سامانه ماشین بویایی

احسان سوندرومی

دانش‌آموخته دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گرایش فناوری پس از برداشت، دانشگاه تهران
savandroumi@ut.ac.ir

تحقیق حاضر با عنوان «طراحی، ساخت و ارزیابی یک هاضم بی‌هوازی چندمرحله‌ای با سامانه کنترل در مقیاس آزمایشی جهت تولید بهینه بیوگاز از پسماندهای آلی شهری» با درنظرداشتن حفظ محیط‌زیست و تولید انرژی تجدیدپذیر انتخاب شده است. در این تحقیق، با استفاده از پتانسیل تجربه ماشین‌بویایی در گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی درزمینه‌ی محصولات کشاورزی، کاربرد آن درزمینه‌ی پایش فرآیند هضم بی‌هوازی مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین یکی از اهداف اصلی این تحقیق، طراحی و ساخت سامانه ماشین‌بویایی ویژه بیوگاز، جهت پایش روزانه فضای گازی هاضم و تحلیل سیگنال‌های خروجی با روش مناسب آماری جهت تحلیل وضعیت هاضم در نظر گرفته شد. طرح حاضر با کد اختصاصی ۹۶۰۷۰ و شماره اعتبار ۵۶۶۱۷۵ توسط پارک علم و فناوری دانشگاه تهران مورد حمایت مالی و معنوی قرار گرفته‌است.

سامانه ماشین‌بویایی

فرآیند هضم بی‌هوازی، یک فرآیند زیستی چندمرحله‌ای بوده که برای تجزیه و تثبیت انواع مختلف پسماندهای مواد آلی و تولید بیوگاز از آن استفاده می‌شود؛ بنابراین یک جایگزین سوخت‌های فسیلی برای تولید گرما و برق است؛ اما در عمل، استفاده از این فرآیند با چالش‌های جدی همراه بوده؛ به‌ویژه زمانی که خوراک ورودی آن مانند پسماندهای مواد غذایی متغیر باشد. به‌عبارت دیگر، تجزیه پسماندهای آلی شهری که تحت تأثیر تغییرات منطقه‌ای و فصلی قرار دارند؛ از طریق فرآیند بی‌هوازی در عملیات با مشکلاتی ناشی از تغییرات مداوم خوراک مواجه است. یکی از شاخص‌هایی که جهت خوراک‌دهی این فرآیند در نظر گرفته می‌شود؛ میزان ترکیبات فرار (VS) خوراک است که معیار مهمی در تعیین ظرفیت هاضم و طراحی آن می‌باشد. درصورتی‌که میزان VS خوراک، کمتر از مقدار طراحی‌شده باشد؛ ازلحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نبوده و بیش از آن مقدار نیز هاضم با بیش‌باری مواجه شده و فرآیند متوقف می‌شود. اما در عملیات، حفظ یک مقدار مشخص VS خوراک ممکن نبوده و بدین ترتیب، بی‌ثباتی در فرآیند هضم بی‌هوازی یک چالش عملیاتی، به‌ویژه در خوراک‌های متغیر، محسوب می‌شود. به‌طوری‌که در یک مطالعه مروری بر فرآیند هضم بی‌هوازی پسماندهای غذایی با تمرکز بر پایداری فرآیند، ناپایداری در عملکرد هاضم‌های بیوگاز با خوراک پسماندهای غذایی را یک مسئله عملیاتی رایج بیان می‌کند (Li et al. 2018)؛ بنابراین پایش مداوم وضعیت فرآیند، امری ضروری جهت حفظ پایداری آن است؛ اما روش‌های پایش و نظارت برخط، تنها در آزمایشگاه‌ها توسعه یافته و کاربری صنعتی آن‌ها در کارخانه‌های بیوگاز، به علت هزینه بالای این روش‌ها محدود شده است. در بین سه روش اقتصادی تیتراسیون، حسگرهای الکتروشیمیایی و حسگرهای زیستی تنها روش تیتراسیون، صنعتی بوده و دو روش دیگر جهت کاربرد صنعتی نیاز به آزمایش بیشتر و توسعه دارند و استفاده از ترکیب روش‌های مختلف پایش جهت کسب اطلاعات تکمیلی از وضعیت فرآیند نیز توصیه شده است (Wu et al. 2019). از طرفی ماشین‌بویایی، توانایی نظارت بر شرایط گازی تحت تأثیر پارامترهای مختلف را داشته و تنها یک پارامتر یا یک ماده را اندازه‌گیری نمی‌کند، بلکه سیگنال حاصل از آرایه حسگری آن در پاسخ به ترکیبی از پارامترهای اثرگذار مختلف است (Drosg 2013).

