

اثر حضور پسماند لیگنوسلولزی گیاه نیشکر و تفاله چای سیاه بر فرآیند تصفیه‌ی زیستی فاضلاب شهری در سیستم راکتور هضم بی‌هوازی ناپیوسته

مجید رسولی^{*}، حسین بابایی^۱، بهنام عطایان^۱

^۱ گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران (آدرس پست الکترونیک: m.rasouli@basu.ac.ir)

چکیده

هضم بی‌هوازی فرآیندی پیچیده و بسیار حساس است که در برگیرنده چندین نوع میکروارگانیسم با شرایط محیطی خاص است. نوع و ساختار بسترها نیز بر عملکرد تولید بیوگاز مؤثر است. در این تحقیق تصفیه زیستی فاضلاب شهری به عنوان یک پساب آلی با نسبت C/N پایین در حضور پسماند لیگنوسلولزی کشاورزی غنی از کربن با نسبت C/N بالا بررسی شد. بهینه‌سازی نسبت ترکیب سوبستراها برای دستیابی به بیشترین بازده تولید سوخت گاز زیستی همراه با حفظ پایداری راکتور مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌ها از تست پتانسیل متان بیوشیمیایی (BMP) استفاده شد. از روش‌شناسی سطح پاسخ (RSM) و طرح مخلوط (Mixture) برای مدل‌سازی و تعیین ترکیب بهینه استفاده شد. نتایج نشان داد، هضم بی‌هوازی همزمان فاضلاب شهری با موادی مانند ضایعات نیشکر و تفاله چای که دارای نسبت C/N بالایی هستند به بهبود تولید بیوگاز از طریق هضم بی‌هوازی کمک می‌کند. استفاده بیش از حد ضایعات نیشکر در ترکیب سوبسترا باعث تولید شدید اسیدهای چرب فرار می‌شود و در نتیجه با اسیدی شدن محیط، تولید بیوگاز کاهش می‌یابد. در آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش راکتورهایی که دارای بیش از ۷۰٪ ضایعات نیشکر بودند این پدیده را نشان دادند. تفاله چای به‌عنوان یک سوبسترا به منظور هضم مشترک با فاضلاب شهری مناسب است، اما حضور این ماده با درصد بالا در ترکیب مخلوط سوبسترا به دلیل خواص ضد باکتریایی پلی‌فنول و تانن موجود در آن باعث از بین رفتن میکروارگانیسم‌های مفید هضم بی‌هوازی شده و عملکرد تولید بیوگاز را کاهش می‌دهد. بهترین ترکیب سوبسترا حاوی ۲۵٪ پسماند لیگنوسلولزی گیاه نیشکر، ۳۴٪ چای سیاه و ۴۱٪ فاضلاب شهری است که بیشترین بیوگاز ممکن را تولید کرد. این مقدار برابر با ۲۳۹ mL/g vs بیوگاز است.

کلمات کلیدی:

هضم بی‌هوازی همزمان، فاضلاب شهری، نسبت کربن به هیدروژن، پایداری راکتور، مدل‌سازی

*نویسنده مسئول (m.rasouli@basu.ac.ir)

مقدمه

بحران‌های زیست محیطی، اقتصادی و محدودیت منابع در حال حاضر مهمترین چالش پیش روی صنایع است. ایران مانند بسیاری از کشورهای دنیا با چالش کاهش منابع آب سالم و مدیریت ناصحیح آن مواجه است. از راه‌های تامین تقاضای آب، تصفیه فاضلاب و بازگردانی آن به چرخه مصرف است. سیستم تصفیه فاضلاب، مصرف کننده بزرگ انرژی است و این امر هزینه سنگینی برای سیستم فاضلاب در پی دارد. بنابراین استفاده از پتانسیل‌های بازیافت آب و انرژی در سیستم فاضلاب ضرورت می‌یابد.

در حال حاضر ۱/۳ میلیارد تن زباله جامد در سال تولید می‌شود. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ این میزان به ۲/۲ میلیارد تن افزایش یابد [۱۶]. مدیریت پسماندهای جامد شامل روش‌های مختلفی مانند کاهش استفاده از مواد اولیه، کاهش مقادیر زباله جامد، استفاده مجدد از مواد زائد جامد و بازیافت مواد و انرژی می‌باشد [۲۱].

زیست توده لیگنوسلولوزی اقتصادی‌ترین و بزرگترین منبع طبیعی تجدیدپذیر در دنیا است. توسعه انرژی تجدیدپذیر به دست آمده از زیست توده‌ی لیگنوسلولوزی به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی در نهایت برای بقای نسل بشر ضروری است [۲۳]. نیشکر به عنوان یک گیاه انرژی‌زا از سوبسترهای مناسب برای تولید سوخت‌های زیستی است که مقادیر بسیار زیادی از آن در کشور تولید می‌شود. پسماندهای نیشکر حاوی قند آزاد و همچنین بخش لیگنوسلولوزی است که می‌تواند به سوخت‌های زیستی تبدیل شود.

امروزه مصرف چای، یکی از اجزای جدایی ناپذیر زندگی عادی مردم در ایران است. برگ‌های چای استفاده شده یک زباله خانگی است که به مقدار زیادی در ایران موجود است و برای تجزیه زیستی به مدت زمان زیادی لازم دارد. دیواره‌های سلولی نامحلول عمدتاً از سلولز و همی‌سلولز، پروتئین‌های ساختاری، تانن‌های چگالیده و لیگنین تشکیل شده‌اند [۹].

برای دستیابی به فرآیند هضم پایدار، ترکیبات سوبسترا مهم است. نسبت C/N خیلی پایین منجر به سطح آمونیاک بالا و در نتیجه توقف تولید متان می‌شود [۱۴,۵]. از دیگر فاکتورهایی که باعث کاهش تولید متان می‌شود، در دسترس نبودن سوبسترای کافی برای میکروارگانیسم‌هاست، که به عنوان مثال اندازه بزرگ ذرات یا دیواره سلولی سخت می‌تواند علت آن باشد [۵]. در همچنین مواردی می‌توان از پسماند کشاورزی به عنوان خوراک همزمان (co-substrates) استفاده کرد. محتوای بالای کربن در پسماند کشاورزی نسبت C/N را بهبود می‌بخشد [۸].

تولید بیوگاز می‌تواند منبع اصلی نشر گازهای گلخانه‌ای (GHG) از واحدهای تصفیه فاضلاب (WWTPs) باشد، اگر به طور مناسب مدیریت نشود. بنابراین تولید بیوگاز به صورت کارآمد و استفاده از این منبع انرژی در واحدهای تصفیه فاضلاب می‌تواند به طور قابل توجهی ردپای کربن در WWTPs را کم کند [۱۹]. هضم ترکیبی بی‌هوازی، هضم همزمان دو یا بیشتر از دو سوبسترا است که یک روش امیدوارکننده برای غلبه بر معایب هضم تکی^۱ (هضم با یک سوبسترا) و بهبود رضایت اقتصادی کارخانه‌های هضم بی‌هوازی و تولید متان بیشتر است [۷].

