

유기성 폐기물의 혐기성 소화효율 향상을 위한 열가용화 하수슬러지의 통합소화

오경수^{1a} · 황정기^{1b} · 송영주^{1c} · 김민지² · 박준규³ · 박대원^{1d,*}

¹서울과학기술대학교 융합과학대학원 에너지 환경공학과, ²충북대학교 환경공학과, ³조선대학교 첨단에너지공학과

Integrated Digestion of Thermal Solubilized Sewage Sludge to Improve Anaerobic Digestion Efficiency of Organic Waste

Kyung Su Oh^{1a} · Jung Ki Hwang^{1b} · Young Ju Song^{1c} · Min Ji Kim² · Jun Gyu Park³ · Dae Won Pak^{1d,*}

¹Department of Environmental Energy Engineering Graduate School of Convergence Science,
Seoul National University of Science and Technology

²Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

³Department of Advanced Energy Engineering, Chosun University

(Received 18 November 2021, Revised 7 March 2022, Accepted 18 March 2022)

Abstract

Studies for improving the efficiency of the traditional anaerobic digestion process are being actively conducted. To improve anaerobic digestion efficiency, this study tried to derive the optimal pretreatment conditions and mixing conditions by integrating the heat solubilization pretreatment of sewage sludge, livestock manure, and food waste. The soluble chemical oxygen demand (SCOD) increase rate of sewage sludge before and after heat solubilization pretreatment showed an increased rate of 224.7% compared to the control group at 170°C and 25 min and showed the most stable increase rate. As a result of the biomethane potential test of sewage sludge before and after heat solubilization pretreatment, the total chemical oxygen demand (TCOD) and SCOD removal rates increased as the heat solubilization temperature increased, but did not increase further at temperatures above 170°C. In the case of methane generation, there was no significant change in the cumulative methane generation from 0.134 to 0.203 Sm³-CH₄/kg-COD at 170°C for 15 min. As a result of the integrated digestion of organic waste, the experimental condition in which 25% of the sewage sludge, 50% of the food waste, and 25% of the livestock manure were mixed showed the highest methane production of 0.3015 m³-CH₄/kg-COD, confirming that it was the optimal mixing ratio condition. In addition, under experimental conditions mixed with all three substrates, M4 conditions mixed with 25% sewage sludge, 50% food waste, and 25% livestock manure showed the highest methane generation at 0.2692 Sm³-CH₄/kg-COD.

Key words : Anaerobic Digestion, Food waste, Livestock manure, Organic waste, Sewage Sludge, Thermal Solubilized

^{1a} 박사과정(Ph.D. Student), oks3k@naver.com, https://orcid.org/0000-0003-3903-7508

^{1b} 박사과정(Ph.D. Student), jkjh0623@naver.com, https://orcid.org/0000-0001-7894-7067

^{1c} 박사과정(Ph.D. Student), loveju@nate.com, https://orcid.org/0000-0003-4487-241X

² 석사과정(Master's course), qhfhfwkd12@naver.com, https://orcid.org/0000-0003-0319-929X

³ 교수(Professor), jp@chosun.ac.kr, https://orcid.org/0000-0003-2290-6543

^{1d} Corresponding author, 교수(Professor), daewon@seoultech.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-8664-1946

1. Introduction

우리나라는 최근 폐기물 배출과 관련하여 런던 협약에 의한 유기성 폐기물의 해양투기 금지, 2018 자원순환기본법 시행 등으로 그 규제가 강화되고 있다. 이에 따라 유기성 폐기물의 처리를 위한 방법으로 매립과 소각 등 여러 가지 방법이 활용되고 있으나 매립과 소각 등의 방법으로 처리된 유기성 폐기물은 2차 환경오염을 발생시킨다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하여 유기성 폐기물을 재활용 및 에너지원으로 활용하고자 하는 연구가 주목받고 있으며 대표적인 방법으로 혐기성 소화를 통한 처리가 있다(ME, 2013).

혐기성 소화는 호기성 공정보다 에너지 소비량이 훨씬 적어 경제적인 이득이 있을 뿐 아니라 최종적으로 발생하는 슬러지의 양을 대폭 감소시킬 수 있으며, 처리 중 발생하는 소화 가스 중에는 에너지원으로써 사용 가능한 메탄가스가 다량 포함되어 신재생에너지 보급에도 기여할 수 있는 장점이 있다. 하지만 혐기성 소화 공정에도 몇 가지 운영상 문제점이 존재하는데, 첫째로 특정 기질을 단독으로 소화 시 효율이 급격히 낮아진다는 점이다. 가축분뇨는 기질 특성상 단독 소화 시 가스 발생 효율이 낮으며, 음식물류 폐기물은 유기물 부하 및 TS 함량 등이 높아 영양 불균형으로 인해 적정처리에 문제점을 가지고 있다. 두 번째 단점으로, 하수슬러지를 기질로 하는 국내 혐기성 소화 처리시설은 대부분 소화 효율이 약 20~40%로 적게 나타나고 있는데, 이는 높은 생분해도를 가진 1차 슬러지의 발생량은 적고 잉여슬러지의 비율이 상대적으로 높기 때문이다. 슬러지 내 세포벽이 단단한 세포벽에 의해 둘러싸여 혐기성 소화 시 가용화가 율속단계로 작용하는 것이 소화 효율을 전체적으로 떨어뜨리게 된다(Kim and Ju, 2012; Mata-Alvarez et al., 2002). 혐기성 소화 공정은 이외에도는 pH, 온도, 영양물질, 독성물질 등의 인자에 영향을 받으며 긴 수리학적 체류시간, 메탄생성균의 느린 성장속도 등의 문제로 인해 안정적인 운전이 쉽지 않다(Oh, 2018).

