



همی‌سلولزهای حاصل از پسماندهای زیستی و کاربردهای آنها در صنایع غذایی به سوی یک زیست اقتصاد پیشرفته و یک زنجیره ارزش جهانی پایدار برای مواد شیمیایی و مواد

مائده اکبری^{۱*}، امیرعلی پاک نژاد^۲ بابک کرمی^۳

1- دانشجوی کارشناسی گروه صنایع غذایی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

Email: iranscience20@gmail.com

2- دانشجوی کارشناسی گروه صنایع غذایی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

ایران

3- استاد یار گروه صنایع غذایی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

چکیده (Abstract)

یک نگرانی عمده در صنایع غذایی، استفاده از مواد مبتنی بر نفت (پتروشیمی) و غیرقابل تجدید و تأثیر مخرب آن بر محیط زیست است. در نتیجه، علاقه فزاینده‌ای به استفاده از زیست‌پلیمرها در بسته‌بندی مواد غذایی و سایر کاربردها به دلیل منبع تجدیدپذیر و ویژگی‌های زیست‌تخریب‌پذیر آنها که دارای مزیت مثبت زیست‌محیطی هستند، وجود دارد. **همی‌سلولزها**، زیست‌پلیمرهای ناهمگن (هتروپلیمر) و زیست‌تخریب‌پذیری هستند که با دیواره سلولی لیگنوسلولزی بافت‌های رویشی و ذخیره‌ای گیاهان یکساله و چندساله مرتبط هستند. آنها نماینده یک منبع عظیم و تجدیدپذیر از زیست‌پلیمرها هستند. همی‌سلولزها دومین جزء فراوان زیست‌توده لیگنوسلولزی هستند و به طور نسبی در کاربردهای صنعتی کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، حتی با اینکه یک محصول فرعی یا باقیمانده اصلی در فرآوری زیست‌توده لیگنوسلولزی محسوب می‌شوند. بنابراین، گنجاندن ارزش‌افزایی (Valorisation) همی‌سلولز از طریق مفهوم زیست‌پالایشگاه (Biorefinery) برای ترویج یک اقتصاد زیستی پایدار (SBE)، اقتصاد زیستی چرخشی (CBE) و اقتصاد چرخشی (CE) مهم است. روش‌های استخراج از گیاهان مختلف، امکان جداسازی طیف متنوعی از ساختارهای همی‌سلولز با بازده و خلوص مختلف را فراهم کرده است. با این حال، در مقایسه با سایر زیست‌پلیمرها، کاربردهای تجاری آنها به دلیل بازده کم، آب‌دوستی (هیدروفیلیسیته) و استحکام مکانیکی پایین، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که کاربردهای همی‌سلولزهای خالص در صنایع غذایی محدود است، استفاده از کامپوزیت‌های همی‌سلولز به عنوان فیلم‌های خوراکی، پوشش‌ها، نگهدارنده‌ها، پرکننده‌ها و امولسیفایرها، امیدوارکننده‌تر است. این مقاله مروری، کاربردهای فعلی زیست‌پلیمرهای همی‌سلولز گیاهی در صنایع غذایی و چشم‌اندازهای آینده در زیست‌اقتصاد پیشرفته (Advanced Bioeconomy) و زنجیره ارزش مواد شیمیایی و مواد و همچنین راه‌های کاهش چالش‌های مرتبط با استفاده از آنها را خلاصه می‌کند.

کلمات کلیدی: همی‌سلولز، زیست‌پلیمر، بسته‌بندی مواد غذایی، فیلم‌های خوراکی

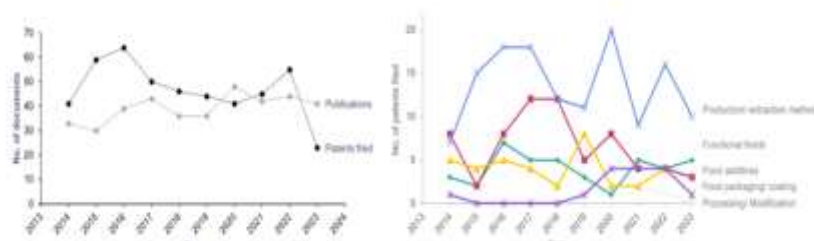


مقدمه (Introduction)

صنایع غذایی جهانی تا یک سوم از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی در سطح جهان را سالانه تولید می‌کنند که نیمی از این انتشارات ناشی از تلفات و ضایعات غذایی (FLW) است. در نتیجه، هدف ۱۲ توسعه پایدار سازمان ملل (UN SDG 12) به دنبال کاهش این مشکل است. اهداف این هدف شامل کاهش به نصف ضایعات غذایی جهانی سرانه، استفاده از مواد اولیه پایدارتر و ترویج بازدهی منابع است.^[۱] در پاسخ، صنایع غذایی راهبردهایی از جمله بازیافت ضایعات غذایی به عنوان مواد اولیه و تولید جایگزین‌های گیاهی برای کاهش مصرف گوشت را در پیش گرفته‌اند. همچنین یک تغییر الگو (Paradigm Shift) به سمت افزودنی‌های وگان با آلتریزایی کم در مقایسه با همتایان حیوانی وجود دارد که می‌توانند به عنوان پوشش، نگهدارنده و تقویت‌کننده بافت استفاده شوند.

نکات برجسته پایداری (Sustainability Spotlight)

صنایع غذایی تا یک سوم از انتشار سالانه گازهای گلخانه‌ای (GHG) در سراسر جهان را تولید می‌کنند که نیمی از این انتشارات ناشی از تلفات و ضایعات غذایی است. ارزش‌افزایی به همی سلولز در زیست‌پالایشگاه‌ها از زیست‌توده لیگنوسلولوزی می‌تواند به ترویج یک اقتصاد زیستی چرخشی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. از همی سلولزها می‌توان در صنایع غذایی برای ایجاد جایگزین‌های بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر استفاده کرد که همچنین می‌توانند به حفظ عمر مفید مواد غذایی و کاهش ضایعات کمک کنند. همی سلولزها همچنین در تولید جایگزین‌های گیاهی برای گوشت در حال بررسی هستند که می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از صنعت گوشت کمک کند. این موضوعات با هدف توسعه پایدار سازمان ملل متحد شماره ۱۲ (تولید و مصرف مسئولانه) هم راستا هستند^[۱]



شکل ۱: (الف) روند تعداد انتشارات علمی و پتنت‌های ثبت‌شده با عبارات جستجو «همی سلولز» یا «زیلان» یا «گلوکان» یا «مانان» در عنوان و «غذا» و «گیاه» در هر فیلد، در بازه زمانی ۱ ژانویه ۲۰۱۳ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۳. (ب) تعداد پتنت‌های ثبت‌شده بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ برای کاربردهای همی سلولزهای گیاهی در صنایع غذایی.



مشکل بسته‌بندی‌های سنتی

در صنایع غذایی، بیشتر مواد بسته‌بندی و افزودنی‌های غذایی سنتزی هستند که عمدتاً به دلیل هزینه، راحتی و در دسترس بودن است. محبوب‌ترین مواد بسته‌بندی غذایی، کاغذ و پلاستیک، با روش‌های عمدتاً ناپایدار تولید می‌شوند (قطع درختان و استخراج نفت). بسته‌بندی بزرگترین سهم را در تولید ضایعات در سراسر جهان دارد و حدود ۹۷٪ از آن بازیافت نمی‌شود. در حالی که تلاش‌ها برای بازیافت در حال افزایش است، آنها نمی‌توانند با تقاضای رو به رشد برای پلاستیک مقابله کنند.^[۲] برای پلاستیک‌های یکبار مصرف (SUP)، عمر کاری از زمان استفاده تا دفع می‌تواند به کوتاهی چند دقیقه باشد.^[۳] برخی از اشکال بسته‌بندی پلاستیکی، ترکیبات خطرناکی برای سلامت در طول زمان آزاد می‌کنند.^[۴] حدود ۹۵٪ از بسته‌بندی‌های پلاستیکی، یکبار مصرف هستند اما تنها حدود ۵٪ بازیافت می‌شوند.^[۵]

