

堆肥预处理对松木屑厌氧发酵的影响*

王忠江^{1,2} Yebo Li² 赵佳²

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 俄亥俄州立大学农业研究与开发中心, 伍斯特 44691)

摘要: 针对目前针叶类林木松树厌氧发酵前预处理效果差、成本高的问题,在添加食品废弃物的条件下,研究好氧堆肥方法对松木屑(6.35 mm、9.53 mm 和 12.70 mm)和食品废弃物混合物料的预处理效果,以及对后续干式厌氧发酵过程的影响。研究表明,好氧堆肥过程对松木屑的预处理效果明显,但随着松木屑粒径的增大预处理效果降低;经堆肥预处理后物料的厌氧发酵原料的 VS 产气率均维持在 199 ~ 215 L/kg 范围内,约为未预处理组的 1.4 倍,而且发酵后物料中的 VFA 总量均维持在 24.5 左右,约为未堆肥预处理组的 1.5 倍,后续产气潜力更大。

关键词: 松木屑 食品废弃物 干式厌氧发酵 堆肥预处理

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0197-04

引言

在美国,园林废弃物成为继报纸之后的第二大城市有机废弃物^[1-2],而作为厌氧发酵的原料具有非常大的产气潜力,但在园林废弃物中占有较大比例的松树属于针叶类林木,木质素含量相对较高^[3],产气率明显低于玉米秸秆和小麦秸秆^[4-5],所以在进行厌氧发酵前必须进行预处理。在众多预处理方法中,堆肥预处理因其成本低、操作简单方便、可实现厌氧发酵快速启动等受到国内外学者的广泛关注^[6-7]。但目前堆肥预处理方法主要用于处理木质素含量相对较低的秸秆,而且堆肥预处理提高秸秆厌氧发酵产气的效果还存在争议。方文杰等^[8]通过研究发现堆沤作为稻秸预处理技术,可大幅度提高其厌氧消化产气效率。李冰冰等^[9]研究表明,堆肥预处理可以提高木质纤维原料产气中甲烷体积分数,最高可提高 70%。高白茹等^[10]研究表明,堆肥预处理并不能提高稻秸产气量和产气中甲烷体积分数,但可以提高容积产气率,缩短产气周期。而目前关于堆肥预处理方法对木质素含量较高的针叶类林木废弃物预处理效果的研究较少,因此本文进行堆肥预处理对松木干式厌氧发酵过程的影响研究。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用的松木屑取自俄亥俄州立大学农业研究与开发中心(40°48'33"N, 81°56'14"W),取回的

木屑经干燥后使含水率降至 10% 以下,之后利用锤片式粉碎机进行粉碎,粉碎后的木屑尺寸分别为 6.35 mm、9.53 mm 和 12.70 mm。试验所用的食品废弃物取自 Quasar 能源公司(Cleveland, OH, USA)厌氧发酵系统的发酵原料。试验所用的接种物取自 Quasar 能源公司中温厌氧发酵系统的发酵后剩余物。松木屑的总固体(TS)质量分数、挥发性固体(VS)质量分数和碳氮比分别为 92.2%、90.9% 和 131.1。食品废弃物的 TS 质量分数、VS 质量分数和碳氮比分别为 20.8%、20.0% 和 3.6。接种物的 TS 质量分数、VS 质量分数和碳氮比分别为 8.6%、3.5% 和 7。

1.2 试验方法

1.2.1 堆肥预处理

将 400 g 食品废弃物和 100 g 的松木屑(3 种尺寸)均匀混合,混合后物料的 TS 质量分数、VS 质量分数和碳氮比分别为 35.11%、34.13% 和 29。之后将混合后的物料装入玻璃瓶内,并用双层纱布将瓶口封住后置于(55 ± 0.5)℃ 的恒温通风培养箱内进行好氧堆肥预处理,每个试验组有 2 个重复,堆肥时间为 4 d,堆肥过程中每天摇动堆肥装置(玻璃瓶)一次,每次摇动时间为 2 min,堆肥开始和结束时分别取样测定物料的 TS、VS、纤维素和半纤维素含量。

