Scientific Journal of Packaging Science and Art
Vol. 15, No. 1, Spring 2024, Serial No. 57
ISSN: 2228-6675 , E-ISSN: 2980-7824

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

نشریه علمی «علوم و فنون بسته بندی»
سال پانزدهم، شماره ۵۷، بهار ۱۴۰۳؛ ص ۶۰-۵۱
شاپای چاپی: ۲۲۲۸-۶۶۷۵| شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۷۸۲۴

علمی – مروری

مروری بر فیلم‌های زیست تخریب پذیر حاصل از سلولز باکتریایی

درسا حسین زاده[۱]، علیرضا مهرگان نیکو[۲*]

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 دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

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 فیزیکوشیمیایی مناسب و نیز عملکرد خوب این پلیمر به عنوان یک ماتریس برای تولید بسته بندی‌های ضدمیکروبی و آنتی اکسیدانی باعث شده تا این پلی ساکارید مورد توجه قرار گیرد. فیلم های سلولزی به دست آمده از طریق روش کشت استاتیک می توانند با غوطه‌وری در محلول‌های ضدمیکروبی 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 ریزجلبک‌ها، 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 فیلم های 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

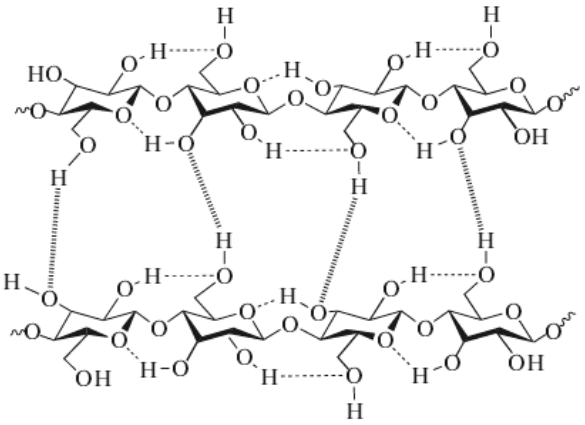
۱- مقدمه

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 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 درسلولزباکتریایی از ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متفاوت است. پیوند بتا ۱،۴ گلیکوزیدی مسئول گروه هیدروکسیل سطح آزاد در سطح سلولز است. معمولاً رشته های سلولز باکتریایی ۱۰ تا ۵۰ نانومتر قطر و ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر طول دارند. به دلیل وجود تعداد زیاد اتم های اکسیژن و گروه های هیدروکسیل پیوندهای هیدروژنی در سلولز به فراوانی وجود دارد (شکل ۱). همچنین به دلیل نیروی واندروالسی دسته ها، ساختار موازی در سلولز مشاهده می شود

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

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.
ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع) © نویسندگان

کـه بـه توسـعه نانوالیـاف کریسـتالی و بـه دنبـال آن سـاختار میکروفیبریلار کمک می کند [۳]. سلولز می توانـد بـاکتری را در برابر پرتوهای مـاورا بـنفش حفـظ نمـوده و باعـث شـناور شـدن باکتری در فصل مشترک هوا و مایع، به منظـور تـأمین اکسـیژن کافی شود [۴]. همچنین سلولز باکتریـایی مـی توانـد هیـدروژل تشـکیل داده و بـه دلیـل داشـتن خـواص ویـژه رئولـوژیکی بـه گستردگی در صنایع غذایی برای بهبود ویژگـی هـای محصـولات غـذایی و آشـامیدنی مـورد اسـتفاده قـرار مـی گیـرد. از سـلولز باکتریایی می توان به عنوان قوام دهنده، تثبیت کننـده و اصـلاح کننده بافت، همچنین به عنوان بسـته بنـدی خـوراکی و زیسـت تخریب پذیر مواد غذایی در صنایع غذایی استفاده کرد [۵].



شکل(۱): ساختار مولکولی سلولز [۶].

