



Biodegradable Films from Bacterial Cellulose: A Review

Dorsa Hoseinzade , Alireza Mehregan Nikoo* 

*Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Agriculture Faculty, University of Guilan, Iran
(Received: 13/12/2023, Revised: 28/01/2024, Accepted: 14/05/2024, Published: 09/06/2024)

DOR:20.1001.1.22286675.1403.15.57.5.4


ABSTRACT

The escalating environmental challenges arising from the extensive utilization of plastic packaging have led to a growing interest in biocompatible polymers among researchers and producers in the food industry. Bacterial cellulose is a natural polysaccharide that is mainly produced by the Acetobacter species. Biodegradability, crystallinity and high purity, suitable physicochemical properties and also the good performance of this polymer as a matrix for the production of antimicrobial and antioxidant packaging have made this polysaccharide to be noticed. Cellulose films produced via the static culture technique may exhibit notable efficacy in extending the shelf life of various products, particularly meat products, through treatment with diverse antimicrobial solutions along with polysaccharides like chitosan. The primary obstacle in bacterial cellulose production lies in the identification of an appropriate carbon source and cost minimization. Findings from studies in this area suggest that potential sources include waste materials from various sectors, including the beverage and brewing industries, agriculture, biological refineries of paper pulp and sugar, microalgae-related industries, biodiesel production, and even textile waste. It can be exploited as a cost-effective source of carbon supply for the production of microbial cellulose on an industrial scale. In this investigation, the utilization of bacterial cellulose and its manufacturing techniques are presented, alongside an examination of its application in the fabrication of eco-friendly films and constructions for food packaging. Furthermore, an analysis is conducted on the potential of generating bacterial cellulose utilizing waste materials as carbon sources.

Keywords: Packaging, Biocompatible, Bacterial Cellulose, Low-Cost Carbon Sources

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: a.mehregan@guilan.ac.ir

علمی - مروری

مروری بر فیلم‌های زیست تخریب پذیر حاصل از سلولز باکتریایی

درسا حسین زاده^۱ ID، علیرضا مهرگان نیکو^۲ ID*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، ایران ۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، ایران

DOR: 20.1001.1.22286675.1403.15.57.5.4

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸

چکیده

به دلیل افزایش معضلات زیست محیطی، ناشی از مصرف گسترده بسته بندی‌های پلاستیکی، پلیمرهای زیست‌سازگار بیش از پیش مورد توجه محققین و تولیدکنندگان صنعت غذا قرار گرفته اند. سلولز باکتریایی یک پلی ساکارید طبیعی است که عمدتاً توسط گونه‌های باکتریایی استوباکتر تولید می شود. زیست تخریب پذیری، بلورینگی و خلوص بالا، خواص فیزیکی شیمیایی مناسب و نیز عملکرد خوب این پلیمر به عنوان یک ماتریس برای تولید بسته بندی‌های ضد میکروبی و آنتی اکسیدانی باعث شده تا این پلی ساکارید مورد توجه قرار گیرد. فیلم‌های سلولزی به دست آمده از طریق روش کشت استاتیک می توانند با غوطه‌وری در محلول‌های ضد میکروبی مختلف و در ترکیب با پلی ساکاریدهایی مانند کیتوزان، عملکرد چشمگیری در افزایش طول عمر انبارمانی محصولات به ویژه محصولات گوشتی داشته باشند. چالش عمده‌ی تولید سلولزهای باکتریایی یافتن منبع کربن مناسب و کاهش هزینه‌های تمام شده می باشد. بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، از پسماند صنایع مختلفی همچون: پسماندهای صنایع آشامیدنی و آبجوسازی، صنعت کشاورزی، پالایشگاه‌های زیستی خمیر کاغذ و صنایع قند، صنایع مرتبط با ریز جلبک‌ها، صنعت بیودیزل و حتی پسماندهای صنایع نساجی می‌توان به عنوان منابع مقرون به صرفه‌ی تأمین کربن برای تولید سلولز میکروبی در مقیاس صنعتی بهره برداری کرد. در این مطالعه ضمن معرفی سلولز باکتریایی و راهکارهای تولید آن به استفاده از آن در تولید فیلم‌های زیست تخریب پذیر و ساختارهای مورد استفاده در بسته بندی مواد غذایی پرداخته شده و نیز امکان پذیری تولید سلولز باکتریایی از پسماندها به عنوان منابع کربنی مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: بسته بندی، زیست تخریب پذیر، سلولز باکتریایی، منابع کربنی ارزان

۱- مقدمه

قابلیت تبدیل ساختار آن به نانوسلولز و ادغام آن با نانوذرات دیگر از ویژگی‌هایی است که باعث افزایش خاصیت ضد میکروبی سلولز باکتریایی شده و در مقایسه با سلولز گیاهی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۲]. اگرچه سلولز باکتریایی و سلولز گیاهی خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی دارند، اما ساختار مشابهی با دو زیر واحد سلولزی مجزا I و II دارند. درجه پلیمریزاسیون در سلولز باکتریایی از ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متفاوت است. پیوند بتا ۱،۴ گلیکوزیدی مسئول گروه هیدروکسیل سطح آزاد در سطح سلولز است. معمولاً رشته‌های سلولز باکتریایی ۱۰ تا ۵۰ نانومتر قطر و ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر طول دارند. به دلیل وجود تعداد زیاد اتم‌های اکسیژن و گروه‌های هیدروکسیل پیوندهای هیدروژنی در سلولز به فراوانی وجود دارد (شکل ۱). همچنین به دلیل نیروی واندروالسی دسته‌ها، ساختار موازی در سلولز مشاهده می شود

سلولز باکتریایی پلی ساکاریدی است که توسط باکتری‌های غیر بیماری‌زا با ساختار نانوالیافی سه بعدی تولید می شود. این پلی ساکارید از لحاظ ساختار شیمیایی با سلولز گیاهی یکسان بوده، اما خلوص و بلورینگی بیشتری نسبت به آن دارد و می تواند به عنوان ماتریس در فیلم‌های ضد میکروبی عمل کند [۱]. خصوصیات منحصر به فرد سلولز باکتریایی مانند غیر سمی بودن، زیست تخریب پذیری، آب دوستی و زیست سازگاری، همچنین

* رایانامه نویسنده مسئول: a.mehregan@guilan.ac.ir

پلیمرهای مبتنی بر پلی ساکارید است که برای بسته بندی مواد غذایی مورد توجه ویژه قرار گرفته است [۱۰]. این فیلم‌ها امکان کنترل تبادلات داخلی و خارجی گازها، رطوبت، رایحه‌های نامطلوب و مهاجرت ترکیبات را فراهم کرده و به عنوان یک عامل نگهدارنده عمل می‌کنند. علاوه بر این، آنها می‌توانند ترکیبات فعال ضد میکروبی یا آنتی‌اکسیدانی طبیعی را در ساختار خود حفظ کرده و به فضای نگهداری ماده‌ی غذایی منتشر کنند [۱۰]. فیلم‌ها و پوشش‌های زیست‌سازگار، دارای حداقل دو جزء می‌باشند: یک ماتریس که معمولاً از یک درشت مولکول تشکیل شده و قادر به تشکیل یک شبکه منسجم است و یک نرم کننده (عمدتاً گلیسرول) که برای افزایش انعطاف پذیری و کاهش شکنندگی فیلم یا پوشش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. گلیسرول که به عنوان نرم کننده سلولز باکتریایی استفاده می‌شود، باعث کاهش استحکام پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی بین زنجیره‌های سلولزی مجاور شده که منجر به بهبود انعطاف پذیری و جلوگیری از تشکیل ورقه‌های سفت و شکننده پس از خشک شدن می‌شود [۱۱]. با توجه به اینکه سلولز باکتریایی دارای درجه غذایی است می‌تواند به عنوان ماتریس در فیلم‌ها و پوشش‌های محصولات غذایی استفاده شود. علاوه بر این، ممکن است برای تولید نانو کریستال‌های سلولز باکتریایی تقویت کننده نیز مورد استفاده قرار گیرد [۴].

