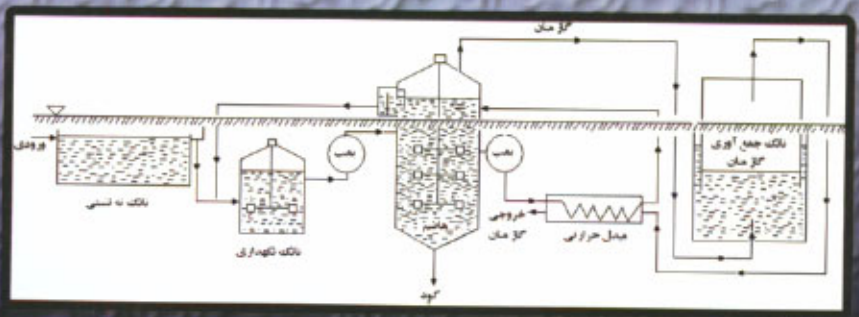
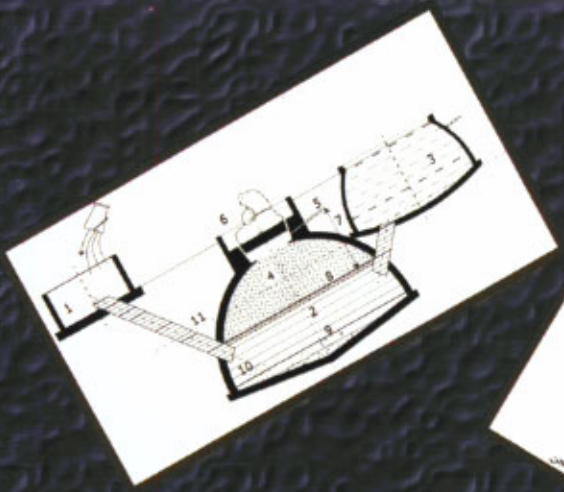
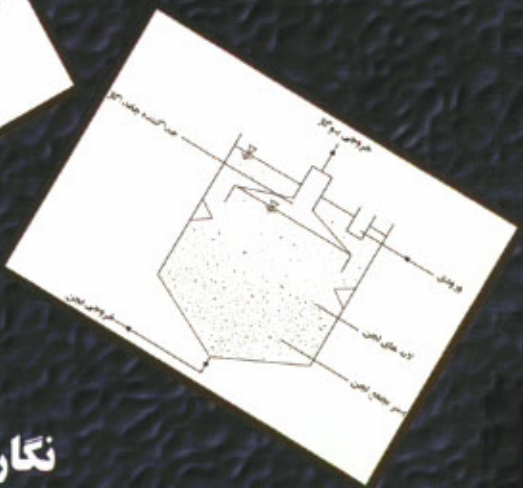
وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
AERI

فرایند تولید انرژی از بیوگاز







نگارش
علی اصغر رجبعلی پور چشمه گز

نشریه فنی، شماره ۳۰، سال ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
نشریه فنی

فرایند تولید انرژی از بیوگاز

نگارش:
علی‌اصغر رجبعلی‌پور چشمه‌گز

سال انتشار:
بهار ۱۳۸۹

د
٦١٢
١٠ج

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

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

آدرس: کرج ، بلوار شهید فهمیده، صندوق پستی: ۸٤٥-۳۱٥۸٥
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
تلفن: ۲۷۰٥۳۲۰، ۲۷۰٥۲٤۲ و ۲۷۰۸۳٥۹ (۰۲٦۱)، دورنگار: ۲۷۰٦۲۷۷ (۰۲٦۱)

