فروشویی زیستی پسماندهای جامد

نگارنده

دکتر سید محمد موسوی

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس

۱۳۹۸

سرشناسه: موسوی، سیدمحمد، ۱۳۵۷ –
عنوان و نام پدیدآور: فروشویی زیستی پسماندهای جامع / نگارنده سیدمحمد موسوی؛ ویراستار ادبی و فنی رضا بیات.
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه تربیت مدرس، دفتر نشر آثار علمی، ۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری: ۳۹۷ ص.
شابک: 978-622-703405-9
وضعیت فهرست نویسی: فیپا
موضوع: زباله و زباله زدایی -- تجزیه‌زیستی
موضوع: Refuse and refuse disposal --Biodegradation
شناسه افزوده: بیات، رضا ویراستار
شناسه افزوده: دانشگاه تربیت مدرس. دفتر نشر آثار علمی
رده بندی کنگره: TDV۹۵/۵
رده بندی دیویی: ٦٢٨/٤٤٥
شماره کتابشناسی ملی: ٦٠٥٢٨٥٩

فروشویی زیستی پسماندهای جامد

نگارنده: دکتر سیدمحمد موسوی
ویراستار ادبی و فنی: دکتر رضا بیات
کارشناس اجرایی: فاطمه طالبی
طراح جلد: ترنج
صفحه‌آرایی: فرشته نجفی
شماره انتشار: ۲۵۵
شماره پیاپی: ۳۳۵
تاریخ انتشار: ۱۳۹۸
شمارگان: ۵۰۰
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۷۰۳٤-۰۵-۹ شابک الکترونیکی: ۹۷۸-۶۲۲-۸۳۷۶-۳۲-۵
ناشر: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس
نوبت چاپ: اول
ناظر چاپ: مصطفی جانجانی
لیتوگرافی: ایران گرافیک
چاپ و صحافی: قشقایی
مرکز پخش: تقاطع بزرگراه‌های آل‌احمد و دکتر چمران، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی: ۳۱۸-۱٤۱۱۵
تلفن: ۸۲۸۸۳۰۹٦
دورنگار: ۸۲۸۸۳۰۳۲
آدرس اینترنتی فروش: pub.modares.ac.ir

مسئولیت صحت مطالب کتاب برعهدهٔ نگارنده است.

تمام حقوق این اثر برای مرکز نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس محفوظ است و تکثیر کتاب به هر روشی بدون اجازه کتبی ناشر موجب پیگرد قانونی می‌شود.

تقدیم به:

تمام کسانی که در راه اعتلای علم می کوشند

فهرست مطالب

پیشگفتار ..... ز

فصل ۱- مقدمه و مبانی

۱-۱ پسماند جامد ۱

۱-۲ ضرورت مدیریت پسماندهای جامد ۳

۱-۳ روش‌های مدیریت پسماندهای جامد ۵

۱-٤ روش‌های بازیافت فلزها ۷

۱-٤-۱ پیرومتالورژی ۸

۱-٤-۲ هیدرومتالورژی ۱۰

۱-٤-۳ بیوهیدرومتالورژی ۱۳

۱-۵ فرایندهای زیستی بازیافت فلز ۱۵

۱-۵-۱ زیست‌پالایی ۱۵

۱-۵-۲ جذب زیستی ۱٦

۱-۵-۳ تجمع زیستی ۱۸

۱-۵-٤ فروشویی زیستی ۲۰

۱-٦ مقایسهٔ روش‌های بازیافت فلزها ۲۱

منابع ۲٤

فصل ۲- فروشویی زیستی

۲-۱ تعریف فروشویی زیستی ۲۷

۲-۲ تاریخچهٔ فروشویی زیستی ۳۲

۲-۳ ریزاندامگان مؤثر در فروشویی زیستی ۳٦

۲-۳-۱ باکتری‌های کمولیتواتوتروف ٤۰

۲-۳-۱-۱ ویژگی‌های باکتری *اسیدی‌تیوباسیلوس فرواکسیدانس* ٤٤
۲-۳-۱-۲ تقسیم‌بندی ریزاندامگان اسیددوست بر مبنای محدودهٔ دمایی ٤٧
۲-۳-۲ ریزاندامگان هتروتروف ٥٠
۲-۳-۲-۱ ریزاندامگان سیانوژنیک ٥١
۲-۳-۲-۲ قارچ‌های تولیدکننده اسیدهای آلی ٥٦
۲-۳-۳ فروشویی توسط کشت مخلوط ریزاندامگان ٦٠
۲-٤ سازوکار فروشویی زیستی توسط ریزاندامگان ٦١
۲-٤-۱ سازوکار فروشویی زیستی *کمولیتواتوتروف*‌ها ٦٢
۲-٤-۱-۱ سازوکار سولفوریک اسید ٦٦
۲-٤-۱-۲ سازوکار یون فریک (Fe^{3+}) ٦٨
۲-٤-۲ سازوکار فروشویی زیستی هتروتروف‌ها ٧٢
۲-٤-۲-۱ سازوکار ریزاندامگان هتروتروف سیانوژنیک ٧٢
۲-٤-۲-۲ سازوکار قارچ‌های هتروتروف تولیدکننده اسید آلی ٧٥
منابع ٨٠

فصل ۳- انواع پسماند جامد

۳-۱ پسماندهای جامد با محتوای فلزی بالا ٨٥
۳-۲ زباله‌های تجهیزات الکترونیکی و الکتریکی (WEEE) ٨٦
۳-۲-۱ ترکیب فلزها در زباله‌های الکترونیکی ٨٨
۳-۲-۲ حجم تولید زباله‌های الکترونیکی ٩٣
۳-۲-۲-۱ آمار زباله‌های الکترونیکی در ایران ٩٦
۳-۲-۳ بازیافت فلزها از زباله‌های الکترونیکی ٩٦
۳-۲-٤ تحقیقات در زمینهٔ فروشویی زیستی پسماندهای الکترونیکی ٩٩
۳-۳ پسماند باتری‌های فرسوده ۱۰۷
۳-۳-۱ آمار باتری‌های فرسوده ۱۱۳
۳-۳-۲ بازیافت فلزها از باتری‌های فرسوده ۱۱٤
۳-۳-۳ تحقیقات در زمینهٔ فروشویی زیستی پسماند باتری‌های لیتیم-یونی ۱۱٦
۳-۳-٤ تحقیق در زمینهٔ فروشویی زیستی باتری‌های نیکل - کادمیم فرسوده ۱۲۱
۳-٤ صفحهٔ نمایشگر فرسوده ۱۲۳
۳-٤-۱ بازیافت فلزها از LCD های فرسوده ۱۲٦

۳-٤-۲ تحقیقات در زمینهٔ فروشویی زیستی پسماند صفحات نمایشگر کریستال مایع ۱۲۷
۳-۵ گل قرمز ۱۲۸
۳-۵-۱ گل قرمز در ایران ۱۳۱
۳-۵-۲ بازیافت فلزها از گل قرمز ۱۳۱
۳-۵-۳ تحقیقات در زمینهٔ فروشویی زیستی گل قرمز ۱۳۳
۳-٦ انواع پسماند نیروگاه‌ها و کوره‌های صنعتی ۱۳۷
۳-٦-۱ بازیافت فلزها از پسماند نیروگاه‌ها و کوره‌های صنعتی.....۱٤۰
۳-٦-۲ تحقیقات در زمینهٔ فروشویی زیستی انواع پسماندهای نیروگاه‌ها و کوره‌های صنعتی ۱٤٤
۳-٦-۲-۱ فروشویی زیستی گردوغبار دودکش کورهٔ ذوب مس ۱٤٤
۳-٦-۲-۲ فروشویی زیستی سرباره و انباشتهٔ کورهٔ واگردان مس.....۱٤۵
۳-٦-۲-۳ فروشویی زیستی گردوغبار فیلتر کارخانهٔ مس ۱٤٦
۳-٦-۲-٤ فروشویی سربارهٔ کورهٔ دمشی فولاد.....۱٤٦
۳-٦-۲-۵ فروشویی زیستی خاکستر بادی و خاکستر ته‌ماند کوره‌ها و دستگاه‌های زباله‌سوز ۱٤۷
۳-۷ پسماند کاتالیست‌های فرسوده.....۱٤۸
۳-۷-۱ بازیافت فلزها از پسماندهای کاتالیست فرسوده.....۱۵۱
۳-۷-۲ فروشویی زیستی کاتالیست‌های فرسوده ۱۵۵
منابع ۱٦۱

