مجله محیط شناسی، شماره ۳۴، تابستان ۱۳۸۳، صفحه ۱۹-۱۵

ارزیابی فرایند هضم بی هوازی زباله های فساد پذیر شهری

دکتر ناصر مهردادی *

مهندس پرویز محمدی **

دکتر عبدالرضا کرباسی ***

مهندس مهرداد عدل ****

چکیده

هضم بی هوازی، تجزیه میکربی مواد آلی در غیاب اکسیژن است که نتیجه این فرایند، تولید متان و مواد تثبیت شده می باشد. هضم بی هوازی دارای سه مرحله، پیش تصفیه، هضم و پس تصفیه است. باکتری های تخمیر کننده، تولید کننده H_2 (کاهنده پروتون) و متان زا سه گروه عمده میکروارگانیسم های فعال در این فرایند هستند. هضم بی هوازی در مقایسه با کمپوست هوازی، یک تولید کننده انرژی خالص است. در هضم بی هوازی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات ساعت در هر تن زباله تر انرژی تولید می شود، در حالیکه در کمپوست هوازی ۷۵۰- ۵۰۰ کیلووات ساعت انرژی برای تصفیه هر تن زباله تر مصرف می شود. در هضم بی هوازی مواد زاید جامد فساد پذیر، بهره دهی متان بین ۰/۲ تا ۰/۵ متر مکعب بر هر کیلوگرم جامدات فرار افزوده شده است. در این مطالعه از یک راکتور با حجم ۲۲ لیتر برای هضم مواد زاید جامد فساد پذیر شهری با درصد بالای TS و زمان ماند ۱۵ تا ۲۰ روز استفاده شده است. راکتور به وسیله یک کویل که آب گرم در آن جریان داشت، گرم می شد، به طوریکه دمای درون هاضم در محدوده ۳۳ تا ۳۷ درجه سانتیگراد نگهداری می شد. در این مطالعه تولید گاز ۲۵۰۰ تا ۹۴۰۰ لیتر بر هر متر مکعب راکتور در روز و بهره دهی متان بین ۰/۲۳ تا ۰/۶۷ متر مکعب متان به ازای هر کیلوگرم جامدات فرار و کاهش مواد آلی بیش از ۵۰٪ به دست آمد.

کلید واژه

هضم بی هوازی، متان زا، بهره دهی متان، جامدات فرار، بیوگاز.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۱/۹/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۲/۶/۲۶

* استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.

** عضو گروه انرژی های نو، پژوهشگاه نیرو.

*** مدیرعامل سازمان بهره وری انرژی ایران (سابا).

**** عضو گروه انرژی های نو، پژوهشگاه نیرو.

سرآغاز

تصفیه بیولوژیکی به عنوان بهترین انتخاب تصفیه برای مواد آلی کم کالری زباله‌های شهری پذیرفته شده است (Chynoweth & Isaacson, 1987). روشهای تصفیه بیولوژیکی شامل کمپوست هوازی و هضم بی هوازی است. گوارش بی هوازی زیست توده به عنوان یکی از فن آوری های تولید انرژی است. این فن آوری به تولید متان که نوعی فرآورده انرژی زا بوده و می تواند سوخت مناسبی برای تولید نهایی باشد، می انجامد. متان می تواند در گرمایش خانگی و تجاری، در تامین انرژی حرارتی صنایع، در موتورهای احتراق داخلی، در موتورهای استرلینگ، در توربین های گازی و بویلرهای نیروگاهی همچنین در برخی از پیل های سوختی برای تولید برق به کار برده شود.

زواید کشاورزی، فضولات حیوانی، فاضلاب های شهری و صنعتی، فاضلاب صنایع غذایی و مواد فسادپذیر شهری، مواد اولیه برای فرایند هضم بی هوازی می باشند.

