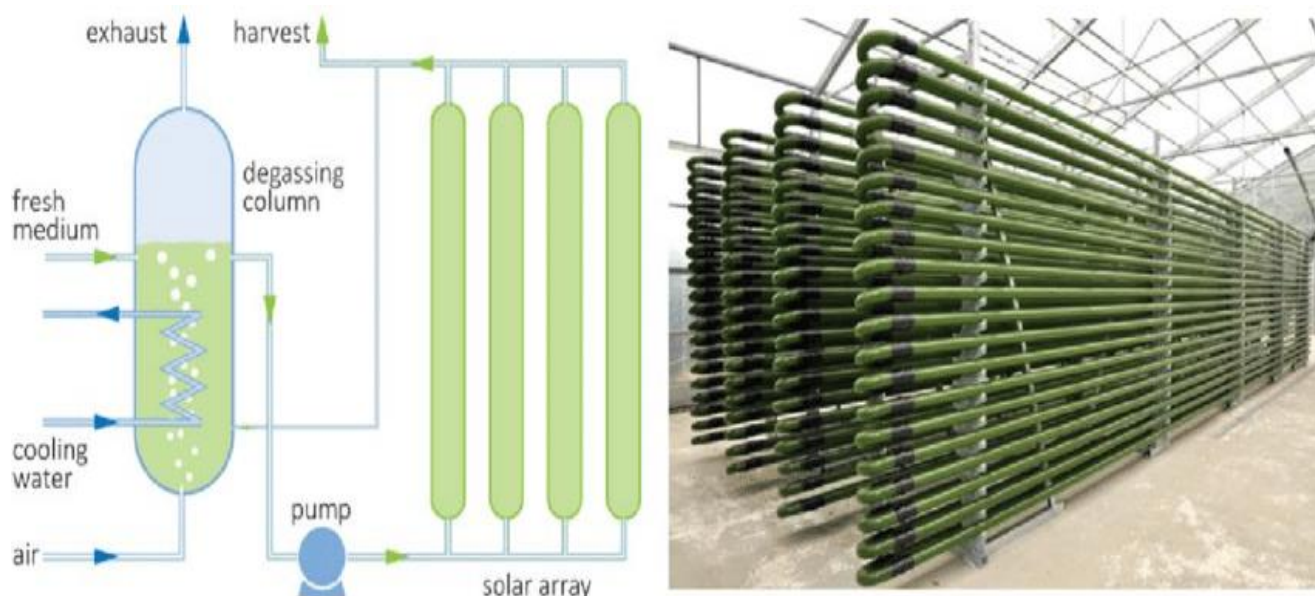
Οι κυλινδρικοί σωληνοειδείς φωτοβιοαντιδραστήρες, όπως η αναδευόμενη δεξαμενή, η στήλη με φυσαλίδες και οι φωτοβιοαντιδραστήρες με αεροσυμπιεστές είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κλειστά συστήματα σε βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

Κατασκευάζονται από γυαλί ή πλαστικό, και αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό σωληνώσεων, μέσω των οποίων δεσμεύεται η απαραίτητη ηλιακή

ενέργεια. Σε αυτά τα συστήματα η βιομάζα κυκλοφορεί μέσω των σωληνώσεων με τη βοήθεια αντλιών, ή μέσω ενός συστήματος αερισμού.

Οι κυλινδρικοί σωληνοειδείς φωτοβιοαντιδραστήρες αντιμετωπίζουν ορισμένα λειτουργικά προβλήματα, όπως οι ακαθαρσίες στα τοιχώματα των σωληνώσεων, που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ανάπτυξη των μικροφυκών. Ένα ακόμη πρόβλημα είναι η πιθανότητα καθίζησης, όπως και η αυξημένη συγκέντρωση σε οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα στο εσωτερικό των σωληνώσεων.

Για την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων έχουν θεσπιστεί ανώτατα όρια στο μήκος και στη διάμετρο των σωληνών, 80 μέτρα και 10 εκατοστά αντίστοιχα. Για τον ακριβή καθορισμό των διαστάσεων του κάθε σωλήνα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν διάφοροι παράγοντες, όπως η ένταση του φωτός, η συγκέντρωση της βιομάζας και η ταχύτητα ροής και εισόδου του οξυγόνου. [48]



Σχήμα 5.1: Οριζόντιος κυλινδρικός φωτοβιοαντιδραστήρας[76]

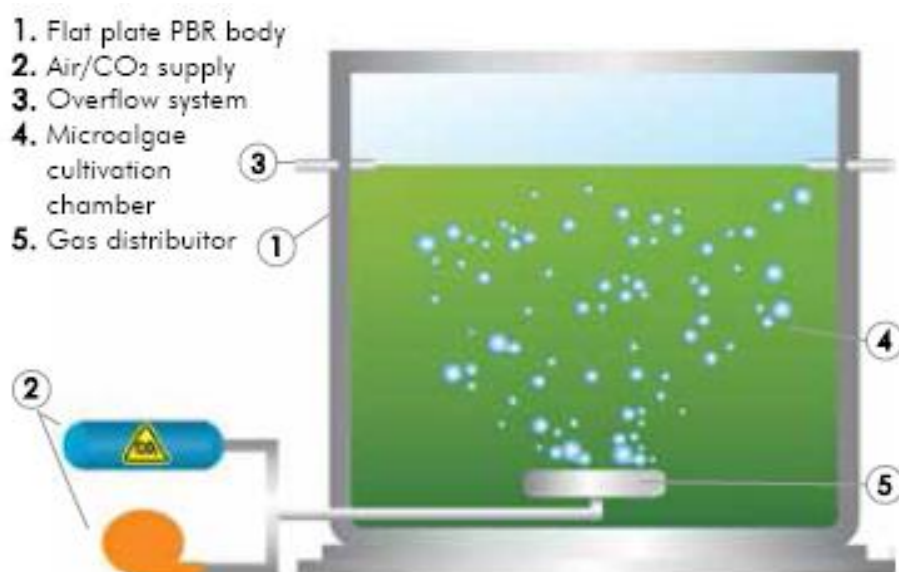
5.3.2 Επίπεδοι φωτοβιοαντιδραστήρες (Flat panel photobioreactors)

Οι επίπεδοι φωτοβιοαντιδραστήρες είναι από τα πρώτα κλειστά συστήματα καλλιέργειας που δημιουργήθηκαν, και είναι οι πιο δημοφιλείς φωτοβιοαντιδραστήρες για καλλιέργειες μικρής κλίμακας.

Οι επίπεδοι φωτοβιοαντιδραστήρες είναι σταθερά συστήματα μεγάλης επιφάνειας με κυβοειδές σχήμα, χαμηλού κόστους λειτουργίας με ευκολία στο χειρισμό. Είναι φτιαγμένοι για παραγωγή βιομάζας μικροφυκών μεγάλης πυκνότητας, καθώς δεσμεύουν ηλιακή ακτινοβολία στο μέγιστο δυνατό βαθμό.

Η κατασκευή τους γίνεται από διαφανή υλικά, συνήθως γυαλί ή πλαστικό, και εμφανίζουν υψηλότερη φωτοσυνθετική απόδοση σε σύγκριση με άλλου τύπου φωτοβιοαντιδραστήρες, ενώ την ίδια ώρα διατηρούν τη συγκέντρωση του οξυγόνου σε χαμηλά επίπεδα. Το πάχος της πλάκας καθορίζει την φωτιζόμενη επιφάνεια και το μήκος της διαδρομής του φωτός.

Οι επίπεδοι φωτοβιοαντιδραστήρες χαρακτηρίζονται από μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς όγκο. Το μόνο αρνητικό είναι η αδυναμία πλήρη ελέγχου της θερμοκρασίας, ενός από τους σημαντικότερους παράγοντες στην καλλιέργεια των μικροφυκών. [49]



Σχήμα 5.2: Επίπεδος φωτοβιοαντιδραστήρας [76]

5.3.3 Φωτοβιοαντιδραστήρες στήλης (Column photobioreactors)

Οι **φωτοβιοαντιδραστήρες στήλης** είναι το τελευταίο είδος φωτοβιοαντιδραστήρων, συνήθως κυλινδρικού σχήματος, με ιδιαίτερα υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο.

Οι φωτοβιοαντιδραστήρες στήλης έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως το χαμηλό κόστος επένδυσης, η έλλειψη κινούμενων μερών, η ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας και μάζας και η αποτελεσματική απελευθέρωση οξυγόνου.

Ανεξάρτητα από το είδος τους, όλα τα συστήματα φωτοβιοαντιδραστήρων είναι απαραίτητο να διακόπτουν τη λειτουργία τους τουλάχιστον μια φορά το χρόνο για καθαρισμό και συντήρηση, ενώ ο καθαρισμός είναι απαραίτητος και μετά από την αποτυχία μιας καλλιέργειας. [50],[51]

Κεφάλαιο 6 Πειραματικό μέρος

6.1 Γενικά

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός πρότυπου επίπεδου φωτοβιοαντιδραστήρα για παραγωγή βιομάζας μικροφυκών, ο οποίος θα παρέχει ένα ιδανικό περιβάλλον καλλιέργειας με αποτελεσματική ανάμιξη και μεταφορά αερίων, με χαμηλό σχετικά κόστος.

Μέσα στον αντιδραστήρα υπάρχουν πλάκες σε κλίση, όπου το νερό κυκλοφορεί με τη βοήθεια μιας περισταλτικής αντλίας από την πρώτη πλάκα στην τελευταία, από την οποία επιστρέφει ξανά στην πρώτη. Με αυτό τον τρόπο, εξασφαλίζεται συνεχής ροή των κυττάρων της καλλιέργειας, ώστε να έρχονται όλα σε επαφή με το διοξείδιο του άνθρακα και την ηλιακή ενέργεια, χωρίς διακοπές στη διαδικασία.

Στο φωτοβιοαντιδραστήρα συνδέθηκαν τεχνητοί λαμπτήρες LED, ώστε τα μικροφύκη να τροφοδοτούνται συνεχώς με φως, ακόμα και τις βραδινές ώρες, και κατά τους χειμερινούς μήνες.

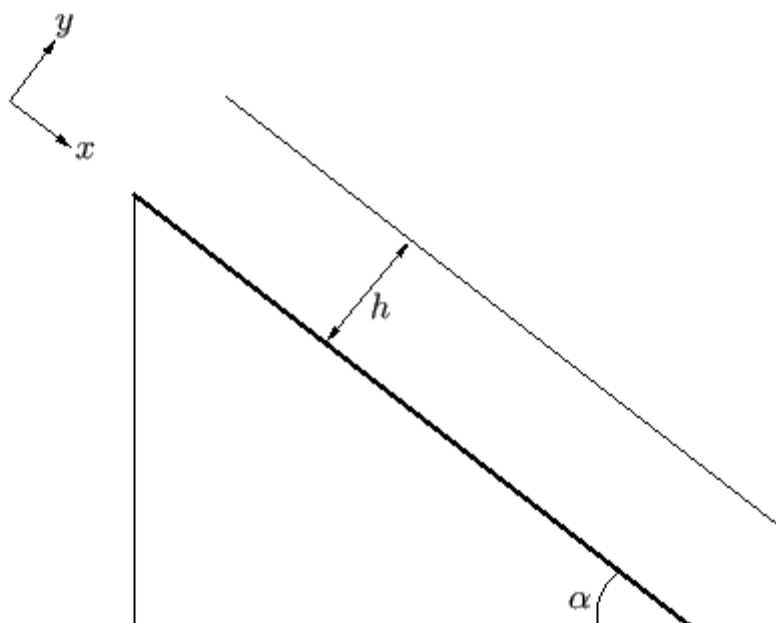
Χρησιμοποιήθηκαν επίσης εντός του θαλάμου ένας ανεμιστήρας για τη συνεχή ανακατανομή και ομοιογένεια της ατμόσφαιρας και δύο βαλβίδες για την είσοδο και έξοδο των αερίων.

Τέλος, στον φωτοβιοαντιδραστήρα τοποθετήθηκαν αισθητήρες πίεσης, διοξειδίου του άνθρακα, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Οι αισθητήρες συνδέθηκαν με ένα μικροελεγκτή Arduino και προγραμματίστηκαν με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η καταγραφή των δεδομένων θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια μιας κάρτας μνήμης SD. Ο μικροελεγκτής λαμβάνει τα δεδομένα των αισθητήρων και στη συνέχεια γίνονται οι απαραίτητες ενέργειες για τη διατήρηση των συνθηκών που έχουν επιλεγεί για την καλλιέργεια.

6.2 Υπολογισμοί

Το πρώτο βήμα είναι η επιλογή των διαστάσεων του αντιδραστήρα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το ύψος του αντιδραστήρα δεν πρέπει να υπερβαίνει το ένα μέτρο, καθώς η συγκέντρωση αερίων μειώνεται σε μεγαλύτερα ύψη, με αποτέλεσμα τη μειωμένη παραγωγή βιομάζας, ενώ και η διάμετρος του πρέπει να είναι σχετικά χαμηλή [82]. Τελικά επιλέχθηκαν διαστάσεις **1 μέτρο ύψος, 1 μέτρο πλάτος και 1 μέτρο μήκος για το κέλυφος**, ενώ για τον αντιδραστήρα επιλέχθηκαν διαστάσεις **75 cm ύψος, 80cm μήκος και 40 cm πλάτος**.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν πόσα λίτρα νερού ανά λεπτό θα διέρχονται από την αντλία, η ταχύτητα του νερού καθώς και ο συνολικός όγκος του αντιδραστήρα.



Σχήμα 6.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο

Έστω σταθερή ροή σε ένα κεκλιμένο επίπεδο, όπου το νερό κινείται μόνο στον άξονα x , και σχηματίζει ένα ομοιόμορφο στρώμα ύψους h , όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.

Το ύψος του στρώματος του νερού πάνω στις πλάκες υπολογίζεται από τον τύπο:

$$h = \left(\frac{3 \times v \times Q}{g \times \sin a} \right)^{1/3}, \quad \text{εξίσωση 6.1}$$

όπου:

Q είναι η ροή του νερού στις πλάκες,

v είναι το κινηματικό ιξώδες του νερού,

g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,

και a είναι η κλίση που έχουν οι πλάκες, η οποία ορίστηκε ως 1° ή $0,01745 \text{ rad}$.

Ως ύψος στρώματος ροής απαιτήθηκε να είναι τουλάχιστον $h = 0,0015$, επομένως λύνοντας την εξίσωση 6.1, προκύπτει πως η ροή του νερού στις πλάκες είναι $Q = 4,62262 \text{ lt/min}$.

Η ταχύτητα του νερού στις πλάκες υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V = \frac{dQ}{dH} = \frac{Gh^2}{\mu} = \left(\frac{9 \times Q^2 \times g \times \sin a}{\nu} \right)^{1/3}, \text{ εξίσωση 6.2}$$

Μετά τους υπολογισμούς προκύπτει ότι η ταχύτητα V του νερού είναι 0,209128636 m/s.

Τέλος, πρέπει να υπολογιστεί ο συνολικός όγκος του αντιδραστήρα. Συνολικά επιλέχθηκαν 15 πλάκες (n), οι οποίες θα έχουν τις διαστάσεις του αντιδραστήρα, δηλαδή 80cm μήκος(LG) και 40 cm(WG) πλάτος. Ο συνολικός όγκος υπολογίζεται από τον τύπο:

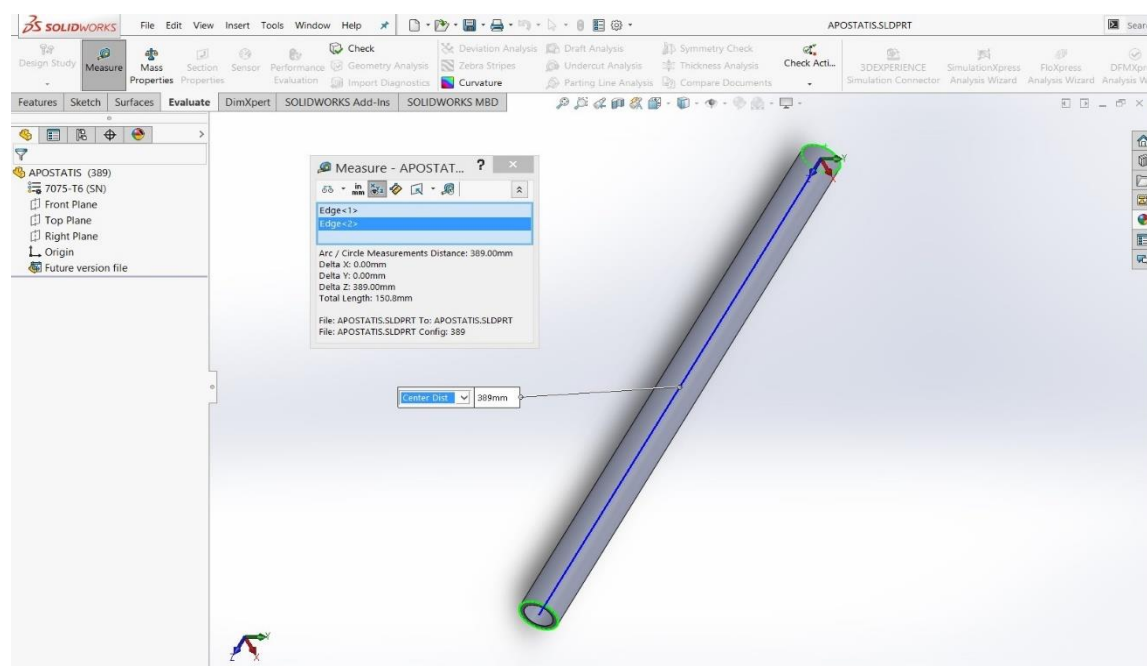
$$v = h \times LG \times WG \times n, \text{ εξίσωση 6.3}$$

Λύνοντας την εξίσωση προκύπτει ότι ο συνολικός όγκος είναι 7,2 λίτρα [77].

