Archive of SID

جنگل و فرآورده‌های چوب، مجلهٔ منابع طبیعی ایران
دورهٔ ۷۲، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۸
ص ۳۶۵-۳۷۶

دانشکده منابع طبیعی
دانشگاه تهران

DOI: 10.22059/jfwp.2020.294871.1055

تولید بریکت‌های سوختی باگاس تقویت‌شده به‌وسیلهٔ اتصال‌دهنده‌های نانوسلولز و نانولیگنوسلولز

علی ابیض[1*]، الیاس افرا[2]، احمدرضا سرائیان[2]

۱. دانشجوی دکتری صنایع خمیر و کاغذ، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۷ ، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۱

چکیده

تبدیل پسماندهای زیست‌توده مانند باگاس به‌عنوان منابع لیگنوسلولزی فراوان و در دسترس به سوخت‌های جامد زیستی می‌تواند جایگزین مناسب منابع سوخت‌های فسیلی و آلایندهٔ محیط زیست باشد. هدف تحقیق حاضر، تولید بریکت‌های سوختی از دو طبقهٔ ابعادی خرده‌باگاس و باگاس آسیاب‌شده است. از اتصال‌دهنده‌های لیگنوسلولزی نانومتری شامل نانولیگنوسلولز (LCNF) و نانوسلولز (CNF) در سه سطح ۳، ۶ و ۹ درصد به‌منظور تقویت و بهبود پارامترهای فنی و حرارتی استفاده شد. بریکت‌ها به روش متراکم‌سازی با سیلندر و پیستون در فشار ۱۵۰ MPa و دمای ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس تولید شدند. نتایج اثر مثبت اتصال‌دهنده‌های لیگنوسلولزی نانومتری بر ویژگی‌های مقاومتی و حرارتی را نشان دادند. بدین ترتیب نانولیگنوسلولز بر خواص فیزیکی و مکانیکی تأثیر بیشتری نسبت به اتصال‌دهندهٔ نانوسلولز در هر دو طبقهٔ ابعادی داشتند. همچنین در خصوص ویژگی‌های حرارتی اتصال‌دهندهٔ نانولیگنوسلولز نتایج بهتری را در بریکت‌های سوختی نشان داد. در مجموع، نانولیگنوسلولز را می‌توان اتصال‌دهندهٔ مناسب‌تری معرفی کرد؛ چراکه هزینه‌های تولید آن در مقایسه با نانوسلولز کمتر و ارزش حرارتی بریکت حاصل به‌دلیل وجود لیگنین در ترکیب آن بیشتر است. به‌طوری که در سطح استفادهٔ ۹ درصد مقاومت فشاری و ارزش حرارتی آن برای خرده‌باگاس و باگاس آسیاب‌شده به‌ترتیب ۳۴/۳۷ N.mm، MJ/Kg ۱۹/۸۵ و ۲۹/۴۵ N.mm، MJ/Kg ۱۹/۸۵ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: اتصال‌دهنده، باگاس، بریکت سوختی، نانوسلولز، نانولیگنوسلولز.

مقدمه

امنیت انرژی همراه با کاهش مؤثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش تغییرات زیست‌محیطی پیامد آن، کشورهای جهان را به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ترغیب کرده است. زیست‌تودهٔ لیگنوسلولزی منبع تجدیدپذیر، پایدار و سازگار با محیط زیست و تنها منبع کربنی است که می‌تواند به انواع شکل‌های سوخت جامد، مایع و گاز تبدیل شود [۱، ۲]. در ایران مقادیر عظیم پسماندهای زراعی و صنایع فرآوری، زمینه‌های گسترده‌ای را در راستای تحقیق و توسعهٔ کاربرد سوخت‌های زیستی فراهم کرده است. احتراق مستقیم زیست‌توده با چالش‌های رطوبت زیاد، چگالی حجمی کم، پتانسیل انرژی اندک، انتشار گازهای ناسازگار با محیط و هزینه‌های حمل‌ونقل و انبارداری زیاد همراه است [۳]. تبدیل بخشی از باگاس در دسترس در جنوب ایران (حدود ۲ میلیون تن در سال) به بریکت‌های سوختی به‌عنوان سوخت جامد زیستی با هدف تولید حرارت و الکتریسیته می‌تواند

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۹۱۹۹۱۴۹۵۰۰
Email: Aliabyaz14@gmail.com

