

Akuakültürde Kullanılan Mikroalg Üretim Sistemleri Fotobiyoreaktörler

Dünyada ve Ülkemizde Kullanımı

Hilal KARGIN*

*Mersin University, Faculty of Fisheries, Yenişehir Campus, 33160, Mersin, Turkey

*corresponding author e-mail: furkanayaz@mersin.edu.tr

ÖZET

Mikroalg üretiminde biyoteknolojik ve teknik uygulamalar, gıda, yem, tarım, çevre ve kozmetik gibi alanlarda kullanımlarına yönelik olumlu çalışmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda, mikroalg üretimi biyoteknolojik bir tabana dayandırılmalıdır. Mikroalgın büyük ölçekli üretilmesindeki hedef, düşük maliyetle yüksek kalitede ürün geliştirmektir. Büyük hacimli üretim sistemlerinde direk ve etkili ışık alımı, ısı, kültürde hidrodinamik denge ve alg üretiminde süreklilik vb. temel konular kıyaslanmalıdır.

Mikroalg üretiminde uygulanan teknik tasarımlara fotobiyoreaktör denir. Dış mekan (açık) fotobiyoreaktörler, alglerin direkt güneş ışığı kullanılarak şeffaf pleksiglas (plastik cam) silindirik borularda sürekli sirküle edildiği mikroalg üretiminde yapılandırılmış modellerdir. Kapalı (kapalı) mikroalg biyoreaktörler; küçük hacimli, basınca dayanıklı şeffaf torbalar, boru şeklindeki reaktörler ve düz plaka tipi fotobiyoreaktörlerdir. Akuakültürdeki diğer biyoreaktörler, geniş hacimli ve basınca dayanıklı torbalar ve polyester tanklardır. Biocoil model reaktörler, küçük çaplı şeffaf plastik cam borulardan yapılmış ve paslanmaz çelik kuleyi çevreleyen bir dizaynla tasarlanmış helozoik tüplü fotobiyoreaktörlerdir.

Fotobiyoreaktörlerin doğru tespiti, ticari mikroalglerin istenilen kalitede üretilmesi için önemli bir konudur. Bu derlemede, mikroalg üretiminde en çok tercih edilen fotobiyoreaktörler ve tasarım modelleri belirtilmiştir. Amaç, mikroalg üretiminde istenilen kalitede ürün elde etmek ve ekonomik fayda sağlamak olup, doğru fotobiyoreaktör tercihinin ışık tutmaktır. Ayrıca dünyada ve ülkemizde kullanım olanakları belirtilmeye çalışılmıştır.

KEY WORDS: Mikroalg üretim sistemleri, fotobiyoreaktör, tübüler, düz-plak, raceway tipli havuzlar, biocoil.

Microalgae Production Systems Photobioreactors in Aquaculture Use in the World and in Our Country

ABSTRACT

In the production of microalgae, positive studies are carried out for their use in areas such as biotechnological and technical applications, food, feed, agriculture, environment and cosmetics. In this context, microalgae production should be based on a biotechnological base. The aim of the large scale production of microalgae is to develop high quality product at low cost. Direct and effective light intake in large volume production systems, heat, hydrodynamic balance in culture and continuity in algae production, etc. fundamental issues should be compared.

Technical designs applied in microalgae production are called photobioreactors. Outdoor (open) photobioreactors are models that are structured in the production of microalgae, in which algae are continuously circulated in transparent plexiglass (plastic glass) cylindrical pipes by using direct sunlight. Indoor (indoor) microalgae bioreactors; are small volume, pressure-resistant transparent bags, tubular reactors, and flat-plate type photobioreactors. Other bioreactors in aquaculture, are large volume and pressure-resistant bags and polyester containers. Biocoil model reactors are helozoic tube photobioreactors made of small diameter clear plastic glass pipes and designed with a design surrounding the stainless steel tower.

Correct detection of photobioreactors is an important issue for the production of commercial microalgae at the desired quality. In this review, the most preferred photobioreactors and design models for microalgae production were specified. The aim is to obtain the desired quality product in microalgae production and to provide economic benefits, and to shed light on the right photobioreactor choice. In addition, the possibilities of use in the world and in our country have been tried to be specified.

Keywords: Microalgae production systems, Photobioreactor, Tubular, Flat-plate, Raceway-type pools

How to cite this article: Kargin, H., (2020).
Akuakültürde Kullanılan Mikroalg Üretim Sistemleri Fotobiyoreaktörler
Dünyada ve Ülkemizde Kullanımı,
MedFAR,3(3):112-130

1.Giriş

Mikroalgler, ışığı kullanan fotosentetik canlılar olup, ışık ve inorganik maddeleri bünyelerine alarak yapılarındaki klorofil aracılığıyla fotosentezi gerçekleştirirler; inorganik maddelerden organik maddeyi üretirler. Mikroalgler basit yapıli mikroskobik organizmalardır (Pragya ve ark., 2013; Boz, 2015). Ancak, mikroalg türleri kendine özgü koşullarına göre; ototrofik şartlar haricinde, heterotrofik ve miksotrofik olarak da gelişebilirler. Mesela, *Haematococcus pluvialis* (Kobayashi ve ark., 1992), *Chlorella sorokiniana* (Wang ve ark., 2012), *Chlorella vulgaris* (Mitra ve ark., 2012), ototrofik, heterotrofik ve miksotrofik koşullarda da gelişmektedir (Kim ve ark., 2013).

Mikroalgler sadece balık ve larva yetiştiriciliğinde besleme amaçlı kullanılmayıp, insan gıdası, tıp, ve kozmetik sanayinde aynı zamanda diyet ürünü olarak da kullanılmaktadır. Bu nedenle mikroalglerin üretimi üzerine kültür çalışmaları hız kazanmıştır. Mikroalgler, gezegenimizde biyolojik olarak fotosentez yoluyla CO₂/O₂ dönüştüren biyolojik üreticiler olarak tanınırlar. Buna ilaveten, sucul sistemin birincil üreticileri olup, sucul sistemlerin en önemli ekolojik gruplarından sayılmaktadır. Son zamanlarda mikroalgler üzerine yapılan biyoteknolojik çalışmalar, tarımda, gıda, yem, ilaç ve eczacılık da, kozmetik, diyet ürünü olarak kullanımlarını yaygınlaştırma üzerine olmaktadır. Mikroalgler sözü edilen bu alanlardaki katkılarından dolayı; alg üretimi biyoteknolojik bir tabana dayandırılmalıdır

(Gezici, 2012). Mikroalgler en eski yaşam formlarındandır. Kök, gövde ve organ gelişimi olmayan talluslu yapıya sahip organizmalardır. Fotosentetik pigment olarak klorofil a mevcut olup, klorofil a ve b, karoten, astaksantin, fitosiyanin, ksanthofil, fitoeritrosin gibi pigmentleri üretebilmeleri önemlerini arttıran diğer bir husus olup, eczacılıkta, gıda, tekstil, kozmetik gibi alanlarda tercih edilmektedirler.

Mikroalg Üretim Sistemleri

Mikroalglerin büyük çaplı üretim çalışmalarının amacı, düşük masraf ve arzu edilen kalitede ürün geliştirmektir. Büyük ölçekli kültür sistemlerinde sıcaklık, ışığın etkin kullanımı, kültürün sürekliliği ve biyomasın zamana bağlı değişmediği sabit koşulların sağlandığı gibi hususların dikkate alınması önemlidir. Mikroalg türlerinde ideal gelişim kültür ortamlarında kendine özgü optimum şartların oluşturulmasıyla sağlanır. Buna göre birçok algin kendine özgü koşullar gerektirmekte olup, *Spirulina* spp. yüksek pH ve bikarbonat yoğunluğunda, yüksek sıcaklıkta, *Chlorella* spp. yüksek besin içeriğine sahip ortamlarda, *Dunaliella salina* ise, yüksek oranda tuz içeren ortamlarda en verimli şekilde üretilebile bilmektedir. Ticari amaçla üretime alınan mikroalgler, genelde gıda sektöründe değerlendirilirken; ilaç, eczacılıkta çoğunlukla tercih edilen *Chlorella* ve *Spirulina* gibi mikroalgler tercihen kullanılır. Bu mikroalglerden bazılarının yağ içerikleri (Çizelge 1) verilmiştir (Gezici, 2012).

