# طراحی و ساخت راکتور آزمایشگاهی پیشرفته برای مطالعه فرآیند تولید کمپوست

**داود داداشی[1]، حمیدرضا قاسم‌زاده[2]، ترحم مصری گندشمین[3]**

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی دانشگاه تبریز

2- استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تبریز

3- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی

dadashi88@ms.tabrizu.ac.ir

**چکیده**

هدف اصلی پژوهش حاضر طراحی و ساخت یک بیوراکتور در مقیاس پایلوت از نوع خود گرمکنی به منظور شبیه سازی و مطالعه سیستماتیک فرآیند تولید کمپوست (هوازی و غیر هوازی ) می‌باشد.راکتور طراحی و ساخته شده دارای سه مخزن استوانه‌ای (مخزن داخلی، مخزن خارجی، مخزن پایه ) می‌باشد. مخزن استوانه‌ای داخلی آن از جنس پلی‌اتیلن با ضخامت 50 میلی متر و مخازن دیگر از جنس فلز با ضخامت 2 میلی متر می‌باشد. مخزن داخلی که مواد اولیه(ضایعات ارگانیک) در داخل این مخزن ریخته می شود دارای حجم 211 لیتر و ارتفاع 700 میلی متر با قطر داخلی 620 میلیمتر می‌باشد. مونتاژ این سه مخزن بر روی هم موجب ایجاد یک لایه عایق هوایی به ضخامت 100 میلی متری در اطراف مخزن داخلی می شود. مخزن پایه نیز دارای یک محفظه هوایی به منظور جریان یافتن هوا از کف مخزن داخلی با ارتفاع 100 میلی متر می‌باشد. در این راکتور به منظور آنالیز گازهای خروجی (دی‌اکسیدکربن، مونواکسیدکربن، آمونیاک و اکسیژن و متان ) از فرآیند و دمای مواد و ثبت مقادیر آنها و اعمال کنترل موردنظر از حسگرهای مربوطه متصل به یک شبکه الکترونیکی استفاده گردید . راکتور مورد نظر با طراحی مخازن جداگانه دارای قابلیت انعطاف کاربردی بوده و می تواند جهت مطالعه فرآیند تولید کمپوست به صورت غیرفعال،( شبیه مقیاسهای واقعی و نفوذ هوا از دیواره‌های جانبی) ، اثر فشار ناشی از ارتفاع مواد و تولید کمپوست به صورت غیر هوازی (بیوگاز) به کار برده شود.

**کلمات کلیدی: آلاینده های زیست محیطی، بیوراکتور، تولید کمپوست، ضایعات ارگانیک، گازهای خروجی**

## مقدمه

در فعالیت های بشری اغلب مواد تولید ی می‌شوند که به عنوان موادی بی فایده در نظر گرفته شده و دور ریخته می‌شوند، زایدات اغلب جامد بوده و کلمه زاید برای موادی که بلااستفاده و ناخوشایند است پیشنهاد شده است . مقدار زیادی از این مواد در صورت مدیریت مناسب به عنوان منابع تولیدات صنعتی و یا تولید انر ژی دوباره می - توانند مورد استفاده قرار گیرند(Tchobanoglous et al., 2002 ) از طرفیب کمپوست سازی یک روش کم هزینه طبیعی جهت بازیافت ضایعات آلی می‌باشد(Bueno et al.,2007 ) .کمپوست سازی یک تجزیه بیولوژیکی و پایدارسازی مواد آلی تحت یک شرایطی است که به علت فعالیت میکروبی ،دما تا سطح ترموفیلیک افزایش پیدا می کند و ماده نهایی تولید شده خالی از عوامل بیماری زا و بذر علف های هرز و مفید برای خاکهای کشاورزی است (Haug.,1993).

