مروری بر فرایند تولید پوسال: چالش‌ها و چشم‌اندازها

مهسا قاسمی‌زاده[۱]، فرح‌سادات هالک[۲*]، مازیار دهقان[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگاه مواد و انرژی

۲- دانشیار مهندسی محیط‌زیست، پژوهشگاه مواد و انرژی

۳- استادیار مهندسی مکانیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

پیام‌نگار: f-halek@merc.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر فرایند تولید پوسال (کمپوست) به یک فرایند دوستدار محیط‌زیست و جایگزینی پایدار برای مدیریت و بازیافت پسماندهای آلی تبدیل شده‌است. هدف از این فرایند دست‌یافتن به محصولی آلی به نام پوسال است که به‌عنوان کود و اصلاح‌کنندهٔ آلی در موارد کشاورزی کاربرد دارد. پوسال برتری‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و کشاورزی بسیاری دارد که در این‌مطالعه به برجسته‌ترین آنها پرداخته می‌شود. عوامل تأثیرگذار بر فرایند از جمله دما، نسبت کربن به نیتروژن، مقدار رطوبت، میزان هوادهی و pH به تفصیل مرور شده‌اند. هم‌چنین، راهبردهایی برای بهسازی عملکرد فرایند مرور می‌شوند. پراکنش بو و زمان نسبتاً بالای مورد نیاز برای برداشت محصولی با کیفیت، از چالش‌های این فرایند به‌شمار می‌رود که رویکردهای پیشنهاد شده برای مواجهه و رفع این چالش‌ها در این مقاله ذکر می‌شوند. در پایان نیز نحوهٔ استانداردسازی پوسال تولیدی بیان می‌شود.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۰۹

شماره صفحات: ۱۸ تا ۳۳

کلیدواژه‌ها: پردازش پسماند، پوسال، بهسازی فرایند، مواد اولیهٔ آلی، استانداردسازی

۱. مقدمه

امروزه در جوامع پیشرفته مقدار بسیارزیادی پسماند جامد شهری تولید می‌شود که دفع آن مشکلات جدی محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی را به‌دنبال داشته است. گسترش پرشتاب شهرها همراه با مهاجرت بزرگ مردم از مناطق روستایی موجب افزایش قابل توجه میزان تولید پسماندهای جامد شهری شده‌است. نرخ افزایشی تولید پسماند جامد، فضای محدود برای خاک‌چال و قوانین سخت محیط‌زیستی برای محل‌های جدید خاک‌چال و زباله‌سوزها موجب افزایش هزینه‌های دفع به‌ویژه در کشورهای پیشرفته شده‌است[۱]. کمبود سرمایه، برنامه‌ریزی نامناسب، زیرساخت‌های توسعه‌نیافته و کمبود نیروی ماهر در سامانهٔ مدیریت پسماند، سبب دفع زباله‌ها به‌شکل دفن روباز و تشدید آلودگی محیط‌زیست شده‌است[۲]. بدین‌ترتیب شهرداری‌ها و مقامات مسؤول برای یافتن راه حلی پایدار و مقرون به‌صرفه برای مدیریت پسماندهای جامد شهری تحت فشار هستند[۳]. از طرف دیگر امروزه بشر با چالش ایجاد فرایندهای پایدار و ارزندهٔ تولید مواد غذایی سازگار با محیط زیست، روبه‌روست. بنابراین توسعهٔ محصولاتی که به بخش کشاورزی در بهبود و حفظ کیفیت خاک، که یک‌منبع نسبتاً تجدید ناپذیر است، سود برساند

* کرج، مشکین‌دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکدهٔ انرژی، گروه محیط‌زیست و انرژی

ضروری است. این‌نیاز با تحقیق و توسعه در زمینهٔ طراحی و بهره‌برداری از فرایندهای زیست‌فناوری برآورده می‌شود و در این بین فرایند تولید پوسال یکی از بادوام‌ترین گزینه‌هاست[۴]. فرایند تولید پوسال، تجزیهٔ زیست‌شناختی هوازی کنترل‌شدهٔ مواد آلی به محصول تثبیت‌شده و گیاخاکی شکل به نام پوسال است[۵]. در سال‌های اخیر فرایند تولید پوسال به یک فرایند دوستدار محیط‌زیست و جایگزینی پایدار برای مدیریت و بازیافت پسماندهای آلی تبدیل شده‌است، با هدف دست‌یافتن به محصولی آلی به نام پوسال که به‌عنوان کود و اصلاح‌کنندهٔ آلی در موارد کشاورزی کاربرد دارد[۶].

بررسی ترکیب پسماند در جهان حاکی از آن است که ۴۴ درصد از کل پسماند جامد شهری را پسماندهای سبز و مواد غذایی (پسماندهای ترِ فسادپذیر) تشکیل می‌دهند[۷]. براساس گزارش بانک جهانی[۷]، میزان تولید پسماند جامد شهری در ایران ۱۷/۸۸۵/۰۰۰ تُن در سال است که از این بین حدود ۷۲ درصد دفن، ۱۲ درصد پوسال، ۱۰ درصد خاک‌چال، ۵ درصد بازیافت می‌شود و ۱ درصد به روش‌های دیگری اعم از زباله‌سوزی و هضم بی‌هوازی پردازش و دفع می‌شود. لازم به ذکر است که، بیش از ۷۰ درصد از پسماند جامد شهری تولیدی در ایران، پسماندهای ترِ فسادپذیر است [۷]. معضل بزرگ پسماندهای تر، شیرابهٔ تولیدی از آنهاست. شیرابه از تجزیهٔ مواد آلی مرطوب در پسماندهای جامد شهری، یا از منابع خارجی مثل زهکش آب‌های سطحی یا آب باران وارد شده به پسماند، به‌وجود می‌آید و حاوی مواد آلی، معدنی و میکروبی است. به مرور زمان شیرابهٔ زباله به لایه‌های زیرین زمین نفوذ می‌کند و سبب آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود. آلودگی خاک مستقیماً بر آلودگی آب تأثیرمی‌گذارد و در پراکنش انواع باکتری‌های بیماری‌زا، ویروس‌ها و انگل‌ها سهیم است. همچنین آلوده شدن آب با فلزات سنگین، نیترات‌ها، کادمیوم و غیره منشأ بسیاری از بیماری‌های خطرناک از جمله سرطان است.

فرایند تولید پوسال شامل تعدادی واکنش‌های شیمیایی و تبدیل‌های ریز-زیست‌شناختی است. این فرایندها که دهه‌هاست مورد مطالعه قرار گرفته‌اند شامل آبکافت، پروتئین‌کافت، آمونیفیکاسیون، نیتریفیکاسیون، معدنی‌شدن کربن و گیاخاکی‌شدن است[۸]. ریزاندام‌ها شتاب‌بخش واکنش‌های این فرایند هستند که در اثر فعالیت یکپارچهٔ سه‌گونهٔ غالب باکتری، قارچ و اکتینومیست، مواد آلی تثبیت و به پوسال تبدیل می‌شوند. طیف گسترده‌ای از مواد آلی را می‌توان به‌عنوان مادهٔ اولیه برای تولید پوسال به‌کار برد[۹و۵]: ضایعات کشاورزی (از قبیل ضایعات هرس، پوشال‌ها، بقایای محصولات و هرگونه محصول کشاورزی غیرقابل فروش)، ضایعات صنعت باغداری (بقایای میوه‌ها، تفاله‌ها، ساقه‌ها)، کودهای حیوانی، لجن فاضلاب و بخش آلی پسماندهای جامد شهری.

فرایند تولید پوسال از لحاظ اجرایی به دودسته تقسیم می‌شود: سامانه‌های بسته (واکنشگاه‌های عمودی و افقی) و سامانه‌های باز. به‌دلیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی کم، سادگی طراحی و بهره‌برداری و کارکرد نسبتاً بالا رایج‌ترین شکل انجام این فرایند، سامانهٔ باز است. البته با افزایش نگرانی‌ها در مورد آلودگی هوا و زیان‌های بوهای نامطبوع به همراه زمان نسبتاً بالای مورد نیاز برای تکمیل فرایند تولید پوسال، صنعت رو به رشد تولید پوسال از سامانه‌های باز به سامانه‌های بستهٔ گران‌قیمت‌تر و با کنترل بیشتر در حال تغییر است[۱۰]. در جدول (۱) مقایسه‌ای بین سامانه‌های باز و بسته به‌صورت کیفی آورده شده‌است.

جدول ۱. مقایسهٔ میان سامانه‌های باز و بسته در فرایند تولید پوسال مواد غذایی[۱۱].

	سرمایهٔ اولیه	مصرف انرژی	پیش‌فرآوری مواد خام اولیه	مشکل شیرابه و پراکنش گاز	فضای مورد نیاز	پیک دمایی	استحکام ساختاری	کاربرد
سامانهٔ بسته	زیاد	بالا	پیچیده	حل‌شده	کوچک	کم	خوب	شهری
سامانهٔ باز	کم	پایین	ساده	حل‌نشده	بزرگ	زیاد	بد	حومهٔ شهر

مقالهٔ پیش رو مروری جامع و فراگیر بر مطالعات انجام شده در زمینهٔ فناوری تولید پوسال است و بر موارد ذیل متمرکز است: الف) مزایای پوسال؛ ب) عوامل مؤثر بر فرایند؛ پ) راهبردهایی برای عملکرد مؤثر فرایند؛ ت) چالش‌های فرایند؛ ث) استانداردسازی محصول نهایی و ج) چشم‌انداز آینده.

