Journal of Research in Environmental Health
Volume10, Issue1, Spring 2024

Application of Cyanobacteria in the Production of Degradable Products

Bahareh Nowruzi
*Professor Associate, Department of Biotechnology, Faculty of Converging Sciences and Technologies, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.
(Corresponding Author)
bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir

Received: 2023/09/13
Accepted: 2024/01/18
Doi: 10.22038/jreh.2024.24340

Abstract

Background and Purpose: The manufacturing process of petroleum-derived goods poses a significant environmental hazard, with the emission of toxic compounds like greenhouse gases posing risks to humans, flora, and fauna. Notably, cyanobacteria emerge as crucial entities due to their potential as sources for degradable plastics and biofuels. Cyanobacteria can harness and assimilate atmospheric nitrogen and carbon dioxide, utilizing them for growth even in inhospitable environments such as barren soils and saline waters. This adaptability renders them promising candidates for producing biodegradable plastics and biofuels. Nevertheless, the full spectrum of their capabilities remains incompletely understood. Hence, this review aims to explore the potential of cyanobacteria in producing degradable plastics, along with strategies for enhancing their production and subsequent commercialization.

Materials and Methods: This review synthesized relevant articles published between 2020 and 2023 from databases including Springer, ScienceDirect, Scopus, and John Wiley to procure the latest insights into the cyanobacteria's potential in degradable product synthesis. Employing appropriate keywords from the MeSH site, we identified thirty new review and research articles pertinent to the subject matter.

Results: Analysis revealed that cyanobacteria exhibit variable capacities for polyhydroxybutyrate production, with the highest (77%) and lowest (less than 0.005%) yields observed in Alusira fertilisima CCC444 and Anabaena cylindric, respectively. Moreover, genetic manipulations have yielded promising results, with PHB biosynthesis increasing by up to 35% in the cyanobacterium Synechocystis sp. Cyanobacterial strains like Synechocystis consortia, *Spirulina platensis*, *Anabaena circinalis*, and *Nostoc muscorum* exhibit metabolic traits conducive to the economical and sustainable production of biopolymers such as polyhydroxyalkanoates and PHB, among other copolymers.

Conclusion: Augmenting culture mediums with supplements like carbonyl cyanide m-chlorophenylhydrazone, dicyclohexyl carbodiimide, monofluoroacetate, L-methionine-DL-sulfoximine, and azaserine has been shown to enhance PHB production by nearly 20%. Furthermore, the natural synthesis of plastics from biodegradable sources mitigates reliance on fossil fuels, rendering the process environmentally sustainable. However, the commercialization of degradable products derived from cyanobacteria faces challenges due to the comparatively lower volume of biological products and their reduced accumulation compared to heterotrophic bacteria.

Keywords: Cyanobacteria, Polyhydroxyalkanoates, Bioplastics, Environmental Health

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Citation: Nowruzi B. Application of Cyanobacteria in the Production of Degradable Products. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Spring 2024; 10(1):110-124.

کاربرد سیانوباکتری‌ها در تولید محصولات تجزیه‌پذیر

بهاره نوروزی
* دانشیار، گروه بیوتکنولوژی، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاداسلامی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)
bahareh.nowruzi@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸

نوع مقاله: مروری

چکیده

زمینه و هدف: فرآیند تولید محصولات نفتی می‌تواند یک تهدید جدی برای محیط‌زیست باشد و انتشار مواد سمی نظیر گازهای گلخانه‌ای در هوا می‌تواند برای انسان‌ها، گیاهان و جانوران خطرناک باشد. در این میان سیانوباکتری‌ها بعنوان منابع تولید پلاستیک‌های تجزیه‌پذیر و سوخت‌های زیستی بسیار حائز اهمیت می‌باشند. سیانوباکتری‌ها دارای رویکردهای قابل‌توجهی برای تثبیت و جذب نیتروژن اتمسفر و دی‌اکسیدکربن و استفاده از آن برای رشد در آب‌وهوای نامساعد، محیط‌هایی مانند خاک‌های غیرحاصلخیز و آب‌های شور، هستند که آن‌ها را برای تولید پلاستیک‌های تخریب‌پذیر و سوخت‌های زیستی مناسب می‌کنند. با این‌وجود طیف وسیعی از محصولات تولیدی آن‌ها تاکنون شناخته نشده است. از این‌رو در این مقاله مروری، پتانسیل سیانوباکتری‌های تولیدکننده‌ی پلاستیک‌های تجزیه‌پذیر و استراتژی بهبود تولید آن‌ها و همچنین تجاری‌سازی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: در مقاله‌ی حاضر، مقالات مرتبط منتشرشده در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۳ در بانک‌های اطلاعاتی اشپرینگر، ساینس دایرکت، اسکاپوس و جان وایلی جهت به‌دست‌آوردن آخرین یافته‌ها در زمینه‌ی پتانسیل سیانوباکتری‌ها در تولید محصولات تجزیه‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله‌ی مروری با جستجو در سایت مش، کلمات‌کلیدی مناسب انتخاب گردید و بر اساس آن‌ها، سی مقاله‌ی جدید مروری و تحقیقاتی، جمع‌آوری گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بیشترین (۷۷ درصد) و کمترین (کمتر از ۰/۰۰۵ درصد) میزان پلی‌هیدروکسی-بوتیرات (PHB) متعلق به سیانوباکتری‌های آلوزیرا فرتیلیزیما و آنابنا سایلیندرک به ترتیب است. علاوه بر آن دستکاری‌های ژنتیکی منجر به افزایش بیوسنتز PHB تا ۳۵ درصد در سیانوباکتریوم سینکوسیستیس می‌شود. سیانوباکتری‌هایی نظیر نوستوک موسکوروم، آنابنا سیرسینالیس، اسپیرولینا پلتنسیس و سینکوسیستیس کنسوریتا می‌توانند در ساخت بیوپلاستیک، نقش کلیدی داشته باشند و دارای متابولیسم مورد نیاز جهت تولید به صرفه و پایدار بیوپلیمر پلی‌هیدروکسی‌الکانوآت (PHAs) و PHB از میان کوپلیمرهای دیگر باشند.

نتیجه‌گیری: افزودن مکمل‌هایی مانند مکمل کربونیل‌سیانید m-کلروفنیل‌هیدرازون (CCCP)، دی-سیکلوهگزیل‌کربودی ایمید (DCCD)، مونوفلوئورواستات، ال متیونین سولفوکسیمین (MSX) و آزاسرین به محیط‌کشت سیانوباکتری‌ها، میزان PHB را تا تقریبا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. علاوه بر آن تولید طبیعی پلاستیک‌های ساخته‌شده از مواد تجزیه‌پذیر، نیاز به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد، و بنابراین دوستدار محیط‌زیست هستند. تنها مشکلی که در تجاری‌سازی محصولات تجزیه‌پذیر توسط سیانوباکتری‌ها وجود دارد، حجم کم محصولات‌زیستی و انباشت کمتر آن‌ها نسبت به باکتری‌های هتروتروف است.

کلیدواژه‌ها: سیانوباکتری‌ها، پلی‌هیدروکسی‌آلکانوآت، پلاستیک‌های‌زیستی، بهداشت‌محیط

استناد: نوروزی ب. کاربرد سیانوباکتری‌ها در تولید محصولات تجزیه‌پذیر. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. بهار ۱۴۰۳؛۱۰(۱)؛۱۱۰-۱۲۴.

مقدمه

پلاستیک‌های زیستی دسته‌ای از پلاستیک‌ها هستند که می‌توانند از مواد طبیعی مثل نشاسته‌های گیاهی و روغن‌ها تهیه شوند. تا سال ۲۰۲۵ انتظار می‌رود حجم استفاده از مواد نفتی که برای ساخت پلاستیک به‌کار می‌رود به‌دلیل استفاده از پلاستیک‌های زیستی که از گیاهان تولید می‌شوند، به میزان ۱۵-۲۰٪ کاهش پیدا کند(۱).

تا سال ۲۰۲۵ قاره‌های آسیا و اروپا بزرگ‌ترین بازار پلاستیک‌های زیستی را خواهند داشت. آسیا ۳۲٪ این مارکت را تشکیل می‌دهد. پس از آن اروپا ۳۱٪ و ایالات متحده ۲۸٪ این بازار را در برخواهند گرفت. در حال‌حاضر بازار زیست‌پلاستیک‌ها سالانه ۱۰٪ رشد دارد. ۱۰-۱۵٪ کل تجارت پلاستیک در سال ۲۰۱۶ را شامل می‌شود و این مقدار در سال ۲۰۲۰ به ۲۵-۳۰٪ افزایش پیدا کرده است. نوستوک موسکوروم[1]، آنابنا سیرسینالیس[2]، اسپیرولینا پلتنسیس[3] و سینکوسیستیس کنسوریتا[4] سیانو باکتری‌هایی هستند که می‌توانند در کارخانه‌های زیستی برای تولید سوخت‌های زیستی و پلاستیک‌های زیستی در نظر گرفته شوند. آن‌ها می‌توانند زیست‌پلیمرهایی نظیر PHB[5] و PHAs[6] تولید کنند که هر دو پایدار و مقرون-به‌صرفه هستند. زیست‌پلاستیک‌هایی که اخیرا ساخته شده‌اند مثل Bio-PET، منشا زیستی دارند که از مونومرهای ذرت ساخته شده‌اند اما پروسه‌ی پلیمریزه‌شدن آن‌ها شیمیایی است و پلیمر نهایی کیفیتی مشابه PET سنتی دارد که از مواد غیرقابل‌تجزیه ساخته شده بود. گونه‌های سیانوباکتریایی می‌توانند گرانول‌های PHB را برای تامین انرژی و کربن تا زمانی که تحت فشار هستند، ذخیره کنند. مواد دوستدار محیط‌زیست و پلی‌هیدروکسی-بوتیرات که به راحتی تجزیه پذیر هستند را می‌توان برای ساخت ترموپلاستیک‌های سازگار با محیط‌زیست، مورد استفاده قرار داد. PHAs، دسته‌ای از پلیمرها هستند که توسط سیانوباکتری‌ها تولید می‌شوند. PHA ها ساختاری لیپیدی هستند که وقتی منابع کربن فراوان دردسترس باشد ساخته می‌شوند.PHA ها می‌توانند برای اهداف مختلفی مثل تولید پلاستیک‌های زیستی مورد استفاده قرار بگیرند. سیانوباکتری‌ها به مقدار کمی مواد غذایی برای رشد نیاز دارند و PHA را هنگام فتوسنتز اکسیژن تولید می-کنند (۲).

