



فصلنامه علوم محیطی، دوره نوزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰

۱۳۰-۱۰۷

مقاله پژوهشی

روش‌های تحلیلی برای ارزیابی کیفیت کمپوست باگاس نیشکر و بهبود ویژگی‌های فیزیکی مکانیکی جهت فشرده‌سازی

احسان سرلکی، محمد حسین کیانمهر* و مرضیه قربانی

گروه مهندسی بیوسیستم، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۰

سرلکی، ا.، م.ح. کیانمهر و م. قربانی. ۱۴۰۰. روش‌های تحلیلی برای ارزیابی کیفیت کمپوست باگاس نیشکر و بهبود ویژگی‌های فیزیکی مکانیکی جهت فشرده‌سازی. فصلنامه علوم محیطی. ۱۹(۴): ۱۰۷-۱۳۰.

سابقه و هدف: سنجه‌های بلوغ و پایداری در کمپوست‌ها برای اطمینان از کیفیت محصول نهایی، حفظ اطمینان مصرف کننده و تضمین قابلیت کاربرد آن‌ها برای مصرف‌های کشاورزی بسیار ضرورت دارند. افزون بر این، زیست‌توده‌های کمپوست‌شده به دلیل کم بودن چگالی انرژی و توده‌ای با مشکل‌هایی از قبیل هزینه‌های انبار و حمل و نقل زیاد و همچنین هزینه‌های کلی در مدیریت لجستیک مواجه هستند. کاهش اندازه ذرات و فشرده‌سازی زیست‌توده‌های کمپوست‌شده می‌تواند تا حدی بر این چالش‌ها غلبه کند.

مواد و روش‌ها: کمپوست باگاس نیشکر (SBC) ^۱ از شرکت توسعه فرآوری باگاس جنوب (بیوفر) برای مشخصه‌یابی کیفیت و آسیاب کردن جهت پلت‌سازی تهیه شد. به منظور ارزیابی کیفیت SBCs، مشخصه‌یابی از طریق روش‌های تحلیلی گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) ^۲، پراش پرتو ایکس (XRD) ^۳، تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR) ^۴ و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ^۵ مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، از یک آسیاب چکشی - سایشی برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی مکانیکی و کاهش اندازه ذرات SBCs استفاده شد. برای این منظور، طرح آزمایشی در قالب طرح فاکتوریل (D-optimal) برای بررسی معنی‌داری و بهینه‌سازی اثر سه متغیر مستقل محتوای رطوبتی (۸، ۱۲ و ۱۶ درصد وزنی بر پایه تر)، اندازه مش (۱، ۲/۵ و ۴ میلی‌متر) و سرعت دورانی آسیاب (۱۴۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه) بر مصرف انرژی ویژه و چگالی توده‌ای به‌عنوان پاسخ‌های طرح استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج مشخصه‌یابی شیمیایی نشان دادند که ویژگی‌های SBCs به‌طور کامل با استانداردهای موجود مطابقت دارند. ریزنگاره‌های SEM، تغییرات فیزیکی در سطح‌های SBCs را می‌توان با یک مورفولوژی ناصاف و غیریکنواخت همراه با ترک‌هایی در راستای طولی در اثر تجزیه همی سلولز و لیگنین و با باز شدن دسته‌های الیاف در سلولز ثابت کرد. این روند همچنین توسط آنالیز XRD اثبات شد به‌طوری‌که با افزایش سنجه بلورینگی (از ۶۲ تا ۷۵)، ناحیه کریستالی سلولز در SBCs بدون تغییر باقی‌ماند؛ اما ناحیه آمورف (شامل همی سلولز و لیگنین) کمی دچار تجزیه شدند. نتایج حاصل از آنالیز FT-IR، تغییرات گروه‌های عاملی، تجزیه زیستی میکروبی لیپیدها و کربوهیدرات‌ها و همچنین تخریب لیگنین و پلی فنول‌ها را در SBCs نشان داد. براساس نتایج حاصل از آنالیز حرارتی DSC، دمای انتقال

* Corresponding Author: Email Address. kianmehr@ut.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.1003>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1400.19.4.3.1>

شیشه‌ای ۸۹/۷ درجه سلسیوس برای SBCs به دست آمد که با توجه به شدت پیک در این نقطه، افزایش درجه بلوغ و هیومیفیکاسیون SBCs تضمین شده است. برای هر دو پاسخ مصرف انرژی ویژه و چگالی توده‌ای SBC، مدل برهمکنش دو عاملی (2FI) با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین انحراف معیار پیشنهاد شد. اندازه مش آسیاب بیشترین تأثیر را در میان پارامترها بر مصرف انرژی ویژه آسیاب و چگالی توده‌ای داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهند که استفاده از آنالیزهای تحلیلی جامع برای بررسی شفاف و مقایسه‌ای بین محصول نهایی کمپوست و ماده اولیه از نظر سنجه‌های پایداری و بلوغ، کاربردی و قابل اطمینان است. نتایج بهینه‌سازی حاصل از طرح D-optimal نشان داد که تحت شرایط بهینه محتوای رطوبتی ۸ درصد وزنی بر پایه تر، اندازه مش آسیاب ۱ میلی‌متر و سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، مقدار کمینه مصرف انرژی ویژه ۱۴۱/۳۸ کیلوژول بر کیلوگرم و بیشینه چگالی توده‌ای ۲۰۹/۶۲ کیلوگرم بر متر مکعب به‌عنوان پاسخ‌های بهینه با تابع مطلوبیت ۰/۸۸ حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آسیاب، چگالی توده‌ای، کمپوست باگاس نیشکر، مصرف انرژی ویژه، XRD، FT-IR.

مقدمه

کمپوست و فرایند تولید کمپوست (TMECC, 2002)^۱ برای اطمینان از کیفیت محصول نهایی و حفظ اطمینان مصرف‌کننده ضروری است. ارزیابی کیفیت کمپوست‌ها از طریق روش‌های مختلف از قبیل فیزیکی شیمیایی (مانند دما، اندازه ذرات، pH، هدایت الکتریکی، چگالی توده، مواد جامد فرار، محتوای مواد مغذی، نیتروژن کل، کربن آلی، نسبت C/N، میزان معدنی‌شدن، نسبت یون آمونیوم به نیترات)، بیوشیمیایی (محتوای پلی‌فنول، لیگنین و کربوهیدرات‌ها) و آزمایش‌های بیولوژیکی (آزمون جوانه‌زنی بذر) و همچنین پارامترهای هیومیفیکاسیون (وزن مولکولی، مقدار و ساختار شیمیایی مواد هیومیکی مانند هیومیک اسید و فولویک اسید)، اطلاعات مفیدی را در مورد بلوغ و پایداری کمپوست‌ها ارائه می‌دهند (Ghorbani et al., 2015; Soobhany, 2018; Sarlaki et al., 2020). این روش‌ها در کنار آنالیزهای حرارتی، طیف‌سنجی و ریزساختاری عمده‌ترین روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی کیفیت کمپوست‌ها هستند. تلفیق تکنیک‌های پیشرفته مانند آنالیزهای حرارتی (TGA)^۲، گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR)، پراش پرتو ایکس (XRD) و رزونانس مغناطیسی آبی هسته کربن (¹³C-NMR)^۳ با روش‌های فیزیکی شیمیایی می‌تواند اطلاعات کامل و

سالانه ۲/۰۱ میلیارد تن پسماندهای زیستی در جهان تولید می‌شوند و تخمین زده می‌شود که تولید آن‌ها تا سال ۲۰۵۰ به ۳/۴ میلیارد تن برسد (Rajabi Hamedani et al., 2019). بنابر گزارش اتحادیه اروپا، ۲۵ درصد از پسماندهای زیستی از جمله پسماندهای جامد شهری و زیست‌توده‌های کشاورزی برای تولید کمپوست مناسب هستند و انتظار می‌رود قابلیت تولید سالانه ۵۰۰ میلیون تن کمپوست در جهان وجود داشته باشد (Martínez-Blanco et al., 2009). استفاده از کمپوست در کشاورزی می‌تواند از نظر فنی و محیط زیستی اثرهای مفیدی را به‌همراه داشته باشد (Pampuro et al., 2016; Tajinia et al., 2020; Ghorbani et al., 2021a). از دیدگاه محیط زیستی، برآورد شده است که کمپوست کردن یک تن پسماند می‌تواند از تولید ۸/۴ کیلوگرم کودهای شیمیایی NPK جلوگیری کند، ضمن این‌که این مقدار پسماند دارای پتانسیل جذب CO₂ به میزان ۴۸ کیلوگرم است (Martínez-Blanco et al., 2009). فراهم کردن پارامترهای بلوغ و پایداری در کمپوست‌ها براساس استانداردهای وضع شده داخلی و/یا خارجی (مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI, 10716)^۴ و استاندارد انجمن تولید کمپوست ایالات متحده (USCC)^۵ تحت عنوان روش‌های آزمایش برای ارزیابی کیفیت

مرحله‌های تجزیه مواد اولیه را که برای آنالیز فیزیکی-شیمیایی مواد مورد نیاز هستند از بین برده و اطلاعات شفاف‌تری را در مورد ماهیت و ساختار مولکولی محصول نهایی کمپوست ارائه داد (Sarlaki and Aboonajmi, 2019).

کاهش اندازه ذرات مواد کمپوست شده از جهت‌های مختلفی دارای اهمیت است. تأمین کمپوست به شکل ذرات ریز سبب سهولت در انتقال و مدیریت لجستیک راحت‌تر می‌شود. با کاهش اندازه ذرات کمپوست، چگالی توده‌ای افزایش می‌یابد و این امر موجب افزایش جریان‌پذیری و سطح تماس زیست‌توده در فرایندهای بعدی فرآوری مانند پلت‌سازی می‌شود. در طی کاهش اندازه ذرات، انرژی مکانیکی برای آسیاب مواد و غلبه بر اصطکاک مورد نیاز است (Sarlaki and Hassan-Beygi, 2018; Ghorbani et al., 2018). انرژی مصرفی دستگاه‌های آسیاب‌کننده، جنبه مهمی از کاهش اندازه ذرات است. به‌طور کلی، بسیاری از متغیرها مانند میزان تغذیه، ظرفیت محفظه آسیاب، اندازه مش، نوع آسیاب و همچنین شکل و ویژگی‌های زیست‌توده (محتوای رطوبت، ترکیب شیمیایی و غیره) بر مصرف انرژی ویژه آسیاب تأثیر می‌گذارند (Ghorbani et al., 2010; Miao et al., 2011). در میان دستگاه‌های مختلف موجود برای کاهش اندازه ذرات مواد زیست‌توده، آسیاب چکشی^{۱۱}، آسیاب چاقویی^{۱۲}، خردکن با چاقوی خطی^{۱۳}، آسیاب‌های سایشی دیسکی^{۱۴} رایج‌تر هستند. انرژی مصرفی در حین آسیاب محصول‌های مختلف زیست‌توده در چندین پژوهش بررسی شده است (Mani et al., 2004; Miao et al., 2014; Tumuluru et al., 2011). از مرور مقاله‌ها می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد آسیاب و مصرف انرژی ویژه، به‌شدت به اندازه بازشدگی صفحه آسیاب چکشی بستگی دارد و برای آسیاب مواد اولیه با اندازه ذرات بسیار ریزتر به مصرف انرژی ویژه بیشتری نیاز است. براساس گزارش (Miao et al., 2011)، در یک اندازه صفحه آسیاب