جایگذاری به سمت جایگزین‌های زیست‌تخریب‌پذیر

در زمان‌های اخیر، تغییر الگو به سوی جایگزین‌های ایمن‌تر، مشتق شده از گیاه و زیست‌تخریب‌پذیر وجود داشته و تحقیقات به طور نمایی در حال رشد است. برای برخی از زیست‌پلاستیک‌ها مانند اسید پلی‌لاکتیک (PLA)، اگرچه منبع مواد اولیه (گیاهان) تجدیدپذیر است، اما ماده بلافاصله زیست‌تخریب‌پذیر نیست، زیرا این پلیمر به طور طبیعی در گیاه وجود ندارد. بنابراین، استفاده از زیست‌پلیمرهای طبیعی موجود در گیاهان می‌تواند این مشکل را دور بزند، زیرا آنها به طور طبیعی زیست‌تخریب‌پذیر هستند.^[۶] مواد لیگنوسلولزی موجود در گیاهان، فراوان‌ترین جزء زیست‌توده آنها هستند.^[۷]

زیست‌توده لیگنوسلولزی (LCB) و اهداف توسعه پایدار

LCB، که نه تنها از صنایع غذایی بلکه از منابع مختلف گیاهی مانند بقایای کشاورزی، ضایعات جنگلی و گیاهان انرژی‌زا به دست می‌آید، به عنوان یک منبع تجدیدپذیر امیدوارکننده برای توسعه یک زیست‌اقتصاد پایدار ظهور کرده است. ادغام LCB در اقتصاد چرخشی با چندین هدف دیگر توسعه پایدار همسو است و راه را برای یک زیست‌اقتصاد مقاوم هموار می‌کند: الف) LCB (می‌تواند به سوخت‌های زیستی مانند بیواتانول، بیودیزل و بیوگاز تبدیل شود که به گذار به سوی منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند: SDG 7) انرژی مقرون به صرفه و پاک (ب) توسعه زیست‌پالایشگاه‌های لیگنوسلولزی، نوآوری در فناوری‌های فرآوری زیست‌توده، بازدهی منابع و ایجاد روش‌های صنعتی پایدار را ترویج می‌کند (SDG 9: صنعت، نوآوری و زیرساخت (ج) جایگزینی محصولات مبتنی بر فسیل با جایگزین‌های زیستی مشتق شده از LCB می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش تأثیرات تغییرات آب و هوایی کمک کند (SDG 13: اقدام اقلیمی) ادغام LCB در اقتصاد چرخشی از طریق توسعه زیست‌پالایشگاه‌های لیگنوسلولزی، از گذار به سوی یک زیست‌اقتصاد پایدار حمایت می‌کند. این زیست‌پالایشگاه‌ها هدفشان به حداکثر رساندن استفاده از زیست‌توده با تبدیل اجزای آن (سلولز، همی‌سلولز و لیگنین)^[۷] به طیف وسیعی از محصولات با ارزش افزوده شامل سوخت‌های زیستی، مواد شیمیایی زیستی و مواد زیستی است.

بازار برای مواد همی سلولزی (Market for Hemicellulose Materials)

تجاری‌سازی محصولات مبتنی بر همی سلولز با چندین مانع مواجه است: فرآیند تولید پرهزینه ناشی از روش‌های استخراج و خالص‌سازی پیچیده برای به دست آوردن همی سلولز خالص. عدم استانداردسازی در تولید که تضمین کیفیت و کمیت ثابت همی سلولز را دشوار می‌سازد. در دسترس بودن محدود مواد اولیه و رقابت با صنایع دیگر صنایع دیگری که از زیست‌توده لیگنوسلولزی استفاده می‌کنند (مانند تولید سوخت زیستی) برای دسترسی به مواد اولیه رقابت ایجاد می‌کنند.



کمبود اکوسیستم بحرانی پردازشگران با ارزش افزوده که فراتر از ارزش محصول اصلی را ببینند و در برخی موارد، تولید این مواد زائد اولیه دور از تأسیسات فرآوری است.^[8] کمبود آگاهی و درک این محصولات در میان مصرف کنندگان و صنایع، نیاز به سیاست ملی برای هدایت دفع ضایعات گیاهی برای حفظ تقاضای همی سلولز و افزایش آگاهی از استفاده از این مواد زائد در صنایع دیگر غیر از سوخت های زیستی^[1] توسعه روش های کارآمد و مقرون به صرفه برای استخراج و تفکیک همی سلولز از زیست توده لیگنوسلولزی پیچیده برای تجاری سازی موفق محصولات مبتنی بر همی سلولز ضروری است. کمبود در دسترس بودن زیرساخت فنی، نیروی انسانی شایسته و بومی سازی ماشین آلات برای استخراج محصولات فرعی مبتنی بر فنولیک و فیتوشیمیایی.^[1]

هم نشینی زیست اقتصاد، زیست پالایشگاه و ارزیابی چرخه حیات

هم نشینی (سینرژی) زیست اقتصاد، زیست پالایشگاه و ارزیابی چرخه حیات (LCA) نقش بسیار مهمی در تولید پایدار مواد شیمیایی و مواد زیست تخریب پذیر از همی سلولز ایفا می کند.^[1]

زیست پالایشگاه های لیگنوسلولزی

از فرآیندهای مختلفی برای به حداکثر رساندن استفاده از زیست توده استفاده می کنند: پیش تیمار (Pretreatment) برای افزایش دسترسی به اجزا. هیدرولیز آنزیمی (Enzymatic Hydrolysis) برای تجزیه پلی ساکاریدهایی مانند همی سلولز به قندهای قابل تخمیر.

تخمیر (Fermentation) این قندها برای تولید مواد شیمیایی زیستی با ارزش و مواد زیست تخریب پذیر. تحقیقات جاری بر بهینه سازی و یکپارچه سازی عملیات واحد برای بهبود بازده فرآیند، کاهش جریان های ضایعات و افزایش مقرون به صرفه بودن کلی اقتصادی متمرکز است.^[1]

ارزیابی چرخه حیات (LCA)

LCA یک روش ساختاریافته برای جمع آوری فهرست (Inventory) ورودی های انرژی و مواد، ارزیابی انتشارات زیست محیطی و ارزیابی تأثیر کلی زیست محیطی مرتبط با محصولات یا فرآیندها ارائه می دهد. این ارزیابی ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و بوم شناختی را در دامنه های مختلف پوشش می دهد: از گهواره تا گور (Cradle-to-Grave) : از مواد خام تا پایان عمر. از گهواره تا دروازه (Cradle-to-Gate): از مواد خام تا محصول قابل عرضه در بازار. از دروازه تا دروازه (Gate-to-Gate) : فقط بخشی از چرخه حیات. اگرچه اطلاعات محدودی درباره مطالعات LCA به طور خاص در مورد زیست پالایشگاه های همی سلولز وجود دارد، اما برخی مطالعات نمای گسترده ای از اهمیت مسیرهای ارزش افزایی ضایعات زیستی برای تولید، کاربرد و سناریوهای پایان عمر مواد شیمیایی و مواد مختلف در محدوده یک زیست پالایشگاه بزرگ ارائه می دهند.^[1]

مواد و مواد شیمیایی مشتق از پلی همی سلولز

چندین ماده و ماده شیمیایی ارزشمند را می توان از تجزیه همی سلولز برای اهداف تجاری تولید کرد: زایلواولیگوساکاریدها (XOs) و زایلیتول : محصولات با ارزش به دست آمده از همی سلولز. بیواتانول مشتقات



فوران: مانند فورفورال و هیدروکسی متیل فورفورال (HMF) مشتقات هیدروفوبیک و قابل پردازش: که می‌توانند برای تهیه فیلم‌ها و کامپوزیت‌ها استفاده شوند^[1].

نمونه‌های خاص از مواد شیمیایی پلتفرمی:

فورفورال (Furfural): یک ماده شیمیایی است که در یک زیست‌پالایشگاه لیگنوسلولزی از دهیدراتاسیون اسید-کاتالیز شده زایلوز تولید می‌شود. فورفورال کاربردهای گسترده‌ای در صنایع پلاستیک، داروسازی، آگروشیمی، چسب و بهبود طعم دارد. **هیدروکسی متیل فورفورال (HMF):** یک ماده شیمیایی پلتفرمی است که می‌تواند برای سنتز انواع مواد و مواد شیمیایی با ارزش افزوده استفاده شود. HMF یک پیش‌ساز برای تولید پلیمرهای زیستی مانند پلی‌استرها و پلی‌اورتان‌ها است و می‌تواند به اسید ۲،۵-فوراندی کربوکسیلیک (FDCA) تبدیل شود که یک واحد سازنده کلیدی برای پلاستیک‌های زیستی مانند پلی اتیلن فورانات (PEF) است. **اسید لوولینیک (Levulinic Acid):** در تولید نرم‌کننده‌ها (پلاستیسیرها)، داروها، آگروشیمی‌ها استفاده می‌شود و یک پلتفرم برای صنایع غذایی عمدتاً به عنوان یک عامل طعم‌دهنده و افزودنی غذایی است. همچنین مشخص شده که دارای خواص ضد میکروبی خاصی است که به طولانی‌تر شدن عمر مفید برخی محصولات غذایی کمک می‌کند.

