2021, Vol.8, No.3, Pages 63 to 72
Journal of Water and Sustainable Development

سال هشتم، شماره ۳، ۱۴۰۰، صفحات ۶۳ تا ۷۲
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Applied

نوع مقاله: کاربردی

Investigating and Comparing the Feasibility of Using Anaerobic Digesters in Wastewater Treatment Plants with SBR and MLE Processes

M. Mehregan[1*], M. Tamjidi Farahbakhsh[2], A. Kazemi[3], M. Rouhbakhsh[4], A. Akbarzadeh[5]

1, 2, 3- Associate Professor, MSc. Graduate in Faculty of Mechanical Engineering and MSc. Graduate in Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran. 4, 5- BSc. of Mechanical Engineering in Azad University of Mashhad and PhD student of Electrical Engineering in Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad Water and Wastewater Company, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: chahartaghi@shahroodut.ac.ir)

Received: 28-02-2021 Revised: 13-05-2021

Accepted: 17-05-2021 Available Online: 06-12-2021

بررسی و مقایسه امکان‌سنجی استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با فرآیندهای SBR و MLE

محمود مهرگان[1*]، میلاد تمجیدی فرح بخش[2]، اشکان کاظمی[3]، مسعود روحبخش[4]، امیر اکبرزاده[5]

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشیار، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد دانشکده مهندسی مکانیک و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران. ٤ و ٥- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی مشهد و دانشجوی دکترای برق دانشگاه فردوسی مشهد، شرکت آب و فاضلاب مشهد، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: chahartaghi@shahroodut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

Abstract

Nowadays, due to the decrease in fossil fuel resources, generating biogas from corruptible waste is getting attention. Anaerobic digesters are utilized in wastes management and produce renewable energy from it. Generally, the anaerobic digesters convert wastes to methane and carbon dioxide. Effective parameters on the anaerobic digestion process are reactor configuration, temperature range, mixing system, and waste type. In this paper, using of produced sludge in an anaerobic digester was investigated for municipal WWTP with SBR and MLE processes. For this means, Alteimour and Kheine-Arab wastewater treatment plants (WWTPs) have been considered as case studies. The applied processes in Kheine-Arab and Alteimour WWTPs are SBR and MLE, respectively. Results comparison shows that the produced sludge from the SBR process (Kheine-Arab WWTP) has no suitable potential for biogas production. However, there is potential for biogas production at the Alteimour treatment plant, and investment can be made in the future on Alteimour WWTP.

Keywords: Anaerobic Digestion, SBR Process, MLE Process, Kheine_Arab Wastewater Treatment Plant, Alteimour Wastewater Treatment Plant.

چکیده

امروزه به علت کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، تولید بیوگاز از ضایعات فسادپذیر مورد توجه قرار گرفته است. هاضم‌های بی‌هوازی برای تولید انرژی تجدیدپذیر از ضایعات قابل تجزیه و همچنین مدیریت کردن پسماندها استفاده می‌شوند. به‌طورکلی هاضم‌های بی‌هوازی مواد فسادپذیر را به متان و کربن دی اکسید تبدیل می‌کنند. از عوامل تأثیرگذار بر فرایند هضم بی‌هوازی می‌توان به نوع راکتور، محدوده دمایی راکتور، نوع اختلاط و پسماند مورد استفاده نام برد. در این پژوهش به بررسی استفاده از لجن تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با فرایندهای SBR و MLE در هاضم‌های بی‌هوازی پرداخته شده است. به‌این‌منظور، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب خین عرب و التیمور در مشهد که فرایندهای آن‌ها به ترتیب از نوع SBR و MLE می‌باشد، به‌عنوان نمونه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد لجن تولید شده از فرایند SBR (تصفیه‌خانه خین عرب) قابلیت مناسبی برای تولید بیوگاز ندارد، درحالی‌که پتانسیل تولید بیوگاز در تصفیه‌خانه التیمور وجود دارد و می‌توان در آینده بر روی تصفیه‌خانه فاضلاب التیمور سرمایه‌گذاری نمود.

واژه‌های کلیدی: هاضم بی‌هوازی، فرایند SBR، فرایند MLE تصفیه‌خانه فاضلاب خین عرب، تصفیه‌خانه فاضلاب التیمور.

HomePage: https://jwsd.um.ac.ir

How to cite this article: Mehregan M., Tamjidi Farahbakhsh M., Kazemi A., Rouhbakhsh M. and akbarzadeh A. 2021. Investigating and Comparing the Feasibility of Using Anaerobic Digesters in Wastewater Treatment Plants with SBR and MLE Processes. Journal of Water and Sustainable Development, 8(3): 63-72. doi: 10.22067/jwsd.v8i3.2102.1023

