DOR: 20.1001.1.24234931.1402.10.1.14.2 DOI: 10.52547/jrenew.10.1.188

Review Article

Received: 02/23/22

Accepted: 08/16/22

Volume 10, Issue 1, Spring & Summer 2023, p. p. 188-197

Journal of Renewable and New Energy

jrenew.ir

Print ISSN 2423-4931 Online ISSN 2676-2994

Comparison of energy production and renewable fuels method from algae with other ways of biodiesel production resources

Bahareh Karimi Douna[1], Hossein Yousefi[2*]

1- Department of Life Science Engineering, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran, hosseinyousefi@ut.ac.ir

Received: 23 February 2022 Revised: 16 July 2022 Accepted: 16 August 2022

Abstract

Nowadays, the production of alternative fuels to fossil fuels is one of the most noticeable issues in dealing with environmental pollution. With the same approach, biodiesel is using to replace fossil diesel fuel. In general, this article examines four generations of biofuel production from different sources and economic comparisons of their production. In this review study of the previous reports, firstly, according to the approach of localizing alternative fuels, we discuss the introduction of microalgae's types, their reproduction process and environmental applications, production of biogas, bioethanol, and biodiesel. Afterward, in particular, the optimal method of producing biodiesel from microalgae is investigated, and eventually, a comparison has been made between biodiesel produced from microalgae and fossil diesel fuel and the ASTM standard of biodiesel. The results of numerous studies have demonstrated that due to the rapid growth of microalgae, high efficiency, and the low cost of their cultivation and production, it is possible to produce about 5000 to 15000 gallons of biodiesel from each hectare of microalgae cultivation; which makes the production of biodiesel from algae allocate a significant position compared to other sources of biodiesel production.

Keywords: Environment, Microalgae, Application of microalgae, Biodiesel, Bioethanol

1. Introduction

Renewable energy sources provide a large part of humanity's future energy needs. One of these types of energy is alternative fuels, in other words, green fuels, and can meet the future human need for fuel for both transportation and electricity supply, and so on. Alternative fuels include four general categories of biodiesel, bioalcohols (including bioethanol and bio-methanol), biogas, and liquid hydrogen. Biodiesel is a suitable fuel for diesel engines and diesel generators, etc., which arises from the reaction between the fats of plants or animals with alcohols in the presence of a catalyst [1].

Algae are the richest source of fat for biodiesel production, with a fat content of up to 60% by weight. Most importantly, the high speed of reproduction of these resources and the ease of work and the very low cost of producing fuel from these sources is one of the main reasons for turning to algae in different countries. This report will introduce microalgae and their types and describe the methods of cultivation, harvesting and production of fuel from them [1].

Microalgae are organisms with different structures in the form of one or more cells and in complex and variable forms such as rods, branches, flagella, etc., which reproduce in both sexual and asexual ways. Photosynthesis converts inorganic matter into organic matter. Microalgae live in wetlands, seas, freshwaters, mudflats, and even on rocks or as parasites on other plants. Microalgae need light, water and carbon dioxide as nutrients to grow. Microalgae are divided into three main families (brown, green and red microalgae), but there are sub-species that are divided into the following six groups depending on the breeding conditions, habitat and physical characteristics: Brown microalgae, golden microalgae, green microalgae, red microalgae, green-yellow microalgae and blue-green microalgae [2].

2. Applications of microalgae

2.1 Environmental applications of microalgae

Growing and multiplying in effluents, microalgae absorb heavy metals, absorb harmful bacteria with the help of phenolic acid, use carbon dioxide produced by industrial plants and machines for their growth and reproduction as feed and wastewater treatment. Among these, brown microalgae have the greatest effect on the absorption of heavy metals such as cadmium, nickel and zinc [3].

2.2 Biogas production

Due to anaerobic digestion of microalgae in digestive tanks, it is carried out by methane-producing bacteria. Due to the lack of lignin and the low amount of cellulose in the structure of microalgae, the production of biogas is done at a higher speed. The required temperature is 55-35 ° C [4].

2.3 Bioethanol production

With the help of carbohydrates and proteins in the cellular structure of microalgae and in dark conditions and fermentation tanks and with the help of anaerobic bacteria,

Check for updates

bioethanol is produced and from each kilogram of carbohydrates and glucose in the structure of microalgae, 0.51 kg Ethanol is produced [4].

2.4 Biodiesel production

Due to rapid growth, low cost and high yields, about 5,000 to 15,000 gallons of biodiesel can be produced per hectare of microalgae cultivation per year. The following steps are generally required to produce biodiesel from microalgae. Reproduction, harvesting, dewatering, extraction and production of the final product [5]. One of the early stages of biodiesel production from microalgae is the stage of lubrication, in which lubrication of algae is done in 4 different ways (industrial and laboratory). There are several methods for extracting oil from microalgae, including:

- pressure method
- Solvent liquid method
- Supercritical flow method
- Ultrasonic method

The flow chart of the biodiesel production process can be seen in Figure. 1.

2.5 Benefits of producing biodiesel from microalgae

- Rapid growth of microalgae (it takes 5 to 24 hours to double in size)
- High biodiesel production
- Lack of sulfur in biodiesel compared to petroleum diesel
- It is non-toxic
- Consumption of CO_2 produced for growth and reproduction

3. Conclusion

Evaluation of biodiesel production from microalgae is of considerable importance and makes appropriate operational plans for the exploitation of this resource to be carried out and implemented. In this study, different types of microalgae were considered and also several methods for biodiesel production from microalgae were investigated. Studies show that the production of biodiesel from algae has a high efficiency compared to previous generations and other sources due to the high percentage of oil in their structure. Furthermore, based on the study of the advantages and disadvantages of using alternative fuels and the economic study of biofuel production from different sources, the low cost of biodiesel production from algae was determined. Therefore, these valuable resources can be used more in the production of biodiesel. The oil content of microalgae is higher than other plant-oil products and also the biodiesel produced from microalgae is in accordance with ASTM biodiesel standards. Finally, it should be noted that the production of third generation fuels does not reduce food production and also does not require arable land, fresh water and fertilizer. High-growth algae production for fuel production has not yet found its place on a commercial scale, however feasibility studies have been conducted to achieve high yields, and significant large-scale developments will soon take place. Detailed economic studies with regard to the current situation and resources of the country and the future and accurate comparisons of performance and costs and effects of algal and non-algal fuels in relation to fossil fuels are among the items that should be given special attention in the future.

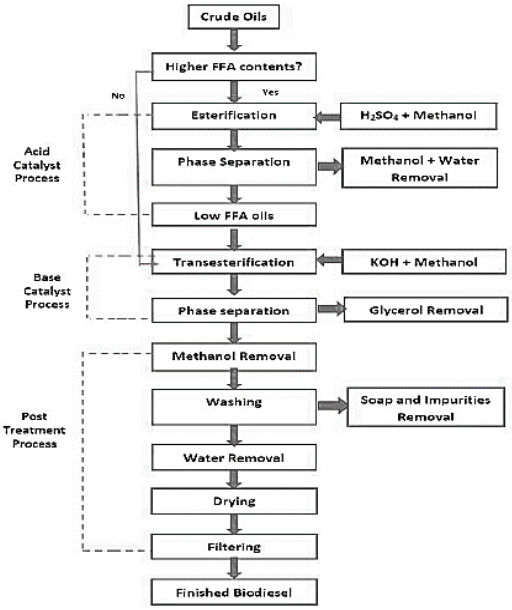


Figure 1. The flow chart of biodiesel production process [6].

4. References

[1] S. F.Han, W.B. Jin, R. J.Tu, W. M.Wu, Biofuel production from microalgae as feedstock: current status and potential. *Critical reviews in biotechnology*, Vol. 35, No. 2, pp. 255-268, 2015.