이러한 혐기성 소화의 고질적인 문제를 해결하기 위해 유기성 폐기물을 하나의 반응조에서 통합소화 하는 방법과 하수슬러지를 전처리하는 방법이 있다. 하수 슬러지를 음식물류폐기물, 가축분뇨와 같은 유기성 폐기물과 혼합하여 생분해 가능 유기물의 부하 증가, 유기물 내 독성물질의 희석, 영양물질의 균형을 이룰 수 있으며, 일반적인 슬러지 내 Carbon/Nitrogen 비율(C/N 비)인 6~16을 혐기성소화 최적 C/N비인 25~30으로 조절해 주는 효과도 있다(ME, 2014). 하수슬러지의 전처리 기술은 하수처리 공정에서 생성된 잉여슬러지 내의 미생물의 세포벽을 파괴하여 소화율을 높이는 방법으로 이는 미생물에 의한 가용화 단계에서의 느린 처리 속도를 개선하고, 소화 효율을 높여 바이오가스 발생량을 증가시키는 방법이다(Kim and Kim, 2010). 특히 열 가용화는 100°C 이상의 열과 압력을 주입하여 유기물질을 입자상에서 용해성으로 전환시키는 방식으로 고온, 고압 조건에서 유기성 폐기물을 이루는 고형 입자가 파괴되어 생분해도가 높은 액상 슬러리로 변환시켜 소화 효율이 증가되는데, 고분자 물질을 저분자 물질로 전환하는 반응으로 수분에 의해 반응이 일어난다

(Photiangka, 2008). 열가수분해는 공정원리가 간단하며 상대적으로 높은 감량화율, 메탄수율이 높은 장점이 있다.

본 연구에서는 하수슬러지의 최적 열 가용화 조건 도출 및 열 가용화된 하수슬러지와 유기성 폐기물의 최적 혼합 조건을 도출하고자 하였다. 온도, 반응시간에 대한 조건을 설정하여 열 가용화된 기질의 중크롬산칼륨($K_2Cr_2O_7$)에 의한 Soluble chemical oxygen demand (SCODCr) 변화량, 유기물 제거율, Biochemical methane potential (BMP) TEST 결과를 통해 최적 가용화조건을 도출하고 열 가용화된 하수슬러지와 유기성 폐기물의 혼합조건에 따른 BMP-TEST 결과와 최적의 혼합비별 메탄발생량을 측정하여 각 기질의 혼합처리 시 최대 메탄 발생량을 발생시킬 수 있는 혼합비를 산출하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 유기성폐기물의 성상

BMP test 및 열가용화 조건에 따른 메탄생성효율을 평가하기 위해 하수슬러지는 C 시 하수처리시설에서 발생한 슬러지를 이용하였고 음식물류폐기물은 동일 처리장 내 음식물류폐기물 자원화시설에서, 가축분뇨는 처리장 인근 가축사육 농가의 분뇨를 채취하였다.

채취한 시료의 고형물 및 이물질 제거하기 위해 2 mm sieve로 거른 후 실험을 진행하였으며, 각 기질의 주요성상은 다음의 표와 같다.

Table 1. Characteristics of the organic wastes

| | Classification(Unit) | Range | Average |
|------------------|----------------------|-----------------|---------------|
| Sewage sludge | pH | 7.14-7.39 | 7.29±0.12 |
| | TS(mg/L) | 22,411-28,435 | 25,614±1,015 |
| | VS(mg/L) | 15,662-18,498 | 16,840±512 |
| | TCODCr(mg/L) | 27,624-32,674 | 29,788±815 |
| | SCODCr(mg/L) | 765-1,776 | 1,151±42 |
| | VS/TS(%) | 0.54-0.63 | 0.58±0.10 |
| | TKN(mg/L) | 348-426 | 389±4 |
| Food waste | pH | 3.13-4.10 | 3.68±0.12 |
| | TS(mg/L) | 187,921-220,833 | 201,972±8,922 |
| | VS(mg/L) | 102,370-134,148 | 117,658±6,075 |
| | TCODCr(mg/L) | 163,679-202,612 | 181,512±5,629 |
| | SCODCr(mg/L) | 69,613-83,460 | 78,741±1,874 |
| | VS/TS(%) | 0.55-0.68 | 0.66±0.11 |
| Livestock manure | TKN(mg/L) | 1,271-1,571 | 1,457±64 |
| | pH | 7.01-7.39 | 7.15±0.12 |
| | TS(mg/L) | 48,230-55,386 | 53,971±1,014 |
| | VS(mg/L) | 24,643-29,122 | 26,174±947 |
| | TCODCr(mg/L) | 47,645-58,454 | 54,825±1,433 |
| | SCODCr(mg/L) | 40,973-51,486 | 44,671±2,962 |
| | VS/TS(%) | 0.48-0.52 | 0.50±0.06 |
| | TKN(mg/L) | 2,247-3,124 | 2,435±109 |