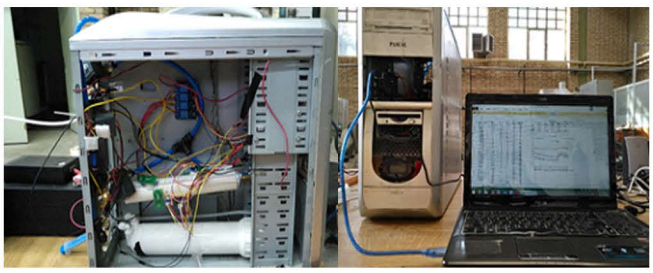
بدین‌ترتیب در تحقیق حاضر، با استفاده از پتانسیل تجربه ماشین بویایی در گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی درزمینه‌ی محصولات کشاورزی، کاربرد آن درزمینه‌ی پایش فرآیند هضم بی‌هوازی مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین یکی از اهداف اصلی این تحقیق، طراحی و ساخت سامانه ماشین‌بویایی ویژه بیوگاز، جهت پایش روزانه فضای گازی هاضم و تحلیل سیگنال‌های خروجی با روش مناسب آماری جهت تحلیل وضعیت هاضم ترسیم شد.

قبل از شروع تحقیق حاضر، یک دستگاه ماشین‌بویایی آزمایشگاهی قابل‌حمل مطابق شکل یک طراحی و ساخته شد. این دستگاه به شماره ثبت اختراع ۹۷۵۲۲ در تاریخ ۱۳۹۷/۱۰/۰۸ بوده[1] و دارای گواهی اعتبار سنجی از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران (با کد DIO: 10.22104/IROST.1397.236) است.

یکی از ویژگی‌های این دستگاه که امکان قابل‌حمل بودن آن را فراهم ساخت، استفاده از هوای تصفیه‌شده محیط به‌جای گاز مرجع مانند هوای صنعتی است. در این دستگاه، استفاده از دو حالت هوای محیط و مخزن تحت‌فشار گاز مرجع قابل انتخاب می‌باشد. دیگر ویژگی آن که باعث ارتقاء کیفیت نمونه‌برداری و تکرارپذیری آزمایش‌ها می‌شود؛ انتخاب مسیر بسته بین محفظه نمونه‌برداری و محفظه آرایه حسگری است که این قابلیت امکان نمونه‌برداری محصولاتی با غلظت بوی کم را فراهم می‌سازد.

شکل ۱: دستگاه ماشین‌بویایی آزمایشگاهی با شماره ثبت ۹۷۵۲۲

اما جهت کاربرد ماشین‌بویایی در پایش بیوگاز، فضای گازی یک هاضم بی‌هوازی به دلیل محدودیت‌های بیوگاز نیاز به یک بازطراحی داشته و در یک نمونه جدید و مستقل به‌عنوان سامانه ماشین‌بویایی ویژه بیوگاز مطابق شکل ۲ در این تحقیق ساخته شد. سامانه ماشین‌بویایی ویژه بیوگاز در سال ۱۳۹۷ به‌عنوان طرح دانش‌بنیان سطح دو رتبه‌بندی شده است.



