Iranian Journal of Wood and Paper Science Research

Print ISSN: 1735-0913

Online ISSN: 2383-112X

Vol. 41, No. 1, Page 1-14 (2026) DOI: 10.22092/ijwpr.2025.370499.1812

(OPEN ACCESS)

Investigation of the Effect of Mixing Temperature on the Mechanical and Thermal Properties of Spruce Wood Flour and Recycled Polyethylene Composites

Jafar Ebrahimpour-Kasmani[1*], Ahmad Samariha[2] and Alireza Khakifirooz[3]

1*- Corresponding author, Department of Wood and Paper, Sava. C., Islamic Azad University, Svadkooh, Iran, Email: kasmani@iau.ac.ir

2-Department of Engineering sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

3-Faculty of Chemistry and Petrochemical Engineering, Department of Cellulosic Materials and Packaging, Standard Research Institute (SRI), Karaj, Iran

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 23 August 2025
Revised: 18 October 2025
Accepted: 22 November 2025
Published online: 20 March 2026

Keywords:
Flexural modulus,
flexural strength,
recycled polyethylene,
residual ash,
spruce wood flour.

ABSTRACT

Background and objectives: Considering the increasing attention to composites in various industries, the investigation and improvement of the mechanical and thermal properties of these materials have become particularly important. Given the environmental problems caused by the use of synthetic materials, the use of natural and renewable materials such as spruce wood flour in combination with a polymer such as recycled polyethylene can be an effective solution for producing sustainable and environmentally friendly materials. This research aims to investigate the effect of mixing temperature on the mechanical and thermal properties of the composite made from spruce wood flour and recycled polyethylene. Temperature, as one of the key parameters in the composite production process, can have a significant impact on the physical, mechanical, and thermal properties. In this regard, investigating the effect of temperature on their mechanical and thermal behavior of this composite can help develop new products and improve their performance in various industries.

Methodology: The use of wood flour as a natural and renewable material, along with recycled polyethylene, can contribute to the development of green and sustainable products. For this purpose, polyethylene (at a constant level of 50%), spruce wood flour (at a constant level of 50%), injection molding temperature (150, 170, and 190 degrees Celsius), and maleic anhydride grafted polypropylene (at a constant level of 3%) were mixed together using a twin-screw extruder. In this study, standard test specimens were made using the injection molding method. Mechanical properties including tensile and flexural strength, tensile and flexural modulus, as well as notched impact resistance were measured and evaluated. In addition, the thermal and flammability properties of the samples were also investigated.

Results: The results showed that increasing the press temperature from 150 to

190 degrees Celsius significantly increased the tensile and flexural strength and modulus of the samples. Specifically, the notched impact resistance decreased by 8, 9.3, 7.5, 4.6, and 3.0 percent, respectively. These changes indicate the effect of temperature on the mechanical behavior and ability of this composite to withstand various loads. In addition, with increasing injection temperature, the thermal stability did not change much, and the amount of residual ash was 10.96, 10.96, 11.92, and 0.56 percent, respectively. These results indicate that even with temperature changes, the thermal stability of the composite is not significantly affected, and the amount of residual ash remains constant.

Conclusion: The results of this research show that the mixing temperature directly affects the mechanical and thermal properties of the composite made from spruce wood flour and recycled polyethylene. Increasing the temperature can help improve the final performance of these types of composites in various applications, including packaging and the automotive industry. Choosing the right temperature and material composition can lead to the development of products with desirable characteristics and high performance. Overall, this research emphasizes the importance of temperature in the design and optimization of composites and can be used as a scientific basis for the development of new and sustainable materials in the future. Future studies could include a more detailed evaluation of the effects of temperature on other physical and chemical properties of this composite to gain a better understanding of their behavior under different conditions.

Cite this article: Jafar Ebrahimpour-Kasmani, Ahmad Samariha and Alireza Khakifirooz. 2026. Investigation of the Effect of Mixing Temperature on the Mechanical and Thermal Properties of Spruce Wood Flour and Recycled Polyethylene Composites. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 41(1), 1-14. **DOI: https://doi.org/10.22092/ijwpr.2025.370499.1812**

Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijwpr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

بررسی تأثیر دمای اختلاط بر خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت آرد چوب نوئل و پلی‌اتیلن بازیافتی

جعفر ابراهیم پور کاسمانی[۱*]، احمد ثمریها [۲] و علیرضا خاکی فیروز[۳]

۱*-گروه مهندسی چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران، پست الکترونیک: kasmani@iau.ac.ir

۲-گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۳-پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، گروه پژوهشی بسته‌بندی و سلولزی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
کامل علمی - پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۹

واژه‌های کلیدی:
آرد چوب نوئل،
پلی‌اتیلن بازیافتی،
خاکستر باقی‌مانده،
مدول‌خمشی،
مقاومت‌خمشی.

چکیده

بیان مسئله و اهداف: با توجه به افزایش روزافزون توجه به کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف، بررسی و بهبود خواص مکانیکی و حرارتی این مواد اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از استفاده از مواد سنتزی، استفاده از مواد طبیعی و تجدیدپذیر مانند آرد چوب نوئل در ترکیب با پلیمری مثل پلی‌اتیلن بازیافتی می‌تواند راه‌حلی مؤثر برای تولید مواد پایدار و سازگار با محیط‌زیست باشد. این تحقیق باهدف بررسی تأثیر دمای اختلاط بر خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت حاصل از آرد چوب نوئل و پلی‌اتیلن بازیافتی انجام شد. دما به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در فرایند تولید کامپوزیت‌ها، می‌تواند تأثیر زیادی بر خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آن‌ها داشته باشد. در این راستا، بررسی تأثیر دما بر رفتار مکانیکی و حرارتی این کامپوزیت می‌تواند به توسعه محصولات جدید و بهبود عملکرد آن‌ها در صنایع مختلف کمک کند.

مواد و روش‌ها: استفاده از آرد چوب به‌عنوان ماده طبیعی و تجدیدپذیر، در کنار پلی‌اتیلن بازیافتی، می‌تواند به توسعه محصولاتی سبز و پایدار کمک کند. برای این منظور، پلی‌اتیلن (در سطح ثابت ۵۰ درصد)، آرد چوب نوئل (در سطح ثابت ۵۰ درصد)، دمای پرس تزریق (۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد) و انیدرید مالئیک پیوند داده‌شده با پلی‌پروپیلن (در سطح ثابت ۳ درصد) به‌وسیله اکسترودر دو ماردونی (دو مارپیچه) با یکدیگر مخلوط شدند. در این پژوهش، نمونه‌های آزمونی استاندارد با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی ساخته شدند. خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی و خمشی، مدول‌کششی و خمشی و مقاومت به ضربه فاق‌دار اندازه‌گیری و ارزیابی گردیدند. علاوه بر این، خواص حرارتی و آتش‌گیری نمونه‌ها نیز بررسی شد.

