

과제 #3 - 답안

제출기한: 2021. 05. 20 (목), 14:00

1. 최근 수산화 라디칼($\cdot\text{OH}$)을 이용한 고도산화공정(advanced oxidation process; AOP)의 대안으로 과황산염(persulfate)을 이용한 고도산화공정이 활발하게 연구되고 있다. 과황산염을 이용한 고도산화공정으로 물속의 난분해성 유기오염물질을 제거하는 원리를 간단하게 설명하시오. (15점)

답)

과황산염을 이용한 고도산화공정은 peroxymonosulfate (PMS , HSO_5^-) 또는 peroxydisulfate (PDS , $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$)을 물에 투여하고, UV 조사, 가열 등으로 에너지를 가함으로써 과황산 라디칼(persulfate radical, $\text{SO}_4^{\cdot-}$)을 발생시키고, 이 라디칼을 주요 산화제로 하여 난분해성 유기오염물질을 분해시키는 방법이다. 과황산 라디칼은 수산화 라디칼보다 높은 산화력을 지니는 반면, 유기오염물질에 대한 선택성이 좀더 높은(즉, 특정 구조의 화합물은 매우 잘 산화시키나 구조적 적합도가 낮은 화합물에 대한 분해능력은 수산화 라디칼보다 크게 떨어질 수 있음) 약점도 있다. 과황산염을 이용한 고도산화공정은 그 메커니즘에 수산화 라디칼을 이용한 공정에 비해 복잡하며, 조건에 따라서는 과황산 라디칼 이외의 산화제(예: $\cdot\text{OH}$, $\text{Cl}\cdot$, $\text{CO}_3^{\cdot-}$, $^1\text{O}_2$ 등)가 보다 오염물질 제거에 큰 역할을 할 수도 있다.

2. 실험실에서 슬러지 반송(sludge recycle)이 없는 간단한 CSTR 형태의 포기조(aeration tank)를 만들어 운전하고 있다. 이 포기조의 유입수 bsCOD 농도는 500 mg COD/L, 유량은 20 m³/d이며, 유출수의 bsCOD 농도는 10 mg COD/L, VSS 농도는 200 mg VSS/L일 때, 다음 물음에 답하시오.

- 1) 공정에서 실제로 관찰되는 기질(substrate) 소모량 대비 고형물 생산량을 observed yield라 한다. 기질을 bsCOD, 고형물을 VSS로 하여 이 포기조의 observed yield를 구하시오. (6점)

답)

$$Y_{obs} = \frac{200 \text{ mg VSS/L}}{(500-10) \text{ mg COD/L}} = 0.408 \text{ mg VSS/mg COD}$$

2) 제거되는 bsCOD 단위질량당 소모되는 산소량을 g O₂/g COD 단위로 구하시오. 이 공정의 VSS는 화학식 C₅H₇O₂N으로 표현할 수 있다고 가정하시오. (9점)

답)

VSS가 화학식 C₅H₇O₂N으로 표현되면, 그 단위질량당 COD 값은 1.42 g COD/g VSS임

COD에 대한 mass balance로부터 우리는 “Oxygen consumed in the system = COD removed in the system”라는 관계를 도출한 바 있음. 이 관계에서 우변은 “유입수의 COD 값 - 유출수의 COD 값”이므로

Oxygen consumed in the system

$$= 500 \text{ mg COD/L} - (10 \text{ mg COD/L} + 200 \text{ mg VSS/L} \cdot 1.42 \text{ mg COD/mg VSS})$$

$$= 206 \text{ mg O}_2/\text{L}$$

제거되는 bsCOD 단위질량당 소모되는 산소량은

$$\frac{206 \text{ mg O}_2/\text{L}}{(500-10) \text{ mg COD/L}} = 0.42 \text{ g O}_2/\text{g COD}$$

3. 어떤 활성슬러지 공정이 bsCOD 농도 2,000 mg/L인 1차처리수 1000 m³/d를 처리하고 있다. 이 공정은 포기조(aeration tank)의 수리학적 체류시간(HRT)이 12 hr, 폐슬러지 유량(waste sludge flowrate, Q^w)이 85.5 m³/d, 고형물 체류시간(SRT)이 3.0 day로 운영되고 있다. 공정 모니터링 결과 유출수의 TSS 농도는 20 mg/L이며, 반송슬러지의 MLSS 농도는 10,000 mg/L이고, 공정 내부의 MLVSS/MLSS 비는 0.80이었다. 유입수의 non- biodegradable VSS (nbVSS), non-biodegradable soluble COD (nbsCOD)는 없다고 가정하고, 아래 미생물 성장과 관련된 인자값을 이용하여 다음 물음에 답하시오.

