انواع هاضم های بی هوازی برای استحصال انرژی از مواد آلی فسادپذیر

علی نظری[1]، جواد نصیری [2]

۱- کارشناسی ارشد، رشته شیمی، سازمان انرژیهای نو ایران، تهران، a.nazari@iranenergy.org.ir
۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، سازمان انرژیهای نو ایران، تهران، javad_nasiri@yahoo.com

چکیده

با توجه به حجم زیاد مواد زائد تولیدی و مشکلات زیست محیطی حاصل از آنها، ضرورت دارد که این مواد قبل از ورود به محیط زیست به طریق مناسبی تصفیه گردند. یکی از روش‌های مناسب برای تصفیه مواد آلی فسادپذیر استفاده از فرآیند هضم بیهوازی است که ضمن کاهش شدید بار آلودگی مواد زائد آلی، باعث تولید انرژی با ارزشی نیز خواهد شد. کمک به حفظ محیط زیست، بهبود بهداشت شهری و روستایی، صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید کودی غنی برای مصارف کشاورزی از مزایای مهم هضم بیهوازی است. تخمیر بی‌هوازی مواد زائد آلی مختلف نظیر لجن فاضلاب شهری، مواد آلی فسادپذیر زباله‌های شهری، فاضلابهای صنعتی با بار آلودگی زیاد همچون فاضلاب کشتارگاههای صنعتی، صنایع غذایی و لجن صنایع روغن گیری، فضولات مرغداریها و گاوداریهای بزرگ و ... می‌تواند علاوه بر کمک در حفظ محیط زیست، مقادیر زیادی انرژی را نیز تولید نماید.

۲۱ در سال۲۰۰۹ ، ۶۶۰۰۰ مگاوات نیروگاه بیوگازی وجود دارد. می‌توان گفت که در حال حاضرREN مطابق آمار ارائه شده توسط تکنولوژی های غالب در زمینه تولید انرژی از مواد زیست توده در جهان شامل روش¬های ترموشیمیایی و بیوشیمیایی است.

روش های ترموشیمیایی مناسب برای مواد آلی دیرفساد پذیر که ظرفیت گرمایی بیشتری دارند بوده و روش های بیوشیمیایی مناسب و قابل کاربرد برای مواد آلی فساد پذیر که ظرفیت گرمایی زیادی ندارند، می باشند. همواره سعی و تلاش در طراحی هاضم های بیهوازی بر این بوده است که کارایی فرآیند هضم در این سیستم‌ها بالا رفته، کیفیت و کمیت گاز حاصله بهبود بخشیده شده و مایع خروجی از هاضم دارای حداقل بار آلودگی باشد.

هاضم‌های بی‌هوازی را می‌توان از نظر سرعت هضم به دو دسته کلی هاضم‌های سرعت پایین و هاضم‌های سرعت بالا تقسیم بندی نمود. در این مقاله انواع هاضم های بیهوازی که توانایی استحصال انرژی از مواد زیست توده را دارند، بررسی نموده و پیشنهاداتی برای استفاده از آنها جهت هضم بیهوازی در ایران را ارائه می¬نمائیم.

کلیدواژگان: انرژی، بیوگاز، هضم بیهوازی، لجن تصفیه خانهٔ فاضلاب.

۱- مقدمه

از مسائل مهم هر کشور در جهت توسعه اقتصادی و اجتماعی بررسی، اصلاح و استفاده بهینه از منابع موجود انرژی در آن کشور است. در حال حاضر اتمام پذیری منابع فسیلی، مشکلات زیست محیطی و رشد فزایندهٔ مصرف انرژی در جهان از جمله عواملی هستند که انجام تحقیقات گسترده در جهت دستیابی به منابع انرژی جدید و تجدیدپذیر را ترغیب کرده‌اند. توسعه اقتصادی، اجتماعی باید ضمن مصرف بهینه از منابع طبیعی حداقل آسیب را به محیط زیست برساند، حجم وسیع زباله‌های خانگی، کشاورزی، صنعتی و فضولات دامی و انسانی، بهداشت و سلامت جامعهٔ بشری را تهدید می‌کند.

فناوری‌های تبدیل و استحصال انرژی از منابع زیست توده نسبتاً متنوع می‌باشد، ولی به طور کلی این فناوری‌ها را میتوان به سه دسته کلی ترموشیمیایی، بیوشیمیایی و شیمیایی- فیزیکی تقسیم کرد. در این فرآیندها منابع زیست توده به سوختهای مختلف جامد، مایع و گازی شکل تبدیل شده و برای تولید حرارت و الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مهمترین فناوری‌های ترموشیمیایی که در صنایع نیروگاهی کوچک و بزرگ دارای قابلیت کارکرد مطمئن با انواع منابع زیست توده می‌باشند می توان به احتراق مستقیم گازی سازی، پیرولیز، پلاسما اشاره کرد.

فناوری‌های بیوشیمیایی برای تولید انرژی از پسماندهای آلی فسادپذیر مناسب می‌باشند. از مهمترین فناوری‌های بیوشیمیایی برای تولید انرژی از پسماندهای آلی فسادپذیر می‌توان به فرایند هضم بیهوازی اشاره کرد که اساس تولید انرژی در نیروگاه‌های بیوگازی و لندفیلی می‌باشد. در صورت طراحی و ساخت راکتورهای بیهوازی مناسب، ضمن سرعت بخشیدن به فرآیند هضم میتوان با ایجاد شرایط بهینه برای تولید کمی و کیفی بیوگاز، در مدت زمان کمتر، با راندمان مناسب‌تر به تولید بیوگاز از پسماندهای آلی پذیر اقدام نمود.

۲- فرایند هضم بیهوازی و تولید بیوگاز

در اثر تخمیر بی‌هوازی مواد آلی، مولکولهای بزرگ به مولکولهای ساده‌تر تبدیل شده و حاصل نهایی این فرآیند گازی است قابل اشتعال که بیوگاز نام دارد، این گاز شامل ۷۰-۶۰ درصد متان و ۴۰-۳۰ درصد دی‌اکسیدکربن می‌باشد. با توجه به اهمیت هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز در حفظ محیط زیست و تولید انرژی در زیر به تفصیل در این مورد بحث خواهد شد. در این فرآیند انواع گوناگونی از باکتریها که راه متابولیکی‌شان تا حد زیادی به یکدیگر وابسته است درگیر هستند. انجام تحقیقات نسبتاً گسترده در زمینه هضم بیهوازی اطلاعات جامعی در زمینه‌های میکروبیولوژی و بیوشیمی، فاکتورهای محیطی، تجزیه پذیری و جنبه‌های بهداشتی مربوط به این فرآیند را در دسترس قرار داده است، که آگاهی از این اصول برای طراحی و بهره‌برداری و درک کیفیت عملکرد هر نوع هاضم بی‌هوازی لازم و ضروری است.

