

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 fertilissima* 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. *Journal of Research in Environmental Health*. 10(1):110-124.

کاربرد سیانوباکتری‌ها در تولید محصولات تجزیه پذیر

بهاره نوروزی

* دانشیار، گروه بیوتکنولوژی، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، 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 قابل توجهی برای تثبیت و جذب نیتروژن اتمسفر و دی‌اکسیدکربن و استفاده از آن برای رشد در آب‌وهوای نامساعد، محیط‌هایی مانند خاک‌های غیر حاصلخیز 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 تولیدکننده 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 اشپرنگر، 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، کلمات کلیدی 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 فرتیلیزما 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 پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات (PHAs) و PHB از میان کویلیم‌های دیگر باشند.

نتیجه‌گیری: افزودن مکمل‌هایی مانند مکمل کربونیل‌سیانید m-کلروفنیل‌هیدرازون (CCCP)، دی-سیکلوهگزیل کربودی‌ایمید (DCCD)، مونوفلوئورواستات، آل متیونین سولفوکسیمین (MSX) و آزاسرین به محیط‌کشت سیانوباکتری‌ها، میزان PHB را تا تقریباً 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 محصولات زیستی و انباشت کمتر آن‌ها نسبت به باکتری‌های هتروتروف است.

کلیدواژه‌ها: سیانوباکتری‌ها، پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات، پلاستیک‌های زیستی، بهداشت محیط

استناد: نوروزی ب. کاربرد سیانوباکتری‌ها در تولید محصولات تجزیه‌پذیر. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت

محیط. بهار ۱۴۰۳؛ ۱۱۰(۱): ۱۱۴-۱۲۴.

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 به کار می‌رود به دلیل 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 بر خواهند گرفت. در حال حاضر 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^۱، آنابنا سیرسینالیس^۲، اسپیرولینا پلتنسیس^۳ و سینکوسیستیس کنسوریتا^۴ سیانو باکتری‌هایی هستند که می‌توانند در کارخانه‌های زیستی برای تولید سوخت‌های زیستی و پلاستیک‌های زیستی در نظر گرفته شوند. آن‌ها می‌توانند زیست‌پلیمرهایی نظیر PHB^۵ و PHAs^۶ تولید کنند که هر دو پایدار و مقرون-به‌صرفه هستند. زیست‌پلاستیک‌هایی که اخیراً ساخته شده‌اند مثل Bio-PET، منشا زیستی دارند که از مونومرهای ذرت ساخته شده‌اند اما پروسه‌ی پلیمریزه شدن آن‌ها شیمیایی است و پلیمر نهایی کیفیتی مشابه PET سنتی دارد که از مواد غیرقابل تجزیه 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 در دسترس 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 می‌کنند (۲).

امروزه در بسیاری از برنامه‌های صنعتی شامل باغبانی، بسته‌بندی مواد غذایی، 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 زمانی که مواد مغذی مثل نیتروژن کمیاب باشند. در طی کلروسیس، سیانوباکتری‌ها ماشین‌های فتوسنتزی خود را از بین می‌برند. فراتر از این فقدان یک دستاورد قابل توجه 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 کوتاه‌تر تولید کند.

تاثیرگذارترین کاتالیز است 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).

ریز جلبک‌ها تا به امروز کاربردهای صنعتی متعددی داشته‌اند - نمونه‌هایی از آن‌ها شامل استفاده در مواد غذایی (۴)، خوراک (۵)، لوازم آرایشی (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 مستقیماً در نتیجه متابولیسم توسط سایر میکروارگانیسم‌ها

^۵ Polyhydroxybutyrate (PHB)

^۶ Polyhydroxyalkanoates (PHAs)

^۱ Nostoc muscorum

^۲ Anabaena circinalis

^۳ Spirulina platensis

^۴ Synechocystis consortia

(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 حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی (۱۱، ۱۰).