[2] M. Olaizola, Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace, *Biomolecular Engineering*, Vol. 20, No. 4-6, pp. 459-466, 2003.

[3] A. Aslam, S. R. Thomas-Hall, T. Mughal, Q. U.Zaman, N. Ehsan, S. Javied, P. M.Schenk, Heavy metal bioremediation of coal-fired flue gas using microalgae under different CO_2 concentrations, *Journal of environmental management*, Vol. 241, No. 1, pp. 243-250, 2019.

[4] R. Harun, M. Singh, G. M.Forde, M. K.Danquah, Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 3, pp. 1037-1047, 2010.

[5] T. M.Mata, A. A.Martins, N. S.Caetano, Microalgae for biodiesel production and other applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, pp. 217-232, 2010.

[6] M. Mofijur, M. G.Rasul, N. M. S.Hassan, M. N.Nabi, Recent development in the production of third generation biodiesel from microalgae, *Energy Procedia*, Vol. 156, No. 1, pp. 53-58, 2019.

سال دهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۲، ص ص ۱۸۸-۱۹۷
فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
jrenew.ir
مقاله مروری
تاریخ دریافت: ۰۰/۱۲/۰۴
تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۵/۲۵

مقایسه روش تولید انرژی و سوخت‌های تجدیدپذیر از جلبک‌ها با سایر روش‌های منابع تولید بیودیزل

بهاره کریمی دونا[۱]، حسین یوسفی[۲*]

۱- کارشناسی ارشد زیست فناوری صنعت و محیط زیست، گروه علوم زیستی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- دانشیار، هیئت علمی گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
* تهران، ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱، hosseinyousefi@ut.ac.ir

چکیده

امروزه تولید سوخت‌های جایگزین برای سوخت‌های فسیلی از مباحث نوین و اساسی برای مقابله با آلودگی‌های محیط زیست به شمار می‌رود. بیودیزل نیز با همین رویکرد برای جایگزینی سوخت دیزل فسیلی به کار می‌رود. به طور کلی در این مقاله علمی ترویجی به بررسی چهار نسل تولید سوخت زیستی از منابع مختلف و مقایسه‌های اقتصادی تولید آنها پرداخته می‌شود. در این مطالعه مروری از گزارش‌های قبلی، ابتدا با توجه به رویکرد بومی‌سازی سوخت‌های جایگزین، به معرفی انواع ریزجلبک‌ها، نحوه تولید، تکثیر و کاربردهای آن‌ها در زمینه محیط زیست، تولید بیوگاز، بیواتانول و بیودیزل پرداخته می‌شود. سپس به طور اختصاصی، شیوه بهینه تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت مقایسه‌ای بین بیودیزل تولیدی از ریزجلبک و سوخت دیزل فسیلی و استاندارد ASTM بیودیزل صورت گرفته است. نتایج مطالعات متعدد نشان داده است که به علت رشد سریع ریزجلبک‌ها و هزینه پایین کشت و تولید آن‌ها و بازدهی بالا می‌توان سالانه از هر هکتار کشت ریزجلبک حدود ۵۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ گالن بیودیزل تولید کرد که در مقایسه با دیگر منابع تولید بیودیزل جایگاه خوبی را به خود اختصاص می‌دهد.

کلیدواژگان: محیط زیست، ریزجلبک، کاربرد ریزجلبک، بیودیزل، بیواتانول

Comparison of energy production and renewable fuels method from algae with other ways of biodiesel production resources

Bahareh Karimi Douna[1], Hossein Yousefi[2*]

1- Master of Industrial and Environmental Biotechnology, Department of Life Science Engineering, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran, hosseinyousefi@ut.ac.ir

Received: 23 February 2022 Accepted: 16 August 2022

Abstract

Nowadays, the production of alternative fuels to fossil fuels is one of the most noticeable issues in dealing with environmental pollution. With the same approach, biodiesel is using to replace fossil diesel fuel. In general, this article examines four generations of biofuel production from different sources and economic comparisons of their production. In this review study of the previous reports, firstly, according to the approach of localizing alternative fuels, we discuss the introduction of microalgae's types, their reproduction process and environmental applications, production of biogas, bioethanol, and biodiesel. Afterward, in particular, the optimal method of producing biodiesel from microalgae is investigated, and eventually, a comparison has been made between biodiesel produced from microalgae and fossil diesel fuel and the ASTM standard of biodiesel. The results of numerous studies have demonstrated that due to the rapid growth of microalgae, high efficiency, and the low cost of their cultivation and production, it is possible to produce about 5000 to 15000 gallons of biodiesel from each hectare of microalgae cultivation; which makes the production of biodiesel from algae allocate a significant position compared to other sources of biodiesel production.

Keywords: Environment, Microalgae, Application of microalgae, Biodiesel, Bioethanol

۱- مقدمه

با رشد روز افزون جمعیت در جهان و نیاز بیشتر انسان به انرژی و افزایش استفاده از منابع تجدید ناپذیر انرژی، مانند منابع فسیلی و اتمی و غیره و با توجه به آلودگی‌ها و اثرات مضر این منابع چه برای انسان‌ها و چه برای تمامی موجودات و محیط زیست و همچنین رو به اتمام بودن این منابع، نیاز به منابع جدید انرژی و دستیابی به انرژی‌های جایگزین که محدودیتی در منابع خود ندارند و آسیب بسیار کمی به محیط زیست می‌رسانند، یکی از اهداف پیش روی دولت‌ها است. منابع تجدید پذیر انرژی تامین کننده بخش زیادی از نیاز آینده بشر به انرژی است. یکی از این نوع انرژی‌ها، سوخت‌های جایگزین به تعبیری سوخت‌های سبز است و می‌توانند نیاز آتی بشر به سوخت هم برای بخش حمل و نقل و هم تامین برق و غیره را برآورده کنند. سوخت‌های جایگزین شامل چهار دسته کلی بیودیزل، بیو الکل‌ها (شامل بیو اتانول و بیو متانول)، بیوگازها و هیدروژن مایع است. بیودیزل سوختی مناسب برای موتورهای دیزلی و دیزل ژنراتورها و غیره است که از واکنش بین چربی گیاهان و یا حیوانات با الکل‌ها در مجاورت کاتالیزور به وجود می‌آید [۱].

از سال ۱۹۲۰ میلادی وقتی که موتورهای دیزلی به وجود آمده‌اند، از چربی گیاهان به عنوان سوخت استفاده می‌شده است. منابع اولیه گیاهی تولید بیودیزل شامل خانواده گیاهان چرب مانند سویا، آفتابگردان، کلزا، خرما و غیره است که به دلیل محدودیت‌های موجود در کشت و برداشت آن‌ها و احتمال صدمه دیدن به مصارف غذایی و کمیت غیر قابل مقابله آن‌ها با منابع فسیلی، به یک منبع غنی و قابل رقابت نیاز است که می‌توان گفت یکی از این منابع، ریزجلبک‌ها (جلبک‌ها) است. جلبک‌ها غنی ترین منبع چربی برای تولید بیودیزل هستن که محتوای چربی آن‌ها تا ۶۰٪ وزن خود است. از همه مهم تر سرعت بالای تکثیر این منابع و راحتی کار و هزینه بسیار پایین تولید سوخت از این منابع یکی از دلایل عمده روی آوری به جلبک‌ها در کشورهای مختلف است. در این گزارش به معرفی ریزجلبک‌ها و انواع آن‌ها و شرحی بر روش‌های کشت، برداشت و تولید سوخت از آن‌ها پرداخته خواهد شد. در جدول ۱ منابع گیاهی مختلف که از آن‌ها می‌توان بیودیزل تهیه کرد آورده شده است و مقایسه‌ای از لحاظ محتوای چربی آن‌ها صورت گرفته است [۱].

