

بررسی اثر لیگنین بر اثرهای منفی فرایند برشته‌سازی در تولید بریکت از باگاس

مجید صالحی سیاهدشتی^۱، محمد طلایی پور^{۲*}، حبیب‌الله خادمی اسلام^۳ و بهزاد بازیار^۴

۱- دانشجوی دکترای گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران،

پست الکترونیک: m.talaeipoor@srbiau.ac.ir

۳- استاد، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۱

چکیده

استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف از جمله فرایند برشته‌سازی برای افزایش کارایی و بهینه‌سازی قابلیت مصرف بریکت‌های سوختی در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. از این رو در این پژوهش از پیش‌تیمار برشته‌سازی با دمای ۱۸۰ °C برای اصلاح زیست‌توده باگاس استفاده شد. علاوه بر این از عامل اتصال‌دهنده لیگنین در سطوح ۲، ۵ و ۱۰٪ استفاده شد. بریکت‌های سوختی با استفاده از دستگاه بریکت‌سازی دستی با وزن ۳۰ گرم تهیه شدند. ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی و حرارتی بریکت‌های حاصل بررسی شدند. نتایج نشان دادند که پیش‌تیمار برشته‌سازی از طریق افزایش دانسیته حجمی بریکت‌های حاصل و افزایش میزان کربن ثابت تا حدود ۵۰٪ توانسته ارزش حرارتی بریکت‌ها را تا حدود ۱۰٪ افزایش دهد، از سویی هم این فرایند منجر به کاهش مقاومت فشاری بریکت‌های حاصل شد که استفاده از لیگنین به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده توانست میزان قابل توجهی از این افت مقاومت را جبران کند. نتایج نشان دادند که میزان فرار بریکت‌ها با پیش‌تیمار برشته‌سازی حدود ۹٪ کاهش یافت که تأثیر قابل توجهی بر کاهش آلاینده‌گی این بریکت‌ها داشت. در بررسی اثر لیگنین نیز مشاهده شد که با افزایش میزان مصرف لیگنین میزان دانسیته و ارزش حرارتی نیز افزایش می‌یابد. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از عامل اتصال‌دهنده لیگنین همراه با پیش‌تیمار برشته‌سازی می‌تواند تولید بریکت‌های سوختی با کیفیت بالا از باگاس را ممکن سازد.

واژه‌های کلیدی: زیست‌توده، سوخت‌های فسیلی، بریکت، باگاس، پیش‌تیمار برشته‌سازی

مقدمه

(Wang et al., 2017; Jordan et al., 2011). انرژی‌های

تجدیدپذیر می‌تواند یکی از گزینه‌های اصلی برای کاهش مشکلات انتشار آلاینده‌ها باشد. طبق گفته Dermibas (۲۰۰۹) عرضه پایدار و قابلیت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای زیست‌توده (Biomass) منجر به معرفی آن به‌عنوان چهارمین منبع انرژی بزرگ بعد از ذغال سنگ، نفت

افزایش سریع تقاضای جهانی برای انرژی اولیه همراه با کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و از سوی دیگر اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی در انتشار گازهای گلخانه‌ای نیاز به یافتن روشی جایگزین برای تأمین سوخت برای تولید انرژی را بیش‌ازپیش کرده است

فرایندهای بعدی مانند کاربرد، ذخیره، حمل و نقل و تغذیه آنها را تسهیل می‌کند (Vance Morey and Kaliyan, 2009). بریکت‌سازی یک تکنولوژی مترکم‌سازی فشار بالای مورد استفاده برای افزایش دانسیته مواد زیست‌توده و تولید یک محصول جذاب و زیستا برای کاربرد زیست‌توده به‌عنوان یک ماده اولیه بالقوه برای تولید انرژی می‌باشد. به‌طورکلی بریکت‌های زیستی از ۳ بخش اصلی تشکیل می‌شوند که شامل (۱) زیست‌توده به‌عنوان ماده اصلی تشکیل دهنده بریکت، (۲) عوامل اتصال عرضی مانند نشاسته و خاک‌اره به‌منظور افزایش ویژگی‌های مقاومتی بریکت‌های تشکیل شده و (۳) فیلرها که عموماً برای افزایش دانسیته و همچنین افزایش ارزش حرارتی بریکت‌های نهایی استفاده می‌شوند (Tumuluru, 2010). فرایند بریکت‌سازی معمولاً با پرس هیدرولیکی، مکانیکی یا غلتکی ماشین بریکت‌سازی انجام می‌شود. بریکت‌سازی دانسیته زیست‌توده را افزایش می‌دهد و مشکل ابعاد و شکل ناهمگن زیست‌توده را برطرف کرده و منجر به یکنواختی و بهبود ویژگی‌های احتراق و همچنین انتشار ذرات بسیار ریز می‌شود (Tumuluru, 2010).

در سازوکارهای اتصال بین ذرات زیست‌توده در مواد مترکم‌شده، نیروهای اتصال اصلی شامل نیروهای جاذبه بین ذرات جامد، هم‌پیوستگی‌های مکانیکی، چسبندگی، هم‌چسبی و نیروهای هم‌کنشگرانه و فشار مویینی هستند. به‌دلیل حضور لیگنین و همی‌سلولز در ترکیبات زیست‌توده، پلیمرهایی که از دیواره سلولی رها می‌شوند با ذرات اطراف برهم‌کنش می‌دهند. با فشار و دمای زیاد فرایند مترکم‌سازی، لیگنین نرم شده و جریان می‌یابد. ترشوندگی، پراکنش درون مولکولی و گرفتاری زنجیره‌های پلیمری بین الیاف مجاور بهبود می‌یابد. این نوع از نیروی اتصال برای مقاومت زیست‌توده مترکم‌شده مهم است (Stelte et al., 2012). علاوه‌براین، سازه‌های ماده خام، مقدار رطوبت زیست‌توده، ابعاد و پراکنش ذرات، شرایط دمایی یا پیش‌حرارت‌دهی، اتصال‌دهنده‌های افزوده شده و متغیرهای دستگاهی مترکم‌سازی نیز بر دوام و مقاومت بریکت‌های حاصل بسیار مؤثر هستند (Kaliyan et al., 2009).

خام و گاز طبیعی شده است. ضایعات کشاورزی به‌عنوان منبع انرژی بالقوه، سوختی تمیز و پایدار هستند که تمام نمی‌شوند و علاوه بر توسعه اقتصادی و درآمد روستایی منجر به حداقل رساندن آلاینده‌های محیطی می‌شوند (Basu, 2010). از این رو تلاش برای توسعه قابلیت استفاده از این مواد به‌عنوان سوخت بسیار مورد اهمیت است.

