کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران
دانشگاه تهران، تهران
۲۶ و ۲۷ بهمن‌ماه ۱۳۹۵

1204P-NWWCE

بررسی و مقایسه‌ی فرآیندهای بازیافت انرژی از لجن فاضلاب شهری

طناز عابدزادگان[۱]، آزاده همتی[۲]، طیبه باقری لطف‌آبادی[۳]

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، تهران – دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران

۲-استادیار، تهران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران

۳-استادیار، پژوهشگاه ملی و مهندسی ژنتیک و زیست‌فناوری، کرج

t.abedzadegan@yahoo.com

خلاصه

تولید روز افزون پسماند و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از آلودگی آن‌ها در اثر مدیریت غیراصولی مسئله مهمی می‌باشد .لجن نوعی پسماند به حساب می‌آید،که از نظر بازیافت، نرخ تولید انرژی قابل قبولی دارد. مدیریت لجن حاصله از تصفیه‌خانه‌ها، عمده‌ترین بخش مدیریت فاضلاب را تشکیل می‌دهد .با توجه به این که مصرف تصاعدی انرژی در دهه‌های اخیر منجر به بحران انرژی در جهان شده است، روش‌های تصفیه تکمیلی لجن با هدف بازیافت انرژی، مورد توجه قرار می‌گیرد. در این مقاله روش‌های مختلف استفاده از لجن به‌عنوان منبع تولید انرژی مورد مقایسه قرار گرفته است. روش‌های مختلف بازیافت انرژی از لجن فاضلاب شامل سوزاندن، گازی‌سازی، پیرولیز، و هضم بی‌هوازی می باشد.بهترین روش تولید انرژی از لجن روش هضم بی‌هوازی است. فرآیندهای سوزاندن، پیرولیز و گازی‌سازی، نیاز به دمای بالا، کنترل پیوسته فرآیند، پالایش و بهسازی محصولات و افزودن مواد کمکی دارند که هزینه سرمایه‌گذاری بسیار زیاد است. هضم بی‌هوازی، در مقایسه با سایر روش‌ها در دمای کم کار می‌کند و بسیاری از پیچیدگی‌ها را ندارد به همین دلیل هزینه سرمایه‌گذاری آن پایین است و مهم‌تر اینکه نیاز به آبگیری و تبخیر کامل آب از لجن وجود ندارد. بر این اساس، این روش از نقطه نظر بازیابی انرژی برای لجن مناسب‌تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: هضم بی‌هوازی، گازی‌سازی، پیرولیز، سوزاندن لجن، تولید انرژی از لجن.

۱. مقدمه

در زندگی روزمره بشر، پسماندها به دو دسته کلی پسماند جامد و فاضلاب تقسیم می‌شوند. در این تقسیم بندی هر نوع ماده جامد، گاز و مایع که بطور مستقیم یا غیرمستقیم از فعالیت انسان حاصل شده و از نظر تولیدکننده زاید تلقی می‌شود، پسماند محسوب می‌شود. از طرفی خطرناک بودن لجن مدیریت و دفن آن را مشکل می‌نماید. بر خلاف پساب‌های خروجی از تصفیه‌خانه‌ها که معمولا کیفیتی مطلوب برای تخلیه به طبیعت دارند ، لجن که در حقیقت حاصل تغلیظ آلاینده‌های موجود می‌باشد ، به هیچ وجه به صورت خام و تصفیه نشده، مجوز ورود به محیط زیست را ندارد. به عبارت دیگر، رها کردن لجن در محیط زیست به دلیل وجود مواد فسادپذیر و میکروب‌های بیماری‌زا ، منجر به اشاعه بیماری‌های عفونی و تخریب محیط زیست می‌شود. مدیریت لجن حاصله از این تصفیه‌خانه‌ها، عمده‌ترین بخش مدیریت فاضلاب را تشکیل می‌دهد. انجام این امر مستلزم صرف هزینه‌های سنگین و تلاش مستمر می‌باشد. لجن خام حاوی بیش از ۹۵ درصد آب است که در حالت کلی برای پردازش آن از فرآیندهایی چون تغلیظ ، گندزدایی ، تثبیت ، حالت‌دهی و آبگیری، استفاده می گردد [1]. از طرف دیگر مصرف تصاعدی انرژی در دهه‌های اخیر منجر به بحران انرژی در جهان شده است، دلایلی مانند آلودگی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، مسائل زیست‌محیطی و رو به اتمام گذاشتن این منابع باعث شده که بشر به دنبال استفاده از منابع انرژی نوین باشد. به طور کلی، منابع انرژی قابل تجدید در جهان توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند زیرا پایا هستند و در بسیاری از موارد، کیفیت محیط زیست را نیز بهبود می‌بخشند[2].

