https://doi.org/10.22034/irenew.2025.218214

سال دوازدهم، شماره دوم، پائیز و زمستان 1404، ص ص 8- 18

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: 1403/04/27

تاریخ پذیرش: 403/08/25

مروری بر فناوری بیوگاز در راستای مدیریت پسماند کشاورزی

زهرا وحیدی اضماره[1]، هادی غائبی[2*]

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

2- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

* اردبیل، 179، hghaebi@uma.ac.ir

چکیده

با توجه به رشد روز افزون جمعیت، تقاضای انرژی، آب و غذا نیز در حال افزایش است. رشد روزافزون جمعیت که نیاز به انرژی بیشتری دارد، فشار زیادی بر ذخایر انرژی طبیعی ایجاد می‌کند و باعث تخلیه آنها می‌شود. در طی تولید محصولات کشاورزی برای نیازهای غذایی، تولید پسماندهای کشاورزی به سرعت در حال افزایش است. تولید عظیم پسماندهای کشاورزی پیامدهای متعددی را به همراه دارد. یکی از موثرترین روش‌های مدیریت این پسماند، هضم بی هوازی و تولید سوخت پاک و تجدیدپذیر بیوگاز است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت فسیلی باشد. در این پژوهش مروری، به بررسی پتانسیل تولید بیوگاز از پسماندهای کشاورزی، پتانسیل بیوگاز در تامین انرژی مصرفی و انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد، پسماندهای کشاورزی دارای پتانسیل تولید بیوگاز و انرژی مصرفی است. تامین انرژی مصرفی توسط بیوگاز مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد. بنابراین، به دلیل کاهش مصرف سوخت فسیلی و مدیریت صحیح پسماند، انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر دو بخش انرژی و کشاورزی کاهش می‌یابد. با بهره‌گیری از بیوگاز در تامین انرژی مصرفی، هزینه تولید و مصرف انرژی پایین می‌آید. هضم باقیمانده در جریان تولید بیوگاز نیز می‌تواند به عنوان کودزیستی برای بهبود خاک مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، بیوگاز نقش موثری در حل بحران انرژی و آلودگی محیط‌زیست دارد.

کلیدواژگان: انرژی تجدیدپذیر، سوخت زیستی، بیوگاز، مدیریت پسماند کشاورزی

An overview of biogas technology in the direction of agricultural waste management

Zahra Vahidi-Ezmareh[1], Hadi Ghaebi[2*]

1- PhD student, Department of Biosystem Mechanical Eengineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

* P.O.B. 179 Ardabil, Iran, hghaebi@uma.ac.ir

Received: 17 July 2024 Accepted: 15 November 2024

Abstract

Due to the Ever-increasing population growth, the demand for energy, water and food is also increasing. The ever-increasing population growth and energy demand puts a 2024 of pressure on natural energy reserves and causes them to decrease. During the production of agricultural products for food needs, the production of agricultural waste is increasing rapidly. This huge production of agricultural waste has many consequences. One of the most effective methods of managing this waste is anaerobic digestion and the production of clean and renewable biogas fuel, which can be a suitable alternative to fossil fuel. In this review research, the potential of biogas production from agricultural wastes, the potential of biogas in providing energy consumption and greenhouse gas emission have been investigated. The results show that agricultural waste has the potential to produce biogas and energy consumption. Providing energy consumption by biogas reduces the consumption of fossil fuels. Therefore, due to the reduction of fossil fuel consumption and proper waste management, greenhouse gas emissions are reduced in both the energy and agriculture sectors. By using biogas to providing energy consumption, the cost of energy production and consumption is reduced. Digestion residue during

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

biogas production can also be used as a fertilizer for soil improvement. Therefore, biogas has an important effect in solving the energy crisis and environmental pollution.

Keywords: Renewable energy, biofuel, biogas, agricultural waste management

1- مقدمه

با توجه به افزایش 9 میلیارد نفری جمعیت جهان تا سال 2050 [1]، نیاز اساسی ما به انرژی، آب و غذا بر همین اساس در حال افزایش است[2]. افزایش سریع جمعیت و تقاضای رو به رشد انرژی، فشار بالایی بر ذخایر انرژی طبیعی مانند زغال‌سنگ و نفت وارد می‌کند و باعث تخلیه آنها می‌شود[3]. سوخت‌های فسیلی منابع محدودی هستند که در مناطق جغرافیایی محدودی از کره زمین متمرکز شده‌اند. این امر برای کشورهای خارج از این حوزه، وضعیت دائمی و ناامن وابستگی به واردات انرژی ایجاد می‌کند. توسعه و اجرای سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، بر اساس منابع زیست توده ملی و منطقه‌ای، امنیت تامین انرژی ملی را افزایش داده و وابستگی به سوخت‌های وارداتی را کاهش می‌دهد[4]. درصد سهم سوخت‌های فسیلی در کل مصرف انرژی بالاست، از این رو، نیاز به معکوس کردن روند با تغییر به سوخت‌های زیستی برای کاهش این امر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ضروری است[5].

با توجه به رشد سریع جمعیت در چند دهه اخیر، تولید پسماند روز به روز در حال افزایش است. افزایش مقدار پسماند و حذف نامناسب آن به ویژه در کشورهای در حال توسعه همواره بر ایمنی سلامت جمعیت محیط زیست فشار وارد کرده و در کنار آن، سهم این کشورها در انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای را تقویت کرده است. گازهای گلخانه‌ای از جمله دی اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن که بیشترین سهم را در گرم‌شدن زمین دارند، از طریق مدیریت و دفع پسماندها تولید می‌شوند[6]. تولید عظیم این پسماندها در صورت سوء مدیریت، پیامدهای متعددی به همراه دارد. طبق تحقیقات انجام شده، 21٪ از گازهای گلخانه‌ای تولیدی در سطح جهان مربوط به پسماندهای کشاورزی می‌باشد[7]. در صورتی که بقایای کشاورزی و پسماندهای کشورهای عضو اتحادیه اروپا به سوخت‌های زیستی[1] تبدیل شوند، 16٪ از کل سوخت مورد نیاز برای حمل و نقل جاده‌ای برای سال 2030 تامین شده و باعث کاهش حدود 60٪ انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. پیش‌بینی شده است تا سال 2050، سوخت‌های زیستی 30٪ انرژی مورد نیاز جهانی را تامین کنند [5].

اصطلاح سوخت‌زیستی به سوخت‌های جامد، مایع یا گازی گفته می‌شود که عمدتاً از زیست توده تولید می‌شوند [8]. سوخت‌های زیستی با توجه به منابع تولید به نسل‌های اول، دوم، سوم و چهارم طبقه‌بندی می‌شوند و وجه مشترک همه نسل‌ها این است که تقاضای انرژی جهانی را برآورده کرده و در عین حال اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهند [9].

سوخت‌های زیستی نسل اول از زیست توده خوراکی و روغن‌های گیاهی[5]، نسل دوم از مواد اولیه زیستی غیرخوراکی(چوب، کاه، علف و پسماند) که به عنوان غذا مناسب نیستند و نسل سوم از میکروارگانیسم‌ها (ماکروجلبک، میکروجلبک) به عنوان ماده اولیه برای تولید سوخت‌های زیستی مانند اتانول، بیوگاز و بیودیزل استفاده می‌کند. نسل چهارم سوخت‌های زیستی نیز بر اصلاح ژنتیکی این میکروارگانیسم‌ها تمرکز دارد. سوخت‌های زیستی نسل اول به دلیل رقابت با نیازهای غذایی نمی‌تواند جایگزین سوخت‌های فسیلی شود. این نوع سوخت‌های زیستی بالاترین بازده انرژی را دارد، اما در دستیابی به هدف کاهش گازهای گلخانه‌ای کارایی کمتری دارد [9]. سوخت‌های زیستی نسل دوم از زیست توده گیاهی غیرخوراکی به ویژه مواد اولیه لیگنوسلولزی به دست می‌آیند؛ بنابراین هیچ گونه تهدیدی برای عرضه مواد غذایی یا رقابت با زمین‌های زراعی ایجاد نمی‌کنند. استفاده از سوخت‌های زیستی نسل دوم می‌تواند تقاضا برای سوخت‌های زیستی نسل اول را کاهش دهد و از رقابت مستقیم با محصولات کشاورزی جلوگیری کند. علاوه بر این، سوخت‌های زیستی نسل دوم در طول چرخه زندگی خود به میزان قابل توجهی انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد[10]. نسل سوم کمترین انتشار خالص گازهای گلخانه‌ای را نشان می‌دهد، اما انرژی مورد نیاز برای پردازش سوخت‌های زیستی نسل سوم بالاتر است[9].

به نظر می‌رسد تولید بیوگاز نسل دوم از هضم بی‌هوازی زباله‌های زیستی یک راه حل مناسب برای حل بحران انرژی و مدیریت پسماند باشد. بنابراین، در این پژوهش به بررسی مروری پتانسیل تولید بیوگاز از پسماندهای بخش کشاورزی، پتانسیل بیوگاز در تامین انرژی مصرفی مورد نیاز و انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از آن پرداخته خواهد شد.

