مقاله مروری

فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ٦٧، زمستان ١٤٠٢ (٤٨-٣٥)

مروری بر انواع روش‌های مناسب هضم بی‌هوازی خشک جهت دفع پسماندهای کشاورزی ایران

لاله قفقازی[1]

لعبت تقوی[2*]

Taghavi_Lobat@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۸/۸/۷ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳**

چکیده

زمینه و هدف: هضم بی‌هوازی خشک روشی مقرون به صرفه برای تصفیه و بازیابی پسماندهای کشاورزی است. آمار بالای تولیدات کشاورزی (بیش از ۱۲۸میلیون تن در ۹۹-۱۳۹۸) و پیامد آن تولید بالای زائدات (۳۸ میلیون تن در سال)، لزوم توجه به دفع بهینه این زیست‌توده را، نشان میدهد. هدف اصلی این مقاله، شناسایی و مقایسه انواع هاضم‌های بی‌هوازی خشک برای مدیریت بهینه پسماندهای کشاورزی ایران میباشد.

روش بررسی: این مقاله حاصل بررسی کتب و مقالات آنلاین داخلی و خارجی از سایتهای گوگل اسکولار، ساینس‌دایرکت، ریسرچ‌گیت و ناشران الزویر، اشپرینگر، فرنتیرز و سیویلیکا با کلیدواژه پسماند کشاورزی، بیوگاز و هضم بیهوازی خشک میباشد.

یافته ها: عملکرد خوب اجرایی، هزینه پایین انرژی و نگهداری، از مزایای شرایط مزوفیلیک دمایی در واحدهای هضم بی‌هوازی خشک است. زمان ماند هیدرولیکی از ۲۰ تا ۳۵ روز متغیر، میانگین جامدات کل بالای ۱۵ درصد و میانگین درصد متان بیوگاز، حدود ۵۵ درصد می‌باشد. هاضم‌های ناپیوسته، فناوری نسبتاً ساده و قابل قبولی را برای دفع پسماندهای کشاورزی ارائه میکنند؛ اما پایداری تأمین بیوگاز با هاضم‌های پیوسته، علی‌رغم نیاز بیشتر به نگهداری و مدیریت، آسانتر است.

بحث و نتیجه‌گیری: این فناوری، بواسطه کارآیی و انعطاف‌پذیری جهت بهره‌برداری با ارزش بالا از پسماندهای کشاورزی و توسعه پایدار بیوگاز مناسب است. توسعه فناوری مناسب برای افزایش بهره‌وری بیوگاز، با توجه به خصوصیات جغرافیایی، تناژ تولید و ویژگی پسماند پیشنهاد می‌شود. فرآیند هضم بی‌هوازی ناپیوسته در استانهایی از ایران که فعالیت‌های کشاورزی در مقیاس کوچکتر رواج دارد؛ درمقایسه با هضم بی‌هوازی پیوسته، مؤثرتر است.

واژه‌های کلیدی: پسماندهای کشاورزی، بیوگاز، هضم بی‌هوازی خشک، روش منقطع هضم بی‌هوازی، روش پیوسته هضم بی‌هوازی.

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران/ایران.

۲- دانشیار، گروه علوم محیط زیست و جنگل، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران/ ایران. *(مسوول مکاتبات)

Human and Environment, No. 67, Winter 2024

A Review of Various Suitable Methods of Dry Anaerobic Digestion for Agricultural Wastes Disposal in Iran

Laleh Ghafghazi [1]

Lobat Taghavi [2 *]

Taghavi_Lobat@yahoo.com

Admission Date: March 14, 2022 Date Received: January 27, 2020

Abstract

Background and Objective: Dry anaerobic digestion is a cost-effective method to purify and recover agricultural waste. Agricultural production statistics (over 128 million tonnes in 2019-2020) and its consequent high waste production (38 million tonnes per year) indicate the need for optimal disposal of this biomass. The purpose of article is identification and compare dry anaerobic digesters for optimal management of agricultural waste disposal in Iran.

Material and Methodology: This article is the result of several internal and foreign online sources: Google Scholar, Science Direct, Research Gate, and publishers Elsevier, Springer, Frontiers, and Civilica with the keywords of agricultural waste, biogas, and dry anaerobic digestion.

Findings: The results of the study show that good performance, low-cost energy, and maintenance are the benefits of mesophilic temperature conditions in dry anaerobic plants. Hydraulic retention times varied from 20 to 35 days, with mean total solids above 15% and mean methane percent at 55%. Batch digesters are a relatively simple and acceptable technology for disposal of agricultural waste but sustainability of biogas supply can be easier with continuous reactors, despite the high need for maintenance and management.

Disscusion and Conclusion: This technology, for its efficiency and flexibility, is essential for the high utilization of agricultural waste, and sustainable development of biogas. Appropriate technology to increase biogas productivity is suggested, by considering geographical features, production tonnage, and characteristics of agricultural waste. The batch anaerobic process in provinces of Iran that have smaller-scale agricultural activities is more effective than continuous digestion.

Key words: Agricultural Waste, Biogas, Dry Anaerobic Digestion, Batch Anaerobic Digestion, Continuous Anaerobic Digestion.

1-PhD Candidate, Department of Environmental Science and Forest, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2-Associate Professor, Department of Environmental Science and Forest, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. *(*Corresponding Auther*)

مقدمه

کشور ایران، با توجه به تنوع اقلیمی و ظرفیتهای موجود، یکی از کشورهای بزرگ تولیدکننده محصولات کشاورزی در جهان است. بر اساس آمار رسمی وزارت جهادکشاورزی (۱۳۹۹)، میزان تولیدات بخش کشاورزی از حدود ۱۱۷ میلیون تن در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵، به بیش از ۱۲۸ میلیون تن در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ رسیده است (۱). بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی سازمان ملل متحد (فائو، ۱۳۹۷)؛ با فرض اینکه حدود ۳۰ در صد محصولات کشاورزی، به زائدات تبدیل شوند؛ از حدود ۱۲۸ میلیون تن تولیدات کشاورزی، سالانه بیش از ۳۸ میلیون تن زائدات، برآورد می‌گردد. ظرفیت تولید بیوگاز این میزان ضایعات، حدود ۸۹۰۰ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود که به نوبه خود قابل توجه است.

زیست‌توده پسماندهای کشاورزی از منابع مهم تولید انرژی تجدیدپذیر هستند که با توجه به سهولت دسترسی به آن و با امکان‌سنجی مناسب می‌توانند برای فرآیند هضم بی‌هوازی مورد استفاده قرار گیرند. در این میان،کاه و کلش برنج، گندم، ذرت و باگاس نیشکر به عنوان زائدات کشاورزی عمده با بیوماس بالا جهت تولید انرژی، مطرح می باشند. بخش زیادی از پسماندهای کشاورزی از راه سوزاندن مزارع و یا برگشت مجدد به خاک در اثر کاشت و برداشت محصول؛ دفع می‌شوند که مشکلات محیط‌زیستی، بدنبال خواهند داشت. با توجه به نقش بخش کشاورزی در تولید ناخالص داخلی، کاهش زائدات میتواند نقش بسیار موثری در ارزآوری این بخش و پاسخگویی بیشتر به نیازهای داخلی، داشته باشد (۲). در این راستا فرآیند هضم بی‌هوازی می‌تواند اقتصادزیستی چرخه‌ای را با تسهیل بازیافت انواع پسماندهای آلی برای تولید انرژی وکودهای زیستی بهبود بخشد (۳).

