

# ارزیابی تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی حالت خشک لجن فاضلاب شهری

محسن ثقوری<sup>۱</sup>، رضا عبدی<sup>۱</sup>، محمدعلی ابراهیمی نیک<sup>۲</sup>، عباس روحانی<sup>۳</sup> و محمدعلی میسمی<sup>۱\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۸/۸/۸

تاریخ پذیرش: ۹۹/۲/۲۳

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\*مسئول مکاتبه [maysami@tabrizu.ac.ir](mailto:maysami@tabrizu.ac.ir)

## چکیده

با توجه به افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی در جهان، همچنین افزایش قیمت و اثرات زیست محیطی آن‌ها، امروزه نیاز و علاقه به جایگزینی آن‌ها با منابع جدید و تجدیدپذیر انرژی زیاد شده است. یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر بیوگاز است و هضم بی‌هوازی یکی از روش‌های تولید بیوگاز از مواد آلی است که روز به روز در حال گسترش می‌باشد. یکی از تقسیم‌بندی‌های هضم بی‌هوازی حالت مایع و حالت خشک است. برخی از مزایای هضم بی‌هوازی حالت جامد شامل حجم کمتر مورد نیاز رآکتور، انرژی کمتر برای گرم کردن و جابجایی راحت‌تر است. در این پژوهش هضم بی‌هوازی حالت جامد لجن فاضلاب شهری مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی (حجم ۱ لیتر)، دمای مزوفیلیک (۳۷ درجه سانتی‌گراد) و سهم مواد جامد ۲۰٪ انجام گرفت. نتایج ارزیابی خصوصیات لجن فاضلاب شهری نشان داد این مواد از پتانسیل خوبی برای تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی حالت جامد برخوردارند (سهم مواد جامد کل ۲۵/۷٪، سهم مواد جامد فرار ۵۰/۷٪ و نسبت کربن به‌ازت ۱۱/۷). همچنین نتایج حاصل از هضم بی‌هوازی نشان داد مقدار ۳۶۲ میلی‌لیتر بیوگاز به‌ازای هر گرم مواد جامد فرار در شرایط نرمال آزمایشگاهی به‌دست آمد. از این میزان ۲۱۳ میلی‌لیتر متان حاصل شد که معادل ۵۸/۸٪ است. همچنین میزان درصد کاهش مواد جامد فرار که یکی از پارامترهای بهره‌وری آزمایش است ۶۳/۷٪ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، بیوگاز، لجن فاضلاب شهری، هضم بی‌هوازی حالت جامد

## اختصارات

MSS	Municipal Sewage Sludge	لجن فاضلاب شهری
SS	Sewage Sludge	فاضلاب شهری
TS	Total Solids	مواد جامد کل
VS	Volatile Solids	مواد جامد فرار
C	Carbon	کربن
N	Nitrogen	نیتروژن
C/N	Carbon to Nitrogen Ratio	نسبت کربن به نیتروژن
pH	Acidity	اسیدیته
T	Thermophilic	گرم‌دوست
M	Mesophilic	معتدل‌دوست
VSr	Volatile Solids Reduction	کاهش مواد جامد فرار
Y <sub>B</sub>	Yields of Biogas	میزان تولید بیوگاز
Y <sub>M</sub>	Yields of Methane	میزان تولید متان
BMP Test	Biochemical Methane Potential Test	آزمون پتانسیل بیوشیمیایی متان

## ۱- مقدمه

در حال حاضر تاسیسات هضم بی‌هوازی حالت خشک مقیاس تجاری در ایران وجود ندارد. البته پژوهش‌های مفیدی به‌ویژه در مقیاس آزمایشگاهی در زمینه تولید بیوگاز اغلب به‌روش هضم بی‌هوازی حالت مایع انجام گرفته است.

با توجه به مزایای اقتصادی و محیط زیستی هضم بی‌هوازی حالت خشک در مقیاس با روش‌های کنونی مدیریت زباله جامد شهری و سایر زباله‌های جامد از قبیل سوزاندن، لندفیل و کمپوست کردن، استفاده تجاری هضم بی‌هوازی حالت خشک در کشور مورد انتظار است. پیش از تجاری‌سازی، ارزیابی و نشان دادن کارایی تولیدی و اقتصادی این فناوری به خصوص در منطقه جایی که هنوز روش‌های مرسوم مانند لندفیل از نظر هزینه پایین‌تر است، لازم است. بدین منظور استفاده از ضایعات موجود در منطقه، سودمندی ماده هضم شده، کنترل ثبات و طراحی رآکتور مورد نیاز است. بنابراین، هدف این مطالعه ارزیابی تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی حالت خشک لجن فاضلاب شهری است که بدین منظور میزان بیوگاز، میزان متان و میزان کاهش مواد جامد فرار از ضایعات مورد نظر در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- تهیه و آماده‌سازی مواد اولیه

