

Influence of Both the Ratio of Feedstock to Inoculum and the Fermentative Concentration on Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste

Jianchang Li^{1,2}, Kewei Sun¹, He Juan¹, Wu Yongsheng¹

¹National Engineering Center of Solid Waste Resources Recovery, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, PR. China

²Ministry of Education's Key Laboratory of Advanced Technique and Preparation for Renewable Energy Materials, Yunnan Normal University, Kunming 650092, PR. China
Email: jclee94213@yahoo.com.cn

Abstract: In this paper, under a mesophilic batch anaerobic digestion, single factor experiment and multi-factor experiment design have been taken to investigate the effect of both the ratio of feedstock to inoculum and the fermentative concentration, which were the mainly influential factors, on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). When experiment was carried out, the Modified Gompertz Equation was used to determine the kinetic parameters of anaerobic digestion, and then Uniform Design Software was used to analyze these kinetic parameters by regression analysis. The results of multi-factor experiment showed that the fermentative concentration was main factor to affect maximum accumulative biogas yield, biogas rate, biogas conversion of VS and biogas rate of VS, while the ratio of feedstock to inoculum relatively was not so important compared to the fermentative concentration, especially for biogas conversion of VS and biogas rate of VS. When concentration was lower, removal or biogas conversion of VS were higher. Contrarily, when concentration was higher, accumulative biogas yield was higher and biogas rate was faster too. On the other hand, the results of single factor experiment also indicated that the optimum VS concentration for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste was 4-8%, the ratio of feedstock to inoculum was 1.5:1-2.5:1.

Keywords: Organic fraction of municipal solid waste; Anaerobic digestion; Ratio of feedstock to inoculum; Fermentative concentration; Modified Gompertz equation; Uniform design

料菌比和发酵浓度对城市生活垃圾厌氧发酵的影响

李建昌^{1,2}, 孙可伟¹, 何娟¹, 吴勇生¹

¹固体废物资源化国家工程中心, 昆明理工大学, 昆明 650031

²可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 云南师范大学 昆明 650092

Email: jclee94213@yahoo.com.cn

摘要: 本文采用中温批量发酵, 对影响生活垃圾厌氧发酵最主要的宏观因素料菌比和发酵浓度, 进行了单因素实验和多因素实验研究, 并利用 Modified Gompertz Equation 拟合软件和 Uniform Design 设计软件对数据进行分析。多因素均匀设计实验研究结果表明发酵浓度是影响最大累积产气量、产气速率、VS 产气率和 VS 产气速率的主要因素, 而料菌比的影响相对较小, 特别是对 VS 产气率和 VS 产气速率几乎不产生影响, 当发酵浓度较低时, VS 降解率和产气率较高, 浓度较高时, 最大累积产气量较大、产气速率较快。单因素实验研究结果表明城市生活垃圾厌氧发酵的 VS 浓度在 4-8% 比较适宜, 料菌比在 1.5:1-2.5:1 比较适宜。

关键词: 城市生活垃圾; 厌氧发酵; 料菌比; 发酵浓度; 改进 Gompertz Equation; 均匀设计

1 引言

基金项目: 昆明理工大学固体废物资源化国家工程中心资助。

针对城市生活垃圾中有机成份高, 可生化降解性较好特点, 采用厌氧发酵处理技术, 不仅能有效地治

理环境污染，又能回收清洁能源，将不失为一种有效的处理处置方法^[1,2]。已有据报表明利用该技术处理市场垃圾^[3]、水果和蔬菜垃圾^[4]、家庭生活垃圾^[5]、厨房垃圾^[6]、城市有机生活垃圾^[7]等是可行的。

影响厌氧发酵的因素很多，但从宏观操控上来看，在给定发酵温度下，对于批量主要是料菌比和发酵浓度，他们将直接影响发酵的效率和发酵能否正常进行。特别是城市生活垃圾成分复杂、处理比较困难，适宜的料菌比和发酵浓度将是实现城市生活垃圾厌氧发酵的关键。因此本文将采用中温批量发酵方式，在恒温35°C下，采用单因素实验和多因素均匀设计(Uniform Design)实验，并结合modified Gompertz equation拟合方法，研究料菌比和浓度之间的联系、以及他们对城市生活垃圾厌氧发酵的影响，从而获得与之相宜的料菌比和发酵浓度。

