

روش جدید حذف بیولوژیکی مواد شیمیایی مخاطره آمیز*

ترجمه : مهشید لؤلویی *

چکیده

یکی از مسائل مورد توجه سال‌های اخیر، حذف ترکیبات سمی از فاضلاب‌ها، خاک و آب زیرزمینی و رساندن آنها به غلظت‌های بسیار پایین در حد میکروگرم بر لیتر یا کمتر می‌باشد. از آنجا که رعایت حدود آستانه در طرح‌های تصفیه بیولوژیکی الزامی است، به این جهت بایستی از روش‌هایی استفاده نمود که بتواند ترکیبات سمی را در غلظت‌های پایین‌تر از حد آستانه حذف نماید، روش‌هایی مانند جریان نهرگونه^۱. روش‌های بیولوژیکی جدیدی برای حذف آلاینده‌های مقاوم و رساندن آنها به غلظت‌های جزئی وجود دارد. حذف حلال‌های کلره، مانند تتراکلرواتان (PCE) و تری‌کلرواتان (TCE) از طریق روش‌هایی هم‌چون هالوژن‌زدایی تنفسی^۲ تحت شرایط بی‌هوازی یا سوخت و ساز مشترک^۳ تحت شرایط هوازی از این جمله‌اند. نتایج موفقیت‌آمیز کاربرد این روش‌ها، فهم بهتر آنها را جهت حذف مشابه سایر مواد شیمیایی در مقادیر جزئی، هم در سیستم‌های بیولوژیکی هوازی و هم بی‌هوازی جهت تصفیه فاضلاب‌ها و پخش در زمین‌های بهداشتی می‌طلبد.

تأثیر آلاینده‌های چندتایی بر روی تجزیه آلاینده‌های منفرد می‌باشد.

مقدمه

حذف بیولوژیکی مواد آلی جزئی

زمانی که هدف، کاهش غلظت یک ماده تا مقادیر جزئی است، دو حد آستانه مختلف مورد توجه قرار می‌گیرد. حد اول مربوط به یک واکنش دهنده محدود کننده رشد زمانی که غلظت آن زیر حد آستانه است می‌باشد، این غلظت را S_{min} می‌نامیم. دوم حداکثر غلظتی است که در آن، تغییر و تبدیل ماده واکنش دهنده انرژی بیشتری از انرژی لازم برای رشد و نگهداری ارگانیسم مصرف خواهد کرد.

بسیاری از مواد آلی خطرناک موجود در فاضلاب‌ها و در محیط، هالوژنه هستند که نسبت به تجزیه بیولوژیکی مقاومت‌ترند. سهولت تجزیه بیولوژیکی عموماً با کاهش اندازه هالوژن کم می‌گردد، پس ترکیبات برم‌ه سریع‌تر از ترکیبات کلره و هر دو سریع‌تر از ترکیبات فلوره تجزیه

تصفیه بیولوژیکی مدت‌هاست که برای حذف مواد آلی از فاضلاب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، علت آن این است که اکسیژن خواهی این فاضلاب‌ها را در آب‌های پذیرنده کاهش دهد. تاکنون توجه، عموماً به غلظت‌هایی بالاتر از چند میلی‌گرم در لیتر متمرکز بوده است. در سال‌های اخیر، مواد آلی خاصی که برای انسان یا اکوسیستم‌های طبیعی حتی در غلظت‌های جزئی سمی می‌باشند مورد توجه قرار گرفته‌اند تا بتوان آن‌ها را از طریق تجزیه بیولوژیکی حذف نمود. در این مورد هدف، اغلب کاهش غلظت تا حد میلی‌گرم در لیتر یا کمتر می‌باشد. بنابراین بایستی غلظت‌ها را سه تا چهار مرتبه پایین‌تر از آن چیزی که در سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی معمولی است کاهش داد. اغلب این آلاینده‌ها منشأ صنعتی دارند و برای میکروارگانیسم‌ها بیگانه‌اند بنابراین امکان تجزیه آنها از این نظر مشکل می‌باشد. به جهت پاسخ به این نیاز، توسعه مفاهیم جدید و کاربرد شیوه‌های نو برای تصفیه بیولوژیکی مورد نیاز می‌باشد.

