

مقاله پژوهشی

هضم بی‌هوازی حالت جامد قسمت آلی زباله جامد شهری برای تولید بیوگاز (مطالعه موردی در مشهد)

محسن ثقوری^{۱*}، رضا عبدی^۲، محمدعلی ابراهیمی نیک^۳، عباس روحانی^۴ و محمدعلی میسمی^۵

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و عضو هیأت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۳ و ۴- اعضا هیأت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۱۱

چکیده

هضم بی‌هوازی حالت جامد، علاوه بر تولید انرژی به عنوان راهکاری برای مدیریت زباله جامد شهری در نظر گرفته می‌شود. مزایای این روش شامل حجم کمتر مورد نیاز راکتور، انرژی کمتر برای گرم کردن و جابجایی راحت تر مواد هضم شده می‌باشد. از آنجا که قسمت آلی زباله جامد شهری بسیار ناهمگن است، در نتیجه برای بررسی تولید بیوگاز از هر نوع زباله جامد شهری، مطالعات ویژه آن لازم است که هدف این تحقیق می‌باشد. در این پژوهش هضم بی‌هوازی حالت جامد قسمت آلی زباله جامد شهری به مدت ۳۰ روز در مقیاس آزمایشگاهی با غلظت مواد جامد ۲۰٪ برای ارزیابی میزان تولید بیوگاز در شرایط ناپیوسته و مزوفیلیک (بینابین) (۳۷ درجه سلسیوس) انجام شد. با توجه به بالا بودن درصد مواد جامد کل بر اساس نتایج ارزیابی اولیه خصوصیات قسمت آلی زباله جامد شهری (درصد مواد جامد کل ۳۰/۶۳٪)، هضم بی‌هوازی حالت جامد برای مدیریت این ضایعات مناسب است. به منظور بازسازی شرایط واقعی در مقیاس تجاری، هیچگونه مواد افزودنی به راکتور اضافه نشد. عملکرد راکتور با اندازه‌گیری روزانه حجم بیوگاز تولیدی و محاسبه میزان تخریب‌پذیری مواد جامد فرار، مورد ارزیابی قرار گرفت. حجم بیوگاز تولیدی در انتهای فرآیند هضم، مقدار ۳۷۲ میلی‌لیتر به ازای هر گرم مواد جامد فرار برای غلظت مواد جامد کل ۲۰٪ با درصد متان ۶۱/۸۲٪ (معادل ۲۳۰ میلی‌لیتر) به دست آمد. همچنین میزان تخریب‌پذیری مواد جامد فرار به عنوان یکی از پارامترهای بهره‌وری آزمایشات حدود ۶۴/۷٪ محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی

انرژی‌های تجدیدپذیر، ضایعات آلی، متان، مدیریت پسماند، هضم بی‌هوازی ناپیوسته

مقدمه

بی‌هوازی می‌تواند یک راهکار مدیریتی کارآمد برای بهره برداری ضایعات آلی زباله جامد شهری باشد که تولید بیوگاز و کود بهداشتی مطلوب را به همراه دارد (Garcia et al., 2005).

تخمیر بی‌هوازی ضایعات آلی می‌تواند برای بازیافت انرژی و تبدیل مواد با مزیت کاهش آلودگی

رشد صنعتی شدن و شهری شدن جوامع، به طور قابل توجهی مقدار ضایعات تولید شده از زباله جامد شهری را افزایش داده است. اگر این ضایعات به طور مناسب مدیریت نشود، ممکن است اثرات نامطلوبی بر بهداشت و سلامت انسان بگذارد. هضم

اختلاط کامل و لاگون پوشیده) و محتوی جامد (تر و خشک) دسته‌بندی می‌شوند. هضم بی‌هوازی حالت جامد توسط محتوی جامد خوراک اولیه برای تجزیه شدن که معمولاً بالاتر از ۱۵٪ است، عنوان می‌شود (Li et al., 2011).

هضم بی‌هوازی حالت جامد بنا به دلایلی از قبیل حجم کمتر رآکتور، انرژی کمتر مورد نیاز برای گرمایش، کمترین جابجایی مواد و مجموع انرژی از دست رفته کمتر، بر هضم بی‌هوازی مایع ارجحیت دارد. تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی حالت جامد با میزان تولید حالت مایع قابل مقایسه است. به خاطر محتوای رطوبتی کمتر، ماده هضم شده (ماده خروجی از رآکتور) هضم بی‌هوازی حالت جامد می‌تواند به عنوان کود یا سوخت پلت شده استفاده شود که جابه‌جایی آن بسیار راحت تر از دوغاب خروجی هضم حالت مایع می‌باشد. در حال حاضر حدود ۵۴٪ از مجموع ظرفیت هضم بی‌هوازی نصب شده در اروپا، با استفاده از فناوری هضم بی‌هوازی حالت جامد بوده و مقدار استفاده از سامانه‌های خشک از سال ۲۰۰۵ در حال افزایش است (Li et al., 2011).

در حال حاضر تاسیسات هضم بی‌هوازی حالت جامد مقیاس تجاری در ایران وجود ندارد. البته پژوهش‌های مفیدی به ویژه در مقیاس آزمایشگاهی در زمینه تولید بیوگاز اغلب به روش هضم بی‌هوازی حالت مایع انجام گرفته است (Ahmadi-Pirlou et al., 2017).

در سالیان اخیر در دنیا پژوهش‌های زیادی در زمینه هضم بی‌هوازی حالت جامد و ضایعات آلی زباله جامد شهری انجام شده است. در پژوهشی سه شرایط مختلف آزمایشگاهی (زمان ماند مواد جامد ۳۰، ۲۰ و ۱۵ روز) در رآکتور نیمه‌پیوسته اختلاط

محیط زیستی، مورد بهره‌برداری قرار گرفته و بیوگاز تولید نماید. بیشترین گستره گاز تولیدی در محدوده ۰/۴-۰/۶ متر مکعب به ازای هر کیلوگرم مواد جامد فرار تبدیل شده قرار داشته که معمولاً در دمای بالای ۳۰ درجه سلسیوس و زمان ماند ۳۰ روز و بیشتر، به دست می‌آید. تاثیرگذارترین فاکتورها دما، زمان ماند، برخی تاثیرات ترکیبی مواد جامد و نسبت کربن به نیتروژن می‌باشد (Almassi, 1976).

بیوگاز یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد که می‌تواند در کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار گیرد. بیوگاز می‌تواند برای استفاده به عنوان یک منبع سوخت خودرو مانند گاز طبیعی فشرده^۱ (CNG)، مصرف شود. در شکل دیگر، می‌تواند برای تولید گرما یا الکتریسیته، سوزانده شود یا برای تولید متانول تبدیل به مایع شود. همچنین می‌تواند به عنوان خوراک اولیه به عنوان بهبود دهنده فرآیند تغییر شکل بخار متان مورد استفاده قرار گیرد. بیوگاز تصفیه شده می‌تواند به شبکه توزیع گاز تزریق شده یا برای خوراک پیل سوختی استفاده شود (Weiland, 2010).

اگر ترکیبات آلی ضایعات جامد توسط هضم بی‌هوازی به انرژی تبدیل شود، می‌تواند تاثیرات مضر بر محیط زیست را کاهش داده و در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی کمک کند. هضم بی‌هوازی پیش از آنکه به عنوان یک فناوری قابل اعتماد در اروپا و آسیا تاسیس گردد، برای مدیریت بیش از ۱۰٪ ضایعات آلی در چند کشور اروپایی استفاده می‌شد. فرآیندهای هضم بی‌هوازی بر اساس پارامترهای عملکردی بحرانی و طرح رآکتور از قبیل پیوستگی (ناپیوسته و پیوسته)، دمای عملکردی (سایکروفیلیک یا سرمادوست، مزوفیلیک یا بینابینو ترموفیلیک یا گرمادوست)، طرح رآکتور (جریان بالا،

متان به ازای هر گرم مواد جامد فرار حذف شده و در شرایط با پیش تیمار ۴۲۰ میلی‌لیتر متان به ازای هر گرم مواد جامد فرار حذف شده به دست آمد (Fdez-Guelfo *et al.*, 2011).