انتخاب فرآیند هضم بی‌هوازی برای تصفیه زائدات کشاورزی در کنار تولید همزمان بیوگاز، در مقایسه با سایر روش‌های بازیابی انرژی مانند بیواتانول، گزینه مؤثرتریست. در ایران بر اساس مطالعه شیرزاد و همکاران (۲۰۱۹)، استان خوزستان با بیشترین میزان ضایعات کشاورزی (۷/۶۱ میلیون تن) و سیستان و بلوچستان با بیشترین میزان ضایعات دامی/کشتارگاهی (۱۰/۶۹ میلیون تن) به ترتیب دارای حداکثر پتانسیل تولید برق با ۸۲/۸۳ مگاوات و ۱۶۴/۲۳ مگاوات از این ضایعات هستند. پتانسیل کل کشور برای تولید برق از این پسماندها، ۲۸۴۸۲۶ مگاوات تعیین شده است. بر اساس نتایج ارزیابی چرخه حیات، با ارزش‌گذاری این ضایعات برای تولید برق در ایران، حداقل از تولید ۱۰۶۹۳۵ هزار تن دی‌اکسیدکربن (معادل) در سال، اجتناب میشود و این به معنای کاهش ۱/۵ درصدی انتشار سالانه گازهای گلخانه‌ای در کشور است (۴).

در کشور برزیل، واحدهای هضم بی‌هوازی در حال فعالیت، از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ به‌طور تصاعدی افزایش یافته‌اند. حدود ۷۹ درصد واحدهای هضم بی‌هوازی در این کشور، از ضایعات کشاورزی و دامی به منظور تولید انرژی، استفاده می‌کنند. در مجموع ۳۱ درصد این واحدها نیز سالانه بین ۱۵۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ نیوتن متر مکعب بیوگاز تولید می‌کنند و برای اکثر مناطق روستایی برزیل، یک نیروگاه کوچک هضم بیهوازی که قادر به تولید برق باشد، به عنوان گزینه ایده آل، مطرح است (۵). این روش بر توسعه فناوری‌های متمرکز بر نیازها و امکانات روستایی تمرکز می‌کند و یکی از کلیدهای ترویج اقتصاد زیستی چرخه‌ای در کشاورزی است (۶). تولید بیوگاز به روش هضم بی‌هوازی در کشورهای اتحادیه اروپا به ویژه آلمان، نیز رشد قابل توجهی داشته است. در سال ۲۰۱۵، تولید کل بیوگاز در اتحادیه اروپا ۶۵۴ پیکاژول (PJ) انرژی اولیه، معادل بیش از ۱۸ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی، برآورد شد. در سال ۲۰۱۸، تولید بیوگاز جهانی دارای محتوای انرژی معادل ۱/۳۶ اگزاژول بوده که در مقایسه با تولید بیوگاز در سال ۲۰۰۰ (در مجموع ۰/۲۸ اگزاژول)، رشد داشته است (۷). کشور چین نیز طی دوره زمانی پنج ساله از ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ میلادی، تولید بیوگاز را افزایش و ۲۰۰۰۰ پروژه هضم بی‌هوازی را برای بازیابی بخش زیادی از پسماندهای کشاورزی در سطح محلی راه‌اندازی کرده است (۸).

هضـــم بی‌هوازی با توجه به میزان جامدات کل و از نظر نوع فرآیند به دو روش هضم بی‌هوازی تر (مرطوب) و خشک تقسیم می‌شود. با جامدات کل کمتر از ۱۵ در صد (TS≤15%) هضم بی‌هوازی تر و برای بالای ۱۵ درصـــد (TS>15%)، هضـــم بی‌هوازی خشـــک، تعریف می شـــود (۸). اگرچه، روش هضـــم بی‌هوازی تر به دلیل تجهیزات کم فناوری، انتخاب اول اکثر واحدهای بیوگاز است؛ با این وجود، مشکلات مختلفی نظیر نیاز به مقادیر زیاد آب برای انجام فرایند، حجم بالای دایجســـتر و تولید ماده هضـم شـده با مقدار کم جامدات کل، به آنها نسـبت داده می‌شود. علاوه بر این، تشکیل کف و لایه‌های ضخیم شناور مانعی برای دستیابی به اختلاط کارآمد و تولید بیوگاز است. این موارد، به طور جدی تولید بیوگاز را از نظر حجمی محدود و راندمان عملیاتی تبدیل انرژی کاه و زائدات کشـاورزی را کاهش می‌دهد. در مقابل، فرآیند هضـــم بی‌هوازی خشـــک، مشـــکلات تشکیل کف و تر سیب مواد را ایجاد نمی‌کند و نیازی به کاهش اندازه یا حذف پلا ستیک‌ها ندارد (۹و۸). لذا با توجه به داده‌های زیست‌توده کشور و بازده مطلوب پسماندهای کشاورزی (بویژه کاه و کلش) در تولید بیوگاز، هاضـــم‌های بی‌هوازی می‌توانند به‌عنوان یکی از گزینه های تولید متان در ایران، مورد بررســـی قرار گیرند. هدف این مقاله مروری، شـناسـایی و مقایسـه انواع فرآیندهای جدید هضـــم بی‌هوازی خشـــک، به عنوان روشـــی اقتصادی و با قابلیت تطبیق در شرایط مختلف کشور، می‌باشد.

روش بررسی

در این مقاله مروری با توجه به موضـوع فرآیند هضـم بی‌هوازی خشـــک و با رویکرد بازیابی پســـماندهای کشـــاورزی، از منابع مختلف آنلاین همانند Science Direct, Research Gate, Google scholar, SID,Wiley online library و از نـاشـــران Civilica,Springer, Elsevier, Frontiers, MDPI, ACS Publication و کتـب علمی معتبر برای پردازش مطالب، اسـتفاده شـده اسـت. روش تحقیق این مقاله مروری به صـــورت توصـــیفی - تحلیلی می‌باشـــد و از عبارات و کلیدواژه های "Agricultural waste", "Biogas ", Dry Batch & Continious ", "anaerobic digestion digestion" استفاده شده است.

