تولید بریکت سوختی بدون بایندر از پسماندهای لیگنوسلولزی پالونیا، ساقه ذرت و خمیرکاغذبازیافتی در فشارهای پایین

نسیبه محمدی[1*]
الیاس افرا[2]
علی قاسمیان[3]
ابولقاسم خزاعیان[4]
فرزام فتوت[5]

[1] دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[2] دانشیار، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[3] استاد، گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[4] استاد، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[5] استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

مسئول مکاتبات:
Mohamadi.nasibe@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵

چکیده

استفاده از انرژی زیست توده به عنوان یکی از منابع انرژی های تجدیدپذیر، علاوه کاهش مشکلات زیست محیطی و گرمایش جهانی امنیت انرژی را تضمین می کند. بریکت های سوختی از انواع سوخت های جامد زیستی هستند که با استفاده از فرآیندهای ساده متراکم کردن بدست می آیند و نیازی به تیمارهای پیچیده فیزیکوشیمیایی ندارند. در این تحقیق پتانسیل استفاده از پسماندهای لیگنوسلولزی مانند پالونیا، ساقه ذرت و خمیرکاغذبازیافتی جهت تولید بریکت سوختی بدون بایندر در فشارهای پایین ۹، ۱۸ و ۲۷ مگاپاسکال در دو سطح دمایی ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد بررسی شد. نتایج امکان پذیری تولید بریکت سوختی از سه ماده لیگنوسلولزی با ویژگی های فیزیکی و مکانیکی مناسب را تایید کرد. برای بریکت خمیرکاغذ بازیافتی دانسیته و مقاومت بیشتری در فشارهای پایین بدست آمد در حالی که پالونیا و ساقه ذرت نیاز به سطوح بالاتر فشار، دما و زمان جهت دستیابی به دانسیته و مقاومت فشاری مطلوب نسبت به خمیرکاغذ بازیافتی داشتند.

واژگان کلیدی: انرژی زیست توده، بریکت های سوختی، متراکم کردن، پسماندهای لیگنوسلولزی.

مقدمه

رویدادهای سال‌های اخیر هزینه‌های یک سیستم انرژی متمرکز را که به شدت به سوخت‌های فسیلی وابسته است، برای اقتصاد جهانی تشدید کرده است. همه‌گیری کووید-۱۹ نیز باعث نوسانات شدید تقاضای انرژی، شوک های قیمتی و اختلال در تامین انرژی و ممانعت از سرمایه گذاری در انرژی شد. بحران اوکراین سطوح جدیدی از نگرانی و عدم اطمینان را به همراه آورده

است و قیمت نفت و گاز به بالاترین حد خود رسیده است. اثرات اقتصادی و اجتماعی سریع افزایش قیمت انرژی به طور فزاینده ای توسط مصرف کنندگان و مشاغل در سراسر جهان احساس می شود. نگرانی‌های امنیت انرژی، به‌ویژه در اروپا، سیاست‌گذاران را وادار می‌کند تا به دنبال استقرار سریع‌تر جایگزین‌های انرژی باشند. در عین حال، بحران آب و هوا مانند همیشه فوری است. همانطور که در آخرین گزارش هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوایی[1] که در پایان فوریه ۲۰۲۲ منتشر شد، با تغییرات اقلیمی که قبلاً خسارت قابل توجهی (و گاهی غیرقابل برگشت) برای اکوسیستم ها، سکونتگاه ها و زیرساخت ها وارد کرده است، جهان با خطرات آب و هوایی چند برابری مواجه است حتی اگر بتوان گرمایش را تا ۱/۵ درجه سانتی گراد مهار کرد. فراتر رفتن از این آستانه که به طور فزاینده ای محتمل به نظر می رسد منجر به اثرات شدید دیگری می شود که نه تنها از نظر اقتصادی پرهزینه هستند، بلکه سلامت و بقای انسان را تهدید می کنند. در واقع در پاریس در سال ۲۰۱۵، امضاکنندگان کنوانسیون سازمان ملل متحد در مورد تغییرات آب و هوایی موافقت کردند که تلاش‌هایی را برای حفظ افزایش دمای جهانی به زیر ۲ درجه سانتی‌گراد ادامه دهند و تلاش کنند تا سال ۲۰۵۰ افزایش دما را به ۱/۵ درجه سانتی‌گراد محدود کنند [۱، ۲].

تشدید بحران های مربوط به انرژی بر نیاز مبرم برای تسریع در انتقال انرژی جهانی تاکید می کند. علیرغم پیشرفت جهانی خوب در استقرار انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش برق، بخش‌های فرآیندهای صنعتی و گرمایش خانگی هنوز به شدت به گاز فسیلی وابسته هستند. در بخش حمل و نقل، نفت همچنان تسلط دارد. در این بخش‌ها، نفوذ عمیق‌تر انرژی‌های تجدیدپذیر، گسترش برق‌رسانی و بهبود بهره‌وری انرژی می‌تواند نقش مهمی در کاهش نگرانی‌ها در مورد قیمت‌ها و امنیت عرضه داشته باشد. دستیابی به هدف اقلیمی ۲۰۵۰ به اقدامات کافی تا سال ۲۰۳۰ بستگی دارد و هشت سال آینده برای تسریع انتقال مبتنی بر انرژی های تجدیدپذیر حیاتی است. دستیابی به هدف ۲۰۵۰ با تسریع استقرار انرژی های تجدیدپذیر و انجام اقدامات جدی برای افزایش بهره وری انرژی، یک استراتژی بدون پشیمانی[2] است که اهداف آب و هوایی را برآورده می کند. همچنین مزایای انتقال انرژی عادلانه و فراگیر مانند دسترسی جهانی به انرژی، ایجاد شغل، کاهش فقر را ارائه می دهد [۱].

در کشور ایران نیز همسو با دیگر کشورهای جهان دستیابی به اطلاعات و فن آوری های روز در خصوص استفاده از انرژی های تجدیدپذیر در اولویت قرار گیرد. کشور ایران اولین دارنده ذخایر گازی و چهارمین ذخایر نفتی در جهان است و همین عامل باعث شده گاز طبیعی عمده ترین سهم را در سوخت مصرفی نیروگاههای کشور به خود اختصاص دهد در حالی که در فصل سرما اساسی ترین مسأله در تولید برق، تأمین سوخت این نیروگاهها می باشد. بنابراین سیاست های انرژی کشور، متولیان بخش برق را بر آن داشته تا در سالهای اخیر به بهره گیری از انرژی های تجدیدپذیر توجه ویژه ای داشته باشند. سوخت های تجدیدپذیر می تواند امنیت انرژی را به همراه داشته باشد. در بین این منابع، زیست توده یک ماده آلی است که براحتی در هر محیطی تولید و قابلیت تبدیل به هر سه حالت ماده را دارد و به سرعت احیا می شود و در واقع زمان تشکیل آن بر خلاف نفت و زغال سنگ کوتاه می باشد و تنها سوخت تجدیدپذیر است که به صورت احتراق مستقیم در نیروگاههای برق می توان از آن استفاده کرد و قابلیت ایجاد نیروگاههای محلی مقیاس کوچک در مناطقی که دسترسی به آن زیاد است، وجود دارد [۳].

طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی، زیست‌توده به عنوان یکی از منابع انرژی تجدید پذیر، ۵۵ درصد از انرژی تجدیدپذیر و ۶ درصد از کل انرژی جهانی را تامین می کند و استفاده از انرژی زیست توده از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ به طور میانگین سالانه ۷ درصد افزایش یافته است و روند صعودی ادامه دارد و پیش بینی می شود که شاهد افزایش ۱۰ درصدی آن بین سال های ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۰ باشیم. زیست توده یک منبع انرژی آلی و تجدیدپذیر و از اولین منابع انرژی بشر به ویژه در مناطق روستایی بوده که اغلب در دسترس و قابل استفاده است. تولید انرژی از مواد

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change

[2] no regrets strategy

زیست توده ای پتانسیل کاهش انتشار گازهای گلخانه ای از سوخت های فسیلی را دارد و همچنین می تواند امنیت انرژی را تضمین کند و با مشکلات زیست محیطی مقابله نماید. بعلاوه در مدیریت کارآمد و توسعه مناطق روستایی به لحاظ اقتصادی شرکت می کند [۴، ۵].