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

عنوان	صفحه
مقدمه	۲
تجزیه بی‌هوازی مواد آلی	٤
خصوصیات بیوگاز	٤
آزمایش‌های لازم	٦
پارامترهای طراحی و عملیاتی	۷
میزان تولید و ترکیب اجزاء بیوگاز	۷
تأثیر دما	۸
تأثیر pH	۱۰
تأثیر نسبت کربن- نیتروژن- فسفر	۱۱
سرعت بارگیری سیستم	۱۲
مواد سمی	۱۲
مقایسه بین تصفیه هوازی و بی‌هوازی	۱۳
ساختار سیستم‌های هضم بی‌هوازی	۱٤
هاضم	۱۵
روش‌های اختلاط در هاضم	۱٦
روش‌های گرمایش هاضم	۱۷
هضم لجن فاضلاب	۱۷
انواع هاضم	۱۸
نتیجه‌گیری	۲۸
منابع مورد استفاده	۲۹

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. هم اکنون در کشورهایی مانند 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، دی اکسیدکربن و ازت است. این گاز یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی است که توسط هاضم‌های (Digester)[1] 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 می‌شوند. مواد آلی به سه دسته مهم از مولکول‌ها یعنی پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و چربی‌ها دسته‌بندی می‌شوند. پروتئین‌ها علاوه بر اینکه به عنوان آنزیم نقش عمده‌ای را دارا هستند به صورت یک منبع ذخیره نیتروژن نیز عمل می‌کنند. چربی‌ها و کربوهیدرات‌ها مواد اصلی ذخیره‌کننده انرژی می‌باشند. **بیوگاز محصول تخمیر بی‌هوازی این مواد یعنی پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و چربی‌ها است.** فرایند تولید بیوگاز مزایای مهمی دارد که برخی از آنها عبارتند از (Anon, 2008):

- حفظ سوخت‌های 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 می‌تواند برای پخت و پز، گرمایش و تولید برق استفاده شود.

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. همچنین، جنبه‌های 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 ارگانیسم‌های حیاتی به طور بی‌هوازی به وسیله سه گروه عمده از باکتری‌ها شامل باکتری‌های تخمیری، اسیدساز و متان ساز تجزیه می‌شوند. محصولات واسطه حاصله یعنی استات، هیدروژن و دی اکسیدکربن به عنوان مواد اولیه به مصرف باکتری‌های متان‌ساز می‌رسند. باکتری‌های متان‌ساز تولید متان و دی اکسید کربن نموده که در واقع محصول نهایی فرایند تجزیه بی‌هوازی است (شکل ۱). حداکثر میزان تولید گاز از تجزیه کامل بی‌هوازی هر کیلوگرم BOD[1]، 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

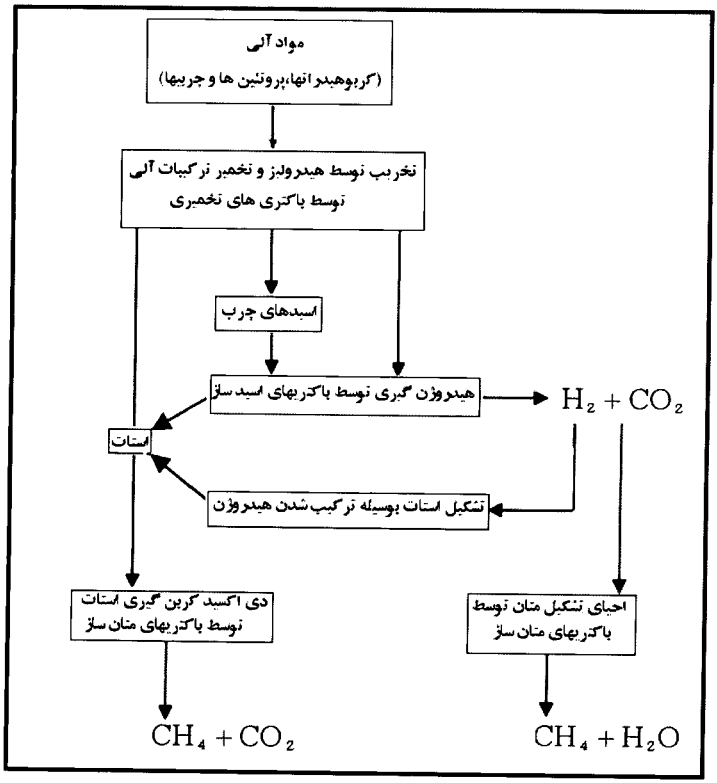
1- Biological Oxygen Demand (BOD)

