مطالعات علوم زیستی و زیست فناوری

دوره ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳

صفحات ۱۰۰-۸۶

Online ISSN: ۲۴۷۶-۴۴۹۳

Print ISSN: ۲۵۳۸-۲۰۲۰

www.irijournals.com

تحلیل امکانسنجی آنزیم ها در کیفیت بخشی به پروسه ی هضم بی هوازی و پیامد تولید بیوگاز و انرژی پاک

امیرحسین خوارزمی خراسانی

دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش مهندسی محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

این مقاله متکفل بررسی تحلیل امکانسنجی آنزیم ها در کیفیت بخشی به پروسه ی هضم بی هوازی و تولید انرژی پاک به روش علمی می باشد. استفاده بیش ازحد از سوخت های فسیلی موجب تشدید تغییرات آب و هوایی، بحران انرژی و آلودگی های زیست محیطی می شود؛ بنابراین آنزیم ها به عنوان جایگزین بالقوه با پتانسیل تولید انرژی پایدار و تجدید پذیر در درازمدت در نظر گرفته شده اند. بی شک گام هیدرولیز در روند انجـام آن یک امر مهم است که می تواند نرخ تولید متان را محدود کند. علاوه بر این آنزیم در طول هیدرولیز سوبسترا به عنـوان یـک جـایگزین امیدوار کننده برای غلبه بر این محدودیت گزارش شده است. تولید تولید بیوگاز و هوای پاک از هضم بی هوازی به زمین های بزرگ زراعی و منابع آب شیرین نیاز ندارد، یک منبع انرژی تجدید پذیر است که می تواند جایگزین گاز طبیعی شود. به منظور بهبود تولید بیوگاز از هضم بی هوازی، از تکنیک های پیش تیماردهی به منظور افزایش تولید هوای پاک استفاده می شود. یافته بیانگر آن است؛ آنزیم ها در کیفیت بخشی به پروسه ی هضم بی هوازی انرژی پاک و آماده سازی زیستی آنزیمی و شناخت میکروب های کارآمد، امکان تقویت انرژی هضم بی هوازی را به طور قابل ملاحظه ای فراهم می کند. هیدرولیز این مجموعه پلیمرهای آلی به عنوان کلید موفقیت هضم بی هوازی شناخته می شود و بهبـود در مرحلـه هیـدرولیز نشان داده شده است که سبب افزایش تولید بیوگاز تولیدی از هضم بی هوازی می گردد. بیوگاز یکی از انرژی های پاک است که تجدیدپذیر است و میتواند توسط پسماندهای آلی طی هضم بی هوازی تولید شود.

واژه‌های کلیدی: هضم بی هوازی، آنزیم، هیدرولیز، پیش تیمار هضم بی هوازی

مقدمه

محیط زیست به طور پیوسته توسط مواد شیمیایی با ساختارهای مختلف و درجه سمیت متفاوت آلوده می شود. منابع تولیدکننده این آلاینده ها می توانند فعالیت های صنعتی، روش های مختلف کشاورزی، فعالیت های نظامی و تسلیحاتی و یافعالیت های روزانه شهری بشر باشند. از موثرترین روش های مبارزه با آلاینده های محیط زیست عوامل موجود در خود محیط زیست می باشند. بسیاری ازمیکروارگانیسم ها و گیاهان می توانند در حذف آلاینده ها به کار گرفته شوند. اما از آنجایی که آنزیم ها بازوهای شیمیا یی طبیعت می باشند انتظار می رود که بتوانند نقش محوری در از بین بردن آلاینده ها داشته باشند. یکی از خانواده های مهم آنزیم ها، اکسیدو ردوکتازها می باشند که می توانند با اکسایش یا کاهش ترکیبات آلاینده زمینه حذف آن ها را از منابع آبی، - خاکی و هوا فراهم آورند. هضم بی هوازی یک فرآیند میکروبی است که مواد زیست آلی تخمیر می شود، مواد در غیاب اکسیژن بـه سـایر اشـکال ماننـد بیوگاز، زیست توده بی هوازی و باقی مانده های آلی تبدیل می شوند[۱]. این تکنولوژی به طور گسترده ای در مدیریت پسماند مخازن حاوی مواد آلوده، هاضم های لجن، سایر محصولات کشاورزی و محصولات انرژی، تصفیه فاضلاب، مـدیریت زبالـه هـای خطرناک و کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرد [۲، ۳]. این فناوری چند منظوره و موثر است. به عنوان مثال، سیستم هضـم بی هوازی مقرون به صرفه در حل مشکلات زباله است. علاوه بر این، استفاده از این فناوری تاثیر زیادی بر کاهش اثرات زیسـت محیطی و افزایش تولید بیوگاز آن دارد. با توجه به مزایای آن، هضم بی هوازی در دهه های گذشته در نشـریات متعـدد مـورد بحث قرار گرفته است. به طور کلی، فرایند هضم بی هوازی می تواند در چهار مرحلـه متـوالی رخ دهـد کـه شـامل: هیـدرولیز، اسیدوژنز، استئوژنیز و متانوژنیز است .تکنولوژی ها و مکانیسم های عملیاتی در هر مرحله، به خوبی در تحقیقات پیشین توضیح داده شده است [۱،۴، ۵]. در میـان این مراحل، هیدرولیز به عنوان گام محدود کننده سرعت در هضم بی هوازی شناخته شده است. در طول هیدرولیز، پلیمرهـای پیچیده مانند کربوهیدرات ها، چربی ها و پروتئین ها با آنزیم های میکروبی خارج سلولی به مونومرهای محلول مانند اسیدهای آمینه، قندها و اسید های چرب زنجیره طولانی تبدیل می شوند .هیدرولیز این مجموعه پلیمرهای آلی به عنوان کلید موفقیت هضم بی هوازی شناخته می شود و بهبـود در مرحلـه هیـدرولیز نشان داده شده است که سبب افزایش تولید بیوگاز تولیدی از هضم بی هوازی میگردد. همچنین بسیاری از تکنیک ها گزارش شده نشان داده است که سبب بهبود عملکرد سیستم هضم بی هوازی، به ویژه مرحله هیدرولیز میشود. همچنین در این میان اضافه کردن آنزیم ها برای تسریع در واکنش هیدرولیز سوبسترا، یا به تعبیری اعمال پیش تیمار بر روی سوبسـترا نیـز گـزارش شده است. هدف اصلی از پیش تیمار این است که بستر ارگانیکی برای دسترسی بیشتر بـه آن فعالیـت میکروبـی ایجـاد شـود .روش های پیش تیمار ممکن است به سه دسته عمده تقسیم شوند: شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی همانطور که در بخـش زیـر توضیح داده شده است. بنابراین، در این فصل، استفاده از آنزیم ها در هیدرولیز بررسی شده است. این بررسی بر روی هیدرولیز و پیش تیمار سوبستراها در هضم بی هوازی توسط آنزیم ها تمرکز دارد. علاوه بر این، اثر تیمار آنزیمی ترکیـب شـده بـا انـواع دیگر پیش تیمارها نیز ارائه شده است. [۶] چالش هوای پاک و اهمیت زیست بوم بگونه ای که اقدامات سختگیرانه برای کاهش سوزاندن محصولات و بیشتر برای تنظیم مدیریت پسماند محصول نیاز به دخالت آژانس ها و سازمان های دولتی مناسب است. برخی از قوانینی که در مورد سوزاندن بقایای محصول در ایران مالک عمل است عبارتند از :ماده ۲۲ قانون هوای پاک (مصوب ۱۸/۴/۹۶):

