

حذف گاز گلخانه‌ای متان با استفاده از بتن هوادار اتوکلاو شده به عنوان بستری برای تجمع باکتری‌های اکسیدکننده متان

؟؟؟؟
؟؟؟؟

چکیده

متان (CH_4) یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که سبب گرم شدن کره زمین می‌شود. در مقایسه بادی اکسیدکربن (CO_2)، اثر آن روی گرم شدن کره زمین ۳۴ برابر بیشتر است. متان از طریق منابع مختلفی وارد جو زمین می‌شود. مناطق دفن پسماند مواد آلی (زباله) یکی از مهم‌ترین این منابع به شمار می‌روند. امروزه در آلمان رهاکردن پسماند مواد آلی در محل دفن زباله‌ها ممنوع است. اگر چه این روال در سایر کشورها، هنوز ادامه دارد. مشکل بزرگ مناطق قدیمی دفن زباله، تولید مقدار قابل توجهی گاز متان در مدت طولانی (بیش از ۵۰ سال) ناشی از تجزیه مواد آلی مدفون شده است. اگر غلظت متان در گاز آزاد شده در محل دفن زباله‌ها بین ۴۰-۶۰ درصد باشد (گاز غنی)، این گاز با مکش (Suction) جمع‌آوری شده و برای تولید الکتریسیته و گرما استفاده می‌شود. در غلظت‌های کمتر از ۳۰ درصد (گاز فقیر) این تکنیک کارایی نداشته و متان به طور معمول وارد جو می‌شود. ما باکتری‌های اکسیدکننده متان را از زیستگاه‌های مختلف جدا کرده و از آن‌ها برای ایجاد کلونی بر روی مخلوطی از بتن هوادار اتوکلاو شده (AAC) و خرده‌های آجر ماسه-آهکی استفاده می‌کنیم. متان توسط باکتری‌های اکسیدکننده از مسیر متانول، فرمالدهید و فرمات به دی‌اکسیدکربن و آب تبدیل می‌شود. در مقیاس آزمایشگاهی، باکتری‌های اکسیدکننده متان با موفقیت بر روی این بسترهای مصنوعی رشد می‌کنند. بعد از دوره سازگاری، آن‌ها فعالیت میکروبی خوب و سرعت بالای اکسیدکنندگی متان را از خود نشان می‌دهند. در آزمایشات بیشتر، ما از این داده‌ها برای آزمایشات میدانی در یک محل دفن زباله در برمن (Bremen) استفاده کردیم. ما یک محل تست برای اندازه‌گیری‌های طولانی مدت در شرایط واقعی ساختیم. در این مقاله نتایج به دست آمده در آزمایشگاه و آزمایشات میدانی و مشکلاتی که اتفاق افتاد نشان داده شده است. با این حال، این داده‌ها یک انتخاب جالب برای بازیابی AAC و دیگر مصالح ساختمانی است که از آن‌ها به عنوان یک بیوفیلتر فعال برای حذف متان در محل‌های دفن زباله استفاده شود.

مقدمه

آزاد شدن گاز متان از محل دفن زباله

در آلمان، تقریباً ۴۰۰۰ محل دفن زباله شناخته شده برای زباله‌های داخلی وجود دارد که گاز گلخانه‌ای متان را در محیط زیست منتشر می‌کنند. تخمین زده شده است که ۱۵-۲۰ درصد مواد آلی که در محل دفن زباله‌ها وجود دارد مربوط به ۳۵ سال قبل بوده که به متان تبدیل خواهند شد. به علت آزاد شدن متان، مناطق بزرگی در مجموعه‌های دفن زباله با نبود اکسیژن مواجه شده و احتمالاً عملیات زراعی در آنها امکان‌پذیر نباشد.