$$k = 12.5 \text{ mg COD/mg VSS-d}$$

$$K_s = 10 \text{ mg COD/L}$$

$$Y = 0.40 \text{ mg VSS/mg COD}$$

$$b = 0.10/d$$

$$f_d = 0.15$$

1) 유출수의 bsCOD 농도를 구하시오. (4점)

답)

$$S = \frac{K_s(1 + b \cdot SRT)}{SRT(Yk - b) - 1} = \frac{10 \text{ mg COD/L}(1 + 0.10/d \cdot 3.0 \text{ d})}{3.0 \text{ d} \cdot (0.40 \text{ mg VSS/mg COD} \cdot 12.5 \text{ mg COD/mg VSS} - d - 0.10/d) - 1}$$

$$S = 0.95 \text{ mg COD/L}$$

2) 이 공정의 SRT에 대한 공정 안전계수(process safety factor)를 구하시오. (5점)

답)

$K_s \ll S^0$ 이므로,

$$SRT_{\min} \approx \frac{1}{Yk - b} = \frac{1}{0.40 \text{ mg VSS/mg COD} \cdot 12.5 \text{ mg COD/mg VSS} - d - 0.10/d} = 0.20 \text{ d}$$

$$SF = \frac{SRT_{des}}{SRT_{\min}} = \frac{3.0 \text{ d}}{0.20 \text{ d}} = 15$$

3) 이 공정 유출수의 COD 값을 구하시오. 유출수 TSS의 구성은 공정 내부의 구성과 동일하다고 가정하고, TSS 중 VSS는 화학식 $C_5H_7O_2N$ 으로 표현 가능하다고 가정하시오. (10점)

답)

유출수의 VSS 농도는

$$20 \text{ mg TSS/L} \times 0.8 \text{ mg VSS/mg TSS} = 16 \text{ mg VSS/L}$$

화학식 $C_5H_7O_2N$ 을 가지는 VSS의 COD/VSS 비는 $1.42 \text{ mg COD/mg VSS}$ 이므로, 유출수의 VSS가 기여하는 COD는

$$16 \text{ mg VSS/L} \times 1.42 \text{ mg COD/mg VSS} = 22.72 \text{ mg COD/L}$$

유출수의 COD는 용존상 COD (soluble COD)와 입자상 COD (particulate COD)로 나눌 수 있으며, 이 중 입자상 COD는 위 계산에 따라 VSS 값으로부터 얻었음. 용존상 COD는 다시 bsCOD와 nbsCOD로 나눌 수 있는데, 유입수의 nbsCOD는 존재하지 않으므로 유출수의 nbsCOD 또한 존재하지 않음. 따라서, 유출수의 COD는 bsCOD와 VSS가 기여하는 COD의 합이므로

$$0.95 + 22.72 = 23.67 \text{ mg COD/L}$$

4) 이 공정 포기조의 MLSS 농도를 구하시오. (10점)

답)

아래 두 풀이방법이 모두 가능합니다. 정확히 설계된 문제라면 두 풀이방법이 동일 하여야 하는데, 공정의 인자값들을 cross-check하지 못하여 두 풀이방법으로 계산한 값 사이에 차이가 생겼습니다. 좀 더 구체적으로는 제시된 SRT와 폐슬러지 유량-반송슬러지 MLSS 농도-MLSS/MLVSS비의 상호관계에 약간의 정량적 오류가 있습니다. 양해와 참고 바랍니다!

[풀이방법#1]

수업 시간에 active biomass에 대해서 도출하였던 SRT의 표현은 TSS에도 그대로 적용 가능하다(active biomass와 TSS에 적용되는 mass balance의 원리가 동일하므로). 따라서,

$$SRT = \frac{VX_{TSS}}{(Q - Q^w)X_{TSS}^e + Q^w X_{TSS}^r}$$

따라서,

$$X_{TSS} = \frac{SRT}{V} \cdot [(Q - Q^w)X_{TSS}^e + Q^w X_{TSS}^r]$$

이고, $V = Q\tau = 1000 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 0.5 \text{ d} = 500 \text{ m}^3$ 이므로,

$$X_{TSS} = \frac{3.0 \text{ d}}{500 \text{ m}^3} \cdot [(1000 \text{ m}^3/\text{d} - 85.5 \text{ m}^3/\text{d}) \cdot 20 \text{ g TSS/m}^3 + 85.5 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 10000 \text{ g TSS/m}^3]$$

$$= 5240 \text{ g TSS/m}^3 = 5240 \text{ mg TSS/L}$$

[풀이방법#2]