www.SID.ir

Archive of SID

راهکار استفاده مؤثر از این ضایعات باشد. متغیرهای مادهٔ اولیه و فرایندی نقش مهمی در تولید این نوع سوخت‌ها دارند. بی‌گمان ساختار مورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی مواد اولیهٔ مصرفی، تأثیر زیادی بر ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی بریکت‌های سوختی دارند [۳]. متراکم کردن ذرات زیست‌توده به شکل‌ها و اندازه‌های مشخص، با اعمال نیروی مکانیکی در حضور دما با ایجاد پیوندهای بین‌ذره‌ای انجام می‌گیرد. بروز رفتار پلاستیکی و الاستیکی در حین فشردگی در اجزای مادهٔ لیگنوسلولزی موجب اتصال و جمود بهتر محصول نهایی می‌شود. عوامل اتصال‌دهندهٔ طبیعی ذرات زیست‌توده مثل لیگنین، پروتئین و نشاسته نقش مهمی دارند. از طرف دیگر با توجه به اینکه سازوکار احتمالی اتصال ایجاد پل‌های جامد است، با اعمال فشار و دماهای زیاد از طریق نفوذ مولکول‌ها از ذره‌ای به ذرهٔ دیگر در نقاط اتصال این پل‌های جامد گسترش می‌یابند. نقش رطوبت زیست‌توده نیز در ژلاتینی شدن نشاسته، کاهش دمای شیشه‌ای لیگنین و تشکیل پل‌های مایع بین ذرات از طریق نیروهای مویینگی و کشش سطحی حیاتی و مهم است [۵-۳]. همچنین پیوندهای درهم‌رفتگی مکانیکی[۱] الیاف، ذرات مسطح[۲] و بالکی، از نیروهای گسیختگی ناشی از نیروهای الاستیک به دنبال فشار جلوگیری می‌کنند و نقش مهمی در اتصال دارند [۴، ۵]. در مواردی کم بودن توانایی اتصال و فاز پلاستیکی و الاستیکی ضعیف در زیست‌توده به‌ویژه در پسماندهای کشاورزی، سبب چگالی و دوام کم می‌شود. اتصال‌دهنده‌های متفاوتی در ترکیب با زیست‌توده برای افزایش شاخص دوام محصول استفاده شده‌اند. اتصال‌دهندهٔ جامد یا مایع، سبب تشکیل یک پل، فیلم، ماتریکس یا واکنش شیمیایی برای ایجاد پیوند بین ذرات قوی می‌شود [۶]. کاربرد انواع اتصال‌دهندهٔ معدنی مثل بنتونیت، کلسیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات، خاک رس (کلی) سبب بروز مشکلات خاکستر در فرایند احتراق، کاهش ارزش گرمایی و همچنین نشر گازهای NO_x و SO_x می‌شود. آرد گندم، خمیرکاغذ و کربوهیدرات‌هایی مثل فروکتوز و ساکارز به‌عنوان اتصال‌دهنده‌های آلی در ترکیب سوخت جامد زیستی استفاده شده‌اند. اتصال‌دهنده‌هایی مثل آرد گندم و نشاسته می‌توانند ارزش حرارتی و کربن ثابت فراورده‌ها را کاهش دهند [۵، ۷]. در این زمینه، تمرکز تحقیق حاضر، بهینه‌سازی استفاده از مواد لیفی لیگنوسلولزی به‌عنوان اتصال‌دهنده است. ازآنجا که ترکیبات اصلی الیاف لیگنوسلولزی شامل سلولز، همی‌سلولز و لیگنین به لحاظ ساختار فیزیکی و شیمیایی متفاوت هستند، می‌توانند از نظر نوع پیوند مؤثر در اتصال و میزان پیوند نقش متفاوتی را به‌عنوان اتصال‌دهنده ایفا کنند. بنابراین هدف اصلی این مطالعه مقایسهٔ استفاده از نانولیگنوسلولز[۳] (LCNF) و نانوسلولز[۴] (CNF) بر ویژگی‌های فنی بریکت‌های سوختی به‌منظور بررسی تأثیر هر یک از ساختارهای شیمیایی تشکیل‌دهندهٔ الیاف لیگنوسلولزی به‌صورت مجزاست. ازآنجا که یکی از مهم‌ترین عوامل پیوند اتصال‌دهنده‌ها، گروه‌های عاملی در دسترس آنهاست، سطح مؤثر در واحد وزن این مواد می‌تواند نقش مهمی در مقدار و نوع اتصالات داشته باشد. در این راستا کاهش ابعاد اتصال‌دهنده‌های لیگنوسلولزی به ابعاد نانو، نسبت سطح به وزن را هزاران بار افزایش می‌دهد و می‌تواند استفادهٔ مؤثرتر این مواد به لحاظ افزایش گروه‌های عاملی در دسترس و نیز افزایش پیوندهای درهم‌رفتگی مکانیکی را نتیجه دهد.

مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر از باگاس نیشکر کارخانه‌های MDF جنوب ایران استفاده شد. باگاس‌ها تا رطوبت ۱۰ درصد خشک و در کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شدند. جدول ۱ دسته‌بندی تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد.

۱. Interlocking mechanical
۲. Flat
۳. Ligno Cellulose Nano Fiber
۴. Cellulose Nano Fiber

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. تیمارهای مختلف بریکت‌های سوختی

شاهد	نانوسلولز (CNF)	نانولیگنوسلولز (LCNF)
خرده‌باگاس	۳٪ نانوسلولز + خرده‌باگاس	۳٪ نانولیگنوسلولز + خرده‌باگاس
	۶٪ نانوسلولز + خرده‌باگاس	۶٪ نانولیگنوسلولز + خرده‌باگاس
	۹٪ نانوسلولز + خرده‌باگاس	۹٪ نانولیگنوسلولز + خرده‌باگاس
باگاس آسیاب‌شده	۳٪ نانوسلولز + باگاس آسیاب‌شده	۳٪ نانولیگنوسلولز + باگاس آسیاب‌شده
	۶٪ نانوسلولز + باگاس آسیاب‌شده	۶٪ نانولیگنوسلولز + باگاس آسیاب‌شده
	۹٪ نانوسلولز + باگاس آسیاب‌شده	۹٪ نانولیگنوسلولز + باگاس آسیاب‌شده

بریکت‌ها در ماشین بریکت‌ساز با فشار عمودی توسط سیلندر و پیستون استوانه‌ای (قطر ۵۰ میلی‌متر، ارتفاع ۳۰ میلی‌متر) در فشار ۱۵۰ MPa و دمای ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس ساخته شدند. چگالی حجمی آنها از تقسیم جرم نمونه‌ها (برحسب Kg) بر حجم آنها (برحسب m^3) و براساس استاندارد ASAE S269.4 اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری براساس استاندارد ASTM D2166-85 اندازه‌گیری شد. بدین منظور بریکت‌ها به‌صورت افقی بین دو فک دستگاه قرار داده شدند. بارگذاری تا ۵۰ KN با سرعت بارگذاری ۰/۳۰۵ mm/min تا زمانی که بریکت شکسته شود اعمال شد. سپس مقاومت فشاری در محل شکست براساس معادلهٔ ۱ محاسبه شد:

$$\text{compressive strength in cleft} = \frac{3\times \text{the load fracture point}(\text{N})}{(L_1(\text{mm})+L_2(\text{mm})+L_3(\text{mm}))} \quad (۱)$$

در معادلهٔ بالا L_1، L_2 و L_3 ارتفاع بریکت در سه نقطهٔ ۱، ۲ و ۳ براساس میلی‌متر هستند.

نقاط شکست میان الیاف با بزرگنمایی ۲۰۰ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LEO-1455 VP عکس‌برداری شد.

برای آنالیز تقریبی[۱]، درصد خاکستر براساس استاندارد ASTM E1755-01 (2007) و مواد فرار[۲] براساس استاندارد ASTM E872-72 (1998) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری کربن ثابت[۳] شامل باقی‌ماندهٔ جامد قابل سوختن یک ماده پس از خارج شدن مواد فرار آن است. کربن ثابت با کسر مجموع درصد رطوبت، مواد فرار و خاکستر از صد محاسبه می‌شود.