امروزه در بسیاری از برنامه‌های صنعتی شامل باغبانی، بسته‌بندی موادغذایی، بهداشت و کیسه‌های کمپوست، بیوپلاستیک‌ها ضروری هستند. با افزایش جهانی استفاده از پلاستیک، تحقیقات زیادی در راستای کاوش مواد سبز(دوست‌دار طبیعت) و تکنیک‌های ایمن انجام شده است. کلروسیس اصطلاحی است برای زمانی‌که موادمغذی مثل نیتروژن کمیاب باشند. در طی کلروسیس، سیانوباکتری‌ها ماشین‌های فتوسنتزی خود را از بین می‌برند. فراتر از این فقدان یک دستاورد قابل‌توجه وجود دارد که سیانوباکتری از گلیکوژن به عنوان ذخیره‌ی انرژی و کربن استفاده می‌کند. این پروسه زمانی پایان می‌یابد که سلول‌ها شروع به شکستن گلیکوژن و تبدیل آن به PHB می‌کنند. همچنین ممکن است از یک کربن آلی به عنوان پیشرو استفاده کنند (مانند والرات) که بوسیله آن PHA های اضافه‌تر و کوتاه‌زنجیره تولید کند.

تاثیرگذارترین کاتالیست شناخته‌شده در سنتز PHB در سیانوباکتری‌ها، محدودکننده‌ی نیتروژن است. عناصری مانند نیتروژن و فسفر در شرایط کشاورزی و در معرض نور و دینامیک دی اکسید کربن در توانایی سیانوباکتری‌ها در تولید PHA تاثیر دارند(۲).

ریزجلبک‌ها تا به امروز کاربردهای صنعتی متعددی داشته-اند - نمونه‌هایی از آن‌ها شامل استفاده در موادغذایی (۴)، خوراک (۵)، لوازم‌آرایشی (۶)، محصولات بهداشتی (۷) و کودها (۸) و همچنین تصفیه‌ی فاضلاب (۸،۹) و تولید سوخت‌زیستی (۵) می‌باشد. با این حال، اکثر یافته‌های تحقیقات فن‌آورانه به دلیل محدودیت‌هایی که شامل موارد زیر می‌شود، نتوانسته‌اند به سطح تجاری برسند: (۱) تقاضای کم بازار. (۲) تولید با هزینه غیررقابتی، در مقایسه با محصولات جایگزین که از طریق سنتز شیمیایی یا مستقیما در نتیجه متابولیسم توسط سایر میکروارگانیسم‌ها

[1] Nostoc muscorum
[2] Anabaena circinalis
[3] Spirulina platensis
[4] Synechocystis consortia

[5] Polyhydroxybutyrate (PHB)
[6] Polyhydroxyalkanoates (PHAs)

(مانند قارچ‌ها، باکتری‌ها) یا حتی به عنوان عصاره‌های مواد-خام فسیلی به دست می‌آیند و (۳) محدودیت‌های نظارتی سخت‌تر از نظر مشخصات کیفی، تضمین ایمنی و به حداقل‌رساندن اثرات زیست‌محیطی (۱۰،۱۱).

علاوه بر آن، طیف گسترده‌ای از ترکیبات فعال بیولوژیکی در زیست توده‌ی ریز جلبکی - به شکل پروتئین، اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه (PUFAs)[1]، رنگدانه‌ها، ویتامین‌ها و موادمعدنی، یا به عنوان ترکیبات خارج سلولی مانند اولیگوساکاریدها یافت شده است (۱۲). بسیاری از مطالعات فواید ترکیبات ریزجلبکی را بر سلامت انسان نشان داده‌اند، به عنوان مثال این ترکیبات دارای خواص ضدسرطانی، ضدالتهابی، آنتی‌اکسیدانی، ضدمیکروبی و ضدچاقی می‌باشند و انتظار می‌رود ارزش بازار آن‌ها در موادغذایی در کوتاه‌مدت افزایش یابد (۱۱).

به بیان دیگر ریزجلبک‌ها نیز به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان موادمغذی توسط صنعت خوراک – به‌ویژه برای آبزی‌پروری و افزایش ایمنی حیوانات دریایی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. با این حال، متاسفانه استفاده تجاری از آن‌ها با توجه به هزینه‌های بالای تولید و ذخیره‌سازی با مشکلاتی مواجه شده است (۱۳). علاوه براین، استفاده صنعتی از ریزجلبک‌ها به عنوان پری‌بیوتیک در فرمولاسیون خوراک با چالش‌های متعددی مواجه شده است، به همین‌دلیل باید از تکنیک‌های جدید برای کاهش هزینه‌های تولید استفاده کرد.

در حال‌حاضر، مشکل اصلی عدم وجود یک استراتژی کشت انبوه اقتصادی برای تولید تجاری PHA های سیانوباکتری است. دو رویکرد کشت انبوه در مقیاس تجاری در (آ) فتوبیوراکتورهای بسته و (ب) سیستم‌های کشت حوضچه باز مرسوم وجود دارد. یک فتوبیوراکتور ایده‌آل باید نسبت به تمامی نیازهای سیستم برای سویه‌های مختلف و محیط‌های رشد خاص برای تولید محصول موردنظر انعطاف‌پذیر باشد. سیستم کشت حوض باز در مقایسه با فتوبیوراکتور که به هزینه ساخت، بهره‌برداری و نگهداری بالایی نیاز دارد، ارزان‌تر است. خشک‌کردن زیست توده برای پردازش و ذخیره‌سازی بیشتر ضروری است. حدود ۲۰ درصد از هزینه کلی تولید PHA از اسپیرولینا به این بخش اختصاص می‌یابد. فرآیند خشک‌کردن با انرژی بالا فقط برای استخراج PHA مورد نیاز است. خشک‌کردن در هوا نیز امکان‌پذیر است، اما به یک منطقه بزرگ و زمان طولانی‌تر نیاز دارد. استفاده از انرژی خورشیدی یا باد برای فرآیند خشک‌کردن نیز می‌تواند بر این محدودیت‌ها غلبه کند (۴).

هزینه تولید پلاستیک سنتی مبتنی بر نفت در سال ۲۰۰۲، ۰/۰۰۱ یورو به ازای هر کیلوگرم بود که به طور قابل‌توجهی کمتر از هزینه ۰/۰۰۹ یورو به ازای هر کیلوگرم PHA بود. حتی در مقایسه با سایر پلیمرهای پایدار، مانند PLA، که قیمت آن ۱/۷۲ یورو به ازای هر کیلوگرم است، ساخت میکروبیولوژیکی PHA ۲/۴۹ یورو به ازای هر کیلوگرم هزینه دارد که هنوز هم گران است. (۵). به همین‌دلیل است که مطالعات زیادی در زمینه بهینه‌سازی محیط‌کشت، روش‌های استخراج با استفاده از سیانوباکتری‌های مختلف انجام شده است **(جدول ۱)**. امروزه با دستکاری‌های ژنتیکی، تغییرات محیط‌کشت محققان توانستند بیشترین بازده تولید ترکیبات پلیمری را داشته باشند، به عنوان مثال کمبود دی اکسید کربن و نیتروژن، محدودیت استات و نیتروژن و دی اکسید کربن در سیانوباکتری‌های سینکوسیستیس[2] و سینکوکوس[3] محتوای PHB از ۴/۵ تا ۳۵ درصد افزایش معناداری یافت **(جدول ۲)**.

روش‌کار

در مقاله‌ی حاضر، مقالات مرتبط منتشرشده در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۳ در بانک‌های اطلاعاتی اشپرینگر، ساینس دایرکت، اسکاپوس و جان وایلی جهت به دست‌آوردن آخرین یافته‌ها در زمینه پتانسیل سیانوباکتری‌ها در تولید محصولات تجزیه‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله مروری با جستجو در سایت MeSH، کلمات‌کلیدی مناسب انتخاب گردید و بر اساس آن‌ها، سی مقاله‌ی جدید مروری و تحقیقاتی، جمع‌آوری گردید. در این تحقیق از کلید-واژه‌هایی مانند سیانوباکتری‌ها، پلی‌هیدروکسی آلکانوآت، پلاستیک‌های زیستی، بهداشت‌محیط جهت جستجو در بانک‌های اطلاعاتی مورد استفاده قرار گرفت. با این‌حال واژه‌هایی مانند سایر انواع جلبک‌ها و محصولات‌شیمیایی مدنظر نبوده است.