این دو مسئله موجب شده است که روش‌های تصفیه تکمیلی لجن با هدف بازیافت انرژی مورد بررسی قرار گیرد. شایان ذکر است فاز جامد لجن حاوی مقادیر قابل توجه از مواد آلی می‌باشد که می‌توان از آن به‌عنوان منبع تولید انرژی استفاده کرد. از روش‌های تصفیه لجن با هدف بازیافت انرژی می‌توان به سوزاندن ، آتشکافت یا پیرولیز[1]، گازی‌سازی[2]، آبگون کردن[3] ، اکسیداسیون آب فوق بحرانی[4] و هضم بی‌هوازی[5] اشاره کرد. در این مقاله روشهای سوزاندن، آتشکافت، گازی‌سازی و هضم بی‌هوازی با یکدیگر مقایسه شده است[2].

۲-روش های تولید انرژی از لجن

۲-۱- هضم بی‌هوازی

هضم بی‌هوازی یکی از قدیمی‌ترین فرآیندهای مورد استفاده در تثبیت لجن است.این فرآیند مواد جامد آلی را در غیاب اکسیژن به محصولات نهایی مانند متان، دی‌اکسیدکربن و مواد بی‌ضرر تبدیل می‌کند.کاربردهای اصلی این فرآیند، تثبیت لجن‌های غلیظ حاصل از تصفیه‌ی فاضلاب و نیز تصفیه‌ی برخی مواد زائد صنعتی بوده است. هضم بی‌هوازی از چندین مرحله‌ی متوالی واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی تشکیل شده است.این فرآیند به سه فاز کلی تقسیم می‌شود: هیدرولیز،تخمیر یا اسیدسازی و متان‌سازی. مهم‌ترین عوامل محیطی موثر بر نرخ ۳ فاز واکنش‌های بی‌هوازی عبارتند از : زمان‌ماند جامدات (SRT)[6] ، زمان‌ماند هیدرولیکی (HRT)[7]، دما، قلیائیت، pH و حضور مواد بازدارنده مانند مواد سمی[3].

بیش‌تر هاضم‌های بی‌هوازی طوری طراحی شده‌اند که در بازه دمایی مزوفیلیک ۳۰ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد کار کنند که ۳۵ درجه سانتی‌گراد معمول‌ترین دماست. بعضی هاضم‌ها طوری طراحی شده‌اند که در بازه دمایی ترموفیلیک ۵۰ تا ۵۷ درجه‌ی سانتی‌گراد کار کنند.تولید گاز در هاضم نتیجه‌ی مستقیم تخریب مواد جامد فرار است. مقادیر ویژه تولید گاز برای لجن در کل بین $m^3/Kg_{vs\text{-}destroyed}$ ۱/۲ –۰/۸ است. اگر لجن درصد زیادی از چربی و روغن داشته باشد که سرعت هضم لجن آن‌ها کمتر است و SRT لازم نیز برای این مواد تأمین شود، مقدار ویژه تولید گاز افزایش می یابد. یک فرآیند هضم در شرایط مساعد،گازی با ۶۵ تا ۷۵ درصد متان،۳۰ تا ۳۵ درصد دی‌اکسید کربن و مقادیر بسیار کمی نیتروژن، هیدروژن و هیدروژن سولفید تولید می‌کند.ارزش حرارتی گاز هاضم تقریباً MJ/m^3 ۲۴ است،در حال که این مقدار برای متان برابر MJ/m^3 ۲۸ است.بیوگاز تولید شده در فرآیندهای هضم بی‌هوازی می‌تواند برای اهداف زیر بکار رود[4] :

- سوخت موتورهای تولید برق
- تولید همزمان برق و حرارت
- کاربرد گاز به طور مستقیم در بویلر ها یا تجهیزات گرمایشی
- بهبود مشخصات بیوگاز به گاز طبیعی جهت استفاده در موتور وسایل نقلیه و یا استفاده در شبکه گاز محلی

۲-۲- سوزاندن با هدف بازیافت انرژی

سوزاندن یا احتراق کامل به معنای اکسیداسیون گرماده سریع عناصر قابل احتراق در لجن می باشد. سوزاندن لجن شامل تبدیل کلی جامدات آلی به محصولات نهایی اکسید شده شامل دی‌اکسیدکربن، آب و خاکستر است. در حضور اکسیژن، لجن آبگیری شده در دمای ۴۲۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (۷۸۸ تا ۹۳۲ درجه فارنهایت) مشتعل می‌شود. برای احتراق کامل مواد جامد آلی، دمای ۷۶۰ تا ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد (۱۴۰۰ تا ۱۵۰۸ درجه‌ی فارنهایت) نیاز است. ذرات ریز و دیگر گازها نیز در خروجی وجود دارند که روش تصفیه گازهای خروجی را قبل از تخلیه به جو تعیین می‌کنند[4].