مسئله مورد توجه، امکان تجزیه بیولوژیکی ترکیبات آلی و رساندن غلظت آنها به پایین‌ترین حد و نیز بررسی

* عضو هیات علمی گروه بهداشت محیط - دانشکده بهداشت کرمان

- 1- Plug-Flow
- 2- Dehalorespiration
- 3- Cometabolism

می‌شوند. بسیاری از ترکیبات هالوژنه که روزی به عنوان غیر قابل تجزیه بیولوژیکی شناخته می‌شدند مشخص شده که قادرند تحت شرایط مناسب و روش‌های پیشرفته تجزیه گردند.

یک روش جدید برای تجزیه این مواد، هالوژن زدایی کاهشی^۱ می‌باشد. در این روش ماده آلی، پذیرنده الکترون است. با پذیرفتن دو الکترون از یک دهنده الکترون مانند یک ترکیب آلی دیگر یا هیدروژن مولکولی، یک اتم هالوژن از ماده آلی خارج شده و به جای آن یک اتم هیدروژن جایگزین می‌گردد، به این ترتیب ماده آلی تغییر و تبدیل می‌یابد.

روش پیشرفته دیگری که می‌تواند باعث تغییر و تبدیل ترکیبات آلی هالوژنه گردد، روش سوخت و ساز مشترک می‌باشد.

در این روش، آنزیم‌های استفاده شده به وسیله ارگانسیم‌ها برای یک عمل متابولیک، به طور اتفاقی بر ماده آلی هالوژنه تأثیر گذاشته، باعث می‌شوند آن ماده آلی تغییر شکل بدهد. از این عمل سودی برای ارگانسیم حاصل نمی‌گردد، در واقع ممکن است مضر هم باشد. یک نوع معمول واکنش سوخت و ساز مشترک هوازی، اکسیداسیون یک ترکیب به وسیله منو یا دی‌اکسیژناز^۲ است. روش هالوژن زدایی کاهشی تحت شرایط بی‌هوازی نیز به خوبی روش سوخت و ساز مشترک عمل می‌کند، اگرچه روش مذکور برای بسیاری از ارگانسیم‌ها بازدهی انرژی در بر دارد.

امکان دارد که یک فرایند سوخت و ساز مشترک نیز از طریق مکانسیم‌های مناسب به یک واکنش با بازدهی انرژی برای ارگانسیم تبدیل گردد.

تری کلرواتان (TCE) یک حلال کلره است که زمانی مقاوم به تجزیه بیولوژیکی شناخته شده بود، اما اکنون توسط فرایندهای سوخت و ساز مشترک هوازی و بی‌هوازی به وسیله بعضی ارگانسیم‌ها قابل تجزیه است، همین طور این ماده طی واکنش هالوژن زدایی کاهشی توسط ارگانسیم‌های دیگری تجزیه می‌گردد. مثال‌هایی از این واکنش‌ها و کاربرد عملی آنها برای تجزیه مواد شیمیایی خطرناک در زیر شرح داده می‌شود.

حداقل غلظت ماده واکنش دهنده^۳

سرعت تبدیل یک ماده واکنش دهنده برای تولید انرژی به وسیله باکتری‌ها تابعی از غلظت آن ماده است. در غلظت‌های کم، سرعت متناسب است با غلظت واکنش دهنده در یک نقطه خاص همان طور که غلظت واکنش دهنده کاهش می‌یابد، سرعت تولید انرژی لازم برای میکروارگانسیم‌ها کافی نبوده و بنابراین افزایشی در سلول رخ نمی‌دهد. این غلظت را S_{min} می‌نامند. بر اساس سینتیک مونود^۴ برای رشد باکتری‌ها، مقدار S_{min} را می‌توان با مساوی قرار دادن سرعت رشد با صفر تعیین نمود:

$$\mu = \frac{YqS_{min}X}{K + S_{min}} - bX = 0 \quad (1)$$

$$S_{min} = K \frac{b}{Yq - b} \quad (2)$$

که $\mu(d^{-1})$ سرعت رشد ارگانسیم، Y (mg/mg) ضریب بازدهی برای رشد باکتری از ماده واکنش دهنده، $q(d^{-1})$ سرعت ماکزیمم مصرف واکنش دهنده بر واحد جرم باکتری K (mg/l) ثابت میل ترکیبی برای واکنش دهنده، $b(d^{-1})$ سرعت مرگ ارگانسیم و X (mg/l) غلظت باکتری می‌باشد. رابطه دیگر $m = b/Y$ می‌باشد که m سرعت مصرف واکنش دهنده در موقعی که رشد و مرگ متعادل هستند می‌باشد. رابطه فوق را می‌توان به روابط ۱ و ۲ ارتباط داد. مروری عالی بر این مفاهیم در سال ۱۹۹۴ توسط الکساندر ارائه شد.

در سال ۱۹۸۰ مک کارتی و ریتمن ثابت نمودند که در تجزیه بیولوژیکی هوازی استات در یک ستون حباب شیشه‌ای نهرگونه غلظت S_{min} برابر ۰/۶۶ خواهد بود که با مقدار تجربی بسیار توافق داشت.

اگرچه بر طبق معادله ۲، S_{min} به چندین متغیر وابسته است که باعث می‌گردد مقدار آن به طور قابل توجهی از یک ارگانسیم به بعدی و از یک ماده مغذی به دیگری تغییر نماید.

برای مثال مک کارتی و باور در سال ۱۹۸۴ دریافتند که غلظت پساب استات در یک ستون مشابه، با محیط

^۳ Minimum Substrate Concentration

^۴ Monod

کشت‌های مخلوط شده به آهستگی با زمان کاهش یافته و به مقدار ۰/۰۵ (mg/l) می‌رسد. این می‌رساند که با گذشت زمان، باکتری S_{min} کوچکتری، شاید در پاسخ به غلظت کم استات را در نزدیکی نقطه انتهایی ستون نشان می‌دهد. آیا این نتیجه، نشان دهنده ثابت ترکیبی کوچکتر است یا سرعت تجزیه کمتر یا بعضی خصوصیات ناشناخته دیگر؟ اگرچه غیر منطقی نخواهد بود که انتظار داشته باشیم باکتری خود را با موقعیتی که در آن نتواند انرژی لازم برای رشد را به دست آورد، سازگار نماید.

حذف تا غلظتی پایین تر از S_{min}

کاربرد واکنش دهنده ثانویه: اغلب باکتری‌ها می‌توانند ترکیبات آلی مختلفی را برای تأمین انرژی مورد نیاز خود به کار ببرند. وقتی که دو ماده در دسترس است، باکتری انرژی لازم برای رشد را از ماده با غلظت بالاتر تأمین می‌کند (واکنش دهنده اولیه) و ماده دوم با غلظت کمتر (ثانویه) هم تجزیه شده و غلظت آن به کمتر از S_{min} خواهد رسید. این مسئله توسط لپات و همکاران در سال ۱۹۸۴ با به کار بردن گونه‌های سودوموناسی که می‌توانست هم بر روی استات و هم بر روی متیلن کلراید رشد نماید توضیح داده شد.

در ستون تغذیه پیوسته مورد مطالعه که با استات 1 (mg/l) تغذیه شده بود متیلن کلراید تا ۹۵٪ حذف گردید.

مکارتی و باور در سال ۱۹۸۴ نتیجه مشابهی را با محیط کشت‌های غنی در یک ستون تغذیه شده با 11 (mg/l) استات و مخلوطی از کلروبنزن‌ها و هیدروکربن‌های آروماتیک با غلظت‌هایی کمتر از 1 (μ g/l) مشاهده نمودند.

