

Mikroalgal Biyokütle Üretimi için Laboratuvar Ölçekli Fotobiyoreaktör Tasarımı

Abdulkadir GÜL*¹, Hamdi Soner ALTUNDOĞAN¹

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

(Alınış / Received: 11.11.2022, Kabul / Accepted: 11.03.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2023)

Anahtar Kelimeler

Biyokütle,
Biyoteknoloji,
Fotobiyoreaktör tasarımı,
Mikroalg

Öz: Mikroalgal biyoteknoloji, enerji krizi, iklim değişikliği, çevresel bozulma ve gıda kıtlığı dahil olmak üzere günümüzde karşılaşılan küresel sorunları, potansiyel olarak çözebilecek verimli bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Bunun başlıca nedeni, mikroalglerin büyük miktarda karbondioksiti yakalayarak fotosentez yoluyla doğrudan güneş enerjisini biyokütle içinde muhafaza edilen kimyasal enerjiye dönüştürebilmeleridir. Mikroalgal biyokütle gıda ve hayvan yemi olarak kullanılabilirliği gibi biyoyakıt üretiminde de değerlendirilebilir. Bu çalışmada, laboratuvar ölçeğinde bir fotobiyoreaktör tasarımı yapılarak, bu sistemde farklı mikroalg türlerinin zamana bağlı gelişimi incelenmiştir. Önerilen sistemin ölçek büyütmeyle endüstriyel boyutta uygulanabilir bir tasarıma sahip olması, mikroalgal biyokütle üretimi açısından önemlidir. Ayrıca, eş zamanlı ve paralel fotobiyoreaktörlere hava temini için kullanılan küresel manifold sistemi, karşılaştırılabilir sonuçların elde edilmesi açısından özgün bir tasarımdır. Farklı alg türlerinin gelişiminin 32 gün optik yoğunluk ölçümleriyle incelendiği deneylerde, alg kültürlerinin yüksek verimliliklerde üretilebileceği görülmüştür. Kullanılan sistemle incelenen *Chlorella protothecoides*-2 türü için kuru madde konsantrasyonunda, 20 günün sonunda 0,04 g/L'den 1,94 g/L'ye kadar artmak suretiyle yaklaşık 50 katlık bir artış sağlanabildiği gözlenmiştir.

Laboratory Scale Photobioreactor Design for Microalgal Biomass Production

Keywords

Biomass,
Biotechnology,
Photobioreactor design,
Microalgae

Abstract: Microalgal biotechnology is recognized as a productive alternative that could potentially solve the global problems faced today, including the energy crisis, climate change, environmental degradation, and food shortages. This is mainly due to the fact that microalgae are able to capture large amounts of carbon dioxide and directly convert solar energy into chemical energy conserved in biomass through photosynthesis. Microalgal biomass can be used as food and animal feed, as well as evaluated in biofuel production. In this study, a laboratory-scale photobioreactor was designed, and the time-dependent development of different microalgae species in this system was investigated. In terms of microalgal biomass production, it is important that the proposed system has an industrially applicable design with scale-up. In addition, the spherical manifold system used for air supply to simultaneous and parallel photobioreactors is an original design in terms of obtaining comparable results. In experiments in which the development of different algae species was examined with optical density measurements for 32 days, it was seen that algae cultures could be produced with high efficiency. It has been observed that an approximately 50-fold increase can be achieved in the dry matter concentration for the *Chlorella protothecoides*-2 strain investigated by using the system with increasing from 0.04 g/L to 1.94 g/L at the end of a 20 day.

1. Giriş

Karbon dioksit (CO₂) emisyonlarının neden olduğu küresel ısınma ve enerji kaynağı olarak fosil yakıtların büyük ölçüde kullanılması, sürdürülebilir sosyal ve ekonomik kalkınmanın önündeki en önemli

engellerden biridir. Bu nedenle, CO₂ emisyonlarını azaltabilecek etkili yolların geliştirilmesi çok önemli hale gelmiştir [1-3]. Bu kapsamda, mikroalgler, CO₂ emisyonlarının azaltılmasının yanı sıra, atık su arıtımı ve yem üretimi gibi önemli diğer uygulamaları fotosentetik işlemlerle gerçekleştiren önemli bir

*İlgili yazar: a.gul@firat.edu.tr

mikroorganizma sınıfıdır [2, 4]. Ayrıca, geniş çaplı biyoçeşitliliklerinden dolayı, insan beslenmesi, tıbbi uygulamalar, kozmetik ve zirai kimya endüstrisi için çok çeşitli yüksek katma değerli ürünler üretebilirler. İlaç araştırmalarındaki son eğilimler, mikroalglerin yeni antikanser, antimikrobiyal ve antiviral biyoaktif bileşenler sağlamak için en umut verici mikrobiyal gruplar arasında olduğunu göstermektedir [5-7]. Hâlihazırda, yığın kimyasalların ve biyoyakıtların üretimi için hammadde olarak ve balık unu ve yağına alternatif içerik olarak mikroalglerin üretilmesine yönelik büyük ilgi vardır [8-10]. Mikroalgler, diğer karasal enerji kaynaklarına kıyasla daha yüksek fotosentetik verimlilikleri, hızlı biyokütle üretimi ve daha yüksek lipid üretkenliklerine sahip olmaları nedeniyle biyodizel üretimi için alternatif bir yenilenebilir hammadde olarak düşünülebilir [2, 11].

Algler, ökaryotik mikroalgleri ve prokaryotik siyanobakterileri içeren geniş bir kategoridir. Bu mikroorganizmalar gezegendeki ekosistemler için çok önemlidir. En önemli özelliklerinden biri mikroalglere önemli bir ekonomik potansiyel atfeden yüksek büyüme oranlarıdır. 3000'den fazla farklı suyla bir tür tek hücreli fotoototrofik mikroorganizma olan mikroalglerin hızlı bir şekilde çoğalmaları, son yıllarda yoğun bir şekilde incelenen biyokütle üretimi ve atık sulardan besin alımı gibi birkaç faydalı çevresel uygulama açısından önemlidir [4, 12, 13]. Mikroalgler, oksijenli fotosentez yapabilen fotosentetik mikroorganizmalardır. Hem prokaryotik hücre yapısına sahip siyanobakteriler hem de ökaryotik hücre yapısına sahip mikroalgler genellikle bu kategoriye dahil edilir. Bu mikroorganizmalar fotoototroflardır, ancak miksotrofik veya heterotrofik koşullar altında da büyüebilirler [4]. Mikroalglerin fototrofik verimliliği, karasal bitkilerden 10-50 kat daha yüksektir [14]. Yüksek büyüme oranı ve önemli CO₂ yakalama kapasitesi nedeniyle mikroalgler, en umut verici CO₂ sekestrasyon (giderme) ortamı olarak kabul edilmiştir [15, 16].

Mikroalg kültürasyonları açık havuzlarda veya kapalı sistemlerde gerçekleştirilebilir [17, 18]. Açık havuzlar, düşük sermaye ve işletme maliyetleri sunduğu için ticari ölçekte kültürlerle en çok uygulananlardır. Ancak, yerel iklime bağımlılık ve kolay kontaminasyon nedeniyle biyokütle verimleri, kapalı sistemlerde elde edilenlerden daha düşüktür. Kapalı sistemler, kültür değişkenlerinin daha iyi kontrolü nedeniyle yüksek biyokütle verimliliğinin elde edilebildiği biyoreaktörlerdir. Bu biyoreaktörler, buharlaşma yoluyla daha az su ve atmosfere CO₂ gazı salar [19]. Fotobiyoreaktörler, mikroalg üretiminde yaygın bir şekilde kullanılan en önemli biyoreaktör türlerinden biridir. Bu biyoreaktörler, ışık, karbon kaynağı, besin maddeleri, pH ve sıcaklık gibi uygun koşullar sağladığından, mikroalg üretimi için önemli sistemlerdir [20]. Genel olarak, CO₂ ile zenginleştirilmiş gaz, mikroalg fototrofik üretiminde ana inorganik karbon kaynağı olarak tanımlanır ve

