

بررسی حالت گذرا در راه اندازی یک هاضم بی هوازی لجن

رضا روستا آزاد*، کورش گلشن** و سید جمال الدین هاشمیان*

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

مرکز آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۷۶/۱۱/۲۵ - دریافت نسخه نهایی: ۷۸/۱۰/۱۸)

چکیده - دینامیک راه اندازی یک هاضم بی هوازی لجن شهری به ظرفیت 1,200,000 lit مورد بررسی قرار گرفت. عمل اختلاط در هاضم با چرخش گاز تولیدی با دبی $0.13 \text{ m}^3/\text{hr}$ به ازای هر مترمکعب از حجم هاضم صورت گرفت. علی‌رغم اختلالات عملیاتی همچون نشی گاز، نشی لجن، نقص سیستم گرمکن و ضعف سیستم اختلاط هیچ گونه مسئله حادی همچون کف کردن، ترش شدن، افت دما و غیره طی مدت زمان ۹ ماه از ابتدای راه اندازی مشاهده نشد. در جریان هضم یک لجن مخلوط به نسبت ۳:۱ از لجن اولیه و ثانویه با دبی $25 \text{ m}^3/\text{d}$ در دمای 25°C و زمان ماند ۴۸ روز، درصد حذف مواد فرار به ۶۰ درصد رسید. داده‌های تجربی حاصل از این بررسی با یک مدل نظری ارائه شده در منابع تحقیقاتی مطابقت داده شد و سازگاری خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر نظری حاصل از مدل به دست آمد.

The Transition Stage in the Start-up of an Anaerobic Sludge Digester

R. Roustazad, K. Golshan and S. J. Hashemian

Department of Chemical Engineering, Sharif University of Technology

Water and Energy Research Center, Sharif University of Technology

ABSTRACT- *The start up dynamics of a one-million and two-hundred-thousand litre anaerobic digester of municipal waste treatment sludge was studied. In the digester, mixing was accomplished by circulation of the produced biogas at a rate of 0.13 m^3 per m^3 of the digester volume per hour. During the nine-month study, no serious phenomena of foaming, getting sour, temperature fall, etc. were observed despite the fact that there were problems including gas leakage, sludge leakage, heating system shortcomings and weak mixing system. In the process of digestion of a 3:1 mixture of primary and secondary sludge at a rate of $25 \text{ m}^3/\text{day}$, 25°C and a residence time of 48 days, volatile content removal was as high as 60%. The experimental data collected in this study was checked against a theoretical model already published in the literature and a good comparison was observed between the measured values and those calculated based on the model.*

** - کارشناس ارشد

* - استادیار

هاضم بی هوازی به طور مطلوبی در حال کار است، دو فاز هضم (فاز اسیدی و فاز متانی) در حال تعادل دینامیکی اند. به عبارت دیگر اسیدهای آلی فرار با همان سرعتی که از تجزیه مواد آلی پیچیده، تشکیل می‌شوند به متان تبدیل می‌شوند و در نتیجه سطح اسیدهای فرار در هاضم‌های در حال کار پایین است.

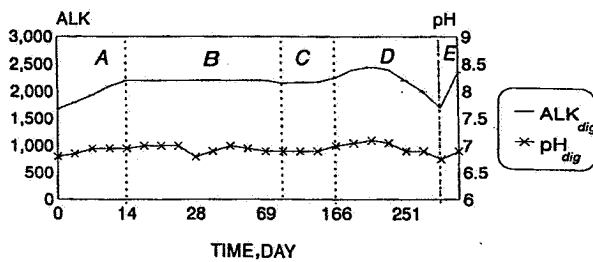
هضم بی هوازی یکی از روشهای مؤثر و کارآمد در تثبیت لجن است و در حال حاضر در سطح وسیعی در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین دلیل تحقیقات زیادی در جهت شناخت و بهبود عملکرد آن صورت گرفته است. در عین حال عواملی چون شناخت کم و کمی تجربه و در نتیجه نگرانی از بروز مشکلات راهبری و به خصوص ترش کردن راکتور تحقیقات بیشتر را در این زمینه می‌طلبد. در این تحقیق، دینامیک راه اندازی یک هاضم بی هوازی لجن شهری با حجم یک میلیون و دویست هزار لیتر مورد مطالعه قرار گرفت و عملکرد آن در چارچوب تغییرات حاصل در لجن و به خصوص VSS، SS، pH و قلیابیت ارزیابی شد.