1.2.2 预处理后物料的干式厌氧发酵

根据 Cui 等^[11]试验得出的干式厌氧发酵物料和接种物较优配比,将经预处理后的松木屑与沼液混合,得到松木屑与沼液的 VS 质量比为 4 的混合

收稿日期: 2014-03-28 修回日期: 2014-04-30

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD15B04)

作者简介: 王忠江,副教授,博士,主要从事农业生物环境与能源工程研究, E-mail: neauwzj@126.com

物料。同时将没有经过预处理的松木屑、食品废弃物和沼液的混合物料作为干式厌氧发酵的对比组,对比组物料中松木屑、食品废弃物和沼液的质量比为 103:410:1 240,混合物的发酵物料与接种物沼液之比也为 4。将沼液接种后的发酵物料装入 2 L 的玻璃瓶内并用胶塞密封,之后放入 37℃ 的恒温培养室内进行干式厌氧发酵试验,每个试验组有 2 个重复,厌氧发酵时间为 41 d,利用 5 L 的气袋收集试验过程产生的沼气,每 2~3 d 对产气量和气体成分进行测定。试验结束后测定物料的 TS 质量分数、VS 质量分数、pH 值、碱度和挥发性脂肪酸含量(VFA)。

1.3 分析方法

堆肥预处理前后松木屑的纤维素和半纤维素含量通过 NREL 试验分析方法进行测定^[12-13],首先采用两级酸水解法水解松木屑样品,之后利用配有 Biorad Aminex HPX-87P 柱和 RID 检测器的高效液相色谱仪(Agilent 1200 series, MN, USA)测定水解液中的单糖量,柱子和 RID 检测器的温度分别为 80℃ 和 55℃,水作为流动相,流速为 0.6 mL/min,根据测定的相应单糖量计算出纤维素和半纤维素的含量。TS 质量分数、VS 质量分数、pH 值和碱度采用实验室废水的标准测定方法^[14]进行测定。总碳和总氮利用元素分析仪(Elementar Vario Max CNS, Elementar Americans, Mt. Laurel, NJ, USA)测定。VFA 采用配有 FID 检测器和 30 m × 0.32 mm × 0.5 μm Stabilwax-DA 型石英柱的气相色谱仪(HP5890, Agilent Technologies, Wilmington, DE, USA)测定,测定 VFA 前样品需进行预处理,预处理方法为先将 10 mL 蒸馏水加入 10 g 样品中,经充分混合后利用离心机在 8 000 r/min 的条件下离心 5 min,取出上清液,并用盐酸将 pH 值调到 2 和 3 之间,之后利用 5 mL 注射器和 0.2 μm 的滤膜过滤样品,然后进行 VFA 的测定,气相色谱仪进样口和检测器的温度均为 230℃,载气为氦气,氦气的流速为 20 mL/min。沼气体积采用液体置换法^[15]测定,沼气成分采用配有 TCD 检测器和 30 m × 0.53 mm × 10 μm 氯化钾改性氧化铝柱的气相色谱仪(Agilent Technologies, HP6890, Wilmington, DE, USA)测定,进样口和检测器的温度分别为 150℃ 和 200℃,载气为氦气,流速为 5.2 mL/min。

2 结果与讨论

2.1 堆肥预处理对松木屑纤维素和半纤维素降解率的影响

堆肥预处理对松木屑纤维素和半纤维素降解率的影响如表 1 所示。

表 1 纤维素和半纤维素降解率变化规律

Tab.1 Variation of degradation rate of cellulose and hemicellulose

木屑尺寸/mm	纤维素降解率/%	半纤维素降解率/%
6.35	3.28	5.06
9.53	2.26	2.71
12.70	0.99	2.57

从表 1 中可以看出经堆肥预处理后松木屑的纤维素和半纤维素均有一定降解,而且随着松木屑粒径的增大,降解率随之减小,随着松木屑粒径由 6.35 mm 增加到 9.53 mm 和 12.70 mm 时,各组的纤维素降解率变化比较均匀,分别由 3.28% 降低到 2.26% 和 0.99%。但粒径为 9.53 mm 和 12.70 mm 组的半纤维素降解率差别较小,分别为 2.71% 和 2.57%,而粒径为 6.35 mm 组的半纤维素降解率相对较高,约为 5.06%。