2- پسماند کشاورزی

افزایش 9 میلیارد نفری جمعیت جهان تا سال 2050 منجر به افزایش تقاضا برای تولید مواد غذایی شده است[1]. مقدار پسماند تولیدی بخش کشاورزی به دلیل افزایش تولید و مصرف مواد غذایی برای تغذیه جمعیت در حال رشد و تامین مواد خام برای بخش صنعتی به طور چشمگیری افزایش یافته است. سالانه حدود 998 میلیون تن پسماند کشاورزی تولید می‌شود که اکثریت آن‌ها دفن یا سوزانده می‌شوند[11]. افزایش تولید محصولات کشاورزی به طور طبیعی منجر به افزایش مقادیر پسماند دامی، پسماند محصولات زراعی و محصولات جانبی صنایع کشاورزی شده است. پسماند کشاورزی به عنوان بقایا و خروجی‌های غیرمحصولی حاصل از تولید و فرآوری محصولات کشاورزی خام مانند میوه‌ها، سبزیجات، گوشت، مرغ، محصولات لبنی و محصولات زراعی تعریف می‌شود و ترکیب آنها به سیستم و نوع فعالیت‌های کشاورزی بستگی دارد که می‌توانند به صورت مایع، دوغاب یا جامد باشند[12]. پسماند کشاورزی به دلیل قیمت پایین، تجدیدپذیری و در دسترس بودن، سازگار با محیط زیست بوده و اقتصادی است[13]. این پسماند به سرعت با نرخ متوسط افزایش سالانه 5 تا 10٪ تولید می شوند که اثرات نامطلوبی بر محیط زیست می‌گذارد. بنابراین، مدیریت پایدار این پسماندها یک امر ضروری است[14].

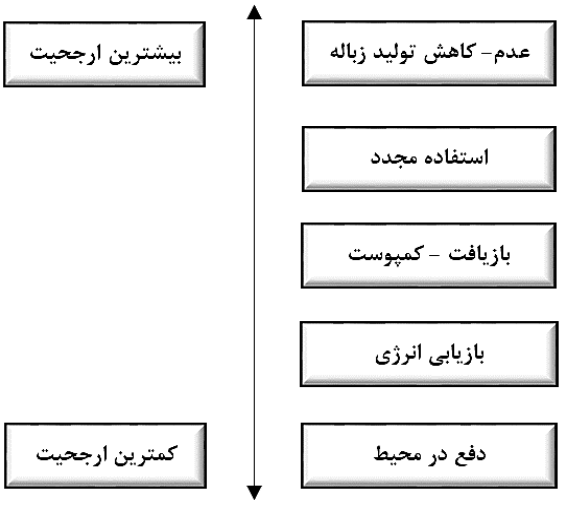
پسماندهای کشاورزی از ساختارهای مولکولی پیچیده‌ای از جمله سلولز، همی سلولز و لیگنین تشکیل شده‌اند. سلولز، یک ماده نامحلول است که جزء اصلی و دیواره سلولی زیست توده لیگنوسلولزی را تشکیل می‌دهد. چوب ذرت، الیاف برگ آناناس، الیاف کتان، الیاف شاهدانه، ساقه پنبه و کاه برنج سرشار از سلولز هستند. ترکیب سلولز در اکثر پسماند کشاورزی معمولاً بین 35 تا 50٪

1. Biofuel

است. همی سلولز، به عنوان رابط بین سلولز و لیگنین عمل می‌کند. همی سلولز به راحتی هیدرولیز می‌شود و در اسیدها، بازها و آنزیم‌های ضعیف حل می‌شود. همی سلولز به نسبت زیادی در گیاهان خشکی، گیاهان آب شیرین و برخی از جلبک‌های دریایی یافت می‌شود و معمولاً بین 20 تا 35٪ تخریب می‌شود. لیگنین قسمت اصلی هر گیاه را تشکیل داده و پشتیبانی مکانیکی و ساختاری آن را برعهده دارد. لیگنین سختی، پایداری و استحکام زیست توده را افزایش می‌دهد. لیگنین نامحلول در آب است و معمولاً پوششی غیر قابل نفوذ تشکیل می‌دهد که در برابر آب، مواد شیمیایی و حشرات مقاومت می‌کند. محتوای ساختاری لیگنین معمولاً 15 تا 20٪ است[11].

2-1- مدیریت پسماند کشاورزی

مدیریت پسماند یکی از دغدغه‌های مهم زیست‌محیطی در جهان بوده و هدف از آن فراهم کردن شرایط بهداشتی زندگی برای کاهش میزان ورود یا خروج مواد به جامعه و تشویق به استفاده مجدد از مواد در جامعه می‌باشد. مدیریت پسماند به شیوه‌ی نادرست می‌تواند تهدیدات جدی در زمینه سلامت ایجاد کرده و همچنین منجر به از دست رفتن منابع و انرژی شود. اثرات زیست محیطی پسماند را می‌توان با استفاده پایدارتر از آن کاهش داد. این به عنوان "سلسله مراتب مدیریت پسماند" شناخته می‌شود [15]. سلسله مراتب مدیریت پسماند اولویت‌بندی مدیریت پسماند را تعریف می‌کند که در آن تمرکز بر به حداقل رساندن و تغییر مسیر پسماند است. [16]. شکل 1، سلسله مراتب مدیریت پسماند را نشان می‌دهد.



شکل 1 سلسله مراتب مدیریت پسماند[16]

با توجه به اینکه استفاده مجدد از پسماند زیرمجموعه‌ای از مدیریت پسماند می‌باشد[15]، استفاده از انرژی پسماندهای کشاورزی یکی از موثرترین روش‌ها برای دفع پسماندهای کشاورزی است که به تبدیل پسماند کشاورزی به انرژی پاک اشاره دارد و از سه جهت حائز اهمیت است: (1) زیست محیطی. رفع کمبود سوخت فسیلی و کاهش اثرات نامطلوب آن، (2) اقتصادی. هزینه‌های تولید، مصرف انرژی و درآمد حاصل از استفاده از انرژی پسماندهای کشاورزی، (3) اجتماعی. بوهای نامطبوع، مگس‌ها و پشه‌های تولید شده از پسماندهای کشاورزی ممکن است باعث گسترش بیماری‌ها و به خطر افتادن سلامت عمومی شود. بنابراین، ارتقای میزان مصرف انرژی پسماندهای کشاورزی یکی از موثرترین اقدامات برای کاهش مشکلات اجتماعی آن از ریشه است. از طرف دیگر صنعت انرژی زیست توده ابزار مهمی برای ایجاد اشتغال، افزایش درآمد مردم و ارتقای توسعه روستایی است[16].

زیست‌توده تولید شده از پسماندهای کشاورزی یکی از منابع تجدیدپذیر است که در طبیعت به وفور یافت می‌شود[17] و شامل بقایای کشاورزی، بقایای جنگل، پسماند فرآوری چوب، محصولات انرژی زا، کود دامی، زباله‌های جامد شهری، پساب‌های صنعتی، لجن فاضلاب است[10]. منابع انرژی زیست توده موادی با منشاء گیاهی و حیوانی با ترکیبات کربوهیدراتی هستند و بیشترین پتانسیل انرژی را در میان منابع انرژی تجدیدپذیر دارند[18]. استفاده از سوخت‌های زیستی تولید شده از مواد تجدیدپذیر دارای پتانسیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تکمیل نیازهای رو به رشد انرژی، بهبود بهره‌وری کلی انرژی سیستم‌های سوخت موجود، و تقویت اشتغال در بخش‌های زیستی است[19]. علاوه بر این، استفاده از پسماندهای کشاورزی برای تولید سوخت‌های زیستی منجر به کاهش آلودگی محیط‌زیست درنتیجه‌ی دفع نادرست آن می‌شود[5].

تولید و استفاده از بیوگاز هضم بی هوازی، زمینه‌ی مناسب برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مدیریت پایدار زباله را به طور همزمان فراهم می‌کند. علاوه بر این، هضم بی هوازی می‌تواند به کاهش حجم پسماند و هزینه‌های دفع پسماند کمک کند[4]. تولید بیوگاز از منابع کشاورزی به عنوان یک منبع انرژی، به طور قابل توجهی به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با جبران انتشار منابع فسیلی و کاهش انتشارات ناشی از ذخیره کود حیوانی کمک می‌کند[20].

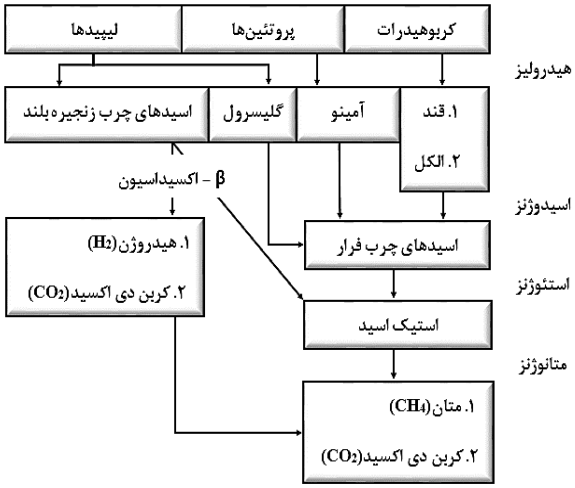
3- بیوگاز

بیوگاز عمدتاً از هضم بی هوازی یا تخمیر بیولوژیکی مواد آلی (کود مایع و سایر مواد اولیه زیست توده قابل هضم) تولید می‌شود[4] و می‌تواند به عنوان جایگزینی برای گاز طبیعی استفاده شود[8]. بخش قابل احتراق بیوگاز را متان تشکیل می‌دهد[4]. محتوای بالاتر دی اکسید کربن در بیوگاز (30٪ تا 40٪) منجر شده است که انرژی آن در مقایسه با گاز طبیعی(میزان دی اکسید کربن جزئی است) بسیار کمتر باشد. با این حال، بیوگاز مزایایی نسبت به گاز طبیعی دارد: (الف) ماده خام تجدیدپذیر، (ب) اقتصادی، (ج) هیچ گاز گلخانه‌ای به اتمسفر اضافه نمی‌کند،(د) به صورت محلی مستقل از منابع نفت یا گاز طبیعی خارجی تولید می‌شود، (ه) کمک به کاهش آلودگی ناشی از زباله‌های آلی، (و) کمک به کاهش مشکلات مدیریت پسماند[8].

