DOI: https://dx.doi.org/10.22034/jam.2023.16160

بررسی ترکیب زیست‌توده‌های باگاس نیشکر و کاه برنج با مواد پیونددهنده طبیعی بر خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت‌های سوختی

حسین صادقی[۱]، رضا طباطبائی کلور[۲*]، علی متولی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

۱- گروه مکانیک بیوسیستم - دانشکده مهندسی زراعی - دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
* مسئول مکاتبه r.tabatabaei@sanru.ac.ir

چکیده

یکی از منابع مهم انرژی‌های تجدیدپذیر زیست‌توده‌ها هستند که جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی به‌شمار می‌روند. پلت‌های سوختی یکی از موارد استفاده از انرژی زیست‌توده‌ها هستند که از پسماند کشاورزی، بقایای گیاهان و فضولات حیوانات ساخته شده و سبب تولید انرژی بیشتر در واحد حجم می‌شوند. در این پژوهش، اثر نسبت‌های مختلف دو نوع زیست‌توده کاه برنج و باگاس نیشکر (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) و ترکیب آن‌ها با پیونددهنده‌های طبیعی (کندر، صمغ عربی، سریش) در سه سطح (۵٪ ، ۱۰٪ ، ۱۵٪)، بر چگالی، مقاومت شکست، پایداری و ارزش حرارتی پلت‌های سوختی ساخته شده، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بهترین تیمار انتخاب شده به‌منظور ساخت پلت سوختی، ترکیبی از باگاس نیشکر و کاه برنج با نسبت ترکیب ۷۵٪ باگاس نیشکر و ۲۵٪ کاه برنج است که این تیمار در ترکیب با پیونددهنده طبیعی کندر در سطح ۱۵٪ دارای بالاترین میزان مقاومت شکست، پایداری و ارزش حرارتی است.

واژه‌های کلیدی: پلت سوختی، پیونددهنده طبیعی، زیست‌توده، ارزش حرارتی، مقاومت شکست

Investigating the Composition of Sugarcane Bagasse and Rice Straw Biomass with Natural Binders on the Mechanical and Thermal Properties of Fuel Pellets

Hossein Sadeghi[1], Reza Tabatabaeekoloor*[1], Ali Motevali[1]

Received: 30 Oct 2022 Accepted: 4 Feb 2023

1- Department of Biosystems Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
*Corresponding author: r.tabatabaei@sanru.ac.ir

Abstract

Biomasses are one of the major sources of renewable energy and suitable alternatives to fossil fuels. An application for biomass energy is fuel pellets which are made from agricultural waste, plant residues and manure, are compacted and contain higher energy per unit of volume. In this research, different proportions of pellets were prepared from two types of rice straw biomass and sugarcane bagasse (25%, 50%, 75% and 100%) and their combination with natural binders (frankincense, Arabic gum, eremurus) at three levels (5%, 10%, 15%). The effect of these variables were investigated on the density, fracture resistance, stability and calorific value of the manufactured fuel pellets. The comparison of results means showed that the optimum proportion for fuel pellet production is a combination of 75% sugarcane bagasse and 25% rice straw, which combined with the frankincense natural binder. This proportion has the highest failure strength, durability, and heating value at 15% binder level.

Keywords: Fuel pellets, natural binders, biomass, heating value, strength failure

How to cite:
Sadeghi, H., Tabatabaeekoloor, and Motevali, A. 2023. Investigating the Composition of Sugarcane Bagasse and Rice Straw Biomass with Natural Binders on the Mechanical and Thermal Properties of Fuel Pellets. *Journal of Agricultural Mechanization* 7 (4): 1−10.

۱- مقدمه

انرژی به‌عنوان یکی از فاکتورهای اصلی به‌منظور استفاده در زندگی انسان‌ها بسیار حائز اهمیت بوده و نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. در دهه‌های اخیر سهم زیست توده در تامین انرژی اولیه جهان در میان سایر انرژی‌های تجدیدپذیر به سبب حجم زیاد و در دسترس بودنشان افزایش یافته و به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است که به تولید گرما، برق و همچنین تولید مواد شیمیایی مختلف و محصولاتی با ارزش افزوده بالا می‌انجامد (Zuwala, 2012). بقایای کشاورزی و جنگلی منبع اصلی زیست‌توده برای پروژه‌های بالقوه زیست انرژی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه است (McMullen *et al.*, 2004). منابع انرژی تجدیدپذیر به‌دلیل ویژگی-هایی همانند، کاهش انتشار گازهای مضر، مقرون به صرفه بودن و نیز کاهش میزان واردات سوخت‌های فسیلی، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است (Chou *et al.*, 2009). در حال حاضر علاقه زیادی به استفاده از سوخت‌های جامد زیستی همانند پلت‌ها به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی وجود دارد (Liu et *al.*, 2013). یکی از شیوه‌های نوین استفاده از این زیست توده‌ها تبدیل آنها به شکل پلت است که در مقایسه با حجمی که اشغال می‌کنند جرم و انرژی بیشتری داشته و امکان استفاده و حمل و نقل آسان‌تر آنها را فراهم می‌سازد (Garsia-Maraver *et al.*, 2017).