هضم همزمان لجن فاضلاب با دیگر مواد زائد آلی باعث افزایش تولید بیوگاز و افزایش کیفیت مواد جامد زیستی تصفیه شده می‌شود و در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸,۱۳,۳].

بودیچ و همکاران [۴] در مطالعه‌ای موفق شدند با استفاده از هضم بی‌هوازی ترکیبی فاضلاب شهری و پسماند صنعت مرغداری مقدار تولید بیوگاز را افزایش دهند. آن‌ها این بررسی را در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی انجام دادند. افزودن

^۱ mono-digestion

پسماند مرغداری به هاضم‌های هضم بی‌هوازی هیچگونه اثر بازدارندگی روی فرآیند نداشت. تاناراسو و همکاران [۲۱] و گوئل و کیشره [۶] هضم بی‌هوازی پسماند چای استفاده شده را مورد بررسی قرار دادند و افزایش تولید متان را در هضم بی‌هوازی ترکیبی گزارش کردند. آن‌ها در این پژوهش، هضم بی‌هوازی تفاله چای که محصول جانبی یک کارخانه فراوری چای فوری بود را در یک هاضم دوفازی مورد آزمایش قرار دادند. هیدرولیز و فاز اسیدی‌سازی منجر به تشکیل مایعی ارگانیک شد که لیکات‌انامیده می‌شود و نیاز اکسیژن شیمیایی آن برابر با ۱۲۸۸۰ میلی‌گرم بر لیتر و زمان ملندگاری آن ده روز بود. لیکات به دست آمده در یک رآکتور متان‌زا مورد آزمایش قرار گرفت تا تولید بیوگاز آن بررسی شود. تولید بیوگاز به‌طور متوسط ۰/۴۸ متر مکعب بر کیلوگرم بود که با کاهش ۹۳ درصدی COD همراه شد. میزان متان این ترکیب، ۷۳ درصد گزارش شد.

پژوهشگران در مطالعه‌ای به بررسی تولید بیوانرژی از پسماندهای ترکیبی به دست آمده از بقایای ذرت، تفاله چای و ضایعات آشپزخانه‌ای که با کود دامی آمیخته شده بودند [۱۲]. در این پژوهش، میزان تولید گاز پسماندهای کشاورزی، کود دامی و پسماندهای آشپزخانه‌ای در هضم بی‌هوازی مواد، مقایسه شد. بقایای ذرت، پسماندهای آشپزخانه‌ای و تفاله چای با کود دامی با هم ترکیب شدند و با زمان ماندگاری ۳۰ روزه در هاضم قرار داده شدند. در شرایط هضم مزوفیلیک، تأثیر غلظت‌های مختلف تغذیه بر خصوصیات تولید بیوگاز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب کود دامی و تفاله چای، کمترین میزان تولید گاز را سبب شد، در حالی که بالاترین میزان تولید گاز که بیش از ۱۴ لیتر بر کیلوگرم بود از نسبت یک به یک کود دامی و پسماند آشپزخانه‌ای به دست آمد. نکته جالب در یافته‌های این پژوهش این بود که تفاله چای، در ابتدا میزان زیادی گاز تولید می‌کرد که می‌تواند به دلیل وجود شکر در ترکیب تفاله چای باشد. ترکیبات آلی ساده مانند گلوکز به‌سادگی به اسید و سپس متان تبدیل می‌شوند و به همین دلیل، نرخ تولید گاز در این ترکیبات در ابتدای هضم، بالاست.

پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۸ در ترکیه بر روی هضم کود گاوی و تفاله چای و تولید بیوگاز انجام شد [۱]. با توجه به میزان بالای مصرف و تولید چای در ترکیه، هدف این پژوهش، رسیدن به روش‌های جدید بازیافت و استفاده مجدد از پسماند چای خانگی بود. هاضم آزمایشگاهی مورد استفاده در این آزمایش تحت شرایط مزوفیلیک به مدت ۸۰ روز کار کرد. ترکیبات با نسبت‌های مختلف کود دامی و تفاله چای مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که هضم هم‌زمان این دو ماده تأثیر مثبتی بر تولید بیوگاز و متان داشت. ترکیب ۷۵ درصد کود دامی و ۲۵ درصد تفاله چای و سرعت همزنی ۱۰۰ دور بر دقیقه، بالاترین میزان تولید بیوگاز (۲۹۶ میلی‌لیتر بر گرم) و بالاترین محتوای متان (بیش از ۷۷ درصد) را در پی داشت. تأثیر سرعت همزن بر تولید بیوگاز نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت به‌طوری که در برخی آزمایش‌ها، سبب افزایشی در حدود ۲۵ درصد در تولید بیوگاز شد.

مطالعه‌ای دیگر نیز در هند، میزان تولید بیوگاز از پسماندهای شهری را مورد بررسی قرار داد که هدف از آن، یافتن ترکیب بهینه برای هاضم‌های بی‌هوازی بود [۱۵]. در این پژوهش، پسماندهای مختلفی از جمله پسماند سبزیجات، پوست موز، ساقه مورد، پسماند غذا و تفاله چای برای رسیدن به سوبسترای بهینه مورد آزمایش قرار گرفتند. ترکیب کود دامی، پسماند سبزیجات و تفاله چای، بیشترین تولید گاز را با ۳/۷۵ لیتر در دوره آزمایشی به خود اختصاص می‌داد. تغییرات اسیدیته، مهم‌ترین عامل محدودکننده در هاضم‌های این آزمایش بود.

² Leachate

با این حال، هضم بی‌هوازی یک فرآیند پیچیده و بسیار حساس است که در برگیرنده چندین نوع میکروارگانیسم با شرایط محیطی خاص است. نوع و ساختار بسترها نیز بر عملکرد تولید بیوگاز مؤثر است. پارامترهای متعددی نظیر مشخصات راکتور، دمای هاضم، زمان ماند هیدرولیکی، رژیم سیستم همزن، و نسبت ترکیب سوبسترا بر تولید متان تأثیر گذارند. بنابراین مطالعه بر روی رفتار و عملکرد فرآیند هضم بی‌هوازی امری اجتناب ناپذیر است. با توجه به مطالب فوق، هدف از این مطالعه بررسی تصفیه زیستی فاضلاب شهری به عنوان یک پساب آلی با نسبت C/N پایین در حضور پسماند لیگنوسلولزی کشاورزی غنی از کربن با نسبت C/N بالا می‌باشد. از دیگر اهداف این مطالعه، بهینه‌سازی نسبت ترکیب سوبستراها برای دستیابی به بیشترین بازده تولید سوخت گاز زیستی همراه با حفظ پایداری راکتور می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تهیه سوبسترا

سوبسترای مورد استفاده در این پژوهش شامل فاضلاب شهری تصفیه‌خانه فاضلاب شهری، تفاله چای و برگ نیشکر می‌باشد. که روش تهیه هر کدام در زیر توضیح داده شده است.

فاضلاب شهری

نمونه فاضلاب شهری از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری همدان تهیه و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد. تصفیه‌خانه فاضلاب همدان در دو مدول طراحی شده است که هر مدول توانایی تصفیه ۲۵۰ لیتر فاضلاب بر ثانیه را دارد.

