

# بررسی تأثیر نسبت ماده‌ی تلقیح به خوراک ورودی در عملکرد فرایند هضم بی‌هوازی خشک

فاضل ضیائی (کارشناس ارشد)

نادر مختارانی\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۴، ص. ۱۳-۱۹، پژوهشی)

هضم بی‌هوازی خشک، یک فرایند مناسب به منظور بازیابی انرژی از زائدات است که اخیراً به دلیل راندمان بالا و راهبری ساده در مقایسه با هضم بی‌هوازی تر به آن توجه شده است. یکی از پارامترهای مؤثر در فرایند مذکور، نسبت ماده‌ی تلقیح به خوراک ورودی (I/S) است. در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر I/S در عملکرد فرایند هضم بی‌هوازی خشک بخش آلی زائدات شهری در شرایط دمایی مزوفیلیک پرداخته شده است. بدین منظور آزمایش‌ها در نسبت‌های مختلف I/S و در راکتورهای ناپیوسته با حجم مفید ۲ لیتر انجام شده است. برای کنترل عملکرد فرایند، پارامترهای pH، پتانسیل اکسیداسیون و احیاء، COD، غلظت اسیدهای چرب فرار و همچنین مقدار و ترکیب بیوگاز تولیدی ارزیابی شده‌اند. براساس نتایج حاصل در نسبت‌های I/S کوچک‌تر از ۱، به دلیل تجمع اسیدهای چرب فرار، عملکرد سیستم مختل و حجم گاز متان تولیدی در حدود ۵٪ حالت بهینه بوده است. در پژوهش حاضر، بهترین عملکرد هاضم در نسبت I/S برابر ۲ با تولید  $0.35 \text{ lit CH}_4/\text{g VS}$  و حذف ۷۷٪ از جامدات فرار به دست آمده است.

واژگان کلیدی: مدیریت پسماند شهری، هضم بی‌هوازی خشک، بیوگاز، ماده‌ی تلقیح.

fazel.ziaee@modares.ac.ir  
mokhtarani@modares.ac.ir

## ۱. مقدمه

انسان همواره به دنبال زندگی بهتر و استانداردهای بالاتر برای زندگی خود بوده است که این امر باعث مصرف بیشتر منابع و به تبع آن، تولید زائدات بیشتر شده است. با توجه به مشکلات ناشی از تولید پسماندها، امروزه جوامع به دنبال روش‌هایی برای مدیریت صحیح و کاهش دفن زائدات هستند.<sup>[۱]</sup> افزایش جمعیت و ارتقاء سطح زندگی در طول چند دهه‌ی گذشته، افزایش مقدار تولید زائدات را به همراه داشته است. بر این اساس تخمین زده می‌شود که سالانه ۲ الی ۳ درصد تولید زباله در جهان افزایش یابد.<sup>[۲]</sup> بخش عمده‌ی زائدات شهری را مواد آلی قابل تجزیه‌ی بیولوژیکی تشکیل می‌دهند که دارای پتانسیل دفع به روش‌های بیولوژیکی، مانند تولید کود کمپوست و هضم بی‌هوازی هستند.<sup>[۳]</sup> با توجه به بالا رفتن قیمت جهانی انرژی طی سال‌های اخیر و با توجه به امکان تولید بیوگاز از طریق هضم بی‌هوازی زائدات قابل تجزیه‌ی بیولوژیکی، امروزه به فرایند اخیر بیش از پیش توجه شده است. فرایند هضم بی‌هوازی به طور کلی شامل ۴ مرحله‌ی: هیدرولیز، اسیدسازی، استات‌سازی و متان‌سازی است. در مرحله‌ی هیدرولیز، پلیمرهای پیچیده‌ی، مانند:

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۵/۲۲، اصلاحیه ۱۴۰۰/۲/۴، پذیرش ۱۴۰۰/۲/۲۵

DOI:10.24200/J30.2021.56446.2829

پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و چربی‌ها توسط آنزیم‌های برون‌سلولی به ترکیب‌های ساده‌تر و فرآورده‌های محلول تجزیه می‌شوند. در مرحله‌ی اسیدسازی، مونومرهای ناشی از فرایند هیدرولیز توسط گونه‌های مختلفی از باکتری‌های بی‌هوازی تجزیه و به محصولات، مانند: دی‌اکسیدکربن، گاز اکسیژن، الکل، اسیدهای آلی، ترکیب‌های آلی دارای نیتروژن و سولفات تبدیل می‌شوند.<sup>[۴]</sup> سپس در مرحله‌ی استات‌سازی، ترکیب‌های آلی به استات، گاز هیدروژن و دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شوند.<sup>[۵]</sup> در نهایت، نیز با فعالیت میکروارگانیسم‌های متان‌ساز، حجم قابل توجهی گاز متان تولید می‌شود. واکنش‌های مختلف احتمالی در طی تجزیه‌ی غیرهوازی یک ترکیب آلی پیچیده در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است انجام فرایند هضم بی‌هوازی به برقراری تعادل میان متابولیسم جمعیت‌های میکروبی حاضر در محیط وابسته است. به عنوان مثال، متان‌سازها به استات‌سازها که سوبسترای موردنیازشان را فراهم می‌آورند و استات‌سازها به متان‌سازها، که آن‌ها را مصرف و از محیط خارج می‌کنند، نیاز دارند.<sup>[۶]</sup>

پارامترهای مختلفی، از قبیل: دما، pH، قلیانیت، اندازه‌ی ذرات، نسبت کربن به نیتروژن، زمان ماند هیدرولیکی و نرخ بار آلی در فرایند هضم بی‌هوازی تأثیرگذارند. همچنین در فرایند هضم بی‌هوازی عوامل مختلفی می‌توانند در سیستم، ایجاد

سمیت و محدودیت کنند. حضور مواد سمی و بازدارنده در محیط واکنش، باعث اختلال در تولید بیوگاز، خروج مواد آلی تجزیه نشده یا حتی خرابی هاضم می شود.<sup>[۷]</sup> منشأ مواد سمی مذکور می تواند از خوراک ورودی هاضم (زباله های جامد آلی) و یا محصولات ثانویه ناشی از فعالیت متابولیکی باکتری های در هاضم باشد. موادی از قبیل: آمونیاک، سولفیدها، یون های فلزی و برخی مواد آلی، پتانسیل ایجاد سمیت و بازدارندگی در هضم بی هوازی را دارند.<sup>[۴]</sup>