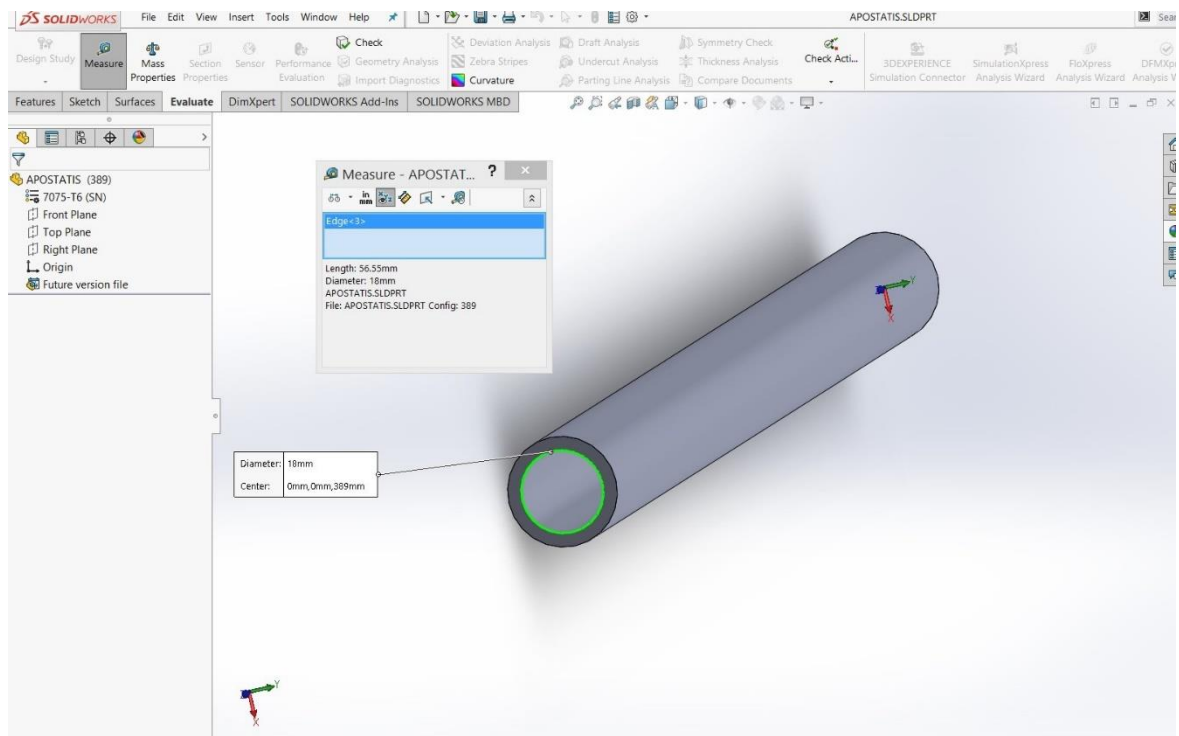
6.3 Σχεδιασμός

Μετά το τέλος των υπολογισμών, ακολούθησε ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα. Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό SOLIDWORKS.

Στις εικόνες 6.2 και 6.3 φαίνεται ο σχεδιασμός των αποστατών, με 18mm εσωτερική διάμετρο, 24mm εξωτερική διάμετρο και 389mm μήκος.

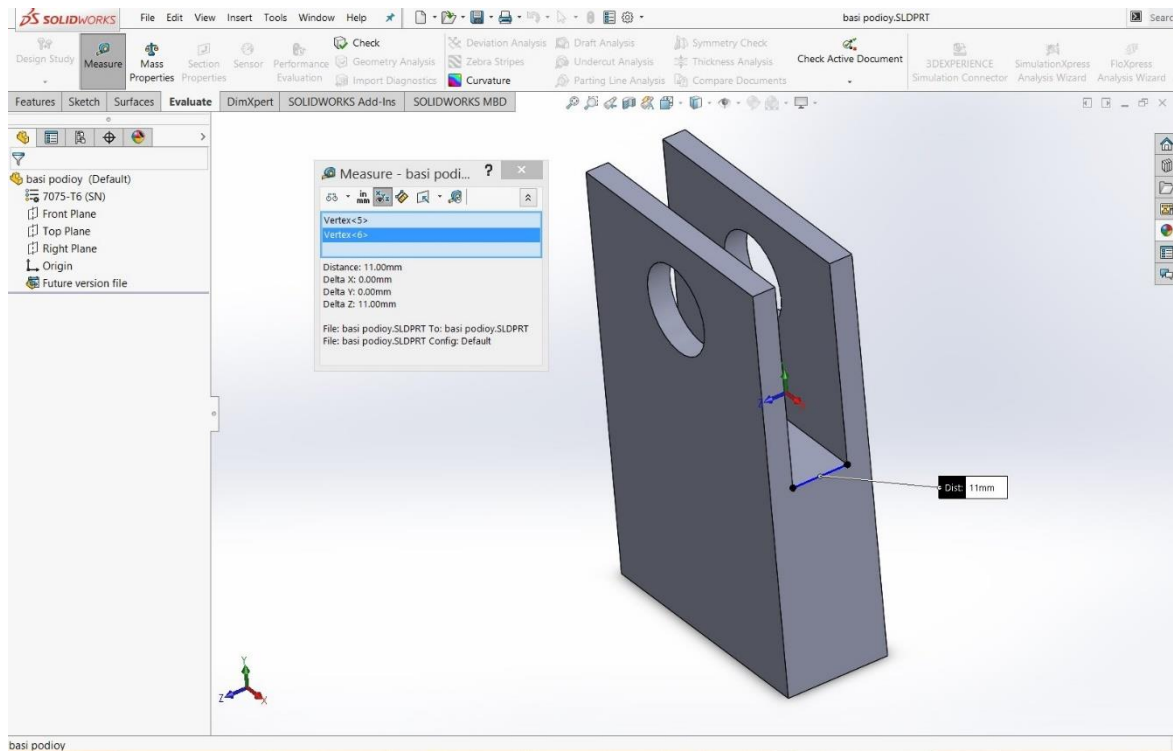


Σχήμα 6.2: Σχεδιασμός αποστάτη

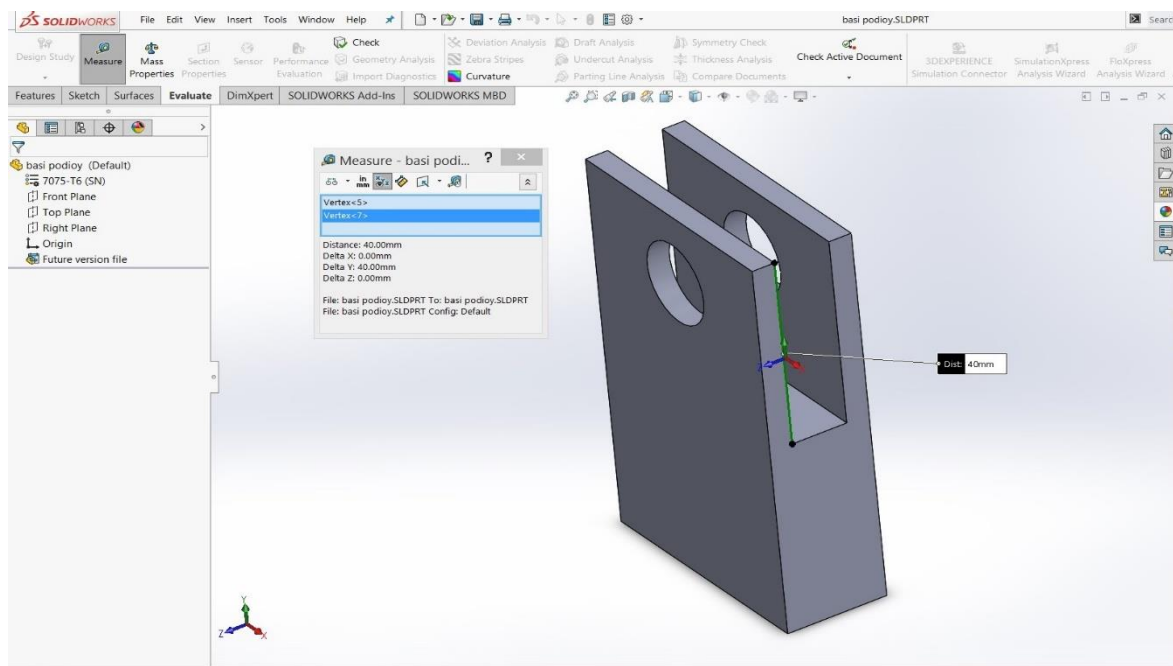


Σχήμα 6.3: Σχεδιασμός αποστάτη

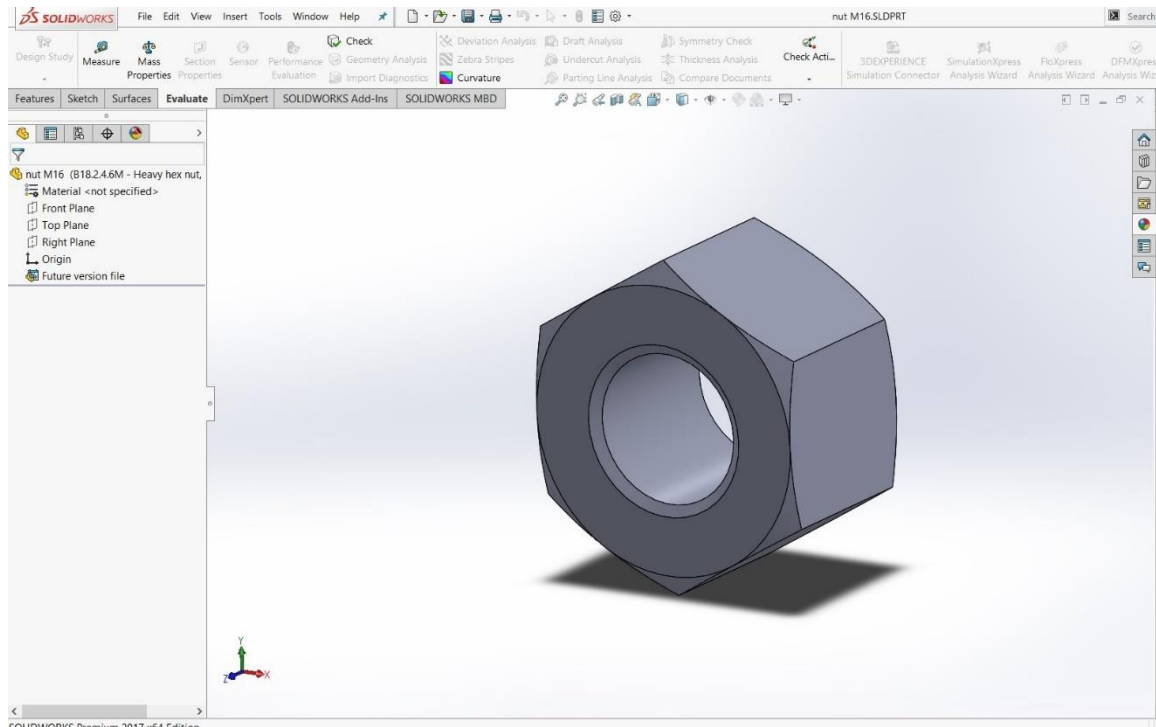
Στις εικόνες 6.4 και 6.5 παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της βάσης για τα πόδια του αντιδραστήρα, με διαστάσεις 50mm μήκος, 20mm πλάτος, 80mm ύψος και 17mm διάμετρο, ενώ στην εικόνα 6.6 το σχέδιο των παξιμαδιών με διάμετρο 16mm.