## لجن فاضلاب شهری

لجن فاضلاب شهری از استخر آبیگری مجتمع تصفیه فاضلاب شهری پرکنندآباد شهر مشهد به‌دست آمد و سریعاً به آزمایشگاه بیوگاز گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد منتقل و در یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. مجتمع تصفیه فاضلاب شهری پرکنندآباد با ظرفیت تصفیه ۱۵۰۰۰ مترمکعب در روز در غرب مشهد واقع شده است. در حال حاضر، فاضلاب شهری به یک استخر منتقل شده و به مدت ۴ الی ۵ روز تا زمانی که ۸۰-۶۰٪ آب آن تبخیر شود نگهداری می‌شود. پس از آن جمع‌آوری شده و به لندفیل منتقل می‌گردد. از ضایعات نمونه‌گیری به عمل آمده و خصوصیات مربوط به هضم بی‌هوازی برای آن‌ها تعیین گردید. این خصوصیات شامل درصد رطوبت و درصد مواد جامد کل و مواد جامد فرار با استاندارد APHA، درصد نیترژن (به‌روش کج‌لدال)، درصد کربن (به-روش والکلی بلاک) و اسیدیته (توسط پی‌اچ متر) مطابق با استاندارد ۱۳۳۲۰ ایران بود.

## ماده تلقیح

برای اغلب مواد اولیه، ماده تلقیح برای شروع تولید متان در هضم بی‌هوازی لازم است. از دوغاب هضم شده هاضم تحت همزنی پیوسته در مقیاس تجاری 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 به‌میزان ۱۵٪ حجم

افزایش جهانی صنعتی شدن و شهری شدن جوامع، به‌طور قابل توجهی مقدار ضایعات تولید شده شهری را افزایش داده است. اگر این ضایعات به‌طور مناسب مدیریت نشود، ممکن است اثرات نامطلوبی بر بهداشت و سلامت انسان بگذارند. هضم بی‌هوازی می‌تواند یک استراتژی مدیریتی کارآمد برای بهره‌برداری ضایعات شهری باشد که تولید بیوگاز و کود بهداشتی مطلوب را به‌همراه دارد (گارسسیا و همکاران، ۲۰۰۵).

بیوگاز یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر است که می‌تواند در کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار گیرد. بیوگاز می‌تواند برای استفاده به عنوان یک منبع سوخت خودرو مانند گاز طبیعی فشرده (CNG)، فشرده گردد. در شکل دیگر، بیوگاز می‌تواند برای تولید گرما یا الکتریسیته، سوزانده شود یا برای تولید متانول تبدیل به مایع شود. هم‌چنین بیوگاز می‌تواند به‌عنوان خوراک اولیه برای کاتالیزور 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 (ویلند، ۲۰۱۰).

اگر ترکیبات آلی ضایعات جامد توسط هضم بی‌هوازی به انرژی تبدیل شود، می‌تواند تأثیرات مضر بر محیط زیست را کاهش داده و در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی کمک کند. پیش از تاسیس به‌عنوان یک فناوری قابل اعتماد در اروپا و آسیا، هضم بی‌هوازی برای مدیریت بیش از ۱۰٪ از ضایعات آلی در چندین کشور اروپایی استفاده می‌شد. فرآیندهای هضم بی‌هوازی بر اساس پارامترهای عملکردی بحرانی و طرح رآکتور از قبیل پیوستگی (ناپیوسته و پیوسته)، دمای عملکردی (سایکروفیلیک، مزوفیلیک و ترموفیلیک)، طرح رآکتور (جریان بالا، اختلاط کامل و لاگون پوشیده) و محتوای جامد (تر و خشک) دسته‌بندی می‌شوند. هضم بی‌هوازی حالت خشک به‌شرایطی گفته می‌شود که در آن غلظت مواد جامد کل خوراک اولیه برای هضم شدن معمولاً بالاتر از ۱۵٪ است (لی و همکاران، ۲۰۱۱).

هضم بی‌هوازی حالت خشک به دلایلی شامل حجم کمتر رآکتور، انرژی کمتر مورد نیاز برای گرمایش، کمترین جابجایی مواد و مجموع انرژی از دست رفته کمتر، مزایایی بر هضم بی‌هوازی مایع دارد. تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی حالت خشک با میزان تولید حالت مایع قابل مقایسه است. به‌دلیل کمتر بودن میزان رطوبت در مواد باقی مانده از هضم بی‌هوازی حالت خشک، ماده هضم شده می‌تواند به‌عنوان کود یا سوخت پلت شده استفاده شود که جابجایی آن بسیار راحت‌تر از دوغاب خروجی هضم حالت مایع است. در حال حاضر حدود ۵۴٪ از مجموع ظرفیت هضم بی‌هوازی نصب شده در اروپا، بوسیله فناوری هضم بی‌هوازی حالت خشک تأمین شده است و سهم سامانه‌های هضم خشک از سال ۲۰۰۵ در حال افزایش است (لی و همکاران، ۲۰۱۱).