سهم متان در مقایسه با سایر گازهای گلخانه‌ای، کمتر و به ۵ تا ۱۰ درصد می‌رسد. اما در مقایسه با دی‌اکسید کربن، اثر آن روی گرم شدن کره زمین ۲۱ تا ۲۵ برابر بیشتر است. داده‌های جدید علمی نشان

سهم متان در مقایسه با سایر گازهای گلخانه‌ای، کمتر و به ۵ تا ۱۰ درصد می‌رسد. اما در مقایسه بادی اکسید کربن، اثر آن روی گرم شدن کره زمین ۲۱ تا ۲۵ برابر بیشتر است.

می‌دهد این اعداد دست پایین گرفته شده است چون تعامل بین گازها و ذرات معلق در هوا را هم باید در نظر گرفت. فاکتور مهم دیگری که در حال وقوع است افزایش متان منتشر شده در سراسر دنیاست. وضعیت در آلمان اما متفاوت است. از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ کاهش مشهودی از انتشار تمامی گازهای گلخانه‌ای در این کشور را می‌توان مشاهده کرد. در خصوص گاز متان این امر ممکن است به تکنولوژی‌های جدید مورد استفاده و زه‌کشی موثر متان از محل‌های دفن زباله مرتبط باشد. در طی چندین سال گذشته، مقدار متان آزاد شده از زباله‌های جامد و مایع بدون تغییر باقی‌مانده است. در تصفیه‌خانه‌های لجن فاضلاب، متان از تجزیه غیرهوازی پسماند مواد آلی در مخازن مخصوص به وجود می‌آید. در حال حاضر از گاز این مخازن برای تولید برق استفاده می‌شود. در مناطق دفن زباله، فرآیند مشابهی به وسیله زه‌کشی فعال متان آزاد شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نقطه نظر اقتصادی، تولید برق از گاز محل دفن زباله‌ها فقط زمانی مناسب و به صرفه است که غلظت متان بین ۴۰ تا ۶۰ درصد باشد. این سطح بالا فقط در مراحل اولیه محل دفن زباله ایجاد می‌شود و بعد از ۵ سال به طور مداوم کاهش پیدا خواهد کرد.

بعد از این دوره، میزان متان به ۱۰ تا ۳۰ درصد رسیده و تولید برق از این حجم گاز فقط با استفاده از روش‌های غنی‌سازی هزینه بر، امکان‌پذیر است. محل‌های قدیمی دفن زباله در یک بازه زمانی طولانی متان تولید می‌کنند. مقدار داده‌های کمی شده در این خصوص بسیار محدود است. بسته به مواد انباشته شده، مناطق دفن زباله برای چندین دهه گاز متان تولید خواهند کرد. اگر متان در مناطق دفن زباله توسط میکروارگانیسم‌ها سوزانده یا اکسید نشود می‌تواند وارد اتمسفر شده و گرم شدن کره زمین را تشدید کند.

بتن هوادار اتوکلاو شده به عنوان بستر و ضایعات

آجر ماسه - آهکی به عنوان اجزای باربر

بتن هوادار اتوکلاو شده به خاطر دانسیته پایین و تخلخل بالا در کنار عایق حرارتی بسیار عالی که دارد، یک مصالح ساختمانی بسیار مهم بوده که به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. در زمان تخریب ساختمان‌های قدیمی می‌توان از ضایعات به وجود آمده آن استفاده



شکل ۱) ترکیب آزمایشی ضایعات AAC با MOB در یک ظرف شیشه‌ای هوازند و سیستم تخلیه برای کشت

