



음식물쓰레기를 처리하는 산발효조의 효율 향상 연구 (I) : 식종균의 효과

신항식, 한선기, 송영채*, 이채영**

한국과학기술원 토목공학과, 한국해양대학교 토목환경공학부*, 삼성건설 기술연구소**
(2000년 7월 30일 접수, 2000년 8월 20일 채택)

Enhanced acidogenic fermentation of food waste (I) : Effect of seed inoculation

Hang-Sik Shin, Sun-Kee Han, Young-Chae Song*, Chae-Young Lee**

Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon

*Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Pusan

**R&D Team, Institute of Technology, Engineering & Construction Group, Samsung Corporation

ABSTRACT

Food waste is the main source of decay, odors and leachate in collection, transportation and landfill due to the high volatile solids (VS) and moisture content. Acidogenic fermentation of food waste is affected by the fermentation constraints including the biodegradability of substrate and the degrading capability of microorganisms. The biodegradability of food waste is mainly related to cellulosic materials, which are hardly degraded and comprise about 50% of food waste. The efficient and economical method of improving hydrolysis is, therefore, to apply microorganisms with increased cellulose-degrading capability. In this experiment, rumen microorganisms were inoculated to improve the low efficiency of acidogenic fermentation, and then compared with that of mesophilic acidogens. The fermentation of food waste in a leaching bed reactor employing rumen microorganisms resulted in the enhanced acidification (71.2% at 3.0 d⁻¹), which was higher than that (59.8% at 4.5 d⁻¹) employing mesophilic acidogens. This indicated that rumen microorganisms had an enhanced waste-degrading capability.

Key Words : Acidogenic fermentation, Food waste, Leaching bed reactor, Rumen microorganisms, Mesophilic acidogens, Dilution (D) rate

요약문

음식물쓰레기는 높은 함수율과 VS(volatile solids) 함량으로 인해 수거, 운반 및 매립에 있어서 부패, 악취, 침출수 등의 주요 원인이 되고 있다. 음식물쓰레기의 산발효는 기질의 생분해도와 식종균의 분해능력과 같은 발효제한요소에 의해서 영향을 받는데, 음식물쓰레기의 생분해도는 잘 분해되지 않으며 전체 양의 약 50%를 차지하는 셀룰로우스 성분(야채류)과 깊은 연관이 있다. 이에 대한 효과적이면서도 경제적인 방법은 셀룰로우스의 분해능력이 뛰어난 미생물을 식종하는 것으로, 본 연구에서는 루멘미생물을 이용하여 산발효의 낮은 효율을 향상시키려 하였으며 그 값을 증온 산발효균과 비교하였다. Leaching bed 반응조에 루멘미생물을 식종했을 때의 산발효 효율은 희석율 3.0 d⁻¹에서 71.2%의 최대값을 얻었으며, 한편 증온 산발효균을 식종하였을 때는 희석율 4.5 d⁻¹에서 59.8%의 최대값을 얻었다. 이는 루멘미생물의 음식물쓰레기 분해능력이 보다 뛰어난 것을 보여주는 것이다.

1. 서론

우리 나라의 도시고형폐기물(MSW; Municipal Solid Waste)은 1998년 현재 44,583톤/일의 양이 발생하고 있으며, 이 중에서 약 26.5%에 해당하는 11,798톤/일이 음식물쓰레기인 것으로 파악되고 있다¹⁾. 음식물쓰레기는 높은 함수율과 VS(volatle solids) 함량으로 인해 수거 및 운반에서 악취 및 부패, 침출수 발생의 원인이 되고 있으며, 특히 매립의 경우 심한 악취와 해충, 유독가스의 발생, 지하수 오염 및 매립지의 수명 감소와 같은 많은 문제를 일으키고 있다. 2005년부터는 시단위 이상 지역에서 직매립이 금지되기 때문에, 음식물쓰레기의 적절한 처리 및 재활용은 더욱더 폐기물 관리의 중요한 부분으로 인식되고 있다.

고형물의 혐기성소화는 가수분해, 산발효, 메탄발효와 같은 다양한 미생물 분해단계를 거치기 때문에 각 미생물의 성장 특성에 따라 최적의 환경을 유지시켜 주는 것이 효과적이다. 따라서 산발효와 메탄발효를 공간적으로 분리하여 각 미생물의 최적조건을 유지시켜 줌으로써 효율을 극대화할 수 있다²⁾.

