

음폐수 산발효 조건에 따른 바이오가스 생산량에 관한 연구

문광석 · 박대원[†]

서울과학기술대학교 에너지환경대학원

(2015년 6월 29일 접수, 2015년 10월 30일 수정, 2015년 11월 3일 채택)

A Study on Biogas Yield According to Food Waste Leachate Acid Fermentation Conditions

Kwangseok Moon, Jaehyung Kim, Daewon Pak[†]

Graduate School of energy and Environment, Seoul National University of Technology & Science, Seoul 139-743, Korea

(Received 29 June 2015, Revised 30 October 2015, Accepted 3 November 2015)

요 약

본 연구에서는 음식물류 폐기물 폐수(이하, 음폐수)를 이용하여 혐기성발효 시 부산물로 생성되는 메탄가스의 생산효율을 높이고자 산발효 전처리를 수행하였으며 전처리된 음폐수를 이용하여 BMP 실험을 통해 메탄생산량 증대를 위한 산발효 최적조건을 확인하고자 하였다. 산발효된 음폐수를 이용하여 BMP 실험을 진행한 결과 HRT 3일 조건에서 0.220 L/g VS의 가장 높은 메탄생산량을 확인하였으며, 초기 pH별 BMP 실험에서는 pH 6에서 19,920 mg/L로 가장 높은 VFA와 Acetic acid/TVFA(76.2%)를 보였다. 이때 메탄생산은 약 10일 이내로 대부분 생산되어 일반적인 메탄발효(30일 이내)에 비해 약 1/3수준으로 단축됨을 확인하였다. 메탄생성량은 0.294 L/g VS로 대조군 대비 약 1.3배 높은 효율을 나타내었다.

주요어 : 음폐수, 산발효, 메탄, 전처리

Abstract - This study performed acid fermentation pre-treatment to improve production efficiency of methane that is produced as a product in case of anaerobic fermentation by using food waste leachate, and attempted to confirm the acid fermentation optimum through the BMP test by using pre-treated food waste leachate to increase the yield of methane. As a result of the BMP experiment by using acid fermented food waste leachate, the highest yield of methane of 0.220 L/g VS was confirmed in the HRT three-day condition, and in the initial BMP test by pH, pH 6 was 19,920 mg/L that the highest VFA and acetic acid/TVFA(76.2%) were shown. At this time, it was confirmed that the yield of methane was mostly within 10 days that was reduced to around one-third compared to the general methane fermentation (within 30 days). As the yield of methane was 0.294 L/g VS, it showed a high efficiency of around 1.3 times compared to the control group.

Key words : Food waste leachate, Acidogenesis, Methane, Pre-treatment

[†]To whom corresponding should be addressed.

Professor, Department of Environmental Energy Engineering,
The Graduate School of Energy and Environment,
Seoul National University of Science and Technology
Tel : 02-970-6595 E-mail : daewon@seoultech.ac.kr

1. 서론

음식물류 폐기물 처리시설에서 자원화 시 발생하는 폐수인 음폐수는 2005년 음식물류 폐기물 직매립 금지조치로 인해 퇴비화 및 사료화 등 자원화율이 높아지면서 증가추세에 있다[1]. 이를 육상처리하기에는 기술적으로나 비용적인 측면에서 많은 어려움이 따라 상대적으로 처리가 간단한 해양배출을 선호하여 왔으나 폐기물 해양배출 규제에 관한 국제적 런던협약과 해양생태계에 미치는 영향을 고려하여 국토해양부 및 환경부에서는 해양으로 배출되는 음폐수를 에너지화 및 폐수처리시설 등을 통해 전량 육상처리로 전환시키고 있다[2, 3].

음폐수는 공공하수처리시설 및 소각시설 등 환경기초시설의 증설 및 처리 시설 개선을 통한 병합처리, 음폐수 자원화시설 설치 및 운영, 바이오가스 연료화 시설 설치 운영 등의 방안이 대안이 되고 있다. 대부분의 지자체에서는 음폐수 육상처리를 위한 자체 처리시설을 운영 또는 하수처리장 및 매립지 침출수처리시설과의 연계처리를 시도하고 있으나, 방류수 수질 기준 충족 어려움과 시설 투자 및 처리 비용의 증가로 인해 어려움을 겪고 있다.