در این آزمایش، استات تا ۹۵٪ حذف شد و به 50 (μ g/l) رسید و ترکیبات آلی حاضر در ستون نیز با درصدی مشابه و در بعضی حالات با درصد بالاتری حذف گردیدند. برای مثال، استیرین بیش از ۹۹٪، اتیل بنزن ۹۹٪، ۱ و ۴ دی کلروبنزن ۹۸٪ و ۱ و ۲ دی کلروبنزن تا ۹۶٪ حذف شدند و غلظت آنها به ترتیب به 0.05 (μ g/l)، 0.1 ، 0.2 و 0.4 (μ g/l) رسید. بنابراین

با حضور یک واکنش دهنده اولیه به غلظت‌های خیلی پایین مواد آلی خطرناک می‌توان دست یافت.

حدود ترمودینامیک

در تجزیه ترکیباتی که به عنوان پذیرنده یا دهنده الکترون در متابولیسم انرژی مصرف می‌شوند غلظت‌های آستانه ترمودینامیکی وجود دارد. آستانه ترمودینامیکی را می‌توان با مساوی قرار دادن انرژی آزاد واکنش (ΔG_r) با صفر تحت شرایط خاص تعیین نمود.

$$\Delta G_r = \Delta G_r^0 + RT \sum_{i=1}^n V_{ir} \ln a_i = 0 \quad (3)$$

در جدول ۱، واکنش‌هایی که در آنها هیدروژن به عنوان دهنده الکترون و ترکیبات دیگر به عنوان پذیرنده الکترون می‌باشند همراه با واکنش انرژی آزاد استاندارد در $pH = 7$ (ΔG_w^0) آمده است.

با به کار بردن معادله ۳، می‌توان غلظت آستانه کوچکتر را برای هیدروژن تعیین نمود. برای مثال تبدیل اتوتروفیک هیدروژن در تولید متان با استفاده از جداول ۱ و معادله ۳ به صورت ذیل می‌باشد.

$$\Delta G_r = \Delta G_w^0 + RT \ln \frac{[CH_4]^{1/4} [H_2O]^{1/2}}{[CO_2]^{1/4} [H_2]} = 0 \quad (4)$$

در صورتی که فعالیت آب را یک فرض کنیم معادله به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\ln[H_2] = \frac{-32.680}{(8.314)(298)} + \ln \frac{[CH_4]^{1/4}}{[CO_2]^{1/4}} = -13.19 \quad (5)$$

(فشار جزئی دی اکسید کربن و متان برابر ۰/۲ اتمسفر در نظر گرفته شده است).

بنابراین حد آستانه هیدروژن در تخمیر متان 10^{-6} /۹۱۰ اتمسفر است. اگر ثابت هنری برای هیدروژن در دمای $25^\circ C$ ، 2.3×10^5 (atm/M) در نظر بگیریم غلظت آستانه برابر $1/5$ (nM) می‌باشد. غلظت‌های آستانه محاسبه شده برای هیدروژن در فرایندهای مختلف به عنوان پذیرنده الکترون همراه با غلظت‌های آستانه‌ای که به طور تجربی به دست آمده در جدول ۱ خلاصه شده است. همان طور که مشخص است در واکنش‌هایی با انرژی بالاتر، غلظت‌های آستانه کوچکترند، حتی تا زیر حد تشخیص دستگاه‌های موجود حدود آستانه اندازه‌گیری شده برای سه واکنش آخر یعنی تولید سولفید، متان و استات ۵ تا ۱۰ برابر حدود ترمودینامیکی اند.

^۱ Reductive Dehalogenation

^۲ Monooxygenase or Dioxygenase

جدول ۱- واکنش انرژی‌های آزاد برای پذیرنده‌های مختلف الکترون با هیدروژن به عنوان دهنده الکترون و آستانه‌های ترمودینامیکی و تجربی