در این فرآیند ابتدا پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و چربیها به وسیلهٔ آنزیم‌های برون سلولی به ترتیب به قندها ، آمینو اسیدها، اسیدهای چرب و گلیسرول تبدیل می‌شوند، سپس قندها و دیگر مولکولهای کوچک به وسیلهٔ ارگانیسم‌های مختلفی تخمیر می‌شوند و محصولاتی شامل استات، بوتیرات، پروپیونات و سوکسینات همراه با H2 و CO2 را تولید می‌نمایند، پروپیونات نیز می‌تواند به وسیله ارگانیسم‌های دیگر به استات و یا CO2 تبدیل شود [۱].

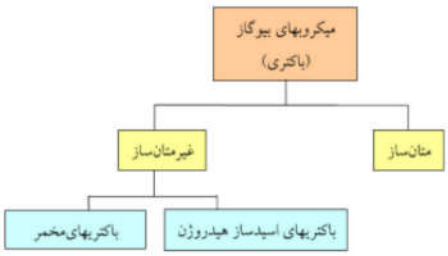
گازهای CO2 و H2 نیز به وسیله بعضی از باکتریها به استات و بوسیله انواع خاصی از باکتریهای متان‌زا به متان تبدیل می‌شوند. در بعضی از اکو سیستم‌های بی‌هوازی، استات به وسیله متانوژن‌های خاصی به متان متابولیزه و یا بوسیله بعضی از باکتریهای احیاء کنندهٔ سولفات به CO2 اکسیده می‌شود که این فرآیند با تشکیل مقداری H2S از سولفات یا سولفیت همراه می‌باشد. تخمیر بی‌هوازی متداولترین فرآیند برای مقابله با لجن‌های فاضلاب است. محققین در تخمیر بی‌هوازی غالباً ارگانیسم‌ها را به دو گروه وسیع تولید کنندهٔ اسید و تولید کنندهٔ متان تقسیم می‌کنند. «تولید کننده‌های اسید» شامل ارگانیسم‌هایی هستند که جامدات آلی را از طریق هیدرولیز محلول می‌کنند، سپس محصولات محلول به اسیدهای آلی و الکل‌هایی با وزن مولکولی پایین تخمیر می‌شوند.

«تولید کننده‌های متان» متشکل از باکتریهای شدیداً بی‌هوازی هستند که اسید و الکل را، همراه با هیدروژن و دی‌اکسید کربن به متان تبدیل می‌کنند.

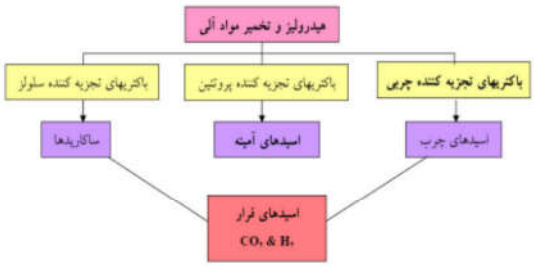
$$(CHONS) + H2O \rightarrow CH4 + CO2 + NH3 + H2S$$

۲-۱- فعل وانفعالات شیمیایی در فرآیند هضم بیهوازی

به طور کلی فرآیند هضم بی‌هوازی در طی ۳ مرحله انجام می‌گیرد که هر مرحله آن توسط گونه‌ای خاص از باکتریهای بی‌هوازی به انجام می‌رسد.



مرحله اول: هیدرولیز مواد آلی پیچیده و نامحلول و تبدیل این مواد به ترکیبات آلی محلول، این مرحله که یک فرآیند هیدرولیز آنزیمی است توسط آنزیمهای برون سلولی تولید شده از اسیدوژنها انجام می‌گیرد، آنزیم‌هایی نظیر سلولازها، پکتینازها، آمیلازها، پروتئازها، لیپازها ترکیبات آلی پیچیده نظیر کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها را به قندها، آمینو اسیدها، اسیدهای چرب و ... تبدیل می‌کنند. این مواد به صورت محلول بوده و آماده برای هرگونه فعل و انفعالات بیوشیمیایی می‌باشند[۲-۳].



مرحله دوم: ترکیبات آلی محلول حاصل از مرحلهٔ اول بوسیله باکتریهای اسیدوژن شکسته شده و اسیدهای آلی تولید می‌شود. معمولاً هیدروکربن‌های ۵ و ۶ کربنی که در آب بصورت محلولند، توسط باکتریهای تولید کننده اسید

مرحله دوم: ترکیبات آلی محلول حاصل از مرحلهٔ اول بوسیله باکتریهای اسیدوژن شکسته شده و اسیدهای آلی تولید می‌شود. معمولاً هیدروکربن‌های ۵ و ۶ کربنی که در آب بصورت محلولند، توسط باکتریهای تولید کننده اسید (اسیدوژن) مورد مصرف واقع شده و به ترکیباتی از قبیل هیدروژن، فورمات، استات، پروپیونات و گاز کربنیک تبدیل می‌گردند. عمل اسید سازی را گروه-های مختلفی از باکتری‌ها انجام می‌دهند که بیشتر آنها بی‌هوازی اجباری بوده و تعداد کمی از آنها بی‌هوازی اختیاری هستند، محصولات فرآیند عمدتاً اسیدهای آلی، الکل‌ها و هیدروژن می‌باشند، علاوه بر باکتریهای اسیدوژن، باکتریهای استوژن نیز در هاضم‌های بیهوازی فعال بوده و عمل استات سازی توسط باکتری‌های استوژن پروپیونات خوار، بوتیرات خوار و اتانول خوار انجام می‌گیرد، محصولات فرآیند استات، هیدروژن و دی‌اکسید کربن می‌باشد [۴].