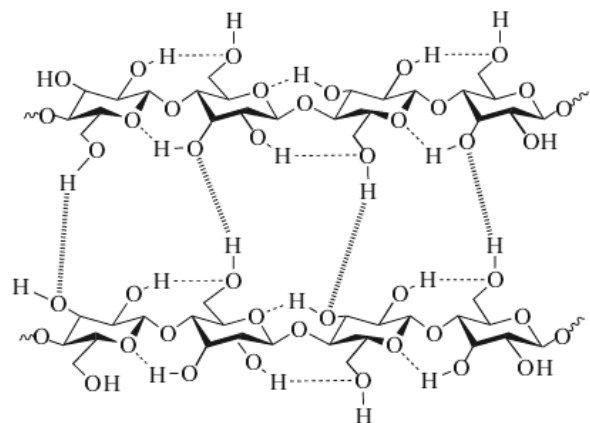
سلولز باکتریایی به دلیل خوراکی بودن و زیست‌تخریب‌پذیری به عنوان یک منبع جایگزین پلاستیک، برای بسته بندی در نظر گرفته می‌شود. این نانو ساختار منحصراً به فرد، استحکام مکانیکی و ظرفیت نگهداری آب بالایی دارد و علاوه بر آن غیر سمی نیز می‌باشد [۱۲].

یکی از چالش‌های عمده در فناوری پلیمرهای باکتریایی، یافتن منابع کربن ارزان قیمت به عنوان محیط کشت بوده که هزینه‌ی تهیه‌ی آن در مقیاس صنعتی با تولید محصول غذایی رقابت نکند. پسماندهای محصولات کشاورزی خام نظیر محصولات زراعی، میوه‌ها، سبزی‌ها و محصولات لبنی می‌توانند جایگزین مناسبی برای این منظور باشند [۱۳]. شایان ذکر است که سلولز باکتریایی را می‌توان نوعی فیبر رژیمی در نظر گرفت که در سال ۱۹۹۲ توسط سازمان غذا و داروی ایالات متحده در دسته‌ی ترکیبات ایمن طبقه بندی شد، بنابراین استفاده از آن به عنوان ماده اولیه، ماده بسته بندی یا افزودنی غذایی مجاز می‌باشد [۱۴].

۲- تولید سلولز باکتریایی

باکتری‌های تولیدکننده‌ی سلولز، عموماً گرم منفی، هوازی و غیر فتوسنتزی هستند که در سرکه، میوه‌ها و سبزیجات یا نوشیدنی‌های الکلی یافت می‌شوند (Urbina et al., 2021). باکتری

که به توسعه نانوالیاف کریستالی و به دنبال آن ساختار میکروفیبریلار کمک می‌کند [۳]. سلولز می‌تواند باکتری را در برابر پرتوهای ماورا بنفش حفظ نموده و باعث شناور شدن باکتری در فصل مشترک هوا و مایع، به منظور تأمین اکسیژن کافی شود [۴]. همچنین سلولز باکتریایی می‌تواند هیدروژل تشکیل داده و به دلیل داشتن خواص ویژه رئولوژیکی به گستردگی در صنایع غذایی برای بهبود ویژگی‌های محصولات غذایی و آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سلولز باکتریایی می‌توان به عنوان قوام دهنده، تثبیت کننده و اصلاح کننده بافت، همچنین به عنوان بسته بندی خوراکی و زیست تخریب پذیر مواد غذایی در صنایع غذایی استفاده کرد [۵].



شکل (۱): ساختار مولکولی سلولز [۶].

نانوذرات دارای فعالیت‌های ضد میکروبی، توانایی مهار اکسیژن، نفوذناپذیری در برابر پرتو ماوراء بنفش و ویژگی‌های دیگری هستند که باعث کاربرد وسیع آنها در تولید کامپوزیت‌های بسته بندی می‌شود. نسبت سطح به حجم بالای این ذرات می‌تواند دلیلی برای سمیت آنها تلقی شود، بنابراین مطالعه مهاجرت و نحوه تعامل آنها با ماتریس پلیمر بسته بندی یکی از نکات مهمی است که در تولید کامپوزیت‌های بسته بندی اهمیت دارد [۷]. پوشش‌های خوراکی ادغام شده با نانوذرات نسبت به بسته بندی‌های معمولی در حفظ و نگهداری محصولات غذایی سودمندتر هستند. نانوذرات می‌توانند خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرهای بسته بندی مانند استحکام، دوام، انعطاف‌پذیری و قابلیت بازدارندگی فیلم‌ها و کامپوزیت‌ها را بهبود بخشند [۸].

امروزه، فیلم‌های زیست‌سازگار بسته بندی که حاوی نانوذرات و ترکیبات زیست فعال می‌باشند به عنوان مواد ایده آل برای حفظ کیفیت و ایمنی مواد غذایی بسته بندی شده در نظر گرفته می‌شوند [۹]. پلیمرهای زیست تخریب پذیر به دست آمده از منابع طبیعی، گزینه‌ای مناسب برای توسعه بسته بندی مواد غذایی هستند. در میان پلیمرهای طبیعی، سلولز با منشأ باکتریایی، ماده‌ای با خواص فوق العاده و متمایز از سایر

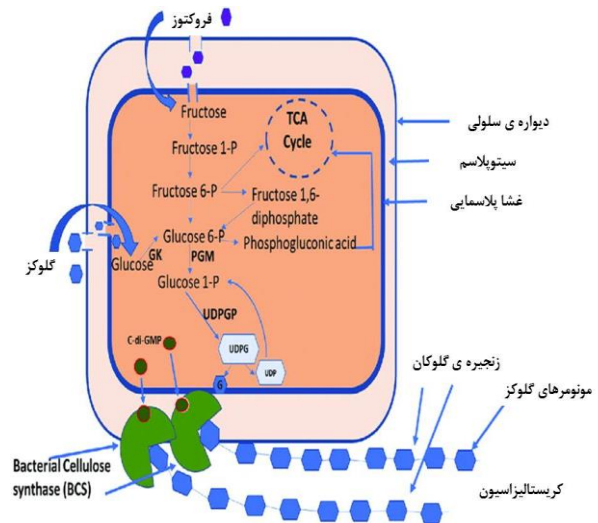
چرخه ی تولید یوریدین دی فسفات-گلوکز^۲ می‌شود که مانند بستری برای تشکیل میکروفیبریل‌ها عمل می‌کند [۱].

۲-۲- مرحله ی دوم

مرحله ی دوم در سطح غشا باکتری رخ می دهد. در این مرحله آنزیم ساکارز سنتتاز، یوریدین دی فسفات-گلوکز را به سطح غشا پلاسمایی حمل می کند. گلوکزهای باقیمانده از منافذ غشای باکتری خارج شده و در سطح یوریدین دی فسفات-گلوکز به کمک آنزیم سلولز سنتتاز، با پیوندهای گلیکوزیدی بتا ۱ به ۴ به یکدیگر متصل شده و زنجیره‌هایی به طول ۹ میکرومتر را بوجود می آورند؛ سپس بلافاصله با یکدیگر پیوند هیدروژنی برقرار می کنند تا آرایش کریستالی و سخت میکروفیبریل‌ها را بوجود آورند [۱]، [۱۶].

