انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی

مدیریت سیستم‌های
تولید بیوگاز

مترجمین:
پروفسور ترحم مصری گندشمین
دکتر منصور احمدی پیرلو

مدیریت سیستم‌های تولید بیوگاز

مولف:

Mario Alejandro Rosato

مترجمان:

پروفسور ترحم مصری گندشمین

دکتر منصور احمدی پیرلو

مدیریت سیستم‌های تولید بیوگاز

ترحم مصری گندشمین، منصور احمدی‌پیرلو

پدیدآور	/ مولف [صحیح: ویراستار ماریو آلخاندرو روساتو]؛ Rosato,Mario Alejandro, 1961
مشخصات نشر	اردبیل: دانشگاه محقق اردبیلی، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری	۳۰۴ ص.: مصور(بخشی رنگی)، جدول، نمودار.
شابک	978-622-7258-74-5
عنوان اصلی	Managing Biogas Plants: a practical guide, 2018.
موضوع	بیوگاز -- صنعت و تجارت -- مدیریت
	دانشگاه محقق اردبیلی University of Mohaghegh Ardabili
رده بندی کنگره	HD۹۵۰۲/۵
رده بندی دیویی	۳۳۳/۹۵۳۹
شماره کتابشناسی ملی	۸۶۶۹۹۷۶

ویراستار: غلامحسین شاهقلی/ صفحه‌آرا: فرشته خدایاری/ طرح جلد: علی رسول‌زاده

انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی

✦ چاپ اول زمستان ۱۴۰۰ ✦ قیمت ۱۶۵۰۰۰۰ ریال ✦

«حق چاپ برای مولف محفوظ است»

اردبیل، انتهای خیابان دانشگاه، دانشگاه محقق اردبیلی، انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی، صندوق پستی ۱۷۹

۰۹۱۴۳۰۵۷۲۸۴ mesrigtm@uma.ac.ir

www.UMA.ac.ir/press

فهرست مطالب

بهینه‌سازی فرایند هضم بی‌هوازی ۱۳
۱-۱ هضم بی‌هوازی چیست؟ ۱۳
۱-۱-۱ مفاهیم نظری ۱۳
۱-۱-۲ مفاهیم کاربردی ۲۰
۱-۲ علائم و اصطلاحات تخصصی ۲۳
۱-۲-۱ تعاریف ۲۴
۱-۲-۲ مثال‌های عددی و کاربردی ۲۸
۱-۳ محدودیت و مشکل مدیریت سیستم بر اساس جدول‌ها ۳۶
۱-۳-۱ استفاده از داده‌های جداول ۴۳
۱-۴ مدیریت دینامیکی واحد بیوگاز ۴۶
۱-۴-۱ pH ۴۸
۱-۴-۲ رابطه pH و قلیائیت ۵۰
۱-۴-۳ ترکیب شیمیایی سوبسترا ۵۱
۱-۴-۴ استفاده از پروفایل VFA ۵۳
۱-۴-۵ پایش دبی و ترکیبات بیوگاز ۵۴
۱-۴-۶ پایش پتانسیل اکسایش و کاهش (ORP) ۵۵
۱-۴-۷ پایش رسانایی الکتریکی ۵۶
۱-۵ مشکلات برون سپاری مدیریت بیولوژیکی ۵۸
۱-۵-۱ نتیجه‌گیری ۶۱
۱-۶ تیتراسیون خودکار ۶۱
منابع ۶۷

۲ مروری بر روش‌های آزمایشگاهی آنالیز فرایند تخمیر ۶۹
۲-۱ تکنیک‌های اندازه‌گیری: صحت، دقت و تکرارپذیری ۶۹
۲-۱-۱ صحت، دقت و تکرارپذیری ۷۰
۲-۱-۲ پراکندگی خطا ۷۱
۲-۲ روش‌های اندازه‌گیری در صنعت بیوگاز ۷۷
۲-۲-۱ آزمون‌های کلاسیک حجم و فشار ۷۸
۲-۲-۲ سیستم‌های اندازه‌گیری خودکار: AMPTS و BRS ۹۳
۲-۲-۳ راکتورهای مناسب برای آزمایش‌های بیولوژیک ۹۵
۲-۲-۴ اشتباهات رایج اندازه‌گیری جریان گاز ۹۶
۲-۲-۴-۱ نرمال‌سازی ۹۶
۲-۲-۴-۲ اصلاح رطوبت ۹۸
۲-۲-۵ آزمایش‌های شیمیایی و فیزیکی کمکی ۱۰۰
۲-۲-۶ آزمایشگاه in-situ کنترل فرایند بیولوژیکی ۱۰۵
منابع ۱۰۷

۳ شرایط مطلوب انجام آزمایش ۱۰۹
۳-۱ مقدمه ۱۰۹
۳-۲ اندازه‌گیری رطوبت و ماده فرار ۱۰۹
۳-۲-۱ اندازه‌گیری DM با آنالایزر رطوبت ۱۱۰
۳-۲-۲ مقیاس ماده خشک در اندازه‌گیری با آون ۱۱۴
۳-۲-۳ اندازه‌گیری مقدار خاکستر و VS ۱۱۵
۳-۳ اندازه‌گیری COD و ازت کل ۱۱۷
۳-۴ چگونگی طراحی آزمایش‌های بیولوژیکی ۱۲۰
۳-۵ تهیه نمونه و تلقیح ۱۲۱
۳-۶ نسبت ماده تلقیح به سوبسترا(I/S) ۱۲۸
۳-۷ تعریف شدت اختلاط (شدت همزنی) ۱۳۰
۳-۸ آزمون BMP و کاربردهای آن ۱۳۵
۳-۸-۱ اندازه‌گیری BMP ۱۳۶
۳-۹ فرایند اندازه‌گیری ۱۳۷
۳-۹-۱ فرایند مرحله‌به‌مرحله تحلیل داده‌ها ۱۳۷
۳-۹-۲ مشکلات احتمالی در تست BMP ۱۳۸
۳-۱۰ آزمون فعالیت هیدرولیتیک و متانوژنیک: و سلامت باکتریایی ۱۴۴
۳-۱۰-۱ تخریب پلی‌ساکاریدها (گلوکز، نشاسته و سلولز) ۱۴۵
۳-۱۰-۲ پودر ژلاتین و کازئین ۱۴۶
۳-۱۰-۳ اسیدهای پروپیونیک و بوتیریک ۱۴۷
۳-۱۰-۴ اسیدهای چرب (لیپیدها) ۱۴۸
۳-۱۰-۵ اسید استیک و استات سدیم ۱۵۰
۳-۱۱ آنالیز انتشار خطا در ارزیابی متان تولیدی و تغییرات آن ۱۵۶
۳-۱۲ صحت pH، قلیائیت و افزودن ماده خنثی قبل از شروع آزمایش راکتورهای ناپیوسته ۱۵۷
منابع ۱۶۱

۴ استفاده از نتایج آزمایشگاهی در صنایع تولید بیوگاز ۱۶۳
۴-۱ کاربرد عملی آزمون VS ۱۶۳
۴-۱-۱ اندازه‌گیری بار آلی (OL) و نرخ بار آلی (OLR) ۱۶۳
۴-۱-۲ اندازه‌گیری بازده تبدیل خوراک خام به متان ۱۶۵
۴-۱-۳ اقدامات لازم در شرایط ηAD<٪۴۵ ..... ۱۶۷
۴-۲ کاربرد عملی آزمون BMP ۱۷۰
۴-۲-۱ قیمت مناسب مواد اولیه ۱۷۰
۴-۲-۲ بهینه‌سازی تغذیه واحد بیوگاز ۱۷۴
۴-۲-۳ بازدارندگی سوبستراهای پیچیده ۱۷۵
۴-۲-۴ بررسی بازده هضم در راکتور بیوگاز ۱۷۷
۴-۲-۵ تعیین نسبت بهینه SRT/HRT ۱۷۸

۴-۲-۶ تعیین اثربخشی افزودنی‌ها و پیشتیمار ۱۸۰
۴-۲-۷ خطاهای متداول در انجام آزمایش‌های بیولوژیکی ۱۸۴
۴-۳ استفاده از سوبستراهای مرجع برای بررسی فعالیت‌های هیدرولیتیک ۱۸۷
۴-۳-۱ آزمون هیدرولیز سلولز ۱۸۷
۴-۳-۲ آزمایش هیدرولیز قند و نشاسته ۱۸۸
۴-۳-۳ هیدرولیز پروتئین‌ها ۱۸۹
۴-۳-۴ تست فعالیت لیپولیتیک ۱۹۱
۴-۳-۵ آزمون‌های عمومی سوبستراهای بازدارنده ۱۹۳
۴-۴ آزمون (SMA): انتخاب استارتر مناسب و جلوگیری از فروپاشی بیولوژیکی ۱۹۴
۴-۴-۱ آزمون بازدارندگی متانوژنیک ماده تلقیح با استفاده از سرکه سفید ۱۹۵
۴-۴-۲ تست SMA و انتخاب تلقیح مناسب برای شروع یک واحد جدید بیوگاز ۱۹۷
۴-۴-۳ تعیین مقدار عناصر کمیاب در راکتورهایی با SMA<10 ۱۹۹
۴-۵ نتیجه‌گیری ۲۰۱
۴-۵-۱ سودمندی آزمایش با سرکه، اسید استیک و یا استات به‌عنوان سوبسترای مرجع ۲۰۱
۴-۵-۲ سوبستراهای مرجع ۲۰۲
منابع ۲۰۲