انواع منابع زیست‌توده متداول در تولید سوخت‌های جامد زیستی شامل پسماندهای جنگلی و کشاورزی، علف‌ها و پسماندهای شهری، صنعتی و دامی هستند. از این رو می توان به سه دسته اصلی ماده اولیه لیگنوسلولزی مانند چوب، موادلیگنوسلولزی غیرچوبی و مواد لیگنوسلولزی بازیافتی به عنوان منابع تولید سوخت های زیستی اشاره کرد [۷].

با توسعه کشت گونه های تند رشد غیر جنگلی همانند پالونیا و صنوبر در سطح کشور به عنوان راه حلی برای تأمین چوب برای مصارف صنعتی و جلوگیری از کاهش روزافزون سطح جنگل های کشور و مشکلات متعاقب آن، مقدار عظیمی از ضایعات چوبی از صنایع فرآوری چوب بر جای می ماند که پتانسیل ورود به تولید سوخت زیستی را دارد. همچنین مقادیر عمده ای از ضایعات کشاورزی در کشور ایران که حدود ۱۹/۶ میلیون تن در سال است تولید می شود که در مزارع سوزانده می شود. در واقع وجود این ضایعات فراوانی، ارزان بودن و دسترس پذیری آسان به منابع زیست توده لیگنوسلولزی تجدیدپذیر را نشان می دهد. در میان پسماندهای زراعی مثل ساقه گندم، جو، پنبه و کلش برنج، ساقه ذرت به علت عدم استفاده در خوراک دام از جمله پسماندهای کشاورزی است که تبدیل آن نه تنها به جمع آوری پسماندهای کشاورزی کمک می کند بلکه سوختی سبز را نیز تولید می کند [۳، ۷]. در ارتباط با سومین منبع مواد لیگنوسلولزی موجود (مواد بازیافتی) مقدار مصرف سالانه انواع کاغذ و کارتن با توجه به مصرف سرانه ۲۵ کیلوگرم، ۲ میلیون تن برآورد شده است که حدود ۴۰ درصد آن تولید داخل است و علیرغم اهمیت بازیافت کاغذ، میزان بازیافت تنها به حدود ۱۸ درصد می‌رسد [۶، ۸]. آمار بازیافت کاغذ در کشور، ضعف این صنعت و پیدا کردن استراتژی‌های استفاده مجدد جایگزین در کنار بازیافت و استفاده حداکثری از این منابع به جای دفن در محل زباله را نشان می‌دهد. در کشورهای پیشرفته نیز باوجود بالاتر بودن نرخ بازیافت کاغذ نسبت به سایر مواد، هنوز هم کاغذ بیشترین بخش ضایعاتی است که در محل دفن زباله وجود دارد [۸، ۹]. بر این اساس اگر در فضای رقابتی بتوانیم با توجه حجم بسیار زیاد انواع کاغذ باطله از قبیل مقوای کنگره ای، کاغذ باطله اداری و کاغذ روزنامه و دیگر انواع کاغذ، ارزش افزوده بیشتری نسبت به بازیافت کاغذ ایجاد کنیم، می توان که از این صنعت پیشی گرفت. بنابراین در این پژوهش از خاک اره پالونیا، ضایعات ساقه ذرت و خمیرکاغذ باطله به عنوان ماده اولیه در تولید انرژی استفاده شده است.

برخی موانع در استفاده اقتصادی از ضایعات لیگنوسلولزی کیفیت متغیر پسماندهای کشاورزی، هزینه جمع آوری و مشکلات مربوط به حمل و نقل و ذخیره سازی آن ها می باشد. به دلیل رطوبت زیاد، شکل و اندازه نامنظم و چگالی حجمی کم، نگهداری و حمل و نقل ضایعات زیست توده ای دشوار است. توسعه روش های جدید برای فرآوری زیست توده ضروری است تا آن را به ماده اولیه مناسبی برای تولید انرژی تبدیل کند. متراکم کردن مستقیم ترین روش و راه حل موثر به منظور کاهش هزینه های عملیاتی صنعت و همچنین تأمین ماده اولیه و تغذیه بهتر پالایشگاه زیستی برای تولید انرژی است که مزایایی از قبیل کنترل مقادیر رطوبتی بیشتر زیست‌توده، خصوصیات احتراق کنترل شده و یکنواختی بیشتر به لحاظ اندازه و شکل را نتیجه می‌دهند. بریکت ها و پلت ها متداول ترین نوع سوخت جامد زیستی هستند که عموماً فرآیند تولید آن ها با اعمال فشار و دما است که منجر به تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک، افزایش نقاط تماس ذرات و افزایش دانسیته در زیست‌توده از دانسیته اولیه ۰/۲ - ۰/۰۴گرم بر سانتی متر مکعب تا دانسیته ۱/۲- ۰/۶ گرم بر سانتی مکعب فرآوره نهایی می-شود. همچنین دانسیته انرژی و دوام سوخت جامد تولیدی زیاد می‌شود [۱۰].

در حال حاضر فناوری های پرس پیچی و پیستون پرس به عنوان فناوری های تولید بریکت سوختی از لحاظ تجاری مهم هستند. از انجا که فناوری پرس پیستون به لحاظ مقایسه ای نسبت به فناوری پرس پیچی قدیمی تر است امروزه بیشتر از آنها استفاده می شود. هر چند فناوری پرس پیچی به سرعت در حال اهمیت گرفتن است [۶].

دانستن متغیرهای تأثیرگذار بر فرآیند متراکم کردن شامل متغیرهای ماده اولیه (میزان رطوبت، شکل و اندازه و توزیع ذرات و خصوصیات بیوشیمیایی) و متغیرهای فرآیندی (فشار، دما و زمان نگهداشت در فشار و ژئومتری قالب) به منظور تولید بریکت های با کیفیت خوب اهمیت زیادی دارد. معمولاً در تولید بریکت ها فشارهای بالا (۷۰-۲۵۰ مگاپاسکال) و دماهای پرس زیاد (۱۰۰-۲۵۰) به منظور افزایش دوام و نرم کردن اجزای تماس برای افزایش نیروی جاذبه بین ذرات کوچک زیست توده به کار برده می شوند یا بایندرهای ویژه ای از قبیل بنتونیت، کلسیم لیگنوسولفونات، نشاسته و ملاس برای ایجاد پل های جامد اضافه می شوند. در حالی که فرآیندهای با فشار و دماهای بالا انرژی زیادی مصرف می کنند و افزودن بایندرهای ذکر شده منجر به معایبی می گردند. برای مثال افزودن محتوای بنتونیت یا کلسیم لیگنوسولفونات محتوای غیرقابل احتراق را افزایش داده و بنابراین سبب کاهش ارزش حرارتی می شود. اضافه کردن نشاسته و ملاس نیز هزینه های آماده سازی را زیاد می کند [۱۱-۱۴]. براین اساس هدف این تحقیق تولید بریکت های بدون بایندر با ویژگی های فیزیکی و مقاومتی مناسب در فشارهای پایین می باشد.

مواد و روشها

تهیه و آماده سازی ماده اولیه

در این مطالعه مواد اولیه شامل ساقه ذرت (از مزارع گرگان)، ضایعات کناره بری پالونیا (از کارگاههای نجاری) و خمیرکاغذ (کارخانه گلستان کاغذ پرشیا) می باشد. برای آماده سازی، ساقه ذرت در دمای محیط هوا خشک گردیده و به طول ۱۰ - ۱۵ سانتی متر بریده و سپس در آسیاب چکشی خرد گردید. پوشال پالونیا نیز در آسیاب چکشی به شکل پودری تهیه و از مش ۱۰ عبور داده شد. خمیرکاغذ شسته و هوا خشک شده و به اندازه های ریز تهیه شد. مواد اولیه به مقدار رطوبت حدود بین ۵/۵-۷/۸ درصد رسانده شده و در کیسه های در بسته نگهداری شدند.

آنالیز ترکیبات شیمیایی مواد اولیه

به منظور آنالیز ترکیبات شیمیایی نمونه ها توسط استاندارد T257 cm-02 آسیاب شده و میزان سلولز، میزان لیگنین، مواد استخراجی و خاکستر مواد اولیه به ترتیب طبق استانداردهای T264 om-98، T 222 om-98، T 207 cm-08 و T 211 om-93 اندازه گیری شد. میزان لیگنین خمیرکاغذبازیافتی با اندازه گیری عدد کاپا بدست آمد. مقدار هولوسلولز با استفاده از روش هیپوکلریت سدیم و اسید استیک اندازه گیری شد که از تفاضل این مقدار از مقدار سلولز، همی سلولز بدست آمد.