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 می‌نماید. درحالی‌که احتراق هر کیلوگرم متان ۵۲ مگا ژول، نفت کوره ۴۳/۵ مگا ژول و بنزین ۴۷/۱ مگا ژول انرژی گرمایی تولید می‌کند. متان که ترکیب اصلی بیوگاز را تشکیل می‌دهد گازی است اختناق‌آور 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، به‌کارگیری، ذخیره‌سازی، و احتراق بیوگاز نکات ایمنی را رعایت کرد. دی‌اکسیدکربن ارزش حرارتی واحد حجم بیوگاز تولیدی را کاهش می‌دهد و سولفید هیدروژن نیز باعث ایجاد خوردگی و آلودگی هوا هنگام احتراق بیوگاز می‌شود. در بعضی موارد قبل از استفاده از بیوگاز لازم است این گازها توسط عملیات اسکربینگ[1] جدا شوند. دی‌اکسیدکربن معمولاً به وسیله شستشوی حباب‌های گاز توسط آب از بیوگاز جدا می‌گردد و سولفید هیدروژن نیز علاوه بر روش‌های شیمیایی می‌تواند به وسیله عبور گاز از بستر اکسید آهن یا اکسید روی جدا شود (کشتکار و شیخ‌الاسلامی، ۱۳۷۷).

1- Scrubbing Process

عملیات اسکربینگ: نوعی عملیات جداسازی گاز-گاز است که در آن یک جزء از یک مخلوط گازی در یک مایع حل می‌شود.



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، COD[1] 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 درصورتی‌که 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 بی هوازی 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 معیارتجزیه شیمیایی (اکسایش) آلودگی‌های موجود در ضایعات دامی،کشاورزی و انسانی از طریق میزان مواد شیمیایی مصرفی می‌باشد.

$$C_nH_aO_b + (n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2})H_2O \rightarrow (\frac{n}{2} - \frac{a}{8} - \frac{b}{4})CO_2 + (\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4})CH_4 \quad (1)$$

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)	CH (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 بی‌هوازی گزارش شده است، محدوده دمایی **مزوفیلیک**[1]

1- Mesophilic Anaerobic Fermentation

تخمیر بی هوازی مزوفیلیک: تخمیری که در حرارت‌های ملایم انجام‌پذیر است. این تخمیر توسط باکتری‌هائی صورت می‌گیرد که در شرائط 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 درجهٔ سانتی‌گراد را تحمل می‌کنند.

(۴۰-۳۰) درجهٔ سانتی‌گراد و محدوده دمای **ترموفیلیک**[1] (۶۰-۵۵) درجهٔ سانتی‌گراد که در این محدوده دمایی سرعت تجزیه مواد آلی دو برابر محدوده قبلی است. نرخ تولید متان در دماهای کمتر از ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد پایین است و در زیر ۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد عملاً متوقف می‌شود. فرایند هضم لجن شهری در محدوده دمای مزوفیلیک به خصوص در دمای ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد 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 می‌شود. تأثیر دما روی میزان بیوگاز تولیدی از لجن فاضلاب را در شکل ۲ می‌توان دید. دمای بهینه فرایند تخمیر تا حدودی نسبت به نوع مواد زائد آلی تغییر می‌کند.