گزیده الکترون	واکنش	ΔG_w° (Kj/molH ₂)	آستانه هیدروژن (nM)	
			منابع	اندازه‌گیری شده
O ₂	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$	-237/18		3×10^{-36}
NO ₃ ⁻	$H_2 + \frac{2}{5}NO_3^- + \frac{2}{5}H^+ = \frac{1}{5}N_2 + \frac{6}{5}H_2O$	-224/14	۱	5×10^{-33}
CCl ₂ =CCl ₂	$H_2 + CCl_2 = CCl_2 = CHCl = CCl_2 + H^+ + Cl^-$	-191/66	۵	2×10^{-31}
MnO ₂	$H_2 + MnO_2 + 2H^+ = Mn^{2+} + 2H_2O$	-153/49		1×10^{-24}
Fe(OH) ₃	$H_2 + 2Fe(OH)_3 + 4H^+ = 2Fe^{2+} + 6H_2O$	-35/36	۷,۶,۴,۳	5×10^{-7}
SO ₄ ²⁻	$H_2 + \frac{1}{4}SO_4^{2-} + \frac{3}{8}H^+ = \frac{1}{8}H_2S + \frac{1}{8}HS^- + H_2O$	-38/04	۷,۶,۴	۰/۱۸
CO ₂	$H_2 + \frac{1}{4}CO_2 = \frac{1}{4}CH_4 + \frac{1}{2}H_2O$	-32/68	۷,۶,۵,۴,۲	۱/۵
CO ₂	$H + \frac{1}{4}CO_2 + \frac{1}{4}HCO_3^- = \frac{1}{4}CH_3COO^- + \frac{3}{4}H_2O$	-24/94	۴,۱	۵۲

* انرژی آزاد با فرض دما حدود ۲۵°C، فعالیت گاز ۰/۲، آتمسفر، فعالیت گونه‌های یونی و هیدروکربورهای کلرینه ۰/۰۰۱ مول و pH = ۷

مشخص گردید که این ترکیبات نیز تحت شرایط بی‌هوازی تغییر و تبدیل می‌یابند، در اینجا هم فرایند تغییر و تبدیل، هالوژن زدایی کاهشی است. تغییر تبدیلی که طی فرایند هالوژن زدایی کاهشی رخ می‌دهد همیشه سودمند نبوده گاهی اوقات محصولی سمی‌تر از ترکیب اصلی را ایجاد می‌نماید. برای مثال، وینیل کلراید حاصل از هالوژن زدایی تتراکلرواتان (PCE) یا تری کلرواتان (TCE).

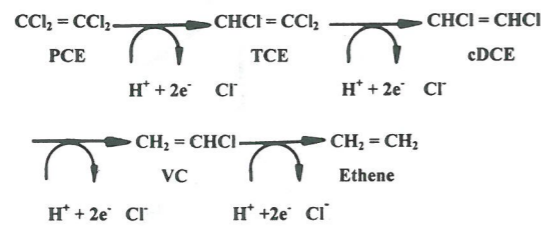
وینیل کلراید توسط EPA به عنوان سرطان‌زا برای انسان شناخته شده و ماکزیمم مقدار مجاز آن در آب $2(\mu g/l)$ گزارش شده است. در حالی که PCE، TCE با $MCL=2(\mu g/l)$ احتمال سرطان‌زایی دارند. عموماً ترکیبات کلره با تعداد کلر بیشتر سریع‌تر از ترکیبات باکلر کمتر تغییر و تبدیل می‌یابند. خوشبختانه گاست و فریدمن در سال ۱۹۸۹ دریافتند که وینیل کلراید نیز می‌تواند به اتان غیر سمی تبدیل شود. امروزه توجه به کاربرد هالوژن‌زدایی کاهشی جهت رفع آلودگی از آب‌های زیرزمینی آلوده بیشتر گردیده است. واکنش‌های زنجیری زیر تبدیل تتراکلرواتان به اتان را نشان می‌دهد.

در برخی حالات مانند کاهش Fe^{3+} و هالوژن‌زدایی کاهشی تتراکلرواتان، حدود اندازه‌گیری شده تقریباً بیشتر از حدود ترمودینامیکی هستند. در هر صورت در هنگام محاسبه غلظت‌های آستانه برای ترکیبات جزئی هم حد سینتیکی و هم ترمودینامیکی نیاز به بررسی بیشتر دارند.