تولید بریکت های سوختی

ماشین بریکت ساز از نوع پرس هیدرولیکی با فشار عمودی توسط سیلندر و پیستون، براساس استاندارد و ورق مشخصات ماشین های بریکت ساز آزمایشگاهی توسط تیم تحقیقاتی دانشگاه گرگان طراحی و ساخته شده است. جهت تنظیم و کنترل فشار از دو عدد سنسور فشار شکن جهت کنترل فشار روغن هیدرولیک و فشار پیستون استفاده شده است. دستگاه دارای سنسور حرارتی در دیواره و کف قالب جهت اعمال حرارت موردنظر می باشد. دستگاه فوق الذکر حداکثر فشار هیدرولیک ۱۵۰ مگاپاسکال و دمای تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد را تحمل می کند.

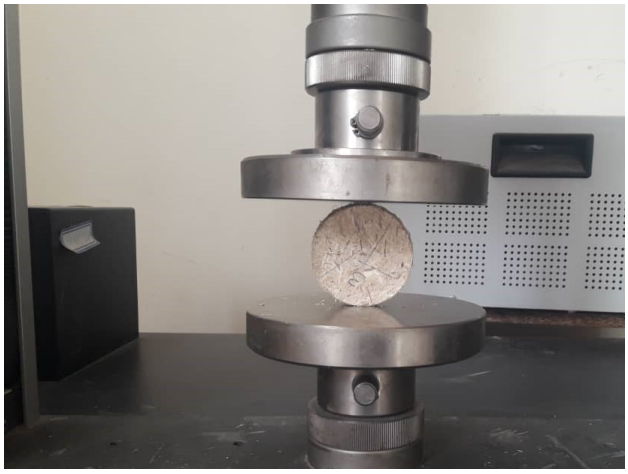
۲۰ گرم از هر کدام از مواد اولیه به قالب ماشین بریکت ساز آزمایشگاهی (ساخته شده در دانشگاه گرگان) به قطر ۵۰ میلی متر منتقل شد. فرآیند متراکم سازی با متغیرهای تولید موردنظر در این تحقیق انجام و مواد به بریکت های سوختی تبدیل شدند. متغیرهای تولید شامل ماده اولیه (پالونیا، ساقه ذرت و خمیر کاغذ بازیافتی)، فشار (۹، ۱۸ و ۲۷ مگاپاسکال)، دما (۷۵، ۱۰۰ درجه سانتی گراد) و زمان نگهداشت در فشار (۲، ۴ و ۶ دقیقه) بودند. بدین ترتیب ۵۴ نمونه با سه تکرار و مجموعاً ۱۶۲ نمونه ساخته شد.

اندازه گیری ویژگی های فیزیکی و مکانیکی

بعد از گذشت زمان چند دقیقه از تولید بریکت ابعاد (قطر و ارتفاع) و وزن محصول اندازه گیری و جهت آزمون های بعدی در کیسه های در بسته نگهداری شد. فرصت زمانی مورد نظر به نمونه های داده شد تا به ثبات ابعادی برسند. به دلیل اعمال دما در فرآیند متراکم سازی نمونه ها بلافاصله بعد از تولید حالت منبسط به خود می گیرند. مقاومت فشاری نمونه های تولید شده بعد از ۲۴ ساعت اندازه گیری شد.

دانسیته حجمی و مقاومت فشاری نمونه ها به ترتیب بر اساس استاندارد ASAE standards S269-4 و ASTM standard D2166-85 اندازه گیری شد. دانسیته حجمی بریکت زیست توده ای از محاسبه نسبت جرم به حجم بدست آمد. وزن نمونه ها با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم و حجم نمونه ها از اندازه گیری قطر و ارتفاع بریکت زیستی با کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلیمتر بدست آمد. مقاومت فشاری با استفاده از دستگاه آزمونگر مقاومت فشاری Cometech ساخت تایوان در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان اندازه گیری شد. بریکت زیستی به صورت افقی بین دو فک دستگاه قرار گرفت. بارگذاری با سرعت mm/min ۰/۳۰۵ بر نمونه ها اعمال شده تا زمانی که بریکت شکسته شود. سپس مقدار مقاومت فشاری در نقطه شکست با توجه به معادله زیر محاسبه گردید که $I1$، $I2$ و $I3$ ارتفاع بریکت در سه نقطه یک، دو و سه بر اساس میلی متر می باشد.

$$\text{مقاومت فشاری در نقطه شکست} = \frac{\text{بیشینه بار در نقطه شکست (N)}}{[I1(mm)+I2(mm)+I3(mm)]}$$



شکل ۱- نحوه قرار گیری نمونه در دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری

نتایج و بحث

ترکیبات شیمیایی مواد اولیه

آگاهی از ترکیبات سازنده زیست توده لیگنوسلولزی در تبدیل آن به فرآورده‌های با ارزش بالاتر مانند بریکت و پلت که از انواع متداول سوخت های جامد زیستی هستند نقشی کلیدی ایفا می-کند. مواد اولیه مورد مطالعه در این تحقیق پالونیا، ساقه ذرت و خمیرکاغذ بازیافتی هستند که در جدول ۱ ترکیبات شیمیایی آن ها نشان داده شده است.

ترکیباتی مثل لیگنین، پروتئین، نشاسته و کربوهیدرات های محلول در آب نقش بایندر های طبیعی را دارند و همانند چسب عمل می کنند و خواص کیفی فرآورده حاصل را تحت تاثیر قرار می دهند. این بایندرهای طبیعی با گرما و بخار نرم و به طور محلی ذوب می شوند و قابلیت پیوندیابی پیدا می کنند [۱۲]. لیگنین و همی سلولز در دماهای محدوده دمای گذار شیشه ای مواد

ترموپلاستیک و آمورف هستند و تغییر شکل الاستیک و پلاستیک می دهند. اگرچه میزان لیگنین ۲۷/۱۹ درصد در پالونیا می تواند در ایجاد فاز پلاستیکی و الاستیکی و ارزش گرمایی بریکت تاثیر گذار باشد اما باید دید دیگر فاکتورها نظیر شکل ذرات چه تأثیری در پیوندیابی دارند. همچنین مواد استخراجی نقش مهمی در پیوندیابی بین ذرات ایفا می کند. ساقه ذرت با ۱۲/۷ درصد مواد استخراجی محلول در آب شامل قندهای محلول است که طی بریکت کردن در ماتریکس پخش می شود و بین ذرات نفوذ می کند و وقتی این ذرات طی سرد کردن جامد می شوند اتصال قوی بین ذرات شکل می گیرد [۱۶]. در هر حال با توجه مطالعات انجام شده طی این تحقیق مجموعه ای از عوامل ذکر شده در میزان پیوندیابی موثر هستند. وجود خاکستر در طول فرآیند بریکت سازی و احتراق سبب بروز مشکلاتی می شود. برخلاف پسماند کشاورزی و خمیرکاغذ بازیافتی، میزان خاکستر پالونیا از دو ماده دیگر بسیار کمتر و زیر یک درصد است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سه ماده اولیه تولید بریکت سوختی

ترکیب شیمیایی	پالونیا (این تحقیق)	ساقه ذرت (این تحقیق)	خمیرکاغذبازیافتی [۱۵]	ساقه ذرت [۱۳]
سلولز	۴۶/۱۶	۴۲/۳۴	۵۶/۸	۴۹/۴
همی سلولز	۲۴/۳	۲۷/۱	۶/۲	۲۶/۲
لیگنین	۲۷/۱۹	۱۸/۲	*۵/۴	۸/۸
پروتئین	-	-	۱/۳	۳/۶
نشاسته	-	-	-	۰/۴
چربی	-	-	-	۰/۷
خاکستر	۰/۷۷	۵/۸۴	**۱۳/۶۱	۱۱/۲
مواد استخراجی در آب	۶/۵	۱۲/۷	-	۷/۹

*معادل با عددکاپای ۳۲/۷ - ** این تحقیق

شکل و اندازه ذرات

جدول ۲ توزیع اندازه ذرات و شکل آن ها را نشان می دهد.