[1] Polyunsaturated Fatty Acids (PUFAs)
[2] Synechocystis
[3] Synechococcus

یافته‌ها

پتانسیل سیانوباکتری‌ها در پالایش محیط

سیانوباکتری‌ها به‌دلیل سازگاری زیاد با شرایط مختلف استرس و هم‌زمان مقاومت در برابر ترکیبات سمی مختلف شناخته شده هستند. بنابراین، این باکتری‌های فتوسنتزی در روش‌های مختلف در زمینه‌ی زیست‌پالایش مثل اصلاح خاک، تصفیه فاضلاب و تجزیه آلاینده‌های آلی کاربرد دارند. آلودگی آب یک مشکل زیست‌محیطی جدی است که در اثر فعالیت انسانی هم در زمینه‌ی شهرنشینی و هم صنعتی‌شدن محیط‌زیست همچنین اقدامات کشاورزی بوجود می‌آید. تحقیقات اخیر نشان داده است که آب آلوده از منابع مختلف را می‌توان با کمک این میکروارگانیسم‌ها به‌خوبی تصفیه کرد و سیستم‌هایی که بر اساس سلول‌های پروکاریوتی فتوسنتزی عمل می‌کنند یک جایگزین خوب برای فرآیندهای بیولوژیکی رایج مثل لجن فعال به‌شمار می‌روند(۶). با پرورش آبزیان حجم زیادی آب آلوده به نیتروژن تبدیل می‌شود که وارد دریاها شده و مستقیما باعث گسترش چرخه نیتروژن در اکوسیستم‌های دریایی می‌گردد و در نهایت باعث تغییر در تعادل گونه‌ها می‌شود. گونه synechococcus سیانوباکتری دریایی نشان داده است که به خوبی آمونیم را از فاضلاب شور پرورش آبزیان دفع می‌کند. میکروارگانیسم تست‌شده که آمونیم را از طریق فعالیت‌های سنتز گلوتامین و سنتز گلوتامات (GOGAT، EC 1.4.1.*13*) جذب می‌کنند، آن را وارد چرخه GS-GOGAT می‌کنند. یک رویکرد جالب در تصفیه فاضلاب بیولوژیکی، استفاده از ترکیب سیانوباکتری-باکتری است که در فعالیت هم‌افزایی بین میکروارگانیسم فتوسنتزی و باکتری‌های هتروتروف دخالت دارد. در فاضلاب آبجوسازی مقادیر زیادی آلاینده‌های آلی وجود دارد و مقدار قابل-توجهی از نیتروژن و فسفر توسط یک ترکیب سیانوباکتری-باکتری تصفیه شدند که اغلب شامل سیانوباکتری رشته‌ای گونه leptolungbya می‌باشد. ترکیب سیانوباکتری-باکتری که در pH و دمای مناسب رشد می‌کنند بسیار مفیدند و موفق به کاهش میزان ترکیبات نیتروژنی شدند. نمونه‌های دیگری که به کاربرد ترکیب باکتریایی در تصفیه فاضلاب اشاره دارند عبارتند از ترکیب Dinophysis acuminate و Dinophysis caudate که طبق گزارشات می‌توانند فسفات، فنل و سیانید را به‌خوبی از فاضلاب کوره ذغال‌پذیری دفع کنند. (۶)

مهم‌ترین نشانه‌ی پتانسیل تجزیه در سلول‌های سیانوباکتریایی توانایی آن‌ها در دفع فلزات سنگین از فاضلاب‌های مختلف است. توانایی سیانوباکتری‌ها در تحمل و برقراری ارتباط با یون‌های فلز، آن‌ها را به ابزارهای جذاب در بیوتکنولوژی زیست‌محیطی تبدیل می‌کند. در سیانوباکتری‌ها انواع مختلف مکانیسم‌ها مثل جذب زیستی، تجمع زیستی، فعال‌سازی ناقلان فلزی، تبدیل زیستی و القاء آنزیم‌های سم‌زدایی بکار برده می‌شوند تا اثرات سمی فلزات سنگین متوقف شدند و به حداقل میزان ممکن برسند. (۷)

کروم شش‌ظرفیتی ممکن است در برخی سیستم‌های آبی به دلیل صنایع نساجی، رنگ، تمیزکاری فلز، آبکاری، آبکاری برقی و حفاری به چشم بخورد. از آن‌جا که کروم ((Cr(VI) برای انسان‌ها سمی و سرطان‌زاست، دفع آن از آب و فاضلاب امری ضروری است تا مانع بروز مشکلات جدی برای سلامت و محیط زیست شود. ترکیب سیانوباکتری‌های Limnococcus limneticus و Leptolyngbya subtilis در دفع Cr(VI) از فاضلاب موثر است، در حالی-که ترکیب سیانوباکتری لجن‌ساز که حاوی گونه های Chlorella sp.، Phormidium sp. و Oscillatoria sp. می باشد، به‌خوبی کروم شش‌ظرفیتی را از فاضلاب صنعت چرم‌سازی دفع می‌کند. (۸)

کادمیوم یک فلز سمی است و تماس با آن یک مسئله و مشکل جهانی می‌باشد. یک استراتژی جالب در جداسازی کادمیم (II) از محلول‌های آبی پیشنهاد شد که شامل کشت‌های آکسنیک Nostoc muscorum غیرمتحرک از طریق تشکیل بیوفیلم‌ها می‌شود که قادر به جذب کادمیوم (II) در میزان غلظت ۲۴ppb - تا ۱۰۰ppm در pH از ۵ تا ۹ است. سیانوباکتری‌های جنس Nostoc با تولید اگزوپلی‌ساکارید توانایی جذب فلزات را افزایش می‌دهند. گونه‌ی اسیلاتوریا[1] نشان داد که دارای ویژگی‌های متابولیکی جهت حذف کادمیوم از آب آلوده به این فلز است. محققان مکانیسم فعالیت باکتریایی در برابر کادمیوم را بررسی کردند

[1] Oscillatoria

و متوجه شدند که جذب فلز توسط گروه‌های فعال بارمنفی در زیست توده‌های سیانوباکتریایی مکانیسم اصلی بود که در گونه .Oscillatoria sp برای دفع فلزات از واسط آبی بکار رفت که با تجمع زیستی کادمیوم در سلول‌های زنده همراه بود. پتانسیل پالایش فاضلاب شهری نیز برای Anabaena oryzae نشان داده شده است که با یک بازده دفع بالای کادمیوم، روی، آهن، سرب، مس و منگنز همراه بود. سیانوباکتری‌ها بیشتر در محیط‌های آلوده دیده می‌شوند و به‌دلیل مقاومت طبیعی و گزینش آلاینده‌های زیست‌محیطی، از یک پتانسیل متابولیکی قابل‌توجه برای تجزیه‌ی موادشیمیایی مصنوعی (زنوبیوتیک) برخوردارند. به‌عنوان مثال، در گونه .Spirulina spp توانایی سوخت-وساز زنوبیوتیک فسفات Dequest 2054 به‌اثبات رسیده است، گونه .leptolyngbya sp از توانایی تجزیه‌ی فنل برخوردار است که باعث کاهش معنی‌دار غلظت آن در واسط کشت می‌شود، در Aphanothece conferta بازده تجزیه‌ی بالا در برابر هیدروکربن‌های آلیفاتیک به‌اثبات رسید، در حالی‌که هیدروکربن‌های آروماتیک توسط Syncechocystis aquatilis تجزیه می‌شوند، همچنین گزارش شده است که سیانوباکتری‌ها دارای سیستم آنزیمی مناسب جهت تجزیه رنگ‌های نساجی می‌باشند (۸).

انواع پلاستیک‌های زیستی

مطالعات اخیر انجام‌شده در سال‌های اخیر (**جدول ۱**) در زمینه‌ی ترکیب پلیمری پلی‌هیدروکسی‌بوتیرات (PHB)، شرایط تولید، میزان تولید و نوع سیانوباکتری تولیدکننده، نشان داد که سیانوباکتری Alusira fertilisima CCC444، در شرایط محدودیت فسفر، ۸۵ درصد تولید را دارد. این درحالی است که سیانوباکتری Synechocystis PCC 7942، در شرایط محدودیت نیتروژن، کمترین میزان تولید PHB را دارد. این نتایج حاکی از اهمیت شرایط کشت بر تولید ترکیبات پلیمری را دارد، امروزه بر اساس همین واقعیت به‌راحتی می‌توان به تولید تجاری بسیاری از ترکیبات پلیمری دست یافت.

پلاستیک‌های زیستی انواع مختلفی دارند، از آن‌جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- زیست‌پلاستیک‌های بر پایه‌ی نشاسته: پلیمرهای بر پایه ی نشاسته به‌عنوان دسته‌ای تعریف می‌شوند که حاوی نشاسته طبیعی یا اصلاح شده هستند. این گروه شامل پلیمرهای ساخته‌شده از تخمیر نشاسته و همچنین مخلوط نشاسته و پلاستیک طبیعی یا تولیدشده‌ی مصنوعی هستند. بسیاری از ترموپلاستیک‌هایی که در حال حاضر استفاده می‌شوند شامل ۵۰٪ بازار جهانی پلاستیک‌های زیستی هستند (۹).