انباشت پسماندهای بیمارستانی و صنعتی در معابر عمومی و فضای باز یا سوزاندن آنها و انباشتن پسماندهای خانگی و ساختمانی در معابر عمومی و فضای باز خارج از مکانهای تعیین شده توسط شهرداری ها و دهیاری ها یا سوزاندن آنها و

همچنین سوزاندن بقایای گیاهی اراضی زراعی پس از برداشت محصول ممنوع بوده و متخلف حسب مورد به جزای نقدی درجه شش موضوع ماده(۱۹) قانون مجازات اسالمی محکوم می شود .وزارت جهاد کشاورزی مکلف است مفاد این ماده را به طرق مقتضی به اطلاع بهره برداران بخش کشاورزی، عشایری و منابع طبیعی برساند .تبصره ۱ -تعاریف پسماندهای مندرج در این ماده مطابق قانون مدیریت پسماند و ایجاد هوای پاک مصوب ۲۱ ۲/ ۱۳۸۳/ می باشد .تبصره ۲ -دولت و شهرداری ها موظفند ظرف مدت سه سال پس از ابالغ این قانون برای شهرهای مختلف زمینه های تبدیل این پسماندها به انرژی یا کود را با کمک بخش خصوصی فراهم کنند .تبصره ۳ -در موارد استثنائی که آتش زدن نباتات یا بقایای گیاهی تنها راه دفع آفات و بیماری ها و آلودگی های گیاهی باشد، براساس شرایطی که توسط وزارت جهادکشاورزی و با تأیید سازمان تدوین و ابالغ می شود، اقدام می گردد.

۱-مفاهیم

۱-۱-پیش تیمار[1]

پیش تیمار، اصطلاح صنعت چوب به کار گرفتن روشهای مخصوص آسانتر کردن تیمار اصلی. مثلا در حفاظت چوب، آج زنی قبل از تزریق مواد حفاظتی برای چوبهای سخت اشباع انجام میگیرد. سوخت زیستی که سوخت سبز نیز نامیده می شود، سوختی است که از مواد زیست توده تجدید پذیر تولید می شود و معمو لا به عنوان منبع سوخت پاک استفاده می شود. سوخت های زیستی کربن کمتری دارند بنابراین تاثیری بر گرم شدن زمین ندارند، استفاده از این مواد می تواند از ورود زباله ها و موارد آلوده کننده دیگر به محیط زیست جلوگیری کند. سه مرحله ضروری برای تبدیل مواد لیگنوسلولزی زیست توده به زیست سوخت وجود دارد که شامل: الف) پیش تیمار (پیش تصفیه) ماده خام ب) تبدیل ماده خام به قندهای ساده قابل تخمیر (هیدرولیز یا آبکافت یا تجزیه) ج) تخمیر این قندها به زیست سوخت مدنظر. [۷]

۱-۲-تعریف علمی هضم بی‌هوازی

تجزیه موادآلی به وسیله دسته‌ای از باکتری‌هایی که تولید دی‌اکسید کربن و متان می‌کنند (باکتریهای استوژنیک و متانوژنیک) اتفاق می‌افتد این باکتری‌ها در رنج دمای بهینه ۳۵–۳۹ °C (مزوفیلیک) ۵۵–۶۰ °C عمل هضم را انجام می‌دهند. زباله‌ها توسط آنزیم‌ها مشابه آنچه که در معده انجام می‌گیرد مواد الی را به قندها و آمینو اسیدها تبدیل می‌کنند مواد آلی توسط باکتری‌های استوژنیک به هیدروژن، دی‌اکسید کربن و استات تبدیل می شوند که در نهایت باکتری‌های متان ساز بیوگاز را که مخلوطی از دی‌اکسید کربن (۴۰٪) و متان (۵۵٪) و مقادیر کمی مواد دیگر تبدیل می‌کنند. هضم بی هوازی، مجموعه‌ای از فرآیندهایی است که مواد آلی قابل‌تجزیه توسط میکروارگانیسم‌های مربوطه و تحت شرایط بی‌هوازی می‌شکنند. این فرایند شامل چهار مرحله هیدرولیز (Hydrolysis)، اسیدسازی (Acidogeneiss)، استوژنسیس (Acetogenesis) و متان‌زایی (Methanogenesis) می‌باشد. مرحله اول عبارتست از تجزیه مواد با وزن مولکولی بالا از قبیل سلولز (Cellulose)، نشاسته، پروتئین‌ها و چربی‌ها و تبدیل آن‌ها به ترکیبات با وزن مولکولی پایین مانند اسیدهای چرب، آمینواسیدها، دی-اکسیدکربن و هیدروژن که این گروه توسط باکتری‌های گروه هیدرولیتیک (Hydrolytic) انجام می‌شود. در مرحله دوم محصولات نهایی مرحله اول توسط باکتری‌های استوژن (Acetogen) به استات (Acetate) و هیدروژن تبدیل می‌شوند. در

[1] - Pre - treatment

مرحله سوم به منظور تولید استات بیشتر، ارگانیسم‌های معروف به هموا‌ستوژن‌ها (Hemoasetogen) ، هیدروژن و ترکیبات ساده کربنی تولید شده در مراحل اول و دوم را به استات تبدیل می‌کنند. مرحله چهارم عبارتست از تبدیل استات و ترکیبات ساده دیگر مانند فورمات (Formate) ، دی‌اکسید کربن و هیدروژن به گاز متان (Methane) [۸،۹]

۱-۲-۱-مزایای هضم بی‌هوازی (AD)

۱-۲-۱-۱-اثرات زیست‌محیطی

توسعه یک سیستم مدیریت زباله پاک و سالم به لحاظ بهداشتی

کنترل بو و آلودگی حاصل از زباله‌ها و پسماندها

کنترل ویروس‌ها و باکتری‌های بیماریزا (پاتوژن‌ها)

تولید انرژی تجدیدپذیر

۱-۲-۱-۲-مزایای اقتصادی

هضم بی‌هوازی همچنین می‌تواند مزایای اقتصادی زیر را به همراه داشته باشد.

تولید و فروش بیوگاز به عنوان منبع تولید الکتریسیته و حرارت

تولید و فروش فیبر و کود مایع

بهبود کشاورزی و صورتحساب‌ها بابت انرژی

۱-۲-۱-۳-اثرات اجتماعی

ایجاد یک محیط زندگی پاکیزه تر

اشتغال زائی بومی

تنوع تجارت روستائی

فرآوری زائدات به شیوه پایدار[۱۰،۱۱]

۱-۳-مفهوم آنزیم و کارکردهای آن

آنزیم ها برای ساخت و بهبود نزدیک به ۴۰۰ محصول تجاری و مصرفی مورد استفاده قرار می گیرند. این مواد نقش حیاتی و مهمی را در تجارت دارند و برای مونتاژ بسیاری از محصولات صنعتی ضروری هستند. این ترکیبات معمولا یک پروتئین هستند اما می توانند RNA نیز باشند؛ این پروتئین ها مانند یک کاتالیزور با افزایش پیش سازهای در دسترس برای واکنش های پایین دست، سرعت واکنش ها را افزایش داده و بازده آنها را بهبود می بخشند. از مهم ترین کاربردهای این پروتئین ها در صنعت می توان به تولید پنیر، نان و الکل اشاره کرد. [۱۲]

یک کاتالیزور بیولوژیکی که سرعت یک واکنش شیمیایی خاص را در سلول افزایش می دهد، آنزیم[۲] نام دارد. آنها در طی واکنش از بین نمی روند و بارها مورد استفاده قرار می گیرند. یک سلول حاوی هزاران نوع مختلف از این ترکیبات است که هر

[2] - enzyme

کدام برای یک واکنش شیمیایی خاص عمل می کنند. به طور کلی از این ترکیبات در فراوری غذاها، داروها، نوشیدنی ها، تغذیه حیوانات، منسوجات، نظافت خانگی، سوخت خودروها و تولید انرژی استفاده می کنند.

