

تولید بیوگاز از ویناس نیشکر با استفاده از راکتور بستر گرانولی ثابت (SGBR)

مصطفی پارسائی^۱، مصطفی کیانی ده کیانی^{۲*} و افشین تكدستان^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، parsaeemostafa@yahoo.com

۲- استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، m.kiani@scu.ac.ir

۳- دانشیار، مرکز تحقیقات فناوری‌های زیست‌محیطی دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، Afshin_ir@yahoo.com

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۲۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۳/۱، پذیرش: ۹۷/۳/۱۹)

چکیده: در این مطالعه، تولید بیوگاز از ویناس با استفاده از سه راکتور SGBR با حجم یکسان ۵/۶ لیتر، در سه زمان ماند هیدرولیکی (HRT) ۲، ۳ و ۴ روز، با بارگیری روزانه مواد آلی ۸۶۰۰۲، ۲۸۶۶۷ و ۲۱۵۰۰ mgCOD/L.Day بررسی شد. به منظور تأمین دمای ۳۵ میان راکتور از روش حمام آب، و از محلول NaOH برای بافر استفاده شد. حجم بیوگاز تولیدی با استفاده از روش جابه‌جایی آب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که میزان گاز متان تولیدی در زمان ماند هیدرولیکی ۲، ۳ و ۴ روز پس از ۱۱، ۱۳ و ۱۶ روز به مقدار تقریباً ثابتی رسید. میزان گاز متان تولیدی در زمان ماند هیدرولیکی ۲، ۳ و ۴ روز، به ترتیب، ۶/۶۶، ۱۶/۶۶ و ۲۷/۳۸ L_{STP}/L.day به ازای هر لیتر ویناس است. باکتری‌های متانوزن و اسیدوژن در pH ۵/۵۷، در هر سه زمان ماند هیدرولیکی، پس از گذشت ۲ روز، به تعادل رسیدند. به طور میانگین، میزان گاز متان تولیدی نسبت به مواد جامد فرار در زمان ماند هیدرولیکی ۲، ۳ و ۴ روز، به ترتیب ۲۴۴، ۳۴۵ و ۴۳۴ L_{CH4}/kg_{vs} به دست آمد.

کلیدواژگان: ویناس، بیوگاز، گاز متان، زمان ماند هیدرولیکی، راکتور بستر گرانولی ثابت

مقدمه

از سال ۱۸۶۰ تا ۲۰۰۵ میلادی، مصرف انرژی جهان ۴۰ برابر افزایش یافت. پیش‌بینی شده که نیاز انرژی جهانی دارای سرعت رشد ۲/۲۳ درصد در سال بوده و در سال ۲۰۱۰، $1/18 \times 10^{17}$ کیلوکالری شده و در سال ۲۰۲۵، $1/56 \times 10^{17}$ کیلوکالری خواهد شد. افزایش نیاز انرژی از راه افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی باعث آلودگی‌های زیست‌محیطی شده است. بنابراین، توجه جهانیان بیشتر به تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه تولید سوخت زیستی معطوف شده است [۱]. طبق گزارش IPCC^۱، زیست‌توده مهم‌ترین نقش را در زمینه تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر ایفا خواهد کرد، به طوری که تولید ۵۰,۰۰۰ TWh انرژی در سال ۲۰۵۰ میلادی و ۷۵,۰۰۰ TWh در سال ۲۰۷۵ میلادی و ۸۹,۰۰۰ TWh در سال ۲۱۰۰ میلادی (معادل ارزش حرارتی تولیدشده از احتراق بیش از ۱۶ میلیارد تن چوب) از زیست‌توده قابل پیش‌بینی است [۲]. زیست‌توده، به علت محتوای مواد آلی بالا، مناسب‌ترین منبع اولیه بیوگاز است [۳]. بیوگاز تولیدی می‌تواند برای تولید همزمان گرما و برق، سوخت خودرو یا تزریق در شبکه گاز پس از ارتقاء استفاده شود [۴]. یکی از این زیست‌توده‌ها، که به وفور در کشورهای دارای کشت و صنعت نیشکر یافت می‌شود، ویناس است. ویناس در واقع پس‌ماند کارخانه تولید بیواتانول از نیشکر است. با توجه به ویژگی‌های ویناس، هضم بی‌هوازی مؤثرترین روش برای تصفیه ویناس با هدف حذف آلودگی و بازیابی انرژی با تولید گاز متان است [۵]. تولید بیوگاز از ویناس نسبت به مواد دیگر ساده‌تر [۶] و سریع‌تر (به علت عدم وجود لیگنین) است [۷]. از بیوگاز تولیدشده می‌توان در فرایند

1. Intergovernmental Panel on Climate Change

تقطیر و بخار بیواتانول [۸]، خشک کردن خمیرمایه [۱۰،۹]، به کار انداختن سوخت مصرفی دیگ های پخت نیشکر [۱۳،۱۱]، سیستم های CHP^۱ [۱۴،۷]، وسایل نقلیه و همچنین اتوبوس های شهری [۱۵،۱۳] استفاده کرد. فاضلاب رقیق حاصل از قندگیری ملاس، که غلظتی حدود ۲/۴ تا ۵ درصد دارد، را با حجمی حدود ۱۰ برابر ملاس مصرفی (به علت برابری وزن و حجم آب) در سیستم های تغلیظ، که مشابه سیستم های تغلیظ شربت است، حرارت می دهند تا به غلظت ۶۵-۶۰ درصد برسد. حاصل این عمل ماده ای غلیظ است که ویناس نام دارد [۱۶]. ویناس از ستون تقطیر در محدوده دمای ۶۵ تا ۱۰۷ درجه سانتی گراد و pH ۳ تا ۵ خارج می شود. ویناس دارای اسیدیته بالا و از لحاظ شیمیایی بسیار پیچیده است [۱۷]. به ازای هر لیتر الکل، ۸ تا ۲۰ لیتر ویناس تولید می شود [۱۸، ۲۳-۱۸]. ویناس باعث انتشار گازهای گلخانه ای (GHG)^۲ و از بین رفتن حیات گیاهان و جانوران آبی، به علت کاهش فتوسنتز، می شود [۲۴، ۶]. آلایندگی و اثر گلخانه ای ویناس در حدود ۱۷۰ برابر کربن دی اکسید است [۲۵]. مطالعاتی زیادی بر روی ویناس نیشکر با روش ها و راکتورهای مختلف انجام شده است که در زیر به چند مورد اشاره می شود.