اندازه‌گیری ارزش حرارتی[۴]

ارزش حرارتی بریکت‌ها توسط بمب کالری‌متر اندازه‌گیری شد. بمب کالری‌متر برای تعیین دقیق ارزش حرارتی هیدروکربن‌های جامد و مایع و سوخت‌های دیگر به‌عنوان روش مستقیم اندازه‌گیری ارزش حرارتی کاربرد دارد. ارزش حرارتی بریکت‌ها براساس استاندارد ASTM E711-87 (2012) و معادلهٔ ۲ اندازه‌گیری شد [۸].

$$Q = \frac{(C_{water} + C_{cal})(T_2 - T_1)}{W_f} \quad (۲)$$

Q ارزش حرارتی (kJ/kg)، C_{water} ظرفیت حرارتی آب (kJ/kg°C)، C_{cal} ظرفیت حرارتی بمب کالری‌متر (kJ/kg°C)، Wf وزن اولیهٔ نمونه و (T_2-T_1) اختلاف درجهٔ حرارت است.

نتایج و بحث

برهمکنش باگاس و اتصال‌دهنده‌های نانومتری

آگاهی از ترکیبات سازندهٔ زیست‌تودهٔ لیگنوسلولزی در تبدیل آن به فراورده‌های باارزش‌تر مانند بریکت و پلت که از انواع متداول سوخت‌های جامد زیستی هستند، بسیار

۱. Proximate analysis
۲. Volatile matter
۳. Fixed carbon
۴. Calorific value

www.SID.ir

Archive of SID

اهمیت دارد. مادهٔ اولیهٔ بررسی‌شده در این تحقیق باگاس نیشکر است. جدول ۲ ترکیبات شیمیایی باگاس را براساس منابع مختلف نشان می‌دهد. در طی متراکم کردن در دما و فشار زیاد نشاسته، پروتئین و لیگنین نقش اتصال‌دهنده‌های طبیعی را دارند و همانند چسب عمل می‌کنند و خواص کیفی فراوردهٔ حاصل را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مقدار نشاسته و پروتئین باگاس بسیار اندک است که ممکن است موجب کمبود فاز الاستیک و پیوندیابی شود. اگرچه مقدار لیگنین به‌طور میانگین ۲۳ درصد است که می‌تواند در ایجاد فاز پلاستیکی و الاستیکی و ارزش گرمایی بریکت تأثیرگذار باشد. برخلاف دیگر پسماندهای کشاورزی مانند کاه برنج و کاه گندم، باگاس، با داشتن مقدار خاکستر کمتر می‌تواند مادهٔ اولیهٔ مناسبی برای تولید بریکت‌های سوختی باشد. وجود خاکستر در طول فرایند احتراق سبب مشکلاتی می‌شود. همچنین مواد استخراجی ممکن است سبب ضعف قابلیت پیوندیابی الیاف شود.

جدول ۳ ویژگی‌های اتصال‌دهنده‌های لیگنوسلولزی نانومتری را نشان می‌دهد. گروه‌های عاملی مختلف در نانولیگنوسلولز (LCNF) و نانوسلولز (CNF) گویای ظرفیت پیوندیابی متفاوت این سه اتصال‌دهنده است [۱۱، ۱۲].

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی باگاس [۱۰-۸]

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی [۸]	درصد وزنی [۹]	درصد وزنی [۱۰]
سلولز	۴۲/۵۰	۴۳/۳	۵۵-۴۵
همی‌سلولزها	۲۴/۸۸	۲۵/۴۲	۲۵-۲۰
لیگنین	۲۰/۹۰	۲۳/۰۵	۲۴-۱۸
خاکستر	۱/۶۴	۴/۷۸	۴-۱
مواد استخراجی	۵/۸۳	۲/۹۲	۹-۱/۵

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اتصال‌دهنده‌های نانومتری

ماده	ویژگی فیزیکی	ویژگی شیمیایی
نانولیگنوسلولز	ساختار شبکه‌ای سطح ویژهٔ زیاد ژل قهوه‌ای ضریب لاغری زیاد	ظرفیت تبادل یونی گروه‌های هیدروکسیل زیاد گروه‌های کربوکسیل
نانوسلولز	ساختار کریستالی- آمورف خواص مقاومتی و انعطاف‌پذیری زیاد ضریب لاغری زیاد سطح ویژهٔ زیاد حالت ژلی چسبناک	تراکم بسیار زیاد گروه‌های هیدروکسیل

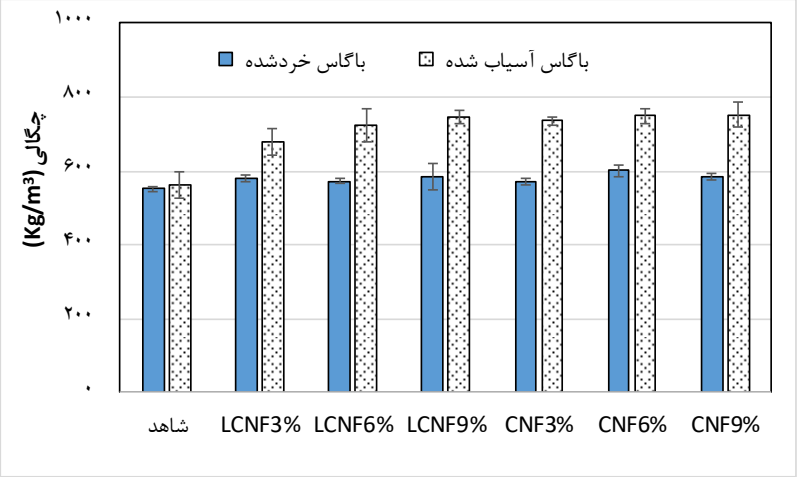
چگالی

یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر چگالی بریکت، برگشت‌پذیر نبودن ابعاد بریکت حذف فشار پرس است. ساختار فیزیکی و شیمیایی ذرات بریکت و ذرات اتصال‌دهنده برگشت‌پذیری ابعاد را تحت تأثیر قرار می‌دهند. شکل ۱ اثر اندازهٔ ذرات باگاس و اتصال‌دهنده‌های مختلف را بر چگالی بریکت نشان می‌دهد. باگاس آسیاب‌شده در همهٔ تیمارها در مقایسه با خرده‌باگاس، چگالی بیشتری از خود نشان داده است. در باگاس آسیاب‌شده، سطح ویژه زیاد نانوسلولز و نانو لیگنوسلولز و هم ذرات پودری باگاس سبب پیوندیابی مؤثر خیلی بیشتر می‌شود و برگشت‌پذیری ابعاد، بعد از