جامعی را از کیفیت محصول نهایی کمپوست ارائه دهد. آنالیزهای حرارتی و طیف‌سنجی در کنار میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به‌عنوان ابزار ریزنگارسنج برای آنالیز ریخت‌شناسی کمپوست‌ها برای توصیف تکامل ماده آلی در کمپوست استفاده شده است (Lim and Wu, 2015). در SEM، از یک پرتو قدرتمند و متمرکز حاوی الکترون‌های با انرژی بالا برای تولید سیگنال در سطح نمونه استفاده می‌شود و در اثر برهمکنش این سیگنال‌ها با سطح نمونه، تصویری از مورفولوژی سطح‌های خارجی و ساختار بلوری نمونه نشان می‌دهد (Iniguez et al., 2011). با استفاده از DSC و FT-IR به‌عنوان ابزاری غیرمخرب، شباهت بین نمونه‌های کمپوست با مواد هیومیکی به‌عنوان سنج پایداری کمپوست بررسی شده است (Sharif Paghaleh et al., 2017; Soobhany, 2018). آنالیز FT-IR، یک روش مهم برای تشخیص گروه‌های عاملی مواد آلی است و به‌طور معمول در بررسی مواد آلی خاک، پسماندهای آلی و لیگنوسلولزی و کمپوست تولید شده از آن‌ها استفاده می‌شود (Amir et al., 2010). آنالیزهای حرارتی TGA و DSC، ابزارهای مؤثری برای ارائه آنالیز حرارتی و شیمیایی کمپوست هستند؛ زیرا این روش‌ها ساده و به‌نسبت ارزان هستند (Zbytniewski and Buszewski, 2005). روش XRD، ابزار مفیدی برای به‌دست آوردن اطلاعاتی در مورد ساختار اتمی و مولکولی کریستال درون مواد آلی است. در این روش، پرتو ایکس به جهت‌های خاصی تابانده می‌شود و هر سیگنال در XRD نمایانگر یک صفحه کریستال است. پس از آن با اندازه‌گیری زاویه‌ها و شدت پرتوهای پراش‌یافته توسط بلورساز می‌توان یک نمودار سه بعدی از تراکم الکترون‌ها در داخل بلور ایجاد کرد. از چگالی الکترون برای تعیین موقعیت‌های اتم‌ها و پیوندهای شیمیایی آن‌ها در بلور استفاده می‌شود (Wu et al., 2011). استفاده از فنون پیشرفته مشخصه‌یابی در ارزیابی کیفیت کمپوست‌ها بسیار مفید بوده و با استفاده از این روش‌ها می‌توان

اندازه‌گیری رطوبت

برای تعیین محتوای رطوبت SBC، سه نمونه ۱۰۰ گرمی مطابق استاندارد ASAE S358.2 در داخل آن با دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. محتوای رطوبت بنابر رابطه (۱) بر پایه تر سنجیده شد (ASAE S358.2, 2006).

$$M_{w.b.\%} = \frac{W_w}{W_t} \times 100 \quad (1)$$

$$= \frac{W_w}{W_w + W_d} \times 100$$

در این رابطه $M_{w.b}$ رطوبت نمونه بر پایه تر (درصد)، W_w جرم آب موجود در نمونه (گرم)، W_t جرم کل نمونه (گرم) و W_d جرم ماده خشک در نمونه (گرم) است. از رابطه (۲)، برای تنظیم محتوای رطوبت SBC در سه سطح رطوبتی (۸، ۱۲ و ۱۶ درصد) بر مبنای تر برای انجام آسیاب توده کمپوست استفاده شد. به این ترتیب که آب مقطر با روش اسپری کردن به نمونه براساس استاندارد (Ghorbani *et al.*, ASTM E-11-70, Part 41 اضافه شد (2017a, b).

$$m_w (g) = \frac{m_i(M_{wf} - M_{wi})}{1 - M_{wf}} \quad (2)$$

در این رابطه m_w جرم آب اضافه شده (گرم)، m_i جرم اولیه مواد (گرم)، M_{wi} رطوبت اولیه مواد بر مبنای تر (درصد)، M_{wf} رطوبت نهایی مواد بر مبنای تر (درصد) است. پس از افزودن آب مقطر، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در کیسه‌های پلاستیکی درب‌بسته در دمای ۴°C به‌منظور توزیع یکنواخت رطوبت نگهداری شدند.

آسیاب چکشی - سایشی و محاسبه مصرف

انرژی ویژه

در این پژوهش، از یک آسیاب چکشی - سایشی (Retch KG 3057, Haan, Germany) واقع در گروه مهندسی بیوسیستم پردیس ابوریحان - دانشگاه تهران استفاده شد. این آسیاب دارای سه صفحه به اندازه مش‌های ۱، ۲/۵ و ۴ میلی‌متر و مجهز به سه تیغه بود که توسط یک موتور

مشخص، آسیاب چکشی نسبت به آسیاب چاقویی دارای بازده انرژی بیشتری بوده و ساز و کار آسیاب‌های چکشی برای کاهش اندازه ذرات زیست‌توده از طریق اعمال نیروی‌های برشی و ضربه‌ای است. از دیدگاه تولید پلت، آسیاب‌های چکشی در میان دستگاه‌های کاهش اندازه ذرات، از بازده انرژی بیشتری برخوردار هستند (Kirsten *et al.*, 2016). با این حال، در این نوع آسیاب‌ها برای زیست‌توده‌هایی با محتوای رطوبت بالا (بیش از ۲۰ درصد وزنی) بیشتر صفحه‌های آسیاب مسدود شده و در نتیجه سبب کاهش خروجی آسیاب و بازده آن می‌شوند (Pradhan *et al.*, 2018). از طرف دیگر، مواد کمپوست شده به دلیل کم بودن چگالی انرژی و توده‌ای با مشکل‌هایی از قبیل افزایش هزینه‌های انبار، حمل و نقل و هزینه‌های کلی در فرآوری‌های بعدی مواجه هستند. کاهش اندازه ذرات و پلت‌سازی کمپوست می‌تواند تا حدی بر این چالش‌ها غلبه کند (Pradhan *et al.*, 2021). با توجه به مطالعات بی‌شماری که در مورد تولید کمپوست وجود دارد، تاکنون اطلاعاتی در مورد استفاده از آنالیزهای تحلیلی به‌منظور ارزیابی جامع کیفیت کمپوست باگاس نیشکر (SBC) موجود نیست. هدف از مطالعه حاضر، ابتدا مشخصه‌یابی SBC از طریق آنالیزهای فیزیکی-شیمیایی، حرارتی، طیفی و ریزساختاری مانند FT-IR، XRD، DSC و SEM و سپس بررسی مصرف انرژی ویژه و چگالی توده‌ای SBCs در شرایط عملیاتی مختلف یک آسیاب چکشی - سایشی است.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه و آماده‌سازی

مواد SBC از شرکت فرآوری باگاس جنوب (بیوفر) جهت تشخیص کیفیت، آسیاب و تولید پلت تهیه شد. رطوبت اولیه SBC ۵۵ درصد بر پایه تر بود. برای کاهش رطوبت، SBC در هوای آزاد خشک و به رطوبت تعادلی ۸ درصد رسید.

(Swiss made) و هدایت الکتریکی توسط دستگاه دیجیتالی (Metrohm 712, Swiss made) با نسبت ۱ به ۱۰ (w/v) اندازه‌گیری شد (Sarlaki and Sharif Paghaleh, 2017).

اندازه‌گیری ترکیب‌های شیمیایی

نیترژن کل به روش هضم کجدال با استفاده از دستگاه (BEHER S4, distillation and digestion, Germany) براساس استاندارد (AOAC, 1990) با سه مرحله هضم، تقطیر و تیتراسیون اندازه‌گیری شد. کربن آلی کل نیز در نمونه‌ها توسط آنالایزر TOC اندازه‌گیری شد. مقدار پروتئین با روش استاندارد (AOAC 920.29, 2001) و با ضرب مقدار نیترژن کل در عدد ۶/۲۵ به دست آمد. محتوای چربی و نشاسته به ترتیب براساس استانداردهای AOAC 996.11, 1998 و AOAC 920.29, 1999 محاسبه شدند. میزان خاکستر کل براساس استاندارد (AOAC, 1990c) با استفاده از دستگاه DEMERD F.69 با سوزاندن نمونه در ۵۵۰ درجه سلسیوس برای ۴ ساعت اندازه‌گیری شد. مقدار فسفر و پتاسیم کل به روش خشک براساس استاندارد (TMECC, 2002) به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های طیف‌سنجی UV-VIS (Systronics double beam spectrophotometer 2202) و فیلم فتومتر (Systronics flame photometer-128) اندازه‌گیری شدند.

تعیین محتوای لیگنین و کربوهیدرات

برای تعیین فیبر شوینده خنثی (NDF)^{۱۵}، فیبر شوینده اسیدی (ADF)^{۱۶} و لیگنین شوینده اسیدی (ADL)^{۱۷} به ترتیب از محلول شوینده خنثی (تعیین محتوای دیواره سلولی)، محلول شوینده اسیدی (تعیین دیواره سلولی بدون همی‌سلولز) و محلول سولفوریک اسید غلیظ ۷۲ درصد با استفاده از دستگاه (VELP Raw Fiber Extractor) استفاده شد. پس از شستشو و خشک کردن نمونه‌ها در آون، با داشتن اختلاف وزن نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش، محتوای ترکیب‌های لیگنوسلولزی مطابق روابط ۵ تا ۸ محاسبه شدند (Ghorbani et al., 2021b).

تک فاز ۰/۵ اسب بخار و با سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه توان‌دهی می‌شد. برای تغییر سرعت دورانی آسیاب از سازو کار تسمه و پولی استفاده شد و مواد اولیه در دو سطح سرعت دورانی ۱۴۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه آسیاب شدند. میزان خوراک‌دهی SBC به درون آسیاب ۰/۵ کیلوگرم بر دقیقه در نظر گرفته شد. توان مصرفی آسیاب توسط دستگاه تحلیل‌گر توان ساخت کشور تایوان مدل (Iutro, DW 6090) با توانایی اتصال به رایانه انجام شد. داده‌های ذخیره شده در رایانه شامل ولتاژ (V)، آمپر (A)، توان مصرفی (W)، فاکتور توان (P)، فرکانس (Hz) و زمان (s) بودند. مقدار مصرف انرژی ویژه آسیاب چکشی - سایشی از رابطه ۳ محاسبه شد. داده‌ها هر یک ثانیه در رایانه ذخیره و هر آزمایش ۳ بار تکرار شد.

$$E (kJ/kg) = \frac{\int_0^T (P_t - P_0) dt}{m} = \frac{\int_0^T \Delta P_t dt}{m} \quad (3)$$

در این رابطه، E کل انرژی خالص برای کاهش اندازه ذرات بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم، P_t توان مصرف شده بر حسب وات در بازه زمانی t ، P_0 توان مصرف شده بر حسب وات در حالت بی‌بار بودن دستگاه (حالت بدون خوراک‌دهی)، ΔP_t توان مصرف شده بر حسب وات خالص در بازه زمانی t و m جرم مواد آسیاب شده بر حسب کیلوگرم است.

آنالیزهای فیزیکی و ترکیب‌های شیمیایی

اندازه‌گیری چگالی توده‌ای

چگالی توده‌ای ذرات خرد شده SBC توسط آسیاب چکشی - سایشی مطابق با استاندارد ASTM E873-82 (2006) DEC با استفاده از یک سیلندر با حجم ۲۵۰ سانتیمتر مکعب و از اختلاف بین جرم خالی و پر ظرف براساس رابطه ۴ با سه تکرار محاسبه شد.

Bulk density (BD)

$$= \frac{(\text{Mass of container and sample}) - (\text{Mass of container})}{(\text{Volume of container})(1 + \text{Moisture content})}$$

اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) و pH

مقدار pH مواد SBC از طریق pHسنج (pH Meter 780)

آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)

برای تعیین دمای جاری شدن لیگنین و عملکرد آن به‌عنوان چسباننده از گرماسنج روبشی تفاضلی مدل (DSC Q100 V9.0 Build 275) در محدوده دمای ۲۰ الی ۱۵۰ درجه سلسیوس استفاده شد. گرماسنج تفاضلی به وسیله ایندیوم^{۱۸} برای استانداردسازی دما کالیبره شده بود. یک گرم نمونه کمپوست روی ظروف آلومینیومی تحت شرایط محیطی گاز نیتروژن قرار داده شد و از یک ظرف خالی آلومینیومی به‌عنوان مرجع مورد استفاده شد. مقدار ۵ الی ۲۰ میلی‌گرم نمونه از دمای ۲۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس با نرخ گرمادهی ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه حرارت‌دهی شد. ترموگرام جریان حرارت را در مقابل درجه سلسیوس نشان می‌دهد. ترموگرام کمپوست در محتوای رطوبت ۲۰ درصد و لیگنین در محتوای رطوبت ۱۰ درصد جهت مقایسه رسم شدند (Lignin-hydrolytic; Aldrich, www. Sigmaaldrich .com) همچنین در مطالعه دمای انتقال شیشه‌ای (T_g)^{۱۹}، دمای نقطه میانی از تغییر شیب ترموگرام تعیین شد.

آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR)

به‌منظور بررسی تغییرات گروه‌های عاملی در SBC، از روش طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (PerkinElmer 1600 FTIR spectrophotometer) استفاده شد. برای انجام این کار، ۲ میلی‌گرم از SBC با اندازه ذرات بسیار ریز با آب مقطر شستشو داده شد و درون آن در دمای ۱۰۴ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت تا به‌طور کامل خشک شود. پس از آن نمونه خشک شده با ۴۰۰ میلی‌گرم پتاسیم برومید (KBr) مخلوط و به‌شکل یک پلت در دستگاه وکیوم به مدت ۱۰ دقیقه متراکم شد و درون دستگاه با دقت ۴ cm⁻¹ محدود به ۴۰۰ - ۴۰۰۰ cm⁻¹ بررسی شد.

طرح آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش، از طرح فاکتوریل نوع بهینه (D-optimal)

$$NDF, ADF, ADL(\%) = \frac{m_{bag+sample} - m_{bag}}{m_{initial\ sample}} \quad (5)$$

$$Hemicellulose\ content = NDF - ADF \quad (6)$$

$$Cellulose\ content = ADF - ADL \quad (7)$$

$$Lignin\ content = ADL \quad (8)$$

در این رابطه m_{bag} ، $m_{bag+sample}$ و $m_{initial\ sample}$ به ترتیب جرم کیسه حاوی نمونه بعد از آزمایش، جرم کیسه خالی (مقاوم به اسید) و جرم نمونه اولیه بر حسب گرم است.

آنالیزهای تحلیلی**آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)**

تغییرات ریخت‌شناسی الیاف سلولز SBC به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (Camscan mv 2300) با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلو ولت بررسی شد. برای آماده‌سازی SBC جهت عکس‌برداری، نمونه‌ها روی یک دیسک آلومینیومی با قطر ۱۲ میلی‌متر قرار گرفتند و سپس در دستگاه پوشش‌دهنده یون با لایه نازکی از یون طلا برای ۲۰ دقیقه پوشش‌دهی شدند.

آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)

درجه بلورینگی پودر SBC به‌وسیله دستگاه (X'Pert Pro (MPD X-ray diffractometer با پرتو دهی Cu α ($\lambda=0.154\text{ nm}$) در شرایط عملیاتی ولتاژ ۴۰ کیلو ولت و $2\theta = 5 - 80^\circ$ با گام 0.05° درجه جمع‌آوری شد. مقدار سنجه بلورینگی نسبت بین سلولز کریستالی به سلولز آمورف در نمونه کمپوست، مطابق رابطه ۹ محاسبه شد.

$$Crystallinity\ index\ (\%) = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100 \quad (9)$$

در این رابطه I_{002} نشان‌دهنده حداکثر شدت (ارتفاع پیک) در $2\theta = 22.6^\circ$ مربوط به سلولز کریستالی و I_{am} ارتفاع پیک مربوط به سلولز آمورف در $2\theta = 19^\circ$ است.

مقدار هدایت الکتریکی SBC از مقدار ۰/۸ دسی زیمنس بر متر برای باگاس نیشکر به ۲/۱ دسی زیمنس بر متر افزایش پیدا کرد. به طور معمول هدایت الکتریکی در طول فرایند کمپوست افزایش می‌یابد. افزایش هدایت الکتریکی کمپوست ممکن است به دلیل آزاد شدن نمک‌های معدنی مانند فسفات، پتاسیم و یون آمونیوم و همچنین تبخیر آمونیاک و شسته شدن نمک‌ها بر اثر تجزیه مواد آلی باشد (Sánchez-Monedero *et al.*, 2001). همچنین افزایش شوری کمپوست در پایان فرایند را به افت وزن کلی مواد معدنی شدن مواد آلی و تبخیر آب نسبت می‌دهند که در نهایت منجر به افزایش غلظت نمک‌های محلول می‌شود (Soobhany *et al.*, 2017). با توجه به استانداردهای موجود، مقدار EC مواد SBC در این پژوهش (۲/۱ دسی زیمنس بر متر) در محدوده قابل قبول قرار داشته و از این لحاظ، برای کاربرد مصرف‌های کشاورزی محدودیتی ندارد. مقدار pH برای SBC در این پژوهش ۷/۷۸ به دست آمد که در محدوده pH مناسب برای رشد باکتری‌ها (۶/۸-۷)، رشد قارچ‌ها (۵-۵/۸) و در محدوده pH مناسب (۵-۹) برای اکتینومیست‌ها بوده و عامل بازدارنده برای رشد گیاه نخواهد بود (Soobhany, 2018). با توجه به اینکه قابلیت تجزیه زیستی بیشتر کمپوست‌ها در pH بین ۶/۵ تا ۸/۳ معرفی شده است، مقدار pH در این پژوهش تأیید می‌شود (Barrena *et al.*, 2009). محتوای رطوبت از ۵۵ درصد در نمونه باگاس نیشکر به ۳۰ درصد در کمپوست نهایی باگاس نیشکر کاهش پیدا کرده است که در محدوده استاندارد تعریف شده (۲۵ - ۴۰ درصد) قرار دارد (Zafari *et al.*, 2012). مقدار لیگنین در SBC (۲۲/۸۵ درصد) نسبت به باگاس نیشکر (۱۵/۷۹ درصد) کاهش یافته است که نشان می‌دهد که معادل ۳۰/۸۹ درصد لیگنین‌زدایی در اثر تجزیه بیوشیمیایی کمپوست اتفاق افتاده است. در اثر تجزیه لیگنین ترکیب‌های اسیدی مانند هیومیک اسید که برای رشد گیاه بسیار مناسب هستند، تولید می‌شوند (Sarlaki *et al.*, 2021a, b, c).

برای بررسی معنی‌داری و بهینه‌سازی اثر سه متغیر مستقل محتوای رطوبتی (۸، ۱۲ و ۱۶ درصد وزنی بر پایه تر)، اندازه مش (۱، ۲/۵ و ۴ میلی‌متر) و سرعت دورانی آسیاب (۱۴۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه) بر مصرف انرژی ویژه و چگالی توده‌ای به‌عنوان پاسخ‌های سیستم توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^{۲۰} نسخه ۱۱ (State-Ease Inc) (Minneapolis, USA) استفاده شد.

نتایج و بحث

بررسی فیزیکی شیمیایی

جدول ۱، ترکیب‌های شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی باگاس نیشکر اولیه و کمپوست تولید شده از آن را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار نیتروژن SBC (۱/۱۴ درصد) نسبت به باگاس اولیه (۰/۴۴ درصد) افزایش یافته است. دلیل این موضوع، اضافه کردن منابع نیتروژنی در فرآیند تولید SBC مانند کود دامی به‌منظور اصلاح نسبت کربن به نیتروژن در شروع فرایند تشکیل کمپوست بوده است. کاهش نسبت C/N به‌عنوان سنجه‌ای از پایداری و بلوغ کمپوست از مقدار ۱۲۵/۶۸ به مقدار ۲۶/۶۳ برای مواد SBC نشان می‌دهد که فرایند کمپوست به‌طور رضایت‌بخشی پیشرفت کرده است. کاهش نسبت C/N نشان‌دهنده تجزیه کربن آلی توسط میکروارگانیسم‌ها است و بدان معنی است که اتلاف نیتروژن از طریق تبخیر آمونیاک در مقایسه با مصرف کربن به‌عنوان منبع انرژی برای جمعیت میکروبی، در پایان فرایند کمپوست بسیار کمتر شده است (Soobhany, 2018). در استانداردهای مختلف (جدول ۱) تعیین شده است که حد مجاز نسبت C/N در کمپوست بالغ، بایستی کمتر از ۳۰ باشد که نشان‌دهنده سطح پیشرفت تثبیت مواد آلی است که از این نظر برای SBC نسبت C/N مقدار مناسبی به دست آمد. مقدار فسفر کل (۰/۶۵ درصد) و پتاسیم کل (۲/۲۸) برای SBC براساس استانداردهای موجود (جدول ۱)، احراز شدند.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی باگاس نیشکر و کمپوست تولید شده از آن
Table 1. Physicochemical properties of sugarcane bagasse and its produced compost

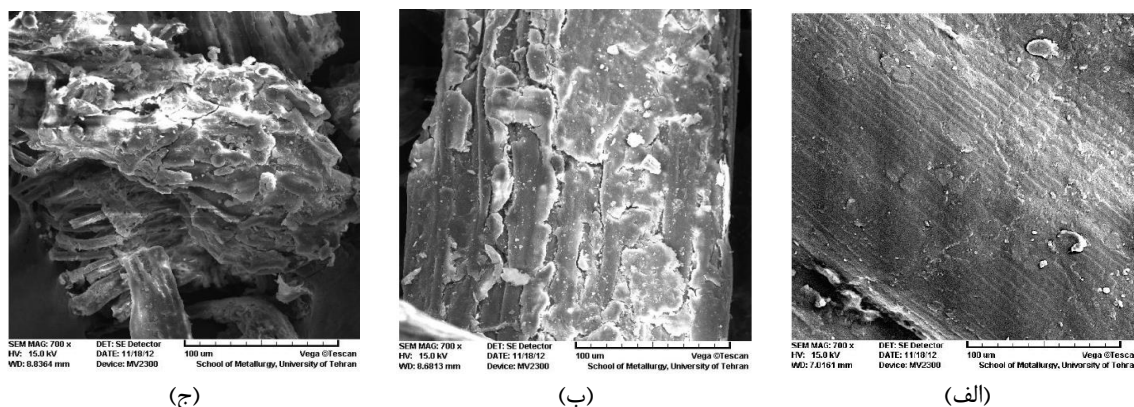
ترکیب‌ها Compounds	باگاس نیشکر Sugarcane bagasse	کمپوست باگاس نیشکر Sugarcane bagasse compost	مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و استاندارد (ISIRI, 10716)
محتوای رطوبت (درصد وزنی) Moisture content (%wb)	55	30	25-40
pH	6.68	7.78	6.5-8.5
هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) Electrical conductivity (ds/m)	0.8	2.1	< 4
نیتروژن کل (درصد) Total nitrogen (%)	0.44	1.14	Minimum 0.8
کربن کل (درصد) Total carbon (%)	55/3	30.36	Minimum 12
فسفر کل (درصد) Total phosphorus (%)	0.25	0.65	Minimum 0.4
پتاسیم کل (درصد) Total potassium (%)	1.2	2.28	Minimum 0.4
نسبت کربن به نیتروژن C/N	125.68	26.63	Minimum 30
محتوای خاکستر (درصد) Ash content (%)	2	4.5	Maximum 50
پروتئین خام (درصد) Crude protein (%)	2.312	4.625	-
محتوای چربی (درصد) Fat content (%)	2.05	23.88	-
محتوای نشاسته (درصد) Starch content (%)	12.24	10.27	-
محتوای لیگنین (درصد) Lignin content (%)	22.85	15.79	-
محتوای همی سلولز (درصد) Hemicellulose content (%)	31.18	25.9	-
محتوای سلولز (درصد) Cellulose content (%)	46.65	48.16	-

بررسی آنالیزهای تحلیلی

بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

دسته‌های فیبری به‌روشنی به‌طور کامل مشخص هستند. بعد از انجام عملیات کمپوست شدن، سطح باگاس نیشکر از لحاظ مورفولوژیکی به‌طور مشخصی تغییر کرده است. در نمونه کمپوست شده، دسته فیبرها دارای ترک‌های عمیقی در راستای طولی خود می‌باشند که به نوبه خود عاملی برای دسترسی آزریم سلولاز به سلولز است و بدین ترتیب عملیات کمپوست شدن با ایجاد ترک و در نتیجه افزایش سطح تماس دسترسی به همی سلولز کمک می‌کند. افزون بر این، سطح روی الیاف SBC نسبت به الیاف باگاس نیشکر اولیه دارای شکستگی‌های بیشتر و در نتیجه تخریل بیشتر است که سبب افزایش آبدوستی و جذب رطوبت می‌شود.