در میان انواع مختلف مواد زیست‌توده انتخاب ماده خام برای اهداف تولید انرژی بستگی به معیارهای خاصی مانند بازده بالقوه در هکتار، ویژگی‌های ماده اولیه و قابلیت کاربرد آن دارد (Kurian et al., 2013). باگاس نیشکر به‌دلیل آنکه قابلیت دسترس‌پذیری آن بیش از استفاده آن است، بسیار مورد توجه می‌باشد. باگاس دارای ارزش گرمایی خالص حدود ۸۰۰۰ kJ/kg، با مقدار رطوبت حدود ۵۰ درصد وزنی و مقدار خاکستر در محدوده ۴ تا ۵ درصد وزنی است. در کارخانه‌های شکر، باگاس به‌عنوان یک سوخت در بویلرها برای تولید بخار و الکتریسیته استفاده می‌شود (Barroso et al., 2003). کارایی بویلرهای مورد استفاده در کارخانه‌های شکر معمولاً ۶۰ تا ۷۰٪ است و کارایی بیشتر می‌تواند با استفاده از احتراق لایه سیال‌شده به‌دست آید. با این حال، سیال‌سازی باگاس به‌دلیل ساختار فیبری آن سخت می‌باشد. باگاس دانسیته پایینی دارد، حاوی رطوبت است و نیازمند یک سیال جامد است. ترکیبات پایه باگاس (براساس درصد وزنی) شامل سلولز (۵۵-۴۱ درصد)، همی‌سلولز (۲۷/۵-۲۰ درصد)، لیگنین (۲۶/۳-۱۸ درصد) و سایر (۷ درصد) هستند (Teixeira et al., 2011). به‌طورکلی استفاده از باگاس به‌عنوان ماده خام برای تولید انرژی تجدیدپذیر بسیار مطلوب می‌باشد، از سوی دیگر، استفاده از باگاس خام به‌دلیل مقدار رطوبت زیاد، نامنظمی شکل و اندازه و همچنین دانسیته حجمی کم باعث بروز مشکلاتی در کاربرد، ذخیره، حمل و نقل و استفاده به‌عنوان سوخت می‌شود (Vance Morey and Kaliyan, 2009).

این مشکلات می‌توانند با استفاده از فرایند مترکم‌سازی با کاربرد فشار و دما حل شود. سوخت مترکم‌شده از کیفیت، مقاومت و دوام مطلوبی برخوردار است، به‌طوری‌که

طول فرایند برشته‌سازی به دلیل اعمال حرارت برای خشک کردن مواد، بیشتر آب موجود در زیست‌توده تبخیر می‌شود. در دماهای بالای 160°C چگالش گرمایی منجر به وقوع برخی واکنش‌های شیمیایی می‌شود که این واکنش‌ها منجر به تشکیل مونوکسیدکربن (CO) می‌شوند. مقدار همی سلولز زیست‌توده به میزان زیادی تحت تأثیر واکنش‌های تجزیه‌ای است که در طول فرایند برشته‌سازی رخ می‌دهند، از این رو با حفظ سلولز و لیگنین با حفظ بیشتر انرژی زیست‌توده، ویژگی‌های نم‌گیری آن کاهش می‌یابد. در طول برشته‌شدن، زیست‌توده طبیعت سرسخت خود را به دلیل فروپاشی ماتریس همی سلولزی و دی‌پلیمریزاسیون سلولزی خود از دست می‌دهد که منجر به کاهش طول الیاف می‌شود (Anukam *et al.*, 2016). فرایند برشته‌سازی همچنین منجر به انقباض مواد می‌شود، مواد را شکننده، لایه لایه و سبک می‌کند، در حالی که ویژگی‌های آسیاب‌پذیری و آرد شدن آن را بهبود می‌بخشد. در این فرایند، مواد عمدتاً به دلیل حذف گروه‌های هیدروکسیل (OH) آبریز می‌شوند و تشکیل پیوندهای هیدروژنی در آنها حذف می‌شود (Arias *et al.*, 2008). H_2 و O_2 در مقایسه با C بیشتر وازده می‌شوند، ارزش گرمایی مواد در این فرایند افزایش می‌یابد (Uslu *et al.*, 2008). درکل، افزایش دمای برشته‌سازی منجر به افزایش مقدار C مواد برشته‌شده می‌شود، با وجود اینکه مقادیر H_2 و O_2 به دلیل تشکیل H_2O ، CO و CO_2 کاهش می‌یابد (Tumuluru *et al.*, 2010). کاهش نسبت H_2 به C (H:C) و O_2 به C (O:C) در نتیجه افزایش دما و زمان برشته‌سازی منجر به افت دود و کاهش تشکیل بخار آب و همچنین کاهش افت انرژی در طول فرایند احتراق یا گازسازی می‌شود (Tumuluru *et al.*, 2010). در کنار تمام مزایای پیش‌تیمار برشته‌سازی در تولید بریکت‌های سوختی، برشته‌سازی موجب کوتاه شدن الیاف زیست‌توده می‌شود که این کوتاهی الیاف می‌تواند باعث کاهش مقاومت بریکت‌های تولیدی شود که این خود موجب بروز مشکلاتی در حمل‌ونقل و انبارش بریکت‌های تولیدی می‌گردد. همان‌طور که در بالا گفته شد بریکت‌ها می‌توانند از سه قسمت شامل ماده زیست‌توده، عامل اتصال‌دهنده و ماده

در کنار تمام متغیرهای فرایندی ویژگی‌های ماده خام مورد استفاده برای تولید بریکت نیز بسیار مهم می‌باشد. امروزه یکی از روش‌های اصلاح زیست‌توده اولیه برای تولید سوخت‌های زیستی جامد، استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف مانند برشته‌سازی، هیدروترمال و یا پیش‌تیمار با اسید یا قلیا قبل از عمل متراکم‌سازی است. به‌طورکلی فرایند پیش‌تیمار باعث بهبود کیفیت بریکت سوختی مانند دوام بیشتر و دانسیته بالاتر و بهبود ویژگی‌های انبارداری و حمل‌ونقل بریکت سوختی می‌گردد.

در میان روش‌های پیش‌تیمار زیست‌توده برشته‌سازی شامل حرارت‌دهی زیست‌توده تا یک دمای هدف برای تکمیل جذب اکسیژن و خارج کردن آب و مواد فرار به منظور افزایش دانسیته انرژی مواد حاصل است. در برشته‌سازی به منظور تغییر ویژگی‌های زیست‌توده برای دستیابی به ماده اولیه با بهترین کیفیت برای تولید انرژی، مواد زیست‌توده بین دماهای 180°C تا 300°C حرارت‌دهی می‌شوند (Al-Widyan *et al.*, 2016; Araújo *et al.*, 2002) که در آن حذف مواد فرار منجر به تولید حدود $80\% - 90\%$ مقدار گرمایی اصلی مواد می‌شود، در حالی که حدود 30% از وزن اولیه مواد در فرایند برشته‌سازی کاهش می‌یابد (Anukam *et al.*, 2016). پیش‌تیمار برشته‌سازی منجر به کاهش تغییرپذیری ماده خام با توجه به تفاوت در نوع و گونه زیست‌توده، کاهش تغییرپذیری نسبت به متغیرهای آب و هوایی و فصلی و همچنین کاهش تغییرپذیری نسبت به شرایط مربوط به ذخیره‌سازی می‌گردد (Bergman, Kiel and 2015).

برشته‌سازی به توسعه مواد خام با ویژگی‌های یکنواخت و بهبود ویژگی‌های فیزیکی آنها کمک می‌کند. تغییرات موجود که مربوط به مواد خام مورد استفاده هستند، شامل آب‌گریزی، قابلیت آسیاب شدن و قابلیت مواد به تشکیل بریکت‌ها می‌باشد. در فرایند برشته‌سازی به دلیل تجزیه ماتریس همی سلولز مقدار لیگنین زیست‌توده که عامل اتصال پایه در مواد محسوب می‌شود (Tumuluru *et al.*, 2010) افزایش یافته و مقدار بیشتر لیگنین در مواد زیست‌توده منجر به قابلیت اتصال بهتر آن مواد شده و شرایط فرایندی ملایم‌تری را می‌طلبد. در

مقاومتی مطلوب از باگاس اثر پیش تیمار برشته سازی و لیگنین به عنوان عامل اتصال عرضی بررسی شد.