جدول ۲- توزیع اندازه ذرات و شکل ذرات

پسماند	اندازه ذرات (mm)				
لیگنوسلولزی	۰-۰/۴۲	۰-۴۲,۰/۸۴	۰/۸۴ – ۲	۲-۴	۱ – ۸
پالونیا	۲۳٪	۴۳٪	۳۴٪	-	-
ساقه ذرت	-	-	-	-	۸۳٪
خمیرکاغذ	-	-	-	۱۰۰٪	-

حدود ۳۴ درصد از ذرات خاک اره پالونیا قطر کمتر از ۲ میلی متر (بین ۲-۰/۸۴ میلی متر) داشتند که از مش ۱۰ (با اندازه قطر ۲ میلی متر) عبور کردند و روی مش ۲۰ باقی ماندند. ۴۳ درصد ذرات از مش ۲۰ عبور داده شده و قطری بین ۰/۸۴ – ۰/۴۲ میلی متر داشتند. ذرات با اندازه کوچکتر از ۰/۴۲ میلی متر که از مش ۴۰ عبور کردند سهمی معادل حدود ۲۳ درصد را به خود اختصاص دادند. ذرات ساقه ذرت طولی بین ۸ – ۱ میلی متر داشتند که شامل ۸۳ درصد از ساقه ذرت بودند. همچنین ذراتی به عنوان نرمه که حاصل از مغز ساقه ذرت بودند نیز ۱۷ درصد وزنی ساقه ذرت را تشکیل دادند. ذرات خمیرکاغذ به شکل گلوله های ریزی به قطر حدود ۴-۲ میلی متر بودند.

رطوبت

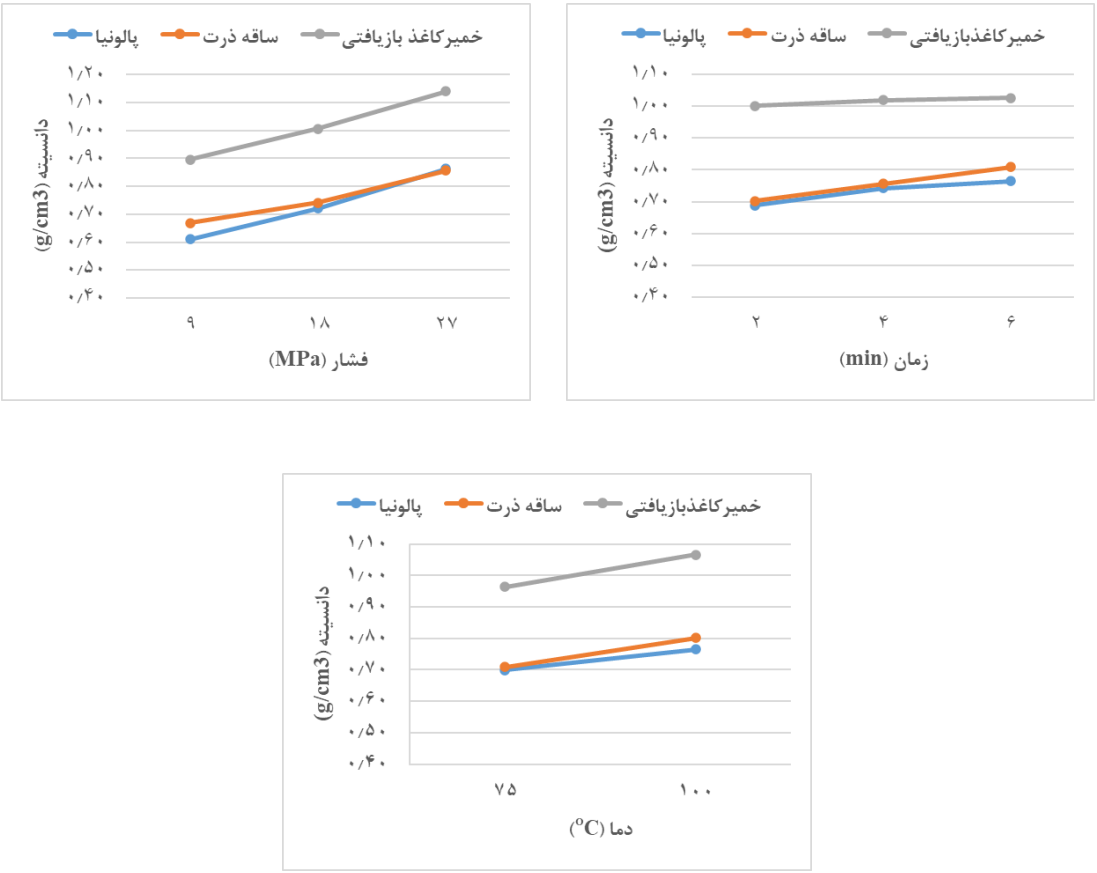
میزان رطوبت پالونیا، ساقه ذرت و خمیرکاغذ در محدوده ۸/۲ – ۷/۶٪ می باشد. با توجه اینکه آب هم به عنوان اتصال دهنده و هم روان کننده عمل

مـی کنـد، رطوبـت مـاده اولیـه نقـش مهمـی در فرآینـد متـراکم کـردن دارد. اتصـال بـین ذرات در مـاده ای کـه خیلی خشـک اسـت بـه علـت نیروهـای اصطکاک بـالا در نقـاط اتصـال دشـوار اسـت. از طـرف دیگـر رطوبـت بـیش از حـد مـی توانـد باعـث از هـم پاشـیدگی داخـل بریکـت بـدلیل تشـکیل بخـار شـود. Mani و همکـاران (۲۰۰۶) مشـاهده کردنـد کـه رطوبـت موجـود در زیسـت تـوده طـی متـراکم کـردن از طریـق نیروهـای واندروالسـی تمـاس بـین ذرات را افـزایش مـی دهـد [۱۷]. همچنـین آن هـا نتیجـه گرفتنـد کـه مقـدار رطوبـت پـایین بـین ۵-۱۰ درصد منجـر بـه بریکـت هـای بـا پایـداری ابعـادی بیشـتر، مقاومـت تـر و دنـس تـر در مقایسـه بـا زیسـت تـوده هـای حـاوی رطوبـت بـالاتر ۱۵٪ مـی گـردد. چنـدین مطالعـه توصـیه کردنـد کـه مـاده اولیـه تولیـد بریکـت بایـد رطوبـت بـین ۸ و ۱۵ درصـد داشـته باشـند. همچنـین تعـدادی از محققـان گـزارش کردنـد کـه رطوبـت پـایین بـین ۸ تـا ۱۲ درصـد بریکـت هـای مسـتحکم بـدون تـرک تولیـد مـی کنـد. رطوبـت هـای بـالاتر و پـایین تـر از ایـن محـدوده مـی توانـد منجـر بـه ماده متـراکم شـده بـا کیفیـت پـایین تـر شـود [۱۲، ۱۳] [۱۸-۲۱]. Borzek (۲۰۱۶) بـا مطالعـه فشـردن چیـپس هـای درخـت پلاتـانوس در رطوبـت هـای متفـاوت (۵/۷-۲۳/۹٪) دریافـت کـه رطوبـت مناسـب در تولیـد بریکـت رطوبـت هـای کمتـر از ۱۲ درصـد مـی باشـد. زیـرا در سـطوح رطـوبتی بـالاتر کـاهش شـدیدی در نیروهـای گسـیختگی و دانسـیته اتفـاق مـی افتـد [۲۲]. در مطالعـه Martinez و همکـاران (۲۰۱۹) مقدار رطوبـت زیسـت تـوده هـای مختلـف نسـبتاً نزدیـک بـه محـدوده از ۸/۷ تـا ۱۲/۲۳ درصـد بـود کـه عـدم وجـود تـرک هـای سـطحی و انبسـاط طـولی معنـی دار در بریکت ها مشاهده شد [۲۱].

ویژگی های فیزیکی و مقاومتی دانسیته

از نگاه کلی افزایش فشار از ۹ به ۲۷ مگاپاسکال، دما از ۷۵ به ۱۰۰ درجه سانتی گراد و زمان ۲ تا ۶ دقیقه منجر به افزایش دانسیته در هر سه ماده اولیه گردیده است. افزایش نیروی خارجی به شکل فشار باعث کاهش فضاهای خالی بین ذرات می شود و همانطور که ذرات به سمت هم حرکت می کنند در داخل ماتریکس تحت تأثیر دما تغییر شکل می دهند و منجر به افزایش دانسیته حجمی می شود. در واقع در اثر فشار نفوذ ملکول ها از یک ذره به ذره دیگر و افزایش نقاط تماس اتفاق می افتد. بعلاوه نرم شدگی الیاف در اثر گرما باعث تسهیل حرکت الیاف به سمت هم و کاهش مقاومت در برابر حرکت در ماتریکس جامد شده و موجب پر شدن بیشتر فضاهای خالی می گردد [۱۷، ۲۱، ۲۳].