۲- بیوپلاستیک‌های ساخته‌شده از سلولز که از آسترهای سلولزی یا سایر مشتقات سلولزی تشکیل شده‌اند چراکه سلولز از واحدهای گلوکز که بوسیله‌ی پیوند کنار هم قرار گرفته اند ساخته شده است و توسط نشخوارکنندگان خاصی هضم می‌شوند. برای مثال سلولزاستات و متیل‌سلولز.

۳-پلی‌استرهای آلیفاتیک: موادی که مقاومت بیشتری در تخریب هیدرولیتیک دارند مثل PHA و PHB.

۴- بیوپلاستیک‌های مبتنی بر پروتئین: مشتق‌شده از منابعی مانند شیر، گلوتن‌گندم و سایر منابع پروتئین. بسیار شبیه به فرآیند پنیرسازی، به‌عنوان مثال، پلاستیک‌های زیستی کازئین.

۵- بیوپلاستیک‌های مبتنی بر لیگنین: اگرچه لیگنین مدت‌ها محصول جانبی تولید سلولز بوده است، اما اخیرا به-دلیل توسعه‌ی پروژه‌های زیست پالایشگاهی اهمیت یافته است.

۶- بیوپلاستیک مبتنی بر کیتین: دومین پلیمر زیستی رایج پس از سلولز، کیتین از واحدهای N-استیل-D-گلوکزامین تشکیل شده است که توسط پیوندهایی به‌هم متصل شده‌اند. اگرچه کیتین در اسکلت بیرونی بندپایان و دیواره‌ی سلولی مخمرها و قارچ‌ها یافت می‌شود، اما پوسته‌ی سخت‌پوستان مانند خرچنگ، میگو است و میگو منبع اصلی استخراج آن می‌باشد. به‌عنوان مثال، پلاستیک‌های زیستی ساخته‌شده از کیتوزان، کیتین ترکیب‌شده با PP و غیره (۹).

جدول ۱: تولید PHA در سیانوباکتری‌ها در شرایط کشت مختلف (۱۰)

سیانوباکتری‌ها	محتوای (PHB DCW٪)	روش استخراج	شرایط تولید	ترکیب پلیمری
Synechocystis sp. PCC 6803	۳۸	استات	محدودیت P و گاز	PHB
Synechocystis sp.	۱۱		کمبود نیتروژن و فسفر	PHB
Synechococcus sp.MA19	۵۵		کمبود فسفر	PHB
Synechocystis sp. PCC 6714	۱۶	دی اکسید کربن	محدودیت P^3و N^2	PHB
Spirulina platensis	۶,۰	دی اکسید کربن	داده نشده	PHB
Spirulina platensis UMACC 161	۱۰	استات و دی اکسید کربن	گرسنگی نیتروژن	PHB
Botryococuus braunli	۱۶,۴	فاضلاب	BG 11 medium	PHB
Spirulina sp. LEB-18	۱۲		محدودیت نیتروژن	–
Spirulina platensis	۱۰		افزودن استات و دی اکسید کربن	PHB
Synechocystis salina	۶,۶-۵,۵	دی اکسید کربن	BG 11 medium	PHB
Synechococcus subsalsus	۱۶		محدودیت نیتروژن	–
Spirulina maxima	۷-۹		محدودیت نیتروژن و فسفر	PHB
Synechocystis sp. PCC6803	۵		BG 11 medium	–
Synechococcus elongates	۱۷/۱۵	ساکارز	محدودیت نیتروژن	PHB
Synechococcus elongates	۷/۰۲	ساکارز	کمبود فسفر	–
Gloeothece sp. PCC 6909	۹,۰	استات	–	–
Microalgae consortium	۴۳	فاضلاب صنعتی و لجن‌فعال مبتنی بر کشاورزی	فاضلاب	PHB
Microalgae consortium	۳۱	فاضلاب صنعتی و لجن فعال مبتنی بر کشاورزی	فاضلاب	PHB
Nostoc muscorum	۶۹		کمبود فسفر	P(3HB-co-3 HV)
N. muscorum	۳۱	استات و پروپیونات	افزودن استات و پروپیونات	P(3HB-co-3 HV)
N. muscorum Agardh	۶۰	استات و والرات	کمبود نیتروژن	PHB-co-PHV
N. muscorum	۲۲	دی اکسید کربن	گرسنگی فسفر	PHB
Spirulina subsalsa	۷,۴۵	استات و دی اکسید کربن	افزایش شوری	PHB
Spirulina sp. LEB18	۳۰/۷		محدودیت نیتروژن	PHB
Aulosira fertilissima	۴۹	استات	محدودیت تبادل گاز	PHB

PHB-co-PHV	محدودیت نیتروژن	فروکتوز و والرات	۷۷	Alusira fertilisim CCC444
PHB	محدودیت فسفر	سیترات و استات	۸۵	Alusira fertilisima CCC444
PHB	محدودیت نیتروژن	دی اکسید کربن	۳	Synechocystis PCC 7942
PHB	محدودیت نیتروژن	استات	۲۵،۶	Synechocystis PCC 7942
PHB	محدودیت نیتروژن	دی اکسید کربن	۱۲،۵	Synechocystis sp. CCALA192
PHB	رشد متوازن	دی اکسید کربن	۰/۰۰۵>	Anabaena cylindric
PHB + PHV	محدودیت نیتروژن	پروپیونات	۰/۲	A. cylindrica
_	کمبود نیتروژن	ساکارز و دی اکسید کربن	۱۷/۲	Synechococcus elongatus
PHB	کمبود نیتروژن	دی اکسید کربن	۲۵	Caltorix scytonemicola TISTR 8095

منابع بیوپلاستیک‌ها

بیوپلیمرهای میکروبی پلیمرهای طبیعی هستند که توسط گونه‌های مختلف تولید و تجزیه می‌شوند. آن‌ها به میزبان آسیب نمی‌رسانند و مزایایی نسبت به پلاستیک‌های مبتنی بر نفت دارند. پلیمرهای زیستی به‌دلیل پتانسیل استفاده و تخریب سریع توسط میکروارگانیسم‌ها، به ویژه باکتری‌ها، نوآورانه و امیدوارکننده هستند. تحت شرایط استرس‌زا، این بیوپلیمرها در سلول‌های میکروبی به عنوان منابع ذخیره می‌شوند. PHA *های* سنتزشده میکروبیولوژیکی پتانسیل قابل‌توجهی را برای کاربردهای مختلف در زمینه‌های مختلف نشان داده‌اند. زمینه‌هایی از جمله داروها (سیستم‌های رهایش کنترل‌شده و تحویل دارو)، کشاورزی (تخلیه منظم آفت‌کش‌ها، تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه و علف‌کش‌ها و کودها) و سوخت‌های زیستی (متیل‌استر ۳- هیدروکسی-بوتیرات و متیل‌استرهای ۳ هیدروکسی‌آلکانوات (MCL)(۸).

مطابق جدول یک، منابع عمده‌ی تولیدکننده‌ی PHBها، سیانوباکتری‌های Synechocystis sp. PCC 6803، Synechococcus ،Synechocystis sp. sp.MA19، Synechocystis sp. PCC 6714، Spirulina platensis ،Spirulina platensis UMACC 161، Botryococuus braunli، Spirulina platensis ،Spirulina sp. LEB-18 Synechococcus ،Synechocystis salina ،subsalsus Spirulina maxima، Synechocystis sp. PCC6803، Synechococcus ،Synechococcus elongates Gloeothece sp. PCC 6909، elongates Microalgae ،Microalgae consortium consortium و Nostoc muscorum هستند. در این-میان استات، پروپیونات و دی اکسید کربن دارای بیشترین بازده استخراج هستند.

PHA ها را می‌توان برای ایجاد بخیه‌های قابل‌جذب، صفحات استخوانی، فیلم‌ها و منگنه‌ها، تکیه‌گاه‌های مغز استخوان، ابزارهای ترمیم تاندون، ایمپلنت‌های چشمی، جایگزین‌های پوستی، دریچه‌های قلب، بافت‌هایی برای استفاده‌ی قلبی‌عروقی، گرافت‌های عروقی، کاربردهای مهندسی بافت، راهنماهای عصبی، موانع چسبندگی و غیره استفاده کرد. PHA های یک‌بار مصرف نیز ممکن است در تولید تیغ، سینی‌های غذا، پوشک، اقلام بهداشتی، کارد و چنگال، بسته‌بندی لوازم آرایشی، عینک، لباس‌های جراحی پزشکی، مبلمان، فرش، بسته‌بندی، کیسه، درب‌های قابل کمپوست و سایر موارد استفاده شوند. علاوه بر این، PHA

ها ممکن است به‌عنوان یک فاز ثابت برای ستون‌های کروماتوگرافی استفاده شوند(۱۱).

پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها

پلیمرهای زیستی مانند PHAs، توسط میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان ذخیره چربی در داخل سلول‌ها تولید می شوند. PHA ها پلی‌استرهای طبیعی هستند که از اسیدهای هیدروکسی آلکانوئیک ۳، ۴، ۵ و ۶ ترموپلاستیک ساخته شده‌اند. تاکنون بیش از ۹۰ جنس از باکتری‌ها، چه گرم-مثبت و چه گرم‌منفی، در هر دو شرایط هوازی و بی‌هوازی، PHA را تولید می‌کنند. برخی از سویه‌های باکتریایی بومی، سویه‌های باکتریایی نوترکیب و یوکاریوت‌های نوترکیب همگی می‌توانند پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها (PHAs) تولید کنند. این پلی‌استرهای زیستی با تبدیل متابولیکی منابع کربن مختلف ایجاد می‌شوند. بسیاری از پلیمرهای PHA ویژگی‌های جالبی مانند توانایی تجزیه زیستی را ارائه می‌دهند و می‌توان از آن‌ها برای اهداف مختلفی استفاده کرد، از پلاستیک‌های یک‌بار مصرف گرفته تا کاربردهای پزشکی تخصصی(۱۲).