مطالعه LCA نمونه

محققان یک ارزیابی چرخه حیات مقایسه‌ای از زیست‌پالایشگاه‌های شبیه‌سازی شده ارائه دهنده HMF از ذرت و miscanthus (نماینده زیست‌توده نسل اول و دوم) انجام دادند. به طور کلی، زیست‌پالایشگاه مبتنی بر miscanthus انتشارات کمتری در دسته‌های تأثیر مختلف در مقایسه با همتای مبتنی بر ذرت داشت، به جز برای اشغال زمین.

استراتژی‌ها و چالش‌های فعلی در ارزش‌افزایی زیست‌توده لیگنوسلولزی

به دلیل رشد جمعیت جهان، استفاده فشرده از زمین و منابع طبیعی برای تولید غذا، کالاها و انرژی وجود دارد که از یک سو استاندارد زندگی بی‌سابقه‌ای در کشورهای صنعتی به ارمغان آورده، اما از سوی دیگر بر محیط زیست و سلامت انسان تأثیر گذاشته است. تعادل طبیعی زمین بر هم خورده و در نتیجه، ما می‌توانیم شاهد تغییرات آب و هوایی، از دست دادن تنوع زیستی، کمبود آب، قحطی و بیماری‌ها باشیم. جامعه مدرن به منابع نفتی و فسیلی محدود و غیرقابل تجدید برای انرژی، مواد شیمیایی و مواد متکی است؛ استفاده از آنها یک تهدید زیست‌محیطی است. علی‌رغم تلاش‌ها برای کاهش مصرف و استفاده از منابع تجدیدپذیر، تقاضای نفت به ویژه برای انرژی حمل و نقل در سال ۲۰۲۴ همچنان در حال رشد است. در مورد گرمایش جهانی، سازمان هواشناسی جهانی (WMO) نشان می‌دهد که ۶۶٪ احتمال دارد که میانگین دمای سطحی سالانه جهانی بین ۲۰۲۳ و ۲۰۲۷ بیش از ۱.۵ درجه سانتی‌گراد بالاتر از سطوح پیش از صنعتی شدن باشد. زیست‌توده شامل تنوع زیستی، زیست‌توده لیگنوسلولزی و زیست‌توده باقیمانده - یک جایگزین پایدار با مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی است. ضایعات زیست‌توده، از جمله ضایعات جنگلی، کشاورزی، صنایع تبدیلی کشاورزی و غذایی در حال افزایش هستند. ضایعات زیست‌توده شروع به دیده شدن به عنوان منبع برای نسل بعدی سوخت‌های زیستی، مواد شیمیایی زیستی و مواد زیستی کرده‌اند. منابع زیستی وابستگی به نفت را کاهش می‌دهند و در عین حال مزیت دفع خوب ضایعات و صرفه‌جویی در منابع اقتصادی را دارند.



ارزش افزایی ضایعات زنجیره تأمین غذایی (FSCW Valorisation)

غذا، آب، بهداشت و سرپناه نیازهای اساسی برای بقای انسان هستند، با این حال، جوامع کم‌درآمد، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، در یافتن این حداقل الزامات با مشکلاتی مواجه هستند. در مقابل، رشد در بیماری‌های مرتبط با تغذیه مانند دیابت و چاقی در کشورهای با درآمد متوسط و بالا وجود دارد. صنایع فرآوری غذایی فشرده از نظر انرژی و آب هستند و هنوز ناکارآمدند، بنابراین ضایعات زنجیره تأمین غذایی (FSCW) در حال تبدیل شدن به یک چالش برای امنیت غذایی و همچنین برای توسعه یک زیست‌اقتصاد پایدار است. یک سوم غذای تولید شده جهانی در زنجیره ارزش غذایی هدر می‌رود، بنابراین نیاز فوری به تغییر رفتار نسبت به FSCW به سمت ارزش‌افزایی و استفاده از آن وجود دارد. دفع مدیریت پسماند کارآمد و پیشرفته باید بر بازطراحی، استفاده مجدد، بازیابی و بازیافت بقایای غذایی با اعمال فناوری‌های سبزتر جدید تمرکز کند.^[9]

ساختار دیواره سلولی زیست‌توده و نقش همی سلولز در رشد دیواره سلولی گیاه

زیست‌توده لیگنوسلولزی (LCB) فراوان‌ترین ماده روی زمین است. اعتقاد بر این است که ۲۰۰ میلیارد تن در سال زیست‌توده گیاهی در سیاره ما رشد می‌کند، اما تنها ۴-۵٪ مورد استفاده قرار می‌گیرد در حالی که بقیه از طریق مسیرهای طبیعی بازیافت می‌شوند. دیواره سلولی از لایه‌ها و زیرلایه‌ها تشکیل شده است: لاملا میانی (Middle Lamella)، دیواره اولیه (Primary Wall) و دیواره ثانویه (Secondary Wall) که خود از سه زیرلایه S1, S2, S3



تشکیل شده است.

شکل ۲: طرح‌واره دیواره سلولی گیاه، ساختار و ترکیب کلی آن

از نظر شیمیایی، LCB از چهار زیست‌پلیمر تشکیل شده است: سلولز (Cellulose) عمدتاً در دیواره اولیه و در زیرلایه S2

همی سلولز (Hemicellulose) عمدتاً در دیواره اولیه و دیواره ثانویه S3 لیگنین (Lignin) عمدتاً در لاملا میانی و در دیواره ثانویه S1 پکتین (Pectin) عمدتاً در دیواره اولیه. فراوانی نسبی این سه زیست‌پلیمر یک عامل کلیدی در کیفیت LCB و استفاده از آن است.



ساختار و ویژگی‌های اجزا

سلولز: یک هموپلیمر خطی تشکیل شده از واحدهای مونومر گلوکز است که از طریق زنجیره‌های β -۱,۴-گلوکان به هم متصل شده‌اند که میکروفیبریل‌های سلولزی را می‌سازند و یک ساختار نیمه کریستالی تشکیل می‌دهند. از این رو، سلولز از نظر شیمیایی یک پلی‌ساکارید است. **همی سلولز:** یک پلی‌ساکارید غیرسلولزی است که از یک زنجیره β -۱,۴-لینک شده تشکیل شده که دارای زنجیره‌های جانبی است که از تشکیل ساختارهای کریستالی جلوگیری می‌کند. این امر همی سلولز را به یک زیست‌پلیمر آمورف تبدیل می‌کند که زنجیره‌های بلندی را تشکیل می‌دهد که می‌توانند از طریق پیوند هیدروژنی با سلولز ارتباط برقرار کنند، به طوری که همی سلولز یک شبکه تقویت‌کننده تشکیل می‌دهد که میکروفیبریل‌ها را در مکان‌های خاصی در کنار هم نگه می‌دارد. همچنین گمان می‌رود که همی سلولزها به عنوان نرم‌کننده (Plasticizer) عمل می‌کنند و میکروفیبریل‌ها را از یکدیگر جدا نگه می‌دارند. **لیگنین:** سومین جزء دیواره سلولی، یک شبکه آروماتیک است که استحکام و آبگریزی (Hydrophobicity) را به دیواره سلولی می‌بخشد و یک مانع قابل توجه برای آنزیم‌های تخریب‌کننده دیواره ایجاد می‌کند. **پکتین:** اگرچه مقدار آن در LCB کم است، اما اهمیت صنعتی آن توجه چندین محقق را جلب کرده است. پکتین‌ها پلی‌ساکاریدهای پیچیده متقاطع هستند که حاوی اسید گالاکتورونیک هستند^[10].

