

하수처리장 바이오가스 플랜트의 가스엔진 최적 운영 방안

김길정 · 김래현*[†]

서울과학기술대학교 에너지환경대학원, *서울과학기술대학교 화공생명공학과
(2019년 3월 14일 접수, 2019년 5월 14일 수정, 2019년 5월 17일 채택)

Optimal Operation of Gas Engine for Biogas Plant in Sewage Treatment Plant

Gill Jung Kim · Lae Hyun Kim*[†]

Graduate School of Energy& Environment, Seoul National University of Science&Technology,

*Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Seoul National University of
Science&Technology

(Received 14 March 2019, Revised 14 May 2019, Accepted 17 May 2019)

요 약

한국지역난방공사에서 난지 물재생센터의 하수처리 설비로 부터 발생하는 45,300 m³/일의 바이오가스를 연료로 1,500 kW, 2대 규모의 엔진 발전기를 운영하고 있다. 그러나 바이오가스 발전 플랜트의 실제 운영 경험이 미미하고, 축적된 기술 및 노하우 부족으로 가스엔진의 잦은 고장과 정지로 많은 경제적 손실이 발생하고 있다. 따라서 이 발전 플랜트의 안정적인 운영을 위한 기술적 근본 대책 마련이 필요한 실정이다

본 연구에서는 난지 물재생센터의 하수처리장에서 발생하는 바이오가스를 이용한 가스엔진 플랜트의 일련의 공정상의 문제점을 확인하고, 각 단계별 문제점을 최소화 하여 실제 운전의 최적화 방안을 마련하였다. 먼저 고장 정지의 주요 원인인 발생가스의 정제를 위해 현재 사용 중인 활성탄에 대한 성분분석 및 흡착실험을 통해 활성탄의 흡착능력 품질 기준 마련을 위한 여건을 조성하였다. 또한, 불순물을 최소화하기 위한 활성탄의 교체주기의 기준수립, 황화수소 측정주기 강화, 활성탄 국산화, 설비개선 등 바이오플랜트 운영기준 강화 및 개선방안을 적용하여 실제운전에 적용하였다.

그 결과 가스엔진 1호기는 530%, 2호기는 250%의 정상운전 가동시간이 증가되는 운영실적을 보였다. 또한 통풍구의 설비개선을 통해 작업공정을 줄이고, 정상 운전시간과 가동률을 높일 수 있었다. 경제적으로도 77,000천 원/년의 매출증대 효과를 나타냈다. 이와 같이 운영기준의 강화 및 개선방안을 적용하여, 바이오가스 플랜트의 고장 정지를 줄이고 가동률을 높여, 안정적인 운영을 하는 것이 현실적인 바이오가스 플랜트의 최적 운영방안으로 판단된다.

주요어 : 하수처리 바이오가스, 가스엔진, 활성탄, 흡착능력, 운영기준, 설비개선

Abstract - The Korea District Heating Corporation operates a gas engine generator with a capacity of 4500 m³ /day of biogas generated from the sewage treatment plant of the Nanji Water Recycling Center and 1,500 kW. However, the actual operation experience of the biogas power plant is insufficient, and due to lack of accumulated technology and know-how, frequent breakdown and stoppage of the gas engine causes a lot of economic loss. Therefore, it is necessary to prepare technical fundamental measures for stable operation of the power plant

In this study, a series of process problems of the gas engine plant using the biogas generated in the sewage treatment plant of the Nanji Water Recovery Center were identified and the optimization of the actual operation was made by minimizing the problems in each step. In order to purify the gas, which is the main cause of the failure stop, the conditions for establishing the quality standard of the adsorption capacity of the activated carbon were established through the analysis of the components and the adsorption test

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : 02-970-6280 E-mail : lhkim@seoultech.ac.kr

for the active carbon being used at present. In addition, the system was applied to actual operation by applying standards for replacement cycle of activated carbon to minimize impurities, strengthening measurement period of hydrogen sulfide, localization of activated carbon, and strengthening and improving the operation standards of the plant.

As a result, the operating performance of gas engine # 1 was increased by 530% and the operation of the second engine was increased by 250%. In addition, improvement of vent line equipment has reduced work process and increased normal operation time and operation rate. In terms of economic efficiency, it also showed a sales increase of KRW 77,000 / year. By applying the strengthening and improvement measures of operating standards, it is possible to reduce the stoppage of the biogas plant, increase the utilization rate, It is judged to be an operational plan.

Key words : wastewater treatment biogas, gas engine, activated carbon, adsorption capacity, operating standard, facility improvement

1. 서론

바이오가스는 메탄 함량이 높아 천연가스와 비교되고 있으며 연소시켜 에너지를 생산하거나 천연가스 대체 연료로 공급될 수 있다. 열병합발전시스템에서 가스엔진에서 생산된 전기는 공장 내의 전력 수요를 보완하기 위해 사용될 수도 있고 전력망에 판매 될 수 있다. 또한 열이용 효율을 더욱 증가시키기 위해, 엔진의 배기가스와 오일에서 열을 회수하여 난방용 열원 및 소화조 가온설비에 공급될 수 있다.

폐기물 처리장 및 오수에서 유기물을 분해하여 생성된 바이오 가스에는 30% 이산화탄소 이고, 메탄성분이 약 50-65%를 포함하기 때문에 가스발전의 에너지로 이용하고 있다. 그러나 언급된 주요 구성 요소 외에도 매립 가스 및 하수 가스에는 다양한 종류가 있다 미량 화합물. 지금까지 140 개 이상의 물질이 확인되었고 총 농도는 2000 mg/m³ (0.15 vol. %)이다[1].

바이오 가스가 연료로 사용될 때 여러 가지 미량 불순 화합물이 연소 엔진을 손상시킬 수 있으며, 시스템의 중단과, 값 비싼 수리가 필요하다. 특히 불순 오염 물질은 황화수소, 할로젠화물 및 규소 함유 화합물이다. 가스엔진 연소 공정시, 황화수소 및 할로젠화 화합물은 H₂SO₄, HCl 및 HF 와 유사하게 부식성 산을 형성한다[5]. 실록산은 규산염으로 전환되고 미세 결정질 내연 기관 내측 표면의 마모를 유발한다[5]. 매립가스에 함유된 실리콘 화합물 (트리메틸 실라 놀, 헥사 메틸 디 실록산 L2, 옥타 메틸-트리 실록산 L3, 데카 메틸 테트라 실록산 L4, 헥사 메틸 시클로 트리실록산 D3, 옥타 메틸 시클로 테트라실록산 D4, 데카 메틸 시클로 펜타 실록산

D5 및 도데 카 메틸 시클로 헥사 실록산 D6)이 50 mg/m³ 이하의 농도로 보고되고 있다[5]. 이러한 농도는 여러 엔진 제조업체가 제시하는 15 mg/m³의 한계를 훨씬 초과하는 양으로 가스 전처리 설비를 부착하여 제거되어야 한다[8].

바이오가스 중에 함유된 수분, 황화수소, 실록산은 엔진 부품과 장비에 막대한 손상을 줄 수 있어 제거 되어야 한다. 수분, 황화수소, 실록산이 엔진 및 장비에 문제를 일으킬 수 있는 주요 원인임을 고려할 때, 황화수소와 실록산이 발생시키는 손상에 의하여 증가하는 유지보수를 수행하는 것보다는 황화수소와 실록산을 제거하는 것을 고려하는 것이 중요하다[1, 4, 5]

난지 물재생센터의 하수처리 설비로 부터 발생하는 45,300 m³/일의 바이오가스를 연료로 이용하여 1,500 kW, 2대 규모의 엔진 발전기를 운영 하는 중 원인이 불분명한 고장정지가 발생하고 있다. 난지 물재생센터의 하수처리 설비로 부터 발생하는 바이오가스를 연료로 가스엔진 발전기를 운영 하는 중 발생한 가스엔진 트러블의 주요원인은 황화수소와 실록산, 수분 등 불순물이라고 볼 수 있으며, 이 중 황화수소는 고장을 일으키는 다른 물질과 반응하며, 전처리 공정에 중대한 영향을 미치는 물질로 확인되었다[2,4,9]. 즉 분뇨와 음폐수가 유입되는 경우 황화수소의 농도가 급격히 상승하게 되고, 습식탈황공정에서 설계기준(50ppm)으로 제거되지 않은 상태의 농도로 바이오가스가 흡착탑으로 공급되고 황화수소 및 실록산 흡착탑의 제거 성능이 급격히 하락하게 되어 가스엔진의 잦은 고장정지 원인이 되었다고 판단되고 있다. 결과적으로, 황화수소 제거방법의 최적화가 안정적인 바이오 가스엔진 운영을 위한 필수적인 대책이라 할 수 있다[6,7].

본 연구에서는 이러한 연구 결과를 바탕으로 난

지 물재생센터의 하수처리장에서 발생하는 바이오가스가 포함하고 있는 고장의 주요 원인인 황화수소, 실록산, 수분 등의 제거 효율을 높이기 위해 활성탄 성분분석 및 흡착능력 시험을 시행하고, 바이오가스의 불순물로 인한 고장정지를 줄이고 안정적인 운영을 위하여 운전 현황을 분석하여 바이오가스 플랜트 운영의 개선방안을 제시하고자 한다.

2. 바이오가스 불순물 정제 및 연료조건

2-1. 황화수소 제거

바이오가스 중의 황화수소를 제거방법은 건식, 습식, 생물학적 탈황공정으로 나눌 수 있으며, 국내에서는 산화철과 침착 활성탄을 이용한 건식 공정이 주로 이용되고 있다[1].

