

Investigating the Interaction Effects of Inoculation and Temperature on Biogas Production from Dairy Industry Effluent in Anaerobic Digestion Process

NARGES NOURI¹, ABBAS ASAKEREH^{1*}, MOHSEN SOLEYMANI¹

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
(Received: Apr. 18, 2020- Revised: June. 13, 2020- Accepted: June. 29, 2020)

ABSTRACT

In this study, batch series of laboratory-scale anaerobic digesters at 35 and 55 ° C were used to investigate the production of biogas from dairy effluents and reduce its pollution. Dairy effluent sludge with ratios of zero, 10, 20, 30, 40 and 100% was used for inoculation. The interaction effect of sludge percentage and temperature at the level of one percent on the volumetric indices of biogas production was significant for the amount of initial volatile solids, volatile solids removed and chemical oxygen demand removed at the level of one percent. With increasing sludge percentage, the amount of biogas produced per initial volume increased for the removed COD but decreased for the initial volatile solids. The highest biogas production efficiency was obtained based on the removed volatile solids at thermophilic temperature and 40% sludge ratio, with the removal of 47.7% volatile solids and 266.5 ml per gram of removed volatile solids. According to the results, the amount of biogas production at mesophilic temperature, in lower proportions of added sludge, is more than the amount of gas produced at thermophilic temperature, and due to the low volume of sludge production in the dairy industry and higher energy consumption under thermophilic conditions, anaerobic digestion and biogas production are more favorable at 35 ° C. The results also showed that by anaerobic digestion of each m³ of dairy effluent, 20.83 MJ of heat energy can be produced.

Keywords: Chemical oxygen demand, Energy, Heating value, Volatile solids.

* Corresponding Author's Email: a.asakereh@scu.ac.ir

بررسی اثرات توأمان مواد تلقیحی و دما بر میزان تولید زیست‌گاز از پساب صنایع لبنی در فرآیند هضم بی‌هوازی

نرگس نوری^۱، عباس عساکره^{۱*}، محسن سلیمانی^۱

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۳۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۳/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۴/۹)

چکیده

در این مطالعه به منظور تولید زیست‌گاز از پساب لبنی و کاهش آلودگی آن، از هاضم‌های بی‌هوازی ناپیوسته در مقیاس آزمایشگاهی در دو دمای ۳۵ و ۵۵ درجه سلسیوس و با نسبت‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۱۰۰ درصد لجن تلقیحی با پساب لبنی استفاده گردید. اثر متقابل درصد لجن و دما در سطح یک درصد بر شاخص‌های حجمی تولید زیست‌گاز به ازای مقدار جامدات فرار اولیه، جامدات فرار حذف شده و اکسیژن خواهی شیمیایی حذف شده در سطح یک درصد معنادار شد. با افزایش درصد لجن مقدار زیست‌گاز تولیدی به ازای حجم اولیه و به ازای COD حذف شده افزایش یافت ولی به ازای جامدات فرار اولیه کاهش یافت. بیشترین بازده تولید زیست‌گاز بر اساس جامدات فرار حذف شده، در دمای ترموفیل و نسبت ۴۰ درصد لجن، با حذف ۴۷/۷ درصد جامدات فرار و به مقدار ۲۶۶/۵ میلی‌لیتر، به ازای گرم جامدات فرار حذف شده به دست آمد. با توجه به نتایج، مقدار تولید زیست‌گاز در دمای مزوفیل، در نسبت‌های کمتر لجن افزوده شده، بیشتر از مقدار گاز حاصله در دمای ترموفیل است و با توجه به حجم کم تولید لجن در صنایع لبنی و مصرف بیشتر انرژی در شرایط ترموفیل، هضم بی‌هوازی و تولید زیست‌گاز در دمای ۳۵ درجه سلسیوس مناسب‌تر می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج حاصله، با هضم بی‌هوازی هر مترمکعب پساب لبنی می‌توان ۲۰/۸۳ مگاژول انرژی تولید کرد.

واژه‌های کلیدی: ارزش حرارتی، اکسیژن خواهی شیمیایی، انرژی، جامدات فرار

(Markou *et al.*, 2017).

مقدمه

مقدار مصرف آب در کارخانه‌های لبنی حدود ۲-۳ برابر مقدار شیر دریافتی است. به ازای هر تن شیر ورودی در صنایع لبنی، ۲ تا ۸ مترمکعب پساب ایجاد می‌شود (Demirel *et al.*, 2005). پساب حاصل از شستشو، حاوی مقداری شیر و فرآورده‌های آن و همچنین تعداد زیادی از عوامل استریل‌کننده و انواع مختلفی از پاک‌کننده‌های اسیدی و قلیایی است. یکی از راه‌های تصفیه پساب لبنی، هضم بی‌هوازی است که نسبت به سایر فرآیندها، از جمله تصفیه شیمیایی، تصفیه فیزیکی و تصفیه بیولوژیکی هوازی، مناسب‌تر است (Vikrant *et al.*, 2018) زیرا در فرآیند بی‌هوازی به انرژی کمتری نیاز است و همچنین محصول هضم بی‌هوازی، گازی حاوی ۵۵-۶۰ درصد متان است که می‌تواند به عنوان منبع تولید انرژی استفاده شود (Demirel *et al.*, 2005). بین ۳۹ تا ۷۶ درصد از کل انرژی برق مورد نیاز تصفیه‌خانه فاضلاب را می‌توان از زیست‌گاز تأمین کرد (Silvestre *et al.*, 2015). لجن حاصل از هضم را می‌توان به عنوان کود کشاورزی استفاده کرد و مشکلات مربوط به دفع لجن نیز کاهش

پساب تولید شده در صنایع از مهم‌ترین آلاینده‌هایی است که تبدیل به جزء لاینفک هر تولید صنعتی شده است. پساب‌های صنایع کشاورزی و لبنیاتی به دلیل دارا بودن بار آلی زیاد، از آلوده‌کننده‌ترین پساب‌ها به شمار می‌روند. صنایع لبنی یکی از صنایع عمده مصرف‌کننده آب و یکی از آلاینده‌ترین صنایع با تولید پساب زیاد می‌باشند (Mortezaei *et al.*, 2018). در طی سال‌های گذشته موضوع حفاظت از محیط زیست، صنایع غذایی و لبنی را مجبور به مدیریت پسماندهای خود کرده است (Prazeres *et al.*, 2012). تصفیه و استفاده مجدد از پساب تولیدی صنایع لبنی بسیار ضروری و از اولویت‌های زیست محیطی است. پسماند صنایع لبنی به دلیل محتوای بالای مواد مغذی و مقدار زیاد مواد آلی، ماده مناسبی برای فرآیندهای تخمیری و تولید زیست‌گاز می‌باشد (Fang & HQ, 2000; Demirel *et al.*, 2005; Prazeres *et al.*, 2012). زیست‌گاز تولیدی به عنوان یک سوخت پاک می‌تواند برای تولید همزمان گرما و برق، سوخت خودرو و یا تزریق در شبکه گاز پس از ارتقا استفاده شود

دمای ۵۵ درجه سلسیوس) مورد بررسی قرار گرفتند تا تأثیر افزودن پسماند شیر بر روی پتانسیل تولید متان و هیدروژن، حذف مواد جامد فرار و بازیافت انرژی تعیین شود. در این پژوهش شش تیمار با نسبت‌های کود گاوی به پسماند شیر ۱۰۰:۰، ۹۰:۱۰، ۷۰:۳۰، ۵۰:۵۰، ۳۰:۷۰ و ۱۰:۹۰ با استفاده از هاضم‌های یک لیتری انجام گرفت. نسبت ۳۰ درصد پسماند شیر (۷۰:۳۰) در مقایسه با هضم کود به تنهایی، کمترین مقدار تولید متان و حذف مواد جامد فرار را داشت. بیشترین مقدار تولید متان و حذف مواد جامد فرار مربوط به نسبت ۳۰:۷۰ بود (Lateef *et al.*, 2014). در مطالعه Mahmoodi *et al.* (2017) میزان درصد متان تولید شده در زیست‌گاز تولیدی برای ترکیبات کود گاوی، پسماند آشپزخانه و فاضلاب شهری با استفاده از هضم بی‌هوازی، اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد میزان متان تولید شده با ذرات فرار و معلق همبستگی دارد. در مطالعه‌ای مقدار تولید زیست‌گاز و متان خالص از ویناس^۶ در دو دمای ۳۵ و ۵۵ درجه سلسیوس و در زمان ماند هیدرولیکی ۲، ۳ و ۴ روز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار گاز متان تولیدی در دمای ترموفیل و زمان ماند هیدرولیکی ۴ روز بود و به ازای هر لیتر ویناس، ۳۱ لیتر گاز متان تولید شد. بیشترین درصد کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی، ۳۹ درصد و در دمای مزوفیل^۷ اتفاق افتاد (Parsaee *et al.*, 2018).

امروزه با توجه به مشکلات زیست‌محیطی و لزوم تأمین انرژی پاک لازم جهت انجام فرآیندهای مختلف در زمینه‌ی فرآوری مواد، استفاده از روش‌هایی که علاوه بر به کارگیری انرژی کمتر و کاهش آلاینده‌ها، خود تبدیل‌کننده انرژی باشند، مورد توجه قرار گرفته است. به همین دلیل استفاده از فرآیند هضم بی‌هوازی که امکان تأمین کل یا بخشی از انرژی مورد نیاز صنعت از طریق ترکیب مواد و بازیافت انرژی و همچنین مدیریت صحیح و جامع پسماند را فراهم می‌کند (Coskun *et al.*, 2012)، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. همان طور که بیان شد در ایران حجم تولید پساب لبنی به ازای هر واحد شیر ورودی به کارخانه‌ها نسبت به کشورهای پیشرفته بیشتر می‌باشد. در صنایع لبنی، پساب بعد از رساندن به پارامترهای استاندارد تخلیه، به زهکش زمین‌های زراعی یا محیط اطراف کارخانه‌ها تخلیه می‌شود که این فرآیند، فرآیندی هزینه‌بر و زمان‌بر است. لجن حاصله از آخرین مرحله‌ی تصفیه هوازی پساب تصفیه‌خانه کارخانه‌های لبنی، به جای دفع زیانبار به محیط زیست، به عنوان ماده تلقیحی و محرک جهت

می‌یابد (Senthilkumar & Muthukumar, 2007). علاوه بر این میکروارگانسیم‌های بیماری‌زا در این فرآیند نابود می‌گردند. در واقع هضم بی‌هوازی ضایعات علاوه بر تولید زیست‌گاز و انرژی، در ایجاد یک محیط زندگی پاک، اشتغال‌زایی بومی، تنوع تجارت روستایی و فرآوری ضایعات به روش پایدار می‌تواند مؤثر باشد (Dennis and Burke, 2001).