کاربردها و مزایای زیست‌پالایشگاه‌ها در اقتصاد چرخشی

زیست‌اقتصاد پایدار (SBE)، اقتصاد زیستی چرخشی (CBE) و مهندسی چرخشی (CEng)

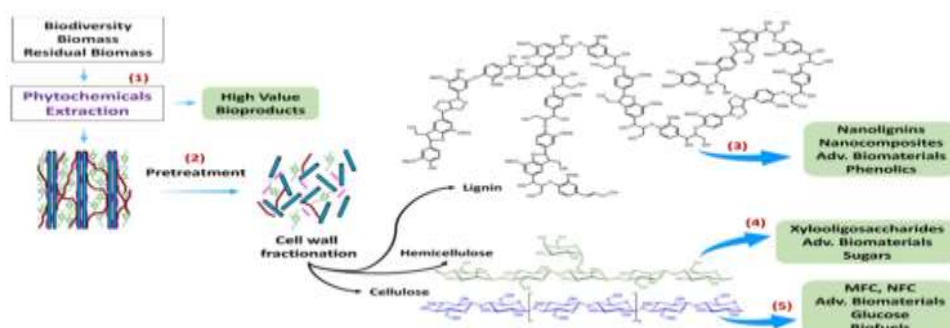
جامعه مدرن ما با سه چالش بزرگ روبرو است: افزایش جمعیت، کاهش منابع و تغییرات آب و هوایی؛ این causes آلودگی و گازهای اثر گلخانه‌ای (GHG) می‌شود، بنابراین به غذای بیشتر، منابع بیشتر و منابع جدید پایدار برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی نیاز است. یکی از امیدوارکننده‌ترین منابع کربن، منابع زیستی تجدیدپذیر، یعنی تنوع زیستی، زیست‌توده و زیست‌توده باقیمانده هستند. LCB و بقایای آن فراوان و یک ماده اولیه مناسب برای فرآوری و ارزش‌افزایی بیشتر به دلیل غنای آنها در ترکیبات شیمیایی مهم هستند. چالش، توسعه فناوری‌های پاک جدید است که بتوانند مقادیر قابل توجهی از زیست‌توده و زیست‌توده باقیمانده (RB) را به روشی کم‌هزینه و پایدار، به سوخت‌های زیستی پیشرفته، زیست‌محصولات با ارزش افزوده بالا و مواد زیستی هوشمند که مناسب نیازهای جامعه فناوری‌محور هستند، تبدیل کنند و یک زیست‌اقتصاد پیشرفته (ABE) را favored کنند. این می‌تواند با به کارگیری مفهوم زیست‌پالایشگاه و فناوری ضایعات صفر (ZWT) محقق شود. برای توسعه یک SBE، باید تعادل بین استفاده پایدار از منابع زیستی و استفاده صنعتی از منابع زیست‌توده برای مصارف چندگانه از جمله زیست‌انرژی، غذا، خوراک، مواد شیمیایی، الیاف، پلیمرها، پلاستیک‌ها و کامپوزیت‌ها را در نظر گرفت. ضایعات تولید شده در فرآوری LCB و RB می‌توانند از طریق توسعه محصولات جدید به زنجیره‌های ارزش موجود یکپارچه شوند، یا فرآیندهای پایدار جدید می‌توانند زنجیره‌های ارزش جدیدی ایجاد کنند که یک توسعه محصول جدید (NPD) را تحریک می‌کنند^[11].

NPD مفید است زیرا رویکردها و تحقیقات جدیدی توسعه می‌یابد و بخش‌های تحقیق + توسعه + نوآوری (R + D + I) در محیط آکادمیک و صنعتی را تقویت می‌کند. این امر، اقتصاد زیستی چرخشی (CBE) را ترویج می‌کند و امکان کاهش ضایعات در محیط زیست و همچنین استفاده کارآمد از منابعی مانند انرژی و آب را فراهم می‌کند و پایه‌هایی برای مهندسی چرخشی (CEng) می‌گذارد. CEng نه تنها مراقبت از منابع صنعت و بهبود بهره‌وری و رقابت‌پذیری آنها را

ممکن می‌سازد، بلکه ضایعات را کاهش می‌دهد و گازهای گلخانه‌ای را از محیط زیست به حداقل می‌رساند و یک محیط زیست پاک، یک صنعت در حال رشد و توسعه پایدار را تضمین می‌کند^[1].

زیست‌پالایشگاه‌ها، فناوری ضایعات صفر (ZWT)

استفاده پایدار از LCB و RB را می‌توان با به کارگیری مفهوم زیست‌پالایشگاه و فناوری ضایعات صفر بهینه کرد، که در آن با ارزش‌ترین اجزای شیمیایی آن به روش cascade آبشاری (استخراج، جداسازی، خالص‌سازی و/یا عملکردی (Functionalized) می‌شوند و تلاش می‌شود تا در تمام مراحل فرآیند، باقیمانده‌ها به حداقل برسند). این ترکیبات شیمیایی لیگنوسلولزی می‌توانند در زیست‌محصولات یا مواد زیستی با ارزش افزوده بالا گنجانده شوند^[1].



شکل ۳: رویکرد یکپارچه پالایشگاه زیستی آبشاری و بیوتکنولوژی بدون ضایعات برای زیست‌توده لیگنوسلولزی (LCB) و زیست‌توده باقی‌مانده (RB)

زیست‌پالایشگاه cascade یکپارچه برای بخش غنی از همی سلولز LCB و RB

ارزش‌افزایی بخش غنی از همی سلولز از LCB و RB با به کارگیری رویکرد زیست‌پالایشگاه، منجر به تولید زیست‌محصولات با ارزش افزوده بالا و زیست‌انرژی می‌شود و زیست‌اقتصاد، زیست‌اقتصاد چرخشی و زیست‌اقتصاد پیشرفته را توسعه می‌دهد. به همین دلیل، توسعه فرآیندها در سطح پایلوت و صنعتی برای تفکیک زیست‌توده، و محصولات اعمال شده به بخش‌های غذایی، مواد و انرژی، یک جایگزین قابل دوام و پایدار برای توسعه جامعه ما است. این مرور بر ارزش‌افزایی بخش همی سلولز، فناوری فرآوری مانند فرآیندهای هیدروترمال در batch برای استخراج همی سلولز، و محصولات با ارزش افزوده بالا مانند زایلواولیگوساکاریدها، زایللوکان، مانان، زایلیتول، مانیتول، بیوفیلیم‌ها، پوشش‌ها و سایر کاربردها تأکید دارد^[1].

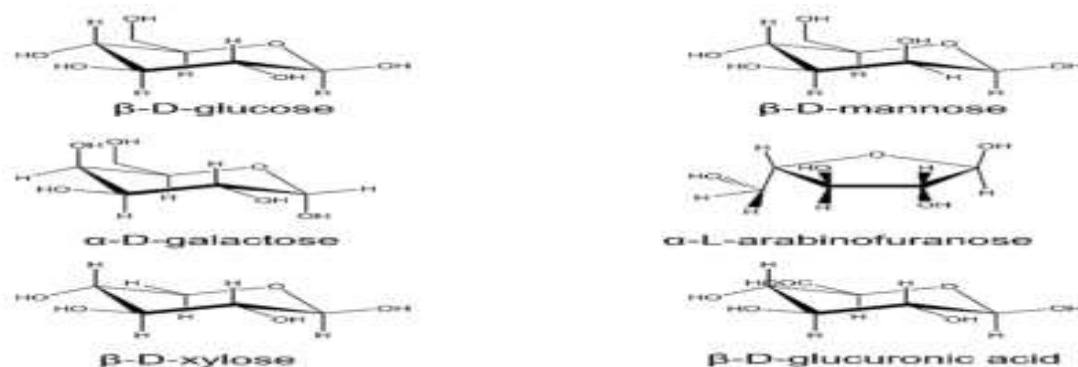
یکپارچه‌سازی زیست‌محصولات از ارزش‌افزایی LCB و RB در زیست‌پالایشگاه‌ها با اقتصاد چرخشی (CE)

یکپارچه‌سازی اقتصاد چرخشی با زیست‌باقیمانده‌ها به زنجیره تأمین محصولات شیمیایی، گامی ضروری برای اطمینان از توسعه موفقیت‌آمیز زیست‌پالایشگاه‌ها و قابلیت تجاری بودن مواد شیمیایی و مواد زیستی تولید شده با به کارگیری رویکرد زیست‌اقتصاد پیشرفته است. یک مطالعه اخیر نشان می‌دهد که بیش از ۳۵۰,۰۰۰ ماده شیمیایی در ۲۲