2.2 堆肥预处理对干式厌氧发酵过程的影响

2.2.1 堆肥预处理对日均沼气产率的影响

堆肥预处理对单位挥发性固体日均沼气产率的影响如图 1 所示。

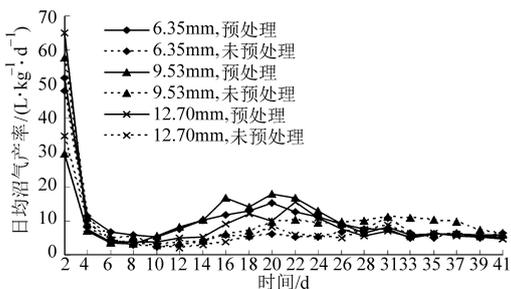


图 1 日均沼气产率的变化规律

Fig.1 Variation of daily biogas yield

从图中可看出在整个发酵周期的前 2 天各发酵组的日均沼气产率较高,基本维持在 30 L/(kg·d) 以上,而在第 2 天到第 4 天各组的日均沼气产率急剧下降,均维持在 10 L/(kg·d) 以下,而且各组的差别较小,并一直维持到第 10 天,而从第 10 天到第 26 天堆肥预处理组与未预处理组的差别较大,预处理组的日均沼气产率明显高于未预处理组,而从第 26 天一直到试验结束,除 9.53 mm 未预处理组的日均沼气产率略高外,其他各组基本保持一致,差别较小。

2.2.2 堆肥预处理对累积沼气产量的影响

堆肥预处理对单位挥发性固体累积沼气产量的影响如图 2 所示。

从图中可以看出在发酵的前 18 天,各发酵组的累积沼气产量差别较小,除 9.53 mm 预处理组略低外,其他两组预处理组的整体发酵效果略优于未预处理组,但从 18 d 以后,预处理组和未预处理组的

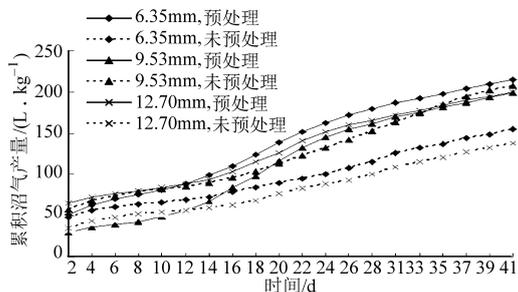


图 2 累积沼气产量的变化规律

Fig. 2 Variation of cumulative biogas yield

累积沼气产量差别逐渐增大,除 9.53 mm 未预处理组略高外,3 个预处理组的累积沼气产量均高于未预处理组,经堆肥预处理后物料的厌氧发酵原料的 VS 产气率均维持在 199 ~ 215 L/kg 范围内,约为未预处理组的 1.4 倍。说明堆肥预处理可显著提高木质纤维类物料的厌氧发酵产气率,这与李冰冰等^[9]的研究相吻合。

2.2.3 堆肥预处理对沼气中甲烷体积分数的影响

堆肥预处理对沼气中甲烷体积分数的影响如图 3 所示。

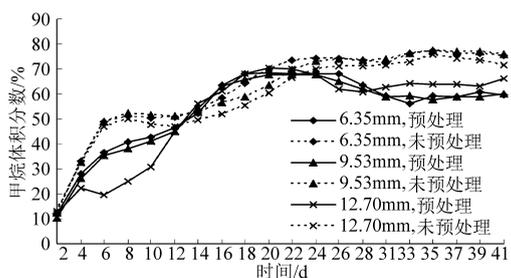


图 3 甲烷体积分数的变化规律

Fig. 3 Variation of methane content

从图中可以看出在发酵的前 12 天,预处理后各组产生的沼气中甲烷体积分数均低于未预处理组,而从第 14 天到第 20 天各发酵组沼气中的甲烷体积分数均有所增加,但预处理后各组的沼气中甲烷体积分数的增幅高于未预处理组,预处理后各组产生的沼气中甲烷体积分数逐渐高于未预处理组,但预处理后各组的沼气中甲烷体积分数从第 20 天后出现小幅下降后基本维持在 60% 左右,而未预处理组沼气中的甲烷体积分数从第 22 天开始逐渐稳定,沼气中的甲烷体积分数基本维持在 70% 左右。说明堆肥预处理并不能显著提高厌氧发酵后沼气中的甲烷体积分数,这与高白茹等^[10]的研究结果相吻合。