نانوذرات دارای فعالیت‌های ضد میکروبی، توانایی مهـار اکسـیژن، نفوذناپذیری در برابر پرتو مـاوراء بـنفش و ویژگـی‌هـای دیگـری هستند که باعث کاربرد وسیع آنها در تولید کامپوزیت‌های بسـته بندی می شود. نسبت سطح به حجم بالای ایـن ذرات مـی توانـد دلیلی برای سمیت آنها تلقی شود، بنـابراین مطالعـه مهـاجرت و نحوه تعامل آنها با ماتریس پلیمر بسته بندی یکی از نکات مهمی است که در تولید کامپوزیت‌های بسـته بنـدی اهمیـت دارد [۷]. پوشـش‌هـای خـوراکی ادغـام شـده بـا نـانوذرات نسـبت بـه بسته بندی‌های معمولی در حفظ و نگهـداری محصـولات غـذایی سودمندتر هستند. نانوذرات می توانند خواص فیزیکی و مکـانیکی پلیمرهای بسـته‌بنـدی ماننـد اسـتحکام، دوام، انعطـاف‌پـذیری و قابلیت بازدارندگی فیلم‌ها و کامپوزیت‌ها را بهبود ببخشند [۸]. امروزه، فیلم‌های زیست‌سازگار بسته‌بندی کـه حـاوی نـانوذرات و ترکیبات زیست فعال می باشند به عنوان مواد ایده‌آل برای حفظ کیفیت و ایمنی مـواد غـذایی بسـته‌بنـدی شـده در نظـر گرفتـه می‌شوند[۹]. پلیمرهای زیست تخریـب پـذیر بـه دسـت آمـده از منابع طبیعی، گزینه‌ای مناسب برای توسعه‌ی بسـته بنـدی مـواد غذایی هسـتند. در میـان پلیمرهـای طبیعـی، سـلولز بـا منشـاء باکتریـایی، مـاده ای بـا خـواص فـوق العـاده و متمـایز از سـایر پلیمرهای مبتنی بر پلی ساکارید است که برای بسته بندی مـواد غذایی مورد توجه ویژه قرار گرفته است[۱۰]. این فیلم‌هـا امکـان کنترل تبـادلات داخلـی و خـارجی گازهـا، رطوبـت، رایحـه‌هـای نامطلوب و مهاجرت ترکیبات را فراهم کرده و به عنوان یک عامل نگهدارنده عمل می کنند. علاوه بر این، آنها می تواننـد ترکیبـات فعال ضد میکروبی یا آنتی اکسیدانی طبیعی را در سـاختار خـود حفظ کرده و به فضای نگهداری ماده‌ی غذایی منتشرکنند [۱۰]. فیلم‌هـا و پوشـش‌هـای زیسـت سـازگار، دارای حـداقل دو جـزء مـی‌باشـند: یـک مـاتریس کـه معمـولاً از یـک درشـت مولکـول تشکیل‌شده و قادر به تشکیل یک شبکه منسجم است و یک نـرم کننده (عمدتا گلیسرول) که برای افزایش انعطاف پذیری و کاهش شکنندگی فیلم یا پوشـش مـورد اسـتفاده قـرار مـی گیـرد [۴]. گلیسرول که به عنوان نرم کننده سلولز باکتریـایی اسـتفاده مـی شود، باعث کاهش استحکام پیوندهای هیـدروژنی بـین مولکـولی بین زنجیره های سلولزی مجاور شده که منجر به بهبـود انعطـاف پذیری و جلوگیری از تشکیل ورقه های سفت و شکننده پـس از خشک شدن می شود [۱۱]. با توجه به اینکـه سـلولز باکتریـایی دارای درجه غذایی است می‌تواند به‌عنوان ماتریس در فـیلم‌هـا و پوشش‌های محصولات غذایی استفاده شود. علاوه بر این، ممکـن است برای تولید نانو کریستال‌های سلولز باکتریایی تقویت کننـده نیز مورداستفاده قرار گیرد [۴].