هالوژن‌زدایی کاهشی

ترکیبات آلی هالوژنه مدت‌های زیادی به عنوان ترکیبات مقاوم به تجزیه هوازی شناخته شده بودند. ۳۰ سال قبل مشخص شد که بعضی آفت‌کش‌های کلره که بسیار مقاوم به تجزیه هوازی شناخته می‌شدند، به آسانی تحت شرایط بی‌هوازی تغییر و تبدیل می‌یابند (مک کارتی و هیل، ۱۹۶۷). این آفت‌کش‌ها شامل لیندن، هپتاکلر، اندرین، ددت و آلدرین بودند. اغلب، محصولات واسطه تجزیه این ترکیبات مورد توجه بودند. به عنوان مثال در هنگام تجزیه DDT، ماده DDD به عنوان واسطه تشکیل می‌شد، در نتیجه این عمل کلر از زنجیر اتان خارج می‌شد و یک هیدروژن به جای آن قرار می‌گرفت. این فرایند را اکنون هالوژن‌زدایی کاهشی می‌نامند.

حلال‌های کلره و تری هالومتانها هم نسبت به تجزیه هوازی مقاوم شناخته شده‌اند، اما طی سال ۱۹۸۰



منبع الکترونی مورد نیاز عموماً هیدروژن مولکولی می‌باشد که در طی تجزیه بی‌هوازی ماده واکنش دهنده تشکیل می‌گردد (شکل ۱ و جدول ۱ را ملاحظه کنید)، اما ترکیبات دیگری مانند استات یا لاکتات نیز می‌توانند به عنوان دهنده الکترون عمل نمایند.

در واکنش‌های هالوژن‌زدایی کاهشی، انرژی تولید می‌گردد. اما آنزیم‌هایی که انرژی آزاد شده را دریافت می‌کنند شناخته شده نبودند. در سال ۱۹۸۷، تی‌جه و دافینگ گزارش کردند که گونه ۱-DCB انرژی لازم برای رشد را از هالوژن زدایی ترکیب ۳ کلروبنزوات می‌گیرد. نکته جالب توجه این است که هیدروژن مورد نیاز به عنوان دهنده الکترون از تخمیر بنزوات، توسط ارگانسیم‌های دیگر و تبدیل آن به استات و هیدروژن به دست می‌آید.

در سال ۱۹۹۳، هالیگر و همکاران، محیط کشت خالصی با عنوان دی‌هالوباکتر رستریکتز را فراهم آوردند که انرژی لازم برای رشد خود را از هالوژناسیون PCE به دست می‌آورد. در اینجا هیدروژن به عنوان دهنده الکترون و PCE به عنوان پذیرنده الکترون عمل می‌کنند. این ارگانسیم PCE را با حذف دو اتم کلر به سیس ۱ و ۲ دی‌کلرواتان تبدیل می‌نماید.

لقب جالب داده شده به این ارگانسیم این یافته را تأیید می‌کند که هیچ ماده دیگری به جز هیدروژن یا فرمات و PCE یا TCE رشد این ارگانسیم را حمایت نمی‌کند.

اخیراً ارگانسیم دیگری که می‌تواند PCE را به اتان تبدیل نماید، ایزوله شده است این ارگانسیم انرژی لازم را از سه مرحله اول هالوژن‌زدایی می‌گیرد. اما تبدیل وینیل کلراید به اتان ظاهراً سوخت و ساز مشترک می‌باشد. حال که هالوژن‌زدایی کاهشی تولید کننده انرژی

برای رشد ارگانسیم می‌باشد، فرایند را هالوژن‌زدایی تنفسی^۱ می‌نامند.

بنابراین در هالوژن‌زدایی تنفسی ترکیب مورد تجزیه پذیرنده الکترون می‌باشد و نه دهنده الکترون. یک استثنا در این مورد واکنش تبدیل نیتراست به گاز ازت در واکنش نیترازدایی می‌باشد.

در تجزیه بسیاری از آلاینده‌های هالوژنه موجود در محیط، هالوژن زدایی کاهشی مورد توجه می‌باشد.