در آزمایش هایی که باروز و همکاران در دمای میانه^۳ با ۳۰ درصد راکتور UASB^۴ لجن انجام دادند، به این نتیجه رسیدند رسیدند که بازده حذف COD^۵ در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درصد و مقدار گاز متان تولیدی 0.19 L/gCOD است [۹]. در آزمایشی که کبررا و همکارش در دمای میانه از راکتور UAF^۶ انجام دادند، بازده حذف COD $75/1$ درصد و بارگذاری روزانه مواد آلی OLR $10 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ ^۷ و مقدار گاز متان تولیدی $0.315 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{kgCOD}$ را گزارش دادند [۲۳]. در آزمایشی که بازوا و همکاران با راکتور AFBR^۸ در دمای $30-37^\circ \text{C}$ و pH $7/3$ انجام دادند، مقدار حذف COD ۷۰ درصد و مقدار بیوگاز تولیدی $0.66 \text{ m}^3/\text{kgCOD}$ یا $0.4 \text{ m}^3/\text{kgCOD}$ و مقدار گاز متان $0.312 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{kgCOD}$ در شرایط استاندارد STP^۹ با ۷۰ تا ۸۰ درصد گاز متان به دست آمد [۲۶]. در آزمایشی که لورا و همکاران در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد با راکتور AFBR بر روی ویناس انجام دادند، بیشترین بازده حذف COD ۷۰ درصد در $13/93 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ OLR و بیشترین تولید بیوگاز $5/37 \text{ m}^3 \text{Biogas/m}^3 \text{Vinsasse} \cdot \text{day}$ به دست آمد [۲۷].

راکتور SGBR^{۱۰} از فناوری های نوین بی هوازی، که کاملاً شامل گرانول های^{۱۱} بی هوازی است، در سال ۲۰۰۰ توسط الیس و ماچ در دانشگاه ایوا^{۱۲} آمریکا ساخته شد [۲۸]. راکتور SGBR نوعی سیستم تصفیه بی هوازی با سرعت بالاست که می تواند با تغییرات زمان ماند هیدرولیکی (HRT)^{۱۳}، مواد جامد را حفظ کند. این نوعی راکتور پایین رونده شامل گرانول های بی هوازی فعال است که جریان در آن گردش پیدا نمی کند. زیست توده از تمام سطوح گرانول تماس برقرار می کند و از هیچ گونه همزن، پمپ و جداساز مایع، گاز، جامد استفاده نمی شود. به همین علت، تماس بیشتری بین میکروارگانیسم ها و گرانول برقرار می شود که خود منجر به کاهش مدت زمان تبدیل مواد آلی و کنترل آلودگی می شود.

با توجه به پیشینه موضوع و تحقیقات انتشار یافته، هیچ گونه کار پژوهشی برای تولید بیوگاز از ویناس نیشکر با استفاده از راکتور SGBR صورت نگرفته است. بنابراین، در این پژوهش، عملکرد این راکتور، که دارای سرعت بالا در بارگیری مواد آلی و زمان ماند هیدرولیکی کم است، در هضم بی هوازی ویناس بررسی شد. به طور خلاصه، در این مقاله، به بررسی تولید بیوگاز از ویناس

1. Combined Heat and Power
2. Greenhouse gases
3. Mesophile
4. Upflow Anaerobic Sludge Blanket
5. Chemical Oxygen Demanded
6. Up Flow Anaerobic Filter
7. Organic Loading Rate
8. Anaerobic Fluidized Bed Reactor
9. Standard temperature and pressure
10. Static Granular Bed Reactor
11. Granular
12. Iowa State University
13. Hydraulic Retention Time

نیشکر با استفاده از راکتور بستر گرانولی ثابت در دمای میانه و در سه زمان ماند هیدرولیکی پرداخته شده است. همچنین مناسبترین زمان ماند هیدرولیکی برای بیشترین تولید بیوگاز در کمترین زمان نیز مشخص می‌شود. سپس، به بررسی دیگر پارامترهای خروجی راکتور، مانند مقدار مواد جامد، جامدات فرار و pH، پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

ویناس از کارخانه الکل‌سازی رازی واقع در کشت و صنعت دعبیل خزائی در ۲۰ کیلومتری اهواز تهیه شد که ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. به‌منظور کاهش مواد آلی در زمان ماند هیدرولیکی کم، در بسیاری از روش‌های هضم بی‌هوازی از توده‌های غلیظ باکتری‌های بی‌هوازی استفاده می‌کنند که گرانول نامیده می‌شود. ویژگی‌های گرانول در جدول ۲ آورده شده است [۲۹]. گرانول از راکتور UASB تصفیه فاضلاب کارخانه تولید شکر واقع در کشت و صنعت امام خمینی واقع در ۳۰ کیلومتری شمال اهواز تهیه شد.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی ویناس نیشکر

Table 1- Chemical composition of the of the sugarcane vinasse[29]

parameter	unit	Content
VS	%	48.32
TS	%	5.58
COD	mg/L	28765
pH	-	4.5
nitrogen	g/kg	14
carbon	%	25
phosphor	g/L	38
sodium	mg/kg	690
magnesium	mg/kg	477
calcium	mg/kg	211
sulphate	mg/L	56.3