هضم بی هوازی مواد زاید جامد شهری به دلایل زیادی حائز اهمیت است. این موارد شامل جنبه های بهداشتی و محیط زیستی، همیاری در عزم جهانی برای کاهش اثر گلخانه‌ای گازهای تولید شده از هضم بی هوازی، کاهش هزینه مدیریت مواد زاید جامد و حفاظت از منابع است.

هدف اصلی از اجرای این پروژه، طراحی، ساخت و راه اندازی یک هاضم بی هوازی در مقیاس آزمایشگاهی برای هضم بی هوازی زباله های فساد پذیر شهری و تولید گاز متان است. طی اجرای این فرایند به ارزیابی پتانسیل تولید متان و تثبیت مواد زاید جامد شهری خرد شده با درصد بالای کل مواد جامد پرداخته خواهد شد. فرایند هضم بی هوازی در این راکتور تحت شرایط درجه حرارت مزوفیلیک (۳۳ تا ۳۷ درجه سانتیگراد) و ۱۵ تا ۴۷ درصد کل جامدات اجرا شده است.

تکنولوژی هضم بی هوازی

هضم بی هوازی، تجزیه میکربی مواد آلی در غیاب اکسیژن است، نتیجه این فرایند، تولید متان و مواد تثبیت شده است. هضم بی هوازی دارای سه مرحله پیش تصفیه، هضم و پس تصفیه می باشد (Sallaff, 2000). در مرحله پیش تصفیه جزء آلی مواد زاید جامد شهری جداسازی و خرد شده و به محل خوراک دهی هاضم فرستاده می شود. در مرحله دوم، مواد آلی در هاضم بارگذاری و عمل تخمیر روی آن صورت گرفته و گاز متان تولید می گردد. در مرحله آخر مواد خروجی از هاضم برای تصفیه بیشتر یا کمپوست، هوازی می شوند و یا عمل آبگیری روی آن انجام می گردد (De Baera, 2000).

کاربرد هضم بی هوازی جزء آلی مواد زاید جامد شهری پدیده ای نسبتاً جدید است. این روش مزیت های زیادی در مقایسه با گزینه های دیگر دفع مواد زاید جامد شهری دارد. هضم بی هوازی تحت شرایط پایدار تولید کننده انرژی خالص است. بهره دهی واقعی بستگی به ترکیب خوراک و پارامترهای بهره برداری در هاضم دارد؛ همچنین می تواند دارای مزیت اقتصادی نسبت به فرایند کمپوست هوازی که یک مصرف کننده انرژی خالص است، باشد. هضم بی هوازی دارای تولید انرژی خالص ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات ساعت در هر تن مواد زاید است، در حالی که کمپوست هوازی ۵۰۰ تا ۷۵۰ کیلووات ساعت برای تصفیه هر تن مواد زاید انرژی مصرف می کند(جرج چوبانوگلوس و همکاران، ۱۳۷۰).

ارزش حرارتی زباله های شهری ۱۹۱۰۰ کیلوژول بر هر کیلوگرم جامدات فرار و بهره متان آنها بین ۰/۵-۰/۲ متر مکعب بر هر کیلوگرم جامدات فرار افزوده شده است (Chynoweth & Isaacson, 1987).

میکروبیولوژی و بیوشیمی هضم بی هوازی

هضم بی هوازی شامل تبدیل مواد آلی به متان و دی اکسید کربن به وسیله فعل و انفعالات داخلی باکتری ها در غیاب اکسیژن است. باکتری های تخمیر کننده، تولید کننده H_2 (کاهنده پروتون) و متان زا سه گروه عمده میکروارگانیسم های متابولیک تخمیر متان هستند. این گونه های باکتری در یک مجموعه مشترک عمل می کنند. مواد آلی درشت مولکول به طور بی هوازی در یک فرایند چند مرحله ای هضم می شوند(Klass, 1998).