۲- مواد و روشها

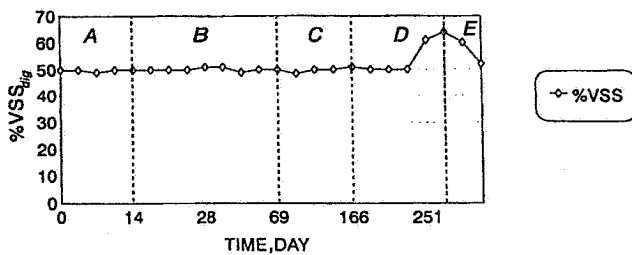
هاضم بی هوازی مورد استفاده در این مطالعه از نوع پرریار با حجم مفید 1200 m^3 بود. عمل اختلاط در هاضم توسط یک سیستم همزن گازی به ظرفیت گردش $0.133 \text{ m}^3/\text{hr}$ گاز به ازای هر m^3 از حجم راکتور صورت گرفت. سیستم مجهز به دیگ آبگرم و مبدل گرمایی برای کار در دمای بهینه بود ولی در مدت راه اندازی امکان بهره‌گیری از آن فراهم نشد. اندازه‌گیری COD، قلیابیت، SS و VSS همگی بر مبنای روشهای استاندارد انجام پذیرفت [۴]. برای اندازه‌گیری COD، 2CC از محلول فیلتر شده با کاغذ صافی، 2CC از محلول اسیدسولفوریک غلیظ و 2CC محلول دی‌کرومات پتاسیم 0.25% نرمال مخلوط شده و به صورت در بسته به مدت 2 hr در دمای 250°C نگهداری شد. آن‌گاه محتویات حاصل توسط سولفات فروآمونوم 0.25% نرمال در حضور معرف فرئون تیترا شد. به منظور سنجش قلیابیت، 1CC محلول صاف شده تا پنج برابر رقیق شد و توسط اسیدسولفوریک 0.2% نرمال در حضور معرف متیل اورانژ تیترا شد. میزان قلیابیت برحسب میلی گرم کربنات کلسیم در لیتر ($1000 \text{ mg}/\text{cc}$ از اسید مصرفی) گزارش شد. برای اندازه‌گیری SS (جامدات معلق)، 10CC از نمونه همگن

هدف از تصفیه فاضلاب، زدودن عوامل آلاینده و تمرکز آنها در توده متراکمتری موسوم به لجن است به نحوی که به دلیل کاهش حجم، انتقال و دفع آن ساده و ارزان شود. چون آلاینده‌های مضر از قبیل میکروبه‌های بیماری‌زا، تخم انگل، فلزات سنگین و موادی که تخمیر آنها موجب بوی نامطبوع می‌شود در لجن زیاد است، حمل و دفع لجن باید طبق موازین زیست محیطی انجام شود تا سلامت جامعه به خطر نیفتد. توسعه شهرها مشکلات حمل و دفع را تشدید می‌کند، بدین لحاظ به منظور کاهش هزینه‌های حمل لازم است لجن تثبیت شده و سپس با به کارگیری عملیات آبیگری، حجم آن را کاهش داده و ترجیحاً خشک کرد. معمولاً فرایند تثبیت، آبیگری و دفع لجن در حدود 50% درصد از هزینه‌های کلی تصفیه فاضلاب را شامل می‌شود و همچنین 55% درصد هزینه راهبری و تعمیرات سالانه یک تصفیه‌خانه مربوط به تأسیسات هضم لجن می‌شود [۱].