Σχήμα 6.4: Βάση ποδιών

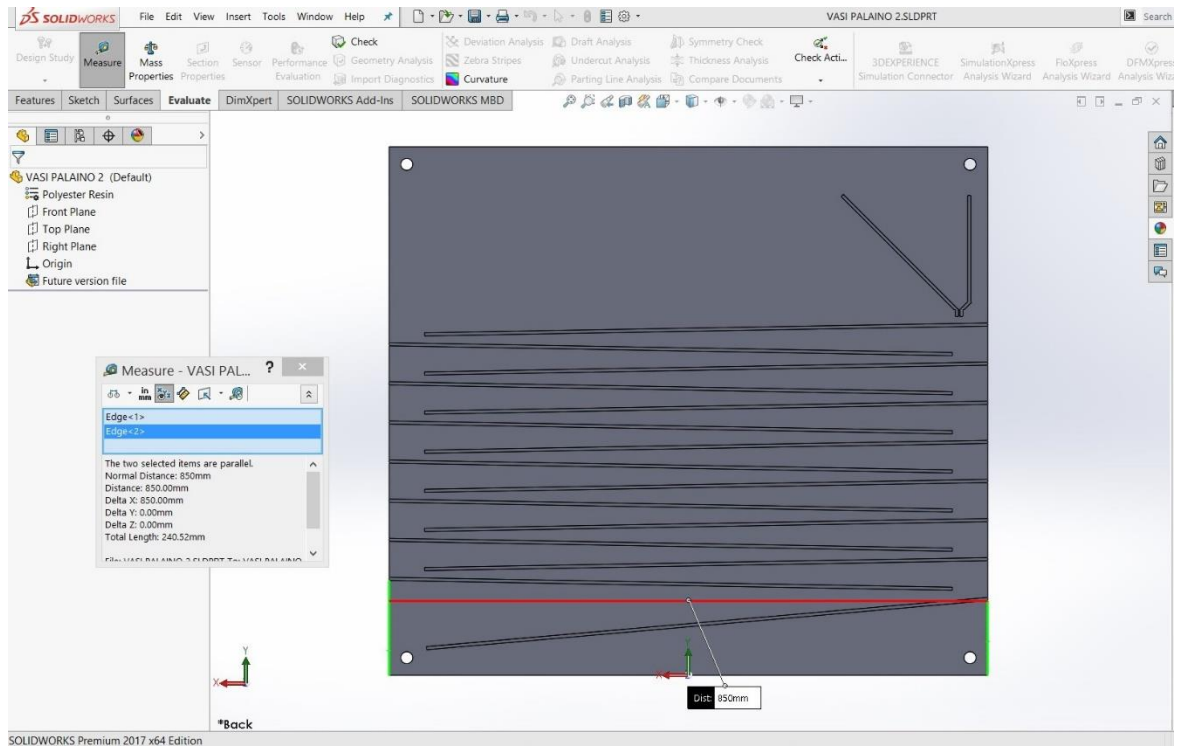


Σχήμα 6.5: Βάση ποδιών

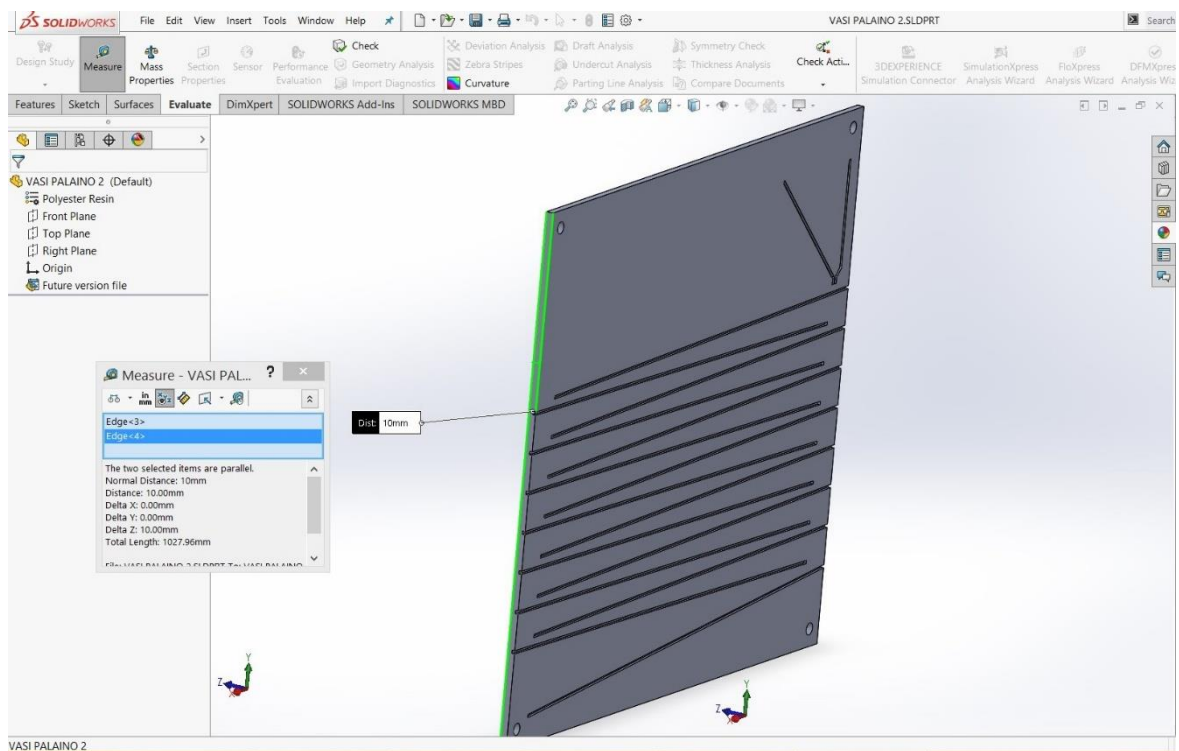


Σχήμα 6.6: Σχεδιασμός παξιμαδιού

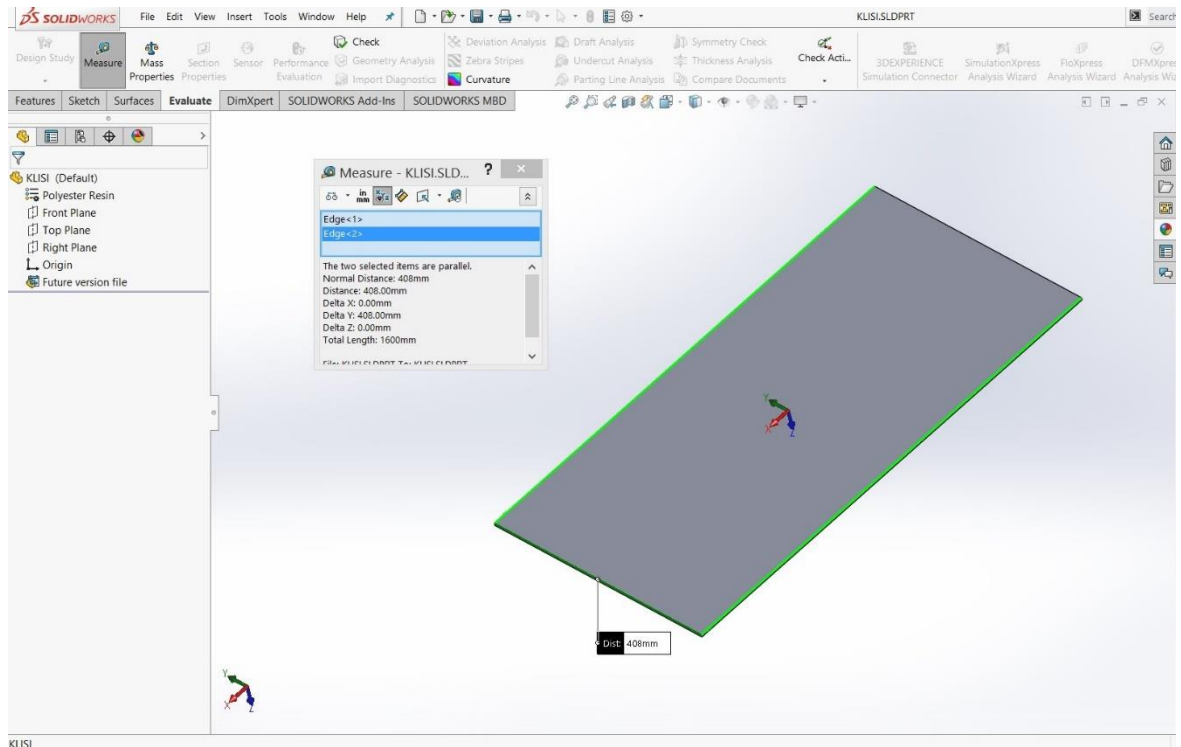
Οι εικόνες 6.7 και 6.8 δείχνουν τις πλαϊνές βάσεις του αντιδραστήρα, με διαστάσεις 850mm μήκος, 10mm πλάτος και 750mm ύψος. Στις βάσεις χαράχθηκαν αυλάκια βάθους 4mm, ούτως ώστε να θηλυκώσουν οι 15 πλάκες. Στην εικόνα 6.9 φαίνεται το σχέδιο των 15 πλακών που τοποθετήθηκαν σε κλίση στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, με διαστάσεις 800mm μήκος, 408mm πλάτος και 4mm ύψος.



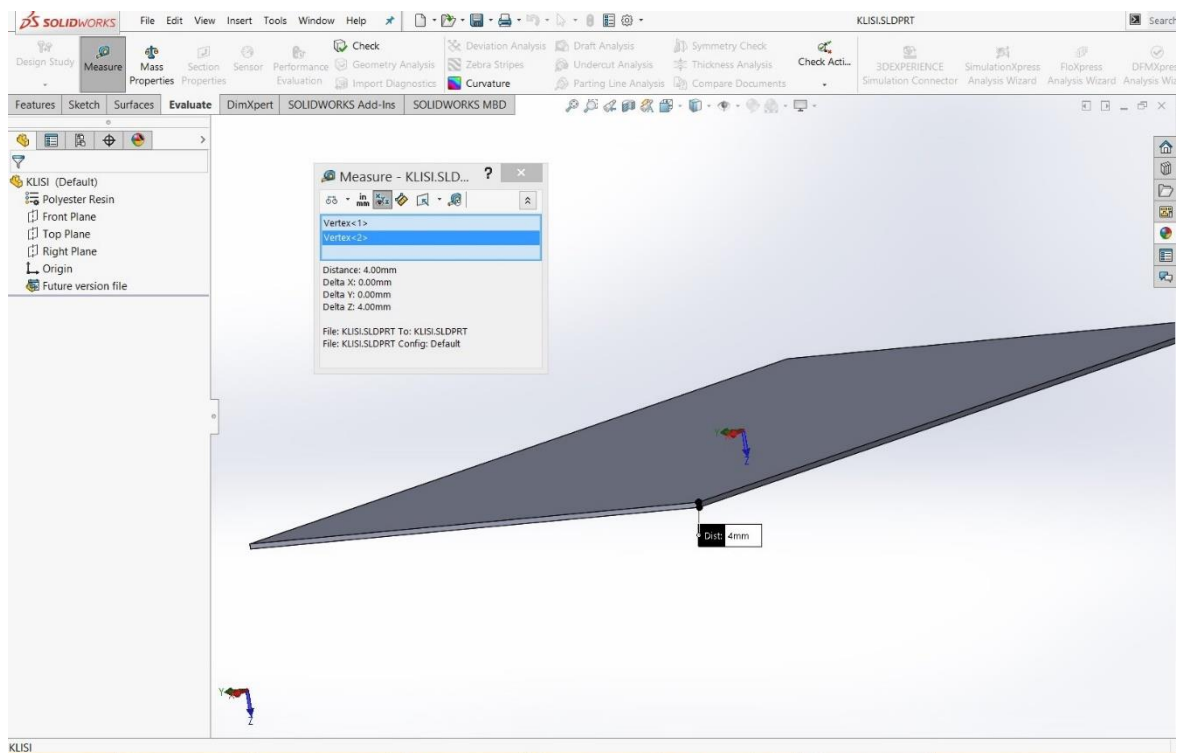
Σχήμα 6.7: Πλαϊνή βάση



Σχήμα 6.8: Πλαϊνή βάση

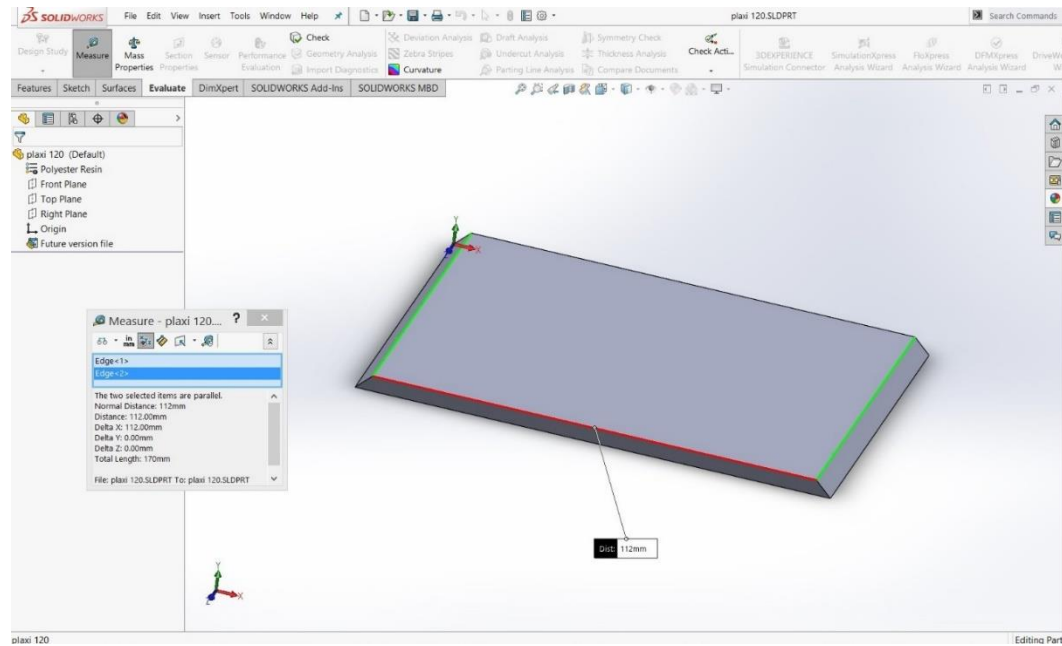


Σχήμα 6.9: Πλάκες σε κλίση

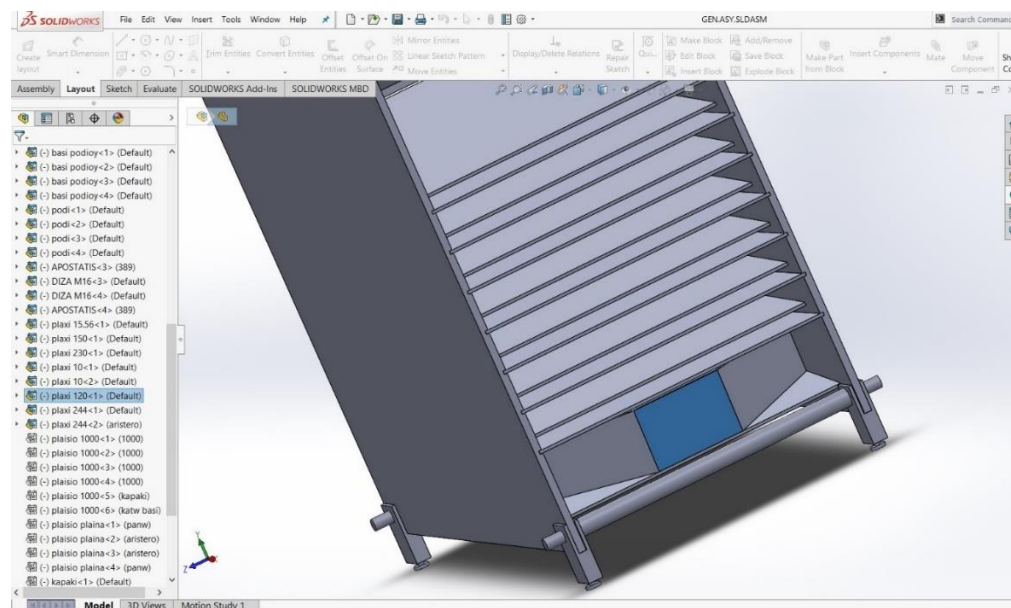


Σχήμα 6.10: Πλάκες σε κλίση

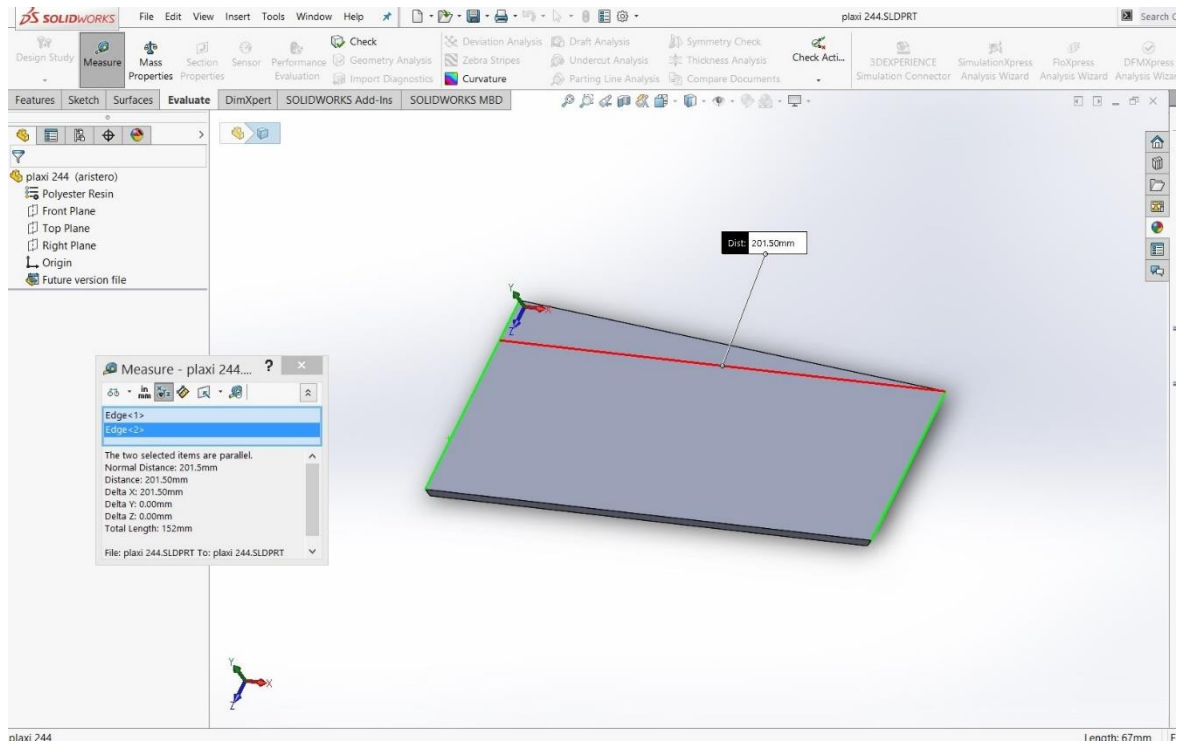
Το κάτω μέρος του αντιδραστήρα αποτελείται από 1 πλάκα στη μέση με διαστάσεις 112mm μήκος στο πάνω μέρος της, 120mm μήκος στο κάτω μέρος της και 85mm πλάτος, και από 2 πλαϊνές πλάκες, με διαστάσεις 201.5mm μήκος στο πάνω μέρος τους, 197.5mm μήκος στο κάτω μέρος τους, 85mm πλάτος στη μία πλευρά τους και 67mm πλάτος στην άλλη. Οι τρεις αυτές πλάκες τοποθετήθηκαν με στόχο να συσωρρευτεί εκεί ένα ποσοστό της βιομάζας. Στην άκρη της κάτω πλάκας, κοντά στα τρία αυτά κομμάτια διανοίχθηκε οπή στην οποία τοποθετήθηκε ο σωλήνας που οδηγεί το υγρό στην περισταλτική αντλία.