---

[1] Pyrolysis
[2] Gasification
[3] Liquefaction
[4] Super Critical Water Oxidation
[5] Anaerobic Digestion
[6] Solid Retention Time
[7] Hydraulic Retention Time

فرآیند سوزاندن لجن در کوره‌ها شامل گرم کردن، خشک کردن، تقطیر مواد جامد فرار، احتراق مواد آلی ماده‌ی سوختی و تکلیس[۱] به منظور سوزاندن کربن باقی‌مانده می باشد. گرم کردن لجن در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (۲۱۲ درجه فارنهایت) و خشک کردن کامل آن در دمای تقریباً ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (۳۹۲ درجه فارنهایت) اتفاق میافتد. هم‌چنین این مقدار گرما بر انتخاب اندازه‌ی تجهیزات اصلی و کمکی تاثیر می‌گذارد و در نتیجه هزینه کلی را تعیین می‌کند. در مرحله‌ی تبخیر رطوبت در ناحیه‌ی خشک کردن، مواد جامد فرار با رطوبت آزاد می‌شوند که گاهی به تولید بوهای آزاردهنده منجر می‌شود. به علت تابش حرارتی شعله و دیوارهای ملتهب اتاقک احتراق، همچنین انتقال حرارت همرفتی از گازهای خروجی، احتراق لجن در دماهای بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (۳۹۲ تا ۹۳۲ درجه فارنهایت) اتفاق می‌افتد. تکلیس بخش خاکستر لجن با خنک کردن تا دمایی که بتوان آن را از سایت خارج کرد، تکمیل می‌شود [4].

برای احتراق کامل مواد جامد آلی، دمای ۷۶۰ تا ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد نیاز است.در فرایند سوزاندن لجن، آب موجود در لجن به طور کامل تبخیر شده و مواد آلی آن در دمای بالا به CO_2 و H_2O اکسید می‌شود. از آنجا که واکنش تبخیر آب بسیار گرماگیر است، به منظور تداوم احتراق برای لجن با درصد پایین از مواد جامد، قبل از سوزاندن نیاز است که آبگیری از لجن انجام شود و یا سوخت اضافی (پوست درخت، چوب و ضایعات و روغن، و غیره) به لجن اضافه شود[5].

علاوه بر میزان رطوبت، شاخص مهم دیگر برای سوزاندن لجن، ارزش حرارتی لجن است. ارزش حرارتی بیانگر مقدار گرمای آزاد شده به ازای جرم واحد مواد جامد است. لجن دارای ارزش حرارتی پایین‌تری نسبت به لجن اولیه می‌باشد. ارزش حرارتی لجن درحدود MJ/kg-ds ۲۲-۱۶می-باشد. پایین بودن ارزش حرارتی و میزان رطوبت زیاد در لجن باعث می‌شود این سیستم‌ها برای تبخیر آب به سوخت کمکی زیادی نیاز داشته باشند. هزینه‌های اضافی چنین سیستم‌هایی به علت افزایش قیمت سوخت،منجر به از کار افتادن بسیاری از این سیستم‌ها شده است.

۲-۳- گازی‌سازی

تبدیل به گاز کردن شامل، تجزیه حرارتی کامل زیست توده به گاز قابل احتراق، مواد فرار و خاکستر در یک راکتور بسته می‌باشد. گازی‌سازی تبدیل مواد آلی به سوخت‌گازی شامل گازهای سنتزی (CO، CO_2، H_2 و CH_4) می باشد. در این فرآیند یک ماده اضافی به نام عامل گازی کننده[۲] نیز وارد راکتور می‌شود. این عامل می‌تواند اکسیژن، هوا، بخار یا هیدروژن باشد [2].