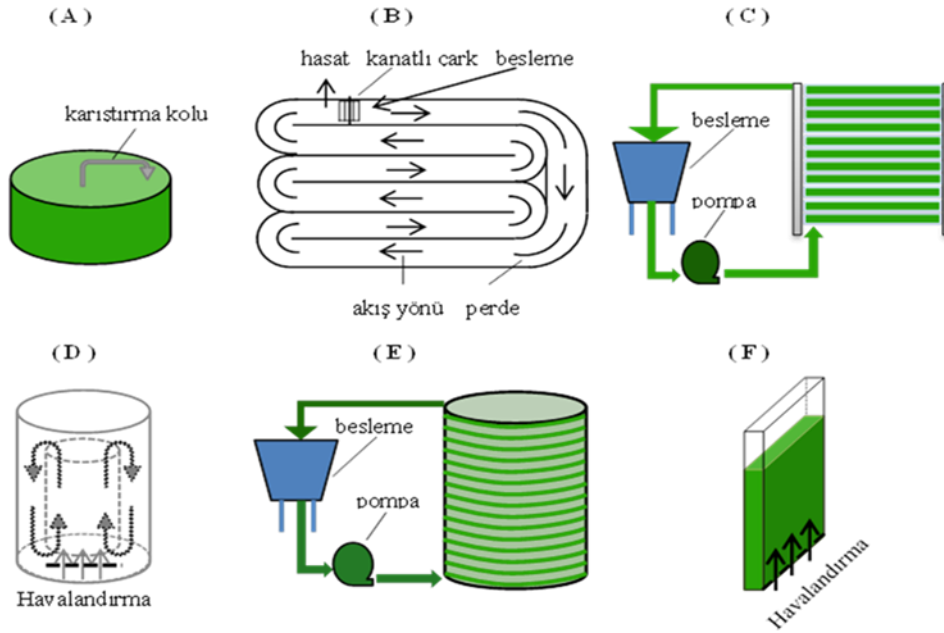
Çizelge 1. Bazı mikroalg çeşitlerinin yağ içerikleri (Tawfîg ve ark., 2004)

Mikroalgler	Yağ içeriği(% Kuru Ağırlık)
<i>Botryococcus braunii</i>	25 – 75
<i>Chlorella sp.</i>	28 – 32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16 – 37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Dunaliella salina sp.</i>	28 – 42
<i>Isochrysis sp.</i>	25 – 33
<i>Monallanthus salina</i>	> 20
<i>Nannochloris sp.</i>	20 – 35

<i>Nannochloropsis sp.</i>	31 – 68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35 – 54
<i>Nitzschia sp.</i>	54 – 47
<i>Palmellopsis Muralis</i>	42 – 58
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20 – 30
<i>Schizochytrium sp.</i>	50 – 77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15 – 23
<i>Spirulina platensis</i> (Yılmaz Kargin ve Duru 2011)	

Mikroalglerin üretiminde açık (dış) ve kapalı (iç) sistemler tercih edilmektedir (Şekil 1). Açık ortamdaki sistemler mikroalg kültürü, dairesel, eğimli, karıştırmasız (sığ) ve karıştırıcı tipte raceway (kanal tip) olarak kategorize edilmiş açık havuzlarda gerçekleşir. Kapalı ortam sistemlerinde

mikroalg kültürü ise tübüler, horizontal- vertikal tasarlanmış, düz plaka, fermentör tipi ve içten aydınlatmalı fotobiyoreaktörler olarak dizayn edilir (Suali ve Sarbatly, 2012).



Şekil 1 Mikroalg üretim sistemlerinin şematik şekilleri (Elçik ve Çakmakçı, 2017).

A) Dairesel karıştırılmalı havuz B) Raceway tipi havuz C) Yatay tübüler fotobiyoreaktör
D) Hava kaldırmalı reactor E) Sarmal tübüler fotobiyoreaktör F) Düz plaka fotobiyoreaktör

Dış (Açık) ortamda kurulan havuzlarda mikroalgin kültüre alınması 1950'li yıllarda başladığı bilinmektedir (Cai ve ark., 2013; Pawlowski ve ark., 2014). Mikroalg kültürlerinde yaygın olarak kullanılan büyük hacimli biyoreaktörler ve raceway (kanal) havuzlardır (Christenson ve Sims, 2011; Rawat ve ark., 2013). Raceway (kanal) tipi havuzlar oval biçimli kapalı resirkülasyon döngü kanal sisteminden oluşurlar (Şekil 2). Derinlikleri 0,2-0,5 metre arasında olup (Brennan ve Owende, 2010),

enleri tahmini olarak 0,25 metredir (Bahadar ve Khan, 2013). 0,15-0,20 metre derinlikte işletilen raceway (kanal) tipi havuzlarda muhtemel mikroalg konsantrasyonu 1 g/L kuru ağırlık ve üretim 60100 mg/L gün arasındadır (Schenk, 2008; Khan ve ark., 2009). Uygulamada bazı kaynaklarda mikroalg üretim veriminin 10-20 g/m²gün (Rawat ve ark., 2013), soğutma ihtiyacı yoktur (Bahadar ve Khan, 2013). Ancak, dış ortamlarda bazı çevresel faktörler sebebiyle kapalı fotobiyoreaktörlere kıyasla mikroalg

üretim oranı düşüktür (Rawat ve ark., 2013). Raceway (kanal) tipi havuzlar dış ortamda olduğu için buharlaşma ile su kaybı olduğundan; kültür suyunun iyon konsantrasyonu artmaktadır. Bu bağlamda mikroalg üretimi bundan zarar görmektedir (Rawat ve ark., 2013). Mikroalg üretimini olumsuz etkileyen diğer bir durum ise, mikroorganizmalar tarafından kolayca bulaşmanın olabilmesidir (Bahadar ve Khan, 2013). Çevresel sıcaklık ve güneş

ışığının günlük ve mevsimsel değişimleri de mikroalg üretimini etkileyen diğer faktörlerdir. Ayrıca, mikroalg üretiminde yoğunluğunun artmasıyla, kültür ortamına giren CO₂ miktarının azalması üretimdeki başarıyı düşürmektedir. Kapalı (iç mekan) fotobiyoreaktörler, açık (dış mekan) havuz sistemlerine göre bazı avantajlar sağlamasına rağmen, dizaynı maliyetli olup, dış mekan havuzlara göre oldukça yüksek olmaktadır.



Şekil 2 Raceway Tip Havuz Sistemleri (Gezici, 2012)

Kapalı (iç mekan) fotobiyoreaktörler tübüler, düz plaka, sarmal, üretim boyunca kültür suyunun sürekli devir daim edildiği devamlı karıştırmalı tasarlanmış modelleri vardır (Demirbas, 2010). Tübüler fotobiyoreaktörler, en yaygın horizontal ve vertikal, sarmal olarak dizayn edilmiş kapalı (iç mekan) biyoreaktör tasarımlarıdır (Khan ve ark., 2009). Tübüler fotobiyoreaktörler pleksiglas (plastik cam) veya plastik malzemeden oluşan şeffaf tüplerden meydana gelir (Chisti, 2007). Tüplerin dizaynına göre vertikal (Sánchez Mirón ve ark., 1999), horizontal (Molina ve ark., 2001), sarmal (Watanabe ve Saiki, 1997) ve eğimli (Ugwu ve Ogbonna, 2002) olarak yapılandırılmıştır. Şeffaf tüplerin çapı, ışığın kültür ortamındaki alg hücrelerine temasını etkilediği için genellikle 0.1 m ya da daha azdır (Chisti, 2007; Rawat ve ark., 2013). Tüpler içerisindeki akış hızı 0,3-0,5 m/s olması araştırma makalelerinde önerilmektedir, açık (dış mekan) havuzların dezavantajlarını gidermek için tasarlanmıştır (Bahadar ve Khan, 2013).