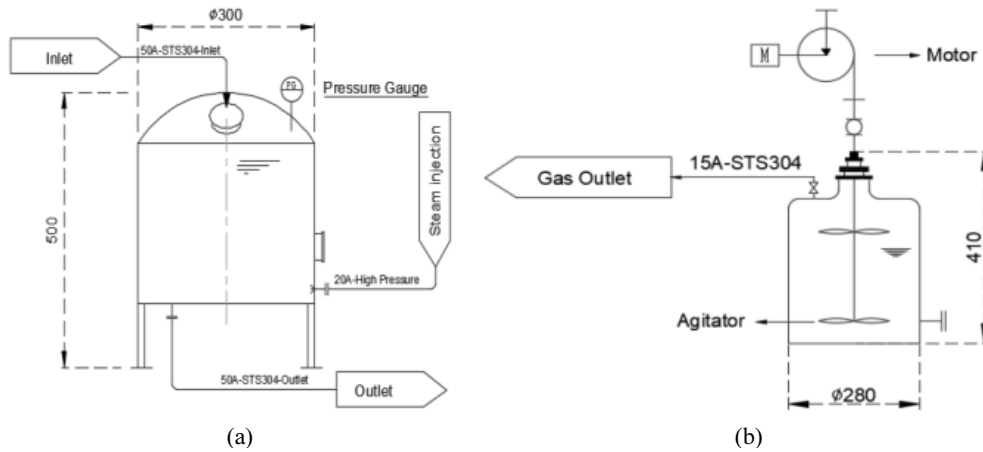


Fig. 1. Schematic diagram of thermal hydrolysis reactor (a) and anaerobic digestion reactor (b).

2.2 BMP Test 반응조 구성

본 연구에서는 하수슬러지의 최적 열 가용화 조건과 기질 혼합 조건을 분석하기 위해 열 가용화조와 혐기성 반응조를 제작하였으며, 다음의 Fig. 1 (a)에 제시된 열 가용화조의 구성으로 회분식 전처리 비교 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 열 가용화조는 STS304 재질의 유효용량 약 30 L(D300 × H500) 원통형 반응기로서, 반응기 상부에 슬러지 주입부 및 내부 정압을 확인할 수 있는 압력 게이지를 장착하였다. 반응기 하단에는 열 가용화된 하수슬러지를 유출시킬 유출부를 타공하고 별도 배관을 접합하였다.

Fig. 1(b)에 BMP Test에 사용된 혐기성 소화 반응조의 구성도를 나타내었다. 열 가용화조에서 유출된 하수슬러지를 혐기성 소화를 통해 메탄 발생량 및 생분해도를 측정하여 최적 열 가용화 조건을 파악하고자 하였다. 또한, 열 가용화된 하수슬러지와 음식물류 폐기물 및 가축분뇨를 혼합하여 통합소화를 통해 메탄 발생량을 비교하고자 하였다. 혐기성 소화 반응조의 구성은 STS304 재질로 유효 용량 약 15 L(D280 × H410)의 원통형 반응기를 제작하였으며 40 rpm의 교반 모터

를 장착하였고 반응기 상부에 바이오가스 포집을 위한 포집부를 구비하였다.

2.3 열 가용화조 및 운전조건

하수슬러지의 열 가용화 효율 분석을 위한 실험은 열 가용화 온도, 압력, 반응 시간을 변화시키며 실험하였으며 다음의 Table 2에 각 실험군에 대한 운전 조건을 나타내었다. 열 가용화 온도는 110°C부터 140°C, 170°C, 190°C까지 증가시키며 실험하였고 반응 시간은 15, 25, 35분, 압력은 각 5, 6, 7, 8 bar까지 증가시키며 실험하였다. 유기물 부하는 1.0 kg/m³·d-COD base에서 실험하였으며, 열 가용화 조건에 따른 TCOD, SCOD 및 Total solid (총고형물, TS), Volatile solid (휘발성 고형물, VS) 변화와 바이오가스 발생량을 통해 열 가용화 효율을 분석하였다. 반응조에서 최종적으로 발생된 바이오가스(CH₄, H₂, CO₂, H₂S 등)는 산성 포화염수가 채워진 가스포집기(Headspace: 20 L)에 포집 후 정량 분석을 수행하였다.

Table 2. Test operating conditions for deriving optimal thermal hydrolysis conditions

| Parameter | Press, bar | Time, min | Temp, °C |
|-----------|------------|-----------|----------|
| Blank | 1 | 15 | 25 |
| T1 | 5 | 15 | 110 |
| T2 | 5 | 25 | 110 |
| T3 | 5 | 35 | 110 |
| T4 | 6 | 15 | 140 |
| T5 | 6 | 25 | 140 |
| T6 | 6 | 35 | 140 |
| T7 | 7 | 15 | 170 |
| T8 | 7 | 25 | 170 |
| T9 | 7 | 35 | 170 |
| T10 | 8 | 15 | 190 |
| T11 | 8 | 25 | 190 |
| T12 | 8 | 35 | 190 |