بر مبنای میکروگراف‌های عکس برداری شده توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی از باگاس نیشکر و کمپوست آن مشاهده شد که باگاس اولیه نیشکر دارای اندازه ذرات بزرگ و سطحی صاف و یکنواخت است و هیچ‌گونه دسته‌های فیبری در آن قابل مشاهده نیست (شکل ۱-الف). زمانی که باگاس نیشکر کمپوست شد، بر اثر فعالیت میکروارگانیسم‌ها، یک سطح با مورفولوژی ناصاف و غیریکنواخت به‌وجود آمد (شکل ۱-ب). در شکل ۱-ج، مقطع عرضی الیاف SBC نشان داده شده است که در آن



شکل ۱- الف) ریزنگاره‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی برای باگاس نیشکر اولیه، ب) کمپوست باگاس نیشکر و ج) مقطع عرضی

کمپوست باگاس نیشکر در بزرگ‌نمایی ۷۰۰ برابر

Fig. 1- a) Micro-images of scanning electron microscope for raw sugarcane bagasse, b) sugarcane bagasse compost, and c) transverse section of sugarcane bagasse compost at 700x magnification

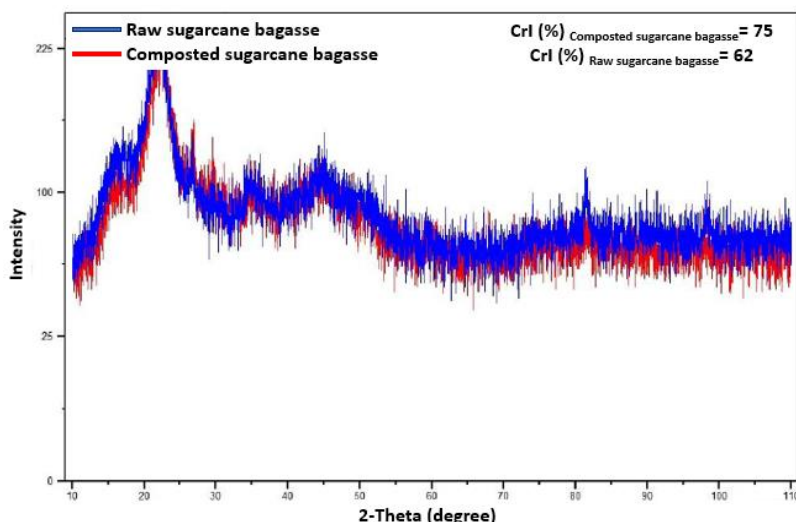
مشخص است که اندازه ذرات مواد اولیه در طی فرایند تجزیه مواد کمپوست کاهش می‌یابند. در این پژوهش، مقدار سنجه بلورینگی از ۶۲ برای باگاس نیشکر به ۷۵ برای SBC افزایش یافته است. این افزایش درجه بلورینگی ناشی از تجزیه بخش آمورف ماده یعنی مقدار همی سلولز و لیگنین و همچنین تجزیه نشدن سلولز است. سنجه بلورینگی متناسب با عکس چگالی ماده است. هرچه سنجه بلورینگی بیشتر باشد، مقدار چگالی ماده به‌دلیل تجزیه بیشتر باگاس نیشکر و تخریب ساختار آن کمتر است (Sharma *et al.*, 2019). با توجه به شکل ۳، می‌توان مشاهده کرد که پیک هردو نمودار در ۲۱/۸ درجه کمابیش برابر است که مربوط به ناحیه کریستالی

بررسی پراش پرتو ایکس (XRD analysis)

در شکل ۲، نمودار XRD برای باگاس نیشکر و SBC آورده شده است. نمودارهای پراش از نوع سلولز نوع ۱ است که نشان‌دهنده این واقعیت می‌باشد که عملیات کمپوست کردن ساختار کریستالی سلولز را تغییر نداده است. دو پیک واضح در ۱۵/۸ درجه و ۲۱/۸ درجه در شکل قابل مشاهده هستند. پیک مشاهده شده در ناحیه ۱۵/۸ درجه مربوط به ناحیه آمورف است. این بخش بیشتر مربوط به مواد غیرسلولزی مانند همی سلولز و لیگنین است. در حالیکه پیک در ۲۱/۸ درجه مربوط به سلولز نوع ۱ است که آلفا سلولز نامیده می‌شود. از نتایج به‌دست آمده از طیف پراش اشعه ایکس،

از ساختار آمورف (همی سلولز و لیگنین) در ماده است. این نتایج به‌طور کامل با نتایج ترکیب‌های شیمیایی باگاس نیشکر و SBC مطابقت دارند.

سلولز است و در نمونه کمپوست شده تغییری در این ناحیه ایجاد نشده است. در اثر کمپوست شدن پیک در ۱۵/۸ درجه در نمونه SBC کاهش یافته است که ناشی از تجزیه بخشی



شکل ۲- پراش پرتو ایکس نمونه‌های باگاس نیشکر و کمپوست باگاس نیشکر

Fig. 2- X-ray diffraction of sugarcane bagasse and sugarcane bagasse compost samples

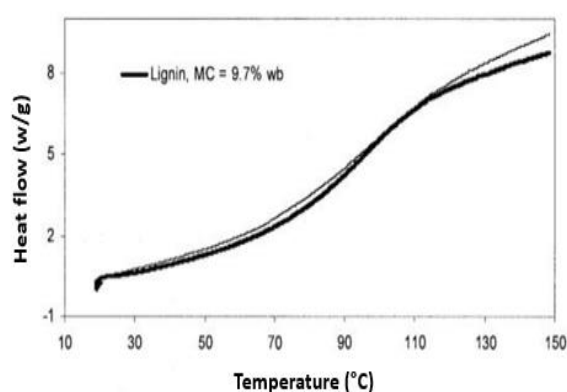
فرایندهای چارشدگی^{۲۲} است که برای کمپوست رخ نداده است. پیک‌های اگزوترمی^{۲۳} در محدوده ۳۰۰-۲۵۰ درجه سلسیوس ناشی از اکسیداسیون، چگالش سنگین^{۲۴} و تجزیه ساختارهای آروماتیک با وزن مولکولی بالا مانند لیگنین‌ها و پلی‌فنول‌ها می‌باشد. بر این اساس، یک پیک اگزوترمی برای SBC در نقطه ۲۷۴/۱۲ درجه سلسیوس مشاهده شد که تجزیه لیگنین و پلی‌فنول‌ها را در اثر کمپوست شدن باگاس نیشکر اثبات می‌کند. در جدول ۲، دماهای محدوده انتقال شیشه‌ای برای SBC و لیگنین آورده شده است. دمای انتقال شیشه‌ای برای SBC از ۴۱/۳۵ درجه سلسیوس آغاز و تا دمای ۱۵۷ درجه سلسیوس ادامه یافت. دمای متوسط انتقال شیشه‌ای برای SBC ۸۹/۷ درجه سلسیوس به‌دست آمد. محققان دمای انتقال شیشه‌ای برای لیگنین را ۶۰ الی ۹۰ درجه سلسیوس گزارش کرده‌اند (Soobhany *et al.*, 2017). به‌طور کلی، مقدار لیگنین بر دمایی که در آن لیگنین به حالت نرم‌شوندگی^{۲۵} تبدیل می‌شود، تأثیر می‌گذارد و دمایی

بررسی گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)

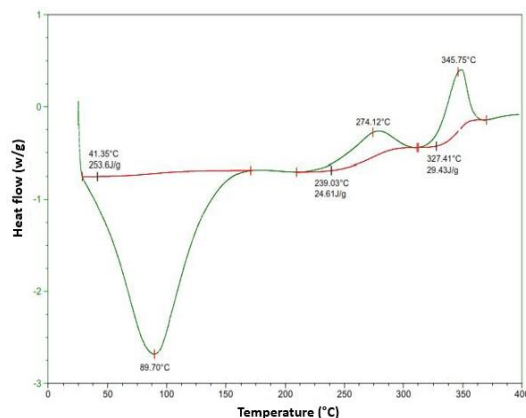
شکل ۳، نمودار ترموگرام DSC را برای نمونه‌های SBC و لیگنین نشان می‌دهد. منحنی DSC یک پیک اندوترمی^{۲۱} با شدت زیاد را در ۸۹/۷ درجه سلسیوس در SBC نشان می‌دهد که به خشک شدن و یا از بین رفتن زنجیره‌های پلی‌ساکارید و واکنش‌های دی‌هیدروکسیل شدن نسبت داده می‌شود. شدت این پیک با زمان کمپوست شدن افزایش می‌یابد و نشان‌دهنده افزایش درجه بلوغ و هیومیفیکاسیون کمپوست است. نتایج مشابهی توسط Provenzano and Droussi و Ouatmane *et al.* (2000)، Senesi (1999) و *et al.* (2008) گزارش شده است. پیک اندوترمی دوم در نقطه ۱۶۶ درجه سلسیوس به‌طور معمول اتفاق می‌افتد که نشان‌دهنده انرژی مورد نیاز برای شکستن پیوندها در حین تجزیه کربوهیدرات‌ها، ترکیب‌های آلیفاتیک و ساختارهای پپتید می‌باشد. برای SBC در این نقطه پیکی مشاهده نشد. پیک‌های موجود در بازه ۲۲۰-۲۳۰ درجه سلسیوس به‌طور عمده ناشی از

هنگام فشرده‌سازی (در یک دمای ثابت مانند ۱۰۰ درجه سلسیوس)، زیست‌توده‌هایی که دارای دمای روان‌کنندگی کمتری برای لیگنین هستند، پل‌های مستحکم‌تری تشکیل می‌شوند و دوام بالاتری دارند (Whittaker and Shield, 2017). با توجه به متوسط دمای انتقال شیشه‌ای به دست آمده در این پژوهش و بیان این نکته که در دماهای بیشتر از ۸۰ - ۷۰ درجه سلسیوس میکروارگانیسم‌های موجود در توده کمپوست غیرفعال می‌شوند، بنابراین باید به عامل دما در فشرده‌سازی کودهای کمپوست توجه نمود.