Kapalı tip fotobiyoreaktörler, açık havuzlarla kıyaslandığında; daha etkin sıcaklık, pH ve ışık kontrolü, sürekli karıştırma ve devirdaim, buharlaşma kayıplarının en az seviyede olduğu, yüksek biyokütle üretimi, üretimi önceden tahmin edebilme, daha yüksek kalitede üretim gibi

avantajları sağlar. Ayrıca, açık havuzların aksine, mikroorganizmaların bulaşma riski açık tip havuzlara kıyasla riski daha az olup, monokültür için elverişlidir (Brennan ve Owende, 2010). Fotobiyoreaktörde mikroalgin üretim verimliliği 20-40 g/m²gün aralığında olabildiği yapılan araştırmalar sonucu belirtilmiştir (Christenson ve Sims, 2011). Dezavantajı ise, yapılandırma maliyetlerinin açık (dış mekan) havuzlara kıyasla oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir. Kapalı fotobiyoreaktörler tübüler, düz plaka, dikdörtgen, vertikal-horizontal dizaynda, sarmal tipte ve devamlı devir-daim edebilen karıştırmalı birçok modeli bulunmaktadır (Demirbas, 2010).

Kapalı Düz- plaka fotobiyoreaktörler, en eski biyoreaktör tasarımlarıdır (Brennan ve Owende, 2010). Düz- plak fotobiyoreaktörlerin yüzey alanlarının büyük olması nedeniyle ışığa temas eden biyokütle yoğunlukları (>80 g/L) daha fazladır (Brennan ve Owende, 2010). Reaktörler ışığın etkin temasını sağlamak amacıyla şeffaf plastik camdan (pleksiglas) imal edilirler. Karıştırma esnasında sisteme 1 L/dk hızda hava ile birlikte karbondioksit girişi de yapılır. Düz-plak reaktörlerin biyomas verimlilikleri yüksektir (Rawat ve ark., 2013). Aynı zamanda maliyeti düşük, tasarımı ve temin edilmesi mümkündür. Ancak, mikroalgler yüzeye yapışma

eğiliminde olup, geniş yüzey alanlarına sahip olmaları nedeniyle sıcaklık ve CO₂ hızını kontrol etmek güç olabilir (Demirbas, 2010).

Düz-plak fotobiyoreaktörler, tübüler reaktörlere göre karıştırma donanımı gerekli olmaz. Çünkü reaktörün alt tabanına yerleştirilen gaz dağıtıcı sistemi sayesinde karıştırma işlevi gerçekleşir. Açık veya kapalı mekanlarda kullanılan sürekli devir-daim eden karıştırmalı tank reaktörlerde bulaşma riski çok az olan sistemlerdir. Tank reaktörlerde mekanik karıştırıcı ve aydınlatma kaynağı reaktörün üst bölümüne konulur. Tahliye kanalı ve gaz enjektörü reaktörün alt kısmındadır (Demirbas, 2010). Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler birçok mikroalgin üretiminde tercih edilen kolayca tasarlanabilen, basit ve maliyeti düşük biyoreaktörlerdir (Bahadar ve Khan, 2013). Genellikle pleksiglas (plastik cam) malzemeden oluşturulurlar (Bahadar ve Khan, 2013). Hava kaldırmalı reaktörde dikey yönde akışı sağlamak için akış kolonları yer alır (Lakaniemi, 2012). Biyoreaktörlerin çapı genel olarak 0,15-0,40 metre arasındadır (Lakaniemi, 2012). Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörde bulaşma riski oldukça düşüktür (Bahadar ve Khan, 2013). Hava kaldırmalı fotobiyoreaktörler günlük $0,21 \text{ g}_{\text{biyokütle}}/\text{L}_{\text{reaktör}}$ üretim hızıyla *Chlorella spp.* alg türünün kültürüne uygun sistemlerdir (Zhang ve ark., 2010). Schenk ve ark., (2008) Mikroalg biyokütle üretimi için, açık

sistemlere kıyasla suyu, kimyasalları ve enerjiyi tasarruflu kullanma açısından doğru fotobiyoreaktörlerin tercih edilmesinin uygun olacağını belirtmiştir. Ancak, verimliliği yüksek laboratuvar ölçekli fotobiyoreaktörlerin endüstriyel boyutlarda kullanılmasının bazı sorunlara yol açtığı da belirtilmektedir. Reaktördeki büyük hacimsel artış ve büyük ölçekli tasarımları endüstriyel alan uygulamalarında biyomas verimliliğinde düşüşlere sebep olabilmektedir. Çizelge 2’de mikro alglerin biyomas verimliliği için ortalama üretim şartları verilmiştir.

Fotobiyoreaktörler ve açık (dış mekan) havuzları iki aşamalı bir süreçte her iki sistemin üstün faydalarını birleştirip, arzu edilen kalitede biyomas sağlamak mümkün olabilir (Huntley ve Redalje, 2006). Bu iki sistem biraraya getirildiğinde toplam maliyetleri düşecektir. Farklı üretim sistemlerinin biyomas üretim verimliliğini belirlemek oldukça güçtür. Literatürde kullanılan mikroalg türü, üretim koşulları, biyomas elde etme amaçları farklılık gösterir. Bazı araştırmalar dış mekanda bazıları ise, iç mekanlarda yürütülmüş olabilir. Bazı araştırmalarda üretim sistemleri tüm yıl ya da mevsimsel olarak çalışılmış olabilir. Ayrıca üretim sistemlerindeki hacimsel farklılıkta oldukça önemli hususlardan biridir.

Çizelge 2 Mikroalglerin ortalama üretim şartları (Eliçin ve ark., 2009)

Parametreler	Sınır değerleri	Optimum şartlar
Sıcaklık (°C)	16 – 40	18 – 24
Tuzluluk (g/l)	12 – 40	20 – 24
Işık yoğunluğu (lux)	1000 – 10000	2500 – 5000
Işıklanma süresi (Gündüz: gece h)	-	16:8 minimum
24:0 maksimum		

Açık (Dış) Mekan üretim sistemleri

Mikroalgler hem açık (dış) hem de kapalı (iç) mekanlarda üretilmektedir. Açık (dış) mekan reaktörler doğal göller, havuzlar ve her tür şeffaf plastikten üretilen konteynerleri içermektedir (Şekil 3) (Yılmaz, 2006).

Mikroalglerin hem iç hem de dış mekanda üretimleri yapılabilmektedir. Dış mekan üretim sistemleri olarak, doğal göletler, havuzlar ve her tür malzemeden imal edilen tanklar sayılabilmektedir (Şekil 3) (Yılmaz, 2006).



Şekil 3 Dış mekan üretim havuzları görülmektedir (Gezici, 2012)

Kapalı (İç) Mekan üretim sistemleri

İç mekan mikroalg üretim sistemleri ise, küçük ölçekli torbalar, tübüler ve düz-levha fotobiyoreaktörler olarak adlandırılırlar (Yılmaz, 2006). Dış mekanlardaki mikroalg üretim sistemlerinin iç mekandaki üretim sistemlerine göre en belirgin farkı, mikroalg kültürlerinin doğrudan çevre etkilerine maruz bırakılmasıdır. *Botryococcus braunii*, *Chlorella* sp ve *Spirulina* spp. hiçbir yapay karışım olmaksızın üstü açık, sıg ve geniş dairesel havuzlarda karışımı sağlanarak üretimi yapılabilmektedir (Şekil 4).

