

Palm Oil Mill Effluent 처리 시 Anaerobic Hybrid Reactor의 기질 제거 Kinetics 비교

A Comparison of Substrate Removal Kinetics of Anaerobic Reactor systems treating Palm Oil Mill Effluent

오대양 · 신창하 · 김태훈 · 박주양*

Daeyang Oh · Changha Shin · Taehoon Kim · Jooyang Park*

한양대학교 건설환경공학과

(2011년 11월4일 접수; 2011년 12월13일 수정; 2011년 12월15일 채택)

Abstract

Palm Oil Mill Effluent (POME) is the mixed organic wastewater generated from palm oil industry. In this study, kinetic analysis with treating POME in an anaerobic hybrid reactor (AHR) was performed. Therefore, the AHR was monitored for its performances with respect to the changes of COD concentrations and hydraulic retention time (HRT). Batch tests were performed to find out the substrate removal kinetics by granular sludge from POME. Modified Stover-Kincannon, First-order, Monod, Grau second-order kinetic models were used to analyze the performance of reactor. The results from the batch test indicate that the substrate removal kinetics of granular sludge is corresponds to follow Monod's theory. However, Grau second-order model were the most appropriate models for the continuous test in the AHR. The second order kinetic constant, saturation value constant, maximum substrate removal rate, and first-order kinetic constant were 2.60/day, 41.905 g/L-day, 39.683 g/L-day, and 1.25/day respectively. And the most appropriate model was Grau second-order kinetic model comparing the model prediction values and measured COD concentrations of effluent, whereas modified Stover-Kincannon model showed the lowest correlation.

Keywords : Anaerobic hybrid reactor, POME, Modeling, Grau, Stover-Kincannon, First-order, Kinetics

1. 서론

Kinetic modeling은 생물학적 처리 시 시스템 및 반응기의 거동을 모니터링 함과 동시에 특정 메카니즘에 의거한 수치해석을 수행하기 위한 용도로 이용된다. 이와 함께, Monod, First-order, Second-order, Grau Second-order, Stover-Kincannon등의 다양한 kinetic model들에 관한 연구도 현재까지 활발히 이루어지고 있다(Donoso-Bravo et al., 2011). 이 중 Stover-Kincannon과 Grau second-order model은 kinetic 상수를 결정하기 위하여 가장 널리 사용되어

지는 수학적 모델로, 이들은 합성폐수(Buyukkamaci et al., 2002; Bhunia & Ghangrekar, 2008), 도시폐수(Turkdogan-Aydinol et al., 2011), 섬유폐수(Sandhya et al., 2008), 종이폐수(Yilmaz et al., 2008)등과 같은 다양한 폐수에 성공적으로 적용되었다. 또한 이 두 모델은 Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) 반응기뿐만 아니라 Anaerobic Filter (AF), Anaerobic Hybrid Reactor (AHR)등 여러 형태의 혐기성 생물학적 반응기에도 효과적으로 적용이 가능하다.

AHR은 기존 UASB 반응기에 AF가 결합된 형태로, 하부의 sludge bed와 상부의 packing media로 이루어

* Corresponding author Tel:+82-2-2220-0411, FAX: +82-2-2220-1945, E-mail: jooypark@kanyang.ac.kr (J.Y.Park)

어진 것이 특징이다(Maxham & Wakamiya, 1981; Wu et al., 2000). AHR은 UASB공법의 단점인 슬러지 유실을 상부 media 부착에 의하여 막아준다는 장점을 지니고 있으며, sludge granulation을 이용한 생물학적 처리방법이다. Sludge granulation은 UASB공법에 매우 중요한 요소로 이는 seed sludge와 폐수의 성질, 그리고 반응기의 수리학적 요소와 밀접한 관련이 있으며 이를 이용한 공법은 고농도 폐수처리에 널리 이용되고 있다(Grot-enhuis et al., 1991; Del Nery et al., 2008).

Palm Oil Mill Effluent (POME)는 오일 팜 (Oil Palm) 밀링 공정등 Crude Palm Oil (CPO)를 추출하는 과정에서 발생하는 폐수이다. POME는 높은 COD와 탁도 그리고 유분을 함유하고 있어, 수질 및 수 생물에 악영향을 미친다. 또한 POME의 처리는 대부분 대기에 노출된 혐기성(嫌氣池)에서 이루어지므로 막대한 양의 메탄가스가 그대로 대기에 방출되고 있어 효율적 COD 저감뿐만 아니라 메탄회수 및 활용까지 도모하는 기술이 요구되는 실정이다(Ahmad et al., 2003; Bhatia et al., 2007; Gobi et al., 2011).