ساختار این پلت‌ها حاوی نوعی مواد افزودنی به‌منظور افزایش استحکام ساختمان آن‌ها می‌باشد. شکل هندسی این سوخت‌های جامد معمولا به فرم استوانه، با قطر ۶ تا ۲۰ میلی‌متر و طول ۲۰ تا۴۰ میلی-متر است. Garsia *et al.*, (2019) از ترکیب خاک اره چوب کاج و دیگر بقایای زیستی پلت‌های در مقیاس صنعتی تولید کردند. پلت‌های تولید شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۱۶/۶ درصد دارای چگالی حجمی ۶۱۶ کیلوگرم بر متر مکعب و ارزش حرارتی ۱۸ مگاژول بر کیلوگرم و پایداری ۹۹/۴ درصد بودند. در پژوهشی به‌منظور بررسی تراکم ظاهری پلت ساخته شده از چوب بامبو، درصدهای گوناگونی از ذرات کاج با چوب بامبو ترکیب شده و کیفیت پلت‌های نهایی ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزودن ذرات کاج به بامبو یک راه مؤثر برای بهبود تراکم ظاهری پلت‌ها می‌باشد (Liu *et al.*, 2014). در پژوهشی که همانند تحقیق حاضر از کاه برنج به‌منظور تولید پلت استفاده شد، پارامترهای ارزش حرارتی و میزان رطوبت مورد بررسی قرار گرفت و مناسب‌ترین رطوبت برای ساخت پلت از کاه برنج بین ۱۳٪ الی۲۰٪ گزارش شد (Ishii and Furuichi, 2014). محققین دریافتند که کمترین مصرف انرژی مخصوص برای تولید بیشترین تراکم پلت‌ها در فشار حدود ۶۳ مگاپاسکال برای جو و گندم و فشار حدود ۹۴ مگاپاسکال برای کلزا و جو دوسر می‌باشد که این نتایج از بررسی فاکتورهای انرژی مخصوص و چگالی کلش کلزا، جو، جودوسر و گندم در رطوبت ۱۰٪ بدست آمد (Adapa *et al.*, 2009). در تحقیق دیگری اثر فشرده‌سازی بر کیفیت پلت ساخته شده از کلش برنج مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج نشان داد که بهترین کیفیت مربوط به پلت ساخته شده با رطوبت ۱۷٪ تحت دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد بود و میزان پایداری آن ۹۹/۳٪ اندازه‌گیری شد (Said *et al.*, 2015). نتایج حاصل از پژوهشی نشان داد که پارامترهای فرآیند پلت‌سازی مانند محتوای رطوبت، اندازه ذرات و ترکیبات زیست توده تاثیر قابل توجهی بر تولید پلت‌های سوختی خواهد داشت (Pradhan *et al.*, 2018). در این پژوهش با استفاده از دو زیست‌توده کاه برنج و باگاس نیشکر و ترکیب آن‌ها با پیونددهنده‌های طبیعی (صمغ عربی، کندر، سریش) در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، به بررسی پارامترهای مقاومت شکست و پایداری هر یک از نمونه‌ها با توجه به وزن و چگالی هر کدام از پلت‌ها پرداخته شده است.

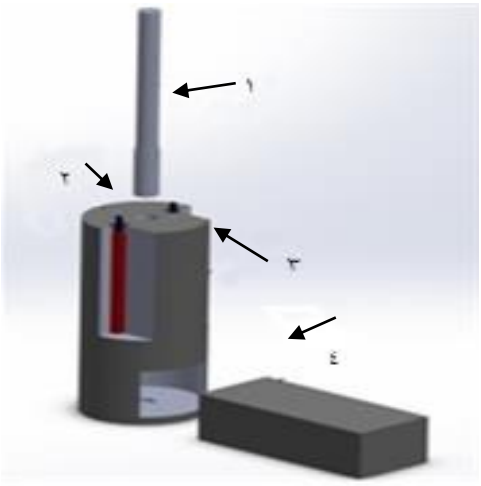
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه مواد

در پژوهش حاضر به‌منظور ساخت پلت سوختی، از زیست‌توده کاه برنج و باگاس نیشکر و همین‌طور از صمغ‌های گیاهی سریش، کندر و صمغ-عربی به‌عنوان یک ماده پیونددهنده طبیعی استفاده شد. کاه برنج از شالیزارهای شهرستان فریدونکنار، باگاس نیشکر از کارگاه‌های فرآوری نیشکر شهرستان بهنمیر استان مازندران و همچنین صمغ‌های طبیعی از عطاری‌ها تهیه شدند. در ابتدا رطوبت اولیه مواد پایه ساخت پلت‌ها با استفاده از آون الکتریکی با دمای۳ ± ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد و در مدت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد (Harun and Afzal, 2016). سپس با در نظر داشتن رطوبت اولیه، این مواد داخل آون قرار داده شد تا به رطوبت مورد نظر (۱۳٪) برسند و پس از آن زیست‌توده‌ها را با استفاده از خردکن آزمایشگاهی، خرد کرده و از الک با شماره مش ۱۸ عبور داده تا ذرات مواد پایه ساخت پلت‌ها یک اندازه شده و در نتیجه کیفیت فیزیکی پلت‌های ساخته شده بهبود یابد (Shaw *et al.*, 2009).

۲-۲- پلت‌ساز آزمایشگاهی

برای تولید پلت از دستگاهی مطابق شکل ۱ استفاده شد که از یک پیستون به قطر ۸ میلی‌متر برای فشرده‌سازی مواد، یک قالب فولادی با قطر داخلی سیلندر ۸/۰۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر و با انتهای مسدود شده توسط یک نگهدارنده متحرک تشکیل شده است. نوع دستگاه پلت‌ساز به‌کار گرفته شده در این پژوهش بر اساس طرح پیشنهادی (Nguyen *et al.*, 2015) و با اعمال تغییراتی جزئی می-باشد. برای اعمال دما به سیلندر پلت‌ساز، از دو المنت خطی به طول ۱۰۰ میلی‌متر در دو طرف سوراخ قالب استفاده شد. انتقال حرارت در شرایط کاری متنوع، مقاومت در برابر ضربه‌های جزئی و راندمان مطلوب از مشخصه‌های المنت به‌کار برده شده در این دستگاه می‌باشد. همچنین، به‌منظور اندازه‌گیری دمای قالب پلت‌ساز از یک سیستم کنترل دمای ترموکوپلی برای تنظیم دمای مورد نظر استفاده گردید.