genellikle gaz havalandırıcı yoluyla kabarcıklar şeklinde mikroalg süspansiyonuna enjekte edilir. Bununla birlikte, kabarcıkların içindeki CO₂ molekülleri doğrudan kullanılamaz, sadece gaz-sıvı arayüzünü geçerek mikroalg süspansiyonu içinde çözünebilir. Çözünen CO₂, kabarcıkları çevreleyen mikroalg hücreleri tarafından hemen yakalanarak, ışık enerjisi tarafından yönlendirilen fotosentez yoluyla, biyokütle oluşturmak için karmaşık organik bileşiklere dönüştürülmektedir [21]. Fototrofik koşullar altında seçilen biyoreaktörlerin mikroalglerin üretim gereksinimlerini karşılamak için yeterli şekilde tasarlanması, inşa edilmesi ve çalıştırılması gereklidir. Fotobiyoreaktörlerin çoklu tasarımları ve konfigürasyonları önerilmiştir, ancak hala optimal bir tasarım mevcut değildir. Hangi uygulama için olursa olsun, kullanılacak fotobiyoreaktör, proses gereksinimlerine uygun olarak seçilmelidir. Bu nedenle mikroalg bazlı bir proses tasarlanırken başlangıç noktasını oluşturan optimal fotobiyoreaktörün, uygun şekilde tasarlanması için kullanılacak biyolojik sistemin gereksinimlerinin belirlenmesi gerekmektedir [4]. Fototrofik mikroalg bazlı proseslerde karşılanması gereken başlıca gereksinimler, ışık, besin kaynağı (karbon, azot, fosfor, vb.) ve yeterli kültür koşullarının (pH, sıcaklık, vb.) sağlanmasıdır [22]. Bu gereksinimleri laboratuvar ortamında veya küçük ölçekli koşullarda karşılamak, maliyetli olsa da nispeten kolaydır, ancak büyük ölçekte gerçekleştirmek, özellikle makul maliyetlerle gerçekleştirilmesi gerektiğinde daha zordur [23]. Doğru yaklaşım, laboratuvar ölçeğinde üretim üzerine etkili olan parametrelerin etkilerinin gözlenmesi ve optimizasyonunun gerçekleştirilmesini takiben, ticarileştirme aşamasında bu bilgilerden faydalanılarak ölçek büyütülmesine yönelik çalışmalar yapılmasıdır. Yüksek ticarileşme potansiyeli taşıyan mikroalg biyoteknolojisine dayalı değerli ürün üretimi uygulamaları için, bu çalışmada oluşturulan fotobiyoreaktör sisteminin önem taşıdığı düşünülmektedir. Çalışmada, laboratuvar ölçekli bir fotobiyoreaktör tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu biyoreaktör sistemi kullanılarak aynı şartlar altında karşılaştırmalı olarak farklı mikroalg türlerinin gelişimi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında oluşturulan sistemin temel bir üretim amacıyla kullanılabilir ve ölçek büyütme için uygun bir dizayna sahip olduğu ifade edilebilir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kültüre alınan mikroorganizmalar

Çalışmada kullanılan mikroalgler, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde yürütülen atık suların alg üretiminde değerlendirilmesine ilişkin çalışmalar amacıyla oluşturulan alg kültür koleksiyonundan temin edildi. Söz konusu kaynaktan, *Chlorella protothecoides* (iki

farklı kaynaktan izole edilmiş 1 ve 2 nolu türler), *Chlorella emersonii*, *Botryococcus braunii* ve karışık kültür olmak üzere beş farklı alg örneği alınarak deneylerde kullanıldı.

2.2. Kültür ortamı

Çalışmada kültür ortamı olarak, daha önce benzer çalışmalarda kullanılmış olan Zarrouk olarak adlandırılan kültür ortamı bazı modifikasyonlar yapılarak kullanıldı [24]. Ortamın hazırlanmasında kullanılan bileşenler ve konsantrasyonları Tablo 1’de görülmektedir. Zarrouk ortamında bulunan A5 ve B6 çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan kimyasallar ve konsantrasyonları da Tablo 2 ve 3’de görülmektedir. Hazırlanan ortamlar, aşılama öncesi 121 °C’de 15 dakika otoklavlanarak sterilize edildi.

Tablo 1. Çalışmada algal kültür üretimi için kullanılan modifiye Zarrouk ortamı [24]

Bileşenler	Konsantrasyon (g/L)
NaHCO ₃	16,8
K ₂ HPO ₄	0,5
NaNO ₃	2,5
K ₂ SO ₄	1,0
NaCl	1,0
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,2
CaCl ₂ .2H ₂ O	0,04
FeSO ₄ .7H ₂ O	0,01
Na ₂ EDTA	0,008
A5 Çözeltisi	1 ml/L
B6 Çözeltisi	1 ml/L

Tablo 2. A5 çözeltisinin hazırlanmasında kullanılan kimyasallar ve konsantrasyonları [24]

Bileşenler	Konsantrasyon (g/L)
H ₃ BO ₃	2,86
MnCl ₂ .4H ₂ O	1,81
ZnSO ₄ .7H ₂ O	0,222
CuSO ₄ .5H ₂ O	0,08
NaMoO ₄ .2H ₂ O	0,39

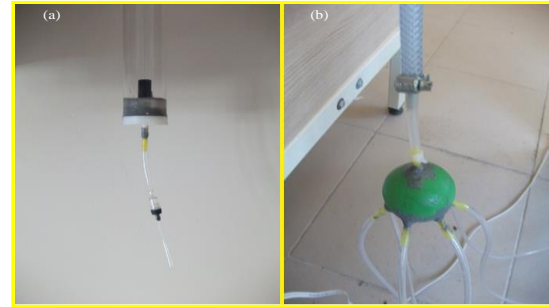
Tablo 3. B6 çözeltisinin hazırlanmasında kullanılan kimyasallar ve konsantrasyonları [24]