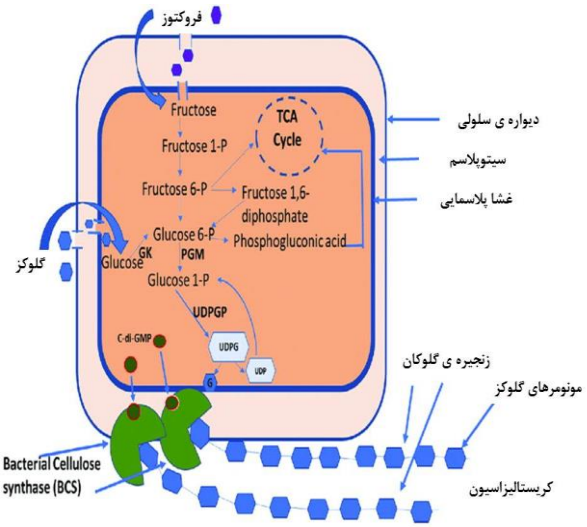
سلولز باکتریایی به دلیل خوراکی بودن و زیست‌تخریب‌پذیری به عنوان یک منبع جایگزینِ پلاستیک، برای بسته بندی در نظـر گرفته می شود. این نانوساختارِ منحصر به فرد، استحکام مکانیکی و ظرفیت نگهداری آب بالایی دارد و علاوه بر آن غیـر سـمی نیـز می باشد [۱۲].

یکی از چالش‌های عمـده در فنـاوری پلیمرهـای باکتریـایی، یافتن منابع کربن ارزان قیمت به عنوان محـیط کشـت بـوده کـه هزینه‌ی تهیه‌ی آن در مقیاس صنعتی با تولیـد محصـول غـذایی رقابـت نکنـد. پسـماندهای محصـولات کشـاورزی خـام نظیـر محصولات زراعی، میوه‌ها، سبزی‌ها و محصولات لبنی می تواننـد جایگزین مناسبی برای این منظور باشند [۱۳]. شایان ذکر اسـت که سلولز باکتریایی را می توان نوعی فیبر رژیمی در نظـر گرفـت که در سال ۱۹۹۲ توسط سازمان غذا و داروی ایـالات متحـده در دسته‌ی ترکیبات ایمن طبقه بندی شد، بنابراین استفاده از آن به عنوان ماده اولیه، ماده بسته بندی یا افزودنـی غـذایی مجـاز مـی باشد [۱۴].

۲- تولید سلولز باکتریایی

باکتری‌های تولیدکننده‌ی سلولز، عموماً گرم منفی، هوازی و غیـر فتوسـنتزی هسـتند کـه در سـرکه، میـوه‌هـا و سـبزیجات یـا نوشیدنی‌های الکلی یافت می‌شوند (Urbina et al., 2021). باکتری

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. به‌جز این‌گونه باکتری، باکتری‌هایی نظیر Azotobacter، Escherichia، Pseudomonas، Salmonella، Agrobacterium، 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[1] 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 دامنه‌ی 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 مرحله‌ی نخست، تشکیل میکروفیبریل‌های سلولز در سیتوپلاسم و درون غشا باکتری صورت می‌پذیرد. سیتوپلاسم باکتری از گلوکز به عنوان سوبسترا استفاده کرده و میزبان چرخه ی تولید یوریدین دی فسفات-گلوکز[2] می‌شود که مانند بستری برای تشکیل میکروفیبریل‌ها عمل می‌کند [۱].

۲-۲- مرحله ی دوم

مرحله‌ی دوم درسطح 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 ۱به 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. غشاهای به دست آمده با یک محلول قلیایی رقیق داغ مانند هیدروکسید سدیم یا پتاسیم در مدت زمان معینی برای حذف سلول‌های باقیمانده‌ی 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 ازبیورآکتورهای صنعتی استفاده می شود. بیورآکتورهای صنعتی می توانند با بکارگیری همزن و

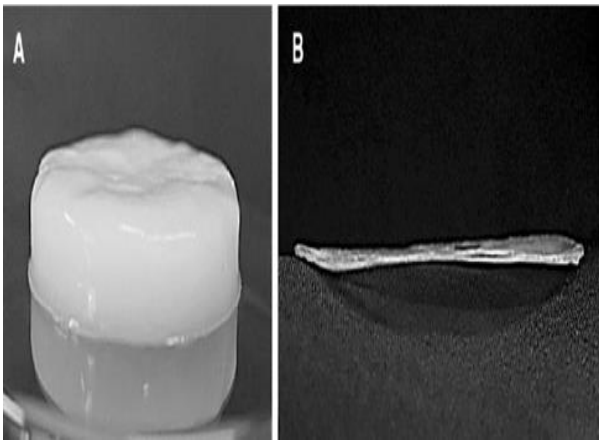
[1] Hestrin–Schramm (HS) medium

[2] UDP–glucose (UDPG)

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

جدول (۱): مزایا ومعایب 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].