جامد فرار درصدی از مواد جامد کل است که باز هم بالا بودن میزان مواد جامد کل هم‌زمان با مواد جامد فرار، نشان‌دهنده مناسب بودن این ضایعات برای تولید بیوگاز است. فاکتور موثر بعدی در تولید بیوگاز که مستقیماً به ضایعات بستگی دارد نسبت کربن به‌ازت است که معمولاً در صورت برآورده شدن نسبت ۱:۳۰-۲۰ ایده‌آل است (عمرانی، ۱۳۷۵). در پژوهش‌های پیشین تولید بیوگاز در نسبت‌های مختلف کربن به‌ازت انجام شده و محدودیت قطعی ذکر نشده است (مورتو و همکاران، ۲۰۰۴؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ دای<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ نیلفا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۵ و رودریگز ابالده<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۱: خصوصیات لجن فاضلاب شهری

نوع ضایعات	لجن فاضلاب شهری
میزان رطوبت (%)	۷۴/۳
مواد جامد کل (%)	۲۵/۷
مواد جامد فرار (%)	۵۰/۷
کربن (%)	۳۲/۵۳
نیترژن (%)	۲/۷۸
نسبت کربن به‌ازت (%)	۱۱/۷
اسیدیته	۷/۶

از آنجا که در این پژوهش هدف اصلی میزان تولید بیوگاز از ضایعات مورد نظر بوده و بهینه‌سازی از اهداف نبوده، وضعیت موجود نسبت کربن به‌ازت ضایعات در نظر گرفته شد. فاکتور موثر دیگر در تولید بیوگاز میزان اسیدیته است. اسیدیته مناسب برای فرآیند هضم بی-هوازی حالت خنثی (۸-۶/۸) ذکر شده است (عمرانی، ۱۳۷۵). همان‌گونه که مشاهده می‌شود اسیدیته این ضایعات در محدوده مناسب قرار دارد. در جدول ۲ مقایسه‌ای بین پژوهش حاضر و مطالعات قبلی آمده است.

### ۲-۳- 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 است. از آنجایی که مهم‌ترین هدف و محصول فرآیند هضم بی‌هوازی تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر است و هم‌چنین مهم‌ترین هدف این پژوهش امکان‌سنجی تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب شهری در حالت جامد است، لذا پارامترهای ذکر شده مورد ارزیابی قرار گرفت.

ابتدا هاضم کنترل که فقط شامل ماده تلقیح بود ارزیابی گردید. این هاضم تنها در چند روز اول گاز تولید کرد که حجم بیشتر آن

کاری هاضم در نظر گرفته شد. این ماده با توجه به نداشتن ماده فرار قابل توجه، بر میزان بیوگاز تأثیری نداشته و فقط در شروع و تسریع روند واکنش اثر می‌گذارد. افزودن این ماده باعث مناسب‌شدن پی‌اچ برای شروع آزمایش می‌گردد (لیو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹).

### ۲-۲- بارگذاری و به‌کار انداختن رآکتورهای آزمایشگاهی

به‌منظور تعیین میزان تولید بیوگاز تولیدی از بطری‌های شیشه‌ای ۱ لیتری با حجم کاری ۶۰۰ میلی‌لیتر استفاده گردید. رآکتورها با ضایعات آلی زباله جامد شهری در ۲ تکرار (براون و لی، ۲۰۱۳؛ لی و همکاران، ۲۰۱۳ و کوی و همکاران، ۲۰۱۱) و با غلظت ۲۰٪ پر شده و همان‌طور که ذکر شد به‌نسبت ۱۵٪ حجم کاری معادل ۹۰ میلی‌لیتر ماده تلقیح اضافه گردید. یک رآکتور فقط حاوی ماده تلقیح به‌عنوان شاهد استفاده شد. شرایط بی‌هوازی با تزریق گاز نیترژن به‌مدت ۳ دقیقه حاصل گردید. پس از آن رآکتورها در حمام آب گرم با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. همزنی روزانه به‌صورت دستی به‌مدت ۳ دقیقه قبل از اندازه‌گیری حجم بیوگاز انجام گرفت.

### ۲-۳- اندازه‌گیری مقدار و ترکیبات بیوگاز تولیدی

میزان گاز تولیدی روزانه به‌روش جایجایی آب تعیین شد. درصد متان تولیدی به‌عنوان مهم‌ترین فاکتور نشان‌دهنده کیفیت بیوگاز تولیدی، به‌روش آینه‌ورن تعیین گشت (کالوزا<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). 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 در آینه‌ورن تزریق می‌شود. به‌دلیل انحلال‌پذیری بالای دی-اکسیدکربن با این محلول، بخش دی‌اکسیدکربن بیوگاز در آن حل گشته 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. پی‌اچ هاضم‌ها هر سه روز یک‌بار توسط پی‌اچ متر تعیین گردید.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- خصوصیات مواد اولیه

خصوصیات لجن فاضلاب شهری در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد ضایعات موردنظر حاوی مواد جامد فرار بالایی است یعنی همان موادی که مستقیماً به بیوگاز تبدیل شده و مقدار گاز تولیدی از ضایعات مختلف رابطه مستقیمی با آن دارد. مواد