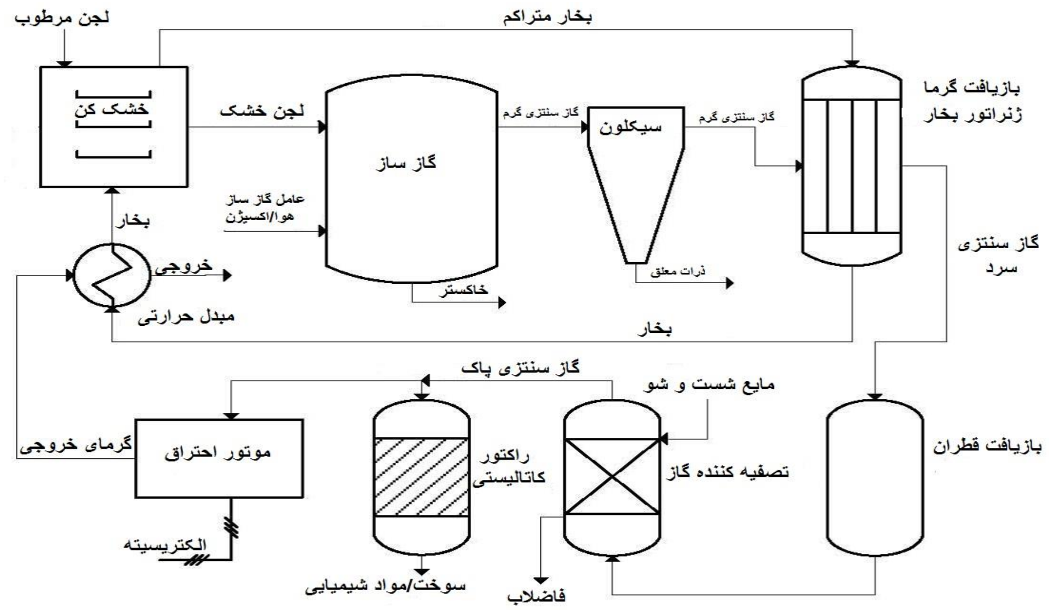
اصول فرآیند گازی‌سازی تبدیل موادکربنی به H_2 و CO با اضافه کردن گرما و عامل گازی کننده (اکسیژن، هوا، بخار یا ترکیبی از آن‌ها) در راکتور می‌باشد. علاوه بر H_2 و CO گازهای سنتزی دیگر شامل N_2 ، آثاری از CH_4 و دیگر هیدروکربن‌ها ، قطران، ذرات ریز و CO_2 تولید می‌شود. پس از تولید گازهای سنتزی می‌توان آن را با انواع دستگاه‌های تصفیه‌کننده برای حذف خاکستر، قطران، نیتروژن و فلزات سنگین تصفیه کرد. پس از تصفیه، گازهای سنتزی به‌عنوان سوخت مایع، برای تولید الکتریسیته در موتورهای احتراق داخلی، سوزاندن برای تولید گرما، در سلول‌های سوختی یا به‌عنوان مواد شیمیایی کاربرد خواهد داشت. انواع زیست توده می‌تواند تحت فرآیند گازی‌سازی قرار بگیرد. محدودیت‌های بهره‌وری فرآیند گازی‌سازی شامل مقدار رطوبت زیاد زیست توده ، دمای ذوب خاکستر، طراحی سیستم تغذیه و مخلوط‌کردن و جداکردن مواد است. لجن مناسب برای فرآیند گازی-سازی ، لجن هضم نشده با محتوای مواد آلی بالا و خاکستر کم است [6].

فرایند گازی‌سازی با آماده کردن مواد خام اولیه از طریق خشک کردن برای رسیدن به رطوبت مناسب که معمولا بین ۱۰ تا ۲۰ درصد است آغاز می‌شود. به طور کلی فرآیند گازی‌سازی به ۴ بخش تقسیم می‌شود[7] :

- خشک کردن
- پیرولیز
- احتراق (اکسیداسیون)
- تبدیل کردن به گاز (کاهش)

[1] Calcination
[2] Gasifier agent

محدودیت‌های بهره‌وری فرآیند گازی‌سازی شامل مقدار رطوبت زیاد زیست توده، دمای ذوب خاکستر، طراحی سیستم تغذیه و مخلوط‌کردن و جدا-کردن مواد است. لجن مناسب برای فرآیند گازی‌سازی ، لجن هضم نشده با محتوای مواد آلی بالا و خاکستر کم است [8]. یک مثال کلی از سیستم گازی سازی در شکل (۱) نشان داده شده است. فرآیند گازی‌سازی با آماده کردن مواد خام اولیه از طریق خشک کردن برای رسیدن به رطوبت مناسب که معمولا بین ۱۰ تا ۲۰ درصد است آغاز می‌شود. پس از خشک شدن، مواد اولیه به سیستم تغذیه منتقل می‌شوند که می‌تواند در طراحی بر اساس فشار گازساز و خواص فیزیکی مواد اولیه بسیار متنوع باشد. پس از وارد شدن به گازساز ، مواد اولیه به گازهای سنتزی تبدیل می‌شوند که از نظر ترکیب بسیار متنوع است، که به نوع گازساز و ترکیب مواد اولیه بستگی دارد. پس از واحد گاز ساز سیکلون وجود دارد که خاکستر و ذرات معلق که از گازساز عبور کرده‌اند را حذف می‌کند. حرارت را می‌توان به صورت بخار با استفاده از یک ژنراتور بخار بازیافت حرارت، بازیابی کرد و برای تکمیل فرآیند خشک کردن به خشک‌کن منتقل کرد. گازهای سنتزی خام سرد شده از طریق یک سیستم تصفیه خشک یا مایع، تصفیه می‌شود. در نهایت گاز های سنتزی برای تولید حرارت، الکتریسیته ، سوخت و تولید مواد شیمیایی استفاده می‌شوند. در صورت استفاده از یک ژنراتور احتراق، انرژی حرارتی اضافی از گازهای خروجی را می‌توان برای تکمیل فرآیند خشک کردن استفاده کرد [6].