از تولید بیودیزل از روغن دانه‌های خوراکی یا غیرخوراکی گرفته تا مهندسی متابولیک جلبک‌ها، این سری از تکامل به چهار نسل طبقه بندی می‌شوند. مواد اولیه اصلی برای سوخت‌های زیستی نسل اول (ذرت، گندم، جو و نیشکر) منابع غذایی هستند، بنابراین ممکن است منجر به رقابت بین مواد غذایی و سوخت شوند. برای تولید سوخت زیستی نسل اول، سهم قابل توجهی در افزایش قیمت کالاها برای غذا و خوراک دام داشته است. تولید سوخت‌های زیستی از زباله‌های کشاورزی و جنگلی یا محصولات غیر غذایی می‌تواند بحران تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم سوخت‌های زیستی بر افزایش قیمت مواد غذایی را حل کند. سوخت زیستی نسل دوم از مواد خام لیگنوسلولزی شامل محصولات جانبی (کاه غلات، باگاس نیشکر، بقایای جنگل)، ضایعات (اجزای آلی پسماندهای جامد شهری) و مواد اولیه اختصاصی (علف‌های گیاهی با رشد هدفمند، جنگل‌های کوتاه مدت و سایر انرژی‌ها) تشکیل شده است. همچنین در رقابت با تولید مواد غذایی و فیبر به زمین نیاز دارند. با این حال، بازده انرژی از این محصولات احتمالا بیشتر از محصولات سوخت زیستی نسل اول یا محصولات آنها است [۲].

جستجو برای منابع جایگزین برای کاهش رقابت در زمین‌های کشاورزی به نسبت استفاده از جلبک به عنوان یک منبع پایدار و غنی از سوخت زیستی که به عنوان سوخت زیستی نسل سوم شناخته می‌شود، ادامه یافت. جلبک‌ها با غذا یا سایر محصولات رقابت نمی‌کنند و می‌توانند در تالاب‌های کم عمق یا حوضچه‌ها در زمین‌های حاشیه‌ای یا استخرهای بسته کشت شوند. با این حال، سوخت‌های زیستی از منابع فوق دارای محدودیت‌هایی از نظر ردپای اکولوژیکی، عملکرد اقتصادی، وابستگی به محیط (نور خورشید)، موقعیت جغرافیایی (عرض جغرافیایی) هستند و بنابراین برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی کافی نیستند. مهندسی متابولیک جلبک برای تولید سوخت زیستی به عنوان نسل چهارم سوخت زیستی محسوب می‌شود و پتانسیل بالایی در تامین انرژی پایدار و پاک دارد. مقایسه‌ای از مزایا و معایب نسل‌های یک تا چهار تولید سوخت زیستی را در جدول ۲ مشاهده می‌کنید و همچنین در جدول ۳، مقایسه اقتصادی هزینه سوخت زیستی از منابع مختلف در مقایسه با سوخت‌های معمولی را طبق مطالعه داتا و همکاران می‌توان مشاهده کرد [۲]. در ادامه به طور اختصاصی به کاربرد و تکثیر ریزجلبک‌ها در تولید بیودیزل پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که این مقاله، حاصل مروری از گزارش‌های قبلی چاپ شده است.

جدول ۱ منابع گیاهی مختلف برای تولید بیودیزل و مقایسه آن‌ها [۱].

منبع	محتوای روغن دانه (% oil by wt in biomass)	میزان (روغن L oil/ha year)	زمین مورد نیاز (m2year/kg biodiesel)	قابلیت تولید بیودیزل (kg biodiesel/ha year)
ذرت	۴۴	۱۷۲	۶۶	۱۵۲
شاه دانه	۳۳	۳۶۳	۳۱	۳۲۱
سویا	۱۸	۶۳۶	۱۸	۵۶۲
جاتروفا	۲۸	۷۴۱	۱۵	۶۵۶
کاملینا	۴۲	۹۱۵	۱۲	۸۰۹
کانولا	۴۱	۹۷۴	۱۲	۸۶۲
آفتاب گردان	۴۰	۱۰۷۰	۱۱	۹۴۶
کرچک	۴۸	۱۳۰۷	۹	۱۱۵۶
خرما	۳۶	۵۳۶۶	۲	۴۷۴۷
ریزجلبک (کم روغن)	۳۰	۵۸۷۰۰	۰/۲	۵۱۹۲۷
ریزجلبک (متوسط روغن)	۵۰	۹۷۸۰۰	۰/۱	۸۶۵۱۵
ریزجلبک (زیاد روغن)	۷۰	۱۳۶۹۰۰	۰/۱	۱۲۱۱۰۴

جدول ۲ مزایا و معایب استفاده از انواع سوخت جایگزین [۲].

نسل	مزایا	معایب
اول	صرفه جویی در گازهای گلخانه‌ای، فناوری تبدیل ساده و کم هزینه	بازده کم، باعث بحران غذایی می‌شود زیرا بخش بزرگی از زمین زراعی مورد نیاز برای رشد محصولات زراعی است.
دوم	صرفه جویی در گازهای گلخانه‌ای، استفاده از ضایعات غذایی به عنوان خوراک، عدم رقابت در محصولات غذایی، استفاده از زمین‌های غیر زراعی برای رشد محصولات انرژی زا	پیش تصفیه پرهزینه مواد اولیه لیگنوسلولزی، فناوری بسیار پیشرفته، نیازمند توسعه برای تبدیل مقرون به صرفه زیست توده به سوخت.
سوم	کشت آسان جلبک، نرخ رشد بالاتر، بدون رقابت در محصولات غذایی تطبیق پذیری: قابلیت استفاده از فاضلاب، آب دریا	مصرف انرژی بیشتر برای کشت جلبک (برای اختلاط، فیلتراسیون، سانتریفیوژ و غیره)، محتوای چربی یا زیست توده کم، مشکل آلودگی در سیستم حوضچه باز، هزینه بالای فوتوبیوراکتور
چهارم	عملکرد بالا با جلبک‌های حاوی لیپید بالا، توانایی جذب بیشتر CO_2، نرخ تولید بالا	سرمایه گذاری اولیه بالا تحقیق در مرحله اولیه است.

جدول ۳ مقایسه هزینه تولید سوخت زیستی از منابع مختلف [۲].

نوع سوخت/سوخت زیستی	قیمت ($/گالن)
بنزین	۳.۳۷
دیزل	۳.۴۶
گاز طبیعی معمولی (CNG)	۲.۱۳
اتانول (*E85*)	۳.۱۴
بیودیزل (*B20*)	۳.۹۵
بیودیزل (B99/100)	۴.۲
اتانول ذرت	۲.۱۲
اتانول ارزن	۴.۵۳
اتانول علف هرز	۲.۷۴
اتانول کاه ذرت	۲.۶۲
بیودیزل جلبک	۹-۴۰

۲- ریزجلبک

ریزجلبک‌ها مواد ارگانیسم با ساختارهای متفاوت به صورت یک یا چند سلولی و در فرم‌های پیچیده و متغیر به صورت میله‌ای، شاخه‌ای، تاژک دار و غیره هستند که به دو روش جنسی و غیر جنسی تکثیر می‌یابند و به کمک عمل فتوسنتز مواد غیر ارگانیک را به مواد ارگانیک تبدیل می‌کنند. محل زندگی ریزجلبک‌ها در تالاب‌ها، دریاها، آب‌های شیرین، گندآب‌ها و حتی در خشکی روی صخره‌ها و یا به صورت انگل روی گیاهان دیگر است. ریزجلبک‌ها برای رشد خود به نور، آب و دی اکسید کربن به عنوان ماده مغذی نیاز دارند.