نتایج: نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزایش دمای پرس از ۱۵۰ به ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، باعث افزایش در مقاومت و مدول‌کششی و خمشی نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۸، ۳/۹، ۵/۷ و ۶/۴ شده است. مقاومت به ضربه فاق‌دار ۰/۳ درصد کاهش یافت. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر دما بر رفتار مکانیکی و توانایی این کامپوزیت در برابر بارهای مختلف است. علاوه بر این، با افزایش دمای تزریق، ثبات حرارتی تغییرات زیادی نداشت و میزان خاکستر باقی‌مانده نیز به ترتیب برابر با ۱۰/۹۶، ۱۰/۹۶، ۱۱/۹۲ و ۰/۵۶ درصد بود. این نتایج نشان‌دهنده این است که حتی با تغییر دما، پایداری حرارتی کامپوزیت چندان تحت تأثیر قرار نگرفته و میزان خاکستر باقی‌مانده ثابت مانده است.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که دمای اختلاط به‌طور مستقیم بر خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت حاصل از آرد چوب نوئل و پلی‌اتیلن بازیافتی تأثیر می‌گذارد. افزایش دما می‌تواند به بهبود عملکرد نهایی این نوع کامپوزیت‌ها در کاربردهای مختلف، ازجمله بسته‌بندی و صنعت خودروسازی، کمک کند. انتخاب صحیح دما و ترکیب مواد، می‌تواند به توسعه محصولاتی با ویژگی‌های مطلوب و عملکرد بالا منجر شود. به‌طورکلی، این تحقیق بر اهمیت دما در طراحی و بهینه‌سازی کامپوزیت‌ها تأکید دارد و می‌تواند به‌عنوان یک مبنای علمی

برای توسعه مواد جدید و پایدار در آینده مورد استفاده قرار گیرد. بررسی‌های بعدی می‌تواند شامل ارزیابی دقیق‌تر اثرهای دما بر دیگر خواص فیزیکی و شیمیایی این کامپوزیت باشد تا به درک بهتری از رفتار آن‌ها در شرایط مختلف برسیم.

استناد: جعفر ابراهیم پور، احمد ثمریها و علیرضا خاکی فیروز. ۱۴۰۵. بررسی تأثیر دمای اختلاط بر خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت آرد چوب نوئل و پلی‌اتیلن بازیافتی. نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۴۱(۱)، ۱۴-۱.

DOI: https://doi.org/10.22092/ijwpr.2025.370499.1812

مقدمه

در سال‌های اخیر، توجه به استفاده از مواد طبیعی و بازیافتی در تولید کامپوزیت‌ها به‌شدت افزایش یافته است. این روند نشأت گرفته از نیاز به توسعه پایدار و کاهش اثرهای زیست‌محیطی ناشی از استفاده از مواد سنتی و غیرقابل تجزیه است. آرد چوب نوئل به‌عنوان یک ماده زیست‌سازگار و تجدیدپذیر، به دلیل خواص مکانیکی و حرارتی مناسب، در ترکیب با پلیمرها به‌ویژه پلی‌اتیلن به‌کار می‌رود و به بهبود خواص مکانیکی و کاهش وزن و هزینه‌های تولید کمک می‌کند.

پلی‌لتیلن به‌عنوان یکی از پرکاربردترین پلیمرهای ترموپلاستیک، به دلیل خواص مکانیکی خوب، قابلیت شکل‌پذیری و امکان بازیافت، در صنایع مختلف استفاده می‌شود (Kazemi *et al.*, 2013). ترکیب آرد چوب و پلی‌اتیلن به تولید مواد کامپوزیتی با خواص بهبود یافته کمک می‌کند که می‌تواند در صنایع ساختمان‌سازی، بسته‌بندی و تولید قطعات خودرو کاربرد داشته باشد. این کامپوزیت به‌عنوان جایگزینی مناسب برای مواد سنتی و غیرقابل تجزیه به‌حساب می‌آید.

دمای اختلاط در فرایند تولید یکی از عوامل کلیدی در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌هاست. تحقیقات نشان داده‌اند که دما تأثیر قابل‌توجهی بر روی خواص نهایی کامپوزیت دارد. برای نمونه، افزایش دما می‌تواند به بهبود پیوند بین ذرات آرد چوب و پلی‌اتیلن کمک کند و خواصی مانند مقاومت کششی، مدول‌الاستیسیته و مقاومت خمشی را افزایش دهد (Goodship, 2007). همچنین، دما بر خواص حرارتی مانند دمای شروع تخریب و پایداری حرارتی تأثیرگذار است. دما به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده در فرایندهایی مانند اختلاط، اکستروژن و قالب‌گیری نقش دارد و دماهای بهینه می‌توانند به تولید کامپوزیت‌هایی با خواص مطلوب منجر شوند.

با توجه به افزایش سریع زباله‌های پلاستیکی در سراسر جهان، استفاده دوباره از پلاستیک‌ها به‌ویژه در ساخت کامپوزیت‌های چوب پلاستیک، به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش صدمات زیست‌محیطی و هزینه‌های تولید محصولات جدید مطرح شده است. کامپوزیت‌های چوب پلاستیک، به دلیل ترکیب خواص چوب و پلاستیک، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند و در صنعت ساختمان، خودرو، مبلمان، الکترونیک و کشاورزی به‌کار می‌روند (Najafi, 2013).

Migneault و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تأثیر روش فراوری (پرس حرارتی در مقابل اکستروژن) بر خواص مکانیکی، ریخت‌شناسی و ساختار کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که روش فراوری به‌طور قابل‌توجهی بر خواص نهایی این کامپوزیت‌ها تأثیر می‌گذارند.

Ramli (۲۰۲۴) نیز تأثیر پارامترهای فراوری مانند دمای اختلاط، زمان اقامت و محتوای الیاف چوبی بر خواص مکانیکی، گرمایی و ریخت‌شناسی کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک ساخته شده از مواد بازیافتی را بررسی کرده است. نتایج این مطالعه نشان داد که این پارامترها به‌طور قابل‌توجهی بر خواص نهایی تأثیر دارند.

Cabrera (۲۰۲۱) به بررسی کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک سازگار با محیط‌زیست و ارزشمندسازی

منابع پســـماند چوبی و پلاســـتیکی پرداخته‌اند. این مقاله به استفاده از مواد بازیافتی و کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید این کامپوزیت‌ها تمرکز دارد.

هدف این تحقیق بررسی تأثیر دمای اختلاط بر خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت آرد چوب نوئل و پلی‌اتیلن بازیافتی است.