www.SID.ir

Archive of SID

حذف فشار پرس کمتر و در نهایت چگالی زیاد می‌شود. در واقع رطوبت موجود در زیست‌توده همراه با دما و فشارهای اعمال‌شده سبب نزدیک شدن ذرات به هم شده و نفوذ ذرات در هم، موجب تشکیل پل‌های جامد می‌شود. در اینجا ساختار شبکه‌ای نانوسلولز و نانولیگنوسلولز به ایجاد بریکت یکنواخت‌تر و متراکم‌تر با حداقل فضای خالی کمک کرده است. اثر نانولیگنوسلولز و نانوسلولز بر خرده‌باگاس و باگاس آسیاب‌شده، شایان توجه بوده است. نانولیگنوسلولز و نانوسلولز با داشتن گروه‌های عاملی فعال هیدروکسیل و دیگر گروه‌های اکسیژن‌دار مانند کربوکسیل با سطوح ذرات مادهٔ اولیه پل‌های مایع برقرار می‌کنند و دما به تبدیل این پل‌های مایع به جامد منجر می‌شود و در نتیجه برگشت‌پذیری ابعاد کم می‌شود و چگالی افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که تأثیر اتصال‌دهندهٔ نانوسلولز اندکی بهتر از اتصال‌دهندهٔ نانولیگنوسلولز است. همان‌طور که در بخش‌های پیش اشاره شد، مقدار لیگنین موجود در نانولیگنوسلولز ناچیز است (۳ درصد) و می‌تواند اثر منفی کمی در پیوند داشته باشد. از نظر کاربردی، تولید و خالص‌سازی نانوسلولز از خمیر کرافت بسیار مشکل‌تر از نانولیگنوسلولز است و خروج همین مقدار ناچیز لیگنین نیازمند صرف زمان و هزینه زیاد است. در نتیجه کاربرد اتصال‌دهندهٔ نانولیگنوسلولز در ساختار بریکت و دست یافتن به نتایج مطلوب، آوردهٔ این تحقیق است.



شکل ۱. اثر اتصال‌دهنده‌های مختلف بر چگالی

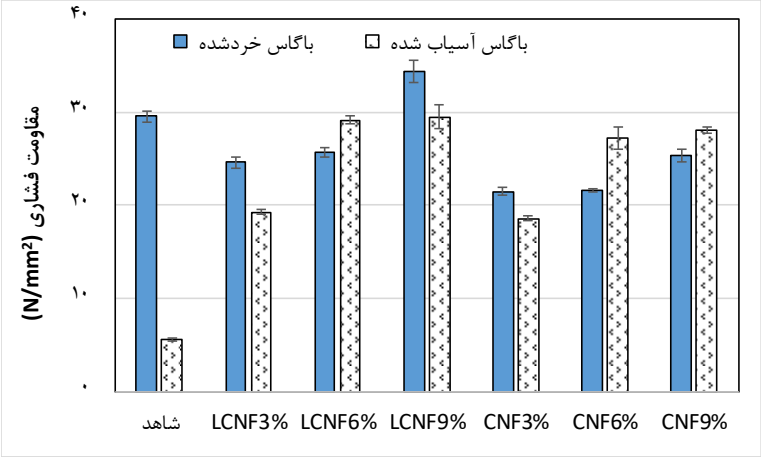
مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بریکت زیستی به ساختار فیزیکی و توزیع اندازهٔ ذرات و مقاومت پیوند بین ذرات در بریکت بستگی دارد. توزیع داده‌های مقاومت فشاری در شکل ۲ نشان می‌دهد که در نمونه‌های کنترل، مقاومت فشاری بریکت باگاس خردشده بیشتر از بریکت باگاس آسیاب‌شده است. بنابراین می‌توان استنباط کرد که از خرده‌باگاس، بریکتی با ساختار و مورفولوژی بهتر با توجه به اندازه و توزیع ذرات آن و در نتیجه توزیع بهتر تنش حاصل می‌شود. دلیل اصلی این مقاومت، ایجاد پیوندهای درهم‌رفتگی مکانیکی در کنار پیوندهای الکترواستاتیکی است [۴]. اندازهٔ ذرات خیلی ریز در بریکت باگاس آسیاب سبب می‌شود که در عین ایجاد سطح پیوند زیاد به‌دلیل ضعف پیوندهای درهم‌رفتگی مکانیکی، مدیا ساختار و چارچوب محکمی نداشته باشد و ذرات روی هم بلغزند و ممکن است با اولین تنش فشاری دچار شکست برشی در لایه‌های مختلف شود. با افزودن اتصال‌دهنده به خرده‌باگاس، مقاومت فشاری بریکت‌های

www.SID.ir

Archive of SID

سوختی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که ممکن است به‌دلیل پیوندهای درهم‌رفتگی بین اتصال‌دهندهٔ لیگنوسلولزی و الیاف خرده‌باگاس، پیوندهای الکترواستاتیک فراوان (پیوند هیدروژنی واندروالسی) به‌دلیل سطح ویژهٔ زیاد LCNF و در نتیجه تشکیل پل‌های جامد قوی بین ذرات و همچنین ذوب‌شدگی لیگنین در کنار پیوندهای درهم‌رفتگی در سوبسترا باشد [۳]. اتصال‌دهنده‌های LCNF و CNF مقاومت فشاری بریکت باگاس آسیاب‌شده را بیش از خرده‌باگاس افزایش داده‌اند. به نظر می‌رسد که در این مورد نقش اثر پیوندهای الکترواستاتیک خیلی زیاد است. سطوح افزایش‌یافته اتصال‌دهندهٔ نانومتری و همچنین سطوح افزایش‌یافتهٔ ذرات باگاس، تشکیل شبکه‌ای بین ذرات و اتصال‌دهنده داده‌اند. فشار اعمال‌شده ذرات را به هم نزدیک کرده، تماس بین‌ذره‌ای خیلی زیاد افزایش یافته و پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی فراوان در ماتریکس ذرات و اتصال‌دهنده تشکیل شده و پل‌های جامد توسعه پیدا کرده‌اند.