مواد و روش ها

زیست توده باگاس به عنوان ماده اولیه برای تولید بریکت های سوختی از شهر اهواز تهیه و در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان خرد و هوا خشک شدند. لیگنین مورد استفاده به عنوان عامل اتصال دهنده به صورت پودر از کارخانه کاغذ پارس تهیه شد. برای ساخت این اتصال دهنده های طبیعی مایع سیاه (Black Liquor) تولید شده در کارخانه با استفاده از دستگاه فریزدرایر به پودر تبدیل گردید.

برشته سازی زیست توده باگاس

برای گرما خشک کردن باگاس های هوا خشک شده از آون خلأ مدل SSVO-502 ساخت شرکت Shinsaeng کره استفاده گردید. برای این منظور نمونه های باگاس در بسته های حدود ۳۵۰ گرم جداسازی شده در یک ظرف مستطیلی شکل پخش شده و در شرایط دمایی ۱۸۰ درجه سانتی گراد برای مدت ۳۰ دقیقه تحت شرایط خلأ در آون قرار گرفتند. پس از گذشت این زمان، نمونه ها تا رسیدن دمای آون خلأ به دمای محیط درون آون نهفته شدند. سپس نمونه ها تا زمان ساخت بریکت ها درون کیسه های پلاستیکی ذخیره گردیدند.

پرکننده تشکیل شوند، در این میان هدف از کاربرد عامل اتصال دهنده افزایش اتصال بین ذرات می باشد که این افزایش اتصال منجر به افزایش ویژگی های مقاومتی بریکت های تولیدی نیز می گردد. در ساختار گیاهی لیگنین عملکردهای ساختاری متفاوتی مانند عملکرد به عنوان چسب برای الیاف سلولزی و همی سلولزی را ایجاد می کند. از دیگر عملکردهای لیگنین در ساختار گیاهی نقش آنها به عنوان رزین های ذاتی است. یکی از مهمترین نقش های لیگنین که در تولید بریکت های سوختی نیز بسیار حائز اهمیت می باشد نقش چسبندگی آن برای ساختار مواد گیاهی لیگنوسلولزی است که در دماهای بالای ۱۴۰ °C رخ می دهد. مقدار لیگنین در روش های بریکت سازی بدون اتصال دهنده بسیار مهم می باشد در این نوع بریکت ها عملکرد لیگنین به عنوان عامل حجمی و سفت کننده ممکن می شود. از این رو، ویژگی های مقاومتی بریکت های ساخته شده از مواد زیست توده لیگنوسلولزی به ویژگی های چسبندگی لیگنین گرمانرم آنها نسبت داده شده است (Anukam et al., 2016). از آنجاکه فرایند برشته سازی می تواند تأثیر قابل توجهی بر ویژگی های مقاومتی بریکت های تولید شده داشته باشد انتظار می رود افزایش میزان لیگنین در ساختار بریکت نهایی به صورت اتصال دهنده بتواند این کاهش مقاومت را جبران کند. از این رو در این تحقیق با هدف تولید بریکت های سوختی با ارزش حرارتی زیاد و ویژگی های



شکل ۱- دستگاه دست ساز ساخت بریکت های سوختی (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)

Figure 1. Manual device for making fuel briquettes (Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources)

ASTM به شماره E711-87 با استفاده از بمب کالری سنج (Bomb Calorimeter) اکسیژن مدل HZ-384A ساخت کشور چین که فشار ظرف آن ۳۰۰۰ kPa بود اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ارزش حرارتی حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در یک کالریمتر بمبی سوزانده شد تا احتراق کامل به دست آید. تفاوت بین حداکثر و حداقل دماهای به دست آمده برای محاسبه ارزش گرمایی ناخالص مواد زیست‌توده براساس فرمول زیر مورد استفاده قرار گرفت.

$$\text{ارزش حرارتی} = \frac{(C_{\text{water}} + C_{\text{cal}})(T_2 - T_1)}{W_f}$$

که در این فرمول ارزش حرارتی برابر W_f ، $J/g^{\circ}C$ برابر با وزن نمونه زیست‌توده (g)، C_{cal} برابر با ظرفیت حرارتی کالریمتر بمبی ($J/g^{\circ}C$)، $T_2 - T_1$ افزایش دما ($^{\circ}C$)، C_{water} برابر با ظرفیت حرارتی آب ($J/g^{\circ}C$) بوده است.

درصد خاکستر و درصد مواد فرار بریکت‌های تهیه شده به ترتیب طبق استاندارد تاپی به شماره T211 om-85 در دمای $25 \pm 5^{\circ}C$ و طبق استاندارد ASTM به شماره E872-72 در شرایط دمایی $20 \pm 95^{\circ}C$ با استفاده از دستگاه کوره مدل HERAEUS K 1252 MUFFLE ساخت کشور فرانسه اندازه‌گیری شدند. کربن ثابت و باقیمانده جامد قابل سوختن یک ماده پس از خارج شدن مواد فرار آن می‌باشد که پس از اندازه‌گیری درصدهای رطوبت، مواد فرار و خاکستر با کسر مجموع از صد، طبق فرمول زیر محاسبه گردید.

$$= \text{مقدار کربن تثبیت شده}$$

$$\text{درصد مواد فرار} + \text{درصد خاکستر} - 100\%$$

$$+ \text{درصد رطوبت}$$

برای بررسی و مقایسه خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی بریکت‌های تولید شده، معنی‌داری بین میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح اعتماد ۹۵٪ انجام شد. بدین منظور از نرم‌افزار SPSS 16 استفاده گردید. در این آزمون اثر ۸ نوع تیمار (شامل باگاس، باگاس گرماخشک شده، ترکیب باگاس

تهیه بریکت‌های سوختی

بریکت‌های سوختی با استفاده از دستگاه دست‌ساز موجود در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تهیه شدند (شکل ۱). بریکت‌ها با وزن پایه ۳۰ گرم از دو نوع باگاس معمولی و باگاس گرماخشک شده تهیه گردیدند. در ساخت بریکت‌ها برای حذف اثرهای منفی احتمالی فرایند برشته‌سازی در ساخت بریکت‌ها لیگنین به‌عنوان اتصال‌دهنده در چهار سطح مصرف ۰، ۲، ۵ و ۱۰ درصد نسبت به وزن اولیه هر بریکت به باگاس‌های معمولی و گرما خشک شده افزوده شدند.

برای تهیه بریکت‌ها ابتدا ماده اولیه زیست‌توده با لیگنین به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده در یک ظرف با درصدهای تعیین شده با هم ترکیب شدند. مواد ترکیب شده بعد به قالب دستگاه بریکت‌سازی که دو ساعت قبل از شروع فرایند گرم شده بود منتقل شدند. ترکیب مواد در شرایط دمایی ۱۵۰ درجه سانتی-گراد و فشار ۱۱۰ psi برای زمان ۶ دقیقه قرار گرفتند، پس از ساخته شدن بریکت‌ها برای ممانعت از ایجاد ترک در ساختار آنها نمونه‌ها برای مدت ۲ ساعت در دستگاه آن مدل Memmert UNB 500 ساخت اروپا در شرایط دمایی ۸۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌ها برای هر تیمار در ۳ تکرار تهیه شد.

مشخصات بریکت‌های ساخته شده

دانسیته حجمی و درصد رطوبت نمونه‌ها به ترتیب طبق استاندارد ASAE به شماره S269.4 و استاندارد تاپی به شماره T۲۴۰ om - ۰۲ اندازه‌گیری شدند. میزان پایداری بریکت‌های تهیه شده براساس مقاومت آنها به فشار طبق استاندارد ASTM به شماره D2166-85 بررسی شد. اندازه‌گیری مقاومت فشاری بریکت‌های تهیه شده با استفاده از دستگاه LoadCell Cometech مدل QC-505BI ساخت کشور چین تحت سرعت بارگذاری ۰/۳۰۵ میلی‌متر در دقیقه انجام شد.