فصل ٤- فرایند فروشویی زیستی پسماندهای جامد

٤-۱ مراحل فروشویی زیستی ۱۷۳
٤-۲ کشت ریزاندامگان ۱۷٤
٤-۲-۱ کشت وآماده‌سازی باکتری‌های اسیددوست ۱۷٤
٤-۲-۲ کشت وآماده‌سازی سویه‌های قارچی.....۱۸۱
٤-۲-۳ کشت وآماده‌سازی باکتری‌های سیانوژنیک ۱۸٦
٤-۳ آماده‌سازی پسماند ۱۸۹
٤-۳-۱ آماده‌سازی پسماند تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی ۱۹۰
٤-۳-۲ آماده‌سازی پسماند باتری‌های فرسوده.....۱۹۱
٤-۳-۳ آماده‌سازی پسماند صفحات نمایش فرسوده ۱۹۳
٤-۳-٤ آماده‌سازی گل قرمز ۱۹٤
٤-۳-۵ آماده‌سازی پسماند نیروگاه‌ها و کوره‌های صنعتی ۱۹۵

٤-٣-٦ آماده‌سازی پسماند کاتالیست‌های فرسوده ۱۹۷
٤-٤ خودهی ریزاندامگان به پسماند ۱۹۸
٤-٤-١ روش‌های سازگارسازی باکتری‌ها ۲۰۰
٤-٤-٢ سازوکار باکتری‌ها برای سازگار شدن ۲۰۱
٤-٤-٣ روش‌ها و نتایج خودهی باکتری به پسماند ۲۰۳
٤-٤-٣-١ خودهی باکتری‌های اسیددوست ۲۰۳
٤-٤-٣-٢ خودهی قارچ‌ها ۲۱۱
٤-٤-٣-٣ خودهی باکتری‌های سیانوژنیک ۲۱۸
٤-٥ انواع روش‌های فروشویی زیستی ۲۱۹
٤-٦ فروشویی زیستی در زیست‌واکنشگاه ۲۲۸
٤-٧ آزمون سمیت ۲۳۵
٤-٨ مقایسه فروشویی زیستی با فروشویی شیمیایی ۲۳۹
منابع ۲٤٥

فصل ٥- روش‌های آنالیز پسماند

٥-١ آنالیزهای لازم برای ارزیابی فرایندهای فروشویی زیستی ۲٤۹
٥-٢ آزمون‌های شناسایی پسماند جامد ۲٤۹
٥-٢-١ تعیین pH پسماند جامد ۲٥۰
٥-٢-٢ سنجش ترکیب درصد نمونه ۲٥۳
٥-٢-٣ فازهای تشکیل‌دهندهٔ ترکیبات فلزی ۲٥۸
٥-٢-٤ ریخت‌شناختی پسماند ۲٦٦
٥-٢-٥ طیف‌سنجی تبدیل فوریهٔ فروسرخ ۲۷٤
٥-٣ آنالیز محلول فروشویی زیستی ۲۷۸
٥-٣-١ اندازه‌گیری پتانسیل اکسایش-کاهش ۲۸۰
٥-٤ اندازه‌گیری متابولیت‌های ریزاندامگان ۲۸۱
٥-٤-١ اندازه‌گیری یون فریک ۲۸۱
٥-٤-٢ اندازه‌گیری یون سولفات ۲۸۲
٥-٤-٣ اندازه‌گیری میزان سیانید محلول ۲۸٤
٥-٤-٤ اندازه‌گیری اسیدهای آلی ۲۸٦
٥-٥ اندازه‌گیری رشد ریزاندامگان ۲۸٦