<sup>4</sup> Nielfa

<sup>5</sup> Rodríguez-Abalde

<sup>1</sup> Liu

<sup>2</sup> Kaluza

<sup>3</sup> Dai

شامل دی اکسید کربن بوده و حجم متان تولید شده از هاضم کنترل بسیار ناچیز بود و صفر در نظر گرفته شد. این موضوع نشان می‌دهد

جدول ۲: مقایسه خصوصیات مواد اولیه با پژوهش‌های پیشین

پژوهشگران (سال)	ضایعات	TS (%)	VS (%)	C (%)	N (%)	C/N	pH
پژوهش حاضر	MSS	۲۵/۷	۵۰/۷	۳۲/۵۳	۲/۷۸	۱۱/۷	۷/۶
تزل و همکاران، ۲۰۱۱	MSS	۵-۹	۶۰-۸۰	-	۱/۵-۴	-	۵-۸
بوروسکی و همکاران، ۲۰۱۴	MSS	۴/۸۵	۷۵/۲	-	۵/۸	-	-
سامولادا و همکاران، ۲۰۱۴	MSS	۷-۳۰	۵۰-۷۷	۴۹-۵۳	۴/۵-۷/۵	۷-۱۱/۴	-
دمیریاس و همکاران، ۲۰۱۶	MSS	-	۴۱-۶۰	۲۰-۴۱	۴/۵-۴/۹	۴-۱۰	-
دای و همکاران، ۲۰۱۳	SS	۲۰/۴	۵۶/۷	-	-	۷/۲	۷/۵
احمدی پیرلو، ۲۰۱۷	SS	۲۶	۵۰/۷	۳۴/۳	۳/۲	۱۰/۷	۷/۱

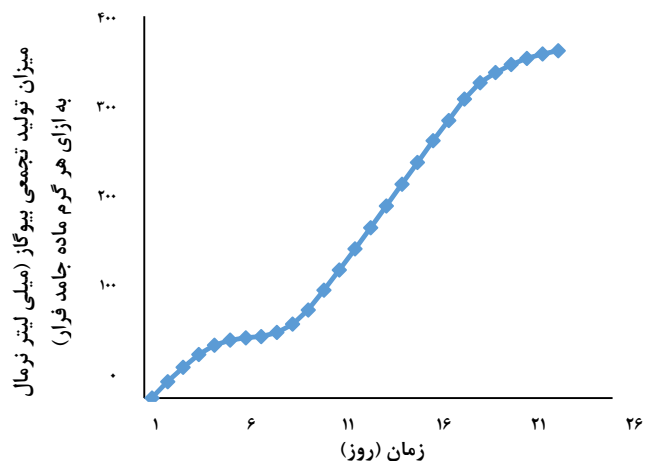
به دست آمد که این میزان معادل ۵۸/۸٪ از میزان بیوگاز به دست آمده است. میزان متان حاصل از بیوگاز نشان دهنده کیفیت بیوگاز است که به مجموعهای از عوامل از قبیل نسبت کربن به ازت و تعادل بین ذرات بستگی دارد. همان‌طور که بیان شد مناسب‌ترین نسبت کربن به ازت در منابع مختلف بین ۱۵ تا ۳۰ گزارش شده است (لی و همکاران، ۲۰۱۳ و احمدی پیرلو و همکاران، ۲۰۱۷)، اما به نظر می‌رسد هر چه نسبت کربن به ازت به محدوده ۲۰ تا ۳۰ نزدیک‌تر باشد برای هضم بی‌هوازی مناسب‌تر خواهد بود (بوروسکی و همکاران، ۲۰۱۴)، هرچند در برخی منابع در نسبت‌های پایین‌تر و بالاتر از این محدوده نیز متان قابل توجهی تولید شده است (نیلفا و همکاران، ۲۰۱۵ و گوارینو و همکاران، ۲۰۱۶). کاپلا و همکاران (۲۰۰۸) 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. معمولاً درصد متان در محدوده ۵۰ تا ۸۰ درصد در فرآیند هضم بی‌هوازی قابل قبول است (دربال و همکاران، ۲۰۱۲). زمان گرنز برای ۲۶ روز برای این ضایعات به دست آمد.

بوروسکی و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه خود هضم مشترک بی‌هوازی کود مرغی و کود خوک با لجن فاضلاب شهری را بررسی کردند. در بخش ارزیابی پتانسیل تولید متان آزمایشات آن‌ها به صورت ناپیوسته، حجم هاضم ۱ لیتر، حالت تر شرایط مزوفیلیک، بدون استفاده از ماده تلقیح و بدون انجام تکرار صورت گرفت. آزمایشات تا زمانی ادامه داشت که نرخ تولید بیوگاز اندازه‌گیری شده، بسیار ناچیز یا نزدیک به صفر باشد (کمتر از ۲۰ سانتی‌مترمکعب بیوگاز در روز). نتایج آن‌ها نشان داد از هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب شهری به تنهایی ۲۷۴ میلی‌لیتر بیوگاز به‌ازای هر گرم مواد جامد فرار تغذیه شده تولید گردید. محتوی بیوگاز آن‌ها شامل ۶۷/۱۵٪ متان بود که معادل ۱۸۴ میلی‌لیتر به‌ازای هر گرم مواد جامد فرار تغذیه شده بود. در مقایسه با پژوهش حاضر میزان بیوگاز اختلاف بیشتری نسبت به میزان متان دارد. بر اساس گزارش آن‌ها اختلاف تولید بیوگاز می‌تواند به وسیله ترکیب

بی‌شتر مواد جامد فرار ماده تلقیح در هاضم صنعتی به بیوگاز تبدیل شده است.