اسیدهای چرب فرار و آمونیاک از مهم ترین محصولات میانی هضم بی هوازی هستند که قابلیت بازدارندگی فرایند را دارند. متان سازها حساسیت زیادی به افزایش غلظت اسید در راکتور دارند، به گونه ای که در شرایط اسیدی، رشد و نمو آنها متوقف می شود.<sup>[۸]</sup> لازم به ذکر است اگر غلظت آمونیاک و یا پروتئین در خوراک ورودی بالا باشد، به دلیل داشتن خاصیت بافری تا حدودی از افت pH ناشی از تجمع اسیدهای چرب فرار جلوگیری خواهد کرد.<sup>[۹]</sup> اما از طرفی اگر غلظت نیتروژن آمونیاکی کل (TAN) در محدوده ۱۲۰۰ تا ۶۰۰۰ میلی گرم در لیتر باشد، منجر به اختلال در انجام فرایند خواهد شد.<sup>[۱۰]</sup>

در فرایند هضم بی هوازی، منشأ میکروارگانیسم های بی هوازی (ماده ی تلقیح)، نقش مهمی در انجام فرایند، تولید گاز متان، زمان راه اندازی و پایداری سیستم بی هوازی دارند.<sup>[۱۱]</sup> در سامانه های هضم بی هوازی، معمولاً از لجن خروجی هاضم به عنوان ماده ی تلقیح برای هاضم بعدی استفاده می شود.<sup>[۱۲]</sup> در راه اندازی راکتور ناپیوسته، برای دستیابی به نرخ بالای تولید متان، استفاده از مقدار مناسب ماده ی تلقیح و مخلوط کردن آن با خوراک ورودی حائز اهمیت است.<sup>[۱۱]</sup> به هر حال، اگر مقدار ماده ی تلقیح از حد بهینه کمتر یا بیشتر باشد، میزان گاز متان تولیدی کاهش می یابد یا به طور کلی متوقف می شود.<sup>[۱۳]</sup> به همین دلیل یافتن نسبت بهینه ی ماده ی تلقیح به خوراک ورودی (I/S) در هاضم های بی هوازی اهمیت دارد.

فرایند هضم بی هوازی به صورت خشک (رطوبت کمتر از ۷۵٪) و یا تر (رطوبت بیش از ۹۰٪) انجام شدنی است. با توجه به امکان بارگذاری بیشتر مواد آلی در فرایند هضم بی هوازی خشک، امروزه به فرایند هضم بی هوازی خشک بیشتر توجه شده است. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص تعیین I/S بهینه در فرایند هضم بی هوازی خشک انجام شده است. ژو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، هضم بی هوازی تقاله ی سویا با I/S را در بازه ۰/۳ تا ۳ مطالعه کرده و بهترین راندمان سیستم را در I/S در محدوده ۱/۷ - ۱/۱ گزارش کرده اند.<sup>[۱۴]</sup> منگ<sup>۲</sup> و همکارانش (۲۰۱۸)، نیز در فرایند هضم هم زمان کود حیوانی و زائدات کشاورزی با بررسی نسبت های I/S (۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۲) بیشترین راندمان حذف جامدات فرار (VS) را در I/S برابر ۲ به دست آورده اند.<sup>[۱۵]</sup> فرناندز<sup>۳</sup> و همکارانش (۲۰۰۸)، توقف فرایند در نسبت های پایین I/S در طی هضم بی هوازی زائدات را گزارش کرده اند.<sup>[۱۶]</sup> همچنین براساس مطالعات دی ماریا<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، با تغییر نسبت I/S از ۱:۱ تا ۳:۱، مقدار انرژی تولیدی به ازاء هر تن زباله از ۱۰۰ کیلووات ساعت به ۳۸۰ کیلووات ساعت افزایش یافته است.<sup>[۱۷]</sup> با توجه به مطالب ذکر شده و با در نظر گرفتن اینکه در کشورهای در حال توسعه، مواد قابل تجزیه ی بیولوژیکی ۴۰ تا ۸۲ درصد زباله های شهری را تشکیل می دهند،<sup>[۱۸]</sup> در پژوهش حاضر تأثیر تغییر نسبت ماده ی تلقیح به خوراک ورودی در تولید بیوگاز از زائدات شهری به روش هضم بی هوازی خشک مطالعه شده است. در پژوهش حاضر، تأثیر تغییرات I/S بر pH، ORP، COD، VFAs و همچنین مقدار و ترکیب های بیوگاز تولیدی در طی فرایند، بررسی و شرایط بهینه جهت تولید بیشینه ی گاز متان تعیین شده است.

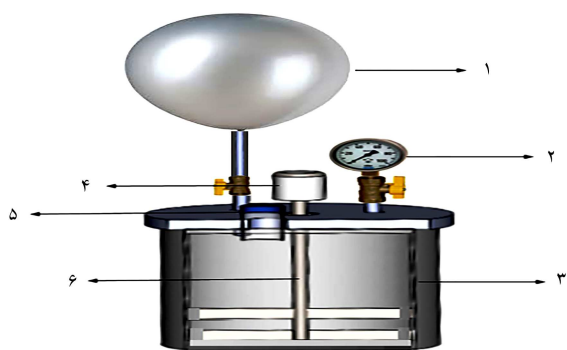
## ۲. مواد و روش ها

### ۱.۲. روش انجام کار

پژوهش حاضر در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از یک سامانه ی ناپیوسته (Batch) که شماتیک آن در شکل ۱ مشاهده می شود، انجام شده است. بدین منظور از راکتورهای استوانه ای از جنس پلاستیک با حجم مفید ۲ لیتر استفاده شده است. همچنین از یک همزن از جنس فولاد ضدزنگ به منظور اختلاط محتویات راکتور استفاده شده است. از آنجا که راکتور بی هوازی باید در برابر هوا نفوذناپذیر باشد، میله ی همزن به یک عدد بلبرینگ ایزوله متصل و تمهیدات لازم جهت اطمینان از عدم نفوذ هوا به داخل راکتور اتخاذ شده است. در بالای هر راکتور، دو عدد شیر توپی، یکی برای خروج و جمع آوری بیوگاز تولیدی و دیگری برای نصب فشارسنج به منظور کنترل فشار درون راکتور تعبیه شده است.