국내 음폐수 처리방법(2011년 기준)을 나타낸 Fig. 1을 보면 전국 지자체별로 광역시 중 발생량이 많은 곳은 부산(934.9 톤/일), 서울(726.8 톤/일) 순, 각 시·도의 경우 경기(2,285.8 톤/일), 경남(629.3 톤/일) 순으로 음폐수가 발생한 것으로 확인되었다. 전국 대부분의 지자체들은 하수처리장(72.5%)를 이용하고 있으며, 바이오가스 등 기타처리(13.3%), 자가처리(6.2%), 폐수처리장(3.8%), 침출수처리장(0.7%)의

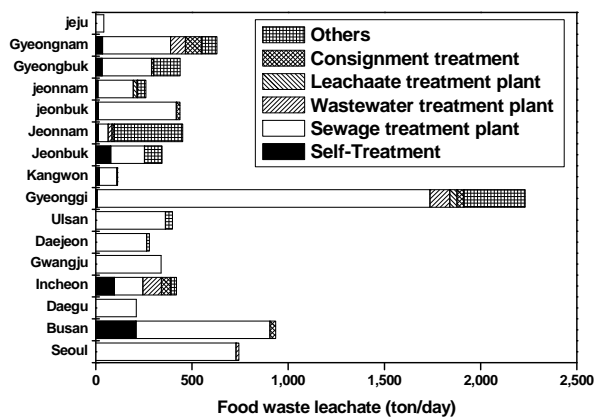


Figure 1. Status of food waste leachate in Korea

순으로 처리되고 있다.[4] 그중 경기도는 전체의 27.5%를 발생하고 있으며 특히, 바이오가스처리를 약 14.0%로 하수처리장(75.7%) 연계방법 다음으로 많은 양을 처리를 하고 있다.

바이오가스화는 혐기성소화처리라고도 불리우는 전통적인 기술로 미생물을 이용하여 하수슬러지, 음식물류폐기물, 축산분뇨 등의 유기성폐기물을 처리하는 공법으로서 폐기물의 저감과 동시에 연료로서 사용할 수 있는 바이오가스를 얻을 수 있다[5]. 이러한 장점으로 신재생에너지가 대두되기 시작하면서 EU, 일본, 미국 등 선진국들은 유기성폐기물의 혐기성 소화처리를 통한 바이오가스 생성에 큰 관심을 가지고 있다.

메탄을 주 부산물로서 생산하는 바이오가스화는 가수분해(hydrolysis), 산생성(acidogenesis), 초산생성(acetogenesis), 메탄생성(methanogenesis)단계로 구성되며 각 단계가 복합적형태를 띄며 미생물이 유기물을 순차적으로 분해하여 메탄을 생산하는 공정이다. 그중 가수분해 단계는 율속단계(Rate limiting step)로 보고 되어 최근에는 유기성폐기물의 전처리를 통한 가수분해 속도 개선을 향상시키기 위한 다양한 전처리 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[6-11]. 이렇듯 유기성폐기물을 대상으로 바이오가스화 연구의 대부분은 슬러지를 대상으로 전처리 방법에 대해 많은 연구들이 진행되어 오고있으나, 음폐수는 우리나라 고유의 식문화와 더불어 음식물류폐기물을 모아서 처리함에 따라 발생함에 따라 국외 사례는 전무한 실정에 있다. 우리나라 연구진들에 의해서도 많은 연구들이 진행되어 오고는 있으나 음폐수는 대부분 하수슬러지와 연계처리를 통한 방법들이 주를 차지하고 있어 [12-19], 고농도 유기성분을 포함한 음폐수 단독처리에 의한 연구는 미비한 실정에 있다.

이에 본 연구에서는 폐자원 바이오가스화 연구의 일환으로 기질로써 음폐수를 사용하였으며 이를 산발효 조건에 따른 처리로 BMP(Biochemical methane potential) 실험을 통한 메탄생산량을 확인하여 바이오가스 생산량 증대를 위한 음폐수 산발효 최적조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2-1. 실험재료

음폐수는 S시 D구음식물중간처리장에서 음식물류 폐기물 자원화 시 분리 및 탈수하는 과정 중 발생하는

폐수를 채취하여 사용하였고, 산발효 식종균과 메탄발효 식종균은 S시 물재생센터에서 채취한 혐기성소화슬러지를 이용하였다.

