

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
نشریه فنی

فرایند تولید انرژی از بیوگاز

نگارش:

علی اصغر رجبعلی پور چشمه گز

سال انتشار:

بهار ۱۳۸۹



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

عنوان نشریه:	فرایند تولید انرژی از بیوگاز
نگارش:	علی اصغر رجبعلی پور چشمه‌گر
ناشر:	مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
سال انتشار:	بهار ۱۳۸۹
شمارگان:	جلد ۵۰۰
ویراستار:	فرحناز سهراب
طراح و صفحه‌آرا:	بنفشه فرزانه
لیتوگرافی، چاپ، صحافی:	مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

آدرس: کرج ، بلوار شهید فهمیده، صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۸۴۵
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
تلفن: ۲۷۰۵۳۲۰، ۲۷۰۵۲۴۲ و ۲۷۰۸۳۵۹ (۰۲۶۱)، دورنگار: ۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶۱)

پایگاه اطلاعاتی مؤسسه: www.aeri.ir

مخاطبان نشریه

کارشناسان، مروجان، مهندسان ناظر و کشاورزان

اهداف آموزشی

شما خوانندگان گرامی در این نشریه با:

فناوری تولید بیوگاز به عنوان یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر با
مزایای بسیار مفید و گوناگون که اصول آن بر یک چرخه طبیعی و
زیست محیطی استوار است آشنا خواهید شد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲	مقدمه
۴	تجزیه بی‌هوازی مواد آلی
۴	خصوصیات بیوگاز
۶	آزمایش‌های لازم
۷	پارامترهای طراحی و عملیاتی
۷	میزان تولید و ترکیب اجزاء بیوگاز
۸	تأثیر دما
۱۰	تأثیر pH
۱۱	تأثیر نسبت کربن - نیتروژن - فسفر
۱۲	سرعت بارگیری سیستم
۱۲	مواد سمی
۱۳	مقایسه بین تصفیه هوازی و بی‌هوازی
۱۴	ساختار سیستم‌های هضم بی‌هوازی
۱۵	هاضم
۱۶	روش‌های اختلاط در هاضم
۱۷	روش‌های گرمایش هاضم
۱۷	هضم لجن فاضلاب
۱۸	انواع هاضم
۲۸	نتیجه‌گیری
۲۹	منابع مورد استفاده



مقدمه

انرژی را می‌توان جوهره حیات و مایه رشد آن دانست، ساده‌ترین تعریف از آن «*توانایی انجام کار*» است. در فرهنگ‌های فارسی برای لغت Energy معادل فارسی «*کارمایه*» را معرفی می‌نماید. ۳۰۰ سال پیش از این شیخ‌بهایی دانشمند بزرگ ایرانی گازهای متصاعد شده از فاضلاب را در نقطه‌ای جمع‌آوری نموده و به‌وسیله افروختن دائمی شمعی، آب مخزن حمام معروف شیخ‌بهایی اصفهان را گرم می‌کرد. بعد از او، ۱۳۸ سال پیش پاستور دریافت باکتری‌ها در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد قادرند در غیاب حضور اکسیژن برخی فاضلاب‌ها را تجزیه نموده و گاز متان تولید کنند. هم‌اکنون در کشورهایمانند ژاپن و هندوستان هزاران دستگاه از این نوع در اندازه‌های روستایی و شهری ساخته شده است. در کشورهای پیشرفته نظیر آلمان از این دستگاه‌ها در مقیاس صنعتی برای تصفیه فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی بهره‌برداری می‌شود.

گاز حاصل از تخمیر (Fermentation) بی‌هوازی مواد آلی تولیدی توسط فضولات حیوان، گیاه و انسان توسط باکتری‌ها را اصطلاحاً بیوگاز (Biogas) می‌نامند. بیوگاز عمدتاً شامل متان، دی‌اکسیدکربن و ازت است. این گاز یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی است که توسط هاضم‌های (Digester)^۱ بی‌هوازی و تبدیل زیستی مواد آلی به متان تولید می‌شود، فرایندی که در راستای حفظ محیط زیست نیز می‌باشد و در آن مواد

۱- هاضم عبارت است از مخزنی که عملیات هضم مواد آلی ضایعاتی جهت تولید بیوگاز به صورت هوازی یا غیر هوازی در آن صورت می‌گیرد.



زائد آلی تجزیه می شوند. مواد آلی به سه دسته مهم از مولکول ها یعنی پروتئین ها، کربوهیدرات ها و چربی ها دسته بندی می شوند. پروتئین ها علاوه بر اینکه به عنوان آنزیم نقش عمده ای را دارا هستند به صورت یک منبع ذخیره نیتروژن نیز عمل می کنند. چربی ها و کربوهیدرات ها مواد اصلی ذخیره کننده انرژی می باشند. بیوگاز محصول تخمیر بی هوازی این مواد یعنی پروتئین ها، کربوهیدرات ها و چربی ها است. فرایند تولید بیوگاز مزایای مهمی دارد که برخی از آنها عبارتند از (Anon, 2008):

- ✦ حفظ سوخت های فسیلی و چوب برای استفاده مصارف صنعتی غیرسوختی
- ✦ حفظ محیط زیست و کاهش آلودگی جو
- ✦ افزایش سطح بهداشت شهری و روستایی
- ✦ تولید کود غنی (کمپوست) و با کیفیت جهت مصارف کشاورزی
- ✦ تولید سوخت گازی متان که می تواند برای پخت و پز، گرمایش و تولید برق استفاده شود.

در این نشریه با فناوری تولید بیوگاز به عنوان یکی از منابع انرژی های تجدیدپذیر با مزایای بسیار مفید و گوناگون که اصول آن بر یک چرخه طبیعی و زیست محیطی استوار است آشنا خواهید شد. همچنین، جنبه های مختلف این فناوری مورد بررسی قرار گرفته و اهمیت و مزایای این گاز به خصوص در زمینه رفع مشکلات زیست محیطی و تولید انرژی مورد نیاز نشان داده خواهد شد.



تجزیه بی‌هوازی مواد آلی

ترکیبات آلی حاصل از ارگانسیم‌های حیاتی به طور بی‌هوازی به وسیله سه گروه عمده از باکتری‌ها شامل باکتری‌های تخمیری، اسیدساز و متان‌ساز تجزیه می‌شوند. محصولات واسطه حاصله یعنی استات، هیدروژن و دی‌اکسیدکربن به عنوان مواد اولیه به مصرف باکتری‌های متان‌ساز می‌رسند. باکتری‌های متان‌ساز تولید متان و دی‌اکسید کربن نموده که در واقع محصول نهایی فرایند تجزیه بی‌هوازی است (شکل ۱). حداکثر میزان تولید گاز از تجزیه کامل بی‌هوازی هر کیلوگرم BOD^۱، در حدود ۳۵۰ لیتر متان است. البته در عمل حداکثر به ۸۰ درصد این میزان تبدیل تئوری می‌توان رسید (کشتکار و شیخ‌الاسلامی، ۱۳۷۷).