علاوه بر آن، طیف گسترده‌ای از ترکیبات فعال بیولوژیکی در زیست توده‌ی ریز جلبکی - به شکل پروتئین، اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه (PUFAs)^۱، 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، ضد میکروبی و ضدچاقی می‌باشند و انتظار می‌رود ارزش بازار آن‌ها در مواد غذایی در کوتاه‌مدت افزایش یابد (۱۱).

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

در حال حاضر، 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. خشک کردن 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 خشک کردن با انرژی بالا فقط برای استخراج PHA مورد نیاز است. خشک کردن در هوا نیز امکان‌پذیر است، اما به یک منطقه بزرگ و زمان طولانی‌تر نیاز دارد. استفاده از انرژی خورشیدی یا باد برای فرآیند خشک کردن نیز می‌تواند بر این محدودیت‌ها غلبه کند (۴).

هزینه تولید پلاستیک سنتی مبتنی بر نفت در سال ۲۰۰۲، ۰/۰۱ یورو به ازای هر کیلوگرم بود که به طور قابل توجهی کمتر از هزینه ۰/۰۹ 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 همین دلیل 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^۲ و سینکوکوس^۳ محتوای PHB از ۴/۵ تا ۳۵ درصد افزایش معناداری یافت (جدول ۲).

روش کار

در مقاله‌ی حاضر، مقالات مرتبط منتشر شده در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۲۳ در بانک‌های اطلاعاتی اشپرینگر، ساینس دایرکت، اسکاپوس و جان وایلی جهت به دست آوردن آخرین یافته‌ها در زمینه پتانسیل سیانوباکتری‌ها در تولید محصولات تجزیه‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله مروری با جستجو در سایت MeSH، کلمات کلیدی مناسب انتخاب گردید و بر اساس آن‌ها، سی مقاله‌ی جدید مروری و تحقیقاتی، جمع‌آوری گردید. در این تحقیق از کلید-واژه‌هایی مانند سیانوباکتری‌ها، پلی‌هیدروکسی آلکانوات، پلاستیک‌های زیستی، بهداشت محیط جهت جستجو در بانک‌های اطلاعاتی مورد استفاده قرار گرفت. با این حال واژه‌هایی مانند سایر انواع جلبک‌ها و محصولات شیمیایی مدنظر نبوده است.

³ Synechococcus

¹ Polyunsaturated Fatty Acids (PUFAs)

² Synechocystis

یافته‌ها

پتانسیل سیانوباکتری‌ها در پالایش محیط

سیانوباکتری‌ها به دلیل 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 صنعتی شدن محیط‌زیست همچنین اقدامات کشاورزی بوجود می‌آید. تحقیقات اخیر نشان داده است که آب آلوده از منابع مختلف را می‌توان با کمک این میکروارگانیسم‌ها به خوبی تصفیه کرد و سیستم‌هایی که بر اساس سلول‌های پروکاریوتی فتوسنتزی عمل می‌کنند یک جایگزین خوب برای فرآیندهای بیولوژیکی رایج مثل لجن فعال به شمار می‌روند (۶). با پرورش آبزیان حجم زیادی آب آلوده به نیتروژن تبدیل می‌شود که وارد دریاها شده و مستقیماً 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 تست شده 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 به خوبی 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 *Limnolobus limneticus* و *Leptolyngbya subtilis* در دفع Cr(VI) از فاضلاب موثر است، در حالی-که ترکیب سیانوباکتری لجن‌ساز که حاوی گونه‌های *Oscillatoria* sp.، *Chlorella* sp. و *Phormidium* sp. می‌باشد، به خوبی 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 ۲۶ppb تا ۱۰۰ppm در pH از ۵ تا ۹ است. سیانوباکتری‌های جنس *Nostoc* با تولید اگزوپلی‌ساکارید توانایی جذب فلزات را افزایش می‌دهند. گونه‌ی اسیلاتوریا^۱ 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 به دلیل مقاومت طبیعی و گزینش آلاینده‌های زیست‌محیطی، از یک پتانسیل متابولیکی قابل توجه برای تجزیه مواد شیمیایی مصنوعی (زئوبیوتیک) برخوردارند. به عنوان مثال، در گونه *Spirulina spp.* توانایی سوخت-وساز زئوبیوتیک فسفات Dequest 2054 به اثبات 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 به اثبات رسید، در حالی که هیدروکربن‌های آروماتیک توسط *Synechocystis aquatilis* تجزیه می‌شوند، همچنین گزارش شده است که سیانوباکتری‌ها دارای سیستم آنزیمی مناسب جهت تجزیه رنگ‌های نساجی می‌باشند (۸).