1- Thermophilic Anaerobic Fermentation

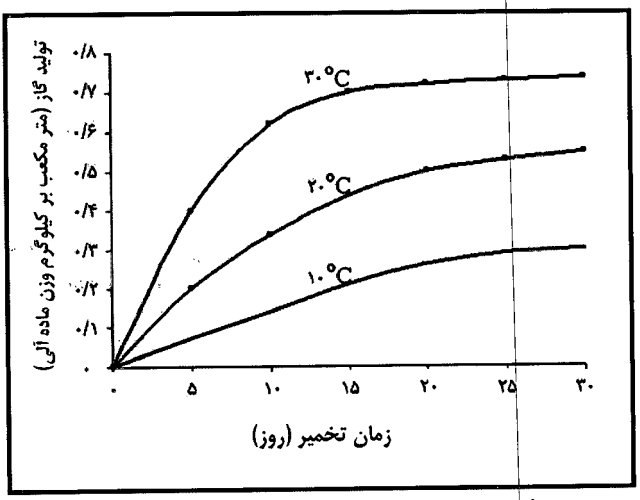
تخمیر بی‌هوازی ترموفیلیک: تخمیری که در حرارت‌های بالا انجام‌پذیر است. این تخمیر توسط باکتری‌هائی صورت می‌گیرد که در شرایط حرارتی بالا قادر به فعالیت هستند. حداکثر فعالیت این باکتری‌ها در ۵۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد. این باکتری‌ها درجات حرارت ۵۰ تا ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد را تحمل می‌کنند.

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	۰/۵-۰/۶۶	-	-
صنایع نشاسته ذرت	۰/۶۷	-	-
صنایع روغن‌گیری	۰/۶۸	-	-

تأثیر pH

عامل دیگری که تولید بیوگاز را تحت تأثیر قرار می‌دهد pH است که تابع مقدار بی‌کربنات‌ها، میزان قلیائیت، حلالیت CO_2 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 آنجایی‌که تجهیزات فنی مورد نیاز برای بررسی وجود این گونه مواد شیمیایی مضر گران قیمت می‌باشند، لذا این‌گونه 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 (میلی‌گرم در لیتر)	۱۰۰-۲۰۰	۳۵۰۰-۵۵۰۰	۸۰۰۰
پتاسیم (میلی‌گرم در لیتر)	۲۰۰-۴۰۰	۲۵۰۰-۴۵۰۰	۱۲۰۰۰
کلسیم (میلی‌گرم در لیتر)	۱۰۰-۲۰۰	۲۵۰۰-۴۵۰۰	۸۰۰۰
منیزیم (میلی‌گرم در لیتر)	۷۵-۱۵۰	۱۰۰۰-۱۵۰۰۰	۳۰۰۰
آمونیم (میلی گرم در لیتر)	۵۰-۱۰۰۰	۱۵۰۰۰	۸۰۰۰
سولفید (میلی‌گرم در لیتر)	۱-۱۰	۱۰۰	۲۰۰
کبالت (میلی‌گرم 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.

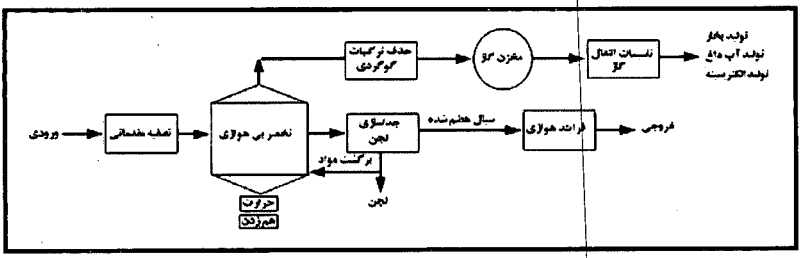
علاوه بر این بعضی خوراک‌ها نظیر لیگنین فقط به طور جزئی در غیاب اکسیژن می‌توانند تجزیه شوند. به طور خلاصه در جدول ۴ مقایسه‌ای بین سیستم‌های تصفیه هوازی و بی هوازی نشان داده شده است.