خصوصیات بیوگاز

بیوگاز، گازی است بی‌رنگ و اشتعال‌پذیر که شامل ۶۰ تا ۷۰ درصد متان، ۳۰ تا ۴۰ درصد دی‌اکسید کربن، کمتر از یک درصد سولفید هیدروژن و مقادیر جزئی هیدروژن، آمونیاک و اکسید نیتروژن است. از احتراق کامل هر متر مکعب بیوگاز در حدود ۲۲ تا ۲۶ مگا ژول انرژی گرمایی تولید می‌شود. از نظر جرمی احتراق هر کیلوگرم بیوگاز در

1- Biological Oxygen Demand (BOD)

BOD معیار تجزیه بیولوژیکی مواد آلی موجود در ضایعات دامی، کشاورزی و انسانی از طریق میزان اکسیژن مصرفی می‌باشد.

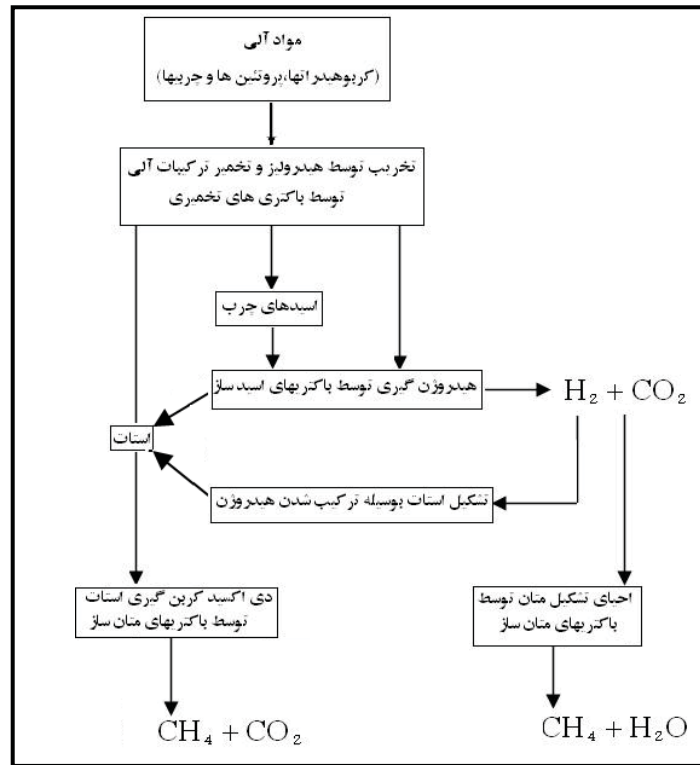


حدود ۳۳/۵ مگا ژول انرژی تولید می نماید. در حالی که احتراق هر کیلوگرم متان ۵۲ مگا ژول، نفت کوره ۴۳/۵ مگا ژول و بنزین ۴۷/۱ مگا ژول انرژی گرمایی تولید می کند. متان که ترکیب اصلی بیوگاز را تشکیل می دهد گازی است اختناق آور و علاوه بر این زمانیکه به نسبت حجمی ۵ تا ۱۵ درصد با هوا مخلوط شود، قابل انفجار و اشتعال خواهد شد. بنابراین لازم است به طور دائم هنگام تولید، به کارگیری، ذخیره سازی، و احتراق بیوگاز نکات ایمنی را رعایت کرد. دی اکسید کربن ارزش حرارتی واحد حجم بیوگاز تولیدی را کاهش می دهد و سولفید هیدروژن نیز باعث ایجاد خوردگی و آلودگی هوا هنگام احتراق بیوگاز می شود. در بعضی موارد قبل از استفاده از بیوگاز لازم است این گازها توسط عملیات اسکرابینگ^۱ جدا شوند. دی اکسید کربن معمولاً به وسیله شستشوی حباب های گاز توسط آب از بیوگاز جدا می گردد و سولفید هیدروژن نیز علاوه بر روش های شیمیایی می تواند به وسیله عبور گاز از بستر اکسید آهن یا اکسید روی جدا شود (کشتکار و شیخ الاسلامی، ۱۳۷۷).

1- Scrubbing Process

عملیات اسکرابینگ: نوعی عملیات جداسازی گاز-گاز است که در آن یک جزء از یک مخلوط گازی در یک مایع حل می شود.





شکل ۱- تجزیه بی‌هوازی مواد آلی

آزمایش‌های لازم

قبل از تصفیه فاضلاب به وسیله روش‌های زیست محیطی ابتدا باید درباره میزان تصفیه‌پذیری فاضلاب توسط این روش‌ها و همچنین مواد سمی فاضلاب، آزمایش‌هایی اجرا کرد. انجام آزمایشاتی روی پسماند تصفیه شده قبل از دفع آن به محیط از نظر میزان آلودگی باقیمانده و مواد شیمیایی مضر از اهمیتی مشابه برخوردار است. پارامترهایی که

باید مورد آزمایش و بررسی قرار گیرند به نوع فاضلاب بستگی دارند. برای مثال در مورد فاضلاب‌های شهری تعیین مقدار فاضلاب، دما، BOD، COD¹ و pH مقدار مواد ته‌نشین‌پذیر و میزان مواد جامد معلق اهمیت زیادی دارد. حال آن‌که آزمایشاتی در مورد تعیین میزان کل نیتروژن، میزان کل فسفر، میکروب‌های پاتوژن، مواد شیمیایی مضر، آزمایش کمیت، بو و رنگ فاضلاب چندان ضروری نیست و تنها انجام چنین آزمایشاتی در مورد پسماند تصفیه شده آن هم در صورتی که قرار باشد پسماند در رودخانه‌ها یا دریاچه‌ها دفع شود، لازم است.

پارامترهای طراحی و عملیاتی

انتخاب نوع راکتور، دما، pH، زمان اقامت، شدت جریان خوراک، غلظت مواد جامد در خوراک، نسبت کربن- نیتروژن- فسفر و تخمینی از میزان بیوگاز تولیدی برای طراحی یک فرایند تخمیر بی‌هوازی ضرورت دارد.