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[1]، میکروفیبریل‌ها[2] و نانوکریستال‌ها[3]

بـا ترکیـب نـانو فیبریـل‌هـا و میکروفیبریـل‌هـا بـه همـراه پلـی ساکاریدها، می توان کامپوزیت‌های مناسب به منظور بسته بندی مواد غذایی را تهیـه نمـود. نانوفیبریـل‌هـا را مـی تـوان از طریـق فرآیندهای مکانیکی از جمله همگن سازی با فشار بـالا و آسـیاب کردن بدست آورد. هیدرولیز اسـیدی متـداول تـرین روش مـورد اسـتفاده بـرای تولیـد نـانوذرات سـلولزی اسـت [۱۶], [۲۲]. میکروفیبریل‌های سلولزی از زنجیـره‌ای از کریسـتال‌هـای سـلولز تشکیل شده اند که توسط نواحی پاراکریستالی مرتب گردیده‌انـد. نواحی پاراکریستالی را می توان تحت تیمار اسیدی حذف نموده و نانوبلورهای سلولزی میله ای شکل بدست آورد. نانوکریستال‌هـای به دست آمده توسط فرآیند هیدرولیز اسـیدی بـه ترتیـب دارای قطر و طول متوسط ۵±۲۰ و ۱۳۰±۲۹۰ نانومتر می باشند [۲۳]. نانوالیاف‌ها به دلیل ساختار نانو و پایداری قابـل توجـه تـا دمـای ۱۸۰ درجه سانتی گراد می توانند در غـذاهای فـرآوری شـده بـا حرارت استفاده شوند [۲۴]. افزودن نانوکریستال ها به فیلم‌هـای تهیه شده از سلولز باکتریایی منجر به افزایش استحکام کششی و نقطه ی شکست و کاهش نفوذپذیری بخـار آب در فـیلم‌هـا مـی گردد [۲۵]. اگرچه منبع استحصال سلولز به طور قابل توجهی بر خواص نانوکریستال‌های سلولز تأثیر می گذارد امـا چنـد پـارامتر رایج دیگر مانند زمان هیدرولیز، دما، نوع اسـید، غلظـت اسـید و

[1] Bacterial Cellulose Nanofibrils (BCNF)
[2] Bacterial Cellulose Microfibrils (BCMF)
[3] Bacterial Cellulose Nanocrystals (BCNC)

نسبت اسید به سلولز نیز بر کیفیت نانوکریستال‌ها اثر گذارند [۲۶]. نانوسلولزهای باکتریایی[1] 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) تقویت‌کننده‌های مناسبی برای ساخت نانوکامپوزیت‌های تجدیدپذیر محسوب می شوند [۲۷]–[۲۹].

امروزه از نانو فیبریل‌ها و میکروفیبریل‌ها برای تقویت و بهبود ویژگی‌های فیلم‌های خوراکی مبتنی بر پلی ساکاریدها استفاده می شود [۳۰]. کیتوزان، نشاسته، آگار، آلژینات و پکتین با الیاف سلولز میکروبی تقویت می شوند تا خواص مکانیکی، خواص حرارتی و برهمکنش آنها با آب بهبود یابد [۱۶]. فیلم‌های ضد میکروبی یکی از اشکال بسته‌بندی فعال هستند که می‌توانند کیفیت و ماندگاری محصولات غذایی را حفظ کنند. این فیلم‌ها را می توان با به دام انداختن عوامل ضد میکروبی در فیلم ها تهیه کرد؛ برای مثال می توان 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[2] و سلولز باکتریایی اثر آنتی اکسیدانی بسیار خوبی را روی نمونه‌های غنی از اسیدهای چرب داشته‌اند، به همین دلیل پیشنهاد می شود از این کامپوزیت برای بسته بندی گوشت و یا سایر فرآورده‌های حاوی اسیدهای‌چرب استفاده شود [۳۱].