جدول ٤- مقایسه‌های بین جنبه‌های مختلف سیستم‌های تصفیه هوازی و بی هوازی

مورد	سیستم هوازی	سیستم بی هوازی
خصوصیات خوراک	بار BOD کم (۲۰۰- ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) مقدار مواد جامد کم (۵۰۰-۰ میلی‌گرم در لیتر)	بارBODزیاد (۱۰۰۰۰۰-۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) مقدار مواد جامد زیاد (۲۰۰۰۰۰-۲۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر)
میزان کاهش بار آلودگی	۹۰-۸۰ درصد کاهشBOD	۸۵-۷۰ درصد کاهشBOD
	۹۰-۷۰ درصد کاهشCOD	۶۰ درصد کاهش COD
تولید لجن	مقدار لجن زیادتری تولید می‌شود	مقدار لجن کمتری تولید می‌شود
حذف نیتروژن	مقدار کل نیتروژن کاهش و فسفر تقریباً ثابت می‌ماند	مقدار کل نیتروژن و فسفر تغییر نمی‌کند
مصرف انرژی	مصرف‌کننده انرژی است	تولید کننده انرژی است
هزینه‌های جاری	گران‌تر است	ارزان‌تر است

ساختار سیستم‌های هضم بی هوازی

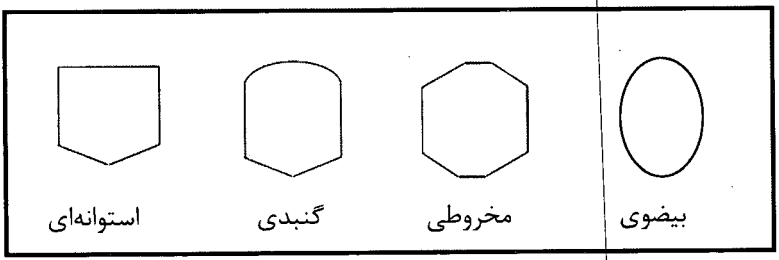
ساختار کلی سیستم‌های هضم بی‌هوازی (شکل ۳) شامل تصفیه اولیه فاضلاب، مخازن هضم بی‌هوازی، واحدهای نگهداری فرایند، جداسازی گاز، و تصفیه نهایی لجن می‌باشد.



شکل ۳- ساختار کلی سیستم هضم بی‌هوازی

هاضم

مخازن هضم اشکال گوناگونی دارند. شکل ۴ بعضی از این اشکال را که در حال حاضر در واحدهای تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ٤- اشکال مختلف هاضم‌های بی‌هوازی

الف) نوع استوانه‌ای

این نوع طراحی متداول است اما دارای فضای مرده زیادی است به‌طوری‌که عمل اختلاط به طور کامل در تمام حجم سیستم انجام نمی‌گیرد.

ب) نوع گنبدی

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

ج) نوع مخروطی

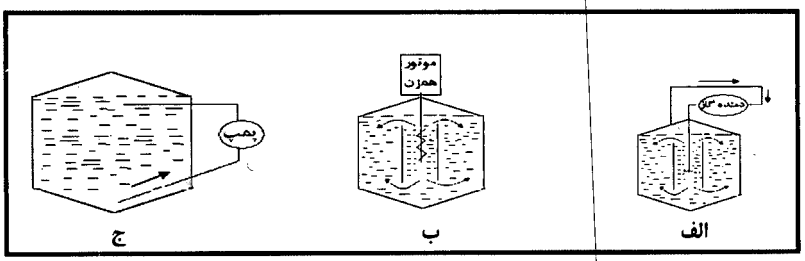
این نوع مخزن دارای فضای مرده کوچکی برای عمل اختلاط می‌باشد. به عبارت دیگر در این حالت عمل اختلاط به طور مؤثر انجام می‌پذیرد و لجن تولیدی نیز به راحتی تخلیه می‌شود.

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 به‌علت 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،
- عبورآب 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 جمع‌اوری می‌شود به‌کار می‌رود. بیش از ۹۹ درصد فاضلاب را آب

تشکیل می‌دهد. مواد جامد موجود در فاضلاب در مراحل اولیه تصفیه از فاضلاب جدا شده به‌طوری‌که 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 به‌وسیله 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 تجزیه‌پذیری آن به عمل آورند.

