Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 6, No. 3, PP. 4-15, Autumn 2021
DOI: 10.22112/JWWSE.2021.262021.1237

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال ششم، شماره ۳، صفحات ۴-۱۵، پاییز ۱۴۰۰

Review Paper

Investigating Methods for Improving the Biogas Quality from Anaerobic Digestion Process

Saba Keshtpour[1] and Maryam Abbasi[2*]
1- MSc Student of Civil and Environment Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
*Corresponding Author, Email: mary_abbasi@sbu.ac.ir

Received: 27/12/2020
Revised: 26/02/2021
Accepted: 03/03/2021
© IWWA

Abstract

As a result of high volume pollution produced by the fossil fuels, different researches have been done to find out the alternative energy sources. The renewable energy is one of the most important sources, due to its economic efficiency, easy operation and low pollution. Wastewater treatment plants with anaerobic digestion treat wastewater and produce industrial raw materials and biogases. The combustion engines can use biogas (methane) to generate energy. The effective environmental factors and innovations in improving the design of the different equipment in waste water treatment plants can be identified through assessing the quality of biogases produced by different sludge and wastes and how inflow carbohydrates and proteins affect the quality of the biogases from an anaerobic digestion system. Biogas quality improvement methods have been divided into three categories; upstream, mainstream and downstream strategies. Due to ease the operation, the high efficiency and economic justification, the mainstream strategies are more confident than others in the wastewater industry. Investigating the process of anaerobic digestion and various methods to increase the quality of biogas, this article aimed at examining the effective factors of anaerobic digestion and compared different methods to improve the quality of biogas.

Keywords: Biogas, Anaerobic, Wastewater, Methane, Anaerobic digester, Sewage sludge.

مقاله مروری

بررسی روش‌های بهبود کیفیت بیوگاز تولیدی در فرآیند هضم بی‌هوازی

صبا کشت‌پور[۱] و مریم عباسی[۲*]
۱- دانشجوی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: mary_abbasi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۱۲/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۳
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

تأمین انرژی صنایع مختلف از سوخت‌های فسیلی موجب تولید حجم گسترده‌ای از آلاینده‌ها در جهان شده است؛ به‌همین علت تحقیقات گسترده‌ای برای یافتن منابع انرژی جایگزین صورت گرفته است. استفاده از منابع تجدیدپذیر به‌علت صرفه‌ی اقتصادی، سهولت در بهره‌برداری و آلودگی محیط‌زیستی پایین از جمله روش‌های نوین تأمین انرژی است. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با بهره‌گیری از تجهیزات هضم بی‌هوازی علاوه‌بر تصفیه فاضلاب و تأمین برخی از مواد اولیه صنایع با تولید بیوگاز سبب تولید انرژی می‌شوند. موتورهای احتراق با احتراق متان موجود در بیوگاز ناشی از هضم بی‌هوازی سبب تولید انرژی می‌شود. بررسی کیفیت بیوگازهای تولید شده از انواع لجن و پسماند علاوه‌بر تعیین میزان تاثیرگذاری کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌های مواد ورودی به سیستم‌های هضم بی‌هوازی در کیفیت بیوگاز خروجی، سبب ایجاد دیدی جامع نسبت به عوامل محیطی مؤثر و نوآوری در طراحی تجهیزات سیستم‌های هضم بی‌هوازی شده است. روش‌های بهبود دهنده کیفیت بیوگاز را می‌توان در سه دسته پیش‌تصفیه، فرآیند اصلی و پس‌تصفیه تقسیم‌بندی کرد؛ روش‌های فرآیند اصلی به‌علت سهولت در بهره‌برداری، بازده بالا و توجیه اقتصادی نسبت به دو روش دیگر در صنعت کاربرد بیشتری دارند. این مقاله با بررسی عوامل مؤثر و روندهای مختلف هر مرحله از هضم بی‌هوازی، به معرفی و مقایسه روش‌های مختلف بهبوددهنده بیوگاز می‌پردازد.

کلمات کلیدی: بیوگاز، بی‌هوازی، فاضلاب، متان، هاضم بی‌هوازی، لجن فاضلاب.

۱- مقدمه

تأمین نیازهای جمعیت در حال رشد مستلزم تولید حجم بالایی از انرژی و مواد اولیه ضروری برای استفاده در صنایع مختلف است. سوخت‌های فسیلی با تأمین ۸۸٪ از انرژی مورد نیاز جهان موجب انتشار ۳۳۰۰۰۰۰ تن گاز گلخانه‌ای به محیط‌زیست می‌شود. همین مسئله محققان را ناچار به یافتن منابعی پاک، تجدیدپذیر و مقرون‌به‌صرفه کرده است (Aghbashlo et al., 2018; Hosseinpour et al., 2018). امروزه زیست سوخت‌ها با توانایی بالای تبدیل به اشکال مختلف انرژی و تولید محصولات جانبی کاربردی در صنایع به یکی از منابع موردتوجه تأمین انرژی تبدیل شده‌اند. طبق پیش‌بینی‌های انجام شده توسط سازمان بین‌المللی کنترل تغییرات اقلیم (IPCC) میزان انرژی تولیدی از زیست سوخت‌ها در سال‌های ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ به‌ترتیب، ۵۰۰۰۰، ۷۵۰۰۰ و ۸۹۰۰۰ تن وات ساعت خواهد بود. تصفیه زیست توده‌ها (بیومس) با استفاده از تکنولوژی‌های مختلف فیزیک–شیمی (تصفیه فیزیکی، سوزاندن، الکل‌زدگی وغیره)، ترموشیمی (تجزیه حرارتی، مایع‌سازی، تولید گاز و غیره)، بیوشیمی (تخمیر، هضم بی‌هوازی) ضمن تولید انواع کودهای مغذی کشاورزی، منجر به ایجاد منابع مختلفی از انرژی از جمله بیوگاز، روغن‌های مختلف زیستی، بیودیزل، بیواتانول، بیوالکتریسیته، نیز می‌شود. توانایی بالای تولید بیوگاز از بیومس‌های مختلف و حمل و نقل آسان، این فرآورده را به منبعی مناسب برای تولید انرژی تبدیل کرده است (Tabatabaei et al., 2020a). بیوگاز تولید شده از هضم بی‌هوازی شامل کربن دی اکسید (CO_2)، متان (CH_4) و مقادیر ناچیزی از سایر ترکیبات (سیلوکسان‌ها؛ مواد مصنوعی با پیوند Si–O–Si) است. کمترین انرژی گرمایی بیوگازی با ۶۰٪ متان در بازه‌ی ۵۰۰۰–۶۰۰۰ kCal/Nm قرار می‌گیرد؛ در حالی‌که با افزایش خلوص متان بیوگاز تا ۹۶–۹۷٪ میزان انرژی گرمایی به ۸۰۰۰ $kCal/Nm^3$ نیز می‌رسد. هدف اصلی ارتقای تجهیزات، استفاده از مواد شیمیایی و بیولوژیکی مختلف و بهینه‌سازی طراحی‌ها در فرآیندهای بی‌هوازی، افزایش درصد متان بیوگاز تولید شده است. بیوگازهای با درصد خلوص بالای بیومتان اغلب توسط دو روش مستقیم (تولید انرژی گرمایی) و غیرمستقیم (با استفاده از موتورهای احتراق درون‌سوز و تبدیل انرژی گرمایی به الکتریسیته) در صنایع مختلف مصرف می‌شوند. این مقاله با تأکید بر اهمیت بیوگاز به‌عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، ضمن بررسی برخی از پربازده‌ترین هاضم‌ها، عوامل مؤثر بر هضم بی‌هوازی و روش‌های بهبود کیفیت بیوگاز سبب ایجاد دیدی جامع در طراحی بهینه سیستم‌های بی‌هوازی تولید بیوگاز می‌شود.