۲. مزایای پوسال

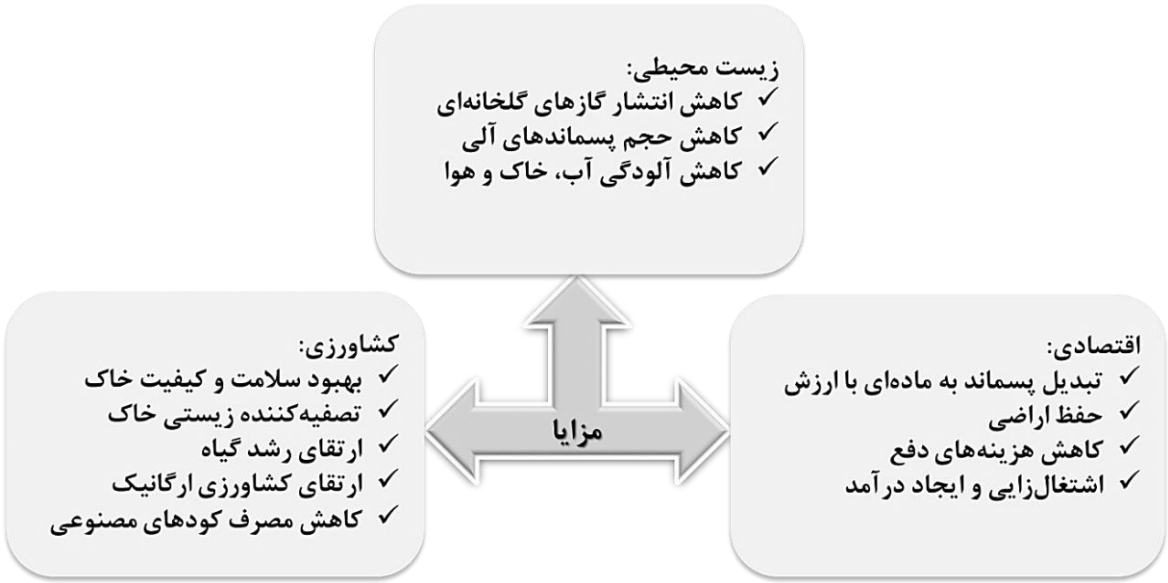
هدف از کشاورزی زیستی، ارتقای فرایندهای بوم‌شناختی، حفظ منابع آبی و خاکی، کاهش آسیب به محصولات کشاورزی، رساندن مواد مغذی به گیاه و افزایش تعداد میکروب‌های مفید در زیست‌بوم خاک است[۱۲]. تشویق به استفاده از کودهای آلی مانند کودهای حیوانی و پوسال به‌منظور حفظ و بهبود کیفیت خاک، ارتقای رشد گیاهان و برطرف‌کردن مشکلات محیط‌زیستی به‌دلیل نامتعادل بودن مواد مغذی بسیار مؤثر است[۱۳]. بنابراین تبدیل مقدار زیادی از پسماندهای آلی به کودهای آلی، کشاورزی زیستی را ارتقا می‌دهد و از وابستگی به کودهای مصنوعی می‌کاهد[۱۳].

از نظر زیست‌محیطی تبدیل پسماندهای آلی به پوسال علاوه‌بر کاهش حجم پسماندها و از بین‌بردن اندام‌های خطرناک[۵]، موجب کاهش پراکنش گازهای گلخانه‌ای و رفع مشکلات محیط‌زیستی مربوط به خاک به‌واسطهٔ بهبود باروری خاک، کاهش فرسایش خاک، تخریب خاک و بیابان‌زایی می‌شود[۱۳]. از نظر اقتصادی نیز تغییر جهت از روش‌های مرسوم دفع پسماندهای آلی اعم از خاک‌چال، دفن روباز و سوزاندن به سمت تولید محصولات با ارزش افزوده، از برتری‌های پوسال به‌شمار می‌رود[۱۲]. کاربرد پوسال به‌عنوان جایگزین خاک‌چال سبب کاهش زمین لازم برای خاک‌چال می‌شود[۲] و علاوه‌بر کاهش هزینه‌ها موجب درامدزایی و ایجاد اشتغال نیز می‌گردد[۹]. در شکل (۱) مزایای پوسال و تولید آن به‌طور خلاصه دیده می‌شود.

۳. عوامل مؤثر بر فرایند تولید پوسال

عوامل مؤثر بر فرایند تولید پوسال را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی کرد[۱۴]: ۱- عوامل وابسته به ماهیت مخلوط پوسالی مثل مواد مغذی، pH، میزان رطوبت، اندازهٔ ذرات و تخلخل؛ و ۲- عوامل وابسته به مدیریت فرایند مثل غلظت اکسیژن، دما و مقدار آب.

دما و اکسیژن در تودهٔ پوسالی دو عامل کلیدی در حفظ شرایط گرمادوستی و هوازی هستند که به چگالی توده و فضای خالی هوا مربوط می‌شوند[۱۰]. در ادامه توضیحات مفصلی در مورد مشخصه‌های مؤثر بر فرایند از جمله دما، نسبت کربن به نیتروژن، رطوبت، هوادهی و pH ارائه می‌شود.



شکل ۱. مزایای پوسال در یک نگاه.

۳-۱ دما

دما عاملی مهم و تأثیرگذار بر بازده فرایند است و به اکسیژن دردسترس برای ریزاندام‌ها و ذات هوازی فرایند تولید پوسال وابستگی دارد[۱۵]. فرایند تولید پوسال یک فرایند خودگرمایش است و دما در این فرایند تابع تجمع حرارت ناشی از سوخت‌وساز میکروبی است و به‌طور پیوسته تعیین‌کنندهٔ فعالیت سوخت‌وسازی است[۱۶]. فرایند تولید پوسال را از نظر دمایی می‌توان به سه‌مرحله تقسیم‌بندی کرد[۱۷]: مرحلهٔ اولیه (مرحله افزایش دما)، مرحلهٔ دما بالا (مرحله گرمادوستی) و مرحلهٔ خنک‌سازی (مرحلهٔ میانه‌دوستی)، بنابراین فعالیت‌های میکروبی در این ۳ مرحله بررسی می‌شوند. با توجه‌به دما دو گروه ریزاندام وجود دارد: میانه‌دوست و گرمادوست. دمای بهینهٔ میانه‌دوست‌ها در محدودهٔ ۳۵-۲۰ °C است، و کمترین و بیشترین حد دماهای قابل تحمل آنها به ترتیب ۱۰ و ۴۵°C است. گرمادوست‌ها در دمای ۶۰-۵۰°C رشد می‌کنند و در برابر دماهای پایین ۴۰-۳۰ °C و دماهای بالا ۹۰-۸۰°C مقاومت خوبی دارند[۱۸]. بر طبق پژوهش راویندران و سکاران[۱۹] در دماهای بالاتر از ۵۵°C شرایط مطلوبی برای حذف عوامل بیماری‌زا و بهداشتی‌شدن پوسال به وجود می‌آید. در دمای ۶۰-۵۲°C فعالیت گرمادوست‌ها در فرایند تولید پوسال به بیشترین حد می‌رسد[۲۰]. غیرفعال‌شدن جمعیت میکروبی و به‌دنبال آن توقف فرایند، در نتیجهٔ تجاوز دمای توده از بازه ۶۵-۶۰°C است[۱۵]. درحقیقت، در دماهای بالاتر از ۶۵°C فعالیت قارچ‌ها، اکتینومیست‌ها و دیگر باکتری‌های گرمادوست متوقف و شرایط برای رشد و فعالیت باکتری‌های از نوع هاگ فراهم می‌شود [۲۱].

دمای بهینه برای فرایند تولید پوسال در واقع توافقی بین حداقل کردن اتلاف مواد مغذی و حداکثر کردن غیرفعالی عوامل بیماری‌زا و علف‌های هرز است [۲۲]. مضاف بر اینکه مقدار مواد مغذی، آب و اکسیژن کافی باشد و فرایند به‌خوبی پیش‌رود، دما یک مؤلفهٔ بسیار متغیر است[۲۳]. مشهودترین اثر فعالیت میکروبی بر مواد آلی افزایش دمای توده است. به‌همین‌دلیل این مؤلفه برای پایش عملکرد فرایند در مراحل ابتدایی (مرحله اُکسایش زیست‌شناختی یا خودگرمایی) و در مدیریت دیگر شرایط عملیاتی مؤثر است[۲۴].

۳-۲ نسبت کربن به نیتروژن

تعادل غذایی با مؤلفه‌ای به‌نام نسبت کربن به نیتروژن (C/N) توصیف‌می‌شود[۱۴]. C/N یک عامل ضروری برای ارزیابی نرخ بلوغ، رشد میکروب‌ها، کیفیت پوسال و دردسترس بودن مواد مغذی در پوسال نهایی است[۲۵]. پسماندها خودشان حاوی مواد مغذی مورد نیاز ریزاندام‌ها هستند، اما مقدار مواد مغذی در پسماند باید توازن داشته‌باشد تا فرایند به درستی پیش‌رود[۲۶]. اگر نسبت C/N زیاد باشد، فرایند آهسته پیش‌می‌رود؛ زیرا غلظت پیش‌ماده (سوبسترا) در محیط بیش از اندازه می‌شود[۱۴]. در مقابل، نسبت C/N کم یعنی به‌ازای کربن تجزیه‌پذیر، نیتروژن اضافی در محیط وجود دارد. که در این‌صورت کربن اضافی تبدیل به CO_2 می‌شود و نیتروژن از طریق تبخیر آمونیاک یا شیرابه هدر می‌رود[۲۶و۱۴]. ریزاندام‌ها به‌ازای ۳۰ واحد کربن، یک واحد نیتروژن مصرف می‌کنند[۹]، به‌همین‌دلیل تنظیم نسبت C/N مواد اولیه در محدودهٔ ۱: ۳۰-۲۵ برای فعالیت مؤثر ریزاندام‌ها توصیه می‌شود[۲۷]. اگرچه، نسبت C/N اولیه در بازه ۱: ۴۰-۲۰ نیز به‌دلیل بازده خوب تولید پوسال پیشنهاد گردیده‌است[۲۸]. چن و همکاران[۲۹] دریافتند که نسبت C/N و مقدار کل مواد آلی رابطهٔ مشخصی با پراکنش گازهای گلخانه‌ای و آمونیاک دارد. آنها نسبت C/N آرمانی برای فرایند تولید پوسال از کود مرغی را از طریق تنظیم نسبت خوراک به خاک رس به‌دست آوردند و گزارش‌کردند که افزودن ۱۰ درصد خاک رس به‌وسیلهٔ تنظیم مقدار کربن به نیتروژن در محدودهٔ آرمانی میزان هدررفت نیتروژن و پراکنش گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد. پوسال‌کردن چند پسماند با C/Nهای مختلف به‌طور همزمان روشی مؤثر برای کاهش اتلاف نیتروژن است؛ به‌عنوان مثال مخلوط‌کردن پسماند با C/N پایین (کود مرغی) با پسماند با C/N بالا (پسماند سبز و شهری)[۳۰].