مواد و روش‌ها

ازآنجاکه در کشور ما مواد زائد شهری به‌طور منظم تفکیک نمی‌شوند و فروشندگان ظروف یک‌بارمصرف اطلاعاتی درباره مواد اولیه این ظروف ندارند، این تحقیق برای جلوگیری از خطا و افزایش دقت، تصمیم به تهیه پلی‌اتیلن بازیافتی به‌صورت آزمایشگاهی گرفته شد. پلی‌اتیلن سنگین (HDPE) محصول پتروشیمی شازند اراک با نام تجاری HD5620EA، با شاخص جریان مذاب ۲۰gr/10min و چگالی ۰/۹۵۶ gr/cm³، تهیه و با استفاده از دستگاه اکسترودر Brabender در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه، دو بار ذوب شده و به‌صورت دانه‌های گرانول درآمد.

آرد چوب نوئل به‌عنوان تقویت‌کننده پودری در ماتریس پلیمری مورد استفاده قرار گرفت. این آرد از یکی از شرکت‌های تولیدکننده مبلمان تهیه و پس از انتقال به آزمایشگاه، با استفاده از دستگاه الک ارتعاشی برای یکنواختی اندازه ذرات طبقه‌بندی شد. آرد نوئل عبور کرده از مش ۶۰ و باقیمانده روی الک با مش ۷۰ به‌عنوان آرد نهایی در نظر گرفته شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

همچنین، مالئیک انیدرید پیوند خورده با پلی‌اتیلن (MAPE) به‌عنوان عامل سازگارکننده با خلوص ۹۸ درصد مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات پلی‌اتیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱- مشخصات پلی‌اتیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید

Table 1- Characteristics of Polyethylene grafted with maleic anhydride

Amount of bonded anhydride (wt%)	Density (gr/cm³)	Melt flow index (g/10min)
1	0.965	7

روش‌ها

درصد وزنی اجزای کامپوزیت‌های ساخته‌شده با ذکر علامت اختصاری به‌کاررفته برای هر تیمار در جدول ۳ آورده شده است. اختلاط پلی‌اتیلن بازیافتی، آرد چوب و سازگار کننده به‌صورت نسبت وزنی مشخص توسط دستگاه اکسترودر دو ماردونی (Dr. Collien) (دو مارپیچه) با دمای ساخت ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ماردون ۷۰ دور در دقیقه که برای حرکت ماردون‌های آن خلاف هم بود فرایند در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شد.

جدول ۲- درصد اجزای کامپوزیت در تیمارهای مختلف

Table 2- Percentage of composite components in different treatments

Treatment number	Wood flour (phc)	Polyethylene (phc)	MAPP (phc)	Injection temperature
1	50	50	3	150
2	50	50	3	170
3	50	50	3	190
4	0	100	0	-

Phc: Per hundred component

ساخت نمونه‌های آزمونی استاندارد

به‌منظور ساخت نمونه‌های آزمون استاندارد، گرانول‌ها به دستگاه قالب‌گیر تزریقی، تزریق می‌شوند. برای این کار از دستگاه تزریق نیمه‌صنعتی ساخت شرکت ایمن ماشین تهران، موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، استفاده شد. دمای سیلندر تزریق به ترتیب ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و دمای قالب ۴۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. فشار تزریق ۸۰ مگاپاسکال و زمان دوره تزریق کمتر از ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. عملیات خنک‌کردن قالب با آب سرد انجام شده و نمونه‌ها برای آزمون‌های کشش، خمش و مقاومت به ضربه فاق‌دار پس از ۲ دقیقه از قالب خارج شدند.

اندازه‌گیری خواص مکانیکی و حرارتی

خواص مکانیکی شامل مقاومت خمشی، مدول‌خمشی، مقاومت به ضربه فاق‌دار و مقاومت و مدول‌کششی کامپوزیت‌های تهیه‌شده مورد آزمایش قرار گرفت. قبل از انجام آزمون‌های مکانیکی، نمونه‌ها به مدت دو روز در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد قرار داده شدند تا به تعادل با دمای محیط برسند. هر آزمون با ۳ تکرار انجام شد.

از استاندارد ASTM D-747 برای آزمون خمش با سرعت بارگذاری ۲ mm/min و دستگاه اینسترون مدل ۴۴۸۶ استفاده شد. ابعاد نمونه برای آزمون خمش ۱۰۵ ×۱۳ ×۵ میلی‌متر (طول×پهنا×ضخامت) بود.

برای بررسی مقاومت کششی، از استاندارد ASTM D-638-M-89 و نمونه‌های M-I و دمبلی استفاده گردید. ابعاد نمونه برای آزمون کشش ۱۴۵×۱۰×۴ میلی‌متر (طول × پهنا × ضخامت) بود.

آزمون ضربه فاق‌دار با استفاده از استاندارد ASTM D-256 و دستگاه آزمایشگر مقاومت به ضربه مدل Zwick انجام شد. ابعاد نمونه برای آزمون ضربه فاق‌دار ۶۰ ×۱۲ ×۶ میلی‌متر (طول × پهنا × ضخامت) بود.

برای گرماسنجی روبشی (Thermogravimetric Analysis (TGA))، نمونه‌هایی با وزن ۵ تا ۷ میلی‌گرم در دستگاه TGA مدل TGA Q50 قرار گرفتند و آزمایش مطابق استاندارد ASTM E1131 انجام شد.

برای انجام آزمون شاخص اکسیژن محدود (Limiting oxygen index (LOI)) نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D2863، به ابعاد ۴ ×۵۰ ×۱۵۰ میلی‌متر تهیه و آزمون شدند.

برای این آزمون ابتدا، نمونه در پایه نگهدارنده نصب می‌شود و بعد محفظه شیشه‌ای با قسمت بالایی باز بر روی آن قرار می‌گیرد. شرایط سوختن با حداقل میزان اکسیژن تنظیم شده و نمونه به مدت ۳۰ ثانیه در معرض شعله مستقیم قرار می‌گیرد. اگر در این مدت نمونه مشتعل نشود یا سریع خاموش گردد، نتیجه می‌گیرد که مقدار اکسیژن کافی نیست. در این صورت، مقدار اکسیژن کمی افزایش یافته و آزمون دوباره تکرار می‌شود. پس از تعیین حدود مقدار اکسیژن، در صورت مشتعل شدن نمونه، زمان‌سنجی به مدت ۳ دقیقه آغاز می‌شود.

تجزیه‌وتحلیل نتایج

در این پژوهش، جامعه آماری از پیش تعیین شده‌ای وجود ندارد و روش نمونه‌گیری به‌صورت تصادفی از نمونه‌های ساخته شده انجام خواهد شد. تأثیر عوامل متغیر شامل دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار آرد چوب، پلی‌اتیلن بازیافتی و مقدار سازگارکننده (ثابت) بر خصوصیات مکانیکی، حرارتی و حرارتی‌کامپوزیت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تعداد کل تیمارها با فرمول‌بندی متفاوت شامل پلاستیک‌های خالص به‌عنوان شاهد، برابر با ۴ تیمار خواهد بود.