جدول ۵- مقایسه بین درصد تقریبی مواد آلی تشکیل‌دهنده مواد زائد مختلف

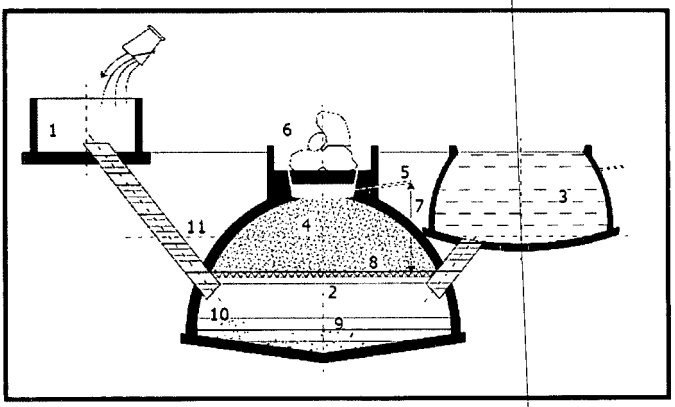
ماده زائد / ماده آلی	لجن اولیه (درصد)	لجن ثانویه (درصد)	فضولات دام (درصد)
کربوهیدرات	۳۴	۲۴	۵۴
چربی	۱۴	۲۰	۸
پروتئین	۱۹	۲۱	۲۱
خاکستر	۳۵	۲۸	۱۸

جدول ٦- بار آلودگی مواد زائد مختلف

بار آلودگی / مواد زائد	BOD (میلی‌گرم در لیتر)	COD (میلی‌گرم در لیتر)	مواد جامد معلق (میلی‌گرم در لیتر)
فاضلاب	۲۰۰-۴۰۰	۳۰۰-۶۰۰	۱۰۰-۴۰۰
صنایع گوشت و لبنیات	۷۰۰-۲۰۰۰	۲۰۰۰-۶۰۰۰	۶۰۰-۱۱۰۰
صنایع نوشابه‌سازی	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.

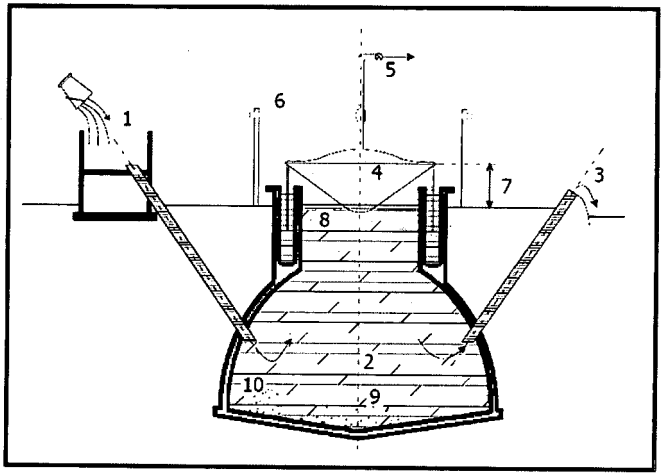
- **واحد با گنبد ثابت:** شامل هاضم، قسمت نگهداری گاز، حوضچه ورود مواد اولیه، و مخزن تعادل می‌باشد. واحد با آجر و ملاتی از شن و سیمان ساخته می‌شود. دقت زیادی در هنگام ساخت مخزن به خصوص موقع پلاستر نمودن سطح داخلی مخزن به منظور آب‌بندی نمودن واحد مورد نیاز است. نوع چینی و نوع Deenbandhu (هندی) جزء این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



شکل ٦- 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)