انتقال شیشه‌ای (Tg) نام دارد. هرچه دمای Tg بالاتر باشد، درجه حرارت مورد نیاز برای روان شدن لیگنین بیشتر است. هرچه دما بیشتر از دمای Tg باشد، جریان‌پذیری لیگنین بین الیاف بیشتر است. مقدار Tg لیگنین می‌تواند بین ۵۰ تا بیشتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس باشد و محتوای رطوبت می‌تواند آن را کاهش دهد. لیگنین موجود در باگاس نیشکر در مقایسه با دیگر زیست‌توده‌ها و چوب، حاوی گروه‌های هیدروکسیل فنولی بیشتر و گروه‌های متوکسیل کمتر است و این سبب افزایش دمای Tg می‌شود. بنابراین،



(ب)



(الف)

شکل ۳- الف) ترموگرام DSC کمپوست باگاس نیشکر و ب) ترموگرام DSC لیگنین
Fig. 3- a) DSC thermogram of sugarcane bagasse compost, and b) DSC thermogram of lignin

جدول ۲- دمای انتقال شیشه‌ای برای کمپوست باگاس نیشکر و لیگنین
Table 2. Glass transition temperature for sugarcane bagasse compost and lignin

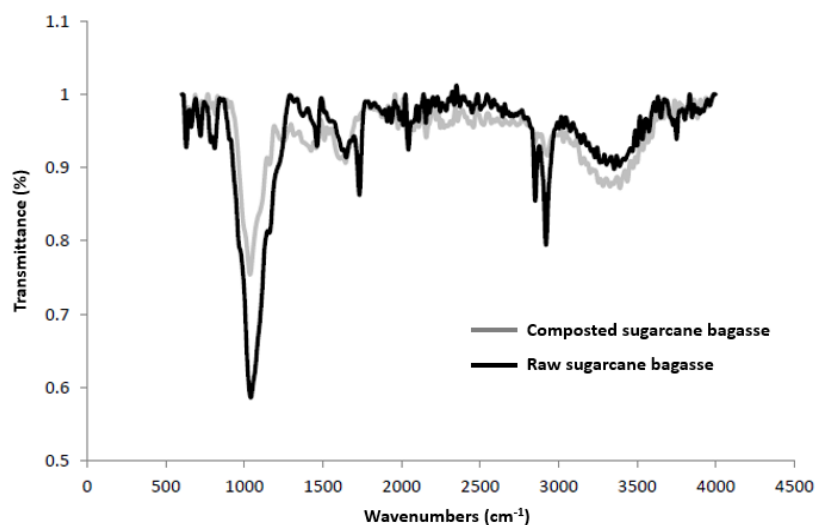
نمونه Sample	کمپوست باگاس نیشکر Sugarcane bagasse compost	لیگنین Lignin
محتوای رطوبت (درصد وزنی) Moisture content (%wb)	20	9.7
ابتدا First	41.35	61.5
انتهای End	157	100.7
میانگین Average	89.7	81.7

کمپوست شده آن در شکل ۴ آورده و تحلیل شده است. جذب مشترک برای هر دو نمونه در محدوده $3653 - \text{cm}^{-1}$ ناشی از پیوندهای C-H و گروه‌های OH الکلی،

بررسی تغییرات گروه‌های عاملی (FT-IR) نتایج حاصل از طیف‌سنجی FT-IR به منظور تعیین گروه‌های عاملی در نمونه باگاس نیشکر اولیه و نمونه

C-O ترکیب‌های کربناته مانند گلوکز است. با توجه به کمتر بودن شدت پیک در این نقطه برای باگاس نیشکر نسبت به نمونه SBC می‌توان نتیجه گرفت که گلوکز موجود در باگاس نیشکر به وسیله میکروارگانیسم‌های موجود در توده کمپوست جهت سوخت و ساز مصرف شده است. در نهایت پیک‌های 448 و 630 cm^{-1} در باگاس نیشکر و 495 و 635 cm^{-1} در SBC که در ناحیه اثرانگشتی (ناحیه کمتر از 1000 cm^{-1}) قرار دارند، به گروه‌های فسفات و سولفات ناشی از اسیدهای نوکلئیک ارتباط داده می‌شوند. افزون بر کوئینین‌ها، کربوکسیل‌های اتصال‌یافته^{۲۶} و کتون‌ها، یک باند در حدود 1508 cm^{-1} به دلیل کشش C-C در گروه‌های آروماتیک و N-H و CN در آمیدها به وجود آمده است. پیک‌های در 1461 و cm^{-1} 1422 به دلیل ساختارهای آلیفاتیک C-H، یک باند در cm^{-1} 1250 و دیگری در cm^{-1} 1260 ، به طور کلی به جذب اثرها و استرهای آروماتیک و به N-H آمیدها مرتبط هستند. پیک در حدود 1162 cm^{-1} مربوط به جذب الکل‌ها و اتر است. یک پیک بزرگ در محدوده $1070-1030$ cm^{-1} به دلیل وجود کربوهیدرات‌ها، اترهای آروماتیک و پلی ساکاریدها است. با کمپوست شدن باگاس نیشکر، اولین تغییر قابل توجه، مشاهده کاهش شدت پیک‌ها در نقاط 2926 و 2855 cm^{-1} بود که به تخریب بیولوژیکی لیپیدها و کربوهیدرات‌ها نسبت داده می‌شود. تغییر دوم افزایش قابل توجه در شدت باندهای $1590-1650$ و $1030-1070$ cm^{-1} به دلیل وجود C-C در گروه‌های آروماتیک، اترهای آروماتیک و پلی ساکاریدها بود. افزایش در نسبت کربن‌های آروماتیک به کربن‌های آلیفاتیک به عنوان سنج افزایش درجه هیومیفیکاسیون در شرایط طبیعی تجزیه زیستی در نظر گرفته می‌شود. برای فرایند کمپوست، این افزایش به پایداری و بلوغ کمپوست‌ها و تبدیل آن‌ها به مواد هیومیکی شده نسبت داده شده است (Droussi *et al.*, 2008; Sarlaki *et al.*, 2017).

فنولی و کربوکسیلی OH و ارتعاش هیدروژن در گروه‌های امید N-H رخ داده است. به طور جزئی پیک‌های موجود در 3338 ، 3454 و 3653 cm^{-1} در باگاس نیشکر و همچنین 3376 ، 3464 و 3443 cm^{-1} در نمونه کمپوست شده بیانگر پیوند O-H گروه‌های هیدروکسیل در ترکیب‌هایی مانند آب، الکل‌ها، فنول‌ها و کربوکسیلیک اسیدها و پیوند N-H موجود در آمین‌ها می‌باشند (Droussi *et al.*, 2008). دو باند در منطقه 2925 و 2855 cm^{-1} به دلیل کشش C-H آلیفاتیک، یک پیک در 1741 cm^{-1} به دلیل گروه‌های COOH، یک باند قوی در 1650 cm^{-1} و دیگری در 1640 cm^{-1} از ارتعاش‌های گروه‌های C-C آروماتیک هستند. همانطور که از هر دو نمودار مشاهده می‌شود، نمودار مربوط به باگاس نیشکر اولیه دارای پیک در نقطه 2925 cm^{-1} می‌باشد که به پیوندهای C-H گروه‌های آلیفاتیک لیگنین و پلی ساکاریدها نسبت داده می‌شود. اما در نمودار مربوط به SBC این پیک از شدت کمتری برخوردار است که نشان دهنده کمتر بودن مقدار این ترکیب‌ها در SBC است. پیک‌های موجود در 2031 و 2358 cm^{-1} در باگاس نیشکر و پیک‌های 2030 و 2356 cm^{-1} در SBC بیانگر گروه Si-H مربوط به ناخالصی‌های سیلیکات و مواد معدنی خاک رس کمپلکس شده با هیومیک اسید می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که مقدار کمی هیومیک اسید در اثر فرایند SBC تولید شده است (Sarlaki *et al.*, 2019a, b, c). پیک 1736 cm^{-1} در باگاس نیشکر و cm^{-1} 1734 در SBC بیانگر پیوند C-C در کربوکسیلیک اسید آروماتیک در لیگنین و یا همی سلولز است. با توجه به شدت کمتر، می‌توان نتیجه گرفت که در اثر فرایند کمپوست شدن مقدار قابل توجهی همی سلولز از بین رفته است. پیک 1468 cm^{-1} در باگاس نیشکر و 1463 cm^{-1} در SBC نشان‌دهنده پیوند C-O مربوط به ترکیب‌های آلیفاتیک و کربناته می‌باشد. پیک‌های موجود در cm^{-1} 1052 در باگاس نیشکر و 995 cm^{-1} در SBC بیانگر گروه



شکل ۴- طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز نمونه‌های باگاس نیشکر و کمپوست باگاس نیشکر

Fig. 4- Fourier Transform Infrared spectroscopy of sugarcane bagasse and sugarcane bagasse compost

انرژی ویژه و چگالی توده‌ای برای آسیاب SBC در سه اندازه مش ۱، ۲/۵ و ۴ میلی‌متر، سه سطح محتوای رطوبتی ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد وزنی و دو سرعت دورانی ۱۴۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه آورده شده است.

بررسی مصرف انرژی ویژه و چگالی

توده‌ای

بررسی آماری

در جدول ۳، مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مصرف

جدول ۳- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مصرف انرژی ویژه و چگالی توده‌ای کمپوست باگاس نیشکر در شرایط عملیاتی مختلف آسیاب چکشی - سایشی

Table 3. Actual and predicted values of specific energy consumption and bulk density of sugarcane bagasse compost under different operating conditions of hammer-atrtrition milling

متغیرهای مستقل Independent variables			پاسخ‌های وابسته Dependent responses			
محتوای رطوبت (درصد وزنی) Moisture content (%wb)	اندازه مش (میلی‌متر) Screen opening size (mm)	سرعت دورانی (دور بر دقیقه) Rotational speed (rpm)	مصرف انرژی ویژه (kJ/kg)		چگالی توده‌ای (kg/m ³)	
			مقدار واقعی Actual value	مقدار پیش‌بینی شده Predicted value	مقدار واقعی Actual value	مقدار پیش‌بینی شده Predicted value
16	2.5	2000	370	360.94	147.2	146.43
12	4	2000	32	16.61	137	134.57
12	1	2000	380	389.44	197.1	196.25
8	2.5	1400	40	36.88	151.1	153.61
8	2.5	2000	44	47.11	176	173.48
16	1	2000	750	726.94	169.9	170.37
12	2.5	2000	105	110.94	169.7	172.97
8	4	1400	11	27.72	113.7	111.56
12	2.5	1400	100	94.05	162.9	159.62
8	4	2000	20	3.27	134.2	136.33
16	4	1400	49	16.88	126.7	126.41
16	4	2000	72	104.1	116.8	117.08
8	1	1400	155	141.38	210	209.62
12	1	1400	330	320.55	212	212.84
8	1	2000	190	230.61	199.2	199.57
12	4	1400	19	34.38	113.9	116.32
16	2.5	1400	230	239.05	159.9	160.66
16	1	1400	530	530.05	215	214.52

همبستگی اصلاح شده با ضریب همبستگی پیش‌بینی شده، تطابق مناسبی ایجاد شد به‌طوری‌که اختلاف آن‌ها کمتر از ۰/۲ بود. دقت مؤثر^{۲۸}، بیانگر اختلاف مقدار پاسخ پیش‌بینی شده مدل با مقدار متوسط خطای پیش‌بینی می‌باشد و مقادیر بیش از ۴ بیانگر کفایت مدل است. در این مطالعه برای هر دو پاسخ این مقدار بیش از ۴ به‌دست آمد. در نتیجه می‌توان بیان داشت که مدل‌های پیشنهادی می‌توانند برای هدایت فضای طراحی (طرح D-optimal) مورد استفاده قرار بگیرند.

براساس نتایج به‌دست آمده، برای هر دو پاسخ مصرف انرژی ویژه و چگالی توده‌ای، مدل برهمکنش دو عاملی^{۲۷} (2FI) با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین انحراف معیار توسط نرم‌افزار پیشنهاد شد (جدول ۴). بررسی سه پارامتر ضریب همبستگی (بیشتر از ۰/۹۹)، انحراف معیار (کمتر از ۳۵/۲۲) و ضریب تغییرات (کمتر از ۱۸/۵) برای پاسخ‌ها (جدول ۴)، بیانگر اعتبار بالای مدل‌های پیشنهادی برای هر دو پاسخ مورد بررسی توسط نرم‌افزار است. از طرف دیگر برای هر دو پاسخ، بین ضریب

جدول ۴- نتایج آماره‌های بهترین مدل برازش یافته پیشنهادی توسط روش D-optimal برای پاسخ‌های بررسی شده
Table 4. The results of the statistics of the best-fitted model proposed by the D-optimal method for the experimented responses

پاسخ Response	نوع مدل Model type	انحراف معیار Std. dev.	میانگین Average	ضریب تغییرات (%) C.V. (%)	ضریب همبستگی R ²	ضریب همبستگی اصلاح شده Adjusted R ²	ضریب همبستگی پیش‌بینی شده Predicted R ²	دقت مؤثر Adequate precision
مصرف انرژی ویژه Specific energy consumption	برهمکنش دو عاملی 2FI	35.22	19.39	18.50	0.9932	0.9710	0.8620	23.29
چگالی توده‌ای Bulk density	برهمکنش دو عاملی 2FI	3.82	16.79	2.36	0.9971	0.9877	0.9415	30.54

مش (AB) از نظر آماری بر مصرف انرژی ویژه آسیاب SBC معنی‌دار بودند. در این میان، اندازه مش آسیاب بیشترین تأثیر را در میان پارامترها بر مصرف انرژی ویژه فرایند آسیاب داشت (جدول ۵). با توجه به اطلاعات داده شده در جدول ۵، تنها اثرهای اصلی محتوای رطوبت (A) و اندازه مش (B) و همچنین اثرهای متقابل محتوای رطوبت - سرعت دورانی (AC) و اندازه مش - سرعت دورانی (BC) بر چگالی توده‌ای SBC معنی‌دار بودند.