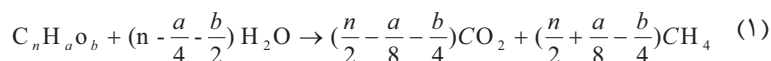
میزان تولید و ترکیب اجزاء بیوگاز

مقدار و ترکیب بیوگاز به نوع خوراک بستگی دارد و از فرمول زیر محاسبه می‌شود (کشتکار و شیخ‌الاسلامی، ۱۳۷۷).

1 - Chemical Oxygen Demand

COD معیار تجزیه شیمیایی (اکسایش) آلودگی‌های موجود در ضایعات دامی، کشاورزی و انسانی از طریق میزان مواد شیمیایی مصرفی می‌باشد.





در جدول ۱ مقدار و ترکیب اجزاء بیوگاز حاصل از سه گروه عمده از مواد آلی مطابق فرمول بالا ارائه شده است. حجم بیوگاز تولیدی به ازای واحد جرم خوراک نیز یک کمیت متغیر است (جدول ۲) و به عواملی نظیر نوع هاضم، دما و سرعت بارگیری خوراک در هاضم بستگی دارد.

جدول ۱- مقدار ترکیب اجزاء تئوری بیوگاز حاصل از مواد آلی مختلف

ماده آلی	ترکیب وزنی		ترکیب حجمی	حجم گاز تولیدی از تخمیر یک کیلوگرم ماده آلی	
	CH (درصد)	CO (درصد)		متان (متر مکعب)	بیوگاز (متر مکعب)
کربوهیدرات	۲۷	۷۳	۵۰	۰/۳۷	۰/۷۵
چربی	۴۸	۵۲	۷۲	۱/۰۴	۱/۴۴
پروتئین	۲۷	۷۳	۵۰	۰/۴۹	۰/۹۸

تأثیر دما

دما به عنوان یکی از مهمترین عوامل محیطی سرعت تولید بیوگاز را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دو محدوده دمایی بهینه برای فرایند تخمیر بی‌هوایی گزارش شده است، محدوده دمایی مزوفیلیک^۱

1- Mesophilic Anaerobic Fermentation

تخمیر بی‌هوایی مزوفیلیک: تخمیری که در حرارت‌های ملایم انجام‌پذیر است. این تخمیر توسط باکتری‌هائی صورت می‌گیرد که در شرایط حرارتی ملایم قادر به فعالیت هستند. حداکثر فعالیت این باکتری‌ها در ۳۰ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد. این باکتری‌ها درجات حرارت ۱۰ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد را تحمل می‌کنند.



(۳۰-۴۰) درجه سانتی گراد و محدوده دمای ترموفیلیک^۱ (۶۰-۵۵) درجه سانتی گراد که در این محدوده دمایی سرعت تجزیه مواد آلی دو برابر محدوده قبلی است. نرخ تولید متان در دماهای کمتر از ۲۰ درجه سانتی گراد پایین است و در زیر ۱۰ درجه سانتی گراد عملاً متوقف می شود. فرایند هضم لجن شهری در محدوده دمای مزوفیلیک به خصوص در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد بسیار متداول است. بنابراین آنچه که بیشتر اهمیت دارد این است که بدانیم تولید بیوگاز نسبت به تغییرات دما بسیار حساس است. اگر تغییرات دما زیاد باشد و یا این که مدت زمان زیادی به طول انجامد در آن صورت تولید بیوگاز کاملاً متوقف می شود. تأثیر دما روی میزان بیوگاز تولیدی از لجن فاضلاب را در شکل ۲ می توان دید. دمای بهینه فرایند تخمیر تا حدودی نسبت به نوع مواد زائد آلی تغییر می کند.

1- Thermophilic Anaerobic Fermentation

تخمیر بی هوازی ترموفیلیک: تخمیری که در حرارت های بالا انجام پذیر است. این تخمیر توسط باکتری هایی صورت می گیرد که در شرایط حرارتی بالا قادر به فعالیت هستند. حداکثر فعالیت این باکتری ها در ۵۵ تا ۷۰ درجه سانتی گراد صورت می گیرد. این باکتری ها درجات حرارت ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد را تحمل می کنند.



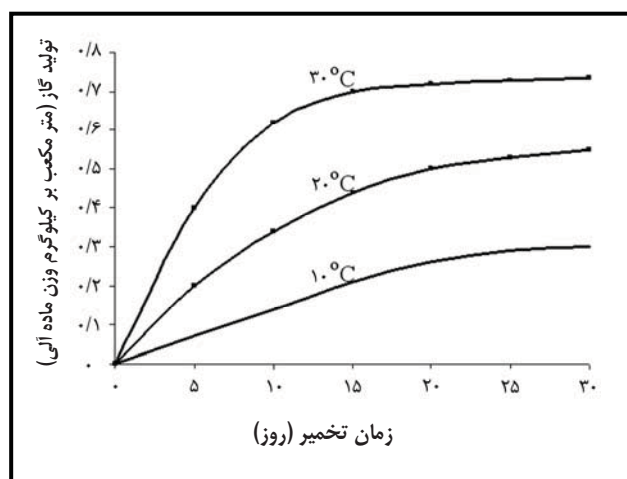
جدول ۲- میزان بیوگاز تولیدی از مواد زائد مختلف

نوع مواد زائد	حجم بیوگاز نسبت به وزن ماده آلی (VS) (متر مکعب بر کیلوگرم)	درصد حجمی متان	حجم مواد زائد در روز (مترمکعب)
فاضلاب	۰/۳۱-۰/۷۴	۶۸	۰/۰۲۸
فضولات گاو	۰/۳۷-۰/۵	۶۵-۷۰	۰/۲۴
فضولات مرغ	۰/۳۱-۰/۶۲	۶۰	۰/۰۱۴
صنایع خمیر مایه	۰/۴۹	-	-
صنایع گوشت	۰/۱۵-۰/۶۶	-	-
صنایع نشاسته ذرت	۰/۶۷	-	-
صنایع روغن گیری	۰/۶۸	-	-

تأثیر pH

عامل دیگری که تولید بیوگاز را تحت تأثیر قرار می‌دهد pH است که تابع مقدار بی‌کربنات‌ها، میزان قلیائیت، حلالیت CO₂ و غلظت اسیدهای فرار است. اگر به هر دلیلی موازنه موجود بین فعالیت باکتری‌های اسیدساز و باکتری‌های متان‌ساز مختل شود، سیستم در جهت اسیدی شدن که بسیار مضر است پیش می‌رود. مقدار pH بهینه در مورد فرایند هضم فاضلاب‌های شهری خیلی نزدیک به مقدار خنثی (۶/۶-۷/۸) گزارش شده است.