همچنین بر روی هر راکتور، دریچه یی برای نمونه برداری و کنترل pH و ORP در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی کمی و کیفی گازهای تولیدی، گازهای خروجی درون توپ های پلاستیکی با حجم مشخص جمع آوری و به وسیله ی دستگاه آنالیز بیوگاز آنالیز شده اند. در پژوهش حاضر، حجم کلیه ی گازهای تولیدی با استفاده از قانون گازهای ایده آل در شرایط استاندارد محاسبه و گزارش شده است. برای تأمین دما و کمینه سازی تغییرات آن نیز یک حمام آب گرم مجهز به سیرکولاتور و ترموستات استفاده شده است.

نسبت ماده ی تلقیح به مواد آلی بیانگر نسبت بین جمعیت میکروبی و سوبسترای موجود در سیستم است. به منظور بررسی تأثیر تغییرات نسبت ماده ی تلقیح به خوراک ورودی (I/S) در عملکرد فرایند هضم بی هوازی، آزمایش ها در نسبت های مختلف جامدات فرار (VS) خوراک ورودی و ماده ی تلقیح (لجن) مبتنی محاسبه قرار گرفته است. لذا برای ساختن I/S های مختلف، با اندازه گیری جامدات فرار خوراک ورودی و لجن، مقادیر مورد نیاز از هر یک تعیین شده است. در کلیه ی آزمایش ها مقادیر سه پارامتر: جامدات کل (TS)، نسبت کربن به ازت (C/N) و دما نیز به ترتیب به میزان ۲۰٪، ۳۰ و ۳۷ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته شده است. پس از آماده سازی نمونه ها و انتقال آن ها به داخل راکتور، به منظور تخلیه ی اکسیژن و ایجاد شرایط بی هوازی، به مدت یک دقیقه، گاز نیتروژن از درون راکتورها عبور داده شد. در طی هر آزمایش در بازه های زمانی مختلف از محتوای راکتورها و همچنین گاز تولیدی، نمونه گیری به عمل آمد و نمونه ها آنالیز شدند. در پژوهش حاضر، از آهک و



۱: محفظه جمع آوری بیوگاز ۲: فشار سنج ۳: راکتور اصلی  
۴: دسته همزن ۵: محل نمونه برداری و کنترل pH ۶: ORP: همزن  
شکل ۱. شماتیک راکتور استفاده شده.

اسیدهای چرب فژار (C ۵۵۶°، استاندارد متد)، ۵ میلی‌لیتر از محتویات هاضم با استفاده از آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد و به مدت ۵ دقیقه روی همزن مغناطیسی قرار گرفت. سپس نمونه از کاغذ صافی عبور و نمونه‌ی صاف شده به مدت ۱۰ دقیقه در سانتریفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت و از قسمت زلال برای اندازه‌گیری پارامترهای مذکور استفاده شد. برای اندازه‌گیری pH از دستگاه متر (Metrohm-۶۹۱) با پراب شیشه‌یی، به منظور کنترل پتانسیل اکسایش - کاهش از ORP متر پرتابل (Hach-HQ۳۰d)، و برای آنالیز گاز خروجی از دستگاه آنالایزر بیوگاز (SAZG SA-M۲۳۰-ZQ) استفاده شده است.

### ۳.۲. تأثیر I/S در تغییرات pH

در شکل ۲، تغییرات pH سیستم در طی زمان در نسبت‌های مختلف I/S مشاهده می‌شود که مطابق آن در ابتدای فرایند، pH محیط برای تمامی آزمایش‌ها یکسان و در محدوده ۷/۵ - ۷/۳ بوده است. با شروع فرایند در دو آزمایش با نسبت ماده‌ی تلقیح به خوراک برابر ۱ و ۲ در ابتدا، pH محیط مقداری کاهش یافت، اما با پیشرفت واکنش دوباره افزایش یافت و به مقدار اولیه رسید. این در حالی است که در دو آزمایش دیگر (نسبت ماده‌ی تلقیح به خوراک برابر ۰/۲۵ و ۰/۵) به دلیل پایین بودن نسبت جمعیت میکروبی به بار آلی و عدم فعالیت متان‌سازها در محیط و در نتیجه، تجمع اسیدهای چرب فژار در سیستم، pH به حدود ۵ کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در نسبت‌های ماده‌ی تلقیح به خوراک برابر ۰/۲۵ و ۰/۵ دو شکستگی در زمان‌های ۴۰ و ۱۳۰ ساعت وجود داشته است که به دلیل افزودن مواد شیمیایی به منظور افزایش pH بوده است. در طی دو آزمایش اخیر، پس از گذشت ۴۰ ساعت از انجام فرایند به دلیل افزایش بیش از حد اسیدیته با افزودن مواد شیمیایی، pH محلول تا حدود ۷ افزایش یافته است. در ادامه، مجدداً افت pH ادامه داشت، به گونه‌یی که پس از گذشت ۱۳۰ ساعت از شروع فرایند، برای بار دوم pH سیستم با افزودن مواد شیمیایی به حدود ۸ افزایش داده شد. در این مرحله نیز پس از گذشت چند روز، دوباره pH افت کرد و به حدود ۶ کاهش یافت که دلیل آن را می‌توان به بالا بودن بار آلی هاضم نسبت به ماده‌ی تلقیح در دو هاضم ذکر شده ارتباط داد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حتی با افزایش pH به محدوده‌ی مناسب متان‌سازی، باز هم میزان فعالیت اسیدسازها غالب بوده و سیستم به سمت اسیدی شدن پیش رفته است. لازم به ذکر است سرعت رشد میکروارگانیسم‌های اسیدساز در مقایسه با متان‌سازها بیشتر است (۳۰

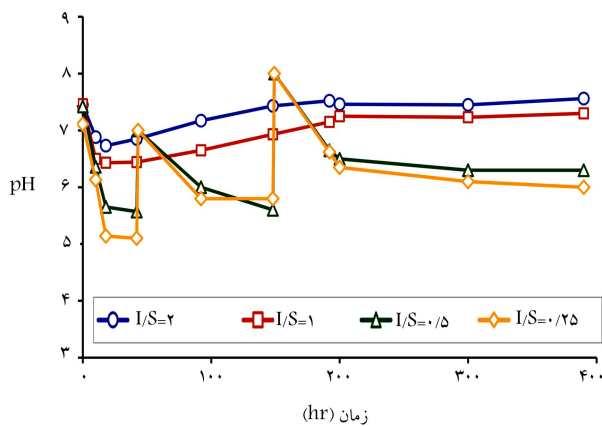
هیدروکسیدسدیم برای تعدیل pH در طی آزمایش‌ها استفاده شده است. همچنین همه‌ی آزمایش‌ها تا زمانی که تولید بیوگاز به کمتر از ۱۰٪ بیوگاز تولیدی در روز اول برسد، ادامه یافته است.