خواص PHA از پلاستیک‌های معمولی متمایز نیست زیرا دارای تنوع شیمیایی زیادی از رادیکال‌ها است. دامنه‌ی این پلیمرها از ترموپلاستیک‌های صلب و شکننده گرفته تا الاستومرها، لاستیک‌ها و چسب‌ها متفاوت است که کاملا بر اساس ترکیب آن‌ها است. بسته به نوع مونومرهای معطر مورد استفاده، PHA های معطر خواص مختلفی را از خود نشان می‌دهند. تحقیقات زیادی در مورد ویژگی‌های حرارتی PHA های معطر انجام شده است که رفتاری خاص برای ساختار نشان می‌دهد (۱۳) . به‌دلیل افزایش طول زنجیر و افزایش تعداد کومونومرها در یک کوپلیمر، خاصیت ارتجاعی آن افزایش می‌یابد و بنابراین، PHA ها با توجه به ترکیب مونومری خود، خواص متفاوتی دارند.

PHA به دلیل منشا طبیعی، زیست تخریب‌پذیری، سازگار با محیط زیست، پیزوالکتریک، خلوص نوری و ترموپلاستیک بودن، جایگزین مناسبی برای پلیمرهای مصنوعی است. علاوه بر این، آن‌ها ترموپلاستیک و یا الاستومری، غیرسمی هستند و خلوص بسیار بالایی در داخل سلول دارند. آن‌ها همچنین آب‌گریز، نامحلول در آب، بی‌اثر و به‌طور نامحدود در هوا پایدار هستند. PHA نسبت به پلی‌پروپیلن در برابر حلال مقاومت کمتری دارد اما در برابر تخریب اشعه ماورا بنفش (UV) انعطاف‌پذیری قابل توجهی دارد. میکروارگانیسم‌های متعددی در موقعیت‌های متمایز توانایی تجزیه PHA ها را دارند. تجزیه PHA در شرایط هوازی دی‌اکسید کربن و آب تولید می‌کند، در حالی‌که در شرایط بی‌هوازی دی‌اکسیدکربن و متان تولید می‌کند. زمان تخریب به تعدادی متغیر از جمله مساحت سطح، فعالیت میکروبی محیط، pH، دما، رطوبت، وجود سایر موادمغذی و خواص پلیمر مانند ترکیب و بلورینگی بستگی دارد و می‌تواند از ماه‌ها (هضم بی‌هوازی) تا سال‌ها (محیط دریایی)، متغیر باشد.

به دلیل چگالی بالا، PHA ها در محیط‌های آبی شناور نمی‌شوند. درنتیجه پس از ریختن در آن‌جا، غرق می‌شوند و در سطح رسوبات تخریب بیوژئوشیمیایی رخ می‌دهد. دو فرآیند اصلی درگیر در تجزیه‌ی زیستی هتروکمپوزیت‌های پلیمری، مانند سلولز، نشاسته و پلی‌استرهای آلیفاتیک، که PHA ها معمولی هستند، اولا هیدرولیز زیستی یا غیرزیست و به‌دنبال آن جذب زیستی (تخریب‌زیستی) است و دوما پراکسیداسیون و به دنبال آن جذب بیولوژیکی محصولات با جرم مولکولی کم (اکسی‌بیوتخریب)، که به‌طور خاص اعمال می‌شود. علی‌رغم زیست‌تخریب‌پذیری سریع، PHA ها در هوا بسیار پایدار هستند و وقتی به‌طور معمول ذخیره می‌شوند پوسیدگی ندارند. بسته به نوع مونومرهای یکپارچه، PHA های معطر دارای ظاهر فیزیکی متنوعی هستند(۱۴).

PHA هایی که فقط از فنوکسی یا مونومرهای فنیل (P(3H5PhV)) ساخته شده‌اند، چسبناک و انعطاف‌پذیر هستند. PHA ها با گروه‌های متیل‌فنوکسی موادی شکننده و سفیدرنگ هستند و با گروه‌های تیوفنوکسی کرم‌رنگ و الاستومری هستند. اکثر PHA هایی که شامل مونومردی-فلوروفنوکسی هستند نیز کرم‌رنگ هستند. حتی با افزودن تعداد کمی از واحدهای نیتروفنیل(۲/۱ تا ۶/۹ درصد)، خواص فیزیکی PHA های حاوی گروه نیتروفنیل به‌طور قابل توجهی از mcl-PHA متفاوت است. ظرفیت PHA های معطر برای تجزیه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از ویژگی‌های مهم استفاده از PHA ها به‌عنوان مواد زیست تخریب‌پذیر، تجزیه‌پذیری است. پایداری PHA ها در pH فیزیولوژیکی و در طول هیدرولیز باید برای کاربردهای پزشکی مانند سیستم‌های تحویل دارو با تجزیه و تحلیل تخریب شیمیایی و تخریب ناشی از میکروارگانیسم ارزیابی شود(۱۵).

کوپلیمرهای PHA باکتریایی اغلب طیف گسترده‌ای از ترکیبات کومونومر را نشان می‌دهند که ممکن است ناشی از تغییرات در متابولیسم باکتری در طول تولید PHA باشد. PHA های معطر بیوسنتزشده همیشه به عنوان یک کوپلیمر تشکیل نمی‌شوند، بلکه گاهی اوقات به عنوان ترکیبی از دو PHA مجزا تشکیل می‌شوند.

بازیابی و خالص‌سازی بیوپلیمرها مراحلی هستند که در فرآیند استخراج PHA دخیل هستند. این روش‌ها امکان استفاده از فناوری‌های شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی یا حتی ترکیبی از این فناوری‌ها را فراهم می‌کند تا محصولی با خلوص بالا و ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی حفظ شود. اولین مرحله در روش استخراج PHA، سانتریفیوژکردن ماده‌ی جامد است که از سلول‌های حاوی پلیمر زیستی داخل‌سلولی تشکیل شده است. علاوه بر این، دیواره‌ی سلولی میکروبی ممکن است از طریق ابزارهای بیولوژیکی، فیزیکی یا شیمیایی سوراخ یا مختل شود. سوسپانسیونی از پلیمر زیستی، سلول‌های حاوی بیوپلیمر (سلول‌هایی که بی‌ثبات می‌شوند اما دیواره‌های سلولی را نمی‌شکنند)، و بقایای سلولی پس از پارگی یا ناپایداری دیواره‌ی سلولی (مخلوطی از پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک، لیپیدها و قطعات دیواره سلولی) تشکیل می‌شوند. مرحله‌ی بعدی بازیابی بیوپلیمر است که می‌تواند به روش‌های مختلفی از جمله شیمیایی، بیولوژیکی، فیزیکی یا استفاده از ترکیبی از رویکردهایی مانند فیزیکی و شیمیایی، بیولوژیکی و شیمیایی و غیره انجام شود(۱۶).

حلال‌های مختلفی در فرآیندهای شیمیایی حذف PHA از سلول‌های میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌شود. کلروفرم، استون، متیل ایزوبوتیل‌کتون، متیلن‌کلرید، پروپیلن‌کربنات، اتیل‌استات و ایزوآمیل‌الکل رایج‌ترین حلال‌ها هستند(۱۷). ارزیابی زمان تماس و دمای حرارت‌دهی پلیمر با حلال برای سنجش کارایی فرآیند استخراج و کیفیت محصول به‌دست‌آمده ضروری است. استفاده از آسیاب‌های هموژنایزر و اولتراسوند از محبوب‌ترین روش‌های فیزیکی مورداستفاده در استخراج PHA است. این روش‌ها معمولا در ابتدای فرآیند استخراج برای مختل‌کردن و تضعیف غشای سلولی میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌شوند. در مقایسه با تکنیک‌های استخراج شیمیایی، استخراج مکانیکی پلیمرهایی با ویژگی‌های حرارتی بالاتر به دست می‌آید و در عین‌حال مقرون به‌صرفه‌تر و کم‌خطرتر است(۱۸). در صورت استفاده از یک روش شیمیایی مناسب همراه با روش مکانیکی برای استخراج بیوپلیمرها که امکان بازیابی PHA بالا را بدون تغییر قابل‌توجه ویژگی‌های آن فراهم می‌کند، امکان بازیابی افزایش می‌یابد(۱۹). علاوه بر آن، شرایط محیط کشت نیز در بازده تولید بسیار موثر هستند. مطابق جدول ۱، محدودیت نیتروژن، کمبود فسفر، افزودن استات و دی اکسید کربن و افزایش شوری تاثیر به‌سزایی در تولید ترکیبات پلیمری دارند (**جدول ۱**).

روش بیولوژیکی استخراج PHA میکروبی، روشی پیچیده است که برای بازیابی پلیمر زیستی به استفاده از آنزیم‌هایی ازجمله لیزوزیم‌ها، نوکلئازها و پروتئازها متکی است. محیط کشت براثر با آنزیم‌هایی برای هیدرولیز سلول‌های حاوی PHA تکمیل می‌شود. شرایط عملیاتی ملایم، گزینش‌پذیری زیاد آنزیم‌ها در هیدرولیزکردن پروتئین‌های دیواره‌ی سلولی میکروارگانیسم‌ها بدون تاثیر بر تجزیه پلیمر و کیفیت بالای پلیمر بازیافتی، این فناوری را جذاب کرده است (۲۰).