일반적으로 용해성 기질의 경우에는 메탄생성(methanogenesis)이 율속단계(rate-limiting step)이지만, 입자성 기질의 경우에는 가수분해(hydrolysis)가 율속단계이다. 그러므로, 가수분해의 효율향상을 위하여 gamma irradiation, ball milling, steam explosion, 산 및 알칼리 처리, white-와 brown-rot fungi를 이용한 미생물 처리와 같은 다양한 방법^{3,4,5,6)} 등이 시도되었으나, 보다 직접적이면서도 효율적인 방법은 뛰어난 분해능력을 갖고 있는 미생물을 이용하는 것이다. 자연계에는 리그노셀룰로우스 물질(lignocellulosic materials)의 분해에 활성이 매우 뛰어난 혐기성 미생물들이 존재하고 있다. 대표적인 예로는 흰개미의 소화기관과 반추동물의 위(rumen)에 존재하는 미생물이다. 특히, 루멘미생물은 다양하고 복잡한 미생물계로서 주로 박테리아와 ciliate protozoa로 구성되어 있으며, 리그노셀룰로우스 물질의 분해시 그 단계는 혐기성 반응조에서의 그것과 유사하지만 단지 가수분해 및 산발효만이 진행된다^{7,8)}. 산발효조 식중균으로서 루멘미생물의 이용은 셀룰로우스의 분해를 향상시키는 커다란

잠재력을 가지고 있다^{9,10)}.

혐기성발효는 기질의 생분해도와 식중균의 분해능력과 같은 발효제한요소에 의해 영향을 받는다. 음식물쓰레기의 경우, 생분해도는 주로 셀룰로우스 성분과 관련이 있는데 이는 분해가 잘 되지 않는 성분일 뿐 아니라 전체 음식물쓰레기의 약 50%를 야채류가 차지하고 있기 때문이다. 그러므로 가장 효율적이면서도 경제적인 방법은 셀룰로우스 분해능력이 매우 뛰어난 루멘미생물을 식중균으로 이용하는 것이다. 루멘미생물은 셀룰로우스 분해에 있어 뛰어난 활성을 보여줄 뿐 아니라 상대적으로 짧은 증식시간(generation times)을 갖고 있다^{8,10,11)}. 본 연구에서는 루멘미생물을 식중균으로 이용하여 기존 산발효조의 낮은 효율을 향상시키고자 하였으며, 이를 증온 산발효조의 효율과 비교 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 시료의 성상

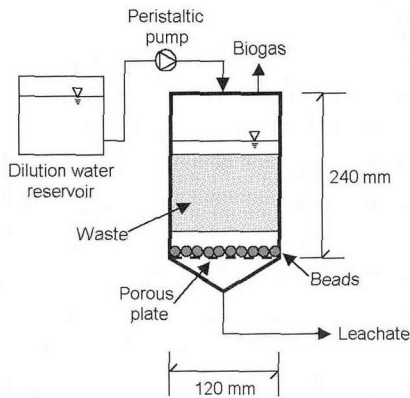
음식물쓰레기는 학교 내 구내식당으로부터 채취하여 동물의 뼈와 조개류를 제거한 후 사용하였으며, (Table 1)은 함수율, VS/TS, g VS 및 g COD와 같은 음식물쓰레기의 특성을 보여주고 있다. 한편 Na⁺의 농도는 1.0-1.5 g/L이었고, 입자크기는 곡류, 야채류, 육류가 각각 10, 25, 15 mm이하였다.

(Table 1) Characteristics of Food Waste

Parameters	Values
Composition (%) (Grains : Vegetables : Meats)	34.4 : 45.7 : 19.9
Water content (%)	82.0
VS/TS	0.94
g VS	173.4
g COD	208.1

2.2 실험장치

본 실험에 이용된 leaching bed 반응조는 (Fig. 1)에서 보는 바와 같이 직경이 120 mm, 높이가 240 mm로서 총부피는 2.7L, 유효부피는 2.0 L이다. 희석수는 연동식(peristaltic) 펌프를 이용하여 연속적으로 공급되며, 하부에는 침출수를 효과적으로 수집하기 위한 다공판과 bead가 설치되었다. 발생하는 바이오가스는 wet gas meter에 의해서 측정이 되었으며, 반응조의 온도는 37℃로 유지되었다.



