

Biyometanol üretiminde mikroalglerin rolü

The role of microalgae in bioethanol production

Yasemin AKDAĞ*¹ , Hüseyin GÜVEN² , Mustafa Evren ERŞAHİN^{3,4} , Hale ÖZGÜN^{5,6} 

^{1,2,3,5} İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye

^{4,6} MEM-TEK Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 26.11.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 06.02.2025

Öz

Mikroalgler, yüksek büyüme hızları ve karbondioksit tüketme kapasiteleri sayesinde sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Mikroalgler, çevresel faktörlere karşı gösterdikleri üstün adaptasyon yetenekleriyle, biyokütle üretimini hızla artırabilmekte ve atmosferdeki karbondioksiti etkili bir şekilde emerek sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Mikroalgler biyometanol üretimi için ideal bir hammadde olarak değerlendirilebilmekte ve yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, mikroalglerden elde edilen biyometanol, enerji üretiminde sürdürülebilir bir çözüm sunmanın yanı sıra fosil yakıt bağımlılığını azaltma potansiyeline de sahiptir. Bu makalenin amacı, mikroalglerin biyometanol üretimindeki rolünü incelemektir. Bu çerçevede, mikroalg yetiştirilmesinde kullanılan yöntemler, biyokütle hasat süreçleri ve biyokütlenin biyometanol üretiminde değerlendirilmesine yönelik teknikler değerlendirilmiştir. Ayrıca, mikroalglerin yenilenebilir enerji üretimindeki avantajların yanı sıra, bu süreçte karşılaşılan zorluklar ve geleceğe dair perspektifler de irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Biyometanol, Biyokütle, Mikroalg, Sürdürülebilirlik, Yenilenebilir enerji

Abstract

Microalgae are emerging as a significant resource for sustainable energy production due to their rapid growth rates and high carbon dioxide absorption capabilities. Their remarkable adaptability to environmental conditions allows microalgae to rapidly increase biomass production while effectively absorbing carbon dioxide from the atmosphere, thus contributing to the reduction of greenhouse gas emissions. As an ideal raw material for bioethanol production, microalgae play a pivotal role in advancing renewable energy goals. Bioethanol derived from microalgae not only offers a sustainable solution for energy generation but also has the potential to reduce dependence on fossil fuels. The purpose of this paper is to explore the role of microalgae in bioethanol production. Within this framework, the methods used for cultivating microalgae, the processes involved in biomass harvesting and the techniques for converting this biomass into bioethanol have been assessed. Additionally, the paper discusses the advantages of using microalgae for renewable energy production, the challenges encountered in the process, and future prospects for this promising field.

Keywords: Bioethanol, Biomass, Microalgae, Sustainability, Renewable energy

*Yasemin AKDAĞ; akdag@itu.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Enerjiye olan küresel talep; nüfus artışı, endüstrileşme ve kentleşmenin hızla artması gibi çeşitli faktörler nedeniyle hızla yükselmektedir. Artan küresel enerji talebi ve fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması, geleneksel enerji kaynaklarına bağımlı olmanın sürdürülebilirliği konusundaki endişeleri artırırken, sürdürülebilir enerji çözümlerine geçiş yapma gereksinimini giderek daha belirgin hale getirmektedir (Chia vd., 2018). Sanayi devrimi sırasında ekonomik büyümenin temeli olan fosil yakıtlar, günümüzde çevresel etkileri ve sınırlı rezervleri nedeniyle büyük bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Fosil yakıt kullanımının sera gazı emisyonlarını arttırması ve iklim değişikliği gibi küresel sorunlara yol açması bu endişeleri pekiştirmektedir (Kabir vd., 2020). Bu sorunları önlemek amaçlı yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve ihtiyaç giderek artmaktadır. Güneş, rüzgar ve hidroelektrik enerji gibi yenilenebilir kaynaklar, çevresel etkileri azaltma ve enerji güvenliğini arttırma potansiyeline sahip olurken, biyoyakıtlar gibi yenilikçi seçenekler de sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynayabilir (Chia vd., 2018).

Biyoyakıtlar, organik materyallerden üretilen ve fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmayı amaçlayan enerji kaynaklarıdır (Cherwoo vd., 2023). Biyoyakıtlar, fosil yakıtların çevresel ve ekonomik dezavantajlarına karşı sürdürülebilir bir alternatif sunarak enerji sektöründe önemli bir rol oynamaktadır. Fosil yakıtlar, sera gazı emisyonlarını arttırarak iklim değişikliğine katkıda bulunurken; biyoyakıtlar, yenilenebilir organik kaynaklardan elde edildikleri için daha düşük karbon salınımına sahiptir. Biyoyakıtların biyodizel, biyogaz ve biyoalkol olmak üzere temelde üç ana türü vardır (Cherwoo vd., 2023).

Biyoalkoller, özellikle etanol ve bütanol, şekerli veya nişastalı bitkilerden fermantasyon yoluyla üretilerek sıvı yakıt olarak kullanılabilen önemli yenilenebilir enerji kaynaklarıdır (Milano vd., 2016). Biyoetanol, özellikle ulaşım sektöründe benzin yerine alternatif bir yakıt olarak kullanılabilir ve genellikle yakıt performansını arttırmak ve sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla benzinle karıştırılır (Milano vd., 2016). Biyoetanol üretiminde üç ana nesil bulunmaktadır. Birinci nesil biyoetanol, şeker kamışı, mısır ve buğday gibi nişastalı veya şekerli gıda ürünlerinden üretilirken, bu hammaddelerin enerji üretiminde kullanılması gıda güvenliği sorunlarına yol açabilir ve tarım ürünlerinin ücretlerini etkileyebilir (Carneiro vd., 2017). İkinci nesil biyoetanol, gıda üretimiyle doğrudan rekabet etmeyen lignoselülozik biyokütlelerden, yani bitkisel ve endüstriyel atıklardan elde edilerek daha sürdürülebilir bir kaynak sağlar ve atık yönetimini iyileştirir; ancak üretim süreçleri genellikle daha karmaşık ve maliyetlidir (Cherwoo vd., 2023). Üçüncü nesil biyoetanol ise yüksek karbonhidrat içeriği ve hızlı büyüme kapasitelerine sahip olan mikroalglerden üretilir; bu özellikleri sayesinde yüksek verim elde edilir ve gıda üretimiyle rekabet etmez (Cherwoo vd., 2023).