Bileşenler	Konsantrasyon (g/L)
NH ₄ NO ₃	0,23
K ₂ Cr ₂ (SO ₄) ₄ .24H ₂ O	96,0
NiSO ₄ .7H ₂ O	47,85
Na ₂ SO ₄ .2H ₂ O	17,94
Ti(SO ₄) ₃	40,0

2.3. Fotobiyoreaktör tasarımı

Bu çalışma, iki ana bölümden oluşmakta olup, birinci bölümde laboratuvar boyutunda bir fotobiyoreaktör tasarımı gerçekleştirilirken, ikinci bölümde, bu reaktör sistemi kullanılarak bazı mikroalg türlerinin çoğaltılması araştırılmıştır. Bu kapsamda, laboratuvar ölçekli fotobiyoreaktör tasarımı, basitçe kolay ışık alan saydam bir ortamın hava beslemesi yapılabilecek şekilde dizayn edilmesiyle gerçekleştirildi. Bunun için 54 mm dış çapa 50 mm iç çapa sahip pleksiglas malzemeden imal edilmiş 6 adet 1 m uzunluğunda saydam plastik boru temin edildi. Bu plastik boruların

alt ve üst ağızları tornada işlenmiş poliamid kapaklar ile kapatıldı. Alt kapaklara hava beslenmesini sağlamak üzere açılan kanala dağıtıcı olarak sıkıştırılmış kumdan bir hava taşı monte edildi. Ayrıca hava girişini sağlamak üzere hortum bağlantıları oluşturuldu (Şekil 1a). Üst kapaklarda da beslenen havanın çıkışını sağlamak üzere çıkış portları açıldı. Kompresörden gelen havayı eşit bir şekilde dağıtarak besleyebilmek için plastik bir toptan faydalanarak yapılan küresel bir manifold (Şekil 1b) kullanıldı. Aynı kaynaktan temin edilen havanın eş zamanlı işletilen paralel reaktörlere beslenmesi sırasında, eşdeğer akış hızlarının borusal yapılı manifold kullanılmasıyla elde edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle küresel bir manifold kullanılmasıyla tüm reaktörlerde eşit hava akışının sağlanması mümkün olabilmektedir. Bu durum, farklı mikroalg türlerinin karşılaştırılması olarak çoğalma davranışlarının incelenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Fotobiyoreaktörlere hava akışını sağlamak için her biri 6 mm iç çapa sahip 75 cm boyunda plastik borular manifolda bağlandı. Kompresöre doğru geri sıvı akışını önlemek için plastik çekvalfler, manifold ile fotobiyoreaktörler arasına yerleştirildi. Çekvalflerin alt kısmına ise hava ayarını yapabilmek için vanalar koyulup tüm sistem elemanları birleştirildi.



Şekil 1. Tasarlanan tübüler fotobiyoreaktör (a) ve manifold (b) sisteminin görünümü

Fotobiyoreaktörleri dik bir şekilde tutabilmek için bir sehpa tasarımı yapıldı. Bu sehpa aynı zamanda ışık kaynağı olarak kullanılan floresan lambaları taşıyacak şekilde tasarlandı. Sehpaya 3 adet her biri 36 W gücünde (3350 Lümen, 120 cm boyunda 2,8 cm çapında) beyaz gün ışığı verebilen floresan lambalar monte edildi. Tüm bileşenler yerleştirildikten sonra elde edilen sistemin görüntüsü Şekil 2’de yer almaktadır.



Şekil 2. Fotobiyoreaktör sistem elemanlarının birleştirilmiş halinin görünümü

2.4. Kültür koşulları ve deneylerin yapılışı

Tasarlanan laboratuvar ölçekli fotobiyoreaktör yardımıyla mikroalglerin üretilmesi amacıyla Şekil 3'de görüldüğü gibi her bir tüpe 1,45 L Zarrouk kültür ortamı doldurulup sırasıyla 1 numaralı tüpe 50 ml *Chlorella protothecoides*-1, 2 numaralı tüpe 50 ml *Chlorella emersonii*, 3 numaralı tüpe 50 ml karışık kültür, 4 numaralı tüpe 50 ml *Chlorella protothecoides*-2 ve 5 numaralı tüpe 50 ml *Botryococcus braunii* ekimi yapıldı. 6 numaralı tüpe hiçbir ekim yapılmadı sadece 50 ml saf su ilave edildi. Kültürlerin ışık ihtiyacı, floresan lambalar ile 24 saat aydınlatılarak karşılandı. Mikroalg kültür çalışmalarında, beyaz ışığı yayma özelliğine sahip olan floresan lamba, güneş ışığına en yakın ışığı vermesi, fazla ısınmaması ve ekonomik olması nedenleriyle tercih edilmiştir. Ekimler gerçekleştirildikten sonra sisteme bir kompresör yardımıyla yeterli karıştırmanın sağlanabileceği sabit bir hızda hava beslenmeye başlandı. Ortam sıcaklığı yaklaşık 25 °C olan bir laboratuvar ortamında belli periyotlarla her biyoreaktörden 10 ml hacminde örnekler alınarak spektrofotometrik olarak optik yoğunluklar (OD) ölçüldü. Her örnek alınışında hava geçirilmesinden dolayı buharlaşan su kadar, steril distile su reaktörlere ilave edildi.