فرآیند کمپوست سازی یک فرآیند پویا ودر حال تغییر می باشد وکنترل شرایط محیطی برای مطالعه سیستماتیک بخصوص مطالعه گازهای خروجی در مقیاس واقعی مشکل ، هزینه بر و کاربر است . بنابراین برای رفع این مشکل

وبررسی و مطالعه دقیق تر این فرآیند و اعمال شرایط کاری مختلف یک محیط کنترل شده مورد نیاز است ،که راکتور این محیط را برای ما فراهم می نماید. روش تولید کمپوست به هر حال همراه با اثرات زیست محیطی مانند تولید گازهای آلاینده و گازهای بو دار است که در کشورهای درحال توسعه به عنوان یکی از مهمترین چالش هاست (Haug.,1993). اگر فرآیند بطور مناسب مدیریت نشود موجب تولید گازهای سمی و مضر برای محیط خواهد شد. گازهای خروجی از ا ین فرآیند می تواند شامل گازهایی نظیر : متان ($CH_4$)، که یک گاز گلخانه ای است، مونواکسیدکربن($CO$)،که مضر برای انسان است، آمونیوم ($NH_3$)که به شدت قابل حل در آب و برای حیوانات آبزی مضر است، اکسید نیتریت ($N_2O$)، که یک گاز گلخانه ای است، باشد . بنابراین نیاز است که شرا یط میکروبی و فیزیکی که بر روی خروج این گازهای فرار موثر هستند، بهتر درک شود تا بتوان آنها را کنترل کرد ( Mason et al., 2005). گازهای خروجی از فرآیند تولید کمپوست به طور نمونه از بخشهایی بر پایه ازت و بخشهایی بر پایه گوگرد و گروه گسترده ای از ترکیباتی که بخش آلی فرار(VOC )نامیده می‌شود، تشکیل یافته است (Eitzer et al., 1995). به طور مثال (فریز و همکاران ، 2001) در یک مطالعه ای داخل راکتوری مشاهده کردند که متصاعد شدن گاز آمونیاک زمانی که دما ترموفیلیک (≥45°C) و pH بالای 9 باهم درون محیط تولید کمپو ست وجود داشته باشد شروع شده، و در نتیجه موجب تلفات 24-33 درصدی مقدار ازت اولیه می‌گردد.

مروری بر تحقیقات انجام شده نشان می دهد که برای اندازه‌گیری گازهای خروجی معمولا از دو روش استفاده می - شود:

الف- استفاده از آنالیزگر گاز یعنی واحد آنالیزگر (حسگرهای الکتروشیمیای یا مجاورتی ویا IR و...)که به صورت ثابت بر روی راکتور نصب می شود ( Smars et al 2001;Edsel et al., 2009, Pagans et al 2006 (Fleming et al 2003,

ب- نمونه‌برداری از گازهای خروجی در فواصل زمانی مشخص وسپس استفاده از سایر دستگاهها مانند کروماتوگراف گاز(Gas chromatograph ) ( Shen et al., 2011,) یا سایر حسگرها برای اندازه‌گیری .

در روش اول معمولا بهتر وسریعتر وبه تعداد زیادی می توان به طور مکانیزه نمونه برداری کرد .برای مثال Edsel و همکاران در سال 2009 از یک دستگاه (FTIR) برای اندازه گیری گازها استفاده کرده‌اند و smars و همکاران در سال 2001 از حسگرهای پایش چند گازه فتو اکوستیک (photoacoustic multi-gas monitor) و سایر حسگرها که در داخل یک پکیج هستند استفاده کرده‌اند.

## مواد و روشها

یکی از مهمترین پارامترها در طراحی مخازن هندسه انتخاب شده برای مخازن است این پ ارامتر بر روی نسبت A/V بسیار موثر بوده و بر روی حجم موادی که در داخل راکتور قرار می گیرد و تلفات حرارتی سیستم بسیار تاثیر گذار است . با در نظر گرفتن این پارمتر شکل استوانه ای برای راکتور انتخاب گردید .راکتور مورد نظر از سه استوانه(مخزن داخلی ،مخزن پایه و مخز ن بیرونی) تشکیل شده است که ترکیب این سه مخزن با یک دیگر یک فاصله هوایی را در اطراف مخزن داخلی جهت عایق سازی این مخزن بوجود می‌آورد.