جدول ۲- ویژگی لجن گرانول

Table 2- Characteristics of granular sludge

Parameter	Values	Unit
Specific methanogenic activity	0.1-0.2	Kg COD-CH ₄ /kg VSS/d
Typical values for industrial wastewater	0.5-1.0	Kg COD-CH ₄ /kg VSS/d
Settling velocities	15-20	m/h
Density	1.0-1.05	g/ml
Diameter	0.1-8	mm
Shape	Spherical form	

از بیوراکتور SGBR به حجم کل ۵/۶ لیتر با نسبت قطر به ارتفاع ۱ به ۷، به‌گونه‌ای که از ۲۰ درصد حجم راکتور برای نگهداری گاز تولیدی استفاده شده بود، استفاده شد. از ذرات شن به میانگین قطر ۵ میلی‌لیتر با ۲۰ درصد ارتفاع کل راکتور در پایین آن برای جلوگیری از شست‌وشوی گرانول‌ها و رشد بهتر میکروارگانیسم‌ها استفاده شد. برای ثابت نگه‌داشتن دمای راکتورها از روش حمام آب استفاده شد که راکتورها را درون مخزن آب به حجم ۲۲۰ لیتر گذاشته و توسط المنت ۲۰۰۰ وات و ترموستات، دمای راکتورها در دمای میانه ۳۵ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته می‌شد. از آنجا که اساس کار راکتور SGBR برمبنای گرانول است، ۲۵ درصد از حجم کاری راکتور گرانول در بدو شروع ریخته شد. بارگیری راکتور SGBR به‌صورت ناپیوسته و مقطعی صورت گرفت (شکل ۱). میزان بارگذاری مواد آلی (OLR) به حجم راکتور و زمان ماند هیدرولیکی (HRT) وابسته است [۳۰]. در HRT ۲، ۳ و ۴ روز راکتورها، به‌ترتیب، ۰/۳۱۵، ۰/۲۱۰ و ۰/۱۵۸ لیتر ویناس بارگذاری شد. با توجه به

اینکه COD ویناس مورد آزمایش ۲۸۷۶۵ میلی گرم بر لیتر به دست آمد، بنابراین OLR در HRT ۲، ۳ و ۴ روز به ترتیب ۸۶۰۰۲، ۲۸۶۶۷ و ۲۱۵۰۰ mgCOD/L.Day بود. با توجه به اینکه نسبت ۱ به ۳ ویناس به آب مناسب ترین نسبت به منظور تولید بیوگاز است، از این نسبت استفاده شد [۳۱]. pH ویناس توسط بافر سدیم هیدرواکسید (۴/۵ گرم به ازای هر لیتر ویناس) کنترل و منجر به از بین رفتن اسیدی بودن آن شد [۳۱]. به منظور اندازه گیری حجم گاز تولیدی، از روش جابه جایی مایع با دو بطری یکنواخت براساس ارتفاع مایع جابه جاشده استفاده شد. براساس رابطه گاز ایدئال میزان بیوگاز تولیدی در شرایط استاندارد STP محاسبه شد. بیوگاز تولیدشده روزانه اندازه گیری شد. قبل از اندازه گیری، بیوگاز تولیدشده از محفظه براده آهن، به منظور حذف گاز هیدروژن سولفید و سپس، از محلول سدیم هیدرواکسید ۸ مولار، به منظور حذف گاز کربن دی اکسید عبور داده شد، که در انتها فقط گاز متان تولیدشده اندازه گیری شود [۳۲]. pH مواد خروجی از راکتور توسط pH سنج قلمی AZ8686 با دقت (دقت ۰/۱) اندازه گیری شد. مواد جامد (TS) و مواد جامد فرار (VS) مواد خروجی راکتور براساس روش استاندارد آب و فاضلاب اندازه گیری شد. برای اندازه گیری TS، ۲۰ تا ۵۰ میلی لیتر مواد به مدت ۱۲ ساعت، در دمای ۱۰۳ تا ۱۰۵ درجه سلسیوس درون آون HORO مدل 038، گذاشته شد. سپس، جرم آن به وسیله ترازو دیجیتال سیانکو مدل GM-1500P با دقت ۰/۵ گرم اندازه گیری شد. برای اندازه گیری VS، مشابه TS عمل شد، با این تفاوت که مواد در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت درون کوره الکتریکی NABER مدل L471 قرار گرفت.