Kapalı (iç) mekan mikroalg biyoreaktörleri ise, küçük hacimli plastik torbalar, tübüler ve düz-levha tipi fotobiyoreaktörlerdir (Yılmaz, 2006).

Kapalı (İç) Mekan ve Açık (dış) Mekan üretim sistemlerinin karşılaştırılması

Dış mekanlardaki mikroalg sistemleri iç mekandaki sistemleriyle kıyaslandığında görünen

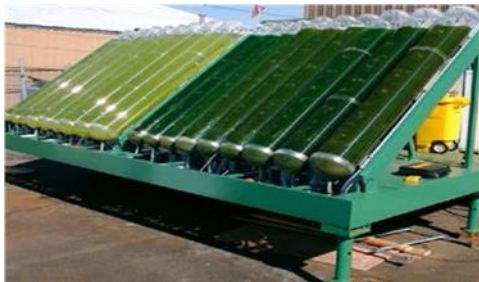
fark, mikroalgın direk olarak çevresel faktörlere maruz kalmasıdır. *Botryococcus braunii*, *Chlorella* sp. ve *Spirulina* sp. yapay karışım olmaksızın dış mekanlarda sıg ve geniş dairesel havuzlarda sürekli devir-daim yapılarak karışım sağlanarak üretimleri gerçekleştirilmektedir (Şekil 4).

Dış mekan (açık) havuz sistemleri önemli ölçüde çeşitlilik göstermekle birlikte; bu sistemlerin maliyetinin düşük olması ve kapalı (iç) mekan üretim sistemleri ise yüksek teknoloji gerektirmesi ve maliyetinin yüksek olması sayılabilir (Şekil 4,5,6) (Çizelge 3).

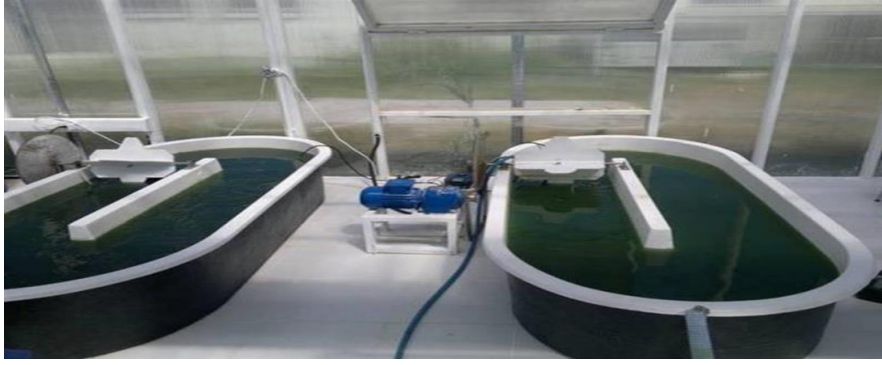
Bununla birlikte dış mekan üretim sistemleri, kirletici etmenlerce kontamine olmaları da mümkündür. Biyomas verimliliği sürekli buharlaşma, CO₂'in karışım esnasında atmosfere yayılması ve kontamine olma riski dış mekan (açık) havuz sistemlerinin göz önünde tutulması gereken dezavantajlarıdır.



Şekil 4 Dış Mekan Üretim Sistemleri(Gezici, 2012)



Şekil 5 Dış Mekan fotobiyoreaktör tasarımları (Gezici, 2012)



Şekil 6 İç ve Dış Mekan Üretim Sistemleri(Gezici, 2012)



Şekil 7 Dış Mekan üretim sisteminde hasat (Gezici, 2012)

Kapalı (iç)mekan ve Açık (dış)mekan üretim sistemlerinin karşılaştırılması

Dış mekan (açık) havuz sistemleri önemli ölçüde çeşitlilik göstermekle birlikte; bu sistemlerin

maliyetinin düşük olması ve kapalı (iç) mekan üretim sistemleri ise yüksek teknoloji gerektirmesi ve maliyetinin yüksek olması sayılabilir (Şekil 3,4,5,6) (Çizelge 3).

Çizelge 3 Farklı Mikroalg Üretim Sistemleri ve Karşılaştırılması (Elçik ve Çakmakçı, 2017)

Üretim sistemi	Avantaj	Dezavantaj
Raceway (kanal) tipi havuz	Başlatma maliyetleri düşüktür İşletilmesi kolay ve basittir. Verimsiz toprak alanlarda yapılandırılabilir	Biyomas verimliliği düşüktür. Kurulum alan ihtiyacı fazladır. Karıştırma, aydınlatma ve CO ₂ kullanım verimliliği yetersizdir. Her mikroalg türü için uygun değildir Buharlaşma ile su kayıpları fazladır. Kültürlerin mikroorganizmalarla bulaşma riski fazladır

<p>Tübüler fotobiyoreaktör</p>	<p>Yüzey alanı büyüktür. Biyokütle üretim performansı yüksektir. Dış (açık mekan) ortamda üretime uygundur. Kültürlerin mikroorganizmaların bulaşma riski düşüktür. Sistemde kültürün büyüme parametrelerinin kontrolü mümkündür. Alan ihtiyacı azdır.</p>	<p>Fotoinhibisyona karşı hassastır. Sıcaklık kontrolü gerektirir. Mikroalgler yüzeye tutunma eğilimindedir. Açık sistemlere göre kurulumu maliyeti yüksektir.</p>
<p>Düz plaka fotobiyoreaktör</p>	<p>Biyomas verimliliği yüksektir. Sterilizasyonu kolaydır. Yüzey alanı büyüktür. Sistemde O₂ birikimi azdır. Güneş ışığına karşı yönlendirilebilir. Kültürlerin mikroorganizmaların bulaşma riski düşüktür. Alan ihtiyacı azdır.</p>	<p>Mikroalgler yüzeye tutunma eğilimindedir. Sıcaklık kontrolü zordur. Açık sistemlere göre kurulum maliyeti yüksektir. Ölçek büyütme güçtür</p>
<p>Hava kaldırmalı fotobiyoreaktör</p>	<p>Kompakt bir sistemdir, alan ihtiyacı azdır. Enerji tüketimi azdır. Kütle transferi yüksektir. Sterilizasyonu kolaydır. Karıştırma verimi iyidir. Kültürlerin kontaminasyon riski düşüktür.</p>	<p>Aydınlatma alanı azdır. Reaktör tasarımı komplikedir. Ölçek büyütme zordur. Açık sistemlere göre kurulum maliyeti masraflıdır.</p>

Geniş torbalar ve polyester konteynerlerde üretim

Akuaakültürde tercih edilen diğer üretim sistemleri; geniş basınca dayanıklı torbalar ve polyester konteynerler (Şekil 8,9).