استوانه داخلی به عنوان قلب سیستم در نظر گرفته می شود این استوانه دارای حجم( 211 )لیتر از جنس پلی‌اتیلن با ضخامت 5 میلی‌متر (لایه عایق ) می‌باشد. قطر داخلی آن 62 سانتی متر و ارتفاع آن 70 سانتی متر می‌باشد که نسبت A/V برابر 6/4 را تامین می کند.مخزن پایه از ورق های فلزی با ضخامت 2 میلی متر طراحی و ساخته شد[1].مخزن مورد نظر به گونه طراحی شده بود که یک محفظه هوایی (Air pluniom ) به ارتفاع 10 سانتی‌متر بین کف مخزن پایه و کف مخزن داخلی به منظور ورود هوا و توزیع به داخل مخزن (به منظور جریان یکنواخت هوا به داخل مخزنی که کف آن سوراخ دار است ) ایجاد شود. بعد از طراحی وساخت مخازن مورد نظر یک شاسی به منظور سوار کردن کلیه سیستم‌های راکتور ساخته شد.

یکی از ویژگی های مهم این راکتور قابلیت مطالعه تغییر ارتفاع توده از طریق تغییر ار تفاع مخازن راکتور است که مخزن خارجی نسبت به مخزن پایه به صورت تلسکوپی حرکت کرده و ارتفاع مخزن حدود 35 سانتیمتر افزایش یابد که در این صورت مخزن داخلی باید با مخزن بلندتر تع ویض شود و از طریق مادگی ها بازوهای قابل نصب بر روی مخزن خارجی و مخزن پایه شکل قابل دست یابی است که این موضوع با هدف امکان مطالعه اثر ارتفاع مواد بروی زیست تخریب پذیری مواد انجام گرفت

یکی دیگر از اهداف دیگر از طراحی جداگانه این مخازن امکان مطالعه سیستم های تولید کمپوست هواددهی غیر فعال است .چرا که این روش امروزه در کشور ما به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد و از لحاظ اقتصادی (سرمایه‌ای اولیه، کاربرد، نگه‌داری، آموزش کاربر) از روش هوادهی فعال مقرون به صرفه تر است(Haug ,.1993).

یکی از مزایای مهم این روش د ر مقایسه با روشهای دیگر، مطالعه این سیستم هوادهی، یعنی ورود هوا از دیواره های جانبی به داخل توده است که در راکتورها ساخته شده توسط سایر محققان ورود هوا از کف مخزن انجام می - گیرد و این امر مغایر با آنچه که در مقیاس واقعی اتفاق می افتد می‌باشد. لازم به ذکر ا ست که در مقیاس واقعی هوادهی غیر فعال هوا معمولا از دیواره های جانبی وارد توده می شود. به بحث آببندی در این سیستم توجه ویژه‌ای شده است در این سیستم توجه بیشتر به بحث آببندی در استای این موضوع می باشد که این بیوراکتور به عنوان یک بیوراکتور تولید کمپوست به صورت غیر هوازی(تولید بیوگاز) را نیز دارا باشد.

برای موفقیت در فرآیند تلفات گرمایی ناشی از هدایت وهمرفت وتشعشع باید در حد بهینه حفظ شود فلذا برای تحقق این امر ابعاد مخازن داخلی و خارجی و فاصله هوایی ایجاد شده بین دو مخزن بر اساس روابط ترمودینامیکی و با توجه به کاربردهای دیگر (مطالعه هوادهی طبیعی )راکتور محاسبه گردید .کلیه محاسبات مربوط به تلفات حرارتی برای حالت پایدار سیستم انجام شده است . چرا که ماسون وهمکاران 2005 با در نظر گرفتن سایر روش های تخمین مانند المان محد ود تنهابه خطای 1.7 ٪ درصد رسیده‌اند واین روش محاسبه چندان خطایی را ایجاد نمی‌کند. معمولا نسبت گرمای تلف شده به کل گرمای بیولوژیکی تولید شده 5الی 18 ٪ و یا کمتر)در نظر گرفته می‌شود( Mason et al., 2005 ). در محاسبات مربوط به مسائل ترمودینامیکی از قوانین فوریه در حالت یک بعدی استفاده شد ( Holman.,1997) . بر اساس قانون فوریه شار هدایت گرمایی یک بعدی در یک محیط تناسب مستقیم با گرادیان دما و سطح تبادل حرارتی (گرادیان دما در دو سوی سطح تبادل حرارت$\frac{dt}{dx}$) دارد.