انواع پلاستیک‌های زیستی

مطالعات اخیر انجام شده در سال‌های اخیر (جدول ۱) در زمینه‌ی ترکیب پلیمری پلی‌هیدروکسی بوتیرات (PHB)، شرایط تولید، میزان تولید و نوع سیانوباکتری تولیدکننده، نشان داد که سیانوباکتری *Alusira fertilissima* CCC444، در شرایط محدودیت فسفر، ۸۵ درصد تولید را دارد. این در حالی 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 به راحتی می‌توان به تولید تجاری بسیاری از ترکیبات پلیمری دست یافت.

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

۱- زیست پلاستیک‌های بر پایه‌ی نشاسته: پلیمرهای بر پایه‌ی نشاسته به عنوان دسته‌ای تعریف می‌شوند که حاوی نشاسته طبیعی یا اصلاح شده هستند. این گروه شامل پلیمرهای ساخته شده 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 ساخته شده از سلولز که از آسترهای سلولزی یا سایر مشتقات سلولزی تشکیل شده‌اند چراکه سلولز از واحدهای گلوکز که بوسیله‌ی پیوند کنار هم قرار گرفته‌اند ساخته شده است و توسط نشخوارکنندگان خاصی هضم می‌شوند. برای مثال سلولز استات و متیل سلولز.

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

۴- بیوپلاستیک‌های مبتنی بر پروتئین: مشتق شده از منابعی مانند شیر، گلو تن گندم و سایر منابع پروتئین. بسیار شبیه به فرآیند پنیرسازی، به عنوان مثال، پلاستیک‌های زیستی کازئین.

۵- بیوپلاستیک‌های مبتنی بر لیگنین: اگرچه لیگنین مدت‌ها محصول جانبی تولید سلولز بوده است، اما اخیراً 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-گلوکز آمین تشکیل شده است که توسط پیوندهایی به هم متصل شده‌اند. اگرچه کیتین در اسکلت بیرونی بندپایان و دیواره‌ی سلولی مخمرها و قارچ‌ها یافت می‌شود، اما پوسته‌ی سخت پوستان مانند خرچنگ، میگو است و میگو منبع اصلی استخراج آن می‌باشد. به عنوان مثال، پلاستیک‌های زیستی ساخته شده از کیتوزان، کیتین ترکیب شده با PP و غیره (۹).

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

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

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

منابع بیوپلاستیک‌ها

Spirulina platensis, *Spirulina* sp. LEB-18
Synechococcus, *Synechocystis salina*
Spirulina maxima, *subsalsus*
Synechocystis sp. PCC6803
Synechococcus, *Synechococcus elongates*
Gloeotheca sp. PCC 6909, *elongates*
Microalgae, *Microalgae consortium*
Nostoc muscorum و *consortium* هستند. در این-
 میان استات، پروپیونات و دی اکسید کربن دارای بیشترین
 بازده استخراج هستند.