Table 3. Substrate mixing ratio for deriving optimal integrated digestion conditions

| Run | Mixing ratio(% of substrate volume) | | |
|-----|-------------------------------------|------------|------------------|
| | Sewage sludge | Food waste | Livestock manure |
| M1 | 50 | 50 | - |
| M2 | - | 50 | 50 |
| M3 | 50 | 25 | 25 |
| M4 | 25 | 50 | 25 |
| M5 | 25 | 25 | 50 |
| M6 | 75 | 25 | - |
| M7 | 25 | 75 | - |
| M8 | - | 75 | 25 |
| M9 | - | 25 | 75 |

2.4 통합소화 운전조건

본 연구에서는 최적 조건에서 열 가용화된 하수슬러지와 전처리되지 않은 음식물류폐기물 및 가축분뇨 혼합비율의 합을 100%로 하여 혼합 조건을 설정하였다. 혼합비율은 기질별로 0%, 25%, 50%, 75%, 100%가 포함되는 경우의 수로 Table 3과 같이 총 9개의 실험군으로 BMT Test를 수행하였으며 발생하는 바이오가스를 포집해 메탄가스 발생량을 분석하였다.

2.5 분석 방법

TCODCr은 원심분리기(MF-80, Hanil, Korea, 3,000 rpm, 5 min)로 고액분리 후 상등액으로 측정하였으며, SCODCr를 비롯한 TS, VS 항목에 대해서는 고액분리 후 상등액을 1.2 µm GF/C(GF/CTM, Whatman, England)로 여과 후 분석하였다. 발생가스의 성분분석은 Porapak Q(80/100mesh)가 충전된 1.83 m × 2 mm의 스테인리스 스틸 컬럼의 Thermal Conductivity Detector (TCD)가 장착된 Gas chromatography (Gow Macseries 580, GOW-MAC, America)를 이용하였다. 분석을 위한 Carrier gas는 초순수 헬륨을 이용하였고, 유속은 15 mL/min으로 고

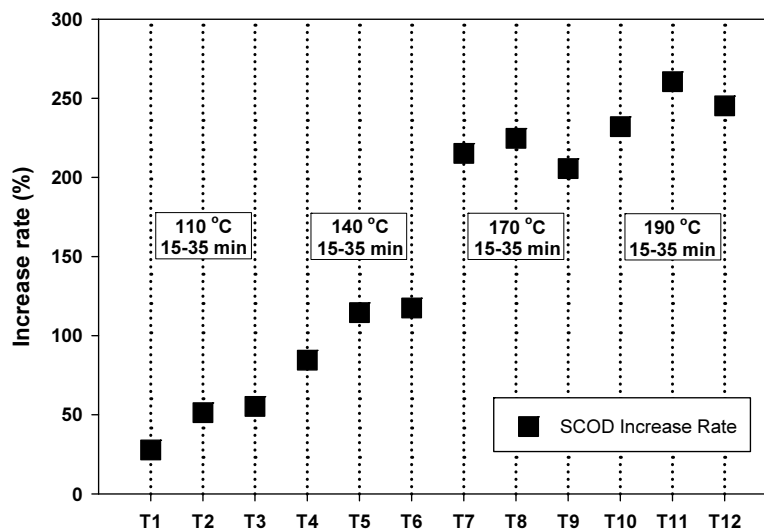
정하였으며 Column, Injector 및 Detector의 온도는 각각 50, 80과 90°C로 고정하였다.

3. Results and Discussion

3.1 열 가용화 조건에 따른 하수슬러지 물리적 특성 변화

Fig. 2는 T1~T12의 SCOD 증가율을 나타낸 것으로 앞서 SCOD의 제거율과 유사한 경향을 보이고 있다. 열 가용화 온도가 증가함에 따라 SCOD는 최소 27.8%에서 최대 260.5%까지 상승하는 것으로 나타났으며, SCOD 증가율에 대한 시간과 온도의 표준편차를 산정한 결과 가용화 시간에 따른 표준편차는 7.8~14.9%인 반면 온도에 따른 표준편차는 74.3~86.3%로 가용온도의 변화가 SCOD 농도에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Fig. 3은 T1~T12의 SCOD 증가율을 나타낸 것으로 앞서 SCOD의 제거율과 유사한 경향을 보이고 있다. 열 가용화 온도가 증가함에 따라 SCOD는 최소 27.8%에서 최대 260.5%까

**Fig. 2.** Increasing rate of SCOD production by thermal solubilization versus the control (BLANK) condition.

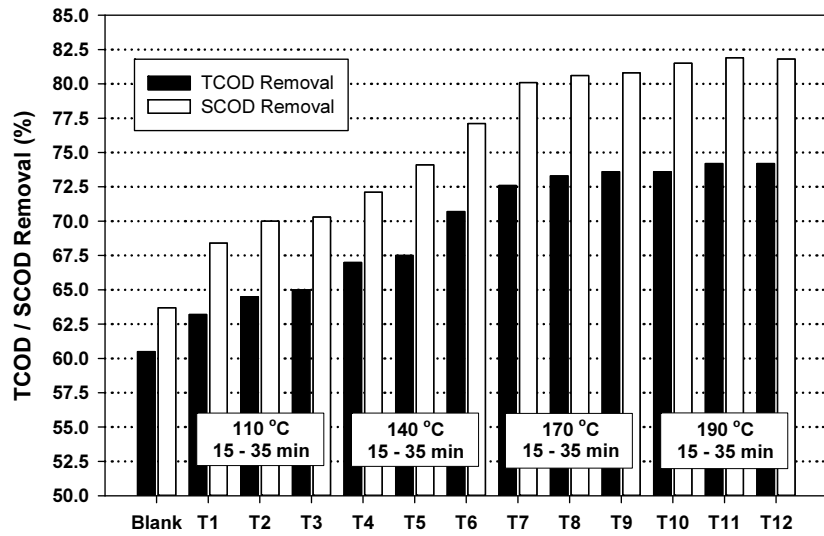


Fig. 3. TCOD and SCOD removal rates of sewage sludge according to the heat solubilization condition.