۱-۴-مفهوم بیوگاز مهم ترین مزیت های بیوگاز

بیوگاز یک منبع انرژی طبیعی تجدید پذیر است که اثرات موثری در طبیعت و صنایع به جا می گذارد. این گاز از تجزیه مواد آلی شامل کود های حیوانی، ضایعات مواد غذایی و فاضلاب تولید می شود. کودها و ضایعات از طریق هضم بی هوازی (یعنی بدون حضور اکسیژن) بیوگاز می سازند. حدود ۵۰-۷۰ درصد از بیوگاز را متان تشکیل می دهد. بنابراین قابل اشتعال است. از ترکیب گازهای متان، هیدروژن، مونواکسید کربن با اکسیژن، سوخت تولید می شود. زیرا هوا حاوی ۲۱٪ اکسیژن است. و آزادسازی انرژی در بیوگازبه عنوان سوخت استفاده می شود. بیوگاز باصرفه ترین سوخت تجدیدپذیر است که در بسیاری از کشورها به کار می رود. از آن برای پخت و پز، سرمایش وگرمایش، تولید برق، متانول و بخار، مدیریت زباله، تولید نیروی مکانیکی استفاده می کنند.

بیوگاز مزیت های زیادی نسبت به سوخت های دیگر دارد. در ادامه به پرکاربردترین مزایای بیوگاز اشاره خواهیم کرد.

تولید انرژی (شامل گرما، نور، برق)

کاهش حجم زباله های دفع شده

کاهش عوامل بیماری زا (مگس، تخم کرم)

تبدیل زباله های حاوی مواد آلی به کود با کیفیت عالی

محافظت از پوشش گیاهی؛ خاک، آب

افزایش بازدهی در زمینه دامداری و کشاورزی[۱۳]

۲- نقش آنزیم ها در هضم بی هوازی

آنزیم مولکول های آلی پیچیده ای است که از پروتئین تشکیل شده و در هر یک از آنها سلول زنده آنزیم ها موجود است .به عنوان کاتالیزور در واکنش های بیوشیمیایی انرژی فعال سازی را کاهش می دهند، بنابراین سرعت واکنش را سرعت می دهد [۶]. در سال های اخیر، افزایش علاقه به استفاده از آنزیم برای سنتز خوب مواد شیمیایی، واسطه های دارویی و زراعتی، و در تیمار پسماندها وجود دارد. در هضم بی هوازی، باکتری از طریق آنزیم ها سوبسترا را تخریب می کند .آندوآنزیم ها و اگزوآنزیم ها دو نوع آنزیم تولید شده در سلول و دخالت کننده در تخریب سوبسترا هستند. آندوآنزیم ها قادر به تخریب سوبسترای محلول در داخل سلول هستند در همین حال، اگزوآنزیم ها خارج سلولی از طریق سطح خارجی لجن حمل می شوند و سبب شکسته شدن بستر نامحلول لجن به هنگام تماس با سوبسترا میگردند، اگزوآنزیم ها سوبستراهای ذرات و کلوئیدی را به محلول تبدیل میکنند. سپس، این زیربناها وارد سلول می شوند و پس از آن توسط اندوآنزیم ها تخریب شد [۱۴]. همه باکتری ها اگزوآنزیم تولید نمی کنند. با توجه به پژوهش [۱۴]، اگزوآنزیم ها می توانند از یکی از سه منبع کلیدی، یعنی فاضلاب، لجن فعال از طریق اتولیز سلولی و آنزیم هایی که به طور فعالاند، توسط سلول ها ترشح شوند. علاوه بر این، آنزیم ها به عنوان کاتالیزورهای خاص واکنش یا بستر شناخته می شوندهر یک از آنزیم تنها یک سوبسترای خاص یا گروهی از زیربناها را تخریب می کنند. برای به دست آوردن میزان تخریب بالا، مهم است که انواع خاصی از اگزوآنزیم ها و

اندوآنزیم ها را در یک سیستم ارائه دهیم. بنابراین، برای تخریب انواع وسیعی از ساختارها، یک جامعه بزرگ و متنوع باکتری مورد نیاز است [۱۵]. علاوه بر این، باکتری ها و میکروارگانیسمهای درگیر در هضم بی هوازی تنها می تواند از ترکیبات ساده با وزن مولکولی کم استفاده کنند. برای تجزیه مولکول های بزرگتر بـه عنـوان مثـال، پروتئین ها، چربی ها و کربوهیدرات ها، که در میان اجزای اصلی هستند در هضم بی هوازی نیاز به آنزیمهای بیشتر میباشد. از این رو، آنزیم های اضافی به عنوان یـک جـایگزین عـالی بـرای تحریک تخریب پسماند در نظر گرفته می شود، بنابراین با افزودن آنزیمها به سیستم هضم بی هوازی، افزایش عملکرد دسـتگاه هضم بی هوازی میسر میشود [۱۶]. علاوه بر این، آنزیم ها ترکیبات طبیعی اند که قابل تخریب هستند [۱۷]. سهم ناچیز آنها از تقاضای شیمیایی اکسیژن(BOD) آنها را در جریان فرآیندهای هضم بی هوازی از پسماند و آسیب رساندن به اکوسیستم بی ضرر می سازد [۱۸]. علاوه بر این، با داشتن انواع مختلف آنزیم ها می تـوان انـواع سوبسـتراها را در طیـف وسـیعی از شـرایط محیطی اضافه کرد. آنها می توانند در حضور انواع مختلف میکروارگانیسم ها فعالیت کنند و عوامل بازدارنده و سـمی را کـه بـه عنوان مهار کننده های متابولیسم میکروبی عمل کنند. علاوه بر این، آنزیم با حلالیت بالاتر و اندازه کـوچکتر سـبب دسترسـی آسان تر میکروارگانیسمها به سوبستراها می شوند[۱۹]. این ویژگی آنزیم ها را مـیتـوان در طیـف گسـترده ای از برنامـه هـای کاربردی، از جمله هضم بی هوازی اعمال کرد.

۲-۱-استفاده از آنزیم ها در مرحله هیدرولیز در سیستم هضم بی هوازی

مرحله اول هضم بی هوازی هیدرولیز است. در طول هیدرولیز آنزیمی، پلیمرها به مونومرهای محلول تبدیل می شوند. این فرایند توسط آنزیم های میکروبی خارج سلولی شناخته شده به عنوان هیدرولاز صورت میگیرد. بسته به نوع واکنش کاتالیز شده، این هیدرولازها می تواند استیراز، گیلیکوداز یا پپتیداز باشند. به عنوان مثال، استراز و گلیکوزیداز در هیدرولیز سوبستراهای همیسلولزی، شرکت میکنند، در حالی که پپتیداز قادر به هیدرولیز سوبسترا های با مقدار بالای پروتئین هستند. در این مرحله، پلی ساکارید ها تبدیل به قندهای ساده تبدیل می شوند؛ سلولز آنزیمی سبب هیدرولیز گلوکز تولیدی، تخریب همیسلولز و تولید مونوساکارید میشود و آنزیم آمیلاز نشاسته را به گلوکز تبدیل می کند [۲۰]. بسیاری از تحقیقات قبلی نشان داده اند که هیدرولیز یک روند نسبتا کندی است و به طور کلی، میزان فرآیند هضم بی هوازی را کلی محدود می کند [۱۳]. بنابراین، به منظور بهبود بهره وری در تبدیل بیوماس طی هضم بی هوازی، بالابردن نرخ هیدرولیز مهم است .هیدرولیز آنزیمی یکی از آن گزینه های در دسترس برای ترویج عملکرد هضم بی هوازی است. این فرایند می تواند تحت شرایط متوسط، دارای سوبسترا و واکنش بالا و تولید هیچ محصول جانبی همراه باشد. [۲۱]