2 材料和方法

2.1 材料

2.1.1 发酵原料

城市生活垃圾来自昆明市某一农贸市场垃圾收集站，通过手工从中选出可分辨的有机垃圾成分，其组成见表1。分选后的垃圾，通过恒温干燥烘干，粉碎成粉末后作为发酵原料，测定各项成分如表2。

Table 1 Ingredient of market waste (%w)
表1 农贸市场垃圾中有机垃圾组成(质量百分数, %)

水果类	蔬菜类	肉类	秸秆类	厨余类	粪便类
23.21	35.02	5.27	11.18	7.38	17.93

Table 2 Composition of powder market waste (%w)
表2 粉末垃圾的各项组成成分(质量百分数, %)

TS	VS	矿物质	水溶物	还原糖	淀粉	纤维素	半纤维素	脂肪	粗蛋白
98.28	75.87	12.80	31.77	3.96	18.8	24.27	11.39	7.60	16.00

2.1.2 接种物

接种物取自废弃物资源化国家工程中心的城市生活垃圾厌氧消化反应器。经测定，接种时污泥的TS为11.71%，VS为7.95%，pH值为6.8。

2.2 方法

2.2.1 实验装置

实验装置如图1。发酵瓶采用100ml血清瓶。投料

启动后，发酵瓶用丁基胶盖塞紧，用封口钳密封。产气后，通过针头扎进胶盖，用排水集气法测量产气量。

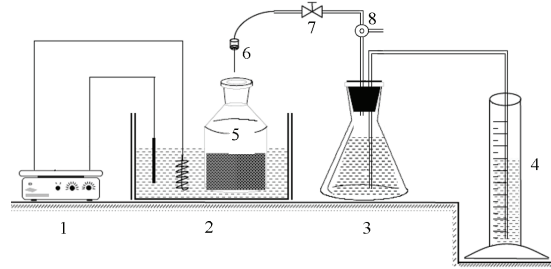


Fig 1 the schematic diagram of anaerobic digester
图1 厌氧发酵实验装置图

1.恒温控制仪；2.水槽；3.集气瓶；4.量筒；5.发酵瓶；6.针头；7.两通活塞；8.三通活塞。

2.2.2 实验设计

在单因素实验设计中，料菌比按VS计分别为1:1、1.5:1、2:1、2.5:1、3:1、3.5:1；发酵浓度按VS计分别为2%、4%、6%、8%、10%、12%。在多因素均匀实验设计中，考察料菌比和发酵浓度两个因素，每个因素取6个水平。采用均匀实验设计软件(Uniform Design Version 3.0)设计实验方案。

生活垃圾和接种物的投料量，由以下公式(1)计算：

$$C_{vs} = \frac{W_1 \times VS_1 + W_2 \times VS_2}{W_0} \quad (1)$$

式中 C_{vs} 为发酵混合物的 VS 浓度(%)； W_0 为发酵混合物的总量(g)； W_1 为生活垃圾的投料量(g)； W_2 为接种物的投料量； VS_1 为生活垃圾的 VS 浓度(%)； VS_2 为接种物的 VS 浓度(%)。

在考察料菌比的影响时，根据公式(1)计算出生活垃圾和接种物的投料量，如表4。

Table 4 Loading quantity of inoculum and feedstock at 6%VS
表4 发酵浓度6%VS下，接种物和原料的投料量

料菌比	发酵总量(g)	发酵浓度(%VS)	垃圾(g)	接种物(g)	加水(g)
1.0:1	80	6	3.16	30.19	46.65
1.5:1	80	6	3.80	24.15	52.05
2.0:1	80	6	4.22	20.13	55.66
2.5:1	80	6	4.52	17.25	58.23
3.0:1	80	6	4.74	15.09	60.16
3.5:1	80	6	4.92	13.42	61.66

在考察发酵浓度的影响时，根据公式(1)计算出生活垃圾和接种物的投料量，如表5。

Table 5 Loading quantity of inoculum and feedstock at 2.5:1 VS ratio of feedstock to inoculum

表 5 在 VS 料菌比 2.5:1 下, 接种物和原料的投料量

发酵浓度 (%VS)	发酵总量 (g)	料菌比	垃圾 (g)	接种物 (g)	加水 (g)
2	80	2.5:1	1.51	5.75	72.74
4	80	2.5:1	3.01	11.50	65.49
6	80	2.5:1	4.52	17.25	58.23
8	80	2.5:1	6.03	23.00	50.97
10	80	2.5:1	7.53	28.75	43.72
12	80	2.5:1	9.04	34.50	36.46