지 상승하는 것으로 나타났으며, SCOD 증가율에 대한 시간과 온도의 표준편차를 산정한 결과 가용화 시간에 따른 표준편차는 7.8~14.9%인 반면 온도에 따른 표준편차는 74.3~86.3%로 가용온도의 변화가 SCOD 농도에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

3.2 열 가용화 조건에 따른 하수슬러지의 메탄 발생량 평가

Fig. 3은 열 가용화 조건별 하수슬러지의 TCOD, SCOD 제거율을 나타내었다. T1~T3 조건은 5 bar, 110°C에서 가용화 시간이 증가함에 따라 TCOD, SCOD 제거율은 증가하는 경향이 관측되었으며, 압력 및 온도조건이 다른 T4~T6(6 bar, 140°C), T7~T9(7 bar, 170°C), T10~T12(8 bar, 190°C)에선 Blank보다 유기물 제거율이 상승한 것으로 나타났다.

특히 초기 가용화 시간이 20분이 지난 시점에서 제거율이 상대적으로 큰 폭으로 상승하고 있는데, 이 시기에 하수슬러지의 세포벽이 파괴되어 입자성 고형물이 용존성 고형물로 변화됨에 따른 결과로 판단된다.

T7~T12 조건에서는 반응시간이 지남에도 불구하고 유기물의 제거효율이 증가하지 않았는데, 선행연구에서 165°C 이상에서의 가용화는 난분해성 물질이 합성되어 혐기성 소화에 불리한 결과를 초래하는 것으로 보고된 바 있고(Wilson and Novak, 2009), 또 다른 연구에서는 40°C 이상의 조건에서 COD 분해에 큰 차이가 없다는 결과를 보고한 바 있다(Dwyer

et al., 2008). 이 외에도 160°C 이상의 열 전처리가 셀룰로오스(Cellulose)나 리그닌(Lignin)의 가용화를 일으키나 폐놀성 물질이 생성으로 인해 메탄발생을 저해할 수 있다는 결과가 있어 본 실험에서 도출된 결과와 메탄발생을 고려하였을 때 170°C 이상의 고온조건에서 온도 및 시간에 따른 제거효율의 차이는 미비할 것으로 판단된다(Chandler et al., 1980).

다음의 Fig. 4에 열 가용화 조건별 BMP test를 수행결과를 나타내었다. 최대 메탄 발생량에 도달하는 시간은 Blank가 28일로 느린 메탄생성반응을 보였고, 열 가용화를 진행한 조건에서는 최대 메탄발생량에 도달하는 시간이 줄어드는 경향이 나타나 T9에서는 24일이 소요된 것으로 측정되었다.

누적메탄량과 이론적 메탄발생량의 비로 산정한 생분해도는 T11에서 58.4%로 가장 높게 산정되었고 T9~T12의 경우 고온 또는 반응시간이 길었음에도 불구하고 가스발생량 및 생분해도는 T8과 유사한 결과가 나타났다.

이러한 결과는 선행연구결과에서도 유사하게 보고되고 있어, 열 가용화에 요구되는 에너지와 소화효율을 고려하여 유입기질별 혼합에 따른 메탄발생량을 최대로 발생시키기 위해 하수슬러지의 가용화 조건을 170 °C, 25 min로 설정하는 것이 최적 조건이라 판단된다.

3.3 기질 혼합 비율에 따른 BMP Test 결과

기질혼합비에 따른 BMP test를 진행한 결과 음식물류폐기물의 혼합비가 높을수록 누적메탄발생량, VS 제거율, 생분해

Table 4. Standard deviation of temperature and reaction time related to the SCOD increase rate

| Increase rate | 110°C | 140°C | 170°C | 190°C | Standard Deviation Population (STDEV.P) |
|---------------|-------|-------|-------|-------|---|
| 15 | 27.8 | 84.6 | 215.2 | 232.1 | 86.3 |
| 25 | 51.4 | 114.6 | 224.7 | 260.5 | 83.8 |
| 35 | 55.3 | 117.5 | 205.6 | 245.3 | 74.3 |
| STDEV.P | 12.1 | 14.9 | 7.8 | 11.6 | |