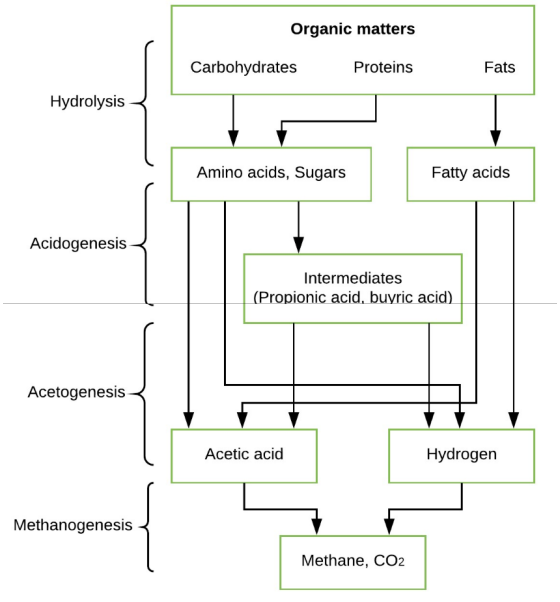
مقدمه

امروزه کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی و جایگزین کردن بخشی از آن‌ها با انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی از اهداف بسیاری از محققین قرار گرفته است (Ali و همکاران ۲۰۲۰). توسعه شهرها و افزایش جمعیت جهانی منجر به افزایش تولید انواع پسماندها شده به‌گونه‌ای که خسارت زیادی به محیط‌زیست وارد کرده و از طرفی مدیریت دفع و یا بازیافت آن‌ها هزینه‌های بالایی را در پی دارد. به‌منظور کاهش آلودگی فاضلاب، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری طراحی شده و بالا رفتن استانداردهای پساب خروجی، به افزایش مصرف انرژی در آن‌ها کشیده شده است، به‌گونه‌ای که هزینه مصرف انرژی در یک تصفیه‌خانه فاضلاب متداول، ۲۵ تا ۴۰ درصد هزینه‌های اجرایی تصفیه‌خانه را شامل می‌شود (Koupaie و همکاران، ۲۰۱۷). در مقابل لجن تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی می‌باشد که می‌توان با استفاده از آن بخشی از انرژی مورد نیاز تصفیه‌خانه‌ها را تأمین نمود. یکی از روش‌های متداول در بازیابی انرژی لجن، استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی می‌باشد که در نتیجه آن بخشی از مواد فرار لجن به بیوگاز تبدیل می‌شود. هضم بی‌هوازی یک سیستم پیچیده است که شامل چندین مرحله تغییرات زیستی بر روی مواد آلی می‌شود، این مراحل عبارت‌اند از: هیدرولیز، اسیدسازی، استات سازی و متان سازی (شکل ۱). هرکدام از این مراحل شرایط عملیاتی مخصوص به خود را دارند که مهم‌ترین آن‌ها شرایط عملیاتی مرحله متان‌سازی است (Mir و همکاران، ۲۰۱۶). باتوجه‌به اینکه استفاده از این منبع انرژی تجدیدپذیر پیچیدگی‌های ویژه‌ای دارد، به‌منظور کاربردی کردن آن باید تمامی جنبه‌های مختلف بررسی شود.

Rulkens (۲۰۰۸) روش‌های استفاده از لجن تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌عنوان سوخت تجدیدپذیر را بررسی کرد. عمده‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند: از هضم بی‌هوازی، هضم هم‌زمان[1]، سوزاندن، سوزاندن همراه با زغال‌سنگ، سوزاندن همراه با ضایعات آلی، گازی‌سازی و غیره. Gikas (۲۰۱۷) یک تصفیه‌خانه فاضلاب با فرایندهای نوین پیشنهاد داده است که مصرف انرژی را به‌شدت کاهش می‌دهد. با استفاده از تحقیقات پیشین انجام شده در مورد سیستم گازی سازی و هضم بی‌هوازی، بیان‌شده مقدار برق تولید شده از برق مصرفی تصفیه‌خانه جدید بیشتر است. Hernández-Sancho (۲۰۱۱) صرفه‌جویی انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در اسپانیا را بررسی کردند. در این تحقیق مشخص‌شد صرفه‌جویی انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب اسپانیا نزدیک به ۱۰ درصد است. منظور از صرفه‌جویی انرژی مقدار انرژی مصرفی پس از بهینه کردن فرایندهای تصفیه‌خانه نسبت به مقدار انرژی مصرفی حال حاضر می‌باشد. آن‌ها بیان کردند ظرفیت تصفیه‌خانه، مقدار مواد آلی حذف‌شده و نوع راکتور هوادهی مورد استفاده، از عوامل مؤثر بر صرفه‌جویی انرژی هستند و عمر تصفیه‌خانه تأثیری بر آن ندارد. Dos Santos (۲۰۱۶) روشی برای بررسی قابلیت انرژی و اقتصادی به‌منظور تولید انرژی یا بیوگاز در فرایند بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برزیل را بررسی کردند. نتایج نشان داد قابلیت اقتصادی تنها برای شهرهایی با جمعیت بیشتر از ۳۰۰ هزار نفر وجود دارد. Junior و همکاران (۲۰۲۰) روش‌های پیش هضم لجن و هضم هم‌زمان آن به‌منظور افزایش تولید بیوگاز در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را بررسی کردند. آن‌ها مکانیزم ها، فواید و معایب و جنبه‌های فنی و اقتصادی هر روشرا بررسی کردند و پیشنهاد کردند با وجود ارزیابی‌های صورت گرفته، استفاده از هر روش باید باتوجه‌به اهداف مورد انتظار به‌طور دقیق بررسی شود. Singh و همکاران (۲۰۲۰) چرخه حیات نیروگاه‌های بزرگ‌مقیاس بیوگاز سوز بر پایه لجن را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد نیروگاه‌های بیوگاز سوز در مقایسه با نیروگاه‌های ذغال سنگ گازهای گلخانه‌ای کمتری منتشر می‌کند. همچنین لجن هضم شده را می‌توان به‌عنوان کود جایگزین کودهای شیمیایی نمود. به‌عنوان یک نتیجه کلی، احداث نیروگاه‌های بیوگازسوز بر پایه لجن، تأثیرات مثبتی بر روی محیط‌زیست نشان داده است. Lafratta و همکاران (۲۰۲۰) تولید بیوگاز و برق تولیدی از آن در حالت دینامیکی در هاضم‌های بی‌هوازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را بررسی کردند. منظور از حالت دینامیکی، تغییر در نرخ ورودی لجن به هاضم و در نتیجه تغییر در مقدار بیوگاز و برق تولیدی ناشی از آن می‌باشد که دلیل این امر، تعدد تعرفه‌های خرید برق تولیدی در طول روز در کشور انگلستان می‌باشد. نتایج نشان داد هاضم‌های بی‌هوازی متداول و همچنین هاضم‌های پیشرفته با فرایند پیش هضم هیدرولیز گرمایی، قابلیت انعطاف‌پذیری برای تولید بیوگاز دینامیک دارند. همچنین مقدار بیوگاز تولیدی نزدیک به ۳/۶ درصد در هاضم‌های متداول و در نزدیک به ۴/۸ درصد در هاضم با فرایند پیش هضم در مقایسه با حالت رژیم تغذیه ثابت، افزایش یافته است.

تولید برق از بیوگاز در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در مقایسه با برق تولید شده از انرژی‌های فسیلی، مستلزم هزینه‌های سرمایه‌گذاری بیشتری می‌باشد. به عبارت دیگر هزینه تولید برق از منبع تجدیدپذیر نسبت به انرژی‌های فسیلی بیشتر است. به همین دلیل تعرفه‌های خرید اختصاصی برای انواع مختلف انرژی تجدید پذیر در ایران در نظر گرفته شده است. در خصوص احداث نیروگاه‌های بیوگاز سوز، قدم اول امکان‌سنجی

استحصال بیوگاز از انواع مواد زیست‌توده می‌باشد تا به‌وسیله آن امکان‌سنجی اقتصادی این نوع نیروگاه‌ها در شرایط مختلف بررسی شود. باتوجه‌به اینکه در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب التیمور و خین عرب در شهر مشهد، لجن قابل توجهی در انتهای فرایندهای تصفیه‌خانه تولید می‌شود، احداث واحدهای بی‌هوازی به‌منظور هضم بیشتر لجن و همچنین استحصال بیوگاز مدنظر قرار گرفته است. از طرفی به دلیل استفاده از روش‌های مختلف برای تصفیه فاضلاب، مشخصات لجن تولید شده در هرکدام از تصفیه‌خانه‌ها با یکدیگر متمایز می‌باشد. به همین دلیل ارزیابی تولید بیوگاز در هرکدام از تصفیه‌خانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، در ابتدا هاضم بی‌هوازی در ابعاد کوچک برای تصفیه‌خانه فاضلاب شهری خین عرب و التیمور مشهد طراحی و ساخته شد و سپس با تزریق لجن و اعمال شرایط هضم، بیوگاز استحصال شد. سپس میزان استحصال بیوگاز و کیفیت آن در هر دو تصفیه‌خانه تعیین شد.