### میزان بیوگاز و متان

میزان تولید بیوگاز از لجن فاضلاب شهری در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب شهری با مراحل هضم بی‌هوازی و پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد. بدین صورت که تولید بیوگاز ابتدا به‌کندی صورت می‌گیرد (تا روز ۱۰ ام) و سپس شروع به افزایش نموده و به حد بیشینه خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد (روز ۲۶ ام). با این توضیح که برای رسم نمودار و تحلیل‌ها در این مطالعه زمان گرنز (حد مرزی) 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 ۳۶۲ میلی‌لیتر به‌ازای هر گرم مواد جامد فرار به دست آمد.

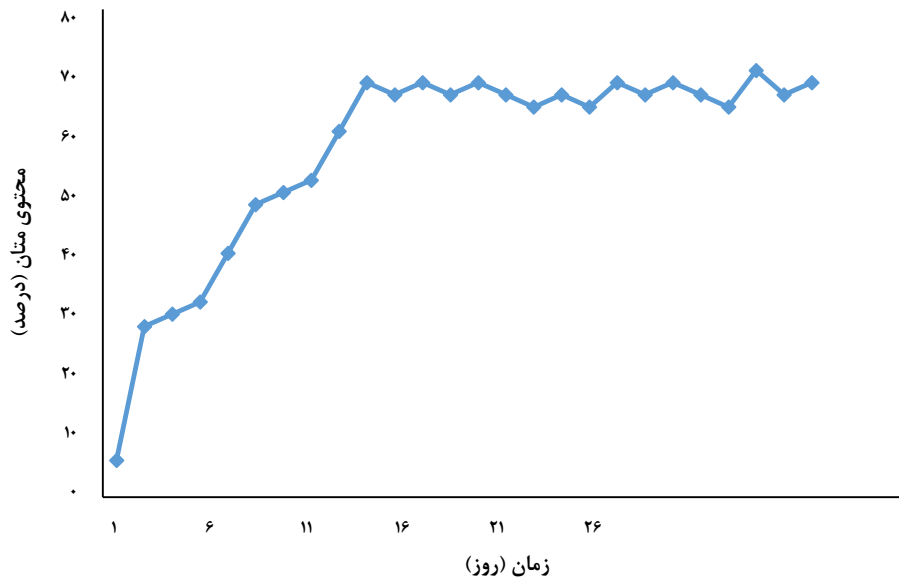


شکل ۱: بیوگاز تجمعی تولیدی از هضم تک ماده‌ای لجن فاضلاب شهری. هر نقطه میانگین دو هاضم

نمودار درصد متان تشکیل‌دهنده روزانه بیوگاز در شکل ۲ مشاهده می‌شود. میانگین تولید متان ۲۱۳ میلی‌لیتر به‌ازای هر گرم مواد جامد فرار حذف شده، بعد از زمان گرنز به‌ترتیب برای لجن فاضلاب شهری

است. از دلایل دیگر کم بودن تولید بیوگاز نسبت به پژوهش حاضر، می‌تواند عدم استفاده از ماده تلقیح باشد. در میزان متان همسویی با پژوهش حاضر مشاهده می‌گردد.

خاص تشکیل‌دهنده سوبسترا توضیح داده شود. هم‌چنین ترکیب تشکیل شده از مواد جامد بیشتر، دارای عناصر جزئی و کربن آلی بیشتر و بنابراین، اثرات متقابل بیشتر برای تولید بیوگاز نسبت به ترکیب مایع



شکل ۲: میزان متان موجود در بیوگاز از هضم تک ماده‌ای لجن فاضلاب شهری. هر نقطه میانگین دو هاضم است.

میزان متان ۳۰۰ میلی‌لیتر به‌ازای هر گرم مواد جامد فرار اضافه شده، به‌دست آمد. هم‌چنین آن‌ها میزان متان در بیوگاز را ۶۶٪ گزارش کردند که به نتیجه مطالعه حاضر نزدیک است. بیشتر بودن میزان متان آن‌ها را می‌توان به خصوصیات مواد نسبت داد. با توجه به بالا بودن میزان مواد جامد فرار در مطالعه آن‌ها (۷۸-۷۱٪) که باعث افزایش پتانسیل تولید بیوگاز و افزایش نرخ بارگذاری مواد جامد فرار می‌شود. هم‌چنین آن‌ها بیان کردند باید توجه داشت که اختلاف در محتوی متان در بیوگاز ممکن است به‌خاطر تفاوت در ترکیب ضایعات باشد. در جدول ۳ مقایسه‌ای با پژوهش‌های پیشین آورده شده است.

