

## Evaluating the Effect of Alkaline Pretreatment on Improvement of Biomethane Production from Anaerobic Digestion of Mixed Municipal Waste and Sewage Sludge

### Mansour Ahmadi Pirlou

Ph.D. Student, Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

### Tarahhom Mesri Gundoshmian

Associate Professor, at Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. (Corresponding Author: E-mail: mesrigtm@uma.ac.ir)

Received: 2021/04/21

Accepted: 2021/05/17

**Document Type:** Research article

### ABSTRACT

**Background and Aim:** Increasing energy consumption has created an energy crisis in the world. Fossil fuels are limited and depleting. Biogas is considered a fuel that has attracted the attention of researchers. To increase biogas production, different pretreatments have been utilized. The purpose of this study was to investigate the optimal mixing ratio of Municipal Solid Waste (MSW) and Sewage Sludge (SS), as well as the effects of various conditions of alkaline pretreatment on biodegradability of wastes and the amount of biomethane production.

**Materials and Methods:** This study was done in a laboratory digester with 1 L volume at 37 °C with different concentrations of NaOH in a completely randomized design. Biogas volume, methane volume, and changes in pH were measured daily. Measurement parameters in the anaerobic digestion including total solids, volatile solids, and carbon and nitrogen content in the feedstock were determined according to the APHA standard methods.

**Results:** The optimal mixing ratio of MSW to SS was 60:40 with the highest methane yield of 254.87 mL/g VS. Next, the effects of 2, 6, and 10% NaOH concentrations were evaluated on the amount of gas produced, indicating that 6% NaOH concentration significantly improved waste decomposition. Methane production, VS, and TS removal were compared to the control treatment, and there were increases of 30, 27.94, and 27.25%, respectively.

**Conclusion:** The results showed that the mixing ratio of MSW to SS at 60:40 with 6% NaOH improves the decomposition of organic wastes and increases biomethane production.

Article type: Research article

**Keywords:** Alkaline Pretreatment; Anaerobic Digestion; Biogas; Municipal Solid Waste; Sewage Sludge

► **Citation:** Ahmadi Pirlou M, Mesri Gundoshmian T. Evaluating the Effect of Alkaline Pretreatment on Improvement of Biomethane Production from Anaerobic Digestion of Mixed Municipal Waste and Sewage Sludge. *Journal of Research in Environmental Health*. Spring 2021; 7(1): 53-66.

## بررسی اثر پیش تصفیه قلیایی بر بهبود شرایط تولید بیومتان از هضم بی‌هوازی مخلوط پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب

متصور احمدی پیرلو

دانشجوی دکتری انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

ترجم مصری گندشمین

\* دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. (نویسنده مسئول): پست الکترونیک: mesrigtm@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

نوع مقاله: مقاله اصیل پژوهشی

### چکیده

**زمینه و هدف:** با افزایش مصرف انرژی، بحران انرژی در جهان پدید آمده است. سوخت‌های فسیلی، منابعی محدود و رو به پایان است. بیوگاز سوختی است که امروزه بسیار مورد توجه محققان قرار دارد. جهت افزایش تولید بیوگاز، روش‌های پیش تصفیه مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر نسبت‌های اختلاط پسماند شهری و لجن فاضلاب و بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف پیش تصفیه قلیایی بر تخریب‌پذیری پسماند و تولید بیومتان انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** این مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی در هاضم‌هایی به حجم ۱ لیتر و در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد با غلظت‌های مختلف سود در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. حجم بیوگاز و pH به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. جامدات کل، جامدات فرار، درصد کربن و نیتروژن مواد اولیه بر اساس استاندارد APHA (موسسه انتشارات سلامت آمریکا) اندازه‌گیری شدند.

**یافته‌ها:** اولین گام در نتایج تعیین نسبت اختلاط بهینه پسماند و لجن فاضلاب بود که بیشترین عملکرد بیومتان در نسبت ۶۰:۴۰ به میزان ۲۵۴/۸۷ میلی‌لیتر به ازای هر گرم ماده فرار تولید شد. در گام دوم آزمایش، اثر غلظت‌های ۲، ۶ و ۱۰ درصد سود در میزان گاز تولیدی ارزیابی شد که غلظت ۶٪ سود، به‌طور قابل‌توجهی تجزیه پسماند آلی را بهبود بخشید. بیومتان تولیدی، حذف ماده فرار و جامد هاضم در مقایسه با نمونه شاهد، به ترتیب ۳۰٪، ۲۷/۹۴٪ و ۲۷/۲۵٪ افزایش نشان داد.

**نتیجه‌گیری:** نسبت اختلاط پسماند و لجن فاضلاب ۶۰:۴۰ و پیش تصفیه با سود ۶٪، باعث بهبود تجزیه پسماند آلی شده و در نتیجه تولید بیومتان افزایش می‌یابد.

**کلید واژه‌ها:** بیوگاز، پسماند شهری، پیش تصفیه قلیایی، لجن فاضلاب، هضم بی‌هوازی

◀ **استناد:** احمدی پیرلو م، مصری گندشمین ت. بررسی اثر پیش تصفیه قلیایی بر بهبود شرایط تولید بیومتان از هضم بی‌هوازی مخلوط پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب. فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط. بهار ۱۴۰۰؛ ۷(۱): ۵۳-۶۶.

یکی از چالش‌های عمده مدیریت شهری به‌ویژه مدیریت کلانشهرها، مدیریت مواد زائد شهری<sup>۱</sup> و لجن فاضلاب<sup>۲</sup> است. در اثر گذشت زمان، کمبود مکان‌های دفن در دسترس و شکل‌گیری مقادیر زیاد ضایعات تولیدی به‌عنوان یک مشکل عمده و مسئله زیست‌محیطی مطرح شده است؛ بدین ترتیب پردازش مناسب پسماند به چالشی جدی تبدیل شده که دولت‌های محلی با آن مواجه هستند و در صورت عدم کنترل ضایعات و انتشار گازهای دفن گاه ممکن است اثرات شدید زیست‌محیطی حادث گردد، زیرا زیاله حاوی آلاینده‌های آلی، ترکیبات نیتروژن‌دار و همچنین فلزات سنگین می‌باشد (۱)، بنابراین عمده‌ترین مواد تشکیل‌دهنده پسماندهای شهری مواد آلی فسادپذیر هستند. در کشور ما، روزانه ۵۰ میلیون کیلوگرم پسماند شهری تولید می‌شود که به‌طور میانگین ۷۱٪ وزنی آن را مواد فاسد شدنی تشکیل می‌دهند (۲). روش‌های مختلفی برای مدیریت مواد زائد از جمله کمپوست، سوزاندن، دفن، هضم بی‌هوازی<sup>۳</sup> و تولید و بازیافت گاز پیشنهاد شده است. برخی از این روش‌های حذف، پاسخگوی دغدغه‌های محیط زیستی نیز هستند و از این نظر توجه ذی‌نفعان و افکار عمومی را جلب کرده‌اند. یکی از سیستم‌های مؤثر در پردازش بیولوژیک پسماندهای آلی، هضم بی‌هوازی است که نسبت به هضم هوازی (کمپوست) به دلیل زمان ماند کوتاه‌تر، تجزیه‌پذیری بالاتر و استحصال گاز قابل اشتعال و غیره ارجحیت دارد (۳).

هضم بی‌هوازی از جمله فرآیندهای بیولوژیکی تبدیل مواد زائد است که علاوه بر تصفیه پسماندهای فعالیتهای انسانی و دامی، برای تولید انرژی تجدیدپذیر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. فعالیت هضم بی‌هوازی در واقع علاوه بر کاهش حجم مواد، به حذف پاتوژن‌های محیطی نیز منجر می‌شود. در نتیجه هضم بی‌هوازی ممکن است به‌عنوان بخشی از سیستم تصفیه آب یا یک فرآیند تولید انرژی در نظر گرفته شود، که علاوه بر کاهش مصرف مجدد، به کاهش بار آلودگی تحمیلی نیز کمک کند. با این حال، گاهی

اوقات هضم بی‌هوازی نیز ناکارآمد می‌گردد و آن زمانی است که برخی از پسماندهای آلی به‌صورت تنها استفاده می‌گردد (۴). بر این اساس، استفاده بیش از یک پسماند آلی به‌عنوان سوبسترا می‌تواند سبب بهبود راندمان هضم گردد (۵). تحقیقات متعددی برای بهبودی میزان گاز تولیدی و تسریع فرآیند پسماندهای شهری انجام شده است. مطالعات جداگانه‌ای در زمینه فاکتورهای مؤثر در پایداری و کارایی هاضم‌های بی‌هوازی پسماندهای بازار، پسماندهای میوه و سبزی، پسماندهای خانگی، پسماندهای آشپزخانه، بخش آلی پسماند جامد مراکز تجاری، بخش آلی پسماندهای مناطق مسکونی و بخش آلی پسماند جامد مراکز غیرمسکونی انجام شده است. از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر در کارایی این هاضم‌ها دما، غلظت سوبسترا، ماده تلقیح (استارتر)، زمان ماند، میزان اختلاط و هضم ترکیبی مواد است (۶-۱۷). پسماندهای جامد شهری شامل مقدار قابل توجهی مواد زائد غذایی و باکتری‌های مفید در هضم پسماند هستند.