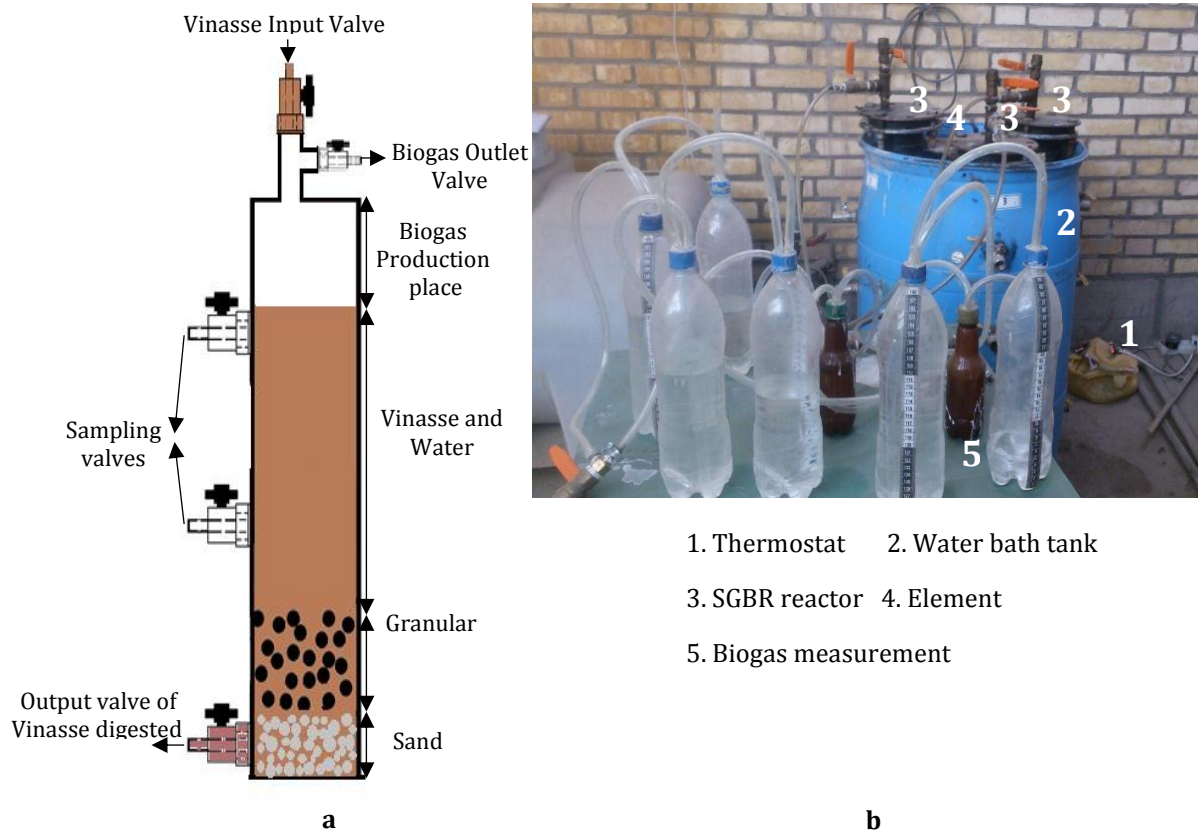
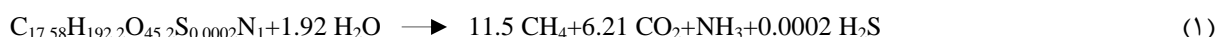


Figure 1- Schematic of the SGBR reactor (a), Reactors, temperature control and biogas measurements (b)
 شکل ۱- طرحواره راکتور SGBR استفاده شده (a)، مجموعه راکتورها، کنترل دما و اندازه گیری بیوگاز (b)

1. Total Solid
2. Volatile Solid

نتایج و بحث

در فرایند هضم بی‌هوازی تولید بیوگاز، مواد آلی (کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها و پروتئین‌ها) در حضور باکتری‌های بی‌هوازی، طی مراحل هیدرولیز، اسیدوژن، استوژن و متانوژن، به بیوگاز (متان، کربن دی‌اکسید، هیدروژن سولفید و نیتروژن) و بیومس تبدیل می‌شود [۳۳]. فرایند هیدرولیز از مراحل محدودکننده هضم بی‌هوازی است. اما، از آنجا که قبلاً در فرایند تولید بیواتانول از ملاس این مرحله بر روی مواد اولیه ویناس (ملاس) صورت گرفته است، پس هضم ویناس سریع‌تر صورت می‌گیرد [۶]. در ویناس نیشکر نسبت C:H و نسبت C:O به ترتیب ۰/۴ و ۱/۷ است [۳۴]. نسبت C:H:O:S:N در ویناس ۰/۰۰۲:۰/۱:۰/۵:۰/۶:۴۴/۱۰:۱۷/۸۵ است (جدول ۱). براساس مدل بویل [۱] میزان گازهای حاصل از تخمیر بی‌هوازی ویناس محاسبه شد (رابطه (۱)).



شکل ۲ روند تولید گاز متان از ویناس نیشکر در شرایط میانه در زمان ماند هیدرولیکی ۲، ۳ و ۴ روز را نشان می‌دهد. در هر سه زمان ماند هیدرولیکی، میزان متان تولیدی، در ابتدا، زیاد بوده، سپس، کاهش یافته است. این گاز تولیدی ناشی از شوک وارد شده به باکتری‌ها بر اثر قرار گرفتن در دمای ۳۵ درجه است. نوسانات تولید روزانه گاز متان تولیدی در دو زمان ماند هیدرولیکی ۳ و ۴ روز نسبت به ۲ روز کمتر است که این امر نشان می‌دهد که در ۳ و ۴ روز باکتری‌ها سازگاری بهتری با مواد آلی موجود در ویناس پیدا کرده‌اند. در ۲ HRT روز نسبت به ۳ و ۴ روز در مدت زمان کمتری (۱۱ روز) تولید روزانه گاز متان ثابت شده است. در دو ۳ و ۴ روز، به ترتیب، تولید روزانه گاز متان ۱۶ و ۱۳ روز ثابت شده است. هرچه HRT بیشتر شده، مدت زمان ثابت شدن تولید روزانه گاز متان کاهش پیدا کرده است. در HRT پایین، مدت زمان کافی برای تجزیه مواد آلی موجود در ویناس نبوده است و باکتری‌ها سازگاری کمتری با مواد آلی موجود در ویناس پیدا کرده‌اند. پس، مدت زمان ثابت شدن تولید روزانه بیوگاز بیشتر است.