برگ نیشکر

برگ نیشکر از مزارع خوزستان تهیه گردید و نمونه مورد نظر توسط میکسر با تیغه‌ی سوهانی یک میلی‌متر پودر شد (شکل-۱) و به آزمایشگاه منتقل گردید.



شکل-۱ برگ نیشکر و پودر برگ نیشکر

پسماند چای سیاه

تفاله چای سیاه از آشپزخانه‌های خانگی تهیه شد. تفاله‌های چای ابتدا خشک و سپس توسط میکسر با تیغه‌ی سوهانی یک میلی‌متر پودر شد (شکل-۲).



شکل-۲ برگ نیشکر و بودر برگ نیشکر

تجهیزات مورد استفاده

آون: برای خشک کردن نمونه‌ها به منظور اندازه‌گیری رطوبت آن‌ها
کوره: ساخت کره (Wisd)، برای خاکستر کردن نمونه‌ها به منظور اندازه‌گیری کل جامدات فرار (TVS).
ترازو: با دقت ۰/۰۱ گرم (Sartorius)، ساخت فرانسه، به منظور توزین نمونه‌ها
pH متر: ساخت آلمان (Metrohm)، برای اندازه‌گیری pH نمونه داخل راکتور
روش‌های آنالیز

جامدات کل (TS)^۳، کل جامدات معلق (TSS)^۴ و کل جامدات فرار (TVS)^۵ بر اساس روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند [۲]. جزئیات روش‌های اندازه‌گیری متغیرهای فوق در زیر آورده شده است.

اندازه‌گیری TS

برای اندازه‌گیری جامدات کل (TS) بر حسب mg/l، حجم خاصی از نمونه برداشته شده، سپس داخل یک بوته چینی خشک توزین شده ریخته شد. سپس بوته‌ی حاوی نمونه داخل آون ۱۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفت تا نمونه کاملاً خشک شود. بوته‌ی حاوی نمونه‌ی خشک شده را وزن کرده و با استفاده از فرمول (۱) (۱) TS محاسبه شد.

$$TS = (W_2 - W_1) / V \quad (1)$$

W₁: وزن بوته چینی خشک (بر حسب گرم)

W₂: وزن بوته چینی به همراه نمونه‌ی خشک شده (بر حسب گرم)

V: حجم نمونه‌ی برداشته شده (بر حسب میلی لیتر)

اندازه‌گیری TSS

برای اندازه‌گیری کل جامدات معلق (TSS)، حجم خاصی از نمونه برداشته و سانتریفوژ شد. یک بوته‌ی چینی خالی و خشک، وزن و رسوب حاصل از سانتریفوژ داخل آن ریخته شد. سپس بوته‌ی حاوی نمونه را داخل آون ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده تا نمونه کاملاً خشک شود. بوته‌ی حاوی رسوب خشک شده وزن شد و از فرمول (۲)، TSS بر حسب mg/l محاسبه شد.

³ Total solid

⁴ Total suspended solids

⁵ Total volatile solids

$$TSS = (W_2 - W_1) / V \quad (2)$$

W_1 : وزن بوته چینی خشک (بر حسب گرم)

W_2 : وزن بوته چینی به همراه رسوب خشک شده (بر حسب گرم)

V : حجم نمونه‌ی برداشته شده (بر حسب میلی لیتر)

اندازه‌گیری TVS

برای اندازه‌گیری کل جامدات فرار (TVS)، بوته‌ی حاوی نمونه‌ای که برای اندازه‌گیری TS مورد استفاده قرار گرفته بود را در کوره‌ی ۵۰۵ درجه سلسیوس قرار داده تا کاملاً خاکستر شود. بوته به همراه خاکستر وزن شد و از فرمول TVS (۳) بر حسب mg/l محاسبه شد.

$$TVS = (W_2 - W_1) / V \quad (3)$$

W_1 : وزن بوته به همراه خاکستر (بر حسب گرم)

W_2 : وزن بوته به همراه نمونه خشک شده (بر حسب گرم)

V : حجم نمونه‌ی برداشته شده برای اندازه‌گیری TS (بر حسب میلی لیتر)

مشخصات سیستم تست پتانسیل متان بیوشیمیایی (BMP)

در این تحقیق از ۲۴ بیوراکتور (بطری‌های شیشه‌ای در آبی ۵۰۰ میلی لیتری) استفاده شد. سازوکار این بیوراکتورها بدین صورت است که تمامی مراحل هضم بی‌هوازی که شامل هیدرولیز، اسیدسازی، استات سازی و متان سازی به صورت تک مرحله‌ای انجام گرفت و طی دوره هضم سوبسترا به هاضم اضافه یا کم نشد بیوراکتورها در دمای مزوفیلیک (۳۷/۵ درجه سانتی‌گراد) راهبری شد که دمای انتخاب شده برابر ۳۸ درجه سانتی‌گراد بود که به منظور ثابت نگه داشتن دمای بیوراکتورها آن‌ها را داخل بن ماری حاوی آب ۳۸ درجه قرار دادیم. جهت نمونه برداری از سوبسترای داخل هاضم که در مواردی مانند تعیین PH، میزان جامد کل یا میزان جامد فرار مورد استفاده قرار می‌گرفت شیرهایی در بدنه بیوراکتورها تعبیه شد که مزلیای دیگری مانند تزریق مواد قلیایی یا اسیدی به داخل هاضم را داشت. جهت نمونه برداری از گاز تولید شده به منظور اندازه‌گیری درصد متان بیوگاز تولیدی، سرنگ‌هایی در کنار درب بطری‌ها تعبیه شد. جهت اندازه‌گیری بیوگاز تولید شده از روش جابه‌جایی آب استفاده شد. در شکل (۳)، سیستم تست پتانسیل متان بیوشیمیایی مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل-۳ سیستم تست پتانسیل متان بیوشیمیایی

اندازه گیری بیوگاز

اندازه گیری بیوگاز تولیدی با روش حجم‌سنجی انجام شد [۲۲]. گاز خروجی از هر کدام از راکتورها توسط شیلنگ‌های پنوماتیک به صورت جداگانه به یک شیشه دیگر که با آب پر شده بود انتقال پیدا می‌کرد. درب این شیشه دارای دو عدد شیر بود که یکی برای ورود گاز از سمت راکتور بود و دیگری، خروج آب از بطری را به همان اندازه که گاز وارد آن شده است، انجام می‌داد (شکل-۳). آب خروجی از این بطری‌ها روزی یک بار اندازه گیری شد.

تنظیم pH راکتورها

سنجش pH راکتورها در صورتی انجام می‌شد که تولید بیوگاز افت شدیدی می‌داشت و به صفر نزدیک می‌شد. این کار به وسیله دستگاه pH متر انجام شد و در صورت پایین بودن pH با اضافه کردن مقداری سود سوزآور (NaOH) ۴ نرمال، به حد متعارف (۶-۸) می‌رسید.

