



بسمه تعالی
سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری
تهران



میکروبیو لوژی و فرآیند بیولوژی در پردازش پسماند جامد شهری

تهیه و تنظیم :

سیده مهشید محمدی

حمید کاظمی

(کارشناسان ارشد کنترل کیفیت و آزمایشگاه سازمان بازیافت و تبدیل

مواد شهرداری تهران)

مقدمه

رشد بی رویه جمعیت، توسعه و غالب شدن فرهنگ شهرنشینی و تغییر عادات و الگوهای مصرف از یکسو و محدودیت در استفاده از منابع طبیعی از سوی دیگر بروز انواع ناسازگاری های اجتماعی، اقتصادی، نهایتاً زیست محیطی را در پی داشته است. با تولید روزانه میلیونها تن پسماند در جهان در صورتی که به امر پردازش و دفع بهداشتی اینگونه مواد پرداخته نشود، پیامدی جز تخریب محیط زیست ندارد و افزایش این پسماند ها ساکنان کره زمین را روزبه روز بیشتر در احاطه انبوه پسماند های خطرناک و بیماریزا قرار می دهد. اثرات و پیامدهای تخریبی پسماند در جهان موجب گردیده که تلاشهای گسترده ای در جهت کاهش تولید پسماند و دریافت و تبدیل مواد به عمل آید و موجب توسعه فنی و روشهای پردازش و دفع آن شده است. امروزه مدیریت پسماند جامد شهری و صنعتی اهمیت به خصوصی دارد و از آنجاکه روشهای دفع سنتی پسماند جوابگو نمی باشد، روشهای نوین همچون زباله سوز و روشهای بیولوژیکی مانند کمپوست سازی و هضم بی هوازی در کنار استفاده از محل های دفن بهداشتی پدید آمدند.

در کلان شهر تهران روزانه به طور متوسط بیش از ۷۵۰۰ تن پسماند خانگی تولید می شوند نظر به این که بخش عمده ای از پسماند های خانگی شهر تهران مواد آلی فساد پذیر هستند و در تبدیل پسماند به کمپوست از این نظر دارای الویت می باشند. تبدیل پسماند آلی به کمپوست باعث بازگشت مواد به چرخه طبیعت، کاهش حجم مواد دفنی و استفاده بهینه از مرکز دفن می گردد.

تاریخچه تولید کمپوست در جهان و احداث کارخانه آن در ایران

اولین قدم مؤثر در کمپوست سازی تجربی تقریباً یکصد سال قبل (توسط Howard و همکاران ۱۹۳۵) در هند برداشته شد. آنها روشهای قدیمی را تبدیل به روشهای اصولی و ضوابط جدید نمودند که معروف به فرایند Indor شد. زیرا این فرایند در محلی به همین نام انجام گرفته بود. این فرایند در بدو پیدایش فقط برای پهن حیوانی مورد استفاده قرار گرفت بعدها از لایه های مواد فساد پذیر نظیر فضولات انسانی مواد گیاهی، پهن حیوانات، و انواع مواد زائد اصطبل و پسماند نیز مورد بهره برداری قرار گرفت. فرایند Indor پس از تغییراتی به طور وسیع در هند مورد استفاده قرار گرفت. از زمانی که برنامه کمپوست کردن به مقیاس وسیع در هند به اجرا درآمد. مؤسسه تحقیقات کشاورزی هند در بنگلور روش مزبور را به نام بنگلور اصلاح نمود.

پژوهش های به عمل آمده در زمینه چگونگی ایجاد کارخانه کمپوست در جهان حاکی از آن است که پدیده تبدیل پسماند های خانگی به کود به رغم انگیزه هایی که از لحاظ قدمت و دیرپنگی آن می شده صنعتی نو به شمار می رود که نخستین بار بر اساس شیوه مصرفی و سیستم معیشتی آمریکائیان در آن کشور مرسوم شده و سپس در قاره اروپا رواج یافت. مسیر توسعه و کاربرد این صنعت در بین ملل مختلف مبین وقوف جامعه بشری و حفظ محیط زیست و پیشگیری از آلودگی آن به دست خویشتن می باشد. به تعبیر دیگر صیانت طبیعت خاکی برای بقای حیات انسانی و بدهی است. در کشور ما بهره برداری از کود آلی در مصارف کشاورزی شناخته شد. شیوه ای

سنتی از طریق دفن برگ و خس و خاشاک باغها و مزارع به درون زمین از پیشینه ای کهن برخوردار است .

