



Journal of Applied Research in Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

Effect of Different Walnut Shell Biomass Content on the Thermal Stability and Morphology of Brake Pads

Mohammad Hedayati Ayandeh, Masoud Mosallaei*, Amin Hossein Morshedi

Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

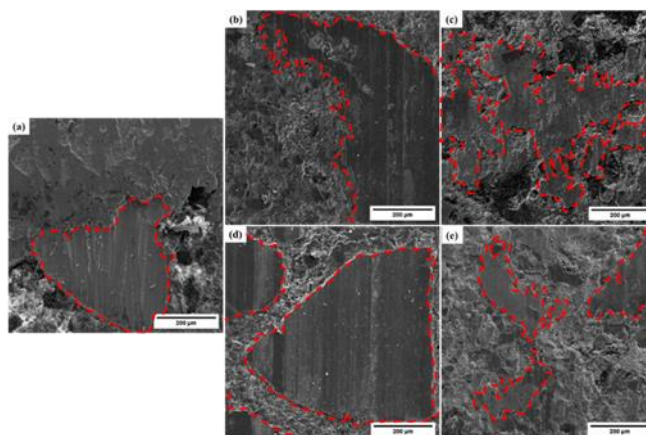
ARTICLE INFO

Received 2025-08-23
Revised 2025-11-29
Accepted 2026-01-04
Available online 2026-05-09
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

Brake Pad
Biomass Materials
Walnut Shell Powder
Thermal Stability
Microstructure

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: This study investigates the effect of processed walnut shell Biomass (PNB) on the thermal and tribological performance of eco-friendly brake pads. Since brake pads are safety-critical components, they must provide both thermal stability and wear resistance. Replacing conventional fillers with biomass-based reinforcements such as walnut shell powder offers a sustainable alternative to asbestos while potentially improving overall performance.

Research approach: Brake pad composites were fabricated by incorporating 0–4 wt.% PNB into the base formulation through controlled mixing, molding, and curing. The produced specimens were examined using a combination of analytical and mechanical techniques. Thermogravimetric (TGA) and differential thermal analysis (DTA) were performed to evaluate degradation behavior and char formation. Microstructural characterization was carried out using scanning electron microscopy (SEM) to assess the dispersion of reinforcing particles and the quality of interfacial bonding. In addition, wear resistance and hardness tests were conducted to measure the tribological and mechanical performance of the pads.

Main results: The results revealed a dual effect of PNB addition. Incorporating up to 3 wt.% PNB improved thermal stability, increased char residue, and led to a more uniform microstructure with better particle dispersion. At this composition, surface hardness and wear resistance were also enhanced, while non-uniform wear decreased. However, higher PNB contents (>3 wt.%) resulted in significant deterioration of thermal resistance, formation of porous regions, and weakened interfacial adhesion, causing unstable frictional behavior and lower wear performance. In conclusion, 2-3 wt.% PNB was identified as the optimum composition, ensuring a desirable balance between hardness, wear resistance, and thermal durability.

* Corresponding author: mosal@yazd.ac.ir – ORCID: 0000-0002-2634-7470



مقاله تحقیقاتی

اثر مقادیر مختلف ماده زیست‌توده پوست گردو بر پایداری حرارتی و مورفولوژی لنت‌های ترمز

محمد هدایتی آینده، مسعود مصلاهی پور یزدی^{*}، امین حسین مرشدی
گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: این پژوهش با هدف بررسی اثر افزودن پودر پوست گردو فرآوری‌شده (PNB) بر خواص سایشی و پایداری حرارتی لنت‌های ترمزی دوستدار محیط‌زیست انجام شد. اهمیت این موضوع از آن جهت است که لنت ترمز به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی سامانه ایمنی خودرو باید هم‌زمان دارای پایداری حرارتی مطلوب و مقاومت سایشی مناسب باشد. استفاده از منابع زیست‌توده مانند پوست گردو می‌تواند ضمن بهبود عملکرد، رویکردی پایدار و جایگزین مناسبی برای ترکیبات آربستی و معدنی محسوب شود.

روش تحقیق: برای این منظور، لنت‌های ترمزی با درصد‌های مختلف پودر پوست گردو (۰ تا ۴ درصد وزنی) تولید شدند. فرایند ساخت شامل اختلاط دقیق مواد اولیه، قالب‌گیری و پخت در شرایط کنترل‌شده بود. به‌منظور بررسی خواص، آزمون‌های حرارتی (TGA, DTA) برای تحلیل رفتار تجزیه حرارتی و میزان کربن باقی‌مانده، آزمون ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای مشاهده توزیع و پیوستگی ذرات تقویت‌کننده و آزمون‌های مکانیکی سایشی برای ارزیابی مقاومت در برابر سایش و سختی سطح انجام شدند.