PHA ها را می‌توان برای ایجاد بخیه‌های قابل جذب،
 صفحات استخوانی، فیلم‌ها و منگنه‌ها، تکیه‌گاه‌های مغز
 استخوان، ابزارهای ترمیم تاندون، ایمپلنت‌های چشمی،
 جایگزین‌های پوستی، دریچه‌های قلب، بافت‌هایی برای
 استفاده‌ی قلبی-عروقی، 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

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 به دلیل 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 سنتز شده میکروبیولوژیکی پتانسیل
 قابل توجهی را برای کاربردهای مختلف در زمینه‌های مختلف
 نشان داده‌اند. زمینه‌هایی از جمله داروها (سیستم‌های
 رهایش کنترل شده و تحویل دارو)، کشاورزی (تخلیه منظم
 آفت‌کش‌ها، تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه و علف‌کش‌ها و
 کودها) و سوخت‌های زیستی (متیل استر ۳- هیدروکسی-
 بوتیرات و متیل استرهای ۳ هیدروکسی آلکانوات
 (MCL)(۸).

مطابق جدول یک، منابع عمده‌ی تولیدکننده‌ی PHB ها،
Synechocystis sp. PCC 6803 سیانوباکتری‌های
Synechococcus, *Synechocystis* sp.
Synechocystis sp. PCC 6714, *sp.* MA19
Spirulina platensis, *Spirulina platensis*
Botryococcus braunii, UMACC 161

میکروارگانسیم‌های متعددی در موقعیت‌های متمایز توانایی تجزیه PHA ها را دارند. تجزیه PHA در شرایط هوازی دی‌اکسید کربن و آب تولید می‌کند، در حالی که در شرایط بی‌هوازی دی‌اکسید کربن و متان تولید می‌کند. زمان تخریب به تعدادی متغیر از جمله مساحت سطح، فعالیت میکروبی محیط، pH، دما، رطوبت، وجود سایر مواد مغذی 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. در نتیجه 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، اولاً هیدرولیز زیستی یا غیرزیست و به‌دنبال آن جذب زیستی (تخریب‌زیستی) است و دوماً پراکسیداسیون و به‌دنبال 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 متیل فنوکسی 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 میکروارگانسیم ارزیابی شود (۱۵).

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

پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها

پلیمرهای زیستی مانند PHAs، توسط میکروارگانسیم‌ها به‌عنوان ذخیره چربی در داخل سلول‌ها تولید می‌شوند. 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 نو ترکیب و یوکاریوت‌های نو ترکیب همگی می‌توانند پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها (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 کاملاً 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). به دلیل 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 منشأ طبیعی، زیست تخریب‌پذیری، سازگار با محیط زیست، پیژوالکتریک، 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.

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 بیوسنتز شده همیشه به عنوان یک کوپلیمر تشکیل نمی‌شوند، بلکه گاهی اوقات به عنوان ترکیبی از دو PHA مجزا تشکیل می‌شوند.

بازیابی و خالص‌سازی بیوپلیمرها مراحل 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، سانتریفیوژ کردن ماده‌ی جامد است که از سلول‌های حاوی پلیمر زیستی داخل سلولی 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 ایزوبوتیل کتون، متیلن کلرید، پروپیلن کربنات، اتیل استات و ایزوآمیل الکل 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 مورد استفاده در استخراج PHA است. این روش‌ها معمولاً در ابتدای فرآیند استخراج برای مختل کردن 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

عین حال 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 از جمله لیزوزیم‌ها، نوکلئازها و پروتئازها متکی است. محیط کشت بر اثر بازیابی برای هیدرولیز سلول‌های حاوی PHA تکمیل می‌شود. شرایط عملیاتی ملایم، گزینش‌پذیری زیاد آنزیم‌ها در هیدرولیز کردن 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 اولین بار توسط Carr G.N گزارش شد. در سال ۱۹۶۶ تا ۱۰٪ (dcw) در *Chlorogloea fritschii* مشاهده شد. در کشت فوتواتوتروفیک آرتروسیراپلاتنسیس (اسپیرولینا) حداکثر ۶٪ PHA انباشته شده است. بیوسنتز PHA در *Nostoc. Synechocystis sp. PCC 6803* و *Synechococcus sp. MA19* به ترتیب تا ۳۸، ۴۶ و ۵۵ درصد تحت شرایط مختلف کشت گزارش شده است (۴). تولید PHA گزارش شده 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-هیدروکسی بوتیرات-کو-۳-هیدروکسی هگزانات) تا ۵۰ درصد (dcw) در *Aeromonas hydrophila* رشد یافته در محیط کشت ۵ درصد گلوکز با اسید لوریک ۵ درصد گزارش کرده‌اند. تولید PHB تا ۷۷٪ در اشیریشیاکلی نوترکیب با استفاده از گلوکز به عنوان سوپسترا با بهره‌وری ۳۲۰۰ mg/l/h گزارش می‌شود. با این حال، منبع کربن مورد استفاده ۳۸٪ از هزینه کلی تولید را تشکیل می‌دهد. در مقایسه با باکتری‌های هتروتروف (۴ تا ۵ درصد بستر