۵ چند ترفند ساده برای بهبود عملیات آزمایشگاهی ۲۰۵
۵-۱ پیشگفتار ۲۰۵
۵-۲ اندازه‌گیری متان بیوگاز راکتور دوگانه و با استفاده از یک سرنگ ۲۰۵
۵-۲-۱ مواد لازم برای آزمون سرنگی ۲۰۸
۵-۲-۲ اجرای تست با سرنگ ۲۰۹
۵-۲-۳ خطای آنالیز با روش سرنگی ۲۱۱
۵-۳ حل مشکل تبخیر حمام ترموستاتیک ۲۱۱
۵-۳-۱ مهروموم فضای بین راکتور و پلکسی گلاس به کمک اورینگ یا تسمه پلاستیکی ۲۱۳
۵-۳-۲ افزودن نمک به آب ۲۱۳
۵-۳-۳ جایگزینی سیال مناسب بجای آب در حمام ترموستاتیک ۲۱۴
۵-۴ بهبود اتصال موتورهای همزن با جریان DC ۲۱۶
۵-۴-۱ تعریف مسئله ۲۱۶
۵-۴-۲ فرایند گام‌به‌گام برای اتصال منبع تغذیه در مرکز خطوط ۲۲۱
۵-۴-۳ استفاده از موتورهای بدون برس (Brushless) ۲۲۴
۵-۵ بررسی کالیبراسیون (روش‌های حجمی) ۲۲۵
۵-۵-۱ کالیبراسیون به روش وزن‌سنجی ۲۲۶
۵-۵-۲ کالیبراسیون حجمی ۲۲۶
۵-۶ بی‌هواسازی حجم فوقانی راکتور با گاز فندک ۲۲۸
۵-۷ پیدا کردن نشتی گاز ۲۳۱
۵-۸ دستورالعمل‌های ایمنی آزمایشگاه‌های بیوگاز ۲۳۴
منابع ۲۳۶
۶ بررسی انتقادی مقالات علمی از دیدگاه مدیران تولید بیوگاز ۲۳۷

۶-۱ مقدمه ۲۳۷
۶-۲ روش‌های کشف حقیقت: قیاس ارسطویی، اصل شک دکارتی و اجتناب از اشتباهات منطقی ۲۳۷
۶-۲-۱ رابطه بین BMP و رسانایی الکتریکی ۲۳۹
۶-۲-۲ ارزیابی صحت روش VFA/TA (FOS/TAC) ۲۴۴
۶-۲-۳ مغالطه علّی ۲۴۶
۶-۳ اشتباه‌های رایج در مقالات علمی ۲۴۹
۶-۳-۱ اهمیت pH و استفاده از بی‌کربنات‌سدیم به‌عنوان بافر راکتورهای‌هوازی ۲۴۹
۶-۳-۲ اهمیت عناصر کمیاب ۲۵۲
۶-۳-۳ گوگردزدایی با استفاده از محصولات خاص ۲۵۴
۶-۳-۴ مدل‌سازی ریاضی BMP و پایگاه‌های اطلاعاتی ۲۵۶
۶-۳-۵ حفاظت از ماده تلقیح ۲۵۸
۶-۳-۶ واحد معادل سیلاژ ذرت ۲۵۹
۶-۳-۷ ارزیابی صحت و دقت داده‌های مقالات ۲۶۴
۶-۴ آزمون‌های BMP در کارخانه‌های صنعتی بیوگاز ۲۶۹
۶-۴-۱ مروری بر دستورالعمل آلمانی VDI 4630/2014 ..... ۲۶۹
۶-۴-۲ استانداردسازی آزمون BMP بر اساس پیشنهاد IWA ۲۷۰
۶-۴-۳ پیش‌نویس ایتالیایی استاندارد UNI/TS E0209F670 ..... ۲۷۰
۶-۴-۴ بررسی انتقادی ضعف‌ها و نقایص استانداردها ۲۷۲
۶-۵ نتیجه‌گیری ۲۸۴
منابع ۲۸۶

۷ واژه نامه اصطلاحات و اختصارات ۲۸۹

۸ جداول مورد نیاز برای تسریع محاسبات ۲۹۵
۸-۱ وزن مخصوص علوفه سیلویی به‌صورت تابعی از TS ۳۰۱
۸-۲ استفاده از سرکه برای انجام تست SMA ۳۰۱
۸-۳ نظارت بر رسانایی الکتریکی لجن ۳۰۲
۸-۴ مقادیر مرجع ارزیابی فرآیند AD با استفاده از VFA/TA (FOS/TAC) ۳۰۲
۸-۵ پروفایل VFA ۳۰۳
۸-۶ ریز مغذی‌ها (الیگوالمان‌ها یا عناصر کمیاب) ۳۰۳
۸-۷ دستورالعمل تعیین VS ۳۰۴

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ وضعیت ارگانیسم‌های متانوژنیک در دسته‌بندی آرکایا ۱۵
شکل ۱-۲ فازهای فرایند هضم بی‌هوازی ۱۶
شکل ۱-۳ تجزیه بی‌هوازی استات و تغییرات سرعت تجزیه به‌صورت تابعی از درجه حرارت در دو نوع ماده تلقیح متفاوت ۱۸
شکل ۱-۴ فعالیت تولیدمثل گونه‌های مختلف آرکایاها ۲۱
شکل ۱-۵ دیاگرام سیستم کنترل حلقه‌باز و سیستم کنترل حلقه‌بسته ۳۷
شکل ۱-۶ مقایسه تولید تجمعی بیوگاز و جریان خطی ایده‌ال طی هضم بی‌هوازی مواد آلی ۴۰
شکل ۱-۷ مقایسه تولید روزانه بیوگاز با تولید روزانه ایده‌ال در یک سیستم ناپیوسته ۴۱
شکل ۱-۸ ساده‌سازی معادلات هاضم پیوسته براساس هاضم‌های ناپیوسته متوالی ۴۱
شکل ۱-۹ مقایسه جریان واقعی هاضم پیوسته با مجموع هاضم‌های بچ ۴۲
شکل ۱-۱۰ پتانسیل متان بیوشیمیایی نشاسته که طی ۱۸ آزمایش مختلف اندازه‌گیری شده است ۴۵
شکل ۱-۱۱ تصویر IR از سیلوی ذرت علوفه‌ای (موقعیت الف) ۴۷
شکل ۱-۱۲ تصویر IR از سیلوی ذرت علوفه‌ای (موقعیت ب) ۴۸
شکل ۱-۱۳ نرخ رشد و سرعت تکثیر آرکایاها به‌صورت تابعی از pH و غلظت سوبسترا ۴۹
شکل ۱-۱۴ تغییر غلظت VFA و ORP به‌صورت تابعی از زمان‌ماند ۵۶
شکل ۱-۱۵ نتایج آنالیز شیمیایی نمونه مواد داخل راکتور ۵۹
شکل ۱-۱۶ گزارش آزمایشگاهی یک نمونه از مواد داخل راکتور بیوگاز ۶۰
شکل ۱-۱۷ مقایسه انرژی تولیدی واحد بیوگاز و شاخص VFA/TA بر اساس تیتراسیون FOS/TAC ۶۶
شکل ۲-۱ بیان تصویری مفاهیم صحت، دقت و تکرارپذیری ۷۰
شکل ۲-۲ آزمایش اندازه‌گیری حجمی با استفاده از سرنگ ۸۱
شکل ۲-۳ شماتیک اودیومتر ۸۱
شکل ۲-۴ اودیومتر آزمایشگاهی ۸۲
شکل ۲-۵ اودیومتر مطابق با استاندارد DIN 38414 ..... ۸۳
شکل ۲-۶ نمونه‌ای از برچسب‌گذاری استوانه‌های کلاس A مطابق ISO DIN EN 4788 ..... ۸۳
شکل ۲-۷ نمونه‌ای از سیستم اندازه‌گیری جابجایی برای بهینه‌سازی هاضم ۸۴
شکل ۲-۸ شماتیک سیستم اندازه‌گیری جابجایی حجم ساخته شده با ظروف استاندارد آزمایشگاهی ۸۵
شکل ۲-۹ ابزارهای اندازه‌گیری µ-Flow ۸۵
شکل ۲-۱۰ سیستم اندازه‌گیری کم‌هزینه (حمام ترموستاتیک، راکتور، بطری حاوی محلول NaOH و دبی‌سنج µ-Flow) ۸۸
شکل ۲-۱۱ سیستم بارومتری ساده ۹۰
شکل ۲-۱۲ نمونه‌ای از راکتورهای مجهز به بارومترهای دست‌ساز ۹۰
شکل ۲-۱۳ بطری‌های بارومتریک، ابتدا برای اندازه‌گیریهای تنفس سنجی هوازی طراحی شده بود ۹۱
شکل ۲-۱۴ انفجار راکتور در اثر فشار بیش‌ازحد ۹۲
شکل ۲-۱۵ AMPTS II ۹۴
شکل ۲-۱۶ حسگرهای کوچک و ارزان AMPTS Light ۹۴
شکل ۲-۱۷ حسگرهای BRS (Bioprocess Control AB.) ۹۴
شکل ۲-۱۸ مجموعه راکتورها در آزمایشگاه CIEMAT، مادرید ۹۷
شکل ۲-۱۹ نمونه مدل جیبی Combo برای سنجش مقدار pH، دما، رسانایی الکتریکی، جامد کل محلول ۱۰۱
شکل ۲-۲۰ نمونه‌ای از آنالایزر رطوبت هالوژنی برای تعیین مواد جامد و رطوبت ۱۰۲