طراحی آزمایش‌ها

روش Mixture یک روش از RSM (روش شناسی سطح پاسخ) است که برای تعیین نسبت متغیرهای (ترکیبات) یک ترکیب به کار می‌رود. که در آن عناصر سازنده‌ی یک مخلوط و پاسخ‌ها متفاوت است زیرا نسبت‌ها با یکدیگر تفاوت دارند، به عبارتی پاسخ در اثر تغییر نسبت‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. فرمول (۴) مقادیر کد شده و جدول (۱) مقادیر واقعی ماتریس‌های تجربی را برای استفاده از این طرح‌ها، ارائه می‌دهد که بر اساس سفارش استاندارد مرتب شده‌اند. پارامترهای مدل با استفاده از معادلات خطی به صورت فرمول (۴) محاسبه شدند:

$$\gamma = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 < i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \beta_{iii} x_i^3 \quad (4)$$

$$+ \sum_{1 < i < j} \beta_{iij} x_i^2 x_j + \sum_{1 < i < j} \beta_{iij} x_i x_j^2 + \sum_{1 < i < j < k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \varepsilon$$

Y مقدار پیش‌بینی شده از متغیر پاسخ است، k تعداد متغیرها است، $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, \beta_{iii}, \beta_{iij}, \beta_{iij}, \beta_{ijk}$ پارامترهای مدل و x_i, x_j, x_k عوامل کدگذاری شده و ε باقی‌مانده مرتبط با آزمایش‌ها است [۱۷]. متغیر مستقل در این آزمایش، ترکیب‌های مختلف سوبسترا و متغیرهای وابسته، بیوگاز تولیدی و درصد متان موجود در آن می‌باشد. طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل داده‌ها به وسیله نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۶ و روش سطح پاسخ در قالب طرح مخلوط^۷ انجام شد. بر اساس این طراحی و طبق خروجی نرم‌افزار با یک نقطه مرکزی و سه نقطه تکرار، ۲۲ ترکیب مختلف از مواد سوبسترا بارگذاری شد که در (جدول-۱) آمده است. آزمایش‌ها در یک زمان ماند هیدرولیکی (HRT) ۲۱ روزه انجام شد.

نتایج و بحث

تحلیل تولید بیوگاز تجمعی

اثر میزان pH

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در تولید بیوگاز مقدار pH دوغاب در طول فرآیند است. مقدار pH در مراحل مختلف هضم بی‌هوایی تغییر می‌کند. در طی مراحل اولیه هضم بی‌هوایی مقدار pH بستر به سرعت کاهش می‌یابد زیرا ماده قابل هضم، هیدرولیز شده و به اسیدهای چرب تبدیل می‌شود. به دلیل تشکیل اسید چرب بسیار زیاد گاهی اوقات ممکن است مقدار pH در هضم به کمتر از ۵ برسد. به طور کلی افزایش pH هنگامی اتفاق می‌افتد که اسیدهای چرب توسط باکتری‌های متان‌زا مصرف می‌شود و در نتیجه مواد قلیایی تولید می‌شود. از طرفی افزایش بیش از حد مواد قلیایی مانند آمونیاک باعث کاهش رشد باکتری‌ها می‌شود. بنابراین وجود تعادل در pH امری ضروری در فرآیند هضم بی‌هوایی است [۱۰].

با توجه به شکل (۴) در آزمایش‌های انجام‌شده راکتورهای شماره ۱، ۴، ۵، ۶ و ۱۵ دارای ترکیبی با وجود برگ نیشکر بیشتر از ۷۰ درصد بوده‌اند. تولید بیوگاز در این راکتورها به ترتیب برابر بود با ۹۲، ۸۷، ۱۱۷، ۹۸ و ۵۴ mL/gvs. وجود ضایعات نیشکر در این راکتورها باعث افت شدید pH و در ادامه آن مختل شدن فرآیند هضم شده است. در مرحله هیدرولیز، تولید زیاد اسیدهای چرب فرار باعث از بین رفتن باکتری‌های مفید هضم می‌شود. در مطالعه‌ی مشابهی که سان و همکاران [۲۰] روی هضم بی‌هوایی مشترک پوست نیشکر و ضایعات آشپزخانه‌ای انجام دادند به نسبت بهینه ترکیبی دارای ۲۵٪ پوست نیشکر و ۷۵٪ ضایعات آشپزخانه‌ای دست یافتند. مقادیر بالاتر پوست نیشکر در ترکیب باعث اسیدی شدن فرآیند و در نتیجه افت عملکرد تولید بیوگاز شده بود.

جدول-۱ مقادیر واقعی ماتریس‌های تجربی و ترکیب مخلوط‌ها

Run	ID	Build Type	Space Type	Component 1 A: Sugarcane Waste (%)	Component 2 B: Spent Black Tea (%)	Component 3 C: Municipal Wastewater (%)
1	10	Model	Edge	70.7983	0	29.2017

⁶ Design expert

⁷ Mixture

2	12	Lack of Fit	Interior	1.56045	48.7505	49.689
3	6	Lack of Fit	Interior	10.414	81.6885	7.89749
4	3	Model	Edge	70.937	29.063	0
5	10	Replicate	Edge	70.7983	0	29.2017
6	3	Replicate	Edge	70.937	29.063	0
7	9	Model	Edge	0	70.82	29.18
8	1	Model	Edge	28.9944	71.0056	0
9	13	Model	Interior	19.2554	18.5959	62.1487
10	15	Model	Edge	27.7593	0	72.2407
11	7	Model	Interior	64.6914	18.1159	17.1927
12	0	Replicate	Center	33.3333	33.3333	33.3333
13	4	Model	Vertex	0	100	0
14	0	Center	Center	33.3333	33.3333	33.3333
15	2	Model	Vertex	100	0	0
16	16	Lack of Fit	Interior	9.30268	9.55147	81.1458
17	14	Model	Edge	0	28.4496	71.5504
18	17	Model	Vertex	0	0	100
19	11	Lack of Fit	Interior	45.5701	7.17716	47.2527
20	0	Center	Center	33.3333	33.3333	33.3333
21	5	Lack of Fit	Interior	46.1282	46.0699	7.80188
22	8	Model	Interior	18.8222	63.308	17.8698

اثر نسبت C/N

نسبت کربن به نیتروژن یکی از مؤثرترین پارامترها در تولید بیوگاز است. به منظور تولید بیوگاز بهینه، نسبت C/N بین ۲۰ تا ۳۰ در مطالعات مختلف گزارش شده است [۲۵، ۲۴، ۱۱]. بالا بودن این نسبت نشان‌دهنده وجود نیتروژن کم در ترکیب سوبسترا است و کمبود نیتروژن به عنوان ماده مغذی برای باکتری‌های متان‌زا تولید متان را کاهش می‌دهد. از طرفی اگر نسبت C/N کم باشد نیتروژن آزاد خواهد شد و به شکل آمونیاک تجمع می‌یابد. وجود آمونیاک در ترکیب سوبسترا باعث افزایش میزان pH می‌گردد و وجود مقدار قابل توجه آن باعث سمی شدن بستر هضم برای باکتری‌های متان‌زا و در نتیجه کاهش تولید بیوگاز می‌شود.