در مرحله هیدرولیز و تخمیر مواد آلی درشت مولکول همچون همی سلولز، سلولز، پروتئین ها و چربی ها به وسیله باکتری های هیدرولیز کننده به ترکیبات منومریک قابل مصرف برای ارگانیسم های دیگر تبدیل می شوند. بعد در تخمیر، مواد منومریک به قندهای آزاد، الکل ها، اسیدهای چرب با زنجیره کوتاه، هیدروژن و دی اکسید کربن تبدیل می شوند. باکتری های تخمیر کننده به CO_2 و یک اسید آلی به عنوان منبع کربن و آمونیاک به عنوان منبع نیتروژن نیاز دارند.

در مرحله اسیدسازی، باکتری های اسیدساز، اسیدهای آلی تولید شده را به H_2 و استات تبدیل می کنند. تبدیل اسیدهای آلی با بیش از دو کربن به وسیله باکتری های کاهنده پروتون به اسیداستیک و H_2 صورت می گیرد.

باکتری های متان ساز آخرین مرحله تشکیل بیوگاز از تجزیه

بی‌هوازی زیست توده را تشکیل مـی دهنـد. متـان، محصـول نهـایی معدنی کردن مواد آلی در هاضم بوده و بیشتـر به صورت بـی هوازی به دست می آید (Kayhanian & Tchobanoglous, 1993).

عوامل تاثیرگذار بر فرایند هضم بی هوازی

ویژگی های فیزیکی و تجزیه پذیری بیولوژیکی مواد خوراکی اثر بزرگی روی پایداری، آهنگ و وسعت هضم دارند. اما عوامـل دیگـری همچون ویژگی‌های ماده غذایی، پارامترهای بهره‌برداری نیز بر فرایند هضم و تولید مواد واسطه مؤثر می باشند. نسبت کربن به نیتروژن یکی از پارامترهای ماده غذایی برای تعیین و کنترل هضم زباله است. نسبت کربن به نیتروژن ماده غذایی ورودی برای ارزیابی شایستگی مواد اولیـه هضم بی هوازی از اهمیت فراوانی برخوردار است. معمولاً نسبت کربن به نیتروژن بهینه با استفاده از اندازه گیری کربن قابل تجزیه بیولـوژیکی بین ۳۰-۲۵ است (Kayhanian & Tchobanoglous, 1993).

همراه با دیگر ترکیبات خوراک، حضور چند فلز سنگین همچـون کادمیوم، کبالت، روی و نیکل در مقادیر کم نـه تنهـا تحریـک کننـده است، بلکه برای هضم بهینه ضـروری نیـز مـی باشـند (Lin, 1993). افزایش ماده تلقیح حاوی باکتری های گوناگون و پایدار همچون لجـن فاضـلاب بـرای تسـریع در مـورد راه انـدازی و موازنـه فراینـد هضـم بی‌هوازی بسیار سودبخش است. در راه اندازی هاضم های بی هـوازی اگر آهنگ بارگذاری خیلی سریع افزایش بیابد باکتری های تولید کننده اسید میزان بیشتری اسـیدهای چـرب نسـبت بـه مصـرف آنهـا تولیـد می‌کنند. این اسیدهای چـرب قلیائیـت محـیط را کـاهش مـی دهنـد. بنابراین به علـت کـاهش pH، ناموازنـه شـدن هاضـم افـزایش پیـدا می‌کند که برای باکتری های تولیدکننده متان سمی است. دامنه بهینه بارگذاری بین ۲۰-۸ کیلوگرم جامدات فرار بر هر متر مکعب راکتـور در روز تعیین شده است (Mata, et al., 1993). بیشتر تحقیقـات نشـان داده که در هضم تحت شرایط ترموفیلیک، زمان مانـد کوتـاهتر، تولیـد گاز بیشتر و آهنگ بارگذاری بالاتر امکان پذیر است. از سویی مطالعات نشان داده هاضم های ترموفیلیک، تغییـرات درجـه حـرارت را تنهـا در ۰/۸± را می توانند تحمل بکنند (De Baere, 2000).