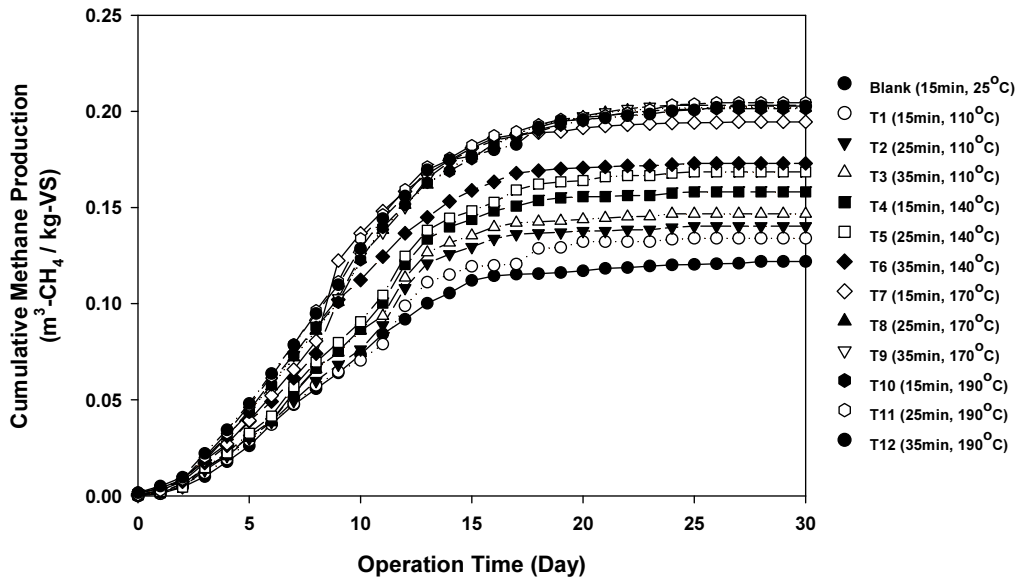


Fig. 4. BMP test methane production result according to the thermal solubilization condition.

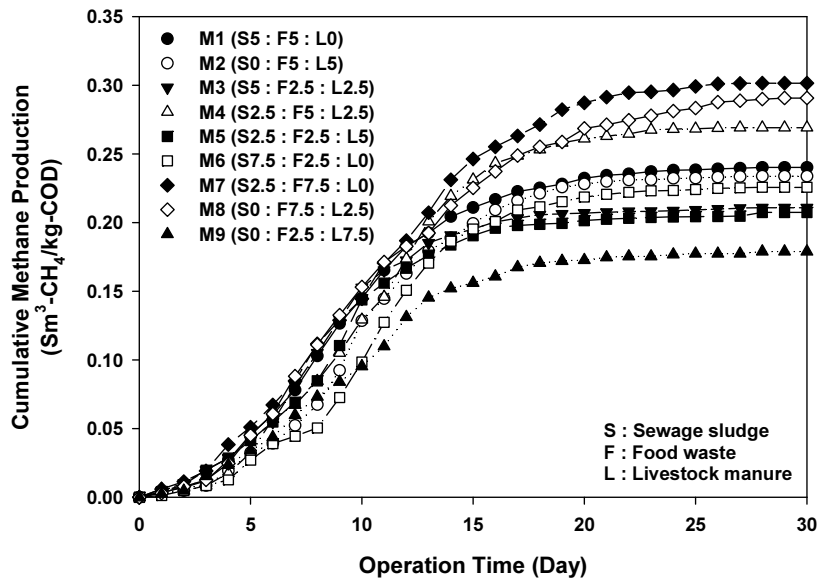


Fig. 5. Cumulative methane production generated according to the substrate mixing ratio.

도가 전반적으로 향상되는 것을 확인하였다. 더불어 M7의 경우 누적메탄발생량은 $0.3015 Sm^3-CH_4/kg-COD$ 로 가장 높게 나타났고 같은 기간 동안 M8에 비해 상대적으로 메탄수율과 생분해도가 높은 것으로 분석되었다.

이러한 결과는 하수슬러지가 열 가수분해에 의한 전처리로 소화효율이 향상되었기 때문으로 판단되며, 일반적으로 가축분뇨가 혼합된 조건의 경우 높은 함수율과 질소성분으로 인해 메탄발생량이 다소 낮아진 것으로 분석된다. 유리 암모니아 등의 소수성 분자는 세포막을 쉽게 관통해, 세포의 pH 불균형을 유발하고, 일부 특정 효소적 반응을 저해하기 때문에 가수분해와 아세트산 생성균의 활성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Jindřich et al., 2012).

또한, 혐기성 소화에서 중요인자로 작용하는 C/N비는 20~35 정도로 보고되고 있는데(Guermoud et al., 2006, Lee et al., 2009), 가축분뇨의 경우 불균형한 C/N비로 인해 메탄생성에 저해요소로 작용할 우려가 있다.

반면, 음식물류폐기물의 비율이 높은 조건에서 메탄발생량이 가장 많이 생성된 것으로 보았을 때, 음식물류폐기물 소화에서 발생하는 리그닌, 섬유소와 같은 난분해성 물질 및 고농도의 염분 등의 저해인자가 하수슬러지와와의 혼합을 통해 일부 분 저감이 된 것으로 해석할 수 있다. 더불어 하수슬러지의 낮은 C/N로 인한 선행연구에 따르면 음식물류폐기물의 혼합비가 높아지면 수소 발생량이 증가하고 이에 따라 메탄발생량이 증가한다고 보고된 바 있다(Kim et al., 2004). 또한, 연