۲-۲- هیدرولیز آنزیمی پسماند های مواد غذایی در هضم بی هوازی

زباله های مواد غذایی از خانوارها، رستوران ها و صنایع غذایی غنی از پروتئین ها، چربی ها، کربوهیدرات ها و غیـره اسـت، کـه بستر عالی برای هضم بی هوازی است. روش معمولی درمان فاضلاب صنایع غذایی از طریق سیستم های تصفیه بیولـوژیکی بـه علت نیاز به اکسیژن شیمیایی و غلظت قند، پروتئین، روغن و گریس بالا، دشـوار اسـت [۵]. در تحقیقـات قبلـی، آنـزیم هـای هیدرولیتی دیواره سلولی مخمر بر روی هضم بی هوازی از کارخانه آبمیوه سازی مورد مطالعه قرار گرفتند که تصفیه مواد آلـی نیاز به اکسیژن بالاداشت. با انجام پیش تیمار آنزیمی قبل از هضم بـی هـوازی، نتـایج نشـان داد تقاضـای شـیمیایی اکسـیژن (COD)کاهش ٪۸۷ داشت، در مقایسه با ٪۱۳ هضم بدون استفاده از آنزیم ها. [۱۶]. آنزیم های تجـاری

مانند کربوهیدرات ها، پروتئاز ها و لیپاز ها هستند که برای بهبود هیدرولیز پسماندهای مواد غذایی استفاده می شود. مخلوط این سه آنزیم به نظرمی رسد کارآمد تر از استفاده از تنها یک واحد آنزیم تجاری است، این مخلوط آنزیمها منجر به عملکرد بالای متان و حذف اکسیژن محلول شیمیایی میگردد[۱۷]. مطالعات قبلی نشان داده است که یک قارچ غنی از آنزیم های هیدرولیتیک میزان هیدرولیز زباله های مواد غذایی در هضم بی هوازی را با موفقیت بهبود میدهد. به عنوان مثال، مخلوط قارچ تولید شده از ضایعات کیک، که مقدار بالایی پروتئاز و گلوکوآمیلاز دارد، در هیدرولیز آنزیمی زباله های مخلوط، میتواند حذف مواد جامد فرار ۳,۵ ± ۸۰,۴ را به دست آورد. علاوه بر این، نرخ تولید و تولید بیومتان از خوراکی های که پیش از قارچ مورد استفاده قرار گرفته بودند، یافته شد که به ترتیب ۳,۵ و 2,3برابر بیشتر از بدون پیش تیمار است [۱۸]. بطور مشابه برای بهبود کارایی هضم بی هوازی از نوعی آنزیم برای پیش تیمار زباله های مواد غذایی و مخلوط لجن فعال استفاده شده است. که عملکرد متان برای لجن فعال مخلوط با مواد غذایی و فقط لجن فعال درمقایسه با حالت بدون پیش تیمار به ترتیب ۲,۵ و ۱,۶ برابر بیشتر است. و کل مواد جامد فرار را ٪۲۳,۳ کاهش داده است. علاوه بر این، در یک مطالعه اخیر، یافته شد که زباله های مواد غذایی با محتوای چربی بالا می تواند تولید بیومتان را افزایش دهند. پیش تیمار با استفاده از لیپاز، مدت زمان هضم را ۱۰ تا ۴۰ روز کاهش میدهد، در حالی که میزان تولید متان را ۱۵۷,۷ – ۲۶,۹ ٪ افزایش میدهند علاوه بر این، پیش تیمار آنزیمی در فاضلاب غنی از لیپید ها نشان داده است که حضور اسید چرب در هضم بی هوازی ممکن است منجر به مشکلات عملیاتی نظیر جابجایی زیست توده، تصفیه شود و سمیت شدید ناشی از لیپید ها سبب تاثیر گذاری برروی عملکرد میکروارگانیسم های متانوژن و استوژنیز شود [۲۱]. راندمان مصرف لیپاز پانکراس سوسیس همزمان در هیدرولیز آنزیمی و تجزیه بی هوازی از پسماند غنی از چربی صنعت طیور توسط دوروس و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته 1- 0/05 gLاست[۲۲]. این نتایج نشان داد که می توان هیدرولیز و تجزیه بی هوازی را همزمان با استفاده از غلظت کم آنزیم انجام داد. تمام نمونه های پیش تیمارشده با لیپاز اثر منفی بر روی COD و حذف رنگ داشتند به جز اینکه سبب افزایش در تولید متان شده بودند. آزمایش دیگری برای تیمار آنزیمی سوبسترای غنی از چربی توسط دومینگوس و همکاران انجام شد .[23] .نویسندگان یافتند که این لیپاز برای استفاده در هیدرولیز مناسب بوده است و برای تولید بیوگاز بالا و تولیدات متان از پسماندها مناسب نشان داده شده است .یک مطالعه پیشین نشان داده بود که پیش تیمار آنزیمی می تواند تا حد زیادی هیدرولیز زباله های پر مرغ در هضم بی هوازی را افزایش دهد [۲۴]. پر از ۹۲-۹۰ درصد پروتئین ساخته شده است که در فرم keratin-b است که بسیار پایدار است و نرخ زیست تخریب پذیری نسبتا کم دارد. هیدرولیز آنزیمی توسط سرین پروتئاز سبب بهبود قابلیت هضم پرها و افزایش گاز زیستی شد، بطوری که طی آن در مقایسه با پرهای بدون تیمار ٪۱۲۲ افزایش در عملکرد متان مشاهده شد. به غیر از این، لیپازی از استافیلوکوک پاستوری A-4COM برای هیدرولیز آنزیمی روغن نارگیل غیر اشباع استفاده شد. روغن و گریس و تقاضای اکسیژن شیمیایی با موفقیت کاهش داشت در حالی که اسید چرب فرار و اسید چرب زنجیر طولانی پس از هیدرولیز بطور قابل توجهی افزایش داشت. علاوه بر این، تجزیه زیستی بی هوازی پساب پیش هیدرولیز شده نشان دهنده بهبود قابل ملاحظه ای در تولید بیوگاز و حذف بار آلاینده داشت [۲۵]. اثرشیرابه عنبه له شده به عنوان منبع آنزیمی از هیدروژن برعملکرد و کارایی تخریب گلوکز، پروتئین و چربی مورد بررسی قرار گرفت. افزایش عملکرد هیدروژن بر اساس تجزیه پروتئین، چربی سوبسترا و بازده تخریب به ترتیب ۴/۵ ± ٪۳/۵۱ و ۶/۲ ± ٪۷/۳۳ به دست آورد.[26]