نور مورد نیاز رشد ریزجلبک‌ها هم می‌تواند به صورت طبیعی در روشنایی روز تامین شود هم به صورت مصنوعی توسط ال ای دی یا نور فلورسانت‌ها. دی اکسید کربن یکی از پارامترهای مهم در تکثیر ریزجلبک‌ها است که بسته به نوع ریزجلبک و نوع کشت آن، هم می‌تواند از دی اکسید کربن موجود در اتمسفر که ناشی از تولید کارخانجات صنعتی و ماشین‌ها و یا حاصل عمل فوتوسنتز گیاهان است، تامین شود هم به صورت مصنوعی و به شکل مواد آلی و قندی توسط مخازن حباب زا به محل تکثیر آن‌ها تزریق شود [۳].

در ادامه این مقاله، با توجه به رویکرد بومی‌سازی سوخت‌های جایگزین، به معرفی ریزجلبک‌ها و شیوه بهینه تولید بیودیزل از آن‌ها پرداخته می‌شود و در نهایت بین بیودیزل تولیدی از ریزجلبک و سوخت دیزل فسیلی و استاندارد ASTM بیودزل مقایساتی صورت خواهد گرفت.

۲-۱- انواع ریزجلبک

ریزجلبک‌ها به سه خانواده اصلی شامل (ریزجلبک‌های قهوه‌ای، سبز و قرمز) تقسیم بندی می‌شوند اما گونه‌های فرعی نیز وجود دارند که بسته به شرایط تکثیر و محل زندگی و خصوصیات فیزیکی به شش گروه زیر تقسیم می‌شوند.

۲-۱-۱- ریزجلبک‌های قهوه‌ای

ریزجلبک‌های قهوه‌ای، دارای ساختار چند سلولی و پیچیده‌ای هستند که به صورت رشته‌های بی شاخ و برگ و میله‌ای یافت می‌شوند و دارای رنگدانه‌های قهوه‌ای هستند. این جلبک‌ها بیشتر در آب‌های سرد دریاها و اقیانوس‌ها زندگی می‌کنند و حدو ۱٪ آن‌ها در آب‌های شیرین یافت می‌شوند. غذای ذخیره شده در این گونه به صورت کربوهیدرات‌های حل شدنی مانند لامارین، چربی‌ها و مواد قندی الکل زا است که در تولید اسید الگنیک، کود و بیوالکل‌ها از آن‌ها استفاده می‌شود علاوه بر این که مصارف غذایی نیز دارند.

۲-۱-۲- ریزجلبک‌های طلایی

این گونه جلبک‌ها، دارای ساختاری شبیه گونه قهوه‌ای هستند و دارای رنگدانه‌های قهوه‌ای طلایی هستند با این تفاوت که محل رشد و زندگی آن‌ها در آب‌های سرد دریاچه‌های آب شیرین و محیط‌های باز مانند برکه‌ها، تالاب‌ها و به صورت خیلی محدود در دریاها است. گونه سینورا[1] در آب‌های شیرین و در کلنی‌های غیر متمرکز یافت می‌شود که غیر سمی بوده و بویی شبیه ماهی دارد.

۲-۱-۳- ریزجلبک‌های سبز

محل زندگی این گونه جلبک‌ها در آب‌های شیرین مانند رودخانه‌ها، تالاب‌ها، برکه‌ها و دریاچه‌های آب شیرین و در آب‌های شور مانند دریاها و اقیانوس‌ها و در گندآب‌ها و پساب‌ها است. این گونه جلبک‌ها ساختاری بسیار شبیه گیاهان و از جنس سلولز و پکتین (نوعی ژلاتین گیاهی) دارند و به تعبیر بسیاری از زیست شناسان از نیاکان گیاهان هستند. غذای ذخیره شده در این گونه به صورت نشاسته و کربوهیدرات است. دو نوع بسیار معروف آن‌ها کلرلا و کلامیدوموناس است که در تولید بیودیزل از آن‌ها استفاده می‌شود.

۲-۱-۴- ریزجلبک‌های قرمز

این گونه جلبک‌ها شامل انواع بسیار زیادی از جلبک‌های دریایی و اقیانوسی است که در نواحی جنوبی خط استوا رشد می‌کنند و شامل خانواده‌ای با بیش از ۴۰۰۰ نوع جلبک و بدون تاژک و ریشه است. بسیاری از آن‌ها مانند

1. Synora

کارولینا[1] شبیه مرجان‌ها دارای قشایی آهکی است که می‌توانند به صخره‌ها بچسبند. یکی از گونه‌های کم سلولی و بسیار کمیاب آن‌ها پورفیریدیوم[2] است.

۲-۱-۵- ریزجلبک‌های سبز- زرد

این گونه نیز مانند گونه سبزها در آب‌های شیرین و دریاها رشد می‌کنند و می‌توانند در خشکی هم زندگی کنند. ساختار ظاهری آن‌ها بسیار متغیر و به صورت تک سلولی، چند سلولی، شاخه شاخه‌ای، تک شاخه‌ای، لیفی هستند. غذای زخیره شده به صورت گلیکوژن[3] است.

۲-۱-۶- ریزجلبک‌های آبی-سبز

این گونه نیز در انواع زیستگاه‌ها از جمله آب‌های شیرین، دریاها و خشکی قابل رشد هستند. در ساختارهای تک سلولی، شاخه‌ای و میله‌ای یافت می‌شوند. رنگدانه‌های سبز و آبی منحصر به فرد خود را دارا هستند و غذای ذخیره شده به صورت گلیکوژن است. دو نوع معروف سیانوفیت[4] و رودوفیت[5] دارد که هیچ سلول تاژک داری ندارند.

۳- کاربردهای ریزجلبک‌ها

ریزجلبک‌ها به علت دارا بودن درصد هیدروکربن زیاد و چربی و مواد غذایی مفید در تولید سوخت‌های جایگزین، در صنایع غذایی، در تولید کود و مصارف بهداشتی و تصفیه فاضلاب کاربرد زیادی دارند. از جمله کاربردهای آن‌ها، می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد.

۳-۱- کاربردهای محیط زیستی

ریزجلبک‌ها با رشد و تکثیر در پساب‌ها باعث جذب فلزات سنگین، جذب باکتری‌های مضر به کمک اسید فنول، مصرف دی اکسید کربن تولیدی کارخانجات صنعتی و ماشین آلات برای رشد و تکثیر خود به عنوان تغذیه و تصفیه فاضلاب می‌شوند. در این میان ریزجلبک‌های قهوه‌ای بیشترین تاثیر در جذب فلزات سنگین مانند کادمیوم، نیکل و روی را داراست. به‌عنوان مثال پژوهش آسلام و همکاران، با هدف روشن ساختن توانایی ریزجلبک‌ها برای حفظ تنوع آن‌ها و تکثیر آنها تحت غلظت‌های مختلف دی اکسید کربن از گاز دودکش حاصل از سوخت زغال سنگ انجام شده است. کشت مخلوط ریزجلبک‌ها در محیط غنی از مواد مغذی رشد کرده و انتظار می‌رفت که فلزات سنگین (Al، Cu، Fe، Mn و Zn) از گاز دودکش متساعد شوند. سه غلظت (۱، ۳ و ۵/۵ درصد) دی اکسید کربن مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات تطبیقی با استفاده از گازهای دودکش و سیستم‌های کنترل در فتوبیوراکتور انجام شد. تحت ۳ درصد CO_2، بیشترین مقدار B، Mn و Zn یافت شد که در طی دوره کشتشان به زیست توده توسط سلول‌ها، داخلی شدند. از این رو، ریزجلبک‌ها ممکن است راه حلی مناسب برای دو چالش عمده ارائه دهند: تامین مواد اولیه بالقوه سوخت زیستی برای تامین امنیت انرژی و کاهش آلودگی فلزات سنگین به هوا [۴].