نتایج حاصل از آنالیز تجزیه واریانس (ANOVA)^{۲۹} برای برهمکنش دو عاملی مصرف انرژی ویژه در جدول ۵، نشان داده شده است. مقدار بالای ضریب همبستگی ($R^2 > 0.99$) نشان دهنده این است که معادله خطی به‌خوبی رفتار سیستم را پیش‌بینی کرده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مدل پیشنهادی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار شد. همچنین، تمام اثرهای اصلی محتوای رطوبت (A)، اندازه مش (B) و سرعت دورانی (C) و اثر متقابل محتوای رطوبت و اندازه

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس برای مصرف انرژی ویژه و چگالی توده‌ای کمپوست باگاس نیشکر در فرایند آسیاب چکشی - سایشی

Table 5. Results of analysis of variance (ANOVA) for specific energy consumption and bulk density of sugarcane bagasse compost in hammer-attrition milling process

مصرف انرژی ویژه و چگالی توده‌ای						
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	ارزش F	ارزش P	معنی‌داری
Source	Sum of square	df	Mean of square	F-value	p-value	Sig.
مدل Model	7.23E+05	13	55634.85	44.86	0.0011	**
A-محتوای رطوبت A-Moisture content	2.06E+05	2	1.03E+05	82.91	0.0006	**
B-اندازه مش B-Screen opening size	3.95E+05	2	1.97E+05	159.17	0.0002	**
C-سرعت دورانی C-Rotational speed	13833.39	1	13833.39	11.15	0.0288	*
AB	91448.56	4	22862.14	18.43	0.0077	**
AC	11769.44	2	5884.72	4.74	0.0879	ns
BC	5708.44	2	2854.22	2.3	0.2162	ns
باقیمانده Residual	4961.22	4	1240.31			
کل Total	7.28E+05	17				
چگالی توده‌ای، Bulk density						
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	ارزش F	ارزش P	معنی‌داری
Source	Sum of square	df	Mean of square	F-value	p-value	Sig.
مدل Model	20163.89	13	1551.07	106.17	0.0002	**
A-محتوای رطوبت A-Moisture content	316.81	2	158.41	10.84	0.0243	*
B-اندازه مش B-Screen opening size	17706.33	2	8853.17	605.98	< 0.0001	**
C-سرعت دورانی C-Rotational speed	18.20	1	18.20	1.25	0.3269	ns
AB	73.15	4	18.29	1.25	0.4165	ns
AC	982.71	2	491.35	33.63	0.0032	**
BC	1066.69	2	533.34	36.51	0.0027	**
باقیمانده Residual	58.44	4	14.61			
کل Total	20222.33	17				

ns, * and ** depict not significance, significance at 5% level, and significance at 1% level, respectively.

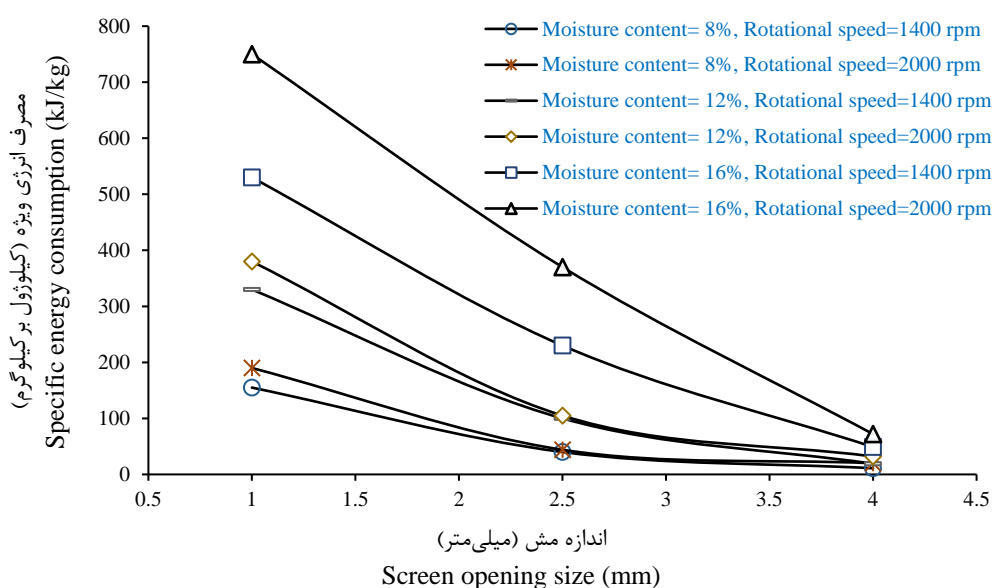
بررسی پارامتری

زمان طولانی‌تری فرایند آسیاب را انجام دهد و در نتیجه انرژی بیشتری مصرف کند تا ماده به اندازه‌ای برسد که از مش آسیاب عبور کند. برای نمونه، زمانی که مش از ۱ به ۴ میلی‌متر در شرایط رطوبتی ۸ درصد وزنی و سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه افزایش می‌یابد، مقدار مصرف انرژی

براساس نتایج به‌دست آمده، اندازه مش آسیاب با مصرف انرژی ویژه رابطه معکوس داشت (شکل ۵). مصرف انرژی ویژه بیشتر براساس این واقعیت قابل توجیه است که در مش‌های ریزتر (۱ میلی‌متر)، دستگاه آسیاب باید مدت

صفحه دستگاه آسیاب چکشی از ۱/۶۸ به ۴/۷۶ میلی‌متر، مصرف انرژی ویژه آسیاب از ۳۰/۵۱ به ۶/۹۶ کیلوژول بر کیلوگرم کاهش یافت (Mani et al., 2004). در دیگر مطالعه، پژوهشگران تأثیر نوع زیست‌توده بر مصرف انرژی ویژه آسیاب را ارزیابی کرده و دریافتند که برای اندازه صفحه مش ۳/۲ میلی‌متر، مصرف انرژی ویژه برای سویچگراس بیشترین مقدار (۹۹/۴ کیلوژول بر کیلوگرم) و برای کاه و کلش ذرت کمترین (۳۹/۷ کیلوژول بر کیلوگرم) بود (Mani et al., 2004).

ویژه آسیاب از ۱۵۵ به ۱۱ کیلوژول بر کیلوگرم کاهش یافت (جدول ۳). نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با گزارش دیگر محققان مطابقت دارد. به‌عنوان نمونه، در مطالعه‌ای پژوهشگران گزارش کردند که مصرف انرژی ویژه برای آسیاب کاه و کلش ذرت (در محتوای رطوبت ۱۲ درصد وزنی) با آسیاب چکشی در اندازه‌های ۰/۸، ۱/۶ و ۳/۲ میلی‌متر به ترتیب ۱۲۳/۵، ۷۱/۴ و ۳۹/۷ کیلوژول بر کیلوگرم بود (Miao et al., 2011). به‌طور مشابه، در هنگام آسیاب یونجه، با افزایش اندازه بازشدگی



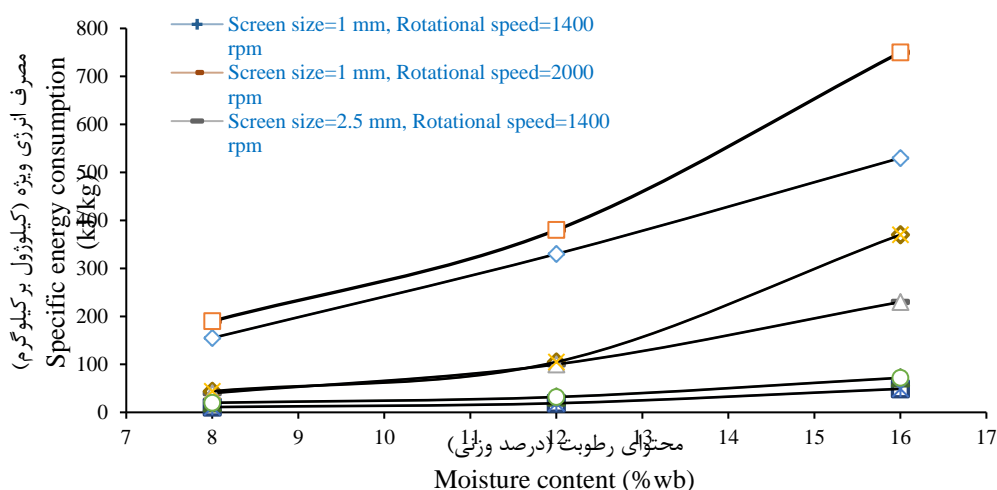
شکل ۵- تأثیر اندازه مش بر مصرف انرژی ویژه آسیاب کمپوست باگاس نیشکر در شرایط مختلف محتوای رطوبتی و سرعت دورانی
 Fig. 5- The effect of screen opening size on specific energy consumption of milling of sugarcane bagasse compost in different conditions of moisture content and rotational speed

۱۱ کیلوژول بر کیلوگرم در شرایط بزرگترین اندازه مش (۴ میلی‌متر)، کمترین محتوای رطوبت (۸ درصد وزنی) و بیشترین سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه به‌دست آمد. افزایش مصرف انرژی ویژه ناشی از افزایش محتوای رطوبت به اتصال رطوبت در ساختار سلول‌های مواد اولیه و در نتیجه بیشتر شدن مقاومت برشی مواد زیست توده در محتوای رطوبتی بیشتر نسبت داده شده است (Liu et al., 2016). به‌عنوان مثال، محققان در پژوهشی گزارش دادند که در هنگام خردایش چپس‌های خرد شده حاصل از درخت Douglas-fir با یک آسیاب چکشی، در اثر

براساس شکل ۶، محتوای رطوبتی رابطه مستقیم با مقدار مصرف انرژی ویژه داشت، به‌طوری‌که با افزایش محتوای رطوبت، مقدار مصرف انرژی ویژه آسیاب افزایش یافت. تأثیر محتوای رطوبتی بر مصرف انرژی ویژه آسیاب SBC در اندازه‌های کوچکتر بسیار مؤثرتر بود (شکل ۶). بیشترین مصرف انرژی ویژه آسیاب SBC به مقدار ۷۵۰ کیلوژول بر کیلوگرم در شرایط کوچکترین اندازه مش (۱ میلی‌متر) و بیشترین محتوای رطوبت (۱۶ درصد) و سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به‌دست آمد. همچنین از طرف دیگر، کمترین مصرف انرژی ویژه آسیاب به مقدار

شده و فقط آب پیوندی^{۳۲} روی پلیمرهای دیواره سلولی جذب می‌شوند. در نتیجه، این آب پیوندی است که ممکن است در افزایش انرژی مصرفی دستگاه آسیاب در حدود ۱۷ - ۱۳ درصد نقش داشته باشد، درحالی‌که آب آزاد سبب مصرف انرژی کمتری می‌شود. این یافته‌ها با ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی ماده اولیه و محتوای رطوبت سازگار است.

