نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق
سال هجدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴

بررسی ویژگی‌های سوخت جامد مشتق شده از پسماندهای‌شهر رشت

جواد ترکمن[1]*
۱- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، ایران. torkaman@guilan.ac.ir
* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷)

چکیده: سوخت جامدزیستی‌شامل انرژی تولیدی از تمام ضایعات سلولزی است که جزء سوخت‌های پاک و ارزان محسوب می‌شود. هدف این مطالعه دستیابی به سوخت مشتق شده بصورت جامد از پسماند شهر رشت است. برای این منظور از مواد آلی (کمپوست) و مواد دورریز کارخانه کود آلی رشت نمونه‌برداری بعمل آمد. از این مواد به‌صورت جداگانه در فرآیند خرد کردن، آسیاب‌کردن و فشرده‌سازی سوخت جامد تهیه شد. از طریق تحلیل‌گروهی[1] و تحلیل نهایی[2] خواص نمونه‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. در تحلیل‌گروهی مقدار رطوبت، ترکیبات فرار، مقدار کربن ثابت وخاکستر و در تحلیل نهایی مقدار عناصرکربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد اندازه‌گیری شد. ارزش‌حرارتی نمونه‌ها نیز از طریق دستگاه بمب کالریمتری و روابط ریاضی محاسبه شد. درحدود ۶۰ درصد پسماند از مواد غذایی تشکیل شده که بصورت کمپوست دارای ارزش حرارتی پایین می‌باشند بنابراین فقط می‌توان از ۲۸/۴ درصد پسماند ورودی که قابلیت احتراق دارند برای تولید سوخت جامد استفاده نمود که عمدتا بصورت کرک هستند. بهترین نوع سوخت مشتق شده از پسماند دراین مطالعه از نوع کرکی فشرده شده است. بیشترین ترکیب تشکیل دهنده آن را کاغذ و مقوا، پلاستیک و پارچه تشکیل می‌دهدکه ارزش‌حرارتی بالایی دارند. این سوخت دارای ارزش حرارتی مناسب (MJ/kg ۱۵/۲۸) است.

کلیدواژگان: پسماند، سوخت زیستی، ارزش حرارتی، تحلیل گروهی، تحلیل نهایی

مقدمه

افزایش جمعیت و صنعتی شدن شهرها باعث تولید انواع پسماند شده است. افزایش پسماند دولتمردان را بر آن داشته تا به دنبال راهکارهای علمی و عملی برای کاهش پسماند باشند. درحال حاضر کشورهای مختلف جهان به سه روش: دفن بهداشتی، تبدیل به کمپوست و بازیافت انرژی، پسماندهای شهری را مدیریت می‌کنند که نسبت استفاده از این روش‌ها با توجه به فن‌آوری و تکنولوژی در کشورهای جهان متفاوت است[۱]. یکی از مهمترین راهکارهای مدیریت پسماند بازیافت انرژی است. که به دو صورت مستقیم (سوزاندن زباله) و غیرمستقیم (RDF[3]) است. تولید انرژی از پسماند بجای دفن بهداشتی، میزان انتشار دی اکسیدکربن و سایر گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد. سوخت‌های حاصل از پسماندهای شهری، براساس منبع اولیه، فرآیند آماده‌سازی، اجزای قابل احتراق زباله و غیره به‌صورت‌های مختلفی هستند. گزارش شده است که کشورهای توسعه یافته در مدیریت پسماند تنها به یک روش اکتفاء نمی‌کنند. این کشورها به چهار شیوه دفن، کمپوست، زباله‌سوزی و بازیافت پسماندهای حامد شهری را مدیریت می‌کنند[۲]. در این میان کشور ایران ۸۳/۵۷ درصد از پسماندهای شهری خود را به روش