زو و همکاران، بیان کردند که دوغاب بیوگاز (BS)[6] یک محصول جانبی اصلی تولید بیوگاز است که معمولا به دلیل ریزمغذی‌ها و مواد معدنی فراوان برای آبیاری کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، کاربرد مستقیم BS ممکن است موجب کاهش کیفیت و تجمع نیترات و فلزات سنگین در محصولات شود. برای مقابله با این مسئله، آزمایش کشت ریزجلبک و آزمایش آبیاری جهت ارزیابی کارایی حذف مواد مغذی و فلزات سنگین از BS رقیق با استفاده از ریزجلبک *Scenedesmus sp* و بررسی اثرات آبیاری با BSهای مختلف تیمار شده با ریزجلبک‌ها بر کیفیت تغذیه، مقاومت اکسایش و باقی مانده نیترات و فلزات در کلم چینی انجام شد. آبیاری با BS تیمار شده با ریزجلبک به‌طور قابل توجهی باعث افزایش رشد محصول، بهبود کیفیت محصول، طعم خوراکی و مقاومت در برابر اکسیداسیون و همچنین کاهش باقی مانده نیترات و فلزات سنگین در چینی کلم در مقیاس بزرگ شد. بنابراین، کشت ریزجلبک‌ها برای کاهش اثرات منفی آبیاری با BS در رشد محصول و ایمنی محصولات کشاورزی مفید بود. این مطالعه ممکن است مبنای نظری برای استفاده ایمن از ضایعات BS در آبیاری کشاورزی باشد [۵].

۳-۲- تولید بیوگاز

در اثر هضم غیر هوازی ریزجلبک‌ها در مخازن هاضم توسط باکتری‌های متان زا انجام می‌شود. به علت عدم وجود لیگنین و کم بودن میزان سلولز موجود در ساختار ریزجلبک‌ها، عملیات تولید بیوگاز با سرعت بالاتری انجام می‌گیرد. دمای مورد نیاز ۵۵-۳۵ درجه سانتی گراد است. میزان متان تولیدی بعضی گونه‌های معروف در جدول ۴ آورده شده است [۶].

جدول ۴ متان تولیدی چند نمونه از ریزجلبک‌ها [۶].

ریزجلبک	متان تولیدی (m^3/kg)
Laminaria sp.	۰/۲۶ – ۰/۲۸
Gracilaria sp.	۰/۲۸ – ۰/۴۰
Macrocystis	۰/۳۹ – ۰/۴۱
L. Digitata	۰/۵۰
Ulva sp.	۰/۲۰

بر اساس مطالعه کاویناتو و همکاران، استفاده ناپایدار از سوخت‌های فسیلی منجر به نگرانی‌های زیست محیطی، بحران‌های انرژی و تغییرات اقلیمی جهانی شده است. ریزجلبک‌ها به‌عنوان یک منبع تغذیه بالقوه برای مقابله با تمام این مسائل اشاره شده است. در بخشی از مطالعات آن‌ها تحقیقات اخیر مربوط به زیست توده ریزجلبک‌ها برای تولید بیوگاز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین دو مورد از محدودیت‌های اصلی مربوط به تولید بیوگاز، یعنی هیدرولیز و متانوژنز، مورد بحث قرار گرفته است. علاوه بر این، یک رویکرد پلایش زیستی ارزان قیمت در زمینه تولید محصولات بیشتر با استفاده از جریان‌های دیگر (دی اکسید کربن و هضم) به جای متان تولید شده در طی هضم بی هوازی (AD)[7] ارائه شده است. محدودیت‌های تجاری استفاده از ریزجلبک‌ها برای تولید بیوگاز نیز پوشش داده شده است. اگر چه تجربه در مقیاس کامل محدود است، با توجه به تعدادی از پروژه‌های تحقیقاتی مورد حمایت در سراسر جهان، مشخص است که اجرای این پروژه‌ها در حال افزایش است [۷].

همچنین با توجه به مزایای بسیار تولید بیوگاز توسط فرایند هضم بی هوازی توسط ریزجلبک، در یکی از مطالعات مروری اخیر توسط کوردووا و

1. Anaerobic Digestion

2. Carollina
3. Porphyridium
4. Glycogen
5. Cyanophytes
6. Rhodophytes
7. Biogas slurry

همکاران، بررسی و تجزیه و تحلیل استفاده از پیش تیمارهای هضمی برای انحلال ریزجلبک با تمرکز بر دیوار سلولی و رابطه آن با افزایش تولید بیوگاز انجام شد [۸].

۳-۳- تولید بیواتانول

با کمک کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌های موجود در ساختار سلولی ریزجلبک‌ها و در شرایط تاریک و مخازن تخمیر و به کمک باکتری‌های غیر هوازی، بیواتانول تولید شده و از هر کیلوگرم کربوهیدرات و گلوکز موجود در ساختار ریزجلبک، ۰/۵۱ کیلوگرم اتانول تولید می‌شود. معادله ۱ بیانگر تبدیل گلوکوز به الکل و دی اکسید کربن است که این معادله مبنای تولید بیواتانول از مواد قندی، همچنون ریزجلبک‌ها است [۶].

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 \quad (۱)$$

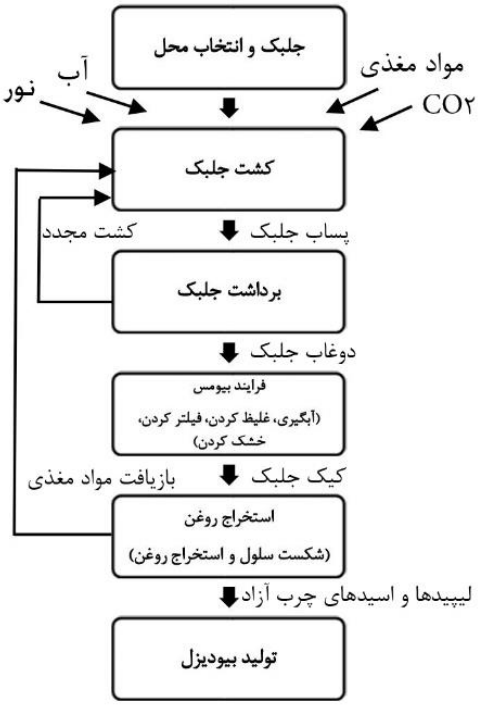
از CO_2 تولید شده در معادله بالا، برای عملیات فوتوسنتز جدید و کشت دوباره استفاده می‌شود. در بین ریزجلبک‌ها، بهترین بازدهی مربوط به ریزجلبک قهوه‌ای است.

کیم و همکاران، تولید بیواتانول در پاسخ به شرایط کشت دو نوع *Porphyridium cruemtum* در آب‌های دریایی و آب شیرین را مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که *P. cruemtum* می‌تواند در شرایط آب شیرین رشد کند و کاندیدای کارآمدی برای تولید بیوتکنول باشد [۹]. مطالعه سیوارماکریشنان و اینچاروایناساکدی بر روی رویکرد پالایش زیستی تولید همزمان بیو اتانول و بیودیزل از مواد اولیه ریزجلبک تمرکز داشته است. برای تعیین حداکثر دستیابی به قند از *Scenedesmus sp* از روش‌های مختلف پیش تیمار استفاده شد. بازدهی کل قند ۹۳ درصد، هنگامی که زیست توده با هیدرولیز اسید پیش تیمار شد حاصل آمد. هیدرولیزات پس از تخمیر با استفاده از *Saccharomyces cerevisiae*، ۸۶ درصد اتانول تولید کرد. همچنین دی متیل کربنات به‌عنوان یک حلال عمل کرده و حداکثر بازدهی ۹۲ درصد متیل استر، ۱/۸۶ درصد گلیسرول کربنات و ۴/۹۳ درصد گلیکسرول دی کربنات به دست آمد. فرآیند یکپارچه تولید بیواتانول و تولید بیودیزل زمانی به طور مطلوب به دست می‌آید که به ترتیب تبادل استری مستقیم ابتدا از طریق تخمیر اتانول با بازدهی ۹۲ و ۹۳ درصد از متیل استر و اتانول به دست آمده باشد [۱۰].

۳-۴- تولید بیودیزل

به علت رشد سریع و هزینه پایین و بازدهی بالا می‌توان سالانه از هر هکتار کشت ریزجلبک حدود ۵۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ گالن بیودیزل تولید کرد. روش‌های تولید بیودیزل که هدف نهایی این نوشتار است، به تفصیل در بخش‌های بعدی شرح داده خواهد شد. برای تولید بیو دیزل از ریزجلبک‌ها به طور کلی مراحل زیر الزامی است. تکثیر، برداشت، آبگیری، استخراج و تولید محصول نهایی (بیودیزل).

لازم به ذکر است که صنعت تولید سوخت سبز از جلبک‌ها صنعتی بسیار نوپا محسوب می‌شود و فازهای اولیه توسعه آن در کشورهای استرالیا، آمریکا و ژاپن در حال شکل گیری است [۱۲و۱۳] که البته تا به حال آنالیزهای اقتصادی در ارتباط با تولید سوخت سبز از جلبک‌ها در کشور ما به صورت جدی انجام نگرفته است. در یکی از مطالعات اخیر، موبارک و همکاران، از لخته سازی به عنوان یک راه موثر برای برداشت ریزجلبک‌ها به منظور تولید بیودیزل استفاده کردند. در این مقاله، بررسی تکنیک‌های مختلف لخته‌سازی ریزجلبک‌ها از قبیل استفاده از نمک‌های معدنی، نمک‌های ارگانیک، لخته سازهای زیستی، لخته سازی اتوماتیک و الکترولیتیک برای جمع آوری ریزجلبک‌ها برای تولید بیودیزل انجام شد. مشخص شد که استفاده از لخته سازهای طبیعی برای برداشت ریزجلبک‌ها، سمیت تولید زیست توده را حذف می‌کند، اما هزینه آن را برای برنامه‌های کاربردی در مقیاس بالا مقرون به صرفه نیست و یافتن روش اقتصادی برای برداشت مقادیر زیاد ریزجلبک‌ها نیاز به تحقیق و توسعه بیشتری دارد [۱۴].



شکل ۱ مراحل تولید بیودیزل از ریزجلبک [۱۱].

همچنین پژوهش موفیجور و همکاران، مروری بر پیشرفت‌های اخیر در بیودیزل ریزجلبک‌ها از منظر تکنیک‌های استخراج نفت، چالش‌های استخراج نفت، تولید بیودیزل از روغن‌های ریزجلبک‌ها و خواص سوخت آن‌ها داشته است. در نهایت، مقاله آن‌ها تجزیه و تحلیل عملکرد و احتراق موتور دیزل سوخت زیستی با ریزجلبک را مورد بحث قرار می‌دهد. این مقاله درک روشنی از استفاده بالقوه بیودیزل ریزجلبک‌ها به‌عنوان منبع جایگزین برای دیزل فسیلی برای موتورهای دیزل ارائه می‌دهد [۱۵].

۴- تکثیر ریزجلبک‌ها

چهار روش مختلف برای تکثیر ریزجلبک‌ها وجود دارد که گونه‌های مختلف بسته به نوع تغذیه و منبع نور مورد نیاز در یک یا چند نوع از این روش‌ها تکثیر می‌یابند. این روش ها عبارتند از:

۱. کشت فتوتروفیک[1]
۲. کشت هتروتروفیک[2]
۳. کشت میکسوتروفیک[3]
۴. کشت فتوهتروتروفیک[4]

1. Phototrophic cultivation
2. Heterotrophic cultivation
3. Heterotrophic cultivation
4. Photoheterotrophic cultivation

روش کشت فتوتروفیک برای تکثیر ریزجلبک‌هایی که جهت رشد به نور و کربن‌های غیر آلی مانند دی اکسید کربن تولیدی صنایع و ماشین‌ها به عنوان تغذیه نیاز دارند، استفاده می‌شود. محصول این روش دارای تراکم کم سلولی است و هزینه‌های این نوع تکثیر به علت وجود منبع کربنی و نور فراوان بسیار پایین است.

روش کشت هتروتروفیک برای تکثیر ریزجلبک‌هایی که جهت رشد به محیط‌های تاریک و کربن‌های آلی مانند گلوکز، گلیسرول، فراکتوز، لاکتوز، گالاکتوز و مانوس به‌عنوان تغذیه نیاز دارند، استفاده می‌شود. این روش دارای بیشترین بازدهی تولید زیست توده است ولی هزینه‌های تکثیر در این روش بیش از روش قبل است و در عین حال امکان آلودگی آب نیز وجود دارد.

روش کشت میکسوتروفیک برای تکثیر گونه‌های ریزجلبکی که در هر دو شرایط تاریک و روشن و مصرف هر دو نوع منبع کربنی آلی و غیر عالی، قابلیت رشد دارند، قابل استفاده است. زیست توده حاصل از این روش دارای تراکم سلولی متوسط و هزینه تکثیر در این روش زیاد است.

روش فتوهتروتروفیک برای تکثیر ریزجلبک‌هایی که جهت رشد به نور و کربن‌های آلی نظیر انواع شکرها به عنوان تغذیه نیاز دارند، استفاده می‌شود. میزان تولید زیست توده در این روش کم ولی هزینه‌های تولید بسیار زیاد است [۱۶]. در جدول ۵، روش‌های کشت انواع ریزجلبک آورده شده است و مقایسه‌ای از لحاظ اقتصادی بین این روش‌ها انجام گردیده است.

جدول ۵ روش های کشت انواع ریزجلبک و مقایسه اقتصادی روش‌ها [۱۶].

هزینه	چگالی سلول	منبع کربن	منبع انرژی	شرایط کشت
کم	کم	غیر ارگانیک	نور	فتوتروفیک
متوسط	زیاد	ارگانیک	ارگانیک	هتروتروفیک
زیاد	متوسط	ارگانیک و غیر ارکانیک	نور و ارگانیک	میکسوتروفیک
زیاد	متوسط	ارگانیک	نور	فتوهتروتروفیک

۴-۱- تکثیر ریزجلبک در معرض نور

بسیاری از روش‌های کشت ریزجلبک‌ها در معرض نور مستقیم انجام می‌گیرد. نور مورد نیاز از منابع مختلف، هم به صورت طبیعی (نور خورشید) و هم به صورت مصنوعی (مانند نور LED و فلورسانت) تامین می‌شود. کشت ریزجلبک در مقابل نور به دو روش انجام می‌شود [۱۱].

- کشت در سیستم‌های کشت باز: استخرهای روباز[1]
- کشت در سیستم‌های کشت بسته: راکتورهای خاص کشت جلبک (فتوبیوراکتور)[2]

۴-۲- کشت ریزجلبک در استخرهای باز

در این روش، در محیط‌های باز، استخرهایی به شکل‌های مختلف ساخته می‌شود و جریان آب به صورت طبیعی (رودخانه‌ها) یا اجباری (توسط چرخ‌هایی آسیاب شکل) در آن‌ها به وجود می‌آید. وجود جریان آب بسیار مهم است زیرا قرار گرفتن بیش از حد ریزجلبک در معرض نور خورشید، باعث مرگ آن‌ها و آلوده شدن آب می‌شود، همچنین جریان آب باعث تلاطم و توزیع یکنواخت CO_2 در کل استخر می‌شود. پارامترهای مهم در رشد ریزجلبک‌ها در این روش، دما، میزان CO_2 محلول در آب، PH آب و میزان آلودگی آب است.