#### درصد کاهش مواد جامد فرار

درصد کاهش مواد جامد فرار به‌نوعی بیانگر میزان بهره‌وری آزمایش هضم بی‌هوازی است به این معنی که هرچه این پارامتر بیشتر باشد مواد جامد فرار بیشتری به‌بیوگاز تبدیل شده است. در هضم تک ماده بی‌هوازی این فاکتور ۶۳/۷٪ برای لجن فاضلاب شهری حاصل گردید، که با پژوهش‌های صورت گرفته همسو است.

بوروسکی و همکاران (۲۰۱۴) در هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب شهری میزان کاهش مواد جامد فرار را ۴۵/۷۸٪ گزارش کردند. در مقایسه با پژوهش حاضر مطالعه آن‌ها در حالت تر بود که میزان مواد جامد کل زیر ۱۰٪ است و میزان مواد جامد فرار نیز کمتر است. آن‌ها نتیجه گیری کردند ترکیب تشکیل شده از مواد جامد بیشتر پتانسیل

سوسنوسکی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۳) هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب را ارزیابی کردند. آن‌ها دو آزمایش هضم بی‌هوازی متفاوت روی لجن فاضلاب انجام دادند. در آزمایش اول لجن اولیه و لجن فعال در یک بیورآکتور یک مرحله‌ای ناپیوسته ۴۰ لیتری با شرایط ترموفیلیک تحت هضم بی‌هوازی قرار گرفتند. در آزمایش دوم فرآیند هضم بی‌هوازی روی همان مواد به صورت دو مرحله‌ای پیوسته انجام شد: مرحله اسیدی‌سازی هضم در بیورآکتور تحت همزنی پیوسته تحت شرایط ترموفیلیک و مرحله متان‌سازی در شرایط مزوفیلیک انجام گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد در آزمایش اول ۵۸۰ میلی‌لیتر بیوگاز به‌ازای هر گرم مواد جامد فرار تغذیه شده و در آزمایش دوم ۵۵۴ میلی‌لیتر بیوگاز به‌ازای هر گرم مواد جامد فرار تغذیه شده به‌دست آمد. آن‌ها درباره میزان متان آزمایش اول گزارشی ندادند اما در آزمایش دوم میزان متان (بازدهی زیستی) معادل ۸۲٪ حجم بیوگاز گزارش شد. این میزان بیوگاز نسبت به سایر پژوهش‌ها و پژوهش حاضر بسیار قابل توجه است. آن‌ها دلیل این افزایش را تاثیر دما و به خصوص در آزمایش دوم، دو مرحله‌ای بودن سیستم عنوان کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند جداسازی مراحل اسیدی‌سازی و متان‌سازی علاوه بر موثر بودن و بازده بیشتر، به‌ویژه در شرایط ترموفیلیک باعث ثبات بهداشتی محصول نهایی نیز می‌گردد.

در پژوهشی دیگر گروسر<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷) هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد متوسط

<sup>2</sup> Grosser

1 Sosnowski

بیشتری برای تولید بیوگاز و بنابراین، بیشتر بودن مواد جامد فرار و درصد کاهش آن دارد.

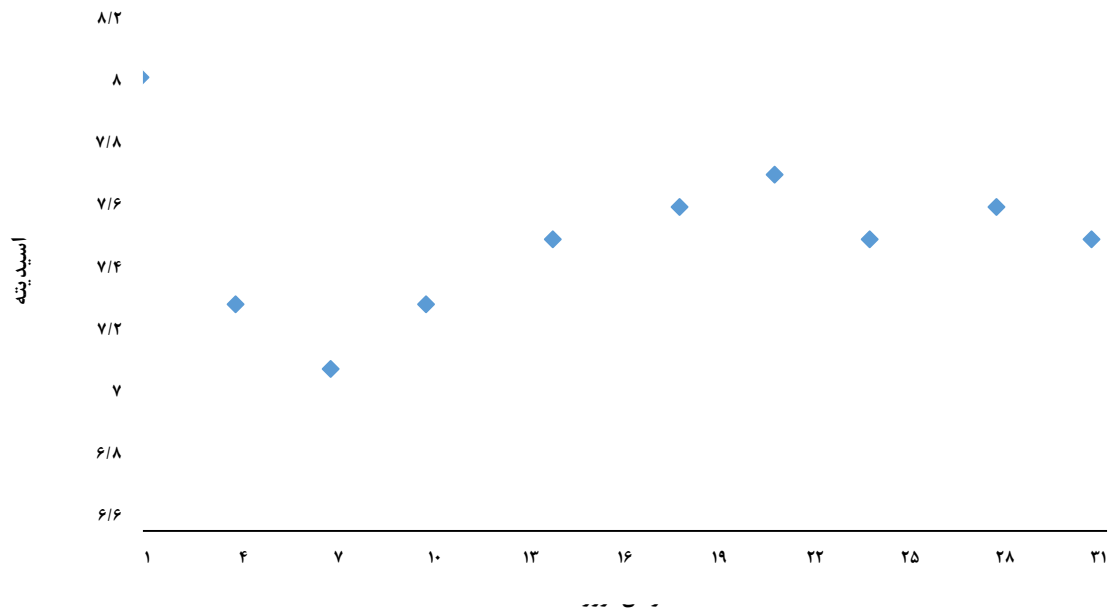
جدول ۳: مقایسه نتایج تولید بیوگاز و متان با پژوهش‌های پیشین