### ۲.۲. مواد استفاده شده

خوراک ورودی استفاده شده در پژوهش حاضر، از بخش آلی پسماندهای شهر تهران تأمین شده است. زائدات پس از انتقال به آزمایشگاه و خشک شدن در هوای آزاد، با استفاده از دستگاه خردکن برای رسیدن به اندازه‌ی موردنظر خرد شدند. در ادامه، با استفاده از الک شماره‌ی ۸، زیاله‌های با اندازه‌ی ذرات کمتر از ۲/۵ میلی‌متر، جداسازی و در ظرفی دربسته و به دور از رطوبت نگهداری شدند. خشک کردن زیاله‌ها به این دلیل انجام شده است که مشخصات آن در طی انجام آزمایش‌ها تغییر نکند و خوراک ورودی برای تمامی آزمایش‌ها، ویژگی یکسانی داشته باشد. ماده‌ی تلقیح، یکی از پارامترهای عملکردی بسیار مهم در هضم بی‌هوازی و منشأ میکروارگانیسم‌های ضروری برای پیشرفت فرایند هضم است. همچنین لجن سازگار شده در شرایط بی‌هوازی، نقش اساسی در راه‌اندازی اولیه راکتور دارد. در پژوهش حاضر، ماده‌ی تلقیح اولیه از طریق لجن هاضم بی‌هوازی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب جنوب شهر تهران تأمین شده است. مشخصات لجن استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است لجن استفاده شده، قبل از شروع آزمایش‌ها با شرایط موردنیاز سازگار شد. در این راستا، در ابتدا حدود ۱۰ لیتر از لجن به داخل یک راکتور مجزا (با حجم ۱۵ لیتر) منتقل و خوراک دهی به آن با استفاده از زیاله (به میزان ۵ گرم جامدات فرار در هر لیتر) شروع شد. این مقدار در بازه‌های زمانی ۷۲ ساعته تا زمانی که مقدار COD محلول و جامدات کل لجن به محدوده‌ی موردنیاز برسد، در هر مرتبه‌ی خوراک دهی حدود ۱۰٪ افزایش یافته است.

### ۳.۲. روش‌های آنالیز

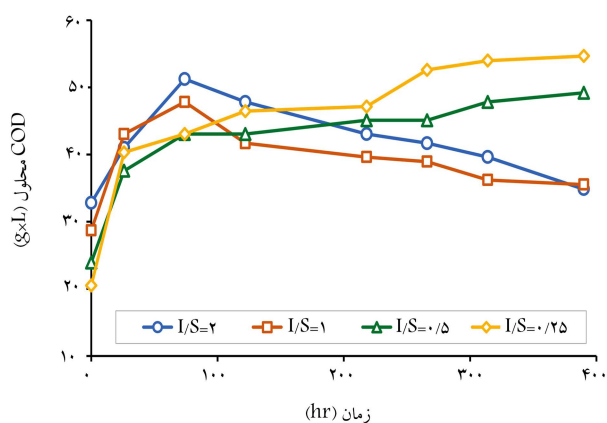
به منظور اندازه‌گیری میزان جامدات کل، ۱۰ گرم از نمونه تا زمانی که وزن آن ثابت شود، در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سلسیوس قرار گرفت. برای محاسبه‌ی مقدار جامدات فژار نیز نمونه به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای ۵۵۰ درجه‌ی سلسیوس حرارت داده شد (APHA، ۲۰۰۵).<sup>[۱۹]</sup> همچنین به منظور اندازه‌گیری COD محلول (D۲۲۰، استاندارد متد)، غلظت آمونیاک (Nessler Method، Hach Company) و



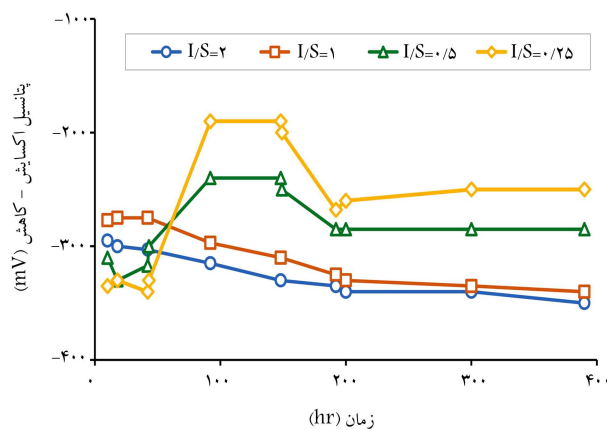
شکل ۲. تأثیر I/S در تغییرات pH.

جدول ۱. مشخصات لجن استفاده شده.

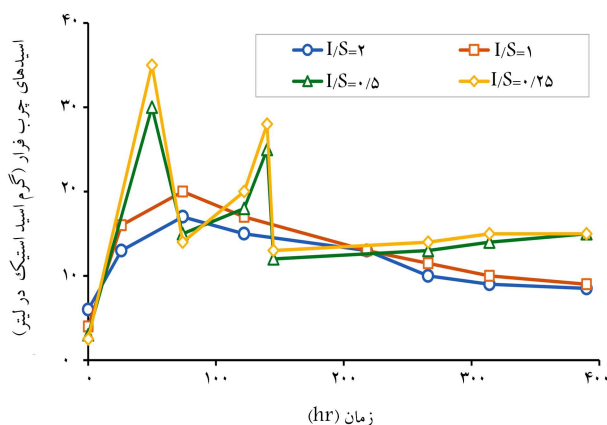
پارامتر	واحد	مقدار
رطوبت (W)	%	۹۷/۷
جامدات کل (TS)	%	۲/۳
جامدات فژار (VS)	%	۶۵
جامدات غیر فژار (FS)	%	۳۵
کربن آلی (OC)	%	۳۳/۸
چگالی	g/cm <sup>۳</sup>	۱/۰۱
pH	-	۷/۴۵
نیترژن آمونیاکی	mg/lit	۹۱۵
COD	mg/lit	۱۸۴۰



شکل ۴. تأثیر I/S در تغییرات COD محلول.