2.2.4 堆肥预处理对物料中 VFA 的影响

(1) 堆肥预处理对 VFA 总量的影响

堆肥预处理对 VFA 总量的影响如表 2 和表 3 所示。

从表 2 中可以看出发酵前未经预处理各组的 VFA 质量比差别不大,基本维持在 2.5 g/kg,而经

表 2 未预处理组 VFA 总量的变化规律

Tab. 2 Variation of total VFA for no pretreated group

木屑尺寸/mm	开始时 VFA 质量比	第 41 天时 VFA 质量比
	$/(g \cdot kg^{-1})$	$/(g \cdot kg^{-1})$
6.35	2.49	17.32
9.53	2.65	16.45
12.70	2.48	15.91

表 3 预处理组 VFA 总量的变化规律

Tab. 3 Variation of total VFA for pretreated group

木屑尺寸/mm	开始时 VFA 质量比	第 41 天时 VFA 质量比
	$/(g \cdot kg^{-1})$	$/(g \cdot kg^{-1})$
6.35	2.28	24.32
9.53	2.62	24.58
12.70	2.58	24.33

41 d 厌氧发酵后各组的 VFA 质量比出现大幅度增加,基本维持在 16 g/kg,并且粒径较小组的 VFA 质量比略高于粒径较大组。

从表 3 中可以看出发酵前各组的 VFA 质量比差别不大,也基本维持在 2.5 g/kg,而经 41 d 厌氧发酵后各组的 VFA 质量比出现大幅度增加,并且各组差别较小,基本维持在 24.5 g/kg。

综合表 2 和表 3 可知,厌氧发酵开始时各组的 VFA 质量比均较低,基本维持在 2.5 g/kg 左右,而厌氧发酵结束时各不同预处理组的 VFA 质量比均出现大幅增加,并且经堆肥预处理组厌氧发酵后的 VFA 质量比明显高于未预处理组,约为未堆肥预处理组的 1.5 倍,结合前面各组的产气情况可知,堆肥预处理组的总 VFA 产量高于未预处理组,这说明经堆肥预处理后的发酵物料更利于纤维素和半纤维素的降解,能够为后续的厌氧发酵过程提供更多的可被微生物利用的 VFA,这与陈广银等^[16]的研究结果相吻合。

(2) 堆肥预处理对 VFA 成分的影响

干式厌氧发酵前后物料的 VFA 成分分别如表 4 和表 5 所示。

从表 4 和表 5 可以看出,发酵初期发酵物料中主要以乙酸为主,丙酸次之,丁酸质量分数最低,发

表 4 厌氧发酵前 VFA 成分

Tab. 4 VFA composition before anaerobic digestion

原料类型	乙酸质量	丙酸质量	丁酸质量	pH 值
	分数/%	分数/%	分数/%	
6.35 mm, 未预处理	67.53	30.19	2.28	7.89
9.53 mm, 未预处理	66.49	29.53	3.98	7.89
12.70 mm, 未预处理	66.11	30.49	3.41	7.86
6.35 mm, 预处理	65.12	32.76	2.12	7.88
9.53 mm, 预处理	67.90	29.60	2.50	7.88
12.70 mm, 预处理	67.18	30.32	2.50	7.83

