علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره هجدهم، ویژه نامه شماره۲، پاییز ۱۳۹۵

تأثیر زمان ماند و نوع ماده اولیه بر میزان تولید بیوگاز و قلیاییت در هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاهی

آمنه سلیمی [۱]

شهناز دانش [۲*]

sdanesh@um.ac.ir

سیدهادی ابراهیمی [۳]

تاریخ دریافت:۹۲/۱۱/۰۸ تاریخ پذیرش:۹۳/۰۸/۲۱

چکیده

زمینه و هدف: تصفیه بی‌هوازی برخی از ضایعات جامد کشتارگاهی مانند محتویات شکمبه، به دلیل پتانسیل تولید انرژی و تأثیر مثبت آن در کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، یکی از گزینه‌های مناسب فرآوری و دفع این قبیل ضایعات به شمار می‌آید. هدف از انجام این پژوهش، تعیین تأثیر زمان ماند و نوع مواد اولیه بر روی میزان تولید بیوگاز و قلیاییت از محتویات شکمبه دام‌های بزرگ بوده است.

روش بررسی: در این پژوهش، تأثیر زمان ماند و نوع ماده اولیه بر روی تولید قلیاییت و بازده بیوگاز در فرآیند هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاهی در مقیاس آزمایشگاهی در راکتورهایی با حجم یک لیتر و با جریان ناپیوسته بررسی شد. بررسی‌ها در درجه حرارت C35 و زمان ماندی معادل ۳۰ روز و با سه نوع ماده اولیه شامل محتویات شکمبه گاو، محتویات شکمبه گوسفند و مخلوط آن‌ها (نسبت اختلاط ۱:۱) که درصد وزنی کل مواد جامد آن‌ها به ترتیب معادل ۶/۵، ۹/۱ و ۸/۰ درصد بود، انجام گرفت.

یافته ها: براساس نتایج، بیش‌ترین میزان افزایش قلیاییت که منجر به افزایش pH نیز شد در هاضم حاوی محتویات شکمبه گاو اتفاق افتاد. بنابراین حداکثر بازده تجمعی بیوگاز و متان در این هاضم‌ها بود که به ترتیب معادل ۲۸۶/۱ و ۸۰/۷ mL/g VSdegraded به دست آمد.

نتیجه گیری: به طورکلی می‌توان چنین بیان کرد که در فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه (علی‌رغم نوع ماده اولیه و زمان ماند)، عامل pH می‌تواند نقش بسیار مهمی را در تولید بیوگاز و متان برعهده داشته باشد. به همین جهت افزایش یک ماده قلیا به منظور جلوگیری از افت pH و تأمین شرایط محیطی مناسب برای رشد و فعالیت میکروارگانیزم‌ها، ضرورت دارد.

واژه‌های کلیدی: هضم بی‌هوازی، ضایعات کشتارگاهی، زمان ماند، نوع ماده اولیه، بیوگاز.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست- مهندسی عمران، دانشکده مهندسی ، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

۲*- (مسوول مکاتبات): دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

۳- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

J.Env. Sci. Tech., Vol 18, Special No.2, Autumn 2016

Effects of Retention Time and Substrate Type on Biogas and Alkalinity Productions from Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Wastes

Amaneh Salimi [1]
sdanesh@um.ac.ir
Shahnaz Danesh [2*]
Seyed Hadi Ebrahimi [3]

Abstract

Background and Objective: Anaerobic digestion of slaughterhouse solid wastes, such as rumen contents, is an appropriate treatment option for managing such residues, because of their significant role in reducing the environmental impacts as well as the potential for biogas production. The objective of this study was to investigate the effects of retention time and substrate type on the biogas and alkalinity productions during anaerobic digestion of rumen contents.
Method: This study aimed to investigate the effects of retention time and substrate type on biogas and alkalinity productions of slaughterhouse wastes using one liter anaerobic digester with batch flow. Experiments were performed at temperature of 35°C and retention time of 30 days with three types of substrate: cattle rumen contents, sheep rumen contents and their mixture (mixing ratio 1:1) with total solids of 6.5, 9.1 and 8.0%, respectively.
Results: Maximum alkalinity was found in the digester containing cattle rumen contents as it increased pH. Thus, the highest cumulative biogas and methane yields obtained for these digesters were 286.1 and 80.7 mL/g VSdegraded respectively.
Conclusion: In general, it can be concluded that in the process of anaerobic digestion of rumen contents (regardless of substrate type and retention time), pH of the reactors can play a major role in biogas and methane productions. Thus, to prevent pH drop and to provide a suitable environment for the growth and activity of microorganisms, addition of an alkaline substance is required.

Keywords: Anaerobic digestion; Slaughterhouse wastes; Retention time; Substrate type; Biogas.

1- Graduate Student of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. * *(Corresponding Author)*
2- Associate Professor and Faculty Member in the Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
3- Assistant Professor and Faculty Member in the Department of Animal Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

مقدمه

فرآیند هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز از ضایعات جامد کشتارگاهی مانند محتویات شکمبه، به دلیل پتانسیل تولید انرژی و حذف آلودگی‌های ناشی از این قبیل ضایعات نسبت به روش‌های دیگر دفع آن‌ها، گزینه بسیار مناسبی محسوب می‌شود. در کشور ما، به دلیل فراوانی و ارزان بودن منابع سوخت‌های فسیلی و همچنین عدم مدیریت بهینه ضایعات تولید شده در کشتارگاه‌ها، تحقیقات قابل توجهی در مورد هضم بی‌هوازی این ضایعات و تبدیل آن‌ها به بیوگاز جهت مصارف مختلف انجام نیافته است. علاوه بر این، فروشندگان دام به منظور افزایش وزن دام قبل از فروش، آن‌ها را تغذیه می‌کنند که این امر موجب افزایش محتویات هضم نشده شکمبه این حیوانات می‌شود. بنابراین محتویات شکمبه بخش عمده‌ای از ضایعات کشتارگاه را تشکیل می‌دهد که پتانسیل فراوانی جهت تولید بیوگاز دارد.

در ایران سالانه بیش از ۳۰۰ هزارتن ضایعات از کشتارگاه‌های دام تولید می‌شود که بیش از ۱۰۰ هزارتن آن را محتویات شکمبه تشکیل می‌دهد. در حال حاضر در کشتارگاه‌هایی مانند مؤسسه صنعتی گوشت مشهد، محتویات شکمبه به کمک دستگاه‌های پرس آب‌گیری شده و در محلی نزدیک کشتارگاه انباشته می‌شود، بدون این‌که از محتوای انرژی این مواد آلی استفاده بهینه شده باشد. اما در صورت استفاده از فرآیند هضم بی‌هوازی علاوه بر دست‌یابی به کودی با کیفیت بالا برای مصارف کشاورزی، می‌توان از بیوگاز تولیدی به عنوان منبع انرژی استفاده کرد (۱).