건식탈황공정은 철, 아연, 구리 등의 금속산화물 및 활성탄과 같은 흡착제를 이용하여 물리·화학적 흡착에 의해 황화수소를 제거한다. 흡착제를 충전한 흡착탑에 바이오가스를 유입시켜 바이오가스 중에 포함된 황화수소가 흡착제에 물리·화학적으로 흡착되어 제거되는 원리를 이용한 것이다. 흡착제에 흡착된 반응물은 황화물 또는 고체 황의 형태로 되어 배출되며, 정기적으로 흡착제를 교체하여 황화수소의 제거율을 안정적으로 유지한다. 설비의 구조가 간단하여 유지관리가 쉽고, 설치비가 저렴하여 가장 많이 보급되고 있다. 건식공정에서는 산화철 계통의 흡착제가 주로 사용되고 있으며, 최근에는 기존의 활성탄을 이용한 물리적 흡착으로는 황화수소의 효율적인 제거에 한계가 있어, 활성탄에 물리흡착뿐만 아니라 화학흡착능력을 부가시키기 위해 활성탄을 산이나 염기용액 등과 같은 물질로 침착시켜 특정 물질의 흡착력을 증가시키는 방법들이 개발·보급되고 있다. 또한 점토광물 및 슬러지를 탈황제로 적용하는 연구들도 진행되었다. 활성탄의 침착에 사용되는 물질로는 KOH, KI, Na₂CO₃, KIO₃, NaOH, 디에틸아민((C₂H₅)₂NH) 등이 있다.

습식탈황공정은 바이오가스를 액체와 접촉하게 하여 황화수소를 제거하며 20°C, 0.1 MPa 하에서 1 m³의 물에 2.8 Nm³의 황화수소가 용해되는 특성을 이용한 것이다. 습식공정은 대량의 바이오가스를 처리하는 경우에 경제성이 있는 것으로 알려져 있으며, 물을 이용하는 수세정식 외에 수산화나트륨(NaOH)과 탄산나트륨(Na₂CO₃)을 사용하는 약액세정방식, 철촉매{Fe/MgO 또는 Fe₂(SO₄)₃}와 철킬레이트를 이용한 액상촉매산화 방식 등이 있다.

생물학적 탈황공정은 미생물의 대사작용을 이용하여, Biofilter, Biotrickling filter, Bioscrubber 등의 방법이 있다. 담체가 충전된 반응기내로 황화수소

를 함유한 바이오가스가 통과하는 과정에서, 담체에 부착된 미생물이 황화수소를 에너지원으로 이용하여 황화수소를 산화·분해하여 제거시킨다.

2-2. 실록산 제거방법

바이오가스 중에 함유된 실록산의 제거방법으로는 흡착(Adsorption), 흡수(Absorption), 냉각(Cooling and chilling) 등이 있으며[8], 이 중에서 활성탄을 이용한 흡착방법이 주로 사용되고 있다. 또한 냉각 제습(5°C)과 재가온(15~50°C), 활성탄 흡착에 의한 공정구성으로 실록산의 대부분을 제거할 수 있다.

흡착법은 탄소계 또는 비탄소계의 흡착제를 이용하여 바이오가스 중의 실록산을 제거한다. 흡착제의 비표면적이 증가할수록 실록산 흡착량이 증가하며, 미세기공, 중기공 및 거대기공 간의 기공구조가 잘 발달되어 있으면, 실록산의 흡착성능도 증가한다. 또한 pH가 높을수록 흡착이 잘 되는 것으로 알려져 있다. 흡착제로 야자계 활성탄과 석탄계 활성탄, 실리카겔, 점토광물, 분자체(Molecular sieve 13X), 탈황제 등을 사용한 실록산 제거효율 분석 연구가 다양하게 수행되고 있으며, 야자계 활성탄과 실리카겔의 실록산 흡착성능이 우수한 것으로 평가되고 있다. 또한 야자계 활성탄을 적용하여 실록산을 제거할 경우 95% 이상, 석탄계 활성탄은 80~95%, 실리카겔은 50~85%, 탈황제와 Molecular sieve 13X는 20%의 제거효율을 나타냈으며, 야자계 활성탄을 두 단계로 직렬 배열할 경우, 급격한 농도변동 요인인 L2 성분의 안정적인 처리가 가능하였다[9].

흡수법은 실록산을 선택적으로 흡수할 수 있는 용매인 흡수액을 이용하는 방법이며, 흡수용매로 SelexolTM(Dimethyl ethers of polyethylene glycol), 강산, Tetradecane, 탄화수소 오일, 수산화나트륨(NaOH) 및 황산(H₂SO₄) 등을 이용한 연구가 수행되었다. Tetradecane을 흡수용매로 사용하여 D4를 97% 제거할 수 있었으며, SelexolTM의 경우 99%의 제거효과가 있었다.

냉각법은 냉각장치를 이용하여 기체상의 실록산을 고체상의 실록산으로 전환하는 방법이며, 바이오가스를 5°C로 냉각시켜 12%의 실록산을 제거할 수 있었으며, 저온냉각에 의해 -25°C에서 25.9%, -70°C에서 99.3%의 제거 효과가 있었다. 냉각법은 높은 투자비와 운영비로 인하여 대용량의 바이오가스나 고농도의 실록산을 처리할 경우에 경제적인 것으로 나타났다.

2-3. 수분

(1) 수분제거의 실록산 제거효과

Prabucki et al.은 냉각 제습을 기반으로 하여 바이오가스 중의 실록산 농도를 1 mg/Nm³ 이하로 저

Table 1. Siloxane clean-up methods described by Prabucki et al [2]

Stage 1 (gas drying)	Clean-up efficiency	Stage 2 (adsorption)	Siloxane level	Application range
Warm gas to 35-40°C	0	Activated carbon	<1mg/Nm ³	Siloxanes <10mg/Nm ³ Gas flow rate <150Nm ³ /hr
Cool gas to 2°C Post-warm up to 10°C	Up to 25%	Activated carbon	<1mg/Nm ³	Siloxanes <30mg/Nm ³ Gas flow rate >150Nm ³ /hr
Cool gas to <-30°C Post-warm up to 10°C	Up to 90%	Activated carbon	<1mg/Nm ³	Siloxanes 200-1,000mg/Nm ³

Clean-up efficiency: Depends on the type of siloxane within the gas

감하기 위한 3가지 방법을 <Table 1>에 제시하였다 [2]. 3가지 방법 모두 활성탄을 사용하고 있으며 흡착 단계 전에 일정 수준의 건조와 냉각을 요구하고 있다. 첫 번째는 가스엔진의 냉각열을 열교환기로 회수하여 가스를 35~40°C로 가열하여 흡착탑 내에서 물방울이 형성되는 것을 막는다. 가스는 활성탄 흡착탑으로 유입되기 전에 전처리가 되지 않아 활성탄 교체비용이 높게 발생한다. 두 번째는 냉각기를 이용하여 먼저 가스를 냉각하고 흡착탑에 유입되기 전에 온도를 올려준다. 냉각에 의해 실록산은 25%까지 수분에 함유되어 응축되고, 또한 응축수는 탄화수소도 일부 함유하여 제거되므로 활성탄의 사용시간을 증대시킨다. 활성탄이 가지고 있는 실록산 흡착능력을 증대시키기 위하여 가스는 10°C로 가열된다. 세 번째는 유입가스에 함유된 실록산을 90%까지 초기에 제거하기 위하여 냉동을 이용하는 방법이다. 이 방법은 활성탄 교체 비용을 절약할 수 있지만 냉동기 운전이 소비되는 전력비용이 추가적으로 발생한다.

(2) 수분제거 효과

바이오가스를 낮은 이슬점으로 건조함으로써 바이오가스 플랜트에 미치는 장점은 다음과 같다[3].

- 엔진의 효율향상: 혐기성 소화조에서 생산되는 바이오가스는 다량의 수증기를 함유하고 있다 (30~100 g/Nm³). 바이오가스 전체 성분의 4~8%에 해당하며, 바이오가스의 열량을 감소시켜 엔진의 출력을 감소시킨다.
- 배관 및 부품의 부식방지: 배관의 주위 온도가 낮아지면 가스는 냉각되어 바이오가스에 함유된 수증기는 응축된다. 응축수는 이산화탄소, 황화수소와 결합되어 산성의 화합물을 형성하게 되고 기계류, 가스 스크러버, 배관, 버퍼용기, 센서와 계기류의 부식을 촉진시킨다. 황화수소와 물의 결합으로 황산과 수소이온이 생산되고, 이산화탄소와 물의 결합으로 탄산이 생산

된다. 산성의 응축수는 부식의 촉진을 초래하고 엔진오일의 알카리도를 빠르게 낮추는 원인이 된다. 가스를 낮은 이슬점으로 건조시키면 수증기는 응축되어 부식성의 산성물질의 생성을 막아준다.