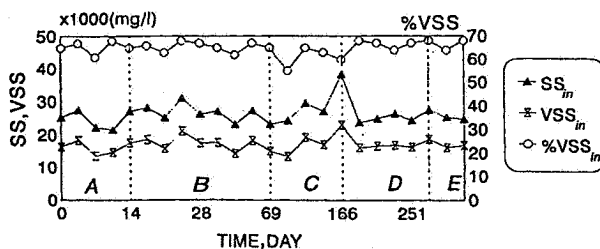
منظور از تثبیت لجن کاهش مواد آلی فسادپذیر موجود در آن است. انواع مختلفی از روشهای تثبیت وجود دارد و هضم، یکی از این روشهاست. هضم بی هوازی یک فرایند بیولوژیکی چندمرحله‌ای است که طی آن انواع مختلفی از مواد آلی تثبیت می‌شوند. براساس نظرات ارائه شده [۲ و ۳] هضم بی هوازی لجن در سه مرحله اصلی انجام می‌شود. در مرحله اول، آنزیمهای خارج سلولی جامدات آلی پیچیده همچون کربوهیدرات، پروتئین و لیپید را به مواد آلی محلول مانند اسیدهای چرب، الکها، دی‌اکسید کربن و آمونیاک می‌شکنند. در مرحله دوم، میکروارگانیسمها (اغلب باکتریهای اسیدوژنیک یا تشکیل دهنده اسید) محصولات اولین مرحله را به اسیداستیک، پروپیونیک اسید، هیدروژن، دی‌اکسید کربن و دیگر اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم تبدیل می‌کنند. در مرحله سوم دو گروه از باکتریهای تشکیل دهنده متان فعالیت می‌کنند. یک گروه هیدروژن و دی‌اکسید کربن را به متان و دیگری استات را به متان و بی‌کربنات (کربن دی‌اکسید به صورت محلول) تبدیل می‌کنند. بنابراین هر دو گروه باکتریها بی‌هوازی هستند. در اکثر مواقع باکتریهای تشکیل دهنده متان، کنترل کننده فرایندند. تشکیل دهنده‌های متان شدیداً به عوامل محیطی (دما، pH، مواد سمی و...) حساس‌اند و خیلی آهسته رشد می‌کنند. وقتی یک



شکل ۲- تغییرات pH و قلیائیت هاضم برحسب زمان



شکل ۳- تغییرات %VSS هاضم برحسب زمان



شکل ۴- تغییرات SS و %VSS لجن ورودی به هاضم برحسب زمان

روز سی و ششم راه‌اندازی انجام شد و زمان شروع در منحنیهای موجود، نمایانگر این روز است.

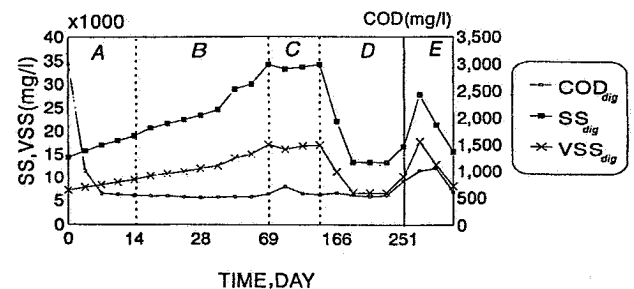
در ناحیه A، هاضم در حال بارگیری اولیه بود و لذا هیچ گونه تخلیه‌ای از آن صورت نمی‌گرفت. علاوه بر این در این ناحیه عمل اختلاط صورت نمی‌گرفت. در ناحیه B که پس از پر شدن هاضم شروع شد، ضمن برقراری جریان خروجی عمل اختلاط در هاضم توسط گردش لجن به مدت 5 hr/day و با دبی $30\text{m}^3/\text{hr}$ انجام شد. در ناحیه C به مدت دو هفته ورود، خروج و گردش لجن در هاضم قطع شد. در ناحیه D از کمپرسورهای برگشت گاز استفاده شد و این کمپرسورها روزانه 20 hr با دبی $130\text{m}^3/\text{hr}$ کار می‌کردند و در نتیجه عمل اختلاط به خوبی انجام می‌شد. در انتهای ناحیه D، حدود 500m^3 از لجن به صورت آبی از هاضم تخلیه شد. بعد از شوکی که در اثر این تخلیه شدید به سیستم وارد آمد، هاضم دچار

شده توسط کاغذ صافی بدون خاکستر روی قیف بوختر تحت خلاء صاف شد و جامد حاصل در دمای 105°C به مدت 12 hr خشک شد و وزن نمونه خشک شده پس از خنک شدن در دسیکاتور به عنوان SS گزارش شد. پس از این، نمونه خشک شده به مدت 10 تا 15 min در دمای 550°C در داخل کوره سوزانده شد. کاهش وزن حاصل در این شرایط به عنوان VSS تلقی شد. مقدار VSS نسبت به SS به صورت درصد نیز با استفاده از این داده‌ها محاسبه و به عنوان %VSS گزارش شد.

pH نمونه‌ها با استفاده از دستگاه pH سنج با دقت 0.01 اندازه‌گیری شد. دمای اندازه‌گیری 20°C و هر بار نیز دستگاه توسط بافر کالیبره شد.