ساحل مرادیان و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از سلولز باکتریایی به عنوان ماتریس اصلی و عصاره‌ی‌گیاهان رزماری، پوست انار و چای سبز در غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ درصد وزنی سلولزباکتریایی، موفق به تولید غشاهای 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 دی‌ترپن‌ها، تری‌ترپن‌ها، 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 گروه های زیر دسته بندی کرد: (۱) مهار فاکتورهای بیماری زا (۲) اختلال در دیواره و غشای سلولی (۳) مهار آنزیم های داخل سلولی (۴) استرس اکسیداتیو (۵) آسیب به DNA. و (۶) کیلاسیون آهن. این مکانیسم ها به طور همزمان با نسبت‌های متفاوت عمل می کنند. شواهد تجربی و نظری نشان می‌دهد که کاتچین‌ها با تشکیل پیوندهای هیدروژنی و آبگریز با سلول هدف اتصال مشترک برقرار می کنند [۳۳] .همچنین با گنجاندن لوریک اسید در سلولز باکتریایی، فیلم‌های ضد میکروبی و زیست تخریب پذیری قابل تهیه می باشند که بر باکتری *باسیلوس سابتیلیس* (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 میکروب ها می شوند [۳۵]. برای تولید کامپوزیت‌های پلی وینیل الکل[3] و سلولز باکتریایی با خواص ضد میکروبی، ابتدا ذرات نقره به کمک واکنش تالنز[4] بر روی غشا مرطوب سلولز با غلظت‌های ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد ورنی/وزنی پراکنده شده و غشاها بعد از خشک شدن آسیاب می شوند [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 سلولزِ آسیاب شده در محلول وینیل الکل حل شده و کامپوزیت‌های ضد میکروبی مناسب برای بسته بندی تولید می شوند. تمامی کامپوزیت های حاوی نقره فعالیت ضد میکروبی خوبی در برابر باکتری *اشریشیا کلای* که یکی از مهم ترین عوامل بیماری زا در صنایع غذایی است، از خود نشان می دهند [۳۶]. در پژوهش Jipa و همکاران (۲۰۱۲) فیلم‌های تک لایه و چندلایه زیست تخریب‌پذیر مبتنی بر سلولز باکتریایی حاوی اسید سوربیک با غلظت‌های ۰/۱٪ و ۰/۵٪ درصد وزنی/وزنی به عنوان عامل ضد میکروبی مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه فیلم های تک لایه ی تهیه شده از سلولز باکتریایی پودر شده و پلی وینیل الکل، برای به دست آوردن فیلم های چند لایه با غشای سلولز باکتریایی پوشانده شدند. آزمایش‌ها نشان داد که غلظت اسید سوربیک و سلولز باکتریایی پودر شده

[1] Bacteriall Nanocellulose (BNC)
[2] Curcumin
[3] Polyvinyl alcohol
[4] Tollens reaction

بـر حساسـیت بـه آب، سـرعت انتشـار و توانـایی ضـد میکروبـی فیلم‌های تک لایـه و چنـد لایـه تـأثیر مـی‌گـذارد. درجـه تـورم، نفوذپذیری بخار آب و حلالیت در آب با افـزایش محتـوای اسـید سوربیک (۰/۵٪ وزنی/وزنی) افزایش یافت، امـا بـا افـزودن سـلولز باکتریایی پودر شده کاهش پیدا کرد، با این وجود در فـیلم هـای چند لایه، حلالیت در آب ناچیز است. انتشـار سـوربیک اسـید در زمانی که غلظت سلولز باکتریایی پودر شده بالاتر اسـت بـه طـور قابل توجهی کندتر است، در مقایسه با فیلم های تک لایه، کاهش زیادی در میزان انتشار سوربیک اسید از طریـق فـیلم‌هـای چنـد لایه مشخص شده است. اثر ضد میکروبـی ایـن فـیلم‌هـا بـر روی *اشریشیا کلای* نیز آزمایش شد. نتایج به‌دست‌آمده نشـان داد کـه فـیلم‌هـای بیوکامپوزیـت جدیـد مـی تواننـد بسـته بنـدی‌هـای ضدمیکروبی امیدوارکننده‌ای باشند [۳۸].