شکل ۲-۲۱ کوره الکتریکی سرامیکی کوچک حاوی سیستم تخلیه دود و تنفس از حفره‌های زیر درب ۱۰۳
شکل ۲-۲۲ شماتیک کلی یک اسپکتروفتومتر ۱۰۵
شکل ۲-۲۳ اسپکتروفتومتر چندپارامتری ویژه مواد سیال ۱۰۵
شکل ۲-۲۴ آزمایشگاه متداول بیوگاز ۱۰۷
شکل ۳-۱ هضم سلولز خالص با دو ماده تلقیحی متفاوت ۱۲۵
شکل ۳-۲ تخریب بی‌هوازی زیست‌توده جلبکی Ulva با استفاده از لجن دریا و کود گاوی به‌عنوان ماده تلقیح ۱۲۶
شکل ۳-۳ راکتور شیشه‌ای یک لیتری با موتور الکتریکی و گیربکس متصل به همزن خمیده ۱۳۱
شکل ۳-۴ راکتور پیوسته پنج لیتری ساخته‌شده از فولاد ضدزنگ با همزن الکترومکانیکی (brushless motor) ۱۳۱
شکل ۳-۵ منحنی‌های نرمال شده تولید متان در راکتور ۱۳۹
شکل ۳-۶ منحنیهای تولید متان *A.donax* تازه ۱۴۱
شکل ۳-۷ مثالی از آزمایش ناتمام به دلیل خطای اندازه‌گیری ۱۴۲
شکل ۳-۸ نمودار هضم تری‌اولئین ۱۵۰
شکل ۳-۹ تغییرات تولید متان به‌صورت تابعی از I/S در حضور استات سدیم ۱۵۳
شکل ۳-۱۰ راکتوری نامتعارف حاوی ماده تلقیح با فعالیت متانوژنیک ناکافی (I/S برابر ۵ و دما ۳۸°C) ۱۵۵
شکل ۳-۱۱ تأثیر منفی میکرو مواد مغذی افزوده در ماده تلقیح راکتور ۱۶۰
شکل ۴-۱ کاهش بازده تبدیل خوراک خام به متان با افزایش ORL در راکتور ۱۶۶
شکل ۴-۲ کاهش حجم مؤثر هاضم به‌واسطه تهنشینی رسوبات در کف هاضم ۱۶۸
شکل ۴-۳ منحنی تجزیه کامل بی‌هوازی سوبسترای X ۱۷۴
شکل ۴-۴ افزایش عملکرد تولید متان در دو سوبسترا و اختلاط آنها ۱۷۵
شکل ۴-۵ بازدارندگی ناشی از افزودن سوبسترای پیچیده و تنوع کم بیولوژیکی ۱۷۶
شکل ۴-۶ پتانسیل تولید متان پسماند هاضم و مقایسه آن با خوراک اولیه ۱۷۸
شکل ۴-۷ تجزیه بی‌هوازی پساب یک کارخانه تولید آب‌میوه ۱۷۹
شکل ۴-۸ اثر افزودن باکتری‌های زنده به ماده تلقیح ۱۸۱
شکل ۴-۹ مقایسه تأثیر پیشتیمار حرارتی و افزودنی تجاری در BMP پسماند کشتارگاه دام ۱۸۲
شکل ۴-۱۰ مقایسه عملکرد تولید متان خالص تیمار شاهد و تیمارهای با دو نوع افزودنی متفاوت ۱۸۴
شکل ۴-۱۱ دبی روزانه تولید متان خالص در راکتور شاهد و دو راکتور با افزودنی‌های متفاوت ۱۸۴
شکل ۴-۱۲ منحنی تولید متان راکتور شاهد و راکتور نمونه ۱۸۵
شکل ۴-۱۳ نمونه‌ای از منحنی تولید غیرنرمال متان ۱۸۶
شکل ۴-۱۴ منحنیهای تجزیه بی‌هوازی ضایعات کاغذی (سلولز)، قند (ساکارز) و نشاسته ذرت ۱۸۹
شکل ۴-۱۵ آزمون فعالیت پروتئولیتیک با استفاده از ضایعات ماهی به‌عنوان سوبسترای مرجع ۱۹۱
شکل ۴-۱۶ اثر بازدارندگی گلیسرول در فرایندAD ۱۹۴
شکل ۴-۱۷ استفاده از سرکه سفید به‌عنوان سوبسترای مرجع در مقایسه با BMP حاوی ۶ درصد محلول اسید استیک ۱۹۶
شکل ۴-۱۸ تست SMA با سرکه به‌عنوان سوبسترای مرجع و تلقیح یکسان ۱۹۷
شکل ۴-۱۹ نمودار SMA راکتورهای بیوگاز که با سه ماده تلقیح متفاوت راه‌اندازی شده‌اند ۱۹۸
شکل ۴-۲۰ اثر افزودن عناصر کمیاب به راکتور بیوگاز با فعالیت متانوژنیک نامطلوب ۲۰۱
شکل ۵-۱ مقایسه منحنی نرمال تولید بیوگاز و تولید متان و درصد تغییر متان در بیوگاز به‌صورت تابعی از زمان ۲۰۶
شکل ۵-۲ تولید بیوگاز و متان از استات سدیم ۲۰۷
شکل ۵-۳ سرنگ مخصوص نمونه‌برداری گاز ۲۰۸
شکل ۵-۴ ولو نمونه‌برداری گاز با سپتوم پلاستیکی ۲۰۹
شکل ۵-۵ نمونه‌برداری بیوگاز با سرنگ ۲۰۹
شکل ۵-۶ سرنگ پر از بیوگاز و محلول سود ۲۱۰
شکل ۵-۷ سرنگ با پیستونی که موقعیت آن به حالت اولیه برگشته است ۲۱۰
شکل ۵-۸ منحنی سیگموئیدی اثر تغییرات دما، تبخیر و گردش آب در حمام ترموستاتیک بر میزان گاز تولیدی ۲۱۲

شکل ۵-۹ فشار بخارآب و محلول اتیلن گلیکول به‌صورت تابعی از دما ۲۱۶
شکل ۵-۱۰ شماتیک اتصال موازی چندین همزن ۲۱۸
شکل ۵-۱۱ مدار الکتریکی معادل اتصال موازی چندین موتور جریان مستقیم (DC) ۲۱۹
شکل ۵-۱۲ اتصال موتورهای DC از طریق منبع تغذیه در مرکز خط توان ۲۱۹
شکل ۵-۱۳ مقایسه بین توزیع ولتاژ در هر موتور هنگام اتصال موازی با منبع تغذیه ۲۲۱
شکل ۵-۱۴ جزئیات کابل اتصال برای گروهی از موتورهای موازی ۲۲۱
شکل ۵-۱۵ جزئیات زبانههای اتصال معمولی موتورهای DC با ولتاژ (۵V) برای همزنی راکتورهای آزمایشگاهی ۲۲۲
شکل ۵-۱۶ مرحله اول ۲۲۳
شکل ۵-۱۷ مرحله دوم ۲۲۳
شکل ۵-۱۸ مرحله سوم اتصال ۲۲۴
شکل ۵-۱۹ دورنمای آرایش اتصال راکتورهای ۱۵ تایی ۲۲۴
شکل ۵-۲۰ کیت کنترل همزن تا حداکثر ۱۵ راکتور با تکنولوژی بدون برس ۲۲۵
شکل ۵-۲۱ شماتیک سیستم کالیبراسیون وزنی ابزار اندازه‌گیری حجم گاز ۲۲۷
شکل ۵-۲۲ شماتیک سیستم کالیبراسیون حجم‌سنجی ۲۲۷
شکل ۵-۲۳ خالی کردن هوای فضای خالی راکتورهای آزمایشگاهی با کپسول گاز ۲۳۰
شکل ۵-۲۴ تنظیم شرایط اولیه آزمایش در سیستم مجهز به الگوریتم محاسبه حجم گاز ۲۳۰
شکل ۵-۲۵ راه‌اندازی و شروع آزمایش ۲۳۲
شکل ۵-۲۶ کشیدن پیستون به انتها و افزایش فشار در محفظه راکتور ۲۳۲
شکل ۵-۲۷ رها کردن پیستون سرنگ و برگشت پیستون به موقعیت اولیه در اثر فشار انباشته ۲۳۳
شکل ۵-۲۸ گیره آزمایشگاهی برای برداشتن اجسام داغ ۲۳۵
شکل ۶-۱ تولید ویژه متان دو نمونه لجن با رسانایی الکتریکی متفاوت و سوبسترای مرجع یکسان ۲۴۲
شکل ۶-۲ تولید ناخالص متان دو نمونه لجن با رسانایی الکتریکی متفاوت و سوبسترای مرجع یکسان ۲۴۳
شکل ۶-۳ مقایسه میزان تولید متان قبل و پس از افزودن آنزیم ۲۴۸
شکل ۶-۴ مقایسه هضم بیهوازی آب‌پنیر خام و خنثی شده (pH=7) با بی‌کربنات‌سدیم ۲۵۰
شکل ۶-۵ تیمار بی‌کربنات‌سدیم و اثر آن بر تولید ناخالص بیوگاز ۲۵۲
شکل ۶-۶ اثر افزودن عناصر کمیاب به ماده تلقیح ۲۵۴
شکل ۶-۷ هضم بی‌هوازی سلولز میکروکریستال با دو ماده تلقیح مختلف ۲۵۸
شکل ۶-۸ مقایسه فعالیت هیدرولیتیک و متانوژنیک ماده تلقیح تازه و بیات ۲۶۰
شکل ۶-۹ بازدارندگی ناشی از گلیسرول در نسبتهای بالای I/S ۲۶۳
شکل ۶-۱۰ میزان تولید متان در اختلاط‌های متفاوت سوبستراهای یکسان ۲۶۳
شکل ۶-۱۱ تخریب بی‌هوازی پساب گاو حاوی ۴٪ مواد جامد فرار ۲۶۴
شکل ۶-۱۲ ظرفیت بیولوژیکی متان (BMP_{30}) کود اسب با سوبسترای کاه ۲۶۹
شکل ۶-۱۳ تأثیر همزنی در ظرفیت بیولوژیکی متان ۲۷۶
شکل ۶-۱۴ اثر گاززدایی فضای خالی راکتور بر تولید متان ۲۸۰
شکل ۶-۱۵ تجزیه بی‌هوازی سلولز با ماده تلقیح ضعیف ۲۸۲
شکل ۶-۱۶ هضم نشاسته با ماده تلقیح یکسان با شکل ۶–۱۵ ..... ۲۸۳
شکل ۶-۱۷ هضم نشاسته با ماده تلقیح یکسان با شکل ۶–۱۵ ..... ۲۸۳