فرآیند هضم بی‌هوازی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تولید بیوگاز است. طراحی سپتیک تانک‌ها در دهه ۱۸۷۰ میلادی نخستین گام عملی در تولید بیوگاز از هاضم‌های بی‌هوازی است (Karthikeyan Trably et al., 2018). تأثیرات مخرب دفع فاضلاب در منابع سطحی و زیرزمینی در کنار محدودیت منابع آب تجدیدپذیر و افزایش روزافزون جمعیت سبب افزایش نیاز به طراحی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌شود (اختیارزاده، ۱۳۹۶؛ حیدری، ۱۳۹۷)؛ در کنار منابع تولید انرژی بحران انرژی در دهه ۱۹۷۰ سبب رشد این تکنولوژی شد که در نهایت اولین تصفیه‌خانه فاضلاب با سیستم هضم بی‌هوازی، سال ۱۹۳۹ در آمریکا تأسیس شد. امروزه کشورهای اروپایی مانند آلمان و سوئیس از جمله اصلی‌ترین قطب‌های طراحی سیستم‌های هضم بی‌هوازی تصفیه‌خانه‌ها هستند. کشورهای آسیایی اغلب از بیوگاز در مقیاس کوچک برای تأمین انرژی گرمایی و الکتریسیته مناطق دورافتاده بهره می‌برند؛ درحالی‌که آمریکا با وجود ۲۱۰۰ تصفیه‌خانه فعال با سیستم هضم بی‌هوازی از این منبع انرژی استفاده می‌کند (Vasco-Correa et al., 2018). از میان سه روش بهبود دهنده هضم بی‌هوازی فرآیندهای اصلی به‌عنوان پیش‌روترین روش برای تولید بیوگاز در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو رویکرد پس و پیش‌تصفیه هضم بی‌هوازی به‌علت هزینه‌های بالای طراحی و بهره‌برداری چندان در صنایع مورد استفاده قرار نگرفته‌اند.

بررسی‌های انجام شده توسط Whiting et al. (2014) بر روی انواع پساب کشاورزی نشان دهنده رابطه‌ای مستقیم بین ترکیبات مواد اولیه در هاضم‌های بی‌هوازی و انرژی تولید شده است. Yuan et al. (2019) با استفاده از روش‌های پیش‌تصفیه و آنالیز فرآیندهای هضم بی‌هوازی سبب بهبود مواد اولیه و افزایش بازده انرژی تولید شده در هاضم‌های بی‌هوازی شدند. تلفیق انواع باکتری‌ها و میکروجلبک‌ها و تعیین شرایط بهینه یکی از بهترین روش‌های مدیریت انرژی وحجم لجن تولید شده در تصفیه فاضلاب در هاضم‌های بی‌هوازی است. جدول ۱ به بررسی برخی از مطالعات چند سال اخیر در طراحی و بهبود تولید بیوگاز می‌پردازد.

هضم بی‌هوازی فرآیندی با چهار مرحله اصلی هیدرولیز، اسیدسازی، استات‌سازی و متان‌سازی است؛ که در هر مرحله فعالیت میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی سبب تبدیل مواد آلی به مواد ساده‌تر می‌شود. ترکیبات آلی مانند انواع پروتئین‌ها،

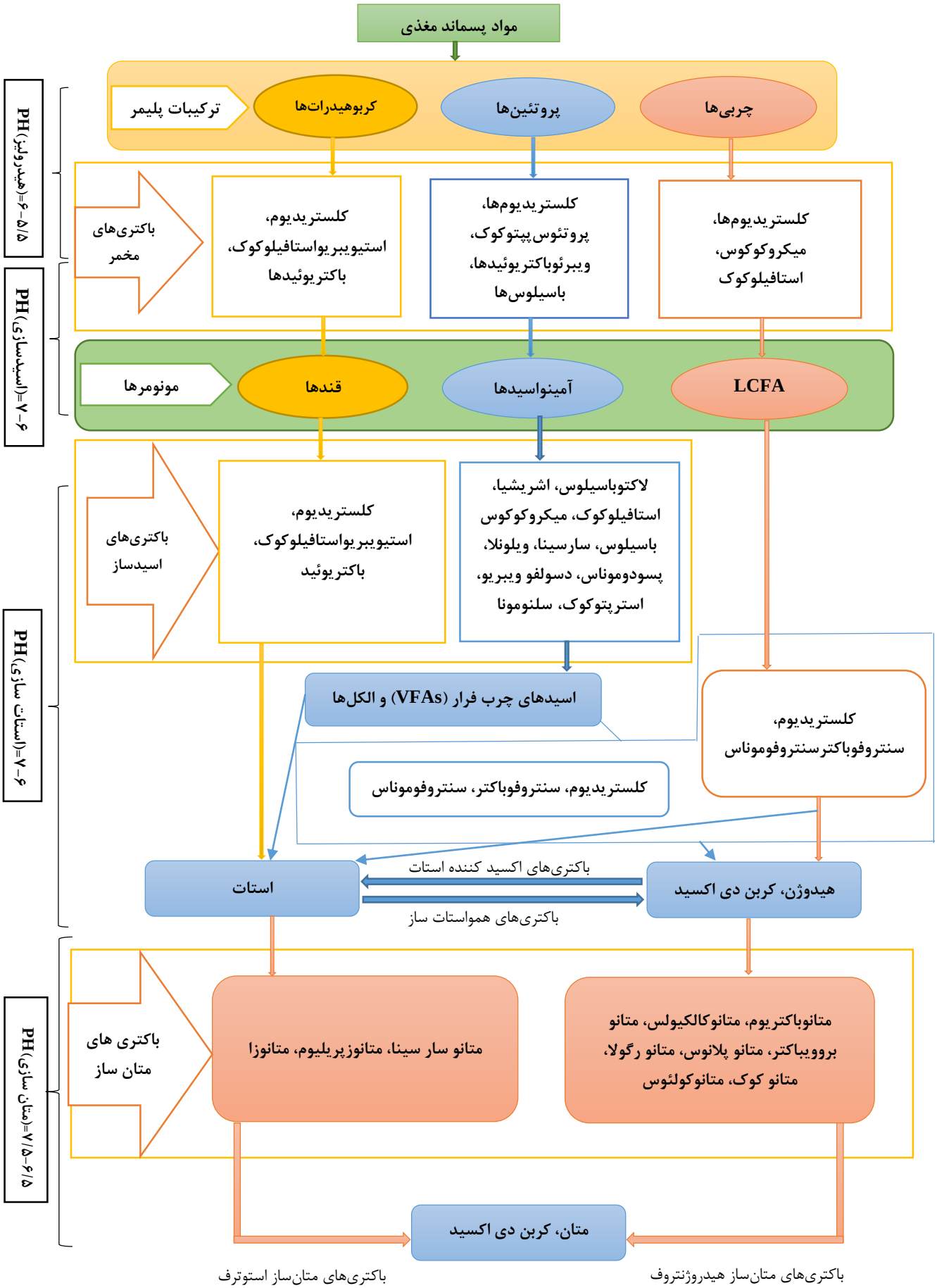
کربوهیدرات‌ها و چربی‌ها در مرحله هیدرولیز به آمینواسیدها و قندها، اسیدهای چرب و ترکیبات محلول تبدیل می‌شوند (Li et al. 2019)؛ این مرحله با تولید اسیدهای چرب فرار و ترکیبات سمی، مرحله کنترل‌کننده نرخ تولید بیوگاز در فرآیند هضم بی‌هوازی است. فرآورده‌های ناشی از فعالیت میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی در هیدرولیز توسط باکتری‌های مرحله اسیدسازی (مرحله‌ی تخمیر)، به کربن‌دی‌اکسید، هیدروژن، اسیدهای آلی (پروپیونیک‌اسید، بوتیریک‌اسید، استیک‌اسید، فرمیک‌اسید، لاکتیک‌اسید) الکل (اتانول، متانول) و برخی از ترکیبات آلی گوگرددار تبدیل می‌شود (Singh, 2018; Obileke et al., 2020). کنترل این مرحله در pH محیطی بالای ۵ سبب تولید اسیدهای چرب فرار (استیک اسید) و افزایش کمیت و کیفیت بیوگاز نهایی می‌شود (Obileke et al., 2020; Singh, 2018). مرحله سوم (استات‌سازی) اسیدهای آلی محیط را به استیک‌اسید، کربن‌دی‌اکسید (CO_2) و هیدروژن (H_2) تبدیل می‌کند (Kothari et al., 2014). فعالیت باکتری‌های مرحله متان‌سازی شامل تبدیل استیک‌اسید به کربن‌دی‌اکسید و متان است؛ که توسط دو گروه مختلف از باکتری‌های متان‌ساز حساس به‌وجود pH بهینه ۶/۵ تا ۷ انجام می‌شود. حجم بیومتان تولید شده از فرآیندهای هضم بی‌هوازی وابسته به میزان و نوع اسید مورد استفاده میکروارگانیزم‌ها در مرحله متان‌سازی است؛ که با توجه به تحقیقات متعدد بیشترین بازده تولید متان در هضم بی‌هوازی استات و کمترین پروپیونات است (پروپیونات < بوتیرات < اتانول < استات) (Tabatabaei et al., 2020a). شکل ۱ تمامی واکنش‌های انجام شده، میکروارگانیزم‌های فعال و با در نظر گرفتن شرایط محیطی مراحل مختلف را واکنش نشان می‌دهد.

