T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKROALGLER KULLANILARAK TASARLANAN FOTOBİYOREAKTÖR SİSTEMLERİNİN MİMARİ TASARIM DİSİPLİNİNE AKTARILMASINDAKİ SORUNLAR

Yunus Turan PEKMEZCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Bina Araştırma ve Planlama Programı

Danışman

Doç. Dr. Funda ÖZTÜRK KERESTECİOĞLU

Eylül, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKROALGLER KULLANILARAK TASARLANAN FOTOBİYOREAKTÖR SİSTEMLERİNİN MİMARİ TASARIM DİSİPLİNİNE AKTARILMASINDAKİ SORUNLAR

Yunus Turan PEKMEZCİ tarafından hazırlanan tez çalışması 23.08.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Bina Araştırma ve Planlama Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Funda ÖZTÜRK KERESTECİOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Funda ÖZTÜRK KERESTECİOĞLU , Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Meltem VATAN KAPTAN, Üye
Bahçeşehir Üniversitesi _____

Dr. Öğretim Üyesi Meliha Pınar SİPAHİ , Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Funda ÖZTÜRK KERESTECİOĞLU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Mikroalgler Kullanılarak Tasarlanan Fotobiyoreaktör Sistemlerinin Mimari Tasarım Disiplinine Aktarılmasındaki Sorunlar başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yunus Turan PEKMEZCİ

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını; çalışmanın yenilikçi konusunun belirlenmesinde ve hazırlanma sürecinin her aşamasında değerli bilgilerini ve zamanını benden esirgemeyerek her fırsatta çalışmamla yakından ilgilenen, eleştirileriyle yol gösteren ve bana akademik anlamda birçok şey öğreten değerli tez danışmanım Doç. Dr. Funda Öztürk Kerestecioğlu'na, tüm yardımseverliğiyle her ihtiyacım olduğunda yanımda olan ve 'Mikroalgler' ile ilgili deneyimlerini benimle paylaşarak bana birçok şey öğreten saygıdeğer Doç.Dr. Sevan Aydın' a, hayatımın her anında benimle birlikte olan annem Filiz Pekmezci, babam Necati Pekmezci, ikiz kardeşim Dr.Dt. Mustafa Pekmezci ve arkadaşım Barış Kolik'e ithaf ediyorum.

Varlıklarına ve desteklerine teşekkür ederim.

Yunus Turan PEKMEZCİ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiv

ÖZET xv

ABSTRACT xvii

1 Giriş 1

1.1 Literatür Özeti 2

1.2 Tezin Amacı 6

1.3 Orijinal Katkı 6

2 Algler, Fotobiyoreaktör ve Mimari 9

2.1 Alglerin Diğer Yenilenebilir Enerji Kaynakları İle Karşılaştırılması 9

2.1.1 Bölüm Sonucu 18

2.2 Mikroalg Yetiştirme Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi ve Mimaride Kullanılabilirliği 18

2.2.1 Açık Havuz Biyoreaktörler 20

2.2.2 Kapalı Fotobiyoreaktörler 23

2.2.3 Bölüm Sonucu 37

2.3 Kapalı Fotobiyoreaktörde Mikroalg Yetiştirme Koşulları 39

2.3.1 Işık 40

2.3.2 Karıştırma 44

2.3.3 Sıcaklık 48

2.3.4 CO_2 Kullanımı 50
2.3.5 O_2 Giderimi 51
2.3.6 Su ve Tuzluluk 53
2.3.7 Besin 54
2.3.8 pH 56
2.3.9 Reaktör Geometrisi – Ölçeklendirme ve Malzeme seçimi 57
2.3.10 Yer Seçimi (Lokasyon) ve Yönlenme 59
2.3.11 Temizlik 60
2.3.12 Bölüm Sonucu 61
2.4 Mimaride Mikroalgler veEnerji Üretimi 62
2.4.1 Bölüm Sonucu 66
3 Mimari Tasarım Bağlamında Alglerin Mimariye Entegrasyonu: Alg Mimarisi 67
3.1 Bina Ölçeğinde Yaklaşımlar 67
3.1.1 B.I.Q Evi, Hamburg, Almanya 68
3.1.2 Alg Dokuması : Binalar İçin Hafif Bir Fotobiyoreaktör 77
3.1.3 Sıfır Süreç Konsept Binası, Kaliforniya, ABD 84
3.1.4 Photo. Synth. Etica, Dublin, İrlanda 87
3.2 Kentsel Ölçekte Bütüncül Yaklaşımlar 89
3.2.1 Kent Kültürü, Cenevre, İsviçre 89
3.2.2 Project: Carbon T.A.P. (Tunnel Algae Park), Philadelphia, PA 91
3.2.3 AlgaEnergetiCity İstanbul, Türkiye 94
3.3 Eleman Düzeyinde Yaklaşımlar 97
3.3.1 Street Lamp (Pierre Calleja) 97
3.3.2 Urban Algae Canopy (ecoLogic Studio) 102
3.3.3 Living Things / Algae Furnishings 107

3.4 Mimaride Kullanım Açısından Alg Mimarisi Örneklerinin Değerlendirilmesi……..……..121

3.4.1 Seçilen Fotobiyoreaktör Tipinin Alg Mimarisine Negatif Etkileri 121

3.4.2 Projenin Bulunduğu Lokasyonun Alg Mimarisine Negatif Etkileri 124

3.4.3 Tercih Edilen İşletme Modelinin Alg Mimarisine Negatif Etkileri 125

3.5 Bölüm Sonucu…….……128

4 Sonuç ve Öneriler..... 129

4.1 Sonuç..... 129

4.2 Öneriler 131

Kaynakça 132

Tezden Üretilmiş Yayınlar..... 156

SİMGE LİSTESİ

NH_4^+	Amonyum
NO_2	Azot Dioksit
Hg	Cıva
vvm	Dakikadaki Kap Hacmi
g/gr	Gram
° S	Güney Enlemi
H^+	Hidrojen
OH^-	Hidroksit
CO_2	Karbondioksit
kWh	Kilowatt Saat
° N	Kuzey Enlemi
SO_2	Kükürt Dioksit
L	Litre
m	Metre
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
µmol	Mikromol
mL	Mililitre
nm	Nanometre
Ni	Nikel
NO_3^-	Nitrat
NO_2^-	Nitrit
O_2	Oksijen

s	Saniye
°C	Santigrat Derece
cm	Santimetre
$NaHCO_3$	Sodyum Bikarbonat
Na_2CO_3	Sodyum Karbonat
H_2O	Su
psu	Tuzluluk Birimi
CH_4N_2O	Üre
V	Vanadyum

KISALTMA LİSTESİ

CCC	İklim Değişikliği Komitesi
CPP	Polipropilen Film
DW	Arıtılmış Su
GSA	General Hizmetler İdaresi
PBR	Fotobiyoreaktör
PVC	Poli Vinil Klorür
RWP	Yarış Pisti Havuz
UV	Ultraviole

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 Açık Havuz Biyoreaktörler 22

Şekil 2. 2 Yapay Işık ve Güneş Işığı Kullanılarak Aydınlatılan Fotobiyoreaktör 24

Şekil 2. 3 Yatay ve Dikey Tübüler Fotobiyoreaktör Örnekleri 26

Şekil 2. 4 Ağaç Şeklindeki Tübüler Fotobiyoreaktörler 27

Şekil 2. 5 Üçgen Tübüler Fotobiyoreaktör Örneği 28

Şekil 2. 6 Hava Kaldırmalı Tübüler Fotobiyoreaktör Çalışma Diyagramı 29

Şekil 2. 7 Dikey – Kolon Fotobiyoreaktör Örnekleri 31

Şekil 2. 8 Kabarcık-Kolon ve Hava Kaldırmalı (Çekiş Tüplü Hava Kaldırmalı ve Bölünmüş Silindir Hava Kaldırmalı) Fotobiyoreaktörler 32

Şekil 2. 9 Düz Panel Fotobiyoreaktör Örnekleri 34

Şekil 2. 10 Düz Panel Fotobiyoreaktörün Yan ve Ön Kesiti 35

Şekil 2. 11 Aydınlık – Karanlık Döngüsü Bazında Mikroalg Büyüme Eğrisi 42

Şekil 2. 12 Işık Yoğunluğu-Alg Büyümesi Grafiği 44

Şekil 2. 13 Karıştırma Hızı, Gaz Birleşimleri ve Gaz Akış Oranlarının Biyokütle Büyümesine Etkisi 48

Şekil 2. 14 Fotobiyoreaktörün Yüzeyinin EğIminin Fotobiyoreaktör İçerisindeki Mikroalg Kültürünün Gelişimi Üzerine Etkisi 60

Şekil 2. 15 Mikroalg Yetiştirme Koşullarını İfade Eden Parametreler 62

Şekil 2. 16 Mikroalg Biyokütlesinin Biyoyakıtlara Dönüşüm İşlemleri 64

Şekil 2. 17 Mikroalglerden Biyoenerji Eldesi ve Diğer Ürünlere Dönüştürülmesi Sürecinin İfadesi 65

Şekil 2. 18 Mikroalglerin Fotobiyoreaktörlerde Yetiştirilmesinin Ardından Hasat Eldesi Sürecini İfade Eden Şematik Gösterim 66

Şekil 3. 1 Uygulanmış İlk Fotobiyoreaktör Cepheli Bina B.I.Q. Hamburg 69

Şekil 3. 2 Destek Yapısı ve Tedarik Sistemi de Dahil Olmak Üzere Panel Prototipinin Oluşturulması 70

Şekil 3. 3 Binanın Bütüncül Çalışma Prensibi 71

Şekil 3. 4 B.I.Q. House Sistem Detayı 72

Şekil 3. 5 Güney Batı Yönelimli Fotobiyoreaktörleri İçin Biyokütle/Güneş Isısı Verimlerine Göre Aylık Işınlama Miktarı 73

Şekil 3. 6 BIQ House: Sistemin Çalışma Mekanizması 74

Şekil 3. 7 Fotobiyoreaktör Cephe Sistem Verilerinin Kontrol Edildiği, Mikroalg Hasat İşlemlerinin Yapıldığı Gözlem Odası ve Teknik Oda 75

Şekil 3. 8 Fotobiyoreaktör Cephe Sisteminin Binaya Entegrasyonunun Şematik İfadesi 76

Şekil 3. 9 Projelendirme Aşamasında Denenen Düz Panel Fotobiyoreaktör Prototipi .. 77

Şekil 3. 10 B.I.Q. House Binasının Enerji Üretim Verileri 77

Şekil 3. 11 Fotobiyoreaktör Sistemi İçin Hafif Malzeme Seçimi 79

Şekil 3. 12 Fotobiyoreaktör Sisteminin Mimariye Entegrasyonu 80

Şekil 3. 13 Geleneksel Fotobiyoreaktör Sistemleri İle Dokuma Alg Fotobiyoreaktörü Karşılaştırması 81

Şekil 3. 14 Fotobiyoreaktör Sistemin Çalışma Diyagramı 82

Şekil 3. 15 Fotobiyoreaktör Sisteminin Destek Birimlerini İfade Eden Mekanik Oda Diyagramı 83

Şekil 3. 16 Geleneksel Fotobiyoreaktör Sistemleri İle Dokuma Alg Fotobiyoreaktörü Verimlilik Karşılaştırması 84

Şekil 3. 17 1960'larda İnşa Edilmiş, U.S. General Services Administration (GSA) Ofis Binası. 85

Şekil 3. 18 Tübüler Fotobiyoreaktörlerin Güneş Korunumuna Göre Farklı Açılarda Konumlanması, Sıcak Su Panelleri ve Fotovoltaikler 86

Şekil 3. 19 Avlu ve Işık Kuyuları İle Ofislerin Tamamen Işık Alması 87

Şekil 3. 20 Tasarımın Bütüncül İşleyişini İfade Eden Sistem Kesiti 87

Şekil 3. 21 Photo.Synth.Etica 88

Şekil 3. 22 Otoyol Üzerinde Bir Viyadük Üzerinde Kurulan Tübüler Fotobiyoreaktör Örneği 90

Şekil 3. 23 Fotobiyoreaktör Sisteminin Çalışma Diyagramı 90

Şekil 3. 24 Carbon T.A.P. (Tunnel Algae Park) Projesi 91

Şekil 3. 25 ABD'nin Farklı Eyaletlerinde Su Altı Tünelleri İçin Önerilen Tasarım Konseptleri 92

Şekil 3. 26 Booklyn Battery Tüneli Havalandırma Sistemi İle Bütünleşen Altyapı Önerisi 93

Şekil 3. 27 Karbon Tutucu Çelik Tüneller ve Endüstriyel Fotobiyoreaktörlerin Bütüncül Çalışması 93

Şekil 3. 28 Projenin Sistem Kesiti 94

Şekil 3. 29 Fotobiyoreaktör Sisteminin Cephe Elemanı Olarak Tüm Şehre Entegrasyonu 94

Şekil 3. 30 Bütüncül Sistemin Cephe Elemanından Farklı Olarak Şehre Entegrasyonu 95

Şekil 3. 31 Yönlenime Göre Fotobiyoreaktör Kullanımı 96

Şekil 3. 32 Fotobiyoreaktör Panel Teknik Sistem Detayı 97
Şekil 3. 33 Pierre Calleja Tarafından Tasarlanan Street Lamp Portatifi 98
Şekil 3. 34 Dikey Kolon Fotobiyoreaktör Tipi Aydınlatma Elemanı Prototipi..... 99
Şekil 3. 35 Sistemin Çalışma Prensibi..... 100
Şekil 3. 36 Güneş Işığını Depolayan Lambanın Daha Sonra Harici Bir Güç Kaynağına İhtiyaç Duymadan Aydınlatma Sağlaması..... 100
Şekil 3. 37 Egzos Gazından Yayılan CO2'nin Mikroalg Lambalarında Kullanılması 101
Şekil 3. 38 Otoparklarda Araçların Dışarıya Vermiş Olduğu CO2'yi Kullanarak Aydınlatma Sağlayan ve O2 Üreten Alg Lambaları 101
Şekil 3. 39 Alg Tentesi Ve Alg Cephesi Prototipleri 103
Şekil 3. 40 Waterlilly 2.0 Cephe Tasarım Sistemi 103
Şekil 3. 41 Polietilen Membran Fotobiyoreaktör Sistem Modülü..... 104
Şekil 3. 42 Altıgen Geometrili Modüler Mikroalg Büyüme Birimleri..... 105
Şekil 3. 43 Sistem Detayı Ve Laboratuvar Deneyleri 106
Şekil 3. 44 3D Yazılım Tasarımı ve Biyotasarım İlkelerini Birleştiren H.O.R.T.U.S Sistemi..... 107
Şekil 3. 45 Üç Farklı Mekanda Dokuz Farklı Fotobiyoreaktör Tasarımı..... 108
Şekil 3. 46 Fotobiyoreaktör Sistemi İçin Tasarlanan Kontrol İstasyonu..... 108
Şekil 3. 47 Fotobiyoreaktör Sisteminin Çalışma Diyagramı..... 109

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Yaygın Kullanılan Biyokütle Hammaddelerinin Enerji Eldesi İçin Yağ Üretim Potansiyelleri……...……..….15

Tablo 2.2 Mikroalg Yetiştiriciliğinde Yaygın Kullanılan Biyoreaktörlerin Karşılaştırmalı Analizi……...……..……...37

Tablo 2.3 Mikroalg Gelişimi İçin En Önemli Parametrelerin Genel Değer Tablosu....40

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri……...……111

ÖZET

Mikroalgler Kullanılarak Tasarlanan Fotobiyoreaktör Sistemlerinin Mimari Tasarım Disiplinine Aktarılmasındaki Sorunlar

Yunus Turan PEKMEZCİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Funda OZTÜRK KERESTECİOĞLU

Konvansiyonel enerji kaynaklaklarının kullanımı sonucu havayı kirletmeleri ve doğada sınırlı olmaları sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının mimaride kullanımı önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından fotovoltaik güneş panelleri, rüzgar türbinleri ve biyokütlenin mimaride kullanımının yaygın olmasının yanında, enerji potansiyeli yüksek biyokütle kaynağı olan mikroalglerin mimariye entegrasyonu sınırlıdır.

Tezin birinci bölümünde belirtilen, fotobiyoreaktör sistemlerinin mimariye entegrasyonundaki sorunların tespitini yapmak tez çalışmasının esas amacıdır. Sorunların alg mimarisi örnekleri üzerinden incelendiği kısım çalışmanın omurgasını oluşturmaktadır. Mikroalg yetiştiriciliği için kullanılan fotobiyoreaktör sistemlerinin çalışma prensiplerinin ve enerji eldesinin ifade edilip mimarlık disiplini arasındaki ilişkinin irdelendiği kısımlar ise bütünü tamamlayan parçalardır.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde mikroalglerin yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki önemi ifade edilmiştir. Mikroalg yetiştirme yöntemlerini ifade etmek için fotobiyoreaktör sistemleri incelenmiştir. Fotobiyoreaktör kavramı tanımlanmış, mikroalg yetiştiriciliğinde yaygın kullanılan fotobiyoreaktör çeşitleri ve çalışma

prensipleri anlatılmıştır. Fotobiyoreaktör sistemlerinde mikroalg yetişticiliğini etkileyen parametreler belirlenmiştir. Fotobiyoreaktörler kullanılarak mikroalglerden nasıl enerji elde edildiği açıklanmış ve mimaride kullanılabilirliği inelenmiştir.

Üçüncü bölümde, mikroalgler kullanılarak tasarlanan fotobiyoreaktör sistemlerinin mimariye entegrasyonundaki sorunları tespit etmek amacıyla toplam 10 adet alg mimarisi örneği incelenmiştir. Çalışma kapsamında, bina ölçeğinde 4 proje, kentsel ölçekte 3 proje ve tekil enstalasyon örneği 3 proje seçilmiştir. İrdelenen alg mimarisi örnekleri üzerinden, kullanılan fotobiyoreaktör çeşidinin teknik özellikleri, projenin uygulandığı lokasyon ve tercih edilen işletme modeli olmak üzere fotobiyoreaktör sistemlerinin mimaride kullanımında dikkat edilmesi gereken değerlendirme kriterleri belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda, fotobiyoreaktör sistemlerinin mimaride kullanımının enerji tasarrufu sağlaması, CO_2 emisyonlarını azaltması, O_2 salınımıyla havayı temizlemesi, atıksu arıtım, uygulandığı yapının kendi elektirik ve ısınma gereksinimlerini karşılaması, şehirlerde ve iç mekanlarda aydınlatma eleman olarak kullanılabilmesi ve biyoenerji üretebilmesi gibi faydalarının yanı sıra, taşıyıcı sisteme yüklenen ekstra taşıma yükü, kullanıcı görüşünün kısıtlanması, temizlik, bakım ve onarım zorlukları, fotobiyoreaktörlerin güneşten ve hava şartlarından olumsuz etkilenebilmesi, kurulum ve operasyon maliyetlerinin fazlalığı, depolama ve mekanik sistem için ekstra alan ihtiyacı, mevcut altyapıya entegrasyonda yaşanan güçlükler olmak üzere farklılaşan sorunlar tespit edilmiştir. Fotobiyoreaktör sistemlerinin mimariye entegrasyonunda dikkat edilmesi gereken hususların teknolojik ilerlemelerle birlikte geliştirilerek enerji verimliliği daha yüksek fotobiyoreaktörler üretilmesi ile tez çalışmasında sorun olarak nitelendirilen problemlerin aşılabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: alg, fotobiyoreaktör, biyokütle enerjisi, alg mimarisi, sürdürülebilirlik

ABSTRACT

The Problems In Integration Of Microalgae Photobioreactor Systems To Architectural Design Discipline

Yunus Turan PEKMEZCİ

Department of Architecture

MSc Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Funda ÖZTÜRK KERESTECİOĞLU

As a result of the conventional energy sources will be exhausted in the future and they contamine the air, the use of renewable energy sources in architecture has gained importance. Besides the common use of photovoltaics, wind turbines and biomass as a renewable energy sources, the integration of microalgae with high energy potential as a biomass source is limited.

As the mentioned in the first section of the thesis, the main purpose of the thesis is to determine the problems in the integration of algae photobiorector systems into architecture. The part where is examined the problems over algae architecture examples forms the backbone of the study. The parts which explains the working principles of photobioreactor systems used for microalgae cultivation and energy production and relationships between the architecture discipline are the parts that complements the whole.

In the second part of the thesis, the importance of microalgae among renewable energy soruces has been expressed. Photobioreactor systems are examined to describe microalgae cultivation methods. The concept of photobioreactor is defined. The types of photobioreactors used in microalgae cultivation and their working principles are explained. The parameters affecting microalgae cultivation in photobioreactor systems

were determined. How to obtain energy from microalgae by using photobioreactors and their usage in architecture was investigated.

In the third part, totally 10 algae architecture projects were examined in order to explore the problems of photobioreactor systems which are integrated in architectonics. In the scope of study, 4 projects in building scale, 3 projects in urban scale and 3 projects as a singular installation are selected. Evaluation criterias such as photobioreactor type, project location and selected operational model are determined when the photobioreactor sytems are applied in architecture by using algae architecture examples.

As a result of the study, beside the using algae in architecture has brought many benefits like energy saving, CO_2 emission reductions, O_2 release, biofuel production, wastewater treatment from micro scale by using building facades and macro scale by integrating to the cities, the thesis has concluded that the integration of algae to the architecture encounters some challenges, including the additional load to the structural system, , limitation of view for the residents, cleaning, maintenance and repair problems, accordance and solidity to the weather conditions, compatibility to the local climate, high initilal and operating costs, need for high space requirements for storage and operating systems and supplying limitations to the common infrastructure of the zone. It is thought that the problems that should be considered in the integration of photobioreactor systems to architecture by developing with the technological advances and producing photobioreactors with higher energy efficiency can be overcome the problems which are described in the thesis.

Keywords: algae, photobioeactor, biomass energy, algae architecture, sustainability

.

1
Giriş

Günümüzde fosil kaynakların tüketilmesi sonucu artan iklim değişikliğinin ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik çalışmalar artmıştır. Çevre kirliliğne karşı alınan önlemlerle birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve gelişimi bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmıştır.

Mimaride yenilenebilir enerji kaynaklarından fotovoltaik güneş panelleri ve rüzgar türbinleri ile entegre yapılar yaygın olmasının yanında; yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütlenin, enerji üretim potansiyeli bakımından yapılı çevreye yaptığı büyük katkıya rağmen, mimariye entegrasyonu oldukça sınırlı düzeydedir.

Reinhardt, Chisti, Patil, Brown, Mutanda, Hall ve Packer'a göre; biyokütle olarak mikroalgler, CO_2'yi emme, atık suyu geri dönüştürme ve O_2 üretme potansiyeli ile diğer yenilenebilir kaynaklara göre çok üstün canlılardır (Reinhardt, Rettenmaier ve Köppen, 2008, s.6), (Chisti, 2007, s.296), (Patil, Tran ve Giselrød, 2008, s.1188), (Brown ve Zeiler, 1993, s.1005), (Mutanda vd.,2011, s.57), (Hall, 2011), (Packer, 2009, s.3429). Mikroalgler kullanılarak tasarlanan ve mimariye entegre bir fotobiyoreaktör yardımı ile enerji eldesine ilişkin mimari tasarım örnekleri incelendiğinde sistemin getirdiği avantajların yanında; sistemin uygulama maliyetinin diğer güncel yenilenebilir enerji kaynaklarına göre yüksek olması, taşıyıcı sisteme getirdiği ek taşıma yükü, temizlik, bakım ve onarım zorlukları, iklim koşullarından etkilenebilme potansiyeli, sistemin fiziksel özelliğinin getirmiş olduğu kullanıcı görüşünü kısıtlama durumu, fotobiyoreaktör sisteminin büyük depolama ve işletim sistemlerine duyduğu ihtiyaç, mevcut altyapıya uyumsuzluk gibi sorunlarla karşılaşılmaktadır.

Tez çalışması, mimariye entegrasyon için uygun fotobiyoreaktör tiplerini, çalışma prensiplerini, teknik gereklilikleri ile ilgili tasarım konularını ve uygulama alanındaki zorluklarını belirterek mimari uygulamadaki sorunları inceler. Gelecekte yaygınlaşması beklenen bu sistemin eksikliklerini ifade ederek ileride yapılacak mimari uygulamaların hangi açılardan geliştirilmesi gerektiğine ışık tutmayı hedefler.

1.1 Literatür Özeti

İnsanlar yaşamlarını devam ettirebilmek için enerjiye ihtiyaç duyarlar (Goldemberg, 2000, s.3). Kullandığımız enerinin çoğu fosil yakıtlardan sağlanmaktadır (Rijksoverheid, 2011). Fosil yakıtların gelecekte tükenme tehlikesiyle karşı karşıya olmaları önemli bir sorundur. (Quintana, Van der Kooy, Van de Rhee, Voshol ve Verpoorte, 2011, s.471). Konvansiyonel enerji kaynaklarının tükenme sorununa çözüm arayışı, yenilenebilir kaynaklar kullanarak biyo kütle üretmeyi önemli hale getirmektedir (Reinhardt vd., 2008). Biyokütleden elde edilen biyoenerji fosil enerjinin sürdürülebilir karşılığıdır (Stephens vd., 2010, s.554). Reinhardt'a göre, biyokütlenin temelini oluşturan tarımsal bitkilerin verimlerinin sınırlı olması ve üretimleri için geniş tarım alanlarının işgal edilmesi biyokütle çeşitleri arasında algleri daha da önemli hale getirmektedir (Reinhardt vd., 2008, s.1). Chisti, büyüme koşullarına kolay adaptasyonları, hızlı ve kolay yetişmeleri, atık suyun arıtımını sağlamaları, az kütlede daha fazla biyoenerji üretebilmeleri, tarım arazilerinin işgaline sebebiyet vermeden üretilebilmeleri ve tedariklerinin kolay oluşu gibi olumlu özelliklerinden ötürü mikroalglerin önemli bir yenilenebilir seçenek olduğunu belirtilerek bu görüşü desteklemiştir (Chisti, 2008, s.126). Literatür çalışmalarından yararlanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarının öneminden bahsedilmiştir (Goldemberg, 2000), (Afgan ve Carvalho, 2002), (REN21, 2008), (Hall ve Moss, 1983), (Hossain ve de Lasa, 2008), (Rijksoverheid, 2011). Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyo kütle kavramı araştırılmıştır (Reinhardt vd., 2008, s.4), (Hossain, Salleh, Boyce, Chowdhury ve Naqiuddin, 2008), (Kaygusuz, 2009), (RFA, 2008), (REN21, 2009), (Marchetti, Miguel ve Errazu, 2007), (Koh ve Ghazoul, 2008). Mikroalgler üzerinden yapılan disiplinler arası okumalarla (Reinhardt vd., 2008), (Chisti, 2007), (Toklu, Güney, Işık, Comaklı ve Kaygusuz, 2010), (Patil vd., 2008), (Chisti, 2008), (Brown ve Zeiler, 1993), (Chiu vd., 2009), (Mutanda vd.,2011), (Shay, 1993), (Lee, 1980), (Chinnasamy, Rao, Bhaskar, Rengasamy ve Singh, 2012), (Wijffels ve Barbosa, 2010), (Edwards, 2008), (Qui, 2014), (Hall, 2011), (Packer, 2009), (Oilgae, 2013), mikroalglerden nasıl enerji elde edilebildiğini anlama düşüncesi tüm süreci taramayı gerekli kılmış ve çalışmanın iskeletini oluşturmuştur. Mikroalglerin enerji potansiyelinin araştırılabilmesi için 'Fotobiyoreaktör' kavramının irdelenmesi gerekli görülmüştür. Türkiye ve Dünya genelinde yapılmış akademik çalışmalardan, yüksek lisans ve doktora tezlerinden

fotobiyoreaktör kavramı araştırılmıştır. “Fotobiyoreaktör nedir?” sorusu sorularak fotobiyoraktör sistemlerini anlatan çalışmalar incelenmiştir. ’Farklı fotobiyoreaktör türleri nelerdir’ sorusu sorularak fotobiyoreaktör çeşitlerinin ayrımını ifade eden tanımlara yer verilmiştir (Chisti, 2007), (Qui, 2014), (Wolkers vd., 2011), (Mata, Martins ve Caetano, 2010), (Genin, Aitchison ve Allen, 2016), (Proksch, 2013), (Croze, Sardina, Ahmed, Bees ve Brandt, 2013), (Bogias, 2014), (Yoo, Choi, Kim, Chang, ve Sim, 2013), (Suali ve Sarbatly, 2012), (Herman ve Anderson, 1947), (Ugwu, Aoyagi ve Uchiyama 2008), (Burlew, 1953), (Muller-Feuga, 2000), (Borowitzka, 1999), (Dallaire, Lessard, Vandenberg, ve de la Noüe, 2007), (Bitog vd., 2011), (Wang, Lan ve Horsman, 2012), (Mulbry, Kondrad, Pizarro ve Kebede-Westhead, 2008), (Christenson ve Sims, 2012), (Suh ve Lee, 2003), (Stewart ve Hessami, 2005), (Brennan ve Owende, 2010), (Schenk vd., 2008), (Jiménez, Cossío, Labella, ve Niell, 2003), (Pulz, 2001), (Norsker, Barbosa, Vermuë ve Wijffels, 2011), (Hemming, Sapounas ve Voogt, 2012), (Boussiba vd., 1988), (Hase, Oikawa, Sasao, Morita ve Watanabe, 2000), (Doucha ve Lívanský, 2006), (Pushparaj, Pelosi, Tredici, Pinzani ve Materassi, 1997), (Benemann,2008), (Kin, 2010), (Wencker, 2011), (Kunjapur ve Eldridge, 2010), (Sierra vd., 2008), (Öncel, Köse ve Öncel, 2016), (WACKER, t.y.), (Xu, Weathers, Xiong ve Liu, 2009), (Matthes, Matschke, Cotta, Grossmann ve Griehl, 2015), (Kram, 2008), (Solarpedia, 2011), (Posten, 2012), (Elrayies, 2018), (Singh ve Sharma, 2012), (Zhang, 2015), (Elnoaky ve Keeling, 2016), (Slegers, 2014), (Posten, 2009), (Palmer, Flint ve Brooks, 2007), (Hu, Guterman ve Richmond, 1996), (Richmond, 2000), (Grima, Fernández, Camacho, ve Chisti, 1999), (Maor ve Appelbaum, 2011), (Richmond, Boussiba, Vonshak ve Kopel, 1993), (Chiu, Tsai, Kao, Ong ve Lin, 2009), (Dalay, İmamoğlu ve Öncel, 2008), (Shen, Yuan, Pei, Wu ve Mao, 2009), (Zijffers, Janssen, Tramper ve Wijffels, 2008), (Molina, Fernández, Acién ve Chisti, 2001), (Li, Stamato, Velliou, Jeffryes ve Agathos, 2015), (Mirón, Gomez, Camacho, Grima ve Chisti, 1999), (Razzak, Hossain, Lucky, Bassi ve de Lasa, 2013), (Pires, 2017), (Chisti ve Moo-Young, 1994), (Chisti, 1999), (Sevilla, 2004), (Chisti, 1998), (Behrenfeld, Prasil, Kolber, Babin ve Falkowski, 1998), (Masojidek, Torzillo ve Koblizek, 2013), (Vonshak ve Guy, 1992), (Janssen vd., 2000), (Bahadar ve Khan, 2013).

İncelemeler sonucunda endüstriyel alanda kullanılan kapalı fotobiyoreaktör tiplerinden düz panel, tübüler ve dikey kolon fotobiyoreaktör çeşitlerinin mimariye entegrasyona en

uygun fotobiyoreaktör çeşitleri olduğu görülmüştür (Proksch, 2013), (Yoo vd., 2013, s.729), (Suali ve Sarbatly, 2012), (Ugwu vd., 2008, s.4022), (Sierra, 2008), (Xu vd., 2009, s.180), (Hu vd., 1996). Fakat hangisinin en iyi verimle mimaride kullanılabileceği hususunda görüş ayrılıkları ortaya çıkmıştır. Yoo ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, dikey kolon şeklinde polipropilen filmden üretilen fotobiyoreaktörler optimum performans göstermiştir (Yoo vd., 2013). Sierra, tübüler fotobiyoreaktörlerin mikroalg yetiştirmek için en ekonomik yöntem olduğunu belirtmiştir (Sierra, 2008). Ugwu, Hu, Richmond, Suali ve Xu ise, düz panel fotobiyoreaktörlerin en verimli fotobiyoreaktör çeşidi olduğunu ifade etmişlerdir (Sierra, 2008), (Ugwu vd., 2008, s.4023), (Hu vd., 1996), (Richmond, 2000, s.443), (Suali ve Sarbatly, 2012,), (Xu vd., 2009, s.181). Arup (Arup, 2015), EcoLogicStudio (photo.Synthetica 2015), Griffa (Griffa, 2015) ve Bogias (Bogias, 2014) tarafından geliştirilen yenilikçi kapalı sistem fotobiyoreaktör prototiplerine rağmen; Genin, çalışmalarında mevcut kapalı sistem fotobiyoreaktörlerin günümüzde binalara entegrasyon için uygun olmadığını ve geniş çaplı çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu iddia etmiştir (Genin vd., 2016, s.450). Fotobiyoreaktör verimliliklerinin her çalışmada farklılık göstermesi sebebi ile spesifik bir fotobiyoreaktör çeşidinin mimari kullanımda en uygun model olduğu konusunda ortak bir sonuca varılamamıştır. ‘Fotobiyoreaktörlerin tasarımını kontrol eden kriterler nelerdir? sorusu sorularak, mikroalg yetiştiriciliğini etkileyen ve fotobiyoreaktör tasarımları için gerekli on bir adet parametre belirlenmiş ve açıklanmıştır. (Chisti, 2007), (Chiu vd., 2009), (Wijiffels ve Barbosa, 2010), (Mata vd., 2010), (Ugwu vd., 2008),(Bitog vd., 2011), (Schenk vd., 2008), (Pulz, 2001), (Kunjapur ve Eldridge, 2010), (Dauta vd., 1990), (Takeuchi vd., 1992), (Barbosa, 2003), (Chen vd., 2011), (Posten, 2009), (Finlay vd., 2002), (Sekar vd., 2004), (Palmer vd., 2007), (Genin vd., 2014), (Schumacher vd., 2007), (Grima vd., 1999), (Alabi vd., 2009), (Ogbonna ve Tanaka, 2000), (Molina vd., 2001), (Masojidek vd., 2013), (Masojidek ve Torzillo, 2014), (Blanken vd., 2013), (Hidaka vd., 2014), (Junying vd., 2013), (Rashid vd., 2014), (Widjaja vd., 2009), (Wang vd., 2014), (Wang, Fu ve Liu, 2007), (Jacob-Lopes, Scoparo, Lacerda ve Franco, 2009), (Ogbonna, Yada ve Tanaka, 1995), (Lakaniemi, 2012), (Kumar vd., 2010), (Komolafe vd., 2014), (De Bhowmick, Subramanian, Mishra ve Sen, 2014), (Richmond, 2004b), (Ugwu vd., 2005), (Guo vd, 2015), (Gao vd., 2015), (Zeng vd., 2011), (Raeesossadati vd., 2014), (Munoz ve Guieysse, 2006), (Subhnash vd., 2014), (Lavens ve Sorgeloos, 1996), (Abu-Rezq vd., 1999), (Sakamoto ve Bryant,

1997), (Converti vd., 2009), (Chokski vd. 2015), (Kumar vd., 2011), (Burlew, 1953), (Vonshak vd., 1996), (Wongluang vd., 2013), (Berndes, 2002), (Wogan vd., 2008), (Yun vd.,1997), (Rao vd, 2007), (Aslan ve Kapdan, 2006), (Bartley vd., 2013), (Fathi ve Asem, 2013), (Shaleh, 2004), (Oncel, 2013), (Ruangsomboon, 2012), (Bahadur vd., 2013), (Pancha vd., 2014), (Guo vd., 2014), (Breuer vd, 2012), (Zhila vd.,2005), (Radakovits vd., 2010), (Ruiz- Martinez vd., 2014), (Singh vd., 2015), (Courhesne vd., 2009), (Liang vd., 2013), (Cai vd., 2013), (Barclay vd., 2013), (Trent, 2012), (Quinn vd., 2012), (Vandu ve Krishna, 2004), (Behrens, 2005), (Castellanos, 2013), (Fonseca ve Teixeria, 2007), (Quesnel, 1987), (Borowitzka, 1991), (Post vd., 1983), (Vonshak, 1990).

Fotobiyoreaktörlerden nasıl enerji elde edilir? sorusu ile sistemin çalışma prensipleri incelenmiştir (Chisti, 2007), (Edwards, 2008), (Mata vd., 2010), (Suali ve Sarbatly, 2012). İncelemeler sonucunda fotobiyoreaktör sistemleri kullanılarak biyogaz, biyodizel, bioetanol, biyohidrojen, gübre, hayvan yemi, kozmetik ürünleri ve elektirik gibi farklı alanlarda kullanılabilecek son ürünler elde edildiği görülmüştür (Chisti, 2007, s.295), (Chew vd., 2017, s.41). Bu son ürünlerin mimaride uygulanabilirliği ve kullanılabilirliğinin tartışılması önemli bulunmuştur. Fotobiyoreaktörler kullanılarak üretilen bu ürünlerden elde edilen biyogazın mevcut mimari altyapıyla en uygun seçenek olduğu anlaşılmıştır (Edwards, 2008).

Endüstriyel alanda alg yetiştiriciliği amacıyla kullanılan fotobiyoreaktör sistemleri ile ilgili yeterli sayıda çalışma mevcutken, alglerin mimariye entegrasyonu konusunda henüz yeterli çalışmanın gerçekleşmemiş olduğu tespit edilmiştir. Fotobiyoreaktörler mimariye nasıl entegre edilebilir?'' sorusundan hareketle fotobiyoreaktör sistemlerinin mimaride kullanımı araştırılmıştır. Alg mimarisi örnekleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Fotobiyoreaktör sistemlerninin mimariye entegrasyonunun, bina ölçeğinde, kentsel ölçekte ve tekil enstalasyonlar ölçeğinde olmak üzere farklılaştığı tespit edilmiştir. Fotobiyoreaktörlerin mimaride kullanımı; havaya salınan CO_2'nin azaltılması, O_2 üreterek havanın temizlenmesi, atık suyun geri dönüştürülmesi, uygulandığı yapının kendi elektirik ve ısınma gereksinimlerini karşılaması, şehirlerde ve iç mekanlarda aydınlatma eleman olarak kullanılabilmesi ve biyoenerji üretebilmesi gibi avantajları ile inovatif bir enerji ve tasarım alternatifi oluşturturduğu görülmüştür. Fotobiyoreaktör sistemlerinin mimarlık disiplinine

katkılarının yanı sıra; dikkat edilmesi gereken sorunları da beraberinde getirdiği tespit edilmiştir. Mimarlık pratiğine yönelik olarak, çalışma için dayanak noktası niteliği taşıyan "Fotobiyoreaktör teknolojisinin mimariye dahil edilmesinin önündeki zorluklar nelerdir? sorusunun cevabını aranmış ve tez çalışmasının çıkış noktası olmuştur. İncelenen alg mimarisi örneklerinin, tasarımda kullanılan 'fotobiyoreaktör çeşiti', projenin uygulandığı 'lokasyon' ve projenin tasarım senaryosuyla değişen bütüncül 'işletme modeli'ne göre şekillendiği görülmüştür. Elde edilen bulguların gelecekte yapılacak olan çalışmalar için araştırmacılara ve mimarlara ışık tutması hedeflenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Mikroalgler kullanılarak tasarlanan bir fotobiyoreaktör sisteminin mimari tasarım disiplinine aktarılmasındaki sorunların tespitini yapmak tez çalışmasının esas amacıdır.

Biyokütlenin temelini oluşturan alglerin biyoenerji üretimindeki öneminin ifade edilmesi, mikroalglerin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına alternatif olarak tercih edilme sebeplerinin incelenmesi, mikroalg yetiştirmek için gerekli fotobiyoreaktör çeşitlerinin ve çalışma koşullarının interdisipliner çalışmalar çerçevesinde incelenerek karşılaştırmalı analizlerle değerlendirilmesi, mimariye entegre bir fotobiyoreaktör sistemi söz konusu olduğunda daha verimli bir fotobiyoreaktörün nasıl tasarlanabileceği, mikroalglerden nasıl enerji üretilebileceği hususunun tartışılması ve değerlendirilmesi ikincil hedef olarak belirlenmiştir.

Dünya genelinde mikroalgler kullanılarak tasarlanan fotobiyoreaktör sistemlerinin, mimaride kullanımının tespitini yapmak ve farklı disiplinlerde kullanılan fotobiyoreaktör sistemlerinin mimarlık disiplini alanında tanıtmak üçüncül olarak hedeflenmiştir.

1.3 Orijinal Katkı

Konu ile ilgili literatür çalışmalarından referanslarla mikroalglerden enerji elde edilmesini sağlayan fotobiyoreaktör sistemlerinin çalışma prensibinin nasıl olduğunu ve mimariye entegrasyonunda meydana gelebilecek sorunların ifadesini temel hedef olarak alan, örneklerle yorumlamasını yaparak ilerleyen çalışma, ilgili literatür taraması, örnek okuması, bulgular ve yorumların yapıldığı kısımlar olmak üzere giriş kısmından sonra üç ana bölüme ayrılmıştır.

Giriş bölümünden sonra gelen ikinci bölümde yenilenebilir enerji kaynağı olarak mikroalglerin enerji potansiyelinin belirtilmesinin ardından, 'Algler ve Biyoreaktör Kavramı' başlığı altında mikroalg yetiştirme yöntemleri, fotobiyoreaktör kavramının tanımı ve fotobiyoreaktör çeşitleri, yerli ve yabancı kaynaklardan yararlanılarak açıklanarak sınıflandırımış, karşılaştırmalı olarak tablolar ve şekillerle birlikte avantaj ve dezavantajları belirtilerek genel bir derleme çalışması yapılmıştır. Konuyla ilgisi nedeniyle yapılan biyoloji, genetik mühendisliği, çevre mühendisliği, makine mühendisliği gibi disiplinlerarası okumalar doğrultusunda, fotobiyoreaktör tasarımları üzerine geliştirilen çalışmalardan bahsedilmiştir. Mimariye entegre bir sistemin üretilebilmesi için bir biyoreaktör sisteminin çalışma prensibinin nasıl olduğunu kavramak önemli bulunduğundan ve bu sistemlerin geçmişten günümüze tarımsal ve biyolojik çalışmaların ışığında temellendiğini, mimariye inovasyonunun ise bu alandaki çalışmalardan referanslardan destekle gerçekleşebildiğini belirtmekte fayda vardır.

Üçüncü bölümde, alglerin mimariye entegrasyonu konusu literatür taramasına ek olarak, dünya genelinde uygulanmış ve hala geliştirilmekte olan projeler ile uygulanmamış fikir aşamasında kalmış proje önerileri üzerinden incelenmiştir. Örnek incelemeleri sonucunda, tüm yaklaşımların belli kavramlar ve ortak noktalar etrafında şekillendiği görülmüştür. Sistemin mimariye entegrasyonunun detaylı olarak aktarılabilmesi ve anlaşılabilmesi amacıyla, incelenen örnekler, bina cephelerine uygulanmış fotobiyoreaktör çeşitleri, kente entegre fotobiyoreaktör sistemleri ve tekil enstalasyonlar olma durumuna göre bölümlendirilmiş ve bir ayrıma gidilmiştir. Bu çerçevede örneklerin 'Alg Mimarisi' başlığı altında yeni bir söylemle anlatılması uygun bulunmuştur. İncelenen tüm projeler, kullanılan fotobiyoreaktör tipi, projenin uygulandığı lokasyon ve tasarım senaryosuna göre şekillenen işletme modelleri bakımından sınıflandırılarak, tablo ve şekillerle desteklenerek ifade edilmiştir. Üçüncü bölümün son aşamasında örnek irdelemelerinin ardından konuyu, literatürde alglerin mimariye entegrasyonunun getirmiş olduğu faydalar üzerinden ters bir okumayla ele almak uygun görülmüştür. Pozitif ve negatif yanları belirtilerek karşılaştırılan proje incelemelerinin sonunda, mimariye entegre bir sistemin yararlarının yanında oluşabilecek tasarım sorunları belirlenmiştir. Literatür çalışmaları ve örnek incelemeleri sonucunda elde edilen veriler ve bilgiler doğrultusunda; kullanılan fotobiyoreaktör çeşidinin teknik özelliklerinden dolayı taşıyıcı sisteme yüklenen ekstra taşıma yükü,

kullanıcı görüşünü kısıtlaması, temizlik, bakım ve onarım zorlukları, projenin uygulandığı lokasyona göre fotobiyoreaktörlerin güneşten ve hava şartlarından olumsuz etkilenebilmesi, projenin tasarım senaryosuna göre bütüncül işletme modelinin bir getirisi olarak, kurulum ve operasyon maliyetlerinin fazlalığı, depolama ve mekanik sistem için ekstra alan ihtiyacı, mevcut altyapıya entegrasyonda yaşanan güçlükler olmak üzere farklılaşan sorunlar, fotobiyoreaktör sistemlerinin mimariye entegrasyonunda dikkat edilmesi gereken sorunlar olarak görülmüştür. Son bölümde, elde edilen bulgular üzerinden yorumlar ve önerilerle çalışma sonlandırılmıştır.

2
Algler, Fotobiyoreaktör ve Mimari

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, fotobiyoreaktör sistemleri incelenerek mimariye entegre edilebilecek en uygun fotobiyoreaktör sisteminin ne olabileceğini tespit etmek amaçlanmaktadır. Bu nedenle çalışmanın 'Algler, Fotobiyoreaktör ve Mimari' ana başlıklığı 4 alt başlık altında incelenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak alglerin biyoenerji üretimindeki önemini vurgulamak amacıyla, alglerin enerji potansiyeli 'Mikroalglerin Diğer Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Karşılaltırılması' kısmında anlatılmıştır. Fotobiyoreaktörlerin alg yetiştiriciliği için önemini anlayabilmek amacıyla 'Mikroalg Yetiştirme Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi ve Mimaride Kullanılabilirliği' başlığı altında mikroalglerden enerji elde edilebilmesi için yaygın kullanılan fotobiyoreaktör çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü alt başlık olan 'Kapalı Fotobiyoreaktörlerde Mikroalg Yetiştirme Koşulları' kısmında mikroalglerin yetiştirilebilmek için gerekli uygun koşulların tespiti yapılmıştır. 'Mimaride Mikroalgler ve Enerji Üretimi' başlıklı dördüncü ve son kısımda ise alglerden nasıl enerji üretildiğini anlamak ve mimariye uygunluğunu tartışmak esas amaçtır. Dördüncü alt başlıkta, fotobiyoreaktör sistemlerinin nasıl çalıştığı, sistemin nasıl işlediği ile ilgili teknik çalışmalara ve deneysel örneklere yer verilmiştir. Bölümün sonucunda mikroalgler kullanılarak tasarlanabilecek en uygun fotobiyoreaktör sisteminin ne olabileceği tartışılmıştır.

2.1 Alglerin Diğer Yenilenebilir Enerji Kaynakları İle Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında, ilk olarak yenilenebilir enerjinin önemi ve yenilenebilir enerji ile ilgili terimler, biyoenerji, biyoyakıt kavramları ve mikroalgler üzerinden biyokütlenin teorik bir arka planı sunularak alglerin biyoenerji üretimindeki önemini vurgulamak amaçlanmıştır.

Enerji, insan yaşamına konfor, hareketlilik ve verimlilik getirmektedir. Günümüzde enerjisiz yaşayabileceğimiz hayal edilemez. Kullandığımız enerji, toplumsal yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Sürekli gelişen ve ilerleme

kaydeden insanın yaşam sorunu düşünüldüğünde enerji açlığı süreklilik göstermektedir (Goldemberg, 2000, s.iii). Kullandığımız enerjinin çoğu fosil yakıt kaynaklarından sağlanmaktadır ve enerji tüketimi sonucunda açığa çıkan CO_2, sera gazı oluşumuna sebep olmaktadır (Rijksoverheid, 2011, s.3). Enerji tüketimi için kullanılan fosil yakıtların yanması atmosferde kirliliğe ve dolayısıyla iklim değişikliklerine neden olmaktadır (Ahmad ve Wyckoff, 2003, s. 6 ve 9).

Son on yılda, dünyada iklim değişikliğinin uzun vadeli etkisinin daha iyi anlaşılmasına yönelik önemli gelişmeler yaşanmıştır. Dünya üzerindeki ortalama sıcaklığın son 200 yılda arttığı kanıtlanmıştır. Atmosferdeki sıcaklık artışı küresel ısınma olarak bilinir (Halmann ve Steinberg, 2000, s. 15). Fosil yakıtların yanması, atmosfere karbondioksit olarak çok miktarda karbon salmaktadır. Fosil yakıt bazlı enerji üretiminin bugün yakıt yanmasından salınan toplam karbondioksitin yaklaşık üçte birine katkıda bulunduğu tahmin edilmektedir (Lyngfelt, Leckner & Mattisson, 2001, s. 3101).

Petrol, kömür ve doğalgaz başta olmak üzere fosil yakıtlar, dünya genelinde enerji ihtiyacımızın yaklaşık %85'ini karşılamaktadır. Konvansiyonel enerji kaynaklarının temel enerji ihtiyacını karşılama bağlamında etkin ve verimli kullanımı hala önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Fosil yakıtlarla ilgili en büyük sorun, sonlu kaynak olmaları ve yakın gelecekte tükenme tehlikesi ile karşı karşıya kalacak olmalarıdır (Quintana vd., 2011, s. 471).

Küresel ısınma ve hızlı nüfus artışı sonucunda ortaya çıkan hava kirliliği, su ve habitatın bozulması, dünyadaki enerji kaynaklarının azalmasına neden olmaktadır. Günümüzde, petrol, kömür vb. gibi geleneksel enerji kaynakları halihazırda yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla kullanılmaktadır (Reinhardt vd., 2008, s.6).

Dünyada artan enerji tüketiminin kaçınılmaz bir sonucu olarak yakın gelecekte fosil yakıtların tükenme tehlikesi ile karşı karşıya kalacağımız gerçeğiyle yüzleşerek, konvansiyonel enerji kaynakları tükendiğinde dünya genelinde enerji kaynaklarımızı ve bunların güvenliklerini yeniden düşünmek zorundayız (BP, 2012, s.1).

Dünya genelinde fosil yakıtların sınırlı niteliği, doğaya verdikleri zararlar ve nükleer enerjiyle ilişkili tehlikeler, ekonomik olarak uygulanabilir alternatif enerji kaynaklarının keşfedilip kullanılması gerektiğinin önemini göstermektedir. Alternatif enerji, fosil yakıtlardan veya nükleer enerjiden elde edilmeyen yenilenebilir enerji kaynaklarını

ifade eder. Günümüzde, fosil yakıtların sonlu olduğu, endüstrileşmiş ülkeler tarafından enerji tüketiminin hızla artması ve fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan çevre sorunları ve yönetimden kaynaklanan küresel kaygının teşvik ettiği sürdürülebilir enerjilerin gelişimine yeni bir ilgi duyulmaktadır (Afgan ve Carvalho, 2002).

Dünya genelinde kullanılan enerjinin çoğu yenilenemeyen enerji kaynaklarından elde edilir ve konvansiyonel enerji kaynaklarını kullanmak yerel, bölgesel ve küresel düzeyde çevreyi etkilemektedir. Çünkü konvansiyonel enerji kaynakları dünya genelinde eşit olarak yayılamamış durumdadır. Eşit olmayan dağılımın sonucu olarak bir ülkeden diğerine enerji ithalat ve ihracatı yapılmaktadır. Enerji ithalatı, kaynakları olmayan ülkeler için önemli bir sorundur (Huang, Chen, Wei, Zhang & Chen, 2010, s.38, 39). Küresel devlet politikaları ile birlikte enerji uzak mesafeler taşınmaktadır. Artık enerjinin verimli ve ekonomik kullanılması gerekliliği bağlamındaki toplumsal bilinç arttırılarak enerji ihtiyaçları tüm dünya genelinde yerel ve sürdürülebilir kaynaklardan üretilmelidir. Bilinçli yaklaşımlarla desteklenen yenilenebilir enerji kullanımıyla birlikte karbon salınımında büyük pay sahibi olan binaların kendi enerjilerini üretebilmeleri, dünya genelinde mikro ölçekten makro ölçeğe yayılarak toplam enerji tüketiminin verimliliği üzerinde olumlu bir etki sağlayacaktır (Rijksoverheid, 2011, s. 6,7).

Yenilenebilir enerji kullanımı ile sosyal, ekonomik ve çevresel boyutlarda uzun vadede insani gelişmeyi destekleyebilecek yenilikçi çözümler üretilebilir ve geliştirilebilir. Yenilenebilir enerji kullanımı sadece gelecek için enerji güvenliği değil, aynı zamanda insan refahını güvence altına almanın ve mevcut enerji tüketiminin neden olduğu çevre sorunlarını önlemenin bir yoludur (Goldemberg, 2000, s.iii).

1997 yılında, Kyoto Protokolü, gelişmekte olan ülkelerin çoğunun, CO_2 emisyonlarını azaltmak için uluslararası bir çaba sarf etmesi gerektiği düşüncesiyle onaylanmıştır. CO_2 emisyonlarını en aza indirmek için olası bir yaklaşım, biyokütle, güneş ve rüzgar enerjileri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmaktır. Alternatif enerji kaynakları, sıfır CO_2 emisyonu ile çevreye katkıda bulunmaktadır. Ancak mevcut gelişme ve/veya kullanılabilirlik durumlarında, alternatif enerji teknolojileri mevcut fosil yakıtlara dayalı enerji üretimini tamamen ortadan kaldıramaz. Böylelikle etkin CO_2 yakalama yoluyla enerji üretimi, öngörülebilir gelecekte enerji arzının önemli bir parçası haline gelecektir. Kyoto protokolü (1997) ile CO_2 salınımlarının önemli ölçüde

düşürülmesi hedeflenmiştir. Kyoto protokolündeki hedeflere erişebilmek için nükleer, güneş, jeotermal, rüzgar ve biyoyakıtlar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması kaçınılmaz olmaktadır (Hossain ve de Lasa, 2008, s. 4434). 2019 yılı Mayıs ayında İklim Değişikliği Komitesi (the Committee on Climate Change-CCC) Birleşik Krallık'ın seragazı emisyonlarını 2050 yılına kadar sıfıra indirmeyi hedeflediğini belirtmiştir. İskoçya, İngiltere'nin hedeflediği temiz ekonomiye ulaşmada daha fazla potansiyel sahip olduğundan bu süreyi 2045 yılı olarak belirleyerek net sıfır sera gazı emisyonlarına ulaşmayı planlamaktadır. Daha küçük bir ülke olan Galler ise imkanları kısıtlı olsa da, 2050 yılındaki sera gazı emisyonlarını 60 yıl öncesine kıyasla %95 oranında azaltmayı hedeflemektedir. Komitenin hedef raporunda 'Düşük karbonlu elektrik kullanımı, verimli binalar ve düşük karbonlu ısıtma, elektrikli araçlar, karbon yakalama ve depolama teknolojisinin ve düşük karbonlu hidrojenin geliştirilmesi (bir seçenek değil zorunluluk), biyolojik olarak parçalanabilen atıkların toprağa gitmesinin durdurulması, ağaç dikiminin artırılması ve çiftliklerdeki emisyonların azaltılmasına yönelik tedbirler' yenilenebilir enerji kullanımın gerekliliğini bir kez daha göstermektedir. İstenilen hedeflere ulaşılmasıyla küresel ısınmanın 30 yıl içinde sonlandırabileceği düşünülmektedir (İklim Haber, 2019).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının öneminden bahsedilirken dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri de gömülü enerji kavramıdır. Gömülü enerji, görünmeyen, gizli enerjidir. Gömülü enerji, mimaride sonuç ürünü oluşturulana kadar gerçekleşen üretim ve taşıma sırasında harcanan enerjiyi, yapım sırasında harcanan enerjiyi ve yapının imhası için gereken enerjiyi ifade eder (Gürcan, 2012). Dolayısıyla gömülü enerji, enerji tasarruflu yapılarda toplam enerji kullanımının değerlendirilmesinde önemli bir husustur (zehirsizev, 2014). Yenilenebilir enerji kullanımı, fosil yakıtlara oranla daha az gömülü enerji sarfiyatı sağlar (Gürcan, 2012).

Fosil ve nükleer yakıtlardan farklı olarak alternatif enerji, sürekli olarak değiştirilen doğal kaynaklardan (rüzgar, güneş ışığı, jeotermal enerji ve biyokütle) sağlanır. Enerji ihtiyacımızı karşılamak için doğal kaynakları kullanmak, sera gazı emisyonlarını azaltarak sürdürülebilir kalkınmayı desteklemektedir. Günümüzde güneş enerjisi (termal veya fotovoltaik), rüzgar, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal enerji en yaygın sürdürülebilir enerji kaynaklarını oluşturmaktadır (Afgan ve Carvalho, 2002). Yenilenebilir enerjilerin geliştirilmesi ve kullanılması, enerji üretimi, çevre koruma,

kirliliğin azaltılması ve iş alanlarının yaratılması dahil olmak üzere, dünya çapında tüm ülkelere önemli miktarda fayda sağlamaktadır ve sağlamaya devam edecektir.

2006 yılında, dünya genelinde yenilenebilir enerjiler, küresel anlamda toplam enerji tüketiminin yaklaşık %18'ini oluşturuyordu (REN21, 2008, s.9). Yenilenebilir enerji kaynakları enerji üretimi, ısınma, ulaşım yakıtı ve kırsal alanda kullanılan enerji çeşitleri dahil olmak üzere geleneksel yakıtların farklı düzeylerde yerini alabilmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde yerel enerji tedarikinin önemi ve ortak kullanımı zorunluluğu sebebiyle biyokütle enerjisi yenilenebilir enerjinin ana kaynağı olacaktır (yenilenebilir enerji kaynaklarının %75'ine kadar) (Hall ve Moss, 1983, s.5).

Biyoenerji üretmek, sera gazı emisyonlarını hafifletmek ve enerji kaynağı olarak fosil yakıtların yerini almak için önemli bir stratejidir (Goldemberg, 2000, s.iii).

Biyoenerji, biyolojik kaynaklardan (biyokütle) türetilen yakıttır ve aynı zamanda biyoyakıt olarak da adlandırılır. Biyokütle, herhangi bir yaşam formundan veya onun türetilmiş metabolik ürünlerinden gelen herhangi bir organik materyal olarak tanımlanır. Biyoyakıt günümüzde araçların motorlarında herhangi bir değişiklik yapmaksızın, petrole alternatif olabilecek tek yakıt türüdür (Kaygusuz, 2009 s. 1069).

Biyokütle, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında önemli avantajlara sahiptir. Örneğin, dünyanın her yerinde mevcuttur, pahalı ekipman gerektirmeden işlenmesi nispeten basittir, uzun süreler boyunca depolanabilir ve tekrar tekrar kullanılabilir. Ek olarak, biyokütleden elde edilecek enerji, organik atık malzemeden üretilebilir ve böylece atık yönetimine katkıda bulunabilir. Biyoyakıt üretimiyle ilgili başlıca tartışmalı konulardan biri, ekilebilir tarım arazilerinin azlığı ve sulak arazilere ihtiyaç duyulmasıdır. Enerji bitkilerinin yoğun olarak yetiştirilmesi, yerel türlerin yer değiştirmesi ve bazı ekolojik değere sahip tarım alanların kullanılması nedeniyle ekosistem biyo çeşitliliğinde olumsuz etkilere neden olabilir (RFA, 2008, s.4). Enerji sorununu çözmek için tükenmez bir kaynak olan yenilenebilir enerji kaynağı biyokütlenin kullanımı neticesinde ortaya çıkan biyoyakıtların kullanımı da giderek daha önemli hale gelmektedir (Reinhardt vd., 2008, s.6).

Biyokütle CO_2'yi atmosferden veya konsantre kaynaklardan fotosentez yoluyla tedarik edebilir. Biyokütle, biyoenerjiye dönüştürülebilen en iyi enerji kaynaklarından biridir. Biyokütleden toplanan enerji, yenilenebilir bir kaynaktan elde edilen zehirsiz ve

biyolojik olarak parçalanabilir (Hossain vd., 2008, s.250).

Fosil yakıtlar kullanılarak ortaya çıkan enerjinin önemi yadsınamaz. Fakat biyoyakıtlar fosil yakıtların sürdürülebilir karşılığıdır (Stephens vd., 2010, s. 554). Biyoyakıtlar, hücrelerinde lipit içeriği olan bitki ve bitkilerden ekstrakte edilir ve biyoetanol veya biyodizel olarak sıvı yakıt olarak kullanılabilir ve biyogaz olarak gaz halinde de olabilir, biyohidrojen sentezlenebilir (Koh ve Ghazoul, 2008, s. 2451). Biyoyakıtlar her ne kadar fosil yakıttan daha pahalı olsa da, bunların üretimi dünya çapında katlanarak artmaktadır (REN21, 2009, s.14).

Türkiye'nin enerji ihtiyacı, demografik ve ekonomik büyüme nedeniyle hızla artmaktadır. Türkiye, enerji tüketiminin, üretimden daha fazla olması nedeniyle ağırlıklı olarak ithal edilmiş, pahalı enerji kaynaklarına bağımlı bir enerji piyasasına sahiptir. Türkiye, gereksinimi olan enerjinin %80'inden fazlasını ithal petrol ve doğal gazdan sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili uygulamalar, Türkiye için verimli, temiz ve sürdürülebilir enerji kalkınması için çok önemlidir. Ayrıca, Avrupa Birliği'nden gelen uluslararası politik baskı da, Türkiye'yi çevre ve enerji politikalarını geliştirme konusunda zorlamaktadır. Türkiye, oldukça önemli yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgar, güneş ve jeotermal) potansiyeline sahip olmasına rağmen kullanımının hala düşük seviyelerde olduğu bilinmektedir (Toklu vd., 2010, s.1184).

Biyokütle enerji teknolojisi kapsamında; odun (enerji ormanları, ağaç artıkları), yağlı tohum bitkileri (ayçiçek, kolza, soya, aspir, pamuk, v.b), karbohidrat bitkileri (patates, buğday, mısır, pancar, şeker kamışı, v.b), elyaf bitkileri (keten, kenaf, kenevir, sorgum, vb.), bitkisel artıklar (dal, sap, saman, kök, kabuk v.b), hayvansal atıklar ile şehirsel ve endüstriyel atıklar değerlendirilmektedir. Dünya genelinde ticari uygulamalarda öne çıkan biyoyakıtlar: biyodizel, biyoetanol ve biyogaz şeklindedir (Marchetti vd., 2007, s. 1301).

Günümüzde, endüstriyel ölçekte sadece biyodizel ve biyoetanol üretilmektedir. Biyodizel ve biyoetanol, içten yanmalı motorlar için petrol ikamesidir ve şeker kamışı, şeker pancarı, mısır, sorgum ve buğday gibi gıda ürünlerinden türetilmiştir, ancak diğer biyokütle formları kullanılabilir ve tercih edilebilir (Van der Laak, Raven & Verbong, 2007, s.3214).

Başta soya fasulyesi olmak üzere ayçiçeği, palmiye, mısır, hindistan cevizi gibi çeşitli karasal bitkilerden çıkarılan yağlardan biyodizel üreterek geleneksel fosil yakıtlara alternatif bir yakıt oluşturacağı düşünülen birinci nesil biyokütle kaynaklarının yetiştirilebilmesi için büyük tarımsal alanların kullanılması gerekmektedir. Bitkisel kaynaklı biyodizel üretimi, küresel gıda kaynaklarını ve uzun vadede, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini etkilemektedir (Toklu vd., 2010, s. 1179). Git gide sınırlı kapasiteye sahip olan tarımsal arazilerinin biyokütle üretimi amacıyla kullanımı ve yakıt ürününün temelini oluşturan tarım ürünlerinden elde edilen yağın sınırlı kapasiteye sahip olması biyokütle çeşitleri arasından algleri daha da önemli hale getirmektedir (Reinhardt vd., 2008, s.6). Mikroalgleri diğer biyokütlelerden farklılaştıran yağ üretim potansiyeli Tablo 2.1 'de ifade edilmiştir.

Tablo 2.1 Yaygın Kullanılan Biyokütle Hammaddelerinin Enerji Eldesi İçin Yağ Üretim Potansiyelleri (Edwards, 2008)

Biyokütle hammaddesi	Dönüm başına düşen yıllık yağ üretimi (Litre)
Mısır	68
Soya Fasülyesi	174
Ayçiçeği	371
Kakao	397
Kolza Tohumu	462
Hindistan Cevizi	1045
Palmiye Yağı	2309
Algler	20000

Günümüz teknolojisini kullanan yenilebilir ürünlerden elde edilen biyodizel ve biyoetanol, yüksek üretim maliyetleri ve yenilebilir mahsullerle arazi kullanımı rekabeti nedeniyle konvansiyonel yakıtın yerine geçmesi için etkili bir alternatifi temsil etmemektedir. İlk (yenilebilir mahsuller) ve ikinci jenerasyon (şalt ve tarımsal atıklar gibi özel olarak yenilmeyen mahsullerden lignoselülozik biyokütle) ve mikroalg gibi üçüncü bir biyoyakıt üretimine geçiş, sürdürülebilir biyoyakıt için umut verici bir seçenektir (Chisti, 2007).

Alternatif kaynaklardan çevre dostu olarak adlandırılan mikroalg üretimi CO_2 nin tüketiminde oldukça önemli bir rol oynamaktadır (Chiu, Kao, Tsai, Ong, Chen ve Lin, 2009, s.833). Alglerden elde edilen biyokütle, diğer biyokütle kaynaklarına kıyasla en verimli olanıdır (Shay, 1993, s.231). Algler en ilkel formunda mikroskobik bitkilerdir ve sürgünler, kökler, yapraklar, tohumlar ve meyveler gibi bitkilerin tanımlı kısımlarından yoksundur (Lee, 1980, s.23). Mikroalg, dünyanın karbon fiksasyonunun 1/3'ünden sorumludur ve aynı zamanda atmosferik oksijenin yaklaşık %70'ini üretirler (Chinnasamy vd., 2012, s.224). Mikroalgler biyoyakıtlar için en umut verici besleme stoğu olarak kabul edilirler (Wijffels ve Barbosa, 2010, s.796).

Çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik için yenilenebilir ve karbon nötr biyoyakıtlar gereklidir. Fakat birinci nesil biyoyakıt üretiminin canlılığı, gıda tedariki ile çatışma nedeniyle tartışmalıdır. Mikroalgal biyoyakıtlar uygulanabilir bir alternatiftir. Birçok mikroalgin yağ verimliliği, en iyi petrol ürünlerini aşmaktadır (Patil vd., 2008, s.1188).

En önemli endişe, bahsedilen birinci nesil biyoyakıtların verimsizliği ve sürdürülebilirliğidir. Aksine, ikinci nesil biyoyakıtlar gıda dışı hammaddelerden elde edilir. Mikroalglerden ve diğer mikrobiyal kaynaklardan, ligno selülozik biyokütle, pirinç samanı ve biyo-eterlerden ekstrakt edilirler ve gıda ve enerji güvenliği ile çevresel kaygıları ele almak için daha iyi bir seçenektir. Mikroalgler, yüksek bitkilere benzer bir fotosentez işlemi kullanır ve birkaç günde bir tüm büyüyen döngüyü tamamlayabilir. Aslında, üstel büyüme sırasında mikro kütle için biyokütle iki katına çıkma süresi 3,5 saat kadar kısa olabilir (Chisti, 2007, s.296).

Chisti tarafından yapılan hesaplamalar, mikroalgal biyoyakıtlar için güçlü senaryoyu açıkça göstermektedir. Alglerin, enerji bitkileri olarak kullanılmaları, büyüme koşullarına kolay adaptasyonları, taze veya deniz sularında yetişme ve arazi kullanımından kaçınma olasılıkları nedeniyle büyük enerji potansiyelleri vardır. Dünyanın yüzeyinin üçte ikisi suyla kaplıdır, bu nedenle algler, küresel enerji ihtiyaçları için potansiyel olarak önemli bir yenilenebilir seçenek olabilir (Chisti, 2008, s.126).

Atmosferden CO_2'nin geri kazanımı için fiziksel ve kimyasal geri dönüşümleri için çeşitli girişimler denenmiştir. Biyolojik yaklaşımda, mikroalg, karasal bitkilerden fotosentetik olarak daha etkili görünür ve verimli CO_2 sabitleyicileri olarak önemlidirler (Brown ve Zeiler, 1993, s.1005). Biyodizelin, yetiştirilmesi sırasında hektarlarca araziye

ihtiyaç duyulmayan, verimli toprağın kullanılmadığı ve en hızlı büyüyen karasal bitkiden (Panicum virgatum) 50 kat daha yüksek biyokütle üretkenliğine sahip mikroalglerden elde edilmesinin ekolojik ve ekonomik açıdan daha verimli olacağı düşünülmektedir (Mutanda vd., 2011, s.57).

Algler mikroalgler ve makroalgler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Makroalgler deniz yosunu olarak bilinir ve tez çalışmasının dışında kalır, çünkü yakıt enerjisi üretimi için mikroalgler yüksek lipid içeriği ve hızlı büyüme oranı nedeniyle daha uygundurlar (Hossain vd., 2008, s.253), (Edwards, 2008), (Qui, 2014, s.5). Algler, mikroskobikten (mikroalg), dev yosun (Encyclopedia, 2019) gibi büyük yosunlara (makroalg) kadar değişen basit yapılı fotosentetik organizmalardır. Yeşil, mavi, kahverengi ve turuncu yaygın olmak üzere farklı alg renk ve çeşitleri vardır. Enerji üretimi açısından en değerli mikroalgler yeşil olanlardır. Mikroalgler, uzun yıllardır Afrika, Asya ve Orta ve Kuzey Amerika'da insani besin ihtiyacı için kullanılmaktadırlar. (Edwards, 2008), (Wolkers vd.,2011, s.13). Algler, oksijenik fototroflardır, yani büyüme için enerji kaynağı olarak ışığı kullanırlar ve oksijen gibi yan ürünler üretebilirler. Algler, her yıl 330 milyar tondan fazla oksijen üretir ya da bir başka deyişle algler, yüksek verimli fotosentetik çevrimi ile yeryüzündeki tüm oksijenin %80'ini ürettiği bilinen tek hücreli organizmalardır. Söz konusu özellikleri algleri biyosferdeki en önemli organizmalardan biri yapar (Hall, 2011). Çünkü toprak bitkileri, alglerden farklı olarak, her zaman enerjilerinin bir kısmını (% 90), kökleri, yaprakları ve sapları gibi fiziksel dış yapılarını desteklemek için harcarlar. Herhangi bir fiziksel yapıya sahip olmayan algler, diğer biyokütle kaynaklarından farklı olarak enerjisinin %100'ünü oksijen üretmek için çoğalmaya adayabilirler (Edwards, 2013). CO_2, NO_2, SO_2 gibi kirletici maddeler üreten karasal bitkilerden çok daha verimlidirler (Packer, 2009, s.3430). Mikroalgler, atmosferik karbondioksiti kullanırlar ve yakıt olarak kullanmak için fotosentez yoluyla karbonhidratlara, proteinlere ve lipitlere dönüştürürler. Aynı zamanda nitrojen, kükürt gibi besinlerini oluşturan nikel (Ni), vanadyum (V) ve cıva (Hg) metallerini tüketirler. Alglerden elde edilen biyokütleler, günümüzde biyodizel ve biyoetanol, yüksek proteinli hayvan yemi, gıda katkı maddeleri, zirai protein bakımından zengin gübre, biyopolimerler, biyoplastikler, ilaçlar ve kozmetikler gibi çok sayıda ürünün üretiminde kullanılmaktadırlar (Chisti, 2007, s.295).

Waite'nin söylemine göre, dünya genelinde algler üzerinde yapılan çalışmaların

başlanması ve günümüze kadar giderek artmasının nedeni, 1970'lerde yaşanan petrol şokundan kaynaklanmaktadır (Waite, 2011, s.2).

Dünyada çeşitli durumlara adapte olarak var olan algler denizlerde, tatlı su ve atık sularda bulunabilir. Algler sadece fotosentetik etkinliği ve dünyadaki bütün bitkilerden daha fazla oksijen üretme kabiliyeti nedeniyle önemli değil, aynı zamanda amfibi kalitesi ve doğal olarak yüksek lipit içeriğiyle yağ üretme konusunda diğer bitkilerden farklılaşırlar. Mevcut özellikleri mikroalgleri en yüksek verimli enerji ürünlerinden biri, tarım arazileri için yer kaybı yaratmayan ve diğer tarımsal besinlerle rekabet etmeyen tek bitki haline getirir. Araştırmalar, alglerin dönüm başına yılda yaklaşık 60.000 litre petrol üretebileceğini, eczacılık-kozmetik ürünleri ve insanların kullanımına yönelik farklı alanlarda kullanılabileceğini, insanın yaşamına dokunarak günlük yaşamını ve çevre ile ilişkisini yeniden tanımlayabilecek şaşırtıcı istatistikler sunmaktadır (Oilgae, 2013).

2.1.1 Bölüm Sonucu

Alglerin, atık suyun arıtımını sağlamaları ve yapısal özelliklerinin bir getirisi olarak az kütlede daha fazla biyoenerji üretebilmeleri, tarım arazilerinin işgalin sebebiyet vermeden üretilebilmeleri, tedariklerinin kolay oluşu gibi olumlu özelliklerinden ötürü diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından daha verimli olduğu görülmüştür.

2.2 Mikroalg Yetiştirme Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi ve Mimaride Kullanılabilirliği

Mikroalglerin mimaride kullanılabilirliğini anlayabilmek için ilk olarak fotobiyoreaktör kavramının ne olduğu, alg yetiştiriciliğinde fotobiyoreaktörlerin rolü ve mikroalglerden enerji elde edilebilmesi için yaygın kullanılan fotobiyoreaktör çeşitlerinden bahsedilmiştir.

Mikroalglerin büyümesi için gerekli olan ekimi için uygun bir kültür sistemi gereklidir. Mikroalglerin enerji üretebilmeleri için biyolojik reaksiyonlarını gerçekleştirmesini sağlayan sisteme Fotobiyoreaktör (PBR) denir (Mata vd.,2010, s.226).

1970'lerde Japonya ve Amerika'da mikroalg yetiştiriciliğinde geliştirilen ana teknikler, günümüzde hala geliştirilmekte olan açık havuz biyoreaktörler ve kapalı fotobiyoreaktörler özelinde hala uygulanmaktadır (Wijffels ve Barbosa, 2010, s.796).

Fotobiyoraktörlerin ilk prototipleri 1950'lerde üretilmeye başlamıştır (Cook, 1953), (Walter, 1958), (Kathrein, 1960) ve günümüze kadar geliştirilerek üretimi devam etmiştir. 1950'lerdeki prototipler mikroalg yetiştirme niyeti ile patentleri alınan ilk cihazlar olsalar da, alglerin büyümesini kontrol etme düşüncesi, bahsedilen prototiplerden önce, su ürünleri yetiştiriciliği çalışmaları sırasında bir endişe kaynağı olarak ortaya çıkmıştır denebilir (Herman ve Anderson, 1947, s.211). Alg üretiminin sanayileşmesi ilk olarak Almanlar tarafından II. Dünya Savaşı'nın sonlarında gıda üretimi amaçlı başlatılmıştır (Ugwu vd., 2008, s.4021). Sanayileşme sürecini, Washington Carnegie Enstitüsü, CO_2 tutumu için toplu alg yetiştiriciliği uygulaması ile desteklemiştir (Burlew, 1953). Fotobiyoreaktör kullanılarak gerçekleştirilen alg ekimi çalışmaları, algal biyokütle uygulamaları için genişlemiş ve büyümeye devam etmiştir. Alglerden yosun biyokütlesi üretimi, 1960'lı yıllardan beri (Muller-Feuga, 2000, s.530) gıda ve su ürünleri uygulamalarında önemliydi, ancak son zamanlarda alglerin, biyokimyasal ve biyoyakıt üretme potansiyelleri dikkat çekmiştir (Borowitzka, 1999, s.319), (Dallaire vd., 2007, s.1433). Pilot proje olarak veya ticari ölçekte alg yetiştiriciliğinin en yaygın yöntemi, oluk göleti gibi açık sistem bir fotobiyoreaktör (PBR) veya kapalı bir fotobiyoreaktör varyasyonu kullanılmasıdır (Chisti, 2007, s.297), (Ugwu vd., 2008, s.4021), (Bitog vd., 2011), (Wang vd., 2012, s.905).

Teknik özellikleri ve çevreyle olan etkileşimleri açısından fotobiyoreaktörler; açık havuz fotobiyoreaktörler ve kapalı sistem fotobiyoreaktörler olmak üzere iki yaygın kullanıma sahiptirler. (Wolkers vd., 2011), (Genin vd.,2016, s.431), (Suali ve Sarbatly, 2012, s.4323), (Suh ve Lee, 2003, s.313). Açık havuzlar dünya çapında en yaygın alg ekim sistemidir (Wolkers vd., 2011, s.13). Açık ve sığ havuzlar yaklaşık 15-30 cm derinliğe sahiptirler (Proksch, 2013, s.150), (Croze vd.,2013, s.2). Açık sistemlerde, su genellikle yerçekimi veya kürek tekerlekleriyle dolaştırılır. Düşük yapım ve işletme maliyetlerine rağmen (Proksch, 2013, s.150), alg yetiştiriciliğinde en etkili yöntem değildirler (Wolkers vd., 2011, s.13). Sistem geniş alanlara ihtiyaç duyar ve dış ortamdan etkilendiği için kirlenmeye, havaya, buharlaşmaya ve zayıf ışık sızmasına maruz kalırlar (Mata vd., 2010, s.227), (Proksch, 2013, s.150). Kontrollü takipleri ve izlenimleri zordur. Tasarımlarından kaynaklı yapısal durumları etkin bir fotosentez gerçekleşmesini ve güneş ışığının enerjiye dönüşümünü sınırlar (Wolkers vd., 2011, s.14).

Açık havuzlarda, kapalı sistem fotobiyoreaktörlerden daha konsantre alg biyokütleleri üretilebilir. Açık havuz fotobiyoreaktörlerinin sıcaklık kontrolü ve türlerin kontrolü çok zayıftır (Genin vd., 2016, s.433). Bogias (2014), tarafından geliştirilen yenilikçi kapalı sistem fotobiyoreaktör prototipine rağmen, Genin çalışmalarında mevcut kapalı sistem fotobiyoreaktörlerin günümüzde binalara entegrasyon için uygun olmadığını iddia etmiştir (Genin vd., 2016, s.450). Açık sistemler atık su arıtma uygulamalarında etkinliğini kanıtlamışlardır. Kapalı fotobiyoreaktör tasarımları hala geliştirilme aşamasındadır ve yaygın olarak çalışılmamışlardır (Genin vd., 2016, s.450). Yoo ve arkadaşlarına göre, kapalı sistem fotobiyoreaktörler, düz, yatay veya dikey boru şeklinde çeşitli tiplerde olabilir. Yoo ve arkadaşları tarafından geliştirilen polipropilen filmden yapılmış dikey tüp şeklindeki kapalı sistem fotobiyoreaktör prototipi, diğerlerine göre optimum performansı göstermiştir (Yoo vd., 2013).

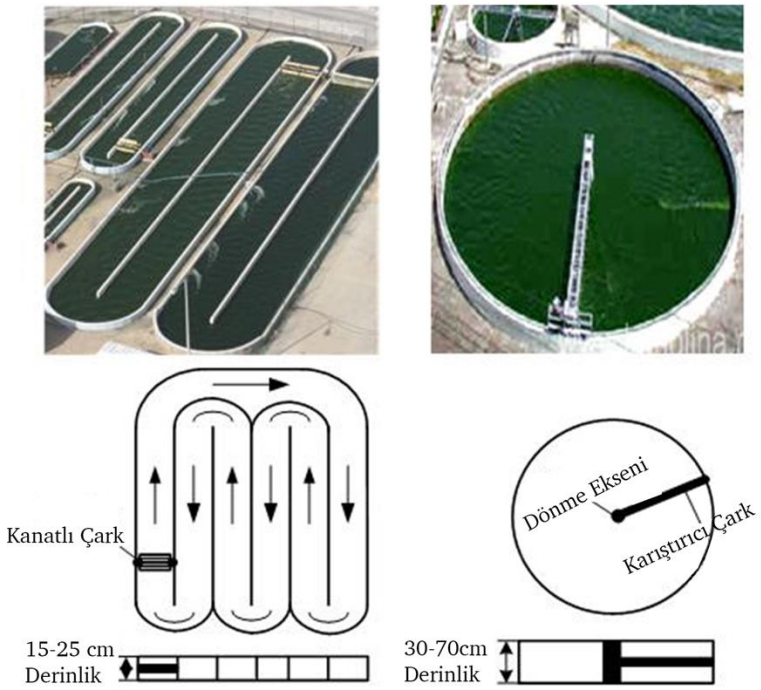
İnce film ya da membran olarak adlandırılan yeni konvansiyonel reaktörlerin atık su arıtımı için kullanımı yaygındır (Christenson ve Sims, 2012, s.1). İnce film fotobiyoreaktörü, şeffaf ve yüksek dayanıklılığa sahip düşük maliyetli polipropilen bazlı CPP filmden yapılmıştır. Montajı basit bir yapıya sahiptir ve kolayca büyük boyurlarda üretilebilirler (Yoo vd., 2013, s.730). İnce film fotobiyoreaktörler bazı araştırmacılar tarafından açık havuz biyoreaktörlere ve kapalı fotobiyoreaktörlere ek olarak üçüncü tip farklı bir biyoreaktör çeşidi olarak bahsedilse de görsel olarak sistemin kapalı olması ve teknik özelliklerinden dolayı kapalı fotobiyoreaktör türlerinden kabul edilebilirler.

‘Açık Havuz Biyoreaktörler’ ve ‘Kapalı Fotobiyoreaktörler’ alt başlıklarında literatür çalışmalarından referanslarla alg yetiştiriciliğinde yaygın kullanılan biyoreaktör çeşitlerinin neler olduğu, teknik özellikleri ve çalışma prensipleri hakkında bilgi verilerek karşılaştırmalı analizlerle birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır.

2.2.1 Açık Havuz Biyoreaktörler

Açık Havuz biyoreaktörler, bir biyoreaktör yaratmanın en eski, en kolay ve en basit olanıdır (Herman ve Anderson, 1947, s.211), (Jiménez vd., 2003, s.180). Açık havuzlar 1950'lerden beri kullanılmaktadır (Borowitzka, 1999, s.315). Açık sistemler; kurulum ve kullanım maliyetlerinin ekonomik olmalarına, mikroalglerin kitlesel ekimi için uygun olmalarına (Ugwu vd., 2008, s.4022), rağmen, dezavantajlara da sahiptirler.

Mikroalg ekimi için çok fazla topraklama alanına ihtiyaç duyarlar. Kirlenmeye karşı hassastırlar. Sıcaklık değişimlerinin kontrolü zordur. Buharlaşma yoluyla su kaybı oluşabilir. Işık kullanımı kontrolsüzdür. Hava ile teması olduğundan CO_2 kayıpları kontrolsüzdür. Her mikroalg çeşidi değil, sadece çok yüksek tuzluluk, pH ve basınç kültürlerinde yaşayabilen mikroalg çeşitleri açık havuzlarda verimli bir şekilde yetiştirilebilmektedirler. Kapalı sistemlere oranla yetiştirilebilecek mikroalg çeşidi bakımından sınırlıdırlar. (Wolkers vd., 2011, s.13), (Ugwu vd., 2008, s.4022), (Schenk vd., 2008, s.30), (Pulz, 2001), (Hemming, Sapounas ve Voogt, 2012, s.12), (Dalay vd., 2008, s.11) Değişen hava koşullarına karşı hassas olmaları sebebiyle üretimleri yıl boyunca yapılamadığı için verimlilikleri düşüktür. Atmosfere maruz kalan açık biyoreaktörler, hava koşullarındaki alg kültürlerine karşı şoklara neden olabilecek değişikliklere karşı hassastırlar. Açık bir biyoreaktördeki verimlilik kapalı bir fotobiyoreaktöre göre daha düşük olduğundan, aynı genel üretkenliğe ulaşmak için daha fazla alana ihtiyaç duyarlar. Açık biyoreaktörler de, uzun süreli üretkenliği azaltabilecek olan ve algleri besin olarak gören mikroorganizmalar tarafından enfeksiyona eğilimlidirler (Benemann, 2008). Açık havuz sistemlerinde biyokütle üretkenliği de kapalı fotobiyoraktörlere göre daha azdır (Chisti, 2007, s.298), (Ugwu vd., 2008, s.4022). Ticari ve endüstriyel amaçlı alg yetiştiriciliği için genellikle açık havuz biyoreaktör sistemleri kullanılır. Açık havuz biyoreaktörlerin en yaygın kullanımları büyük yarış pisti havuzlar (RWP), dairesel havuzlardır (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3521). Açık havuz biyoreaktörleri için tipik tasarımlar, tek yönlü bir döngü veya perdeli bir döngü olacak şekildedir (Shen vd., 2009, s.1276). Şekil 2.1'de açık havuz fotobiyoreaktörler şematik anlatımları ile ifade edilmiştir.



Şekil 2. 1 Açık Havuz Biyoreaktörler (Shen vd., 2009, s.1277)

Açık havuz göletleri genellikle durgunluktan korunmak için suyu hafifçe dolaştıran büyük bir karıştırma pervanesine sahiptirler. Biyoreaktör içerisindeki dolaşım ve sürekli karıştırma, aynı zamanda tutarlı besin dağılımları için, hatta termal dağılım sağlamak, alg hücrelerini süspansiyonda tutmak ve hafif kullanım verimliliğini artırmak için çok önemlidir (Suh ve Lee, 2003). Açık havuzlarda besleme işlemi, çark'ın önünden (Suh ve Lee, 2003), hasat işlemi ise çarkın arka tarafından yapılır (Chisti, 2007, s.297).

Açık havuz biyoreaktörlerde, alg kültürünü karıştırma için bir çark, suyu sirküle etmek için 0.25 m/s hızında döner. Çarkın havuzdaki sıcaklık farkını ve mikroalglerin dibe çökmesini önlemek için sürekli çalışması gerekir (Wolkers vd., 2011, s.14), (Brennan ve Owende, 2010, s.560). Açık havuzlarda hasat edilen biyokütle yoğunluğu düşüktür (0,3 g DW/litre/gün). Genelde endüstriyel mikroalg üretiminin çoğu, Spirulina ve Dunaliella mikroalg türleri tercih edilerek yapılmaktadır (Norsker vd., 2011, s.25).

Karıştırmayı iyileştirmek ve havuza giren suyun rahat dolaşımını sağlamak için bölümlü yapıda tasarlanabilirler. Su kürek tekerlekleri veya pompalar kullanılarak gölette dolaşır ve bazen karışıma yardımcı olmak için gölete hava verilir (Boussiba vd., 1988, s.249), (Hase vd, 2000, s157). Açık bir kanal göleti genellikle alçak duvarlar (genellikle dökme beton) inşa edilerek veya toprağın kazılması sonucu derinlik oluşturulup, plastik bir

astarla kaplanarak oluşturulur. . Bir kanal göletinin derinliği, ışık sınırlamaları nedeniyle 20 ila 50 cm arasında değişmektedir (Doucha ve Lívanský, 2006, s.812), (Chisti, 2007, s.297). Ancak uzunluk ve genişlik ölçeğe bağlıdır.

Açık fotobiyoreaktörler, 0.05 ila 0.32 g/L gün arasında değişen hacimsel verimliliklere ve 11.1 ila 35 g/m^2 gün arasında değişen hava etkinliklerine sahip olma eğilimindedirler (Jiménez vd. 2003, s.181), (Doucha ve Lívanský, 2006), (Pushparaj vd., 1997, s.116). Büyüyen alglerin hasatından, lipid içeriğine bağlı olarak çoğu karasal mahsulden (0.25 g/m^2 gün) daha yüksek olan 0.55 ila 10.5 g/m^2'lik bir lipit üretkenliği oluşur (Mata vd., 2010, s.220).

Açık biyoreaktörler için kullanılan malzemeler toprağa geçebilecek su kaybını önlemek için su geçirimsiz özellikte olması gerekir. Açık sistemler tasarlanırken PVC ve beton gibi plastikler sıklıkla tercih edilen malzemelerdir (Genin vd., 2016, s.433).

Büyük ölçekte alg yetiştiriciliği için daha çok tercih edilen açık havuz sistemlernin teknik anlamda dezavantajları olmasına ragmen, mikrolglerin havadaki CO_2 yoğunluğunu etkili bir biçimde azaltması sonucu havayı temizleme özelliği yadsınamaz bir gerçektir. Monash Üniversitesi'nden Caleb Stuart ve Mir-Akbar Hessami'nin açık havuz alg filtreleri üzerine yaptıkları bir araştırma, doğal günlük ışığk altında 4000 m^3'lük bir havuzun yılda 2,2 kilometreye kadar CO_2 temizleyebileceğini ispatlamıştır (Stewart ve Hessami, 2005, s.418).

Araştırmacılara göre açık havuz biyoreaktörler teknolojik sınırlarına ulalmış durumda olduklarından, günümüzde fotobiyoraktörlerde verimliliği artırmak için birçok yenilikçi çalışma yapılmaktadır (Hemming vd., 2012, s.162). Yenilikçi çalışmalar neticesinde kontrol edilmesi ve müdahalesi daha kolay olan kapalı fotobiyoreaktör tasarımları doğmuştur (Wencker, 2011).

2.2.2 Kapalı Fotobiyoreaktörler

Mikroalg yetiştiriciliğinde açık havuzlarla ilgili problemlerin üstesinden gelmek amacıyla kapalı biyoreaktör sistemleri geliştirmek için çeşitli yaklaşımlar uygulanmıştır (Wencker, 2011). Alg üretimi için yaygın kullanılan biyoreaktör çeşitleri üzerine yapılan çalışmalar sonucunda reaktör tasarımlarında, işletme maliyetleri, asgari miktarda su kullanımı, arazi ve enerji kullanımına önem verilmesi gerektiğini ortaya çıkmıştır. Kapalı sistemler bu gereklilikler bağlamında açık sistemlerin yerini almaya

başlamıştır (Schenk vd., 2008, s.30). Günümüze kadar gelen çalışmalar sonucunda farklı kapalı fotobiyoreaktör sistem test edilmiştir, ancak endüstriyel ölçekte yalnızca birkaç yaklaşımın gerçekleştirilebilir durumda olduğu görülmektdir (Wencker, 2011). Kapalı fotobiyoraktörler genellikle geometrilerine göre karakterize edilirler. Yaygın geometriler; yatay ve dikey tübüler, dikey kolon ve düz plakalardır (Ugwu vd., 2008, s.4022), (Bitog vd., 2011, s.134), (Wang vd., 2012, s.905). Fotoreaktörler güneş ışığından ve yapay ışıktan veya her ikisinden de aydınlatılabilir (Şekil 2.2) (Ugwu vd., 2008, s.4022).



Şekil 2. 2 Yapay Işık ve Güneş Işığı Kullanılarak Aydınlatılan Fotobiyoreaktör (Potter ve Eza, R, (t.y.)), (EcoFriend, 2014)

Kapalı sistemler, biyoreaktör uygulamaları arasındaki en pahalı sistemlerdir. Ancak, diğer sistemlere göre 5-10 kat daha yüksek verimlidirler. Kapalı fotobiyoreaktörler, güneş ışınlarının yüzey alanını ince bir boru matrisine ya da panel içine dağıtarak enerji ve besin maddelerinin emilimini en üst düzeye çıkartırlar. Böylece asgari miktarda su kullanırlar. Sahip oldukları özellikler, yüksek kontrol koşullarında büyümeyi ve daha yüksek hızda üretim sağlar (Proksch, 2013, s.151).

Kapalı fotobiyoreaktörlerin tasarım, farklı mikroalg türlerinin spesifik özelliklerinden de etkilendiği için farklı mikroalg türlerine uyacak şekilde çeşitli tiplerde tasarlanmışlardır (Sierra vd., 2008, s.136). Her ne kadar mikroalgler çeşitli sıcaklıklarda büyüyebilir ve yıl boyunca üretilebilir olsalar da (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3522), (Öncel vd., 2016, s.265), yosun türlerine göre optimal büyüme farklılık gösterir. Mevsimsel ve günlük sıcaklık değişimleri bile alg üretimini etkileyebilir. Dolayısıyla, soğutma ekipmanı ve gölgeleme teknikleri, alg büyümesi için tehlikeli boyutta olan sıcaklık artışlarını engellemek için kapalı biyoreaktörlerin kullanımında önemlidir (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3520).

Alglerin, uzun süre doğrudan güneş ışığına maruz kalması gerekliliği yaygın bir yanılgıdır. Yüksek yoğunluklu güneş ışığına maruz kalma durumu daha düşük verim, büyümenin durması ve bitkinin kararması sonucu çürümesi ile sonuçlanabilir. Biyoreaktör tiplerinden alglerin büyüme dinamiklerini dikkate alan reaktör tipleri daha etkilidir ve daha yüksek verim sağlayabilirler. İncelemeler sonucunda alg yetiştiriciliği için en verimli yöntemin yüzey/hacim oranının en yüksek olduğu biyoreaktör tiplerininin kullanıldığı sistemlerdir. Yüzey/hacim oranının yüksek olduğu fotobiyoreaktör türleri, tercih edilen büyüme koşullarının yüksek kontrollü olarak sağlanabilmektedirler. Kapalı bir fotobiyoreaktörün uygun büyüme koşullarını sağlama yeteneği, etkili yosun büyüme sistemleri oluşturmada tasarımını ve tipini önemli bir belirleyici faktör yapar (Schenk vd., 2008, s.29). Kapalı fotobiyoreaktörlerde, yüzey alanı/hacim oranını maksimize etmek, biyoreaktör tasarımlarında daha yüksek büyüme hızları elde etmenin kilit prensibidir. Çünkü yüzey/hacim oranının yüksek olması güneş ışınımının daha büyük bir fotosentetik yüzey alanı üzerine dağılmasını sağlar. (Schenk vd., 2008, s.30), (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3516). Kapalı fotobiyoreaktörler güneş ışığını yakalama ve mevcut kapalı alan içine yakaladıkları ışığı dağıtma prensibi ile çalışırlar. Esas amaç her alg üzerine düşen ışık yoğunluğunu optimum ve eşit düzeyde sağlamaktır (Zijffers vd., 2008, s.404). Bir biyoreaktörün geometrisi ışık dağılımını etkileyerek verimliliği artırmaktadır (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3516). Bahsedilen parametreler, alg yetiştiriciliğinde kapalı fotobiyoreaktörlerin neden en üretken reaktör tipi olduğunu ve yüksek maliyetlerini büyük ölçüde gösterir (Proksch, 2013, s.151).

Kapalı fotobiyoreaktörler, birçok farklı şekillerde tasarlanabilmektedirler. Bu bölüm kapsamında bahsedilecek olan kapalı fotobiyoreaktör en yaygın biçimde kullanılan ve çeşitli tübüler biçimlerde, dikey kolon veya düz panel şeklinde olan biyoreaktörlerdir.

2.2.2.1 Tübüler Fotobiyoreaktörler

Tübüler PBR'ler, merkezi bir mikroalg kültürünü biriktiricisinden beslenen boru sistemlerinin kombinasyonundan geliştirilen özel tasarımlardır. Mikroalg içeren kültür, ana hazneden, bütün borular boyunca kültürün dolaşımını mümkün kılan U-dirseklere bağlı ayrı tüplere pompalanır. Bireysel PBR ölçeğine göre tüm sistem bir veya daha fazla biriktiriciye boşaltılabilir (Posten, 2009).

Tübüler sistemde, mikro algler şeffaf tüplerde ekilir (Wolkers vd., 2011, s.15). Tübüler

sistemlerde, tüpler tek sıra ve çoklu ard arda dizilmiş şekilde yatay veya dikey dizilimli olarak tasarlanabilir. Tek sıra tübüler fotobiyoreaktörlerde yetişen algler, güneş ışığına fazla maruz kalabilir ve yüksek ışık yoğunluğu sebebi ile daha sonra mikroalg büyümesinde gecikme olabilir. Bu nedenle, tübüler fotobiyoreaktörler tasarlanırken çok katmanlı dikey ya da yatay tüpler tercih edilir (Şekil 2.3). Birbirlerine gölgeleme yapan tüpler ışık yoğunluğunu düşürür ve daha yüksek verimlilik sağlar. Tüp malzemeleri cam, yumuşak polietilen, akrilik, plastik veya çok şeffaf silikon kauçuk olabilir (Qui, 2014, s.7), (WACKER, (t.y).



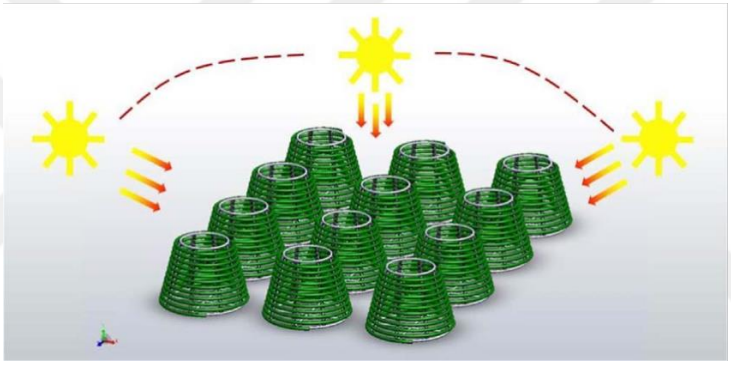
Şekil 2. 3 Yatay ve Dikey Tübüler Fotobiyoreaktör Örnekleri (Qui, 2014, s.7)

Tübüler fotobiyoreaktörler temel tasarım prensibi olarak üç kısımdan oluşurlar. İlk kısım, mikroalglerin yetiştirildiği kültür ortamını içinde bulunduran reaktöre şeklinden dolayı ismini veren tüp kısmıdır. İkincisi, sistem içinde toplanan gazın ortamdan uzaklaştırılmasını sağlayan degazör ünitesi ve kültür ortamındaki dolaşımı sağlayan pompa sistemidir. Üçüncü kısım ise hasat işlemlerinin gerçekleştirildiği mekanik destek kısmıdır (Molina vd., 2001).

İnce bir kültür süspansiyonu tabakası, optimum ışıktan faydalanma, düşük pompalama sarfiyatı ile gelen minimum enerji tüketimi ve kirlilik engelleyici sistemlerle donanmış geliştirilmiş çeşitli tübüler şekilli fotobiyoreaktör tasarımları vardır (Wencker, 2011). Günümüze kadar tasarlanmış tübüler fotobiyoreaktör prototiplerinin incelenmesi sonucunda; fotobiyoreaktörlerin piramit, koni ya da elmas gibi istenen herhangi bir şekilde olabileceği sonucuna varılabilir (Elrayies, 2018, s.1178).

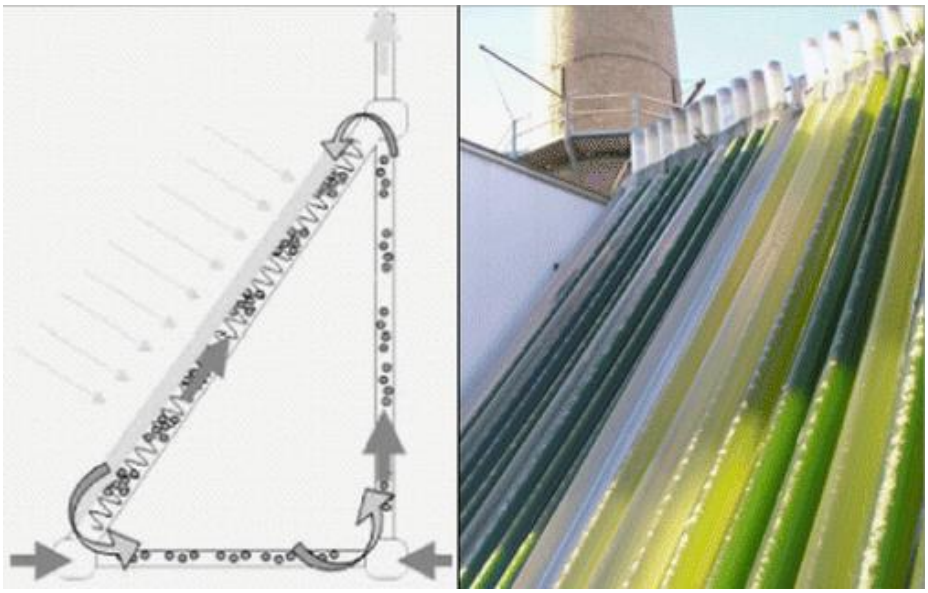
OriginOil şirketi Quantum Fracturing adı verilen, mikro yosunların emmesi daha kolay olan mikronize karbondioksit kabarcıkları ve besin maddeleri oluşturarak alglerin büyümesini teşvik eden yenilikçi bir teknoloji geliştirmiştir. Quantum Fracturing

sistemi büyümeyi teşvik etmek için gereken ışığın dalga boylarında ayarlanabilen kontrollü mikro dalgalar üretebilir. Ayrıca, GICON ve ortakları tarafından geliştirilen ve yeni darbeli gaz akış sistemi çift cidarlı, son derece şeffaf ELASTOSIL silikon kauçuk borulu fotobiyoreaktör sisteminin, gün boyunca ışığa iyi bir şekilde maruz kalmasını sağlayarak, yüksek oranda bir radyal karışım sistemi ile düşük enerji girişi sağladığı sonucuna varılabilir (Qui, 2014, s.9), (WACKER, (t.y)), (Kram, 2008), (Solarpedia, 2011), (Posten, 2012, s.41). Spiral şekilli tübüler fotobiyoreaktörlerin şekli tüm gün boyunca herhangi bir coğrafi yönde güneş ışığına iyi maruz kalmaya izin verdiği için belirli bir oryantasyona ihtiyacı yoktur. Reaktörü, güneşin akışına göre çeşitli enlemlerde ayarlamak için sadece belirli bir eğim açısı gereklidir (Matthes vd., 2015, s.1756). Ağaç şeklindeki Gicon'un PBR'si gibi tasarımlar, binaların çatılarına veya yerleşim planlarına dahil edilebilir (Şekil 2.4) (Elrayies, 2018, s.1178).



Şekil 2. 4 Ağaç Şeklindeki Tübüler Fotobiyoreaktörler (© Gicon) (Matthes vd., 2015, s.1757)

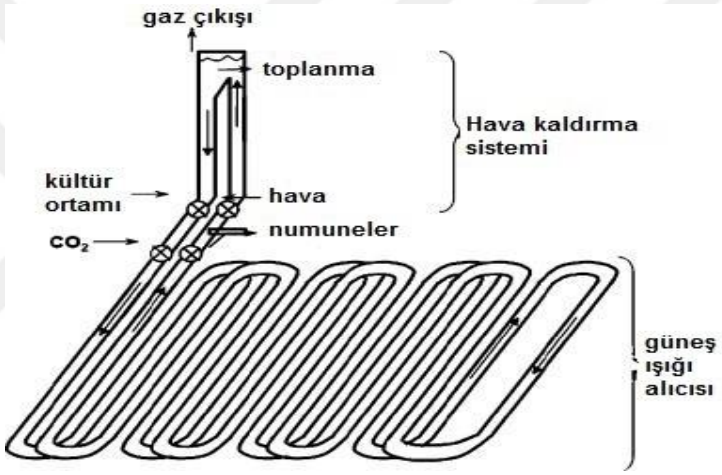
AgloMed, Klotze'de (Almanya), dünyanın en büyük alg biyoreaktör sistemi olan ve bir yönden baca gazlarını sisteme dahil eden ve alg kültürünü pompalayan üçgen bir biyoreaktör tasarımı gerçekleştirmiştir (Şekil 2.5). Pompalama sonucunda meydana gelen hareketten oluşan ve hızlıca yoğunlaşan girdapların oluşması, alg kültürüne mikro kabarcıklar sokar ve yosun verimini %30 arttırır. CO_2' nin mikro kabarcıkları daha hızlı çözündüğü, süspansiyonu iyi karıştırdığı ve ayrıca algler için toksik olan oksijenin giderilmesine yardımcı olduğu için biyoreaktörün performansını artırır. Sonuç olarak, bugüne kadar üretilmiş en üretken yetiştirme sistemlerinden biridir ve çalkalama işleminin biyoreaktör tasarımında da önemli bir faktör olduğunu göstermektedir (Kin, 2010).



Şekil 2. 5 Üçgen Tübüler Fotobiyoreaktör Örneği (Kin, 2010)

Tüp çapı, tasarım ve yapımda sınırlayıcı bir faktördür. Işık penetrasyon uzunluğu üzerindeki zorluklar nedeniyle, tüp çapları 10 cm'yi geçemez. Tüplerin kapalı bir sistemdeki çapı sınırlıdır (Croze vd., 2013, s.2), (Bogias, 2014). Tübüler fotobiyoreaktörler farklı büyüklüklerde tasarlanabilirler. Fakat büyüklüğün arttırıldığı fotobiyoreaktörlerin dezavantajlarından biri düşük kütle iletimidir. Düşük kütle aktarımı bazı yatay tübüler fotobiyoreaktör sistemlerde zamanla alglerin büyümesini engelleyen yüksek seviyelerde çözünmüş oksijenden birikmesine sebep olabilmektedir (Richmond vd., 1993, s.327). Çaptaki artış, yüzey/hacim oranını azaltır. Uzunluktaki herhangi bir artış, mikroalg için toksik olan O_2 birikimine neden olabilir ve fotosentezi inhibe edebilir. Tübüler fotobiyoreaktörlerde hava pompası teknolojisi ya da hava kaldırma sistemi kullanılarak (Şekil 2.6) mikroalg kültürü tüplerin içinde dolaştırılıp karıştırılır ve kültürün havalandırma işlemi gerçekleştirilmiş olur (Bogias, 2014), (Suali ve Sarbatly, 2012, s.4323), (Ugwu vd., 2008, s.4023), (Öncel vd., 2016, s.256), (WACKER, (t.y)), (Xu vd., 2009, s.181), (Matthes vd., 2015, s.1756). Tüp uzunluğununun arttırılması, gaz alma, kültür dolaşımı, karışımın durumu, havalandırma, fotosentetik aktivite, PBR performansı ve verimlilik ile ilgili problemler de yaratabilir (Oncel, Kose, Vardar ve Torzillo, 2015). Tübüler PBR'ler, bireysel boruların geometrisi nedeniyle daha küçük bir yüzey alanı/hacim oranına sahiptir. Tüm tüp sisteminin yüzey/hacim oranı (verimlilik), uzunluk (sınırlara göre) ve tüp sayısının artmasıyla arttırılabilir (Chisti, 2007, s.298), (Grima vd., 1999, s.241). Tübüler PBR'lerin karıştırılması, pompalar veya

hava kaldırma sistemleri veya her ikisinin kombinasyonu ile elde edilir. Tüm kapalı fotobiyoreaktör sistemlerinde olduğu gibi karıştırma; kütle transfer oranlarını, gaz difüzyonunu, O_2 uzaklaşmasını ve ışık kullanımını belirler ve hücrelerin tüp dibine çökmesini önler (Molina vd., 2001, s.115). Tübüler PBR'ler için temel tasarım mentalitesi, kültürün karıştırılması ve dolaşımı için uygun pompalama sistemlerinin yönetimidir. Tüp şeklindeki PBR'lerin özdeş konfigürasyonu, O_2 uzaklaştırma ve arazi kullanımı vasıtasıyla yatay yerine dikey oryantasyon tercih edildiğinde bir avantaj gibi görülmektedir. PBR oryantasyonundan bağımsız olarak, pompalama sistemi ve sıvı dolaşımı için gereken enerji, PBR'nin performansını belirler (Li vd., 2015,s 75). Sadece hafif kullanım değil, aynı zamanda akışkan dinamikleri de tübüler bir PBR'nin etkin kullanımı için başka bir tasarım parametresidir.



Şekil 2. 6 Hava Kaldırmalı Tübüler Fotobiyoreaktör Çalışma Diyagramı (Molina vd., 2001, s.116)

Tübüler fotobiyoreaktörlerin literatürde potansiyel tasarım ve uygulama örnekleri sıkça belirtilmiştir (Chisti, 2007, s.298), (Ugwu vd., 2008, s.4023), (Grima vd., 1999). Biyoreaktörler genellikle merkezi bir serpme sistemine bağlı sıralar halinde düzenlenmiş cam veya plastik borular ile yapılır. Grima ve arkadaşları, tüp şeklindeki reaktörlerin, boru çapının 0,1 m'den daha büyük olmayacak şekilde ve 0,3-0,5 m/s akış hızında sürekli bir 80 m uzunluğunda olacak şekilde tasarlanması gerektiğini önermişlerdir (Grima vd., 1999, s.244).

Tübüler fotobiyoreaktör tasarımlarında kültür ortamında bulunan her algin optimum seviyede ışıktan yararlanamaması gibi sorunlar söz konusu olabilir. Tübüler fotobiyoreaktörün tüp çapı artırıldığında ışıktan faydalanan yüzey/hacim oranı azalır.

Fotobiyoreaktörün geometrik yapısından dolayı gölgeleme sebebiyle, tüpün alt kısmındaki algler, büyümeleri için yeterli ışığı alamazlar. Mikroalglerin tüplerin yüzeyine yapışması ve yapıştığı yerde yığılması ve bunun ışık almayı engellemesi gibi durumlar da greçekleşebilir. Böyle durumlarda iyi bir karıştırma sistemine ihtiyaç duyulur. Her durumda, alglere verimli ışık dağılımı, ancak tüplerin içinde iyi bir karıştırma sistemi geliştirilmesi ile başarılabilmektedir (Ugwu vd., 2008, s.4023).

Tüpler tek bir yatay boru tabakasında olabilir. Boru şeklindeki PBR'deki verimlilik, açık bir sisteme kıyasla metrekare başına daha yüksektir, Ancak tüplerin yüzeyindeki yüksek ışık yoğunluğu nedeniyle, büyüme hızı sınırlanabilir. Tübüler sistemin avantajı, daha uzun hale getirmek için daha fazla tüp ekleyerek ölçeklenebilir olmasıdır. Tüpleri kullanmanın daha etkili bir yolu, üst üste dikey olarak istiflemek ve reaktörlerin birkaçını yan yana koymaktır. Yan yana koyulan fotobiyoreaktörler birbirlerine gölgeler oluşturup maruz kalınan ışık yoğunluklarını düşürerek daha yüksek bir üretkenlik elde edilelerek metrekare başına daha fazla biyokütle oluşturulabilir (Wolkers vd., 2011, s.15).

Tübüler fotobiyoreaktörlerde mikroalg kültürü santrifüjlü bir pompa ile dolaştırılır ve biriken oksijeni üfleyen bir gaz giderici mevcuttur. Tüpler farklı saydam malzemelerden yapılabilir, ancak malzemenin seçimi fotobiyopraktörün kullanım ömrünü etkilemektedir. Yumuşak polietilen boru maliyet açısından uygundur, ancak bir yıllık ömrü vardır. Akrilik boru ve istiflenmiş cam tabakaları da daha uzun ömürlü olan olasılıklardır. Santrifüjlü pompanın, hücreleri aydınlatılan yüzeyden ve tüpün karanlık bölgelerine kadar olan tüm sistemi karıştırmak için 0,5 m/s türbülanslı bir akış oluşturması gerekir (Norsker vd., 2011, s.25).

Mikroalg kültürünün sıcaklık değerlerinin istenen düzeyde sağlanabilmesi için yüzeyleri termostat ile kaplıdır fakat bu malzeme gideri maliyet ve iş yükü olarak yüksektir (Ugwu vd., 2008, s.4023). Sierra'ya göre tübüler fotobiyoreaktörlerde mikroalgler yetiştirmek en ekonomik olan yöntemdir (Sierra vd., 2008).

2.2.2.2 Dikey Kolon Fotobiyoreaktörler

Dikey kolon fotobiyoreaktörlerde, mikroalg kültürü geniş hacimdeki silindir şeklinde panellerde yetiştirilir (Şekil 2.7) Maliyetleri düşük ve işletmesi kolay olan fotobiyoreaktörlerdir. Kitlesel ölçekte olmasa da geniş ölçekte kullanıma uygundurlar

(Ugwu vd., 2008, s.4023).

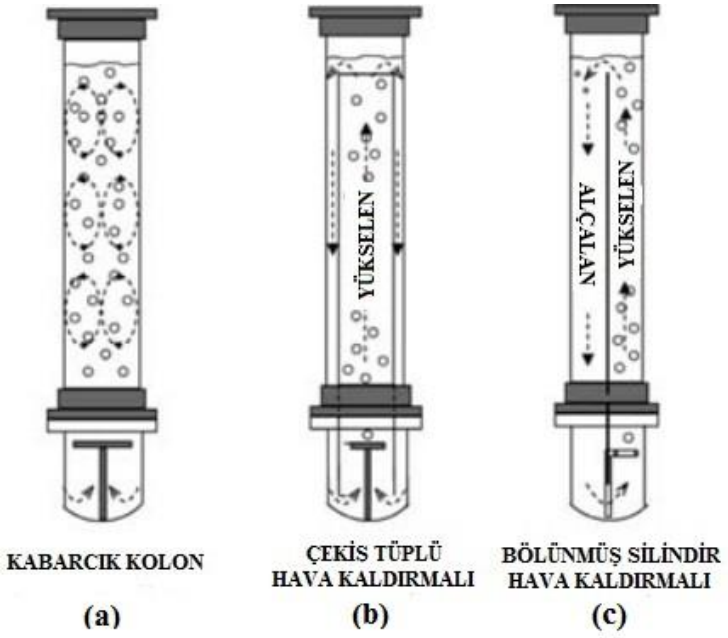


Şekil 2. 7 Dikey – Kolon Fotobiyoreaktör Örnekleri (Donewell, t.y), (Bitog vd., 2011, s.135), (FEMONLINE, 2017)

Dikey kolon fotobiyoreaktörler çalışma prensiplerine göre kabarcık kolonları veya hava asansörleri(airlift) olarak adlandırılırlar. Yükselen gaz kabarcıkları reaktörde akım oluşturarak karışmaya neden olur. Karışımı arttırmak için perdeler eklenir ve bu da gazların difüzyonunu arttırır (Ugwu vd., 2008, s.4023). Airlift reaktörlerinin, kültür ortamının stimüle edilerek alg büyümesini kontrollü olarak arttırabilme özelliklerinden dolayı kabarcık kolonlarına göre ek avantaja sahiptirler. Chui ve arkadaşları, konsantre airlift reaktörlerinde yetiştirilen alglerin, konsantre kabarcık kolonlarına (0.180 gün-1) kıyasla daha yüksek bir spesifik büyüme oranına (0.226 gün-1) sahip olduğunu göstermiştir (Chiu, Tsai, Kao, Ong ve Lin, 2009, s.257).

Kabarcık-kolon fotobiyoreaktörlerde hava girişi alt kısımdan sağlanır ve kültür ortamı içerisinde akış çevrim (girdap) biçiminde sirküle olur (Şekil 2.8(a)). Bu durum mikroalg kültürlerine zarar verebileceğinden, zararı engellemek için, fotobiyoreaktör sisteminde çekiş tüpleri kullanılır ya da silindir geometrisi bölünerek tasarlarlanır. Hava kaldırmalı olarak adlandırılan düşey kolon fotobiyoreaktörler çalışma prensibine göre iki kısıma ayrılarak tanımlanabilirler. Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerin ilki, Çekiş tüplü-hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerdir. Çekiş tüplü-hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerde sistemin ortasına çekme amaçlı bir tüp yerleştirilir ve sisteme verilen havanın sağladığı karışma durumu çekiş tübünün duvarlarının birbirinden ayırdığı birbirine zıt yönde gerçekleşir (Şekil 2.8(b)). Diğeri ise Bölünmüş-hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerdir. Bölünmüş-hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler sisteminde silindirdeki kültür akımı yükselen bölge ve alçalan bölge olacak şekilde gerçekleşir (Şekil 2.8(c)). Kabarcık-kolon fotobiyoreaktörlerin çapı 0,19 m'ye kadar küçültülerek tasarlandığında tübüler

fotobiyoreaktör mantığında çalışabilir (Ugwu vd., 2008, s.4023).



Şekil 2. 8 Kabarcık-Kolon ve Hava Kaldırmalı (Çekiş Tüplü Hava Kaldırmalı ve Bölünmüş Silindir Hava Kaldırmalı) Fotobiyoreaktörler (Sevilla, 2004, s.729)

Dikey kolon fotobiyoreaktörler, iyi karıştırma ve yönetilebilir ekim sağlayan bir başka PBR konfigürasyonudur. Üretimi kolaydır ve maksimum ışığa maruz kalmaya izin verir (Razzak vd., 2013, s.628). Hava asansörlü dikey kolon PBR'ler yüksek kütle transfer hızı, düzenli ışık/karanlık döngüleri sunar ve alg hücreleri düşük kayma gerilimi ile karşı karşıya kalır. Gaz kabarcığı, kültürün biyoreaktörün yükseltici ve alt bölümü arasında hareket ettirilmesiyle gerçekleştirilen kültürün karıştırılmasında kullanılır. PBR'ler mikroalg ekimi için uygundur. Çünkü verimli fotosentez ve karışma çözünmüş oksijenin düşük oranda birikmesini sağlayarak, yüksek oranda oksijen birikimini engellerler. Dikey kolon fotobiyoreaktörlerde sıcaklık kontrolü ve hidrodinamik yük yönetimi konusunda eksiklikler yaşanabilmektedir (Pires, 2017, s.869). Hava pompası, normal pompalardan daha az esnektir ve çalışması için hava beslemesi gerektirir. Periyodik olarak, fotobiyoreaktörler temizlenmeli ve sterilize edilmelidir. Temizlik, otomatik temizleme işlemleri kullanılarak kolayca başarılabilir (Chisti, Moo-Young, 1994, s.201), (Chisti, 1999, s.1806). Dikey kolon fotobiyoreaktörler yüksek karıştırma ve kütle aktarımı özelliğine sahiptirler. Enerji tüketimleri düşüktür. Büyük ve küçük ölçekte rahatlıkla tasarlanabilirler. Temizlikleri kolaydır. Geometrik yapıları ve çalışma prensipleri sayesinde alg kültürünün fazla ışığa maruz kalmasını engelleyerek ışıktan

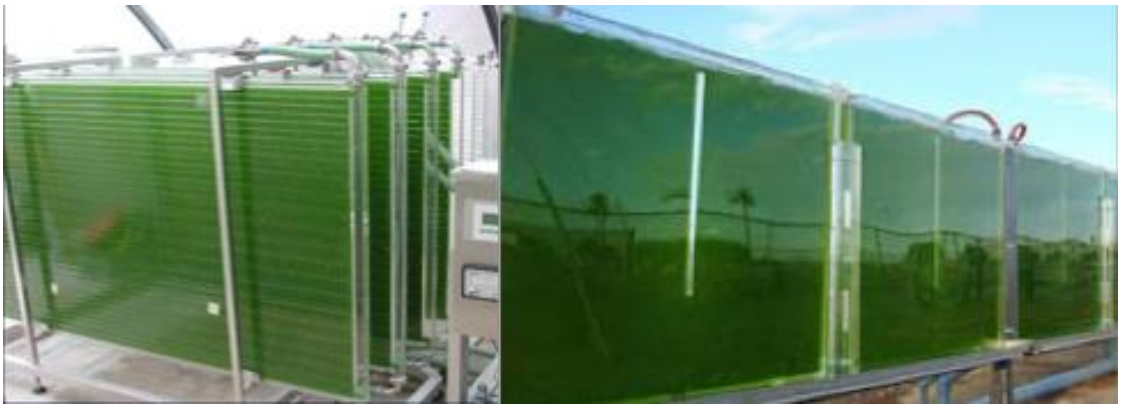
dolayı oksitleşmeyi azaltırlar. Dikey kolon fotobiyoreaktörlerin dezavantajları, kısıtlı ışıklandırma yüzeyine sahip olmaları, etkili çalışmaları için kullanılan mekanik sistemlerden dolayı nitelikli malzeme gereksinimler ve karıştırmanın yeterli olmadığı durumlarda alg kültürlerinin üstüne yüksek kesme kuvveti binmesidir. Boyutları büyüyen dikey kolon fotobiyoreaktörlerin ışık kullanımları da boyutla ters orantılı olarak azalmaktadır (Ugwu vd., 2008).

Fotobiyoreaktörün tabandan gaz kabarcıkları kontrollü olarak enjekte edilir yaratılan türbülans, mikroalg için besleyici maddeleri harekete geçirerek kültür ortamının karışmasını sağlar. Literatür örneklerinde, yaz aylarında bir kabarcık kolonunda P. tricornutum için ölçülen alan verimliliği 2.02 g/L/gün olarak belirtilmiş olup, yıllık ortalama verimlilik 1,535 g/L/gündür. Bu tip PBR'lerde en yüksek verimlilik yaz mevsimi olarak ölçülmüşür (Mirón vd., 1999, s.266).

Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler karıştırma ve gaz aktarımının hava beslemesi ile aynı anda yapıldığı sistemlerdir. Bu reaktörler tek alg türünün üretiminde kullanılabilmektedirler. Yeterli ve etkin karıştırma, kontrol edilen sıvı akışı ile uygulanmaktadır. Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörlerde CO_2 beslenmesi ve O_2 uzaklaştırması reaktör verimliliğini kısıtlamamaktadır. Ayrıca biyokütle yoğunluğuna göre reaktörlerin içinde karanlık bölgelerin oluşumu, yoğun ışığa karşı belirli bir engelleme kalkanı olarak görev yapmaktadır (Chist, 1998).

2.2.2.3 Düz Panel Fotobiyoreaktörler

Düz plaka fotobiyoreaktörler, geniş aydınlatma yüzeyleri ve ince yapıları nedeniyle fotobiyoreaktörler için en verimli tasarım olarak kabul edilir (Ugwu vd., 2008, s.4023). Bu fotobiyoraktörlerin diğer tasarımlara göre çok yüksek fotosentetik verimler elde edebildiği bildirilmiştir (Şekil 2.9) (Hu vd., 1996), (Richmond, 2000, s.442). Düz plakalı bir fotobiyoreaktör şeffaf plastikten veya camdan yapılmıştır ve kabarcık kolonu veya hava asansörü konfigürasyonları olabilir. Işık aydınlatma alanı, şanzımanı ve algal verimliliği dengelemek için ince olacak şekilde tasarlanmıştır. Düz panel fotobiyoreaktör sistemi, düz, şeffaf bir cam, pleksiglas, polikarbonat veya polietilen filmden oluşabilir (Qui, 2014, s.7), (Singh ve Sharma, 2012, s.2350), (Zhang, 2015, s.35).

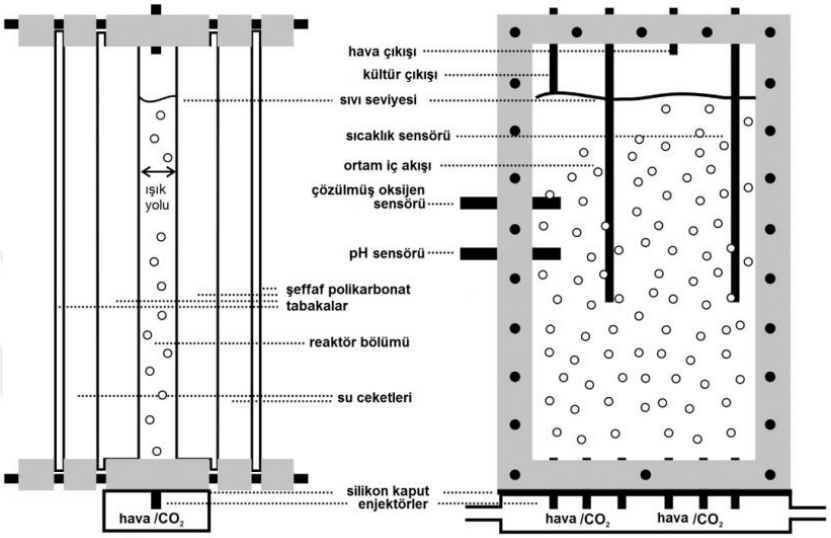


Şekil 2. 9 Düz Panel Fotobiyoreaktör Örnekleri (Bitog vd., 2011, s.135)

Tübüler fotobiyoreaktörler ile karşılaştırıldığında, düz panel PBR'lerin yüzey/hacim oranının yüksek olduğu için verimi daha yüksektir. (Suali ve Sarbatly, 2012, s.4323), (Xu vd., 2009, s.181). Dış mekan yetiştiriciliği için, paneller paralel veya bitişik plakalarda düzenlenebilir. (Qui, 2014, s.7). Mikroalg hücrelerinin düz plakalar arasında kendi kendine gölgelenmesi fotosentez işlemini ve mikroalg verimliliğini engelleyebilir. Bu nedenle, kültürde ışığın verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak ve ışığın nüfuzunu arttırmak için ek iç aydınlatma için optik fiberler veya LED ışıklar kullanılabilir (Suali ve Sarbatly, 2012, s.4324), (Xu vd., 2009, s.184). Ayrıca, güneşin hareketini izlemek ve güneş ışığını gölgeli alanlara yönlendirmek için Fresnel lensleri kullanılabilir (Elrayies, 2018, s,1179).

Mikroalg büyümesi ve verimliliği kritik olarak karışan tüm girdilere bağlı olduğundan, diğer tüm fotobiyoreaktör çeşitleri gibi düz panel fotobiyoreaktörlerkde de bu girdiler önemlidir (Elrayies, 2018, s.1179). Örneğin, gaz hızı ve havalandırma oranı, gaz dağılımını ve kabarcık boyutlarını da etkileyen kütle transferini belirler (Pulz, 2001). Karıştırma, aynı zamanda karışım besinleri de sağlayan ve O_2 birikimini önleyen yükselen baloncuklardan sağlanır (Croze vd., 2013, s.3). Mekanik sistemin çalışmasını etkileyebilecek girdilerin yaratabileceği riskleri azaltmak için, fotobiyoreaktör içindeki kültür ortamının içinde etkili bir şekilde karıştırılması ve dolaştırılması gerekir (Vonshak ve Guy, 1992). Genel olarak düz panel fotobiyoreaktörlerde karıştırma işlemi havalandırma yoluyla yapılır. Çok noktalı serpicilerin tercih edildiği havalandırma ünitesi reaktörün altına yerleştirilir. Gaz kabarcıklarının yükselme hareketi, karışım, gaz aktarımı, besin aktarımı, ısı aktarımı ve ayrıca hücrelerin ve ışığın homojen dağılımına yardımcı olur (Janssen vd., 2000, s.226). Düz Panel fotobiyoreaktör sisteminin çalışma

mekanizmasını gösteren diyagram kesitleri Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Karıştırma koşullarında herhangi bir probleme rastlandığı durumlarda fotobiyoreaktör mekanik çarklarla da donatılabilirler. Çarklar açık sistemlerdeki gibi çalışarak kültürün etkili karıştırılmasına yardımcı olabilirler ve ayrıca hücrelerin yüksek yoğunlukta (> 10^8 hücre/mL) çökelmesini önlerler (Pulz, 2001, s.290).



Şekil 2. 10 Düz Panel Fotobiyoreaktörün Yan ve Ön Kesiti (Bahadar ve Khan, 2013 s.135)

Oryantasyon, herhangi bir mikroalgal sisteminin verimliliği, yakalanan toplam güneş ışınımının doğrudan bir işlevi olduğundan, düz panel PBR tasarımını etkileyen önemli bir faktördür. Dış mekan mikroalg ekimi için Sierra ve ark. dikey yassı PBR'lerin doğu / batı yöneliminin 35 °N üzerindeki enlemler için uygun oryantasyon olduğunu ve kuzey / güney yönünün 35 °N'nin altındaki enlemlerde tercih edildiğini belirtmişlerdir (Sierra vd., 2008, s.143). Benzer şekilde, Slegers panel oryantasyonunun yüksek enlemlerde verimlilik üzerinde büyük etkisi olduğunu ve kuzey/güney ve doğu/batı yönelimi arasındaki farkın %50'ye kadar çıkabileceğini belirtmiştir (Slegers, 2014, s.24). Elnokaly ve Keeling, İngiltere Lincoln Kampüsü Üniversitesi'nde yapılan deneysel çalışmalarıyla, güney yöneliminin, daha yüksek gün ışığı faktörlerini elde etmek için dikey tübüler PBR'lerinin tercih edilen yönelimi olduğunu göstermiştir (Elnokaly ve Keeling, 2016, s.721). Hamburg'daki BIQ evinde (53.5◦N), biyolojik cepheler güneydoğu ve güneybatı cephelerinde yer almaktadır (Roedel ve Petersen, 2013, s.6). Marsullo ve arkadaşlarına göre, düz panel PBR'lerin ortama ışık girmesini sağlamak

için 5-6 cm'den daha kalın olmamalıdır (Marsullo vd., 2015, s.3). Dikey düz panel PBR'lere kıyasla, eğimli düz panel PBR'ler ışığı optimum biçimde kullanarak ışık ve sıcaklık üzerinde önemli bir kontrol sağlayabilir. Eğim açısının yıl boyunca ayarlanması gerektiğinden işletme maliyetleri daha yüksek olacaktır. Dolayısıyla, eğimli düz plaka PBR'lerine kıyasla dikey düz plaka PBR'leri, maliyet etkinlikleri için mikroalg ekimi için daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Xu vd., 2009, s.182). Provost ve Legendre, düz panel PBR cepheleri için, mimarlık firması X-TU, AlgoSource Technologies tarafından desteklenen Nantes Saint-Nazaire'deki (47 °N) SymBio2 projesinin araştırılması ve geliştirilmesine göre güney oryantasyonun önerildiğini tespit etmiştir (Elrayies, 2018, s.1179).

Düz panel fotobiyoreaktör taarımlarında dikkat edilmesi gereken en önemli husus ışık kullanımıdır (fotosentetik dönüşüm verimliliği), bu nedenle yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olmaları, panel tipi PBR sistemlerinde etkili ışık penetrasyonu, dağıtımı ve kullanımı açısından avantajdır. Işıktan yararlanma kontrollü olmalıdır. Aşırı ışığa maruz kalan mikroalg kültürünün zarar görmesi durumu olasıdır. Aksi halde alg kültürünün ışık doygunluk sınırlarından dolayı daha yüksek ışınlama seviyelerinde, fot inhibisyon olarak adlandırılan hücre ölümü tetiklenebilir (Behrenfeld vd., 1998, s.259), (Masojidek vd., 2013). Fotoinhibisyon, aydınlatma oranının güneşe bağlı olduğu dış mekan kültürlerinde operasyonel zorluklardan biridir. Dış ortamda çalışan fotobiyoreaktörlerin konumu güneşin günlük hareketine bağlı olarak, kompakt tasarımları nedeniyle basit yönlendirme sistemleri ile panellerin eğim yakalaması sağlanarak değiştirilebilir. Bahsedilen eğim açısı, mevsimsel değişikliklerin ve iklim koşullarının da etkisinin olduğu doğal ışıklandırılmış kültürlerde önemli bir tasarım parametresidir ve ışık kullanımı için en uygun koşulları sağlamaya yardımcı olur ve artık aydınlatma ve aşırı sıcaklığı önler (Pulz, 2001).

Düz panel PBR'lerin yapısı çok yüksek basınca dayanamaz. Mikroalg büyümesi artan baskıdan etkilenir. Dolayısıyla, ölçek büyütme potansiyel olarak sınırlandırılmıştır (Zhang, 2015, s.36). Düz panel fotobiyoreaktörlerde ölçek büyütülmek istendiğinde yüzey alanı ve kültür hacmindeki artışın getirileri dikkate alınmalı ve tasarımda ışık kullanımı birincil olarak düşünülmelidir. Hasat üretimini arttırabilmek adına, tekil fotobiyoreaktörün boyutlarının artırılması yerine modüler yapıya sahip PBR'lerin sayısı artırılarak hedeflenen ürün miktarına ulaşabilmek endüstriyel ölçekte daha uygun

bulunmuştur (Öncel vd., 2016, s.256). Kolay ölçeklendirme ve kontrollü ışık kullanımı için düz panel fotobiyoreaktörün üretildiği, örneğin lamine edilmiş emniyet camı gibi, belirli tipte malzemelerin kapsamlı bir seçimini gerektirebilir (Elrayies, 2018, s.1179).

2.2.3 Bölüm Sonucu

Endüstriyel ve akademik alanda en yaygın olarak kullanılan Açık havuz biyoreaktör ve kapalı fotobiyoreaktör tipleri, literatür özetini ifade eden özgün bir derleme çalışması ile Tablo 2.2'de çevresel, ekonomik ve operasyonel bağlamda mevcut özellikleri bakımından karşılaştırmalı olarak ifade edilmiştir. Mikroalg kültürünün yetiştirilmesi ve verimliliğin tespiti belirtilen parametrelere bağlı değişebildiğinden karşılaştırmalı ifadeler kesinlik ifade etmemektedir (Richmond, 2004a).

Tablo 2.2 Mikroalg Yetiştiriciliğinde Yaygın Kullanılan Biyoreaktörlerin Karşılaştırmalı Analizi (Chisti, 2007), (Qui, 2014), (Mata vd., 2010), (Genin vd., 2016), (Croze vd., 2013), (Bogias, 2014), (Yoo vd., 2013), (Ugwu vd., 2008), (Borowitzka, 1999), (Brennan ve Owende, 2010), (Schenk vd., 2008), (Pulz, 2001), (Hemming vd., 2012), (Kunjapur ve Eldridge, 2010), (WACKER, (t.y)), (Xu vd., 2009), (Kram, 2008), (Solarpedia, 2011), (Posten, 2012), (Zhang, 2015), (Elrayies, 2018), (Elnokaly ve Keeling, 2016). (Genin, Aitchison ve Allen, 2014), (Schumacher, 2007), (Hu vd., 1996), (Richmond, 2000), (Grima vd., 1999), (Richmond vd., 1993), (Dalay vd., 2008), (Oncel vd., 2015), (Razzak, Hossain, Lucky, Bassi ve de Lasa, 2013), (Pires, 2017), (Chisti, Moo-Young, 1994), (Chisti, 1999), (Chisti,1998), (Behrenfeld vd, 1998), (Arsalane vd., 1994), (Masojidek vd., 2013), (Janssen vd., 2000)

Fotobiyoreaktör Çeşidi	Açık Havuz	Tübüler	Dikey Kolon	Düz Panel
Işık Kullanımı	Çok Kötü	İyi	Çok İyi	Çok İyi
Sıcaklık Kontrolü	Çok Kötü	Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi
Gaz Transferi	Çok Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
Hidrodinamik Stres	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük
Tür Kontrolü	Zor	Kolay	Kolay	Kolay
Sterilizasyon	Çok Zor	Zor	Kolay	Kolay
Ölçek Büyütme	Çok Zor	Zor	Zor	Zor

Tablo 2.2 Mikroalg Yetiştiriciliğinde Yaygın Kullanılan Biyoreaktörlerin Karşılaştırmalı Analizi (Devamı)

Fotobiyoreaktör Çeşidi	Açık Havuz	Tübüler	Dikey Kolon	Düz Panel
Verimlilik	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Kurulum Maliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
İşleyiş Maliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Hasat Maliyeti	Çok Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Karıştırma	Kötü	İyi	İyi	İyi
Kütle Transferi	Çok Düşük	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Kurulum İşgücü	Çok Kolay	Kolay	Zor	Kolay
Bakım	Zor	Kolay	Kolay	Kolay
Kitlesel Yetişticilik	Çok İyi	İyi	İyi	Çok Kötü
CO_2 Düfizyonu	Yüksek	Düşük	Düşük	Çok Düşük
Isı Kaybı	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Alan İşgali	Çok Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük
Fotooksidasyon İhtimali	Çok Düşük	Çok Yüksek	Yüksek	Düşük
Eerji Tüketimi	Çok Düşük	Düşük	Yüksek	Düşük

Alg yetiştiriciliğinde yaygın kullanılan açık havuz biyoreaktörler ve kapalı fotobiyoreaktörler olmak üzere iki farklı biyoreaktör sistemi vardır Açık havuzlu sistemler düşük maliyetleri nedeniyle daha çok ilgi çekmesine karşın kapalı sistemlerin, büyüyen alglerin sistemi kontamine etmelerini önleyerek daha iyi bir kontrol sağladığı ayrıca daha iyi kütle transferi ve düşük su gereksinimi ile çok daha yüksek yoğunluklu biyokütle eldesi sağlaması yönüyle açık sistemlerden üstün olduğu görülmüştür. Kapalı sistemlerinin mikroalg yetiştirme yöntemlerinde en etkin yöntem oldukları anlaşılmıştır. 'Kapalı Fotobiyoreaktörlerde Mikroalg Yetiştirme Koşulları' başlığında mikroalg yetiştiriciliğini etkileyen parametreler anlatılmıştır.

2.3 Kapalı Fotobiyoreaktörde Mikroalg Yetiştirme Koşulları

Alglerin yetiştirilebilmeleri için gerekli uygun koşullar mikroalg yetiştiriciliği ile ilgili deneyler ve literatür taramalarından referanslarla açıklanmıştır.

Mikroalg yetiştiriciliği ve biyokütle üretkenliği karbondioksit ve su kullanımıyla orantılıdır. Genel olarak, alglerin büyümesi için belirli bir sıcaklıktaki ışığa ve besinlere ihtiyacı vardır. Çok yüksek yoğunluklu ışık veya oksijen seviyesi büyümeyi olumsuz etkileyebilir. Biyokütle üretimi alg türleri ile de bağlantılıdır. Bazıları düşük sıcaklıklarda ve düşük ışık yoğunluklarında iyi büyürken, diğerlerinde daha yüksek ışınım gerekir. Mikroalglerden biyokütle üretimi, bu biyolojik işlemin tüm gereksinimlerini tanımlayan basit bir fotosentez şemasına dayanmaktadır (Masojídek ve Torzillo, 2014, s.2226).

Tespit edilem on bir adet parametre alglerin büyümesini ve lipid içeriğini dolayısıyla elde edilen biyokütleyi etkiler. Güneş ışığının depolanan enerjiye ilk dönüşümünü sağlayan reaksiyon fotosentezdir. Fotosentezde yer alan tüm bileşenler büyümeye katkıda bulunur. Bunlar sisteme verilen CO_2 miktarı, su tüketimi, besin (azot, fosfor) temini ve konsantrasyonu, ışık, O_2 giderimi, sıcaklık, pH ve tuzluluktur (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3516), (Dauta, Devaux, Piquemal ve Boumnich, 1990), (Takeuchi, Utsunomiya, Kobayashi, Owada ve Karube, 1992), (Blanken, Cuaresma, Wijffels ve Janssen, 2013), (Hidaka, Inoue, Suzuki ve Tsumori, 2014), (Junying, Junfeng ve Baoning, 2013). Mikroalglerin verimli bir şekilde hasatı için mikroalgin fotosentez yapmasını sağlayabilecek parametrelerin yanı sıra operasyonel parametreler çok önemlidir. Operasyonel parametreler fotobiyoreaktör sistemindeki mikroalgin yetiştirme koşullarını ifade eder. Işıklandırma, kütle aktarımı, karıştırma (Rashid, Rehman, Sadiq, Mahmood ve Han, 2014, s.766), seyreltme oranı, hasat sıklığı (Chiu vd.,2009), (Widjaja, Chien ve Ju, 2009), ölçeklendirme ve süreç yönetimi ve temizlik (Ugwu vd., 2008), parametreleri de mikroalg yetiştirmek için en uygun koşulların oluşturulabilmesi adına önemlidir (Mata vd., 2010, s.222). Tüm kriterlerinin alg üretimini en üst düzeye çıkarmak için optimize edilmesi gerekir. Kapalı fotobiyoeaktörlerin üretkenliği, tasarıma, çalışma koşullarına ve alg türlerine bağlı olarak günde 0.05 ila 2.7 g/L arasında değişmektedir (Ugwu vd., 2008, s.4026).

Yukarıda belirtilen on bir adet parametreye bağlı olarak değişkenlik gösteren mikroalg yetiştirme şartları ile ilgili genel ifade Coutteau tarafından tablolaştırılmış ve incelenen literatür çalışmalarında Tablo 2.3'te belirtilen değerlerin referans olarak kullanıldığı görülmüştür. Coutteau bir çalışma koşullarında optimum seviyede olan değişkenler, başka bir çalışma için farklı bir değerde olabileceğini vurgulamıştır (Couteau, 1996, s.10).

Tablo 2.3 Mikroalg Gelişimi İçin En Önemli Parametrelerin Genel Değer Tablosu (Couteau, 1996, s.10)

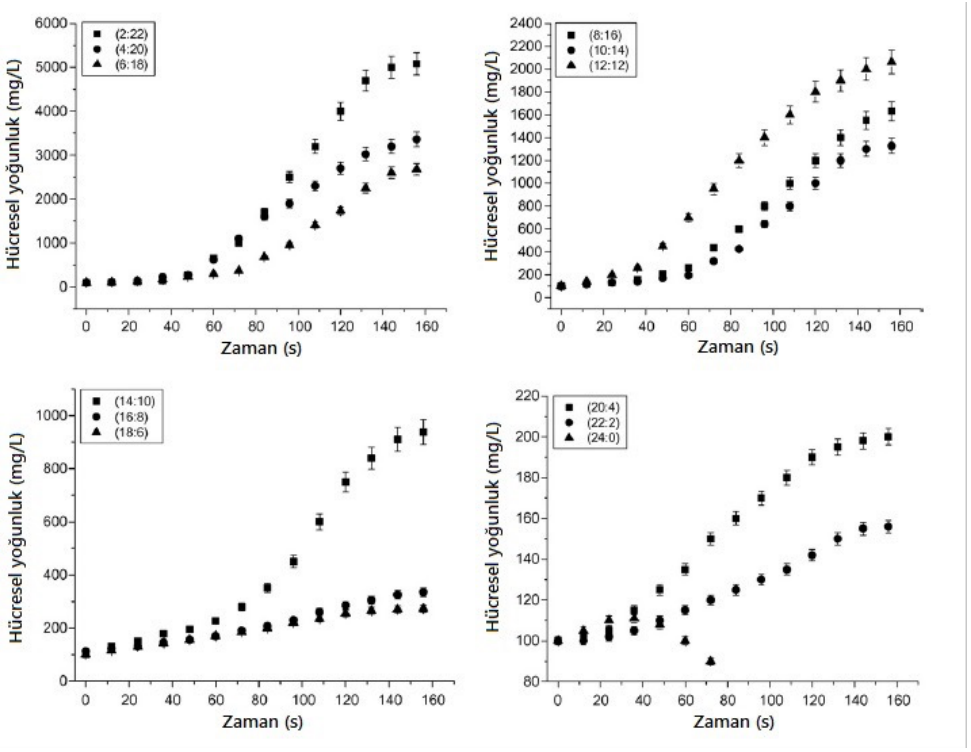
Parametreler	Aralık	Optimum
Sıcaklık	16-27	18-24
Tuzluluk	12-40	20-24
Işık Yoğunluğu (%)	1-10	2,5-5
Fotoperiyot (saat)	-	16:8 (min) - 24:0 (mak)
pH	7-9	8.2-8.7

2.3.1 Işık

Fototrofik canlılar olan algler için temel enerji ve büyüme kaynağı olduğundan ışığın önemi büyüktür. Maruz kalınan ışığın miktarının yanında, ışığın dalga boyu (Wang vd. 2007, s.21), hücre yoğunluğu (Koller vd., 2017, s.18) PBR'nin geometrisi (Grima vd., 1999, s.234) ve iletilen ışığın hareket mesafesi (Ogbonna ve Tanaka, 2000, s.209) ile ilişkilidir. Güneşten gelen ışığa ek olarak, PBR'nin yüzeyi, dar ışık döngüsü (Jacob-Lopes vd., 2009, s.306). PBR'nin kalınlığı, ışık iletimi ve PBR malzemelerinin yansıtıcılığı, mikroalg ekimi için anahtar parametrelerdir (Ogbonna vd., 1995, s.369). Bu parametreler alg kültürlerinin yetişme koşullarını olumlu ve olumsuz olarak etkileyebilir (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3516). Mikroalg büyümesi maruz kalınan ışığın özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Mikroalgler çeşitlerine göre, 400 - 700 nm dalga boyun aralığında ışığa ihtiyaç duyarlar (Blair, Kokabian ve Gude, 2014, s.665), (Kim, Lee, Han, ve Hwang, 2013, s.76). Örneğin, yeşil mikroalgler en iyi 450 - 475 nm ve 630 - 675 nm aralığındaki ışığı kullanmaktadırlar (Teo vd., 2014). Fazla ışık seviyelerindeki ortamlarda fotooksidasyon ve fotoinhibisyon gerçekleşebilirken (Rashid

vd., 2014, s.764), (Gris, Morosinotto, Giacometti, Bertucco ve Sforza, 2014, s.233) düşük ışık seviyeleri büyüme için sınırlayıcı olabilmektedir. Kapalı fotobiyoreaktörler ile ilgili yapılan çalışmalar, alglerin fotosentetik reaksiyonunun dolaylı orta yoğunluklu ışığa (1000–10000 lüks) maruz kaldığında optimum verim alındığını kanıtlamıştır (Proksch, 2013, s.151). Literatür çalışmalarında, genelde mikroalglerin doygunluğa ulaştığı aydınlatma düzeyi yaklaşık 200 µmol·m-2·s-1 olduğu saptanmıştır (Teo vd., 2014, s.39). Fakat Znad ve ark.ları 2012 yılındaki çalışmalarında 4000 lmol m-2·s-1 ışık yoğunluğu altında iyi mikroalgal büyüme oranı gerçekleştiğini hesaplamışlardır (Znad, Naderi, Ang ve Tade, 2012, s.235). Bu farklılıklar tercih edilen mikroalgin çeşidine göre farklılıkların olabileceğini kanıtlamaktadır. Sharma ve ark.ları (Sharma, Singh ve Korstad, 2011, s.2999), aydınlatma düzeyini 20 µmol·m-2·s-1'den 50 µmol·m-2·s-1'ye yükselttikleri çalışmalarında, mikroalglerin büyüme hızının üç kat arttığını gözlemlemişlerdir. Mikroalglerin gün içinde maruz kaldığı aydınlık/karanlık süreleri de büyümelerinde etkilidir (George vd., 2014, s.16). Algal kültür içindeki ışık kullanımı, mikroalglerin fotobiyoreaktör içerisindeki konumuna göre de farklılık gösterebilmektedir. Fotobiyoreaktörlerin geometrilerine bağlı olarak sistem içerisinde yaşayan mikroalglerden güneş ışınımına farklı derecelerde maruz kalırlar. Çünkü ışık kaynağına daha yakın olan mikroalgler arka kısımlarında kalan güneş ışığının direkt ulaşamadığı mikroalgleri gölgelerler. Mikroalglerin güneş ışığına maruz kalması ve karıştırılmaları sonucunda birbirleri üzerlerinde gölgeleme yapma veya gölgeden kurtulma gibi kültür ortamı faaliyetlerinin oluşturduğu aydınlık ve karanlık döngüleri biyokütle üretimini etkilemektedir (Grima vd., 1999, s.234). Wahidin ve ark.larının (Wahidin, Idris ve Shaleh, 2013, s.7) Nannochloropsis sp. Mikroalg türü kullanarak ışığa maruz kalma sürelerinin mikroalg gelişimine ve enerji eldesi için gerekli yağ üretimine etkisi üzerine yapmış oldukları çalışma, en iyi sonuçların (maksimum hücre konsantrasyonu: 6.5x107 hücre·ml-1, lipit: %31,3 kuru ağırlık) 18 saat aydınlık 6 saat karanlık olacak şekilde gerçekleşen döngü olduğunu göstermiştir. Lee ve ark.ları (Lee vd., 2015, s.683) mikroalgler üzerine yaptıkları deneyde, ışığa maruz kalma süreleri bağlamında karanlık döngünün artırılmasının karbon giderimi için faydalı, azot ve fosfor giderimi için zararlı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, aynı çalışmada biyokütle üretimi için aydınlık döngünün artırılmasının önemli olduğunu söylemişlerdir. Jacob-Lopes ve arkadaşları yapmış oldukları deneyde mikroalglere 24 saat farklı ışık yoğunlukları uygulayarak değişken aydınlık ve karanlık döngülerinin mikroalglerin

büyümesi üzerine etkisini araştırmışlardır. 2 saat karanlık, 22 saat aydınlık döngüsünde (2:22) mikroalgler üzerinde sürekli ışığa maruz kalma durumuyla eşdeğer bir sonuç gözlenmiştir Aydınlık döngünün azaltılmasıyla mikroalg büyümesinin aynı oranda azaldığı tespit edilmiştir. 12 saat karanlık ve 12 saat aydınlık (12:12) ışık döngüsününde tam tersi bir bulguyla en yüksek büyüme eğrisi gözlemlenmiştir (Şekil 2.11) (Jacob-Lopes vd., 2009, s.307 ve s.308).

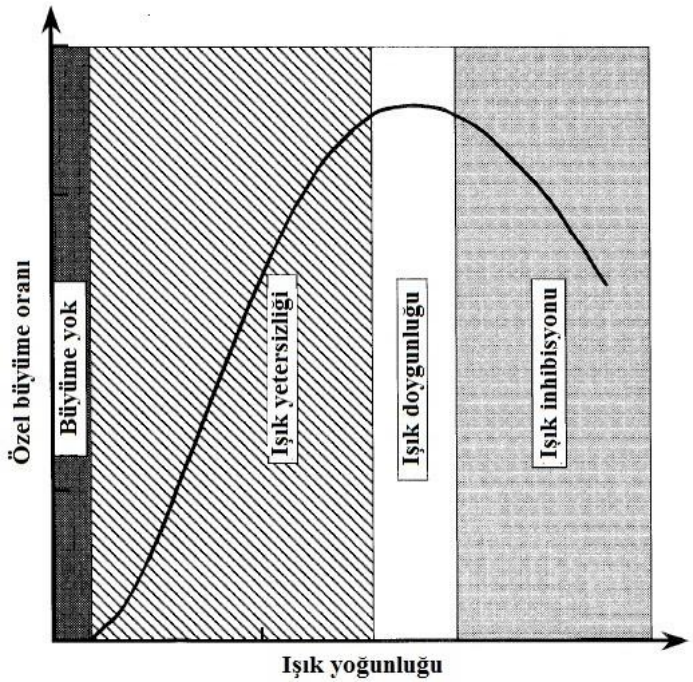


Şekil 2. 11 Aydınlık – Karanlık Döngüsü Bazında Mikroalg Büyüme Eğrisi (Jacob-Lopes vd., 2009, s.308)

Tüm alg yetiştirme sistemlerinde, ışık kaynağı ve ışık yoğunluğu, ototrofik alg büyümesinin durumunu etkileyen kritik faktörlerdir. Dış mekan yetiştiriciliği sistemleri için, güneş ışığı ana ışık kaynağıdır, mikroalg yetiştiriciliğinde yapay ışık kaynakları da iç mekan yetiştiriciliği sistemleri için kullanılmaktadır (Chen, vd., 2011, s.74). Güneş ışığının enerjisinin kullanımı serbest ve bol olduğundan yatırım veya elektrik maliyetlerine duyulan gereksinimi önler. Fakat güneş ışığı kullanımı yüksek yüzey alanı ihtiyacı doğurur. Ayrıca, güneş ışığının yoğunluğu, gündüz ve gece döngüsüne, değişen hava koşullarına ve mevsimsel değişikliklere göre değiştiğinden mikroalgin büyüme hızı ve metabolizması bu döngülere bağlı olarak değişebilir ve kontrol altında tutulmalıdır. Mikroalg yetiştiriciliğinde yapay ışık kaynaklarının kullanılmasıyla güneş

ışığındaki dalgalanmalardan kaçınılabilir. Yapay ışığın kararlı, kontrol edilebilir olması bir avantajdır. Işık kullanım etkinliği ve mikroalg biyokütle verimliliği, doğal güneş ışığına kıyasla yapay ışık kaynakları altında genellikle daha yüksektir. Öte yandan, sermaye yatırımı ve işletme maliyetleri, daha yüksek nihai üretim maliyetlerine yol açan güneş ışığı ekim sistemine göre daha yüksektir (Wang, Stiles, Guo ve Liu, 2014, s.552).

Alglerin fotosentez yaparak büyümelerini sağlayan ışık yoğunluğu ihtiyacında iki farklı önemli nokta vardır. Biri, alglerin hiç büyümediği sıfır ışık yoğunluğudur. Sıfır ışık yoğunluğu, gündelik yaşam döngüsünden güneşten yararlanamadığı gece vaktini ifade eder. Büyüme hızı, artan ışık yoğunluğu ile artar ve fotosentez, maksimum ışık emilimine ulaşılana kadar artarak devam eder. İkinci durumda ise, ışık doygunluk noktasıdır. Algler alacakları ışık miktarına doymuş hale gelir ve daha fazla ışığı ememez. Algler ışığa fazla maruz kalırlarsa, bazı alg kültürlerinde kısa bir süre içinde fotooksidasyon ile büyüme hızı düşerek alg kültüre %50'yi aşan bir oranda zarar görebilir. Fotooksidasyon, fotosentez oranında ve verimliliğinde düşüşle sonuçlanan ışık odaklı durumların sebep olduğu neden olduğu hasardır (Alabi, Tampier ve Bibeau, 2009, s.41). Işığın yokluğu kadar aşırı ışığın varlığı da alglerin büyümesini negatif olarak değiştirmektedir. Fototobiyoreaktör içinde eş zamanlı olarak tamamen karanlık bölge, ışığın yetersiz olduğu bölge, ışığın doygun olduğu bölge ve ışığın inhibisyonu (aşırı ışığın büyümeyi durdurması ya da yavaşlatması) durumu gerçekleşebilmektedir (Şekil 2.12). Işık yoğunluğu kritik seviyelerin altında ya da üstünde kaldığında kültür ortamındaki alglerin büyümesi son bulmakta ya da azalmaktadır (Ogbonna ve Tanaka, 2000, s. 209).



Şekil 2. 12 Işık Yoğunluğu-Alg Büyümesi Grafiği (Ogbonna ve Tanaka, 2000, s.208)

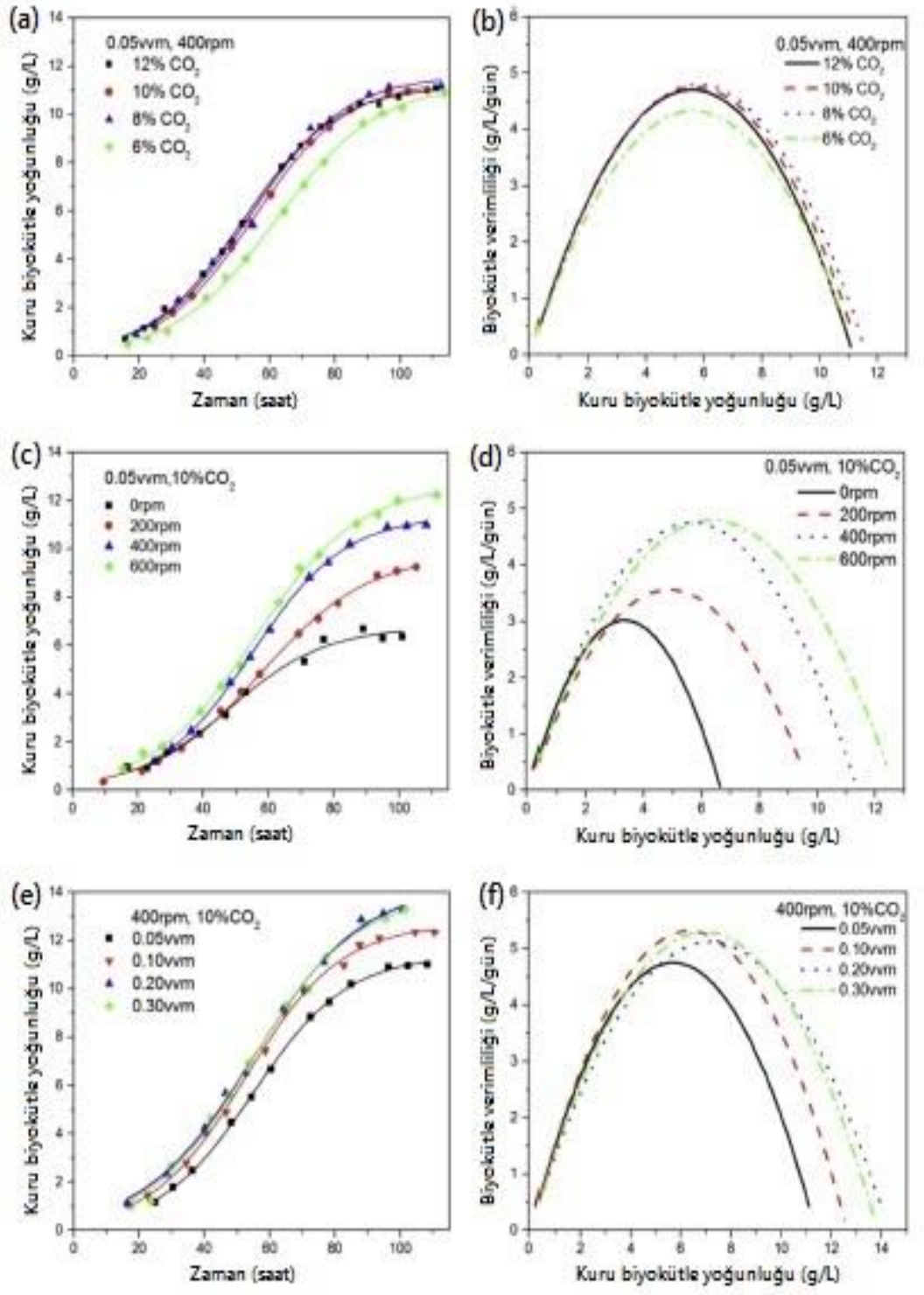
2.3.2 Karıştırma

Karıştırma, mikroalgler için önemli bir büyüme parametresidir (Mata vd., 2010, s.223). Bir fotobiyoreaktördeki karışım seviyesi alglerin büyümesine güçlü bir şekilde katkıda bulunur. Nitekim, Suh ve Lee, yapmış oldukları çalışmalarında çevresel koşullar büyüme hızını sınırlamadığında karışımın yosun büyüme oranlarına katkıda bulunan en etkili faktör olduğunu belirtmişlerdir (Suh ve Lee, 2003). Karıştırma, ışık, sıcaklık ve gazların (O_2 ve CO_2) homojen dağılımı için gerekmektedir (Rashid vd., 2014, s.767). Ayrıca, mikroalglerin çökmesini önlemek ve besin maddelerinin kullanımını artırmak için karıştırma gereklidir. (Lakaniemi, 2012, s.10) Karıştırma, güneş ışığını kültürdeki tüm hücrelere eşit olarak dağıtmaya ve hücrelerin etrafındaki difüzyon engellerini azaltmaya çalışır. Fotobiyoreaktör sistemlerinde karıştırma ve ışıklandırma yakından ilişkilidir, çünkü karıştırma genellikle yosun oluşumuna yararlı olan ışık ve karanlık döngülerinin oluşturulmasından sorumludur. Benzer şekilde, ışık kullanımı zayıfsa karıştırma, çok az fayda sağlar. Karıştırma ve ışıklandırma ilişkisinin önemi, genelde çalışmalarında kültürler düşük ışık ve düşük hücre yoğunluğuna maruz kaldığında karışım oranının verimliliği etkilemediğini açıklayan Richmond tarafından da doğrulanmıştır (Richmond, 2004b, s.35). Karıştırılmayan durgun bir alg kültürünün ışığa doyma noktası gün boyu maruz kaldığı güneş ışığının %20'sidir (Wijffels,

Barbosa ve Eppink, 2010). Mikroalgler sistem içerisinde hareket ettirilip karıştırılmazsa, yosun kültürünün üst veya dış katmanı tüm ışığı emer ve doygun hale gelir ve yosun geri kalanının gölgelenmesine (karşılıklı gölgeleme) neden olur. Gölgeleme, üretkenlikte genel bir düşüşe neden olur (Alabi vd., 2009, s.41). Fotobiyoreaktör sisteminin çalışması devam ederken oluşabilecek bu problemlerin üstesinden gelmek alg hücrelerini güneş ışığına mümkün olduğunca maruz kalırken algleri karıştırmaya devam etmekle mümkündür. Biyoreaktör içindeki alglerin oluşturduğu kültür ortamındaki alg hücreleri, alglerin en iyi şekilde büyümesi için karşılıklı gölgelemenin minimum olduğu bir noktada tutulmalıdır (Alabi vd., 2009, s.41). Alg hücrelerinin bozulmasını önlemek ve tüm hücrelerin ışığa ve besin maddelerine eşit ortalama maruz kalma süresine sahip olmasını sağlamak için gereklidir. Karıştırma işlemi yavaş olursa, mikroalgal kültür içerisinde karanlık bölgeler oluşabilir. (Rashid vd., 2014, s.767). Ayrıca, anaerobik bölgeler oluşarak, mikroalglerin gelişimini etkileyebilir. Karıştırma da ısı transferini kolaylaştırmalı ve dolayısıyla aşırı sıcaklık artışlarının olumsuz etkilerini engellemelidir (Alabi vd., 2009, s.36). Karıştırma hızlı olursa, kesme gerilmesinden dolayı mikroalgal hücreler zarar görebilir (Wang vd., 2012, s.907). Karıştırma işlemi, mekanik karıştırıcılar (ör. çark, karıştırma kolu), mekanik pompalar veya gaz (hava veya diğer gaz karışımları) dağıtıcı sistemler ile yapılabilir (Kaygusuz, 2009, s.1073). Çoğunlukla, mekanik karıştırıcılar açık sistemlerde kullanılırken, pompalar ve gaz dağıtıcılar kapalı sistemlerde kullanılmaktadır. (Lakaniemi, 2012, s.10). Mikroalgal kültür ortamının biyoreaktör içerisinde dolaşımını sağlayarak karıştırma işlemini gerçekleştiren pompaların kullanılması durumunda, verimli bir karıştırma sağlanmaktadır ancak gaz transfer hızı düşüktür (Kumar vd., 2010, s.376). PBR'lerde havalandırma ve karıştırma birbirinden ayrılamaz, bu nedenle havalandırma işleminin karışım üzerindeki rolü ve karışımın kültüre etkisi vurgulanmalıdır. Karıştırma havalandırma ile gerçekleştirildiği için, karıştırma hızı aynı zamanda reaktörün heterojenliğini de belirler. Havalandırma yetersiz kaldığında, PBR ilave mikserlerle de desteklenebilir (Pulz, 2001), (Ugwu, Ogbonna ve Tanaka, 2005, s.3406) Havalandırma, fotobiyoraktör içerisindeki kütle aktarımının homojen olarak yapılması, CO_2 kullanımının kontrollü yapılabilmesi, çözünmüş O_2 mikartının artışına bağlı olarak ortaya çıkan zehirleyici etkinin engellenmesi, mikroalglerin çökelmesi, kümelenme sonucu ölü bölgelerin oluşması ve

dolayısıyla kültür ortamındaki alglerin bozulmasını engellemesi ve kültür ortamındaki aydınlık karanlık bölgelerin dengeli dağılımını yapılması açısından önemlidir (Guo, Yao ve Huang, 2015, s.191). Kapalı sistemlerde kullanılan diğer bir karıştırma yöntemi ise gaz enjeksiyonudur. Gaz enjeksiyonu mikroalg kültürü üzerinde daha az hidrodinamik stres oluşturmaktadır, iyi bir gaz transferi ve karıştırma verimi sağlamaktadır. Gaz enjeksiyonunda biyoreaktör içerisindeki biyokütle konsantrasyonunun artması durumunda uygun karıştırmanın sağlanması için karıştırma hızının arttırılması, mikroalgal hücrelere zarar verebilmektedir. Açık sistemlerde kullanılan mekanik karıştırma ile iyi bir karıştırma ve gaz transferi verimi elde edilebilmektedir ancak hidrodinamik stres oluşumu muhtemeldir. Stress oluşumu, yeterli sayıda bölme (perde) kullanıp, türbülansı kontrol ederek önlenebilir (Kumar vd., 2010, s.376). Uygun karıştırma sisteminin seçilmesi durumunda, biyokütle üretimi %75'e kadar artırılabilmektedir (Rashid vd., 2014, s.767). Komolafe ve arkadaşları, mikroalg kültivasyonu için kullandığı biyoreaktörlerde, besin maddelerinin homojen dağılımı için karıştırma sistemi olarak hava pompası kullanmıştır (Komolafe vd., 2014, s.298) . De Bhowmick ve arkadaşları, mikroalgal kültürü 0,3 m/s'lik sabit hızda mekanik çark karıştırıcı ile sürekli olarak karıştırmıştır (De Bhowmick vd., 2014, s.202). Ugwu ve arkadaşları karıştırıcıların boru biçimli reaktörlere yerleştirilmesinin, ışık kullanımını arttırmakta başarılı olduğu ve reaktörün boru çapının arttırılmasıyla ölçeklendirildiği zaman biyokütle verimlerinin arttığı gösterilmiştir (Ugwu vd., 2005, s.3406). Gao ve arkadaşları, karıştırma hızları ve gaz akış oranlarının biyokütle verimliliğine etkisinin zamanla ilişkisini irdeleyen bir deney yapmışlardır. Biyokütlelerin büyüme durumunun karıştırıcının hızına, gaz akış oranına ve gaz birleşimine göre değiştiği tespit edilmiştir. Homojen karışım seviyesine erişim süresinin 10-30 saniye arasında olduğu durumlar için, karıştırma hızının ve gaz akış oranının artması karışma zamanını ters yönde etkilemiştir. Şekil 2.13(a) ve (b)'de gaz birleşiminde CO_2 yoğunluğunun etkisine bakılmıştır. CO_2 yoğunluğunun %6'dan yüksek oduğu koşulda, biyokütlenin büyüme oranı değişmemiştir. Şekil 2.13(c) ve (d)'de karıştırma hızının, sabit gaz akış oranı (0,05 vvm) ve CO_2 birleşimi (%10 CO_2) koşullarında biyokütle büyüme oranına olan etkisi incelenmiştir. Karıştırma hızının artması, kütle aktarımında artışa neden olmuştur. Deneyde denenen tüm karıştırma hızlarının CO_2 tedariği veya kütle aktarımını olumsuz etkilemediği görülmüştür. Şekil 2.13(e) ve (f)'de 400 rpm sabit karıştırma hızı ve %10 CO_2 şartlarında besin-gaz

birleşiminde , gazın akış oranının biyokütle büyümesindeki etkilerine bakılmıştır. Gaz akış oranı 0,05 vvm'den 0,2 vvm'ye yükseltildiğinde, biyokütle büyümesi artmıştır. Gaz akış oranının bahsedilen değerlerden daha fazla arttırıldığı durumlarda, biyokütle verimliliğinde değişiklik gözlenmemiştir. Çalışma sonucunda karışım hızının biyokütle verimliliğinde direkt etkileyici olmadığı değerlendirilen tüm parametrelerle birlikte etkileyici olduğu tespit edilmiştir. (Gao vd.,2015, s.289).



Şekil 2. 13 Karıştırma Hızı, Gaz Birleşimleri ve Gaz Akış Oranlarının Biyokütle Büyümesine Etkisi (Gao vd., 2015, s.289)

2.3.3 Sıcaklık

Sıcaklık, mikroalg büyümesini etkileyen en önemli faktörlerdendir (Raeesossadati, Ahmadzadeh, McHenry ve Moheimani, 2014, s.81). Fotobiyoreaktör içindeki mikroalg

kültürü büyüme hızı, sıcaklığa bağlı olarak değişir. Genellikle, yüksek sıcaklıklar mikroalgal büyümeyi artırırken, düşük sıcaklıklar azaltmakta ya da engellemektedir (Alabi vd., 2009, s.46), (Kumar vd., 2010, s.373), (Munoz ve Guieysse, 2006, s.2809). Optimum sıcaklık koşullarında mikroalgler yüksek aktivitasyon gösterirler (Zeng, Danquah, Chen ve Lu, 2011, s.3256). Optimum sıcaklık değerleri mikroalg türüne göre değişiklik göstermekle birlikte bir çok değişkenden de etkilenmektedir (Kumar vd., 2010, s.373). Sıcakklıktaki günlük değişimler alglerin üretkenliğini olumsuz yönde etkiler (Lavens ve Sorgeloos, 1996, s.14). Mikroalgler, 5-35°C gibi geniş sıcaklık aralıklarında büyüyebilmektedirler (Rashid vd., 2014, s.766), (Lavens ve Sorgeloos, 1996, s.14). Çoğu mikroalgin büyümesi için en uygun sıcaklıklar 20-30°C arasındadır (Chisti, 2007, s.297), (Wang, Li, Wu ve Lan, 2008, s.709), (Lavens ve Sorgeloos, 1996, s.14) ve 5°C nin altındaki ve 35°C'nin üzerindeki sürekli sıcaklıklar büyümeyi durdurur (Lavens ve Sorgeloos, 1996, s.14). Bazı mikroalg türleri, 15 ila 45 °C arasındaki geniş bir sıcaklık aralığında büyüme gösterebilirler (Masojídek ve Torzillo, 2014, s.2227). Mikroalg hücrelerinin yağ üretimi, besin kullanımı, karbon dengesi ve dolayısı ile büyüme hızı sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Aşırı sıcaklık veya düşük sıcaklık mikroalglerin karbon ve azot kullanımını azaltabilmektedir (Subhash vd., 2014, s.789). Alabi ve arkadaşları hava sıcaklıklarına uzun tepki süresinin, optimum yosun büyümesi için negatif bir boyut olduğunu ve günün en iyi kültür sıcaklığına ulaşacağının yalnızca bir kısmı olduğunu düşünüyor. Alabi ve arkadaşları tarafından belirtilen bir diğer sorun, alg kültürlerinin sıcaklığının optimum seviyelerin altında olduğu sabahları ışık yoğunluğunun çok hızlı artmasıdır. Her iki koşulun da optimum olması senkronize değildir ve alg büyümesinin genel verimliliğini etkiler. Dış mekanlarda alg yetiştiriciliğindeki zorlukların üstesinden gelmek için sıcaklık kontrolü ve güneş ışığı senkronize olmalıdır. Algler optimum seviyelerin altındaki sıcaklıklarda (donma koşullarında değil) hayatta kalacaktır, ancak bu seviyenin üzerinde kalan sıcaklıklar algleri öldürür (Alabi vd., 2009 s.36), (Lavens ve Sorgeloos, 1996, s.14). Soğutma veya gölgeleme teknikleri bu büyüklükteki sıcaklıkları engellemek için sıklıkla kullanılır. Ek olarak, gece boyunca solunum nedeniyle oluşan biyokütle kaybını azaltmak için düşük bir sıcaklık görünür (Chisti, 2007, s.300). Geceleri yüksek bir sıcaklık biyokütle kaybının arttığını göstermiştir. Amaç, sabahları optimum güneş ışığı ve sıcaklık seviyelerine ulaşmak ve gün batımından sonra sıcaklıkları hızla düşürmektir.

Bahsedilen sıcaklık değerleri alglerin hızla büyüdüğü ve biyokütlesini koruduğu optimum durumdur. CO_2 ve ışık nüfuzu sınırlayıcı faktörler olduğunda sıcaklığın etkisi önemsizdir (Lavens ve Sorgeloos, 1996, s.14). Her ne kadar yosun çeşitli sıcaklıklarda yetişebilse de, optimum büyüme her suşa özgü dar bir aralık ile sınırlıdır. Literatürde mikroalg kültürlerinin büyümesi üzerinde sıcaklığın etkisini araştırmıştır. Örneğin, Abu-Rezq ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmalarla, Nannochloropsis, Tetraselmis ve Isochrysis mikroalg türleri için optimum sıcaklık aralığının sırasıyla 19-21, 19-21 ve 24-26 °C olduğunu tespit etmiştir (Abu-Rezq vd., 1999, s.106). Sakamoto ve Bryant, Synechococcus sp. PCC 7002 türü ile yaptığı çalışmada, en kısada iki kat kütle artırımı hesabını 38°C kültivasyon sıcaklığında bulmuştur (Sakamoto ve Bryant, 1997, s.10). Converti ve arkadaşları, N. Oculata mikroalg türü ile yaptıkları çalışmada, 25°C sıcaklıkta, yağ üretiminin iki katına çıktığını belirlemiştir , (Converti, Casazza, Ortiz, Perego ve Del Borghi, 2009, s.1146). Chokshi ve arkadaşları, Acutodesmus dimorphus ile yaptıkları çalışmada mikroalg kütürü bünyesinde %22,7 yağ, %33,7 karbonhidrat ve %38 protein biriktirdiğini ve en iyi büyümenin 35°C'de gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. (Chokshi vd., 2015, s.36).

2.3.4 CO_2 Kullanımı

Alglerin karakteristik özelliği, fotosentez yoluyla diğer bitkilerle aynı şekilde güneş ışığını, CO_2 ve suyu besinlerle birlikte biyokütleye dönüştürebilmeleridir. CO_2 atmosferden yakalayan algler yüksek fotosentetik verimleriyle 1.8 ton CO_2 'nin 1 ton alg biyokütlesine dönüşmesi ile büyük oranda CO_2 azaltıcı özelliktedirler (Wijffels ve Barbosa, 2010, s.798), (Milano vd., 2016, s. 194). Mikroalgler önemli karbon kaynaklarıdır. Mikroalg biyokütlesinin kuru ağırlığının yarısı karbon içermektedir (Alabi vd., 2009, s.50), (Converti vd., 2009, s.1146). Fotobiyoreaktör sistemlerindeki mikroalg kültürlerinin kullandığı CO_2 atmosferden temin edilmektedir. Havadaki CO_2 konsantrasyonu (%0.033-0.035), mikroalgleri beslemek için ek CO_2 tedarik edilmediğinde hızlı bir mikroalg gelişimi için bir sınırlama oluşturur. Maksimum büyüme hızı için konsantre CO_2 gereklidir. Konsantre CO_2 egzoz gazlarından, baca gazlarından veya çözünür karbonatlardan ($NaHC0_3$ ve Na_2CO_3) yakalanabilir (Chinnasamy vd., 2012, s.227), (Kumar vd., 2010, s.373). CO_2'nin sudaki çözünürlüğü çok düşüktür. CO_2 konsantrasyonunu sağlamak için fotobiyoreaktör sistemleri sürekli hava pompası yardımı ile beslenmelidirler. Sisteme verilen CO_2' nin su ile reaksiyona

girip pH'ı düşürmemesi için, yüksek yoğunlukta aşılama ile CO_2'nin tamamının mikroalg kültürü tarafından kullanılması sağlanmalıdır (Hemming vd., 2012, s.160). Rashid ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarda %1-15 CO_2 miktarlarında mikroalglerin büyüme hızının arttığını ve dolayısıyla biyokütle üretiminin de fazlalaştığını tespit etmişlerdir (Rashid vd., 2014, s.764). Yetiştirme ortamındaki CO_2 miktarı önemli bir sınırlayıcı faktördür. Widjaja, CO_2'nin büyüme üzerindeki etkisini incelemiştir ve CO_2 miktarının doğrudan lipit verimliliğiyle ilişkili olduğunu bildirmiştir, çünkü büyümenin, CO_2 konsantrasyonunun arttırılmasıyla büyük ölçüde arttığını gözlemlemiştir (Widjaja vd., 2009, s.13). Mikroalg hücreleri, CO_2 fazlalığını belirli bir seviyeye kadar tolere edebilir, daha sonra yüksek CO_2 konsantrasyonu ile indüklenen çevresel stres, CO_2 sekestrasyonu olarak mikroalg hücreleri için zararlı hale gelerek biyolojik azalmaya neden olur (Kumar vd., 2011, s.4948).

2.3.5 O_2 Giderimi

Fotosentezde CO_2, organik makromoleküller ve O_2'ye dönüştürülür. Fotosentezdeki son elektron alıcısı olarak, kültür içinde hücre dış yüzeyinden oksijen salınır ve çözünmüş form olarak kültür sıvısında birikmeye başlar (Burlew, 1953, s.4), (Vonshak, Torzillo, Accolla ve Tomaselli, 1996), (Pulz, 2001, s.290), (Oncel vd., 2015, s.136). Fotosentez için bir itici gaz olarak karbondioksitin oksijene göre oranı azalmaya başladığında, hücresel sistem PBR içindeki oksijenin toksik etkileriyle karşı karşıya kalacaktır. O_2 birikimi, O_2'nin metabolik inhibitör olarak görev yapan ve DNA düzeyinde hücre hasarı ile sonuçlanan reaktif oksijen türlerine dönüşümünü tetikler. Hücre sağkalımı, belirtilen enzimlerin ve pigmentlerin sentezi yoluyla sağlanabilir; ancak, yüksek O_2 hücreleri altında 24 saatten daha fazla yaşayamaz (Pulz, 2001). Biyoreaktör içerisinde gelişen mikroalglerin yarattığı O_2 konsantrasyonu, mikroalg kültürlerinde doyma noktasını geçmemelidir. Doyma noktasını aşmanın etkisi mikroalg kültürüne fotooksidasyon hasarı verir ve bu durum da alglerin üretkenliğini azaltır (Alabi vd., 2009, s.51). Açık sistemlerde bu bir sorun değildir, ancak kapalı PBR'lerde, aşırı O_2 birikimi mikroalg kültürünün büyümesine engelleyici bir sorun olarak ortaya çıkacaktır. Oluşabilecek sorun fotobiyoreaktör sistemine O_2 gaz değişim odaları eklenerek uzaklaştırılabilir (Wolkers vd., 2011, s.15), (Alabi vd., 2009, s.51), (Kumar vd., 2010, s.374). Fotobiyoreaktör sisteminde O_2'nin birikmesi, yatay boru şeklindeki reaktörler gibi zayıf gaz değişimli reaktörlerde ciddi bir problemdir. Karıştırılmış tankta ve dikey

reaktörlerde olduğu gibi açık gaz transfer alanına sahip reaktörlerde büyük bir endişe değildir (Kumar vd., 2010, s.376). Fotobiyoreaktör sistemi içerisinde mikroalg hücrelerinin etrafında yüksek miktarda oksijen bulunması istenmeyen bir durumdur. Yoğun güneş ışığı ve yüksek oksijen konsantrasyonu kombinasyonu, alg hücrelerinde fotooksidasyon hasarı ile sonuçlanır. Genel olarak, oksijen konsantrasyonları hava doyma değerinin % 400'ünün altında tutulmalıdır (Chisti, 2007, s.299).Oksijen büyük ölçüde açık havuzlarda birikmediğinden, bu açık havuzların kapalı reaktörlerden daha iyi performans gösterdiği bir özelliktir. Çözünmüş oksijenin konsantrasyonundaki kısıtlama nedeniyle, tüp uzunluğu yatay tüp reaktörlerde sınırlıdır. Sınırlılık, boru şeklindeki reaktörlerin ölçeklendirilmesini çok zorlaştırır. Molina ve arkadaşları tarafından tasarlanan boru şeklindeki bir reaktörde, mikroalg kültürü düzenli olarak fotosentezden biriken oksijenin hava ile sıyrıldığı bir hava asansör bölgesine aktarır. Hava asansörü kolonunun üst kısmındaki bir gaz-sıvı ayırıcısı, gaz kabarcıklarının hava asansörü reaktörünün yatay döngüsüne geri dönmesini önler. Şekil 2.6, Molina ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan fotobiyoreaktör konfigürasyonunun bir gösterimidir. Çalışma sonucunda, sıvının gaz gidericinin uzunluğunu dolaşması için geçen zaman, oksijen baloncuklarının yükselmesi için gereken zamana eşit olması gerektiği tespit edilmiştir (Molina vd., 2001, s.118). Kunjapur ve arkadaşlarına göre reaktörlerden sıyrılan bu oksijenin yakalanması ve satışı, biyoyakıt üretiminin maliyetini düşürmek için bir fırsat olabilecektir (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3520). Hücreden salınan aşırı O_2, sıvıya yayılır ve gaz kabarcıklarına taşınır. Kabarcıkların dikey hareketi ile fazla O_2 dış atmosfere taşınır. Boru sistemlerinde aşırı O_2, artan yoğunluğa sahip ayrı ayrı borular ile birlikte dolaşır. Reaktör içindeki türbülanstaki artış, aşırı O_2'yi hızla gidermek için etkili bir yöntem olabilir. Bununla birlikte, daha sürdürülebilir olan yol, gaz gidericiler adlı özel O_2 temizleme üniteleri tasarlamaktır. Tüplerde hızlı O_2 birikmesi, hücreler için oldukça toksiktir, bu nedenle etkili gaz alma sağlanmadığı sürece, toksitlenmeye bağlı hücre kaybı, tübüler PBR'lerde ana problemdir (Wongluang, Chisti ve Srinophakun, 2013, s.56). Düz panel PBR'lerde havalandırma ile eş zamanlı olarak gaz giderme işlemi yapılabilir; ayrıca mekanik çarklar, fazla gazın hızlı bir şekilde çıkarılması için faydalı olabilir. Kısa tüp uzunluklarında kültürün ana tanka sürekli beslenmesi hızlı gaz tahliyesi için etkili olabilir. Daha uzun tüplerde, reaktörün üstündeki gaz sıvı ayırıcısı, yatay tüplerin içindeki gaz kabarcıklarının dolaşımını önler. Sıvının dolaşım süresi, O_2 ile zengin gaz

kabarcıklarının kalış süresini belirlediğinden pompalama kapasitesi, sıvı hızı ve gaz gidericinin uzunluğu, boru şekilli PBR'lerde ana tasarım parametreleridir (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3516).

2.3.6 Su ve Tuzluluk

Fotosentez için, konsantre mikroyosun biyokütlesinin kg'ı başına yaklaşık 0,75 litre su gerekir. Mikroalg lipid içeriği %50 ise, 1 litre biyoyakıt için 1,5 litre su gerekir. Diğer biyokütle bitkileriyle karşılaştırırsak, 1 litre biyoyakıt için yaklaşık 10000 litre su gerekir (Wijffels ve Barbosa, 2010, s.798). Geleneksel biyokütle mahsullerin aksine, birçok mikroalg türünden yakıt üretmenin dikkate değer bir faydası, biyokütle ekimi ve gelişimi için tatlı su gerektirmediğidir. Su kaynakları, özellikle tatlı su kaynakları, dünyanın birçok yerinde sınırlı miktardadır ve daha fazla biyoyakıt üretim talebi bu kaynakların değerlendirilmesinde ekstra zahmet getirmektedir (Berndes, 2002). Su tüketimi fotobiyoreaktör tasarımları konusunda önemli bir parametredir (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3519). Araştırmalar mikroalglerin taze içme suyu, tuzlu veya acı su ve hatta atık su atıklarında yetişebildiğini göstermiştir (Yun, Lee, Park, Lee ve Yang, 1997). Wogan ve arkadaşları (Wogan, Da Silva, Webber ve Stautberg, 2008, s.5), mikroyosunların diğer karasal biyokütle mahsullerine göre çok daha geniş bir su kaynağı aralığında yetişebileceğine değinmişlerdir. Mikroalg türleri, genellikle tatlı suda veya tuzlu suda en iyi şekilde yetişip büyümelerine bağlı olarak iki kategoriye ayrılır. Tuzluluk seviyesi, her bir suştaki lipid ve karbonhidratların bireysel üretim hızlarının yanı sıra genel verimi de etkiler (Rao, Dayananda, Sarada, Shamala ve Ravishankar, 2007, s.562), (Oncel, 2013, s.244), (Ruangsomboon, 2012, s.261). Tuzluluk, mikroalglerden elde edilen biyokütle üretimini etkileyen önemli bir paramatredir (Schenk vd., 2008, s.28), (Rashid vd., 2014, s.766). Tercih edilen mikroalg türünün yetiştirilmesi için gereken optimum tuzluluk miktarı farklıdır (Mata vd., 2010, s.223). Büyüme ortamının ne kadar tuzlu olabileceğinin anlaşılması için birkaç örnek ve bunların optimum tuzluluk değerleri verilmiştir. Bazı deniz mikroalglerinin büyümesi için yüksek tuzluortam gereklidir. Örneğin Chlorococcum littorale, Nannochloropsis salina, Botryococcus braunii ve Synechococcus sp. (Rashid vd., 2014, s.767). Tatlı su mikroalgleri ise daha az tuzlu besin ortamında büyüyebilmekteditler. Örneğin Microcystisa eruginosa ve Chlorella vulgaris (Rashid vd., 2014, s.767). Nannochloropsis salina bir deniz mikroalgidir ve genellikle 34 psu tuzlulukta

yetişmektedir. 68 psu'nun üzerinde ve 8 psu'nun altında yetişmemektedir (Bartley, Boeing, Corcoran, Holguin ve Schaub, 2013, s.84). Fathi ve Asem (2013, s.244), Chlorella sp. türünün, Shaleh (Shaeh, 2004, s.5), Chlorella vulgaris türünün, gelişmesi için optimum tuzluluk değeri 30 psu olarak tespit etmişlerdir. Bartley ve ark.ları (Bartley vd., 2013, s.83), Nannochloropsis salina ile yaptıkları çalışmada optimum yağ üretimini (%36 biyokütle eş değeri) 34 psu olarak hesaplamışlardır. Abu-Rezq ve arkadaşları (Abu-Rezq vd., 1999, s.101) büyüme ortamının ne kadar tuzlu olabileceğinin anlaşılabilmesi için ve bunların optimum tuzluluk değerlerinin ne olduğunun ifadesi için Nannochloropsis, Tetraselmis ve Isochrysis mikroalg türleri için optimum üretim koşullarını bulmuşlardır. Optimum tuzluluk aralığı Nannochloropsis için 20-40 psu, Tetraselmis için 20-35 psu ve Isochrysis için 25-35 psu olarak saptanmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi, atık su mikroalgleri yetiştirmek için kullanılabilir. Çalışma için atık su kullanılması, iki önemli fayda sağlar: mikroalgler, gerekli besinler açısından zengin, pahalı olmayan girdileri kullanır ve fotobiyoraktör sisteminin mekanik işleyişiyle atık su arıtılmış olur (Wogan vd., 2008). Atık su atıkları genellikle yüksek konsantrasyonlarda azot ve fosfor içerir ve diğer su kütleleri atık su aldığında istenmeyen yosun büyümesi ve ötrofikasyon meydana gelir. Azot ve fosfor konsantrasyonları bunun yerine atık suyun bir alg reaktörü içinden geçirilmesiyle en aza indirilebilir (Aslan ve Kapdan, 2006, s.64). Açık havuz sistemlerinde, suyun buharlaşmasından dolayı daha fazla suya ihtiyaç vardır. Ancak kapalı fotobiyoreaktörlerde bu bir sorun değildir. Kapalı fotobiyoreaktörlerde soğutma için su kullanılabilir, ancak bir ısı değişim sistemi ile de soğutma sağlanabilir (Wijffels ve Barbosa, 2010, s.798), (Schenk vd., 2008). Su reaktörden buharlaştığında mevcut tüm türlerin konsantrasyonları artar ve tuzluluk tolere edilebilir değerlerin üzerine çıkabileceği için bu tuzlu su havuzları için mühim bir sorun olabilir (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3519).

2.3.7 Besin

Mikroalgler doğal ve yapay besin ortamlarında yetiştirilebilirler. Doğal besin ortamları mikroalglerin büyümesi için gereken besin maddelerini yeterli oranlarda içermemeleri sebebiyle daha ucuz olsalar da yapay besin ortamlarına oranla daha az tercih edilmektedirler. Çünkü yapay besin ortamlarındaki hücresel konsantrasyonlar mikroalg türüne göre ihtiyaç oranında ayarlanabilmekte ve kontrol edilebilmektedir (Rashid vd.,

2014, s.774). Azot ve fofsor mikroalglerin büyüyebilmesi için gerekli iki ana besin kaynaklarıdır. Her ikisi de büyüme oranlarını ve lipit üretimini kontrol etmede önemli bir rol oynamaktadır. Karbon, oksijen, hidrojen, potasyum, kükürt, kalsiyum, sodyum, magnezyum ve klorin gibi besinler ise büyümeyi etkileyen diğer önemli bileşenlerdir (Bahadur, Zubair ve Khan, 2013, s.12). Azot, mikroalglerin fizyolojik aktiviteleri dolayısıyla büyüme ve gelişmeleri için gereklidir (Junying vd., 2013, s.83), (Bahadur vd., 2013, s.12). Azot mikroalgler tarafından türlerine göre değişse de genel olarak kullanım önceliğine göre sırasıyla amonyum (NH_4^+), üre (CH_4N_2O), nitrat(NO_3^-) ve nitrit (NO_2^-) olarak kullanılır (Junying vd., 2013, s.83 ve s.84), (Rashid vd., 2014, s.766). Mikroalglerin azot kaynağı olarak amonyumu kullanması H+ iyonu açığa çıkarak kültür ortamının pH değerini azalmaktadır. Azot kaynağı olarak amonyum miktarı fazla olursa pH 6'nın altına düşerek mikroalg kültürünün gelişimi engelleyebilir.

Azot kaynağı olarak nitratın kullanılması durumda ise pH arttırılabilir. 1 mol nitrat kullanıldığında, 1 mol OH- açığa çıkmaktadır (Rashid vd., 2014, s.766), Azot kaynağı olarak nitrat miktarı fazla olursa pH 10'un üzerine çıkarak mikroalg kültürünün gelişimini engelleyebilir. Azot kaynağı olarak amonyum ve ya nitrat tercih edildiğinde pH dengesi önemli bir mesele arz etmektedir. Çünkü azot besininin eksikliği veya fazlalığı mikroalg kültürü için stres koşularını oluşturabilmektedir (Panvha vd., 2014).

Schenk ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmalarda mikroalg türlerinin azot sınırlayıcı şartlarda, normalde içerdikleri lipit miktarından 2-3 kat daha fazla lipit üretimi yaptıklarını kanıtlamışlardır (Schenk vd., 2008, s.26). Guo ve arkadaşlarının (Guo vd., 2014, s.19) azot eksikliğin mikroalgler üzerinde etkili olduğu mikroalglerin türüne göre lipit üretim miktarının değişkenlik gösterdiğini, Breuer ve arkadaşlarının (Breuer, Lamers, Martens, Draaisma ve Wijffels, 2012, s.218), Scenedesmus obliquus, Chlorella vulgaris, Chlorella zofingiensis Neochloris oleoabundans, Chlorella zofingiensis mikroalg türlerinin azot eksikliğinde normalde kuru ağırlık olarak %35 olan lipit miktarından daha fazla yağ üretimi yapıldığını kanıtlamışlardır. Yine başka bir çalışmada, Zhila ve arkadaşlarının (Zhila, Kalacheva ve Volova, 200, s.3095) azot sınırlayıcı şartlarda mikroalglerin yapısındaki yağ üretim miktarının farklılık gösterdiğini, Radakovits ve arkadaşlarının (Radakovits, Jinkerson, Darzins ce Posewitz, 2010, s.486) mikroalglerin azot eksikliğinde çoğalmayı yavaşlatarak yapılarında yağ birikimi yaptıklarını tespit etmeleri ve Widjaja ve arkadaşlarının (Widjaja vd., 2009,

s.13) azot miktarındaki azlığının lipid birikimi üzerindeki incelemeleri sonucunda uzun bir süre azot konsatrasyonunun düşük olduğu ortamlarda mikroalg hücrelerinde daha fazla yağ birikimi olduğunu iifade ettiği çalışmalarla azot miktarının mikroalg büyümesi üzerine etkisi kanıtlamışlardır.

Fosfor, fosfolipit, nükleik asit veya nükleotit gibi temel hücre bileşenleri içerisinde bulunduran ve mikroalgal hücre büyümesi için önemli bir besindir (Razzak vd., 2013, s.632), (Junying vd., 2013, s.84), (Ruiz-Martinez, Serralta, Pachés, Seco ve Ferrer 2014, s.2249). Fosfor, mikroalglerin lipit üretimini de etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda, fosfor sınırlayıcı şartlarda mikroalglerin lipit üretimlerinin arttığı görülmüştür (Singh, Guldhe, Kumari, Rawat ve Bux, 2015, s.3 ve s.4), (Courchesne, Parisien, Wang ve Lan, 2009, s.39). Liang ve arkadaşları (Liang, Zhang, Gu ve Cong, 2013, s.311) yapmış oldukları çalışmalarında Chlorella sp. mikroalg türünü kullanmışlardır ve düşük fosfor ortamında mikroalglerin yağ içeriklerinin ve yağ üretimlerinin yükseldiğini belirtmişlerdir. Magnezyum, kalsiyum, çinko, silika, potasyum, bakır, demir gibi mikro besin kaynaklarına mikroalg yetiştiriciliği için az miktarda da ihtiyaç duyulabilmektedir. Fakat besin kaynakları, yüksek değerlere ulaştıklarında çökelti oluşturarak mikroalgler için gelişimi durdurucu etkiye sebebiyet verebilmektedirler (Cai, Park ve Li, 2013, s.363). Ruangsomboon, yapmış olduğu çalışmalarda en yüksek fosfor konsantrasyonunda optimum biyokütle oranı elde etmiştir. (Ruangsomboon, 2012, s.263),

2.3.8 pH

Bir mikroalg kültür ortamındaki pH seviyesi besin alımı parametresi ile direkt bağlantılıdır (Rashid vd., 2014, s.766). Mikroalglerin büyümesi için en uygun pH seviyeleri mikroalg çeşidine göre değişkenlik gösterir. Ancak çoğu mikroalg türü için en uygun pH seviyeleri 7 ile 9 arasında değişmektedir (Kumar vd., 2010, s.373), (Lavens ve Sorgeloos, 1996, s.13). İstisnai olarak bazı mikroalg çeşitlerinin en iyi gelişim gösterme durumları daha asidik ya da bazik ortamlar olabilir. Örneğin, Spirulina platensis mikroalg türü için en uygun pH değeri 9 (bazik) iken C. Littorale mikroalg türü için optimum pH değeri 4 (asidik) olarak ölçülmüştür (Zeng vd., 2011, s.3256). Mikroalgler fotosentez yaparak CO_2'yi kullanmaları sonucunda hücrelerdeki pH artar. pH'ın yükselmesi kontrol edilmesi gereken bir durumdur. Hidroklorik asit veya asetik asit (karbon kaynağı olarak mikroalgler için önemli olduğu için daha yararlı)

kullanılarak pH dengelenebilmektedir (Junying vd., 2013, s.84).,Mikroalg kültür ortamındaki pH değerleri kültürde yetişen mikroalg için uygun olmadığında mikrolg kültürü çökelti oluşturabilir. Örneğin pH değerinin 10'un üzerine çıkması durumunda mikroalg gelişimi durabilmektedir (Lavens ve Sorgeloos, 1996, s.13). Bu durum diğer besin kaynakları kulanılarak dengelenebilmektedir. CO_2 ve nitrat(NO_3^-) alımı pH değerini yükselirken, amonyum (NH_4^+), alımı kültür ortamındaki pH değerini düşürmektedir (Rashid vd., 2014, s.766).

2.3.9 Reaktör Geometrisi – Ölçeklendirme ve Malzeme seçimi

Fotobiyoreaktör tasarımları ilk olarak laboratuvar ortamlarında mikro ölçekte değerlendirilir daha sonrasında verimlilik ve elde edilen başarı oranına göre daha mikro ölçeklerde değerlendirilmek üzere büyütülmesi işlemine dayanan prensibe ölçeklendirme denir (Quinn, Turner ve Bradley, 2012, s.363).

Fotobiyoreaktör tasarımlarında önemi olan bir başka mesele de malzeme seçimidir. Açık fotoreaktörlerin aksine, kapalı fotobiyoreaktör sistemlerinde üretim malzemeleri tasarıma dayanmaktadır. Güneş kollektörü olmayan, güneş ışığını kullanan kapalı bir fotoreaktör, ışığın geçmesine izin vermek için şeffaf duvarlara ihtiyaç duyacaktır; iç ışığı olan (yapay ışık) bir fotobiyoreaktör iç duvarların yansıtıcı malzeme ile kaplanmasını isteyebilir ve malzeme için en yüksek optik saydamlığa sahip plastikler (özellikle kırmızı dalga boyu aralığında (590-670 nm)) kullanılır. Kapalı fotobiyoreaktörlerde, biyo-kirlenmeyi önleyen ve algal biyofilm oluşumunu önleyen maddeler tercih edilmektedir. Çünkü aksi taktirde sistemlerdeki biyofilm oluşumu ışık iletimini azaltır, besin maddeleri için rekabet eder ve temizlenmesi zordur. Yüzey enerjisi ve pürüzlülük gibi malzeme özelliklerinin algal biyofilm ekisini etkilediği bilinmektedir (Finlay, Callow, Ista, Lopez ve Callow, 2002, s.1116 ve s.1118), (Sekar, Venugopalan, Satpathy, Nair ve Rao, 2004, s.114), (Palmer vd., 2007, s.585), (Genin vd., 2014, s.141). Nano ve mikro malzemeler, bu durumu azaltmak için tasarımda kullanılabilirler (Schumacher, 2007). CO_2'nin verimli şekilde eklenmesi ve O_2'nin uzaklaştırılması, fotobiyoreaktörün hidrodinamik ve kütle taşıma özelliklerine bağlıdır. Fotoreaktörlerde önemli hidrodinamik ve kütle taşınım özellikleri, toplam kütle taşınım katsayısı (kLa), karışım, sıvı hızı ve gaz kabarcığı hızı ve bekletmedir. Biyoreaktörlerde, bir gazın sıvı faza toplam hacimsel kütle taşınması, toplam kütle nakil katsayısına (kLa) bağlıdır. Ölçeklendirme parametresi genellikle biyoreaktörlerin

performansını değerlendirmek ve bunları tasarlamak için kullanılır. Çalkalama hızına, yüzey aktif cisimleri, sıcaklık gibi kimyasal katkı maddelerine ve biyoreaktörün tasarımına bağlıdır (Barbosa, 2003, s.38). Bir fotobiyoreaktör içindeki kültürü karıştırmak havalandırma yoluyla veya mekanik olarak bir pervane kullanımıyla sağlanabilir. İyi karışım, alglerin hücre konsantrasyonunu yüksek tutmaya yardımcı olur, hücreleri süspansiyon halinde tutar, besin dağılımını artırır, gaz değişimini arttırır, gölgelemeyi azaltır ve hepsi de fotobiyoreaktörün verimliliğini artırabilen termal tabakalaşmayı ortadan kaldırır (Chen, 2011, s.75).

Bir PBR'nin yapı malzemeleri toksik olmamalı ve mikroalgal metabolizmasına etkisiz olmalıdır. PBR'lerde anahtar tasarım parametresi mikroalglerin aydınlatma ve ışık kullanımıdır. Heterotrofik ekim tercih edilmediği sürece, PBR mikroalg kültürüne hafif nüfuz etmeyi sağlayan saydam bir malzeme ile yapılmalıdır. Malzemenin soğurma katsayısı, ışığın soğurulması ve ışığın yansıması için çok önemlidir. Çünkü bu parametre doğrudan fotosentetik verimliliği ve fotosentetik aktif radyasyonu etkilemektedir (Pulz, 2001, s.290), (Masojidek vd., 2013). Mikroalg ekimini erken aşamalarında seyreltik olan mikroalg kültür ortamlarında gölgeleme etkisi görülmez. Fakat mikroalg kültürünün büyüyerek yoğunluğunun artması sonucunda ışık kullanımını engelleyen birbiri üzerindeki gölgeleme durumu ortaya çıkacaktır. Yoğunluğun artmasıyla birlikte, biyofilm kalınlığında ve yoğunluğunda bir artış hücresel gelişimi ve dolayısıyla verimliliği olumsuz yönde etkileyecektir. Diğer yandan, malzemenin yüzey pürüzlülüğü de reaktörün iç yüzeyinde mikroalgal yapışma oluşumu üzerinde etkilidir. Etkili temizlik ve sterilizasyon yapılsa bile, PBR malzemesinin gözeneklerinde biriken hücreler kirlenme riski taşır (Barclay, Apt ve Dong, 2013, s.135). Yapı malzemesi ucuz, bulması kolay, kolayca değiştirilebilen ve daha büyük ölçeklerde uygun olmalıdır. PBR'ler genel olarak cam, PVC ve polietilen malzemelerden yapılırlar. Fotobiyoreaktör sistemleri ile ilgili diğer bir tasarım parametresi de üretim hedefine göre değişen reaktör geometrisidir. Çok temel reaktör geometrilerinin tübüler, düz paneller ve dikey kolonlar oldukları daha önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bununla birlikte, ışık kullanımı, havalandırma ve sıvı sirkülasyonu bakımından verimliliği değişen ve gelişen PBR tasarım reformu ile teknolojiye daha estetik tasarımlar da eklenmiştir (Trent, 212). Fotobiyoreaktör çeşitlerinin sahip oldukları geometrik formlara göre ölçeklendirilme işleminde dikkat

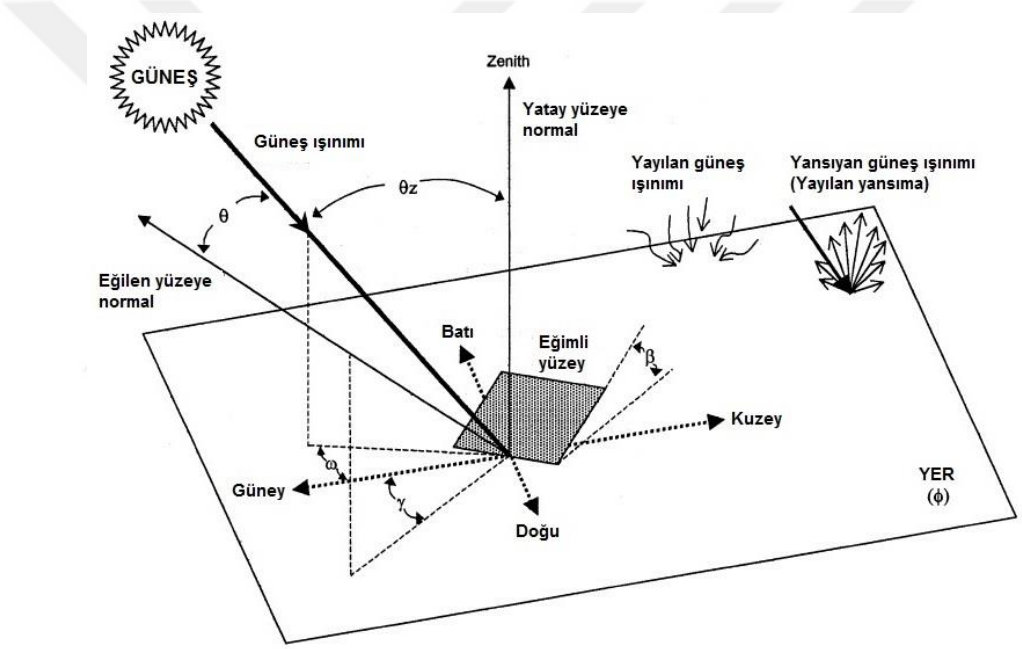
edilmesi gereken parametreler sistemlerin işleyişlerine göre değişmektedir. Düz panel fotobiyoreaktörlerde dikkat edilmesi gereken ölçeklendirme parametreleri genişlik ve yükseklik yani yüzey alanıdır. Dikey kolon fotobiyoreaktörlerde dikkat edilmesi gereken ölçeklendirme parametreleri ise kolon çapıdır. Çünkü kolon çapının değişmesi kütle aktarımını önemli ölçüde etkilemekte ve verimlilik üzerinde önemli değişiklikler getirmektedir (Vandu ve Krishna, 2004, s.575). Tübüler fotobiyoreaktörlerde dikkat edilmesi gereken en önemli ölçeklendirme parametresi tüp çapıdır. Çünkü geometrik formun büyümesi sonucu ışık kullanımı ve gölgeleme etkisi sonucunda mikroalg kültürlerinin bozunma riskinin kontrol altında tutulması gerekmektedir (Grima vd., 1999, s.231).

Sonuç olarak fotobiyoreaktör boyutları arttırıldıkça mikroalg yetiştirme koşulları ana başlığı altında alt başlıklarda değerlendirilen tüm parametrelerin kontrol altında tutulması zorluk oluşturmaktadır. Laboratuvar ortamındaki deneysel çalışmalardan makro ölçekte bir uygulamaya geçildiğinde ölçeklendirme sonucunda doğabilecek sorunlar mikroalg yetişmesini etkileyen tüm parametrelerle birlikte düşünülmelidir.

2.3.10 Yer Seçimi (Lokasyon) ve Yönlenme

Güneşin gün içerisindeki konumu döngüsel olarak değişmektedir. Dolayısıyla mevsimsel farklılıklar ve fotobiyoreaktörün mevcut yer aldığı lokasyon da güneş ışığından etkin yararlanmak açısından önem kazanmaktadır (Kunjapur ve Eldridge, 2010, s.3521). Sierra ve arkadaşları, bir fotobiyoreaktör sistemin verimliliğini belirleyen en önemli hususlardan birinin reaktörün yeri, kullanımı ve yönlendirilmesi olduğu sonucuna varılabileceğini söylemişlerdir. 37 derece Kuzey ve Güney enlemleri arasında bulunan bölgelerde fotobiyoreaktörlerin Kuzey – Güney yönünde, bu sınırların dışında kalan bölgelerde ise Doğu- Batı yönünde yerleştirilmeleri verimlilik açsından uygun bulunmuştur (Sierra vd., 2008, s.143). Şekil 2.14'te Grima vd., yapmış oldukları çalışmada; fotobiyoreaktör kurulumu için seçilen yerin, gün içerisinde güneş ışınımının optimum olduğu saat aralığı, güneş ışığını alma açısı, mevsimsel ve günlük maruz kaldığı gölgeleme, fotobiyoreaktörün yüzeyinin eğimi yani yer düzlemi ile arasında kalan açı gibi matematiksel hesapların güneş ışığından ve yansımadan doğan avantajların etkin kullanımının fotobiyoreaktör içerisindeki mikroalg kültürünün gelişimi üzerine etkili olduğunu belirtmişlerdir (Grima vd., 1999, s.235), Grima vd., güneşin konumunun değişmesiyle yerel ışınım bağlamında dikey ve yatay tübüler

fotobiyoreaktörleri karşılaştırmışlardır. Sabah saatlerinde dikey tübüler fotobiyoreaktörlerin güneşe maruz kalan kısımlarının diğer kısımlardan daha yüksek doğrusal yerel ışınım değerine sahip olduğu görülmüştür. Aynı durum yatay tübüler fotobiyoreaktörlerde de gözlenmiş fakat aradaki ışınım farklılığının dikey tübüler fotobiyoreaktörlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Öğlen saatlerinde ise dikey tübüler fotobiyoreaktörlerde ışınımın eşit dağıldığı, yatay tübüler fotobiyoreaktörlerin sahip olduğu ışınımın kendi içinde farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak yerel ışınım değerinin kutupsal koordinatlardaki açısal konuma bağlı olmadığı belirtilmiştir Fotobiyoreaktörlerde güneş ışığından faydalanma hususunda lokasyon ve yönlenmenin yanı sıra fotobiyoreaktörün geometrik formunun da belirleyici özellikte olduğu kabul edilmiştir (Grima vd., 1999, s.235).



Şekil 2. 14 Fotobiyoreaktörün Yüzeyinin EğIminin Fotobiyoreaktör İçerisindeki Mikroalg Kültürünün Gelişimi Üzerine Etkisi (Grima vd., 1999, s.235)

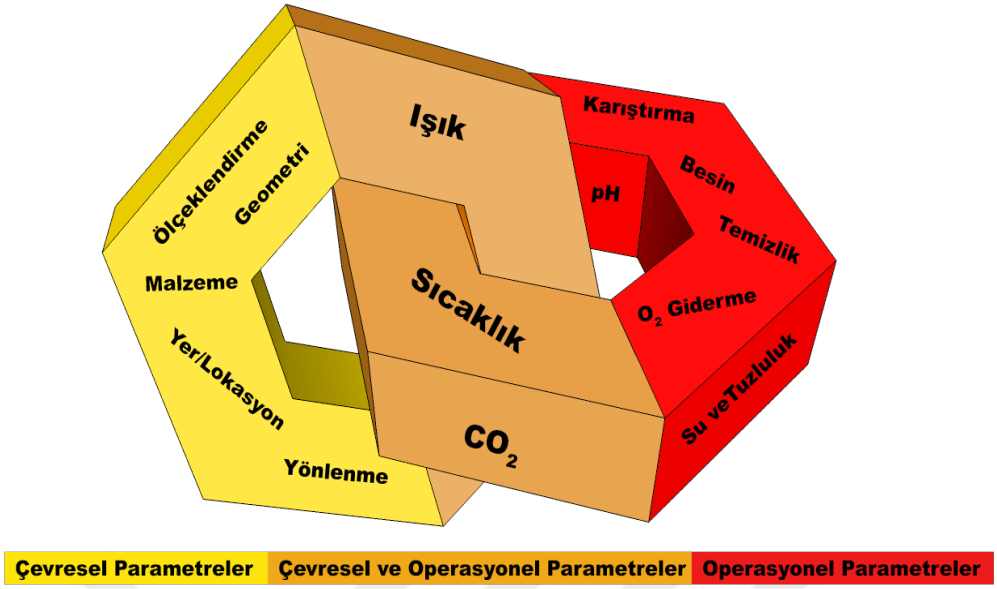
2.3.11 Temizlik

Fotobiyoreaktörler yüzey malzemesine (cam, akrilik, polietilen veya polivinil klorür gibi optik olarak berrak malzemeler), ölçeklerine (laboratuar ölçeği, pilot proje veya endüstriyel ölçek) ve büyüme ortamına göre (tatlı, tuzlu ve atık su) çeşitli şekillerde sterilizasyon yöntemleri ile temizlenebilmektedirler. Genel olarak kullanılan buhar sterilizasyonu ve otoklav gibi teknikler, kullanılan malzemelerin türüne veya boyutlarına bağlı olarak PBR'lerin çoğunun sterilizasyonu için uygun değildir (Behrens,

2005, s.197). Otoklav (yüksek sıcaklık ve basınçlı temizleyici), 10 L'ye kadar hacimli PBR'ler (Castellanos, 2013, s.43), ve 10 L ile 100 L arasındaki hacimler için kullanılır (Fonseca ve Teixeira 2007). Yaygın olarak kullanılan yöntemlerden farklı bir alternatif, ozonlama ile sterilizasyondur. Ancak bu sistemin maliyeti çok yüksektir (Quesnel, 1987). PBR'lerin sterilizasyon prosedürleriyle ilgili literatürdeki bilgiler oldukça azdır. Bazı durumlarda, hiçbir sterilizasyon işleminin kullanılmamaktadır (Reis vd., 1996, s.84). Çünkü kültür ortamınaki (yüksek tuzluluk oranı ve / veya yüksek pH) aseptik koşulların korunmasını sağlayabilmektedir (Borowitzka, 1991, s.251), (Post vd.,1983, s.96), (Vonshak,1990, s.711).

2.3.12 Bölüm Sonucu

Belirtilen on bir adet parametre mikroalglerin büyümesini ve enerji elde etmek için gerekli biyokütleyi üretkenliğini etkilemektedir. Kapalı fotobiyoreaktörlerde mikroalg yetiştiriciliğini etkileyen değişkenler incelendiğinde bazılarının çevresel düzeyde, bazılarının operasyonel düzeyde, bazılarının da hem çevresel hem de operasyonel düzeyde mikroalg gelişimini ve verimini etkilediği görülmüştür. Fotobiyoreaktörler kullanılarak mikroalg yetiştiriciliği için gerekli koşulları ifade eden parametreler alt başlıklar halinde yukarıda incelenmiş ve incelemeler sonucunda mikroalg yetiştiriciliği hususunda gerekli olan parametreler, çevresel ve operasyonel bağlamda değerlendirilerek Şekil 2.15'te grafik anlatımla ifade edilmiştir.



Şekil 2. 15 Mikroalg Yetiştirme Koşullarını İfade Eden Parametreler

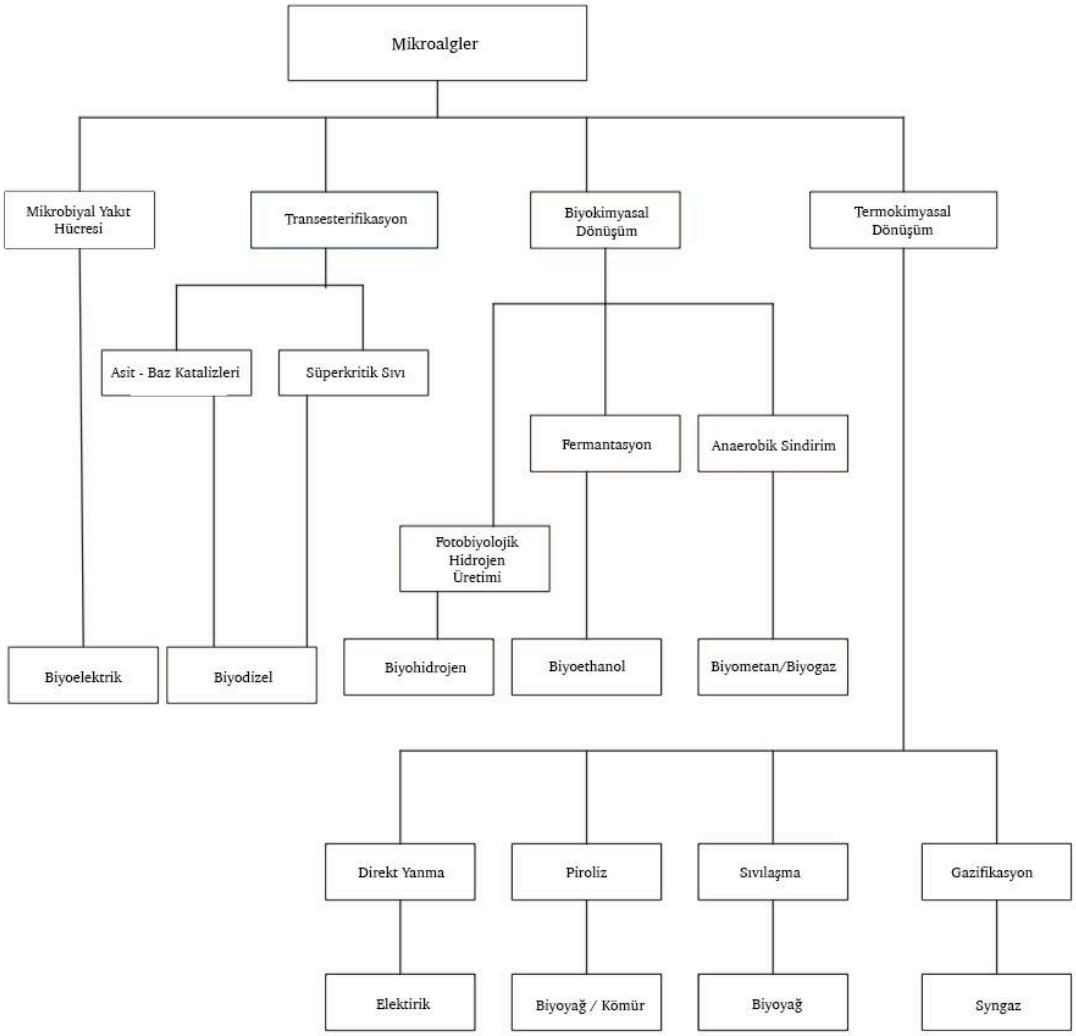
Mikroalg yetiştiriciliğini etkileyen parametreler değerlendirilerken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, tüm paramatrelerin birbirlerinden bağımsız düşünülemeyeceğidir. Çünkü araştırmalar sonucunda bahsedilen parametrelerden birinin eksikliğinde ya da fazlalığında mikroalg büyümesini durdurabileceği yada yavaşlatabileceği görülmüştür. Mikroalg üretimini ve veriminin en iyi şekilde sağlanması için tüm parametrelerin birlikte kontrolü ve optimize edilmesi çok önemlidir. Mikroalg yetiştirme yöntemleri ve mikroalg yetiştirilmesi için gerekli koşulların neler olduğu üzerine yapılan literatür çalışmalarının ardından 2.4. Nolu bölümde mikroalgler kullanılarak nasıl enerji elde edildiği ifade edilmiştir.

2.4 Mimaride Mikroalgler ve Enerji Üretimi

Mikroalglerden nasıl enerji üretildiğini anlamak amacıyla; mikroalglerden enerji üretim süreci, fotobiyoreaktör sistemlerinin çalışma prensipleri ve işleyişi ifade edilmiştir.

Biyokütle enerjisi olarak yakıt üretmek için mikroaalglerin kullanılması, alglerin biyolojik işlemesi açısından tartışmasız araştırmaya açık bir alandır (Chisti, 2007, s.294). Biyokütle kaynağı olarak mikroalgler kullanılarak enerji eldesinde kullanılan biyoyakıtlar Şekil 2.16'da (Chew vd., 2017, s.41) gösterildiği gibi dönüşüm teknolojilerine (termo-kimyasal dönüşüm, biyokimyasal dönüşüm, transesterifikasyon

ve fotosentetik mikrobiyal yakıt hücresi) göre dört kategoriye ayrılabilir. Biyodizel mikroalglerden üretilen enerji için önemli bir seçenektir. Çünkü, petrole benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan temiz bir yenilenebilir enerji kaynağıdır (Leung, Wu ve Leung, 2010,s 1084) .Mikroalgler, birçok türde biyoyakıt için ham madde kaynağı olarak kullanılabilmektedir. Örneğin, mikroalgal biyokütlenin anaerobik bozunması ile metan, mikroalgal yağlardan biyodizel ve fotobiyolojik reaksiyonlar ile biyohidrojen üretimi mümkün olabilmektedir. Mikroalgler biyodizel üretimi için kullanılacaksa yağ içeriği yüksek türlerin, biyohidrojen üretimi için kullanılacaksa hidrojen üreten türlerin, biyoetanol üretimi için kullanılacaksa karbonhidrat içeriği yüksek türlerin seçilmesi gerekmektedir. Besin ortamı, çevresel etkiler ve biyoreaktör çeşidi de biyoyakıt verimini etkileyen önemli parametrelerdir (Elcik ve Çakmakcı, 2017, s.812).

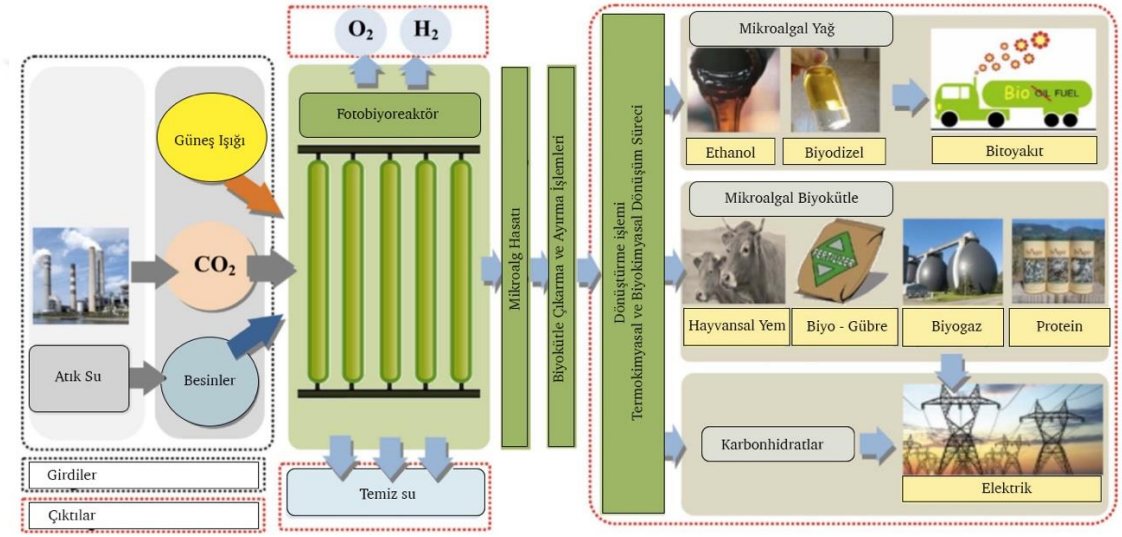


Şekil 2. 16 Mikroalg Biyokütlesinin Biyoyakıtlara Dönüşüm İşlemleri (Chew vd., 2017, s.41)

Mikroalglerin hasadı günlük olarak santrifüjleme, filtreleme, yüzdürme, çökeltme veya ultrason teknikleriyle yapılabilir (Edwards, 2008), (Suali ve Sarbatly, 2012, s.4325). Ekstrakte edilen biyokütlenin bileşimi değişebilir, fakat genel olarak protein/yağ oranı 2/1 olacak şekilde yaklaşık % 15 karbonhidrat ve% 10 kül veya atık içeren bileşim yapısındadır. Yağ bileşeni biyodizele dönüştürülür ve dönüştürülmeyen biyokütle ayrıştırılır. Yağ dışı biyokütle, gübre, hayvan yemi ve diğer yardımcı ürünler için kullanılabilir. Sistem içerisindeki artık besinler sudan çıkarılır ve biyokütle üretimi için geri dönüştürülür. Harcanan biyokütlenin bir kısmı, çoğu biyokütle üretimi sırasında tüketilen elektrik üretmek için anaerobik sindirim yoluyla biyogaz üretmek amacıyla kullanılır. Aşırı elektrik pillerde saklanabilir veya şebekeye satılabilir. Fotovoltaik hücreler, mikroalg sistemi tarafından üretilen elektriği korumak için de kullanılabilir.

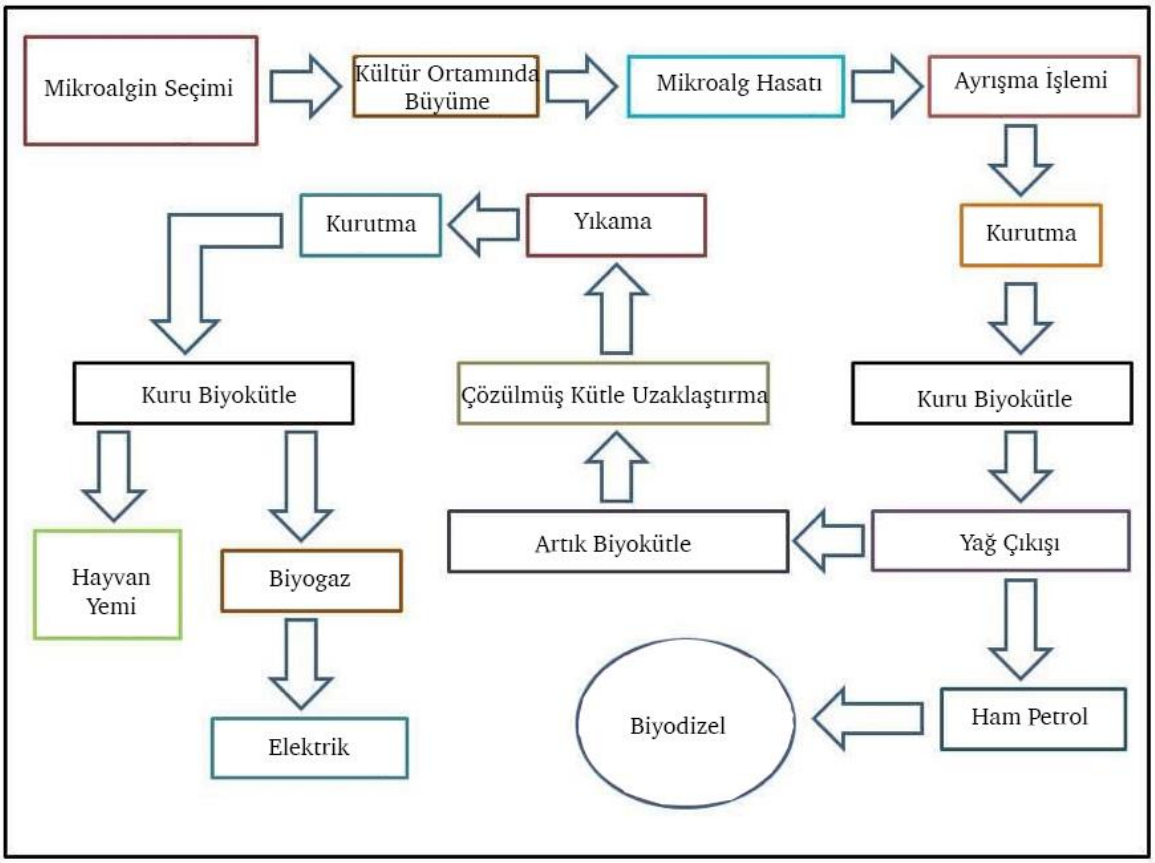
Anaerobik sindirimden elde edilen atıklar, besin yönünden zengin bir gübre olarak kullanılabilir. Ayrıca mikroalg biyokütlesinden Hidrojen gazı açığa çıkar. Fakat hidrojen kaynağı olarak mikroalgler halen araştırma ve geliştirme aşamasındadır. Bugüne kadar mikroalglerden hidrojen üretim yöntemleri, yosunlardan yalnızca küçük miktarlarda hidrojen üretebilmiş ve halen daha araştırılma ve gelişme aşamasındadır (Edwards, 2008).

Şekil 2.17'de, mikroalglerden biyoenerji eldesi ve diğer ürünlere dönüşme sürecinin bütün girdileri ve çıktıları şematik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2. 17 Mikroalglerden Biyoenerji Eldesi ve Diğer Ürünlere Dönüştürülmesi Sürecinin İfadesi (Elrayies, 2018, s.1180)

Mikroalglerin kurutulması sonucu elde edilecek olan yağa ek olarak, mikroalgal biyokütlesi, yağ ekstraksiyonu gerçekleştikten sonra geriye kalan ve organik içeriği yüksek alg posasının, anaerobik karışık kültür ile aşılanmış, çürütücülerde, anaerobik fermantasyonu gerçekleştirilir. Böylelikle biyodizel üretimi amacıyla kullanılan mikroalglerden arta kalan yüksek organik madde içerikli posadan da biyogaz enerjisi elde edilmiş olur (Chisti, 2007, s.302). Biyokütlenin biyogaza dönüşümü, mikroalg ekimi için tekrar kullanılabilecek olan elektriği üretir. Böylece mikrolglerden aynı anda biyodizel, biyogaz, hayvan yemi ve elektrik üretilmiş olur (Şekil 2.18).



Şekil 2. 18 Mikroalglerin Fotobiyoreaktörlerde Yetiştirilmesinin Ardından Hasat Eldesi Sürecini İfade Eden Şematik Gösterim (Kim, J. Vd., 2013, s.873)

2.4.1 Bölüm Sonucu

Mikroalglerin biyoprosesi sonucunda elde edilen son ürünler mimariye uygulanabilirlik açısından değerlendirildiğinde biyogaz eldesinin biyodizel, biyohidrojen ve biyoethanol gibi son ürünlere kıyasla daha en uygun model olduğu görülmüştür. Çünkü elde edilen biyogaz; mevcut altyapıya entegre edilerek mimari yapının ısınmasında, sıcak su eldesinde ve kısmi olarak da elektirik eldesinde kullanılabilmektedir. Üçüncü bölümde mikroalglerin mimaride kullanımı örnekler üzerinden detaylandırılacaktır.

3
Mimari Tasarım Bağlamında Alglerin Mimariye Entegrasyonu: Alg Mimarisi

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynağı olarak alglerin mimarlık disiplini ile bütüncül bir bağlamda değerlendirilme düşüncesi sonucunda ortaya çıkan alg mimarisi kavramı, alglerin mimari tasarımdaki kullanım imkanları hakkında bir fikir elde etmemizde yardımcı olabilir. Mikroalglerin mimariye entegrasyon örnekleri incelendiğinde, sahada uygulanmış projeler ve uygulanmamış konsept projelerden oluşan toplam 10 adet alg mimarisi proje örneği aşağıdaki üç kriter doğrultusunda seçilmiştir;

- Bina cephelerine entegre fotobiyoreaktör uygulamaları
- Kentsel ölçekte fotobiyoreaktör uygulamaları
- Eleman düzeyinde fotobiyoreaktör uygulamaları.

Örnek projeler;

- Fotobiyopraktör tipi
- Lokasyon
- Tercih edilen işletim modeli

olarak belirlenen 3 değerlendirme kriterine göre sınıflandırılarak mimariye entegre bir fotobiyoreaktör sistemi tasarlanırken dikkat edilecek hususlar belirlenmiştir. Bölüm sonunda seçilen 10 adet projenin olumlu ve olumsuz yönleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir.

3.1 Bina Ölçeğinde Yaklaşımlar

Fotobiyoreaktör sistemlerininin mimariye entegrasyonunda, yapı cepheleri enerji üretimi için kullanılarak yeni bir işlev kazanmaktadırlar. Bina ölçeğinde yaklaşımlar bağlamında aşağıda belirtilen 4 adet proje incelenmiştir.

- B.I.Q Evi, Hamburg, Almanya
- Alg Dokuması : Binalar İçin Hafif Bir Fotobiyoreaktör

- Sıfır Süreç Konsept Binası, Kaliforniya, ABD
- Photo.Synth.Etica, Dublin, İrlanda

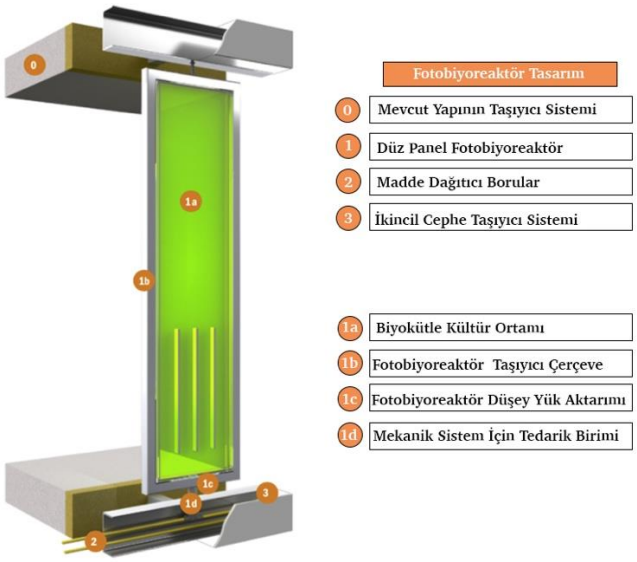
3.1.1 B.I.Q Evi, Hamburg, Almanya

Hamburg, Almanya'da 2013 yılında Uluslararası Bina Sergisi kapsamında (IBA), Smart Material House yarışmasında birincilik ödülü kazanmış olan bu bina, mikroalgler kullanılarak tasarlanan bir fotobiyoreaktör cephe uygulamasının gerçekleştirildiği ilk alg mimarisi örneğidir (Chalcraft, 2013). Bina tasarlanırken kendi kendine yetebilen sürdürülebilir bir yapı yapma düşüncesinden yola çıkılmıştır. Binanın düz panel fotobiyoreaktörler kullanarak mikroalglerden biyogaz üretmesi amaçlanmış ve bu biyogaz eldesi ile binanın ısınması hedeflenmiştir (Takkos, 2013, s.14). Arup ve Colt şirketleri tarafından "SolarLeaf" biyoreaktör cephesi olarak patenti alınmış fotobiyoreaktör cephesi, dünyada yenilenebilir enerji kaynakları olarak ısı ve biyokütle üretmek için mikroalg yetiştiren ilk cephe sistemidir. SolarLeaf, enerji verimli binaların tasarımı için biyokimyasal fotosentez işlemini kullanma fikrine dayanmaktadır (Arup, 2015). Şeffaf camlardan oluşturulan düz panel fotobiyoreaktörler, güneşten gelen termal ısıyı ve güneş ışığını kullanan bir fotobiyoreaktör sistem içerisindeki mikroalg kültürü CO_2 kullanımı ve besinler yardımıyla biyoyakıt ve biyokütle üretmektedir (Arup, 2015). B.I.Q, beş katlı bir konut yapısıdır. Düz panel fotobiyoreaktör cepheleri güneş ışığı ve ısısından en etkin şekilde yararlanılabilmek adına güneydoğu ve güneybatı cephelerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.1) (Roedel ve Petersen, 2013, s.6).



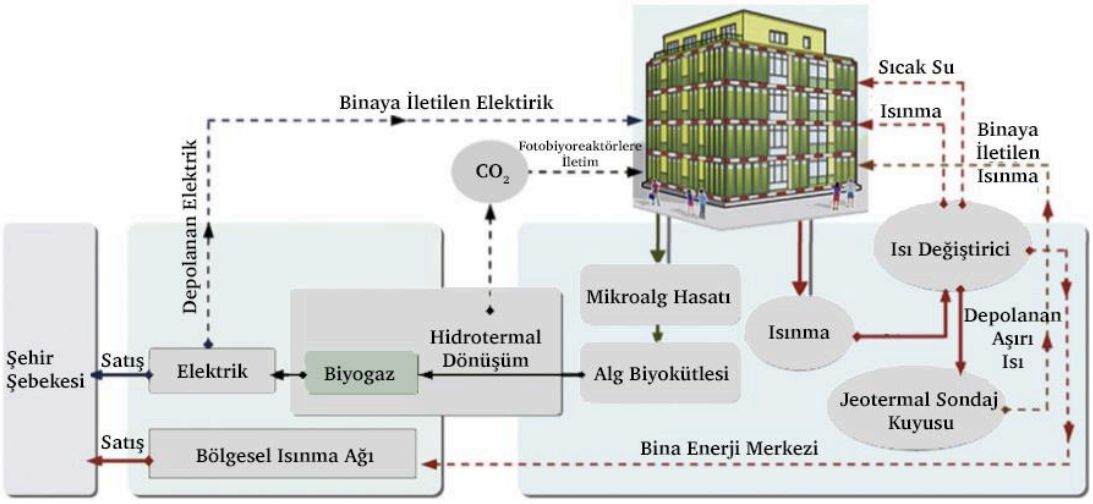
Şekil 3. 1 Uygulanmış İlk Fotobiyoreaktör Cepheli Bina B.I.Q. Hamburg (Roedel ve Petersen, 2013, s.20)

Bahsi geçen 4 katlı konut yapısının güneydoğu ve güneybatı cephelerine 200 m^2 ikincil bir cephe elemanı olarak 129 adet düz-panel kapalı fotobiyoreaktör yerleştirilmiştir. Her bir fotobiyoreaktör paneli, 0.8 m kalınlığında 2.5 m x 0.7 m boyutlarında tasarlanmıştır (Şekil 3.2) ve mikroalg kültürünün büyümesi için 24 litre sıvı kapasitesine sahiptir (Roedel ve Petersen, 2013, s.12), (Arup, 2015). ,(Zhang, 2014, s.37). Biyo-uyumlıu cephe, gün boyunca güneş ısısını toplamak, dağıtmak, depolamak, kullanmak ve üretilen biyokütleyi toplamak için bina işletim sistemine tam olarak entegre edilmiştir (Arup, 2015).



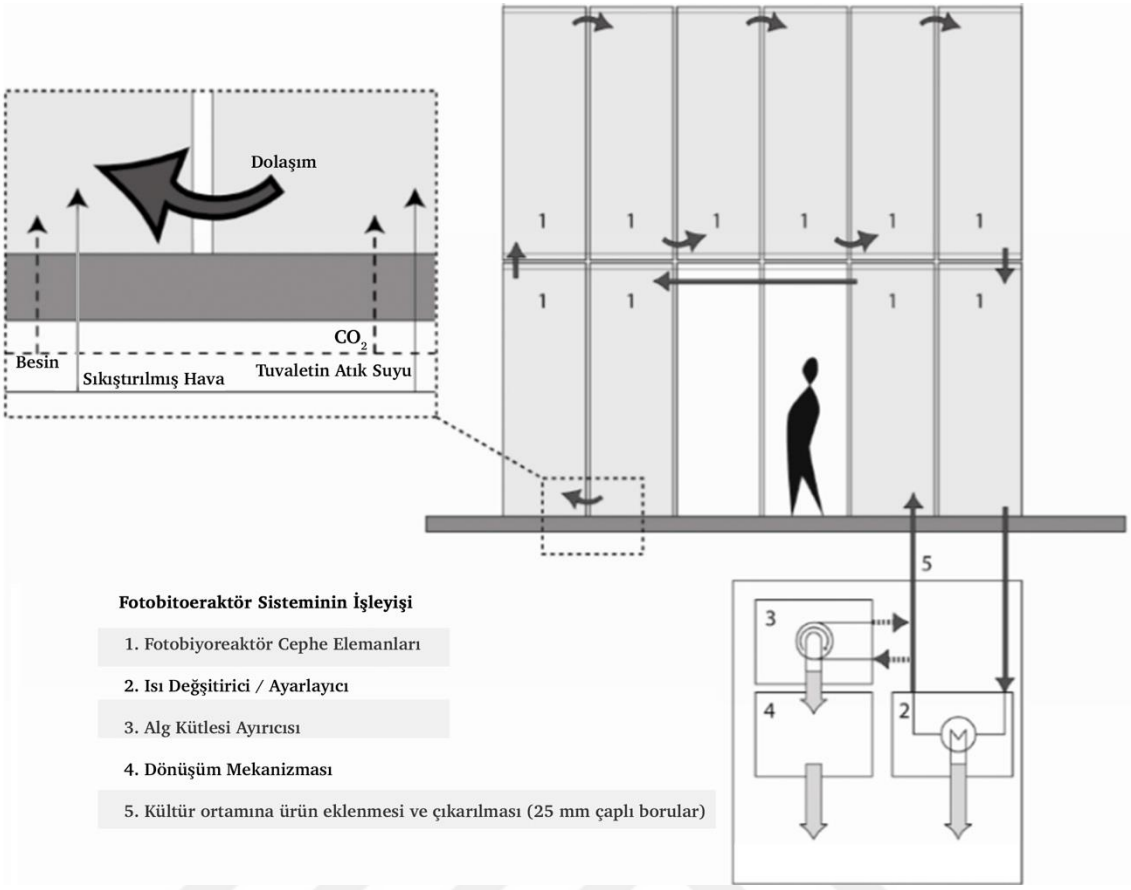
Şekil 3. 2 Destek Yapısı ve Tedarik Sistemi de Dahil Olmak Üzere Panel Prototipinin Oluşturulması (Wurm, (t.y.))

Fotobiyoreaktör cephe sistemi bütüncül bir çalışma prensibine sahiptir. Çalışma prensibine göre ilk olarak fotobiyoreaktör içindeki mikroalglerin büyümesi için oluşturulan kültür ortamı ve bu ortamda ihtiyaç duyulan CO_2, besin ve su ihtiyacının karşılanmasıdır. Büyüme sonucunda mikroalgal kültür sıvısının sıcaklığı ile dolaşımı izlenerek ve gerektiğinde kontrol edilerek elde edilen biyokütlenin filtreleme ve hasat işlemleri yapılır. Bir sonraki aşama elde edilen ısının toplaması, depolaması ve dağıtım işlemidir. En son aşama ise üretilen metan gazının işlenerek biyogaz üretim sistemine aktarımıdır (Şekil 3.3) (Arup, 2015).



Şekil 3. 3 Binanın Bütüncül Çalışma Prensibi (Elrayies, 2018, s.1182)

Her bir düz panel fotobiyoreaktör özelinde her metrekareye başlangıçta 15 gr olacak şekilde mikroalg kütlesi ekimi yapılmıştır (Wurm, t.y). Fotobiyoreaktörlerin çalışma prensibinde iletimi sağlayan boru sistemleri mikroalg kültür ortamını, CO_2, tuvaletin atık suyu, besinler ve basınçlı hava ile besler (Roedel ve Petersen, 2013, s.12). Panelin tabanından verilen basınçlı havanın enjeksiyonu ile havanın süspansiyonu sağlanarak mikroalglerin büyümesi, çoğalması ve karbon ve ışığın uyarılması sağlanır (Roedel ve Petersen, 2013, s.12), (Wurm, t.y). Su sistemi, azot, fosfor ve besin elementleri ile zenginleştirilmiş kültür ortamını oluşturur (Roedel ve Petersen, 2013, s.13). Su için tuvaletin atık suyu kullanılır. Fotobiyoreaktör sistemindeki bu boru sistemi, kapalı bir panel ile bina servis sistemine (Wurm, t.y) entegre edilmiştir (Şekil 3.4).

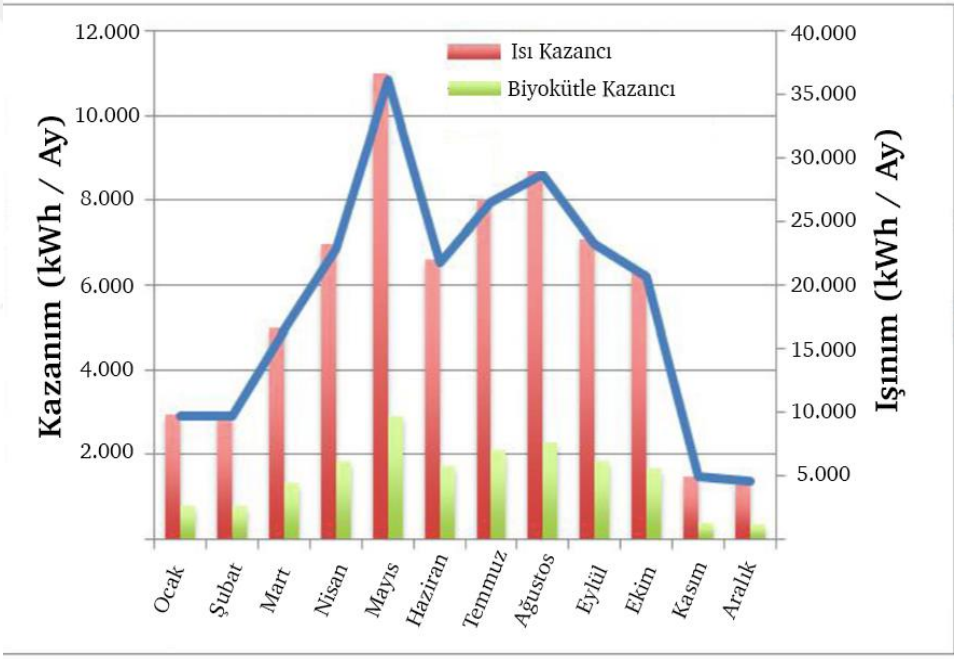


Şekil 3. 4 B.I.Q. House Sistem Detayı (Roedel ve Petersen, 2013, s.13)

CO_2, sistemin içinde bulunun biyogazla çalışan kombine ısı ve güç ünitesi yardımı ile baca gazından elde edilir. Membran teknolojisi ve doymuş bir cihaz su devresine zenginleştirilmiş bir CO_2 akımı sağlamak için kullanılır (Roedel ve Petersen, 2013), (Zhang, 2014, s.37). CO_2 çözündürülüp besinlerle ve suyla birlikte kültürün içindeki mikroalglere yayılır (Zhang, 2014, s.37). Biyoreaktörün iç yüzeyleri boyunca yüksek akış hızları ve bunun içine alınmış kafes benzeri boncuklar (kazımalar), mikroalg birikimini ve biyolojik kirlenmeyi engeller. Sisteme CO_2 sürekli bir besin maddesi olarak enerji yönetimi sistemindeki verilere göre sürekli eklenir (Roedel ve Petersen, 2013, s.12). Sürekli türbülans sayesinde, alglerin aşırı güneş ışığından dolayı kararmaları önlenir. Türbülans, PBR'ye sürekli basınçlı hava enjeksiyonu ile üretilir. Mikroalgler hasat edilmeye hazır olduğunda, biyokütle bir flotasyon sistemi ile filtrelenir, bina sistemindeki sıcaklık kontrollü bir kapta toplanır ve harici bir biyogaz tesisinde biyogaza(metan) dönüştürülür ve daha sonra şehre enerji sağlamak için kullanılır. (Roedel ve Petersen, 2013, s.14). Biyokütlenin biyogaz tesisine alınması sonucunda metan gazı olarak enerjiye dönüşümü haftada yaklaşık bir kez gerçekleşir.

Biyokütlenin (biyogaz) metan haline dönüşümü bina içerisinde yerinde gerçekleşememiştir. Çünkü gerekli teknoloji henüz konut binalarında kullanıma hazır olmadığı veya yasal açıdan uygun olmadığı belirtilmiştir. Son dönüşüm aşaması harici olarak bir biyogaz tesisinde gerçekleştirilir (Roedel ve Petersen, 2013, s.14).

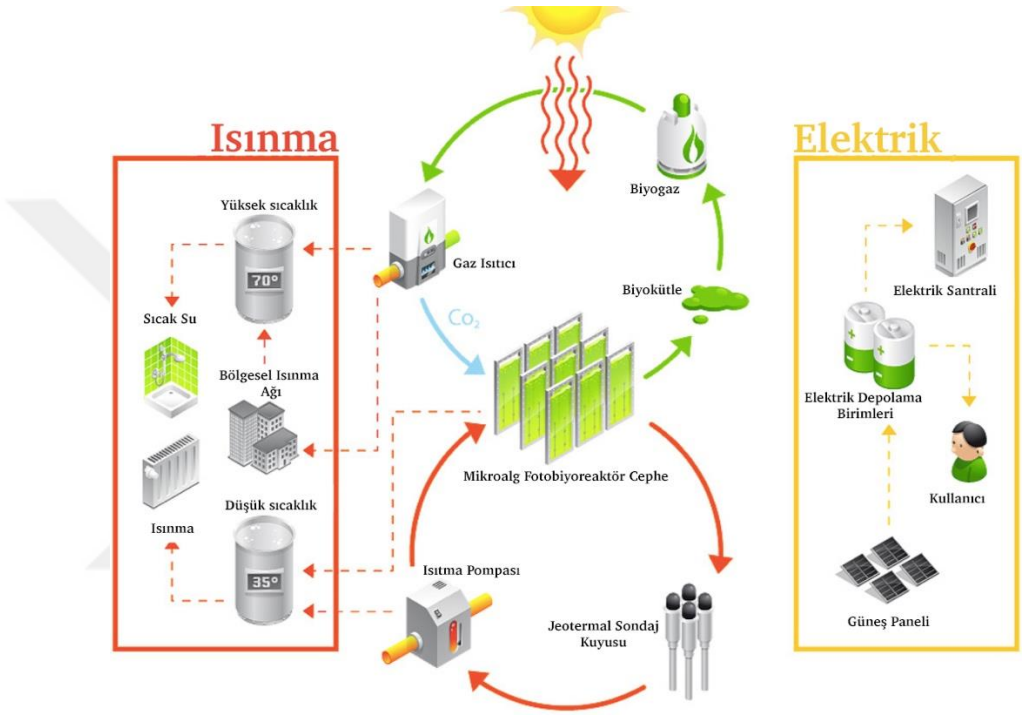
Güneş ışığının etkisi kontrol altına alınamadığında aşırı ısınmadan dolayı mikroalg kültüründe bozunma tespit edilmiş ve sisteme aşırı ısıyı dengeleyen soğutucu sistemler eklenmiştir. Böylece aşırı ısı, ısı değiştiriciler ve soğutucular yardımıyla kontrol altında tutulmuştur. Fotobiyoreaktör içindeki kültür ortamının sıcaklığı yaz aylarında sürekli olarak 40°C'nin altında, kışın ise yaklaşık 5°C'nin üzerinde olması gerektiği saptanmıştır (Roedel ve Petersen, 2013, s.15). Şekil 3.5'te binanın bir yıllık verileri sonucunda elde edilen ısı ve biyokütle kazancı grafiği verilmiştir.



Şekil 3. 519 Güney Batı Yönelimli Fotobiyoreaktörleri İçin Biyokütle/Güneş Isısı Verimlerine Göre Aylık Işınlama Miktarı (Wurm, (t.y.))

B.I.Q. House'da otobiyoreaktör sisteminin sağlamış olduğu ısınma özelliği sayesinde fazla ısı direkt olarak sıcak su tedariği için kullanılmaktadır. Gerekli durumlarda kullanılabilmek adına depolanan aşırı ısı ayrıca jeotermal kuyularla zeminde depolanmaktadır (Roedel ve Petersen, 2013, s.16), (Arup, 2015). Orijinal plan, geniş yeşil alanlı çatı yüzeyinde fotovoltaik panellerin kullanılmasını öngörmesine ramen ancak bu uygulanamamıştır. Gerekli görüldüğü taktirde fotovoltaik panellerin binanın

çatısına eklenebileceği düşünülmektedir. Düşünülen plan gerçekleşene kadar bina için gerekli tüm elektrik şebekeden çekilmektedir. BIQ House'nin, sahip olduğu 15 daireden yalnızca bir tanesi sistem içerisinde üretilen elektrik ile beslenebilmiştir. Ancak, dairelerin çok daha büyük bir kısmı üretilen biyogazın yakılması sonucu ıstılabilmiştir. Elde edilen imkanlar neticesinde görüldüğü üzere; biyoreaktör cepheleri, elektrik üretimi için değil, ısı üretimi için kullanılmıştır (Roedel ve Petersen, 2013, s.20), (Arup, 2015). Sistemin çalışma prensibi Şekil 3.6' da ifade edilmiştir (Wurm, (t.y.)).



Şekil 3. 6 BIQ House: Sistemin Çalışma Mekanizması (Roedel ve Petersen, 2013, s.16)

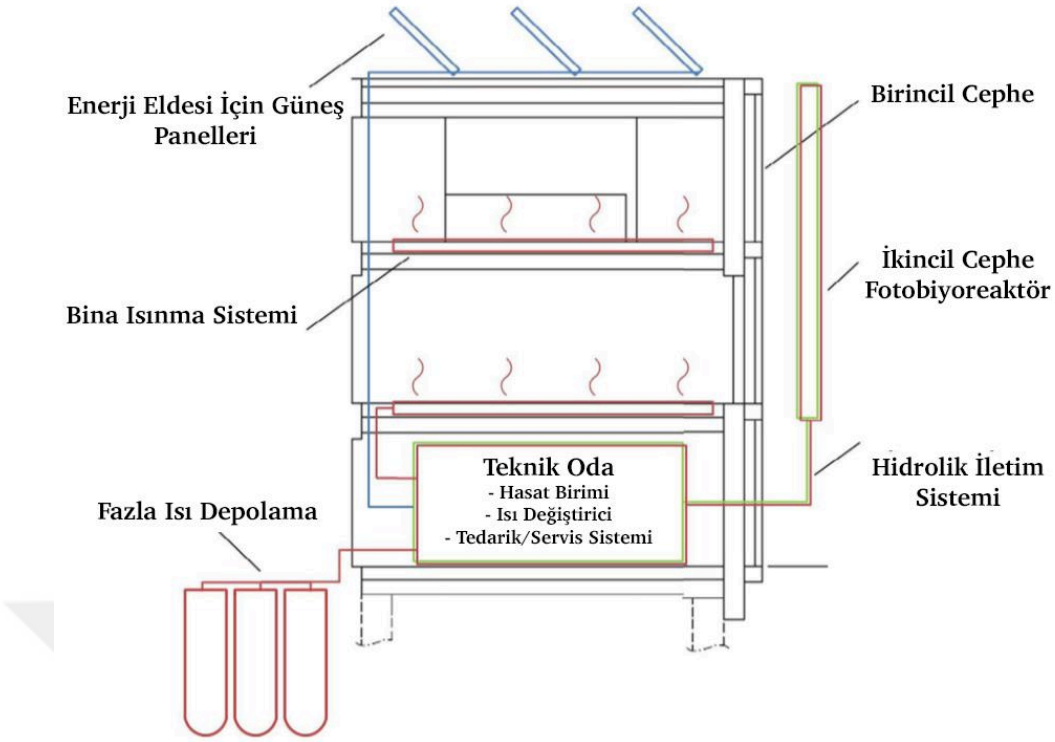
Yıl boyunca ısı üreten biyoreaktör cephesi yaz mevsiminde en yüksek mevsimsel faaliyete ulaşır. Aşırı ısı, yaklaşık 80 metre derinlikte jeotermal sondaj deliklerinde depolanır ve biyoreaktörler tarafından düşük ısı üretimi dönemlerinde serbest bırakılır. Binalar için merkezi bir ısı eşanjörü (enerji kontrolörü) aracılığıyla kullanılabilir hale getirilir ve otomatik bina hizmetleri kontrol sistemi aracılığıyla gerektiğinde kullanılabilir ve enerji açısından optimize edilir. Her daire için bina hizmetlerinin kontrolü tüm blok için bir kontrol sistemi tarafından otomatik olarak sağlanmaktadır (Roedel ve Petersen, 2013, s.16). Sistemin çalışması otomatik olarak gerçekleştirilir (besin tedariki dahil), böylece bakım maliyetleri ve önemli bir sorunda müdahale edilebilir (Wurm, t.y). Merkezi bina enerji yönetimi sistemi (BMS), döngü sisteminin

girişlerini ve çıkışlarını otomatik olarak izler. Beslenme arzını, yosun hücresi yoğunluğunu ve alg biyokütlesinin hasadı kontrol eder (Roedel ve Petersen, 2013, s.16)., (Wurm, t.y). (BuildUp, 2015). Şekil 3.7'de binanın giriş katına yerleştirilen bilgisayarlı kontrol sistemi ile brlikte çalışan mikroalg hasat işlemlerinin ve ürün eldesinin yapıldığı mekanik işleyişin gerçekleştiği bir teknik oda ifade edilmiştir.



Şekil 3. 7 Fotobiyoreaktör Cephe Sistem Verilerinin Kontrol Edildiği, Mikroalg Hasat İşlemlerinin Yapıldğı Gözlem Odası ve Teknik Oda (Colt, 2013)

Sistem kontrolünün yapılarak oluşabilecek sorunlara müdahele ve veri depolama açısından önemli gözüken bu mekanik sistem ve mikroalglerden ürün eldesi için gerekli olan tüm mekanik sistem ekstra alan gereksinimi doğurmuştur (Şekil 3.8). Ekstra alan gereksiniminin yapının planlanması ve mekan sürdürülebilirliği açısından sorun teşkil ettiği düşünülebilir.



Şekil 3. 8 Fotobiyoreaktör Cephe Sisteminin Binaya Entegrasyonunun Şematik İfadesi (Wurm, (t.y.))

Yapının oluşum sürecinde cephe tasarımı için tübüler ve düz panel fotobiyoreaktör tipleri denenmiştir. Düz panel fotobiyoreaktörler güneş ışığını %10 verimlilik ile dönüştürmüştür. Düz panel fotobiyoreaktörler tübüler fotobiyoreaktörlere oranla daha fazla verimlilik sağlamış olup daha az bakım- onarım gerektirmiş ve kullanım kolaylığı sağlamıştır (Şekil 3.9) (Wurm, t.y).



Şekil 3. 9 Projelendirme Aşamasında Denenen Düz Panel Fotobiyoreaktör Prototipi (Wurm, (t.y.))

Yapının yıl başına 150 kWh/m^2 ısı enerjisi ve 30 kWh/m^2 biyoenerji ürettiği tespit edilmiştir. 129 adet düz panel fotobiyoreaktörden oluşan cephe sistemi güneş ışığı %10 verimle biyoenerjiye, %38 verimle ısıya dönüştürüldüğü saptanmıştır. Ayrıca bina her yıl CO_2 salımını 6 ton azaltmaktadır ve 2,5 ton CO_2 mikroalgler tarafından absorbe edilmektedir (BuildUp, 2015), (Wurm, t.y). (Colt, 2013). Bina çalışma sistemindeki mikroalgler, bir enerji taşıyıcısı olan biyokütlelerini ikiye katlayarak günde bir defaya kadar bölünebilir. 1 gram kuru biyokütle, yaklaşık 23 kJ enerji içerir (Roedel ve Petersen, 2013, s.14). Şekil 3.10. Fotobiyoreaktör cephe panelli bu yapının yıllık enerji kazancı göstergelerini ifade etmektedir.

FOTOBİYOREAKTÖR PANEL ENERJİ GÖSTERGELERİ	
200 m² LİK FOTOBİYOREAKTÖR PANELLERİNİN YILLIK ÜRETİM GÖSTERGELERİ	
BİYOMETAN ÜRETİMİ	612 m³ metan / yıl
METAN İÇERİSİNDEKİ ENERJİ	6,487 kWh / yıl
METAN OLARAK NET ENERJİ	4,541 kWh / yıl
ISIDAN GELEN NET ENERJİ	6,000 kWh / yıl
KARBONDİOKSİT EMİSYONU	6 ton / yıl
HER BİR FOTOBİYOREAKTÖR PANEL İÇİN M² BAŞINA DÜŞEN VERİLER	
BİYOKÜTLE ÜRETİMİ	900 kg / yıl
BİYOKÜTLEDEN SAĞLANAN ENERJİ ÜRETİMİ	345 kJ / m² / gün
BİYOKÜTLEDEN SAĞLANAN BİYOGAZ MİKTARI	10.20 L metan / m² / gün



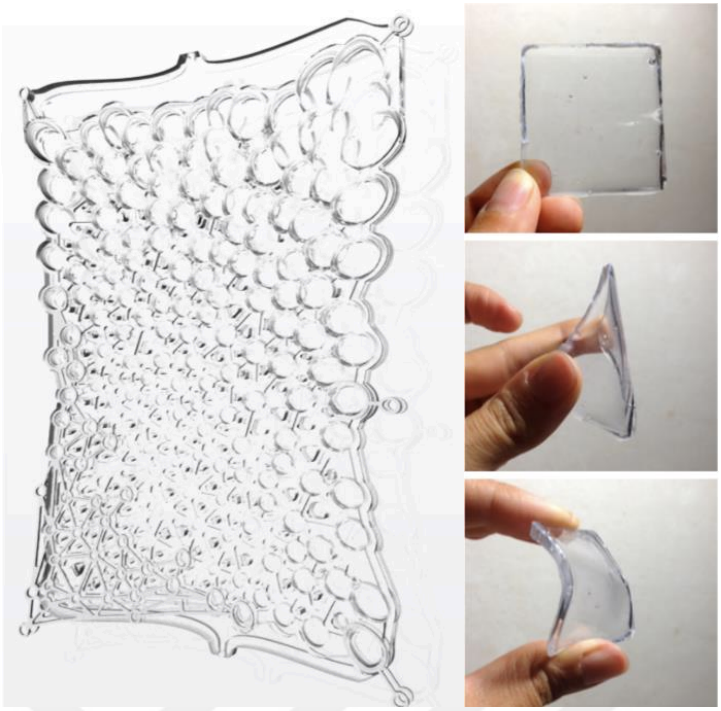
Şekil 3. 10 B.I.Q. House Binasının Enerji Üretim Verileri (Wurm, (t.y.))

3.1.2 Alg Dokuması: Binalar İçin Hafif Bir Fotobiyoreaktör

Petra Bogias tarafından yüksek lisans tezi kapsamında, bina cephelerine kolaylıkla entegre edilebilen hafif bir fotobiyoreaktör sistemi önerilmiştir. Önerilen fotobiyoraktör

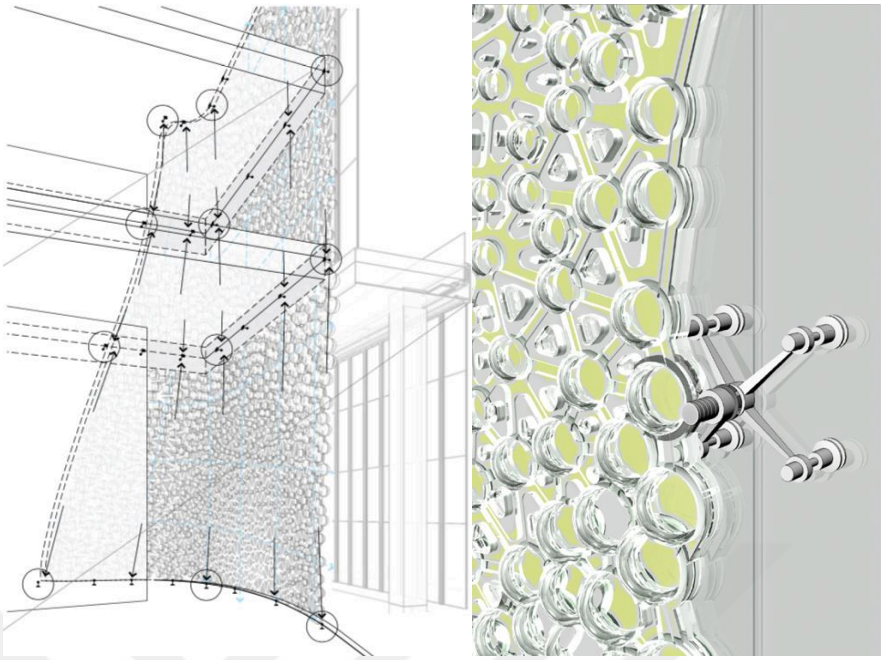
sistemi ile mikroalgler fotosentez yolu ile havadan CO_2 toplamakta ve atmosfere O_2 vermektedir. Fotobiyoraktör sistemlerinin sahip olduğu bioproses işlemi ile bina cephelerinde üretilen mikroalglerin hasat işlemleri ile biyokütle elde edilmektedir. Elde edilen biyokütle ile yapı için gerekli olan enerji eldesi amaçlanmatadır.

Önerilen esnek membran fotobiyoreaktör sistemi, mevcut yapıların mekânsal ihtiyaçlarına, çevre koşullarına ve uygulanabilirlik ölçütlerine göre şekillenmiştir. Binaya entegre fotobiyoreaktör sistemleri gibi ikincil bir cephe önerisi olarak giydirme cephe bağlamında önerilmiştir (Bogias, 2014, s.45). Fotobiyoreaktör sisteminin hafif ve esnek membran malzemesi parametrik tasarım ilkelerine göre farklı geometriler kullanılarak tasarlanmıştır. İnce film polimer şeffaf malzeme ufak, esnek ve farklı geometrilerin parametrik tasarımı cephe boyunca membran kaplama sistemini oluşturmaktadır. Böylece fotobiyoreaktör sistemlerinin en büyük problemlerinden birisi olan yapılara ek taşıma yükü yükleme problemi bu hafif malzeme seçimi ile giderilmeye çalışılmıştır. Alg tekstilinde polimer bazlı malzemeler; elastik, monolitik ve suya dayanıklıdır. İç kısmındaki karmaşık bir boşluğu kaplayan yüzey şeffaf poliüretan reçine, camın özelliklerini taklit eder fakat sisteme esnek ve elastik bir form verir. Endüstriyel imalat teknikleri kullanılarak çeşitli şekillerde uyarlanıp uygulanabilir (Şekil 3.11) (Bogias, 2014, s.46).



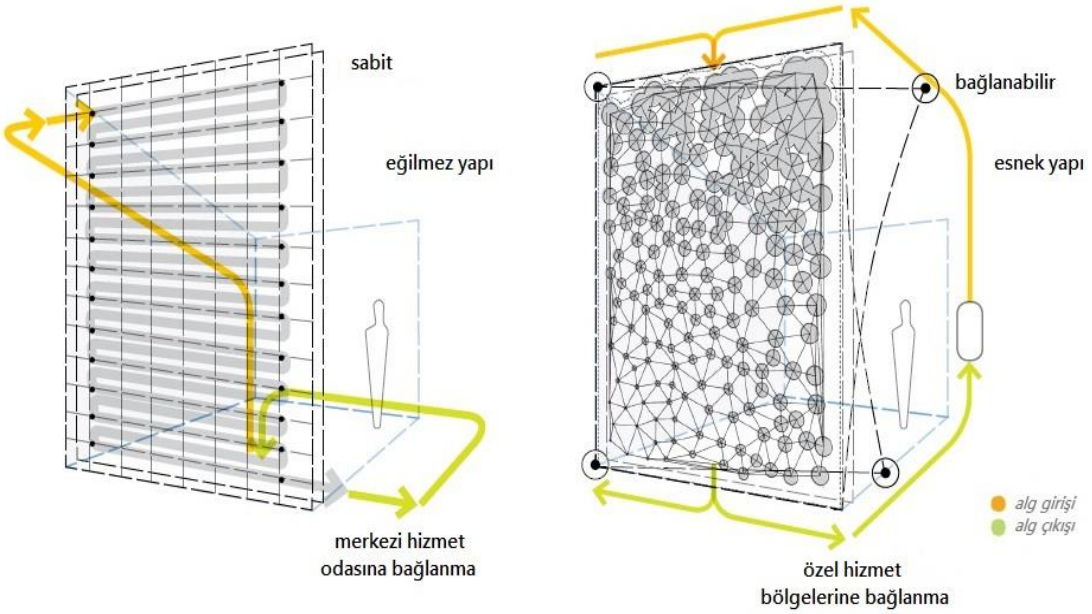
Şekil 3. 11 Fotobiyoreaktör Sistemi İçin Hafif Malzeme Seçimi (Bogias, 2014, s.46)

Fotobiyoreaktör sisteminin yapıya entegrasyonu için gerekli imalat sırasında, tutucu yapısal kancalar kalıbın içine yerleştirilir ve zarın içine dökülür. Konumları yapıya göre şekillenen geometriye göre belirlenir ve yalnızca dış kısmı üzerinde bir bağlantı mekanizması olarak bulunur. Sistem montaj edilirken iç kısmı gerilir ve şekillendirilir. Reaktörün mevcut yapılara ve yeni inşaa edilecek yapılara entegrasyonunun kolaylığı için sistemin cepheye tutunma ve mekanik destek kısımları, sade bir yapıdadır. Silikon ürünlerden farklı olarak, poliüretan oldukça dayanıklıdır ve yırtılmaya karşı dirençlidir. Moleküler bileşimi, yüksek berraklığa ve UV direncine sahip olmasını sağlar ve güçlü kalıplanmış parçaların oluşturulmasına imkan sağlar. Camın niteliklerini elastik formda sergilemek suretiyle tekstil, mevcut bir pencere duvarına yerleştirilebilir, minimum engel oluşturarak yerine oturtmak için yalnızca bir bağlantı noktaları ağı kullanılarak yerleştirilebilir. Malzeme özelliği, yosun tekstili gibi sistemlerin, duvar düzeneğinde sert bir ekstra malzeme olmadan mevcut bina sistemlerine entegre edilmiş olur (Bogias, 2014, s.47). Bağlantı noktaları, düşük profilli ve invazif olmayan donanım kullanarak döşeme plakalarının veya duvarların kenarına yerleştirilebilir. Tekstilde gömülü yapı daha sonra zarı yerine oturtmak için bu pim noktalarına asılabilir. Şekik 3.12'de belirtilen detay, tekstildeki kancaların bir örümcek cam konektörüne nasıl tutturulacağını göstermektedir (Bogias, 2014, s.27 ve s.129).



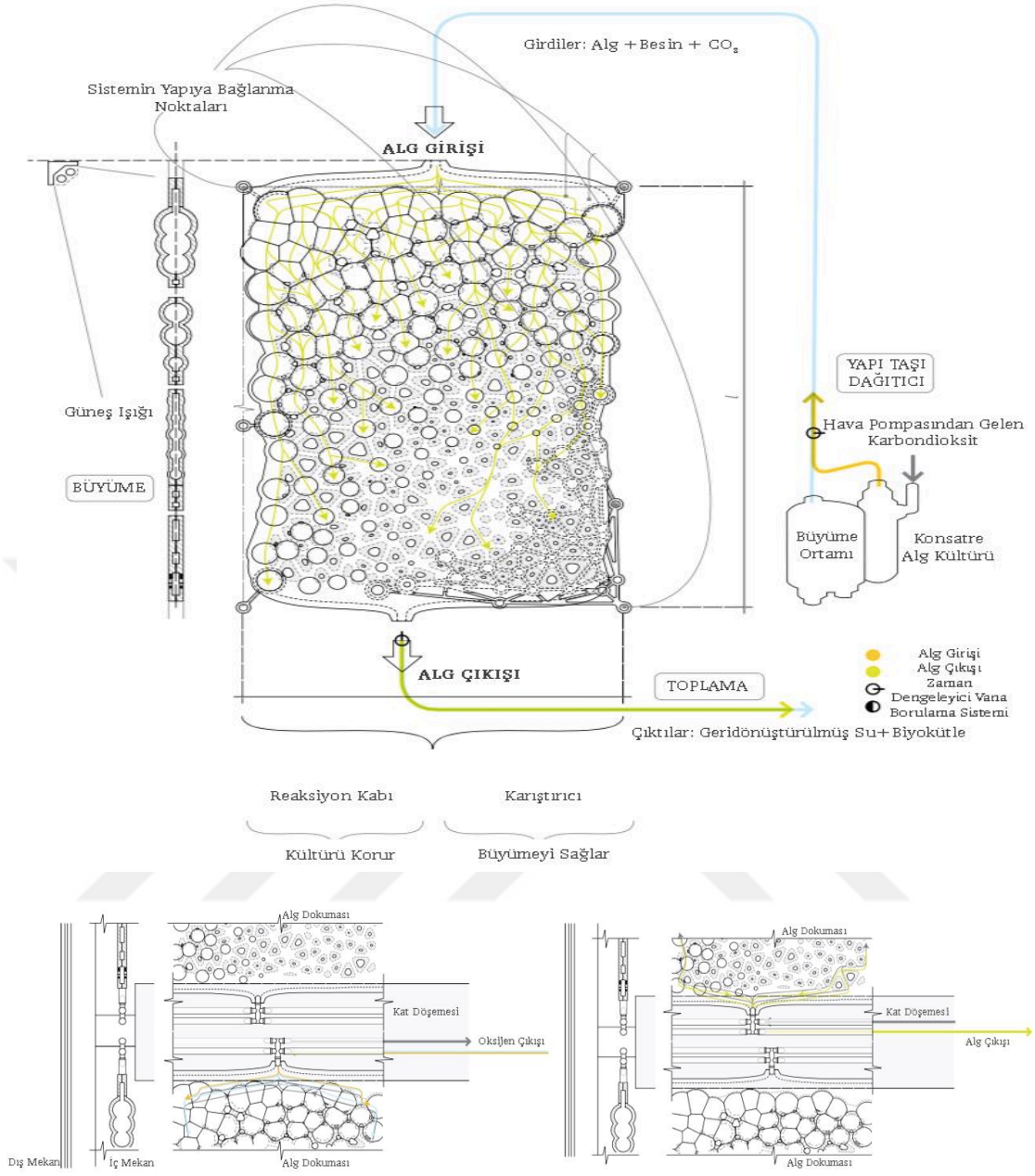
Şekil 3. 12 Fotobiyoreaktör Sisteminin Mimariye Entegrasyonu (Bogias, 2014, s.27)

Dokuma alg fotobiyoreaktörü diğer endüstriyel fotobiyoreaktörler gibi sabit ve esnemez bir yapıya sahip değildir. Aksine kolaylıkla bağlanabilir ve esnek bir yapıya sahiptir. Endüstriyel fotobiyoreaktörler büyük ölçekli destek birimlerine, ağır ve hantal yapılarından dolayı montajları sırasında fazla iş gücüne, yapı ile birlikte düşünülmesi gereken bir mekanik sisteme ihtiyaç duyarlar. Önerilen dokuma alg fotobiyoreaktör sistemi hafif yapısından dolayı daha az iş gücü gerektirir. Ufak yapıya destek elemanlarına sahiptir. Modüler bir yapıya sahip olduğu için şantiye alanının dışında önceden parça parça hazırlanabilir. İstenilen şekilde mevcut yapının ihtiyaçlarına göre birleştirilip, sökülebilir ya da değiştirilebilir (Şekil 3.13) (Bogias, 2014, s.15, s.17 ve s.74).



Şekil 3. 13 Geleneksel Fotobiyoreaktör Sistemleri İle Dokuma Alg Fotobiyoreaktörü Karşılaştırması (Bogias, 2014, s.22)

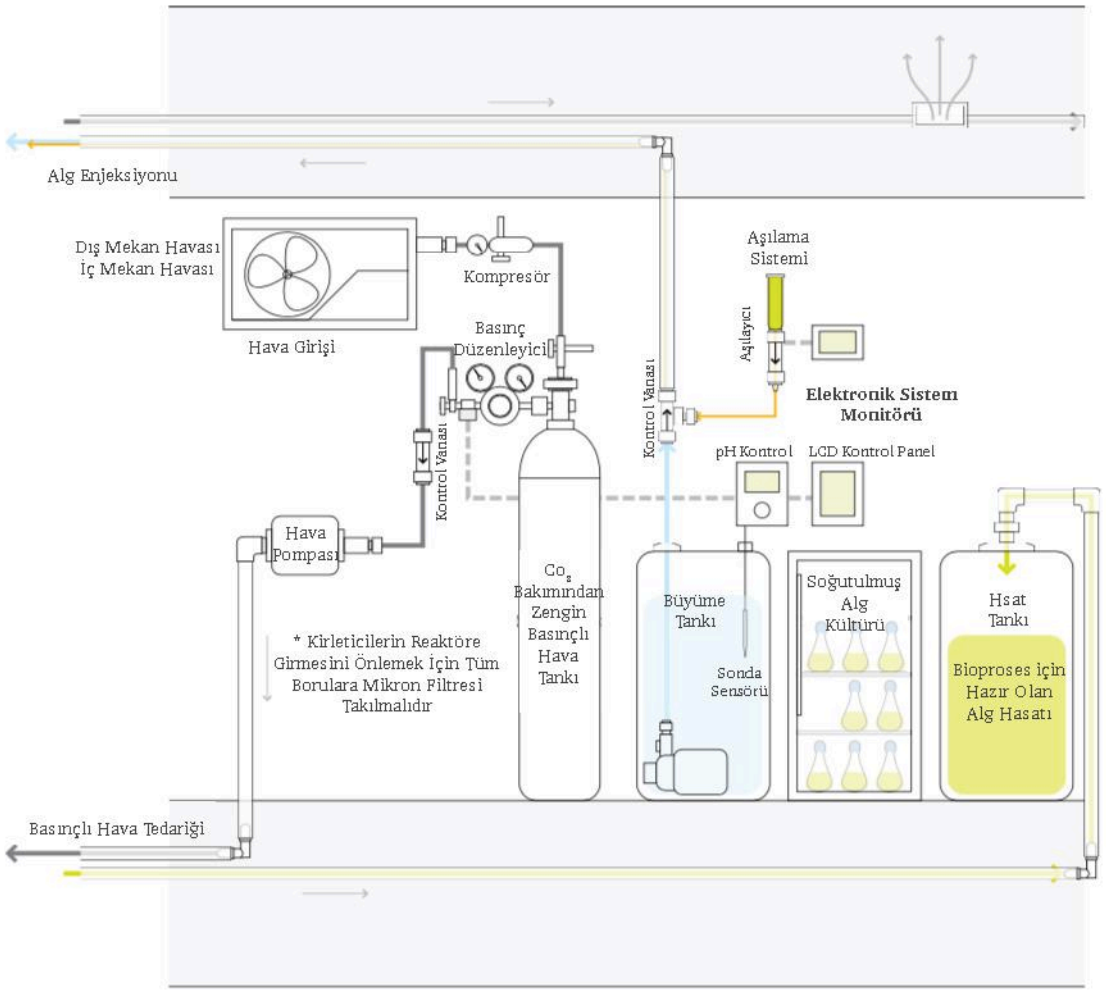
Sistemin çalışma mekanizması incelendiğinde geleneksel fotobiyoreaktör sistemlerine benzer işletme modeli ile karşılaşmaktayız. Dokuma fotobiyoreaktör mikroalglerin büyümesi için havadan CO_2, tuvaletin atık suyu ve arıtılmış suyun içerisindeki besinler ile güneş ışığını kullanır. Mikroalgler ve besinler ve CO_2 sisteme alg dokumasının üst kısmından sürekli olarak ihtiyaç durumuna göre ilave edilir. Büyüme ortamına giren mikroalgler şeffaf dokuma fotobiyoreaktörü içerisinde yayılırlar ve tüm yüzeye dağılarak hareket etmeye başlarlar ve büyüme evresi başlamış olur. Büyüme sırasında üretilen oksijen üst kısımdan gerektiği kadar atmosfere ve bir kısmı da iç mekana aktarılır (Bogias, 2014, s.54). Fotobiyoreaktör sisteminin çalışma diyagramı Şekil 3.14'de ifade edilmiştir.



Şekil 3. 14 Fotobiyoreaktör Sistemin Çalışma Diyagramı (Bogias, 2014, s.55 ve s.56)

Hasat için büyüyen mikroalgler, sistemin alt kısmından teknik destek birimine hasat işlemleri için santirfüj yöntemi ile çekilerek iletilir. Sistemin alt kısmından verilen sürekli hava ile kültür ortamı karıştırılarak büyümeye destek olur ve ortamın sıcaklığını ve pH değeri borulama sistemleri ve elektronik sistemle sürekli dengede tutulur (Bogias, 2014, s.54 ve s.128). Dış cepheye entegre dokuma sistemi tek başına işlev görmez. Sistemin bütüncül işleyişinin gerçekleşmesi aşağıda Şekil 3.15 ile ifade edilen hasat işlemleri ile binanın tesisatı ve mekanik altyapısına çeşitli destek sistemlerinin

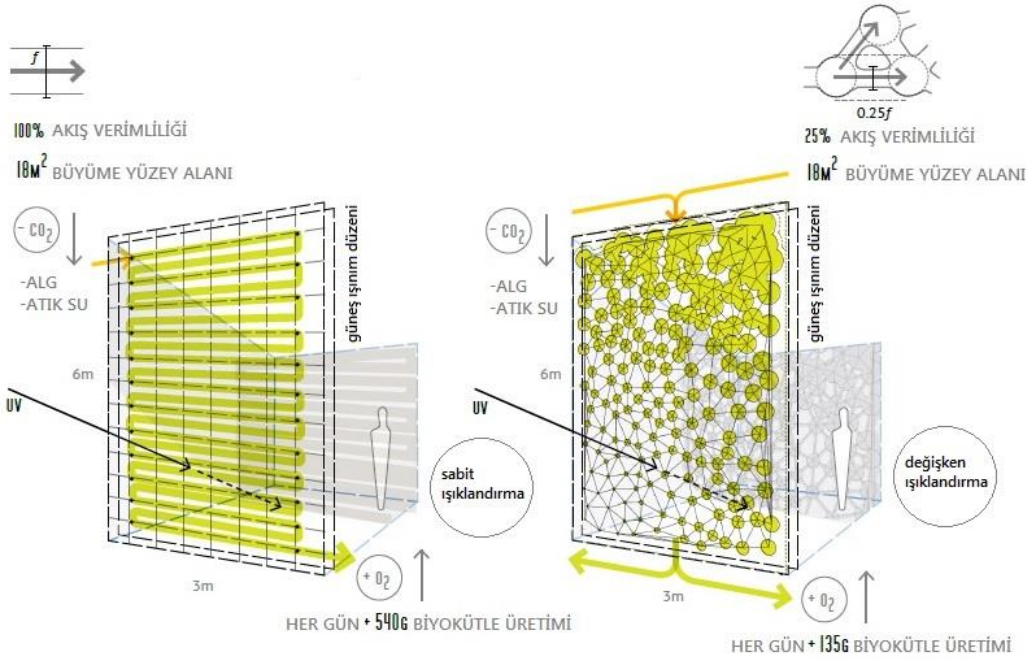
entegrasyonunu gerektirir. Mekanik sistemde bir aşılama (kültür enjeksiyonu) sistemi, bir hava işleme sistemi, bir hasat sistemi ve bir aydınlatma sistemi yer alır. Sistemin istenen şekilde çalışmasını sağlamak için bu sistemlerin birbirine ve binaya bağlanma yollarının detaylandırılması önemlidir (Bogias, 2014, s.57). Bütüncül biyoproses, önerilen proje için seçilen işletme modelini ifade eder.



Şekil 3. 15 Fotobiyoreaktör Sisteminin Destek Birimlerini İfade Eden Mekanik Oda Diyagramı (Bogias, 2014, s.57)

Verimlilik açısından geleneksel fotobiyoreaktör ssistemleri ve dokuma alg fotobiyoreaktör sistemi karşılaştırılmıştır. 3 x 6 m (en–boy) 18 m^2 büyüme yüzey alanına sahip, CO_2 ve atık suyu, algler yardımıyla kullanıp O_2 üreten endistriyel bir fotobiyoreaktör sistemi, sabit ışıklandırmayla, %100 akış verimliliğine sahiptir. Her gün ortalama 540 gr biyokütle üretmektedir. Aynı boyutlarda dokuma alg fotobiyoreaktörü ise, geometrik yapısından dolayı değişen ışıklandırmayla, %25 akış verimliliğine

sahiptir. Her gün ortalama 135 gr biyokütle üretmektedir (Şekil 3.16) (Bogias, 2014, s.28 ve s.30).



Şekil 3. 16 Geleneksel Fotobiyoreaktör Sistemleri İle Dokuma Alg Fotobiyoreaktörü Verimlilik Karşılaştırması (Bogias, 2014, s.28)

3.1.3 Sıfır Süreç Konsept Binası, Kaliforniya, ABD

HOK ve Vanderweil mimarlık ve mühendislik ekipleri tarafından tasarlanan proje, bina emisyonlarının 2020 yılına kadar %30 oranında azaltılması amacıyla Uluslararası Alg Yarışması ve Metropolis Magazine'in Yeni Nesil Tasarım Yarışması 2011'in kazanan projesi olmuştur. Yarışmayla; Los Angeles, Amerikada bulunan 1960 senesinde inşaa edilmiş mevcut General Services Administration (GSA) ofis binasının daha sürdürülebilir bir yapı olarak yenilenmesi amaçlanmıştır (Şekil 3.17). 70.600 m^2 alana sahip 8 katlı mevcut bina, çelik cam ve beton malzemeden yapılmıştır. Yapının mevcut tasarımından dolayı bina içerisindeki koridorlar doğal ışığı kullanamamaktadır. Hedef, federal hükümetlerin önemli görevlerinden biri olan 2020 yılından önce sera gazı emisyonlarının %30 azaltma görevini yerine getirebilmektedir (Bernard, 2011).



Şekil 3. 17 1960'larda İnşa Edilmiş, U.S. General Services Administration (GSA) Ofis Binası. Los Angeles, ABD (Bernard, 2011), (GSA, t.y)

Mevcut yapıya entegre fotobiyoreaktör tasarımları geliştirilmiştir. Şekil 3.18' de belirtildiği gibi %25, %60 ve %80 oranında açıklık içeren tübüler fotobiyoreaktör sistemleri, bina cephesi boyunca 2.322,5 m^2 alan kaplayacak şekilde tasarlanmışlardır. Fotobiyoreaktör sistemlerindeki açıklıklar kontrolü güneş ışığı sağlayarak güneş kırıcı görevi üstlenmektedirler. Fotobiyoreaktör sistemi içerisindeki mikroalgler büyüyebilmek için tuvaletin atık suyundaki besinleri kullanmaktadırlar. Mevcut ofis binasının çevresinde bulunan Santa Ana Çevre yolundan geçen araçların egoslarından salınan karbonu absorbe edip fotosentez ile atmosfere oksijen tedariği sağlamaktadır. Güneş ışığı, karbon ve besinleri kullanarak fotobiyoreaktör sistemi içerisinde büyümeye başlayan mikroalglerden elde edilen biyokütle ile enerji üretmektedirler (Szenasy, t.y.).



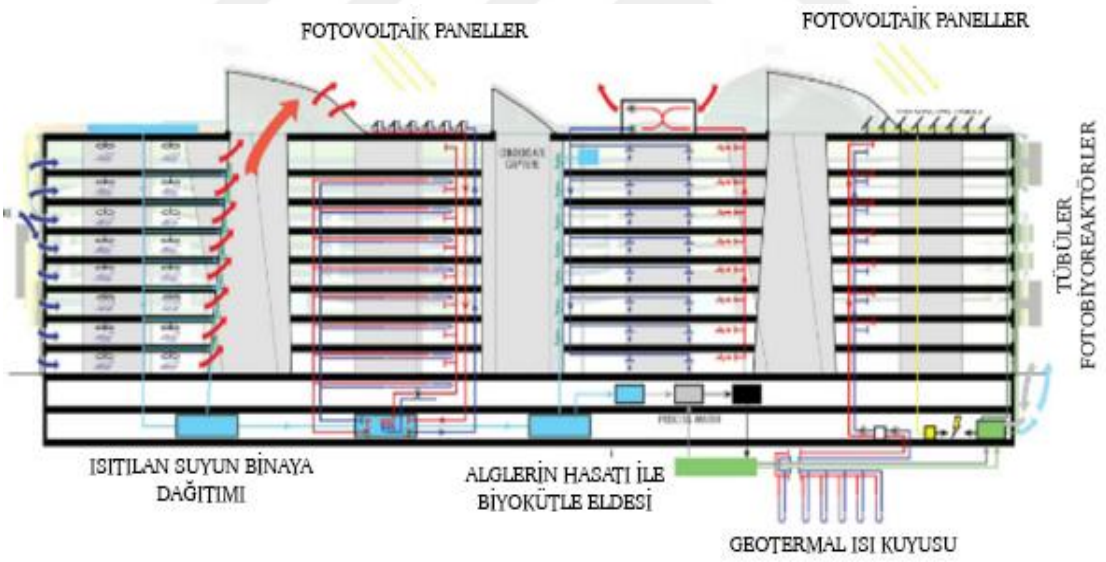
Şekil 3. 18 Tübüler Fotobiyoreaktörlerin Güneş Korunumuna Göre Farklı Açılarda Konumlanması, Sıcak Su Panelleri ve Fotovoltaikler (Szenasy, t.y.)

Yapı sadece fotobiyoreaktör sistemleri entegre edilerek revize edilmemiştir. Yapı fonksiyonellik bağlamında da değiştirilerek 3 büyük avlu ve 8 adet ışık kuyusu eklenmiştir. Böylece tüm ofis birimleri güneşten %100 olarak faydalanabilmektedir (Şekil 3.19). Tasarım sonucunda yapının enerji yükünün ¼'ünü tüketen yapay aydınlatmaya gerek duyulmamıştır. Cephede 3.441,5 m^2 fotovoltaik filmler fotobiyoreaktör sistemlerine destek olmaktadır. Çatıda 2.949,9 m^2'lik güneş panelleri kullanılmıştır. Güneş panelleri ve fotobiyoreaktör sistemleri ile de su ısıtılmakta ve binanın döşemesine yerleştirilen tesisatla tüm binayı ısıtmada kullanılmaktadır (Szenasy, t.y.).



Şekil 3. 19 Avlu ve Işık Kuyuları İle Ofislerin Tamamen Işık Alması (Bernard, 2011)

Entegre fotobiyoreaktör tasarımı ve diğer radikal müdehalelerle yenilenen bina harcadığı enerjiyi %84 oranında azaltmaktadır. Fotobiyoreaktör sistemi iste projeye %9 kadar enerji sağlayabilmektedir. Güneş kırıcıları ile suyun ısıtmada kullanılması ile gereksiz enerji kayıpların azaltarak geriye kalan %16'lık kısım proje alanında üretilebilmektedir (Bernard, 2011). Projenin bütüncül çalışma prensibini gösteren sistem kesiti Şekil 3.20'de ifade edilmiştir.



Şekil 3. 20 Tasarımın Bütüncül İşleyişini İfade Eden Sistem Kesiti (Szenasy, t.y.)

3.1.4 Photo. Synth. Etica, Dublin, İrlanda

EcoLogicStudio tarafından Innsbruck Üniversitesi Kentsel Morfogenez Laboratuvarı - UCL ve Sentetik Manzara Laboratuvarı - Innsbruck Üniversitesi ile ortak bir konsorsiyumda tasarlanan Photo.Synth.Etica, İklim Değişikliği Zirvesi 2018 haftası

sırasında Dublin'de Dublin Castle adlı binanın ilk iki katının dış kısmına inşaa edilmiştir (Şekil 3.21). Tasarlanan fotobiyoreaktör sistemi günde 20 adet büyük ağacın kapasitesine eşdeğer miktarda 1kg CO_2 atmosferden emilir (ecoLogicStudio, 2018).



Şekil 3. 21 Photo.Synth.Etica (ecoLogicStudio, 2018)

Sistem hem mevcut hem de yeni binalara entegre edilmek üzere tasarlanmıştır. 16.2 x 7 metrelik modüllerden oluşur ve her bir fotobiyoreaktör dijital olarak tasarlanmış ve ısmarlama bir biyo-plastik kap olarak çalışır. Fotobiyoreaktör içinde yaşayan mikroalg kültürlerini beslemek için gün ışığını kullanırlar (ecoLogicStudio, 2018).

Fotobiyoreaktör sisteminin çalışma prensibi filtrelenmemiş doğal havanın ön cephenin altından fotobiyoreaktör sisteminin içine alınması ve içeri giren hava kabarcıklarının doğal olarak biyoplastik fotobiyoreaktörler içindeki sulu ortamdan yükselmesi ile başlar. CO_2 molekülleri ve hava kirleticileri algler tarafından yakalanır, depolanır ve yeniden kullanılabilir biyokütle haline getirilir. Fotosentezle elde edilen oksijen daha sonra her bir modülün tepesinden salınır (photo.Synthetica, 2018). Önerilen konsept, binaların canlı olabileceği ve enerji üretip havayı kirleten maddeleri tüketebileceği bir gelecek öngörülmektedir. Binalar şehrin biyosensörleri olarak da görev alabileceklerdir.

Bütüncül fotobiyoreaktör sistemi kurulumdan sonra, hasat tankları, bir kompresör, su pompası, gaz giderici ve sensörler (pH ve sıcaklık) ve elektro valflerle tamamlanacaktır. Kablosuz bir elektronik izleme sistemi ile incelenecektir. Sistem, mevsimsel değişimleri test etmek ve tarım protokolünün göreceli uyarlamasını yapmak için tüm bir güneş yılı boyunca çalışacak ve veriler toplanacaktır. Hızlı büyüyen mikroalg çeşitleri, hasat modu

ve düşük bakım modu gibi değerlendirme kriterleri belirlenecek ve daha sonra, kullanıcıların bu tür modları basit ve sezgisel adımlarla programlamasına izin verecek sezgisel bir tarım uygulaması geliştirecektir. Test süresinin sonunda amaç, sistemin kullanıcıya kiralanabileceği ve sistemin sağlamlığına ve karlılığına katkıda bulunacak bir bakım hizmetiyle bütünleştirip bütüncül bir model yaratmaktır. EcoLogicStudio ekibinden bir kişi, sistemi günlük olarak izlemek ve kültürlerin durumunu ve gelişimini doğrudan gözlemlemek için haftada bir kez bölgeyi ziyaret etmekten sorumlu olacaktır (photo.Synthetica, 2018). Sistem henüz yeni kurulduğu ve uzun vadede izlenerek sonuçların neler olacağı test edilebileceğinden projenin tasarım amacı ile ilgili yaklaşımlar değerlendirilebilse de verimliliği konusunda puanda yeterli ve yönlendirici bir değerlendirme yapmak mümkün değildir.

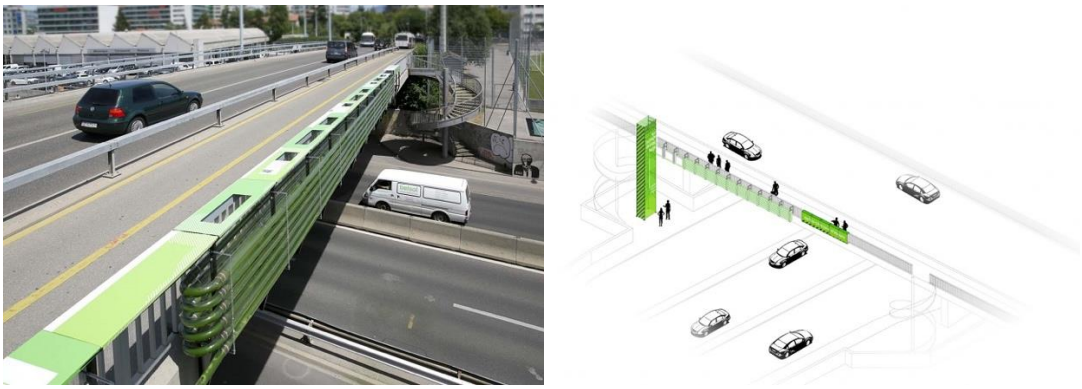
3.2 Kentsel Ölçekte Bütüncül Yaklaşımlar

Fotobiyoreaktör sistemlerinin mimaride kulanım alanlarından bir diğeri kentsel ölçekte planlanan bütüncül yaklaşımlarla karşımıza çıkmaktadır. Kentsel ölçekte yaklaşım bağlamında aşağıda belirtilen 3 adet proje incelenmiştir.

- Kent Kültürü, Cenevre, İsviçre
- Karbon Alg Tüneli Parkı, Filedeifiya, ABD
- AlgaEnergetiCity İstanbul, Türkiye

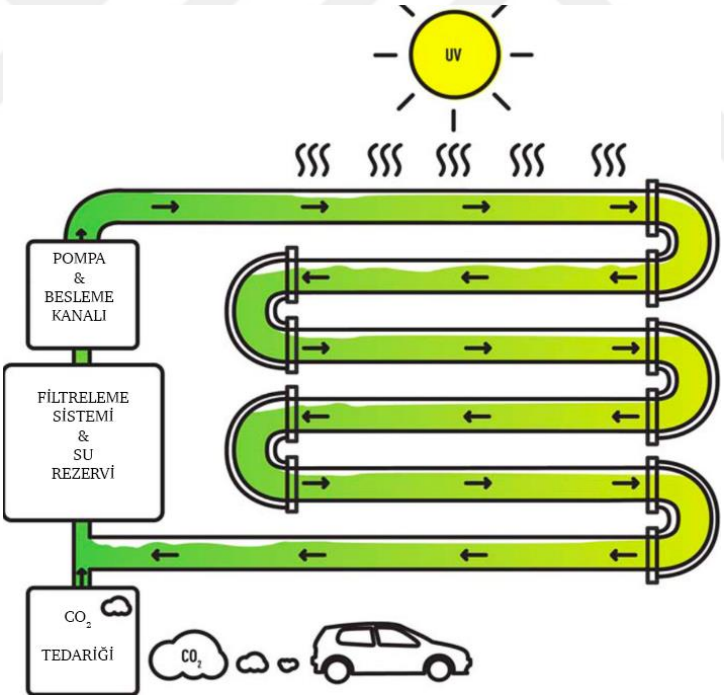
3.2.1 Kent Kültürü, Cenevre, İsviçre

Proje, 2014 yılında Cenevre ‘Villes et Champs’ festivali kapsamında Hollandalı tasarım ofisi The Cloud Collective tarafından kentsel enstalasyon ve odak noktası olarak doğal alanların korunması ve kent içerisinde genişlemesi bağlamında yenilenebilir enerji kullanımına dikkat çekmek amacıyla tasarlanmıştır. Enstelasyon yeri olarak Cenevrede bir karakol üzerindeki araç, bisiklet ve yaya trafiğinin yoğun olduğu bir viyadük seçilmiştir (Şekil 3.22). Çalışmayla, karbon salınımında büyük pay sahibi olan araç kullanımının gıda ve biyokütle üretiminde önemli bir rol oynayabileceği kanıtlanmaya çalışılmıştır. Kentin mevcut alt yapısının yenilenebilir sistemleri destekleyen bir sisteme dönüşmesini sağlayarak yeniden yorumlanması amaçlanmıştır (Burnham, 2018, s.131).



Şekil 3. 22 Otoyol Üzerinde Bir Viyadük Üzerinde Kurulan Tübüler Fotobiyoreaktör Örneği (Burnham, 2018)

Fotobiyoreaktör tipi seçilirken araçların ve yayaların hareket yönü referans alınmıştır. Trafiğin akış yönünde ilerleyen bir mikroalg kültürü yatay tüpler içinde hareket etmektedir. Fotobiyoreaktör sistemini mekanik olarak destekleyen pompalama ve filtreleme sistemleri ile mikroalglerin hasatıyla biyokütle eldesi amaçlanmıştır (Şekil 3.23) (urbanNext, 2015).



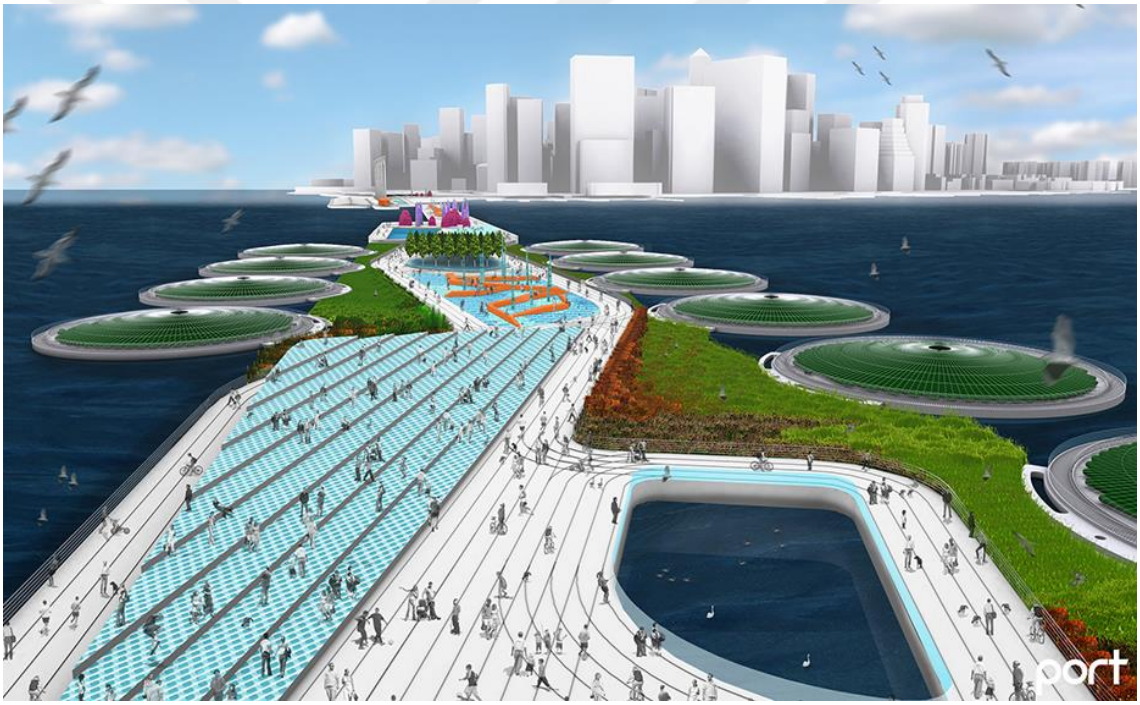
Şekil 3. 23 Fotobiyoreaktör Sisteminin Çalışma Diyagramı (urbanNext, 2015)

Sistemin birincil amacı araçların egzozlarından çıkan karbonun mikroalgler kullanılarak oluşturulan fotobiyoreaktör sistemi ile yakalanması ve fotobiyoreaktör içinde alg bitkisinin fotosentez yapmasıyla atmosfere O_2 vererek havayı temizlemesidir. Proje

kapsamında ikincil olarak fotobiyoreaktör sistemi içerisinde büyüyen mikroalglerden biyokütle elde edilerek bu biyokütlenin yakıt, besin tedariği ve kozmetik ürün eldesi ile kentte kullanılmasıyla gerçekleşecek olan bütüncül bir hedef amaçlanmıştır (Burnham, 2018, s.131).

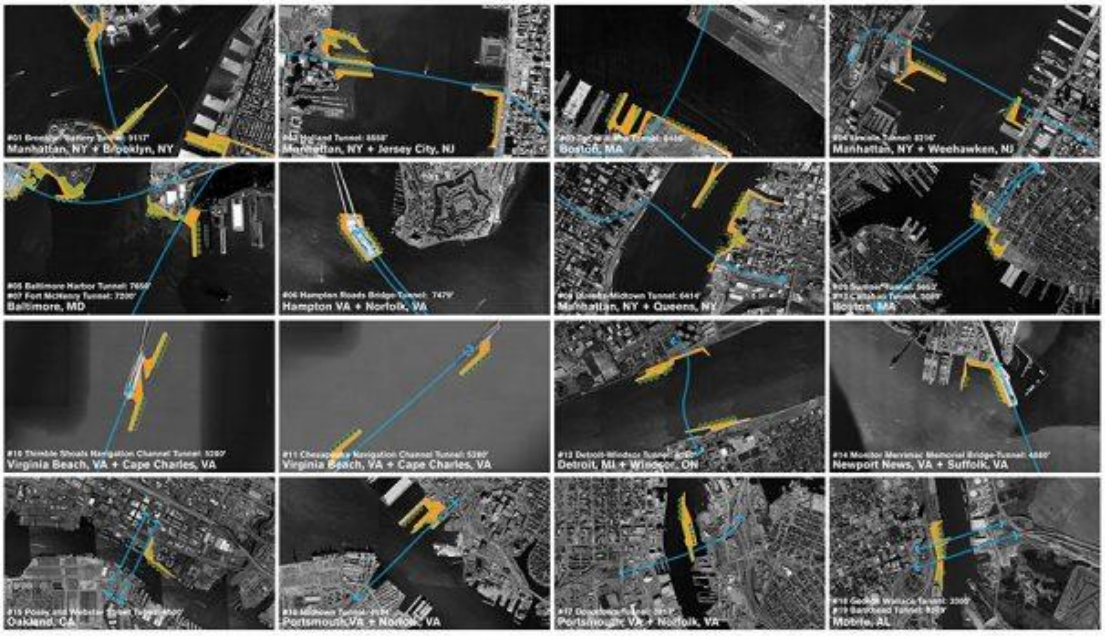
3.2.2 Project: Carbon T.A.P. (Tunnel Algae Park), Philadelphia, PA

2009 yılında Christopher Marcinkoski ve Andrew Moddrell tarafından tasarlanan proje (Şekil 3.24), 'WPA 2.0 Whoever Rules the Sewers Rules the City' mimari proje yarşımasında birincilik ödülü kazanmıştır. Proje; federal, eyalet ve yerel yönetimlerin kentsel altyapıların yenilenmesi ve değiştirilmesi için büyük çaplı yarıtırımlar yapmalarını tavsiye etmektedir. Böylece tasarlanan sistemik ağların rolünü ve günümüz kentsel peyzajın üzerindeki etkisini yeniden gözden geçirme önerisi sunar (port, 2009).



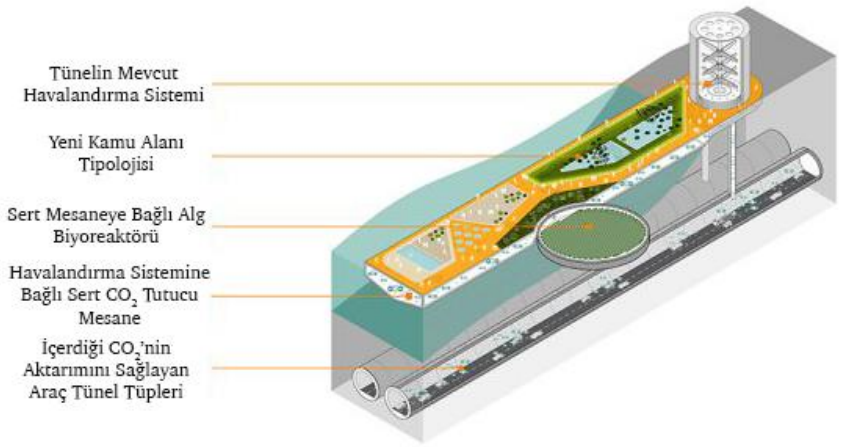
Şekil 3. 24 Carbon T.A.P. (Tunnel Algae Park) Projesi (port, 2009)

Araç tünelleri yılda yüz miyonlarca metreküp CO_2 üretebilirler. CO_2 emisyonlarının küçük bir kısmını bile yakalamak büyük ölçekli alg üretimi için muazzam bir gıda kaynağıdır. ABD'de sekiz farklı eyalette mevcut su altı otomobil tünelleri altyapısı kullanılarak araçların egzoslarından çıkan karbonun mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılması hedeflenmektedir (WPA 2.0., 2009) Şekil 3.25'te ABD'nin farklı bölgelerinde su altı tünellerine yerleştirilen konsept projeler ifade edilmiştir.



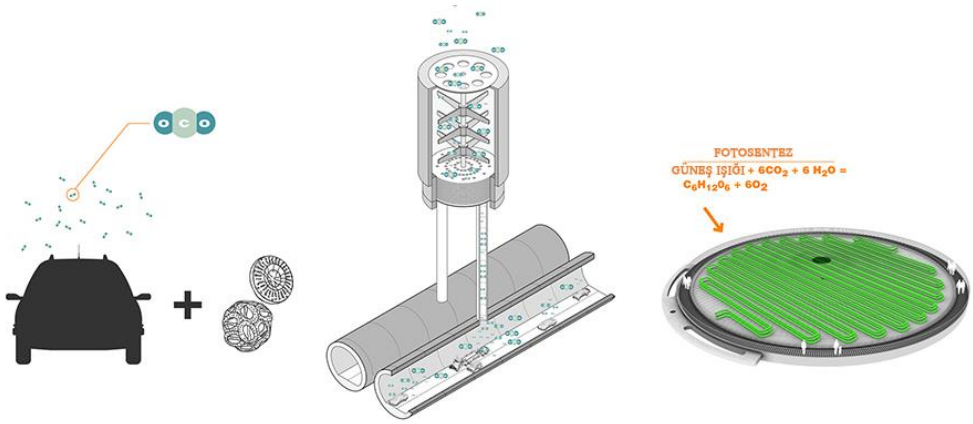
Şekil 3. 25 ABD'nin Farklı Eyaletlerinde Su Altı Tünelleri İçin Önerilen Tasarım Konseptleri (Scenario Journal, 2009)

Projenin tasarım senaryosunda; konsantre CO_2 ve sera gazı üretimine sebep kentsel bölgelerde yeni bir tür 'yeşil altyapı' önerilmektedir. Yeni altyapı, karbon salınımını azaltmak için endüstriyel ölçekte bir algal tarım sistemi kullanılırken, aynı zamanda oksijen, biyoyakıt, biyoplastik, nütrasötikler ve tarımsal yemlerin üretimiyle yeni bir ekonomik kaynak yaratılmak amaçlanmıştır (port, 2009). Proje senaryosunda bahsedilen bu yeni altyapı Brooklyn Battary tüneli havalandırma sistemine bağlı bir dizi iskele armatürü olarak ortya çıkmaktadır (Şekil 3.26). Yeşil altyapı önerisinin bir kısmı tarımsal üretim, bir kısmı ekolojik koruma, bir kısımı kamusal alan yaratma ve bir kısmı da ekonomik katalizör sağlama amacıyla çalışmaktadır. Bütüncül yaklaşımla birlikte bir şehrin ekonomik ve sosyal yaşam kalitesinin şimdiki ve gelecekteki sakinleri için iyileştirmek hedeflenmektedir (Scenario Journal, 2009).



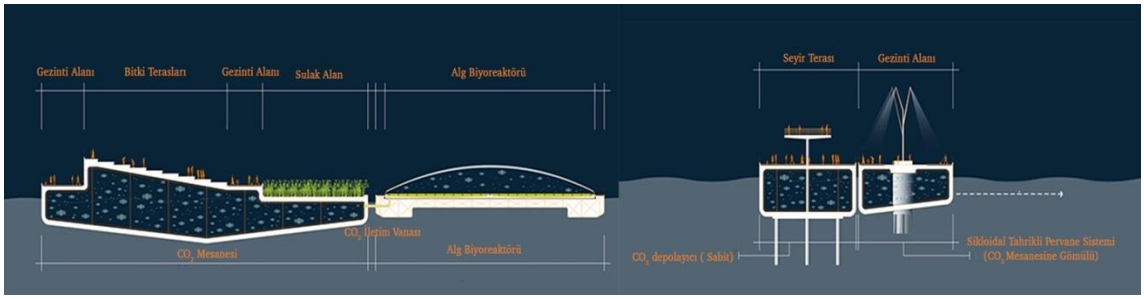
Şekil 3. 26 Booklyn Battery Tüneli Havalandırma Sistemi İle Bütünleşen Altyapı Önerisi (port, 2009)

Projenin çalışma mekanizması incelendiğinde, karbon yakalamak ve endüstriyel ölçekte alg biyoreaktörüne gerekli karbon iletimini sağlamak için iki parçalı bir sistem kullanıldığı görülür. İlki, tünelin havalandırma sistemine bağlanan ve araçların egzoslarından salınan karbonu tutan karbon tutucu mesanelerdir. İkincisi ise sistemin bağlanmış olduğu endüstriyel ölçekli kapalı fotobiyoreaktör sistemleridir (Şekil 3.27) (WPA 2.0., 2009).



Şekil 3. 27 Karbon Tutucu Çelik Tüneller ve Endüstriyel Fotobiyoreaktörlerin Bütüncül Çalışması (Scenario Journal, 2009)

Su altı tünellerine doğrudan borularla bağlanan ve karbondioksiti emen büyük silindirik emici çelik tanklarda toplanırlar (Şekil 3.28). Toplanan karbon kültürü, mikroalg mahsullerinin üretilmesi ve işlenmesi için kullanılan 20.000 adet biyoreaktörüne pompalanır (WPA 2.0., 2009).



Şekil 3. 28 Projenin Sistem Kesiti (Scenario Journal, 2009)

Mimarlar, kentsel altyapıları sadece gizlenmesi ya da hafifletilmesi gereken bir kötülük olarak görmemektedir. Aksine onları kentle bütünleştirmeyi ve Amerika kentsel manzarasına olumlu katkı yaratan yeni bir sosyal alan biçimleri yaratmayı hedeflemektedirler (port, 2009).

3.2.3 AlgaEnergetiCity İstanbul, Türkiye

2015 yılında o seneki teması 'Üretken Şehirler' olarak belirlenen Uluslarası Altıncı İleri Mimarlık Yarışması kapsamında Yunus Turan Pekmezci tarafından tasarlanan 'AlgaEnergetiCity İstanbul' isimli proje, mikroalgler kullanılarak oluşturulan fotobiyorektör sistemlerinin yalnızca binalarda ikincil cephe elemaı olarak değil, tüm şehre entegre bir sistem öneri sunmaktadır (Şekil 3.29) (Pekmezci, 2015).



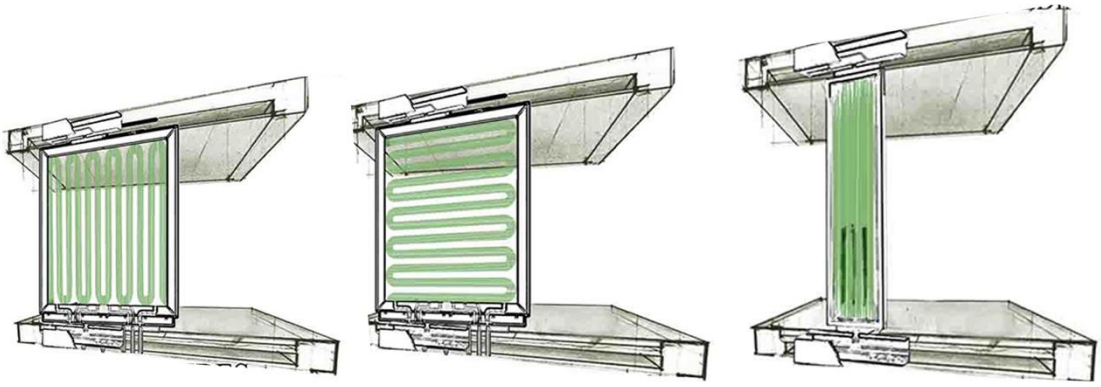
Şekil 3. 29 Fotobiyoreaktör Sisteminin Cephe Elemanı Olarak Tüm Şehre Entegrasyonu (Pekmezci, 2015)

Proje kapsamında, fotobiyoreaktör sistemlerinin şehirdeki mevcut yüksek katlı binalara entegre edilmesi, ilk kez inşa edilen yapılarda değerlendirilebilmesi, şehrin morfolojik düzenine göre sistemin entegre edilmesi mümkün olmayan yapılarda ise yüksek yapılı binalardan elde edilecek biyokütleden elde edilen gübrenin çatı teraslarında kullanılması ve köprülere entegrasyonu ile araç trafiğinin yoğun bölgelerde taşıt egzoslarından çıkan karbonun değerlendirilmesi önerilmiştir(Şekil 3.30). Böylece bütüncül bir sistem önerisi geliştirilmiştir (Pekmezci, 2015).



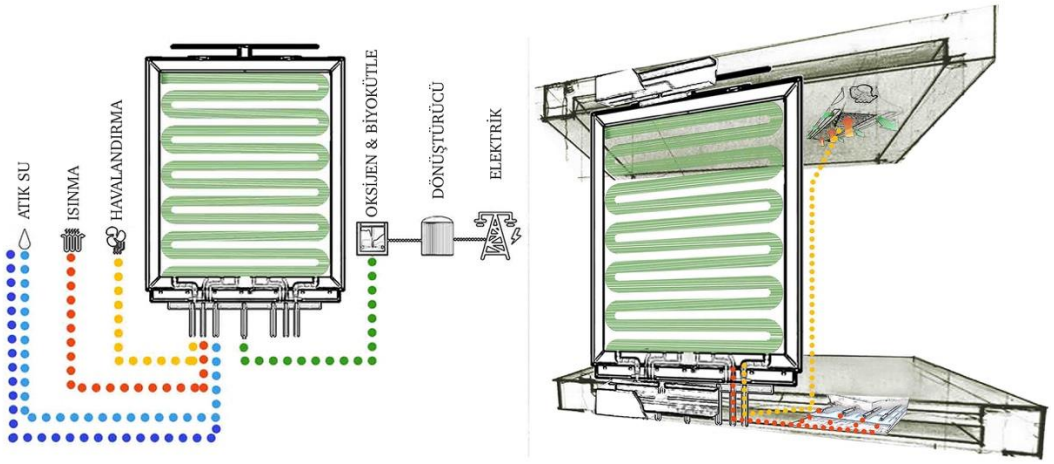
Şekil 3. 30 Bütüncül Sistemin Cephe Elemanından Farklı Olarak Şehre Entegrasyonu (Pekmezci, 2015)

Fotobiyoreaktör sistemleri bina ölçeğinde ikincil cephe elemanı olarak kullanılmışlardır. Şekil 3.31'de gösterildiği gibi, güneşin geliş açısına göre binanın doğu ve batı cephelerine yatay tübüler fotobiyoreaktörler, kuzey ve güney cephelerine ise dikey tübüler fotobiyoreaktörler önerilmiştir. Binanın plan düzenine göre şekillenen ve güneşten korunum ihtiyacının az olduğu kısımlara düz panel fotobiyoreaktörler önerilmiştir (Pekmezci, 2015).



Şekil 3. 31Yönlenime Göre Fotobiyoreaktör Kullanımı (Pekmezci, 2015)

Projenin tasarım senaryosuna göre; bina cephelerine entegre fotobiyoreaktörler içindeki mikroalgler güneş ışığını kullanarak CO_2'yi emer ve atmosfere O_2 verir. Fotobiyoreaktör sistemi ile elde edilen oksijen hem dış ortama verilirken bina havalandırma sistemlerine bağlanarak iç mekan hava kalitesini artırır. Kültür ortamında mikroalglerin büyümesi için gerekli besinler tuvaletin atık suyundan sağlanır. Mikroalg hücreleri çoğalarak zamanla panelleri doldurur. Yeteri kadar çoğaladıktan sonra sistemden santirfüjlü pompa sistemi ile hasat işlemlerinin gerçekleşmesi için binanın içerisinde yer alan bir teknik odada toplanır. Panel içerisindeki tüm mikroalg kültürü sistemden çekilmez. 1/10'luk kısım panel içerisinde bırakılır ve büyümeyi sürdürerek sürekli bir döngüyü devam ettirir. Mikroalglerden hasat işlemleri sonucunda biyokütle elde edilir. Elde edilen biyokütle aneorobik reaksiyonla biyogaza dönüştürülür ve bina için gerekli ısınma ve elektrik enerjisi sağlanmış olur. Fotobiyoreaktör sistemleri kullanılan suyun ısıtılması ve binalarda kullanılmasında görev alır (Şekil 3.32). Fazla su ihtiyaç halinde kullanılmak üzere jeotermal kuyulara aktarılır (Pekmezci, 2015).



Şekil 3. 32 Fotobiyoreaktör Panel Teknik Sistem Detayı (Pekmezci, 2015)

3.3 Eleman Düzeyinde Yaklaşımlar

Tekil ölçekte tasarlanan fotobiyoreaktör prototipleri mimari kullanımda; elektrik enerjisi sağlama, biyokütle üretme, havayı temizleme gibi özellikleriyle iç mekanlarda ya da sokaklarda aydınlatma elemanı olarak ve sergi enstalasyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Tekil ölçekte tasarlanan fotobiyoreaktör prototiplerinin mimaride kullanımı aşağıda belirtilen 3 adet projeyle incelenmiştir.

- Street Lamp, Pierre Calleja
- Living Things, Jacob Douenias +Ethan Frier
- Urban Algae Canopy, EcoLogicStudio

3.3.1 Street Lamp (Pierre Calleja)

2012 yılında Fransız biyokimyacı Pierre Calleja, CO_2 emisyonlarını azaltırken sokakları ve otoparkları aydınlatabilecek çevre dostu lamba tasarlamıştır (Şekil 3.33) (Rodriguez, 2013). Pierre Calleja mikroalglerin CO_2 ve ışığı kullanma özelliklerinden yola çıkarak mikroalgin ihtiyaç duyduğu 'ışığı paylaşma' fikrinden hareketle bu tasarımı ortaya koymuştur. Tasarlanan lamba tamamen elektriksiz çalışmakta ve mikroalglerin fotosentezi işlemiyle üretilen enerjiyi kullanmaktadır. Pierre, TED Konuşmasında, tek bir lambanın, düşük ışıklı alanları aydınlatırken, bir yılda havadan en az bir ton karbon emme yeteneğine sahip olduğunu açıklamıştır (Calleja, 2013). Lamba, daha sonra kullanılmak üzere fotosentez sonucu ürettiği enerjiyi depolayabilecek şekilde tasarlanmıştır (Rodriguez, 2013).



Şekil 3. 33 Pierre Calleja Tarafından Tasarlanan Street Lamp Portatifi (Rodriguez, 2013)

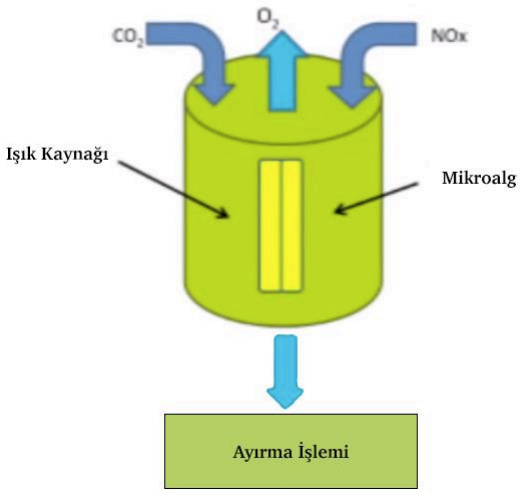
Street Lamp, mikroalglerden enerji elde etmek için kullanılan fotobiyoreaktörlerin çalışma mekanizmasına çok benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Tasarımcı fotobiyoreaktör prototipini enerji üretimi amacıyla değil aydınlatma elemanı olarak kullanmayı önermektedir. Tasarım detaylı incelendiğinde dikey kolon fotobiyoreaktörlerden esinlenildiği anlaşılmaktadır (Şekil 3.34).



Şekil 3. 34 Dikey Kolon Fotobiyoreaktör Tipi Aydınlatma Elemanı Prototipi (Calleja, 2013)

Tasarımın yalnızca elektrik kullanmadan mikroalglerden aydınlatma sağlamasının amaçlandığı belirtilmesine (Calleja, 2013) rağmen, mikroalglerin yapısal özelliklerinin bir getirisi olarak kültür ortamındaki sudan ayrıldığında biyoyakıt olarak kullanılabileceği durumu bu tasarım için de geçerli olduğu ifade edilmiştir. Mikroalg büyümesi sonucunda lambadaki kültür ortamına ait suyun her değiştirilmesi gerektiğinde, atık algler hala yakıt olarak kullanılabilir ve su geri dönüştürülebilir ve başka amaçlar için kullanılabilirler (Walker, 2013).

Lambanın iç kısımdaki sıvı alglerle doludur. Dikey kolon panelin içerisinde CO_2 havadaki CO_2'yi emen ve bir karbon tutma borusuna sahiptir. Biyokütle, biyoyakıtta işlenecek son üründür. (Şekil 3.35) (Calleja, 2013).



Şekil 3. 35 Sistemin Çalışma Prensibi (Calleja, 2013)

Calleja'nın lambası, akü sisteminin yanı sıra mikroalg doldurulmuş fotobiyoreaktör sistemine benzer su içeren bir tüpten oluşur. Lamba, gün içerisinde güneş ve besin maddeleri kullanarak fotosentez yoluyla şarj edilebilir. Lamba, düşük ışıklı alanlara taşındığında, herhangi bir harici güç kaynağına ihtiyaç duymadan aydınlık sağlayabilir (Şekil 3.36) (Rodriguez, 2013).



Şekil 3. 36 Güneş Işığını Depolayan Lambanın Daha Sonra Harici Bir Güç Kaynağına İhtiyaç Duymadan Aydınlatma Sağlaması (Rodriguez, 2013)

Calleja, havada bulunan CO_2 miktarının yaklaşık %25'inin araba egzozundan üretildiğini düşünmektedir, bu nedenle cihazları yol kenarındaki aydınlatma olarak kullanmak, her bir birim yılda bir ton emisyonu emerek aynı anda iki sosyal sorunu

çözmeye yardımcı olacağını belirtmiştir (Şekil 3.37) (Calleja, 2013).



Şekil 3. 37 Egzos Gazından Yayılan CO2'nin Mikroalg Lambalarında Kullanılması (Calleja, 2013)

Algler karbondan da enerji üretebildiğinden, lambanın çalışması için güneş ışığı gerekli değildir. Lambalar, yeraltı otoparkları gibi daha az doğal ışığın olduğu yerler için bile elektriksiz bir aydınlatma çözümü sunacağı iddaa edilmiştir. Güneş ışığından yoksun ortamda sadece karbon kullanarak enerji üretebilme iddaası ile otoparklarda da kullanılması ile araçların egzoslarından çıkan karbonu emerek çalışabileceği önerilmiştir (Şekil 3.38) (Rodriguez, 2013).



Şekil 3. 38 Otoparklarda Araçların Dışarıya Vermiş Olduğu CO2'yi Kullanarak Aydınlatma Sağlayan ve O2 Üreten Alg Lambaları (Calleja, 2013)

1 kg mikroalg üretimi sonucunda lamba havadan 2 kg CO_2 yakalar. 1.5 m^3 haciminde tek bir lamba, sadece bir yılda havadan yaklaşık bir ton karbon emebilir. Bu oran 150

veya 200 ağacın yaptığı karbon emilim miktarına eşdeğerdir. ABD verilerine göre, yılda ortalama 21.000 mil hızla giden süren ve yılda 12.000 mil yol kat eden tipik bir ABD arabası, yılda yaklaşık 5 ton karbondioksit yayar. Her araç sahibi bu sokak lambalarından beşinin çalışmasını sağlayabilecek potansiyelde karbon salınımı yapar. Sadece prototif olarak tasarlanan ve denenen bu lambalar seri üretime girebilirlerse iklim değişikliği ile mücadelede ve hava kirliliğini azaltmada uzun bir yol kat edebilirler (Rodriguez, 2013).

Street Lamp şık bir görünüme sahiptir ve kullanılacak olan mikroalg çeşidine göre farklı renklerde, tercih edilen fotobiyoreaktör tipine göre farklı geomertilerde olabilirler. Lambaların maliyeti ve uygulanabilirliği ile ilgili sorular olduğu düşünülmektedir (Walker, 2013). Mikroalgler kullanılarak havanın temizlenmesi, biyogaz ve biyodizel üretimi yaygınlaşmakta ve fotobiyoreaktör sistemleriyle ilgili gelişmeler sürekli artmaktadır. Fakat günümüze kadar yakın zamanda araştırmacılar mikroalglerden çok küçük miktarda elektrik üretebilmişlerdir. Elektrik üretimi için daha fazla çalışma yapılması gerektiği düşünülmektedir. Çünkü yapılan çalışmalar incelendiğinde mikroalglerden elde edilen enerji miktarı o kadar küçük miktarlardadır ki basit bir AA piline depolanan enerji miktarını yakalayabilmek için bir saat boyunca fotosentezlenen trilyon hücrelere ihtiyaç duyulacağı düşünülmektedir (Williams, 2013).

Çalışma ile ilgili tartışılmayan şey, böyle bir ışığın ne kadar bakım gerektirdiğidir. Mikroalglerin kültür ortamından ayrıldıktan sonra biyoyakıt olarak da işlev görebilir olması, sık sık kültür ortamının değişimine ihtiyaç duyulmasına ramen, atık algler suyun geri kazanılabildiği yerde başka bir yakıt türü oluşturabilir. İddaa edildiği gibi dünyanın fazla karbondioksidini çok fazla absorbe edip edemedikleri hususu yaygın kullanımı sonucunda deneyimlenebilecektir.

3.3.2 Urban Algae Canopy (ecoLogic Studio)

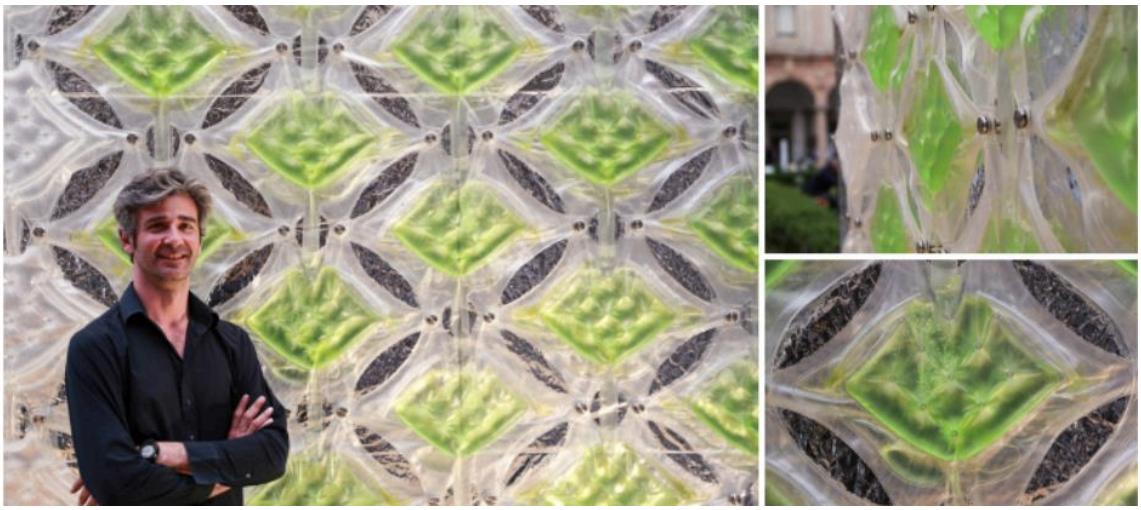
2015 yılında Milano Expo alanının meydanında sergilenen tasarım, mikroalgler kullanılarak tasarlanan fotobiyoreaktör sistemlerinin mimariye entegrasyonu ile ilgili uygulanabilmiş sayılı örneklerden biridir. ‘ecoLogicStudio’ tasarım ofisi ve mimar Cesare Griffa tarafından ortaklaşa tasarlanan proje, mikroalg tentesi ve cephe prototipi olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır (ecoLogicStudio, 2014b). Mikroalglerin enerji üretim potansiyelinden yola çıkılarak tasarlanan proje, tarımsal ve endüstriyel alanda

kullanılan fotobiyoreaktör sistemlerini mimari estetikle birleştirmeyi başarmıştır. Bireysel enstalasyon ile iki farklı proje, çevre bilinci ve çalışma sistemleri bağlamında aynı noktada buluşmuştur (Şekil 3.39).



Şekil 3. 39 Alg Tentesi Ve Alg Cephesi Prototipleri (Griffa, 2015, (Griffa, 2014)

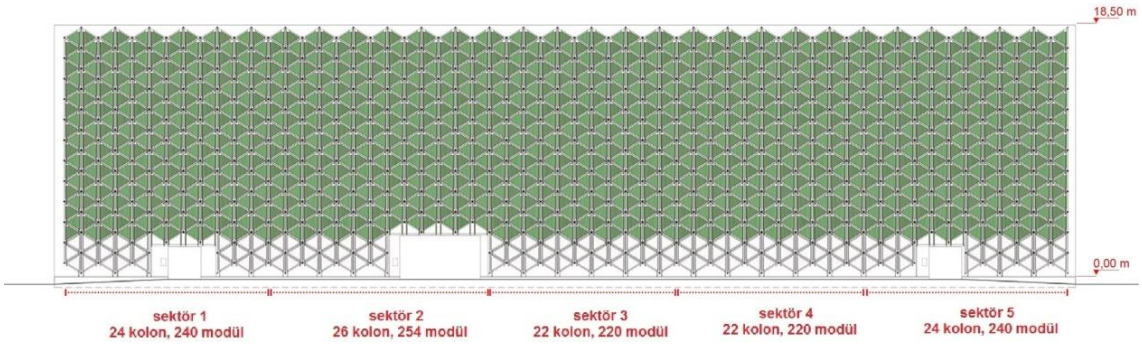
İlk örnek olan alg cephesi prototipi, bina cephelerinde mikroalglerin karbon emisyonu yaparak oksijen üretmesini sağlayan, ikincil cephe elemanı olarak yapı kabuğu görevi gören ve güneş kontrolü ile pasif iklimlendirmeye yardımcı olan fotobiyoreaktör cephedir. Mimar Cesare Griffa'nın uygulanamayan ''WaterLiilly 2.0'' isimli tasarımını (Griffa, 2014) referans alan cephe prototipi mikroalglerin yapılarda kullanılarak dikey tarım fikrinden bir parça kesit sunar (Şekil 3.40) (Griffa, 2015).



Şekil 3. 40 Waterlilly 2.0 Cephe Tasarım Sistemi (Griffa, 2015)

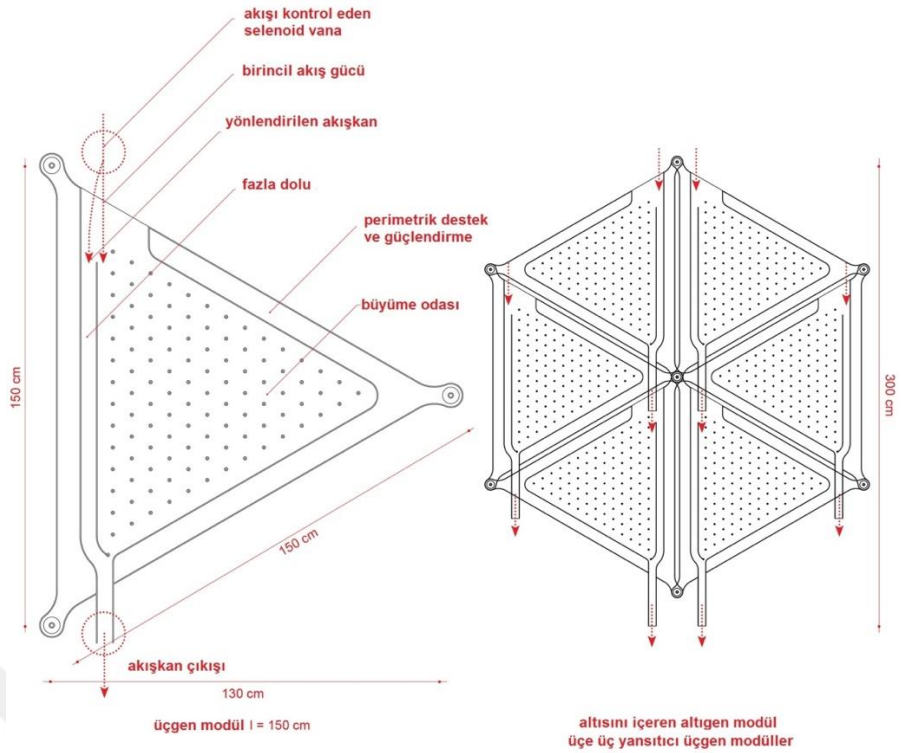
Griffa'nın uygulanamayan projesinde, modüler 1174 mikroalg birimi 118 sıra olacak şekilde 1348 yüzey alanına sahip polietilen membran malzemeden oluşturulan fotobiyoreaktör sistemini amaçlanmıştır (Şekil 3.41). Mikroalglerin içinde büyüdüğü

kültür ortamlarını ifade eden membran sisteme ek olarak, mikroalg kültür ortamına gerekli besin, CO_2, su iletimi ve sistemi karıştıracak donanımı da içine alan 2554 m^2 kaplama birimi tasarlanmıştır (Griffa, 2015).



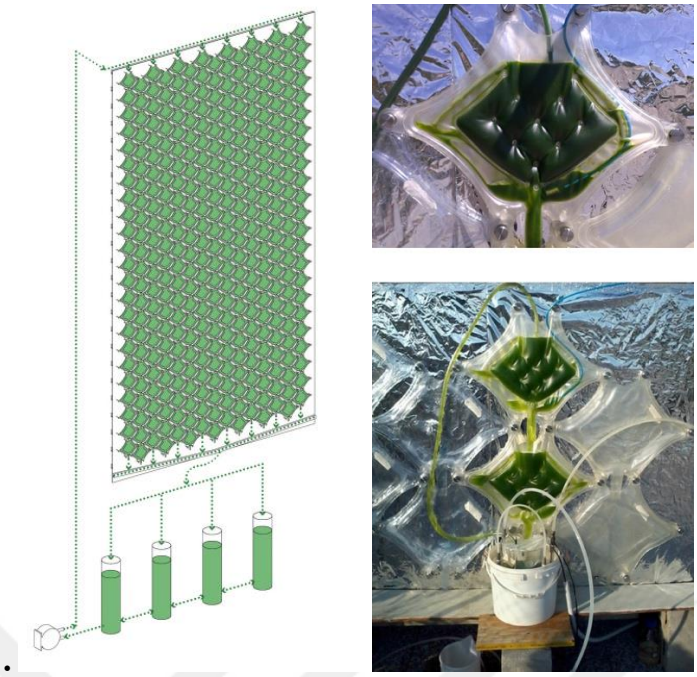
Şekil 3. 41 Polietilen Membran Fotobiyoreaktör Sistem Modülü (Griffa, 2014)

Membran sistem modüler altıgen odacıklardan oluşmaktadır. Her bir odacık 10-15 litre mikroalg kültürü ile dolmaktadır. Mikroalg kültürü modüler odacıkların üst kısmından sisteme eklenmekte ve aşağıya doğru cephe kanalı boyunca eşit oranda yayılmaktadır. Sistem yatayda ve dikeyde birbirine bağlı ve geçişli bir yapıdadır. Geçişli yapıyla her bir odacıkta meydana gelebilecek taşmaları engelleyecek yan kanallar oluşturularak mikroalg kültürünün şeffaf membran boyunca dengeli şekilde yerleşimi sağlamak amaçlanmıştır. Mikroalg kültürü için gerekli olan hava iletimi ve karıştırma işlemleri sistemin kenar kısımlarından yapılmaktadır (Şekil 3.42) (ecoLogicStudio, 2014b). Sistemin bütüncül işlemi düşünüldüğünde, mikroalg büyümesinden sonra alglerin hasat işlemleri sonucu biyokütle ve ısınma enerjisi sağlanması için gerekli sistemlerin ihtiyaç duyduğu pompalama, depolama ve monitörleme mekanizmalarının binanın bodrum katında bir teknik odada çözülmesi önerilmiştir (Griffa, 2015).



Şekil 3. 42 Altıgen Geometrili Modüler Mikroalg Büyüme Birimleri (Griffa, 2014)

Teknik oda içerisinde bulunan monitör sistemi ile bütüncül sistemin tüm hidrolik ve mekanik sistemleri kontrol edilmektedir. Böylece, fotobiyoreaktör sisteminde meydana gelebilecek herhangi bir teknik aksaklık hızlı müdahale ile önlenebilecektir. Fotobiyoreaktör cephede üretilen mikroalg kültürü hasat ve enerji üretim işlemleri gerçekleştirilmek üzere bodrum katta bulunan teknik oda içerisindeki monitörleme sistemine bağlı kontrol edilebilen, her biri 4.000 litre kapasitesinde beş toplama tankına aktarılacaktır. (Şekil 3.43.a). Toplama kampları mikroalg kültürünü tüm cephe boyunca hasat işlemi için kendine doğru çekme ve mikroalg kültürünün tüm sisteme dağılmasını sağlayan itme kuvvetine sahiptir. Tüm mikroalg akışı akıllı sistem tarafından programlanabilmektedir. Monitörleme sistemi yardımı ile fotobiyoreaktör sistemi içerisindeki kültür ortamı uygun sıcaklık, pH değerlerinde tutulabilecektir. Çok sıcak yaz aylarında sistem içerisinde bulunan soğutma sistemi ile fotobiyoreaktör membran cepheler sulama sistemi serinletilip aynı zamanda temizlik sağlanacaktır. Kurulumundan önce laboratuvar ortamında deneylenen fotobiyoreaktör cephe sisteminin (Şekil 3.43.b) her bir modülü günde 0,8 gram mikroalg üretimine sahip olduğu görülmüştür. Boşluklu yapısından dolayı meydana gelebilecek buharlaşma günlük 100 ml olarak ölçülmüştür (Griffa, 2015).



(a) (b)

Şekil 3. 43 (a) Sistem Detayı, (b) Laboratuvar Deneyleri (Griffa, 2014)

ecoLogicStudio tarafından tasarlanan ikinci enstelasyon olan Alg Tentesi dünyadaki uygulanmış olan ilk fotobiyoreaktör tentedir. 27 adet fotobiyoreaktör içindeki mikroalg kültürü havadan aldığı CO_2'yi oksijene dönüştürerek atmosferi temizlemektedir. Enstalasyonun, 4 hektar ormanlık alan kadar O_2 üreteceği ve fotobiyoraktör sistemi içerisinde büyüyen mikroalglerin hasatı sonucunda gün boyu projein bakımından zengin (biyokütlenin 3/5'i) olan toplamda 150 kg biyoküte üreteceği tahmin edilmektedir (ecoLogicStudio, 2014a). Mikroalglerin tente uygulaması olarak mimariye entegrasyonu ile ilgili birçok konsept projeye imza atan ecoLogicStudio mimarlık ofisinin bu projelerini tasarlarken geliştirdikleri 'H.O.R.T.U.S' (Şekil 3.44) (ecoLogicStudio, 2019) sistemi ile geliştirilen fotobiyoreaktör tentenin her gün 3 yetişkin insanın ihtiyacı kadar oksijen ürettiği savunulmuştur. Yetiştirilen mikroalglerin hasatı sonunda elde edilen biyokütlenin sahip olduğu protein değerinin 2 kg kırmızı ete eşdeğer kabul edilebileceği ifade edilmiştir (photo.Synthetica, 2015).



Şekil 3. 44 3D Yazılım Tasarımı ve Biyotasarım İlkelerini Birleştiren H.O.R.T.U.S Sistemi (ecoLogicStudio, 2019)

3.3.3 Living Things / Algae Furnishings

Mimar Jacob Douenias ve Endüstriyel tasarımcı Ethan Frie tarafından mikroalgler kullanılarak tasarlanan fotobiyoreaktör sistemi Pennsylvania, Pittsburgh'daki Çağdaş Sanat Müzesi'nin bir uzantısı olan Yatak Fabrikası'nda 2015-2016 yılları arasında sergilenmiştir. Tasarımın hedefi fotosentetik algler aracılığıyla insanlar ve mikroorganizmalar arasındaki simbiyozu sağlayan mobilyalar yaratmaktır. Aydınlatma elemanları, içinde yaşayan alglere ısı, ışık, hava beslemesi, besin ve atık kontrolü sağlayan fotobiyoreaktörler olarak işlev görür. Tasarlanan fotobiyoreaktör sistemi, kullanıcıdan gelen ısı ve karbondioksiti kullanarak fotosentez ile oksijen ve biyokütle üretmektedir. Aynı zamanda bulunduğu ortama aydınlatma sağlamaktadır. (Douenias ve Frier, 2015). Dönüştürülmüş bir yatak fabrikasına yerleştirilen kurulum, bu mimari parçaların üç farklı mekanda günlük hayata nasıl entegre edilebileceğini göstermektedir (Şekil 3.45) (DiStasio, 2015). Oturma odası, yemek odası ve mutfak olmak üzere üç farklı mekan içerisinde 9 adet fotobiyoreaktör; lamba ve ısıtıcı olarak hizmet ederek kabaca aynı şeyi yapsa da, evde yerleştirildikleri mekanlara ve fonksiyonlarına gör farklı şekilde tasarlanmışlardır (Douenias ve Frier, 2015).



Şekil 3. 45 Üç Farklı Mekanda Dokuz Farklı Fotobiyoreaktör Tasarımı (Douenias ve Frier, 2015)

Mutfak alanında, her bir alg kabının bakımını sağlayan bir kontrol istasyonu inşa edilmiştir (Şekil 3.46). Oturma odasında, okumak için bir aydınlık sağlayan, iç ışıklarından yaydığı ısıyı yakınındaki insanlara yayan, daha büyük olan kaplar kullanılır. Yemek alanı içerisindeki fotobiyoreaktör kaplar bir şeyler atıştırmak için vakit geçirileceğinden yeterince küçük şekilde tasarlanmışlardır (Brownlee, 2015).

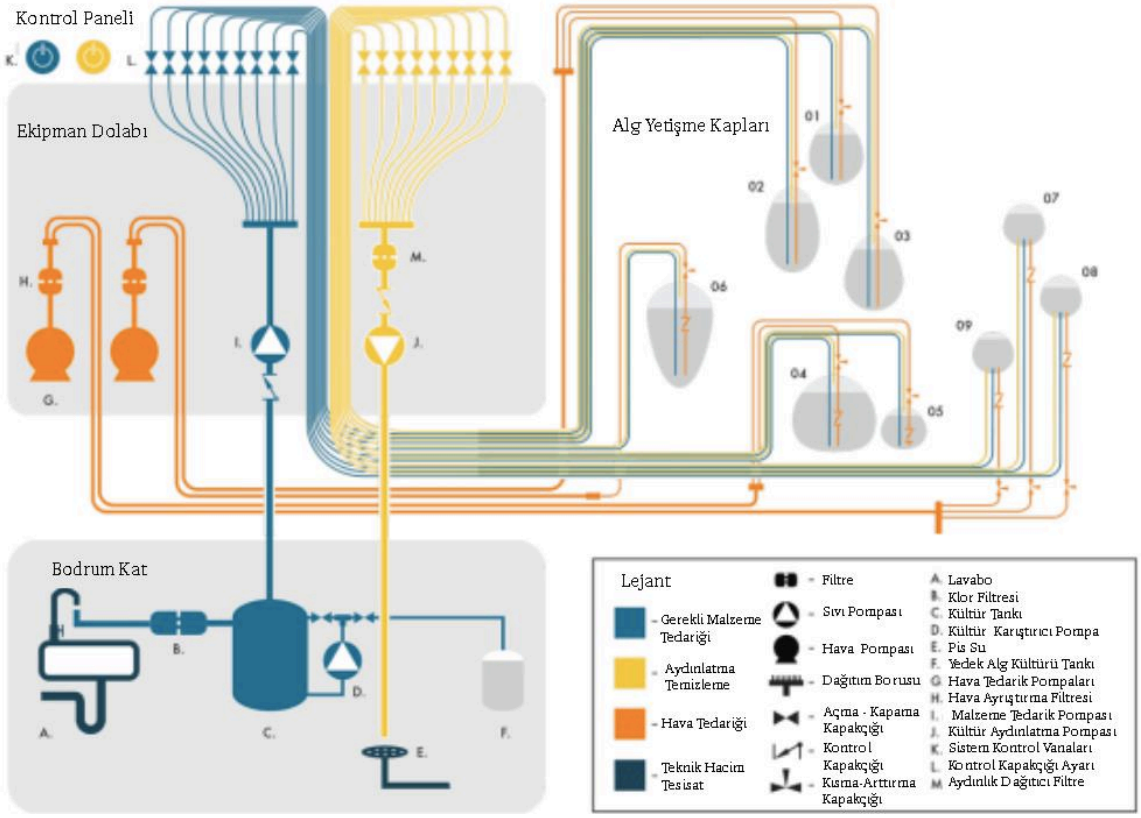


Şekil 3. 46 Fotobiyoreaktör Sistemi İçin Tasarlanan Kontrol İstasyonu (DiStasio, 2015)

Dokuz fotobiyoreaktörün de çalışma sistemleri her biri için ayrı ayrı ayarlanabilir. Sıvı ortamının beslenmesini sağlayan 18 adet 3B baskılı naylon düğmeler (Şekil X), her bir fotobiyoreaktörde kültür yeterince yoğunlaştığında Spirulina'nın toplanmasını sağlar. Aydınlatma elemanı olarak kullanılan mikroalglerin yetiştiği kaplarda ve bodrum katta

bulunan hasat işlemlerini gerçekleştiren mekanik sistemde pompalar, borular, manifoldlar, LED sürücüler, hava pompaları, ısıtıcı bağlantıları ve filtreler yer alır. Sistem yapının bodrum katına yaklaşık 1⁄2 mil kablolama ve tesisat yoluyla bağlanır (Douenias ve Frier, 2015).

Sistemin işleyişini ifade eden diyagram Şekil 3.47 ’de ifade edilmiştir.



Şekil 3. 47 Fotobiyoreaktör Sisteminin Çalışma Diyagramı (Brownlee, 2015)

Fotobiyoreaktörlerde çoğu bakterinin yaşayamayacağı mikroalg türü olan Spirulina, çok alkali sularda büyüme kabiliyeti nedeniyle kurulum için seçilmiştir. Çünkü tasarımda oksijen üretimi, aydınlatmanın yanında elde edilen biyokütleden besin eldesi amacı da güdülmektedir. Parlak yeşil mikro algler, zaten sağlık gıda mağazalarında satılan popüler bir besin takviyesidir ve genellikle bir süper gıda olarak lanse edilir. Ağırlığının yarısı kadarı proteinlerden oluşuyor ve bu da onu süper verimli bir besin kaynağı yapmaktadır (DiStasio, 2015). Filtre edildikten sonra algler, yapışkan bir macundan, ağırlıkça %60'ın üzerinde bir proteini olan ve çoğunlukla ince, yeşil bir toz şeklinde kurutularak gıda maddesi olarak kullanılabileceğinden hareketle kurulum süresince

düzenlenen özel etkinliklerde Spirulina'yı içeren içecekler ve yemekler yaratmak için barmenler ve şeflerle birlikte çalışmışlardır (Douenias ve Frier, 2015).

Tablo 3.1'de çalışma kapsamında bina ölçeğinde, kentsel ölçekte ve eleman düzeyinde seçilen 10 adet alg mimarisi örneği, değerlendirme kriteri olarak belirlenen kullanılan fotobiyoreaktör tipi, projenin bulunduğu lokasyon, tercih edilen işletme modeli başlıklarında incelenmiştir. Değerlendirme kriterleri doğrultusunda örnek projeler olumlu ve olumsuz özelliklerine göre sınıflandırılarak, mimariye entegre bir fotobiyoreaktör sistemi tasarlanırken dikkat edilmesi gerekenler ifade edilmiştir.

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri

Bina Cephelerine Entegre Fotobiyoreaktör Tasarımları		B.I.Q House - Hamburg, Almanya		
Açıklama	**Değerlendirme Kriterleri**	**Pozitif**	**Negatif**	
Düz Panel Fotobiyoreaktör	**Tercih Edilen Fotobiyoreaktör Tipi**	İkincil cephe elemanı olarak kullanılan fotobiyoreaktör panelleri gölgeleme kolaylığı sağlayarak kontrollü güneş ışığı sağlamıştır.	Cephe önlerine zeminden tavana kadar yerleştirilen düz panel fotobiyoreaktörler kullanıcı görüşünü paneller mikroalglerle dolduğunda tamamen kapatmaktadır.	
		Çift cidarlı cephe gibi çalışan paneller tüm binaya ısı ve ses yalıtımı sağlamaktadır.	İkincil cephe elemanı olarak kullanılan fotobiyoreaktör panelleri ağırlıklarından dolayı mevcut taşıyıcı sisteme ek taşıma yükü getirmiştir.	
		Proje tasarım aşamasında tübüler ve düz panel fotobiyoreaktör tipleri denenmiştir. Düz panel fotobiyoreaktörler tübüler fotobiyoreaktörlere oranla daha fazla verimlilik sağlamıştır.	Panellerde temizlik için kullanılan su akışının yetersiz olduğu köşelerde veya bölgelerde aşırı miktarda yosun birikiminin olabileceği durumu temizlik konusunda problemler yaratabilmektedir. Temizlik için sulama sistemi olmasına rağmen panel köşelerindeki kütle birikiminin temizliği mekanik sistemle değil en iyi elle yapılabilmektedir.	
		Düz panel fotobiyoreaktörler, türübler fotobiyoreaktörlere göre daha az bakım-onarım gerektirmiş ve kullanım kolaylığı sağlamıştır.	Fotobiyoreaktör sistemlerinin çalışma periyodu boyuna kirlenme ve sızıntılarla ilgili teknolojik endişeler vardır. Olası sızıntılar ve teknik arızalar insan ve çevre sağlığı için problem oluşturabilmektedir. Herhangi bir hasar veya sızıntı da kokulara neden olabilir.	
53.5° Kuzey Hamburg Almanya	**Seçilen Lokasyon**	Bölgenin çok fazla sıcak bir bölge olmamasının bir getirisi olarak mikroalglerin yetişmesi için gerekli olan sıcaklık değerlerinin Kışın 5° altına düşmesi, yazın 40° üstüne çıkması engellenebilmiştir.	Çok sıcak günlerde güneş ışığının etkisi kontrol altına alınamadığında aşırı ısınmadan dolayı mikroalg kültüründe bozunma tespit edilmiştir.	
		Bina her yıl CO2 salımını 6 ton azaltmaktadır ve 2,5 ton CO2 mikroalgler tarafından absorbe edilmektedir. Fotosentez yapan bina atmosfere O2 salınımı yaparak havayı temizlemektedir.	Almanya'daki hava şartları dikkate alındığında güneşli olmayan gün sayısının fazlalığı ve yoğun yağış sebebi ile güneş ışığının %10 verimle biyoenerjiye, %38 verimle ısıya dönüştürüldüğü saptanmıştır.Bu durum tamamen sürdürülebilir bir yapı tasarım kriterleri için yeterli değildir.	
Biyogaz Eldesi ile Isınma Enerjisi Sağlanması & Fotobiyoreaktör Sisteminden ve Geotermal Kuyulardan Sıcak Su Sağlaması	**Tercih Edilen İşletme Modeli**	Fotobiyoreaktör sisteminin sağlamış olduğu ısınma özelliği sayesinde fazla ısı direkt olarak sıcak su tedariği için kullanılmaktadır. Yapı içerisinde bulunan tüm dairelere sıcak su tedariği sağlanabilmektedir.	Orijinal plan, çatı yüzeyinde fotovoltaik panellerin kullanılmasını öngörmesine ramen bu uygulanamamıştır. Bina için gerekli tüm elektrik şebekeden çekilmektedir. Mevcut 15 daireden yalnızca bir tanesi sistem içerisinde üretilen elektrik ile beslenebilmiştir.	
		Gerekli durumlarda kullanılabilmek adına depolanan aşırı ısı ayrıca jeotermal kuyularla zeminde depolanmaktadır.	Enerji üretiminin gerçekleştiği biyogaz üretim işlemi binanın içerisinde uygulanamamış olup dışarıda başka bir alanda yapılabilmektedir. Bu durumdan doğan taşıma maliyetleri ekonomik değildir.	
		Bütüncül fotobiyoreaktör sisteminin çalışması otomatik olarak gerçekleştirilir. (besin tedariki dahil), böylece bakım maliyetleri ve önemli bir sorun olduğunda hızlıca müdahale edilebilir.	4 katlı bir yapının plan şeması incelendiğinde norma kat planının 1/4 ölçeğinde depolama ve mekanik sistem için gerekli makinelerin ve borulama sistemlerinin olduğu teknik odaya ihtiyaç duyulmuştur. Bu durum diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile kıyaslandığında fonksiyonellik açısından mimari tasarım disiplininde önemli bir problem oluşturmaktadır.	
		Mikroalglerin büyümesi için gerekli besinler ve su ihtiyacı tuvaletin atık suyunun kullanılarak değerlendirilmesine imkan sağlamıştır.	Tekil bina ölçeğinde gerçekleştirilen uygulama, mevcut bölgenin bütüncül altyapısına entegre edilemediğinden bireysel çalışmak durumundadır. Bu durum ekstra ekonomik zorluk ve teknik donanım yetersizliğini beraberinde getirmiştir. Bütüncül sistemin çalışması ilk kurulum ve işletim açısından diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre maliyetlidir.	

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri (Devamı)

Bina Cephelerine Entegre Fotobiyoreaktör Tasarımları		Algae Textile: Binalar İçin Hafif Fotobiyoreaktör	
Açıklama	**Değerlendirme Kriterleri**	**Pozitif**	**Negatif**
Membran Tipi Fotobiyoreaktör	**Tercih Edilen Fotobiyoreaktör Tipi**	Fotobiyoreaktörün tasarıma göre dikilip farklılaşabilmesi, geometrik bir esneklik sunmaktadır. Bu sayede istenilen geometride tasarımlarla kullanıcı görüşü kısıtlama problemi ortadan kaldırılabilmektedir. Fotobiyoreaktörün tasarıma göre şekillenebilen gözenekli yapısı güneş ışığı kırıcı özelliği göstermektedir.	Mikroalglerin fotobiyoreaktör ortamında hareketi kısıtlıdır. Bu nedenle panel ve boru şeklindeki endüstriyel fotobiyoreaktör çeşitlerinde gözlenen geniş hareket hacmi burada yakalanamamıştır. Bu nedenle mikroalg büyümesi için gerekli olan hareketlilik sınırlıdır. Bu nedenle kültür ortamının bozunması ve mikroalg hücrelerinin ölmesi durumu söz konusu olabilir.
		Kullanılan membran malzemenin hafif ve esnek yapısı diğer fotobiyoreaktör tiplerinden farklı olarak taşıyıcı sisteme ihmal edilebilir taşıma yükü yüklemektedir.	Endüstriyel fotobiyoreaktör tiplerine kıyasla tasarım bağlamında daha estetik olmasına rağmen , çalışma performansı olarak daha düşük verimlilikte biyokütle üretmektedir.
		Algae Textile, parçaları fabrikalarda hazırlanıp daha sonra uygulama alanında birleştirilerek kurulup dökülebilen bir sisteme, küçük parçalara, küçük ölçekli destek sistemlerine sahiptir ve daha az iş yükü ile inşaa edilebilmektedir.	Geometrisi dışında, geleneksel fotobiyoreaktör sistemlerine benzer özellikte çalışma prensibine sahip olan sistem ince ve boşluklu yapısı ile yüzeysel olarak girinti çıkıntılıdır. Kütle transferi sırasında fotobiyoreaktör sisteminin daraldığı bölgelerde yosun birikmeleri oluşabileceğinden temizlik açısından zorluklar oluşturabilmektedir.
Belirtilmemiş	**Seçilen Lokasyon**	Önerilen tasarım için herhangi bir lokasyon ifade edilmemiş olup, kentsel ölçekte tüm binalara uygulanabilirliği ifade edilmiştir.	Önerilen tasarım için herhangi bir bölge ifade edilmemiş olup ihtiyaç duyulan her bölgeye uygulanabileceği ifade edilmiştir. Fakat polietilen yapısından dolayı hava şartlarının ağır olduğu iklim bölgelerinde fotobiyoreaktörün dış cephede kullanımı yırtılma gibi hasarlara sebep olabilir. Tasarımda bu ihmal edilmiştir.
Atık Suyun Geri Dönüşümü & Biyokütle Üretimi	**Tercih Edilen İşletme Modeli**	Sadece yeni binalara değil, mevcut kentsel bina sistemlerine entegre edilebileceği ifade edilmiştir.	Önerilen tasarımda mikroalglerin yetiştirilmesinden sonra gerçekleşecek olan hasat işlemleri ve biyokütle eldesi yapı içerisinde bulunan teknik odalarda çözüleceği ifade edilmiştir. Bu durumda mevcut yapılara entegrasyonda eklenmesi gereken ekstra teknik hacimler yapı fonksiyonelik açısından gerçekleşmeyebilir.
		Tasarım bağlamında herhangi bir işletme modeli önerilmemiştir. Proje önerisinde seçilecek projeni ölçeğine göre verilerin ve ihtiyaçların değişeceği ifade edilmiştir. Mikroalglerin potansiyel avantajları olan atık suyun geri dönüştürülmesi, CO_2 emisyonu sonucu O_2 üretimi ve mikroalglerden biyokütle eldesi ile biyokütleden elde edilen tüm ürünlerin ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılabileceği gibi genel ve ucu açık söylemler vardır.	Öneri projedeki söylemler doğrultusunda, sistemin mimariye entegrasyonu düşünüldüğünde mevcut kentsel altyapıya ve yapıların mekanik altyapısına entegrasyonu konularına dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmış fakat bu durumla ilgili herhangi bir çözüm önerisi geliştirilememiştir.

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri (Devamı)

Bina Cephelerine Entegre Fotobiyoreaktör Tasarımları		Process Zero Concept Building, Los Angeles, California, USA	
Açıklama	**Değerlendirme Kriterleri**	**Pozitif**	**Negatif**
Tübüler Fotobiyoreaktör	**Tercih Edilen Fotobiyoreaktör Tipi**	Binanın cephesinde, %25, %60 ve %80 oranında açıklık içeren tübüler fotobiyoreaktörler kullanılmıştır. Böylece fotobiyoreaktörler güneş kırıcı olarak değerlendirilmişlerdir ve düz panel fotobiyoreaktörler gibi kullanıcı görüş açısını kısıtlamamışlardır.	Binanın cephesinde 2.322,5 m^2 alan kaplayan ikincil cephe elemanı olarak kullanılan fotobiyoreaktör panelleri ağırlıklarından dolayı mevcut taşıyıcı sisteme ek taşıma yükü getirmiştir.
		Çift cidarlı cephe gibi çalışan paneller tüm binaya ısı ve ses yalıtımı sağlamaktadır.	Fotobiyoreaktör sistemlerinin çalışma periyodu boyuna kirlenme ve sızıntılarla ilgili teknolojik endişeler vardır. Olası sızıntılar ve teknik arızalar insan ve çevre sağlığı için problem oluşturabilmektedir. Herhangi bir hasar veya sızıntı da kokulara neden olabilir. Tübüler fotobiyoreaktörler düz panel fotobiyoreaktörlerle kıyaslandıklarında sızıntı ihtimalinin daha yüksek olduğu bilinmektedir.
		Fotobiyoreaktör sistemi yenilenen ofis binasının enerji ihtiyacının %9'unu sağlamaktadır. Fotovoltaik paneller ile birleşen mikroalg fotobiyoreaktör sistemi ile binanın genel enerji talebi %84 azaltılmıştır.	Tübüler fotobiyoreaktörler kıvrımlı yapısından dolayı düz panel fotobiyoreaktörlere oranla temizlik açısından handikaplıdır. Kıvrımlı köşelerde veya tüplerin dar olduğu bölgelerde aşırı miktarda yosun birikiminin olabileceği durumu temizlik konusunda problemler yaratabilmektedir. Temizlik için sulama sistemi olmasına rağmen panel köşelerindeki kütle birikiminin temizliği mekanik sistemle değil en iyi elle yapılabilmektedir.
34° Kuzey Los Angeles, California USA	**Seçilen Lokasyon**	Proje önerisi mevcutta var olan bir yapının yenilenmesi olarak düşünülmüştür. Mevcut durumda güneş ışığını kullanamayan yapıya güneş tüpleri yerleştirilerek tüm birimlerin güneş ışığı alması sağlanmıştır. Proje alanının bulunduğu koordinasyonlar mikroalgler fotobiyoreaktör sistemleri için çalışma alanı olarak belirlenen 37° Kuzey - Güney enlemleri arasında yer almaktadır. İklim şartlarından en iyi şekilde yararlanabileceği planlanmaktadır.	Çok sıcak günlerde güneş ışığının etkisi kontrol altına alınamadığında aşırı ısınmadan dolayı mikroalg kültüründe bozunma gerçekleşebilir. Düz panel fotobiyoreaktörlere oranla daha az verimlilik gösteren sistemin bakım ve onarım sorunları da daha fazla olacağı düşünülmektedir.
Fotovoltaik Paneller ile Isınma Enerjisi Sağlanması & Fotobiyoreaktör Sisteminden ve Geotermal Kuyulardan Sıcak Su Sağlaması & Biyokütle Üretimi	**Tercih Edilen İşletme Modeli**	Mikroalglerin büyümesi için gerekli besinler ve su ihtiyacı tuvaletin atık suyunun kullanılarak değerlendirilmesine imkan sağlamıştır.	Fotobiyoreaktör sistemi, mevcut yapıya entegre sistem olarak tasarlanmıştır. Fakat proje sunumlarında jeotermal sondaj kuyusu, mikroalglerden elektrik enerjisi eldesi, tuvaletin atık suyunun kullanılması gibi mevcut şebekeden bağımsız diyagramlar görülmektedir. Bu durum öneri proje için anlamlı gözükse de uygulanabilirlik açısından tartışmalı durumdadır. Çünkü mevcut yapıya entegre bir tasarım önerilirken mevcut altyapıya entegrasyon ihmal edilmiştir.
		Gerekli durumlarda kullanılabilmek adına depolanan aşırı ısı ayrıca jeotermal kuyularla zeminde depolanmakadır.	Tekil bina ölçeğinde gerçekleştirilen uygulama, mevcut bölgenin bütüncül altyapısına entegre edilemediğinden bireysel çalışmak durumundadır. Bu durum ekstra ekonomik zorluk ve teknik donanım yetersizliğini beraberinde getirmiştir. Bütüncül sistemin çalışması ilk kurulum ve işletim açısından diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre maliyetlidir.
		Bina çatısına yerleştirilen fotovoltaik paneller direkt olarak sıcak su tedariği için kullanılmaktadır. Yapı içerisinde bulunan tüm dairelere sıcak su tedariği sağlanabildiği ifade edilmiştir. Yapının ısınma prensibi ile ilgili detaylı bir bilgi yokken, diyagramlar elektrik eldesinin fotobiyoreaktör sisteminden sağlandığını göstermektedir. Fakat operasyonel sistemin ne şekilde ve yapının neresinde olduğu ifade edilmemiştir.	Önerilen tasarımda mikroalglerin yetiştirilmesinden sonra gerçekleşecek olan hasat işlemleri ve biyokütle eldesi yapı içerisinde bulunan teknik odalarda çözüleceği ifade edilmiştir. Bu durumda mevcut yapılara entegrasyonda eklenmesi gereken ekstra teknik hacimler yapı fonksiyonelik açısından gerçekleşmeyebilir.

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri (Devamı)

Bina Cephelerine Entegre Fotobiyoreaktör Tasarımları		Dublin Kalesi Photo. Synth. Etica	
Açıklama	Değerlendirme Kriterleri	Pozitif	Negatif
Plastik Torba Fotobiyoreaktör	Tercih Edilen Fotobiyoreaktör Tipi	Kullanılan membran malzemenin hafif ve esnek yapısı diğer fotobiyoreaktör tiplerinden farklı olarak taşıyıcı sisteme ihmal edilebilir taşıma yükü yüklemektedir.	Mikroalglerin fotobiyoreaktör ortamında hareketi kısıtlıdır. Bu nedenle panel ve boru şeklindeki endüstriyel fotobiyoreaktör çeşitlerinde gözlenen geniş hareket hacmi burada yakalanamamıştır. Bu nedenle mikroalg büyümesi için gerekli olan hareketlilik sınırlıdır. Bu nedenle kültür ortamının bozunması ve mikroalg hücrelerinin ölmesi durumu söz konusu olabilir.
		Fotobiyoreaktör sistemi, kompleks olmayan hafif yapısı ve montaj kolaylığı ile ve daha az iş yükü ile inşaa edilebilmektedir. Tasarımın şeffaf ve boşluklu yapısı ile kullanıcı görüşü kısıtlama problemi ortadan kaldırılabilmektedir. Fotobyoreaktörün tasarıma göre şekillenebilen parçalı yapısı güneş ışığı kırıcı özelliği göstermektedir.	Geometrisi dışında, geleneksel fotobiyoreaktör sistemlerine benzer özellikte çalışma prensibine sahip olan sistem ince ve boşluklu yapısı ile yüzeysel olarak girinti çıkıntılıdır. Kütle transferi sırasında fotobiyoreaktör sisteminin daraldığı bölgelerde yosun birikmeleri oluşabileceğinden temizlik açısından zorluklar oluşturabilmektedir.
53° Kuzey Dublin İrlanda	Seçilen Lokasyon	Bölgenin çok fazla sıcak bir bölge olmamasının bir getirisi olarak mikroalglerin yetişmesi için gerekli olan sıcaklık değerlerinin Kışın 5° altına düşmesi, yazın 40° üstüne çıkması engellenebilmiştir. Geometrik formu ile güneş ışığını verimli şekilde kullanabilir.	Önerilen tasarım için herhangi bir bölge ifade edilmemiş olup ihtiyaç duyulan her bölgeye uygulanabileceği ifade edilmiştir. Rakat polietilen yapısından dolayı hava şartlarının ağır olduğu iklim bölgelerinde fotobiyoreaktörün dış cephede kullanımı yırtılma gibi hasarlara sebep olabilir. Tasarımda bu ihmal edilmiştir.
Fotosentez & Küçük Ölçekte Biyokütle	Tercih Edilen İşletme Modeli	Bina cephesine yerleştirilen fotobiyoreaktör uygulamalarından gerçekleştirilebilen ender uygulama günde havadan 2.2 kilo karbondioksit absorbe etmiştir ve bu durum 20 ağacın yapabileceği karbon tutumuna denktir. 16 fotobiyopraktör modülünden oluşan tesis, geçen karbon dioksit moleküllerini yakalayan mikroorganizmaları yetiştirmek için gün ışığını kullanarak atmosfere O2 temin etmiş ve havayı temizlemiştir.	Endüstriyel fotobiyoreaktör tiplerine kıyasla tasarım bağlamında daha estetik bir yapısı olmasına rağmen fotobiyoreaktörlerin kompleks çalışma prensibi bu projede değerlendirilmemiştir. Fotobiyoreaktör sisteminden elde edilebilecek olan biyokütle enerjisi, binanın ısınma ve elektrik enerjisi gibi kavramlar ihmal edilmiştir. Sadece yaşayan bir bitki özelliğinde havayı temizleme misyonu yüklenmiştir. Panellerde büyüyen mikroalgler basit yöntemlerle toplanır ve biyokütle elde edilir.

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri (Devamı)

Bütüncül Ketsel Fotobiyoreaktör Tasarımları		Culture Urbaine, Geneva,Switzerland	
Açıklama	**Değerlendirme Kriterleri**	**Pozitif**	**Negatif**
Tübüler Fotobiyoreaktör	**Tercih Edilen Fotobiyoreaktör Tipi**	Düz panel ve dikey kolon fotobiyoreaktörlerin sahip olduğu geniş cam yüzeyleri otoyoldan saçılan taşların verebileceği zararlardan kolay etkilenip hasar görebilirlerdi. Bu nedenle daha küçük yüzey hacmine ve birbirlerine göre konumlarına göre korunaklı olan tübüler fotobiyoraktörler tercih edilmiştir.	Yatay kullanılan fotobiyoreaktörler birbirleri üzerinde güneşin konumuna göre birbirleri üzerinde gölgelemeye sebep olabilirle. Bu durum kültür ortamındaki mikroalglerin güneşten yeterince yararlanamaması gibi durumlara sebebiyet verip hücre ölümleri gerçekleşirse sistemin çalışması aksayabilir.
46° Kuzey Geneva Switzerland	**Seçilen Lokasyon**	Kentin dışında değil, otoyollarda ,sokaklarda kenti içinde enerji ve gıda üretimi. Verimli tarım arazilerinin boşa işgalinin önlenmesi. CO_2, otomobil motorları tarafından üretilen bir kirletici olduğundan, çevreye zarar veren emisyonlarla dolu Cenevre Otoyolu Üst geçidi doğru bir tercihtir.	Oluşabilecek herhalgi bir soruna müdahale ve mikroalg bioproses işlemlerinin kontrollü yapılabilmesi mevcut projenin bulunduğu yerden dolayı zorluklar oluşturabilir. Sürekli akan bir trafiğin durumu ve işletim sistemlerinin mevcut alana göre konumunun uzaklığı taşıma ve iş yükü problemlerini de beraberinde getirir.
Fotosentez & Küçük Ölçekte Biyokütle & Besin Kaynağı & Enerji Üretimi	**Tercih Edilen İşletme Modeli**	Otoyoldan geçen araçlardan salınan karbonu emip oksijen üreterek havayı temizler. Yenilenebilir enerji kullanır. Yeni bir altyapı sistemi önerir. Otoyoldan biyodizel, elektrik, ilaç, kozmetik ürünler ve hatta yiyecekler için hammadde oluşturmak için kullanılabilir. Böylece yeni bir sistem ve altyapı önerir .	Projede, sistemin mimariye entegrasyonu düşünüldüğünde mevcut kentsel altyapıya yeni bir sistemi önerdiği ifade edilmiştir. Fakat konu ile ilgili herhangi bir çözüm önerisi geliştirilememiştir. Burada fotobiyoreaktör sistemi için gerekli olan, pompalama, filtreleme, su ve besin tedariği ile mikroalg kütlesinin kasadı için gerekli mekanik ve kimyasal işlemler için gerekli olan makine ekipmanlarının kaplayacağı alan ve mevcut altyapıya entegrasyonu maliyet ve estetik açısından önemli bir sorundur.

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri (Devamı)

Bütüncül Ketsel Fotobiyoreaktör Tasarımları		Carbon TAP (Tunnel Algae Park), Philadelphia, USA	
Açıklama	**Değerlendirme Kriterleri**	**Pozitif**	**Negatif**
Tübüler Fotobiyoreaktör	**Tercih Edilen Fotobiyoreaktör Tipi**	Projede, tübüler fotobiyoreaktörlerin tarımsal ve endüstriyel alanda kullanılan boyutlarda geniş arazide yapay olarak kullanımı önerilmiştir. Okyanus üzerine yerleştirilen yapay alg çiftlikleri geniş yüzey hacimleri ile büyük ölçekte verimlilik elde edilebilir.	Önerilen sistemin kent alanı içerisinde olan bir okyanus üzerinde kapladığı geniş alanın estetik açıdan zararları sosyal alana yaratan, yürüyüş yolları, parklar ve kamusal alanlarla azaltılmaya çalışılsa da tarımsal arazilerde kullanılan büyük sistemlerin kentin kalabalık bölgelerinde kurulması durumu ve büyük alan işgali açısından negatif bir durumdur.
39º Kuzey Philadelphia USA	**Seçilen Lokasyon**	Brooklyn-Battery tüneli havalandırma sistemine bağlı bir kentsel odak noktası ve sosyal alan yaratma düşüncesi ülkenin benzer yapıdaki bölgelerinde değişen ölçeklerde uygulanabilirliği önerilerek, hem enerji verimliliği sağlayan bütüncül bir mekanik sistem önerilmiş hem de bu bütüncül sistem kente sadece altyapı ve teknik anlamda değil sosyal anlamda da fayda sağlayacağı görülmüştür.	Okyanus dalgalarının sisteme verebileceği hasarlar, Tüm mekanik sistemin dış ortamda olması ve hava şartlarına karşı korumasız oluşunun getirebileceği zorluklar ihmal edilmiştir.
Fotosentez & Büyük Ölçekte Biyokütle & Yeni Bir Altyapı Önerisi & Enerji Üretimi	**Tercih Edilen İşletme Modeli**	Bu yeni altyapı, sera gazı emisyonlarını sınırlandırmak ve tüketmek için tescilli bir endüstriyel ölçekli alg tarım sistemi kullanırken, aynı zamanda oksijen, biyoyakıt, biyoplastik, nutrasötikler ve / veya tarımsal yemler üretmeyi hedefler. Brooklyn-Battery tüneli havalandırma sistemine bağlı sistem tüneldeki araçların saldıkları karbonu kullanır. Havaya O2 sağlar. Aynı zamanda okyanus üzerindeki yapay alg çiftlikleri ile biyokütle üretir.	Federal, eyalet ve yerel yönetimler kentsel altyapıların yenilenmesi ve değiştirilmesi için büyük çaplı yatırımlar gereklidir. Bu durum yüksek maliyeti beraberinde getirmektedir. Günümüzde kentsel altyapının gizlenmesi ve hafifletilmesi hedeflenirken buradaki söylem mekanik sistemin tamamen açıkta işlemesi yönündedir.

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri (Devamı)

Bütüncül Ketsel Fotobiyoreaktör Tasarımları		AlgaEnergetiCity Istanbul	
Açıklama	**Değerlendirme Kriterleri**	**Pozitif**	**Negatif**
 Tübüler - Panel Fotobiyoreaktör	**Tercih Edilen Fotobiyoreaktör Tipi**	Proje senaryosuna göre, sistemin uygulanacağı yüksek yapılı binaların yönlenimine ve güneşe maruz kaldığı duruma göre ikincil cephe elemanı olarak iki farklı tip fotobiyoreaktör sistemi önerilmiştir. Önerilen tübüler fotobiyoreaktör sistemi modüler olarak istenilen ya da ihtiyaç duyulan aralıklarla yerleştirilebileceği belirtilmiş böylece kontrollü güneş ışığı sağlanması ve fotobiyoreaktör sistemlerinin aynı zamanda güne kırıcı özellikte kullanımı amaçlanmıştır. Güneş korunumunun fazla gerekli olduğu alanlarda düz panel fotobiyoreaktörler tavsiye edilmiştir. Çift cidarlı cephe gibi çalışan paneller tüm binaya ısı ve ses yalıtımı sağlamaktadır.	Cephe önlerine zeminden tavana kadar yerleştirilen düz panel fotobiyoreaktörler kullanıcı görüşünü paneller mikroalglerle dolduğunda tamamen kapatmaktadır. İkincil cephe elemanı olarak kullanılan fotobiyoreaktör panelleri ağırlıklarından dolayı mevcut taşıyıcı sisteme ek taşıma yükü getirmiştir. Panellerde su akışının yetersiz olduğu köşelerde veya bölgelerde aşırı miktarda yosun birikiminin olabileceği durumu temizlik konusunda problemler yaratabilmektedir. Temizlik için sulama sistemi olmasına rağmen panel köşelerindeki kütle birikiminin temizliği mekanik sistemle değil en iyi elle yapılabilmektedir. Fotobiyoreaktör sistemlerinin çalışma periyodu boyuna kirlenme ve sızıntılarla ilgili teknolojik endişeler vardır. Olası sızıntılar ve teknik arızalar insan ve çevre sağlığı için problem oluşturabilmektedir. Herhangi bir hasar veya sızıntı da kokulara neden olabilir.
36° Kuzey İstanbul Türkiye	**Seçilen Lokasyon**	Bölgenin çok fazla sıcak bir bölge olmamasının bir getirisi olarak mikroalglerin yetişmesi için gerekli olan sıcaklık değerlerinin Kışın 5° altına düşmesi, yazın 40° üstüne çıkması engellenebilmiştir. Proje alanının bulunduğu koordinasyonlar mikroalgler fotobiyoreaktör sistemleri için çalışma alanı olarak belirlenen 37° Kuzey - Güney enlemleri arasında yer almaktadır. İklim şartlarından en iyi şekilde yararlanabileceği planlanmaktadır.	Bölgeye ait suyun sert olması nedeniyle fotobiyoreaktör sistemi içerisinde kalsiyum depolanabilmesi durumu çoğunlukla yönetilebilir problemler olarak kabul edilmekle birlikte, akışta ve muhtemelen üretim oranlarını azaltan borularda birikmesi durumunda monitörleme işlemiyle bu duruma müdahale etmek gerekebilecektir. Çok sıcak günlerde güneş ışığının etkisi kontrol altına alınamadığında aşırı ısınmadan dolayı mikroalg kültüründe bozunma olasılığı vardır.
Fotosentez & Biyogaz Eldesi ile Isınma ve Elektrik Enerjisi Sağlanması & Fotobiyoreaktör Sisteminden ve Geotermal Kuyulardan Sıcak Su Sağlaması & Tüm Şehre Entegre Mikroalg Sistem Önerisi	**Tercih Edilen İşletme Modeli**	Fotobiyoreaktör sisteminin sağlamış olduğu ısınma özelliği sayesinde fazla ısı direkt olarak sıcak su tedariği için kullanılmaktadır. Yapı içerisinde bulunan tüm dairelere sıcak su tedariği sağlanabilmektedir. Gerekli durumlarda kullanılabilmek adına depolanan aşırı ısı ayrıca jeotermal kuyularla zeminde depolanmaktadır. Mikroalglerin büyümesi için gerekli besinler ve su ihtiyacı tuvaletin atık suyunun kullanılarak değerlendirilmesine imkan sağlamıştır. Proje, mikroalg sisteminin sadece bir yapı özelinde değerlendirilmesinden ziyade sistemin bütüncül bir yaklaşım olarak değerlendirilir köprülerde araçların egzozlarından çıkan karbonun yakalanması, şehrin morfolojik düzenine göre cephe sisteminin uygulanamayacağı yapılarda ise uygulanan binaların mikroalg biopresesi sonucu ortaya çıkardıkları gübreyi çatı teraslarında kullanılmasını önermiştir.	Önerilen tasarımda mikroalglerin yetiştirilmesinden sonra gerçekleşecek olan basat işlemleri ve biyokütle eldesi yapı içerisinde bulunan teknik odalarda çözüleceği ifade edilmiştir. Bu durumda mevcut yapılara entegrasyonda eklenmesi gereken ekstra teknik hacimler yapı fonksiyonellik açısından gerçekleşmeyebilir. Sistem tamamen mevcut bölgenin bütüncül altyapısına entegre edilemediğinden bireysel çalışmak durumundadır. Bu durum ekstra ekonomik zorluk ve teknik donanım yetersizliğini beraberinde getirmiştir. Bütüncül sistemin çalışması ilk kurulum ve işletim açısından diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre maliyetlidir. Mikroalg fotobiyoreaktör sisteminin pompalama, karıştırma, hücre aktarımı gibi işlemleri için gerekli boruluma ve mekanik sistemleri yapının döşemesinde ya da yardımcı duvarlar içindeki tesisatlarda çözülmesi önerisi mevcut binalara entegrasyon söylemi ile çelişmektedir. Fakat yeni yapılan binalara bu şekilde uygulanması olasıdır. Ancak bu durum için taşıyıcı sisteme ek yükün yanında döşemeye gizlenecek olan borulama ve mekanik sistemin döşeme boyutlarını ve uygulama maliyetleri artırması söz konusudur.

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri (Devamı)

Tekil Enstalasyon Yaklaşımları		Street Lamp, Pierre Calleja	
Açıklama	**Değerlendirme Kriterleri**	**Pozitif**	**Negatif**
Dikey Kolon Fotobiyoreaktör	**Tercih Edilen Fotobiyoreaktör Tipi**	Lamba, daha sonra kullanılmak üzere fotosentez sonucu ürettiği enerjiyi depolayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle düz panel fotobiyoreaktörlere ve tübüler fotobiyoreaktörlere göre daha fazla hacime sahip olan dikey kolon fotobiyoreaktörler önerilmiştir. Bir yılda havadan en az bir ton karbon emme yeteneğine sahip olduğunu açıklamıştır.	Tarımsal ve endüstriyel alanda kullanılan fotobiyoreaktörler geniş yüzey hacimlerine sahip kompleks sistemlerdir. Burada tekil yaklaşımla tasarlanan lambaların bireysel olarak bahsedilen düzeyde karbondioksidi çok fazla absorbe edip edemeyeceği hususu yaygın kullanımı sonucunda deneyimlenebilecektir. Çalışma ile ilgili artışılmayan şey, böyle bir ışığın ne kadar bakım gerektirdiğidir. Herhangi bir hasar ya da çalışma sistemindeki bir arızada müdahale el yordamıyla olacağından pratiklik açısından negatiflik getirmektedir.
Sokaklar ve Otoparklar	**Seçilen Lokasyon**	Tasarım sokak lambası, otopark aydınlatması gibi kentsel alanlarda kullanılmak üzere modüler olarak yerleştirilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Calleja, havada bulunan CO_2 miktarının yaklaşık% 25'inin araba egzozundan üretildiğini düşünmektedir, bu nedenle cihazları yol kenarındaki aydınlatma olarak kullanmak, her bir birim yılda bir ton ton emisyonu emerek aynı anda iki sosyal sorunu çözmeye yardımcı olacağını belirtmiştir	Tasarımcının lambanın fotosentez ile elde ettiği enerjiyle şarj edilebileceğini ve herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duyulmadan çalışabileceğini ifade etmesine karşın, güneş ışığı almayan ve kapalı bir alan olan otoparklarda kullanımı ve yapay aydınlatma ile ışık kullanımını önermesi durumu çelişkilidir. Burada yapay aydınlatma için ekstra bir güç kaynağına ihtiyaç duyulacaktır. Bahsedilen özellik açık alanlarda uygulanabilir olsa da kapalı alanlarda bu bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.
Fotosentez & Aydınlatma & Havayı Temizleme & Küçük Ölçekte Biyokütle	**Tercih Edilen İşletme Modeli**	Street Lamp, mikroalglerden enerji elde etmek için kullanılan fotobiyoreaktörlerin çalışma mekanizmasına çok benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Tasarımcı bu fotobiyoreaktör prototipini enerji üretimi amacıyla değil aydınlatma elemanı olarak kullanmayı önermektedir. Mikroalglerin yapısal özelliklerinin bir getirisi olarak kültür ortamındaki sudan ayrıldığında biyoyakıt olarak kullanılabileceği durumu bu tasarım için de geçerli olduğu ifade edilmiştir. Lamba, gün içerisinde güneş ve besin maddeleri kullanarak fotosentez yoluyla şarj edilebilir. Bu şekilde, düşük ışıklı alanlara taşındığında, herhangi bir harici güç kaynağına ihtiyaç duymadan aydınlık sağlayabilir.	Mikroalg büyümesi sonucunda dolan hacmin tekrar kullanılmasını sağlamak ve elde edilen biyokütleyi kullanmak amacıyla lambadaki kültür ortamına ait suyun belirli periyotlarla değiştirilmesi gerekecektir. Herhangi bir mekanik monitörleme sistemi ile birlikte çalışma prensibi tasarım açısından taşınılabilirliği ve her bölgeye uygulanabilirliği etkileyeceğinden kontrolün manuel olarak yapılması zahmetli ve pratik olmayan bir durumdur. Sistemin ana amacının aydınlatma olacağı söylemi önemlidir .Yapılan çalışmalar incelendiğinde mikroalglerden elde edilen elektrik enerjisi miktarı oldukça küçük miktarlardadır ki basit bir AA piline depolanan enerji miktarını yakalayabilmek için bir saat boyunca fotosentezlenen trilyon hücrelere ihtiyaç duyulacağı düşünülmektedir.

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri (Devamı)

Tekil Enstalasyon Yaklaşımları		Living Things, Jacob Douenias +Ethan Frier	
Açıklama	**Değerlendirme Kriterleri**	**Pozitif**	**Negatif**
Dikey Kolon Fotobiyoreaktör	**Tercih Edilen Fotobiyoreaktör Tipi**	Laboratuvar, ortamında kullanılan, tarımsal ve endüstriyel alanlarda kullanılan alışıla gelmiş fotobiyoreaktör tiplerinden farklı olarak iç mekanda aydınlatma armatürü ve mobilya olarak kullanılması amaçlanan tasarımda;: tübüler, düz panel gibi estetik olmayan endüstriyel geometriler yerine mimari dekorasyon ve estetik bağlamında daha değerli olabilecek şekiller denenmiştir. Aydınlatma elemanı olarak kullanılmak istenmesi amacı ile dikey kolon fotobiyoreaktör geometrileri farklılaştırılarak küreye yakın geometride bir tasarım elde edilmiştir. Böylece dikey kolon fotobiyoreaktör tiplerinin geniş hacim avantajı bu tasarımda avantaj olarak kullanılmıştır. Burada amaç daha fazla alanı aydınlatmak ve küçük ölçekte daha fazla biyokütle elde etmektir.	Mimaride fotobiyoreaktör kullanım örnekleri incelendiğinde baca gazlarındaki karbondioksidin kullanımı görülmüştür. Bu tasarımda fotobiyoreaktör için gerekli karbondioksit için kullanıcı tarafından solunumla salınan miktarların yeterli olup olmayacağı tartışma konusudur. Yeterli olmadığı durumlarda ek karbon tedariği ekstra maliyet ve iş yükü getirecektir. Burada tekil yaklaşımla tasarlanan lambaların bireysel olarak bahsedilen düzeyde karbondioksidi çok fazla absorbe edip edemeyeceği hususu da yaygın kullanımı sonucunda deneyimlenebilecektir. Çalışma ile ilgili artışılmayan şey, böyle bir ışığın ne kadar bakım gerektirdiğidir. Herhangi bir hasar ya da çalışma sisteminde bir arızada müdahale el yordamıyla olacağından pratiklik açısından negatiflik getirmektedir.
İç Mekan	**Seçilen Lokasyon**	Fotobiyoreaktör tasarımları hertürlü içe mekan alanlarında ofisler, daireler vb. aydınlatma armatürü olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Yenilenebilir enerjiden aydınlatma ve biyokütle eldesi enerji tasarrufu açısından değerlidir.	Aydınlatma elemanı olarak tasarlanan ürünler, kullanıldığı alanlarda iç mekan fonksiyonelliği açısından geniş hacimleri sebebi ile pratik değillerdir.
Aydınlatma & Fotosentez & Havayı Temizleme & Küçük Ölçekte Biyokütle	**Tercih Edilen İşletme Modeli**	İç mekanda kullanıcı tarafından yayılan ckarbonun emilip oksijen açığa çıkararak iç mekan hava kalitesinin arttırılması amaçlanmıştır. Mikroalglerden enerji elde etmek için kullanılan fotobiyoreaktörlerin çalışma mekanizmasına çok benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Tasarımcı bu fotobiyoreaktör prototipini enerji üretimi amacıyla değil aydınlatma elemanı olarak kullanmayı önermektedir.	Mikroalg büyümesi sonucunda dolan hacmin tekrar kullanılmasını sağlamak ve elde edilen biyokütleyi kullanmak amacıyla lambadaki kültür ortamına ait suyun belirli periyotlarla değiştirilmesi gerekecektir. Herhangi bir mekanik monitörleme sistemi ile birlikte çalışma prensibi tasarım açısından taşınılabilirliği ve her bölgeye uygulanabilirliği etkileyeceğinden kontrolün manuel olarak yapılması zahmetli ve pratik olmayan bir durumdur. Bu da iç mekanda kullanılacak tasarıma estetik algısı ile çelişmektedir.

Tablo 3.1 Seçilen 10 Adet Alg Mimarisi Örneğinin Belirlenen Değerlendirme Kriterlerine Göre Olumlu ve Olumsuz Özellikleri (Devamı)

Tekil Enstalasyon Yaklaşımları		Urban Algae Canopy, EcoLogicStudio	
Açıklama	**Değerlendirme Kriterleri**	**Pozitif**	**Negatif**
Membran Tipi Fotobiyoreaktör	**Tercih Edilen Fotobiyoreaktör Tipi**	Fotobiyoreaktörün esnek plastik membran malzemeden yapılması ve tasarıma göre, geometrik bir esneklik sunmaktadır. Fotobiyoreaktörün gözenekli yapısı güneş ışığı kırıcı özelliği göstermektedir ve gölgeleme sağlamaktadır. Mimar Cesera Griffa ile birlikte Milano Expo 2015 için bir bina cephesi ve kanopi olmak üzere benzer sistemleri uygulayan iki farklı mimari uygulama olarak önerilmiş, fakat sadece kanopi kentsel enstelasyon olarak uygulanabilmiştir. Uygulanamayan cephe projesinde, dikey üretim sahası sağlamak için bir yapı kabuğu yaratmak amaçlanmıştır. Buradaki amaç, şehirlerin yeşil sistemiyle bütünleşen, alglerin CO_2 emmesine ve O_2 üretmesine yardım eden, binaların ikinci bir kabuğu olarak hareket edebilen, pasif soğutmayı destekleyen ve cephenin gölgelenmesini arturan bir sistem kurmaktır.	Mikroalglerin fotobiyoreaktör ortamında hareketi kısıtlıdır. Bu nedenle panel ve boru şeklindeki endüstriyel fotobiyorektör çeşitlerinde gözlenen geniş hareket hacmi burada yakalanamamıştır. Bu nedenle mikroalg büyümesi için gerekli olan harekellilik sınırlıdır. Bu nedenle kültür ortamının bozunması ve mikroalg hücrelerinin ölmesi durumu söz konusu olabilir. Endüstriyel fotobiyoreaktör tiplerine kıyasla tasarım bağlamında daha estetik olmasına rağmen , çalışma performansı olarak daha düşük verimlilikte biyokütle üretmektedir. Geometrisi dışında, geleneksel fotobiyoreaktör sistemlerine benzer özellikte çalışma prensibine sahip olan sistem ince ve boşluklu yapısı ile yüzeysel olarak girinti çıkıntılıdır. Kütle transferi sırasında fotobiyoreaktör sisteminin daraldığı bölgelerde yosun birikmeleri oluşabileceğinden temizlik açısından zorluklar oluşturabilmektedir.
45° Kuzey Milano Italy	**Seçilen Lokasyon**	İtalya'nın Milano şehrindeki EXPO 2015'te, Expo alanının merkez geçiş yolunda sergilenmek için geliştirilmiştir. Tasarlanan enstelasyon ziyaretçiye gölgelik görevi üstlenmesinin yanında havayı temizlemekte ve biyokütle üretimi gerçekleştirmektedir.	Çok sıcak günlerde güneş ışığının etkisi kontrol altına alınamadığında aşırı ısınmadan dolayı mikroalg kültüründe bozunma gerçekleşebilir. Düz panel fotobiyoreaktörlere oranla daha az verimlilik gösteren sistemin bakım ve onarım sorunları da daha fazla olacağı düşünülmektedir.
Aydınlatma & Fotosentez & Havayı Temizleme & Biyokütle & Yenilenebilir Enerji	**Tercih Edilen İşletme Modeli**	Proje kapsamında önerilen ve uygulanamayan fotobiyoreaktör cephe elemanı mikroalglerin potansiyel avantajları olan atık suyun geri dönüştürülmesi, CO2 emisyonu sonucu O2 üretimi ve mikroalglerden biyokütle eldesi ile biyokütleden elde edilen tüm ürünlerin ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılabileceği gibi görevler üstlenmiştir. Burada fotobiyoreaktör sisteminin biopreses işlemlerinin gerçekleşeceği depolama ve mekanik sistemin binanın bodrum katında çözüleceği ifade edilmiştir. Alg tentesi için önerilen çalışma sistemi havayı temizlemesi ve ürettiği biyokütlenin sahip olduğu proteinden faydalanmak esas amaç olarak ifade edilmiştir. Fuarda uygulanan alg tentesi her gün 4 kg karbondioksidi atmosferden uzaklaştırmaktadır ve 2 kg oksijeni fotosentetik çatısından serbest bırakmaktadır. Üretilen oksijen her gün 3 yetişkinin nefes almasına yetmektedir. Mikroalglerden 12 insanın günlük ihtiyacına eş olan protein üretilmektedir, üretilen protein günlük 2 kg etten alınan protein miktarına eşittir. alg tentesi ile, 4 hektar ormanlık alanın ürettiğine eş oksijen ve her gün, %60'ı doğal proteinden oluşan 150 kg'ın üstünde biyokütle üretileceği düşünülmektedir.	Cephe önerisinde mikroalglerin yetiştirilmesinden sonra gerçekleşecek olan hasat işlemleri ve biyokütle eldesi yapı içerisinde bulunan teknik odalarda çözüleceği ifade edilmiştir. Bu durumda mevcut yapılara entegrasyonda eklenmesi gereken ekstra teknik hacimler yapı fonksiyonellik açısından gerçekleşmeyebilir. Sistem tamamen mevcut bölgenin bütüncül altyapısına entegre edilemediğinden bireysel çalışmak durumundadır. Bu durum ekstra ekonomik zorluk ve teknik donanım yetersizliğini beraberinde getirmiştir. Bütüncül sistemin çalışması ilk kurulum ve işletim açısından diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre maliyetlidir. Plastik membran yapısından dolayı hava şartlarının ağır olduğu zamanlarda fotobiyoreaktörün dış cephede kullanımı yırtılma gibi hasarlara sebep olabilir. Alg tentesi sürdürülebilirlik ve yenilenebilir enerji kullanımı açısından ilham verici görülse de uygulamadaki getirileri bu küçük tekil ölçeklerle sınırlı oldukça istenilen değerlere ve beklenen verilere ulaşmak henüz mümkün değildir.

3.4 Mimaride Kullanım Açısından Alg Mimarisi Örneklerinin Değerlendirilmesi

Örnek incelemeleri ve akademik çalışmaların değerlendirilmesi sonucunda mikroalglerin mimaride kullanımının, gerçekleştirilmiş uygulamalar ve tasarım fikirlerindeki veriler ile söylemler ışığında mimariye ve sürdürülebilirliğe, havadaki karbon salınımını azaltarak atmosfere O_2 tedariği, yenilenebilir enerji kullanarak biyokütle üretimi ve bunun sonucunda enerji eldesi, tuvaletin atık suyunun geri dönüştürülmesi, güneş korunumu ve kontrollü güneş ışığı sağlaması gibi katkılarının olmasının yanı sıra; dikkat edilmesi gereken sorunları da beraberinde getirdiği görülmüştür. Mikroalglerin mimariye entegrasyonunda ortaya çıkan zorlukların üstesinden gelmek için, fotobiyoreaktör sistemlerinin bütüncül çalışma prensibinden yola çıkarak sorunların çözümüne odaklanan, mimariye entegre fotobiyoreaktör sistemleri tasarlanırken dikkat edilmesi gereken değerlendirme kriterleri belirlenmiş ve alg mimarisi örnekleri değerlendirme kriterlerine göre sınıflandırılmış ve karşılaştırılmıştır ve tablolaştırılmıştır.

Mikroalglerin mimariye entegrasyon örnekleri incelendiğinde, bina cephelerine entegre fotobiyoreaktör sistemleri, kentsel ölçekte planlanan bütüncül fotobiyoreaktör örnekleri ve tekil enstalasyonlar olmak üzere üç farklı şekilde mimaride kullanıldığı tespit edilmiştir. Mimaride kullanım alanlarına göre değerlendirildiğinde alg mimarisi örneklerinin tasarımda kullanılan fotobiyoreaktörün çeşidi, projenin uygulandığı lokasyon ve projenin tasarım senaryosuna göre değişen bütüncül işletme modeline göre farklılaştıkları gözlenmiştir. Ortaya çıkan farklılıkların proje ve tasarımlara pozitif ve negatif getirileri olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında negatif durumlar dikkate alınarak gelecekte fotobiyoreaktör sistemlerinin mimariye entegrasyonu ile ilgili çalışmalar için dikkat edilmesi gereken problemler belirlenmiştir.

3.4.1 Seçilen Fotobiyoreaktör Tipinin Alg Mimarisine Negatif Etkileri

Mikroalgler kullanılarak biyokütleden enerji elde edilebilmesi uygun fotobiyoreaktör seçimi ve kullanımı ile mümkün olmaktadır (Colt, 2013). Seçilen fotobiyoreaktörün teknik özelliklerinden dolayı taşıyıcı sisteme yüklenen ekstra taşıma yükü, kullanıcı

görüşünü kısıtlama, temizlik, bakım ve onarım sorunları olmak üzere farklılaşan sorunlar tespit edilmiştir.

3.4.1.1 Taşıyıcı Sisteme Yüklenen Ekstra Taşıma Yükü

Fotobiyoreaktör sisteminin mevcut bir mimari yapıya entegrasyonu düşünüldüğünde taşıyıcı sisteme yapacağı ek taşıma yükü yapı için sorun teşkil etmektedir. Mikroalg fotobiyoreaktör sistemlerinin örneklerde mevcut yapı ölçeğinde binaların kentsel ölçekte ise köprü döşemelerine ikincil bir cephe önerisi ya da ek malzeme olarak entegre edilmiş olduğu görülmüştür. Mevcut faliyetini sürdüren bir yapının taşıyıcı sistemine fazladan ağırlık teşkil edecek olan sistem için yapının taşıma yükü hesabı tekrar gözden geçirilmelidir. Mikroalg cephesinin ağırlığı, hareketli kültürün zamanla panellerde çoğalması ile daha da artacak ve rüzgar, yağmur, kar gibi çevresel etkiler de belirli periyotlarda fotobiyoreaktör sisteminin ağırlığının ve dengesinin değişmesine sebep olacaktır. Fotobiyoreaktör cepheye etkiyen bu değişken yükller zamanla mevcut yapının duvarlarında ilave güç gerektirecek ve ek maliyetlere neden olabilecektir. Ek maliyetleri en aza indirmeye yönelik bir yaklaşım, fotobiyoreaktör tasarımlarında, mümkün olduğunda hafif yapı malzemelerinin kullanılması olacaktır. Bogias Petra, yapmış olduğu öneride, taşıyıcı sisteme yüklenen ekstra ağırlık ve kullanıcının görüşünün kısıtlanması durumları problem olarak görülerek iki durumu da çözüme kavuşturabilecek daha hafif ve boşluklu fotobiyoreaktör cephe tasarımı önermiştir (Bogias, 2014).

3.4.1.2 Kullanılan Fotobiyoreaktör Tipinin Kullanıcı Görüşünü Kısıtlama Durumu

Bina cephelerine entegre fotobiyoreaktör sistemlerinin tümünde çift cephe elemanı olarak kullanılan fotobiyoreaktör cepheler gölgeleme kolaylığı sağlamasının yanı sıra, ilk alg ekimi sonucunda mikroalglerin sistem içerisinde büyüyerek şeffaf panelleri doldurması ile hasat edileceği vakite kadar geçen süreçte panellerin geçirgenliği zamanla azalması kullanıcının görüşünü kısıtlamaktadır. Kullanıcı görüşü kısıtlama durumu, fotobiyoreaktör sisteminin işleyişinin yapısal durumundan kaynaklanır ve kullanıcı konforu açısından negatif bir durumdur. Tasarım açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bina cephelerinde fotobiyoreaktör uygulamaları yapılırken kullanıcı görüşünü kısıtlamayacak şekilde fotobiyoreaktör geometrisi seçilmeli ya da yapının kullanıcı görüşünü engellemeyecek kısımlarında değerlendirilmesine dikkat edilmelidir.

Örnekler arasında karşılaştırmalı incelemeler sonucunda, kullanıcı görüşünü etkileyen en önemli husus tasarımda kullanılan fotobiyoreaktörün çeşidi ve geometrisidir. Örnekler karşılaştırıldığında cephelere ikincil bir cephe elemanı olarak eklenen tüm fotobiyoreaktör sistemler cephe önünde görüş alanına engel teşkil etmektedir. Düz panel fotobiyoreaktör sistemlerinin tercih edildiği tasarımlarda bu durum çok daha fazla şekilde rahatsızlık vermektedir. Cephe önlerine zeminden tavana kadar yerleştirilen düz panel fotobiyoreaktörler kullanıcı görüşünü paneller mikroalglerle dolduğunda tamamen kapatmaktadır. Örnek incelemeleri sonucunda görülen, tübüler fotobiyoreaktör kullanımı durumlarında ise kullanıcı görüşü kısıtlansa da tüplerin çapları küçültülerek ve aralarındaki mesafe arttırılarak kullanıcı görüşü arttırılabilmekte ve güneş kırıcı panel özelliği sağlanarak kontrollü güneş ışığı kullanımı sağlandığı ve mimari estetik açıdan daha kullanışlı olduğu düşünülmektedir.

3.4.1.3 Temizlik- Bakım – Onarım Sorunları

Fotobiyoreaktör sistemlerinin çalışma periyodu boyuna kirlenme ve sızıntılarla ilgili teknolojik endişeler olduğu tasarımcılar tarafından dile getirilmiştir. Mesele şu ki, bazı alglerin (siyanobakteriler gibi) tümü insan sağlığına bir ölçüde zararlı olan hepatotoksinler ve nörotoksinler içermesidir (Bell ve Codd, 1994, s.261). Olası sızıntılar ve teknik arızalar insan ve çevre sağlığı için problem oluşturabilmektedir. Örnekler kıyaslandığında fotobiyoreaktör çeşidine göre sızıntı ihtimalleri değişmektedir. Düz panel fotobiyoreaktörlerkde tübüler fotobiyoreaktörlere oranla daha fazla sızıntı olabileceği ihtimali vardır. Ayrıca, herhangi bir hasar veya sızıntı da kokulara neden olabilir (Wilkinson, Stoller, Ralph ve Hamdorf, 2016). Dolayısıyla, sistemin getirdiği teknolojiden kaynaklanan birçok çevresel fayda var olmakla birlikte, aynı zamanda tamamen mekanik sistemle çalışan tasarımın olası teknik arızalardan dolayı getirebileceği problemlerde mevcuttur.

Cam panellerin veya boruların temizlenmesi başka bir teknik husustur. Wilkinson ve arkadaşları (Wilkinson vd., 2016); temizlik sorununun, camın iç yüzünü temizlemek için kullanılan tekniklerin akvaryum tasarımında kullanılan ve temizliği karşı alınan önlemlerden referanslarla çözülebileceğini ifade etmişlerdir. Fotobiyoreaktör panellerin temizliğinin kontrolü bilgisayar sistemleri ile kontrol edilebilirken müdehalenin en iyi elle yapıldığını ve panellerde temizlik için kullanılan su akışının yetersiz olduğu köşelerde veya bölgelerde aşırı miktarda yosun birikiminin olabileceği durumu temizlik

konusunda problemler yaratabilmektedir. B.I.Q. binası ile ilgili yapmış oldukları inelemeler sonucunda Wilkinson ve arkadaşları (Wilkinson vd., 2016); çok katlı bir binanın üst katlarında böyle bir temizlik yapılması durumunun bakım maliyetlerini artıracağını belirtmişlerdir. Temizleme sorumluluğunu azaltma önerisi olarak, yosun birikmesi sonucu oluşan biyofilmi (ölü alg kütleleri) azaltacak düşük sürtünme katsayılı özel camların belirlenmesi olduğunu dile getirmişlerdir. . Ek olarak, sistemin düzenli ve muhtemelen bilgisayarla izlenmesi, optimum çalışma ortamlarının korunmasını sağlamasının gerekliliğini ve sonuç olarak camlama teknolojisinde yenilikçilik fırsatları olabileceğini önermişlerdir.

3.4.2 Projenin Bulunduğu Lokasyonun Alg Mimarisine Negatif Etkileri

Fotobiyoreaktörlerin mimariye entegrasyonu için seçilen lokasyon da fotobiyoreaktörün tipi kadar önemlidir. Sıerra, bir fotobiyoreaktör sistemin verimliliğini belirleyen en önemli hususlardan birinin reaktörün yeri, kullanımı ve yönlendirilmesi olduğunu ifade etmiştir. Tercih edilen lokasyona göre dış cephede bulunan fotobiyoreaktörlerin güneşten yararlanma miktarı ve hava şartlarına dayanıklılıkları değişeceğinden verimlilikleri üzerinde önemli değişikler gözlenecektir (Sierra vd., 2008, s.140).

3.4.2.1 Hava Şartlarına Uyumluluk ve Güneş Işığından Yararlanma

İncelenen örneklerde de görüldüğü gibi fotobiyoreaktör sistemleri güneş ışığı ve CO_2 kullanımı gerektirdiği için sürekli dış mekanla temas halinde olan sistemlerdir. Fotobiyoreaktör sistemlerinin hava şartlarına uyumluluğu ve dayanıklılığı da önemli bir sorundur. Hava şartlarından etkilenme durumu güneş ışığından yararlanma süresi ve iklime uyumlulukla birlikte düşünülmelidir. Dikkat edilmesi gereken hususlar, seçilen fotobiyoreaktörün geometrisi ve fotobiyoreaktör kültür ortamını çerçeveleyen geçirgen panellerin, sistemin uygulanacağı iklim ve hava şartlarına dayanıklı malzemelerden seçilmesi gerektiğidir. Seçilen fotobiyoreaktör geometrisinden dolayı sistem içerisinde yetişen mikroalglerin yapının bulunduğu konuma göre güneş ışığına fazla ya da az maruz kalarak bozunması durumunda kararma, kirlenme, yapışma gibi sorunlar teşkil ederek cephe panellerine zarar verebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Sistemin uygulanacağı lokasyon çok önemlidir. Binanın bulunduğu enlemlere göre, yağışlı ve güneşli gün süresi, iklim şartlarının bir getirisi olarak önemsenmeli ve sistem için düşünülen tüm malzemeler bölgenin iklimi ve hava şartlarıyla uyumlu olarak her proje

özelinde ayrıca değerlendirilmelidir. Örneğin Hamburg'da inşaa edilen B.I.Q Almanya hava şartlarından farklı olarak daha sıcak ve güneşten yararlanma süresi daha fazla olan bir bölgede uygulanması durumunda daha yüksek biyokütle üretim oranları ile sonuçlanması beklenebilir. Daha fazla ürün eldesinin getirisi olarak, gerek duyulan depolama alan ihtiyacının artması, daha sık temizlik gereksinimi, daha fazla bakım ve onarım ihtiyacı ve maliyeti ve işletim sisteminin daha hızlı çalışmak zorunda kalması durumundan dolayı daha fazla efor gereksinimi gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Hamburg binası, (Colt, 2013) kış döneminde fotosentez ve bakım için yeterli güneş ışığının olmaması nedeniyle burada sorun olmaz, ancak başka bir iklim bölgesinde fotobiyoreaktörlerkde oluşabilecek aşırı ısınma sonucu kültür ortamının bozulması söz konusu olabilir.

Bölgenin hava şartlarına göre arka arkaya birkaç bulutlu gün varsa, değişen rutinin kontrol altına alınamaması durumunda yaşanabilecek handikaplar düşünülmelidir. Oluşabilecek sorunların önüne geçebilmek için sistemi kontrol eden ve çalışmasını sağlayan bilgisayarlı monitör sistemlerine ihtiyaç olacaktır. Kullanılan suyun bazı bölgelerde sert veya yumuşak suya sahip olduğu farklı bölgelerdeki farklı özellikleri olacaktır. Sert suyun olduğu yerlerde, kalsiyum depolanır ve çoğunlukla yönetilebilir problemler olarak kabul edilmekle birlikte, akışta ve muhtemelen üretim oranlarını azaltan borularda birikmesi durumunda monitörleme işlemiyle bu duruma müdahale etmek gerekmektedir.

3.4.3 Tercih Edilen İşletme Modelinin Alg Mimarisine Negatif Etkileri

Mimaride kullanım örnekleri incelendiğinde; fotobiyoreaktör sisteminin çalışması besin, su, ışık ve CO_2 tedariki ile başlar ve mikroalgler büyüyerek kültür ortamınıda çoğalırlar. Çalışma mekanizması mikroalg üretiminden sonra toplama ve ekstraksiyon işlemleri ile devam eder ve işlem gören mikroalg biyokütlesinden biyogaz, biyodizel, elektrik ve ısınma enerjisi, projenin tasarım senaryosuna göre aralarından bir kaçı veya tamamı olmak üzere elde edilir. Belirtilen aşamaların tümü mikroalg biyoprosesini ifade eder. Örnekler karşılaştırıldığında fotobiyoreaktör sistemlerinin entegre edildiği mimari yapıya göre çalışma senaryolarının değişiklik gösterdiği görülür. Bütüncül çalışma prensibi yalnızca bina ölçeğinde, tekil enstalasyonlar özelinde ya da kentsel ölçekte gerçekleşebilir. Mikroalg biyoprosesi projenin tasarım senaryosu ile birleşerek alg mimarisi sistemin işletme modelini oluşturur. Tercih edilen işletme modeli, kurulum ve

operasyonel maliyet, depolama ve mekanik system için geniş alan ihtiyacı ve mevcut altyapıya entegrasyon gibi sorunları da beraberinde getirebilir.

3.4.3.1 Kurulum ve Operasyonel Sistem Maliyeti

Mikroalglerin yenilenebilir enerji kaynağı olarak fotobiyoreaktör cephe elemanı olarak kullanılması diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş panelleri ve rüzgar tirübünleri gibi binaya entegre sistemlerle kıyaslandığında daha maliyetlidir. Aynı miktarda enerji eldesi sağlayabilmek için sisteme entegre edilecek mikroalg fotobiyoreaktör cephe elemanlarının diğer entegre sistemlere oranla kurulum ve işletim maliyeti açısından dezavantajlı olduğu görülmüştür. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının uzun yıllardır kullanılması ve gelişen teknoloji ile üzerinde daha fazla araştırma ve gelişme çalışmaları yapılması, mikroalg sistemlerinin ise henüz çok yeni oluşu ve yeterince çalışma yapılamamış olmasının yanında canlı bir organizmandan faydalanılması sebebi ile kurulum sonrasında gerekli olan bakım, onarım ve temizlik gibi zorlukların bir getirisi olarak çok daha pahalı ve verimliliği düşüktür. Mikroalg fotobiyoreaktör sistemlerinin kurulumundan sonra gerekli olan bütüncül çalışma sisteminin işleyebilmesi için gereken mikroalg büyüme işleminden sonraki hasat işlemleri ve biyoproses işlemlerine duyulan ihtiyaç da ekstra maliyet gerektirmektedir. Bina cephelerine entegre fotobiyoreaktör sistemleri, kentsel ölçekte planlanan bütüncül fotobiyoreaktör örnekleri ve teknik enstalasyonlar kıyaslandığında uygulama ölçeği arttıkça ihtiyaç duyulan altyapı ve işletim sisteminin getirisi olan bütüncül uygulama zorunluluğu maliyeti daha da arttırmaktadır. Tekil enstalasyonlar en uygun maliyetle çözülebilirken bina ölçeğinde yaklaşımlar onlara kıyasla daha fazla maliyetlidir. Kente entegre sistemler ise bu kıyaslamada en yüksek ekonomik gidere ihtiyaç duyacaktır. Dünya üzerinde ilk uygulanmış mikroalg fotobiyoreaktör cephe binası olan B.I.Q. House binası Arup tarafından açıklanan rakamlara göre yaklaşık 5 milyon Euro'ya mal olmuştur. Bu Almanya'da 4 katlı bir yapının inşaa edilmesi için gerekli miktardan çok yüksek bir miktardır. Wilkinson ve arkadaşlarının ifade ettiğine göre (Wilkinson vd., 2016); mikroalg fotobiyoreaktör sisteminin, şu an 2.300 - 3.300 ABD Doları/m2' gibi bir başlangıç maliyeti vardır ve projenin boyutuna ve ölçek ekonomisine bağlı olarak bu oran artabilir.

3.4.3.2 Depolama ve Mekanik Sistemin İşleyişi İçin Geniş Alan İhtiyacı

Sistemin teknik detayları ve işleyişi söz konusu olduğunda depolama ve işletim sistemlerine duyulan ihtiyacı yapı fonksiyonellik ve tasarım açısından sorun teşkil edebilmektedir. Mikroalglerin cephelerde fotobiyoreaktörlerde yetiştirilmesinin ardından yapılan mikroalg hasat işlemleri, sistem döngüsünün gerçekleştirildiği tüm mekanik işlemler ve sistemin sahip olduğu boru kanalları ile otomatik kontrolü sağlayan bilgisayarlı takip birimleri gibi tüm işlemler örneklerde de görüldüğü üzere henüz uygulamada bina döşemesinde çözülemediğinden ekstra mekan gereksinimine ihtiyaç duyulup teknik kısımlar için yapı fonksiyonelliğini değiştiren ekstra odalar kullanılmak zorunda kalınmıştır. Ekstra alan ihtiyacı yapının mekan düzenlemesi yapılırken fonsiyonellik ve kullanışlılık açısından en uygun tasarımı gerçekleştirilmesi adına mimarlara kısıtlama getirmektedir. Örnek incelemeleri sonucunda uygulanmış B.I.Q projesinde 4 katlı bir yapının plan şeması incelendiğinde normal kat planının 1/4 ölçeğinde depolama ve mekanik sistem için gerekli makinelerin ve borulama sistemlerinin olduğu teknik odaya ihtiyaç duyulmuştur. Ekstra alan ihtiyacı diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile kıyaslandığında fonksiyonellik açısından mimari tasarım disiplininde önemli bir problem oluşturmaktadır.

3.4.3.3 Yenilikçi Sistemin Mevcut Altyapıya Entgrasyonunda Yaşanacak Zorluklar

Fotobiyoreaktör sisteminin uygulanabilirliği, işletme modelinin nasıl olacağı gibi konularla birlikte değerlendirildiğinde birçok problemi de beraberinde getirmiştir. İncelenen örneklerden görüldüğü üzere tasarım ve uygulamaların ortaya çıkış söylemleri yapılı çevreye bütüncül katkı olarak ifade edilse de tüm örnekler kendine has işletim modelleri ile ifade edilmiştir. Yani sistem yalnızca kendi içerisinde değerlendirilmiş yapının bulunduğu bölgenin tasarım önerilerine cevap verebilecek kentsel alt yapıya sahip olup olmadığına dikkat edilmemiştir. Örneklerde bahsi geçen sıcak suyun depolandığı sondaj kuyuları, enerji üretiminin gerçekleştiği biyogaz üretim tesisleri ve biyodizel üretim rafinerilerinin yapının uygulandığı lokasyona göre konumundan doğan taşıma maliyetleri, alt yapı eksikliği durumunda yeniden inşaasının getireceği ekonomik zorluk ve teknik donanım eksikliği gibi problemler sistemin tam kapasite çalışabilme durumuna engel teşkil edebileceği görülmüştür. Proje özelinde uygulama senaryolarına göre farklı iş modeli önerileri ortaya çıkmıştır. İş modellerinin farklılık göstermesi, mevcut altyapının ve enerji işletim sistemlerinin tekrar gözden

geçirilmesi ve mikroalg fotobiyoreaktör sistemine uygun hale getirilmesi için çalışma yapmayı gerekli kılmaktadır. Günümüzde daha çok tercih edilen güneş ve rüzgar enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerjilerin hepsinin mikroalglerden daha fazla enerji ürettiği ve mevcut altyapıya uygunluğu açıktır. Wilkinson ve arkadaşları (Wilkinson vd., 2016), güneş panelleri kullanılarak Avusturalya'da yaklaşık 1400 kwh/m^2/yıl enerji ürettiğini söylemişlerdir. Avusturalya'daki rakamlar Hamburg'da uygulanan B.I.Q. House yapısının ürettiği enerjinin yaklaşık 40 katına denk gelmektedir.

3.5 Bölüm Sonucu

Örnek incelemeleri sonucunda tasarlanan projelerin bir çoğunun uygulama aşamasına geçemediği sadece fikir projesi olarak kaldığı görülmüştür. Uygulanabilmiş projelerden Hamburg'daki B.I.Q projesi ve Cenevre'deki Culture Urbaine projesi dışındaki projeler ya portatif olarak kalmışlar ya da sergilendikten belirli bir süre sonra kaldırılmışlardır. Dublin'deki Photo.Synth.Etica projesi ise uygulanabilmiş olsa da tasarım söylemi doğrultusunda uygulama esasları tam olarak tamamlanmamıştır. Sonuç olarak algleri mimariye entegrasyonu konusunda uygulamaya dönük çalışmaların henüz yeterli düzeyde olmadığı görülmektedir.

İncelenen 10 adet örnek proje ile fotobiyoreaktör sistemlerinin mimaride kullanım örneklerinin, tasarımda kullanılan fotobiyoreaktörün çeşidi, projenin uygulandığı lokasyon ve projenin tasarım senaryosuyla değişen bütüncül işletme modeline göre şekillendiği görülmüştür.

4
Sonuç ve Öneriler

4.1. Sonuç

Örnek incelemeleri ve akademik çalışmaların değerlendirilmesi sonucunda mikroalglerin mimaride kullanımı, gerçekleştirilmiş uygulamalar ve tasarım fikirlerindeki veriler ile söylemler bağlamında mimariye ve sürdürülebilirliğe önemli katkılarının olmasının yanı sıra düşünülmesi, dikkat edilmesi gereken üçüncü bölümde tanımlanan sorunları da beraberinde getirdiği görülmüştür.

Mikroalglerin yenilenebilir enerji kaynağı olarak fotobiyoreaktör cephe elemanı olarak kullanılması diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş panelleri ve rüzgar tirübünleri gibi binaya entegre sistemlerle kıyaslandığında daha maliyetlidir. Aynı miktarda enerji eldesi sağlayabilmek için sisteme entegre edilecek mikroalg fotobiyoreaktör cephe elemanlarının diğer entegre sistemlere oranla başlangıç maliyeti açısından dezavantajlı olduğu görülmüştür. Sistemin mimari bir yapıya entegrasyonu düşünüldüğünde taşıyıcı sisteme yapacağı ek taşıma yükü yapı için sorun teşkil etmektedir. Mikroalg fotobiyoreaktör sistemlerinin tüm örneklerde mevcut binaların döşemelerine ikincil bir cephe önerisi olarak entegre edilmiş oduğu görülmüştür. Cepheye entegre sistemler mevcut faaliyetini sürdüren bir yapının taşıyıcı sistemine fazladan ağırlık teşkil edecek olan sistem için yapının taşıma yükü hesabı tekrar gözden geçirilmelidir. İncelenen örneklerde de görüldüğü gibi fotobiyoreaktör sistemleri güneş ışığı ve CO_2 kullanımı gerektirdiği için sürekli dış mekanla temas halinde olan sistemlerdir. Dış mekanda kullanılan fotobiyoreaktör sistemlerinin hava şartlarına uyumluluğu ve dayanıklılığı da önemli bir sorundur. Hava şartlarından etkilenme durumu güneş ışığından yararlanma süresi ve iklime uyumlulukla birlikte düşünülmelidir. Dikkat edilmesi gereken hususlar, seçilen fotobiyoreaktörün geometrisi ve fotobiyoreaktör kültür ortamını çerçeveleyen geçirgen panellerin, sistemin uygulanacağı iklim ve hava şartlarına dayanıklı malzemelerden seçilmesi gerektiğidir. Seçilen fotobiyoreaktör geometrisinden dolayı sistem içerisinde yetişen mikroalglerin

yapının bulunduğu konuma göre güneş ışığına fazla ya da az maruz kalarak bozunması durumunda kararma, kirlenme, yapışma gibi sorunlar teşkil ederek cephe panellerine zarar verebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Sistemin uygulanacağı lokasyon da çok önemlidir. Binanın bulunduğu enlemlere göre, yağışlı ve güneşli gün süresi, iklim şartlarının bir getirisi olarak önemsenmeli ve sistem için düşünülen tüm malzemeler bölgenin iklimi ve hava şartlarıyla uyumlu olarak her proje özelinde ayrıca değerlendirilmelidir. Ayrıca çift cephe elemanı olarak kullanılan fotobiyoreaktör cepheler gölgeleme kolaylığı sağlamasının yanı sıra, ilk alg ekimi sonucunda mikroalglerin sistem içerisinde büyüyerek şeffaf panelleri doldurması ile hasat edileceği vakite kadar geçen süreçte panellerin geçirgenliği zamanla azalması kullanıcının görüşünü kısıtlamaktadır. Görüş kısıtlanması fotobiyoreaktör sisteminin işleyişinin yapısal durumundan kaynaklanır ve kullanıcı konforu açısından negatif bir durumdur. Tasarım açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir. Tasarım sorununa çözüm olarak bina cephelerinde fotobiyoreaktör uygulamaları yapılırken kullanıcı görüşünü kısıtlamayacak şekilde fotobiyoreaktör geometrisi seçilmeli ya da yapının kullanıcı görüşünü engellemeyecek kısımlarında değerlendirilmesine dikkat edilmelidir. Sistemin teknik detayları ve işleyişi söz konusu olduğunda büyük depolama ve işletim sistemlerine duyulan ihtiyacı yapı fonksiyonellik ve tasarım açısından sorun teşkil edebilmektedir. Mikroalglerin cephelerde fotobiyoreaktörlerde yetiştirilmesinin ardından yapılan mikroalg hasat işlemleri, sistem döngüsünün gerçekleştirildiği tüm mekanik işlemler ve sistemin sahip olduğu boru kanalları ile otomatik kontrolü sağlayan bilgisayarlı takip birimleri gibi tüm işlemler örneklerde de görüldüğü üzere henüz uygulamada bina döşemesinde çözülemediğinden ekstra mekan gereksinimine ihtiyaç duyulup teknik hacimleri için bir dairenin planında bulunan oda ölçeğinden daha fazla metrekarede alanlar kullanılmak zorunda kalınmıştır. Ekstra alan ihtiyacı yapının mekan düzenlemesi yapılırken fonsiyonellik ve kullanışlılık açısından en uygun tasarımı gerçekleştirilmesi adına mimarlara kısıtlama getirmektedir. Ayrıca sistemin uygulanabilirliği, işletme modelinin nasıl olacağı gibi konularla birlikte değerlendirildiğinde faydalarının yanında problemleri de beraberinde getirmiştir. İncelenen örneklerden görüldüğü üzere tasarım ve uygulamaların ortaya çıkış söylemleri yapılı çevreye bütüncül katkı olarak ifade edilse de tüm örnekler kendine has işletim modelleri ile ifade edilmiştir. Yani sistem yalnızca kendi içerisinde değerlendirilmiş yapının bulunduğu bölgenin tasarım önerilerine cevap verebilecek

kentsel alt yapıya sahip olup olmadığına dikkat edilmemiştir. Örneklerde bahsi geçen sıcak suyun depolandığı sondaj kuyuları, enerji üretiminin gerçekleştiği biyogaz üretim tesisleri ve biyodizel üretim rafinerilerinin yapının uygulandığı lokasyona göre konumundan doğan taşıma maliyetleri, alt yapı eksikliği durumunda yeniden inşaasının getireceği ekonomik zorluk ve teknik donanım eksikliği gibi problemler sistemin tam kapasite çalışabilme durumuna engel teşkil edebileceği görülmüştür.

4.2. Öneriler

Mikoalgler kullanılarak tasarlanan fotobiyoreaktör sistemlerinin mimaride kullanımı ile henüz gelişme aşamasındadır. Çevre bilinçli yaklaşımlarla birlikte yenilenebilir enerji üzerinde yapılan çalışmalar ışığında fotobiyoreaktör sistemlerinin mimaride kullanımının artacağı düşünülmektedir.

Fotobiyoreaktörlerin bina ölçeğinde mimaride kullanımı, mevcut bir yapıya entegrasyon ve yeni projeyle bütüncül tasarım olmak üzere ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Mevcut yapıya entegre bir sistem söz konusu olduğunda taşıyıcı sisteme yüklenen ek taşıma yükü başta olmak üzere tüm uygulama koşulları dikkate alınmalıdır. Fotobiyoreaktör sistemli yeni bir bina tasarım konseptinde fotobiyoreaktör sisteminin sadece çift cephe olarak kullanımı değil yapı strüktürü ile birlikte düşünülüp tasarlanarak yenilikçi sistem detayları geliştirilmesi ve fotobiyoreaktör tasarımlarında dikkat edilmesi gereken hususların teknolojik ilerlemelerle birlikte geliştirilerek enerji verimliliği daha yüksek fotobiyoreaktörler üretilmesi ile tez çalışmasında sorun olarak nitelendirilen problemler aşılabilir.

Fotobiyoreakör sistemlerinin mimaride kullanımının geliştirilerek mevcut altyapıya entegrasyonları başarılı bir şekilde sağlanabilir ya da fotobiyoreaktör sistemleri kullanılarak yeniden planlanacak yeşil altyapılar oluşturulabilir. Fotobiyoreaktörlerin bina cephelerinde kullanılarak, kentsel enstalasyon simgesi olarak ve iç mekan tasarımları ile desteklenerek mimarlık disiplinine entegre edildiği görülmüştür. Fotobiyoreaktör sistemlerinin sadece endüstriyel alanda değil farklı alanlarda ve farklı amaçlarla kullanımı, mikroalgler kullanılarak tasarlanan fotobiyoreaktörlerin mimariye entegrasyonu ile tüm kenti dahil edebilecek bir sürdürülebilirlik anlayışını göstermektedir.

Kaynakça

Abu-Rezq, T. S., Al-Musallam, L., Al-Shimmari, J., & Dias, P. (1999). Optimum production conditions for different high-quality marine algae. *Hydrobiologia*, *403*, 97-107.

Afgan, N. H., & Carvalho, M. G. (2002). Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, *27*(8), 739-755.

Ahmad, N., & Wyckoff, A. (2003). Carbon dioxide emissions embodied in international trade of goods.

Alabi, A. O., Tampier, M., & Bibeau, E. (2009). Microalgae technologies & processes for biofuels-bioenergy production in British Columbia: current technology, suitability & barriers to implementation. Vancouver: British Columbia Innovation Council.

Encylopedia. (2019). Algae. U*X*L Complete Life Science Resource, https://www.encyclopedia.com/social-sciences/applied-and-social-sciences-magazines/algae, 05 Şubat 2019.

Arsalane, W., Rousseau, B., & Duval, J. C. (1994). Influence of the pool size of the xanthophyll cycle on the effects of light stress in a diatom: competition between photoproteci'ion and photoinhibition. *Photochemistry and photobiology*, *60*(3), 237-243.

Arup. (2015). SolarLeaf. *Worldwide first façade system to cultivate micro-algae to generate heat and biomass as renewable energy sources*. https://www.arup.com/projects/solar-leaf, 27 Mart 2019.

Aslan, S., & Kapdan, I. K. (2006). Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *Ecological engineering*, *28*(1), 64-70.

Bahadar, A., & Khan, M. B. (2013). Progress in energy from microalgae: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *27*, 128-148.

Bahadur, A., Zubair, M., & Khan, M. B. (2013). Design, construction and evaluation of solarized airlift tubular photobioreactor. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 439, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.

Barbosa, M. J. (2003). *Microalgal photobioreactors: scale-up and optimisation*.

Barclay, W., Apt, K., & Dong, X. D. (2013). Commercial production of microalgae via fermentation. *Handbook of microalgal culture: applied phycology and biotechnology*. *Blackwell, Chichester*, 134-145.

Bartley, M. L., Boeing, W. J., Corcoran, A. A., Holguin, F. O., & Schaub, T. (2013). Effects of salinity on growth and lipid accumulation of biofuel microalga Nannochloropsis salina and invading organisms. *Biomass and Bioenergy*, *54*, 83-88.

Behrenfeld, M. J., Prasil, O., Kolber, Z. S., Babin, M., & Falkowski, P. G. (1998). Compensatory changes in photosystem II electron turnover rates protect photosynthesis from photoinhibition. *Photosynthesis Research*, *58*(3), 259-268.

Behrens PW. (2005). Photobioreactors and fermentors: the light and dark sides of growing algae. In: Andersen RA, editor. Algal Cult TechAlgal Culturing Techniques. 1st ed. Burlington, USA: Elsevier Academic Press; p. 189–203.

Bell, S. G., & Codd, G. A. (1994). Cyanobacterial toxins and human health. *Reviews in Medical Microbiology*, *5*(4), 256-264.

Benemann, J. R. (2008, April). Open ponds and closed photobioreactors–comparative economics. In *5th Annual World Congress on Industrial Biotechnology and Bioprocessing, Chicago, Illinois, USA*.

Bernard. M. (2011). HOK / Vanderweil Process Zero Concept Building: As Green As...Algae?,http://buildipedia.com/aec-pros/featured-architecture/hok-vanderweil-process-zero-concept-building-as-green-asalgae, 28 Mart 2019.

Berndes, G. (2002). Bioenergy and water—the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. *Global environmental change*, *12*(4), 253-271.

Bitog, J. P., Lee, I. B., Lee, C. G., Kim, K. S., Hwang, H. S., Hong, S. W., ... & Mostafa, E. (2011). Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: a review. *Computers and electronics in agriculture*, *76*(2), 131-147.

Blair, M. F., Kokabian, B., & Gude, V. G. (2014). Light and growth medium effect on Chlorella vulgaris biomass production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *2*(1), 665-674.

Blanken, W., Cuaresma, M., Wijffels, R. H., & Janssen, M. (2013). Cultivation of microalgae on artificial light comes at a cost. *Algal Research*, *2*(4), 333-340.

Bogias, P. (2014). Algae textile: a lightweight photobioreactor for urban buildings (Master's thesis, University of Waterloo).

Borowitzka, L. J. (1991). Development of western biotechnology's algal β-carotene plant. *Bioresource technology*, *38*(2-3), 251-252.

Borowitzka, M. A. (1999). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, and fermenters. In *Progress in industrial microbiology* (Vol. 35, pp. 313-321). Elsevier.

Boussiba, S., Sandbank, E., Shelef, G., Cohen, Z., Vonshak, A., Ben-Amotz, A., ... & Richmond, A. (1988). Outdoor cultivation of the marine microalga Isochrysis galbana in open reactors. *Aquaculture*, *72*(3-4), 247-253.

BP. (2012). BP statistical review of world energy, https://www.laohamutuk.org/DVD/docs/BPWER2012report.pdf, 25 Şubat 2019.

Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and sustainable energy reviews*, *14*(2), 557-577.

Breuer, G., Lamers, P. P., Martens, D. E., Draaisma, R. B., & Wijffels, R. H. (2012). The impact of nitrogen starvation on the dynamics of triacylglycerol accumulation in nine microalgae strains. *Bioresource Technology*, *124*, 217-226.

Brown, L. M., & Zeiler, K. G. (1993). Aquatic biomass and carbon dioxide trapping. *Energy Conversion and Management*, *34*(9-11), 1005-1013.

Brownlee, J. (2015). The Future Of Home Decor: Vats Of Edible, Bioluminescent Algae, https://www.fastcompany.com/3049588/the-future-of-home-decor-vats-of-edible-bioluminescent-algae, 14 Mart 2019.

BuildUp. (2015). The BIQ House: first algae-powered building in the world, http://www.buildup.eu/en/practices/cases/biq-house-first-algae-powered-building-world, 17 Şubat 2019.

Burlew, J. S. (1953). Algal culture from laboratory to pilot plant. *Algal culture from laboratory to pilot plant*. *Carnegie Institution of Washington, Washington, DC,* p 357

Burnham, S. (2018). Programming the City: Repurposing Urban Objects for New Use Chapter 4: Energy + Ecology Book Page 129-133.

Cai, T., Park, S. Y., & Li, Y. (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *19*, 360-369.

Calleja, P. (2013). The street lamp that absorbs CO_2. TedxLausanne speech, https://www.tedxlausanne.com/talks/pierre-calleja/, 3 Mart 2019.

Castellanos, C.S. (2013). Batch and Continuous Studies of Chlorella Vulgaris in Photo-Bioreactors. The University of Western Ontario; 2013. p. 80.

Chalcraft, E. (2013). Arup unveils word's first algae-powered building, https://www.dezeen.com/2013/04/15/arup-unveils-worldsfirst-algae-powered-building/, 15 Mart 2019.

Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. *Bioresource technology*, *102*(1), 71-81.

Chew, K. W., Yap, J. Y., Show, P. L., Suan, N. H., Juan, J. C., Ling, T. C., ... & Chang, J. S. (2017). Microalgae biorefinery: high value products perspectives. *Bioresource technology*, *229*, 53-62.

Chinnasamy, S., Rao, P. H., Bhaskar, S., Rengasamy, R., & Singh, M. (2012). Algae: a novel biomass feedstock for biofuels. *Microbial biotechnology: Energy and environment*, 224-239.

Chisti, Y. (1998). Pneumatically agitated bioreactors in industrial and environmental bioprocessing: hydrodynamics, hydraulics, and transport phenomena. *Applied Mechanics Reviews*, *51*(1), 33-112.

Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, *25*(3), 294-306.

Chisti, Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in biotechnology*, *26*(3), 126-131.

Chisti, Y., & Moo-Young, M. (1994). Clean-in-place systems for industrial bioreactors: design, validation and operation. *Journal of Industrial Microbiology*, *13*(4), 201-207.

Chisti, Yusuf. "Modern systems of plant cleaning." Encyclopedia of food microbiology 3 (1999): 1806-1815.

Chiu, S. Y., Kao, C. Y., Tsai, M. T., Ong, S. C., Chen, C. H., & Lin, C. S. (2009). Lipid accumulation and CO_2 utilization of Nannochloropsis oculata in response to CO_2 aeration. *Bioresource technology*, *100*(2), 833-838.

Chiu, S. Y., Tsai, M. T., Kao, C. Y., Ong, S. C., & Lin, C. S. (2009). The air-lift photobioreactors with flow patterning for high-density cultures of microalgae and carbon dioxide removal. *Engineering in life sciences*, *9*(3), 254-260.

Chokshi, K., Pancha, I., Trivedi, K., George, B., Maurya, R., Ghosh, A., & Mishra, S. (2015). Biofuel potential of the newly isolated microalgae Acutodesmus dimorphus under temperature induced oxidative stress conditions. *Bioresource technology*, *180*, 162-171.

Christenson, L. B., & Sims, R. C. (2012). Rotating algal biofilm reactor and spool harvester for wastewater treatment with biofuels by-products. *Biotechnology and bioengineering*, *109*(7), 1674-1684.

Colt. (2013), SolarLeaf technical datasheet, https://www.coltinfo.co.uk/files/pdf/UK/SolarLeaf%20bioreactor%20facade.pdf, 3 Nisan 2019.

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

Cook PM (1953) U.S. Patent No. 2,658,310. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC.

Courchesne, N. M. D., Parisien, A., Wang, B., & Lan, C. Q. (2009). Enhancement of lipid production using biochemical, genetic and transcription factor engineering approaches. *Journal of biotechnology*, *141*(1-2), 31-41.

Coutteau, P. (1996). Micro-algae. Manual on the production and use of live food for aquaculture, 361.

Croze, O. A., Sardina, G., Ahmed, M., Bees, M. A., & Brandt, L. (2013). Dispersion of swimming algae in laminar and turbulent channel flows: consequences for photobioreactors. *Journal of The Royal Society Interface*, *10*(81), 20121041.

Dalay, M.C, İmamoğlu, E. ve Öncel, S. (2008). Mikroalgal biyokütle üretimi için düşük maliyetli fotobiyoreaktör tasarımı. TÜBİTAK MAG, Proje No: 104M354. 19 Ekim 2014

Dallaire, V., Lessard, P., Vandenberg, G., & de la Noüe, J. (2007). Effect of algal incorporation on growth, survival and carcass composition of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) fry. *Bioresource technology*, *98*(7), 1433-1439.

Dauta, A., Devaux, J., Piquemal, F., & Boumnich, L. (1990). *Growth rate of four freshwater algae in relation to light and temperature*. *Hydrobiologia, 207(1),* 221-226.

De Bhowmick, G., Subramanian, G., Mishra, S., & Sen, R. (2014). Raceway pond cultivation of a marine microalga of Indian origin for biomass and lipid production: A case study. *Algal Research*, *6*, 201-209.

DiStasio, C. (2015). inhabitat. These living algae lamps produce light, heat, and a protein-packed snack, https://inhabitat.com/living-things-furniture-puts-spirulina-to-work-for-light-heat-and-a-protein-packed-snack/, 4 Nisan 2019.

Donewell. (t.y.). Customized Solutions dor Researchers. Photobioreactor Annular 01.Gallery, http://donewell.com.my/gallery/index.php/Customized-Solutions-for-Researchers/Photobioreactor-Annular-01, 4 Nisan 2019.

Doucha, J., & Lívanský, K. (2006). Productivity, CO 2/O 2 exchange and hydraulics in outdoor open high density microalgal (Chlorella sp.) photobioreactors operated in a Middle and Southern European climate. *Journal of Applied Phycology*, *18*(6), 811-826.

Douenias, J., Frier, E. (2015). Living Things. Photosynthetic furniture, http://www.livingthings.us, 3 Nisan 2019.

EcoFriend. (2014). BIOS- FIN SYSTEM: A building facade that produces solar energy and biofiltrates water, https://ecofriend.com/bios-fin-system-building-facade-produces-solar-energy-biofiltrates-water.html, 3 Nisan 2019.

ecoLogicStudio (2018). photo.Synthetica, http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=3&idsubcat=71&idproj=174, 10 Nisan 2019.

ecoLogicStudio. (2014a). Algae Canopy, http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=3&idsubcat=59&idproj=137, 10 Nisan 2019.

ecoLogicStudio. (2014b). Interni – Expo, http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=7&idsubcat=59&idproj=129, 11 Nisan 2019.

ecoLogicStudio. (2019). H.O.R.T.U.S. XL, http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=7&idsubcat=59&idproj=177, 11 Nisan 2019.

Edwards, M. (2013) "Algae 101: Algae Medical Solutions Part 1" (algaeindustrymagazine.com. Erişim adresi: http://www.algaeindustrymagazine. com/algae–medical–solutions–part–1/ 7 Nisan 2019.

Edwards, M. R. (2008). Green algae strategy: end oil imports and engineer sustainable food and fuel. CreateSpace.

Elcik, H., & Çakmakcı, M. (2017). Mikroalg üretimi ve mikroalglerden biyoyakıt eldesi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, *32*(3).

Elnokaly, A., & Keeling, I. (2016). An empirical study investigating the impact of micro-algal technologies and their application within intelligent building fabrics. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *216*, 712-723.

Elrayies, G. M. (2018). Microalgae: prospects for greener future buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 1175-1191.

Fathi, M., & Asem, A. (2013). Investigating the impact of NaCl salinity on growth, β-carotene, and chlorophyll a in the content life of halophytes of algae Chlorella sp. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, *6*(3), 241-245.

FEMONLINE. (2017). Bubble Column Photobioreactor. (F&M- BCP), http://www.femonline.it/products/, 4 Mayıs 2019.

Finlay, J. A., Callow, M. E., Ista, L. K., Lopez, G. P., & Callow, J. A. (2002). The influence of surface wettability on the adhesion strength of settled spores of the green alga Enteromorpha and the diatom Amphora. *Integrative and comparative biology*, *42*(6), 1116-1122.

Fonseca M.M, Teixeira J.A. (2007). Reactores Biológicos—Fundamentos e Aplicações. In: Fonseca MM, Teixeira JA, editors. Lisboa: Lidel Edições Técnicas;. p. 483.

Gao, X., Kong, B., & Vigil, R. D. (2015). Characteristic time scales of mixing, mass transfer and biomass growth in a Taylor vortex algal photobioreactor. *Bioresource technology*, *198*, 283-291.

Genin, S. N., Aitchison, J. S., & Allen, D. G. (2014). Design of algal film photobioreactors: material surface energy effects on algal film productivity, colonization and lipid content. *Bioresource technology*, *155*, 136-143.

Genin, S. N., Aitchison, J. S., & Allen, D. G. (2016). Photobioreactor-Based Energy Sources. In *Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency* (pp. 429-455). Springer, Cham.

George, B., Pancha, I., Desai, C., Chokshi, K., Paliwal, C., Ghosh, T., & Mishra, S. (2014). Effects of different media composition, light intensity and photoperiod on morphology and physiology of freshwater microalgae Ankistrodesmus falcatus–A potential strain for bio-fuel production. *Bioresource technology*, *171*, 367-374.

Goldemberg, J. (Ed.). (2000). *World Energy Assessment: Energy and the challenge of sustainability* (pp. 1-29). New York^ eNY NY: United Nations Development Programme.

Griffa, C. (2014). Algaetecture, Expo 2015 preview: algae systems to design and feed the city. https://cesaregriffa.com/2014/04/07/algaetecture-expo-2015-preview-algae-systems-to-design-and-feed-the-city/, 7 Mayıs 2019.

Griffa, C. (2015). Vertical algae farm 2014, https://cesaregriffa.com/2015/03/16/vertical-algae-farm-2014/, 3 Mayıs 2019.

Grima, E.M., Fernández, F. A., Camacho, F. G., & Chisti, Y. (1999). Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. In *Progress in industrial microbiology* (Vol. 35, pp. 231-247). Elsevier.

Gris, B., Morosinotto, T., Giacometti, G. M., Bertucco, A., & Sforza, E. (2014). Cultivation of Scenedesmus obliquus in photobioreactors: effects of light intensities and light–dark cycles on growth, productivity, and biochemical composition. *Applied biochemistry and biotechnology*, *172*(5), 2377-2389.

GSA. (t.y.). 300 North Los Angeles Street Federal Building, https://www.gsa.gov/about-us/regions/welcome-to-the-pacific-rim-region-9/buildings- and-facilities/california/300-north-los-angeles-street-federal-building, 4 Mayıs 2019.

Guo, F., Wang, H., Wang, J., Zhou, W., Gao, L., Chen, L., ... & Liu, T. (2014). Special biochemical responses to nitrogen deprivation of filamentous oleaginous microalgae Tribonema sp. *Bioresource technology*, *158*, 19-24.

Guo, X., Yao, L., & Huang, Q. (2015). Aeration and mass transfer optimization in a rectangular airlift loop photobioreactor for the production of microalgae. *Bioresource technology*, *190*, 189-195.

Gürcan, T.S. (2012). ekoYapı, '' Yeşil İç Mimarlık Nedir?; Turizm Yapılarında Yeşil İç Mekan'', https://www.ekoyapidergisi.org/13-yesil-ic-mimarlik-nedir.html, 23 Mart 2019.

Hall, D. O., & Moss, P. A. (1983). Biomass for energy in developing countries. *Geojournal*, *7*(1), 5-14.

Hall, J. (2011). "The Most Important Organism? | Ecology Global Network." Ecology Global Network, http://www.ecology.com/2011/09/12/important-organism/, 15 Mart 2019.

Halmann, M., Steinberg, M. (2000). Greenhouse Gas Carbon Dioxide Mitigation: Science and Technology. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.

Hase, R., Oikawa, H., Sasao, C., Morita, M., & Watanabe, Y. (2000). Photosynthetic production of microalgal biomass in a raceway system under greenhouse conditions in Sendai city. *Journal of bioscience and bioengineering*, *89*(2), 157-163.

Hemming, S., Sapounas, A., & Voogt, W. (2012). *Algenteeltsystemen voor de tuinbouw: Integratie* (No. 1221). Wageningen UR Glastuinbouw.

Herman, E. F., & Anderson, W. (1947). Control of algal growths in hatching ponds and raceways. *The Progressive Fish-Culturist*, *9*(4), 211-212.

Hidaka, T., Inoue, K., Suzuki, Y., & Tsumori, J. (2014). Growth and anaerobic digestion characteristics of microalgae cultivated using various types of sewage. *Bioresource technology*, *170*, 83-89.

Hossain, A. S., Salleh, A., Boyce, A. N., Chowdhury, P., & Naqiuddin, M. (2008). Biodiesel fuel production from algae as renewable energy. *American journal of biochemistry and biotechnology*, *4*(3), 250 254

Hossain, M. M., & de Lasa, H. I. (2008). Chemical-looping combustion (CLC) for inherent CO_2 separations—a review. *Chemical Engineering Science*, *63*(18), 4433-4451.

Hu, Q., Guterman, H., & Richmond, A. (1996). A flat inclined modular photobioreactor for outdoor mass cultivation of photoautotrophs. *Biotechnology and Bioengineering*, *51*(1), 51-60

Huang, G., Chen, F., Wei, D., Zhang, X., & Chen, G. (2010). Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Applied energy*, *87*(1), 38-46.

İklim Haber. (2019). İklim değişikliği Komitesi: Küresel ısınmaya katkımızı 30 yıl içinde sonlandırabiliriz. Erişim adresi: https://www.iklimhaber.org/iklim-degisikligi-komitesi-kuresel-isinmaya-katkimizi-30-yil-icinde-sonlandirabiliriz/

Jacob-Lopes, E., Scoparo, C. H. G., Lacerda, L. M. C. F., & Franco, T. T. (2009). Effect of light cycles (night/day) on CO_2 fixation and biomass production by microalgae in photobioreactors. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *48*(1), 306-310.

Janssen, M., de Bresser, L., Baijens, T., Tramper, J., Mur, L. R., Snel, J. F., & Wijffels, R. H. (2000). Scale-up aspects of photobioreactors: effects of mixing-induced light/dark cycles. *Journal of applied phycology*, *12*(3-5), 225-237.

Jiménez, C., Cossío, B. R., Labella, D., & Niell, F. X. (2003). The feasibility of industrial production of Spirulina (Arthrospira) in Southern Spain. *Aquaculture*, *217*(1-4), 179-190.

Junying, Z. H. U., Junfeng, R. O. N. G., & Baoning, Z. O. N. G. (2013). Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel. *Chinese Journal of Catalysis*, *34*(1), 80-

Kathrein HR (1960) U.S. Patent No. 2,949,700. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC

Kaygusuz, K. (2009). Bioenergy as a clean and sustainable fuel. *Energy Sources, Part A*, *31*(12), 1069-1080.

Kim, J., Yoo, G., Lee, H., Lim, J., Kim, K., Kim, C. W., ... & Yang, J. W. (2013). Methods of downstream processing for the production of biodiesel from microalgae. Biotechnology advances, 31(6), 862-876.

Kim, T. H., Lee, Y., Han, S. H., & Hwang, S. J. (2013). The effects of wavelength and wavelength mixing ratios on microalgae growth and nitrogen, phosphorus removal using Scenedesmus sp. for wastewater treatment. *Bioresource technology*, *130*, 75-80.

Kin,S. (2010). Airlift Bioreactor Links, http://biofuels2010.blogspot.com/2010/11/airlfit-bioreactor-link.html, 21 Nisan 2019.

Koh, L. P., & Ghazoul, J. (2008). Biofuels, biodiversity, and people: understanding the conflicts and finding opportunities. *Biological conservation*, *141*(10), 2450-2460.

Koller, A. P., Löwe, H., Schmid, V., Mundt, S., & Weuster-Botz, D. (2017). Model-supported phototrophic growth studies with Scenedesmus obtusiusculus in a flat-plate photobioreactor. *Biotechnology and bioengineering*, *114*(2), 308-320.

Komolafe, O., Orta, S. B. V., Monje-Ramirez, I., Noguez, I. Y., Harvey, A. P., & Ledesma, M. T. O. (2014). Biodiesel production from indigenous microalgae grown in wastewater. *Bioresource technology*, *154*, 297-304.

Kram J.W. (2008). Industry steps up algae efforts. Biodiesel Magazine 2008, http://www.biodieselmagazine.com/articles/2739/industry-steps-up-algae-efforts, 6 Mayıs 2019.

Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J., ... & Van Langenhove, H. (2010). Enhanced CO_2 fixation and biofuel production via

microalgae: recent developments and future directions. *Trends in biotechnology*, *28*(7), 371-380.

Kumar, K., Dasgupta, C. N., Nayak, B., Lindblad, P., & Das, D. (2011). Development of suitable photobioreactors for CO_2 sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresource technology*, *102*(8), 4945-4953.

Kunjapur, A. M., & Eldridge, R. B. (2010). Photobioreactor design for commercial biofuel production from microalgae. *Industrial & engineering chemistry research*, *49*(8), 3516-3526.

Lakaniemi, A-M. (2012). Microalgal Cultivation and Utilization in Sustainable Energy Production. (Tampere University of Technology. Publication; Vol. 1034). Tampere University of Technology.

Lavens, P., & Sorgeloos, P. (1996). Manual on the production and use of live food for aquaculture (No. 361). Food and Agriculture Organization (FAO).

Lee, C. S., Lee, S. A., Ko, S. R., Oh, H. M., & Ahn, C. Y. (2015). Effects of photoperiod on nutrient removal, biomass production, and algal-bacterial population dynamics in lab-scale photobioreactors treating municipal wastewater. *Water research*, *68*, 680-691.

Lee, R. E. (1980). Phycology. New York: Cambridge University Press,http://www.dbbe.fcen.uba.ar/contenido/objetos/PhycologyLee_1395342784413494.pdf, 2 Mayıs 2019.

Leung, D. Y., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied energy*, *87*(4), 1083-1095.

Li, J., Stamato, M., Velliou, E., Jeffryes, C., & Agathos, S. N. (2015). Design and characterization of a scalable airlift flat panel photobioreactor for microalgae cultivation. *Journal of applied phycology*, *27*(1), 75-86.

Liang, K., Zhang, Q., Gu, M., & Cong, W. (2013). Effect of phosphorus on lipid accumulation in freshwater microalga Chlorella sp. *Journal of Applied Phycology*, *25*(1), 311-318

Lyngfelt, A., Leckner, B., & Mattisson, T. (2001). A fluidized-bed combustion process with inherent CO_2 separation; application of chemical-looping combustion. *Chemical Engineering Science*, *56*(10), 3101-3113.

Maor, T., & Appelbaum, J. (2011). Solar radiation on horizontal tubular microalgae photobioreactor: direct beam radiation. *Journal of Solar Energy Engineering*, *133*(2), 024502.,

Marchetti, J. M., Miguel, V. U., & Errazu, A. F. (2007). Possible methods for biodiesel production. *Renewable and sustainable energy reviews*, *11*(6), 1300-1311.

Marsullo, M., Mian, A., Ensinas, A. V., Manente, G., Lazzaretto, A., & Marechal, F. (2015). Dynamic modeling of the microalgae cultivation phase for energy production in open raceway ponds and flat panel photobioreactors. *Frontiers in Energy Research*, *3*, 41.

Masojídek, J., Torzillo, G. (2014). "Mass Cultivation of Freshwater Microalgae." In book: Encyclopedia of Ecology, pp.2226-2235. DOI: 10.1016/B978-008045405-4.00830-2.

Masojidek, J., Torzillo, G., Koblizek, M. (2013). Photosynthesis in microalgae. In: Richmond, A., Hu, Q. (Eds.), Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology Second Edition. Wiley, pp. 21-36.

Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, *14*(1), 217-232.

Matthes, S., Matschke, M., Cotta, F., Grossmann, J., & Griehl, C. (2015). Reliable production of microalgae biomass using a novel microalgae platform. *Journal of applied phycology*, *27*(5), 1755-1762.

Milano, J., Ong, H. C., Masjuki, H. H., Chong, W. T., Lam, M. K., Loh, P. K., & Vellayan, V. (2016). Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *58*, 180-197.

Mirón, A. S., Gomez, A. C., Camacho, F. G., Grima, E. M., & Chisti, Y. (1999). Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae. In *Progress in industrial microbiology* (Vol. 35, pp. 249-270). Elsevier.

Molina, E., Fernández, J., Acién, F. G., & Chisti, Y. (2001). Tubular photobioreactor design for algal cultures. *Journal of biotechnology*, *92*(2), 113-131.

Mulbry, W., Kondrad, S., Pizarro, C., & Kebede-Westhead, E. (2008). Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers. *Bioresource technology*, *99*(17), 8137-8142.

Muller-Feuga, A. (2000). The role of microalgae in aquaculture: situation and trends. *Journal of applied phycology*, *12*(3-5), 527-534.

Munoz, R., & Guieysse, B. (2006). Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water research*, *40*(15), 2799-2815.

Mutanda, T., Ramesh, D., Karthikeyan, S., Kumari, S., Anandraj, A., & Bux, F. (2011). Bioprospecting for hyper-lipid producing microalgal strains for sustainable biofuel production. *Bioresource technology*, *102*(1), 57-70.

Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H., & Wijffels, R. H. (2011). Microalgal production—a close look at the economics. *Biotechnology advances*, *29*(1), 24-27.

Ogbonna, J. C., & Tanaka, H. (2000). Light requirement and photosynthetic cell cultivation–Development of processes for efficient light utilization in photobioreactors. *Journal of applied phycology*, *12*(3-5), 207-218.

Ogbonna, J. C., Yada, H., & Tanaka, H. (1995). Light supply coefficient: a new engineering parameter for photobioreactor design. *Journal of fermentation and bioengineering*, *80*(4), 369-376.

Oilgae. (2013) "About Algae". Erişim adresi: http://www.oilgae.com/algae/algae.html

Oncel, S. S. (2013). Microalgae for a macroenergy world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *26*, 241-264.

Öncel, S. Ş., Köse, A., & Öncel, D. Ş. (2016). Façade integrated photobioreactors for building energy efficiency. In *Start-Up Creation* (pp. 237-299). Woodhead Publishing.

Oncel, S. S., Kose, A., Vardar, F., & Torzillo, G. (2015). From the Ancient Tribes to Modern Societies, Microalgae Evolution from a Simple Food to an Alternative Fuel Source. In *Handbook of Marine Microalgae* (pp. 127-144). Academic Press.

Packer, M. (2009). Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy. *Energy policy*, *37*(9), 3428-3437.

Palmer, J., Flint, S., & Brooks, J. (2007). Bacterial cell attachment, the beginning of a biofilm. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, *34*(9), 577-588.

Pancha, I., Chokshi, K., George, B., Ghosh, T., Paliwal, C., Maurya, R., & Mishra, S. (2014). Nitrogen stress triggered biochemical and morphological changes in the microalgae Scenedesmus sp. CCNM 1077. *Bioresource Technology*, *156*, 146-154.

Patil, V., Tran, K. Q., & Giselrød, H. R. (2008). Towards sustainable production of biofuels from microalgae. *International journal of molecular sciences*, *9*(7), 1188-1195.

Pekmezci, Y. T. (2015). AlgaEnergetiCity İstanbul, 6th Advanced Architecture Contest, Productive Cities.

photo.Synthetica. (2015). Urban Algae Canopy. Milano 2015, https://www.photosynthetica.co.uk/urban-algae-folly-milan, 24 Nisan 2019.

photo.Synthetica. (2018). Algae Curtain. Algae powered bio smart cladding system, https://www.photosynthetica.co.uk/urban-algae-clad, 24 Nisan 2019.

Pires, J. C. (2017). COP21: The algae opportunity?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *79*, 867-877.

port. (2009). Carbon T.A.P (Tunnel Algae Park), http://porturbanism.com/work/carbon-t-a-p/, 4 Nisan 2019.

Post, F. J., Borowitzka, L. J., Borowitzka, M. A., Mackay, B., & Moulton, T. (1983). The protozoa of a Western Australian hypersaline lagoon. *Hydrobiologia*, *105*(1), 95-113.

Posten C. (2012). Design and performance parameters of photobioreactors. (TATuP) J ITAS Technol Assess;21:38–45.

Posten, C. (2009). Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Sciences*, *9*(3), 165-177.

Potter, A.; Eza, R. (t.y.). Algae Analytics. educational products, cultures, and consulting. BioFence, http://algaeanalytics.com/biofence, 21 Mart 2019.

Proksch G. (2013). Growing sustainability - integrating algae cultivation into the built environment. Edinb Archit Res J.;33(147):62

Pulz, O. (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied microbiology and biotechnology*, *57*(3), 287-293.

Pushparaj, B., Pelosi, E., Tredici, M. R., Pinzani, E., & Materassi, R. (1997). As integrated culture system for outdoor production of microalgae and cyanobacteria. *Journal of Applied Phycology*, *9*(2), 113-119.

Qiu, F. (2014). Algae architecture. (Master's thesis, TU Delft: Delft University of Technology).

Quesnel L.B. (1987). Sterilization and sterility. In: Bu'Lock J, Kristiansen B, editors. New York: Academc Press Inc. p. 197–215.

Quinn, J. C., Turner, C. W., & Bradley, T. H. (2012). Scale-Up of flat plate photobioreactors considering diffuse and direct light characteristics. *Biotechnology and bioengineering*, *109*(2), 363-370.

Quintana, N., Van der Kooy, F., Van de Rhee, M. D., Voshol, G. P., & Verpoorte, R. (2011). Renewable energy from Cyanobacteria: energy production optimization by metabolic pathway engineering. *Applied microbiology and biotechnology*, *91*(3), 471-490.

Radakovits, R., Jinkerson, R. E., Darzins, A., & Posewitz, M. C. (2010). Genetic engineering of algae for enhanced biofuel production. *Eukaryotic cell*, *9*(4), 486-501.

Raeesossadati, M. J., Ahmadzadeh, H., McHenry, M. P., & Moheimani, N. R. (2014). CO_2 bioremediation by microalgae in photobioreactors: impacts of biomass and CO_2 concentrations, light, and temperature. *Algal Research*, *6*, 78-85.

Rao, A. R., Dayananda, C., Sarada, R., Shamala, T. R., & Ravishankar, G. A. (2007). Effect of salinity on growth of green alga Botryococcus braunii and its constituents. *Bioresource technology*, *98*(3), 560-564.

Rashid, N., Rehman, M. S. U., Sadiq, M., Mahmood, T., & Han, J. I. (2014). Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *40*, 760-778.

Razzak, S. A., Hossain, M. M., Lucky, R. A., Bassi, A. S., & de Lasa, H. (2013). Integrated CO_2 capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, *27*, 622-653.

Reinhardt, G., Rettenmaier, N., & Köppen, S. (2008, April). How sustainable are biofuels for transportation. In *Bioenergy: challenges and opportunities*. *International conference and exhibition on bioenergy*.

Reis, A., Gouveia, L., Veloso, V., Fernandes, H. L., Empis, J., & Novais, J. M. (1996). Eicosapentaenoic acid-rich biomass production by the microalga Phaeodactylum tricornutum in a continuous-flow reactor. *Bioresource Technology*, *55*(1), 83-88.

REN21 (2008). Renewables 2007 Global Status Report, 1–52, http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/RE2007_Global_Status_Report.pdf, 2 Nisan 2019.

REN21 (2009). Renewables Global Status Report: 2009 Update, 1-31, http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/RE_GSR_2009_Update.pdf 2 Nisan 2019.

RFA. (2008). Feeding the future: the role of the US ethanol industry in food and feed production. Renewable Fuels Association, Washington DC, USA, https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2015/09/feed_co-products.pdf 11 Nisan 2019.

Richmond, A. (2000). Microalgal biotechnology at the turn of the millennium: a personal view. *Journal of Applied Phycology*, *12*(3), 441-451.

Richmond, A. (2004b). Principles for attaining maximal microalgal productivity in photobioreactors: an overview. In *Asian Pacific Phycology in the 21st Century: Prospects and Challenges* (pp. 33-37). Springer, Dordrecht.

Richmond, A. (Ed.). (2004a). Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology (Vol. 577). Oxford: Blackwell Science.

Richmond, A., Boussiba, S., Vonshak, A., & Kopel, R. (1993). A new tubular reactor for mass production of microalgae outdoors. *Journal of Applied Phycology*, *5*(3), 327-332.

Rijksoverheid. (2011). Plan van Aanpak Energiebesparing Gebouwde Omgeving, https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2011/02/25/plan-van-aanpak-energiebesparing-gebouwde-omgeving, 14 Mayıs 2019.

Rodriguez, J.M. (2013). inhabitat. Living Microalgae Lamp Absorbs CO_2 from the Air, https://inhabitat.com/living-microalgae-lamp-absorbs-co2-from-the-air/, 24 Mart 2019.

Roedel, C., Petersen, J.P. (2013). IBA-Hamburg. Smart Material House-BIQ, https://www.ibahamburg.de/fileadmin/Mediathek/Whitepaper/130716_White_Paper_BIQ_en.pdf, 15 Nisan 2019.

Ruangsomboon, S. (2012). Effect of light, nutrient, cultivation time and salinity on lipid production of newly isolated strain of the green microalga, Botryococcus braunii KMITL 2. *Bioresource Technology*, *109*, 261-265.

Ruiz-Martinez, A., Serralta, J., Pachés,M., Seco, A., & Ferrer, J. (2014). Mixed microalgae culture for ammonium removal in the absence of phosphorus: effect of phosphorus supplementation and process modeling. *Process Biochemistry*, *49*(12), 2249-2257.

Sakamoto, T., & Bryant, D. A. (1997). Growth at low temperature causes nitrogen limitation in the cyanobacterium Synechococcus sp. PCC 7002. *Archives of microbiology*, *169*(1), 10-19.

Scenario Journal. (2009). Carbon. T.A.P, https://scenariojournal.com/strategy/carbontap/, 9 Mart 2019.

Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussgnug, J. H., Posten, C., ... & Hankamer, B. (2008). Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy research*, *1*(1), 20-43.

Schumacher, J. F., Carman, M. L., Estes, T. G., Feinberg, A. W., Wilson, L. H., Callow, M. E., ... & Brennan, A. B. (2007). Engineered antifouling

microtopographies–effect of feature size, geometry, and roughness on settlement of zoospores of the green alga Ulva. *Biofouling*, *23*(1), 55-62.

Sekar, R., Venugopalan, V. P., Satpathy, K. K., Nair, K. V. K., & Rao, V. N. R. (2004). Laboratory studies on adhesion of microalgae to hard substrates. In *Asian Pacific Phycology in the 21st Century: Prospects and Challenges* (pp. 109-116). Springer, Dordrecht.

Sevilla, J. F., Cerón García, M. C., Sánchez Mirón, A., Belarbi, E. H., Camacho, F. G., & Grima, E. M. (2004). Pilot-plant-scale outdoor mixotrophic cultures of Phaeodactylum tricornutum using glycerol in vertical bubble column and airlift photobioreactors: studies in fed-batch mode. *Biotechnology progress*, *20*(3), 728-736.

Shaleh, S. R. M. (2004). Optimum growth parameters for both indoor and outdoor propagation of microalgae, Chlorella vulgaris and Isochrysis galbana (Doctoral dissertation, Ph. D., Universiti Putra Malaysia, Department of Science, Serdang).

Sharma, Y. C., Singh, B., & Korstad, J. (2011). A critical review on recent methods used for economically viable and eco-friendly development of microalgae as a potential feedstock for synthesis of biodiesel. *Green chemistry*, *13*(11), 2993-3006.

Shay, E. G. (1993). Diesel fuel from vegetable oils: status and opportunities. *Biomass and bioenergy*, *4*(4), 227-242.

Shen, Y., Yuan, W., Pei, Z. J., Wu, Q., & Mao, E. (2009). Microalgae mass production methods. *Transactions of the ASABE*, *52*(4), 1275-1287.

Sierra, E., Acién, F. G., Fernández, J. M., García, J. L., González, C., & Molina, E. (2008). Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, *138*(1-3), 136-147.

Singh, P., Guldhe, A., Kumari, S., Rawat, I., & Bux, F. (2015). Investigation of combined effect of nitrogen, phosphorus and iron on lipid productivity of microalgae Ankistrodesmus falcatus KJ671624 using response surface methodology. *Biochemical Engineering Journal*, *94*, 22-29.

Singh, R. N., & Sharma, S. (2012). Development of suitable photobioreactor for algae production–A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(4), 2347-2353.

Slegers, P. M. (2014). Scenario studies for algae production. Wageningen University.

Solarpedia. (2011). Photobioreactor Produces Biofuel as Art, http://www.solaripedia.com/13/335/4050/photobioreactor_coils.html, 24 Nisan 2019.

Stephens, E., Ross, I. L., Mussgnug, J. H., Wagner, L. D., Borowitzka, M. A., Posten, C., ... & Hankamer, B. (2010). Future prospects of microalgal biofuel production systems. *Trends in plant science*, *15*(10), 554-564.

Stewart, C., & Hessami, M. A. (2005). A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration—the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach. *Energy Conversion and Management*, *46*(3), 403-420.

Suali, E., & Sarbatly, R. (2012). Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(6), 4316-4342.

Subhash, G. V., Rohit, M. V., Devi, M. P., Swamy, Y. V., & Mohan, S. V. (2014). Temperature induced stress influence on biodiesel productivity during mixotrophic microalgae cultivation with wastewater. *Bioresource technology*, *169*, 789-793.

Suh, I. S., & Lee, C. G. (2003). Photobioreactor engineering: design and performance. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, *8*(6), 313.

Szenasy, S.S. (t.y.). Algae Powers Design of Net Zero Energy Building Retrofit, https://www.hok.com/about/sustainability/process-zero-concept-building/, 7 Nisan 2019.

Takeuchi T, Utsunomiya K, Kobayashi K, Owada M, Karube I (1992) *Carbon dioxide fixation by a unicellular green algal Oocystis sp*. *J Biotechnol* 25:261–267

Takkos J. (2013). Algae production systems in cooperation with sustainable architectural design: a possible future. (Master's Thesis, University Of Nicosia.)

Teo, C. L., Atta, M., Bukhari, A., Taisir, M., Yusuf, A. M., & Idris, A. (2014). Enhancing growth and lipid production of marine microalgae for biodiesel production via the use of different LED wavelengths. *Bioresource technology*, *162*, 38-44.

Toklu, E., Güney, M. S., Işık, M., Comaklı, O., & Kaygusuz, K. (2010). Energy production, consumption, policies and recent developments in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(4), 1172-1186.

Trent, J. (2012). Offshore Membrane Enclosures for Growing Algae (OMEGA) e A Feasibility Study of Wastewaters to Biofuels. NASA Ames Research Center. CEC-500-2013-143.

U.S. DOE. (2010) . National Algal Biofuels Technology Roadmap. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Biomass Program, http://bioenergy.energy.gov/pdfs/algal_biofuels_roadmap.pdf 8 Nisan 2019.

Ugwu, C. U., Aoyagi, H., & Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource technology*, *99*(10), 4021-4028.

Ugwu, C. U., Ogbonna, J. C., & Tanaka, H. (2005). Characterization of light utilization and biomass yields of Chlorella sorokiniana in inclined outdoor tubular photobioreactors equipped with static mixers. *Process Biochemistry*, *40*(11), 3406-3411.

urbanNext. (2015). Culture Urbaine: Co-habitation of the Urban and the Natural. The Cloud Collective, https://urbannext.net/culture-urbaine/ 13 Mart 2019.

Van der Laak, W. W. M., Raven, R. P. J. M., & Verbong, G. P. J. (2007). Strategic niche management for biofuels: Analysing past experiments for developing new biofuel policies. *Energy Policy*, *35*(6), 3213-3225.

Vandu, C. O., & Krishna, R. (2004). Influence of scale on the volumetric mass transfer coefficients in bubble columns. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *43*(4), 575-579.

Vonshak, A. (1990). Recent advances in microalgal biotechnology. *Biotechnology advances*, *8*(4), 709-727

Vonshak, A., & Guy, R. (1992). Photoadaptation, photoinhibition and productivity in the blue-green alga, Spirulina platensis grown outdoors. *Plant, Cell & Environment*, *15*(5), 613-616.

Vonshak, A., Torzillo, G., Accolla, P., & Tomaselli, L. (1996). Light and oxygen stress in Spirulina platensis (cyanobacteria) grown outdoors in tubular reactors. *Physiologia Plantarum*, *97*(1), 175-179.

WACKER (t.y). Biomass from Algae, https://www.wacker.com/cms/en/100years/r_and_d/biomasse.jsp, 18 Mayıs 2019.

Wahidin, S., Idris, A., & Shaleh, S. R. M. (2013). The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae Nannochloropsis sp. *Bioresource technology*, *129*, 7-11.

Waite, S. (2011). Private company pre-ipo report - Solazyme: synthetic nanobiology comes of age. Boston: Research 2.0, http://s3.amazonaws.com/PUBLISHED/Solazyme_PreIPO_Report_PUB_MAY_2011.pdf, 2 Nisan 2019.

Walker, K. (2013). Clean Technology: Microalgae Lamps, https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=387, 11 Nisan 2019.

Walter J (1958) U.S. Patent No. 2,854,792. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC

Wang, B., Lan, C. Q., & Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology advances*, *30*(4), 904-912.

Wang, B., Li, Y., Wu, N., & Lan, C. Q. (2008). CO 2 bio-mitigation using microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, *79*(5), 707-718.

Wang, C. Y., Fu, C. C., & Liu, Y. C. (2007). Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of Spirulina platensis. *Biochemical Engineering Journal*, *37*(1), 21-25.

Wang, S. K., Stiles, A. R., Guo, C., & Liu, C. Z. (2014). Microalgae cultivation in photobioreactors: An overview of light characteristics. *Engineering in Life Sciences*, *14*(6), 550-559.

Wencker, T. (2011). Photobioreactor design principles, submariner project cooperation event: present and potential uses of algae, Trelleborg, Sweden, http://www.submariner-project.eu/images/stories/events/algae-trelleborg/presentations/wencker.pdf, 19 Nisan 2019.

Widjaja, A., Chien, C. C., & Ju, Y. H. (2009). Study of increasing lipid production from fresh water microalgae Chlorella vulgaris. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *40*(1), 13-20.

Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2010). An outlook on microalgal biofuels. *science*, *329*(5993), 796-799.

Wijffels, R. H., Barbosa, M. J., & Eppink, M. H. (2010). Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a sustainable economy*, *4*(3), 287-295.

Wilkinson, S. J., Stoller, P., Ralph, P., & Hamdorf, B. (2016). Feasibility of Algae Building Technology in Sydney. *Feasibility of Algae Building Technology in Sydney*.

Williams, C. (2013). Pierre Calleja: Why microalgae is the future of green energy, https://www.mnn.com/leaderboard/stories/pierre-calleja-why-microalgae-is-the-future-of-green-energy, 24 Mart 2019.

Wogan, D. M., Da Silva, A. K., Webber, M. E., & Stautberg, E. (2008). Algae: pond powered biofuels. *ATI Cleanenergy Incubator*. *The University of Texas at Austin*, 23.

Wolkers, H., Barbosa, M. J., Kleinegris, D. M. M., Bosma, R., Wijffels, R. H., & Harmsen, P. F. H. (2011). Microalgae: the green gold of the future?: large-scale sustainable cultivation of microalgae for the production of bulk commodities. Wageningen UR-Food & Biobased Research.

Wongluang, P., Chisti, Y., & Srinophakun, T. (2013). Optimal hydrodynamic design of tubular photobioreactors. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, *88*(1), 55-61.

WPA 2.0. (2009). The Projects. WPA 2.0 Exhibition. Winners. Carbon T.A.P // Tunnel Algae Park, http://wpa2.aud.ucla.edu/info/index.php?/theprojects/winners/, 16 Mayıs 2019.

Wurm, J. (t.y.). Summary Report. Research Report. Ventilated facade system with integrated photobioreactors. Project Management - Schneider, C. (Editor.), https://www.irbnet.de/daten/kbf/kbf_e_F_2856.pdf, 24 Mart 2019.

Xu, L., Weathers, P. J., Xiong, X. R., & Liu, C. Z. (2009). Microalgal bioreactors: challenges and opportunities. *Engineering in Life Sciences*, *9*(3), 178-189.

Yoo, J. J., Choi, S. P., Kim, J. Y., Chang, W. S., & Sim, S. J. (2013). Development of thin-film photo-bioreactor and its application to outdoor culture of microalgae. *Bioprocess and biosystems engineering*, *36*(6), 729-736.

Yun, Y. S., Lee, S. B., Park, J. M., Lee, C. I., & Yang, J. W. (1997). Carbon dioxide fixation by algal cultivation using wastewater nutrients. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental AND Clean Technology*, *69*(4), 451-455.

zehirliev. (2014), Zehirli Ev. '' Enerjinizi Nereye Gömdünüz?'', http://www.zehirsizev.com/ev/enerjinizi-nereye-gomdunuz/ 13 Nisan 2019.

Zeng, X., Danquah, M. K., Chen, X. D., & Lu, Y. (2011). Microalgae bioengineering: from CO_2 fixation to biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(6), 3252-3260.

Zhang X.(2014). Visit to world first algal house at BIQ in Hamburg. Park House, London, United Kingdom: IEA Clean Coal Centre, https://www.iea-coal.org/visit-to-world-first-algal-house-at-biq-in-hamburg/, 7 Nisan 2019.

Zhang, X. (2015). Microalgae removal of CO_2 from flue gas. *IEA Clean Coal Centre, UK*.

Zhila, N. O., Kalacheva, G. S., & Volova, T. G. (2005). Influence of nitrogen deficiency on biochemical composition of the green alga Botryococcus. *Journal of Applied Phycology*, *17*(4), 309-315.

Zijffers, J. W. F., Janssen, M., Tramper, J., & Wijffels, R. H. (2008). Design process of an area-efficient photobioreactor. *Marine biotechnology*, *10*(4), 404-415.

Znad, H., Naderi, G., Ang, H. M., & Tade, M. O. (2012). CO_2 biomitigation and biofuel production using microalgae: photobioreactors developments and future directions. In *advances in Chemical Engineering*. IntechOpen.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: y.turanpekmezci@gmail.com

Makaleler

Kerestecioğlu, F. Ö., & Pekmezci, Y. T. Defining The Problems Of Integrated Algae Photobioreactor Systems To Architecture. *International Journal of Engineering Science Application*, *3*(2),52-70