

اثر استفاده از آرد پوست بادام و مقوای کهنه بازیافتی بر ویژگی‌های بریکت تولیدی

چکیده

افزایش فعالیت‌های صنعتی سبب افزایش تقاضا به منابع انرژی شده‌است. استفاده از منابع انرژی موجود (عمدتاً از نوع سوخت‌های فسیلی) خسارات فراوان به محیط زیست وارد می‌کند. لذا یافتن جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی امری ضروری است. یکی از منابع جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی، زیست‌توده لیگنوسلولزی است. در این راستا، لازم است با استفاده از روش‌های مناسب تغییراتی در زیست‌توده خام ایجاد و آن‌ها را جهت مصارف تامین انرژی آماده‌سازی کرد. یکی از این روش‌ها، تبدیل مواد خام زیست‌توده به بریکت‌های سوختی است. در تحقیق حاضر، تاثیر استفاده از آرد پوست بادام و مقوای کهنه بازیافتی در تولید بریکت سوختی بررسی شد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که تیمار A2 (۱۰۰ درصد مقوای کهنه بازیافتی) دارای بیش‌ترین مقدار دانسیته، مقاومت فشاری و خاکستر بود (به-ترتیب برابر $1/19 \text{ g/cm}^3$ ، $178/94 \text{ N/mm}^2$ و $18/4$ درصد). تیمار A1 (۱۰۰ درصد آرد پوست بادام) دارای بیش‌ترین مقدار مواد فرار و نرخ پایداری سوخت بود (به-ترتیب برابر با $79/48$ درصد و $3/67 \text{ g/min}$). در نمونه شاهد (۱۰۰ درصد آرد چوب)، بیش‌ترین مقدار ارزش حرارتی ($20/53 \text{ MJ/kg}$) مشاهده شد. لذا، براساس ویژگی-های مورد بررسی و میزان اهمیت آن‌ها در فرآورده نهائی، رتبه‌بندی تیمارهای آزمایش انجام شد و تیمارهای A2، A9 (۸۰ درصد مقوای کهنه بازیافتی + ۲۰ درصد پوست بادام) و A8 (۷۰ درصد مقوای کهنه بازیافتی + ۳۰ درصد پوست بادام) به‌ترتیب رتبه‌های ۱ تا ۳ را از نظر مجموع ویژگی‌ها به‌دست آوردند و به عنوان تیمارهای بهینه انتخاب شوند.

واژگان کلیدی: زیست‌توده لیگنوسلولزی، بریکت سوختی، سوخت جامد زیستی، پوست بادام، مقوای کهنه بازیافتی، منابع تجدیدپذیر.

مقدمه

به‌دلیل رشد جمعیت و همچنین افزایش قابل توجه فعالیت‌های تجاری و صنعتی در سراسر جهان تقاضا برای انرژی بیش‌تر افزایش یافته‌است. سوخت‌های فسیلی مانند فرآورده‌های نفتی، زغال‌سنگ، گاز طبیعی و غیره مهم‌ترین منابع انرژی هستند که حدود ۸۰ درصد انرژی اولیه مورد نیاز جهانی را تامین می‌کنند [۱]. به گفته

محمد رونما^۱
علی قاسمیان^۲
الیاس افرا^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۲ دانشیار دانشکده علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مسئول مکاتبات:

Mohamad.karsang@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

Tursi (۲۰۱۹)، استفاده روزافزون از سوخت‌های فسیلی برای توسعه صنعتی و فراصنعتی باعث رشد ثروت شده-است، اما سطوح بالاتر آلودگی و در نتیجه انحطاط سلامت عمومی را نیز به‌دنبال داشته‌است [۲]. با توجه به گزارش منتشرشده از سوی سازمان ملل متحد، در صورت عدم تلاش جهت جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای، تا سال

سوختی دارای طولی برابر ۵ تا ۳۰ میلی متر و بریکت‌ها دارای طولی برابر ۵۰ تا ۴۰۰ میلی متر و قطر ۳۰ تا ۲۰۰ میلی متر) با هم تفاوت دارند. متراکم‌سازی جهت تولید بریکت با اعمال فشار و حرارت بر روی زیست‌توده انجام می‌گیرد. خروجی فرآیند فشرده‌سازی که به‌عنوان یک بلوک فشرده از مواد پسماند آلی مورد استفاده برای مصارف خانگی و صنعتی در مناطق روستایی و شهری شناخته می‌شود، بریکت نام دارد [۱۶]. یکی از متداول‌ترین راه‌های متراکم کردن زیست‌توده تبدیل آن به بریکت است [۱۷]. بریکت کردن یک روش فشرده‌سازی برای ارتقای زیست‌توده جامد و تولید محصولات نهایی با خواص و ویژگی‌های استاندارد شده است. این فرآیند روی تبدیل زیست‌توده با چگالی کم به سوخت با چگالی بالا و همچنین انرژی زیاد متمرکز است. فرآیند بریکت‌سازی جهت بهبود چگالی، زمان سوختن، ارزش حرارتی زیست‌توده خام و همچنین سهولت در حمل و نقل زیست‌توده انجام می‌شود [۱۸]. بریکت‌ها از نظر اندازه و شکل بسیار متفاوت هستند، اما معمولاً به شکل استوانه‌ای با قطر بین ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر و طول‌های بین ۱۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر هستند [۱۹]، با این‌حال بریکت‌های مربع، مستطیل و چند ضلعی نیز وجود دارد. زیست‌توده متراکم‌شده مانند بریکت‌ها دارای چندین مزیت است که شامل افزایش دانسیته، سهولت در جابه‌جایی و حمل و نقل، ذخیره‌سازی، بهبود سوختن، انتشار ذرات کمتر، فراریت کم، کیفیت یکنواخت و ارزش حرارتی بالاتر است [۲۰]. بریکت‌ها به طور کلی از سه جزء اصلی تشکیل شده‌اند که شامل زیست‌توده، چسب‌ها و پرکننده‌ها می‌باشد. متراکم شدن زیست‌توده تحت فشار بالا باعث به‌هم‌پیوستگی مکانیکی و افزایش چسبندگی بین ذرات می‌شود و پیوندهای بین مولکولی را در ناحیه تماس ایجاد می‌کند [۲۱]. کیفیت بریکت تولیدشده به استحکام و دوام پیوندهای بین ذرات بستگی دارد، که تحت تأثیر تعدادی از متغیرهای فرآیند مانند قطر قالب، دمای قالب، فشار، بایندها و پیش‌گرمایش مخلوط زیست‌توده قرار دارند [۴]. تعدادی از انواع مواد زیست‌توده مورد استفاده برای تولید بریکت‌های سوختی در جدول ۱-۱ آورده شده است.

۲۱۰۰ میلادی زمین شاهد گرمایشی معادل $3/2^{\circ}\text{C}$ خواهد بود [۳]. از بین تمام منابع انرژی، زیست‌توده سومین منبع انرژی بزرگ در جهان است [۴]، همچنین غالب‌ترین منبع انرژی پخت و پز و گرمایش برای سه چهارم مردم کشورهای در حال توسعه است و حدود ۱۴ درصد از کل مصرف انرژی جهانی را به خود اختصاص می‌دهد [۵، ۷۰۶]. در ایتالیایی، سوزاندن زیست‌توده سنتی بیش از ۹۲ درصد انرژی مصرفی را تامین می‌کند [۸]، و این مقدار به بیش از ۶۴ درصد در غنا [۹]، ۷۰ درصد در کنیا [۱۰] و ۷۸ درصد در نیجریه [۱۱] می‌رسد. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ناشی از زیست‌توده یکی از معدود فناوری‌های اثبات‌شده، مقرون‌به‌صرفه و در دسترس است که می‌تواند انتشار CO_2 را کاهش دهد [۱۲].

این منابع به صورت مستقیم یا غیرمستقیم به‌عنوان سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرند و در حال حاضر از سوزاندن، دفن یا ذخیره‌سازی بی‌مورد خودداری می‌شود، در صورتی که این مواد به‌صورت ناکارآمد استفاده شوند می‌توانند باعث آلودگی زیست‌محیطی گسترده شوند [۱۳]. ویژگی سازگاری با محیط زیست، زیست‌توده را به یک منبع پایدار و ایده‌آل برای تولید بریکت تبدیل می‌کند. علاوه بر مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، زیست‌توده از نظر تامین انرژی حرارتی نیز یک ماده ارزشمند می‌باشد. تراکم زیست‌توده نشان‌دهنده مجموعه‌ای از فناوری‌ها برای تبدیل زیست‌توده به سوخت است. اساساً فشرده‌سازی جهت کاهش حجم غیر قابل برگشت مواد زیست‌توده انجام می‌گیرد [۱۴]. عمل فشرده‌سازی چندین مزیت عمده را در پی دارد، از جمله بهبود امکان جابه‌جایی و انتقال در سراسر سیستم تامین مواد اولیه پالایشگاه زیستی، توزیع اندازه ذرات کنترل‌شده برای بهبود یکنواختی و چگالی مواد اولیه، انطباق با تکنولوژی تبدیل از پیش تعیین‌شده و مشخصات سیستم تامین [۴]. چندین فناوری متراکم‌سازی برای تولید مواد اولیه یکنواخت جهت تامین انرژی به کار می‌رود، با این حال پلت و بریکت‌سازی^۱ دو مورد از پرکاربردترین آن‌ها هستند [۱۵]. هر دو محصول (بریکت و پلت) از نظر ماهیت کاملاً شباهت دارند و صرفاً از نظر اندازه (پلت‌های