فهرست در سراسر جهان توزیع شده‌اند؛ بیشتر آنها از منابع فسیلی، به ویژه از نفت می‌آیند و این مواد شیمیایی منابع اصلی آلودگی هستند. علاوه بر این، بازیافت بیشتر این ترکیبات دشوار است. از سوی دیگر، ۷۰,۰۰۰ از این مواد شیمیایی به عنوان "مواد زیستی پیچیده" با ترکیب ناشناخته یا متغیر طبقه‌بندی شده‌اند که نیاز به طبقه‌بندی دارند تا استفاده چرخشی پایدار آنها برای مدیریت منطقی آنها در میان‌مدت و بلندمدت تسهیل شود.^[12] از این رو، تولید سوخت‌های زیستی، زیست‌محصولات و مواد زیستی یک جایگزین برای یک راه‌حل urgently needed برای مدیریت کارآمد سوخت‌های موجود، مواد شیمیایی و ضایعات در بازار جهانی است. پذیرش سوخت‌های زیستی جدید، زیست‌محصولات و مواد زیستی از زیست‌پالایشگاه‌های cascade (زیست‌اقتصاد پیشرفته) برای یکپارچه‌سازی آنها در زنجیره تأمین محصولات شیمیایی جهانی ضروری است. این می‌تواند آلودگی زیست‌محیطی ناشی از مواد شیمیایی، مواد شیمیایی زیستی و زیست‌باقیمانده‌ها را کاهش دهد و possibly حذف کند. استفاده پایدار و مؤثر از زیست‌باقیمانده‌ها یک عامل مهم برای بستن حلقه اقتصاد چرخشی در صنایع شیمیایی و صنایع وابسته است.^[1]

شیمی، انواع و ویژگی‌های همی‌سلولزهای گیاهی

زیست‌پلیمرها ماکرومولکول‌هایی هستند که نقش‌های فیزیولوژیکی را برای حمایت یا ذخیره ایفا می‌کنند. همی‌سلولز یک هتروپلیمر از گلوکز و قندهای دیگر است که ۲۰-۳۵٪ از دیواره سلولی گیاه را تشکیل می‌دهد. مانند سلولز، حاوی- β گلوکز است اما طیف متنوعی از قندهای دیگر به عنوان مونومر از جمله زایلوز، مانوز، گالاکتوز، آرابینوز و اسید گلوکورونیک دارد. زیست‌پلیمرهای همی‌سلولز (۵۰۰-۳۰۰۰ واحد مونومر) بسیار کوتاه‌تر از سلولز (۷۰۰۰-۱۵۰۰۰ واحد مونومر) هستند. این پلیمرها بر اساس جایگشت‌های مختلف قندهای پیرانوز و فورانوز، تنوعی از ساختارهای شیمیایی دارند. با این حال، بلوک‌های تکراری از مونومرها در ستون فقرات چهار نوع اصلی همی‌سلولز در گیاهان وجود دارد: زیلان‌ها، مانان‌ها، زایلولوکان‌ها و β -گلوکان‌های با اتصال مخلوط (MLGs) آنها از طریق یک پیوند گلیکوزیدی به لیگنین متصل شده‌اند و از طریق پیوند هیدروژنی به سلولز. در حالی که میکروفیبریل‌های سلولز استحکام را به دیواره سلولی می‌بخشند، همی‌سلولز انعطاف‌پذیری را impart می‌کند. علاوه بر تغییر در پیوند هیدروژنی، تغییر در انشعاب، درجه استیل‌شدن، حضور گروه‌های کربوکسیل و حضور گروه‌های آلدهید وجود دارد.^[13]

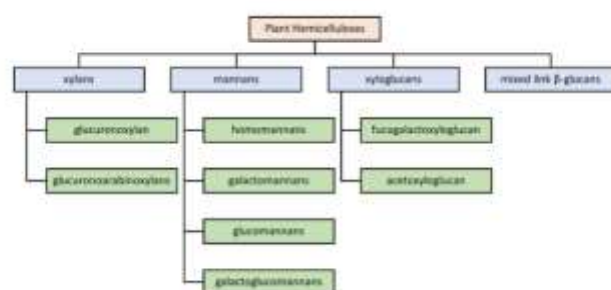


شکل ۴: ساختارهای شیمیایی مونومرهایی که برای ساخت همی‌سلولزها استفاده می‌شوند.

گروه‌های قطبی بیشتر می‌توانند قوی‌تر با سلولز ارتباط برقرار کنند در حالی که گروه‌های کمتر قطبی مانند گروه‌های استیل بیشتر با لیگنین ارتباط برقرار می‌کنند. انشعاب ۱ → ۶ گسترده‌تر، پیوند هیدروژنی را مختل می‌کند و انشعاب‌ها مستعدتر به شکست آنزیمی و هیدرولیز قلیایی و اسیدی هستند^[1].

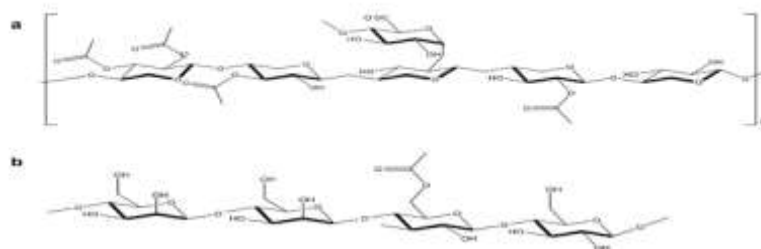
انواع همی سلولزها

زیلان‌ها (Xylans): معمولاً از یک ستون فقرات از باقیمانده‌های زایلوز با اتصال β -۱ → ۴ (تشکیل شده‌اند. می‌توانند به هموزیلان‌ها و هتروزیلان‌ها طبقه‌بندی شوند. **مانان‌ها (Mannans):** می‌توانند بر اساس حضور هگروزها در زنجیره‌شان به گالاکتومانان‌ها و گلوکومانان‌ها طبقه‌بندی شوند. **زایلولوکان‌ها (Xyloglucans):** یک ستون فقرات مشابه سلولز متشکل از گلوکز با اتصال β -۱ → ۴ (دارند که سه تا از چهار باقیمانده گلوکز با- α زایلوز در موقعیت ۶ جایگزین شده‌اند. β **گلوکان‌های با اتصال مخلوط (Mixed-linkage β -glucans):** رشته‌هایی از باقیمانده‌های متوالی- β -۱ → ۴ (گلوکوپیرانوز دارند که توسط یک β -۱ → ۳) گلوکوپیرانوز جدا شده‌اند^[14].

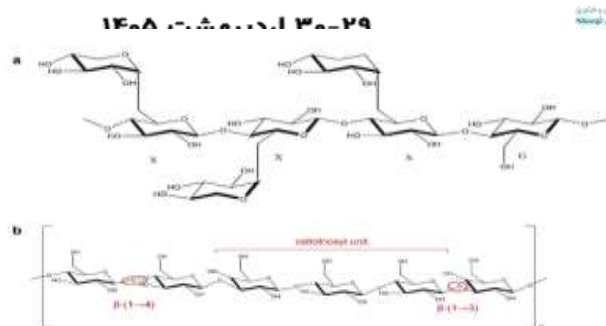


شکل ۵: دسته‌بندی‌های همی سلولزهای گیاهی، همان‌طور که توسط قاسم و همکاران شرح داده شده است.

ویژگی‌های



همی سلولزها برای کاربردهای غذایی (Properties for Food Applications) صنایع غذایی به طور فعال به دنبال مواد اولیه و افزودنی‌های طبیعی جدید برای استفاده در غذا و بهبود ویژگی‌های غذایی مانند بافت، پایداری، حلالیت و خواص امولسیون‌سازی هستند. ویژگی‌های همی سلولزها بسته به بافت، کلاس گیاه، شرایط محیطی و ساختار شیمیایی تغییر می‌کند^[1].