تجزیه‌وتحلیل نتایج آزمون‌های مکانیکی در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی تحت آزمون فاکتوریل با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. همچنین، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. به‌منظور رسم نمودارها، از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

نتایج

نتایج آزمون تجزیه واریانس در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج تجزیه واریانس بیانگر این است که تأثیر دمای پرس تزریق بر مقاومت خمشی در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نیست. در عوض، تأثیر دمای پرس تزریق بر مدول‌خمشی، مقاومت و مدول‌کششی، مقاومت به ضربه و شاخص اکسیژن محدود در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار است.

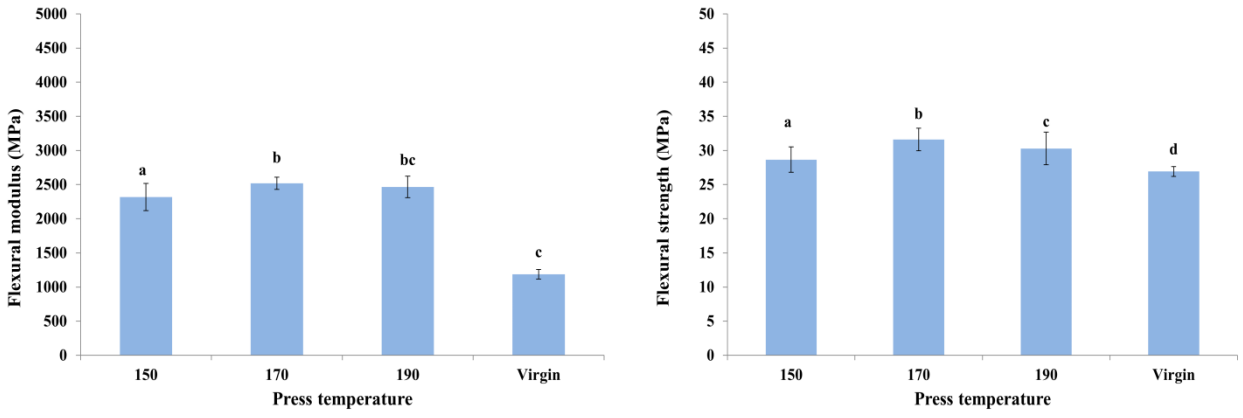
جدول ۳- تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی‌داری) اثر دمای پرس تزریق بر مقاومت‌ها

Table 3- Analysis of variance (F value and significance level) of the effect of injection press temperature on resistances

Construction variables	F-value and significance level
Flexural strength (MPa)	F=3.982, ns
Flexural modulus (MPa)	F=61.949, *
Tensile strength (MPa)	F=9.931, *
Tensile modulus (MPa)	F=90.306, *
Impact resistance (J/m)	F=15.694, *
Limited Oxygen Index (%)	F=302.001, *

تأثیر درجه حرارت پرس بر مقاومت و مدول خمش

بیش‌ترین مقاومت خمشی مربوط به دمای پرس ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۳۱/۵۹ مگاپاسکال و کم‌ترین مقدار آن مربوط به دمای پرس ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲۸/۶۵ مگاپاسکال است (شکل ۱، الف). بیش‌ترین مدول‌خمشی مربوط به دمای پرس ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲۵۱۷/۴۳ مگاپاسکال و کم‌ترین مقدار آن مربوط به دمای پرس ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲۳۱۷/۵۴ مگاپاسکال است (شکل ۱، ب).



الف(a) ب(b)

شکل ۱- تأثیر مستقل درجه حرارت پرس بر مقاومت خمش (الف) و مدول خمش (ب)

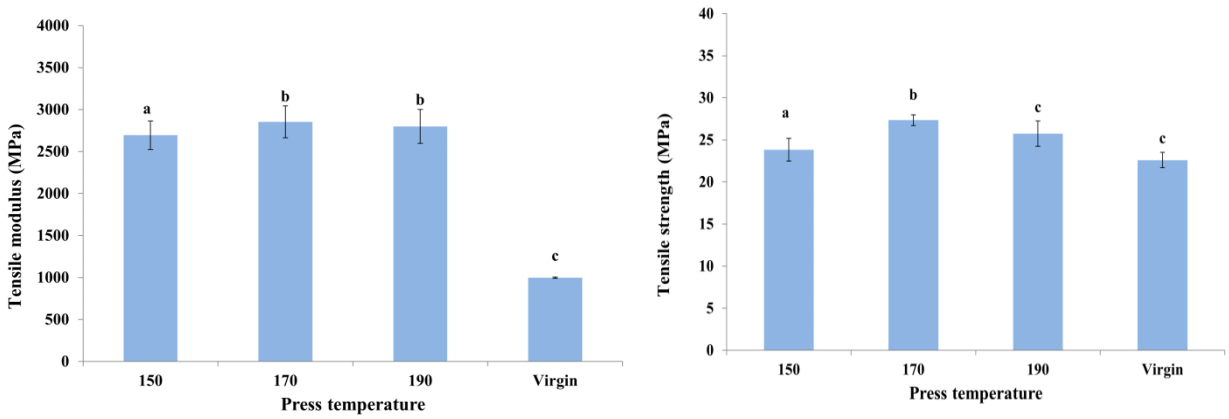
Figure 1. Independent effect of pressing temperature on flexural strength (a) and flexural modulus (b)

افزایش دمای پرس از ۱۵۰ به ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد منجر به بهبود مقاومت و مدول خمشی می‌شود که دلیل آن می‌تواند افزایش چسبندگی بین الیاف و ماتریس باشد. اما در دماهای بالاتر از حد بهینه، احتمالاً به دلیل تخریب حرارتی، کاهش در مقاومت و مدول خمشی مشاهده می‌شود.

تأثیر درجه حرارت پرس بر مقاومت و مدول کشش

بیش‌ترین مقاومت کشش مربوط به دمای پرس ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲۷/۳۴ مگاپاسکال و کم‌ترین مقدار آن مربوط به دمای پرس ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲۳/۸۲ مگاپاسکال است (شکل ۲، الف).

بیش‌ترین مدول کشش مربوط به دمای پرس ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲۸۵۳/۵۱ مگاپاسکال و کم‌ترین مقدار آن مربوط به دمای پرس ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲۶۹۳/۸۵ مگاپاسکال است (شکل ۲، ب).