^۱ Pellet & Briquette

جدول ۱ - چند مورد از انواع مواد زیست‌توده مورد استفاده جهت تولید بریکت‌های سوختی

ماده اولیه	ترکیب پسماند	بایندر مورد استفاده	مرجع
بقایای کشاورزی	پوست برنج، پسماند ذرت، باگاس، کاه برنج	نشاسته، جلبک‌ها، ساقه چنبه	[۲۲]
زیست‌توده چوبی	چوب و پوست درخت، ضایعات ناشی از هرس درخت	-----	[۲۳]
ضایعات میوه	هسته انبه، نارگیل، پوست موز، ضایعات کاکائو	نشاسته، نشاسته ذرت، نشاسته کاساوا	[۲۴]
زیست‌توده‌های آبی	سنبل آبی، نی غول پیکر (Arundo donax)، نی	ملاس	[۲۵]
ضایعات جامد دباهی	پوست، مو	نشاسته کاساوا	[۲۶]
ضایعات صنایع کاغذ و مقوا	کاغذهای اداری، مقوای کهنه، روزنامه باطله، مجلات	-----	[۲۷]

می‌توان از آن به عنوان منبعی مناسب جهت تولید بریکت‌های سوختی استفاده کرد. مقوای کهنه بازیافتی^۱ یکی از عمده محصولات سلولزی تولیدی در سراسر جهان است که قابلیت بازیافت دارد و همچنین دارای محتوای با قابلیت سوختن زیاد و در عین حال با خاکستر کم است. علاوه بر این به علت دارا بودن الیاف بلند و مقداری لیگنین می‌تواند با ایجاد پل جامد باعث پیوند ذرات زیست‌توده شود [۳۰]. بر همین اساس در تولید بریکت‌های سوختی می‌توان از آن به عنوان اتصال دهنده^۲ بهره برد.

مواد و روش‌ها

مواد

پوست بادام مورد استفاده در این پژوهش از رقم مامایی، از مراکز تولید آجیل شهرستان نجف‌آباد تهیه شد. لازم به ذکر است که هیچ‌گونه فرآوری بر روی پوست‌های بادام مذکور انجام نشده بود. مقوای کهنه بازیافتی که از نوع دو رویه قهوه‌ای بوده از مراکز جمع‌آوری پسماند شهر گرگان تهیه شد. همچنین خاک اره چوب نراد از مراکز برش چوب شهر گرگان تهیه گردید.

روش‌ها

خرد و آسیاب کردن مواد

پس از جداسازی ناخالصی‌ها و مواردی که به‌عنوان مواد زائد تلقی می‌شوند، پوست بادام جهت خرد کردن به-

محققان متعددی امکان استفاده از انواع مواد زیست-توده لیگنوسلولزی مانند ضایعات کشاورزی و ضایعات جنگلی در تولید بریکت‌های سوختی را بررسی کردند. ماهیت لیگنوسلولزی این مواد سبب تولید بریکت‌های سوختی با ویژگی‌های حرارتی و مقاومتی مناسبی گردیده است. براساس موارد ذکر شده تمرکز مقاله حاضر استفاده از سایر مواد لیگنوسلولزی به منظور بهبود ویژگی‌های حرارتی، مقاومتی و شیمیایی بریکت‌های سوختی می‌باشد. درخت بادام با نام علمی *prunus dulcis* (یا *p. abygdalus*) به خانواده *Rosaceae* تعلق دارد و بومی مناطق کوهستانی آسیای مرکزی (ایران، هند و پاکستان) است. کشور ما از لحاظ تولید بادام در جهان رتبه سوم را پس از آمریکا و اسپانیا به خود اختصاص داده. فارس، کرمان، زنجان، چهارمحال و بختیاری و اصفهان از جمله استان‌هایی هستند که کشت بادام در آن‌ها بیش‌ترین میزان را نسبت به دیگر مناطق دارند. بادام نوعی آجیل محسوب می‌شود که پوست آن به‌عنوان زیست‌توده دسته-بندی می‌گردد. تولید جهانی بادام تا سال ۲۰۱۴، سالانه سه میلیون تن گزارش شده‌است. پوست بادام حدود ۳۵ تا ۷۵ درصد از وزن کل میوه را تشکیل می‌دهد، بنابراین حدود ۱۰/۵ تا ۲۲/۵ میلیون تن به‌صورت ضایعات باقی می‌ماند [۲۸]. عناصر پوسته بادام شامل (۷۲/۲۷ درصد) C، (۲۲/۸۸ درصد) O، (۳/۷۸ درصد) N و (۰/۸۷ درصد) Si است. مقدار ترکیبات شیمیایی اصلی شامل سلولزها، همی‌سلولز و لیگنین به ترتیب برابر ۳۸/۴۸ درصد، ۲۸/۸۲ درصد و ۲۹/۵۴ درصد است [۲۹]. با توجه به ترکیبات شیمیایی پوست بادام و میزان قابل توجه لیگنین موجود،

¹ OCC

² Binder

گردید. نمونه‌ها در آون به مدت سه ساعت در دمای °C ۱۰۳ قرار داده شد. پس از این مدت زمان نمونه‌ها جهت سرد شدن و عدم دریافت رطوبت به دسیکاتور منتقل شدند. در نهایت نمونه‌ها توزین و رطوبت طبق رابطه ۱ اندازه‌گیری شد.

$$MC (\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، W1: وزن تر (g)، W2: وزن خشک (g)، MC: درصد رطوبت (%).

تولید بریکت‌های سوختی

بریکت‌ها در ماشین بریکت‌ساز (ساخته شده توسط دکتر الیاس افرا و علی ابیض) با فشار عمودی توسط سیلندر و پیستون به شکل استوانه‌ای با قطر قالب ۵۰ mm، اعمال فشار ۷۲ MPa و دمای °C ۱۰۰ ساخته شدند. طبق جدول ۱ مواد با نسبت‌های مشخص با هم مخلوط شدند. مجموع وزن مواد اولیه و اتصال‌دهنده در تمام تیمارهای آزمایش ۵۰ گرم بود. از مقوای کهنه بازیافتی به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده و همچنین افزایش‌دهنده ارزش حرارتی استفاده شد. وزن و ابعاد (قطر و ارتفاع) بریکت‌های تهیه‌شده توسط دستگاه بریکت‌ساز بلافاصله جهت محاسبه دانسیته و انجام سایر آزمون‌های مورد نظر اندازه‌گیری شد و سپس نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی جهت عدم تبادل رطوبتی با محیط نگهداری شدند.

وسیله آسیاب چکشی به آزمایشگاه انتقال یافت. عمل خردکردن پوست بادام در دو مرحله و توسط آسیاب چکشی و آسیاب دوم انجام شد تا ذرات کاملاً خردشده به-دست آیند. سپس ذرات مذکور توسط الک با مش ۱۶ الک شدند و ذرات مناسب برای ادامه کار تهیه گردید. مقوای بازیافتی تهیه‌شده توسط دست به قطعات ریز تبدیل و به-مدت ۲۴ ساعت در ظرف حاوی آب خیس‌انده شد. سپس با استفاده از دستگاه پراکنده‌ساز الیاف به خمیر کاغذ تبدیل گردید. خمیرهای حاصل روی الک با مش ۲۰۰ آبیگری شد و جهت خشک شدن روی فویل آلومینیوم پهن گردید. پس از خشک شدن، خمیرهای حاصل توسط آسیاب اندکی دفییره شدند تا الیاف از هم کاملاً جدا شوند. در نهایت خمیر کاغذ مذکور جهت عدم تبادل رطوبت با محیط درون کیسه پلاستیکی قرار گرفت. خاک اره حاصل از برش چوب نراد توسط آسیاب به آرد چوب تبدیل گردید. آرد چوب خارج‌شده از آسیاب روی الک با مش ۶۰ قرار گرفت. آرد چوب مذکور، هواخشک شد و به‌منظور عدم تبادل رطوبتی با محیط، در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شد.