۳-۳ رطوبت

رطوبت به‌عنوان یک مؤلفهٔ کلیدی، بستری برای جابه‌جایی مواد مغذی حل‌شدهٔ مورد نیاز برای فعالیت سوخت‌وسازی ریزاندام‌ها فراهم می‌کند[۳۱]. رطوبت خیلی‌کم موجب کم‌آبی زودهنگام و توقف فرایند می‌شود. بنابراین محصول نهایی از نظر فیزیکی تثبیت اما از نظر زیست‌شناختی تثبیت نخواهد شد؛ از طرف دیگر رطوبت بیش از حد نیز موجب شرایط بی‌هوازی و پس از آن بازدارندگی و توقف فعالیت‌ها می‌شود[۳۲]. رطوبت زیاد هم‌چنین بر تجمع ذرات، ماتریس تخلخل، فضای خالی هوا و نفوذپذیری گاز تأثیر دارد؛ که

همهٔ این عوامل، جابه‌جایی اکسیژن مورد نیاز در توده را محدود می‌کنند[۳۲]. سه مشخصهٔ مرتبط با حفظ شرایط هوازی وجود دارد[۳۳]: وزن توده، تخلخل و فضای خالی هوا. میزان رطوبت در ارتباط با فضای خالی هوا است. هنگامی که فضاهای میان‌بافتی در تودهٔ پوسالی از آب پر شوند، مواد خاصیت کششی پیدا می‌کنند و به حالت پلاستیکی درمی‌آیند؛ در نتیجه به‌دلیل محدودیت جابه‌جایی اکسیژن فرایند هوازی متوقف می‌شود. فقط هنگامی که فضاهای خالی با هوا پر شوند، شرایط هوازی به‌وجود می‌آید. پس میزان رطوبت بهینه یعنی حفظ فضای خالی هوا در یک‌مقدار معین. به‌طور کلی میزان رطوبت بهینه ۶۰-۵۰ درصد گزارش شده است[۳۴]. لیانگ و همکاران[۳۵] بیشترین فعالیت میکروبی را در محدودهٔ ۷۰-۶۰ درصد گزارش کرده‌اند. رودریگرز و همکاران[۳۶] مقدار رطوبت ۷۰-۴۰ درصد را برای پسماندهای شهری پیشنهاد کرده‌اند، که از این‌بین مقدار ۵۵ درصد را مقدار بهینه در کنترل پراکنش ترکیبات آلی فرار گزارش‌کرده‌اند. برطبق گزارش وانگ و همکاران[۳۷] اندازه‌های تجربی رطوبت بهینه اغلب مفیدند؛ اما میزان رطوبت در حین فرایند تغییر می‌کند و رسیدن به مقدار رطوبت بهینه در ابتدای فرایند، تضمین‌کنندهٔ این نیست که در کل فرایند شرایط هوازی حفظ می‌شود و هیچ‌مقدار بهینهٔ کلی برای رطوبت مواد قابل پوسال‌شدن وجود ندارد[۳۸].

۳-۴ هوادهی

هوادهی با ۱) حفظ و تأمین اکسیژن کافی در توده و درنتیجه ایجاد شرایط هوازی ۲) خارج کردن ترکیبات گازی تولیدشده در داخل توده ۳) حفظ دما در محدوده‌ای که تجزیهٔ زیست‌شناختی مواد آلی حداکثر است، بر فرایند تولید پوسال تأثیر می‌گذارد[۳۹]. محدودیت اکسیژن و درنتیجه کندشدن نرخ تجزیه از عواقب هوادهی ناکافی است[۴۰]. از دیگرسو نرخ زیاد هوادهی زمان رسیدن به فاز گرمادوستی را افزایش و طول مدت فاز گرمادوستی را به‌دلیل اتلاف حرارتی فزاینده بر اثر سطح جابه‌جایی زیاد بین گاز و توده، کاهش می‌دهد[۴۱]. نتایج نشان می‌دهد که مقدار اکسیژن کمتر از ۵ درصد در توده، منجربه شرایط بی‌هوازی می‌شود و مقدار بیشتر از ۱۵ درصد نشان‌دهندهٔ هوادهی اضافی است؛ که توده را سرد می‌کند و منجر به بقای عوامل بیماری‌زا می‌شود[۴۲].

مطالعات مختلفی در ارتباط با نرخ‌های بهینهٔ متفاوت برای هوادهی در فرایند تولید پوسال مواد مختلف موجود است، که متفاوت‌بودن نرخ هوادهی نشان می‌دهد که ارتباط نزدیکی بین نوع پسماند و نرخ بهینهٔ هوادهی وجوددارد. یوآن و همکاران[۴۳] در فرایند تولید پوسال لجن فاضلاب دریافتند که در نرخ هوادهی زیاد، میزان NH_4^+-N بیشترین و NO_x^- -N کمترین خواهدبود. بر این‌اساس یوآن و همکاران[۴۳] مقدار بهینه $0/2\ L.kg^{-1}.min^{-1}$ را برای لجن فاضلاب گزارش کرده‌اند. هوا از سه‌طریق هوادهی اجباری، طبیعی و چرخش مکانیکی تأمین می‌شود[۴۴]. رساپور و همکاران[۴۵] روش‌های هوادهی اجباری، چرخش، طبیعی و ترکیب چرخش و هوادهی طبیعی را مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که هر دو هوادهی اجباری و چرخش توده، بر کیفیت محصول نهایی اثر مثبت دارد؛ اگرچه چرخش مصرف انرژی بالاتری دارد و پراکنش آلاینده را نیز به همراه دارد ولی چرخش نتایج بهتری برای کاربردهای کشاورزی نشان داده‌است. ترکیب چرخش و هوادهی طبیعی نیز می‌تواند مشکل زمان تجزیه را برطرف کند و تأثیر به‌سزایی بر کیفیت پوسال حاصل از پسماندهای کشاورزی بگذارد. همچنین هوادهی می‌تواند در دو حالت پیوسته یا متناوب انجام‌شود. شیمیزو و همکاران[۴۶] نرخ هوادهی، حالت هوادهی (پیوسته و متناوب) و حالت چرخش را در فرایند تولید پوسال کود ماکیان مقایسه‌کردند و مقدار $0/45\ L.kg^{-1}.min^{-1}$ را برای فرایند تولید پوسال کود ماکیان مناسب می‌دانند. وانگ و همکاران[۴۷] هوادهی با فشار منفی را برای کاهش پراکنش‌های گازی و بررسی کارکرد هوادهی در فرایند تولید پوسال کود احشام مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان‌می‌دهد که هوادهی با فشار منفی، توزیع موقتی دما و اکسیژن را تغییر می‌دهد. در مقایسه با فشار مثبت، در حالت دبی یکسان، فشار منفی مدت زمان مرحلهٔ گرمادوستی را بیشتر می‌کند. هم‌چنین تجزیهٔ مواد آلی و به بلوغ‌رسیدن مواد را سرعت می‌دهد. لی و همکاران[۱۱] مقایسه‌ای بین سامانه‌های هوادهی فشار مثبت و منفی در فرایند تولید پوسال پسماندهای غذایی انجام داده‌اند که در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. مقایسهٔ میان سامانه‌های هوادهی فشار مثبت و منفی[۱۱]

	توزیع رطوبت (از زیاد به کم)	منبع هوا	پراکنش گاز	تأثیر بر سامانه
فشار مثبت	پایین به بالا	هوای طبیعی از محیط اطراف	جمع‌آوری مستقیم	فضای خالی هوای کم‌تر
فشار منفی	سطح به داخل	هم هوای طبیعی و هم هوای مصنوعی	نیاز به تجهیزات جمع‌آوری بزرگ	رطوبت کم‌تر

pH ۵-۳

بر طبق مطالعهٔ کوی و همکاران[۴۸] دما و pH دو مؤلفهٔ کلیدی فرایند تولید پوسال هستند. قبل از شروع فرایند، در طی جمع‌آوری و ذخیره‌سازی پسماندها، pH مواد به‌دلیل تولید محصولات فرعی، که اصطلاحاً اسیدهای آلی نامیده می‌شوند، کاهش می‌یابد[۴۹]. فعالیت‌های میکروبی تحت تأثیر تغییرات pH هستند و به‌همین دلیل اغلب pH خنثی برای فرایند تولید پوسال مناسب است[۵۰]. بر اساس گزارش چیونگ و همکاران[۵۱] بوریک‌اسید یا لاکتیک‌اسید به‌تنهایی یا ترکیب این‌دو و اسیدهای پروپیونیک به‌طرز چشمگیری بازدارندهٔ باکتری‌های گرمادوست هستند. اگر ۰/۵ mmol/g از این اسیدها در پوسال وجود داشته‌باشد، تنها ۶۵-۵۱ درصد از باکتری‌های گرمادوست زنده می‌مانند. اگر در مراحل آخر فرایند شرایط بهینه برای فعالیت میکروبی ایجاد شود، اسیدهای آلی نیز تجزیه‌پذیر می‌شوند و به‌آسانی به‌وسیلهٔ ریزاندام‌ها مصرف می‌شوند[۵۲]. راهکارهای متعددی برای کنترل افت pH پیشنهاد شده است از جمله افزایش هوادهی[۵۳]، تلقیح باکتری یا کشت مخمر[۵۲] یا افزودن مواد قلیایی به تودهٔ پوسالی[۵۴].

۴. روش‌های بهسازی عملکرد فرایند تولید پوسال

چالش اصلی کنترل و بهسازی فعل و انفعالات پویایی‌شناختی و پیچیده بین سازوکارهای زیست‌شناختی، شیمیایی و فیزیکی با اثرات همپوشانی در ماتریس ناهمگن مواد آلی است[۱۰]. در فرایند تولید پوسال گزینه‌های مختلفی برای مدیریت فرایند وجود دارد، که در بیشتر موارد، هدف اصلی حداکثرکردن نرخ تجزیه است؛ نرخ واکنش‌ها یا جنبش‌شناسی‌ها مسألهٔ اصلی در مطالعهٔ فرایند تولید پوسال است. علاوه‌بر رفتار جنبش‌شناختی فرایند، مهم است که بدانیم هر مؤلفهٔ عملیاتی چگونه بر نرخ فرایند اثر می‌گذارد. این آگاهی، تشخیص ضعف عملکردی فرایند را برای ما تسهیل می‌کند و در نتیجه بهینه‌سازی عملکرد فرایند را ارتقا می‌بخشد[۵۵].

ترکیب اولیهٔ مخلوط پسماندها نیز بر بهینه‌سازی و مشخصه‌های فیزیکی- شیمیایی اولیهٔ مخلوط تأثیر دارد و مطالعات متعددی اثر مخلوط‌های اولیه را بر مشخصه‌های پوسال نهایی بررسی‌کردند[۵۶]. شیوه‌های مختلفی برای بهینه‌سازی فرایند و کیفیت پوسال وجود دارد[۵۷و۱۲]. این روش‌ها شامل ۱) اضافه‌کردن مواد معدنی طبیعی ۲) بقایای آلی ۳) میکروب ۴) کنشگر ۵) و یا ترکیب میکروب- کنشگر است.