[1] Proximate
[2] Ultimate
[3] Refuse Derived Feul

دفن و در حدود ۱۰/۵۳ درصد پسماندها را تبدیل به کمپوست و ۵/۹ درصد باقیمانده را بازیافت می‌کند[۳]. بر اساس آمار سازمان جهانی[1] در سال ۲۰۲۱ ایران رتبه ۱۷در تولید زباله بدست آورده‌است متوسط سرانه زباله تولید شده در تهران ۳۲۰ کیلوگرم است. در حالی که سرانه تولید زباله در جهان حدود ۱۱۰ کیلوگرم در سال است. سرانه روزانه در ایران ۶۰۰ گرم است که دو برابر سرانه جهانی است. روزانه ۴۵ هزار تن زباله در مناطق شهری و ۱۰ هزار تن در مناطق روستایی تولید می‌شود که متوسط سرانه تولید زباله هر نفر در شهر ۷۶۰ گرم و در روستاها ۴۸۵ گرم است. ۶۵ درصد از پسماندهای تولیدی"تر" و ۳۵ درصد آن "خشک" است و ۲۵ درصد از پسماندهای تولیدی پردازش و ۷۵ درصد باقیمانده بدون فرآیند پردازش به‌طور مستقیم دفن و ۱۰ درصد در مبداء تفکیک می‌شوند[۴]. در حال حاضر زباله‌های ۱۷ شهر وارد رشت می‌شود که میزان آن ۱۱۰۰ تن است که مقدار زیادی است که نیازمند تدابیر و راهکار اجرایی است[۵]. سالانه هزاران تن از ضایعات سلولزی شامل کشاورزی، صنعتی و جنگلی به هدر می‌رود که می‌توان طی فرآیندی این ضایعات را به کالایی تبدیل کرد که ارزش افزوده بالاتری داشته باشد. استفاده از این سوخت از اوایل دهه ۹۰ میلادی با شروع بحران انرژی در جهان مورد توجه دوباره کشورهای اروپایی قرار گرفت و هر ساله مصرف آن افزایش می‌یابد[۶]. همچنین، دامنه مصرف‌کنندگان زیست توده جامد به دلیل ارزانی و در دسترس بودن این نوع سوخت بسیار گسترده است. خانواده‌های کوچک به خصوص در نواحی روستایی، ویلایی، واحدهای کوچک و بزرگ صنعتی و تجاری و حتی در رستوران‌ها برای طبخ طبیعی غذا می‌توانند از این سوخت به راحتی بهره‌مند شوند. یکی از موارد کاربرد صنعتی این سوخت، استفاده از این سوخت در ترکیب با ذغال سنگ برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به داخل جو زمین، در کشورهایی مانند لهستان، فنلاند، سوئد و هلند است[۷]. سوخت زیست توده جامد نسبت به گازوئیل و نفت ارزان‌تر و به مراتب پاک‌تر است. اگر میزان آلودگی حاصل از سوزاندن چوب و تولید برق را ۱۵، سوزاندن گازوئیل را ۵ و سوزاندن گاز را ۳ در نظر بگیریم میزان آلودگی سوخت زیست توده در حد۱ برای یک میزان مشخص و یکسان انرژی حاصله است. یکی از راحت‌ترین روش‌های استحصال انرژی از زیست‌توده‌ها، سوزاندن و استفاده مستقیم از انرژی آن‌ها در حالت جامد است. یکی از قدیمی‌ترین سوخت‌های مورد استفاده توسط انسان‌ها که امروزه به عنوان سوخت زیستی جامد شناخته می‌شود، ضایعات کشاورزی و گیاهان بوده است که برای تهیه انرژی گرمایی یا روشنایی از آن‌ها استفاده می‌کردند[۸]. برخی از زیست‌توده‌های جامد مانند خاک اره که ارزش حرارتی چندان بالایی ندارند، طی فرایندهایی متراکم می‌شوند و به صورت پلت مورد استفاده قرار می‌گیرند. ازمزایای متراکم‌کردن زیست‌توده‌ها می‌توان به افزایش ارزش حرارتی، حمل‌ونقل آسان و ذخیره‌سازی مقرون‌به‌صرفه اشاره‌نمود. هم‌چنین برخی از زیست‌توده‌های دیگر مانند زباله‌های شهری باید تفکیک شوند و پیش‌تیمارهای‌لازم مانند خردکردن، خشک‌کردن و متراکم‌سازی بر روی آن‌ها صورت بگیرد. به دلیل آن که سوخت زیست‌توده جامد از ضایعات درختان و گیاهان است، پس از سوخته‌شدن همان مقدار کربن‌دی‌اکسید جذب شده توسط گیاهان را به محیط باز می‌گرداند و این ویژگی سبب پاک بودن این سوخت شده‌است. طبق اعلام وزارت انرژی ایالات متحده که در تحقیقاتی به بررسی تأثیر دو سوخت زیستی و سوخت‌های‌فسیلی بر گرمایش جهانی پرداخته است، هنگامی که تمام جوانب مورد توجه قرار می‌گیرند، استفاده از سوخت‌های‌زیستی به جای زغال سنگ، منجر به کاهش ۱۴۸ درصدی پتانسیل گرم شدن زمین در نیروگاه می‌شود[۹]. سوخت جامد مشتق شده از پسماند به مواد پسمانده‌ای گفته می‌شود که پس از انجام پروسه‌های مختلف بازیافت به عنوان سوخت حاصل از مواد زائد تولید می‌شود یک نوع بازیافت انرژی است. هر فرد روزانه بطور میانگین یک کیلوگرم زباله تولید می‌کند. که پس از استحصال اولیه توسط افراد غیرمسئول حدود ۸۰۰ گرم آن باقی‌می‌ماند. یعنی یک شهر ده میلیونی مانند تهران روزی ۸ میلیون کیلو یا هشت هزار تن زباله دارد، که اگر ۶۰ درصد آن مناسب تبدیل به سوخت باشد حدود ۵ هزار تن زباله برای‌تبدیل به سوخت وجود دارد. حال با یک ضرب و تقسیم ساده می‌توان پی به اهمیت اقتصادی آن‌برد. بدیهی‌است از این طریق می‌توان به میلیون‌ها کیلو انرژی دست یافت. شکل شماره ۱ مربوط به مقایسه

[1] World Organization Statistics

روش‌های مختلف مدیریت پسماند درسال ۲۰۱۴ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کشورهایی نظیر تایوان، ژاپن، آلمان، سوئد و دانمارک در طرح تبدیل زباله به سوخت پیشگام هستند[۱۰].

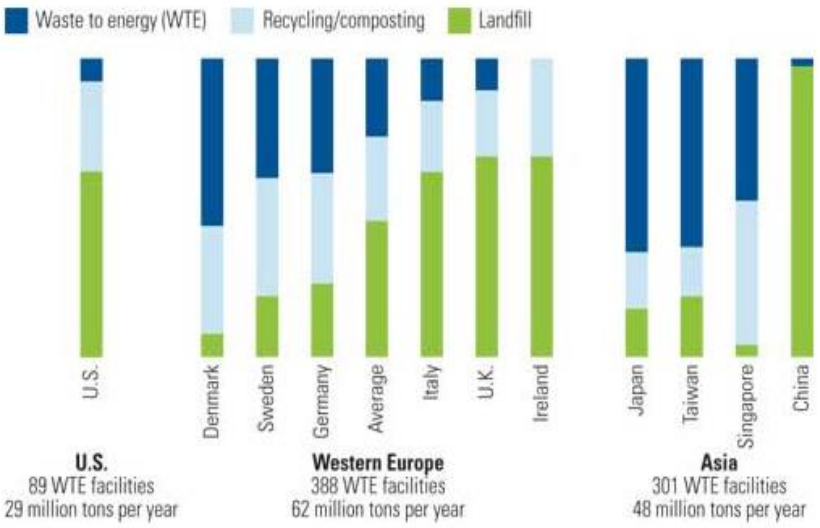

Figure 1- Comparison of waste management methods in some countries of the world
شکل ۱- مقایسه روش‌های مدیریت پسماند در برخی از کشورهای جهان

سوخت جامد مشتق شده از پسماند از اجزای جامد قابل احتراق پسماند مانند مواد سلولزی و پلاستیکی که ارزش‌حرارتی بالایی دارند تشکیل شده است[۱۱]. درحقیقت سوخت جامد مشتق شده از پسماند به پسماندی گفته می‌شود که پس از طی نمودن فرآیندهای مختلف بازیافت، بعنوان سوخت حاصل از مواد زائد بکار برده می‌شود. تکنولوژی احتراق سوخت جامد مشتق شده از پسماند در شمال آمریکا در دهه ۱۹۷۰ گسترش یافت امروزه سوخت جامد مشتق شده از پسماند دربسیاری از کشورهای جهان تولید می‌شود[۱۲].

بر اساس استاندارد ASTM E828_81 ، سوخت جامد مشتق شده از پسماند به ۷ نوع تقسیم‌بندی می‌شود[۱۰].

۱) شکل خام[1]

مواد زائد جامدی که حداقل پردازش برای حذف مواد زائد حجیم و درشت صورت گرفته است

۲)ذرات درشت[2]

مواد زائد جامدی که به منظور جداسازی ذرات درشت حاوی فلزات آهنی یا بدون آن پردازش شده و ۹۵ درصد از وزن ذرات از سرند با قطر ۶ اینچ عبور می‌کنند.