محققان از هضم بی‌هوازی حالت تر ضایعات آلی زباله جامد شهری در شرایط مزوفیلیک (بینابین) (۳۷ درجه سلسیوس) ۲۹۸ میلی‌لیتر متان به ازای هر گرم مواد جامد فرار تغذیه شده به دست آوردند (Martin-Gonzalez *et al.*, 2010). همچنین گروهی دیگر از محققین، از هضم بی‌هوازی حالت جامد (درصد مواد جامد ۲۰٪) ضایعات آلی زباله جامد شهری در شرایط مزوفیلیک (بینابین) ۳۸۲ میلی‌لیتر متان به ازای هر گرم مواد جامد فرار بارگذاری شده به دست آوردند. آنها گزارش کردند درصد متان در بیوگاز بعد از شرایط پایدار همواره بالای ۵۵٪ بوده است (Ponsa *et al.*, 2011).

در تحقیق دیگری محققان در پژوهش خود هضم بی‌هوازی ضایعات آلی زباله جامد شهری با پیش تیمار را با غلظت از ۳٪ تا ۱۰٪ مواد جامد کل انجام دادند. نتایج آنها نشان داد متوسط تولید بیوگاز ۶۰۰ میلی‌لیتر به ازای هر گرم مواد جامد فرار بود. هنگامی که غلظت مواد جامد ورودی به ۱۰٪ وزنی افزایش یافت، متوسط تولید بیوگاز تا ۸۰۰ میلی‌لیتر به ازای هر گرم مواد جامد فرار افزایش یافت (Novarino & Zanetti, 2012).

به واسطه وجود منابع عظیم نفتی در کشور ما، ممکن است سرمایه گذاری در این بخش در نگاه اول ضروری به نظر نرسد، ولی با کمی تامل می توان به این نکته پی برد که در آینده مجبور به استفاده از منابع انرژی از این دست و تجدیدپذیر خواهیم بود. طبق تخمین‌های صورت گرفته توسط سازمان اوپک منابع فسیلی در آینده به شدت کاهش یافته و از

کامل در شرایط مزوفیلیک (بینابین) و غلظت مواد جامد بالا (۲۰٪) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد ۲۰ روز زمان ماند مواد جامد بهینه برای هضم بی‌هوازی حالت جامد ضایعات آلی زباله جامد شهری می‌باشد. میزان متان برای زمان ماند مواد جامد ۳۰، ۲۰ و ۱۵ روز به ترتیب ۲۰۰، ۳۶۰ و ۲۴۰ میلی‌لیتر به ازای هر گرم مواد جامد فرار تغذیه شده به دست آمد. درصد تشکیل دهنده متان از حجم بیوگاز تولیدی ۶۰-۷۰٪ گزارش گردید (Rodriguez *et al.*, 2012).

در مطالعه‌ای دیگر ارزیابی کارایی فرآیند هضم بی‌هوازی روی ضایعات آلی زباله جامد شهری انجام گرفت. برای تعیین پتانسیل متان، آزمایشات تعیین پتانسیل متان بیوشیمیایی^۱ (BMP) در شرایط ناپیوسته مزوفیلیک (بینابین) و ترموفیلیک (گرمادوست) در رآکتورهای ۱۰۰۰ میلی‌لیتری انجام شد. نتایج نشان داد در شرایط مزوفیلیک (بینابین) و ترموفیلیک (گرمادوست) به ترتیب ۴۵۰ و ۴۸۱ میلی‌لیتر بیوگاز به ازای هر گرم مواد اولیه به دست آمد. علاوه بر این، متوسط درصد ترکیب بیوگاز برای شرایط مزوفیلیک (بینابین) (متان: ۶۱/۱٪، دی اکسید کربن: ۳۸/۹٪) و ترموفیلیک (گرمادوست) (متان: ۶۲/۳٪، دی اکسید کربن: ۳۷/۷٪) گزارش شد (Derbal *et al.*, 2012).

در پژوهشی دیگر تاثیر پیش تیمار بیولوژیکی بر هضم بی‌هوازی ضایعات آلی زباله جامد شهری صنعتی بررسی گردید. آزمایش هضم بی‌هوازی حالت جامد (درصد مواد جامد ۳۰٪) در دو بخش بدون پیش تیمار و با پیش تیمار و شرایط نیمه‌پیوسته ترموفیلیک (گرمادوست) (۵۵ درجه سلسیوس) با زمان ماند مواد جامد ۱۵ روز انجام گرفت. نتایج نشان داد در شرایط بدون پیش تیمار ۳۱۰ میلی‌لیتر

دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. سپس از ضایعات نمونه گیری به عمل آمده و خصوصیات مربوط به هضم بی‌هوازی آن‌ها اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری‌ها شامل درصد رطوبت، مواد جامد کل، مواد جامد فرار طبق استاندارد APHA^۱ (Anon, 2005) درصد نیتروژن و درصد کربن و pH، طبق استاندارد ملی ایران شماره ۱۳۳۲۰ (Anon, 2011) می‌باشند.

روش اندازه‌گیری مواد جامد کل و مواد جامد فرار طبق استاندارد G 2540 از کتاب روش‌های استاندارد APHA مقدار ۲۵ تا ۵۰ گرم از نمونه در یک ظرف تبخیر قرار داده و وزن شد. سپس به مدت یک شب در آن با دمای ۱۰۳ تا ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده، سپس در دسیکاتور سرد شده و وزن گردید. مراحل خشک کردن (به مدت یک ساعت)، سرد کردن در دسیکاتور و وزن کردن تا زمانی که تغییرات وزن به کمتر از ۰.۴٪ یا ۵۰ میلی‌گرم برسد ادامه داده شد. مواد خشک شده به مدت یک ساعت در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شده سپس در دسیکاتور سرد و وزن شد. فرآیند سوزاندن (به مدت ۳۰ دقیقه)، سرد کردن و وزن کردن تا زمانی که تغییرات وزن به کمتر از ۰.۴٪ یا ۵۰ میلی‌گرم برسد ادامه داده شد. آنگاه مواد جامد کل و مواد جامد فرار از روابط ۱ و ۲ محاسبه گردید:

$$\%TotalSolids = \frac{(A - B) \times 100}{C - B} \quad (1)$$

$$\%VolatileSolids = \frac{(A - D) \times 100}{A - B} \quad (2)$$

که در آن،

A = جرم ظرف و مواد خشک شده (میلی‌گرم)؛

B = جرم ظرف (میلی‌گرم)؛ C = جرم نمونه تر و ظرف

سوی دیگر آلودگی‌های زیست محیطی به طور فزاینده‌ای رو به افزایش است که اگر شرایط به همین صورت ادامه پیدا کند، بقای زیستی انسان و موجودات زنده با خطرات جدی روبرو خواهد شد (Hazinia, 2011).

با توجه به مزایای اقتصادی و محیط زیستی هضم بی‌هوازی حالت جامد در مقایسه با روش‌های کنونی مدیریت زباله جامد شهری و سایر زباله‌های جامد از قبیل سوزاندن و دفن کردن که تاثیرات نامطلوبی دارند، استفاده تجاری از هضم بی‌هوازی حالت جامد، می‌تواند مورد نظر قرار گیرد. پیش از تجاری‌سازی، ارزیابی و نشان دادن کارایی تولیدی و اقتصادی این فناوری به خصوص در جایی که هنوز روش‌های مرسوم اقتصادی‌تر مانند لندفیل (دفن کردن)، لازم می‌باشد. بنابراین هدف این مطالعه ارزیابی تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی حالت جامد ضایعات آلی زباله جامد شهری در مقیاس آزمایشگاهی برای اولین بار در کشور می‌باشد.