بهینه‌سازی سیستم‌های هضم بی‌هوازی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌علت فعالیت میکروارگانیزم‌های حساس به شرایط محیطی و کیفیت مواد اولیه مستلزم دیدی جامع در انطباق سیستم هضم بی‌هوازی با عوامل مؤثر بر بهبود کیفیت بیوگاز است. برای بهبود کیفیت بیوگاز بررسی‌های گسترده‌ای انجام شد، که درنهایت منجربه طراحی طیف گسترده‌ای از تجهیزات هضم بی‌هوازی مانند انواع هاضم‌ها، بافل‌دار، تماسی، با بستر لجن و ... و پیل‌های سوختی میکروبی (Kumar et al., 2019; Palanisamy et al., 2019; AlSayed et al., 2020) و موتورهای احتراق شده است. هاضم‌های بی‌هوازی براساس تجهیزات مورد استفاده و ساختار فیزیکی هاضم (مرتبط با تعداد محفظه‌ها و بافل‌ها و...) تقسیم‌بندی می‌شوند. این مقاله عوامل مؤثر بر عملکرد هضم بی‌هوازی و پربازده‌ترین روش‌های آزمایشی مورد استفاده در جهان را مورد بررسی قرار می‌دهد.

هاضم‌های تک، دو یا چند مرحله‌ای براساس انعطاف بالا در ترکیب با فرآیندهای هضم بی‌هوازی مستلزم بررسی دقیق در بهره‌برداری هستند. هاضم‌های تک مرحله‌ای چهار فرآیند هیدرولیز، اسیدسازی، استات‌سازی و متان‌سازی در محفظه‌ای با pH بهینه‌ی ۷/۵-۶/۵، زمان ماند هیدرولیکی ۲۰ تا ۳۰ روز سبب تولید بیوگازی با ۵۰-۵۵٪ متان می‌شود؛ در حالی‌که فرآیندهای هیدرولیز، اسیدسازی و استات‌سازی هضم بی‌هوازی در هاضم‌های دو مرحله‌ای در محفظه اول تحت شرایط pH بهینه ۵-۶ و زمان ماند هیدرولیکی ۲ تا ۴ انجام شده و فرآورده آن به محفظه دوم با pH بهینه‌ی ۶-۸ و زمان ماند هیدرولیکی ۸ تا ۱۰ روز برای تولید بیوگازی با درصد متان ۶۰-۷۰٪ انتقال می‌یابد. هاضم‌های دو مرحله‌ای با جدا کردن متان‌سازی از سایر فرآیندهای هضم بی‌هوازی علاوه‌بر کاهش زمان ماند (۲۰-۳۰ روز در هاضم‌های تک مرحله‌ای در مقابل ۸-۱۲ روز هاضم‌های دو محفظه‌ای)، سبب کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی(COD)، مواد مغذی جامد فرار (VS) تا ۱۶٪ و افزایش بازده بیومتان تا حدود ۱۰/۸ درصد نسبت به هاضم‌های تک مرحله‌ای می‌شوند (Micolucci et al., 2018; Rajendran et al., 2020)؛ هر یک از محفظه‌های هاضم دو مرحله‌ای هضم بی‌هوازی بسته به شرایط محیطی و اقتصادی می‌توانند دارای تجهیزات (انواع همزن، بافل و...) هستند؛ که همین امر سبب افزایش نوآوری در طراحی سیستم‌های بی‌هوازی می‌شود (Rajendran et al., 2020).

طراحی بهینه‌ی هاضم‌های یک، دو یا چند مرحله‌ای براساس شرایط محیطی و مواد اولیه سبب بهبود کیفیت بیوگاز می‌شود (Xiao et al., 2019)؛ مثلاً طراحی ترکیبی فرآیندهای وابسته به دمای محیط (مزوفیلی/ ترموفیلی)، غلظت مواد اولیه ورودی (هضم خشک/ مرطوب) و ورود مواد اولیه به هاضم‌ها (مخزنی/ جریان مداوم) از جمله مواردی است که در مقیاس آزمایشگاهی انجام می‌شود. جدول ۲ نمونه‌هایی از این روش ترکیبی را نشان می‌دهد.

این مقاله با بررسی طیف گسترده از مطالعات بر انواع پسماند، علاوه‌بر طبقه‌بندی اهمیت هر یک از پارامترها در تولید انرژی سبب ایجاد دیدی جامع نسبت به انواع روش‌های بهبود دهنده‌ی کیفیت بیوگاز می‌شود.



شکل ۱- فرآیند هضم بی‌هوازی

جدول ۱- مقایسه چند روش بهبود کیفیت بیوگاز در سال های اخیر

راکتور مورد استفاده	مقیاس مورد بررسی	نتایج
بیوراکتور غشایی چند لایه	آزمایشگاهی	تولید بیوگاز ۵- ۱۲۰ mL/d
سیستم تحت فشار دو مرحله‌ای شامل یک راکتور CSTR و راکتور بیوفیلم بی‌هوازی	آزمایشگاهی	تولید بیوگاز ۴۰۶ mL/g COD
سیستم دوگانه AD-MEC	آزمایشگاهی	تولید متان ۲۷۳/۵ mL/g COD
ادغام پیل‌های سوختی میکروبی (MFCs) با بیوراکتور بی‌هوازی	آزمایشگاهی	تولید متان ۵۴ mL/g COD
UASB اصلاح شده	-	تولید بیوگاز ۱۸۴۰ mL CH4/g COD

جدول ۲- مقایسه نمونه‌های آزمایشگاهی از انواع سیستم‌های هضم بی‌هوازی طراحی شده برای هضم لجن

نوع هاضم	سیستم هضم	شرایط اجرا	بازده متان (mL/g VS)	حذف مواد جامد فرار(%)	منابع
تک محفظه‌ای	راکتور ۲ لیتری CSTR با جریان نیمه متناوب مزوفیلی	نرخ بار آلی = (g VS/L day) ۵؛ زمان ماند هیدرولیکی = ۲۰ روز؛ PH = ۷/۷	۴۹۴	۷۴/۷	(Jo et al., 2018)
دو محفظه‌ای	راکتورهای ۰/۵ و ۲ لیتری CSTR با جریان نیمه متناوب مزوفیلی	نرخ بار آلی = (g VS/L day) ۴؛ زمان ماند هیدرولیکی = ۲۵ روز؛ PH = ۷/۵	۵۱۱	۷۸/۹	
تک محفظه‌ای	راکتور ۲۳۰ لیتری CSTR ترموفیلی	نرخ بار آلی = (g VS/L day) ۳/۵؛ زمان ماند هیدرولیکی ۲۰ روز	۴۵۰	۹۳/۶	(Micolucci et al., 2018)
دو محفظه‌ای	راکتورهای ۲۰۰ و ۷۶۰ لیتری CSTR ترموفیلی	زمان ماند هیدرولیکی = ۲۰ روز؛ PH = ۸/۳۱؛ اسیدهای چرب فرار = ۰/۸۷ (g HAc/L)	۵۵۰	۹۶/۲	
تک محفظه‌ای	راکتور ۵ مترمکعبی مزوفیلی	نرخ بار آلی = ($kg\ VS/m^3/day$) ۳/۷۹؛ PH = ۷/۳۲	۳۸۰	۹۶	
دو محفظه‌ای	راکتورهای ۵ مترمکعبی مزوفیلی	نرخ بار آلی = ($kg\ VS/m^3/day$) ۰/۷۸؛ PH = ۷/۳۲ ،۵/۲	۴۴۶	۹۳	

۲- عوامل مؤثر بر هضم بی‌هوازی

اولین مرحله تعیین عوامل مؤثر بر هضم بی‌هوازی، بررسی دقیق شرایط محیطی و مواد اولیه ورودی است. حساسیت میکروارگانیزم‌ها نسبت به تغییرات اندک محیطی و وابستگی بالای عوامل مؤثر در هضم بی‌هوازی به یکدیگر، بهره‌برداری از هاضم‌های بی‌هوازی را به یکی از دشوارترین مراحل تصفیه فاضلاب تبدیل کرده است.