شکل ۱- فرایندهای تخریب هضم بی‌هوازی (Mir و همکاران، ۲۰۱۶)

مواد و روش‌ها

هدف اصلی از این تحقیق، ارزیابی لجن‌های تولید شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب التیمور و خین عرب برای استفاده از آن‌ها در هاضم‌های بی‌هوازی می‌باشد. به عبارت دیگر هدف، مشخص نمودن کارایی یا عدم کارایی هاضم‌های بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مذکور است. از طرفی ازآنجاکه هاضم‌های بی‌هوازی به شکل‌های مختلفی طراحی می‌شود و راهبری آن‌ها در شرایط گوناگونی صورت می‌گیرد، در پژوهش‌های انجام گرفته پیشین، عموماً یک یا چند شاخص مؤثر بر هضم بی‌هوازی مورد ارزیابی قرار گرفته است، به‌گونه‌ای که هدف اکثر این پژوهش‌ها بهینه‌سازی راهبری یا طراحی هاضم‌ها می‌باشد. باتوجه‌به اینکه در این تحقیق، هدف بهینه‌سازی هاضم‌ها یا راهبری هاضم‌ها نمی‌باشد، سعی بر آن شده است که به‌منظور حصول نتایج بهتر، با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده توسط محققین دیگر، طراحی و راهبری هاضم‌ها به‌صورت بهینه انجام پذیرد.

۱- ملاحظات طراحی

• نوع هاضم

هاضم‌های بی‌هوازی باتوجه‌به نوع ضایعاتی که در آن‌ها استفاده می‌شود به‌صورت‌های مختلفی طراحی می‌شود. هاضم‌ها می‌توانند از نوع لاگون های سرپوشیده[۲]، اختلاط کامل[۳] (برای مواد خام ورودی شامل مواد جامد کمتر از ۱۰٪)، پلاگ فلو[۴] (برای مواد خام ورودی شامل مواد جامد کمتر از ۱۳٪)، سیستم‌های ناپیوسته[۵]، سیستم‌های ناپیوسته متوالی[۶] و یا سیستم‌های پیوسته تک[۷] یا دو[۸] مرحله‌ای باشد. باتوجه‌به اینکه در بسیاری از تصفیه‌خانه‌های بروز در دنیا از هاضم‌های اختلاط کامل استفاده می‌شود، در این تحقیق این نوع هاضم از نوع نیمه پیوسته[۹] انتخاب شده است.

• دما

دمای کارکرد برای زنده ماندن، رشد و نمو بهینه میکروب‌ها و عملکرد هاضم بی‌هوازی بسیار مهم و حیاتی است. در سیستم‌های صنعتی، هضم بی‌هوازی در دو محدوده دمایی مزوفیلیک (۲۵-۴۰ درجه سانتی گراد) و ترموفیلیک (۵۰-۶۵ درجه سانتی گراد) رخ می‌دهد. شرایط دمایی ترموفیلیک به بهبود بازدهی بیوگاز، هضم مواد، تولید متان و کاهش پاتوژن ها کشیده می‌شود اما کوچک‌ترین تغییراتی سمی و شرایط محیطی منجر به مرگ میکروارگانیسم‌ها خواهد شد. در مقابل در شرایط دمایی مزوفیلیک، توده‌های میکروارگانیسم در مقابل تغییرات محیطی مقاوم‌تر، پایداری هاضم‌ها بیشتر، راهبری و نگهداری هاضم‌ها آسان‌تر و هزینه‌های سرمایه‌گذاری آن کمتر است. از معایب شرایط دمایی مزوفیلیک، زمان ماند بالا و تولید بیوگاز کمتر می‌باشد. باتوجه‌به نتایج منتشر شده توسط سایر محققین پیرامون دماهای مختلف در محدوده‌های دمایی ترموفیلیک و مزوفیلیک، ازآنجایی‌که بحث اقتصادی در احداث هاضم‌های بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب خین عرب و التیمور از اولویت‌های اصلی بوده است، با بررسی‌های صورت گرفته، محدوده دمایی آزمایش، ترموفیلیک و دمای کارکردی هاضم ۵۵ درجه سانتی گراد انتخاب شده است. (Wang و همکاران، ۲۰۱۹)

• زمان ماند

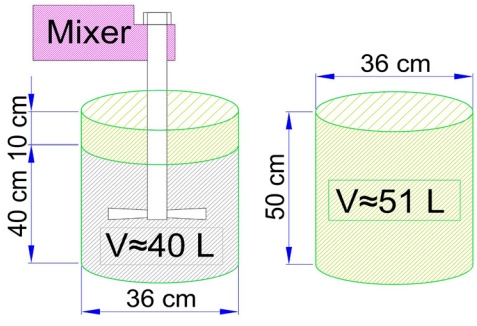
زمان ماند به مدت زمانی گفته می‌شود که مواد خام در هاضم باقی می‌مانند. برای تبدیل بیولوژیکی مواد خام به بیوگاز، زمان ماند بهینه‌ای تعریف شده است. این بازه بهینه برای محدوده دمایی ترموفیلیک در حدود ۱۲ تا ۲۴ روز و برای محدوده دمایی مزوفیلیک در حدود ۱۵ تا ۳۰ روز بیان شده است و به نوع ماده خام مورد استفاده، شرایط محیطی و همچنین استفاده نهایی مواد هضم شده بستگی دارد. باتوجه‌به مقالات منتشر شده پیرامون زمان بهینه برای محدوده دمایی ترموفیلیک برای لجن‌های تولید شده در تصفیه‌خانه‌های مختلف فاضلاب، با در نظر گرفتن دمای کارکرد هاضم (۵۵ درجه سانتی گراد) مدت زمان ۱۲ روز به‌عنوان زمان ماند انتخاب شده است (Feng و همکاران، ۲۰۱۹)

• اختلاط

اختلاط مناسب به یکنواختی غلظت لجن، دما و جلوگیری از ته‌نشینی مواد جامد کشیده می‌شود. اختلاط باتوجه‌به غلظت مواد جامد می‌تواند با تیغه‌های مکانیکی یا با استفاده از چرخش گاز در هاضم انجام پذیرد (Karim و همکاران، ۲۰۰۵). از طرفی اختلاط بیش از اندازه به اخلال در فعالیت میکروب‌ها کشیده می‌شود. در پژوهش حاضر با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از سایر تحقیقات، سیستم اختلاط فیزیکی با استفاده از یک الکتروموتور با دو مجموعه سه پره‌ای طراحی و سرعت اختلاط در حدود ۵۰ rpm انتخاب شد.