شکل ۲) راکتور ستونی با مواد یازافتی



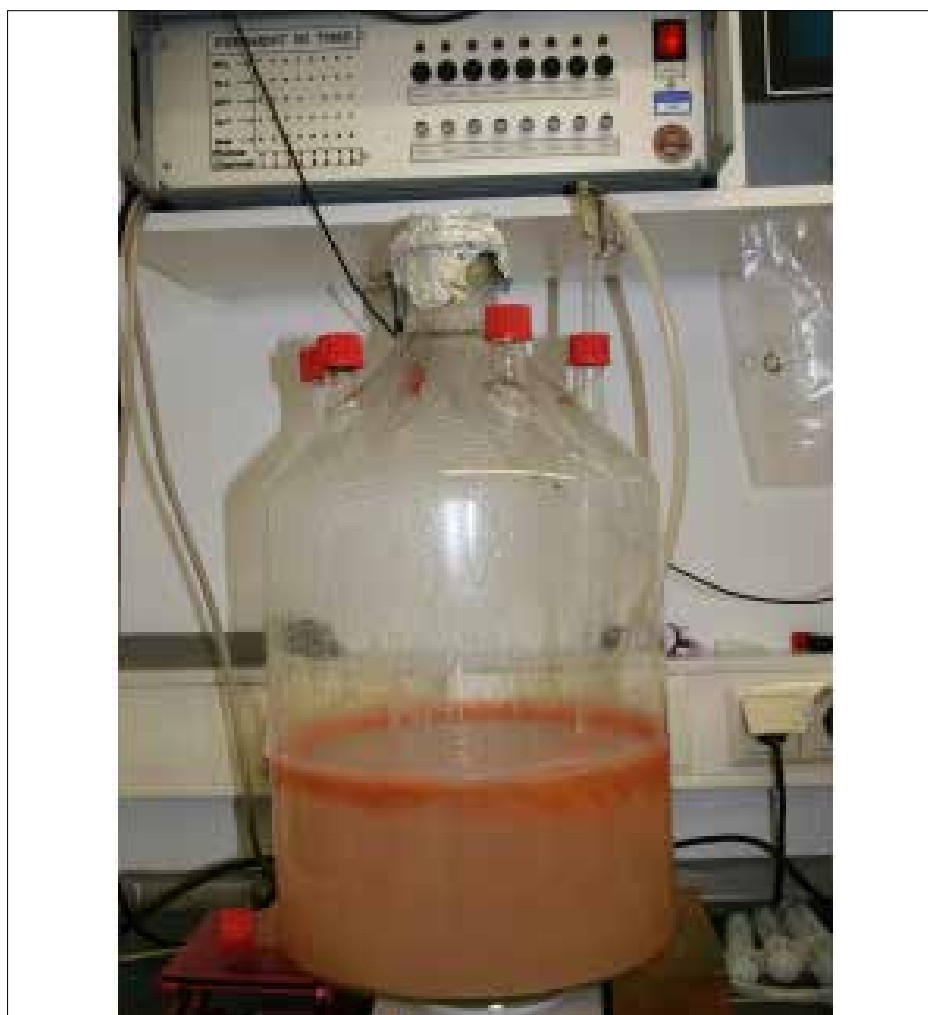
کرد. به طور کلی بهتر است ضایعات AAC از دیگر ضایعات ساختمانی، جدا و نگهداری شود. جریان تولید ضایعات در آلمان سالانه ۲/۵-۲/۷ میلیون تن تخمین زده می شود که ۱/۶ درصد آن ضایعات ساختمانی است. ذرات دانه درشت AAC برای میکروارگانیزم ها جذاب هستند چون تخلخل های میکرو و ماکرو اجازه ذخیره مقدار زیادی آب و هوا را می دهند (حداکثر تا ۸۰ درصد وزنی) که این امر می تواند سبب نگهداری از میکروارگانیزم ها شده و بسترهایی رشدی را به وجود آورد. البته قلیایی بودن AAC ممکن است مانع از رشد میکروارگانیزم ها گردد.