یافته‌ها

فرآیند هضـــم بی‌هوازی به کاهش حجم مواد زائد آلی، کاهش میزان گازهای گلخانه ای و بسته شدن چرخه انتقال مواد مغذی از طریق بازگرداندن مواد هضـــم شـــده به خاک، کمک می‌کند. طبق گزارش انجمن جهانی بیوگاز[1](۲۰۲۱)، در ســـراســـر جهان حداقل باید یک میلیون تاسیسات هاضم در مقیاس بزرگ وجود داشته باشد و هر کدام بیش از ۱۰۰۰۰۰ تن در سال مواد اولیه را به همراه میلیونها هاضـــم مقیاس کوچکتر تا ســـال ۲۰۳۰ (حدود ۵ تریلیون دلار آمریکا ســـرمایه)، به‌کار گیرند تا به پتانســـیل کاهش انتشـــار گازهای گلخانه ای جهانی در یک دهه آینده به میزان ۱۲ درصد نایل آیند. فعالیت‌های انسانی در حال حاضـــر ســـالانه ۱۰۵ میلیارد تن زائدات آلی تولید می‌کنند که گازهای مضـــر به‌ویژه متان را در جو آزاد می‌کنند. بنا به گزارش این انجمن، درحال حاضر دو درصد پسماندهای آلی به‌طور موثر بازیافت میشوند و بهتر است ضایعات کشاورزی با فرآیند هضم بی‌هوازی و با تولید انرژی سبز و سایر محصولات زیستی ضروری برای توسعه اقتصاد چرخه ای پایدار، بازیافت شوند (۱۰).

◄ مقایسه آماری تولید انرژی بیوگاز در چند کشور

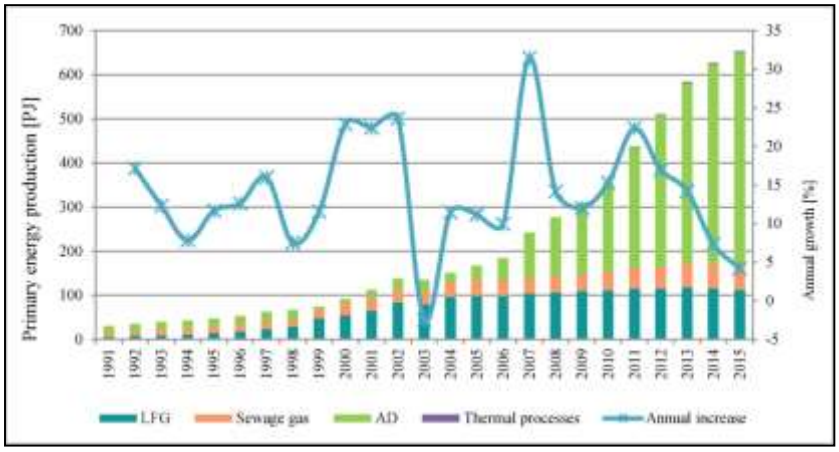
تولید بیوگاز در اروپا از گذشته تا حال، رشد قابل توجهی داشته اســـت. براســـاس مطالعه نیکولای[2]و همکاران (۲۰۱۸)، اتحادیه اروپا با تولید بیش از ۱۰ گیگاوات انرژی از ۱۷۴۰۰ واحد بیوگاز در سال ۲۰۱۵، بدنبال ادامه برنامه‌های توسعه بلند مدت اینگونه طرح‌ها، از پیشـــروان تولید برق بیوگاز در جهان معرفی شـــد؛ درشـــرایطی‌که سـهم بازیابی گازهای محل دفن در تولید بیوگاز، طی دهه گذشته، تقریباً ثابت بوده است؛ سهم عمده این رشد بدلیل واحدهای هضم بی‌هوازی و به میزان کمتری ناشی از گاز خروجی از واحدهای تصـفیه فاضـلاب، بوده اسـت و حدود ۵۰ درصـد از کل مصـرف بیوگاز در اروپا به تولید گرما اختصـاص داشـته اسـت. اروپا با ۴۵۹ نیروگاه با ظرفیت تولید ۱/۲ بیلیون مترمکعب و ۳۴۰ واحد تغذیه‌کننده شـــبکه گاز با ظرفیت ۱/۵

1- World Biogas Association (WBA)

2- Nicolae

میلیون مترمکعب، پیشـــروترین تولیدکننده بیومتان در جهان برای ا ستفاده در سوخت خودرو یا تزریق به شبکه گاز طبیعی شناخته شده ا ست (۷). شکل (۱) در صد ر شد سالیانه تولید انرژی اولیه بیو گاز در ارو پا را با تو جه به فرآیند های مختلف حرارتی، هضم بیهوازی، گاز فاضلاب و گاز لندفیل نشان میدهد. پیش‌بینی روند تولید جهانی بیوگاز از ســـال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ میلادی در شـــکل (۲) ارائه شـــده اســـت. تولید بیوگاز عمدتاً از محل‌های دفن پســـماند جامد شـــهری، هضـــم بی‌هوازی لجن فاضلاب و بخش فسادپذیر پسماندهای جامد شهری و واحدهای تولید بیوگاز پســـماندهای کشـــاورزی می باشـــد. ســـوخت‌های زیســـتی به عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر چندین مزیت دارند: ۱) مزایای قابل توجه در کاهش انتشـــار CO_2 و آلاینده‌ها در مقیاس خرد و کلان دارند؛۲) به کشـــورها برای افزایش امنیت انرژی و ایجاد بازار انرژی با ثبات تر کمک می کنند؛ ۳) درتوسـعه اقتصـاد جدید مرتبط با کشـت محصـولات انرژی زا و تولید ســـوختهای زیســـتی موثرند. به همین دلایل بســـیاری از کشورها برنامه‌هایی را به نفع سوختهای زیستی ترویج کردند و پیامد آن رشـد سـریع تولید بیوگاز در دهه گذشـته بوده اسـت (۱۱).

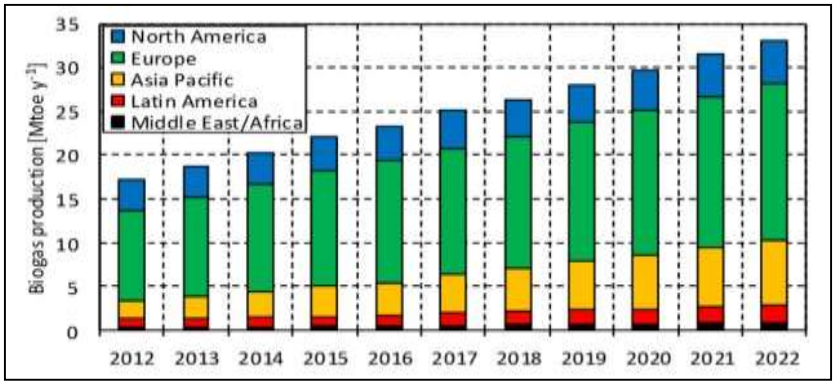
بر اســـاس گزارش انجمن بیوگاز اروپا (۲۰۱۷)، بین ســـال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۶، تعداد کل واحدهای بیوگاز در اروپا از ۶۲۲۷ به ۱۷۶۶۲ واحد (۱۱۴۳۵ واحد افزایش) رسـیده اسـت. بیشـترین ر شد از افزایش تعداد واحدهای هضم بیهوازی زائدات کشاورزی ناشی می‌شود؛ بطوریکه تعداد آنها از ۴۷۹۷ واحد در سال ۲۰۰۹ به ۱۲۴۹۶ تأسیسات در سال ۲۰۱۶ رسیده است (۱۲).