الف(a) ب (b)

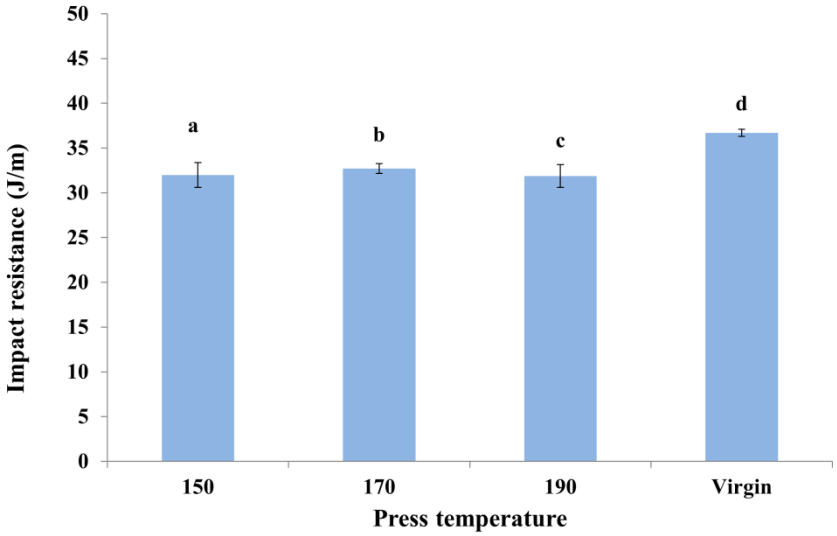
شکل ۲-تأثیر مستقل درجه حرارت پرس بر مقاومت کشش (الف) و مدول کشش (ب)

Figure 2. Independent effect of pressing temperature on tensile strength (a) and tensile modulus (b)

با افزایش دمای پرس از ۱۵۰ به ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت و مدول‌کششی نمونه‌ها نیز به‌طور محسوسی افزایش یافته‌اند. این روند را می‌توان ناشی از کامل‌تر شدن واکنش‌های پخت در ماتریس پلیمری، بهبود چسبندگی بین الیاف و ماتریس، کاهش تخلخل‌ها و عیوب داخلی و توزیع بهتر تنش در ساختار کامپوزیت دانست. در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، روان‌تر شدن ماتریس موجب نفوذ بهتر آن در بین مرحله تقویت‌کننده و کاهش احتمال وجود حفره‌های ریز شده است، به‌طوری‌که درنتیجه، ساختاری همگن‌تر و مستحکم‌تر به‌دست آمده است. بهبود اتصال بین الیاف و ماتریس نیز نقش مؤثری در انتقال مؤثر تنش‌های کششی و جلوگیری از شکست زودهنگام داشته است. در مقابل، در دماهای بالاتر از حد بهینه، احتمال بروز تخریب حرارتی، کاهش استحکام بین‌سطحی و کاهش خواص مکانیکی وجود دارد.

تأثیر درجه حرارت پرس بر مقاومت به ضربه فاق‌دار

بیش‌ترین مقاومت به ضربه فاق‌دار در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۳۲/۷ ژول بر متر با جذب انرژی بالاتر به دلیل چسبندگی بهتر بین الیاف و ماتریس و کاهش تخلخل‌ها مشاهده شده است. مقاومت به ضربه فاق‌دار در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۳۱/۸۸ ژول بر متر بود. کاهش مقاومت ضربه ناشی از احتمال تخریب حرارتی و کاهش چسبندگی بوده که باعث افت جذب انرژی می‌شود (شکل ۳).



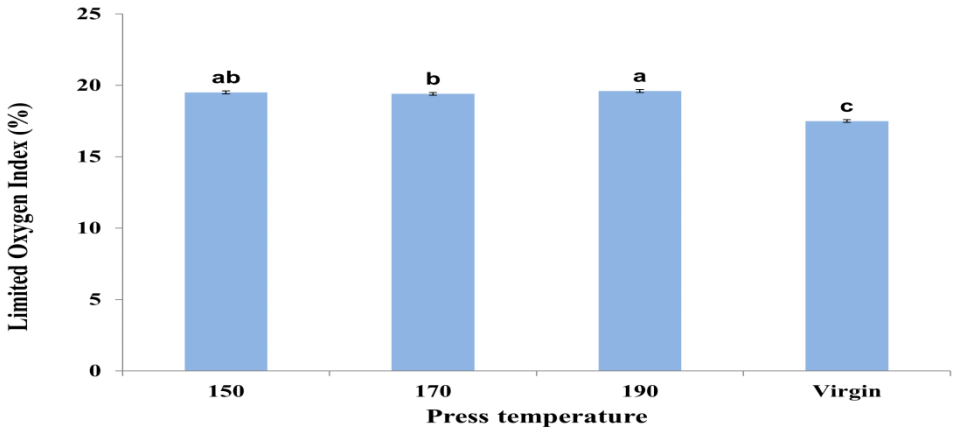
شکل ۳- تأثیر درجه حرارت پرس بر مقاومت به ضربه فاق‌دار

Figure 3. Effect of pressing temperature on impact resistance

رفتـارآتش‌گیری

ارزیابی شاخص اکسیژن محدود توسط دستگاه شاخص اکسیژن انجام می‌شود. این شاخص پارامتری برای ارزیابی اشتعال‌پذیری و بازدارندگی پلیمرها از آتش است و حداقل میزان اکسیژن لازم را برای سوختن با شعله پایدار در مخلوط گازهای اکسیژن و نیتروژن را نشان می‌دهد.

کم‌ترین مقدار آن مربوط به دمای پرس ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۱۹/۵ درصد و بیش‌ترین شاخص اکسیژن محدود چوب پلاستیک مربوط به دمای پرس ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۱۹/۶ درصد است (شکل ۴). با افزایش دما شاخص اکسیژن محدود افزایش بسیار جزئی داشته است. شاخص بالاتر نشان‌دهنده شرایط سخت‌تر برای شعله‌وری و تحمل حرارتی بالاتر برای ماده مورد بررسی است.



شکل ۴- تأثیر درجه حرارت پرس بر شاخص اکسیژن محدود

Figure 4. Effect of press temperature on limiting oxygen index

گرماسنجی وزنی

نتایج میزان خاکستر باقیمانده مربوط به آنالیز حرارتی در جدول ۴ و شکل ۵ مشاهده می‌شود. با افزایش دمای پرس میزان خاکستر باقیمانده کاهش یافت.