شکل ۲: نمای داخلی و نمای کلی سامانه ماشین‌بویایی ساخته‌شده در این تحقیق

دیگر چالش ارزیابی بیوگاز توسط ماشین‌بویایی نسبت به محصولات کشاورزی، تغییرات زمانی ترکیبات بیوگاز در اثر تغییرات شرایط محیطی هاضم و ترکیبات خوراک ورودی آن است که تعریف یک الگوی ثابت را در بخش الگوی تشخیص (pattern recognition) مشکل می‌سازد؛ بنابراین در ابتدای

۱. عنوان اختراع: ماشین بویایی آزمایشگاهی، مشخصات مخترع: سید سعید محتسبی، مهدی کرامت جهرمی، احسان سوند رومی

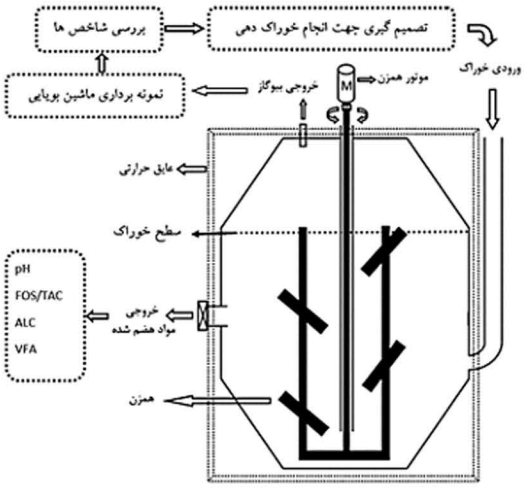
تحقیق، این سؤال مطرح شد که در پایش هاضم بیوگاز چه ویژگی‌هایی را می‌توان مورد ارزیابی قرارداد. بدین ترتیب تحقیق در زمینه‌ی شناسایی و بررسی ویژگی‌ها، جهت تشخیص الگو به سه فاز تقسیم شد.

ففاز اول مقایسه سه نمونه هاضم ناپیوسته با درصدهای مختلف از ترکیب کود گاو و مرغی انجام شد. بدین ترتیب نمونه‌برداری روزانه از بیوگاز تولیدی انجام شد و درنهایت پس از توقف دو نمونه از هاضم‌ها، داده‌ها بررسی شدند و یک روش پایش از داده‌های ماشین‌بویایی در روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، استخراج و نتایج آن در مجله بیوسیستم منتشر شد (سوند رومی و همکاران ۱۳۹۸).

به‌طور خلاصه نتیجه مرحله اول، بررسی و استخراج روش‌های تحلیلی جهت ارتباط بین سیگنال‌های ماشین‌بویایی و شرایط هاضم بوده و دو روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل تفکیک خطی (LDA) به‌ترتیب جهت پایش و طبقه‌بندی وضعیت هاضم انتخاب شدند.

در فاز دوم، آزمایش‌ها به خوراک پسماندهای آلی شهری و خوراک‌دهی نیمه‌پیوسته (روزانه یک‌مرتبه) در یک هاضم دائم همزن (CSTR) تغییر داده شد. در مرحله دوم، مدل استخراج‌شده مرحله اول در پایش زمان‌های ماند هیدرولیکی (HRT) مختلف ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ روزه مورد ارزیابی قرار گرفت. در بخش تحلیل LDA، طبقه‌بندی زمان‌های ماند مرحله دوم با دقت ۹۱/۴۹ درصد و طبقه‌بند زمان ماند بهینه (HRT: 30) با دقت و صحت و حساسیت ۱۰۰ درصد طبقه‌بندی را انجام داد. دانستن این نکته ضروری است که دو پارامتر عملیاتی HRT و OLR (نرخ بارگذاری مواد آلی) در کارخانه‌های بیوگاز اهمیت ویژه‌ای در عملکرد و ثبات هاضم داشته و این دو پارامتر به یکدیگر وابسته می‌باشند. درنهایت با کسب تجربه از دو فاز اولیه و اهداف رساله، فاز سوم نیز تعریف شد. بدین ترتیب در فاز سوم، طراحی و ساخت یک هاضم چندمرحله‌ای بیوگاز در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. هاضم‌های مرحله اول یا هیدرولیز فرآیند هضم بی‌هوازی به‌صورت ناپیوسته (Batch) و هاضم مرحله متان‌زا به‌صورت CSTR و خوراک‌دهی نیمه‌پیوسته (روزانه یک بار و تحت کنترل سامانه ماشین‌بویایی) به حجم حدود ۳۰ لیتر مطابق شکل ۳ به‌کار برده شد.