۲-۱- دمای محیط

دما عاملی تأثیرگذار بر عملکرد میکروارگانیزم‌های تولید کننده متان و اسیدهای چرب فرار است (Panigrahi and Dubey, 2019). هضم بی‌هوازی در سه بازه دمایی سایکوفیلیک (۲۰ ℃)، مزوفیلیک (۲۰-۴۰ ℃) و ترموفیلیک (۵۰-۶۵ ℃) انجام می‌شود. بیشترین بازده هضم بی‌هوازی در شرایط دمایی مزوفیلی و ترموفیلی رخ می‌دهد.

عملکرد میکروارگانیزم‌های تولیدکننده اسیدهای چرب فرار در شرایط مزوفیلی کاهش می‌یابد که سبب افزایش تولید متان نسبت به شرایط ترموفیلی (تقریبا ۱/۵ برابر بیشتر) می‌شود. هضم بی‌هوازی در شرایط مزوفیلی ثبات بالاتر و هزینه‌های به‌مراتب کمتری دارد. تخریب میکروارگانیزم‌های پاتوژن در دماهای بالا از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های هضم بی‌هوازی در شرایط دمایی ترموفیلی است. افزایش سرعت واکنش‌ها و توانایی تصفیه حجم زیادی از فاضلاب از جمله نقاط قوت این شرایط دمایی است؛ البته با بهینه‌سازی دمای واکنش هر مرحله می‌توان تولید متان را نیز افزایش داد.

۲-۲- pH محیط

ثبات pH در فرآیند هضم بی‌هوازی به مواد اولیه و سایر عوامل محیطی مانند قلیائیت محیط، غلظت اسیدهای چرب فرار (استیک‌اسید، پروپیوتیک‌اسید، اسیدبوتیرات) و غلظت CO_2 و HCO_3 تولید شده وابسته است. تعیین pH بهینه سبب بهبود شرایط عملکرد باکتری‌های مختلف و در نتیجه تولید متان می‌شود. براساس مطالعات تجربی، pH بهینه مرحله استات‌سازی و متان‌سازی به‌ترتیب در حدود ۶ – ۶/۷ و ۶/۵ – ۷/۵ قرار می‌گیرد. pH های پایین‌تر/بالاتر از حدود بهینه مرحله استات‌سازی سبب تولید بیش از حد اسیدهای چرب فرار/آمونیاک شده و در نهایت سبب کاهش تولید متان می‌شود. افزایش نیاز به

کنترل pH بهینه میکروارگانیزم‌های هر مرحله سبب تولید هاضم‌های چند مرحله‌ای بی‌هوازی شده است. هضم بی‌هوازی مواد در هاضم‌های دو مرحله‌ای علی‌رغم حساسیت بالای بهره‌برداری سبب افزایش تولید متان می‌شود. بهینه‌سازی نرخ بار آلی ورودی (OLR)، دما و زمان ماند در هاضم‌های بی‌هوازی دو مرحله سبب افزایش بازده آن می‌شود.

۲-۳- اسیدهای چرب فرار (VFA)

یکی از عوامل تصفیه فاضلاب در هضم بی‌هوازی، واکنش‌های اسیدهای چرب فرار (VFA) و مواد اولیه آلی است، که این عامل را به شاخصی مناسب در تعیین تعادل نسبی هاضم بی‌هوازی تبدیل می‌کند. اسیدهای چرب فرار (VFA) تولید شده از هضم بی‌هوازی شامل، استیک‌اسید، پروپیونیک‌اسید، اسیدبوتیریک، ایزوبوتیریک‌اسید، ایزووالریک‌اسید و والریک‌اسید هستند؛ استیک‌اسید (تا ۷۰٪ سبب تولید متان) و بوتیریک‌اسید، واکنش دهنده‌های اصلی تولیدکننده متان هستند (Shi et al., 2018; Xu et al., 2014; Zhang et al., 2014). کنترل تولید اسیدهای چرب فرار نیازمند تعیین مقادیر بهینه نرخ بار آلی و زمان ماند هیدرولیکی (HRT) است. نرخ بار آلی ورودی بیش از حدود بهینه و زمان ماند هیدرولیکی کم با افزایش غلظت اسیدهای چرب فرار و کاهش pH محیط، سبب کاهش عملکرد میکروارگانیزم‌های تولیدکننده متان می‌شود.

۲-۴- نرخ بار آلی (OLR)

نرخ بار آلی (OLR)، تعریفی مختصر از مقادیر روزانه مواد آلی خشک اولیه در هاضمی با حجم مشخص است. این عامل با کنترل غلظت اسیدهای چرب فرار (VFA) و دمای بهینه هاضم موجب سبب افزایش سرعت رشد باکتری‌های متان‌ساز می‌شود. مقادیر بهینه نرخ بار آلی ورودی به هاضم بی‌هوازی به دو عامل ساختار هاضم (تک مرحله‌ای یا چند مرحله‌ای) و شرایط دمایی فرآیند هضم بی‌هوازی (ترموفیلی یا مزوفیلی) وابسته است. تولید متان در شرایط دمایی مزوفیلی با افزایش نرخ بار آلی کاهش می‌یابد. هاضم‌های چند مرحله‌ای به سبب انعطاف پذیری بالایی که در تأمین pH و دمای بهینه در هر مرحله، امکان پذیرش نرخ بار آلی با ویژگی‌های متنوع نسبت به هاضم‌های تک مرحله‌ای دارند (Lay et al., 2019).

۲-۵-زمان ماند (HRT)

میانگین زمان مورد نیاز برای حذف مواد آلی درفرآیند هضم بی‌هوازی زمان ماند گفته می‌شود. تعیین مقدار بهینه این عامل در فرآیند هضم بی‌هوازی مستلزم کنترل مستمر آن در طول فرآیندهای هضم است. زمان ماند صلب (SRT) و زمان ماند هیدرولیکی (HRT) دو تعریف مختلف زیر مجموعه زمان ماند هستند که در فرآیند هضم بی‌هوازی مورد بررسی قرار می‌گیرند. زمان ماند صلب (SRT) میانگین زمان ماند باکتری‌ها در هاضم است (عامل تعیین کننده تعداد میکروارگانیزم‌های هاضم) و زمان ماند هیدرولیکی (HRT) به معنی میانگین زمان ماند لجن مایع در هاضم است. اسیدهای چرب فرار (VFA)، نرخ بار آلی (OLR) و زمان ماند هیدرولیکی (HRT)، تأثیرگذاری نسبتا بالایی بر هم دارند؛ بنابراین بهینه‌سازی هر یک مستلزم کنترل سایر عوامل است.

۲-۶- نسبت کربن به نیتروژن (C/N) در پسماند ورودی

نسبت بهینه برخی از مواد مغذی مانند کربن، نیتروژن، اکسیژن و هیدروژن بر عملکرد هضم بی‌هوازی تأثیرگذار است. مقدار بهینه کربن به نیتروژن (C/N) عامل اصلی پایداری و تعادل در هاضم بی‌هوازی است. افزایش نسبت کربن به نیتروژن سبب تولید آمونیاک و افزایش pH محیط شده و تاثیرات منفی در تولید متان دارد. شرایط دمایی یکی از مؤثرترین عوامل در تعیین مقادیر بهینه نسبت کربن به نیتروژن است. مثلا اگر نسبت کربن به نیتروژن در شرایط مزوفیلی و ترموفیلی به‌ترتیب بیشتر ۱۵ و ۲۰ باشد، منجربه افزایش آمونیاک و pH محیط می‌شود. جدول ۳ به بررسی عوامل مؤثر بر هضم بی‌هوازی و مقادیر بهینه آن‌ها می‌پردازد.