- 황화수소, 암모니아, 실록산 및 다른 수용성 가스들과 같은 불순물의 부분적인 제거 효과: 엔진의 연소를 촉진시키고 적절한 기능을 보장하기 위해서는 불순물들의 부식성, 산화 및 불연성의 특성으로 인해 소량이라도 바이오가스에 존재하게 되면 제거되어야 한다. 대부분의 불순물들은 수용성으로 냉각시스템에 의한 제습(이슬점 5°C)으로 바이오가스에 함유된 수증기와 함께 부분적으로 혹은 완전히 제거하는 것이 가능하다. 불순물의 양을 감소시키면 엔진오일의 수명을 증대시키고 연소 설비(열병합 발전기의 실린더, 밸브, 엔진헤드)의 뜨거운 표면에 이산화규소가 축적되는 것과 이산화탄소와 황화수소의 응축과의 조합에 의한 단분자 질소산화물의 배출과 부식현상을 감소시킨다.
- 엔진오일의 오염감소: 바이오가스는 중요한 연료성분인 메탄으로 주로 이루어졌지만 제거되지 않으면 윤활유의 조기 노화를 일으킬 수 있는 매우 공격적인 불순물을 함유하고 있다. 지나치게 많은 양의 황화수소를 함유한 산성의 바이오가스는 윤활유의 매우 빠른 노화의 원인이 되는데, 오일에 산성물질의 함량을 급속히 증가시켜 오일의 산성화가 빠르게 진행되고 오일의 윤활특성을 잃어버리게 되어 엔진부품의 과도한 마모를 방지하기 위해서는 자주 교체해야만 한다. 이러한 불순물의 대부분은 수용성으로 바이오가스를 낮은 이슬점으로 제습을 할 경우 많은 양의 제거가 가능하다. 엔진오일의 오염을 줄이고, 오일의 수명을 증가시켜서 결과적으로 엔진오일 교체 빈도와 설비 가동중단에서 발생하는 비용을 감소시킨다.

Table 2. Biogas engine fuel conditions

Constituent	Waukesha	MAN	Caterpillar	MTU
Methane number	-	MN >80	MN 33 to 150 rate of change <5MN/min	MN ≥115 rate of change <5MN/min
Heat value	>4.36 kWh/Nm ³	>5 kWh/Nm ³	4.5kWh/Nm ³ to 26kWh/Nm ³ (lower heat value H _u) rate of change <5%/min	4.5kWh/Nm ³ to 8kWh/Nm ³ (lower heat value H _u) rate of change <10%/min
Sulphur	<715mg H ₂ S/Nm ³ CH ₄ (total S bearing compounds)	<200mg/Nm ³	<2200mg/Nm ³ CH ₄ (total S)	<800mg/Nm ³ CH ₄ (total S)
Hydrogen sulfide	-	<228mg/Nm ³	<1500mg/Nm ³ CH ₄ (total H ₂ S / <0.15vol%)	<280ppm at 50% CH ₄
Chlorine	see sum of Cl and F	<80mg/Nm ³ CH ₄	<100mg/Nm ³ CH ₄ (total Cl)	<100mg/Nm ³ CH ₄ (total Cl)
Fluorine	see sum of Cl and F	<40mg/Nm ³ CH ₄	<50mg/Nm ³ CH ₄ (total F)	<50mg/Nm ³ CH ₄ (total F)
Chlorine and fluorine	<300mg/Nm ³ CH ₄ (total organic halides as Cl)	<80mg/Nm ³ CH ₄ (Sum Cl and F)	<100mg/Nm ³ CH ₄ (Sum Cl and F)	<100mg/Nm ³ (total Cl and F)
Ammonia	<105mg/Nm ³ CH ₄ (total NH ₃)	<30mg/Nm ³ CH ₄	<150mg/Nm ³ CH ₄ (total NH ₃)	<30ppm at 50% CH ₄
Humidity	Zero liquid water: recommend chilling gas to 4°C followed by coalescing filter and then reheat to 29-35°C: dew point should be at least 11°C below temperature of inlet gas	<60% (relative humidity φ) no condensation in the whole suction part	<80% (relative humidity φ) at lowest temperature of the entire gas pipe system	<80% (relative moisture in the gas at 35°C and 1.013 bar)
Silicon compounds	<50mgNm ³ CH ₄ Total siloxanes (models with prechamber fuel system only)	<2mg/Nm ³ CH ₄	<20mg/Nm ³ CH ₄ (total VOSiC)	<5mg/Nm ³ CH ₄ (total Si)
Dust content	removal of particles >0.3μm	<10mg/Nm ³ CH ₄ Grain <5μm	Total <10mg/Nm ³ CH ₄ Grain size >3μm	-
Oil fumes/ Higher hydrocarbon compounds and tars	<2vol% 'liquid fuel hydrocarbons' at coldest inlet temperature	<400mg/Nm ³ CH ₄	<3000mg/Nm ³ CH ₄ (>C5 / <C10) <250mg/Nm ³ CH ₄ (>=C10) <0.5mg/Nm ³ (>=C12)	<0.4mg/Nm ³ (HC with carbon number >5)
Gas temperature	>-29°C and <60°C	10°C<T<30°C temperature gas mixer outlet	-	0<T<50

Date of information: Waukesha 2000, MAN 2011, Caterpillar 2008, MTU 2014.

- 황성탄의 사용시간 증가: 황화수소, 암모니아와 같은 유해한 바이오가스 오염물질들은 물에 대한 용해성으로 부분적으로 제거가 될 수 있다. 이러한 오염물질들은 낮은 이슬점으로 가스를 건조시켜 제거될 수 있는 응축수에 부분적으로 용해된다.

2-4. 가스엔진 연료조건

바이오가스 엔진의 제조업체들은 연료가스의 품질 수준을 명확히 제시하고 있다. 가스엔진 제조사들의 바이오가스 연료조건은 <Table 2>와 같다.

2-5. 바이오가스 불순물에 의한 영향

(1) 피스톤 및 실린더 라이너 긁힘 발생

Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 실록산이 함유된 바이오가스가 엔진에 공급되어 연소실에 이산화규소와 규소염 화합물(CaO, Ca 등)이 다량 부착되는 현상이 발생되었으며, 규산염 부착물인 칼슘이 황 화합물과 결합된 물질과 이산화규소가 피스톤 및 실린더라이너에 긁힘을 유발한 것으로 분석되었다.

(2) 엔진오일 수명감소

Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 엔진오일에 유입된 이산화규소와 황화수소가 엔진오일의 수명을 단축시키고 구동부의 비정상적인 마모를 초래하는 것으로 분석된다.

(3) 인터쿨러 소손

Fig. 1(c)에서 보는 바와 같이 황화수소를 함유한 바이오가스가 엔진에 공급되어 인터쿨러의 핀 부식을 초래하는 현상이 발생되었다. 제습장치의 간헐적인 중단으로 수분이 유입되었으며, 수분이 인터쿨러 핀에 침착된 황 화합물(SO₃)과 화학적 반응으로 황산(H₂SO₄)을 생성하고 인터쿨러의 핀을 부식시켰다.

2-6. 침적물 분석

바이오가스 엔진의 연소실 내부와 인터쿨러 핀에 부착된 이물질의 무기원소 성분을 X선 형광분석기(XD-XRF)를 이용하여 분석하였으며<Table 3>, 가스엔진 연소실 내부의 부착물 성분분석 결과 산화칼슘 41%, 이산화규소 21%로 나타났다. 그리고 인터쿨러 핀에 부착물은 삼산화황 27%로 나타났다.

Table 3. Additive compositions

Combustion Chamber		Intercooler Fin	
Descriptions	Concentrations (wt%)	Descriptions	Concentrations (wt%)
CaO	41.1	CuO	71.0
SiO ₂	21.5	SiO ₂	0.3
SO ₃	17.4	SO ₃	27.6
ZnO	9.8	SnO ₂	0.4
P ₂ O ₅	8.5	P ₂ O ₅	0.3
Others	1.7	Others	0.4



(a) Piston scratches due to deposits

(b) Piston fusion

(c) Intercooler cooling pin corrosion

Fig. 1. Influence of biogas impurities

산화구리 71%는 인터쿨러 핀의 구성성분이다. 혐기성 소화조내 음식물폐수가 다량으로 유입되는 경우 황화수소의 농도가 증가하고 음식물폐수와 함께 무기성분의 대부분인 칼슘, 마그네슘, 칼륨 등이 유입되는 것으로 조사되었다.

2-7. 엔진오일 분석

난지 물재생센터의 바이오가스 엔진에 사용된 오일의 성분을 분석하여 <Table 4>에 나타내었다. 4월 14일 엔진오일의 교환주기가 도래하여 엔진오일 50%를 신유로 교체하였다. 4월 28일까지 사용 후 교환한 엔진오일의 분석결과를 보면 TAN(2.67)이 TBN(3.2) 값 이내에 있으나, Si(151 mg/kg) 값이 대폭 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 실록산 흡착제의 흡착효율이 저하되어 나타난 현상으로 판단되며, 이후 경상정비시 실린더 내벽 마모상태와 실린더 헤드에 부착된 회백색의 침적물의 상태를 확인할 수 있었다.

3. 난지 물재생센터 운영현황

3-1. 난지 바이오가스 엔진 발전 공정

Fig. 2은 난지 물재생센터의 혐기성 소화조에서 발생하는 바이오가스를 연료로 사용하는 바이오가스 엔진 발전공정도를 보여주고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 발전공정도는 물재생센터에서 담당하고 있는 바이오가스를 생산하는 혐기성 소화조 및 바이오가스 중 황화수소를 제거하는 1차 습식 탈황설비로 구성되고, 1차 습식탈황설비에서 공급되는 바이오가스를 플랜트에서 가스엔진 발전연료로 공급하고 있다. 바이오가스플랜트는 1차 습식탈황설비로부터 공급되는 바이오가스를 제습기, 2차 건식탈황, 탈실록산의 바이오가스 전처리 설비를 거친 후에 가스엔진 발전기에 연료로 공급하여 가스엔진으로부터 전기와 열을 생산하고 있다.