فهرست جداول

جدول ۱-۱ قابلیت هضم مواد آلی از بهترین تا بدترین حالت ۱۶
جدول ۱-۲ استوکیومتری فرایند AD ۱۷
جدول ۱-۳ بازه دمای ایده‌آل فعالیت انواع آرکایاها ۱۹
جدول ۱-۴ مقادیر تخمینی C و N و نسبت C/N برخی زیست‌توده‌های متداول (w.w.٪ برحسب درصد وزن مرطوب محاسبه شده است) ۲۳
جدول ۱-۵ قابلیت هضم زیست‌توده‌های متداول ۲۴
جدول ۱-۶ نسبت‌های هم‌ارز VS و COD برخی سوبستراهای متداول ۳۰
جدول ۱-۷ شاخص BMP چندین سوبسترای کشاورزی ۴۹
جدول ۱-۸ همبستگی بین رسانایی الکتریکی و بازده خالص متان در ۳۸ °C ۵۷
جدول ۱-۹ جدول اصلی نسبت FOS/TAC ۶۵
جدول ۱-۱۰ مقادیر مرجع FOS، TAV و pH در هاضم‌های بی‌هوازی کشاورزی ۶۶
جدول ۲-۱ برخی آزمایش‌های هاضم در شرایط in situ ۸۰
جدول ۲-۲ مزایا و معایب اودیومتر برای اندازه‌گیری بیوگاز از AD ۸۶
جدول ۳-۱ مقدار نمونه لازم برای اندازه‌گیری VS با خطای کمتر از ۱٪ ۱۱۷
جدول ۳-۲ استانداردهای بین‌المللی آلاینده‌های آلی، هضم بی‌هوازی (با تأکید بر مصارف تصفیه فاضلاب) ۱۲۳
جدول ۳-۳ سوبسترای مرجع برای آزمون فعالیت بیولوژیکی ۱۴۴
جدول ۴-۱ الگوی اطلاعات مورد نیاز در یک صفحه گسترده ۱۶۷
جدول ۴-۲ نتایج راکتورهای منفرد و متوسط تولید خالص متان آن‌ها ۱۷۲
جدول ۴-۳ دستورالعمل و کاربرد محلول مادر در واحد بیوگاز ۱۹۹
جدول ۵-۱ ولتاژ هر اتصال‌دهنده موتور DC در خطی که ۱۵ موتور به‌صورت موازی به هم متصل شده‌اند ۲۲۰
جدول ۵-۲ ولتاژ هر موتور الکتریکی در خطوط اتصال ۱۵ واحد موازی که از مرکز بوشینگ موتور ۸ تغذیه می‌شوند ۲۲۰
جدول ۶-۱ محتوای مواد معدنی ذرت طبق گزارش FAO (میانگین ۵ نمونه) ۲۴۵
جدول ۶-۲ مقایسه سه محصول تجاری گوگردزدایی ۲۵۶
جدول ۶-۳ مقایسه ظرفیت تولید متان سوبستراهای رایج کشاورزی ۲۵۷
جدول ۶-۴ ارزش BMP کود اسب که توسط گروه تحقیقاتی Hohenheim تهیه شده است ۲۶۸
جدول ۸-۱ محتوای کربن، نیتروژن و نسبت C/N بیوماس ۲۹۵
جدول ۸-۲ مقدار pH برخی مواد متداول ۲۹۶
جدول ۸-۳ نسبت هم ارزی (VS) و (COD) چند ماده خالص که به عنوان بستر مرجع هاضم ۲۹۷
جدول ۸-۴ مقدار دفع روزانه و سرگین برخی از گونه‌های جانوری ۲۹۸
جدول ۸-۵ بسترهای مرجع برای آزمایش فعالیت‌های بیولوژیکی ۲۹۸
جدول ۸-۶ پتانسیل متان بیوشیمیایی (BMP) برخی از بسترهای کشاورزی رایج (تقریبی) ۲۹۹
جدول ۸-۷ دامنه خطای اندازه‌گیری برخی ابزارهای استاندارد در بازار ۳۰۰
جدول ۸-۸ جدول تبدیل واحد ۳۰۰
جدول ۸-۹ ضرایب تصحیح دانسیته به‌صورت تابعی از رطوبت ۳۰۱
جدول ۸-۱۰ همبستگی بین رسانایی الکتریکی و فعالیت متانوژنیک ۳۰۲
جدول ۸-۱۱ مقادیر مرجع FOS، TAC و pH ۳۰۲
جدول ۸-۱۲ مقادیر نرمال، حداکثر مقدار قابل‌قبول، و آستانه فروپاشی بیولوژیکی VFA که بیشتر در لجن برحسب mg/l بیان می‌شود ۳۰۳
جدول ۸-۱۳ غلظت عناصر کمیاب برای حفظ پایداری فرآیند AD ۳۰۳
جدول ۸-۱۴ حداقل مقدار نمونه زیست‌توده برای حفظ خطای VS کمتر از ۱٪ ۳۰۴

تقدیم به گوهرهای زندگی‌ام

همسرم فرشته و دخترم دیانا

ارتباط ارکان طبیعت با همدیگر، چرخه نظام‌مندی را شکل داده است؛ چرخه‌ای که بسیاری از نیازهای موجودات در ارتباط با دیگران تأمین می‌شود. در کنار استقلال حرکت و خواست درونی هر نهاد طبیعی برای گسترش و جهان‌شمول شدن خود، وابستگی آنها به چرخه‌های فرودست خود طی یک رابطه ارگانیکی محدودکننده چیرگی بی‌حد و حصر فرادستان طبیعی شده است. یکی از خطرات بزرگی که امروزه تمدن مدرن را در زمینه‌های مختلف با مشکل مواجه کرده است، کاهش وابستگی بشر امروزی به نهادهای طبیعی است. این غلبه به کمک منابع تجدید ناپذیر انرژی فسیلی اتفاق افتاده است. در کنار مزیت‌های زیادی که از این حیث در حیات صنعتی و رفاه عمومی حاصل شده است، نگرانی عمیقی به خاطر تجدید ناپذیری این منبع در زندگی روزمره و صنعتی بوجود آمده است. توان و دست‌اندازی بسیار عظیم انرژی فسیلی، امکان مقاومت و نقش سازنده نهادهای طبیعی را به‌کلی دگرگون کرده است طوری که این تغلب به تحدید تنوع منجر شده است و از این حیث، تنش و لرزه‌ی شدیدی بر جان طبیعت افتاده است.

مسئله دیگری که زندگی مدرن بر محیط‌زیست خود تحمیل کرده است، تمرکز تولیدات و تمرکز انرژی در محیط فشرده شهری است. بخش قابل‌توجهی از منابع طبیعی در مصارف دنیای مدرن به دلایل و شکل‌های مختلفی از چرخه مصرف کنار رفته و از زنجیره تامین جدا می‌شوند و در جای نامناسب بصورت پسماند رها می‌شوند. بازیافت در کنار وارد کردن این منابع به چرخه مصرف، رشد برداشت و استخراج مواد اولیه را از منابع محدود زمین کاهش داده و از قطع زنجیره و نشتی منابع جلوگیری به عمل می‌آورد.

تولید انرژی از این منابع که در محل نامناسب و به شکل انبوه رها شده‌اند، تیری است در کمان که با

اهداف ارزشمندی را نشانه رفته است. تأمین انرژی از این منابع راه‌حلی برای کاهش هراس از اتمام سوخت‌های فسیلی است. به‌علاوه، این کار به کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای به‌واسطه فعالیت‌های انسانی و تأثیر آن بر تغییرات آب‌وهوایی نیز کمک شایانی خواهد نمود.

هسته پژوهشی مدیریت انرژی در صنایع زیستی در کنار کارهای پژوهشی که در مدت‌زمان کوتاهی که از تشکیل آن می‌گذرد، افتخار می‌نماید که کتاب حاضر را به پژوهشگران، دانشجویان، علاقمندان و دوستداران زندگی تقدیم نماید. این کتاب به‌عنوان منبع بین‌رشته‌ای به دنبال ارائه چارچوب دقیق و راهکارهای تولید انرژی تجدیدپذیر از پسماندهای آلی است.

خداوند متعال را شاکر هستیم که توان ترجمه و چاپ این کتاب ارزشمند را به ما عطا فرمود. از زحمات و تلاش جناب آقای دکتر منصور احمدی که زحمت بخش قابل توجهی از این کار ارزشمند را برعهده داشتند تشکر و قدردانی می‌نمایم. قدردان محبت همکاران و تمام عزیزانی هستم که در اتمام این کار به انحای مختلف کمک و دستیار ما بودند و مشتاقانه منتظر دریافت نظرات، تحلیل‌ها و انتقادات صاحب‌نظران در خصوص این کتاب و راه پیش روی هستیم.