Şekil 8 Geniş torbalarda üretim (Gezici, 2012)

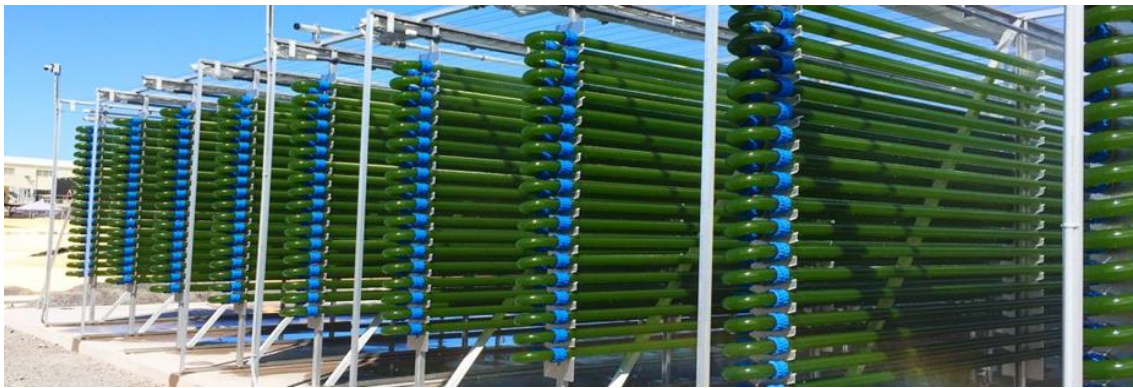


Şekil 9 Polyester tanklarda üretim (Gezici, 2012)

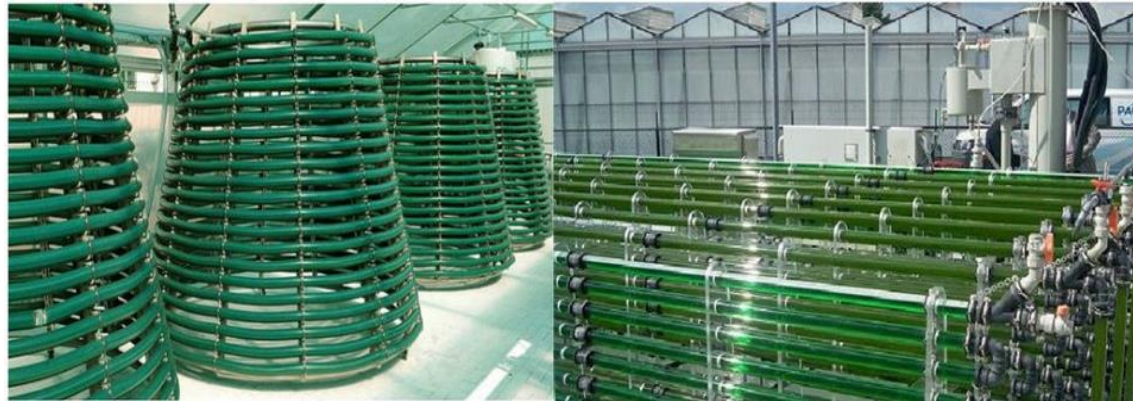
Bu konteynerlerde doğal yollarla güneş ışığından direk olarak faydalanılarak mikroalg üretimi sağlanmaktadır. Dezavantajları ise, üretim performansları her mevsim alg üretimi için uygun olmadığından üretim verimliliği garanti değildir. Üretim performansı önceden tahmin edilemez. Basınca dayanıklı şeffaf torbalarda üretiminin dezavantajları ise; kesikli üretim süreci yüksek işçilik gerektirirken, sistemde üretim hacmi kültür yoğunluğuna bağlı olarak artırılır. Büyük ölçekli üretimde ise, ışıktan etkin olarak yararlanma azalırken; üretim istenen kalitede olmaz.

Fotobiyoreaktörlerde Üretim

Mikroalg üretimi için, yapılandırılan teknik tasarımlara fotobiyoreaktör denir (Naz ve Gökçek, 2006). Dış (açık) mekandaki fotobiyoreaktörler, mikroalg üretimi için yapılandırılmış, direk güneş ışığından yararlanarak seffaf pleksiglas (plastik cam) silindirik borular içerisinde algin sürekli devirdaim ettiği dolaşım sistemine dayanan modellerdir (Şekil 11,12). Mikroalg üretiminde bu sistemler geçen 15 yılın üzerinde su ürünleri yetiştiriciliği açısından bakıldığında sürekli olarak var olmuştur (Borowitzka, 1997; Duerr ve ark., 1998; Muller-Fuega ve ark., 2003; Zmora ve Richmond, 2004; Tredici ve ark., 2009).



Şekil 10 Fotobiyoreaktörde horizontal üretim sistemi (Gezici, 2012)

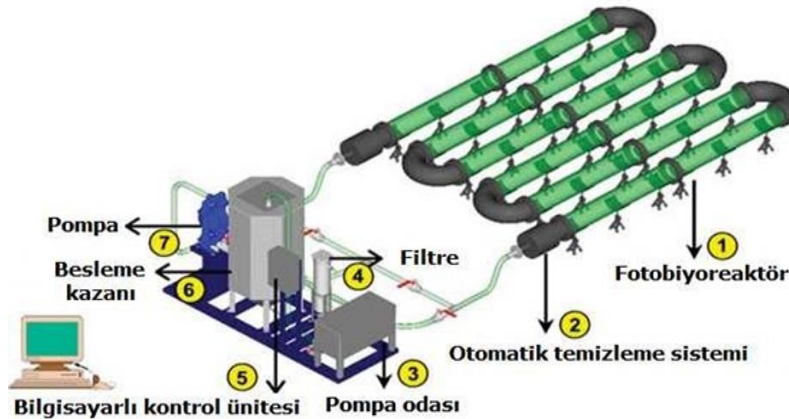


Şekil 11 Fotobiyoreaktörde kule ve horizontal üretim sistemi (Gezici, 2012)

Tübüler fotobiyoreaktörler

Tübüler fotobiyoreaktörlerde şeffaf silindirik tüp şeklindeki biyoreaktörler büyük hacimli olarak yapılandırılmıştır (Şekil 11,12). “Biyofence” adı verilen ticari fotobiyoreaktörlerde çok sert ya da esnek yapılı şeffaf plastik cam tüp ya da boru tercih edilmektedir. Reaktörlerin sayıları ve boruların çapları genişletilerek üretim artırılabilir. Mikroalglerin biyoreaktör tüpler içerisindeki sirkülasyonu pompa yardımıyla sağlanır. Reaktörler, vertikal veya horizontal dizayn edilerek, kapalı mekan ya da açık mekanlarda belirli açıyla yapılandırılırlar. Şeffaf plastik cam boruların yüzeyine yapışan alglerin temizlenmesinde özel boncuklar kullanılır. Bu boncuklar alglerle beraber tüp borular içerisinde devir-daim edilerek sistemin temizliği sağlanır. Büyük ölçekli tübüler fotobiyoreaktörde tüplerin uzunluğu artırılarak ve çapları genişletilerek akışın rahatlatılması önemli bir

hususdur. Ayrıca pompanın büyük olması gerekmektedir. Sistemde tüplerin boyutu ve hacim artışına paralel olarak ışık, CO₂ tüketimi artacak ve O₂'nin birikimi (satürasyon) olacaktır. Aşırı oksijen birikimi reaktörlerin üst kısmında köpüklenmesine ve hücrelerin foto-oksidasyon nedeniyle alg hücrelerinin renklerini kaybetmesine neden olmaktadır. Kapalı mekan sistemleri oldukça pahalı fotobiyoreaktörlerdir. Bu fotobiyoreaktörler sadece monokültür için uygun tasarımlardır. Kapalı sistem reaktörlerde mikroalg üretiminde kontaminasyonu engellemek ve ışığın etkin kullanımı ile yüksek biyomas sağlamak, sıcaklık kontrolü mümkün olurken, dış mekanda tasarlanan kapalı sistem reaktörlerde doğrudan güneş ışığının kullanılması gibi avantajları sunar. Kapalı sistem biyoreaktörlerde kültürde büyüme parametrelerini kontrol etmek kolayca mümkün olurken, elde edilen ürün arzu edilen kalitede ve performansta olur.