اندازه‌گیری درصد رطوبت

اندازه‌گیری درصد رطوبت مواد اولیه (مقوای کهنه بازیافتی، آرد چوب، پوست بادام خردشده) بر اساس دستور کار استاندارد ASAES 352.2 صورت پذیرفت. از هر کیسه سه بار مقدار سه گرم به‌صورت تصادفی انتخاب

جدول ۲ شرایط تیمارهای آزمایشی

کد تیمار	مقوای کهنه بازیافتی (درصد)	پوست بادام (درصد)	آرد چوب (درصد)
C	۰	۰	۱۰۰
A ₁	۰	۱۰۰	۰
A ₂	۱۰۰	۰	۰
A ₃	۲۰	۸۰	۰
A ₄	۳۰	۷۰	۰
A ₅	۴۰	۶۰	۰
A ₆	۵۰	۵۰	۰
A ₇	۶۰	۴۰	۰
A ₈	۷۰	۳۰	۰
A ₉	۸۰	۲۰	۰

$$(۴) \quad \frac{۳ \times \text{نیرو فشاری اعمال شده (N)}}{(I_1 + I_2 + I_3) \text{ (mm)}} = \text{مقاومت فشاری (N/mm)}$$

I: ارتفاع بریکت در سه نقطه (mm)

اندازه‌گیری درصد خاکستر

اندازه‌گیری مقدار خاکستر در نمونه‌ها بر اساس دستورالعمل استاندارد شماره (2007) ASTM E1755-01 با استفاده از کوره الکتریکی القایی Heraeus انجام گرفت. به‌طوری که در گام نخست مقدار ۵ گرم از نمونه‌ها را داخل بوته چینی (که به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای 103°C قرار داده شد و سپس جهت خنک شدن به مدت ۴۵ دقیقه به دسیکاتور منتقل و در نهایت توزین گردید) قرار داده شد. در گام بعد نمونه‌ها توسط شعله ملایم سوزانده شدند تا جایی که دود از آن‌ها بلند نشود. بوته‌های حاوی نمونه‌های سوزانده شده درون کوره با دمای حدود 100°C قرار داده شد. سپس دما به تدریج به $575 \pm 25^{\circ}\text{C}$ افزایش پیدا کرد تا نمونه‌ها بدون خروج آتش یا ذرات خاکستر به مدت ۳ ساعت سوزانده شوند. پس از گداخته شدن نمونه‌ها و حذف ذرات تیره داخل بوته‌ها، بوته‌ها به مدت ۴۵ دقیقه جهت خنک شدن و عدم دریافت رطوبت به دسیکاتور انتقال یافتند. در نهایت بوته‌ها توسط ترازو (با دقت ۰/۰۰۰۱) توزین شدند. مقدار خاکستر از طریق رابطه ۵ اندازه‌گیری شد.

$$(۵) \quad \text{مقدار خاکستر (\%)} = \frac{C}{A} \times 100$$

C: وزن خاکستر نمونه (g)

A: وزن اولیه نمونه (g)

محاسبه دانسیته

دانسیته نمونه‌ها بر اساس دستورالعمل استاندارد شماره ASAES269.4 محاسبه گردید. جهت محاسبه دانسیته بریکت‌های تولیدی ابتدا ابعاد (ارتفاع و قطر) و وزن بریکت‌ها اندازه‌گیری شد. سپس حجم آن‌ها، با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردید. در ادامه، دانسیته هر نمونه با استفاده از رابطه ۳ تعیین شد.

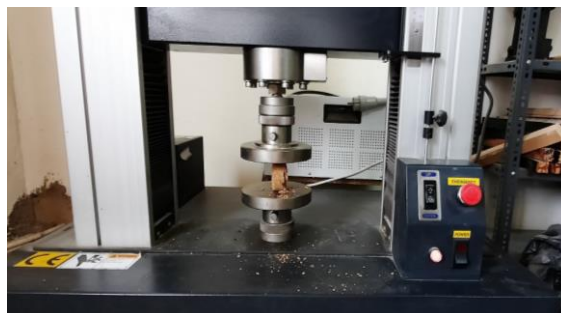
$$(۲) \quad V_p = \frac{\pi}{4} d^2 L$$

$$(۳) \quad \rho_p = \frac{m_p}{V_p}$$

که در آنها، d: قطر بریکت (cm)، L: طول (ارتفاع) بریکت (cm)، m_p : وزن بریکت (g)، V_p : حجم بریکت (cm^3)، ρ_p : دانسیته بریکت (g/cm^3).

اندازه‌گیری مقاومت فشاری

مقاومت فشاری عبارت است از ظرفیت تحمل یک جسم، مصالح ساختمانی یا سازه در مقابل نیروهای فشاری محوری مستقیم. هنگامی که حد مقاومت فشاری یک ماده فرا می‌رسد، ماده گسیخته خواهد شد. مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس دستورالعمل استاندارد شماره ASTM D2166-85 با استفاده از دستگاه 505B1 Loadcell در ساخت تایوان اندازه‌گیری شد. جهت انجام این آزمون نمونه‌ها به صورت افقی در زیر فک‌های دستگاه قرار گرفتند و اعمال نیروی فشاری بر نمونه با سرعت 0.305 mm/min انجام شد. این اعمال فشار تا زمان شکسته شدن نمونه‌ها ادامه داشت. در نهایت مقدار مقاومت فشاری در نقطه شکست با استفاده از رابطه شماره ۴ محاسبه گردید.



شکل ۱. انجام تست مقاومت فشاری توسط دستگاه 505B1 Loadcell comotech Qc

اندازه‌گیری مواد فرار

اندازه‌گیری مقدار مواد فرار براساس دستورالعمل استاندارد شماره ASTM E872-72 (1998) انجام گرفت. پس از اندازه‌گیری وزن خاکستر دوباره بوت‌ها در کوره با دمای $900 \pm 25^\circ\text{C}$ به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد. پس از مدت زمان قیدشده بوت‌ها به دسیکاتور جهت خنک شدن انتقال یافتند. در نهایت بوت‌ها توزین گردید و مقدار مواد فرار طبق رابطه ۶ محاسبه گردید.

$$Q = \frac{A-B}{B} \times 100 \quad (6)$$

A: وزن نمونه قبل از کوره (g)

B: وزن نمونه بعد از کوره (g)

اندازه‌گیری نرخ پایداری سوخت

این آزمون طبق روش‌های اجرایی مرسوم در منابع [۳۱]، [۳۲] انجام شد. نرخ پایداری سوخت، پارامتر مهمی در خصوص تعیین کیفیت سوختی بریکت‌های تولیدی است. بدین منظور مقدار مشخصی از نمونه‌ها روی سه پایه قرار داده شد. سپس شعله را زیر آن قرار داده و زمان شعله‌ور شدن ثبت می‌شود (زمان شعله‌وری). تا شعله‌ور شدن و سوختن کامل بریکت صبر کرده و در نهایت زمان را مجدداً ثبت و نمونه را وزن می‌کنیم. نرخ سوختن از طریق رابطه ۸ محاسبه می‌گردد.

$$\left(\frac{\xi}{\text{min}}\right) \text{ نرخ سوختن} = \frac{Q1-Q2}{T} \quad (8)$$

که در آن، Q1: وزن اولیه قبل از سوختن (g)، Q2: وزن نهایی پس از سوختن (g)، T: زمان کل سوختن (min).

تحلیل آماری

جهت تحلیل آماری داده‌های حاصل از طرح آماری One way ANOVA استفاده شد. آنالیز تجزیه واریانس به کمک نرم‌افزار آماری SPSS.16 انجام شد. همچنین خطای استاندارد در هر ستون توسط نرم‌افزار اکسل رسم شد.

نتایج و بحث

محاسبه دانسیته

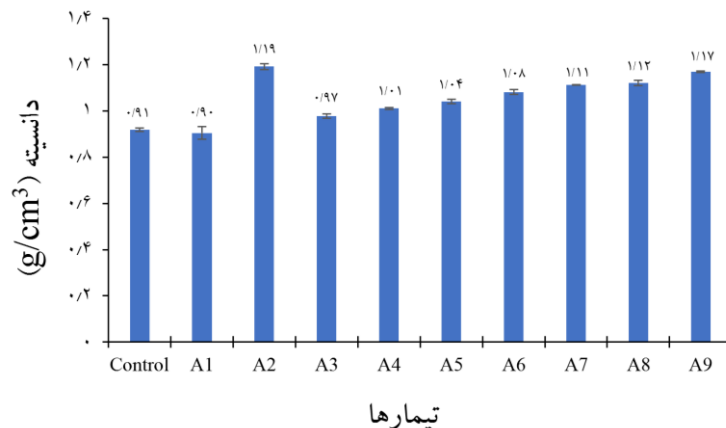
شکل ۲ میزان دانسیته اندازه‌گیری شده بریکت‌های تولیدی را نشان می‌دهد. طبق این شکل مقدار دانسیته تیمار A1 (حاوی ۱۰۰٪ آرد پوست بادام) بسیار کم بود. اما با افزودن مقدار OCC دانسیته افزایش پیدا کرده است. به‌طوری که تیمار A2 (حاوی ۱۰۰٪ OCC) دارای بیشترین مقدار دانسیته ($1/19 \text{ g/cm}^3$) در بین نمونه‌های تولیدی است. در نتیجه افزایش دانسیته، تولید بریکت با خواص حرارتی و مقاومتی مناسب امکان‌پذیر خواهد بود. نمونه شاهد دارای دانسیته $0/91 \text{ g/cm}^3$ است.

اندازه‌گیری ارزش حرارتی

اندازه‌گیری مقدار ارزش حرارتی نمونه‌ها بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM E711-87 (2012) با استفاده از دستگاه بمب کالری‌متر انجام شد. برای تعیین دقیق ارزش حرارتی هیدروکربن‌های جامد و مایع و سایر سوخت‌ها از بمب کالری‌متر استفاده می‌شود. این دستگاه شامل محفظه کالری‌متری، محفظه آب دو جداره خارجی، بمب، واحد شارژ اکسیژن مجهز به درجه فشار، حسگر دما و سیستم جرقه‌زنی می‌باشد. این روش به‌صورت مستقیم یا واقعی ارزش حرارتی ناخالص را اندازه‌گیری می‌کند. جهت انجام این اندازه‌گیری ۰/۴ گرم از هر نمونه را درون دستگاه قرار داده تا به‌صورت کامل سوخته شود، سپس حداقل و حداکثر دمای به‌دست آمده را ثبت کرده و از طریق رابطه ۷ مقدار ارزش حرارتی محاسبه شد.

$$Q = \frac{(C_{\text{water}} + C_{\text{cal}})(T_2 - T_1)}{W_f} \quad (7)$$

که در آن، Q: میزان ارزش حرارتی (MJ/kg)، C_{water} : ظرفیت حرارتی آب (kJ/kg $^\circ\text{C}$)، C_{cal} : ظرفیت حرارتی بمب کالری متر (kJ/kg $^\circ\text{C}$)، W_f : وزن اولیه نمونه (g)، $T_2 - T_1$: اختلاف درجه حرارت ($^\circ\text{C}$).