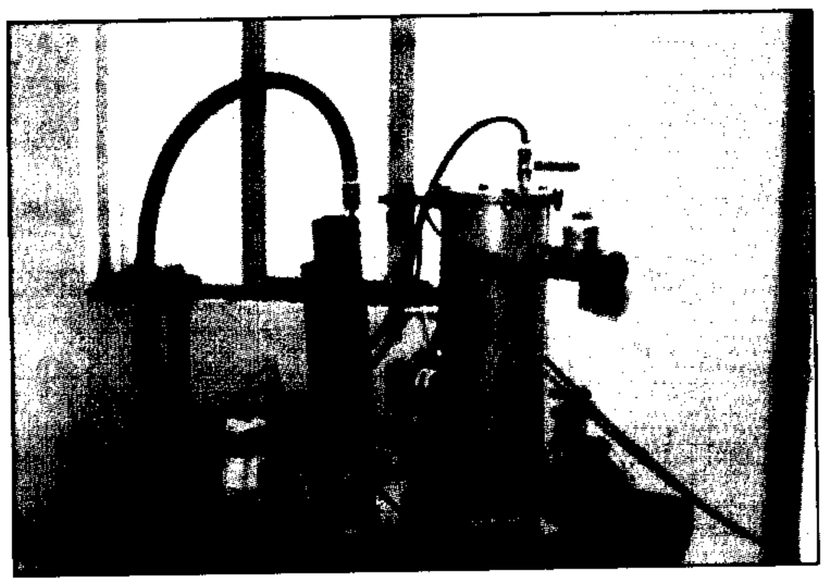
مقادیر پایین pH می تواند نشانه عدم موازنه هاضم باشد و باعـث پتانسـیل سـمیت‌زایـی و ناکـامی هاضـم شـود. هنگـامی کـه غلظـت اسیدهای چرب فرار افزایش مـی‌یابـد، pH هاضـم کـاهش مـی یابـد. در مقادیر پایین‌تر از ۶ شرایط اسـیدی ایجـاد شـده مـی توانـد بـرای اکتری های متان زا سمی باشد. pH هضم بی هوازی تابع دی اکسـید کربن و قلیائیت است، بنابراین می باید بین ۶/۵ تا ۷/۵ نگه داشته شود (Chynoweth & Isaacson, 1987).

مواد و روش تحقیق

راکتور هضم بی هوازی آزمایشگاهی ساخته شـده دارای ۲۲ لیتـر حجم، ۲۰ سانتیمتر قطر، ۷۰ سانتیمتر ارتفاع، یک شیر ورودی در بالا و یک شیر خروجی در انتهاست و همچنین سه شیر برای نمونـه بـرداری از مواد موجود در هاضم در نظر گرفتـه شـده اسـت. راکتـور از جـنس فولادی بوده که مجهز به اورینگ آب‌بندی و شامل یک فلنج قابل باز و بسته شدن است. لوله خروج گاز در قسمت راکتور تعبیه گردیده است. شیر ورودی مواد زاید جامد به هاضم در ارتفاع ۶۰ سانتیمتری از کف و با قطر ۵۰ میلیمتر و شیر خروجی مواد هضم شده در کف راکتور با قطر ۵۰ میلیمتر تعبیه گردیده است.

در این راکتور، فرایند هضم بی هوازی مواد فساد پذیر در شـرایط درجه حرارت میان دوست، درصد بالای مـواد جامـد و بـدون اخـتلاط انجام گرفته است. گرمایش محیط فرایند به وسیله یک مارپیچ (کویل) که از لوله مسی ساخته شده صورت گرفته و درون لوله مسی آب گـرم که در یک مخزن جداگانه گرم می شود توسط پمپ جریان مـی یابـد. برای گرم کردن آب از یـک المنـت حرارتـی برقـی ۵۰۰ وات و بـرای تنظیم دما از یک ترموستات برقی با محدوده ۳۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد استفاده شده است.