مرحلهٔ سوم: تمام ترکیبات آلی و اسیدهای آلی تولید شده در مرحله اسیدوژن توسط باکتری‌های متانوژن به بیوگاز تبدیل می‌شوند. عمل متان سازی عمدتاً توسط دو گونه از باکتری‌های متانوژن استات خوار و هیدروژن خوار انجام می‌گیرد. باکتریهای متانوژن از انواع مختلفی نظیر متانو تریکس، متانو سارسینا، متانو اسپریلیوم و متانو باکتریوم تشکیل شده‌اند و جهت رشد به موادی نظیر کربن، ازت، فسفر، گوگرد، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم و مواد غذایی آلی مثل اسیدهای آمینه و ویتامین‌ها احتیاج دارند. حدود هفتاد درصد متان تولیدی در هضم از استات و مابقی عمدتاً بوسیله باکتریهای هیدروژن خوار بوجود می‌آید [۳-۴].

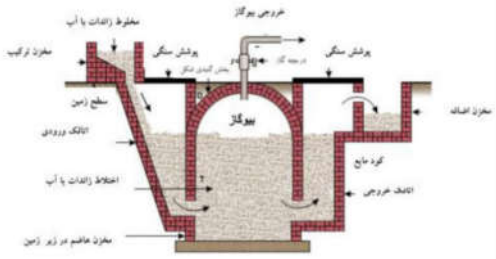
۲-۲- انواع هاضم‌های بیهوازی[۵]

افزایش راندمان تولید گاز در هاضم‌های بیهوازی از مسائلی بوده است که همواره مد نظر محققین و کاربران قرار داشته است. همواره سعی و تلاش در طراحی این راکتورها بر این بوده است که کارایی فرآیند تخمیر در این سیستم‌ها بالا رفته، کیفیت و کمیت گاز حاصله بهبود بخشیده شده و مایع خروجی از راکتور دارای حداقل بار آلودگی باشد. نتیجهٔ این تحقیقات، طراحی راکتورهای مختلفی است که دارای ساختار متنوعی می‌باشند. فرهنگ و میزان نیاز مردم، جغرافیای منطقه و میزان حمایت‌های دولتی از جمله عواملی است که در رشد و توسعه ساختار هاضم‌های بی‌هوازی مؤثر بوده است. در این مبحث سعی بر این است که ضمن معرفی این راکتورها گوشه‌ای از چگونگی عملیات آنها را نیز نشان دهیم.

هاضم‌های بی‌هوازی را می‌توان از نظر سرعت بارگیری به دو دسته کلی هاضم‌های سرعت پایین و هاضم‌های سرعت بالا تقسیم بندی نمود. زمان اقامت مواد در هاضم‌های سرعت پایین معمولاً بالا می‌باشد، همچنین هاضم فاقد سیستم گرمایش و اختلاط است، این نوع هاضم‌ها معمولاً در مقیاس‌های کوچک و روستایی ساخته می‌شوند و به علت نداشتن تجهیزات پیچیده ارزان قیمت می‌باشند. در مقابل، هاضم‌های سرعت بالا در مقیاس‌های بزرگ و صنعتی ساخته شده و مجهز به سیستم‌های اختلاط و گرمایش می‌باشند.

۲-۲-۱- هاضم‌های چینی

این نوع هاضم در سال ۱۹۳۶ توسط یک محقق چینی ساخته شد و به مرور زمان تحقیقات فراوانی بر روی این مدل انجام گرفته است. هاضم‌چینی، شامل اطاقک گاز بندی شده‌ای است که از آجر، سنگ و یا بتون ساخته می‌شود. اجرای این نوع هاضم در محیط‌های مختلف امکان پذیر است. در این نوع مدل، فشار گاز حاصله ثابت نبوده و موقع پر بودن گاز، فشار زیاد و هنگام مصرف گاز، فشار بتدریج افت پیدا می‌کند، که با طراحی و استفاده از شیرهای فشار شکن مناسب می‌توان، فشار ثابتی از گاز را ایجاد کرد.



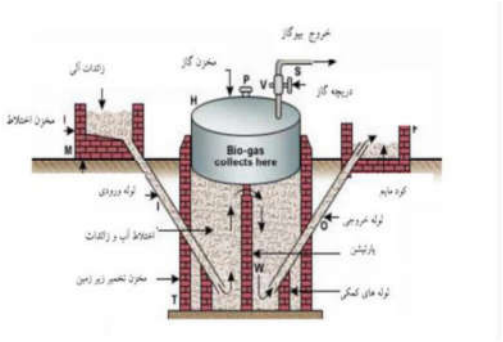
شکل ۱ هاضم طرح چینی

در احداث این نوع هاضم، کیفیت مواد اولیه و کنترل وضعیت گاز بندی قسمت‌های مختلف در افزایش راندمان تولید بسیار مؤثر است، ضمن آنکه نمی‌توان از طراحی و نظارت دقیق در هنگام ساخت این نوع هاضم‌ها چشم پوشی کرد. چرا که گاهاً مشاهده شده است به علت عدم رعایت اصول فنی و مهندسی لازم، شکاف و ترک‌های وسیعی در این نوع هاضم‌ها ایجاد شده و وضعیت گازبندی هاضم را کاملاً مختل کرده است.

۲-۲-۲- هاضم‌های با سرپوش شناور (هاضم‌های هندی)

این نوع هاضم‌ها که به هاضم‌های هندی معروفند، نتیجهٔ تجربیات و کاربرد بیوگاز در هندوستان می‌باشد. در این نوع سیستم‌ها محفظهٔ تخمیر با استفاده از مصالحی نظیر آجر، سیمان، سنگ و بتون ساخته می‌شود. گاز تولیدی در محفظهٔ تخمیر در زیر سرپوش شناوری که در جهت مرکز بالا و پایین می‌رود، حبس می‌گردد. سرپوش اغلب از جنس فلز می‌باشد و به خاطر رهایی از مشکلات خوردگی می‌توان از مواد دیگری نظیر پلی اتیلن سنگین و فایبرگلاس در ساخت آن استفاده کرد.