شکل ۱- نمایی کلی از سیستم گازی سازی[6].

گازهای سنتزی دارای ارزش حرارتی پایین (btu/ft^3 ۱۵۰- ۱۲۰) است که درحدود ۲۵٪ از ارزش حرارتی بیوگاز تولید شده از هضم بی‌هوازی می-باشد. در گازی کردن با هوا، مقدار هوا همواره کمتر از مقداریست که برای سوختن کامل مواد خام لازم است. هر چه نسبت هوای ورودی به هوای مورد نیاز کمتر باشد، ارزش حرارتی گاز تولید شده بیشتر خواهد بود. معمولا این نسبت را بین ۰/۲ تا ۰/۳ در نظر می‌گیرند[2].

بهره‌برداری موثر از انرژی از طریق گازی‌سازی و بازیافت انرژی صورت می‌گیرد، در بسیاری از سیستم‌های تجاری نیاز به لجن خشک با بیش از ۷۵٪ مواد جامد است. انرژی مورد نیاز برای خشک کردن لجن به طور معمول از طریق فرآیند گازی‌سازی تأمین می‌شود، همچنین می‌توان انرژی تلف شده را از طریق سیستم تولید همزمان برق و حرارت بازیافت کرد[2].

بزرگترین مانع مربوط به گازی‌سازی، کاهش محتوای آب لجن تا رسیدن به سطح مناسب برای گازی‌سازی است. فرآیندهای مکانیکی از فرآیندهای حرارتی از نظر مصرف انرژی مطلوب‌تر است، اما لجن(به‌عنوان مثال، فعال) فقط می‌تواند با فرآیند مکانیکی حدود ۴۰٪ مواد جامد را آبگیری نماید. مشکل آبگیری از لجن در آب به دام افتاده در داخل دیواره های سلولی ریزاندامها می‌باشد. آبگیری لجن تا ۸۰٪ بسیار پر هزینه می باشد.

۲-۴- پیرولیز یا آتشکافت

یک روش نوین تولید انرژی از لجن ،پیرولیز است . در فرآیند شیمیایی-حرارتی پیرولیز لجن در غیاب هوا و اکسیژن حرارت داده می‌شود تا از مواد آلی، انرژی استخراج شود. محصولات این فرآیند عبارت اند از: بیو-روغن (فاز مایع) ، گاز چگال ناپذیر و جامد زیستی باقی مانده،که هر سه این محصولات قابل بازیابی باری تولید انرژی می باشند. مطالعات صورت گرفته نشان داده است تقریباً نیمی از مواد آلی موجود در لجن قابل تبدیل به انرژی زیستی سودمند (به صورت های گازی و روغن) بوده و مابقیِ مواد آلی به صورت تثبیت شده در لجن باقی می‌مانند. از این لجن باقی مانده نیز می توان برای افزایش کیفیت خاک بهره گرفت. مصرف انرژی زیاد محدود کننده‌ترین عامل استفاده از این روش است[10,9].

مواد جامد پدید آمده در این فرآیند، زغال (از نوع کربن فعال) و خاکستر هستند. مایعات به دست آمده، ترکیبات آلی با وزن مولکولی سبک‌تر از ترکیبات ماده خام را در خود دارند. از جمله این ترکیبات می‌توان اسیدها، الکل‌ها، آلدهیدها، کتن‌ها، استرها، ترکیبات حلقوی و ترکیبات فنلی را نام برد. در گاز به وجود آمده نیز ترکیبات شامل منواکسیدکربن، هیدروژن، دی‌اکسیدکربن،متان، اتان، اتیلن، بخار آب و دیگر هیدروکربن‌ها به مقدار ناچیز می باشد. پیرولیز عمدتاً به دو صورت سریع و کند دسته‌بندی می‌شود [11].