به‌طور کلی برای تولید سلولز باکتریایی در مقیاس آزمایشگاهی دو روش کشت استاتیک و دینامیک وجود دارد. کشت استاتیک یک روش ساده و معمولی برای بیوسنتز سلولز باکتریایی است که در آن لایه ی سلولز در فصل مشترک هوا/ محیط مغذی تولید می شود. در این روش بسته به ارلن یا ظرف مورد استفاده می توان اشکال مختلف غشاها را به دست آورد. ضخامت غشاء سلولزی تولید شده بستگی به زمان انکوباسیون دارد که معمولاً از ۱۴ روز تجاوز نمی کند، زیرا در صورت تخمیر طولانی مدت، متابولیت‌های بازدارنده نظیر گلیکولیک و فرمیک اسیدها در محیط کشت تجمع می یابند. از کشت استاتیک برای تولید فیلم‌های مناسب بسته بندی استفاده می شود [۱۳]. پس از گذشت چندین روز، غشا تشکیل شده روی سطح محیط کشت، برداشته شده و خالص سازی می شود. غشاها به دست آمده با یک محلول قلیایی رقیق داغ مانند هیدروکسید سدیم یا پتاسیم در مدت زمان معینی برای حذف سلول‌های باقیمانده ی باکتری، تیمار شده و با آب مقطر چندین بار شستشو داده می شوند. ممکن است بقایای سلول‌های باکتری یا محیط کشت بین الیاف سلولز باقی بمانند به همین دلیل لازم است شستشو با آب مقطر در چندین مرحله انجام شده و یا غشاها با امواج فراصوت تیمار شوند. شستشو با آب مقطر تا زمانی ادامه پیدا می کند که پی اچ پساب شستشو به ۷ برسد [۱۶]. سلولز را می توان پس از خالص سازی در دمای اتاق، آون و یا به روش انجمادی خشک کرد (شکل ۴) [۱۶]، [۱۲]. سلولز باکتریایی بدست آمده از کشت دینامیک در شکل (۳) نمایش داده شده است. برای تولید سلولز باکتریایی در مقیاس صنعتی از بیورآکتورهای صنعتی استفاده می شود. بیورآکتورهای صنعتی می توانند با بکارگیری همزن و

Komagataeibacter xylinus یک باکتری گرم منفی هوازی است که به‌عنوان بهترین تولیدکننده سلولز شناخته می‌شود. این فرایند در شکل (۲) به نمایش گذاشته شده است. به جز این گونه باکتری، باکتری‌هایی نظیر *Escherichia*، *Pseudomonas*، *Agrobacterium*، *Salmonella*، *Klebsiella* و *Sarcina ventriculi* نیز قادر به تولید سلولز می‌باشند [۱].



شکل (۲): مسیر سنتز سلولز از باکتری Komagataeibacter xylinus [۱۵].

سلولز باکتریایی به کمک تخمیر اکسیداتیو در یک محیط کشت ترکیبی تشکیل می شود [۱]. تولید سلولز باکتریایی به یک محیط کشت غنی از گلوکز و سایر منابع مغذی نیاز دارد که منجر به هزینه بالای تولید آن می شود. محیط کشت مورد استفاده برای تولید سلولز باکتریایی عمدتاً محیط هسترین-شرام^۱ بوده که حاوی گلوکز، پپتون واتر، عصاره مخمر به عنوان کربن و منابع نیتروژن است [۴]. در مرحله ی ابتدایی تولید سلولز، باکتری غیرفتوسنتزی *Komagataeibacter xylinus* در دمای ۲۵ درجه ی سانتی‌گراد و دامنه ی پی اچ ۳ الی ۷ و با استفاده از یک نوع ساکارید (گلوکز یا فروکتوز) به عنوان منبع کربن تخمیر شده و مقدار زیادی میکروفیبریل سلولزی تولید می کند [۱]. در ادامه به دو مرحله ی اصلی در تولید سلولزهای باکتریایی اشاره می گردد.

۲-۱- مرحله ی نخست

در مرحله ی نخست، تشکیل میکروفیبریل‌های سلولز در سیتوپلاسم و درون غشا باکتری صورت می‌پذیرد. سیتوپلاسم باکتری از گلوکز به عنوان سوبسترا استفاده کرده و میزبان

^۲ UDP-glucose (UDPG)

^۱ Hestrin-Schramm (HS) medium



شکل (۴): سلولز مرطوب بدست آمده پس از ۱۰ روز تخمیر و فیلم حاصل از آن در تصویر مشاهده می شود. تصویر A سلولز باکتریایی قبل از فرآیند خشک کردن و تصویر B فیلم بدست آمده پس از خشک کردن سلولز در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت [۲۱].

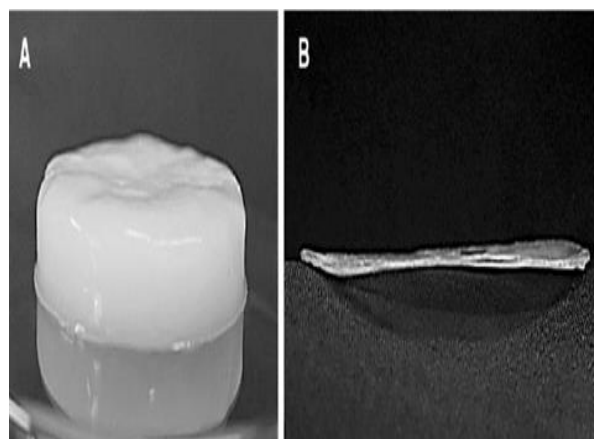
۳- سلولزهای باکتریایی در قالب نانوفیبریل‌ها^۱، میکروفیبریل‌ها^۲ و نانوکریستال‌ها^۳

با ترکیب نانو فیبریل‌ها و میکروفیبریل‌ها به همراه پلی ساکاریدها، می توان کامپوزیت‌های مناسب به منظور بسته بندی مواد غذایی را تهیه نمود. نانوفیبریل‌ها را می توان از طریق فرآیندهای مکانیکی از جمله همگن سازی با فشار بالا و آسیاب کردن بدست آورد. هیدرولیز اسیدی متداول ترین روش مورد استفاده برای تولید نانوذرات سلولزی است [۱۶]، [۲۲]. میکروفیبریل‌های سلولزی از زنجیره‌ای از کریستال‌های سلولز تشکیل شده اند که توسط نواحی پاراکریستالی مرتب گردیده‌اند. نواحی پاراکریستالی را می توان تحت تیمار اسیدی حذف نموده و نانوبلورهای سلولزی میله ای شکل بدست آورد. نانوکریستال‌های به دست آمده توسط فرآیند هیدرولیز اسیدی به ترتیب دارای قطر و طول متوسط 20 ± 5 و 290 ± 130 نانومتر می باشند [۲۳]. نانوالیاف‌ها به دلیل ساختار نانو و پایداری قابل توجه تا دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد می توانند در غذاهای فرآوری شده با حرارت استفاده شوند [۲۴]. افزودن نانوکریستال‌ها به فیلم‌های تهیه شده از سلولز باکتریایی منجر به افزایش استحکام کششی و نقطه ی شکست و کاهش نفوذپذیری بخار آب در فیلم‌ها می گردد [۲۵]. اگرچه منبع استحصال سلولز به طور قابل توجهی بر خواص نانوکریستال‌های سلولز تأثیر می گذارد اما چند پارامتر رایج دیگر مانند زمان هیدرولیز، دما، نوع اسید، غلظت اسید و

دیسک‌های هوادهی و افزایش نرخ انتقال مواد مغذی و اکسیژن به افزایش مقیاس تولید سلولز باکتریایی کمک کنند [۱۷].

جدول (۱): مزایا و معایب انواع روش‌های کشت سلولز باکتریایی

انواع کشت	مزایا	معایب	کاربرد
کشت استاتیک	تبلور بالا- استحکام مکانیکی بالا [۱۸]	فرآیند زمان بر تولید [۱۷]	پانسمان زخم، بسته بندی مواد غذایی، داربست کشت سلولی [۱۳]
کشت دینامیک	سرعت بالای تولید-سادگی فرآیند تولید [۱۳]- قدرت جذب آب و زیست تخریب پذیری بیشتر [۱۷]	استحکام مکانیکی، تبلور و درجه پلیمریزاسیون کم [۱۹]	حامل زیستی، ارسال دارو، تثبیت آنزیم، کشت سلولی، جاذب فلزات سنگین [۱۷]
کشت در رآکتور	تولید در مقیاس صنعتی- بازدهی بالا- سرعت بالای تولید [۱۷]	نیاز به نرخ انتقال اکسیژن بالا [۲۰]	اصلاح کننده بافت محصولات غذایی، بسته بندی، پانسمان، تصفیه آب، جاذب سطحی [۱۷]



شکل (۳): سلولز باکتریایی بدست آمده از کشت دینامیک [۲۱].