表5 厌氧发酵后VFA成分

Tab.5 VFA composition after anaerobic digestion

原料类型	乙酸质量	丙酸质量	丁酸质量	pH值
	分数/%	分数/%	分数/%	
6.35 mm, 未预处理	18.64	55.52	22.37	8.49
9.53 mm, 未预处理	12.33	60.06	25.15	8.46
12.70 mm, 未预处理	10.32	62.53	25.63	8.43
6.35 mm, 预处理	13.00	55.34	29.43	8.59
9.53 mm, 预处理	16.08	54.68	25.66	8.52
12.70 mm, 预处理	16.12	55.14	27.31	8.45

酵物料的 pH 值基本维持在 7.8 ~ 7.9 之间。而发酵结束时发酵物料中的 VFA 成分发生较大变化,其中丙酸质量分数较高,丁酸次之,乙酸质量分数最低,发酵物料的 pH 值基本维持在 8.4 ~ 8.6 之间。这是由于在厌氧发酵过程中乙酸能被产甲烷菌直接利用,而丙酸必须经过同型产乙酸过程转化为乙酸

后才能被产甲烷菌利用,而且丙酸向乙酸转化的条件比较苛刻,转化速度较慢,进而导致乙酸在厌氧发酵过程中得到迅速降解,而较难被利用的丙酸则出现积累,进而导致发酵后物料中 VFA 成分的变化较大。

3 结论

(1)堆肥过程可以取得较好的预处理效果,能够加快松木屑的降解,但粒径对堆肥预处理效果的影响较大,随着粒径的增大,堆肥预处理效果降低。

(2)经堆肥预处理后的物料更利于厌氧发酵过程进行,经堆肥预处理后物料的厌氧发酵原料单位累积产气率均维持在 199 ~ 215 L/kg 范围内,约为未预处理组的 1.4 倍,而且发酵后物料中的 VFA 质量比均维持在 24.5 g/kg,约为未堆肥预处理组的 1.5 倍,后续产气潜力更大。

参 考 文 献

- 吕子文,方海兰,黄彩娣.美国园林废弃物的处置及对我国的启示[J].中国园林,2007(8):90-94.
- United States Environmental Protection Agency. Municipal solid waste in the United States: 2005 facts and figures, EPA 530-R-06-011[R]. Office of Solid Waste, Environmental Protection Agency, 2006.
- 王忠江,王丽丽.木质纤维类农业废弃物水解酸化技术与发酵设备[M].北京:化学工业出版社,2012:8-21.
- Brown D, Li Y. Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production[J]. Bioresource Technology, 2012,127: 275-280.
- Liew L N, Shi J, Li Y B. Methane production from solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass [J]. Biomass & Bioenergy, 2012, 46:125-132.
- Zhong Weizhang, Zhang Zhongzhi, Luo Yijing, et al. Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(24): 11177-11182.
- 陈小华,朱洪光.农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J].农业工程学报,2007,23(3):279-283.
Chen Xiaohua, Zhu Hongguang. Research progress and prospect on producing biogas from crop straws[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3):279-283. (in Chinese)
- 方文杰.堆沤预处理提高稻草厌氧消化产气量的实验研究与机理探讨[D].北京:北京化工大学,2007.
- 李冰冰,肖波,胡智泉,等.堆肥预处理对生物质厌氧消化特性的影响[J].安徽农业科学,2010,38(20):10848-10851.
Li Bingbing, Xiao Bo, Hu Zhiquan, et al. Effects of composting pretreatment on biological characteristics of anaerobic digestion [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(20):10848-10851. (in Chinese)
- 高白茹,常志州,叶小梅,等.堆肥预处理对稻秸厌氧发酵产气量的影响[J].农业工程学报,2010,26(5):251-256.
Gao Bairu, Chang Zhizhou, Ye Xiaomei, et al. Effect of compost pre-treatment on biogas production from rice straw [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 251-256. (in Chinese)
- Cui Zhifang, Shi Jian, Li Yebo. Solid-state anaerobic digestion of spent wheat straw from horse stall[J]. Bioresource Technology, 2011,102(20): 9432-9437.
- Sluiter A, Hames B, Ruiz R, et al. Laboratory analytical procedure (LAP): determination of structural carbohydrates and lignin in biomass, NREL/TP-510-42618[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- Wang Zhongjiang, Xu Fuqing, Li Yebo. Effects of total ammonia nitrogen concentration on solid-state anaerobic digestion of corn stover[J]. Bioresource Technology, 2013,144: 281-287.
- Zhu Jiying, Wan Caixia, Li Yebo. Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(19): 7523-7528.
- Park S, Li Y. Evaluation of methane production and macronutrient degradation in the anaerobic co-digestion of algae biomass residue and lipid waste[J]. Bioresource Technology, 2012,111: 42-48.
- 陈广银,马慧娟,常志州,等.堆肥预处理温度控制促进麦秸厌氧发酵产沼气[J].农业工程学报,2013,29(23):179-185.
Chen Guangyin, Ma Huijuan, Chang Zhizhou, et al. Promotion of biogas production of wheat straw by controlling composting pretreatment temperature[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 179-185. (in Chinese)
- 晏水平,高鑫,艾平,等.发酵条件对典型木质纤维素原料产沼气影响实验[J].农业机械学报,2013,44(增刊2):136-142.
Yan Shuiping, Gao Xin, Ai Ping, et al. Effect of anaerobic fermentation conditions on biogas yields from typical lignocellulosic materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.2):136-142. (in Chinese)