Şekil 3. Deney düzeneğinin mikroalglerin ekimi yapıldıktan sonraki görünümü

2.5. Analizler

Deneylerde kullanılmak üzere temin edilen alg kültürlerini içeren ortamlar, ekim yapıldığında elde edilen biyoreaktörlerdeki alg konsantrasyonunun belirlenmesi için mavi bant süzgeç kağıdından belli bir hacimde süzülükten sonra, süzgeç kâğıdı 70°C'de 24 saat kurutulup tartılarak başlangıç alg konsantrasyonu belirlendi. Belli periyotlarla alınan örneklerdeki alg konsantrasyonunun değişimi ise 680 nm'de, kullanılan besiyerini içeren 6 nolu reaktördeki çözeltinin kör olarak kullanılmasıyla spektrofotometrik olarak (model 10S UV-VIS, Thermo Scientific, Massachusetts, ABD) OD ölçümleriyle takip edildi. Ayrıca deney sonlandırıldığında, reaktörlerdeki tüm karışımın süzülerek, katı bakiyenin 70°C'de 24 saat kurutulup tartılmasıyla elde edilen toplam alg miktarları belirlendi. Tüm deneyler iki tekrar ile

gerçekleştirildi. Deney sonuçları arasındaki farklar % 5'i aşmadığında sonuçların ortalaması alındı.

3. Bulgular

Bu çalışmada, tasarlanan tübüler fotobiyoreaktörlerde farklı alg türlerinin karşılaştırmalı olarak üretiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Tasarlanan biyoreaktör sisteminin alg üretimi sırasında oluşturmuş olduğu görüntü Şekil 4'de görülmektedir. Şekil 4'den de anlaşılacağı üzere mikroalg gelişiminin gözle görülür bir seviyede gerçekleştiği söylenebilir.

Tübüler fotobiyoreaktörlerde farklı mikroalg türlerinin üretiminin karşılaştırmalı olarak incelenmesinin amaçlandığı bu çalışmada, eş zamanlı ve paralel olarak çok sayıda reaktörün kullanılması ve aynı hava besleme kaynağından havanın beslenmesi durumunda, kullanılan borusal manifold yapısı nedeniyle, her bir reaktöre beslenen havanın eşdeğer olma durumunun sağlanamaması söz konusu olmuştur. Çalışmada özellikle karşılaştırmalı şartların sağlanabilmesi için manifold yapısının önemli olduğu düşünülerek küresel yapı bir manifold kullanımıyla problemin aşılabileceği düşünülmüştür. Zira borusal manifold kullanılması durumunda, manifoldta havanın girdiği noktaya yakın çıkış noktalarında hava basıncı yüksek olurken, uzak noktalarda düşmekte ve eşdeğer bir hava beslemesi sağlanması mümkün olamamaktadır. Küresel manifold kullanılması durumunda, manifold içerisinde homojen bir basınç dağılımı elde edilebilmektedir. Bu durumun endüstriyel boyuttaki üretim proseslerinde de karşılaşılan bir problem olduğu düşünülerek, üretilen çözümün önemli olduğu değerlendirilebilir.



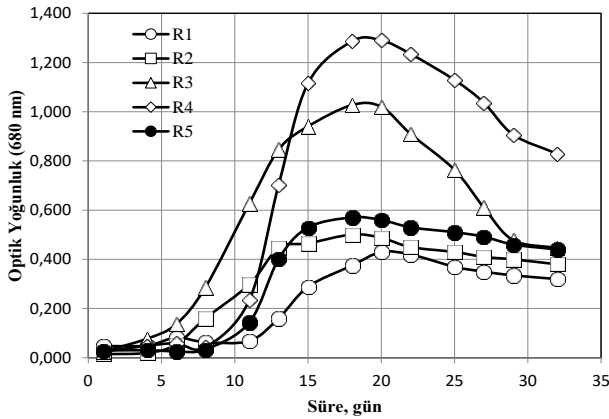
Şekil 4. Deneyler sürerken fotobiyoreaktör sisteminin görüntüsü

Deneylerin başlangıcında her bir biyoreaktördeki belirlenen başlangıç alg konsantrasyonları Tablo 4'de görülmektedir. Tablo 4'den de görüldüğü gibi başlangıç alg konsantrasyonları oldukça düşüktür. Görüldüğü gibi 1 ve 4 numaralı reaktörlere ekilen kültürler aynı kültürler olmakla birlikte farklı kaynaklardan izole edilmişlerdir ve başlangıç konsantrasyonu itibarıyla de önemli bir farklılığın olduğu açıktır.