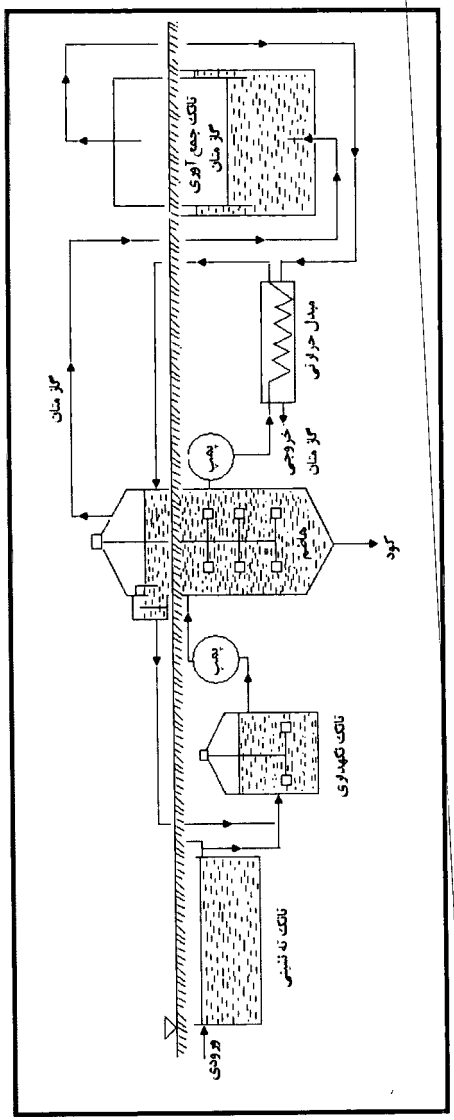
✦ **واحد با گنبد شناور:** از دو بخش مجزای مخزن نگهداری گاز و مخزن هاضم تشکیل شده است. این نوع واحد نیز همانند واحد گنبدی ثابت از آجر و سیمان ساخته شده و دارای لوله‌های برای ورود و خروج مواد می‌باشد. هاضم هندی پیشنهادی KVIC جزء این دسته از هاضم‌ها می‌باشد (شکل ۷).



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

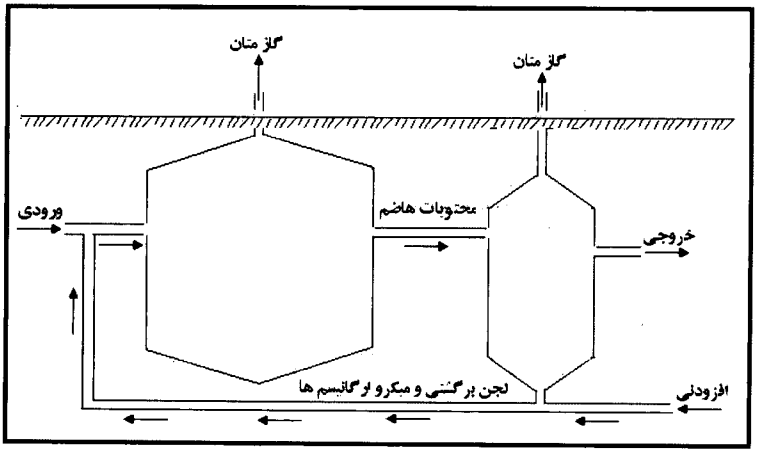
جدول ۱-۷- مقایسه خوراک مناسب و حجم مواد جامد انواع مختلف هاضم‌ها

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	حجم های بزرگتر، غلظت موادجامد بین ۱۵-۵ درصد
هاضم با دبی خوراک بالا	کشاورزی، صنعتی	غلظت مواد جامد بین ۱۵-۱ درصد
فرایند تماس بی‌هوازی	صنعتی و کشاورزی	غلظت کم مواد جامد
فرایند فیلتر بی‌هوازی	صنعتی	غلظت کم مواد جامد
فرایند توده میکروبی متراکم	صنعتی	غلظت کم مواد جامد