مواد و روش‌ها

الف) تهیه و آماده‌سازی مواد اولیه

ضایعات آلی زباله جامد شهری

ضایعات آلی زباله جامد شهری از محل کارخانه بازیافت شهرداری مشهد جمع‌آوری شد. این مواد به صورت تصادفی از ضایعات آلی باقیمانده بعد از جدا کردن سایر مواد (پلاستیک، آهن و...) در خط تفکیک زباله جامد شهری این کارخانه به دست آمد. ابتدا توسط خردکن به ابعاد ۲ تا ۱۰ میلی‌متر خرد گشته و به منظور حداقل شدن فعالیت میکرواورگانسیم‌های موجود در آن‌ها، سریعاً به آزمایشگاه بیوگاز گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد منتقل، سپس در یخچال و

1- American Public Health Association

خشک با دهانه بلند به طوری که دهانه آن به داخل قسمت حبایی بالن هضم برسد، به آن اضافه شد و بالن با احتیاط و به آرامی روی هیتر هضم قرار داده شد و تا از بین رفتن رنگ و کف ایجاد شده در سطح آن هضم شد.

بعد از تمام شدن مرحله هضم به بالن سرد شده مقدار ۲۰ میلی لیتر آب مقطر به آرامی همراه با تکان دادن اضافه و بالن چرخانده شد تا هرگونه مواد نامحلول چسبیده شده به جداره بالن به داخل محلول منتقل شود. سپس محتویات بالن به بخش تقطیر دستگاه کج‌جدال مدل Vapodest ساخت شرکت Gerhardt آلمان منتقل شد.

سه مرتبه بالن با آب مقطر شسته و محتویات آن به دستگاه منتقل شد. سپس ۵۰ میلی لیتر محلول اسید بوریک به یک ارلن ۱۰۰ میلی لیتری اضافه و بالن در زیر بخش مبرد دستگاه کج‌جدال قرار داده شد به طوری که انتهای مبرد در داخل محلول ارلن فرو برده شود. ۳۰ میلی لیتر محلول سدیم هیدروکسید به قیف دستگاه افزوده و به تدریج به داخل قسمت تقطیر اضافه شد. مقدار ۱۰۰ میلی لیتر از محلول تقطیر شده جمع آوری و ۷ قطره معرف ازت به آن افزوده و با اسید سولفوریک ۰/۰۱ نرمال تیتر شد. حجم مصرفی اسید سولفوریک در آزمایش ثبت گردید. پس از انجام آزمایش نیتروژن کل با استفاده از رابطه ۴ محاسبه گردید.

$$T_N = 0.1 \times (V_S - V_B) \quad (4)$$

که در آن،

T_N = نیتروژن کل؛ V_S = حجم اسید سولفوریک مصرفی در تیتراسیون نمونه (میلی لیتر)؛ و V_B = حجم اسید سولفوریک مصرفی در تیتراسیون شاهد (میلی لیتر).

(میلی گرم)؛ و D = جرم مواد و ظرف پس از سوزاندن (میلی گرم).

کربن آلی کل

در آزمون اندازه‌گیری درصد کربن، مقدار ۰/۱ گرم از نمونه خشک و آسیاب شده به یک ارلن مایر ۱۵۰ میلی لیتری منتقل شد و به آن مقدار ۱۵ میلی لیتر محلول پتاسیم دی کرومات نرمال افزوده و سپس به آرامی هم زده و در حمام آب گرم قرار داده شد. ۳۰ میلی لیتر اسید سولفوریک غلیظ جهت هضم به آن اضافه و به مدت سه ساعت محتویات ارلن در دمای آب جوش حرارت داده شد. سپس به آن ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر و حدود ۷ قطره از شناساگر ارتوفنانترولین اضافه و با محلول فرو آمونیوم سولفات ۰/۵ نرمال تیتر شد. این کار برای محلول شاهد نیز انجام گرفت.

پس از آن درصد کربن آلی از رابطه ۳ محاسبه گردید.

$$OC = 60.03 \left(\frac{V_B - V_S}{V_B} \right) \quad (3)$$

که در آن،

OC = درصد کربن آلی؛ V_B = حجم فرو آمونیوم سولفات مصرفی (میلی لیتر برای تیتراسیون محلول شاهد)؛ و V_S = حجم فرو آمونیوم سولفات مصرفی (میلی لیتر برای تیتراسیون نمونه).

نیتروژن کل

برای تعیین مقدار نیتروژن کل مقدار ۰/۱۴ گرم از نمونه خشک شده در بالن هضم قرار داده، ۸ میلی لیتر اسید سولفوریک غلیظ به آن افزوده و بالن تکان داده شد تا اسید کاملاً با نمونه مخلوط شود. سپس مخلوط برای رسیدن به حالت ثابت حداقل یک ساعت در همان حالت قرار داده شد. سپس مقدار ۱/۵ گرم پودر سلنیوم به وسیله یک قیف

تعیین مقدار نسبت کربن به ازت

نسبت کربن به ازت (C/N) از رابطه ۵ محاسبه شد:

$$C/N = OC / T_N \quad (5)$$

که در آن،

OC = درصد کربن آلی موجود در نمونه؛ و $T_N =$ درصد نیتروژن کل موجود در نمونه.

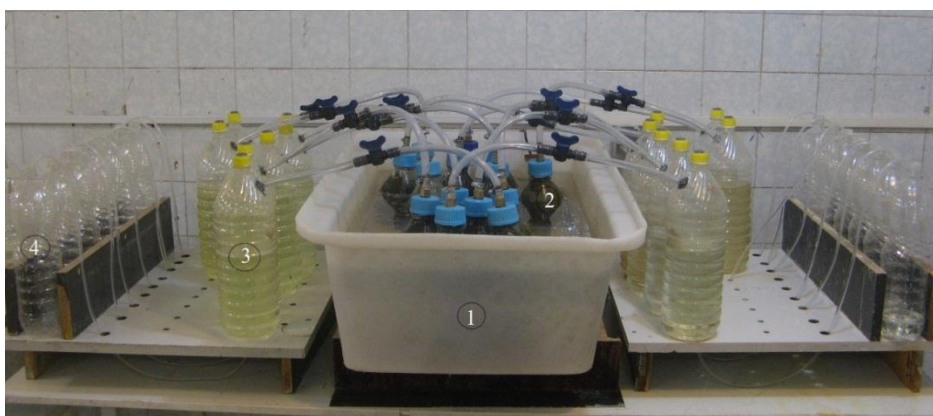
ماده تلقیح

برای اغلب مواد اولیه، ماده تلقیح (استارتر) برای شروع تولید متان در هضم بی‌هوازی لازم است. از دوغاب هضم شده هاضم تحت همزنی پیوسته در مقیاس پایلوت واقع در مجتمع بازیافت و تبدیل مواد شهرداری مشهد، به عنوان ماده تلقیح استفاده شد. میزان ماده تلقیح در پژوهش‌های مختلف متفاوت

است و در این مطالعه به میزان ۱۵٪ حجم کاری هاضم در نظر گرفته شد. این ماده، بر میزان بیوگاز تاثیر چندانی نداشته و فقط در شروع و تسریع روند واکنش، موثر است. افزودن این ماده باعث مناسب شدن pH برای شروع آزمایش می‌گردد (Liu *et al.*, 2009). یک رآکتور فقط شامل ماده تلقیح به عنوان شاهد در نظر گرفته شد تا در صورت تولید بیوگاز از تیمار اصلی کسر گردد.

ب) بارگذاری و به کار انداختن رآکتورهای آزمایشگاهی

به منظور تعیین میزان تولید بیوگاز تولیدی از بطری‌های شیشه‌ای ۱ لیتری با حجم کاری ۶۰۰ میلی‌لیتر استفاده گردید. در شکل ۱ تصویری از رآکتورها و مجموعه بی‌هوازی حین کار مشاهده می‌شود.