شکل ۱- طرح‌واره پلت‌ساز آزمایشگاهی
۱) پیستون ۲) المنت حرارتی ۳) جداره سیلندر ۴) مسدود کننده انتهای سیلندر
Fig 1. Schematics of laboratory pelletizer
1. Piston; 2. Thermal element; 3. Cylinder wall; 4. End banned of cylinder

۲-۳- ساخت پلت

برای ساخت پلت‌ها، از یک دستگاه آزمون کشش-فشار به‌منظور فشرده‌سازی مواد درون قالب استفاده شد (شکل ۲). قالب مسدود کننده انتهایی پیستون به فک متحرک دستگاه متصل شده و پس از اینکه قالب دستگاه پلت‌ساز به دمای مورد نظر رسید نمونه آماده شده با نسبت ترکیب معین کاه برنج، باگاس نیشکر و پیونددهنده طبیعی به وزن ۱ گرم درون قالب دستگاه ریخته شد. نمونه توسط پیستون با سرعت ۵ میلی‌متر در دقیقه تا فشار ۱۳۰۰ نیوتن متراکم شده و بعد از ۱۰ ثانیه استراحت در همان فشار۱۳۰۰ نیوتن، با بیرون آوردن مسدودکننده متحرک انتهایی سیلندر، پلت ساخته شده را خارج نموده و برای انجام آزمون‌های بعدی آن‌ها را درون ظرف شیشه‌ای نگهداری کرده تا رطوبت محیط باعث تخریب ساختمان آن‌ها نشود.

شکل ۲- دستگاه پلت‌ساز آزمایشگاهی
Fig 2. Laboratory pelletizer device

۲-۴- تحلیل آماری

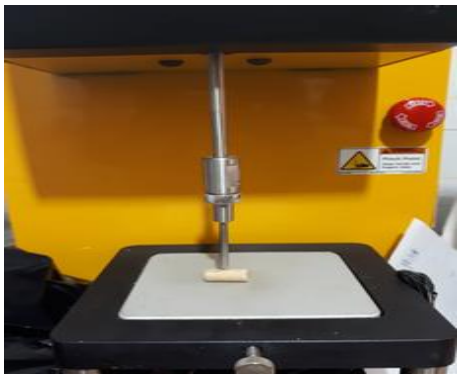
آزمایش‌های مربوط به پژوهش حاضر بر پایه طرح کاملا تصادفی انجام شدند. داده‌ها با استفاده از آنالیز واریانس دوطرفه در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۴ تحلیل شدند. به‌منظور مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون دانکن در سطح احتمال یک درصد استفاده شد. آزمایش‌ها در ۴۵ تیمار گوناگون و هر یک با ۳ تکرار صورت پذیرفت. متغیرهای مستقل شامل نسبت اختلاط کاه برنج با باگاس نیشکر (۱۰۰٪ کاه، ۷۵٪ کاه + ۲۵٪ باگاس، ۵۰٪ کاه + ۵۰٪ باگاس، ۲۵٪ کاه + ۷۵٪ باگاس، ۱۰۰٪ باگاس)، نوع ماده پیونددهنده (کندر، صمغ عربی، سریش) و نسبت ترکیب آن‌ها در مواد سازنده پلت (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪) و متغیرهای وابسته شامل مقاومت فشاری شعاعی، پایداری و ارزش حرارتی بودند.

۲-۵- چگالی

چگالی پلت‌ها، به‌عنوان یکی از خصوصیات فیزیکی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری چگالی، حجم پلت‌ها با فرض اینکه شکل آن‌ها کاملاً استوانه‌ای می‌باشد، محاسبه شد. ابعاد پلت‌ها با استفاده از کولیس با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. جرم هر کدام از پلت‌ها بوسیله ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شده و سپس چگالی پلت‌ها برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب محاسبه شد.

۲-۶- مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری پلت‌های ساخته شده با استفاده از دستگاه آزمون کشش-فشار مدل Brook field -CT310K انجام شد (شکل ۳). اعمال نیروی فشاری در راستای شعاعی توسط فک متحرک که بر روی آن پروب استوانه‌ای شکل قرار داشت با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر در ثانیه تا زمان گسیختگی ساختمان پلت ادامه داشته و بلافاصله پس از گسیختگی، حداکثر نیروی اعمال شده به پلت ثبت گردید.



شکل ۳- نمونه پلت تحت بارگذاری فشاری
Fig 3. Pellet sample under compression test

۲-۷- پایداری

آزمون پایداری به‌منظور بررسی سایش و تخریب ساختار پلت‌ها، در اثر زیر و رو شدن و تکان خوردن در طول فرآیند حمل و نقل و نگهداری صورت می‌پذیرد. این آزمون با دستگاه آزمون پایداری که بر اساس طرح Ligno ساخته شده (شکل ۴)، انجام شد. پلت‌ها در معرض شوک‌های ناشی از جریان هوا و دیواره داخلی دستگاه قرار می‌گیرد. دستگاه تست پایداری به فرم هرم چهارضلعی می‌باشد و جریان هوا از زیر هرم به داخل آن وارد می‌شود. این هرم چهارضلعی که با توری فلزی ساخته شده به تنهایی قادر به ایجاد جریان چرخشی در محفظه نمی‌باشد. به همین جهت ساختار این دستگاه به نحوی است که این هرم چهارضلعی درون یک فضای بسته مکعبی شکل قرار گرفته که این محفظه بسته باعث گردش هوا درون دستگاه شده و سبب افزایش دقت آزمایش تست پایداری پلت می‌شود (Temmerman *et al.*, 2006).

شکل ۴- دستگاه تست پایداری پلت
Fig 4. Durability test device

۲-۸- ارزش حرارتی

ارزش حرارتی سوخت عبارت است از مقدار گرمایی که در موقع سوختن کامل واحد جرم سوخت آزاد می‌شود. ارزش حرارتی، میزان پتانسیل ماده و انرژی آن را برای استفاده به‌عنوان سوخت نشان خواهد داد. در این پژوهش به‌منظور اندازه‌گیری ارزش حرارتی هر یک از نمونه‌ها از دستگاه بمب کالریمتر (ایران، شرکت مهرتجهیز) استفاده شد. این دستگاه نمونه سوخت را سوزانده و گرمای حاصله را به جرم مشخص از آب منتقل می‌کند. با توجه به وزن نمونه سوخت، و افزایش دمای آب، عدد کالری محاسبه می‌شود. عدد کالری در یک آزمون بمب کالریمتر، بیان‌کننده گرمای حاصل از احتراق به ازای جرم واحد نمونه سوخت است. این گرما به‌صورت حرارت تولید شده هنگام سوختن نمونه، به‌علاوه گرمای گرفته شده از بخار آب تولید شده، طی فرآیندهای چگالش و خنک شدن تا دمای بمب است.