شکل ۳. تأثیر I/S در تغییرات ORP.



شکل ۵. تأثیر I/S در تغییرات اسیدهای چرب فرار.

در سیستم‌های با نسبت ماده تلقیح به خوراک ورودی ۰/۲۵ و ۰/۵۰ از حدود  $20000\text{ mg/L}$  در ابتدای فرایند به حدود  $55000\text{ mg/L}$  در پایان فرایند رسیده است که دلیل اصلی آن تولید و تجمع اسیدهای چرب فرار و به تبع آن بالا رفتن غلظت مواد آلی محلول در سیستم است، که موجب افزایش COD شده است. [۱۶] این در حالی است که در آزمایش‌های با I/S برابر ۱ و ۲ مقدار COD از حدود  $30000\text{ mg/L}$  در ابتدای فرایند به حدود  $50000\text{ mg/L}$  پس از ۱۰۰ ساعت افزایش یافته است، اما در ادامه با پیشرفت فرایند و مصرف مواد آلی و محصولات میانی موجود در سیستم (تولید بیوگاز)، مقدار نهایی COD در این دو سیستم به حدود  $35000\text{ mg/L}$  کاهش یافته است.

#### ۶.۲. اثر I/S در تغییرات VFAs

در شکل ۵، تغییرات غلظت اسیدهای چرب فرار در طی فرایند در ۴ آزمایش با نسبت‌های مختلف I/S مشاهده می‌شود که مطابق آن در کلیه آزمایش‌ها با شروع فرایند هضم، غلظت اسیدهای چرب فرار افزایش یافته است. در این فرایند، در مرحله‌ی اسیدسازی مونومرهای حاصل از هیدرولیز پلیمرهای پیچیده توسط باکتری‌های بی‌هوازی (اسیدساز) تخمیر شده و به دی‌اکسیدکربن، الکل، اسیدهای آلی و ... تجزیه می‌شوند. اسیدهای آلی تولید شده در این مرحله عامل اصلی در افزایش غلظت VFA در محیط هستند. [۴]

مطابق شکل ۵، در I/S‌های برابر ۰/۲۵ و ۰/۵۰ با شروع فرایند هضم، غلظت اسیدهای چرب فرار به مقدار زیادی افزایش یافته و در یک بازه‌ی زمانی حدود

تا ۴۰ برابر) و این گروه از میکروارگانیسم‌ها حتی می‌توانند در شرایط محیطی خاص از قبیل pH کم، دمای زیاد و بار آلی بالا نیز به فعالیت خود ادامه دهند. [۲۰] در پژوهشی مشابه، لی<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۸) در طی فرایند هضم بی‌هوازی زائدات غذایی در نسبت‌های ماده تلقیح به خوراک ورودی پایین، افت pH و همکاران کاهش بیوگاز تولیدی را گزارش کرده‌اند. [۲۱] در پژوهشی دیگر نیز ژو و همکاران (۲۰۱۱) در هضم بی‌هوازی مواد آلی در شرایط مزوفیلیک در نسبت‌های ماده تلقیح به خوراک برابر ۰/۳، ۰/۵، ۰/۶ و pH نهایی حدود ۵/۳ را گزارش کرده‌اند. [۱۴]

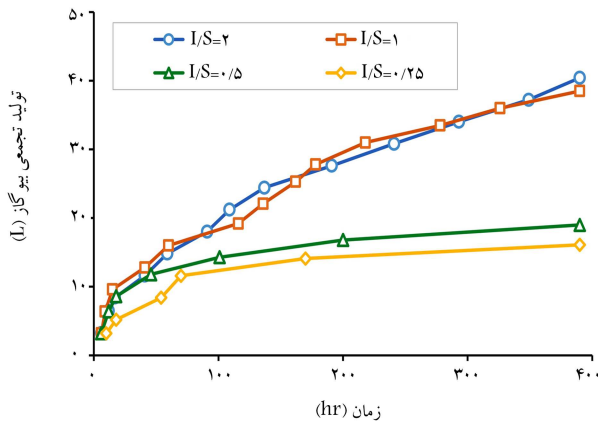
#### ۴.۲. تأثیر I/S در تغییرات ORP

تغییرات پتانسیل اکسایش - کاهش نسبت به زمان برای ۴ آزمایش با نسبت‌های مختلف ماده تلقیح به خوراک ورودی در شکل ۳ مشاهده می‌شود، که مطابق آن ORP در سیستم‌های با I/S برابر ۱ و ۲ از حدود  $-280$  میلی‌ولت در ابتدای فرایند تا حدود  $-350$  میلی‌ولت در انتهای فرایند کاهش داشته است که محدوده‌ی قابل قبولی برای فعالیت‌های بی‌هوازی (متان‌سازی) است. اما در آزمایش‌های با I/S برابر ۰/۲۵ و ۰/۵۰ با تجمع اسیدهای چرب و افت pH، میزان ORP تا  $-200$  میلی‌ولت نیز افزایش یافته است. این افزایش بیشینه‌ی ORP که در محدوده‌ی زمانی ۱۰۰ تا ۲۰۰ ساعت از انجام فرایند مشاهده می‌شود، به دلیل غالب شدن واکنش‌های اسیدسازی (معمولاً در محدوده‌ی  $-100$  تا  $-225$  میلی‌ولت انجام می‌شوند) در سیستم به‌دست آمده است. [۲۲]