سیانوباکترها به عنوان منبع بیوپلاستیک

تجمع PHB در سیانوباکتری‌ها اولین‌بار توسط Carr G.N گزارش شد. در سال ۱۹۶۶تا ۱۰٪ (dcw) در Chlorogloea fritschii مشاهده شد. در کشت فوتواتوتروفیک آرتروسپیراپلاتنسیس (اسپیرولینا) حداکثر ۶٪ PHA انباشته شده است. بیوسنتز PHA در، Synechocystis sp. PCC 6803، Nostoc muscorum و Synechococcus sp. MA19 به ترتیب تا ۳۸، ۴۶ و ۵۵ درصد تحت شرایط مختلف کشت گزارش شده است (۴). تولید *PHA* گزارش‌شده در چندین سویه دیگر در فوتواتوتروفیک و همچنین با مکمل استات یا سایر منابع کربن آلی در مقایسه با باکتری‌های هتروتروف بسیار کمتر است. چن و همکاران حداکثر تجمع کوپلیمر پلی (۳-هیدروکسی‌بوتیرات-کو-۳-هیدروکسی هگزانوات) تا ۵۰ درصد (dcw) در Aeromonas hydrophila رشدیافته در محیط کشت ۵ درصد گلوکز با اسید لوریک ۵ درصد گزارش کرده‌اند. تولید PHB تا ۷۷٪ در اشریشیاکلی نوترکیب با استفاده از گلوکز به عنوان سوبسترا با بهره وری ۳۲۰۰ mg/l/h گزارش می‌شود. با این‌حال، منبع کربن مورد استفاده ۳۸٪ از هزینه کلی تولید را تشکیل می‌دهد. در مقایسه با باکتری‌های هتروتروف (۴ تا ۵ درصد بستر

کربن)، سیانوباکتری‌ها به زیرلایه‌ی کربن کمتری در حدود ۰/۴ درصد نیاز دارند. بنابراین، سیانوباکتری‌ها نامزد امیدوارکننده‌تری برای تولید پلاستیک‌های زیستی در مقیاس بزرگ هستند (۲۱).

کشت عمومی سیانوباکتری‌ها

سیانوباکتری‌ها پروکاریوت‌های فتوسنتزی هستند که هم در آب شیرین و هم در آب شور، خاک و غیره یافت می‌شوند و دارای فیزیولوژی منحصر به فردی هستند که باعث می‌شود حتی در زیستگاه‌های اکولوژیکی سخت مانند بیابان‌ها، چشمه‌های آب‌گرم، بسترهای آتشفشانی و حتی در محیط زیست زنده بمانند (۱۰). حوضچه‌های قلیایی سیانوباکتری‌ها را می‌توان در سه سیستم کشت مختلف، یک حوضچه باز (بیشتر ترجیح داده‌شده)، یک سیستم بسته (فوتوبیوراکتور)، و یک سیستم ترکیبی (ترکیبی از هر دو سیستم باز و بسته) کشت کرد. محیط پرکاربرد برای کشت سیانوباکتری‌ها BG-11 است. PH و دمای بهینه برای رشد سیانوباکتری‌ها به ترتیب ۹-۷/۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد است. کشت تا ۷ روز طول می‌کشد تا به فاز لگاریتم برسد و چرخه رشد کامل در ۲۰ روز (پس از رسیدن به مرحله مرگ) به‌پایان می‌رسد (۲۱).

حوضچه‌های باز اکوسیستم طبیعی هستند که جلبک‌ها در آن تمایل به رشد و توسعه دارند. سیستم‌های باز به دو نوع طبیعی (دریاچه‌ها و برکه‌ها) و مصنوعی (ظروف و حوضچه‌های مصنوعی) طبقه‌بندی می‌شوند (۲۲). چندین مزیت رشد سیانوباکتریوم در سیستم‌های باز وجود دارد که شامل سرمایه‌گذاری کم، آسان‌تر بودن ساخت استخر و نگهداری آسان می‌شود. برخی از معایب شامل نیاز به زمین بزرگ، نفوذ نور ضعیف و بهره‌وری کم زیست توده است.

فتوبیوراکتورها سیستم بسته‌ای برای کشت سیانوباکتریوم در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از این سیستم می‌توان از ایرادات سیستم باز چشم‌پوشی کرد. استفاده از سیستم بسته برای کشت جلبک مزایای متعددی دارد که شامل کنترل پارامترهای کشت (pH، دما و غیره)، سطح کم آلودگی است که باعث تبادل زیاد گاز در داخل کشت می‌شود (۲۳). انواع مختلفی از سیستم‌های بسته برای کشت جلبک‌ها وجود دارد که شامل ستون عمودی، بیوراکتور لوله‌ای، بیوراکتور صفحه تخت و غیره است. ترکیبی از هر دو سیستم باز و بسته به عنوان یک سیستم ترکیبی شناخته می‌شود. دو مرحله از کشت وجود دارد که مرحله اول شامل یک سیستم بسته است و مرحله دوم در سیستم راه‌آهن باز رخ می‌دهد. با استفاده از این سیستم، مزایای هر دو سیستم باز و بسته امکان‌پذیر است. بسیاری از مطالعات در حال انجام در حال طراحی یک راکتور هیبریدی در مقیاس تجاری هستند که می‌تواند مقرون به‌صرفه باشد و کار با آن آسان باشد.(۲۴)

بیوسنتز PHA در سیانوباکتری‌ها

سیانوباکتری‌ها مانند برخی از پروکاریوت‌ها دارای چرخه کربس ناقص هستند، به دلیل عدم وجود کمپلکس 2-oxoglutarate دهیدروژناز که تبدیل 2-oxoglutarate به چرخه سوکسینیل را انجام می‌دهد. از آن‌جایی که چرخه TCA ناقص است، فرض بر این است که تجزیه پلیمرهای PHB که استیل-CoA را تولید می‌کنند، نه برای تولید اجزای سلولی و نه برای تولید انرژی، قابل‌استفاده نیست (۳). بیوسنتز پلیمر PHA با دپلیمریزاسیون مرتبط است. پلیمرهای PHA معمولا تحت فرآیند چرخه‌ای بیوسنتز و دپلیمریزاسیون قرار می‌گیرند، که در آن PHA از پیش‌سازهای acyl-CoA از طریق مسیرهای متابولیکی مختلف تحت شرایط محدودیت موادمغذی تشکیل می‌شود، زیرا منبع کربن به عنوان دانه‌های پلیمری در سلول‌ها ذخیره می‌شود. بهره‌برداری از منابع کربن برون‌زا مانند گلوکز، فروکتوز و استات، کاهش تحرک و افزایش بیوسنتز PHA را نشان داد(۱۲).

Synechocystis sp. PCC6803 در محیط کشت BG-11 با غلظت نیتروژن کاهش‌یافته کشت شد و حداکثر تجمع PHB ۱۸۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر را نشان داد، 192 Synechocystis sp. CCALA در یک فتوبیوراکتور لوله‌ای ۲۰۰ لیتری کشت شد و حداکثر ۱۲۵ میلی‌گرم در میلی‌لیتر PHB را تولید کرد و یک سویه سیانوباکتری از نوع وحشی Synechocystis sp. PCC6714 حداکثر ۶۴۰ میلی‌گرم در لیتر PHA را در محیط‌های رشد بهینه تولید می‌کند.

نتایج تحقیقات دیگر نشان می‌دهد که تجمع زیاد PHA در سیانوباکتری‌ها، تحت استرس تغذیه‌ای رخ می‌دهد و مسیر بیوسنتز PHA را فعال می‌کند. هنگامی که سیانوباکتری‌ها کمبود مواد مغذی (نیتروژن و یا فسفر) را تجربه می‌کنند، مسیرهای متابولیک برای تولید ترکیبات غنی از کربن برای ذخیره‌ی انرژی، مانند PHAs و گلیکوژن منحرف می‌شوند. مطالعه بر روی سیانوباکتری Synechococcus subsalsus و Spirulina sp. LEB 18 در محیط

کمبود نیتروژن نشان داد که منبع کربن به سایر مسیرهای متابولیکی برای تولید بیوپلیمر منحرف می‌شود که به‌عنوان ذخیره‌ی انرژی استفاده می‌شود و در شرایط مساعد مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد. تجمع PHA در Botryococcus braunii و Synechocystis salina رشدکرده در محیط کشت BG-11 بدون هیچ‌گونه محدودیت غذایی گزارش شد. برای افزایش تولید PHA از شرایط تغذیه‌ای متفاوتی مانند سطوح اضافی یا محدود نیتروژن و یا فسفر، استات و پروپیونات استفاده می‌شود و شرایط مختلف دیگری مانند شوری، تبادل گاز، فاضلاب به‌عنوان منبع و غیره در (**جدول ۱**) خلاصه می‌شود (۱۰). جدا از تغییرات شرایط کشت، انتخاب سویه بسیار پربازده نیز می‌تواند بازده تجمع PHA را از ۰/۵ تا حدود ۷۰ درصد (dcw) افزایش دهد. کولئو و همکاران، درصد بیشتری از تجمع PHA را در Spirulina sp گزارش کردند. با استفاده از محیط کشت زاروک با محدودیت نیتروژن و فسفر به ترتیب ۳۰/۷ درصد و ۱۴/۱ درصد (dcw). محدودیت‌های تبادل فسفر و گاز همراه با محدودیت‌های اضافی استات و نیتروژن و فسفر در6803 Synechocystis sp. PCC منجر به تجمع *PHA* به ترتیب حدود ۳۸٪ و ۱۱٪ (dcw) می‌شود. همچنین تولید کوپلیمر PHB-PHV در N. muscorum تحت کمبود نیتروژن و فسفر منجر به تجمع کوپلیمر به ترتیب حدود ۶۰٪ و ۶۹٪ (*dcw*) شد. محققان دیگر حداکثر ۸۵٪ (dcw) PHB و ۷۷٪ (dcw) PHB-co-PHV را در Alusira fertilisima CCC تحت کمبود نیتروژن با مکمل فروکتوز و والرات و کمبود فسفر همراه با سیترات و استات اضافی به ترتیب گزارش کردند (۱۸).