۳- نتایج و بحث

دینامیک راه‌اندازی هاضم بی‌هوازی لجن مدت ۹ ماه مورد مطالعه قرار گرفت. طی این مدت، لجن مازاد روزانه یک تصفیه خانه فاضلاب شهری با دبی تقریبی $25\text{m}^3/\text{d}$ مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به حجم هاضم، این دبی خوراک زمان ماندی در حدود ۴۸ روز عاید کرد. خوراک ورودی مخلوطی از لجن اولیه و ثانویه به نسبت ۳:۱ بود. به هنگام عملکرد هاضم، به صورت متناوب از ورودی و خروجی آن نمونه برداری شد و هر بار میزان SS، COD، pH، درصد مواد فرار، دما و قلیائیت تعیین شد. در طول مدت مذکور، بار آلی اعمالی به هاضم در حدود 0.4 kg مواد فرار به ازای هر مترمکعب راکتور در روز و دمای هاضم در حدود 25°C بود. نتایج حاصل از اندازه‌گیریها در شکل‌های (۱) تا (۴) ارائه شده است. در این شکل‌ها، پنج ناحیه از راه‌اندازی با حروف A، B، C، D و E مشخص شده است. شرح مختصری از مشخصات عملیاتی این نواحی در جدول (۱) ارائه شده است. نمونه برداریها از

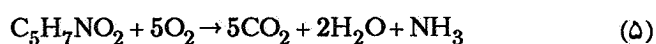


شکل ۱- تغییرات SS، VSS و COD محلول هاضم برحسب زمان

جدول ۱- مشخصات عمومی ناحیه‌های عملیاتی در راه اندازی هاضم بی هوازی

ناحیه	مدت (روز)	ورودی (m ³ /d)	خروجی	اختلاط	ملاحظات
A	۱۴	۲۵	-	-	-
B	۵۵	۲۵	۲۵	گردش لجن	-
C	۴۰	۲۵	-	-	-
D	۱۴۶	۲۵	۲۵	گردش گاز	تخلیه 500m ³ در انتها
E	۲۰	۲۵	۲۵	گردش گاز	-

هضم پروتیین حاصل می‌شود. در جریان هضم پروتیین، آمونیزاسیون نیتروژن آلی باعث افزایش قلیابیت می‌شود به نحوی که به ازای هر 113 gr لجن فرار با فرمول شیمیایی C₅H₇NO₂ یک مول نیتروژن آلی به آمونیاک تبدیل خواهد شد. بنابراین افزایش قلیابیتی معادله با $\frac{1}{113}$ اکی والان گرم بر گرم VSS هضم شده ایجاد می‌شود. از طرفی طبق واکنش:



میزان COD استوکیومتریکی برای یک واحد VSS باکتریایی ۱/۴۲ است (1.42g COD/g VSS). بنابراین در چنین حالتی افزایش قلیابیت حاصل در سیستم به ازای حذف هر گرم COD برابر خواهد بود با:

$$COD \times 10^{-3} \times \frac{1}{113} \div \frac{1}{42} = 6/2 \times 10^{-3}$$

اکی والان قلیابیت برای هر گرم

بر مبنای فرمول تجربی باکتریایی کسر جرمی نیتروژن $\frac{14}{113}$ گرم جرم خشک یعنی ۱۲/۴ درصد توده سلولی است. البته با توجه به وجود خاکستر در سلول و نیز حضور موادی به غیر از توده سلولی، کسر جرمی نیتروژن در لجنها معمولاً کمتر از این مقدار است. با در نظر گرفتن میزان ۴ و ۱۰ درصد نیتروژن برحسب VSS، به ترتیب برای لجن اولیه و ثانویه یا مقدار ۲/۸ و ۷ درصد برحسب جرم COD حذف شده است [۵]. می‌توان افزایش قلیابیت در لجن اولیه و ثانویه را به این ترتیب محاسبه کرد:

$$\frac{4}{12.4} \times 0.0062 = 0.002$$

در لجن اولیه:

اکی والان قلیابیت تولیدی به ازای گرم COD حذف شده

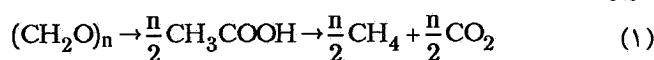
$$\frac{10}{12.4} \times 0.0062 = 0.005$$

در لجن ثانویه:

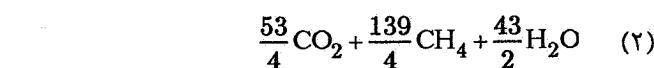
نوسان شده و دامنه این نوسانات حتی به داخل ناحیه E هم نفوذ کرد.

با دقت به نحوه تغییر داده‌ها در شکل‌های (۱) و (۲) ملاحظه می‌شود که در ناحیه A قلیابیت افزایش یافته و COD محلول کاهش قابل ملاحظه‌ای کرده است. برای بررسی این پدیده می‌توان به ماهیت بیوشیمیایی لجن توجه کرد. لجن اولیه از ته نشینی مواد جامد معلق در فاضلاب حاصل می‌شود که اساساً از کربوهیدراتها (به فرمول عمومی (CH₂O)_n) و لیپیدها (مانند پالمیتات گلیسرین (C₄₈H₉₈O₆) تشکیل شده است. لجن ثانویه که بعد از یک فرایند بیولوژیکی به دست می‌آید دارای طیف وسیعی از انواع باکتریها با درصد بالایی از پروتیین است که می‌توان "فرمول تجربی" آنها را در نظر گرفت. تخمیر اسیدی و متانی این سه گروه اصلی (لیپیدها، کربوهیدراتها و پروتئینها) به شکل زیر صورت می‌پذیرد:

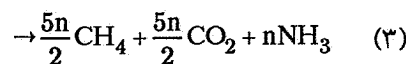
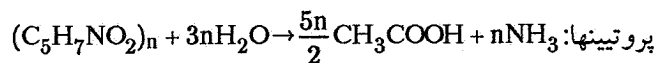
کربوهیدراتها:



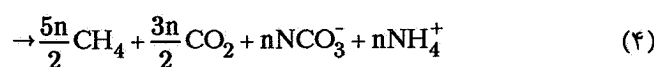
لیپیدها:



پروتئینها:



یا



از این معادله‌ها چنین برداشت می‌شود که قلیابیت فقط به هنگام

بنابراین افزایش قلیابیت برای لجن مخلوط با نسبت ۷۵:۲۵ (لجن اولیه به لجن ثانویه) برابر خواهد بود با:

$$0.0062 \left(\frac{10}{12.4} \times 0.25 + \frac{4}{12.4} \times 0.75 \right) = 0.00275$$

اکی والان قلیایی به ازای گرم COD حذف شده

داده‌های تجربی مندرج در شکل‌های (۱) و (۲) نسبت قلیابیت اضافه شده به COD حذف شده را در حدود ۰/۰۰۲۸۹ نشان می‌دهند. مقایسه این نسبت تجربی با مقدار نظری آن یعنی ۰/۰۰۲۷۵ توافق خوبی را بین نظریه و تجربه ارائه می‌دهد. در این مقایسه مقدار اندازه‌گیری شده این نسبت فقط ۵ درصد نسبت به مقدار نظری بیشتر است. این تفاوت می‌تواند ناشی از وجود قلیابیت به جز نیتروژن آمونیاکی یعنی یون HCO_3^- باشد. غلظت این یون با کاهش COD (مصرف اسید) بالا می‌رود و لذا اهمیت آن به تدریج افزایش می‌یابد.

در ناحیه B قلیابیت، pH، درصد مواد فرار و COD محلول ثابت ماندند. می‌توان گفت در این ناحیه یک حالت تعادل بین فازهای مختلف هضم برقرار بوده است. زیرا در صورت تعادل است که میزان اسید مصرفی و اسید تولیدی در هاضم برابر بوده و در نتیجه قلیابیت و اسیدیته ثابت خواهند ماند. در این ناحیه افزایشی در میزان SS و VSS مشاهده شد که می‌تواند در اثر ضعف اختلاط و همچنین عدم تخلیه لجن از کف هاضم باشد.