۵-۵-۱ شمارش سلولی ۲۸۷
۵-۵-۲ سنجش چگالی نوری ۲۸۷
۵-۵-۳ غلظت اکسیژن محلول در محیط ۲۸۸
۵-۵-٤ اندازه‌گیری وزن خشک سلولی ۲۹۰
۵-۵-۵ اندازه‌گیری یون‌های فلزی تجمع یافته در تودهٔ زیستی قارچ ۲۹۰
منابع ۲۹۱

فصل ٦- بهینه‌سازی متغیرهای مؤثر بر فرایند

٦-۱ متغیرهای تأثیرگذار ۲۹۵
٦-۱-۱ متغیرهای فیزیکی و شیمیایی ۲۹۵
٦-۱-۲ متغیرهای زیستی ۳۰۱
٦-۱-۳ متغیرهای وابسته به نمونه ۳۰۳
٦-۱-٤ ویژگی‌های انتخابی فرایند ۳۰۵
٦-۱-۵ عوامل الکتروشیمیایی ۳۰۷
٦-۲ طراحی آزمایش ۳۰۹
٦-۲-۱ روش سطح پاسخ ۳۱۰
٦-۲-۲ روش باکس- بنکن ۳۱۳
٦-۲-۳ نمونه‌هایی از طراحی به‌روش سطح پاسخ ۳۱٤
٦-۳ تحلیل آماری نتایج و مدل‌سازی ریاضی پاسخ‌ها ۳۱۹
٦-٤ بهینه‌سازی فرایند ۳۲۵
٦-۵ آزمون تأییدیه ۳۲۸
منابع ۳۲۸

فصل ۷- سینتیک فروشویی زیستی و استفاده از کاتالیست

۷-۱ سینتیک فروشویی زیستی ۳۳۵
۷-۲ مطالعات سینتیکی در فرایند فروشویی زیستی پسماندهای جامد ۳٤۰
۷-۳ استفاده از کاتالیست برای بهبود سینتیک فرایند فروشویی زیستی ۳٤۵
۷-۳-۱ استفاده از یون‌های فلزی به‌عنوان کاتالیست ۳٤۵
۷-۳-۲ استفاده از مواد فعال سطحی به‌عنوان کاتالیست ۳٤۸
۷-۳-۳ استفاده از کاتالیست‌های کربنی ۳٤۹