عوامل مختلفی بر میزان تولید زیست‌گاز و متان مؤثر می‌باشند که عبارت‌اند از درصد ترکیب مواد مختلف، pH، دما، مدت زمان تولید متان، شرایط محیطی واکنش‌ها، ذرات فرار و عناصر موجود در ترکیبات (Bouallagui *et al.*, 2003; Martin, 2008; Espinoza-Escalante *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010; Amani *et al.*, 2011; Amani *et al.*, 2015; Barros *et al.*, 2017; Ohimain & Izah, 2016). در مطالعه‌ای، هاضم‌های بستر لجن با جریان رو به بالا (UASB^۱) برای تصفیه آب پنیر و سایر پساب‌های لبنی در انگلستان به کار گرفته شد که همراه با حذف ۹۰ درصد اکسیژن خواهی شیمیایی (COD^۲)، مقدار کافی زیست‌گاز برای مصارف انرژی مورد نیاز تصفیه‌خانه تولید گردید (Senthilkumar & Muthukumar, 2007). در پژوهشی (Jurgensen *et al.*, 2018) از یک هاضم ترکیبی برای هضم بی‌هوازی پساب لبنی استفاده کردند. آن‌ها فرآیندی در مقیاس آزمایشگاهی با زمان ماند ۹۰ روز با استفاده از ترکیب یک هاضم پیوسته دارای همزن و یک هاضم بافل‌دار بی‌هوازی (ABR^۳) به صورت سری، ایجاد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که سامانه هضم بی‌هوازی مورد بررسی می‌تواند جایگزین سامانه‌های تصفیه معمولی گردد. در مطالعه Demirel *et al.* (2005) با استفاده از هاضم آزمایشگاهی مقدار حذف اکسیژن خواهی شیمیایی و تولید زیست‌گاز در هضم پسماند آب پنیر در زمان ماند‌های مختلف و بارگذاری مختلف مواد آلی مورد بررسی قرار گرفت. زیست‌گاز تولیدی حاوی ۵۵-۶۰ درصد متان بود و ۶۳/۷ درصد مواد آلی آب پنیر، به متان تبدیل شد. نتایج مطالعه موردی در پنج تصفیه‌خانه فاضلاب شهری در کاتالونیا^۴ (شمال شرق اسپانیا) نشان داد، بسته به فرآیند تصفیه‌خانه‌ها و نحوه‌ی بهره‌برداری از آن‌ها درصد تولید زیست‌گاز متفاوت خواهد بود و می‌توان بین ۳۹ تا ۷۶ درصد از کل انرژی الکتریکی مورد نیاز تصفیه‌خانه فاضلاب را از زیست‌گاز تأمین کرد (Silvestre *et al.*, 2015).

در پژوهشی فرآیند هضم بی‌هوازی ترکیب کود گاوی و پسماند شیر حاصل از گاوهای بیمار در دوره‌ی تحت درمان آنتی‌بیوتیک در فرآیند دو مرحله‌ای و تحت شرایط ترموفیل^۵

5 Thermophilic
6 Vinasse
7 Mesophile

1 Upflow Anaerobic Sludge Blanke
2 Chemical Oxygen Demand
3 Anaerobic Baffled Reactor
4 Catalonia

تأمین جمعیت باکتریایی و تسریع عمل تصفیه به سامانه تصفیه کارخانه‌های لبنی برگردانده می‌شود. معمولاً برای تأمین جمعیت باکتریایی و تسریع عمل هضم بی‌هوازی نیازمند افزودن مواد تلقیحی می‌باشد. در مطالعات مختلف از مواد مختلفی مانند لجن بذردهی شده فاضلاب، ماده تلقیحی شکمبه گاوی (Jahangiri, 2018) و کود حیوانی (Salehi et al., 2013; Membere et al., 2015) استفاده شده است. استفاده از لجن حاصل از تصفیه پساب لبنی صنایع لبنی نیاز به تأمین ماده تلقیحی برای فرآیند هضم بی‌هوازی را برطرف خواهد کرد. همچنین لجن حاصل از هضم بی‌هوازی می‌تواند به عنوان کود کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه سعی گردیده است که میزان تولید زیست‌گاز از پساب صنایع لبنی همراه با افزودن لجن آن به عنوان ماده تلقیحی با استفاده از فرآیند هضم بی‌هوازی بررسی و برخی ویژگی‌های کیفی پسماند حاصل از هضم بی‌هوازی آن جهت استفاده به عنوان کود کشاورزی یا دارای بودن استانداردهای تخلیه به محیط اندازه‌گیری و ارزیابی شود.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها و هاضم بی‌هوازی

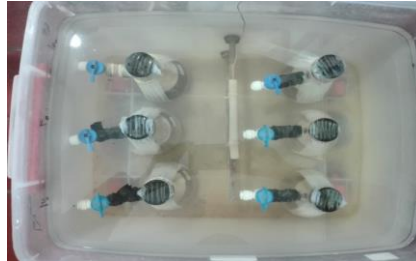
ماده اولیه اصلی این مطالعه پساب صنایع لبنی بود که از کارخانه شیر پگاه خوزستان واقع در ۵ کیلومتری جاده شوش-دزفول، تهیه گردید. لجن حاصل از آخرین مرحله تصفیه هوازی در تصفیه‌خانه نیز به دلیل دارا بودن جمعیت باکتری و مواد آلی و مغذی بالا به عنوان ماده تلقیح به ماده اصلی اضافه شد. تیمارهای مورد بررسی، دما در دو سطح ۳۵ (دمای مزوفیل) (Mortezaei et al., 2018; Zou & Kang, 2018) و ۵۵ (دمای ترموفیل) (Zou & Kang, 2018) درجه سلسیوس و میزان ماده تلقیحی (لجن حاصل از تصفیه‌خانه کارخانه لبنی) در شش سطح صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۱۰۰ درصد ترکیب وزنی پساب لبنی بود که تأثیر آن‌ها بر میزان تولید زیست‌گاز با استفاده از طرح کرت‌های خرد شده در قالب بلوک کامل تصادفی بررسی گردید. دما به عنوان عامل (کرت) اصلی و درصد ماده تلقیح به عنوان عامل (کرت) فرعی در نظر گرفته شد.

در محدوده‌ی دمایی متفاوت، باکتری‌های متان‌ساز متفاوتی فعالیت می‌کنند. باکتری‌های فعال در محدوده میان دمایی (۲۰-۴۵ درجه سلسیوس) را باکتری‌های مزوفیل و باکتری‌های فعال در محدوده فرادمایی (۱۲۲-۴۵ درجه سلسیوس) را باکتری‌های ترموفیل و باکتری‌های فعال در محدوده پایین دمایی را

سایکروفیل^۱ گویند. البته گونه‌ای دیگر از باکتری‌ها را هایپرترموفیل^۲ گویند که در دمای بالاتر از ۶۰ درجه سلسیوس فعالیت دارند. در دماهای پایین‌تر از محدوده مزوفیلیک، باکتری‌های اسیدساز فعال باقی می‌مانند ولی فعالیت متان‌سازها کند می‌شود و تولید زیست‌گاز کم می‌شود. همچنین محدوده‌ی دمایی ۴۰-۵۰ درجه سلسیوس حالت گذار از فاز مزوفیلیک به ترموفیلیک است که فعالیت باکتری‌های متان‌ساز در آن کم می‌شود و کارایی هاضم کم می‌گردد. (Komemoto et al., 2009; Nasir et al., 2012; Jahangiri, 2018; Vanegas & Bartlett, 2018; Vikrant et al., 2013). اثر دما در مطالعات گذشته به طور گسترده بررسی شده است و تقریباً مشخص است که با افزایش دما در محدوده‌های دمایی باکتری‌ها، میزان تولید زیست‌گاز نیز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج تحقیقات نشان‌دهنده این است که تولید موفق و اقتصادی در محدوده دمایی مزوفیل و ترموفیل می‌باشد (Pham et al., 2013; Markowski et al., 2014; Cabrera-Diaz et al., 2016; Parsaee et al., 2018; Zou & Kang, 2018). بنابراین با توجه به علم به افزایش میزان گاز تولیدی در دمای بالاتر، هدف اصلی این مطالعه بررسی اثر متقابل دما و افزودن ماده تلقیحی بود. بنابراین هدف اصلی در این مطالعه، بررسی اثر متقابل دما و افزودن لجن (ماده تلقیحی) می‌باشد. لذا با توجه به محدودیت تعداد هاضم‌ها، ابزار و وسایل مورد نیاز، دما به عنوان عامل اصلی (با دقت کمتر) و ماده تلقیحی به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. بنابراین دقت لازم برای دما (به دلیل سطوح و درجه آزادی کم و همچنین در نظر گرفتن دما به عامل اصلی در طرح کرت‌های خرد شده) کم شد. با این حال به دلیل اینکه تقریباً اثرات دما به تنهایی از قبل مشخص است، در درجه دوم اهمیت قرار دارد، ولی اثرات فرعی و متقابل از دقت کافی برخوردار می‌باشند و نتایج آن‌ها مورد اطمینان است. سطوح ماده تلقیحی بر اساس آزمایش‌های اولیه، نظرات کارشناسان بخش تصفیه‌خانه پساب لبنی کارخانه مذکور و مقدار لجن تولیدی نسبت به پساب تولیدی انتخاب گردیدند. از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ جهت تجزیه واریانس و تحلیل آماری استفاده گردید.

از هاضم‌های دسته‌ای که مجموعه‌ای از ارلن‌های شیشه‌ای ۲۵۰ میلی‌لیتری با سرپوش الاستیکی بود، استفاده شد (شکل ۱). مواد مورد آزمایش پس از ترکیب شدن با هم، به اندازه‌ی ۲۰۰ گرم در هر هاضم بارگذاری شد. جهت بی‌هوازی کردن هاضم، به مدت ۳۰ ثانیه گاز نیتروژن از طریق شیر نمونه‌برداری و خروجی گاز، در حالی که درب هاضم باز بود، به درون هاضم تزریق شد (Fantozzi & Buratti, 2011). برای اطمینان و جلوگیری از

شد. در قسمت پایین حمام المنت‌های ۷۰۰ واتی جهت گرم کردن آب تعبیه شد و از ترموستات‌های کنترل‌کننده خودکار برای ثابت نگه داشتن دمای آب داخل حمام استفاده شد.