به طور مثال PCBs کلروبنزنها و فنل‌های کلره شده پنتاکلروفنل PCP.

هالوژن‌زدایی ترکیبات آلی هالوژنه خطرناک به طور طبیعی در آب‌خوان‌ها اتفاق می‌افتد، در اینجا هم به یک دهنده الکترون مناسب نیاز است، هیدروژنی که از تخمیر بی‌هوازی اغلب مواد آلی حاصل می‌گردد می‌تواند دهنده خوبی برای الکترون باشد (شکل ۱).

هالوژن زدایی در پخش در زمین‌ها، جایی که غلظت بالایی از مواد الکترون دهنده وجود دارد و همچنین هاضم‌ها رخ می‌دهد. بنابراین حذف ترکیبات هالوژنه خطرناک از این طریق حائز اهمیت خواهد بود.

سوخت و ساز مشترک

مفهوم سوخت و ساز مشترک در سال ۱۹۵۹ از کار فاستر و لیدبتر گرفته شد. آنها مشاهده نمودند که بعضی آلکانها به طور اتفاقی به وسیله باکتری‌های منواکسیژناز به الکل‌ها اکسید می‌شوند.

این اکسیداسیون تحت شرایط بی‌هوازی صورت می‌گیرد و ممکن است هم از نوع اکسیدی و هم از نوع

¹ Dehalorespiration

² Landfills

برای چنین منظوری از تخمیر بی‌هوازی اغلب ترکیبات آلی به دست می‌آید بنابراین تقریباً هر ترکیب آلی می‌تواند به عنوان ماده تولید کننده هیدروژن باشد. درک فرایندهای رقابتی درگیر برای کاربرد موفقیت‌آمیز این تکنولوژی ضروری است.

نکته قابل توجه این است که تجزیه بی‌هوازی حلال‌های کلره به حضور ترکیبات آلی دیگر وابسته است. بنابراین تجزیه حلال‌های کلره به مخلوطی از مواد شیمیایی آلی نیاز دارد. فرایند مورد توجه دیگر جهت تجزیه مواد آلی هالوژنه، سوخت و ساز مشترک می‌باشد. سوخت و ساز مشترک هوازی اغلب بیشتر از فرایند بی‌هوازی به کار می‌رود. در اینجا نیز به حضور ترکیبات دیگر نیاز می‌باشد.

اکنون مشخص شده است که فرایندهای تصفیه بیولوژیکی قادرند غلظت ترکیبات منفرد را تا حد $(\mu\text{g/L})$ یا پایین‌تر نیز کاهش دهند. مقادیر کمتر را می‌توان به وسیله طراحی مناسب سیستم‌های تصفیه‌ای که اصول نهرگونه در آنها به کار گرفته شده است به دست آورد.

این فرایندها برای بقاء خاک‌ها و آب‌های زیرزمینی آلوده به کار می‌روند. از این اصول برای تجزیه ترکیبات آلی خطرناک در سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی هوازی، هاضم‌های بی‌هوازی و پخش در زمین‌ها، محل‌هایی که مخلوطی از مواد آلی وجود دارد استفاده می‌شود و بی‌شک به تجزیه بسیاری از ترکیبات خطرناک منجر می‌گردد.

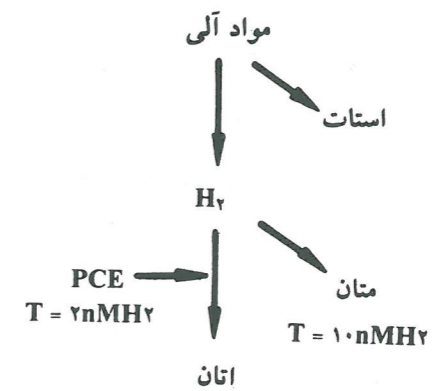
*McCarty, P.L. (2000) "Novel Biological Removal of Hazardous Chemicals at trace levels", Wat. Sc & Tech., Vol. 42, No. 12, pp.49-60.