نتایج اصلی: نتایج نشان داد افزودن ۳ درصد وزنی پودر پوست گردو موجب بهبود چشمگیر در پایداری حرارتی، افزایش تشکیل کربن باقی‌مانده و ایجاد ریزساختار یکنواخت شد. همچنین سختی سطح و مقاومت سایشی افزایش یافت و سایش غیریکنواخت کاهش پیدا کرد. باین‌حال، مقادیر بالاتر از ۳ درصد باعث افت محسوس مقاومت حرارتی، تشکیل نواحی متخلخل و تضعیف چسبندگی فاز زمینه و تقویت‌کننده شد که ناپایداری رفتار و افت کارایی سایشی را موجب شد. در جمع‌بندی، مقدار بهینه‌ی ۲ تا ۳ درصد وزنی پودر پوست گردو بهترین تعادل بین سختی، مقاومت سایشی و پایداری حرارتی را فراهم می‌آورد و به‌عنوان گزینه‌ای پایدار برای تولید لنت‌های ترمزی پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها

لنت ترمز
مواد زیست‌توده
پودر پوست گردو
پایداری حرارتی
ریزساختار

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴
دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: mosal@yazd.ac.ir – ORCID: 0000-0002-2634-7470

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان. این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

در ۲۰ سال گذشته، تحولات سریع در صنعت خودرو با افزایش سرعت، بار و قدرت موتور همراه بوده است. مهم‌ترین جنبه ایمنی هر خودرو، سامانه ترمز آن است که باید وسیله نقلیه را متوقف کند و همچنین در شرایط مختلف این کار را با اطمینان انجام دهد [۱ و ۲]. مواد لنت ترمز مدرن شباهت زیادی با طناب‌های اولیه دارند. همراه با فناوری در حال تکامل خودرو، مطالعات بسیاری با هدف تولید لنت ترمز با کارایی بالا، ارزان و سازگار با محیط‌زیست انجام شده است که اثرات مضر بر سلامتی ایجاد نمی‌کند [۳ و ۴].

مواد اصطکاکی مورد استفاده در لنت ترمز خودرو معمولاً از بیش از ۱۰ جزء تشکیل شده است. باتوجه به عملکرد غالب، هر جز را می‌توان در یکی از چهار گروه پیونددهنده‌ها، ساینده‌ها، پرکننده‌های فضایی و پرکننده‌های کاربردی دسته‌بندی کرد. ترکیب مناسب مواد خام عملکردی مختلف، می‌تواند عملکرد اصطکاک-سایشی و حرارتی خوب را تضمین کند که در بسیاری از جنبه‌ها مانند پایداری حرارتی، ضریب اصطکاک بالا و پایداری، نرخ سایش کم، بی‌صدا، حداقل تأثیر محیطی، قیمت قابل قبول منعکس می‌شود. دو دسته اصلی از مواد اصطکاکی برای کاربرد پوشش ترمز خودرو وجود دارد، نیمه‌فلزی و آلی غیرآزبستی (Non-Asbestos Organic (NAO)) [۵ و ۶]. آزبست برای مدت طولانی در لنت ترمز استفاده شده است، اما به دلیل سرطان‌زا بودن آن در سال‌های اخیر اکیداً ممنوع شده است [۷]. به دلیل اثرات مضر موادی مانند آزبست، در سال‌های اخیر تغییرات قابل توجهی در مواد لنت ترمز ایجاد شده است. تلاش‌های زیادی برای توسعه لنت‌های ترمز با عملکرد بالا و سازگار با محیط‌زیست انجام شده است [۸]. مواد آلی مانند ولاستونیت، ورمیکولیت، میکا، الیاف بازالت، الیاف شیشه خردشده، الیاف سرامیکی، پلی‌آکریلونیتریل، پشم سنگ، پلی‌استر و الیاف آرامید که به جای آزبست استفاده می‌شوند، دارای ویژگی‌های عملکردی مشابهی هستند [۹]. علاوه بر این، پسماندهای طبیعی و کشاورزی به عنوان مواد جدید و ارزان قیمت در توسعه لنت‌های ترمز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۰].

در تعیین ترکیب مواد لنت ترمز، عواملی مانند نوع وسیله نقلیه، نوع پرایمر مورد نیاز، ماهیت و هزینه مواد، هزینه تولید و اثرات زیست‌محیطی و سلامتی باید در نظر گرفته شوند [۱۱]. گرافیت، MoS_2 و Sb_2S_3 سه روان‌کننده جامد پرکاربرد در فرمول‌های اصطکاکی هستند که نقش کاهش نرخ سایش و تثبیت ضریب اصطکاک را ایفا می‌کنند. با این حال، مشکلات زیست‌محیطی MoS_2 و Sb_2S_3 و همچنین قابلیت آلوده‌سازی تجهیزات توسط گرافیت، ضرورت یافتن جایگزین‌های مناسب برای این مواد خطرناک را افزایش داده است.

پوسته مغزها مانند گردو، فندق و زردآلو قبلاً به عنوان پرکننده در کامپوزیت‌های پلیمری مختلف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند [۱۲-۱۵]. مقدار لیگنین در پوسته مغزها بیشتر از الیاف طبیعی است و در نتیجه، تجزیه حرارتی آن‌ها به دلیل ترکیب غنی از لیگنین، باعث تشکیل مقدار بیشتری کربن باقی‌مانده (char) می‌شود. این ویژگی، تأثیر مثبتی بر کاهش نرخ سایش دارد [۱۶]. به همین دلیل، پودر پوسته مغزها می‌تواند به عنوان

جایگزین بالقوه‌ای برای گرافیت مطرح شود که معمولاً مشکلاتی مانند آلودگی تجهیزات را به همراه دارد. برای افزایش میزان تولید کربن باقی‌مانده، برخی تیمارهای خاص بر روی پوسته مغزها انجام شده است تا همی‌سلولزها که تأثیر منفی بر استحکام، رطوبت‌پذیری و اسیدیته مواد کامپوزیتی دارند، حذف شوند [۱۷].