شکل ۲- تأثیر دما بر میزان بیوگاز تولیدی از تخمیر لجن فاضلاب

تأثیر نسبت کربن- نیتروژن- فسفر

مقادیر کافی از نیتروژن و فسفر برای فرایند تخمیر بی‌هوازی باید در دسترس باشد. علاوه بر کربن، اکسیژن و هیدروژن یک جزء عمده دیگر در بافت سلولی باکتری‌ها، نیتروژن است و بنابراین برای رشد باکتری‌ها مقادیر زیادی از آن مورد نیاز است. در DNA، ATP، غشاهای سلولی و آنزیم‌ها فسفر وجود دارد بنابراین این ماده نیز یک جزء اساسی در ساختمان باکتری‌ها به‌شمار می‌رود. از میان ترکیبات آلی، پروتئین و اوره و از میان ترکیبات غیر آلی آمونیاک به عنوان منابع غنی از نیتروژن به‌شمار می‌روند. فسفات‌های غیر آلی نیز به عنوان یک منبع غنی از فسفر به‌کار می‌روند.



سرعت بارگیری سیستم

یکی از مهمترین پارامترها در طراحی هاضم، سرعت بارگیری است که بیانگر مقدار مواد جامد تجدیدپذیر در واحد حجم خوراک ورودی به هاضم است. بالا بودن بیش از حد سرعت بارگیری یا به عبارت دیگر پایین بودن بیش از اندازه زمان اقامت در هاضم باعث کاهش مقدار pH شده، عملکرد باکتری‌هایی متان ساز را متوقف نموده و فرایند را به مرحله‌ای سوق خواهد داد که از لحاظ زیست محیطی متوقف شود. وقتی که تخمیر اسیدی غالب شود، موادی با بوی زننده نظیر H_2S و آمین‌های نوع اول تولید خواهند شد. بنابراین ایجاد موازنه بین نسبت تخمیر اسیدی و تخمیر متانی مانع از ایجاد بوی زننده می‌شود.

مواد سمی

زمانی که مقدار COD یک فاضلاب به میزان قابل توجهی بیشتر از مقدار BOD آن فاضلاب باشد (نسبت COD/BOD در فاضلاب‌های شهری در حدود ۱/۵ تا ۲/۵ است)، لازم است که بررسی شود آیا مواد سمی مسبب آن می‌باشند یا نه. برای این منظور باید از آزمایش‌های سمیت استفاده شود. وجود مواد آلی نظیر فنل‌ها، مواد حشره‌کش، مواد پاک‌کننده و هیدروکربن‌های کلردار نظیر کلروفرم و مواد غیرآلی نظیر کلریدها، فلزات سنگین و دیگر ترکیبات سمی باید به طور اخص در آزمایشگاه تعیین شوند. از آنجایی که تجهیزات فنی مورد نیاز برای بررسی وجود این گونه مواد شیمیایی مضر گران قیمت می‌باشند، لذا این گونه آزمایش‌ها فقط باید روی فاضلاب‌هایی که مظنون به دارا بودن



این گونه ترکیبات هستند انجام گیرد. در جدول ۳ غلظت‌های بهینه و حد مجاز برای بعضی از نمک‌های غیر آلی آورده شده است (کشتکار و شیخ‌الاسلامی، ۱۳۷۷).

جدول ۳- غلظت‌های بهینه، متوسط و حداکثر حد مجاز یون‌های غیر آلی در مخزن هاضم

یون غیر آلی	غلظت بهینه	متوسط حد مجاز	حداکثر مجاز نهایی
سدیم (میلی گرم در لیتر)	۱۰۰-۲۰۰	۳۵۰۰-۵۵۰۰	۸۰۰۰
پتاسیم (میلی گرم در لیتر)	۲۰۰-۴۰۰	۲۵۰۰-۴۵۰۰	۱۲۰۰۰
کلسیم (میلی گرم در لیتر)	۱۰۰-۲۰۰	۲۵۰۰-۴۵۰۰	۸۰۰۰
منیزیم (میلی گرم در لیتر)	۷۵-۱۵۰	۱۰۰۰-۱۵۰۰۰	۳۰۰۰
آمونیم (میلی گرم در لیتر)	۵۰-۱۰۰۰	۱۵۰۰۰	۸۰۰۰
سولفید (میلی گرم در لیتر)	۱-۱۰	۱۰۰	۲۰۰
کبالت (میلی گرم در لیتر)	۲۰	نامعلوم	نامعلوم
کروم (درصد)	نامعلوم	۲	۳

مقایسه بین تصفیه هوازی و بی هوازی

تولید متان که یک سوخت است و تولید لجن کمتر که ناشی از سرعت رشد کمتر باکتری‌های بی‌هوازی است دو مزیت عمده روش بی‌هوازی نسبت به روش هوازی در تصفیه خانه فاضلاب‌ها است. در مقابل، سرعت رشد کم باکتری‌های بی‌هوازی باعث می‌شود که زمان اقامت در فرایندهای بی‌هوازی طولانی‌تر از فرایندهای هوازی شود. عیب دیگر تصفیه بی‌هوازی تولید سولفید هیدروژن (H_2S) است که در واقع محصول جانبی تجزیه بی‌هوازی پروتئین‌ها یا حاصل از سولفات‌ها است.



فرایند تولید انرژی از بیوگاز

علاوه بر این بعضی خوراک‌ها نظیر لیگنین فقط به طور جزئی در غیاب اکسیژن می‌توانند تجزیه شوند. به طور خلاصه در جدول ۴ مقایسه‌ای بین سیستم‌های تصفیه هوازی و بی‌هوازی نشان داده شده است.