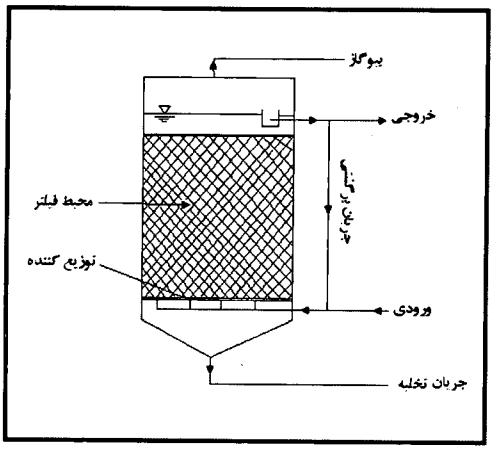
جدول ۲-۷- مقایسه زمان‌های اقامت متداول، میزان اختلاط موادلازم، دمای عملیاتی و نحوه تولیدگاز انواع مختلف هاضم‌ها

نوع هاضم	زمان‌های اقامت متداول	اختلاط مواد لازم	دمای عملیاتی	نحوه تولیدگاز
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 بی‌هوازی	۵ تا ۰/۵ روز	دائم	معمولاً ۳۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد	دائمی و مداوم
فرایند فیلتر بی‌هوازی	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 بی‌هوازی:** در این فرایند قسمتی از لجن تخمیر شده پس از مخلوط شدن با خوراک ورودی دوباره به داخل سیستم بازگردانده می‌شود. باکتری‌های موجود در لجن برگشتی، خوراک تازه را از باکتری‌های فعال غنی ساخته و در نتیجه فرایند تخمیر بلافاصله روی خوراک شروع می‌شود. از آنجایی که باکتری‌ها مرتباً به داخل سیستم بازگردانده می‌شوند بنابراین زمان اقامت مؤثر باکتری‌ها در سیستم بسیار بزرگتر از زمان اقامت جریان مایع در سیستم است (شکل ۹).
- **فرایند فیلتر بی هوازی:** همان‌طورکه از شکل ۱۰ می‌توان دید راکتور شامل محیط متخلخلی است که می‌تواند از خرده‌های سنگ و چوب گرفته تا قطعات پلاستیکی با ابعاد و اشکال مختلف ساخته شود. میکروارگانیسم‌های تجمع یافته علاوه بر اینکه در فضای خالی بستر قرار می‌گیرند، به سطح خود بستر نیز می‌چسبند. بنابراین جمعیتی از باکتری‌ها با دانسیته بالا می‌تواند در داخل راکتور نگهداری شود که این امر باعث انعقاد و چسبیدن سایر باکتری‌ها خواهد شد.

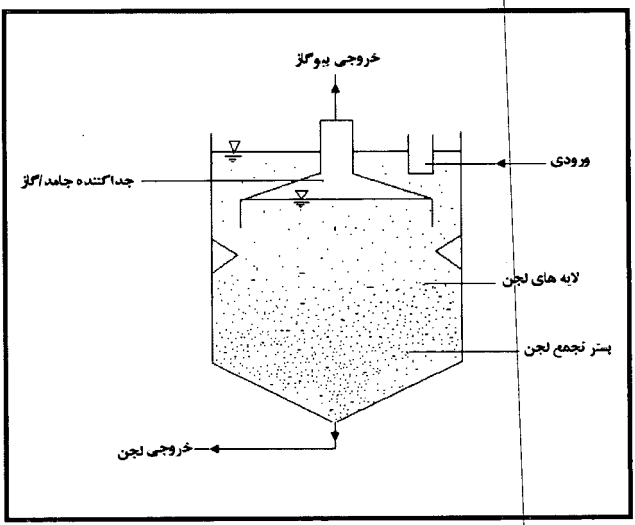


شکل ۹- فرایند تماس بی‌هوازی



شکل ۱۰- فرایند فیلتر بی‌هوازی

✦ **فرایند توده میکروبی متراکم:** استفاده از راکتورهای UASB[1] 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 (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) **UASB**، 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 بی‌هوازی عمدتاً توسط دو گروه مجزا از باکتری‌ها انجام می‌گیرد. اسیدهای آلی که محصول مرحله اول فرایند تخمیر می‌باشد، در مرحله بعد توسط سایر میکروارگانیسم‌ها 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 این‌گونه 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 کشورهایی 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- رجبعلی‌پور چشمه‌گز، 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، ۷-۶ 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.