$$q = -kA\frac{dt}{dx}$$

معادله (1)

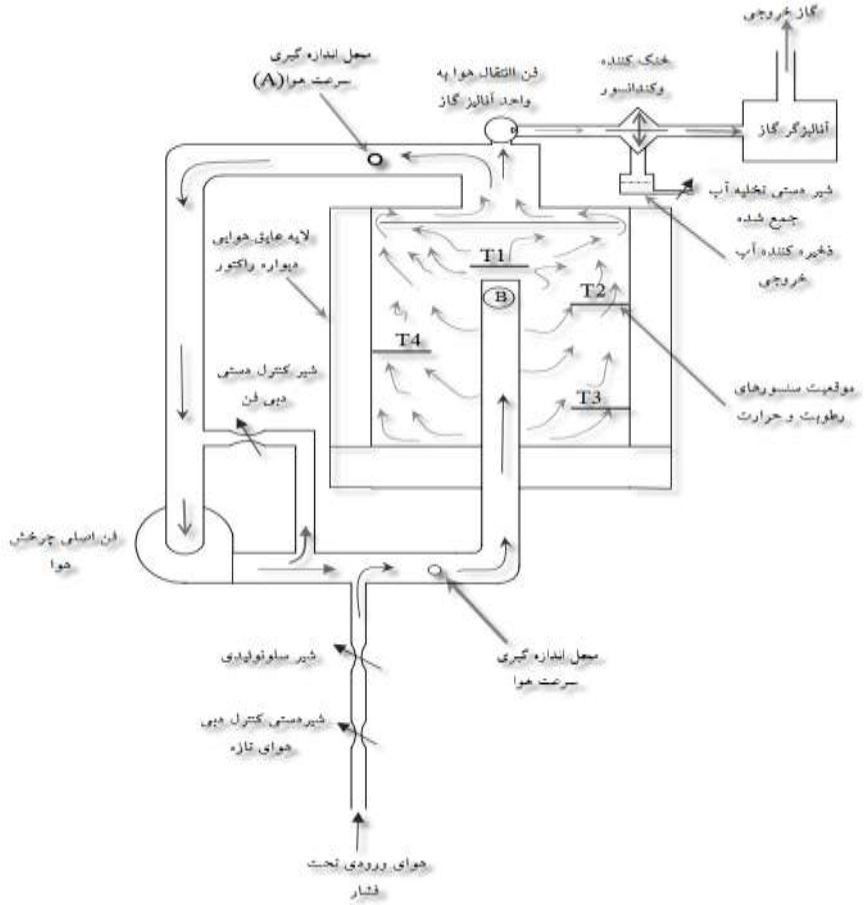
1 -لازم به ذکر است که طراحی ابعاد مخازن راکتور بر اساس محاسبات ترمودینامیکی می‌باشد که در ادامه تشریح می‌گردد.

در رابطه( 2-1 ) q شار حرارتی بر ح سب (W)، t دما بر حسب $^{o}C$ ، $\frac{dt}{dx}$ گرادیان دما بر حسب $^{o}C/m$ ، K ضریب انتقال حرارت( $W/_{m\ ^{o}C}$ ) و A مساحت سطح بر حسب($m^2$)می‌باشد.