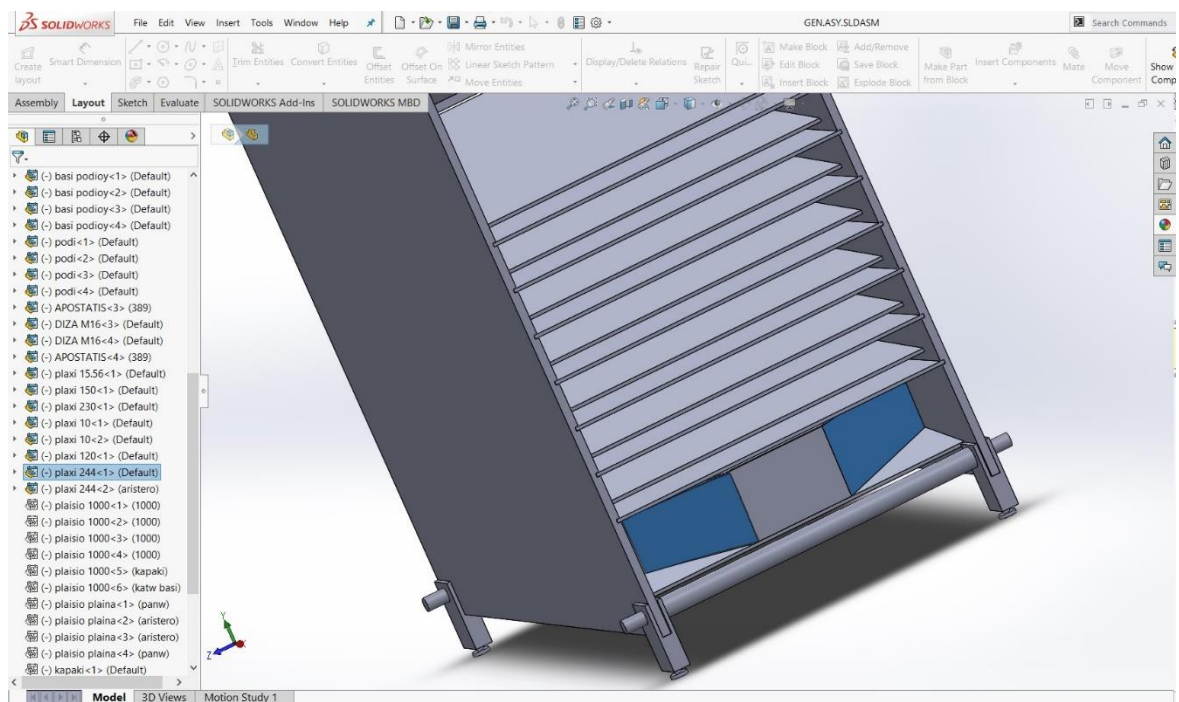
Σχήμα 6.11: Πλάκα στη μέση



Σχήμα 6.12: Πλάκα στη μέση

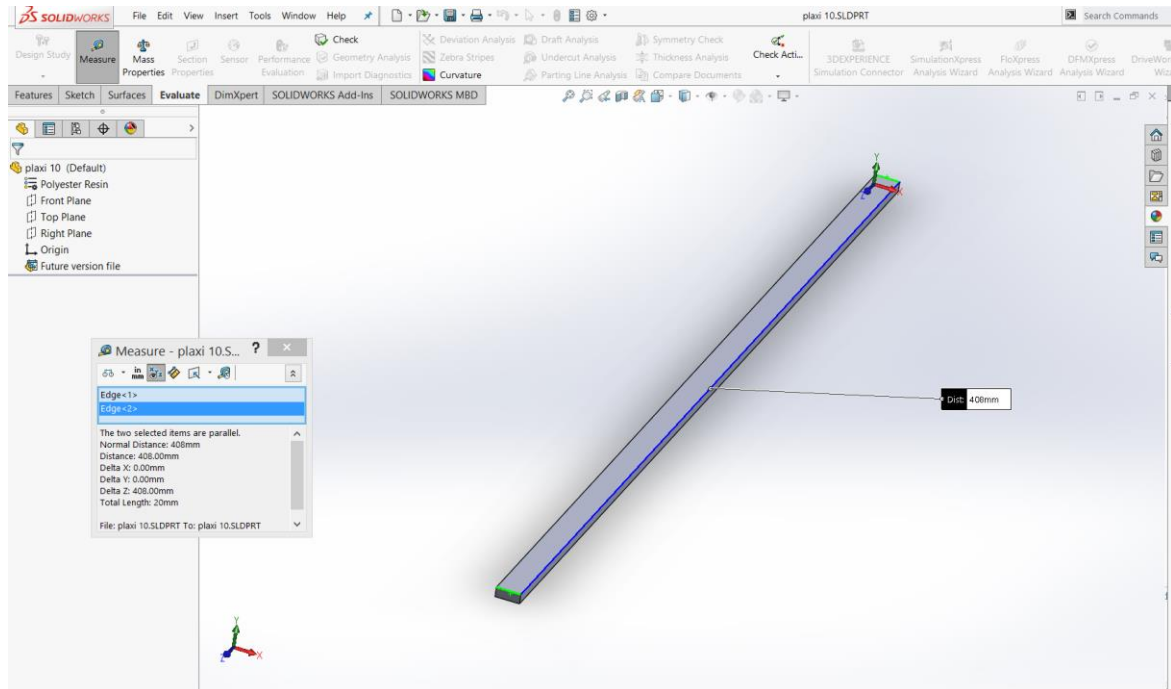


Σχήμα 6.13: Οι 2 πλαϊνές πλάκες

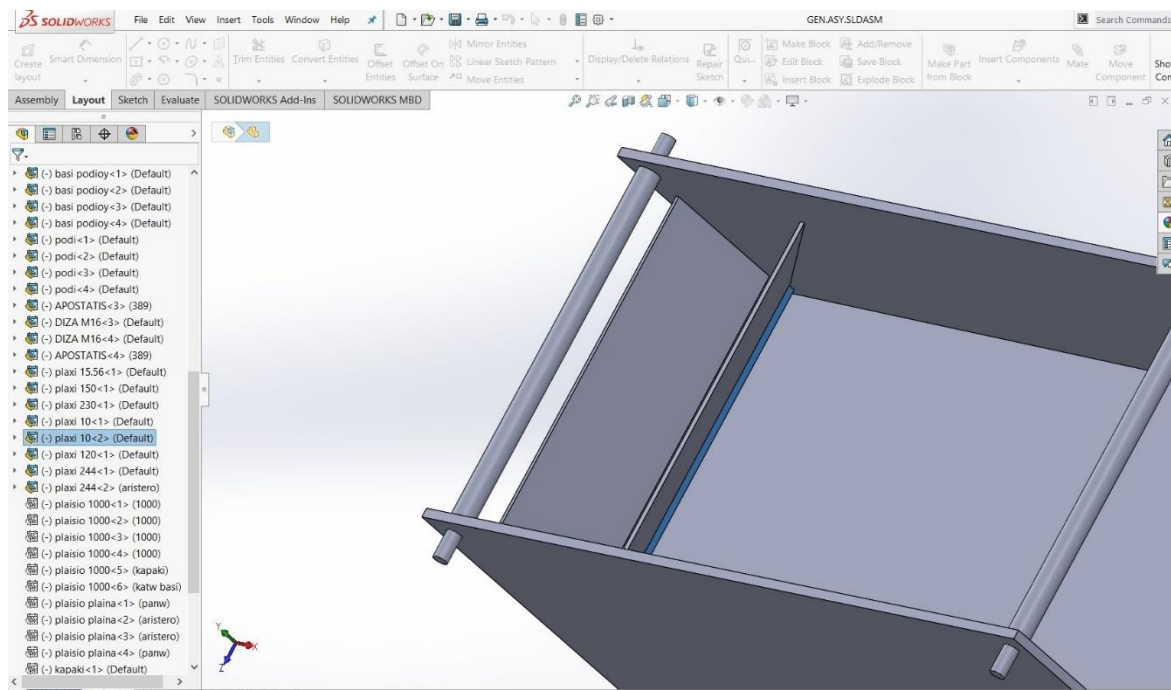


Σχήμα 6.14: Οι 2 πλαϊνές πλάκες

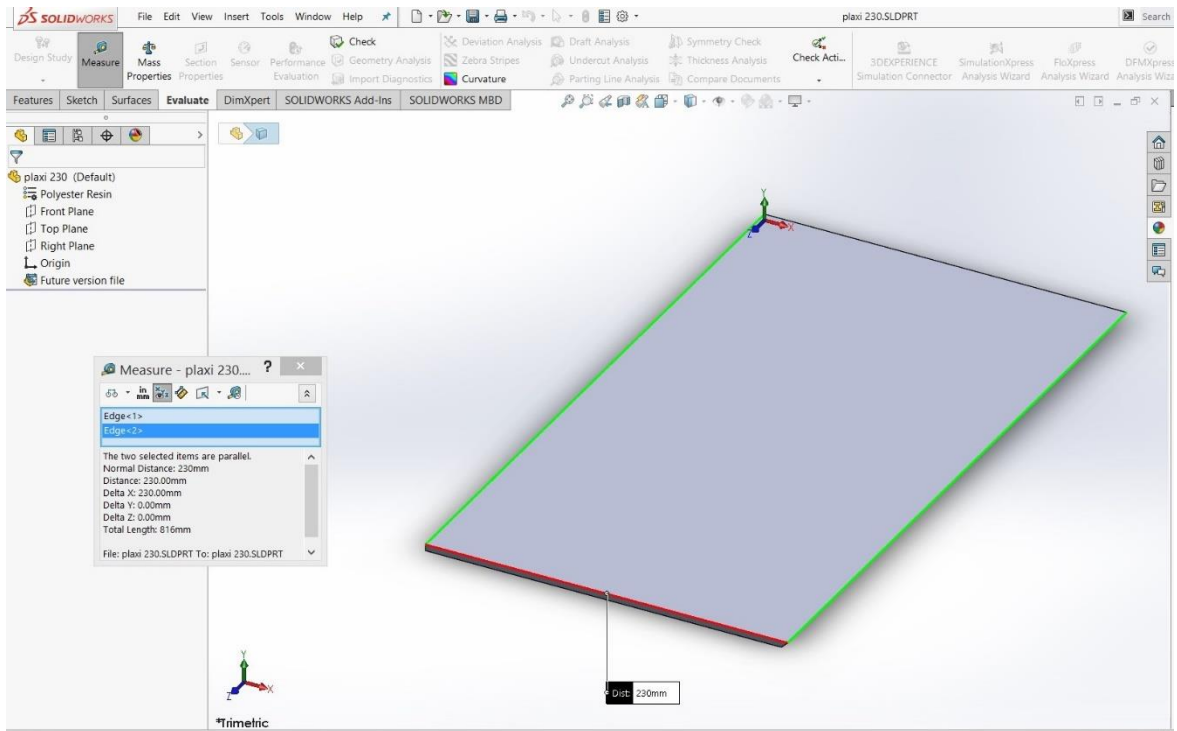
Στην κορυφή του αντιδραστήρα κατασκευάστηκε ακόμα ένα ντεπόζιτο με σχισμή κατά μήκος της πλάκας ώστε το υγρό να απλώνει ομοιόμορφα. Το ντεπόζιτο στο πάνω μέρος του αντιδραστήρα αποτελείται από 2 πλάκες με διαστάσεις 408mm μήκος και 10mm πλάτος, 1 πλάκα με 408mm μήκος, 230mm πλάτος στο πάνω μέρος της και 226 στο κάτω, 1 πλάκα με 408mm μήκος και 150mm πλάτος και 1 πλάκα με 408mm μήκος και 15.06 πλάτος.