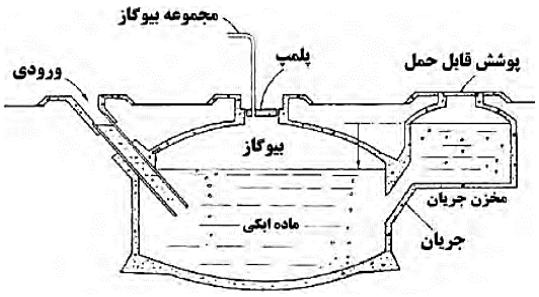
نیروگاه بیوگاز نه تنها تامین‌کننده انرژی است، بستر هضم شده نیز که معمولاً هضم نامیده می‌شود، یک کود با ارزش خاک غنی از نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ریز مغذی‌ها است. در مقایسه با کود خام حیوانی، هضم به دلیل همگنی و در دسترس بودن بالاتر مواد مغذی، نسبت کربن به نیتروژن بهتر و کاهش قابل توجه بو، کارایی کود را بهبود بخشیده است. تولید بیوگاز توسط هضم بی‌هوازی، انتشار متان و اکسید نیتروژن حاصل از ذخیره‌سازی و استفاده از کود حیوانی تصفیه نشده را کاهش داده و به کاهش گرمایش جهانی کمک می‌کند[4].

3-1- فرآیند تولید بیوگاز

هضم بی‌هوازی[1] یک تصفیه بیولوژیکی است[21]. در طی فرآیند هضم بی‌هوازی، مواد زیست تخریب‌پذیر به گاز قابل احتراق تبدیل می‌شود که عمدتاً شامل متان و دی اکسید کربن است. دی اکسید کربن و متان تولید شده به ترکیب مواد ورودی و درجه هضم بستگی دارد. از نظر تئوری، تمام بسترهای حاوی مواد آلی مانند کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و چربی‌ها می‌توانند برای هضم بی‌هوازی استفاده شوند. فرآیندهای هضم بی‌هوازی بسته به سهولت و درجه تبدیل مواد ورودی به بیوگاز و فناوری مورد استفاده، حدود سه تا شش هفته طول می‌کشد. پسماند با محتوای لیگنین بالا، زمان بیشتری برای تولید بیوگاز نیاز دارد[9]. شکل 2، فرآیند هضم بی‌هوازی تولید بیوگاز را نشان می‌دهد.



شکل 2 مسیر فرآیند هضم بی‌هوازی[22]



شکل 3 نمای یک دستگاه بیوگاز [23]

تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی بسترهای تک هضم منجر به بروز برخی مشکلات می‌شود. برای مثال، (1) لجن فاضلاب دارای بارهای آلی کم می‌باشد، (2) کودهای حیوانی دارای بارهای آلی کم و غلظت نیتروژن بالا هستند، که ممکن است متانوژن‌ها را مهار کند، (3) بخش آلی زباله‌های جامد شهری دارای مواد نامناسب و همچنین غلظت نسبتاً بالایی از فلزات سنگین است، (4) محصولات و پسماندهای کشاورزی و صنعتی، بسترهای فصلی هستند که ممکن است فاقد نیتروژن باشند، و (5) پسماند کشتارگاهی شامل غلظت بالای نیتروژن و یا اسیدهای چرب با زنجیره‌ی طولانی است که پتانسیل بالایی در مهار فعالیت متانوژنیک دارند. بسیاری از این مشکلات با افزودن یک بستر در هضم مشترک بی هوازی[2] برطرف می‌شود. هضم مشترک برای غلبه بر معایب تک هضم و بهبود قابلیت اقتصادی نیروگاه‌های هضم بی‌هوازی برای تولید بیشتر متان، موثر است[21].

3-2- کاربردهای فناوری بیوگاز

تولید برق از زیست توده به دلیل پیشرفت‌های تکنولوژیکی، کاهش اتکا به انرژی‌های مبتنی بر منابع فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای محبوب‌ترین و رو به رشدترین بازار در سراسر جهان است. مزیت اصلی تولید برق در محل، جلوگیری از تلفات انتقال برق و افزایش قابلیت اطمینان به دلیل استقلال از شبکه متمرکز سوخت‌های فسیلی متداول است. همچنین با تامین نیاز برق داخلی مورد نیاز و فروش برق اضافی، سود اقتصادی بیشتری به همراه دارد[24].

از بیوگاز می‌توان برای تولید حرارت در بویلرها نیز استفاده کرد. از آنجایی که زیست توده مزرعه منبع اصلی تولید بیوگاز است، گرمای تولید شده را می‌توان برای گرم کردن هاضم‌ها، ساختمان‌های مزرعه مانند واحدهای نگهداری دام، گلخانه‌ها و همچنین پرورش آبزیان و خشک کردن محصولات مزرعه استفاده کرد. گرمای موجود برای استفاده خارجی، که تقریباً 30 تا 50٪ گرمای تولید شده را نشان می‌دهد، می‌تواند به منطقه مجاور فروخته شود تا از آن برای گرمایش منطقه‌ای مانند گرمایش استخرهای شنا استفاده شود[24].

اگر بیوگاز به بیومتان ارتقا داده شود، می‌توان آن را به شبکه گاز طبیعی تزریق کرد تا برای مقاصد گرمایشی، تولید برق یا تامین سوخت گاز طبیعی فشرده و حتی وسایل نقلیه گاز طبیعی استفاده شود. همچنین مزایای زیست محیطی و اقتصادی در مقیاس کوچکتر برای کشاورزان، شهرداری‌ها و شهرستان‌ها برای مدیریت پسماند و قراردادهای سودآور با شرکت‌های خدمات گاز وجود دارد[24]. استفاده از بیومتان به عنوان سوخت حمل و نقل و به عنوان یک افزودنی به گاز طبیعی پتانسیل بیشتری را برای کاهش انتشار کربن فراهم می‌کند. ارتقای بیوگاز و تولید بیومتان فرصت‌های جدیدی را برای استفاده از بیوگاز و جایگزینی سوخت‌های فسیلی در بخش حمل و نقل، غلبه بر محدودیت‌های استفاده از گرما و بهبود اقتصادی نیروگاه‌های بیوگاز فراهم می‌کند [25].

پیل‌های سوختی از کاربردهای پیشرفته فناوری بیوگاز هستند. پیشرفت‌های اخیر در سلول‌های سوختی با انتشار کم دی اکسید کربن، نیتروژن اکسید و راندمان بالا، آن‌ها را برای اهداف تولید برق و حمل و نقل مناسب می‌سازد. پیل‌های سوختی را می‌توان در نیروگاه‌های مقیاس بزرگ، ژنراتورهای توزیع برق، ساختمان‌ها، دستگاه‌های تامین برق در مقیاس کوچک و قابل حمل برای تجهیزات میکروالکترونیک و اجزای توان ثانویه در وسایل نقلیه مورد استفاده قرار داد. پیل‌های سوختی راندمان الکتریکی بالای 60٪ (تولید برق) و راندمان حرارتی تا 40٪ (تولید همزمان حرارت و برق[3]) را نشان می‌دهند[24].

عادلی گیلانی و همکارانش در روستای گالش کلام (گیلان) با بهره‌گیری از فناوری بیوگاز، میزان صرفه‌جویی انرژی جهت مصارف پخت‌وپز، تأمین آبگرم مصرفی و گرمایش ساختمان را 17 تا 39/4٪ برآورد کردند[26].

1. Anaerobic digestion

2. Anaerobic co-digestion

3. Combined Heat and Power

4- پسماند کشاورزی به عنوان بستر تولید بیوگاز

برای افزایش عملکرد هضم بی‌هوازی، ماده اولیه به عنوان یک پارامتر کلیدی در نظر گرفته می‌شود، و شامل بسترهایی است که به انرژی زیستی تبدیل می‌شوند [27]. بسترهای انتخابی باید برای فرآیند تخمیر مناسب بوده و ارزش غذایی بالایی داشته باشند[28]. ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده بر عملکرد بیوگاز، محتوای متان، سینتیک زیست تخریب پذیری و تخریب زیست توده درگیر تأثیر می‌گذارد. ترکیب اصلی تغذیه‌ای در بسترها شامل کربوهیدرات، پروتئین و چربی است[29]. جدول 1، بازده احتمالی متان، درصد بیوگاز و دی اکسید کربن حاصل از این مواد مغذی را نشان می‌دهد.

جدول 1 بازده احتمالی متان، درصد بیوگاز و دی اکسید کربن مواد مغذی[29]

مواد مغذی	بازده متان ($m^3/kg\ VS$)	CO_2(%)	CH_4(%)
چربی	1/01	30	70
پروتئین	0/50	50	50
کربوهیدرات	0/42	50	50

4-1- پسماند گیاهی

در فرآیند هضم بی‌هوازی، زیست توده لیگنوسلولزی یک بستر کلیدی برای تولید بیوگاز است. پسماند کشاورزی عمدتاً از بخش لیگنوسلولزی تشکیل شده است[30]. دفع نادرست پسماند لیگنوسلولزی ممکن است مقدار زیادی گازهای گلخانه‌ای تولید کند و محیط زیست را آلوده کند[31]. نمونه‌هایی از بازده متان هضم مشترک لیگنوسلولز و کود حیوانی در جدول 2، ارائه شده است.