ایجاد کارخانه کمپوست در ایران ، به سال ۱۳۴۸ که کارخانه کود آلی اصفهان تأسیس شد بر می گردد . در سال ۱۳۵۱ کارخانه کمپوست با ظرفیت ۵۰۰ تن در روز در صالح آباد تهران توسط شرکت New Soil انگلستان راه اندازی شد این کارخانه تا سال ۱۳۵۴ به صورت متناوب مورد استفاده قرار گرفت و در همان سال تعطیل شد . در سال ۱۳۶۸ سازمان بازیافت تهران که جایگزین اداره کل کود گیاهی شد کار را پیگیری کرده و بعد از انجام اصلاحات مجدد کارخانه راه اندازی شد . ولی به دلیل نزدیک شدن بافت مسکونی در اطراف کارخانه و اعتراضات مردمی فعالیت کارخانه متوقف شد در اواخر سال ۱۳۷۲ مطالعات اولیه و بررسی های فنی برای احداث کارخانه ای با ظرفیت ۲۰۰۰ تن در روز شروع شد . فاز اول کارخانه با ظرفیت دریافت ۱۰۰۰ تن زباله در دو شیفت کاری در زمینی به مساحت ۵۰ هکتار با ۳۲ هزار متر مربع زیربنا (شامل ساختمانهای تولید و اداری) و در حاشیه مرکز دفن زباله کهریزک احداث و در تیر ماه ۱۳۷۷ با ظرفیت ۵۰۰ تن زباله در یک شیفت کاری در روز راه اندازی شد .

وضعیت تولید پسماند در حال حاضر

در چند سال اخیر مقدار تولید زباله شهر تهران از ۷۵۰۰ تن نیز تجاوز کرده است که از این مقدار حدود ۷۷.۶٪ پسماند خانگی شهری ، ۲.۱٪ خاک و نخاله ، ۱٪ زباله بیمارستان و ۱۵.۶٪ سایر موارد می باشد . با توجه به آنالیز فیزیکی که در دوره های مختلف انجام شده است در حدود ۶۵ تا ۶۹ درصد مواد متشکله پسماند خانگی را مواد آلی فسادپذیر می باشد که در حال حاضر برای مدیریت صحیح و اصولی این حجم از زباله آلی نیاز به تأمین منابع مالی و انسانی متخصص می باشد ولی می توان براساس راهکارهای مناسب این مواد آلی را پردازش کرد و آنرا تبدیل به کمپوست نمود .

جدول ۱ آنالیز فیزیکی پسماند خانگی شهری مناطق بیست و دوگانه شهر تهران در دو دوره زمانی مختلف

نوع پسماند	درصد میانگین در سال	درصد میانگین در سال
پسماند تر	۶۵.۲۲	۶۹.۳۳

نان	۰.۸۶	۰.۶۱
پلاستیک	۹.۵۲	۱۰.۳۱
کاغذ و مقوا	۱۲.۶۱	۶.۹۱
فلزات	۰.۷۱	۱.۸۳
شیشه	۱.۲۷	۲.۲۷
خاک و نخاله	۰.۸۵	۰.۹۰
ضایعات ویژه	۲.۵۸	۱.۴۳
سایر موارد	۶.۳۸	۶.۴۱
جمع	۱۰۰	۱۰۰

با شناختی که از مجموع پسماند جمع آوری شده از سطح تهران حاصل گردیده است برای مدیریت و پردازش آن راهکارهای مختلفی وجود دارد شامل :

۱. دفن بهداشتی پسماند جامد
 ۲. بازیافت انرژی از پسماند جامد
 ۳. بازیافت و تبدیل پسماند جامد (تولید کمپوست)
- که همانطور که اشاره شد باتوجه به نوع پسماند تولیدی ، تبدیل آن به کمپوست از نظر اهمیت در اولویت می باشد .

کمپوست چیست :

کمپوست حاصل یک فرآیند هوازی است که در طی آن پسماند هایی که منشأ آلی دارند (مانند پسمانده های غذایی، زراعی و برگ درختان) تغییر ترکیب داده و به حالت نسبتاً پایدار هوموس مانند در می آیند . عامل این تغییرات موجودات ذره بینی و میکروارگانیسم های (قارچ و باکتری های گرمادوست هوازی) موجود در توده مواد آلی هستند . در طبیعت بر اثر فعالیت این میکروارگانیسم ها مواد آلی تجزیه شده و به حالت کمپوست در می آیند اما با ایجاد شرایط مناسب (رطوبت ، اکسیژن ، دما) فعالیت آنها افزایش یافته و در نتیجه تجزیه مواد با سرعت بیشتری انجام می گردد و کمپوست تولید شده می تواند برای بهبود وضعیت خاک و افزایش رشد گیاه مورد استفاده قرارگیرد . برای تولید کمپوست سالم تمام استانداردها بایستی رعایت گردد و تفاوت موجود در انواع کمپوست ها و یا طبقه بندی آن به کیفیت تولید بستگی دارد .

کمپوست به سه روش اصلی تولید می گردد :

پشته ای	Windrow (top turn)
توده ای	Static Pile
در ظرف	In –Vessel

در مجتمع بازیافت و پردازش آراد کوه (سازمان بازیافت) از روش ویندرو (top turn) جهت تبدیل پسماند های آلی به کمپوست استفاده می شود. .