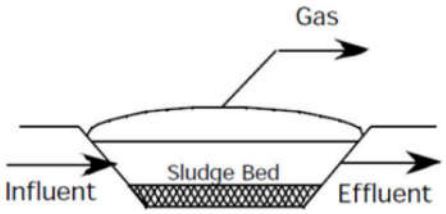
در طرح هندی، فشار گاز موجود در زیر سرپوش شناور به وزن نگهدارندهٔ گاز در واحد سطح بستگی دارد. معمولاً حجم زیر سرپوش گاز تقریباً پنجاه درصد کل حجم گاز تولیدی روزانه می‌باشد. اکثر این نوع هاضم‌ها در درجه حرارت محیط کار می‌کنند و زمان ماند محتویات در هاضم به دمای محیط بستگی دارد به طور مثال زمان ماند چهل روز بر اساس آب و هوای معتدل و پنجاه روز برای آب و هوای سرد در نظر گرفته می‌شود. در دمای بیست تا چهل درجه سانتی‌گراد معمولاً زمان ماند را سی‌روز در نظر می‌گیرند. تحقیقات بر روی این هاضم‌ها همچنان ادامه داشته و همواره، سعی بر این است که ضمن کاهش هزینه، میزان گازدهی نیز بیشتر گردد. مهمترین عیب این هاضم، اتلاف حرارتی از قسمت سرپوش هاضم می‌باشد. طرح شماتیک یک هاضم با سرپوش شناور در زیر آورده شده است:



شکل ۲ هاضم با سرپوش شناور

۲-۲- ۳- لاگن بیهوازی سرپوشیده (سرعت هضم خیلی کم)

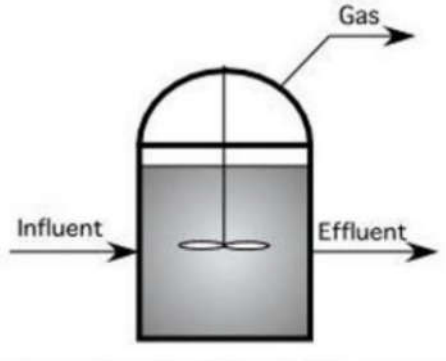
لاگن‌های بیهوازی با پوشش خاصی پوشانده شده‌اند و در محدودهٔ سرما دوست یا دمای محیط بهره برداری می‌شوند. سرعت هضم در داخل لاگن‌ها تحت تأثیر تغییرات دمایی فصلی است. با توجه به پایین بودن دمای محیط، سرعت هضم نیز در این لاگن‌ها پایین است. در مناطق گرم و نزدیک خط استوا با توجه به بالا بودن دمای محیط، سرعت هضم در لاگن‌های بیهوازی قابل ملاحظه است.



شکل ۳ لاگن بیهوازی سرپوشیده

۲-۲- ۴- هاضم اختلاط کامل (سرعت هضم پایین)

یکی از پرکاربردترین هاضم‌های بیهوازی است. هاضم‌های صنعتی زیادی برای هضم لجن و سایر زائدات از این نوع ساخته شده‌اند. هاضم اختلاط کامل مخزنی است که مجهز به سیستم گرمایش و همزن برای همزدن محتویات می‌باشد. اکثر این هاضم‌ها در ناحیه مزوفیلیک و بعضی از آنها در ناحیه ترموفیلیک بهره برداری می‌شوند. سیستم گرمایش این هاضم‌ها ممکن است داخل هاضم یا بیرون هاضم باشد.



شکل ۴ هاضم اختلاط کامل

۲-۲- ۵- هاضم جریان پیستونی[1]

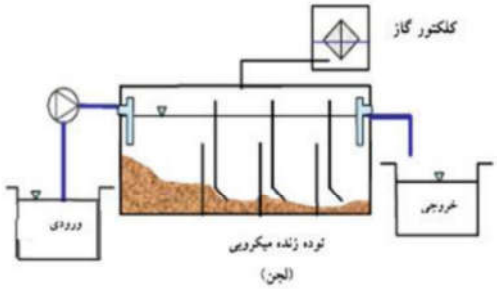
هاضم جریان پیستونی به صورت یک محفظهٔ افقی بوده که از یک سمت مواد خام وارد و از سمت دیگر مواد تخمیر شده خارج می‌گردد. این هاضم را می‌توان از مصالح و مواد گوناگونی ساخت. این هاضم شامل محفظه‌ای است که با سیمان یا پوشش غیر قابل نفوذ دیگری اندود می‌گردد. به منظور اطمینان از ایجاد جریان پیستونی این سیستم را طوری طراحی می‌کنند که طول آن به طور قابل ملاحظه‌ای از عرض و عمق آن زیادتر باشد، این هاضم دارای یک سرپوش برای نگهداری گاز از جنس بتون یا آهن گالوانیزه می‌باشد. ورودی و خروجی در این هاضم‌ها در دیواره‌های جانبی مقابل یکدیگر می‌باشند.

شکل ۵ هاضم جریان پیستونی

به خاطر مشکلاتی که در زمینه ساخت هاضم‌های آجری و فلزی وجود داشت بسیاری از متخصصین در تایوان و چین به استفاده از PVC در ساخت هاضم‌هایی روی آوردند که اساساً مانند یک هاضم جریان پیستونی (بدون اختلاط) عمل می‌نماید، این هاضم دارای وزن کمی بوده و به هاضم طرح کیسه‌ای (تایوانی) معروف است.

۲-۲- ۶- هاضم بی‌هوازی با فل‌دار[2]

در این هاضم‌ها، با تعبیه راه بندهایی در داخل محفظهٔ تخمیر، مواد آلی با یک تودهٔ زندهٔ فعال باکتری در تماس بوده و به دلیل طرح خاص سیستم، اکثر تودهٔ زندهٔ میکروبیولوژی در راکتور باقی‌مانده و باعث می‌گردد تا راندمان حذف باز آلودگی افزایش یابد. نظر به بار آلودگی و میزان جامدات موجود در مواد آلی فسادپذیر می‌توان جهت افزایش کارآیی این هاضم، تعداد مناسبی بافل (راه‌بند) را در مسیر جریان مواد طراحی کرد. راندمان گزارش شده در این هاضم بسیار بالا می‌باشد، به طوری که در حرارت ۳۵ درجه و زمان ماند یک روز هشتاد درصد کاهش در COD برای موادی با COD بین ۷-۱ گرم در لیتر برای این هاضم‌ها گزارش شده است. این هاضم‌ها جدید بوده و به نظر می‌رسد در آینده استفاده‌های بیشتری از آنها به عمل آید. طرح شماتیک یک هاضم بافل‌دار به شرح زیر است:

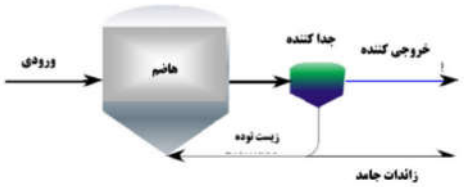


شکل ۶ هاضم بیهوازی بافل دار

1. Plug Flow
2. Baffled Reactor

۲-۲- ۷- هاضم بی‌هوازی تماسی (سرعت بالا)

این نوع هاضم‌ها در واحدهای تصفیه خانه فاضلاب شهری و به منظور تخمیر بی‌هوازی لجن به جا مانده از فرآیندهای هوازی به کار برده می‌شود. زمان ماند مواد در این نوع هاضم‌ها نسبتاً بالا و معمولاً بین ۲۰-۱۰ روز می‌باشد، در هاضم‌های بی‌هوازی تماسی سعی می‌گردد از طریق نصب حوضچه‌های ته نشینی بعد از هاضم، بخشی از لجن تخمیری را غلیظ نموده و در نتیجه باکتریهای خارج شده از هاضم را از طریق برگشت دوباره لجن، به داخل راکتور عودت داد. بنابراین فرآیند شبیه به روش لجن فعال هوازی است. هاضم‌های بی‌هوازی تماسی در ابتدا برای پساب کارخانهٔ بسته بندی گوشت با بار آلودگی ۱/۶ گرم در لیتر BOD با زمان ماند ۱۲ ساعت و در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد به کار برده شدند.



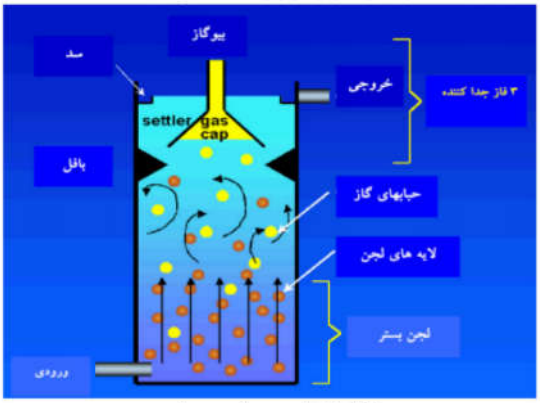
شکل ۷ هاضم بیهوازی تماسی

راندمان بالای حذف بارآلودگی که به ۹۵٪ می‌رسید باعث گردید تا از این نوع هاضم‌ها برای تصفیهٔ پساب سایر صنایع و از جمله صنایع غذایی استفاده شود.

۲-۲- ۸- هاضم بستر لجن بیهوازی[1]

در اواخر دهه هفتاد میلادی تحقیقات و کوشش‌های بسیاری بعمل آمد تا نسل جدیدی از هاضم‌های بی‌هوازی سرعت بالا طراحی و ساخته شوند. در راکتورهای نسل جدید برای برطرف نمودن معایب فرآیندهای تخمیر بی‌هوازی متعارف نظیر پایین بودن غلظت باکتری و ناپایداری سیستم در برابر شوکهای محیطی و عملیاتی، کوششهایی بعمل آمد، تا بتوان به طریقی میکرو ارگانیسم‌های مفید را با دانسیته بالا در سیستم نگهداشت، تا بدین ترتیب امکان دستیابی به یک تخمیر بی‌هوازی سریع و مؤثر فراهم شود.

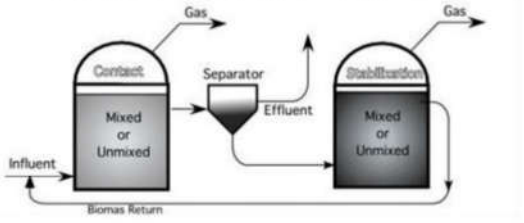
یکی از این روش‌ها تشکیل توده‌های میکروبی با دانسیته بالا در داخل سیستم است و راکتورهای بستر لجن بیهوازی بر این اساس طراحی شده‌اند. به عبارت دیگر این نوع راکتورها قادر به تشکیل گرانولهایی از باکتریهای بی‌هوازی می‌باشند، قطر این گرانولها معمولاً ۵-۱ میلیمتر است. متخصصان دریافتند که در صورت تشکیل لجن گرانولی می‌توان بار زیادی از فاضلاب را به راکتور اعمال نمود، ولی فرآیند گرانول سازی در همه فاضلابها صورت نمی‌گیرد. به عنوان مثال در مورد فاضلابهای انسانی خام و فاضلاب کشتارگاه گرانول سازی اتفاق نمی‌افتد. بنابر این لازم است که در برخی موارد راکتور را با استفاده از گرانولهای آماده نطفه گذاری نمود. در راکتور بستر لجن بیهوازی جریان مواد از پایین راکتور وارد شده و از میان بستر لجن و یا سبد لجنی که محل تجمع گرانولهاست عبور می‌کند. بدین ترتیب مواد آلی توسط انبوهی از باکتریهای بی‌هوازی موجود در این محل تجزیه شده و بیوگاز تولید می‌گردد. سپس گاز تولیدی بوسیله یک جدا کننده گاز، مایع، جامد که در بالای راکتور نصب گردیده است، جدا شده و مایع زلال شده از طریق سرریز خارج می‌گردد. این در حالی است که لجن گرانوله به طور طبیعی در پایین راکتور به حالت ته نشین باقی می‌ماند. سرعت صعود گازهای تولیدی و همچنین سرعت جریان خوراک ورودی از جمله مهمترین عوامل در حفظ و نگهداری گرانول‌ها در داخل راکتور هستند. در راکتورهای بستر لجن بیهوازی احتیاج به سیستم جریان برگشتی مواد و همچنین سیستم اختلاط مکانیکی نمی‌باشد، لذا انرژی مورد نیاز برای راهبری راکتور حداقل خواهد بود. طرح شماتیک یک هاضم بستر لجن را در زیر ملاحظه می‌کنید:



شکل ۸ هاضم بستر لجن بیهوازی

۲-۲- ۹- هاضم تثبیت تماسی (سرعت بالا)

این هاضم سرعت بالایی دارد و دارای دو هاضم پشت سر هم است. خروجی هاضم اول وارد یک جدا کننده میشود و فاز جامد مجدداً به هاضم دوم فرستاده می شود. خروجی هاضم دوم به ورودی هاضم اول بر می گردد.