باکتری های اکسیدکننده متان

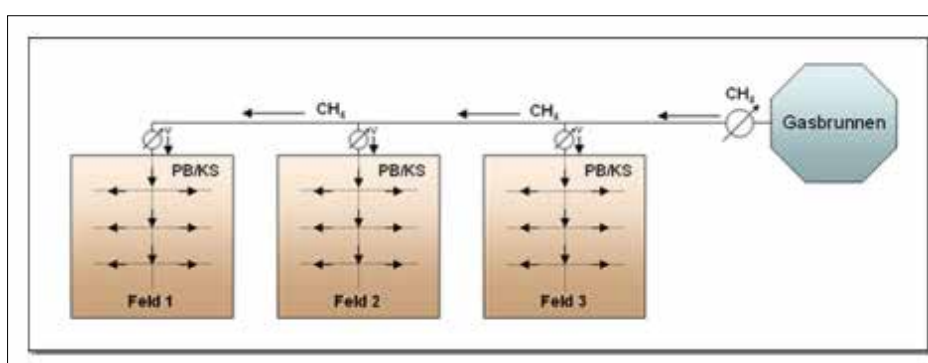
باکتری های هوازی اکسیدکننده متان (MOB) فیزیولوژی خاص و بی همتایی دارند. تا کنون تمام گونه های تفکیک شده، می توانند متان و تا حدی متانول

را به عنوان دهنده کربن و الکترون استفاده کنند. فقط یک استثنا وجود دارد که می تواند از تعدادی ترکیبات آلی به عنوان بستر استفاده کند. متان توسط یک آنزیم کلیدی به نام متان مونواکسیژناز با اکسیژن و کو آنزیم کاهش یافته، به متانول، اکسید می شود. دو نوع آنزیم شناخته شده متان مونواکسیژناز وجود دارد. یک نوع در سیتوپلاسم یافت شده (متان مونواکسیژناز محلول (MMO) و نوع دوم که به غشاء متصل است (Membrane-bound MMO). نوع دوم از مس به عنوان کاتالیزور (کو آنزیم) استفاده می کند. همه MOB ها شامل هر دو نوع نمی باشند. متانول با اکسیداسیون بیشتر به فرمالدهید تبدیل می شود. برای تشکیل انرژی (Dissimilation) فرمالدهید از طریق فرمات به دی اکسیدکربن و آب تبدیل می شود. کو آنزیم کاهش یافته می تواند برای تشکیل ATP از طریق زنجیره تنفسی یا برای مسیر بیوسنتزی مورد

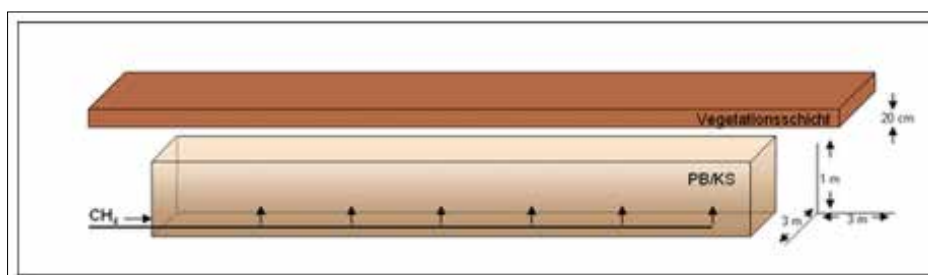
**فقط یک استثنا وجود دارد
که می تواند از تعدادی
ترکیبات آلی به عنوان
بستر استفاده کند. متان
توسط یک آنزیم کلیدی
به نام متان مونواکسیژناز با
اکسیژن و کو آنزیم کاهش
یافته، به متانول، اکسید
می شود.**



شکل ۳) کشت مایع متیلوآکسید



شکل ۴) شماتیک پیل آزمون



شکل ۵) موقعیت لایه‌های گیاهی بالای مواد بازیافتی

از نقطه نظر باکتریایی،
AAC یک ماده جالب
است چون تخلخل بالای
آن تبادل خوبی برای
گازها مخصوصاً اکسیژن
و همچنین آب در شکل
مایع را فراهم می کند.

پوششی با استفاده از مواد حامل به ندرت استفاده شده است.