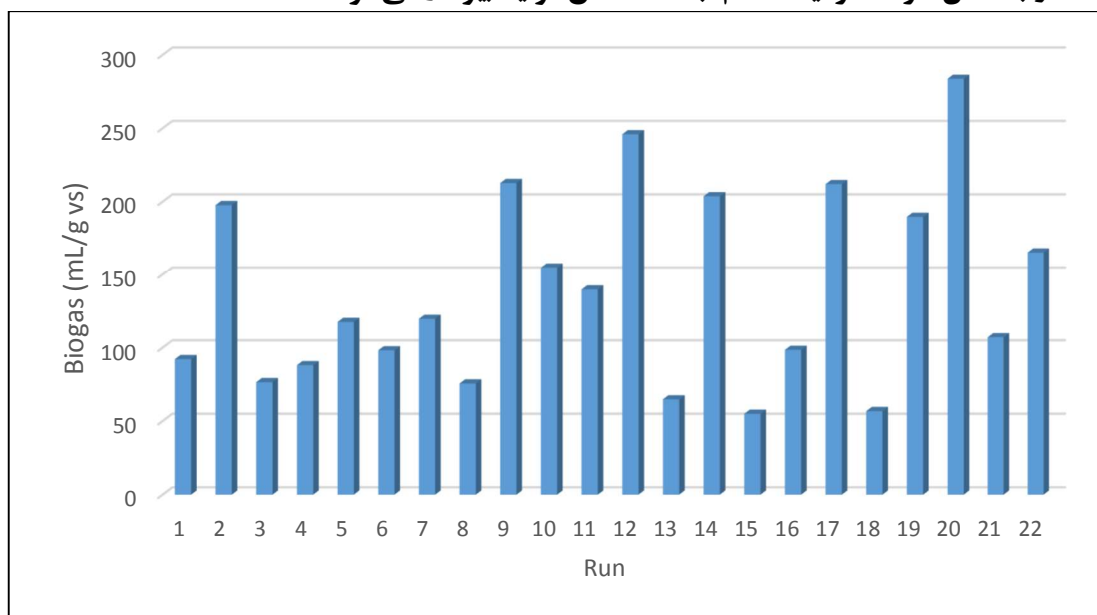
مطابق با شکل (۴)، در این پژوهش ترکیباتی که دارای فاضلاب شهری بیشتر از ۸۰٪ بوده‌اند به دلیل کم بودن میزان C/N دچار مسمومیت آمونیاکی شده و بیوگاز کمی تولید کرده‌اند. راکتورهای شماره ۱۶ و ۱۸ به ترتیب با تولید بیوگاز ۹۸ و ۵۶ mL/g vs دارای فاضلاب شهری بیشتر از ۸۰٪ بوده‌اند. استفاده مقادیری از برگ نیشکر و تفاله چای بهبود نسبت C/N ترکیب را به همراه داشت و باعث تولید بیوگاز بیشتر شد. در مطالعه‌ای که تالو و همکاران (۲۰۲۰) روی تولید بیوگاز از ترکیب فاضلاب خانگی، پسماند زیتون و کود گاوی انجام دادند، دریافتند که اضافه کردن پسماند زیتون و کود گاوی با داشتن C/N بالا باعث بالا بردن این نسبت در فاضلاب خانگی و در نتیجه بهبود تولید بیوگاز می‌شود [۲۴].

در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش همان گونه که در شکل (۴) دیده می‌شود ترکیبات دارای تفاله چای بیش از ۷۰٪ دچار افت تولید بیوگاز شده‌اند. این ترکیبات در راکتورهای شماره ۳، ۷، ۸ و ۱۳ وجود دارند که به ترتیب بیوگازی معادل ۷۶، ۱۱۹، ۷۵ و ۶۴ mL/g vs تولید کرده‌اند.

بهترین ترکیب برای تولید بیوگاز

با توجه به شکل (۴)، می‌توان دریافت که راکتورهای ۹، ۱۲، ۱۴، ۱۷ و ۲۰ گازی بیشتر از ۲۰۰ mL/g vs تولید کرده‌اند. از بین این راکتورها، راکتورهای شماره ۱۲، ۱۴ و ۲۰ دارای ترکیبی مساوی از هر سه ماده (۳۳٪) هضم بوده‌اند. این ترکیبات نشان می‌دهند که ترکیب این سه ماده به منظور بالا بردن تولید بیوگاز مناسب است و استفاده از تفاله چای

سیاه و پسماند لیگنوسلولزی گیاه نیشکر در هضم هم‌زمان با فاضلاب شهری عملکرد تولید بیوگاز را بالا می‌برد. این امر به خاطر عدم افت شدید pH، نسبت مناسب C/N و عدم وجود پلی‌فنول و تانن بیش از حد در ترکیب است. پلی‌فنول و تانن ترکیباتی ضد باکتریایی محسوب می‌شوند که در تفاله چای وجود دارند. این ترکیبات فعالیت میکروارگانیسم‌های متان‌زا را کاهش داده و با مختل کردن فرآیند هضم، باعث کاهش تولید بیوگاز می‌شوند [۱].



شکل-۴ مقادیر تجمعی بیوگاز تولید شده از هر آزمایش

مدل سازی

خلاصه برازش^۸

نرم افزار دیزاین اکسپرت مطابق با جدول (۲)، با توجه به داده‌های آزمایشی مدلی ارائه می‌دهد تا بتواند رفتار آزمایش‌ها را پیش‌بینی کند. بر این اساس مدل پیشنهادی نرم‌افزار، مدل درجه سه ویژه^۹ می‌باشد.

تجزیه و تحلیل واریانس مدل پیشنهادی

مطابق با جدول (۳)، مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار با F-value برابر با ۱۳/۳۵ معنی‌دار است. همچنین مقادیر کمتر از P-value ۰/۰۵ تایید کننده معنی‌دار بودن مدل خروجی نرم‌افزار است. جملات ستون اول جدول بیانگر ارتباط بین فاکتورهای آزمایش هستند و در صورتی که P-value آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ باشد معنی‌دار هستند. بر این اساس جملات AC، BC و ABC با P-value کمتر از ۰/۰۵ معنی‌دار هستند. جمله AB با P-value برابر با ۰/۲۶ معنی‌دار نیست و نشان می‌دهد که اثر متقابل فاکتور A و B قابل چشم‌پوشی است. از موارد مهم دیگر این جدول، عدم برازش^{۱۰} مدل است. مقدار F-value نقطه عدم برازش برابر با ۱/۱ است که بیان‌گر معنی‌دار نبودن آن است. معنی‌دار نبودن عدم برازش نشان‌دهنده مناسب بودن مدل ارائه شده می‌باشد.