۳- نتایج و بحث

جدول ۱، تجزیه واریانس حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به مقاومت فشاری، پایداری و ارزش حرارتی پلت‌های سوختی ساخته شده را نشان می‌دهد که نتایج به بصورت میانگین مربعات بیان شده است. نتایج نشان داد که نسبت اختلاط کاه برنج با باگاس نیشکر، نوع ماده پیونددهنده و نسبت ترکیب آن‌ها در مواد سازنده پلت و همچنین اثرات متقابل آنها بر متغیرهای وابسته در سطح ۱٪ معنی‌دار بودند.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس مربوط به مقاومت فشاری، پایداری و ارزش حرارتی پلت‌ها
Table 1. ANOVA for the failure strength, durability and heating value of different treatments

منابع تغییرات S.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات (MS)		
		مقاومت فشاری Failure strength	پایداری Durability	ارزش حرارتی Heating value
نسبت ترکیب مواد Combination ratio (A)	4	11679.49**	278.35**	6224727.27**
نوع پیونددهنده Binder type (B)	2	6815.65**	263.31**	410308.25**
درصد پیونددهنده Binder percentage (C)	2	3765.58**	72.78**	10475648.14**
برهم‌کنش ترکیب – نوع پیوند A ×B	8	104.29**	13.24**	80832.24**
برهم‌کنش ترکیب – درصد پیوند A × C	8	231.86**	2.26**	44836.38**
برهم‌کنش نوع – درصد پیوند B × C	8	90.84**	1.63**	39814.56**
برهم‌کنش ترکیب – نوع- درصد A × B× C	16	151.01**	0.81**	9552.28**
خطا Error	90	1.31	0.27	1466.30

**: وجود اختلاف معنی‌دار در سطح 1% ns: عدم وجود اختلاف معنی‌دار

* and ** shows meaningful at 5 and 1 percent level, respectively

۳-۱- چگالی پلت

جدول ۲، میانگین نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری ابعاد و محاسبه چگالی پلت‌های سوختی ساخته شده را نشان می‌دهد. پژوهشگران میانگین چگالی پلت‌های تولید شده از برخی زیست‌توده‌ها را بین ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش کرده‌اند Rhen *et al.*, 2005) ؛ Kaliyan and Morey, 2010؛ Lehtikangas, 2001). چگالی پلت‌ها، فاکتور مهمی برای حمل و نقل و ذخیره‌سازی محسوب می‌شود. با توجه به جدول۱ نسبت ترکیب زیست‌توده‌ها به‌عنوان مواد پایه ساخت پلت، نوع ماده پیونددهنده طبیعی و نسبت ترکیب آن با زیست‌توده‌ها، بر مقدار چگالی پلت‌های ساخته شده تأثیرگذار بوده است. ترکیب باگاس نیشکر و کاه برنج با نسبت ترکیب ۳ به ۱ و پیونددهنده کندر به‌عنوان مواد چسبنده طبیعی، بیشترین میزان چگالی را در میان سایر پلت‌های ساخته شده دارد که این مقدار برابر ۰/۹۱۰۲۴۰۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. نتایج نشان داد که با افزایش سطح پیونددهنده‌ها از ۵ تا ۱۵ درصد، مقدار چگالی پلت‌های ساخته شده نیز افزایش پیدا کرد.

جدول ۲- ابعاد فیزیکی، وزن و مقدار چگالی پلت‌های سوختی متشکل از زیست‌توده‌های گوناگون

Table 2. Physical dimensions, density and weight of the different biomass pellets

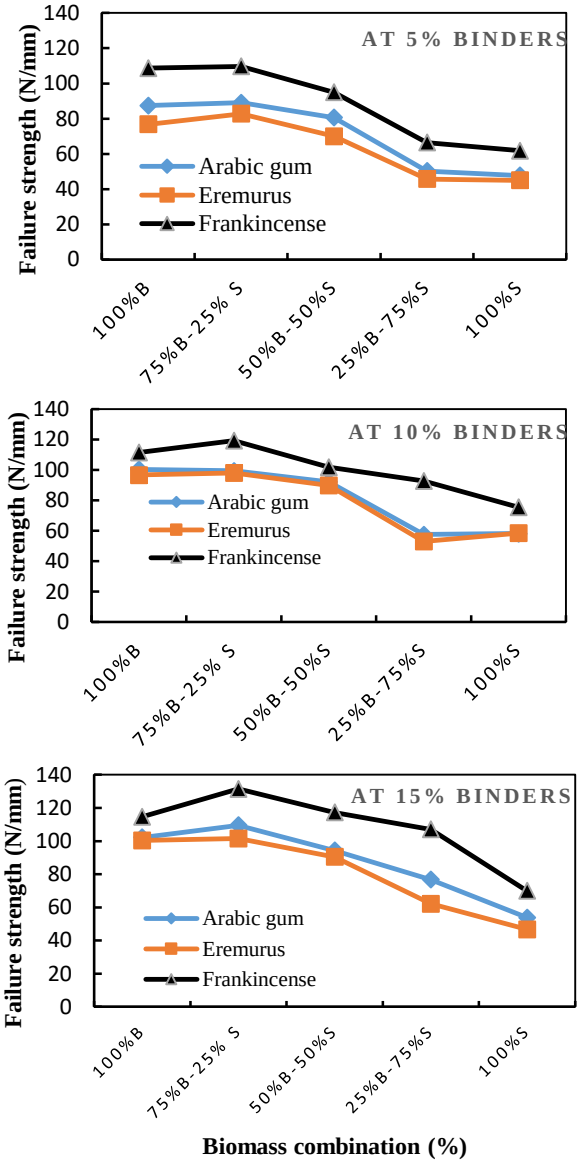
تیمارها Treatments		سطوح پیونددهنده‌ها Binders levels (%)	وزن Weight (g)	طول Length (mm)	شعاع Radius(mm)	چگالی Density ($\frac{g}{mm^3}$)
۱۰۰٪ باگاس 100% bagasse	صمغ عربی Arabic gum	5	0.876	21.77	4.11	758.634
		10	0.883	21.10	4.07	804.562
		15	0.891	20.62	4.08	826.683
	سریش eremurus	5	0.869	21.03	4.21	742.483
		10	0.871	21.61	4.02	754.662
		15	0.877	21.28	4.14	765.768
	کندر frankincense	5	0.897	19.42	4.16	850.891
		10	0.900	22.01	4.06	790.384
		15	0.901	21.29	4.11	797.876
۷۵٪ باگاس + ۲۵٪ کلش 75% bagasse+25% straw	صمغ عربی Arabic gum	5	0.891	21.13	4.07	815.717
		10	0.905	20.77	4.21	854.982
		15	0.926	19.83	4.17	855.237
	سریش eremurus	5	0.879	19.54	4.25	793.152
		10	0.887	19.70	4.07	839.688
		15	0.892	19.91	4.12	840.983
	کندر frankincense	5	0.929	19.82	4.17	859.307
		10	0.947	19.13	4.18	902.303
		15	0.962	19.04	4.21	910.240
۵۰٪ باگاس + ۵۰٪ کلش 50% bagasse+50% straw	صمغ عربی Arabic gum	5	0.882	21.28	4.21	829.166
		10	0.890	19.90	4.11	843.186
		15	0.894	19.65	4.12	848.819
	سریش eremurus	5	0.867	20.11	4.16	791.567
		10	0.872	20.52	4.15	826.791
		15	0.883	19.95	4.16	832.573
	کندر frankincense	5	0.905	21.25	4.06	850.507
		10	0.918	21.04	4.17	884.746
		15	0.946	21.07	4.11	900.085