جدول ۴- مقایسه‌های بین جنبه‌های مختلف سیستم‌های تصفیه هوازی و بی‌هوازی

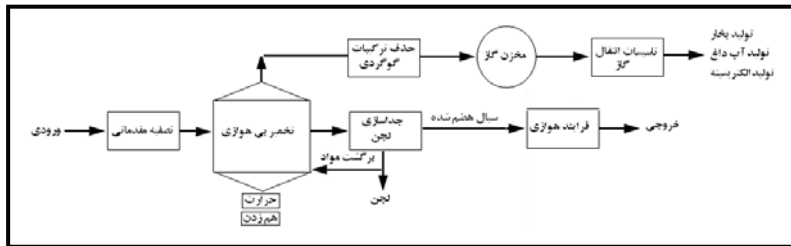
سیستم بی‌هوازی	سیستم هوازی	مورد
بار BOD زیاد (۱۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر)	بار BOD کم (۲۰۰-۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر)	خصوصیات خوراک
مقدار مواد جامد زیاد (۲۰۰۰۰۰-۲۰۰۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر)	مقدار مواد جامد کم (۵۰۰-۰ میلی‌گرم در لیتر)	میزان کاهش بار آلودگی
۷۰-۸۵ درصد کاهش BOD	۸۰-۹۰ درصد کاهش BOD	تولید لجن
۶۰ درصد کاهش COD	۷۰-۹۰ درصد کاهش COD	حذف نیترژن
مقدار لجن کمتری تولید می‌شود	مقدار لجن زیادتری تولید می‌شود	مصرف انرژی
مقدار کل نیترژن و فسفر تغییر نمی‌کند	مقدار کل نیترژن کاهش و فسفر تقریباً ثابت می‌ماند	هزینه‌های جاری
تولید کننده انرژی است	مصرف کننده انرژی است	
ارزان تر است	گران تر است	

ساختار سیستم‌های هضم بی‌هوازی

ساختار کلی سیستم‌های هضم بی‌هوازی (شکل ۳) شامل تصفیه اولیه فاضلاب، مخازن هضم بی‌هوازی، واحدهای نگهداری فرایند، جداسازی گاز، و تصفیه نهایی لجن می‌باشد.



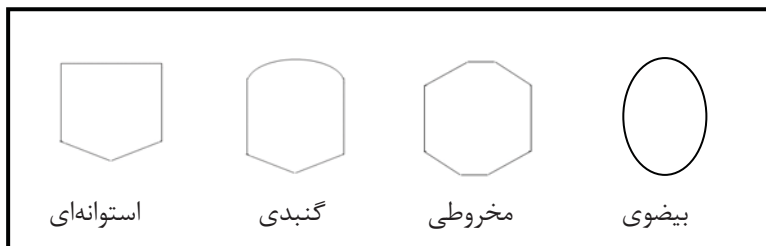
رجبعلی پور چشمه گز



شکل ۳- ساختار کلی سیستم هضم بی هوازی

هاضم

مخازن هضم اشکال گوناگونی دارند. شکل ۴ بعضی از این اشکال را که در حال حاضر در واحدهای تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته اند را نشان می دهد.



شکل ۴- اشکال مختلف هاضم‌های بی هوازی

الف) نوع استوانه‌ای

این نوع طراحی متداول است اما دارای فضای مرده زیادی است به طوری که عمل اختلاط به طور کامل در تمام حجم سیستم انجام نمی گیرد.



(ب) نوع گنبدی

این نوع مخزن به علت مقاومت در برابر فشارهای بالا می‌تواند در ابعاد بزرگ ساخته شود.

(ج) نوع مخروطی

این نوع مخزن دارای فضای مرده کوچکی برای عمل اختلاط می‌باشد. به عبارت دیگر در این حالت عمل اختلاط به طور مؤثر انجام می‌پذیرد و لجن تولیدی نیز به راحتی تخلیه می‌شود.

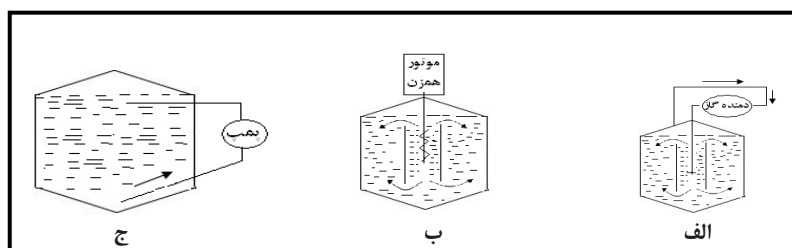
(د) نوع بیضوی

ساخت این نوع مخزن در تصفیه فاضلاب شهری از سال ۱۹۶۰ در آلمان غربی متداول بوده است. این نوع شکل یک طراحی خوب محسوب می‌گردد و انتهای مخزن دارای شیب مناسبی است که عمل تخلیه لجن ته‌نشین شده را ممکن می‌سازد. در ساخت هاضم‌های بیضوی از بتن می‌توان استفاده نمود، بنابراین به علت مقاومت زیاد در برابر فشار می‌توانند در ابعاد بزرگ ساخته شوند.

روش‌های اختلاط در هاضم

عمل اختلاط مواد درون هاضم باعث افزایش تولید گاز می‌شود. بنابراین وسایل و روش‌های متفاوتی برای اختلاط نظیر اختلاط توسط پمپ، اختلاط مکانیکی و اختلاط توسط گاز پیشنهاد شده است (شکل ۵).





شکل ۵- سیستم‌های اختلاط در هاضم

(الف- مخلوط‌کن گازی، ب- مخلوط‌کن مکانیکی؛ ج- مخلوط‌کن پمپی)

روش‌های گرمایش هاضم

روش‌های مورد قبول مختلفی برای عمل گرمایش هاضم با دبی خوراک بالا وجود دارد. عمده‌ترین آنها عبارتند از:

- ✦ عبور مداوم محتویات داخل مخزن از یک مبدل حرارتی نصب شده در بیرون هاضم،
- ✦ عبور آب گرم از درون کویل‌های حرارتی نصب شده در درون هاضم،
- ✦ عبور آب گرم از درون ژاکت اطراف هاضم،
- ✦ تزریق مستقیم بخار آب به درون هاضم،

هضم لجن فاضلاب

فرایند هضم بی‌هوازی اغلب اوقات برای تصفیه لجن حاصل از فاضلاب انسانی، احتمالاً به این دلیل که این نوع فاضلاب در مقیاس زیاد جمع‌آوری می‌شود به کار می‌رود. بیش از ۹۹ درصد فاضلاب را آب



تشکیل می‌دهد. مواد جامد موجود در فاضلاب در مراحل اولیه تصفیه از فاضلاب جدا شده به طوری که غلظت آب در فاضلاب به ۹۵ درصد می‌رسد. لجن حاصل از این قسمت (لجن اولیه) به طور بی‌هوازی تصفیه می‌شود. سپس قسمت رقیق شده فاضلاب به وسیله روش‌های هوازی و از طریق انحلال اجباری هوا در درون فاضلاب به منظور تسریع تجزیه مواد آلی توسط باکتری‌های هوازی، تصفیه می‌شود. فرایند هوازی خود تولید لجن دیگری می‌نماید. این لجن ثانویه از فاضلاب جدا شده و همراه با لجن اولیه به طور بی‌هوازی تصفیه می‌شود. فاضلاب تصفیه شده نیز که اینک دارای مواد آلی کمی است می‌تواند بدون ترس از آلودگی محیط زیست وارد رودخانه‌ها یا دریاچه‌ها شود. در جدول ۵ ترکیب اجزاء تشکیل دهنده لجن اولیه، لجن ثانویه و فضولات خوک برای مقایسه آورده شده است. همچنین در جدول ۶ بعضی از ویژگی‌های مواد زائد مختلف قبل از اینکه تصفیه شوند، نشان داده شده است.