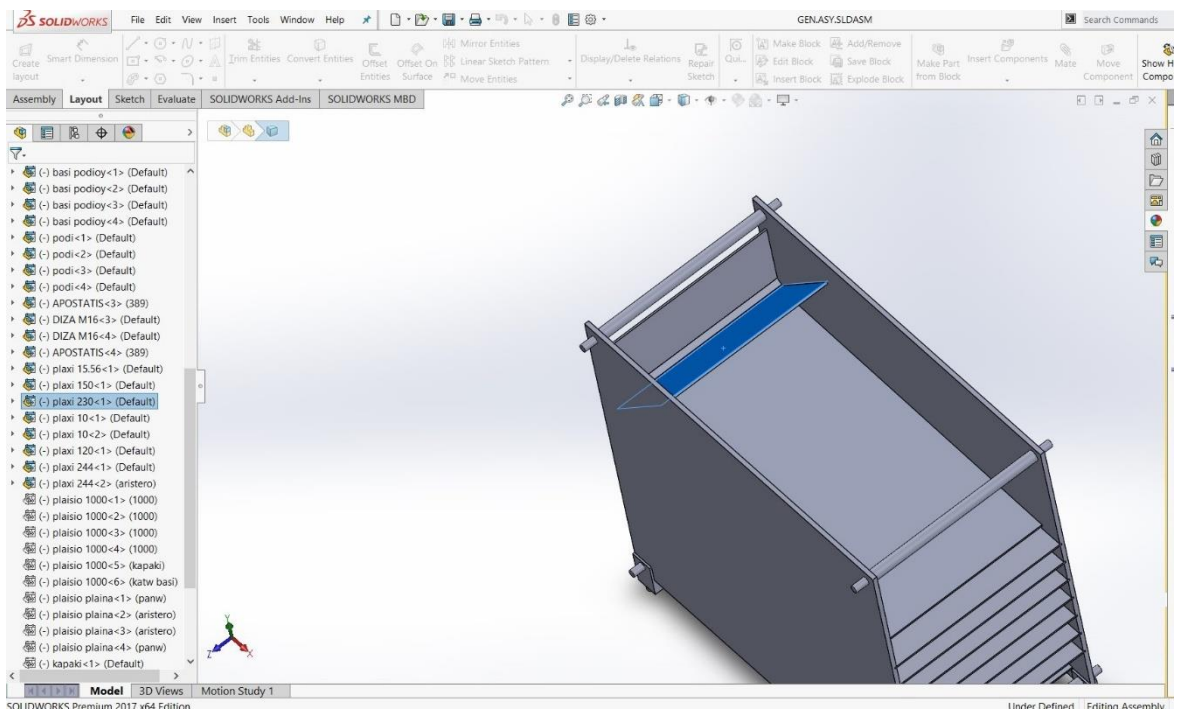
Σχήμα 6.15: Πλάκα 10mm



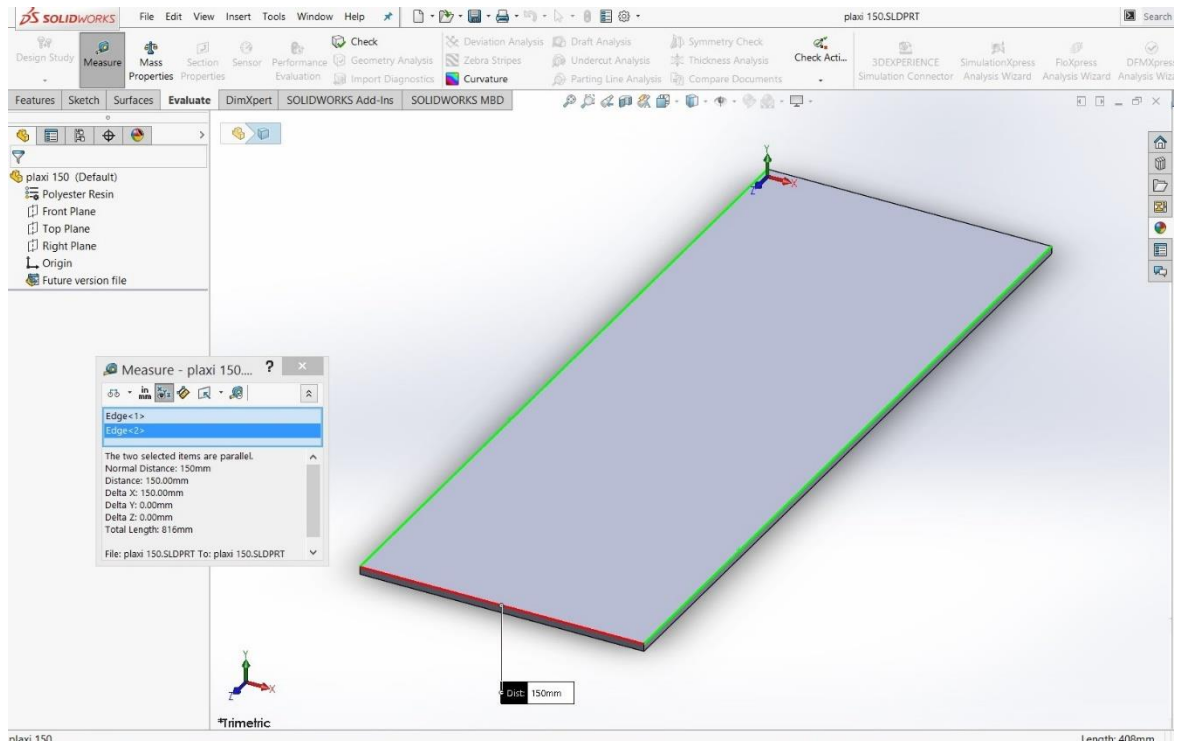
Σχήμα 6.16: Πλάκα 10mm



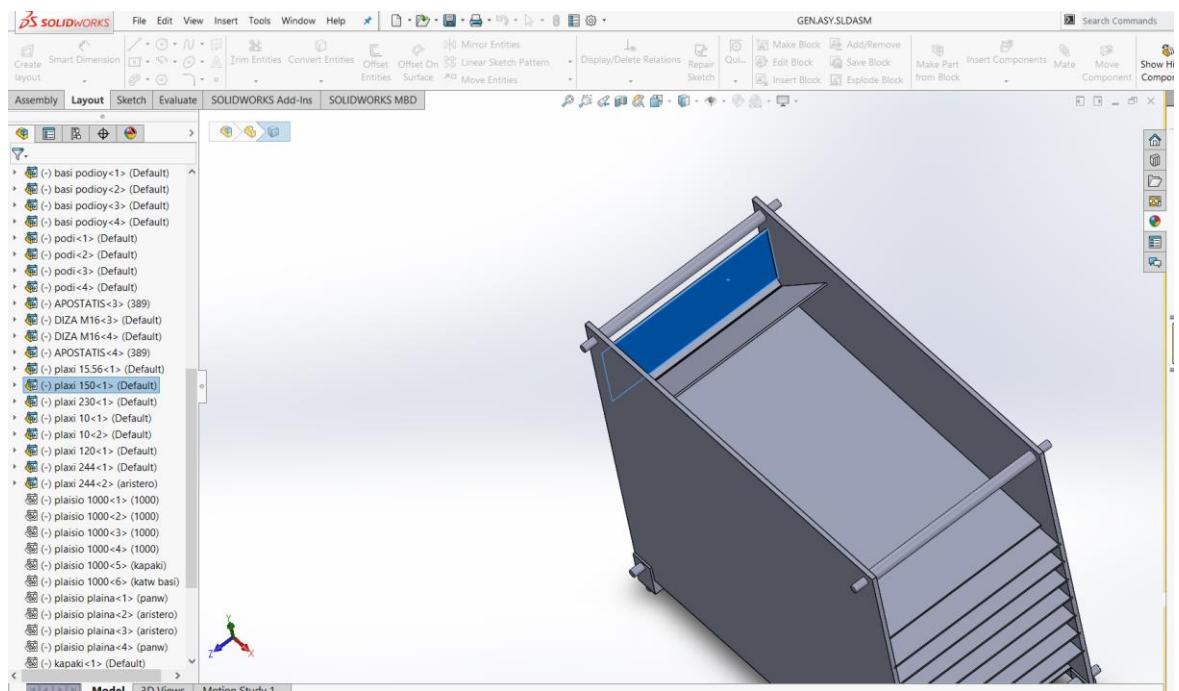
Σχήμα 6.17: Πλάκα 230mm



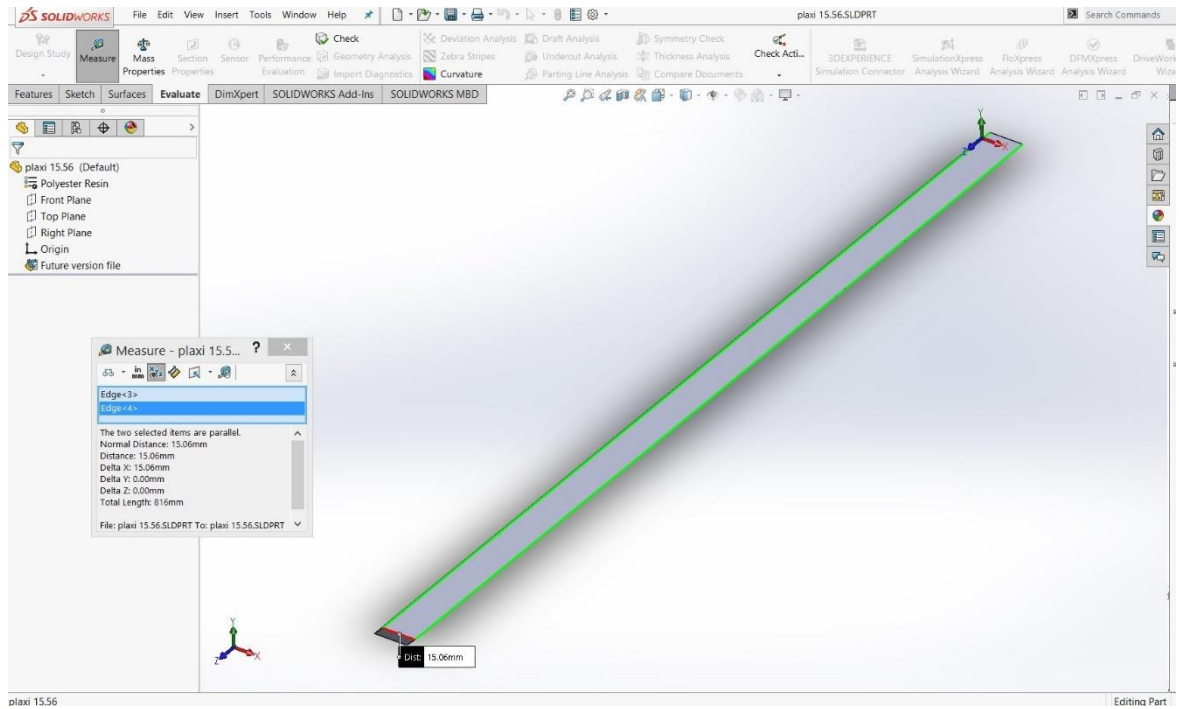
Σχήμα 6.18: Πλάκα 230mm



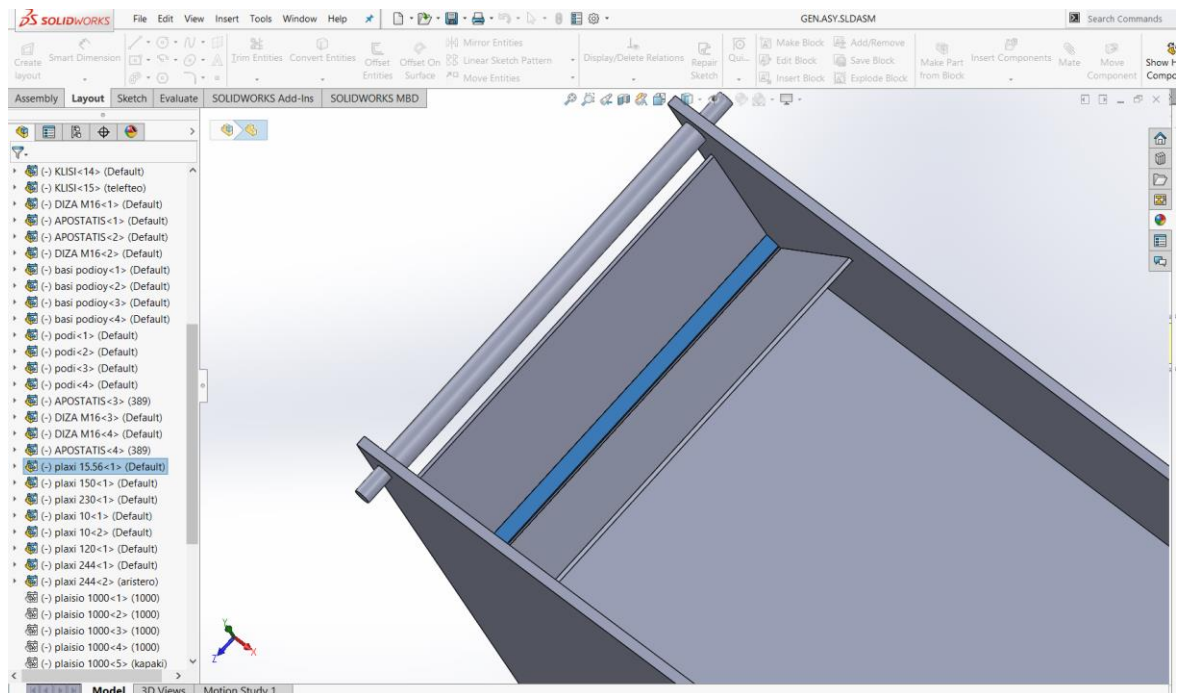
Σχήμα 6.19: Πλάκα 150mm



Σχήμ 6.20: Πλάκα 150mm

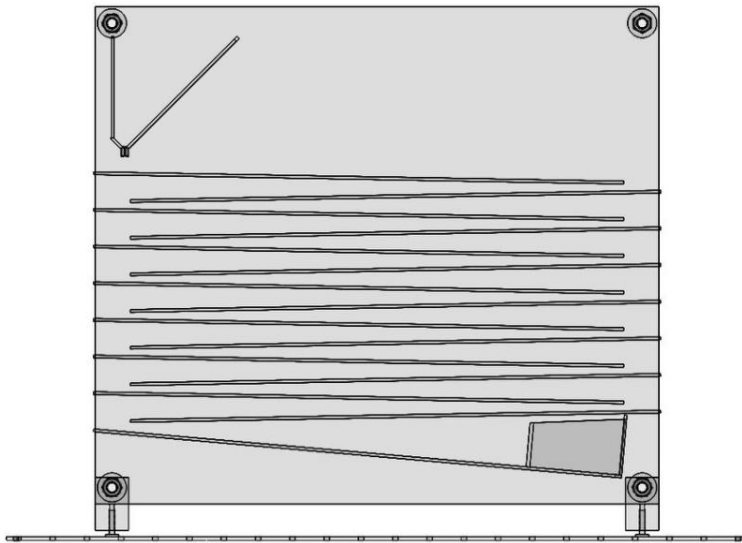


Σχήμα 6.21: Πλάκα 15.06mm

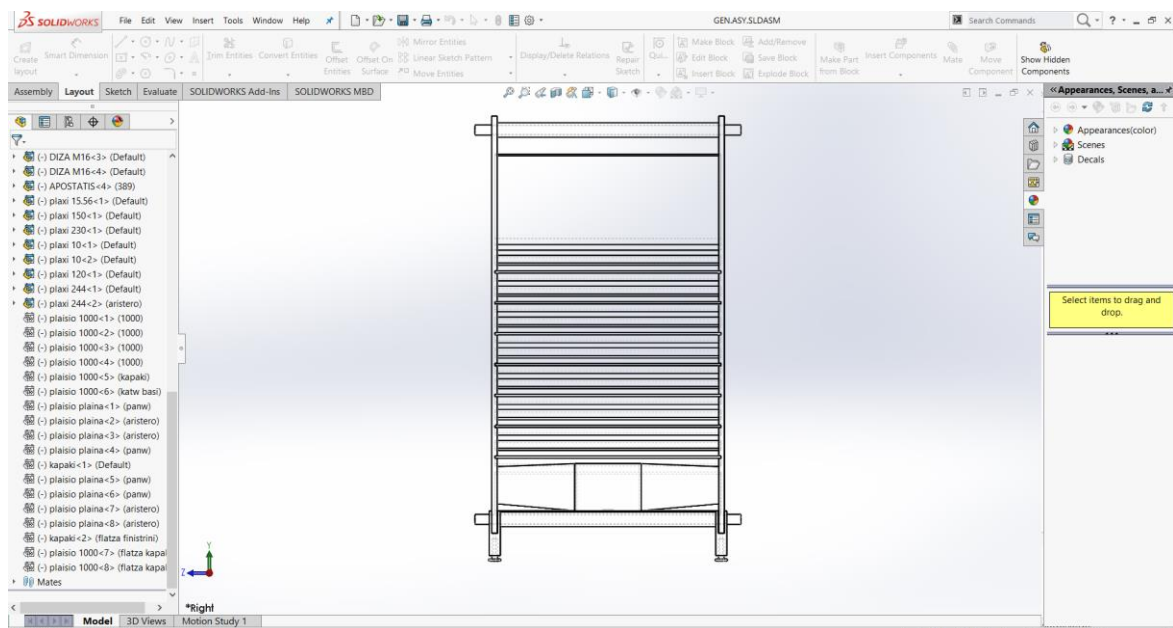


Σχήμα 6.22: Πλάκα 15.06mm

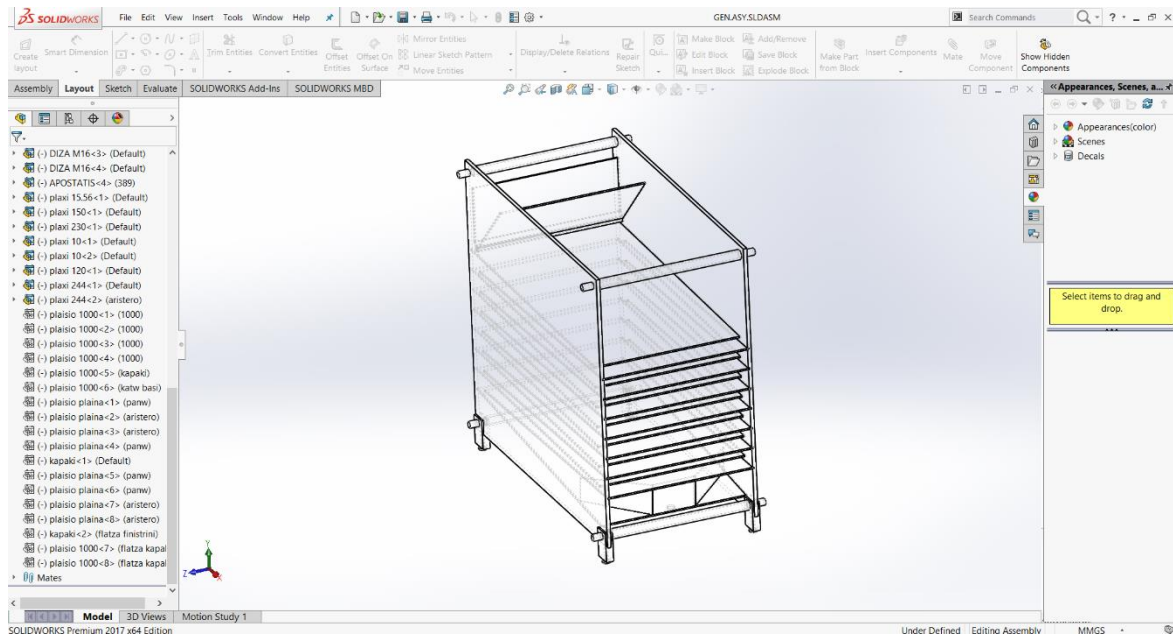
Στα σχήματα 6.22 και 6.23 φαίνεται το ολοκληρωμένο μοντέλο του αντιδραστήρα σε προτομή και πλάγια όψη, ενώ στο σχήμα 6.24 σε ισομετρική προβολή.



Σχήμα 6.23: Σχέδιο αντιδραστήρα σε πλάγια όψη.



Σχήμα 6.24: Σχέδιο αντιδραστήρα σε προτομή.



Σχήμα 6.25: Σχέδιο αντιδραστήρα σε ισομετρική προβολή

6.4 Κατασκευή

6.4.1 Υλικό

Ως υλικό για την κατασκευή του φωτοβιοαντιδραστήρα επιλέχθηκε το Plexiglas.

Το Plexiglass, όπως έχει επικρατήσει να αποκαλείται το ακρυλικό, είναι ένα διαφανές θερμοπλαστικό, που συχνά χρησιμοποιείται αντί του γυαλιού λόγω του ότι είναι ελαφρύτερο και ανθεκτικότερο από αυτό. Η επιστημονική του ονομασία είναι πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (Poly methyl methacrylate ή PMMA). Γι' αυτό και συχνά ονομάζεται ακρυλικό γυαλί ή απλά ακρυλικό. Η χύτευση του υλικού επιτυγχάνεται στους 105 βαθμούς Κελσίου με έγχυση, συμπίεση ή εξώθηση.

Το Plexiglas επιλέχθηκε καθώς προσφέρει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα από το γυαλί, αλλά και καλύτερη αντοχή στο χρόνο από τα άλλα πλαστικά. Ορισμένα χαρακτηριστικά του είναι:

- Θερμομονωτικό
- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
- Αντοχή σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες
- Καλή διάχυση φωτός
- Ανθεκτικό
- Χαμηλότερη τιμή από το γυαλί
- Δεν γίνεται θρύψαλα [79,80]

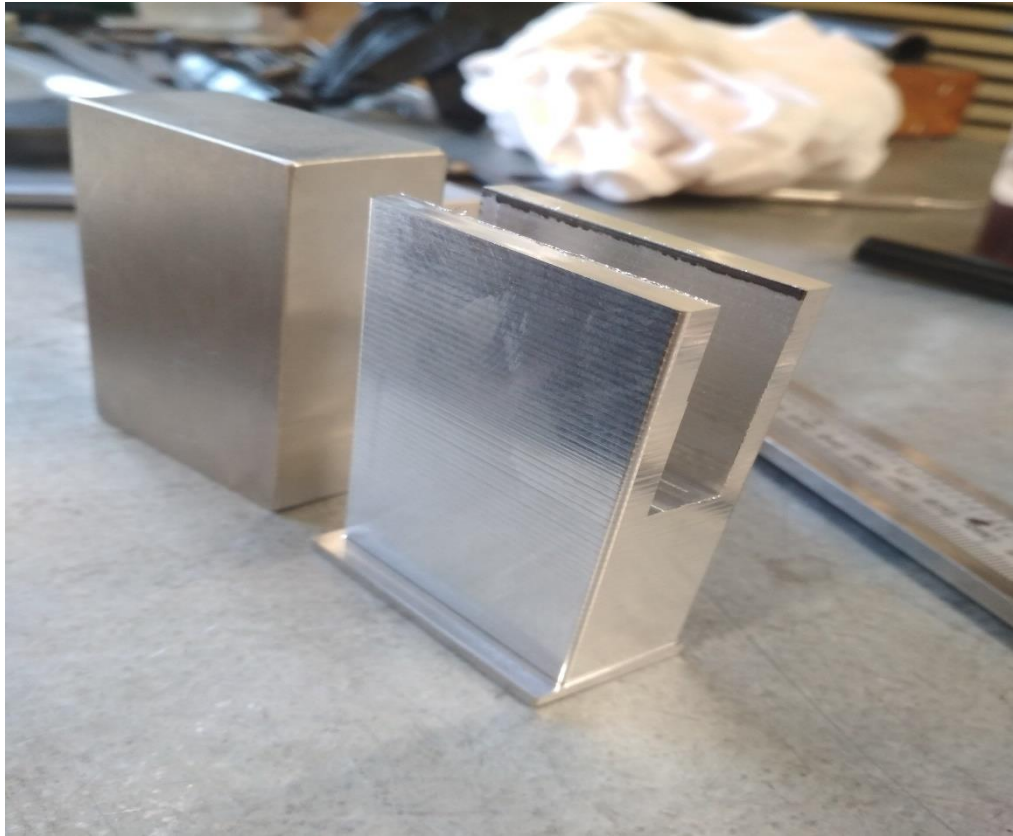
6.4.2 Επεξεργασία υλικού και δημιουργία εξαρτημάτων

Η επεξεργασία του υλικού πραγματοποιήθηκε σε μηχανουργείο, όπου δημιουργήθηκαν οι πλάκες Plexiglas στις απαραίτητες διαστάσεις για την κατασκευή του κελύφους και του αντιδραστήρα.

Στο μηχανουργείο κατασκευάστηκαν επίσης οι τέσσερις βάσεις για τα πόδια του αντιδραστήρα από αλουμίνιο.



Σχήμα 6.26: Βάση ποδιών αντιδραστήρα από αλουμίνιο



Σχήμα 6.27: Βάση ποδιών αντιδραστήρα



Σχήμα 6.28: Το κέλυφος του φωτοβιοαντιδραστήρα



Σχήμα 6.29: Το κέλυφος του φωτοβιοαντιδραστήρα



Σχήμα 6.30: Αντιδραστήρας



Σχήμα 6.31: Αντιδραστήρας

6.4.3 Συναρμολόγηση

Η συναρμολόγηση του φωτοβιοαντιδραστήρα πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Στο σχήμα 6.4 φαίνεται ο αντιδραστήρας στην εμπρόσθια όψη του, ενώ στο σχήμα 6.5 φαίνεται στην πλαϊνή όψη, μετά από τη στεγανοποίηση.