یکی از گزینه‌های مناسب هضم بی‌هوازی، هضم مشترک از مواد با ویژگی‌های مکمل است (۱۸). اختلاط پسماند جامد شهری با لجن فاضلاب به‌علت ویژگی‌های مکمل، یکی از گزینه‌های مناسب هضم مشترک هستند. لجن فاضلاب نسبت کربن به نیتروژن کمتری از حد مطلوب هضم بی‌هوازی دارد، از سوی دیگر، نسبت کربن به نیتروژن پسماند جامد شهری ۲۵-۳۸ و بالاتر از مقدار مطلوب هضم بی‌هوازی است. بنابراین، اختلاط پسماند با لجن فاضلاب به بهبود تعادل مواد مغذی منجر می‌شود (۱). بروسکی و ویتزلی گزارش دادند که افزودن لجن فاضلاب به پسماند جامد شهری باعث افزایش تولید بیوگاز و بیومتان می‌شود (۱۹). همچنین احمدی پیرلو و همکاران مشاهده کردند که اختلاط پسماند جامد شهری با لجن فاضلاب به نسبت ۴۰:۶۰ منجر به افزایش ۷۰ درصدی بیوگاز تولید شده و نسبت C/N را برای هضم بی‌هوازی متعادل می‌کند (۲۰).

فرآیند هضم بی‌هوازی شامل چهار مرحله است که هر کدام

1. Municipal Solid Waste (MSW)
2. Sewage Sludge (SS)
3. Anaerobic Digestion

از این مراحل توسط گروه‌های مختلف باکتریایی، کامل شده‌اند. هیدرولیز، تولید اسید، استات‌زایی و متان‌زایی، مراحل اصلی تولید بیوگاز هستند. همه واکنش‌ها به‌طور همزمان اتفاق می‌افتد و به یکدیگر وابسته‌اند (۲۱). این مواد در شرایط عدم حضور اکسیژن و با وجود باکتری‌های بی‌هوازی تجزیه شده و محصولاتی از جمله بیوگاز که شامل متان و دی‌اکسید کربن است، تولید می‌کنند. پسماند جامد این فرآیند کود است که پس از عمل‌آوری می‌تواند برای بهبود شرایط خاک مورد استفاده قرار گیرد (۲۲). پسماند شهری، جزء آن دسته از مواد خامی است که به‌دلیل ترکیبات متفاوت آن در مناطق مختلف، مطالعات فراوانی بر روی آن صورت گرفته است که از آن جمله میتوان به داگ و همکاران، ژانگ و بانکس، لیو و همکاران، کولازو و همکاران، ژانگ و همکاران، کریستانچو و همکاران، فورستر-کارنیرو و همکاران و نصیر و همکاران اشاره نمود (۱۶، ۲۳-۲۹). در تمامی این مطالعات، با تغییر در شرایط واکنش و ماده خام، سعی در افزایش تولید بیوگاز بوده است.

غالباً هیدرولیز یک مرحله محدود کننده سرعت در فرآیند هضم بی‌هوازی است، ازین‌رو به منظور تسریع زمانی فرآیند بهتر است که مواد خام ورودی قبل از بارگذاری به راکتور، پیش‌تیمار گردد (۳۰). در میان روش‌های پیش‌تیماردهی شیمیایی که وجود دارد (مانند پیش‌تیماردهی با اسیدها، بازها و اکسید کننده‌ها)، پیش‌تیماردهی با استفاده از هیدروکسید سدیم بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است (۳۱، ۳۲). پیش‌تصفیه قلیایی با استفاده از هیدروکسید سدیم برای هضم مواد لیگنوسلولزی نیز مناسب است (۳۳). الیانا و همکاران چندین روش پیش‌تصفیه شیمیایی را به منظور افزایش سرعت هیدرولیز و قابلیت تخمیر مورد استفاده قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که پیش‌تصفیه با سود بیشترین تأثیر در کاهش ماده فرار دارد (۳۴). چن و همکاران با استفاده از سود افزایش ۱۵٪ تا ۴۲٪ بیوگاز را گزارش دادند (۳۵). ژو و همکاران مشاهده کردند که تیمار یک درصدی سود، بهبود قابل توجهی در عملکرد تولید بیوگاز نداشته است، درحالی‌که

افزایش سود به میزان ۵٪ باعث افزایش تولید بیوگاز به میزان ۳۷٪ شده است (۳۶).

تابه‌حال مطالعات اندکی بر روی هضم بی‌هوازی پسماند جامد شهری در ایران صورت گرفته است. همچنین با توجه به مطالعات انجام شده، به‌نظر می‌رسد تا به‌حال تحقیقی در زمینه زیست‌تخریب‌پذیری و بهبود هضم مشترک بی‌هوازی پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب با بهینه کردن درصد غلظت‌های مختلف پیش‌تصفیه قلیایی با استفاده از سود صورت نگرفته است. بر این اساس، هدف از این مطالعه بررسی کارایی تولید بیوگاز از هضم مشترک پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب (۵۰:۵۰، ۴۰:۶۰، ۲۰:۸۰ و ۱۰:۹۰ MSW:SS) با پیش‌تصفیه قلیایی در غلظت‌های مختلف سود (۲، ۶ و ۱۰ درصد سود) در هضم غیرپیوسته بی‌هوازی بود. برای این منظور در سری آزمایش اول: اثر نسبت اختلاط بهینه پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب بر عملکرد هضم بی‌هوازی مورد بررسی قرار گرفت و سپس اثر غلظت‌های مختلف پیش‌تیماردهی با سود بر بهبود تولید بیوگاز حاصل از هضم مشترک پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب بر اساس نسبت اختلاط بهینه مشخص شده از آزمایش سری اول بررسی گردید.

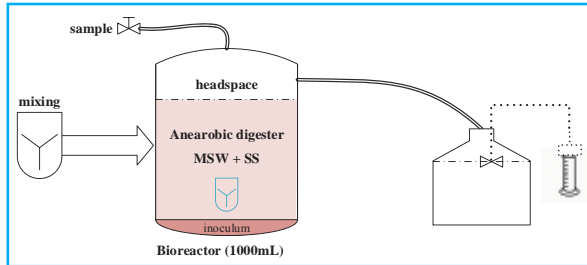
## روش کار

### مواد اولیه و تلقیح

جزء آلی پسماند جامد شهری<sup>۱</sup> از محل جمع‌آوری پسماند سلف و خوابگاه دانشگاه محقق اردبیلی در انتهای روز به‌صورت روزانه و تصادفی از چند نقطه توده، به مقدار ۱ کیلوگرم برداشت و با هم مخلوط گردید؛ به‌طوری‌که در انتهای نمونه‌برداری به مقدار تقریبی ۱۰ کیلوگرم ماده برای استفاده‌های بعدی تهیه شدند. مواد آلی تهیه شده پس از تفکیک ناخالصی‌های آن (همچون استخوان، فلزات، کاغذ، شیشه و پلاستیک) به‌صورت دستی جدا و به کمک خردکن برقی به قطعات ۲-۵ میلی‌متر تبدیل شدند. لجن فاضلاب

1. Organic Fraction of Municipal Solid Waste

استفاده شد (۳۹). شکل ۱، سامانه هاضم‌های بی‌هوازی را در طول فرآیند نشان می‌دهد.