حجم بالایی راکتور، یعنی حدود ۲۰ درصـد از حجـم کـل بـرای ذخیره بیوگاز تولیدی در نظر گرفته شـده اسـت. بیوگـاز تولیـد شـده از طریق یک شیر از بالای راکتور خارج و به وسیله شیلنگ به کنتور گـاز وصل و مقدار گاز تولیدی از طریق این کنتور اندازه گیـری مـی گـردد. نمای کلی این راکتور در شکل شماره (۱) نشان داده شده است.

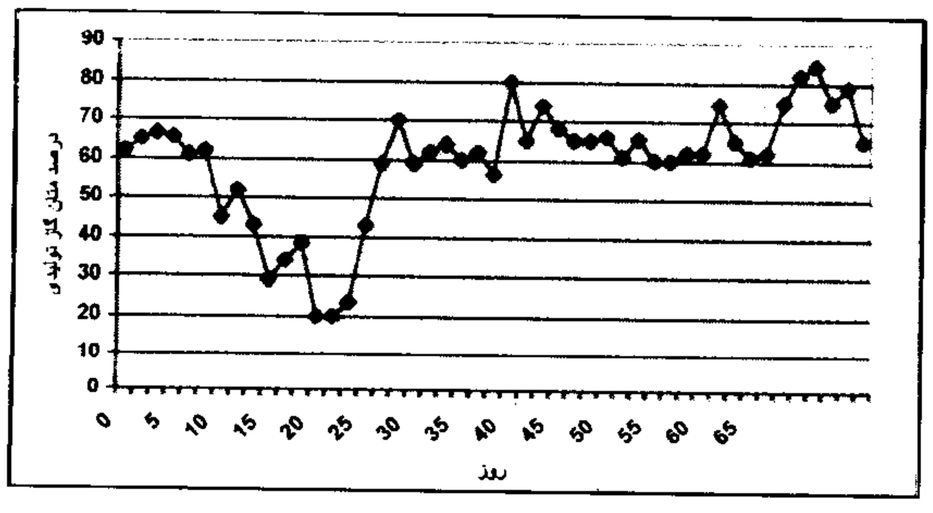


شکل شماره (۱): نمای راکتور هاضم بی هوازی ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی

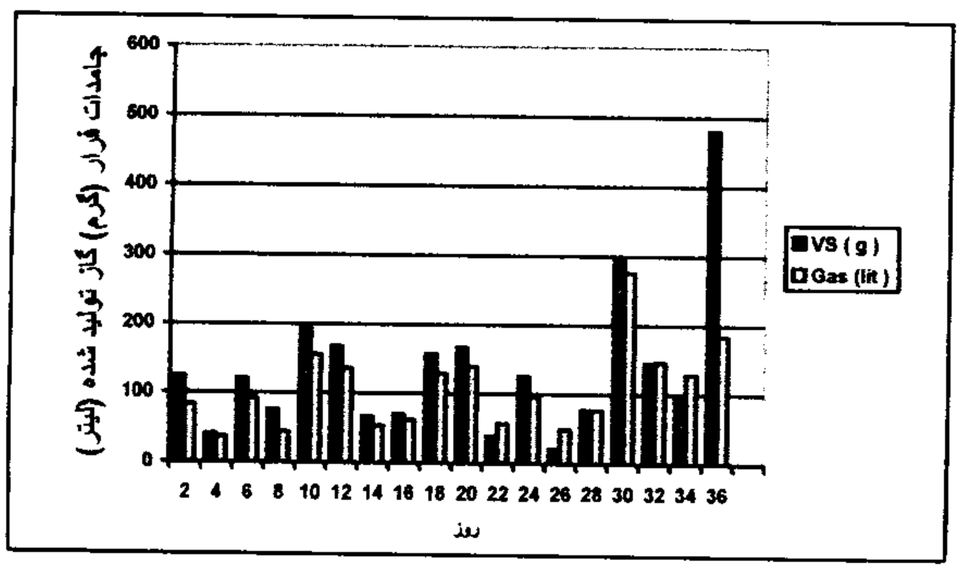
راه اندازی

در راه اندازی این هاضم و برای کوتاهتر شدن دوره راه انـدازی از لجن بی هوازی فاضلاب استفاده گردید. بارگذاری راکتور بدین صورت بود که ابتدا هاضم با لجن بی هوازی فاضلاب بارگـذاری گردیـد و بـه طور روزانه مواد زاید جامد آلی به هاضم افزوده شد. مواد زاید جامد ابتدا به صورت دستی جداسازی شده و با یک آسیاب دستی خرد گشته، بـه طوری که اندازه ذرات به کمتـر از ۳ میلیمتـر رسـیدند و بعـد از عمـل اختلاط با مواد هضم شده با نسبت بیش از ۴:۱ از طریـق شـیر ورودی به هاضم خورانده شد. برای نگه داشتن pH هاضم در محدوده ۶/۸ تـا ۷/۵ از بافر بی کربنات سدیم استفاده شد که به ازای هر گـرم جامـدات کل، ۵۲ میلیگرم بافر بی کربنات سدیم به ماده غـذایی ورودی افـزوده شد. ماده غذایی خوراک دارای COD برابر با ۲۲ گرم بـر لیتـر، TKN برابر با ۰/۸ گرم بر لیتر (بر حسب N) و TP برابر با ۰/۳۷ گرم بر لیتـر (بر حسب P) و همچنین دارای ۱۵ تا ۴۷ درصد جامدات کـل و ۹۲ تـا ۹۵ درصد TS جامدات فرّار بود. همان طوری که ذکـر شـد بـرای راه اندازی سریعتر فرایند هضم از مایه تلقیح لجـن بـی هـوازی فاضـلاب استفاده گردید. بارگـذاری ایـن هاضـم بـه طـور پیوسته و بـا آهنـگ بارگذاری ۵ تا ۲۵ کیلوگرم جامدات فرّار بـر هـر متـر مکعـب در روز و زمان ماند حدود ۱۵ تا ۲۰ روز انجام شد.

برای کنترل راه بری و کارایی بالای فرایند هضم، به طور مرتـب پارامترهـایی همچـون TP, TKN, COD و pH، درجـه حـرارت و یون های آهن، منگنز و نیکل اندازه گیری شد. برای این کار شـیرهای نمونه برداری حجمی از مواد موجـود در هاضـم را برداشـته و آزمـایش های تعیین شده تست گردیدندکه نتایج بعضی از آنها در زیر به صورت نمودار نشان داده شده است. دو پارامتر کنترل فرایند یعنی تولید بیوگـاز و ترکیبات آن و درصد کاهش مواد آلی به طـور روزانـه انـدازه گیـری گردید. برای اندازه گیری حجم گاز تولیدی از کنتور گاز استفاده شـد و برای تعیین درصد حجمی متـان از دسـتگاه نشـانگر متـان کـه دارای حسگر متان بود استفاده گردید. اما برای تعیین درصد کاهش مواد آلـی از آزمایش های مقدار جامدات کـل و جامـدات فـرّار، طبـق اسـتاندارد ASTM استفاده شد. نمونه های برداشت شده بعد از تـوزین در دمـای ۷۰ درجه سانتیگراد و به مـدت ۲۴ سـاعت در آون نگـه داشـته شـد و دوباره نمونه های خشک شده توزین گردیـد. از تفاضـل ایـن مقـادیر، درصد رطوبت و جامدات کل به دسـت آمـد، امـا بـرای تعیـین درصـد جامدات فرّار، از نمونه ای که قبلاً در آون خشک شده بود در یک بوته چینی ریخته و توزین کرده و در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت در کوره قرار گرفت و مجدداً وزن شـد. از تفاضـل ایـن مقـادیر درصد جامدات فرّار به دست آمد. نمودار تغییرات تولید بیوگاز با توجه به مقـدار جامـدات خـوراک و درصـد متـان در ایـن خـوراک دهـی در شکل های شماره (۲) و (۳) نشان داده شده است. همـان طـوری کـه مشاهده می شود تولید بیوگاز در سطح مطلوبی اسـت و ایـن تنهـا بـه دلیل موازنه هضم است. درصد متان در این دوره بین ۵۵ تا ۸۰ درصـد بود. بهره دهی متان و تولید بیوگاز به ترتیب برابر ۰/۲۳ تـا ۰/۶۷ متـر مکعـب گـاز متـان بـر هـر کیلـوگرم جامـدات فـرار افـزوده شـده ، ۹۴۰۰-۲۵۰۰ لیتر بر هر مترمکعب راکتور است.