شکل ۲. اثر اتصال‌دهنده‌های مختلف بر مقاومت فشاری

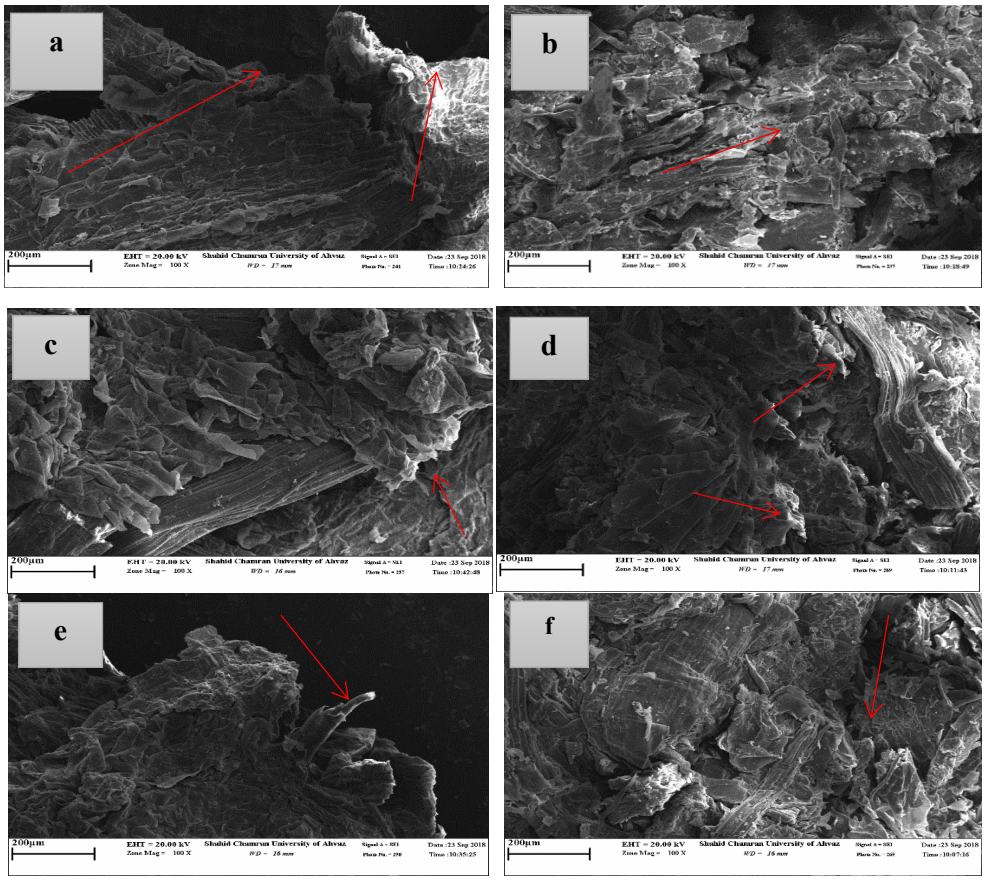
تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM)

تصاویر SEM برای نشان دادن سطوح شکست، پوشش‌دهی اتصال‌دهنده‌های طبیعی روی ذرات و ذوب‌شدگی موضعی ترکیبات زیست‌توده روی سطوح خارجی ذرات تهیه شد (شکل ۳). در تصاویر a و b سطوح شکست و لایه‌های مرزی ضعیف و شکنندگی ترد در نمونه‌های کنترل مشاهده می‌شود. در این تصاویر فواصل و فضاهای خالی بین ذرات کنار هم نشان اتصال ضعیف الیاف، کم بودن غلظت اتصال‌دهندهٔ طبیعی و تشکیل نشدن پل‌های جامد است. سطوح شکست صاف و یکنواخت نشان‌دهنده سطح اتصال کمتر و پیوند ضعیف‌تر ذرات است. در تصاویر c تا f نمونه‌های ساخته‌شده با اتصال‌دهنده مشاهده می‌شود. در این تصاویر سطح زبر بیرون زده و پارگی الیاف نشان‌دهندهٔ وجود جریان زنجیره‌های پلیمریک و چسبندگی قوی ناشی از اتصال‌دهندهٔ به‌کار رفته است که فشار زیادی را برای پاره شدن متحمل شده است. همچنین در این تصاویر نشان داده شده که ذرات با لایه‌های اتصال‌دهنده‌ها پوشیده شده‌اند و پل‌های جامد بین ذرات را به وجود آورده‌اند. پارگی انتهای الیاف در این تصاویر نشان می‌دهد که این نحوهٔ پاره شدن انرژی زیادی را برای پاره شدن جذب کرده است، از این‌رو چسبندگی زیاد و وجود پل‌های جامد در این منطقه را اثبات می‌کند. شایان ذکر است که در کل نمونه‌های ساخته‌شده از باگاس خرده نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده

www.SID.ir

Archive of SID

از باگاس آسیاب‌شده دارای ساختاری با اتصالات ضعیف‌تر و فواصل و فضای خالی بیشتر است.



شکل ۳. تصاویر SEM نمونه‌های کنترل و تقویت‌شده به‌وسیلهٔ اتصال‌دهنده‌های نانو لیگنوسلولز و نانوسلولز [شاهد خرده‌باگاس (a)، شاهد باگاس آسیاب‌شده (b)، نانولیگنوسلولز + خرده‌باگاس(c)، نانولیگنوسلولز + باگاس آسیاب‌شده (d)، نانوسلولز + خرده‌باگاس (e)، نانوسلولز + باگاس آسیاب‌شده (f)]

آنالیز تقریبی

نتایج مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ مواد فرار، خاکستر و کربن ثابت بریکت‌های تولیدشده در جدول ۴ آورده شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، در نمونه‌های کنترل، اندازهٔ ذرات باگاس در مقدار خاکستر تولیدشده مؤثر است و بریکت خرده‌باگاس خاکستر کمتری در مقایسه با بریکت باگاس آسیاب‌شده دارد.