شکل ۲ مقایسه دانسیته بریکت‌های تولیدی با نمونه شاهد

واکنش‌های شیمیایی و انجماد تفجوشی^۱، سخت شدن بایندر، سخت شدن مواد ذوب‌شده یا تبلور مواد محلول ایجاد می‌شوند [۳۵]. فشار اعمال‌شده در حین تراکم، نقطه ذوب ذرات را کاهش داده و باعث حرکت ذرات به سمت یکدیگر می‌شود. در نتیجه سطح تماس افزایش یافته و نقطه ذوب به یک سطح تعادل جدید تغییر می‌یابد. وجود مایعات مانند آب، در طول متراکم شدن منجر به نیروهای سطحی و فشارهای مویرگی می‌شود که پیوند ذرات را افزایش می‌دهد [۳۶ و ۳۷]. Mani و همکاران (۲۰۰۲) سه مرحله اساسی را در طول تراکم زیست‌توده فرض کردند که در آن ذرات پس از تخریب دوباره مرتب می‌شوند تا توده‌ای نزدیک به هم تشکیل دهند [۳۸]. در این مرحله بیش‌تر ذرات خواص خود را حفظ می‌کنند و انرژی به دلیل اصطکاک بین ذره و ذره به دیوار تلف می‌شود. در مرحله دوم در اثر فشار ذرات تحت تغییر پلاستیک و الاستیک قرار می‌گیرند که به‌طور قابل توجهی تماس بین ذرات را افزایش می‌دهد. در اثر تغییرات ایجادشده و همچنین وجود نیروهای واندروالس و الکترواستاتیک، ذرات به هم پیوند می‌خورند. در مرحله نهایی کاهش قابل توجه حجم، منجر به رسیدن دانسیته مواد به دانسیته واقعی اجزای تشکیل‌دهنده می‌گردد. ترکیب شیمیایی زیست‌توده که شامل سلولز، همی‌سلولز، پروتئین، نشاسته، لیگنین، چربی و خاکستر است، نیز بر فرآیند متراکم‌سازی تأثیر می‌گذارد به‌طوری که طی

Kong و همکاران (۲۰۱۲) بریکت‌های سوختی را تولید کردند که در آن خاک اره و ضایعات ناشی از برش چوب به‌عنوان جزء اصلی (بیومس) و الیاف مقوای بسته بندی به‌عنوان چسب (بایندر) استفاده شد [۳۳]. هدف آن‌ها بررسی تاثیر الیاف مقوای بسته‌بندی به‌عنوان پل جامد بر ویژگی‌های فیزیکی بریکت‌های زیست‌توده ساخته‌شده از خاک اره بود. در نهایت نتایج پژوهش این محققان به این صورت بود که؛ افزودن الیاف مقوای بسته بندی به خاک اره تا حد زیادی اثرات منفی ارتجاعی بر دانسیته و خواص مکانیکی در طول ذخیره‌سازی را کاهش داد.

Kpalo و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی بریکت‌هایی تولید کردند که حاوی ذرات ذرت و پوست درخت نخل روغنی (پالم) به‌عنوان بیومس و خمیر کاغذ باطله به‌عنوان بایندر استفاده شد [۳۴]. در طی این پژوهش دانسیته ۴۰/۳۸-۰/۰ گرم بر سانتی‌مترمکعب ثبت گردید. دانسیته یک پارامتر مهم برای فرآیند بریکت‌سازی است و عواملی نظیر دانسیته ماده اولیه، چسب، فشار، دما و زمان تا حد زیادی دانسیته نهایی بریکت را تعیین می‌کند [۱۷]. خمیر کاغذ حاوی مقدار زیادی الیاف بلند و لیگنین است که باعث ایجاد پل جامد بین پیوند ذرات زیست‌توده می‌شود و همچنین دارای ویژگی‌های مشابه با سایر سوخت‌های زیست‌توده است [۳۳]. برخی پژوهشگران بر این باور هستند که مکانیسم اتصال در طول تجمع می‌تواند از نوع تشکیل پل‌های جامد باشد. این پل‌های جامد توسط

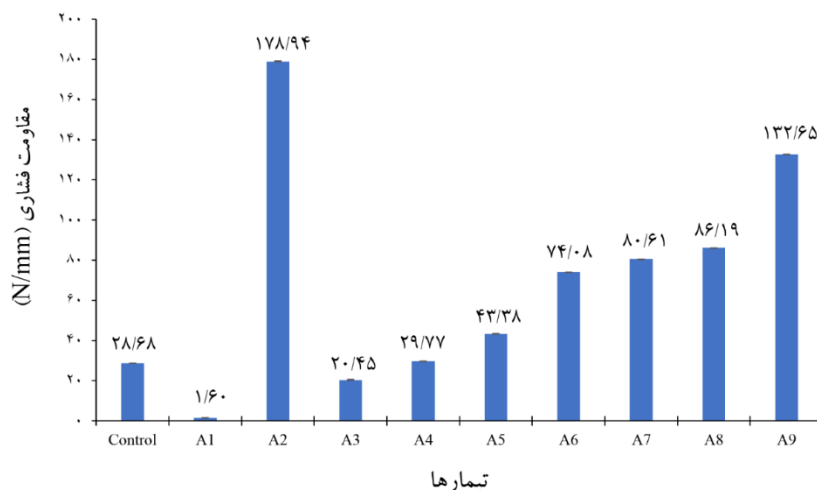
¹ Sintering

مقاومت شده است. لذا از این بابت می توان نتیجه گرفت که مقوای کهنه بازیافتی، جایگزین بسیار عالی برای آرد چوب باشد ولی پوست بادام جایگزین مناسبی تلقی نمی شود. Shyamalee و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی تاثیر استفاده از سه بایندر طبیعی (سرگین گاو، آرد و خمیر کاغذ) در تولید بریکت های سوختی را بررسی کردند [۴۲]. آن ها دریافتند که حداقل مقدار قابل قبول بایندر جهت تولید بریکت های سوختی ۳۰ درصد است. در این پژوهش نمونه هایی که دارای سرگین گاو به عنوان چسب بودند با جداسازی از قالب دچار شکستگی شدند. مقاومت فشاری بریکت ها برای مقدار بایندر ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد (بر اساس وزن خشک) آرد گندم و چسب خمیر کاغذ مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری با افزایش درصد بایندر افزایش می یابد. در نهایت بریکت های دارای خمیر کاغذ در مقایسه با بریکت های دارای آرد گندم مقاومت فشاری نسبتاً بالاتری از خود نشان دادند. Mitchual و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی تاثیر گونه ها، اندازه ذرات و فشار فشردگی بر دانسیته و مقاومت فشاری بریکت های تولیدی را بررسی کردند [۴۳]. نتایج نشان داد که پارامترهای ذکر شده تاثیر معنی داری بر دانسیته و مقاومت فشاری بریکت های تولیدی داشت.

فرآیند فشردگی در دماهای بالا، پروتئین و نشاسته پلاستیکی می شوند و به عنوان یک چسب عمل نموده و منجر به افزایش استحکام بریکت های تولیدی می گردد. لیگنین موجود در زیست توده نیز در دمای بالاتر از حدود ۱۴۰ °C نرم شده و اتصال ذرات را بهبود می بخشد [۳۹، ۴۰].

مقاومت فشاری

مقاومت فشاری به صورت نیروی فشاری محوری مستقیم، وارد بر سطح عمودی نمونه ها بیان می شود. نتایج آزمون بررسی مقاومت فشاری بریکت های تولیدی در شکل ۳ بیان شده است. نتایج حاکی از آن است که مقاومت فشاری نمونه شاهد و سایر تیمارها به طور قابل توجهی متفاوت است. با افزایش سهم مقوای کهنه بازیافتی در بریکت های تولیدی، مقاومت فشاری افزایش می یابد. نمونه A2 با ۱۰۰ درصد مقوای کهنه بازیافتی، بالاترین مقاومت فشاری (۱۷۸/۹۴ N/mm) و نمونه A1 که متشکل از ۱۰۰ درصد آرد پوست بادام بود، کمترین مقاومت فشاری (۱/۶۰ N/mm) را از خود نشان دادند. به طور کلی دیده می شود که با افزایش سهم مقوای کهنه بازیافتی در مخلوط، مقادیر مقاومت فشاری افزایش یافته اند. افزایش سهم پوست بادام در مخلوط سبب کاهش این

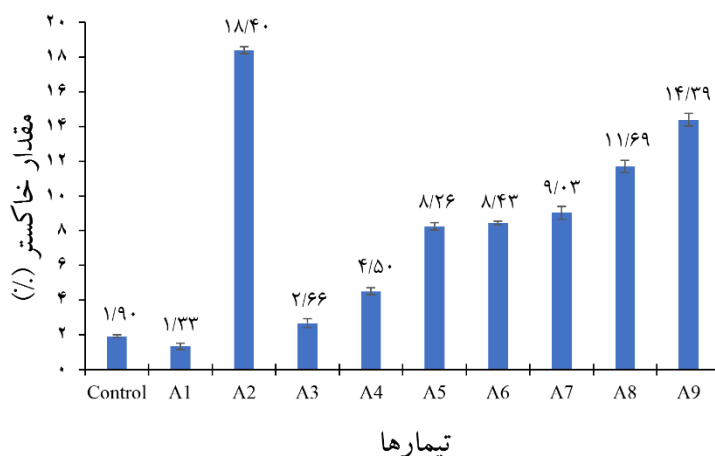


شکل ۳ مقایسه مقاومت فشاری بریکت های تولیدی با نمونه شاهد

فشاری و شاخص شکست بریکت‌های تولیدی افزایش می‌یابد [۴۷].