شکل ۶: (الف) ساختار شیمیایی زیلان در چوب سخت (ب) ساختار شیمیایی گلوکومان کونجاک

حلالیت (Solubility): یک ویژگی مهم است که می تواند برای کاربردهای غذایی مختلف تنظیم شود. هر چه زنجیره پلیمری بلندتر باشد، حلالیت در آب کمتر است. درجه انشعاب نیز بر حلالیت تأثیر می گذارد.

شکل ۷: (الف) ساختار شیمیایی زایلوگلوکان در دانه تمر هندی (نوع XXXG) (ب) ساختار شیمیایی گلوکان های پیوند مخلوط بتا- (۳/۱) و بتا- (۴/۱) در جو دوسر

رئولوژی و ویسکوزیته (Rheology and Viscosity): انعطاف پذیری زنجیره یک عامل اصلی مؤثر بر رئولوژی زیست پلیمر است. درجه استیل شدن، دما و وزن مولکولی متوسط بر فرآیند ژلاسیون تأثیر می گذارند. **خواص امولسیفایری (Emulsifying Properties):** این ویژگی های همی سلولزها که assembly آنها در رابط مایع-مایع را تعیین می کند، به آنها خواص امولسیون سازی می دهد که می تواند در امولسیون های روغن-آب در غذاهای مختلف مورد بهره برداری قرار گیرد. **خواص حرارتی و نوری (Thermal and Optical Properties):** مشخص شده که آنها یک دمای انتقال شیشه ای از ۲۵۰-۳۰۰ درجه سانتی گراد دارند که نشان می دهد از نظر حرارتی پایدار هستند. همچنین شفاف هستند که نشان می دهد برای ساخت مواد بسته بندی مناسب هستند. **معایب:** تعداد زیاد گروه های هیدروکسیل آزاد در همی سلولزها آنها را هیگروسکوپیک می کند و برخی از همی سلولزها، مانند زیلان ها، شکننده هستند. **مزایا:** با این حال، همی سلولزها ویژگی های عالی مانند زیست تخریب پذیری، زیست سازگاری و زیست فعالیت دارند که امکان اعمال آن را در صنایع مختلف، از جمله صنایع غذایی فراهم می کند [1].

روش های استخراج و فرآوری همی سلولزها برای مصارف صنعتی



استخراج پلیمرهای همی سلولز از زیست باقیمانده‌ها سه دسته اصلی روش‌های استخراج همی سلولز وجود دارد. پیش تیمار فیزیکی (Physical Pretreatment): که در آن همی سلولز طریق استخراج هیدروترمال (یا اتوهیدرولیز) یا انفجار بخار (Steam Explosion) به دست می‌آید [16]

پیش تیمار (Chemical Pretreatment): که شامل استخراج قلیایی، استخراج اسیدی یا پیش تیمار حلال مانند استخراج ارگانوسالو، فناوری CO₂/O₂ فشار بالا، استخراج حلال یونی، استخراج حلال یوتکتیک عمیق می‌شود [1].

پیش تیمار ترکیبی (Combined Pretreatment): که شامل پیش تیمار فیزیکی-شیمیایی (مانند استخراج با کمک اولتراسونیک، استخراج با کمک مایکروویو)، ترکیبی از فرآیندهای شیمیایی و هیدروترمال و سایر

Plant source	Hemicellulose type	Extraction conditions [extraction category]	MW (kDa)	Uses	Reference
<i>Alae vera</i>	Acemannan	Aqueous extraction/ethanol leaf : water ratio (1 : 3) at varying times (3-6 h) and temperatures (80-100 °C)	1000-1600	Functional foods and pharmaceutical products	Liu et al., 2019 ⁷⁵
Sugarcane [<i>Saccharum officinarum</i>] bagasse	Xylan	Ethanol, followed by 25% NaOH 120 °C [alkaline treatment]	380	Food packaging bioplastic	Jia et al., 2023 ⁷⁶
Kunjac (<i>Amorphophallus konjac</i>)	Glucomannan	Aqueous extraction/ethanol at varying temperatures (35-95 °C)	200-2000	Food additives	Yang et al., 2017 ⁷⁷
Oat bran (<i>Avena sativa</i>)	Mixed linked β -glucan	1 N NaOH (1 : 50) 1 h, pH 6.3 HCl and CaCl ₂ (1 h), pH 4.5 HCl (15 min), 50% ethanol [alkali extraction]	>2000	Food and pharmaceutical industries	Mashewari et al., 2017 ⁷⁸
Spruce softwood (<i>Picea</i> spp.)	Arabinoglucuronoxylan	Soaked in 1 M NaOH (1 : 7) or water, followed by microwave-assisted extraction [microwave-assisted extraction]	66	Various e.g. packaging	Chadni et al., 2019 ⁷⁹
Tamarind seed (<i>Tamarindus indica</i>)	Xyloglucan	Aqueous extraction/95% ethanol at 50 °C (4 h) [hydrothermal extraction]	770	Food additive - gelling agent	Limsangman et al., 2019 ⁸⁰

فرآیندهای ترکیبی است.

جدول ۱: نمونه‌هایی از منابع گیاهی و پسماندهای زیستی همی سلولزها و عصاره‌ها

پلیمریزاسیون مونومرهای زیستی (Polymerization of Bio-based Monomers)

همی سلولزها را می‌توان از مونومرهای تشکیل دهنده آن توسط پلیمریزاسیون شیمیایی، پلیمریزاسیون آنزیمی و/یا سنتز شیمیایی سنتز کرد. این روش کمتر از روش‌های استخراج محبوب است، زیرا وقت گیر است و در مورد سنتز آنزیمی، ویژگی آنزیم‌ها برای یک واکنش خاص، دامنه سوبسترا را محدود می‌کند. این معایب منجر به مقیاس پذیری ضعیف می‌شود [16].

تخمیر میکروبی (Microbial Fermentation)

گلوکان‌ها را می‌توان توسط تخمیر میکروبی تولید کرد، که در آن میکروب‌ها تحت شرایط تخمیر، اگزوپلی ساکاریدها ترشح می‌کنند. به عنوان مثال، اسکرو گلوکان یک- β -۱,۳- β -۱,۶-گلوکان است که توسط قارچ *Sclerotium* تحت شرایط تخمیر ترشح می‌شود. با این حال، این مرور بر همی سلولزهای گیاهی تمرکز دارد و بنابراین بیشتر مورد بحث قرار نخواهد گرفت [17].

تغییرات شیمیایی (Chemical Modifications)



اتراسیون (Etherification): واکنش‌های اتراسیون همی سلولز شامل موارد زیر است: کربوکسی متیلاسیون، آلکیلاسیون، بنزیلاسیون، هیدروکسی پروپیلاسیون و کواترنیزاسیون. این واکنش‌ها حلالیت و زیست تخریب پذیری همی سلولزها را تغییر می‌دهند. **استریفیکاسیون (Esterification):** همی سلولزها را می‌توان توسط استیله سازی، سولفاتاسیون، سوکسینیل‌اسیون، اولئویلاسیون، لورویلاسیون و فلوئوریناسیون استریفیه کرد. در این واکنش‌ها، گروه‌های هیدروکسیل با یک اسید کربوکسیلیک یا مشتقات آن برای تشکیل یک استر واکنش می‌دهند. جایگزینی گروه‌های هیدروکسیل، ظرفیت پیوند هیدروژنی پلیمر را کاهش می‌دهد، بنابراین آن را هیدروفوبیک‌تر و انعطاف‌پذیری فیلم‌های همی سلولز را افزایش می‌دهد. **اکسیداسیون (Oxidation):** حلقه‌های همی سلولز را می‌توان توسط اکسیداسیون پرپودات باز کرد. آمیناسیون احیایی و آمیداسیون (**Reductive Amination and Amidation**): آلکیل آمینه شده گلوکونوزیلان، خواص امولسیون سازی بالاتری با درجات بالاتر آمیناسیون تا یک نقطه خاص نشان داد. **اتصال عرضی/کوپلیمریزاسیون پیوندی (Cross-linking/Graft Copolymerization):** فیلم‌های زیلان/پلی وینیل الکل که می‌توانند در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده شوند، با اسید ۱،۲،۳،۴-بوتان تتراکربوکسیلیک برای بهبود آبگریزی، سد اکسیژن و خواص مکانیکی آنها اتصال عرضی داده شدند^[1].