ترحم مصری گندشمین

بهینه‌سازی فرایند هضم بی‌هوازی

۱-۱ هضم بی‌هوازی چیست؟

۱-۱-۱ مفاهیم نظری

هضم بی‌هوازی (AD[1]) فرایندی بیولوژیکی است که منجر به تخریب ماده آلی در غیاب هوا می‌شود. ازآنجاکه ۲۱٪ حجم هوا را اکسیژن تشکیل می‌دهد، هضم بی‌هوازی را فرایند آنوکسی نیز می‌نامند. انواع فرایندهای تخمیر بی‌هوازی در طبیعت عبارت‌اند از:

- تخمیر الکلی: برای تولید بیواتانول
- تخمیر لاکتیک: به‌عنوان‌مثال، در طی تولید سبزیجات تخمیری مانند کلم ترش، ذرت، سس سویا
- تخمیر تاریک: یک نوع خاصی از تخمیر بی‌هوازی است که بیوهیدروژن تولید می‌کند و نیازمند انرژی حرارت است.
- فوتوتخمیر: اگر انرژی به‌صورت نور تأمین شود بعضی از باکتری‌ها و سیانوباکتری‌ها می‌توانند بیوهیدروژن تولید کنند.
- تخمیر بوتیریک[2]: یک نوع خاصی از تخمیر تاریک است که منجر به تولید هم‌زمان هیدروژن، بوتانول و استون می‌شود.

[1] Anaerobic digestion
[2] Butyric fermentation

thermophillic conversion of granular and dispersed sludge, *Water Research*, 30(1), 199–207, 1996.

Varnero Moreno, M.T., *Manual de biogás*, Edition by FAO (Food and Agriculture Organization) and Government of Chile, Santiago, Chile, ISBN 978-95-306892-0, 2011.

Violante, P., *Chimica e fertilità del suolo,* Edagricole, Bologna, Italy 2013.

مروری بر روش‌های آزمایشگاهی آنالیز فرایند تخمیر

۲-۱ تکنیک‌های اندازه‌گیری: صحت، دقت و تکرارپذیری

« من اغلب می‌گویم، موقع صحبت کردن در مورد چیزی، چنانچه مقدار آن را اندازه‌گیری کرده و اندازه آن را با عدد بیان کنید، چیزی در مورد آن می‌دانید؛ اما هنگامی که نمی‌توانید آن را اندازه گیری کنید و مقدار آن را با عدد بیان کنید، دانش شما ناچیز و نامفهوم است. این مرحله ممکن است شروع دانش باشد، اما به‌ندرت اندیشه قادر به حصول مرحله علم خواهد بود، هر چه که باشد».

William Thomson (Lord Kelvin)

این جمله ویلیام تامسون (مبدع مقیاس درجه حرارت کلوین)، ماهیت این بخش را خلاصه می‌کند. در سیستم‌های تولید بیوگاز، هدف از اندازه‌گیری و کنترل پارامترهای سیستم، ماکزیمم‌سازی تولید متان به ازای هر مترمکعب حجم راکتور (بهینه‌سازی فرایند) یا به ازای هر تن ماده اولیه (بهینه‌سازی سوبسترا)، است. سؤال اینجاست که "اندازه‌گیری" چیست؟

اندازه‌گیری یعنی تعیین عددی بزرگی و اندازه یک متغیر برحسب واحد اندازه‌گیری (متغیر) مربوطه.

اندازه‌گیری یک واحد فیزیکی مشخص و تعریف‌شده (مانند وزن، طول یا جریان الکتریکی) کار نسبتاً آسانی است. در مقابل اندازه‌گیری متغیرهای یک فرایند پیچیده مانند هضم بی‌هوازی بسیار دشوار است، چون‌که از جزئیات فرایند مانند تعداد باکتری‌های زنده و نوع فعالیت‌های متابولیکی آن اطلاع دقیقی در دسترس نیست. تنها می‌توان وضعیت کل اکوسیستم متشکل از باکتری و سوبسترا را بر اساس اطلاعات

Energy from Biomass and Waste, San Servolo, Venice, Italy, 2012.

Schnurer, A., and Jarvis, A., *Microbiological Handbook for Biogas Plants*, Swedish Waste Management U2009:03, Swedish Gas Centre Report 207, 2010.

Strömberg, S., Nistor, M., and Liu, J., Standardization as a key to reliable gas measurements in biochemical methane potential (BMP) tests, *Proceedings of the Fourth International Symposium on Energy from Biomass and Waste, San Servolo*, Venice, Italy, 2012.

Thomson, W. (Lord Kelvin); *Lecture on "Electrical Units of Measurement"*, Popular Lectures Vol. I, p. 73, May 3, 1883.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure), Norm VDI 4630/2006-Fermentation of organic materials. Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany, 2006.

شرایط مطلوب انجام آزمایش

۳-۱ مقدمه

در فصل قبل، ابزارها و آزمایش‌های موردنیاز برای مدیریت واحد بیوگاز (تکنیک‌های لازم برای بهینه‌سازی فرایند هضم بی‌هوازی) مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل راهنمای عملی انجام آزمایش‌ها در مجموعه تولید بیوگاز مرور خواهد شد. کاربرد عملی این آزمون‌ها نیز در فصل ۴ مرور خواهد شد.

۳-۲ اندازه‌گیری رطوبت و ماده فرار

اصلی‌ترین آزمون‌های بهینه‌سازی فرایند هضم بی‌هوازی عبارت‌اند از:

- تعیین مقدار ماده خشک (DM[1])
- تعیین مواد جامد فرار (VS[2]).

آزمون‌های مورد نیاز بر اساس نوع ماده اولیه و ویژگی‌های استراتژیک بهینه‌سازی و پیش‌تیمار سوبسترا تعیین می‌گردند تا به کاهش نسبت مواد جامدات فرار ورودی به باقی‌مانده آن پس از هضم کمک کند. اگرچه تعیین هر دو متغیر DM و VS بسیار ساده است ولی اهمیت آن‌ها برای درک کیفیت مواد اولیه و بازده فرایند هضم بی‌هوازی بسیار مهم است. کیفیت مواد اولیه به مقدار زیادی تابع رطوبت است، زیرا رطوبت نه‌تنها به تولید بیوگاز کمک نمی‌کند بلکه هزینه‌های حمل‌ونقل را نیز افزایش می‌دهد. رطوبت زیاد رشد قارچ و کپک زدن مواد اولیه را تسریع می‌کند که تولید مایکوتوکسین‌ها را بیشتر کرده و

[1] Dry Matter
[2] Volatile Solids

هضم بی‌هوازی را مختل می‌کند. در کشورهایی که مواد اولیه هضم بی‌هوازی از محصولات کشاورزی تأمین می‌شود (مانند کشور ایتالیا و آلمان)، قیمت مواد اولیه بر اساس میزان ماده خشک تعیین می‌شود. چنین معیاری تا حدودی دقیق نیست، چون‌که برخی مواد خام علی‌رغم داشتن مقدار DM برابر، پتانسیل تولید متان متفاوتی دارند یا مقدار لیگنین زیست‌توده یا میزان خاکستر آن‌ها نیز متفاوت است. با اندازه‌گیری مقدار خاکستر و تعیین تفاوت ماده خشک و خاکستر می‌توان پتانسیل بیوشیمیایی تولید متان (BMP[1]) را تخمین زد. تفاوت ماده خشک و خاکستر بیانگر مقدار مواد جامد فرار است که بیانگر درصد بالقوه تجزیه‌پذیری مواد آلی نیز است. به عبارت «تجزیه‌پذیری بالقوه» دقت کنید، این بدین معنی است که دو مقدار برابر یک سوبسترا که مواد جامد فرار یکسانی هم دارند، در شرایط نابرابر تولید متان متفاوتی (BMP) دارند. پتانسیل متان‌زایی تابعی از مقدار لیگنین، وجود یا عدم وجود مواد بازدارنده (قارچ‌ها، آفت‌کش‌ها و ...)، نسبت C/N، اندازه ذرات و پیش‌تیمارهای (حرارتی، شیمیایی یا بیولوژیکی) سوبسترا است. بر این اساس آزمون‌های تعیین کیفیت سوبسترا به‌صورت زیر باید مدنظر قرار گیرد:

تعیین DM ← تعین مقدار خاکستر ← محاسبه VS ← تعیین BMP

یکی دیگر از کاربردهای تعیین مواد جامد فرار اندازه‌گیری بازده هاضم است. مقدار بیوگاز تولید شده طی فرایند هضم بی‌هوازی متناسب با محتوای مواد جامد فرار است. شاخص راندمان تبدیل زیست‌توده به متان عبارت است از نسبت VS مواد خام (ورودی هاضم) به VS باقیمانده مواد هضم شده (خروجی هاضم). آزمایش‌های مورد نیاز برای تعیین بازده کلی واحد بیوگاز به شرح زیر است:

تعیین VS مواد خام و پسماند هاضم ← محاسبه بازده هاضم ← تعیین BMP مواد هضم شده (آزمایش تکمیلی)

۳-۲-۱ اندازه‌گیری DM با آنالایزر رطوبت

این آزمایش جزو ساده‌ترین آزمایش‌های ماده خام است و به‌راحتی به‌صورت زیر قابل انجام است:

- ظرف را در ترازو قرار داده و ترازو را صفر کنید.

[1] Biochemical methane potential

- ظرف را به‌صورت یکنواخت با مقدار توصیه‌شده (معمولاً ۱۰ گرم) از ماده اولیه پر کنید.
- ظرف را در آون قرار داده و دمای آون را روی ۱۰۵ درجه سلسیوس تنظیم کنید.