نتیجه گیری

از نقطه نظر باکتریایی، AAC یک ماده جالب است چون تخلخل بالای آن تبادل خوبی برای گازها مخصوصاً اکسیژن و همچنین آب در شکل مایع را فراهم می کند. تنها نقص آن ویژگی قلیایی این ماده است. (بتن با قلیابیت خود مانع از خوردگی آرماتور و قطعات فلزی مدفون می گردد).

فعالیت متابولیک MOB و آزادسازی مداوم دی اکسید کربن می تواند منجر به کربونیزاسیون سطح شود. در دو پروژه تحقیقاتی کامل شده، ما توانستیم نشان دهیم که ضایعات بازیافت شده AAC که باید با هزینه ای بالغ بر ۱۰۰ یورو در هر تن انباشت شود، ممکن است به عنوان بستر برای MOB و در ترکیب با ضایعات آجر ماسه - آهکی برای لایه پوششی محل های دفن زباله مناسب باشد. ما توانستیم نشان دهیم که این چنین

استفاده قرار بگیرد. به عنوان یک نقطه شروع برای بیوسنتز (Assimilation)، فرمالدهید از طریق دو مسیر بیوسنتزی متفاوت مورد استفاده قرار می گیرد. اغلب MOBها پی اچ خنثی یا نسبتاً اسیدی را برای رشد بهینه ترجیح می دهند. تجزیه میکروبیولوژی متان به دی اکسید کربن در محل دفن زباله که به طور طبیعی توسط MOBها اتفاق می افتد در چندین انتشارات علمی مورد پژوهش قرار گرفته است، اما هنوز هم یک موضوع غالب است. MOB در لایه پوششی محل دفن زباله یافت شده است. پروژه های زیادی فاکتورهایی که روی سرعت اکسیداسیون متان تاثیر می گذارند را مورد آنالیز قرار داده اند و سعی در بهبود آن ها داشته اند. تمام این روش ها از MOB حاضر در لایه پوششی استفاده کرده اند. به نظر می رسد که مهم ترین عوامل موثر روی فعالیت MOB شامل؛ PH خاک، غلظت اکسیژن، دما و منبع نیتروژن باشد. مهم ترین نقش MOB در محدوده لایه پوششی مدت هاست که بی اهمیت در نظر گرفته شده است. کاربرد سیستماتیک MOB در محدوده لایه

شکل ۶) نصب پاتل های تست ۱) کاملاً با مواد بازیافتی پر شده است) و پاتل تست ۲) خالی)



برای تولید MOB، ما محفظه‌هایی در مقیاس بزرگ با اندازه‌های مختلف استفاده کردیم. (شکل ۱ و ۳). MOB مورد استفاده باکتری‌های تازه تفکیک شده *Methlobacter* بودند که پس از رسیدن به یک دانسیته سلولی خاص رنگ قرمز-نارنجی از خود نشان می‌دهند (شکل ۳).

آزمایشات موفق در مقیاس آزمایشگاهی باید به سطح آزمایشات میدانی توسعه داده شوند. این آزمایشات در یک قسمت خارج از عملیات محل دفن زباله منطقه سیاه در برمن (Bremen) آغاز شده بود. مخلوطی از مواد بازیافتی تهیه و سه پانل تست نصب شدند (شکل ۴-۶). در مخلوط متراکم شده از مواد بازیافتی، زیست توده کافی از MOB به کار گرفته شد. یک پانل تست با MOB تلقیح نشد و به عنوان پانل کنترل حفظ شد. پانل‌های تست از طریق لوله کشی به یک چاه گاز متصل بودند. همه پانل‌های تست با سنسورهای دمايي و تجهیزاتی برای حذف گاز مجهز شده بودند. در آغاز آزمایشات میدانی، سرعت اکسیداسیون متان با موفقیت اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