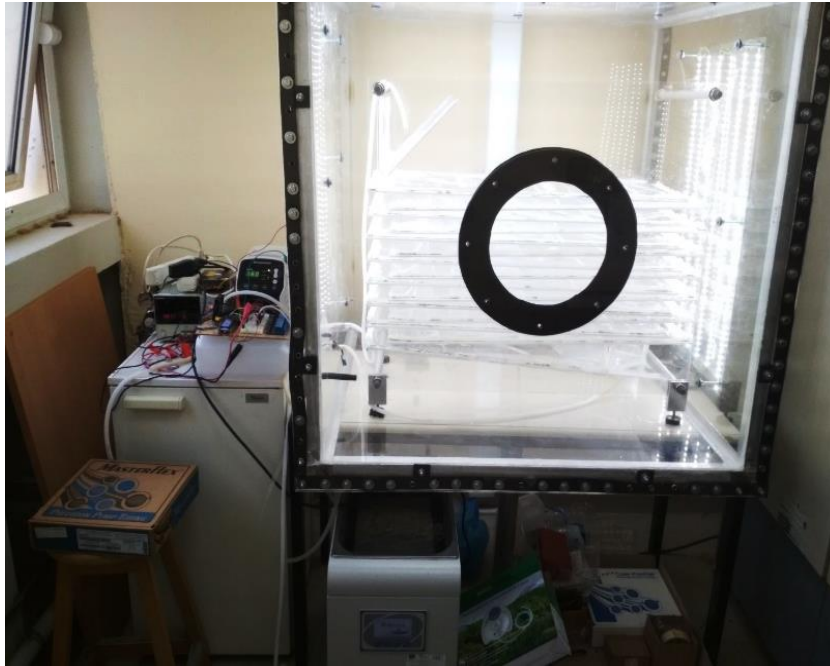
Σχήμα 6.32: Εμπρόσθια όψη αντιδραστήρα



Σχήμα 6.33: Πλαϊνή όψη αντιδραστήρα μετά την στεγανοποίηση

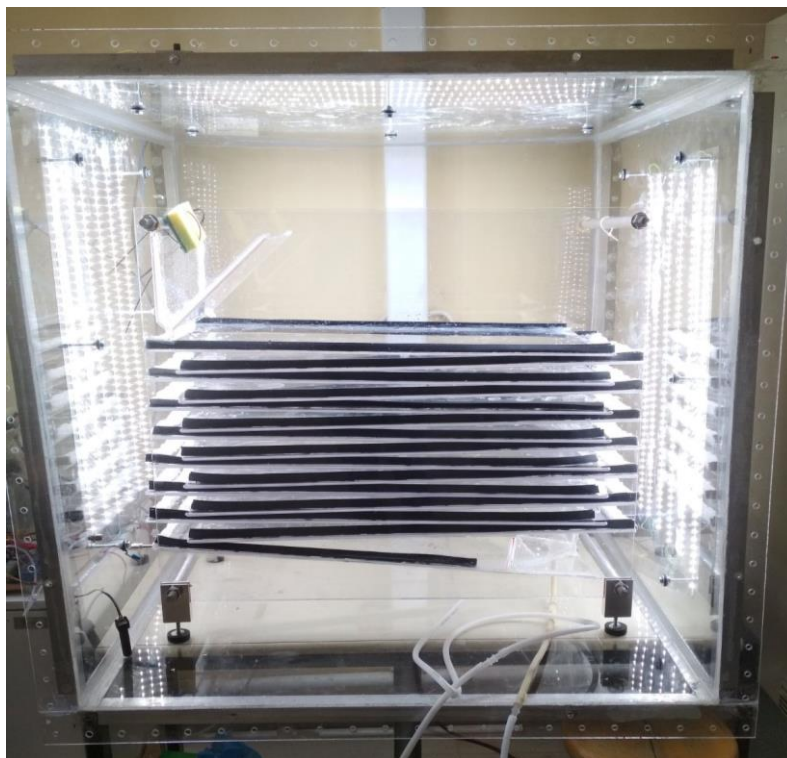
Στο σχήμα 6.34 φαίνεται ο αντιδραστήρας, όπου έχουν τοποθετηθεί οι λαμπτήρες LED στην οροφή και στα πλάγια και ο ανεμιστήρας. Όπως ήδη αναφέρθηκε, το κέλυφος έχει διαστάσεις $1 \times 1 \times 1$, με συνολικό όγκο 1 m^3 .

Ο ανεμιστήρας επιλέχθηκε να τοποθετηθεί στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ομοιομορφία αέρα μέσα στο κέλυφος, χωρίς να υπάρχει έντονη ροή στο μέρος όπου καλλιεργούνται τα κύτταρα, βοηθώντας έτσι την φωτοσύνθεσή τους.

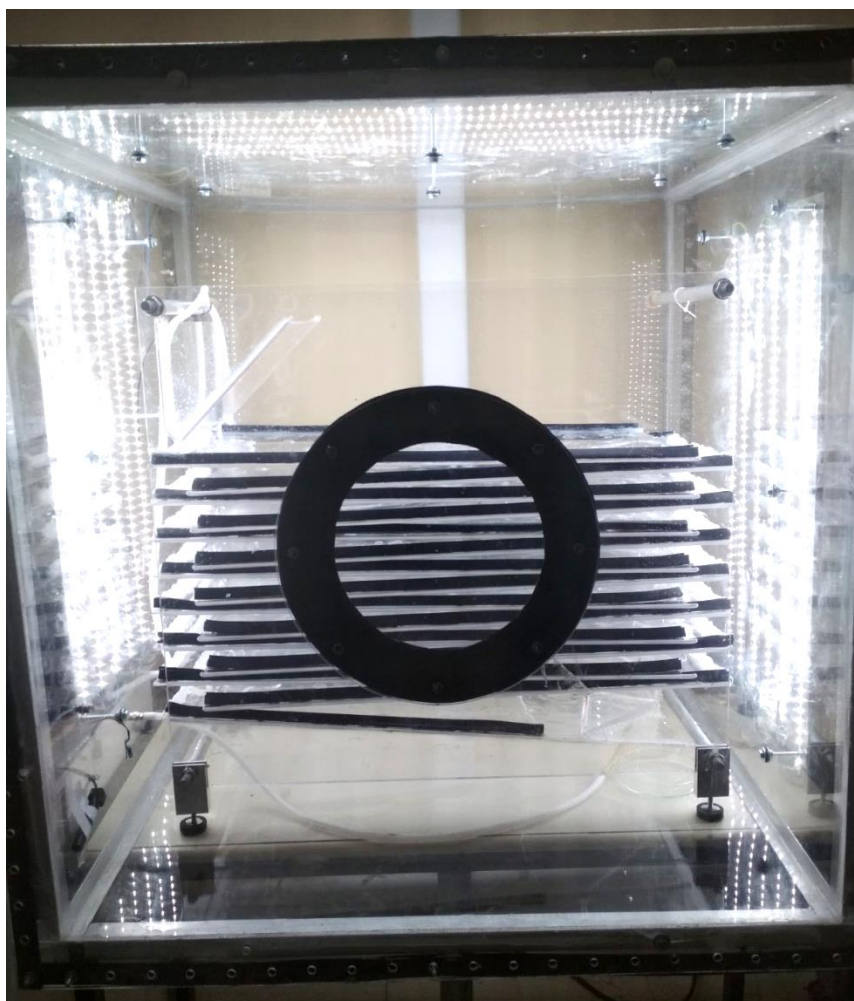


Σχήμα 6.34: Ο φωτοβιοαντιδραστήρας

Στα σχήματα 6.35 και 6.36, φαίνεται αντίστοιχα ο ολοκληρωμένος φωτοβιοαντιδραστήρας, πριν και μετά την τοποθέτηση της πλαϊνής επιφάνειας.



Σχήμα 6.35: Φωτοβιοαντιδραστήρας πριν τη στεγανοποίηση



Σχήμα 6.36: Φωτοβιοαντιδραστήρας μετά την τοποθέτηση της πλαϊνής επιφάνειας.

6.5 Σύστημα ελέγχου

Για τη μέτρηση των συνθηκών της καλλιέργειας χρησιμοποιήθηκαν τρεις αισθητήρες, ένας αισθητήρας DHT11 για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, ένας αισθητήρας πίεσης MPX4250 και ένας αισθητήρας MH-Z16 για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του CO₂.

Το σύστημα και όλοι οι αισθητήρες ήταν συνδεδεμένα με μια κάρτα μνήμης SD για τη συνεχή καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε μια LCD οθόνη για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων στον χρήστη.

6.5.1 Αισθητήρας θερμοκρασίας & υγρασίας DHT 11

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας DHT11 της εταιρίας Aosong.



Σχήμα 6.37: Αισθητήρας θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας DHT11

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι ιδιαίτερα μικρού μεγέθους, καθώς δεν ξεπερνά τα 15,5 mm σε μήκος, τα 12 mm σε ύψος και τα 5,5 mm σε πάχος.

Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του είναι:

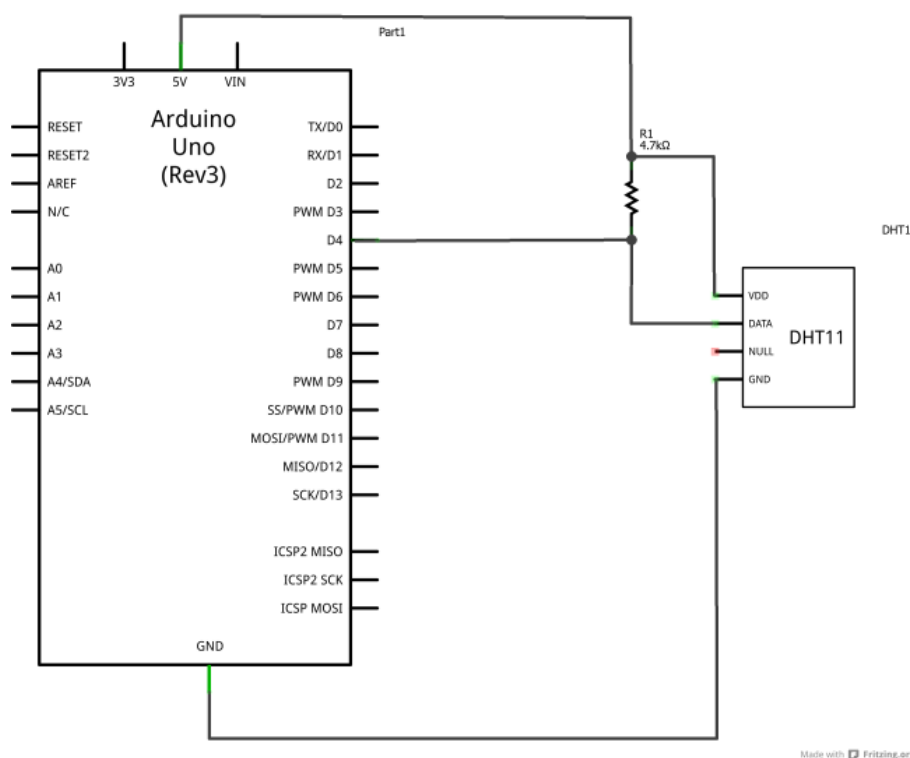
- Υψηλή ακρίβεια
- Χαμηλό κόστος
- Γρήγορη απόκριση
- Ψηφιακό σήμα εξόδου
- Ακριβής βαθμονόμηση
- Ισχυρή ικανότητα έναντι παρεμβολών
- Μετάδοση του σήματος σε μεγάλες αποστάσεις

Ο DHT11 χρειάζεται τροφοδοσία από 3,5 έως και 5,5 V και ρεύμα της τάξης των 0,3 mA κατά τη μέτρηση και 60 μ A στην αναμονή. Η περίοδος δειγματοληψίας διαρκεί περίπου 2 δευτερόλεπτα.

Η ανάλυση του είναι 16 bit, έχει σφάλμα μέτρησης $\pm 5\%$ για τη σχετική υγρασία (RH) στους 25 °C, και εύρος θερμοκρασιών στους 25 °C ± 2 °C.

Για τη σωστή λειτουργία του αισθητήρα ο κατασκευαστής προτείνει:

- Οι μετρήσεις υγρασίας να γίνονται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, καθώς η σχετική υγρασία εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία.
- Ο αισθητήρας να είναι σε απόσταση από πηγές θερμότητας.
- Να μην έρχεται σε άμεση επαφή με ηλιακό φως ή υπεριώδη ακτινοβολία.



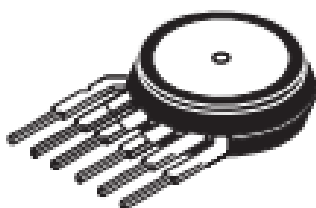
Σχήμα 6.38: Συνδεσμολογία του DHT11 με μικροελεγκτή Arduino

Η σύνδεση του αισθητήρα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας με το Arduino έγινε με βάση το σχήμα 6.10. Για τη σύνδεση χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις από τις τέσσερις ακίδες του αισθητήρα και συνδέθηκαν η μία με τροφοδοσία, μια άλλη με GND και η άλλη με το Arduino στη θέση D4 [78].

6.5.2 Αισθητήρας πίεσης MPX4250

Η μέτρηση της πίεσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αισθητήρα MPX4250 της εταιρείας NXP semiconductors. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας

είναι σχεδιασμένος για χρήση με μέσο πίεσης τον ξηρό αέρα, και δεν συνιστάται η χρησιμοποίησή του σε άλλο μέσο πίεσης.



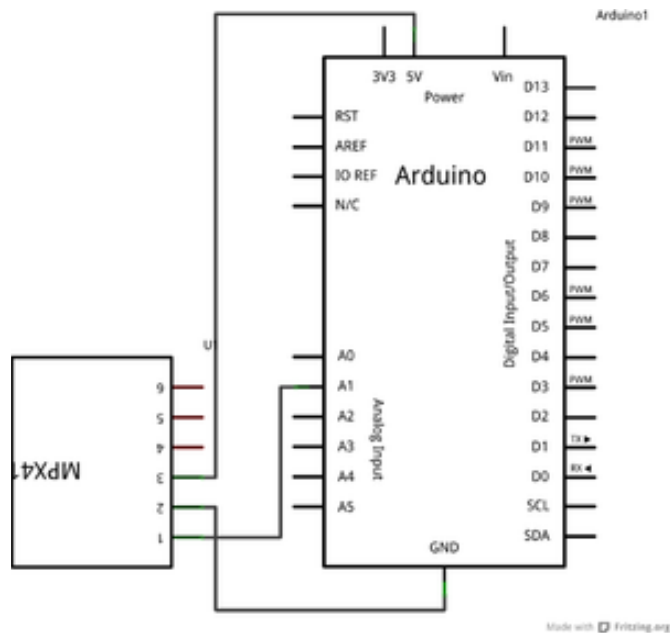
Σχήμα 6.39: Αισθητήρας πίεσης MPX4250

Για τη λειτουργία του απαιτείται τάση τροφοδοσίας μεταξύ 4,85 και 5,35 V, με τυπική τάση στους 25 °C τα 5,1 V. Έχει εύρος μέτρησης πίεσης από 0 έως και 250 kPa, και παροχή ρεύματος από 7 έως 10 mA. Ο χρόνος απόκρισης του είναι περίπου 1ms.

Ορισμένα χαρακτηριστικά του MPX4250 είναι:

- Έχει διαθέσιμες διαφορικές και μετρητικές εφαρμογές.
- 1,4% μέγιστο σφάλμα σε θερμοκρασίες από 0 έως και 85 °C.
- Υψηλή ακρίβεια.
- Γρήγορη απόκριση.
- Προσφέρει μείωση του βάρους και του όγκου συγκριτικά με τις υφιστάμενες υβριδικές μονάδες
- Χαμηλό κόστος.

Στο σχήμα 6.12 φαίνεται η συνδεσμολογία του αισθητήρα με τον μικροελεγκτή Arduino, όπου στέλνονται και καταγράφονται οι μεταβολές στην πίεση. Μία ακίδα συνδέεται με τη γείωση GND και άλλες δύο με Vin και Vout αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 6.40: Συνδεσμολογία αισθητήρα MPX4250 με Arduino.

6.5.3 Αισθητήρας CO₂ MH-Z16

Η μέτρηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αισθητήρα MH-Z16 της εταιρείας Zhengzhou Winsen Electronics.

Το μήκος του αισθητήρα είναι 9,7 cm, το πλάτος 1,7 cm και το ύψος 2 cm, ενώ η διάμετρος του είναι 1,55cm.



Σχήμα 6.41: Αισθητήρας CO₂ MH-Z16

Η συγκέντρωση του CO₂ υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$C_{ppm} = 2000 \times \frac{(T_H - 2ms)}{(T_H + T_L - 4ms)}, \text{ εξίσωση 6.4}$$

Όπου:

- C_{ppm} είναι η συγκέντρωση του CO₂
- T_H ο χρόνος για ένα πλήρη κύκλο στο υψηλό επίπεδο
- T_L ο χρόνος για έναν πλήρη κύκλο στο χαμηλό επίπεδο.