تغییرات آنزیمی (Enzymatic Modification)

انواع آنزیم‌ها می‌توانند برای تغییر زنجیره‌های پلی ساکارید همی سلولز برای سفارشی سازی یا بهبود ویژگی‌های آنها استفاده شوند. تغییرات آنزیمی نسبت به تغییرات شیمیایی مزایایی دارند، مانند استفاده از شرایط واکنش ملایم‌تر که کمتر مستعد تخریب پلی ساکارید هستند و ویژگی یا regioselectivity واکنش‌ها. یک اشکال تغییرات آنزیمی این است که آنزیم‌های مختلف برای انواع مختلف همی سلولز مورد نیاز هستند و این آنزیم‌ها گران هستند^[18].

افزودنی‌ها/کامپوزیت‌ها (Additives/Composites)

افزودنی‌ها (Additives): انواع نرم‌کننده‌ها (پلاستیسیرها) مانند کیتوزان، کربوکسی متیل سلولز، زایلیتول، سوربیتول یا لیگنین به همی سلولزها اضافه می‌شوند تا خواص film-forming آنها را بهبود بخشند. **کامپوزیت‌ها (Composites):** کامپوزیت‌ها موادی هستند که با دو یا چند جزء ساخته می‌شوند که together منجر به ماده‌ای با خواص beneficial می‌شوند. عوامل تقویت کننده به کامپوزیت‌ها اضافه می‌شوند تا خواص مکانیکی فیلم‌های همی سلولز را افزایش دهند^[19].

زیست نانو کامپوزیت‌ها (Bio-nanocomposites)

فیلم‌ها (Films): فیلم‌ها می‌توانند از کامپوزیت‌های زیست پلیمری ساخته شوند که از طریق نیروهای ثانویه جاذبه برای تشکیل ساختارهای سه بعدی interaction (3D) می‌کنند. افزودن نانوفیلرها به زیست پلیمر همی سلولز می‌تواند خواص عملکردی فیلم‌های بسته بندی همی سلولز را بهبود بخشد. **امولسیون‌ها (Emulsions):** همی سلولزها می‌توانند برای ایجاد نانوامولسیون‌ها نیز استفاده شوند. نانوامولسیون‌ها همچنین می‌توانند آزادسازی آهسته ترکیبات فعال را تسهیل کنند، که آنها را برای بسته بندی فعال مناسب می‌سازد^[20].

مزایا و معایب استفاده از همی سلولزها در صنایع غذایی



مزایا (Advantages)

آنها دومین جزء فراوان زیست توده لیگنوسلولزی هستند. بنابراین، آنها مواد اولیه به راحتی در دسترس و تجدیدپذیر هستند که با مواد اولیه استفاده شده در تولید غذا رقابت نمی کنند. آنها نیز به دلیل حضور چندین گروه هیدروکسیل آزاد، amenable به تغییر شیمیایی آسان هستند. تغییرات شیمیایی می توانند ویژگی های آن را تغییر دهند تا آن را برای کاربردهای مختلف مناسب تر کنند. همی سلولزها خواص film-forming دارند. زیست تخریب پذیر و زیست سازگار هستند. همی سلولزها همچنین حلالیت کم در آب و خواص سدکنندگی در برابر اکسیژن دارند. برخی از همی سلولزها، مانند گلوکومانان، خواص آنتی اکسیدانی جزئی دارند و می توانند آزادسازی کنترل شده مواد فعال را تسهیل کنند. گلوکومانان به طور گسترده ای برای کاربردهای صنایع غذایی مطالعه شده است زیرا یک زیست پلیمر خنثی، غیر یونی است. تقاضا از صنایع غذایی برای همی سلولز از ضایعات لیگنوسلولزی می تواند برای جوامع کشاورزی شغل ایجاد کند و ضایعات پس از برداشت را با ایجاد یک زنجیره ارزش downstream به حداقل برساند^[1].

معایب (Disadvantages)

وزن مولکولی نسبتاً پایین همی سلولز در مقایسه با سلولز نشان می دهد که همی سلولز استحکام مکانیکی و پایداری حرارتی پایین تری دارد. علاوه بر این، ترکیب همی سلولز یکنواخت نیست، بلکه بسته به منبع متفاوت است و ناهمگنی بالای مخلوط وجود دارد. حضور چندین گروه هیدروکسیل به آنها اجازه می دهد چندین پیوند هیدروژنی درون مولکولی و بین مولکولی ایجاد کنند، که همی سلولزها را به طور ذاتی نیمه کریستالی، هیگروسکوپیک و آب دوست می کند. علاوه بر این، استخراج همی سلولز از زیست توده لیگنوسلولزی چالش برانگیزتر از استخراج سایر اجزاء مانند سلولز است.^[1]

کاربردهای همی سلولزها در صنایع غذایی

بسته بندی مواد غذایی (Food Packaging)

همی سلولزها و کامپوزیت های آنها برای کاربردهایشان در ایجاد انواع مختلف بسته بندی مواد غذایی مطالعه شده اند بسته بندی فعال (Active): (Packaging) بسته بندی که حاوی یا ساخته شده از اجزایی است که عمداً درون material بسته بندی یا فضای سرپوش بسته بندی گنجانده شده اند با هدف افزایش سیستم بسته بندی. کامپوزیت های KGM برای ایجاد بسته بندی فعال ضد باکتری، ضد قارچ و آنتی اکسیدانی استفاده شده اند. بسته بندی هوشمند (Intelligent Packaging): سیستمی capable از حس کردن، detecting، recording و communicating به منظور تسهیل گسترش عمر مفید، بهبود کیفیت و افزایش کیفیت غذا. بیشتر indicators از مواد شیمیایی indicator استفاده می کنند که بر اساس pH گاز detect شده تغییر رنگ خواهند داد. فیلم ها و پوشش های خوراکی (Edible Films and Coatings): همی سلولزها candidates خوبی برای فیلم ها و پوشش های خوراکی هستند زیرا بیشتر آنها غیر سمی و حاوی مواد non-آلرژیک، easily manufactured هستند و نیمه تراوایی را برای حفظ تعادل داخلی گازهای involved در طول تنفس بی هوازی و هوازی فراهم می کنند.^[21]

افزودنی های غذایی (Food Additives)



همی سلولزها غیر سمی هستند، که برخی دارای وضعیت عموماً به عنوان ایمن شناخته شده (GRAS) هستند. بنابراین، انواع مختلف همی سلولزها در حال حاضر در استفاده تجاری هستند یا برای پتانسیل آنها به عنوان انواع مختلف افزودنی های غذایی در حال بررسی هستند. **نگهدارنده ها (Preservatives):** ارزش افزایی همی سلولزها به عنوان یک نگهدارنده بالقوه در لوازم آرایشی و غذا قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است. **تقویت کننده های مواد مغذی (Nutrient Enhancers):** همی سلولزها چندین خاصیت nutraceutical دارند که آنها را به عنوان افزودنی های غذایی عملکردی applicable می سازند. به عنوان مثال، چندین benefit سلامتی برای مصرف گلوکومانان وجود دارد. **امولسیفایرها (Emulsifiers):** همی سلولزها می توانند برای تثبیت امولسیون ها و امولسیون های Pickering در ساخت محصولات غذایی مختلف استفاده شوند. **عوامل غلیظ کننده/تقویت کننده های بافت (Thickening Agents/Texture Enhancers):** مرورهای recent چگونگی استفاده تجاری برخی از گالاکتومانان ها را به عنوان غلیظ کننده، عوامل اتصال و تثبیت کننده در صنایع غذایی خلاصه کرده اند. همی سلولزها همچنین پتانسیل جایگزینی چربی به عنوان یک عامل اتصال در غذاها را دارند^[1].