در بریکت‌های خرده‌باگاس در اثر استفاده از اتصال‌دهنده‌های نانولیگنوسلولز و نانوسلولز مقدار خاکستر برجای‌مانده ۱ درصد افزایش یافت. نتیجهٔ جالب در مورد بریکت‌های باگاس آسیاب‌شده این است که با اینکه بریکت کنترل مقدار خاکستر بیشتری داشت، در اثر استفاده از اتصال‌دهنده‌های لیگنوسلولز و نانوسلولز، مقدار خاکستر کاهش یافت. به‌طور کلی استفاده از اتصال‌دهنده‌های نانومتری مختلف بر مواد فرار بریکت‌های خرده‌باگاس و باگاس آسیاب‌شده اثر معنی‌داری نداشته است. مقادیر مواد فرار نمونه‌های تولیدشده مشابه زیست‌تودهٔ خام هستند.

در شکل ۴ مقادیر کربن ثابت، مواد فرار و خاکستر بریکت‌های خرده‌باگاس و باگاس آسیاب‌شده با

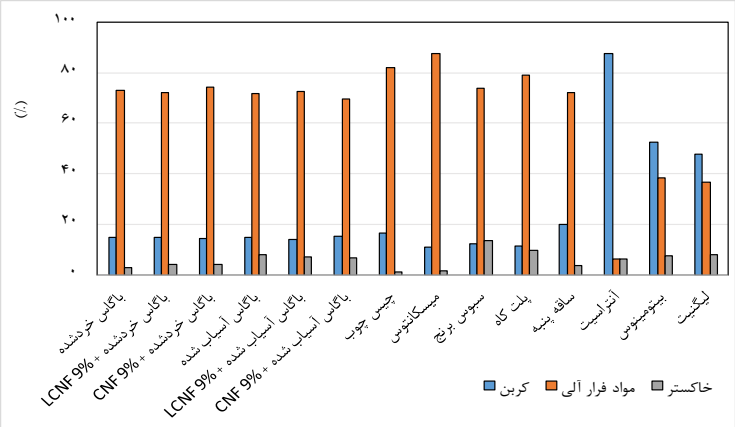
www.SID.ir

Archive of SID

اتصال‌دهنده‌های لیگنوسلولزی نانومتری و داده‌های مرجع برای زیست‌توده و زغال مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار مواد فرار در بیشتر مواد زیست‌توده‌ای، بیشتر از انواع زغال است. به‌طور معمول مقدار مادهٔ فرار زیست‌توده ۸۶-۷۰ درصد برمبنای وزن خشک زیست‌توده است، درحالی که زغال تنها دارای حدود ۳۵ درصد مادهٔ فرار است. در نتیجه توزیع کسری گرمای مواد فرار برای زیست‌توده بیشتر است که سبب می‌شود زیست‌توده سوخت واکنش‌پذیرتری نسبت به زغال باشد و سرعت احتراق بیشتری در طی فاز مواد فرارزدایی ارائه دهد [۱۳].

جدول ۴. آنالیز تقریبی بریکت‌های کنترل و ساخته‌شده با اتصال‌دهنده‌های لیگنوسلولزی نانومتری

نمونه	خاکستر (٪)	مواد فرار آلی (٪)	کربن ثابت (٪)
شاهد (باگاس خردشده)	۲/۹۹	۷۳/۰۲	۱۴/۸۹
نانولیگنوسلولز ۳٪	۴	۷۴/۵۷	۱۴/۴۹
نانولیگنوسلولز ۶٪	۴	۷۳/۰۹	۱۴/۷۳
نانولیگنوسلولز ۹٪	۴	۷۲/۱۹	۱۴/۹۴
نانوسلولز ۳٪	۳	۷۶/۰۲	۱۵/۳۱
نانوسلولز ۶٪	۴/۵	۷۵/۸۲	۱۴/۶۷
نانوسلولز ۹٪	۳/۹۹	۷۴/۴۲	۱۴/۳۳
شاهد باگاس آسیاب‌شده	۸	۷۱/۷۲	۱۴/۶۱
نانولیگنوسلولز ۳٪	۵	۷۳/۲۲	۱۶/۱۱
نانولیگنوسلولز ۶٪	۶	۷۴/۳۵	۱۳/۹۸
نانولیگنوسلولز ۹٪	۷	۷۲/۵۲	۱۳/۸۱
نانوسلولز ۳٪	۵/۵	۷۲/۶۸	۱۶/۱۵
نانوسلولز ۶٪	۵/۵	۷۴/۴	۱۴/۴۳
نانوسلولز ۹٪	۶/۵	۶۹/۴	۱۵/۰۹



شکل ۴. آنالیز تقریبی نمونه‌های کنترل و بریکت‌های ساخته‌شده با اتصال‌دهنده سطح ۹ درصد در مقایسه با برخی از انواع زیست‌توده (پسماندهای کشاورزی و چوب) و انواع زغال [۱۶، ۱۵، ۱۴، ۵]