ارزش حرارتی

ارزش حرارتی بریکت‌های تهیه شده طبق استاندارد

(2002)؛ این پدیده منجر به افزایش میزان اتصال و در نتیجه افزایش دانسیته بریکت‌های حاصل شده است. از سوی دیگر، با افزایش درصد مصرف لیگنین از ۰ درصد تا ۱۰ درصد نیز در هر دو نوع باگاس دانسیته حجمی بریکت‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهند که لیگنین توانسته به خوبی نقش اتصال‌دهنده را ایفا کند و موجب افزایش دانسیته بریکت‌های حاصل شود (Olugbade *et al.*, 2019; Yank *et al.*, 2016).

با ۳ سطح مصرف لیگنین و ترکیب باگاس گرماخشک شده با ۳ سطح مصرف لیگنین) مختلف بررسی شدند.

نتایج

نتایج تحلیل آماری نشان دادند که فرایند برشته‌سازی اثر قابل توجهی بر دانسیته حجمی بریکت‌ها داشته است. در طول فرایند برشته‌سازی تعداد محل‌های لیگنین فعال در دسترس است و ماتریس همی سلولز به منظور تشکیل ترکیبات اشباع نشده با ویژگی‌های اتصال بهتر تجزیه می‌شود (Zanzi *et al.*,

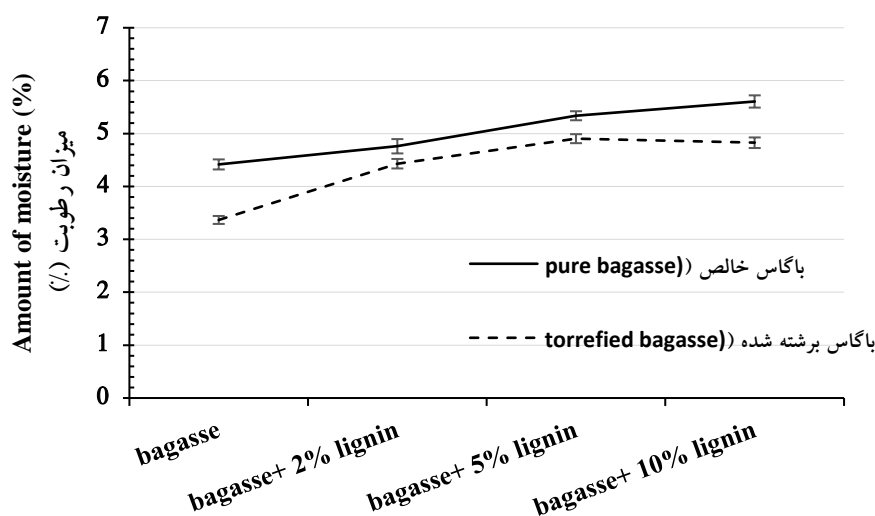


شکل ۲- تأثیر فرایند برشته‌سازی و لیگنین بر دانسیته بریکت‌های سوختی

Figure 2. The effect of torrefaction process and lignin on the density of fuel briquettes

رطوبت است تحت تأثیر واکنش‌های تجزیه‌ای از ساختار زیست‌توده حذف می‌گردد (Anukam *et al.*, 2016). از سوی دیگر، نتایج نشان دادند که با افزایش درصد لیگنین میزان رطوبت نهایی تمامی بریکت‌ها افزایش یافته است، به طوری که در بریکت‌های حاصل از باگاس معمولی با افزایش ۱۰ درصد لیگنین، میزان رطوبت از ۴/۴ به ۵/۶ درصد رسید. Stegemann و Muazu (۲۰۱۵ و ۲۰۱۷) گزارش کردند که افزایش اتصال‌دهنده در ساختار بریکت منجر به افزایش رطوبت و تخلخل موجود در ساختار بریکت می‌شود.

نتایج نشان دادند که فرایند برشته‌سازی منجر به کاهش قابل توجه رطوبت در بریکت‌های حاصل از باگاس برشته شده در مقایسه با بریکت‌های حاصل از باگاس معمولی شده است. پس از فرایند برشته‌سازی، رطوبت باگاس‌ها به حدود ۱ درصد رسیده بود که نسبت به باگاس‌های معمولی که حدود ۳ درصد بود اختلاف اولیه قابل توجهی داشته است. از سوی دیگر، در فرایند برشته‌سازی در دماهای بالای ۱۶۰ °C چگالش گرمایی منجر به وقوع برخی واکنش‌های شیمیایی می‌شود و همی سلولز زیست‌توده که عامل اصلی در جذب



شکل ۳- تأثیر فرایند برشته‌سازی و لیگنین بر میزان رطوبت بریکت‌های سوختی

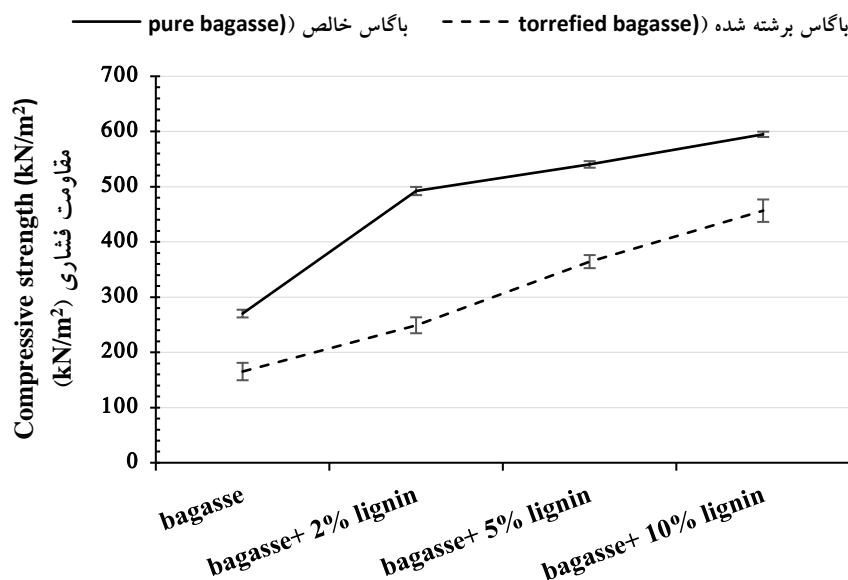
Figure 3: The effect of torrefaction process and lignin on the amount of moisture of fuel briquettes

نقطه ذوب ثابتی می‌باشد که در دماهای بالا شروع به نرم شدن، ذوب شدن و مایع شدن می‌کند، این تغییر شکل پلاستیکی در لیگنین همراه با اعمال فشار منجر می‌شود تا لیگنین و سلولز به هم متصل و جامد شوند (Sharif Ahmed *et al.*, 2008; Olugbade *et al.*, 2019). از این رو افزایش تعداد نقاط اتصال بین ساختار فیبری بریکت منجر به افزایش مقاومت فشاری در بریکت‌های نهایی شده است (Afra *et al.*, 2021).