مقدار خاکستر

شکل شماره ۴ نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقدار خاکستر برای بریکت‌های تولیدی را نشان می‌دهد. بقایای باقی‌مانده پس از سوختن بریکت‌های سوختی را خاکستر می‌نامند. طبق نتایج به‌دست آمده، بیش‌ترین مقدار خاکستر مربوط به بریکت A2 (شامل ۱۰۰ درصد مقوای کهنه بازیافتی) و کم‌ترین مقدار خاکستر مربوط به بریکت A1 (شامل ۱۰۰ درصد آرد پوست بادام) بود. به‌طور کلی دیده شد که افزایش سهم مقوای کهنه بازیافتی منجر به افزایش مقدار خاکستر در نمونه‌ها شده‌است، از طرف دیگر، افزایش سهم پوست بادام سبب کاهش مقدار خاکستر در نمونه‌ها گردیده است. لذا از این بابت دیده می‌شود که پوست بادام به‌دلیل تولید خاکستر کمتر، جایگزین مناسبی برای آرد چوب است ولی مقوای کهنه بازیافتی جایگزین مناسبی تلقی نمی‌شود.



شکل ۴ مقایسه مقدار خاکستر بریکت‌های تولیدی با نمونه شاهد

صمغ زانتان موجب افزایش خاکستر، در حالی که افزودن صمغ گوار سبب کاهش درصد خاکستر گردید. Lela و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی بریکت‌های مقوای خاک اره را به‌عنوان یک گزینه مناسب جهت تولید سوخت زیستی مورد بررسی قرار دادند [۴۹]. نتایج حاصل نشان داد که مقدار

مقاومت فشاری یکی از شاخص‌هایی است که برای ارزیابی توانایی بریکت‌ها جهت جابه‌جایی، بسته‌بندی و حمل‌ونقل بدون آسیب دیدگی ظاهری و مکانیکی استفاده می‌شود. ابعاد ذرات زیست‌توده تاثیر به‌سزایی در ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی بریکت‌های تولیدی دارد، به‌طوری که با کاهش اندازه ذرات زیست‌توده مقاومت فشاری، دانسیته و دوام نمونه‌ها افزایش می‌یابد [۴۴]. با کاهش ابعاد ذرات زیست‌توده و در نتیجه افزایش تعداد نقاط اتصال بین ساختار فیبری، مقاومت فشاری در بریکت‌های تولیدی افزایش می‌یابد [۴۵]. همچنین در طول فرآیند بریکت‌سازی با افزایش مقدار اتصال‌دهنده (بایندر)، مقاومت فشاری بریکت‌های تولیدی به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند [۴۶]. رطوبت از جمله عواملی است که تاثیر زیادی بر مقاومت فشاری دارد به‌طوری که افزایش رطوبت سبب بهبود مقاومت فشاری می‌شود. همچنین با افزایش میزان فشار اعمال‌شده در حین بریکت‌سازی، مقاومت

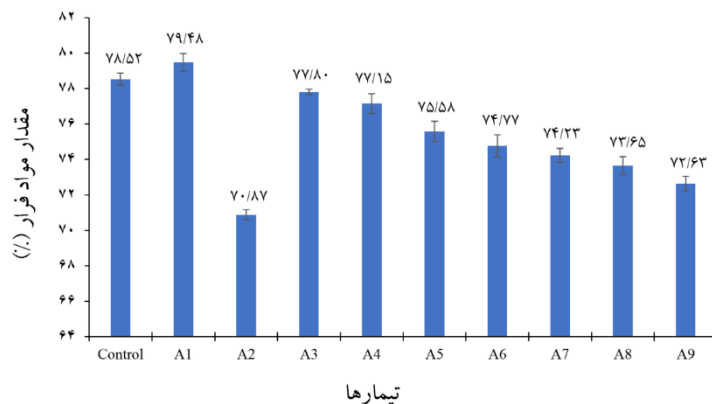
Espuelas و همکاران (۲۰۲۰) بر روی توانایی تفاله قهوه مصرف‌شده جهت تولید بریکت‌های سوختی کار کردند [۴۸]. آن‌ها از تفاله قهوه مصرف شده به‌عنوان جزء اصلی (بایومس) و از صمغ زانتان و صمغ گوار به‌عنوان بایندر استفاده کردند. در نهایت نتایج به‌دست آمده به این صورت بود که افزودن

مقابل بایندهای آلی موجب کاهش درصد خاکستر نمونه‌های تولیدی می‌شود [۵۳].

مقدار مواد فرار

افزایش مقدار مواد فرار، یکی از ویژگی‌های منفی در بریکت‌های سوختی است. بررسی نتایج حاصل نشان داد که با افزایش سهم مقوای کهنه بازیافتی، مقدار مواد فرار در نمونه‌های تولیدی کاهش پیدا کرد. به طوری که نمونه A1 دارای بیشترین و نمونه A2 دارای کمترین مقدار مواد فرار بود. به طور کلی، افزایش سهم مقدار مقوای کهنه بازیافتی سبب کاهش مقدار مواد فرار می‌شود در حالی که افزایش سهم پوست بادام در مخلوط، سبب افزایش مقدار آن‌ها می‌گردد. لذا از این بابت دیده می‌شود که پوست بادام جایگزین مناسبی برای آرد چوب بوده و در مورد مقوای کهنه بازیافتی تفاوت چندانی با آرد چوب دیده نمی‌شود.

خاکستر بریکت‌های تولیدی با افزایش میزان فشار افزایش می‌یابد. همچنین برای بریکت‌هایی که شامل ۴۰ درصد خاک آره به همراه رطوبت نسبی هستند حداقل میزان خاکستر ثبت گردید. درصد محتوای خاکستر پارامتر مهمی است که کیفیت بریکت‌ها را توصیف می‌کند [۵۰]. جهت تولید بریکت‌های سوختی، مواد زیست‌توده‌ای مناسب‌تر می‌باشند که دارای مقدار خاکستر کمتر از ۴ درصد هستند [۵۱]. محتوای خاکستر بیش‌تر موجب ایجاد سرباره و رسوب می‌گردد که منجر به خوردگی فلز می‌شود، از این رو در بریکت‌سازی استفاده از ماده اولیه‌ای با محتوای خاکستر کمتر ترجیح داده می‌شود. زیست-توده‌هایی که دارای محتوای خاکستر بالایی هستند، ارزش حرارتی کمتری دارند [۵۲]. نوع باینده مورد استفاده در بریکت‌سازی تاثیر به‌سزایی در مقدار خاکستر نمونه‌های تولیدی دارد، به طوری که استفاده از بایندهای معدنی موجب افزایش و در



شکل ۵ مقایسه مقدار مواد فرار بریکت‌های تولیدی با نمونه شاهد

تولید کردند [۵۴]. هدف آن‌ها بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های تولیدی بود. در این تحقیق از فرآیند پیرولیز خفیف ۱ (یک فرآیند ترموشیمیایی است که هدف آن کاهش محتویات آب و مواد فرار از زیست‌توده است، در نتیجه برخی از خواص سوخت آن را بهبود می‌بخشد) استفاده شد. نتایج حاصل به این صورت بود که پیرولیز خفیف سبب کاهش محتوای مواد فرار گردید. همچنین بریکت‌هایی که در آن از ضایعات هرس درخت قهوه

Espuelas و همکاران (۲۰۲۰) بر روی توانایی تفاله قهوه مصرف‌شده جهت تولید بریکت‌ها سوختی کار کردند [۴۸]. آن‌ها از تفاله قهوه مصرف‌شده به‌عنوان جزء اصلی (بایومس) و از صمغ زانتان و صمغ گوار به‌عنوان باینده استفاده کردند. افزودن باینده سبب کاهش مواد فرار، افزایش کربن ثابت و کاهش محتوای نیتروژن شد. Reis و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی با استفاده از چهارنوع زیست‌توده (ضایعات درخت اوکالیپتوس، ضایعات درخت کاج، ضایعات هرس درخت قهوه و باگاس) بریکت‌هایی