۴- اســـتفاده از ذرات نـــانو بـــرای ســـاخت کامپوزیت‌های سلولزی

بر اساس پـژوهش هـا، بهتـرین روش بـرای رفـع نـواقص همـراهِ سلولزهای باکتریایی، تولید کامپوزیـت‌هـای مربوطـه بـا ترکیـب نانوذرات از جمله نانوذرات طلا، نقره، کادمیوم و اکسیدهای فلزات مختلف مانند مس، تیتانیوم، روی و ... است. نانوذرات را می تـوان به روش هیدروترمال تهیه کـرد [۳۹]. آسـیب بـه سـلول توسـط ایجاد استرس اکسیداتیو و اکسیداسیون ماکرومولکول‌ها، به عنوان مکانیسم عمل اصلی نانوذرات نقره در نظر گرفتـه مـی شـود کـه موجب مهار رشد و تکثیر *استافیلوکوکوس* و *اشریشیا کـلای* مـی شود [۴۰]. شاه محمدی جبـل و همکـاران (۲۰۱۶)، بـا تهیـه‌ی فیلم‌های تک لایه و چند لایه حاوی ۵٪ وزنـی نـانوذرات اکسـید روی، تاثیر نانوذرات را بر خواص مکانیکی فیلم‌هـای تولیـد شـده بررسی کردند. نانوالیاف اکسید روی نانوساختار هیبریدی پایدار با توزیع یکنواخت را ایجاد کرده، باعـث بهبـود خـواص مکـانیکی و کاهش نفوذپذیری بخار آب و جذب رطوبت فیلم‌های تهیـه شـده مـی‌شـوند. فعالیـت ضـد باکتریـایی فـیلم هـای تهیـه شـده از سلولزباکتریایی و اکسیدروی علیه *استافیلوکوکوس اورئوس* بیشتر از *اشریشیا کلای* است که می توان از آنها به عنـوان بسـته‌بنـدی فعال ضدمیکروبی با انتشارکنترل‌شده استفاده کرد [۴۱]. سالاری و همکاران (۲۰۱۸) از نانوبلورهای سلولز (BCNC) با غلظت ۲، ۴ و ۶٪ وزنی/وزنـی و نـانوذرات نقـره (AgNPs) بـا غلظـت ۱٪ وزنی/حجمی برای تهیه فیلم‌های نانوکامپوزیتی مبتنی بر کیتوزان (Ch) استفاده کردند. مشخص شد که ترکیـب نـانوذرات سـلولز و نانوذرات نقره در فیلم‌های کیتوزان به طور قابل‌تـوجهی بـر رنـگ ظاهری و شفافیت فیلم‌ها تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، حساسیت بـه آب، نفوذپـذیری بخـار آب و خـواص مکـانیکی فـیلم‌هـای نانوکامپوزیت پس از افزودن نانوذرات تا حد زیـادی بهبـود یافـت [۴۲]. Mocanu و همکـاران (۲۰۱۹) بـا اضـافه کـردن ۲۲ گـرم سلولزباکتریایی به محلول ۰/۳۵٪ استات روی، فیلم کامپوزیتی از سلولز باکتریایی و نانوذرات روی تهیه کردند. سپس فـیلم هـا در غلظت‌های ۳/۵٪ ، ۷٪ ، ۱۱٪، و ۱۵٪ وزنی/وزنی عصاره‌ی اتانولی بره‌موم غوطه ور شده و بـه عصـاره بـره‌مـوم آغشـته شـدند. اثـر ضـدمیکروبی کامپوزیـت‌هـای تهیـه شـده بـر۳ میکروارگانیسـم *E. coli*، *B. subtilis* و *C. albicans* مـورد آزمـون قـرار گرفـت. باکتری E. coli در همـه‌ی مـوارد بـه اثـر هـم افزایـی نـانوذرات اکسیدروی و غلظت بره موم مقاوم است. اثرهم افزایی *B. subtilis* و نانوذرات روی در غلظت های پائین بره‌موم قابل مشاهده اسـت، در این میان، نابودی میکروارگانیسم *C. albicans* بـا غلظـت بـره موم و هم افزایی آن با نانوذرات روی همبستگی دارد [۴۳]. شـیخ نظری و همکاران (۲۰۱۶)، با تهیه کامپوزیت‌های سلولز باکتریایی غنی شده با نانوذرات سیلیس (SiO_2) تـاثیر ایـن نـانوذرات را بـر خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت ها بررسـی کردنـد. افـزایش مدول ذخیره سازی و پایداری حرارتی همزمان با افزایش محتوای نانوذرات سیلیس افزایش می یابد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که خواص مکانیکی کامپوزیـت هـا بـا اسـتفاده از مقـادیر بـالای نانوذرات سـیلیس بهبـود یافتـه اسـت. از سـوی دیگـر، پایـداری حرارتی همه کامپوزیت ها در مقایسـه بـا کامپوزیـت هـای شـاهد سلولز باکتریایی به طور قابل‌توجهی افزایش یافـت [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 ضدمیکروبی علیه باکتری های بررسی شده بودنـد [۴۵]. گنجاندن نانوذرات کیتوزان در فیلم پایه‌ی متشکل از سلولز باکتریایی/پلی وینیل الکل نیز اثرات قابـل تـوجهی بـر اسـتحکام کششی و خاصیت ضـد باکتریـایی فـیلم‌هـای تولیـد شـده دارد. نانوذرات کیتوزان خواص ضد میکروبـی بـالایی را علیـه *اشریشـیا کلای* و *استافیلوکوکوس اورئوس* از خود نشان مـی دهنـد [۳۰]. بارهای مثبت گروه های آمینه کیتوزان به صورت الکترواستاتیکی با اجزای دارای بار منفی روی غشـای میکروبـی بـرهمکنش مـی کنند و باعث فروپاشی غشا سلولی و تداخل در عملکرد سلول می شوند [۴۶].