2-2. 실험방법

(1) 음폐수 희석비율에 따른 메탄생성

음폐수 희석비율에 따른 메탄생성 실험은 채취한 음폐수를 직접 이용하였고, 희석수로는 증류수를 이용하였다. 반응기는 세럼병을 이용하였고 유효부피 100 mL 중 식종균 10%(V/V)에 음폐수와 희석수를 각각 (1:1, 1:2, 1:3, 1:4(V/V))로 혼합된 시료를 유효부피의 90%를 채워 세럼병을 질소치환 후 혼합배양기를 이용하여 35℃로 실험을 진행하였다.

(2) 산발효 처리시간 및 pH에 따른 메탄생성

음폐수 산발효는 총부피 유효부피 5 L의 아크릴제 질로 제작된 반응기를 이용하였으며 실험초기 혐기성 소화슬러지로 반응기를 유효부피만큼 채운 후 음폐수를 산발효 처리시간별 실험은 체류시간을 2 ~ 5일에 맞게 정량펌프를 이용하여 반응기에 연속적으로 주입하였으며, pH별 실험은 음폐수를 3N-NaOH와 3N-HCl을 이용하여 pH 조정 후 반응기에 주입하여 진행하였다. 산발효가 완료된 음폐수는 세럼병을 이용하여 유효부피 100 mL 중 식종균 10%로 하여 35℃로 조정된 혼합배양기를 이용하여 BMP 테스트를 수행하였다.

2-4. 분석방법

음폐수 및 모든 시료들은 실험 전 후를 기준으로 각 항목들을 분석하였다. TS, VS, SS, VSS, SCODcr, TCODcr은 모두 standard methods[20]를 기준으로 시행하였으며, pH는 pH미터(UB-5, Denver instrument, USA), Volatile fatty acids(VFAs)는 flame ionization detector(FID) 검출기가 장착된 Gas Chromatography (Acme 6000 series, Younglin, Korea)를 이용하여 분

석하였다. 이때 컬럼은 Innowax (30 m × 0.25 mm × 0.25 μ m)를 사용하였으며, 오븐온도는 40℃에서 10분간 유지 후 210℃까지 20℃/min으로 승온 후 최종 온도에서 2분간 유지하였다. 주입구 및 검출부의 온도는 각각 220℃, 250℃로 설정하였다. 운반기체로는 헬륨가스를 이용하였다. VFAs 중 측정항목은 acetic acid, propionic acid, butyric acid, Iso-butyric acid, valeric acid 등을 대상으로 하였으며, VFAs의 정량을 위해 표준물질(Volatile free acid mix, Sigma-Aldrich)을 사용하였다. BMP 테스트에서 생산된 가스성상분석은 열전도도검출기(Thermal conductivity detector, TCD)가 장착된 가스크로마토그래피를 이용하였다. 분석조건은 주입구와 검출기 온도를 각각 210℃와 220℃, 오븐온도는 35℃ - 210℃ (20℃/min), 운반기체로는 아르곤(30 mL/min)을 이용하였다. 분석된 배출가스 성상별 농도와 가스배출량으로 메탄생산량을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 음폐수 희석비율에 따른 메탄생성

본 연구에서는 음폐수 희석처리를 통해 유기물 주입농도에 따른 메탄생산량을 확인하고자 하였으며, 이를 위한 BMP 실험결과를 Table. 1에 나타내었다.

음폐수 원수를 직접 이용한 샘플에서는 0.01±0.01 L/g VS로 매우 낮은 메탄가스 생산량을 확인하였으나, 일정량의 희석수를 주입한 시료에서는 1:1(0.12 L/g VS), 1:2(0.23 L/g VS), 1:3(0.25 L/g VS), 1:4(0.28 L/g VS)로 희석비율이 높을수록 메탄가스 발생량이 높아짐을 확인하였다. 음폐수는 높은 탄소원을 함유하고 있어[21, 22], 높은 유기물 부하량과 현장적용 문제로 전처리 또는 병합처리(희석)가 필요한 것으로 알려져 있다[23]. 본 연구결과에서는 음폐수를 직접 이용한 시료가 약 80 g/L VS로 메탄생성균의 저해조건으로 알려진 OLR(organic loading rate)과 유사하여 매우 낮은