نتیجه گیری (Conclusions)

زیست پلیمرهای حاصل از زیست توده لیگنوسلولزی کم مصرف، ارزش افزایی شده، جایگزین های جذاب و زیست تخریب پذیری برای پلیمرهای سنتزی هستند. تنوع ساختارهای همی سلولز، طیف وسیعی از خواص عملکردی را اعطا می کند، که به نوبه خود بر کاربردهای عملی آنها influence می کند. در حالی که روش های de novo مانند تخمیر میکروبی و پلیمریزاسیون جایگزین های با بازده بالا ارائه می دهند، استخراج از زیست باقیمانده ها با استفاده از مفهوم زیست پالایشگاه پایدارتر و سازگارتر با محیط زیست است. وزن مولکولی پایین، استحکام مکانیکی و هیگروسکوپیسیتی همی سلولزها موانع اصلی برای کاربردهای جریان اصلی آنها هستند. این چالش ها توسط تغییرات شیمیایی، تغییرات آنزیمی، افزودن عوامل تقویت کننده و زیست کامپوزیت ها مورد خطاب قرار گرفته اند. در حالی که مرحله extra یک هزینه additional به تولید است، مطالعات augmentation خواص بیوشیمیایی آنها، مانند افزایش خواص ضد میکروبی و آنتی اکسیدانی و پایداری را نشان داده اند. این کاربردهای آنها را در صنایع غذایی به نگهدارنده ها و افزودنی های غذایی و گان که می توانند در طول عمر مفید محصول پایدار باشند، extended کرده است. کاربردهای بسته بندی فرمولاسیون های بهینه شده همی سلولز از زیست پلاستیک ها به بسته بندی ثانویه مانند بسته بندی هوشمند و فیلم ها و پوشش های خوراکی extended شده است. روند تحقیق در همی سلولز در بخش غذایی به سمت افزودنی های غذایی و بسته بندی حرکت کرده است. علی رغم plethora از مزایا و کاربردهای همی سلولزها، شکافی وجود دارد که برای تحقق پتانسیل کامل نیاز به پر شدن دارد. مشارکت ذی نفعان در تمام سطوح، از کشاورزان تا تصمیم گیرندگان، برای بسیج تحقیق و توسعه برای پیشبرد اقتصاد چرخشی و افزایش بازار برای محصولات مبتنی بر همی سلولز با ارزش افزوده در صنایع غذایی ضروری است. در حالی که plethora از مطالعاتی که کاربردهای همی سلولزها را در صنایع غذایی بررسی کرده اند وجود دارد، یک lag قابل توجه در تجاری سازی چنین فناوری هایی وجود دارد. مطالعات آینده باید به دنبال توسعه راه حل های تجاری قابل دوام باشند که دامنه وسیع تری از کاربردها در صنایع غذایی داشته باشند.



- 1: Sarah R. Mathura, a Andrea C. Landazuri, ' cdef Farrah Mathura, b Ana Gabriela Andrade Sosa c and Lourdes M. Orejuela-Escobar *cde
- 2 :J. Zhu, Z. Luo, T. Sun, W. Li, W. Zhou, X. Wang, X. Fei, H. Tong and K. Yin, Cradle-to-grave emissions from food loss and waste represent half of total greenhouse gas emissions from food systems, Nat. Food, 2023, 4, 247–256.
- 2 J.-G. Rosenboom, R. Langer and G. Traverso, Bioplastics for a circular economy, Nat. Rev. Mater., 2022, 7, 117–137.
- 3: New Greenpeace Report, <https://www.greenpeace.org/usa/news/new-greenpeace-report-plastic-recycling-is-a-deadend-street-year-a-quarter-year-plastic-recycling-declines-even-as-plastic-waste-increases/>, accessed 4 January 2024.
- 4: J. Muncke, Tackling the toxics in plastics packaging, PLoS Biol., 2021, 19, e3000961.
- 5 :W. Phillips, E. Thorne and C. Roopnarine, Economic implications of the ban on single-use plastics in the Caribbean, Digital Repository BETA Economic Commission for Latin America and The Caribbean (ECLAC), 2020, vol. 95, <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/8fccf1bc-87de-4615-8da2-f239917587ee>.
- 6: B. Xu, Y. Chen, J. He, S. Cao, J. Liu, R. Xue, F. Xin, X. Qian, J. Zhou, W. Dong and M. Jiang, New insights into the biodegradation of polylactic acid: from degradation to upcycling, Environ. Rev., 2022, 30, 30–38.
- 7: Y. Zhao, H. Sun, B. Yang and Y. Weng, Hemicellulose-Based Film: Potential Green Films for Food Packaging, Polymers, 2020, 12, 1775.
- 8: M. F. Qaseem, H. Shaheen and A.-M. Wu, Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization, Renewable Sustainable Energy Rev., 2021, 144, 110996.
- 9: D. J. Magliano, L. Chen, R. M. Islam, B. Carstensen, E. W. Gregg, M. E. Pavkov, L. J. Andes, R. Balicer, M. Baviera, E. B. Dam, G. L. Booth, J. C. N. Chan, Y. X. Chua, S. Fosse-Edorh, S. Fuentes, H. L. Gulseth, R. Gurevicius, K. H. Ha, T. R. Hird, G. Jermendy, M. D. Khalangot, D. J. Kim, Z. Kiss, V. I. Kravchenko, M. Leventer-Roberts, C.-Y. Lin, A. O. Y. Luk, M. Mata- Cases, D. Mauricio, G. A. Nichols, M. M. Nielen, D. Pang, S. K. Paul, C. Pelletier, S. Pildava, A. Porath, S. H. Read, M. C. Roncaglioni, P. L.-D. Ruiz, M. Shestakova, O. Vikulova, K.-L. Wang, S. H. Wild, N. Yekutieli and J. E. Shaw, Trends in the incidence of diagnosed diabetes: a multicountry analysis of aggregate data from 22 million diagnoses in high-income and middle-income settings, Lancet Diabetes Endocrinol, 2021, 9, 203–211.
- 10: P. E. Marriott, L. D. Gómez and S. J. McQueen-Mason, Unlocking the potential of lignocellulosic biomass through plant science, New Phytol., 2016, 209, 1366–1381.

- 11: S. Narasimhan, B. S. Srikanth and P. Poltronieri, in *Biotransformation of Agricultural Waste and By-Products*, ed. P. Poltronieri and O. F. D'Urso, Elsevier, 2016, pp. 49–67.
- 12 :A. Lai, A. M. Clark, B. I. Escher, M. Fernandez, L. R. McEwen, Z. Tian, Z. Wang and E. L. Schymanski, *The Next Frontier of Environmental Unknowns: Substances of Unknown or Variable Composition, Complex Reaction Products, or Biological Materials (UVCBs)*, *Environ. Sci. Technol.*, 2022, 56, 7448–7466.
- 13: F. Abik, C. Palasingh, M. Bhattarai, S. Leivers, A. Ström, B. Westereng, K. S. Mikkonen and T. Nypelö, *Potential of Wood Hemicelluloses and Their Derivates as Food Ingredients*, *J. Agric. Food Chem.*, 2023, 71, 2667–2683.
- 14: H. V. Scheller and P. Ulvskov, *Hemicelluloses*, *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2010, 61, 263–289
- 15: Y. Lu, Q. He, G. Fan, Q. Cheng and G. Song, *Extraction and modification of hemicellulose from lignocellulosic biomass: A review*, *Green Process. Synth.*, 2021, 10, 779–804
- 16: X.-D. Shi, J.-Y. Yin, S. W. Cui, Q. Wang, S.-Y. Wang and S.-P. Nie, *Plant-derived glucomannans: Sources, preparation methods, structural features, and biological properties*, *Trends Food Sci. Technol.*, 2020, 99, 101–116.
- 17: X.-D. Shi, J.-Y. Yin, S. W. Cui, Q. Wang, S.-Y. Wang and S.-P. Nie, *Plant-derived glucomannans: Sources, preparation methods, structural features, and biological properties*, *Trends Food Sci. Technol.*, 2020, 99, 101–116.
- 18: Z. Li and X. Pan, *Strategies to modify physicochemical properties of hemicelluloses from biorefinery and paper industry for packaging material*, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 2018, 17, 47–69.
- 19: F. M. Fakhouri, D. Costa, F. Yamashita, S. M. Martelli, R. C. Jesus, K. Alganer, F. P. Collares-Queiroz and L. H. Innocentini-Mei, *Comparative study of processing methods for starch/gelatin films*, *Carbohydr. Polym.*, 2013, 95, 681–689.
- 20: N. Bu, N. Zhou, G. Cao, R. Mu, J. Pang, C. Ma and L. Wang, *Konjac glucomannan/carboxymethyl chitosan film embedding gliadin/casein nanoparticles for grape preservation*, *Int. J. Biol. Macromol.*, 2023, 249, 126131.
- 21: W. Liu, Z. Ling, C. Huang, C. Lai and Q. Yong, *Investigation of galactomannan/deacetylated chitosan nanocomposite films and their anti-bacterial capabilities*, *Mater. Today Commun.*, 2022, 30, 103002.