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

کامپوزیت	نانوذره	ویژگی	منبع
سلولزباکتریایی و نانواکسید روی	ZnO	بهبود خواص مکانیکی-کاهش نفوذپذیری بخارآب و جذب رطوبت-فعالیت ضد میکروبی	[۴۱]
نانوبلورهای سلولز میکروبی و نانوذرات نقره بر پایه کیتوزان	AgNPs -BCNC	بهبود رنگ و شفافیت فیلم-بهبود خواص مکانیکی	[۴۲]
سلولزباکتریاییو نانوذرات روی اکسید با روکش بره‌موم	ZnO	افزایش خاصیت ضدمیکروبی	[۴۳]
سلولزباکتریایی و نانوذرات سیلیس	SiO_2	افزایش مدول ذخیره سازی و پایداری حرارتی- بهبود خواص مکانیکی	[۴۴]
سلولزباکتریایی و نانوذرات نقره	AgNPs	ایجاد ویژگی‌های ضدمیکروبی	[۴۵]
سلولزباکتریایی/پلی وینیل الکل و نانوذرات کیتوزان	CsNPs	ایجاد ویژگی‌های ضدمیکروبی	[۴۶]

۵- تهیه‌ی سلولز باکتریایی از پسماند صنایع مختلف

به طور کلی پسماندهای مورد استفاده برای تولید سلولز باکتریایی را می توان 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 (شکل۵).

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

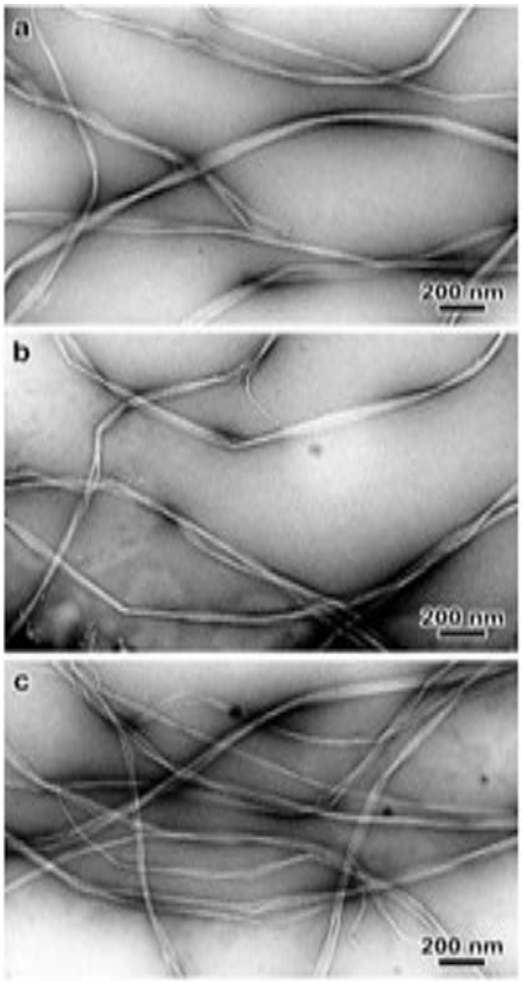
در میان صنایع مذکور، ضایعات و محصولات جانبی صنایع غذایی، کشاورزی و آبجوسازی به عنوان منابع غنی از کربن بیشترین استفاده و کاربرد در تولید سلولز باکتریایی را دارند [۴۷]. از این رو محیط کشت‌های حاوی آبمیوه، ملاس نیشکر و پسماند آبجوسازی در تولید سلولز باکتریایی مورد بررسی قرار گرفته اند [۴]. به عنوان مثال مایع هیدرولیز شده‌ی ساقه‌ی ذرت حاوی گلوکز، مانوز، زایلوز، فورفورال و لیگنین است که با افزودن آن به محیط کشت هسترین-شرام[1]، طول فیبریل‌های سنتز شده افزایش می یابد [۴۷].