پسماندهای آلی منتقل شده به سایت تخمیر به صورت پشته های منظمی دسته بندی شده و در فواصل زمانی مشخص توسط دستگاه های Top Turn (هم زن) هوادهی می شوند. با گذشت دو ماه از حضور این مواد در سایت و فعالیت میکرورگانسیم های زیستی، کمپوست تولید می شود .

کود کمپوست تولیدی پس از جداسازی مواد زائد موجود در آن، تفکیک و درجه بندی می شود



شکل: نمایی از Top Turn که عمل گرداندن توده ها را انجام می دهد

پیش نیازهای فرایندهای بیولوژیکی

قبل از بحث در مورد فرایندهای بیولوژیکی در تبدیل پسماندبایدبه مواردذیل توجه خاص شود.

- ۱- نیازهای غذایی میکروارگانسیم ها یی که در کارخانه های تبدیل پسماند نقش دارند .
- ۲- متابولیسم میکروبی
- ۳- میکروارگانسیم های مهم در تبدیل پسماند
- ۴- شرایط محیطی
- ۵- شرایط هوایی

نیازهای غذایی برای رشد میکروبی :

میکروارگانیزم ها برای تولید مثل و انجام کار به منبع انرژی نیاز دارند . کربن در سنتز بخش های جدید سلول نقش دارند و عناصر معدنی مانند پتاسیم ، کلسیم ، منیزیم و فسفر نیز ضروری می باشد . فاکتورهای رشد هم در سنتز سلولی به کار می رود .

منابع انرژی و کربن

بر اساس نیاز به کربن و انرژی میکروارگانیزم ها را به دودسته موجودات اتوتروف و هتروتروف تقسیم میکنند .

هتروتروف ها کربن مواد آلی و اتوتروف ها از کربن دی اکسید کربن برای سنتز سلولی بهره می گیرند . در اتوتروف ها تبدیل دی اکسید کربن به یک ماده آلی یک فرایند احیایی است که به انرژی نیاز دارد . بنابراین اتوتروفها ، انرژی بیشتری نسبت به هتروتروفها در ساخت سلول صرف می کنند .

منبع انرژی اگر نور باشد میکروارگانیزمی که از نور به عنوان منبع انرژی استفاده می کنند ، فوتوتروف نامند .

موجودات فوتوتروف : اتوتروف (جلبک و باکتری های فوتوسنتتیک) و یا هتروتروف (باکتری های سولفور) می باشند . موجوداتی که انرژی را از واکنش های شیمیایی و پیوندهای شیمیایی دریافت می کنند شیمیوتروف می باشند . شیمیوتروفها نیز هتروتروفند (پروتوزوا ، قارچ ، اکثر باکتری ها) و یا اتوتروفند (باکتریهای نیتریفیان و...)

شیمیوتروفها : انرژی را از اکسیداسیون و احیاء مواد معدنی نظیر آمونیاک ، نیترات ، سولفید به دست می آورند شیمیوهتروتروفها : انرژی را از اکسیداسیون مواد آلی به دست می آورند .

۲- جدول طبقه بندی میکروارگانیزم ها بر اساس منابع انرژی و کربن

منبع کربن	منبع انرژی	
		اتوتروف
دی اکسید کربن	نور	فتوتروف
دی اکسید کربن	اکسیداسیون و احیاء مواد معدنی	شیمیوتروف
		هتروتروف
کربن آلی	اکسیداسیون و احیاء مواد آلی	شیمیوتروف
کربن آلی	نور	فتوتروف

فاکتورهای رشد میکروبی :

مواد غذایی نسبت به کربن و انرژی نقش تعیین کننده تری در ساخت سلول میکروبی و رشدشان دارند . مواد معدنی اصلی مورد نیاز میکروارگانیزم ها شامل نیتروژن ، سولفور ، فسفر ،

پتاسیم ، منیزیم و کلسیم ، آهن ، سدیم کلرید می باشد . عنصری که اهمیت کمتری دارند روی ، منگنز ، مولیبدن ، سلنیوم ، کبالت ، مس ، نیکل تنگستن می باشند . علاوه بر مواد معدنی ، بعضی از میکروارگانسیم ها به مواد آلی نیاز دارند که این مواد آلی فاکتور رشد می باشند که به عنوان پیشساز یا ماده متشکله سلولی می باشند و از منابع کربن دیگری ستر می شوند . نیاز به فاکتور رشد از یک موجود به موجود دیگر متفاوت است . فاکتورهای رشد عبارتند از :

اسیدهای آمینه ، پورین ها و پیریمیدین ها می باشند .