ادامه جدول ۲
Con. Table 2.

تیمارها Treatments		سطوح پیونددهنده‌ها Binders levels (%)	وزن Weight (g)	طول Length (mm)	شعاع Radius(mm)	چگالی Density ($\frac{g}{mm^3}$)
٪۲۵ کلش + ٪۷۵ باگاس 25% straw +75% bagasse	صمغ عربی Arabic gum	5	0.834	20.15	4.09	787.979
		10	0.851	19.21	4.14	823.136
		15	0.862	19.18	4.12	843.207
	سریش eremurus	5	0.813	21.3	4.07	733.825
		10	0.826	19.8	4.21	749.585
		15	0.835	21.14	4.06	763.132
	کندر frankincense	5	0.864	20.16	4.16	788.691
		10	0.874	19.15	4.23	812.329
		15	0.881	20.19	4.17	799.167
٪۱۰۰ کلش 100% straw	صمغ عربی Arabic gum	5	0.765	21.77	4.17	668.816
		10	0.788	21.27	4.12	695.079
		15	0.779	20.63	4.13	705.031
	سریش eremurus	5	0.764	19.19	4.02	658.457
		10	0.768	21.42	4.14	666.210
		15	0.779	19.07	4.2	685.483
	کندر frankincense	5	0.781	20.03	4.07	711.244
		10	0.786	20.87	4.08	720.526
		15	0.789	20.65	4.16	738.785

۳-۲- مقاومت فشاری پلت

مقدار مقاومت پلت‌های سوختی یکی از موارد اصلی در سنجش کیفیت پلت‌ها می‌باشد و نقش اساسی در حفظ شکل ظاهری پلت‌های سوختی در زمان بارگیری، جابجایی و تخلیه آن‌ها دارد. هرچه مقاومت فشاری پلت‌های ساخته شده بیشتر باشد، کیفت پلت‌ها بالاتر است. مطابق شکل ۵ نتایج نشان داد که ترکیب باگاس و کاه برنج با نسبت ۳ به ۱ (۷۵ درصد باگاس و ۲۵ درصد کاه)، بهترین نسبت به‌منظور ساخت پلت از مواد زیستی است که بیشترین مقدار مقاومت شکست را در مقایسه با دیگر زیست‌توده‌ها دارا می‌باشد. نسبت بیشتر باگاس در مقایسه با کاه درترکیب مواد پایه ساخت پلت، مقاومت شکست پلت-های سوختی ساخته شده را افزایش می‌دهد. این امر به‌دلیل ترکیبات فیبری و بویژه میزان لیگنین و سلولز موجود در ساختار کاه برنج و باگاس می‌باشد. پژوهشگران طی تحقیقاتی به این نتیجه رسیدند که ساختار فیبری غیر محلول سلولز و لیگنین در زیست‌توده‌ها در طی فرآیند پلت‌سازی نرم می‌شوند و سبب تشکیل پیوندی قوی بین ذرات خواهند شد. بنابراین، مقدار بیشتر سلولز و لیگنین منجر به دگر چسبی بیش‌تر و در نتیجه مقاومت بیش‌تر می‌شود (Kaliyan and Morey., 2010). با توجه به شکل ۵ می‌توان بیان نمود که افزودن پیونددهنده‌ها به مواد زیست‌توده سبب افزایش استحکام پلت‌های ساخته شده می-شود. طی تحقیقات به‌عمل آمده بیان شد که برای افزایش استحکام پلت‌های ساخته شده از مواد جنگلی و کشاورزی می‌توان از پیونددهنده‌های طبیعی استفاده نمود (Jamradloedluk *et al.*, 2017). در این پژوهش پیونددهنده طبیعی کندر با افزایش نسبت ترکیب از ۵ تا ۱۵ درصد، بهترین پیونددهنده در بین دو نوع دیگر می‌باشد. این مواد که شامل ۵۰ تا ۷۰ درصد رزین‌های اسیدی می‌باشد (Krohn *et al.*, 2001) زمانی که با زیست‌توده‌ها ترکیب شده و درون قالب پلت‌ساز ریخته می‌شود، در اثر جذب حرارت منتقل شده از قالب دستگاه که حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد فعال شده و به حالت پخته درآمده که باعث مقاومت و استحکام بالای مواد ترکیب شده با آن می‌شود. در نتیجه، هرچه میزان این ماده بیشتر باشد ساختار پلت ساخته شده پایدارتر و مقاوم‌تر خواهد شد. محققان بیان کردند که با ایجاد گرما در قالب پرس پلت زیست‌توده یا مواد پیونددهنده اضافه شده، فعال شده و در نتیجه فرایند خودچسبی تقویت شده و کیفیت پلت افزایش پیدا می‌کند (Rhen *et al.*, 2005).