پیرولیزسریع

فرآیند پیرولیز سریع برای بیشینه کردن محصولات مایع یا گاز می‌باشد. در حال حاضر گرایش به پیرولیز سریع با دمای متوسط (۴۵۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد) در سال های اخیر مورد توجه بوده است . مزایای این روش عبارت است از :

- کاهش میزان دمای ورودی و در نتیجه انرژی ورودی کمتر از پیرولیز با دمای زیاد
- قابلیت ذخیره سازی و انتقال روغن تولید شده[12].

در این فرآیند مواد آلی در دمای °C ۶۰۰ - ۴۵۰ در غیاب اکسیژن برای مدت چند ثانیه به سرعت گرم می‌شوند (نرخ حرارت دهی بیش از °C ۱۰۰۰می‌باشد).تحت این شرایط، گازهای پیرولیز، بخارات آلی و مقدار کمی زغال تولید می‌شود. گاز تولید شده دارای ارزش حرارتی متوسط (MJ/Nm^3 ۲۱-۱۳) می‌باشد. بخارات آلی تولید شده پس از این فرآیند برای تبدیل شدن به مایع(روغن پیرولیز یا بیو-روغن) فشرده می‌شوند. این مایع قهوه‌ای تیره رنگ دارای ترکیبات پیچیده‌ای از هیدروکربن‌ها می‌باشد که می‌توان آن را تبدیل به مواد شیمیایی یا برای تولید الکتریسته و حرارت استفاده کرد[9].

پیرولیز کند

پیرولیز کند به طور سنتی برای تولید زغال چوب استفاده می‌شده است. در این فرآیند، نرخ حرارت دهی کم ولی مدت زمان ماند بیشتر است. این روش معمولا به منظور تولیدکربن فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد تا تولید منبع انرژی (بیو-روغن یا گاز). پیرولیز کند (یا کربنیزاسیون) مستلزم یک واکنش آهسته، زمان ماند طولانی‌تر (۳۰ ثانیه برای فاز گازی و ۳۰ دقیقه یا بیشتر برای فاز جامد)، دمای پایین (به طور معمول ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد یا کمتر) است تا حداکثر بازده تولید زغال را داشته باشد[10]. در حال حاضر بیش از آن‌که بر روی تولید انرژی از بیوذغال بحث شود ، بر روی توانایی بالقوه و بالفعل آن در تهویه خاک پرداخته شده است. هنگامی که بیوذغال وارد خاک می‌شود با جمع کردن آلاینده‌های خاک (به‌عنوان مثال فلزات سنگین)، حفظ و به تدریج آزاد کردن مواد مغذی، و همچنین بهبود ظرفیت نگهداری آب و زیستگاه ریزاندام ها باعث بهبود کیفیت خاک می گردد. علاوه بر این، بیو-زغال، کربن غنی و پایدار در محیط زیست است، و استفاده از آن برای تهویه خاک به طور همزمان به‌عنوان یک رویکرد امیدوار کننده برای ترسیب کربن عمل می کند[11].

بر اساس یافته‌های تجربی بیشترین مقدار تولید بیو- روغن در دمای °C ۵۰۰ می باشد [10]. در مقایسه با سوزاندن و هضم بی‌هوازی، ۹۸-۹۵ ٪ از انرژی موجود در لجن خشک شده از طریق محصولات مختلف قابل بازیابی است و بازده خالص انرژی می‌تواند بیشتر باشد. با این حال، ورودی انرژی برای فرآیند پیرولیز، از جمله مصرف انرژی برای تغلیظ، خشک کردن، و تأمین حرارت لازم برای مواد اولیه لجن از ضرورت‌های فرآیند پیرولیز

می‌باشد. در حالیکه اطلاعات مربوط به میزان مصرف انرژی برای تغلیظ لجن در دسترس نیست، مصرف انرژی مورد نیاز برای خشک کردن لجن فعال مازاد تغلیظ شده، با ۱۰ درصد مواد جامد کل در دمای ۱۰۵ °C با توجه به معادله (۱) در حدود ۲۲۰۰ KJ/Kg-ws است که بخش قابل توجهی از مصرف انرژی برای پیرولیز است. مصرف انرژی برای افزایش درجه حرارت در لجن خشک از ۱۰۵°C برای رسیدن به درجه حرارت مورد نیاز راکتور در ۵۰۰°C با توجه به فرمول کیم و پارکر (۲۰۰۸) قابل محاسبه می‌باشد[11] :

$$Q_{target} = M_{ds} \times Cp_{sludge} \times \Delta T_{target} \qquad (۱)$$

که در آن Q_{target} میزان انرژی لازم برای بالا بردن دمای لجن بر حسب KJ/Kg ، M_{ds} وزن نمونه خشک لجن بر حسب Kg ، ΔT اختلاف دما بین دمای اولیه (۱۰۵°C) و دمای راکتور(۵۰۰°C) می‌باشد. این میزان انرژی در حدود ۷۷۰ KJ/Kg-ds می‌باشد، با توجه به اینکه پیرولیز یک فرآیند گرماگیر است میزان انرژی که لجن خشک برای این فرآیند مصرف می کند با توجه به آزمایشات کابالِرو و همکاران (۱۹۹۷) برابر ۳۰۰ KJ/Kg-ds در نظر گرفته می‌شود[11]. بنابراین، مصرف کل انرژی برای لجنی با ۱۰ درصد مواد جامد کل در ۵۰۰°C با توجه به فرمول زیر در حدود KJ/kg-۲۳۰۷ws است.

$$Q_{total} = Q_{drying} + Q_{target} + Q_{pyrolysis} \qquad (۲)$$

انرژی خروجی برای فرآیند پیرولیز شامل ارزش حرارتی روغن، گاز و زغال محصولات می‌باشد که به راحتی قابل محاسبه نیست. با استفاده از آزمایش‌ها ، متوسط بازده تولید روغن، گاز و زغال در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برای لجن به ترتیب ۳۱٪ ، ۲۶٪ و ۴۳٪ بر اساس وزن لجن خشک (یا ۳/۱٪ ، ۲/۶٪ و ۴/۳٪ بر اساس وزن لجن تر) می‌باشد[13]. به طور متوسط ارزش حرارتی روغن، گاز و زغال به ترتیب ۳۷۰۰۰، ۱۴۰۰۰ و ۱۶۵۰۰ کیلوژول در هر کیلوگرم می‌باشد[11]. به این ترتیب کل تولید انرژی ۲۲۲۰KJ/kg تخمین زده می‌شود. لازم به ذکر است که دستیابی به انرژی خروجی بیشتر برای مواد خام داده شده، لزوماً به معنای تولید بیشتر انرژی موثر (تفاضل انرژی تولید شده از انرژی داده شده به سیستم) یا مقرون به صرفه بودن سیستم نمی‌باشد. واقعیت این است که پیرولیز یک فرآیند حرارتی شیمیایی گرماگیر است، در واقع نشان می‌دهد که انرژی تولید شده از محصولات پیرولیز تا حدودی به خاطر گرمای داده شده برای انجام واکنش است، نه فقط از مواد خام داده شده به فرایند[13]. این نتیجه‌گیری با کار فیتیلی و زابانیوتو (۲۰۰۸) که نشان می‌دهد پیرولیز یک فرآیند نسبتا گرماگیر به مقدار ۱۰۰KJ/kg-ds می‌باشد، هماهنگ است[12]. مطالب بررسی شده نشان می‌دهد که پیرولیز همچنان یک فرآیند ناکارآمد برای تولید انرژی است. شرایط عملیاتی (دما، اتمسفر، محصولات و غیره) در روش‌های مختلف برای تولید انرژی متفاوت بوده و در جدول (۱) خلاصه‌ای از شرایط عملیاتی و همچنین مزایا و معایب روش‌های مختلف در جدول (۲) آورده شده است.

جدول۱- مقایسه روش‌های تولید انرژی از لجن

پارامترهای مقایسه	سوزاندن	پیرولیز	گازی‌سازی	هضم بی‌هوازی
نیاز به خشک کردن	ندارد	دارد (۲۵٪ جامدات، ۱۵۰°C)	دارد	ندارد
دمای عملیاتی (°C)	۸۵۰-۹۵۰	۴۰۰-۸۰۰	۸۰۰-۱۴۰۰	مزوفیلیک (۳۷) ترموفیلیک (۵۵)
شرایط عملیاتی	هوا	فاقد اکسیژن	هوا یا اکسیژن	بی‌هوازی
محصولات اولیه	بخار	بیو-روغن، بیو-گاز و بیو-زغال	گاز	بیوگاز، متان

جدول ۲-مقایسه مزایا و معایب تولید انرژی از لجن[11,13,14,15]

