



University of Tehran

Extraction of high-purity cellulose from banana stem waste and comprehensive analysis of its crystalline structure and thermal behavior

Ali Shayesteh¹ | Mehdi Jonoobi^{2*} | Peyman Ahmadi^{3*} | Amin Kalantari⁴

1. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: alishayesteh7878@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mehdi.jonoobi@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ahmadi.p@ut.ac.ir
4. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: amin1359k@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 24 February 2026

Revised: 03 June 2026

Accepted: 01 July 2026

Published online: 14 September

2026

Keywords:

Cellulose,

Banana pseudostem lignocellulosic waste,

Crystallinity,

Degree of polymerization,

Thermal analysis.

ABSTRACT

Introduction: The increasing production of bananas in tropical and subtropical regions generates substantial amounts of lignocellulosic residues, particularly banana pseudostems. These residues are often discarded or burned without effective utilization, despite containing significant amounts of cellulose, hemicelluloses, lignin, and fibrous constituents that can serve as renewable resources for the production of bio-based materials. Therefore, the objective of this study was to extract high-purity cellulose from banana pseudostem waste and to comprehensively evaluate its chemical composition, structural characteristics, crystallinity, thermal behavior, and degree of polymerization.

Method: Banana pseudostem fibers were collected, washed, dried, and mechanically processed prior to treatment. The fibers were subjected to a mild alkaline treatment using a 4 wt. % sodium hydroxide solution at 75-80°C. Subsequently, a three-stage oxidative bleaching sequence was applied to further remove hemicelluloses, lignin, and extractive substances. Chemical composition and ash content were determined using standard analytical methods. Structural changes were investigated by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), crystallinity was evaluated using X-ray diffraction (XRD), thermal stability was assessed through thermogravimetric analysis (TGA), and the degree of polymerization was determined by viscometric measurements in cuprammonium hydroxide solution.

Results: Chemical composition analysis revealed that the raw banana pseudostem fibers contained 35.5% cellulose, 28.9% hemicelluloses, 16.0% lignin, and 19.6% extractives. Ash content decreased from 14.94% in the raw fibers to 8.75% after alkaline pulping and further to 3.70% after bleaching, indicating the effective removal of mineral constituents and inorganic impurities. FTIR analysis confirmed the elimination of characteristic hemicellulose- and lignin-related absorption bands, while the bands associated with the β -(1 $\rightarrow$ 4)-glucan backbone of cellulose remained intact, demonstrating the preservation of the fundamental cellulose structure throughout the treatment process. XRD results showed a substantial increase in the relative crystalline fraction, with the crystallinity index rising from 57.87% in the raw fibers to 86.4% in the bleached fibers, which was attributed to the removal of amorphous components during pulping and bleaching. Furthermore, the degree of polymerization increased from 395 in the raw fibers to 1100 in the purified cellulose product. TGA analysis revealed enhanced thermal stability in the treated samples. In the DTG curves, the degradation peak associated with hemicelluloses within the temperature range of approximately 220–320 °C was markedly reduced and nearly eliminated, confirming the predominance of the cellulose phase in the final material.

Conclusion: The findings demonstrated that the combination of mild alkaline treatment and oxidative bleaching is an effective approach for removing non-cellulosic constituents from banana pseudostem fibers and producing cellulose with high purity, crystallinity, thermal stability, and degree of polymerization. Accordingly, banana pseudostem waste can be considered a low-cost, renewable, and valuable feedstock for the production of cellulose fibers and bio-based materials within the framework of a circular bioeconomy.

Cite this article: Shayesteh, A., Jonoobi, M., Ahmadi, P., Kalantari, A. (2026). Extraction of high-purity cellulose from banana stem waste and comprehensive analysis of its crystalline structure and thermal behavior. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (2), 133-145. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2026.411910.1392>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2026.411910.1392>



دانشگاه تهران

استخراج سلولز با خلوص بالا از پسماند ساقه موز و تحلیل جامع ساختار بلوری و رفتار حرارتی آن

علی شایسته^۱ | مهدی جنوبی^{۲*} | پیمان احمدی^۳ | امین کلانتری^۴

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: alishayesteh7878@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mehdi.jonoobi@ut.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ahmadi.p@ut.ac.ir
۴. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: amin1359k@yahoo.com

اطلاعات مقاله

چکیده

مقدمه: افزایش تولید موز در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری، حجم قابل توجهی از پسماندهای لیگنوسلولزی از جمله ساقه کاذب موز را به همراه دارد. این پسماندها اغلب بدون استفاده مؤثر رها یا سوزانده می‌شوند، در حالی که به دلیل دارا بودن سلولز، همی‌سلولزها، لیگنین و ترکیبات فیبری، می‌توانند به عنوان منبعی تجدیدپذیر برای تولید مواد زیست‌پایه مورد استفاده قرار گیرند. هدف از این پژوهش، استخراج سلولز با خلوص بالا از پسماند ساقه موز و ارزیابی همزمان ویژگی‌های شیمیایی، ساختاری، بلوری، حرارتی و درجه پلیمریزاسیون آن بود.

نوع مقاله:

پژوهشی

روش پژوهش: الیاف ساقه موز پس از جمع‌آوری، شست‌وشو، خشک‌سازی و خردایش، تحت تیمار قلیایی ملایم با محلول ۴ درصد هیدروکسید سدیم در دمای ۷۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس برای حذف بیشتر همی‌سلولزها، لیگنین و ترکیبات استخراجی، از توالی رنگبری اکسایشی سه مرحله‌ای استفاده شد. ترکیبات شیمیایی اولیه، میزان خاکستر، ساختار شیمیایی با طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه، ساختار بلوری با پراش پرتو ایکس، رفتار حرارتی با آنالیز توزین حرارتی و درجه پلیمریزاسیون به روش ویسکوزیمتری در حلال کوپرامونیم بررسی شد.

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳

یافته‌ها: نتایج ترکیبات شیمیایی نشان داد که الیاف ساقه موز حاوی ۳۵/۵ درصد سلولز، ۲۸/۹ درصد همی‌سلولزها، ۱۶ درصد لیگنین و ۱۹/۶ درصد مواد استخراجی بود. میزان خاکستر از ۱۴/۹۴ درصد در نمونه خام به ۸/۷۵ درصد پس از پخت و ۳/۷۰ درصد پس از رنگبری کاهش یافت که نشان‌دهنده حذف مؤثر ترکیبات معدنی و ناخالصی‌های غیرآلی بود. آنالیز FTIR حذف باندهای شاخص همی‌سلولزها و لیگنین را تأیید کرد، در حالی که باندهای مربوط به ساختار β -1,4-گلوکانی سلولز حفظ شد و نشان داد که اسکلت اصلی سلولزی طی فرآیند، پایدار مانده است. نتایج XRD بیانگر افزایش سهم نسی فاز بلوری در نمونه تیمار شده بود؛ به گونه‌ای که شاخص بلورینگی از ۵۷/۸۷ درصد در الیاف خام به ۸۶/۴ درصد در الیاف رنگبری شده افزایش یافت که به حذف بخشی از مناطق آمورف طی پخت و رنگبری نسبت داده می‌شود. همچنین درجه پلیمریزاسیون از ۳۹۵ در الیاف خام به ۱۱۰۰ در محصول سلولزی افزایش یافت. آزمون TGA نیز افزایش پایداری حرارتی نمونه‌های تیمار شده را نشان داد؛ به طوری که در متحنی DTG، پیک تجزیه همی‌سلولزها در بازه حدود ۲۲۰ تا ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد به طور چشمگیر کاهش یافته و تقریباً حذف شد و در نتیجه غلبه فاز سلولزی در ساختار نهایی تأیید شد.

کلیدواژه:

آنالیز حرارتی،

بلورینگی،

درجه پلیمریزاسیون،

سلولز،

ساقه موز،

ضایعات لیگنوسلولزی.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که ترکیب تیمار قلیایی ملایم و رنگبری اکسایشی، روشی مؤثر برای حذف اجزای غیرسلولزی ساقه موز و تولید سلولز با خلوص، بلورینگی، پایداری حرارتی و درجه پلیمریزاسیون بالا است. بنابراین، پسماند ساقه موز می‌تواند به عنوان منبعی ارزان، تجدیدپذیر و ارزشمند برای تولید الیاف سلولزی و مواد زیست‌پایه در چارچوب اقتصاد زیستی چرخشی مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: شایسته؛ علی، جنوبی؛ مهدی، احمدی؛ پیمان، کلانتری؛ امین (۱۴۰۵). استخراج سلولز با خلوص بالا از پسماند ساقه موز و تحلیل جامع ساختار بلوری و رفتار حرارتی آن. نشریه جنگل و

فرآورده‌های چوب، ۷۹ (۲)، ۱۴۵-۱۳۳. DOI: <https://10.22059/jfwf.2026.411910.1392>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2026.411910.1392>



۱. مقدمه

افزایش تقاضای جهانی برای محصولات کشاورزی در دهه‌های اخیر، علاوه بر تأمین نیازهای غذایی، منجر به تولید حجم قابل توجهی از پسماندهای لیگنوسلولزی شده است. مدیریت نامناسب این ضایعات می‌تواند پیامدهای محیط‌زیستی از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی خاک و اتلاف منابع زیستی را به همراه داشته باشد. در این میان، موز یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری جهان است که براساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، تولید جهانی آن سالانه بیش از ۱۱۵ میلیون تن برآورد می‌شود [۱]. کشت موز پسماندهای لیگنوسلولزی قابل توجهی تولید می‌کند، به طوری که تقریباً ۶۰ درصد از زیست توده موز پس از برداشت به عنوان ضایعات باقی می‌ماند که در مجموع سالانه در سراسر جهان حدود ۱۱۴ میلیون تن تخمین زده می‌شود [۲، ۳]. این ضایعات شامل ساقه‌های کاذب، پوست، برگ‌ها، محور سنبله و سایر اجزای گیاهی است که معمولاً رها یا سوزانده می‌شوند و منجر به چالش‌های محیط‌زیستی قابل توجهی از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای، تخریب خاک و آلودگی می‌شوند [۳]. با این حال، این فرآورده‌های جانبی موز، زیست توده‌های تجدیدپذیر ارزشمندی حاوی سلولز، همی سلولزها و لیاف طبیعی با پتانسیل صنعتی هستند [۴، ۵]. در چارچوب اقتصاد زیستی چرخشی، تمرکز اصلی بر ارزش آفرینی از پسماندهای لیگنوسلولزی از طریق تبدیل آنها به مواد و محصولات زیست پایه با کارایی زیاد است. در این راستا، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که زیست توده‌های لیگنوسلولزی قابلیت تبدیل به کامپوزیت‌های لیگنوسلولزی؛ پلیمرهای زیستی، سوخت‌های زیستی، جاذب‌های کربنی، سامانه‌های فیلتراسیون زیستی و فیلم‌های زیست تخریب پذیر مورد استفاده در بسته بندی‌های پایدار را دارا هستند [۲، ۶]. علاوه بر این، ضایعات موز می‌تواند به عنوان منبع ترکیبات زیست فعال، کودهای زیستی، خوراک دام و موادی برای صنایع نساجی و خودرو عمل کند [۲، ۴]. این رویکرد ارزش گذاری، ضمن فراهم کردن فرصت‌های درآمدی اضافی برای جوامع کشاورزی، از ابتکارات اقتصاد چرخشی پشتیبانی می‌کند. سلولز به عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی، دارای ساختار نیمه بلوری است که ناشی از آرایش منظم زنجیره‌های گلوکز و برهم کنش‌های هیدروژنی میان آن‌هاست و این ساختار نقش مهمی در تعیین خواص مکانیکی و حرارتی آن دارد [۷، ۸]. این پلیمر زیستی خطی دارای زیست سازگاری برجسته، زیست تخریب پذیری، استحکام کششی زیاد و چگالی کم است [۹، ۱۰]. افزایش درصد سلولز با خلوص بالا بیانگر حذف مؤثر همی سلولزها و سایر اجزای آمورف می‌باشد و از دیدگاه صنعتی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا سلولز با خلوص بیشتر برای تولید مشتقات سلولزی، لیاف بازساخته و مواد زیست پایه عملکرد مطلوب‌تری نشان می‌دهد. استخراج سلولز از منابع پسماندهای لیگنوسلولزی غیرچوبی با استفاده از تیمارهای قلیایی و فرآیندهای رنگبر برای حذف لیگنین و همی سلولزها با موفقیت انجام شده است. مطالعات روی کاکل‌های ذرت نشان داد که تیمار هیدروکسید سدیم و به دنبال آن رنگبر، ناخالصی‌ها را به طور مؤثر حذف کرده و سلولزی با شاخص بلورینگی ۴۴/۹۷ درصد تولید می‌کند [۱۱]. به طور مشابه، تیمار قلیایی و رنگبر برگ‌های پاندان^۱ (*Pandanus amaryllifolius*) منجر به تولید سلولزی با خلوص ۸۶ درصد و پایداری حرارتی بالاتر شد [۱۲]. فرآوری شیمیایی چند مرحله‌ای چاودار چند ساله (*Lolium perenne*)، محصولات سلولزی با بلورینگی زیاده‌تر را در مقایسه با پروتکل‌های تک مرحله‌ای هرچند با بازده کمتر ارائه داد [۱۳]. تیمارهای شیمیایی پوسته سویا و ضایعات کنف با استفاده از محلول‌های قلیایی و اسیدی با حذف اجزای غیرسلولزی، با موفقیت محتوای سلولز را افزایش داده و لیاف سلولزی بلوری با ابعاد مختلف تولید کردند [۱۴]. با وجود انجام مطالعاتی در زمینه استخراج سلولز از منابعی نظیر باگاس نیشکر، پوسته برنج و لیاف کنف، پژوهش‌ها درباره استخراج سلولز با درصد خلوص و درجه پلیمریزاسیون زیاد از شبه ساقه موز و بررسی همزمان شاخص بلورینگی، ویژگی‌های شیمیایی و رفتار حرارتی آن محدود است. به ویژه ارتباط میان فرآیند خالص سازی شیمیایی و تحول درجه پلیمریزاسیون سلولز در این زیست توده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، ارزیابی یکپارچه تغییرات ساختاری، بلورینگی و خواص حرارتی در کنار تعیین درجه پلیمریزاسیون می‌تواند درک دقیق تری از کیفیت سلولز حاصل فراهم کند. بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر استخراج لیاف سلولز با خلوص بالا از پسماند ساقه موز و ارزیابی ویژگی‌های ساختاری، بلوری، حرارتی و درجه پلیمریزاسیون آن است. در این مطالعه، فرآیند خالص سازی شیمیایی با هدف حذف مؤثر اجزای غیرسلولزی انجام شده و سپس با بهره گیری از آزمون‌های XRD، FTIR، آنالیز حرارتی و اندازه گیری درجه پلیمریزاسیون، کیفیت سلولز بررسی شده است. نوآوری این پژوهش در ارزیابی همزمان شاخص بلورینگی، رفتار حرارتی و درجه

^۱Pandan

پلیمریزاسیون الیاف سلولز استخراج شده از شبه‌ساقه موز و تحلیل ارتباط میان این عوامل نهفته است. نتایج این مطالعه می‌تواند زمینه بهره‌برداری صنعتی از این زیست‌توده لیگنوسلولزی غیرچوبی را در تولید مواد زیست‌پایه فراهم سازد و گامی در جهت توسعه مدیریت پایدار پسماندهای لیگنوسلولزی محسوب شود.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد

الیاف از بقایای ساقه کاذب گیاه موز (*Musa sapientum*) برداشت شده از باغات واقع در نواحی جنوبی استان سیستان و بلوچستان تهیه شد. پس از جمع‌آوری و تمیزکاری اولیه، ساقه‌ها به قطعاتی به طول ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر برش داده شدند. سپس به مدت ۴۸ ساعت در شرایط دمای محیط آزمایشگاه (23 ± 3 درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند تا به رطوبت تعادل برسند. مواد شیمیایی مورد استفاده شامل هیدروکسید سدیم، هیپوکلریت سدیم، اسید استیک، پراکسید هیدروژن (استفاده در توالی رنگبری) بودند. تمامی مواد شیمیایی از گرید آزمایشگاهی مجللی از شرکت پارسیان تجهیز کرج تهیه و استفاده شدند.

۲-۲. روش‌ها

۲-۲-۱. بررسی ترکیبات شیمیایی

اندازه‌گیری ترکیبات شیمیایی الیاف موز استفاده شده در این پژوهش در سه تکرار انجام شد. ابتدا ذرات الیاف موز خشک شده با استفاده از دستگاه آسیاب خرد شدند و پودر به دست آمده از مش ۶۰ عبور داده شد. اندازه‌گیری میزان لیگنین مطابق با دستورالعمل شماره استاندارد T222 cm-88 آیین‌نامه TAPPI انجام گرفت. اندازه‌گیری میزان هولوسلولز با استفاده از یک گرم کلرید سدیم (با درصد خلوص ۸۰ درصد) و ۰/۵ میلی‌لیتر استیک اسید به مدت ۶ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. بعد از فیلتر کردن محلول به دست آمده محتویات روی کاغذ صافی در آن ۱۰۳ درجه خشک شدند. سپس وزن هولوسلولز با کسر وزن کاغذ صافی به دست آمد. محتویات سلولز نیز با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید ۱۷/۵ درصد از هولوسلولز استخراج و تعیین شد. در نهایت، محتوای همی‌سلولزها با کم کردن مقدار سلولز از محتوای هولوسلولز محاسبه شد. درصد خاکستر ذرات باگاس نیز براساس دستورالعمل T211 cm-93 با استفاده از قرار دادن ذرات باگاس در کوره ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت تعیین شد.

۲-۲-۲. روش پخت

الیاف ساقه موز پس از جمع‌آوری، ابتدا با آب شستشو داده شده و سپس در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. پس از خشک‌سازی، الیاف به قطعات کوچک‌تر خرد شده و برای انجام فرآیند پخت آماده شدند. با توجه به ماهیت غیرچوبی و میزان نسبتاً پایین لیگنین در ساقه موز، فرآیند استخراج سلولز با استفاده از تیمار قلیایی ملایم انجام شد. بدین منظور، الیاف خشک در محلول ۴ درصد هیدرواکسید سدیم (معادل ۴۰ گرم NaOH در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر) قرار داده شدند. نسبت لیکور به الیاف در این مرحله ۱:۲۰ (حجمی به وزنی) در نظر گرفته شد. مخلوط حاصل در یک بشر شیشه‌ای مقاوم به حرارت قرار داده و در حمام آب با دمای کنترل شده ۷۵-۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت نگهداری شد. برای یکنواختی واکنش، نمونه‌ها در طول فرآیند به صورت دوره‌ای هم زده شدند. پس از پایان پخت، الیاف تیمار شده چندین بار با آب مقطر شستشو داده شدند تا pH محلول خروجی به حالت خنثی برسد و سپس برای مراحل بعدی آماده‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور آزادسازی ساختار الیافی و تسهیل حذف ترکیبات غیرسلولزی در مراحل بعدی، الیاف به صورت مکانیکی جداسازی و همگن‌سازی شدند تا خمیر اولیه حاصل گردد (شکل ۱). خمیر حاصل پس از شست‌وشوی کامل با آب مقطر تا رسیدن به pH خنثی، برای انجام مرحله رنگبری آماده شد.

۲-۲-۳. روش رنگبری مورد استفاده در پژوهش

به منظور حذف بخش قابل توجهی از همی‌سلولزها، لیگنین و ترکیبات استخراجی و افزایش خلوص سلولز، از یک توالی رنگبری شیمیایی سه مرحله‌ای (D0EpD1) استفاده شد. در این روش، که یک توالی سه مرحله‌ای است، در مرحله اول (D0) از محلول آبی ۲ درصد

سدیم کلریت NaClO_2 و محلول آبی ۳ درصد استیک اسید در دمای ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۸۰ دقیقه استفاده شد. مرحله دوم (Ep) با استفاده از محلول ۱/۵ درصد سدیم هیدروکسید (نسبت به وزن خشک ساقه موز) و ۱ درصد آب اکسیژنه در دمای ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت نود دقیقه به طول انجامید. در مرحله سوم این توالی (D1) از محلول سدیم کلریت ۱/۲۵ درصد (نسبت به وزن خشک ساقه موز) و استیک اسید ۳ درصد در دمای ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۹۰ دقیقه استفاده شد. پس از هر مرحله، نمونه‌ها با آب مقطر شست‌وشو داده شدند تا pH آنها به محدوده خنثی برسد. نمونه نهایی پس از خشک‌سازی در دمای ۴۰-۵۰ درجه سانتی گراد، به عنوان الیاف سلولز مورد استفاده در آزمون‌های بعدی قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱. استخراج سلولز اولیه و رنگبری الیاف سلولز

(۱) پخت ساقه موز در دمای ۷۵-۸۵ درجه، (۲) جداسازی مکانیکی الیاف سلولز با خلوص بالا و (۳) رنگبری و آبشویی الیاف سلولز

۲-۳. آنالیزها و بررسی ویژگی‌های سلولز با خلوص بالا

۲-۳-۱. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

جهت شناسایی گروه‌های عاملی و بررسی حذف ترکیبات غیرسلولزی، از دستگاه FTIR مدل Perkin Elmer Spectrum 400 با رزولوشن و بازه عدد طول موج ۶۰۰ تا ۴۰۰۰ استفاده شد.

۲-۳-۲. آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)

برای تعیین ساختار بلوری و تبلور، الگوهای XRD نمونه الیاف ساقه موز با استفاده از دستگاه پراش سنج اشعه ایکس پودری (XRD-7000S SHIMADZU، ژاپن) اندازه‌گیری شدند. داده‌های XRD با تابش $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1.542 \text{ \AA}$) در ولتاژ ۴۰ کیلو ولت و جریان ۳۰ میلی آمپر ثبت شد. اندازه‌گیری‌ها در بازه زاویه 2θ برابر با ۱۰ تا ۴۰ درجه، با گام زاویه‌ای ۰/۰۲ درجه، زمان توقف ۰/۴ ثانیه و سرعت جاروب ۳ درجه بر دقیقه انجام شد. برای محاسبه درجه بلورینگی الیاف، از روش سگال^۱ استفاده شد که در آن شدت پیک آمورف در زاویه ۱۸ به عنوان I_{am} و شدت پیک کریستالی سلولز I002 در زاویه ۲۲/۷ به عنوان I_{002} در نظر گرفته می‌شود. بلورینگی براساس رابطه ۱ محاسبه شد.

$$CrI = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100 \quad (1)$$

۲-۳-۳. آنالیز حرارتی (TGA)

رفتار حرارتی نمونه‌های خام و رنگبری شده با استفاده از دستگاه ترموگراویمتری (TA Instruments SDT Q600، آمریکا) مورد بررسی قرار گرفت. وزن اولیه نمونه‌ها به ترتیب ۲/۲ و ۳/۴۱ میلی گرم بود. آزمون در اتمسفر نیتروژن با نرخ جریان ۱۰۰ میلی لیتر بر

^۱Segal

دقیقه و سرعت گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه انجام شد. محدوده تخریب حرارتی و مراحل کاهش وزن جهت تحلیل حذف همی سلولزها و پایداری زنجیره سلولزی بررسی شد.

۲-۳-۴. تعیین درجه پلیمریزاسیون (DP)

اندازه‌گیری درجه پلیمریزاسیون نمونه سلولز الیاف موز بر اساس روش Klemm و همکارانش (۲۰۱۱) و با استفاده از محلول هیدروکسید کوپرا آمونیم $(\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2(\text{NH}_3)_4(\text{H}_2\text{O}))$ به عنوان حلال انجام شد [۱۵]. محلول هیدروکسید کوپرا آمونیم با حل کردن $\text{Cu}(\text{OH})_2$ در آمونیاک آبی تهیه شد. سپس ۱۰۰ میلی گرم نمونه به ۱۰۰ میلی لیتر محلول هیدروکسید کوپرا آمونیم اضافه شد. مخلوط به شدت به مدت ۵ دقیقه تکان داده شد و سپس به مدت ۵ دقیقه در حمام آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از حل شدن کامل نمونه در حلال، ویسکوزیته محلول در ویسکومتر اندازه‌گیری شد. ویسکوزیته از زمان خروج محلول سلولز و محلول هیدروکسید کوپرا آمونیم خالی رابطه ۲ محاسبه شد.

$$\eta_{\text{spec}} = \frac{\eta}{\eta_0} - 1 \quad (2)$$

که در آن η_{spec} ویسکوزیته خاص است. ویسکوزیته نسبی η زمان لازم برای حرکت حلال از علامت مدرج بالا به علامت مدرج پایین و η زمان (ثانیه) مورد نیاز برای حرکت نمونه از علامت مدرج بالا به علامت مدرج پایین است. سپس η_{spe} به دست آمده برای محاسبه DP بر اساس رابطه ۳ استفاده شد.

$$\text{Cellulose} = \frac{200 \times \eta_{\text{spec}}}{c \times (1 + 0.29 \times \eta_{\text{spec}})} \quad (3)$$

که در آن c غلظت (بر حسب گرم در لیتر) سلولز و ۰/۲۹ ثابت ویسکومتر است. وزن مولکولی نمونه سلولز از DP با استفاده از رابطه ۴ تعیین شد.

$$\text{MDp} = \text{Dp} \times 162 \quad (4)$$

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. ترکیبات شیمیایی الیاف موز

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد ساقه موز حاوی ۳۵/۵ درصد سلولز، ۲۸/۹ درصد همی سلولزها، ۱۶ درصد لیگنین و ۱۹/۶ درصد مواد استخراجی است. این ترکیب شیمیایی در محدوده مقادیر گزارش شده در مطالعات Cordeiro و همکاران (۲۰۰۴) و Badanayak (۲۰۲۳) بود که برای الیاف شبه ساقه موز گزارش کرده بودند [۱۶، ۱۷]. مقدار سلولز اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد این زیست توده پتانسیل مناسبی برای تولید خمیر و استخراج سلولز دارد، هرچند به دلیل سهم قابل توجه اجزای غیر سلولزی، اجرای تیمارهای قلیایی و رنگبری برای افزایش خلوص ضروری است. مقدار نسبتاً بالای همی سلولزها (۲۸/۹ درصد) بیانگر حضور بخش آمورف قابل توجه در ساختار دیواره سلولی است که حذف آن در طی پیش تیمار قلیایی می‌تواند منجر به افزایش خلوص و بهبود شاخص‌های ساختاری سلولز گردد [۱۸]. همچنین لیگنین ۱۶ درصد در محدوده معمول منابع غیر چوبی قرار داشته و حذف آن برای دستیابی به سلولز با رنگ روشن‌تر و پایداری حرارتی بالاتر اهمیت دارد [۱۶]. مقدار ۱۹/۶ درصد مواد استخراجی نیز نشان‌دهنده حضور ترکیبات محلول نظیر قندها، پکتین‌ها و ترکیبات فنلی است که در صورت حذف ناکافی می‌توانند بر بازدهی رنگبری و کیفیت نهایی سلولز اثرگذار باشند. به طور کلی، ترکیب شیمیایی به دست آمده نشان می‌دهد ساقه موز یک منبع لیگنوسلولزی مناسب برای استخراج سلولز است، اما دستیابی به سلولز با خلوص بالا مستلزم حذف مؤثر همی سلولزها، لیگنین و مواد استخراجی در مراحل فرآوری است. پس از انجام مراحل فرآوری شامل تیمار قلیایی و رنگبری، خلوص سلولز نمونه استخراج شده حدود ۸۵/۲ درصد (بر اساس روش استاندارد TAPPI T203) به دست آمد که نشان‌دهنده حذف مؤثر بخش قابل توجهی از همی سلولزها، لیگنین و سایر ترکیبات غیر فیبری است. به طور کلی، ترکیب شیمیایی به دست آمده نشان می‌دهد ساقه موز یک منبع لیگنوسلولزی مناسب برای استخراج سلولز است، هرچند دستیابی به سلولز با خلوص بسیار بالا مستلزم بهینه‌سازی بیشتر شرایط فرآوری برای حذف کامل تر اجزای غیر سلولزی است.

¹ Degree of polymerization

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی موز

ترکیبات شیمیایی	مواد استخراجی	همی سلولز	سلولز	لیگنین
درصد	۱۹/۶ ± (۳/۴۳)	۲۸/۹ ± (۷/۷)	۳۵/۵ ± (۸/۶۲)	۱۶ ± (۴/۷۱)

۳-۲. درصد خاکستر

براساس نتایج جدول ۲، میزان خاکستر الیاف موز قبل از پخت ۱۴/۹۴ درصد بوده که پس از مرحله پخت و قبل از رنگبری به ۸/۷۵ درصد کاهش یافته و در نمونه نهایی سلولز (بعد از رنگبری)، این مقدار به ۳/۷ درصد رسیده است. کاهش تدریجی خاکستر در طی فرآیند پخت و رنگبری نشان دهنده حذف مؤثر ترکیبات معدنی و مواد غیرآلی همراه با اجزای غیرسلولزی است. مقدار نسبتاً بالای خاکستر در نمونه خام معمولاً به حضور املاح معدنی نظیر پتاسیم، کلسیم، سیلیس و سایر عناصر غیرآلی در ساختار بافت گیاهان غیرچوبی نسبت داده می شود. منابع غیرچوبی عموماً در مقایسه با چوب دارای خاکستر بالاتری هستند [۱۹]. کاهش خاکستر تا ۳/۷ درصد در نمونه نهایی سلولز اهمیت صنعتی دارد، زیرا وجود مقادیر بالای مواد معدنی می تواند بر رنگ، پایداری حرارتی، رفتار فرآیندی و کیفیت مشتقات سلولزی اثر منفی بگذارد. مطالعات قبلی استخراج سلولز از منابع غیرچوبی نیز نشان داده اند که مراحل قلیایی و اکسیداتیو علاوه بر حذف لیگنین و همی سلولزها، موجب کاهش قابل توجه مواد معدنی همراه می شوند [۱۶، ۲۰]. در این مطالعه، روند کاهشی مشاهده شده در میزان خاکستر تأییدکننده کارایی مراحل پخت و رنگبری در خالص سازی زیست توده و حرکت به سمت تولید سلولز با خلوص بالاتر است.

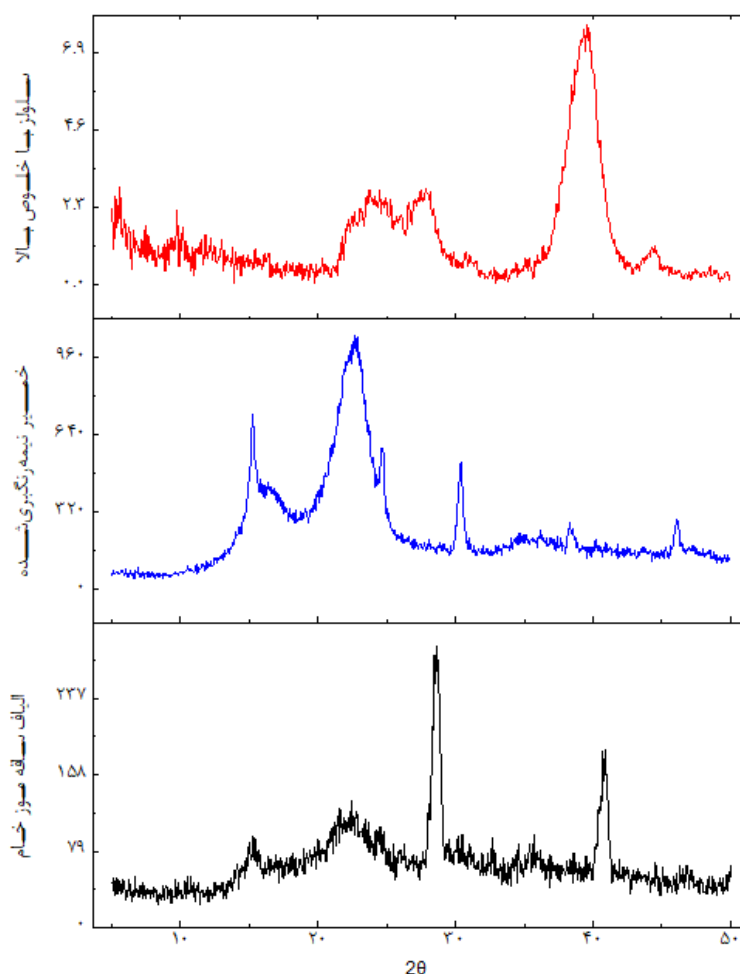
جدول ۲. درصد خاکستر الیاف موز در حالت قبل از پخت، بعد از پخت و بعد از رنگبری

حالت الیاف موز	توضیحات	درصد خاکستر
خام	میزان خاکستر الیاف موز خام قبل از پخت	۱۴/۹۴ ± (۴/۱۱)
رنگبری نشده	میزان خاکستر الیاف موز پخت شده و رنگبری نشده	۸/۷۵ ± (۱/۰۸)
رنگبری شده	میزان خاکستر الیاف موز رنگبری شده	۳/۷۰ ± (۰/۷۶)

۳-۳. آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)

الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه های الیاف ساقه موز اولیه، خمیر رنگبری نشده و سلولز خالص (سلولز با خلوص بالا) در شکل ۲ ارائه شده است. در نمونه خام، دو پیک شاخص در ناحیه $20 \sim 15^\circ$ و $20 \sim 22^\circ$ مشاهده می شود که مشخصه ساختار سلولز نوع I است. این الگو نشان می دهد که سلولز طبیعی در کنار بخش های آمورف ناشی از همی سلولز، لیگنین و سایر ترکیبات غیرسلولزی وجود دارد [۲۰]. پس از اجرای توالی رنگبری، کاهش شدت ناحیه آمورف در $20 \sim 18^\circ$ و افزایش وضوح پیک بلوری در $20 \sim 22^\circ$ مشاهده شد که بیانگر حذف مؤثر اجزای غیرسلولزی و افزایش سهم نسبی فاز بلوری است. به طور مشخص، افزایش شاخص بلورینگی از ۵۷/۸۷ در نمونه خام به ۷۶/۴ در نمونه رنگبری شده، نشان دهنده کارایی فرآیند قلیایی و اکسیداتیو در حذف همی سلولزها و لیگنین و تمرکز ساختار بر زنجیره های منظم سلولزی است. با این حال، لازم به ذکر است که شاخص بلورینگی یک پارامتر نسبی و نیمه کمی است و تحت تأثیر روش محاسبه، خط پایه و تفکیک نواحی آمورف و بلوری قرار می گیرد؛ بنابراین، این مقدار بیشتر برای مقایسه روند تغییرات بین نمونه ها قابل تفسیر است. روند مشابهی در استخراج سلولز از منابع غیرچوبی توسط Ardila و همکاران (۲۰۲۴) نیز گزارش شده است [۲۱]. علاوه بر این، حضور پیک هایی در نواحی $20 \sim 26^\circ$ و $20 \sim 42^\circ$ در نمونه اولیه می تواند به ترکیبات معدنی نظیر سیلیس نسبت داده شود که با کاهش میزان خاکستر در مراحل شیمیایی، شدت آنها کاهش یافته است؛ این موضوع با نتایج آنالیز خاکستر همخوانی دارد. ساختار بلوری مشاهده شده مربوط به سلولز نوع I است که برای سلولز طبیعی گزارش می شود [۷]. افزایش شدت پیک بلوری پس از تیمارهای شیمیایی را می توان به حذف اجزای آمورف نظیر همی سلولز، لیگنین و مواد استخراجی نسبت داد که در نتیجه آن سهم نسبی فاز بلوری سلولز افزایش یافته است. به طور کلی، نتایج XRD

تأیید می‌کند که فرآیند پخت و رنگبری نه تنها موجب حذف اجزای غیرسلولزی شده، بلکه با افزایش سهم نسبی فاز بلوری، به تولید سلولزی با ساختار منظم‌تر و کیفیت ساختاری بالاتر منجر شده است.

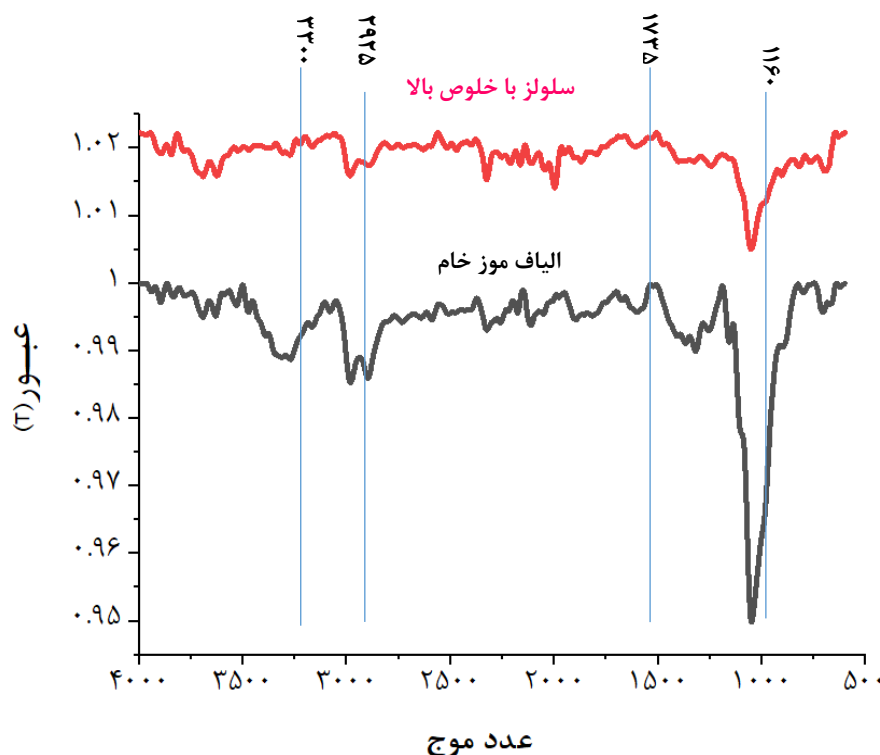


شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های الیاف ساقه موز خام (پایین)، خمیر رنگبری نشده (بعد از پخت) (وسط) و سلولز با خلوص بالا (بالا)

۳-۴. طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR)

طیف‌های FTIR الیاف ساقه موز خام و سلولز رنگبری شده (شکل ۳) تغییرات شیمیایی قابل توجهی را پس از تیمار قلیایی و رنگبری نشان می‌دهند. باند پهن در ناحیه $3300-3400\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (O-H) و شبکه Z پیوندهای هیدروژنی در ساختار سلولز است که مشخصه مواد لیگنوسلولزی محسوب می‌شود [۲۲، ۲۳]. کاهش شدت باند پهن 3400 cm^{-1} در نمونه سلولز را می‌توان به حذف همی‌سلولزهای آمورف و کاهش گروه‌های هیدروکسیل آزاد نسبت داد. علاوه بر این، افزایش نظم بلوری و تقویت شبکه پیوندهای هیدروژنی در ساختار سلولز موجب کاهش تحرک و در نتیجه کاهش شدت نسبی جذب در این ناحیه شده است. این تغییر با افزایش شاخص بلورینگی در آنالیز XRD بیانگر افزایش سهم نسبی بخش بلوری در نمونه نهایی است. از این‌رو، این نتیجه را می‌توان به صورت افزایش سهم فاز بلوری در اثر حذف اجزای آمورف تفسیر کرد. به‌طور مشابه، فیبر *Arenga pinnata* پس از پخت و رنگبری، بلورینگی بیشتری نشان داد و XRD افزایش محتوای بلوری را از طریق حذف اجزای آمورف لیگنوسلولز تأیید کرد [۲۴]. در نمونه خام، باند جذب در حدود $1740-1730\text{ cm}^{-1}$ مشاهده می‌شود که به گروه‌های کربونیل (C=O) استری در همی‌سلولزها و پیوندهای استری بین لیگنین و کربوهیدرات‌ها نسبت داده می‌شود [۲۳]. کاهش یا حذف این باند در نمونه

سلولز تأیید می‌کند که تیمار قلیایی موجب هیدرولیز پیوندهای استری و حذف مؤثر همی‌سلولزها شده است. حذف این باند یکی از شاخص‌های رایج کاهش فاز آمورف در فرایندهای خالص‌سازی سلولز است [۲۲]. در ناحیه $1500-1600\text{ cm}^{-1}$ که به ارتعاشات حلقه آروماتیک لیگنین مربوط است، کاهش شدت سیگنال در نمونه رنگبری شده مشاهده می‌شود. این تغییر نشان‌دهنده حذف بخش عمده لیگنین طی مرحله رنگبری است [۲۵]. پیک‌های شاخص ساختار سلولزی در نواحی 1160 cm^{-1} (کشش نامتقارن C-O-C در پیوندهای گلیکوزیدی)، $1025-1030\text{ cm}^{-1}$ (ارتعاش کششی C-O در اسکلت پلی‌ساکاریدی) و 895 cm^{-1} (پیوند-β گلیکوزیدی) هستند. این پیک‌ها به‌عنوان نشانه‌های ساختاری سلولز نوع I شناخته می‌شوند [۷]. کاهش نسبی شدت باندهای 1160 ، $1025-1030$ و 895 cm^{-1} در نمونه سلولز را نمی‌توان به کاهش مقدار سلولز نسبت داد، بلکه این تغییرات می‌تواند ناشی از بازآرایی ساختاری، افزایش سهم فاز بلوری و کاهش سهم فاز آمورف باشد که منجر به تغییر در شدت نسبی و پهنای باندهای ارتعاشی می‌شود. حفظ موقعیت این باندها نشان می‌دهد که پیوندهای گلیکوزیدی (۴→۱β) در طی فرآیند شیمیایی تخریب نشده و تنها خلوص و آرایش ساختاری آن تغییر یافته است. نتایج FTIR نشان می‌دهد که فرآیند پخت و رنگبری موجب حذف همی‌سلولزها و لیگنین، کاهش گروه‌های کربونیل و آروماتیک و غالب شدن سیگنال‌های مربوط به ساختار سلولزی شده است. این تغییرات طیفی بیانگر افزایش خلوص سلولز و حفظ ساختار اصلی پیوندهای گلیکوزیدی (۴→۱β) در نمونه نهایی است.

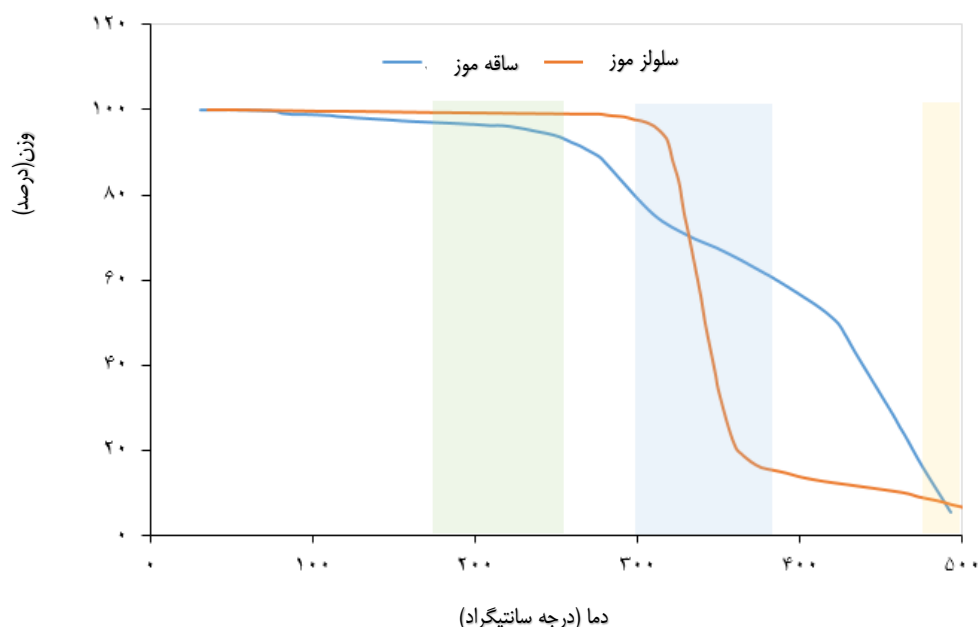


شکل ۳. مقایسه طیف‌های مادون قرمز نمونه ساقه موز خام و سلولز پس از فرآیند رنگبری

۳-۵. تحلیل آنالیز حرارتی (TGA)

منحنی‌های TGA الیاف ساقه موز خام و سلولز رنگبری شده (شکل ۴) تفاوت معنی‌داری در رفتار تخریب حرارتی نشان می‌دهند که بیانگر تغییرات ساختاری ناشی از حذف اجزای غیرسلولزی است. در نمونه خام، سه مرحله کاهش وزن قابل تشخیص است. مرحله اول در محدوده $80-100$ درجه سانتی‌گراد مربوط به تبخیر رطوبت جذب‌شده و آب پیوندی مرتبط با گروه‌های هیدروکسیل است؛ این رفتار در تمام مواد لیگنوسلولزی گزارش شده است [۲۵]. مرحله دوم در بازه $180-260$ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که به تخریب همی‌سلولزها نسبت داده می‌شود. همی‌سلولزها به‌دلیل ساختار آمورف و شاخه‌ای، دارای پایداری حرارتی کمتر از

سلولز است و در دماهای پایین‌تر تجزیه می‌شود [۲۶، ۲۷]. مرحله سوم که در حدود ۳۸۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد، مربوط به تخریب زنجیره‌های سلولزی است. حداکثر نرخ تخریب سلولز معمولاً در محدوده ۳۵۰-۳۲۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است [۲۷]. در دماهای بالاتر (۵۰۰-۳۸۰ درجه سانتی‌گراد) تجزیه تدریجی لیگنین و تشکیل باقی‌مانده کربنی رخ می‌دهد. لیگنین به دلیل ساختار آروماتیک سه‌بعدی خود، در بازه دمایی گسترده‌تری تجزیه می‌شود [۲۸]. در مقابل، نمونه سلولز رنگبری شده رفتار تخریبی ساده‌تری نشان می‌دهد و عملاً مرحله مربوط به همی‌سلولزها حذف شده است. آغاز تخریب اصلی در حدود ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده حذف اجزای کم‌پایدار حرارتی و غالب شدن ساختار سلولزی است. افزایش دمای شروع تخریب در نمونه رنگبری شده نسبت به نمونه خام، به افزایش نظم بلوری و کاهش فاز آمورف نسبت داده می‌شود؛ زیرا نواحی بلوری انرژی بیشتری برای شکست پیوندهای گلیکوزیدی نیاز دارند [۲۸]. همچنین کاهش میزان باقی‌مانده کربنی در نمونه سلولز در انتهای آزمون، با حذف لیگنین همخوانی دارد، زیرا لیگنین سهم عمده‌ای در تشکیل بایوچار دارد [۲۸]. نتایج TGA تأیید می‌کند که فرآیند پخت در شرایط قلیایی و رنگبری موجب حذف همی‌سلولزها و لیگنین، افزایش سهم سلولز بلوری و بهبود پایداری حرارتی نمونه شده است. این نتایج با تحلیل FTIR (حذف باند 1730 cm^{-1}) و افزایش شاخص بلورینگی در XRD هم‌راستا است.



شکل ۴. آنالیز توزین حرارتی نمونه ساقه موز خام و سلولز پس از فرآیند رنگبری

۳-۶. درجه پلیمریزاسیون

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که درجه پلیمریزاسیون از ۳۹۵ در الیاف خام به ۶۵۰ در نمونه تیمار شده و در الیاف سلولز رنگبری شده افزایش یافته و به ۱۱۰۰ رسیده است. به طور متناظر، وزن مولکولی میانگین نیز روند افزایشی مشابهی را نشان می‌دهد. در ابتدا ممکن است چنین تصور شود که تیمارهای قلیایی و رنگبری، به دلیل شرایط شیمیایی نسبتاً فعال، سبب کوتاه شدن زنجیره‌های سلولزی و کاهش درجه پلیمریزاسیون شوند. با این حال، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش DP مشاهده شده ممکن است تا حدی ناشی از حذف اجزای با وزن مولکولی پایین‌تر و تغییر در ترکیب نمونه باشد [۲۹]. الیاف خام موز حاوی مقدار قابل توجهی همی‌سلولزها، مواد استخراجی و ترکیبات با وزن مولکولی پایین‌تر هستند. حضور این اجزا می‌تواند ویسکوزیته ذاتی محلول سلولزی را کاهش دهد و در نتیجه مقدار درجه پلیمریزاسیون ویسکوزیمتری (DP_v) محاسبه شده کمتر از مقدار واقعی سلولز خالص به دست آید. با حذف این اجزای کم‌وزن طی تیمار قلیایی و رنگبری، سهم نسبی زنجیره‌های بلندتر سلولزی افزایش یافته و در نتیجه DP

میانگین بالاتر گزارش می‌شود. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که حذف همی سلولزها و لیگنین می‌تواند موجب افزایش ظاهری DP شود، زیرا همی سلولزها معمولاً دارای درجه پلیمریزاسیون بسیار پایین‌تر (۲۰۰-۱۰۰) نسبت به سلولز هستند [۷، ۳۰]. علاوه بر این، افزایش بلورینگی مشاهده شده در الگوی XRD نشان می‌دهد که سهم نواحی منظم و ساختارهای کریستالی در نمونه نهایی نسبت به فاز آمورف و اجزای غیرسلولزی بیشتر شده است. این تغییر احتمالاً عمدتاً ناشی از حذف همی سلولزها، لیگنین و سایر ترکیبات آمورف در طی مراحل تیمار قلیایی و رنگ‌بری است، بدون آنکه لزوماً به معنای افزایش طول زنجیره‌های سلولزی باشد. از سوی دیگر، مقدار DP برابر با ۱۱۰۰ برای سلولز به دست آمده در محدوده گزارش شده برای سلولزهای نیمه تصفیه شده و سلولزهای صنعتی قرار دارد. در بسیاری از منابع، DP سلولز بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ گزارش شده است [۸]. این مقدار می‌تواند نشان دهنده اثر خالص سازی و کاهش سهم اجزای غیرسلولزی در برآورد ویسکوزیمتری باشد. نتایج برآورد شده برای DP زنجیره‌های سلولزی در این پژوهش برخلاف انتظار ظاهر شدند و افزایش DP پس از فرایندهای خمیرسازی و رنگ‌بری مشاهده شد. با توجه به این که DP به روش ویسکوزیمتری تعیین شده است، این افزایش می‌تواند تا حدی ناشی از حذف همی سلولزها، لیگنین، مواد استخراجی و سایر اجزای با وزن مولکولی پایین و در نتیجه تغییر در رفتار ویسکوزیته ذاتی نمونه باشد [۳۱، ۳۲]. این نتایج با تحلیل FTIR (حذف باند 1730 cm^{-1}) و افزایش شاخص بلورینگی در XRD هم‌راستا است.

جدول ۳. مقایسه درجه پلیمریزاسیون (DP) و وزن مولکولی میانگین (MDp) الیاف موز در فرآیند خالص سازی

ردیف	نوع نمونه	DP	MDp
۱	الیاف موز اولیه	$395 \pm (83)$	۶۳۹۹۰
۲	الیاف موز رنگ‌بری نشده	$650 \pm (101)$	۱۰۵۳۰۰
۳	الیاف موز رنگ‌بری شده	$1100 \pm (132)$	۱۷۸۲۰۰

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ضایعات ساقه موز به عنوان یک منبع لیگنوسلولزی غیرچوبی، قابلیت بالایی برای تولید سلولز با خلوص و کیفیت ساختاری مناسب دارد. ترکیب شیمیایی اولیه شامل سهم قابل توجهی از همی سلولزها، لیگنین و مواد استخراجی بود که ضرورت اجرای تیمارهای قلیایی و رنگ‌بری را برای دستیابی به سلولز خالص تر تأیید می‌کند. کاهش محسوس میزان خاکستر در طی فرآیند پخت و رنگ‌بری نیز بیانگر حذف مؤثر ترکیبات معدنی و بهبود کیفیت نهایی محصول است. آنالیزهای FTIR حذف باندهای مشخصه همی سلولزها و لیگنین، به ویژه در ناحیه 1730 cm^{-1} ، را نشان داد و حفظ باندهای شاخص سلولز تأیید کرد که اسکلت-1,4-β گلوکانی در طی فرآیند تخریب نشده است. نتایج XRD افزایش شاخص بلورینگی از نمونه خام به سلولز را نشان داد که بیانگر کاهش فاز آمورف و تمرکز ساختار بر نواحی بلوری سلولز نوع I است. افزایش سهم بخش بلوری به دلیل حذف بخشی از مناطق آمورف طی فرایندهای پخت و رنگ‌بری اعمال شده با رفتار حرارتی نمونه نیز هم‌راستا بود. در آزمون TGA، حذف مرحله تخریب همی سلولزها و افزایش دمای شروع تخریب در سلولز نشان دهنده بهبود پایداری حرارتی و غالب شدن ساختار سلولزی خالص تر بود. از سوی دیگر، افزایش درجه پلیمریزاسیون از ۳۹۵ در الیاف خام به ۱۱۰۰ در سلولز بیانگر حذف اجزای با وزن مولکولی پایین تر و تمرکز بر زنجیره‌های بلند سلولزی است. مقدار DP به دست آمده در محدوده سلولزهای صنعتی قرار داشته و نشان می‌دهد فرآیند اعمال شده موجب تخریب زنجیره‌های سلولزی نشده است. در مجموع، ترکیب پخت قلیایی ملایم و مرحله رنگ‌بری موجب حذف بخش قابل توجهی از ترکیبات غیرسلولزی مانند لیگنین و همی سلولز شده و سلولزی با خلوص بالاتر، پایداری حرارتی مناسب و افزایش درجه پلیمریزاسیون از ضایعات ساقه موز فراهم می‌کند. اگرچه فرآیند رنگ‌بری به کاررفته عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ضایعات ساقه موز می‌تواند به عنوان یک منبع لیگنوسلولزی مناسب برای تولید سلولز با ارزش افزوده مورد توجه قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش: نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این

موضوع مورد تأیید آنها است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حمایت مالی

حمایت از این پژوهش از طرف دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات. **نویسنده دوم:** استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، نگارش، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله. **نویسنده سوم:** استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تهیه پیشنویس مقاله. **نویسنده چهارم:** اندازه‌گیری‌های میدانی، گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیشنویس مقاله.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

References

- [1] FAO. (2023/2024). FAOSTAT – Production: Crops and livestock products (Database). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat>
- [2] Alzate Acevedo, S., Díaz Carrillo, Á. J., Flórez-López, E. & Grande-Tovar, C.D. (2021). Recovery of banana waste-loss from production and processing: a contribution to a circular economy. *Molecules*, 26(17), 5282.
- [3] Azriena, H.A.A., Kaur, K., Ilyas, R.A., Kamaruddin, Z.H., Neenu, K.V., Dominic, C.M. & Mahardika, M. (2025). Recent developments in lignocellulosic banana (*Musa spp.*) fiber-based biocomposites and their potential industrial applications: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147180.
- [4] Padam, B.S., Tin, H.S., Chye, F.Y. & Abdullah, M.I. (2014). Banana by-products: an under-utilized renewable food biomass with great potential. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3527-3545.
- [5] Ragauskas, A. J., Beckham, G.T., Bidy, M.J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M.F. & Wyman, C.E. (2014). Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. *Science*, 344(6185), 1246843.
- [6] Rezaei, E., Moradpour, P., Zarea Hosseinabadi, H. & Ahmadi, P. (2025). Fabrication of Bio-Based Banana Fiber-Cement Composite and Evaluating its Technical Characteristics. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 16(3), 437-455. (In Persian)
- [7] Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.P. & Bohn, A. (2005). Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), 3358-3393.
- [8] Marinho, E. (2025). Cellulose: A comprehensive review of its properties and applications. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 100283.
- [9] Börjesson, M. & Westman, G. (2015). Crystalline nanocellulose—preparation, modification, and properties. Cellulose-fundamental aspects and current trends, 7.
- [10] Kontturi, E., Laaksonen, P., Linder, M.B., Nonappa, Gröschel, A.H., Rojas, O.J. & Ikkala, O. (2018). Advanced materials through assembly of nanocelluloses. *Advanced Materials*, 30(24), 1703779.
- [11] Chik, J. Y., Wan-Ibrahim, W. S. F. A., & Tamat, N. S. M. (2024). Extraction of cellulose from Corn Tassel using alkaline pretreatment and bleaching process. In BIO Web of Conferences (Vol. 131, p. 01004). EDP Sciences.

- [12] NYNNMII, Y. (2014). Extraction and characterization of cellulose from pandan leaves (Pandanus amaryllifolius Roxb.). *Research Journal of Chemistry and Environment*, 18.
- [13] Lyons, G. A., McRoberts, C., Sharma, H. S., McCormack, R., Carmichael, E., & McCall, R. D. (2013). Rapid analysis of purified cellulose extracted from perennial ryegrass (*Lolium perenne*) by instrumental analysis. *Bioresource technology*, 146, 184-191.
- [14] Moramarco, A., Ricca, E., Acciardo, E., Laurenti, E. & Bracco, P. (2025). Cellulose extraction from soybean hulls and hemp waste by alkaline and acidic treatments: An in-depth investigation on the effects of the chemical treatments on biomass. *Polymers*, 17(9), 1220.
- [15] Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D. & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: a new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(24), 5438-5466.
- [16] Cordeiro, N., Belgacem, M.N., Torres, I.C. & Moura, J. C. V. P. (2004). Chemical composition and pulping of banana pseudo-stems. *Industrial Crops and Products*, 19(2), 147-154.
- [17] Badanayak, P., Jose, S. & Bose, G. (2023). Banana pseudostem fiber: A critical review on fiber extraction, characterization, and surface modification. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2168821.
- [18] Van, N. T. T., Gaspillo, P.A., Thanh, H.G.T., Nhi, N.H.T., Long, H.N., Tri, N., & Ha, H. K. P. (2022). Cellulose from the banana stem: optimization of extraction by response surface methodology (RSM) and characterization. *Heliyon*, 8(12).
- [19] Rowell, R. M. (2005). Handbook of wood chemistry and wood composites. CRC press.
- [20] French, A. D. & Santiago Cintrón, M. (2013). Cellulose polymorphy, crystallite size, and the Segal Crystallinity Index. *Cellulose*, 20(1), 583-588.
- [21] Ardila, A.A.N., Arriola-Villaseñor, E., González, E.E.V., Guerrero, H.E.G., Hernández-Maldonado, J.A., Gutiérrez-Pineda, E. & Villa, C. C. (2024). Enhanced cellulose extraction from banana pseudostem waste: a comparative analysis using chemical methods assisted by conventional and focused ultrasound. *Polymers*, 16(19), 2785.
- [22] Oh, S. Y., Yoo, D. I., Shin, Y. & Seo, G. (2005). FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide. *Carbohydrate Research*, 340(3), 417-428.
- [23] Pandey, K.K. (1999). A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*, 71(12), 1969-1975.
- [24] Yuanita, E., Pudjiastuti, W., & Chalid, M. (2020). The crystallinity of Arenga pinnata "Ijuk" fiber cellulose through KMnO4 addition on NaClO bleaching process. In *Macromolecular Symposia* 39(1), 2000007.
- [25] Sun, R.C., Tomkinson, J., Ma, P.L. & Liang, S.F. (2000). Comparative study of hemicelluloses from rice straw by alkali and hydrogen peroxide treatments. *Carbohydrate Polymers*, 42(2), 111-122.
- [26] Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H. & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788.
- [27] Poletto, M., Zattera, A.J., Forte, M.M. & Santana, R.M. (2012). Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. *Bioresource Technology*, 109, 148-153.
- [28] Brebu, M. & Vasile, C. (2010). Thermal degradation of lignin a review. *Cellulose Chemistry & Technology*, 44(9), 353.
- [29] Liu, Z., Fatehi, P., Sadeghi, S. & Ni, Y. (2011). Application of hemicelluloses precipitated via ethanol treatment of pre-hydrolysis liquor in high-yield pulp. *Bioresource Technology*, 102(20), 9613-9618.
- [30] Fengel, D. & Wegener, G. (Eds.). (2011). Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter.
- [31] Malešič, J., Kraševac, I. & Kralj Cigić, I. (2021). Determination of cellulose degree of polymerization in historical papers with high lignin content. *Polymers*, 13(12), 1990.
- [32] Fischer, K., & Schmidt, I. (2008, January). Hemicellulose in dissolving pulp and its behaviour during its processing to viscose. In *Macromolecular symposia* (262(1), 85-88). Weinheim: WILEY-VCH Verlag.