Table 5. BMP test result according to thermal solubilization condition

| Parameter | Cumulative Methane yield (Sm ³ -CH ₄ /kg-COD) | Theoretical Methane yield (Sm ³ -CH ₄ /kg-COD) | Biodegradability (%) | Maximum rate operation time (day) |
|-----------|---|--|----------------------|-----------------------------------|
| Blank | 0.122 | | 34.9 | 28 |
| T1 | 0.134 | | 38.3 | 25 |
| T2 | 0.140 | | 40.1 | 25 |
| T3 | 0.146 | | 41.9 | 25 |
| T4 | 0.158 | | 45.2 | 25 |
| T5 | 0.169 | | 48.2 | 25 |
| T6 | 0.173 | 0.35 | 49.4 | 25 |
| T7 | 0.194 | | 55.6 | 27 |
| T8 | 0.202 | | 57.7 | 25 |
| T9 | 0.203 | | 58.1 | 24 |
| T10 | 0.201 | | 57.6 | 26 |
| T11 | 0.205 | | 58.4 | 26 |
| T12 | 0.203 | | 57.9 | 27 |

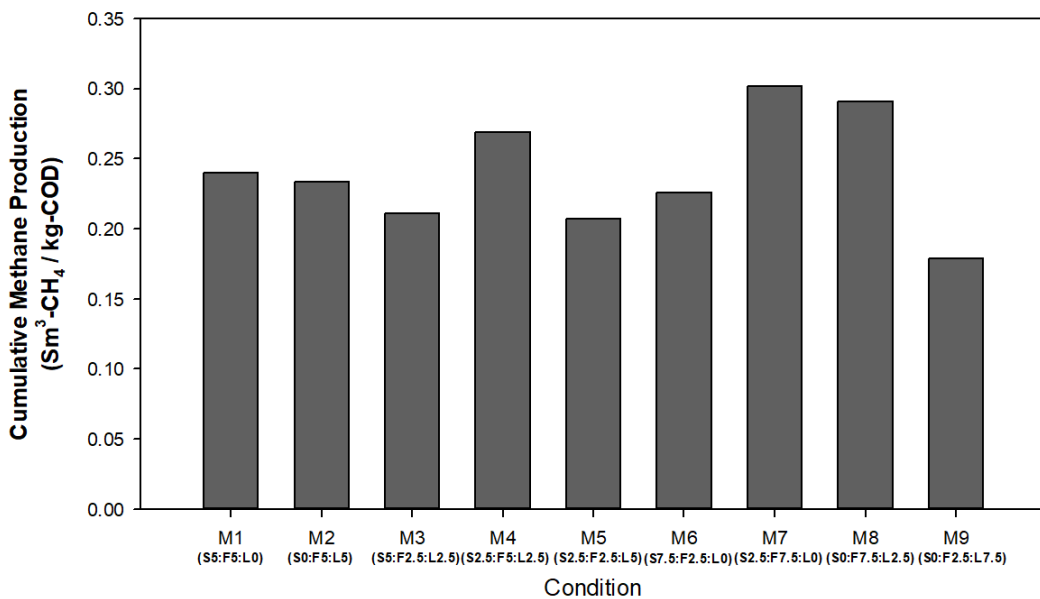


Fig. 6. Cumulative methane production by condition (steady-state).

속식 반응조에서 음식물류폐기물을 유입 기질로 사용할 경우 부하가 증가함에 따라 메탄 발생량이 증가한다는 연구결과가 보고되었다(Zhang, 2007).

4. Conclusion

본 연구에서는 슬러지 소화효율 향상을 위한 최적 열 가용화 조건을 분석하고자 하였으며, 전처리된 하수슬러지와 음식물류 폐기물, 가축분뇨의 최적 혐기성 소화 혼합 조건을 파악하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 열 가용화 전처리 전후 하수슬러지의 SCOD 증가율은 대조군 대비 T11(190°C, 25 min)의 조건에서 최대 260.5%가

지 증가하였으나 실험조건 T8(170°C, 25 min)에서의 224.7%의 증가율과 비교하였을 때 큰 변화는 없는 것으로 판단된다.

2) 열 가용화 전처리 전후 하수슬러지의 BMP Test 결과 TCOD 및 SCOD 제거율은 열 가용화 온도가 올라갈수록 증가하였으며 170°C 이상의 온도에서는 더 증가하지 않았다.

3) 열 가용화한 하수슬러지의 BMP Test 메탄 발생량 분석 결과 T7(170°C, 15 min)의 온도조건 이후부터는 누적 메탄발생량이 0.195~0.205 Sm³-CH₄/kg-COD로 큰 변화가 없었으며 생분해도의 경우 T8 조건에서 53.6%로 가장 높게 나타났다.

4) 열 가용화된 하수슬러지와 음식물류 폐기물, 가축분뇨 통합소화 실험결과 슬러지 25%, 음식물류 폐기물 75%를 혼합한 M7의 조건에서 누적메탄발생량 0.3015 Sm³-CH₄/kg-COD