تغذیه میکروبی و فرایند تبدیل بیولوژیکی

هدف اصلی از فرایند بیولوژیکی تبدیل ماده موجود در پسمانده یک محصول نهایی پایدار می باشد در میکروارگانسیم های شیمیوهتروف نیاز به ماده آلی به عنوان منبع کربن و انرژی مشهود است . در پسماند جامد شهری ، مواد آلی و هم مواد معدنی وجود دارند و تبدیل بیولوژیکی در آنها مشهود است . در بعضی از پسماندهای تجاری مواد غذایی کافی وجود ندارد و افزودن ماده مغذی برای رشد باکتری های خاص در تجزیه پسماند الی ضروری است .

انواع متابولیسم میکروبی

شیمیوتروفها بر اساس نیاز به اکسیژن و نوع متابولیسم تقسیم می شوند . موجوداتی که با واسطه ناقل های آنزیمی ، الکترون را از دهنده الکترون به گیرنده نهایی الکترون مانند اکسیژن منتقل کنند و با این عمل انرژی تولید می کنند گفته می شود متابولیسم تنفسی دارند . در متابولیسم تخمیری پذیرنده نهایی الکترون ماده آلی است . در تخمیر انرژی کمتری نسبت به تنفس داریم میکروارگانسیم های هتروتروف تخمیر کننده رشد و تولید سلولی کمتری دارند .

اگر اکسیژن پذیرنده نهایی الکترون در متابولیسم تنفسی باشد به آن فرایند تنفس هوازی می گوئیم . موجوداتی که تنفس هوازی دارند ، فقط در حضور اکسیژن انرژی تولید می کنند این موجودات هوازی اجباری می باشند . میکروارگانسیم هایی هستند که در تولید کمپوست نقش دارند و مورد بحث این مطالعه می باشند . میکروارگانسیم هایی که از ترکیبات معدنی اکسیدی مانند نیترات و سولفات در محیطی که اکسیژن مولکولی وجود ندارد به عنوان پذیرنده نهایی الکترون استفاده می کنند . این موجودات تنفس بی هوازی دارند موجوداتی که از طریق تخمیر انرژی به دست می آورند فقط در نبود اکسیژن رشد می کنند موجوداتی که در نبود و نبود اکسیژن رشد می کنند بی هوازی اختیاری هستند .

محیط	پذیرنده الکترون	فرایند
هوازی	اکسیژن (O ₂)	متابولیسم هوازی
بی هوازی	نیترات (NO ₃) سولفات (SO ₄) دی اکسید کربن (CO ₂)	دنیتریفیکاسیون

جدول ۳- پذیرنده های الکترون در واکنش های باکتریایی

انواع میکروارگانیسم ها :

میکروارگانیسم ها براساس ساختمان سلولی و عمل به دو گروه پروکاریوت و یوکاریوت تقسیم می شوند .

پروکاریوتها : یوباکترها

سیانوباکترها (جلبک های سبز آبی)

آرکئی باکترها : نمک دوست های اجباری و اسیدو گرمادوست ها ، تولید کننده

های متان

یوکاریوتها : پروتوزوئرها

جلبکها

قارچها

پروکاریوتها و یوکاریوتها نقش مهمی در تبدیل بیولوژیکی مواد آلی پسماند دارند.

باکتریها : باکتریها موجودات تک سلولی و به اشکال کروی ، میله ای و مارپیچی هستند . اشکال کروی کوکسی ها و میله ای باسیل و به اشکال مارپیچی اسپریل میگویند که در همه جای طبیعت یافت می شوند و در شرایط هوازی و بی هوازی یافت می شوند . به دلیل وجود مواد آلی در توده های کمپوست موجب رشد باکتریها و تجمع مواد حد واسط و محصولات نهایی متابولیسم می شود .

قارچها

قارچها موجودات یوکاریوت واز گروه پروتیستها می باشند . این موجودات هتروت رف و غیرفتوسنتتیک و پرسلولی می باشند . بیشتر قارچها در شرایط رطوبت پائین رشد میکنند . به PH پائین مقاومند .. PH بهینه ۵/۶ است . این میکروارگانیسم ها هوازی هستند و رشته های طویلی تولید می کنند و توانایی تجزیه مواد آلی مختلف رادر شرایط مختلف محیطی دارا می باشن .

مخمرها

از دسته قارچها می باشند که تک سلولیند و تولید رشته یا میسلیم نمیکنند . تعدادی از مخمرها ۸-۱۵ میکرون تا ۳-۵ میکرون می باشند در حالی که انهایی که کروی هستند ۱۲-۸ میکرون قطر دارند .

اکتینومیست ها :

اکتینومیست ها پروکاریوتند و باکتریها ی واقعی می بلشند . تنها از نظر شکلی و ویژگی های رشد به قارچها شبیه هستند . ۰/۵-۱/۴ میکرون پهنا دارند و آنتی بیوتیک تولید می کنند

شرایط محیطی میکروارگانیسم ها :

شرایط محیطی مانند درجه حرارت و PH اثر مهمی بررشد و بقای میکروارگانیسم ها دارند.