۳)ذرات کرکی‌خردشده[3]

مواد زائد جامدی که برای حذف فلز، شیشه و مواد آلی بر اثر پردازش خرد شده و ۹۵ درصد از وزن ذرات از سرند با قطر ۱۲ اینچ عبور می‌کنند.

۴) مواد پودری[4]

[1] Municipal Solid Waste
[2] Corse-RDF
[3] Fluff-RDF
[4] Poder-RDF

بخش قابل احتراق مواد زائد که بر اثر پردازش پودری شده و ۹۵ درصد از وزن ذرات از سرند با قطر ۱۰ اینچ عبور می‌کند.

۵)مواد زائد متراکم شده[1]

بخش قابل احتراق مواد زائد که متراکم شده و به شکل گلوله‌ای، صدفی، مکعبی و اشکال مشابه تبدیل می‌شود.

۶) مایع

بخش قابل احتراق مواد زاد که به سوخت مایع تبدیل می‌شود.

۷)گاز

بخش قابل احتراق مواد زائد که به سوخت گاز تبدیل می‌شود

از میان انواع سوخت جامد مشتق شده از پسماند نوع متراکم آن از لحاظ هزینه تولید گران‌تر اما از لحاظ عملیات نقل وانتقال و ذخیره آسان‌تر است. سوزاندن سوخت جامد مشتق شده از پسماند درمقایسه با سوزاندن مستقیم مواد زائد شهری پردازش نشده (شکل‌خام) مزایای بسیاری ازجمله تولید انرژی بالاتری دارد. کیفیت سوخت جامد مشتق شده از پسماند از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نظیر ارزش‌حرارتی، درصد خاکستر و رطوبت با توجه به اجزای تشکیل دهنده و فرآیند تولید متفاوت است که در این ارتباط گزارش‌های متفاوتی وجود دارد[۱۳]. معمولا هرکشوری با توجه به نیاز و سخت‌گیری، استاندارد منحصر به فرد خودش را برای سوخت جامد مشتق شده از پسماند تعیین می‌کند به‌عنوان مثال در سال ۱۹۹۸ کشور ایتالیا مقدار استاندارد ارزش حرارتی سوخت جامد مشتق شده از پسماند را ۱۵ MJ/kg در نظر گرفته است[۱۴]. سوخت مشتق از پسماند جامد ترکیبی از اجزای دارای انرژی و مواد آلی است که با تنظیم انرژی حرارتی، قابل استفاده در کوره‌های دوار سیمان، آجرپزی، صنایع چوب و کاغذ و نیز نیروگاه‌های حرارتی و زباله‌سوزها است. بررسی‌های انجام شده در مورد کاربرد سوخت جامد مشتق شده از پسماندهای شهر اسنانبول، ارومیه، تبریز، تهران و رشت باعث کاهش هزینه حامل‌های انرژی و کاهش انتشار آلودگی کارخانه سیمان می‌شود[۷]. از نظر تئوری می‌توان تا ۹۰ درصد پسماندهای شهری را بطوری که قابل خرید و فروش باشد بازیافت نمود در حالی‌که آزانس حفاظت محیط زیست[2] EPA معتقد است دربهترین شرایط تنها می‌توان ۵۶ درصد پسماند را بازیافت نمود[۱۵]. براساس سرشماری سال ۱۳۹۵ جمعیت شهر رشت حدود ۷۰۰ هزار نفر و سرانه تولید یک کیلوگرم به ازای هر نفر گزارش شده‌است. درنتیجه نرخ تولید روزانه پسماند شهری رشت در حدود ۷۰۰ تن در روز است. همچنین با توجه به جمعیت شناور و افزایش جمعیت در طول ماه‌های فروردین،شهریور به علت وجود توریست درمنطقه،نرخ تولید پسماند تا حدود ۸۰۰ تا۸۵۰ تن در روز نیز افزایش می‌یابد[۳]. با توجه به اینکه ارزش حرارتی پسماندهای ورودی به دفنگاه رشت ۵۹۶۸ KJ/Kg گزارش شده است. احداث نیروگاه زباله‌سوز برای این پسماندها مناسب نیست. و نمی‌توان بطور مستقیم از آن‌ها استفاده کرد و برای رفع این مشکل بایستی به‌صورت سوخت جامد مورد استفاده قرارگیرد. سوخت جامد مشتق شده از پسماند را به سه شکل آجر[3]، حبه یا گلوله [4] و کرک[5] می‌توان تولید کرد[۱۶]. هدف این پژوهش تولید سوخت جامد مشتق شده از پسماند شهر رشت و تجزیه وتحلیل گروهی و نهایی آن است.

مواد و روش‌ها

منطقه نمونه‌برداری

بطور مجزا از دو بخش تولید کودآلی(کمپوست) و مواد دورریز کارخانه کودآلی رشت بصورت تصادفی طی سه مرحله و درهرمرحله سه نمونه (شکل۲) برای تولید سوخت جامد نمونه‌برداری صورت گرفت.

[1] Densified-RDF
[2] Environmental Protection Agency
[3] Bricks
[4] Pellets
[5] Fluff

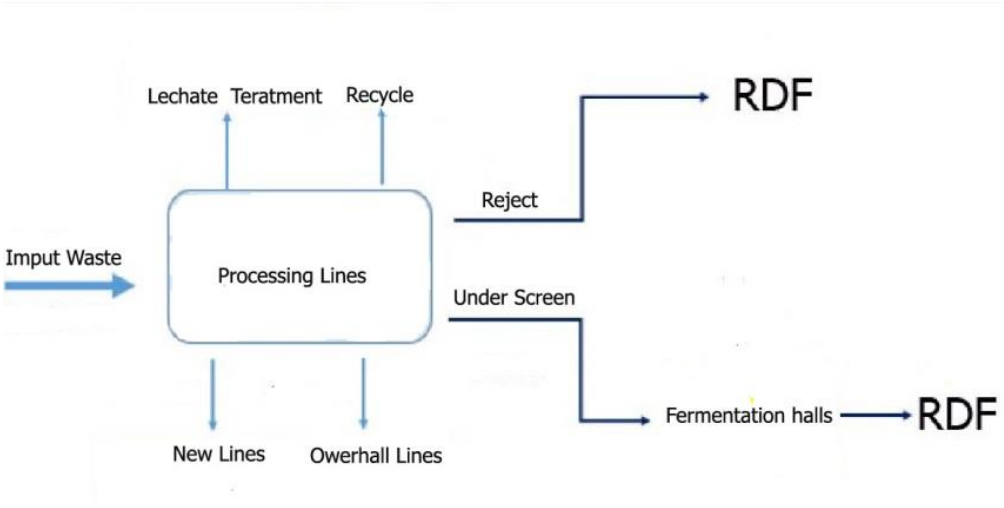

Figure 2- Sampling location in the production process of the Rasht organic fertilizer factory
شکل ۲- محل نمونه‌برداری در فرآیند تولید کارخانه کودآلی رشت

ظرفیت کارخانه کودآلی رشت ۱۰۰۰ تن در روز است که ۶۰ درصد آن معادل ۶۰۰ تن، عمدتاً از پسماند غذایی هستند که از طریق فرآیند تخمیر به کمپوست تبدیل می‌شود و در حدود ۴۰ درصد باقی‌مانده معادل ۴۰۰ تن بصورت دورریز غیرقابل استفاده است.