Table 1. Methane production rate in accordance with mixed ratio of FWL & DW (FWL; Food waste leachate, DW; Diluted water)

| Ratio of FWL & DW | 1:0 | 1:1 | 1:2 | 1:3 | 1:4 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| CH4 production (L/g VSinitial) | 0.01±0.01 | 0.12±0.06 | 0.23±0.03 | 0.25±0.01 | 0.28±0.01 |
| VSinitial (mg/L) | 80,550 | 40,280 | 26,970 | 21,150 | 15,950 |
| Salinityinitial (%) | 0.45 | 0.23 | 0.15 | 0.11 | 0.09 |

효율을 보인 것으로 사료되며[24], 이와는 대조적으로 음폐수를 1:2 이상으로 희석한 샘플들은 약 40 g/ L VS 이하인 적정수준의 유기물부하로 인해 메탄생산이 원활하게 이루어진 것을 확인하였다. 이를 통해 음폐수를 이용한 메탄발효 시 희석과 같은 전처리 적용 시 메탄생산 효율이 증대됨을 확인할 수 있었다.

먼저 음폐수를 주입 시 유기물 함량에 의한 메탄가스 생산량을 확인하고자 전처리 되지 않은 음폐수를 이용하여 BMP test로 메탄가스 발생량 증가 가능성을 확인하였다.

실험은 전처리되지 않은 음폐수와 더불어 희석수와 의 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (V/V) 혼합된 시료로 BMP test를 진행하여 30일간 가스생산량과 가스성분을 확인하였다. 그 결과, 이로 인해 음폐수 원액을 혐기성소화(매립지내 메탄생산 메커니즘)에 적용하는 것은 메탄생성균에 해를 주므로 주입농도의 희석 또는 전처리가 선행되어야 하는 것으로 확인되었다.

3.2. 전처리시간에 따른 메탄발생량

음폐수 산발효 최적 pH를 도출하기 위해 산발효 시 HRT(Hydraulic retention time)에 따른 메탄생산량을 확인하기 위해 대조군과 함께 HRT를 3일 ~ 5일까지 각각 달리하여 산발효된 시료로 BMP 실험을 진행하였으며 결과를 Fig. 2에 나타내었다. BMP 테스트 결과, 산발효 전처리를 적용하지 않은 시료에서는 메탄생성이 없었으며 산발효 전처리시간 별로 HRT 2일 (0.190 L/g VS), HRT 3일(0.220 L/g VS), HRT 4일

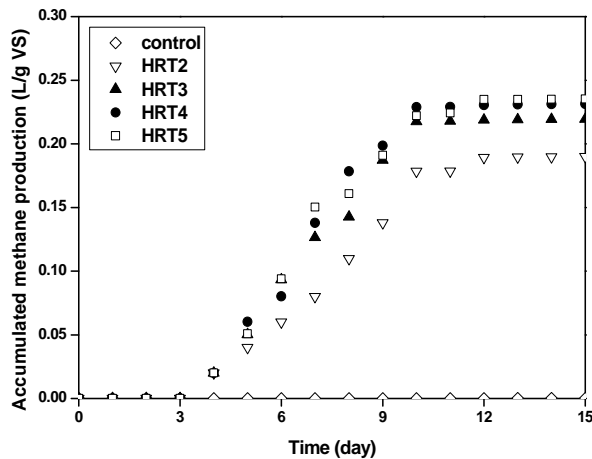


Figure 2. Accumulated methane production rate according to hydraulic retention time at the BMP test

(0.231 L/g VS), HRT 5일(0.235 L/g VS)의 메탄생산량을 확인할 수 있었다. 산발효를 적용하지 않은 시료에서는 메탄이 생성이 없는 것은 앞선 음폐수 희석에 따른 연구결과와 같이 높은 유기물함량 때문인 것으로 확인된다. 또한, 산발효 처리된 시료를 이용한 메탄생산 결과는 희석처리 연구보다 높은 메탄생산을 보였는데, 이는 음폐수가 포함하고 있는 Protein, Lipids, Carbohydrate 등의 고농도의 유기물질이 산발효 처리에 의해 VFA(Volatile fatty acid)와 같은 저분자 물질로 전환되어 메탄발효균주가 기질로써 이용이 용이하게 됨에 따른 것으로 사료된다.