شکل ۱- رآکتورها و مجموعه بی‌هوازی حین کار (۱- حمام آب گرم ۲- هاضم ۳- بطری تعادل ۴- بطری جمع آوری حجم جابجا شده معادل میزان بیوگاز تولیدی)

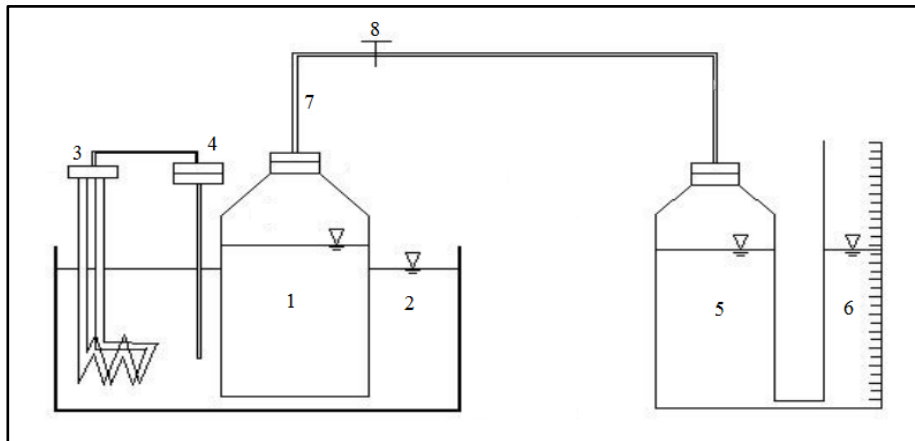
Fig. 1- Reactors and anaerobic digestion lab setup (1- bain-marie bath 2- digester 3- equilibrium bottle 4-water displacement tank equivalent of yield of biogas production)

میلی‌لیتر ماده تلقیح اضافه گردید. با توجه به اینکه غلظت مواد جامد ضایعات از ۲۰٪ بیشتر بود، به آن آب مقطر اضافه گردید تا به غلظت مورد نظر برسد. یک رآکتور فقط حاوی ماده تلقیح به عنوان شاهد

رآکتورها با ضایعات آلی زباله جامد شهری در ۲ تکرار (Cui *et al.*, 2011; Brown & Li, 2013; Li *et al.*, 2013) و با غلظت ۲۰٪ پرشده و همان‌طور که ذکر شد به نسبت ۱۵٪ حجم کاری معادل ۹۰

به مدت ۳ دقیقه قبل از اندازه‌گیری حجم بیوگاز انجام گرفت. در شکل ۲ نیز شماتیک طرح سیستم انجام آزمایش هضم بی‌هوازی مشاهده می‌شود.

استفاده شد. شرایط بی‌هوازی با تزریق گاز نیتروژن به مدت ۳ دقیقه حاصل گردید. پس از آن راکتورها در حمام آب گرم با دمای ۳۷ درجه سلسیوس قرار داده شدند. همزنی روزانه به صورت دستی



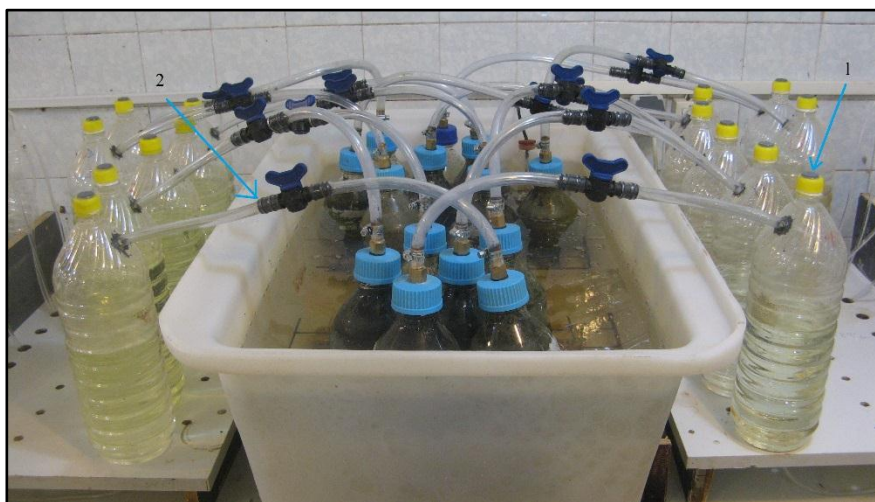
شکل ۲- شماتیک طرح سیستم بی‌هوازی (۱- هاضم ۲- حمام آب گرم ۳- المنت حرارتی ۴- سنسور دما ۵- بطری تعادل ۶- بطری جمع‌آوری حجم معادل بیوگاز ۷- لوله خروج بیوگاز ۸- شیر قطع و وصل)

Fig. 2- Schematic of anaerobic digestion system (1-digester 2- bain-marie bath 3- thermal element 4- temperature sensor 5-equilibrium bottle 6- water displacement tank equivalent of yield of biogas production 7- gas collector tube 8-on/off valve)

مخزن جابه‌جایی آب توسط سرنگ استخراج شده بود، در آینه‌ورن تزریق می‌شود. به دلیل انحلال‌پذیری بالای دی‌اکسید کربن با این محلول، بخش دی‌اکسید کربن بیوگاز در آن حل‌گشته و میزان گاز باقی‌مانده در انتهای لوله آینه‌ورن نشان‌گر متان موجود در بیوگاز است. در نتیجه با تقسیم حجم باقی‌مانده گاز انتهای لوله بر حجم تزریقی (پنج میلی‌لیتر) میزان متان تولیدی نسبت به بیوگاز مشخص می‌شود. بیوگاز اضافه روزانه سوزانده می‌شود. در شکل ۳ محل نمونه‌گیری گاز و ارتباط با مشعل مشاهده می‌شود.

ج) اندازه‌گیری مقدار و ترکیبات بیوگاز تولیدی

میزان گاز تولیدی روزانه به روش جابه‌جایی آب و درصد متان تولیدی به عنوان مهم‌ترین فاکتور نشان‌دهنده کیفیت بیوگاز تولیدی به روش آینه‌ورن تعیین‌گشت (Kaluza et al., 2014). آینه‌ورن وسیله‌ای آزمایشگاهی از جنس شیشه است که برای اندازه‌گیری میزان انحلال‌پذیری گازها در مایعات و با حجم مدرج پنج و دقت نیم میلی‌لیتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری متان، آینه‌ورن با محلول سدیم کلرید اشباع پر شده و سپس پنج میلی‌لیتر از بیوگاز که از قسمت بالای



شکل ۳- محل نمونه‌گیری بیوگاز (۱) و اتصال به شعله برای سوزاندن گاز اضافی (۲)

Fig. 3- Biogas sampling point (1) and connection to the flame to burn produced gas (2)

در کف هر رآکتور تعبیه گردید تا شرایط بی‌هوازی مجموعه از بین نرود که در شکل ۴ تعیین گردید. بدین منظور یک شیر کوچک pH هاضم‌ها هر سه روز یکبار توسط پی‌اچ‌متر مدل ۲۰۱-pH با دقت ۰/۰۱ ساخت تایوان مشاهده می‌شود.