Şekil 12 Tübüler fotobiyoreaktör üretim sistemi (Gezici, 2012)

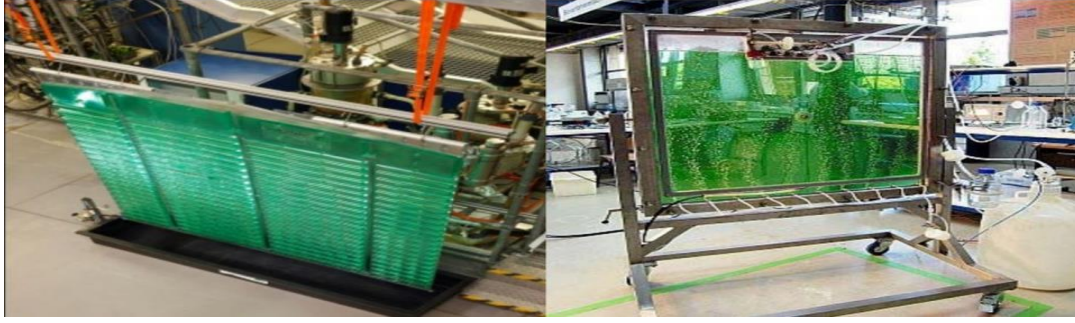
Levha şeklindeki fotobiyoreaktörler

Düz-levha tipi fotobiyoreaktörlerin bir diğer modelidir. Bu tip fotobiyoreaktörlerin ana prensibi;

ince çaplı şeffaf borunun içindeki çap önemli ölçüde daraltılmış ve düz-levha şeklindeki modellerdir. Bu tip reaktörler tamamen şeffaf pleksiglas veya şeffaf plastik camdır. (Şekil 13,14).



Şekil 13 Düz Panel Fotobiyoreaktörler (Gezici, 2012)



Şekil 14 Düz levha tip fotobiyoreaktör (Gezici, 2012)

Biocoil tip fotobiyoreaktörler

Biocoil model reaktör, küçük çaplı şeffaf plastik cam borulardan oluşan ve paslanmaz çelikten oluşan kuleyi saran tasarımla oluşturulan helozoik tüplü fotobiyoreaktörlerdir. Biocoil tip reaktörlerde eşit

oranda karışım sağlanırken ve alglerin boruların iç yüzeyine yapışması önlenmektedir. Bu tip fotobiyoreaktörler kolay taşınabilen, otomasyona olanak sağlarken de işçiliği en aza indirmektedir. Ancak bu sistem model reaktörler her alg türüne uygun değildir (Şekil 15).



Şekil 15 Biocoil tip fotobiyoreaktör tasarımları (Gezici, 2012)

Sütun fotobiyoreaktörler

Vertikal (dikey) sütunlar genellikle kapalı (iç) mekan uygulamalarında kullanılır. Vertikal (dikey) kolonlar tabandan havalandırılır. Sütunun merkezinde çapları yaklaşık 20 cm olan karanlık bir

alan oluşturulur. Sütunun iç kısmı üretkenliği arttırmak için daylight lambalar kullanılarak aydınlatılır. Genelde yassı plaklardan iki farklı ölçüde mesela 40 ve 50 cm silindirden oluşan vertikal (dikey) sütun reaktörler oluşturulur (Şekil 16).



Şekil 16 Sütun Fotobiyoreaktörler (Gezici, 2012)

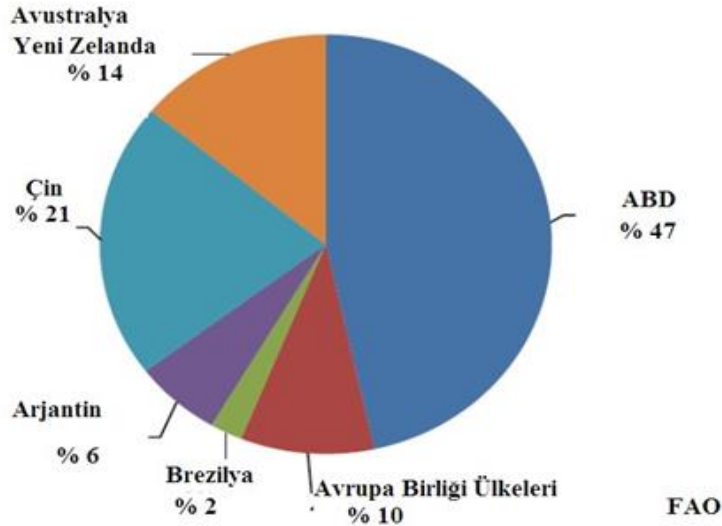
Dünyadaki Üretim Durumu

Mikroalgler en çok uzak doğuda gübre olarak uygulama alanı bulmuş olup, bilinen en eski kullanım sahasıdır. Fransa, İrlanda, İngiltere gibi kıyıları geniş ülkelerde 12. yüzyılda bu tip uygulamalar olmuştur. Fransa mikroalg uygulamalarına 17. yy. başlamıştır. İngiltere 1720 yılından başlayarak mikroalg toplanmış ve bu yüzyıl sonunda İskoçya’da mikroalg yıllık üretimi 20.000 ton kuru alg olduğu rapor edilmiştir. Bu oran da yaklaşık 400.000 ton yaş alg’e denktir. Günümüzde Avrupa ve Amerika’da birçok endüstri alanında algler bazı ürünlerin ham maddesi olarak tercih edilmektedir. Bu nedenle mikroalgler yenilenebilir enerji kaynakları piyasasında büyük öneme sahip organizmalar olup, mikroalgler incelemeye ve üzerinde araştırmalar yapılmaya değer organizmalardır. Son yıllarda Amerika mikroalg üretimi üzerine yapılan çalışmalarla öncülük etmektedir. Amerikan hükümeti 2010 yılının ortalarında mikroalgler, odak noktası olmayı

başarmış olup, Amerikan Enerji Bakanlığınca alg tabanlı biyoyakıtları ticarileştirmek amaçlı 3 araştırma grubuna 24 milyon dolar para ödemeye söz vermiştir.

Ülkelere göre mikroalg üretimi

Ülkelerin 2009 yılı mikroalg üretim paylarına göre % 47 ile Amerika Birleşik Devletleri sektörde öndedir. ABD’nin ürettiği mikroalglerin büyük kısmını ilaç ve kozmetik sanayinde değerlendirmektedir. Mikroalg tabanlı biyoyakıt eldesinne daha az oranda pay ayırmaktadır. Çin % 21’lik alg üretimiyle ikinci sırada yer alıp, ürettiği mikroalglerin tamamını gıda endüstrisinde değerlendirmektedir. Avustralya ve Yeni Zelanda % 14 ile Çini takip etmektedir. Yeni Zelanda ise, mikroalg tabanlı biyofuel elde etme konusunda mikroalgleri en verimli kullanan ülke olmaktadır. Avrupa Birliği Ülkeleri % 10 üretimleriyle Arjantin % 6 ile, Brezilya % 2 ile izlemektedir. 2009 yılında yapılan araştırmaya göre ülkelerdeki mikroalg üretim oranları verilmiştir (Şekil 17).