ارزش حرارتی بریکت‌ها که در واقع مهمترین ویژگی بریکت‌ها می‌باشد بسیار متأثر از پیش‌تیمار برشته‌سازی بوده است (شکل ۵). نتایج نشان دادند که بریکت‌های حاصل از باگاس برشته‌شده ارزش حرارتی بیشتری نسبت به بریکت‌های حاصل از باگاس معمولی داشته‌اند. در طول فرایند برشته‌سازی به دلیل تشکیل H_2O ، CO و CO_2 میزان O_2 و H_2 موجود در ساختار فیبری باگاس کاهش می‌یابد، در نتیجه نسبت C موجود در این ساختار فیبری در مقایسه با باگاس معمولی افزایش می‌یابد (Tumuluru *et al.*, 2010; Anukam *et al.*, 2016) از آنجایی که ارزش حرارتی بریکت‌ها رابطه مستقیمی با میزان

مقاومت فشاری بریکت‌های ساخته شده از باگاس معمولی در تمامی تیمارها به طور قابل توجهی بیشتر از باگاس برشته شده بوده است (شکل ۴). در طول برشته‌سازی، به دلیل فروپاشی ماتریس همی سلولزی و دی پلیمریزاسیون سلولزی طول الیاف زیست‌توده کاهش می‌یابد (Anukam *et al.*, 2016). از سوی دیگر، در فرایند برشته‌سازی تعداد قابل توجهی از گروه‌های OH موجود در ساختار فیبری باگاس حذف می‌شود که منجر به کاهش تعداد پیوندهای ایجاد شده بین ذرات در فرایند تولید بریکت‌سازی می‌گردد؛ این دو اتفاق منجر به کاهش مقاومت فشاری بریکت‌های حاصل شده است (Wu و همکاران، ۲۰۱۸). به عبارت دیگر نتایج نشان می‌دهند که در بریکت‌های حاصل از هر دو نوع باگاس، با افزایش درصد مصرف لیگنین مقاومت فشاری افزایش یافته است، به طوری که در بریکت حاصل از باگاس معمولی مقاومت فشاری در نتیجه افزودن ۲، ۵ و ۱۰ درصد لیگنین از 270 kN/m^2 به ترتیب به حدود 490 ، 540 و 590 kN/m^2 رسید و در باگاس برشته شده از 165 kN/m^2 به ترتیب به حدود 250 ، 360 و 460 kN/m^2 رسید. لیگنین یک پلیمر آروماتیک بدون ساختار کریستالی و بدون هیچ

کربن موجود در ساختار الیاف دارد، ارزش حرارتی بریکت- های حاصل از باگاس برشته شده با نسبت کربن بیشتر، بیشتر از بریکت‌های حاصل از باگاس معمولی بوده است (Negi and Sadaka, 2009).



شکل ۴- تأثیر فرایند برشته‌سازی و لیگنین بر مقاومت فشاری بریکت‌های سوختی

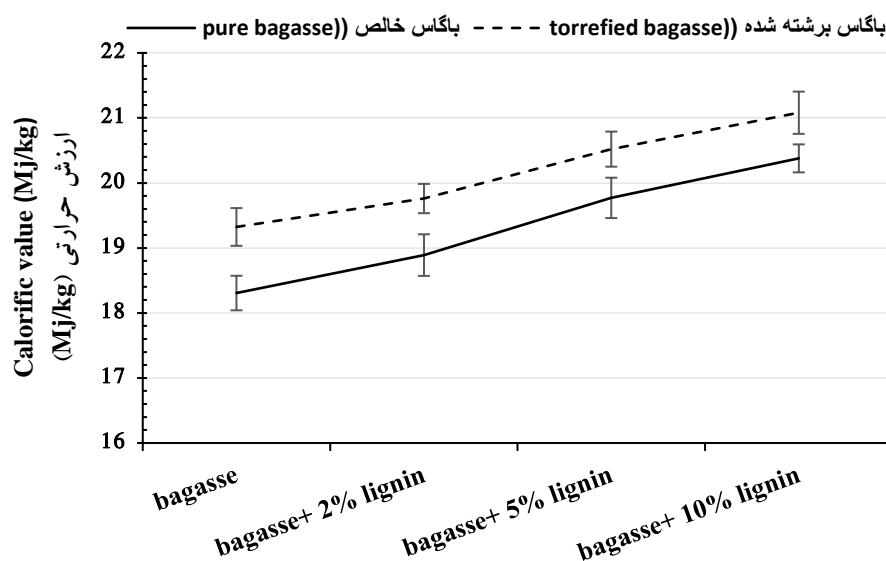
Figure 4. The effect of torrefaction process and lignin on the compressive strength of fuel briquettes

در حالی است که ارزش حرارتی باگاس معمولی حدود $19/3 \text{ MJ/kg}$ و باگاس برشته‌شده حدود $18/3 \text{ MJ/kg}$ باشد که نشان می‌دهد ارزش حرارتی این زیست‌توده تقریباً برابر با چوب است. درحالی‌که استفاده از اتصال‌دهنده توانسته به‌طور قابل توجهی ارزش حرارتی بریکت‌های حاصل را افزایش دهد و با اعمال فرایند برشته‌سازی و افزودن ۱۰ درصد لیگنین به حدود $21/08 \text{ MJ/kg}$ برساند که بیشتر از ارزش حرارتی چوب است.

نتایج نشان دادند که درصد خاکستر بریکت حاصل از باگاس برشته شده حدود ۱ درصد بیشتر از بریکت حاصل از باگاس معمولی بوده است (شکل ۶). در فرایند برشته‌سازی به‌دلیل افت جرم در هنگام افزایش دما که موجب تجمع غلظت‌های زیاد عناصر فلزی می‌شود مقدار خاکستر افزایش می‌یابد، زیرا مواد زیست‌توده معمولاً دارای غلظت زیاد عناصر فلزی هستند (Xue et al., 2014).

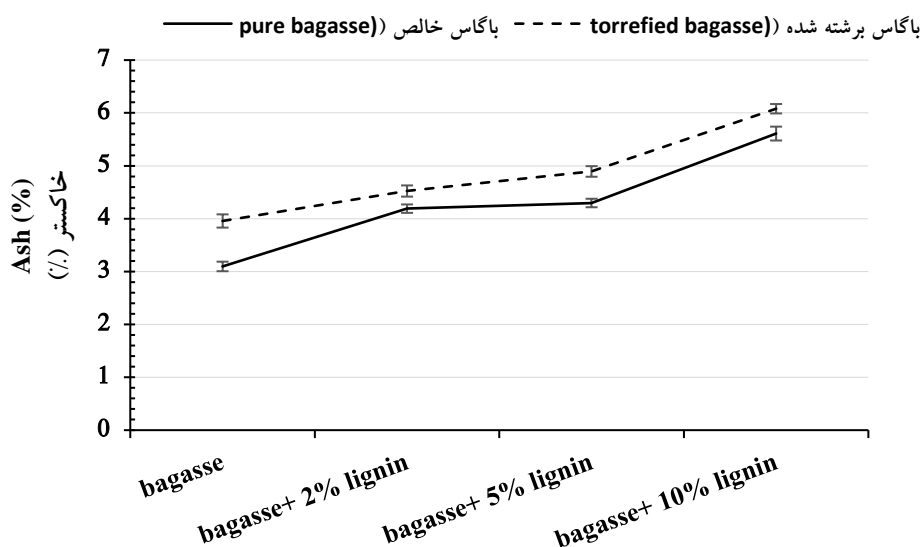
در بررسی اثر لیگنین نتایج نشان دادند که با افزایش درصد لیگنین میزان ارزش حرارتی در بریکت‌های حاصل از هر دو نوع باگاس افزایش قابل توجهی داشته است. اتصال‌دهنده‌ها از طریق افزایش دانسیته بریکت‌ها منجر به افزایش ارزش حرارتی آنها می‌شوند (Tamilvanan, 2013). این افزایش می‌تواند علاوه بر اثر لیگنین بر افزایش دانسیته بریکت‌ها، به‌دلیل بالا بودن ارزش حرارتی خود لیگنین نسبت به سلولز و همی‌سلولز نیز باشد (Oliveira and Setter, 2022; Patil, 2017).