۲-ساخت ست آپ

در این پروژه که در قالب یک پایلوت آزمایشگاهی می‌باشد، دو هاضم بی‌هوازی به حجم ۵۱ لیتر و از جنس استینلس استیل ساخته شده است. حجم خالص استفاده شده برای هضم لجن نزدیک ۴۰ لیتر بوده و نزدیک ۱۱ لیتر به‌عنوان فضای ذخیره‌سازی موقت بیوگاز تولید شده در نظر گرفته شده است. همچنین به‌منظور اختلاط لجن در هر هاضم از یک الکتروموتور با قدرت ۱۸۰ وات استفاده شده است. شرایط کاری هاضم در محدوده ترموفیلیک و در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد و زمان ماند در هاضم‌ها ۱۲ روز در نظر گرفته شده است. مدت زمان آزمایش هاضم جمعاً ۳۶ روز (۳ دوره ۱۲) روزه به طول انجامید. هاضم به‌صورت نیمه پیوسته[10] بوده و میزان تغذیه هاضم برابر با میزان تخلیه لجن می‌باشد. همچنین در اندازه‌گیری مقدار بیوگاز تولید شده از روش جابجایی آب[11] بهره گرفته شده است. در شکل (۲) شماتیکی از هاضم بی‌هوازی طراحی شده نشان داده شده است.



شکل ۲- شماتیکی از هاضم بی‌هوازی

۳-شاخص‌های مورد بررسی

به‌منظور بررسی کارکرد هاضم بی‌هوازی ازلحاظ شکل‌گیری پایدار فرایند هضم بی‌هوازی در آن، نیاز به بررسی شاخص‌های مختلفی می‌باشد. آنالیزهای انجام شده بر روی لجن در حین آزمایش عبارت‌اند از: نسبت کربن به نیتروژن (C/N)، VSS، pH، COD و قلیاییت برحسب $CaCO_3$ که در ادامه به توضیح برخی از آن‌ها پرداخته شده است.

• PH و قلیاییت

PH نقشی حیاتی در پایداری هاضم و متعادل‌سازی شرایط برای فعالیت‌های بیولوژیکی دارد. ازدیاد اسیدهای آلی به‌خصوص زمانی‌که مقدار زیادی از مواد آلی وارد راکتور و تبدیل به اسیدهای آلی می‌شود، PH هاضم کاهش خواهد یافت. کاهش PH به مقادیر کم (برای نمونه به مقدار ۵) منجر به مرگ میکروارگانیسم‌های متان ساز می‌شود زیرا بیشتر آن‌ها تنها در برابر تغییرات اندک از خود مقاومت نشان می‌دهند و بهترین محدوده برای آن‌ها ۷ تا ۷/۲ گزارش شده است؛ بنابراین باید مقدار PH به‌طور مناسبی کنترل شود تا شرایط برای فعالیت میکروارگانیسم‌های متان ساز که اسیدهای آلی را مصرف می‌کنند تسهیل شود. از طرفی، زمانی‌که رشد میکروارگانیسم‌های متان ساز بیش از اندازه باشد به توقف اسیدسازی کشیده شده، غلظت آمونیاک افزایش یافته و مقدار PH بیش از ۸ می‌شود؛ بنابراین ضروری است که مقدار PH در محدوده مناسبی حفظ شود. محدوده مذکور از ۶/۸ تا ۷/۲ پیشنهاد شده است (Ward و همکاران، ۲۰۰۸)

• VSS

به‌منظور تصفیه مناسب و دفع لجن فاضلاب در ابتدا لازم است مشخصه‌های آن دانسته شود. به‌طورکلی لجن ترکیبی از مواد فرار، مواد آلی، مواد مغذی، پاتوژن ها، فلزات و آلاینده‌های آلی و آب است. مقدار TSS متناسب با فرایندهای مختلف تصفیه‌ای که بر روی فاضلاب انجام‌شده، تغییر می‌کند. مقدار TSS[12] بعد

از مرحله تغلیظ لجن می‌تواند به بیشتر از ۹٪ و بعد از مرحله آبگیری مکانیکی به ۲۵ تا ۳۵٪ برسد (Milieux، ۲۰۰۳). مواد جامد (TSS) تشکیل دهنده لجن نزدیک به ۵۵ تا ۸۸٪ از مواد فرار (VSS) می‌باشند که این مواد به‌طور عمده شامل مواد آلی با منشأ حیوانی یا گیاهی هستند. هدف اصلی استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی، تخریب این دسته از مواد و تبدیل آن به بیوگاز می‌باشد. هضم بی‌هوازی لجن به‌صورت بیولوژیکی می‌تواند نزدیک به ۵۰٪ از مقدار VSS موجود در لجن را به بیوگاز تبدیل کند. در حقیقت میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی از VSS به‌عنوان ماده غذایی استفاده کرده و مقدار آن را کاهش می‌دهد (Bresters، ۱۹۹۸)

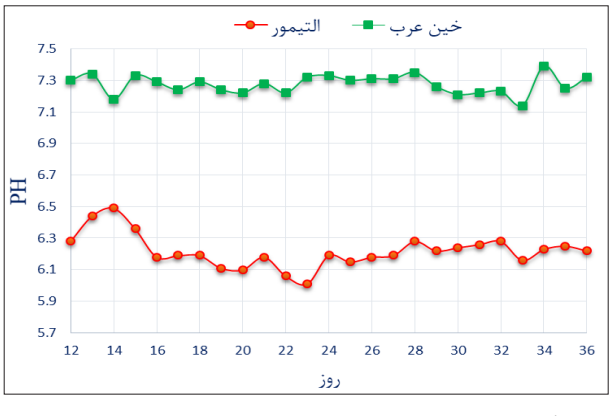
نتایج و بحث

در مدت‌زمان انجام آزمایش برای بررسی وضعیت پایداری هاضم های بی‌هوازی، نیاز به اندازه‌گیری شاخص‌های مختلفی می‌باشد. هر کدام از این شاخص‌ها تأثیر مستقیمی بر عملکرد هاضم‌ها، هضم لجن و تولید بیوگاز خواهند داشت و باید مقادیر آن‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شود تا از ایجاد اختلال در فرایندهای هضم بی‌هوازی جلوگیری به عمل آید. کنترل و مهار این شاخص‌ها می‌تواند با استفاده از تغییر در شرایط راهبری هاضم‌ها و یا استفاده از مواد افزودنی صورت بگیرد. لازم به ذکر است باتوجه‌به مطلوب بودن شاخص‌های موردنظر از تغییر در شرایط راهبری و افزودن مواد دیگر به هاضم خودداری شده است. در ادامه به بررسی این شاخص‌ها و نتایج حاصل از آن پرداخته می‌شود.