جدول 2 هضم مشترک لیگنوسلولز و کود حیوانی[32]

نوع بستر	نسبت اختلاط	بازده متان (mL/gVS)
سرگین گاو + باگاس نیشکر	2 : 1	322
کود حیوانی + محصولات جانبی انگور	2 : 1	348
کود حیوانی + تفاله گوجه فرنگی	2 : 1	404
کود حیوانی + محصول جانبی زیتون	2 : 1	398

4-2- پسماند مواد غذایی

پسماند مواد غذایی، هزینه جمع آوری و حمل و نقل پایین و تجزیه‌پذیری زیستی و بازده متان بالایی دارد. پسماند میوه و سبزیجات به دلیل داشتن لیگنین کمتر، نسبت به سایر پسماند قابلیت تجزیه زیستی 50 تا 70٪ و عملکرد متان بیشتری دارند. این پسماند دارای pH پایینی هستند که ممکن است فرآیند هضم بی‌هوازی را به دلیل اسیدی شدن تحت تاثیر قرار دهد، بنابراین این پسماند باید همراه با یک بستر برای هضم بی‌هوازی استفاده شود[28]. جدول 3، بازده متان پسماند برخی از مواد غذایی را نشان می‌دهد.

جدول 3 بازده متان پسماند مواد غذایی

نوع بستر (پسماند مواد غذایی)	بازده متان (mL/gVS)
پسماند آشپزخانه	501 [32]
پسماند غذای گیاهی	425 [32]
پوست پیاز	400 [32،33]
پوست سیب‌زمینی	267 [32،33]
هویج (دمبرگ)	309 [32،33]
برگ شلغم	314 [33]
ساقه گل کلم	331 [33]
گوجه فرنگی فاسد	298 [33]

4-3- پسماند حیوانی

پسماند حیوانی شامل کود حیوانی، ادرار و فضولات اصطبل می‌باشد. پسماند دام و طیور غنی از مواد آلی هستند و می‌توانند به عنوان ماده اولیه برای تولید انرژی در نیروگاه‌های زیست توده استفاده شوند[9]. حدود 65٪ وزن کل در دام‌های جوان و سالم و حدود 75٪ وزن دام‌های پیر را محصولات جانبی (پسماند) تشکیل می‌دهد[34].

کود حیوانی در مقادیر زیاد، مقدار کمی ماده خشک دارد که منجر به بازده پایین بیوگاز و هزینه‌های بالای حمل و نقل مواد هضم می‌شود. علاوه بر این، فضولات حیوانی ممکن است حاوی فلزات سنگین و آنتی‌بیوتیک‌هایی باشد که تأثیرات نامطلوبی بر فرآیند هضم بی هوازی و هضم باقیمانده دارند. محتوای رطوبت و محتوای مواد آلی در مواد به طور قابل توجهی بر کیفیت محصول نهایی تأثیر می‌گذارد، زیرا باعث تحریک رشد میکروارگانیسم‌ها می‌شود[9]. هضم مشترک کودها با سایر بسترها منجر به بهبود کارایی فرآیند و در نتیجه امکان‌پذیری اقتصادی نیروگاه هضم بی‌هوازی می‌شود [21].

ذخیره و استفاده از کود مایع، فضولات حیوانی و ضایعات آلی منبع بوی نامطبوع و پایدار و جذب مگس‌ها هستند. هضم بی‌هوازی این بوها را تا 80٪ کاهش می‌دهد[4]. تولید بیوگاز از پسماند کشاورزی، به طور قابل توجهی به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با جبران انتشار منابع فسیلی و کاهش انتشارات ناشی از ذخیره کود حیوانی کمک می‌کند[20]. تونینی و همکاران به این نتیجه رسیدند که برای تبدیل انرژی کود، هضم بی هوازی امیدوارکننده‌ترین فناوری است و استفاده از پتانسیل انرژی کود و کاه بزرگترین فرصت برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر دو بخش انرژی و کشاورزی است[35]. جدول 4، بازده متان برخی از کودهای دامی را نشان می‌دهد.

جدول 4 بازده متان کود دامی

نوع بستر (کود دامی)	بازده متان (mL/gVS)
کود مرغی	160-396 [32]
کود گوسفندی	207-357 [32]
کود بز	402-500 [32]
کود گاو شیری	148 [33]
کود گاو گوشتی	328 [33]

5- پتانسیل تولید بیوگاز از پسماند کشاورزی در ایران

خدابخشی‌پور و همکاران مطالعه‌ای در راستای پتانسیل تولید بیوگاز حاصل از هضم مشترک کاه وکلش برنج (10%) و کود دامی (90٪) و همچنین انتشارات گازهای گلخانه‌ای ناشی از آن انجام دادند. این مطالعه در اطراف مزارع برنج استان گیلان (روستای پونل) از طریق مطالعه آزمایشگاهی و تعمیم آن به

مقیاس بزرگتر انجام شد. میزان بقایا 22 کیلوگرم در هر دوره یک ماهه محاسبه گردید که طی یک سال 264 کیلوگرم است. حجم بیوگاز تولید شده در هر دوره 28 روزه معادل 15/63 متر مکعب و طی یک سال برابر با 187/56 مترمکعب برآورد گردید. براساس اطلاعات به دست آمده از ساکنین و شورای روستای پونل یک خانواده 5 نفره در طول یک ماه به طور میانگین 1626/9 مگاژول انرژی برای پخت و پز و گرمایش آب مصرفی استفاده می‌کنند. با در نظرگرفتن بیوگاز تولیدی در هر ماه به مقدار 15/63 متر مکعب، انرژی این مقدار از بیوگاز با توجه به ارزش حرارتی آن برابر با 343/86 مگاژول می‌باشد. بنابراین استفاده از بیوگاز به جای سوخت فسیلی منجر به صرفه‌جویی 21 درصدی در مصرف سوخت فسیلی خواهد شد. فاکتور انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر متر مکعب بیوگاز معادل 0/005 کیلوگرم دی اکسید کربن است. بنابراین با توجه به حجم تولید بیوگاز در یک سال، میزان تولید سالانه دی اکسید کربن در نتیجه‌ی استفاده از بیوگاز، 0/937 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن است. درصورتیکه بیوگاز تولید نشود، دی اکسید کربن رها شده در اتمسفر در نتیجه‌ی سوزاندن این پسماند، 105/6 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن خواهد بود. مصرف سوخت فسیلی برای تامین 1626/9 مگاژول انرژی 222/54 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن وارد اتمسفر می‌کند. بنابراین در صورت عدم تولید بیوگاز در مجموع 328/14 (105/6 + 222/54) کیلوگرم در سال دی اکسید کربن وارد اتمسفر می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده کاهش چشم‌گیر انتشار گازهای گلخانه‌ای در نتیجه استفاده از بیوگاز می‌باشد[36].

مرادی و همکاران، پتانسیل سالانه تولید بیوگاز از کود گاوی و گوسفندی در شهرستان ایوان غرب، استان ایلام را مورد مطالعه قرار دادند. میزان کل کود دامی هر خانوار 53/712 تن در سال محاسبه شد. میانگین حجم کل بیوگاز تولیدی سالانه از کود دامی قابل جمع آوری در هر خانوار، برابر 9344/44 مترمکعب (انرژی حرارتی تولیدی معادل 35505/07 کیلووات ساعت) برآورد شد. میانگین انرژی مصرفی سالانه هر خانوار از چوب، نفت سفید و گاز مایع معادل 37374/6 کیلووات ساعت محاسبه شد. بنابراین در صورت تولید بیوگاز، هر خانواده 4 نفره می‌تواند تمام نیازهای حرارتی خود را تأمین نماید[37].

ذوالفقاری و واعظی پتانسیل تولید بیوگاز از کود دامی در شهرستان جوین استان خراسان رضوی را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور میزان کود دامی قابل جمع آوری در این شهرستان و میزان بیوگاز حاصل از آن محاسبه گردید. حجم کل کود دامی قابل جمع‌آوری در این شهرستان 136826 تن در سال برآورد شد. ارزش حرارتی بیوگاز 5/96 و ارزش حرارتی گاز طبیعی 7/52 کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب می‌باشد. بنابراین ارزش حرارتی بیوگاز برابر 0/79 ارزش حرارتی گاز طبیعی است. اگر کل کود دامی جمع آوری شده در شهرستان به بیوگاز تبدیل شود، سالانه معادل 32/4 میلیون متر مکعب بیوگاز تولید خواهد شد. این بیوگاز با توجه به ارزش حرارتی آن معادل با 25/6 میلیون متر مکعب گاز طبیعی خواهد بود[38].

زارعی و ملکی پتانسیل تولید بیوگاز از کود دامی و پسماندهای روستایی در استان کردستان را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش مقدار کل کود دامی قابل دسترس به منظور تولید بیوگاز در استان کردستان $8/47 \times 10^8$ کیلوگرم در سال برآورد شد که بیوگاز قابل تولید از آن 107/49 میلیون متر مکعب می‌باشد. همچنین، مجموع پسماندهای تجزیه‌پذیر روستایی برای استفاده به منظور تولید بیوگاز در این استان $76/91 \times 10^9$ کیلوگرم در سال تخمین زده شد که قابلیت تولید 9/998 میلیون متر مکعب بیوگاز را دارد. بنابراین، مجموع پتانسیل بیوگاز تولیدی از این منابع 117/272 میلیون متر مکعب برآورد شد. مقدار انرژی تولیدی از این میزان بیوگاز معادل $2/533 \times 10^9$ مگاژول می‌باشد. از مجموع بیوگاز محاسبه شده در استان کردستان می‌توان سالیانه معادل $6/99 \times 10^8$ کیلووات ساعت برق تولید کرد[39].

وحیدی و همکاران، اثرات زیست محیطی تولید بیوگاز از هضم مشترک 1) پوست زمینی و کود گاوی؛ 2) پسماند آشپزخانه و کود گاوی در شمال-غرب ایران را مورد بررسی قرار دادند. به منظور محاسبه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای خاص از تولید بیوگاز، روش استاندارد ارزیابی چرخه حیات به کارگرفته شد. از زباله‌های آشپزخانه با محتوای چربی متوسط و پوست سیب زمینی به عنوان یک گزینه ورودی برای دستگاه تخمیر استفاده شد. در این مطالعه، میزان تولید بیوگاز از 70٪ کود گاو (ورودی روزانه 1/663 کیلوگرم؛ و ورودی سالانه 606/813 کیلوگرم) و 30٪ پوست سیب زمینی (ورودی روزانه 0/608 کیلوگرم؛ و ورودی سالانه 802/ 221 کیلوگرم) 69/629 متر مربع در سال برآورد شد. همچنین میزان تولید بیوگاز از 60٪ کود گاو (ورودی روزانه 1/425 کیلوگرم؛ و ورودی سالانه 520/125 کیلوگرم) و 40٪ پسماند آشپزخانه (ورودی روزانه 0/8776 کیلوگرم؛ و ورودی سالانه 320/323 کیلوگرم) 76/281 متر مربع در سال برآورد شد. میزان کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید بیوگاز با استفاده از پوست‌زمینی و کود گاو تا 0/316 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن بر هر مگاژول بیوگاز و با استفاده از پسماند آشپزخانه تا 0/236 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن بر هر مگاژول بیوگاز بدست آمد. با این حال، بر خلاف منبع انرژی فسیلی که اغلب از گاز مایع[1] و گاز طبیعی[2] استفاده می‌شود، بیوگاز تولید شده بسیار کمتر از این سوخت‌ها به آب و هوا آسیب می رسانند. انتشار گازهای گلخانه‌ای گاز مایع، 1/59 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن می‌باشد؛ که بسیار بیشتر از بیوگاز است[40].

فلاح‌نژاد فتحی و همکاران پتانسیل تولید بیوگاز از کود دامی در کل روستاهای ایران را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ابتدا آمار و اطلاعات تعداد و نوع هر دام به دست آمد. سپس با استفاده از آمار تولید فضولات سالانه هر نوع دام در کل روستاهای کشور محاسبه شد. با توجه به نتایج، مقدار کل کود دامی در روستاهای کشور در سال 1382، 43 میلیون تن و بیوگاز قابل استحصال از این پسماند 11 میلیارد و 195 میلیون متر مکعب برآورد شد. همچنین مجموع پسماند تجزیه‌پذیر روستاهای کشور 1 میلیون و 249 هزار تن برآورد شد. از این میزان پسماند، 487 میلیون متر مکعب بیوگاز قابل استحصال است. با افزایش جمعیت انسانی و دام در سال‌های آینده، امکان تولید انرژی بیوگاز حاصل از کود دامی و پسماند تجزیه‌پذیر روستایی نیز افزایش خواهد یافت[41].

6- پتانسیل تولید بیوگاز از پسماند کشاورزی در سایر کشورها

سیدیکی و همکاران، تولید پسماند دامی، ظرفیت تولید بیوگاز تخمینی، پتانسیل تولید برق، پتانسیل کاهش گازهای گلخانه‌ای و ظرفیت تخمینی تولید کودزیستی بنگلادش برای سال مالی 2019-2018 را مورد مطالعه قرار دادند. پسماند دام و طیور به عنوان مواد اولیه برای تولید انرژی زیستی مورد استفاده

1. Liquid Petroleum Gas (LPG)

2. Natural gas (NG)

قرار گرفت. میزان تولید کود، خون و شکمبه گاو و گاومیش به ترتیب (209/95، 78/38، 111/97) میلیون تن در سال، کود، خون و شکمبه گوسفند و بز به ترتیب (17/27، 6/82، 56/83) میلیون تن در سال و پسماند طیور 5/5 میلیون تن در سال می‌باشد. در مجموع میزان تولید پسماند برآورد شده، 486/72 میلیون تن در سال می‌باشد. پتانسیل بیوگاز از پسماند گاو و گاومیش، گوسفند و بز، طیور به ترتیب(24010/17، 2638/45، 1275/10) میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. نتایج نشان داد که بنگلادش (برای سال مالی 2019-2018) پتانسیل تولید سالانه 27923/72 میلیون متر مکعب بیوگاز از 486/72 میلیون تن پسماند دامی دارد. از این میزان بیوگاز، 50 تراوات ساعت در سال توان الکتریکی بدست آمد. در سال 2019-2018، مصرف برق در بنگلادش 70533 گیگاوات ساعت گزارش شده است. بنابراین، برق تولید شده توسط بیوگاز برآورد شده در این مطالعه، تقریباً 70٪ از برق مصرفی در سال 2019-2018 را تأمین می‌کند. این نشان می‌دهد که تولید بیوگاز با استفاده از زباله‌های حیوانی در بنگلادش، هزینه تولید انرژی را با محدود کردن واردات سوخت‌های مایع، کاهش می‌دهد. همچنین، استفاده از نیروگاه‌های بیوگاز خانگی برای تولید برق، مصرف انرژی روستایی را کاهش می‌دهد و در هزینه روستاییان در پرداخت قبوض انرژی صرفه‌جویی می‌شود. علاوه بر این، حدود 29/232 میلیون تن در سال کودزیستی توسط هضم 232/77 میلیون تن کود دامی تولید می‌شود. بنابراین، بیوگاز تولید شده از ضایعات دام می‌تواند یکی از منابع مهم تولید انرژی تجدیدپذیر و راه‌حلی برای مشکل مدیریت پسماندهای حیوانی در بنگلادش باشد[42].

کفالو و لامی، پتانسیل تولید بیوگاز، انرژی، کود زیستی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای پسماند کشتارگاه در کشتارگاه شهر شاشامانه، اتیوپی را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که سالانه حدود 688755 کیلوگرم پسماند کشتارگاهی از 13505 گاو تولید می‌شود. بیوگاز تولید شده از هضم بی‌هوازی این پسماند تقریباً $206/63 \times 10^3$ متر مکعب در سال می‌باشد. برق حاصل از این میزان بیوگاز 1018/98 کیلووات ساعت در روز و 371927/7 کیلووات ساعت در سال برآورد شد. بیوگاز تولیدی سالانه می‌تواند جایگزین 211/8 تن انرژی مصرف شده توسط گاز مایع، نفت سفید، زغال سنگ، بنزین و گازوئیل شود. علاوه بر این، هاضم بی‌هوازی این پتانسیل را دارد که انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا 952/4 تن معادل دی اکسید کربن در سال کاهش داده و سالانه 43184/9 کیلوگرم کود زیستی خشک تولید کند. در نتیجه، هضم بی هوازی مقدار زیادی کود زیستی و انرژی تولید می‌کند و در عین حال انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز کاهش می‌دهد [43].

آفوتی و همکاران مطالعه‌ای در خصوص برآورد پتانسیل تولید بیوگاز از ضایعات دام و کشتارگاه در غنا و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را با استفاده از تکنیک محاسبات هوشمند انجام دادند. در این پژوهش تولید ضایعات دامی از کشتارگاه‌ها، ظرفیت تولید بیوگاز، پتانسیل تولید برق، کاهش گازهای گلخانه‌ای تخمین زده شد. داده‌های تعداد دام از وزارت غذا و کشاورزی و وزارت شیلات و دام از سال 2010 تا 2020 به دست آمد. پسماند دام، به عنوان مواد آلی مورد استفاده به عنوان ماده خام برای تولید انرژی زیستی در نظر گرفته شد. بر اساس داده‌های سال 2020، میزان کل زباله‌های کشتارگاهی برای سال 2020، $4/205 \times 10^{10}$ کیلوگرم در سال و بیوگاز تولید شده از این میزان پسماند معادل $6/792 \times 10^9$ متر مکعب است. نرخ تولید برق حاصل از این میزان بیوگاز $7/110 \times 10^9$ کیلووات ساعت در سال برآورد شد. طبق گزارش کمسیون انرژی غنا، کل مصرف برق این کشور در این سال 16531 گیگاوات ساعت بوده است. بنابراین، بیوگاز به دست آمده در این پژوهش می‌تواند حدود 43%/01 از این میزان برق مصرفی را تامین نماید. همچنین سالانه از رها شدن $1/075 \times 10^{10}$ کیلوگرم معادل دی اکسید کربن به اتمسفر جلوگیری شده و به میزان $2/648 \times 10^9$ کیلوگرم کود زیستی به‌دست آمد [44].

کوسمیاتی و همکاران مزایای انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی بیوگاز تولید شده از کود گاو را در صورت جایگزینی با برق و گاز مایع در منطقه بویولالی، جاوه مرکزی اندونزی مورد بررسی قراردادند. در این پژوهش، نرخ بازده بیوگاز 36 لیتر به ازای هر کیلوگرم کود گاو استفاده شد. در این مطالعه غلظت کل مواد جامد ورودی با اضافه کردن آب به کود گاو در مخزن اختلاط، 9٪ به دست آمد. سپس مخلوط وارد دستگاه هاضم شده، و در دمای 35 درجه سانتیگراد شروع به تخمیر کرد. از 22/56 تن کود گاو و 27/5 تن آب (در روز)، 812/2 متر مکعب بیوگاز بدست آمد. برق تولید شده از این میزان بیوگاز، روزانه 1950/7 کیلووات ساعت است. این مقدار انرژی برای تامین برق خانه‌های 5053 خانواده کافی است. هر روستا به ۱۵۸۰ کیلووات ساعت در روز برای خانه‌ها و 1/54 کیلووات ساعت در روز برای نیروگاه‌های بیوگاز نیاز دارد. بنابراین، 368/4 کیلووات ساعت در روز برق اضافی می‌ماند که شرکت برق دولتی می‌تواند از آن استفاده کند. اگر تمام کود گاو در اندونزی برای بیوگاز استفاده شود، پتانسیل برق تولید شده 49/8 گیگاوات ساعت در روز یا 18177 گیگاوات ساعت در سال است. این انرژی می تواند انرژی 13 میلیون خانوار را برای یک روز تامین کند که معادل استفاده از 6/09 میلیون تن گازوئیل یا 2/23 میلیون تن زغال سنگ است. بر اساس یافته‌های این مطالعه با نصب یک نیروگاه بیوگاز در این روستا، انتشار کربن تا 6/78 تن معادل دی اکسید کربن کاهش می‌یابد. اگر بیوگاز به عنوان جایگزین گاز مایع استفاده شود، میزان صرفه‌جویی در گاز مایع، 3/84 میلیون تن در سال خواهد بود. دوغاب تولید شده نیز 49/2 تن (93٪ رطوبت) در روز بود و بلافاصله برای کود استفاده شد. دوغاب دارای مواد مغذی زیادی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم و همچنین سایر ترکیبات آلی است که می تواند حاصلخیزی خاک را بهبود بخشد. در صورت استفاده از بیوگاز تولیدی به جای گاز مایع، صرفه‌جویی در بودجه دولتی برای گاز مایع و یارانه کود 40/3 تریلیون روپیه اندونزی و کل پس‌انداز هر خانواده به 60420 تا 725000 روپیه اندونزی در سال خواهد رسید. استفاده از بیوگاز، تقاضای سوخت فسیلی را کاهش داده و کاهش واردات سوخت فسیلی و امنیت انرژی را در پی خواهد داشت[45].

وارگاس سوپلین و همکاران تولید بیوگاز با استفاده از برگ درختان پاییزی در شهر برلین را مورد مطالعه قراردادند. در این مطالعه سه سناریوی الف) کمپوست کردن برگ‌ها الف) تولید بیوگاز؛ و ج) پیش تصفیه برگ‌ها قبل از تولید بیوگاز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مقدار برگ درختان جمع‌آوری شده در سال 2020 در شهر برلین 34000 تن تعیین شد. پیش تیمار شیمیایی با هدف افزایش تولید متان انجام شد. این پیش تیمار شامل افزودن هیدروکسید سدیم به میزان 3/5٪ بر اساس ماده خشک، با افزایش فرضی عملکرد متان 20٪ در طول هضم بی‌هوازی برگ‌ها است. انتشار گازهای گلخانه‌ای از پیش تیمار شیمیایی با توجه به انتشارات مرتبط با فرآیند تولید

هیدروکسید سدیم، بر اساس فهرست ارزیابی چرخه حیات[1] محاسبه شد. میزان تولید الکتریسیته از بیوگاز به ازای هر تن برگ 202/3 کیلووات ساعت و به ازای هر تن برگ پیش‌تیمارشده 234/1 کیلووات ساعت به دست آمد. مقایسه کلی نشان داد که سناریوهای مرتبط با بیوگاز عملکرد بهتری از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای (140/1- کیلوگرم معادل دی اکسید کربن به ازای هر تن برگ برای بیوگاز و 167/4- کیلوگرم معادل دی اکسید کربن برای پیش تیمار قبل از تولید بیوگاز) نسبت به کمپوست کردن برگ‌ها (49/0 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن) داشتند. برگ‌های پیش تیمار شده، کمترین انتشار خالص و بالاترین میزان تولید انرژی در هر تن مواد اولیه را داشتند [46].

7- موانع مسیر توسعه بیوگاز در ایران

با توجه به تحقیقات ارائه شده در بخش‌های قبلی، بکارگیری انرژی بیوگاز سهم بالایی در تامین انرژی و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی دارد. با وجود مزایای ذکر شده، توسعه انرژی بیوگاز در ایران با موانعی روبرو است. با توجه به مطالعه انجام شده توسط غلامی و همکاران، علل و موانع عدم گسترش بهره‌گیری از انرژی بیوگاز در ایران عبارت است از:

1- ارزان بودن انرژی در ایران
2- نبود مرجع و متصدی مشخص برای بیوگاز در کشور
3- نبود روحیه مشارکت در مردم
4- آگاهی کم و آموزش ناکافی
5- کمبود اطلاعات فنی

بنابراین، برای توسعه فناوری بیوگاز در ایران لازم است اقداماتی در جهت مرتفع کردن موانع ذکر شده در مسیر توسعه بیوگاز انجام پذیرد[47].

8- نتایج و بحث

8-1- پتانسیل تولید بیوگاز از پسماند کشاورزی

با توجه به جدول 5، پسماندهای کشاورزی در ایران و همچنین سایر کشورها، دارای پتانسیل کافی برای تولید سوخت پاک و تجدیدپذیر بیوگاز است.

جدول 5 پتانسیل تولید بیوگاز از پسماند کشاورزی

نوع بستر تولید بیوگاز	پتانسیل تولید بیوگاز
264 kg بقایای کلش برنج و کود دامی	[36] 187/56 m^3
53/712 ton کود دامی	[37] 9343/44 m^3
136826 ton کود دامی	[38] 32/4 million m^3
$8/47 \times 10^8$ kg کود دامی	[39] 107/49 million m^3
$76/91 \times 10^9$ kg پسماند تجزیه‌پذیر روستایی	[39] 9/998 million m^3
828/615 kg پوست سیب زمینی (30٪) و کود گاو (70٪)	[40] 69/629 m^2
840/448 پسماند آشپزخانه (40٪) و کود گاو kg (60٪)	[40] 76/281 m^2
43 million ton کود دامی	[41] $111/95 \times 10^8$ m^3
$1/249 \times 10^6$ ton پسماند تجزیه‌پذیر روستایی	[41] 487 million m^3
486/72 million ton پسماند دام و طیور	[42] 27923/72 million m^3
688755 Kg پسماند کشتارگاهی (گاو)	[43] $206/63 \times 10^3$ m^3
22/56 ton کود گاو + 27/5 ton آب	[45] 812/2 m^2

8-2- پتانسیل تولید انرژی از بیوگاز

با توجه به جدول 6، بیوگاز حاصل از پسماند کشاورزی دارای پتانسیل کافی برای تامین انرژی مصرفی مورد نیاز است.

جدول 6 پتانسیل تولید انرژی از بیوگاز

بیوگاز مصرفی برای تولید انرژی	پتانسیل انرژی حاصل از بیوگاز
15/63 m^3	[36] 343/86 Mj
9343/44 m^3	[37] 35505/07 Kwh
117/272 million m^3	[39] $6/99 \times 10^8$ Kwh
27923/72 million m^3	[42] 50 Twh
$206/63 \times 10^3$ m^3	[43] 371927/7 Kwh
6792 million m^3	[44] $7/11 \times 10^9$ Kwh
812/2 m^2	[45] 1950/7 Kwh

با توجه به پیشینه تحقیق، بیوگاز بدست آمده از پسماند کشاورزی دارای پتانسیل جایگزینی با منابع فسیلی همچون گاز مایع، نفت سفید، زغال سنگ، بنزین و گازوئیل است. علاوه بر این، بیوگاز بدست آمده پتانسیل بالایی در تولید الکتریسته و حرارت دارد. با توجه به تولید الکتریسیته در محل با بیوگاز حاصل از پسماند کشاورزی، از تلفات انتقال برق جلوگیری شده و به دلیل استقلال از شبکه متمرکز سوخت‌های فسیلی، منجر به افزایش امنیت انرژی خواهد شد. انرژی حرارتی بدست آمده از بیوگاز نیز می‌تواند برای گرمایش آب مصرفی، گرمایش دامداری‌ها، گرمایش گلخانه‌ها، گرمایش استخرها و پرورش آبزیان مورد استفاده قرار گیرد. تامین انرژی مصرفی با استفاده از بیوگاز باعث صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی شده و آلودگی‌ها، انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات زیست محیطی حاصل از آن را کاهش می‌دهد. جایگزینی سوخت فسیلی با بیوگاز حاصل از پسماند کشاورزی، هزینه تولید انرژی را به دلیل استفاده از مواد اولیه ارزان قیمت به جای منابع فسیلی با قیمت بالا کاهش می‌دهد. با کاهش هزینه تولید انرژی و واردات سوخت، بودجه دولتی مورد نیاز برای تامین انرژی مصرفی کاهش می‌یابد. به این ترتیب، هزینه‌ی پرداختی متقاضیان انرژی در قبال انرژی مصرف شده نیز کاهش می‌یابد.

8-3- انتشار گازهای گلخانه‌ای

جدول 7، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در مسیر مدیریت پسماند را نشان می‌دهد.

جدول 7 انتشار گازهای گلخانه‌ای

مسیر مدیریت پسماند	انتشار گاز گلخانه‌ای
سوزاندن (264 Kg کلش برنج و کود دامی)	[36] 105/6 Kg CO_{2eq}

1. Life Cycle Assessment

بیوگاز (از 264 kg کلش برنج و کود دامی)	0/937 Kg CO_{2eq} [36]
بیوگاز (از 615 Kg /828 پوست سیب‌زمینی(30٪) و کود گاو(70٪))	0/316 Kg CO_{2eq} [40]
بیوگاز (از 840/448 Kg پسماند آشپزخانه(40٪) و کود گاو(60٪))	0/236 Kg CO_{2eq} [40]
بیوگاز (از 688755 Kg پسماند کشتارگاهی(گاو))	کاهش انتشار تا [43] 952/4 ton CO_{2eq}
بیوگاز (از $4/205 \times 10^{10}$ Kg پسماند کشتارگاهی)	کاهش انتشار تا [44] $1/075 \times 10^{10}$ Kg CO_{2eq}
بیوگاز (از 27/5 ton آب و 22/56 ton کود گاو)	کاهش انتشار تا [45] 6/78 ton CO_{2eq}
الکتریسیته از بیوگاز (1ton برگ درخت)	140/1- Kg CO_{2eq} [46]

با توجه به جدول 7، استفاده از 1 تن برگ درخت برای تولید الکتریسیته حاصل از بیوگاز به جای کمپوست، انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا 8911/1 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن کاهش می‌دهد. همچنین، تولید بیوگاز از 264 کیلوگرم بقایای کلش برنج و کود دامی به جای سوزاندن آن، انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا 104/663 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن کاهش می‌دهد. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بیوگاز حاصل از 828/615 کیلوگرم کود گاو و پوست سیب زمینی و همچنین 840/448 کیلوگرم کود گاو و پسماند آشپزخانه به ترتیب 0/316 و 0/236 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن می‌باشد. در حالی که انتشار گازهای گلخانه‌ای گاز مایع 1/59 کیلوگرم معادل دی اکسید کربن می‌باشد. بنابراین در صورتی که بیوگاز تولید شده جایگزین گاز مایع شود، انتشارات حاصل از آن بسیار پایین‌تر از انتشارات حاصل از گاز مایع خواهد بود. بیوگاز حاصل از $4/205 \times 10^{10}$ کیلوگرم پسماند کشتارگاهی و 688755 کیلوگرم پسماند کشتارگاهی (گاو) میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را در مقایسه با انتشارات سوخت‌های فسیلی به ترتیب 1.075×10^{10} کیلوگرم معادل دی اکسید کربن و 952/4 تن معادل دی اکسید کربن کاهش می‌دهد. بیوگاز تولید شده از 22/56 تن کود گاو نیز، انتشار گازهای گلخانه‌ای را به میزان 6/78 تن معادل دی اکسید کربن کاهش می‌دهد. با توجه به نتایج، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بیوگاز در مقایسه با سوخت‌های فسیلی بسیار پایین‌تر است. بنابراین، با مدیریت پسماند در راستای تولید بیوگاز و جایگزینی سوخت‌های فسیلی با بیوگاز، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

8-4- هضم باقیمانده در فرآیند تولید بیوگاز

هضم باقیمانده در جریان تولید بیوگاز دارای مواد مغذی شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم و همچنین سایر ترکیبات آلی است؛ که می‌تواند به عنوان کودزیستی برای بهبود خواص خاک مورد استفاده قرار بگیرد[45]. طبق برآوردهای انجام شده، از هضم 232/77 میلیون تن کود حیوانی 29/232 کیلوگرم کودزیستی[42]، از 688755 کیلوگرم پسماند کشتارگاهی (گاو)، 43184/9 کیلوگرم کودزیستی [43] و از هضم $4/205 \times 10^{10}$ کیلوگرم پسماند کشتارگاهی، $2/648 \times 10^{9}$ کیلوگرم کودزیستی[44] تولید شده است.

9- نتیجه‌گیری

با توجه به رشد روزافزون جمعیت در چند دهه اخیر، تقاضای انرژی، آب و غذا نیز در حال افزایش است. بنابراین، مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید محصولات کشاورزی برای تامین انرژی و نیازهای غذایی در حال رشد جهان، افزایش یافته است. افزایش مصرف سوخت فسیلی منجر به اثرات زیست محیطی نامطلوب و افزایش تولید محصولات کشاورزی منجر به افزایش تولید پسماند کشاورزی و آلودگی‌های ناشی از آن شده است. یکی از موثرترین روش‌ها برای دفع پسماندهای کشاورزی، هضم بی هوازی این پسماند و تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر بیوگاز است. تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی به عنوان یک منبع انرژی جایگزین می‌تواند میزان مصرف انرژی فسیلی و همچنین، آلودگی‌ها و انتشارات ناشی از آن را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. این پژوهش به بررسی مروری پتانسیل تولید بیوگاز از پسماندهای بخش کشاورزی، پتانسیل بیوگاز در تامین انرژی مصرفی مورد نیاز و انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از آن پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد، پسماندهای کشاورزی پتانسیل تولید سوخت زیستی بیوگاز را داشته و انرژی تولیدی از آن پاسخگوی تقاضای انرژی رو به رشد جهان است. توسعه و اجرای سیستم‌های انرژی بیوگاز از هضم بی‌هوازی پسماند کشاورزی، امنیت تامین انرژی ملی را افزایش داده و وابستگی به سوخت‌های فسیلی و برق وارداتی را کاهش می‌دهد. تامین انرژی مصرفی با استفاده از بیوگاز باعث صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی شده، و همچنین آلودگی‌ها، انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات زیست محیطی حاصل از آن را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، اگر پسماندهای کشاورزی بصورت نامطلوب مدیریت شود (مثل سوزاندن) مقدار زیادی گاز گلخانه‌ای وارد اتمسفر می‌شود. با توجه بررسی انجام شده، با استفاده از این پسماند در مسیر صحیح و تولید بیوگاز، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های ناشی از دفع نادرست پسماند به طور چشمگیری کاهش یافت. بنابراین، تولید بیوگاز از پسماندهای کشاورزی بزرگترین فرصت برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر دو بخش انرژی و کشاورزی بوده و نقش موثری در حل بحران انرژی و آلودگی محیط‌زیست ایفا می‌کند. با کاهش استفاده از منابع فسیلی و جایگزینی آن با بیوگاز حاصل از پسماند کشاورزی، هزینه تولید و مصرف انرژی نیز کاهش می‌یابد. علاوه بر موارد ذکر شده؛ هضمی که در فرآیند تولید بیوگاز باقی می‌ماند، دارای مواد مغذی شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم و همچنین سایر ترکیبات آلی می‌باشد که می‌تواند به عنوان کودزیستی برای بهبود خواص خاک مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به پتانسیل بالای تولید بیوگاز در کشور، در صورت استفاده از پسماندهای کشاورزی برای تولید بیوگاز در راستای مدیریت پسماند و همچنین بـه کارگیری سیاست‌های تشویقی دولت در زمینه افزایش پرورش دام و بالابردن فرهنگ مصرف انرژی در روستاهای کشور، به میزان بالاتری از تأمین انرژی از این منبع پاک خواهیم رسید. از طرفی نیز، آلودگی‌های ناشی از این پسماند به دلیل مدیریت در مسیر صحیح کاهش خواهد یافت. افزایش دام در روستاهای کشور علاوه بر افزایش بیوگاز تولیدی، موجب افزایش درآمد و رونق اقتصادی روستا شده و بازگشت دوباره به ماهیت تولیدی روستا را در پی خواهد داشت. بنابراین، شاهد رونق اقتصادی و اشتغال در مناطق اطراف نیروگاه‌های بیوگاز خواهیم بود. نیروگاه‌های بیوگاز برای تولید بیوگاز، نیازمند حجم زیادی پسماند خواهند بود. بنابراین، تامین پسماند این نیروگاه‌ها و همچنین کار در

بخش‌های مختلف نیروگاه می‌تواند زمینه‌ی اشتغال افراد زیادی را فراهم کند. در صورت استفاده از پسماندهای کشاورزی برای تولید بیوگاز می‌توان امیدوار بود که بحران‌های انرژی، آلودگی، اشتغال و اقتصاد بهبود یافته و تا حدودی رفاه اجتماعی و اقتصادی برای مردم منطقه به ارمغان آید. با توجه به موانعی که در مسیر توسعه بیوگاز در ایران وجود دارد، دستیابی به مزایای فناوری بیوگاز مستلزم اقداماتی در جهت مرتفع کردن این موانع و هموار کردن مسیر توسعه بیوگاز می‌باشد.

10- مراجع

[1] N. Gontard, U. Sonesson, M. Birkved, M. Majone, D. Bolzonella, A. Celli, H. Angellier-Coussy, G. Jang, A. Verniquet, J. Broeze, B. Schaer, A. P. Batista, A. Sebok, A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy, *Critical reviews in environmental science and technology*, Vol. 48, No. 6, pp. 614-654, 2018.

[2] A. M. Salem, H. S. Dhami, M. C. Paul, Syngas production and combined heat and power from scottish agricultural waste gasification –A computational study, *Sustainability*, Vol. 14, No. 7, 3745, 2022.

[3] D. Neupane, Biofuels from renewable sources, a potential option for biodiesel production, *Bioengineering*, Vol. 10, 29, 2022.

[4] O. Khayal, Advantages and limitations of biogas technologies, 2019.

[5] O. A. Towoju, Residues to energy: A study of improving the renewable energy mix in Nigeria, *Journal of Energy Research and Review*, Vol. 10, No. 1, pp. 47-56, 2022.

[6] A. *Negm* and N. Shareef, *Waste Management in MENA Regions*, pp. 149-169, Switzerland: Springer, 2020.

[7] E. O. Diemuodeke, K. Owebor, C. O. Nwachukwu, and M. O. Ukoba, Agricultural Waste-Derived Management for Bioenergy: A Paradigm Shift in the Waste Perceptions, in: E. Jacob-Lopes, L. Q. Zepka, and M. C. Deprá (Eds.), *Handbook of Waste Biorefinery: Circular Economy of Renewable Energy*, pp. 13.345-13.367, Cham: Springer, 2022.