Tablo 4. Kültürlerin ekimini takiben reaktörlerdeki başlangıç alg konsantrasyonları

Reaktör No	Alg türü	Başlangıç konst. (g kuru madde/L)
1	<i>Chlorella protothecoides</i> -1	0,09
2	<i>Chlorella emersonii</i>	0,04
3	Karışık Kültür	0,03
4	<i>Chlorella protothecoides</i> -2	0,04
5	<i>Botryococcus braunii</i>	0,08

Zamanla alg konsantrasyonundaki değişimi gözlemek üzere yapılan OD ölçüm testlerinin sonuçları toplu olarak Şekil 5'de görülmektedir. Şekil 5'den de görüldüğü gibi tüm biyoreaktörlerdeki alg türleri için artan süre ile ölçülen OD değerleri, dolayısıyla alg konsantrasyonları yaklaşık ilk 20 gün boyunca sürekli olarak artmıştır. Dikkat çeken bir husus 1 ve 4. reaktörlerdeki mikroalgler tür olarak aynı olmasına rağmen, OD ve konsantrasyon değişimi davranışları farklıdır. Bu durum muhtemelen farklı kaynaklardan izole edilmiş kültürlerin saflık derecelerinin farklı oluşundan kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan alglerin zamanla OD ve dolaylı olarak konsantrasyon değişimlerinin beklenen bir eğilim gösterdiği söylenebilir. İlk 5 günlük sürecin bir lag fazı olarak bilinen bir uyum dönemi şeklinde gerçekleştiği, bu fazı takiben alg konsantrasyonunun logaritmik olarak artması nedeniyle bir log fazının gözlemlendiği ve bu fazı bir sabit faz ve ölüm fazlarının takip ettiği görülmektedir. Ancak farklı alg türleri için bu fazların uzunluğunun da farklı olduğu dikkati çekmektedir. Örneğin, en yüksek konsantrasyon artışının meydana geldiği 4. reaktördeki *Chlorella protothecoides*-2 kültürü için gözlenen sabit faz birkaç gün ile sınırlıyken, 2. reaktördeki *Chlorella emersonii* ve 5. reaktördeki *Botryococcus braunii* türleri için sabit faz oldukça uzun olduğu görülmektedir. Benzer şekilde karışık kültür ve *Chlorella protothecoides*-2 türü için sabit fazı takiben meydana gelen ölüm fazındaki konsantrasyon düşüşü oldukça belirgin olmasına rağmen, diğer türler için azalma hızı oldukça düşüktür.

**Şekil 5.** Biyoreaktörlerdeki mikroalglerin optik yoğunluğunun zamanla değişimi

Deneylerin sonlandırılmasını takiben reaktör içeriklerinin mavi bant süzgeç kağıdından süzülerek

kurutulup tartılması ile belirlenen alg miktarları (kuru ağırlık olarak), dolayısıyla son alg konsantrasyonları ve alg miktarlarında meydana gelen artışlar Tablo 5'de görülmektedir.

Tablo 5. Deneyler sonunda elde edilen alg miktarları, son alg konsantrasyonları ve alg miktarlarındaki artışlar

Reaktör no	Alg türü	Alg miktarı (g kuru madde)	Son alg konst. (g kuru madde/L)	Alg konst. artışı
1	<i>Chlorella protothecoides</i> -1	2,015	1,34	14,9 kat
2	<i>Chlorella emersonii</i>	2,105	1,43	35,8 kat
3	Karışık kültür	2,009	1,34	44,6 kat
4	<i>Chlorella protothecoides</i> -2	2,914	1,94	48,5 kat
5	<i>Botryococcus braunii</i>	2,307	1,54	19,3 kat

Tablo 5'den görüleceği üzere en önemli alg konsantrasyon artışı karışık kültür ve *Chlorella protothecoides*-2 içeren fotobiyoreaktörlerden elde edilmiştir. Daha önceki OD ölçümlerinden, bu iki tür için sabit faza ulaşılmasının diğer türlere göre erken olduğu düşünülerek, bu türlerin biyoyakıt elde edilmesi gibi amaçlar için üretiminin mantıklı olduğu söylenebilir. Zira bu çalışmada bir optimizasyon yapılmamış olmakla birlikte kullanılan mikroalg türleri arasında avantajlı olabilecek türlerin belirlenmesi açısından önemli bulgular elde edildiği görülmektedir.