HRT별 메탄생산량은 HRT 2일 이후의 실험결과들에서는 큰 차이를 보이지 않았으며 경제성 및 공정운전 효율측면을 고려해 본다면 음폐수 산발효 시 체류시간 조건은 HRT를 3일로 처리하는 것이 메탄생산량을 높일 수 있는 것으로 나타났다.

3.3. 초기 pH별 메탄가스 생산량

음폐수 산발효 최적 pH를 도출하기 위해 산발효 시 초기 pH에 따른 메탄생산량을 확인하기 위해 대조군과 pH를 5 ~ 8까지 각각 달리하여 산발효(HRT 3일)된 시료로 BMP 실험을 진행하였으며 결과를 Fig. 3와 Fig. 4에 나타내었다. BMP 테스트 후 VFA 분석결과 (Fig. 3), pH를 조정하지 않은 대조군은 초기 pH가 약 4였으며 실험종료 후 TVFA는 12,478 mg/L이었으며, pH를 각각 조정한 시료에서는 pH 5(17,636 mg/L), pH 6(19,920 mg/L), pH 7(14,233 mg/L), pH 8(16,860 mg/L)의 TVFA 생산량을 확인할 수 있었다. 특히, pH

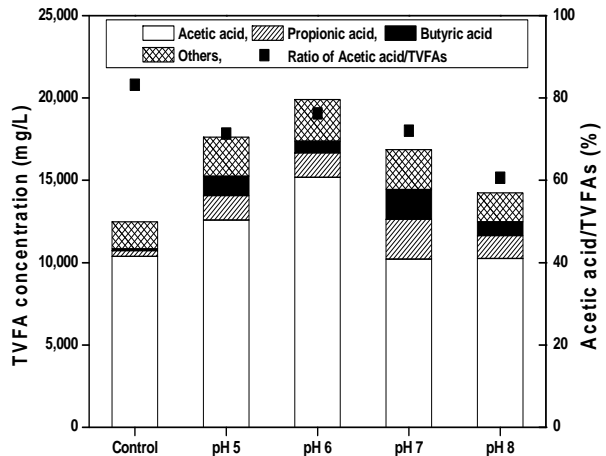


Figure 3. TVFA concentration and Ratio of Acetic acid and TVFA according to initial pH at the BMP test

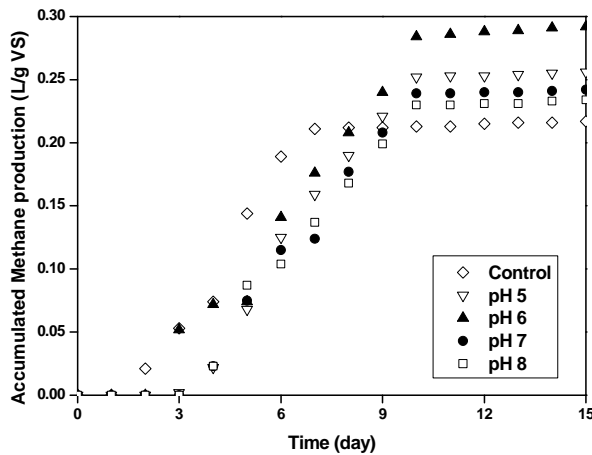


Figure 4. Accumulated methane production rate according to initial pH at the BMP test

6을 초기 pH로 조정된 시료에서 가장 높은 TVFA를 생산하였으며, 이때 TVFA 대비 Acetic acid의 비율은 76,24%로 높은 수치를 나타내었다. Yu L 등에 의해 메탄발효 시 VFA와 메탄생산량이 비례한다고 알려져 있으며[25], Stephen은 VFA 중 Acetic acid의 비율이 높을수록 기질을 최종생산물로 전환하는 효율이 높다고 보고하였다[26]. 본 연구결과에서는 음폐수 산발효 시 초기 pH 6의 실험에서 가장 높은 VFA생산량과 Acetic acid 비율을 보였다.