ب- نحوه‌ی قرارگیری هاضم‌ها درون حمام آب گرم



الف- واحد هضم

شکل ۱- واحد هضم و نحوه قرارگیری هاضم‌ها درون حمام آب گرم جهت کنترل دمای هضم

از اتمام عمل هضم) اندازه‌گیری شدند. مقدار ذرات جامد کل و ذرات جامد فرار به ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شدند. برای خشک کردن مواد از آون مدل HORO۰۳۸ ساخت کشور آلمان و جهت به دست آوردن جامدات فرار (همچنین خاکستر) از کوره الکتریکی شرکت شیماز مدل ۳۰۰۲۳۸ ساخت ایران استفاده شد.

$$TS = \frac{(A-B) \times 1000}{V} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$VS = \frac{(A-C) \times 1000}{V} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که TS: مقدار ذرات جامد کل (میلی‌گرم بر لیتر)، A: وزن بقایای خشک شده در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس، به علاوه وزن ظرف (میلی‌گرم)، B: وزن ظرف (میلی‌گرم)، V: حجم نمونه مورد اندازه‌گیری (میلی‌لیتر)، VS: مقدار ماده جامد فرار (میلی‌گرم بر لیتر) و C: وزن بقایا پس از سوزانده شدن در ۵۵۰ دمای درجه سلسیوس، به علاوه وزن ظرف (میلی‌گرم) می‌باشد.

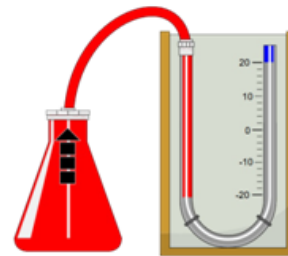
در روزهای ابتدایی، pH درون هاضم‌ها به صورت روزانه و پس از یک هفته به صورت هفتگی، با نمونه‌برداری توسط سرنگ از سر الاستیک هاضم‌ها، اندازه‌گیری شد. به نمونه‌های اسیدی، مقداری پتاسیم هیدروکسید (KOH) تا رسیدن pH به محدوده‌ی مناسب اضافه شد. پس از بارگیری مواد درون هاضم و ایجاد شرایط بی‌هوازی، پس از سه روز pH مواد به محدوده‌ی مناسب رسید و تا پایان آزمایش در محدوده‌ی ۶/۵-۷/۵ حفظ شد. از pH متر مدل AZ86P3 برای اندازه‌گیری pH استفاده شد.

جهت اندازه‌گیری اکسیژن خواهی شیمیایی، ابتدا در یک بالن ۲۵۰ میلی‌لیتری، ۰/۴ گرم مرکوریک سولفات ریخته و سپس

نشتی، درب هاضم با چسب مایع و روکش حرارتی عایق‌بندی شد. به منظور فراهم آوردن محیط آزمایش در محدوده‌ی دمایی (۲±۵۵) و (۲±۳۵) درجه سلسیوس از حمام آب گرم استفاده

اندازه‌گیری گاز تولیدی

جهت اندازه‌گیری حجم گاز تولید شده از روش جابجایی ستون مایع در یک لوله یو (U) شکل (Parajuli, 2011; Janke *et al.*, 2016) استفاده شد (شکل ۲). میزان حجم آب جابه‌جا شده که معادل حجم گاز تولید شده در فشار برابر با ارتفاع ستون آب جابه‌جا شده است، با استفاده از رابطه گازهای کامل به حجم گاز در شرایط استاندارد تبدیل شد (Castka *et al.*, 2002). درصد متان، دی‌اکسیدکربن و منوکسیدکربن زیست‌گاز تولیدی به وسیله سامانه کروماتوگرافی گازی مدل Gp ۹۰۰۱ اندازه‌گیری شد. به منظور کالیبره کردن دستگاه برای گاز متان، قبل از تزریق نمونه آزمایشگاهی، یک میلی‌متر گاز خالص متان (خلوص ۹۹٪) به کروماتوگرافی گازی تزریق و نقطه ماندگاری و سطح زیر منحنی مشخص شد. هم‌چنین از گاز نیتروژن به عنوان گاز حامل استفاده شد.



شکل ۲- سامانه U شکل اندازه‌گیری مقدار زیست‌گاز تولیدی حاصل از هضم بی‌هوازی

ذرات جامد کل (TS^۱) و ذرات جامدات فرار (VS^۲) بر اساس استاندارد SMWW^۳ و روش ۲۵۴۰E (Rice *et al.*, 2017) قبل از بارگیری مواد به درون هاضم و پس از خروج مواد از هاضم (پس

پرمنگنات تا ایجاد رنگ بنفش کم رنگ که نقطه پایان تیتراسیون می‌باشد، تیتراژ می‌شود. با استفاده از رابطه (۵) مقدار مواد آلی محاسبه گردید.

$$a = (a - b) \times 3/16 = \text{مقدار مواد آلی}$$

a: مقدار کل پتاسیم پرمنگنات مصرفی (میلی‌لیتر) و b: مقدار اگزالیک اسید مصرفی (میلی‌لیتر) می‌باشد.

میزان فسفر نمونه‌ها نیز بر اساس روش والسون^۳ اندازه‌گیری شد. بر این اساس، ابتدا ۵ سی‌سی از نمونه را وزن کرده و در یک ارلن ۲۵۰ سی‌سی ریخته شد. مقداری (به اندازه‌ی نوک قاشق) زغال گیاهی (کربن فعال) به هر نمونه اضافه گردید و سپس ۱۰۰ سی‌سی بی‌کربنات سدیم با $\text{pH} = 8/5$ به هر نمونه افزوده و به مدت نیم ساعت هم زده شد. پس از آن به وسیله قیف و کاغذ صافی نمونه‌ها را صاف کرده و ۱۰ سی‌سی از این ماده به دست آمده، در یک بالن ژوژه‌ای با ۵ سی‌سی محلول مولیبدات اصلی (مولیبدات آمونیوم + اسیداسکوروبیک) مخلوط شد. چهار قطره معرف دی‌نیتروفنل (زرد رنگ) به هر نمونه اضافه شده و یک محلول آبی رنگ به دست آمد. سپس به محلول، آب مقطر اضافه کرده تا به حجم ۵۰ سی‌سی برسد. برای تهیه شاهد نیز یک بالن ژوژه ۵۰ سی‌سی آماده کرده و ۱۰ سی‌سی بی‌کربنات سدیم، ۵ سی‌سی مولیبدات اصلی و چهار قطره معرف دی‌نیتروفنل به همان روش انجام گرفته برای نمونه اضافه گردید. سپس با آب مقطر به حجم ۵۰ سی‌سی رسانده شد. حدود ۲۰ دقیقه قبل از شروع آزمایش دستگاه اسپکتروفتومتر را روشن و روی طول موج ۸۸۲ نانومتر تنظیم شد. پس از انجام آزمایش عدد حاصل از دستگاه، در منحنی استاندارد قرار داده و میزان فسفر نمونه بر حسب گرم در لیتر به دست آمد. برای محاسبه فسفر بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم، پاسخ به دست آمده بر حسب ppm را در رابطه (۶) قرار داده و پاسخ بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم محاسبه گردید.

$$P_k = P_p \times (V_A/V_B) \times (V_C/M) \quad (\text{رابطه ۶})$$

جایی که P_k : مقدار فسفر بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم، P_p : مقدار فسفر بر حسب ppm، V_A : حجم عصاره نهایی (میلی‌لیتر)، V_B : حجم عصاره مصرفی (میلی‌لیتر)، V_C : حجم عصاره استخراج شده (میلی‌لیتر) و M : وزن نمونه (گرم) می‌باشد.

مشخصات اندازه‌گیری شده برای ماده‌ی اصلی (پساب لبنی) و مایه تلقیح (لجن)، قبل از بارگذاری درون هاضم‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. میزان pH مایه تلقیحی در محدوده مناسب جهت هضم بی‌هوازی قرار دارد؛ اما میزان pH

حجم معینی از ماده مورد نظر (۲۰ میلی‌لیتر) به آن اضافه شد. سپس ۲ میلی‌لیتر سولفوریک اسید غلیظ به آن افزوده و بالن تا زمانی که محتویات آن کاملاً مخلوط گردند، تکان داده شد. با استفاده از (پپیت، ۱۰ میلی‌لیتر محلول پتاسیم دی‌کرومات ۰/۲۵ نرمال به داخل بالن اضافه و در حالی که بالن تکان داده می‌شود، محلول سولفوریک اسید-سیلور سولفات به آن اضافه شد. سپس چند گلوله‌ی شیشه‌ای کوچک به داخل بالن انداخته و به یک کندانسور وصل گردید. یک محلول شاهد نیز با تکرار مراحل فوق، اما با جایگزینی آب مقطر به جای نمونه زیست‌توده تهیه شد. نمونه و شاهد به مدت دو ساعت ریفلکس^۱ شدند. سپس کندانسور شسته شده و آب مقطر به آن اضافه شد. هر دو محلول نمونه و شاهد با محلول فروآمونیم سولفات استاندارد شده تیتراژ شدند و سپس مقدار اکسیژن خواهی شیمیایی از رابطه (۳) محاسبه شد (Mohit, 2011).

$$\text{COD} = \frac{(Y-X) \times Z \times 8000}{V} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که COD: اکسیژن خواهی شیمیایی (میلی‌گرم بر لیتر)، Y: حجم ماده تیتراژ کننده (فروآمونیم سولفات) برای شاهد (میلی‌لیتر)، X: حجم ماده تیتراژ کننده برای نمونه (میلی‌لیتر)، Z: نرمالیه محلول فروآمونیم سولفات و V: حجم نمونه زیست‌توده (میلی‌لیتر) می‌باشد.

جهت محاسبه نسبت اتمی کربن به نیتروژن، درصد نیتروژن از طریق روش کجلدال^۲ و درصد کربن با استفاده از روش تیتراسیون^۳ محاسبه شدند (Rongping et al., 2010). درصد نیتروژن پس از انجام سه مرحله هضم، تقطیر و تیتراسیون با استفاده از رابطه (۴) به دست آمد.

$$\text{TN} = [(V_s - V_b) \times N \times \left(\frac{M_n}{m}\right) \times 100] / 1000 \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه، V_s : حجم اسیدسولفوریک مصرف شده در تیتراسیون نمونه (میلی‌لیتر)، V_b : حجم اسیدسولفوریک مصرف شده در تیتراسیون شاهد (میلی‌لیتر)، N: نرمالیه اسیدسولفوریک، M_n : جرم مولی نیتروژن (۱۴ گرم بر مول) و m: وزن نمونه (گرم) می‌باشد.

جهت محاسبه کربن ابتدا ۱۰۰ میلی‌لیتر نمونه را داخل بالن مجهز به کندانسور ریخته و سپس با افزودن ۱۰ میلی‌لیتر سولفوریک اسید ۲۰ درصد، نمونه اسیدی می‌گردد. آنگاه ۱۰ میلی‌لیتر پتاسیم پرمنگنات ۰/۰۱ نرمال افزوده و کندانسور را وصل کرده و به مدت ۳۰ دقیقه محلول جوشانده می‌شود. بعد از این مرحله ۱۰ میلی‌لیتر از محلول اگزالیک اسید ۰/۰۱ نرمال اضافه نموده و میزان اضافی آن را با محلول ۰/۰۱ نرمال پتاسیم

غلظت‌تر کردن و افزایش مواد جامد در هاضم، فرآیند هضم را سرعت می‌بخشد. نسبت کربن به نیتروژن در پساب لبنی و لجن، به ترتیب، ۶۲/۶۵ و ۶/۹۵ می‌باشند.