۲-۳ هیدرولیز آنزیمی لجن فاضلاب در هضم بی هوازی

لجن هیدروکسید شده به عنوان مواد پیچیده ای تشکیل دهنده ذرات شناخته شـده اسـت؛ مـواد، میکروارگانیسـم هـا و مـواد پلیمری خارج سلولی توسط این میکروارگانیسم ها دفع می شوند. مشکلات مرتبط با لجن عبارتند از: (۱) حضور مواد غیر قابلهضم، که می تواند به صورت نامطلوب به کربن یا ترکیبات آلی قابل هضم به آرامی متصـل شـود (۲) اکثـر ترکیبـات آلـی در سلول های تولید شده در طول فرآیند تیمار لجن فعال واقع شده است. ساختار پایدار دیواره سلولی آن را به تجزیـه بیولوژیـک مقاوم می سازد؛ و (۳) حضور مواد لیگنوسلولزیک در لجن .این مشکلات را می توان با افزایش میزان هیدرولیز زیست توده لجن به سازه های قابل تخمیر بهبود داد[۵]. هیدرولیز آنزیمـی لجن عملکرد هیدرولیز را در شرایط خفیف عملیاتی، با مصرف انرژی کم و تشکیل محصولات کمتری افزایش مـی دهـد .[27] برای سه دهه گذشته، انواع مختلفی از آنزیم ها مانند آمیلاز، پروتئاز و آندو گلیکانازها در هیـدرولیز آلـی ترکیبـات موجـود در لجن به خوبی مورد استفاده قرار گرفته اند [۲۸]. لو و همکاران [۲۹]، به بررسی اثرات دوز آنزیم و درجه حـرارت در هیـدرولیز لجن فعال پرداخته بودند. که طبق یافته آنان افزایش بارگذاری آنزیم آمیلاز منجر به کاهش بیشتر در مواد جامد فرار میگردد .بارگذاری آنزیمی بهینه در میزان ۰,۰۶ گرم آمیلاز به گرم لجن خشک یافت شد، نتایج نشان داد که هنگام افزایش دما از ۴۰ تا دمای ۷۰ درجه سانتیگراد، نرخ فرآیند هیدرولیز آمیلاز از ۰,۱۰۶ به ۰,۲۱۵ بر ساعت، افزایش یافت؛ در حالی که انـرژی فعـال سازی واکنش هیدرولیز برای مواد جامد فرار از ۶۲,۷۲ به ۲۰,۱۹ کیلوژول بر مول کاهش یافته است .از این یافته ها، نتیجه گیری شد که هیدرولیز آمیلاز شدیدا لجن فعال را افزایش میدهد و درجه حرارت بالاتر باعـث افـزایش کارآیی هیدرولیز می شود. آنزیم های مختلف برای پیش تیمار و تخریب اجزای لجن فاضلاب های معمول استفاده شده اند. اثر لیپاز، سلولاز، آمیلاز و پروتئاز بر روی هضم بی هوازی لجن اولیه در شرایط معمول مخزن بررسی شده است [۸] مخازن حـاوی مواد آلاینده را می توان به عنوان هضم ساده بی هوازی در نظر گرفت و تجزیه جزئی مواد آلی تحت شرایط محیطـی را بدسـت آورد. مشخص شد که تیمار آنزیمی لجن اولیه هیدرولیز و میزان هضم را افزایش نمی دهد .علاوه بر این، هیچ پیشرفت قابل توجهی در این مورد حذف مواد جامد، جامدات فرار، جامدات معلـق کـل و محلـول تقاضـای اکسیژن شیمیایی و اسیدهای آلی نسبت به راکتورهای کنترل مشاهده نشد. در پژوهش دونوسو و پلانکو [۱۱]، اثرات افـزودن لیپاز و دوز در هضم بی هوازی لجن فاضلاب و گریس آن را مورد بررسی قرار دادند؛ افزودن آنزیم به طور قابل توجهی در هضم بی هوازی لجن فاضلاب و گریس آن و تجزیه زیستی زباله آنها اثر معنیداری داشت و به طـور قابـل تـوجهی بـر روی افـزایش تولید متان اثر داشت.

۳-پیشینه های بحث

۳-۱-آزیتا بهرامی و کمال الدین حق بین (۱۳۹۱)نویسندگان مقاله چالش های به کارگیری آنزیم ها برای حذف آلاینده ها از محیط زیست

محیط زیست به طور پیوسته توسط مواد شیمیایی با ساختارهای مختلف و درجه سمیت متفاوت آلوده می شود. منابع تولیدکننده این آلاینده ها می توانند فعالیت های صنعتی، روش های مختلف کشاورزی، فعالیت های نظامی و تسلیحاتی و یافعالیت های روزانه شهری بشر باشند. از موثرترین روش های مبارزه با آلاینده های محیط زیست عوامل موجود در خود محیط زیست می باشند. بسیاری ازمیکروارگانیسم ها و گیاهان می توانند در حذف آلاینده ها به کار گرفته شوند. اما از آنجایی که آنزیم ها بازوهای شیمیا یی طبیعت می باشند انتظار می رود که بتوانند نقش محوری در از بین بردن آلاینده ها داشته

باشند. یکی از خانواده های مهمآنزیم ها، اکسیدو ردوکتازها می باشند که می توانند با اکسایش یا کاهش ترکیبات آلاینده زمینه حذف آن ها را از منابع آبی، - خاکی و هوا فراهم آورند. این مقاله به بررسی کارایی دو گروه بزرگ از خانواده اکسیدو ردوکتاز یعنی پراکسیداز ها و پلی فنل -اکسیدازها می پردازد. تحقیقات نشان داده است که این آنزیم ها در حذف آلاینده هایی از قبیل رنگ ها، ترکیبات فنلی وآروماتیک، آفت کش ها، لیگنین، سوخت ها، پساب گیاهان، فلزات سنگین و... موثر واقع شده اند. همچنین بررسی ها نشان داده با تثبیت این آنزیم ها به روش مناسب نه تنها می توان از آن ها چند بار استفاده کرد بلکه می توان کارایی عملیاتی آن هارا افزایش داد. با این حال بیوتکنولوژی آنزیم ها همواره برای حذف آلاینده ها با محدودیت هایی مواجه است که در این مقالهمهم ترین آن ها معرفی خواهند شد.

۳-۲-نویسندگان: سیدعلی مرتضوی، محمدحسین عباسپورفرد، اکبر ثنایی مقدم، محمد طبسی زاده، هشتمین همایش علمی تخصصی انرژی های تجدید پذیر، پاک و کارآمد - ۱۳۹۴

نویسندگان مقاله در این پژوهش بیان می کنند؛ که فرآیند هضم بی هوازی، یکی از فناوری های قابل قبول، هم از نظر زیست محیطی و هم از نظر اقتصادی، به منظور تولید انرژی از پسماندهای آلی می باشد. یکی از ضایعات عمده آلی که در جوامع شهری وجود دارد دور ریزها و پسماند های ناشی از گل و قسمتهای مختلف آن می باشد.هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی تولید انرژی از این منبع ضایعات با استفاده از روش ذکر شده می باشد. جهت انجام آزمایش های هضم بی هوازی، پایلوت آزمایشگاهی تولید بیوگاز از نوع تک مرحله ای موجود در سازمان مدیریت پسماند شهرداری مشهد مورد استفاده واقع گردید؛ این پایلوت قابلیت کنترل خودکار شرایط محیطی فرآیند را از جمله دما، مدت و سرعت همزنی دارا بود. آزمایش هضم بی هوازی بر روی هضم مشترک پسماند گل (F)و کود گاوی (M) در چهار سطح(F:M)100:0 ، ۸۰:۲۰ و ۷۰:۳۰و ۰:۱۰۰بر اساس وزن ماده خشک مورد ارزیابی قرار گرفت. بعداز حداکثر ۴۵ روز ماند مواد درداخل هاضم، برای تیمار گل بدون اختلاط با کود،تولید گاز،ملموسمشاهده نگردید ولیدر سایر تیمارها به ترتیببه طور متوسط ۲۲۷،۲۶۶ و ۱۴۷ لیتر متان به ازای هر کیلو ماده خشک (l/kgTS) جمع آوری گردید که دارای تفاوت معنی داری نسبت به یکدیگر می باشند. میزان متان تولید شده در تیمار ۸۰:۲۰ و ۷۰:۳۰،به ترتیب ۶۴ و ۹۸درصد نسبت به تیمار کود گاوی بدونافزودنی (۰:۱۰۰)، افزایش داشته است که انرژی معادل متان تولید شده، حدود Kwh/kgTS8/2 تعیین گردید. با توجه به ظرفیت بالای تولید گل و پسماند آن در کلان شهرهایی مثل مشهد، پتاسیل قابل توجهی برای تولید انرژی از این پسماندوجود دارد که جهت بهره برداری نیاز به ارزیابی فنی و اقتصادی دقیقتری می باشد.