تولید سوخت جامد

نمونه‌های تهیه شده از کارخانه کودآلی رشت توسط یک دستگاه خردکن و آسیاب ساخت شرکت توس شکن خراسان مدل-TS۱۳۰۰ با دور موتور ۲۰۰۰۰ rpm نمونه‌ها خرد و آسیاب شد و سپس از الک ۴۰ مش عبور داده شد. از مواد عبور کرده از الک و کرک‌های باقی‌مانده بر روی الک به‌طور جداگانه ۹ گرم توزین و با ۱۰ درصد چسب نشاسته مخلوط کرده پس از ریختن در قالب تحت فشار ۳ تن قرار گرفت (شکل۳ و ۴).

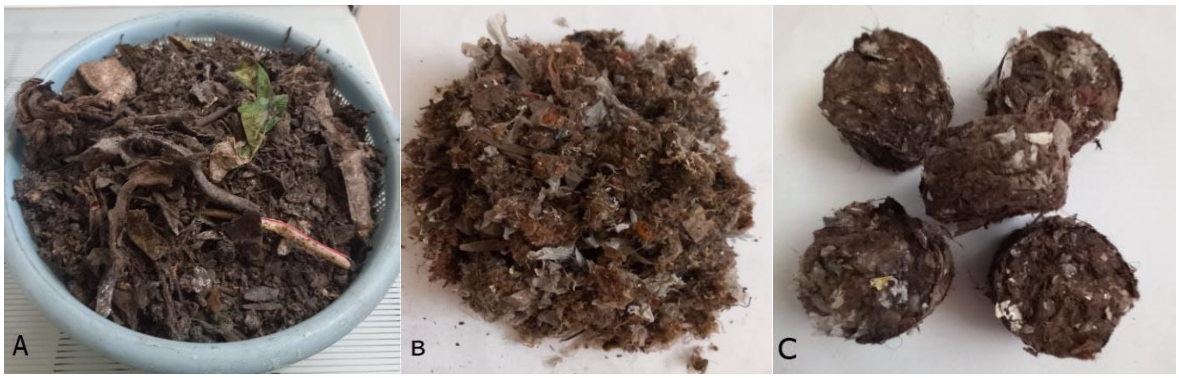

Figure 3- Solid fuel sample (C) from fluff-like materials (B) derived from reject materials (A) of the Rasht organic fertilizer factory
شکل۳- نمونه سوخت جامد (C) از مواد کرک مانند(B) مشتق شده از مواد دورریز(A) کارخانه کودآلی رشت

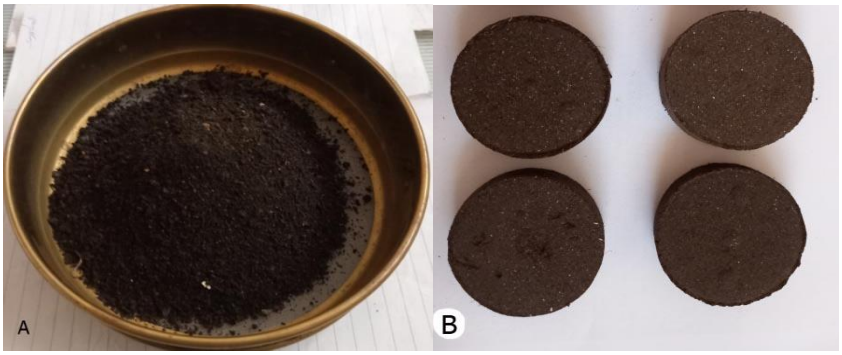

Figure 4- Solid fuel sample (B) from organic materials (A) of the Rasht organic fertilizer factory
شکل۴- نمونه سوخت جامد (B) از مواد آلی (A) کارخانه کودآلی رشت

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها

تجزیه و تحلیل گروهی و نهایی دو روش برای شناسایی ترکیب شیمیایی پسماند هستند. در تحلیل گروهی مقدار رطوبت، مواد فرار، مقدار کربن ثابت وخاکستر و در تحلیل نهایی مقدار عناصر کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد عنوان می‌شود.

اندازه‌گیری رطوبت

اندازه‌گیری رطوبت طبق استاندارد ASTM-E871-82 و توزین نمونه‌ها قبل و بعد از قرار گرفتن در آون با استفاده از فرمول ۱ تعیین شد

$$H = \frac{Wt-Wo}{Wo} \times 100 \quad (1)$$

Wt = وزن تر(گرم)

Wo=وزن خشک(گرم)

H= رطوبت(درصد)

اندازه‌گیری خاکستر

طبق استاندارد ASTM-E1755-01 نمونه در کوره الکتریکی با دمای ۲۰ ± ۵۸۰ درجه سیلسیوس قرار گرفته و با روش وزن‌سنجی قبل و بعد از خاکستر شدن با استفاده از فرمول ۲ محاسبه شد.

$$Ash = \frac{Wo-Wash}{Wo} \times 100 \quad (2)$$

Ash = مقدارخاکستر(درصد)

$Wash$ = وزن خاکستر(گرم)

Wo = وزن خشک ماده اولیه(گرم)

اندازه‌گیری مواد فرار

طبق استانداردASTM-E872-82 نمونه در کوره الکتریکی با دمای ۲۰±۹۵۰ درجه سیلسیوس به مدت ۷ دقیقه قرار گرفته و مقدار کاهش نسبی وزن نمونه به عنوان مواد فرار تعیین شد.

اندازه‌گیری عناصر کربن، هیدروژن و نیتروژن

طبق استاندارد ASTM-D-5291 نمونه‌ها در دستگاه CHN مدلECS4010 قرار داده وسه عنصر نمونه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

اندازه‌گیری عنصر گوگرد

طبق استاندارد ASTM-E775-15 با استفاده از دستگاه بمب کالیمتری مدل PARR1261 و عمل تیتراسیون مقدار عنصر گوگرد اندازه‌گیری شده است.