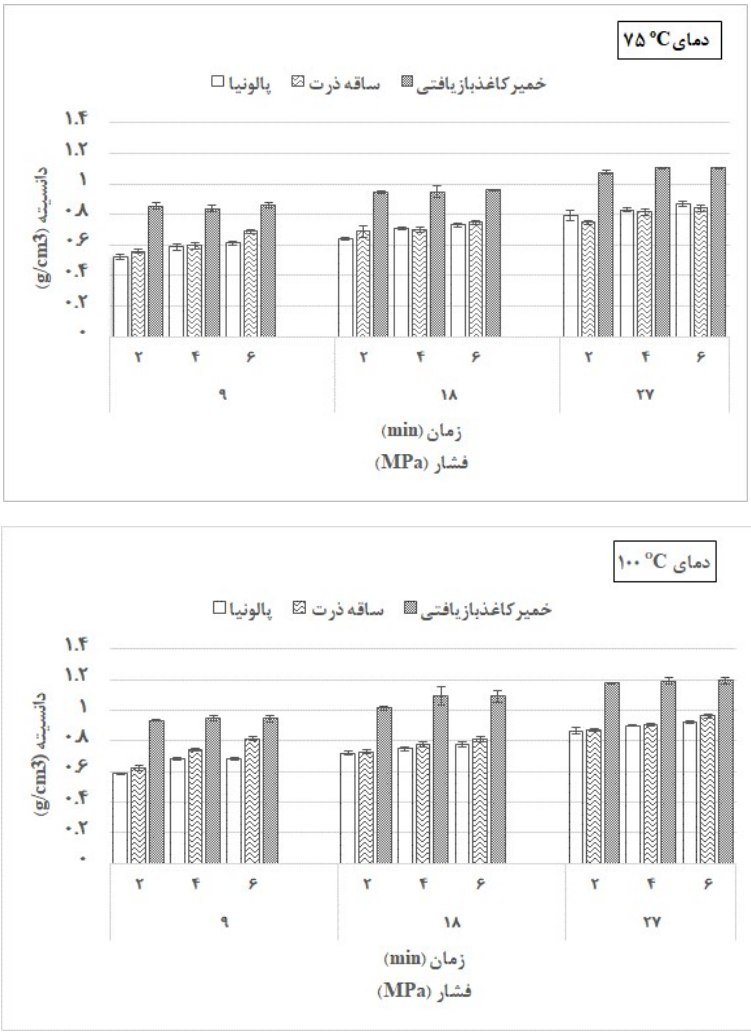
مقادیر دانسیته بریکت های تولید شده از پالونیا، ساقه ذرت و خمیرکاغذ بازیافتی به ترتیب از ۰/۹۲۴ -۰/۵۲۲، ۵۵۷/۹۶۲-۰/۰ و ۸۵۵/۱۹۵-۰/۱ گرم بر سانتی متر مکعب تغییر کردند. همانطور که از نمودار های شکل ۲ و ۳ نیز به وضوح مشاهده می شود بیشترین دانسیته مربوط به بریکت خمیرکاغذ بازیافتی تحت تأثیر سه عامل فرآیندی است که تفاوت فاحشی با دانسیته دو ماده لیگنوسلولزی دیگر دارد. در واقع ماهیت فیبری و همگن خمیرکاغذ بازیافتی باعث شده است که نسبت به دو ماده دیگر بیشتر تحت تأثیر دما و فشار قرار گرفته و فضاهای خالی پر شده و منجر به بریکت های با دانسیته بیشتری شده است. بهرحال نکته قابل توجه این است که اگرچه اثر زمان نگهداشت در فشار بر دانسیته به لحاظ آماری معنی دار است اما تفاوت اندکی بین دانسیته بریکت های خمیرکاغذبازیافتی در تمامی سطوح فشار با تغییر سطوح زمان مشاهده گردید. بالاتر بودن دانسیته بریکت ساقه ذرت نسبت به بریکت پالونیا گویای شکل متفاوت ذرات ساقه ذرت در مقایسه ذرات پالونیا می باشد. نرم شدگی بیشتر ذرات فیبری ساقه ذرت در مقابل ذرات کروی پالونیا در مقابل گرما و فشار و پر شدن فضاهای خالی با ذرات ر یزتر تفاوت دانسیته این دو نوع بریکت را توجیه می کند.



شکل ۲- مقایسه دانسیته بریکت های پالونیا، ساقه ذرت و خمیرکاغذبازیافتی تحت شرایط فرآیندی

آنچه که از نتایج می توان دریافت این است که شکل، اندازه ذرات و توزیع اندازه ذرات اهمیت زیادی در دانسیته بریکت زیست توده دارد. اگرچه ذرات ریزتر ناحیه تماس بزرگتری در طول متراکم سازی ایجاد می کنند اما در واقع حضور ذرات با اندازه های متفاوت دینامیک بسته بندی را بهبود می بخشد و نیز به مقاومت استاتیک بالا کمک می کند. در واقع توزیع اندازه ذرات بر کیفیت پلت و بریکت تاثیر می گذارد. [۶، ۱۷، ۲۱، ۲۳، ۲۴، ۲۵]. علاوه بر این به طور کلی هر چه قدر ذرات ماتریکس بریکت، دانسیته کمتری داشته باشند دانسیته محصول بالاتر خواهد بود که در نتایج تحقیق مشاهده شد [۱۹، ۲۳، ۲۵].

دانسیته مطلوب بریکت سوختی به منظور تولید انرژی بین ۰/۹ تا ۱/۲ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. [۲۶]. در بریکت های خمیرکاغذبازیافتی دانسیته بالای ۰/۹ گرم بر سانتی مترمکعب از فشار ۱۸ مگاپاسکال و زمان ۲ دقیقه به بعد در دمای فرآیندی ۷۵ درجه سانتی گراد بدست آمد. در حالی که بریکت های ساقه ذرت و پالونیا در دمای فرآیندی ۱۰۰ درجه سانتی گراد و فشار ۲۷ مگاپاسکال و زمان ۴ و ۶ دقیقه دانسیته بالای ۰/۹ گرم بر سانتی مترمکعب داشتند.

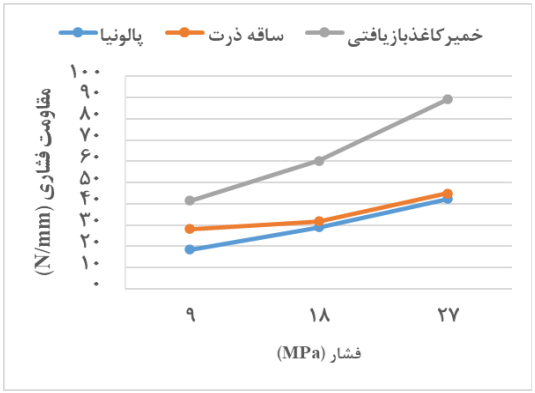


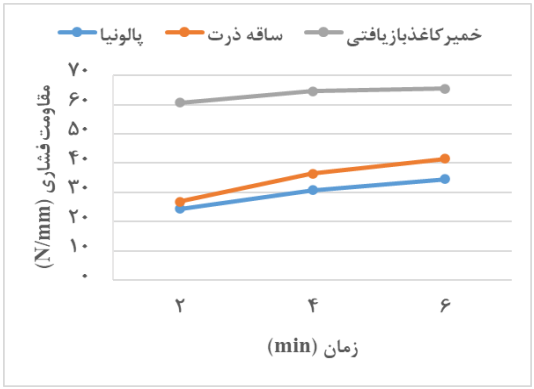
شکل ۳- تغییرات دانسیته بریکت های تولیدشده در تمام تیمارها در دو دمای ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد

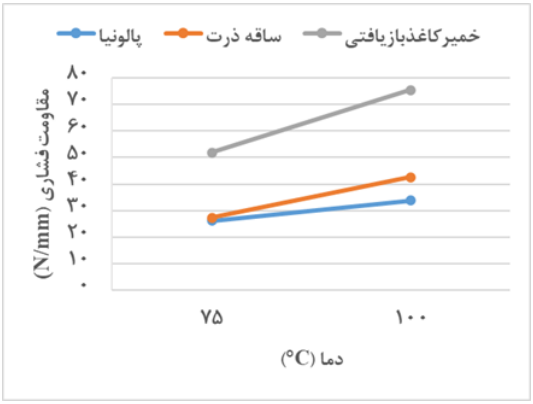
مقاومت فشاری

مقاومت بریکت ها در برابر نیروهای آسیب رسان طی جابجایی، ذخیره و حمل و نقل از طریق مقاومت فشاری ارزیابی می شود. مقاومت فشاری بریکت مقدار نیروی مورد نیاز برای اینکه ساختار بریکت بشکند را نشان می دهد.