۳-۳-مقاله بهینه سازی تولید زیست گاز در هضم بی هوازی پسماندهای آلی جامد شهری با غلظت های مختلف تحت پیش تیمارهای حرارتی نویسندگان: مسعود کمالی، رضا عبدی، عباس روحانی، شمس الله عبدالله پور، سیروس ابراهیمی، نشریه ماشین های کشاورزی » دوره ۱۲، شماره ۳ (پاییز ۱۴۰۱)

در بخشی از این مقاله آمده است ؛ که در چند دهه اخیر منابع تجدیدپذیر انرژی که باعث آلودگی کمتر محیط زیست شوند بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. در این میان استحصال زیست گاز از ضایعات آلی جامد شهری برای تولید انرژی به دلیل کنترل گازهای گلخانه ای و کاهش آلودگی های زیست محیطی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. اگرچه هضم بی هوازی به عنوان یکی از بهترین روش های مواجهه با پسماندهای آلی جامد شهری مطرح است، با این حال، این فرآیند دارای محدودیت

هایی نیز می باشد. از این رو پیش فرآوری های مختلفی به منظور بهبود فرآیند هضم بی هوازی و افزایش تولید زیست گاز از هضم پسماندهای آلی مورد بررسی قرار گرفته اند. پیش فرآوری حرارتی از موثرترین روش ها جهت حذف عوامل بیماری زای موجود در مواد زاید آلی است. در همین حال این پیش فرآوری می تواند تاثیر به سزایی در بهبود هضم بی هوازی و تسریع هیدرولیز مواد داشته باشد. بنابراین یافتن شرایط بهینه این پیش تیمار برای دستیابی به بالاترین مقدار تولید زیست گاز حایز اهمیت به سزایی است. هدف از این تحقیق دستیابی به بهترین دما و زمان و غلظت در هضم مواد آلی موجود در پسماند شهری است. در این مطالعه، دما و مدت اعمال پیش تیمار حرارتی به ترتیب در سه سطح ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ درجه سانتی گراد و ۳۰، ۹۰ و ۱۵۰ دقیقه و غلظت نیز در سطوح ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد مورد بررسی قرار گرفتند. به این منظور ۱۵ آزمایش به روش سطح پاسخ باکس بنکن طراحی شدند. نتایج آزمایش ها نشان دادند که اثر متغیرهای دما و زمان در سطح ۱ درصد بر تولید زیست گاز معنی دار هستند در حالی که تغییرات غلظت در محدوده مورد مطالعه اثر کمتری در تولید این گاز داشته است. همچنین، بهترین سطوح متغیرهای دما و زمان پیش تیمار و غلظت مواد هضم شونده برای تولید زیست گاز به ترتیب ۹۵ درجه سانتی گراد، ۱۰۴ دقیقه و غلظت ۱۲ درصد بوده که پیش بینی می شود اعمال پیش تیمار حرارتی در شرایط بهینه متغیرهای مورد ارزیابی موجب تولید ۴۴۵ میلی لیتر زیست گاز به ازای هر گرم ماده آلی جامد فرار موجود در پسماندهای آلی شود که بدین ترتیب با اعمال پیش تیمار حرارتی در شرایط بهینه، افزایش ۳۱/۱۷ درصدی تولید زیست گاز نسبت به میزان زیست گاز ناشی از هضم مواد بدون اعمال پیش تیمار (۶/۱۸±۳۳۹/۳۳ میلی لیتر) قابل انتظار خواهد بود.

۴-نقش پیش تیمارهای شیمیایی و آنزیمی در هضم بی هوازی و کاهش مقدار لجن و تولید هوای پاک

نتایج و بحث هدف اصلی پیش تیمار، افزایش سوبسترای محلول و سرعت بخشیدن به روند هیدرولیز و کاهش مقدار لجن بـرای دفـع اسـت .روشهای مختلفی برای افزایش اثربخشی هضم بی هوازی استفاده شده است [۱۲، ۳۰]. بسیاری از پیش تیمارهـای شـیمیایی و فیزیکی حرارتی، روشهای رزیابی شده هستند، یکی از آنها ترکیب پیشتیمارها برای افزایش تخریب زیستی زباله هاست .قبلا پیش تیمار شیمیایی و آنزیمی برای کاه جو دو سر گزارش شده است [۳۱]. هیدرولیز مرکب اسید و قلیایی سلولز کاه جـو دوسر انجام شد. مشخص شد که محلول سازی همی سلولز،٪۹۶,۸ ٪۲/۷۷ سلولز و ٪۲/۴۲ لیگنین با ترکیب پیش تیمار اسید و آنزیمی بدست میآید. از سوی دیگر، رولینی و همکاران [۱۵]، ترکیب پیش تیمار آنزیمی و قلیایی از علوفه سورگوم خوراکی، که ماده لیگنوسلولزی است بررسی شد. میزان متان تولیدی در مقایسه با نمونه های بدون درمان بیشتر به دست آمد. طی این ترکیب حلالیت تا ۳۲ و ۵۶ درصد به ترتیب برای سلولز و همی سلولز در مقایسه با هیدرولیز آنزیمی حاصـل شـد. یافتـه هـای مشابه توسط میچاسکا و همکاران[۳]، نیز نشان میدهد علاوه بر افزایش میزان هیدرولیز طی پیش تیمـار ترکیبـی آنزیمـی و قلیایی ممکن است منجر به توزیع فیزیکی یا تغییر ترکیب لجن و افزایش سطح دسترسی و حجم منافذ سوبسترا گردد .همچنین نویسندگان نتیجه گرفتند که پیش تیمار ترکیبی در یک فرآیند دو مرحلـه ای بـر عملکـرد بیوگـاز تولیـدی کـارآیی بیشتری دارد؛ بطوری که در مقایسه با هیدرولیز آنزیمی، حدود ۳۰ درصد عملکرد بالاتر بود و بیش از ۶۰ درصد حجم تولیـدی متان بالاتر بود. پیش تیمار قلیایی بر تخریب ساختارهای لیگنینی و به طور جزئی همـیسـلولزی کارآمـد عمـل مـیکنـد و درنتیجه سبب افزایش دسترسی آنزیمها و میکروارگانیسمها برای مواد لیگنوسلولزی میگردد. علاوه بر این، حذف همـی سـلولز و لیگنین سبب افزایش هیدرولیز مواد لیگنوسلولزی نیز می شود،پیش تیمار آنزیمی با استفاده از لیپاز به همراه اشعه ماوراء بنفش انجام شد فاضلاب تهیه شده حاوی حدود ۲۰۰۰ میلـی گـرم در لیتر چربی بود