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 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، قابل استفاده نیست (۳). بیوسنتز پلیمر PHA با دپلمیریزاسیون مرتبط است. پلیمرهای PHA معمولاً تحت فرآیند چرخه‌ای بیوسنتز و دپلمیریزاسیون قرار می‌گیرند، که در آن PHA از پیش‌سازهای acyl-CoA از طریق مسیرهای متابولیکی مختلف تحت شرایط محدودیت مواد مغذی تشکیل می‌شود، زیرا منبع کربن به عنوان دانه‌های پلیمری در سلول‌ها ذخیره می‌شود. بهره‌برداری از منابع کربن برون‌زا مانند گلوکز، فروکتوز و اسات، کاهش تحرک و افزایش بیوسنتز PHA را نشان داد (۱۲).

Synechocystis sp. PCC6803 در محیط کشت BG-11 با غلظت نیترژن کاهش‌یافته کشت شد و حداکثر تجمع PHB ۱۸۰ میلی گرم در میلی‌لیتر را نشان داد، 192 Synechocystis sp. CCALA در یک فتوبیوراکتور لوله‌ای ۲۰۰ لیتری کشت شد و حداکثر ۱۲۵ میلی گرم در میلی‌لیتر PHB را تولید کرد و یک سویه سیانوباکتری از نوع وحشی Synechocystis sp. PCC6714 حداکثر ۶۴۰ میلی گرم 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 (نیترژن 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

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 آب گرم، 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 (فتوبیوراکتور)، 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 ۷-۹ 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) به پایان 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

کمبود نیتروژن نشان داد که منبع کربن به سایر مسیرهای متابولیسمی برای تولید بیوپلیمر منحرف می‌شود که به‌عنوان ذخیره انرژی استفاده می‌شود و در شرایط مساعد مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد. تجمع PHA در *Synechocystis salina* و *Botryococcus braunii* رشد کرده 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 به-عنوان 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. کولتو 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 در *Synechocystis sp. PCC 6803* 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٪

PHB (dcw) و ۷۷٪ PHB-co-PHV (dcw) را در *Alusira fertilissima 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 سیانوباکتری دستکاری ژنتیکی

مطالعات زیادی بر روی دستکاری ژن سیانوباکتری‌ها انجام شده است که مهندسی متابولیک و سنتز PHB، *Synechocystis sp. PCC 6803* بیشترین سویه مورد مطالعه است. قراردادن اپرون *C. nectar PHA* در *Synechococcus PCC 7942* تولید PHA را از ۳ به ۲۵ درصد (dcw) افزایش می‌دهد. *Synechocystis 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 *Synechocystis sp. PCC 6803* نشان داد. دانشمندان بهره‌وری حجمی ۲۶۳ mg/l/d و بازده ۲۶۳ 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)

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

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

بهره‌برداری از مهارکننده‌های متابولیسمی برای افزایش PHA سیانوباکتری

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. این گونه به دلیل خروجی زیست‌توده که دارای محتوا پروتئین بالایی است مهم است و می‌تواند برای تهیه خوراک دام یا مواد مغذی 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 میکوتوکسین‌ها رعایت شود، می‌تواند به عنوان 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 تبدیل شدن به منبع جایگزین تولید PHA هستند. علت اصلی تولید PHA با استفاده از ریزجلبک‌ها کاهش هزینه است. در حال حاضر، 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