۴-۱ الگوسازی فرایند

الگوهای ریاضی به‌عنوان ابزاری مهم برای طراحی بهتر فرایند و تجزیهٔ سامانه به شمار می‌روند[۵۸]. دو رویکرد اصلی برای الگوسازی فرایند تولید پوسال وجود دارد: تحلیلی و عددی[۵۹]. الگوهای ریاضی متعددی برای تجزیهٔ زیست‌شناختی در حین فرایند تولید پوسال توسعه یافته‌اند که شامل جنبش‌شناسی مرتبهٔ اول، جنبش‌شناسی مونود، جنبش‌شناسی Contois (توسعه‌یافتهٔ مونود)، جنبش‌شناسی Tessier و Moser می‌شود[۶۰]. با وجود اینکه الگوهای زیادی توسعه یافته‌اند، اما اغلب تجربی هستند و یکپارچگی بین الگوهای حال حاضر وجود ندارد؛ این فقدان به این‌دلیل است که تودهٔ زیستی قابل پوسال یک تودهٔ چندجزئی، چندفازی و در کل یک سامانهٔ ناهمگن است[۶۱]. میسون[۶۰] از بررسی الگوهای ریاضی موجود نتیجه گرفته‌است که الگوهای تجربی جنبش‌شناختی یا مرتبهٔ اول (با تصحیح دما و رطوبت) نسبت‌به الگوهای جنبش‌شناختی مونود در پیش‌بینی رُخ‌نمای (پروفایل) دما موفق‌تر بوده‌اند. پتریک و همکاران[۶۲] با ترکیب الگوی جنبش‌شناختی مرتبهٔ n ($n>1$) و معادلات موازنهٔ جرم و حرارت یک الگوی ریاضی برای مخلوط بسیار ناهمگن پسماندهای جامد شهری و کود ماکیان توسعه‌داده‌اند (معادله (۱)). تأثیر دما بر ثابت نرخ واکنش نیز در معادلهٔ (۲) آورده شده است. داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی دما، تبدیل مواد آلی، غلظت کربن دی‌اکسید و غلظت اکسیژن تطابق

خوبی نشان دادند و با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مقدار بهینه رطوبت ۴۵ درصد به‌دست آمده‌است.

$$\frac{dm_{OM}}{dt} = -k \times m_{OM}^{n} \qquad n = 1.6 \qquad (۱)$$

که m_{OM} جرم مادهٔ آلی (Kg)، t زمان فرایند (hr)، K ثابت نرخ واکنش ($Kg^{1-n}\ h^{-1}$) و n مرتبهٔ واکنش است. که T دمای پیش‌ماده بر حسب $^{\circ}$C است.

$$k_T = 0.015 \times \left[1.018 - 2.8^{-0.002(T-20)}\right] \qquad (۲)$$

در تحقیق دیگری پتریک و همکاران[۶۳] از جنبش‌شناسی مرتبهٔ اول و براساس متغیرهای دما، اکسیژن، pH و رطوبت استفاده‌کردند تا رخ‌نمای مادهٔ آلی در حین فرایند تولید پوسال پسماندهای جامد شهری و کود ماکیان را شبیه‌سازی کنند. نتایج حاکی از آن است که الگوهای جنبش‌شناختی با چهار متغیر قابل اندازه‌گیری بهتر از الگوهای با متغیرهای کمتر است و تعداد متغیرهای آزمایشگاهی نسبت‌به متغیرهای جنبش‌شناختی بیشتر بر روی جنبش‌شناسی تأثیر دارد. الگوی پیشنهادی آنها در معادلهٔ (۳) دیده می‌شود.

$$k_T = O_2^{a}.b^{(T-23)}.pH^{c}.\left(\frac{M_c}{T}\right)^{d} \qquad (۳)$$

که K_T ثابت واکنش برحسب بر روز ، T دمای فرایند برحسب $^{\circ}$C، M_c درصد رطوبت روزانه و a,b,c,d ثابت‌های آن هستند.

۴-۲ مواد کمکی

طبق گزارش تورس و همکاران[۶۴] مواد کمکی که به‌همراه پیش‌ماده وارد فرایند می‌شود، در سه‌دسته جای دارند: ۱) عامل حجیم‌کننده: مواد آلی یا غیرآلی که برای کنترل رطوبت، افزایش تخلخل، حفظ ساختار و بهبود جابه‌جایی هوا در توده به‌کار می‌روند. ۲) اصلاح‌کننده: موادی که به پیش‌ماده یا محصول نهایی افزوده می‌شوند به‌منظور بهبود پیش‌رفت فرایند یا کیفیت محصول نهایی. ۳) افزودنی: شامل ریزاندام‌ها، مواد معدنی، کنشگرها، منابع کربنی در دسترس و ترکیبات متعادل‌کنندهٔ pH.

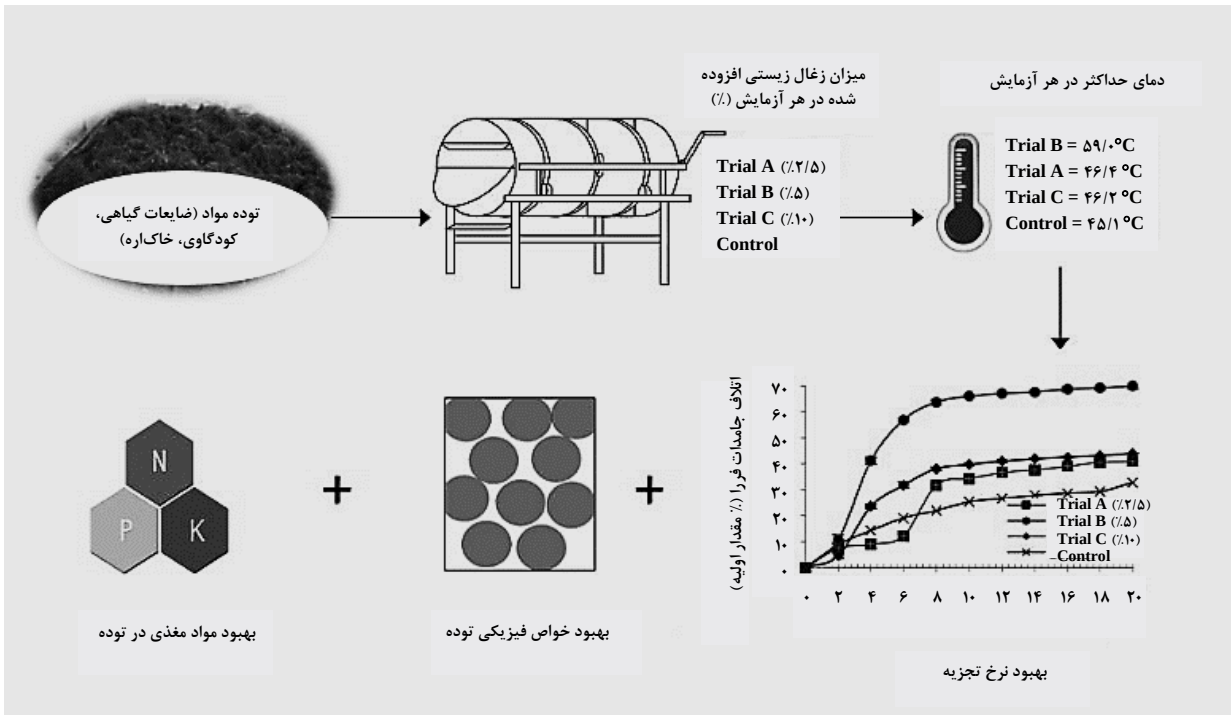
یوسفی و یونسی[۶۵] در بررسی تأثیر اندازه‌های مختلف خاکاره بر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی پوسال حاصل از پسماند جامد شهری دریافتند که به‌طور کلی افزودن خاکاره به تودهٔ پوسالی سبب حفظ دما در محدودهٔ گرمادوستی و به‌دنبال آن حذف هرچه بیشتر عوامل بیماری‌زا و بهداشتی‌شدن پوسال تولیدی، کاهش نوسان‌های دمایی توده و کاهش غلظت فلزهای سنگین می‌شود. در مطالعهٔ دیگری یوسفی و یونسی[۶۶] به‌طوردقیق مقدار ۱۶ درصد وزنی خاکاره را برای فرایند تولید پوسال پسماند شهری در شهر زاهدان پیشنهادکرده‌اند.

زغال زیستی به‌عنوان یک‌مادهٔ کمکی در فرایند تولید پوسال نقشی حیاتی در تأمین شرایط هوازی دارد[۶۷]. زغال زیستی ماده‌ای غنی از کربن است که از آتش‌کافت تودهٔ زیستی حاصل می‌شود[۶۸]. از جمله خواص برجستهٔ فیزیکوشیمیایی این‌ماده که به ترکیب تودهٔ زیستی و دمای آتش‌کافت بستگی دارد[۶۹] می‌توان به تخلخل زیاد، مساحت سطح زیاد و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد آن اشاره کرد[۷۰]. با افزودن این‌ماده به تودهٔ قابل پوسال‌شدن: خواص فیزیکی و شیمیایی توده بهبود می‌یابد، فعالیت‌های میکروبی ارتقاء می‌یابد و نرخ تجزیهٔ مواد آلی شتاب‌می‌گیرد، پراکنش آمونیاک و گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد و کیفیت پوسال به‌دلیل افزایش مواد مغذی، افزایش بلوغ و کاهش سمیت؛ بالا می‌رود[۷۱]. در همین‌راستا، جِین و همکاران[۷۲] افزودن زغال زیستی به پسماندهای آلی نیتروژنی را مطالعه کردند که نتایج حاصل از پژوهش آنها در شکل (۲) گنجانده شده‌است.

نجات‌زاده و بروجنی[۷۳] اثر افزودن مواد شیمیایی از جمله گلوکز (به‌عنوان منبع انرژی ریزاندام) و اسید استیک (به‌عنوان کربن در دسترس) و تلقیح میکروبی را بر شتاب‌دهی نرخ تجزیه در فرایند تولید پوسال از پسماند جامد شهری بررسی کردند. ژانگ و سان[۷۴] از یک پوسال تهیه‌شده از پسماندهای گیاهی (منبع غنی از ریزاندام‌ها) به‌عنوان مادهٔ کمکی استفاده‌کردند تا اثر آن‌را بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی فرایند تولید پوسال دو مرحله‌ای پسماندهای گیاهی بررسی‌کنند. با وجود اینکه مطالعات بسیاری در زمینهٔ مزیت‌های مواد کمکی انجام‌شده، اما هنوز مطالعه‌ای جامع و فراگیر در مورد مقایسهٔ اثرات و طرز عمل مواد مختلف بر فرایند تولید پوسال انجام نشده‌است[۷۵].

۵. چالش‌های پیش‌روی فرایند

همان‌طورکه پیشتر بیان شد، باوجود بررسی‌های بسیار، هنوز چالش‌هایی در فرایند تولید پوسال پیش‌روی محققین برای تسهیل عملی و تجاری آن وجود دارد که به‌دلیل اهمیت مسأله در ادامه بررسی خواهندشد.