Table 4. Oil Analysis Results

Descriptions	Date of Analysis							
	14.1.27	14.2.11	14.2.24	14.3.10	14.3.24	14.4.14	14.4.28	14.5.13
TBN (mg KOH/g)	2.7	3.3	3.2	2.9	3.2	3.1	3.2	2.9
TAN (mg KOH/g)	3.13	2.34	2.77	3.83	3.22	2.45	2.67	2.8
Silicon (mg/kg)	34	18	15	20	14	71	151	96
Aluminum (mg/kg)	1.23	0.75	0.41	1.08	0.63	0.62	1.43	0.88
Chrome (mg/kg)	0	0	0	0	0	0	0.36	0
Iron (mg/kg)	1.23	0.38	0.41	1.08	0.63	0.41	3.94	1.75
Lead (mg/kg)	0.62	0	0	0.36	0	0	1.08	0.29
Tin (mg/kg)	0	0	0	0	0	0	0.72	0
Copper (mg/kg)	0	0	0	0	0	0	0	0
Boron (mg/kg)	1	1	0	0	0	1	0	0

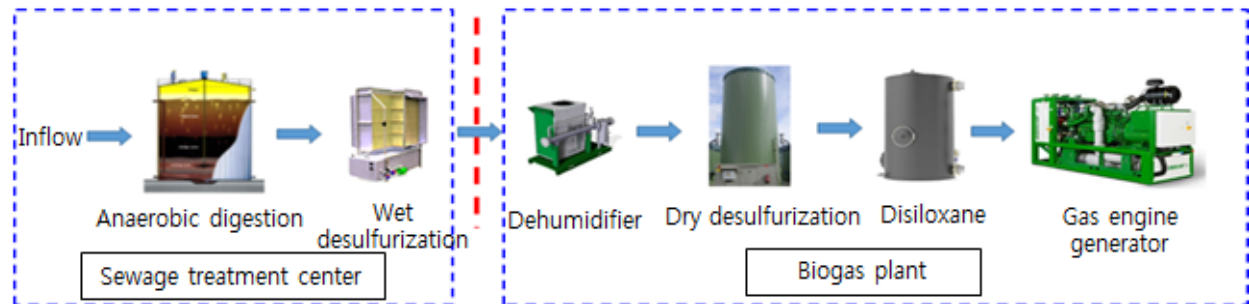


Fig. 2. Biogas cogeneration plant process

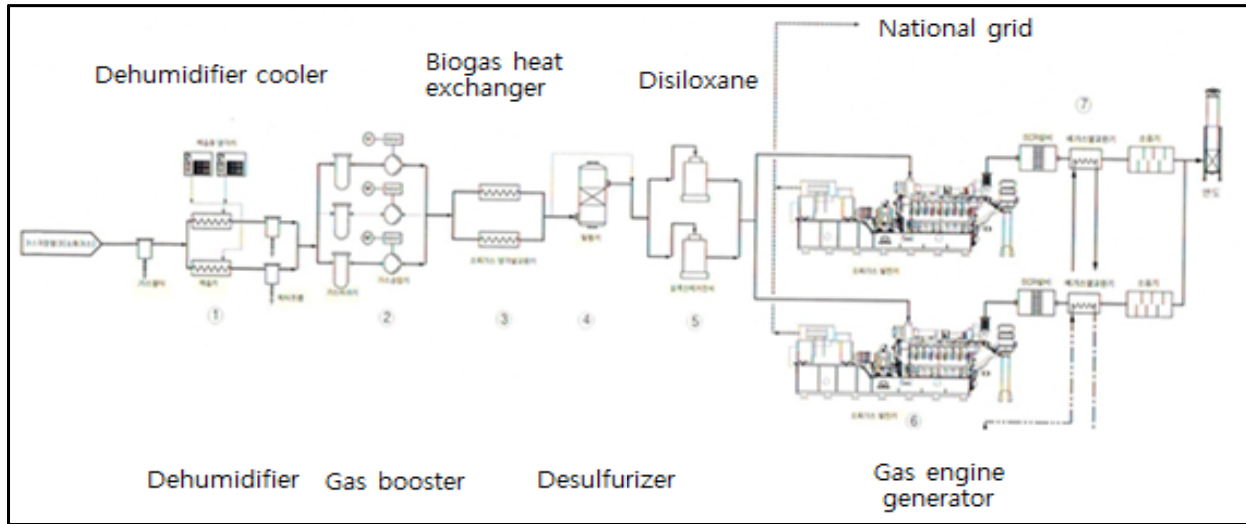


Fig. 3. Pre-treatment process of Biogas plant

Table 5. Specifications of biogas pretreatment facilities

Facility Name	Type & Size	Quantity
Dehumidifier	Gas to Water Shell & Tube Heat Exchanger Cooling Heat : 55,000kcal/hr Biogas In/Out Temp. : 35→7℃ Water Trap : 500A*250A	2(1)
Biogas Heat Exchanger	Gas to Water Shell & Tube Heat Exchanger Cooling Heat : 9,000kcal/hr Biogas In/Out Temp. : 45→32℃	2(1)
Dehumidifier Cooler	Air-cooled Type Cooler Cap. : 75,000kcal/hr, PWR. : 30kW Brine In/Out Temp. : 5→1℃	2(1)
Gas Filter	Cylindrical Cartridge, Cap. : 850 m ³ /hr Filtration Size : 0.3μm	3(1)
Gas Booster	Single Suction Turbo, Cap.: 850m ³ /hr Pr. : 3,000mmAq, PWR : 30 kW, VVVF	3(1)
Desulfurizer	Vertical Dry Type 1 Tower, Cap. : 1,700 m ³ /hr H ₂ S In/Out Density : 200→10ppm Adsorption Amount : 0.4 kgH ₂ S/kgAC	1
Disiloxane	Activated Carbon Adsorption Type, Cap.: 850m ³ /hr Siloxane In/Out Density : 50→1mg/Nm ³ Absorbent : Si4, 10m ³ /Tower	2

Fig. 3은 바이오가스 엔진발전의 연료로 사용하는 바이오가스 전처리 공정도(제습기, 가스승압기, 탈황기, 실록산제거장치)를 보여주고 있다. <Table 5>은 바이오가스 전처리 공정을 구성하는 제습기, 냉각 열교환기, 가스 여과기, 가스 승압기, 건식 탈황설비, 실록산 제거설비 및 미세여과기에 대한 형식 및 규격을 나타내었다.

3-3. 바이오가스 발생현황 및 가스성상

(1) 발생현황

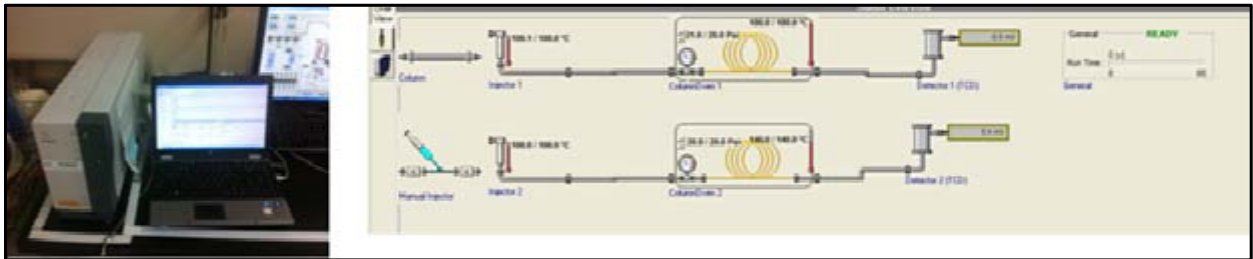
<Table 6>은 난지 물재생센터에서 연간 발생하는 바이오가스 생산량과 바이오가스 이용현황을 보여주고 있다. 난지 물재생센터에서 발생하는 바이오가스 중 가스엔진 발전기로 공급되는 가스의 양이 점차 줄어드는 것을 알 수 있으며, 이는 폐기물 건

Table 6. Production and usage of biogas by year

Object \ year	'13	'14	'15	'16 The first half
Gas engine	8,068,570 (48.8%)	5,551,302 (36.5%)	5,212,979 (31.7%)	2,017,446 (28.9%)
Food garbage disposal plant	2,854,637 (17.3%)	4,888,964 (32.2%)	3,915,219 (23.8%)	1,677,506 (24.1%)
Drying plant	미설치	2,610,955 (17.2%)	4,922,312 (30.0%)	2,618,886 (37.6%)
Digester boiler	1,070,113 (6.5%)	-	-	-
Surplus gas incineration	4,541,234 (27.4%)	2,138,223 (14.1%)	2,386,554 (14.5%)	656,911 (9.4%)
Total	16,534,554 (100%)	15,189,444 (100%)	16,437,064 (100%)	6,970,749 (100%)

Table 7. Biogas component analysis result

Component	Rear end of wet desulfurizer	Rear end of disiloxane
CH4(%)	59.7	60.1
CO2(%)	33.9	34.8
O2(%)	2.3	1.9
N2(%)	3.41	3.1

**Fig. 4.** Biogas analysis device photo(Varian CP-450)

조장에 사용되는 가스량의 증가와 함께 가스품질저하에 따른 가스엔진 정지로 인한 가스 사용량의 감소(잉여가스량 발생)에 기인한 결과이다. 따라서 가스품질로 저하로 발생하는 문제가 해결이 되면 잉여가스량(14%)만큼 가스 엔진 가동률을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 가스성상

<Table 7>은 습식탈황설비 후단과 실록산 흡착탑 후단의 바이오가스 성분을 나타내었다. 바이오가스 중 가스엔진의 연료성분인 메탄은 약 60%를 함유하고 있다. Fig. 4은 바이오가스 성분분석에 사용한 분석기로서, Varian CP-450 분석장치 사진과 분석

기의 구성도를 보여주고 있다. Fig. 5은 분석장치인 Varian CP-450을 이용하여 바이오가스를 분석한 크로마토그램을 보여주고 있다.