چرخه خشک شدن نمونه در آون شروع می‌شود و زمانی که تغییرات وزنی نمونه قطع شد، چرخه خشک شدن را متوقف کنید. تفاوت وزن اولیه ماده و وزن نهایی، مبنای محاسبه مقدار رطوبت است. تحلیل و اندازه‌گیری رطوبت درعین‌حال که ابزار و روش بسیار ساده‌ای دارد ولی به‌واسطه اشتباهات کوچک می‌تواند منشأ اتلاف وقت و خطای آزمایشی نیز باشد. نمونه‌هایی از اشتباهات متداول اندازه‌گیری DM و VS در ذیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۲-۱-۱ خطای مقیاس رطوبت و ماده خشک

به‌طور پیش‌فرض رطوبت‌سنج‌ها، محتوای رطوبت را بر اساس وزن نمونه مرطوب و خشک و به‌صورت درصد اندازه‌گیری می‌کنند (برحسب). مدل‌های تجاری روش‌های مختلفی را برای گزارش نتایج استفاده می‌کنند که ازجمله آن داریم:

- رطوبت برحسب درصد (ترپایه WW) یا رطوبت ATRO
- ماده خشک برحسب درصد (ترپایه WW) یا ماده خشک ATRO

کلمه ATRO از نام آلمانی Absolut TROcken (ماده خشک مطلق) گرفته شده است و یک روش متداول برای اندازه‌گیری رطوبت مطلق در صنعت چوب است که مقدار DM ترپایه را برحسب درصد محاسبه می‌کند:

- رطوبت برحسب درصدی از WW

$$M\ [\%] = \frac{WW - DW}{WW}$$

- DM برحسب درصدی از WW (معیار مفید برای این فرایند)

$$DM\ [\%] = \frac{DM}{WW}$$

- رطوبت ATRO

$$DM_{ATRO}\ [\%] = \frac{WW - DW}{DW}$$

- DM_{ATRO}

استفاده از نتایج آزمایشگاهی در صنایع تولید بیوگاز

۴-۱ کاربرد عملی آزمون VS

مقدار کربن کل که پیش‌تر به‌عنوان قابل‌هضم در نظر گرفته می‌شد، منحصراً به مواد جامد فراری اطلاق می‌شود که بخشی از مواد جامد را شامل می‌شوند. با اجرای آزمون VS که بسیار ساده است می‌توان به اطلاعات بسیار مفیدی برای نظارت و کنترل فرایند هضم بی‌هوازی دست یافت.

۴-۱-۱ اندازه‌گیری بارآلی[1] (OL) و نرخ بارآلی[2] (OLR)

اولین کاربرد عملی اندازه‌گیری VS، بررسی بار آلی و نرخ بار آلی است که به‌منظور ارزیابی واحد بیوگاز در محدوده طراحی قابل‌استفاده است. اغلب واحدهای بیوگاز کشاورزی ساخته شده در اروپا را می‌توان در زمره راکتورهای با همزن پیوسته[3] (CSRT) طبقه‌بندی کرد. نرخ بار آلی این نوع راکتورها نمی‌توانند بیش از ۳ $kgVS/m^3.day$ را تحمل کنند. در صورتی بارگذاری از این مقدار تجاوز کند، بازده تبدیل زیست‌توده به متان به سطح غیرقابل قبولی کاهش می‌یابد. به‌طورمعمول، نرخ بار آلی واحدهای بیوگاز تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای باید در محدوده ۳-۲٫۵ $kg\ VS/m^3.day$ ثابت باقی بمانند. برخی از تولیدکنندگان آلمانی راکتورهایی طراحی کرده‌اند که تا ۵ $kg\ VS/m^3.day$ در روز را تحمل می‌کنند. در چنین راکتورهایی به‌منظور حفظ بازده هضم در سطح قابل‌قبول، اکوسیستم باکتریایی را با افزودن روزانه مخلوطی از آنزیم-

[1] Organic Load
[2] Organic Load Rate
[3] continuously stirred reactor tank

ها، مواد معدنی و باکتری‌های lyophilized تثبیت می‌کنند. سازندگان این هاضم‌ها معتقدند که این راکتورها از نوع راکتورهای CSRT نیستند. این راکتورها درواقع، به‌صورت هاضم‌های جریان پلاگ (PFD)[1] عمل می‌کنند که به‌صورت تئوریک از راکتورهای با همزن پیوسته کارآمدتر است. علی‌رغم، ملاحظات تئوریک و مرور مقالات مربوطه چنین برآورد می‌شود که تجربه برخی از پژوهشگران ایتالیایی در ارتباط با چنین هاضم‌هایی بسیار منفی است. دلایل آن را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- هاضم‌های آلمانی تجاری کمپکت را نمی‌توان واقعاً یک هاضم جریان پلاگ در نظر گرفت. درواقع ازلحاظ کارکردی آن‌ها در محدوده هاضم‌های CSRT و هاضم‌های PFD می‌توان طبقه‌بندی کرد.
- مواد افزودنی به دلیل فرمول‌های خاصی که دارند از طرف سازنده هاضم‌ها، هزینه بالایی را مطالبه می‌کنند. بااین‌وجود، در دوره بهره‌برداری تجاری از راکتورها، مالکان کارخانه‌ها خیلی به اثربخشی چنین افزودنی‌هایی در حفظ بازده هضم اعتمادی ندارند و قابلیت مواد افزودنی را بسیار پایین‌تر از ادعای سازندگان آن ارزیابی کرده‌اند. کارایی پایین این مواد در راکتورهای ناپیوسته[2] (BR) آزمایشگاهی نیز نشان داده شده‌اند. خروجی پسماند هضم راکتورهای جریان پلاگ تقریباً دارای ۵۰ درصد BMP خوراک خام ورودی را دارا هستند.

خوراک‌دهی زیست‌توده کشاورزی راکتورهای پیوسته تک‌مرحله‌ای دارای همزن CSRT اگر بیش از $۳kgVS/m^3.day$ باشد، محیط را اسیدی نموده و درنهایت به فروپاشی بیولوژیکی فرایند هضم بی‌هوازی منجر خواهد شد. برای محاسبه نرخ بار آلی (OLR) واحدهای بیوگاز حاوی دو یا تعداد بیشتری هاضم، باید بار آلی (OL) روزانه را بر مجموع حجم همه راکتورها تقسیم کنید.

۴-۱-۱-۱ کاربردهای اجرایی

در صنایع تولید بیوگاز لازم است که ماهانه حداقل یک بار آزمون‌های زیر تکرار شود:

- یک نمونه از خوراک خام (یا یک نمونه مخلوط حاوی خوراک و زیست‌توده‌های مختلف) را تهیه کنید و VS آن را اندازه‌گیری نمایید. اگر ذرت یا سایر سوبستراها از سیلو تأمین می‌شوند، بهتر است که نمونه‌ها را از شش نقطه مختلف سیلو تهیه کرده و همه آن‌ها را در یک ظرف مخلوط و سپس مقدار مورد نیاز را از آن بردارید. برای تهیه نمونه از لجن یا کود مایع، توصیه می‌شود قبل از نمونه‌برداری آن

[1] plug flow digester
[2] batch

چند ترفند ساده برای بهبود عملیات آزمایشگاهی

۵-۱ پیشگفتار

اغلب تکنیک‌های توصیف شده در این فصل با AMPTS II پیاده‌سازی و انجام شده‌اند و اجرای آن با ابزار و تجهیزات دیگر نیز امکان‌پذیر است.

۵-۲ اندازه‌گیری متان بیوگاز راکتور دوگانه و با استفاده از یک سرنگ

در اغلب آزمایشگاه‌ها و فعالیت‌های دانشگاهی، کروماتوگرافی گازی یکی از مرسوم‌ترین تکنیک‌های آنالیز ترکیب شیمیایی بیوگاز است. روش GC اگرچه بسیار دقیق است ولی اجرای مداوم آن برای مدیر واحد بیوگاز علاوه بر پیچیدگی از هزینه بالایی نیز برخوردار است. اغلب همه واحدهای بیوگاز مجهز به آنالایزر آنلاین درصد بیوگاز هستند که معمولاً بر اساس اسپکتروفتومتری فروسرخ (IRS) عمل می‌کنند که مقادیر دی‌اکسیدکربن و متان بیوگاز را تعیین می‌کند. آنالایزرهای قابل‌حمل IRS و سنسورهای حالت‌جامد نیز در مراکز فروش موجود هستند. این قبیل تجهیزات برای اندازه‌گیری عملیات آزمایشگاهی مناسب نیستند، چون‌که این سنسورها نیازمند حجم بالایی راکتورهای بیوگاز در هر خوانش هستند. برای مثال، آنالایزر قابل‌حمل Geotech نیازمند دبی بیوگاز به میزان ۵۰۰ ml/min است که فراتر از ظرفیت هر راکتور آزمایشگاهی است. در برخی از آزمایش‌ها، علاوه بر مقدار خالص متان تولیدی نمونه‌ها، کیفیت بیوگاز (درصد متان) نیز مهم است. یک روش ساده برای این ارزیابی، تهیه دو منحنی جداگانه و ترسیم میزان متان تولیدی و دی‌اکسیدکربن به‌طور مستقل از هم است که بدین طریق می‌توان میزان روزانه

improve
biogas production. Bioresource Technology, 101(22), 8713–8717. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.108.

Burgstaler, J., Wiedow, D., Godlinski, F., and Kanswohl, N., Einsatz von Natriumhydrogencarbonat in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Landbauforschung—VTI Agriculture and Forestry Research, 4, 343–352, 2011. https://www.thuenen.de/media/publikationen/landbauforschung/Landbauforschung_Vol61_4.pdf.