شکل ۲. تأثیر زغال زیستی بر فرایند تولید پوسال از پسماندهای آلی غنی از نیتروژن[۷۲].

۵-۱ پراکنش بو

صرف نظر از مواد آلی اولیه یا شرایط فرایند، بو یک محصول ذاتی فرایند تولید پوسال است[۷۶]. مواد مغذی نامتعادل، رطوبت زیاد و نوع پسماند در فرایند تولید پوسال می‌تواند منجربه تشکیل محصولات فرعی از جمله بوهای نامطبوع و شیرابه شود که از آلاینده‌های ثانویهٔ محیط‌زیست به‌شمارمی‌روند[۷۷]. در کنار پراکنش کربن دی‌اکسید، که اصلی‌ترین محصول اکسایش زیست‌شناختی است، ترکیبات آلی فرار نیز از گروه‌های شیمیایی پخش‌شده در حین فرایند تولید پوسال هستند[۷۸]. صدها گونهٔ مختلف از این ترکیبات فرار در حین فرایند تشخیص داده‌شده‌است که رایج‌ترین آنها اسیدهای آلی فرار، ترکیبات آروماتیکی و آلیفاتیکی، ترکیبات نیتروژن‌دار و سولفوردار، الکل‌ها، کتون‌ها، آلدهیدها و ترپن‌ها هستند[۷۹].

برطبق مطالعهٔ کردا و همکاران[۷۶] فراوانی ترکیبات بودار به مواد اولیه، نوع سامانه (باز یا بسته)، شرایط فرایند مثل رطوبت و هوادهی، مرحلهٔ فرایند و بهره‌برداری فرایند مثل خردکردن، غربال‌کردن و چرخاندن توده بستگی‌دارد. کوکر[۸۰] پراکنش گازها را بر اثر سه عامل گزارش کرده‌است: ۱) ترکیب پیش‌ماده: دسترسی به مواد مغذی میکروبی در مواد خام بستگی به میزان اختلاط مواد و دیگر مشخصه‌های فیزیکی مثل رطوبت و اندازهٔ ذرات دارد. ۲) اکسیژن: توزیع اکسیژن و دسترسی به آن در توده ۳) خیز اولیهٔ دما: که به‌طور مستقیم تحت تأثیر نرخ سوخت‌وسازی میکروبی و درجهٔ تجزیه‌پذیری زیست‌شناختی پسماند است و به‌طور غیر مستقیم تحت تأثیر فشار بخار آب و تبخیر رطوبت است.

بر طبق مطالعهٔ هان و همکاران[۸۱] تغییر دمای محیط در طی فصول بر پراکنش ترکیبات سولوفوریک فرار تأثیر دارد؛ بدین‌منظور، آنها پراکنش ترکیباتی اعم از متیل دی‌سولفید، متیل سولیفید، کربن دی‌سولفید، متیل مرکاپتان و هیدروژن سولفید از فرایند تولید پوسال لجن فاضلاب شهری را در طی فصل‌های بهار، تابستان و زمستان بررسی کردند.طبق نتایج، مقدار پراکنش این ترکیبات در فصل تابستان، بهار و زمستان به‌ترتیب برابر ۵۶۱/۸۹، ۳۵۸/۴۵ و ۲۱۵/۵۲ میلی‌گرم به‌ازای کیلوگرم مادهٔ خشک بوده‌است. هم‌چنین بیشترین مقدار پراکنش؛ در فاز میان‌دوستی و ابتدای مرحلهٔ گرمادوستی بوده‌است. مطالعهٔ مصطفی و همکاران[۸۲] بر روی پراکنش

ترکیبات فرار از فرایند تولید پوسال پسماندهای آلی شهری نشان‌می‌دهد که پراکنش ترکیبات فرار در زمستان (۱۳۸/۰۳ mg/m^3) بیشتر از تابستان (۵۸/۵۰ mg/m^3) است؛ آنها همچنین استفاده از زیست‌پالایه‌ها را روشی مؤثر در کنترل بو معرفی کردند.

۵-۲ زمان

فرایند تولید پوسال به‌روش قدیمی و مرسوم نیاز به نیروی کار بسیار و فضای زیاد دارد، زمان‌بر است، گازهای بدبو و محصولی تثبیت نشده و نامناسب برای کشاورزی تولید می‌کند[۸۳]؛ به‌همین‌دلیل فرایندهای قدیمی جذابیتی برای کارفرمایان ندارد. امروزه گسترش فناوری‌های تولید پوسال از قبیل پوسال‌سازی در واحدهای پردازش مکانیکی- زیست‌شناختی، استفاده از مواد افزودنی، پوسال‌سازی سریع با استفاده از تسریع‌کننده‌ها و تلقیح میکروبی؛ موجب آسان‌سازی فرایند و ایجاد اشتیاق در کارفرمایان بخش مدیریت پسماند شده است[۷۵].

انجام فرایند در محل محیط باز به‌طورگسترده برای تبدیل پسماندهای آلی از جمله پسماندهای شهری به‌کار می‌رود. فرایند تولید پوسال طبیعی مدت زمان زیادی (اغلب ۴-۳ ماه) نیاز دارد تا مواد به‌طور کامل تجزیه شوند؛ درحالی‌که به‌علت کمبود زمین و حجم زیاد پسماندهای شهری، لازم است تا هرچه سریعتر این پسماندها تبدیل شوند[۱]. یکی از راهکارهای شتاب‌دهی نرخ تجزیه، تلقیح پیش‌ماده با قارچ‌های تجزیه‌کنندهٔ لیگنوسلولز است[۸۴]. میردامادیان و همکاران نشان دادند که در فرایند تولید پوسال از پسماندهای جامد شهری، تلقیح پیش‌ماده با ریزاندام‌های تجزیه‌کنندهٔ بسپارهای طبیعی (مواد لیگنوسلولزی) در کاهش زمان تجزیه نقش موثری دارد[۸۵]. ترکیب چند نوع کنشگر مثل سلولاز، پروتئاز، آمیلاز و لیپاز به‌دلیل اثر هم‌پوشانی کنشگرها در بهبود نرخ فرایند و کاهش مدت زمان انجام واکنش‌ها تأثیر دارد[۸۶]. افزودنی‌هایی از قبیل اوره، پوشال‌های خرد شده، بنتونیت، بقایای فورفورالی، کربوهیدرات (مانند قند) و کلسیم سوپرفسفات نیز در مطالعات بررسی شده‌اند[۸۷]. هم‌چنین تحقیقات قبلی نشان‌دادند که افزودن قندهای ۵ و ۶ کربنه (پنتوز و هگزوز) نرخ تجزیهٔ ترکیبات کمپلکس و رشد ریزاندام‌ها را افزایش می‌دهد و به‌واسطهٔ شتاب‌بخشی نرخ فرایند، زمان انجام فرایند را کاهش می‌دهد[۸۸و۷۵].

ژانگ و همکاران[۸۹] نشان‌دادند که فرایند تولید پوسال با روش دو مرحله‌ای به‌دلیل افزایش فعالیت میکروبی زمان فرایند را کاهش می‌دهد؛ این روش شامل یک پوسال‌سازی اولیه و یک پوسال‌سازی ثانویه است. در نتیجه؛ تولید پوسال به بلوغ رسیده نسبت به زمان ۲۷۰-۹۰ روزه که فرایندهای مرسوم طول می‌کشند، به زمان کمتری نیاز دارد. چیارلوتو و همکاران[۹۰] تأثیر کاهش زمان فرایند تولید پوسال از پسماند کارخانهٔ فرآوری گوشت را بر کیفیت پوسال نهایی بررسی کردند. آنها با سنجش کیفیت محصول از طریق سنجش خواص فیزیکوشیمیایی پوسال تولیدی و به‌ویژه میزان تبدیل مادهٔ آلی محلول در آب، دریافتند که در مدت ۳۵ روز، در مقایسه‌با زمان ۶۵ و ۹۵ روزهٔ بررسی شده در این مطالعه، می‌توان پوسالی پایدار، بالغ و مناسب برای کاربردهای کشاورزی تولید کرد.

۶. استانداردسازی محصول نهایی

قبل از به‌کارگیری پوسال در صنعت کشاورزی باید از بلوغ و درجهٔ پایداری مواد آلی در پایان فرایند اطمینان حاصل کرد؛ چراکه اگر مواد آلی به‌خوبی تثبیت نشده‌باشند، بین تودهٔ میکروبی و ریشهٔ گیاه بر سر اکسیژن رقابت به وجود می‌آید[۹۱]. پایداری و بلوغ دو معیار مهم برای تضمین کیفیت پوسال است[۹۲]. پایداری یعنی مقاومت مادهٔ آلی در برابر تجزیهٔ بیش از حد یا فعالیت‌های ریززیست‌شناختی، درحالی‌که بلوغ یعنی اینکه پوسال تولیدشده بتواند به‌طورمؤثر در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد و در اصل، جنبه‌های سمیت پوسال و اثر آن بر رشد گیاه را در برمی‌گیرد[۹۲].

اویدو و همکاران[۹۲] تست‌هایی که باید برای ارزیابی بلوغ و پایداری پوسال به‌کار روند را به دو دستهٔ تست‌هایی که در محل انجام می‌شوند (مثل دما، pH، رطوبت، هدایت الکتریکی، رنگ و بو) و تست‌های پیچیده‌تر که باید در آزمایشگاه انجام‌شوند (مثل مقدار جامدات فرار، نسبت C/N، خودگرمایش، شاخص تنفس و شاخص جوانه‌زنی) تقسیم‌بندی‌کرده‌اند؛ که از این بین pH، هدایت الکتریکی و شاخص جوانه‌زنی را جزو تست‌های مربوط به بلوغ و مابقی را تست‌های سنجش پایداری معرفی کرده‌اند. براساس انجمن کیفیت پوسال کالیفرنیا[۹۳] شاخص جوانه‌زنی

بین ۹۰-۸۰ درصد قابل قبول است و کمتر از ۸۰ درصد بدین معنی است که پوسال نامرغوب است. براساس انجمن کیفیت پوسال کالیفرنیا[۹۳] قبل از انجام تست‌های مربوطه در پایان فرایند، ابتدا باید نسبت C/N اندازه‌گیری شود، اگر این نسبت ۲۵ یا کمتر باشد آنگاه پوسال قابل قبول است و می‌توان تست‌های دیگر را انجام داد. علیدادی و نجف‌پور[۹۴] نسبت C/N، نسبت آمونیوم به نیترات، درصد جامدات فرار و مقدار کلیفرم‌های مدفوعی را مؤلفه‌های تعیین بلوغ پوسال لجن فاضلاب شهری معرفی کرده‌اند. محدودهٔ قابل قبول برای نسبت NH_4^+/NO_3^- یا شاخص نیتریفیکاسیون ۳-۰/۵ پیشنهاد شده‌است[۹۳].