در ابتدای ناحیه C، جریان ورودی به هاضم به مدت دو هفته قطع شد. انتظار می‌رود در این مدت جریان هضم با توجه به منابع غذایی موجود در هاضم به صورت منقطع (batch) ادامه یابد. در این صورت کاهش در SS و VSS هاضم پدید خواهد آمد. نتایج منعکس در شکل (۱) چنین کاهش را نشان می‌دهند. همزمان با این کاهش، افزایش مختصری نیز در قلیابیت قابل مشاهده است. البته این مقدار کاهش SS و VSS و نیز افزایش قلیابیت چندان قابل توجه نیست و می‌تواند از نظر آماری بی‌اهمیت و در حد خطای اندازه‌گیری ارزیابی شود.

در ناحیه D کمپرسورهای گردش گاز به طور دوره‌ای وارد عمل شدند و عمل اختلاط را روزانه 20 hr با دبی $130\text{m}^3/\text{hr}$ انجام دادند. در اثر عمل اختلاط SS و VSS کاهش یافته و بعد در محدوده خاصی ثابت ماندند. علاوه بر این، COD محلول و درصد مواد فرار

تغییری نکردند ولی قلیابیت تا حد 2400mg/l افزایش یافت. توجه این پدیده‌ها در گرو توجه به نقش عمل اختلاط در بیوراکتورها می‌تواند باشد. اختلاط باعث همگن شدن سیستم می‌شود و در نتیجه محتویات درون هاضم بهتر در اختیار میکروارگانیسمها قرار خواهد گرفت. در این شرایط تمام حجم راکتور از نظر فعالیت باکتریایی تقویت می‌شود و در نتیجه شدت واکنشهای بیولوژیکی در هاضم به طور کلی افزایش خواهد یافت. این تحولات می‌تواند افزایش قلیابیت و کاهش SS و VSS را به دنبال داشته باشد. می‌توان گفت حالت پایدار هاضم به معنی واقعی کلمه در ناحیه‌ای که VSS و SS به ترتیب در مقدار 6650 و 13300mg/l ثابت ماندند، اتفاق افتاد. بنابراین یک موازنه جرم کلی در بیوراکتور در این حالت می‌تواند مشخصات مهم عملیاتی آن را تعیین کند. شرایط ورودی و خروجی هاضم در این مرحله عبارت‌اند از:

$$\text{VSS}_{\text{in}} = 16560\text{mg/L}$$

$$\text{VSS}_{\text{out}} = 6650\text{mg/L}$$

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}} = 25\text{m}^3/\text{d}$$

بنابراین میزان VSS تبدیل شده به بیوگاز برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} \text{میزان VSS تبدیل شده به بیوگاز} \\ = 25(16560 - 6650) \times 10^{-3} = 247.75\text{kg/d} \end{aligned}$$

حال با فرض تولید 0.78m^3 بیوگاز به ازای حذف هر کیلوگرم VSS [۶] میزان گاز تولیدی روزانه^۱ (GPR) برابر خواهد بود با:

$$\text{GPR} = 0.78 \times 247.75 = 193.25\text{m}^3/\text{d}$$

و نیز درصد VSS حذف شده برابر خواهد بود با

$$\text{VSS حذف شده} = \frac{16560 - 665}{16560} \times 100 = 59.84$$

موازنه جرم هاضم در این حالت افزایشی در درصد حذف مواد فرار از ۵ درصد در حالت قبل به حدود ۶۰ درصد و حجم گاز تولیدی روزانه را ۱۹۳ مترمکعب به دست می‌دهد. این ارقام نشان دهنده بهبود عملکرد هاضم در حالت پایدار منطقه D است.

یک نکته قابل توجه در منطقه پایدار ناحیه D افزایش حذف مواد فرار تا حد ۶۰ درصد ولی ثابت ماندن درصد مواد فرار لجن داخل هاضم در حد ۵۰ درصد است. در نظر اول داده‌ها به نظر متضاد می‌آیند در حالی که توجه به بارگذاری کم و یا زمان ماند بالا

در این هاضم توجیه داده‌ها را ممکن می‌سازد. با استفاده از یک موازنه جرم پیرامون هاضم می‌توان این مطلب را بهتر توضیح داد. مشخصات عملیاتی مهم در این شرایط عبارت‌اند از

$$SS_{\text{feed}} = 25000 \text{ mg/L}$$

$$VSS_{\text{feed}} = 17000 \text{ mg/L}$$

$$Q_{\text{feed}} = 25 \text{ m}^3/\text{D}$$

$$V_{\text{digester}} = 1200 \text{ m}^3$$

$$SS_{\text{digester}} = 16000 \text{ mg/L}$$

$$VSS_{\text{digester}} = 8000 \text{ mg/L}$$

بنابراین در یک طیف وسیع از درصد حذف مواد فرار از صفر تا ۶۰ خواهیم داشت:

$$\%VSS_{\text{removed}} = 0 \Rightarrow \%VSS_{\text{digester}} =$$

$$\frac{8000+17000 \times 25.1200}{16000+25000 \times 25.1200} \times 100 = 50.57$$

$$\%VSS_{\text{removed}} = 60 \Rightarrow \%VSS_{\text{digester}} =$$

$$\frac{8000+17000(1-0.6) \times 25.1200}{16000+(25000-0.6 \times 17000) \times 25.1200} \times 100 = 49.92$$

بنابراین اگر درصد حذف مواد فرار از صفر تا ۶۰ درصد تغییر کند، درصد مواد فرار داخل هاضم در محدوده کوچکی بین ۵۰/۵۷ تا ۴۹/۹۲ تغییر خواهد کرد که البته چندان محسوس نخواهد بود. در صورتی که زمان ماند در داخل هاضم تا حد رقم مورد نظر در طراحی یعنی ۱۲ روز کاهش یابد آن‌گاه تأثیر برقراری جریان گردشی گاز توسط کمپرسور محسوستر خواهد بود. به هر حال مسلم است که گردش گاز بر راندمان حذف اثر مثبتی دارد.

در انتهای ناحیه D، بیش از ۵۰۰ m³ از لجن هاضم به صورت آبی تخلیه شد. با تخلیه لجن، هاضم از میکروارگانیسمهای فعال عاری شده و در نتیجه شوک حاصل ضمن ایجاد اختلال در عمل هضم، حجم گاز تولیدی را به شدت کاهش داد. افزایش درصد مواد فرار درون هاضم تا ۶۴ درصد، افزایش در SS، VSS، COD محلول و درصد مواد فرار و همچنین کاهش قلیابیت و pH همگی دلایلی بر تضعیف شدید فرایند هضم لجن پس از اعمال شوک مذکورند.

در ناحیه E با قطع خروجی سیستم، در ابتدای کار اثرات ناشی از شوک اعمالی در ناحیه D به تدریج مرتفع و شرایط هضم بهتر شد. حدود ۲۰ روز طول کشید تا هاضم دوباره به حالت پایدار خود

رسید. درصد حذف مواد معلق فرار در انتهای ناحیه به بیش از ۶۰ درصد و قلیابیت به ۲۳۵۰ mg/l رسید. در حالی که درصد مواد فرار در لجن خروجی هاضم حدود ۵۲ درصد بود.

داده‌های تجربی حاصل از این تحقیق با مدلی که در این خصوص توسط گاست و پائولواستاتیس [۷] ارائه شده است مطابقت داده شد. در این مدل، معادله‌های حالت پایدار برای راکتور همزده با جریان پیوسته بدون جریان برگشتی در شرایط مزوفیلیک و خوراک دهی لجن فعال حل شده و شاخصهای مختلف جریان خروجی از سیستم تعیین شده‌اند. با استفاده از این مدل و مشخصات جریان ورودی به سیستم، مقدار درصد حذف مواد فرار، VSS خروجی و گاز تولیدی به ترتیب ۵۸ و ۷۱۴۰ mg/L و ۲۰۴ m³/d به دست آمد. داده‌های تجربی در این تحقیق مقادیر ۶۰، ۶۶۵۰ mg/l و ۱۹۳ m³/d را به ترتیب برای درصد حذف مواد فرار، VSS خروجی و گاز تولیدی روزانه نشان دادند. بنابراین انطباق خوبی بین مدل و داده‌های تجربی در حالت پایدار مشاهده شد. با این که این مدل عملکرد بیوراکتورهای هضم لجن فعال را بررسی می‌کند، مطابقت فوق‌العاده آن را در پیش‌بینی عملکرد هضم بی‌هوازی لجن مخلوط نیز نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به داده‌های به دست آمده و مباحثی که به منظور توجیه نتایج به عمل آمد می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- با زمان ماند طولانی می‌توان در دماهای پایین از راندمان هضم خوبی برخوردار بود. در این پژوهش در زمان ماند بیش از ۴۸ روز و دمای متوسط ۲۵°C، درصد حذف مواد فرار به ۶۰ درصد رسید.

۲- اختلاط نقش مؤثری در بالا بردن راندمان هضم دارد و هر چه زمان ماند کمتر باشد این نقش جدی‌تر خواهد بود. اختلاط حاصل از گردش ۰.۱۳ m³/hr گاز به ازای هر m³ از حجم هاضم توانست درصد حذف مواد فرار را از ۵ درصد به ۶۰ درصد برساند.

۳- به ازای حذف هر گرم COD، ۰/۰۰۲۹۸ اکی والان قلیابیت افزایش یافت.

۴- در هضم بی‌هوازی لجن فاضلاب شهری در زمان ماند بالا،

حدود ۲۰ روز یعنی کمتر از نصف زمان ماند، زمان لازم است تا هاضم دوباره شرایط مطلوب خود را به دست آورد.

۷- درصد مواد فرار لجن هاضم در مراحل اولیه راه اندازی از ۶۸ درصد به ۵۰ درصد کاهش یافت و در طول مدت هضم ثابت ماند.

۸- داده‌های تجربی انطباق خوبی با مدل ارائه شده توسط پائولوستاتیس و گوست داشت.

۹- با وجود مشکلات عملیاتی همچون نشتی لجن و گاز، اختلال در سیستم گرمکن و همزن، عملکرد هاضم قابل قبول و کیفیت آبیگری از لجن نیز خوب بود.

سیستم به خودی خود قلیائیت مطلوب را به دست خواهد آورد و هیچ گونه احتیاجی به افزودن مواد قلیایی به سیستم نیست. قلیائیت برای سیستم مورد تحقیق در شرایط عادی 2400 mg/L برحسب کربنات کلسیم به دست آمد.

۵- در بار آلی کم و زمان ماند طولانی، سیستم هضم بی هوازی از قدرت بافری بالایی برخوردار است و می‌تواند شوکهای اعمالی را تعدیل کند. در زمان ماند ۴۸ روز با بار آلی 0.4 kg مواد فرار به ازای هر m^3 از حجم راکتور، هیچ گونه مسئله حادی (کف کردن، ترش کردن، افت دما و...) دیده نشد.

۶- در اثر اعمال شوک شدید تخلیه ناگهانی حجم زیادی از لجن،

واژه نامه

مراجع

1. Gas Production Rate

1. *Operation of Municipal Waste Water Treatment Plants*, Copyright 1990 by the Water pollution Control Federation. Manual of Practice No. 11, Vol. 3, Second Edition, Chaps. 25, 27.
2. Zehnder, A. J. B., Ingvorsen, K., and Marti, T., "Microbiology of Methane Bacteria," *Proc. of 2nd Intern. Symp. on Anaerobic Digestion.*, Travemunde, Germany, pp. 45-68, Sept. 1981.
3. Paulostathis, S. G., and Gossett, J. M. "Preliminary Conversion Mechanisms in Anaerobic Digestion of Biological Sludges," *J. Env. Eng.*, Vol. 144, No. 3, pp. 1519-1530, June 1988.
4. *Standard Methods of the Examination of water and Waste*, American Public Health Association, 1985.
5. Van Haandel, A. C., "Influence of the Digested COD concentration on the Alkalinity Requirement in Anaerobic Digesters," *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 30, No. 88, pp. 23-34, 1994.
6. "Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal," U. S. Environmental Research Laboratory Office of Research and Development Center for Environmental Research Information Technology Transfer, Sept. 1979.
7. Paulostathis, S. G., and Gossett, J. M., "A Kinetic Model for Anaerobic Digestion of Biological Sludge," *Biotech, and Bioen.* Vol. 28, pp. 1519-1530, 1986.