نکتهٔ شایان توجه، روند افزایشی معنی‌دار کربن ثابت در اثر کاربرد اتصال‌دهنده‌های نانومتری نانولیگنوسلولز و نانوسلولز به‌خصوص در درصدهای افزودن اتصال‌دهندهٔ کم است. کربن ثابت پارامتر مهمی در تعیین کیفیت بریکت‌های سوختی است و کربن باقی‌مانده پس از فاز مواد فرارزدایی است. ضرورتاً کربن ثابت یک سوخت، درصد کربن در

www.SID.ir

Archive of SID

دسترس برای احتراق زغال است که این مقدار با مقدار کل کربن در سوخت (کربن نهایی) برابر نیست، زیرا مقدار زیادی به‌عنوان هیدروکربن‌ها در مواد فرار آزاد می‌شود [۱۳]. در میان انواع زیست‌توده، مقدار کربن ثابت بریکت باگاس ساخته‌شده با اتصال‌دهنده، نزدیک چوب و بیشتر از دیگر پسماندهای کشاورزی است. مقدار خاکستر بریکت باگاس کمتر از زغال و انواع زیست‌توده به‌جز گونه‌های چوب است. رفتار گرمایی سوخت جامد تحت تأثیر مقدار مواد فرار است. اما این رفتار مؤثر از ساختار و پیوندیابی درون سوخت نیز است؛ در نتیجه تعیین کیفیت سوخت دشوار است [۱۷]. مقدار زیاد مواد فرار و کربن ثابت کم بریکت باگاس و دیگر انواع زیست‌توده نسبت به زغال گواه ارزش حرارتی و ویژگی‌های احتراق پایین‌تر آنهاست. به هر حال احتراق همزمان[1] بریکت‌های باگاس با زغال می‌تواند به‌طور چشمگیری از انتشار گازهای دی‌اکسید کربن و مونواکسید کربن بکاهد.

ارزش حرارتی

ارزش حرارتی عامل بسیار مهمی در تعیین کیفیت بریکت‌های زیستی است و به مقدار کربن عنصری در مقایسه با مقدار اکسیژن عنصری موجود در زیست‌توده بستگی دارد. بنابراین ارزش حرارتی اجزای زیست‌توده روند عمومی زیر را نشان می‌دهد:

لیگنین> سلولز> همی سلولز> مواد استخراجی > خاکستر

همچنین ارزش حرارتی سوخت جامد زیستی به شرایط فرایندی مثل دما، اندازهٔ ذرات و پیش‌تیمار همچنین ساختار بریکت وابسته است. کاربرد انواع اتصال‌دهنده‌ها مثل اتصال‌دهنده‌های معدنی در ترکیب سوخت‌های جامد زیستی به کاهش ارزش حرارتی منجر شده است [۴، ۵، ۷]. در این تحقیق با استفاده از اتصال‌دهنده‌های لیگنوسلولزی نانومتری نتایج جالبی در مورد ارزش حرارتی به‌دست آمده است. همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، در نمونه های کنترل، میزان ارزش حرارتی بریکت باگاس آسیاب‌شده بیشتر از بریکت باگاس خرده‌شده است. روند افزایش ارزش گرمایی تیمارهای مختلف با استفاده از دو نوع اتصال‌دهندهٔ لیگنوسلولزی نانومتری به‌جز بریکت خرده‌باگاس تقریباً مشابه و در دامنهٔ MJ/Kg ۱۹/۸۵– ۱۷/۹ بود. در مورد اتصال‌دهنده‌های نانولیگنوسلولز و نانوسلولز تشکیل ساختار شبکه‌ای بین اتصال‌دهنده و خرده‌باگاس و باگاس آسیاب در نتیجهٔ درهم‌رفتگی‌های مکانیکی فراوان می‌تواند دلیل افزایش کربن ثابت و ارزش حرارتی باشد. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد اتصال‌دهندهٔ نانوسلولز در تشکیل ساختار شبکه‌ای باگاس آسیاب‌شده بسیار مؤثر بوده و مقدار ارزش حرارتی MJ/Kg ۲۳/۸ را نتیجه داده است.

جدول ۵. ارزش حرارتی نمونه‌های بررسی‌شده و مقایسهٔ آن با مواد متداول و منابع سوختی [۱۵، ۱۶][1]

نمونه	ارزش حرارتی (MJ/Kg)	نمونه	ارزش حرارتی (MJ/Kg)
باگاس خردشده(شاهد)	۱۶	باگاس آسیاب‌شده (شاهد)	۱۷/۹
نانولیگنوسلولز ۳٪	۱۷/۹	نانولیگنوسلولز ۳٪	۱۷/۹
نانولیگنوسلولز ۶٪	۱۹/۸۵	نانولیگنوسلولز ۶٪	۱۹/۸۵
نانولیگنوسلولز ۹٪	۱۹/۸۵	نانولیگنوسلولز ۹٪	۱۹/۸۵
نانوسلولز ۳٪	۱۷/۹	نانوسلولز ۳٪	۱۷/۹
نانوسلولز ۶٪	۱۷/۹	نانوسلولز ۶٪	۱۷/۹
نانوسلولز ۹٪	۲۳/۸۰	نانوسلولز ۹٪	۱۹/۸۵
چوب [۱۵]	۱۹-۱۸/۵	کاغذ روزنامه [۱۵]	۱۸/۶
بیتومینس [۱۶]	۲۷/۴	آنتراسیت [۱۶]	۳۰/۲-۲۹/۱

1. Co-combustion

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که هر دو اتصال‌دهندهٔ زیست‌تخریب‌پذیر به‌کاررفته نتایج مطلوبی را در ویژگی‌های کیفی و حرارتی بریکت‌های باگاس ارائه دادند. نتایج نشان داد که پارامترهای فنی بریکت‌های تقویت‌شده به‌وسیلهٔ بایندرهای سلولزی نانومتری بیشتر از نمونه‌های شاهد هستند. به‌طوری که بیشترین چگالی (۷۵۱ kg/m^3) برای نمونهٔ نانوسلولز ۹ درصد در طبقهٔ باگاس آسیاب‌شده و بیشترین مقاومت فشاری برای تیمار نانولیگنوسلولز ۹ درصد در طبقهٔ خرده‌باگاس برابر N/mm ۳۴ ثبت شد. تحلیل میکروساختاری (تصاویر SEM) بریکت‌های سوختی نشان داد که اتصال‌دهنده‌های سلولزی نانومتری در کنار اتصال‌دهنده‌های ترموپلاستیک طبیعی (لیگنین، همی سلولز) در بستر زیست‌توده باگاس تحت فشار و دمای زیاد (۱۰۰ درجهٔ سلسیوس و ۱۵۰ MPa) به‌دلیل وجود رطوبت، فعال شده و سبب تقویت پیوندیابی ذرات زیست‌توده شدند. ازآنجا که این اتصال‌دهنده‌های نانومتری با توجه به روش تولید، هزینه‌های مشخصی دارند، نتایج این تحقیق، نوع و سطوح استفاده مناسب از اتصال‌دهنده را به لحاظ مقرون‌به‌صرفه بودن و به‌دست آمدن ویژگی‌های کیفی مطلوب نشان خواهد داد. بر این اساس نانولیگنوسلولز به‌عنوان اتصال‌دهندهٔ بهینه، بهترین پاسخ‌ها را به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی نشان داد. از دیدگاه ویژگی‌های حرارتی تأثیر مثبت هردو اتصال‌دهندهٔ لیگنوسلولزی نانومتری بر کربن ثابت و ارزش حرارتی در هر دو اندازهٔ ابعاد باگاس مشاهده شد. بدین صورت که اتصال‌دهنده‌های نانولیگنوسلولز و نانوسلولز نه‌تنها کربن ثابت را کاهش ندادند، بلکه در مقادیر استفادهٔ کم با افزایش کربن ثابت ارزش حرارتی را نیز افزایش دادند، به‌طوری که بیشترین مقدار ارزش حرارتی برای تیمار نانوسلولز ۹ درصد برابر MJ/kg ۲۳/۸ و نانولیگنوسلولز ۹ درصد برابر MJ/kg ۱۹/۸۵ در طبقهٔ باگاس آسیاب‌شده ثبت شد. به‌طور کلی مهم‌ترین دستاورد این تحقیق معرفی اتصال‌دهنده‌های جدید و کارا در مقیاس نانومتری به صنعت تولید سوخت‌های جامد زیستی است.