چاه گاز، گازی با ۶ درصد حجمی متان تحویل داد که به داخل لایه بیواکتیو پانل‌های تست تزریق شد. اندازه‌گیری‌ها، تغییرات بزرگی از غلظت متان و دی‌اکسیدکربن نشان داد. اندازه‌گیری‌ها در پانل تست ۲ (مواد بستر: ذرات AAC و سنگ آهک با نسبت حجمی ۶۰ به ۴۰ و اندازه ذرات ۸ تا ۳۲ میلی‌متر، بیواکتیو) نشان داد که میزان متان به ۱۵ درصد رسیده است غلظت متان در پانل تست غیر بیواکتیو بالاتر بود. پانل تست شماره ۱ (مواد بستر: ذرات AAC و سنگ آهک با نسبت حجمی ۶۰ به ۴۰ و اندازه ذرات ۸ تا ۱۶ میلی‌متر، بیواکتیو) سطوح خیلی پایینی از متان را نشان داد. اعداد به طور واضحی پایین‌تر از غلظت متان چاه گاز یا پانل‌های تست ۲ و ۳ بود. این مسئله تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. در طول زمان، چندین فاکتور مانع انجام آزمایشات میدانی پروژه به یک سطح خاص شدند: غلظت متان در پانل‌های تست و چاه گاز تغییرات زیادی را نشان دادند. چندین دفعه غلظت متان در چاه گاز، برای یک مدت طولانی صفر بود. به طور مشخص، چاه گاز هنوز برای زهکشی گاز استفاده می‌شد؛ بنابراین امکان اندازه‌گیری سرعت قطعی اکسیداسیون متان تحت این

لایه فعال بیولوژیکی می‌تواند انتشار متان را در محیط واقعی محل دفن زباله کاهش دهد. به خاطر عواملی چون چگونگی دفن زباله و فصل، سرعت اکسیداسیون متان فقط می‌تواند در آزمایشات میدانی تشخیص داده شود. برای ایجاد یک لایه پوشش فعال بیولوژیکی، AAC به تنهایی نمی‌تواند پایداری مورد نیاز در مقابل تجهیزات سنگین را در محل دفن زباله به روش معمولی را فراهم کند. بنابراین ما ضایعات بازیافتی آجرهای ماسه-آهکی را به عنوان اجزا باربر به مخلوط اضافه کردیم تا به مثابه ستون فقرات محکمی برای بستر عمل کند. البته از اجزای خنثی هم می‌توان بدین منظور استفاده نمود. در پروژه تکمیل شده *AiF Zutech MethanoxII*، ترکیب ضایعات بازیافتی آجرهای ماسه-آهکی و AAC با نسبت حجمی ۶۰ به ۴۰ بهترین نتیجه به دست آمد. اندازه ذرات در بازه ۱۶ تا ۳۲ میلی‌متر بود. در پروژه دیگر، ما نتایج خوبی را با استفاده از ضایعات آجر در ترکیب با AAC به دست آوردیم. در هر دو پروژه ما از مواد بازیافت شده در ترکیب با *Methylbacter sp* مانند MOB استفاده کردیم.

MOB در یک اتمسفر متشکل از هوا و متان در بستری از مواد معدنی با پی‌اچ خنثی، غنی‌سازی، جدا و کشت شد. در نهایت، مواد بازیافت شده با ترکیبات مختلف در مقیاس آزمایشگاهی، کشت شدند.