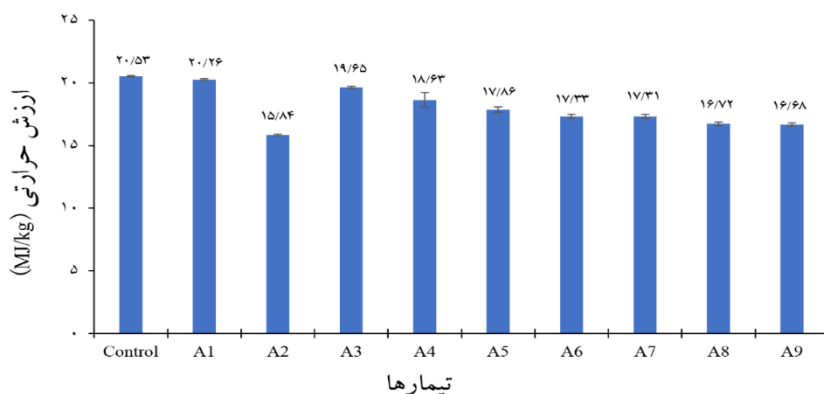
¹ Torrefaction

توجه به نتایج حاصل از این پژوهش دیده شد که افزایش سهم مقوای کهنه بازیافتی سبب کاهش ارزش حرارتی نمونه‌های تولیدی گردید. طبق شکل شماره ۶ مقدار ارزش حرارتی برای نمونه شاهد برابر $20/53 \text{ MJ/kg}$ است که نشان می‌دهد ارزش حرارتی نمونه شاهد از دیگر نمونه‌ها بیشتر است. به‌طور کلی دیده می‌شود که ارزش حرارتی پوست بادام تقریباً معادل ارزش حرارتی آرد چوب است درحالی‌که در مورد مقوای کهنه بازیافتی، مقدار این ویژگی اندکی کم‌تر است. لذا از این بابت دیده می‌شود که با افزایش سهم مقوای کهنه بازیافتی در مخلوط مقدار ارزش حرارتی بریکت‌های تولیدی به‌تدریج کاهش یافت که البته از این بابت عموماً تفاوت معنی‌دار آماری ($P > 0/05$) با هم نداشتند. از طرف دیگر افزایش سهم پوست بادام منجر به افزایش ارزش حرارتی بریکت‌ها می‌شود. به عبارت دیگر، از بابت این ویژگی، پوست بادام جایگزین مناسبی برای آرد چوب می‌باشد ولی مقوای کهنه بازیافتی را نمی‌توان یک جایگزین مناسب تلقی کرد.

استفاده شد دارای مواد فرار کمتری نسبت به دیگر زیست‌توده‌ها بودند. تولید بریکت‌های توخالی می‌تواند موجب کاهش محتوای مواد فرار در نمونه‌های تولیدی شود [۵۵]. با این حال محتوای اتصال‌دهنده‌ها (بسته به نوع و ترکیبات آن‌ها) می‌تواند سبب افزایش یا کاهش مواد فرار در نمونه‌های تولیدی گردد [۵۶]. براساس نتایج به‌دست آمده درصد مواد فرار با اندازه ذرات رابطه مستقیم دارد، به‌طوری‌که ذرات بزرگتر در مقایسه با ذرات کوچکتر، مواد فرار بیشتری را آزاد می‌کند [۵۷]. فرآیند پیرولیز خفیف میزان محتوای مواد فرار زیست‌توده‌های مورد استفاده در بریکت‌های تولیدی را کاهش می‌دهد [۴]. بریکت‌هایی که دارای درصد مواد فرار بالایی می‌باشند، از نظر ویژگی‌های حرارتی نمونه‌های با کیفیتی هستند [۵۸].

ارزش حرارتی

به‌طور کلی، ارزش حرارتی بریکت‌های سوختی، مهم‌ترین ویژگی آن‌ها از نظر تولید انرژی محسوب می‌شود. با



شکل ۶ مقایسه ارزش حرارتی بریکت‌های تولیدی با نمونه شاهد

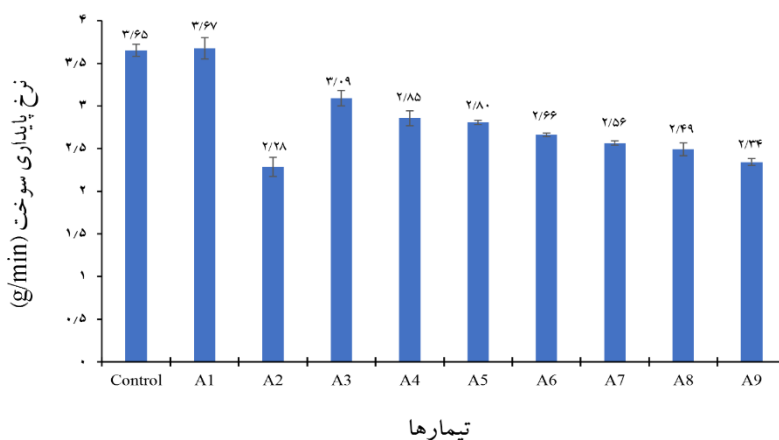
حاوی ذرات ریز (حدود ۱۲۵ میکرومتر) دارای ارزش حرارتی پایینی هستند. Anatasya و همکاران (۲۰۱۹) بریکت‌هایی با محتوای فضولات گاو (به‌عنوان زیست‌توده) و ملاس، نشاسته و نیشکر (به‌عنوان بایندر) تولید کردند [۶۰]. هدف از این تحقیق تولید بریکت‌هایی با بهترین ارزش حرارتی براساس تجزیه و تحلیل اثر ترکیب و نوع چسب بر روی بریکت بود. در نهایت مشاهده شد که بریکت حاوی ۱۰ درصد قطره‌های نیشکر بالاترین ارزش حرارتی را داراست. ارزش حرارتی مهم‌ترین پارامتر در

Ismaila و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی جهت بررسی ارزش حرارتی و اندازه‌گیری کربن و محتویات عنصری نمونه‌های تولیدی برای استفاده کارآمد از سوخت زیستی، بریکت‌هایی تولید کردند [۵۹]. نتایج به‌دست آمده به این صورت بود که ارزش حرارتی زیست‌توده‌های مورد بررسی با محتوای هیدروژن کل آن‌ها مرتبط نیستند، بلکه مستقیماً با محتوای کربن کل آن‌ها مرتبط است. همچنین آن‌ها گزارش کردند؛ اندازه ذرات تاثیر به‌سزایی بر ارزش حرارتی نمونه‌های تولیدی دارد، به‌طوری‌که بریکت‌های

نرخ پایداری سوخت

شکل ۷ مقایسه نرخ پایداری سوخت نمونه‌های تولید شده با نمونه شاهد را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، افزایش نرخ پایداری سوخت یکی از ویژگی‌های مهم و مثبت در بریکت‌های سوختی است. طبق نتایج به‌دست آمده بریکت‌های حاوی آرد پوست بادام دارای نرخ پایداری سوخت بیش‌تری هستند در صورتی که افزودن OCC به نمونه‌های تولیدی سبب کاهش نرخ پایداری سوخت آن‌ها گردید. به‌طوری که نمونه A1 دارای بیش‌ترین و نمونه A2 دارای کمترین مقدار نرخ سوختن بود. به‌طور کلی دیده می‌شود که افزایش سهم مقوای کهنه بازیافتی در مخلوط منجر به کاهش نرخ پایداری سوخت شده، در حالی که افزایش سهم پوست بادام منجر به افزایش این ویژگی شده‌است. لذا از این بابت دیده می‌شود که پوست بادام جایگزین مناسبی برای آرد چوب می‌باشد ولی مقوای کهنه بازیافتی شاید چندان مناسب نباشد.

تعیین کیفیت بریکت است، زیرا افزایش ارزش حرارتی تاثیر مثبتی بر راندمان حرارتی بریکت‌های تولیدی دارد [۶۱]. نوع بایندر یکی از موارد موثر بر ارزش حرارتی بریکت‌های تولیدی است [۶۰] زیرا افزودن بایندر موجب بهبود ارزش حرارتی می‌گردد [۳۲]. از طرفی مقدار خاکستر نیز می‌تواند به‌شکل موثری بر ارزش حرارتی بریکت‌های تولیدی دخیل باشد به‌طوری که بریکت‌های با درصد خاکستر بالا، ارزش حرارتی پایین‌تری دارند [۶۲]. همچنین با اضافه کردن افزودنی‌های خاصی مانند ذغال سنگ به بریکت‌های تولیدی، می‌توان ارزش حرارتی آن‌ها را بهبود بخشید. به‌طوری که با افزودن حدود ۱۰-۲۰ درصد ذغال سنگ به فرمولاسیون بریکت‌های تولیدی، شاهد بهبود ارزش حرارتی آن‌ها خواهیم بود [۶۳]. یکی دیگر از پارامترهای موثر بر ارزش حرارتی، اندازه ذرات زیست‌توده است به‌صورتی که با افزایش اندازه ذرات، ارزش حرارتی بریکت‌های تولیدی بهبود می‌یابد [۶۴].