به طور کلی مجموعه از عوامل مانند ساختار فیزیکی و شیمیایی و شکل و اندازه ذرات ماده اولیه بعلاوه شرایط فرآیندی باعث پیوندیابی و تقویت آن می شوند. مکانسیم های پیوندیابی شامل طریق پل های جامد، نیروهای بین مولکولی و درهم رفتگی مکانیکی می باشند. ذرات جامد ممکن است همدیگر را از طریق نیروهای بین مولکوبی (واندروالسی)، نیروهای الکترواستاتیک و نیروهای مگنتیک جذب کنند. نیروهای با محدوده کوتاه وجود دارند که برای ذرات با اندازه کوچکتر موثرتر هستند؛ بنابراین اهمیت نیروهای جاذبه در کل مکانیسم اتصال آنقدر زیاد نیست که آنها نقش مهمی را در پیوندیابی فرآورده نهایی داشته باشند. بدین ترتیب که آنها در ابتدا ذرات را نگه می دارند و جهت دهی می کنند تا در یک ناحیه تماس به اندازه کافی طولانی نیروهای قوی تر بتوانند اتصال را کنترل کنند. در نتیجه در حالی که سایر مکانیسم های پیوندیابی در درجه اول به پیوندیابی اولیه ذرات باهم طی فرآیند انباشتگی کمک می کنند، این پل های جامد هستند که به طور زیادی مقاومت فرآورده نهایی را تعیین می کنند [۶].

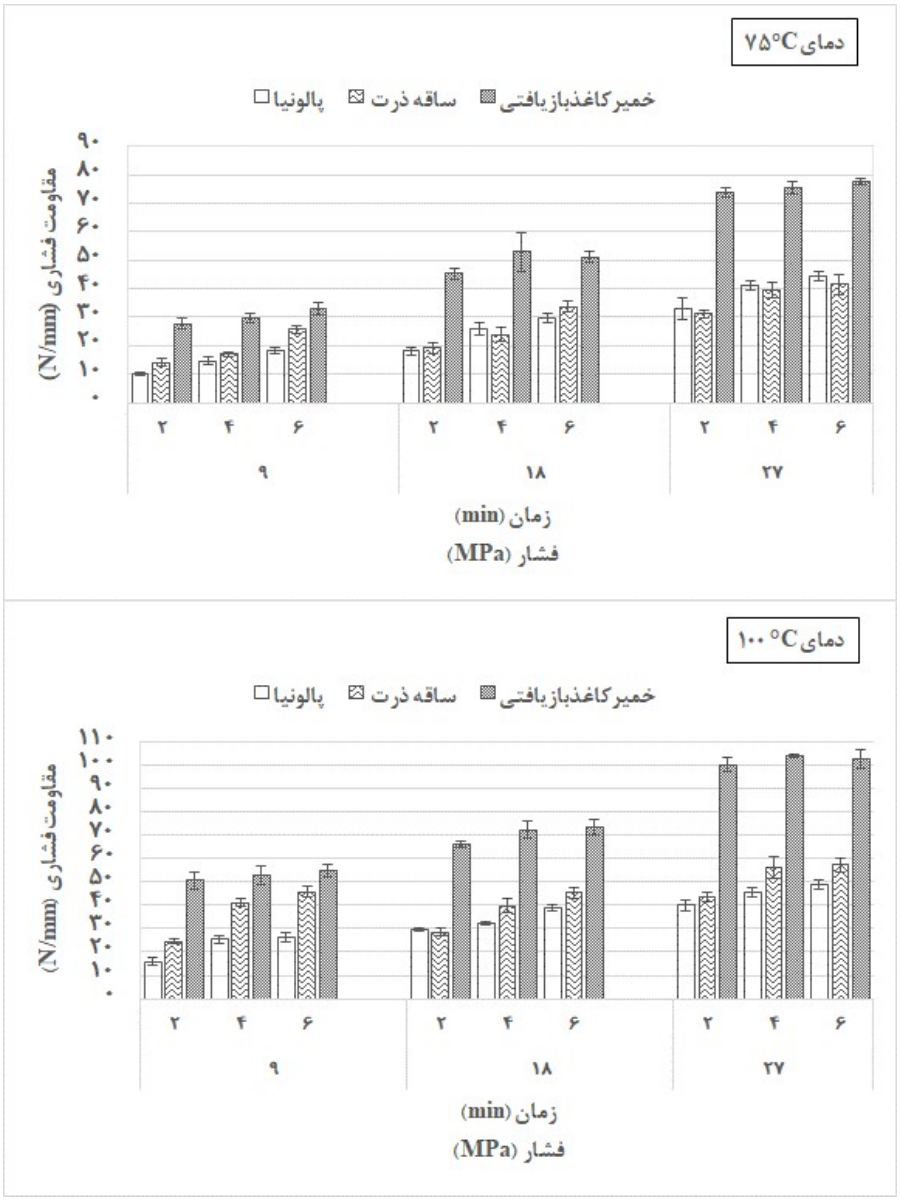






شکل ۴- مقایسه کلی مقاومت فشاری بریکت های تولید شده از پالونیا، ساقه ذرت و خمیرکاغذبازیافتی تحت شرایط فرآیندی

در کنار همه عوامل و مکانسیم های اتصال نقش رطوبت زیست توده در فرآیند متراکم شدن حیاتی است. آب به صورت رطوبت در ماده اولیه یکی از عوامل مفید به عنوان اتصال دهنده و روان کننده می باشد. رطوبت موجود در زیست توده با کمک حرارت باعث تغییرات فیزیکی و شیمیایی مانند نرم شدگی گرمایی الیاف، ژلاتینی شدن نشاسته و حل شوندگی و دوباره کریستالی شدن پیاپی قندها می شود. آب به عنوان یک لایه فیلم نازک اتصال دهنده باعث استحکام و بهبود پیوند های ناشی از نیروهای واندروالسی به وسیله افزایش سطح تماس ذرات می گردد [۱۳، ۲۱].



شکل ۵- تغییرات مقاومت فشاری بریکت های ساخته شده در تمام تیمارها در دو دمای ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد

میزان مقاومت فشاری بریکت های ساخته شده از پالونیا، ساقه ذرت و خمیرکاغذ بازیافتی در تیمارهای مختلف به ترتیب از ۴۹/۰۳-۱۰/۰۸، ۵۷/۲۸ - ۱۴/۱۲ و ۶۵/۷۹-۲۷/۱۰۲ نیوتن بر میلی متر تغییر کرده است. همانطور که از نمودارهای شکل ۴ و ۵ مشاهده می شود بریکت خمیرکاغذ بازیافتی بالاترین مقدار مقاومت فشاری تحت تاثیر سه عامل فرآیندی نشان داد. ماهیت فیبری و همگن الیاف سبب شده است که با اعمال فشار و دما الیاف به روهم بلغزند و با نواحی تماس افزایش یافته تحت تغییر شکل الاستیک و پلاستیک قرار گرفته، نیروهای جاذبه قوی بین الیاف تشکیل می شوند و همه این عوامل منجر به نفوذ الیاف به یگدیگر می گردند. در اینجا اثر سینرژیک درهم رفتگی مکانیکی همزمان با تشکیل پیوندهای شیمیایی هیدروژنی فراوان و متعاقباً تشکیل بیشمار پل های جامد مستحکم مقاومت فشاری بریکت خمیرکاغذ بازیافتی را به طور شگرفی افزایش داده است به عبارت دیگر قدرت پیوندهای درهم رفتگی در مقابل نیروی گسیختگی ناشی از بازیابی الاستیک الیاف بسیار بالاتر

است [۲۷]. اگر چه تفاوت مقاومت فشاری بریکت های خمیرکاغذ بازیافتی در سطح فشار بالاتر (۲۷ مگاپاسکال) به لحاظ آماری معنی دار است اما در واقع این تفاوت در اثر تغییر سطوح زمانی اندک است که بنظر می رسد به ماهیت همگن خمیرکاغذ بازیافتی بر می گردد.