¹ Bacterial Cellulose Nanofibrils (BCNF)

² Bacterial Cellulose Microfibrils (BCMF)

³ Bacterial Cellulose Nanocrystals (BCNC)

تری ترین‌ها، اسیدهای فنولیک و فلاونوئیدها، از خود نشان دادند [۳۲]. فعالیت ضد باکتریایی کاتچین‌های چای سبز ناشی از مکانیسم‌های مختلفی است که می‌توان آن‌ها را به گروه‌های زیر دسته بندی کرد: (۱) مهار فاکتورهای بیماری زا (۲) اختلال در دیواره و غشای سلولی (۳) مهار آنزیم‌های داخل سلولی (۴) استرس اکسیداتیو (۵) آسیب به DNA و (۶) کیلاسیون آهن. این مکانیسم‌ها به طور همزمان با نسبت‌های متفاوت عمل می‌کنند. شواهد تجربی و نظری نشان می‌دهد که کاتچین‌ها با تشکیل پیوندهای هیدروژنی و آبگریز با سلول هدف اتصال مشترک برقرار می‌کنند [۳۳]. همچنین با گنجاندن لوریک اسید در سلولز باکتریایی، فیلم‌های ضد میکروبی و زیست تخریب پذیری قابل تهیه می‌باشند که بر باکتری *باسیلوس ساتیلیس* (گرم مثبت) موثرند [۳۴]. اگرچه مکانیسم خاصیت ضد میکروبی اسیدهای چرب آزاد به خوبی شناخته نشده است، Anzaku و همکاران (۲۰۱۷) گزارش دادند که اسیدهای چرب آزاد باعث فروپاشی غشای سلولی میکروب‌ها می‌شوند [۳۵]. برای تولید کامپوزیت‌های پلی وینیل الکل^۳ و سلولز باکتریایی با خواص ضد میکروبی، ابتدا ذرات نقره به کمک واکنش تالنز^۴ بر روی غشا مرطوب سلولز با غلظت‌های ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی/وزنی پراکنده شده و غشاها بعد از خشک شدن آسیاب می‌شوند [۳۶]. سنتز تالنز با استفاده از معرف تالنز $[Ag(NH_3)_2]^+$ به عنوان منبع Ag^+ و آلدئید به عنوان یک عامل کاهنده، نانوذرات نقره با اندازه کنترل شده را طی فرآیندی یک مرحله‌ای تولید می‌کند [۳۷]. میکروفیبریل‌های سلولز آسیاب شده در محلول وینیل الکل حل شده و کامپوزیت‌های ضد میکروبی مناسب برای بسته بندی تولید می‌شوند. تمامی کامپوزیت‌های حاوی نقره فعالیت ضد میکروبی خوبی در برابر باکتری *شریشیا کلای* که یکی از مهم ترین عوامل بیماری زا در صنایع غذایی است، از خود نشان می‌دهند [۳۶]. در پژوهش Jipa و همکاران (۲۰۱۲) فیلم‌های تک لایه و چندلایه زیست تخریب پذیر مبتنی بر سلولز باکتریایی حاوی اسید سوربیک با غلظت‌های ۱/۰٪ و ۵/۰٪ درصد وزنی/وزنی به عنوان عامل ضد میکروبی مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه فیلم‌های تک لایه ی تهیه شده از سلولز باکتریایی پودر شده و پلی وینیل الکل، برای به دست آوردن فیلم‌های چند لایه با غشای سلولز باکتریایی پوشانده شدند. آزمایش‌ها نشان داد که غلظت اسید سوربیک و سلولز باکتریایی پودر شده

نسبت اسید به سلولز نیز بر کیفیت نانوکریستال‌ها اثر گذارند [۲۶]. نانوسلولزهای باکتریایی^۱ عاری از ناخالصی‌هایی نظیر لیگنین، همی سلولز یا پکتین هستند به همین دلیل برای کاربرد در زمینه‌های زیست پزشکی مناسب می‌باشند. علاوه بر خلوص، نانوسلولزها به دلیل استحکام کششی استثنایی (تا ۳ گیگا پاسکال) و سختی بالا (تا ۱۶۰ گیگا پاسکال) تقویت کننده‌های مناسبی برای ساخت نانو کامپوزیت‌های تجدیدپذیر محسوب می‌شوند [۲۷]–[۲۹].

امروزه از نانو فیبریل‌ها و میکروفیبریل‌ها برای تقویت و بهبود ویژگی‌های فیلم‌های خوراکی مبتنی بر پلی ساکاریدها استفاده می‌شود [۳۰]. کیتوزان، نشاسته، آگار، آلژینات و پکتین با لیاف سلولز میکروبی تقویت می‌شوند تا خواص مکانیکی، خواص حرارتی و برهمکنش آنها با آب بهبود یابد [۱۶]. فیلم‌های ضد میکروبی یکی از اشکال بسته بندی فعال هستند که می‌توانند کیفیت و ماندگاری محصولات غذایی را حفظ کنند. این فیلم‌ها را می‌توان با به دام انداختن عوامل ضد میکروبی در فیلم‌ها تهیه کرد؛ برای مثال می‌توان با ترکیب سوسپانسیون سلولز باکتریایی به عنوان پایه‌ی اصلی، کیتوزان به عنوان یک عامل ضد میکروبی طبیعی، کربوکسی متیل سلولز (CMC) به عنوان ماده ای برای پخش یکنواخت مواد در سطح ماتریکس و گلیسرول به عنوان یک نرم کننده، یک فیلم ضد میکروبی قوی تولید کرد [۱۲]. تحقیقات نشان داده کامپوزیت‌های تهیه شده از کیتوزان، کورکومین^۲ و سلولز باکتریایی اثر آنتی اکسیدانی بسیار خوبی را روی نمونه‌های غنی از اسیدهای چرب داشته‌اند، به همین دلیل پیشنهاد می‌شود از این کامپوزیت برای بسته بندی گوشت و یا سایر فرآورده‌های حاوی اسیدهای چرب استفاده شود [۳۱].

ساحل مرادیان و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از سلولز باکتریایی به عنوان ماتریس اصلی و عصاره‌ی گیاهان رزماری، پوست انار و چای سبز در غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ درصد وزنی سلولز باکتریایی، موفق به تولید غشاها ی فعالی شدند که با بررسی تأثیر این نوع بسته بندی بر عمر انبارمانی قارچ دکمه ای، کاهش ۳۰ درصدی افت وزن، همچنین مهار فرآیند قهوه ای شدن و رشد میکروبی مشاهده گردید. عصاره چای سبز به علت حضور گروه هیدروکسیل حلقه‌ی بتا در مولکول کاتچین بالاترین فعالیت ضد میکروبی و عصاره ی رزماری بالاترین خاصیت آنتی اکسیدانی را به علت وجود ترکیبات فنولی مانند دی‌ترین‌ها،

³ Polyvinyl alcohol

⁴ Tollens reaction

¹ Bacterially Nanocellulose (BNC)