또한, 바이오가스에 함유된 실록산의 농도 분석을 위하여 Fig. 6와 Fig. 7과 같은 가스 샘플링 장치를 제작하였다. Fig. 6에 있는 냉각수조는 냉동기를 설치하여 0℃를 유지하도록 하였다. 임핀저는 3단으로 구성하였으며, 흡수액으로 메탄올을 사용하였다. 적산유량계를 설치하였으며, 가스 샘플링시간은 3시간으로 하였다. 가스 샘플링 위치는 가스저장소에서 공급되는 원료가스를 샘플링하여 원료가스에 함유된 실록산의 분포특성을 파악하고자 하였다.

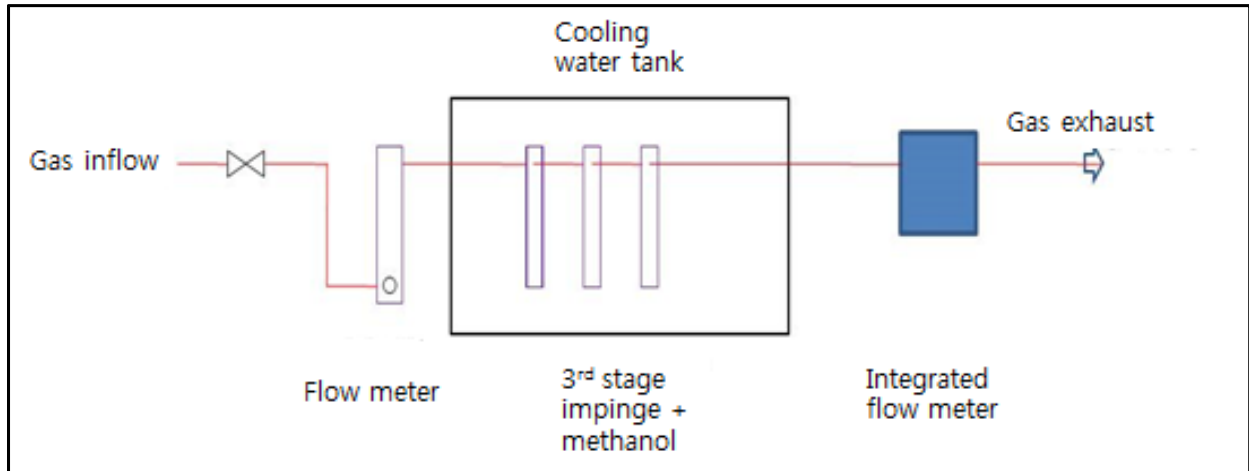


Fig. 6. Systematic diagram of siloxane sampling device



Fig. 7. Siloxane sampling device photo

Table 8. Siloxane contents of incoming biogas

Date	D4(ppm)	D5(ppm)
2016-03	5.2	1.5
2016-04	6.8	1.9
2016-05	4.8	2.1
2016-07	1.2	0.8

바이오가스 샘플링은 메탄을 흡수액을 이용하여 샘플링한 바이오가스이다. <Table 8>은 바이오가스에 함유된 실록산 함량이다.

3-4 바이오가스 품질저하에 의한 운전 영향 분석

(1) CH4농도 저하(기준치 : 60% 이상)

Fig. 8는 비분산적외선(NDIR)Type 가스성분 분

석기(ABB, EL3040)를 이용하여 22개월간 바이오가스 중 메탄의 농도 변화를 분석한 결과이다. 월평균 메탄 농도가 기준치인 60%에 미달하는 것을 알 수 있으며, 이것은 소화가스 생산과정 중 외기유입으로 인한 농도 저하로 추정된다. 이로 인하여 점화실패, 비상정지 등 가스엔진의 정지기간이 증가하였다.

○ 정지건수 : 1호기(60회), 2호기(52회)

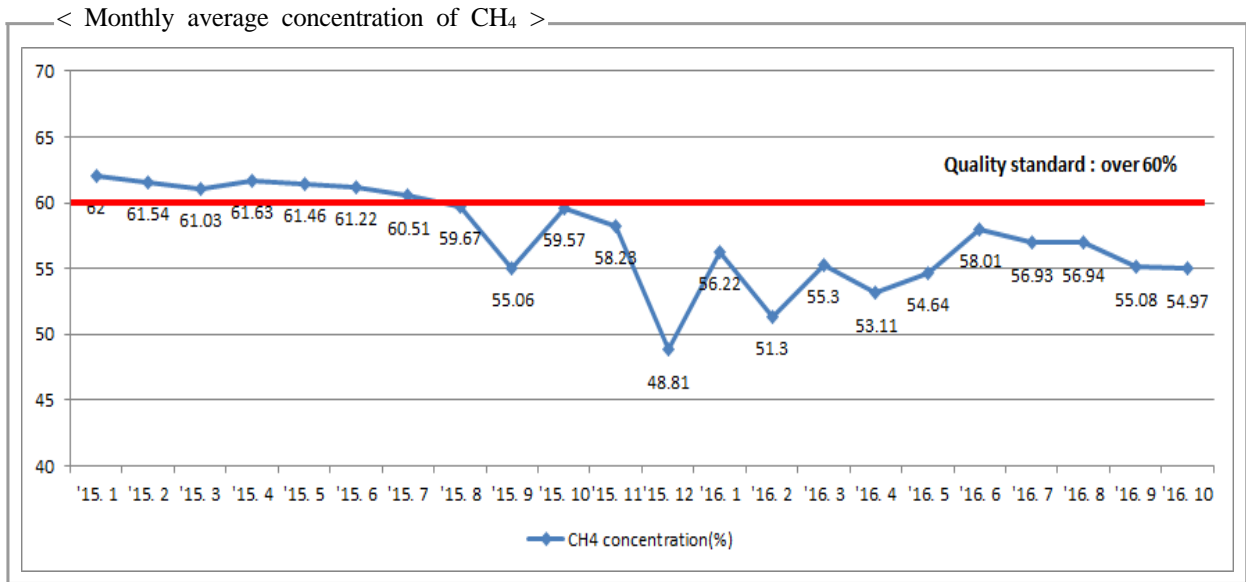


Fig. 8. Average concentration of CH₄ in biogas cogeneration plant

Table 9. Analysis for average concentration of H₂S in biogas cogeneration plant

< H₂S concentration measurement status >

Division \ Quarter	'15	'16 Q1	'16 Q2	'16 Q3	Total
Average concentration of H ₂ S(ppm)	103.9	173.6	166.7	166.1	129.0
Number of measurement(A)	789	135	189	207	1,320
Number of quality degradation(B)	672	135	129	204	1,140
Frequency rate of quality degradation (B/A X 100)	85%	100%	68%	99%	86%

(2) H₂S(황화수소) 농도 상승(기준치 : 50ppm 이하)

<Table 9>는 황화수소 측정장비(GV-100S, Gastec / Gasalert Micro 5, BW Technologies)를 이용하여 바이오가스 성분 중 H₂S 농도를 21개월간 측정하여 분석한 결과이다. 이 기간 동안 황화수소 평균 농도는 129ppm으로 바이오가스 가스엔진 플랜트 설계 기준치인 50ppm을 상회함을 알 수 있으며, 이로 인하여 설비 정지가 다수 발생하였고 및 가스엔진 및 전처리 설비 유지보수 비용의 증가로 이어졌다.

- 정지건수 : 1호기(55회), 2호기(46회)

(3) 2016년 난지 가스엔진 가동현황

- <Table 10>은 2016년 난지 바이오가스엔진의

정지현황을 분석한 결과이다. 가스품질저하 및 정비 등의 사유로 가스엔진 가동률은 계획대비 55%에 불과하며, 정지사유 중 바이오 가스의 품질과 관련한 정지는 63%로 가스엔진의 운영에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있고 이중 H₂S 농도상승과 이로 인한 설비고장의 비율이 39.8%였다. 따라서 바이오 가스의 품질을 높이는 것 다시 말해서 바이오가스 중 불순물의 영향을 최소화하는 것이 안정적인 바이오가스 엔진의 운영에 있어서 최선의 방안이라 할 수 있다.

Table 10. Downtime analysis of biogas engine

< Gas engine stop status >			
(2016. 10, unit : h)			
Stop-rate Cause	Gas engine #1 (Downtime)	Gas engine #2 (Downtime)	#1,2 Total (Downtime)
Gas shortage	7.9% (658h)	13.7% (1,150h)	21.6% (1,808h)
CH ₄ density degradation	12.3% (1,029h)	11.3% (948h)	23.6% (1,978h)
H ₂ S concentration rise	10.6% (883h)	8.5% (713h)	19.1% (1,597h)
Equipment failure	13.8% (1,158h)	6.9% (577h)	20.7% (1,735h)
Overhaul	7.2% (605h)	7.5% (628h)	14.7% (1,233h)

4. 흡착제 물성 분석

4-1 국내 활성탄 물성 분석

Fig. 9은 활성탄의 물성인 비표면적, 거대기공 및 미세기공을 측정하는 비표면적 측정장치이다. 본 연구에서 사용한 측정장치 모델은 일본의 Bel-Sorp Max이다. 측정에 사용한 활성탄은 국내 활성탄업체에서 판매되고 있는 5종류의 활성탄을 분석한 결과를 Fig. 10~Fig. 12에서 보여주고 있다.