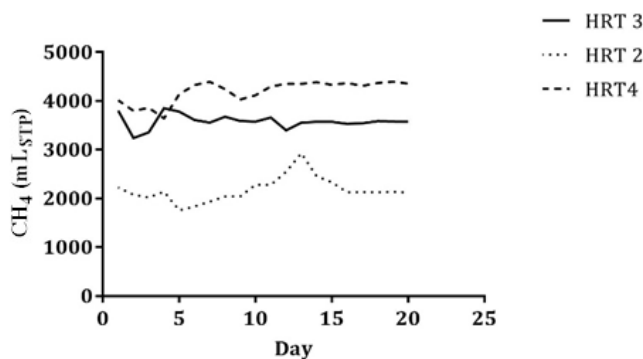


Figure 2- The process of producing methane at 2, 3, and 4 days hydraulic retention times

شکل ۲- روند تولید گاز متان در زمان‌های ماند هیدرولیکی ۲، ۳ و ۴ روز

درصد کاهش مواد جامد در ۲ HRT روز، نسبت به ۳ و ۴ روز، کمتر است. اما، در ۴ HRT روز، نسبت به ۳ روز، تفاوت کمتری وجود دارد (شکل ۳-b). درصد کاهش مواد جامد فرار در هر سه زمان ماند هیدرولیکی تقریباً یک روند مشابه داشتند. اما، در ۵ روز پایانی، در ۳ HRT روز، روند آن کاهش یافت (شکل ۳-a). پس، زمان ماند هیدرولیکی ۳ روز بهتر توانسته میزان مواد جامد موجود در ویناس را کاهش دهد.

pH روزانه هر سه HRT در روز دوم از ۷/۳ به ۵/۵۷ کاهش پیدا کردند. در روز دوم، با تولید اسید در مرحله اسیدوژن تولید بیوگاز، محیط اسیدی شده و pH کاهش پیدا کرده است. با توجه به اینکه pH روزانه در هر سه HRT تقریباً در ۵/۵۷ ثابت مانده است، پس باکتری‌های تولیدکننده متان و اسید در این pH به سازگاری رسیده‌اند (شکل ۴).

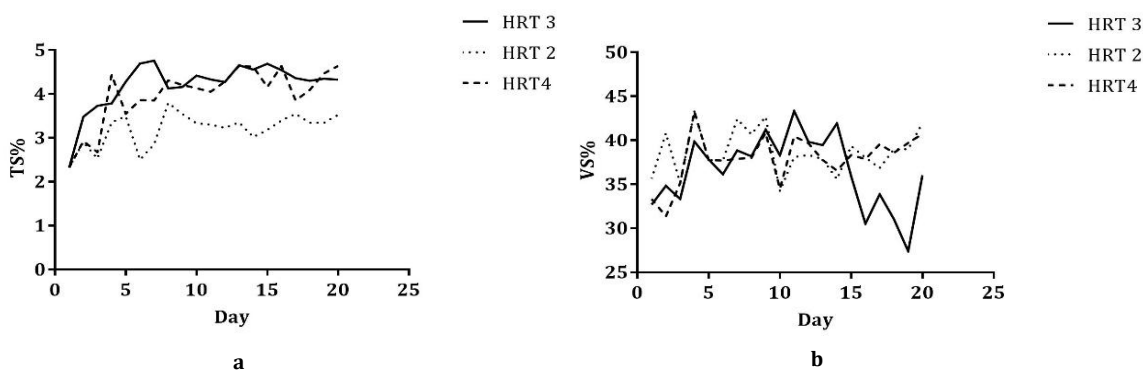


Figure 3- Daily solid content (a) and volatile solids (b) vinasse digested in HRT 2, 3 and 4 days
 شکل ۳- روند روزانه محتوای جامد (a) و جامدات فرار (b) ویناس هضم شده در HRT ۲، ۳ و ۴ روز

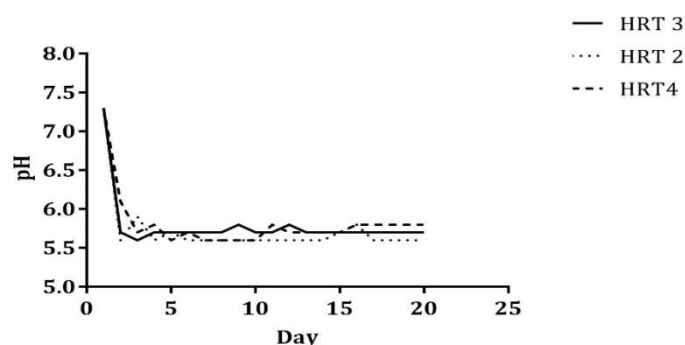


Figure 4- daily pH of the reactors at 2, 3 and 4 days of hydraulic residual times
 شکل ۴- روند pH روزانه راکتورها در زمان های ماند هیدرولیکی ۲، ۳ و ۴ روز

مقدار گاز متان تولید شده نسبت به مواد جامد حذف شده در HRT ۴ روز، نسبت به HRT ۲ و ۳ روز، بیشتر است. میکروارگانیسمها در زمان ماند هیدرولیکی ۴ روز با تجزیه مواد آلی کمتری توانسته اند گاز متان بیشتری را تولید کنند. به طور میانگین میزان گاز متان تولید شده از ویناس در سه HRT ۲، ۳ و ۴ روز، به ترتیب، ۲۴۴، ۳۴۵ و ۴۳۴ L_{CH_4}/kg_{VS} است (شکل ۵). در پنج روز پایانی، میزان تولید گاز متان نسبت به مواد جامد حذف شده در HRT ۴ روند صعودی خود و در HRT ۲ روز، روند ثابت خود را حفظ کرده، اما، در زمان ماند ۳ روز، به یک دفعه کاهش پیدا کرده است (شکل ۵). این در حالی است که روند تولید گاز متان در این ۵ روز، در هر سه زمان ماند، تقریباً ثابت بوده است (شکل ۲). از آنجا که در این مدت زمان در HRT ۳ روز کاهش مواد جامد فرار بیشتر بوده (شکل b-۳)، می توان گفت تولید گاز متان نسبت به مواد جامد حذف شده در ۵ روز پایانی کاهش پیدا کرده است. با توجه به این تغییر VS می توان گفت که در این مدت، علاوه بر گاز متان، تولید گازهای دیگر مانند کربن دی اکسید بیشتر بوده است.

با مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات پژوهشگران دیگر، مشاهده می شود که عملکرد این راکتور در تولید گاز متان براساس مواد آلی حذف شده (COD) نسبت به دیگر راکتورها بهتر بوده است (جدول ۳). از آنجا که زمان ماند هیدرولیکی نتوانسته تغییر زیادی در میزان تولید گاز متان ایجاد کند، نتایج این تحقیق با نتایج پارک هم خوانی دارد [۳۵]. راکتور SGBR نسبت به دیگر راکتورها در کاهش آلودگی ویناس عملکرد ضعیفی داشته است. دلیل این امر می تواند بالا بودن میزان بارگذاری مواد آلی در این راکتور باشد که به خوبی نتوانسته است COD ویناس را کاهش دهد.

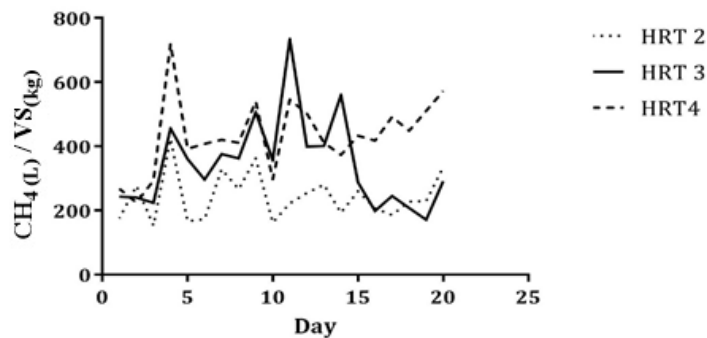


Figure 5- Process for methane production based on the amount of vinasse solids removed in HRT 2, 3 and 4 days
 شکل ۵- روند تولید گاز متان براساس میزان مواد جامد حذف شده ویناس در HRT ۲، ۳ و ۴ روز

جدول ۳- مقایسه عملکرد راکتورهای بی‌هوازی در تولید بیوگاز از ویناس نیشکر

Table 3- Comparison of Anaerobic Reactors Performance in Biogas Production of Sugar Cane Vinasse

Reactor	COD ^a	OLR ^b	CH ₄ ^c	HRT ^d	T ^e	Re
UASB	71	12.50	0.289	2.0	35	[22]
UASB	75	7.50	0.185	2.8	30	[9]
UASB	75	24.00	0.316	4.0	24	[36]
FBR	72	9.20	0.288	4.9	37	[37]
AFBR	70	19.30	0.312	3.0	37	[26]
AFBR	70	25.32	0.386	1.0	30	[27]
UAFR	75	10.00	0.315	5.0	29	[23]
CSTR+FBR	92	4.1.00	0.330	5.0	37	[38]
FBR+CSTR	67	21.30	0.315	4.0	35	[39]
SGBR	19	86.00	0.375	2.0	35	Present study
SGBR	27	28.66	0.448	3.0	35	Present study
SGBR	34	21.50	0.429	4.0	35	Present study

^a% COD_{removed}, ^bkgCOD/m³.day, ^cm³/kgCOD_{removed}, ^dday, ^eTemperature C

عدم قطعیت داده‌ها براساس انحراف معیار داده‌ها محاسبه و در جدول ۴ آورده شده است. بر این اساس، اندازه‌گیری مقدار pH و TS در هر سه زمان ماند هیدرولیکی دارای کمترین عدم قطعیت و اندازه‌گیری مقدار گاز متان دارای بیشترین عدم قطعیت است.

جدول ۴- عدم قطعیت داده‌ها

Table 4- uncertainty data

HRT	CH ₄ stp	TS	VS	pH	CH ₄ /VS
2	251.56	0.54	2.53	0.35	72.04
3	139.66	0.38	4.04	0.37	135.75
4	218.24	0.64	2.70	0.36	113.21

میزان تولید گاز متان از ویناس با راکتور SGBR^۲ در HRT ۲، ۳ و ۴ روز، به ترتیب، ۲/۱، ۳/۵ و ۴/۳ لیتر به ازای ۰/۳۱۵، ۰/۲۱۰ و ۰/۱۵۷ لیتر در روز ویناس است. بنابراین، میزان گاز متان تولید شده از ویناس در سه HRT ۲، ۳ و ۴ روز، به ترتیب، ۶/۶۶، ۱۶/۶۶ و ۲۷/۳۸ L_{STP}/L.day است. زمان ماند هیدرولیکی بیشتر منجر به تولید گاز متان بیشتری شده است. با توجه به ارزش حرارتی گاز متان، در دمای میانه با استفاده از راکتور SGBR از هر لیتر ویناس می‌توان ۱/۰۷ مگاژول انرژی تولید کرد. از آنجا که ۱۰۰۰ مترمکعب ویناس در روز در کارخانه الکل‌سازی رازی تولید می‌شود [۴۰]، با این روش می‌توان ۲۷ میلیون مترمکعب گاز متان در شرایط استاندارد تولید و بخش عمده‌ای از انرژی مورد نیاز کارخانه را تأمین کرد. همچنین، با تولید ۲۷۰

تن ملاس سالانه در خوزستان [۴۱]، که در روند تولید بیواتانول از آن می توان ۲/۵ میلیون لیتر ویناس تولید کرد، پتانسیل کلی تولید گاز متان از این روش ۶۸ میلیون مترمکعب گاز متان در شرایط استاندارد ست که علاوه بر تولید انرژی پاک از آلودگی های زیست محیطی ویناس نیز می کاهد.

نتیجه گیری

ویناس، به عنوان یکی از مهم ترین منابع آلودگی صنایع الکل سازی، منبعی مناسب برای تولید سوخت های زیستی از جمله بیوگاز است. در زمان ماند هیدرولیکی ۴ روز، با بارگذاری مواد آلی $21500 \text{ mgCOD/L.Day}$ با استفاده از راکتور بستر گرانولی ثابت می توان $27/38 \text{ L}_{\text{STP}}/\text{L.day}$ گاز متان تولید کرد که حاوی $1/07$ مگاژول انرژی است. زمان ماند هیدرولیکی ۴ روز برای تولید گاز متان از مواد جامد حذف شده ویناس نسبت به دو زمان دیگر بهتر است. اما، در زمان ماند هیدرولیکی ۳ روز، مواد جامد فرار موجود در ویناس کاهش بهتری داشتند. با استفاده از روش هضم بی هوازی و راکتور SGBR می توان، علاوه بر کاهش آلودگی ویناس، بیوگاز نیز تولید کرد. با سوزاندن گاز متان تولیدی در چرخه های ترکیبی و ژنراتورها، می توان بخش زیادی از انرژی مورد نیاز کارخانه الکل سازی و حتی صنایع تولید شکر را تأمین کرد.