شکل ۱- روند تکامل سالیانه تولید اولیه انرژی به صورت بیوگاز در اتحادیه اروپا (۷)

(AD =Anaerobic digestion; LFG= Landfill gas)

Figure 1. Evolution of primary energy biogas production in the EU



شکل ۲- روند تولید جهانی بیوگاز از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ (۱۱)

Figure 2. Global biogas production trend from 2012 to 2022

◄ ارزیابی فنی فرآیندهای هضم بی‌هوازی خشک

سیستم هضم بی‌هوازی شامل مراحل متابولیسم دوگانه یا چندگانه از جمله هیدرولیز/ اسیدوژنز، استوژنز و متانوژنز در راکتورهای زیستی می‌باشد. بهره‌برداری از این سیستم‌ها، نه تنها به نوع سیستم هضم بلکه به تعامل بین فاکتورهای دما، pH و موادمغذی، تیپ راکتور و پارامترهای عملیاتی زمان ماند و نرخ بارگیری موادآلی وابسته است (۱۳). بدلیل ساختار پیچیده لیگنوسلولزی پسماندهای کشاورزی که به راحتی توسط باکتری‌های بی‌هوازی تجزیه نمی‌شوند؛ لازم است عملیات اجرایی با توجه به شاخص‌های بهینه هضم صورت گیرد تا راندمان تولید بیوگاز برای کاربردهای مؤثرتر، افزایش یابد. بر این اساس، چندین پارامتر برای بهبود راندمان هضم توصیه می‌گردد، از جمله: الف) پیش‌تصفیه پسماندهای کشاورزی (بویژه کاه و کلش) برای افزایش نرخ هیدرولیز؛ ب) انتخاب نرخ بارگیری مناسب موادآلی برای به حداکثر رساندن راندمان خالص تولید انرژی و محدودکردن عوامل مهارکننده فرآیند؛ ج) کنترل دما جهت بهینه‌سازی نرخ تجزیه زیستی و د) اختلاط کارآمد (۸).

الف) نرخ هیدرولیز: روشهای فیزیکی (کاهش اندازه، حرارتی)، شیمیایی (افزودن ترکیبات اسیدی و قلیایی) و بیولوژیکی (تجزیه میکروبی) نمونه‌هایی از فرآیند پیش‌تصفیه می‌باشند که باعث افزایش تجزیه‌پذیری و تسریع هیدرولیز می‌شوند. روشهای پیش‌تصفیه فیزیکی به مقدار زیاد انرژی و سرمایه‌گذاری اولیه و روش بیولوژیکی به کارکنان آموزش دیده، نیاز دارند. استفاده مجدد از باقیمانده هضم شده مواد (به عنوان کود) بعد از پیش‌تصفیه شیمیایی دشوار است. لذا بر اساس این محدودیت‌ها، خردکردن مواد ورودی به عنوان روشی ساده و در دسترس، پیشنهاد شده است.

ب) نرخ بارگیری موادآلی: این نرخ تأثیر زیادی بر پایداری فرآیند هضم بی‌هوازی پسماندهای کشاورزی دارد. مقادیر بالای نرخ بارگیری مواد اولیه باعث رشد زیاد فیبروباکترها شده و در نتیجه نرخ تولید متان بالا می‌رود؛ اگرچه غلظت اسیدهای چرب فرار، ایزوبوتیرات‌ها و سایر مواد سمی نیز به طور همزمان می‌تواند افزایش یابد؛ در صورت نرخ پایین بارگیری نیز، میزان متابولیسم و تولید بیوگاز بدلیل تغذیه ناکافی میکروارگانیسم‌ها، محدود خواهد شد. البته افزایش این شاخص، راندمان تولید را به همان نسبت افزایش نمی‌دهد. برای نمونه، نرخ بارگیری ۱ gVS/(L.d) باعث تولید ۳۰۰ میلی لیتر بیوگاز با محتوای ۵۰ درصد متان گردید؛ اما در نرخ بارگیری gVS /(L.d) ۲، همان ۳۰۰ میلی‌لیتر ولی با محتوای ۵۲ درصد متان، تولید شد (۱۴).

ج) درجه حرارت ها ضم: کنترل دما در ه ضم بی‌هوازی، برای به حداکثر رساندن بهره‌وری انرژی و نیز جهت کاهش انرژی اولیه (کاهش هزینه های راهبری)، ضروری است. هضم ترموفیلیک (۵۵-۶۰ درجه سلسیوس) مستعد رشد عوامل بازدارنده و بی‌ثباتی هستند؛ چراکه pH افزایش و تولید آمونیاک ناپایدار می‌گردد که عموماً برای باکتریهای متانوژن، سمی است. بدلیل تنوع بیشتر باکتریهای موجود در راکتور، فرآیند مزوفیلیک (۳۵-۴۰ درجه سلسیوس) نسبت به تغییرات، مقاومتراست (۱۵).

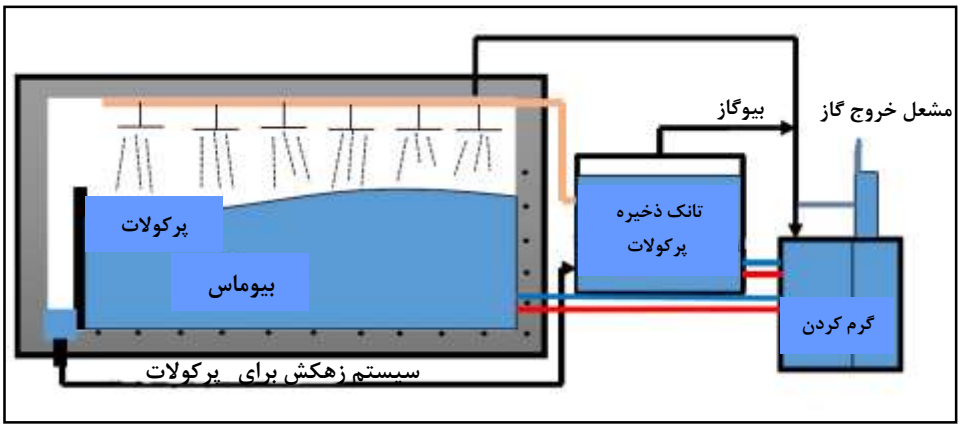
د) اختلاط مناسب: کاه و کلش سبب کاهش انتقال ماده و انرژی بدلیل چگالی پایین و ظرفیت بالای نگهداری آب می شوند؛ لذا برای بهینه سازی فرآیند، اختلاط منا سب مواد برای دستیابی به توزیع همگن بستر، میکروارگانیسمها و آنزیمها، ضروریست.

◄ انواع مختلف روش‌های هضم بی‌هوازی خشک

هضم بی‌هوازی خشک شامل روشهای ناپیوسته (منقطع) و پیوسته می‌باشد. روش ناپیوسته معمولاً در مناطقی که کشاورزی در مقیاس کوچک (با تولید پایین پسماند) متداول است، ترجیح داده می شود؛ زیرا حجم هاضم ناپیوسته بر اساس خوراک ورودی، تنظیم می‌شود. نیاز کم به تجهیزات راهبری و نگهداری از مزیتهای دیگر روش ناپیوسته است. در مقایسه، روش پیوسته در مقیاسهای بزرگ فعالیتهای کشاورزی، ارجح ا ست و به نوعی تولید بیوگاز در آن ثابت و قابل‌کنترل می‌با شد (۸و۹).

◈ روش‌های ناپیوسته (منقطع) هضم بی‌هوازی

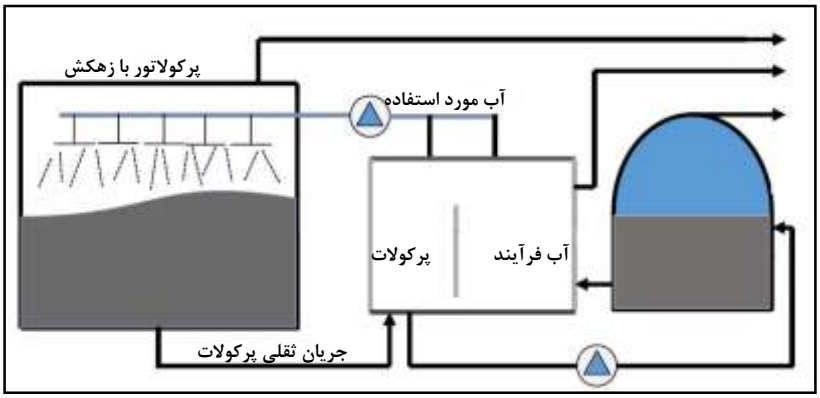
الف) سیستم BEKON: این فناوری تحت نام راکتور ناپیوسته همراه با پرکولاسیون (فیلتر کردن تدریجی از میان یک سطح یا ماده متخلخل) از نوع گاراژ نیز نامیده می‌شود و عمدتاً برای کاه، زائدات کشاورزی و باغی استفاده می‌گردد. در این سیستم، شیرابه از طریق پمپ به دایجستر بازگردانده و روی سطح مواد اسپری می‌شود. بهینه‌سازی جریان برگشتی شیرابه (مقدار و زمان جریان)، برای مدیریت فرایند مهم است و سبب افزایش متابولیسم میکروارگانیسم‌ها و تولید بیوگاز از طریق انتقال جرم می‌شود. مزیت این فرآیند نیاز کم به نگهداری، اتلاف اندک انرژی سیستمیک و میزان بالای جامدات کل است (شکل ۳) (۸).



شکل ۳- دیاگرام شماتیک طراحی سیستم ناپیوسته BEKON به همراه پرکولات (۸)

Figure 3. Schematic diagram of the BEKON batch system design with percolat.

ب) سیستم GICON: پرکولات حاصله در یک مخزن ذخیره و سپس به یک دایجستر بیرونی که در آن مواد محلول تجزیه ثانوی و به بیوگاز تبدیل می‌شوند، منتقل می‌گردد. این مسأله مبین تفاوت اساسی با سیستم BEKON است. این فناوری سیستم هضم دو فازی است که فرایند تولید بیوگاز را به منظور اطمینان از عملکرد پایدار و کارایی بهتر به دو مرحله استوژنز و متانوژنز، تقسیم می‌کند و از خطر اسیدی شدن سیستم به طور مؤثری می کاهد. بنابراین روش مذکور یک سیستم متانوژنز ساده و مؤثر بدلیل سیرکولاسیون و استفاده مجدد از پرکولات‌ها می‌باشد و در مقایسه با سیستم BEKON بدلیل فعالیت خاص متانوژن‌ها، راندمان بالاتری در تولید متان دارد (شکل ۴) (۸).

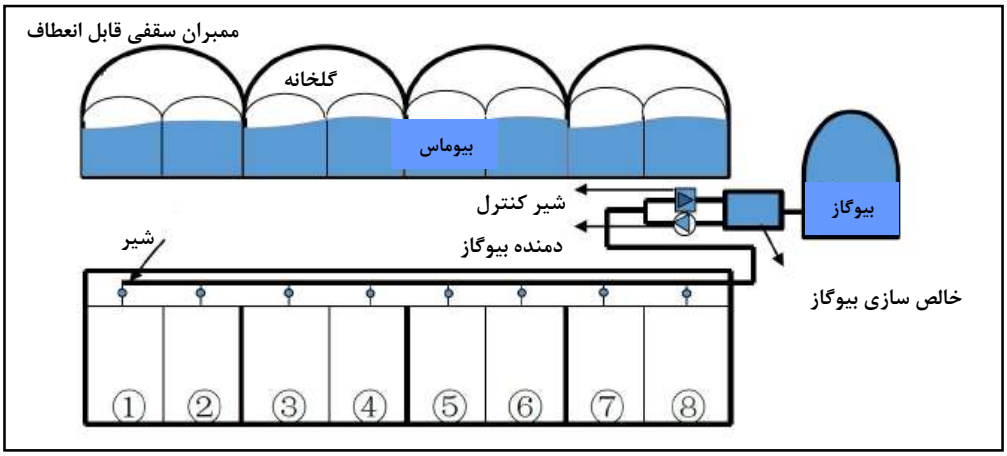


شکل ۴- دیاگرام شماتیک طراحی سیستم ناپیوسته GICON به همراه پرکولات (۸)

Figure 4. Schematic diagram of the GICON batch process with percolat.

ج) سیستم BIOFerm: محتوای جامدات کل خوراک ورودی حدود ۲۵ الی ۳۵ در صد است و فرآیند سیرکولاسیون پرکولات برای بازیابی گرمای باقیمانده از واحد ترکیبی گرما و قدرت، طراحی شده است. از مزیتهای سیستم استفاده مؤثر از گرما برای حفظ دمای تخمیر و کاهش میزان انرژی موردنیاز ورودی و تولید کودآلی با جامدات کل بالا می‌باشد (۱۶).

د) راکتورهای ناپیوسته چینی: این سیستم می‌تواند با جامدات کل ۲۳ تا ۴۰ درصد عمل نماید و در طی عملیات، با افزودن یا کاهش تعداد بیوراکتورهای پوشیده با ممبران ، مقدار موردنیاز بیوگاز تولید می شود (شکل۵). نوعی از این سیستم با ممبران‌های سقفی قابل انعطاف گاراژگونه، تجهیز و فاقد همزن برای اختلاط سوبستراها و میکروارگانیسم‌ها میباشند (۸).



شکل ۵- دیاگرام شماتیک سیستم تخمیر بی‌هوازی خشک با ممبران سقفی قابل انعطاف (۸)

Figure 5. Schematic diagram of dry anaerobic fermentation system with flexible roof membrane.

بطورکلی از نظر مقایسه فرآیندهای اصلی هضم بی‌هوازی ناپیوسته، پیش‌تصفیه شرط غیر ضروری برای هضم ناپیوسته است؛ سیستم تخمیر GICON می‌تواند از تجمع اسیدهای چرب فرار به طرز مؤثری از طریق سیستم دو فازی شامل مراحل استوژنز و متانوژنز، جلوگیری کند؛ لذا می‌تواند با میزان بالای جامدات کل نیز، عمل نماید و البته از سایر سیستم‌ها پیچیده‌تر است. از طرفی فناوری‌های هضم بی‌هوازی سیستم چینی، کارایی تولید بیوگاز نسبتاً کمی را از خود نشان می دهند (جدول ۱).

جدول ۱- مقایسه عملکرد اجرایی تکنولوژی‌های مختلف هضم بی‌هوازی ناپیوسته (۲۳و۲۲و۸)

Table 1. Executive performance comparison of different technologies of discontinuous anaerobic digestion

نوع راکتور/ کشور	ظرفیت (تن در سال)	سوبسترا	جامدات کل (٪)	نرخ بارگیری مواد آلی (kg VS/m^3.d)	درجه حرارت (سلسیوس)	زمان ماند هیدرولیکی (روز)	راندمان تولید متان ($Nm^3_{CH4}/Kg_{VS\ removed}^{-1}$)	متوسط متان (٪)
BEKON آلمان	۴۰۰۰۰-۷۵۰۰	AW	N/A	N/A	۵۵-۳۷	۳۵-۲۸	۰/۱۷ -۰/۳۷	۶۲-۵۲
GICON آلمان	۴۰۰۰۰-۳۰۰۰۰	AW, OFMSW	۳۶	N/A	۳۷	۳۵	N/A	۵۳
BIOFerm آلمان	۸۰۰۰	AW, OFMSW	۲۵	N/A	۳۷	۲۸	۰/۲۱ -۰/۳۵	N/A
MCT چین	N/A	AW	۲۰-۱۰	N/A	۳۷-۳۵	N/A	N/A	۶۰-۵۵
GFRM چین	N/A	AW	بزرگتر یا مساوی ۸	N/A	۳۷	N/A	N/A	N/A

N/A: ناموجود

AW: پسماندهای کشاورزی

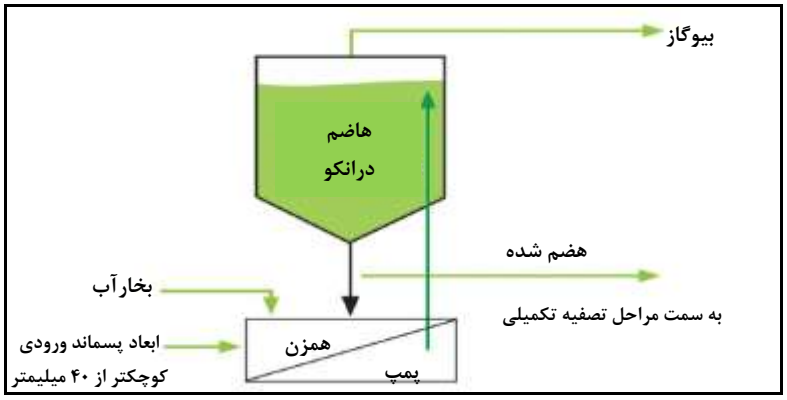
OFMSW: بخش آلی پسماندهای جامد شهری

◈ روش‌های پیوسته هضم بی‌هوازی خشک

الف) سیستم Dranco: درانکو یک فرآیند بیوتکنولوژی پیشرفته و مقرون به صرفه برای تصفیه زیست محیطی اجزای ارگانیک پسماندهای جامد شهری است. این فرایند هضم بی‌هوازی یک مرحله‌ای با نرخ بارگذاری بالا می باشد که معمولاً در دماهای ترموفیلیک از آن، بهره‌برداری میگردد (۱۷). طرح شماتیک فرآیند Dranco که طراحی آن بر اساس پسماندهای آلی کشور بلژیک است؛ در شکل (۶) نشان داده شده است. در این سیستم از یک سیلوی عمودی با کف مخروطی به عنوان راکتور و از یک واحد همزن برای مخلوط کردن مواد خام اولیه و میکروارگانیسم های بی‌هوازی قبل از هضم بیوگاز، استفاده می شود؛ زیرا هاضم مکانیزم اختلاط داخلی ندارد و فرآیند همزدن از طریق جریان رو به پایین پیستونی و جابجایی پسماند و نیز حرکت رو به بالای بیوگاز تأمین می‌شود. مزایای این روش عبارتند از: ۱) فرآیند اختلاط در خارج از سیستم هاضم به پایان می رسد در نتیجه، مدت زمان اقامت مواد در راکتور کوتاه می‌شود؛ ۲) درجه بالای چرخش مجدد پرکولات، به طور موثر باکتریهای بی‌هوازی و انرژی حرارتی پسماند را بازیابی می‌کند و ۳) جامدات کل بعد از دوره طولانی کارکرد سیستم ۳۰ تا۴۰ درصد، حفظ میشود. این فناوری بدلیل طراحی عمودی، غلظت بالای مواد جامد و عدم اختلاط در هاضم منحصر به فرد است (۱۸و۸).

ب) سیستم Linde-KCA: این سیستم آلمانی به صورت رآکتوری با جریان پلاگ (جریان ایده‌آل پیستونی) همراه با هضم هوازی و بیهوازی در تانک‌های مجزا (دو مرحله ای)، عمل می کند. مرحله اول هوازی و محصول هیدرولیز از طریق قیف به دایجستر افقی با جریان پلاگین (پیستونی) حاوی چرخاننده‌های داخلی وارد می‌شود تا در آنجا مخلوط و به واحد آبگیری انتقال یابد. مرحله نخست را می‌توان به عنوان یک مرحله پیش تصفیه هوازی، مجزا از هاضم بی‌هوازی در نظر گرفت. این نوع هاضم قابلیت بهره‌برداری و تصفیه سوبسترای

حاوی ۱۵ تا ۴۵ درصد جامدات کل را دارد. تیغه های چرخان داخل هاضم‌ها به ترکیب و همگن شدن یکنواخت مواد و افزایش د ستر سی میکروارگانی سمها به مواد اولیه منجر می شوند. نرخ بالای بارگیری در اختلاط موثر مفید است. البته هزینه عملیات اضافی مربوط به پیش تصفیه هوازی در این سیستم وجود دارد (۱۹و۸).



شکل ۶- طرح پایه فرآیند Dranco (۱۸)

Figure 6. Basic Dranco process scheme

ج) سیستم Valorga: فرآیند والورگا از هاضم استوانه ای عمودی با سیستم جریان پلاگ افقی (پیستونی) تشکیل شده است. ورودی خوراک اولیه و خروجی تخلیه مواد به ترتیب در وسط و قسمت پایین تر دیواره اصلی قرار گرفته است. دیواره داخلی استوانه عمودی این رآکتور حدود دو سوم از قطر تانک را در بر گرفته است. مواد از کف هاضم و از روی یک بخش از دیواره ورودی وارد و قبل از خروج بر روی دیواره جریان می‌یابد. در این فرایند زمان ماند حدود سه هفته است. بیوگاز از کف رآکتور تزریق و حباب‌ها برای اختلاط و تعلیق جامدات به کار می رود. ماده هضم شده در نهایت آب‌گیری و کمپوست می‌شود. در این فرآیند نازل های داخلی در کف هاضم اجازه برقراری جریان با فشار بالای بیوگاز را می دهند که اختلاط مواد را افزایش می دهد. این سیستم با میزان بالای جامدات کل ۲۵ تا ۳۵ درصد بطور خاص برای تصفیه پسماندهای آلی طراحی و پارامترهای عملیاتی آن برای تصفیه پسماندهای کشاورزی کاه و کلش بهینه نشده اند (۲۰و۸). مقایسه رو شهای پیو سته هضم بی‌هوازی خشک در جدول (۲) ارایه شده است. در همه روشهای معرفی شده ۱) پیش پردازش مکانیکی (به عنوان مثال آ سیاب مواد) برای جلوگیری از انسداد راکتور موردنیاز است؛۲) نرخ بارگیری موادآلی در سیستم Valorga از سیستم‌های هضم بی‌هوازی Linde-KCA آلمان، Dranco بلژیک بالاتر است؛ اما پارامترهای بهینه تصفیه کاه و کلش در سیستم Valorga ناشناخته است، سیستم Linde-KCA برای تصفیه کاه و کلش مناسب‌تر باشد؛۳) دمای هضم درسیستم Dranco بالاتر و برای حفظ عملکرد پایدار نیاز به انرژی بیشتری دارد؛۴) چرخش شیرابه یا همزن مکانیکی برای بهبود انتقال جرم مواد اولیه و میکروارگانی سم ها ضروری ست؛ ۵) سیستم‌های هضم پیوسته معمولاً تولید بیوگاز پایدار و مداوم نسبت به سیستم منقطع دارند.

جدول ۲- مقایسه عملکرد اجرایی تکنولوژی‌های مختلف هضم بی‌هوازی پیوسته (۲۳و۲۲و۸)

Table 2. Executive performance comparison of different technologies of continuous anaerobic digestion

نوع راکتور کشور	ظرفیت (تن در سال)	سوبسترا	جامدات کل (٪)	نرخ بارگیری مواد آلی ($kg\ VS/m^3.d$)	درجه حرارت (سلسیوس)	زمان ماند هیدرولیکی (روز)	راندمان تولید متان ($Nm^3_{CH4}/Kg_{VS\ removed}^{-1}$)	متوسط متان (٪)
Dranco بلژیک	۷۰۰۰۰-۱۰۰۰۰	AW, OFMSW	۳۲-۱۰	۱۰ ~ ۱۵	۵۰-۵۵	۲۰	۰/۲۱ - ۰/۳۰	۵۰
Valorga فرانسه	۳۵۰۰۰۰-۲۰۰۰۰	AW, OFMSW	۶۰-۳۶	۱۰ ~ ۱۵	۵۵-۳۷	۲۰ - ۳۳	۰/۲۱ - ۰/۳۰	۵۵-۵۰
Linde-KCA آلمان	N/A	AW, OFMSW	۴۵-۱۵	N/A	۵۵-۳۷	N/A	N/A	۵۵
VPD چین	N/A	AW	۱۰-۸	N/A	۳۷	N/A	N/A	۵۰
TPAD چین	N/A	AW, OFMSW	≥۸	N/A	۳۰	۲۵	N/A	N/A

N/A : ناموجود

AW : پسماندهای کشاورزی

OFMSW : بخش آلی پسماندهای جامد شهری

◄ امکان سنجی استفاده از روشهای هضم بی‌هوازی خشک در ایران

ضوابط اجرایی مدیریت پسماندهای کشاورزی ایران در ۷۲ ماده و سه پیوست ضمیمه به استناد ماده ۱۱ قانون مدیریت پسماند مصوب ۱۳۸۳/۲/۱۵ مجلس شورای اسلامی توسط سازمان حفاظت محیط زیست و وزارت جهاد کشاورزی تدوین و در تاریخ ۱۳۹۱/۸/۲۷در کارگروه ملی مدیریت پسماند موضوع ماده ۲ آیین نامه اجرایی قانون مدیریت پسماندها، به تصویب رسید. اجرای این ضوابط در راستای دستیابی به اهداف حفظ سلامت عمومی و محیط زیست در مقابل اثرات نامطلوب پسماندهای کشاورزی؛ افزایش بهره‌وری در بخش کشاورزی و کاهش تولید پسماندهای کشاورزی و استفاده مجدد آنها؛ اعمال روش‌های نوین مدیریت پسماندهای کشاورزی؛ اطمینان از مدیریت اجرایی مناسب و ایجاد رویه ضابطه‌مند در مدیریت پسماندهای کشاورزی می باشد. لذا توجه به مدیریت صحیح پسماندهای کشاورزی و استفاده از روش‌های نوین بازیابی، از پشتوانه قانونی لازم در کشور برخوردار است. تولید و استفاده از بیوگاز اگرچه در ایران سابقه قدیمی دارد؛ ولی تحقیقات منسجم کمی در زمینه استفاده از روش‌های هضم بی‌هوازی بویژه در تصفیه و بازیابی زائدات کشاورزی، صورت گرفته است. پتانسیل‌سنجی تولید بیوگاز در مناطق روستایی ایران نشان می‌دهد که مقدار فضولات دامی قابل دسترس به منظور تولید بیوگاز در ایران، ۲۶۱۳۴۰ هزار تن در سال است که بیوگاز قابل تولید از آن ۶۵۳۳۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. از طرف دیگر میزان پسماندهای فسادپذیر روستایی قابل استفاده در دستگاه‌های بیوگاز در ایران، ۱۱۷۱/۳ هزار تن در سال بوده که بیوگاز قابل تولید از آن‌ها، ۱۵۲/۲۷ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود. از مجموع منابع یاد شده به طور میانگین، سالیانه ۶۵۴۸۷/۲۷ میلیون مترمکعب بیوگاز (۳۶۰۱۸ میلیون مترمکعب متان) قابل استحصال است. با فرض ارزش حرارتی متان

MJ/m^3 ۳۶/۷ ، این حجم متان معادل MJ $۱۰^{۱۲}$× ۱/۳۲ انرژی خواهد بود (۲۴).