Ορισμένα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αισθητήρα είναι:

- Καλή σταθερότητα
- Υψηλή ευαισθησία
- Υψηλή ανάλυση
- Γρήγορη απόκριση
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Αντίσταση στην υγρασία
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

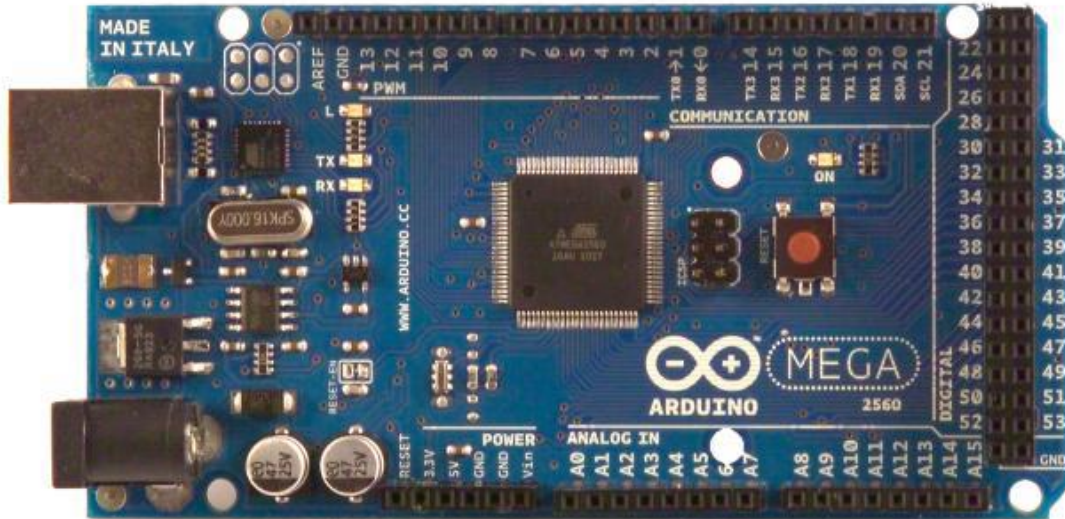
Ο MH-Z16 απαιτεί τάση τροφοδοσίας από 4,5 έως 5,5 V και μέσο ρεύμα μικρότερο από 85 mA. Ο χρόνος απόκρισης είναι περίπου 30 δευτερόλεπτα, ενώ η συσκευή απαιτεί χρόνο προθέρμανσης 3 λεπτών.

Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι λειτουργικός ο αισθητήρας είναι από 0 έως 50 °C και μεταξύ 0-95 % σχετική υγρασία.

Για τη σύνδεση του αισθητήρα με το Arduino χρησιμοποιήθηκαν οι 4 ακίδες (pins) όπου συνδέθηκαν η μια με Vin, μια άλλη με GND και δύο ακόμα με PWM (Pulse Width Modulation).

6.5.4 Μικροελεγκτής Arduino

Ως μικροελεγκτής επιλέχθηκε το μοντέλο Arduino 2560 MEGA, που είναι μια απλή πλακέτα όπου συνδέονται όλοι οι παραπάνω αισθητήρες, και τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος.



Σχήμα 6.42: *Arduino MEGA 2560*

Το Arduino mega 2560 λειτουργεί με τροφοδοσία 5V DC από την είσοδο του USB ή με έως 20 V DC από την είσοδο της τροφοδοσίας. Ωστόσο, το προτεινόμενο εύρος τροφοδοσίας από τον κατασκευαστή είναι μεταξύ 7 και 12 V, καθώς σε χαμηλότερες τιμές παρουσιάζεται αστάθεια, ενώ σε υψηλότερες υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης.

Μετά από τη σύνδεση όλων των μερών του συστήματος στον μικροελεγκτή έγινε προγραμματισμός του μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, ώστε ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνει από τους αισθητήρες να πραγματοποιεί τις κατάλληλες ενέργειες για την επίτευξη των ιδανικών συνθηκών μέσα στον αντιδραστήρα.

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

```
//-----START OF INCLUDE-----
//----- LCD Display -----
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
//----- CO2 Sensor -----
#include <SoftwareSerial.h>
#include <NDIR_SoftwareSerial.h>
//----- Temp sensor -----
```

```

#include "dht.h"

//-----START OF DEFINITIONS -----

//----- CO2 Sensor -----

NDIR_SoftwareSerial mySensor(10, 11); // RX, TX

//-----

//----- 8 Channel Relay -----

#define ValveIn 43

#define ValveOut 41

//-----Pump-----

unsigned long previous_time1 = 0;

//-----Valve-----

unsigned long previous_time2 = 0;

//----- Temp sensor -----

#define DHT11_PIN 7

dht DHT;

//----- Pressure -----

int PressureSensorPin = A1;

//-----START OF VOID SETUP-----

void setup()

{

//----- LCD Display CHECK -----

lcd.init();          // initialize the lcd

lcd.init();

lcd.backlight();

lcd.setCursor(1, 0);

lcd.print("LCD CHECK");

lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print("HELLO");

delay(2000);

//-----

```

```

Serial.begin(9600);

//----- Relay SETUP -----

pinMode(ValveIn, OUTPUT);
pinMode(ValveOut, OUTPUT);
// pinMode(Pump, OUTPUT);
digitalWrite(ValveIn, LOW);
digitalWrite(ValveOut, LOW);

//----- CO2 Sensor SETUP -----

if (mySensor.begin()) {
  lcd.setCursor(1, 0);
  lcd.print("CO2 Init.");
  Serial.println("Wait 10 seconds for sensor initialization...");
  delay(10000);
}
else {
  Serial.println("ERROR: Failed to connect to the sensor.");
  while (1);
}
}

void loop() {
  int chk = DHT.read11(DHT11_PIN);
  int temp = DHT.temperature;
  int humidity = DHT.humidity;
  Serial.print("Temp:");
  Serial.println(temp);
  Serial.print("Hmdt:");
  Serial.println(humidity);

  float Pressure = analogRead(PressureSensorPin);
  float Pressure2 = (((Pressure / 1023) + 0.04) / 0.004) * 0.145; //by 0.145 to calc psi

```

```

Serial.print("Pressure:");
Serial.println(Pressure2);
if (Pressure2 < 18) {
    digitalWrite(ValveOut, LOW);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(2, 0);
    lcd.print("NORMAL Pr.");
    lcd.setCursor(4, 1);
    lcd.print(Pressure2);
    delay(1000);

    //----- Read CO2-----
    if (mySensor.measure()) {
        int co2ppm = mySensor.ppm;
        Serial.print("CO2 Concentration in ppm: ");
        Serial.println(co2ppm);
        if (co2ppm >= 10000) {
            digitalWrite(ValveIn, LOW);
            digitalWrite(ValveOut, LOW);
            lcd.clear();
            lcd.setCursor(3, 0);
            lcd.print("CO2 High");
            lcd.setCursor(4, 1);
            lcd.print(co2ppm);
            lcd.print("ppm");
            delay(1000);
        }
    }
    else {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(3, 0);

```

```

    lcd.print("CO2 Low");

    lcd.setCursor(4, 1);

    lcd.print(co2ppm);

    lcd.print("ppm");

    delay(1000);

    unsigned long current_time2 = millis();

    if (current_time2 - previous_time2 >= 20000) {

        digitalWrite(ValveIn, HIGH);

        digitalWrite(ValveOut, LOW);

        delay(3000);

        digitalWrite(ValveIn, LOW);

        digitalWrite(ValveOut, HIGH);

        delay(1000);

        digitalWrite(ValveOut, LOW);

        previous_time2 = current_time2;

    }

}

}

else {

    Serial.println("Sensor communication error.");

    lcd.clear();

    lcd.setCursor(3, 1);

    lcd.print("CO2 Error");

}

delay(1000);

}

else {

    digitalWrite(ValveOut, HIGH);

    lcd.clear();

    lcd.setCursor(2, 0);

```

```

    lcd.print("OVERPRESSURE");

    lcd.setCursor(0, 1);

    lcd.print(Pressure2);

    delay(1000);
}

lcd.clear();

lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print("Temp[C]: ");

lcd.print(temp);

lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print("Hmdt[%]: ");

lcd.print(humidity);

delay(2000);

unsigned long current_time1 = millis();

/*
    if (current_time1 - previous_time1 >= 3600000) {

        digitalWrite(Pump, LOW);

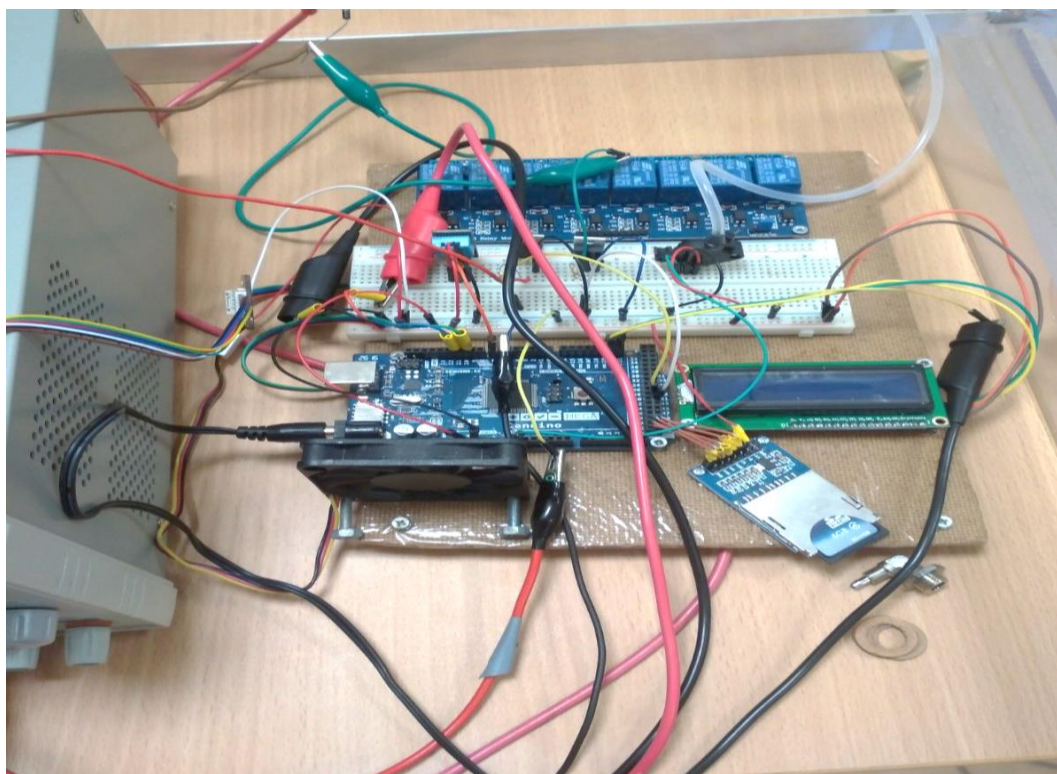
        delay(3000);

        digitalWrite(Pump, HIGH);

        previous_time1 = current_time1;

    }
*/
}

```



Σχήμα 6.43: *Σύνδεση εξαρτημάτων στον μικροελεγκτή*

6.6 Διαδικασία πειράματος

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φωτοβιοαντιδραστήρα τοποθετήθηκαν 7 λίτρα νερού εμπλουτισμένου με θρεπτικά συστατικά και μικροφύκη μέσα στην κατασκευή για καλλιέργεια.

Οι ιδανικές συνθήκες για την αναπαραγωγή των κυττάρων είναι πίεση από 15 έως και 18 psi, θερμοκρασία 20 °C και συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα κοντά στο 1%.

Οι αισθητήρες πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας και CO₂ λάμβαναν συνεχώς τιμές, ούτως ώστε να εξασφαλιστούν οι επιθυμητές συνθήκες μέσα στο θάλαμο.

Η βαλβίδα εισόδου είναι συνδεδεμένη σε μια φιάλη διοξειδίου του άνθρακα και έχει σκοπό την παροχή του αερίου στο σύστημα, όταν αυτό πέφτει κάτω από το επιθυμητό επίπεδο. Στην περίπτωση που ο αισθητήρας CO₂ καταγράψει έλλειμα στη συγκέντρωσή του, τότε αυτόματα ανοίγει η βαλβίδα εισόδου. Η δεύτερη βαλβίδα είναι για εκτόνωση, εφόσον αυτή χρειαστεί. Σε περίπτωση που η πίεση ξεπερνάει τα 18 psi, ή η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα ξεπερνάει το 1%, ανοίγει αυτόματα η αντλία εξόδου, ώστε να αποσυμπιεστεί ο θάλαμος.

Ο ανεμιστήρας και η περισταλτική αντλία βρισκόντουσαν σε λειτουργία συνεχώς, σε όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας. Οι λαμπτήρες LED ήταν επίσης αναμμένοι συνεχώς.

Κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρατηρήθηκε το φαινόμενο της εξάτμισης, το οποίο επηρέαζε αρνητικά την καλλιέργεια. Υπολογίστηκε ότι ο ρυθμός εξάτμισης είναι 60ml ανά ώρα.

Για την αντιμετώπιση της εξάτμισης τοποθετήθηκε μία διάταξη αναπλήρωσης νερού, που αποτελείται από ένα μικροελεγκτή AT MEGA2500, ένα ρελέ και μία αντλία. Ο μικροελεγκτής προγραμματίστηκε να παρέχει 10ml νερού κάθε 10 λεπτά, σύμφωνα με τον κώδικα που παρατίθεται παρακάτω.

```
#define relay1 0

void setup()
{
  digitalWrite(relay1,HIGH);
  pinMode(relay1, OUTPUT);
}

void loop()
{
  digitalWrite(relay1,LOW);
  delay(900000);
  digitalWrite(relay1,HIGH);
  delay(10000);
}
```

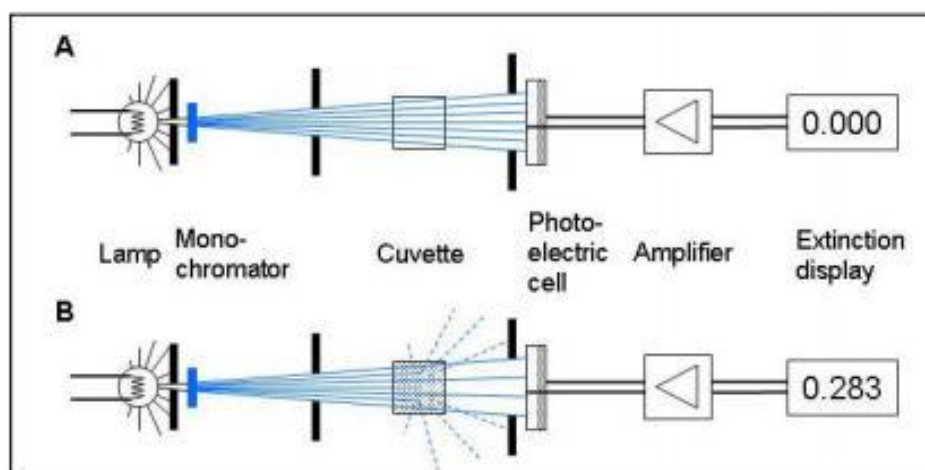
6.7 Αποτελέσματα

6.7.1 Οπτική πυκνότητα

Η οπτική πυκνότητα(Optical Density) είναι μια μέθοδος για τον έλεγχο της ανάπτυξης και της μεταβολικής δραστηριότητας των κυττάρων των μικροφυκών, μετρώντας ουσιαστικά την πυκνότητα των κυττάρων της καλλιέργειας.

Με τη χρήση ενός φασματοφωτόμετρου προσπίπτει φως σε δείγμα της καλλιέργειας, σε ειδικό δοχείο. Όσο πιο πυκνό είναι το δείγμα, τόσο λιγότερο φως διέρχεται από το δείγμα και αντίστροφα.

Στη συνέχεια, με τη χρήση φωτοκύτταρου μετράται η δέσμη φωτός αμέσως μόλις εξέρχεται από το δείγμα. Εφόσον δεν υπάρχουν κύτταρα η δέσμη παραμένει ίδια με το δείγμα αναφοράς (νερό), και η οπτική πυκνότητα είναι μηδέν.



Σχήμα 6.44: Λειτουργία φασματοφωτόμετρου A) χωρίς κύτταρα και B) με κύτταρα

Με την μέθοδο της οπτικής πυκνότητας μπορεί επίσης να γίνει και σύγκριση δύο διαφορετικών καλλιεργειών, με ίδια αρχική ποσότητα και μήκος κύματος, ώστε να βρεθεί ποια από τις δύο έχει ταχύτερο ρυθμό ανάπτυξης.

Το μόνο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν μπορεί να γίνει διαχωρισμός με νεκρά κύτταρα που πιθανόν να υπάρχουν στην καλλιέργεια, ενώ δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί ο αριθμός τους, καθώς η σκέδαση του φωτός σχετίζεται με το ξηρό βάρος τους.

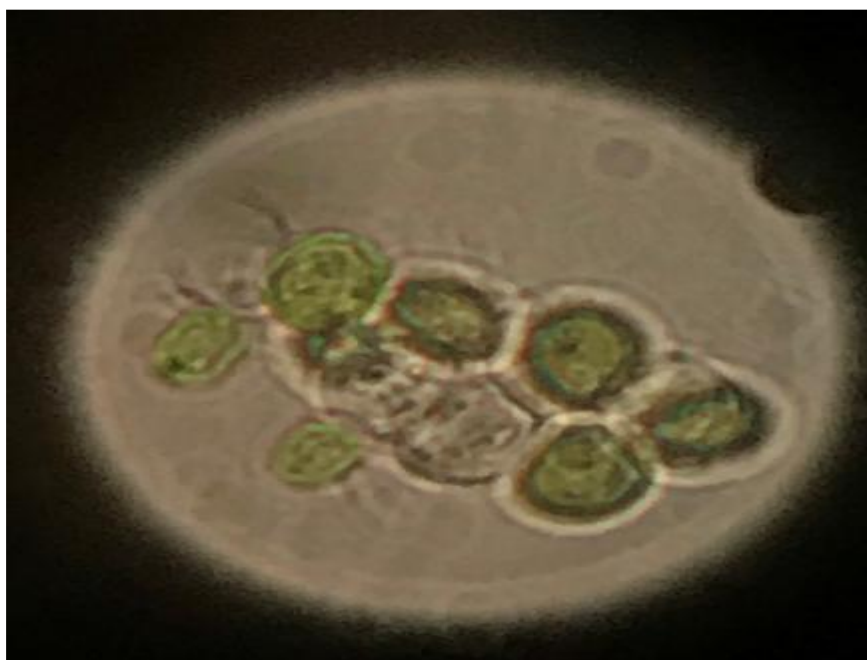
6.7.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Κατά την πειραματική διαδικασία τοποθετήθηκαν τα κύτταρα στο θάλαμο για καλλιέργεια. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε για 72 ώρες.