انواع هاضم

هاضم‌ها انواع مختلفی دارند. هاضم‌ها می‌توانند به دو دسته کلی جریان ناپیوسته و جریان پیوسته تقسیم شوند. در جدول ۷ بعضی از ویژگی‌های هاضم‌های مختلف ارائه شده است. ساده‌ترین آنها نوع ناپیوسته است. در هاضم‌های ناپیوسته، مواد آلی در یک مخزن قرار گرفته و سپس به طور بی‌هوازی با توجه به نوع خوراک در یک دوره زمانی دو تا شش ماهه هضم می‌شوند. کاربرد اصلی این گونه هاضم‌ها



در مواقعی است که بخواهند قبل از ساخت یک واحد صنعتی کامل، آزمایشاتی را روی یک ماده زائد خاص به منظور تعیین میزان تجزیه پذیری آن به عمل آورند.

جدول ۵- مقایسه بین درصد تقریبی مواد آلی تشکیل دهنده مواد زائد مختلف

ماده آلی	ماده زائد	لجن اولیه (درصد)	لجن ثانویه (درصد)	فضولات دام (درصد)
کربوهیدرات	۳۴	۲۴	۵۴	
چربی	۱۴	۲۰	۸	
پروتئین	۱۹	۲۱	۲۱	
خاکستر	۳۵	۲۸	۱۸	

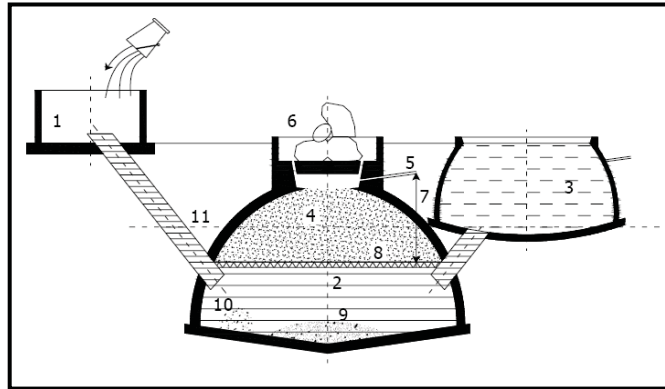
جدول ۶- بار آلودگی مواد زائد مختلف

مواد زائد	بار آلودگی	BOD (میلی گرم در لیتر)	COD (میلی گرم در لیتر)	مواد جامد معلق (میلی گرم در لیتر)
فاضلاب	۲۰۰-۴۰۰	۳۰۰-۶۰۰	۱۰۰-۴۰۰	
صنایع گوشت و لبنیات	۷۰۰-۲۰۰۰	۲۰۰۰-۶۰۰۰	۶۰۰-۱۱۰۰	
صنایع نوشابه سازی	۴۰۰-۱۵۰۰	۶۰۰-۵۰۰۰	۲۵۰-۶۵۰	
مواد زائد کشاورزی	۵۰۰-۶۰۰۰۰	۱۰۰۰-۱۵۰۰۰۰	۸۰۰-۵۰۰۰	

در هاضم‌های جریان پیوسته، با توجه به اسمشان، خوراک در فواصل زمانی منظم وارد مخزن می‌شود. در حالت تئوری برای داشتن حداکثر بازده، خوراک باید به طور مداوم وارد مخزن شود. اما به دلایل عملی مخزن به طور دائم تغذیه نمی‌شود و متداول‌ترین دوره ورود خوراک به طور روزانه می‌باشد. برای داشتن شرایط پایا در سیستم لازم است به همان میزان تغذیه روزانه عمل تخلیه از مخزن نیز انجام گیرد. انواع هاضم‌های زیر جزء مخازن جریان پیوسته محسوب می‌شوند.

✦ واحد با گنبد ثابت: شامل هاضم، قسمت نگهداری گاز، حوضچه ورود مواد اولیه، و مخزن تعادل می‌باشد. واحد با آجر و ملاتی از شن و سیمان ساخته می‌شود. دقت زیادی در هنگام ساخت مخزن به خصوص موقع پلاستر نمودن سطح داخلی مخزن به منظور آب‌بندی نمودن واحد مورد نیاز است. نوع چینی و نوع Deenbandhu (هندی) جزء این دسته از هاضم‌ها محسوب می‌شوند (شکل ۶).

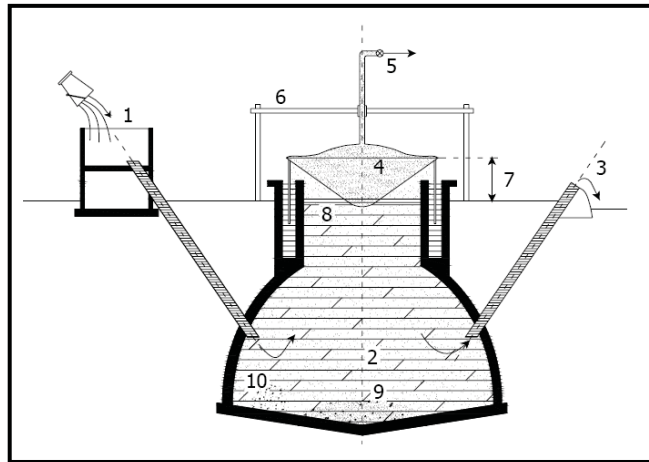




شکل ۶- هاضم نوع گنبدی ثابت

(شامل: ۱- مخزن همزن با لوله ورودی، ۲- هاضم، ۳- مخزن خروجی، ۴- مخزن نگهدارنده گاز، ۵- لوله گاز، ۶- درپوش ورودی (با استفاده از وزنه‌ها مهار شده است)، ۷- اختلاف ارتفاع برابر با فشار گاز (سانتی‌متر آب)، ۸- لایه زلال، ۹- انباشتگی لجن غلیظ، ۱۰- انباشتگی سنگ و شن، ۱۱- خط مبدا (صفر)، ارتفاع پر شدن مخزن بدون فشار گاز)