اندازه‌گیری اکسیژن

طبق فرمول(۳) ارائه شده توسط باندی[1] و همکاران (۲۰۱۱) محاسبه شد[۱۷و۱۸].

(۳) (درصد کربن + درصد نیتروژن+ درصد گوگرد + درصد هیدروژن + درصد خاکستر)-۱۰۰= درصد اکسیژن

اندازه‌گیری کربن ثابت

کربن ثابت شامل باقی‌مانده جامد قابل سوختن یک ماده پس از خارج شدن مواد فرار آن است. این ویژگی با کسر مجموع درصدهای رطوبت، مواد فرار و خاکستر از صد طبق فرمول۴ محاسبه شده‌است.

(۴) (درصد رطوبت + درصد خاکستر+ درصد مواد فرار) − ۱۰۰= کربن ثابت

اندازه‌گیری ارزش حرارتی

ارزش‌حرارتی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه بمب کالیمتری و روابط ریاضی محاسبه شد. در روش اول برای اندازه‌گیری ارزش حرارتی نمونه‌ها از دستگاه بمب کالریمتری ساخت شرکت مهرتجهیز ایران استفاده شد. این دستگاه نمونه سوخت جامد را سوزانده و گرمای حاصله را به جرم مشخص از آب منتقل می‌کند .با توجه به وزن نمونه سوخته شده، و افزایش دمای آب، عدد کالری محاسبه می‌شود. در روش دوم‌از فرمول اصلاح شده دالونگ[2] برای محاسبه ارزش‌حرارتی استفاده‌شد.که بصورت رابطه-های ۵ و ۶ می‌باشند. در صنایع دو نوع ارزش‌حرارتی استفاده می‌شود. که ارزش‌حرارتی‌بالایی[3] و ارزش‌حرارتی‌پایینی[4] نام دارند [۱۱].

$$HHV\left(\frac{KJ}{kg}\right) = 337\mathrm{C} + 1419\left(H2 - \frac{O2}{8}\right) + 93S + 23N \quad (5)$$

$$LHV\left(\frac{MJ}{kg}\right) = HHV\left(\frac{Mj}{Kg}\right) - 0.0244(W + 9H) \quad (6)$$

نتایج

پسماندهای ورودی کارخانه کودآلی رشت عمدتاً شامل پسماندهای خانگی و پسماندهای جمع‌آوری شده از برخی مراکز تجاری است که خصوصیات پسماند آن شبیه پسماند خانگی است. با توجه به جدول آنالیز فیزیکی پسماند خام ورودی کارخانه (جدول۱) درحدود ۶۰ درصد پسماند از مواد غذایی تشکیل شده که قابلیت کمپوست را دارد و ۲۸ درصد آن از مواد قابل سوختن تشکیل شده است که نتایج آنالیز فیزیکی این مواد که عمدتاً به‌صورت کرک جداسازی شده‌اند در جدول۲ مندرج است.

[1] Bundy
[2] Dulong
[3] HHV
[4] LHV

جدول۱- آنالیز فیزیکی پسماند خام

Table 1 - Physical analysis of raw waste

Waste Type	Percentage
Wet Waste	58.72
Paper and cardboard	12.37
Cloth and textiles	9.4
Plastic	4.5
Wood	0.5
Types of peat	1.63
Iron	1
Non-ferrous metal	0.1
Glass	1.53
Other materials	10.25

جدول۲- آنالیزفیزیکی کرک‌های حاصل از مواد دورریز

Table 2- Physical analysis of fluffs obtained from reject materials

Waste Type	Percentage
Paper and cardboard	45
Cloth and textiles	30
Plastic	20
Wood	5
Sum	100

جدول۳- نتایج تجزیه وتحلیل نهایی پسماندهای مورداستفاده در ساخت‌سوخت‌جامد

Table3 - The results of the Ultimate analysis of the waste used in the manufacture of solid fuel

The elements(%)	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	Sulfur	Oxygen
Organic fertilizer (compost)	15	3	1.5	0.2	16.3
Fluff	40.5	5.8	0.9	0.3	37.5

جدول۴- نتایج تجزیه و تحلیل گروهی پسماندهای مورد استفاده در ساخت‌سوخت‌جامد

Table 4- The results of the Proximate analysis of the wastes used in the manufacture of solid fuel

The parameters	Density	Moisture	Ash	Volatile Matter	FixedCarbon	Minimum Calorific Value	Maximum Calorific Value
Unit	gr/cm^3	%	%	%	%	MJ/Kg	MJ/Kg
Organic fertilizer (compost)	1.2	20	64	10.5	5.5	5.32	6.45
Fluff	0.36	11.5	15	48.2	25.3	13.73	15.28

بحث

همان‌طور که در جدول آنالیز فیزیکی پسماند خام (جدول۱) شهر رشت مشاهده می‌شود. حدود ۶۰ درصد از پسماند را مواد غذایی تشکیل می‌دهد این مواد دارای رطوبت بالا و ارزش‌حرارتی پایین می‌باشند که باعث بروز مشکلاتی در تجهیزات پردازش و در نتیجه افزایش هزینه‌ها می‌شوند. بنابراین فقط می‌توان از ۲۸/۴ درصد پسماند ورودی که قابلیت احتراق دارند برای تولید سوخت جامد استفاده نمود. البته گزارش‌شده که در شهر تهران ۱۵و در کشور هند ۲۴ درصد پسماند شهری قابل تبدیل به سوخت است[۳]. گزارش شده که سرانه تولید پسماند شهر رشت حدود ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ گرم در روز است که این مقدار با توجه به جمعیت ثابت و شناور در ماه‌های مختلف فرق می‌کند. درحال حاضر میزان پسماند روزانه شهر رشت ۷۰۰ تن برآورد می‌شود که در حدود ۲۰۰ تن آن از مواد قابل احتراق تشکیل‌شده و می‌تواند در تولید سوخت جامد کاربرد داشته‌باشد[۵]. علاو برآن طبق پژوهش حاضر از مواد دورریز کارخانه (شکل- ۳a) به مقدار۲۰ درصد می‌توان مواد کرک مانند استخراج نمود (شکل- ۳b) که قابلیت احتراق دارند. آنالیز فیزیکی این مواد در جدول ۲ نشان می‌دهد که عمده این ترکیبات از کاغذ و مقوا و پارچه هستند که امکان تفکیک از مبدا کارخانه را نداشته‌اند.