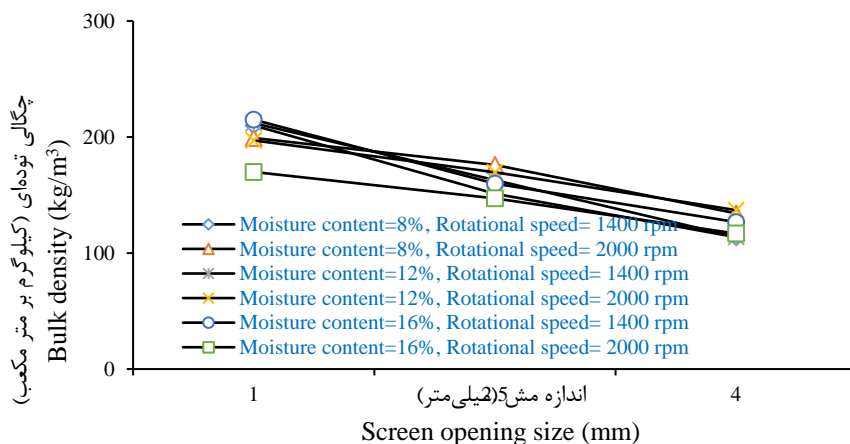
افزایش میزان محتوای رطوبت از ۱۳ به ۱۶/۵ درصد، مقدار مصرف انرژی ویژه ۶۶ درصد افزایش یافت. با این حال، با افزایش بیشتر محتوای رطوبت از ۱۶/۵ به ۲۳/۲ درصد، مقدار مصرف انرژی ویژه فقط ۲۳ درصد افزایش یافت (Liu et al., 2016). به‌طور کلی، در کمتر از نقطه اشباع الیاف^{۳۰} (برای بیشتر مواد زیست توده ۲۲ - ۲۳ درصد)، آب آزاد^{۳۱} (آب مایع درون سلول لیومن) حذف



شکل ۶- تأثیر محتوای رطوبتی بر مصرف انرژی ویژه آسیاب کمپوست باگاس نیشکر در شرایط مختلف اندازه مش و سرعت دورانی
Fig. 6- The effect of moisture content on the specific energy consumption of milling of sugarcane bagasse compost in different conditions of screen opening size and rotational speed

آسیاب چکشی - سایشی ذرات ریزتری در یک اندازه مش ثابت تولید می‌کنند، این اندازه ذرات کوچکتر، چگالی توده‌ای بیشتری دارند (Miao et al., 2011; Liu et al., 2016)

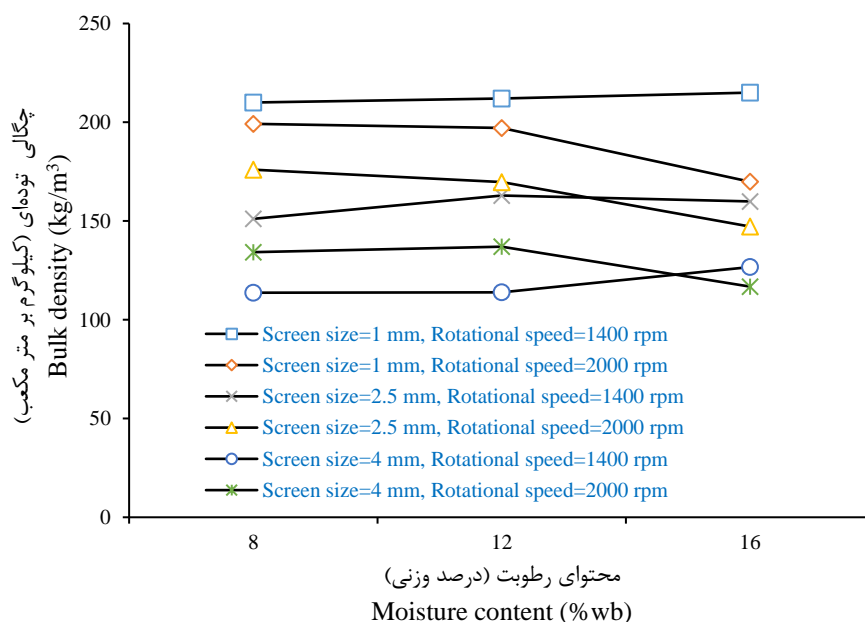
براساس شکل ۷، آسیاب چکشی - سایشی سبب افزایش چگالی توده‌ای ذرات SBC شد. رابطه معکوس اندازه مش آسیاب و چگالی توده‌ای برای آسیاب چکشی - سایشی وجود داشت (شکل ۷). از آنجا که



شکل ۷- تأثیر اندازه مش بر چگالی توده‌ای کمپوست باگاس نیشکر در شرایط مختلف محتوای رطوبتی و سرعت دورانی
Fig. 7- The effect of screen opening size on the bulk density of sugarcane bagasse compost in different conditions of moisture content and rotational speed

دورانی آسیاب، اثر معنی‌داری بر چگالی توده‌ای SBC نداشته است. در نهایت، در این پژوهش براساس بهینه‌سازی داده‌ها توسط نرم‌افزار و با ایجاد قیود is in range برای متغیرهای مستقل و قیود کمینه برای مصرف انرژی ویژه و بیشینه برای چگالی توده‌ای، تحت شرایط بهینه محتوای رطوبتی ۸ درصد وزنی بر پایه تر، اندازه مش ۱ میلی‌متر و سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، مقدار کمینه مصرف انرژی ویژه ۱۴۱/۳۸ کیلوژول بر کیلوگرم و بیشینه چگالی توده‌ای ۲۰۹/۶۲ کیلوگرم بر متر مکعب به‌عنوان پاسخ‌های بهینه با مطلوبیت ۰/۸۸ معرفی می‌شود.

همچنین نتایج نشان دادند که محتوای رطوبت در سطح احتمال ۵ درصد ($p < 0.05$) بر چگالی توده‌ای SBC تأثیرگذار است، به‌طوری‌که با افزایش رطوبت، میزان چگالی توده‌ای افزایش یافت (شکل ۸). بیشترین چگالی توده‌ای SBC (۲۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب) مربوط به حالت ذرات عبور کرده از مش ۱ میلی‌متر (کوچکترین مش) و بیشترین درصد محتوای رطوبتی (۱۶ درصد) بود. در مقابل، کمترین چگالی توده‌ای (۱۱۳/۷ کیلوگرم بر متر مکعب) در شرایط بزرگترین مش (۴ میلی‌متر) و کمترین درصد محتوای رطوبتی حاصل شد. همچنین نتایج نشان دادند که سرعت



شکل ۸- تأثیر محتوای رطوبتی بر چگالی توده‌ای کمپوست باگاس نیشکر در شرایط مختلف اندازه مش و سرعت دورانی

Fig. 8- The effect of moisture content on the bulk density of sugarcane bagasse compost in different conditions of screen opening size and rotational speed

لیگنین می‌شوند، در اثر فرایند کمپوست دچار تجزیه شده‌اند. نتایج FT-IR نشان از تغییرات گروه‌های عاملی در کمپوست نهایی را داشت. نتایج آنالیز DSC نشان داد که دمای انتقال شیشه‌ای از ۴۱/۳۵ درجه سلسیوس آغاز و تا دمای ۱۵۷ درجه سلسیوس ادامه پیدا می‌کند و متوسط دمای انتقال شیشه‌ای SBC ۸۹/۷ درجه سلسیوس به‌دست آمد. بر این اساس می‌توان بیان داشت که استفاده از روش‌های تحلیلی جامع برای بررسی دقیق و مقایسه‌ای و همچنین کنترل کیفیت محصول نهایی

نتیجه‌گیری

براساس نتایج حاصل از این پژوهش، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مشخصه‌یابی ریزساختاری SBCs توسط SEM نشان داد که دسته‌های الیاف SBC نسبت به باگاس نیشکر اولیه بازتر بوده و دارای شکاف‌های طولی در راستای خود می‌باشند که همین موضوع سبب جذب بیشتر آب درون توده کمپوست می‌شود. نتایج XRD نشان داد که بخش کریستالی سلولز دچار تغییر نشده است اما بخش آمورف SBC که شامل همی‌سلولز و

- ⁷ United States Composting Council
⁸ Test Methods for the Examination of Composts and Composting
⁹ Thermogravimetric Analysis
¹⁰ ¹³C Carbon-Nuclear Magnetic Resonance
¹¹ Hammer mill
¹² Knife mill
¹³ Linear knife grids
¹⁴ Disk attrition mills
¹⁵ Neutral Detergent Fiber
¹⁶ Acid Detergent Fiber
¹⁷ Acid Detergent Lignin
¹⁸ Indium
¹⁹ Glass transition
²⁰ Design-Expert
²¹ Endothermic peaks
²² Charring
²³ Exothermic peaks
²⁴ Polycondensation
²⁵ Plasticising
²⁶ Conjugated carboxyls
²⁷ Two Factor Interaction
²⁸ Adeq Precision
²⁹ Analysis of variance
³⁰ Fiber saturation point
³¹ Free waters
³² Bound water

Amir, S., Jouraiphy, A., Meddich, A., El Gharous, M., Winterton, P. and Hafidi, M., 2010. Structural study of humic acids during composting of activated sludge-green waste: elemental analysis, FTIR and ¹³C NMR. *Journal of Hazardous Materials*. 177, 524-529.

ASAE Standard S358.2 FEB03, 2006. Moisture measurement-forages. In: ASABE Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers. St. Joseph, Michigan, USA, pp. 1-2.

ASTM E873-82 DEC, 2006. Standard test method for bulk density of densified particulate biomass fuels. In: ASTM Standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

Barrena, R., D'imporzano, G., Ponsa, S., Gea, T., Artola, A., Vasquez, F., Sanchez, A. and Adani, F., 2009. In search of a reliable technique for the determination of the biological stability of the organic matter in the mechanical-biological treated waste. *Journal of Hazardous Materials*. 192, 1065-1072.

کمپوست و ماده اولیه از نظر سنج‌های پایداری و بلوغ، کاربردی و قابل اطمینان است. در بین پارامترهای بررسی شده، اندازه مش آسیاب تأثیرگذارترین متغیر مستقل بر پاسخ‌های مورد بررسی بود. تحت شرایط بهینه محتوای رطوبتی ۸ درصد وزنی بر پایه تر، اندازه مش ۱ میلی‌متر و سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، مقدار کمینه مصرف انرژی ویژه ۱۴۱/۳۸ کیلوژول بر کیلوگرم و بیشینه چگالی توده‌ای ۲۰۹/۶۲ کیلوگرم بر متر مکعب به‌عنوان پاسخ‌های بهینه با تابع مطلوبیت ۰/۸۸ معرفی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- ¹ Sugarcane Bagasse Compost
² Differential Scanning Calorimetry
³ X-Ray Diffraction
⁴ Fourier Transform Infrared
⁵ Scanning Electron Microscopy
⁶ Institute of Standards and Industrial Research of Iran

منابع

Droussi, Z., D'orazio, V., Provenzano, M.R., Hafidi, M. and Ouattmane, A., 2008. Study of the biodegradation and transformation of olive-mill residues during composting using FTIR spectroscopy and differential scanning calorimetry. *Journal of Hazardous Materials*. 164, 1281-1285.

Ghorbani, M., Aboonajmi, M. and Asefpour Vakilian, K., 2021a. The machine vision technology in precision agriculture: An introduction to principles and its applications. *Soft Computing Journal*. 9(1): 92-113. (In Persian with English abstract).

Ghorbani, M., Aboonajmi, M. and Ghorbani Javid, M., 2015. Ultrasonic waves a new method for extraction of plant compositions. *Journal of Sound and Vibration*. 4(8), 85-99. (In Persian with English abstract).