Mikroalgler, biyoetanol üretimi için büyük bir potansiyele sahip olup, çeşitli avantajlar sunmaktadır. Yüksek karbonhidrat içeriği biyodizel için önemli olduğundan ve hızlı büyüme kapasiteleri sayesinde mikroalgler, yüksek verimli biyoetanol üretimi için ideal bir seçenek oluşturur (Milano vd., 2016). Bu hızlı büyüme özelliği, kısa sürede büyük miktarda biyokütle üretme imkanı sağlayarak üretim sürecini daha verimli hale getirir. Ayrıca, mikroalgler tatlı su, tuzlu su veya atıksu gibi farklı ortamlarda çoğalabilmeleri sayesinde geniş bir spektrumda yetiştirilebilir; bu da biyoyakıt üretimini daha sürdürülebilir hale getirir (Mehariya vd., 2021). Arazi kullanımı açısından, mikroalgler geleneksel tarım arazilerine ihtiyaç duymadan büyük miktarda biyokütle üretebilme kapasitesine sahiptir; böylece arazi kullanımında verimliliği arttırarak gıda üretimi ile rekabet etmeyen bir kaynak sağlar (Carneiro vd., 2017).

Bu çalışmanın amacı, biyoetanol üretiminde mikroalglerin rolünü incelemektir. Çalışma kapsamında, mikroalglerin üretimi ve hasat edilmesinde kullanılan yöntemler, elde edilen biyokütlenin ön işleme ve yağ ekstraksiyonu yöntemleri, mikroalglerden biyoetanol üretim yöntemleri ve bu süreçte karşılaşılan zorluklar ele alınacaktır.

2. Mikroalgerden biyoetanol üretimi

2. Bioethanol production from microalgae

Mikroalgler, sucul ekosistemlerde yaygın olarak bulunan ve fotosentetik süreçlerle enerji üreten tek hücreli organizmalardır (Mehariya vd., 2021). Klorofil pigmentleri sayesinde ışık enerjisini kullanarak karbondioksiti oksijene dönüştürme yeteneğine sahiptirler. Yüksek büyüme hızları, mikroalgleri biyokütle üretimi açısından cazip bir kaynak haline getirir. Hızla büyüme ve karbon depolama potansiyelleri sayesinde önemli miktarda

karbondioksiti biyokütleyle dönüştürerek karbon emisyonlarını azaltır ve iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir rol oynarlar (Milano vd., 2016). Ayrıca, alan kullanımı açısından sundukları avantajlarla da dikkat çekerler. Geleneksel tarımsal ürünlerin aksine, mikroalgler sınırlı su kaynakları ve tarım arazileri gerektirmeden tuzlu su veya atıksu gibi dezavantajlı ortamlarda yetiştirilebilir (Carneiro vd., 2017). Bu özellikleri; su kıtlığı ve tarım arazisi eksikliği çeken bölgeler için büyük bir avantaj sunar. Besin içeriği bakımından zengin olan mikroalgler, yüksek protein, lipit, vitamin ve mineral değerleriyle dikkat çekmektedir (Milano vd., 2016).

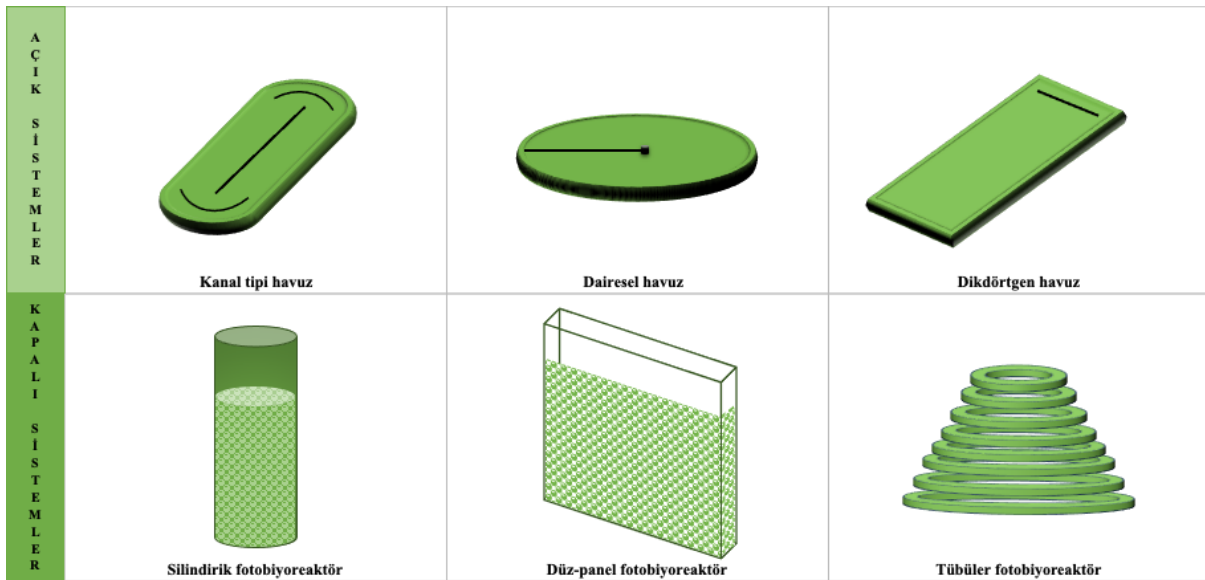
2.1. Mikroalg üretimi

2.1.1. *Microalgae cultivation*

Mikroalgler, fotosentetik aktivitelerini destekleyerek biyokütle üretimini artıran azot, fosfor ve çeşitli mikro besin elementleri gibi temel besin maddelerine ihtiyaç duyarlar. Farklı mikroalg türleri, farklı besin gereksinimlerine sahip olduğundan, uygun besin ortamının belirlenmesi mikroalg yetiştiriciliğinde büyük önem taşımaktadır (Tao vd., 2022). Mikroalgler, fotoototrofik, heterotrofik ve miksotrofik koşullar gibi farklı ortamlarda yetiştirilebilir. Fotoototrofik yetiştirme yönteminde, mikroalgler enerji kaynağı olarak güneş ışığını ve karbondioksit formundaki inorganik karbonu kullanarak biyokütle üretirler (Alam vd., 2022). Heterotrofik yetiştirmede ise mikroalgler, ışık olmadan glikoz veya melas gibi organik karbon kaynaklarını kullanmaktadır (Alam vd., 2022). Miksotrofik yetiştirme, mikroalglerin organik ve inorganik karbon kaynaklarını kullanarak büyümesini sağlayan, fotootrofik ve heterotrofik metabolizma yollarını entegre eden bir yöntemdir; bu sayede çevresel koşullara uyum sağlamaları ve biyokütle verimliliğini arttırmaları mümkün olur (Abdelfettah vd., 2022). Mikroalglerin yetiştirilmesinde besi yerinin seçimi kadar kullanılacak sistemin seçimi de büyük öneme sahiptir. Mikroalgler, açık havuzlar ve kapalı fotobiyoreaktörler olmak üzere iki ana sistem türü aracılığıyla yetiştirilebilir (Tao vd., 2022). Mikroalg yetiştirilmesinde kullanılan açık ve kapalı sistemlere örnekler Şekil 1'de yer almaktadır.

Açık havuzlar, mikroalglerin yetiştirilmesi için tasarlanmış düz yüzeyli ve sığ derinliklere sahip yapılardır. Bu sistemler, mikroalglerin büyümesinde doğrudan çevresel koşullardan faydalanma imkanı sundukları için işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Tao vd., 2022). Güneş enerjisinin entegrasyonu, üretim süreçlerinin çevresel sürdürülebilirliğine katkıda bulunurken, fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını teşvik etmektedir. Açık sistemlerin bir diğer önemli avantajı, mikroalglerin çevresel değişimlere daha hızlı uyum sağlama yeteneğidir. Bu sistemler, doğal ekosistemlerin bir parçası olarak işlev gördüğünden, mikroalgler sürekli değişen besin maddeleri ve ışık kaynaklarına etkili bir şekilde yanıt verebilmektedir (Paul vd., 2021). Ayrıca, açık havuzlar, büyük ölçekli biyokütle üretimi için uygun bir ortam sunarak mikroalglerin yaygın kullanılabilirliğini arttırmaktadır. Bununla birlikte; açık sistemlerin bazı dezavantajları da mevcuttur. Hava koşulları, kirleticiler ve diğer mikroorganizmalar gibi dış etkenler, mikroalglerin büyümesini olumsuz yönde etkileyebilir ve verimliliği azaltabilir (Xiaogang vd., 2022).

Kapalı fotobiyoreaktörler, mikroalglerin büyümesi için optimize edilmiş koşullar oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır (Tao vd., 2022). Mikroalglerin kapalı sistemler kullanılarak yetiştirilmesi, kontrol edilebilir bir ortam sağlama imkanı sunarak üretim süreçleri açısından önemli avantajlar sağlar (Paul vd., 2021). Kapalı fotobiyoreaktörlerin düz, boru tipi ve silindirik fotobiyoreaktörler olmak üzere farklı tipleri bulunmaktadır (Tao vd., 2022). Düz fotobiyoreaktörler, yüzey alanını arttırarak güneş ışığını etkin bir şekilde kullanmalarını sağlarken, boru tipi fotobiyoreaktörler akışın daha homojen dağılımını ve karışımın daha kolay olmasını sağlar. Silindirik reaktörler ise genellikle daha az yer kaplayarak dikey büyüme alanı sunar (Tao vd., 2022). Kapalı sistemlerin en büyük avantajı, dış etkenlere karşı koruma sağlamasıdır. Böylece kontaminasyon riskini azaltarak ürün kalitesini artırır (Paul vd., 2021). Ayrıca, ışık, sıcaklık ve besin maddeleri gibi büyüme koşulları üzerinde kontrol imkanı sağlar. Bununla birlikte; kapalı sistemlerin dezavantajları arasında yüksek maliyetli olması ve yüksek enerji tüketimi yer almaktadır (Xiaogang vd., 2022).



Şekil 1. Açık ve kapalı sistemlere örnekler

Figure 1. Examples for open and closed systems

2.2. Hasat yöntemleri

2.2. Harvesting methods

Mikroalg biyokütlesinin hasadı, bu organizmaların ekonomik değerinin artırılması ve kullanılabilir hale getirilmesi açısından kritik bir aşamadır. Mikroalglerin biyoteknolojik uygulamadaki rolü göz önüne alındığında, bu süreçler yalnızca verimlilik açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği açısından da büyük önem taşımaktadır (Liu vd., 2023). Hasat süreçleri; mikroalg türüne, yetiştirme sistemine ve istenen nihai ürünün niteliğine bağlı olarak çeşitlilik gösterirken, bu durum farklı mikroalg türlerinin farklı büyüme koşullarına ve fiziksel özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Deepa vd., 2023). Mikroalglerin etkin bir şekilde hasat edilmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, mikroalglerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine uygun olarak seçilmelidir. Yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında filtrasyon, santrifüj, koagülasyon ve flokülasyon, yüzdürme ve elektrokoagülasyon-flokülasyon yer almaktadır (de Morais vd., 2023). Mikroalg hasadında kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin avantajları ile dezavantajları Tablo 1’de özetlenmektedir.

Filtrasyon, mikroalg hücrelerinin belirli gözenek boyutlarına (0.1-1 µm) sahip filtreler kullanılarak ayrılmasını sağlayan bir yöntemdir (Liu vd., 2023). Bu yöntem, özellikle düşük enerji gereksinimi ile yüksek verim sunma kapasitesi nedeniyle mikroalg hasadında yaygın olarak tercih edilmektedir (Udayan vd., 2022). Filtrasyon süreci, mikroalglerin büyüklüklerine ve morfolojilerine bağlı olarak optimize edilebilir. Böylece belirli mikroalg türlerinin etkin bir şekilde ayrılması sağlanır (Liu vd., 2023). Bu süreçte, filtre materyalinin özellikleri, gözenek boyutları ve akış hızı gibi faktörler, hasat verimliliğini etkileyen unsurlardır (de Morais vd., 2023).

Santrifüj ise, mikroalg hücrelerinin ayrılmasında kullanılan başka bir yöntemdir. Bu teknik, yüksek hızda dönen bir santrifüj cihazı aracılığıyla mikroalg hücrelerini yoğunluk farklarına göre hızlı ve etkili bir şekilde ayırır (de Morais vd., 2023). Santrifüj, mikroalg hücrelerinin hızlı bir şekilde yoğunlaştırılmasını sağlarken, büyük hacimlerde biyokütle elde etme potansiyelini artırır (Liu vd., 2023). Ancak, bu yöntem enerji tüketimi açısından diğer yöntemlere göre daha maliyetli olabilir; dolayısıyla, uygulanacak sistemin ekonomik sürdürülebilirliği açısından dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir (Udayan vd., 2022).

Koagülasyon ve flokülasyon ise, mikroalg hücrelerinin hasadında kimyasal maddelerin kullanıldığı bir diğer önemli süreçtir. Bu yöntemde, alüminyum sülfat ($Al_2(SO_4)_3$) veya demir klorür ($FeCl_3$) gibi koagülantların eklenmesi, mikroalg hücrelerinin birleşmesini ve daha büyük aglomeratlar oluşturmasını sağlar (de Morais vd., 2023). Bu aglomeratlar, yerçekimi etkisiyle kolayca çöker ve böylece biyokütlenin hasadı mümkün hale gelir. Koagülasyon ve flokülasyon süreçleri yüksek hasat verimliliği sağlamakla birlikte, kullanılan kimyasalların

ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır (Liu vd., 2023). Bu nedenle, bu yöntemlerin çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik açısından dikkatlice değerlendirilmesi önemlidir. Yüzdürme, mikroalglerin hasadında kullanılan yenilikçi bir yöntemdir ve temel prensibi, mikroalg hücrelerinin su yüzeyinde toplanmasını sağlamaktır (Yin vd., 2020; Zhu vd., 2024). Bu yöntemde, mikroalglerin doğal olarak yüzeyde birikmesi için çeşitli yüzdürme ajanları kullanılır (Udayan vd., 2022). Yüzdürme işlemi, enerji tüketimini minimize ederken, düşük maliyetli bir hasat süreci sunar. Mikroalglerin yüzeyde yoğunlaşması, daha sonraki aşamalarda bu biyokütlenin toplanmasını kolaylaştırır. Ancak, yüzdürme süreci, çevresel faktörlere ve mikroalg türlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir, bu nedenle uygun koşulların sağlanması önemlidir (de Morais vd., 2023).

Elektrokoagülasyon-flokülasyon, mikroalglerin hasadında kullanılan bir başka etkili yöntemdir. Bu teknik, elektrik akımının uygulanmasıyla mikroalg hücrelerinin koagülasyon-flokülasyonunu sağlayarak hücrelerin yüzey yüklerini nötralize eder, böylece daha büyük aglomeraların oluşmasına neden olur ve bu aglomeralar yerçekimi ile çökerek hasat edilmeyi kolaylaştırır (Pereira vd., 2024). Elektrokoagülasyon-flokülasyon, özellikle yüksek verimlilik sağlama potansiyeli ile öne çıkar, ancak enerji tüketimi ve sistem tasarımı açısından maliyetli olabilir (Udayan vd., 2022).

Tablo 1. Mikroalg hasadında kullanılan yöntemler (Udayan vd., 2022; de Morais vd., 2023; Liu vd., 2023; Pereira vd., 2024)

Table 1. Methods used in microalgae harvesting (Udayan et al., 2022; de Morais et al., 2023; Liu et al., 2023; Pereira et al., 2024)

Hasat Yöntemi	Avantajlar	Dezavantajlar
Filtrasyon	<ul style="list-style-type: none"> Düşük enerji gereksinimi Yüksek verimlilik Basit ve etkili uygulama 	<ul style="list-style-type: none"> Büyük hacimlerde tıkanma sorunları Filtrelerin bakımı ve temizliği
Santrifüj	<ul style="list-style-type: none"> Yoğunluk farklarına dayalı hızlı ve etkili hasat 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek enerji maliyetleri Ekipman maliyetleri ve bakım gereksinimleri Kimyasal ilavesi gereksinimi
Koagülasyon ve flokülasyon	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek hasat verimi Düşük maliyet ve etkili 	<ul style="list-style-type: none"> Kimyasal maddelerin kullanımının ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri Hasat sonucunda oluşan atıkların bertarafı
Yüzdürme	<ul style="list-style-type: none"> Düşük maliyet ve enerji tüketimi Doğal süreçle biyokütle hasadı 	<ul style="list-style-type: none"> Çevresel faktörlere bağımlılık Yüzeyden mikroalg kaybı
Elektrokoagülasyon-flokülasyon	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek verimlilik ve hızlı hasat Daha az kimyasal kullanımı 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek enerji tüketimi Ekipman maliyetleri ve bakım gereksinimleri

2.3. Biyokütle ön işleme, yağ ve karbonhidrat ekstraksiyonu

2.3. Biomass pretreatment and lipid extraction

2.3.1. Biyokütle ön işleme

2.3.1. Biomass pretreatment

Biyokütle ön işleme, mikroalg hücrelerinin yapısını fiziksel veya kimyasal yöntemlerle değiştiren bir süreçtir ve biyoetanol üretimi için kritik öneme sahiptir. Bu işlem, hücre duvarlarının parçalanmasını sağlayarak içeriğin daha iyi erişilebilir hale gelmesini amaçlar. Mikroalglerden elde edilen biyokütlenin biyoetanol üretiminde kullanılmadan önce ısı ve alkali ön işleme yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Velazquez-Lucio vd., 2018).

Biyokütlenin ısı ile ön işlenmesi, mikroalglerin biyoetanol üretiminde kritik bir aşama olup, hücre yapılarının modifikasyonu yoluyla biyokütle verimliliğini arttırmayı amaçlar. Bu işlem, mikroalg hücrelerinin belirli bir sıcaklıkta ısıtılması ile gerçekleştirilir ve genellikle 60-180 °C arasında değişen sıcaklıklar tercih edilir (Velazquez-Lucio vd., 2018). Isı uygulaması, hücre duvarlarının zayıflamasını sağlayarak, içerdikleri polisakkaritlerin ve diğer biyomoleküllerin daha iyi çözünmesini mümkün kılar (Velazquez-Lucio vd., 2018). Bu durum, sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek enzimatik hidroliz sürecinin verimliliğini artırarak, glikoz ve diğer fermentasyona uygun şekerlerin daha hızlı ve etkin bir şekilde serbest kalmasına katkı sağlar (Velazquez-Lucio vd., 2018).

Biyokütlenin alkali ön işleme, mikroalglerden biyoetanol üretiminde verimliliği arttırmak amacıyla uygulanan önemli bir yöntemdir. Alkali ön işleme, genellikle sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit gibi alkali kimyasalların kullanılmasıyla gerçekleştirilir ve hücre duvarlarının çözülmesini teşvik eder (Velazquez-Lucio vd., 2018). Alkali ortam, mikroalg hücrelerinin yapısal bileşenlerini parçalayarak, içerdikleri polisakkaritlerin ve diğer karbonhidratların daha iyi çözünmesine olanak sağlar (Chauhan vd., 2023). Bu süreç, özellikle mikroalglerin lignoselülozik yapısının bulunduğu durumlarda, hücre duvarı katmanlarını zayıflatır ve fermentasyon için gerekli şekerlerin serbest kalmasını kolaylaştırır (Velazquez-Lucio vd., 2018).

2.3.2. Yağ ekstraksiyonu

2.3.2. Lipid extraction

Yağ ekstraksiyonu, mikroalglerden elde edilen lipitlerin ayrılması işlemini içerir ve biyoetanol üretimi için önemli bir ham madde sağlar. Lipit ekstraksiyonu genellikle çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir; bunlar arasında solvent ekstraksiyonu, mekanik presleme, süperkritik CO₂ ekstraksiyonu ve ultrasonik ekstraksiyon yer alır (Ezhumalai vd., 2024).

Solvent ekstraksiyonu, mikroalglerden lipitlerin ayrılması için kullanılan en yaygın ve etkili yöntemlerden birisidir. Bu işlem, organik solventlerin kullanılmasıyla gerçekleştirilir; genellikle heksan, etanol veya asetat gibi solventler tercih edilir (Razzak vd., 2022). Mikroalg hücreleri, seçilen solvent ile karıştırılarak, lipitlerin çözünmesi sağlanır (Agarwalla vd., 2023). Solventin mikroalglerle etkileşimi, lipitlerin hücre yapısından ayrılmasına olanak tanırken; bu süreç, yüksek yağ verimi ve yüksek kaliteli yağ elde edilmesi açısından avantaj sağlar.

Mekanik presleme, lipitlerin mikroalglerden çıkarılması için kullanılan fiziksel bir yöntemdir. Bu işlem, mikroalglerin mekanik bir pres ile sıkıştırılması yoluyla gerçekleştirilir ve yağın serbest bırakılması sağlanır (Razzak vd., 2022). Mekanik presleme, solvent kullanımını minimize ettiği için çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır; ancak, bu yöntemin verimliliği, kullanılan mikroalg türüne ve hücre yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Agarwalla vd., 2023). Yüksek yağ içeriğine sahip mikroalgler için mekanik presleme, düşük maliyet ve basit uygulama avantajı sunarken, yağ verimliliği genellikle solvent yöntemlerine göre daha düşüktür (Razzak vd., 2022).

Süperkritik CO₂ ekstraksiyonu, karbondioksitin süperkritik hale getirilmesi yoluyla gerçekleştirilir. Bu aşamada CO₂ gaz ve sıvı özelliklerini sergileyerek, lipitleri çözme yeteneğini artırır (Lorenzen vd., 2017). Süperkritik CO₂, düşük sıcaklıkta işlem yapılmasına imkan sağlar ve böylece lipitlerin kalite kaybını önler (Razzak vd., 2022). Ayrıca, bu yöntem solvent kullanımını en aza indirerek, çevresel etkiyi azaltır ve elde edilen yağların saf olmasını sağlar.

Ultrasonik ekstraksiyon, yüksek frekanslı ses dalgaları kullanılarak mikroalglerden lipitlerin çıkarılmasını sağlayan bir yöntemdir (Razzak vd., 2022). Bu işlem, ultrasonik dalgaların mikroalg hücrelerine uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Bu dalgalar, hücre duvarlarını zayıflatarak yağların çözünmesine yardımcı olur (Razzak vd., 2022). Ultrasonik ekstraksiyon, kısa işlem süresi ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlar sunar. Bununla birlikte; ultrasonik ekstraksiyonun bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu yöntem, yüksek frekansların kullanımı nedeniyle ekipman maliyetlerini arttırabilir ve işlem sürecinin kontrol edilmemesi durumunda lipitlerin ısınarak kalite kaybına yol açabilir (de Boer vd., 2012).

2.3.3. Karbonhidrat ekstraksiyonu

2.3.3. Carbohydrate extraction

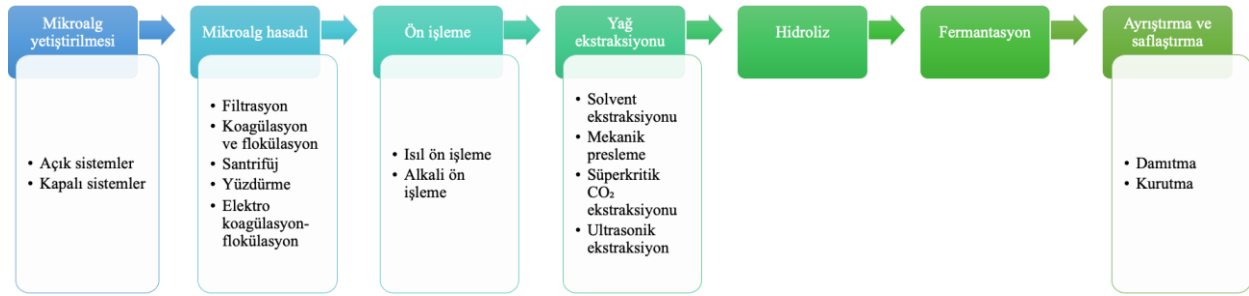
Alglerin içerdiği karbonhidratlar, biyoetanol üretimi için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Mikroalg biyokütlesinde yer alan çözünür karbonhidratlar (glikoz, mannoz, galaktoz gibi monosakkaritler) ve polisakkaritler (örneğin nişasta), etanol fermantasyonu ile enerjiye dönüştürülebilir (Velazquez-Lucio vd., 2018). Karbonhidrat ekstraksiyonu genellikle termal, kimyasal veya enzimatik yöntemlerle gerçekleştirilir. Enzimatik ekstraksiyon, nişasta ve selüloz gibi polisakkaritlerin amilaz ve selülaz gibi enzimler kullanılarak şekerlere hidrolize edilmesini içerir (Kusmiyati vd., 2023). Düşük enerji gereksinimi ve çevre dostu özellikleri sayesinde enzimatik yöntemler daha fazla tercih edilmektedir.

Ekstraksiyon ve hidroliz işlemleri sonrasında ortaya çıkan monosakkaritler, *Saccharomyces cerevisiae* gibi maya suşları tarafından fermente edilerek biyoetanol üretiminde değerlendirilir (Velazquez-Lucio vd., 2018). Bu bütünleşik süreç, yalnızca biyoetanol üretiminin etkinliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda mikroalg biyokütlesinin sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlar. Böylece mikroalgler, biyoyakıt endüstrisinde geleneksel hammaddelere güçlü bir alternatif olarak öne çıkar ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine katkıda bulunur.

2.4. Biyoetanol üretimi

2.4. Bioethanol production

Biyoetanol üretimi, mikroalg biyokütlesinden fermentasyon süreçleriyle gerçekleştirilen sürdürülebilir bir enerji dönüşümüdür (Kusmiyati vd., 2023; Kumari vd., 2024). Bu proses, öncelikle biyokütlenin ön işlemeyle başlayarak hücre duvarının parçalanmasıyla karbonhidratların serbest kalmasını sağlamak ve serbest kalan kompleks karbonhidratlar hidroliz ile basit yapıya karbonhidratlara dönüştürülmektedir (Maity ve Mallick, 2022). *Saccharomyces cerevisiae* gibi mayalar aracılığıyla basit yapıya karbonhidratlar fermentasyon süreci sonunda alkol ve karbondioksit dönüştürülür (Kusmiyati vd., 2023; Kumari vd., 2024). Bu aşamalardan sonra, elde edilen biyoetanol, çeşitli arıtma yöntemleri ile saflaştırılır. En yaygın arıtma yöntemi, damıtma işlemi olup, etanolün kaynama noktası (78,37 °C) ile suyun kaynama noktası (100 °C) arasındaki farktan yararlanılarak gerçekleştirilir (Maity ve Mallick, 2022). Şekil 2’de mikroalglerden biyoetanol elde edilmesinde kullanılan aşamalar gösterilmektedir.



Şekil 2. Mikroalglerden biyoetanol üretim aşamaları

Figure 2. Steps to produce bioethanol from microalgae

3. Karşılaşılan zorluklar ve gelecek yönelimleri

3. Challenges and future perspectives

Mikroalglerin büyütülmesi, özel besin çözeltileri ve kontrollü koşullar gerektirdiğinden yüksek maliyetlere neden olabilir; ayrıca hasat ve işleme aşamaları da yüksek enerji tüketimi ve karmaşık yöntemler gerektirebilir (Liu vd., 2023). Bu nedenle, doğal ortamlar veya atıksu gibi düşük maliyetli kaynakların kullanımını içeren yenilikçi stratejilerin geliştirilmesi önemlidir. Uzun vadede, yüksek teknoloji entegrasyonu süreçlerin otomasyonu ve verimliliğini artırarak maliyetleri düşürebilir. Genetik iyileştirme, biyoetanol üretiminde verimliliği artırmak ve biyokütlenin şeker veya lipit içeriğini optimize etmek için kullanılan kritik bir stratejidir (Mehariya vd., 2021). Biyoetanol üretiminde daha verimli suşlar geliştirmek amacıyla genetik mühendislik yöntemlerinin sunduğu büyük potansiyel sayesinde, genetik olarak modifiye edilmiş mikroalgler artırılmış karbonhidrat sentezi, kolaylaştırılmış şeker salınımına uygun optimize edilmiş polisakkarit yapıları ve geliştirilmiş biyokütle verimi gibi önemli avantajlar sağlayabilir (Ardo vd., 2022). Bununla birlikte, mikroalglerden biyoetanol üretimi için farklı teknolojiler ve kaynaklar gerektiğinden, mevcut sistemlere entegrasyonu zorlaşmakta ve bu biyoyakıtların tarım ve sanayi sistemleriyle uyumlu hale getirilmesinde zorluklar ortaya çıkmaktadır (Liu vd., 2023). Mikroalg üretim sistemlerinin mevcut enerji altyapılarıyla entegrasyonu karmaşık bir süreçtir ve su, besin maddeleri ve enerji gibi kaynakların etkin kullanımı için optimize edilmelidir. Yenilenebilir enerji talebinin artmasına rağmen, mikroalglerden biyoetanol üretiminde yetersiz teşvikler nedeniyle zorluklarla karşılaşmaktadır. Yüksek üretim maliyetleri, genellikle gerekli yatırımları destekleyen teşvik eksikliğinden etkilenir. Mikroalglerin ticari ölçekli üretimi için daha fazla destek sağlanmalıdır. Uzun vadeli teşvikler, araştırma ve özel sektör yatırımlarını artırarak sürdürülebilir bir biyoetanol pazarına katkı sağlayabilir.

4. Sonuç

4. Conclusions

Mikroalglerden biyoetanol üretimi, yenilenebilir enerji alanında dikkat çekici bir potansiyele sahiptir. Bu potansiyel, mikroalglerin yüksek biyokütle verimi ve karbondioksiti etkili bir şekilde dönüştürme kabiliyetiyle doğrudan ilişkilidir. Bu özellikleri, mikroalgleri yalnızca çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir kaynak haline getirmekle kalmaz, aynı zamanda fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak enerji üretiminde yenilikçi bir yaklaşım sunar. Mikroalglerin karbondioksiti emme kapasitesi, atmosferdeki sera gazı seviyelerinin düşürülmesine katkıda bulunarak iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar. Ancak, bu büyük potansiyelin gerçeğe dönüşmesi için birkaç önemli engelin aşılması gerekmektedir. Özellikle, mikroalglerin biyoetanol üretimi için uygun suşlarının yüksek üretim maliyetleri, genetik iyileştirme süreçlerindeki zorluklar ve mikroalg üretim sistemlerinin mevcut enerji üretim altyapılarına entegrasyonundaki sorunlar, bu alandaki en büyük engelleri oluşturur. Bu engellerin ortadan kaldırılması, mikroalglerin enerji sistemlerine entegre edilerek sürdürülebilir ve verimli bir çözüm sunabilmesi için hayati önem taşımaktadır. Gelecekte mikroalgler, çevresel hedeflere ulaşmak ve enerji üretiminde daha yeşil alternatifler sağlamak için kritik bir araç olabilir. Ancak, bu potansiyelin hayata geçirilmesi için multidisipliner bir yaklaşım gerekmektedir; biyoteknoloji, kimya mühendisliği, çevre bilimi ve enerji mühendisliği gibi alanlardaki bilgilerin birleşmesi, bu alandaki ilerlemeyi hızlandırabilir. Gelecek araştırmalarının, daha verimli mikroalg türlerinin geliştirilmesine, genetik mühendislik tekniklerinin iyileştirilmesine ve mikroalglerin daha ekonomik ve sürdürülebilir bir şekilde üretilebileceği entegre sistemlerin tasarımına odaklanması büyük önem taşır. Bu tür yenilikçi yaklaşımlar, mikroalglerden biyoetanol üretimini daha verimli ve ekonomik hale getirerek, yenilenebilir enerji kaynaklarının gelecekteki rolünü güçlendirebilir.

Yazar katkısı

Author contribution

Yasemin Akdağ: Araştırma, Yazı - İlk Taslak, Görselleştirme **Hüseyin Güven:** Yöntem, Denetim, Yazı - Gözden Geçirme ve Düzenleme **Mustafa Evren Erşahin:** Yöntem, Denetim, Yazı - Gözden Geçirme ve Düzenleme **Hale Özgün:** Yöntem, Denetim, Yazı - Gözden Geçirme ve Düzenleme

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Abdelfattah, A., Ali, S. S., Ramadan, H., El-Aswar, E. I., Eltawab, R., Ho, S. H., Elsamahy, T., Li, S., El-Sheekh, M. M., Schagerl, M., Kornaros, M., & Sun, J. (2022). Microalgae-based wastewater treatment: mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environmental Science Ecotechnology* 8(13). <https://doi.org/10.3390/en14082282>
- Agarwalla, A Komandur, J., & Mohanty, K. (2023). Current trends in the pretreatment of microalgal biomass for efficient and enhanced bioenergy production. *Bioresource Technology* 369(2023) 128330. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128330>
- Alam, M.A., Wan, C., Tran, D.T., Mofijur, M., Ahmed, S. F, Mehmood, M. A., Shaik, F., Vo, D. V. N., & Xu, J. (2022). Microalgae binary culture for higher biomass production, nutrients recycling, and efficient harvesting: a review. *Environmental Chemistry Letters* 20 (2022), 1153–1168. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01363-z>

- Ardo, F. M., Lim, J. W., Ramli, A., Lam, M. K., Kiatkittipong, W., Abdelfattah, E. A., Shahid, M. K., Usman, A., Wongsakulphasatch, S., & Sahrin, N. T. (2022). A review in redressing challenges to produce sustainable hydrogen from microalgae for aviation industry. *Fuel* 33 (2022) 125646. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125646>.
- Carneiro, M. L. N. M., Pradelle, F., Braga, S. L., Gomes, M. S., P., Martins, A. R. F. A., Turkovics, F., & Pradelle, R. N. C. (2017). Potential of biofuels from algae: comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73(2017), 632-653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.152>
- Chauhan, S.J., Patel, B., Devliya, B., Solanki, H., & Patel, H. D. (2023). Recent advancement in production of bioethanol from waste biomass: A review. *Clean Technology Environmental Policy* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02710-0>
- Cherwoo, L., Gupta, I., Flora, G., Verma, R., Kapil, M., Arya, S. K., Ravindran, B., Khoo, K. S., Bhatia, S. K., Chang, S. W., Ngamcharussrivichai, C., & Ashokkumar, V. (2023). Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: a comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 60(2023) 103503. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103503>
- Chia, S. R., Ong, H. C., Chew, K. W., Show, P. L., Phang, S. M., Ling, T. C., Nagarajan, D., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2018). Sustainable approaches for algae utilisation in bioenergy production. *Renewable Energy* 129(2018), 838-852. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.001>
- de Boer, K., Moheimani, N.R., Borowitzka, M.A., & Bahri, P. A. (2012). Extraction and conversion pathways for microalgae to biodiesel: A review focused on energy consumption. *Journal of Applied Phycology* 24(2012), 1681–1698. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9835-z>
- Deepa, P., Sowndhararajan, K., & Kim, S. A. (2023). Review of the harvesting techniques of microalgae. *Water* 15(2023) 3074. <https://doi.org/10.3390/w15173074>
- de Morais, E. G., Sampaio, I. C. F., Gonzalez-Flo, E., Ferrer, I., Uggetti, E., & Garcia, J. (2023). Microalgae harvesting for wastewater treatment and resources recovery: a review. *New Biotechnology* 78(2023), 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2023.10.002>
- Ezhumalai, G., Arun, M., Manavalan, A., Rajkumar, R., & Heese, K. A. (2024). Holistic approach to circular bioeconomy through the sustainable utilization of microalgal biomass for biofuel and other value-added products. *Microbial Ecology* 87(61). <https://doi.org/10.1007/s00248-024-02376-1>
- Kabir, F., Gulfraz, M., Raja, G. K., Inam-ul-Haq, M., Awais, M., Mustafa, M. S., Khan, S. U., Tlili, I., & Shadloo, M. S. (2020). Screening of native hyper-lipid producing microalgae strains for biomass and lipid production. *Renewable Energy* 160(2020), 1295-1307. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.004>
- Kumari, A., Chakraborty, S., Sirotiya, V., Kalita, D., Rai, A., Yadav, K. K., Bhutto, J. K., Vinayak, V. (2024). A review on economical and impact of bioethanol production from microalgae: Current scenario and future prospect, *Industrial Crops and Products* 222(2024) 119927. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119927>.
- Kusmiyati, K., Hadiyanto, H., & Fudholi, A. (2023). Treatment updates of microalgae biomass for bioethanol production: a comparative study. *Journal of Cleaner Production* 383(2023) 135236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135236>
- Liu, Z., Hao, N., Hou, Y., Wang, Q., Liu, Q., Yan, S., Chen, F., & Zhao, L. (2023). Technologies for harvesting the microalgae for industrial applications: current trends and perspectives. *Bioresour Technol* 387(2023) 129631. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129631>
- Lorenzen, J., Igl, N., Tippelt, M., Stege, A., Qoura, F., Sohling, U., & Brück, T. (2017). Extraction of microalgae derived lipids with supercritical carbon dioxide in an industrial relevant pilot plant. *Bioprocess Biosystems Engineering* 40(2017), 911–918. <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1755-5>
- Maity, S., & Mallick, N. (2022). Trends and advances in sustainable bioethanol production by marine microalgae: a critical review. *Journal of Cleaner Production* 345(2022) 131153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131153>.
- Mehariya, S., Goswami, R.K., Verma, P., Lavecchia, R., & Zuorro, A. (2021). Integrated approach for wastewater treatment and biofuel production in microalgae biorefineries. *Energies*, 14(2021) 2282. <https://doi.org/10.3390/en14082282>

- 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(2016), 180-197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.150>
- Paul, S., Bera, S., Dasgupta, R., Mondal, S., & Roy, S. (2021). Review on the recent structural advances in open and closed systems for carbon capture through algae. *Energy Nexus* 4(2021) 100032. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100032>
- Pereira, A. S.A. P., Silva, T. A., Magalhaes, I. B., Ferreira, J., Braga, M. Q., Lorentz, J. F., Assemany, P. P., de Aguiar do Couto, E., & Calijuri, M. L. (2024). Biocompounds from wastewater-grown microalgae: a review of emerging cultivation and harvesting technologies. *Science of The Total Environment* 920(2024) 170918. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170918>
- Razzak, S. A., Lucky, R. A., Hossain, M. M., & de Lasa, H. (2022). Valorization of microalgae biomass to biofuel production: A review. *Energy Nexus* 7(2022) 100139. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100139>
- Tao, Y., Liu, Z., Zheng, J., Zhou, J., He, D., & Ma, J. (2022). Microalgae production in human urine: fundamentals, opportunities, and perspectives. *Frontiers in Microbiology* 13(2022), 1067782. <https://doi.org/10.3389%2Ffmicb.2022.1067782>
- Udayan, A., Sirohi, R., Sreekumar, N., Sang, B., & Sim, S. J. (2022). Mass cultivation and harvesting of microalgal biomass: current trends and future perspectives. *Bioresource Technology* 344(2022) 126406. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126406>
- Velazquez-Lucio J., Colla L. M., Rodríguez-Jasso R. M., Sáenz-Galindo A., Cervantes-Cisneros D. E., Aguilar C. N., Fernandes B. D., & Ruiz H.A. (2018). Microalgal biomass pretreatment for bioethanol production: A review. *Biofuel Research Journal* 17(2018), 780-791. <https://doi.org/10.18331/BRJ2018.5.1.5>
- Xiaogang, H., Jalalah, M., Jingyuan, W., Zheng, Y., Li, X., & Salama, E. S. (2022). Microalgal growth coupled with wastewater treatment in open and closed systems for advanced biofuel generation. *Biomass Conversion and Biorefinery* 12(2022), 1939–1958. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01061-w>
- Yin, Z., Zhu, L., Li, S., Hu, T., Chu, R., Mo, F., Hu, D., Liu, C., & Li, B. (2020). A comprehensive review on cultivation and harvesting of microalgae for biodiesel production: environmental pollution control and future directions. *Bioresource Technology* 301(2020) 122804. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122804>
- Zhu, J., Wakisaka, M., Omura, T., Yang, Z., Yin, Y., Fang, W. (2024) Advances in industrial harvesting techniques for edible microalgae: Recent insights into sustainable, efficient methods and future directions. *Journal of Cleaner production* 436(2024) 140626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140626>