شکل ۴- راست: ۱- هاضم ۲- شیر تعبیه شده در کف هاضم؛ چپ: تصویر اسیدیته سنج مورد استفاده در آزمایشات

Fig. 4- Right: 1- digester 2-sampling valve equipped in the bottom of digester, left: pH meter

مختلف رابطه مستقیمی با آن دارد. مواد جامد فرار درصدی از مواد جامد کل می باشد. بالا بودن میزان مواد جامد کل هم‌زمان با مواد جامد فرار، نشان‌دهنده مناسب بودن این ضایعات برای هضم بی‌هوازی حالت جامد می‌باشد. فاکتور موثر بعدی در تولید بیوگاز که مستقیماً به ضایعات بستگی دارد

نتایج و بحث

الف) خصوصیات مواد اولیه

خصوصیات ضایعات آلی زباله جامد شهری در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد ضایعات مورد نظر حاوی مواد جامد فرار زیادی می‌باشد و مقدار گاز تولیدی از ضایعات

نسبت کربن به نیتروژن است که معمولاً نسبت ۱:۳۰-۲۰ در صورت برآورده شدن نسبت ایده آل می‌باشد (Brown & Li, 2013). در پژوهش‌های پیشین تولید بیوگاز در نسبت‌های مختلف کربن به نیتروژن انجام شده و محدودیت قطعی ذکر نشده است (Murto *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2013; Dai *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014; Nielfa *et al.*, 2015; Rodriguez-Abalde *et al.*, 2017)

جدول ۱- خصوصیات ضایعات آلی زباله جامد شهری

Table 1. Composition of organic fraction of municipal solid waste

اسیدیته (pH)	نسبت کربن به نیتروژن (C:N Ratio)	نیتروژن (Total Nitrogen) (%)	کربن (Total Carbon) (%)	مواد جامد فرار (از مواد جامد کل) (درصد) (Volatile solids) (%)	مواد جامد کل (درصد) (Total solids) (%)	نوع ضایعات (Type of waste)
6.2	38.28	1.14	43.64	76.2	30.63	ضایعات آلی زباله جامد شهری (Organic fraction of municipal solid waste)

فاکتور موثر دیگر در تولید بیوگاز میزان pH می‌باشد. pH مناسب برای فرآیند هضم بی‌هوازی حالت خنثی می‌باشد که برای باکتری‌های تخمیرکننده ۴-۸/۵ و برای باکتری‌های تولیدکننده متان ۶/۵-۷/۲ ذکر شده است (Zhang *et al.*, 2014). همان‌گونه که مشاهده می‌شود pH این ضایعات نزدیک محدوده مناسب قرار دارد که پس از افزودن ماده تلقیح کاملاً در محدوده مورد نظر قرار گرفت. در جدول ۲ مقایسه‌ای بین مطالعه حاضر و پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌گردد.

جدول ۲- مقایسه خصوصیات ضایعات آلی زباله جامد شهری با پژوهش‌های پیشین

Table 2- Comparison of Organic fraction of municipal solid waste in his study with previous reseachs

pH	C/N	N (%)	C (%)	VS of TS (%)	TS (%)	پژوهشگران (سال)
6.2	38.28	1.14	43.64	76.2	30.63	پژوهش حاضر
-	37.8	1.3	48.1	80.4	86.8	Forster-Carneiro <i>et al.</i> , 2007
-	32.1	1.3	42.7	73.4	6.4	Cuetos <i>et al.</i> , 2008
-	14.09	1.83	25.78	77	29	Ponsa <i>et al.</i> , 2011
-	15	3.01	44.09	92.6	18.6	Ghanimeh <i>et al.</i> , 2012
-	17	2.57	43.15	95.6	19.3	Ghanimeh <i>et al.</i> , 2012
3.5	21.71	2.1	45.6	88.5	23.3	Abudi <i>et al.</i> , 2016
7.3	28.67	1.7	48.75	74.1	23	Ahmadi-Pirlou <i>et al.</i> , 2017

فرآیند هضم بی‌هوازی تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر می‌باشد و همچنین هدف این پژوهش ارزیابی تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی حالت جامد ضایعات آلی زباله جامد شهری به عنوان یک روش مدیریت بهداشتی این ضایعات برای اولین بار در

ب) ارزیابی فرآیند هضم بی‌هوازی

بهره‌وری فرآیند هضم بی‌هوازی بر اساس پارامترهای مختلفی تعیین می‌گردد که مهم‌ترین آن‌ها میزان متان آن و درصد کاهش مواد جامد فرار می‌باشد. از آنجایی که مهم‌ترین هدف و محصول

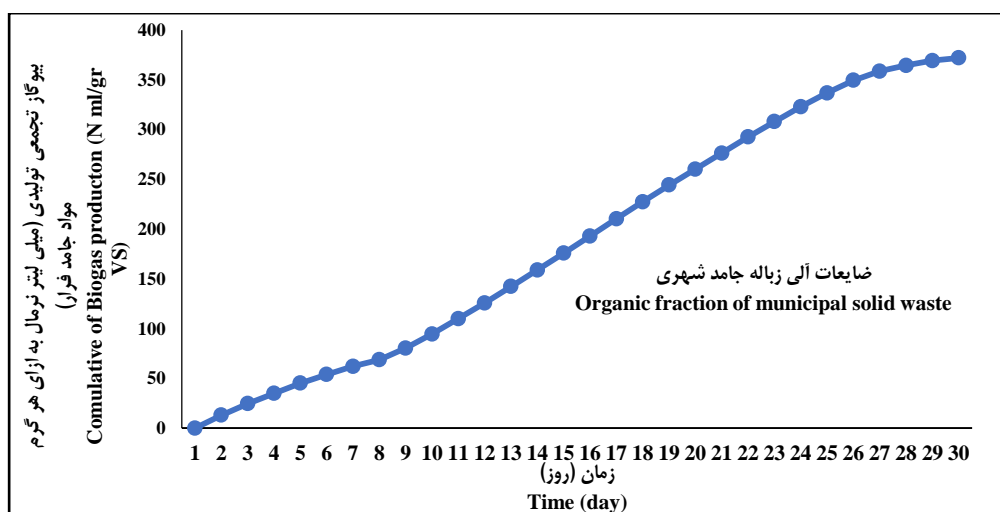
ماده تلقیح در روزهای پایانی فرآیند تولید بیوگاز هاضم صنعتی از آن برداشت گردید.

کشور می‌باشد، لذا پارامترهای ذکر شده مورد ارزیابی قرار گرفت.

میزان بیوگاز و متان

میزان بیوگاز از ضایعات آلی زباله جامد شهری در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار تولید بیوگاز از هضم بی‌هوای ضایعات آلی زباله جامد شهری با مراحل هضم بی‌هوایی و پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد.

ابتدا هاضم شاهد که فقط شامل ماده تلقیح بود ارزیابی گردید. این هاضم تنها در چند روز اول گاز تولید کرد که حجم بیشتر آن شامل دی‌اکسید کربن بوده و حجم متان تولید شده از هاضم کنترل بسیار ناچیز بود و صفر در نظر گرفته شد. این موضوع نشان می‌دهد بیشتر مواد جامد فرار ماده تلقیح در هاضم صنعتی به بیوگاز تبدیل شده است زیرا



شکل ۵ - بیوگاز تجمعی تولیدی از هضم تک ماده‌ای (هر نقطه میانگین دو هاضم)

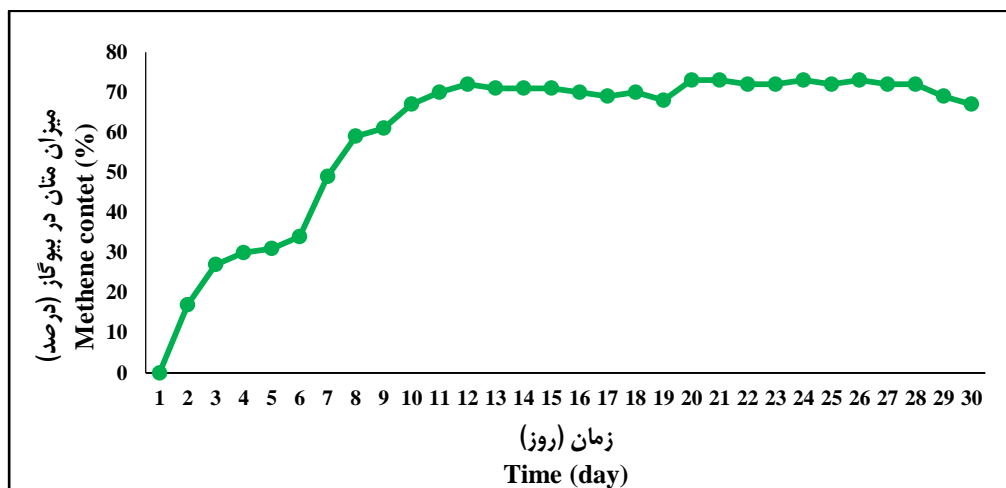
Fig. 5- Cumulative of biogas production at mono-digestion (each point is the average of two digester)