شکل ۱. سامانه هاضم‌های بی‌هوازی در طول فرآیند هضم بی‌هوازی آزمایشات انجام شده

در این مطالعه، دو سری آزمایش به منظور دست‌یابی به الگوی عملکردی بهینه تولید بیوگاز در قالب طرح کاملاً تصادفی<sup>۲</sup> در سه تکرار انجام شد. از نرم‌افزار SPSS، ورژن ۲۵ برای تحلیل‌های آماری استفاده گردید. پس از اتمام آزمایشات و مقایسه میزان تولید بیومتان و بیوگاز تجمعی، تیماری که بیشترین میزان بیومتان تولیدی را داشت، به‌عنوان تیمار بهینه انتخاب گردید و در سری بعدی آزمایش‌ها مورد پیش تصفیه قلیایی قرار گرفت.

سری اول آزمایش‌ها: به‌منظور تعیین نسبت بهینه اختلاط پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب (۵۰:۵۰، ۶۰:۴۰، ۸۰:۲۰ و ۹۰:۱۰ MSW:SS) طراحی و اجرا شد، پس از اتمام اولین سری از آزمایش‌ها، نسبت بهینه ۶۰:۴۰ (۶۰٪ پسماند شهری و ۴۰٪ لجن) برای تولید بیوگاز مشخص شد. در سری دوم آزمایش‌ها، اثر غلظت‌های مختلف پیش تصفیه سود (۲، ۶ و ۱۰ درصد) بر روی نسبت اختلاط بهینه و به‌منظور تعیین غلظت بهینه سود انجام شد.

#### روش اندازه‌گیری

مواد جامدات کل<sup>۳</sup> و جامدات فرار<sup>۴</sup> بر اساس روش استاندارد شماره B ۲۵۴۰ و C ۲۵۴۰ کتاب آزمایش استاندارد آب و فاضلاب اندازه‌گیری شد (۴۰). درصد کربن و نیتروژن موجود در ماده خام و همچنین نسبت کربن به نیتروژن<sup>۵</sup> نیز بر مبنای کتاب آزمایش

مورد نیاز نیز از قسمت لجن ثانویه تصفیه‌خانه فاضلاب (فرآیند بیولوژیکی) تهیه شدند. بعد از آماده‌سازی، نمونه‌ها قبل از بارگذاری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. مقداری کود گاوی تهیه و پس از ۳ ماه نگهداری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در شرایط بی‌هوازی، ۱۵٪ حجمی از آن به هاضم بی‌هوازی اضافه گردید تا به‌عنوان ماده تلقیحی افزایش جمعیت میکروبی را تسریع کند.

#### پیش تصفیه قلیایی

برای پیش تصفیه زیست توده لیگنوسولوزی از سود (۲، ۶ و ۱۰ درصد) استفاده شد که باعث تسریع تولید اسیدهای چرب فرار در مراحل هیدرولیز و اسیدوژن می‌شود (۳۶). پسماندهای خرد شده با استفاده از سود با غلظت‌های ۲، ۶ و ۱۰ درصد وزن ماده خام، در دستگاه انکوباتور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت تیمار شدند. مخلوط تهیه شده با آب مقطر شست‌وشو داده شد تا pH آن به ۷ برسد. مواد پیش تیمار شده تا بارگذاری در هاضم در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ روز نگهداری شدند (۳۷).

#### هاضم آزمایشگاهی

هاضم‌های آزمایشگاهی از جنس شیشه و به حجم ۱ لیتر تهیه شدند. ۵۹۵ میلی‌لیتر از حجم هاضم‌ها با ماده خام و ۱۰۵ میلی‌لیتر نیز از ماده تلقیحی<sup>۱</sup> پر شدند (۹). با اضافه کردن آب به ماده خام، درصد ماده جامدات کل در سطوح ۱۰٪ تنظیم گردید. در قسمت تحتانی هاضم یک شیر برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری پارامترهای آزمایش تعبیه شد. هاضم‌ها در حمام آب گرم در شرایط مزوفیلیک (۳۷ درجه سانتی‌گراد) با زمان واکنش ۳۰ روز نگهداری شدند. حجم بیوگاز تولید شده به‌صورت روزانه به روش جابجایی مایع اندازه‌گیری شد. برای این منظور از محلول آب مقطر و نمک اشباع ۷۵٪ با  $pH = 2/5$  استفاده شد (۳۸). در هر روز، قبل از تعیین حجم گاز تولیدی و نمونه‌برداری، جهت اختلاط بهتر، هاضمها برای مدت تقریباً ۳۰ ثانیه تکان داده می‌شدند (۳۹). از گاز نیتروژن برای بی‌هوازی کردن هر یک از هاضم‌ها در شروع، به مدت ۱ دقیقه

2. Completely Randomized Design  
3. Total Solids  
4. Volatile Solids  
5. carbon-to-nitrogen (C/N) ratio

1. inoculum

افزونه‌ای برای تنظیم اسیدیته استفاده نشد.

جدول ۱. ویژگی‌های ماده خام و تلقیح

تلقیح	SS	MSW	واحد	پارامتر
۱۲/۰۰	۲۶/۰۰	۲۳/۰۰	درصد	TS (w.b.)
۸۲/۰۰	۶۱/۷۰	۷۴/۱۰	درصد	VS (w.b.)
۸۸/۰۰	۱۳/۴۸	۸۴/۰۵	درصد	M (d.b.)
۳۲/۳۷	۷/۸۰	۴۸/۷۵	درصد	C (d.b.)
۲/۶۲	۱/۷۸	۱/۷۰	درصد	N (d.b.)
۶/۹۰	۷/۱۰	۷/۳۰	-	pH
۱۲/۳۵	۴/۳۸	۲۸/۶۷	-	C/N

w.b. رطوبت پایه تر؛ d.b. رطوبت پایه خشک و M محتوای رطوبتی ماده

حجم بیوگاز و بیومتان، دو شاخص مهم در ارزیابی عملکرد هاضم‌ها محسوب می‌شوند، نتایج تجزیه واریانس تیمارها به روش دانکن در جدول ۲ آمده است. در این جدول، نتایج تجزیه واریانس برای بررسی مقدار بیوگاز، متان، TS، pH، VS بر اساس طرح پایه کاملاً تصادفی برآورد شده است. مشاهده می‌شود که اثر پیش تصفیه سود بر میزان تولید بیوگاز و بیومتان در سطح احتمال ۱٪ اثر معنی‌دار بود، همچنین اثر پیش تصفیه‌ها با تیمار شاهد نشان داد که این تفاوت فقط در غلظت ۲ غیرمعنی‌دار بود و سایر غلظت‌ها با تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری داشتند (جدول ۲). تأثیر پیش تصفیه‌ها بر تغییرات pH، غیرمعنی‌دار بود.

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر پارامترهای غلظت پیش تصفیه بر مقدار تولید بیوگاز، متان، TS، pH و VS

منبع تغییر	درجه آزادی	متغیر وابسته	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
غلظت‌های مختلف پیش تصفیه NaOH	۳	بیوگاز	۱۵۵۹۹۴/۲۵	۵۱۹۹۸/۰۸	۱۴۱/۸۵**
	۳	متان	۷۱۹۶۲/۲۵	۲۳۹۸۷/۴۱	۴۱/۸۲**
	۳	pH	۱۶۹/۵۶	۵۶/۵۲	۲۲/۲۵ <sup>ns</sup>
	۳	TS	۱۱۲۱/۷۱	۳۷۳/۹۰	۴۹/۳۸**
	۳	VS	۲۶۸۶/۸۰	۸۹۵/۶۰	۲۶۷/۲۰**

\*\* معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، <sup>ns</sup> غیرمعنی‌دار

خطی، لگاریتمی، نمایی و درجه ۲، مدل رگرسیونی درجه دو، بالاترین ضریب تبیین را داشت که نتایج آن به صورت جدول ۳ و ۴ تعیین می‌گردد.

استاندارد آب و فاضلاب اندازه‌گیری شدند (۴۰). برای اندازه‌گیری روزانه درصد تولید بیومتان از ظرف آینه‌ورن<sup>۱</sup> استفاده شد (۲۷). اساس کار این ظرف، انحلال سریع CO<sub>2</sub> در محلول قلیایی و باقی ماندن گاز بیومتان است. برای این منظور از محلول سدیم هیدروکسید ۷ مولار استفاده شد. ظرف آینه‌ورن با این محلول پر و مقدار ۵ میلی‌لیتر از بیوگاز توسط سرنگ از مخزن نگهداری بیوگاز برداشته شد و به آرامی به داخل ظرف تزریق گردید؛ بدین صورت که CO<sub>2</sub> توسط سود جذب شده و چون قسمت عمده بیوگاز CH<sub>4</sub> و CO<sub>2</sub> است، گاز باقی‌مانده در بالای ظرف، مقدار متان را نشان می‌دهد (۱۲). برای این منظور از محلول سدیم هیدروکسید ۷ مولار استفاده شد. هر هاضم به صورت روزانه توسط pH متر مدل pH-۲۰۱ ساخت کشور تایوان تعیین می‌شد.

## یافته‌ها

### ویژگی‌های ماده اولیه

ویژگی‌های ماده اولیه مورد استفاده در آزمایش‌های این تحقیق در جدول ۱ خلاصه شده است. TS ماده تلقیحی برابر ۱۲٪ و TS و پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب نیز به ترتیب ۲۳٪ و ۲۶٪ بر اساس وزن تر محاسبه شد و همچنین نسبت C/N که در محدوده مناسب هضم بی‌هوازی (۱۵ تا ۳۰) قرار گرفت. pH در شروع آزمایش در محدوده خنثی بود که در شروع بارگذاری، از هیچ

مدل‌های مختلفی برای تخمین رفتار تولید تجمعی بیوگاز به صورت تابعی از زمان مورد بررسی قرار گرفت که از بین مدل‌های

1. Einhorn

جدول ۳. مدل درجه ۲

خطای استاندارد	ضریب تبیین	مدل	تیمار
۱۸/۹۳۰	۰/۹۸۳	$Y = ۳۲/۸۹ + ۰/۵۸۱t - ۰/۲۲۸$	کنترل
۱۹/۶۹۰	۰/۹۸۴	$Y = ۳۵/۸۵ + ۰/۶۲۶t - ۸/۸۸۳$	NaOH ۲٪
۲۵/۹۸۵	۰/۹۸۱	$Y = ۴۴/۱۴ + ۰/۷۸۶t - ۱۹/۶۲۶$	NaOH ۶٪
۱۴/۵۳۷	۰/۹۶۸	$Y = ۱۹/۵۹ + ۰/۳۶۴t - ۱۳/۶۸۲$	NaOH ۱۰٪

جدول ۴. تجزیه واریانس مدل رگرسیونی

F	انحراف معیار	مجموع مربعات باقی مانده	مجموع مربعات رگرسیون	تیمار
۷۵۸**	۱۵۲/۰۶۹	۹۶۷۶/۳۹	۵۴۳۶۸۵/۳۴	کنترل
۸۵۱/۴۲۲**	۱۳۸/۱۳۵	۱۰۴۶۷/۳۷۲	۶۶۰۱۵۹/۰۰۸	NaOH ۲٪
۷۱۱/۳۵۱**	۱۸۳/۷۱۹	۱۸۲۳۰/۳۳۱	۹۶۰۶۰۴/۷۰۲	NaOH ۶٪
۴۰۸/۴۵۴**	۷۸/۴۲۱	۵۷۰۶/۰۵۸	۱۷۲۶۴۱/۷۲۰	NaOH ۱۰٪

\*\* معنی دار در سطح احتمال ۱٪، NS غیرمعنی دار

در نهایت در روز بیست و سوم برای تمام تیمارها تولید به صفر رسید. نمودار ۳، تغییرات روزانه pH را برای تمام تیمارها در طول آزمایش نشان می دهد. متناسب با روند تولید بیوگاز، در روزهای اول آزمایش، در تمامی تیمارها pH روند نزولی داشت؛ به طوری که در روز هفتم میزان آن به ۶/۱ رسید. سپس با افزایش تدریجی از روز پانزدهم به بعد در سطح ۷/۲ ثابت ماند.

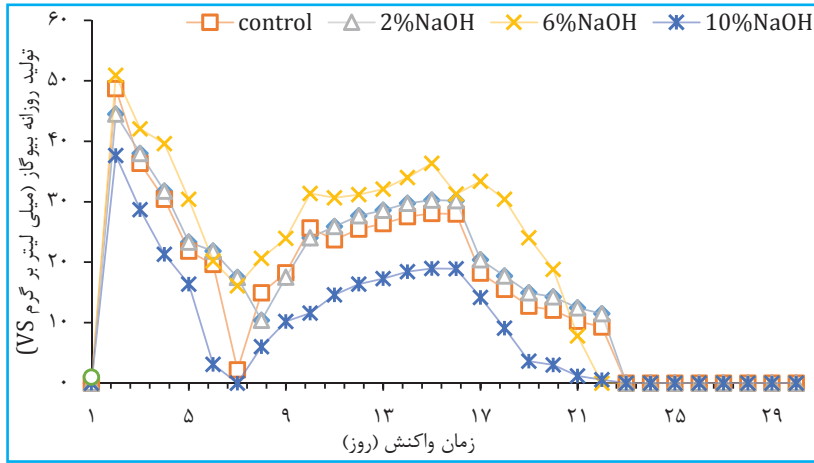
با توجه به نمودار ۲، مقدار تولید جمعی بیوگاز در پیش تصفیه ۲٪ و ۶٪ سود به ترتیب ۴۹۲ و ۵۸۵ میلی لیتر بر گرم ماده فرار اندازه گرفته شد که به ترتیب ۸٪ و ۲۳٪ بیشتر از مقدار شاهد بود. اگرچه بهبود تخریب پذیری غلظت ۲٪ سود نسبت به تیمار شاهد خیلی چشم گیر نبود (نمودار ۲)، اما تأثیر غلظت ۶٪ سود در روند تولید بیوگاز بسیار مؤثر بود، با افزایش غلظت سود به ۱۰٪، مقدار جمعی بیوگاز به ۲۷۱ میلی لیتر بر گرم VS کاهش یافت که ۴۰/۵٪ کمتر از تیمار شاهد بود.

نمودار ۴، تولید جمعی متان و درصد متان کل برای ارزیابی اثر غلظت های مختلف پیش تصفیه سود را نشان می دهد. تولید بیومتان در هاضم های شاهد، ۲، ۶ و ۱۰ درصد سود به ترتیب ۲۵۵، ۲۹۰، ۳۶۳ و ۱۴۴ میلی لیتر بر گرم VS بود. مقدار بیومتان از هضم

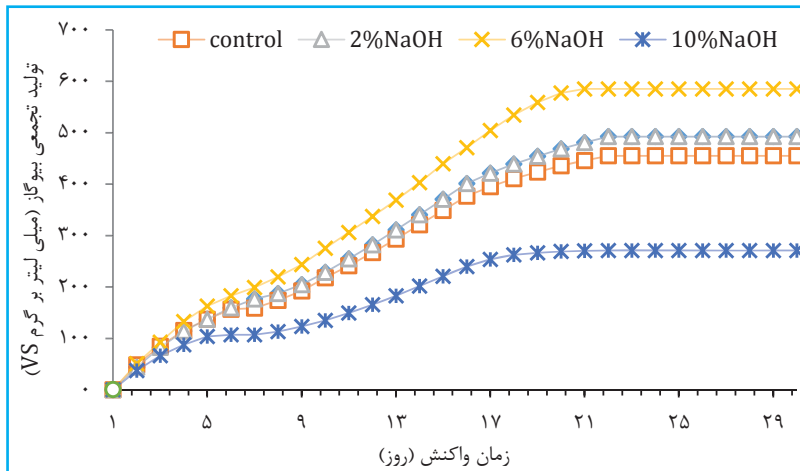
در این مطالعه، هضم مشترک پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب با نسبت های مختلف ۶۰:۴۰، ۵۰:۵۰، ۸۰:۲۰ و ۹۰:۱۰ مورد بررسی قرار گرفت و بیشترین عملکرد تولید بیوگاز در نسبت اختلاط ۶۰:۴۰ پسماند شهری و لجن فاضلاب (MSW ۶۰٪ و SS ۴۰٪) به دست آمد و به عنوان نسبت بهینه به کار گرفته شد. در ادامه، بر اساس نسبت اختلاط بهینه در سری های بعدی آزمایش، تولید روزانه و جمعی بیوگاز، تولید متان کل، میزان متان کل و عملکرد بیوگاز و متان بر اساس جامدات فرار اندازه گیری و اثر پیش تصفیه قلیایی بر عملکرد هضم مشترک بررسی شد.

#### تأثیر پیش تصفیه قلیایی بر تولید بیوگاز

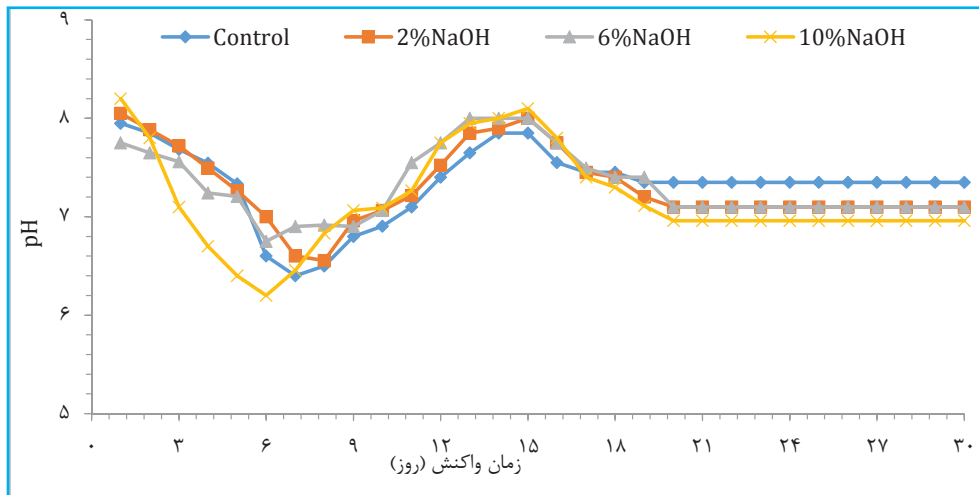
نمودار ۱ و ۲ تولید روزانه و جمعی بیوگاز در طول هضم مشترک پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب با غلظت های مختلف پیش تصفیه سود و تیمار شاهد را نشان می دهد. در این سری از آزمایش برای تمام هاضم ها، تولید بیوگاز بلافاصله از روز اول آزمایش شروع شد و حداکثر نرخ تولید بیوگاز بعد از ۱/۵ روز از هضم مشاهده شد. تولید روزانه بیوگاز در ابتدای آزمایش ها، برای تمام تیمارها روند مشابهی را نشان داد. در روزهای بعدی روند تولید کاهش یافت و در برخی از هاضم ها تولید بیوگاز متوقف شد که



نمودار ۱. تولید بیوگاز در فرآیند هضم بی‌هوازی (SS:MSW=۶۰:۴۰ و I/F=۱۰۵ T, mL=۳۷ N/C, °C=۲۱/۴۸)



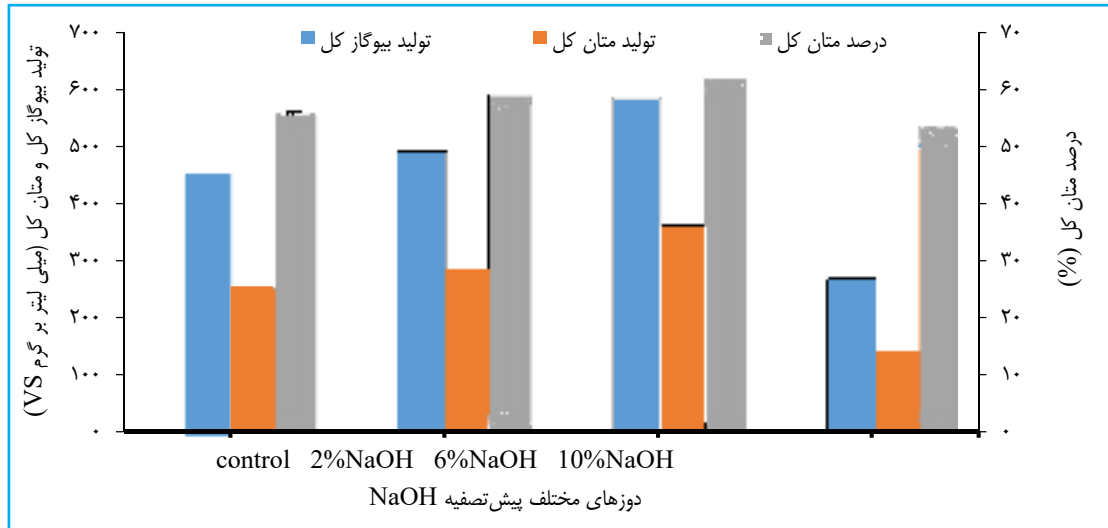
نمودار ۲. تولید تجمعی بیوگاز در طول فرآیند هضم بی‌هوازی (SS:MSW=۶۰:۴۰ و I/F=۱۰۵ T, mL=۳۷ N/C, °C=۲۱/۴۸)



نمودار ۳. تغییرات اسیدیته در طول فرآیند هضم بی‌هوازی (SS:MSW=۶۰:۴۰ و I/F=۱۰۵ T, mL=۳۷ N/C, °C=۲۱/۴۸)

مشترک پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب در پیش تصفیه‌های ۲٪ و ۶٪ سود به ترتیب ۱۲٪ و ۳۰٪ بیشتری از هاضم شاهد بود و همچنین درصد متان در هاضم شاهد نسبت به هاضم‌های ۲٪ و ۶٪ سود به ترتیب از ۵۶٪ به ۵۹٪ و ۶۴٪ افزایش یافت. با این حال

هنگامی که غلظت سود به ۱۰٪ تغییر کرد، تولید جمععی بیوگاز ۴۳٪ و درصد متان کل از ۵۹٪ به ۵۳٪ به ترتیب نسبت به هاضم شاهد کاهش یافته بود.

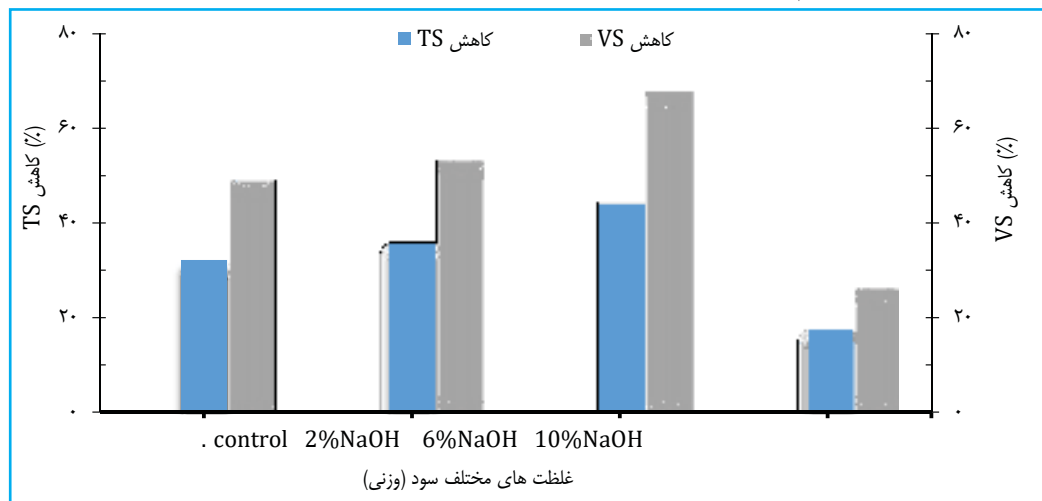


نمودار ۴. تولید بیوگاز، متان و درصد کل متان در هضم مشترک MSW و SS (۲۱/۴۸)C=۳۷ N/C، mL=۱۰۵ T، I/F=۱ و (SS:MSW=۶۰:۴۰)

تأثیر پیش تصفیه قلیایی بر کاهش TS و VS

تغییرات کاهش TS و VS در هضم مشترک MSW و SS در ۵ نمودار نمایش داده شده است. با پیش تصفیه ۲٪ و ۶٪ سود، کاهش TS در هضم مشترک ۱۱٪ و ۲۸٪ و کاهش VS ۷/۷٪ و ۲۷/۷٪ به ترتیب نسبت به هاضم شاهد بالاتر بود. بیشترین

کاهش TS و VS یا به عبارت دیگر، بیشترین تخریب پذیری زیستی در سیستم هضم با عملکرد متان بالاتر به دست آمد، همچنین بیشترین عملکرد متان و کاهش TS و VS در غلظت ۶٪ سود مشاهده شد.



نمودار ۵. تغییرات کاهش TS و VS در غلظت‌های مختلف سود (۲۱/۴۸)C=۳۷ N/C، mL=۱۰۵ T، I/F=۱ و (SS:MSW=۶۰:۴۰)

## بحث

جهت کاهش ضایعات شهری و مضرات آن و تولید پاتوژن کمتر در محیط و کاهش آلودگی حاصل از آن می‌توان از هضم بی‌هوازی به‌عنوان روش مناسب و جذاب به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه استفاده کرد و هم می‌توان از آن انرژی به‌دست آورد. این روش در مقایسه با روش‌های دیگر، دارای مزایایی از قبیل انرژی مصرفی کمتر، تولید گاز قابل استفاده و تصفیه بهتر است. این مطالعه در طی دو مرحله و در دو سری آزمایش انجام شد. در سری اول آزمایش: بررسی نسبت‌های اختلاط دو ماده (پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب) و تعیین نسبت بهینه اختلاط و در سری دوم آزمایش: بر اساس نسبت اختلاط بهینه، اثر غلظت‌های مختلف پیش تصفیه قلیایی با استفاده از سود مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج سایر محققین مقایسه گردید.

### ویژگی‌های ماده اولیه

پیش تصفیه قلیایی مواد لیگنوسلولوزی، ترکیب و ساختار شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی مواد آلی را تغییر داده و تخریب پذیری زیستی آنها را طی فرآیند تخمیر بی‌هوازی تسریع می‌کند (۴۱). با توجه به ویژگی‌های ماده اولیه در جدول ۱، می‌توان نتیجه گرفت که درصد بالایی از مواد جامد پسماند شهری و لجن فاضلاب به‌طور بالقوه قابلیت هضم داشته و شرایط مناسبی برای هضم بی‌هوازی دارند. نسبت C/N کمتر منجر به تشکیل آمونیاک شده و در نتیجه به‌عنوان عامل بازدارنده تولید بیومتان عمل می‌کند (۴۲)، لذا نسبت C/N کم لجن فاضلاب بعد از اضافه نمودن زیاله شهری بهبود یافته و در محدوده مناسب هضم بی‌هوازی قرار گرفت (۱۹، ۲۱) (جدول ۱).

### تولید بیوگاز از نسبت اختلاط پسماند شهری و لجن فاضلاب

بر اساس نتایج، بیشترین عملکرد تولید بیوگاز در نسبت ۶۰:۴۰ پسماند شهری و لجن فاضلاب (MSW ۶۰٪ و SS ۴۰٪) به‌دست آمد و به‌عنوان نسبت بهینه به‌کار گرفته شد. همانطور که در مطالعات پیشین گزارش شده است (۲۰)، این عملکرد برتر نسبت مناسب C/N، مواد مغذی متعادل برای میکروارگانیسم‌های

بی‌هوازی و قلیائیت کافی برای حالت جامد هضم مشترک MSW و SS فاضلاب بود (۳۵). همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش میزان لجن در خوراک منجر به افزایش عملکرد بیوگاز می‌شود (۴۳). بر اساس نسبت اختلاط بهینه در سری‌های بعدی آزمایش، تولید روزانه و تجمعی بیوگاز، تولید متان کل و درصد متان کل بر اساس جامدات فرار (VS) اندازه‌گیری و اثر پیش تصفیه قلیایی بر عملکرد هضم مشترک پسماند جامد شهری و لجن فاضلاب بررسی شد.

### تأثیرات پیش تصفیه قلیایی بر تولید بیوگاز

نتایج نشان داد که تولید بیوگاز برای تمام هاضم‌ها، بلافاصله از روز اول آزمایش شروع شد و حداکثر نرخ تولید بیوگاز بعد از ۱/۵ روز از هضم مشاهده شد. تولید روزانه بیوگاز در ابتدای آزمایش‌ها، برای تمام تیمارها روند مشابهی را نشان داد. در روزهای بعدی، روند تولید کاهش یافت و در برخی از هاضم‌ها تولید بیوگاز متوقف شد که در نهایت در روز بیست و سوم برای تمام تیمارها تولید به صفر رسید. فرآیند مشابهی در مطالعات دیگر از جمله در مطالعه پانگ و همکاران و لی و همکاران گزارش شده است (۴۴، ۴۵). دلیل رخداد چنین روندی با مشاهده تغییرات pH و نیز میزان متان در روزهای مختلف قابل تشریح است؛ آن‌چنان که در نمودار ۳ آمده است که در روزهای اول، فرآیند اسیدزایی منجر به تولید دی‌اکسید کربن می‌شود و افت pH در مخلوط می‌شود (۴۶). به عبارتی دیگر در شروع فرآیند هضم بی‌هوازی، رشد سریع میکروارگانیسم‌های اسیدزا نسبت به تولیدکننده‌های بیومتان، محیط را تا حدودی اسیدی می‌کند. در این حالت اگر مواد تلقیح حاوی جمعیت انبوه متان‌زها به هاضم اضافه نشده باشد، احتمال تجمع میکروارگانیسم‌های تولیدکننده اسید و در نتیجه غیرفعال شدن متان‌زها وجود دارد (۲۵). پس از چند روز، با غلبه جمعیت باکتری‌های متان‌زا و مصرف اسیدزها توسط آنها، pH دوباره افزایش یافته و تولید بیوگاز روندی صعودی به‌خود می‌گیرد (۴۷).

در مطالعه حاضر مقدار تولید تجمعی بیوگاز در پیش تصفیه ۲٪ و ۶٪ سود به ترتیب ۸٪ و ۲۳٪ بیشتر از مقدار شاهد بود (نمودار ۲). اگرچه بهبود تخریب پذیری غلظت ۲٪ سود نسبت به تیمار شاهد خیلی چشم‌گیر نبود (نمودار ۲)، اما تأثیر غلظت ۶٪ سود در

کمترین آن در ۱۰٪ سود مشاهده شد. همچنین بیشترین عملکرد متان و درصد تبدیل ماده جامد و فرار (کاهش TS و VS) نیز در غلظت ۶٪ سود مشاهده شد (۴۶). این به نوبه خود نشان می‌دهد که کاهش TS و VS با عملکرد تولید متان در غلظت‌های مختلف سود ارتباط مستقیم دارد و نیز بیشترین کاهش TS و VS در سیستم هضم با عملکرد متان بالاتر به دست آمد (۲۷) (نمودار ۵). برآون و لی و همچنین ژانگ و همکاران نیز بالاترین کاهش VS را در ۶٪ سود گزارش کردند (۲۷، ۵۲). عملکرد کمتر بیومتان در مقایسه با کاهش VS، در پیش تصفیه ۱۰٪ سود احتمالاً به دلیل افزایش قلیائیت هاضم و در نتیجه کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌ها است که با گزارش خاتری و همکاران نیز مطابقت داشت (۵۹)، و یا ممکن است به دلیل تبدیل VS به محصولات جانبی مانند اسیدهای چرب فرار<sup>۱</sup> باشد (۵۰، ۵۴). خلاصه مطالعات انجام یافته در خصوص پسماندهای شهری و کشاورزی در جداول ۵ و ۶ به‌طور خلاصه جمع‌بندی شده است (۲۷، ۵۵).

روند تولید بیوگاز بسیار مؤثر بود (۱۴، ۲۰). با افزایش غلظت سود به ۱۰٪، مقدار تجمعی بیوگاز به ۲۷۱ میلی‌لیتر بر گرم VS کاهش یافت که ۴۰٪ کمتر از تیمار شاهد بود که چنین روندی در چندین مطالعه از جمله ژانگ و همکاران (۲۰۱۳)، اسدی و همکاران (۱۹۹۸) و رینزما و همکاران (۱۹۸۸) نیز گزارش شده است (۲۷، ۴۸، ۴۹). دلیل چنین رخدادی، افزایش غلظت  $\text{Na}^+$  در پیش تصفیه زیاله جامد شهری و افزایش ظرفیت بافری در ترکیب سیستم هضم با  $\text{HCO}_3^-$  و در نتیجه کاهش اسیدیتیه در طول فرآیند هضم است. (۵۰) با این حال، افزایش  $\text{Na}^+$  در پیش تصفیه زیاله جامد شهری، ممکن است منجر به بازدارندگی میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی نیز گردد که چنین حالتی توسط رینزما و همکاران و بوندسن و همکاران نیز گزارش شده است (۴۸، ۵۱).