Choong, Y.Y., Norli, I., Abdullah, A.Z., and Yhaya, M.F., Impacts of trace element supplementation on the performance of anaerobic digestion process: A critical review, Bioresource Technology, 209, 369–379, 2016.

Dupont, Biogas enzymes brochure, http://www.dupont.com/content/dam/ dupont/products-and-services/industrial biotechnology documents /DuPontBiogas Enzymes -brochure-web-EN .pdf.

FAO, Maize in human nutrition, FAO Food and Nutrition Series, No. 25, ISBN 92-5-103013-8, Rome, 1992. http://www.fao.org/docrep/t0395e/t0395e03.htm. Garuti, M., Soldano, M., and Fabbri, C., Conducibilità elettrica, utile monitorarla nel digestato, article published by L'Informatore Agrario, 40, 2014.

Gustavsson, J., Cobalt and Nickel, Bioavailability for Biogas Formation, Linköping Studies in Arts and Science No. 549, Water and Environmental Studies, Linköping, Sweden, 2012.

Helffrich, D., and Oechsner, H., The Hohenheim biogas yield test: comparison of different laboratory techniques for the digestion of biomass, Landtechnik 3/2003. Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., de Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J.-C., de Laclos, H.F., Ghasimi, D.S.M., Hack, G., Hartel, M., Heerenklage, J., Horvath, I.S., Jenicek, P., Koch, K., Krautwald, J., Lizasoain, J., Liu, J., Mosberger, L., Nistor, M., Oechsner, H., Oliveira, J.V., Paterson, M., Pauss, A., Pommier, S., Porqueddu, I., Raposo, F., Ribeiro, T., Pfund, F.R., Strömberg, S., Torrijos, M., van Eekert, M., van Lier, J., Wedwitschka, H., and Wierinck, I., Towards a standardization of biomethane potential tests, Water Science & Technology, 2016. http://wst.iwaponline.com/content/ppiwawst/ early/2016/09/19/wst.2016.336.full.pdf.

ISO/IEC Guide 98-1:2009, Uncertainty of measurement—Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement. https://www.iso.org/standard/46383.html.

ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). https://www.iso.org/standard/50461.html.

Lebuhn, M., Liu, F., Heuwinkel, H., and Gronauer, A., Biogas production from monodigestion of maize silage–long-term process stability and requirements, Water Science & Technology, 58(8), 1645–1651, 2008.

Luna del Risco, M., Normak, A., and Orupõld, K., Biochemical methane potential of different organic wastes and energy crops from Estonia, Agronomy Research, 9(1–2), 331–342, 2011.

Michener, B., Scarlata, C., and Hames, B., Rounding and significant figures: Laboratory analytical procedure (LAP), issued July 17, 2005, Technical Report NREL/TP-510-42626, January 2008.

Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Oechsner, H., and Jungbluth, T., Investigation of the methane potential of horse manure, Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 15(2), 161–172, 2013.

Petta, L., Giuliano, A., Porzio, V., and Gamberini, P., Con il pretrattamento enzimatico cresce la sostenibilità della filiera, Terra e Vita, 29–30, 50, 2013.

Ploechl, M., Hilse, A., Heiermann, M., Quiñones, T.S., Budde, J., and Prochnow, A., Application of hydrolytic enzymes for improving biogas feedstock fluidity, Agricultural Engineering International: CIGR Journal, IX, 2009.

Södeborg, S., Nistor, M., and Liu, J., Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in biochemical methane potential (BMP) tests, Waste Management, 34, 1939–1948, 2014.

Verein Deutscher Ingenieure, VDI 4630-2014 Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche (Entwurf—April 2014), ICS 13.030.30, 27.190. https://www.vdi.de/technik/fachthemen/energie-und-umwelt/fachbereiche/energiewandlung-und-anwendung / richtlinien/vdi-4630/.

واژه نامه اصطلاحات و اختصارات

AD Anaerobic digestion	هضم بی‌هوازی توسط میکروارگانیسم‌ها در غیاب اکسیژن انجام می‌شود که محصول نهایی فرایند متان و دی‌اکسیدکربن است.
ADP	تجهیزات هضم بی‌هوازی.
Alkalinity	واحد مقاومت محلول در برابر کاهش pH. واحد اندازه‌گیری مقاومت محلول در برابر کاهش pH که با غلظت بی‌کربنات‌ها یا کربنات‌ها در محلول متناسب است. وقتی به‌صورت معادل کربنات‌کلسیم (برحسب mg) بیان شود، قلیایی کل می‌نامند.
AMPTS Automatic methane potential test system	سیستم آزمایشگاهی تعیین پتانسیل متان.
Ash	بخش معدنی مواد آلی.
Biological collapse	شرایطی که در یک یا چند گروه از میکروارگانیسم‌ها مهار می‌شوند و زنجیره تغذیه تجزیه مواد آلی می‌شکند. این اتفاق به انباشت محصولات میانی زنجیره (معمولاً اسیدهای چرب فرار VFA) و کاهش شدید (یا صفر شدن) تولید متان می‌شود.
Blank	راکتور(هایی) که فقط حاوی ماده تلقیح هستند. تولید خالص متان به‌صورت تفاوت بین تولید راکتور تیماری (میانگین تکرارها) منهای راکتور شاهد (میانگین تکرار راکتورهای بلنک) تعیین می‌شود.
BMP Biochemical methane potential	پتانسیل متان بیوشیمیایی: مقدار خالص متان تولید شده طی هضم بی‌هوازی. در برخی مواقع پسوندی به دنبال آن قرار می‌گیرد که نشان

	دهنده زمان‌ماند و روزهای آزمایش است به عنوان مثال BMP_{30} به معنای BMP حاصل طی یک آزمایش ۳۰ روزه است.
BOD_5	نیاز بیولوژیکی اکسیژن در ۵ روز: معیاری برای تجزیه‌پذیری هوازی زیست‌توده است. لازم به ذکر است که ارتباط مستقیمی بین زیست‌تخریب‌پذیری هوازی و هضم بی‌هوازی مواد آلی وجود ندارد.
Buffer capacity	واحد مقاومت محلول در برابر کاهش pH. واحد اندازه‌گیری مقاومت محلول در برابر کاهش pH که با غلظت بی‌کربنات‌ها یا کربنات‌ها در محلول متناسب است.
COD Chemical oxygen demand	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی: میزان کربن موجود در ماده آلی را بیان می‌کند. این شاخص را می‌توان به جای مواد جامد فرار به عنوان یک پارامتر محاسبه BMP استفاده کرد. هم‌ارزی COD و VS در فصل ۸ بحث شده است.
CRT	مشابه زمان نگهداری مواد جامد (SRT) است با این تفاوت که به بخش مواد جامد حاوی باکتری‌های زنده اشاره دارد.
CSRT	مخزن راکتور دارای همزن مداوم (CSRT) که متداول‌ترین هاضم‌های صنعت بیوگاز کشاورزی هستند.
Digestate	لجن باقیمانده (پسماند هضم) پس از فرآیند هضم بی‌هوازی (AD) که عمدتاً از مواد غیرقابل هضم (لیگنین، مواد معدنی) و زیست‌توده میکروبی زنده تشکیل شده است.
DM Dry matter	کسر ماده به جز رطوبت که مترادف کل مواد جامدات (TS) است
d.w.: Dry weight	وزن مواد جامد.
E Absolute error	تفاوت بین مقدار واقعی یک متغیر و مقداری که توسط یک ابزار یا دستگاه مشخص اندازه‌گیری شده است.
e Relative error	خطای نسبی: نسبت خطای مطلق به مقدار متغیر اندازه‌گیری شده.
Error propagation	انتشار خطا: هنگام محاسبه یک شاخص با استفاده از دو یا چند متغیر اندازه‌گیری شده (به‌صورت جداگانه)، خطاهای تک‌تک متغیرها تمایل به تجمیع دارند و درنتیجه مقدار خطای نهایی (عدم قطعیت) بزرگ‌تر از خطای تک‌تک متغیرها است.
FOS/TAC	نام تجاری آزمون نسبت VFA/TA مخفف عبارت آلمانی *Flüchtige Organische Säuren/Total Anorganisches Carbonat*.

Headspace	فضای خالی راکتور: بخشی از هاضم یا راکتور آزمایشگاهی که توسط بیوگاز اشغال شده است.
HRT Hydraulic retention time	زمان‌ماند هیدرولیک: میانگین زمانی که حجمی از زیست‌توده مایع یا رقیق‌شده در هاضم باقی می‌مانند.
Inoculum	تلقیح: زیست‌توده متشکل از میکروارگانیسم‌های زنده است که می‌تواند مواد آلی را در شرایط مناسبی تجزیه کند. بسته به نوع فرآیند، تلقیح‌ها هوازی یا بی‌هوازی هستند. به عنوان مثال، مخمر مایه تلقیح برای تخمیر خمیر نان (هوازی) یا تولید بیوگاز (بی‌هوازی) است. کود نشخوارکنندگان هم تلقیح و هم سوبسترای AD است. پسماند هضم ماده تلقیح متداول برای ارزیابی BMP است.
LCFA Long chain fatty acids	اسیدهای چرب با زنجیره بلند: اسیدهای چربی که بیش از شش اتم کربن دارند. این اسیدها معمولاً در آب نامحلول هستند، تمایل به تشکیل امولسیون و صابونی‌شدن دارند. به طور کلی، LCFA برای فرآیند AD بازدارنده است و برای هضم کامل آن‌ها به زمان طولانی (۴۵ تا ۶۰ روز) نیاز دارد.
Mix ratio	نسبت اختلاط: شدت هم زدن در راکتور CSRT.
Nl **Nm^3**	لیتر یا مترمکعب در شرایط نرمال: ازآنجایی‌که حجم گازها تابعی از دما و فشار است، باید شرایط اندازه‌گیری حجم گاز مشخص شود. در صنعت بیوگاز حجم گاز را در صفر درجه سِلسیوس و در فشار اتمسفر 101.3kPa اندازه می‌گیرند.
ODM Organic dry mass	توده خشک آلی: مترادف VS که معمولاً در ادبیات فنی اروپا استفاده می‌شود (ترجمه عبارت آلمانی Organische trocken Masse).
OL Organic load	بار آلی: میزان (kg) مواد جامد فرار (VS) یا COD بارگیری شده به هاضم در روز kgVS (or COD)/day.
OLR Organic loading rate	میزان (kg) مواد جامد فرار (VS) یا COD بارگیری شده به ازای هر مترمکعب هاضم در روز $kgVS\ (or\ COD)/m^3/day$.
ORP Oxidation reduction potential (aka **redox**)	پتانسیل کاهش اکسیداسیون ORP (یا ردوکس): اندازه گیری ظرفیت تبادل الکترون بین گونه‌های شیمیایی (۲۵۷ میلی ولت). اگر مقدار ORP مثبت باشد، واکنش‌ها اکسیداتیو هستند (به طور معمول فرایندهای هوازی) و اگر منفی باشد، کاهشی هستند (به طور معمول فرایندهای بی‌هوازی).