[Fig. 1] Schematic diagram of the experimental leaching bed reactor.

2.3 식종균

루멘 미생물은 소의 위(rumen)로부터 그 액을 채취한 다음 이물질을 체로 걸러 낸 후 사용하였으며, 중온 산발효균은 음식을 처리하는 산발효조에서 그 액을 얻어 사용하였다. [Table 2]는 pH, alkalinity, VSS/TSS와 같은 각 미생물의 특성을 보여주고 있다.

2.4 실험조건

실험조건은 [Table 3]에서 보는 바와 같다. 다양한 희석율에 대하여 루멘미생물의 분해율을 측정하고, 이를 중온 산발효균의 효율과 비교하였다. 식종균(5% v/v)이 주입되고, 6시간동안 순유기간을 가진 후 희석수가 공급되었는데 희석수의 역할은 산발효조에서 발생된 유기산을 배출시킨다. 이때 희석율은 다음과 같이 정의된다

$$: \text{희석율 (D rate; } d^{-1}) = 1/\theta \text{ (수리학적 체류시간; } d)$$

$$= Q \text{ (희석수의 유량; L/d) / V (반응조 유효부피; L)}$$

2.5 분석방법

유기산은 gas chromatography(GC; Hewlett

Packard model 5890A)를 이용하여 측정하였으며, 가스발생량은 wet gas meter를 이용하였고 가스성분은 thermal conductivity detector (TCD)가 정착된 GC(GowMac series 580)를 이용하였다. Protozoa count 시료는 0.4 ml 37% formaldehyde로 고정시켰으며, Reichert MeF inverted microscope를 이용하여 측정하였다. 그리고 TS, VS, TSS, VSS, pH 및 COD와 같은 항목은 Standard Methods¹²⁾에 준하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유기산과 pH

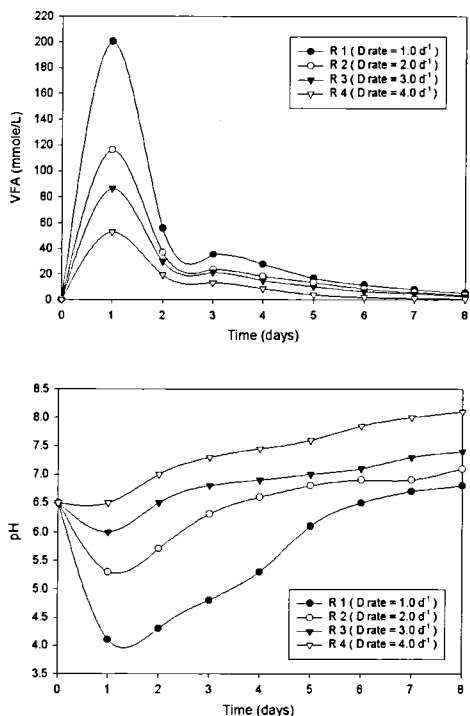
[Fig. 2]와 [Fig. 3]은 루멘미생물과 중온 산발효균을 식종균으로 이용한 산발효조의 유기산과 pH 변화를 각각 보여주고 있다. R1과 R5는 운전 첫날 높은 유기산의 값(202 and 181 mmol/L)과 3일째까지 낮은 pH의 값(below 5.0)을 보여주었다. 운전 초기에 곡류 성분이 재빨리 산화되기 때문에 낮은 희석율 1.0과 1.5 d⁻¹에서는 유기산의 축적이 발생하고, 축적된 유기산은 product inhibition을 일으킴으로¹³⁾ 산발효 효율이 감소된다[Fig. 5]. 반면에 R4와 R8은 첫날 낮은 유기산의 값(53 and 31 mmol/L)과 운전기간 내내 높은 pH의 값(6.5-8.1과 6.2-7.7)을 보여주었다. 4.0과 6.0 d⁻¹의 높은 희석율에서는 미생물의 성장보다 미생물의 washout이 더 크기 때문에, 반응조 안의 낮은 미생물 농도는 유기산의 감소와 pH의 상승을 가져온다. 루멘 미생물과 중온 산발효균의 최적 pH는 각각 6.0-7.0과 5.5-6.5로 알려져 있다^{8,9)}. 따라서 각 미생물에 대한 적절한 희석율 값이 3.0(R3)과 4.5 d⁻¹(R7)임을 알 수가 있다.