نمودار درصد متان تشکیل‌دهنده روزانه بیوگاز در شکل ۶ مشاهده می‌شود. میانگین متان ۲۳۰ میلی‌لیتر به ازای هر گرم مواد جامد فرار حذف شده، بعد از زمان گرنز برای ضایعات آلی زباله جامد شهری به دست آمد که این میزان معادل ۶۲٪ از میزان بیوگاز به دست آمده می‌باشد. میزان متان حاصل از بیوگاز نشان‌دهنده کیفیت بیوگاز می‌باشد که به مجموعه‌ای از عوامل از قبیل نسبت کربن به نیتروژن، تعادل بین ذرات بستگی دارد. همان‌طور که بیان شد مناسب‌ترین

بدین صورت که تولید بیوگاز ابتدا به کندی صورت می‌گیرد (تا روز هشتم) و سپس شروع به افزایش نموده و به حد ماکزیمم خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد (روز ۲۹م). با این توضیح که برای رسم نمودار و تحلیل‌ها در این مطالعه زمان گرنز در نظر گرفته شده است که عبارتست از زمانی که تولید روزانه از ۱٪ تولید مجموع کمتر باشد. بعد از زمان گرنز، میزان بیوگاز تولید شده ۳۷۲ میلی‌لیتر به ازای هر گرم مواد جامد فرار به دست آمد.

خواهد بود (Borowski *et al.*, 2014)، هرچند در برخی منابع در نسبت‌های پایین‌تر و بالاتر از این محدوده نیز متان قابل توجهی تولید شده است (Nielfa *et al.*, 2015; Guarino *et al.*, 2016).

نسبت کربن به نیتروژن در منابع مختلف بین ۱۵ تا ۳۰ گزارش شده است (Li *et al.*, 2013; Ahmadi-Pirlou *et al.*, 2017)، اما به نظر می‌رسد هر چه نسبت کربن به نیتروژن به محدوده ۲۰ تا ۳۰ نزدیک‌تر باشد برای هضم بی‌هوازی مناسب‌تر



شکل ۶- میزان متان موجود در بیوگاز در هضم تک ماده‌ای (هر نقطه میانگین دو هاضم)

Fig. 6- Methane content of biogas production at mono-digestion (each point is the average of two digester)

مقایسه با پژوهش (Rodriguez *et al.*, 2012) که در قسمت مقدمه آمد، با توجه به همسویی زمان گرنز به دست آمده برای ضایعات آلی زباله جامد شهری در این پژوهش (۲۹ روز) در مقایسه با زمان ماند مواد جامد ۳۰ روز یکی از دلایل بیشتر شدن میزان متان در این پژوهش بخاطر محاسبه آن بر اساس مواد جامد فرار حذف شده که بخشی از مواد جامد فرار تغذیه شده است، می‌باشد بنابراین عدد مواد جامد فرار حذف شده کوچک‌تر از مواد جامد فرار ورودی می‌باشد. البته در صورت محاسبه پژوهش فوق بر اساس مواد جامد فرار حذف شده قطعاً میزان متان آنها افزایش خواهد یافت که این افزایش را می‌توان به نوع مواد، نیمه‌پیوسته بودن و تحت همزنی مداوم قرار داشتن فرآیند نسبت داد.

محققان در مطالعه خود نتایج مشابهی را به دست آوردند که در آن میزان تولید متان در لجن صنعتی و کود گاوی کمتر از ضایعات آلی زباله جامد شهری بود و دلیل آن را ظرفیت متان کمتر این ضایعات عنوان کردند (Capela *et al.*, 2008). میزان متان بالاتر زباله جامد شهری و کود گاوی را می‌توان به نسبت کربن به نیتروژن مناسب‌تر، ساختار مواد تشکیل‌دهنده این ضایعات و تعادل بین آن‌ها نسبت داد. معمولاً درصد متان در رنج ۵۰ تا ۸۰ درصد در فرآیند هضم بی‌هوازی قابل قبول است (Derbal *et al.*, 2012). زمان گرنز برای هضم تک ماده ۲۹ روز برای این ضایعات به دست آمد.

مطالعات مشابه که در بخش مقدمه آمد، نتایجی نزدیک به پژوهش حاضر را نشان می‌دهند که اکنون به مقایسه و دلایل علمی آن‌ها پرداخته می‌شود. در

ضایعات آلی زباله جامد شهری در شرایط مزوفیلیک (بینابین) ۳۸۲ میلی‌لیتر متان به ازای هر گرم مواد جامد فرار بارگذاری شده به دست آوردند. آن‌ها گزارش کردند درصد متان در بیوگاز بعد از شرایط پایدار همواره بالای ۵۵٪ بوده است. این میزان متان در مقایسه با پژوهش حاضر به میزان قابل توجهی بیشتر است که با توجه به یکسان بودن اکثر شرایط می‌توان آن را به نوع خصوصیات و نسبت ضایعات به ماده تلقیح ۱ به ۲ نسبت داد. ماده تلقیح بیشتر با فراهم آوردن میکروارگانیسم‌ها و باکتری‌های بیشتر باعث افزایش تولید متان گشته است (Ponsa *et al.*, 2011).

در مقایسه با تحقیق (Novarino & Zanetti, 2012) که میزان بیوگاز آن‌ها با پژوهش حاضر اختلاف قابل توجهی دارد را می‌توان به ماهیت ضایعات و پیش تیمار خوب صورت گرفته و پیوسته بودن سیستم نسبت داد. همچنین آن‌ها گزارش کردند بعد از شرایط پایدار تولید بیوگاز میزان متان موجود در بیوگاز همواره بالای ۶۰٪ بوده است. در جدول ۳ مقایسه‌ای بین نتایج این پژوهش و مطالعات قبلی آورده شده است.

در مطالعه (Derbal *et al.*, 2012) میزان بیوگاز و متان در شرایط ترموفیلیک (گرمادوست) بیشتر از شرایط مزوفیلیک (بینابین) می‌باشد که دلیل احتمالی آن می‌تواند تاثیرات دما باشد. در مقایسه با پژوهش (Fdez-Guelfo *et al.*, 2011) که نتایجشان نشان داد در شرایط بدون پیش تیمار ۳۱۰ میلی‌لیتر متان به ازای هر گرم مواد جامد فرار حذف شده و در شرایط با پیش تیمار ۴۲۰ میلی‌لیتر متان به ازای هر گرم مواد جامد فرار حذف شده به دست آمد که بهبود ۳۵/۵٪ را با پیش تیمار نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد علاوه بر شرایط نیمه‌پیوسته، پیش تیمار کردن دمای بالا، درصد مواد بالاتر در این پژوهش از عوامل افزایش میزان متان نسبت به پژوهش حاضر می‌باشد.