جدول-۲ خلاصه برازش مدل‌های آماری

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R ²	Predicted R ²
--------	--------------------	---------------------	-------------------------	--------------------------

⁸ Fit Summary

⁹ Special Cubic

¹⁰ Lack of Fit

Linear	0.3745	0.0496	0.0033	-0.2729	
Quadratic	< 0.0001	0.3233	0.6874	0.3752	
Special Cubic	0.0145	0.5067	0.7791	0.6062	Suggested
Cubic	0.2929	0.5406	0.7952	0.0472	
Sp Quartic vs Quadratic	0.1125	0.4314	0.7533	0.5605	
Quartic vs Cubic	0.3253	0.6230	0.8254	-18.6207	
Quartic vs Sp Quartic	0.2111	0.6230	0.8254	-18.6207	

جدول ۳- تجزیه و تحلیل واریانس مدل پیشنهادی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	77062.68	6	12843.78	13.35	< 0.0001	Significant
⁽¹⁾ Linear Mixture	8987.62	2	4493.81	4.67	0.0265	
AB	1298.90	1	1298.90	1.35	0.2635	
AC	5563.78	1	5563.78	5.78	0.0296	
BC	17844.64	1	17844.64	18.54	0.0006	
ABC	7354.42	1	7354.42	7.64	0.0145	
Residual	14436.15	15	962.41			
Lack of Fit	10857.76	11	987.07	1.10	0.5067	not significant
Pure Error	3578.39	4	894.60			
Cor Total	91498.83	21				

برازش آماری^{۱۱}

یکی از جداول خروجی مهم دیگر نرم افزار دیزاین اکسپرت، جدول برازش آماری (جدول ۴) است که بیان گر مشخصات آماری داده های آزمایش و مدل ساخته شده است.

خروجی های این جدول شامل انحراف معیار استاندارد آزمایش^{۱۲}، میانگین^{۱۳} پاسخ ها، ضریب تغییرات^{۱۴}، ضریب رگرسیون^{۱۵}، ضریب رگرسیون تعدیل شده^{۱۶}، ضریب رگرسیون پیش بینی شده^{۱۷} و دقت کافی^{۱۸} نسبت سیگنال به نویز می باشد.

معادله های (۵) و (۶) به ترتیب روش محاسبه ضریب رگرسیون و ضریب رگرسیون تعدیل شده می باشد.

¹¹ Fit Statistics

¹² Standard deviation

¹³ Mean

¹⁴ Coefficient of Variation (CV)

¹⁵ R-square

¹⁶ Adj R-square

¹⁷ Pred R-square

¹⁸ Adequate Precisio

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{total}} \quad (5)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_{residual} / DF_{residual}}{SS_{total} / (DF_{model} + DF_{residual})} \quad (6)$$

در روابط بالا، $SS_{residual}$ بیانگر مجموع مربعات باقیمانده، DF معرف درجه آزادی و SS_{total} معرف مجموع مربعات کل ($SS_{residual} + SS_{model}$) است.

جدول - ۴ برازش آماری

Std. Dev.	31.02	R ²	0.8422
Mean	138.82	Adjusted R ²	0.7791
C.V. %	22.35	Predicted R ²	0.6062
		Adeq Precision	11.4005

جدول (۴) نشان دهنده دقت لازم ۱۱/۴ می باشد که این مقدار (بیشتر از ۴) نشانه مطلوبیت مدل تعیین شده توسط نرم افزار است.

نمودارهای تشخیص خطاها^{۱۹}

نمودار نرمال^{۲۰}

توزیع باقی مانده ها در مدل توسط این نمودار ارزیابی می شود. اگر نقاط روی نمودار که نشان دهنده باقی مانده ها است دارای توزیعی بر روی یک خط راست باشند نمودار نشان دهنده یک مدل مناسب است. این نمودار در شکل (۵) نشان داده شده است.

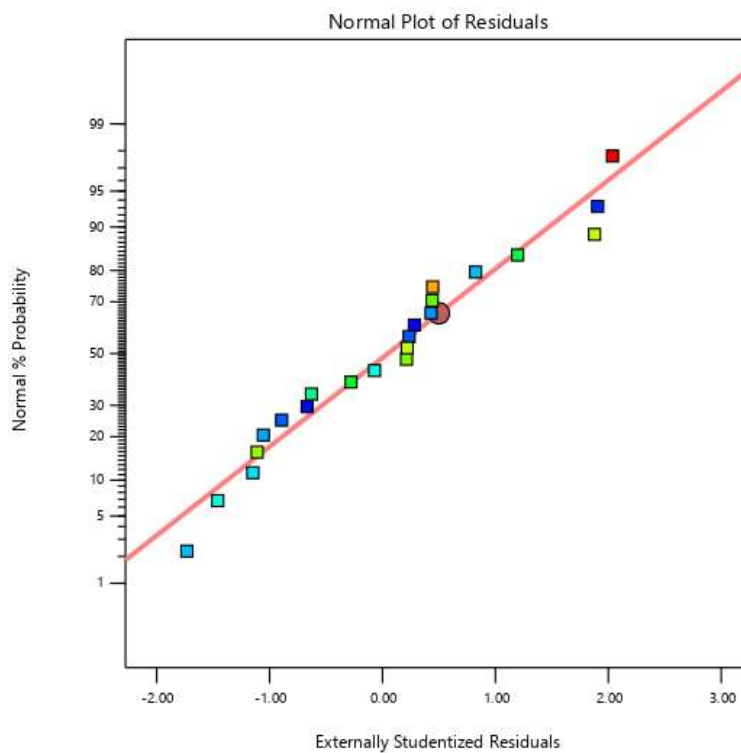
مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی^{۲۱}

مقادیر پاسخ های پیش بینی شده به وسیله مدل در مقابل مقادیر واقعی پاسخ که از آزمایش ها به دست آمده است، در این نمودار قابل مشاهده است. در نتیجه با استفاده از این نمودار می توان مقادیر پاسخی را که توسط مدل قابل پیش بینی نیستند شناسایی کرد (شکل ۶).