میزان مقاومت فشاری بریکت ساقه ذرت بالاتر از پالونیا می باشد که می تواند به علت تفاوت در هندسه ذرات باشد. ذرات پالونیا نسبتاً کروی یا گرانولی هستند در حالی که ذرات ساقه ذرت به صورت ذرات فیبری بلند (۸-۱ mm) هستند. ذرات بلند فیبری درهم رفتگی مکانیکی را طی متراکم کردن با اعمال فشار و گرما افزایش می دهد، همانطور که الیاف درهم گیر می کنند منجر به تشکیل پیوندهای قوی تر می شود. درهم رفتگی مکانیکی ذرات می تواند مقاومت کافی نسبت به نیروهای برشی و گسیختگی را که به علت بازیابی الاستیکی رخ می دهد را فراهم کند [۲۷]. Demirel (۲۰۲۳) در پژوهش خود اشاره کرد که اندازه ذرات ۵-۲ میلی متر در فرآیند بریکت کردن نتایج مطلوب تری را به لحاظ ویژگی های فیزیکی مکانیکی ارائه می دهد. محققان دیگری نیز دریافتند که اندازه ذرات بزرگتر (۱۰-۰ میلی متر) طی فرآیند بریکت کردن منجر به درهم رفتگی بیشتر ذرات و مقاومت فشاری بیشتر می گردد [۱۹، ۲۴، ۲۸].

در طول فشردگی تحت دماهای نزدیک به محدوده گذار شیشه ای، اجزا پیوندیابی طبیعی (لیگنین، نشاسته، پروتئین و چربی) موجود در ماده اولیه از ماتریکس اصلی شان خارج شده و در ماتریکس جدید بریکت در حال تشکیل، دوباره توزیع می گردند که در نقاط تماس با نفوذ مولکول ها به یکدیگر منجر به گسترش پل های جامد در نقاط ذوب محلی از طریق از طریق جامد شدن و سفت شدن می شوند. این پدیده نقاط ضعیف را کاهش می دهد و در نتیجه مقاومت فشاری افزایش می یابد. همچنین لیگنین و همی سلولز به عنوان مواد ترموپلاستیک آمورف دستخوش تغییر شکل پلاستیک در فشارهای پایین در دماهای محدوده گذار شیشه ای شان (دماهای نرم شدن) می شوند. تغییر شکل پلاستیک ذرات به ایجاد پیوندهای ذره به ذره دائمی کمک می کند [۱۳]. بالاتر بودن مقاومت فشاری بریکت ساقه ذرت در مقایسه با بریکت پالونیا علی رغم کمتر بودن میزان لیگنین ساقه ذرت نسبت به پالونیا احتمالاً به مقدار لیگنین خارج شده کمتر از ماتریکس اولیه پالونیا با توجه به هندسه ذرات بر می گردد. از طرف دیگر مطالعه ترکیبات شیمیایی پالونیا و ساقه ذرت همانطور که در بخش های قبل عنوان شد نشان داد که ساقه ذرت حاوی مقدار اندکی پروتئین، نشاسته و چربی است که می تواند در پیوندیابی موثر باشد. طبق نظریه Rumpf 1962 و Pitsch 1984 فشار اعمال شده بر روی ذرات باعث کاهش نقطه ذوب شدگی ذرات شده و آن ها را به سمت یکدیگر حرکت می دهد که باعث افزایش نقاط تماس شده و در نتیجه یک نقطه تعادل ذوب شدگی جدید به وجود می آید که منجر به تشکیل پل های جامد بین ذرات و اتصال آن ها می گردد [۱۳]. بر اساس این توضیحات و با توجه به شکل های ۴ و ۵ تأثیر دما بر مقاومت فشاری بریکت ساقه ذرت نسبت به بریکت پالونیا مشهودتر بوده است.

همچنین می توان به نقش مواد استخراجی در پیوندیابی و بالاتر بودن مقدار مقاومت فشاری بریکت ساقه ذرت نسبت به بریکت پالونیا اشاره کرد. ساقه ذرت بیشتر از ۱۲ درصد مواد استخراجی محلول در آب دارد که عمدتاً کربوهیدارت های محلول در آب هستند که در طول بریکت کردن تحت دما ذوب شده، در ماتریکس بریکت پخش و بین ذرات نفوذ می کند. وقتی این ذرات طی سرد کردن جامد می شوند اتصال قوی بین ذرات و در واقع پل جامد شکل می گیرد. [۱۳، ۱۶]. مقدار مواد استخراجی پالونیا حدود ۶/۵ درصد می باشد.

اگرچه تاکنون در مورد مقاومت فشاری به عنوان ویژگی مکانیکی بریکت، کمینه مقاومت استانداردی برای بریکت های تجاری گزارش نشده است اما در این پژوهش میزان مقاومت فشاری بیشتر از حد کافی برای ذخیره و حمل و نقل عملی این بریکت ها بدست آمد. Navalta (۲۰۲۰) در تحقیق خود عنوان کرد که ۳۰۰۰۰۰ بریکت ۲۵ گرمی با قطر ۴۲/۵ میلی متر، ضخامت ۱۹/۲۳-۱۳/۴۴ میلی متر می توانند با مقاومت فشاری حدود ۵۰ نیوتن بر میلی متر روی هم قرار بگیرند. مقدار بریکت های روی هم قرار گرفته بیش از مقدار کافی برای حمل ونقل عملی این بریکت ها می باشد. ویژگی های ابعادی بریکت های

تولیدی در این پژوهش نیز با آنچه در پژوهش Navalta بدست آمد تقریباً مشابه است.

نتیجه گیری

در این تحقیق امکان تولید بریکت های سوختی از سه ماده اولیه پالونیا، ساقه ذرت و خمیرکاغذ بازیافتی در فشارهای پایین با دستگاه بریکت ساز پیستون پرس آزمایشگاهی نشان داده شد. فشار عملیاتی به طور زیادی در مقایسه با فشار معمول ۲۵۰-۷۰ مگاپاسکال کاسته شد.

ارتباط بین پایداری ابعادی بریکت های تولیدی با نوع و شکل و توزیع اندازه ذرات در اثر اعمال فشار و دماهای مختلف فرآیندی مشاهده شد طوری که به ترتیب خمیرکاغذ بازیافتی، ساقه ذرت و پالونیا دانسیته بیشتری را در دماها و فشارهای فرآیندی نشان دادند.

با توجه به نتایج این تحقیق می توان گفت شکل و اندازه ذرات اهمیت زیادی در فرآیند بریکت کردن به طور کلی و به ویژه در فشارهای پایین دارد. به احتمال زیاد شکل گرد ذرات پالونیا مقاومت بیشتری را به نرم شدگی در اثر اعمال فشار و دما نشان داده است و قدرت درهم رفتگی مکانیکی بین ذرات پالونیا به اندازه ساقه ذرت با اندازه ذرات ۸-۱ میلی متری نیست. مسئولیت ذرات ریز در میان ذرات درشت تر را می توان پر شدگی فضاهای خالی طی متراکم کردن عنوان کرد اما مقدار آن نباید نسبت به ذرات درشت تر بیشتر باشد که علت آن تأثیر منفی بر دانسیته و دوام بریکت سوختی می باشد. شکل فیبری و رشته ای خمیرکاغذ بازیافتی به راحتی دستخوش تغییر شکل شده، منجر افزایش قدرت درهم رفتگی مکانیکی در نتیجه پیوندهای هیدروژنی در عرض می شود و ویژگی های کیفی مطلوب تری را ارائه می دهد. نتایج پتانسیل پیوندیابی بسیار زیاد خمیرکاغذ بازیافتی را نشان داد.