در این تحقیق، جهت کاهش فاصله شرایط تحقیقاتی و آزمایشگاهی با شرایط عملیاتی در وضعیت واقعی، به‌جای استفاده از ترکیب‌های خوراک ثابت، از پسماندهای غذایی تازه با ترکیب متنوع به‌صورت روزانه استفاده شد؛ بنابراین باوجود تغییرات گسترده در پسماندهای غذایی تازه ازلحاظ مقدار مواد آلی فرار (VS)، کنترل پارامترهای HRT و OLR در شرایط عملیاتی امکان‌پذیر نیست. از طرفی افزایش محتوی VS خوراک و عدم کنترل آن، می‌تواند باعث اسیدی شدن محیط هاضم و درنهایت توقف آن شود. اما در این تحقیق با استخراج شاخص کنترلی از داده‌های ماشین‌بویایی حاصل از پایش فضای گازی هاضم، خوراک‌دهی هاضم تحت کنترل این شاخص‌ها قرار گرفت. ابتدا کنترل خوراک‌دهی هاضم از دو شاخص زمان بازگشت در صفحه scores و تغییر جهت دو گروه حسگر در صفحه loading در روش PCA در مرحله راه‌اندازی آن انجام شد. درواقع مرحله راه‌اندازی هاضم، مرحله‌ای مهم و حیاتی جهت ادامه کار آن در شرایطی پایدار و کارآمد است. این مرحله در زمانی کوتاه، حدود یک ماه، انجام و به مرحله پایدار رسید.



شکل ۳: شماتیک کلی ارتباط بین هاضم بیوگاز و ماشین‌بویایی

در بخش پایانی تحقیق، ارزیابی شاخص بازگشت زمان و جایگزینی آن با چند پارامتر مرسوم شامل FOS/TAC، pH و VFA در پایش هاضم انجام شد. درنتیجه ارزیابی ۵۱ روزه هاضم، تنها با کنترل خوراک‌دهی و بدون لحاظ VS خوراک ورودی و کنترل pH آن باوجود تغییرات گسترده در میزان VS خوراک ورودی، فرآیند هضم بدون مشکلاتی مانند بیش‌باری و اسیدی یا قلیایی شدن انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که پایش هاضم از طریق سامانه بویایی ویژه بیوگاز، قادر به حل چالش تصفیه پسماندهای غذایی باوجود تغییرات گسترده در میزان VS آن است و مقایسه عملکرد هاضم در این تحقیق با عملکرد هاضم‌ها در سایر تحقیقات و هاضم‌های کشاورزی، نشان از عملکرد مناسب آن داشت. به‌طوری‌که میانگین تولید متان و VS/TS خروجی هاضم در این دوره به ترتیب (NL CH_4/kg VS) ۲۲۰و ۰/۷۱ به‌دست آمد. علاوه بر این، با تقویت ظرفیت بافری هاضم، با وجود عدم کنترل pH خوراک ورودی هاضم، میزان pH روزانه هاضم در طول این دوره در محدوده باریکی بین ۷/۸ تا ۸/۵ متغیر بود.

خلاصه نتایج:

پایش فضای گازی هاضم‌های مختلف توسط ماشین‌بویایی ویژه بیوگاز طراحی‌شده در این تحقیق در سه فاز مختلف در شرایط خوراک‌دهی ناپیوسته و نیمه‌پیوسته، میزان مختلف بارگذاری مواد آلی (OLR) و زمان‌های ماند مختلف انجام شد. در تحلیل نتایج حاصل از این پایش، علاوه بر شناسایی روش تحلیل مناسب، دو شاخص مهم کنترل خوراک‌دهی به نام زمان بازگشت و موقعیت حسگرها نسبت به یکدیگر استخراج شد. ویژگی این شاخص‌ها، مستقل بودن آن‌ها از نوع هاضم و خوراک است. درنهایت شاخص‌های استخراج‌شده در راه‌اندازی و شرایط عملیاتی هاضم CSTR با شرایط خوراک‌دهی نامعین (undefined)، با موفقیت در جهت حفظ شرایط پایدار هاضم، ارزیابی شدند.