منبع	VSR (%)	محصول (mL/g VS)	C/N	TS (%)	دما	روش هضم	ضایعات
سوسنوسکی و همکاران، ۲۰۰۳	-	$Y_B=580$	۹/۲۶	-	T	Batch single stage	SS
سوسنوسکی و همکاران، ۲۰۰۳	۸۲	$Y_B=554$	۸/۱۶	-	T M	Continuous two stage	SS
گروسر و همکاران، ۲۰۱۷	۵۰	$Y_M=300$	۹-۲۱	-	M	CSTR, Semi-continuous	SS
بوروسکی و همکاران، ۲۰۱۴	۴۵/۷۸	$Y_M=184$	-	۵	M	BMP test	MSS
پژوهش حاضر	۶۳/۷	$Y_M=213$	۱۱/۷	۲۰	M	BMP test	MSS

پایین می‌آید، سپس هنگامی که اسیدهای چرب توسط متان‌زها مصرف می‌شوند شروع به بالا آمدن می‌کند. اسیدیته بعد از افزایش، تا پایان هضم تقریباً پایدار باقی می‌ماند (ماروسی و لیلی، ۱۳۸۸ و هوانگ و همکاران، ۲۰۱۶). در این پژوهش، نمودار تغییرات اسیدیته برای این ضایعات در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار اسیدیته لجن فاضلاب شهری طی ۷ روز نخست کاهش می‌یابد و سپس شروع به افزایش می‌کند.

### تغییرات اسیدیته

اسیدیته یکی از شاخص‌های بسیار مهم برای ارزیابی ثبات فرآیند هضم بی‌هوازی است و تأثیر عمده‌ای بر میکروارگانیسم‌های اسیدز و متان‌زا دارد. به‌طور کلی فرآیند هضم بی‌هوازی یک فرآیند خود تنظیم کننده اسیدیته است. در شروع هضم بی‌هوازی، اسیدیته هم‌زمان با تبدیل مواد آلی ریزمولکولی به اسیدهای چرب، به سرعت



شکل ۳: تغییرات اسیدیته در طول دوره هضم بی‌هوازی

به‌عنوان ارزشمندترین ترکیب بیوگاز است که نشان‌دهنده کیفیت مطلوب و مناسب آن است. هم‌چنین میزان درصد کاهش مواد جامد فرار ۶۳/۷٪ به‌دست آمد. از دلایل کمتر شدن میزان متان نسبت به برخی پژوهش‌ها می‌توان به این دلایل اشاره کرد: کمتر بودن نسبت کربن به ازت، هضم تک ماده، استفاده نکردن از مواد بهبود دهنده فرآیند مانند تنظیم اسیدیته. زیرا هدف این پژوهش ارزیابی تولید بیوگاز در شرایط واقعی بود.

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 به‌منظور تجاری‌سازی صورت گیرد.

### سپاس‌گزاری

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

اسیدیته هاضم بی‌هوازی در ابتدا به‌خاطر تولید اسیدهای فرار کاهش می‌یابد. اما با فعالیت باکتری‌های متان‌ساز، اسیدهای فرار مصرف شده و اسیدیته هاضم افزایش یافته و سپس تثبیت می‌شود (ماروسی و لیلی، ۱۳۸۸). همان‌طور که دیده می‌شود این نمودار با فرآیند هضم بی‌هوازی و تغییرات اسیدیته در مراحل مختلف آن با پژوهش‌های قبلی برای لجن فاضلاب شهری (بوروسکی و همکاران، ۲۰۱۴) مطابقت دارد.