효율적인 POME 처리를 위하여 실험실 또는 필드 규모의 혐기성 소화조에 관한 다양한 연구가 진행되었다. Najafpour 등(2006)의 연구에서는 5 L 용량의 lab-scale의 upflow anaerobic sludge-fixed film (UASFF) 반응기를 이용하여 중온(38°C) 조건에서 실험한 결과 89~97%의 COD 제거율을 보였다. Yacob

등(2006)은 pilot 규모(500 m²)의 말레이시아 지역 anaerobic pond system에서의 COD제거와 메탄가스 발생량을 측정된 결과 약 97%의 COD를 제거하였다고 밝혔다. 하지만 이러한 pond를 이용한 처리 시 메탄가스가 그대로 대기로 방출되었다고 기술하였다. Choorit 과 Wisarnwan (2007)은 바이오가스 포집을 위하여 Closed continuous-flow stirred reactor를 이용하여 mesophilic 조건과 thermophilic 조건하에서 POME를 처리하였으며, 각각 71%, 70%의 COD제거 효율을 보였고 특히 thermophilic 조건하에서 운전 시 보다 많은 바이오가스가 생성되는 것을 밝혔다. 그러나 thermophilic 조건하에서의 운전은 온도유지를 위하여 더 많은 양의 에너지를 필요로 한다는 문제점을 지적하였다. Zhang 등(2008)은 Expanded granular sludge bed (EGSB) 반응기를 이용하여 POME를 처리하였으며 91%의 COD를 제거하였다.

현재 국내에서는 POME 처리 및 모델링에 관한 연구는 활발히 이루어지고 있지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 AHR을 이용하여 POME를 처리하였고 COD 제거 예측에 가장 적합한 모델을 찾기 위하여 kinetic 해석을 수행하였다. 그러므로 AHR에 유입되는 POME의 COD농도와 유량을 변화시켜가며 연속식 실험을 수행하였고 가장 적합한 모델을 파악하고자 그 결과 값을 모델에 적용하여 실험값과 예측 값을 비교하였다. 또한 배치 실험을 병행하여 granular sludge의 COD 제거 특성을 파악해보았다. 또한

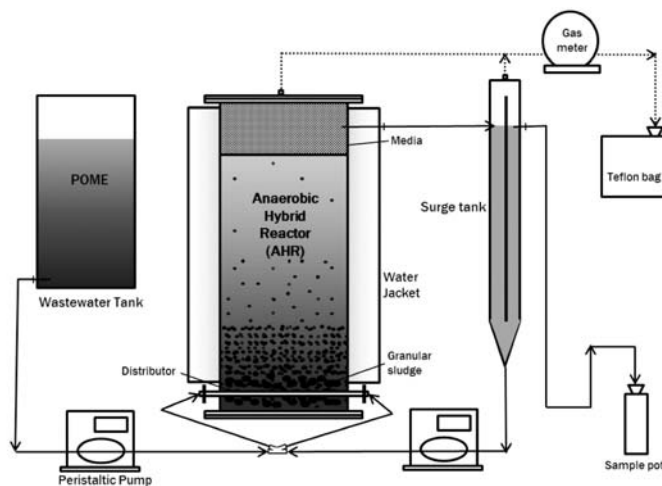


Fig. 1 Schematic diagram of an Anaerobic Hybrid Reactor (AHR)

Table 1. Characteristics of POME

Item	Concentration	Item	Concentration
CODcr	23,500 mg/L	pH	3.9
BOD	5,700 mg/L	total P	61.6 mg/L
total N	238 mg/L	Manganese, Mn	8.8 mg/L
Potassium, K	1,728 mg/L	Nickel, Ni	0.2 mg/L
Magnesium, Mg	533 mg/L	Aluminum, Al	7.7 mg/L
SS	146 mg/L	Iron, Fe	58.4 mg/L

kinetic 해석을 위하여 사용된 모델은 널리 알려진 first-order kinetic model, Grau second-order kinetic model, modified Stover-Kincannon model, Monod model이다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 장치

반응기는 AHR의 형태로 하부와 상부는 각각 granular sludge와 media를 충전하였다. AHR은 직경 20 cm, 높이 65 cm로 부피는 20 L이며 media는 PE 재질의 5/8 inch 사이즈의 폴링을 사용하였다. 온도 조절을 위하여 water jacket을 적용 하였다. 연동식 펌프를 사용하여 유입유량과 반송유량을 조정하였으며 gas meter를 사용하여 가스의 발생량을 측정하였다.

2.2 시험수 성상

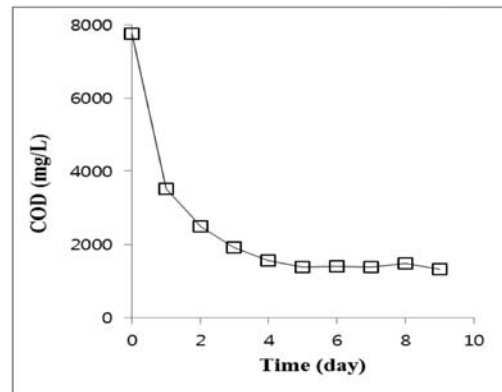
POME는 말레이시아 지역으로부터 수입하였고 Table 1과 같은 성질을 가지고 있다. POME의 pH는 3.9로 산성을 띄는 폐수이므로 pH조절을 위하여 NaHCO₃를 주입하여 6.5~6.8로 상승시켜 사용하였다. 그러나 미생물 영양물질로 알려진 N, P는 물론 철, 니켈, 망간, 칼륨등이 다량으로 함유되어 있어 추가 영양물질 주입은 하지 않았다.

2.3 기질 소비특성 실험

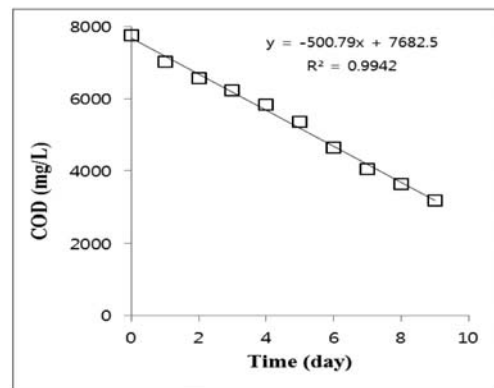
AHR 내부에서 혐기성 슬러지를 채취하여 이를 이용한 배치 실험을 수행 하였다. 배치 반응조로서 40 mL 바이알을 사용하였으며, 구멍이 뚫린 캡과 고무테프론 재질의 셉텀을 이용하여 주사기로 반복 샘플링 시 외부 공기가 혼입되지 않도록 하였다. 슬러지는 5.5 mL씩 배치 반응조에 주입하였으며 폐수로는 POME를 사용하여 시간에 따른 COD 변화를 관찰하였다.

2.4 AHR을 이용한 연속 실험

70일간 유입수의 농도와 유입 유량을 변화시켜가며 운전하였다. Organic Loading Rate (OLR) 10.5 g/L/d 까지는 POME를 증류수에 희석하여 조정하였으며 이후에는 유입유량을 증가시켜 OLR을 상승하여 AHR을 이용한 연속식 실험을 수행하였다. Gas meter를 이용



(a)



(b)

Fig. 2 Changes of COD concentrations depend on dosage of biomass in kinetic experiment for 9 days ((a) VSS=3.0 g/L, (b) VSS=0.4 g/L)

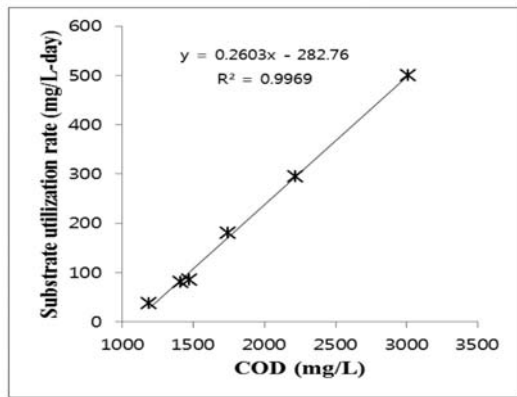


Fig. 3 First order kinetic model application of the batch test result (VSS = 3.0 g/L)

하여 가스 발생량을 측정하였고 유입수와 유출수내 COD, SS, pH, 그리고 VFA를 측정하였다. COD분석에는 Hach사의 DR2800 spectrophotometer (Hach Method 8000)를 이용하였다. VFA는 GC-FID (Agilent HP-6890)를 이용하여 측정하였으며 RESTEK사의 컬럼(Stabilwax-DA, 30m×0.25mm×0.25 μm)을 사용하였다. 반응기는 water jacket을 이용하여 중온 조건에 해당하는 36~37 °C에서 운전되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 COD 제거 특성

외부 영향인자를 배제하였을 때의 biomass의 기질 소비 특성을 파악하기 위하여 증류수로 희석한 POME에 AHR에서 채취한 granular sludge를 주입하

여 배치 실험을 수행하였다. Fig. 2는 각각 다른 양의 biomass (g VSS/L)를 주입하였을 때 시간에 따른 POME의 COD 변화를 나타낸 그래프이다. 3.0 g/L의 VSS가 주입된 경우 기질의 농도는 초기 1일만에 7,750 mg COD/L의 농도에서 3,510 mg COD/L로 낮아졌으며 2일~5일째에는 각각 2,510, 1,920, 1,560, 1,360 mg COD/L의 농도를 보였다. 5일 이후에는 뚜렷한 농도 변화가 관찰되지 않았다. 이를 first order kinetic model에 적용하여 해석한 결과 1차 반응속도 상수 k1은 0.260/day로 나타났으며 농도 감소에 따라 소비 속도가 선형적으로 감소하는 것을 확인하였다 (Fig. 3). 반면 0.4 g/L의 VSS가 주입된 경우 초기 7,750 mg COD/L의 농도에서 9일째 되는 날 까지 시간에 따라 COD의 농도가 일평균 500 mg/L로 선형적으로 감소하는 0차 반응의 거동을 보여주었다.

Monod 이론에 따르면 상대적으로 biomass의 양에 비하여 기질의 양이 매우 많을 때에는 maximum specific substrate utilization rate와 같은 속도로 기질이 소비되는 0차 반응에 가까운 거동을 보이며 반대로 기질의 양이 적을 때에는 기질의 양과 소비속도가 비례하는 1차 반응에 가까운 거동을 보인다(Metcalf & Eddy, 2002). 따라서 Fig. 2와 3의 결과는 외부 물리적 인자에 대한 영향이 없을 때 granular sludge에 의한 기질 소비는 Monod 이론을 따른다는 것을 나타낸다.

3.2 AHR 성능 실험

각각의 kinetics model의 계수를 결정하기 위하여

Table 2. The result of continuous test using Anaerobic Hybrid Reactor

OLR (g/L-d)	HRT (d)	COD concentrations of raw water (mg/L)	COD concentrations of treated water (mg/L)	pH	Temp (°C)	COD removal (%)
1.0	3.66	3,619	335	6.77	35.5	91
1.9	3.66	6,800	313,5	6.77	35.2	95
2.1	3.66	7,688	829	6.86	35.6	89
3.1	3.66	11,335	725	6.83	35.4	93
5.6	3.66	20,500	1,020	6.93	35.1	95
10.5	3.66	38,54	3,537	6.92	36.2	90
14.8	0.913	13,500	6,265	7.06	34.9	54
14.9	1.83	27320	7510	7.23	35.1	73
15.7	0.609	9,560	4,890	7.43	36.8	49
16.4	1.22	13,840	3,735	7.50	73.1	73

70일간 유입수의 농도와 유입 유량을 변화시켜가며 반응기를 운전하였다. Organic Loading Rate (OLR)는 유입수의 농도와 유량을 변화시킴으로써 변화시켰다. 유입수의 농도는 증류수로 희석한 POME를 사용함으로써 변화시켰으며 OLR과 농도에 따른 유량을 계산한 후 연동식 펌프를 사용하여 일정 유량이 유입 되도록 투입하였다. 운전기간 중 OLR 변화에 따른 유입수 및 유출수의 농도 변화, 반응기내 pH 및 온도 변화를 Table 2에 나타내었다.

운전기간 중 반응기는 VSS 농도 평균 6.80 g/L이며 온도 35.5~37 °C, pH 6.8~7.5로 유지되었다. 본 공정은 혐기소화 기작 중 산 발효와 메탄 생성반응을 모두 이용한 공정으로 초기 유기물이 미생물에 의하여 가수분해 되면서 Volatile Fatty Acids (VFAs)류등의 유기산을 생성하게 된다. 이 후 생성된 VFAs는 acetogen 박테리아에 의하여 아세트 산의 형태로 가수분해 되며 생성된 아세트산은 methanogen 박테리아에 의하여 이산화탄소 및 메탄가스로 분해된다. 따라서 AHR 역시 내부의 혐기성 미생물 군집인 granular sludge의 대사에 의해 POME내 유기물은 아세테이트, 프로피오네이트(propionate) 등으로 분해가되며 생성된 유기산은 수소이온을 발생시켜 pH가 낮아지게 한다. 그러나 반응기내 pH는 초기 폐수에 투입한 NaHCO₃를 제외하고 추가적 조정을 하지 않았음에도 불구하고 메탄 생성 박테리아에게 최적 조건이라 알려진 중성영역(6.5-7.5)을 유지(Rajeshwari et al., 2000)하였으며 OLR이 상승할수록 증가하였다. 이러한 이유는 두 가지 이유로 설명할 수 있다. 첫 번째는 POME에 투입한 중탄산나트륨(NaHCO₃)의 영향이다. NaHCO₃는 pH 버퍼로 사용되는 물질로 물에 용해되어 중탄산 이온 (HCO₃⁻)과 탄산 이온(CO₃²⁻)을 형성하여 알칼리도를 증가시킨다. 두 번째 이유는 methanogen 박테리아에 의해 발생한 이산화탄소는 가스상으로 존재하나 이 중 일부는 물에 다시 용해되어 HCO₃⁻와 CO₃²⁻ 이온을 형성한다(Wong et al., 2009). 따라서 pH는 유기산과 bicarbonate, carbonate 이온간 중화반응에 의하여 중성영역의 pH가 유지된 것으로 판단된다(Rajeshwari et al., 2000). OLR이 증가할수록 pH역시 증가하는 것 또한 같은 이유로 투입된 NaHCO₃와 분해 생성물(HCO₃⁻, CO₃²⁻)이 AHR 반

응기 내에 누적된 결과로 판단된다.

COD 제거율의 경우 OLR 10.5 g/L/d 까지는 90% 이상의 높은 제거율을 보여주지만 이후 급속히 감소하게 되는 것을 알 수 있다. 특히 OLR 14.8 g/L/day 와 15.7 g/L/day 지점에서는 각각 54%, 49%로 OLR 변화와 관계없이 낮은 제거율을 보인다. 이는 낮은 농도의 원수 유입에 따라 OLR 상승을 위하여 유입유량을 초기 5.7 L/day에서 각각 22.8 L/day, 34.2 L/day로 증가시킨 결과, 반응기내 수리학적 체류시간(HRT)이 1/4, 1/6로 감소했기 때문이다. 또한 반응기 내의 환경이 VSS 농도 6.80 g/L, 온도 35.5~37 °C, pH 6.8~7.5로 유지되었을 때 OLR과 HRT가 COD 제거율에 직접적으로 영향을 준다는 것을 말해준다.

3.3 Model Analysis

3.3.1 Grau second-order kinetic model

Grau second-order kinetic model은 기질 제거 속도는 현재 농도와 초기농도의 비에 영향을 받는다는 모델로 식 (1)과 같다(Isik & Sponza, 2005; Grau et al. 1975).

$$-\frac{dS}{dt} = k_2 \times X \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 \quad (1)$$

식 (1)을 정리후 t=0~HRT, S=S₀~S 구간으로 정적분 후 역수를 취하여 선형화 하면 식 (2)와 같다.

$$\frac{S_0 \times HRT}{S_0 - S} = HRT + \frac{S_0}{k_2 \times X} \quad (2)$$

여기서, 식 (2)의 변수를 HRT로 하고 S₀/(k₂×X)를 상수로 볼 수 있다. 또한 (S₀-S)/S₀를 제거 효율 (E)로 표현하면 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{HRT}{E} = a + b \times HRT \quad (3)$$

여기서, S와 S₀는 각각 유출수와 유입수의 COD 농도 (g/L)를 말하며, X는 반응기내 biomass의 평균 농도 (g/L), k₂는 이차반응속도상수(day⁻¹)를 나타낸다. AHR에서 POME 처리 시 기질 제거에 관한 kinetic 상

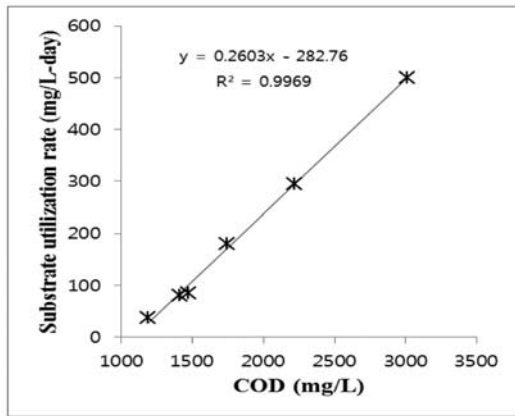


Fig. 4 Grau second-order kinetic model application

$$S = S_0 \left(1 - \frac{HRT}{0.7826 + 0.8698HRT} \right) \quad (4)$$

수 a, b, 그리고 k_2 값을 결정하기 위하여 식 (3)을 이용하여 Fig. 4와 같이 나타내었다. 상수 a, b의 값은 각각 0.7826, 0.8698로 나타났으며 결정계수는 0.99로 나타났다. 이차반응속도상수(k_2)는 $a=S_0/(k_2 \cdot X)$ 로부터 계산할 수 있는데 그 값은 평균 2.60/day로 나타났다. 또한 유입 폐수의 농도와 HRT를 이용하여 유출수의 농도를 예측하기 위하여 상수 a, b값을 치환하여 정리하면 식 (4)와 같이 표현된다.

3.3.2 Modified Stover-Kincannon model의 적용

본래 Stover-Kincannon model은 Rotating Biological Contactor (RBC)에서 부유 물질 내 포함된 biomass의 양은 disc에 부착된 biomass의 양에 비하여 무시할 수 있다는 가정 하에서 biomass가 부착된 disc의 면적당 기질 부하량과 그 소비속도간의 관계로 표현하였다 (Kincannon & Stover, 1982; 식. 5).

$$\frac{dC}{dt} = \frac{U_{max} \times (Q \times C_0 / A)}{K_B + (Q \times C_0 / A)} \quad (5)$$

그러나 bio-film의 성장과 관계하는 유효 표면적의 측정이 어렵기 때문에 본래의 모델은 bed reactor의 유효 부피에 의한 식으로 전환되었다(Debik & Coskun, 2009; Yu et al., 1998; 식. 6).

$$\frac{dS}{dt} = \frac{U_{max} \times (Q \times S_0 / V)}{K_B + (Q \times S_0 / V)} \quad (6)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V} \times (S_0 - S) \quad (7)$$

Modified Stover-Kincannon model과 mass balance (식. 7)을 연립 후 선형화 하면 식 (8)과 같다.

$$\frac{V}{Q \times (S_0 - S)} = \frac{K_B}{U_{max}} \frac{V}{Q \times S_0} + \frac{1}{U_{max}} \quad (8)$$

여기서, V는 반응기의 부피 (L), Q는 유입유량 (L/day), K_B 는 saturation value constant (g/L-day), U_{max} 는 maximum substrate removal rate (g/L-day)를 의미한다. 이 Stover-Kincannon model과 Monod model간의 가장 큰 차이는 Monod의 경우, biomass의 성장속도와 기질소비 속도는 시스템 내에 존재하는 기질의 양에 관계하지만, Stover-Kincannon model은 시스템이 받는 부하량으로 부터 고안되어, 기질의 소비속도는 부하량에 의하여 결정 된다는 것이다 (Buyukkamaci & Filibeli, 2002).

Fig. 5는 식(8)을 이용하여 선형 해석한 결과이다. y절편 값은 U_{max} 의 역수를 나타내고 기울기는 K_B/U_{max} 를 나타내며 각각 0.0252, 1.056의 값을 보였다. 또한 실

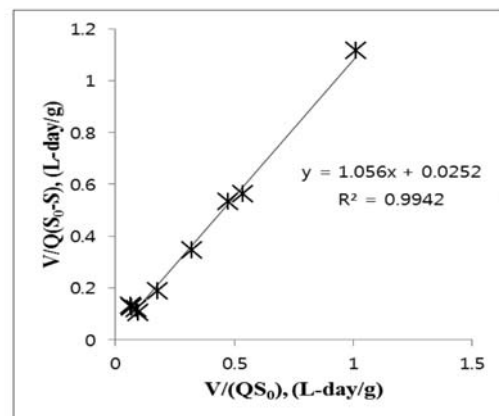


Fig. 5 Modified Stover-Kincannon model application

$$S = S_0 - \frac{U_{max} \times S_0}{K_B + (Q \times S_0 / V)} \quad (9)$$

$$S = S_0 - \frac{39.683 \times S_0}{41.905 + (Q \times S_0 / V)} \quad (10)$$

험 결과 값은 이 모델에 0.99가 넘는 결정계수 값을 보여주었다. 이를 이용하여 계산한 U_{max} 값과 K_B 값은 각각 39.683 g-L/day, 41.905 g-L/day로 나타났다. 식 (6)과 (7)을 연립하면 정리하면 유입수의 농도, 반응기의 부피, 유입유량과 유출수 농도간의 관계식을 유도할 수 있으며(식. 9) 이에 각 상수값을 대입하면 식 (10)과 같다.

3.3.3 First-order kinetic model 적용

연속식 반응조인 AHR에서의 First-order kinetic model은 식 (11)과 같다.

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V} \times S_0 - \frac{Q}{V} \times S - k_1 \times S \quad (11)$$

Steady-state를 가정하면 $ds/dt=0$ 으로 생략가능하면 이를 정리하면 식 (12)와 같다.

$$\frac{S_0 - S}{HRT} = k_1 \times S \quad (12)$$

여기서, k_1 은 1차반응속도상수(day^{-1})를 의미하며 이를 계산하기 위하여 Fig. 6과 같이 나타내었다. First-order kinetic model 적용 시 k_1 은 1.25/day로 나타났으며, 결정계수는 0.92로 나타났다. 위 상수를 대입하면 first-order kinetic model식은 식 (13)과 같이 정리된다.

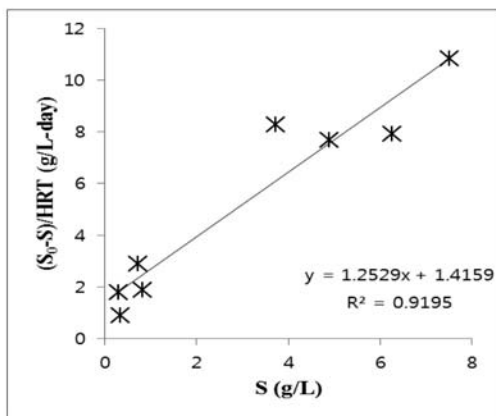


Fig. 6 First-order kinetic model application

$$S = \frac{S_0 - 1.4159 \times HRT}{1 + 1.2529 \times HRT} \quad (13)$$

3.3.4 모델 고찰

Monod model은 UASB 반응기를 포함하여 다른 여러 형태의 반응기에 가장 널리 사용되어 지는 모델 중 하나이다(Castillo et al., 1999). 또한 배치 실험의 결과에 따라 AHR 내 기질 소비 역시 Monod model에 부합할 것이라 예상하였다. Isik 와 Sponza (2005)의 연구에서 나타난 Monod model의 선형해석법은 biomass와 기질의 mass blance를 Monod equation과 연립하여, Sludge Retention Time (SRT)에 따른 단위 biomass당 기질 소비 속도의 상관관계를 도출한다. 그러나 동일한 방법을 본 연구에 적용하였을 때 결정계수는 Grau second-order kinetic model과 modified Stover-Kincannon model 적용 시에 비하여 0.23으로 낮게 나타났다. 운전기간 동안 SRT는 1.56~9.36 day로 계산되었다. 그러나 실제 반응기내 VSS농도는 바닥으로부터 20 cm까지는 평균 19.74 g/L, 20~65 cm에서는 평균 2.89 g/L로 나타났으며, 이는 기질 소비를 일으키는 biomass는 하단부에 유동 없이 분포되어 있다는 것을 의미한다. 따라서 이론상으로 계산한 SRT와 실제 반응기의 SRT는 다를 것으로 사료되며, 이러한 이유로 monod model 적용 시 SRT와 기질 제거 속도 간 상관관계가 낮게 나온 것으로 판단된다.

Fig. 7은 modified Stover-Kincannon, Grau second-order 및 First-order kinetic model에 의한 예측값과 AHR을 이용한 POME 처리 시 유출수의 COD 농도를 비교한 그래프이다. 실험값과 가장 높은 상관관계를 보인 모델은 Grau second-order kinetic model이었으며, modified Stover-Kincannon model이 가장 낮은 상

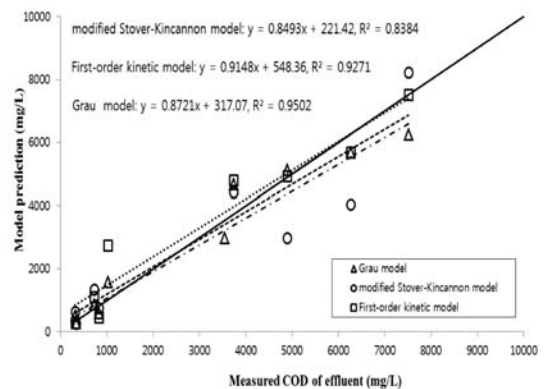


Fig. 7 Comparison of the measured COD concentrations of effluent and the predicted COD concentrations

관관계를 보였다. 또한, First-order kinetic model 적용 시에도 실험값과 선형적인 관계를 보였다. 이는 배치 실험 시 3.0 g/L의 VSS를 주입한 경우(Fig. 2(a) & Fig. 3)와 같이 AHR은 POME의 COD에 비하여 상대적으로 많은 biomass를 포함한 상태에서 운전되고 있다는 것을 설명한다. Modified Stover-Kincannon model의 경우 선형해석 시 가장 높은 결정계수를 보였지만, 본 연구에서 적용해본 다른 모델과 비교하여 보았을 때 AHR의 거동 예측에는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

4. 결론

Anaerobic Hybrid Reactor를 이용하여 POME를 처리하였으며 그 기질 제거 경향을 기존에 잘 알려진 Grau second-order kinetic model과 modified Stover-Kincannon model에 의거하여 해석해보았다. 또한 배치 실험을 통하여 외부 인자의 영향이 없을 때의 기질 소비 경향을 파악해 보았다.

- 1) 배치 실험을 수행한 결과, biomass에 의한 POME의 기질 소비는 monod 이론을 따른다는 것이 나타났다.
- 2) Grau second-order kinetic model에 실험값을 적용하였을 때 상수 a, b값은 각각 0.7826, 0.8698을 보였으며, 이차반응속도상수 k_2 값은 평균 2.60/day로 나타났다. Modified Stover-Kincannon model 적용 시 U_{max} 값과 K_B 값은 각각 39.683 g-L/day, 41.905 g-L/day로 나타났다. First-order kinetic model의 적용결과 k_1 값은 1.25/day로 나타났으며 실험값과 선형적인 관계를 갖는 것으로 나타났다.
- 3) 모델 해석결과 Grau second-order kinetic model이 거동 예측에 가장 적합한 것으로 사료되며, AHR의 POME내 COD제거 특성은 HRT 및 OLR등의 인자에 대한 영향이 지배적인 것으로 판단된다. 따라서, 위의 모델등을 이용하여 최적의 OLR과 HRT를 도출함으로써 AHR의 성능을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 환경부 폐자원 에너지화 및

non-CO2 온실가스사업(과제번호 : 10-01-120, 과제명 : 동남아지역 팜오일 잔재물의 에너지화 및 고효율 메탄회수 폐수처리 기술 상용화를 통한 CDM 시범사업 운영)의 지원을 받아 시행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Ahmad, A.L., Ismail, S., Bhatia, S. (2003) Water recycling from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology, *Desalination* 157 pp.87-95.
- Bhatia, S., Othman, Z., Ahmad, A.L. (2007) Coagulation-flocculation process for POME treatment using Moringa oleifera seeds extract: ptimization studies, *Chemical Engineering Journal*, 133 pp.205-212.
- Bhunja, P. & Ghangrekar, M.M., (2008) Analysis, evaluation, and optimization of kinetic parameters for performance appraisal and design of UASB reactors, *Bioresource Technology*, 99(7), pp.2132-2140.
- Buyukkamaci, N., & Filibeli, A. (2002) Determination of kinetic constants of an anaerobic hybrid reactor, *Process Biochemistry* 38, pp.73-79.
- Castillo, A., Llabres, P., Mata-Alvarez, J. (1999) Kinetic study of a combined anaerobic-aerobic system for treatment of domestic sewage. *Water Research* 33(7) pp. 1742-1747.
- Choorit, W. & Wisamwan, P. (2007) Effect of temperature on the anaerobic digestion of palm oil mill effluent, *Electronic Journal of Biotechnology*, 10(3), pp.376-385.
- Debik, E. & Coskun, T. (2009) Use of the static granular bed reactor (SGBR) with anaerobic sludge to treat poultry slaughterhouse wastewater and kinetic modeling, *Bioresource Technology*, 100, pp.2777-2782.
- Del Nery, V., Pozzi, E., Damianovic, M.H.R.Z., Domingues, M.R., Zaiat, M. (2008) Granulation characteristics in the vertical profile of a full-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor treating poultry slaughterhouse wastewater, *Bioresource Technology*, 99(6), pp.2018-2024
- Donoso-Bravo, A., Mailier, J., Martin, C., Rodriguez, J., Aceves-Lara, C.A., Wouwer, A.V. (2011) Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review, *Water Research*, 45, pp.5347-5364 .
- Grau, P. Dohanyas, M. Chudoba, J. (1975) Kinetic of multicomponent substrate removal by activated sludge.

- Water Research, 9 pp.337-342.
- Gobi, K., Mashitah, M.D., Vadivelu, V.M. (2011) Development and utilization of aerobic granules for the palm oil mill (POM) wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 174 pp.213-220
- Isik, M., & Sponza, D.T. (2005) Substrate removal kinetics in an upflow anaerobic sludge blanket reactor decolorising simulated textile wastewater. *Process Biochemistry* 40(3-4), pp. 1189-1198.
- Kincannon, D.F. & Stover, E.L. (1982) Design methodology for fixed film reaction-RBCs and biological towers. *Civil Engineering for Practicing and Design Engineers*, 2, pp.107-124.
- Maxham, J.V., Wakamiya, W. (1981) Innovative biological wastewater treatment technologies applied to the treatment of biomass gasification wastewater. *Proceedings of the 35th Ind. Waste Conference*, Purdue University, pp.80-94.
- Metcalf & Eddy, (2002) *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th Ed, McGraw-Hill, New York.
- Najafpour, G.D., Zinatizadeh, A.A.L., Mohamed, A.R., Hasnain Isa, M., Nasrollahzadeh, H. (2006) High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. *Process Biochemistry*, 41, pp.370-379
- Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., Kishore V.V.N. (2000) State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, pp.135-156
- Sandhya, S., Sarayu, K., Swaminathan, K. (2008) Determination of kinetic constants of hybrid textile wastewater treatment system. *Bioresource Technology*, 99(13), pp.5793-5797.
- Turkdogan-Aydinol, F.I., Yetilmezsoy, K., Comez, S., Bayhan, H. (2011) Performance evaluation and kinetic modeling of the start-up of a UASB reactor treating municipal wastewater at low temperature. *Bioprocess Biosyst Eng.*, 34, pp.15.-162.
- Wong, B.T., Show, K.Y., Lee, D.J., Lai, J.Y. (2009) Carbon balance of anaerobic granulation process: Carbon credit. *Bioresource Technology*, 100, pp.1734-1739 .
- Wu, W., Wilson, F., Tay, J.H. (2000) Influence of media-packing ratio on performance of anaerobic hybrid reactors. *Bioresource Technology*, 71, pp.151-157.
- Yacobl, S., Hassan, H.A., Shirai, Y., Wakisaka, M., Subash, S. (2006) Start-up operation of semicommercial closed anaerobic digester for palm oil mill effluent treatment. *Process Biochemistry*, 41, pp. 962-964.
- Yilmaz, T., Yuceer, A., Basibuyuk, M. (2008) A comparison of the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating papermill wastewater. *Bioresource Technology*. 99(1), pp.156-163.
- Yu, H., Wilson, F., Tay, J.H. (1998) Kinetic analysis of an anaerobic filter treating soybean wastewater. *Water Research*, 32(11) pp. 3341-3352.
- Zhang, Y., Yan, L., Chi, L., Long, X., Mei, Z., Zhang, Z. (2008) Startup and operation of anaerobic EGSB reactor treating palm oil mill effluent, *Journal of Environmental Sciences*, 20(6), pp.658-663.