在均匀实验设计中, 根据 Uniform Design 设计和公式(1)计算出生活垃圾和接种物的投料量, 如表 6。

Table 6 Loading quantity of inoculum and feedstock in experimental operation of uniform design

表 6 均匀设计实验中接种物和原料的投料量

No.	发酵总量 (g)	料菌比	发酵浓度 (%VS)	垃圾 (g)	接种物 (g)	加水 (g)
1	80	1.0:1	6	3.16	30.19	46.65
2	80	1.5:1	12	7.59	48.30	24.11
3	80	2.0:1	4	2.81	13.42	63.77
4	80	2.5:1	10	7.53	28.75	43.72
5	80	3.0:1	2	1.58	5.03	73.39
6	80	3.5:1	8	6.56	17.89	55.55

(1) 总固体含量(TS)和挥发性固体含量(VS)的测定, 采用常规重量分析法测定。

(2) pH 值测定:用微量注射器汲取发酵液, 并用精密 pH 试纸测定。

(3) 产气量和产气速率测定:产气量每天从量筒读出测量, 产气速率根据产气量来计算, 表示为 ml/d。

(4) 沼气中甲烷含量测定: 用 10ml 的注射器从发酵瓶上部的气体取样口中准确吸取 10ml 气体, 用浓 KOH(33%)吸收完二氧化碳后, 剩余的便是甲烷。

3 结果及分析

3.1 料菌比对生活垃圾厌氧发酵的影响

在发酵 VS 浓度为 6%时, VS 料菌比分别为 1:1、1.5:1、2:1、2.5:1、3:1、3.5:1 下, 实验结果如图 2 所示。为比较料菌比对生活垃圾厌氧发酵的影响, 应用 CurveExpert 1.3 软件中 Gompertz equation 对数据进行分析。然后采用 modified Gompertz equation 拟合最大累积产气量和产气速率, 进而求得原料的 VS 产气量和 VS 产气速率^[8-9]。

Gompertz equation:

$$y(x) = a \exp[-\exp(b - cx)] \quad (2)$$

Modified Gompertz equation:

$$H(t) = H \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R \cdot e}{H} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (3)$$

在 Gompertz equation and Modified Gompertz 中: $H(t) = y(x)$; $H=a$; $R=c \cdot a/e$; $\lambda = (b-1)/c$ 。H(t)为 t 时的累积产气量(ml); H 为最大累积产气量(ml); R 为产气速率 (ml/d); λ 为滞留时间(d); $e=2.71828$ 。结果如表 7。

2.2.3 分析方法

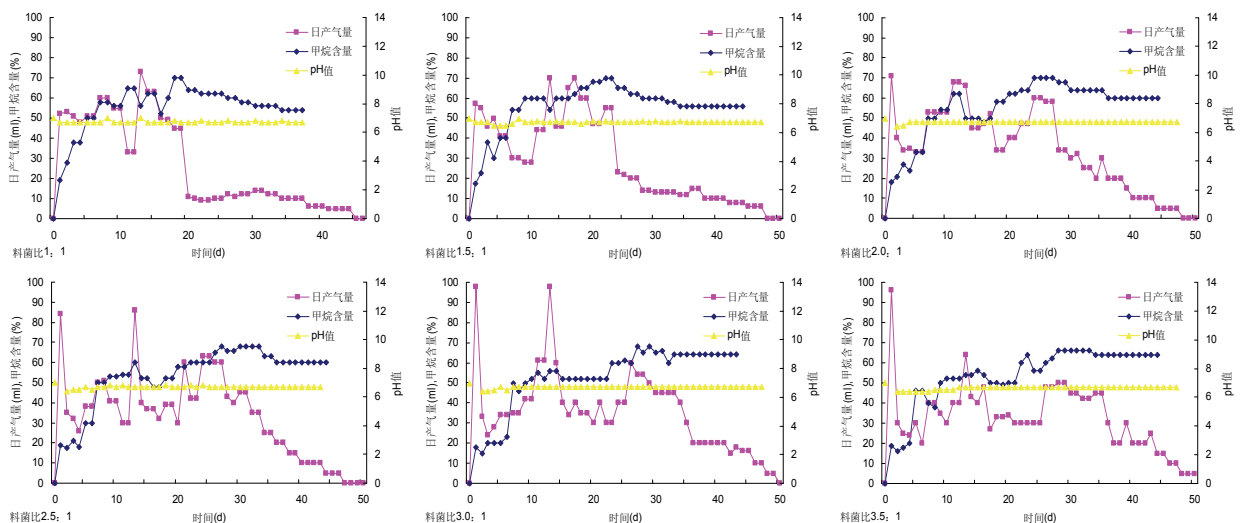


Fig.2 Biogas rate, methane content and pH value per day at a VS concentration of 6%