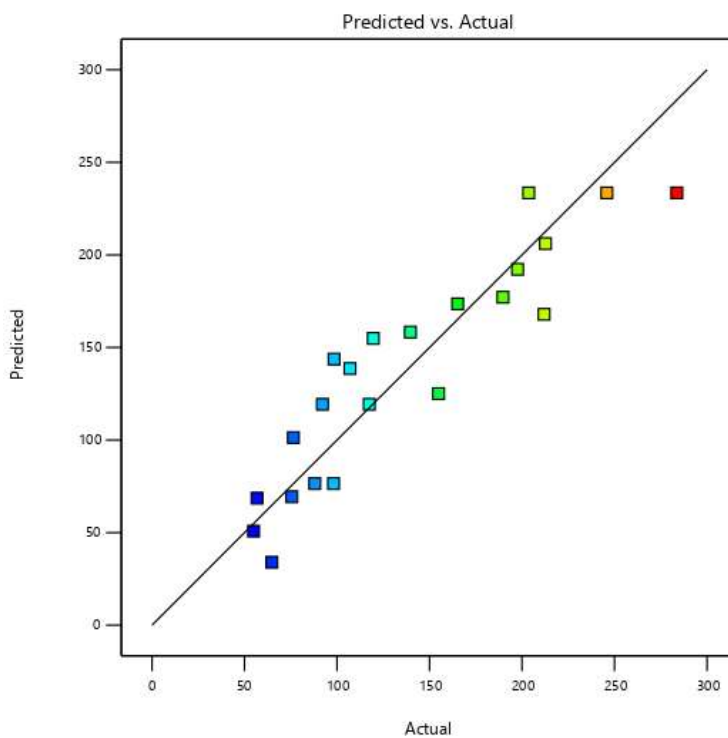
¹⁹Diagnostics Plots

²⁰ Normal plot

²¹ Predicted vs. Actual



شکل-۵ نمودار نرمال باقی مانده‌ها

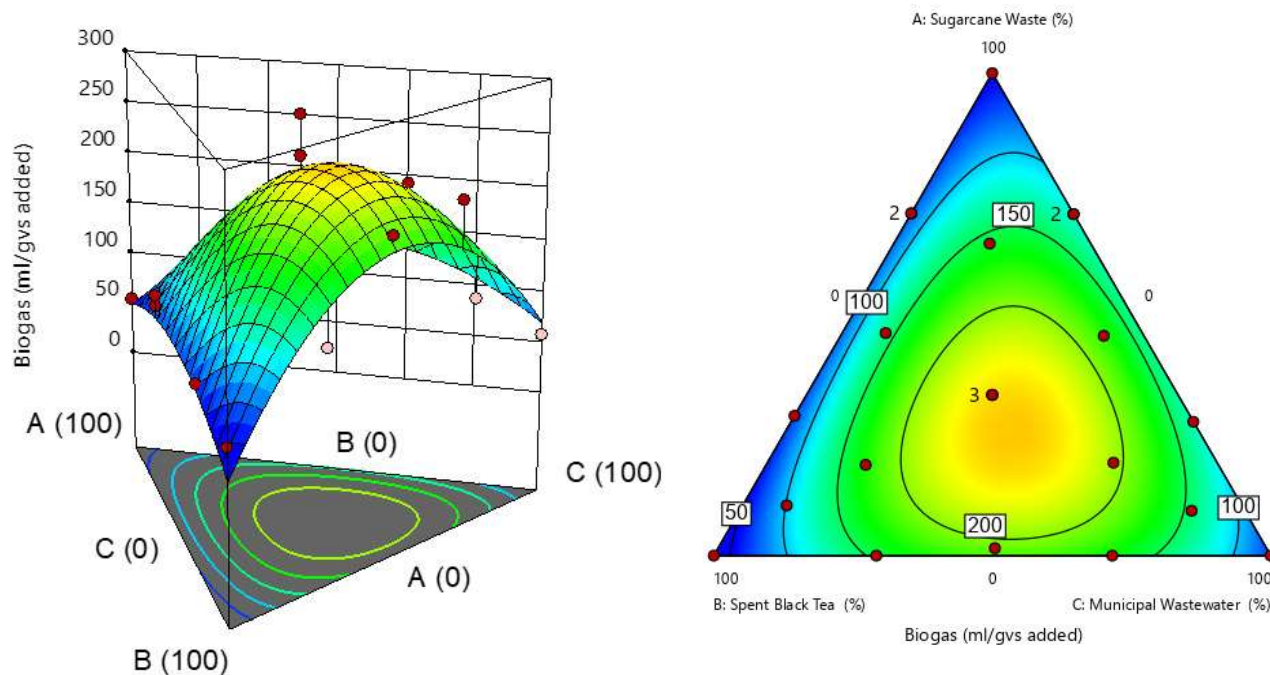


شکل-۶ نمودار مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی

نمودار کانتور^{۲۲} و سطح سه بعدی^{۲۳}

در این نمودار می توان پاسخ های به دست آمده توسط مدل را در مقابل ترکیب اجزای مختلف مخلوط مشاهده کرد. در این نمودار مثلث شکل هر کدام از رئوس نشان دهنده ۱۰۰٪ از یکی از اجزای مخلوط است و هر چقدر به سمت ضلع مقابل هر راس نزدیک شویم از میزان آن جزء کاسته می شود. همچنین طیف رنگ درون مثلث بیانگر میزان پاسخ است به این شکل که رنگ های متمایل به رنگ آبی نشان دهنده پاسخ های ضعیف تر و رنگ های متمایل به رنگ قرمز نشان دهنده پاسخ های قوی تر می باشد (شکل ۷- الف).

طبق نمودار خروجی توسط نرم افزار با حرکت بر روی نمودار به سمت رئوس مثلث، رنگ نمودار آبی می شود. بنابراین هر کدام از اجزا به تنهایی و بدون وجود اجزا دیگر منجر به ضعیف ترین پاسخ ها می شوند. از سوی دیگر هر چقدر به مرکز مثلث نزدیک شویم رنگ نمودار به زرد و قرمز نزدیک می شود و نشان می دهد نسبت مساوی از ترکیب اجزا مخلوط باعث رسیدن به بهترین پاسخ ها که بیشینه بیوگاز است می شود. نمودار سطح سه بعدی در شکل ۷- ب نمایش داده شده است.



ب

الف

شکل ۷- الف) نمودار کانتور و ب) سطح سه بعدی پاسخ ها

نتیجه گیری

به طور کلی نتایج به دست آمده از این پژوهش را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. هضم بی هوازی فاضلاب شهری که دارای تقاضای اکسیژن شیمیایی بالاست، علاوه بر تولید انرژی پاک می تواند به عنوان یک روش مناسب به منظور کاهش مضرات زیست محیطی این گونه از ضایعات به کار گرفته شود.

²² Contour Plot

²³ (3D) Surface

۲. به دلیل پایین بودن نسبت C/N در فاضلاب شهری این ماده هنگام هضم بی‌هوازی دچار تجمع نیتروژن به شکل آمونیاک و در نتیجه مختل شدن فرآیند هضم می‌شود. از این رو هضم هم‌زمان این ماده با موادی مانند ضایعات نیشکر و تفاله چای که دارای نسبت C/N بالایی هستند به بهبود تولید بیوگاز از طریق هضم بی‌هوازی کمک می‌کند.
۳. استفاده بیش از حد ضایعات نیشکر در ترکیب سوسترا باعث تولید شدید اسیدهای چرب فرار می‌شود و در نتیجه با اسیدی شدن محیط، تولید بیوگاز کاهش می‌یابد. در آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش، راکتورهای که دارای بیش از ۷۰٪ ضایعات نیشکر بودند این پدیده را نشان دادند.
۴. تفاله چای به‌عنوان یک سوسترا به‌منظور هضم مشترک با فاضلاب شهری مناسب است اما حضور این ماده با نسبت بیشتر از ۷۰٪ در ترکیب مخلوط سوسترا به دلیل خواص ضد باکتریایی پلی‌فنول و تانن موجود در آن باعث از بین رفتن میکروارگانیسم‌های مفید هضم بی‌هوازی شده و عملکرد تولید بیوگاز را کاهش می‌دهد.
۵. با توجه به مدل‌سازی انجام‌شده در غالب طرح مخلوط، بهترین ترکیب سوسترا حاوی ۲۵٪ پسماند لیگنوسلولزی گیاه نیشکر، ۳۴٪ چای سیاه و ۴۱٪ فاضلاب شهری است که بیشترین بیوگاز ممکن را تولید خواهد کرد. این مقدار برابر با ۲۳۹ mL/g vs بیوگاز می‌باشد.