برطبق گزارش طرح مدیریت پسماند حوزه مرکزی‌گیلان ارزش‌حرارتی پسماند ورودی به دفنگاه زباله (MJ/kg) ۵/۹۸۶ است[۵]. ارزش‌حرارتی اگر کمتر از (MJ/Kg) ۶ باشد برای احداث نیروگاه‌زباله سوز مناسب نیست. درنتیجه با توجه به اینکه در شهر رشت ارزش‌حرارتی پسماند خام پایین است برای احداث نیروگاه مناسب نیست. پایین بودن ارزش حرارتی کاربرد مستقیم آن را غیرقابل قبول می‌کند برای رفع این مشکل بایستی بصورت سوخت‌جامد از آن استفاده نمود. سوخت جامد کرکی نوعی از سوخت جامد است که می‌توان از طریق جداسازی مکانیکی زباله شامل جدا کردن مواد قابل بازیافت بطور دستی و به وسیله آهنربا، و بدنبال آن خرد کردن مواد در دو مرحله و جداسازی کرک‌ها و پلاستیک‌ها از طریق هوادهی و فشرده‌سازی تولید کرد. مطابق استاندارد ASTM-E828-81 هفت نوع سوخت‌جامد وجود دارد برای تولید سوخت‌جامد از کرک‌های مواد دورریز کارخانه می‌توان سوخت جامد از نوع کرکی به همراه فشرده‌سازی مطابق روش نوع تراکمی عمل‌کرد. گزارش شده که بهترین نوع سوخت جامد از پسماند را نوع کرکی تشکیل می‌دهد. این نوع سوخت ترکیبی از اجزای دارای انرژی و مواد آلی است که با تنظیم ارزش حرارتی، قابلیت استفاده در کوره‌های دوار سیمان، آجرپزی، صنایع چوب و کاغذ و نیز نیروگاه‌های حرارتی و زباله‌سوزها را پیدا خواهدکرد[۱۱]. با توجه به جدول ۲ بیشترین ترکیب سوخت جامد کرکی را کاغذ و مقوا، پلاستیک و پارچه تشکیل می‌دهد که دارای ارزش حرارتی بالایی هستند. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود بین عناصر کلیدی در انرژی حرارتی سوخت جامد حاصل از مواد آلی و کرک‌ها تفاوت معنی‌داری وجود دارد (P<۰/۰۵) مقدار کربن و اکسیژن کرک‌ها بیش از دو برابر و هیدروژن این مواد در حدود دو برابر مواد آلی است. این عناصر در سوختن و تولید انرژی اثر مستقیم دارند. برای تولید انرژی از پسماند مقدار زیادتر کربن، هیدروژن و اکسیژن ارجح‌تر و برعکس مقدار کمتر نیتروژن و گوگرد مناسب‌تر است. چهار عنصر اصلی کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن در همه زیست توده‌ها وجود دارند مقدار زیاد کربن به عنوان یک مزیت به‌دلیل ارزش‌حرارتی بیشتر در احتراق و گازی‌سازی مطرح است. با آزاد شدن انرژی حرارتی، عناصر کربن، هیدروژن، اکسیژن به صورت دی اکسیدکربن و آب از زیست توده آزاد می‌شوند مقدار انرژی آزاد شده به نسبت وزنی این عناصر و رطوبت زیست توده بستگی دارد و بخشی از آن صرف تبدیل آب موجود در زیست توده به بخارآب می‌شود[۱۷،۱۸]. مقدار گوگرد پسماند از نظر تولید آلاینده‌های گوگرددار مثل دی‌اکسید گوگرد از محل‌گازهای خروجی دیگ بخار یا کوره اهمیت دارد[۱۰]. امروزه استفاده از فیلترهای مختلف، از جمله فیلترهای حاوی کربن فعال می‌توانند درصد قابل توجهی از آلاینده‌های خروجی را کاهش دهند[۴]. نتایج تحلیل گروهی سوخت‌های مشتق شده از مواد آلی و کرک‌های حاصل از مواد دورریز در جدول شماره ۴ نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری بین ویژگی‌های هر دو گروه وجود دارد (P<۰/۰۵). پسماندهای قابل احتراق دانسیته حجمی پایین دارند که این مسئله سبب مشکلات عمده در ذخیره‌سازی، جابجایی و حمل ونقل برای فرآوری بعدی می‌شود. کمترین دانسیته مربوط به کاه‌و باگاس ۰/۰۴gr/cm3 و بیشترین دانسیته ۰/۲۵ gr/cm3 مربوط به پسماندهای چوبی است[۱۶]. متراکم کردن فرآیندی است که با اعمال فشار، دانسیته حجمی ماده را افزایش وشکل آن را برای کاربردهای زیست انرژی بعدی مناسب می‌سازد. تبدیل ذرات پسماند به شکل حبه یا بریکت می‌تواند کارایی مبدل‌های حرارتی را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد[۱۷و۱۸]. ازمزایای مکانیکی بریکت کردن می‌توان به افزایش دانسیته حجمی مواد، حمل ونقل آسانتر و ارزان‌تر،افزایش مقدارانرژی به ازای هر واحد حجمی ماده، بدست آمدن یک محصول همگن از مخلوط ناهمگن ماده و مقدار انرژی یکنواخت به ازای هر واحد از احتراق ماده اولیه را برشمرد[۲]. سوخت مشتق شده از مواد آلی (شکل۴) دارای وزن مخصوص، رطوبت و خاکستر بیشتر و مواد فرار، کربن ثابت و انرژی حرارتی کمتر نسبت به سوخت مشتق شده از کرک‌های دورریز می‌باشد. زیاد بودن درصد خاکستر در مواد آلی باعث افزایش وزن مخصوص شده است زیادی خاکستر به‌علت مواد معدنی حاصل از وجود موادی مانند شیشه، خاک و نخاله و فلزات در مواد آلی است. در سال ۲۰۱۷ پناهنده و همکاران [۱۱] گزارش کردند که مقدار خاکستر در دور ریز پسماندهای شهر تهران ۲۱ درصد است که بیش از حد استاندارد(۱۵>) است. برای کاهش مقدار خاکستر می‌توان با کاهش یا حذف موادی که قابلیت احتراق بالایی ندارند مانند شیشه، خاک و نخاله و فلزات که بیشترین مقدار خاکستر را به‌ترتیب ۴۰/۱۹، ۱۸ و ۱۳/۳۲ درصد را دارند میزان خاکستر کل را کاهش داد. زیاد بودن درصد

خاکستر پسماند به عنوان یک پارامتر منفی در تولید انرژی حرارتی مطرح است. بررسی‌ها نشان می‌دهدکه تأثیر منفی خاکستر به جای مانده از پسماندها پس از سوختن‌برای تولید انرژی به دلیل تجمع در سطوح انتقال حرارت دیگ بخار، مشکلات تمیزکردن وحتی از کار افتادن قسمت‌های مکانیکی مبدل‌های حرارتی را به همراه‌داشته باشد[۱۳،۱۹].