پساب لبنی (ماده اصلی)، مقداری بالا است. TS مایه تلقیحی و پساب، به ترتیب حدود ۷ و ۱/۴۶ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. رقیق بودن پساب باعث کند شدن فرآیند هضم بی‌هوازی می‌شود. افزودن لجن به ماده‌ی اصلی تا حدودی pH را پایین می‌آورد و با

جدول ۱- مشخصات ماده اصلی (پساب لبنی) و مایه تلقیحی (لجن) قبل از هضم

مواد اولیه	P (mg/lit)	C/N	COD (mg/lit)	جامدات کل (g/lit)	جامدات فرار (g/lit)	pH
پساب لبنی	۳/۴ ^b	۶۲/۶۵ ^a	۶۰۱۹ ^a	۱/۴۶ ^b	۰/۸۸ ^b	۱۰/۷ ^a
لجن	۴۹/۳ ^a	۶/۹۵ ^b	۱۸۰۳ ^b	۷/۳۶ ^a	۵/۲۸ ^a	۷/۳ ^b

- در هر ستون، ردیف‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه هستند فاقد تفاوت آماری معنادار در سطح ۵ درصد احتمال می‌باشند.

تولید زیست‌گاز در تیمار بدون ماده تلقیحی (و تا حدودی در تیمار با ۱۰ درصد ماده تلقیحی) متفاوت است. در تیمار بدون ماده تلقیحی به دلیل عدم تولید زیست‌گاز پس از چند روز ابتدایی، مقدار تجمعی تولید زیست‌گاز متوقف می‌شود و سپس با شدت بیشتری نسبت به سایر تیمارها افزایش می‌یابد و به ۱۰۱ میلی‌لیتر به ازای گرم ماده جامد فرار می‌رسد که بیشترین مقدار در بین تیمارها می‌باشد. کمترین میزان تولید زیست‌گاز به ازای مواد جامد فرار در دمای ۳۵ درجه در تیمار ۱۰۰ درصد لجن (ماده تلقیحی) حاصل شد.

در دمای مزوفیل مجموع تولید زیست‌گاز به ازای مواد جامد فرار با افزایش مقدار ماده تلقیحی، روند تقریباً یکنواخت کاهشی دارد به طوری کمترین مقدار در تیمار با بیشترین ماده تلقیحی به دست آمد. در دمای ترموفیل به دلیل نوسانات روزانه تولید زیست‌گاز، مقدار تجمعی تولید زیست‌گاز در تیمارهای مختلف متفاوت است ولی به طور کلی در همه تیمارها به جز تیمار بدون ماده تلقیحی روند آن مشابه است. مقدار تجمعی تولید زیست‌گاز تیمارهای بدون ماده تلقیحی، ۳۰ درصد ماد تلقیحی و تیمار ماده تلقیحی بسیار به هم نزدیک می‌باشند.

در شکل ۵ مقدار تولید زیست‌گاز استاندارد در ۶۳ روز زمان ماند هیدرولیکی نشان داده شده است. تولید زیست‌گاز به ازای مواد جامد فرار در دمای ۳۵ درجه سلسیوس در نسبت‌های اختلاط صفر، ۱۰ و ۲۰ درصد ماده تلقیحی بیشتر از مقادیر متناظر آن در دمای ۵۵ درجه سلسیوس است ولی در نسبت‌های بیشتر ماده تلقیحی، مقدار تولید زیست‌گاز در دمای ۵۵ درجه سلسیوس بیشتر بود. بیشترین مقدار زیست‌گاز تولیدی به ازای مواد جامد فرار اولیه در دمای ۵۵ درجه سلسیوس (ترموفیل) در تیمار ماده تلقیحی خالص (۱۰۰ درصد) با ۵۳/۳ میلی‌لیتر بر گرم

ارزش حرارتی زیست‌گاز تولیدی با استفاده از رابطه (۷) محاسبه گردید.

$$E = Q * M * C \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این رابطه، E: مقدار انرژی گرمایی زیست‌گاز تولیدی از هر مترمکعب پساب لبنی (مگاژول)، Q: مقدار زیست‌گاز تولیدی از هر مترمکعب پساب لبنی (مترمکعب)، M: نسبت متان در زیست‌گاز تولیدی و C: ارزش حرارتی گاز متان (مگاژول بر مترمکعب) می‌باشد. ارزش حرارتی گاز متان برابر با ۳۵/۹ مگاژول بر مترمکعب در نظر گرفته شد (Akbulut, 2012).

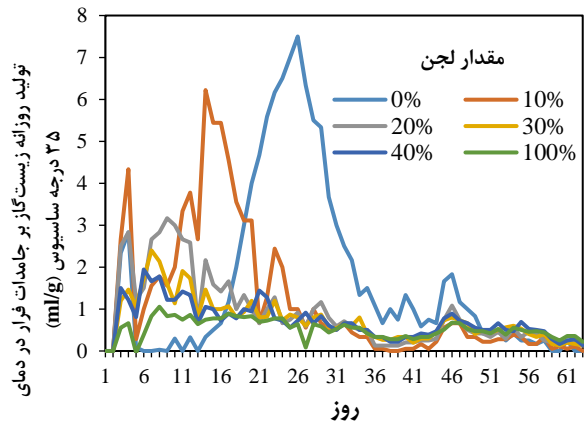
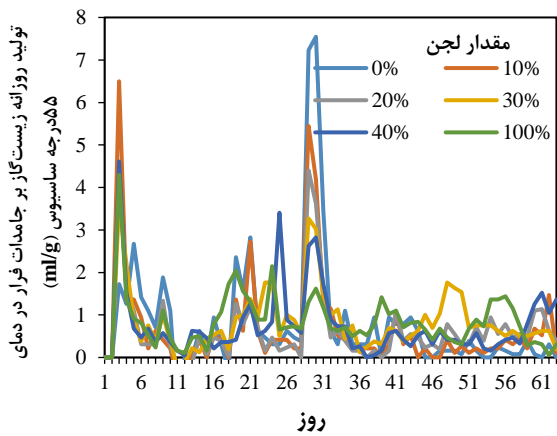
نتایج و بحث

تولید زیست‌گاز از روز سوم بارگذاری شروع شد. زمانی که مقدار تولید روزانه در بیشتر تیمارها به کمتر از یک درصد مقدار تجمعی رسید (پس از ۶۳ روز)، آزمایش متوقف شد. با توجه به مطالعه Jurgensen et al. (2018)، ۹۰٪ کل زیست‌گاز تولیدی از هضم بی‌هوازی پساب لبنی با استفاده از هاضم پیوسته در دمای ۳۸ درجه سلسیوس در ۶۰ روز اول تولید می‌شود. تولید روزانه زیست‌گاز استاندارد بر اساس مواد جامد فرار در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار تولید زیست‌گاز نوسانات زیادی دارد اما در روزهای ابتدایی به خصوص در دمای مزوفیل نسبت به روزهای پایانی بیشتر بود.

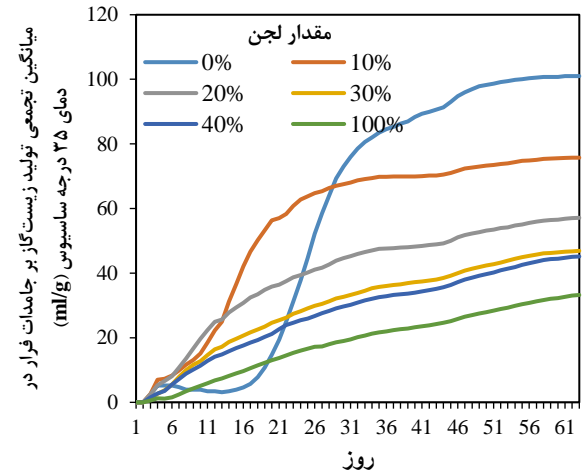
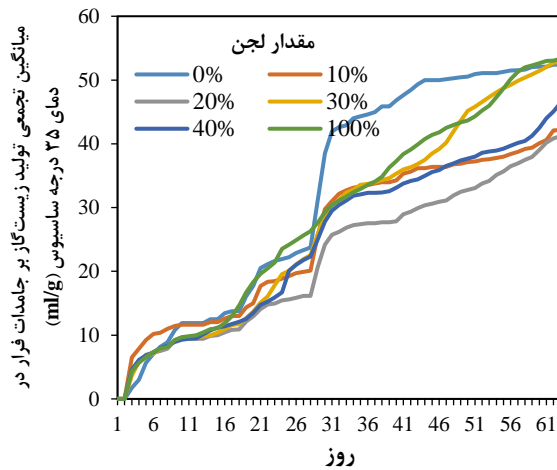
میانگین تجمعی تولید زیست‌گاز (در شرایط استاندارد) در دو دمای ۳۵ و ۵۵ درجه سلسیوس به ازای مقادیر مختلف لجن در شکل ۴ نشان داده شده است. در دمای مزوفیل روند و مقدار تجمعی تولید زیست‌گاز در تیمارهای ۳۰ و ۴۰ درصد ماده تلقیحی شبیه و نزدیک به هم می‌باشد. با وجود اختلاف در مقدار تولید، روند تولید زیست‌گاز در تیمار ۱۰ و ۱۰۰ درصد ماده تلقیحی نیز شبیه تیمار ۳۰ و ۴۰ درصد ماده تلقیحی بود ولی

در دمای ترموفیل در نسبت ۲۰ درصد لجن به ترتیب با مقادیر ۳/۲ و ۴۰/۸ میلی لیتر بر گرم بود.