[۳۴]. با استفاده از این تکنیک، عملکرد زمان قرار گرفتن در معرض افزایش سرعت انتقال جرم و هیدرولیز ٪ 78در حداقلترین مقدار به دست آمد. یک یافته دیگر هنگامی بود که این تکنیک برای پیش تیمار از چوب انگور استفاده شد، طی آن مشاهده شد که ساختار شاخه های پسماندهای کشاورزی با محتوای لیگنوسلولزی بالا میباشد [۱۴]. این استفاده از پیش تیمار اولتراسوند و هیدرولیز آنزیمی سبب بهبود بیوگاز تولیدی از بقایای ذرت شد، اما برای شاخه های انگور پیش تیمار اولتراسوند تاثیر منفی داشت. با این حال، پیش تیمار آنزیمی به تنهایی با موفقیت سبب افزایش بیوگاز تولیدی از هر دو سوبسسترا شد .ترکیبی از پیش تیمارهای مکانیکی و حرارتی قبل از پیش تیمارآنزیمی می تواند هزینه را کاهش دهد. در پژوهش زمینسکی و کولاسکا [۳۵]، اثر پیش تیمار بقایای چغندرقند بر عملکرد بیوگاز تولیدی در هضم بی هوازی را بررسی کردند؛ مشاهده شد که هیدرولیز آنزیمی از اساس و تحت فشارهای حرارتی تحت فرایندهای به دست آمده سبب بالاترین میزان تولید بیوگاز تجمعی 898/7میلی لیتر در گرم جامد جامد می شود. به بیان دیگر تخریب مواد لیگنوسلولزی بر ساختار سلولزی مواد نیز تاثیرگذاراست. پس از شکستن پلیمرهای عظیم، ساختار کریستالی سلولز کاهش می یابد [۳۶]. از میان فرایندهای مختلف پیش تیمار، اکستروژن ساده، انعطاف پذیر و سازگار است. اکستروژن یک فرآیندی است که در آن مواد زیست توده یکنواخت مرطوب از یک بشکه اکسترودر با فشار از یک پیچ عبور می کند. این روش به عنوان یک روش فیزیکی موثر برای کاهش میزان زیست توده گزارش شده است که هضم بی هوازی مواد لیگنوسلولزی را افزایش می دهد [۳۷]. در پژوهش پریز رودریگز و همکاران [۳۸]، تأثیر این پیش درمان را به تنهایی و در ترکیب با هیدرولیز قلیایی و یا آنزیمی جهت بهبود تولید متان از طریق هضم بی هوازی بقایای ذرت بررسی کرده اند. در میان تمام پیش تیمارهای مورد مطالعه، اکستروژن و قلیایی و پیش تیمار هیدرولیز آنزیمی متداول است و بالاترین مقدار تولید متان را دارد. [۴۲]

نتیجه گیری

این بررسی به وضوح نشان می دهد که استفاده از آنزیم یک جایگزین برای غلبه بر محدودیت های مرتبط با هضم بی هوازی است. اثر هیدرولیز آنزیمی با این حال، در تهیه و پیش تیمار، بستگی بسیاری به ترکیب زیست توده و شرایط عملیاتی دارد؛ ولی راهبردهای کلیدی به منظور توسعه یافتن یک منبع انرژی جایگزین با سوخت های فسیلی برای جبران نیاز کنونی به انرژی و بعلاوه به منظور کاهش نگرانی های زیست محیطی (اعم از آلودگی حجم زیاد پسماند و گرم شدن جهانی) مطرح می شوند. از این رو اقتصاد و فن‌آوری ها تا حد زیادی بستگی به منابع انرژی تجدیدپذیر سازگار با معیارهای زیست محیطی ازقبیل بیوگاز دارند. فناوری بیوگاز علاوه بر مزیت های فراوانی که دارد با محدودیت های خاصی نیز همراه است. به طوری که تولید انرژی بدون حضور عوامل متوقف کننده یک کار دشوار است و برای اطمینان از توسعه پایدار، می‌بایست فناوری‌های دردسترس جاگزین شوند. پیشرفت های بیشتر باعث توجه مجدد و عمیق تری در فن آوری تولید بیوگاز شده است. در حالی که این موضوع اثرات بزرگی در کاهش مسائل عمده اقتصادی مطرح در جهان دارد. مرور کنونی به عوامل محدود کننده و ارزیابی پیشرفت های تکنولوژیکی اخیر همراه با جنبه‌های مختلف تولید بیوگاز مانند استفاده از مواد خام پایدار، میکروبی و پویایی های آنزیم، پارامتر بهینه سازی و فرایند تفکیک برای افزایش این تکنولوژی می پردازد. آماده سازی زیستی آنزیمی و شناخت میکروب های کارآمد، امکان تقویت انرژی هضم بی هوازی را به طور قابل ملاحظه ای فراهم می کند. لذا بهینه سازی پارامترهای مختلف برای سرعت بخشیدن به تولید بیوگاز در طول هضم بی هوازی نسبت به قبل و بعد آن ترجیح داده شده است. همچنین علی‌رغم توسعه طرح های هاضم چند مرحله ای به قصد دستیابی به موفقیت در فرایند تفکیک، تحقیقات

بیشتر برای رسیدن به عملکرد بهتر سیستم نیاز است.مطابق با اکثر تحقیقات بررسی شده در این پژوهش آنزیمها موجب بهبود فرآیند هضم بی هوازی می شوند و این می -تواند به تولید بهتر انرژی پاک از هضم بی هوازی و مدیریت بهتر پسماند منجر گردد. در آینده در زمینه توسعه و بهینـه سـازی هیدرولیز آنزیمی تحقیقات زیادی برای دستیابی به حداکثر سود از این تکنولوژی مورد نیاز است. علاوه بـر ایـن، بـرای کـاهش هزینه پیش تیمار با استفاده از آنزیم ها، تحقیقات بیشتر در مورد آماده سازی آنزیم، ثبات و فعالیت باید انجام شود.

منابع

1. Pilli S, More TT, Yan S, Tyagi RD, Surampalli RY, Zhang TC (2016) Anaerobic digestion or co-digestion for sustainable solid waste treatment/management. In: Sustainable solid waste management, pp 187–232. https://doi.org/10.1061/9780784414101.ch08

2- Gupta P, Singh RS, Sachan A, Vidyarthi AS, Gupta A. A re-appraisal on intensification of biogas production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012;16(7):4908-16.

3-Tarbaghia TM. Design of biogas plant to product energy with special application to Benghazi, Libya. Renewable energy. 1993;3(2):207-9.

4- Holm-Nielsen JB, Al Seadi T, Oleskowicz-Popiel P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. Bioresource technology. 2009;100(22):5478-84.

5- Ward AJ, Hobbs PJ, Holliman PJ, Jones DL. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. Bioresource technology. 2008;99(17):7928-40.

6- Curry N. Modeling and Design of a Food Waste to Energy System for an Urban Building: Concordia University Montréal, Québec, Canada; 2010.

7- Kiran EU, Trzcinski AP, Ng WJ, Liu Y. Bioconversion of food waste to energy: a review. Fuel. 2014;134:389-99.

8- Okonko IO, Adeola O, Aloysius F, Damilola A, Adewale O. Utilization of food wastes for sustainable development. EJEAFChe. 2009;8(4):120-44.

9- Hahn H, Krautkremer B, Hartmann K, Wachendorf M. Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;29:383-93.

10- Silva M, Naik T. Review of composting and anaerobic digestion of municipal solid waste and a methodological proposal for a mid-size city. Sustainable Construction Materials and Technologies. 2007;63.

11-Schlegel M, Kanswohl N, Rossel D, Sakalauskas A, editors. Essential technical parameters for effective biogas production. Agronomy Research; 2008: Estonian University of Life Sciences, Jõgeva Plant Breeding Institute, Estonian Research Institute of Agriculture.

12- Zhu JY, Pan X, Zalesny Jr RS. Pretreatment of woody biomass for biofuel production: energy efficiency, technologies, and recalcitrance. Applied microbiology and biotechnology. 2010;87(3):847-57.

13- Singh R, Shukla A, Tiwari S, Srivastava M. A review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of ethanol production potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;32:713-28.

14- Chaiprasert P. Biogas production from agricultural wastes in Thailand. J Sustainable Energ Environ Spec Issue. 2011:63-5.

15- Sagagi B, Garba B, Usman N. Studies on biogas production from fruits and vegetable waste. Bayero Journal of Pure and Applied Sciences. 2009;2(1):115-8.