بحث و نتیجه گیری

روش های هضـــم بی‌هوازی خشـــک با توجه به ویژگی های جغرافیایی و امکانات موجود می توانند برای دفع پســـماندهای کشـاورزی در مناطق مختلف شـهری و روسـتایی در نظرگرفته شـوند و نقش اسـاسـی در ایجاد فرصـت‌های تبدیل پسـماند به انرژی ایفا کنند. بدین و سیله تضمین تأمین انرژی کافی، پایدار و مقرون به صرفه، اهمیت ویژه‌ای در تو سعه پایدار اقتصادی و کاهش آسـیب‌های محیط‌زیسـت خواهد داشـت. نتایج بررسـی سیستمهای هضم بی‌هوازی خشک نشان می‌دهد که واحدهای ناپیو سته (منقطع) هضم بی‌هوازی خشک، دارای فناوری نسبتاً سـاده، قوی و با هزینه پایین سـرمایه‌گذاری و بهره برداری تجهیزات، هسـتند. این واحدها بدلیل نیاز به فضـای بیشـتر و تولید گاز متغیر، در مقایسه با سیستم‌های پیو سته، می توانند راهکار منا سبتری برای ا ستفاده در مناطق رو ستایی با شند. از طرف دیگر، تضـمین پایداری و تداوم تأمین بیوگاز، در صـورت ا ستفاده از راکتورهای پیو سته، علی رغم نیاز بیشتر به نگهداری و مدیریت فرآیند، می‌تواند آسان‌تر باشد. عملکرد اجرایی، هزینه پایین انرژی و نگهداری، از مزایای ا ستفاده از شرایط مزوفیلیک دمایی در واحدهای هضـم بی‌هوازی خشـک اسـت. زمان ماند هیدرولیکی از ۲۰ تا ۳۵ روز متغیر، میانگین جامدات کل بالای ۱۵ درصد و میانگین درصد متان در بیوگاز اکثر انواع رآکتورهای هضـم خشـک، حدود ۵۵ درصـد برآورد می شـود که رقم قابل قبولی ا ست. فرآیندهای هضم بی‌هوازی ناپیو سته در ا ستانهایی از ایران که فعالیت‌های کشـاورزی در مقیاس کوچکتر رواج دارد (بوشـــهر و ...)؛ مؤثرتر خواهد بود؛ درحالیکه هضـــم بی‌هوازی پیوسته در استانهایی همانند فارس، خراسان رضوی و خوزستان (سـالانه بیش از هفت میلیون تن تولید پسـماند کشـاورزی بر ا ساس آمارنامه کشاورزی سال۱۳۹۹)که کشاورزی در مقیاس بزرگ متداول ا ست، ترجیح داده می شود. این مقاله لزوم توجه به بهره‌برداری با ارزش بالا از پسـماندهای کشـاورزی و توسـعه پایدار بیوگاز در ایران را، با ا ستفاده از تکنولوژی هضم بی‌هوازی خشک، بوا سطه کارآیی و سازگاری آن، نشان می‌دهد. در این راستا، ضمن توجه به تولید و ویژگی پسماندهای کشاورزی نقاط مختلف کشـور، تحقیقات بیشـتر در زمینه انتخاب و توسـعه فناوری مناسب با توجه به شیوه عملیاتی هر فرآیند و هزینه‌های راهبری و نگهداری؛ موردنیاز ا ست. نتایج این مطالعه می‌تواند به سیا ست‌گذاران در تصمیم‌گیری با هدف ا ستفاده از این منابع کمک کند.

References

1. Ahmadi, K.; Ebadzadeh, H.;Hatami,F.; Hoseinpour,R. Agricultural Statistics Book of the Crop Products (2018-2019). First Edition, Ministry of Jihad Agriculture Publications, Deputy of Planning and Economy, Information & Communication Center, 2020, Vol.1. (In Persian)
2. Taghavi, L.; Abbaspour,M. The Role of Renewable Energy in Sustainable Development (with Emphasis on Biogas Produced from Agricultural Waste), 4th Iranian Bioenergy Conference (Biomass and Biogas). 2013. Tehran. Iran. (In Persian)
3. Tsapekos, P.; Khoshnevisan, B.; Alvarado-Morales, M.; Zhu, X.; Pan, J.; Tian, H.; Angeli- daki, I. Upcycling the anaerobic digestion streams in a bioeconomy approach: a review. Renewable Sustainable Energy Rev. 2021. Vol.151.
4. Shirzad, M.; Kazemi Shariat Panahi,H.; Dashti, B.;Rajaeefar, M.A.;Aghbashlo,M. A comprehensive review on electricity generation and GHG emission reduction potentials through anaerobic digestion of agricultural and livestock/slaughterhouse wastes in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 111, PP. 571-594.

5. Durante Muhl, D.; Oliveira, L. Features of anaerobic digestion plants in the brazilian agricultural sector. Cleaner and Circular Bioeconomy.2022. Vol.1.
6. Oconnor, S.; Ehimen, E.; Pillai, S.C.; Black, A.; Tormey, D.; Bartlett, J. Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms. Renewable Sustainable Energy Rev. 2021. Vol.139.
7. Nicolae,S.; Jean-Francois,D.; Fahl,F.Biogas: Developments and perspectives in Europe. Renewable Energy. 2018. Vol.129, Part A. December 2018, PP. 457-472.
8. Y, Fu.; T, Luo.; Z, Mei.; J, Li.; K, Qiu.; Ge, Y. Dry Anaerobic Digestion Technologies for Agricultural Straw and Acceptability in China. Sustainability. 2018. Vol. 10, No.12, PP. 1-13.
9. Ge, X.; Xu, F.; Li, Y. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives. Bio resource Technology. 2016 .Vol. 205,PP. 239–249.
10. World Biogas Association (WBA). Biogas: Pathways to 2030. new report. 2021.
11. Raboni,M.; Viotti,P.; Capodaglio,AG. A comprehensive analysis of the current and future role of biofuels for transport in the European Union (EU). Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. 2015.Vol.10.
12. European Biogas Association Report 2017, Available in: www.europeanbiogas.eu/
13. Pham Van, D.; Fujiwara, T.; Leu Tho, B.; Song Toan, P.P.; Minh, G.H. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. Environmental Engineering Research. 2019.
14. Zealand, A.M.; Roskilly, A.P.; Graham, D.W. The Effect of Feeding Frequency and Organic Loading Rate on the Anaerobic Digestion of Chinese Rice Straw. Energy Procedia. 2017.Vol.105,PP. 62–67.
15. Labatut, R.A.; Angenent, L.T.; Scott, N.R. Conventional mesophilic vs. thermophilic anaerobic digestion.Water Res. 2014. Vol. 53,PP. 249–258.
16. Yoshida, H.; Gable, J.J.; Park, J.K. Evaluation of organic waste diversion alternatives for greenhouse gas reduction". Resourse. Conservation. Recycling.2012. Vol. 60, PP. 1–9.
17. Mcdonald, N. DRANCO Anaerobic Digestion Plant in Hengelo, Netherlands, Integration of AD with Existing Composting and RDF Facility. OWS, Inc, Biocycle. 2012. PP. 29-31.
18. De Baere, L.The DRANCO Technology: A Unique Digestion Technology for Solid Organic Waste. Organic Waste Systems.. 2012. PP. 2-8.
19. Abbasi,T.; Tosif,S.M.; Abbasi,S.E. Biogas energy. Translated by Kazem Nadafi et al., Publications of Municipalities & Rural Affairs Organization, 2017. (In Persian)
20. Kothari, R.; Pandey, A.K.; Kumar, S.; Tyagi, V.V.; Tyagi, S.K. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy,Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier. 2014, Vol.39, PP.174–195.
21. Rapport, J.; Zhang, R.; Jenkins, B.M.; Williams, R.B. Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid

Waste. California Integrated Waste Management Board, Department of Biological & Agricultural Engineering, 2008.

22. Eslami, H.; Hashemi, H.; Fallahzadeh, R.A.; Khosravi, R.; Fard, R.F.; Ebrahimi, A.A. Effect of organic loading rates on biogas production & anaerobic biodegradation of composting leachate in anaerobic series bioreactors. Ecol. Eng. 2018.Vol. 110, PP.165–171.
23. Shen, F & et al. Improving the Mixing Performances of Rice Straw Anaerobic Digestion for Higher Biogas Production by Computational Fluid Dynamics Simulation. Appl. Biochem. Biotechnol.2013.Vol.171,PP. 626–642.
24. Abdoli,M.A.; Pazouki,M,; Samieefard,R.;Rahmati,A. Potential and technology of energy production from biomass in rural areas. First edition, Tehran, Municipalities and Rural Affairs Organization, Ostad Motahari Publications, 2012. Vol.2. (In Persian)