### ۴- نتیجه‌گیری

برای استفاده بهینه از ضایعات کشاورزی و صنایع فرآوری محصولات کشاورزی، مدیریت ضایعات و کاهش آلودگی‌های زیست-محیطی، ارزیابی منابع جدید، پاک و تجدیدپذیر انرژی میزان بیوگاز تولیدی از لجن فاضلاب شهری اندازه‌گیری شد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد هضم بی‌هوازی ضایعات مورد نظر در شرایط مزوفیلیک و حالت جامد، ۳۶۲ میلی‌لیتر بیوگاز به‌ازای هر گرم مواد جامد فرار در شرایط نرمال آزمایشگاهی به‌دست می‌دهد و شامل ۵۸/۸٪ گاز متان

### منابع

- عمرانی، ق. ۱۳۷۵. مبانی تولید بیوگاز از فضولات شهری و روستایی. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص: ۱۷۰.
- ماروسی، م. و لیلی، م. ۱۳۸۸. میکروبیولوژی هاضم‌های بی‌هوازی. تالیف مایکل اچ. جراردی، چاپ اول، انتشارات شهرآب، تهران، ص: ۱۸۰.
- Ahmadi-Pirlou, M, Ebrahimi-Nik, M, Khojastehpour, M. and 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.
- APHA. American Public health association. 2005. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.** 21st ed. New York.
- Borowski, S., Domanski, J. and Weatherley, L. 2014. **Anaerobic co-digestion of swine and poultry manure with municipal sewage sludge.** Waste Management, 34: 513-521.
- Brown, D. and 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. and 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.
- Cui, Z., Shi, J. and 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. and 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.
- Demirbas, A., Taylan, O. and Kaya, D. 2016. **Biogas production from municipal sewage sludge (MSS).** Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects. Vol. 38, NO. 20: 3027-3033.
- Derbal, K., Bencheikh-lehocine, M. and Meniai, A.H. 2012. **Study of Biodegradability of Organic Fraction of Municipal Solids Waste.** Energy Procedia, 19: 239-248.
- Garcia, A. J, Esteban, M. B, Marquez, M. C. and Ramos, P. 2005. **Biodegradable municipal solid waste: Characterization and potential use as animal feedstuffs.** Waste Management, 25: 780-787.
- Grosser, A., Neczaj, E., Singh, B. R, Almås, A. R., Brattebø, H. and Kacprzak, M. 2017. **Anaerobic digestion of sewage sludge with grease trap sludge and municipal solid waste as co-substrates.** Environmental Research, 155: 249-260.

- Guarino, G., Carotenuto, C., Cristofaro, F. D., Papa, S., Morrone, B. and 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.
- Huang, X., Yun, S., Zhu, J., Du, T., Zhang, C. and 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. and 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. and 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. and 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. and Dong, R. 2009. **Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes.** Bioresource Technology, 100: 5103-5108.
- Murto, M., Bjornsson, L. and 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. and 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.
- Rodríguez-Abalde, A., Flotats, X. and Fernández, B. 2017. **Optimization of the anaerobic co-digestion of pasteurized slaughterhouse waste, pig slurry and glycerine.** Waste Management, 61: 521-528.
- Samolada, M. C. and Zabaniotou, A. A. 2014. **Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece.** Waste Management, 34: 411-420.
- Sosnowski, P., Wieczorek, A. and Ledakowicz, S. 2003. **Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes.** Advances in Environmental Research, 7: 609-616.
- Tezel, U., Tandukar, M., and Pavlostathis, S. G. 2011. **Anaerobic Biotreatment of Municipal Sewage Sludge.** Municipal Wastes: 447-461.
- Weiland, P. 2010. **Biogas production: current state and perspectives.** Appl Microbiol Biotechnol., 85:849-860.
- Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H. and 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. and Dong, R. 2014. **Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions.** Applied Energy, 128: 175-183.



## Evaluation of Biogas Production from Solid State Anaerobic Digestion of Municipal Sewage Sludge

Mohsen Saghouri<sup>1</sup>, Reza Abdi<sup>1</sup>, Mohammadali Ebrahimi-nik<sup>2</sup>, Abbas Rohani<sup>2</sup> and Mohammadali Maysami<sup>\*1</sup>

Received: 30 October 2019

Accepted: 12 May 2020

<sup>1</sup>Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\*Corresponding author: maysami@tabrizu.ac.ir

### Abstract

Due to the increasing consumption of fossil fuels in the world as well as their increasing cost and environmental impacts, the great need and interest to replace them with renewable energy resources has increased. Anaerobic digestion is a biochemical process that is able to convert almost all kinds of multi-dimensional biodegradable organic matters under anaerobic conditions to biogas. According to water content, anaerobic digestion methods are classified as wet and solid state. The solid-state anaerobic digestion has been claimed to be advantageous over liquid AD for a number of reasons including smaller reactor volume, lower energy requirements for heating and minimal material handling. In this paper, biogas production from solid state anaerobic digestion of municipal sewage sludge was studied. A series of single-stage batch mesophilic ( $37 \pm 1^\circ\text{C}$ ) anaerobic digestions were performed at a total solids concentration of 20% in 1 liter reactor volume. The evaluation of municipal sewage sludge characteristics showed that this substrate has a good potential for solid state anaerobic digestion (Total solids, volatile solids and C/N ratio were obtained 25.7%, 50.7% and 11.7, respectively). The biogas yield was achieved 362 ml/g VS, which methane content of biogas was 213 ml (58.8%). The volatile solids reduction, a significant parameter to measure productivity of anaerobic digestion, was obtained to be 63.7%.

**Keywords:** Renewable Energies, Biogas, Municipal Sewage Sludge, Solid State Anaerobic Digestion