Fig. 10은 활성탄에 존재하는 비표면적을 보여주는 질소흡착등온선이다. 질소흡착등온선을 통하여 활성탄이 가지고 있는 기공 크기를 대략적으로 파악할 수 있다. Fig. 11은 활성탄에 존재하는 거대기공의 분포를, Fig. 12은 활성탄에 존재하는 미세기공을 분포를 보여주고 있다. 이와 같이 활성탄 종류에 따라 기공분포가 달라지므로, 활성탄을 적용하고자 하는 장소에 적합한 활성탄을 선정하는 것이 매우 중요하다.

4-2 난지 바이오가스 플랜트 활성탄 분석

(1) 질소흡착등온선

Fig. 13는 바이오가스중 황화수소 흡착제거에 사용하는 신규활성탄과 황화수소가 흡착된 폐활성탄의 질소흡착등온선을 보여주고 있다. 또한 <Table 11>는 활성탄의 물성인 비표면적(BET), 기공부피(V_m), 전용적(Total Pore volume) 및 평균기공지름을 보여주고 있다. 신규활성탄에 비해 폐활성탄은 질소흡착등온선이 거의 변화하지 않는 경로를 나타내고 있다. <Table 11>에서 보는 바와 같이 신규활성탄의 비표면적은 1063 m²/g인 반면, 폐활성탄의 비표면적은 3 m²/g을 보여주고 있다.

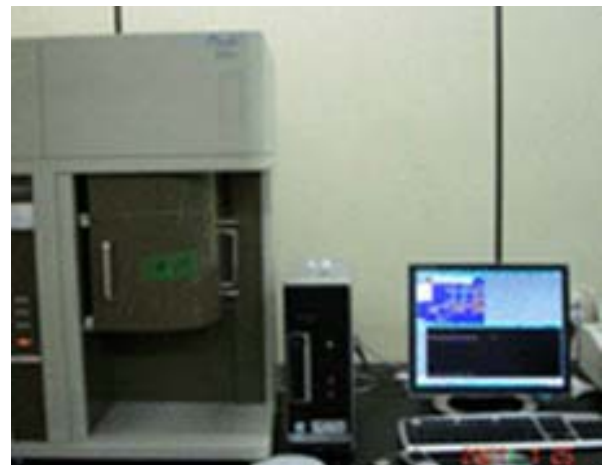


Fig. 9. Apparatus for evaluating activated carbon properties

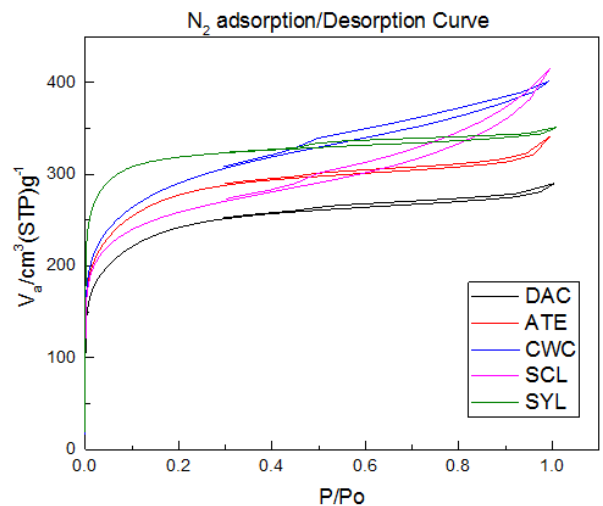


Fig. 10. Nitrogen adsorption isotherm of activated carbon

Table 11. Properties of new and waste activated carbon

Item	New-AC	Waste-AC
V _m (m ³ /g)	244.37	0.7267
a _s ,BET (m ² /g)	1063	3.163
Total pore volume (cm ³ /g)	0.6091	0.027
Average pore diameter (nm)	2.2908	34.146

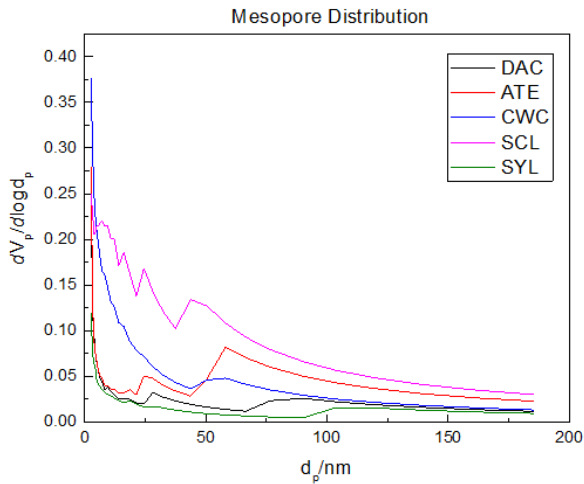


Fig. 11. Mesopore distribution of activated carbon

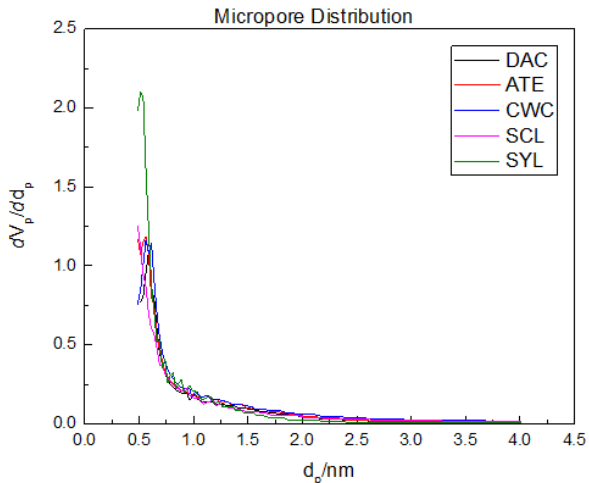


Fig. 12. Microopore distribution of activated carbon

(2) 침착활성탄 미침착활성탄 비교 실험

Fig. 14과 Fig. 15는 활성탄을 이용하여 바이오가스중 황화수소 제거에 대한 흡착실험 장치 및 실험

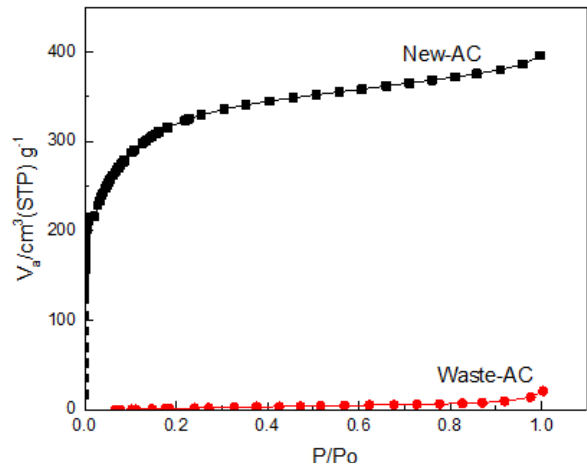


Fig. 13. Nitrogen adsorption isotherm of new and waste activated carbon

결과이다. Fig. 14는 실험실에서 활성탄을 이용한 흡착장치를 이용한 H₂S 흡착실험으로서, 사용한 활성탄은 침착활성탄과 미침착활성탄이다. 바이오가스중 황화수소 흡착실험에 사용한 분석기는 기체인 황을 전문적으로 분석하는 PFPD(Pulsed Flame Photometric Detector)검출기를 구비한 가스크로마토그래피(GC)를 사용하여 연속적으로 분석하였다.

미침착활성탄에 비해 침착활성탄이 황화수소에 대한 파과점시간이 오래 걸리고 있어, 침착활성탄이 황화수소 제거에 월등함을 보여주고 있다. 미침착활성탄의 H₂S 흡착능은 5.2 mg/g인 반면, 침착활성탄의 흡착능은 7.5 mg/g이다.

Fig. 15은 현장인 난지하수처리장에서 발생하는 바이오가스를 대상으로 한 황화수소 흡착실험 장치와 실험결과이다. 현장 실험장치는 일정량의 활성탄을 충전한 흡착칼럼 및 유량계로 구성되어 있고, 황화수소 검출에 사용된 분석기는 휴대용 황화수소 분석기를 사용하였다. 현장에서의 바이오가스중 황화수소 흡착능은 5.5 mg/g이다. 실험실 및 현장의 황화수소 흡착능 사이에 편차가 발생하는 것은 현장

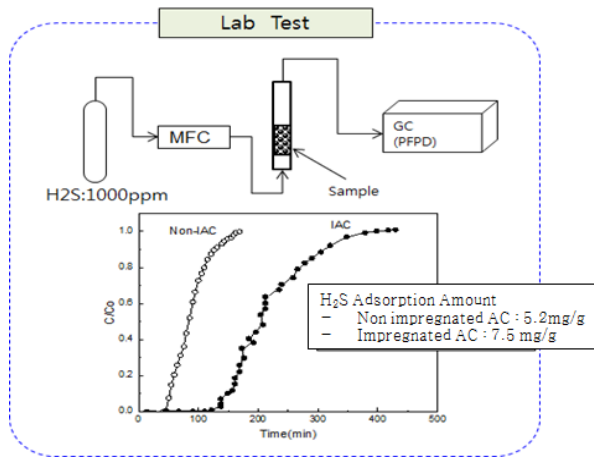


Fig. 14. Adsorption experiment equipment and experimental results of activated carbon(LAB)

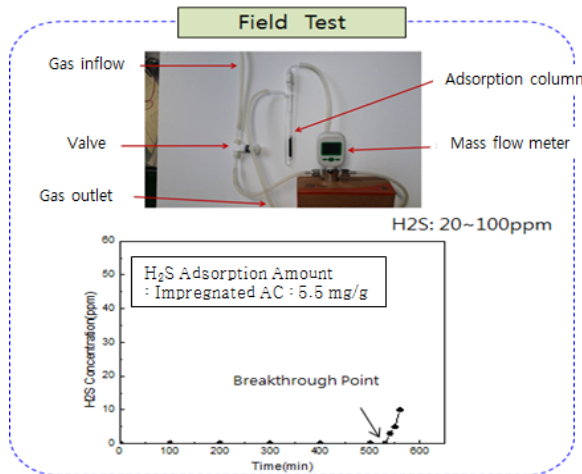


Fig. 15. Adsorption experiment equipment and experimental results of activated carbon(Site)

실험시 공급되는 바이오가스의 유량이 불규칙적인 유량변화로 추정된다.