Şekil 17 Ülkelere göre mikroalg üretim payı (FAO, 2009)

Mikroalg yetiştiriciliği, su ürünleri yetiştiriciliğinin yaygın olarak kabul edilen tanımına uymakla birlikte, mikroalg yetiştiriciliği, su ürünleri yetiştiriciliğinden ayrı olarak ulusal veya yerel düzeyde sıkı bir şekilde düzenlenmeli ve izlenmelidir. Su ürünleri yetiştiriciliği yapan ilk 20 ülkeden birinde, yakın zamanda gerçekleştirilen su ürünleri - üretimi mikroalg üretimini kapsamaktadır, ancak bu, henüz ulusal su ürünleri veri toplama ve raporlama sisteminin bir parçası değildir. FAO, 2018'de 11 ülkeden 87.000 ton çiftlik mikroalg kaydetmesine rağmen, yalnızca Çin'den 86.600 ton rapor edmiştir. *Spirulina spp.*, *Chlorella spp.*, *Haematococcus pluvialis* ve *Nannochloropsis spp.* gibi mikroalglerin yetiştirilmesi, ölçek olarak arka plandan büyük ölçekli ticari üretime kadar değişmektedir ve birçok ülkede insan besin

takviyeleri ve diğer kullanımlar için iyi bir şekilde kurulmuştur. FAO verileri, Avustralya, Çekya, Fransa, İzlanda, Hindistan, İsrail, İtalya, Japonya, Malezya, Myanmar ve Amerika Birleşik Devletleri gibi önemli üreticilerden elde edilen verilerin mevcut olmaması nedeniyle dünya mikroalg çiftçiliğinin gerçek ölçeğini olduğundan daha düşük göstermektedir.

Dünyadaki mikroalg üretim tesislerinden örnekler

GreenFuel Tech Aurora Biofuels Gmbh, Arizona, ABD'nin şeffaf torba içinde mikroalg üretim uygulaması yüksek fiyatlara ulaşmıştır. Ülkelerde mevcut olan çeşitli alg üretim tesisleri verilmiştir (Şekil 18,19,20,21, 22).



Şekil 18 GreenFuel Tech Aurora Biofuels Gmbh, Arizona, alg üretim tesisi (Gezici, 2012)



Şekil 19 Algepower Gmbh Manhattan, ABD'de yeni kurulan bir fotobiyoreaktör (Gezici, 2012)



Şekil 20 İspanya'da Synthetic Genomics Gmbh ait bir mikroalg üretim tesisi (Gezici, 2012)



Şekil 21 İsrail'den; Algae Technologies Gmbh tesisi (Gezici, 2012)



Şekil 22 Almanya'dan Otto Pulz laboratuvarlarına ait kapalı üretim tesisi (Gezici, 2012)

Mikroalg tesislerini kuran tüm şirketlerin amacı biyoyakıt üretmektir. Ancak bu tesisler şimdilik AR-GE evresindedir. Alglerden yakıt üretmenin çok zor olmadığı belirtilmektedir. Bu ARGE çalışması ticari boyutta yapabilmek düşünüldüğü kadar kolay

olmayacağı gibi, 20 yıldır üzerinde çalışılmakta olan bir projedir. Dünyada birçok şirket mikroalg tabanlı biyoyakıt üretmeye çalışsa da, sadece Yeni Zelanda'da Aquaflo adında bir şirket başarılı olabirmiştir. Yeni Zelanda'da kurulan Aquaflo

isimli şirketin ürettiği biyoyakıt ve mikroalg (Şekil 23).



Şekil 23 Aquaflow isimli şirketin ürettiği biyoyakıt ve çalıştırdığı otomobil (Gezici, 2012)

Türkiye’de Mikroalg Üretimi

Ülkemizde biyodizelde, kanola, soya ve pamuk gibi yağlı tohumlardan ve şimdilerde mikroalglerden biyodizel üretim devri başlamış olup, Ülkemizde Ege Biyoteknoloji şirketi faaliyet gösteren kuruluştan biridir.

Tübitak’tan destekli olan Ege Biyoteknoloji A.Ş., projenin %40’ını Tübitak karşılamakta ve yağ oranı

en yüksek olan mikroalgler üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Ege Biyoteknoloji bünyesinde mevcut olan mikroalg laboratuvarında yaklaşık 30 türün yer aldığı bir kültür koleksiyonu mevcut bulunmakta olup, geniş çaplı araştırmalar yürütülmektedir. Ege Üniversitesi Biyomühendislik bölümü mikroalg üretim serası görülmektedir (Şekil 24).



Şekil 24 Ege Üniversitesi Biyomühendislik bölümü mikroalg üretim serası (Gezici, 2012)

Projeyi destekleyen özel kuruluş Ege Biyoteknoloji A.Ş. Bergama’daki Üretim Tesisleri’nde (Şekil 25) biyoyakıt üretmekte olup, KOSGEB kredisiyle kurulan laboratuvarlarında

ürettikleri biyoyakıtın standartlara uygunluğunu tespit etmek için analizleri yapma yetkinliğine sahiptir.



Şekil 25 İzmir Bergama’da Ege Biyoteknoloji A.Ş. Mikroalg Üretim Tesisi (Gezici, 2012)

Projeye destekleyen diğer kuruluşlardan Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Araştırma ve Uygulama Merkezi (ÇEVMER), mikroalg üretiminde kullanılacak artılmış atık suyu temin ederek, suyun ve mikroalg hasatı sonunda ortam suyunun özelliklerini saptamak için, gerekli kimyasal ve fiziksel analizleri tespit edecektir. Bununla beraber yağ ekstrasyonu ve biyoyakıt üretimindeki süreçlere de katkıda bulunacaktır.

SONUÇ

Ticari mikroalglerin arzu edilen kalitede üretilmesi önemli bir husus olup, ekonomik fayda sağlamada en çok tercih edilen fotobiyoreaktörler ve tasarım modelleri ayrıntılı olarak incelenmelidir. Gelecek mikroalg çalışmaları için, fotobiyoreaktörlerin her ikisi birarada kullanılarak bir sistemin dezavantajı diğer sistemle ortadan kaldırılmalı ve verimli biyomas elde etmek üzerine olmalıdır. Mikroalg üretim sistemlerinden fotobiyoreaktörün doğru seçimi ile ekonomik kazançlar sağlamak da mümkündür. Mikroalg üretiminde fotobiyoreaktör kullanımı Dünya ve Ülkemizde yaygınlaşmış olup, kullanım olanakları tıp, eczacılık ve kozmetik, biyoyakıt üretimi, gıda, yem, diyet ürünü vb. alanlarda önemli ölçüde değerlendirilmektedir.

Ülkelerin FAO 2009 yılı mikroalg üretimlerine göre; %47 ile ABD sektörde lider görünmekle birlikte FAO 2018 verileri göre, 11 ülkeden 87.000 ton mikroalg üretildiği kaydedilmiştir. Bunun sadece 86.600 tonu Çin'den elde edildiği belirtilmiş olup, FAO 2018 mikroalg üretimi üzerine Avustralya, Çekya, Fransa, İzlanda, Hindistan, İsrail, İtalya, Japonya, Malezya, Myanmar ve Amerika Birleşik Devletleri gibi önemli üreticilerin verileri mevcut değildir. Bu nedenle mikroalg üretim ölçeği düşük görünmekle birlikte arka planda gizlenen veriler gerçek üretim ölçeğini düşük göstermektedir. Oysa ki Dünyada ve Ülkemizde mikroalg üretimi üzerine çalışmalar *Spirulina spp.*, *Chlorella spp.*, *Haematococcus pluvialis* ve *Nannochloropsis spp.* gibi mikroalglerin yetiştirilmesi üzerine küçük ölçekli ve büyük ölçekli ticari üretime dayalı olarak (gıda, tıp, eczacılık, kozmetik, yem sanayisi ve gübre vb.) alanlarda farklı üretim modelleri geliştirilerek gizlilik içinde yürütülmektedir.