تمام اندازه‌گیری‌ها با استفاده از یک بطری شیشه‌ای مخصوص پر شده با احجام مختلفی از گاز انجام شد (شکل ۱). مواد بازیافتی با بخش‌های مشخصی از کشت‌های MOB تلقیح و در دمای اتاق نگهداری شد. غلظت متان به طور غیر پیوسته اندازه‌گیری شد. بعد از مصرف کامل، متان دوباره جایگزین شد. اغلب مخلوط‌ها با مواد بازیافتی مختلف نتایج خوبی را نشان دادند. سرانجام ما اجزای بازیافتی AAC را با نسبت حجمی ۶۰ به ۴۰ و اندازه ذرات بین ۸ و ۱۶ میلی‌متر برای آزمایش راکتور ستونی استفاده کردیم (شکل ۲). مخلوط گازها شامل سطوح مختلفی از متان از قسمت انتهایی وارد شد. ستون شامل چندین سنسور دمايي و سپتوم برای حذف گاز از طریق سرنگ در لول‌های مختلف می‌باشد. در قسمت بالایی یک آبپاش برای پر کردن دوباره آب و یک مانومتر گاز نصب شده بود.

مخلوط گازها شامل سطوح مختلفی از متان از قسمت انتهایی وارد شد. ستون شامل چندین سنسور دمايي و سپتوم برای حذف گاز از طریق سرنگ در لول‌های مختلف می‌باشد.

TABLE 1 Methane oxidation rates on various recycling materials

Recycling material	Average methane oxidation rate (l/d*m ³)	Measuring period
KS1 4/8 mm	0.2	18 days
KSM2 4/8 mm	23.27	
KS1 8/16 mm	6.63	
PB3 0/8 mm	8.67	
PB3 8/16 mm	63.16	21 days
PBM4 8/16 mm	84.75	
PB3 8/16 mm	23.04	
PBM4 8/16 mm	41.1	

KS, limestone; KSM, limestone with contaminations; PB, AAC; PBM, AAC with contaminations.

وجود دارد. انتقال تجربیات آزمایشگاهی به مقیاس واقعی امکان پذیر است. نقایص متعددی برای کار میدانی شناسایی شد. به طور کلی، جنبه های مثبت و منفی می تواند به شرح زیر خلاصه شود:

انتشار متان در محدوده محل دفن زباله تغییرات زیادی را نشان داد که به میزان زیادی غیر همگن بود. این امر مستقل از زهکشی گاز چاه ها بود مخلوط مواد باز یافتی فقط تغییرات جزئی نشان دادند. تجزیه ذرات AAC به هیچ عنوان مشاهده نشد. حتی بعد از قرار گیری طولانی مدت در محیط و فشرده شدن بستر به دلیل تردد ادوات هیچ تغییری مشاهده نشد. MOB به کار رفته حتی بعد از مدت زمان طولانی هنوز فعال بود و می توانست با استفاده از تجهیزات مولکولی خاصی تشخیص داده شود. البته ترکیب جمعیت باکتریایی در طول زمان تغییر کرد. این امر طبیعی است و قبلاً در راکتور ستونی آزمایشات مشاهده شده است.

موقعیت ها وجود نداشت. متان همچنین از جهات دیگر غیر از جهت لوله چاه گاز به پانل های تست می رسید. در مجموع، حرکت گاز در محدوده یک محل دفن زباله به میزان بالایی غیر یکنواخت است. فعالیت MOB در اینچنین مقیاس بزرگی از مواد باز یافتی در مقایسه با مقیاس آزمایشگاهی به میزان زیادی کمتر است و علت آن پی اچ قلیایی مواد باز یافتی می باشد.

نتیجه گیری

در مقاله های علمی می بینیم که انتشار گاز متان از محل های دفن زباله می تواند به میزان ۱۲۰ لیتر متان در هر دسی متر مکعب برسد. در نتایج مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از بطری شیشه ای و راکتور ستونی، ما به سرعتی بین ۲۰-۸۰ لیتر متان در هر دسی متر مکعب رسید، که امکان رسیدن به سرعت های آکسیداسیون بالاتر متان با افزایش ضخامت مواد باز یافتی بیواکتیو

در مقاله های علمی
می بینیم که انتشار گاز
متان از محل های دفن
زباله می تواند به میزان
۱۲۰ لیتر متان در هر
دسی متر مکعب برسد.