

مقاله علمی - پژوهشی

بررسی تولید سوخت زیستی از ریز جلبک *اسپیرولینا* تحت فرآیند مایع‌سازی هیدروترومال

نسیم حبیبی^۱، مرتضی الماسی^{۲*} و حسین باخدا^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ استاد؛ و استادیار گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۵

چکیده

در میان انواع مختلف زیست‌توده، مزایای ذاتی ریزجلبک‌ها باعث شده است تا آنها به منبعی سودمند برای تولید سوخت زیستی تبدیل شوند. فرآیند مایع‌سازی هیدروترومال یکی از فرآیندهای ترموشیمیایی است که به دلیل داشتن مزایایی همچون تولید محصولات با ارزش و مصرف پایین انرژی توجه محققان را به خود جلب کرده است. هدف از این مقاله، بررسی تولید سوخت زیستی از ریزجلبک *اسپیرولینا* به کمک فرآیند مایع‌سازی هیدروترومال در محیط آب زیر بحرانی به صورت آزمایشگاهی و ناپیوسته است. نتایج آنالیز دقیق عنصری سوخت زیستی نشان داد که مقدار کربن، هیدروژن، گوگرد و نیتروژن سوخت زیستی خام به ترتیب برابر با ۶۸/۲۷، ۱۵/۵۶، ۳/۰۸ و ۰/۳۸ درصد است. علاوه بر این، ترکیبات سوخت زیستی تولید شده توسط آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز بررسی شد که نتایج آن تأییدکننده تولید سوخت پاک نسبت به سوخت‌های فسیلی است. در نتیجه می‌توان گفت که فرآیند مایع‌سازی هیدروترومال فرآیندی نویدبخش برای تبدیل ریزجلبک‌ها به سوخت زیستی می‌باشد و به تأثیر بیش‌تیمار روی بهبود تولید سوخت نیز تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی

آنالیز عنصری، آنالیز طیف‌سنجی، زیست سوخت، پیش تیمار، فرآیند هیدروترومال

مقدمه

زیست‌توده به خوبی شناخته شده است (Milledge & Heaven, 2014). انتخاب ریزجلبک‌ها به عنوان ماده خام اولیه اصلی برای تولید سوخت امتیازات بسیار زیادی به همراه دارد. نویدبخش‌ترین خصوصیت جلبک‌ها نرخ رشد بالا، قابلیت انباشت مقادیر بالای لیپید (از ۱۰٪ تا ۸۰٪ وزن خشک)، کارایی فتوسنتزی بالا و انعطاف‌پذیری در شیوه‌های کشت مختلف است که از نیاز آبی ناچیز و امکان استفاده از فاضلاب‌ها برای رشد آنها ناشی می‌شود (Galadima & Muraza, 2018). انواع زیادی از ریزجلبک‌ها از جمله گونه‌های *لرلا*^۱

روند کاهش سریع منابع سوخت‌های فسیلی و خطرات گازهای گلخانه‌ای در محیط زیست باعث شده است که انرژی به نگرانی عمده دانشمندان شود (Sahebi *et al.*, 2013). زیست‌توده می‌تواند به عنوان جانشین سوخت‌های فسیلی در نظر گرفته شود. با استفاده از فرایندهای مختلفی می‌توان زیست‌توده را به سوخت‌های زیستی تبدیل نمود (Gollakota *et al.*, 2018).

پتانسیل ریزجلبک‌ها به عنوان منبع روغن‌زیستی مایع و گازی نسبت به سایر مواد

میزان مصرف انرژی در فرآیند مایع‌سازی هیدروترمال تنها ۱۲ درصد انرژی مورد نیاز برای حذف کامل آب در دیگر فرآیندهای ترموشیمیایی گزارش شده است. تولید سوخت زیستی از طریق فرایند مایع‌سازی هیدروترمال زیست‌توده به مقدار زیادی آب نیاز دارد. امروزه در سراسر جهان معمولاً از آب شیرین در این فرایند استفاده می‌شود. محققان در حال بررسی هستند تا از آب دریا، به جای آب شیرین، استفاده کنند. برای نمونه در تحقیقی نشان داده شد که با استفاده از غلظت‌های متفاوت NaCl در فرآیند مایع‌سازی هیدروترمال یک گونه ریزجلبک (کلرلا) از نظر عملکرد و کیفیت سوخت زیستی تأثیری ایجاد نشد (Yang et al., 2020). در تحقیقی دیگر در دمای ۲۷۰ درجه سلسیوس، استفاده از آب دریا در فرایند مایع‌سازی هیدروترمال خاک اره، در مقایسه با استفاده از آب شیرین، منجر به کاهش آشکار تولید سوخت زیستی شد (Yang et al., 2022).

مزیت دیگر مایع‌سازی هیدروترمال این است که سوخت زیستی نه تنها از لپیدها بلکه از کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها حاصل می‌شود که بازده کلی محصول را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، در فرآیند مایع‌سازی هیدروترمال، آب به طور هم‌زمان به عنوان واکنش‌دهنده و کاتالیزر عمل می‌کند و از این رو تفاوت چشمگیری نسبت به پیرولیز دارد (Jena, 2011).

فرآیند مایع‌سازی هیدروترمال معمولاً در دمای واکنش بین ۲۰۰ تا ۳۷۰ درجه سلسیوس و در فشار ۱۰ تا ۲۵ مگاپاسکال در محیطی مایع در راکتور پیش می‌رود (Ross et al., 2010). سوخت زیستی خام محصول اصلی اجرای فرآیند مایع‌سازی

(Gai et al., 2014)، گونه‌های *دونالیلا*^۱ (Reddy et al., 2013)، گونه‌های *نانوکلوریس*^۲ (Sudasinghe et al., 2014) و گونه‌های شیزوکتیریوم^۳ (Bi et al., 2015) برای تولید سوخت به کار گرفته شده‌اند. در این میان، ریزجلبک *اسپیرولینا*^۴ یکی از امیدوارکننده‌ترین منابع سوخت‌های زیستی تجدیدپذیر است (Raslavičius et al., 2014). مزایای ریزجلبک *اسپیرولینا* شامل فناوری‌های نسبتاً ساده و ارزان برای کشت و برداشت آن و عدم قابلیت ترکیب بیوشیمیایی است (یعنی پاسخ قابل پیش‌بینی به تغییرات در محیط خارجی است) (Chernova et al., 2017). بهره‌وری ریزجلبک *اسپیرولینا* و مقدار لپید آن ۱۰ برابر بیشتر از بهره‌وری دیگر زیست‌توده‌های خاکی است (Chernova & Kiseleva, 2014).

یکی از مشکلات تولید سوخت زیستی از ریزجلبک‌ها، مقدار رطوبت بسیار بالا، حدود ۸۰ درصد، آنهاست (Vlaskin et al., 2017). با توجه به این امر، روش‌های ترموشیمیایی قدیمی، مانند پیرولیز و تبدیل گازی از نظر اقتصادی باصرفه نیستند. از این رو، فرآیندهای ترموشیمیایی برای زیست‌توده مرطوب از جمله مایع‌سازی هیدروترمال^۵ برای تبدیل ریزجلبک‌ها به سوخت زیستی به دلیل حذف مرحله خشک کردن به صورت گسترده به کار رفته است (Barreiro et al., 2013; Chen et al., 2014; Gai et al., 2014; Sudasinghe et al., 2014; Vlaskin et al., 2017). از دلایل برتری فرایند مایع‌سازی هیدروترمال، در مقایسه با دیگر فرایندها، می‌توان به ارزش بالای محصولات و پایین بودن مصرف انرژی اشاره کرد.

1- *Dunaliella*3- *Schizochytrium*

5- Hydrothermal Liquefaction

2- *Nannochloris*4- *Spirulina*

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، از ریزجلبک *اسپیروولینا* به عنوان منبع زیست‌توده استفاده شده است. فرآیندهای پیش‌تیمار و مایع‌سازی هیدروترومال زیست‌توده ریزجلبک *اسپیروولینا*، هر دو، در راکتور همزن دار به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر با دما-فشار بالا دنبال شد.

در مرحله پیش‌تیمار، ۲۵۰ میلی‌لیتر نمونه متشکل از ۲۰ درصد ریزجلبک *اسپیروولینا* بر اساس وزن خشک با آب مقطر مخلوط شد. مخزن راکتور کاملاً مسدود شد و تا دمای مورد نظر، ۱۰۰ درجه سلسیوس، حرارت داده شد. پس از ۲۰ دقیقه، گرم‌کننده خاموش و زمان ماند روی ۶۰ دقیقه تنظیم شد. در انتهای زمان مورد نظر برای اجرای واکنش، راکتور تا دمای محیط سرد شد. محصول نیز سرد شد تا در مرحله بعدی از فرآیند مایع‌سازی هیدروترومال متوالی استفاده شود.

در فرآیند مایع‌سازی هیدروترومال، ۹۰ میلی‌لیتر از محلول جلبک پیش‌تیمار شده با ۶۰ میلی‌لیتر آب مقطر رقیق شد. این مخلوط ۱۵۰ میلی‌لیتری وارد راکتور شد. فرآیند مایع‌سازی هیدروترومال در دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه پی‌گرفته شد. در انتهای این فرآیند، راکتور تا رسیدن به دمای محیط سرد شد. پس از سرد شدن، محصول با استفاده از n -هگزان به عنوان حلال به قیف جداکننده انتقال یافت. بیست میلی‌لیتر از سوپسترا با همین مقدار از n -هگزان در قیف جداکننده مخلوط و به منظور جداسازی بهتر لایه‌های آلی و آبی به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه همزن قرار داده شد. مخلوط به مدت ۱۲ ساعت به صورت ثابت نگهداری شد، فازهای روغنی و آبی از یکدیگر جدا و به دو ظرف مختلف