[Table 2] Characteristics of Inocula

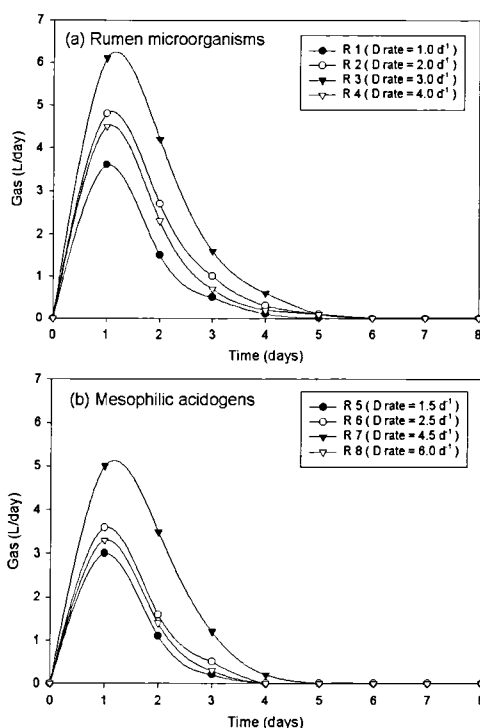
Parameters	Rumen microorganisms	Mesophilic acidogens
pH	6.4	5.7
Alkalinity (g/L as CaCO ₃)	4.3	2.7
VSS/TSS	0.61	0.62

[Table 3] Experimental Conditions

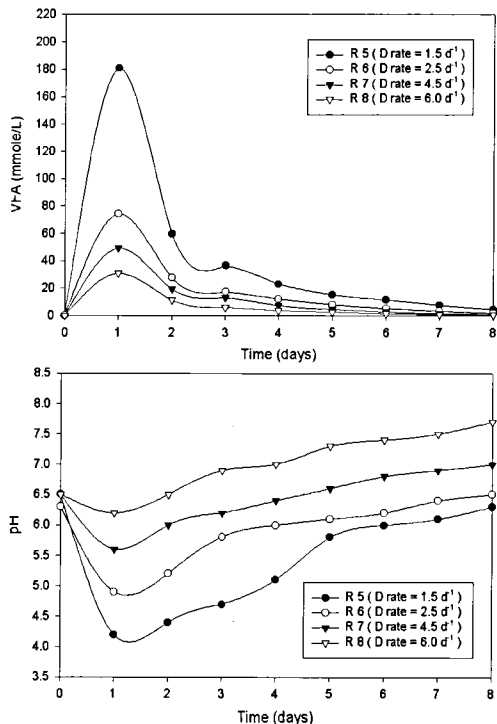
Parameters	Rumen microorganisms				Mesophilic acidogens			
Reactor	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Dilution rate (d ⁻¹)	1.0	2.0	3.0	4.0	1.5	2.5	4.5	6.0



(Fig. 2) Variation of VFA and pH during acidogenic fermentation employing rumen microorganisms.



(Fig. 4) Variation of gas production during acidogenic fermentation depending on inocula.



(Fig. 3) Variation of VFA and pH during acidogenic fermentation employing mesophilic acidogens.

3.2 가스발생

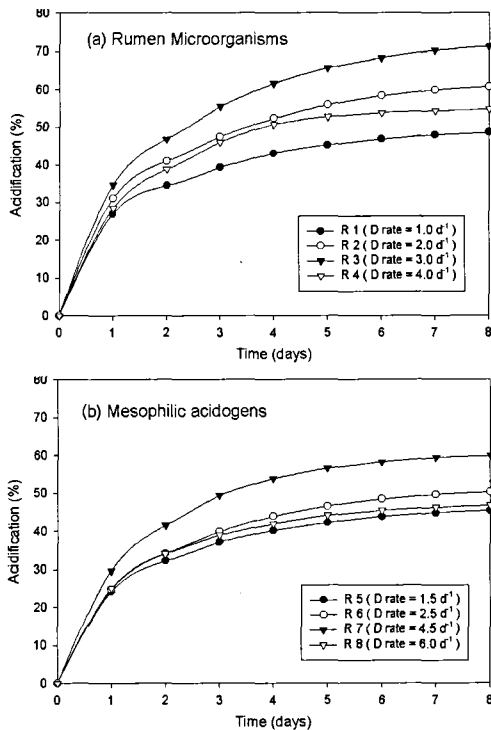
(Fig. 4)는 각 식중균에 따른 산발효조의 가스발생 변화를 보여주고 있다. 가스발생은 루멘미생물의 경우 R3에서 중온 산발효균의 경우 R7에서 가장 큰 값을 보여주었는데, 이것은 희석율 3.0과 4.5 d⁻¹에서 각 식중균의 활성이 가장 활발함을 보여주는 것이다. 한편, 발생된 가스의 조성은 모든 반응조에서 운전기간 내내 이산화탄소가 96% 이상 기록되었으며, 그 나머지는 질소가 차지하였다.