- 15 邓志党,高峰,刘献栋,等. 磁流变阻尼器力学模型的研究现状[J]. 振动与冲击,2006,25(3):121-126.
Deng Zhidang, Gao Feng, Liu Xiandong, et al. State-of-art research on dynamical models of magnetorheological damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006,25(3): 121-126. (in Chinese)
- 16 兰文奎,郑玲,李以农,等. 活塞式磁流变液阻尼器磁场有限元分析[J]. 农业机械学报,2007,38(4):142-145.
Lan Wenkui, Zheng Ling, Li Yinong, et al. FEM analysis of magnetic field of piston-type MR fluids damper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(4): 142-145. (in Chinese)

Design and Experiments of Rotary Magnetorheological Damper with Three Working Surfaces

Li Junqiang Wang Juan Liu Jinyue Chen Guiliang

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: A new structure rotary magnetorheological damper with three working surfaces was designed, which were two end surfaces and one cylindrical surface of the rotor. The area of the working surfaces was increased with the same volume of the rotor. Base on properties of magnetorheological fluid and magnetic core material, the magnetic circuit was designed, and the mechanical and electrical parameters of the damper were calculated. Depending on the characteristics of the magnetorheological damper structure, the finite element model of the magnetorheological damper was built, and the electromagnetic field analysis was performed. Then the magnetic field quantities of the damper model were got. With the results of the magnetic analysis and the constitutive relations, the performance simulation of the damper was conducted. On these bases, the magnetorheological damper and the mechanical performance test system were developed, and the mechanical performance of the damper was investigated using the test system. The damper properties, torque *vs* rev and yielding torque *vs* current, were obtained.

Key words: Magnetorheological damper Magnetic circuit design Finite element method Performance analysis Experiment

(上接第 200 页)

Influence of Composting Pretreatment on Dry Anaerobic Digestion of Pine Sawdust

Wang Zhongjiang^{1,2} Li Yebo² Zhao Jia²

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Ohio Agricultural Research and Development Center, The Ohio State University, Wooster OH 44691, USA)

Abstract: The effects of aerobic composting pretreatment on the mixed material of pine sawdust (6.35 mm, 9.53 mm, 12.70 mm) and food wastes and the influence on subsequent dry anaerobic digestion were studied by adding the food wastes aiming at the problems of the less effects and the high costs of pretreatment of conifer pine before anaerobic digestion. The experimental results showed that the pretreatment effects of aerobic composting process on the pine sawdust were obvious. But the pretreatment effects decreased with the increase of particle size of pine sawdust. The biogas production rates of anaerobic digestion of the raw materials, which were pretreated by aerobic composting, were all within the ranges of 199 ~ 215 L/kg, about 140% of unpretreated samples. And the total volatile fatty acid of the material, which had more subsequent potential for generating biogas, were all 24.5 or so after anaerobic digestion, about 150% of unpretreated samples.

Key words: Pine sawdust Food wastes Dry anaerobic digestion Composting pretreatment