16-Chandra R, Vijay VK, Subbarao PM, editors. A study on biogas generation from non-edible oil seed cakes: potential and prospects in India. The 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment; 2006.

17- Merlin Christy P, Gopinath LR, Divya D (2014) A review on anaerobic decomposition and

enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. Renew Sustain Energy Rev 34:167–173. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.010

18- Michalska K, Bizukojć M, Ledakowicz S (2015) Pretreatment of energy crops with sodium hydroxide and cellulolytic enzymes to increase biogas production. Biomass Bioenergy80:213–221. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.022

19- Madsen M, Holm-Nielsen JB, Esbensen KH (2011) Monitoring of anaerobic digestion processes: a review perspective. Renew Sustain Energy Rev 15(6):3141–3155. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.026

20- Parawira W (2012) Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogas production. Crit Rev Biotechnol 32(2):172–186. https://doi.org/10.3109/07388551.2011.595384

21- Quiñones TS, Plöchl M, Päzolt K, Budde J, Kausmann R, Nettmann E, Heiermann M (2012) Hydrolytic enzymes enhancing anaerobic digestion. In: Biogas production: pretreatment methods in anaerobic digestion, pp 157–198. https://doi.org/10.1002/9781118404089.ch6

22- Burgess JE, Pletschke BI (2008) Hydrolytic enzymes in sewage sludge treatment: a mini-review. Water SA 34(3):343–349

23- Diak J, Örmeci B, Kennedy KJ (2012) Effect of enzymes on anaerobic digestion of primary sludge and septic tank performance. Bioprocess Biosyst Eng 35(9):1577–1589. https://doi. org/10.1007/s00449-012-0748-7

24- Hettiaratchi JPA, Jayasinghe PA, Bartholameuz EM, Kumar S (2014) Waste degradation and gas production with enzymatic enhancement in anaerobic and aerobic landfill bioreactors. Bioresour Technol 159:433–436. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.026

25- Quiñones TS, Plöchl M, Budde J, Heiermann M (2012) Results of batch anaerobic digestion test - effect of enzyme addition. Agricult Eng Int: CIGR J 14(1):38–50

26- Donoso-Bravo A, Fdz-Polanco M (2013) Anaerobic co-digestion of sewage sludge and grease trap: assessment of enzyme addition. Process Biochem 48(5–6):936–940. https://doi.org/10. 1016/j.procbio.2013.04.005

27- Romero-Güiza MS, Vila J, Mata-Alvarez J, Chimenos JM, Astals S (2016) The role of

additives on anaerobic digestion: a review. Renew Sustain Energy Rev 58:1486–1499. https:// doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.094

28- Farid Haghighat Shoar, Reza Abdi, Bahman Najafi and Sina Faizollahzadeh Ardabili. The effect of thermochemical pretreatment on biogas production efficiency from kitchen waste using a novel lab scale digester. Renewable Energy Focus _ Volume 28, Number 00 _ March 2019.

29- Pérez-Rodríguez N, García-Bernet D, Domínguez JM (2016) Effects of enzymatic hydrolysis and ultrasounds pretreatments on corn cob and vine trimming shoots for biogas production. Bioresour Technol 221:130–138. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.013

30- Rollini M, Sambusiti C, Musatti A, Ficara E, Retinò I, Malpei F (2014) Comparative performance of enzymatic and combined alkaline-enzymatic pretreatments on methane production from ensiled sorghum forage. Bioprocess Biosyst Eng 37(12):2587–2595. https:// doi.org/10.1007/s00449-014-1235-0

31- Mallick P, Akunna JC, Walker GM (2010) Anaerobic digestion of distillery spent wash: influence of enzymatic pre-treatment of intact yeast cells. Bioresour Technol 101(6):1681–1685. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.089

32- Moon HC, Song IS (2011) Enzymatic hydrolysis of foodwaste and methane production using UASB bioreactor. Int J Green Energy 8(3):361–371. https://doi.org/10.1080/15435075.2011.

33- Uçkun Kiran E, Trzcinski AP, Liu Y (2015) Enhancing the hydrolysis and methane production potential of mixed food waste by an effective enzymatic pretreatment. Bioresour Technol 183:47–52. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.033

34- Yin Y, Liu YJ, Meng SJ, Kiran EU, Liu Y (2016) Enzymatic pretreatment of activated sludge, via anaerobic digestion. Appl Energy 179:1131–1137. https://doi.org/10.1016/j.apenergy. food waste and their mixture for enhanced bioenergy recovery and waste volume reduction2016.07.083

35- Meng Y, Luan F, Yuan H, Chen X, Li X (2017) Enhancing anaerobic digestion performance of crude lipid in food waste by enzymatic pretreatment. Bioresour Technol 224:48–55. https:// doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.052

36- Angelidaki I, Sanders W (2004) Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. Rev Environ Sci Biotechnol 3(2):117–129. https://doi.org/10.1007/s11157-004- 2502-3

37- Dors G, Mendes AA, Pereira EB, de Castro HF, Furigo A (2013) Simultaneous enzymatic hydrolysis and anaerobic biodegradation of lipid-rich wastewater from poultry industry. Appl Water Sci 3(1):343–349. https://doi.org/10.1007/s13201-012-0075-9

38- Domingues RF, Sanches T, Silva GS, Bueno BE, Ribeiro R, Kamimura ES, Franzolin Neto R, Tommaso G (2015) Effect of enzymatic pretreatment on the anaerobic digestion of milk fat for biogas production. Food Res Int 73:26–30. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.027

39- Forgács G, Lundin M, Taherzadeh MJ, Horváth IS (2013) Pretreatment of chicken feather waste for improved biogas production. Appl Biochem Biotechnol 169(7):2016–2028. https://doi.org/10.1007/s12010-013-0116-3

40- Kanmani P, Kumaresan K, Aravind J (2015) Pretreatment of coconut mill effluent using celite-immobilized hydrolytic enzyme preparation from Staphylococcus pasteuri and its impact on anaerobic digestion. Biotechnol Prog 31(5):1249–1258. https://doi.org/10.1002/btpr.2120

41- Elsamadony M, Tawfik A, Danial A, Suzuki M (2015) Use of Carica papaya enzymes for enhancement of H2 production and degradation of glucose, protein, and lipids. Energy Proc975–980. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.308

42- Chen YT, Wang FS (2011) Determination of kinetic parameters for enzymatic cellulose hydrolysis using hybrid differential evolution. Int J Chem React Eng 9

43-Yang Q, Luo K, Xm Li, Db Wang, Zheng W, Gm Zeng, Jj Liu (2010) Enhanced efficiency of biological excess sludge hydrolysis under anaerobic digestion by additional enzymes. Bioresour Technol 101(9):2924–2930. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.012

44-. Luo K, Yang Q, Li XM, Yang GJ, Liu Y, Wang DB, Zheng W, Zeng GM (2012) Hydrolysis kinetics in anaerobic digestion of waste activated sludge enhanced by a-amylase. Biochem
Eng J 62:17–21. https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.12.009

45-Jha AK, Li J, Nies L, Zhang L (2011) Research advances in dry anaerobic digestion process of solid organic wastes. Afr J Biotechnol 10(65):14242–14253

46- Gomez-Tovar F, Celis LB, Razo-Flores E, Alatriste-Mondragón F (2012) Chemical and enzymatic sequential pretreatment of oat straw for methane production. Bioresour Technol116:372–378. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.109
2008.05.027

47- Adulkar TV, Rathod VK (2014) Ultrasound assisted enzymatic pre-treatment of high fat content dairy wastewater. Ultrason Sonochem 21(3):1083–1089. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.11.017