۷. چشم‌انداز آینده

در زمینهٔ تولید کود پوسال، با توجه به اینکه بیش از ۷۰ درصد از پسماندهای تولیدی در سطح کشور پسماند تر است، بازار و ظرفیت مناسبی در استان‌های کشور وجود دارد. همان‌گونه که پیشتر ذکر شد، این مسأله از لحاظ زیست‌محیطی نیز اهمیت زیادی دارد. علاوه‌بر کمبود منابع ملی و ضعف فناوری پیشرفته، موضوع تفکیک زباله در مبدأ یکی از چالش‌های اصلی در این‌زمینه به شمار می‌آید. رصد برنامه‌ها و طرح‌های انجام‌شده در دیگر کشورهای دنیا حاکی از آن است که اساس تولید پوسال از ضایعات تفکیک‌شده در مبدأ می‌باشد. ارائهٔ آموزش‌های لازم به همهٔ اقشار جامعه و به‌خصوص مدارس سطح کشور در تمام مقاطع تحصیلی، گامی مهم در بهسازی مدیریت پسماند خواهدبود. پیاده‌سازی موفق طرح‌های تفکیک از مبدأ مستلزم مشارکت و همکاری عمومی است. از سویی‌دیگر، با توجه‌به محاسن واگذاری امور اجرایی پسماندها به بخش خصوصی، دولت‌مردان از طریق تأمین وام و کمک هزینه در راستای حمایت از پوسال به‌عنوان روش جایگزین خاک‌چال نقش مهمی دارند؛ از این‌طریق پایداری پوسال تضمین و در جامعه اشتغال ایجاد خواهدشد[۹۵].

به‌نظر می‌رسد موادی که به‌همراه پیش‌ماده اضافه می‌شوند، صرفهٔ اقتصادی ندارند و باید تحقیقات بیشتری برای یافتن مواد مناسب و ارزنده انجام‌شود. استفاده از پیش‌فرآوری‌های ارزان قیمت برای پیش‌ماده‌های سرسخت در مقابل تجزیه و استفاده از ریزاندام‌های اصلاح‌شدهٔ ژنتیکی برای ارتقای تجزیهٔ زیست‌شناختی مواد آلی و افزایش بازده فرایند لازم است[۹۵].

در بین روش‌های ارزیابی بو، سنجش بو از طریق رقیق‌سازی رایج‌ترین سبک است[۹۶]. البته این‌روش زمان‌بر و هزینه‌بر است، نیاز به نیروی انسانی زیاد دارد، دارای خطاست و بین نمونه‌گیری و اندازه‌گیری تأخیر وجود دارد[۹۶]. هم‌چنین این‌روش قادر به تشخیص برخی ترکیبات شیمیایی خاص و بودار نیست[۷۸]. بنابراین فناوری‌های گوناگون کنترل و پالایش بو باید گسترش یابد و وارد بازار شود.

همچنین استفاده از حرارت تولیدی در حین فرایند به‌عنوان یک‌منبع تجدیدپذیر بررسی شده است[۹۷]. گرچه نیاز است تا تحقیقات بیشتری در این‌زمینه و روشهای متفاوت برداشت حرارت از فرایند انجام‌شود.

۸. نتیجه‌گیری کلی

در سال‌های اخیر فرایند تولید پوسال به‌عنوان فرایندی که مشخصهٔ اصلی آن ریزاندام‌ها هستند، در کاهش حجم پسماندهای آلی و تبدیل آنها به یک مادهٔ با ارزش به‌نام پوسال به‌خوبی شناخته شده‌است. بدین منظور، در این‌مقاله سعی شد تا جوانب مهم و تأثیرگذار فرایند تولید پوسال به‌صورتی جامع بررسی و مرور شود؛ در ادامه نکته‌های برجستهٔ این مطالعه خلاصه شده است:

۱) پوسال برتری‌های متعددی از لحاظ زیست‌محیطی، اقتصادی و کشاورزی دارد که به طورخلاصه عبارت است از: الف) کاهش پراکنش گازهای گلخانه‌ای و آلودگی منابع آب زیرزمینی به‌دنبال جایگزین‌شدن فرایند تولید پوسال با خاک‌چال و دفن روباز؛ ب) تبدیل پسماند به کود آلی و به‌دنبال آن اشتغال‌زایی و درامدزایی از تولید و فروش کود و هم‌چنین حفظ اراضی و جلوگیری از تغییر کاربری آنها؛ پ) به‌عنوان منبع غنی از مواد مغذی و ریزاندام‌های مفید، موجب ارتقای رشد گیاه و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و اثرات بد ناشی از مصرف بیش از حد این کودها می‌شود، همچنین به‌عنوان پالایندهٔ زیستی، آلاینده‌های موجود در خاک را جذب و بستر رشد را پاکیزه می‌کند.

۲) عوامل تأثیرگذار بر فرایند تولید پوسال را می‌توان به دو گروه دسته‌بندی کرد: عوامل وابسته به ماهیت مادهٔ آلی از جمله نسبت کربن به نیتروژن، رطوبت، pH و مشخصه‌های محیطی اعم از دما و اکسیژن. در شروع فرایند، رطوبت و نسبت کربن به نیتروژن مادهٔ آلی دو مشخصهٔ کلیدی به‌شمار می‌روندکه باید در مقدار بهینه تنظیم شوند؛ چرا که این دو مشخصه نقش مهمی در شروع تجزیه و پیش‌رفت فرایند ایفا می‌کنند. پس از آن، دما و اکسیژن مشخصه‌های مؤثری در حفظ شرایط گرمادوستی و هوازی خواهند بود. دما و مقدار اکسیژن باید در طول فرایند به‌طور پیوسته پایش شوند.

۳) هدف اصلی محققان حداکثرکردن نرخ تجزیه با کنترل و بهسازی فعل و انفعالات بین سازوکارهای زیست‌شناختی، شیمیایی و فیزیکی است. گزینه‌های مختلفی برای نزدیک‌شدن یا حتی رسیدن به این هدف موجود است که از آن بین شناخت رفتار جنبش‌شناختی از راه الگوسازی ریاضی و تنظیم ترکیب مواد اولیهٔ مخلوط پسماندها در یک‌مقدار بهینه از برجسته‌ترین راهکارهای بررسی‌شده در مطالعات پیشین بوده است. الگوهای ریاضی متعددی از جمله جنبش‌شناسی درجهٔ اول، مونود، Contois، Tessier و Moser برای تجزیهٔ زیست‌شناختی مواد آلی گسترش یافته‌اند. هر کدام از این جنبش‌شناسی‌ها دارای قوت و ضعف ویژهٔ خود هستند؛ به‌عنوان مثال جنبش‌شناسی مونود نیاز به تخمین تودهٔ میکروبی اولیه دارد یا جنبش‌شناسی مرتبهٔ اول در مدت زمان کوتاهی قادر به پیش‌بینی تجزیهٔ پیش‌ماده است؛ البته ثابت شده است که الگوهای با مرتبهٔ بزرگتر از یک کارایی بیشتری دارند.

۴) مواد کمکی که به‌عنوان راهکاری مؤثر در ارتقای فرایند تولید پوسال معرفی شده‌اند به سه‌دسته عامل حجیم‌کننده، افزودنی و اصلاح‌کننده طبقه‌بندی می‌شوند و تأثیر به‌سزایی دارند در: متعادل‌کردن رطوبت، بهبود نسبت کربن به نیتروژن، بافری کردن pH، افزایش تخلخل توده و به‌دنبال آن حفظ شرایط هوازی، کاهش پراکنش آمونیاک و گازهای گلخانه‌ای و به‌طور کلی افزایش فعالیت میکروبی و درنتیجه افزایش نرخ تجزیه. طیف وسیعی از مواد گوناگون مانند تراشه‌های چوب، خاک‌اره، مواد معدنی مختلف، ریزاندام و زیمایه به‌عنوان مواد کمکی استفاده می‌شود.

۵) از چالش‌های اصلی پیش‌روی محققان در فرایند تولید پوسال، پراکنش بو و طولانی‌بودن زمان فرایند است. بو یک فرآوردهٔ جانبی و ذاتی فرایند تولید پوسال است که در صورت بهینه‌نبودن شرایط فرایندی شدت می‌گیرد و غلظت آن بیشتر می‌شود. بر طبق نتایج، پراکنش ترکیبات بودار در اثر شرایط بی‌هوازی به‌دنبال کمبود اکسیژن و متعادل نبودن مشخصه‌های ذاتی پیش‌ماده اعم از مواد مغذی، رطوبت و تخلخل، ایجاد می‌شود.

۶) زمان طولانی فرایند تولید پوسال، عاملی است که موجب کاهش جذابیت فرایند می‌شود؛ علت آن تجزیهٔ طولانی‌مدت ترکیبات پیچیده و سرسخت در مقابل تجزیه- همچون مواد لیگنوسلولزی- است. از جملهٔ راه‌حل‌های رفع این مشکل می‌توان به واحدهای پردازش مکانیکی- زیست‌شناختی، استفاده از مواد کمکی به‌ویژه ریزاندام‌ها و زیمایه‌های تجزیه‌کنندهٔ مواد آلی مقاوم به تجزیه اشاره کرد.

۷) آزمون‌های سنجش کیفیت پوسال باهدف پایداری و بلوغ پوسال اهمیت زیادی دارند؛ اگر پوسال به پایداری نرسیده باشد، بین تودهٔ میکروبی و گیاه بر سر اکسیژن و مواد مغذی رقابت به وجود می‌آید. پوسال به بلوغ نرسیده نیز برای رشد گیاه سمی است. با وجود اینکه هیچ استاندارد مدونی برای سنجش پایداری و بلوغ پوسال وجود ندارد، اما برخی آزمون‌های شاخص به‌وسیلهٔ محققان بررسی و معرفی شده‌است. در وهله اول دما، بو، رنگ، رطوبت و pH پوسال حائز اهمیت است. سپس باید مؤلفه‌های پیچیده‌تری اعم از نسبت کربن به نیتروژن، مقدار مادهٔ آلی، شاخص تنفس میکروبی، نرخ مصرف اکسیژن و شاخص جوانه‌زنی سنجیده‌شود. شاخص جوانه‌زنی اولین و مهم‌ترین آزمون برای سنجش بلوغ و سمیت پوسال است.

مراجع

[1] Awasthi, M. K., Pandey, A. K., Khan, J., Bundela, P. S., Wong, Jonathan W. C., Selvam, A., "Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting", Bioresource Technology, Vol. 168, pp. 214-221, (2014).