در مطالعه‌ای دیگر محققان از هضم بی‌هواری حالت تر ضایعات آلی زباله جامد شهری در شرایط مزوفیلیک (بینابین) (۳۷ درجه سلسیوس) ۲۹۸ میلی‌لیتر متان به ازای هر گرم مواد جامد فرار تغذیه شده به دست آوردند (Martin-Gonzalez *et al.*, 2010). همچنین گروهی دیگر از محققین، از هضم بی‌هواری حالت جامد (درصد مواد جامد ۲۰٪)

جدول ۳- مقایسه نتایج پژوهش حاضر و مطالعات پیشین روی ضایعات آلی زباله جامد شهری

Table 3- Comparison of this study results with previous reseach on organic fraction of municipal solid waste

VSr (%)	محصول (Yield) (mL/gVS)	C/N	TS (%)	دما (Temperature)	روش هضم (Type of digestion)	منبع (Reference)
-	$Y_M=200$	-	20	M	(SRT=30) Semi-continous	Rodriguez <i>et al.</i> , 2012
-	$Y_M=360$	-	20	M	(SRT=20) Semi-continous	Rodriguez <i>et al.</i> , 2012
-	$Y_M=240$	-	20	M	(SRT=15) Semi-continous	Rodriguez <i>et al.</i> , 2012
-	$Y_M=275$	-	-	M	BMP test	Derbalet <i>et al.</i> , 2012
-	$Y_M=300$	-	-	T	BMP test	Derbalet <i>et al.</i> , 2012
-	$Y_M=310$	-	30	T	Semi-continous with treatment	Fdez-Guelfoet <i>et al.</i> , 2011
-	$Y_M=420$	-	30	T	Semi-continous without treatment	Fdez-Guelfoet <i>et al.</i> , 2011
65.2	$Y_M=298$	-	Wet	M	BMP test	Martin-Gonzalez <i>et al.</i> , 2010
66	$Y_M=240$	-	4	M	Continuuous	Martin-Gonzalez <i>et al.</i> , 2010
-	$Y_M=382$	14	20	M	BMP test	Ponsaet <i>et al.</i> , 2011
60-70	$Y_B=600-800$	-	3-10	M, T	Continuuous	Novarino& Zanetti, 2012
64.7	$Y_M=236$	38.28	20	M	BMP test	پژوهش حاضر

درصد کاهش مواد جامد فرار

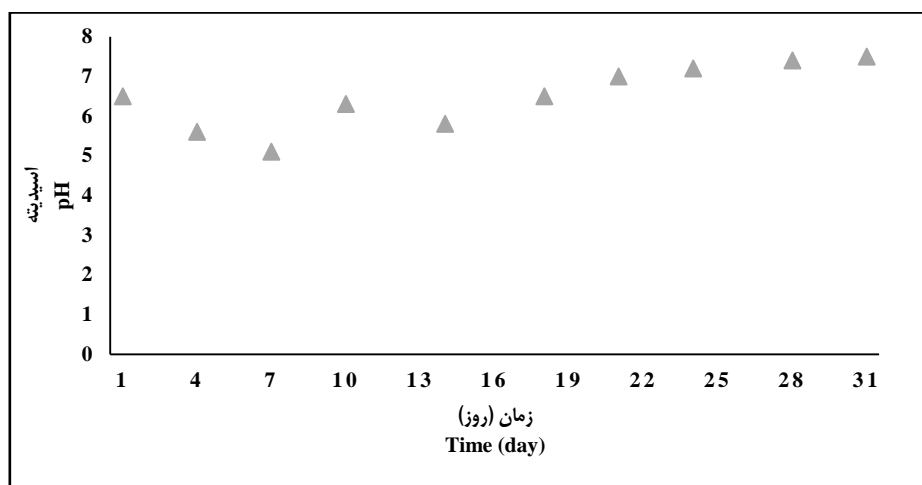
درصد کاهش مواد جامد فرار به نوعی بیانگر میزان بهره‌وری آزمایش هضم بی‌هوازی است به این معنی که هرچه این پارامتر بیشتر باشد مواد جامد فرار بیشتری به بیوگاز تبدیل شده است. در هضم تک ماده بی‌هوازی این فاکتور $0.64/7$ ، برای زباله جامد شهری حاصل گردید، که با پژوهش‌های صورت گرفته همسو می‌باشد. فرناندز و همکاران (Fernandez *et al.*, 2008) در هضم بی‌هوازی حالت جامد ضایعات آلی زباله جامد شهری در دو سطح 20% و 30% مواد جامد کل در شرایط مزوفیلیک (بینابین) میزان حذف مواد جامد فرار را به ترتیب $49/95\%$ و $40/91\%$ گزارش کردند. محققان در مطالعه‌ای از هضم بی‌هوازی ضایعات آلی زباله جامد شهری، درصد کاهش مواد جامد فرار را به میزان $65/2\%$ به دست آوردند (Martin-Gonzalez *et al.*, 2010). در پژوهشی دیگر میزان کاهش مواد جامد فرار از هضم بی‌هوازی ضایعات آلی زباله جامد شهری 70% - 60% گزارش گردید (Novarino & Zanetti, 2012) که نتایج پژوهش حاضر نیز در همین محدوده می‌باشد.

تغییرات pH

pH یکی از شاخص‌های بسیار مهم برای ارزیابی

ثبات فرآیند هضم بی‌هوازی می‌باشد، و تاثیر عمده‌ای بر میکروارگانیسم‌های اسیدزا و متان‌زا دارد. به طور کلی فرآیند هضم بی‌هوازی یک فرآیند خود تنظیم کننده pH می‌باشد. در شروع هضم بی‌هوازی، pH هم‌زمان با تبدیل مواد آلی ریزمولکولی به اسیدهای چرب، به سرعت پایین می‌آید، سپس هنگامی که اسیدهای چرب توسط متان‌زها مصرف می‌شوند شروع به بالا آمدن می‌کند. pH بعد از افزایش، تا پایان هضم تقریباً پایدار باقی می‌ماند (Marousi & leyli, 2009; Huang *et al.*, 2016).

در این پژوهش، نمودار تغییرات pH برای این ضایعات در شکل ۷ نشان داده شده است. مقدار pH ضایعات آلی زباله جامد شهری طی ۷ روز نخست کاهش می‌یابد، و سپس شروع به افزایش می‌کند. pH هاضم بی‌هوازی در ابتدا به خاطر تولید اسیدهای فرار کاهش می‌یابد. اما با فعالیت باکتری‌های متان‌ساز، اسیدهای فرار مصرف شده و pH هاضم افزایش یافته و سپس تثبیت می‌شود (Marousi & leyli, 2009). همان‌طور که دیده می‌شود این نمودار با فرآیند هضم بی‌هوازی و تغییرات pH در مراحل مختلف آن با پژوهش‌های قبلی برای ضایعات آلی زباله جامد شهری (Rodriguez *et al.*, 2012) مطابقت دارد.



شکل ۷- تغییرات اسیدیته در طول دوره هضم بی‌هوازی

Fig. 7- pH variation during anaerobic digestion period

دست می‌دهد و شامل ۶۱/۸۲٪ گاز متان به عنوان ارزشمندترین ترکیب بیوگاز می‌باشد که نشان‌دهنده کیفیت مطلوب و مناسب بیوگاز می‌باشد. همچنین میزان درصد کاهش مواد جامد فرار ۶۴/۷٪ به دست آمد.

بنابراین می‌توان از این روش برای مدیریت ضایعات آلی مختلف و همچنین تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر استفاده نمود. پیشنهاد می‌گردد این ارزیابی‌ها برای سایر ضایعات نیز انجام شود و تحلیل اقتصادی نیز به منظور تجاری‌سازی صورت گیرد.

نتیجه‌گیری

برای استفاده بهینه از ضایعات کشاورزی و صنایع فرآوری محصولات کشاورزی، مدیریت ضایعات و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، ارزیابی منابع جدید، پاک و تجدیدپذیر انرژی میزان بیوگاز تولیدی از ضایعات آلی زباله جامد شهری اندازه‌گیری شد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد هضم بی‌هوازی ضایعات مورد نظر در شرایط مزوفیلیک (بینابین) و حالت جامد، ۳۷۲ میلی‌لیتر بیوگاز به ازای هر گرم مواد جامد فرار در شرایط نرمال آزمایشگاهی به

قدردانی

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از همه کسانی که در کلیه مراحل این پژوهش ما را یاری نمودند، اعلام می‌دارند.