3.3 산발효 효율

산발효 효율은 기질의 이론적인 유기산 발생량에 대한 실제 유기산 발생량의 비로서 평가되었다.

$$\text{acidification}(\%) = \frac{VFA_p}{VFA_t} \times 100 \text{ ---- (i)}$$

여기서 VFA_t는 기질의 이론적인 유기산 발생량(g COD), VFA_p는 임의의 산발효 시간에 발생한 실제 유기산의 양(g COD)을 나타낸다.



(Fig. 5) Efficiencies of acidogenic fermentation depending on inocula.

실험에 사용된 음식물쓰레기의 이론적인 유기산 발생량(VFA_i)은 208.1 g COD이며, 운전 8일째까지 발생한 각각의 실제 유기산 발생량(VFA_p)은 루멘미생물의 경우 101.1(R1; 1.0 d⁻¹), 126.3(R2; 2.0 d⁻¹), 148.1(R3; 3.0 d⁻¹), 113.7 g COD(R4; 4.0 d⁻¹)이며, 중온 산발효균의 경우는 94.5(R5; 1.5 d⁻¹), 104.6(R6; 2.5 d⁻¹), 124.5(R7; 4.5 d⁻¹), 97.2 g COD(R8; 6.0 d⁻¹)이었다. 식 (i)에 의해서 얻어진 최대 산발효 효율은 (Fig. 5)에서 보는 바와 같이, 루멘 미생물의 경우는 희석율 3.0 d⁻¹(R3)에서 71.2%, 중온 산발효균의 경우는 희석율 4.5 d⁻¹(R7)에서 59.8%였다. 이것은 루멘미생물이 기존의 산발효균보다 음식물쓰레기의 분해능력이 뛰어난을 보여준다.

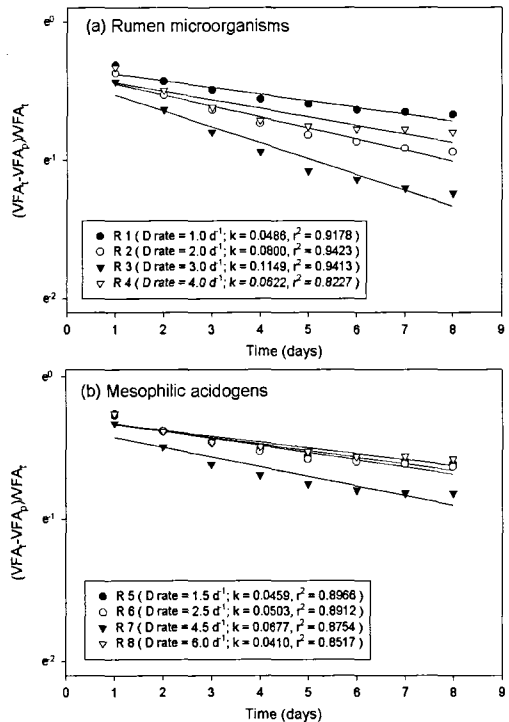
3.4 속도상수

미생물이 기질을 분해함에 있어서, 미생물의 성장이 아닌 기질의 이용이 율속으로 작용할 때, 그 분해작용은 1차식에 의해서 나타내어질 수 있다⁽⁴⁾.

$$\frac{VFA_p - VAA_p}{VFA_t} = \exp(-kt) \text{ ----- (ii)}$$

여기서 VFA_t는 기질의 이론적인 유기산 발생량(g COD), VFA_p는 임의의 산발효 시간에 발생한 실제 유기산의 양(g COD)을 말하며, t는 산발효 시간 day를 나타낸다.