۱- بررسی تغییرات پارامترهای آزمایش

- **PH**

شکل (۳) تغییرات PH در هاضم خین‌عرب و التیمور را نشان می‌دهد. نوسانات PH می‌تواند در هنگام هضم بی‌هوازی بر روی بیوگاز به‌دست‌آمده تأثیر بگذارد. در مراحل اولیه (هیدرولیز، اسیدسازی، استات‌سازی) به دلیل تشکیل اسیدهای آلی، PH کاهش می‌یابد و زمانی‌که مرحله متان سازی شروع می‌شود، PH کمی افزایش پیدا می‌کند. باتوجه‌به اینکه در ۱۲ روز اول آزمایش، هاضم هیچ‌گونه تغذیه و یا تخلیه‌ای نشده است، مقدار PH از روز ۱۲ ام که اولین روز تغذیه و تخلیه می‌باشد، از روی نمونه‌های تخلیه اندازه‌گیری شده است. مقدار PH برای هر هاضم رفتاری متفاوت از هاضم دیگر به‌دست‌آمده است. به‌طوری‌که مقادیر PH در طول زمان هضم برای لجن خین‌عرب همواره در محدوده مناسب قرار دارد. این امر منجر می‌شود که شرایط مناسب از نظر PH برای میکروارگانیسم‌های متان‌ساز فراهم باشد. از طرف دیگر در هاضم خین عرب مقدار PH در روز ۱۵ ام (سه روز پس از اولین تغذیه) مقداری کاهش یافته اما پس از آن تا روز ۳۲ ام روند ثابتی را پیموده و پس از آن دچار مقداری کاهش و افزایش شده است. مقدار PH در هاضم التیمور در روزهای ۱۲ الی ۱۵ ام که (در سه روز متوالی پس از اولین تغذیه) دچار افزایش شده اما پس از آن به سرعت کاهش یافته و بعد از آن روند ثابتی را پیموده است. دلیل این امر این است که پس از تغذیه هاضم، هضم بی‌هوازی وارد مراحل هیدرولیز، اسیدسازی، استات‌سازی شده و به دلیل تشکیل اسیدهای آلی، PH کاهش می‌یابد؛ اما پس از شروع مرحله متان‌سازی، مقدار PH افزایش پیدا کرده است.



شکل ۳- مقایسه تغییرات pH در هاضم خین عرب و التیمور

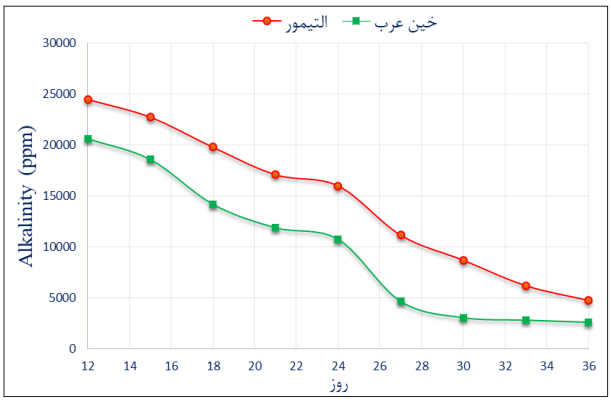
- **قلیائیت**[۱۳]

در شکل (۴) تغییرات قلیائیت نشان داده شده است. مقدار قلیاییت در روز ۱۲ ام برای هر دو نمونه لجن مقدار بالایی داشته و در روزهای بعد با شیب قابل ملاحظه‌ای کم شده

- **نسبت کربن به نیتروژن**

نسبت کربن به نیتروژن یک پارامتر متداول در مطالعات هاضم‌های بی‌هوازی است که در بسیاری از تحقیقات بررسی قرار گرفته است. نسبت کربن به نیتروژن بیانگر مقدار کربن آلی و نیتروژن موجود در ماده اولیه می‌باشد. تغییرات در محتویات بیوگاز به‌طور مداوم بستگی به این نسبت دارد. نسبت کربن به نیتروژن یک پارامتر اصلی در هضم بی‌هوازی است. کربن در نقش منبع انرژی عمل می‌کند و نیتروژن منجر به افزایش رشد میکروارگانیسم‌ها می‌شود. اگر نسبت کربن به نیتروژن زیاد باشد به علت مصرف سریع نیتروژن مقدار تولید بیوگاز کم می‌شود (Khalid و همکاران، ۲۰۱۱)

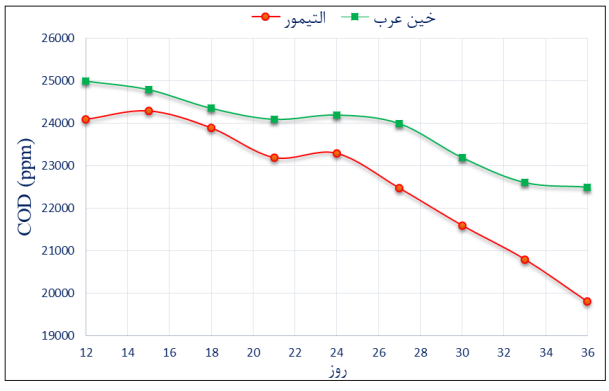
است و برای هر دو نمونه به کمتر از ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. کاهش شدید قلیاییت، احتمالاً به علت تشکیل زیاد اسیدهای آلی در هاضم به علت مواد آلی افزوده شده از طریق تغذیه روزانه می‌باشد که البته با گذشت زمان و رسیدن به روزهای آخر آزمایش و افزایش تعداد میکروارگانیسم‌های متان ساز، اسیدهای آلی توسط این میکروارگانیسم‌ها مصرف شده و شیب کاهش قلیاییت کم شده است. این موضوع اهمیت بالا بودن قلیاییت در لجن مورد استفاده را نشان می‌دهد، زیرا در صورت پایین بودن قلیاییت، با تشکیل زیاد اسیدهای آلی، محیط هاضم اسیدی شده و به اختلال در فعالیت میکروارگانیسم‌های متان ساز کشیده می‌شود. از طرف دیگر همان‌طور که مشاهده می‌شود این مقدار برای لجن التیمور همواره بیشتر بوده است. برای هاضمی که به‌درستی فرایند هضم بی‌هوازی در آن شکل گرفته است مقدار قلیائیت کل باید بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (ppm) باشد (Metcalf و همکاران، ۲۰۰۳). همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است مقدار قلیائیت در هر دو هاضم در محدوده بیان شده قرار دارد که نشان‌دهنده شکل‌گیری مناسب فرایند هضم بی‌هوازی است.