图 2 发酵浓度为 6%VS 时, 不同料菌比的日产气量、甲烷含量和 pH 值的变化

Table 7 Kinetic parameters of Gompertz equation at a VS concentration of 6%
表 7 发酵 VS 浓度 6% 实验组的 Gompertz equation 动力学参数

料菌比	模拟参数			最大累积产气量 (H, ml)	产气速率 (R, ml/d)	VS产气率 (ml/gVS)	VS产气速率 (ml/gVS.d)	相关系数 r
	a	b	c					
1.0:1	1223	1.088	0.127	1223	57.0	510	23.7	0.9983
1.5:1	1431	1.230	0.106	1432	55.8	497	19.4	0.9984
2.0:1	1723	1.253	0.095	1724	60.3	539	18.8	0.9982
2.5:1	1810	1.270	0.089	1810	59.5	528	17.3	0.9960
3.0:1	1762	1.194	0.079	1762	51.6	489	14.3	0.9974
3.5:1	1669	1.179	0.071	1669	43.3	447	11.6	0.9978

从表7中可以看出，料菌比2:1组的VS产气率最高，为539ml/gVS，其次是2.5:1组为528 ml/gVS，最低的3.5:1组为447 ml/gVS。料菌比对VS产气率的影响，并未表现出明显的规律性，但从另一个角度说明了在料菌比1:1-2.5:1间最有较好的VS产气率，料菌比超过2.5:1以上时，VS产气量反而明显降低。表明高的料菌比对垃圾厌氧发酵不利。相反料菌比对VS产气速率的影响，却表现出明显的规律性，即随料菌比的增加而逐渐降低。这一结果实际上反映了在沼气发酵中增加接种量时，VS产气速率比较高，对原料的利用率也较

大。然而接种量的加大，势必导致原料减少，处理效率较低，因此料菌比的选择不宜过高和太低，1.5:1-2.5:1比较适合。

3.2 发酵浓度生活垃圾厌氧发酵的影响

在 VS 料菌比 2.5:1 下，发酵 VS 浓度分别为 2%、4%、6%、8%、10%和 12%下，生活垃圾厌氧发酵过程中的日产气量、甲烷含量和 pH 值变化如图 3。应用 CurveExpert 1.3 软件对最大累积产气量和产气速率分析，结果如表 8。

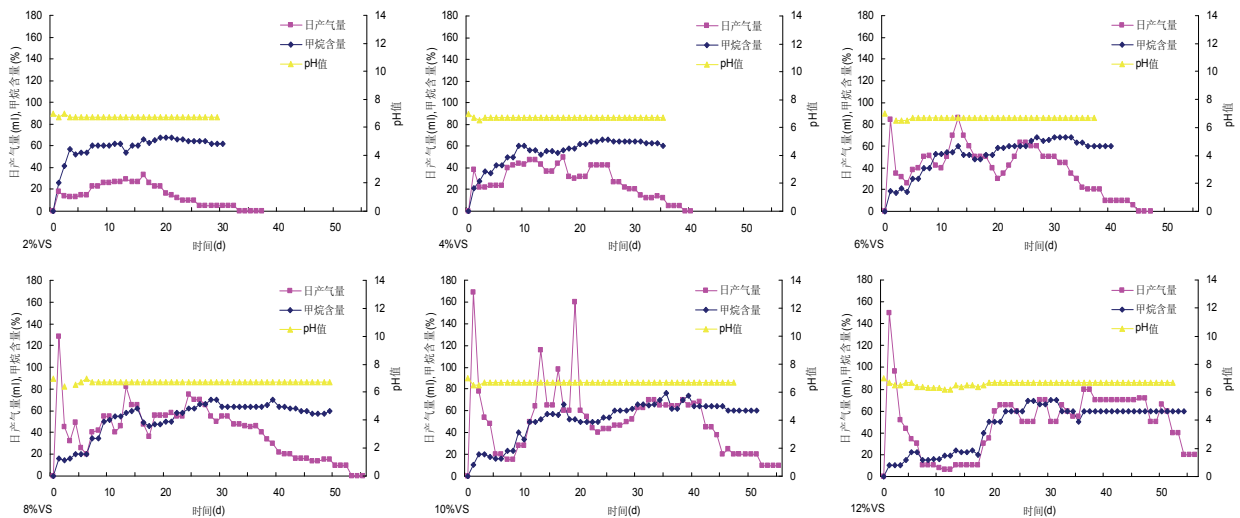


Fig.3 Biogas rate, methane content and pH value per day at a VS ratio of feedstock to inoculum 2.5:1