[2] Bekchanov, M., Mirzabaev, A., "Circular economy of composting in Sri Lanka: Opportunities and challenges for reducing waste related pollution and improving soil health", Journal of Cleaner Production, 202: pp. 1107-1119, (2018).

[3] Saha, J. K., Panwar, N., Singh, M. V., "An assessment of municipal solid waste compost quality produced in different cities of India in the perspective of developing quality control indices", Waste Management, 30(2): pp. 192–201, (2010).

[4] Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., Montoya, S., "Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process", Waste Management, Vol. 69, pp. 136-153, (2017).

[5] Pergola, M., Persiani, A., Palese, A. M., Di Meo, V., Pastore, V., D'Adamo, C., Celano, G., "Composting: The way for a sustainable agriculture", Applied Soil Ecology, 123: pp. 744–750, (2018).

[6] Wu, J., Zhao, Y., Zhao, W., Yang, T., Zhang, X., Xie, X., Cui, H., Wei, Z., "Effect of precursors combined with bacteria communities on the formation of humic substances during different material composting", Bioresource Technology, 226: pp. 191–199, (2017).

[7] Kaza, S., Lisa, Y., Perinaz Bhada-Tata, Frank V. W., "What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050", Urban Development Series, (2018).

[8] Cáceres, R., Malińska, K., Marfà, O., "Nitrification within composting: A review", Waste Management, 72: pp. 119-137, (2018).

[9] Proietti, P., Calisti, R., Gigliotti, G., Nasini, L., Regni, L., Marchini, A.,"Composting optimization: Integrating cost analysis with the physical-chemical properties of materials to be composted", Journal of Cleaner Production, 137: pp. 1086-1099, (2016).

[10] Oazana, S., Naor, M., Grinshpun, J., Halachmi, I., Raviv, M., Saadi, I., Avidov, R., Varma, V. S., Rosenfeld, L., Gross, A., Laor, Y., "A flexible control system designed for lab-scale simulations and optimization of composting processes", Waste Management, 72: pp. 150–160, (2018).

[11] Li, Z., Lu, H., Ren, L., He, L., "Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review", Chemosphere, 93: pp. 1247-1257, (2013).

[12] Awasthi, M. K., Pandey, A. K., Bundela, P. S., Wong, J. W., Li, R., Zhang, Z., "Co-composting of gelatin industry sludge combined with organic fraction of municipal solid waste and poultry waste employing zeolite mixed with enriched nitrifying bacterial consortium", Bioresource Technology, 213: pp. 181-189, (2016).

[13] Waqas, M., Nizami, Dr. Abdul-Sattar, Aburizaiza, A., Barakat, M., Rashid, M., Ismail, I., "Optimizing the process of food waste compost and valorizing its applications: A case study of Saudi Arabia", Journal of Cleaner Production, 176: pp. 426-438, (2017).

[14] Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., Moral, R., "Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review", Bioresource Technology, 100 (22): pp. 5444–5453, (2009).

[15] Imbeah, M., "Composting piggery waste: a review", Bioresource Technology, 63: pp. 197–203, (1998).

[16] MacGregor, S. T., Miller, F. C., Psarianos, K. M., Finstein, M. S., "Composting process-control based on interaction between microbial heat output and temperature", Appl.Environ. Microbiol, 41: pp. 1321–1330, (1981).

[17] Chang, R., Guo, Q., Chen, Q., Pilar Bernal, M., Wang, Q., Li, Y., "Effect of initial material bulk density and easily-degraded organic matter content on temperature changes during composting of cucumber stalk", Journal of environmental scienece, 80: pp. 306-315, (2019).

[18] Lester, J. N., Birkett, J. W., "Microbiology and Chemistry for Environmental Scientists and Engineers", E and FN SPON: p. 184–185, (1999).

[19] Ravindran, B., Sekaran, G., "Bacterial composting of animal fleshing generated from tannery industries", Waste management, 30(12): pp. 2622-2630, (2010).

[20] Vuorinen, A. H., Saharinen, M. H., "Evolution of microbiological and chemical parameters during manure and straw co-composting in a drum composting system", Agriculture, ecosystems & environment, 66(1): pp. 19-29, (1997).

[21] Varma, V. S., Kalamdhad, A. S., "Evolution of chemical and biological characterization during thermophilic composting of vegetable waste using rotary drum composter", International Journal of Environmental Science and Technology, 12(6), pp. 2015-2024, (2015).

[22] Larney, F. J., Hao, X., "A review of composting as a management alternative for beef cattle feedlot manure in southern Alberta, Canada", Bioresource Technology, 98: pp. 3221–3227, (2007).

[23] Sadef, Y., Poulsen, T. G., Bester, K., "Impact of compost process temperature on organic micro-pollutant degradation", Science of the Total Environment, 494: pp. 306–312, (2014).

[24] Kuok, F., Mimoto, H., Nakasaki, K., "Effects of turning on the microbial consortia and the in situ temperature preferences of microorganisms in a laboratory-scale swine manure composting", Bioresource Technology, 116: pp. 421-427, (2012).

[25] Yang, L., Zhang, S., Chen, Z., Wen, Q., Wang, Y., "Maturity and security assessment of pilot-scale aerobic co-composting of penicillin fermentation dregs (PFDs) with sewage sludge", Bioresource Technology, 204: pp. 185–191, (2016).

[26] Fourti, O., "The maturity tests during the composting of municipal solid wastes", Resources, Conservation & Recycling, 72: pp. 43– 49, (2013).

[27] Huang, G. F., Wong, J. W. C., Wu, Q. T., Nagar, B. B., "Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust", Waste Management, 24(8): pp. 805-813, (2004).

[28] Pace, M. G., Miller, B. E., Farrell-Poe, K. L., "The Composting Process", Utah State University Cooperative Extension: pp. 1-2, (1995).

[29] Chen, H., Awasthi, M. K., Liu, T., Zhao, J., Ren, X., Wang, M., Duan, Y., Awasthi, S. K., Zhang, Z., "Influence of clay as additive on greenhouse gases emission and maturity evaluation during chicken manure composting", Bioresource Technology, 266: pp. 82-88, (2018).

[30] Zhou, H., Zhao, Y., Yang, H., Zhu, L., Cai, B., Luo, S., Cao, J., Wei, Z., "Transformation of organic nitrogen fractions with different molecular weights during different organic wastes composting", Bioresource Technology, 262: pp. 221–228, (2018).

[31] Zhang, J., Zeng, G., Chen, Y., Yu, M., Yu, Z., Li, H., Yu, Y., Huang, H., "Effects of physico-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting", Bioresource Technology, 102(3): pp. 2950–2956, (2011).

[32] Makan, A., Assobhei, O., Mountadar, M., "Effect of initial moisture content on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco", Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 10(1), (2013).

[33] Petric, I., Šestan, A., Šestan, I., "Influence of initial moisture content on the composting of poultry manure with wheat straw", Biosystems Engineering 104(1): pp. 125-134, (2009).

[34] Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. A., "Integrated solid waste management, Engineering principles and management issues", McGraw-Hill, (1993).

[35] Liang, C., Das, K. C., McClendon, R. W., "The influence temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend", Bioresource Technology, 86(2): pp. 131–137, (2003).

[36] Delgado-Rodríguez, M., Ruiz-Montoya, M., Giraldez, I., López, R., Madejón, E., Díaz, M. J., "Effect of aeration rate and moisture content on the emissions of selected VOCs during municipal solid waste composting", Journal of Material Cycles and Waste Management, 14(4): pp. 371–378, (2012).

[37] Wang, Y., Ai, P., Cao, H., Liu, Z., "Prediction of moisture variation during composting process: A comparison of mathematical models", Bioresource Technology, 193: pp. 200-205, (2015).

[38] Ahn, H. K., Richard, T. L., Glanville, T. D., "Optimum moisture levels for biodegradation of mortality composting envelope materials", Waste Management, 28(8): pp. 1411–1416, (2008).

[39] Leton, T. G., Stentiford, E. I., "Control of aeration in static pile composting", Waste Management and Research, 8(4): pp. 299-306, (1990).

[40] Mejias, L., Komilis, D., Gea, T., Sánchez, A., "The effect of airflow rates and aeration mode on the respiration activity of four organic wastes: Implications on the composting process", Waste Management, 65, pp. 22-28, (2017).

[41] Ge, J., Huang, G., Huang, J., Zeng, J., Han, L., "Particle-scale modeling of oxygen uptake rate during pig manure-wheat straw composting: a new approach that considers surface convection", International Journal of Heat & Mass Transfer, 97: pp. 735–741, (2016).

[42] Epstein, E., Wilson, G. B., Parr, J. F., "The Beltsville aerated pile method for composting sewage sludge", New Processes of Waste Water Treatment and Recovery. Soc. Chem. Ind. London, UK, pp. 201-213, (1978).

[43] Yuan, J., Chadwick, D., Zhang, D., Li, G., Chen, S., Luo, W., Du, L., He, S., Peng, S., "Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting", Waste Management, 56: pp. 403-410, (2016).

[44] Chowdhury, M. D., de Neergaard, A., Jensen, L.

S., "Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting", Chemosphere, 97: pp. 16–25, (2014).

[45] Rasapoor, M., Adl, M., Pourazizi, B., "Comparative evaluation of aeration methods for municipal solid waste composting from the perspective of resource management: A practical case study in Tehran, Iran", Journal of Environmental Management, 184: pp. 1-7, (2016).

[46] Shimizu, N., Karyadi, J. N. W., Harano, M., Iwabuchi, K., Kimura, T., "Cattle manure composting in a packed-bed reactor with forced aeration strategy", Engineering in Agriculture, Environment and Food, 11(2): pp. 65-73, (2018).

[47] Wang, X., Bai, Z., Yao, Y., Gao, B., Chadwick, D., Chen, Q., Hu, H., Ma, L., "Composting with negative pressure aeration for the mitigation of ammonia emissions and global warming potential", Journal of Cleaner Production, 197: pp. 448-457, (2018).

[48] Cui, E., Wu, Y., Zuo, Y., Chen, H., "Effect of different biochars on antibiotic resistance genes and bacterial community during chicken manure composting", Bioresource Technology, 203: pp. 11-17, (2016).

[49] Nakasaki, K., Hirai, H., "Temperature control strategy to enhance the activity of yeast inoculated into compost raw material for accelerated composting", Waste Management, 65: pp. 29-36, (2017).

[50] Gage, J., "Checklist for odor management at compost facilities", Biocycle, 44(5): pp. 42-47, (2003).

[51] Cheung, H. N. B., Huang, G. H., Yu, H., "Microbial-growth inhibition during composting of food waste: Effects of organic acids", Bioresource Technology, 101(15): pp. 5925–5934, (2010).