شکل ۴- تغییرات قلیائیت

• **COD**

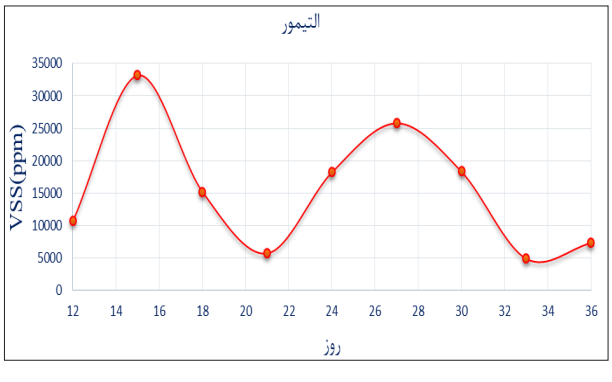
در شکل (۵) مشاهده می‌شود، میزان COD در لجن خین‌عرب از التیمور در تمام مرحله هضم بیشتر می‌باشد. با گذشت زمان تغییرات مقدار COD در هر دو هاضم روی هم رفته کاهشی بوده است. کاهش COD در هاضم، بیانگر کاهش آلودگی لجن از طریق تخریب VSS، مواد آلی و مغذی است که این امر از اهداف به‌کارگیری هاضم‌های بی‌هوازی می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود کاهش COD در هاضم التیمور نسبت خین عرب بیشتر بوده که دلیل آن می‌تواند شکل‌گیری بهتر فرایند هضم بی‌هوازی و یا مستعدتر بودن لجن تولید شده در تصفیه‌خانه فاضلاب التیمور باشد.



شکل ۵- تغییرات COD

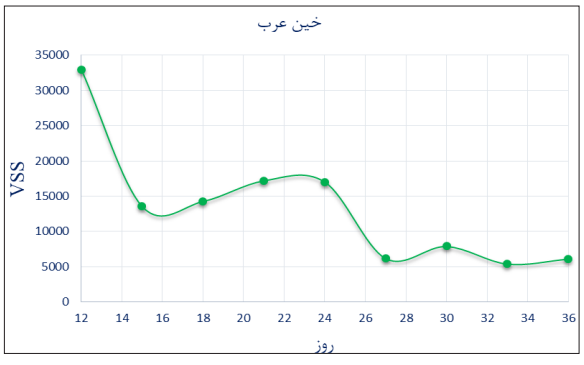
• **VSS**

شکل (۶) تغییرات VSS در هاضم التیمور را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد فعالیت میکروارگانیسم‌ها به‌طور پایدار نمی‌باشد و به دلایلی فعالیت آنان متوقف شده و پس از مدتی مجدد شروع می‌شود. باتوجه‌به این نکته که PH در محدوده تقریباً مناسبی برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها قرار دارد، نوسان مقدار VSS در لجن هضم شده می‌تواند به علت عدم تغذیه هاضم در ۱۲ روز اول باشد، زیرا اختلال در فرایند تأمین مواد مغذی منجر به نقصان فعالیت میکروارگانیسم‌ها و برهم خوردن تعادل در هاضم می‌شود. از طرفی بروز شوک‌های دمایی ناخواسته مانند قطعی برق و کاهش مقطعی دمای هاضم‌ها می‌تواند از علل دیگر نوسان فعالیت میکروارگانیسم‌ها در هاضم التیمور باشد که این امر منجر انباشت VSS می‌شود.



شکل ۶- تغییرات VSS در هاضم التیمور

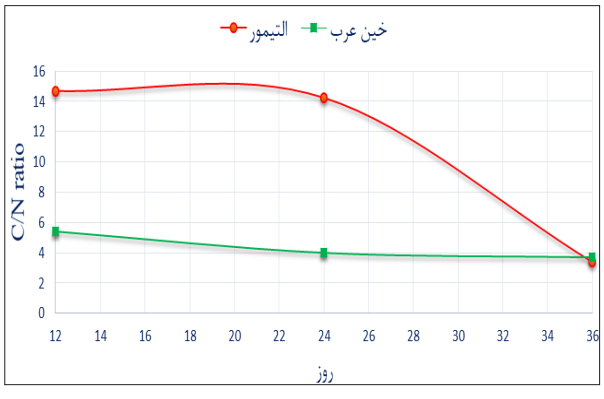
شکل (۷) تغییرات VSS در هاضم خین‌عرب را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است برخلاف شرایط ایجاد شده برای هاضم التیمور در هاضم خین‌عرب شرایط بی‌هوازی مناسبی ایجاد شده و سپس با تغذیه لجن در دوره بعدی مقدار VSS کاهش داشته یافته و در دوره آخر (روز ۲۴ تا ۳۶) به شرایطی پایدارتری رسیده است.



شکل ۷- تغییرات VSS در هاضم خین‌عرب

• نسبت کربن به نیتروژن

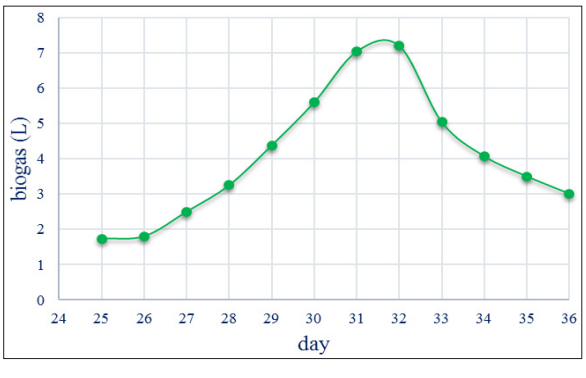
شکل (۸) نسبت کربن به نیتروژن را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌ترگفته شد این مقدار باید در محدوده ۲۰ تا ۳۰ قرار بگیرد. موادی که نسبت کربن به نیتروژن پایینی دارند، باعث غلظت بیش از اندازه آمونیاک می‌شوند که این غلظت، بیش از مقدار مورد نیاز برای رشد میکروارگانیسم‌ها می‌باشد و احتمالاً به توقف هضم بی‌هوازی کشیده می‌شود، یعنی به دلیل وجود شرایط زیستی نامناسب، فعالیت میکروارگانیسم‌ها کم شده و جمعیت آن‌ها کاهش می‌یابد (Calli و همکاران، ۲۰۰۵؛ Procházka و همکاران، ۲۰۱۲). این نمودار نشان می‌دهد نسبت کربن به نیتروژن برای لجن خین عرب پایین بوده و احتمالاً برای کاربرد در هاضم‌های بی‌هوازی نامناسب است ولی لجن التیمور شرایط مناسب‌تری برای هضم بی‌هوازی دارد.