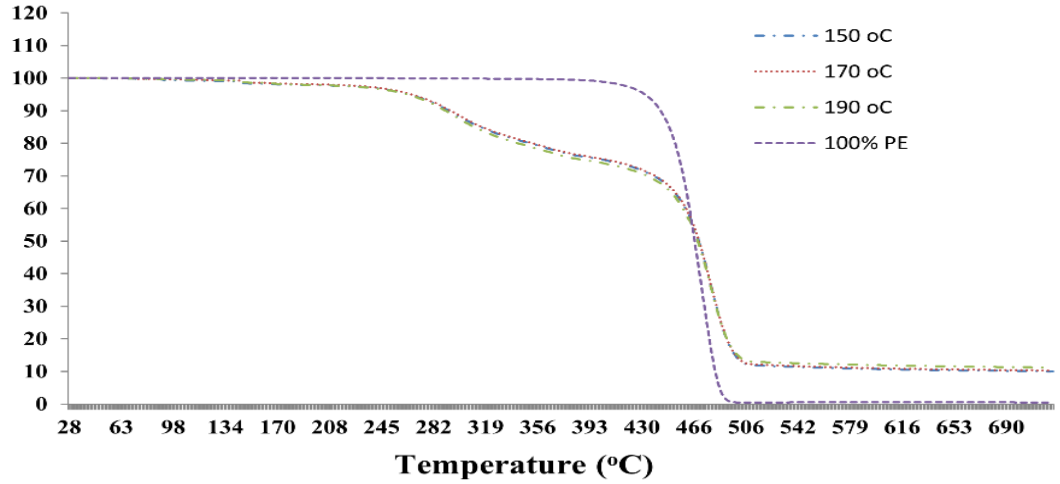
جدول ۴ نتایج گرماسنجی وزنی ۵۰ درصد آرد چوب و سه سطح دمای پرس (۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد) را نشان می‌دهد. نتایج بررسی گرماسنجی وزنی کامپوزیت‌ها بیانگر این است که اختلاف معنی‌داری بین دمای تخریب نمونه‌های مختلف وجود ندارد.

بر اساس نتایج، در نمونه‌ها سه محدوده تخریب حرارتی شناسایی شده است. در مرحله اول، نمونه‌ها در دمای بالاتری شروع به تخریب می‌کنند. در مرحله دوم که شدت تخریب بیشتر است، افت وزن در نمونه‌های حاوی چوب پلاستیک تا محدوده دمایی ۵۰۰ درجه ادامه می‌یابد و پس‌ازآن با افزایش دما، کاهش وزن به‌طورکلی روند ثابتی گرفته و یا بسیار ناچیز است (شکل ۵). میزان خاکستر باقیمانده در چهار نمونه کامپوزیت به ترتیب برابر با ۱۰/۹۶، ۱۰/۹۶، ۱۱/۹۲ و ۰/۵۶ درصد می‌باشد.

جدول ۴-آنالیز گرمایی کامپوزیت چوب پلاستیک

Table 4. Thermal analysis of wood plastic composite

Treatment number	Press temperature (degrees)	Initial degradation temperature (Ti)	Maximum pyrolysis temperature (Tm)	Maximum pyrolysis temperature (Tm)	Destruction temperature (TD) at different weight loss (٪) percentages				Residual weight at (٪RW) 600°C
					20%	40%	60%	80%	
1	150	295	318	453	358	462	477	493	10.96
2	170	294	317	453	358	461	474	494	10.96
3	190	291	311	451	347	460	477	493	11.92
4	0	445	450	461	328	464	472	479	0.56



شکل ۵- تأثیر درجه حرارت پرس بر گرماسنجی وزنی

Figure 5. Effect of press temperature on thermogravimetric analysis

بحث

تأثیر دمای پرس بر مقاومت و مدول‌کششی و خمشی

در این تحقیق مشاهده شد که با افزایش دمای پرس تزریق، مقاومت و مدول کشش و خمش ابتدا افزایش یافته و بعد در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. افزایش دما از ۱۵۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به بهبود پیوندهای شیمیایی بین فاز چوبی و ماتریس پلیمری منجر می‌شود. پیوندهای قوی‌تر بین چوب و پلیمر، انتقال تنش‌ها را بین این دو فاز بهبود می‌بخشد و مقاومت کششی کامپوزیت چوب-پلاستیک را افزایش می‌دهد (Adhikary *et al.*, 2008).

بااین‌حال، در دماهای بالای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، ساختار سلولزی چوب ممکن است دچار تجزیه و تخریب شود. این تخریب منجر به کاهش پیوندهای بین چوب و ماتریس پلیمری می‌گردد و مواد استخراجی چوب ممکن است در این دماها دچار نقص شوند. درنتیجه، این عوامل باعث افت مقاومت کششی کامپوزیت چوب-پلاستیک می‌شوند (Friedrich, 2021). این الگوی رفتار با سایر منابع علمی مطابقت دارد. بیشتر مطالعات نشان داده‌اند که مقاومت کششی چوب پلاستیک در محدوده دمایی ۱۶۰-۱۸۰ درجه سانتی‌گراد بهینه است و افزایش بیش‌ازحد دما باعث کاهش این خواص می‌شود (Faruk *et al.*, 2012).

همچنین، در دماهای پایین‌تر (مانند ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد)، پلیمر به‌طور کامل ذوب نشده و به‌صورت یکنواخت در داخل ماتریس چوبی پخش نمی‌شود. این مسئله باعث ایجاد نقاط ضعف در ساختار و کاهش مدول‌کششی می‌گردد. با افزایش دما به ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، پلیمر به‌طور کامل ذوب شده و به‌صورت یکنواخت در ماتریس چوبی توزیع می‌شود. این موضوع موجب بهبود چسبندگی و انتقال بار بین اجزا و افزایش مدول‌کششی می‌شود. مطالعات Adhikary و همکاران (۲۰۰۸) و Ayrilmis و همکاران (۲۰۱۱) نیز به‌طور مشابه بهبود خواص مکانیکی را در محدوده دمایی ۱۶۰-۱۸۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کرده‌اند.

اما در دماهای بسیار بالا (بالاتر از ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد)، ممکن است تخریب حرارتی چوب و پلیمر رخ دهد که این موضوع باعث کاهش مدول‌کششی و خمشی می‌شود. همچنین، در این دماهای بالا، انبساط حرارتی متفاوت اجزای چوب و پلیمر می‌تواند به ایجاد تنش‌های داخلی و کاهش چسبندگی منجر شود. افزایش دمای پرس تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش سفتی پلیمر و به‌تبع آن افزایش مدول‌کششی و خمشی می‌شود. بالا رفتن مدول‌خمشی به معنای کاهش تغییر شکل ماده مرکب تحت بار است که در سازه‌های مهندسی که باید بار زیادی را بدون تغییر شکل تحمل کنند، به‌عنوان یک عامل مثبت به شمار می‌آید.

تأثیر دمای پرس بر مقاومت به ضربه فاق‌دار

در این تحقیق مشاهده شد که با افزایش دمای پرس تزریق، مقاومت به ضربه فاق‌دار ابتدا افزایش و بعد در دماهای بالاتر کاهش می‌یابد. افزایش دما از ۱۵۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد باعث بهبود چسبندگی بین فاز چوبی و ماتریس پلیمری می‌شود، زیرا نفوذ بهتر پلیمر به درون ساختار چوب و کاهش تخلخل در این دما منجر به ساختاری یکنواخت‌تر و جذب مؤثرتر انرژی ضربه می‌گردد (Stark & Rowlands, 2003Ayrilmis *et al.*, 2011;).