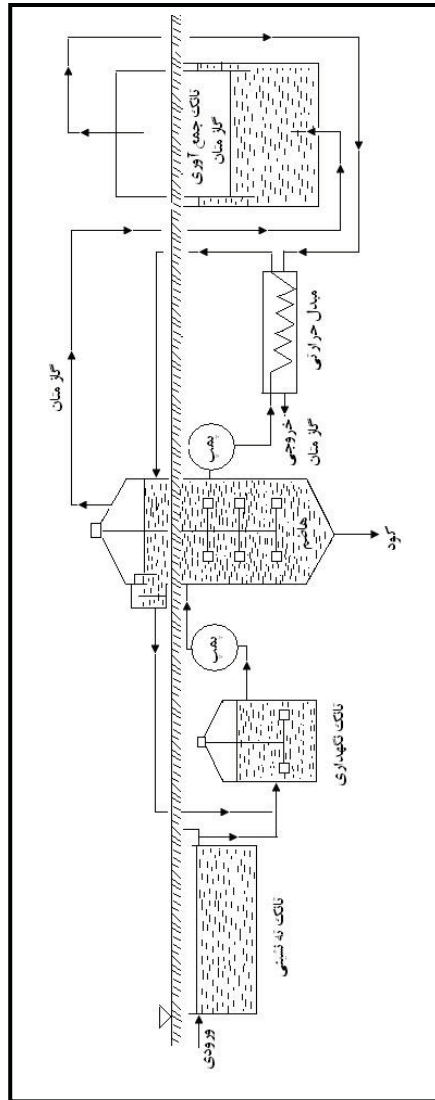
✦ **واحد با گنبد شناور:** از دو بخش مجزای مخزن نگهداری گاز و مخزن هاضم تشکیل شده است. این نوع واحد نیز همانند واحد گنبدی ثابت از آجر و سیمان ساخته شده و دارای لوله‌های برای ورود و خروج مواد می‌باشد. هاضم هندی پیشنهادی KVIC جزء این دسته از هاضم‌ها می‌باشد (شکل ۷).



شکل ۷- هاضم نوع گنبدی شناور

(شامل: ۱- مخزن همزن با لوله ورودی، ۲- هاضم، ۳- جریان سرریز از لوله خروجی، ۴- مخزن نگهدارنده گاز که در سطح مایع شناور است، ۵- خروجی گاز با خمش لوله اصلی، ۶- اسکلت راهنما برای مخزن گاز، ۷- اختلاف ارتفاع برابر با فشار گاز، ۸- لایه شناور هنگامی که از الیاف به عنوان خوراک استفاده شود)

✦ **هاضم با دبی خوراک بالا:** طبق تعریف، هاضم با دبی خوراک بالا به واحدی اطلاق می‌شود که دارای سیستم بهم زن به منظور رسیدن به اختلاط کامل و همچنین وسیله‌ای برای گرمایش سیستم به منظور اطمینان از انجام واکنش در دمای بهینه باشد (شکل ۸).



شکل ۸- هاضم با دبی خوراک بالا

جدول ۱-۷- مقایسه خوراک مناسب و حجم مواد جامد انواع مختلف هاضم‌ها

نوع هاضم	نوع خوراک مناسب	حجم و میزان مواد جامد
هاضم ناپیوسته	کشاورزی، تغذیه ناپیوسته و موردی، خوراک‌هایی از قبیل مواد فیبری یا موادی که به سختی هضم می‌شوند	حجم‌های کم، غلظت مواد جامد تا ۲۵ درصد
هاضم با گنبد ثابت و شناور	کشاورزی، تغذیه پیوسته یا منظم خوراک‌هایی با میزان مواد فیبری کم	حجم‌های بزرگتر، غلظت مواد جامد بین ۵-۱۵ درصد
هاضم با دبی خوراک بالا	کشاورزی، صنعتی	غلظت مواد جامد بین ۱-۱۵ درصد
فرایند تماس بی‌هوایی	صنعتی و کشاورزی	غلظت کم مواد جامد
فرایند فیلتر بی‌هوایی	صنعتی	غلظت کم مواد جامد
فرایند توده میکروبی متراکم	صنعتی	غلظت کم مواد جامد

جدول ۲-۷- مقایسه زمان‌های اقامت متداول، میزان اختلاط مواد لازم، دمای عملیاتی و نحوه تولید گاز انواع مختلف هاضم‌ها

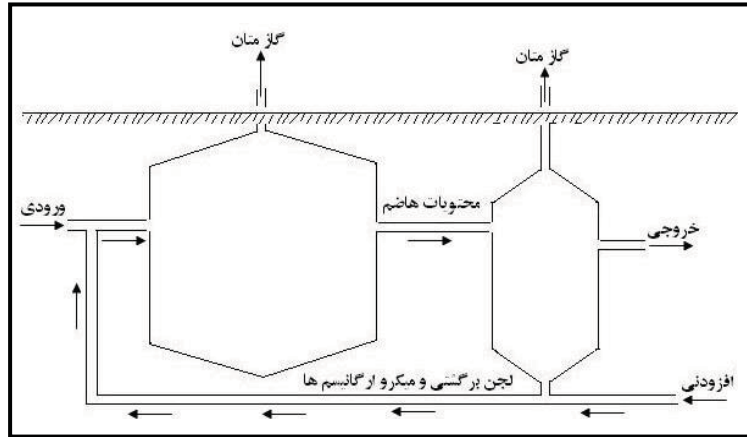
نوع هاضم	زمان‌های اقامت متداول	اختلاط مواد لازم	دمای عملیاتی	نحوه تولید گاز
هاضم ناپیوسته	۶۰ روز یا بیشتر	کمتر مورد نیاز است	معمولاً ۳۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد	نامنظم و غیردائم
هاضم با گنبد ثابت و شناور	۲۵ تا ۶۰ روز	گاهی نیاز است	معمولاً ۳۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد	دائمی و مداوم
هاضم با دبی خوراک بالا	۵ تا ۲۰ روز	دائم	معمولاً ۳۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد	دائمی و مداوم
فرایند تماس بی‌هوایی	۵ تا ۰/۵ روز	دائم	معمولاً ۳۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد	دائمی و مداوم
فرایند فیلتر بی‌هوایی	۵ تا ۰/۵ روز	نیازی نیست	معمولاً ۳۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد	دائمی و مداوم
فرایند توده میکروبی متراکم	۰/۱ تا ۲ روز	نیازی نیست	معمولاً ۳۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد	دائمی و مداوم