PHB مطالعات زیادی در مورد اثر مهارکننده متابولیک بر تولید PHB انجام شد. به عنوان مثال پس از استفاده از مکمل *N. muscorum* با کربونیل سیانید *m*-کلروفنیل-هیدرازون (CCCP)^۱ و دی‌سیکلوهاگزیل کربودی‌ایمید (DCCD)^۲، میزان PHB از ۸/۵ درصد به ترتیب به ۲۱ درصد و ۱۷ درصد افزایش یافت. مطالعات نشان می‌دهد که افزودن مونوفلوئوروآستات میزان PHB را تا ۱۹ درصد افزایش می‌دهد (dcw)، در حالی که اضافه شدن *Lmethionine-DL-sulfoximine* (MSX)^۳ آزارین 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 انجام شده بر روی *Chlorogloea fritschii* TISTR 8527 در دو مرحله کشت، حداکثر تجمع ۲۵٪ PHB (dcw) را با استفاده از استات به عنوان بستر با $51 \pm 7\%$ (وزنی/وزنی) راندمان تبدیل را نشان می‌دهد. از آنجایی که مرحله اول حداکثر زیست‌توده را تولید می‌کند، به نظر می‌رسد این استراتژی به طور 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 میلی گرم در لیتر PHA در ۱۴ روز تولید شد. سیانوباکتریوم در محیطی بهینه رشد کرد به طوری که فسفر و نیتروژن تقریباً بین ۷ تا ۸ روز با حداکثر تولید زیست‌توده تا ۲ گرم در لیتر (dcw) مورد استفاده قرار گرفت و در نتیجه به دلیل 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 به دلیل تولید متابولیت‌های مختلف است که با بیش از یک نوع ترکیب به عنوان یک

³ L-Methionine sulfoximine (MSX)

¹ Carbonyl cyanide 3-chlorophenylhydrazone (CCCP)

² dicyclohexylcarbodiimide (DCCD)

را افزایش دهد. البته جدا از تغییرات شرایط کشت، انتخاب سویه بسیار پربازده نیز می‌تواند بازده تجمع PHA را از ۰/۵٪ تا حدود ۰/۷۰٪ (dcw) افزایش دهد.

تشکر و قدردانی: این مقاله کاملاً 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 تأثیر بگذارد را رد می‌کند و تعارض منافع ندارد.

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

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

References

- 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>
- 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>
- 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
- 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>
- 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>
- 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
- 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.
- Nowruzi B, Jafari S. Plant-cyanobacteria interactions: Beneficial and harmful effects of cyanobacterial bioactive compounds on soil-plant systems and subsequent risk to

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 بدون شک با ادغام همه‌ی این مواد تحت یک روش پالایش بهبود می‌یابد. نتایج کلی نشان داد زمانی که سیانوباکتری با غلظت نیتروژن کاهش یافته کشت شد، میزان PBH تا ۱۸۰ میلی گرم در میلی لیتر افزایش یافت. علاوه بر آن کشت در فتوبیوراکتورهای لوله‌ای، حداکثر ۶۴۰ میلی گرم در لیتر PHA را در محیط‌های رشد موجب شد. در واقع محققان معتقدند که تجمع زیاد PHA در سیانوباکتری‌ها، تحت استرس تغذیه‌ای رخ می‌دهد. معمولاً استفاده از محیط کشت زاروک با محدودیت نیتروژن و فسفر به ترتیب ۳۰/۷ درصد و ۱۴/۱ درصد می‌تواند تولید کوپلیمر PHB-PHV

- animal and human health. *Phytochemistry*. 2021; 192: 112959. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112959> PMID:34649057
- 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
 - Jacob-Lopes E, R Sartor. Biodegradable Plastics from Cyanobacteria. *Materials Research Foundations*. 2021; 99.
 - 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.
 - 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>
 - 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>
 - 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
 - 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. Krasauesueb 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