منابع ۳۵۱

فصل ۸- چشم‌انداز پژوهش‌های آینده

۸-۱ چالش‌های پیش‌روی فروشویی زیستی پسماندهای جامد ۳۵۳

۸-۱-۱ فروشویی زیستی در مقیاس صنعتی ۳۵۳

۸-۱-۱-۱ فروشویی توده‌ای ۳۵٤

۸-۱-۱-۲ فروشویی انباشته ۳۵٦

۸-۱-۱-۳ فروشویی مخزنی ۳۵۷

۸-۱-۲ نقش فناوری امیک در فروشویی زیستی پسماندهای جامد ۳٦۱

۸-۱-۳ جداسازی و خالص‌سازی فلزها از محلول حاصل از فروشویی ۳٦۳

منابع ۳٦٤

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی ۳٦۷

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی ۳۷۱

نمایه ۳۷۵

پیشگفتار

پسماندهای جامد جزئی جدانشدنی از زندگی دنیای کنونی هستند. در چند دهۀ اخیر با پیشرفت صنعت و فناوری، حجم عظیمی از انواع مختلف پسماندهای جامد تولیدشده است. مهم‌ترین پسماندهای تولیدشده در صنعت شامل زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی، لجن‌های آبکاری، باتری‌های فرسوده، کاتالیست‌های فرسوده، خاکسترهای بادی و پساند نیروگاه‌ها است. در بسیاری از پسماندها، گسترۀ وسیعی از مواد مانند پلیمر، شیشه، چوب و فلزها وجود دارد. در برخی از پسماندهای جامد بیش از ۵۰ نوع فلز وجود دارد که برخی بسیار خطرناک و سمی و برخی بسیار ارزشمند و گران‌بها هستند. مواجهه با حجم عظیم پسماندهای مختلف نیازمند مدیریتی صحیح و دقیق است. سه راهکار اصلی برای مدیریت پسماندها حذف، استفاده مجدد و بازیافت است. اگر به‌منظور حذف، پسماندهای جامد سوزانده شود فلزها و مواد خطرناک سمی وارد هوا می‌شود و اگر این پسماندها دفن شود محیط خاک در معرض آلودگی قرار می‌گیرد. درست‌ترین شیوۀ مدیریت پسماندهای جامد، بازیافت است. زیرا بازیافت به سلامت محیط‌زیست و همچنین حفظ ذخایر معدنی کمک می‌کند. در بخش بزرگی از معادن نیز پسماندهای جامد تولید می‌شود و دور ریختن آنها به‌معنای دور ریختن محتوای معادن است. پیرومتالورژی، هیدرومتالورژی و استفاده از فناوری زیستی سه روش اصلی برای بازیافت است. پیرومتالورژی و هیدرومتالورژی دو روش سنتی هستند که هم‌اکنون در برخی از موارد از آنها استفاده می‌شود. این دو روش مصرف انرژی بالایی داشته و برای بازیافت بسیاری از پسماندهای جامد صرفۀ اقتصادی اندکی دارند و به‌علاوه به‌علت تولید مواد خطرناک در این فرایند، ایمنی کمی دارند. استفاده

از فناوری زیستی روشی نوین برای بازیافت پسماندهای جامد است. فروشویی زیستی شاخه‌ای مهم از زیست فناوری است که برای تصفیهٔ پسماندهای جامد کارامد است. در فروشویی زیستی، فلز مورد نظر توسط ریزاندامگان از حالت جامد به حالت محلول تبدیل می‌شود. مهم‌ترین ریزاندامگان‌های مورد استفاده در فروشویی زیستی باکتری‌های اسیددوست و قارچ‌های *آسپرژیلوس نایجر* و *پنی‌سیلیوم سیمپلیسیسیموم* هستند.

در این کتاب، فروشویی زیستی پسماندهای جامد شهری و صنعتی بررسی شده است. کتاب در هشت فصل تنظیم شده است. در فصل اول مبانی و مقدمات پسماندهای جامد، روش‌های مدیریت این دستهٔ خطرناک از پسماندها، روش‌های بازیافت فلزها از پسماند جامد به‌ویژه روش‌های زیستی تشریح شده است. فصل دوم به فرایند فروشویی زیستی، ریزاندامگان مناسب و سازوکار فروشویی زیستی اختصاص دارد. در فصل سوم، پسماندهای جامد شهری و صنعتی که فروشویی زیستی آنها مطالعه شده است، تشریح می‌شوند. بعضی از پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی شامل صفحه‌های مدار چاپی، باتری‌های فرسوده و صفحه‌های نمایشگر می‌شود. در میان پسماندهای صنعتی، گِل قرمز، کاتالیست‌های فرسوده، پسماندهای کوره و خاکستر بادی نیروگاه‌ها بررسی شده است. فصل چهارم که به مراحل انجام آزمایش‌های فروشویی زیستی پسماند جامد می‌پردازد، می‌تواند راهنمای پژوهشگران و دانشجویان مقاطع کارشناسی ارشد و دکترا باشد. در این فصل مراحل لازم، یعنی: کشت و آماده‌سازی ریزاندامگان، آماده‌سازی پسماند جامد، خودهی ریزاندامگان، انجام فروشویی زیستی، مقایسه نتایج با آزمایش فروشویی شیمیایی و آزمون سمیت تشریح شده است. در هر مورد نتایج پژوهش‌های قبلی در قالب جدول، نمودار و شکل گزارش شده است. فصل پنجم روش‌های آنالیز شیمیایی که در این زمینهٔ پژوهشی کاربرد دارند، شرح داده می‌شود. در فصل ششم پارامترهای مؤثر بر فرایند فروشویی زیستی معرفی شده است. وجود پارامترهای متعدد، ضرورت استفاده از روش‌های طراحی آزمایش را نشان می‌دهد که در این فصل تشریح شده است. در فصل هفتم خلاصه‌ای از پژوهش‌های مرتبط با سینتیک فرایند فروشویی زیستی آورده شده است. موضوع فصل هشتم چالش‌های پیش‌رو در زمینهٔ تجاری‌سازی فرایند فروشویی زیستی، استفاده از فناوری‌های اُمیک در بررسی سازوکار ریزاندامگان در فروشویی زیستی و