² Curcumin

نانوذرات نقره در فیلم‌های کیتوزان به طور قابل توجهی بر رنگ ظاهری و شفافیت فیلم‌ها تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، حساسیت به آب، نفوذپذیری بخار آب و خواص مکانیکی فیلم‌های نانوکامپوزیت پس از افزودن نانوذرات تا حد زیادی بهبود یافت [۴۲]. Mocanu و همکاران (۲۰۱۹) با اضافه کردن ۲۲ گرم سلولزباکتریایی به محلول ۰/۳۵٪ استات روی، فیلم کامپوزیتی از سلولز باکتریایی و نانوذرات روی تهیه کردند. سپس فیلم‌ها در غلظت‌های ۰/۳۵٪، ۰/۷٪، ۱/۱٪، و ۱/۱۵٪ وزنی/وزنی عصاره‌ی اتانولی بره‌موم غوطه‌ور شده و به عصاره بره‌موم آغشته شدند. اثر ضد میکروبی کامپوزیت‌های تهیه شده بر ۳ میکروارگانیزم *C. albicans*، *B. subtilis*، *E. coli* مورد آزمون قرار گرفت. باکتری *E. coli* در همه‌ی موارد به اثر هم افزایی نانوذرات اکسیدروی و غلظت بره‌موم مقاوم است. اثر هم افزایی *B. subtilis* و نانوذرات روی در غلظت‌های پائین بره‌موم قابل مشاهده است، در این میان، نابودی میکروارگانیزم *C. albicans* با غلظت بره‌موم و هم افزایی آن با نانوذرات روی همبستگی دارد [۴۳]. شیخ نظری و همکاران (۲۰۱۶)، با تهیه کامپوزیت‌های سلولز باکتریایی غنی شده با نانوذرات سیلیس (SiO_2) تاثیر این نانوذرات را بر خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌ها بررسی کردند. افزایش مدول ذخیره سازی و پایداری حرارتی همزمان با افزایش محتوای نانوذرات سیلیس افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها با استفاده از مقادیر بالای نانوذرات سیلیس بهبود یافته است. از سوی دیگر، پایداری حرارتی همه کامپوزیت‌ها در مقایسه با کامپوزیت‌های شاهد سلولز باکتریایی به طور قابل توجهی افزایش یافت [۴۴]. Zeng و همکاران (۲۰۲۳) کامپوزیت‌های سلولز باکتریایی با نانوذرات نقره در غلظت‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ مولار غنی سازی کرده و اثر فیلم‌های تهیه شده را بر باکتری‌های *E. coli*، *Ps. eruginosa*، *K. pneumoniae* و *St. aureus* کردند. تمامی فیلم‌های غنی شده دارای خاصیت ضد میکروبی علیه باکتری‌های بررسی شده بودند [۴۵]. گنجاندن نانوذرات کیتوزان در فیلم پایه‌ی متشکل از سلولز باکتریایی/پلی وینیل الکل نیز اثرات قابل توجهی بر استحکام کششی و خاصیت ضد باکتریایی فیلم‌های تولید شده دارد. نانوذرات کیتوزان خواص ضد میکروبی بالایی را علیه *شریشیا کلای* و *استافیلوکوکوس اورئوس* از خود نشان می‌دهند [۳۰]. بارهای مثبت گروه‌های آمینه کیتوزان به صورت الکترواستاتیکی با اجزای دارای بار منفی روی غشای میکروبی برهمکنش می‌کنند و باعث فروپاشی غشا سلولی و تداخل در عملکرد سلول می‌شوند [۴۶].

بر حساسیت به آب، سرعت انتشار و توانایی ضد میکروبی فیلم‌های تک لایه و چند لایه تأثیر می‌گذارد. درجه تورم، نفوذپذیری بخار آب و حلالیت در آب با افزایش محتوای اسید سوربیک (۰/۵٪ وزنی/وزنی) افزایش یافت، اما با افزودن سلولز باکتریایی پودر شده کاهش پیدا کرد، با این وجود در فیلم‌های چند لایه، حلالیت در آب ناچیز است. انتشار سوربیک اسید در زمانی که غلظت سلولز باکتریایی پودر شده بالاتر است به طور قابل توجهی کندتر است، در مقایسه با فیلم‌های تک لایه، کاهش زیادی در میزان انتشار سوربیک اسید از طریق فیلم‌های چند لایه مشخص شده است. اثر ضد میکروبی این فیلم‌ها بر روی *شریشیا کلای* نیز آزمایش شد. نتایج به دست آمده نشان داد که فیلم‌های بیوکامپوزیت جدید می‌توانند بسته بندی‌های ضد میکروبی امیدوارکننده‌ای باشند [۳۸].

۴- استفاده از ذرات نانو برای ساخت کامپوزیت‌های سلولزی

بر اساس پژوهش‌ها، بهترین روش برای رفع نواقص همراه سلولزهای باکتریایی، تولید کامپوزیت‌های مربوطه با ترکیب نانوذرات از جمله نانوذرات طلا، نقره، کادمیوم و اکسیدهای فلزات مختلف مانند مس، تیتانیوم، روی و ... است. نانوذرات را می‌توان به روش هیدروترمال تهیه کرد [۳۹]. آسیب به سلول توسط ایجاد استرس اکسیداتیو و اکسیداسیون ماکرومولکول‌ها، به عنوان مکانیسم عمل اصلی نانوذرات نقره در نظر گرفته می‌شود که موجب مهار رشد و تکثیر *استافیلوکوکوس* و *شریشیا کلای* می‌شود [۴۰]. شاه محمدی جبل و همکاران (۲۰۱۶)، با تهیه‌ی فیلم‌های تک لایه و چند لایه حاوی ۰/۵٪ وزنی نانوذرات اکسید روی، تاثیر نانوذرات را بر خواص مکانیکی فیلم‌های تولید شده بررسی کردند. نانوالیاف اکسید روی نانوساختار هیبریدی پایدار با توزیع یکنواخت را ایجاد کرده، باعث بهبود خواص مکانیکی و کاهش نفوذپذیری بخار آب و جذب رطوبت فیلم‌های تهیه شده می‌شوند. فعالیت ضد باکتریایی فیلم‌های تهیه شده از سلولزباکتریایی و اکسیدروی علیه *استافیلوکوکوس اورئوس* بیشتر از *شریشیا کلای* است که می‌توان از آنها به عنوان بسته‌بندی فعال ضد میکروبی با انتشار کنترل شده استفاده کرد [۴۱]. سالاری و همکاران (۲۰۱۸) از نانوبلورهای سلولز (BCNC) با غلظت ۲، ۴ و ۶٪ وزنی/وزنی و نانوذرات نقره (AgNPs) با غلظت ۱٪ وزنی/حجمی برای تهیه فیلم‌های نانوکامپوزیتی مبتنی بر کیتوزان (Ch) استفاده کردند. مشخص شد که ترکیب نانوذرات سلولز و

جدول (۲): تاثیر نانوذرات بر خواص فیلم‌های تولید شده بر پایه سلولز باکتریایی

منبع	ویژگی	نانوذره	کامپوزیت
[۴۱]	بهبود خواص مکانیکی-کاهش نفوذپذیری بخار آب و جذب رطوبت-فعالیت ضد میکروبی	ZnO	سلولز باکتریایی و نانواکسید روی
[۴۲]	بهبود رنگ و شفافیت فیلم-بهبود خواص مکانیکی	AgNPs-BCNC	نانولورهای سلولز میکروبی و نانوذرات نقره بر پایه کیتوزان
[۴۳]	افزایش خاصیت ضد میکروبی	ZnO	سلولز باکتریایی و نانوذرات روی اکسید با روکش بره موم
[۴۴]	افزایش مدول ذخیره سازی و پایداری حرارتی-بهبود خواص مکانیکی	SiO ₂	سلولز باکتریایی و نانوذرات سیلیس
[۴۵]	ایجاد ویژگی‌های ضد میکروبی	AgNPs	سلولز باکتریایی و نانوذرات نقره
[۴۶]	ایجاد ویژگی‌های ضد میکروبی	CsNPs	سلولز باکتریایی/ پلی وینیل الکل و نانوذرات کیتوزان

در میان صنایع مذکور، ضایعات و محصولات جانبی صنایع غذایی، کشاورزی و آبجوسازی به عنوان منابع غنی از کربن بیشترین استفاده و کاربرد در تولید سلولز باکتریایی را دارند [۴۷]. از این رو محیط کشت‌های حاوی آبمیوه، ملاس نیشکر و پسماند آبجوسازی در تولید سلولز باکتریایی مورد بررسی قرار گرفته اند [۴]. به عنوان مثال مایع هیدرولیز شده‌ی ساقه‌ی ذرت حاوی گلوکز، مانوز، زایلوز، فورفورال و لیگنین است که با افزودن آن به محیط کشت هسترین-شرام^۱، طول فیبریل‌های سنتز شده افزایش می‌یابد [۴۷].