초기 pH별 산발효된 음폐수를 이용한 메탄생산결과(Fig. 2), 약 3일 후부터 메탄생산이 시작되었고 약 6~9일까지 메탄생산이 급격하게 진행되었으며 이후부터는 생산량이 다소 낮은 경향으로 모든 시료에서 유사한 메탄생산 속도를 나타내었다. 메탄생산량은 대조군에서 0.218 L/g VS, pH 5 ~ 8까지 각각 0.258, 0.294, 0.243, 0.235 L/g VS를 보였다. 특히, 산발효 초기 pH를 6으로 조정된 시료에서 가장 높은 메탄생산량을 보였다. 이는 앞선 TVFA 실험과 같은 결과로 음폐수 산발효 시 적정 pH에 의해 음폐수의 고농도 유기물이 저분자화 됨에 따라 메탄발효균에 의한 기질 이용성이 높아진데에 기인한 결과로 볼 수 있다.

또한, 일반적인 메탄발효 시 HRT(Hydraulic Retention Time)는 20~30일 내외인데 반해 본 실험결과에서는 약 10일 이내에 메탄생산이 완료된 것을 확인할 수 있었다. 이는 메탄생산단계 중 율속단계로 알려진 가수분해 단계가 음폐수의 산발효에서 대부분 진행됨에 따라 이후 본 실험인 메탄생성 단계가 짧아진 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 음식물류 폐기물의 처리시설에서 자원화처리 단계에서 발생하는 음식물류폐기물 폐수(이하, 음폐수)를 이용하여 생물학적 전환반응을 통해 에너지원을 생산하고자 하였으며, 이를 위해 음폐수에 산발효 전처리를 적용하여 메탄생산량을 확인한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 음폐수 희석 처리를 통해 메탄생산량을 확인한 결과 음폐수 원수를 직접 이용한 샘플에서는 0.01 ± 0.01 L/g VS로 매우 낮은 메탄가스 생산량을 확인하였으나, 일정량의 희석수를 주입한 시료에서는 1:1(0.12 L/g VS), 1:2(0.23 L/g VS), 1:3(0.25 L/g VS), 1:4(0.28 L/g VS)로 희석비율이 높을수록 메탄가스 발생량이 높아짐을 확인할 수 있었다. 이는 음폐수가 함유하고 있는 높은 유기물농도에 기인한 것으로 예상된다.
2. 음폐수 산발효 시 체류시간에 따른 메탄생산량을 확인한 결과, 산발효 전처리를 적용하지 않은 시료에서는 메탄생성이 없었으며 HRT 2일(0.190 L/g VS), HRT 3일(0.220 L/g VS), HRT 4일(0.231 L/g VS), HRT 5일(0.235 L/g VS)의 메탄생산량을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 경제성과 공정효율성을 고려한 음폐수 산발효 체류시간 최적조건은 3일 인 것으로 확인되었다.
3. 음폐수 산발효 시 초기 pH에 따른 메탄생산량을 확인한 결과, pH 6에서 처리한 시료에서 가장 높은 TVFA 생산량과 Acetic acid 비율을 확인하였으며, 이때 메탄생산량은 0.294, L/g VS로 대조군 대비 약 1.3배 높은 생산량을 나타내었다.

이상의 결과로 메탄생산량 증대를 위한 음폐수 산발효 처리는 HRT 3일, 초기 pH 6 조건에서 가장 좋은 효율을 보였다.

References

1. 음식물류 폐기물 관리정책 방향 및 개선방향 연구, 환경부, 2012.
2. 대구시 음식물류폐기물 발생폐수 적정 처리방안, 대구경북연구원, 2010.