4-3 난지 바이오가스 플랜트 활성탄 분석 결과 고찰

활성탄 분석 결과 난지 바이오가스플랜트의 활성탄의 질소 흡착등온선의 형태는 타사와 유사함을 알 수 있으며, 침착활성탄과 미침착활성탄의 흡착 실험결과 연구실실험에서는 2mg/g의 흡착량 차이가 있었다. 현장실험에서는 불규칙적인 유량으로 목적하는 결과를 도출하지는 못하였으나 연구실 실험에 비해 흡착량이 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 활성탄은 다양한 기공 구조를 보이고 있어, 바이오가스 중 황화수소 및 실록산 제거에 적합한 기공을 가지는 활성탄 선정 필요가 있다.

5. 운영방법 개선

바이오가스엔진의 운영에서 발생하는 잦은 고장 정지의 주요원인으로 황화수소와 실록산, 수분이 바이오 가스엔진 고장의 주요 원인으로 볼 수 있으며, 이 중 황화수소는 고장을 일으키는 다른 물질과 반응하며, 전처리 공정에 중대한 영향을 미치는 물질로 볼 수 있다. 결과적으로, 황화수소 제거방법의 최적화가 안정적인 바이오 가스엔진 운영을 위한 필수적인 대책으로 사료된다. 또한 바이오가스의 성분분석결과 바이오가스에 포함된 불순물의 함량이 결정되는 변수가 다양하여 그 발생량을 정량적으로 예측하는 것이 현실적으로 어려움이 상존하므로[4] 탈황설비 활성탄의 재질 변경을 통한 황화수소 제거율 향상은 경제적, 실효적인 측면에서 효과가 미미하고, 신소재의 개발 및 도입은 현실적인 어려움이 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 바이오가스의 불순물에 의한 영향을 최소화하고 가스엔진 운영의 최적화를 위해 바이오가스 플랜트 공정개선 방안을 제시하고 운영하였으며 그 결과는 다음과 같다.

5-1 운영방법 개선방안(적용)

(1) H₂S 측정주기를 변경하였다. 황화수소 측정주기를 과거 운전Shift당 1회이던 것을 Shift당 3회로 하여 약10회/일 로 변경하여 황화수소의 유입 농도를 보다 민감하게 관찰할 수 있도록 하였고 농도 변화의 추이를 관찰하여 탈황설비 활성탄의 교체시기를 예측하는 기반이 되도록 하였다.

(2) 활성탄 교체 기준 및 주기를 변경하였다. 가동시간과 활성탄 교체주기 계산식(식1)[5]을 기준으로 하여 활성탄의 교체 주기를 결정하던 것을 가동시간과 활성탄 교체주기 계산식(식1)[5]과 더불어 탈황탑 후단 및 실록산탑 후단의 황화수소 농도의 변화 추이를 분석하여 적정 교체시기를 결정하였다.

- 활성탄교체주기 계산식(t)

$$t = \frac{W \cdot S}{E \cdot Q \cdot C} \dots\dots\dots (1)$$

- t : 활성탄 교체주기
- W: 흡착제 질량
- S : 활성탄 흡착량
- E : 활성탄 사용효율
- Q : 처리가스량
- C : 오염물질 농도

- 활성탄교체공정 : 계산식에 의한 활성탄 교체시기가 도래하거나 실록산탑 후단의 황화수소 농도가 연속적으로 3일 이상 100ppm이상이 기록

되면 ④에 언급된 단가계약을 맺은 국산업체에 납품을 지시하여 7일 이내에 교체를 완료하도록 하였다.

(3) <Table 13>은 바이오가스엔진의 연료 인입구 가스 Vent 공정 개선과 효과를 보여준다. 활성탄의 교체 및 엔진의 보수 후 연료라인에 낮은 CH₄ 농도를 갖는 연료가 존재하여 가스엔진의 기동이 불가

능하므로 엔진 기동전 연료라인을 개방하여 Vent 작업을 시행하여 한다. 기존 공정은 Vent 작업을 시행할 때마다 연료배관을 개방하여 Vent Hose를 연결하여 공정을 진행하게 되므로 많은 문제점을 갖고 있었다<Table 12>. 이러한 문제를 해결하기 위해 Vent 공정의 개선이 필요하고 이를 위하여 연료 배관에 3-Way Valve를 신설하여 작업시간 단축과 매뉴얼 작업에 의한 설비 손상 및 불순물 유입이 방

Table 12. Problems before process improvement





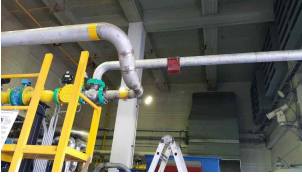

Existing Task	Problem
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Flexible Joint Separation - Equipment damage by frequent assembly and disassembly - Possibility of entering foreign matter into the engine
	<ul style="list-style-type: none"> ○ PVC hose connection and taping - Risk of bio gas leakage - Risk of high place work(2.5M)
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Exhaust low concentration bio-gas - Increasing exhaustion time due to handful flow rear end of regulator ※ Flow before/after regulator : 850 Nm³/h / 250 Nm³/h

Table 13. Process improvements and effects

Process improvements	Effects
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Maximize work efficiency - Easy valve operation - Shortening exhaustion time (1/3hour compared to existing time) - Shortening Process (7times operation → 2times operation)
	<ul style="list-style-type: none"> ○ ensure safety - Eliminate the risk of gas leakage - Eliminate the risk of high place work
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Improve economy - Increase electricity production time (173hour/year) - Increase sales (77,000,000 won/year)

지되도록 하였다.

(4) 실록산 설비의 침착 활성탄의 국산화이다. 실록산 흡착제의 종류별 제거효율을 분석하여 실록산 제거효율이 높은 야자계 활성탄으로 변경하고 국산화로 비용을 절감하였으며, 납품시기를 줄이고 유사시 신속하게 대응할 수 있게 하였다.

5-2 운영방법 개선방안

(1) 바이오가스 농도 변화 모니터링을 위한 가스 분석기 설치

- 바이오가스 중에 함유된 메탄, 이산화탄소, 황화수소 및 실록산 등의 농도는 바이오가스 생산공정, 유입하수의 성상 등에 따라 크게 달라질 수 있으므로 흡착공정의 설계와 교체주기의 파악 등을 위하여 연속적인 가스분석은 매우 중요하다.
- 또한 신뢰할 만한 흡착효과를 얻기 위하여 평균 농도와 비교하여 흡착공정에 여유율을 적용하여 설계하고자 할 경우, 바이오가스 중에 함유된 황화수소 및 실록산 농도 변동의 정도를 파악하는 것이 중요하다. 국내의 경우, 계절변화에 따라 하수처리시설로 유입되는 유기성폐기물의 성상이 변화될 수 있으므로 가스엔진 안정화를 위해 계절변화에 따른 바이오가스 분석 자료 및 바이오가스 농도 모니터링 시스템 고정설치 필요하다.

(2) 탈황기 흡착탑에 사용되는 활성탄 구매사양 기준 강화

- 탈황기에 적용되는 석탄계 침착활성탄의 현재 규격(KS M 1802-2009, 활성탄 시험방법)은 일반적인 활성탄의 흡착능력 기준이므로 공급받는 바이오가스에 함유된 황화수소의 농도에 능동적으로 대처하기 위하여 구매사양 기준의 강화가 요구된다. 기존 규격에 추가하여 H₂S 흡착제거용 활성탄 흡착능(13.6 mg/g 기준)을 신설 및 시험성적서를 첨부하되, 제작사 자체시험시에는 직접 입회하도록 하여 시험의 객관성 확보가 필요하다.