محققان اکثرا در راکتورهای تولید کمپوست از هوای فشرده به عنوان منبع اکسیژن برای اطمینان از تجزیه هوازی در مواد آلی ا ستفاده می کنند(Edsel et al., 2009) . در راکتور ساخته شده از یک کمپرسور به منظور تامین هوای فشرده استفاده گردید دبی هوادهی مورد نظر حدود ( $(m3/_{\text{min m}^3}$ 0.2 انتخاب گردید ( Shen et al., 2011) تا اکسیژن در سطح 16 درصد گازهای خروجی حفظ گردد .Barrington وهمکاران در سال 2002 مقاومت هوا در داخل کمپوست را مورد بررسی و گزارش کرده‌اند که برای تخمین افت فشار در جریان هوای با سرعت کمتر از 0/002 متر برثانیه از داخل کمپوست از رابطه زیر می توان استفاده کرد.

$P=134200V$ معادله (2)

در رابطه فوق V بر حسب متر بر ثانیه سرعت عبور هوا که با تقسیم دبی حجمی جریان هوا از مقطع مواد بر مساحت مقطع مواد بدست می آید. و P فشار بر حسب پاسکال می‌باشد . بر اساس محاسبه انجام شده مقدار فشار 50 کیلو پاسکال براحتی توانایی این را دارد که بر افت فشارهای داخل مواد غلبه کند . از آنجایی که چرخش قسمتی از هوای خروجی با تغذیه مجدد به داخل راکتور منجر به یکنواختی فرآیند از لحاظ دمایی ورطوبت در داخل راکتور سیستم چرخش هوا در داخل راکتور مطابق شکل (1) به کار گرفته شد.




**شکل 1--بلوک دیاگرام سیستم توزیع هوا و هوادهی در وضعیت کاربرد هوازی راکتور**

برای چرخش هوا از یک فن گریز از مرکز با پره های محوری استفاده شد. با توجه به اینکه دبی چرخش هوا حدود 5 برابر دبی هوای ورودی بود این عمل موجب یکنواختی بیشتر در سیستم از نظر گرادیان های دمایی خواهد شد (Ekinci et al.,2003) .حسگرهای دمای T1،T2،T3و T4 به ترتیب در ارتفاعهای 55، 40، 10 و25 سانتی از کف مخزن قرار داده شده بود (شکل 2-9). هوا به همراه بخار آب پس از عبور از خنک کننده سرد شد و آب جمع شده توسط یک شیر دستی تخلیه می گردد.برای آنالیز گاز های خروجی یک واحد آنالیزگر گاز با استفاده از سنسورهای دی اکسیدکربن و آمونیاک ، مونواکسیدکربن ،و اکسیزن (Senko.kr.co.ltd ) و سیستم های الکترونیکی طراحی و ساخته شد . برنامه نرم افزاری مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار visual c# .net 2011 و بر اساس فناوری (.NET Framework) نوشته شد. برای بدست آوردن و درک شر ایط دمایی در داخل راکتور از حسگرهای بیان شده در ذیل استفاده شد این حسگرها قابلیت اندازه‌گیری رطوبت نسبی وحرارت( Switzerland) SHT7x, sensirion company را به طور همزمان با دقت بالا دارند. خروجی این حسگرها به صورت دیجیتال می‌باشد.