ملاس به عنوان یک منبع کربن ارزان برای تولید مقدار قابل توجهی از سلولز باکتریایی با سویه های 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].

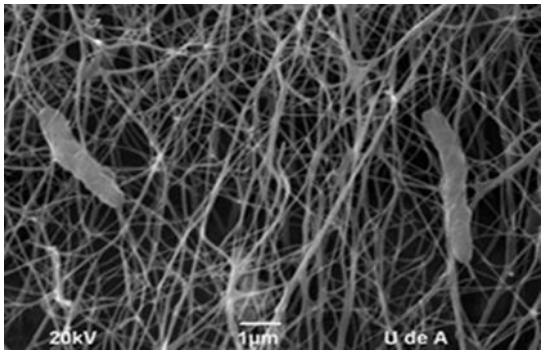
محصولات جانبی صنایع لبنی و آبجوسازی سرشار از مواد مغذی هستند. تین استیلج[2]، یک محصول جانبی مایع است که پس از تخمیر میکروبی کربوهیدرات‌ها توسط مخمر تولید می‌شود و حاوی ترکیبات آلی مختلف است. از این رو، منبع مناسب تأمین نیتروژن و کربن برای سنتز سلولز باکتریایی به شمار می آید [۴۹]. Wu و Liu (۲۰۱۲) از تین استیلج به جای آب مقطر در محیط هسترین-شرام استفاده کردند که از دو جهت بسیار سودآور بود زیرا علاوه بر افزایش بهره وری 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، پروتئین های آب پنیر[3] به طور ویژه به عنوان یک منبع عالی از مواد مغذی برای تولید سلولز باکتریایی عمل می کند. 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 دهنده ی مقرون‌به‌صرفه بودن این منبع از لحاظ دارا بودن نیتروژن و کربن

[1] Hestrin-Schramm culture media
[2] Thin stillage
[3] Whey protein

برای تولید سلولز باکتریایی می باشد [۵۲]. آب نارگیل و آب آناناس که توسط بیشتر صنایع غذایی مرتبط، به عنوان پسماند دور ریخته می شوند، 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 می تواند 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 ۶و۷) [۵۳].



شکل(۶): تصاویری از رنگ آمیزی منفی روبان های 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 می باشد [۵۳].



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

سلولز باکتریایی می تواند به عنوان محیط جذب مورد استفاده واقع شود. نتایج پژوهش Kurosumi و همکارانش (۲۰۰۹) نشان داد که این سلولز دارای ویژگی‌های مشابهی با پلاستیک های نفتی است، البته به استثنای حضور گروه متیل (CH3) که در پلاستیک سنتز شده از پتروشیمی یافت می شود 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 گروه های عاملی CH– و CH_2– که به آن متصل هستند، می توان از آن برای تولید پلاستیک های زیستی استفاده کرد در نتیجه سلولز تولید شده با خواص فیزیکی و شیمیایی مشابهی با پلاستیک پتروشیمی، می تواند 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 آبگیری شده تولید شد [۵۴].

۶- نتیجه‌گیری

طی سال‌های اخیر روش‌های گوناگونی برای افزایش نرخ بهره وری و کاهش هزینه‌های تولید سلولز باکتریایی مورد بررسی قرار گرفته اند. 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.

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 استیلج 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. Vasconcellos, 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. Gromovykh, 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.

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

[15] R. Singhania, 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-Jezierska, 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. Singhania 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 fi lms 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

[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 lignosulfonate 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.