درجه حرارت

به طور کلی رشد بهینه در محدوده ضعیفی از درجه حرارت و PH میباشد. از نظر محدوده درجه حرارت باکتری ها رابه سه گروه تقسیم می شوند .
 سرمادوست ، حرارت میانه ، گرمادوست تقسیم می شوند .

درجه حرارت (برحسب سانتیگراد)		
نوع		بهینه
سایکروفیل (سر ما دمست)	۳۰° C - ۱۰°	۱۵° C
مزوفیل (حرارت میانی)	۴۰° C - ۲۰°	۳۵° C
ترموفیل (گرمادوست)	۷۵° C - ۴۵°	۵۵° C

PH

غلظت هیدروژن و فاکتور مؤثری بر رشد میکروارگانیسم هانسبست عموماً بهینه ۶/۵-۷/۵ می باشد. زمانیکه PH بیشتر از ۹ یا کمتر از ۴/۵ باشد. موجب جدا شدن مولکول های اسیدی ضعیف یا بازی که می تواند به آسانی وارد سلول شود و با تغییر PH، درونی سلول موجب نابودی سلول شود .

رطوبت

مقدار رطوبت نیز یک شرط محیطی دیگر در رشد میکروارگانیسم هاست . میزان رطوبت در تبدیل پسماند باید شناخته شود . مخصوصاً اگر یک فرایند خشک مانند کمپوست باشد . در بضعی عملیات کمپوست برای دستیابی به حداکثر فعالیت باکتریایی آب اضافه می شود .

فاکتورهای مهم در کنترل فرایند کمپوست :

اندازه ذرات	بهترین اندازه پسماند جامد ۲۵-۷۵ میلی متر می باشد
نسبت کربن به نیتروژن	بهترین نسبت ۲۵-۵۰ برای کمپوست هوزی است نسبت ژائین تر موجب آزاد شدن آمونیاک . نسبت بیشتر به علت محدود بودن نیتروژن در ماده غذایی است
مخلوط کردن و پروراندن	برای کاهش زمان کمپوست ۱-۵٪ وزن پسماند که تا اندازه ای کمپوست شده به آن اضافه کرد
مقدار رطوبت	میزان رطوبت ۶۰-۵۰ در صد باید باشد و بهترین آن ۵۵ در صد می باشد .
درجه حرارت	بهترین درجه ۶۰-۵۰ برای اولین روزهای کمپوست می باشد
کنترل بیماریزها	در اواخر فرایند کمپوست حررت ۶۰-۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت نگه داشته شود . کلیه میکروارگانیسم های بیماریزا از بین می رود
نیاز به اکسیژن و هوادهی	هوا با حداقل ۵۰ درصد غلظت اکسیژن اگر به روش مکانیکی به همه قسمتهای کمپوست برسد بهترین نتیجه را خواهد داد .
کنترل PH	برای دستیابی به یک تجزیه هوزی PH ۷-۷.۵ لازم است وهم چنین برای اینکه نیتروژن به صورت گاز متصاعد نشود PH باید کمتر از ۸.۵ باشد

میکروارگانسیم های کمپوست

میکروارگانسیم های کمپوست در همه جا وجود دارند. این میکروارگانسیم ها در کمپوست و آب و هوا و خاک و ماشین های ذخیره غذایی حین فرایند وجود دارند. این منابع میکروارگانسیم های متنوعی دارند و به حفظ و نگهداری یک جمعیت میکروبی فعال در حین فرایند فیزیکی و شیمیایی کمپوست نظیر تغییر PH، درجه حرارت، آب، ماده آلی و مواد غذایی موجود کمک می کنند.

میکروارگانسیم های کمپوست شامل باکتری و قارچ و اکتینومیست ها می باشند. اکثر میکروارگانسیم های تشکیل کمپوست نقش دارند هوای هستند و به اکسیژن و رطوبت نیاز دارند. رطوبت بهینه ۶۰-۵۰ درصد می باشد.

قارچ ها

با رشته های طویلی به نام هیف که طویلتر از رشته های اکتینومیست ها می باشد. با آنزیم های خارج سلولی موجب تجزیه موادی مانند سلولز و لیگن می شود. هیف قارچ به طور فیزیکی کمپوست را (اگر با هوادهی و آبدایی مناسب باشد) به صورت توده های کوچک تثبیت می کند. از نظر اکولوژیکی قارچ نقش مهمی در شکستن پسماند گیاهی دارد.

باکتری ها

فراوانترین جزء بیولوژیکی کمپوست باکتری است. آنها متجاوز از یک میلیون ارگانسیم در یک خاک هستند و به استثناء اکتینومیست ها باکتری ها به صورت تک لولی هستند و هیف تشکیل نمی دهند. باکتری ماده آلی را تجزیه می کند و در تمام این مراحل غالب هستند. در صورتی که اکتینومیست و قارچ به طور تپییک در مرحله بعدی تکثیر می یابند.