$$X_a = \left(\frac{SRT}{\tau} \right) \left[\frac{Y(S^0 - S)}{1 + b(SRT)} \right] = \left(\frac{3.0 \text{ d}}{0.5 \text{ d}} \right) \left[\frac{0.5 \text{ mg VSS/mg COD} \cdot (2000 - 0.95) \text{ mg COD/L}}{1 + 0.10 \text{ d}^{-1} \cdot 3.0 \text{ d}} \right]$$

$$= 3690 \text{ mg VSS/L}$$

$$X_{VSS} = X_a + f_d \cdot b \cdot X_a \cdot SRT = (1 + f_d \cdot b \cdot SRT) \cdot X_a$$

$$= (1 + 0.15 \cdot 0.10 \text{ d}^{-1} \cdot 3.0 \text{ d}) \cdot 3690 \text{ mg VSS/L} = 3860 \text{ mg VSS/L}$$

$$X_{TSS} = \frac{X_{VSS}}{0.8} = 4820 \text{ mg/L}$$

5) 이 공정의 F/M 비(ratio)를 g bsCOD/g VSS-d의 단위로 구하시오. (6점)

답)

$$F/M = \frac{QS^0}{VX_{VSS}}$$

i) $X_{VSS} = 0.8X_{TSS} = 4190 \text{ mg VSS/L}$

$$F/M = \frac{1000 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 2000 \text{ g/m}^3}{500 \text{ m}^3 \cdot 4190 \text{ g/m}^3} = 0.955 \text{ g bsCOD/g VSS-d}$$

ii) $X_{VSS} = 3860 \text{ mg VSS/L}$

$$F/M = \frac{1000 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 2000 \text{ g/m}^3}{500 \text{ m}^3 \cdot 3860 \text{ g/m}^3} = 1.04 \text{ g bsCOD/g VSS-d}$$

4. 교재 또는 문헌을 이용하여 생물학적 인 처리공정(enhanced biological phosphorus removal process)에서 인 축적 미생물(phosphorus accumulating organism, PAO)과 글리코겐 축적 미생물(glycogen accumulating organism, GAO) 간의 경쟁이 공정의 인 제거

효율에 영향을 미치는 원리를 기술하시오. 이 경쟁에 영향을 미치는 공정 내 환경요인에 대하여 소개하시오. (20점)

답)

GAO는 호기적 조건에서 BOD를 glycogen의 형태로 저장하고, 혐기적 조건에서는 저장한 glycogen을 소모하면서 VFA를 섭취, PHA의 형태로 저장하는 박테리아임. 따라서, GAO가 Enhanced P biological removal process 내에서 과다증식하면 PAO의 증식을 방해, 인 제거 효율을 떨어뜨리게 됨.

PAO는 GAO에 비해 약간 높은 pH 조건(pH 7.5 수준), 15°C 이하 또는 30°C 이상의 온도, 낮은 SRT 등의 조건에서 생장에 우위를 가지므로, 이러한 조건을 부여하여 PAO의 경쟁력을 높여줄 필요가 있음. 또한, GAO의 일종인 Competibacter는 PAO의 일종인 Accumulibacter에 비해 propionate 섭취속도가 훨씬 느리고, GAO의 일종인 Alphaproteobacteria는 propionate 섭취속도가 빠르되 acetate 섭취속도가 느리므로 반응조에 acetate와 propionate를 순차적으로 번갈아 주입함으로써 acetate, propionate 모두를 적절한 속도로 섭취하는 PAO가 우점하도록 할 수 있음.

5. 아래 표에는 하수로부터 에너지를 회수할 수 있는 방법 중 최근에 주목받고 있는 대표적인 기술 몇 개가 제시되어 있다. 이 중 하나를 골라 제시된 참고문헌을 읽고 그 내용을 3문단 내외로 요약하시오. (30점)

Process	Reference
Anaerobic Fluidized Membrane Bioreactor	Kim et al. (2011) Anaerobic fluidized bed membrane bioreactor for wastewater treatment. Environmental Science & Technology, 45, 576-581.
Wastewater Heat Pump	Hepbasli et al. (2014) A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems. Energy Conversion and Management, 88, 700-722. (focus on Chapter 1-3 [pp. 700-705])
Coupled Aerobic-Anoxic Nitrous Decomposition Operation	Scherson et al. (2013) Nitrogen removal with energy recovery through N ₂ O decomposition. Energy & Environmental Science, 6, 241-248.
Solid-State Anaerobic Digestion	Li et al. (2011) Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 821-826.
Microbial Fuel Cell	Wang et al. (2015) Practical energy harvesting for microbial fuel cells: a review. Environmental Science & Technology, 49, 3267-3277.