جدول ۳- تعیین مقادیر بهینه عوامل مؤثر بر تولید بیومتان

عوامل مؤثر	مقدار بهینه
pH	فرآیند اسیدسازی ۴ - ۸/۵ فرآیند متان‌سازی ۶/۵ - ۷/۲
قلیائیت	۱۰۰۰ - ۵۰۰۰ mg $CaCO_3$/L
دما	سرما دوست: ۵ – ۱۵ °C مقدار بهینه ۱۰ °C مزوفیلی: ۲۰ - ۴۰ °C مقدار بهینه ۳۵ °C ترموفیلی: ۵۰ - ۶۵ °C مقدار بهینه ۵۵ °C
نسبت کربن به نیتروژن	۲۵
زمان ماند هیدرولیکی HRT	وابسته به نوع ماده اولیه و دما کمتر از ۲ تا ۴ روز نباشد.
زمان ماند جامد SRT	وابسته به شرایط فرآیند
نرخ بار ورودی	۱۵/۲ g/L COD
مواد جامد فرار	۰/۵ – ۱/۱
میزان رطوبت	هاضم‌های بی‌هوازی خشک ۶۰ - ۷۵٪ هاضم‌های بی‌هوازی مرطوب ۸۵ – ۹۰٪

۳- نتایج

۳-۱- روش‌های افزایش دهنده بیومتان در فرآیندهای بی‌هوازی

دسته‌بندی‌های متنوعی برای روش‌های بی‌هوازی افزایش‌دهنده بازده تولید بیومتان وجود دارد. کامل‌ترین دسته‌بندی شامل روش‌های قابل اجرا در سه مرحله پیش‌تصفیه، فرآیندهای اصلی هضم و پس‌تصفیه است.

۳-۱-۱- روش‌های تقویت کننده پیش‌تصفیه

روش‌های پیش‌تصفیه در سه بعد فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قابل بررسی است. افزایش توانایی پیش‌تصفیه فیزیکی و شیمیایی برخلاف روش بیولوژیکی، به‌علت تولید فرآورده‌های جانبی سمی و هزینه‌های بالای اجرا و بهره‌برداری چندان موردتوجه محققان نیست. روش‌های اصلی بهبود دهنده پیش‌تصفیه بیولوژیکی شامل پیش‌تصفیه قارچی، کنسرسیوم‌های میکروبی، آنزیمی، میکروهوادهی، تشدیدکننده‌ها و کمپوست هستند. جدول ۴ به بررسی هریک از نقاط قوت و ضعف روش‌های افزایش دهنده تولید بیومتان در پیش‌تصفیه می‌پردازد. علی‌رغم بهینه سازی ابعاد مختلف این روش‌ها، هم‌چنان مسائلی جدی در طراحی، بهره‌برداری و مدیریت هزینه‌ها وجود دارد که مستلزم بررسی‌های دقیق‌تر است.

جدول ۴- بررسی روش‌های پیش‌تصفیه افزایش دهنده بیومتان

روش	بهبود در تولید متان (بازده ٪)	مزایا	معایب
قارچی	۵۰۰-۱۵	- مؤثرترین روش بیولوژیکی برای حذف لیگنوسلولز - کشت راحت - نرخ رشد بالا - دوستدار محیط‌زیست - توانایی بالقوه پیش‌تصفیه بی‌هوازی قارچی و فرآیند هضم بی‌هوازی - توانایی بالقوه در روش‌های تصفیه زیستی - بهبود ضعف مواد اولیه ورودی به مایع‌سازی آنزیمی	- کاهش مصرف قندهای تولید شده - کند بودن فرآیند - هزینه عملیاتی و سرمایه‌گذاری بالا - زمان ماند بالا - تولید کم انرژی - نیازمند مرحله پیش استریل
کنسرسیوم میکروبی	۹۷-۱۶	- دوستدار محیط زیست - تنوع متابولیکی بالا - نرخ رشد وسازگاری بالا - توانایی بالای تخریب مواد اولیه نسبت به شرایط خالص با اثر هم‌افزایی - تخریب سلولز و همی‌سلولز - بهبود کیفیت مواد اولیه ورودی به مایع سازی آنزیمی - عدم نیاز به مرحله پیش استریل - توانایی بالقوه پیش‌تصفیه کنسرسیوم میکروبی و فرآیند هضم بی‌هوازی	- کاهش مصرف انرژی‌های تولید شده - کند بودن فرآیند - نیازمند دانش و تخصص برای ساخت کنسرسیوم میکروبی
آنزیمی	۳۴-۰	- دوستدار محیط‌زیست - تولید انرژی بالا	- نیازمند به سایر روش‌های پیش‌تصفیه برای افزایش تاثیرگذاری بر مایع‌سازی آنزیمی - نیازمند مرحله پیش‌تصفیه استریل برای حذف میکروارگانیزم‌های درون‌زا - استفاده از آنزیم‌های گران قیمت
میکروهوادهی	–	- افزایش غلظت میکروبی برای بهبود فعالیت آن‌ها در طول فعل و انفعالات مرحله اولیه هیدرولیز - مقرون‌به‌صرفه‌تر و دوستدار محیط‌زیست نسبت به سایر روش‌های پیش تصفیه بیولوژیکی	- نیازمند به کنترل دقیق تأمین اکسیژن برای پشتیبانی از رشد باکتری‌های اختیاری - کیفیت پایین مواد اولیه
تشدیدکنندگی	۱۵-۷	- جلوگیری از رشد میکروارگانیزم‌های نامناسب از طریق تخمیر اسیدی لاکتیک - افزایش ظرفیت آب‌دوستی لیگنین - افزایش منافذ در ماتریس لیگنوسلولز - بهبود ضعف مواد اولیه ورودی به مایع‌سازی آنزیمی - دوستدار محیط‌زیست	- نیازمند دانش و تخصص - روش کمتر استفاده شده نسبت به سایر روش‌های هضم بی‌هوازی صنعتی
کمپوست	–	- عدم نیاز به تجهیزات پیچیده - فرآیند نسبتا سریع - کاهش گرمای مورد نیاز برای تولید اولیه بیوگاز از طریق گرمایش خودکار مواد اولیه	- تولید بازدارنده‌ها - از بین رفتن مواد آلی

امروزه مطالعات گسترده‌ای در مقیاس آزمایشگاهی برای بررسی میزان تأثیرگذاری روش‌های پیش‌تصفیه بر بهبود کیفیت بیوگاز انجام شده است. جدول ۵ به بررسی برخی از مطالعات انجام شده بر روش‌های پیش تصفیه می‌پردازد.

۳-۲- روش‌های تقویت کننده‌ی فرآیندهای اصلی

روش‌های بهبود دهنده فرآیندهای اصلی هضم به‌علت انعطاف‌پذیری بالا، در صنایع مختلف قابل اجرا هستند؛ و نمونه‌های اجرا شده نتایج مطلوبی از بهره‌برداری این روش‌ها ارائه می‌دهند. سه روش اصلی مورد استفاده در این دسته‌بندی شامل استفاده از تقویت کننده‌های بیولوژیکی، هم هضمی بی‌هوازی و تولید تلفیقی بیوگاز هستند.

۳-۲-۱- تقویت کننده‌های بیولوژیکی

تقویت‌کننده‌های بیولوژیکی با ترکیبی مناسب از انواع باکتری‌ها و قارچ‌ها با بسترهای مختلف در فرآیند هضم بی‌هوازی، بازده تولید بیوگاز و متان را افزایش می‌دهند. تثبیت میکروارگانیزم‌ها بر روی نانو ذرات نیکل (Ni) و کبالت (Co)، و اصلاح ژنتیکی میکروارگانیزم‌ها توسط مهندسی ژنتیک، یکی از روش‌های افزایش تولید متان در فرآیندهای هضم بی‌هوازی است (Mishra et al., 2019). ترکیبات متنوع از انواع باکتری‌ها، قارچ‌ها و مواد اولیه در فرآیند هضم بی‌هوازی سبب بهبود فرآورده‌های مرحله هیدرولیز وافزایش تولید هیدروژن (H_2) می‌شوند.