(3) 제습기 인터록 등 수분제거 시스템 구축

- 제습 냉동기의 상태를 가스엔진 발전 시스템과 연동시켜 이상현상(냉동기 운전정지등) 발생시 시스템의 안정성을 확보하도록 한다. 바이오가스 배관이 완전히 건조 상태로 유지되기는 어렵지만, 바이오가스 중의 수분은 최소화 되어야 한다. 황화수소 및 할로젠화합물은 물과 함께 산성수용액으로 되어 가스의 수송 및 압축단계

에서 배관부품, 임펠러 등의 부식 및 손상원인이 될 수 있다. 또한, 바이오가스의 온도와 습도는 흡착효율에 영향을 준다. 활성탄 흡착탑으로 공급되는 가스는 건조되어야 하며, 그렇지 않으면 흡착제는 수분으로 빠르게 포화되어 흡착공정은 선택적으로 이루어지지 않고, 실록산과 황화수소는 흡착되지 않는다. 바이오가스의 상대 습도는 50% 이하로 유지되어야 흡착효율을 증대시킬 수 있다. 수분제거를 위한 제습기 인터록 구성, 신규 수분제거기술(CDF; Cooling Demisting Filtration Scrubbing System) 도입 등 적극적인 설비 투자가 필요하다.

(4) 가스엔진의 안정적인 운전을 위해 메탄함량 증대기술 개발

- 바이오가스 중 메탄가스의 농도가 때때로 50% 미만으로 낮아 엔진 발전기의 기동이 이루어지지 않고 있다. 메탄가스의 농도를 약 60%로 정제하여 엔진 발전기의 안정적인 운영에 기여할 수 있도록 메탄 고질화 기술 도입에 대한 타당성 검토가 필요한 시점이다.
- 2016년 2월부터 6월까지 최근 5개월간 메탄가스 농도 저하로 인한 발전설비 운전정지일수는 33일이었으며, 이때 공급받는 바이오가스 중 메탄가스의 농도는 평균 51%로 매우 낮았다. 가스엔진의 연료성분인 CH₄ 농도저하 대응을 위한 바이오가스 고질화 시스템 개발이 필요하다.

5-3 개선방안 적용 결과

Fig. 16에서 보는 바와 같이 운영개선 방안 적용 전, 후의 23개월 동안 난지 물재생센터의 가스엔진 운전시간을 분석해보면 운영방법의 개선 전인 1기간 동안은 트러블로 인한 정지시간이 길고 전체적인 가동율이 낮으며, 1호기, 2호기가 각각 가동시간의 편차를 보이고 있다. 그러나 운영방법을 개선한 후인 2기간 동안은 가동율이 전체적으로 높으며, 트러블로 인한 비상정지 시간이 현저히 줄어들었으며, 1, 2호기가 유사한 운전시간 추이를 가짐으로써 보다 안정적으로 운영되고 있음을 알 수 있다.

<Table 14>는 2014년과 2015년 난지 물재생센터 가스엔진의 운전시간과 고장정지시간을 보여준다.

1호기는 고장이 발생하기 시작한 2014년 9월부터 2015년 2월까지 약 6개월 동안 월평균 가동시간이 102시간이었고 운영방법을 개선한 후 2015년 3월부터 동년 8월까지 6개월 동안 월평균 가동시간은 537시간으로 530% 증가하였다. 2호기는 고장이 발생하기 시작한 2014년 6월부터 2015년 2월까지 약 8개월동안 월평균 가동시간이 208시간이었고 운영

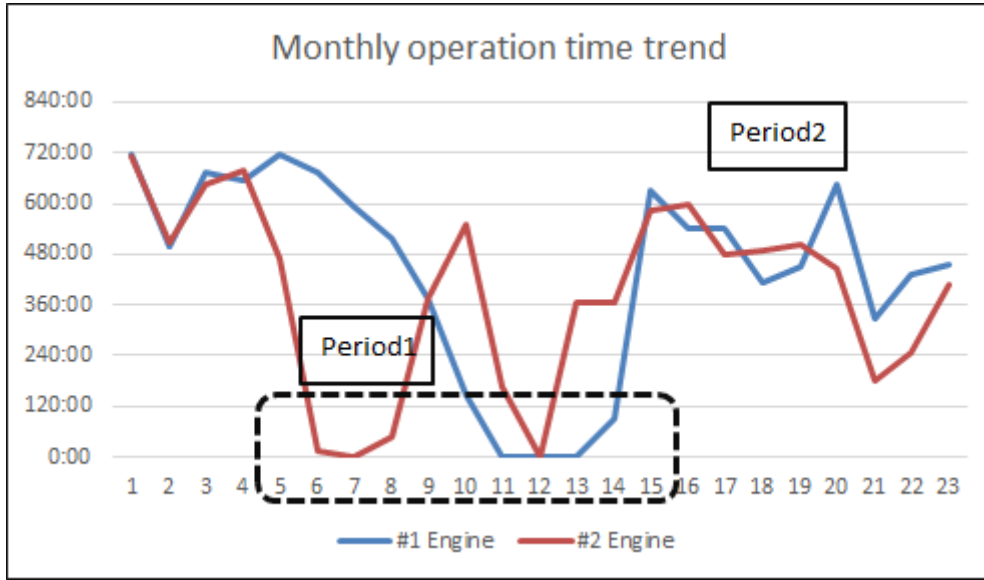


Fig. 16. Analysis for operating hours of biogas engines

Table 14. Operating hours of biogas engines

	Mon.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2014	#1	717	499	671	656	715	671	591	519	373	146	0:00	0:00
	#2	714	506	644	677	468	13	0:00	45	372	549	164	0:00
2015	#1	0:30	90	631	542	543	411	451	643	X			
	#2	367	363	584	598	477	490	501	444				

방법 개선 시행 후 2015년 3월 부터 동년 8월까지 6개월 동안 월평균 가동시간은 516시간으로 250% 증가하였다.

6. 결론

본 연구에서는 난지 물재생센터의 하수처리장에서 발생하는 바이오가스를 이용한 가스엔진 플랜트의 실제 운영 결과로 부터 나타난 고장정지의 주요 원인인 불순물에 의한 영향을 최소화하기 위해 현재 사용 중인 활성탄에 대한 성분분석 및 흡착실험을 통해 활성탄의 흡착능력 품질 기준을 마련을 위한 여건을 조성하였다. 또한, 활성탄의 교체 주기 기준 수립, 황화수소 측정 주기 강화, 활성탄 국산화, 설비개선 등 바이오플랜트 운영기준 강화 및 개선을 시행한 결과 가스엔진 1호기는 530%, 2호기는 250%의 가동시간이 증가되는 결과를 얻었다. 또한 통풍구(Vent line) 설비개선을 통해 작업공정을 줄이고 발전시간을 증가시켜 안전한 운전을 도모하고 77,000 천원/년의 매출증대효과를 볼 수 있게 되었다.

바이오가스 중에 함유된 메탄, 이산화탄소, 황화수소 및 실록산 등의 농도는 바이오가스 생산공정, 유입하수의 성상 등에 따라 크게 달라져 발생량, 주기 등의 예측이 불가능하고 현재 사용되는 활성탄 및 첨착물 등 불순물 제거용 물질의 개발이 이미 완료되어 새로운 물질의 개발을 통한 정제기술 향상 보다 트러블의 주요원인인 바이오가스 내 불순물의 영향을 최소화하기 위한 황화수소 제거용 활성탄의 교체 주기 변경, 황화수소 측정 주기 및 관리강화, 운영기준 강화 등 운영방법의 개선을 통해 바이오가스 플랜트의 고장 정지를 줄이고 가동률을 높여 안정적인 운영을 하는 것이 최적의 운영방안으로 판단된다. 나아가 바이오가스 농도 변화 모니터링을 위한 가스분석기 설치, 탈황기 흡착탑에 사용되는 활성탄 구매사양 기준 강화, 제습기 인터록 등 수분제거 시스템 구축, 가스엔진의 안정적인 운전을 위해 메탄함량 증대기술 개발 등 앞으로 개선해야 할 방안의 개발 및 적용이 필요할 것으로 사료되며, 이를 통해 보다 안정적인 바이오가스플랜트 운영을 확보할 수 있을 것이라 사료된다.

References

1. Kim, Y. J., 2015, Study on numerical model and pressure swing adsorption process experiment for CH₄/CO₂ separation from biogas, *KyungHee University*, Ph.D. Dissertation (in Korea)
2. Prabucki, M. J., Doczyck, W. and Asmus, D., 2001, Removal of organic silicon compounds from landfill and sewer gas, *Proceedings of Sardinia 2001 Eighth International Waste Management and Landfill Symposium*, Vol. 2, pp. 631-639.
3. Steven, S. and Filippo, T., Six reasons to dry biogas to a low dewpoint before combustion in a CHP engine,
www.parker.com/literature/United%20Kingdom/PAR6841_Whitepaper_v3.pdf.
4. Kim, G. J., Kim, L. H., 2016, Analysis of cause of engine failure during power generation using biogas in sewage treatment plant, *Journal of Energy Engineering* v.25, No.4, Dec pp. 13-29
5. 한국지역난방공사, 2012, 난지 물재생센터 바이오 가스엔진 구매, 탈황기 Vendor print pp. 11
6. Noyola1,* , Juan Manuel Morgan-Sagastume1& Jorge E. López-Hernán, 2006 Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic-wastewater: odor control and energy/resource recovery Adalberto, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* vol 5: pp 93-114
7. Muhammad Rashed Al Mamun and Shuichi Torii, 2017, Enhancement of Methane Concentration by Removing Contaminants from Biogas Mixtures Using Combined Method of Absorption and Adsorption, *Hindawi International Journal of Chemical Engineering*, pp1-9
8. Schweigkofler, M., Niessner, R., 2001, Removal of siloxanes in biogases, *Journal of Hazardous Materials*, B83, pp183-196
9. Rafaela Lora Grandoa, Adelaide Maria de Souza Antunea,b, Fabiana Valéria da Fonseca, Antoni Sánchezc, Raquel Barrenac, Xavier Fontc, 2017, Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, pp 44-53