ملاس به عنوان یک منبع کربن ارزان برای تولید مقدار قابل توجهی از سلولز باکتریایی با سویه‌های مختلف *A. xylinum* در کشت استاتیک استفاده شد که باعث کاهش چشمگیر هزینه‌های تولید گردید. با این حال، استفاده از ملاس منجر به کاهش اندک ضریب بلورینگی و کاهش قابل توجهی در ویسکوزیته محلول سلولز باکتریایی تولید شده شد [۴۸].

محصولات جانبی صنایع لبنی و آبجوسازی سرشار از مواد مغذی هستند. تین استیلج^۲، یک محصول جانبی مایع است که پس از تخمیر میکروبی کربوهیدرات‌ها توسط مخمر تولید می‌شود و حاوی ترکیبات آلی مختلف است. از این رو، منبع مناسب تأمین نیتروژن و کربن برای سنتز سلولز باکتریایی به شمار می‌آید [۴۹]. Liu و Wu (۲۰۱۲) از تین استیلج به جای آب مقطر در محیط هسترین-شرام استفاده کردند که از دو جهت بسیار سودآور بود زیرا علاوه بر افزایش بهره‌وری تولید سلولز به میزان ۲/۵ برابر (۱۰/۳۸ گرم در لیتر)، منجر به استفاده مجدد از پساب کارخانه به جای تصفیه و تخلیه گردید [۴۶]، [۴۷]. در این میان، پروتئین‌های آب پنیر^۳ به طور ویژه به عنوان یک منبع عالی از مواد مغذی برای تولید سلولز باکتریایی عمل می‌کند. Revin و همکاران (۲۰۱۸) استفاده از محصولات جانبی اسیدی کارخانجات لبنی، پروتئین‌های آب پنیر بدست آمده از فرآیند تولید پنیر و تین استیلج را برای تولید اقتصادی سلولز باکتریایی با *Gluconacetobacter sucrofermentans* بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که سه روز کشت سویه باکتریایی مورد نظر در آب پنیر، ۵/۴۵ گرم در لیتر سلولز تولید نموده که این نشان دهنده‌ی مقرون به صرفه بودن این منبع از لحاظ دارا بودن نیتروژن و کربن

۵- تهیه‌ی سلولز باکتریایی از پسماند صنایع مختلف

به طور کلی پسماندهای مورد استفاده برای تولید سلولز باکتریایی را می‌توان در شش گروه دسته بندی کرد: ۱- پسماندهای صنایع آشامیدنی و آبجوسازی ۲- پسماندهای صنعت کشاورزی ۳- پسماند پالایشگاه‌های زیستی لیگنوسلولزی، خمیر کاغذ و صنایع قند ۴- پسماند صنایع مرتبط با ریزجلبک‌ها ۵- پسماندهای صنعت بیودیزل ۶- پسماندهای صنایع نساجی (شکل ۵).

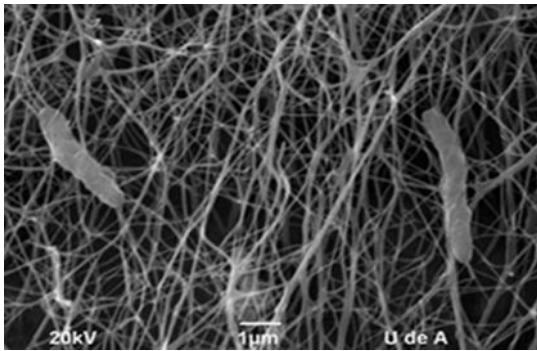


شکل (۵): منابع اصلی تأمین کربن اقتصادی [۴۷].

¹ Hestrin-Schramm culture media

² Thin stillage

³ Whey protein



شکل (۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از روبان‌های سلولزی تشکیل شده در سطح سرکه‌ی خانگی [۵۳].

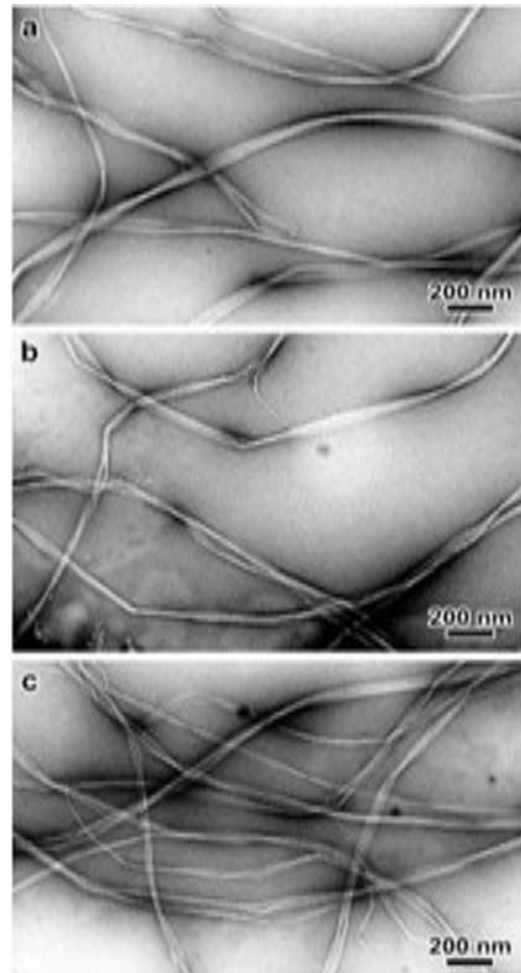
سلولز باکتریایی می‌تواند به عنوان محیط جذب مورد استفاده واقع شود. نتایج پژوهش Kurosumi و همکارانش (۲۰۰۹) نشان داد که این سلولز دارای ویژگی‌های مشابهی با پلاستیک‌های نفتی است، البته به استثنای حضور گروه متیل (CH₃) که در پلاستیک سنتز شده از پتروشیمی یافت می‌شود و مسئول استحکام پلاستیک است. بنابراین، سلولز باکتریایی سنتز شده در این مطالعه به اندازه پلاستیک پتروشیمی از استحکام لازم برخوردار نبود اما به دلیل حضور گروه‌های عاملی -CH₂ و -CH که به آن متصل هستند، می‌توان از آن برای تولید پلاستیک‌های زیستی استفاده کرد در نتیجه سلولز تولید شده با خواص فیزیکی و شیمیایی مشابهی با پلاستیک پتروشیمی، می‌تواند به عنوان پلیمر زیستی استفاده شود [۵۴].

Kurosumi و همکاران (۲۰۰۹) روش‌های تولید سلولز باکتریایی از آب میوه‌های پرتقال، آناناس، سیب، گلابی ژاپنی و انگور، توسط باکتری *Acetobacter xylinum* NBRC 13693 را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، با افزودن منبع نیتروژن به آب میوه بازده تولید سلولز باکتریایی افزایش یافت. علاوه بر این، آب پرتقال و گلابی ژاپنی به عنوان محیط‌های مناسبی برای تولید سلولز باکتریایی مورد تأیید قرار گرفتند. از ۱۰۰ گرم پرتقال تهیه شده حدود ۱۷/۲ گرم باقیمانده‌ی جامد بدست آمد که ۰/۶۵ گرم (وزن خشک) سلولز باکتریایی از بقایای پوست پرتقال آبیگری شده تولید شد [۵۴].

۶- نتیجه‌گیری

طی سال‌های اخیر روش‌های گوناگونی برای افزایش نرخ بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید سلولز باکتریایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. استفاده از پسماند صنایع مختلف به عنوان منابع در دسترس و ارزان کربن/نیتروژن یکی از روش‌های جایگزین مناسب برای تولید سلولز باکتریایی با هزینه کمتر است.

برای تولید سلولز باکتریایی می‌باشد [۵۲]. آب نارگیل و آب آناناس که توسط بیشتر صنایع غذایی مرتبط، به عنوان پسماند دور ریخته می‌شوند، سرشار از پروتئین، کربوهیدرات و عناصر کمیاب هستند. در پژوهش Hussain و همکاران (۲۰۱۹) آب نارگیل در مقایسه با آب آناناس موجب افزایش بازده تولید سلولز توسط باکتری شد. نتایج نشان داد که پوست موز نیز می‌تواند تا حدی جایگزین منابع متداول نیتروژن و کربن برای تولید سلولزهای باکتریایی شود [۴۷]. Castro و همکاران (۲۰۱۱) گزارش دادند، تولید سلولز باکتریایی از آب پوست آناناس (۲/۸ گرم در لیتر) بیشتر از تولید سلولز از محیط هسترین-شرام (۲/۱ گرم در لیتر) است زیرا دارای منابع نیتروژن و قند کافی برای فعالیت باکتری *Gluconacetobacter swingsii* sp. است (شکل ۷ع) [۵۳].