دانسیته مطلوب بریکت سوختی (بالای ۰/۹ گرم بر سانتی متر مکعب) برای ماده اولیه خمیرکاغذ بازیافتی در فشار ۱۸ مگاپاسکال، زمان ۲ دقیقه و دمای ۷۵ درجه سانتی گراد بدست آمد. در صورتی که این مقدار دانسیته دو ماده دیگر (پالونیا و ساقه ذرت) در فشار ۲۷ مگاپاسکال، زمان ۴ دقیقه و دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد بدست آمد.

نتایج این تحقیق استفاده از پتاسیل اتصال دهنده های[3]طبیعی ماده لیگنوسلولزی در فشارهای پایین جهت دستیابی به مقاومت فشاری مطلوب را نشان داد. با اعمال فشار لیگنین، همی سلولز و کربوهیدراتهای محلول در آب و نشاسته موجود ماده اولیه، ظرفیت ایجاد پل های جامد را از طریق نرم شدگی و ذوب محلی و ایجاد نقطه تعادل ذوب شدگی جدید افزایش داد. با در نظر گرفتن ترکیبات شیمیایی ساقه ذرت و پالونیا و همچنین نتایج تحقیق پتانسیل پیوندیابی ساقه ذرت نسبت به پالونیا بیشتر است؛ بنابراین با توجه به نتایج این تحقیق و در نظر گرفتن هزینه افزایش یافته تولید بریکت سوختی در فشارهای بالا و معایب افزودن بایندر، تولید بریکت سوختی با روش های مقرون به صرفه اقتصادی آن را جذاب تر می کند. در واقع می توان بر اساس نتایج این تحقیق خمیرکاغذ بازیافتی را با توجه به پتانسیل های پیوندیابی زیاد آن به عنوان اتصال دهنده با صرفه اقتصادی معرفی کرد.

[3] Natural binders

منابع

[1] IRENA (2023), World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, Volume 1, International Renewable Energy Agency, Abu Dha.

[2] Zakeri, B., Paulavets, K., Barreto-Gomez, L., Echeverri, L. G., Pachauri, S and Boza, B.,2022. Pandemic, war, and global energy transitions. Energies, 15(17), pp6114.. https://doi.org/10.3390/en15176114.

[3] Amiri, M., Najafi, A., 2016. Electric power plant with biomass solid fuel and determining the quality of cotton stem samples. Iranian Journal of Energy, 19(2). (In Persian).

[4] IEA (2022), Bioenergy, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/bioenergy, License: CC BY 4.0

[5] 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), pp2468.. https://doi.org/10.3390/su12062468.

[6] Kurchania, A., 2012. Biomass energy, in Biomass conversion: the interface of biotechnology, chemistry and materials science. Springer. pp. 91-122. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28418-2_2.

[7] Hassan Abassi., 2000. Investigation of the growth and adaptation of Paulonia Fortunei. National Conference on Northern Forest Management and Sustainable Development. (In Persian).

[8] Gug, J., Cacciola, D and Sobkowicz, M.J.,2014. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. Waste Management, 35, pp. 283-292. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.031.

[9] Li, Y and Liu, H., 2000. High-pressure binderless compaction of waste paper to form useful fuel. Fuel processing technology, 67(1), pp. 11-21. http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3820(00)00092-8.

[10] Tabil, L., Adapa, P and Kashaninejad, M., 2011. Biomass feedstock pre-processing—part 2: densification. Biofuel's Engineering Process Technology, 19, pp. 439-446. http://dx.doi.org/10.5772/18495.

[11] Chen, T., Jia, H., Zhang, S., Sun, X., Song, Y and Yuan, H., 2020. Optimization of cold pressing process parameters of chopped corn straws for fuel. Energies, 13(3), pp652.. http://dx.doi.org/10.3390/en13030652.

[12] Kaliyan, N and Morey, R.V., 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass and bioenergy, 33(3), pp. 337-359. http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005.

[13] 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), pp.1082-1090. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064.

[14] Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X., Lim, J and Sokhansanj, S., 2012. Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets. Applied Energy, 93, pp. 680-685. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.002.

[15] Zhou, W., Gong, Z., Zhang, L., Liu, y., Yan, J and Zhao, m., 2017. Feasibility of lipid production from waste paper by the oleaginous yeast Cryptococcus curvatus. BioResources, 12(3), pp. 5249-5263. http://dx.doi.org/10.15376/biores.12.3.5249-5263.

[16] Navalta, C.J.L.G., Banaag, K., Von Adrian, O., Go, A., Cabatingan, L and Ju, Y., 2020. Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran. Renewable Energy, 147, pp. 1941-1958. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.129.

[17] Mani, S., Tabil, L.G and Sokhansanj, S., 2006. Specific energy requirement for compacting corn stover. Bioresource Technology, 97(12), pp. 1420-1426. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2005.06.019.

[18] Demirel, B., 2023. Determination of solid biofuel properties of hazelnut husk briquettes obtained at different compaction pressures. Biomass Conversion and Biorefinery, pp. 1-12. http://dx.doi.org/10.1007/s13399-023-04431-2.

[19] Guo, L., Wang, D., Tabil, L and Wang., G., 2016. Compression and relaxation properties of selected biomass for briquetting. Biosystems Engineering, 148, pp. 101-110. http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.05.009.

[20] Gurdil., G and Demirel, B., 2020. Effect of moisture content, particle size and pressure on some briquetting properties of hazelnut residues. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 35(3), pp. 330- 338. https://doi.org/10.7161/omuanajas.736851.

[21] Martinez, C.L.M., Sermyagina, E., Carneiro, A. d. C. O., Vakkilainen, E and Cardosoet., M., 2019. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. Biomass and Bioenergy, 123, pp. 70-77. http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.013.

[22] Brozek, M., 2016. The effect of moisture of the raw material on the properties briquettes for energy use. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 64(5), pp.1453-1458. http://dx.doi.org/10.11118/actaun201664051453.

[23] 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, pp. 1-6. http://dx.doi.org/10.1186/2251-6832-4-30.

[24] Wang, Y., Wu, K and Sun, Y., 2018. Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw. Journal of the Energy Institute, 91(1), pp. 153-162. http://dx.doi.org/10.1016/j.joei.2016.09.002.

[25] Mitchual, S.J., Frimpong-Mensah, K and Darkwa, N.A., 2014. Relationship between physico-mechanical properties, compacting pressure and mixing proportion of briquettes produced from maize cobs and sawdust. Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 2014. http://dx.doi.org/10.4236/jsbs.2014.41005.

[26] Deutsches Pelletinstitut GmbH, EN Plus Briquettes Manual for the Certification of Wood Briquettes for the End-User Market According to European Standard EN, 2013.

[27] 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, pp. 33-39. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.068.

[28] Demirel, C., Gurdil, G. A. K., Kabutey, A and Herak, D., 2020. Effects of forces, particle sizes, and moisture contents on mechanical behaviour of densified briquettes from ground sunflower stalks and hazelnut husks. Energies, 13(10), pp. 2542. http://dx.doi.org/10.3390/en13102542.

Production of Binderless Fuel Briquettes from Lignocellulosic Residues of Paulownia, Corn Stalks, and Waste Paper Pulp at Low Pressures

Abstract

The use of biomass energy as a source of renewable energy, in addition to reducing environmental problems and global warming, ensures energy security. Fuel briquettes are solid biofuels that are obtained by simple densification processes and do not require complex physicochemical treatments. In this research, the potential of using lignocellulosic residues such as paulownia, corn stalks, and recycled paper pulp to produce fuel briquettes without binders at low pressures of 9, 18, and 27 MPa, at two temperature levels of 75 and 100 degrees Celsius, was investigated. The results confirmed the feasibility of producing fuel briquettes from these three lignocellulosic materials with appropriate physical and mechanical characteristics. For recycled paper pulp briquettes, higher density and compressive strength were obtained at low pressures, while Paulownia and corn stalks required higher levels of pressure, temperature, and time to achieve desirable density and compressive strength compared to recycled paper pulp.

Keywords: Biomass energy, fuel briquettes, densification, lignocellulosic residues.

N. Mohammadi[1*]
E. Afra[2]
A. Ghasemian[3]
A. Khazaeian[4]
F. Fotovat[5]

[1] Ph.D. Student, Paper Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources

[2] Associate Prof., Paper Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources

[3] Professor, Paper Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources

[4] Professor, Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources

[5] Assistant Prof., Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology

Corresponding author:
mohamadi.nasibe@gmail.com

Received: 2023/07/19
Accepted: 2023/09/06