منابع

1. K. Karimi and S. Mirmohamadsadeghi, *Principles and Technologies of Biogas Production*, Isfahan, Isfahan University of Technology, 2016. (in persian)
2. A. R. Sepaskhah, "Sustainable bio-ethanol production in relation to water and soil resource in Iran," *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 2, 2017, pp. 29-44. (in persian)
3. L. Janke, A. F. Leite, K. Batista, W. Silva, M. Nikolausz, M. Nelles and W. Stinner, "Enhancing biogas production from vinasse in sugarcane biorefineries: Effects of urea and trace elements supplementation on process performance and stability," *Bioresource Technology*, 217, 2016, pp. 10-20.
4. G. Markou, M. Brule, A. Balafoutis, M. Kornaros, D. Georgakakis and G. Papadakis, "Biogas production from energy crops in northern Greece: economics of electricity generation associated with heat recovery in a greenhouse," *Clean Technologies and Environmental Policy*, 4, 2017, pp. 1147-1167.
5. V. G. de Barros, R. M. Duda, J. de Silva Vantini, W. P. Omeri, M. I. T. Ferro, R. A. Oliveira, "Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of Methanothermobacter and Methanosarcina archaea and Thermotogae bacteria," *Bioresource Technology*, 244, 2017, pp. 371-381.
6. I. Syaichurrozi, "Review-biogas technology to treat bioethanol vinasse," *Waste Technology*, 1, 2016, pp. 16-23.
7. L. Janke, A. Leite, H. Wedwitschaka, T. Schmidt, M. Nikolausz and W. Stinner, "Biomethane production integrated to the Brazilian sugarcane industry: The case study of São Paulo state," *Proceedings of the 22nd European Biomass Conference and Exhibition*, Hamburg, Germany, June 2014.
8. B. S. Moraes, M. Zaiat and A. Bonomi, "Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 2016, pp. 888-903.
9. V. G. de Barros, R. M. Duda and R. A. de Oliveira, "Biomethane production from vinasse in upflow anaerobic sludge blanket reactors inoculated with granular sludge," *Brazilian Journal of Microbiology*, 47, 2016, pp. 628-639.
10. C. E. Rodrigues Reis and B. Hu, "Vinasse from Sugarcane Ethanol Production: Better Treatment or Better Utilization?," *Frontiers in Energy Research*, 5, 2017, p. 7.
11. E. I. Espana-Gamboa, J. O. Mijangos-Cortes, G. Hernandez-Zarate, J. A. D. Maldonado and L. M. Alzate-Gaviria, "Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor," *Biotechnology for biofuels*, 5, 2012, p. 82.
12. C. E. C. Nogueira, S. N. M. de Souza, V. C. Micuanski and R. L. Azevedo, "Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 2015, pp. 300-305.
13. B. S. Moraes, T. L. Junqueira, L. G. Pavanello, O. Cavalett, P. E. Mantelatto, A. Bonomi and M. Zaiat, "Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense?," *Applied Energy*, 113, 2017, pp. 825-835.
14. E. L. Barrera, H. Spanjers, J. Dewulf, O. Romero and E. Rosa, "The sulfur chain in biogas production from sulfate-rich liquid substrates: a review on dynamic modeling with vinasse as model substrate," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 88, 2013, pp. 1405-1420.

15. S. N. de Souza, R. F. Santos and G. P. Fracaro, "Potential for the production of biogas in alcohol and sugar cane plants for use in urban buses in the Brazil," *World Renewable Energy Congress-Sweden, Linkoping University Electronic Press, Linkoping, Sweden, May 2011.*
16. M. Fakhari and E. Joudaki, "study of production Vinasse in sugar factories," *Iranian Chemical Engineering*, 11, 2012, pp. 86-90. (in persian)
17. S. Belhadj, F. Karouach, H. El Bari and Y. Joute, "The biogas production from mesophilic anaerobic digestion of vinasse," *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)*, 5, 2013, pp. 72-77.
18. M. H. Rocha, E. E. S. Lora and O. J. Venturini, "Life cycle analysis of different alternatives for the treatment and disposal of ethanol vinasse," *Proc Int Soc Sugar Cane Technol*, 26, 2007, pp. 108-114.
19. K. R. Salomon and E. E. S. Lora, "Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil," *Biomass and Bioenergy*, 33, 2009, pp. 1101-1107.
20. M. M. F. Ribas, F. A. Chinalia, E. Pozzi and E. Foresti, "Microbial succession within an anaerobic sequencing batch biofilm reactor (ASBBR) treating cane vinasse at 55°C," *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 52, 2009, pp. 1027-1036.
۲۱. M. Boncz, E. Formagini, Ld, S. Santos, R. Marques and P. Paulo, "Application of urea dosing for alkalinity supply during anaerobic digestion of vinasse," *Water Science and Technology*, 66, 2012, pp. 2453-2460.
22. A. Cabrera-Diaz, I. Pereda-Reyes, D. Oliva-Merencio, R. Lebrero and M. Zaiat, "Anaerobic digestion of sugarcane vinasse through a methanogenic UASB reactor followed by a packed bed reactor," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 183, 2017, pp. 1127-1145.
23. A. Cabrera-Diaz, I. Pereda-Reyes, J. Duenas-Moreno, E. Veliz-Lorenzo, M.A. Diaz-Marrero, C.L. Menendez-Gutierrez, D. Oliva-Merencio and M. Zaiat, "Combined treatment of vinasse by an upflow anaerobic filter-reactor and ozonation process," *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33, 2016, pp. 753-762.
24. C.A. Christofolletti, J. P. Escher, J. E. Correia, J. F. U. Marinho and C. S. Fontanetti, "Sugarcane vinasse: environmental implications of its use," *Waste Management*, 33, 2013, pp. 2752-2761.
25. M. Moghadam Nasab, A. Takdastan and S. Sabz Alipour, "Quantitative analysis and characterization of wastewater generated from the alcohol industry and its treatment methods," *The first national conference on technical, economic, social and environmental 555 thousand hectares of land reclamation projects in Khuzestan and Ilam-Iran, Ahvaz, Iran, February 2015.* (in persian)
26. C. de Bazua, M. Cabrero and H. Poggi, "Vinasses biological treatment by anaerobic and aerobic processes: laboratory and pilot-plant tests," *Bioresource Technology*, 35, 1991, pp. 87-93.
27. L. M. Siqueira, E. S. Damiano and E. L. Silva, "Influence of organic loading rate on the anaerobic treatment of sugarcane vinasse and biogas production in fluidized bed reactor," *Journal of Environmental Science and Health*, 13, 2013, pp. 1707-1716.
28. E. Debik and T. Coskun, "Use of the Static Granular Bed Reactor (SGBR) with anaerobic sludge to treat poultry slaughterhouse wastewater and kinetic modeling," *Bioresource Technology*, 100, 2009, pp. 2777-2782.
29. S. J. Lim, and T. H. Kim, "Applicability and trends of anaerobic granular sludge treatment processes," *Biomass and Bioenergy*, 60, 2014, pp. 189-202.
30. E. I. Ohimain and S. C. Izah, "A review of biogas production from palm oil mill effluents using different configurations of bioreactors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 2017, pp. 242-252.
31. F. Ehelinger, I. Gueler, F. X. Ball and C. Prevot, "Treatment of lees vinasses of red wine by methanogenic fermentation in presence of tannins and sulphides," *Water Science and Technology*, 25 1992, pp. 275-284.
32. K. Aboudi, C. J. Alvarez-Gallego and L. I. Romero-Garcia, "Semi-continuous anaerobic co-digestion of sugar beet byproduct and pig manure: effect of the organic loading rate (OLR) on process performance," *Bioresource Technology*, 194, 2015, pp. 283-290.
33. M. H. Geradi, *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2003.
34. I. Syaichurrozi and S. Sumardino, "Predicting kinetic model of biogas production and biodegradability organic materials: biogas production from vinasse at variation of COD/N ratio," *Bioresource Technology*, 149, 2013, pp. 390-397.
35. J. Park, *Evaluation of tire derived rubber particles as biofilter media and scale-up and design considerations for the static granular bed reactor (SGBR)*, PhD Thesise, Department of Civil Engineering, Iowa State University, 2008.
36. F. Sanchez Rieraa, P. Cordoba and F. Sineriz, "Use of the UASB reactor for the anaerobic treatment of stillage from sugar cane molasses," *Biotechnology and Bioengineering*, 27, 1985, pp. 1710-1716.
37. A. Bories, J. Raynal and F. Bazile, "Anaerobic digestion of high-strength distillery wastewater (cane molasses stillage) in a fixed-film reactor," *Biological Wastes*, 23, 1998, pp. 251-267.
38. I. G. Lalov, M. A. Krysteva and J. L. Phelouzat, "Improvement of biogas production from vinasse via covalently immobilized methanogens," *Bioresource Technology*, 79, 2001, pp. 83-85.
39. S. Goyal, R. Seth and B. Handa, "Diphasic fixed-film biomethanation of distillery spentwash," *Bioresource Technology*, 56, 1996, pp. 239-244.
40. M. Alipour and A. Takdastan, "Feasibility study of vinasse wastewater treatment plant of Razi yeast and Alcohol Company by use of complete mixed anaerobic digester method," *Eighth National Conference on Iranian Sugar Cups, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, February, 2016.* (in persian)
41. www.isfs.ir, Accessed 18 March 2018.

English Abstract

Biogas production from sugar cane vinasse using a Static Granular Bed Reactor (SGBR)

Mostafa Parsaee¹, Mostafa Kiani Deh Kiani^{2*} and Afshin Takdastan³

1- Department of Biosystem Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, parsaeemostafa@yahoo.com

2- Department of Biosystem Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, m.kiani@scu.ac.ir

3- Environmental Technologies Research Center, Jundishapur University of Medical Sciences of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Afshin_ir@yahoo.com

*Corresponding author

(Received: 2018.04.15, Received in revised form: 2018.05.22, Accepted: 2018.06.09)

In this study, the production of biogas from vinasse by using three SGBR reactors with the same volume of 5.6 liters for three hydraulic retention times (2, 3 and 4 days) and organic loading rates of 86002, 28667 and 21500 mgCOD/L.d was investigated. The water bath method was used to provide the temperature of mesophyll reactors at 35, and NaOH solution was used for buffer. The biogas volume was measured using the water displacement method. The results showed that the methane production was almost constant with HRT of 4, 3, and 2 days after 11, 13, and 16 days, respectively. Methane gas production with HRT of 2, 3, and 4 days was 6.66, 16.66 and 27.38 $L_{CH_4(STP)}/L.day$ per liter of vinasse, respectively. For three reactors, methanogen and acidogenic bacteria were in the equilibrium state at pH 5.57 after 2 days. The amount of methane gas production per volatile solids with the HRT of 2, 3, and 4 days was 244, 345 and 434 $m^3_{CH_4}/g_{vs}$, respectively.

Keywords: Vinasse, Biogas, Methan Gas, hydraulic retention time, Static Granular Bed Reactor