Πριν από την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε μέτρηση του όγκου της καλλιέργειας, με τη μέθοδο της οπτικής πυκνότητας. Η ίδια μέτρηση πραγματοποιήθηκε και στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Η μέτρηση της οπτικής πυκνότητας πραγματοποιήθηκε σε μήκος κύματος 680 nm.

Παράλληλα, στο κέλυφος του αντιδραστήρα τοποθετήθηκε φιάλη 500ml με κύτταρα από την ίδια καλλιέργεια η οποία αναδευόταν με μαγνητική συσκευή ανάδευσης προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση της αποτελεσματικότητας.

Η αρχική μέτρηση της οπτικής πυκνότητας της καλλιέργειας ήταν 1, ενώ η μέτρηση μετά από 72 ώρες ήταν 1.1 για τον αντιδραστήρα και 1.06 για τα κύτταρα στη φιάλη, το οποίο σημαίνει 10% αύξηση στην ποσότητα της βιομάζας του αντιδραστήρα και 6% στη φιάλη. Θεωρείται πως με βελτιώσεις στις συνθήκες καλλιέργειας, η απόδοση μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω.



Σχήμα 6.45: Εικόνα κυττάρων από μικροσκόπιο

6.7.3 Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι

Στόχος της εργασίας ήταν η κατασκευή ενός κλειστού συστήματος καλλιέργειας, όπου θα εξασφαλίζει τις ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη των κυττάρων, με σκοπό τη βελτίωση της παραγωγικότητας της βιομάζας.

Η αυξημένη οπτική πυκνότητα στο τέλος του πειράματος υποδηλώνει ότι τα κύτταρα όχι μόνο επέζησαν την διαδικασία της καλλιέργειας, αλλά και πολλαπλασιάστηκαν.

Το γεγονός αυτό υποδηλώνει τη σωστή λειτουργία του φωτοβιοαντιδραστήρα. Το σύστημα ελέγχου, οι λαμπτήρες LED και οι 2 βαλβίδες καταφέρανε να διατηρήσουν τις επιθυμητές συνθήκες για την ανάπτυξη της καλλιέργειας, ενώ παράλληλα ο ανεμιστήρας και η αντλία δούλεψανε χωρίς κανένα απολύτως πρόβλημα. Τέλος, η διάταξη αναπλήρωσης νερού ήταν αποτελεσματική στην εξάλειψη του προβλήματος της εξάτμισης του νερού.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος μιας έρευνας, με απώτερο σκοπό την μετάβαση της παραγωγής από εργαστηριακό σε βιομηχανικό επίπεδο. Με βάση αυτή την κατεύθυνση παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω μελέτη:

- Πραγματοποίηση πειραμάτων μεγαλύτερης διάρκειας, για να παρατηρηθεί η πορεία της καλλιέργειας σε βάθος χρόνου.
- Μελέτη και άλλων ειδών κυττάρων μικροάλγης για σύγκριση της απόδοσης της λειτουργίας του συστήματος.
- Χρήση υπολογιστικών προσομοιώσεων με σκοπό τη βελτιστοποίηση όλων των αυξητικών παραγόντων της καλλιέργειας.

Κεφάλαιο 7 Βιβλιογραφία

1. www.census.gov/population
2. Ηνωμένα Έθνη, World Population Prospects : The 1996 Revision.
3. www.grida.no
4. <https://ec.europa.eu/eurostat>
5. <https://www.gov.uk/government/organisations/government-office-for-science>
6. R.A. Andersen, "Algae. In: J.C. Hunter-Cevera and C.A. Belt eds. Maintaining Cultures for Biotechnology and Industry", London (1996).
7. W. Wiessner, E. Schnepf, R.C. Starr, "Algae, Environment Human Affairs", Bristol (1995).
8. A. Jassby, "Spirulina: a Model of Microalgae as Human Food. In: C. Lembi, J.R. Waaland eds. Algae and Human Affairs", Cambridge (1988).
9. <http://www.ypeka.gr>
10. http://www.uhhe.gr/images/fotos/img/viomaza_phges.jpg
11. "Το ενεργειακό δυναμικό της βιομάζας γεωργικών και δασικών υποπροϊόντων", Κ. Αποστολάκης, Σ. Κυρίσης, Χ. Σούτερ, ΕΛΚΕΠΑ-ΙΤΕ, Αθήνα, 1987.
12. J.A. Gimpel, E.A. Specht, D.R. Georgianna, S.P. Mayfield, "Advances in Microalgae Engineering and Synthetic Biology Applications for Biofuel Production", Current Opinion in Chemical Biology, USA (2013).
13. Ε. Βουλτσιάδου, Θ. Αμπατζόπουλος, Ε. Αντωνοπούλου, Κ. Γκάνιας, Σ. Γκέλης, Α. Στάικου, Α. Τριανταφυλλίδης, "Υδατοκαλλιέργειες Οργανισμοί, Συστήματα Παραγωγής, Προοπτικές", ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη (2015).
14. Π. Χριστακόπουλος, Ε. Τόπακας, "Βιοτεχνολογική Παραγωγή Βιοκαυσίμων, 2ης & 3ης Γενιάς Βιοκαύσιμα", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα (2015).
15. Ελληνική Φυκολογική Εταιρεία (http://www.phycology.gr/downloads/Fykointyro_X.pdf).
16. Γ. Μάρκου, Ι. Τζοβένης, Η. Νερατζής, "Μικροφύκη : Καλλιέργεια και Βιομηχανικές Εφαρμογές", E-Journal of Science & Technology (e-JST) (2013).
17. L. Brennan, P. Owende, " Biofuels from Microalgae-A Review of Technologies for Production, Processing, and Extractions of Biofuels and Co-Products", Renewable and Sustainable Energy Reviews (2010).
18. R. Harun, M. Singht, G.M. Forde, M.K. Danquah, Bioprocess Engineering of Microalgae to Produce a Variety of Consumer Products", Renewable and Sustainable Energy Reviews (2010).
19. Ελληνική Φυκολογική Εταιρεία <http://phycology.gr>
20. <https://ibiologia.com/algae/>
21. M. Gantar, Z. Svircev, "Microalgae and Cyanobacteria : Food for Thought (1)", Journal of Phycology (2008).
22. J. Nickelsen, U. Kuck, "The Unicellular Green Alga Chlamydomonas Reinhardtii as an Experimental System to Study Chloroplast", RNA Metabolism Naturwissenschaften (2000).
23. Λυμπέτη Αιμιλία «Διαχωρισμός συνεχούς ροής μαγνητικά τροποποιημένων κυττάρων άλγης»

24. K. Chojnacka, F.J. Marquez-Rocha, "Kinetic and Stoichiometric Relationships of the Energy and Carbon Metabolism in the Culture of Microalgae", *Biotechnology Advances* (2004).
25. A.P. Abreu, B. Fernandes, A.A.Vicente, J. Texeira, G. Dragone, "Mixotrophic Cultivation of *Chlorella Vulgaris* Using Industrial Dairy Waste as Organic Carbon Source", *Bioresource Technology* (2012).
26. M.R. Andrade, J.A.V. Costa, "Mictrophic Cultivation of Microalgae *Spirulina Platensis* Using Molasses at Organic Substrate", *Aquaculture* (2007).
27. F. Chen, "High Cell Density Culture of Microalgae in Heterotrophic Growth", *Trends in Biotechnology* (1996).
28. K. Chojnacka, A. Zielinska, "Evaluation of Growth Yield of *Spirulina* (*Arthrospira*) sp. In Photoautotrophic, Heterotrophic and Mixotrophic Cultures", *World Journal of Microbiology and Biotechnology* (2011).
29. C. Gao, Y. Zhai, Y. Ding, Q. Wu, "Application of Sweet Sorghum for Biodiesel Production by Heterotrophic Microalgae *Chlorella Protothecoides*", *Applied Energy* (2010).
30. L. Gouveia, "Microalgae as a Feedstock for biofuels", Springer (2011).
31. P. Spolaore, C. Joannis-Cassan, E. Duran, A. Isambert, "Commercial Applications of Microalgae", *Journal of Bioscience and Bioengineering* (2006).
32. J.B. Waterbury. "The Cyanobacteria-Isolation, Purification and Identification. In: M. Dworkin eds. *The Prokaryotes – A Handbook on the Biology of Bacteria*" (2006).
33. B. Gikonyo, "Advances in Biofuel Production : Algae and Aquatic Plants", Apple Academic Press (2013).
34. J.U. Grobbelaar, "Algal Nutrition. In Richmond, A., ed., *Handbook of Microalgal Culture*", *Biotechnology and Applied Phycology*, Blackwell (2004).
35. Τζανής Θεόδωρος «Μελέτη νέων μεθόδων καλλιέργειών για παραγωγή βιομάζας μικροφυκών»
36. O. Jorquera, A. Kiperstok, E.A. Sales, M. Embirucu, M.L. Ghirardi, "Comparative Energy Life-Cycle Analyses of Microalgal Biomass Production in Open Ponds and Photobioreactors", *Bioresource Technology* (2010).
37. M. Marsullo, A. Mian A.V. Ensinas, G. Manente, A. Lazzaretto, F. Marechal, "Dynamic Modeling of the Microalgae Cultivation Phase for Energy Production in Open Raceway Ponds and Flat Panel Photobioreactors", *Frontiers in Energy Research* (2005).
38. D. Chaumont, "Biotechnology of Algal Biomass Production : a Review of Systems for Outdoor Mass Culture", *Journal of Applied Phycology* (1993).
39. J.G. Day, S.P. Slocombe, M.S. Stanley, "Overcoming Biological Constraints to Enable the Exploitation of Microalgae for Biofuels", *Bioresource Technology* (2011).
40. D. Bilanovic, A. Andaratchew, T. Kroeger, G Shelef, "Freshwater and Marine Microalgae Sequestering of CO₂ at Different C and N Concentrations – Response Surface Methodology Analysis", *Energy Conversion and Management* (2009).
41. M.A. Borowitzka, "Commercial Production of Microalgae : Ponds, Tanks, Tubes and Fermenters", *Journal of Biotechnology* (1999).
42. C.U. Ugwu, H. Aoyagi, H. Uchiyama, "Photobioreactors for Mass Cultivation of Algae", *Bioresource Technology* (2008).

43. A. Richmond, "Open Systems for the Mass Production of Photoautotrophic Microalgae Outdoors : Physiological Principles", *Journal of Applied Phycology* (1992).
44. <http://www.Cynanotech.com>.
45. O.P. Pulz, "Photobioreactors : Production Systems for Phototrophic Microorganisms", *Applied Microbiology and Biotechnology* (2001).
46. A.P. Carvalho, L.A. Meireles, F.X. Malcata, "Microalgal Reactors : A Review of Enclosed System Designs and Performances", *Biotechnology Progress* (2006).
47. Y. Chisti, M. Moo-Young, "Bioreactors, In : R. Meyers eds. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*", San Diego (2002).
48. E. Molina, J. Fernandez, F.G. Acien, Y. Chisti, "Tubular Photobioreactor Design for Algal Cultures", *Journal of Biotechnology* (2001).
49. N. Eriksen, "The Technology of Microalgal Culturing", *Biotechnology Letters* (2008).
50. A. Carvalho, S. Silva, J. Baptista, F. Malcata, "Light Requirements in Microalgal Photobioreactors : An Overview of Biophotonic Aspects", *Applied Microbiology and Biotechnology* (2011).
51. C.Y. Chen, K.L. Yeh, R. Aisyah, D.J. Lee, J.S. Chang, "Cultivation, Photobioreactor Design and Harvesting of Microalgae for Biodiesel Production : A Critical Review", *Bioresource Technology* (2011).
52. F. Lehr, C. Posten, "Closed Photo-Bioreactors as Tools for Biofuel Production", *Current Opinion in Biotechnology* (2009).
53. M. Janssen, "Cultivation of Microalgae: Effect of Light/Dark Cycles on Biomass Yield" (2002).
54. H. Xu, X.L. Miao, Q.Y. Wu, "High Quality Biodiesel Production from a Microalgae *Chlorella Protothecoides* by Heterotrophic Growth in Fermenters", *Journal of Biotechnology* (2006).
55. Y.N. Liang, N. Sarkany, Y. Cui, "Biomass and Lipid Productivities of *Chlorella Vulgaris* Under Autotrophic, Heterotrophic and Mixotrophic Growth Conditions", *Biotechnology Letters* (2009).
56. E. Molina Grima, F.G.A. Fernandez, F. Garcia Camacho, Y. Chisti, "Photobioreactors : Light Regime, Mass Transfer and Scaleup", *Journal of Biotechnology* (1999).
57. B. Fernandes, G. Dragone, J. Teixeira, A. Vicente, "Light Regime Characterization in an Airlift Photobioreactor for Production of Microalgae with High Starch Content", *Applied Biochemistry and Biotechnology* (2010).
58. A. Richmond, "Physiological Principles and Modes of Cultivation in Mass Production of Photoautotrophic Microalgae. In Z. Cohen eds. *Chemical from Microalgae*", Philadelphia (1999).
59. A. Carvalho, C. Monteiro, F. Malcata, "Simultaneous Effect of Irradiance and Temperature on Biochemical Composition of the Microalgae *Pavlova Lutheri*", *Journal of Applied Phycology* (2009).
60. S. Jensen, G. Knutsen, "Influence of Light and Temperature on Photoinhibition of Photosynthesis *Spirulina Platensis*", *Journal of Applied Phycology* (1993).
61. A. Vonshak, "Spirulina : Growth, Physiology and Biochemistry. In: A. Vonshak eds. *Spirulina Platensis (Arthrospira): Physiology, Cell-Biology and Biotechnology*", London (2002).

62. M. Borowitzka, "Limits to Growth. In: Y.S. Wong and N.F.Y. Tam eds. Wastewater treatment with Algae" (1998).
63. A. Richmond, "Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology" (2004).
64. N.C. Yeh, J.P. Chung, "High-Brightness LEDs-Energy Efficient Lighting Sources and Their Potential in Indoor Plant Cultivation", Renewable and Sustainable Energy Reviews (2009).
65. Tsoglin LN, Gabel BV, Fal'kovich TN, Semenenko VE. Closed photobioreactors for microalgal production. Russ J Plant Physiol 1996;43(1):131–6.
66. S.-H. Ho, C.-Y. Chen, D.-J. Lee, J.-S. Chang, Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation
67. S.A. Razzak, M.M. Hossain, R.A. Lucky, A.S. Bassi, H. de Lasa, Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing: a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 27 (2013) 622e653.
68. S.-H. Ho, M.-C. Chan, C.-C. Liu, C.-Y. Chen, W.-L. Lee, D.-J. Lee, J.-S. Chang, Enhancing lutein productivity of an indigenous microalga *Scenedesmus obliquus* FSP-3 using light-related strategies, Bioresource Technology 152 (2014) 275e282
69. A. Juneja, R.M. Ceballos, G.S. Murthy, Effects of environmental factors and nutrient availability on the biochemical composition of algae for biofuels production: a review, Energies 6 (2013) 4607e4638
70. Z.I. Khalil, M.M. Asker, S. El-Sayed, I.A. Kobbia, Effect of pH on growth and biochemical responses of *Dunaliella bardawil* and *Chlorella ellipsoidea*, World Journal of Microbiology and Biotechnology 26 (2010) 1225e1231.
71. M. Calvin, 40 years of photosynthesis and related activities, Photosynthesis Research 21 (1989) 3e16.
72. X. Wang, Z. Ruan, P. Sheridan, D. Boileau, Y. Liu, W. Liao, Two-stage photoautotrophic cultivation to improve carbohydrate production in *Chlamydomonas reinhardtii*, Biomass and Bioenergy 74 (2015) 280e287.
73. J. Raven, Inorganic carbon acquisition by eukaryotic algae: four current questions, Photosynthesis Research 106 (2010) 123e134.
74. T. Chrismadha, M.A. Borowitzka, Effect of cell density and irradiance on growth, proximate composition and eicosapentaenoic acid production of *Phaeodactylum tricorutum* grown in a tubular photobioreactor, Journal of Applied Phycology 6 (1994) 67e74.
75. A.S. Miron, A.C. Gomez, F.G. Camacho, E.M. Grima, Y. Chisti, Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae, Journal of Biotechnology 70 (1999) 249e270.
76. Microalgae removal of CO₂ from flue gas, Xing Zhang
77. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/336L/Fluidhtml/node135.html>
78. <https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/DHT11>
79. <http://www.plexiglas-petropoulos.gr/%CF%84%CE%BF-%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C-plexiglass/>
80. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CF%80%CE%BB%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C>

81. ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ν. ΧΩΤΟΣ, « ΒΙΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΥΚΩΝ», Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Τεχνολογίας Αλιείας-Υδατοκαλλιεργειών, Εργαστήριο Καλλιέργειας Πλαγκτού, 2018
82. Mixing in Bubble Column and Airlift Reactors, A.Sánchez Mirón, M.-C.Cerón García, F.García Camacho, E.Molina Grima, Y.Chisti