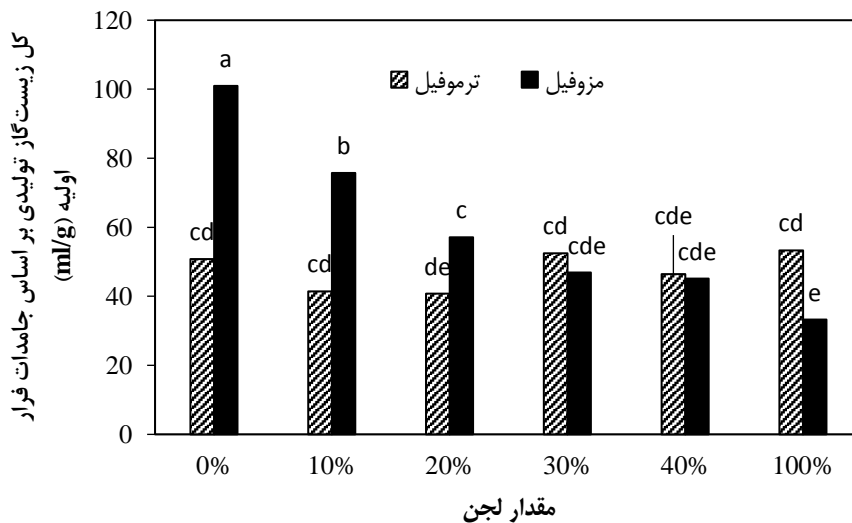
جامدات فرار، به دست آمد. کمترین مقدار تولید زیست گاز به ازای جامدات فرار اولیه در دمای مزوفیل در نسبت ۱۰۰ درصد لجن و



شکل ۳- تولید روزانه زیست گاز بر اساس مواد جامد فرار در دمای ۳۵ و ۵۵ درجه سلسیوس



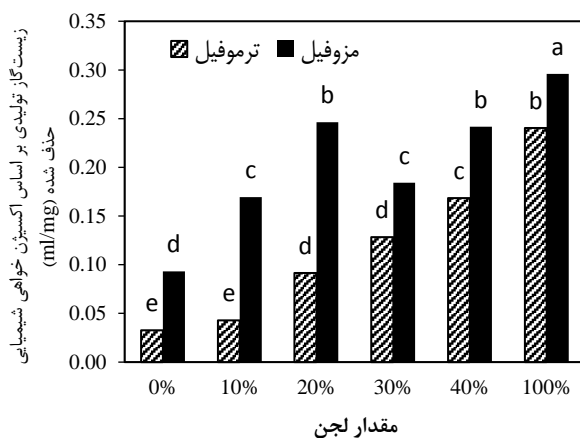
شکل ۴- میانگین تجمعی تولید زیست گاز در دمای ۳۵ و ۵۵ درجه سلسیوس



شکل ۵- مقدار تولید زیست گاز استاندارد در ۶۳ روز زمان ماند هیدرولیکی (ستون هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه هستند فاقد تفاوت آماری معنادار بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد احتمال می باشند).

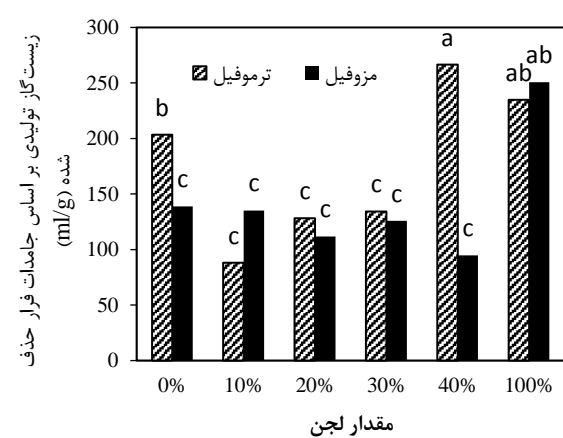
تلقیحی به ترتیب با ۲۶۶/۵ و ۲۳۴/۷ میلی لیتر بر گرم جامدات فرار حذف شده به دست آمد و کمترین میزان تولید در نسبت ۱۰ درصد لجن با مقدار ۸۸/۲ میلی لیتر بر گرم جامدات فرار حذف شده حاصل شد.

تولید زیست گاز به ازای اکسیژن خواهی شیمیایی حذف شده در دمای مزوفیل و ترموفیل تقریباً متناسب با افزایش درصد ماده تلقیحی افزایش یافت (شکل ۵). در همه تیمارها میزان تولید زیست گاز بر اساس میزان اکسیژن خواهی شیمیایی حذف شده در دمای مزوفیل بیشتر از دمای ترموفیل بود که این برتری در نسبت های کمتر لجن بیشتر بود. بیشترین میزان تولید زیست گاز به ازای اکسیژن خواهی شیمیایی حذف شده در دمای مزوفیل با ۰/۲۹۶ میلی لیتر بر میلی گرم و در دمای ترموفیل با ۰/۲۴۱ میلی لیتر بر میلی گرم در تیمار ماده تلقیحی خالص (۱۰۰ درصد لجن) به دست آمد. کمترین میزان تولید زیست گاز به ازای اکسیژن خواهی شیمیایی حذف شده در هر دو دمای مزوفیل و ترموفیل در تیمار بدون ماده تلقیحی (پساب لبنی) به ترتیب با مقدار ۰/۰۹۳ و ۰/۰۳۳ میلی لیتر بر میلی گرم به دست آمد. در مطالعه مشابه، مقدار تولید زیست گاز از پساب لبنی با استفاده از هاضم پیوسته در زمان ماند ۹۰ روز و دمای ۳۸ درجه سلسیوس ۰/۲۶ مترمکعب بر کیلوگرم COD حذف شده به دست آمد (Jurgensen et al., 2018).



زیست گاز تولیدی بر اساس جامدات فرار حذف شده و اکسیژن خواهی شیمیایی حذف شده

مقدار تولید زیست گاز به ازای جامدات فرار حذف شده و اکسیژن خواهی شیمیایی حذف شده در شکل ۶ نشان داده شده است. در شرایط مزوفیل میزان تولید زیست گاز به ازای جامدات فرار حذف شده با افزایش نسبت لجن تا ۴۰ درصد تقریباً روند کاهشی داشت ولی در تیمار ماده تلقیحی خالص (۱۰۰ درصد) به طور چشمگیری افزایش یافت و با ۲۵۰/۷ میلی لیتر بر گرم جامدات فرار حذف شده بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد. این یافته نشان می دهد که افزایش درصد لجن (مایه تلقیحی) همیشه اثر مثبت بر مقدار تولید زیست گاز به ازای جامدات فرار حذف شده ندارد. به عبارت دیگر افزایش جمعیت باکتریایی به دلیل بروز رقابت بر سر مواد مغذی و نیز افزایش نیاز به تأمین انرژی جهت تکثیر جامعه میکروبی، بر بازده تولید متان اثر منفی می گذارد و احتمالاً موجب کاهش بازده تولید زیست گاز تا نسبت ۴۰ درصد ماده تلقیحی شده است. در این حالت بخشی از کربن موجود در محیط واکنش، صرف رشد و تکثیر باکتری ها و تولید زیست توده خواهد شد که موجب کاهش بازده تولید زیست گاز می شود. بازده تولید زیست گاز به ازای جامدات فرار حذف شده در دمای ۵۵ درجه سلسیوس روند مشخصی نداشت. بیشترین بازده تولید زیست گاز در این شرایط در نسبت های ۴۰ و ۱۰۰ درصد ماده



شکل ۶- شاخص بازدهی زیست گاز تولیدی بر اساس جامدات فرار حذف شده و اکسیژن خواهی شیمیایی حذف شده در شرایط استاندارد (ستون هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه هستند فاقد تفاوت آماری معنادار بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد احتمال می باشند).

حذف شده و اکسیژن خواهی شیمیایی حذف شده در سطح یک درصد معنی دار است. تیمار افزودن ماده تلقیحی بر مقدار حجمی تولید زیست گاز به ازای حجم تیمارها، جامدات فرار اولیه و حذف شده اثر معنی داری در سطح یک درصد داشت ولی اثر آن بر مقدار شاخص حجمی تولید زیست گاز به ازای COD حذف شده

تحلیل آماری

تجزیه واریانس شاخص های مورد مطالعه در جدول نشان داده شده است. نتایج طرح نشان داد اثر متقابل افزودن ماده تلقیحی و دما در سطح یک درصد بر شاخص های حجمی تولید زیست گاز به ازای حجم تیمارها، مقدار جامدات فرار اولیه، جامدات فرار

تولید زیست‌گاز در تیمارها با درصد بالای ماده تلقیحی در شرایط ترموفیل بیشتر است. با این وجود هضم بی‌هوازی در دمای ترموفیل با حساسیت بالا و صرف انرژی و هزینه بیشتری همراه است. بنابراین به نظر می‌رسد هضم بی‌هوازی و تولید زیست‌گاز در دمای ۳۵ درجه سلسیوس مناسب‌تر (از نظر اقتصادی و مصرف انرژی) می‌باشد.

معنی‌دار نشد. بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که در دمای مزوفیل مقدار تولید زیست‌گاز در نسبت کم افزودن ماده تلقیحی بیشتر از دمای ترموفیل است و با افزایش نسبت ماده تلقیحی مقدار تولید زیست‌گاز در دمای ترموفیل بیشتر می‌شود. بنابراین بدون در نظر گرفتن مسائل اقتصادی اگر تولید با نسبت کم ماده تلقیحی انجام شود، شرایط مزوفیل بهتر است در حالی که مقدار

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر دما و درصد لجن (ماده تلقیحی) بر شاخص‌های حجمی زیست‌گاز تولیدی

متغیر	درجه آزادی	تولید زیست‌گاز به ازای حجم اولیه	تولید زیست‌گاز به ازای جامدات فرار اولیه	تولید زیست‌گاز به ازای جامدات فرار حذف شده	مقدار تولید زیست‌گاز به ازای COD حذف شده
دما	۱	۰/۰۱۰ ^{ns}	۹۴/۱۱**	۱۱/۶۴**	۲۰۶/۵۶**
درصد لجن	۵	۸۲/۳۴**	۱۲/۱۷**	۱۶/۱۹**	۰/۶۹ ^{ns}
دما×درصد لجن	۵	۱۹/۰۸**	۱۴/۵۶**	۹/۹۲**	۶۴/۵۳**

ns: غیر معنی‌دار، **: معنی‌دار در سطح یک درصد

معنی‌داری با هم نداشتند، در بین سایر سطوح ماده تلقیحی، اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد مشاهده گردید. تیمار بدون ماده تلقیح بیشترین میانگین تولید گاز به ازای جامدات فرار اولیه را با ۷۵/۹۲ میلی‌لیتر بر گرم به خود اختصاص داد. ماده تلقیحی خالص با تولید ۴۳/۲۹ میلی‌لیتر بر گرم جامدات فرار اولیه کمترین مقدار را داشت.

میانگین تولید زیست‌گاز به ازای VS حذف شده با افزودن ماده تلقیحی بیشتر از ۱۰ درصد، افزایش یافت، هر چند در بین تیمارها با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد ماده تلقیحی اختلاف معنی‌دار نشد. میانگین تولید زیست‌گاز به ازای VS حذف شده در تیمار بدون ماده تلقیحی به طور معنی‌داری بیشتر از ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد ماده تلقیحی بود ولی با سطح ۴۰ درصد اختلاف معنی‌داری نداشت. بیشترین مقدار تولید زیست‌گاز به ازای VS حذف شده در تیمار ماده تلقیحی خالص با ۲۴۲/۷۱ میلی‌لیتر بر گرم به دست آمد.