식 (ii)에 의해서 얻어진 R3와 R7의 1차 속도상수(k)는 (Fig. 6)에서 보이는 바와 같이 각각 0.1149와 0.0677 d⁻¹이었으며, 이 또한 루멘 미생물의 우수한 분해능력을 보여준다.



(Fig. 6) First order rate constants of acidogenic fermentation depending on inocula.

4. 결론

음식물쓰레기의 산발효시 식종균의 영향을 살펴본 것으로, 그 결론은 다음과 같다.

1. Leaching bed 반응조에 루멘 미생물을 식종하여 음식물쓰레기를 처리한 경우, 희석율 3.0 d⁻¹에서 최대 효율 71.2%의 값을 얻을 수 있었고, 이때의 1차 속도상수 값은 0.1149 d⁻¹이었다. 반면, 중온 산발효균을 식종한 경우에는 희석율 4.5 d⁻¹에서 최대 59.8%의 효율을 얻었으며, 1차 속도상수 값은 0.0677 d⁻¹이었다.

2. 루멘미생물은 중온 산발효균에 비해 뛰어난 음식물쓰레기 분해능력을 보여주었으며, 이는 기질의 생분해도와 식중균의 분해능력에 관련된 발효제한요소가 효과적으로 극복되었음을 보여주는 것이다.

3. 우리나라의 음식물쓰레기는 셀룰로우스 성분이 많은 야채류의 비율이 크기 때문에, 이의 활성이 뛰어난 루멘미생물의 이용은 음식물쓰레기의 처리에 효율과 경제성 면에서 매우 효과적인 대안이 될 수 있음을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 산학협력연구(No.95-1-13-01-01-3)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. MOE, "Homepage of Ministry of Environment (<http://www.me.go.kr>)", (2000).
2. Pohland, F. G., and Ghosh, S. "Developments in anaerobic treatment processes. Biological Waste Treatment (Biotech. Bioeng. Symp. No. 2)", New York: Interscience Publishers, pp.85-106(1971).
3. Kirk, T. K., and Moore, W. E. "Removing lignin from wood with white-rot fungi and digestibility of resulting wood", Wood Fiber 4, pp.72-79(1972).
4. Han, Y. W., Pence, J. W., and Anderson, P. W. "Dioxane pretreatment to improve microbial digestability of cellulosic fibres", Appl. Microbiol. 29, pp.708-709(1975).
5. Millet, M. A., Baker, A. J., and Satter, L. D. "Pretreatments to enhance chemical, enzymic and microbiological attack of cellulosic materials", Biotechnol. Bioeng. Symp. 5, pp.193-219(1975).
6. Oi, S., Tanaka, T., and Yamamoto, T. "Methane fermentation to coffee grounds

and some factors to improve the fermentation. Agric. Biol. Chem. 45, pp.871-878(1981).

7. Gijzen, H. J., Zwart, K. B., van Gelder, P. T., and Vogels, G. D. "Continuous cultivation of rumen microorganisms, a system with possible application to the anaerobic degradation of lignocellulosic waste materials. Appl. Microbiol. Biotechnol. 25, pp.155-162(1986).
8. Gijzen, H. J. "Anaerobic digestion of cellulosic waste by a rumen derived process", Ph D Thesis, Univ. of Nijmegen(The Netherlands) (1987).
9. Song, Y. C. "High-rate methane fermentation of the organic solid waste", Ph D Thesis, Dept. of Civil Engineering, KAIST (1995).
10. Shin, H. S., and Han, S. K. "Anaerobic digestion of food waste", Proc. International Symp. of Bio-recycling/composting in Sapporo. Japan, pp.(V-2) 1-20(1999).
11. Taya, M., Ohmiya, K., Kobayashi, T., and Shimizu, S. "Enhancement of cellulose digestion by mutants from an anaerobe, Ruminococcus albus", J. Ferment. Technol. 61, pp.197-199(1983).
12. APHA, "Standard methods for the examination of water and wastewater", 18th Ed., Amer. Public Health Assoc., Washington, D. C., U.S.A.(1992).
13. Zoetemeyer, R. J., Matthijsen, A. J. C. M., Cohen, A., and Boelhouwer, C., "Product inhibition in the acid forming stage of the anaerobic digestion process", Wat. Res. 16, pp.633-639(1982).
14. Llabres-Luengo, P., and Mata-Alvarez, J. "Kinetic study of the anaerobic digestion of straw-pig manure mixture", Biomass 14, pp.129-142(1987). ☒