3. 음식물류 폐기물 처리시설 발생폐수 육상처리 및 에너지화 종합대책, 환경부, 2007.
4. 2013년 음식물류 폐기물 처리시설 설치·운영 현황, 환경부, 2014.
5. Kelleher, B. P., J. J. Leahy, A. M. Henihan, T. F. O'Dwyer, D. Sutton, and M. J. Leahy. 2000. Advances in poultry litter disposal technology - a review. *Bioresour. Technol.* 83: 27-36.
6. H. Carrère, C. Dumas, A. Battimelli, D. J. Baststone, J. P. Delgenès, J. P. Steyer, I. Ferrer, "Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review", *Journal of Hazardous materials*, **183**, 2000, 1-15.
7. M. R. Salsabil, A. Prorot, M. Casellas, C. Dagot, "Pre-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerobic digestibility", *Chem. Eng. J.*, **148**, 2009, 327-335.
8. H. Li, Y. Y. Jin, R. B. Mahar, Z. Y. Wang, Y. F. Nie, "Effects of ultrasonic disintegration on sludge microbial activity and dewaterability", *J. Hazard. Mater.*, **161**, 2009, 1421-1426.
9. M. Dohanyos, J. Zabranska, J. Kutil, P. Jenicek, "Improvement of anaerobic digestion of sludge", *Water Sci. Technol.*, **49**, 2004, 89-96.
10. C. Fjordside, "An operating tale from Næstved Sewage Treatment Plant", in: Municipal wastewater treatment Nordic Conference, Copenhagen (Denmark), 2001
11. X. Yang, X. Wang, L. Wang, "Transferring of components and energy output in industrial sewage sludge disposal by thermal pretreatment and two-phase anaerobic process", *Bioresour. Technol.*, **101**, 2010, 2580-2584.
12. D. H. Lee, S. K. Behera, J. W. Kim, H. S. Park, "Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab-scale study", *Waste Manag.*, **29**, 2009, 876-882.
13. M. J. Han, S. K. Behera, H. S. Park, "Anaerobic co-digestion of food waste leachate and pigery wastewater for methane production: statistical optimization of key process parameters, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **87**, 2012, 1541-1550.
14. S. K. Cho, W. T. Im, D. H. Kim, M. H. Kim, H. S. Shin, S. E. Oh, "Dry anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: performance and methanogenic community analysis", *Bioresour. Technol.*, **131**, 2013, 210-217.
15. H. S. Shin, S. K. Han, Y. C. Song, C. Y. Lee, "Performance of UASB reactor treating leachate from acidogenic fermenter in the two-phase anaerobic digestion of food waste", *Water Res.*, **35**, 2001, 3441-3447.
16. S. G. Shin, G. Han, J. Lim, C. Lee, S. Hwang, "A comprehensive microbial insight into two-stage anaerobic digestion of food waste-recycling wastewater", *Water Res.*, **44**, 2010, 4838-4849.
17. J. Y. Wang, H. L. Xu, J. H. Tay, "A hybrid two-phase system for anaerobic digestion of food waste", *Water Sci Technol.*, **45**, 2002, 159-165.
18. C. Lee, J. Kim, S.G. Shin, V. O'Flaherty, S. Hwang, "Quantitative and qualitative transitions of methanogen community structure during the batch anaerobic digestion of cheese-processing wastewater", *Appl Microbiol Biotechnol.*, **87**, 2010, 1963-1973.
19. C-F. Chu, Y. Ebie, K-Q. Xu, Y-Y. Li, Y. Inamori, "Characterization of microbial community in the two-stage process for hydrogen and methane production from food waste", *Int J Hydrogen Energy*, **35**, 2010, 8253-8261.
20. APHA, AWWA and WEF : Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. Baltimore, American Public Health Association 2, 1998. 16. M. S.
21. 김동훈, 신항식, 오세은, "이단 혐기성 소화공정을 이용한 음폐수의 처리 및 바이오가스 생산", *한국폐기물학회지*, **25**(8), 2008, 716-722.
22. 박종웅, 최독혁, "음폐수를 탄소원으로 이용시 생분해 및 탈질특성에 미치는 영향", *한국도시환경학회지*, **11**(1), 2011, 41-48.
23. 김동훈, 신항식, 조시경, 박홍석, 윤석표, "음폐수 주입을 통한 생활폐기물 매립지의 메탄가스 발생량 증진에 관한 현장 실험", *한국폐기물자원순환학회지*, **27**(4), 2010, 331-338.
24. Verma S., "Anaerobic digestion of biodegradable

- organics in municipal solid wastes”, Master’s thesis, Applied Science Columbia University, New York, NY, USA; May, 2002.
25. Yu, L., Bule, M., Ma, J., Frear, C., Chen, S., “Enhancing volatile fatty acid (VFA) and bi-methane production from lawn grass with pretreatment”, *Bioresour. Technol.*, **162**, 2014, 243-249.
26. Stephen H. Z., “Conversion of acetic acid to methane by thermophiles”, *FEMS Microbiology Letters*, **75**, 1990, 125-137.