کیفیت و ارزش حرارتی زیست‌گاز تولیدی

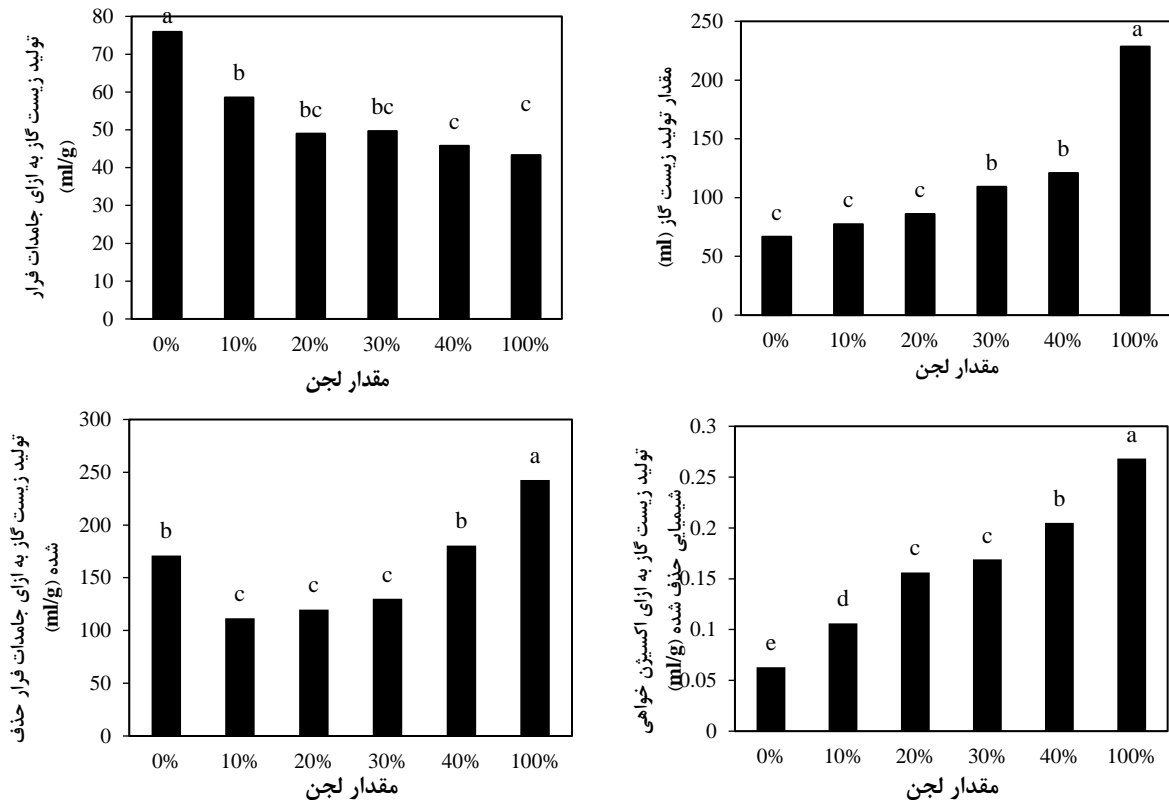
مقدار متان موجود در زیست‌گاز نشان دهنده کیفیت زیست‌گاز تولیدی می‌باشد به طوری که با افزایش محتوی متان، ارزش حرارتی زیست‌گاز نیز بیشتر می‌شود (Akbulut, 2012). نوع و درصد گازهای تشکیل دهنده زیست‌گاز تولیدی در جدول ۳. Error! Reference source not found. نشان داده شده است. با افزایش نسبت درصد لجن، میزان متان موجود در زیست‌گاز نیز افزایش یافته است. زیست‌گاز تولیدی در تیمار ۱۰۰ درصد لجن با ۶۵/۱۰ درصد، بیشترین نسبت متان تولیدی را به خود

مقایسه میانگین سطوح مختلف افزودن ماده تلقیحی بر شاخص‌های مختلف حجمی زیست‌گاز تولیدی با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد. مقایسه میانگین (شکل ۷)، نشان داد که با افزایش درصد لجن مقدار زیست‌گاز تولیدی به ازای حجم اولیه و همچنین به ازای COD حذف شده افزایش می‌یابد هر چند در بین برخی تیمارها اختلاف معنی‌دار نیست. در شاخص زیست‌گاز تولیدی به ازای حجم اولیه، سطوح صفر، ۱۰ و ۲۰ درصد لجن در یک گروه (a)، ۳۰ و ۴۰ درصد در گروه دیگر (b) و لجن خالص (۱۰۰ درصد) به تنهایی در یک گروه (c) قرار گرفتند. کمترین و بیشترین مقدار تولید زیست‌گاز به ازای ۲۰۰ میلی‌لیتر ماده اولیه با ۶۶/۸۱ و ۲۲۸/۵۷ میلی‌لیتر به ترتیب مربوط به نسبت صفر و ۱۰۰ درصد ماده تلقیحی بود. در مقایسه میانگین تولید زیست‌گاز به ازای COD حذف شده، به جزء سطوح افزودن ۲۰ و ۳۰ درصد ماده تلقیحی، در بین همه سطوح اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد به دست آمد که نشان می‌دهد با افزودن ماده تلقیحی، زیست‌گاز بیشتری به ازای هر واحد COD حذف شده، تولید می‌شود. کمترین و بیشترین مقدار تولید زیست‌گاز به ازای COD حذف شده به ترتیب در تیمارهای بدون افزودن ماده تلقیحی (۰/۶۲۹ میلی‌لیتر بر میلی‌گرم) و تیمار ماده تلقیحی (۰/۲۶۸۲ میلی‌لیتر بر میلی‌گرم) حاصل شد.

مقایسه میانگین تولید زیست‌گاز به ازای جامدات فرار اولیه نشان می‌دهد که روند آن عکس روند تولید زیست‌گاز به ازای حجم ماده اولیه است و با افزودن ماده تلقیحی تقریباً روند کاهشی دارد. به جز سطوح اختلاط ۲۰ و ۳۰ درصد لجن که اختلاف

با توجه به ارزش حرارتی متان، زیست‌گاز تولیدی و نسبت متان در زیست‌گاز تولیدی، ارزش حرارتی کلی زیست‌گاز نیز محاسبه شد که در جدول ۳ آمده است. حداقل و حداکثر انرژی از هر مترمکعب پساب لبنی با هضم بی‌هوازی در نسبت‌های مختلف افزودن ماده تلقیحی تا ۴۰ درصد با زمان ماند ۶۳ روز به ترتیب ۸/۴۹ و ۱۳/۳۵ مگاژول به دست آمد.

اختصاص داد. همچنین کمترین میزان دی‌اکسید کربن در زیست‌گاز تولیدی، با ۳۴/۸۴ درصد مربوط به این تیمار می‌باشد. در تیمار با ۴۰ درصد لجن میزان متان برابر با ۶۴/۲۶ درصد بود. این میزان متان با متان تولیدی در مطالعه Markowski *et al.* (2014)، به میزان ۶۴/۵ درصد قابل مقایسه است. در مطالعه دیگری درصد متان بین ۵۵ تا ۶۵ درصد بیان شده است (Rabah *et al.*, 2010).



شکل ۷- مقایسه میانگین بین گروهی تولید زیست‌گاز در نسبت‌های مختلف لجن (ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه هستند فاقد تفاوت آماری معنادار بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد احتمال می‌باشند).

جدول ۳. درصد گازهای موجود در زیست‌گاز تولیدی و ارزش حرارتی آن

ارزش حرارتی		سایر گازها (%)	دی‌اکسید کربن در زیست‌گاز (%)	متان موجود در زیست‌گاز (%)	نسبت‌های لجن با پساب لبنی (%)
مگاژول بر مترمکعب پساب لبنی	مگاژول بر مترمکعب گاز تولیدی				
۸/۴۹ ^d	۱۷/۲۱ ^e	۰/۰۹	۵۱/۷۸ ^a	۴۸/۱۳ ^e	۰
۹/۰۹ ^d	۱۸/۱۷ ^d	۰/۰۸	۴۹/۰۶ ^b	۵۰/۸۶ ^d	۱۰
۱۱/۸۸ ^c	۲۲/۵۷ ^{bc}	۰/۰۴	۳۶/۳۸ ^{cd}	۶۳/۵۸ ^{bc}	۲۰
۱۱/۲۵ ^c	۲۲/۸۳ ^{bc}	۰/۰۵	۳۶/۱۳ ^{cd}	۶۳/۸۲ ^{bc}	۳۰
۱۳/۳۵ ^{bc}	۲۲/۹۷ ^{ab}	۰/۰۶	۳۵/۶۸ ^{de}	۶۴/۲۶ ^{ab}	۴۰
۲۰/۸۳ ^a	۲۳/۳۶ ^a	۰/۰۶	۳۴/۸۴ ^e	۶۵/۱۰ ^a	۱۰۰

- در هر ستون، ردیف‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه هستند فاقد تفاوت آماری معنادار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشند

ورمی‌کمپوست مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. همان طور که بیان شد پس از بارگیری مواد به درون هاضم هیچ‌گونه موادی جهت تعدیل pH اضافه نشد و pH که در محدوده ۹-۱۰ بود

آنالیز ماده هضم شده‌ی نهایی بعد از اتمام دوره تولید زیست‌گاز، ماده هضم شده نهایی که به عنوان کود مایع در نظر گرفته می‌شود جهت مقایسه با

اختلاط بیشتر از سایر نسبت‌ها بود. جامدات فرار حذف شده، مقدار کاهش مواد جامد فرار را نشان می‌دهد که به معنای مصرف شدن بافت آلی زیست‌توده توسط باکتری‌های متان‌ساز است. بنابراین هر چه مقدار حذف جامدات فرار بیشتر باشد، هضم کامل‌تری انجام شده است.

کاهش میزان اکسیژن خواهی شیمیایی در هضم بی‌هوازی، شاخص و نشان‌دهنده‌ی کاهش آلودگی ناشی از پساب می‌باشد. اکسیژن خواهی شیمیایی در هضم بی‌هوازی انجام شده در این مطالعه، به مقدار قابل توجهی کاهش نیافت و همان‌طور که در جدول ۴ بیان شده است، در تمام سطوح دما و نسبت‌های ترکیب لجن، اکسیژن خواهی شیمیایی خروجی بیش از استانداردهای سازمان محیط زیست کشور (۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) برای استفاده جهت مصارف کشاورزی می‌باشد. بنابراین از پسماند حاصل از این هضم بی‌هوازی نمی‌توان به عنوان کود مایع برای گیاهان استفاده کرد و لزوم استفاده از تصفیه تکمیلی برای دست‌یابی به استانداردها اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای هضم بی‌هوازی، میزان حذف اکسیژن خواهی شیمیایی افزایش می‌یابد. در مطالعه مشابه، با استفاده از هاضم پیوسته با زمان ماند ۹۰ روز با حجم یک مترمکعب ۸۲٪ اکسیژن خواهی شیمیایی پساب لینی حذف گردید (Jurgensen et al., 2018). در مطالعه دیگر، مقدار حذف COD در هضم بی‌هوازی پساب حاصل ماست برابر با ۹۰٪ به دست آمد (Mortezaei et al., 2018).