شکل ۷ مقایسه نرخ پایداری سوخت بریکت‌های تولیدی با نمونه شاهد

بیش‌ترین زمان اشتعال را داشتند. Mustafa و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی عملکرد سوختن بریکت‌های تولیدشده از بقایای زیست‌توده منتخب در منطقه مایدوگوری را مورد بررسی قرار دادند [۶۵]. نتایج این تحقیق نشان داد که نرخ پایداری سوختن بریکت‌های تولیدشده از پسماند خاک اره و پوسته بادام زمینی بیش‌تر از بریکت‌های پسماند پوسته برنج است. یکی از پارامترهای موثر بر نرخ پایداری سوختن بریکت‌های سوختی فشار تراکم است، به‌طوری که با افزایش فشار اعمالی این پارامتر

Davies و همکاران (۲۰۱۳) مطالعه‌ای به‌منظور بررسی اثر فشار تراکم، نسبت چسب و اندازه ذرات بر زمان اشتعال و سرعت سوختن بریکت‌های تولیدشده از مخلوط سنبل آبی و پوست درخت چنار انجام دادند [۳۲]. نتایج به‌دست آمده به این صورت بود که افزایش فشار تراکم باعث کاهش سرعت سوختن نمونه‌های تولیدی شد. همچنین سرعت سوختن بریکت‌ها با افزایش نسبت چسب کاهش یافت. به‌طوری که نمونه‌های تولیدشده از سطح بایندر ۵۰ درصد کم‌ترین سرعت سوختن و همچنین

نمونه‌های حاوی OCC، به‌ویژه تیمار A2 (۱۰۰ درصد مقوای کهنه بازیافتی)، مقاومت فشاری قابل قبول را از خود نشان دادند. لذا در نگاه اول به‌نظر می‌رسد بریکت‌های سوختی حاصل از ۱۰۰ درصد مقوای کهنه بازیافتی می‌توانند به‌صورت نسبی پاسخ‌گوی تمام ویژگی‌های مدنظر باشند. اما، از سوی دیگر، با استفاده تنها از مقوای کهنه بازیافتی ارزش حرارتی خیلی بالایی (در مقایسه با آرد چوب یا آرد پوست بادام) به‌دست نمی‌آید و در صورت نیاز به ارزش حرارتی بالا، لازم است از ماده دیگری همانند پوست بادام در اختلاط با مقوای کهنه بازیافتی استفاده کرد. با افزایش سهم آرد پوست بادام در مخلوط مواد تا حد ۲۰ الی ۳۰ درصد می‌توان به‌نسبت مناسبی از مجموع ویژگی‌های مورد بررسی رسید. افزایش سهم آرد پوست بادام به‌مقدار بیش‌تر از ۳۰ درصد، مناسب نبوده و منجر به افت مجموع ویژگی‌های مورد نیاز خواهد شد. در نهایت با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، اولین فرضیه مطرح‌شده در این پژوهش پذیرفته می‌شود و آرد پوست بادام به‌عنوان جزء اصلی در سطح مصرف ۲۰ الی ۳۰ درصد، جایگزین مناسبی برای آرد چوب می‌باشد و می‌توان بریکت‌هایی با مجموع ویژگی‌های مطلوب تولید کرد. در خصوص دومین فرضیه مطرح‌شده می‌توان بیان کرد که آرد پوست بادام اثر مثبتی بر ویژگی‌های مقاومتی و فیزیکی بریکت‌های تولیدی ندارد، اما مقوای کهنه بازیافتی به‌علت وجود همی‌سلولزها، لیگنین و مقداری الیاف بلند تاثیر به‌سزایی در پیوندیابی بین اجزای بریکت و استحکام مکانیکی بریکت‌های تولیدی دارد و در نتیجه سبب بهبود ویژگی‌های مقاومتی و فیزیکی نمونه‌های تولیدشده می‌گردد. نتایج حاصل از این بررسی، در مقیاس تولید صنعتی نیز می‌تواند با احتمال بسیار زیاد مورد استفاده قرار گیرد و منجر به تولید فرآورده مناسب گردد.

بریکت‌های تولیدی کاهش می‌یابد [۶۶]. یکی دیگر از عوامل موثر بر نرخ سوختن، بایندها هستند که با توجه به نوع آن‌ها می‌توانند موجب کاهش یا افزایش نرخ سوختن شوند. به‌طوری که در پژوهشی [۳۲] جهت تولید بریکت‌های سوختی از پوست درخت چنار به‌عنوان بایندها استفاده کردند که منجر به کاهش نرخ سوختن گردید. در حالی که در پژوهشی دیگر [۶۷] از نشاسته و ملاس و از آب به‌عنوان بایندها در بریکت‌های پوست برنج استفاده کردند. در نهایت مشخص شد که بایندهای مورد استفاده سبب افزایش نرخ سوختن بریکت‌های تولیدی شد. از طرفی شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد بریکت‌های دارای مواد فرار بالاتر، نرخ سوختن بیش‌تری دارند. در همین راستا Mitchual و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که نرخ سوختن بریکت‌های تولیدشده از ضایعات کشاورزی در آن دسته از بریکت‌هایی که مواد فرار بیش‌تری دارند، زیادتر است [۶۸].

نتیجه‌گیری

آرد پوست بادام یکی از انواع زیست‌توده لیگنوسلولزی است که در کشور ما به مقدار نسبتاً فراوان موجود می‌باشد. همچنین، مقوای کهنه بازیافتی نیز ماده لیگنوسلولزی مناسبی برای این امر به‌شمار می‌رود. لذا، در تحقیق حاضر اثر استفاده از آرد پوست بادام و مقوای کهنه بازیافتی در تولید بریکت سوختی بررسی شد. نتایج ارزیابی ویژگی‌های مورد بررسی در بریکت‌های تولیدی نشان داد استفاده ۱۰۰ درصد از آرد پوست بادام (تیمار A1) جهت تولید بریکت‌های سوختی، در مجموع ویژگی‌های مناسبی را در بریکت ایجاد نمی‌کند. اما مقوای کهنه بازیافتی به‌دلیل وجود همی‌سلولزها و مقدار لیگنین قابل‌توجه می‌تواند نقش یک بایندها را به‌خوبی اجرا کند، به‌طوری که

منابع

- [1] Sansaniwal, S. K., Pal, K., Rosen, M. A. and Tyagi, S. K., 2017. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 72, 363-384.
- [2] Tursi, A. 2019. A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion. *Biofuel Research Journal*, 6(2), 962.

- [3] United Nation Environment Programme. Emissions Gap Report. 2019. Available online: <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>.
- [4] 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.
- [5] Baqir, M., Kothari, R. and Singh, R. P., 2019. Fuel wood consumption, and its influence on forest biomass carbon stock and emission of carbon dioxide. A case study of Kahinaur, district Mau, Uttar Pradesh, India. *Biofuels*, 10(1), 145-154.
- [6] Kumar, D. and Singh, B. 2019. Role of biomass supply chain management in sustainable bioenergy production. *Biofuels*, 10(1), 109-119.
- [7] Geyer, W., 2007. Biomass for energy in Europe and the United States. In National Convention of the Society of American Foresters.
- [8] Asresu, A. T., 2017. Biomass briquetting: Opportunities for the transformation of traditional biomass energy in Ethiopia. *J. Energy Technol. Policy*, 7, 46-54.
- [9] Ahiataku-Togobo, W. and Ofosu-Ahenkorah, A., 2009. Bioenergy policy implementation in Ghana. In COMPETE international conference (Vol. 26, p. 28).
- [10] Mwakubo, S., Mutua, J., Ikiara, M. and Aligula, E. 2007. Discussion Paper No. 74 of 2007 on Strategies for Securing Energy Supply in Kenya.
- [11] Agbro, E. B. and Ogie, N. A. 2012. A comprehensive review of biomass resources and biofuel production potential in Nigeria. *Research journal in engineering and applied sciences*, 1(3), 149-155.
- [12] Trubetskaya, A., Leahy, J. J., Yazhenskikh, E., Müller, M., Layden, P., Johnson, R. and Monaghan, R. F., 2019. Characterization of woodstove briquettes from torrefied biomass and coal. *Energy*, 171, 853-865.
- [13] Maninder, R. S. K. and Grover, S., 2012. Using agricultural residues as a biomass briquetting: an alternative source of energy. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSRJEEE) ISSN, 2278-1676*.
- [14] Eriksson, S. and Prior, M., 1990. The briquetting of agricultural wastes for fuel (No. 11). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [15] Tumuluru, J. S., Tabil, L. G., Song, Y., Iroba, K. L. and Meda, V., 2015. Impact of process conditions on the density and durability of wheat, oat, canola, and barley straw briquettes. *Bioenergy research*, 8, 388-401.
- [16] Ahmed, S. A., Kumari, A. and Mandavgane, K., 2014. A Review on Briquettes as an Alternative Fuel. *Int. J. Innov. Eng. Technol*, 3(6).
- [17] Tumuluru, J. S. and Wright, C. T., 2010. A review on biomass densification technologie for energy application.
- [18] Tiwari, C., & Beck, S. 2011. Producing fuel briquettes from sugarcane waste. *EWB-UK National Research & Education Journal*, 220-550.
- [19] Kristoferson, L.A. and Bokalders, V., 1986. *Renewable Energy Technologies-Their Applications in Developing Countries*; Pergamon Press: Oxford, UK,; p. 319.
- [20] Werther, J., Saenger, M., Hartge, E. U., Ogada, T. and Siagi, Z., 2000. Combustion of agricultural residues. *Progress in energy and combustion science*, 26(1), 1-27.
- [21] Grover, P. D. and Mishra, S. K., 1996. Biomass briquetting: technology and practices. Regional wood energy development program in Asia. Field document, (46).
- [22] Muazu, R. I. and Stegemann, J. A., 2017. Biosolids and microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting. *Fuel*, 194, 339-347.
- [23] Sette Jr, C. R., Hansted, A. L. S., Novaes, E., e Lima, P. A. F., Rodrigues, A. C., de Souza Santos, D. R. and Yamaji, F. M., 2018. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. *Industrial crops and products*, 122, 209-213.
- [24] Brunerová, A., Roubík, H., Brožek, M., Herák, D., Šleger, V. and Mazancová, J., 2017. Potential of tropical fruit waste biomass for production of bio-briquette fuel: Using Indonesia as an example. *Energies*, 10(12), 2119.