در سایت ادوارد مقدار $9(\text{mg/l})$ تولوئن به آب آلوده به TCE همراه با اکسیژن کافی و H_2O_2 جهت نگهداری شرایط هوازی و جلوگیری از تجمع بیولوژیکی آشفالگیرهای آب تزریق شد. میان ۸ چاه مورد تصفیه سیستم برگشت آب زیرزمینی اعمال شد، سرعت پمپاژ (l/min) ۲۵-۳۸ بود. ۹۷٪ ترکیب TCE حذف شد و غلظت آن از $1200-1000(\mu\text{g/l})$ به $20-50(\mu\text{g/l})$ رسید. بنابراین از این فرایند برای بقا آب‌های زیرزمینی می‌توان کاملاً بهره برد. سوخت و ساز مشترک بی‌هوازی ترکیبات آلی کلره از طریق هالوژن‌زدایی کاهشی به خوبی به اثبات رسیده است. این فرایند آرامتر صورت می‌گیرد و نیاز به دهنده الکترون بیشتری جهت تکمیل واکنش نسبت به فرایند هالوژن‌زدایی تنفسی دارد.

کربن تتراکلرید از طریق فرایند سوخت و ساز مشترک تحت شرایط بی‌هوازی توسط ارگانسیم‌های مختلفی، مانند دی‌نیتروفایرها، کلستریدها و اینتریکها تجزیه می‌گردد. عموماً هالوژن‌زدایی کاهشی تتراکلریدکربن به طور جزئی منجر به تولید کلروفرم که یک ترکیب سمی است می‌شود. فرایند سوخت و ساز مشترک جدیدی برای تبدیل تتراکلرورکربن به وسیله سودوموناژ استاتزری گونه KC توسط کریدل و همکاران در سال ۱۹۹۰ انجام پذیرفت که در آن دی‌اکسید کربن و کلراید محصولات نهایی می‌باشند.

نتیجه‌گیری

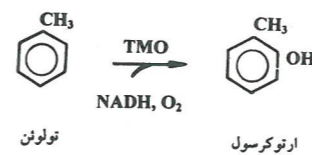
طی بیست سال گذشته فرایندهای جدیدی جهت تجزیه بیولوژیکی ترکیبات آلی هالوژنه کشف شده است. در هالوژن‌زدایی کاهشی حلال‌های کلره، این ترکیبات پذیرنده الکترون می‌باشند و هیدروژن به عنوان معمول‌ترین دهنده الکترون به کار می‌رود. هیدروژن لازم



شکل ۱- تخمیر بی‌هوازی ترکیبات آلی پیچیده منجر به تولید استات و هیدروژن می‌گردد. فرایندهای میکروبی، هیدروژن در دسترس را به عنوان دهنده الکترون مصرف می‌نمایند (جدول ۱). شکل، دو واکنش را نشان می‌دهد. یک واکنش که منجر به تشکیل متان می‌گردد و دیگری کاربرد PCE به عنوان پذیرنده الکترون که منجر به تولید اتان می‌گردد. حرف T غلظت آستانه را برای این فرایندها نشان می‌دهد.

مواد آلی که جهت اکسیداسیون CAH به وسیله اکسیژن‌ها به کار می‌روند شامل، متان، پروپان، بوتان، اتان، ایزوپرن، آمونیاک، وینیل کلراید، تولوئن و فنل می‌باشد.

به طور مثال، در یک آبخوان در پایگاه هوایی ادوارد کالیفرنیا، از تولوئن به عنوان فراهم آورنده اکسیژن‌ها برای تجزیه TCE در یک مقیاس کامل استفاده شد. برای شروع اکسیداسیون تولوئن حداقل ۵ اکسیژن‌ها به وسیله ارگانسیم‌های مختلف استفاده شد. اکسیژن‌ها فعال شده عبارت بود از تولوئن ارتومواکسیژناز (TOM)، طبقه عملکرد آن به وسیله واکنشهای زیر ارائه شده است.



اپوکسیداسیون TCE و تجزیه آن از طریق سوخت و ساز مشترک طی واکنش‌های زیر نشان داده شده است:

