

Treatment of palm oil mill effluent using 2 stage reactors combined anaerobic hybrid reactor and anaerobic attached growth reactor

혼합공정과 부착성장공정을 조합한 2단계 혐기 조합공정에서 palm oil mill effluent의 처리

Chang-Ha Shin · Sung-Min Son · Joo-Young Jeong · Joo-Yang Park*

신창하 · 손성민 · 정주영 · 박주양*

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University
한양대학교 건설환경공학과

Abstract : Present study was conducted to evaluate the performance of Anaerobic Hybrid Reactor (AHR) combined with two types of anaerobic attached growth reactors at mesophilic temperature (37 °C). The reactor was operated at the influent substrate condition of 19,400 mg/L soluble chemical oxygen demand (sCOD). The organic loading rate (OLR) and flow rate were varied in the range of 9.5 ~ 22.5 kg/m³ · day and 10.6 ~ 26.0 L/day respectively since start-up was done. The COD removal efficiency of 93 % was measured at the OLR of 14 kg/m³ · day in AHR. However a reduction in removal efficiency to as low as 85 % could have been related to a combined effect of high concentration suspended solids (SS) concentration over 3,800 mg/L. On the other hand the total COD removal efficiencies were measured to be 96.3 % and 96.2 % for AHR+APF and AHR+ADF respectively. The pH of the POME was adjusted to neutral range by using sodium bicarbonate at the initial stages of the reactor feed, later stages pH adjustment was not required as the pH was maintained in the desired neutral range due to self-buffering capacity of the reactor. The reactor proved to be economically acceptable and operationally stable. The biogas was measured to have CH₄ and CO₂ with a ratio of 35:65, and methane gas production rate was estimated to be 0.17 ~ 10.269 L CH₄/g COD_{removed}.

Key words : Anaerobic hybrid reactor, anaerobic plug flow filter, anaerobic down flow filter, organic loading rate, biogas production
주제어 : 혐기성 혼합 반응기, 혐기성 압출류형 반응기, 혐기성 하향흐름 반응기, 유기물 부하, 바이오가스 발생

1. 서론

말레이시아와 인도네시아는 세계에서 가장 큰 팜오일 생산국으로서 이들 국가에 있어서 팜오일은 국가적으로 가장 큰 소득원 중 하나이다. 말레이시아의 경우 팜오일을 통해 얻는 수익은 1998년 이미 GDP의 5.6 %를 차지하고 있으며(Yu-soff, 2006), 향후 팜오일을 바이오디젤로 활용하여 수송부분에 사용하는 등의 방법이 논의된다(Reijnders and Huijbregts, 2008).

Palm oil mill effluent (POME)는 팜오일을 생산 중에 발생하는 부산물이다. 1 톤의 팜오일을 생산하는데 5 ~ 7 ton의 물이 필요한 것으로 알려져 있으며, 이 사용된 물 중 50%가 POME로서 배출된다(Rupani et al, 2010). 이는 고농도의 유기물질로서 수계에 유입 시 부영양화를 비롯한 수질오염을 일으키는 것으로 보고되고 있다(Igwe and Ontegbado, 2007).

POME를 처리하기 위해 일반적으로 많이 사용되는 방법은 높은 온도조건을 이용하면서 추가적인 처리 비용이 발생하지 않는다는 장점을 바탕으로 혐기 저류조(anaerobic pond)가 많이 사용되

었다. 하지만 이 공법은 긴 체류시간과 넓은 부지면적, 악취 등으로 잠재적인 환경적 유해 가능성이 큰 것으로 평가 되고 있다(Fang et al, 2011). 또한 저류조에서 발생하는 CO₂와 CH₄는 지구온난화를 유발하는 온실가스로 알려져 있다(Path, 2001). 이러한 문제점을 극복하고자 필요면적을 감소시키고 온실가스를 회수할 수 있는 상향류 슬러지상 공정(up-flow anaerobic sludge blanket, UASB) 방법 등이 많이 연구되고 있다(Lama and Lee, 2011). 하지만 UASB는 높은 농도의 유기물이 공정에 유입 시 과부하를 유발하여 안전성에 제한을 받는 것으로 보고되고 있으며, 상향유속에 따른 biomass 손실 역시 한계점으로 볼 수 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 UASB의 상부에 담체를 충전하여 폐색 현상과 biomass 손실을 줄이면서, 한 반응기 내에 두 가지 이상의 혐기 시스템이 존재하게 되는 anaerobic hybrid reactor (AHR)에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다(Zinatizadeh et al. 2006).

본 연구에서는 이러한 추세와 더불어 선단 반응기로서 AHR과, 후단에 혐기성 부착성장 반응을 추가한 2단계 혐기 조합공정으로서 anaerobic plug-flow reactor (APF)와 ceramic media를 충전한 anaerobic down-flow reactor (ADF)를 병행 연결하여 운전하였다. APF는 baffle로 구분된 구조적인 특징으로 충격부하 시에도 반응기가 안정적으로 운전되는 것으로 알려져 있고(Barber and Stuckey, 1999), ADF는 반응기내 packing media가 갖는 높은 부착능으로 오염물질처리 효율이 높은 것으로 평가 되어(Young, 1983) 후단 반응기로서 함께 고려 되었다.

본 연구에서는 (1) 2단계 조합공정에서 POME의 COD 제거효율을 확인하고, (2) 최대 COD 제거효율을 위한 유입 유기물 부하량을 결정하였으며 (3) POME 성상에 맞는 영양인자 등에 대한 고려 (SS, pH, nutrient)가 이루어졌다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 Palm oil mill effluent (POME)

POME는 인도네시아 현지 팜오일 농장에서 채집하여 사용하였다. POME에는 3 ~ 4 %의 고형물과 0.5 ~ 2 %의 오일이 함유되어 있으며 이는 생물학적 처리에 방해로 주는 것으로 알려져 있다(Igwe et al, 2007). Tong 등(2005)에 따르면 이는 반응기 상에 scum을 유발하고 공정 효율을 저하시키기 때문에 전처리가 필요한 것으로 보고되고 있는데, 이를 위해 decanter(동서, DSD-185 LT)를 통하여 유입 폐수 상에 oil과 과량의 SS를 제어하였다. 유입 폐수의 성상은 Table 1과 같으며 POME 상의 COD:TN:TP비는 Annachharte 등(1996)이 제안한 혐기성 소화에 필요한 영양비 600:5:1 이상을 충족하여 별도의 영양물질의 주입 없이 사용하였다. 또한 POME의 pH가 3.9로 산성을 띄고 있어 NaHCO₃(삼전화학, 99 %)를 중화제로 사용하였다.

Table 1. Characteristic of POME

Component	Aver. POME
COD	19,700 mg/L
TN	154 mg/L
TP	212 mg/L
TSS	3,115 mg/L
VSS	3,005 mg/L
pH	3.9

2.2 반응기 설계 및 제작

본 연구에서는 사용된 반응기는 Fig. 1과 같이 선단부는 AHR이며, 후단은 APF와 ADF를 병행한 조합공정으로 구성되었다. 선단부의 AHR은 직경 20 cm, 높이 65 cm의 20 L 용적을 가지고 있으며 아크릴로 제작되었다. AHR 상부의 담체는 PE 재질의 pall ring (직경 5/8 inch, 비표면적 362 m²/m³, 공극률 92 %) 으로서 4 L를 충전 하였다. 또한 AHR의 후단에 반송조를

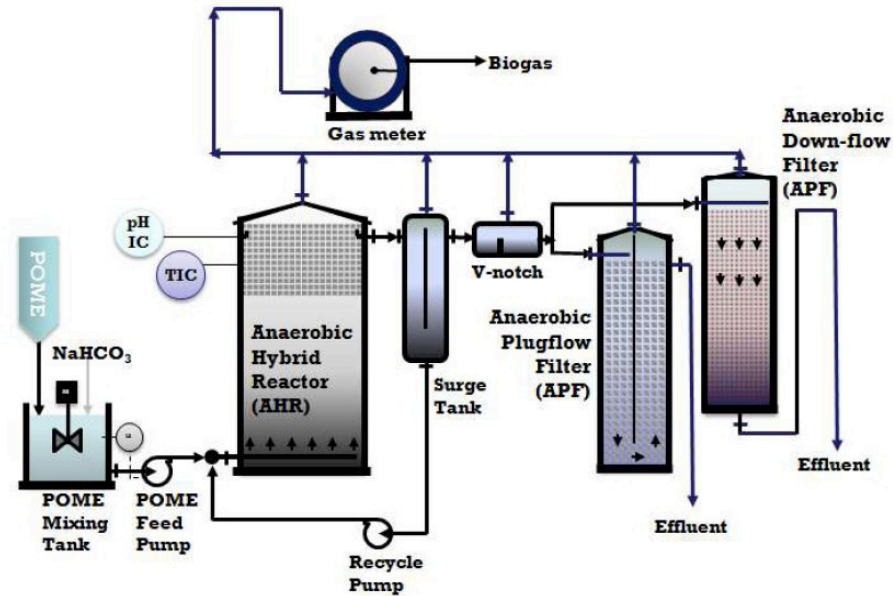


Fig.1. Detailed schematic diagram of reactor

두어 AHR의 pall ring을 통과한 슬러지 회수를 도모하고, 반송 펌프를 통해 유입 유량의 30배를 반송하여 이를 통해 AHR의 상향 유속을 증가시켜 입상화 미생물의 부상을 통한 기질소비가 원활하도록 하였다. 후단부의 APF는 직경 15 cm, 높이 61 cm 부피 10 L의 원형 아크릴로 제작되었으며 중간에 0.5 cm 두께의 baffle을 두어 하향흐름과 상향흐름이 이루어질 수 있도록 설계되었다. APF의 충전 담체는 AHR과 동일한 pall ring으로 반응기의 7 L를 충전 하였다. ADF는 APF와 같은 부피로 제작되었으며 충전 물은 1/2 inch의 황토볼형 담체를 7 L 충전 하였다. 모든 반응기 내 배관은 실리콘 재질의 내경 8 mm의 masterflex tube를 사용하였다. 각 반응기간 연결관의 경사도는 0.2로 하여 중력흐름 시 흐름이 원활하도록 하였고 유입 및 반송은 정량주입을 위해 연동펌프를 사용하였다. 가스 포집은 반응기 상부를 가스미터(Ritter, TG-05/5)와 연결하여 정량 측정하였으며 바이오가스 상의 H₂S는 직경 8 cm, 높이 15 cm의 0.7 L 컬럼에 산화철(Fe₂O₃, 94 %, Bayferrox)을 충전하여 제거하였다.

2.3 실험방법

미생물 생장에 적합한 중온 환경에서 운전이 이루어지도록 반응기 내부온도는 36±1 °C로 유지하고 유입수의 pH는 7±0.5 범위로 조절하여 운전을 수행하였다. 분석을 위한 시료채취는 6 시간 간격으로 수행하였으며 본 반응조의 수리학적 체류시간이 1.8 일이므로 OLR 증가에 따른 반응기내 농도변화가 안정한 상태가 되도록 5 일 이상의 시간을 두고 다음 단계로 변화시켰다. 이 기간은 기존의 논문이 내린 혐기성 생물학적 처리반응기에서 준 정상상태(pseudo steady state)에 대한 정의를 충족시키는 조건이 되도록 하였다(Wilson et al, 1999). 또한 POME의 부하량을 단계적으로 조절하기 위해 유량(volumetric loading)을 OLR에 따라 결정하였고(Basri et al, 2010) 그에 대한 식은 다음의 식(1)에 나타내었다.

$$F = \frac{OLR \times V}{COD} \quad (1)$$

여기서, F는 폐수 유입유량 (m^3/day), OLR은 유기물부하율 ($kg/m^3 \cdot day$)을 나타내며 V는 반응기 용적 (m^3), COD는 유입폐수의 COD 농도 (kg/m^3)를 각각 표현한다.

2.4 미생물 식종

Granule은 하·폐수 처리장에서 채취 후 기존의 연구 (신창하 등, 2012)에서 사용한 lab scale reactor에서 POME에 순응시켜, AHR에 2 L를 seeding하였다. 후단 반응기에는 탈이온수를 채운 후 선단반응기의 유출수 상의 미생물에 의해 seeding이 되도록 하였다.

2.5 분석방법

모든 측정 항목은 standard method에 의거하여 분석되었다. COD_{cr} 분석은 부유물질에 포함된 유기물에 의한 영향을 최소화 하고자 원심분리기를 사용하여 3000 rpm에서 15 분간 전처리한 후 분석하였다. COD 분석은 USEPA에서 승인된 reactor digestion method를 사용하였고, TN은 persulfate digestion method를, TP의 분석은 molybdovanadate method를 사용하여 분광광도기(HACH DR-2800)로 측정하였다. TSS와 VSS의 양은 standard method에 의거하여 분석하였다. Biogas 분석은 CO₂ 가스검지관 (2HT, gastech)을 사용하였고 기존의 POME를 대상으로 한 혐기성 공법에서는 발생하는 바이오 가스가 대부분 CO₂와 CH₄ 형태로 배출되므로(Tong et al, 2005) CO₂를 제외한 바이오 가스 발생량을 CH₄로 가정하였다(Lara et al, 2000). 또한 충전된 media의 부착된 미생물의 양은 biofilm이 형성된 담체를 80 °C에 24 시간 동안 건조하여 전후의 무게를 분석하였다(Zinatizadeh et al, 2006).

3. 결과 및 고찰

3.1 Reactor performance

3.1.1 COD제거효율의 변화

반응기의 운전은 170일 동안 수행하였으며 운전기간 중 AHR의 COD 제거효율은 84.9 ~ 93.8 %로 나타났고, 후단반응기의 전체 COD 제거 효율은 AHR+APF가 90.7 ~ 96.3 %, AHR+ADF의 효율은 91.9 ~ 96.2 %로 나타났다(Fig. 2).

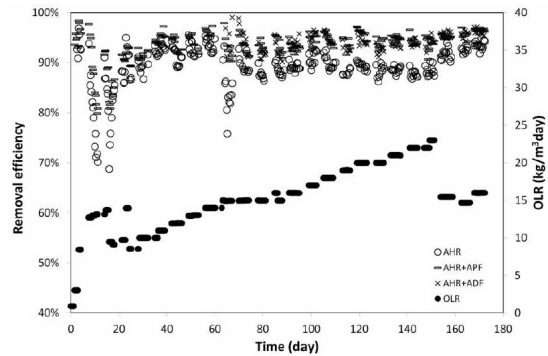


Fig.2. Variation of COD removal efficiency changing OLR

혐기성처리의 경우에는 start up 기간이 3 ~ 8개월이 걸리는 것으로 알려져 있는데(Zhou et al, 2006), 본 반응기에 seeding한 미생물은 POME에 순응이 되어있는 상태이기 때문에 start-up을 고려하지 않고 미생물의 반응기내 적응을 위해 단계적으로 OLR을 조절하였다. 초기 OLR을 1, 3, 8, 12 $kg/m^3 \cdot day$ 로 단계적으로 증가시키기에 따라 COD 제거 효율이 93 %에서 71 %로 낮아지는 결과를 보였고, 이는 OLR 증가에 따른 loading shock로 사료된다. 따라서 그 이후의 운전에서는 OLR을 10 $kg/m^3 \cdot day$ 낮추어 1 $kg/m^3 \cdot day$ 씩 단계적으로 증가시켰다. 이후 운전 효율은 90 % 이상 유지가 되었는데 OLR 15 $kg/m^3 \cdot day$ (62-70일)에서 COD 제거효율이 84.9 %로 저하되는 결과를 보였는데 이 시기에 운전상의 문제로 유입폐수의 SS가 4,000 mg/L 이상 유입되었다. Nasiman 등(1996)은 높은 농도의 SS는 짧은 HRT로 운전 시 미생물에 의한 가수분해를 어렵게 하는 것으로 보고하고 있어, 과량의 SS는 반응기 내 효율을 저하시

키는 요인으로 사료된다. 이러한 운전 문제점이 발견됨에 따라 유입폐수의 SS를 3,000 mg/L 이하로 제어하였고 90 % 이상의 제거 효율을 회복하였다. 이 후 계속적인 OLR 증가에 따른 선단 AHR의 COD제거 효율은 22.5 kg/m³.day의 높은 OLR 에서도 88 % 이상의 COD제거 효율을 보여 높은 COD제거 효율 유지가 가능한 것으로 보인다. 또한 AHR이 효율이 저하됨에 관계없이 후단 APF와 ADF는 각각 94.0 %와 94.2 %의 COD 제거효율을 보였다. Lara 등 (2000)이 수행한 연구에서는 UASB와 down flow anaerobic filter (DFAF)의 조합공정에서 선단반응기의 효율에 따라 후단공정의 유입 OLR이 의존됨을 설명하고 UASB의 운전 효율 저하 시 후단반응기에서 전체 tCOD 제거 효율이 98 %를 달성하는 결과를 보였다. 이와 마찬가지로 본 공정이 선단부의 loading shock 또는 condition 유지 실패 등으로 효율이 떨어질 시에도 운전 효율을 유지할 수 있음을 보여준다.

3.1.2 다른 영향인자

본 공정은 AHR의 1차 처리수가 APF와 ADF에 유입되는 구조로서 유입폐수에 의한 pH와 영양 물질의 영향을 확인하기 위해 유입폐수의 약품투여량에 따른 AHR의 condition 변화를 고

려하였다.

반응기 내 pH를 미생물이 활동하기 적합한 중성영역으로 유지하기 위해 유입 폐수의 pH를 중탄산나트륨을 중화제로 사용하여 조절하였다. Chui 등(1994)에 따르면 혐기성반응기에서 발생하는 CO₂가 탄산염이온으로 해리되어 alkalinity로서 반응기내 산성화를 완화시키는 역할을 하는 것으로 보고하고 있다. 따라서 반응기의 가스 중 CO₂ 발생비가 30 % 이상 발생함에 따라 초기 유입수의 pH를 7로 유지시켰던 10 g/L의 pH 완충제의 주입량을 일주일의 간격으로 1/2, 1/4로 단계적으로 줄여가며 pH 유지를 확인하였다. Fig. 3을 통해 나타난 AHR의 pH 변화는 유입폐수에 별도의 pH 완충이 없어도 반응기 내 pH가 중성영역에서 안정됨을 보여준다. 또한 반응기 운전 시 OLR을 높임에 따라 volumetric loading이 증가하여 pH 3.9의 유입폐수가 더 빠른 시간에 유입되었음에도 pH는 6.5 이상 유지되는 것으로 확인되었다. 이 중 140 일 이후의 pH가 증가하며 유지되는 것은 운전 OLR을 낮춰 유입유량이 감소한 것이 원인인 것으로 보인다. 이에 대해 Zinatizadeh 등 (2006)이 POME를 대상으로 수행한 기존 연구에서도 1:47의 높은 반송 비를 통해 effluent 순환이 pH 유지에 도움을 주는 것으로 보고하고 있어 본 반응기 역시 1:30의 높은 반송 비를 통

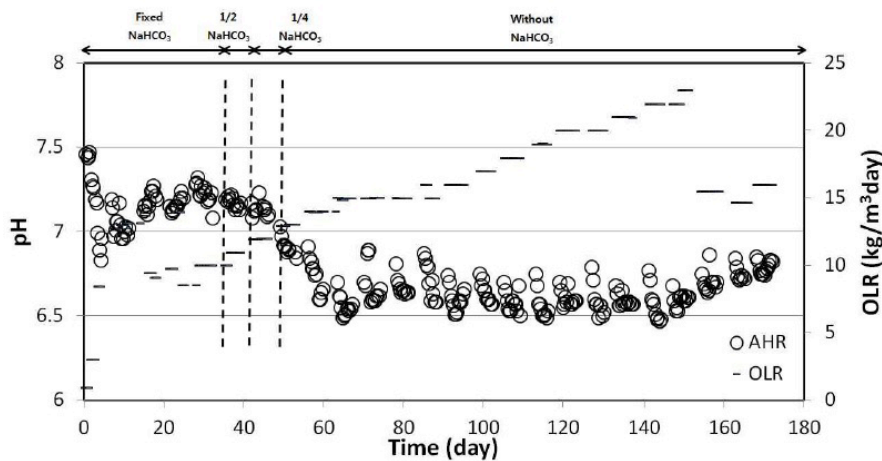


Fig.3. Variation of pH NaHCO₃ dosage

해 유입페수의 산도에 의한 pH 영향이 줄어들 것으로 사료된다.

또한 AHR의 COD:TN의 소비 비는 177:1로 나타났으며 COD:TN의 낮은 소비 비는 바이오 가스 중 CO₂의 비 (50 % 이상)에 영향을 주는 것으로 알려져 있으나 (박종문 등, 2004) 본 반응기의 CO₂ 발생 비는 35.4 %로 일반적인 POME의 혐기성처리 공정과 비슷한 비율을 나타내었다 (Tong 등, 2005). 이를 통해 POME의 추가적인 영양물질 투입은 필요하지 않는 것으로 보인다.

3.2 OLR 변화에 따른 AHR의 COD제거효율 변화

Start-up 시 POME를 희석시켜 실험을 수행한 시기를 제외하고 OLR 10 kg/m³·day에서부터 단계적으로 OLR을 증가시켜 AHR의 COD 제거효율의 변화를 확인하였다. Fig. 4에서 각 OLR에 해당하는 step point는 일주일간 동일한 OLR에서의 운전효율을 평균화하였다. 실험결과 OLR 14 kg/m³·day에서 93.8 %로 최대 제거효율을 나타냈다. 이는 단계적으로 OLR을 증가시키기에 따라 반응기에서의 기질소비량이 증가하여 반응효율이 증가됨을 보이며 14 kg/m³·day 이후 효율이 감소하는 것은 유기물 부하가 증가함에 따라 미생물에 과부하로 작용하는 것으로 사료된다. 이에 대해 Toprak (1995)은 OLR이 증가시키기에 따라 COD제거 효율이 개선되는 본 연구와 유사한 결과를 보였고 급격한 OLR 증가는 미생물의 산 생성단계 (acidogenesis)의 활성도를 떨어뜨리는 것으로 보고하고 있다.

또한 유입된 SS의 농도에 따른 효율변화를 고려하기 위해 Fig. 2의 62일부터 SS를 함께 측정하였다. 운전 중 15 kg/m³·day에서 급격한 효율의 저하를 나타냈는데 이는 유입페수 상에 고형물이 제어가 되지 않아 4000 mg/L의 높은 농도로 유입된 것이 원인으로 보여 이에 대한 확인을 위해 Fig. 2의 150 일부터 OLR 15 kg/m³·day에서 유입페수의 SS를 3,000 mg/L로 제어하였

고 운전효율이 회복되는 것을 확인하였다. 이를 통해 공정의 COD 효율을 유지하기 위해서는 SS의 제어가 중요한 것으로 사료된다.

3.3 후단반응기(ADF, APF)의 유기물 제거량

후단 반응기의 유기물 제거량 (removal loading rate)은 AHR로부터 유입되는 OLR이 높아짐에 따라 점차 증가하는 결과를 나타내었다. 후단 반응기로 높은 농도의 OLR이 유입된 이유는 Fig. 2에서 운전 70일경에 나타난 고농도 SS 유입에 따른 AHR의 효율 저하시기이며, 이 때 후단 반응기 내에서 소모된 유기물량이 증가하여 유입수 대비 2차 처리수의 효율은 유지되는 결과를 보였다. Lara 등(2000)이 수행한 연구에서도 이와 유사한 결과를 나타내었는데 이에 대해 낮은 농도의 COD에 대해서 후단 anaerobic filter가 1차 반응의 제거속도를 보이는 결과에 대해 언급하였다. 본 공정 또한 압출류의 흐름특성을 가지는 후단 공정의 특성으로 filter의 상부부터 biofilm 형성됨에 따라 반응기 효율이 점차 증가하는 것으로 사료된다. 또한 선단반응기의 효율 저하에 따른 후단 공정에 높은 농도의 COD가 유입이 되는 경우에도 전체 공정 효율을 유지할 수 있음을 나타낸다.

유출되는 평균 SS의 양은 ADF가 670 mg/L, APF가 520 mg/L로 나타났다. 이 중 95 % 이상이 미생물량을 의미하는 mixed liquor volatile suspended solid (MLVSS)로 유출되는 미생물량이 ADF가 더 많은 것으로 보이며 이는 APF의 baffle을 통한 U자형 흐름이 미생물 유출을 제어하는데 도움을 주는 것으로 사료된다.

3.4 바이오가스 발생량

바이오 가스 중 CO₂ 대 CH₄의 비는 35:65로 일반적인 POME 페수의 anaerobic digestion과 유사한 결과를 나타냈으며 (Tong 등, 2005), 일평균 바이오가스발생량은 38 ~ 107 L/day로 큰 편차로 나타났다. 이는 Fig. 6에서 OLR

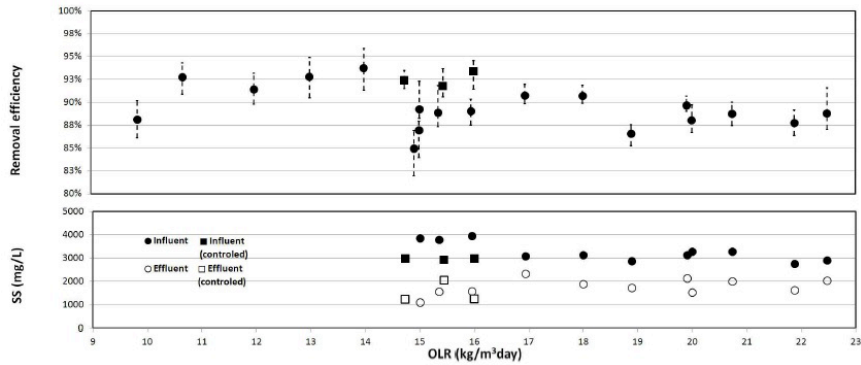


Fig.4. Variation of COD removal efficiency and suspended solid in AHR

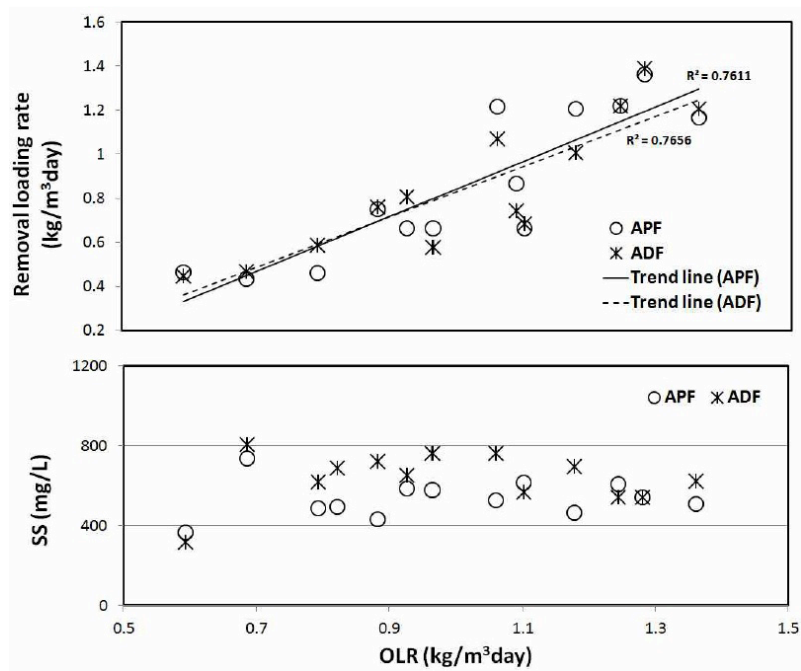


Fig.5. Comparison organic removal rate and suspended solid in APF and ADF

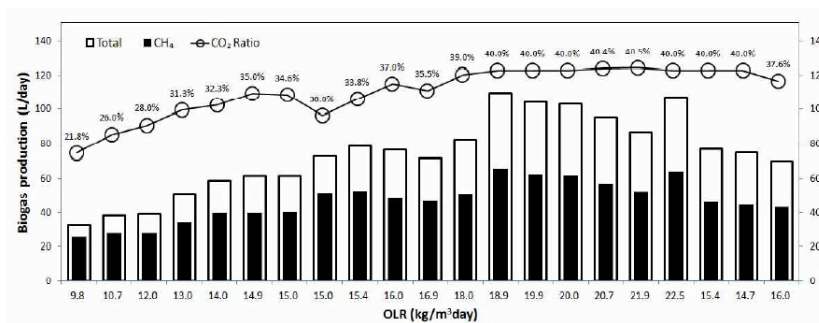


Fig.6. Variation of daily biogas production and ratio of CO₂

이 증가함에 따라 유기물의 바이오가스로 변하는 양이 늘어나고, 운전이 계속됨에 따라 1차 처리수로부터 후단공정에 부착하는 미생물량이 늘어나기 때문인 것으로 사료된다. 또한 메탄가스 생산계수(methane production coefficient)는 Rincón등 (2008)이 제안한 다음 식 (2)을 사용하였다.

$$q_{CH_4} q_{CH_4} = Y_p q (S_0 - S) \quad (2)$$

여기서, S_0 , S 는 유입, 유출 기질 농도를 나타내며 Y_p 는 메탄생산계수를, q 는 유입유량을 의미한다. 계산된 메탄가스생산계수는 0.171 ~ 0.269 L CH_4 /g $COD_{removed}$ 로 나타났다. Lama 등 (2011)이 제안한 이론적인 값인 0.330 L CH_4 /g $COD_{removed}$ 값과 차이를 보였다. POME를 대상으로 AHR 반응기에 대해서 Zinatizadeh 등(2005)이 수행하여 0.287 ~ 0.348 L CH_4 /g $COD_{removed}$ 로 이론값과 유사한 결과를 보였으나, Lara 등 (2000)이 수행한 후단공정을 더한 조합 공정에서는 본 실험결과와 비슷한 0.26 CH_4 /g $COD_{removed}$ 로 나타났다. 이는 후단반응기가 미생물의 부착성장에 의한 유기물제거과정에서 유기물이 담체에 흡착 등의 물리화적으로 처리되어 미생물로 처리하는 단일반응기보다 메탄생산계수가 작게 나타나는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구는 POME를 대상으로 한 혐기 조합 공정을 통해 최적 COD 제거효율 달성을 위한 운전인자 산정을 위한 연구가 수행되었다. 운전인자로서 고려된 값으로는 유기물 부하량과 유입 폐수상의 SS, pH 완충제, 영양물질(TN, TP) 등이 고려되었다. 또한 선단 공정으로서 AHR의 처리에 대한 고찰과 후단 공정으로서 병행 운전된 APF, ADF의 처리 및 비교하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 170 일 간의 운전 동안 OLR을 0 ~ 22.5

kg/m³.day로 조절하였을 때 반응기의 전체 COD제거 효율은 AHR+APF가 90.7 ~ 96.3 %, AHR+ADF의 효율은 91.9 ~ 96.2 %로 나타났다. 운전 중 폐수 제어를 위한 약품투입량을 모의한 결과 본 공정에서는 pH 유지를 위한 중화제 및 영양물질 투입은 필요치 않은 것으로 판단된다.

2. 선단 반응기로서 AHR은 유입 OLR을 14 kg/m³.day로 운전하였을 때 93.8 %의 최대 COD제거 효율을 보였다. 이를 통해 폐수특성에 따른 최적 효율을 갖는 유기물 부하량이 존재함을 확인하였다.

3. 후단 반응기로서 APF와 ADF는 선단 AHR의 효율 저하 시 운전 효율을 유지하게 하며, 유출 COD와 SS 농도로 보았을 때 APF가 baffle이 갖는 구조적 특징으로 ADF보다 높은 COD제거효율과 낮은 sludge 유출을 나타냈다.

4. 바이오 가스 중 CO₂:CH₄ 구성비는 35:65로 나타났으며, 메탄가스 생성계수는 0.171 ~ 0.269 L CH_4 /g $COD_{removed}$ 로 확인하였고 부착공정을 조합한 기존 연구들과 비슷한 결과를 보여 온실가스 포집에 적합한 공정으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 환경부 폐자원 에너지화 및 non-CO₂ 온실가스사업(과제번호 :10-01-021, 과제명 : 동남아지역 팜오일 잔재물의 에너지화 및 고효율 메탄회수 폐수처리 기술 상용화를 통한 CDM 시범사업 운영)의 지원을 받아 시행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 박종문, 김근호 (2004) 혐기성처리, *DICER techinfo part 1*, 3, 150-164
- 신창하, 오대양, 김태훈, 박주양 (2012) 유기물부하가 Anaerobic Hybrid Reactor 운전효율에 미치는 영향, *대한상하수도학회*, 26(4), 497-502

- Annachhatre A. P. (1996) Anaerobic treatment of industrial wastewaters, *resources, conservation and recycling*, 16, 161-166
- Barber W. P. and Stuckey D. C. (1999) The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review, *Water Resource*, 23, 1559-1578
- Basri M. F., Hassan M. A., Shirai Y., Wakisaka M., Zakaria M. R., Phang L. Y. (2010) Improved biogas production from palm oil mill effluent by a scale-down anaerobic treatment process, *Microbiol Biotechnol*, 26, 505-514
- Chui H. K., Fang H. H. P., Li Y. Y. (1994) Removal of formate from wastewater by anaerobic process, *Environ Engineering*, 120(5), 1308-1320
- Fang C., Thong S. O., Boe K., Angelidaki I. (2011) Comparison of UASB and EGSB reactors performance, for treatment of raw and deoiled palm oil mill effluent (POME), *Journal of Hazardous Material*, 189, 229-234
- Igwe J. C. and Onyegbado C. C. (2007) A Review of Palm Oil Mill Effluent (Pome) Water Treatment, *Global Journal of Environmental Research*, 1(2), 54-62
- Lama M. K. and Lee K. T. (2011) Renewable and sustainable bioenergy production from palm oil mill effluent (POME): Win-win strategies toward better environmental protection, *Biotechnology Advances*, 29, 124-141
- Lara J., Beal; D., Raj R. (2000) Sequential two-stage anaerobic treatment of confectionery wastewater, *agric. Engng Res*, 76, 211-217
- Nasiman S., Chew T. Y., Yaziz M. I. (1996) Treatment of palm oil mill effluent by mesophilic anaerobic digestion with flocculant addition, *Journal of Science and Technology*, 4(2), 263-273
- Path, P. (2001) Green house gas emission and energy benefits of anaerobic digestion of Animal Waste, NREL
- Reijnders L. and Huijbregts M. A. J. (2008) Palm Oil and the emission of carbon-based greenhouse gases, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3, 432-437
- Rincón B., Borja R., González J. M., Portillo M. C., Sáiz-Jiménez C. (2008) Influence of organic loading rate and hydraulic retention time on the performance, stability and microbial communities of one-stage anaerobic digestion of two-phase olive mill solid residue, *Biochemical Engineering Journal*, 40, 253-261
- Rupani P. F., Singh R. P., Ibrahim M. H., Esa N. (2010) Review of Current Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment Methods: Vermicomposting as a Sustainable Practice, *World Applied Sciences Journal*, 10(10), 1190-1201
- Tong S. L. and Jaafar A. B. (2005) POME biogas capture, upgrading and utilization, *Chemistry and Technology, Palm Oil Engineering Bulletin*, 78, 11-17
- Toprak H. (1995) Temperature and organic loading dependency of methane and carbon dioxide emission rates of a full-scale anaerobic waste stabilization pond, *Water Resource*, 29, 1111-1119
- Wilson, F., Wu, M., Tay, J. H. (1999) Influence of media-packing ratio on performance of anaerobic hybrid reactors, *Bioresource Technology*, 71, 151-157
- Young J. C. (1983) The anaerobic filter - past, present, and future, *Third international symposium on anaerobic digestion*, 91-104, Boston, USA
- Yusoff S. (2006) Renewable energy from palm oil - innovation on effective utilization of waste, *Journal of Cleaner Production*, 14, 87-93
- Zhou W., Imai T., Ukita M., Li F., Yuasa A. (2006) Effect of loading rate in the granulation process and granular activity in a bench scale UASB reactor, *Bioresource Technology*, 98, 1386-1392
- Zinatizadeh A. A. L., Mohamed A. R., Najafpour G. D., Isa M. H., Nasrollahzadeh H. (2006) Kinetic evaluation of palm oil mill effluent digestion in a high rate up-flow anaerobic sludge fixed film bioreactor, *Process biochemistry*, 41, 1038-1045