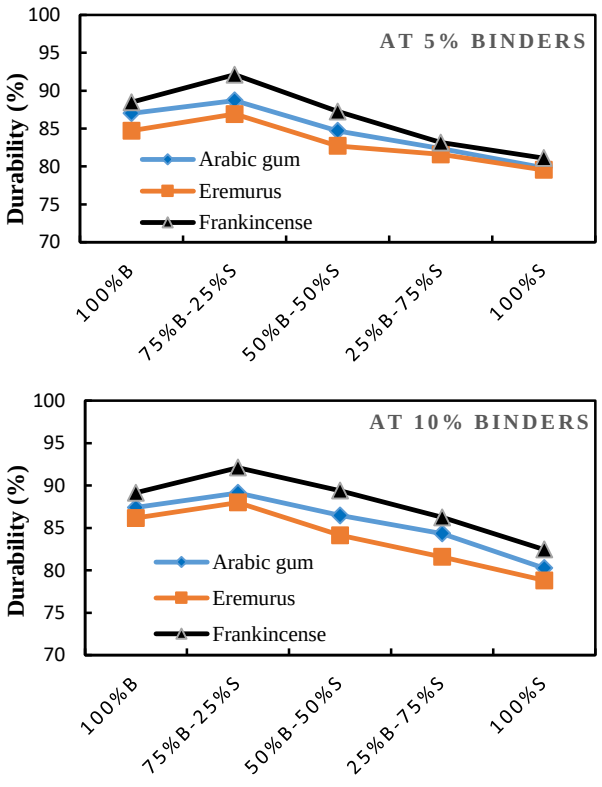


شکل ۵- اثر متقابل نوع مواد، پیونددهنده‌ها و درصد ترکیب آن‌ها بر مقاومت شکست پلت‌ها (باگاس: B و کلش: S)

Fig 5. Effect of different combinations of biomass and binder types on the failure strength of the pellets (B: Bagasse and S: Straw)

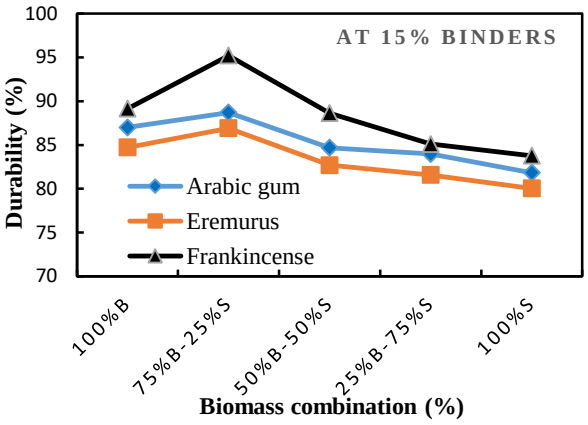
۳-۳- پایداری پلت

پایداری یکی از پارامترهای کیفی پلت‌های سوختی می‌باشد و به‌عنوان توانایی فیزیکی سوخت‌های فشرده در هنگام استفاده یا جابجایی پلت-ها نقش اساسی ایفا می‌کند (Temmerman *et al.*, 2006). میزان پایداری پلت‌ها با اعمال شوک و یا در اثر اصطکاک با دیواره دستگاه آزمون پایداری اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۶ میانگین مقادیر پایداری پلت‌های ساخته شده از زیست‌توده‌ها و پیونددهنده‌های گوناگون را نشان می‌دهد. بیشترین و کمترین مقادیر میانگین پایداری پلت‌های ساخته شده از زیست‌توده‌ها با سه نوع پیونددهنده طبیعی، به‌ترتیب برابر با ۹۵/۲۲ درصد مربوط به ترکیب باگاس نیشکر و کاه برنج با نسبت اختلاط ۳ به ۱ در ترکیب با پیونددهنده کندر و ۸۰/۰۴ درصد مربوط به پلت ساخته شده با مواد پایه کاه برنج در ترکیب با پیونددهنده سریش می‌باشد. نسبت بیشتر باگاس در مقایسه با کاه درترکیب مواد پایه ساخت پلت، پایداری پلت‌های سوختی ساخته شده را به‌میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این امر به‌دلیل ترکیبات فیبری و خصوصا میزان لیگنین و سلولز موجود در ساختار کاه برنج و باگاس نیشکر می‌باشد. محققان طی تحقیقاتی بیان کردند که میزان تجزیه‌پذیری ساقه نیشکر حتی اگر له شده باشد نیز خیلی پایین بوده و مشاهده شد که حتی بعد از ۱۲۰ روز نیز فیبرها استحکام خود را حفظ کرده بودند (Pound *et al.*, 1981). ساختمان باگاس نیشکر و کاه برنج از مواد فیبری و لیگنوسلولزی ساخته شده و تخریب و تجزیه-پذیری بیولوژیکی آن کند و دشوار است. ترکیبات فیبری حدود ۶۹ درصد از ساختار کاه (Singh *et al.*, 2010; Hills *et al.*, 1981) و ۸۰ درصد از باگاس (Farsi and Janpour, 2013; Rezende *et al.*, 2011; Taherzadeh and Karimi , 2008) را شامل می‌شوند. پیونددهنده طبیعی کندر نیز با افزایش سطح ترکیب از ۵ تا ۱۵ درصد، بهترین نوع پیونددهنده در مقایسه با دو نوع دیگر می‌باشد. این امر نیز همانند مطلب بیان شده در مقاومت فشاری به سبب میزان رزین موجود در ساختار کندر می‌باشد.



شکل ۶- میانگین مقادیر پایداری پلت‌های ساخته شده از زیست‌توده‌ها و پیونددهنده‌های گوناگون (باگاس: B و کلش: S)

Fig 6. Effect of different combinations of biomass and binder types on the durability of pellets (B: Bagasse and S: Straw)



ادامه شکل ۶

Cont. Fig 6.