图 3 料菌比为 2.5:1 时，不同发酵浓度的日产气量、甲烷含量和 pH 值的变化

Table 8 Kinetic parameters of Gompertz equation at a group of 2.5:1 VS ratio of feedstock to inoculum
表 8 VS 料菌比 2.5:1 实验组的 Gompertz equation 动力学参数

发酵浓度 (%VS)	模拟参数			最大累积产气量 (H, ml)	产气速率 (R, ml/d)	VS产气率 (ml/gVS)	VS _g 产气速率 (ml/gVS.d)	相关系数 r
	a	b	c					
2	536	1.569	0.154	536	30.3	501	28.3	0.9988
4	1090	1.396	0.113	1090	45.4	512	21.3	0.9984
6	1810	1.238	0.088	1810	58.6	528	17.1	0.9960
8	2240	1.314	0.083	2240	68.2	525	16.0	0.9975
10	2750	1.315	0.075	2750	75.5	516	14.2	0.9958
12	2741	1.376	0.048	2741	48.5	428	7.6	0.9908

表8显示,最大累积产气量和产气速率,除12%VS外,随浓度增加而增大,说明当反应器内原料充足时,最大累积产气量和产气速率较大;对VS的产气率来说,并未表现出明显的变化规律,发酵浓度6%组最高,为528ml/gVS,其次是8%组为525 ml/gVS,最低的12%组为428 ml/gVS;而对VS产气速率来说,变化却比较明显,随浓度的增加而逐渐降低。根据实验结果,发酵VS浓度在4-8%比较适合。

3.3 料菌比和发酵浓度的组合影响

采用 Uniform Design Version 3.0 软件,通过累积产气率(指标 1, ml),产气速率((指标 2, ml/d), VS产气率((指标 3, ml/gVS)和 VS 产气速率((指标 4, ml/gVS.d)指标来考察料菌比和发酵浓度的双重影响。

指标数据根实验数据、采用 modified Gompertz equation 拟合获得,如表 9。并根据表 9 的结果,利用 Uniform Design 软件对拟合数据采用全回归法进行回归分析,归纳部分分析结果如表 10。

Table 9 Index value of uniform design experiment from modified Gompertz equation
表 9 均匀设计实验 modified Gompertz equation 拟合的指标值

No.	指标1	指标2	指标3	指标4	相关系数r	因素1	因素2
1	1223	28.9	510	12.0	0.9983	1.0:1	6
2	2105	59.5	365	10.3	0.9989	1.5:1	12
3	1220	47.3	573	22.2	0.9989	2.0:1	4
4	2830	66.9	496	11.7	0.9974	2.5:1	10
5	643	30.2	536	25.1	0.9987	3.0:1	2
6	2401	47.0	482	9.4	0.9973	3.5:1	8

Table 10 Partial results of regression analysis in uniform design experiment
表 10 均匀设计实验回归分析部分结果

No.	显著性水平 α	回归方程 $y = b(0) + b(1)*X(1) + b(2)*X(2)$			检验值 F t	临界值 F	回归方程显著性	方程各项对回归的贡献		优化结果
		b(0)	b(1)	b(2)				b(1)/因素1	b(2)/因素2	
指标1	0.10	-481	341	208	9.742	5.462	显著(F>F t)	16.1%	95.6%	因素2=12%
指标2	0.20	14.1	3.95	3.39	3.071	2.886	显著(F>F t)	8.42%	99.1%	因素2=12%
指标3	0.20	595	4.05	-15.7	3.687	2.886	显著(F>F t)	0.386%	93.2%	因素2=2%
指标4	0.15	26.1	-7.38*10 ⁻²	-1.55	4.237	3.813	显著(F>F t)	1.37*10 ⁻² %	96.4%	因素2=2%

从表 10 可以看出,对于指标 1,当显著水平 $\alpha \geq 0.10$ 时,回归方程显著,因素 1 料菌比对回归方程贡献值为 16.1%,因素 2 发酵浓度为 95.6%;对于指标 2,当显著水平 $\alpha \geq 0.20$ 时,回归方程显著,因素 1 料菌比对