استفاده از تقویت‌کننده‌های بیولوژیکی محدودیت‌های زیادی در اجرا داشته و اغلب به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ ولی برخی از ترکیبات مانند باکتری پسودوبوتیری‌ویبریوزایلانیوورانس (Pseudobutyrivibrio xylanivorans) و پساب مخمرسازی، در صنعت نیز قابل‌اجرا است (Goud et al., 2014; Tabatabaei et al., 2020b). جدول ۶ به بررسی برخی از نمونه‌های آزمایشگاهی تقویت‌کننده‌های بیولوژیکی می‌پردازد.

جدول ۵ مقایسه چند نمونه آزمایشگاهی برای بررسی میزان تأثیرگذاری روش‌های پیش‌تصفیه در تولید بیومتان/بیوگاز

مواد اولیه	روش پیش‌تصفیه	نرخ تولید بیوگاز/بیومتان (mL/g VS)	
		وضعیت معمول	پیش تصفیه
پسماند غذایی	قارچی	بیومتان ۱۵۹/۶	بیومتان ۲۸۰/۵
پسماند غذایی	کنسرسیوم میکروبی	بیوگاز ۳۹۰/۹	بیوگاز ۵۱۴/۹
پسماند غذایی	آنزیمی	بیومتان ۱۲۰/۴	بیومتان ۲۸۰
پسماند غذایی	میکروهوادهی (با نرخ اختلاط هوا ۵ (mL O_2/g VS))	بیومتان ۲۷۲/۸	بیومتان ۳۲۵/۷
پسماند حیوانی	تشدید کننده‌ها	بیومتان ۳۱۶	بیومتان ۴۴۱-۴۸۲
پسماند حیوانی	قارچی	بیومتان ۱۲۵/۸	بیومتان ۱۶۹/۲
پسماند حیوانی	کنسرسیوم میکروبی	بیوگاز ۱۰۷/۹	بیوگاز ۱۵۰/۴
پسماند حیوانی	آنزیمی	بیومتان ۶۸*	بیومتان ۱۸۰*

* mL/d

جدول ۶- مقایسه چند نمونه‌ی آزمایشگاهی برای بررسی میزان تأثیرگذاری تقویت‌کننده‌های بیولوژیکی در تولید بیومتان/بیوگاز

روش تقویت‌کننده فرآیند اصلی	تکنیک‌ها	مواد اولیه	نرخ تولید بیوگاز/بیومتان (mL/g VS)	
			وضعیت معمول	پیش‌تصفیه
تقویت‌کننده‌های بیولوژیکی	مرحله هیدرولیز	پسماند جامد	بیومتان ۳۲۶/۳	بیومتان ۳۴۲/۵
	تولید H_2	پوشال ذرت	بیومتان۲۰۹/۳	بیومتان ۲۵۸/۱
	مرحله متان‌سازی	ترکیب پسماند صنعتی شیر خشک با چربی پایین	بیومتان *۴/۳	بیومتان *۳۲

*mL/d

۳-۲-۲- هم‌هضمی بی‌هوازی (AcoD)

روش هم‌هضمی بی‌هوازی (AcoD)، چندین فاضلاب مختلف به‌صورت هم‌زمان در یک هاضم، هضم می‌شوند. فرآیند هضم بی‌هوازی توسط انواع باکتری‌های کلستریدیالس، باکتریوئیدها، اکتینوباکتریوم انجام می‌شود. هم‌هضمی بی‌هوازی در هاضم‌های دو مرحله‌ای با مواد اولیه پسماند مواد غذایی و مخمرها ۱/۱۸ برابر

هاضمی تک مرحله‌ای است. روش هم‌هضمی بی‌هوازی به علت فعالیت طیف گسترده‌ای از باکتری‌ها، نسبت کربن به نیتروژن متعادل و بهینه، ثبات pH مخلوط، کاهش باکتری‌های پاتوژن در هضم یکی از کارآمدترین روش‌های افزایش کیفیت بیوگاز است (Divya et al., 2015; Esposito et al., 2012; Maragkaki et al., 2017; Tabatabaei et al., 2020a).

درصد بالای چربی مواد اولیه، سبب مسائل مختلفی در بهره‌برداری و اجرای فرآیند هضم می‌شود. کاهش سرعت انتقال جرم، لخته‌شدگی و افزایش چسبندگی مولکول‌های چربی در زیست‌توده مهم‌ترین این مسائل است، که در نهایت منجربه کاهش تولید بیومتان می‌شود (Tabatabaei et al., 2020a). جدول ۷ چند نمونه از مطالعات انجام شده بر هم‌هضمی بی‌هوازی (AcoD) را بررسی می‌کند.

جدول ۷- مقایسه چند نمونه آزمایشگاهی برای بررسی میزان تأثیرگذاری هم‌هضمی بی‌هوازی (AcoD) در تولید بیومتان/بیوگاز

روش تقویت‌کننده فرآیند اصلی	مواد اولیه	نسبت اختلاط	شرایط محیطی		نرخ تولید بیوگاز/بیومتان (mL/g VS)	
			دما (°C)	زمان ماند هیدرولیکی (روز)	وضعیت معمول	پیش‌تصفیه
هم‌هضمی بی‌هوازی (AcoD)	ترکیب پسماندهای کشاورزی	۷:۳ (V:V)	۳۵	۳۹	بیومتان ۴۸/۶	بیومتان ۶۹۵
	مایعات لبنی، فضولات گاو، CM	۱ :۰/۸: ۰/۲ (V:V)	۳۷	۲۰	بیوگاز ۳۱۵**	بیوگاز ۳۸۳**
	ترکیب پسماندهای لبنی	۵/۵	۳۵	۲۲	بیومتان ۱۰۱***	بیومتان ۵۷۶***

۳-۲-۳- تولید تلفیقی بیوگاز

هزینه‌های بالای استفاده مستقیم بیوگاز در تولید انرژی، یکی از محدودیت‌های اساسی بهره‌برداری صنعتی است. برای توجیه اقتصادی تولید بیوگاز توسط هاضم‌های بی‌هوازی دو رویکرد استفاده از فرآورده‌های یک مرحله در واکنش دهنده‌های مرحله بعد، و تولید فرآورده‌های جانبی مقرون‌به‌صرفه در کنار تولید بیوگاز مورد بررسی و طراحی قرار گرفته‌اند. تولید گرما و الکتریسیته در کنار تولید بیوگاز یکی از محصولات جانبی ارزشمند در هضم بی‌هوازی است (Dererie et al., 2011; Martin et al., 2014; Nozari et al., 2018; Parajuli et al., 2015; Safari et al., 2017).

تلاش‌ها برای تولید بیوگاز با روش‌های تلفیقی شامل تولید تلفیقی بیودیزل، بیواتانول و بیوگاز، بیوهیدروژن و بیواتانول می‌شود. بیوهیدروژن یکی از مناسب‌ترین سوخت‌های موتورهای درون‌سوز است که در مقایسه با بیوگاز علاوه‌بر آزادسازی انرژی بیشتر با تولید محصول جانبی آب، سوختی دوست‌دار محیط‌زیست محسوب می‌شود. جدول ۸ تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده با این رویکرد را مورد بررسی قرار می‌دهد.