اکتینومیستها :

: تشکیل رشته و یا فیلامنت را می دهند. این رشته ها به اکتینومیست ها امکان تشکیل کلنی را میدهند و در سراسر توده کمپوست پخش می شوند و در تجزیه مواد مقاوم نقش دارند. اکتینومیست ها ۱-۰/۱ میلیون در گرم خاک می باشند. رشته آنها برای تشکیل یک ماده آلی پایدار و یک کمپوست کامل نقش دارد. اکتینومیست ها به شرایط رطوبت پائین نسبت به باکتری های دیگر مقاومترند و ژئوسمین تولید میکنند که یک ترکیب شیمیایی است که عامل بوی کپک زدگی و بوی خاک کمپوست است

فرایند کمپوست

در فرایند کمپوست مراحل را میتوان پیشگویی کرد. در طی مراحل مختلف، درجه حرارت، و ماده غذایی موجود، مختلف است و برنوع و تعداد میکروارگانسیم ها تاثیر دارد. اولاً دمای توده ها تقریباً دمای محیط می باشد. موادی که کمپوست می شوند بواسطه وجود باکتری های مزوفیل که در دمای ۴۰-۲۰ درجه سانتیگراد فعالترند. بزودی با افزایش گرما فعالیت میکروبی افزایش می یابد و درجه حرارت به ۷۵-۴۵ درجه سانتیگراد فعالترند، بزودی با افزایش گرما فعالیت میکروبی افزایش می یابد و درجه حرارت به ۷۵-۴۵ درجه سانتیگراد می رسد. در این

مرحله تولید کمپوست بالا ست. میکروبهای گرمادوست با شرایط خود را وفق می دهند و سوبستراهای موجود در ماده اولیه را استفاده می کنند. بعد درجه حرارت کاهش می یابد و باخنک شدن توده ها باکتری های مزوفیل مجددا ظاهر می شوند و مرحله عمل آوری آغاز می شود.

مرحله اولیه

فرایند انتقال و بکارگیری ماده خام برای کمپوست در واقع عرضه ماده آلی به میکروارگانیزم می باشد اساسا در مرحله اولیه مزوفیل ها غالبند و به آسانی قند و پروتئین و نشاسته و مخصوصا اسیدهای چرب که در مواد غذایی اولیه هضم نشده باقی می ماند، مصرف می کنند. از مواد آلی موجب تکثیر میکروارگانیزم ها می شود. این باکتری ها از تجزیه موادالی که به آسانی تجزیه می شوند گرما تولید می کنند، گرمای حاصل درجه حرارت توده کمپوست را بالا میبرد و به ۴۰ درجه سانتیگراد می رسد

مرحله فعال

با افزایش حرارت باکتری های گرمادوست برتری می یابند. مرحله فعال مرحله ایست که ماده آلی به دی اکسید کربن و هوموس تبدیل می شود و جمعیت میکروبی افزایش می یابند. گرمادوست ها با تجزیه ماده آلی باقیمانده، گرمای بیشتری تولید می کنند. باکتریهای جنس ترموس و باسیلوس و کلاستریدیوم و دریک توده کمپوست با تهویه مناسب با درجه حرارت ۶۵-۵۵ درجه سانتیگراد باقی می ماند. خوشبختانه بیماریزها مانند ویروسهای انسانی و باکتری ها ی واگیردار در این محیط قادر به بقا نیستند. چون درجه حرارت بالا موجب تسریع پردازش ماده آلی می شود و همزمان شرایط بهینه ای را برای تخریب بیماریزها ی گیاهی و انسانی نظیر تم انگل فراهم میکند. توده کمپوست در سطح بیرونی خنک تر است مخلوط کردن متناوب لایه بیرونی به درون توده برای کشتن بیماریزها و تخم انگل ضروری است. مخلوط کردن و زیرورو کردن توده نیز به تهویه و افزایش منافذ هوا کمک می کند. این عمل مهم است چون توده کمپوستی که تهویه مناسبی ندارد، درجه حرارت در آن به ۷۰ درجه سانتیگراد می رسد و کلیه فعالیت های میکروبی آن متوقف می شوند. منافذ هوا برای عبور اکسیژن به درون توده به کار می رود و میکروارگانیزم ها برای تجزیه ماده آلی به اکسیژن نیاز دارند.

کاری که در سال ۲۰۰۵ توسط Jose Germani.Diego Hoffmeister برای شناسایی میکروارگانیزم های پسماند جامد شهری انجام دادند در مرحله تولید گرما، گونه های ترموفیل و ترموتولرانت نظیر قارچ و بعضی از باکتری ها و اکتینومیست ها مشاهده شده است. کلیفرمها با افزایش درجه حرارت و در مرحله ترموفیلیک یا بازدست دادن رطوبت کمپوست، کاهش می یابد و عمل کاهش برای تثبیت کیفیت کمپوست مناسب نیست.