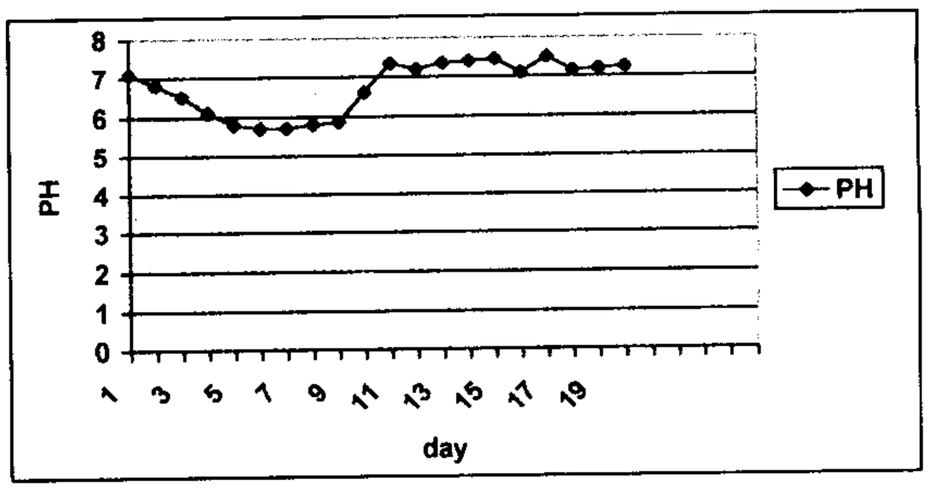


شکل شماره (۲): نمودار تغییرات درصد متان در طی اجرای فرایند هضم بی هوازی

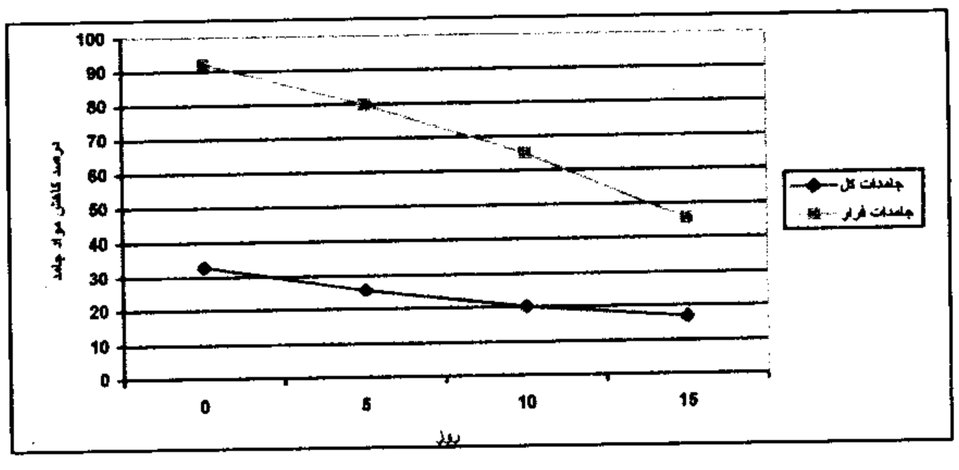


شکل شماره (۳): نمودار تغییرات بیوگاز تولید شده با توجه به مقدار جامدات فرّار افزوده شده