Elde edilen deney sonuçlarının literatürde yer alan çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması için en doğru yol, verimlilik değerlerinin kıyaslanmasıdır [25]. Son ve başlangıç alg konsantrasyonu farkının inkübasyon süresine oranlanmasıyla g/L.gün olarak verimlilik değerleri hesaplanabilir. Yapılan hesaplamalarda en yüksek verimlilik değerinin *Chlorella protothecoides*-1 ve 2 suşları için sırasıyla 0,038 ve 0,059 g/L.gün olduğu görülmektedir. Literatürde fototrofik şartlarda bu suş için verimlilik değerlerinin 0,002-0,02 g/L.gün aralığında belirlendiği belirtilen bir çalışma mevcuttur [26]. Benzer olarak *Chlorella emersonii* ve *Botryococcus braunii* için fototrofik verimlilik değerlerinin sırasıyla 0,04 [26, 27] ve 0,03 g/L.gün [28] olarak verildiği çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada ise söz konusu bu suşlar için verimlilik değerleri sırasıyla 0,045 ve 0,043 g/L.gün olarak belirlenmiştir. Bu karşılaştırmalardan önerilen sistemin literatürde yer alan sistemlere göre verimliliğinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

4. Tartışma ve Sonuç

Mikroalgal biyokütle, gıda, yem ve ilaç endüstrilerinde değerli maddeler üretmek için büyük bir potansiyele sahip biyoteknolojik organizmalardır. Bu

organizmalar, CO₂ salınımının azaltılması, atık su arıtımı ve biyoyakıt üretimi gibi önemli biyoteknolojik uygulama alanlarına sahip olduğundan, mikroalglerin üretilmesine yönelik büyük araştırma ilgisi vardır. Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli fotobiyoreaktör tasarımı ve bu biyoreaktörlerde farklı mikroalg türlerinin üretimi için bir seri deney gerçekleştirilmiştir. Algler gelişimleri için organik besinlere ihtiyaç duymayan ve gelişimini fotosentez ile sağlayan mikroorganizmalar olduğundan, büyük ölçüde inorganik tuzlardan oluşan bir besiyeri ortamında ve yeterli ışık varlığında üreyebilirler. Burada alg ortamına hava beslemesi yapılması hem karıştırma etkisinin sağlanması hem de alglerin havanın CO₂'den faydalanması açısından önemlidir. Yapılan deneyler, tasarlanan fotobiyoreaktör sisteminin alg üretimi açısından uygun bir dizayn olduğunu göstermektedir. Özellikle aynı kaynaktan hava beslemesi yapılan paralel reaktörlerin kullanılması durumunda, reaktörlerde eşdeğer şartların sağlanması açısından küresel yapılı bir hava besleme manifoldunun kullanılması, karşılaştırmalı sonuçların elde edilebilmesi açısından önemlidir. Bu manifold sisteminin endüstriyel uygulamalarda da kullanılmasıyla bir avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Laboratuvar ölçekli olarak tasarlanan fotobiyoreaktör sisteminde, farklı mikroalg türlerinden ve karışık kültürden oluşan alglerin Zarrouk ortamı kullanılarak gelişiminin incelendiği bu çalışmada, zamanla mikroalg konsantrasyonunun önemli ölçüde arttığı, özellikle karışık kültür ve *Chlorella protothecoides*-2 türü için yaklaşık 20 günlük bir sürenin sonunda maksimum konsantrasyonlara ulaşıldığı belirlenmiştir. Bu türler için gözlenen biyokütle artışlarının 40-50 kat seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada tasarlanan fotobiyoreaktörün özellikle biyoyakıt üretimi olmak üzere farklı ürünlerin elde edilmesinde alg gelişiminin optimizasyonunun yapılması için kullanılabileceği görülmüştür. Bu sistem kullanılarak aynı şartlar altında karşılaştırmalı olarak farklı alg türlerinin gelişimi incelenebileceği gibi, seçilen herhangi bir alg türü veya bir karışık kültürün gelişimi üzerine, besiyeri ortamı bileşenlerinin etkisi, ışık alma rejimi ve süresi, çeşitli inorganik ve organik katkı miktarlarının etkisi, hava besleme hızının etkisi, CO₂ ilavesinin etkisi gibi pek çok parametrenin etkileri incelenebilir. Bu şekilde yapılacak bir optimizasyonu takiben alg üretiminin büyük boyutlarda ekonomik olarak geliştirilmesine katkıda bulunması beklenmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, alg kültürlerinin temini noktasında vermiş olduğu desteklerden dolayı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi merhum Doç. Dr. Yusuf SAATÇI'ye ve deneylerin gerçekleştirilmesinde emek veren Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Biyomühendislik