شکل (۶): تصاویری از رنگ آمیزی منفی روبان‌های سلولزی سنتز شده: تصویر a متعلق به سلولز بدست آمده از محیط کشت هسترین-شرام، تصویر b متعلق به سلولز بدست آمده از محیط کشت حاوی نیشکر و تصویر c متعلق به سلولز بدست آمده از پوست آناناس می‌باشد [۵۳].

[14] A. Santos, "Applications of bacterial cellulose in food , cosmetics and drug delivery," 2016, doi: 10.1007/s10570-016-0986-y.

[15] R. Singhanian, A. Patel, M.-L. Tsai, C.-W. Chen, and C.-D. Dong, "Genetic modification for enhancing bacterial cellulose production and its applications," *Bioengineered*, vol. 12, pp. 6793–6807, Jan. 2021, doi: 10.1080/21655979.2021.1968989.

[16] P. Cazón and M. Vázquez, "Bacterial cellulose as a biodegradable food packaging material: A review," *Food Hydrocoll.*, vol. 113, 2021, doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.106530.

[17] J. Wang, J. Tavakoli, and Y. Tang, "Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods – A review," *Carbohydr. Polym.*, vol. 219, pp. 63–76, 2019, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.05.008.

[18] A. Krystynowicz, W. Czaja, A. Wiktorowska-Jezińska, M. Gonçalves-Miśkiewicz, M. Turkiewicz, and S. Bielecki, "Factors affecting the yield and properties of bacterial cellulose," *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 29, no. 4, pp. 189–195, 2002, doi: 10.1038/sj.jim.7000303.

[19] C. Molina-Ramírez et al., "Effect of Different Carbon Sources on Bacterial Nanocellulose Production and Structure Using the Low pH Resistant Strain *Komagataeibacter Medellinensis*," *Materials*, vol. 10, no. 6. 2017, doi: 10.3390/ma10060639.

[20] R. R. Singhanian et al., "Developments in bioprocess for bacterial cellulose production," *Bioresour. Technol.*, vol. 344, p. 126343, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126343.

[21] J. D. P. de Amorim et al., "Plant and bacterial nanocellulose: production, properties and applications in medicine, food, cosmetics, electronics and engineering. A review," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 851–869, 2020, doi: 10.1007/s10311-020-00989-9.

[22] M. Aurélio, C. Daniele, A. Mikowski, M. Rita, L. Pereira, and F. Wypych, "Bionanocomposites of thermoplastic starch reinforced with bacterial cellulose nanofibres : Effect of enzymatic treatment on mechanical properties," *Carbohydr. Polym.*, vol. 80, no. 3, pp. 866–873, 2010, doi: 10.1016/j.carbpol.2009.12.045.

[23] M. Salari, M. S. Khiabani, R. R. Mokarram, B. Ghanbarzadeh, and H. S. Kafil, "Development and evaluation of chitosan based active nanocomposite films containing bacterial cellulose nanocrystals and silver nanoparticles," *Food Hydrocoll.*, 2018, doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.05.037.

[24] T. Jayani, B. Sanjeev, S. Marimuthu, and S. Uthandi, "Bacterial Cellulose Nano Fiber (BCNF) as carrier support for the immobilization of probiotic , *Lactobacillus acidophilus* 016," *Carbohydr. Polym.*, vol. 250, no. August, p. 116965, 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116965.

[25] E. S. Nascimento et al., "All-cellulose nanocomposite films based on bacterial cellulose nanofibrils and nanocrystals," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 29, no. January, p. 100715, 2021, doi: 10.1016/j.fpsl.2021.100715.

[26] I. Reiniati, A. N. Hrymak, and A. Margaritis, "Critical Reviews in Biotechnology Recent developments in the production and applications of bacterial cellulose fibers and nanocrystals," vol. 8551, 2017, doi: 10.1080/07388551.2016.1189871.

[27] K. Y. Lee, Y. Aitomäki, L. A. Berglund, K. Oksman, and A. Bismarck, "On the use of nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 105, pp. 15–27, 2014, doi: 10.1016/j.compscitech.2014.08.032.

[28] B. Thomas et al., "Nanocellulose, a Versatile Green Platform: From Biosources to Materials and Their Applications," *Chem. Rev.*, vol. 118, no. 24, pp. 11575–11625, 2018, doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00627.

[29] M. Ghasemlou, F. Daver, E. P. Ivanova, Y. Habibi, and B. Adhikari, "Surface modifications of nanocellulose: From synthesis to high-performance nanocomposites," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 119, p. 101418, 2021, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101418.

[30] S. Ju, F. Zhang, J. Duan, and J. Jiang, "Characterization of bacterial cellulose composite films incorporated with bulk chitosan and chitosan nanoparticles: A comparative study," *Carbohydr. Polym.*, vol. 237, no. March, p. 116167, 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116167.

[31] Y. Xu et al., "Development and properties of bacterial cellulose , curcumin , and chitosan composite biodegradable films

سلولزهای باکتریایی در قالب میکرو و نانوفیبریل‌ها به علت نفوذپذیری مناسب، خلوص و استحکام کششی بالا کامپوزیت‌های مناسبی برای بسته بندی محسوب می شوند. با بررسی پسماند میوه‌های مختلف نتیجه گیری شد که پرتقال بهترین عملکرد را در تولید سلولز باکتریایی دارد و در بخش پسماندهای مرتبط با صنایع نوشیدنی و لبنی نیز پروتئین‌های آب پنیر و تین استیلیج دارای منابع مناسب کربن و قند هستند. فیلم‌های تولید شده با سلولز باکتریایی خواص مکانیکی و ضد میکروبی مناسبی از خود نشان می دهند که گسترش کاربرد این بیوپلیمرهای پایدار و سبز منجر به کاهش آسیب‌های زیست محیطی ناشی از پلیمرهای نفتی می شود.

۷- مراجع

[1] M. V. Ghica, E. Tudoroiu, and D. Ionescu, "Bacterial Cellulose — A Remarkable Polymer as a Source for Biomaterials Tailoring," 2022.

[2] R. Naomi, R. Bt Hj Idrus, and M. B. Fauzi, "Plant- vs. Bacterial-Derived Cellulose for Wound Healing: A Review.," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 18, Sep. 2020, doi: 10.3390/ijerph17186803.

[3] D. Lahiri et al., "Bacterial Cellulose: Production, Characterization, and Application as Antimicrobial Agent.," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, no. 23, Nov. 2021, doi: 10.3390/ijms222312984.

[4] M. C. Azeredo, H. Barud, C. S. Farinas, V. M. Vasconcelos, and A. M. Claro, "Bacterial Cellulose as a Raw Material for Food and Food Packaging Applications," *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 3, no. February, 2019, doi: 10.3389/fsufs.2019.00007.

[5] Z. Shi, Y. Zhang, G. O. Phillips, and G. Yang, "Utilization of bacterial cellulose in food," *Food Hydrocoll.*, vol. 35, pp. 539–545, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.012.

[6] Z. N. Skvortsova, T. I. Gromovych, V. S. Grachev, and V. Y. Traskin, "Physicochemical Mechanics of Bacterial Cellulose," vol. 81, no. 4, pp. 366–376, 2019, doi: 10.1134/S1061933X19040161.

[7] A. Ashfaq, N. Khursheed, S. Fatima, Z. Anjum, and K. Younis, "Application of nanotechnology in food packaging: Pros and Cons," *J. Agric. Food Res.*, vol. 7, p. 100270, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100270.