شکل ۸- نسبت کربن به نیتروژن

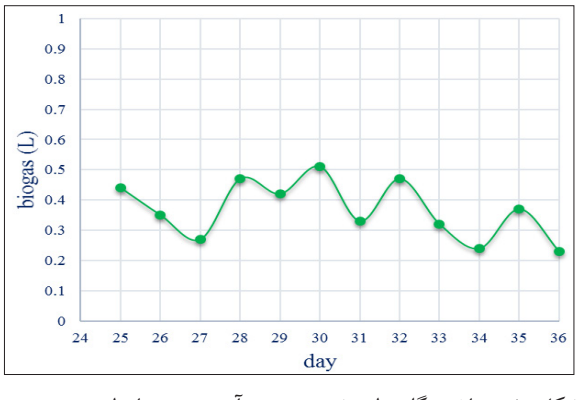
۲-میزان تولید بیوگاز

میزان بیوگاز تولید شده در زمان‌های مختلف هضم متفاوت می‌باشد. این مقدار در ابتدای فرایند هضم بی‌هوازی (روزهای اولیه راه‌اندازی هاضم) کم بوده و بعد از گذشت چندین روز مقدار آن افزایش پیدا می‌کند. هنگامی‌که هاضم به شرایط پایدار هضم بی‌هوازی رسیده باشند مقدار تغییرات تولید بیوگاز کاهش پیدا می‌کند. شکل‌های (۹) و (۱۰) مقدار تولید بیوگاز در دوره آخر هضم برای لجن التیمور و خین‌عرب را نشان می‌دهد.



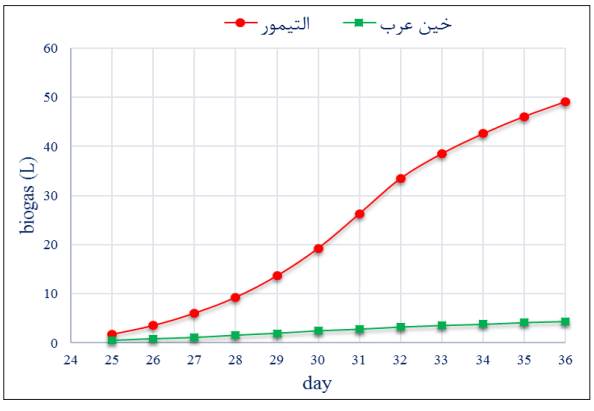
شکل ۹- میزان بیوگاز تولید شده در دوره آخر هضم برای لجن التیمور

همان‌گونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، میزان بیوگاز تولید شده برای لجن التیمور با گذشت زمان افزایش و سپس کاهش پیدا کرده است. این موضوع می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که به علت نوع لجن مورد استفاده (نسبت کم کربن به نیتروژن) فعالیت میکروارگانیسم‌ها در حالت پایدار نمی‌باشد، به‌طوری‌که فعالیت میکروارگانیسم‌ها در ابتدا کم و سپس با گذشت زمان افزایش پیدا کرده که نتیجه آن افزایش تولید بیوگاز می‌باشد. همچنین در روزهای ۳۲ به بعد مقدار تولید بیوگاز کاهش یافته که می‌تواند به علت کمبود مواد غذایی برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها و یا عواملی دیگر باشد.



شکل ۱۰- میزان بیوگاز تولید شده در دوره آخر هضم برای لجن خین‌عرب

همان‌گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است میزان تولید بیوگاز برای لجن خین‌عرب ثبات نسبی در طول آزمایش داشته، اما باتوجه‌به نوع لجن خین‌عرب که از فرایند هوادهی گسترده به‌دست‌آمده و همچنین نوع لجن مورد استفاده در آزمایش که نسبت کربن به نیتروژن در آن پایین است میزان تولید بیوگاز به‌شدت پایین بوده است.



شکل ۱۱- میزان تولید تجمعی بیوگاز در دوره آخر هضم برای هاضم التیمور

در شکل (۱۱) میزان تولید تجمّعی بیوگاز در دوره آخر هضم نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۹) نمایش داده شده است میزان تولید تجمعی بیوگاز در هر دو هاضم نشان داده شده است. با مقایسه میزان تولید بیوگاز برای دو لجن به‌کار رفته در آزمایش مشخص می‌شود، میزان تولید بیوگاز در هاضم التیمور (نزدیک به ۵۰ لیتر در ۱۲ روز) نزدیک به ۸ برابر بیوگاز تولید شده در هاضم خین‌عرب است (نزدیک به ۵ لیتر در ۱۲ روز).

۳-آنالیز درصد بیوگاز

آنالیز نمونه‌های بیوگاز استحصال شده برای هر لجن با استفاده از دستگاه GC[۱۴] اندازه‌گیری شده که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، درصد متان بیوگاز استحصال شده از تصفیه‌خانه التیمور در محدوده مناسب است اما مقدار متان موجود در بیوگاز استحصال شده از تصفیه‌خانه خین عرب پایین می‌باشد.

جدول ۱- درصد متان هریک از تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه

متان (٪)	تصفیه‌خانه مورد مطالعه
۶۳/۵۲	التیمور
۲۵/۲۸	خین‌عرب

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، در ابتدا هاضم بی‌هوازی در ابعاد کوچک برای تصفیه‌خانه فاضلاب شهری خین عرب و التیمور مشهد طراحی و ساخته شد و سپس با تزریق لجن و اعمال شرایط هضم، بیوگاز استحصال شد. سپس شرایط تولید بیوگاز و رفتار و اثر شاخص‌های کیفی در طول آزمایش بررسی شد و میزان استحصال بیوگاز و کیفیت آن در هر دو تصفیه‌خانه اندازه گیری شد.