بااین‌حال، افزایش دما به بیش از ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، به‌ویژه در دمای ۱۹۰ درجه، منجر به کاهش مقاومت به ضربه شد. این افت را می‌توان ناشی از آغاز تخریب حرارتی ساختار چوب، تضعیف پیوندهای شیمیایی بین چوب و پلیمر و احتمال افزایش تخلخل در اثر تجزیه حرارتی دانست. چنین تغییراتی می‌توانند اتصال بین فازها را ضعیف کرده و ظرفیت جذب ضربه کامپوزیت را کاهش دهند (Yeh *et al.*, 2009).

درمجموع، این نتایج نشان می‌دهد که دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان شرایط بهینه برای دستیابی به بیشینه مقاومت به ضربه در کامپوزیت چوب-پلاستیک مورد بررسی شناخته می‌شود که با یافته‌های مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد.

تأثیر دمای پرس بر شاخص اکسیژن محدود

در این تحقیق مشاهده شد که با افزایش دمای پرس تزریق از ۱۵۰ به ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، شاخص اکسیژن محدود (LOI) کامپوزیت چوب‌پلاستیک به‌طور جزئی افزایش یافت. شاخص LOI به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی اشتعال‌پذیری مواد پلیمری، بیانگر حداقل غلظت اکسیژن لازم برای تداوم شعله‌وری است؛ درنتیجه افزایش آن به معنای بهبود مقاومت در برابر آتش‌سوزی است. افزایش دمای پرس می‌تواند با بهبود نفوذپذیری پلیمر درون ساختار چوب و ایجاد چسبندگی بهتر بین دو فاز، مسیرهای انتشار اکسیژن را محدود کرده و قابلیت اشتعال را کاهش دهد (Turku *et al.*, 2018). همچنین در دماهای بالاتر، تخریب ترکیبات فرار و قابل اشتعال مانند لیگنین و تشکیل محصولات کربنی پایدار می‌تواند نقش مؤثری در بهبود نسبی شاخص LOI ایفا کند (Jayamani & Balakrishnan, 2021). در این تحقیق، مقدار حداکثر LOI برابر با ۱۹/۶ درصد به دست آمد که با مقادیر گزارش‌شده برای کامپوزیت‌های چوب‌پلاستیک بدون بازدارنده شعله در مطالعات قبلی مطابقت دارد؛ برای نمونه، Adhikary و همکاران (۲۰۰۸) و Kiliaris و Papaspyrides (۲۰۱۰) محدوده LOI بین ۱۹ تا ۲۱ درصد را برای WPC بدون افزودنی گزارش کرده‌اند. عدم استفاده از مواد بازدارنده شعله در ترکیب این کامپوزیت‌ها می‌تواند علت اصلی محدود بودن میزان افزایش LOI باشد؛ زیرا در پژوهش‌هایی توسط Maake و همکاران (۲۰۰۵) استفاده از موادی مانند APP یا PER باعث افزایش قابل‌توجه LOI تا بیش از ۲۵ درصد شده است. درنتیجه، گرچه افزایش دمای پرس تأثیر محدودی برافزایش LOI داشته، اما روند مشاهده‌شده با رفتار شناخته‌شده کامپوزیت‌های چوب‌پلاستیک بدون افزودنی همخوانی دارد.

تأثیر دمای پرس بر گرماسنجی وزنی

گرماسنجی وزنی یک فن آزمایشگاهی است که تغییرات وزن یک ماده را در هنگام افزایش دما اندازه‌گیری می‌کند. این فن برای بررسی رفتار گرمایی و ترموشیمیایی مواد مختلف، ازجمله چوب پلاستیک، استفاده می‌شود. در مورد چوب پلاستیک، دمای پرس تزریق می‌تواند بر نتایج گرماسنجی وزنی تأثیرگذار باشد. **در دمای پرس پایین‌تر (۱۵۰ درجه سانتی‌گراد)**، در این دما، گرماسنجی وزنی نشان می‌دهد که کاهش وزن چوب پلاستیک در دماهای پایین‌تر (حدود ۲۰۰–۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) بیشتر است. این به دلیل تبخیر و خروج ترکیبات فرار و رطوبت موجود در ماده است. همچنین، در این دما، پیک‌های مربوط به تجزیه پلیمر و تخریب حرارتی چوب (در محدوده ۴۰۰–۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) کمتر واضح و مشخص هستند، زیرا این فرایندها به‌خوبی تحریک نمی‌شوند. **دمای پرس بالاتر (۱۷۰ درجه سانتی‌گراد)**، در این دما، گرماسنجی وزنی نشان می‌دهد که کاهش وزن در دماهای پایین‌تر (۱۰۰–۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) کمتر است. این به علت خروج بیشتر ترکیبات فرار و رطوبت در دمای پرس بالاتر می‌باشد. همچنین، پیک‌های مربوط به تجزیه پلیمر و تخریب چوب در محدوده ۳۰۰–۴۰۰ درجه سانتی‌گراد واضح‌تر و مشخص‌تر هستند که به دلیل تحریک بیشتر این فرایندها در دمای پرس بالاتر است.

درنهایت، باقی‌مانده کربنی در پایان آزمون گرماسنجی وزنی در دمای پرس بالاتر بیشتر است که این نشان‌دهنده تشکیل محصولات کربنی مقاوم در برابر حرارت در دمای پرس بالاتر می‌باشد. به‌طورکلی، افزایش دمای پرس تزریق چوب پلاستیک از ۱۵۰ به ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد باعث می‌شود که روند تخریب حرارتی ماده در گرماسنجی وزنی تشدید شود و محصولات حرارتی مقاوم‌تری تشکیل گردد. این تغییرات در نتایج گرماسنجی وزنی ناشی از تأثیر دمای پرس بر فرایندهای فیزیکی–شیمیایی در ساختار چوب پلاستیک است.

در آزمون TGA، سه مرحله اصلی تجزیه حرارتی در نمونه‌ها مشاهده شد. مرحله اول مربوط به رطوبت و مواد فرار، مرحله دوم مربوط به تخریب اصلی ترکیبات آلی مانند سلولز و همی‌سلولز و مرحله سوم باقیمانده خاکستر است.

میزان خاکستر باقی‌مانده برای سه نمونه در محدوده ۱۰/۹۶ تا ۱۱/۹۲ درصد ثبت شده است که با نتایج مطالعات مشابه هماهنگی دارد. برای نمونه، در مطالعه Ayrilmis و همکاران (۲۰۱۱) مقدار خاکستر باقیمانده در کامپوزیت‌های چوب–پلی‌پروپیلن در همین بازه گزارش شده است.