پس از سه روز از شروع هضم بی‌هوازی، به محدوده‌ی ۶/۵-۷/۵ رسید و تا پایان آزمایش در این محدوده ثابت ماند (جدول ۴). pH در محدوده‌ی ۶/۵-۷/۵ جهت تخلیه به محیط زیست یا مصارف کشاورزی مناسب می‌باشد. pH ورمی‌کمپوست نیز در همین محدوده می‌باشد. نتایج حاصل از تغییرات pH در پژوهش Lo et al. (1988) در هضم بی‌هوازی آب پنیر و کود دامی نشان داد pH از ۴/۴۷ قبل از هضم به ۷/۱۸ بعد از هضم رسید و در محدوده‌ی مناسب قرار گرفت. در مطالعه مشابه در هضم بی‌هوازی پساب لینی، pH از حالت قلیایی به حالت خنثی رسید و تقریباً در ۷۰ روز اول هضم ثابت ماند (Jurgensen et al., 2018).

جامدات فرار از ویژگی‌هایی مهمی است که قبل و بعد از هضم اندازه‌گیری شدند. بیشترین مقدار حذف جامدات فرار در حالت مزوفیل در تیمار بدون افزودن ماده تلقیحی و ۱۰ درصد ماده تلقیحی به ترتیب با ۷۲/۷۲ و ۵۶ درصد و در حالت ترموفیل در نسبت‌های ۱۰ و ۳۰ درصد ماده تلقیحی به ترتیب با ۴۶/۹۶ و ۳۹/۰۹ درصد اتفاق افتاد که با نتایج حاصل از پژوهش Lo et al. (1988) در هضم بی‌هوازی در شرایط مزوفیل آب پنیر و کود دامی تقریباً مشابه است. کمترین درصد حذف جامدات فرار در شرایط مزوفیل در تیمار ماده تلقیحی خالص با ۱۳/۲۵ درصد و در شرایط ترموفیل در نسبت ۴۰ درصد ماده تلقیحی با ۱۲/۶۰ درصد به دست آمد. یعنی در این نسبت‌ها باکتری‌ها با مصرف مواد مغذی کمتری گاز بیشتری تولید کرده‌اند. همچنین بازده تولید گاز به ازای جامدات فرار حذف شده در این نسبت‌های

جدول ۴. مقدار مواد جامد کل و مواد جامد فرار قبل و بعد از هضم در دو شرایط دمایی هضم بی‌هوازی

پارامتر	نمونه	۰٪	۱۰٪	۲۰٪	۳۰٪	۴۰٪	۱۰۰
pH	قبل از هضم	۱۰/۷ ^a	۹/۷۲ ^a	۹/۴۴ ^a	۹/۱۶ ^a	۸/۸۸ ^a	۷/۲۰ ^a
	بعد از هضم (مزوفیل)	۶/۸۱ ^b	۶/۸۱ ^b	۶/۶۳ ^b	۶/۵۸ ^b	۶/۵۵ ^b	۶/۵۶ ^b
	بعد از هضم (ترموفیل)	۷/۲۲ ^b	۷/۱۳ ^b	۶/۸۹ ^b	۶/۶۹ ^b	۶/۵۸ ^b	۶/۷۸ ^b
VS (g/lit)	قبل از هضم	۰/۸۸ ^a	۱/۳۳ ^a	۱/۷۶ ^a	۲/۲ ^a	۲/۶۴ ^a	۵/۲۸ ^a
	بعد از هضم (مزوفیل)	۰/۲۴ ^c	۰/۵۸ ^c	۰/۸۶ ^c	۱/۱۶ ^b	۱/۳۸ ^c	۴/۵۸ ^b
	بعد از هضم (ترموفیل)	۰/۶۶ ^d	۰/۷۰ ^b	۱/۲۰ ^b	۱/۳۴ ^b	۲/۱۸ ^b	۴/۰۸ ^c
COD (mg/lit)	قبل از هضم	۶۰۱۹ ^a	۵۴۷۷ ^a	۴۲۱۳ ^{ab}	۳۴۰۰ ^a	۲۵۲۸ ^a	۱۸۰۳ ^a
	بعد از هضم (مزوفیل)	۵۰۶۶ ^b	۴۸۸۷ ^b	۳۸۰۵ ^{bc}	۲۸۴۰ ^b	۲۰۳۵ ^b	۱۲۱۰ ^b
	بعد از هضم (ترموفیل)	۴۶۴۵ ^c	۴۲۰۳ ^c	۳۴۲۸ ^c	۲۵۰۰ ^b	۱۸۰۰ ^b	۶۳۳ ^c
C/N	مواد اولیه (قبل از هضم)	۶۲/۶۵ ^a	۴۹/۵۲ ^a	۳۶/۸۱ ^a	۲۶/۷۶ ^a	۲۱/۲۱ ^a	۶/۹۵ ^a
	پسماند هضم (مزوفیل)	۴۱/۹۷ ^b	۳۳/۱۸ ^b	۲۴/۶۶ ^b	۱۷/۹۳ ^b	۱۴/۲۱ ^b	۴/۶۵ ^b
	پسماند هضم (ترموفیل)	۳۸/۵۲ ^b	۳۲/۴۲ ^b	۲۱/۶۵ ^c	۱۷/۱۴ ^b	۱۳/۱۱ ^b	۳/۴۷ ^b
P (mg/lit)	قبل از هضم	۳/۴ ^a	۴/۱۰ ^a	۷/۹۴ ^a	۲۱/۲ ^a	۳۶/۰۰ ^a	۴۹/۲۵ ^a
	بعد از هضم (مزوفیل)	۲/۶۰ ^b	۲/۹۴ ^b	۵/۴۵ ^b	۱۶/۱۷ ^b	۲۹/۸۵ ^b	۴۰/۹۴ ^b
	بعد از هضم (ترموفیل)	۲/۱۵ ^c	۲/۴۵ ^b	۵/۲۱ ^b	۱۵/۱۴ ^b	۲۷/۷۳ ^b	۳۹/۵۲ ^b

- در هر ستون، ردیف‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه هستند فاقد تفاوت آماری معنادار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشند

مقدار استاندارد تخلیه نزدیک می‌باشند. (Mahvi et al. (2005) حذف فسفر فاضلاب شهری در سه مرحله با زمان ماند هیدرولیکی و دبی مختلف در راکتور با جریان پیوسته را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که مقدار حذف آن در محدوده‌ی ۳۸/۵ تا ۵۵/۹ درصد بود ولی با این حال بیان کردند که میزان فسفر در فاضلاب هضم شده به منظور تخلیه به آب‌های سطحی بیشتر از میزان استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست می‌باشد و نیاز به تصفیه تکمیلی دارد.

نتیجه‌گیری

بیشترین میزان بازده زیست‌گاز تولیدی بر اساس جامدات فرار حذف شده، از نسبت ترکیب ۴۰ درصد ماده تلقیحی با پساب لبنی در دمای ۵۵ درجه سلسیوس حاصل شد و مقدار آن ۲۶۶/۵ میلی‌لیتر بر گرم جامدات فرار حذف شده بود. میانگین تولید زیست‌گاز همه تیمارها به ازای جامدات فرار در حالت ترموفیل ۴۷/۵۶ و در حالت مزوفیل ۵۹/۸۶ میلی‌لیتر بر گرم جامدات فرار به دست آمد که در سطح یک درصد معنی‌دار شد. ترکیب لجن با پساب لبنی بر شاخص‌های حجمی تولید زیست‌گاز در سطح یک درصد معنی‌دار بود و نشان داد نسبت ترکیب مواد در میزان تولید زیست‌گاز تأثیر فراوانی دارد. تولید زیست‌گاز به ازای اکسیژن خواهی شیمیایی حذف شده با افزایش درصد لجن افزایش یافت. مقادیر اکسیژن خواهی شیمیایی در پساب لبنی و لجن بسیار بالاست و هضم بی‌هوازی در سیستم ناپیوسته جهت هضم مقادیر بالای اکسیژن خواهی شیمیایی کافی نیست و به دلیل عدم کاهش قابل توجه مقدار اکسیژن خواهی شیمیایی در این سیستم، استفاده از پسماند حاصل به عنوان کود مایع در مصارف کشاورزی مناسب نیست و باعث آلاینده‌گی محیط می‌شود. حداقل و حداکثر انرژی حاصل از هضم هر مترمکعب پساب لبنی با نسبت‌های مختلف لجن با زمان ماند ۶۳ روز به ترتیب ۸/۴۹ و ۱۳/۳۵ مگاژول محاسبه گردید. عمل هضم بی‌هوازی، pH پسماند را به محدوده‌ی ۷/۵-۶/۵ که مناسب تخلیه به آب‌های جاری یا مزارع کشاورزی تغییر داد. همچنین هضم بی‌هوازی موجب کاهش میزان فسفر کل موجود در پسماند شد ولی به مقدار مجاز جهت تخلیه در آب‌های سطحی نرسید.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.AA98.29747) تشکر و قدردانی می‌کند.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

اندازه‌گیری کربن و نیتروژن نشان داد مقدار نسبت کربن به نیتروژن پس از عملیات هضم به دلیل تجزیه مواد آلی (کربن) در حین عمل هضم بی‌هوازی، کاهش یافته است. نسبت کربن به نیتروژن در نسبت‌های ۳۰ و ۴۰ درصد ماده تلقیحی قبل از هضم بی‌هوازی به ترتیب ۲۶/۷۶ و ۲۱/۲۱ بود که در محدوده مطلوب برای تولید زیست‌گاز می‌باشد. نسبت کربن به نیتروژن قبل و بعد از هضم در شرایط مزوفیل و ترموفیل در تیمار بدون افزودن ماده تلقیحی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد که قبل از هضم برابر با ۶۲/۶۵ بود و بعد از هضم در دمای ۳۵ و ۵۵ درجه به ترتیب به ۴۱/۹۷ و ۳۸/۵۲ رسید. لجن خالص کمترین نسبت را با ۶/۹۵ به خود اختصاص داد که این مقدار پس از هضم در دمای ۳۵ و ۵۵ درجه به ترتیب به ۴/۶۵ و ۳/۴۷ رسید. نسبت کربن به نیتروژن قبل و بعد از هضم بی‌هوازی در نسبت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد لجن در محدوده‌ی مناسب ۱۰-۳۰ درصد قرار دارند و می‌توانند به عنوان کود مایع در مصارف کشاورزی به کار روند. نسبت کربن به نیتروژن در ورمی‌کمپوست‌ها اکثراً در محدوده‌ی ۱۰-۲۰ درصد است. نسبت کربن به نیتروژن پسماند حاصل از هضم در نسبت‌های ۳۰ و ۴۰ درصدی لجن در دمای مزوفیل به ترتیب ۱۷/۹۳ و ۱۴/۲۱ و در دمای ترموفیل به ترتیب ۱۷/۱۴ و ۱۳/۱۱ به دست آمد که در محدوده نسبت کربن به نیتروژن ورمی‌کمپوست قرار می‌گیرند. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که هضم بی‌هوازی باعث کاهش نسبت کربن به نیتروژن می‌شود که بیانگر مصرف کربن آلی یا تولید نیتروژن آلی می‌باشد که جهت مصارف کشاورزی مفید است.