با توجه به نمودار ۴، بیومتان در هاضم‌های شاهد، ۲، ۶ و ۱۰ درصد سود به ترتیب ۲۵۵، ۲۹۰، ۳۶۳ و ۱۴۴ میلی‌لیتر بر گرم VS بود. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار و درصد متان در ۶٪ سود و

جدول ۵. مقایسه شاخص‌های اصلی در هضم بی‌هوازی پسماند جامد شهری با تحقیق حاضر

نوع پسماند	pH	TS	VS	C	N	منابع
زیاله	۶	٪۴۰	٪۶۰	-	-	سزارو و همکاران (۴۵)
زیاله	۴/۳۰	۴۰/۸۰ گرم بر لیتر	۳۰/۵۰ گرم بر لیتر	۱۵/۸۰ گرم بر لیتر	۴۸۰ گرم بر لیتر	فونتولاکیس و مانیوس (۴۸)
زیاله	۷/۶	٪۸۹/۸	٪۶۹/۸	-	۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر	فورستر-کارنیو و همکاران (۲۸)
زیاله	۴/۵۱	۱۸/۷۲	۹۵/۳۹	٪۳۹/۶۰	٪۱/۶۵	زینلی و همکاران (۵۶)
زیاله	۷/۳۰	٪۲۳	٪۷۴/۱۰	٪۴۸/۷۵	٪۱/۷۵	مطالعه حاضر

جدول ۶. مقایسه شاخص‌های اصلی در هضم بی‌هوازی پسماندها در مجاورت پیش تصفیه با تحقیق حاضر

نوع پسماند	پیش تصفیه	نتایج	منابع
پسماند موز	٪۶ NaOH	کاهش جامدات کل و جامدات فرار به ترتیب ٪۴۸/۵۰ و ٪۷۰/۴۰ پیش تصفیه قلیایی با استفاده NaOH یک روش مؤثر برای تولید بیوگاز از ضایعات موز است.	ژانگ و همکاران (۴۳)
لجن فاضلاب	حرارتی-قلیایی	پیش تصفیه قلیایی با استفاده از NaOH بیشتر درصد تبدیل ماده جامد و فرار و بالاترین تولید بیوگاز ( VS۶۴۷ گرم بر لیتر) را مشاهده کردند.	خو و همکاران (۵۷)
زیاله	٪۶ NaOH	بیشتر درصد تبدیل ماده جامد و فرار در NaOH ٪۶ به ترتیب ٪۴۴/۸ و ٪۶۸/۱ و با بیشترین تولید بیوگاز ( VS ۵۸۵ میلی‌گرم بر لیتر) گزارش کردند.	تحقیق حاضر

ماده مؤثر برای تولید بیوگاز از پسماند جامد شهری به مقدار محدود (تا نسبت اختلاط ۴۰٪) است. مقدار بیشتر از آن موجب به تأخیر افتادن فرآیند تخمیر می‌گردد. همچنین مشخص شد که غلظت‌های مختلف پیش‌تصفیه قلیایی، عامل مهمی برای بالا بردن انحلال و تخریب‌پذیری زیستی مواد آلی است و به‌طور قابل ملاحظه‌ای تولید بیوگاز را افزایش می‌دهد. تحقیقات بیشتری در مورد امکان افزایش میزان تولید بیوگاز از طریق پیش‌تصفیه قلیایی در دیگر غلظت‌های سود و نسبت اختلاط مطلوب مورد نیاز است.

#### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

#### تشکر و قدردانی

این مقاله منتج از طرح تحقیقاتی در دوره دکتری مصوب سال ۱۳۹۹ و کد ۱۱۱۱۹۶-۵۱ است که با حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی و نیز هسته پژوهشی مدیریت انرژی در صنایع زیستی گروه مهندسی بیوسیستم آن دانشگاه اجرا شده است. بدین وسیله از مسئولین محترم آزمایشگاه صنایع زیستی این گروه و آقای مهندس اسماعیل عشایری که در این پژوهش همکاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

در حالت کلی نتایج نشان داد که تجزیه بیولوژیک زیاله جامد شهری تحت پیش‌تصفیه سود بهبود یافته و اجزای تبدیل بیشتر به بیوگاز توسط فعالیت‌های بیشتر میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی است. بهبود بیولوژیکی بدان معنی است که نه تنها سوبسترات بیشتری مورد استفاده قرار گرفته و بنابراین به همان مقدار سوبسترات هضم شده، بیوگاز نیز افزایش یافته است (۴۱). در نتیجه تولید بیوگاز و بیومتان توسط ترکیب اولیه از ماده خام برای یک سیستم هضم داده شده مشخص می‌شود. در واقع، پیش‌تصفیه با استفاده از سود عمدتاً ساختار فیزیکی و شیمیایی و حلالیت مواد اولیه را تغییر می‌دهد و به این ترتیب، مواد خام را برای تجزیه بهتر در اختیار میکروارگانیسم‌ها قرار می‌دهد (۴۱). همچنین دلیل افزایش تولید بیوگاز با پیش‌تصفیه سود، بهبود تخریب‌پذیری زیستی است. این فرآیند بسیار پیچیده بوده و شامل واکنش‌های متعددی مانند حل شدن پلی‌ساکاریدهای تجزیه نشده، هیدرولیز پیوندهای گلیکوزیدی و گروه‌های استیل و نیز تجزیه پلی‌ساکاریدهای حل شده است (۵۸). با این حال، مکانیزم اصلی افزایش تولید بیوگاز با پیش‌تصفیه سود شامل شکسته شدن پیوندهای استری بین همی‌سلولز، سلولز و لیگنین و در نتیجه افزایش سطح دسترسی باکتری‌ها به مواد می‌باشد (۵۹).

#### نتیجه‌گیری

پیش‌تصفیه قلیایی از پسماند جامد شهری به‌طور قابل توجهی عملکرد بیوگاز را افزایش می‌دهد و لجن فاضلاب به‌عنوان یک

## References

1. Wickham R, Galway B, Bustamante H, Nghiem LD. Biomethane potential evaluation of co-digestion of sewage sludge and organic wastes. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2016;113:3-8.
2. Farokhzad S, keihani A, Perveh S. Energy potential of biogas from waste and Animal waste in Iran. *Seventh National Congress Agricultural Machinery Engineering and Mechanization*. 2012:1-9. (Persian).
3. Nasrollahi-Sarvaghaji S, Alimardani R, Sharifi M, Taghizadeh Yazdi M. Comparison of the environmental impacts of different municipal solid waste treatments using life cycle assessment (LCA)(Case Study: Tehran). *Iranian Journal of Health and Environment*. 2016;9(2):273-88. (Persian).
4. Viotti P, Di Genova P, Falcioli F. Numerical analysis of the anaerobic co-digestion of the organic fraction from municipal solid waste and wastewater: prediction of the possible performances at Olmeto plant in Perugia (Italy). *Waste Management & Research*. 2004;22(2):115-28.
5. Yamashiro T, Lateef SA, Ying C, Beneragama N, Lukic M, Masahiro I, et al. Anaerobic co-digestion of dairy cow manure and high concentrated food processing waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2013;15(4):539-47.
6. Neyens E, Baeyens J, Dewil R. *Advanced sludge treatment*

- affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering. *Journal of hazardous materials*. 2004;106(2-3):83-92.
7. Bouallagui H, Touhami Y, Cheikh RB, Hamdi M. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process biochemistry*. 2005;40(3-4):989-95.
  8. Krzystek L, Ledakowicz S, Kahle H-J, Kaczorek K. Degradation of household biowaste in reactors. *Journal of biotechnology*. 2001;92(2):103-12.
  9. Rao M, Singh S. Bioenergy conversion studies of organic fraction of MSW: kinetic studies and gas yield–organic loading relationships for process optimisation. *Bioresource Technology*. 2004;95(2):173-85.
  10. Charles W, Walker L, Cord-Ruwisch R. Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. *Bioresource technology*. 2009;100(8):2329-35.
  11. Davidsson Å, Gruvberger C, Christensen TH, Hansen TL, la Cour Jansen J. Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management*. 2007;27(3):406-14.
  12. Stroot PG, McMahon KD, Mackie RI, Raskin L. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. Digester performance. *Water research*. 2001;35(7):1804-16.
  13. Kim M, Ahn Y-H, Speece R. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic. *Water research*. 2002;36(17):4369-85.
  14. Ahmadi-Pirlou M, Ebrahimi-Nik M, Khojastehpour M, Ebrahimi S. Effect of alkaline pretreatment on improvement of biodegradability of organic fraction of municipal solid wastes and biogas production in anaerobic digestion. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2017;9(4). (Persian).
  15. Forster-Carneiro T, Pérez M, Romero L, Sales D. Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: focusing on the inoculum sources. *Bioresource technology*. 2007;98(17):3195-203.
  16. Cristancho DE, Arellano AV. Study of the operational conditions for anaerobic digestion of urban solid wastes. *Waste management*. 2006;26(5):546-56.
  17. Hartmann H, Ahring BK. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: influence of co-digestion with manure. *Water research*. 2005;39(8):1543-52.
  18. Grosser A, Neczaj E. Enhancement of biogas production from sewage sludge by addition of grease trap sludge 2016.
  19. Borowski S, Weatherley L. Co-digestion of solid poultry manure with municipal sewage sludge. *Bioresource technology*. 2013;142:345-52.
  20. Ahmadi-Pirlou M, Ebrahimi-Nik M, Khojastehpour M, Ebrahimi SH. Mesophilic co-digestion of municipal solid waste and sewage sludge: Effect of mixing ratio, total solids, and alkaline pretreatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017;125:97-104.
  21. Siripong C, Dulyakasem S. Continuous co-digestion of agro-industrial residues. 2012.
  22. Themelis N, Verma S. The better option-Anaerobic digestion of organic wastes in MSW. *Waste management world*. 2004:41-8.
  23. Dong L, Zhenhong Y, Yongming S. Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW). *Bioresource Technology*. 2010;101(8):2722-8.
  24. Zhang Y, Banks CJ. Impact of different particle size distributions on anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Waste management*. 2013;33(2):297-307.
  25. Liu C-f, Yuan X-z, Zeng G-m, Li W-w, Li J. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource technology*. 2008;99(4):882-8.
  26. Colazo A-B, Sánchez A, Font X, Colón J. Environmental impact of rejected materials generated in organic fraction of municipal solid waste anaerobic digestion plants: Comparison of wet and dry process layout. *Waste Management*. 2015;43:84-97.
  27. Zhang C, Li J, Liu C, Liu X, Wang J, Li S, et al. Alkaline pretreatment for enhancement of biogas production from banana stem and swine manure by anaerobic codigestion. *Bioresource technology*. 2013;149:353-8.
  28. Forster-Carneiro T, Pérez M, Romero L. Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*. 2008;99(15):6763-70.
  29. Nasir IM, Mohd Ghazi TI, Omar R. Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: a review. *Engineering in Life Sciences*. 2012;12(3):258-69.
  30. Delgenes J, Penaud V, Moletta R. Pretreatments for the enhancement of anaerobic digestion of solid wastes. *ChemInform*. 2003;34(13).
  31. Tanaka S, Kobayashi T, Kamiyama K-i, Bildan MLNS. Effects of thermochemical pretreatment on the anaerobic digestion of waste activated sludge. *Water Science and Technology*. 1997;35(8):209-15.
  32. Taherzadeh MJ, Karimi K. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *International journal of molecular sciences*. 2008;9(9):1621-51.
  33. Sun Y, Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource technology*. 2002;83(1):1-11.
  34. Eliana C, Jorge R, Juan P, Luis R. Effects of the pretreatment method on enzymatic hydrolysis and ethanol

- fermentability of the cellulosic fraction from elephant grass. *Fuel*. 2014;118:41-7.
35. Shen F, Yuan H, Pang Y, Chen S, Zhu B, Zou D, et al. Performances of anaerobic co-digestion of fruit & vegetable waste (FVW) and food waste (FW): single-phase vs. two-phase. *Bioresource technology*. 2013;144:80-5.
  36. Zhu J, Wan C, Li Y. Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment. *Bioresource technology*. 2010;101(19):7523-8.
  37. Taherdanak M, Zilouei H. Improving biogas production from wheat plant using alkaline pretreatment. *Fuel*. 2014;115:714-9.
  38. Cuetos MJ, Fernández C, Gómez X, Morán A. Anaerobic co-digestion of swine manure with energy crop residues. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 2011;16(5):1044.
  39. Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, Borzacconi L, Campos J, Guwy A, et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water science and technology*. 2009;59(5):927-34.
  40. APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. American Public Health Association. 1998;Washington DC.
  41. Tian M, Liu X, Li S, Liu J, Zhao Y. Biogas production characteristics of solid-state anaerobic co-digestion of banana stalks and manure. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2013;29(7):177-84.
  42. Deublein D, Steinhauser A. *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*: John Wiley & Sons, 2011.
  43. Borowski S. Co-digestion of the hydromechanically separated organic fraction of municipal solid waste with sewage sludge. *Journal of environmental management*. 2015;147:87-94.
  44. Pang Y, Liu Y, Li X, Wang K, Yuan H. Improving biodegradability and biogas production of corn stover through sodium hydroxide solid state pretreatment. *Energy & Fuels*. 2008;22(4):2761-6.
  45. Li X, Li L, Zheng M, Fu G, Lar JS. Anaerobic co-digestion of cattle manure with corn stover pretreated by sodium hydroxide for efficient biogas production. *Energy & Fuels*. 2009;23(9):4635-9.
  46. Marañón E, Castrillón L, Quiroga G, Fernández-Nava Y, Gómez L, García M. Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Waste management*. 2012;32(10):1821-5.
  47. Siciliano A, Stillitano M, De Rosa S. Biogas production from wet olive mill wastes pretreated with hydrogen peroxide in alkaline conditions. *Renewable energy*. 2016;85:903-16.
  48. Rinzema A, van Lier J, Lettinga G. Sodium inhibition of acetoclastic methanogens in granular sludge from a UASB reactor. *Enzyme and Microbial Technology*. 1988;10(1):24-32.
  49. Asadi A, Hemat A, Taki O. The effect of different methods of Tillage in Wheat production on irrigated farming. *Research in Agriculture*. 1998;6(33):11.
  50. Cesaro A, Naddeo V, Amodio V, Belgiorno V. Enhanced biogas production from anaerobic codigestion of solid waste by sonolysis. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2012;19(3):596-600.
  51. Bondesson P-M, Galbe M, Zacchi G. Ethanol and biogas production after steam pretreatment of corn stover with or without the addition of sulphuric acid. *Biotechnology for biofuels*. 2013;6(1):11.
  52. Brown D, Li Y. Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresource technology*. 2013;127:275-80.
  53. Fountoulakis M, Manios T. Enhanced methane and hydrogen production from municipal solid waste and agro-industrial by-products co-digested with crude glycerol. *Bioresource technology*. 2009;100(12):3043-7.
  54. Salehian P, Karimi K, Zilouei H, Jeyhanipour A. Improvement of biogas production from pine wood by alkali pretreatment. *Fuel*. 2013;106:484-9.
  55. Fang W, Zhang P, Zhang G, Jin S, Li D, Zhang M, et al. Effect of alkaline addition on anaerobic sludge digestion with combined pretreatment of alkaline and high pressure homogenization. *Bioresource technology*. 2014;168:167-72.
  56. Zeynali R, Khojastehpour M, Ebrahimi-Nik M.A. Effect of ultrasonic pre-treatment on biogas yield and specific energy in anaerobic digestion of fruit and vegetable wholesale market wastes. *Sustainable Environment Research*. 2017; 256-267.
  57. Xu J, Yuan H, Lin J. Evaluation of thermal, thermal-alkaline, alkaline and electrochemical pretreatments on sludge to enhance anaerobic biogas production. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014;45(5):2531-6.
  58. Fengel D. *Chemical composition and analysis of wood*. Wood. 1984:26-65.
  59. Khatri S, Wu S, Kizito S, Zhang W, Li J, Dong R. Synergistic effect of alkaline pretreatment and Fe dosing on batch anaerobic digestion of maize straw. *Applied Energy*. 2015;158:55-64.