شکل ۹ هاضم تثبیت تماسی

۲-۲- ۱۰- هاضم بستر سیال بی‌هوازی[2]

در راکتورهای بستر سیال بی‌هوازی، باکتریها به صورت یک لایه میکروبی بر روی سطح ذرات حامل رشد می‌کنند. این ذرات حامل می‌توانند جامداتی نظیر شن، کربن فعال، کوارتز، آلومینا، آنتراسیت و کریستو بالیت باشند. اندازه ذرات معمولاً بین ۰/۲ تا ۰/۶ میکرون می‌باشد. ذرات ریز دارای سطح تماس بالایی هستند به طوریکه مساحت سطحی هر متر مکعب از این ذرات به ۳۰۰۰ متر مربع و غلظت باکتریهای رشد کرده بر روی سطح آنها به ۳۰g/lit می‌رسد. در این نوع راکتورها جریان خوراک از پایین راکتور و از طریق یک توزیع کننده جریان وارد می‌گردد. وجود یک جریان برگشتی که بخشی از پساب خروجی از راکتور را به طور مداوم به داخل راکتور برگشت می‌دهد، باعث ایجاد سیالیت در ذرات جامد می‌گردد. برای اینکه ذرات جامد از یک طرف به حالت سیالیت درآیند و از طرف دیگر از داخل راکتور خارج نگردند، لازم است سرعت جریان برگشتی بین دو محدوده سرعت مینیمم سیالیت ذرات و سرعت حمل ذرات قرار داشته و کنترل گردد.

1. UASB

2. AFBR

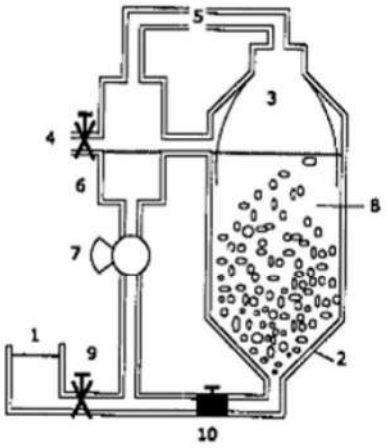
با توجه به اینکه در این نوع راکتورها از ذرات ریز که در حالت سیالیت و طغیان قرار دارند، استفاده می‌گردد، لذا میزان انتقال جرم و اختلاط مواد در آنها عالی می‌باشد. این امر باعث می‌گردد تا مواد آلی موجود در خوراک به محض ورود خوراک به راکتور، خود را بر روی لایهٔ میکروبی تشکیل شده بر روی ذرات رسانده و با نفوذ در این لایه میکروبی توسط باکتریهای اسیدوژن و متانوژن به اسیدهای چرب فرار و نهایتاً بیوگاز تبدیل شوند. بنابر این می‌توان سرعت بارگیری مواد را در این راکتورها بسیار بالا انتخاب کرد. دیگر مزایای این نوع راکتورها عبارتند از:

۱- آب بردگی باکتریها به دلیل چسبندگی آنها به ذرات حامل به حداقل می‌رسد.

۲- ذرات حامل آزادانه حرکت می‌کنند، لذا راکتور کمتر دچار مشکل گرفتگی می‌شود.

۳- وجود غلظت بالای باکتری در راکتور باعث می‌گردد تا راکتور در برابر بروز شوکهای مختلف مقاومتر و پایدارتر باشد.

۴- وجود خواص انتقال جرمی عالی در راکتور این امکان را می‌دهد که پسابهای با بارآلودگی بسیار پایین نیز بتوانند در راکتور با راندمان بالا تصفیه گردد. طیف وسیعی از پسابهای صنعتی نظیر پساب صنایع شیمیایی، غذایی، لبنی، بطری شویی و ... و همچنین فاضلابهای شهری در واحدهای پایلوت و آزمایشگاهی راکتورهای بستر سیال بی‌هوازی در شرایط عملیاتی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

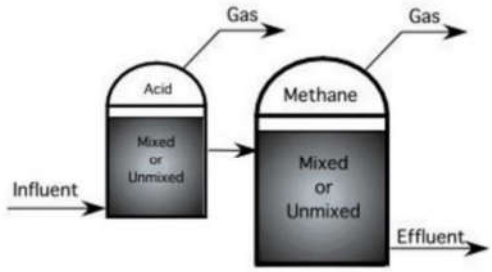


۱- ظرف تغذیه ۲- مخزن تخمیر ۳- مخزن گاز ۴- خروجی از هاضم ۵- خروجی گاز ۶- ظرف سیرکولاسیون ۷-پمپ سیرکولاسیون ۸-ذرات حامل سیال ۹-شیر تغذیه ۱۰- شیر یکطرفه

شکل ۱۰ هاضم بستر سیال بی‌هوازی

۲-۲- ۱۱- هاضم اسیدی فازی شده (سرعت بالا)

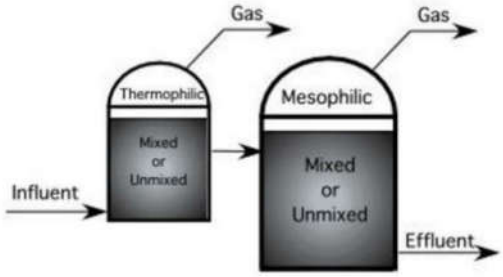
برای افزایش سرعت هضم، مراحل اسیدوژن و متانوژن در دو هاضم جداگانه انجام می‌شود. در هاضم اول مرحله اسیدوژن انجام می‌شود، لذا PH در این هاضم حدود ۵ است در این PH باکتریهای اسیدوژن فعالیت بیشتری دارند، در حالی که در هاضم دوم باکتری‌های متانوژن فعالند و PH در این هاضم حدود ۸ – ۷ است.