مراجع

- Abudi, Z.N., Hu, Z., Sun, N., Xiao, B., Rajaa, N., Liu, C., & Guo, D. (2016). Batch anaerobic co-digestion of OFMSW (organic fraction of municipal solid waste), TWAS (thickened waste activated sludge) and RS (rice straw): Influence of TWAS and RS pretreatment and mixing ratio. *Energy*, 107, 131-140.
- Ahmadi-Pirlou, M., Ebrahimi-Nik, M., Khojastehpour, M., & Ebrahimi S. H. (2017). Mesophilic co-digestion of municipal solid waste and sewage sludge: Effect of mixing ratio, total solids, and alkaline pretreatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 125, 97-104.

- Almassi M. (1976). Anaerobic digestion of agricultural waste with particular reference to energy recovery and pollution control (Ph. D. thesis), Agricultural Engineering. University of Reading.
- Anon. (2005). Standard methods for examination of water and wastewater. 21st Ed. American Public Health Association. New York.
- Anon. (2011). Composot, sampling and physical and chemical test methods. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. No. 13320. Iran National Standard. (in Persian)
- Borowski, S., Domanski, J., & Weatherley, L. (2014). Anaerobic co-digestion of swine and poultry manure with municipal sewage sludge. *Waste Management*, 34, 513-521.
- Brown, D., & Li, Y. (2013). Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresource Technology*, 127, 275-280.
- Capela, I., Rodrigues, A., Silva, F., Nadais, H., & Arroja, L. (2008). Impact of industrial sludge and cattle manure on anaerobic digestion of the OFMSW under mesophilic conditions. *Biomass and Bioenergy*, 32, 245-251.
- Cuetos, M. J., Gomez, X., Otero, M., & Moran, A. (2008). Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Biochemical Engineering Journal*, 40, 99-106.
- Cui, Z., Shi, J., & Li, Y. (2011). Solid-state anaerobic digestion of spent wheat straw from horse stall. *Bioresource Technology*, 102, 9432-9437.
- Dai, X., Duan, N., Dong, B., & Dai, L. (2013). High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: Stability and performance. *Waste Management*, 33, 308-316.
- Derbal, K., Bencheikh-Lehocine, M., & Meniai, A. H. (2012). Study of biodegradability of organic fraction of municipal solids waste. *Energy Procedia*, 19, 239-248.
- Fdez-Güelfo, L. A., Álvarez-Gallego, C., Márquez, D. S., & García, L. I. R. (2011). Biological pretreatment applied to industrial organic fraction of municipal solid wastes (OFMSW): Effect on anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal*, 172, 321-325.
- Fernandez, J., Perez, M., & Romero, L. I. (2008). Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Bioresource Technology*, 99, 6075-6080.
- Forster-Carneiro, T., Perez, M., Romero, L. I., & Sales, D. (2007). Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: Focusing on the inoculum sources. *Bioresource Technology*, 98, 3195-3203.
- Garcia, A. J., Esteban, M. B., Marquez, M. C., & Ramos, P. (2005). Biodegradable municipal solid waste: Characterization and potential use as animal feedstuffs. *Waste Management*, 25, 780-787.
- Ghanimeh, S., El Fadel, M., & Saikaly, P. (2012). Mixing effect on thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 117, 63-71.

- Guarino, G., Carotenuto, C., Cristofaro, F. D., Papa, S., Morrone, B., & Minale, M. (2016). Does the C/N ratio really affect the Bio-methane Yield? A three years investigation of Buffalo Manure Digestion. *Chemical Engineering Transactions*, 49, 463-468.
- Hazinia, R. (2011). Comparison and evaluation of biogas quantity and quality which obtain from cattle, poultry and plant wastes on the laboratory conditions (M. Sc. Thesis), Agricultural Mechanization Engineering. Islamic Azad University, Science and Research Branch. (in Persian)
- Huang, X., Yun, S., Zhu, J., Du, T., Zhang, C., & Li, X. (2016). Mesophilic anaerobic co-digestion of aloe peel waste with dairy manure in the batch digester: Focusing on mixing ratios and digestate stability. *Bioresource Technology*, 218, 62-68.
- Kaluza, L., Šuštaršič, M., Rutar, V., & Zupancic, G. D. (2014). The re-use of Waste-Activated Sludge as part of a “zero-sludge” strategy for wastewater treatments in the pulp and paper industry. *Bioresource Technology*, 151, 137-143.
- Li, C., Champagne, P., & Anderson, B. C. (2011). Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions. *Bioresource Technology*, 102, 9471-9480.
- Li, Y., Zhang, R., Chen, C., Liu, G., He, Y., & Liu, X. (2013). Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions. *Bioresource Technology*, 149, 406-412.
- Liu, G., Zhang, R., El-Mashad, H. M., Dong, R. (2009). Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. *Bioresource Technology*, 100, 5103-5108.
- Marousi, M., & Leyli, M. (2009). The microbiology of anaerobic digesters. First Ed. Shahrab Pub. Tehran. (in Persian)
- Martín-González, L., Colturato, L. F., Font, X., & Vicent, T. (2010). Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant: Recovering a wasted methane potential and enhancing the biogas yield. *Waste Management*, 30, 1854-1859.
- Murto, M., Bjornsson, L., & Mattiasson, B. (2004). Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *Journal of Environmental Management*, 70, 101-107.
- Nielfa, A., Cano, R., & Fdz-Polanco, M. (2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*, 5, 14-21.
- Novarino, D., & Zanetti, M. C. (2012). Anaerobic digestion of extruded OFMSW. *Bioresource Technology*, 104, 44-50.
- Ponsa, S., Gea, T., & Sanchez, A. (2011). Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates. *Biosystems Engineering*, 108, 352-360.

- Rodríguez, J. F., Pérez, M., & Romero, L. I. (2012). Mesophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Optimisation of the semicontinuous process. *Chemical Engineering Journal*, 193-194, 10-15.
- Rodríguez-Abalde, A., Flotats, X., & Fernández, B. (2017). Optimization of the anaerobic co-digestion of pasteurized slaughterhouse waste, pig slurry and glycerine. *Waste Management*, 61, 521-528.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 849-860.
- Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H., & Tan, T. (2013). The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology*, 129, 170-176.
- Zhang, W., Wei, Q., Wu, S., Qi, D., Li, W., Zuo, Z., & Dong, R. (2014). Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions. *Applied Energy*, 128, 175-183.

Research Paper**Solid State Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste for Biogas Production (Case Study in Mashhad)****M. Saghouri*, R. Abdi, M. A. Ebrahimi Nik, A. Rohani and M. A. Meisami**

* Corresponding Author: Ph. D. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran. Email: saghouri.mohsen@gmail.com
Received: 14 January 2020, Accepted: 1 July 2020

Abstract

Increasing in consumption of fossil fuels and their price and environmental impacts, have led to a growing need and interest in replacement of these fuels with new and renewable energy sources. Anaerobic digestion is one of the attractive methods to produce biogas from organic matter. Wet state and solid state are the categories of anaerobic digestion. Some benefits of solid-state anaerobic digestion (SS-AD) include the need for smaller reactor capacity requirements, less energy used for heating, and easier handling. In this study, SS-AD of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) was examined. The study was done in the laboratory scale of (1-liter volume), mesophilic condition (37°C), and 20% solid content. Characterization of OFMSW indicated good potential of these materials to produce biogas through SS-AD (69.37% of total solids, 76.2% of volatile solids, and a C/N ratio of 38.28%). According to the results of SS-AD, a total of 372 ml biogas/g of volatile solids was obtained under normal laboratory conditions, of which 230 ml (61.82%) was methane. Also, a reduction of 64.7% was obtained for volatile solids, which is one of the parameters of the experiment productivity.

Keywords: Batch Anaerobic Digestion, Methane, Organic Waste, Renewable Energies, Waste Management

© 2020 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran.

[This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0 license\)](#)