## نتایج و بحث

با توجه به اینکه هدف اصلی پژوهش حاضر طراحی و ساخت یک راکتور در مقیاس پایلوت از نوع خود گرمکنی به منظور شبیه سازی و مطالعه سیستماتیک فرآیند تولید کمپوست (هوازی و غیر هوازی ) می‌باشدراکتور مورد نظر طراحی وساخته شد . راکتور طراحی و ساخته شده دارای سه مخزن استوانه ای (مخزن داخلی، مخزن خارجی، مخزن پایه ) می‌باشد. مخزن استوانه‌ای داخلی آن از جنس پلی اتیلن با ضخامت 50 میلی متر و مخازن دیگر از جنس فلز با ضخامت 2 میلی متر می باشد. مخزن داخلی که مواد اولیه (ضایعات ارگانیک) در داخل این مخزن ریخته می‌شود دارای حجم 211 لیتر و ارتفاع 700 میلی متر با قطر داخلی 620 میلیمتر می‌باشد. مونتاژ این سه مخزن بر روی هم موجب ایجاد یک لایه عایق هوایی به ضخامت 100 میلی متری در اطراف مخزن داخلی می شود. مخزن پایه نیز دارای یک محفظه هوایی به منظور جریان یافتن هوا از کف مخزن داخلی با ارتفاع 100 میلی متر می‌باشد. در این راکتور به منظور آنالیز گازهای خروجی (دی‌اکسیدکربن، مونواکسیدکربن، آمونیاک و اکسیژن و متان ) از فرآیند و دمای مواد و ثبت مقادیر آنها و اعمال کنترل موردنظر از حسگرهای مربوطه متصل به یک شبکه الکترونیکی استفاده گردید. راکتور مورد نظر با طراحی مخازن جداگانه در مقایسه با سایر راکتورها ی ساخته شده علاوه بر دار بودن قابلیتهای مطالعاتی این راکتور ها دارای قابلیت انعطاف کاربردی بوده و می تواند جهت مطالعه فرآیند تولید کمپوست به صورت غیرفعال، ( شبیه مقیاسهای واقعی و نفوذ هوا از دیواره های جانبی) ، اثر فشار ناشی از ارتفاع مواد و تولید کمپوست به صورت غیر هوازی (بیوگاز) اشاره کرد که این موضوع بزرگترین مزیت طراحی ویژه این راکتور در مقایسه با سایر راکتورها می باشد.

**منابع**

Barrington, S., Choiniere, D., Trigui, M., Knight , W. 2002. Compost airflow resistance.Biosystems engineering 81 (4):433-441.

Bueno, P., R, Tapias., Lopez, F., Dıaz, M. J. 2007. Optimizing composting parameters for nitrogen conservation in composting .Bioresource Technology. 99 : 5069–5077.

Edsel A, Ph., Grant, C. 2009. A Pilot-Scale Compost Reactor for the Study of Gaseous Emissions from Compost . ASABE.Paper Number: 096756.

Eitzer, B.D., 1995. Emissions of volatile organic chemicals from municipal solid waste composting facilities. Environmental Science and Technology 29, 896-902.

Ekinci, K., Keener, H. M., Elwell, D. L., Michel, F. C .2003 .Effects af aeration strateges af the composting process : expermental studies .ASAE 47(5): 1697−1708

Fleming ,R. J., Wagner-Riddle .C.,2003. Emission of methane and nitrous oxide during the composting of liquid swine manure. ASAE Publication Number 701P1403.

Friis, B., Smars, S., Jo¨nsson, H., Kirchmann, H., 2001. Gaseous Emissions of Carbon Dioxide, Ammonia and Nitrous Oxide from Organic Household Waste in a Compost Reactor under Diferent Temperature Regimes. Journal of Agricultural Engineering Research 78 (4), 423-430.

Haug, R. T. 1993. The Practical Handbook of Compost Engineering: CRC Press.

He ,Y., Inamori, Y., Mizuochi, M., Kongb, H., Iwami, N., Suna, T., 2000. Measurements of $N_2O$ and $C_4H$ from the aerated composting of food waste. The Science of the Total Environment( 254 ),65-74.

Holman, J.P., 1997.Heat Transfer, McGrow-Hill, New York.

Mason, I. G., Milke, M. W. 2005. Physical modelling of the composting enviroment: A review. Part 1: Reactor systems. Waste Management 25 (5):481-500.

Pagans,E., Barrena,R.,Fon,X., Sa´nchez,A.,.2006. Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. Chemosphere 62 ; 1534–1542.

Shen, Y., Ren ,L ., Li ,G ., Chen ,T ., Guo ,R .,2011. Influence of aeration on CH4, N2O and NH3 emissions during aerobic composting of a chicken manure and high C/N waste mixture. Waste Management (31) 33–38.

Smårs, S., Beck-Friis, B., Jönsson, H., Kirchmann, H. 2001. SE-Structures and Environment: An Advanced Experimental Composting Reactor for Systematic Simulation Studies. Journal of Agricultural Engineering Research 78 (4):415-422.

Tchobanoglous,G., Kreith, F.,.2002 Handbook of solid waste management. McGraw-Hill.