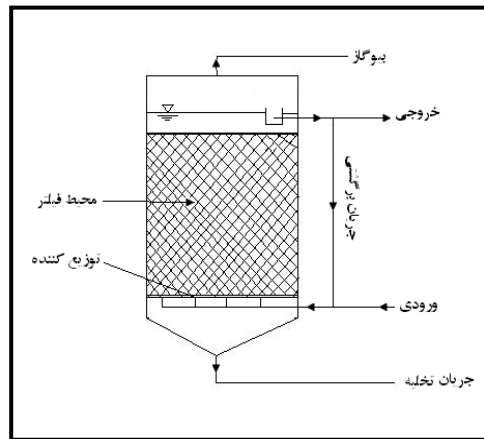
✦ فرایند تماس بی هوازی: در این فرایند قسمتی از لجن تخمیر شده پس از مخلوط شدن با خوراک ورودی دوباره به داخل سیستم بازگردانده می شود. باکتری های موجود در لجن برگشتی، خوراک تازه را از باکتری های فعال غنی ساخته و در نتیجه فرایند تخمیر بلافاصله روی خوراک شروع می شود. از آنجایی که باکتری ها مرتباً به داخل سیستم بازگردانده می شوند بنابراین زمان اقامت مؤثر باکتری ها در سیستم بسیار بزرگتر از زمان اقامت جریان مایع در سیستم است (شکل ۹).

✦ فرایند فیلتر بی هوازی: همان طور که از شکل ۱۰ می توان دید راکتور شامل محیط متخلخلی است که می تواند از خرده های سنگ و چوب گرفته تا قطعات پلاستیکی با ابعاد و اشکال مختلف ساخته شود. میکروارگانیسم های تجمع یافته علاوه بر اینکه در فضای خالی بستر قرار می گیرند، به سطح خود بستر نیز می چسبند. بنابراین جمعیتی از باکتری ها با دانسیته بالا می تواند در داخل راکتور نگهداری شود که این امر باعث انعقاد و چسبیدن سایر باکتری ها خواهد شد.



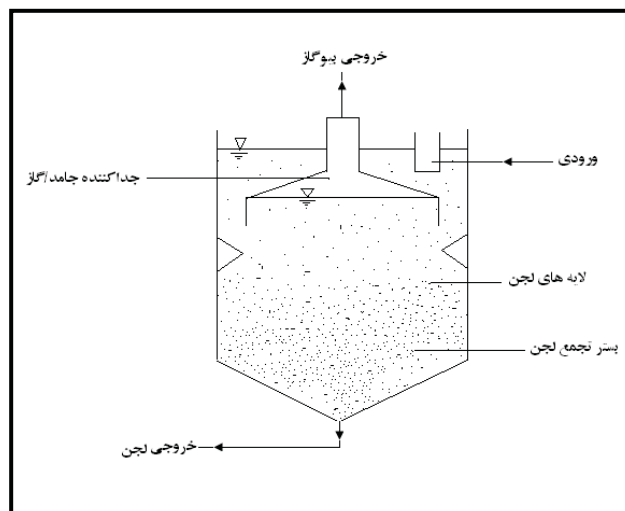


شکل ۹- فرایند تماس بی هوازی



شکل ۱۰- فرایند فیلتر بی هوازی

✦ فرایند توده میکروبی متراکم: استفاده از راکتورهای UASB^۱ برای تصفیه بعضی از خوراک‌های صنعتی مناسب است. در این فرایند با عبور جریان خوراک از میان توده میکروبی متراکم موجود در راکتور مواد آلی خوراک توسط باکتری‌ها تجزیه می‌شود. از جمله مزایای این روش عدم نیاز به اختلاط مکانیکی و جریان بازگشتی لجن می‌باشد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- فرایند توده میکروبی متراکم

۱- راکتور (UASB) (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). یکی از راکتورهای بیولوژیکی بی‌هوازی می‌باشد که در چند دهه اخیر همزمان با توجه محققین به کاراتر بودن سیستم‌های تصفیه بی‌هوازی نسبت به هوازی در تصفیه فاضلاب، کاربرد و موفقیت بسیاری داشته است.



✦ **هاضم چند مرحله‌ای:** فرایند تخمیر بی‌هوایی عمدتاً توسط دو گروه مجزا از باکتری‌ها انجام می‌گیرد. اسیدهای آلی که محصول مرحله اول فرایند تخمیر می‌باشد، در مرحله بعد توسط سایر میکروارگانیزم‌ها به متان تبدیل می‌شوند. در یک هاضم چند مرحله‌ای هر یک از این مراحل در مخازن جداگانه‌ای انجام می‌گیرند. بدین ترتیب برای هر یک از این دو دسته از باکتری‌ها، شرایط عملیاتی بهینه گشته و در نتیجه سرعت کلی فرایند به حداکثر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

رشد فزاینده مصرف انرژی در جهان، اتمام‌پذیری منابع فسیلی و معضلات زیست محیطی از جمله عواملی هستند که انجام تحقیقات گسترده در جهت دستیابی به انرژی‌های تجدیدپذیر و اجرای پروژه‌هایی نظیر تولید بیوگاز را در سراسر جهان ترغیب کرده‌اند. بخش بیوگاز مرکز انرژی‌های نو سعی دارد با یک برنامه هدف‌دار گامی در انسجام و انجام پروژه‌های مربوطه بردارد که گزارش حاضر نمونه‌ای از این فعالیت‌ها بوده و در راستای همین برنامه است. بدیهی است که سازمان‌ها و ارگان‌های دولتی نظیر وزارت کشاورزی با حمایت مالی از این گونه طرح‌ها می‌توانند علاقمندان را در ساخت واحدهای بیوگاز که برای مناطق روستایی و یا صنایع دامپروری مفید باشد، یاری نمایند. لازم به ذکر است که رشد روزافزون ساخت واحدهای بیوگاز در مناطق روستایی کشورهای نظیر چین و هندوستان تنها با کمک



حمایت‌های دولتی و همکاری ارگان‌های ذیربط این کشورها میسر شده است، امری که امیدواریم در کشور عزیز ما ایران نیز، به ویژه با توجه به مزایای با ارزشی که تولید بیوگاز دارد، هرچه زودتر تحقق یابد.

منابع مورد استفاده

- ۱- رجبعلی پور چشمه گز، ع. ا. ۱۳۷۵. فرایند تولید انرژی از بیوگاز در روستاهای اسفراین. گزارشات طرح تحقیقاتی، مرکز تحقیقات مهندسی جهاد سازندگی سابق.
- ۲- کشتکار، ع. و شیخ الاسلامی، ج. ۱۳۷۷. فرایند تولید بیوگاز. دومین کنفرانس سراسری روستا و انرژی، ۶-۷ خرداد. ساری.
- 3- Anon. 2008. The state of food and agriculture. Biofuels: prospects, risks and opportunities. FAO Pub. ISBN 978-92-5-105980-7. 10-56.