روش تصفیه	مزایا	معایب
سوزاندن	کاهش بالای حجم لجن در حدود ۹۰٪ حذف تقریباً کامل مواد آلی امکان استفاده از خاکستر به دست آمده نابودی کامل پاتوژن‌ها	امکان کمبود انرژی مشکلات آلودگی هوا (تولید گازهای گلخانه‌ای) آبگیری/ تغلیظ لجن مورد نیاز است نیاز به کارکنان ماهر برای بهره‌برداری و تعمیرات هزینه زیاد سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری
پیرولیز	تولید مخلوطی از سوخت های گازی و مایع و پس‌مانده‌های جامد خنثی تبدیل تمام بخش زیست توده لجن به انرژی مفید کاهش حجم تا ۹۰٪ و تولید زغال کربن	آبگیری / تغلیظ مورد نیاز است.
گازی سازی	بهره‌وری عالی از بازیابی انرژی کاهش تولیدگازهای گلخانه‌ای قابلیت مدیریت بیشتر ترکیبات معدنی موجود در لجن تولید مواد زائد جامد بی اثر	خوردگی و رسوب نمک در تجهیزات که باعث تخریب راکتور می‌شود
هضم بی‌هوازی	بهره وری انرژی بالا درجه حرارت عملیاتی پایین بدون نیاز به آبگیری/ خشک کردن	فرآیند آهسته، زمان ماند طولانی حساسیت بیشتر به تغییرات شرایط محیطی مثل دما و PH نیاز به مواد مغذی مخصوص و فلزات ناچیز

۳. نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان می‌دهد بیشترین کاهش حجم لجن (بیش از ۹۰٪) را می‌توان با استفاده از روش‌های تصفیه حرارتی مثل سوزاندن به دست آورد که به طور موثر حجم لجن را برای دفع کاهش می‌دهد. مشکل اصلی فرآیندهای تصفیه حرارتی (سوزاندن، پیرولیز و گازی‌سازی) در تصفیه لجن با محتوای بسیار بالای آب (۹۹٪-۹۸)، پایین بودن بازده انرژی خالص می‌باشد که ناشی از مصرف زیاد انرژی برای آبگیری، تغلیظ و تبخیر کامل آب از لجن است. دیگر مشکلات اصلی فرآیندهای تصفیه حرارتی انرژی بیش از حد برای رسیدن به دمای بالا است که نیاز به تجهیزات گسترده و در نتیجه نیازمند هزینه سرمایه گذاری بالاست. در مقابل هضم بی‌هوازی، در دمای نسبتا پایین کار می کند و مهم‌تر از آن نیاز به آبگیری، تغلیظ و تبخیر کامل آب از لجن ندارد. بر این اساس، این روش از نقطه نظر بازیابی انرژی برای لجن بیشتر امیدوار کننده است.

۴. مراجع

[۱] سمیعی، رودابه ؛ پایان‌نامه امکان سنجی تولید الکتریسیته از گاز حاصل از تخمیر شیرابه آرادکوه، صفحه ۲۸

[۲] عبدلی، پازوکی؛ فصل اول و دوم ، جلد اول، کتاب پتانسیل و فناوری تولید انرژی از زیست توده در مناطق روستایی، انتشارات استاد مطهری، ۱۳۹۰، صفحات ۵۹-۱۵۰

[3] Paul,J. Guyer,P. Fellow ASCE,Fellow AEI, Introduction to Sludge Handling Treatment and Disposal, Continuing Education and Development,Inc(2011) .

[4] Izrail ,Turovskiy , Mathai,P.K, "Wastewater Sludge Processing" University of Tehran press. (2010).

[5] Monte, M.C., Fuente, E., Blanco, A., Negro, C., 2008. Waste managment from pulp and paper production in the European Union. Waste Management.(2008).

[6] EPA .Technology Assessment Report "Aqueous Sludge Gasification Technologies " . June (2012).

[7] Judex , J., Gaiffi, M., Burgbacher , H. Gasification of dried sewage sludge: Status of the demonstration and the pilot plant. Waste Management, 32 (4), 719-723. (2012).

[8] Greenhouse Gas Technology Center, TechnologyAssessment Report, Aqueous Sludge Gasification Technologies, (2012).

[9] Gasification of Sludge and Biosolids A Review of Technology Fundamentals and the Current Commercial Status. PNCWA (2012).

[10] Tasma,T., Panait,T. The quality of syngas prodused by fluidised bed gasification using sunflower husk. ISSN 1221- 4566, (2012).

[11] KimY , Parker W “A technical and economical evaluation of the pyrolysis of swage sludge for the production of bio-oil” . Bioresour technol; 99:1406 – 16, (2008),

[12] Fytili, D., Zabaniotou, A., Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 116-140.2008.

[13] Yucheng Cao , Artur Pawlowski. “Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and Pyrolysis : Brief overview and energy efficiency assessment ” Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 , 1657-1665. , (2012)

[14] Kumar, S., Technology options for municipal solid waste-to-energy project. TERI Information Monitor on Environmental Science 5, 1-11. (2000).
.
[15] Monte, M.C., Fuente, E., Blanco, A., Negro, C., 2008. Waste managment from pulp and paper production in the European Union. Waste Management doi:10.1016/j.wasman.2008.02.002. (article in press)