نتایج به‌دست‌آمده بیانگر دو نتیجه به‌طور کامل متفاوت برای تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه است. هدف اصلی از این تحقیق، ارزیابی اولیه برای پتانسیل سنجی هرکدام از لجن‌ها برای تولید بیوگاز بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، شرایط در نظر گرفته شده برای راه‌اندازی و راهبری هاضم التیمور مناسب بوده است. میزان بیوگاز تولید شده برای این تصفیه‌خانه پایین‌تر از حد تئوری بوده ولی از لحاظ محتویات متان، بیوگاز در حالت کاملاً استاندارد می‌باشد، بنابراین از لحاظ کمیت ضعیف‌تر از تئوری، ولی از لحاظ کیفیت مناسب است. هرچند در این تحقیق سعی بر آن بوده است که با استفاده از نتایج دیگر محققان، پارامترهای مورد استفاده و راهبری هاضم‌ها به‌گونه‌ای بهینه انتخاب شوند، اما پایین‌تر بودن میزان بیوگاز تولیدی در این تصفیه‌خانه نسبت به حالت تئوری، بیانگر این مطلب است که با مطالعه پارامتری شاخصه‌های تأثیرگذار بر فرایند هضم، امکان بازدهی بیشتر هاضم و به عبارتی تولید بیوگاز بیشتر وجود دارد. از طرف دیگر نتایج به‌دست‌آمده برای تصفیه‌خانه خین عرب پایین‌تر از حد انتظار بوده و نشان داده شد که میزان بیوگاز قابل استحصال از لجن این تصفیه‌خانه بسیار پایین می‌باشد. از طرفی باتوجه‌به آنالیزهای انجام شده بر روی بیوگاز به‌دست‌آمده از تصفیه‌خانه خین عرب، مشخص شد محتویات و درصد متان موجود در آن نیز پایین می‌باشد. باتوجه‌به اینکه شرایط راهبری برای هر دو هاضم یکسان بوده و پارامترهای اندازه‌گیری شده بیانگر پایداری نسبتاً مطلوب در هر دو هاضم می‌باشد، اما به نظر می‌رسد لجن خین عرب پتانسیل مناسبی برای تولید بیوگاز ندارد. هرچند که نتیجه‌گیری قطعی در مورد آن نیازمند پژوهش‌های بیشتری می‌باشد.

باتوجه‌به اینکه در تصفیه لجن در تصفیه‌خانه‌های التیمور و خین عرب به‌ترتیب از فرایندهای MLE و SBR استفاده می‌شود، مطالعه بر روی سایر تصفیه‌خانه‌ها با فرایندهای مشابه، می‌تواند نسبت به استعداد ذاتی لجن تولید شده از این فرایندها برای بازیافت انرژی توسط هاضم‌های بی‌هوازی دید بهتری در اختیار قرار دهد. همچنین با افزودن برخی پلیمرها و ترکیبات دیگر بر روی لجن، می توان کیفیت تولید بیوگاز را نیز تحت تاثیر قرار داد که این امر مستلزم انجام آزمایشات بیشتری است. در نهایت، باتوجه‌به اینکه در آینده استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، امری ضروری می باشد، تحقیقات مشابه می‌تواند سودمند واقع شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت آب و فاضلاب مشهد و معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شاهرود، بابت حمایت و پشتیبانی برای انجام این تحقیق به عمل می آورند.

پی‌نوشت

1-co-digestion
2-Covered lagoon
3-Complete mix
4-Plug flow
5-Batch system
6-Sequencing batch reactor
7-Continuous one-stage system
8-Continuous two-stage system
9-Semi-continues
10-Semi continuous
11-Water displacement method
12-Total suspended solids
13-Alkalinity
14-Gas chromatography

منابع

Ali S.M.H., Lenzen M., Sack F. and Yousefzadeh M. 2020. Electricity generation and demand flexibility in wastewater treatment plants: Benefits for 100% renewable electricity grids. Applied Energy, 268: 114960.

Bresters A.R. 1998. Sludge treatment and disposal: management approaches and experiences, Office for official publications of the European communities.

Calli B., Mertoglu B., Inanc, B. and Yenigun, O. 2005. Effects of high free ammonia concentrations on the performances of anaerobic bioreactors. Process Biochemistry, 40(3-4): 1285-1292.

Dos Santos I.F.S., Barros R.M. and Tiago Filho G.L. 2016. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. Journal of cleaner production, 126: 504-514.

Feng Q., Song Y.C., Kim D.H., Kim M.S. and Kim D.H. 2019. Influence of the temperature and hydraulic retention time in bioelectrochemical anaerobic digestion of sewage sludge. International Journal of Hydrogen Energy, 44(4): 2170-2179.

Gikas P. 2017. Towards energy positive wastewater treatment plants. Journal of environmental management, 203: 621-629.

Hernández-Sancho F., Molinos-Senante M. and Sala-Garrido R. 2011. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach. Science of the Total Environment, 409(14): 2693-2699.

Junior I.V., de Almeida R. and Cammarota M.C. 2020. A review of sludge pretreatment methods and co-digestion to boost biogas production and energy self-sufficiency in wastewater treatment plants. Journal of Water Process Engineering, 16: 101857.

Karim K., Hoffmann R., Klasson K.T., Al-Dahhan M.H. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: effect of mode of mixing. Water Research, 39: 3597–3606.

Khalid A., Arshad M., Anjum M., Mahmood T. and Dawson L. 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste.Waste Management, 31: 1737–1744.

Koupaie E.H., Johnson T. and Eskicioglu C. 2017. Advanced anaerobic digestion of municipal sludge using a novel and energy-efficient radio frequency pretreatment system. Water research, 118: 70-81.

Lafratta M., Thorpe R.B., Ouki S.K., Shana A., Germain E., Willcocks M. and Lee J. 2020. Dynamic biogas production from anaerobic digestion of sewage sludge for on-demand electricity generation. Bioresource technology, 310: 123415.

Meegoda J.N., Li B., Patel K. and Wang L.B. 2018. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. International journal of environmental research and public health, 15(10): 2224.

Metcalf & Eddy, Inc., Burton F.L., Stensel H.D. and Tchobanoglous G. 2003. Wastewater engineering: treatment and reuse. McGraw Hill. New York, United States.

Mir M.A., Hussain A. and Verma C. 2016. Design considerations and operational performance of anaerobic digester: A review. Cogent Engineering,

Singh A.D., Upadhyay A., Shrivastava S. and Vivekanand V. 2020. Life-cycle assessment of sewage sludge-based large-scale biogas plant. Bioresource technology, 309: 123373.

Skinner S.J., Studer L.J., Dixon D.R., Hillis P., Rees C. A., Wall R.C. and Scales P.J. 2015. Quantification of wastewater sludge dewatering. water research, 82: 2-13.

Wang S., Ma F., Ma W., Wang P., Zhao G. and Lu X. 2019. Influence of temperature on biogas production efficiency and microbial community in a two-phase anaerobic digestion system. Water, 11(1): 133.

Ward A. J., Hobbs P. J., Holliman P. J. and Jones D. L. 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. Bioresource technology, 99(17): 7928-7940.

3(1): 1181696.

Milieux Z.d., Sludge dewatering, S. FLOERGER, Editor. 2003, SNF FLOERGER.

Procházka J., Dolejš P., Máca J. and Dohányos M. 2012. Stability and inhibition of anaerobic processes caused by insufficiency or excess of ammonia nitrogen. Applied microbiology and biotechnology, 93(1): 439-447.

Romano RT. and Zhang R: 2011 Anaerobic digestion of onion residuals using a mesophilic Anaerobic Phased Solids Digester. Biomass Bioenerg, 35(10): 4174–4179.

Rulkens W. 2008. Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: overview and assessment of the various options. Energy & Fuels, 22(1): 9-15.