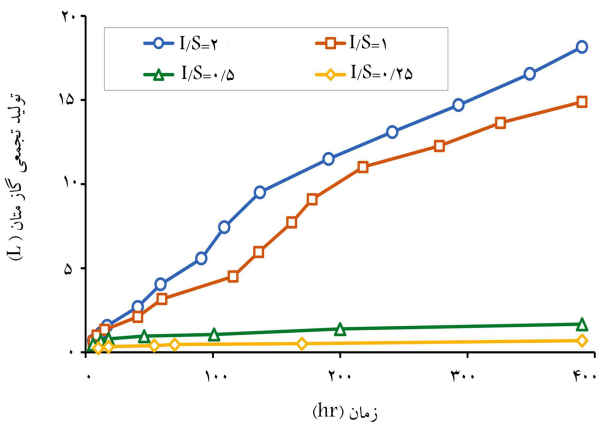
#### ۵.۲. تأثیر I/S در تغییرات COD

تغییرات غلظت COD محلول در طول دوره‌ی آزمایش برای نسبت‌های مختلف I/S در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به ثابت در نظر گرفتن مقدار TS در هر ۴ سیستم بررسی شده، بدیهی است که در ابتدای فرایند در نسبت‌های کوچک‌تر I/S، مقدار COD نیز کمتر باشد. لازم به ذکر است برای دستیابی به نسبت‌های مختلف I/S، مقادیر متفاوتی از سوبسترا و لجن با هم مخلوط شده‌اند که اختلاف در میزان بار آلی آن‌ها باعث تفاوت در COD اولیه‌ی نمونه‌ها درون راکتور شده است.

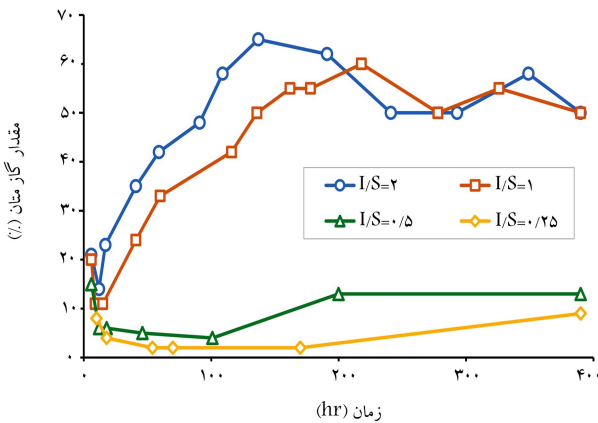
مطابق شکل ۴، با شروع تجزیه‌ی محتویات هاضم، در ابتدا غلظت COD محلول در هر ۴ سیستم افزایش یافته است. براساس نتایج آزمایش‌ها غلظت COD



شکل ۶. تأثیر I/S در تغییرات حجم بیوگاز تولید شده.



شکل ۷. تأثیر I/S در تغییرات حجم گاز متان تولید شده.



شکل ۸. تأثیر I/S در مقدار متان در بیوگاز تولید شده.

هاضم قضاوت کرد، تغییرات درصد گاز متان نسبت به کل بیوگاز تولیدی می‌باشد که در شکل ۸ این تغییرات برای ۴ راکتور با نسبت‌های مختلف I/S ارائه شده است.

مطابق شکل ۸، در آزمایش‌های با نسبت I/S برابر ۰/۲۵ و ۰/۵، متان درصد بسیار کمی از بیوگاز تولیدی را به خود اختصاص داده است که این امر ناشی از اسیدی شدن سیستم و عدم پیشرفت واکنش‌های متان‌سازی بوده است. اگرچه بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت از انجام فرایند افزایش جزئی در میزان متان

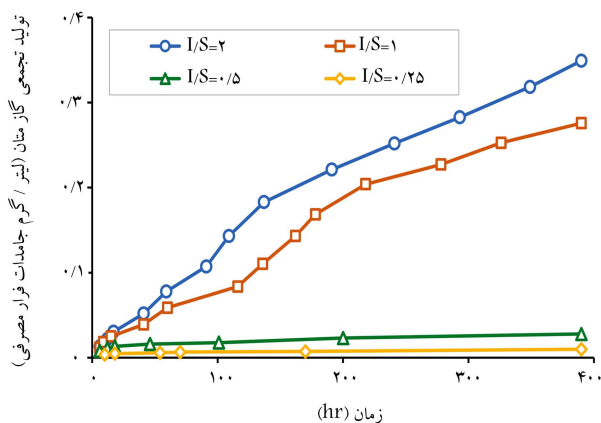
یک روز به بیش از ۳۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. اما در ادامه، به یکباره غلظت اسیدهای چرب فزاینده کاهش یافته است، که ناشی از افزودن مواد شیمیایی به منظور تعدیل pH در سیستم بوده است. با گذشت زمان، مجدداً غلظت اسیدهای چرب فزاینده مشاهده شده است که با افزودن مجدد مواد شیمیایی به منظور تعدیل pH کاهش غلظت اسیدهای چرب فزاینده و شکستگی دوم در نمودار حاصل شده است.

همان‌طور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، پس از مرحله‌ی اسیدسازی، در صورت فراهم بودن شرایط، واکنش‌های استات‌سازی رخ می‌دهد. در این مرحله مواد آلی و اسیدهای چرب فزاینده با وزن مولکولی کم، به وسیله‌ی باکتری‌های استات‌ساز به استات، گاز هیدروژن و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند.<sup>[۱۵]</sup> در نهایت نیز با مصرف محصولات مرحله‌ی استات‌سازی توسط متان‌سازها و تولید گاز متان، غلظت اسیدهای چرب فزاینده در محیط کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر نیز در آزمایش‌های با I/S برابر با ۱ و ۲ در ابتدای فرایند هضم، با تولید اسیدهای چرب فزاینده غلظت VFAs تا ۲۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافته است. اما در ادامه، با مهیا شدن شرایط برای فعالیت متان‌سازها، محصولات مرحله‌ی اسیدسازی و استات‌سازی به عنوان سوبسترا توسط میکروارگانیسم‌های متان‌ساز مصرف شده و به مرور زمان، غلظت VFAs در داخل هاضم کاهش یافته است. در مطالعه‌ی مشابه، فرناندز و همکاران (۲۰۰۸) افزایش غلظت اسیدهای چرب فزاینده در سیستم را به دلیل بالا بودن بار آلی در I/S برابر با ۰/۳۳ گزارش کرده‌اند.<sup>[۱۶]</sup>