از آنجاکه تأثیر مقادیر مختلف پوست گردو بر پایداری حرارتی لنت‌های ترمز غیرآزبستی به‌ندرت مورد بررسی قرار گرفته است؛ در این مطالعه، ریزساختار و پایداری حرارتی پودر پوسته گردو فراوری شده (PNB) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و تحلیل گرموزن‌سنجی (TGA) به عنوان پرکننده عملکردی در کامپوزیت‌های NAO مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تحلیل جامع نتایج آزمون سایش طی آزمون اصطکاک لنت‌های ترمز نیز ارائه شده است.

۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد، دستگاه و روش‌ها

پوست گردوی دریافت‌شده ابتدا از ناخالصی‌ها پاک‌سازی شد، سپس با استفاده از خشک‌کن کابینتی در دمای 60°C به مدت ۵ ساعت خشک و با آسیاب پره‌ای سرعت بالا با سرعت 3000 rpm پودر شد. پودر پوست گردو فراوری شده (PNB)، حاصل با استفاده از یک الک (مش ۴۰) یکنواخت شد. ذرات ریز و همگن برای فرایند شیمیایی انتخاب شد و به عنوان افزودنی به مقدار ۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد وزنی به ترکیب لنت ترمز اضافه شد. ترکیب لنت‌های سازگار با محیط زیست در جدول ۱ فهرست شده است. تمامی مواد خام با استفاده از مخلوط‌کن به مدت ۵ دقیقه ترکیب شدند، سپس در دمای 180°C درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۵ بار به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه پرس داغ JFY60 قالب‌گیری و فشرده شدند. در ادامه، کامپوزیت‌های تهیه‌شده تحت عملیات بازیخت تکمیلی در دمای 200°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت قرار گرفتند.

پایداری حرارتی این پودرها با تحلیل گرموزن‌سنجی (TG-209) مورد ارزیابی قرار گرفت. این آزمون TG با نرخ گرمایش 10°C درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و جریان نیتروژن 50 mL بر دقیقه در بوتله آلومینایی انجام شد. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-MIRA3 TESCAN) مجهز به آنالیزگر طیف‌سنج پراش انرژی (EDS) و با استفاده از حالت الکترون برگشتی (BSE) انجام شد.

برای بررسی خواص اصطکاکی، آزمون ضریب اصطکاک به صورت خشک و در شرایط آزمایشگاهی مطابق استاندارد ISO 286-P67 انجام شد. آزمون‌های مشخصه‌یابی خواص اصطکاکی و سایشی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آزمون مواد اصطکاکی (Friction Material Test Machine) انجام پذیرفت. نمونه‌های آزمون با ابعاد استاندارد $25 \times 25 \text{ mm}$ از بخش مرکزی لنت‌ها تهیه شد. سطح کاری نمونه‌ها به گونه‌ای آماده‌سازی شد که با انحنای سطح داخلی کاسه چدنی دستگاه تطابق کامل داشته باشد و ضخامت نهایی نمونه در مرکز آن حدود 6 mm تنظیم شد. پیش از شروع هر آزمون، سطح داخلی کاسه با سنباده نمره ۳۲۰ پولیش و کاملاً تمیز شد. سپس هر نمونه به منظور اطمینان از دستیابی به حداقل ۹۵٪ سطح تماس، تحت فرایند آماده‌سازی اولیه با نیروی 440 N و سرعت دورانی 312 rpm قرار گرفت.

در خلال گرمایش، تجزیه شود یا با محیط گازی اطراف خود واکنش دهد، اطلاعات مفیدی را ارائه خواهد کرد. نمودارهای TG، DTA و DTG برای نمونه‌های P₀، P₁، P₂، P₃ و P₄ حاوی به ترتیب ۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد وزنی پودر پوست گردو در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تحلیل دقیق‌تر اثر مقادیر مختلف پودر پوست گردو فراوری شده (PNB) بر پایداری حرارتی نمونه‌های لنت‌های ترمز، باید به تأثیرات تغییرات در دمای شروع تجزیه و تغییرات اولیه ساختار نمونه (T₁)، دمای تجزیه‌های عمده ماده (T₂) و دماهای بیشینه نرخ تجزیه (T_{max}) [۱۸] بر اساس داده‌های موجود در جدول ۳ توجه کرد.

جدول ۲ حدود و معیار پذیرش نتایج آزمون‌های اصطکاک و سایش برای لنت

خودرو با وزن‌های مختلف

Table 2 Acceptance limits and criteria for friction and wear test results for car pads with different weights

No	Items	Permissible variations of μ		Permissible variations of the mean value of μ relative to its average obtained in the first and second baseline test result	Permissible variations of the mean value of μ relative to its average obtained in the first and second fade test result	Permissible variations of the mean value of μ relative to its average obtained in the first and second recovery wear test result	Maximum wear ($\times 10^{-7}$ g/Nm)
		Max.	Min.				
1	Parking brake	0.7	0.2	± 30	± 30	± 30	4.56
2	Vehicle & motorcycle under 2 Ton	0.6	0.25	± 20	± 30	± 20	4.56