طبق گزارش برخی از محققان مانند Onuegbu و همکاران (Lee, 2015) و Lunguleasa و همکاران (2020) ارزش حرارتی چوب در بخش‌های مختلف بین 18 (MJ/kg) تا 20 (MJ/kg) می‌باشد که به‌طور تقریبی در بیشتر گونه‌ها بیشترین میزان ارزش حرارتی مربوط به شاخه و شاخ و برگ می‌باشد که حدود 20 (MJ/kg) گزارش شده است. این



شکل ۵- تأثیر فرایند برشته‌سازی و لیگنین بر ارزش حرارتی بریکت‌های سوختی

Figure 5. The effect of torrefaction process and lignin on the calorific value of fuel briquettes



شکل ۶- تأثیر فرایند برشته‌سازی و لیگنین بر میزان خاکستر بریکت‌های سوختی

Figure 6. The effect of torrefaction process and lignin on the amount of ash of fuel briquettes

خاکستر آنها به ترتیب به میزان ۲/۵۱ و ۲/۱۲٪ افزایش یافت. بر اساس گزارش‌ها در میان ترکیبات اصلی تشکیل‌دهنده الیاف، لیگنین دارای بیشترین میزان درصد خاکستر می‌باشد (Stefanidis *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2016)

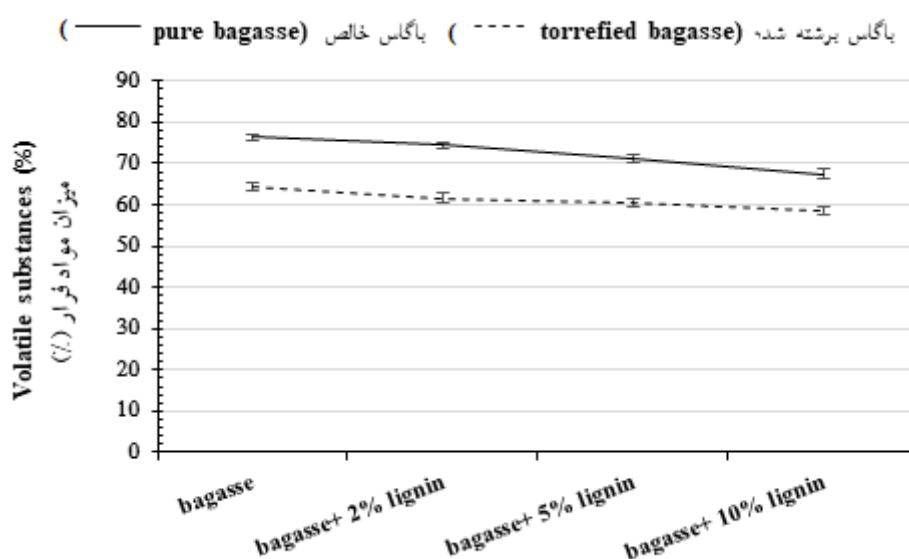
همچنین نتایج نشان دادند که با افزایش میزان مصرف لیگنین نیز میزان خاکستر بریکت‌ها افزایش یافت، به طوری که با افزودن میزان ۱۰ درصد لیگنین به ترکیب بریکت حاصل از باگاس معمولی و باگاس برشته‌شده درصد

که این موضوع می‌تواند دلیل اصلی بیشتر شدن درصد خاکستر در بریکت‌های حاوی اتصال‌دهنده لیگنین باشد. از سوی دیگر، در فرایند برشته‌سازی نیز درصد لیگنین موجود در الیاف به دلیل افت سلولز و همی سلولز موجود در آنها در مراحل اولیه برشته‌سازی افزایش می‌یابد که این خود می‌تواند دلیل دیگری برای زیاد بودن درصد خاکستر بریکت‌های حاصل از باگاس برشته‌شده نسبت به باگاس معمولی باشد.

بر اساس نتایج، عمل برشته‌سازی منجر به کاهش میزان مواد فرار موجود در بریکت‌ها شده است، به طوری که مقدار مواد فرار در بریکت‌های حاصل از باگاس برشته شده حدود ۱۲ درصد کمتر از بریکت‌های حاصل از باگاس معمولی بوده است (شکل ۷). در طول فرایند برشته‌سازی مقادیر قابل توجهی از O_2 و H_2 موجود در زیست توده به دلیل تشکیل گازهای H_2O ، CO و CO_2 کاهش می‌یابد.

این کاهش منجر به افت دود و کاهش تشکیل بخار آب و در نتیجه کاهش مواد فرار در بریکت‌های حاصل می‌شود (Tumuluru et al., 2010; Reis Portilho et al., 2020).

اثر لیگنین بر میزان مواد فرار نیز قابل توجه بوده است، در بریکت‌های حاصل از باگاس معمولی میزان مواد فرار با افزایش میزان لیگنین کاهش یافته است، در حالی که در بریکت‌های حاصل از باگاس برشته‌شده لیگنین تأثیر قابل توجهی بر میزان مواد فرار نداشت. در برخی از پژوهش‌ها گزارش شده است که حضور لیگنین به عنوان اتصال‌دهنده در ساختار بریکت، می‌تواند از طریق کاهش مقدار سولفور موجود در بریکت در طول احتراق از طریق فرایند اتصال شیمیایی منجر به کاهش مواد فرار موجود در بریکت‌ها و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده‌ها به محیط زیست شود (Wang et al., 2017; Kim et al., 2002).



شکل ۷- تأثیر فرایند برشته‌سازی و لیگنین بر میزان مواد فرار بریکت‌های سوختی

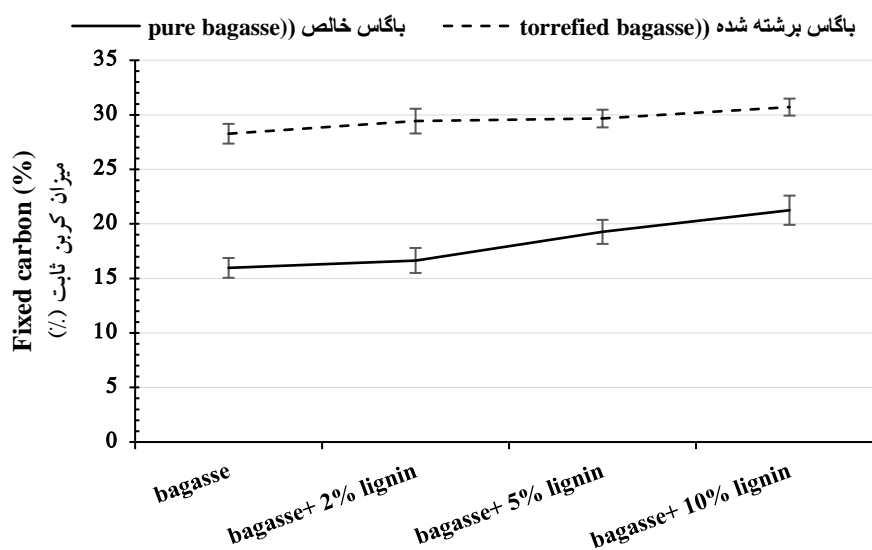
Figure 7. The effect of torrefaction process and lignin on the volatile substances of fuel briquettes

میزان کربن ثابت موجود در بریکت‌های حاصل از باگاس برشته‌شده به طور قابل توجهی بیشتر از باگاس معمولی بوده

است. از آنجاکه در فرایند برشته‌سازی میزان رطوبت موجود در باگاس به طور قابل توجهی کاهش یافت و از سوی دیگر

قابل توجهی میزان رطوبت (شکل ۳) و همچنین میزان مواد فرار (شکل ۷) موجود در بریکت‌ها را کاهش داده است. از آنجاکه میزان کربن ثابت در نتیجه کسر میزان رطوبت، مواد فرار و خاکستر موجود در بریکت‌ها از ۱۰۰ محاسبه می‌شود، در نتیجه کاهش هریک از این ترکیبات منجر به افزایش میزان کربن ثابت در بریکت‌های حاصل شده است (Anukam *et al.*, 2015).