pH	پتانسیل هیدروژن: مقیاس بی‌بعدی که اسیدیته یا خاصیت بازی یک محلول را اندازه‌گیری می‌کند. pH = 7 بیانگر محلول خنثی است (آب مقطر و گاز زدایی شده). pH کمتر از ۷ در محلول اسیدی بروز می‌یابد (سرکه، کوکاکولا، آب لیمو، آب غیرمعدنی، پراکسید هیدروژن). محلول را بازی یا قلیایی نیز pH بزرگ‌تر از ۷ دارد (محلول سود سوزآور، آب لوله‌کشی، آب دریا، آمونیاک، سفید کننده، صابون ماشین ظرف‌شویی).
Short circuit (more correctly, hydraulic short circuit)	اتصال کوتاه (به طور صحیح‌تر، اتصال کوتاه هیدرولیکی): شرایط دینامیک سیالات باعث ایجاد HRT بسیار کوتاه‌تر از زمان‌ماند اسمی می‌شود. این عامل را معادل کاهش مجازی حجم هاضم نیز در نظر می‌گیرند.
Sl or **Sm³** Standard liters or cubic meters	لیتر یا مترمکعب استاندارد: مفهوم مشابه Nl یا Nm^3 است که به عنوان شرایط استاندارد در ۲۰ درجه سِلسیوس و ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال تعریف می‌شود. در صنعت بیوگاز خیلی متداول نیست و بیشتر در صنعت گاز طبیعی استفاده می‌شود.
Sludge	لجن: محتویات هاضم معمولاً از مواد آلی زنده (باکتری‌ها و آرکایاها) و سوبسترای نیمه تخریب‌شده تشکیل شده است.
SMA Specific methanogenic activity	فعالیت متانوژنیک خاص SMA: حداکثر مقدار متان تولید شده از استات سدیم (یا اسید استیک) در روز، به ازای هر گرم VS تلقیح.
Substrate	سوبسترا: ماده آلی که BMP آن اندازه‌گیری می‌شود. مواد اولیه (خوراک) نیروگاه بیوگاز.
TOC Total organic carbon	کل کربن آلی (Idem COD) که با روشی متفاوت اندازه‌گیری می‌شود $TOC = COD \times 12/32$.
TS	کل مواد جامد موجود در بستر (اعم از آلی و معدنی).
Turnover time	زمان گردش: ضریبی که به‌صورت نسبت بین حجم هاضم/جریان گردشی تعریف می‌شود. به عنوان یک پارامتر کنترل پمپ همزن در هاضم‌های CSRT استفاده می‌شود. مقدار مطلوب در محدوده ۳۰-۲۰ دقیقه است.
Unit gas flow	جریان گاز واحد: ضریبی که به‌صورت نسبت جریان/حجم بیوگاز تزریقی تعریف می‌شود در هاضم های CSRT که با دمیدن بیوگاز از پایین فرایند همزنی انجام می‌شود، مورداستفاده قرار می‌گیرد. مقدار مطلوب در محدوده $(m^3/h)/m^3$ digester ۰/۳ -۰/۲۴ قرار دارد.

Unit power	توان واحد: ضریبی که به‌صورت نسبت توان شفت/حجم همزن تعریف می‌شود (ویژه هاضم‌های CSRT با همزن‌های مکانیکی، مقادیر مطلوب در محدوده ۵ تا ۸ وات بر مترمکعب برای همزنی کامل).
V Useful volume of the digester	حجم مفید هاضم: بخشی از هاضم که به طور مؤثر توسط لجن فعال اشغال می‌شود.
VG Velocity gradient	گرادیان سرعت: $VG = [P\text{stirrers}/(V\text{digester}\cdot\mu)]^{1/2}$ (که μ ویسکوزیته دینامیکی یا مطلق لجن است). به طور تئوریک، بهترین معیار تعریف شدت هم زدن است، اما اندازه گیری μ عملاً غیرممکن است، زیرا لجن یک سیال غیرنیوتنی است. مقدار ایده‌آل آن در محدوده $VG = 50\text{-}80\ s^{-1}$ است.
VFA Volatile fatty acids	اسیدهای چرب فرار VFA: اسیدهای چرب با زنجیره کوتاه (<۶ اتم کربن). اسیدهای استیک، پروپیونیک و بوتیریک که اغلب در فرآیندهای هضم طبیعی موجود هستند.
VS Volatile solids	VS جامدات فرار: کسری از TS که به طور کامل توسط میکروارگانیسم‌ها قابل‌هضم است. $(VS = TS - ash)$
w.w. Wet weight	وزن مرطوب: VS را به صورت کسری از DM یا کسری از w.w بیان می‌کنند. در سراسر این کتاب، VS به عنوان کسری از w.w بیان شده است، مگر در مواردی که نحوه محاسبه مشخص شده باشد.

جداول مورد نیاز برای تسریع محاسبات

جدول ۸-۱ محتوای کربن، نیتروژن و نسبت C/N بیوماس

C/N	C (%d.w.)	N (%d.w.)	
56.6	68	1.2	کاه ذرت
12.5	45	3.6	کلم
12	48	4	یونجه Hay
16	40	2.5	یونجه Alfalfa
25	40	1.6	علوفه لگوم
17–25	30–40	1.6–1.8	کود گاوی
13–20	49–76	3.8	کود گوسفندی
27.4	22	0.8	کود طویله
25	57.5	2.3	کود اسب
6.2–13.7	23–38	2.8–3.8	کود خوک (جامد)
10	4	0.4	کود خوک (پساب)
80	40	0.5	کاه جو دوسر
100	50	0.5	کاه گندم
48	48	1	کاه جو
5–9.6	31–35	3.7–6.3	کود بستر مرغ
12.5	41	3.3	گوجه‌فرنگی
28.6	54	1.9	زباله آشپزخانه
31	44	1.4	ساقه ذرت
13	39	3	شبدر

جدول ۸-۲ مقدار pH برخی مواد متداول

نوع ماده	مقدار pH
محلول اسید هیدروکلریک ۱ M	0
اسید باتری	1.5
شیره معده	1.0–2.0
آب‌لیمو	2.4
کوکاکولا	2.5
سرکه	2.9
صابون آنتی باکتریال	3.5
آب پرتقال	3.7
ماءالشعیر	4.5
باران اسیدی	4.5–4.8
قهوه	5.0
چای، پوست سالم	5.5
آب دی یونیزه در دمای ۲۵ °C	5.5-6.0
آب اکسیژنه	6.2
شیر	6.5–6.7
آب مقطر در دمای ۲۵ °C	7
بزاق انسان سالم	6.5–7.5
خون	7.40–7.45
آب استخر	7.2-7.8
آب دریا	7.7–8.3
صابون قلیایی	9.0–10.0
آمونیاک	11.5
سفید کننده	12.5
آب قلیایی Lye	13.5
محلول هیدروکسید سدیم ۱ M	14

جدول ۸-۳ نسبت هم ارزی محتوای جامدات فرار (VS) و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) چند ماده خالص که به عنوان بستر مرجع هاضم

ماده	فرمول شیمیایی	g VS/g COD
بیومس گیاهی و باکتریایی	≈50% C	1.3333
گلوکز	C6H12O6	1.0666
ساکارز	C12H24O12	1.0666
فروکتوز	C6H12O6	1.0666
نشاسته	$(C_6H_{12}O_6)_n$	1.0666
سلولز	$(C_6H_{10}O_5)_n$	0.84375
پروتئین‌ها (میانگین)	55% C + 7% H + 17% N + 21% O	≈0.42
اسید استیک	CH_3COOH	0.93
استات سدیم	CH_3COONa	≈0.93
اسید پروپیونیک	$C_3H_6O_2$	0.6622
سدیم پروپیونات	$C_3H_5O_2Na$	≈0.6622
اسید بوتیریک	$C_4H_8O_2$	0.5525
سدیم بوتیرات	$C_4H_7O_2Na$	≈0.5525
روغن‌های گیاهی (اسید اولئیک)	$C_{18}H_{34}O_2$	0.346

Mario Alejandro Rosato

MANAGING BIOGAS PLANTS

Translated By:

Prof. T. Mesri Gundoshmian

Dr. M. Ahmadi Pirlou

9 786227 258745