در مقابل، مقدار بسیار پایین خاکستر، مربوط به نمونه **پلیمر خالص** بدون افزودن چوب یا هرگونه فاز تقویت‌کننده است. این نتیجه قابل انتظار بوده و به دلیل تجزیه کامل پلیمر در دمای بالا بدون تولید باقی‌مانده معدنی حاصل می‌شود. در پلیمرهای خالص، پس از پایان مراحل تجزیه حرارتی، اغلب باقی‌مانده قابل‌توجهی وجود ندارد و مقدار خاکستر نزدیک به صفر گزارش می‌شود (Friedrich, 2021). این اختلاف بین نمونه‌های تقویت‌شده و نمونه پلیمر خالص، به‌وضوح نقش مواد چوبی و سایر افزودنی‌ها را در افزایش باقی‌مانده حرارتی و پایداری حرارتی نهایی نشان می‌دهد.

مطالعاتی مانند Yang و همکاران (۲۰۰۷) نیز تأکید کرده‌اند که نوع چوب، درصد تقویت‌کننده و شرایط حرارتی فرایند می‌توانند تأثیر زیادی بر میزان باقی‌مانده خاکستر داشته باشند.

نتیجه‌گیری

این تحقیق باهدف بررسی تأثیر دمای اختلاط بر خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت حاصل از آرد چوب نوئل و پلی‌اتیلن بازیافتی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش دمای پرس از ۱۵۰ به ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد تأثیرات قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها دارد.

افزایش دما به‌طور قابل‌توجهی منجر به بهبود مقاومت و مدول‌کششی و خمشی شد و به ترتیب افزایش‌هایی برابر با ۸، ۳/۹، ۵/۷ و ۶/۴ درصد را نشان داد. این بهبود در خواص مکانیکی به دلیل بهبود پیوندهای شیمیایی بین فاز چوبی و ماتریس پلیمری است که درنتیجه افزایش دما و ذوب بهتر پلیمر به دست می‌آید. بااین‌حال، افزایش دما همچنین منجر به کاهش مقاومت به ضربه فاق‌دار شد که به میزان ۰/۳ درصد کاهش یافت. این کاهش می‌تواند به دلیل تخریب ساختاری در دماهای بالا و کاهش کیفیت پیوندها بین اجزای چوب و پلیمر باشد.

علاوه بر این، نتایج نشان داد که با افزایش تعداد دفعات بازیافت، ثبات حرارتی تغییر زیادی نداشت و میزان خاکستر باقی‌مانده به ترتیب برابر با ۱۰/۹۶، ۱۰/۹۶، ۱۱/۹۲ و ۰/۵۶ درصد بود. این نشان‌دهنده این است که خواص حرارتی کامپوزیت‌ها تحت تأثیر تعداد دفعات بازیافت قرار نمی‌گیرد و می‌توان از این مواد بازیافتی با حفظ خواص حرارتی مناسب استفاده کرد. به‌طورکلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که دمای پرس نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی چوب پلاستیک دارد و همچنین مشخص می‌کند که استفاده از مواد بازیافتی در تولید کامپوزیت‌ها می‌تواند بدون ایجاد افت محسوس در خواص حرارتی، به‌عنوان یک راهکار پایدار موردتوجه قرار گیرد. این یافته‌ها می‌تواند به توسعه و بهینه‌سازی فرایندهای تولید چوب پلاستیک کمک کند و ظرفیت استفاده از این مواد را در کاربردهای مختلف مهندسی و صنعتی افزایش دهد.

نتایج این تحقیق نه‌تنها می‌تواند به توسعه مواد جدید با خواص بهبود یافته منجر شود، بلکه به ترویج استفاده از مواد بازیافتی و پایدار در صنایع مختلف نیز کمک خواهد کرد. درنهایت، این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مرجع مفیدی برای محققان و صنعتگران در این حوزه تلقی گردد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای دستیابی به خواص مطلوب، دماهای بین ۱۶۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد در فرایند تولید کامپوزیت‌های چوب–پلاستیک در نظر گرفته شود. این دما نه‌تنها منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌شوند، بلکه می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی کمک کنند.

References

-Adhikary, K.B., Pang, S. & Staiger, M.P., 2008. Dimensional stability and mechanical behavior of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering*, *39* (5), 807-815. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.10.005

-Ayrilmis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V. & Bauchongkol, P., 2011. Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites. *Polymer Degradation and Stability*, *96*(5), 818-822. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.02.005

-Cabrera, F. C. (2021). Eco-friendly polymer composites: A review of suitable methods for waste management. *Polymer Composites*, *42*(6), 2653-2677. https://doi.org/10.1002/pc.26033

-Goodship, V., 2007. *Introduction to plastics recycling*: iSmithers Rapra Publishing.

-Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science*, *37*(11), 1552-1596. https://doi.org/10. 101 6/j.progpolymsci.2012.04.003

-Friedrich, D., 2021. Thermoplastic moulding of Wood-Polymer Composites (WPC): A review on physical and mechanical behaviour under hot-pressing technique. *Composite Structures*, *262*, 113649. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113649

-Jayamani, E. & Balakrishnan, V., 2021. Thermal Properties and Flammability of Wood Plastic Composites. In *Wood Polymer Composites: Recent Advancements and Applications* (pp. 161-178). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/ 10.1007/978-981-16-1606-8_8

-Kazemi, Y., Cloutier, A. and Rodrigue, D., 2013. Mechanical and morphological properties of wood plastic composites based on municipal plastic waste. *Polymer composites,* 34(4): 487-493. https://doi.org/10.1002/pc.22442

-Kiliaris, P. and Papaspyrides, C.D., 2010. Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: an overview of flame retardancy. *Progress in polymer science*, *35*(7), 902-958. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.03.001

-Maake, T., Asante, J.K., Mhike, W. and Mwakikunga, B., 2025. Fire-Retardant Wood Polymer Composite to Be Used as Building Materials for South African Formal and Informal Dwellings-A Review. *Fire*, *8*(2), 81. https://doi.org/10.3390/ fire8020081

-Migneault, S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K., Krause, C. and Wolcott, M., 2020. "Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood-plastic composites." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 130, 105767. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.10.004

-Najafi, S.K., 2013. Use of recycled plastics in wood plastic composites–A review. *Waste management,* 33(9): 1898-1905. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.017

-Ramli, R.A., 2024. A comprehensive review on utilization of waste materials in wood plastic composite. *Materials Today Sustainability*, *27*, 100889. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024. 100889

-Stark, N.M. and Rowlands, R.E., 2003. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and fiber science. 35(2): 167-174*.

-Turku, I., Kärki, T. & Puurtinen, A., 2018. Durability of wood plastic composites manufactured from recycled plastic. *Heliyon*, *4*(3). https://doi.org/ 10.10 16/j.heliyon.2018.e00559

-Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H. and Zheng, C., 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, *86*(12-13),1781-1788. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013

-Yeh, S.K., Agarwal, S. and Gupta, R.K., 2009. Wood–plastic composites formulated with virgin and recycled ABS. *Composites Science and Technology*, *69*(13), 2225-2230. https://doi.org/ 10.1016/j.compscitech.2009.06.007