جنس های سودوموناس از اواسط تا پایان فرایند کمپوست حضور دارند چون این باکتری ها توانایی متابولیکی و آنزیمی دارند به دلیل محدود شدن موادغذای در مرحله پایانی و وجود موادمقاوم موجب بقا این میکروارگانیزم ها می شود. باسیلوسها نیز در این مرحله شایعند و علت آن توانایی این خانواده در تولید اسپور می باشد که به درجه حرارت بالا کمپوست مقاومند.

(۵).

مرحله تولید گرمای زیاد

اگر توده ها بیش از حد گرم شوند و به ۷۰ درجه سانتیگراد برسد. میکروارگانیسمها از بین می روند فعالیت میکروبی متوقف خواهد شد. فقط اسپورباکتری باقی می ماند . ساختمان دیواره سلولی اسپور ضخیم می باشد و تحت استرس و گرما و سرما و خشکی و فقر ماده غذایی تشکیل می شود. بعد از مرحله گرمای زیاد ، توده کمپوست نتواند ماده آلی قابل استفاده را مصرف کند. این توده قادر نیست تا فعالیت میکروبی که برای بازگشت به شرایط ترموفیل نیازاست ، تامین کند . در چنین موردی ضروری است تا به توده کمپوست ماده غذایی بیشتری اضافه شود تا عمل تجزیه به حاکثر برسد و بیماریزا حذف شوند . توده کمپوستی که بیش از حد گرم شده است ممکن است از طریق جوانه زدن و فعالیت میکروارگانیسم های اسپوردلر و یا جداسازی میکروارگانیسم های سطح خارجی توده کمپوست که درجه حرارت پائینی دارند به درجه حرارت ترموفیل بازگردد. (۴)

از چند کارخانه کمپوست در سوئیس تعداد زیاد و متنوعی از باکتری های هوازی ، ترموفیل هتروتروف و یا اتواروف در درجه حرارت ۸۰-۶۰ درجه سانتیگراد جدا شده است . که شامل سویه های جنس ترموس ، باسیلئسها و گونه های مختلف هیدرونوباکتر ها می باشند

Bacillus .Scheglelii ، *T.termophilus*، *Thermus.aquaticus*
Hydrogenobacter.SPP باسیل های اسپوردار هتروتروف در کمپوست با درجه حرارت بالا ۶۰ درجه تعداد کمی باکتری های هتروتروف ترموفیل وجود دارد.

مرحله عمل آوری

عملا توده کمپوست از موادی که به راحتی قابل تجزیه اند تهی خواهد شد و موادی مانند سلولز و بخصوص لیگنین و هیومیک باقی خواهد ماند . معمولا باکتری ها کمتر با وجود چنین موادی باقی می مانند در نتیجه جمعیت باکتریایی در مقایسه با قارچها و اکتینومیست ها کاهش می یابد . چون در این زمان گرمای کمتری تولید می شود . درجه حرارت مزوفیل می رسد . با بازگشت به شرایط مزوفیل مرحله نهایی عمل آوری شروع می شود . در حین مرحله خنک شدن نهایی یا مرحله بلوغ *Maturation Phase* تعداد زیاد و متنوعی از باکتری ها ی مزوفیل مشاهده شده است که شامل : باکتری های تولید کننده پلی ساکراید خارج سلولی یا هیومین *Bacterial Humin* ، تثبیت کننده های نیتروژن ، اکسیدکننده های سولفور آکسید کنند های هیدروژن ، نیتریفیان ها باشند . که این نوع میکروبی کمپوست ضروری است. (۲)

طی مرحله عمل آوری جمعیت قارچ و اکتینومیست ها غالبند در حالیکه باکتریها تاحدی کاهش می یابند قارچها و اکتینومیست ها با تجزیه مواد باقیمانده مانند کیتین و سلولز و لیگنین تکثیر می یابند . این مواد مقاومترند و به دلیل غیر محلول بودن در آب و پیچیدگی های شیمیایی از دیواره سلولی باکتری عبور نمیکنند . بدین ترتیب تجزیه این مواد نیاز به آنزیم های خارج سلولی دارد .