[8] A. Pandey, C. Larroche, C-G. Dussap, E. Gnansounou, S. Kumar Khanal, and S. Riske, *Biofuels: Alternative feedstocks and conversion processes for the production of liquid and gaseous biofuels*, Second Edition, pp. 3-43, London: Academic Press, 2019.

[9] M. Zupančič, V. Možic, M. Može, F. Cimerman, I. Golobič, Current status and review of waste-to-biogas conversion for selected European countries and worldwide, *Sustainability*,Vol. 14, No. 3, 1823, 2022.

[10] P. Sarangi, S. Nanda, and P. Mohanty, *Recent Advancements in Biofuels and Bioenergy Utilization*, Singapore: Springer, pp. 1-25, 2018.

[11] O. Awogbemi, D. V. Von Kallon, Valorization of agricultural wastes for biofuel applications, *Heliyon*, Vol. 8, *No.* 10, e11117, 2022.

[12] C. M. Hussain, S. Singh, and L. Goswami, *Emerging Trends to Approaching Zero Waste: Environmental and Social Perspectives*, PP. 133-151, Amsterdam : Elsevier, 2022.

[13] A. Alsulaili, K. Elsayed, A. Refaie, Utilization of Agriculture Waste Materials as Sustainable Adsorbents for Heavy Metal Removal: A Comprehensive Review, *Journal of Engineering Research,* 2023.

[14] R. S. Riseh, M. G. Vazvani, M. Hassanisaadi, V. K. Thakur, Agricultural wastes: A practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries, *Industrial Crops and Products*, Vol. 208, 117904, 2024.

[15] A. Demirbas, Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 2, pp. 1280-1287, 2011.

[16] R. L. Skaggs, A. M. Coleman, T. E. Seiple, A. R. Milbrandt, Waste-to-Energy biofuel production potential for selected feedstocks in the conterminous United States, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 2640-2651, 2018.

[17] K. Harshwardhan, K. Upadhyay, Effective utilization of agricultural waste: review, *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, Vol. 7, No. 5, 7, 2017.

[18] R. Ennetta, H. S. Soyhan, C. Koyunoğlu, V. G. Demir, Current technologies and future trends for biodiesel production: a review, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 47, No. 12, pp. 15133-15151, 2022.

[19] S. Nanda, R. Azargohar, A. K. Dalai, J. A. Kozinski, An assessment on the sustainability of lignocellulosic biomass for biorefining, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 925-941, 2015.

[20] A. Meyer-Aurich, A. Schattauer, H. J. Hellebrand, H. Klauss, M. Plöchl, W. Berg, Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources, *Renewable Energy*, Vol. 37, No. 1, pp. 277-284, 2012.

[21] J. Mata-Alvarez, J. Dosta, M. S. Romero-Güiza, X. Fonoll, M. Peces, S. Astals, A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 36, pp. 412-427, 2014.

[22] N. Rasit, A. Idris, R. Harun, W. A. W. A. K. Ghani, Effects of lipid inhibition on biogas production of anaerobic digestion from oily effluents and sludges: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 351-358, 2015.

[23] D.Nemati, GH.Yavari, N.Karimi, F.Foroudi, and S.Yousefi, Study of Causes and Abstacles of Utilization of Biogas Energy in Livestock Farms in Iran (Case Study of Shahr-e-Rey), *International Conference On Applied Research in Agriculture,* Pishtaz Iranian Science Cooperative Company, Tehran, Iran, 2015. (in persian)

[24] S. Abanades, H. Abbaspour, A. Ahmadi, B. Das, M. A. Ehyaei, F. Esmaeilion, M. El Haj Assad, T. Hajilounezhad, D. H. Jamali, A. Hmida, H. A. Ozgoli, S. Safari, M. AlShabi, E. H. Bani-Hani, A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 19, pp. 3377-3400, 2022.

[25] N. Scarlat, J. F. Dallemand, F. Fahl, Biogas: Developments and perspectives in Europe, *Renewable energy*, Vol. 129, pp. 457-472, 2018.

[26] A. Adeli Gilani, F. suri, and M. Pour Ahmadi, Application of biogas technology in the villages of Iran; Estimation of energy savings resulting from the application of biogas technology in Galesh Kalam village (Gilan), *Journal of Housing and Rural Environment*, Vol. 145, pp. 111-123, 2014. (in Persian)

[27] A. Mishra, M. Kumar, N. S. Bolan, A. Kapley, R. Kumar, L. Singh, Multidimensional approaches of biogas production and up-gradation: opportunities and challenges, *Bioresource Technology*, Vol, 338, 125514, 2021.

[28] M. R. Atelge, D. Krisa, G. Kumar, C. Eskicioglu, D. D.Nguyen, S. W. Chang, A. E. Atabani, A. H. Al-Muhtaseb, S. Unalan, Biogas production from organic waste: recent progress and perspectives, *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 11, pp. 1019-1040, 2020.

[29] R. Hatti-Kaul, G. Mamo, and B. Mattiasson, *Anaerobes in Biotechnology*, vol. 156, pp. 195-234, Switzerland: Springer, 2016.

[30] S. Bhuvaneshwari, H. Hettiarachchi, J. N. Meegoda, Crop residue burning in India: policy challenges and potential solutions, *International journal of environmental research and public health*, Vol. 16, No. 5, 832, 2019.

[31] Z. Gao, K. Alshehri, Y. Li, H. Qian, D.Sapsford, P. Cleall, M. Harbottle, Advances in biological techniques for sustainable lignocellulosic waste utilization in biogas production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 170, 112995, 2022.

[32] N. Nwokolo, P. Mukumba, K. C. Obileke, M. Enebe, Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production, *Processes*, Vol. 8, No. 10, 1224, 2020.

[33] A. J. Ward, P. J. Hobbs, P. J. Holliman, D. L. Jones, Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources, *Bioresource technology*, Vol. 99, No. 17, pp. 7928-7940, 2008.

[34] H. Afazeli, A. Jafari, S. Rafiee, M. Nosrati, An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 34, pp. 380-386, 2014.

[35] D. Tonini, C. Vadenbo, TF. Astrup, Priority of domestic biomass resources for energy: Importance of national environmental targets in a climate perspective, *Energy*, Vol. 124, pp. 295–309, 2017.
[36] M. Khodabakhshipur, M. Mohammadi Golangash, and M. Khodabakhshipur, Environmental and Technical Assessment of Biogas Production using Rice Straw, *Journal of Environmental Research and Technology,* Vol. 4, No. 6, pp. 5-11, 2020. (in Persian)
[37] H. Moradi1, H. Mobli, A. Jafari1, and M. Khanali, Potential of Biogas Production from Animal Waste in Rural Areas of West Eyvan County, Ilam Province, *Journal of Agricultural Mechanization,* Vol. 4, No. 2, pp. 101-110, 2019. (in Persian)
[38] G. Zolfaghari1 and I. Vaezi, Biogas production capacity from animal waste (case study: Joveyn city, Razavi Khorasan province), *Journal of Environmental Science Studies,* Vol. 9, No. 3, pp. 9225-9234, 2024. (in Persian)
[39] S. Zareei and MR. Maleki, A survey on potential of biogas production from livestock and rural wastes using GIS in Kurdistan province, *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 48, No. 1, pp. 173-178, 2017. (in Persian)
[40] Z. Vahidi-Ezmareh, T. Mesri-Gundoshmian, and A. Mirzazadeh, Biogas production in northwestern Iran: from the point of view of life cycle assessment, *Journal of Environmental Science Studies*, Vol. 7, No. 3, pp. 5339-5346, 2022. (in Persian)
[41] M. Falah Nejad Tafti, MA. Abdoli, and F. Golbabai Kootenay, Investigating the potential of biogas and energy production from biomass resources in the villages of Iran with a sustainable development approach, *Environmental science and technology,* Vol. 18, No. 2, pp. 387-394, 2016. (in Persian)
[42] S. Y. A. Siddiki, M. N. Uddin, M. Mofijur, I. M. R. Fattah, H. C. Ong, S. S. Lam, P. Senthil Kumar, S. F. Ahmed, Theoretical calculation of biogas production and greenhouse gas emission reduction potential of livestock, poultry and slaughterhouse waste in Bangladesh, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 9, No. 3, 105204, 2021.
[43] T. Kefalew, M. Lami, Biogas and bio-fertilizer production potential of abattoir waste: implication in sustainable waste management in Shashemene City, Ethiopia, *Heliyon*, Vol. 7, No. 11, e08293, 2021.
[44] B. Afotey, G. T. Sarpong, Estimation of biogas production potential and greenhouse gas emissions reduction for sustainable energy management using intelligent computing technique, *Measurement: Sensors*, Vol. 25, 100650, 2023.
[45] K. Kusmiyati, D. K. Wijaya, B. R. Hartono, G. F.Shidik, A. Fudholi, Harnessing the power of cow dung: Exploring the environmental, energy, and economic potential of biogas production in Indonesia, *Results in Engineering*, Vol. 20, 101431, 2023.
[46] A. de Jesús Vargas-Soplín, A. Prochnow, C. Herrmann, B. Tscheuschner, U. Kreidenweis, The potential for biogas production from autumn tree leaves to supply energy and reduce greenhouse gas emissions–A case study from the city of Berlin, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 187, 106598, 2022.
[47] M. Gholami, S. Khosrooyar, and Z. Hejri, Biogas in Iran, applications and challenges*, Iran National Bioenergy Conference,* Hamandishan Energy Kimia, Tehran, Iran, 2013. (in Persian)