Ghorbani, M., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A., Asadi Alamouti, A. and Sadeghi, R., 2021b. Ozonolysis pretreatment of wheat straw for

- enhanced delignification: applying rsm technique for modeling and optimizing process. Iranian Journal of Biosystem Engineering. 52(1): 37-53. (In Persian with English abstract).
- Ghorbani, M., Aboonajmi, M., Ghorbani Javid, M. and Arabhosseini, A., 2018. Optimization of ultrasound-assisted extraction of ascorbic acid from fennel (*Foeniculum vulgare*) seeds and evaluation its extracts in free radical scavenging. AgricEngInt: CIGR Journal. 19(4), 209-218.
- Ghorbani, M., Aboonajmi, M., Ghorbani Javid, M. and Arabhosseini, A., 2017a. Effect of ultrasound extraction conditions on yield and antioxidant properties of the fennel seed (*Foeniculum vulgare*) extract. Iranian Journal of Food Science and Technology. 14(67), 63-73. (In Persian with English abstract).
- Ghorbani, M., Aboonajmi, M., Ghorbani Javid, M. and Arabhosseini, A., 2017b. Effect of ultrasound waves on the amount of ascorbic acid extraction from fennel seeds and potential of its extraction for improvement of antioxidant properties. Journal of Food Research. 27(1), 59-71. (In Persian with English abstract).
- Ghorbani, Z., Masoumi, A.A. and Hemmat, A., 2010. Specific energy consumption for reducing the size of alfalfa chops using a hammer mill. Biosystems Engineering. 105(1), 34-40.
- Iniguez, G., Valadez, A., Manriquez, R. and Moreno, M.V., 2011. Utilization of by-products from the tequila industry: Part 10. Characterization of different decomposition stages of *Agave tequilana* Webber bagasse using FTIR spectroscopy, thermogravimetric analysis and scanning electron microscopy. Revista Internacional De Contaminación Ambiental. 27, 61-74.
- Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.W. and Repke, J.U., 2016. Hay pellets - The influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production. Fuel Processing Technology. 148, 163-174.
- Lim, S.L. and Wu, T.Y., 2015. Determination of maturity in the vermicompost produced from palm oil mill effluent using spectroscopy, structural characterization and thermogravimetric analysis. Ecological Engineering. 84, 515-519.
- Liu, Y., Wang, J. and Wolcott, M.P., 2016. Assessing the specific energy consumption and physical properties of comminuted Douglas-fir chips for bioconversion. Industrial Crops and Products. 94, 394-400.
- Mani, S., Tabil, L.G. and Sokhansanj, S., 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. Biomass and Bioenergy. 27(4), 339-352.
- Martínez-Blanco, J., Muñoz, P., Antón, A. and Rieradevall, J., 2009. Life cycle assessment of the use of compost from municipal organic waste for fertilization of tomato crops. Resources, Conservation and Recycling. 53(6), 340-351.
- Miao, Z., Grift, T.E., Hansen, A.C. and Ting, K.C., 2011. Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. Industrial Crops and Products. 33, 504-513.
- Ouatmane, A., Provenzano, M.R., Hafidi, M. and Senesi, N., 2000. Compost maturity assessment using calorimetry, spectroscopy and chemical analysis. Compost Science and Utilisation. 8, 135-146.
- Pampuro, N., Dinuccio, E., Balsari, P. and Cavallo, E., 2016. Evaluation of two composting strategies for making pig slurry solid fraction suitable for pelletizing. Atmospheric Pollution Research. 7(2), 288-293.
- 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.
- Pradhan, P., Mahajani, S.M. and Arora, A., 2021. Pilot scale production of fuel pellets from waste biomass leaves: Effect of milling size on pelletization process and pellet quality. *Fuel*. 181, 215-32.
- Provenzano, M.R. and Senesi, N., 1999. Thermal properties of standard and reference humic substances by differential scanning calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 57, 517-526.
- Rajabi Hamedani, S., Colantoni, A., Gallucci, F., Salerno, M., Silvestri, C. and Villarini, M., 2019. Comparative energy and environmental analysis of agro-pellet production from orchard woody biomass. *Biomass and Bioenergy*. 129, 105334.
- Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C. and Bernal, M.P., 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*. 78, 301-308.
- Sarlaki, E. and Aboonajmi, M., 2019. Authentication and identification of food adulterants based on fingerprinting techniques and chemometric tools. *Food Hygiene*. 9(35), 13-36. (In Persian with English abstract).
- Sarlaki, E. and Hassan-Beygi, R., 2018. Production potentials and technical barriers facing the development and utilization of renewable energies in Iran. *Journal of renewable and new energy*. 6(1), 14-25. (In Persian with English abstract).
- Sarlaki, E., Chegini, G.R., Marzban, I. and Bakhshi, H.R., 2021a. The sustainable solutions for energy saving in greenhouse systems using renewable energies technologies. *Journal of renewable and new energy*. 8(1), 1-12. (In Persian with English abstract).
- Sarlaki, E., Kianmehr, M.H., Ghorbani, M. and Azadegan, B., 2021b. Optimization of pelletizing process of sugarcane bagasse compost using response surface methodology and evaluation of release rate of nitrogen from pellet. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52(4): 1117-1133. (In Persian with English abstract).
- Sarlaki, E. and Sharif Paghaleh, A., 2017. Effects of centrifuge pretreatment on membrane ultrafiltration of coal-derived humic alkaline extracts. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 48(2), 273-283. (In Persian with English abstract).
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Asefpour Vakilian, K., 2020. Chemical, spectral and morphological characterization of humic acids extracted and membrane purified from lignite. *Chemistry and Chemical Technology*. 14, 353-361.
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Asefpour Vakilian, K., 2021c. Valorization of lignite wastes into humic acids: Process optimization, energy efficiency and structural features analysis. *Renewable Energy*. 163, 105-122.
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Asefpour Vakilian, K., 2019a. Extraction and purification of humic acids from lignite wastes using alkaline treatment and membrane ultrafiltration. *Journal of Cleaner Production*. 235, 712-23.
- Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Mirsaedghazi, H., 2017. Effect of processing temperature on membrane ultrafiltration of lignite coals-derived humic alkaline extracts, membrane performance and humic acid purity. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 48, 475-89. (In Persian with English abstract).

Persian with English abstract).

Sarlaki, E., Sokhandan Toomaj, M., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Nikousefat, O., 2019b. Extraction of humic acid from lignite coals using stirred tank reactors (STRs): Assessment of process parameters and final product characterization. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50, 1111-1125. (In Persian with English abstract).

Sarlaki, E., Sokhandan Toomaj, M., Sharif Paghaleh, A., Kianmehr, M.H. and Nikousefat, O., 2019c. Extraction of humic acid from lignite coals using stirred tank reactors (STRs): Assessment of process parameters and final product characterization. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50, 1111-1125. (In Persian with English abstract).

Sharif Paghaleh, A., Sarlaki, E., Kianmehr, M.H. and Shakiba, N., 2017. Study of spectral, structural and chemical characteristics of humic acids isolated from coalfield of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 48, 1145-1158. (In Persian with English abstract).

Sharma, A., Ganguly, R. and Gupta, A.K., 2019. Spectral characterization and quality assessment of organic compost for agricultural purposes. *International journal of recycling organic waste in agriculture*. 8, 197-213.

Soobhany, N., 2018. Assessing the physicochemical properties and quality parameters during composting of different organic constituents of municipal solid waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 6, 1979-1988.

Soobhany, N., Gunasee, S., Rago, Y.P., Joyram, H., Raghoo, P., Mohee, R. and Garg, V.K., 2017. Spectroscopic, thermogravimetric and structural characterization analyses for comparing municipal solid waste composts and vermicomposts stability and maturity. *Bioresource Technology*. 236, 11-19.

Tajinia, R., Kianmehr, M.H., Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A. and Mirsaeedghazi, H., 2020. Extracting humic acids from spend mushroom compost (SMC) by alkaline treatment and membrane ultrafiltration. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 50, 847-861. (In Persian with English abstract).

TMECC, 2002. Test methods for the examination of composts and composting. us composting council.

Tumuluru, J.S., Tabil, L.G., Song, Y., Iroba, K.L. and Meda, V., 2014. Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat, and canola straws. *Biomass and Bioenergy*. 60, 58-67.

Whittaker, C. and Shield, I., 2017. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability - A review. *Renewable and Sustainable Energy Review*. 71, 1-11.

Wu, H., Zhao, Y., Long, Y., Zhu, Y., Wang, H. and Lu, W., 2011. Evaluation of the biological stability of waste during landfill stabilization by thermogravimetric analysis and Fourier transform infrared spectroscopy. *Bioresource Technology*. 102, 9403-9408.

Zafari, A. and Kianmehr, M.H., 2012. Effect of temperature, pressure and moisture content on durability of cattle manure pellet in open-end die method. *Journal of Agricultural Science*. 5, 203-208
Zbytniewski, R. and Buszewski, B., 2005. Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: chemical and spectroscopic properties. *Bioresource Technology*. 96, 471-478.





Environmental Sciences Vol.19 / No.4 / Winter 2022

107-130

Original Article

Analytical methods for assessing the quality of sugarcane bagasse compost and improving the physicochemical properties toward densification

Ehsan Sarlaki, Mohammad Hossein Kianmehr¹ and Marzieh Ghorbani

Department of Biosystem Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2021.01.10 Accepted: 2021.05.10

Sarlaki, E., Kianmehr, M.H. and Ghorbani, M., 2022. Analytical methods for assessing the quality of sugarcane bagasse compost and improving the physicochemical properties toward densification. *Environmental Sciences*. 19(4): 107-130.

Introduction: The stability and maturity indicators of composted biomasses are important to ensure the quality of the final product, maintain consumer confidence, and guarantee safe applicability in agricultural uses. In addition, due to the low energy density and bulk density, the composted biomasses face problems such as higher storage and transportation costs as well as overall costs in logistics management. Particle size reduction and densification of composted biomasses can partially overcome these challenges.

Material and methods: Sugarcane bagasse compost (SBC) was prepared from the South bagasse processing development company (Biofer) for quality characterization and assessing the grinding process toward densification. For assessing the quality of SBCs, the physicochemical characterization, as well as the analytical techniques were investigated through differential scanning calorimetry (DSC), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FT-IR), and scanning electron microscopy (SEM). In the following, a hammer-attribution mill was used to improve the physicochemical properties and reduce the particle size of SBCs. To this end, an experimental design in the form of factorial design (D-optimal) was used to assess the significance and optimization of the effects of moisture content of SCBs (8, 12, and 16 w.b.%) and screen opening size (1, 2.5, and 4 mm) and rotational speed (1400 and 2000 rpm) of hammer-attribution mill as independent variables on specific energy consumption and bulk density as design responses.

Results and discussion: The results obtained from chemical analysis exhibited that the properties of SBCs are in accordance with existing standards. The SEM micrographs revealed a physical change on the surfaces of SBCs with a wrinkly and heterogeneous morphology along with longitudinal cracks with the opening of fiber bundles in cellulose resulting from the degradation of lignin and hemicellulose. This trend was also

demonstrated by XRD analysis, so that with increasing the crystallinity index (from 62 up to 75), the crystalline regions of cellulose in SBCs remained unchanged, but the amorphous regions, which includes hemicellulose and lignin, was slightly decomposed. Changes in functional groups from FT-IR spectra demonstrated that the microbial-biological degradation of lipids and carbohydrates, as well as dissociation of lignin and polyphenols occurred in SBCs. From the DSC thermal curves, a glass transition temperature of 89.7 °C was obtained for SBCs, which due to the peak intensity at this point, the improved maturation and humification of SBCs are guaranteed. For both responses of specific energy consumption and bulk density of SBCs, a two-factor interaction (2FI) model with the highest correlation coefficient and the lowest standard deviation was proposed. The mesh opening size had the greatest effect among the parameters on the specific energy consumption and the bulk density.

Conclusion: The results demonstrated that the use of comprehensive analytical analyses for an accurate and comparative study between the final composted biomasses and the raw materials in terms of stability and maturity indicators, is practical and reliable. Optimization results from D-optimal design showed that under optimum conditions of moisture content of 8 % w.b, 1-mm mesh opening size and rotational speed 1400 rpm of hammer-attrition mill, a minimum amount of SEC (141.38 KJ/Kg), and the maximum amount of bulk density (209.62 kg/m³) were introduced as optimum responses with the desirability function of 0.88.

Keywords: Bulk density, FT-IR, Milling, Specific energy consumption, Sugarcane bagasse compost, XRD.