در نهایت، وزن و ضخامت نمونه در سه نقطه با دقت 0.1 g و 0.1 mm اندازه‌گیری و ثبت شد. آزمون اصلی شامل هفت مرحله متوالی و بدون وقفه بود که تحت نیروی ثابت 667 N و سرعت دورانی 417 rpm انجام شد. مرحله مبنای اولیه (First Baseline)، شامل ۲۰ ترمزگیری (10 s) اعمال نیرو و 20 s رها سازی) درحالی‌که دمای کاسه بین 82°C تا 104°C حفظ می‌شد. مرحله گرمایی اول (First Fade)، ترمزگیری ممتد به مدت 10 min و تا زمانی که دمای کاسه به 288°C برسد (هرکدام زودتر اتفاق افتد). مرحله بازیابی اول (First Recovery)، بلافاصله پس از مرحله گرمایی اول، ترمزگیری‌های کوتاه در حین فرایند خنک‌سازی در دماهای مشخص 260 ، 204 ، 149 و 93°C انجام شد. مرحله سایش (Wear)، شامل 100 ترمزگیری (20 s) اعمال نیرو و 10 s رها سازی)، درحالی‌که دمای کاسه بین 193°C تا 216°C حفظ می‌شد. مرحله گرمایی دوم (Second Fade)، مشابه مرحله گرمایی اول، اما این بار ترمزگیری ممتد تا رسیدن دما به 343°C ادامه یافت. مرحله بازیابی دوم (Second Recovery)، ترمزگیری‌های کوتاه در حین فرایند خنک‌سازی در دماهای 316 ، 260 ، 204 ، 149 و 93°C مرحله مبنای دوم (Second Baseline)، تکرار کامل مرحله مبنای اولیه. در طول تمام مراحل، ضریب اصطکاک در لحظات پایانی هر بار اعمال نیرو ثبت شد. پس از اتمام آزمون، وزن و ضخامت نهایی نمونه مجدداً اندازه‌گیری شد تا میزان سایش مشخص شود. حدود و معیار پذیرش نتایج آزمون‌های اصطکاک و سایش در جدول ۲ خلاصه شده است. تغییرات مجاز میانگین μ در مراحل مبنای دوم و بازیابی‌های اول و دوم و سایش، نسبت به میانگین μ در مرحله مبنای اول، حداکثر $\pm 10\%$ درصد باشد. همچنین تغییرات مجاز میانگین μ در مراحل گرمایی اول و دوم، نسبت به میانگین μ در مرحله مبنای اول، حداکثر $\pm 15\%$ درصد باشد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی نمونه لنت‌های ساخته‌شده حاوی مقادیر ۰، ۱، ۲، ۳ و

۴ درصد وزنی پودر پوست گردو

Table 1 Chemical composition of brake pad samples containing 0, 1, 2, 3, and 4 wt.% walnut shell powder

Chemical composition (wt.%)	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
Phenol formaldehyde resin	7	7	7	7	7
Rubber	6	6	6	6	6
Steel fibers	18	18	18	18	18
Cellulosic residue	15	15	15	15	15
Rock wool	8	8	8	8	8
Refractory powder	8	8	8	8	8
Graphite	12	11	10	9	8
Walnut shell powder	0	1	2	3	4
Coke	6	6	6	6	6
Mineral filler	20	20	20	20	20

۳ نتایج و بحث

روش گرمایزسنجی یکی از روش‌های بررسی حرارتی است که در آن تغییرات وزن نمونه در اثر افزایش دما یا در طول زمان در محیط کنترل‌شده (مانند هوا، نیتروژن یا آرگون) اندازه‌گیری می‌شود. این روش زمانی که ماده

شکل ۱ نمودارهای TG، DTA و DTG برای نمونه لنت‌های الف (P₀)، ب (P₁)، ج (P₂)، د (P₃) و ه (P₄) حاوی به ترتیب ۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد وزنی پودر پوست گردو

Figure 1 TG, DTA, and DTG curves of brake pad samples: (a) P₀, (b) P₁, (c) P₂, (d) P₃, and (e) P₄, corresponding to 0, 1, 2, 3, and 4 wt.% walnut shell powder, respectively

جدول ۳ دماهای T_1 ، T_2 و T_{max} برای نمونه لنت‌های ساخته‌شده حاوی مقادیر ۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد وزنی پودر پوست گردو

Table 3 Thermal stability parameters (T_1 , T_2 , T_{max}) of brake pad samples containing 0, 1, 2, 3, and 4 wt.% walnut shell powder

Thermal stability ($^{\circ}\text{C}$)	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
$^{*}T_1$	357.52	357.82	360.84	365.32	347.08
$^{*}T_2$	457.75	495.56	498.58	526.25	437.13
$^{*}T_{max}$	444.98	446.53	447.83	492.63	431.98

* T_1 = initial decomposition temperature, T_2 = secondary decomposition, T_{max} = maximum decomposition temperature