References

[1]. Lela, B., Barišić, M., and Nižetić, S. (2016). Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical–mechanical and thermal characteristics. Waste Management, 47(2): 245-236.

[2]. Saxena, R.C., Adhikari, D.K., and Goyal, H.B. (2009). Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(1):167-178.

[3]. Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., and Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 5(6): 683-707.

[4]. Kaliyan, N., and Morey, R. (2010). Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. Bioresource Technology, 101: 1082-1090.

[5]. Soleimani, M., Tabil, X., Grewal, R., and Tabil, L. (2017). Carbohydrates as binders in biomass densification for biochemical and thermochemical processes. Fuel, 193: 134-141.

[6]. Rezvani, Z., Chegini, G. R., Arabhosseini, A., and Kianmehr, M. H. (2014). Natural energy of briquette, definitions, benefits and technologies. Journal of Automotive and Applied Mechanics, 2: 1-12.

[7]. Wu, Sh., Zhang, Sh., Wang, G., Mu, C., and Huang, X. (2018). High-strength charcoal briquette preparation from hydrothermal pretreated biomass wastes. Fuel Processing Technology, 171: 293-300.

[8]. Mitchual, S.J., Frimpong-Mensah, K., and Darkwa, N.A. (2014). Evaluation of fuel properties of six tropical hardwood timber species for briquettes. Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 4: 1-9.

www.SID.ir

Archive of SID

[9]. Carvalho, W., Canilha, L., Castro, P. F., and Barbosa, L. D. F. O. (2009). Chemical composition of the sugarcane bagasse. In 31st Symposium on Biofuels and Materials, May 3-6, San Francisco, USA.

[10]. Rocha, G.J.M. Martín, C., Silva, V., Gomez, E., and Gonçalves, A., (2012). Mass balance of pilot-scale pretreatment of sugarcane bagasse by steam explosion followed by alkaline delignification. Bioresource Technology, 111: 447-452.

[11]. Yadav, S., Gupta, G., and Bhatnagar, R. (2015). A review on composition and properties of bagasse fibers. International Journal of Scientific & Engineering Research, 6 (5): 143-147.

[12]. Vishtal, A., and Kraslawski, A. (2011). Challenges in industrial applications of technical lignins. BioResources, 6(3): 3547-3568.

[13]. Standard Method for the Determination of the Content of Volatile Matter, CEN/TS 15148. 2009.

[14]. Roy, P., Dutta, A., and Gallant, J. (2018). Hydrothermal carbonization of peat moss and herbaceous biomass (Miscanthus): A potential route for bioenergy. Energies, 11(10): 2794.

[15]. Subramanian, P. M. (2000). Plastics recycling and waste management in the US. Resources, Conservation and Recycling, 28(3-4): 253-263.

[16]. Milici, R. C., Flores, R. M., and Stricker, G. D. (2013). Coal resources, reserves and peak coal production in the United States. International Journal of Coal Geology, 113: 109-115.

www.SID.ir

Archive of SID

Production of bagasse biofuel briquettes reinforced by nanocellulose and nanolignocellulose binders

A. Abyaz*; Ph. D. Student, Pulp and Paper Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

E. Afra; Assoc. Prof., Pulp and Paper Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

A.R. Saraeyan; Assoc. Prof., Pulp and Paper Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

(Received: 28 December 2019, Accepted: 31 January 2020)

ABSTRACT

Converting biomass waste such as bagasse as an abundant lignocellulosic resource available for producing biofuels can be a viable alternative to fossil fuel and environmental pollutants. The purpose of the present study was to produce biofuel briquettes from two dimensional classes of shredded bagasse and grinded bagasse. Nanometer lignocellulose binders including nanolignocellulose (LCNF) and nanocellulose (CNF) at three levels of 3, 6 and 9% were used to enhance and improve the thermal and technical parameters. The briquettes were produced by cylinder and piston press at 150 MPa and 100 °C. The results showed a positive effect of nanometer lignocellulosic binders on the thermal and strength properties. Thus, nano-lignocellulose was more effective on the physical and mechanical properties of nanocellulose binder in both dimensional classes. Also, in terms of thermal properties of nano-lignocellulose binder, better results were obtained in biofuel briquettes. Consequently, nanolignocellulose may be a more suitable binder, since its production costs are lower than nanocellulose and the calorific value of briquette is higher due to the low lignin content in the compound. As a result, at 9% level of usage, calorific value and compressive strength of shredded and grinded bagasse were 34.37 N.mm, 19.85 MJ/Kg and 19.85 Nmm 29.45 MJ/Kg, respectively.

Keywords: bagasse, biofuel briquette, nanometer lignocellulosic binders.

* Corresponding Author, Email: Aliabyaz14@gmail.com, Tel: +989199149500

www.SID.ir