۳-۴- ارزش حرارتی پلت

عوامل متعددی مانند درصد رطوبت، جنس و نوع مواد سوختی بر میزان ارزش حرارتی تولید شده تاثیرگذار می‌باشد (Mishra and Mohanty,. 2018). ارزش حرارتی به میزان کربن تشکیل دهنده ساختمان زیست‌توده‌ها بستگی و با آن رابطه مستقیم دارد، در نتیجه بیش‌تر بودن این مقدار در زیست‌توده‌ها، سبب افزایش ارزش حرارتی آن‌ها می‌شود. جدول ۳ محتوای کربن زیست‌توده‌های باگاس نیشکر و کاه برنج بکاربرده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

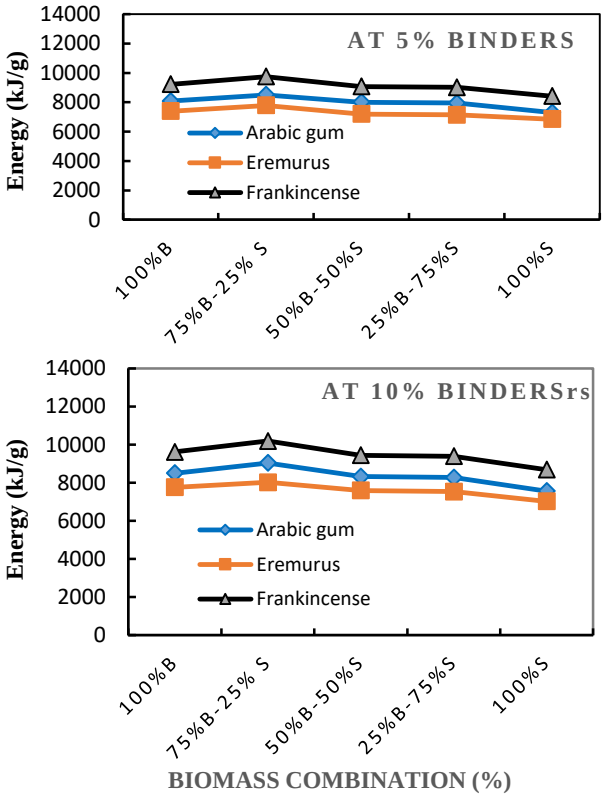
جدول ۳- درصد رطوبت و مقدار کربن در ساختار زیست‌توده‌های استفاده شده

Table 3. The moisture content and carbone percent of biomass

زیست توده Biomass	رطوبت اولیه Initial MC (%)	رطوبت نهایی Final MC (%)	کربن *Carbone (%)
باگاس نیشکر Sugarcane bagasse	39.57	13	42.57
کلش برنج Rice straw	14.76	13	38.2

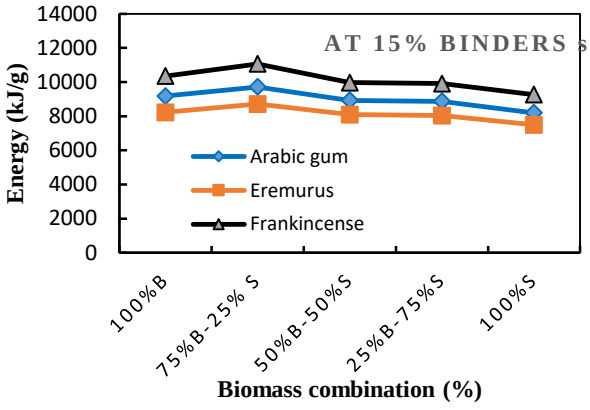
* درصد کربن از روش استاندارد APHA محاسبه شد.

ارزش حرارتی پلت‌های سوختی یکی از فاکتورهای مهم سنجش کیفیت پلت‌ها محسوب می‌شود. ارزش حرارتی بالاتر سوخت، به ترکیبات و عناصر تشکیل دهنده مواد سوختی و علی‌الخصوص به میزان کربن نهایی موجود در ساختار سوخت بستگی دارد (Atli *et al.*, 2018). با توجه به شکل ۷، نمودار اثر متقابل نوع زیست‌توده و پیونددهنده و نسبت ترکیب آن‌ها بر ارزش حرارتی پلت‌های ساخته شده، می‌توان نتیجه گرفت که پلت ساخته شده متشکل از ۷۵٪ باگاس و ۲۵٪ کاه در ترکیب با پیونددهنده طبیعی کندر بیشترین میزان ارزش حرارتی را دارد. پیونددهنده طبیعی کندر که دارای رنگی ما بین زرد تا قهوه‌ای است، بهترین پیونددهنده در بین دو نوع دیگر می‌باشد. این ماده شامل ۵۰ تا ۷۰ درصد رزین می‌باشد (Krohn *et al.*, 2001). با توجه به نوع گونه استفاده شده در این پژوهش که نوع صنعتی بوده و دارای درصدی هپتان می‌باشد خاصیت اشتعال‌زایی خوبی دارد. در نتیجه با افزایش نسبت ترکیب این پیونددهنده از ۵ تا ۱۵ درصد با زیست‌توده‌ها، میزان ارزش حرارتی نیز افزایش می‌یابد. در پژوهشی ارزش حرارتی برای پلت‌های ساخته شده از چهار نوع زیست‌توده‌ی: ترتیکاله، گیاه فستوکا، سورگوم و یونجه به‌ترتیب ۱۸/۰۲، ۱۷/۴۶، ۱۷/۶۷ و ۱۷/۶۲ مگاژول بر کیلوگرم محاسبه شد (Puig-Amavat *et al.*, 2016). تحقیقات مشابهی بر روی کاه برنج برای تولید پلت‌هایی با ارزش حرارتی بالا و تعیین مناسب‌ترین رطوبت انجام شد. ارزش حرارتی برای پلت‌های ساخته شده با کاه برنج در رطوبت ۱۰/۷، ۱۲/۷ و ۱۴/۱ درصد، به‌ترتیب ۱۲/۶، ۱۲/۵و ۱۱/۸ کیلوژول بر گرم بدست آمد که نشان‌دهنده افزایش رطوبت زیست‌توده بر کاهش ارزش حرارتی است (Ishii and Furuichi, 2014). محققین پلت‌هایی از ترکیب ذغال قهوه‌ای و سبوس برنج ساختند و خصوصیات پایداری و ارزش حرارتی آنها را بررسی کردند و دریافتند که نسبت ترکیب زیست‌توده‌ها نقش مهمی در میزان استحکام و ارزش حرارتی پلت‌های ساخته شده دارد (Tsuchiya and Yoshida , 2017).