بلافاصله موادی که به اشکال کوچکتر و محلول شکسته می شودو به عنوان منبع غذایی و انرژی میکروارگانیسم قرار می گیرد . میکروارگانیسم های خارج سلولی برای تجزیه این مواد مقاوم دارند که مزایای انتخابی در این مرحله از فرایند کمپوست دارند . ویژگی خاص بسیاری از آنزیم

های خارج سلولی قارچ اثر آن بر موادی است که برای تجزیه نیاز به چندین آنزیم خاص دارند و این ویژگی یک میکروارگانیسم به تنهایی یافت نمی شوند. قارچها نسبت به باکتری ها زمانی که ماده غذایی به راحتی در دسترس باشد کندتر تکثیر می یابند ولی اگر در یک محیط غنی از مواد مقاوم مانند مرحله عمل آوری کمپوست قارچ رشد و تکثیر مناسبی دارد. مدت فرایند عمل آوری کمپوست متفاوت می باشد و عمل آوری بامدت زمان طولانی ضری اطمینانی است که کمپوست عاری از بیماریها و توکسین قارچی است به علاوه کمپوست نارس و نابالغ سطح بیشتری از مواد آلی محلول (اسیدهای آلی) که می تواند منجر به مشکلات توکسیک در کاربردهای کشاورزی خاص نظیر جوانه زدن دانه نقش دارند در مرحله عمل آوری به تدریج با افزایش هوموس که یک ماده مقاوم نسبت به تجزیه در طبیعت می باشد. همچنین یکی از روشهای حفظ و نگهداری ماده غذایی مخصوصا نیتروژن و فسفر و ریز مغذی و اب را حفظ می کنند. اغلب جایگاه بیشترین فعالیت بیولوژیکی میکروارگانیسم ها و ژروتوزوا ها و بی مهره ها مخصوصا کرمها و هزارپایان و گیاهان می باشد. که این موجودات هم به نوعی با ایجاد منافذ در هوادهی توده ها ی کمپوست نقش دارند .

میکروبیولوژی کمپوست عمل آوری شده

میکروبهای کمپوست متمایزند و اکولوژی بسیار پیچیده ای دارند روشهای استفاده شده برای شناسایی گنه های خاص تجربه و تحلیل بر اساس فعالیت متابولیکی و یا مقدار اسیدهای چرب می باشد. اما به خاطر تنوع زیاد شناسایی گونه های خاص در کمپوست عمل آوری شده به ندرت انجام می شود. عموما نشدنی است آزمایشگاهها و قالعاده گران می باشد در عوض باری شناسایی و شمارش گونه ها موجودات مانند اکتینومیست ها ، ه وازی ها ف بی هوازی ها ، قارچها ، باکتری های تثبیت کننده نیتروژن یا سودوموناس ها محتمل ترند . روش جدید در تجزیه و تحلیل DNA بررسی هایی است که بر اساس نمونه ها با ابزارهای بیشتری برای شناسایی کمپوست و میکروبهای خاک انجام می شود

جدول ۵: میکروارگانیسم های مزوفیل موثر در تولید کمپوست

قارچها	باکتریها
Alternaria .SPP آلترناریا	Coliforms کلی فرمها
CladosporiumSPP کلادوسپوریوم	Pseudomonas.SPP سودوموناسها
Mucor.SPP موکور	Bacillus .SPP باسیلوسها
Aspergillus .SPP آسپرژیلوس	Flavobacterium .SPP فلاوباکتریومها
Hamicola.SPP هامیکلا	Clostridium.SPP کلاسترییدیومها
Penicillium.SPP پنیسیلیوم	Streptomyces.SPP استرپتومیسرها

قارچ	باکتری
اسپرژیلوس فومیگاتوس Aspergilus .fumigatus	bBacillus .SPP باسیلوسها
موکورپوسییلوس Mucour.Pusillus	استرپتومیسیس ها Streptomyces
کتومیوم ترموفیل Chetomium Thermophile	ترمواکتینومیسیس ها Thermoactinomyces .SPP
هومیکلا لانگوئینوزا Humicola.Lanuginose	ترموس ها Thermus .SPP
ابسیدیا راموزا aAbsidia .ramosa	ترمومونوسپورا Thermomonospora .SPP

اسپوروتریکوم ترموفیل sSporotrichum.Thermophile	میکرو پلی اسپورا Micropoly spora .SPP
ترولا ترموفیل Torula .Thermophile	
ترمو اسکوس اورونتیکوس Thermoascus .aurantiacus	

جدول ۶: میکروارگانیسم های ترموفیل مؤثر در تولید کمپوست

منابع:

۱-G . Tchobanglous H. Theisen S. Vigid , ۱۹۹۳ . **Biological and Chemical Conversion Technologies In Integrated solid Waste Management** ۶۷۱ -۷۱۵

۲-M . Betoldi . p . sequi . taxonomic and Metabolic microbial Diversity During composting . **The Science of composting** . ۱۹۹۶ :۱۴۹-۱۶۱

۳- U. S EPA S Bioremediation Fact sheet , WWW epa . gov / epaoswer / non hw /compost/S Bioremed. Pdf
compost Microbiology and soil food Web page ۱-۶

۴- diego HO ffmeister , Jose Carlos * Sueli Teresinha Van der Sand ۲۰۰۵ **Characterization Of bacterial population During composting of municipal solid waste . Acta Scientiae Veterinariae** ۲۸۳ -۲۹۰