هیدروترومال روی ریزجلبک‌هاست و در کنار آن محصولات جانبی جامد، مایع و گازی نیز حاصل می‌شوند. این نوع سوخت اندکی گوگرد دارد که باعث می‌شود در هنگام احتراق مواد آلاینده کمتری در محیط منتشر کند و بنابراین به دلیل تولید خاکستر کمتر، پراکنش ذرات آلاینده را کاهش می‌دهد. همچنین، مقدار NO_x تولیدی کمتر از NO_x سوخت دیزل در توربین نیروگاه‌هاست. علاوه بر این، در مقایسه با دیگر سوخت‌های تولیدی از مواد زیست‌توده، این ماده به راحتی قابل انتقال و جابه‌جایی، پمپاژ و ذخیره‌سازی است (Barreiro *et al.*, 2013). از محصولات جانبی فرآیند مایع‌سازی هیدروترومال می‌توان به کود جامد و نیز آب فرآوری شده اشاره کرد که می‌تواند به منظور مصرف در چرخه عناصر مغذی به‌منظور تولید مجدد توده‌های رشدیافته جلبکی تصفیه شود (Chen *et al.*, 2014).

راحتی کشت ریزجلبک *اسپیروولینا* در آب‌های شور و آلوده و سرعت رشد آن در صورت وجود این نوع آب‌ها و شرایط گرمسیری دلیل اصلی انتخاب این ریزجلبک برای این مطالعه بود. همچنین، در کشور ما با توجه به شرایط تولید این نوع جلبک تعداد تولیدکنندگان این نوع جلبک افزایش یافته است و از این نوع جلبک در صنایع غذایی و آرایشی بسیار استفاده می‌شود؛ از این رو با توجه به حجم بالای تولید، در مقایسه با دیگر گونه‌ها، و دردسترس بودن این نوع جلبک در این تحقیق از آن استفاده شده است. هدف از این تحقیق، تولید سوخت زیستی از ریزجلبک *اسپیروولینا* به کمک آب زیربحرانی^۱ طی دو مرحله پیش‌تیمار و مایع‌سازی هیدروترومال است.

روغن زیستی خام مشتق از محصول مایع‌سازی هیدروترمال آنالیز شد. ساختار و گروه‌های فعال موجود در روغن با طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز مورد آنالیز قرار گرفت. فرمول شیمیایی روغن خام از طریق کروماتوگرافی گازی-اسپکترومتری جرمی نیز مشخص شد.

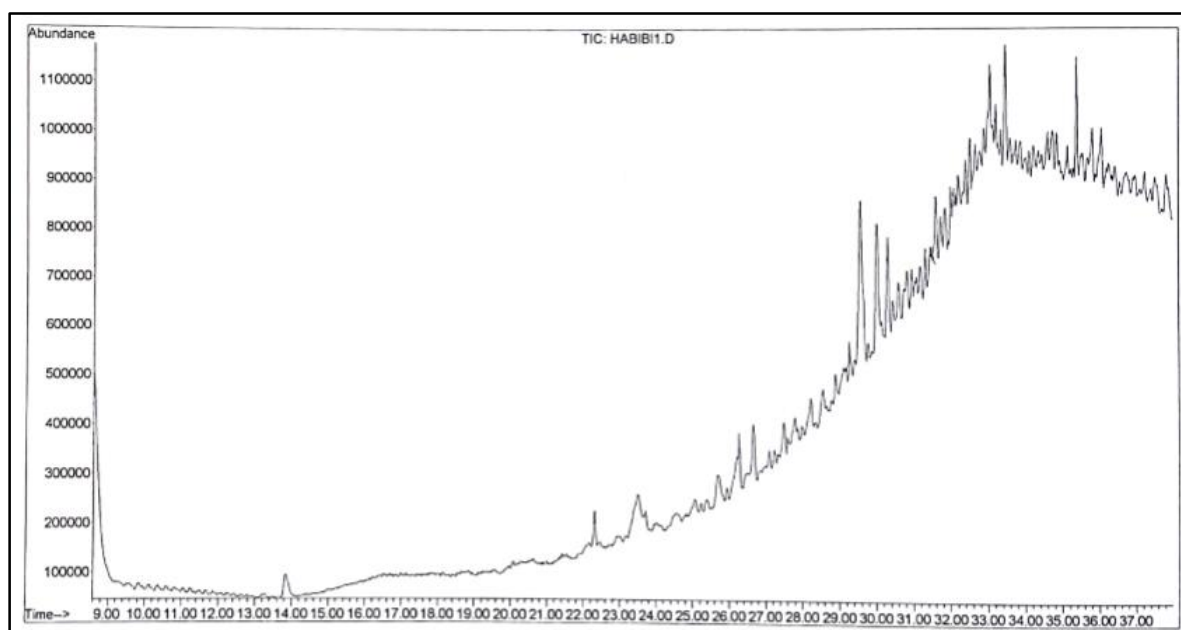
نتایج و بحث

آنالیز کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی روی ریزجلبک‌های پیش‌تیمار نشده در شکل ۱ ارائه شده است. دلایل این کار را می‌توان به فقدان کاتالیزور و نوع زیست‌توده اولیه نسبت داد که در اصل از هیدروکربن‌های سنگین موجود در ماده خام اولیه ناشی می‌شوند.