شکل۷- اثر متقابل نوع مواد، پیونددهنده‌ها ودرصد ترکیب آن‌ها بر ارزش حرارتی پلت‌ها

Fig 7. Effect of different combinations of biomass and binder types on the calorimetric value of pellets



ادامه شکل ۷

Cont. Fig 7.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش مواد اولیه ساخت پلت‌های سوختی از پسماند کشاورزی (کاه برنج، و باگاس نیشکر) تهیه شد و تاثیر فرآیند تولید بر روی برخی از خصوصیات مکانیکی و حرارتی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات و اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی و حرارتی پلت‌های سوختی ساخته شده از زیست‌توده‌های کاه برنج و باگاس نیشکر و پیونددهنده‌های گوناگون، می‌توان بیان نمود که پلت ساخته شده با مواد پایه متشکل از ۷۵٪ باگاس نیشکر و ۲۵٪ کاه برنج، در ترکیب با پیونددهنده طبیعی کندر در سطح ۱۵ درصد، بهترین نتیجه را در میان دیگر تیمارها، در مجموع ارزیابی خواص مکانیکی و حرارتی دارا می‌باشد.

منابع

Adapa, P., Tabil, L., and Shoenau, G. (2009). *Comparison characteristics of barley, canola and wheat straw*. Biosystems Engineering, 104, 335-344.

APHA, "Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed", American Public Health Association 1998, Washington DC.

Atli, A., Candelier, K., and Alteyrac, J. (2018). *Mechanical, thermal and biodegradable properties of bioplast-spruce green wood polymer composites.* International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, 12(5), 226.

Chou, C.S., Lin, S.H., Peng, C.C., and Lu, W.C. (2009). *The optimum conditions for preparing solid fuel briquette of rice straw by a piston-mold process using the Taguchi method*. Fuel Process. Technol. 90 (7–8), 1041–1046.

Farsi, M., and Janpour, J. (2013). *Cultivation and improvement of oyster mushrooms.* Mashhad Jihade-daneshgahi publications, Mashhad, Iran (In Persian)

Garsia, R., Gil, M.V., Rubiera, F., and Perida, C. (2019). *Pelletization of wood and alternative biomass blends for producing industrial quality pellets*. Fuel, 251: 739-753.

Garsia-Maraver, A., Rodriguez, M.L., Serrano-Bernardo, F., Jamradloedluk, J., and Lertsatitthanakorn, C. (2017). *Influence of mixing ratios and binder types on properties of biomass pellets.* Energy Procida, 138, 1147-1152.

Harun, N.Y., and Afzal, M.T. (2016). *Effect of particle size on mechanical properties of pellets made from biomass blends.* Procedia Engineering, 148, 93-99.

Hills, D.J., and Roberts, D.W. 1981. *Anaerobic digestion of dairy manure and field crop residues.* Agricultural Wastes. 3(3): 179-89.

Ishii, K., and Furuichi, T. (2014). *Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets.* Waste Management, 34, 2621-2626.

Kaliyan, N., and Morey, R.V. (2010). *Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn Stover and switch grass.* Bioresource Technology ,101, 1082-1090

Krohn K, Rao MS, Raman NV and Khalilullah M. (2001). *HPTLC analysis of anti-inflammatory triterpenoids from Boswellia serrata Roxb*. Phytochemical Analysis, 12: 374 – 6.

Liu, Z., Fei, B., Jiang, Z., Cai, Z., and Yu, Y. (2013). *The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. Renewable Energy, 55*, 1-5.

Liu, Zh., Quek, A., and Balasubramanian, R. (2014). *Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residue and their corresponding hydrochars.* Applied Energy, 113, 1315-1322.

Mishra, R. K., and Mohanty, K. (2018). *Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis.* Bioresource Technology, 251, 63-74.

McMullen, J., Fasina, O., Wood, W., Feng, Y.C., and Mills, G. (2004). *Physical characteristics of pellets from poultry litter.* ASABE Paper No. 046005. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2004.

Pound, B., Done, F., and Preston, T. R., (1981). *Biogas production from mixtures of cattle slurry and pressed sugar cane stalk, with and without urea.* Trop anim prod. 6:1.

Pradhan, P., Mahajani, S. M., and Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. Fuel Processing Technology, 181, 215-232.

Puig-Arnavat, M., Shang, L., Sárossy, Z., Ahrenfeldt, J., and Henriksen, U.B. (2016). *From a single pellet press to a bench scale pellet mill—Pelletizing six different biomass feedstock.* Fuel Processing Technology, 142, 27-33.

Rezende, C.A., de Lima, M.A., Maziero, P., deAzevedo, E.R., Garcia, W., Polikarpov, I. (2011). *Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility.* Biotechnol. Biofuels, 4, 54-62.

Rhen, C., Gref, R., and Wasterlund, M. (2005). *Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets*. Fuel Process Technology, 87,111-116.

Said, N., Abdel daiem, M.M., Garcia-Maraver, A., and Zamorano, M. (2015). *Influence of densification parameters on quality properties for rice straw pellets.* Fuel Processing Technology. 138, 56-65.

Shaw, M.D., Karunkaran, C., and Tabil, L.G. (2009). *Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds.* Biosystems Engineering, 103,198-207.

Singh, A., Singh, N., and Bishnoi, N. R., (2010). *Enzymatic hydrolysis of chemically pretreated rice straw by two indigenous fungal strains: a comparative study.* Journal of Scientific and Industrial Research. 69: 232-237.

Taherzadeh, M.J., and Karimi, K. (2008). *Pretreatment of lignocellulose waste to improve ethanol and biogas production: A Review.* Int J. Mol. Sci.

Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P.D., Hartmann, H., and Böhm, T. (2006). *Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes.* Biomass and Bioenergy 30: 964-972.

Tsuchiya, Y., and Yoshida, T. (2017). *Pelletization of brown coal and rice bran in Indonesia*. Fuel Processing Technology, 156, 68-71.

Zuwala, J. (2012). Life cycle approach for energy and environmental analysis of biomass and coal co-firing in CHP plant with backpressure turbine. Journal of cleaner production, 35, 164-175.

This is an open access article under the CC BY NC license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/)