در سوخت‌های جامد، به دو شکل رطوبت می‌تواند وجود داشته باشد. یکی آب آزاد درخلل و فرج و دیگری آب پیوندی که بخشی از ساختار شیمیایی ماده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود میزان رطوبت سوخت حاصل از مواد آلی بیشتر از سوخت‌های حاصل از کرک‌های دورریز است. رطوبت اثر زیادی بر ویژگی‌های سوختن پسماند دارد. در طول احتراق، رطوبت موجود در پسماند گرما را با تبخیر شدن و گرم کردن بخار حاصله جذب خواهد کرد. و بطور عمده‌ای ارزش گرمایی سوخت کاهش می‌یابد. مواد فرار اجزای کربن، هیدروژن و اکسیژن موجود در پسماند را نشان می‌دهد که وقتی گرم می‌شود به بخار تبدیل می‌شوند که معمولاً مخلوطی از هیدروکربن‌های کوتاه و بلند زنجیر هستند. مقدار مواد فرار بدست آمده برای کرک‌های دورریز تقریباً پنج برابر مقدار مواد فرار مواد آلی است. مواد فرار شامل گازهای CO، CO_2 و CH_4 هستند که با اندازه‌گیری میزان افت جرم پسماند (به جز رطوبت) در اثر تخریب حرارتی، می‌توان مقدار آن را اندازه‌گیری نمود. رفتار گرمایی سوخت جامد تحت تأثیر میزان مواد فرار است. سوخت‌های با کیفیت پایین از قبیل سوخت‌های حاصل از کود حیوانی تمایل به داشتن مواد فرار کم هستند که منجر به احتراق بدون شعله و با دود می‌شوند. بنابر این سوخت‌های مشتق شده از کرک‌های دورریز بخاطر رطوبت و خاکستر کمتر و مواد فرار زیاد کیفیت بالایی نسبت به سوخت مشتق شده از مواد آلی کارخانه دارند. پس از اینکه مواد فرار و رطوبت آزاد شدند، خاکستر وکربن ثابت باقی می‌مانند همان‌طور که درجدول ۴ مشاهده می‌شود مقدار کربن ثابت سوخت مشتق شده از کرک‌های دورریز در حدود پنج برابر سوخت مشتق شده از موادآلی است. ضرورتاً کربن ثابت یک سوخت، درصد کربن قابل دسترس برای احتراق زغال است که این مقدار با مقدار کل کربن در سوخت (کربن نهایی) برابر نیست زیرا مقدار قابل توجهی به عنوان هیدروکربن‌ها در مواد فرار آزاد می‌شود. کربن ثابت به نسبتی از زغال دلالت دارد که بعد از فاز مواد فرارزدایی باقی می‌ماند. مقدار کربن ثابت در فرآیندهای گازی‌سازی اهمیت زیادی دارد. به طوری‌که هرچه مقدار کربن ثابت پسماند بیشتر باشد. مقدار قیر تولید شده کمتر ومقدار زغال بیشتر خواهد شد[۲۰،۹]. مقدار کربن ثابت کرک و مواد آلی به ترتیب ۲۵/۳ و ۵/۵ درصد بدست آمده است. اجزای تشکیل دهنده سوخت جامد از این جهت که سوختن آن چه مقدار می‌تواند انرژی حرارتی تولید کند دارای اهمیت است. یکی از موارد مهم و قابل توجه در ارتباط با سوخت جامد مقایسه انرژی‌حرارتی آن با سایر سوخت‌هاست. البته جنبه‌های اقتصادی، زیست محیطی و آلودگی آن نیز دارای اهمیت است. همان‌طور که درجدول ۴ مشاهده می‌شود میزان انرژی حرارتی سوخت‌جامد تولید شده از کرک‌های دورریز بیش از دو برابر انرژی‌حرارتی سوخت‌جامد تولیدی از مواد آلی است. دلیل آن با توجه به آنالیز فیزیکی کرک‌ها در جدول۲ مشخص می‌شود که تمام اجزای تشکیل‌دهنده آن از مواد قابل احتراق نظیر کاغذ ومقوا، پارچه و مواد پلاستیکی است. درحالی‌که مواد آلی با داشتن ۶۴ درصد خاکستر بیانگر این واقعیت است که بیشتر اجزای دهنده را مواد غیرقابل اشتعال نظیر شیشه، خاک و نخاله و فلزات تشکیل می‌دهد. پائین بودن درصد رطوبت و درصدخاکستر و همچنین مناسب بودن شرایط فیزیکی وشیمیایی سوخت‌جامد حاصل از کرک‌های دورریز باعث شده‌است که انرژی‌حرارتی حاصل از سوختن آن بیش از موادآلی باشد. برای ارزیابی نتایج روابط ریاضی درمحاسبه انرژی‌حرارتی نمونه‌ها از روش بمب کالیمتری استفاده شد که بین نتایج این دوروش تفاوت معنی‌داری درسطح اطمینان ۹۵درصد ازطریق آزمون تی مستقل مشاهده نشد($P>0/05$). برای هردو نوع ماده اولیه سوخت‌جامد ارزش حرارتی بالایی و ارزش حرارتی پایینی در جدول ۴ قابل مشاهده است. اختلاف این دو نوع ارزش‌حرارتی درگرمای نهان تبخیر آب است که در اولی به حساب می‌آید ولی دردومی در نظر گرفته نمی‌شود.

نتیجه‌گیری

بطورکلی از بخش قابل اشتعال مواد دورریز کارخانه کودآلی رشت می‌توان محصولی تولید کرد که نسبت به زباله همگن تر و پایدارتر است. این ماده را می‌توان سوخت جامد فشرده شده از نوع کرکی دانست. که از تراکم کرک‌های حاصل از کاغذ و مقوا، پلاستیک، پارچه و چوب مواد دورریز کارخانه بدست آمده است. این سوخت دارای ارزش‌حرارتی مناسب (۱۵/۲۸ MJ/Kg) و در حد استاندارد (۱۵ MJ/Kg) و فاقد بوی تعفن است. در واقع یک نوع سوخت ثانویه است که ارزش‌حرارتی آن به ترکیب و عناصر تشکیل دهنده آن وابسته است. علاوه‌بر ارزش‌حرارتی سوخت جامد که فاکتور مهمی است. جنبه‌های اقتصادی، زیست محیطی و آلودگی آن نیز اهمیت دارد که بایستی در بررسی‌های آینده به آن توجه شود.