سپاسگزاری

پژوهشگران این تحقیق، از پارک علم و فناوری دانشگاه تهران که طرح حاضر را با کد اختصاصی ۹۶۰۷۰ و شماره اعتبار ۵۶۶۱۷۵ مورد حمایت مالی و معنوی قرار داد؛ تشکر می‌نمایند. علاوه بر این، از حمایت گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران و مسئولین کارگاه‌های تخصصی آن گروه که انجام این تحقیق را میسر ساختند؛ تشکر می‌کنند.

منابع:

* سوند رومی، احسان، سید سعید محتسبی، شاهین رفیعی و حسین قنواتی. ۲۰۲۰. «کاربرد بینی الکترونیک جهت پایش و استخراج الگوی پیش بینی وضعیت هاضم بیوگاز آزمایشگاهی.» مهندسی بیوسیستم ایران ۵۰(۴):۸۱۱–۲۱.

* Chen, Hong, Wen Wang, Lina Xue, Chang Chen, Guangqing Liu, and Ruihong Zhang. 2016. “Effects of Ammonia on Anaerobic Digestion of Food Waste: Process Performance and Microbial Community.” Energy & Fuels 30(7):5749–57.

* Dahlin, Johannes, Carsten Herbes, and Michael Nelles. 2015. “Biogas Digestate Marketing: Qualitative Insights into the Supply Side.” Resources, Conservation and Recycling 104:152–61.

* Drosg, Bernhard. 2013. Process Monitoring in Biogas Plants.

* Gaida, Daniel, Christian Wolf, and Michael Bongards. 2017. “Feed Control of Anaerobic Digestion Processes for Renewable Energy Production: A Review.” Renewable and Sustainable Energy Reviews.

* Ghanavati, Hossein, Iraj Nahvi, and Keikhosro Karimi. 2015. “Organic Fraction of Municipal Solid Waste as a Suitable Feedstock for the Production of Lipid by Oleaginous Yeast Cryptococcus Aerius.” Waste Management 38:141–48.

* Hagos, Kiros, Jianpeng Zong, Dongxue Li, Chang Liu, and Xiaohua Lu. 2017. “Anaerobic Co-Digestion Process for Biogas Production: Progress, Challenges and Perspectives.” Renewable and Sustainable Energy Reviews 76:1485–96.

* Li, Lei, Xuya Peng, Xiaoming Wang, and Di Wu. 2018. “Anaerobic Digestion of Food Waste: A Review Focusing on Process Stability.” Bioresource Technology 248:20–28.

* Liu, Chao, Wen Wang, Naveed Anwar, Zonghu Ma, Guangqing Liu, and Ruihong Zhang. 2017. “Effect of Organic Loading Rate on Anaerobic Digestion of Food Waste under Mesophilic and Thermophilic Conditions.” Energy & Fuels 31(3):2976–84.

* Mata-Alvarez, J., J. Dosta, M. S. Romero-Güiza, X. Fonoll, M. Peces, and S. Astals. 2014. “A Critical Review on Anaerobic Co-Digestion Achievements between 2010 and 2013.” Renewable and Sustainable Energy Reviews 36:412–27.

* Nielsen, H. B. and I. Angelidaki. 2008. “Codigestion of Manure and Industrial Organic Waste at Centralized Biogas Plants: Process Imbalances and Limitations.” Water Science and Technology 58(7):1521–28.

* Pellera, Frantseska-Maria and Evangelos Gidarakos. 2017. “Anaerobic Digestion of Solid Agroindustrial Waste in Semi-Continuous Mode: Evaluation of Mono-Digestion and Co-Digestion Systems.” Waste Management 68:103–19.

* Sun, Chen, Weixing Cao, Charles J. Banks, Sonia Heaven, and Ronghou Liu. 2016. “Biogas Production from Undiluted Chicken Manure and Maize Silage: A Study of Ammonia Inhibition in High Solids Anaerobic Digestion.” Bioresource Technology.

* Wu, Di, Lei Li, Xiaofei Zhao, Yun Peng, Pingjin Yang, and Xuya Peng. 2019. “Anaerobic Digestion: A Review on Process Monitoring.” Renewable and Sustainable Energy Reviews.