## ۷.۲. تأثیر I/S در تولید بیوگاز

نوع خوراک ورودی و منشأ ریزاندام‌های بی‌هوازی (ماده‌ی تلقیح)، در تولید بیوگاز نقش مهمی را ایفا می‌کنند.<sup>[۱۵،۱۱]</sup> در پژوهش حاضر، به منظور بررسی تأثیر نسبت I/S در کمیت و کیفیت بیوگاز تولیدی، تعدادی آزمایش انجام شده است. در شکل ۶، تغییرات کل بیوگاز تولیدی نسبت به زمان در ۴ راکتور با نسبت‌های مختلف I/S مشاهده می‌شود که مطابق آن در دو سیستم با I/S برابر ۱ و ۲ پس از گذشت ۴۰۰ ساعت، مقدار تولید بیوگاز در حدود ۴۰ لیتر و در دو سیستم با I/S برابر ۰/۲۵ و ۰/۵، حجم بیوگاز تولیدی در حدود ۲۰ لیتر بوده است. علاوه بر میزان بیوگاز تولید شده طی فرایند هضم، حجم گاز متان تولیدی نیز حائز اهمیت بوده است که اطلاعات مرتبط در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۷، در I/S برابر ۰/۲۵ و ۰/۵ متان تولیدی بسیار ناچیز بوده و در عمل فرایند تولید متان متوقف شده است. وقتی در محیط جمعیت میکروبی کم بوده و با مقدار سوبسترا در محیط تناسب نداشته باشد، اسیدهای چرب فزاینده در فرایند اسیدسازی در محیط تجمع یافته که غلظت بیش از حد آن‌ها نهایتاً به توقف فعالیت متان‌سازها و اسیدی شدن هاضم می‌انجامد. این در حالی است که در I/S برابر ۱ و ۲، فرایند بدون مشکل پیشرفت داشته و تولید متان نیز در کل طول دوره هضم مشاهده شده است. در پژوهش حاضر، در آزمایش با استفاده از I/S برابر ۲ پس از ۴۰۰ ساعت بیشترین میزان تولید گاز متان به مقدار ۱۸/۲ لیتر اندازه‌گیری شد. در پژوهشی مشابه، لی و همکاران (۲۰۱۸) نیز تأثیر نسبت ماده‌ی تلقیح به خوراک ورودی حدود ۱/۴ را به عنوان شرایط بهینه جهت تولید گاز متان گزارش کرده‌اند.<sup>[۱۱]</sup> علاوه بر حجم متان تولیدی، پارامتر دیگری که براساس آن می‌توان به خوبی درباری عملکرد



شکل ۹. تأثیر I/S در متان تولیدی به ازاء VS مصرف شده.

جدول ۲. مقادیر اولیه و نهایی VS و درصد حذف آن برای I/S های مختلف.

I/S	VS			
	حذف (%)	نهایی (گرم)	اولیه (گرم)	لجن (%)
۲	۸۰	۲۸۲	۳۳۵	۷۰
۱	۵۰	۲۹۵	۳۴۳	۷۰
۰/۵	۵۴	۲۹۵	۳۵۶	۷۰
۰/۲۵	۵۷	۳۰۰	۳۷۰	۷۰

### ۸.۲. تأثیر I/S در درصد حذف VS

مقدار حذف VS در نسبت مادهی تلقیحی به خوراک ورودی برابر با ۲، ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ در جدول ۲ ارائه شده است، که مطابق آن در I/S برابر با ۲، بیشترین راندمان حذف VS مشاهده می‌شود. منگ و همکاران (۲۰۱۸) نیز در مطالعات خود بیشترین مقدار حذف VS را در I/S برابر با ۲ و به میزان ۸۴٪ گزارش کرده‌اند.<sup>[۱۵]</sup>

### ۳. نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر نسبت مادهی تلقیح به خوراک ورودی در تولید گاز متان از زائدات شهری با استفاده از هضم بی‌هوازی خشک بوده است. در پژوهش حاضر، تأثیر نسبت مادهی تلقیح به خوراک ورودی در تغییرات pH، ORP، COD، VFAs، ترکیب و مقدار گاز متان تولیدی ارزیابی شده است. تمامی آزمایش‌ها در دمای ۳۷ درجهی سلسیوس، جامدات کل برابر ۲۰ و مقدار C/N برابر ۳۰ انجام شد. براساس نتیجهی آزمایش‌ها با کاهش I/S به دلیل افزایش غلظت سوبسترا در محیط، پدیدهی محدودشدگی رخ داده و افزایش COD، کاهش pH تا حدود ۵، تجمع اسیدهای چرب فرار، کاهش و در نهایت توقف تولید متان مشاهده شده است. با افزایش I/S، در سیستم ثبات بیشتر pH، غلظت مناسب آمونیاک و اسیدهای چرب فرار و همچنین عملکرد بهتر هاضم در تولید بیوگاز و متان مشاهده شده است. در این تحقیق در I/S برابر ۲، میزان حذف VS در حدود ۸۰٪ و مقدار بیشینهی گاز متان تولیدی به ازاء هر گرم جامدات مصرف‌شده به میزان ۰/۳۵ لیتر به‌دست آمده است.

تولیدی مشاهده می‌شود؛ اما به طور کلی مقدار گاز متان تولیدی در این دو آزمایش ناچیز و کمتر از ۱٪ بوده است. این در حالی است که در نمودارهای مربوط به دو آزمایش با I/S برابر ۱ و ۲ با گذشت زمان و پیشرفت واکنش به مرور میزان گاز متان تولیدی افزایش یافته و حتی در زمان‌هایی به بیش از ۶۵٪ نیز رسیده است.

دلیل اصلی کاهش مقدار متان تولیدی در شروع فرایند این است که در ابتدا، راکتور در شرایط بهینه از نظر pH قرار داشته است، ولی پس از مدتی به دلیل آغاز واکنش‌های بیولوژیکی (شروع فاز اسیدسازی)، مقدار pH محیط کاهش یافته است، که این امر باعث افت درصد متان تولیدی شده است. در ادامه، پس از پیشرفت واکنش‌ها مجدداً شرایط برای تولید متان مهیا شده و به مرور غلظت آن افزایش یافته است. در رابطه با بیوگاز و متان تولیدی، پارامتر دیگری که بسیار حائز اهمیت بوده و در بسیاری از مطالعات معیار مقایسه‌ی فرایندهای هضم قرار گرفته است، مقدار متان تولیدی به ازاء هر گرم از جامدات فرار مصرفی است. در شکل ۹، تغییرات پارامتر مذکور نسبت به زمان در ۴ راکتور با نسبت‌های مختلف I/S ارائه شده است.