Bölümü öğrencisi Mehmet ÇAKICI'ya teşekkürlerini sunar.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Adeniyi, O. M., Azimov, U., Burluka, A. 2018. Algae biofuel: current status and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 316-335.
- [2] Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, 25(3), 294-306.
- [3] Raheem, A., Prinsen, P., Vuppaladadiyam, A. K., Zhao, M., Luque, R. 2018. A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: Recent developments. *Journal of Cleaner Production*, 181, 42-59.
- [4] Ación, F. G., Molina, E., Reis, A., Torzillo, G., Zittelli, G. C., Sepúlveda, C., Masojedek, J. 2017. Photobioreactors for the production of microalgae. In *Microalgae-based biofuels and bioproducts* (pp. 1-44). Woodhead Publishing.
- [5] Tredici, M. R., Biondi, N., Ponis, E., Rodolfi, L., Zittelli, G. C. 2009. Advances in microalgal culture for aquaculture feed and other uses. In *New technologies in aquaculture* (pp. 610-676). Woodhead Publishing.
- [6] Milledge, J. J. 2011. Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 10, 31-41.
- [7] Satyanarayana, K. G., Mariano, A. B., Vargas, J. V. C. 2011. A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials. *International Journal of Energy Research*, 35(4), 291-311.
- [8] Gouveia, L. 2011. Microalgae as a Feedstock for Biofuels. In *Microalgae as a Feedstock for Biofuels* (pp. 1-69). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [9] Hemaiswarya, S., Raja, R., Ravi Kumar, R., Ganesan, V., Anbazhagan, C. 2011. Microalgae: a sustainable feed source for aquaculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27(8), 1737-1746.
- [10] Tulli, F., Chini Zittelli, G., Giorgi, G., Poli, B. M., Tibaldi, E., Tredici, M. R. 2012. Effect of the inclusion of dried *Tetraselmis suecica* on growth,

- feed utilization, and fillet composition of European sea bass juveniles fed organic diets. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 21(3), 188-197.
- [11] 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.
- [12] Olguín, E. J. 2012. Dual purpose microalgae-bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a biorefinery. *Biotechnology Advances*, 30(5), 1031-1046.
- [13] Pires, J. C. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G., Simões, M. 2012. Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: engineering aspects and biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3043-3053.
- [14] Zhou, W., Wang, J., Chen, P., Ji, C., Kang, Q., Lu, B., Li, K., Liu, J., Ruan, R. 2017. Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1163-1175.
- [15] Shuba, E. S., Kifle, D. 2018. Microalgae to biofuels: Promising alternative and renewable energy, review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 743-755.
- [16] Sun, Y., Huang, Y., Liao, Q., Xia, A., Fu, Q., Zhu, X., & Fu, J. 2018. Boosting *Nannochloropsis oculata* growth and lipid accumulation in a lab-scale open raceway pond characterized by improved light distributions employing built-in planar waveguide modules. *Bioresource Technology*, 249, 880-889.
- [17] De Vree, J. H., Bosma, R., Janssen, M., Barbosa, M. J., Wijffels, R. H. 2015. Comparison of four outdoor pilot-scale photobioreactors. *Biotechnology for biofuels*, 8(1), 1-12.
- [18] Pires, J. C., Alvim-Ferraz, M. C., Martins, F. G. 2017. Photobioreactor design for microalgae production through computational fluid dynamics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 248-254.
- [19] Bahadar, A., & Khan, M. B. 2013. Progress in energy from microalgae: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 128-148.
- [20] Sun, Y., Huang, Y., Liao, Q., Fu, Q., Zhu, X. 2016. Enhancement of microalgae production by embedding hollow light guides to a flat-plate photobioreactor. *Bioresource Technology*, 207, 31-38.
- [21] Zhao, B., Su, Y., Zhang, Y., Cui, G. 2015. Carbon dioxide fixation and biomass production from combustion flue gas using energy microalgae. *Energy*, 89, 347-357.
- [22] Acien Fernandez, F. G., Fernandez Sevilla, J. M., Molina, G. E. 2013. Photobioreactors for the production of microalgae. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 12, 131-151.
- [23] Acien, F. G., Fernández, J. M., Magán, J. J., Molina, E. 2012. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1344-1353.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Illman, A. M., Scragg, A. H., Shales, S. W. 2000. Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium. *Enzyme and microbial technology*, 27(8), 631-635.
- [27] Scragg, A. H., Illman, A. M., Carden, A., Shales, S. W. 2002. Growth of microalgae with increased calorific values in a tubular bioreactor. *Biomass and Bioenergy*, 23(1), 67-73.
- [28] Yoo, C., Jun, S. Y., Lee, J. Y., Ahn, C. Y., Oh, H. M. 2010. Selection of microalgae for lipid production under high levels carbon dioxide. *Bioresource Technology*, 101(1), 71-74.