تکثیر ریزجلبک‌ها در استخرهای روباز هزینه‌های بسیار کمی دارد ولی از معایب آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- تولید بسیار کم زیست توده
- بستگی زیاد به شرایط محلی و میزان نور و دمای محیط و نوع جلبک بومی منطقه
- عدم کنترل بر شرایط آب و هوایی محل و آلودگی آب
- محدودیت پارامترهای رشد

۴-۳- کشت ریز جلبک‌ها در فوتوبیوراکتورهای بسته

در این روش ریزجلبک‌ها در سیکل های بسته و در راکتورهای خاص تولید می‌شوند. از مزایای این روش می‌توان به کنترل زیاد بر شرایط تکثیر ریزجلبک‌ها، تولید بسیار زیاد زیست توده تا ۵۰۰۰ برابر روش روباز و مساحت بسیار کم مورد نیاز را نام برد. هزینه تولید در این روش بیشتر از روش قبل است. فوتوراکتورهای کشت جلبک به دو نوع لوله‌ای[3] و صفحه‌ای[4]است.

روش لوله‌ای روشی مناسب جهت کشت در محیط بیرون است که به دو نوع صاف (عمودی، مایل، افقی) و دایره‌ای است. در میان روش‌های موجود، نوع عمودی کمترین مصرف انرژی و بیشترین میزان تولید زیست توده را دارا است و نوع افقی آن به مساحت بیشتری برای کشت نیاز دارد. در انتهای سیکل هرکدام، از مخازن حباب زا که به منبع تامین CO_2 متصل است برای تامین ماده غذایی جلبک‌ها استفاده می‌شود.

روش صفحه‌ای، روشی مناسب جهت کشت در محیط‌های با نور کمتر است. در مقایسه با روش قبلی دارای مصرف انرژی بسیار کمتر و تولید زیست توده بسیار بیشتری است. از مزایای دیگر این روش کاهش تولید اکسیژن و تولید دی اکسید کربن بیشتر در سیکل است. راکتورهای صفحه‌ای در انواع Glass type، مواد شفاف PVC، V شکل و صفحه‌های مایل است که در این میان نوع PVC بیشترین جذب نور و بالاترین بازدهی را داراست [۱۷].

۵- برداشت محصول و آب گیری

این فرآیند به روش‌های مختلفی مانند جمع آوری رسوبات، سانتریفیوژ کردن ریزجلبک‌ها، فیلتراسیون و فیلتراسیون ماوراء بنفش انجام می‌شود. همچنین یک روش جدید و کارآمد نیز وجود دارد که طی آن با افزودن نیترات آهن و سلولز به آلگاها، آب و آلگا از هم جدا شده و به صورت خمیر در می‌آید [۱۸].

۶- تولید بیودیزل

یکی از کاربردهای بسیار مهم ریزجلبک‌ها، تولید بیودیزل است. منابع مناسب برای تولید بیودیزل باید دارای شرایط زیر باشند:

- کمیت قابل قبول
- هزینه پایین برای تولید
- سوخت تولید شده از این منابع با استانداردهای سوخت مطابقت داشته باشد.

در بین منابع تولید بیودیزل، روغن حاصل از ریزجلبک هر سه شرط بالا را برآورده می‌کند. این روغن از نوع خنثی و اشباع نشده است که پس از استخراج آن، طی یک واکنش شیمیایی با الکل‌هایی نظیر اتانول یا متانول و در مجاورت کاتالیزرهایی مانند هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم، تولید بیودیزل و گلیسیرین می‌کند که گلیسیرین تولیدی در صنایع بهداشتی

1.Open Pond
2.Photo bioreactor
3. Tubular
4. Plate-type

کاربرد فراوان دارد. به علت رشد بسیار سریع ریزجلبک‌ها و هزینه‌های پایین و بازدهی بالا، جلبک‌ها بهترین منبع تولید بیودیزل هستند (۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ گالن در سال در هکتار) که نسبت به روغن خرما تفاوت بسیار بالایی دارد (۶۳۵ گالن در سال در هکتار).

۶-۱- روغن گیری

از مراحل اولیه تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها، مرحله روغن گیری است که روغن گیری از جلبک‌ها به ۴ روش مختلف (صنعتی و آزمایشگاهی) انجام می‌پذیرد. روش‌های متعددی برای استخراج روغن موجود در ریزجلبک‌ها وجود دارد از جمله:

- روش پرسی
- روش مایع حلال[1]
- روش جریان فوق بحرانی[2]
- روش فوق صوت[3]

۶-۱-۱- روش پرسی

در این روش پس از آب گیری از ریزجلبک، با عمل پرس کردن و تحت فشار قرار دادن ریزجلبک‌ها می‌توان تا ۷۵٪ روغن آن را استخراج کرد. این روش غیر موثر است و نیاز به صرف زمان زیادی دارد. روغن خارج شده از ریزجلبک به رنگ قهوه‌ای تیره است.

۶-۱-۲- روش مایع حلال

در این روش حلال‌های آلی نظیر کلروفرم، هگزان، بنزن و استان را به خمیر آلگا اضافه می‌کنند. این حلال‌ها، دیواره سلولی ریزجلبک‌ها را تخریب می‌کنند و باعث خروج رطوبت و روغن از آن می‌شوند. سپس طی عملیات تقطیر، روغن حاصله از ریزجلبک از حلال جدا شده و میزان ۸۰٪ از روغن ریزجلبک با این روش استخراج می‌شود. در بین حلال‌های موجود، هگزان بیشترین تأثیر را داراست و از معایب این روش می‌توان به گرانی حلال‌ها و هزینه‌های زیاد جداسازی حلال‌ها اشاره کرد.

۶-۱-۳- روش جریان فوق بحرانی

در این روش از سیالی با دما و فشار زیاد استفاده می‌شود که باعث تخریب دیواره سلولی و خروج روغن از جلبک‌ها می‌شود. این روش در دمای ۵۵-۴۵ درجه سانتی گراد و در فشار ۷۰۰-۴۰۰ بار انجام می‌گیرد. این روش، روشی صنعتی و مورد استفاده در بسیاری موارد است و از محاسن آن می‌توان به زمان بسیار کم عملیات روغن کشی و بازدهی بالا اشاره کرد. در این روش دما و فشار بر نرخ استخراج روغن تأثیر گذار هستند و تأثیری بر ماهیت شیمیایی و خواص فیزیکی روغن ندارد و هرچه دما و فشار بیشتر باشد خروج روغن با سرعت بالاتری صورت می‌گیرد.

۶-۱-۴- روش فوق صوت

این روش توسط امواج با سرعت فوق صوت انجام می‌گیرد. برخورد ریزجلبک و سیال پرسرعت باعث بروز پدیده کاویتاسیون و در نتیجه باعث ایجاد حباب‌های نازک در دیواره سلولی می‌شود. با فروپاشی حباب‌ها، شوکی بر دیواره سلولی وارد شده و باعث تخریب آن و خروج روغن تا ۹۰٪ می‌گردد. این روش، با وجود کارآمدی در روغن کشی، دارای هزینه‌های زیاد و مصرف انرژی بسیاری است و تنها در مقیاس آزمایشگاهی انجام می‌شود [۱۹].

۷- تولید نهایی بیودیزل از روغن

در واحد نهایی تولید بیودیزل، روغن حاصله را با الکل هایی نظیر متانول یا اتانول و در مجاورت کاتالیزورهایی نظیر هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم ترکیب کرده و محصول نهایی متیل استر (بیودیزل) و گلیسیرین است.