شکل شماره (۴) نمودار کاهش مواد آلی طـی فراینـد هضـم بـی هوازی را نشان می دهد و همان طوری که مشاهده می گردد جامـدات فرّار حدود ۵۲ درصد کاهش یافته است. این آزمایش نشان می دهد که به کمک این فرایند می توان به بازده کـاهش جامـدات فـرّار بـیش از ۵۰٪ همراه با تولید مقادیر قابل توجهی متان جهت تولید برق در طـی ۱۵ تا ۲۰ روز زمان ماند دست یافت. شکل شمـاره (۵) تغییـــرات pH طی اجرای فرایند هضم بی هوازی را نشان می دهد.



شکل شماره (۴): نمودار تغییرات درصد جامدات کل و جامدات فرار



شکل شماره (۵): نمودار تغییرات pH طی اجرای فرایند هضم بی هوازی

نتیجه گیری

فرایند هضم بی هوازی یکی از جدیدترین و مناسب ترین روشهای دفع مواد زاید جامد شهری است که از لحاظ محیط زیستی و همچنین به دلیل مدیریت مواد زاید جامد حائز اهمیت است.

در سالهای اخیر توجه بعضی از کشورهای پیشرفته به این فرایند معطوف شده است ولی در کشور ما در این زمینه تحقیقات چندانی به عمل نیامده است. بنابراین با توجه به عدم کار تحقیقاتی در این زمینه، پتانسیل بالای منابع مواد آلی در کشور ایران (حدود ۷۰٪ زباله های شهری را مواد فسادپذیر تشکیل می دهد) و همچنین توان بالقوه انرژی زایی این منابع، ساخت این واحد آزمایشگاهی برای مطالعه این فرایند مدنظر قرار گرفت. مطالعات انجام شده نشان دهنده توان تولید بالای بیوگاز در آهنگ های بارگذاری بالا و زمان ماند ۱۰ تا ۲۰ روز است. این هاضم قادر به تولید بیش از ۳۵۰ تا ۱۰۰۰ لیتر گاز در هر کیلوگرم جامدات افزوده شده و کاهش بیش از ۵۰ درصد مواد آلی و ۸۵ درصد کاهش COD است. در صورت کنترل پارامترهای بهره برداری، این روش یکی از بهترین و مناسب ترین روشهای دفع مواد زاید جامد شهری می باشد.

قدردانی

با تشکر از آقای مهندس وخشور مدیر تعمیرات و نگهداری کارخانه شیر پاستوریزه تهران و سرکار خانم مهندس ریاحی مسئول آزمایشگاه شیمی آب و بخار پژوهشگاه نیرو که در این پروژه ما را یاری کردند.

منابع مورد استفاده

جرج چوبانوگلوس، هیلاری تیسن، رولف الیاسن. ۱۳۷۰. مدیریت مواد زاید جامد شهری، ترجمه دکتر محمدعلی عبدلی، سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری تهران.

Chynoweth, D. P. and Isaacson, R. 1987. Anaerobic Digestion of Biomass. Elsevier Applied Science Publisher Ltd, GB.

De Baere, L. 2000. Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the art – Water Science and Technology. 41(3): 283-290.

Kayhanian, G. and Tchobanoglous. 1993. Innovative two– stage process for recovery of energy and compost from the organic fraction of municipal solid waste. Water Science and Technology. 27(2): 133-143.

Klass, D. L. 1998. Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals – Academic Press, USA.

Mata, A. et al., 1993. Basetti – Semi – dry thermophilic anaerobic digestion of fresh and pre-composed organic fraction of MSW. Water Science and Technology. 27(2): 87-96.

Sallaff, S. 2000. Anaerobic digestion in Toronto, Canada Renewable Energy World.