در فرآیند هضم بی‌هوازی، مواد آلی به وسیله میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی، تحت شرایط محیطی مناسب و طی یک‌سری واکنش‌های پیچیده بیوشیمیایی به گازهایی مانند متان و دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شود که در مجموع به آن‌ها بیوگاز گفته می‌شود (۲). فرآیند تولید بیوگاز نیز مانند هر فرآیند بیولوژیکی دیگری تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند درجه حرارت، نوع مواد، شرایط هیدرولیکی جریان، زمان ماند، pH و ... قرار می‌گیرد. لذا برای تسریع این فرآیند و تولید قابل توجه بیوگاز در مقیاس صنعتی، بایستی کلیه شرایط و عوامل تأثیرگذار در محیطی قابل کنترل (هاضم‌ها یا راکتورها) در محدوده‌های بهینه تنظیم گردد (۳).

در مطالعاتی که تاکنون انجام گرفته، تأثیر عوامل مختلفی از قبیل غلظت و نوع ماده اولیه، زمان ماند، pH و درجه حرارت برروی هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاهی بررسی شده است. Hejnfelt و Angelidaki با بررسی تأثیر غلظت و نوع ماده اولیه در هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاهی نشان دادند که غلظت زیاد این قبیل مواد در فرآیند هضم بی‌هوازی به دلیل محتوای پروتئین و چربی بالا بر تولید بیوگاز تأثیر منفی دارد مگر این‌که ضایعات به کمک آب یا موادی با محتوای پروتئین و چربی کم‌تر، رقیق شود (۴).

Kashyap و همکاران با مقایسه تولید بیوگاز از فضولات گاو در هاضم‌های پیوسته در زمان‌های ماند مختلف، به این نتیجه رسیدند که تولید بیوگاز با افزایش زمان ماند کاهش می‌یابد (۵).

Alvarez و Lidén ، Cuetos و همکاران ، Bayr و همکاران نشان دادند که در هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاهی، افت pH باعث کاهش تدریجی بیوگاز و غلظت متان در بیوگاز می‌شود (۶-۸).

Chae و همکاران ، Sánchez و همکاران فرآیند هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاهی را در درجه حرارت‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که با افزایش درجه حرارت بازده تولید متان افزایش می‌یابد (۹و۱۰).

در مطالعات انجام گرفته تاکنون، اغلب هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاه‌های خوک و طیور مورد بررسی قرار گرفته‌اند و هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاه چهارپایانی از قبیل گاو و گوسفند کم‌تر مورد توجه بوده است.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر زمان ماند (۳۰-۱ روز) و نوع ماده اولیه (محتویات شکمبه گاو، گوسفند و مخلوط آن‌ها) بر میزان تولید بیوگاز از محتویات شکمبه و همچنین بررسی پتانسیل تولید قلیاییت از محتویات شکمبه طی فرآیند هضم بی‌هوازی بوده است.

روش بررسی

خصوصیات مواد اولیه

در این تحقیق، مواد اولیه مورد استفاده برای فرآیند هضم بی‌هوازی شامل محتویات شکمبه گاوها و گوسفندهایی بود که در مؤسسه صنعتی گوشت مشهد ذبح می‌شدند. میزان کل مواد جامد (TS[1]) محتویات شکمبه گاو، گوسفند و مخلوط آن‌ها به ترتیب معادل ۱۵/۵٪، ۲۴/۶ درصد و ۲۰/۶ درصد بود. جهت رقیق‌سازی، مواد یاد شده با نسبت ۱:۲ (آب:محتویات شکمبه) با آب حوضچه‌ای که شکمبه‌ها در آن شسته می‌شدند، مخلوط گردید. خصوصیات مخلوط حاصل مرتبط با پارامترهای TS، TVS[2]، pH و قلیاییت در جدول ۱ ارایه شده است.

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش حاوی ترکیبات پروتئینی هستند (۱۱). بنابراین می‌توان چنین انتظار داشت که این ترکیبات طی فرآیند هضم بی‌هوازی به آمونیاک تبدیل شده و آمونیاک موجود در محیط باعث ایجاد ظرفیت بافری در برابر افت pH شود (۸). بنابراین به محیط هاضم‌ها ماده قلیایی اضافه نشد تا تأثیر زمان ماند و نوع ماده اولیه بر میزان تولید قلیاییت و نیز در صورت تولید قلیاییت، تأثیر آن بر میزان تولید بیوگاز بررسی شود.

1- Total Solid
2- Total Volatile Solid

جدول ۱- برخی خصوصیات کیفی محتویات رقیق شده شکمبه گاو، گوسفند و مخلوط آن‌ها (قبل از شروع فرآیند هضم بی‌هوازی)

Table 1- Qualitative characteristics of diluted rumen contents of cattle, sheep and their combinations (Before starting anaerobic digestion)

نوع ماده اولیه	TS (%)	TVS (% of TS)	pH	قلیاییت (mg/L as $CaCO_3$)
محتویات شکمبه گاو	۶/۵	۹۱/۵	۶/۶	۱۷۲۰
محتویات شکمبه گوسفند	۹/۱	۹۳/۸	۵/۱	۱۰۱۹
مخلوط محتویات شکمبه گاو و گوسفند	۸/۰	۹۳/۱	۵/۶	۱۷۳۷

به‌طورکلی مواد موجود در شکمبه گاو و گوسفند و همچنین دام‌های مشابهی که از مناطق مختلفی به کشتارگاه فرستاده می‌شوند، به دلیل تفاوت در نوع تغذیه و همچنین شرایط موجود در سیستم گوارشی آن‌ها، تا حد زیادی با یکدیگر متفاوت هستند. محتویات شکمبه گاو عمدتاً شامل علوفه و محتویات شکمبه گوسفند علاوه بر علوفه، شامل جو نیز می‌باشد. لازم به ذکر است که نسبت علوفه و جو در محتویات شکمبه گوسفند، با توجه به نوع تغذیه آن‌ها در محل پرورش دام متغیر است. گاهی اوقات، جو بخش اعظم محتویات شکمبه گوسفند را تشکیل می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود تفاوت در نوع مواد موجود در شکمبه گاو و گوسفند باعث ایجاد تفاوت‌هایی در خصوصیات کیفی مواد اولیه شده است.