۸- مزایای تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها

- رشد سریع ریزجلبک‌ها (۵ تا ۲۴ ساعت طول می‌کشد تا حجم آن‌ها ۲ برابر شود)
- میزان تولید بیودیزل زیاد
- عدم وجود سولفور در بیودیزل نسبت به دیزل نفتی
- غیر سمی بودن آن
- مصرف CO_2 تولید شده برای رشد و تکثیر مجدد

در انتها، مشخصات بیودیزل تولیدی از ریزجلبک آورده شده است و مقایسه‌ای بین این بیودیزل و انواع فسیلی و استاندارد ASTM بیودزل صورت گرفته است که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶ مقایسه خواص بیودیزل تولیدی از ریزجلبک و سوخت دیزل فسیلی و استاندارد ASTM بیودیزل [۱۹].

خواص	بیودیزل از روغن ریز جلبک	سوخت دیزل	استاندارد بیودیزل ASTM
دانسیته (kg/l)	۰/۸۶۴	۰/۸۳۸	۰/۹ — ۰/۸۶
ویسکوزیته (mm²/s, cSt at 40°C)	۵/۲	۴/۱ — ۱/۹	۵/۰ — ۳/۵
نقطه اشتعال (°C)	۱۱۵	۷۵	کمینه ۱۰۰
نقطه انجماد (°C)	-۱۲	۵۰- تا ۱۰	-
نقطه ابری شدن (°C)	-۱۱	-۳ (بیشینه -۶/۷)	بیشینه تابستان ۰ بیشینه زمستان -۱۵
محتوای اسیدی (MJ/kg)	۰/۳۷۴	بیشینه ۰/۵	کمینه ۰/۵
ارزش حرارتی (MJ/kg)	۴۱	۴۵ - ۴۰	-
H/C ratio	۱/۸۱	۱/۸۱	-

۹- نتیجه گیری

ارزیابی تولید بیودیزل از ریزجلبک از اهمیت قابل توجهی برخوردار است و باعث می‌شود برنامه‌های عملیاتی مناسبی برای بهره برداری از این منبع صورت پذیرد و اجرا گردد. در این تحقیق انواع ریزجلبک‌ها مورد توجه قرار گرفته و همچنین روش‌های متعددی برای تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات نشان دهنده این موضوع است که تولید بیودیزل از جلبک‌ها در مقایسه با نسل های پیشین و منابع دیگر به علت دارا بودن درصد روغنی بالا در ساختارشان دارای بازدهی بالا هستند. همچنین بر اساس بررسی مزایا و معایب استفاده از انواع سوخت جایگزین و بررسی اقتصادی تولید سوخت زیستی از منابع مختلف، پایین بودن هزینه تولید بیودیزل از جلبک‌ها مشخص شد. لذا می‌توان از این منابع ارزشمند در تولید بیودیزل بیشتر بهره جست. محتوای روغن ریزجلبک‌ها نسبت به سایر فراورده‌های گیاهی-روغنی، بیشتر است و همچنین بیودیزل‌های تولیدی از

1. Solvent liquid
2. Super critical
3. Ultra sound technology

ریزجلبک‌ها مطابق استانداردهای ASTM بیودیزل است. در نهایت لازم به ذکر است که تولید سوخت‌های نسل سوم باعث کاهش تولید مواد غذایی نمی‌شود و هم‌چنین نیازی به زمین‌های کشاورزی قابل کشت، آب شیرین و کود ندارند. تولید جلبک با نرخ رشد بالا به منظور تولید سوخت، هنوز در مقیاس تجاری، جایگاه خود را نیافته است اما مطالعات امکان‌سنجی برای دستیابی به عملکرد بالا صورت گرفته است و به زودی تحولات قابل توجهی در مقیاس بالا رخ خواهد داد. بررسی‌های دقیق اقتصادی با توجه به شرایط و موقعیت و منابع موجود و آینده کشور و مقایسه‌های دقیق عملکرد و هزینه‌ها و اثرات سوخت‌های جلبکی و غیرجلبکی به نسبت سوخت‌های فسیلی از جمله مواردی است که باید در آینده مورد توجه خاص قرار بگیرد.

۱۰- مراجع

[1] S. F.Han, W.B. Jin, R. J.Tu, W. M.Wu, Biofuel production from microalgae as feedstock: current status and potential. *Critical reviews in biotechnology*, Vol. 35, No. 2, pp. 255-268, 2015.

[2] K. Dutta, A. Daverey, J. G. Lin, Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation, *Renewable energy*, Vol. 69, No. 1, pp.114-122, 2014.

[3] M. Olaizola, Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace, *Biomolecular Engineering*, Vol. 20, No. 4-6, pp. 459-466, 2003.

[4] A. Aslam, S. R. Thomas-Hall, T. Mughal, Q. U.Zaman, N. Ehsan, S. Javied, P. M.Schenk, Heavy metal bioremediation of coal-fired flue gas using microalgae under different CO_2 concentrations, *Journal of environmental management*, Vol. 241, No. 1, pp. 243-250, 2019.

[5] Z. M.Xu, Z. Wang, Q. Gao, L. L.Wang, L. L.Chen, Q. G.Li, P. Yang, Influence of irrigation with microalgae-treated biogas slurry on agronomic trait, nutritional quality, oxidation resistance, and nitrate and heavy metal residues in Chinese cabbage, *Journal of environmental management*, Vol. 244, No. 1, pp. 453-461, 2019.

[6] R. Harun, M. Singh, G. M.Forde, M. K.Danquah, Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 3, pp. 1037-1047, 2010.

[7] C. Cavinato, A. Ugurlu, I.de Godos, E. Kendir, C. Gonzalez-Fernandez, Biogas production from microalgae, *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*, pp. 155-182, 2017.

[8] O. Córdova, J. Santis, G. Ruiz-Fillipi, M. E.Zuñiga, F. G.Fermoso, R. Chamy, Microalgae digestive pretreatment for increasing biogas production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, No. 1, pp. 2806-2813, 2018.

[9] H. M.Kim, C. H.Oh, H. J.Bae, Comparison of red microalgae (Porphyridium cruentum) culture conditions for bioethanol production, *Bioresource technology*, Vol. 233, No. 1, pp. 44-50, 2017.

[10] R. Sivaramakrishnan, A. Incharoensakdi, Utilization of microalgae feedstock for concomitant production of bioethanol and biodiesel, *Fuel*, Vol. 217, No. 1, pp. 458-466, 2018.

[11] T. M.Mata, A. A.Martins, N. S.Caetano, Microalgae for biodiesel production and other applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, pp. 217-232, 2010.

[12] R. Davis, A. Aden, P. T.Pienkos, Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 10, pp. 3524-31, 2011.

[13] R. Pate, G. Klise, B. Wu, Resource demand implications for US algae biofuels production scale-up, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 10, pp. 3377-3388, 2011.

[14] M. Mubarak, A. Shaija, T. V.Suchithra, Flocculation: An effective way to harvest microalgae for biodiesel production, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 2213-3437, 2019.

[15] M. Mofijur, M. G.Rasul, N. M. S.Hassan, M. N.Nabi, Recent development in the production of third generation biodiesel from microalgae, *Energy Procedia*, Vol. 156, No. 1, pp. 53-58, 2019.

[16] C. Y.Chen, K. L.Yeh, R. Aisyah, D. J.Lee, J. S.Chang, Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review, *Bioresource Technology*, Vol. 102, No. 1, pp. 71-81, 2011.

[17] J. A. V.Costa, M. G.de Morais, The role of biochemical engineering in the production of biofuels from microalgae, *Bioresource Technology*, Vol. 102, No. 1, pp. 2-9, 2011.

[18] Y. Chisti, Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*, Vol. 25, No. 3, pp. 294-306, 2007.

[19] P. Schenk et al, Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production, *BioEnergy Research*, pp. 20-43, 2008.