استراتژی بهبود تولید PHA سیانوباکتری‌دستکاری ژنتیکی

مطالعات زیادی بر روی دستکاری ژن سیانوباکتری‌ها انجام شده است که مهندسی متابولیک و سنتز PHB، Synechhocystis sp. PCC 6803 بیشترین سویه مورد مطالعه است. قراردادن اپرون C. nectar PHA درSynechococcus PCC 7942 تولید PHA را از ۳ به ۲۵ درصد (dcw) افزایش می‌دهد. Synechhocytis sp. PCC 6803 با ژن PHA سنتاز از C. nectar ترانسفکت شد و فعالیت بیشتری نشان داد اما محتوای خالص PHB افزایش پیدا نکرد. بیان بیش از حد phaAB با مکمل ۴ میلی‌مولار استات، افزایش PHB را تا ۳۵٪ (dcw) در Synechocytis sp. PCC 6803 نشان داد. دانشمندان بهره‌وری حجمی ۲۶۳ mg/l/d و *بازده* ۱،۸۴ mg/l با بیان بیش‌ازحد ژن استواستیل-*CoA* ردوکتاز در Synechocystis را گزارش داده‌اند. **جدول ۲** مطالعات بیشتر انجام‌شده در مورد دستکاری ژنتیکی برای افزایش تولید *PHB* را خلاصه می‌کند(۲۵).

جدول ۲: دستکاری‌های ژنتیکی برای افزایش بیوسنتز PHB (۲۶)

محتوای PHB (% DCW)	شرایط کشت	دستکاری ژنتیکی	سیانوباکتری‌ها
۱۴	فتوسنتز	بیان بیش‌ازحد PHA سنتاز	Synechocystis sp. PCC 6803
۷/۰	دی اکسید کربن	سلول‌های ترانس‌کونژوگانت حامل وکتورهای بیانی حامل ژن‌های PHA	Synechocystis sp. PCC 6803
۱۱	محدودیت استات و نیتروژن	معرفی ژن‌های بیوسنتزی PHA از C. nectar	Synechocystis sp. PCC 6803
۱۲	دی اکسید کربن	افزایش سطح استیل‌کوآ	Synechocystis sp. PCC 6803
۲۶	کمبود دی اکسید کربن و نیتروژن	بیان بیش‌ازحد ژن‌های طبیعی PHA	Synechocystis sp. PCC 6803
۳۵	دی اکسید کربن	بهینه‌سازی اتصال استواستیل-کوآردوکتاز	Synechocystis sp.
۱/۰	دی اکسید کربن	نقص در سنتز گلیکوژن	Synechococcus sp. PCC 7942
۲۶	محدودیت استات و نیتروژن	معرفی ژن‌های بیوسنتزی PHA از C. nectar	Synechococcus sp. PCC 7942
۴/۵	دی اکسید کربن	معرفی GABA Shunt	Synechococcus sp. PCC 7002

بهره‌برداری از مهارکننده‌های متابولیکی برای افزایش PHA سیانوباکتری

عدم تعادل C: N و نسبت NADPH: ATP عواملی هستند که در تولید PHA نقش دارند. برای تحریک تولید

PHB مطالعات زیادی در مورد اثر مهارکننده متابولیک بر تولید PHB انجام شد. به‌عنوان مثال پس از استفاده از مکمل N. muscorum با کربونیل‌سیانید m-کلروفنیل-هیدرازون (CCCP)[1] و دی‌سیکلوهگزیل‌کربودی‌ایمید (DCCD)[2]، میزان PHB از ۸/۵ درصد به ترتیب به ۲۱ درصد و ۱۷ درصد افزایش یافت. مطالعات نشان می‌دهد که افزودن مونوفلوئورواستات میزان PHB را تا ۱۹ درصد افزایش می‌دهد (dcw)، در حالی‌که اضافه‌شدن Lmethionine-DL-sulfoximine (MSX[3]) و آزاسرین نیز تولید PHB را افزایش می‌دهند (۲۱).

کشت دو مرحله‌ای برای تولید زیست توده بالا و افزایش غلظت PHA

در این استراتژی، سلول‌ها در محیط‌های تازه با محدودیت یک ماده‌ی غذایی خاص مانند نیتروژن یا فسفر کشت می‌شوند و در مرحله‌ی دوم یا تجمع برای القای استرس و تولید PHA دوباره کشت می‌شوند. مطالعه انجام‌شده بر روی Chlorogloea fritschii TISTR 8527 در دو مرحله کشت، حداکثر تجمع ۲۵٪ PHB (dcw) را با استفاده از استات به‌عنوان بستر با ۵۱ ± ۷٪ (وزنی/وزنی) راندمان تبدیل را نشان می‌دهد. از آن‌جایی که مرحله اول حداکثر زیست‌توده را تولید می‌کند، به نظر می‌رسد این استراتژی به‌طور بالقوه برای تولید در مقیاس بزرگ قابل دوام است (۲۷).

در کشت دو مرحله‌ای Synechocystis cf. salina PCC 6909 ، در یک مرحله، بدون کشت مجدد زیست توده حدود ۹۰ میلی‌گرم در لیتر PHA در ۱۴ روز تولید شد. سیانوباکتریوم در محیطی بهینه رشد کرد به‌طوری که فسفر و نیتروژن تقریبا بین ۷ تا ۸ روز با حداکثر تولید زیست‌توده تا ۲ گرم در لیتر (dcw) مورد استفاده قرار گرفت و درنتیجه به‌دلیل گرسنگی مواد مغذی بدون برداشت وارد مرحله انباشتگی شد. هزینه تولید کلی تولید PHA را می‌توان با استفاده از چنین نوع استراتژی کشت دو مرحله‌ای کاهش داد.(۲۸).

بحث

استفاده زیاد از سیانوباکتری‌ها به‌دلیل تولید متابولیت‌های مختلف است که با بیش از یک نوع ترکیب به عنوان یک محصول قابل فروش کار می‌کند، به این نوع کاربرد، سیستم تبدیل زباله به محصول جدید که پلاستیک زیستی است، می‌گویند (۲۹). یکی دیگر از نمونه‌های تبدیل زباله به محصول جدید، استفاده از ریزجلبک‌ها، استفاده مجدد از پساب‌های حاصل از تصفیه روغن زیتون در کشت ریزجلبک‌ها برای بیودیزل و بیوپلیمرها است.(۱۳)

با استفاده از محصولات جانبی و بقایای تولید میکروبی، می‌توان تولید بیوپلاستیک را با ساخت سایر کالاهای مطلوب ادغام کرد تا هزینه PHB میکروبی کاهش یابد. یک جایگزین موثر، جنس سیانوباکتری Nannochloropsis sp. است که اسید ایکوزاپنتانوئیک تولید می‌کند و جنس سیانوباکتری Spirulina platensis که اسید لینولئیک تولید می‌کند. این‌گونه به‌دلیل خروجی زیست‌توده که دارای محتوا پروتئین بالایی است مهم است و می‌تواند برای تهیه خوراک دام یا موادمغذی مورد استفاده قرار گیرد (۳۰).