مقدار مواد فرار نیز در فرایند برشته‌سازی کاهش پیدا کرد، در وزن برابر زیست‌توده، میزان کربن موجود در باگاس حاصل از زیست‌توده برشته‌شده بیشتر شد (Anukam *et al.*, 2016). نتایج نشان دادند که اثربخشی لیگنین بر میزان کربن ثابت در بریکت‌های حاصل از باگاس معمولی به‌طور قابل توجهی بیشتر از بریکت‌های حاصل از باگاس برشته‌شده بوده است (شکل ۸). وجود لیگنین در ساختار فیبری بریکت‌ها به‌طور



شکل ۸- تأثیر فرایند برشته‌سازی و لیگنین بر میزان کربن ثابت بریکت‌های سوختی

Figure 8. The effect of torrefaction process and lignin on the fixed carbon of fuel briquettes

برشته‌سازی نسبت C موجود در این ساختار فیبری در مقایسه با باگاس معمولی افزایش می‌یابد (Anukam *et al.*, 2016; Tumuluru *et al.*, 2010). از آنجایی که ارزش حرارتی بریکت‌ها رابطه مستقیمی با میزان کربن موجود در ساختار الیاف دارد، ارزش حرارتی بریکت‌های حاصل از باگاس برشته شده افزایش یافت (Negi and Sadaka, 2009). در نتیجه استفاده از این پیش تیمار توانست با کاهش رطوبت و مواد فرار زیست‌توده میزان کربن ثابت و در نتیجه ارزش حرارتی بریکت‌های تولید شده را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد، به‌گونه‌ای که اعمال این پیش تیمار ارزش حرارتی زیست‌توده باگاس را از ۱۸ MJ/kg به

بحث

با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان کرد که فرایند برشته‌سازی از طریق کاهش رطوبت زیست‌توده و تخریب و تغییر ساختار لیگنوسلولوزی آن قادر به افزایش قابل توجه در ویژگی‌های حرارتی بریکت‌های حاصل می‌گردد که در واقع مهمترین ویژگی در تولید و قابلیت مصرف بریکت‌های سوختی است. در فرایند برشته‌سازی چگالش گرمایی منجر به وقوع برخی واکنش‌های شیمیایی و حذف همی‌سلولز زیست‌توده که عامل اصلی در جذب رطوبت است می‌گردد (Anukam *et al.*, 2016). از سوی دیگر به‌دلیل تشکیل گازهای H_2O ، CO و CO_2 در طول فرایند

اتصال بین ساختار بریکت‌ها توانست تأثیر مثبتی در تغییر و افزایش مقاومت به فشار بریکت‌های حاصل از باگاس و مخلوط سبوس برنج، دانه ذرت و باگاس داشته باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که استفاده از لیگنین به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده قابلیت استفاده از پیش‌تیمار برشته‌سازی برای افزایش کاربرد بریکت از باگاس به‌عنوان منبع سوخت جایگزین را افزایش می‌دهد.

منابع مورد استفاده

- Afra, E., Abyaz, A. and Saraeyan, A., 2021. The production of bagasse biofuel briquettes and the evaluation of natural binders (LNFC, NFC, and lignin) effects on their technical parameters. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123543.
- Akay, G. and Jordan, C.A., 2011. Gasification of fuel cane bagasse in a downdraft gasifier: influence of lignocellulosic composition and fuel particle size on syngas composition and yield. *Energy & Fuels*, 25(5), 2274-2283.
- Al-Widyan, M.I., Al-Jalil, H.F., Abu-Zreig, M.M. and Abu-Hamdeh, N.H., 2002. Physical durability and stability of olive cake briquettes. *Canadian Biosystems Engineering*, 44, 3-41.
- Anukam, A.I., Mamphweli, S.N., Reddy, P. and Okoh, O.O., 2016. Characterization and the effect of lignocellulosic biomass value addition on gasification efficiency. *Energy exploration & exploitation*, 34(6), 865-880.
- Anukam, A., Mamphweli, S., Reddy, P., Okoh, O. and Meyer, E., 2015. An investigation into the impact of reaction temperature on various parameters during torrefaction of sugarcane bagasse relevant to gasification. *Journal of Chemistry*.
- Araújo, S., Boas, M.A.V., Neiva, D.M., de Cassia Carneiro, A., Vital, B., Breguez, M. and Pereira, H., 2016. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. *Biomass and Bioenergy*, 90, 181-186.
- Arias, B., Pevida, C., Feroso, J., Plaza, M.G., Rubiera, F., and Pis, J.J., 2008. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Processing Technology*, 89(2), 169-175.
- Barroso, J., Barreras, F., Amaveda, H. and Lozano, A., 2003. On the optimization of boiler efficiency using bagasse as fuel. *Fuel*, 82(12), 1451-1463.
- Basu, P., 2010. *Biomass gasification and pyrolysis:*

حدود ۲۰ MJ/kg رساند که این ارزش حرارتی برابر است با ارزش حرارتی چوب که بین ۱۸ MJ/kg تا ۲۰ می‌باشد (Lunguleasa et al., 2020). همان‌طور که پیش‌تر هم گفته شد در طول فرایند برشته‌سازی مقادیر قابل توجهی از O₂ و H₂ موجود در زیست‌توده به‌دلیل تشکیل گازهای CO، H₂O و CO₂ کاهش می‌یابد (Tumuluru et al., 2010) و این کاهش منجر به افت دود و کاهش تشکیل بخار آب و در نتیجه کاهش مواد فرار در بریکت‌های حاصل می‌شود (Reis Portilho et al., 2020). از آنجایی‌که ارزش حرارتی لیگنین بیشتر از سایر اجزای لیگنوسلولزی می‌باشد، در نتیجه افزودن این ماده به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده ارزش حرارتی بریکت‌های تولید شده افزایش یافت که می‌تواند به‌دلیل بالا بودن ارزش حرارتی خود لیگنین نسبت به سلولز و همی‌سلولز باشد (Oliveira and Setter, 2022). da Silva و همکاران (۲۰۲۱) افزودن لیگنین به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده به‌ساختار بریکت‌های حاصل از پسماندهای چوبی را به‌عنوان عامل افزایش‌دهنده ارزش حرارتی اعلام کردند که این گزارش با یافته‌های پژوهش ما کاملاً مطابقت دارد. در کنار تمام اثربخشی‌های مثبت پیش‌تیمار برشته‌سازی، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد به‌دلیل کوتاهی الیاف و کاهش اتصال بین الیاف در نتیجه برشته‌سازی مقاومت فشاری بریکت‌های تولید شده کاهش یافت که افزودن لیگنین به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده توانست این افت مقاومت را جبران کند. لیگنین یک پلیمر آروماتیک بدون ساختار کریستالی و بدون هیچ نقطه ذوب ثابتی می‌باشد که در دماهای بالا شروع به نرم شدن، ذوب شدن و مایع شدن می‌کند، این تغییر شکل پلاستیکی در لیگنین همراه با اعمال فشار منجر می‌شود تا لیگنین و سلولز به هم متصل و جامد شوند (Sharif Ahmed et al., 2008; Olugbade et al., 2019). از این‌رو افزایش تعداد نقاط اتصال بین ساختار فیبری بریکت منجر به افزایش مقاومت فشاری در بریکت‌های نهایی شده است. نتایج حاصل از این بخش مشابه با نتایج گزارش شده توسط Afra و همکاران (۲۰۲۱) و Muazu و Stegemann در سال (۲۰۱۷) می‌باشد. آنان نیز گزارش کردند که لیگنین از طریق افزایش میزان