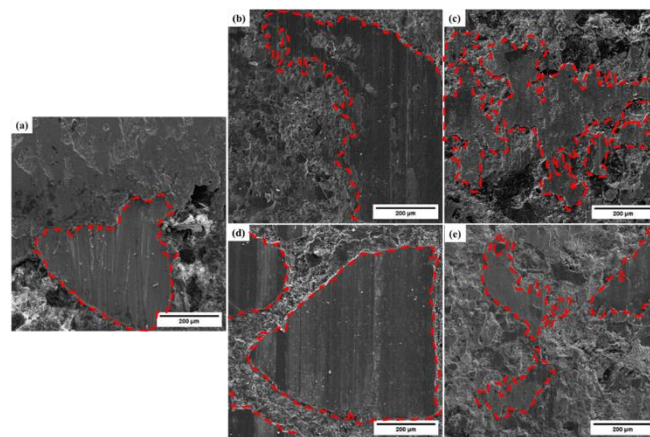
دمای T_1 به‌عنوان دمایی که در آن اولین تغییرات وزنی (معمولاً تجزیه رطوبت و مواد فرار) مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده حساسیت ماده به تجزیه حرارتی اولیه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، T_1 در نمونه‌های P_1 تا P_3 که به‌ترتیب دارای ۱، ۲ و ۳ درصد پودر پوست گردو هستند، افزایش یافته است که نشان می‌دهد با افزودن پودر پوست گردو تا حد ۳ درصد، دمای تجزیه اولیه افزایش می‌یابد. این نشان‌دهنده آن است که پودر پوست گردو ممکن است به‌عنوان ماده تقویت‌کننده در برابر تجزیه اولیه عمل کرده و باعث افزایش پایداری حرارتی نمونه‌ها در مراحل اولیه شود. اما در نمونه P_4 (با ۴ درصد پودر پوست گردو)، دمای T_1 کاهش یافته است ($347.08/0.8^{\circ}\text{C}$). این کاهش می‌تواند ناشی از اثرات منفی تجمع زیاد پودر پوست گردو در ترکیب باشد که باعث کاهش پایداری حرارتی در مراحل اولیه می‌شود. دمای T_2 نشان‌دهنده دمایی است که تجزیه عمده ماده در آن رخ می‌دهد. این دما معمولاً نشان‌دهنده تجزیه مواد اصلی (مثل لیگنین و سلولز) است. در نمونه‌های P_1 تا P_3 ، دمای T_2 به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. برای مثال، نمونه P_3 (با ۳ درصد پودر پوست گردو) بالاترین دمای تجزیه کامل را با مقدار $526/25^{\circ}\text{C}$ نشان می‌دهد. این افزایش می‌تواند نشان‌دهنده اثر مثبت پودر پوست گردو در افزایش پایداری حرارتی در دماهای بالا باشد. به نظر می‌رسد پودر پوست گردو به‌عنوان ماده افزودنی می‌تواند در مقاومت مواد به تجزیه در دماهای بالا کمک کند و موجب بهبود پایداری حرارتی در مراحل تجزیه کامل شود. بر خلاف آن، نمونه P_4 که دارای ۴ درصد پودر پوست گردو است، کمترین مقدار T_2 را دارد ($437.13/0.8^{\circ}\text{C}$) که نشان‌دهنده تأثیر منفی افزایش بیش از حد پودر پوست گردو در ترکیب است. دمای T_{max} به دمایی اطلاق می‌شود که در آن بیشترین نرخ تجزیه در ماده رخ می‌دهد، یعنی جایی که بالاترین تغییرات وزنی مشاهده می‌شود. نمونه‌های P_1 و P_2 که دارای ۱ و ۲ درصد پودر پوست گردو هستند، T_{max} مشابهی در حدود $446-447^{\circ}\text{C}$ دارند. این نشان‌دهنده عملکرد نسبتاً ثابت این ترکیبات در برابر تجزیه در دماهای بالا است. در نمونه P_3 (با ۳ درصد پودر پوست گردو)، T_{max} به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و به $492/63^{\circ}\text{C}$ می‌رسد. این افزایش نشان‌دهنده بهبود پایداری حرارتی و مقاومت در برابر تجزیه در دماهای بالا است. به نظر می‌رسد که ۳ درصد پودر پوست گردو در ترکیب، باعث افزایش دمای بیشینه نرخ تجزیه شده و در نتیجه عملکرد بهتر ماده در دماهای بالا را به همراه داشته است. اما در نمونه P_4 (با ۴ درصد پودر پوست گردو)، T_{max}

کاهش یافته است ($431.98/0.8^{\circ}\text{C}$) که نشان‌دهنده کاهش کارایی و پایداری حرارتی است [۱۹ و ۱۶].

پوست گردو حاوی مقادیر بالای لیگنین است که ماده آلی مقاوم به تجزیه است. لیگنین به‌دلیل ساختار پیچیده و مقاوم خود در برابر تجزیه حرارتی، می‌تواند در پایداری حرارتی ترکیب اثرگذار باشد. لیگنین معمولاً در دماهای بالا تجزیه می‌شود و در نتیجه چار (کربن باقی‌مانده) تشکیل می‌دهد. این چار در اثر حرارت‌دیدن، به‌عنوان مانع فیزیکی عمل کرده و از تجزیه بیشتر مواد جلوگیری می‌کند. همان‌طور که اشاره شد، یکی از محصولات اصلی تجزیه لیگنین، تشکیل چار است که به‌عنوان ماده مقاوم در برابر حرارت عمل می‌کند. با افزودن پودر پوست گردو که غنی از لیگنین است، مقدار چار تولیدی افزایش می‌یابد. این چار می‌تواند به‌عنوان حفاظت‌کننده حرارتی عمل کرده و به کاهش سرعت تجزیه حرارتی در دماهای بالا کمک کند. افزودن پودر پوست گردو ممکن است باعث کاهش سرعت تجزیه سایر اجزای تشکیل‌دهنده لنت‌های ترمز، مانند سلولز و همی‌سلولز، شود. در صورتی که پودر پوست گردو در دمای بالا به‌طور مؤثر تجزیه نشود، می‌تواند مانند پشتیبان حرارتی برای سایر مواد عمل کند و از تجزیه سریع آن‌ها جلوگیری کند. لیگنین موجود در پوست گردو خواص ضد اکسایشی دارد که می‌تواند کمک کند تا ترکیب در دماهای بالا کمتر در معرض آسیب‌های اکسایشی قرار گیرد. این ویژگی می‌تواند در افزایش عمر و پایداری حرارتی لنت‌ها مؤثر باشد [۱۶ و ۱۹].