جداسازی فلزها از محلول فروشویی است.

مجموعه حاضر برای تمامی دانشجویان علاقه‌مند به حوزه‌های زیست‌فناوری در مقاطع کارشناسی تا دکترا مناسب است. بی‌تردید این اثر برای تمامی مدرسان حوزهٔ فروشویی زیستی منبع معتبری است و می‌تواند به‌عنوان کتاب درسی دانشگاهی تدریس شود. این کتاب می‌تواند در حوزهٔ زیست‌فناوری، به‌عنوان کتاب کمک درسی تصویری واقعی از فرایندهای زیستی را برای دانشجویان ترسیم کند. این مجموعه همچنین برای صاحبان معادن راهگشای مناسبی است و می‌تواند معدن‌کاران را برای بهره‌گیری از فرایندهای زیستی در استخراج فلز از معدن به‌درستی راهنمایی کند. تألیف نشدن کتابی در حوزهٔ فروشویی زیستی و پسماندهای جامد پیش از این، به اهمیت نشر کتاب «فروشویی زیستی پسماندهای جامد» می‌افزاید. امید است که به اشتراک‌گذاری اندوخته‌های چندین ساله و نتایج پژوهش‌های انجام شده بتواند راهگشای مناسبی برای فعالان این حوزه باشد.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از مدیر محترم انتشارات دانشگاه تربیت مدرس جناب آقای دکتر سید نجم‌الدین امیرشاه کرمی و نیز کارکنان کوشای آن مرکز به‌خصوص خانم‌ها آتوما فروهی، فاطمه طالبی، لیلا نجفی زمان، فرشته نجفی و همچنین آقای مصطفی جانجانی که با نهایت دقت و حوصله تمام مراحل نشر این کتاب اعم از حروف‌چینی، ویراستاری و صفحه‌آرایی، نمونه‌خوانی و چاپ نهایی را پیگیری کرده‌اند، صمیمانه تشکر کنم. در پایان از خانم‌ها دکتر مهسا بنی‌اسدی، دکتر مهدخت ارشدی و نیز آقای دکتر هادی حسینی و به‌ویژه دانشجویان گرانقدر دکترا خانم‌ها مهندس فرزانه وکیل‌چپ و مهندس نازنین بهاءلو هوره برای همکاری در ویرایش کتاب نهایت سپاس و قدردانی را دارم.

مؤلف سعی کرده است کتابی با کمترین اشکال و ایراد در اختیار خوانندگان قرار دهد، ولی با وجود تمام تلاش‌های صورت گرفته ممکن است اشکالاتی در این مجموعه وجود داشته باشد، از این‌رو از تمامی استادان، دانشجویان و صنعتگران عزیز تقاضا می‌شود وجود هرگونه اشکال را به مؤلف یادآوری کنند تا انشالله نسخه‌های بعدی کاملتر در اختیار آنان قرار گیرد.

نگارنده

دی‌ماه ۱۳۹۸