منتقل شدند.

به منظور جداسازی حلال از روغن به دست آمده، ابتدا مواد با استفاده از دستگاه تبخیرکننده چرخشی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس تحت شرایط خلأ قرار گرفت، پس از آن به مدت ۱۰ دقیقه به دستگاه سانتریفوژ انتقال داده شد و سرانجام با استفاده از فیلتر سرنگ PTFE (۰/۴۵ میکرومتر) صاف شد.

اندازه‌گیری خصوصیات سوخت زیستی نیاز به مقدار قابل‌توجهی از روغن حاصل از منبع تولید لپید و تجهیزات تخصصی برای استخراج آن دارد (Nasirian, 2016)، از این رو آنالیزهای متعددی در جهت تجزیه و شناخت مواد تشکیل‌دهنده سوخت زیستی تولید شده صورت گرفت. فرمول عنصری



شکل ۱- آنالیز کروماتوگرافی گازی- اسپکترومتری جرمی روی ریزجلبک‌های پیش‌تیمار نشده
 Fig. 1- Gas Chromatography mass spectrometry analysis on untreated microalgae

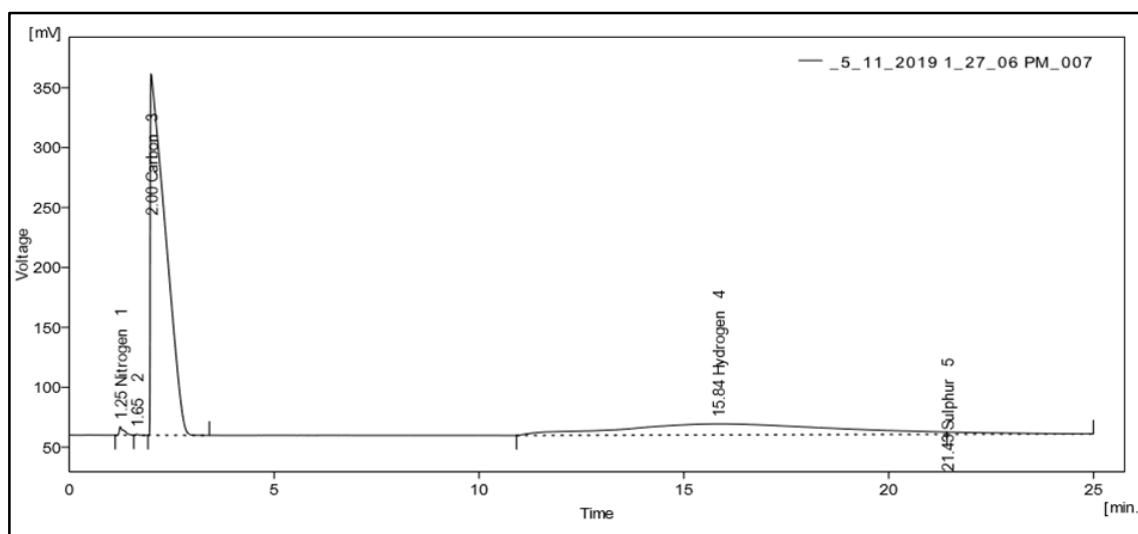
هیدرولیز اولیه ریز جلبک‌ها برخی بخش‌های پروتئینی می‌توانند به ترکیبات N مثل آمین‌ها و اسید آمینه تجزیه شوند، این فرایند از طریق واکنش‌های دکربوکسیلاسیون و دامیناسیون صورت می‌گیرد، و به کاهش بیشتر مقدار نیتروژن در سوخت زیستی منجر می‌شود. در مورد مقدار کربن نیز یافته‌های حاضر با گزارش‌های پیشین مطابقت دارند و همگی مقدار کربن سوخت زیستی را ۶۶-۷۸ درصد وزنی/وزنی اعلام می‌کنند و سایر مقادیر نیز با مقادیر یافت شده در این تحقیق مشابهت دارند (Eboibi *et al.*, 2014).

نتایج آنالیز دقیق عنصری سوخت زیستی خام در جدول ۱ و شکل ۲ نمایش داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار کربن، هیدرژن، گوگرد و نیتروژن روغن زیستی خام به ترتیب برابر با ۶۸/۲۷، ۱۵/۵۶، ۳/۰۸ و ۰/۳۸ درصد است. این یافته تأیید می‌کند که از مایع‌سازی هیدروترمال جلبک‌های پیش‌تیمار شده مقدار نیتروژن پایینی در روغن زیستی خام حاصل می‌شود. نتایج به دست آمده با مشاهدات دیگر محققان (Eboibi *et al.*, 2014; Haider *et al.*, 2018; Wei & Jie, 2018) همخوانی دارد که نشان می‌دهد در

جدول ۱- آنالیز عنصری محصول مایع‌سازی هیدروترمال

Table 1- Hydrothermal liquefaction elemental analysis

نسبت پاسخ کربن Carbon Response ration	نوع قله Peak type	وزن (درصد) Weight (%)	وزن (میلی گرم) Weight (mg)	پاسخ Response	زمان ماند (دقیقه) Time Remained (min)	عنصر Element
0.007	Ordnr	0.38	0.031	56.086	1.247	نیتروژن Nitrogen
1.000	Ordnr	68.27	5.605	7710.345	1.997	کربن Carbon
0.437	Ordnr	15.56	1.278	3368.141	15.837	هیدرژن hydrogen
0.022	Ordnr	3.08	0.253	168.308	21.427	سولفور Sulfur
		87.29	8.210		Total	

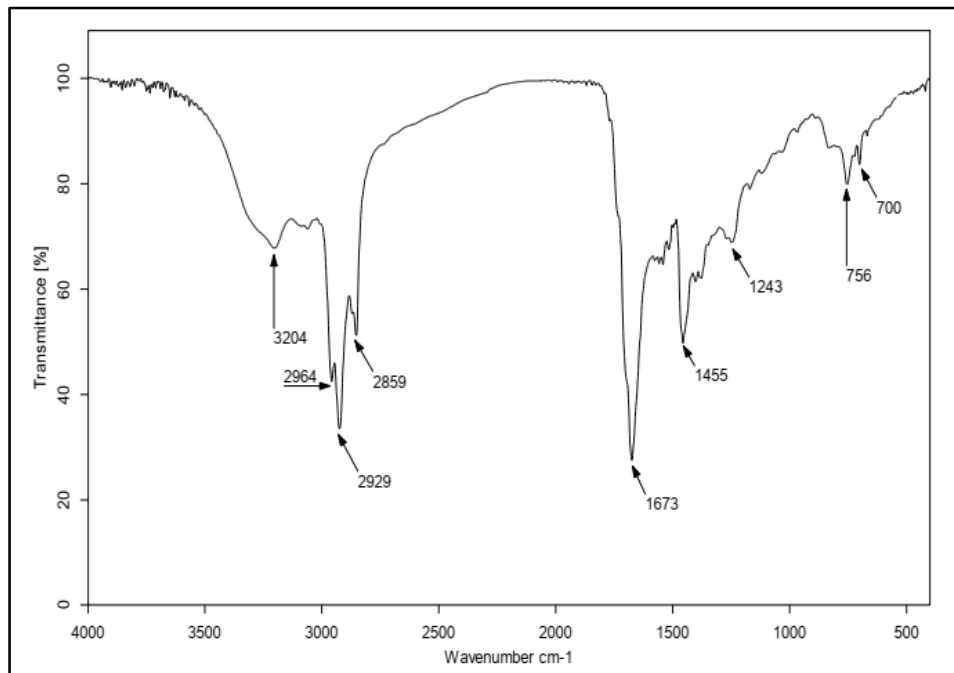


شکل ۲- قله‌های آنالیز عنصری
Fig. 2- Peaks of elemental analysis

عنصری و GC-MS نیز قابل تأیید است. طول موج 1243 cm^{-1} بیانگر پیوند N-H است و طول موج 1244 cm^{-1} پیوند C-N را نشان می‌دهد. وجود کربوهیدرات‌ها و لیپیدها سبب حضور پیوندها با ارتعاشی کششی $\text{C}=\text{O}$ ($1730-1700 \text{ cm}^{-1}$)، $\text{C}-\text{O}$ ($1320-1210 \text{ cm}^{-1}$) و $\text{C}-\text{O}$ ($1260-1000 \text{ cm}^{-1}$) در سوخت زیستی تولیدی شده است که با ترکیبات کتون، آلدهید و کربوکسیلیک اسیدهای موجود در آنالیز GC-MS مطابقت دارد. علاوه بر این، طول موج در محدوده 700 cm^{-1} نشانگر پیوند O-H است که حضور الکل و آب را در روغن زیستی تأیید می‌کند. مقایسه این پیوندها با ترکیبات سوخت‌های فسیلی و حضور کمتر ترکیبات گوگردی و نیتروژنی نشان از پاک بودن سوخت تولیدی و دوستدار محیط زیست است. در جدول ۲ گروه‌های عاملی ترکیب سوخت زیستی آورده شده است.

نتیجه طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز حاصل از محصول مایع‌سازی هیدروترمال در شکل ۳ نشان داده شده است و گروه‌های عاملی در سوخت زیستی خام را نشان می‌دهد که با آنالیز عنصری و GC-MS همخوانی دارد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، طول موج‌های محدوده 2800 تا 3000 cm^{-1} بیانگر پیوند C-H و طیف 1455 cm^{-1} نتیجه پیوند CH_2 است که نشان‌دهنده گروه‌های آلکیل در چربی‌ها و استرهای موجود در ترکیب سوخت زیستی است. این طیف‌ها همچنین مقدار بالای هیدروژن و کربن را در سوخت زیستی تولید شده در فرآیند مایع‌سازی هیدروترمال اثبات می‌کند که با نتایج آنالیز عنصری مطابقت دارد.

طیف هترو- اتم‌ها در طول موج $1150-1730 \text{ cm}^{-1}$ تأییدکننده حضور ترکیبات آمین و آمید در سوخت زیستی است. وجود این پیوندها با آنالیز



شکل ۳- طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز مربوط به محصول مایع سازی هیدروترمال حاصل از جلبک‌های پیش تیمار شده

Fig. 3- FT-IR spectra of Hydrothermal liquefaction product from pretreated algae

جدول ۲- گروه‌های عاملی ترکیب سوخت زیستی تولید شده

Table 2- Functional group of produced bio-oil

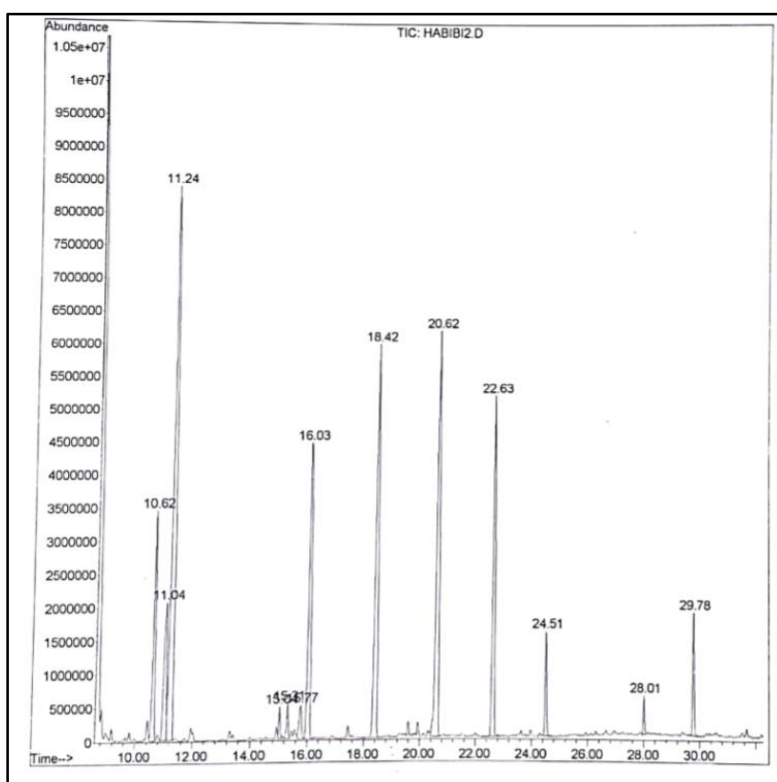
طبقه ترکیبات Class of compounds	گروه عاملی Functional group	طول موج (cm ⁻¹) Wavelength (cm ⁻¹)
آلکان‌ها	کششی C-H	3204, 2964, 2929, 2859
ترکیبات آمینی	N-H	1673
آلکن‌ها	CH ₂ خمشی	1455
پپتید	C-N کششی	1243
فنول، اتر و استرها	O-H خمشی	756, 700

تقسیم کرد. مونوآروماتیک‌ها شامل بنزن و مشتقات آن، تولوئن، فوران، فنول‌ها و مشتقات آن هستند. آلیفاتیک‌ها عموماً از آلکان‌ها و مشتقات آنها تشکیل شده‌اند، در حالی که ترکیبات اکسیژن دار شامل آلدهیدها، کتون‌ها، استرها و کربوکسیلیک اسیدها هستند. آمین‌ها و آمیدها مانند پیریدین، پیریمیدین، پیرازول در ترکیبات نیتروژن دار تقسیم‌بندی می‌شوند. سرانجام، ترکیبات آروماتیک حلقوی مانند نفتالن و ایندین با آنالیز GC-MS تعیین شده‌اند.

برای ارزیابی دقیق فرمول شیمیایی ترکیبات، آنالیز GC-MS صورت گرفت. شکل ۴ طیف آنالیز GC-MS را نشان می‌دهد. همچنین، ترکیبات مربوط به هر یک از پیک‌های موجود در نمودار در جدول ۳ آورده شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند سوخت زیستی تولید شده شامل انواع مختلفی از مواد با ساختار و وزن مولکولی متفاوت است. این ترکیبات را می‌توان به گروه‌های متفاوت مونوآروماتیک‌ها، پلی‌آروماتیک‌ها و مشتقات آنها

هگزادکانوئیک اسید که نتیجه تجزیه لیپیدهاست، از جمله ترکیبات اصلی ریزجلبک است. همچنین، وجود هیدروکربن‌ها مانند هپتادکان و مشتقات آن و ترکیبات فنولی ناشی از کربوهیدرات‌ها نیز قابل مشاهده است. به طور کلی، هیدروکربن‌های آروماتیک به دلیل افزایش عدد اکتان در سوخت‌ها مورد توجه هستند که در نمونه‌های مورد آزمایش نیز پیک‌های قابل قبولی داشته‌اند.

سوخت زیستی تولید شده از ریزجلبک *اسپیروولینا* به دلیل مقدار بالای پروتئین در این ریزجلبک حاوی درصد بالایی از ترکیبات نیتروژن‌دار است که مشابه با نتایج مطالعات قبلی است (Biller, 2013). در جدول ۳ ترکیبات حلقوی آروماتیک نیتروژن‌دار و ترکیبات متنوعی از آمید و آمین‌ها قابل مشاهده است که نتیجه تجزیه پروتئین موجود در ریزجلبک‌اند. اسیدهای چرب غیراشباع مانند



شکل ۴- کروماتوگرافی گازی و اسپکترومتری جرمی روغن حاصل از فرآیند مایع‌سازی هیدروترمال

Fig. 4- Gas Chromatography and mass spectrometry of oil from Hydrothermal liquefaction process

جدول ۳- ترکیب شیمیایی محصول مایع سازی هیدروترمال به دست آمده از جلبک پیش تیمار شده بر اساس گزارش حاصل از GC-MS

Table 2- The chemical composition of Hydrothermal liquefaction product obtained from the pretreated algae that is reposed from GC-MS

شماره	ترکیب	درصد (%)
No.	Compound	Area (%)
1	3-methyl-Heptane	6.52
2	1-octane	20.36
3	5-methyl-decane	0.70
4	Cyclopentane, 1-ethyl-3-methyl-, (1R, 3R)-rel-	5.64
5	1-Hexyl-3-methylcyclopentane	1.29
6	Decane	11.27
7	Undecane	15.88
8	Dodecane	15.01
9	Tridecane	11.37
10	Tetradecane	2.39
11	Hexadecanoic acid	0.74
12	Heptadecane	2.94
13	3-methylnonane	0.86
14	2,5-Piperazinedione, 3,6-bis(2-methylpropyl)-	3.01
15	Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione,hexahydro-3-(2methylpropyl)-	2.56

نتیجه گیری

مشکل، فرآیند ترموشیمیایی مایع سازی هیدروترمال به کار گرفته می شود. هدف از این مطالعه، تولید سوخت زیستی از ریزجلبک اسپرولینا توسط فرآیند مایع سازی هیدروترمال بود. نتایج آنالیز دقیق عنصری روغن زیستی خام نشان داد که مقدار کربن، هیدروژن، گوگرد و نیتروژن روغن زیستی خام به ترتیب برابر با ۶۸/۲۷، ۱۵/۵۶، ۳/۰۸ و ۰/۳۸ درصد است. همچنین، با توجه به نتیجه طیفسنجی تبدیل فوریه مادون قرمز و تعیین گروه های عاملی، مشخص شد که سوخت زیستی دارای ترکیبات آلکان، آلدهید، کتون، الکل و آب است.

تغییر جهانی آب و هوا ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای از یک سو و کاهش ذخایر نفت از سوی دیگر، باعث شده است تا موضوع انرژی به مهم ترین مشکل جهان تبدیل شود. تبدیل زیست توده به سوخت های زیستی پتانسیل جبران این مشکل را دارد. ریزجلبک ها، زیست توده ای بالقوه برای تولید سوخت های زیستی پایدار، توجه محققان را به خود جلب کرده اند. مقدار رطوبت بالای ریزجلبک ها باعث شده است تا روش های ترموشیمیایی قدیمی از جمله پیرولیز و تبدیل گازی کارایی خود را از دست بدهند. برای رفع این

مراجع

- Barreiro, D. L., Prins, W., Ronsse, F., & Brilman, W. (2013). Hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae for biofuel production: state of the art review and future prospects. *Biomass and Bioenergy*, 53, 113-127.
- Bi, Z., He, B. B., and McDonald, A. G. (۲۰۱۵). Biodiesel production from green microalgae *Schizochytrium limacinum* via in situ transesterification. *Energy & Fuels*, 29, 5018-5027.
- Billar, P. (2013). *Hydrothermal processing of microalgae*. University of Leeds.

- Chen, W.-T., Zhang, Y., Zhang, J., Yu, G., Schideman, L. C., Zhang, P., & Minarick, M. (2014). Hydrothermal liquefaction of mixed-culture algal biomass from wastewater treatment system into bio-crude oil. *Bioresource technology*, 152, 130-139.
- Chernova, N., & Kiseleva, S. (2014). Efficiency of the biodiesel production from microalgae. *Thermal Engineering*, 61, 399-405.
- Chernova, N. I., Kiseleva, S. V., Vlaskin, M. S., & Rafikova, Y. Y. (2017). Renewable energy technologies: enlargement of biofuels list and co-products from microalgae. Proceedings of the 21st Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference – IManE&E, May 24-27, Iasi, Romania.
- Eboibi, B. E.-O., Lewis, D. M., Ashman, P. J., & Chinnasamy, S. (2014). Hydrothermal liquefaction of microalgae for biocrude production: Improving the biocrude properties with vacuum distillation. *Bioresource technology*, 174, 212-221.
- Gai, C., Zhang, Y., Chen, W. T., Zhang, P., & Dong, Y. (2014). Energy and nutrient recovery efficiencies in biocrude oil produced via hydrothermal liquefaction of *Chlorella pyrenoidosa*. *RSC Advances*, 4, 16958-16967.
- Galadima, A., & Muraza, O. (2018). Hydrothermal liquefaction of algae and bio-oil upgrading into liquid fuels: Role of heterogeneous catalysts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1037-1048.
- Gollakota, A., Kishore, N., & Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1378-1392.
- Haider, M. S., Castello, D., Michalski, K. M., Pedersen, T. H., & Rosendahl, L. A. (2018). Catalytic hydrotreatment of microalgae biocrude from continuous hydrothermal liquefaction: Heteroatom removal and their distribution in distillation cuts. *Energies*, 11, 3360.
- Jena, U. (2011). Thermochemical conversion of microalgal biomass for production of biofuels and co-products, University of Georgia.
- Milledge, J. J., and Heaven, S. (2014). Methods of energy extraction from microalgal biomass: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 13, 301-320.
- Nasirian, N. (2016). Discontinuous lipid production using the lipid-producing yeast *Rhodospiridium diobovatum* and calculating the physical properties of produced biodiesel using fatty acid profiles. *Agricultural Engineering*, 40, 155-168. (in Persian)
- Raslavičius, L., Semenov, V. G., Chernova, N. I., Keršys, A., & Kopeyka, A. K. (2014). Producing transportation fuels from algae: In search of synergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 133-142.
- Reddy, H. K., Muppaneni, T., Rastegary, J., Shirazi, S. A., Ghassemi, A., & Deng, S. (2013). ASI: Hydrothermal extraction and characterization of bio-crude oils from wet *Chlorella sorokiniana* and *Dunaliella tertiolecta*. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 32, 910-915.
- Ross, A., Biller, P., Kubacki, M., Li, H., Lea-Langton, A., & Jones, J. (2010). Hydrothermal processing of microalgae using alkali and organic acids. *Fuel*, 89, 2234-2243.
- Sahebi, Y., Almassi, M., Sheikhdavoodi, M., & Bahrami, H. (2013). Feasibility study for replacement of renewable sources of energy, in selected segments fars province. *Middle East Journal of Scientific Research*, 13, 1119-1125.

- Sudasinghe, N., Dungan, B., Lammers, P., Albrecht, K., Elliott, D., Hallen, R., & Schaub, T. (2014). High resolution FT-ICR mass spectral analysis of bio-oil and residual water soluble organics produced by hydrothermal liquefaction of the marine microalga *Nannochloropsis salina*. *Fuel*, *119*, 47-56.
- Vlaskin, M., Chernova, N., Kiseleva, S., & Zhuk, A. (2017). Hydrothermal liquefaction of microalgae to produce biofuels: state of the art and future prospects. *Thermal Engineering*, *64*, 627-636.
- Wei, X., & Jie, D. (2018). Optimization to hydrothermal liquefaction of low lipid content microalgae *spirulina* sp. using response surface methodology. *Journal of Chemistry*, *2018*(1):1-9
- Yang, J., Chen, H., Liu, Q., Zhou, N., Wu, Y., & He., Q. (2020). Is it feasible to replace freshwater by seawater in hydrothermal liquefaction of biomass for biocrude production? *Fuel*, *282*, 118870.
- Yang, J., Nasirian, N., Chen, H., Niu, H., & He, Q. (2022). Hydrothermal liquefaction of sawdust in seawater and comparison between sodium chloride and sodium carbonate. *Fuel*, *308*(7), 122059.

Investigating Biofuel Production from Microalgae Biomass (*Spirulina*) using Hydrothermal Liquefaction Process (HTL)

N. Habibi, M. Almassi* and H. Bakhoda

*Corresponding Author: Professor of Agricultural Systems Engineering Department, Science and Research Unit of Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: morteza.almassi@gmail.com

Received: 28 February 2021, Accepted: 27 July 2022

[http://doi: 10.22092/AMSR.2022.353787.1380](http://doi:10.22092/AMSR.2022.353787.1380)

Abstract

Among different types of biomass, the inherent advantages of microalgae have made them a useful source for biofuel production. The hydrothermal liquefaction process is one of the thermochemical processes that has attracted the attention of researchers due to its advantages such as the production of valuable products and low energy consumption. The aim of this article is to investigate the production of biofuel from *spirulina* microalgae using the hydrothermal liquefaction process in a subcritical water environment in a laboratory and discontinuous manner. The results of detailed elemental analysis of biofuel showed that the amount of carbon, hydrogen, sulfur and nitrogen of raw biofuel is equal to 68.27, 15.56, 3.08 and 0.38 percent, respectively. In addition, the produced biofuel compounds were analyzed by infrared Fourier transform spectroscopic analysis, the results of which confirm the production of clean fuel compared to fossil fuels.

Keywords: Biofuel, Elemental Analysis, -FT-IR Spectra, Hydrothermal Process Pretreatment



© 2022 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)