تشکر و قدردانی

از استانداری محترم استان گیلان بابت حمایت مالی صورت گرفته در اجرای این پروژه تشکر و قدردانی بعمل می‌آید.

References

[1] A.Neville,The Growing Role of Waste-to-Energy in the U.S. *Power Magazine*,vol.153,no.7,pp.46-47, July 2009.

[2] J.S.Tumuluru, A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. Biofuels, *Bioproducts and Biorefining*,vol.5,no.6,pp.683-707,2011.

[3] Gilan Science and Technology Park., "Comprehensive Waste Management Plan", Central Gilan Region, Rasht Municipality Waste Management Organization,pp.10-30,2010.(In Persian).

[4] J.Nasiri, Study and comparison of electricity generation technologies from municipal solid waste, Third National Conference on Waste Management in Tehran, Organization of Municipalities and Village Administrations of the Country, Environmental Protection Organization, 2007. (In Persian)

[5] F.Abedinzadeh,M. Monavari, Study of Solid Waste Management in Industrial Estate of Rasht, *Environmental Sciences* ,vol.4,no.4,pp.101-118 ,2007(In Persian).

[6] D.Indrawati, M.Lindu, P.Denita, Potential of solid waste utilization as source of refuse derived fuel (RDF) energy (case study at temporary solid waste disposal site in West Jakarta). The 4th International Seminar on Sustainable Urban Development. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 106 (2018) 012103, 2018. doi :10.1088/1755-1315/106/1/012103

[7] A.Mohammadi, A.Ebrahimi,M.Amin, Feasibility energy recovery potential of municipal solid waste in Northwest of Iran,*Journal of Environmental health engineering*,vol.1,pp.71-74, 2012.(In Persian)

[8] O. A.Oyelaran, B.O.Bolaji, M. A.Waheed and M. F. Adekunle, Characterization of Briquettes Produced from Groundnut Shell and Waste Paper Admixture. *Iranica Journal of Energy and Environment*, vol.6,no.1,pp. 34-38, 2015. DOI:10.5829/idosi.ijee.2015.06.01.07

[9] A.R.D.Romallosa and E.Kraft,Feasibility of Biomass Briquette Production from MunicipalWaste Streams by Integrating the Informal Sector in the Philippines. *Resources*,vol.6,no.1,pp.1-19,2017. doi:10.3390/resources6010012

[10] F.Aliaghaei, M.Pazoki, F.Farsad, I.Tajfar, Evaluating of Refuse Derived Fuel (RDF) Production from Municipal Solid Waste (Case Study: Qazvin Province). *Environmental Energy and Economic Research*,vol.4,no.2, pp.97-109,2020. DOI 10.22097/eeer.2020.187286.1088

[11] A. Panahandeh, G.Asadollahfardi,M.Mirmohammadi,Technical and economic study of using Tehran rejected solid waste as a fuel in cement kilns. *Journal of Environmental Science Technology*,vol.19,no.4,pp.495-506,2017(In Persian)

[12] T.Dong and B.K.Lee, Analysis of potential RDF resources from solid waste and their energy values in the largest industrial city of Korea,*Waste Management*,vol.29,pp.1725-1731, 2009.

[13] Z.Q. AlKhayat, Bio-charcoal production from municipal organic solid wastes. *Materials Science and Engineering*, 2017, doi:10.1088/1757-899X/227/1/012003

[14] T.Espinoza-Tellez, J.Bastías, R.Quevedo-León, E.Valencia-Aguilar, H.Aburto, D.Díaz-Guineo, M.Ibarra-Garnica, O.Díaz-Carrasco, Agricultural, forestry, textile and food waste used in the manufacture of biomass briquettes: a review. *Scientia Agropecuaria* ,vol.11,no.3, pp.427-437, 2020

[15] B.Boundy, S.W.Diegel, L.Wright and S.C.Davis , Biomass Energy Data Book, Office of the biomass program energy efficiency and renewable energy U.S. department of energy, Roltek, Inc., USA, 2011, 254 p.

[16] N.Mohammadi,E.Afra, Briquettes and pellets, Solid fuels from biomass, Alternative energy sources, *Journal of Renewable and New Energy*,vol.7,no.1,pp.12-19,2020.(In Persian)

[17] S.Mahdavi,Comparison of thermal energy production from different wood biomass. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research* , vol.34,no.3,pp.313-325,2019.(In Persian)

[18]S.Mahdavi,Compariison off non--woody biiomass properttiies ffor energy generattiion. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, vol.10,no.4,pp.617-628,2020.(In Persian)

[19] M. Beckmann, M.Pohl, D.Bernhardt and K.Gebauer; "Criteria For Solid Recovered Fuels As a Substitute For Fossil Fuels – A Review",Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Power Engineering, Dresden, *Germany,Waste Management & Research*, vol.30, pp. 354 – 369, April 2012.

[20] P.Krizan,M.Matus,L.Soos, J.Kers, P.Peetsalu,U. Kask and A.Menind, Briquetting of municipal solid waste by different technologies in order to evaluate its quality and properties, *Agronomy Research Biosystem Engineering*, Special Issue 1, 115-123. 2011

English Abstract

Study of the characteristics of solid fuel derived from municipal waste in Rasht city

Javad Torkaman[1*]

1- Associate Professor of Forestry Department, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Iran,torkaman@guilan.ac.ir
*Corresponding author
(Received: 2025/07/22, Received in revised form: 2025/08/20, Accepted: 2025/09/29)

Abstract
Solid biofuel includes energy produced from all cellulosic waste, which is considered a clean and cheap fuel. The aim of this study is to obtain a solid fuel derived from the municipal waste of Rasht city. For These materials were separately prepared in the process of crushing, grinding, and compressing solid fuel. This purpose, organic materials (compost) and reject materials of Rasht organic fertilizer factory were sampled. The properties of the manufactured samples were examined through proximate analysis and ultimate analysis. In group analysis, the moisture content, volatile compounds, fixed and carbon content were measured, and in final analysis, the amount of carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen and sulfur elements were measured. The calorific value of the samples was also calculated using a bomb calorimetry device and mathematical equations. About 60% of the waste consists of food materials that have a low calorific value in the form of compost. Therefore, only 28.4% of the input waste which are combustible can be used to produce solid fuel, which is mainly fluff. The best type of fuel derived from waste in this study is in the form of compressed fluff. The most common composition of it is paper and cardboard, plastic and fabric, which have a high calorific value. This fuel has a suitable calorific value (15.28 MJ/kg).

Keywords: Waste, biofuel, calorific value, Proximate analysis , Ultimate analysis