علاوه بر رنگدانه‌ها، زیست توده S. salina حاوی کربوهیدرات، لیپید و پروتئین است. تا زمانی که استانداردها و قوانین تغذیه‌ای لازم در خصوص وجود آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین(۷) یا مایکوتوکسین‌ها رعایت شود، می‌تواند به‌عنوان خوراک دام مورد استفاده قرار گیرد. در این مورد، سیانوتوکسین‌ها نسبت به سیانوباکتری‌هایی که سم تولید نمی‌کنند، اولویت دارند.(۲۴)

نتیجه‌گیری

معلوم شده است که PHA جایگزینی برای پلاستیک‌های معمولی است. سیانوباکتری‌ها در حال تبدیل‌شدن به منبع جایگزین تولید PHA هستند. علت اصلی تولید PHA با استفاده از ریزجلبک‌ها کاهش هزینه است. در حال‌حاضر، سیانوباکتری‌ها به تولید PHA کمک می‌کنند زیرا مقدار زیادی PHS را از طریق فتوسنتز جمع‌آوری می‌کنند که در نهایت به محتوای غذایی کمتری برای رشد نیاز دارند. سیانوباکتری‌ها دارای عملکرد بسیار پایینی از PHA اتوتروف هستند. در آینده‌ی نزدیک، می‌توان یک سیستم بیولوژیکی برای استفاده از منابع و ویژگی‌هایی ساخت که می‌تواند تولید PHA را از طریق اتوتروف و هتروتروف افزایش دهد. تولید PHA با استفاده از ریزجلبک‌ها دارای مزایای بسیاری مانند ترکیبات صنعتی است که شامل

[1] Carbonyl cyanide 3-chlorophenylhydrazone (CCCP)
[2] dicyclohexylcarbodiimide (DCCD)
[3] L-Methionine sulfoximine (MSX)

رنگدانه‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها، موادآرایشی، دارویی، پلی-ساکاریدها و غیره می‌شود. علاوه بر این، اشاره شده است که این ارگانیسم‌ها انواع متابولیت‌های ثانویه، سموم و سایر مواد فعال زیستی را ایجاد می‌کنند که از دیدگاه فارماکولوژیکی مهم هستند. جنبه اقتصادی PHA های سیانوباکتری بدون‌شک با ادغام همه‌ی این مواد تحت یک روش پالایش بهبود می‌یابد. نتایج کلی نشان داد زمانی که سیانوباکتری با غلظت نیتروژن کاهش‌یافته کشت شد، میزان PBH تا ۱۸۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر افزایش یافت. علاوه بر آن کشت در فتوبیوراکتورهای لوله‌ای، حداکثر ۶۴۰ میلی‌گرم در لیتر PHA را در محیط‌های رشد موجب شد. در واقع محققان معتقدند که تجمع زیاد PHA در سیانوباکتری‌ها، تحت استرس تغذیه‌ای رخ می‌دهد. معمولا استفاده از محیط کشت زاروک با محدودیت نیتروژن و فسفر به ترتیب ۳۰/۷ درصد و ۱۴/۱ درصد می‌تواند تولید کوپلیمر PHB-PHV را افزایش دهد. البته جدا از تغییرات شرایط کشت، انتخاب سویه بسیار پربازده نیز می‌تواند بازده تجمع PHA را از ۰/۵٪ تا حدود ۷۰٪ (dcw) افزایش دهد.

تشکر و قدردانی: این مقاله کاملا مستقل بوده و نتیجه‌ی تحقیقات نویسنده مسئول به همراه مقالات مروری اخیر می‌باشد.

تعارض منافع: نویسنده هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تاثیر بگذارد را رد می‌کنند و تعارض منافع ندارد.

حمایت مالی: این مقاله کاملا مستقل بوده و حمایت مالی ندارد.

ملاحظات اخلاقی: نویسندگان کلیه‌ی نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

References

1. Balaji S, K Gopi, B Muthuvelan. A review on production of poly β hydroxybutyrates from cyanobacteria for the production of bio plastics. Algal Research. 2013; 2(3): 278-285. https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.03.002

2. Nowruzi B, H Fahimi. Nostoc cyanobacteria species: a new and rich source of novel bioactive compounds with pharmaceutical potential. Journal of Pharmaceutical Health Services Research. 2018; 9(1): 5-12. https://doi.org/10.1111/jphs.12202؛

3. Bhati R. Biodegradable plastics production by cyanobacteria. Biotechnology Products in Everyday Life. 2019; 131-143. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92399-4_9؛

4. Price S, Want T. Cyanobacterial polyhydroxybutyrate for sustainable bioplastic production: critical review and perspectives. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. 8(4): 104007. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104007؛

5. Koller M. "Bioplastics from microalgae"-Polyhydroxyalkanoate production by cyanobacteria. Handbook of Microalgae-Based Processes and Products. 2020; 597-645. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818536-0.00022-1؛

6. Ghorbani E, Nowruzi B, Hekmat A. Metal removal capability of two cyanobacterial species in autotrophic and mixotrophic mode of nutrition. BMC microbiology. 2022; 22(1): p. 58. https://doi.org/10.1186/s12866-022-02471-8 PMid:35176992 PMCid:PMC8851847؛

7. Najafi Y, B Nowruzi, AH Sari. Review on the Combined Effect of Cold Plasma Treatment Technology and Cyanobacteria in Heavy Metal Removal such as Zinc, Calcium, and Magnesium. Iranian Journal of Applied Physics. 2023; 13(1): 75-116.؛

8. Nowruzi B, Jafari S. Plant-cyanobacteria interactions: Beneficial and harmful effects of cyanobacterial bioactive compounds on soil-plant systems and subsequent risk to animal and human health. Phytochemistry. 2021; 192: 112959. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112959 PMid:34649057؛

9. Shah AA, Saeedi M. Biological degradation of plastics: a comprehensive review. Biotechnology advances. 2008; 26(3): 246-265. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005 PMid:18337047؛

10. Jacob-Lopes E, R Sartor. Biodegradable Plastics from Cyanobacteria. Materials Research Foundations. 2021; 99.؛

11. Anvar S, B Nowruzi, M Tala. Bioactive products of cyanobacteria and microalgae as valuable dietary and medicinal supplements. Food Hygiene. 2021; 11(1 (41)): 99-118.؛

12. Tan C, F Tao, P Xu. Direct carbon capture for the production of high-performance biodegradable plastics by cyanobacterial cell factories. Green Chemistry. 2022; 24(11): 4470-4483. https://doi.org/10.1039/D1GC04188F؛

13. Singh AK, Ahmad H. Progress and challenges in producing polyhydroxyalkanoate biopolymers from cyanobacteria. Journal of Applied Phycology. 2017; 29: 1213-1232. https://doi.org/10.1007/s10811-016-1006-1؛

14. Afreen R, Rhim A. Challenges and perspectives of polyhydroxyalkanoate production from microalgae/cyanobacteria and bacteria as microbial factories: an assessment of hybrid biological system. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2021; 9: 624-885. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.624885 PMid:33681160 PMCid:PMC7933458؛

15. Nowruzi B, G Sarvari, S Blanco. Applications of cyanobacteria in biomedicine, in Handbook of Algal Science, Technology and Medicine. 2020; Elsevier: 441-453. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818305-2.00028-0؛

16. Ansari S, T Fatma. Cyanobacterial polyhydroxybutyrate (PHB): screening, optimization and characterization. PLoS One. 2016; 11(6): e0158168. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158168 PMid:27359097 PMCid:PMC4928839؛
17. Rueda E, Saeedi A. Life cycle assessment and economic analysis of bioplastics production from cyanobacteria. Sustainable Materials and Technologies. 2023; 35: e00579. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00579؛
18. Agarwal P, Singh H. Cyanobacteria as a promising alternative for sustainable environment: Synthesis of biofuel and biodegradable plastics. Frontiers in Microbiology. 2022; 13. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.939347 PMid:35903468 PMCid:PMC9325326؛
19. Singh PK. Cyanobacterial biology in twenty-first century. Frontiers in Microbiology. 2023; 14: 1184669. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1184669 PMid:37065144 PMCid:PMC10090853؛
20. Arias D M, J García, E Uggetti. Production of polymers by cyanobacteria grown in wastewater: Current status, challenges and future perspectives. New biotechnology. 2020; 55: 46-57. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.09.001 PMid:31541716؛
21. Das M, SK Maiti. Recent progress and challenges in cyanobacterial autotrophic production of polyhydroxybutyrate (PHB), a bioplastic. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021; 9(4): 105379. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105379؛
22. Mahmoud N A. Impacts of Biodegradable Plastic on the Environment, in Handbook of Biodegradable Materials. 2023; Springer. 811-837. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09710-2_34؛
23. Carpine R. Industrial production of poly-β-hydroxybutyrate from CO2: can cyanobacteria meet this challenge? Processes. 2020; 8(3): p. 323. https://doi.org/10.3390/pr8030323؛
24. Gomes Gradíssimo D, L Pereira Xavier, A Valadares Santos. Cyanobacterial polyhydroxyalkanoates: A sustainable alternative in circular economy. Molecules. 2020; 25(18): p. 4331. https://doi.org/10.3390/molecules25184331 PMid:32971731 PMCid:PMC7571216؛
25. Oliveira Bispo Cardoso L. The Patent Landscape of Polyhydroxyalkanoates Production by Algae and Cyanobacteria. Recent Patents on Biotechnology. 2023; 17(3): 271-288. https://doi.org/10.2174/1872208317666221207145011 PMid:36503455؛
26. Krasaesueb N. Inactivation of phosphate regulator (SphU) in cyanobacterium Synechocystis sp. 6803 directly induced acetyl phosphate pathway leading to enhanced PHB level under nitrogen-sufficient condition. Journal of Applied Phycology. 2021; 33(4): 2135-2144. https://doi.org/10.1007/s10811-021-02460-w؛
27. Amadu A A, deGraft-Johnson, G K Ameka. Industrial Applications of Cyanobacteria, in Cyanobacteria-Recent Advances in Taxonomy and Applications. 2021; IntechOpen.؛
28. Agarwal P. Cyanobacteria as a promising alternative for sustainable environment: Synthesis of biofuel and biodegradable plastics. Frontiers in Microbiology. 2022; 13: 939347. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.939347 PMid:35903468 PMCid:PMC9325326؛
29. Karan H. Green bioplastics as part of a circular bioeconomy. Trends in plant science. 2019; 24(3): 237-249. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.010 PMid:30612789؛
30. Kamravamanesh D, M Lackner, C Herwig. Bioprocess engineering aspects of sustainable polyhydroxyalkanoate production in cyanobacteria. Bioengineering. 2018; 5(4): p. 111. https://doi.org/10.3390/bioengineering5040111 PMid:30567391 PMCid:PMC6315491؛