[8] N. Bumbudsanpharoke, J. Choi, and S. Ko, "Applications of Nanomaterials in Food Packaging," vol. 15, no. 9, pp. 6357–6372, 2015, doi: 10.1166/jnn.2015.10847.

[9] C. Wang et al., "Bioactive and functional biodegradable packaging films reinforced with nanoparticles," *J. Food Eng.*, vol. 312, p. 110752, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110752.

[10] P. Cazón and M. Vázquez, "Bacterial cellulose as a biodegradable food packaging material: A review," *Food Hydrocoll.*, vol. 113, p. 106530, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106530.

[11] Y. Sun et al., "The effects of two biocompatible plasticizers on the performance of dry bacterial cellulose membrane: a comparative study.," *Cellulose*, vol. 25, no. 10, pp. 5893–5908, 2018, doi: 10.1007/s10570-018-1968-z.

[12] Indriyati, F. Dara, I. Primadona, Y. Srikandace, and M. Karina, "Development of bacterial cellulose/chitosan films: structural, physicochemical and antimicrobial properties," *J. Polym. Res.*, vol. 28, no. 3, pp. 1–8, 2021, doi: 10.1007/s10965-020-02328-6.

[13] L. Urbina, M. Á. Corcuera, N. Gabilondo, A. Eceiza, and A. Retegi, "A review of bacterial cellulose: sustainable production from agricultural waste and applications in various fields," *Cellulose*, vol. 28, no. 13, pp. 8229–8253, 2021, doi: 10.1007/s10570-021-04020-4.

- [43] A. Mocanu, G. Isopencu, C. Busuioc, O.-M. Popa, P. Dietrich, and L. Socaciu-Siebert, "Bacterial cellulose films with ZnO nanoparticles and propolis extracts: Synergistic antimicrobial effect," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 17687, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-54118-w.
- [44] S. Sheykhnazari, T. Tabarsa, A. Ashori, and A. Ghanbari, "Bacterial cellulose composites loaded with SiO₂ nanoparticles: Dynamic-mechanical and thermal properties," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 93, pp. 672–677, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.035>.
- [45] T. G. Volova et al., "Antibacterial properties of films of cellulose composites with silver nanoparticles and antibiotics," *Polym. Test.*, vol. 65, pp. 54–68, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.10.023>.
- [46] D. Yan, Y. Li, Y. Liu, N. Li, X. Zhang, and C. Yan, "Antimicrobial Properties of Chitosan and Chitosan Derivatives in the Treatment of Enteric Infections," *Molecules*, vol. 26, no. 23, Nov. 2021, doi: 10.3390/molecules26237136.
- [47] Z. Hussain, W. Sajjad, T. Khan, and F. Wahid, "Production of bacterial cellulose from industrial wastes: a review," *Cellulose*, vol. 1, 2019, doi: 10.1007/s10570-019-02307-1.
- [48] S. Keshk and K. Sameshima, "The utilization of sugar cane molasses with / without the presence of liginosulfonate for the production of bacterial cellulose," pp. 291–296, 2006, doi: 10.1007/s00253-005-0265-6.
- [49] A. Kadier et al., "Use of Industrial Wastes as Sustainable Nutrient Sources for Bacterial Cellulose (BC) Production: Mechanism, Advances, and Future Perspectives," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 19, Sep. 2021, doi: 10.3390/polym13193365.
- [50] C. Campano, A. Balea, A. Blanco, and C. Negro, "Enhancement of the fermentation process and properties of bacterial cellulose: a review," *Cellulose*, 2015, doi: 10.1007/s10570-015-0802-0.
- [51] J. Wu and R. Liu, "Thin stillage supplementation greatly enhances bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus*," *Carbohydr. Polym.*, vol. 90, no. 1, pp. 116–121, 2012, doi: 10.1016/j.carbpol.2012.05.003.
- [52] V. Revin, E. Liyaskina, M. Nazarkina, A. Bogatyreva, and M. Shchankin, "Cost-effective production of bacterial cellulose using acidic food industry by-products," *Brazilian J. Microbiol.*, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1016/j.bjm.2017.12.012.
- [53] C. Castro, R. Zuluaga, J. L. Putaux, G. Caro, I. Mondragon, and P. Gañán, "Structural characterization of bacterial cellulose produced by *Gluconacetobacter swingsii* sp. from Colombian agroindustrial wastes," *Carbohydr. Polym.*, vol. 84, no. 1, pp. 96–102, 2011, doi: 10.1016/j.carbpol.2010.10.072.
- [54] A. Kurosumi, C. Sasaki, Y. Yamashita, and Y. Nakamura, "Utilization of various fruit juices as carbon source for production of bacterial cellulose by *Acetobacter xylinum* NBRC 13693," *Carbohydr. Polym.*, vol. 76, no. 2, pp. 333–335, 2009, doi: 10.1016/j.carbpol.2008.11.009.
- for active packaging materials," *Carbohydr. Polym.*, vol. 260, no. February, p. 117778, 2021, doi: 10.1016/j.carbpol.2021.117778.
- [32] S. Moradian and H. Almasi, "Development of bacterial cellulose-based active membranes containing herbal extracts for shelf life extension of button mushrooms (*Agaricus bisporus*)," no. June, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1111/jfpp.13537.
- [33] A. Renzetti, J. W. Betts, K. Fukumoto, and R. N. Rutherford, "Antibacterial green tea catechins from a molecular perspective: mechanisms of action and structure–activity relationships," *Food Funct.*, vol. 11, no. 11, pp. 9370–9396, 2020, doi: 10.1039/D0FO02054K.
- [34] K. A. Zahan, N. M. Azizul, M. Mustapha, W. Y. Tong, M. S. A. Rahman, and I. S. Sahuri, "Application of bacterial cellulose film as a biodegradable and antimicrobial packaging material," *Mater. Today Proc.*, vol. 31, no. xxxx, pp. 83–88, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.201.
- [35] A. Abel Anzaku, A. Akyala, J. Adeola, and C. Ewenighi, "Antibacterial Activity of Lauric Acid on Some Selected Clinical Isolates," *Ann. Clin. Lab. Res.*, vol. 05, Jan. 2017, doi: 10.21767/2386-5180.1000170.
- [36] M. L. Dobre and A. Stoica-guzun, "Antimicrobial Ag-Polyvinyl Alcohol-Bacterial Cellulose Composite Films," vol. 7, no. 1, pp. 157–162, 2013, doi: 10.1166/jbmb.2013.1272.
- [37] M. A. AbuDalo, I. R. Al-Mheidat, A. W. Al-Shurafat, C. Grinham, and V. Oyanedel-Craver, "Synthesis of silver nanoparticles using a modified Tollens' method in conjunction with phytochemicals and assessment of their antimicrobial activity," *PeerJ*, vol. 7, p. e6413, 2019, doi: 10.7717/peerj.6413.
- [38] I. M. Jipa, A. Stoica-guzun, and M. Stroescu, "Controlled release of sorbic acid from bacterial cellulose based mono and multilayer antimicrobial films," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 47, no. 2, pp. 400–406, 2012, doi: 10.1016/j.lwt.2012.01.039.
- [39] T. G. Volova et al., "Bacterial Cellulose (BC) and BC Composites : Production and Properties," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 8, 2022.
- [40] M. Ver, G. G. E, and P. Mar, "Biosynthesized silver nanoparticles: decoding their mechanism of action in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*," *Int. J. Biochem. Cell Biol.*, 2018, doi: 10.1016/j.biocel.2018.09.006.
- [41] F. Shahmohammadi and H. Almasi, "Morphological , physical , antimicrobial and release properties of ZnO nanoparticles-loaded bacterial cellulose films," *Carbohydr. Polym.*, vol. 149, pp. 8–19, 2016, doi: 10.1016/j.carbpol.2016.04.089.
- [42] M. Salari, M. Sowti Khiabani, R. Rezaei Mokarram, B. Ghanbarzadeh, and H. Samadi Kafil, "Development and evaluation of chitosan based active nanocomposite films containing bacterial cellulose nanocrystals and silver nanoparticles," *Food Hydrocoll.*, vol. 84, pp. 414–423, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.037>.