مطابق شکل ۹، در آزمایش‌های با I/S برابر ۰/۲۵ و ۰/۵ میزان گاز متان تولیدشده به ازاء کاهش جامدات فرار بسیار ناچیز است، که دلیل آن همان توقف فرایند تولید گاز متان در دو آزمایش اخیر بوده است. در پژوهشی مشابه، راپوسو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۹) نیز محدودیت در انجام فرایند و تولید گاز متان را در اثر کاهش I/S در هنگام هضم بی‌هوازی تقاله‌ی آفتابگردان<sup>۸</sup> گزارش کرده‌اند.<sup>[۲۳]</sup>

در پژوهش حاضر، در آزمایش‌های با I/S برابر با ۱ و ۲، عملکرد مناسبی در

پانویسها

1. inoculum to substrate ratio
2. Zhou
3. Meng
4. Fernandez
5. Di Maria
6. Li
7. Raposo
8. Sunflower oil cake
9. Zeng
10. Fagbohunge

منابع (References)

1. Tchobanoglous, G. and Kreith, F., *Handbook of Solid Waste Management*, 2ed edition, McGRAW-HILL (2006).
2. Salhofer, S., Obersteiner, G., Schneider, F. and et al. "Potentials for the prevention of municipal solid waste", *Waste Management*, **28**(2), pp. 245-259 (2008).
3. Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S. "Integrated solid waste management: Engineering principles and management Issues", McGraw-Hill (1993).
4. Nayono, S.E. "Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production", *Germany:KIT Scientific Publishing* (2010).
5. Gerardi, M.H. "The microbiology of anaerobic digesters", John Wiley & Sons (2003).
6. Chanakya, H.N., Ramachandra, T.V. and Vijayachamundeeswari, M. Centre for Ecological Sciences & Centre for Sustainable Technologies Indian Institute of Science Bangalore, 560012 (2006).
7. Stronach, S.M., Rudd, Th. and Lester, J.N. "Anaerobic digestion processes in industrial wastewater treatment", *Springer Science & Business Media*, **2**, pp. (2012).
8. Buyukkamaci, N. and Filibeli, A. "Volatile fatty acid formation in an anaerobic hybrid reactor", *Process Biochemistry*, **39**(11), pp. 1491-1494 (2004).
9. Angelidaki, I. and Sanders, W. "Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants", *Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology*, **3**(2), pp. 117-129 (2004).
10. Zeshan Karthikeyan O.P. and Visvanathan, Ch. "Effect of C/N ratio and ammonia-N accumulation in a pilot-scale thermophilic dry anaerobic digester", *Bioresour Technol*, **113**, pp. 294-302 (2012).
11. Ge, X., Xu, F. and Li, Y. "Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives", *Bioresource Technology*, **205**, pp. 239-249 (2016).
12. Cui, Zh., Shi, J. and Li, Y. "Solid-state anaerobic digestion of spent wheat straw from horse stall", *Bioresource Technology*, **102**(20), pp. 9432-9437 (2011).
13. Zhou, Y., Li, Ch., Nges, I.A. and et al. "The effects of pre-aeration and inoculation on solid-state anaerobic digestion of rice straw", *Bioresource Technology*, **224**, pp. 78-86 (2017).
14. Zhou, Y., Zhang, Zh., Nakamoto, T. and et al. "Influence of substrate-to-inoculum ratio on the batch anaerobic digestion of bean curd refuse-okara under mesophilic conditions", *Biomass and Bioenergy*, **35**(7), pp. 3251-3256 (2011).
15. Meng, L., Xie, L., Kinh, C.Th. and et al. "Influence of feedstock-to-inoculum ratio on performance and microbial community succession during solid-state thermophilic anaerobic co-digestion of pig urine and rice straw", *Bioresource Technology*, **252**, pp. 127-133 (2018).
16. Jose, F., Perez, M. and Romero, L.I. "Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW)", *Bioresource Technology*, **99**(14), pp. 6075-6080 (2008).
17. Di Maria, F., Sordi, A. and Micale, C. "Optimization of solid state anaerobic digestion by inoculum recirculation: the case of an existing mechanical biological treatment plant", *Applied Energy*, **97**, pp. 462-469 (2012).
18. Khajuria, A., Yamamoto, Y. and Morioka, T. "Solid waste management in Asian countries: problems and issues", *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, **109**, pp. 643-653 (2008).
19. American Public Health Association, "Standard methods for the examination of water and wastewater: 21st Edition, Method 2540 D, Total suspended solids", Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, pp. 2-58. APHA, AWWA, WEF Washington DC, USA (2005).
20. Ahring, B.K., Ibrahim, A.A. and Mladenovska, Z. "Effect of temperature increase from 55 to 65 C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure", *Water Research*, **35**(10), pp. 2446-2452 (2001).
21. Li, Y., Jin, J., Borrion, A. and et al. "Influence of feed/inoculum ratios and waste cooking oil content on the mesophilic anaerobic digestion of food waste", *Waste Management*, **73**, pp. 156-164 (2018).
22. Environmental, Y.S.I. "ORP Management in wastewater as an indicator of process efficiency", YSI, Yellow Springs, OH (<http://www.ysi.com/media/pdfs/A567-ORP-Management-in-Wastewater-as-an-Indicator-of-Process-Efficiency.pdf>) (accessed on 15.08. 13) (2008).
23. Raposo, F.R. Borja, M.A. Martin, A. and et al. "Influence of inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: process stability and kinetic evaluation", *Chemical Engineering Journal*, **149**(1-3), pp. 70-77 (2009).
24. Zeng, Sh., Yuan, X., Shi, X. and et al. "Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and orthophosphate release from anaerobic digestion of *Microcystis* spp", *Journal of Hazardous Materials*, **178**(1-3), pp. 89-93 (2010).
25. Fagbohunge, M.O., Herbert, B.M.J., Li, H. and et al. "The effect of substrate to inoculum ratios on the anaerobic digestion of human faecal material", *Environmental Technology & Innovation*, **3**, pp. 121-129 (2015).