- [25] Onukak, I. E., Mohammed-Dabo, I. A., Ameh, A. O., Okoduwa, S. I. and Fasanya, O. O., 2017. Production and characterization of biomass briquettes from tannery solid waste. *Recycling*, 2(4), 17.
- [26] Fengmin, L. and Mingquan, Z., 2011. Technological parameters of biomass briquetting of macrophytes in Nansi Lake. *Energy Procedia*, 5, 2449-2454.
- [27] Brožek, M., 2015. Evaluation of selected properties of briquettes from recovered paper and board. *Research in Agricultural Engineering*, 61(2), 66-71.
- [28] Ebringerová, A., Hromádková, Z., Košťálová, Z. and Sasinková, V., 2008. Chemical valorization of agricultural by-products: isolation and characterization of xylan-based antioxidants from almond shell biomass. *BioResources*, 3(1), 60-70.
- [29] Li, X., Liu, Y., Hao, J. and Wang, W., 2018. Study of almond shell characteristics. *Materials*, 11(9), 1782.
- [30] Kaliyan, N. and Morey, R. V., 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and bioenergy*, 33(3), 337-359.
- [31] Islam, M. H., Hossain, M. M. and Momin, M. A., 2014. Development of briquette from coir dust and rice husk blend: An alternative energy source. *International Journal of Renewable Energy Development*, 3(2), 119.
- [32] Davies, R. M. and Abolude, D. S., 2013. Ignition and burning rate of water hyacinth briquettes. *Journal of Scientific Research and Reports*, 2(1), 111-120.
- [33] Kong, L., Tian, S., He, C., Du, C., Tu, Y. and Xiong, Y., 2012. Effect of waste wrapping paper fiber as a "solid bridge" on physical characteristics of biomass pellets made from wood sawdust. *Applied energy*, 98, 33-39.
- [34] Kpalo, S. Y., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A. and Roslan, A. M., 2020. Production and characterization of hybrid briquettes from corncobs and oil palm trunk bark under a low pressure densification technique. *Sustainability*, 12(6), 2468.
- [35] Rumpf, H., 1962. The strength of granules and agglomerates. *Agglomeration*, 379-418. Said, N., Bishara, T., García-Maraver, A. and Zamorano, M., 2013. Effect of water washing on the thermal behavior of rice straw. *Waste Management*, 33(11), 2250-2256.
- [36] York, P. and Pilpel, N., 1973. The tensile strength and compression behaviour of lactose, four fatty acids, and their mixtures in relation to tableting. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 25, 1-11.
- [37] Pietsch, W. B., 1984. Agglomerate bonding and strength. *Handbook of powder science and technology*, 231-252.
- [38] Mani, S., Tabil, L. G. and Sokhansanj, S., 2002, July. Compaction characteristics of some biomass grinds. In AIC 2002 Meeting, CSAE/SCGR Program, Saskatoon, Saskatchewan (pp. 14-17).
- [39] Adapa, P. K., Tabil, L. G., Schoenau, G. J. and Sokhansanj, S., 2004. Pelleting characteristics of fractionated sun-cured and dehydrated alfalfa grinds. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(6), 813-820.
- [40] Tabil, L. G., 1997, "Binding and Pelleting characteristics of alfalfa" An Unpublished Ph.D diss
- [41] Adapa, P. K., Tabil, L. G. and Schoenau, G. J., 2009. Compression characteristics of selected ground agricultural biomass. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- [42] Shyamalee, D., Amarasinghe, A. D. U. S. and Senanayaka, N. S., 2015. Evaluation of different binding materials in forming biomass briquettes with saw dust. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(3), 1-8.
- [43] Mitchual, S. J., Frimpong-Mensah, K. and Darkwa, N. A., 2013. Effect of species, particle size and compacting pressure on relaxed density and compressive strength of fuel briquettes. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4, 1-6.
- [44] Lindley, J. A. and Vossoughi, M., 1989. Physical properties of biomass briquets. *Transactions of the ASAE*, 32(2), 361-0366.
- [45] 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.

- [46] Manyuchi, M. M., Tichapondwa, S. M., Ikhu-Omoregbe, D. I. and Oyekola, O. O., 2016. Process Parameters Affecting the Production of Charcoal Briquettes from Lignocellulose Waste. *Lignocellulose*, 5(2), 86-93.
- [47] DEMIRBAS, A. and Sahin-Demirbas, A. Y. S. E., 2004. Briquetting properties of biomass waste materials. *Energy Sources*, 26(1), 83-91.
- [48] Espuelas, S., Marcelino, S., Echeverría, A. M., Del Castillo, J. M. and Seco, A., 2020. Low energy spent coffee grounds briquetting with organic binders for biomass fuel manufacturing. *Fuel*, 278, 118310.
- [49] Lela, B., Barišić, M. and Nižetić, S., 2016. Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical-mechanical and thermal characteristics. *Waste management*, 47, 236-245.
- [50] Dinesha, P., Kumar, S. and Rosen, M. A., 2019. Biomass briquettes as an alternative fuel: A comprehensive review. *Energy Technology*, 7(5), 1801011.
- [51] Kaliyan, N. and Morey, R. V., 2010. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource technology*, 101(3), 1082-1090.
- [52] Koppejan, J. and Van Loo, S., 2012. *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.
- [53] Zhang, G., Sun, Y. and Xu, Y., 2018. Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 477-487.
- [54] 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.
- [55] Kumar, J. A., Kumar, K. V., Petchimuthu, M., Iyahraja, S. and Kumar, D. V., 2021. Comparative analysis of briquettes obtained from biomass and charcoal. *Materials Today: Proceedings*, 45, 857-861.
- [56] Sotande, O. A., Oluyege, A. O. and Abah, G. B., 2010. Physical and combustion properties of briquettes from sawdust of *Azadirachta indica*. *Journal of Forestry research*, 21, 63-67.
- [57] Nazari, M. M., San, C. P. and Atan, N. A., 2019. Combustion performance of biomass composite briquette from rice husk and banana residue. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol*, 9, 455-460.
- [58] Ajimotokan, H. A., Ehindero, A. O., Ajao, K. S., Adeleke, A. A., Ikubanni, P. P. and Shuaib-Babata, Y. L., 2019. Combustion characteristics of fuel briquettes made from charcoal particles and sawdust agglomerates. *Scientific African*, 6, e00202.
- [59] Ismaila, A., Zakari, I. Y., Nasiru, R., Tijjani, B. I., Abdullahi, I. and Garba, N. N., 2013. Investigation on biomass briquettes as energy source in relation to their calorific values and measurement of their total carbon and elemental contents for efficient biofuel utilization. *Advances in Applied Science Research*, 4(4), 303-309.
- [60] Anatasya, A., Umiati, N. A. K. and Subagio, A., 2019. The effect of binding types on the biomass briquette calorific value from cow manure as a solid energy source. In *E3S Web of Conferences (Vol. 125, p. 13004)*. EDP Sciences.
- [61] Onukak, I. E., Mohammed-Dabo, I. A., Ameh, A. O., Okoduwa, S. I. and Fasanya, O. O., 2017. Production and characterization of biomass briquettes from tannery solid waste. *Recycling*, 2(4), 17.
- [62] Koppejan, J. and Van Loo, S., 2012. *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.
- [63] Zakari, I. Y., Ismaila, A., Sadiq, U. and Nasiru, R., 2013. Investigation on the effects of addition of binder and particle size on the high calorific value of solid biofuel briquettes. *Journal of Natural Sciences Research*, 3(12), 30-34.
- [64] Mustafa, B. G., Aji, M. M., Yaumi, A. L., Highina, B. K. and Sulaiman, S. I., 2014. Comparative studies on the combustion performance of briquettes produced from selected biomass residues in Maiduguri. *World J Energy Sci Eng*, 1, 1-8.
- [65] Thabuot, M., Pagketanang, T., Panyacharoen, K., Mongkut, P. and Wongwicha, P., 2015. Effect of applied pressure and binder proportion on the fuel properties of holey bio-briquettes. *Energy Procedia*, 79, 890-895.

Effect of using Almond shell flour and OCC on the properties of the production briquette

Abstract

The rising demand for energy resources has been fueled by the growth of industrial activities. The utilization of existing energy sources (primarily fossil fuels) has detrimental effects on the environment. Therefore, finding a suitable alternative to fossil fuels is crucial. Lignocellulosic biomass emerges as a viable replacement for fossil fuels. To harness its potential, biomass raw materials can be processed through appropriate methods into fuel briquettes. This study explored the impact of incorporating almond shell flour and OCC into the production of fuel briquettes. The findings revealed that treatment A2 (100% OCC) exhibited the highest density, compressive strength, and ash content (1.19 g/cm³, 178.94 N/mm², and 18.4%, respectively). Treatment A1 (100% almond shell flour) demonstrated the highest volatile matter and fuel stability rate (79.48% and 3.67 g/min, respectively). Calorific value, measured at 20.53 MJ/kg, was highest in the control sample consisting of 100% wood flour. Based on the examined characteristics and their significance in the final product, the experimental treatments were ranked, with A2, A9 (80% recycled old cardboard and 20% almond shell), and A8 (70% recycled old cardboard and 30% almond shell) occupying the top three positions, respectively.

Keywords: Lignocellulosic biomass, Fuel briquettes, Solid biofuel, Almond shell, Recycled old cardboard, Renewable resources.

M. Roonama¹
A. Ghasemian²
E. Afra²

¹ Master Student, Pulp and Paper Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

² Associate Prof., Pulp and Paper Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Corresponding author:
M.dalvand@ut.ac.ir

Received: 2023/08/24
Accepted: 2023/12/09