شکل ۱۱ هاضم اسیدی فازی شده

۲-۲- ۱۲- هاضم حرارتی فازی شده (سرعت بالا)

برای افزایش سرعت هضم و همچنین نابودی بیشتر پاتوژن‌ها و کاهش زیادتر مواد جامد از هاضم‌های متوالی با حرارت فازی شده استفاده می‌شود.



شکل ۱۲ هاضم حرارتی فازی شده

۳- وضع جهانی

منابع انرژی تجدید پذیر پس از منابع انرژی ذغال سنگ، نفت و گاز طبیعی، چهارمین منبع بزرگ انرژی در دنیا می‌باشد که حدود ۱۴ درصد از انرژی اولیه جهان را تامین می‌نماید و این در حالی است که در ایالات متحده آمریکا ۴-۳ درصد از انرژی اولیه مورد نیاز فقط از منابع زیست توده تامین می‌شود. قابلیت‌های زیست توده تنها در تولید حرارت نیست، بلکه در تولید سرما، سوختهای مورد نیاز برای حمل و نقل و تولید انرژی الکتریکی نیز می‌باشد. تا سال ۲۰۰۹ حدود ۶۶۰۰۰ مگاوات نیروگاه تولید برق مبتنی بر زیست توده (با انواع فن آوریها) وجود داشت که حدود ۱۲۰۰۰ مگاوات از این مقدار از سوخت زبالهٔ شهری استفاده می‌کنند. همچنین در این سال ۲۴۰۰۰۰ مگاوات حرارتی نیروگاه مدرن حرارتی احداث شده است که حدود ۱۰۰۰۰ مگاوات آن فقط در ایالات متحده بوده است (حدود ۵۸ درصد از بازار تولید انرژی از منابع تجدید پذیر در امریکا).

برمبنای مطالعات انجام شده، منابع زیست توده حدود ۶۴ درصد از منابع اولیه انرژیهای نو در اتحادیه اروپا که به مرحله کاربردی رسیده است را به خود اختصاص داده است و حدود ۹ درصد از انرژی الکتریکی تولیدی و ۹۸ درصد از انرژی حرارتی تولیدی از طریق منابع انرژیهای نو به منابع انرژی زیست توده تعلق دارد. (با در نظر گرفتن منابع برق-آبی).

۴- وضع ایران

انرژی‌های نو در دهه اخیر مورد توجه دولت جمهوری اسلامی‌ایران و بویژه وزارت نیرو قرار گرفته است. با افزایش صرفه جوئی در منابع طبیعی،

انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان منبع مکملی برای منابع نفت و گاز مورد نظر قرار گرفته‌اند. استفاده از این منابع در دو جنبه به توسعه پایدار کمک می‌کند، یکی کاهش میزان بهره‌برداری از منابع تجدید ناپذیر نفت و گاز، و دیگری پیشگیری از دفع موادی که هنوز قابل استفاده می‌باشند. مطابق با برنامه چهارم توسعه کشور، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) به نمایندگی از دولت تلاش دارد که با مشارکت بخش‌های خصوصی و دولتی نسبت به تولید برق از مواد زیست توده به خصوص از مواد آلی زباله‌های شهری و لجن فاضلاب تصفیه‌خانه‌ها اقدام نماید. مهمترین فعالیت‌هایی که در زمینهٔ استحصال انرژی الکتریکی از مواد زیست توده در کشور انجام شده است، به شرح زیر است:

- بیش از ۳ سال است که دو واحد نیروگاهی از دفنگاه‌های زباله شهر شیراز (ظرفیت ۱ mwe) و مشهد (ظرفیت ۶۰۰kw) فعال بوده و برق را به شبکه تحویل می دهند.
- از سال ۱۳۹۱ در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران یک نیروگاه به ظرفیت ۵ mwe فعال بوده و بزودی ظرفیت این واحد به ۷ mwe افزایش خواهد یافت.
- توان صنعتی کشور در زمینهٔ تولید بیواتانول حدود ۱۰۰ میلیون لیتر است که ۶۰ میلیون لیتر آن قابلیت استفاده در خودروهای بنزینی را دارا می‌باشد.
- در حال حاضر ۴ نیروگاه زباله‌سوز با فناوری گازی‌سازی در کشور در حال نصب بوده و یک نیروگاه زباله با فناوری هضم بیهوازی نیز در حال بهره‌برداری است.

جدول ۱ نیروگاههای زباله سوز در حال نصب و بهره برداری کشور

نوع نیروگاه	شهر	ظرفیت ورودی t/d	ظرفیت نیروگاه	انرژی سالانه mwh
گازی سازی	تهران	۲۰۰	۳	۲۱۰۰۰
گازی سازی	نوشهر	۲۰۰	۲	۱۴۰۰۰
گازی سازی	ساری	۴۵۰	۵	۳۵۰۰۰
گازی سازی	رشت	۶۰۰	۸	۵۶۰۰۰
هاضم	تهران	۲۰۰	۲	۱۴۰۰۰
جمع کل		۱۶۵۰	۲۰	۱۴۰۰۰۰

۵- مزایای هضم بیهوازی

از مهمترین مزایای هضم بیهوازی و تولید بیوگاز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۵-۱- اثرات زیست محیطی استفاده از هضم بیهوازی:

- جلوگیری از افزایش گازهای گلخانه‌ای
- جلوگیری از توسعه محل های دفن
- از بین بردن عوامل بیماری‌زا در زیست تودهٔ تثبیت شده
- تکمیل پروسهٔ تثبیت مواد آلی و قابل جذب شدن نیتروژن آن برای گیاهان
- کاهش پیامدهای ناشی از تأثیر سوء کود و فضولات دامی در مزارع بر کیفیت آب
- کاهش مصرف سوختهای فسیلی و حفظ جنگلها
- تولید پراکنده حامل انرژی و مصرف آن در محل

۵-۲- اثرات اقتصادی استفاده از هضم بیهوازی:

- تولید انرژی پایدار
- ایجاد درآمد از طریق فروش انرژی (بیوگاز ، برق ، حرارت) ، کود آلی قابل استفاده در کشاورزی و توسعهٔ فضای سبز
- تصفیهٔ مواد آلی بدون هزینه های دراز مدت بعدی نظیر آلودگی آب و خاک
- استحصال موادقابل بازیافت همراه زباله های آلی (فلز ، شیشه ، کاغذ و پلاستیک) و فروش آن به صنایع بازیافت
- بهینه سازی خاک و بهره وری در کشاورزی بدلیل استفاده از کود آلی و اثرات دراز مدت آن در اصلاح ساختار خاک و حاصلخیزی آلی
- کاهش مصرف کود شیمیایی به خاطر تولید کود آلی و کاهش تقاضا برای سموم دفع آفات و علف های هرز و همچنین کاهش تقاضا برای سوخت های فسیلی
- فروش CDM