کاهش پایداری حرارتی لنت با افزودن بیش از ۳ درصد می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که ترکیب بالای پودر پوست گردو ممکن است موجب اختلال در ساختار مواد و کاهش مقاومت به تجزیه در دماهای بالاتر شود. اگرچه چار تولیدشده از لیگنین می‌تواند به‌عنوان ماده مقاوم به حرارت عمل کند، اما در مقادیر بسیار زیاد، این چار ممکن است به‌طور یکنواخت در ترکیب پخش نشود و نقاط ضعفی در ساختار ترکیب ایجاد کند. این نقاط ضعف می‌توانند در دماهای بالا باعث شکست مواد یا کاهش پایداری حرارتی شوند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نمونه لنت‌های P_0 ، P_1 ، P_2 ، P_3 و P_4 در شکل ۲ نشان داده شده است. حفظ یکنواختی سطح پس از اصطکاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های لنت ترمز است که مستقیماً بر عملکرد و طول عمر آن تأثیر می‌گذارد. برای بررسی دقیق اثر پودر پوست گردو بر این ویژگی، لازم است به تأثیر این افزودنی بر ریزساختار، همگنی سطح، توزیع تنش‌ها، و چسبندگی اجزا توجه شود. باتوجه به شکل ۲-ج و ۲-د، در مقدار بهینه (۳-۲٪)، ذرات پودر پوست گردو به‌عنوان فاز تقویت‌کننده عمل می‌کنند و به‌طور یکنواخت در ماتریس پخش می‌شوند. این توزیع یکنواخت باعث بهبود پیوند بین اجزا شده و از ایجاد حفره‌های بزرگ و نواحی ضعیف جلوگیری می‌کند. حضور پودر پوست گردو، به‌دلیل داشتن ترکیبات لیگنین و سلولز، می‌تواند به افزایش پیوند بین اجزا کمک کند [۲۰]. این ویژگی باعث کاهش احتمال جداشدگی اجزا در اثر تنش‌های اصطکاکی می‌شود. مطابق شکل ۲-الف، نمونه‌های بدون پودر پوست گردو (P_0) دارای ترک‌های سطحی و شکست‌های بین‌دانه‌ای بیشتر هستند، اما در مقادیر ۳-۲٪ (P_2 و P_3)، این ترک‌ها کمتر شده و سطح لنت همگن‌تر است.

اصطکاکی نمونه به تدریج بهبود می‌یابد. با این حال، رفتار کلی نمونه بسیار پایدار و با نوسانات کم است و دما نیز در محدوده ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ثابت باقی‌مانده است. در شکل ۳-ج، با افزودن ۲٪ پودر پوست گردو، نمونه ضریب اصطکاک بالایی را مشابه نمونه شاهد، در محدوده ۰/۴۶ نشان می‌دهد. پایداری ضریب اصطکاک در این حالت فوق‌العاده است و تقریباً هیچ روند صعودی یا نزولی قابل تشخیصی در طول آزمون مشاهده نمی‌شود. این رفتار، عملکردی بسیار باثبات و یکنواخت را نوید می‌دهد. کنترل دما نیز در این آزمون کاملاً موفقیت‌آمیز بوده است. در شکل ۳-د، با افزودن ۳٪ پودر پوست گردو، ضریب اصطکاک در این نمونه کمی پایین‌تر از نمونه P2 و در محدوده ۰/۴۴ قرار دارد. خط ضریب اصطکاک تقریباً افقی است و نوسانات آن در طول ۱۰۰ ترمزگیری بسیار ناچیز است که نشان از عملکردی قابل‌اعتماد در شرایط سایش دارد. مطابق شکل ۳-ه، با افزودن ۴٪ پودر پوست گردو، عملکرد این نمونه بسیار شبیه به نمونه P3 است. ضریب اصطکاک در سطح پایداری حدود ۰/۴۳ قرار دارد و در سراسر آزمون سایش، ثبات خود را به خوبی حفظ کرده است. عدم وجود نوسانات شدید یا تغییرات محسوس در ضریب اصطکاک، نشان‌دهنده رفتار یکنواخت این فرمول‌بندی در این مرحله است. دما نیز به‌طور کاملاً پایدار در محدوده آزمون حفظ شده است.