جدول ۸- مقایسه چند نمونه آزمایشگاهی برای بررسی میزان تاثیرگذاری تولید تلفیقی بیوگاز در تولید بیومتان/بیوگاز

روش تقویت‌کننده فرآیند اصلی	مواد اولیه ورودی	ماده بهبود دهنده تولید بیومتان و بیوهیدروژن	زمان ماند هیدرولیکی (روز)	بازده تولید ($mL\ H_2/g\ VS$)	بازده تولید بیومتان CH_4 (mL CH4/g VS)	انرژی بازیافت شده	منابع
تولید تلفیقی بیوگاز	گلیسرول، لجن فاضلاب	لجن	۳۶ ساعت	۱۷۹/۳	۳۴۲	بیومتان=۱۳/۷ بیوهیدروژن=۲/۲	(Silva et al., 2018)
	پسمان غذایی	لجن فاضلاب	بیوهیدروژن = ۵ بیومتان = ۱۵	۱۰۱۰۰۰	۱۴۹۰۰۰	بیومتان = ۰/۰۲ بیوهیدروژن = ۱/۳	(Algapani et al., 2018)
	پساب کارخانه روغن (نخل)	لجن غنی از میکروارگانیزم	بیوهیدروژن =۲ بیومتان = ۱۵	۱/۸۴	****۲/۶۱	بیومتان = ۱۲/۶۲ بیوهیدروژن = ۲/۷۲	

**** $L\ H_2/L/d$

۳-۳- روش‌های تقویت کننده پس از تصفیه

این روش‌ها به بهبود کیفیت بیوگاز تولید شده از هاضم‌ها می‌پردازد. کیفیت بیوگاز تولید شده به مواد اولیه ورودی به هاضم بی‌هوازی بستگی دارد. ولی اغلب شامل فرآورده‌هایی از جمله متان (۵۵٪ - ۷۵٪) و سایر آلاینده‌ها مانند CO_2 و آب و H_2S است. این آلاینده‌ها ضمن به‌خطر انداختن محیط‌زیست از جمله علل اصلی افت کیفیت بیوگاز هستند. روش‌های تقویت کننده پس‌تصفیه به حذف این آلاینده‌ها و افزایش تولید بیومتان می‌پردازد (Shirzad et al., 2019).

۳-۳-۱- تکنولوژی حذف کربن‌دی‌کسید (CO_2)

حذف کربن‌دی‌اکسید (CO_2) از بیوگاز سبب کاهش هزینه‌های حمل و نقل و افزایش ۳۰٪ گرمای سوخت بیوگاز می‌شود. بیوگازی با درصد بالای بیومتان، جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی است. دو روش اصلی حذف کربن‌دی‌اکسید (CO_2) از بیوگاز بیوالکتروشیمیایی و فتوسنتز میکرو جلبک‌ها است.

پیل‌های الکترولیز میکروبی با تبدیل کربن‌دی‌اکسید (CO_2) به متان یا جذب آن سبب کاهش کربن‌دی‌اکسید (CO_2) در محیط می‌شود. روش بیوالکتروشیمیایی با استفاده از الکتریسیته و آب/هیدروژن به‌عنوان منابع انرژی و الکترون، طی دو مرحله الکترومتانژن و هیدروژن‌تروفیک‌متانوژن، کربن‌دی‌اکسید را به متان تبدیل می‌کند. براساس مطالعات انجام شده، ترکیب دو روش پیل‌های الکترولیز میکروبی و هضم بی‌هوازی درون هاضم بشکه‌ای ضد زنگ بی‌هوازی، سبب افزایش ۹۸٪ تولید متان و۶۶/۷٪ انرژی نسبت به هضم بی‌هوازی بدون تصفیه شدند. فتوسنتز میکرو جلبک‌ها با انعطاف‌پذیری بالای محیطی در جذب کربن‌دی‌اکسید (CO_2) توسط پیل‌های میکروجلبکی و تولید محصولات جانبی با ارزش، یکی از روش‌های مورد توجه در بهبود بیوگاز است. Yan et al. (2016) در بررسی سیستم‌های حذف میکروجلبکی، به حذف ۸۵٪ کربن‌دی‌اکسید (CO_2)، ۸۵/۵٪ COD خروجی، ۸۷/۱٪ نیتروژن و ۹۲/۴٪ فسفر و ترکیبات آن را از بیوگاز خام رسیدند.

۳-۳-۲- تکنولوژی‌های حذف بیولوژیکی سولفید هیدروژن (H_2S)

یکی از مسائل اساسی استفاده از بیوگاز به‌عنوان منبع انرژی، وجود آلاینده‌هایی با خاصیت خورندگی بالا مانند سولفید هیدروژن است؛ که سبب تخریب خطوط انتقال بیوگاز و تجهیزات بهره‌برداری می‌شود. روش‌های حذف شیمیایی سولفیدهیدروژن (H_2S) به‌علت استفاده از مواد شیمیایی متنوع، مصرف انرژی بالا و تولید محصولات جانبی خطرناک قابل‌اجرا در ابعاد گسترده نیستند. در مقابل روش‌های گوگردزدایی بیولوژیکی با ایجاد سولفات و عناصر سولفور خطرات کمتری برای محیط‌زیست ایجاد می‌کنند. فعالیت باکتری‌هایی کمولیتوتروفیک (chemolithotrophs) و فوتوتروفیک (photoautotrophic) تعیین‌کننده حذف بیولوژیکی سولفید هیدروژن هستند. فرآیند حذف سولفید هیدروژن توسط فوتوتروفیک‌ها، کربن‌دی‌اکسید (CO_2) و کمولیتوتروفیک‌ها، اکسیژن (هوازی) و نیترات و نیتریت در (بی‌هوازی) به‌عنوان پذیرندگان الکترون فعالیت می‌کنند.

مناسب‌ترین روش حذف غلظت بالای سولفیدهیدروژن، سیستم شیمیایی–بیولوژیکی است. هم‌زیستی میکروجلبک‌ها و باکتری‌ها در هاضم‌های سنتز بیولوژیکی، ضمن حذف کربن‌دی‌اکسید (CO_2) و تولید هم‌زمان اکسیژن (O_2)، با مصرف اکسیژن سبب اکسید سولفید هیدروژن به سولفات شده و سولفات باقی‌مانده توسط ریزجلبک‌های تولیدکننده بیومس جذب می‌شوند (Garcia-Peña et al., 2012; Tabatabaei et al., 2020b).

مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی روش‌های پس‌تصفیه بر بهبود کیفیت بیوگاز در طیف گسترده‌ای صورت‌گرفته که تنها در ابعاد هزینه‌های طراحی و بهره‌برداری، و فرآورده‌های خروجی قابل بررسی هستند. بهبود کیفیت بیوگاز تولید شده در روش پس‌تصفیه با حذف عناصر و ترکیباتی اضافی مانند CO_2 و H_2S از ترکیب بیوگاز انجام می‌شود. روش‌های متعددی برای حذف هر یک از این ترکیبات وجود دارد که شامل طیف گسترده‌ای از راکتورها با تجهیزات گوناگون می‌شود؛ مثلا بررسی‌های Rachbauer et al. (2016) بر هاضم چکنده غنی شده هیدروژنتروفیک با مواد اولیه همراه با بیوگاز (CO_2 ۴۲-۳۶ ٪) و هیدروژن در شرایط مزوفیلی در مدت زمان ۸ ماه به بازده ۹۶٪ در حذف کربن‌دی‌اکسید و نرخ ۶/۵ (m_n^3 H^2/m^3 reactor vol./d.) انجامید.

برخی از روش‌های موجود در این رویکر علاوه‌بر حذف CO_2 توانایی حذف H_2S را نیز دارند. مثلا یکی از روش‌های مورد بررسی در دو گام کلی صورت می‌گیرد. در گام اول کربن‌دی‌اکسید با سنتز ریزجلبک‌ها تثبیت می‌شود. در گام دوم ۲ مول از اکسیژن توسط باکتری‌های SOB استفاده شده که هیدروژن سولفید را به سولفات تبدیل می‌کند. سپس سولفات تولید شده تا حدودی توسط میکرو جلبک‌ها برای تولید زیست توده مورد استفاده قرار

می‌گیرد.

۴- نتیجه گیری

حساسیت‌های بالای میکروارگانیزم‌های هضم بی‌هوازی به عوامل محیطی، سبب افزایش پیچیدگی‌های طراحی، اجرا و بهره‌برداری روش‌های بهبود دهنده کیفیت بیوگاز می‌شود. افزایش کیفیت بیوگاز مستلزم طراحی سیستم هضم بی‌هوازی با بیشترین بازده تولید بیوگاز است؛ به‌همین علت طراحی سیستم هضم بی‌هوازی نیازمند انطباق بالای موارد قابل طراحی مانند انتخاب نوع و شکل بهینه تجهیزات بر عوامل محیطی و کیفیت و کمیت مواد اولیه است. استفاده از تکنولوژی‌های جدید مانند پیل‌های سوختی میکروبی می‌تواند علاوه‌بر بهبود کیفیت بیوگاز خروجی سبب تولید مستقیم انرژی شود. هم‌چنین استفاده از رویکردهای پیل الکترولیز میکروبی، تقویت کننده‌های بیولوژیکی، و هم‌هضمی به‌علت پایداری بالا نسبت به تغییرات مواد اولیه، افزایش کیفیت بیوگاز نهایی، ارتقاپذیری و مقرون به‌صرفه بودن آینده بهتری نسبت به سایر روش‌ها در صنعت دارند.