回归方程贡献值为 8.42%,因素 2 发酵浓度为 99.1%;对于指标 3,当显著水平 $\alpha \geq 0.20$ 时,回归方程显著,因素 1 料菌比对回归方程贡献值为 0.386%,因素 2 发酵浓度为 93.2%;对于指标 4,当显著水平 $\alpha \geq 0.15$ 时,

回归方程显著, 因素 1 料菌比对回归方程贡献值仅为 $1.37 \times 10^{-2}\%$, 因素 2 发酵浓度为 96.4%。回归分析结果表明发酵浓度对最大累积产气量, 产气速率, VS 产气量和 VS 产气速率的影响较大, 是主要的影响因素, 而料菌比的影响则相对较小, 尤其是对 VS 产气率和 VS 产气速率几乎产生影响。当剔除不显著方程项 b(1)/ 因素 1, 再次回归分析并对实验条件进行优化时, 发现当以最大累积产气量和产气速率为考察指标时, 发酵 VS 浓度 12% 为最佳条件 (实际上酸化的危险比较大); 当以 VS 产气量和 VS 产气速率为考察指标时, 发酵 VS 浓度 2% 为最佳条件。

4 结论

(1) 发酵浓度是影响最大累积产气量、产气速率、VS 产气率和 VS 产气速率的主要因素。而料菌比的影响相对较小, 特别是对 VS 产气率和 VS 产气速率几乎不产生影响。

(2) 发酵浓度较低时, VS 产气率或降解率较高; 浓度较高时, 最大累积产气量较大、产气速率较快。当追求原料产气率高、VS 降解率好时, 可以适当的降低发酵浓度; 当追求产气量大、产气速度快时, 可以适当的增加发酵浓度, 但是浓度过高时, 产气量和产气速率反而下降。因此发酵 VS 浓度在 4-8% 比较适宜。

(3) 尽管料菌比对最大累积产气量、产气速率、VS 产气率和 VS 产气速率的影响相对较小, 但是料菌比反映的是微生物与原料间的比例关系, 当原料过剩时, 得不到有效的利用和降解, 同时酸化危险比较严

重; 当微生物过多时, 微生物常处于饥饿状态, 效率的不到充分发挥。因此料菌比在 1.5:1-2.5:1 比较适宜。

References (参考文献)

- [1] Li Dong, Sun Yongming, Zhang Yu, et al., Application and research advances on anaerobic digestion for municipal solid waste treatment, *Biomass Chemical Engineering*, 2008, 28(11):2 284-2 290.
李东, 孙永明, 张宇等, 城市生活垃圾厌氧消化处理技术的应用研究进展[J], *生物质化学工程*, 2008, 28(11):2 284-2 290.
- [2] De Baere, L., Will anaerobic digestion of solid waste survive in the future? In: *Fourth International Symposium of Anaerobic digestion of Solid Waste*, Copenhagen, Denmark, 2005, vol. 1, pp. 34-51.
- [3] Mata-Alvarez J., Viturtia A., Llabres-Luengo P., et al., Anaerobic digestion of the Barcelona central market organic waste: experimental study, *Bioresearch Technology*, 1993, 39: 39-48.
- [4] Bouallagui H., Touhami Y., BenCheikh R., et al., Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes, *Process Biochemistry*, 2005, 40: 43, 989-995.
- [5] Krzystek L., Ledakowicz S., Kahle, H.J., et al., Degradation of household biowaste in reactors, *Journal of Biotechnology*, 2001, 92(2): 103-112.
- [6] Rao, M.S. and Singh, S.P., Bioenergy conversion studies of organic fraction of MSW: kinetic studies and gas yield-organic loading relationships for process optimization, *Bioresearch Technology*, 2004, 95(2): 173-185.
- [7] Bonzonella D., Pavan P., Mace, S., et al., Dry Anaerobic digestion of differently sorted organic municipal solid waste: a full scale experience. In: *Fourth International Symposium of Anaerobic digestion of Solid Waste*, Copenhagen, Denmark, 2005, vol. 1, pp. 85-92.
- [8] Chen Wen-Hsing, Chen Shen-Yi, Khanal S. K., et al., 2006. Kinetic study of biological hydrogen production by anaerobic fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(15): 2170-2178.
- [9] Hu Z. H. and Yu H. Q., Anaerobic digestion of cattail by rumen cultures. *Waste Management*, 2006, 26(11): 1222-8.