- physical and thermochemical characteristics via torrefaction process. *Environmental Progress & Sustainable Energy: An Official Publication of the American Institute of Chemical Engineers*, 28(3), 427-434.
- Setter, C. and Oliveira, T.J.P., 2022. Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis. *Renewable Energy*, 189, 1007-1019.
- Sharif Ahmed, M., Mizanur Rahman, M., Islam, A., Mohammad Mashud, M., Moral, and Ali, N., 2008. Role of biomass briquetting in the renewable energy sector and poverty diminution for bangladesh. *Proceedings of the 4th BSME-ASME International Conference on Thermal Engineering*, 739- 747.
- Stefanidis, S.D., Kalogiannis, K.G., Iliopoulou, E.F., Michailof, C.M., Pilavachi, P.A. and Lappas, A.A., 2014. A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 105, 143-150.
- Stelte, W., Sanadi, A.R., Shang, L., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J. and Henriksen, U.B., 2012. Recent developments in biomass pelletization—A review. *BioResources*, 7(3), 4451-4490.
- Tamilvanan, A., 2013. Preparation of Biomass Briquettes using Various AgroResidues and Waste Papers. *Journal of Biofuels*, 4(2), 47-55.
- Teixeira, S.R., de Souza, A.E., Peña, A.F.V., de Lima, R.G. and Miguel, Á.G., 2011. Use of charcoal and partially pyrolysed biomaterial in fly ash to produce briquettes: sugarcane bagasse. In *Alternative Fuel*. IntechOpen.
- Tumuluru, J.S., Wright, C.T., Kenny, K.L. and Hess, J.R., 2010. A review on biomass densification technologies for energy application. *A technical report prepared for the U.S Department of Energy. Contract DE-AC07-05ID14517*.
- Uslu, A., Faaij, A.P. and Bergman, P.C., 2008. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, 33(8), 1206-1223.
- Wang, J., Feng, L., Tang, X., Bentley, Y. and Höök, M., 2017. The implications of fossil fuel supply constraints on climate change projections: A supply-side analysis. *Futures*, 86, 58-72.
- Wu, S., Zhang, S., Wang, C., Mu, C. and Huang, X., 2018. High-strength charcoal briquette preparation from hydrothermal pretreated biomass wastes. *Fuel Processing Technology*, 171, 293-300.
- Xue, G., Kwapinska, M., Kwapinski, W., Czajka, K.M., *practical design and theory*. Academic press.
- Bergman, P.C.A., 2005. Combined torrefaction and pelletisation. *The TOP process*, 399.
- Demirbas, A., 2009. Sustainable charcoal production and charcoal briquetting. *Energy Sources, Part A*, 31(19), 1694-1699.
- Kaliyan, N. and Morey, R.V., 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and bioenergy*, 33(3), 337-359.
- Kim, H., Lu, G., Li, T. and Sadakata, M., 2002. Binding and desulfurization characteristics of pulp black liquor in biocoal briquettes. *Environmental science & technology*, 36(7), 1607-1612.
- Kurian, J.K., Nair, G.R., Hussain, A. and Raghavan, G.V., 2013. Feedstocks, logistics and pre-treatment processes for sustainable lignocellulosic biorefineries: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 205-219.
- Lee, J.S., 2015. Calorific value of wood pellets (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Lunguleasa, A., Spirchez, C. and Zeleniuc, O., 2020. Evaluation of the calorific values of wastes from some tropical wood species. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22(3), 269-280.
- Muazu, R.I. and Stegemann, J.A., 2015. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. *Fuel Processing Technology*, 133, 137-145.
- Muazu, R.I. and Stegemann, J.A., 2017. Biosolids and microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting. *Fuel*, 194, 339-347.
- Olugbade, T., Ojo, O. and Mohammed, T., 2019. Influence of binders on combustion properties of biomass briquettes: a recent review. *BioEnergy Research*, 12(2), 241-259.
- Onuegbu, T.U., Ogbu, I.M. and Ejikeme, C., 2012. Comparative analyses of densities and calorific values of wood and briquettes samples prepared at moderate pressure and ambient temperature. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 2(1), 40-45.
- Patil, R.A., 2017. Dry Sugarcane Leaves: Renewable Biomass resources for Making Briquettes. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 10(1), 232- 235.
- Reis Portilho, G., Resende de Castro, V., de Cássia Oliveira Carneiro, A., Cola Zanuncio, J., José Vinha Zanuncio, A., Gabriella Surdi, P. and de Oliveira Araújo, S., 2020. Potential of Briquette Produced with Torrefied Agroforestry Biomass to Generate Energy. *Forests*, 11(12), 1272.
- Sadaka, S. and Negi, S., 2009. Improvements of biomass

- Bjornbom, E., (2002, May). Biomass torrefaction. In *the 6th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Kuala Lumpur*.
- Zhao, C., Jiang, E. and Chen, A., 2017. Volatile production from pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. *Journal of the Energy Institute*, 90(6), 902-913.
- Kennedy, J. and Leahy, J.J., 2014. Impact of torrefaction on properties of *Miscanthus× giganteus* relevant to gasification. *Fuel*, 121, 189-197.
- Yank, A., Ngadi, M., and Kok, R., 2016. Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications. *Biomass and Bioenergy*, 84, 22-30.
- Zanzi, R., Ferro, D.T., Torres, A., Soler, P.B. and

Investigating the effect of lignin on the negative effects of the torrefaction process in the production of briquettes from bagasse

M. Salehi Siahdashti¹, M. Talaeipour^{2*}, H. Khademieslam³ and B. Bazyar⁴

1-PhD Candidate, Department of Wood and Paper industry, faculty of natural resources and environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2*-Corresponding author, Associate Professor, Department of Wood and Paper industry, faculty of natural resources and environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,
Email: m.talaeipour@srbiau.ac.ir

3-Professor, Department of Wood and Paper industry, faculty of natural resources and environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4-Associate Professor, Department of Wood and Paper industry, faculty of natural resources and environment, Science and Research Branch Islamic Azad University, , Tehran, Iran

Received: Aug., 2022

Accepted: Sep., 2022

Abstract

The application of various pretreatments, including the torrefaction process, to increase the efficiency and optimizing the consumption of fuel briquettes, have attracted considerable attention in recent years. Therefore, in this research, torrefaction pretreatment at 180 °C temperature was used to modify bagasse biomass. In addition, lignin binding agent was used at levels of 2, 5 and 10%. Fuel briquettes weighing 30 grams were prepared using a manual briquetting machine. The physical, mechanical and thermal characteristics of the resulting briquettes were measured. The results showed that torrefaction pre-treatment by increasing the volumetric density and the amount of fixed carbon up to about 50% of the resulting briquettes was able to increase the heating value of the briquettes up to about 10%. On the other hand, this process led to a decrease in the compressive strength of the resulting briquettes, as a consequence of using lignin as a binding agent which could compensate a significant amount of mechanical loss. The results showed that the volume of volatile substances of briquettes was reduced by 9% with torrefaction pre-treatment, which has a significant effect on reducing the pollution of these briquettes. It was also observed that with the increase in the consumption of lignin, the density and calorific value increased. In general, the results of this research show that the use of lignin binding agent together with torrefaction pre-treatment can make the production of high-quality fuel briquettes from bagasse possible.

Keywords: Biomass, fossil fuels, briquettes, bagasse, torrefaction pre-treatment.