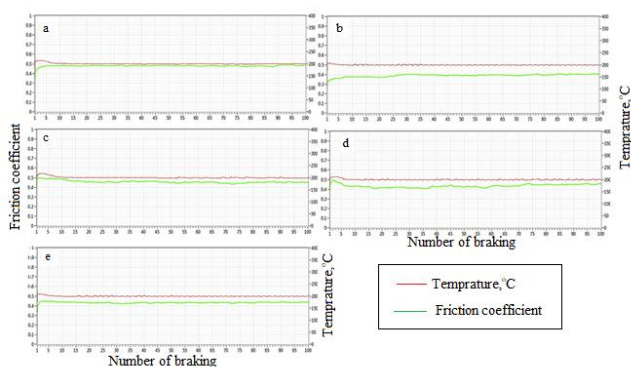


شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش خراشان نمونه لنت‌های ساخته‌شده حاوی مقادیر (الف) ۰، (ب) ۱، (ج) ۲، (د) ۳ و (ه) ۴ درصد وزنی پودر پوست گردو

Figure 2 Scanning electron microscopy (SEM) images of the worn surfaces of brake pad samples containing a) 0, b) 1, c) 2, d) 3, and e) 4 wt.% walnut shell powder

شکل ۲-الف نشان می‌دهد، در نمونه‌های بدون پودر پوست گردو (P0)، زبری سطح و ضعف چسبندگی اجزا، باعث کندگی سریع ذرات از سطح لنت و کاهش طول عمر آن می‌شود. با افزودن پودر پوست گردو (P2 و P3)، به دلیل یکنواختی ساختاری، این نوع سایش کاهش یافته و مقاومت در برابر فرسایش افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۲-ج و ۲-د، در مقادیر بهینه (۳٪-۲٪)، ذرات پوست گردو در برابر ذرات ساینده فلزی مقاومت نشان داده و مانع از فرسایش سریع سطح لنت می‌شوند. این امر منجر به کاهش عمق و شدت خطوط سایش در سطح لنت می‌شود که در تصاویر میکروسکوپی قابل مشاهده است. تشکیل لایه‌های اکسیدی محافظ در دماهای بالاتر یکی از سازوکارهای مهم در کاهش یکنواختی و همگنی ریزساختار است. پودر پوست گردو حاوی ترکیبات آلی و لیگنین است که در دماهای بالا تجزیه شده و لایه‌های محافظی ایجاد می‌کنند که مانع از سایش بیش از حد می‌شود. این موضوع در مقادیر بهینه ۳٪-۲٪ به‌وضوح دیده می‌شود، اما در ۴٪ (P4) (شکل ۲-ه)، این لایه‌ها ناپایدار شده و باعث ضعف ساختاری می‌شوند.

شکل ۳، نمودارهای مربوط به مرحله آزمون سایش (Wear Test) برای هر پنج نمونه را به تفکیک نشان می‌دهد. در تمام نمودارها، خط سبز نشان‌دهنده ضریب اصطکاک و خط قرمز نشان‌دهنده دما است. محور افقی نیز تعداد ۱۰۰ مرتبه ترمزگیری را نمایش می‌دهد. در شکل ۳-الف، ضریب اصطکاک (خط سبز) در سطح نسبتاً بالایی، حدود ۰/۴۸، قرار دارد و در طول ۱۰۰ ترمزگیری، پایداری بسیار خوبی را به نمایش می‌گذارد. نوسانات مشاهده‌شده بسیار جزئی است که نشان‌دهنده عملکرد یکنواخت و قابل‌پیش‌بینی نمونه شاهد در این مرحله است. دمای آزمون (خط قرمز) نیز به‌خوبی در محدوده ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شده است. مطابق شکل ۳-ب، با افزودن ۱٪ پودر پوست گردو، ضریب اصطکاک به شکل محسوسی کاهش یافته و به‌طور میانگین در محدوده ۰/۳۹ قرار گرفته است. نکته قابل‌توجه در این نمودار، وجود شیب ملایم و صعودی در ضریب اصطکاک است؛ این امر نشان می‌دهد که با ادامه ترمزگیری، عملکرد



شکل ۳ نمودارهای مقایسه عملکرد ضریب اصطکاک و دما در مرحله آزمون سایش (Wear Test) برای نمونه‌های لنت با درصدهای مختلف افزودنی پوست گردو. (الف) نمونه شاهد (P0)، (ب) P1، (ج) P2، (د) P3 و (ه) P4

Figure 3 Comparison graphs of friction coefficient and temperature performance in the wear test phase for pad samples with different percentages of walnut shell additive. (a) Control sample (P0), (b) P1, (c) P2, (d) P3 and (e) P4

۴ نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که:

۱. افزودن پودر پوست گردو تا ۳ درصد وزنی به فرمول‌بندی لنت‌های ترمزی منجر به بهبود قابل‌توجهی در پایداری حرارتی و ویژگی‌های سطحی این محصولات شد. تحلیل‌های حرارتی (DTA و TGA) نشان دادند که افزایش میزان پودر پوست گردو تا ۳ درصد وزنی، موجب افزایش دمای بیشینه تجزیه (T_{max}) و ارتقای پایداری حرارتی لنت‌ها شد که بیانگر بهبود پایداری حرارتی ترکیب لنت ترمز است.
۲. بهبود پایداری حرارتی نشان می‌دهد که ترکیب مورد استفاده می‌تواند در برابر دماهای بالاتر پیش از شروع تجزیه حرارتی مقاومت کند که ویژگی