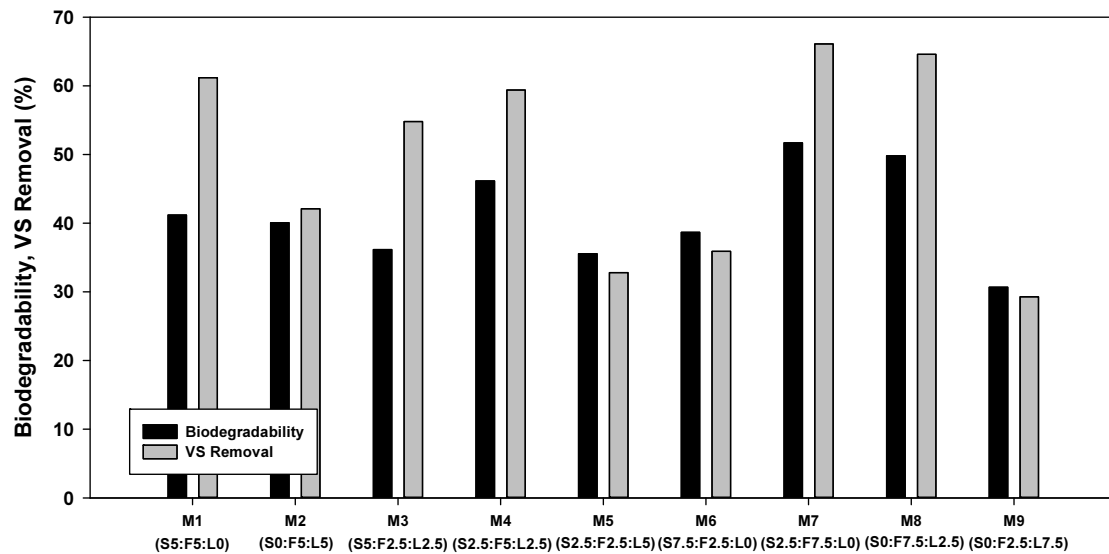


Fig. 7. Changes in biodegradability VS removal by BMP-test.

로 가장 높게 나타났다. 세 가지 기질을 모두 혼합한 M3, M4, M5 실험조건에서는 하수슬러지 25%, 음식물류 폐기물 50%, 가축분뇨 25%를 혼합한 M4 실험조건이 $0.2692 \text{ Sm}^3\text{-CH}_4/\text{kg-COD}$ 로 가장 높은 메탄 발생량을 보였다.

5) 상기 결론을 종합하여 보면, 170°C , 25 min에서의 열 가용화 조건이 혐기성 소화 효율 향상을 위한 최적의 조건임을 확인하였다. 또한, 유기성 폐기물 통합소화를 위한 최적의 기질 혼합비율은 가축분뇨를 혼합하지 않고 음식물류 폐기물 비율을 높일수록 높은 소화 효율을 나타내었으며 세 가지 기질을 모두 혼합할 경우 하수슬러지 25%, 음식물류 폐기물 50%, 가축분뇨 25%의 비율에서 가장 안정적인 효율을 나타내었다.

References

- Chandler, J. A., Jewell, W. J., Gossett, J. M., Van Soest, P. J., and Robertson, J. B. (1980). Predicting methane fermentation biodegradability, *Biotechnology and Bioengineering Symposium*, 10, 93-107.
- Dwyer, J., Starrenburg, D., Tait, S., Barr, K., Batstone, D. J., and Lant, P. (2008). Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability, *Water Research*, 42(18), 4699-4709.
- Guermoud, N., Ouadjnia, F., Abdelmalek, F., and Taleb, F. (2009). Municipal solid waste in Mostaganem city (Western Algeria), *Waste Management*, 29(2), 896-902.
- Jindřich, P., Petr, D., Josef, M., and Michal, D. (2012). Stability and inhibition of anaerobic processes caused by insufficiency or excess of ammonia nitrogen, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 93, 439-447.
- Kim, D. J. and Kim, H. Y. (2010). Sludge solubilization by pre-treatment and its effect on methane production and sludge reduction in anaerobic digestion, *Korean Chemical Engineering Research*, 48(1), 103-109. [Korean Literature]
- Kim, J. R., Sim, S. J., Choi, S. H., and Yeom, I. T. (2004). Sludge reduction through enzymatic pretreatment, *Korean Society for Biotechnology and Bioengineering Journal*, 19(2), 93-97.
- Kim, S. H. and Ju, H. J. (2012). Feasibility of co-digestion of sewage sludge, swine waste, and food waste leachate, *Journal of the Korea Organic Resource Recycling Association*, 20(1), 61-70. [Korean Literature]
- Lee, D. H., Behera, S. K., Kim, J., and Park, H. S. (2009). Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: A lab scale study, *Waste Manage*, 29, 876-882.
- Mata-Alvarez, J. (2002). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*, IWA Publishing, 4.
- Ministry of Environment (ME). (2013). *Statistics of sewerage (Sewerage division)*, Ministry of Environment, 1397-1423.
- Ministry of Environment (ME). (2014). *A study on the expansion plan for the integrated digestion of manure and sewage sludge*, Ministry of Environment, 56-72.
- Oh, H. J. (2018). *A study on the methane production efficiency according to the electrical characteristics of bio-electrochemical anaerobic digestion reactor*, Master's Thesis, Ho-Seo University, Asan, Korea. [Korean Literature]
- Phothilangka, P. (2008). *Sludge disintegration technologies for improved biogas yield*, Ph. D. Dissertation, The University of Innsbruck, Austria.
- Wilson, C. A. and Novak, J. T. (2009). Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment, *Water Research*, 43(18), 4489-4498.
- Zhang, P., Zhang, G., and Wang, W. (2007). Ultrasonic treatment of biological sludge: Floc disintegration, cell lysis and inactivation, *Bioresour Technol*, 98, 207-210.