۵-۳- اثرات اجتماعی استفاده از هضم بیهوازی:

- ایجاد اشتغال در قسمت نیروگاه بیوگازی
- بهبود وضعیت کشاورزی به دلیل دسترسی محلی به کود آلی غنی شده و عاری از عوامل بیماریزا و تخم علفهای هرز
- کنترل آلودگیهای زیست محیطی ، حذف بوهای مشمئز کننده و کنترل مگس ، جانوران و حشرات موذی در حاشیهٔ شهرها
- بهینه سازی وضعیت شهرها و نمای خیابانها
- بهینه سازی وضعیت بهداشتی به خصوص برای افرادی که با زائدات در ارتباطند

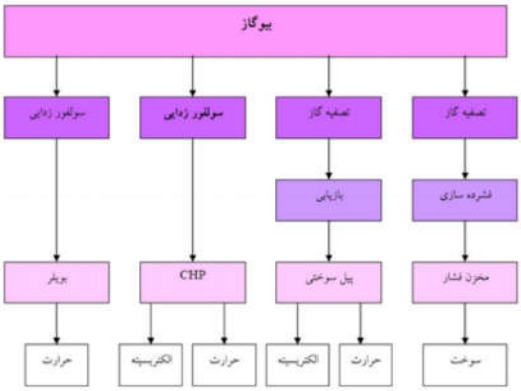
۶- معایب هضم بیهوازی

از مهمترین معایب هضم بیهوازی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- نیاز به سرمایه گذاری زیاد اولیه
- نامناسب برای مواد آلی غیر فسادپذیر
- نیاز به زمین زیاد
- نیاز به آب برای رقیق سازی در بسیاری از روش‌های هضم

۷- محصولات

گاز متان حاصل از هضم‌های بی‌هوازی به عنوان یک منبع انرژی می‌تواند برای تولید حرارت جهت پخت و پز، روشنایی و یا به عنوان سوخت موتورهای درون سوز مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱۳ مسیرهای تبدیل بیوگاز به انرژی

این گاز قابل اشتعال، دارای شعله‌ای پاکیزه به رنگ آبی، بی‌بو، بی‌رنگ بوده و دارای ارزش حرارتی ۴۵۸۰ تا ۵۹۴۵ کیلوکالری در هر متر مکعب بیوگاز به ازاء ۵۰ تا ۶۵ درصد متان می‌باشد.

انرژی حرارتی بهترین روش استفاده از بیوگاز بوده و بیشترین کاربرد را دارد و حرارت حاصل از سوختن این گاز جهت پخت و پز و تهیه آبگرم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مواردی که نیاز به ارزش حرارتی بالاتر باشد، می‌توان با حذف CO2 همراه بیوگاز ارزش حرارتی آن را تا حدود ۴۰ درصد افزایش داد. در صورت کافی بودن مقدار گاز می‌توان توسط موتور ژنراتورهای مخصوص، برق تولید نمود. ارزش حرارتی تپاله خشک شده گاو که اغلب روستائیان آن را به این طریق می‌سوزانند برابر با ۵۰۰ تا ۶۰۰ کیلوکالری در هر کیلوگرم تپاله است، در حالیکه همین یک کیلوگرم تپاله بعد از تخمیر و تبدیل به بیوگاز، حرارتی بین ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ کیلوکالری تولید می‌کند، که حرارت بدست آمده تقریباً ۵ تا ۶ برابر ارزش حرارتی ماده اولیه آن است.

بیوگاز می‌تواند به عنوان ماده اولیه مناسب در سنتز بسیاری از ترکیبات و فرآورده‌های شیمیایی به کار رود. متان موجود در بیوگاز در حرارت بالا می‌تواند تحت واکنش کلراسیون قرار بگیرد. کلرومتانهای حاصله از این واکنش ماده اولیه مهمی در صنایع مختلف شیمیایی می‌باشند. به عنوان مثال مونوکلرومتان در ساخت حشره‌کش‌ها و سیلیکانهای آلی کاربرد داشته و به عنوان یک حلال مناسب در سنتزهای آلی مطرح است. دی‌کلرومتان ماده اولیه مهمی برای ساخت پاک کننده‌ها فیلم‌های عکاسی و سینمایی و حلال بسیار مهمی در صنایع سنتزی شیمیایی می‌باشد. تری کلرومتان ماده اولیه صنایع تولید پلاستیک، پلی تترا فلوئورو اتیلن و آنتی بیوتیک ها بوده و از قدیم الایام به عنوان داروی بیهوشی مورد استفاده قرار می‌گرفته است. تترا کلرید کربن در صنایع آتش نشان کاربرد داشته و ماده اولیه ساخت مواد ضد حریق بوده و به عنوان حلال شیمیایی نیز کاربرد فراوانی دارد.

متان همچنین ماده اولیه تهیه استیلن، الکل، متانول، آمونیاک، کود و دیگر فرآورده‌های شیمیایی است و از مایع تخمیر شده داخل هاضم می‌توان کریستالهای ویتامین B-12 تهیه نمود.متان خالص تهیه شده از هضم بیهوازی می‌تواند بعنوان سوخت برای پیل سوختی بکار رود.

۸- مراجع

[1] قبادیان، ب، *طراحی دستگاه بیوگاز گنبدی ثابت، مجموعه مقالات اولین سمینار بیوگاز در ایران* ، مجموعه مقالات اولین سمینار بیوگاز در ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران، آبان ماه ۱۳۷۵.

[2] Mata Alvarez, j. 2003 : Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes.

[3] Ostrem, K. 2004 : Greening waste Anaerobic Digestion For Treatment The Organic Fraction Of Municipal Solid Wastes. Earth Engineering Center Columbia University.

[4] United Tech, I. 2003 : Anaerobic Digestion, UTI Web Design. 2003

[5] Dennis A. Burke P.E. Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook june 2001