استفاده این رویکردها در صنایع نیازمند جمع‌آوری داده‌های دوره‌ای از شرایط اقلیمی و مدل‌سازی دقیق براساس ویژگی‌های منحصر به‌فرد مواد اولیه و شرایط محیطی مورد مطالعه، و مهندسی مجدد و ارتقای آن‌ها در بهره‌برداری است. سایر عوامل مؤثر بر انتخاب روش افزایش‌دهنده کیفیت بیوگاز در هضم‌های بی‌هوازی شامل هزینه‌های طراحی، اجرا و بهره‌برداری، نوع و کیفیت محصولات جانبی، ویژگی‌های مواد اولیه و میزان تاثیرات مخرب محیط‌زیستی روش انتخاب شده هستند.

۵- مراجع

حیدری، ع.، (۱۳۹۷)، "مدیریت منابع آب و بازچرخانی پساب، راه‌کار تأمین آب شرب مناطق خشک: مطالعه موردی شهر مشهد"، *نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۳(۴)، ۴۹-۶۴.

رسولی سعدآباد، ح.، و اختیارزاده، ز.، (۱۳۹۶)، "بررسی امکان تخلیه لجن حاصل از تصفیه‌خانه‌های آب به شبکه فاضلاب و تاثیر آن بر روی فرآیندهای تصفیه‌خانه فاضلاب"، *نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۲(۴)، ۶۱-۶۳.

Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Hosseini, S.S., Dashti, B.B., and Soufiyan, M.M., (2018), "Performance assessment of a wind power plant using standard exergy and extended exergy accounting (EEA) approaches", *Journal of Cleaner Production*, 171, 127-36.

Dererie, D.Y., Trobro, S., Momeni, M.H., Hansson, H., Blomqvist, J., Passoth, V., Schnürer, A., Sandgren, M., and Ståhlberg, J., (2011), "Improved bio-energy yields via sequential ethanol fermentation and biogas digestion of steam exploded oat straw", *Bioresource Technology*, 102(6), 4449-4455.

Divya, D., Gopinath, L., and Christy, P.M., (2015), "A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 690-699.

Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., Liotta, F., Panico, A., and Pirozzi, F., (2012), "Anaerobic co-digestion of organic wastes", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 11(4), 325-341.

Garcia-Peña, E.I., Nakauma-Gonzalez, A., and Zarate-Segura P., (2012), "Biogas production and cleanup by biofiltration for a potential use as an alternative energy source", *Biogas, Croatia, InTech*, 113-134.

Goud, R.K., Sarkar, O., Chiranjeevi, P., and Mohan, S.V., (2014), "Bioaugmentation of potent acidogenic isolates: A strategy for enhancing biohydrogen production at elevated organic load", *Bioresource Technology*, 165, 223-232.

Hosseinpour, S., Aghbashlo, M., and Tabatabaei, M., (2018), "Biomass higher heating value (HHV) modeling on the basis of proximate analysis using iterative network-based fuzzy partial least squares coupled with principle component analysis (PCA-INFPLS)", *Fuel*, 222, 1-10.

Jo, Y., Kim, J., Hwang, K., and Lee, C., (2018), "A comparative study of single-and two-phase anaerobic digestion of food waste under uncontrolled pH conditions", *Waste Management*, 78, 509-520.

Lay, C.-H., Vo, T.-P., Lin, P.-Y. Abdul, P.M., Liu, C.-M. and Lin, C.-Y., (2019), "Anaerobic hydrogen and methane production from low-strength beverage wastewater", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(28), 14351-14361.

Maragkaki, A., Fountoulakis, M., Gypakis, A., Kyriakou, A., Lasaridi, K., and Manios, T., (2017), "Pilot-scale anaerobic co-digestion of sewage sludge with agro-industrial by-products for increased biogas production of existing digesters at wastewater treatment plants", *Waste Management*, 59, 362-370.

Martin, M., Svensson, N., Fonseca, J., and Eklund, M., (2014), "Quantifying the environmental performance of integrated bioethanol and biogas production", *Renewable Energy*, 61, 109-116.

Micolucci, F., Gottardo, M., Pavan, P., Cavinato, C., and Bolzonella, D., (2018), "Pilot scale comparison of single and double-stage thermophilic anaerobic digestion of food waste", *Journal of Cleaner Production*, 171, 1376-1385.

Mishra, P., Singh, L., Islam, M.A., Nasrullah, M., Sakinah, A.M., and Ab Wahid, Z., (2019), "NiO and CoO nanoparticles mediated biological hydrogen production: Effect of Ni/Co oxide NPs-ratio",

simultaneously biogas slurry decontamination by using of microalgae photobioreactor under various light wavelengths, light intensities, and photoperiods", *Applied Energy*, 178, 9-18.

Yuan, T., Cheng, Y., Zhang, Z., Lei, Z., and Shimizu, K., (2019), "Comparative study on hydrothermal treatment as pre-and post-treatment of anaerobic digestion of primary sludge: Focus on energy balance, resources transformation and sludge dewaterability", *Applied Energy*, 239, 171-180.

Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., and Tan, T., (2014), "Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383-392.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.

Bioresource Technology Reports, 5, 364-368.

Nozari, B., Mirmohamadsadeghi, S., and Karimi K., (2018), "Bioenergy production from sweet sorghum stalks via a biorefinery perspective", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(7), 3425-38.

Obileke, K., Nwokolo, N., Makaka, G., Mukumba, P., and Onyeaka, H., (2021), "Anaerobic digestion: Technology for biogas production as a source of renewable energy, A review", *Energy & Environment*, 32(2), 191-225.

Parajuli, R., Dalgaard, T., Jørgensen, U., Adamsen, A.P.S., Knudsen, M.T., Birkved, M., Gylling, M., and Schjørring, J.K., (2015), "Biorefining in the prevailing energy and materials crisis: a review of sustainable pathways for biorefinery value chains and sustainability assessment methodologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 244-263.

Rachbauer, L., Voitl, G., Bochmann, G., and Fuchs, W., (2016) , "Biological biogas upgrading capacity of a hydrogenotrophic community in a trickle-bed reactor", *Applied Energy*, 180, 483-490.

Safari, A., Karimi, K., and Shafiei, M., (2017), "Dilute alkali pretreatment of softwood pine: A biorefinery approach", *Bioresource Technology*, 234, 67-76.

Shi, X., Guo, X., Zuo, J., Wang, Y., and Zhang, M., (2018), "A comparative study of thermophilic and mesophilic anaerobic co-digestion of food waste and wheat straw: Process stability and microbial community structure shifts", *Waste Management*, 75, 261-269.

Singh, S., (2018), "Optimization of biogas production from City of Johannesburg market waste by anaerobic digestion for sustainable energy development", University of Johannesburg.

Shirzad, M., Panahi, H.K.S., Dashti, B.B., Rajaeifar, M.A., Aghbashlo, M., and Tabatabaei, M., (2019), "A comprehensive review on electricity generation and GHG emission reduction potentials through anaerobic digestion of agricultural and livestock/slaughterhouse wastes in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 571-594.

Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Valijanian, E., Panahi, H.K.S., Nizami, A.-S., Ghanavati, H., Sulaiman, A., Mirmohamadsadeghi, S., and Karimi, K., (2020a), "A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, part 1: Upstream strategies", *Renewable Energy*, 146, 1204-1220.

Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Valijanian, E., Panahi, H.K.S., Nizami, A.-S., Ghanavati, H., Sulaiman, A., Mirmohamadsadeghi, S., and Karimi, K., (2020b), "A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 2: Mainstream and downstream strategies", *Renewable Energy*, 146, 1392-1407.

Xu, Z., Zhao, M., Miao, H., Huang, Z., Gao, S., and Ruan, W., (2014), "In situ volatile fatty acids influence biogas generation from kitchen wastes by anaerobic digestion", *Bioresource Technology*, 163, 186-192.

Yan, C., Zhu, L., and Wang, Y., (2016), "Photosynthetic CO_2 uptake by microalgae for biogas upgrading and