- Formaldehyde-Based Composite Particleboard from Almond Shell, *Materials & Design*, 27(10), 1148-1151, 2006.
- [13] Çöpür Y., Güler C., Akgül M., and Taşcıoğlu C., Some Chemical Properties of Hazelnut Husk and Its Suitability for Particleboard Production, *Building and Environment*, 42(7), 2568-2572, 2007.
- [14] Gürü M., Atar M., and Yıldırım R., Production of Polymer Matrix Composite Particleboard from Walnut Shell and Improvement of Its Requirements, *Materials & Design*, 29(1), 284-287, 2008.
- [15] Ibhade A.O.A., and Dagwa I.M., Development of Asbestos-Free Friction Lining Material from Palm Kernel Shell, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 30(2), 2008.
- [16] Sutikno M., Marwoto P., and Rustad S., The Mechanical Properties of Carbonized Coconut Char Powder-Based Friction Materials, *Carbon*, 48(12), 3616-3620, 2010.
- [17] Pandey K.K., A Study of Chemical Structure of Soft and Hardwood and Wood Polymers by FTIR Spectroscopy, *Journal of Applied Polymer Science*, 71(12), 1969-1975, 1999.
- [18] Vyazovkin S., Burnham A.K., Criado J.M., Pérez-Maqueda L.A., Popescu C., and Sbirrazzuoli N., ICTAC Kinetics Committee Recommendations for Performing Kinetic Computations on Thermal Analysis Data, *Thermochimica Acta*, 520(1-2), 1-19, 2011.
- [19] Yun R., Filip P., and Lu Y., Performance and Evaluation of Eco-Friendly Brake Friction Materials, *Tribology International*, 43(11), 2010.
- [20] Akıncioğlu G., Akıncioğlu S., Öktem H., and Uygur İ., Wear Response of Non-Asbestos Brake Pad Composites Reinforced with Walnut Shell Dust, *Journal of the Australian Ceramic Society*, 56(3), 1061-1072, 2020.

بسیار مطلوبی برای لنت‌های ترمز است که به‌طور مداوم در معرض گرمای ناشی از اصطکاک قرار دارند. این رفتار به افزایش میزان کربن حاصل از تجزیه حرارتی پوست گردو و کاهش سهم اجزای فرار در ساختار لنت نسبت داده می‌شود. کربن باقیمانده به‌عنوان فازی پایدار در برابر حرارت عمل کرده و مقاومت حرارتی مجموعه را افزایش می‌دهد، درحالی‌که کاهش ترکیبات فرار باعث کاهش افت جرم و جلوگیری از تخریب ساختاری در دماهای بالا شده و در نتیجه، پایداری حرارتی ترکیب را بهبود می‌بخشد.

۳. مشاهدات میکروسکوپی (SEM) نشان دادند که حضور ذرات سخت کربنی در ماتریس لنت باعث کاهش رشد ترک‌های سطحی و کاهش میزان سایش شد. باین‌حال، افزودن بیش از ۳ درصد وزنی پودر پوست گردو، به‌ویژه در نمونه حاوی ۴ درصد (P۴)، منجر به کاهش پایداری حرارتی شد. ۴. به‌طور کلی، با بررسی خواص سایشی مشخص شد، افزودن ۲-۳ درصد وزنی پودر پوست گردو به‌عنوان مقدار بهینه برای بهبود خواص حرارتی و مکانیکی لنت‌های ترمزی شناسایی شد، درحالی‌که مقادیر بالاتر می‌تواند منجر به افت کیفیت نهایی محصول شود.

مراجع

- [1] Irawan A.P., et al., Overview of the Important Factors Influencing the Performance of Eco-Friendly Brake Pads, *Polymers (Basel)*, 14(6), 1180, 2022.
- [2] Chan D., and Stachowiak G.W., Review of Automotive Brake Friction Materials, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 218(9), 953-966, 2004.
- [3] Rashid B., Leman Z., Jawaid M., Ghazali M.J., Ishak M.R., and Abdelgnei M.A., Dry Sliding Wear Behavior of Untreated and Treated Sugar Palm Fiber Filled Phenolic Composites Using Factorial Technique, *Wear*, 380-381, 26-35, 2017.
- [4] Kchaou M., Mat Lazim A.R., Abdul Hamid M.K., and Abu Bakar A.R., Experimental Studies of Friction-Induced Brake Squeal: Influence of Environmental Sand Particles in the Interface Brake Pad-Disc, *Tribology International*, 110, 307-317, 2017.
- [5] Lu Y., A Golden Section Approach to Optimization of Automotive Friction Materials, *Journal of Materials Science*, 38, 1081-1085, 2003.
- [6] Fan Y., Matějka V., Kratošová G., and Lu Y., Role of Al_2O_3 in Semi-Metallic Friction Materials and Its Effects on Friction and Wear Performance, *Tribology Transactions*, 51(6), 771-778, 2008.
- [7] Fubini B., and Otero Areán C., Chemical Aspects of the Toxicity of Inhaled Mineral Dusts, *Chemical Society Reviews*, 28(6), 373-381, 1999.
- [8] Jacko M.G., Tsang P.H.S., and Rhee S.K., Automotive Friction Materials Evolution During the Past Decade, *Wear*, 100(1-3), 503-515, 1984.
- [9] Blau P., Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives, *Oak Ridge National Laboratory Report*, Oak Ridge, TN, USA, 2001.
- [10] Idris U.D., Aigbodion V.S., Abubakar I.J., and Nwoye C.I., Eco-Friendly Asbestos Free Brake-Pad: Using Banana Peels, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 27(2), 185-192, 2015.
- [11] Lazim A.R.M., Kchaou M., Hamid M.K.A., and Bakar A.R.A., Squealing Characteristics of Worn Brake Pads Due to Silica Sand Embedment into Their Friction Layers, *Wear*, 358-359, 123-136, 2016.
- [12] Gürü M., Tekeli S., and Bilici İ., Manufacturing of Urea-