دانه‌های جو حاوی مقادیر زیادی کربوهیدرات می‌باشند که به سهولت توسط میکروارگانیزم‌ها قابل تجزیه هستند (۱۲) بنابراین، با افزایش نرخ واکنش‌ها در مرحله هیدرولیز، تولید اسید در مقایسه با علوفه در طی فرآیند هضم افزایش می‌یابد و این امر در محیط‌هایی که حاوی مقادیر زیادی جو باشد سبب افت سریع pH می‌شود.

در مقایسه با محتویات شکمبه گوسفند، محتویات شکمبه گاو عمدتاً حاوی مواد فیبری هستند. دیواره سلولی این مواد تجزیه‌پذیری آن‌ها را محدود می‌کند (۱۳) در نتیجه فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه گاو توسط میکروارگانیزم‌ها به زمان ماند بیش‌تری نیاز دارد تا مواد داخل سلول آن‌ها، پس از شکستن دیواره سلولی آزاد شده و در اختیار گروه‌های دیگری از میکروارگانیزم‌ها جهت ادامه این فرآیند قرار گیرند.

هاضم‌ها (راکتورها) و شرایط آزمایش

جهت انجام بررسی‌ها، ۱۸ عدد بطری یک لیتری (شکل ۱) با g ۱۵۰ محتویات شکمبه و mL ۳۰۰ آب بارگذاری شدند، به طوری‌که از یک لیتر حجم بطری‌ها حدود mL ۴۵۰ آن پر شد. این بطری‌ها در حقیقت هاضم‌های بی‌هوازی با جریان هیدرولیکی ناپیوسته بودند که در آن‌ها، زمان ماند هیدرولیکی (HRT[1]) و زمان ماند لجن (SRT[2]) برابر بود. از ۱۸ بطری، ۶ عدد بطری از محتویات شکمبه گوسفند، ۶ عدد بطری از محتویات شکمبه گاو و ۶ عدد بطری دیگر از مخلوط محتویات شکمبه گاو و گوسفند پر شدند. سپس در زمان‌های ماند مختلف (۱، ۲، ۳، ۷، ۱۵ و ۳۰ روز) مقدار بیوگاز و متان تولید شده در همه هاضم‌ها اندازه‌گیری شد.

1- Hydraulic Retention Time
2- Sludge Retention Time

شکل ۱- هاضم مورد استفاده در این پژوهش

Figure 1- Experimental bioreactor used in the study

لازم به ذکر است که در هر یک از زمان‌های مانـد، از هـر گـروه از هاضـم‌های موجود، یک هاضم جهت باز کـردن درپـوش و انـدازه‌گیری پارامترهـای pH، قلیاییت، TS و TVS به صورت تصادفی انتخـاب شـد و پـس از انـدازه‌گیری پارامترهای یاد شده، حذف گردید. این آزمایش‌ها در سه تکرار انجام گرفت.

روش‌های اندازه‌گیری پارامترها

در تحقیق حاضر به منظور بررسی عملکرد هاضم‌ها در زمان‌های ماند مختلـف برای هر سه نوع ماده اولیه، پارامترهـای مختلفـی ماننـد pH، قلیاییـت، TS، TVS، میزان بیوگاز و متان تولیدی اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری پارامترهای یاد شده براساس روش‌های استاندارد انجام گرفـت (۱۴) میـزان فشـار بیوگـاز تولید شده در هاضم‌ها و درصد متان موجود در آن توسط دستگاه اندازه‌گیری فشار و متان GMAS[1] ۱۷۰۲ (شرکت رادپایـا، ایـران) انـدازه‌گیری شـد. بـه علاوه کل بیوگاز و متان تولیدی در نمونه‌های مـورد آزمـایش نیـز بـه ترتیـب براساس معادلات López و همکاران (۱۵) و Tavendale و همکـاران (۱۶) محاسبه شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام یافته در طی دوره تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (ویرایش ۸) مورد تجزیه و تحلیل آماری قـرار گرفت.

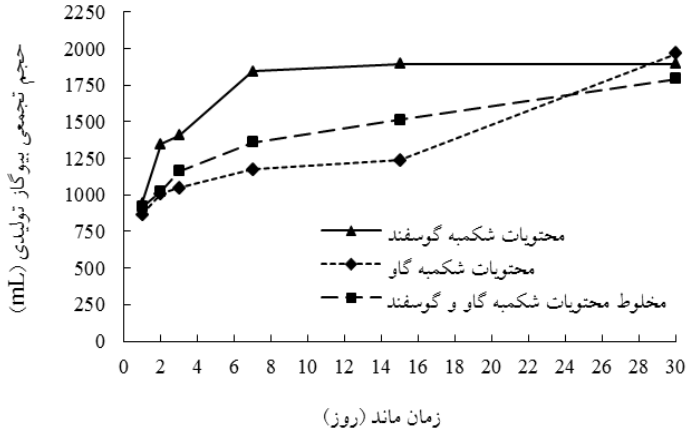
یافته‌ها

حجم تجمعی بیوگاز و متان تولید شده

در نمودارهای ۱ و ۲، به ترتیب حجم تجمعـی بیوگـاز و متـان تولیـد شـده از محتویات شکمبه گاو، گوسفند و مخلوط آن‌ها نشان داده است.

با توجه به نمودار ۱ روند افزایش تولید بیوگاز در سه نوع ماده اولیه یکنواخـت نبود. به طوری‌که میـزان افـزایش تولیـد بیوگـاز در هاضـم حـاوی محتویـات شکمبه گـاو تـا روز پـانزدهم کـم بـود ولـی از روز پـانزدهم بـه بعـد افـزایش چشـم‌گیری در آن مشـاهده شـد. در صـورتی‌که در هاضـم حـاوی محتویـات شکمبه گوسفند، میزان تولید بیوگاز، تا روز هفتم افزایش تدریجی داشـت و از روز هفتم تا پانزدهم مقدار ناچیزی بیوگـاز تولیـد شـد و بعـد از روز پـانزدهم تولید بیوگاز متوقف گردید که ثابت شدن شیب منحنی حجم تجمعی بیوگـاز تولید شده بیانگر آن می‌باشد. تولید بیوگاز از مخلوط محتویات شکمبه گـاو و گوسـفند در کـل دوره هضـم رونـد افزایشـی منظمـی داشـت و منحنـی آن حدواسط دو منحنی دیگر بود.

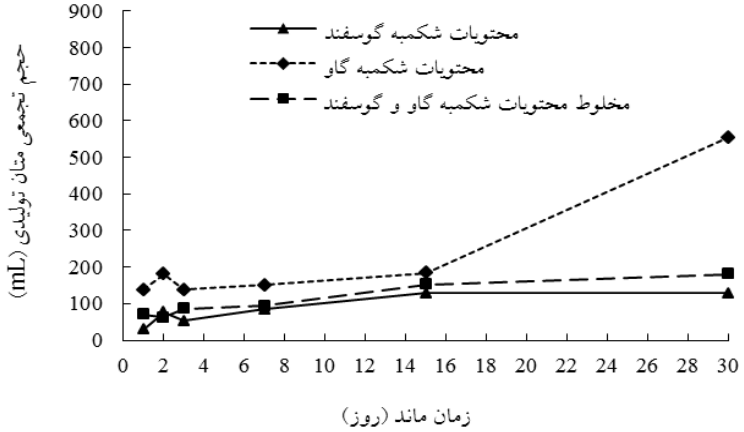
1- Gas Measuring and Analysis System



نمودار ۱- حجم تجمعی بیوگاز تولیدی در فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه

Graph 1- Commutative biogas produced from anaerobic digestion of sheep and cattle rumen contents

همان‌طور که نمودار ۲ نشان می‌دهد میزان تولید متان از هر سه نوع ماده اولیه تا روز پانزدهم روند افزایشی کمی داشت ولی از روز پانزدهم به بعد تولید متان در هاضم‌های حاوی سه نوع ماده اولیه متفاوت بود. به طوری‌که در هاضم حاوی محتویات شکمبه گاو تولید متان افزایش چشم‌گیری داشت اما در هاضم حاوی محتویات شکمبه گوسفند به دنبال توقف تولید بیوگاز، تولید متان نیز متوقف شد. تولید متان مربوط به مخلوط محتویات شکمبه گاو و گوسفند از روز پانزدهم به بعد نیز، همانند روزهای قبل روند افزایشی کمی داشت.



نمودار ۲- حجم تجمعی متان تولیدی در فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه

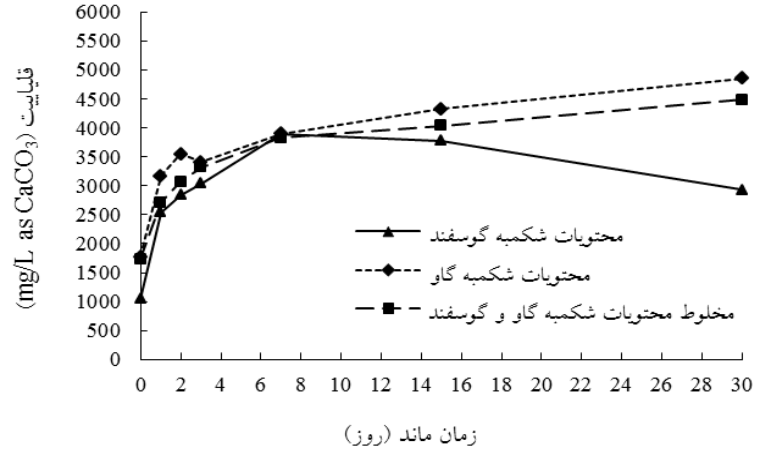
Graph 2- Commutative methane produced from anaerobic digestion of sheep and cattle rumen contents

برای بررسی تغییراتی که در شرایط هاضم‌ها ایجاد شده و باعث تغییر در رشد و فعالیت میکروارگانیزم‌ها می‌شود و همچنین دست‌یابی به جزئیات کارایی فرآیند هضم در زمان‌های ماند مختلف، به ترتیب تغییرات قلیاییت و pH و نیز نرخ تولید متان در ادامه بحث آمده است.

تغییرات قلیاییت و pH

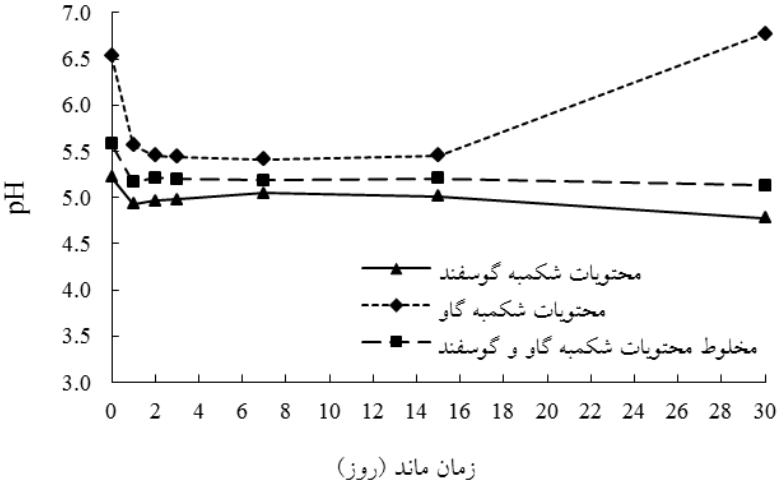
براساس جدول ۱، قلیاییت اولیه در محتویات شکمبه گاو، گوسفند و مخلوط آن‌ها به ترتیب معادل ۱۷۲۰، ۱۰۱۹ و ۱۷۳۷ بود. اما با گذشت زمان، قلیاییت در هر سه نوع ماده اولیه افزایش یافت. افزایش قلیاییت در هر سه نوع ماده اولیه تا روز هفتم مشاهده شد. اما از روز هفتم به بعد، قلیاییت در هاضم حاوی محتویات شکمبه گوسفند کاهش و در هاضم‌های حاوی دو ماده دیگر افزایش داشت (نمودار ۳).

افزایش قلیاییت برروی pH محیط هاضم‌ها همان‌طور که در نمودار ۴ نشان داده شده است، تأثیر داشت. pH محیط برای هر سه نوع ماده اولیه، در روز اول یعنی ۲۴ ساعت پس از شروع فرآیند هضم علی‌رغم افزایش قلیاییت، به دلیل تولید اسید بیش‌تر و مصرف آهسته آن توسط متانوژن‌ها، کاهش یافت و از روز اول تا پانزدهم، در نتیجهٔ مصرف قلیاییت تولید شده در محیط، ثابت ماند. از روز پانزدهم به بعد، pH محیط، در هاضم حاوی محتویات شکمبه گاو افزایش قابل توجهی داشت به طوری‌که از pH اولیه آن بیش‌تر شده و در محدوده pH مطلوب جهت فعالیت متانوژن‌ها قرار گرفت، ولی در هاضم حاوی محتویات شکمبه گوسفند کاهش یافت و در هاضم حاوی محتویات مخلوط همچنان ثابت باقی ماند.



نمودار ۳- تغییرات قلیاییت در طول فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه

Graph 3- Alkalinity changes during anaerobic digestion of sheep and cattle rumen contents



نمودار ۴- تغییرات pH در طول فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه

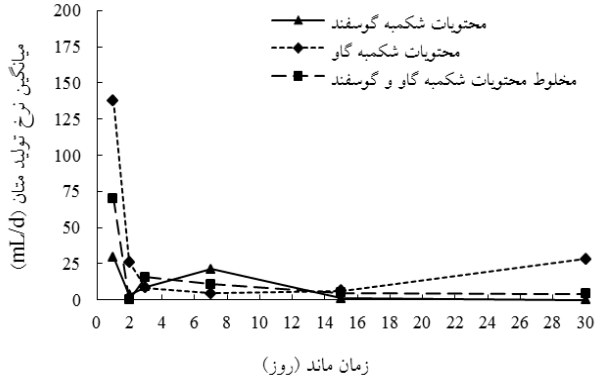
Graph 4- Alkalinity changes during anaerobic digestion of sheep and cattle rumen contents

با افزایش pH بعد از روز پانزدهم، میزان بیوگاز و متان تولیدی در هاضم حاوی محتویات شکمبه گاو که متشکل از مواد فیبری هستند، نسبت به سایر هاضم‌ها افزایش یافت. به طوری‌که در هاضم حاوی محتویات شکمبه گوسفند به دلیل وجود مواد هیدروکربنه، pH محیط بعد از روز پانزدهم کاهش یافت. pH در هاضم‌های حاوی مخلوط محتویات شکمبه گاو و گوسفند چون شامل هر دو نوع ماده هیدروکربنه و فیبری بود، ثابت باقی ماند و در آن کاهش یا افزایشی که در دو هاضم دیگر رخ داد، مشاهده نشد.

نرخ تولید متان

با بررسی پارامترهای میانگین نرخ تولید متان و درصد متان می‌توان تأثیر زمان ماند را بر میزان تولید متان ارزیابی کرد. نمودار ۵ میانگین نرخ تولید متان و نمودار ۶ درصد متان موجود در بیوگاز را در فرآیند هضم بی‌هوازی سه نوع ماده اولیه (محتویات شکمبه گاو، گوسفند و مخلوط آن‌ها) نشان می‌دهند.

با توجه به نمودارهای یاد شده، تولید متان با گذشت زمان (مخصوصاً بعد از یک روز)، صرف نظر از نوع ماده اولیه، کاهش چشم‌گیری داشت. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در روز اول یعنی ۲۴ ساعت بعد از شروع بارگذاری هاضم، به دلیل وجود میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی در محتویات تازه شکمبه، حداکثر مقدار متان تولید شد. اما با گذشت زمان و به دلیل ناپیوسته بودن جریان در هاضم‌ها، مقدار اسیدهای تولید شده در هاضم‌ها افزایش یافت. با افزایش مقدار اسید و در نتیجهٔ کاهش pH در محیط هاضم، رشد و تکثیر و فعالیت میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی که به شرایط محیطی مانند تغییرات pH وابسته هستند، به مرور زمان تحت تأثیر قرار گرفته و منجر به کاهش میزان تولید متان شد. بنابراین حداقل میانگین نرخ تولید متان از محتویات شکمبه گوسفند و مخلوط محتویات شکمبه گاو و گوسفند در روز سی‌ام و از محتویات شکمبه گاو در روز پانزدهم اتفاق افتاد.

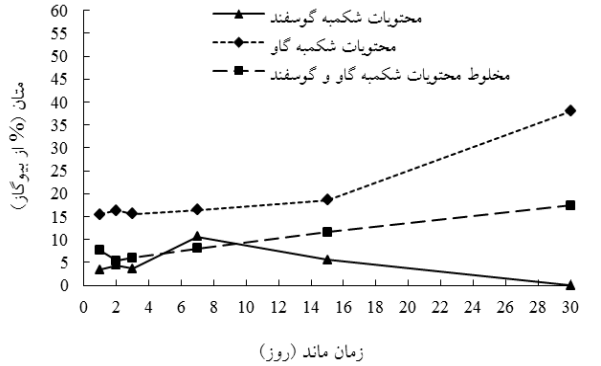


نمودار ۵- میانگین نرخ تولید متان در فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه

Graph 5- Average of methane production rate during anaerobic digestion of sheep and cattle rumen contents

همان‌طور که در نمودار ۵، مشاهده می‌شود میانگین نرخ تولید متان از محتویات شکمبه گاو در روز سی‌ام افزایش قابل توجهی داشت و این افزایش در نرخ تولید متان با افزایش مقدار pH همراه بود در حالی‌که در دو ماده دیگر، منحنی میانگین نرخ تولید متان در بازه زمانی ۳۰-۱ روز نزولی بود. میانگین نرخ تولید متان از محتویات شکمبه گوسفند در پایان ۳۰ روز به صفر رسید که این توقف در تولید متان در شکل ۳ نیز مشهود بود. علاوه بر این، pH محیط به حدی کاهش یافت که دیگر احتمال تولید بیوگاز در زمان ماندی بیش از ۳۰ روز وجود نداشت. میانگین نرخ تولید متان از مخلوط محتویات شکمبه گاو و گوسفند نیز نزدیک به صفر شد.

درصد متان موجود در بیوگاز نیز تحت تأثیر زمان ماند و نوع ماده اولیه بود (نمودار ۶). به طوری‌که درصد متان مربوط به محتویات شکمبه گاو بیش از دو ماده اولیه دیگر شد و حداکثر درصد متان تولیدی در هاضم حاوی محتویات شکمبه گوسفند در روز هفتم و در هاضم‌های حاوی محتویات شکمبه گاو و مخلوط در روز سی‌ام اتفاق افتاد که به ترتیب معادل ۱۰/۷، ۳۸/۱ و ۱۷/۵ درصد بود. علت کاهش درصد متان از روز هفتم به بعد در هاضم حاوی محتویات شکمبه گوسفند را می‌توان به نامناسب شدن شرایط محیطی جهت رشد و فعالیت میکروارگانیزم‌های متانوژن نسبت داد.

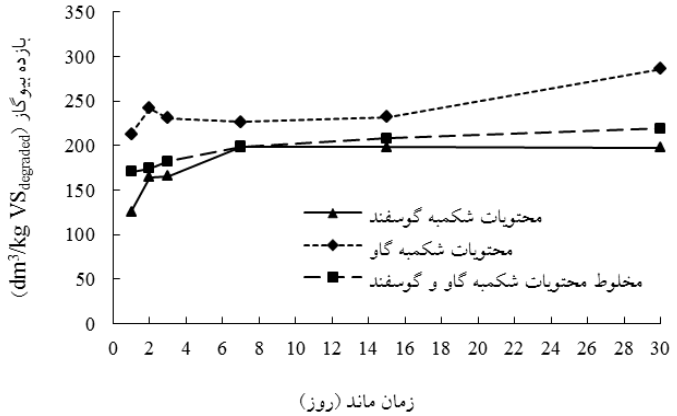


نمودار ۶- درصد متان موجود در بیوگاز در فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه

Graph 6- Percentage of methane in the biogas during anaerobic digestion of sheep and cattle rumen contents

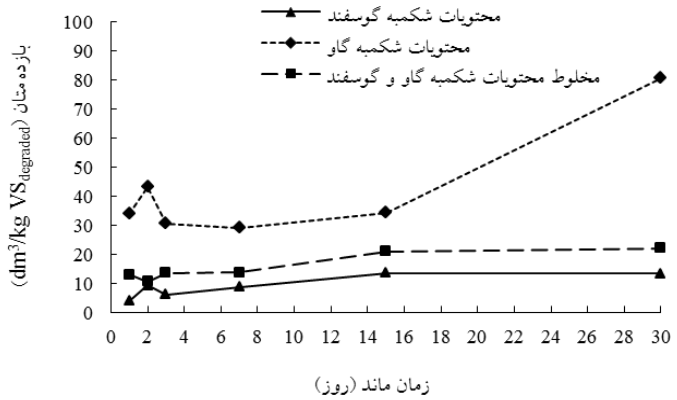
بازده بیوگاز و متان

مهم‌ترین پارامترها در ارزیابی سیستم‌های هضم، بازده بیوگاز و متان می‌باشند که به صورت حجم بیوگاز و متان تولید شده به ازای واحد جرم VS مصرف شده تعریف می‌شود. نمودارهای ۷ و ۸ بازده بیوگاز و متان را نشان می‌دهند. با توجه به نمودارهای یاد شده، حداکثر بازده بیوگاز و متان در بازه زمانی ۳۰-۱ روز در هاضم‌های حاوی محتویات شکمبه گاو به دست آمد و این در حالی است که با مقایسه حجم تجمعی بیوگاز و متان تولید شده از هر سه نوع ماده اولیه در نمودارهای ۱ و ۲، مشاهده شد که حجم تجمعی بیوگاز و متان تولید شده از محتویات شکمبه گاو در این بازه زمانی (به استثنای بازه زمانی ۳۰-۱۵ روز که افزایش قابل توجهی در میزان تولید بیوگاز و متان مشاهده شد) نسبت به دو ماده دیگر کم‌تر بود. همچنین براساس جدول ۲ میزان کاهش TVS مربوط به محتویات شکمبه گاو در انتهای دوره هضم، ۶/۹ بود که نسبت به دو ماده دیگر کم‌تر است، بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که به ازای مصرف واحد جرم VS، مقدار بیوگاز و متان بیش‌تری در هاضم‌های حاوی محتویات شکمبه گاو نسبت به دو ماده دیگر تولید شده است. در نتیجه بازده تولید بیوگاز و متان از محتویات شکمبه گاو نسبت به دو ماده دیگر بیش‌تر بود.



نمودار ۷- بازده بیوگاز در فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه

Graph 7- Yield of biogas during anaerobic digestion of sheep and cattle rumen contents



نمودار ۸- بازده متان در فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه

Graph 8- Yield of methane during anaerobic digestion of sheep and cattle rumen contents

همان‌طور که در نمودارهای ۷ و ۸ مشاهده می‌شود حداقل بازده بیوگاز و متان در بازه زمانی ۳۰-۱ روز، مربوط به هاضم‌های حاوی محتویات شکمبه گوسفند بود، در حالی‌که حجم تجمعی بیوگاز و متان تولید شده در این هاضم‌ها، با توجه به نمودارهای ۱ و ۲، نسبت به دو ماده دیگر بیش‌تر بود که علت را می‌توان به کم‌تر بودن مقدار تولید بیوگاز و متان به ازای مصرف واحد جرم VS نسبت داد. شیب منحنی بازده تولید بیوگاز و متان از محتویات شکمبه گوسفند در بازه زمانی ۳۰-۱۵ روز تغییری نکرده و ثابت باقی ماند که بیانگر توقف تولید بیوگاز و متان می‌باشد. این موضوع در نمودار ۱ نیز با صفر شدن نرخ تولید بیوگاز، به وضوح قابل مشاهده است. همچنین pH محیط همان‌طور که در نمودار ۴ نشان داده شده است به شدت کاهش یافته و محیط هاضم کاملاً اسیدی می‌شود. بنابراین محیط جهت فعالیت میکروارگانیزم‌ها بسیار نامناسب است. بازده بیوگاز و متان از مخلوط محتویات شکمبه گاو و گوسفند، حدواسط منحنی‌های مربوط به بازده بیوگاز و متان از دو ماده دیگر است.

جدول ۲- پارامترهای TVS اولیه، میزان و درصد کاهش TVS

Table 2- Initial, amount and percentage of reduction in TVS

پارامتر	واحد	محتویات شکمبه گوسفند	محتویات شکمبه گاو	مخلوط محتویات شکمبه گاو و گوسفند
TVS اولیه	g	۳۷/۳	۲۶/۲	۳۲/۴
میزان کاهش TVS	g	۹/۶	۶/۹	۸/۲
درصد کاهش TVS	%	۲۵/۷	۲۶/۳	۲۵/۳

به منظور جمع‌بندی مطالب، نتایج عملکرد بهینه هاضم‌ها در شرایط آزمایش شده در این تحقیق در طول دوره هضم ۳۰ روزه در جدول ۳ ارایه شده است که شامل پارامترهای حداکثر بازده بیوگاز و متان و نیز حداکثر درصد متان موجود در بیوگاز می‌باشد. همان‌طور که در جدول یاد شده مشاهده می‌شود، محتویات شکمبه گاو به لحاظ حداکثر بازده بیوگاز، درصد متان و بازده متان بیش‌تر از دو ماده دیگر بود و مخلوط محتویات شکمبه گاو و گوسفند حدواسط و محتویات شکمبه گوسفند نامناسب‌ترین حالت را به دلیل تأثیر pH آن داشت.

جدول ۳- عملکرد بهینه هاضم‌های حاوی محتویات شکمبه گاو، گوسفند و مخلوط آن‌ها در طول دوره هضم

Table 3- Optimum performance of bioreactors during anaerobic digestion of sheep and cattle rumen contents

نوع ماده اولیه	بازده بیوگاز (mL/g VS)	درصد متان (%)	بازده متان (mL/g VS)
محتویات شکمبه گاو	۲۸۶/۱	۳۸/۱	۸۰/۷
محتویات شکمبه گوسفند	۱۹۸/۶	۱۰/۷	۱۳/۶
مخلوط محتویات شکمبه گاو و گوسفند	۲۱۹/۳	۱۷/۵	۲۲/۱

بحث و نتیجه‌گیری

افزایش قابل توجه میزان بیوگاز و متان تولیدی و همچنین افزایش میانگین نرخ تولید متان و درصد متان در هاضم حاوی محتویات شکمبه گاو بعد از روز پانزدهم (نمودارهای ۱، ۲، ۵ و ۶)، به دلیل سازش میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی مخصوصاً متانوژن‌ها با شرایط محیطی جدید و رشد و تکثیر آن‌ها بود. در نتیجه برای هضم محتویات شکمبه گاو، زمان ماندی بیش از ۱۵ روز لازم است تا هاضم به شرایط محیطی مناسب از نظر قلیاییت و pH جهت فعالیت میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی دست یابد. افزایش pH در هاضم حاوی محتویات شکمبه گاو منجر به ایجاد شرایط محیطی مناسب در این هاضم‌ها شد. علت افزایش pH در این هاضم‌ها علاوه بر مصرف قلیاییت، احتمالاً به دلیل بالاتر بودن pH اولیه این مواد و کندتر بودن نرخ تولید اسیدهای حدواسط در فرآیند هضم بود. زیرا همان‌طور که گفته شد مواد فیبری موجود در محتویات شکمبه گاو نسبت به مواد هیدروکربنه موجود در محتویات شکمبه گوسفند، دارای نرخ تجزیه کندتری هستند. همین امر سبب می‌شود که در هاضم‌های حاوی محتویات شکمبه گاو، نرخ تولید اسیدها کاهش یافته و میزان تجمع آن‌ها به حدی نرسد که pH محیط بیش از حد کاهش یابد. در هاضم‌های حاوی محتویات شکمبه گاو به دنبال افزایش pH محیط، شرایط مطلوب‌تری جهت رشد و فعالیت متانوژن‌ها فراهم شد. به دنبال بهتر شدن شرایط محیطی برای میکروارگانیزم‌ها، مصرف اسیدهای موجود در محیط توسط متانوژن‌ها افزایش یافت که این امر نیز می‌تواند یکی دیگر از عوامل افزایش pH محیط باشد.

کاهش pH در هاضم‌های حاوی محتویات شکمبه گوسفند به دلیل افزایش نرخ تولید اسیدها از تجزیه مواد هیدروکربنه موجود در محتویات شکمبه گوسفند و توقف مصرف آن‌ها توسط متانوژن‌ها بود. به طوری‌که محیط هاضم کاملاً اسیدی شد و قلیاییت تولید شده در محیط جبران مقدار زیاد اسیدهای تولید شده را نکرد بنابراین همان‌طور که در نمودارهای ۱ و ۲ نیز مشاهده می‌شود در این بازه زمانی تولید بیوگاز و متان متوقف شد.

با توجه به نمودارهای ۳ و ۴، افزایش و کاهش pH تحت تأثیر تغییرات قلیاییت قرار داشت. افزایش قلیاییت احتمالاً به دلیل تجزیه ترکیبات پروتئینی موجود در محتویات شکمبه و تولید آمونیاک در محیط هاضم‌ها ایجاد می‌شود. آمونیاک تولید شده در محیط در زمان کاهش pH (یعنی افزایش یون‌های H^+) با آب ترکیب شده و تولید یون آمونیوم می‌کند و یون هیدروکسیل آزاد شده با یون‌های هیدروژن موجود ترکیب می‌شود که این امر از کاهش بیش‌تر pH جلوگیری می‌کند و حتی باعث افزایش آن نیز می‌شود (۸).

نتایج حاصل از تغییرات قلیاییت و pH و تأثیر آن‌ها بر روی تولید بیوگاز و متان، با بررسی‌های انجام یافته توسط Bayr و همکاران (۸) در هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاهی که نشان دادند غلظت زیاد آمونیاک در محیط باعث ایجاد ظرفیت بافری در برابر افت pH می‌شود اما تجمع VFA در هاضم، به عنوانیک عامل بازدارنده، می‌تواند میزان تولید بیوگاز و متان را کاهش دهد، مطابقت دارد. Alvarez و Lidén (۶) نیز در هضم بی‌هوازی ماده اولیه‌ای مرکب از ضایعات کشتارگاه گاو و خوک و ضایعات میوه و سبزیجات در هاضمی با جریان پیوسته نشان دادند که کاهش pH محیط به دنبال افزایش غلظت VFAs باعث کاهش فعالیت متانوژن‌ها و نهایتاً کاهش تدریجی تولید بیوگاز و درصد متان می‌گردد. همچنین این محققان در هضم بی‌هوازی ضایعات کشتارگاه به این نتیجه دست یافتند که در نتیجه تولید آمونیاک در محیط، pH افزایش می‌یابد و این امر باعث افزایش تولید بیوگاز می‌شود.

به طور کلی محتویات شکمبه گوسفند، به صورت بالقوه به دلیل وجود مواد آلی با قابلیت تجزیه آسان، پتانسیل بیش‌تری برای تولید بیوگاز (در زمان ماند

مشابه) نسبت به محتویات شکمبه گاو دارد، ولی به علت پایین بودن pH و ناکافی بودن قلیاییت تولید شده برای بالا بردن آن در کل دوره هضم، این پتانسیل نتوانست مورد استفاده قرار گیرد و در نتیجه به دلیل نامناسب بودن pH، واکنش‌های تولید بیوگاز و متان متوقف شد. در صورتی‌که محتویات شکمبه گاو که حاوی مواد فیبری می‌باشد به علت بالا بودن pH و قلیاییت و نیز شرایط محیطی مناسب‌تر برای رشد و تکثیر و فعالیت میکروارگانیزم‌ها، چنانچه زمان ماند کافی برای تجزیه این مواد فراهم گردد، بیوگاز و متان بیش‌تری تولید می‌کند. علاوه بر این بازده تولید بیوگاز و متان از محتویات شکمبه گاو بیش از دو ماده دیگر بود به عبارت دیگر به ازای مصرف واحد جرم محتویات شکمبه گاو، بیوگاز و متان بیش‌تری تولید می‌شود.

حداکثر بازده تجمعی بیوگاز و متان به ترتیب معادل ۲۸۶/۱ و mL/g $VS_{degraded}$ ۸۰/۷ به دست آمد که مربوط به هاضم حاوی محتویات شکمبه گاو بود که بیش از بازده تجمعی بیوگاز و متان از محتویات شکمبه گوسفند و مخلوط شد. Wang و Banks (۱۷) در تحقیقات خود بر روی هضم بی‌هوازی مخلوطی از محتویات شکم گاو و خون در یک هاضم نیمه‌پیوسته با TS معادل ۵٪ و دوره هضم ۳۰ روز در دمای ۳۵°C، درصد متان را ۲۰/۶٪ و بازده بیوگاز و متان را به ترتیب معادل ۴۳ mL/g VS و ۹ mL/g VS به دست آوردند. بنابراین در این پژوهش، حداکثر بازده بیوگاز و متان تولیدی با در نظر گرفتن تفاوت در بعضی از موارد آزمایش، از مقادیر به دست آمده توسط Wang و Banks بیش‌تر بود. همچنین Banks و Wang (۱۸) هضم بی‌هوازی مخلوطی از محتویات شکمبه گاو و خون را در یک هاضم دومرحله‌ای با TS معادل ۷٪ در دوره هضم ۵۲ روز در دمای ۳۵°C مورد بررسی قرار دادند که بازده متان در این تحقیق معادل ۲۷۰ mL/g TS شد.

نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش زمان ماند، افت pH در همه هاضم‌ها مشاهده شد که به دنبال آن میزان تولید بیوگاز و متان نیز کاهش یافت. با وجود این‌که قلیاییت همه هاضم‌ها در روز دوم نسبت به زمان شروع فرآیند هضم افزایش داشت، اما قلیاییت تولید شده برای جلوگیری از افت pH در همه هاضم‌ها به جز هاضم حاوی محتویات شکمبه گاو کافی نبود. بنابراین در فرآیند هضم بی‌هوازی محتویات شکمبه جهت افزایش pH و قلیاییت نمی‌توان تنها به وجود ترکیبات پروتئینی در این مواد اکتفا کرد، زیرا هم از لحاظ اقتصادی و هم به دلیل طولانی شدن زمان ماند مقرون به صرفه نیست. به طورکلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که در طول فرآیند هضم، افت pH تأثیر قابل توجهی بر روی کاهش تولید بیوگاز داشت. بنابراین افزایش ماده قلیا برای فراهم کردن محیط مناسب جهت رشد و فعالیت میکروارگانیزم‌ها و کنترل pH و قلیاییت محیط ضروری است.

با توجه به این‌که آزمایش‌های انجام یافته در این پژوهش در هاضم‌های کوچک ناپیوسته و با هدف مقایسه سه نوع ماده اولیه و بهینه‌یابی شرایط تولید بیوگاز بود نمی‌توان در خصوص توجیه اقتصادی تولید بیوگاز جمع‌بندی خاصی ارایه نمود، لذا برای پاسخ به سؤالاتی در خصوص وجوه اقتصادی آن، نیاز به انجام تحقیقات بیش‌تر با هاضم‌های پیوسته می‌باشد.

منابع

۱- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۸۸؛ «چکیده کشتار دام کشتارگاه‌های کشور»، مرکز آمار ایران، ص ۹ تا ۴۶.

2- Yadvika, G., Santosh, S., Sreekrishnan, T.R., Kohli, S., Rana, V., 2004. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques – a review. Bioresource Technology, Vol. 95, pp. 1–10.

3- Civit, J. P., 2010. Anaerobic digestion of slaughterhouse waste: Impact of the LCFA inhibition. PhD thesis, University of Lleida, Spain.

4- Hejnfelt, A., Angelidaki, I., 2009. Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products. Biomass and Bioenergy, Vol. 33, pp. 1046–1054.

5- Kashyap, D.R., Dadhich, K.S., Sharma, S.K., 2003. Biomethanation under psychrophilic conditions: A review. Bioresource Technology, Vol. 87, pp. 147–153.

6- Alvarez, R., Lidén, G., 2008. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. Renewable Energy, Vol. 33, pp. 726–734.

7- Cuetos, M.J., Gómez, X., Otero, M., Morán, A., 2008. Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). Biochemical Engineering, Vol. 40, pp. 99–106.

8- Bayr, S., Rantanen, M., Kaparaju, P., Rintala, J., 2012. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of rendering plant and slaughterhouse wastes. Bioresource Technology, Vol. 104, pp. 28–36.

9- Chae, K.J., Jang, A., Yim, S.K., Kim, I.S., 2008. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. Bioresource Technology, Vol. 99, pp. 1–6.

10- Sánchez, E., Borja, R., Weiland, P., Travieso, L., Martín, A., 2001. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. Process Biochemistry, Vol. 37, pp. 483–489.

11- Tritt, W.P., Schuchardt, F., 1992. Materials flow and possibilities of treating liquid and solid wastes from slaughterhouses in Germany – a review. Bioresource Technology, Vol. 41, pp. 235–245.

12- Hunt, C.W., 1996. Factors affecting the feeding quality of barley for ruminants. Animal Feed Science Technology, Vol. 62, pp. 37–48.
13- Buxton, D.R., 1996. Quality-related characteristics of forages as influenced by plant environment and agronomic factors. Animal Feed Science Technology, Vol. 59, pp. 37–49.
14- APHA, 1985. Standard method for the examination of water and wastewater. 16th Edition, American Public Health Association Washington D.C.
15- López, S., Dhanoa, M.S., Dijkstra, J., Bannink, A., Kebreab, E., France, J., 2007. Some methodological and analytical considerations regarding application of the gas production technique. Animal Feed Science and Technology, Vol. 135, pp. 139–156.
16- Tavendale, M.H., Meagher, L.P., Pacheco, D., Walker, N., Attwood, G.T., Sivakumaran, S., 2005. Methane production from in vitro rumen incubations with Lotus pedunculatus and Medicago sativa, and effects of extractable condensed tannin fractions on methanogenesis. Animal Feed Science and Technology, Vol. 123–124, pp. 403–419.
17- Wang, Z., Banks, C.J., 2003. Evaluation of a two stage anaerobic digester for the treatment of mixed abattoir wastes. Process Biochemistry, Vol. 38, pp. 1267–1273.
18- Banks, C.J., Wang, Z., 1999. Development of a two phase anaerobic digester for the treatment of mixed abattoir wastes. Water Science and Technology, Vol. 40, pp. 67–76.