از جدول ۴ مشاهده می‌شود میزان فسفر کل در همه تیمارها پس از هضم بی‌هوازی کاهش یافت که نشانگر مصرف فسفر کل توسط باکتری‌های بی‌هوازی می‌باشد. کاهش مقدار فسفر کل پس از هضم بی‌هوازی در دمای ترموفیل کمی بیشتر از دمای مزوفیل است. فسفر کل موجود در ورمی‌کمپوست که می‌تواند مورد مصرف و جذب گیاهان قرار گیرد در محدوده‌ی ۰/۱ تا ۰/۳ درصد می‌باشد. میزان فسفر کل موجود در پسماند حاصل از هضم کمتر از میزان فسفر کل موجود در ورمی‌کمپوست است اما استفاده از آن به عنوان کود مایع بلامانع است. فسفر برخلاف این‌که برای رشد جلبک‌ها و سایر میکروارگانیسم‌ها ضروری است ولی به علت ایجاد بوتریفیکاسیون در آب‌های پذیرنده و عوارض مختلفی که ایجاد می‌کند، آلاینده شدیدی به حساب می‌آید. فسفر مجاز جهت تخلیه به آب‌های سطحی ۲ میلی‌گرم در لیتر است. فسفر موجود در پسماند حاصل از هضم در همه نسبت‌ها بیشتر از ۲ میلی‌گرم در لیتر است. در تیمارهای بدون ماده تلقیحی و ۱۰ درصد ماده تلقیحی بعد از هضم مقادیر فسفر به

REFERENCES

- Akbulut, A. (2012). Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: Cicekdag case study. *Energy*, 44, 381-390.
- Amani, T. Nosrati, M. Mousavi, S. & Elyasi, S. (2015). Study of microbiological and operational parameters in thermophilic syntrophic degradation of volatile fatty acids in an up flow anaerobic sludge blanket reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 507-514.
- Amani, T. Nosrati, M. Mousavi, S. & Kermanshahi, R. (2011). Study of syntrophic anaerobic digestion of volatile fatty acids using enriched cultures at mesophilic conditions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 8, 83-96.
- Rice, E.W. Baird, R.B. & Eaton, A.D. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (23th ed.). Washington: American Public Health Association.
- Barros, V. G. Duda, R. M. & Oliveira, R. A. (2016). Biomethane production from vinasse in upflow anaerobic sludge blanket reactors inoculated with granular sludge. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(3), 628-639 .
- Bouallagui, H. Cheikh, R.B. Marouani, L. & Hamdi, M. (2003). Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology*, 86, 85-89.
- Cabrera-Diaz, A. Pereda-Reyes, I. Duenas-Moreno, J. Veliz-Lorenzo, E. Diaz-Marrero, A.M. Menendez-Gutierrez, C.L. Oliva-Merencio, D. & Zaiat, M. (2016). Combined treatment of vinasse by an upflow anaerobic filter-reactor and ozonation process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33, 753-762.
- Castka, F. Clark, M. H. Raymond, E. & John, E. (2002). *Modern Chemistry*. Holt, Rinehart and Winston. ISBN 0-03-056537-5.
- Chen, X. Romano, R. T. & Zhang, R. (2010). Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3 (4), 61-72.
- Coskun, C. Bayraktar, M. Oktay, Z. & Dincer, I. 2012. Investigation of biogas and hydrogen production from waste water of milk-processing industry in Turkey. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 16498-16504.
- Demirel, B. Yenigun, O. & Onay, T.T. (2005). Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review. *Process Biochemistry*, 40(8), 2583-2595.
- Dennis, A. & Burke, P. E. (2001). *Dairy waste anaerobic digestion handbook*. Olympia: Environmental Energy Company.
- Espinoza-Escalante, F. M. Pelayo-Ortiz, C. Navarro-Corona, J. Gonzalez-Garcia, Y. Bories, A. & Gutierrez-Pulido, H. (2009). Anaerobic digestion of the vinasses from the fermentation of Agave tequilana Weber to tequila: the effect of pH, temperature and hydraulic retention time on the production of hydrogen and methane. *Biomass and Bioenergy*, 33(1), 14-20.
- Fang, H.H.P. & HQ, Y. (2000). Effect of HRT on mesophilic acidogenesis of dairy wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 126(12), 1-4.
- Fantozzi, F. & Buratti, C. (2011). Anaerobic digestion of mechanically treated OFMSW: experimental data on biogas/methane production and residues characterization. *Bioresource Technology*, 102, 8885- 8892.
- Jahangiri, V. (2018). Investigation the effect of temperature, hydraulic retention time and pH changes on the production of biogas from vinasse in anaerobic digestion process. MSc thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz (In Farsi).
- Janke, L. Leite, A. F. Batista, K. Silva, W. Nikolauszc, M. Nellesa, M. & Stinnera, W. (2016). Enhancing biogas production from vinasse in sugarcane biorefineries: Effects of urea and trace elements supplementation on process performance and stability. *Bioresource Technology*, 217(1), 10-20.
- Jurgensen, L. Augustine, E. Born, J. & Holm-Nielsen, J. B. (2018). A combination anaerobic digestion scheme for biogas production from dairy effluent-CSTR and ABR, and biogas upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 111, 241-247.
- Komemoto, K. Lim, U.G. Nagao, N. Onoue, Y. Niwa, N. & Toda, T. (2009). Effect of temperature on VFA's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste. *Waste Management*, 29 (12), 2950-2955.
- Lateef, S. A. Beneragama, N. Yamashiro, T. Iwasaki, M. & Umetsu, K. (2014). Batch anaerobic co-digestion of cow manure and waste milk in two-stage process for hydrogen and methane productions. *Bioprocess and biosystems engineering*, 37(3), 355-363.
- Lo, K.V. Liao, P.H. & Chiu, C. (1988). Mesophilic anaerobic digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. *Biomass*, 15(1), 45-53.
- Mahmoodi, M. Ebrahimi, R. & Ghasemi-Pirbaloti, A. (2017). Qualitative and quantitative analysis of biogas generated from co-digestion of cow dung, municipal sewage and kitchen waste. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(1), 192-203 (In Farsi).
- Mahvi, A.H. Mesdaghineia, A.R. & Gorgani, F. (2005). Biological removal of phosphorus from effluent by continuous SBR reactor with continuous flow. *08th National Congress on Environmental Health*, 11-08. Tehran (In Farsi).
- Markou, G. Brule, M. Balafoutis, A. Kornaros, M. Georgakakis, D. & Papadakis, G. (2017). Biogas production from energy crops in northern Greece: economics of electricity generation associated with heat recovery in a greenhouse. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 4, 1147-1167.
- Markowski, M. Bialobrzewski, I. Zielinski, M. Debowski, M. & Krzemieniewski, M. (2014). Optimizing low-temperature biogas production from biomass by anaerobic digestion. *Renewable*

- Energy*, 69, 219-225.
- Martin, J.H. (2008). *A new method to evaluate H₂S removal from biogas*. MSc thesis, North Carolina State University.
- Membere, A.E. John, U. & Joshua, O. (2013). Computational model for biogas production from solid waste. *Journal of Environment*, 2(2), 47-51.
- Mohit, B. (2011). *Water and Wastewater Tests*. Shahrab press (In Farsi).
- Mortezaei, Y. Amani, T. & Elyasi, S.H. (2018). High-rate anaerobic digestion of yogurt wastewater in a hybrid EGSB and fixed-bed reactor: Optimizing through response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 255-263.
- Nasir, I. Mohd Ghazi, T. & Omar, R. (2012). Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review. *Engineering in Life Science*, 12(3), 258-269.
- Ohimain, E.I. & Izah, S.C. (2017). A review of biogas production from palm oil mill effluents using different configurations of bioreactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 242-253.
- Parajuli, P. (2011). *Biogas measurement techniques and the associated errors*. MSc Thesis, University of Jyväskylä.
- Parsaee, M. Kiani, M. & Takdastan, A. (2018). Biogas production from sugar cane vinasse using a Static Granular Bed Reactor (SGBR). *Fuel and Combustion*, 11(2), 69-78 (In Farsi).
- Prazeres, A.R. Carvalho, F. & Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48-68.
- Rabah, A. B. Baki, A. S. Hassan, L. G. Musa, M. & Ibrahim, A. D. (2010). Production of biogas using abattoir waste at different retention time. *Science World Journal*, 5(4), 23-26.
- Rongping, L. Shulin, C. & Xiujiu, L. (2010). Biogas production from anaerobic co-digestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 160, 643-654.
- Salehi, K. Khazraee, S.M. Sadathosseini, F. & Khosravanipour, F. (2015). Biogas Production from Chicken Waste and Sheep Manure in Laboratory Scale. *Journal of Environmental Science and Technology*, 16(1), 463-470 (In Farsi).
- Senthilkumar, M. & Muthukumar, M. (2007). Studies on the possibility of recycling reactive dye bath effluent after decolouration using ozone. *Dyes and Pigments*, 72(2), 251-255.
- Silvestre, G. Fernandez, B. & Bonmati, A. (2015). Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management*, 101, 255-262.
- Vanegas, C. & Bartlett, J. (2013). Anaerobic digestion of laminaria digitata: The effect of temperature on biogas production and composition. *Waste and Biomass Valorization*, 4, 509-515.
- Vikrant, K. Kailasa, S.K. Tsang, D.C. Lee, S.S. Kumar, P. Giri, B.S. Singh, R.S. & Kim, K.H. (2018). Biofiltration of hydrogen sulfide: Trends and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 187 (20), 131-147.
- Zou, S. & Kang, D. (2018). Relationship between anaerobic digestion characteristics and biogas production under composting pretreatment. *Renewable Energy*, 125, 485-494.
- Pham, C. H. Triolo, J.M. Sommer, S.G. (2013). Validation and recommendation of methods to measure biogas production potential of animal manure. *Asian-Australasian Journal of Animal Science*, 26 (6), 864-873.