References

1. Aksay, M. V., Ozkaymak, M., and Calhan, R. 2018. Co-digestion of cattle manure and tea waste for biogas production. *Int. J. Energ. Res*, 8: 1246-1353.
2. APHA, AWWA, and WPCF. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington DC: American Public Health Association.
3. Athanasoulia, E., Melidis, P., and Aivasidis, A. 2014. Co-digestion of sewage sludge and crude glycerol from biodiesel production. *Renewable Energy*, 62: 73-78.
4. Budyh-Gorzna, M., Smoczynski, M., and Oleskowicz-Popiel, P. 2016. Enhancement of biogas production at the municipal wastewater treatment plant by co-digestion with poultry industry waste. *Applied Energy*, 161: 387-394.
5. Caporgno, M. P., Trobajo, R., Caiola, N., Ibáñez, C., Fabregat, A., and Bengoa, C. 2015. Biogas production from sewage sludge and microalgae co-digestion under mesophilic and thermophilic conditions. *Renewable Energy*, 75: 374-380.
6. Goel, B., Pant, D. C., and Kishore, V. V. N. 2001. Two-phase anaerobic digestion of spent tea leaves for biogas and manure generation. *Bioresource Technology*, 80(2): 153-156.
7. Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., and Lu, X. 2017. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76: 1485-1496.
8. Jiménez, J., Guardia-Puebla, Y., Romero-Romero, O., Cisneros-Ortiz, M. E., Guerra, G., Morgan-Sagastume, J. M., and Noyola, A. 2014. Methanogenic activity optimization using the response surface methodology, during the anaerobic co-digestion of agriculture and industrial wastes. *Microbial community diversity. Biomass and Bioenergy*, 71: 84-97.
9. Khajeh, M., and Barkhordar, A. 2013. Modelling of solid-phase tea waste extraction for the removal of manganese from food samples by using artificial neural network approach. *Food Chemistry*, 141(2): 712-717.
10. Khayum, N., Anbarasu, S., and Murugan, S. 2018. Biogas potential from spent tea waste: A laboratory scale investigation of co-digestion with cow manure. *Energy*, 165: 760-768.
11. Li, Y., Li, L., Sun, Y., and Yuan, Z. 2018. Bioaugmentation strategy for enhancing anaerobic digestion of high C/N ratio feedstock with methanogenic enrichment culture. *Bioresource Technology*, 261: 188-195.
12. Munda, U., Pholane, L., Kar, D., and Meikap, B. 2012. Production of bioenergy from composite waste materials made of corn waste, spent tea waste, and kitchen waste co-mixed with cow dung. *International journal of green energy*, 9(4): 361-375.
13. Nghiem, L. D., Nguyen, T. T., Manassa, P., Fitzgerald, S. K., Dawson, M., and Vierboom, S. 2014. Co-digestion of sewage sludge and crude glycerol for on-demand biogas production. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 95: 160-166.

**13th National Congress on Biosystems Engineering and Agricultural Mechanization
Tehran, 15-17 September 2021**

14. Olsson, J., Feng, X. M., Ascue, J., Gentili, F. G., Shabimam, M. A., Nehrenheim, E., and Thorin, E. 2014. Co-digestion of cultivated microalgae and sewage sludge from municipal waste water treatment. *Bioresource Technology*, 171: 203-210.
15. Pallan, A., Raja, S., Varma, C., Mathew, D., Anil, K., and Kannan, A. 2018. Biogas production from community waste to optimise the substrate for anaerobic digestion. *International Review of Mechanical Engineering*, 12(7): 580-589.
16. Pavi, S., Kramer, L. E., Gomes, L. P., and Miranda, L. A. S. 2017. Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. *Bioresource Technology*, 228: 362-367.
17. Rasouli, M., Ajabshirchi, Y., Mousavi, S. M., Nosrati, M., and Yaghmaei, S. 2015. Process Optimization and Modeling of Anaerobic Digestion of Cow Manure for Enhanced Biogas Yield in a Mixed Plug-flow Reactor using Response Surface Methodology. *Biosciences, Biotechnology Research Asia*, 12: 2333-2344.
18. Ratanatamskul, C., Onnum, G., and Yamamoto, K. 2014. A prototype single-stage anaerobic digester for co-digestion of food waste and sewage sludge from high-rise building for on-site biogas production. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 95: 176-180.
19. Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-Demirtas, M., Mintz, M. M., and Snyder, S. W. 2015. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50: 346-362.
20. Sun, C., Xie, Y., Hou, F., Yu, Q., Wang, Y., Wang, X., . . . Zhang, T. 2020. Enhancement on methane production and anaerobic digestion stability via co-digestion of microwave-Ca (OH) 2 pretreated sugarcane rind slurry and kitchen waste. *Journal of Cleaner Production*, 264: 121731.
21. Thanarasu, A., Periyasamy, K., Devaraj, K., Periyaraman, P., Palaniyandi, S., and Subramanian, S. 2018. Tea powder waste as a potential co-substrate for enhancing the methane production in Anaerobic Digestion of carbon-rich organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 199: 651-658.
22. Tippayawong, N., and Thanompongchart, P. 2010. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. *Energy*, 35(12): 4531-4535.
23. Tojo, S., and Hirasawa, T. 2013. *Research approaches to sustainable biomass systems*: Academic Press.
24. Zahan, Z., Othman, M. Z., and Muster, T. H. 2018. Anaerobic digestion/co-digestion kinetic potentials of different agro-industrial wastes: A comparative batch study for C/N optimisation. *Waste Management*, 71: 663-674.
25. Zheng, Z., Cai, Y., Zhang, Y., Zhao, Y., Gao, Y., Cui, Z., . . . Wang, X. 2021. The effects of C/N (10–25) on the relationship of substrates, metabolites, and microorganisms in “inhibited steady-state” of anaerobic digestion. *Water Research*, 188: 116466.

The effect of lignocellulosic waste of sugarcane plant and spent black tea on biological treatment of municipal wastewater in batch anaerobic digestion reactor system

Majid Rasouli^{1*}, Hosein Babaei¹, Behnam Ataeiyan¹

1. Department of Biosystem Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Abstract

Anaerobic digestion is a complex and very sensitive process that includes several types of microorganisms with specific environmental conditions. The type and structure of the substrates also affect the performance of biogas production. In this research, the biological purification of municipal wastewater was investigated as an organic waste with a low C/N ratio in the presence of carbon-rich lignocellulose subestra with a high C/N ratio. Optimization of the composition of the substrates to achieve the highest yield of biogas production with the maintenance of reactor stability. A Biochemical methane potential (BMP) test was used to perform experiments. The response surface methodology (RSM) and mixture design were used to modeling and determine the optimal composition. The results showed that anaerobic co-digestion of municipal wastewater with substrates such as sugarcane plant and spent black tea with high C/N ratios help improve biogas production. Excessive use of sugar waste in the substrate composition causes a severe production of fatty acids, and as a result, biogas production decreases with acidification. In experiments conducted in this study, reactors with more than 70% cane waste showed this phenomenon. Spent black tea as a co-substrate is suitable for co-digestion with municipal wastewater. But the presence of this substance with a high percentage in combination due to the antibacterial properties of polyphenol and tannins in it leads to the loss of useful microorganisms of anaerobic digestion and reduces biogas production yield. The best substrate composition contains 25% of the lignocellulose waste of sugar cane, 34% spent black tea, and 41% municipal wastewater, which produced the most possible biogas. This value is equal to 239 ml / g vs of biogas.

Keywords: Anaerobic co-digestion, municipal wastewater, Carbon to hydrogen ratio, Reactor stability, Modeling

*Corresponding author
E-mail: m.rasouli@basu.ac.ir