[52] Sundberg, C., Jönsson, H., "Process inhibition due to organic acids in fed-batch composting of food waste – influence of starting culture", Biodegradation, 16(3): pp. 205-213, (2005).

[53] Beck-Friis, B., Smårs, S., Jönsson, H., Eklind, Y., Kirchmann, H., "Composting of source-separated household organics at different oxygen levels: gaining an understanding of the emission dynamics", Compost Science & Utilization, 11(1): pp. 41-50, (2003).

[54] Nakasaki, K., Yaguchi, H., Sasaki, Y., Kubota, H., "Effects of pH control on composting of garbage", Waste Management and Research, 11(2): pp. 117–125, (1993).

[55] Baptista, M., Antunes, F., Gonçalves, M. S., Morvan, B., Silveira, A., "Composting kinetics in full-scale mechanical–biological treatment plants", Waste Management, 30(10): pp. 1908–1921, (2010).

[56] Gutiérrez, M. C., Siles, J. A., Diz, J., Chica, A. F., Martín, M. A., "Modelling of composting process of different organic waste at pilot scale: Biodegradability and odor emissions", Waste Management, 59: pp. 48-58, (2017).

[57] Chan, M. T., Selvam, A., Wong, J. W. C., "Reducing nitrogen loss and salinity during struvite' food waste composting by zeolite amendment", Bioresource Technology 200 (9): pp. 838–844, (2015).

[58] Petric, I., Selimbašić, V., "Development and validation of mathematical model for aerobic composting process", Chemical Engineering Journal, 139(2): pp. 304–317, (2008).

[59] Qin, X., Huang, G., Zeng, G., Chakma, A., Xi, B., "A fuzzy composting process model", Journal of the Air & Waste Management Association, 57(5): pp. 535-550, (2007).

[60] Mason, I. G., "Mathematical modelling of the composting process: A review", Waste Management, 26(1): pp. 3-21, (2006).

[61] Seki, H., "A new deterministic model for forced-aeration composting processes with batch operation", Transactions of the ASAE, 45(4): pp. 1239-1250, (2002).

[62] Petric, I., Avdihodžić, E., Ibrić, N., "Numerical simulation of composting process for mixture of organic fraction of municipal solid waste and poultry manure", Ecological Engineering, 75: pp. 242-249, (2015).

[63] Petric, I., Helić, A., Avdić, E. A., "Evolution of process parameters and determination of kinetics for co-composting of organic fraction of municipal solid waste with poultry manure", Bioresource Technology, 117: pp. 107-116, (2012).

[64] Reyes-Torres, M., Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., Sánchez, A. , "A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies", Waste Management, 77: pp. 486-499, (2018).

[۶۵] یوسفی، ج.، یونسی، ح.،"بررسی تأثیر مقادیر مختلف خاک‌اره بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کمپوست حاصل از پسماند شهری". علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۶ (شمارهٔ ویژه ۹۳).

[۶۶] یوسفی، ج.، یونسی، ح.، "کمپوست‌سازی همزمان پسماند شهری و خاک‌اره جهت حفظ رطوبت و جلوگیری از دست‌رفتن نیتروژن توده کمپوست"، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۵ (۴)، (۱۳۹۲).

248: pp. 57–67, (2018).

[77] Zhang, H., Li, G., Gu, J., Wang, G., Li, Y., Zhang, D., "Influence of aeration on volatile sulfur compounds (VSCs) and NH3 emissions during aerobic composting of kitchen waste", Waste Management, 58: pp. 369-375, (2016).

[78] Gutiérrez, M. C., Martín, M. A., Serrano, A., Chica, A. F., "Monitoring of pile composting process of OFMSW at full scale and evaluation of odour emission impact", Journal of Environmental Management, 151: pp. 531-539, (2015).

[79] Schiavon, M., Martini, L. M., Corrà, C., Scapinello, M., Coller, G., Tosi, P., Ragazzi, M., "Characterization of volatile organic compounds (VOCs) released by the composting of different waste matrices", Environmental Pollution, 231: pp. 845–853, (2017).

[80] Coker, C., "Managing odors in organics recycling", BioCycle, 53(4): pp. 25-28, (2012).

[81] Han, Z., Qi, F., Wang, H., Liu, B., Shen, X., Song, C., Bao, Z., Zhao, X., Xu, Y., Sun, D., "Emission characteristics of volatile sulfur compounds (VSCs) from a municipal sewage sludge aerobic composting plant", Waste Management, 77: pp. 593-602, (2018).

[82] Mustafa, M. F., Liu, Y., Duan, Z., Guo, H., Xu, S., Wang, H., Lu, W., "Volatile compounds emission and health risk assessment duringcomposting of organic fraction of municipal solid waste", Journal of Hazardous Materials, 327: pp. 35-43, (2017).

[83] Zhang, L., Sun, X., "Effects of rhamnolipid and initial compost particle size on the two-stage composting of green waste", Bioresource Technology, 163: pp. 112–122, (2014).

[84] Vargas-García, M. C., Suárez-Estrella, F., López, M. J., Moreno, J., "Microbial population dynamics and enzyme activities in composting processes with different starting materials", Waste Management, 30(5): pp. 771-778, (2010).

[85] Mirdamadian, S. H., Khayam-Nekoui, S. M., Ghanavati, H., "Reduce of fermentation time in composting process by using a special microbial consortium", World Acad Sci Eng Technol, 52: pp. 475-479, (2011).

[86] Echeverria, M. C., Cardelli, A., Bedini, S., Colombini, A., Incrocci, I., Castagna, A., Agnolucci, M., Cristani, C., Ranieri, A., Saviozzi, A., Nuti, M., "Microbial enhanced composting of wet olive husks", Bioresource Technology, 104: pp. 509–517, (2012).

[87] Xu, Z., Zhang, F. B., Zhang, L. L., Li, J., "Effects of indigenous and exogenous microbial inocula on dynamic changes of enzyme activities during

[67] Zhang, J., Lü, F., Shao, L., He, P., "The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge", Bioresource Technology, 168: pp. 252-258, (2014).

[68] López-Cano, I., Roig, A., Cayuela, M., Alburquerque, J. A., Sánchez-Monedero, M. A., "Biochar improves N cycling during composting of olive mill wastes and sheep manure", Waste Management, 49: pp. 553-559, (2016).

[69] Jindo, K., Sonoki, T., Matsumoto, K., Canellas, L., Roig, A., Sanchez-Monedero, M. A., "Influence of biochar addition on the humic substances of composting manures", Waste Management, 49: pp. 545-552, (2016).

[70] Sanchez-Monedero, M. A., Cayuela, M. L., Roig, A., Jindo, K., Mondini, C., Bolan, N., "Role of biochar as an additive in organic waste composting", Bioresource Technology, 247: pp. 1155–1164, (2018).

[71] Xiao, R., Awasthi, M. K., Li, R., Park, J., Pensky, S. M., Wang, Q., Wang, J. J., Zhang, Z., "Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: A review", Bioresource Technology, 246: pp. 203-213, (2017).

[72] Jain, M. S., Jambhulkar, R., Kalamdhad, A. S., "Biochar amendment for batch composting of nitrogen rich organic waste: Effect on degradation kinetics, composting physics and nutritional properties", Bioresource Technology, 253: pp. 204-213, (2018).

[۷۳] نجات‌زاده، ف.، بروجنی‌غلامی، ف.، "بررسی کارایی شاخص دینامیک میکروبی و فعالیت‌آنزیمی نسبت به روش‌های متداول و استفاده از آن به‌منظور تعیین میزان رسیدگی کود کمپوست". تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی، مولکولی، ۴ (۱۳)، (۱۳۹۲).

[74] Zhang, L., Sun, X., "Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste", Waste Management, 48: pp. 115-126, (2016).

[75] Gabhane, J., William, S. P. M. P., Bidyadhar, R., Bhilawe, P., Anand, D., Vaidya, A. N., Wate, S. R., "Additives aided composting of green waste: effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the final compost", Bioresource Technology, 114: pp. 382–388, (2012).

[76] Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrena, R., Gea, T., Sánchez, A., "Composting of food wastes: Status and challenges", Bioresource Technology,

composting in a bioreactor", Adv. Mater. Res., 383: pp. 4017–4023, (2012).

[88] Kim, J. H., Block, D. E., Mills, D. A., "Simultaneous consumption of pentose and hexose sugars: an optimal microbial phenotype for efficient fermentation of lignocellulosic biomass", Applied microbiology and biotechnology, 88(5): pp. 1077–1085, (2010).

[89] Zhang, L., Sun, X., Tian, Y., Gong, X., "Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste", Bioresource Technology, 131: pp. 68–75, (2013).

[90] Chiarelotto, M., Damaceno, F. M., Lorin, H. E. F., Tonial, L. M. S., de Mendonça Costa, L. A., Bustamante, María A., Moral, R., Marhuenda-Egea, F. C., Costa, M. S. S. de Mendonça, "Reducing the composting time of broiler agro-industrial wastes: The effect of process monitoring parameters and agronomic quality", Waste Management, 96: pp. 25-35, (2019).

[91] Grigatti, M., Cavani, L., Ciavatta, C., "The evaluation of stability during the composting of different starting materials: Comparison of chemical and biological parameters", Chemosphere, 83(1): pp. 41-48, (2011).

[92] Oviedo-Ocaña, E. R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellon, L. F., Hoyos, L. V., Gonzales, S., Barrena, R., Komilis, D., Sanchez, A., "Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices", Waste Management, 44: pp. 63–71, (2015).

[93] California Compost Quality Council (CCQC), "Compost maturity index", (2001).

[۹۴] علیـدادی، ح.، نجـف‌پـور، ع.، "تعیـین زمـان رسـیدن کمپوست حاصل از لجن تصفیه‌خانه فاضـلاب شـهری". دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ۲۱ (۸۵)، (۱۳۹۰).

[95] Onwosi, C. O., Igbokwe, V. C., Odimba, J. N., Eke, I. E., Nwankwoala, M. O., Iroh, I. N., Ezeogu, L. I., "Composting technology in waste stabilization: on the methods, challenges and future prospects", Journal of Environmental Management, 190: pp. 140–157, (2017).

[96] Tsai, Chung-Jung, Chen, Mei-Lien, Ye, An-Di, Mao, I-Fang, "Single SnO_2 gas sensor as a practical tool for evaluating the efficiency of odour control engineering at food waste composting plants", Sensors and Actuators B: Chemical, 169: pp. 248-254, (2012).

[97] Irvine, G., Lamont, E. R., Antizar-Ladislao, B., "Energy from waste: reuse of compost heat as a source of renewable energy", International Journal of Chemical Engineering, doi: http://dx.doi.org/10.1155/2010/627930, (2010).