Kaynaklar

- Bahadar, A., Khan, M.B. (2013). Progress in energy from microalgae: A review, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 27, 128-148. DOI.org/10.1016/j.rser.2013.06.029
- Brennan, L., Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 14 (2), 557-577. DOI.org/10.1016/j.rser.2009.10.009
- Borowitzka, M.A. (1997). Microalgae for Aquaculture: Opportunities and Constraints. In: *Journal of Applied Phycology* 9/5 (1997), pp. 393–401.
- Boz N., (2015). Calcium oxide based heterogeneous catalyst design for the production of methyl esters from canola oil, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (4), 641-648.
- Cai, T., Park, S.Y., Li, Y.B. (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 19, 360-369. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.030
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae, *Biotechnol. Adv.*, 25 (3), 294-306. DOI.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001
- Christenson, L., Sims, R. (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts, *Biotechnol. Adv.*, 29 (6), 686-702. DOI: [10.1016/j.biotechadv.2011.05.015](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.015)
- Demirbas, A. (2010). Use of algae as biofuel sources, *Energy Convers. Manage.*, 51 (12), 2738-2749. DOI.org/10.1016/j.enconman.2010.06.010
- Duerr, E.O., Molnar, A., Sato, V. (1998). Cultured Microalgae as Aquaculture Feeds. In: *Journal of Marine Biotechnology* 6/2 (1998), pp. 65–70.
- Elçik, H., Çakmakçı, M. (2017). Mikroalg Üretimi ve Mikroalglerden Biyoyakıt Üretimi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32:3 (2017), 795-820. DOI:10.17341/gazimmfd.337627
- Eliçin, A.,K., Kılıçkan, A., Avcioğlu, A.O. (2009). Mikroalglerden Biyodizel Üretimi. 23.

- Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, 273-278, Isparta.
- FAO. (2009). Alg üretim istatistikleri web sitesi. (<http://www.fao.org/corp/statistics/en/>)
- Gezici, M. (2012). Biyodizel Üretimine Uygun Mikroalglerin Gelişimine Bazı Yetiştirme Parametrelerinin Etkisinin Belirlenmesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Ankara, 2012, pp:1-17, Ankara.
- Huntley, M.E., Redalje, D.G. (2006). CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: A new appraisal, Mitig. adapt. strategies glob. chang. , 12 (4), 573-608. DOI: [10.1007/s11027-006-7304-1](https://doi.org/10.1007/s11027-006-7304-1)
- Khan, S.A., Rashmi Hussain, M.Z., Prasad, S., Banerjee, U.C. (2009). Prospects of biodiesel production from microalgae in India, Renewable Sustainable Energy Rev., 13 (9), 2361-2372.
- Kim, S., Park, J.E., Cho, Y.B., Hwang, S.J. (2013). Growth rate, organic carbon and nutrient removal rates of *Chlorella sorokiniana* in autotrophic, heterotrophic and mixotrophic conditions, Bioresour. Technol., 144, 8-13. DOI: [10.1016/j.biortech.2013.06.068](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.068)
- Kobayashi, M., Kakizono, T., Yamaguchi, K., Nishio, N., Nagai, S. (1992). Growth and astaxanthin formation of *Haematococcus pluvialis* in heterotrophic and mixotrophic conditions, J. Ferment. Bioeng., 74 (1), 1720.
- Lakaniemi, A.M. (2012). Microalgal cultivation and utilization in sustainable energy production, Ph. D., Tampere University of Technology, Department of Chemistry and Bioengineering, Tampere. DOI.org/10.17341/gazimmd.337627
- Mitra, D., Van Leeuwen, J., Lamsal, B. (2012). Heterotrophic/mixotrophic cultivation of oleaginous *Chlorella vulgaris* on industrial co-products, Algal Res., 1 (1), 40-48, DOI: [10.1016/j.algal.2012.03.002](https://doi.org/10.1016/j.algal.2012.03.002)
- Molina, E., Fernández, J., Acien, F.G., Chisti, Y. (2001). Tubular photobioreactor design for algal cultures, J. Biotechnol., 92 (2), 113-131. DOI: [10.1016/s0168-1656\(01\)00353-4](https://doi.org/10.1016/s0168-1656(01)00353-4).
- Muller-Feuga, A., Moal, J., Kaas, R. (2003). The Microalgae of Aquaculture. In: Støttrup, J.G.; McEvoy, L.A. (eds.): Live Feeds in Marine Aquaculture. Oxford, pp. 206–252.
- Naz, M., Gökçek, K. (2006). Fotobiyorewaktörler. Fototropik Mikroorganizmalar için Alternatif Üretim Sistemleri, Ulusal Su Günleri 2004, 6-8 Ekim 2004, İzmir.
- Pawlowki, A., Mendoza, J.I., Guzman, J.L., Berenguel, M., Acien, F.G., Dormido, S. (2014). Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event based pH control for microalgae culture, Bioresour. Technol., 170, 1-9. DOI: [10.3390/pr7050247](https://doi.org/10.3390/pr7050247)
- Pragya, N., Pandey, K.K., Sahoo, P.K. (2013). A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae, Renewable Sustainable Energy Rev., 24, 159-171. DOI: [10.1016/j.rser.2013.03.034](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.034)
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., Bux, F. (2013). Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production, Appl. Energy, 103, 444-467. DOI.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.004
- Sánchez Mirón, A., Contreras Gómez, A., García Camacho, F., Molina Grima, E., Chisti Y. (1999). Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae, J. Biotechnol., 70 (1–3), 249-270.
- Schenk, P.M., Thomas-Hall S.R., Stephens E., Marx U.C., Mussgnug J.H., Posten C., Kruse O., Hankamer B. (2008). Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production, Bioenergy Res., 1 (1), 20-43.
- Suali, E., Sarbatly, R. (2012). Conversion of microalgae to biofuel, Renewable Sustainable Energy Rev., 16 (6), 4316-4342. DOI.org/10.1016/j.rser.2012.03.047
- Tawfig, S.A., Suadand, A.H., Jacob, D.A. (2004). Optimum Culture Conditions Required For Locally Isolated *Dunaliella salina*, Journal of Algal Biomass Utilization. Volume 1(2), pp:12-19.
- Tredici, M.R., Biondi, N., Ponis, E. (2009). Advances in Microalgal Culture for Aquaculture Feed and Other Uses. In: Burnell, G.; Allan, G. (eds.): New Technologies in Aquaculture: Improving

- Production Efficiency, Quality and Environmental Management. Cambridge, pp. 611–676. DOI: [10.1533/9781845696474.3.610](https://doi.org/10.1533/9781845696474.3.610)
- Ugwu, C.U., Ogbonna, J.C. (2002). Tanaka H. Improvement of mass transfer characteristics and productivities of inclined tubular photobioreactors by installation of internal static mixers, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 58 (5), 600-607. DOI: [10.1007/s00253-002-0940-9](https://doi.org/10.1007/s00253-002-0940-9)
- Wang, H., Xiong, H., Hui, Z., Zeng, X. (2012). Mixotrophic cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* with diluted primary piggery wastewater to produce lipids, *Bioresour. Technol.*, 104, 215-220. DOI: [10.1016/j.biortech.2011.11.020](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.020)
- Watanabe, Y., Saiki, H. (1997). Development of a photobioreactor incorporating *Chlorella* sp. for removal of CO₂ in stack gas, *Energy Convers. Manage.*, 38, Supplement, S499-S503. DOI.org/10.1016/S0196-8904(96)00317-2
- Yılmaz, H., K. (2006). Mikroalg Üretimi İçin Fotobiyoreaktör Tasarımları. *E.Ü. Su Ürünleri Dergisi*, 23 (1/2), 327-332.
- Zhang, X., Hu, Q., Sommerfeld, N., Puruhita, E., Chen, Y. (2010). Harvesting algal biomass for biofuels using ultrafiltration membranes, *Bioresour. Technol.* 101 (14), 5297-5304. DOI: [10.1016/j.biortech.2010.02.007](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.007)
- Zmora, O., Richmond, A. 2004. Microalgae for Aquaculture: Microalgae Production for Aquaculture. In: Richmond, A. (eds.): *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Oxford, pp. 365–379. DOI: [10.1002/9780470995280.ch20](https://doi.org/10.1002/9780470995280.ch20)