

TECHNICAL NOTE

## BDD 전극을 이용한 축산폐수 처리의 적용성 평가

김현구<sup>1)</sup> · 안대희<sup>1),2)\*</sup>

<sup>1)</sup>주식회사 블루뱅크, <sup>2)</sup>명지대학교 환경에너지공학과

### Evaluation of the Applicability of Livestock Wastewater Treatment using Boron-Doped Diamond (BDD) Electrodes

Hyun-Gu Kim<sup>1)</sup>, Dae-Hee Ahn<sup>1),2)\*</sup>

<sup>1)</sup>BlueBank Co., Ltd., The 2nd engineering building, Myongji University, Yongin 17058, Korea

<sup>2)</sup>Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University, Yongin 17058, Korea

#### Abstract

In this study, we evaluated the treatment efficiency of livestock wastewater by altering the current density using boron-doped diamond (BDD) electrodes. As the current density was adjusted from 10 to 35 mA/cm<sup>2</sup>, the removal efficiency of organic matter increased from 22.2 to 71.5%. Similar to that of organic matter, the removal efficiency of color increased with increasing current density up to 85.7%, indicating a higher removal efficiency for color than that of organic matter. The removal efficiency of ammonia nitrogen increased from 14.6 to 53.3% as the current density increased, but it was lower than that of organic matter. In addition, the removal of organic matter, color, and ammonia nitrogen followed first-order reactions, according to the reaction rate analysis. The energy consumption ranged from 4.87 to 8.33 kWh/kg COD, and it was found that the organic matter removal efficiency was more efficient at high current densities. Based on various analyses, the optimal current density was 20 mA/cm<sup>2</sup>, and the corresponding energy consumption was 6.824 kWh/kg COD.

**Key words** : Boron-doped diamond, Livestock wastewater, Organic matter, Color, Ammonia nitrogen

#### 1. 서론

농업의 규모화 및 산업화로 국내 축산업은 점차 집약적이고 전문화되고 있으며 과거 곡류 위주의 식생활 문화에서 육류 소비 형태가 증가함에 따라 가축분뇨의 발생량은 지속적으로 증가하고 있다(Lee et al., 2022). 이러한 가축분뇨는 처리형태 별 축산폐수 정화방류 및 자원화 방법을 통하여 처리되고 있으며(Lee and Choi, 2015), 자원화된 퇴·액비를 수용할 경지면적은 한정됨

에 따라 가축분뇨의 적정 처리방안에 대한 중요성이 강조되고 있다.

축산폐수 정화처리는 기본적으로 고액분리, 2차 처리 및 고도처리 방식을 적용하여 운영되며, 대부분 미생물을 이용한 생물학적 처리방식을 적용하고 있다. 그러나 축산폐수는 일반 하·폐수 대비 오염원 농도가 매우 높은 특성이 있으며 항생제에 기인한 난분해성 유기물질로 인하여 생물학적 처리공정의 원활한 운영이 어려운 문제가 있다(Zhang et al., 2023).

Received 4 April, 2023; Revised 16 May, 2023;

Accepted 30 May, 2023

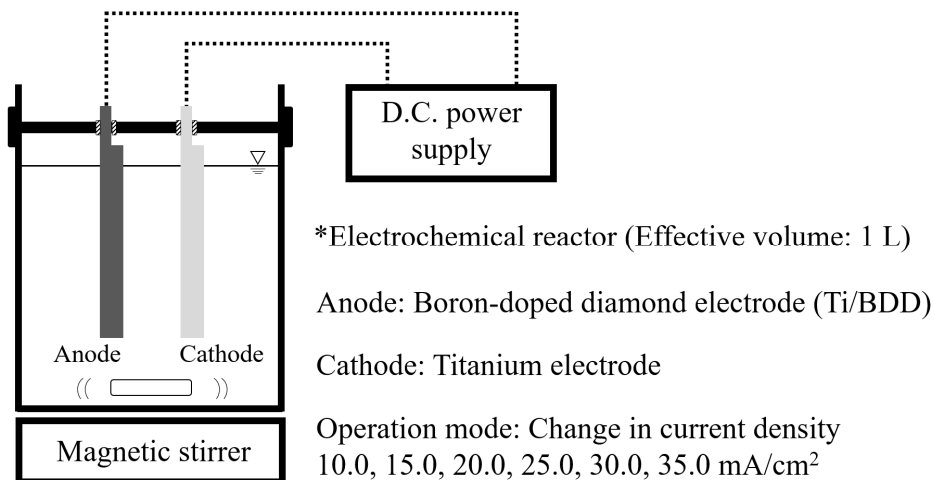
\*Corresponding author : Dae-Hee Ahn, Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University, Yongin 17058, Korea  
Phone : +82-31-321-5901  
E-mail : dhahn@mju.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Table 1.** Experimental conditions of lab. scale reactor

Effective volume (L)	Anode	Cathode	Electrode distance (mm)	D.C. power supply	Stirring speed (rpm)	Reaction time (hr)
1	Ti/BDD	Ti	10	15 V, 30 A	120	1

Current density (mA/cm<sup>2</sup>): 10, 15, 20, 25, 30 and 35  
Sampling point: every 10 minutes

**Fig. 1.** Schematic diagram of lab. scale reactor.

한편, 전기분해(전기화학적) 처리기술의 특징은 생물학적 처리방법이나 화학적 처리방법에서 분해가 곤란한 오염물질이 있는 난분해성 폐수를 처리하는데 유용한 것으로 알려져 있다(Han, 2001). 기술의 원리는 일반적으로 폐수를 사이에 두고 양극과 음극의 산화-환원 반응을 이용하여 전기화학적 반응을 발생시켜 유해 물질을 제거하거나 무해한 성분으로 변화시키는 기술로써 방대한 공간이 필요하지 않고 높은 처리효율을 나타낸다는 장점이 있다(Lee, 2008).

전기화학적 폐수처리에 사용되는 양극산화 전극물질로는 대표적으로 PbO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub>, RuO<sub>2</sub> 및 BDD (Boron Doped Diamond)가 있다(Patel et al., 2013). 산화물 촉매 전극인 PbO<sub>2</sub>와 IrO<sub>2</sub>는 긴 시간 안정성을 유지할 수 있어 난분해성 물질 제거에 효과적인 것으로 알려져 있으나 폐수처리의 경우, 낮은 에너지 밀도로 인해 경제성 측면에서 현장 적용에 대한 어려움이 존재한다. 반면 BDD 전극은 우수한 전기 전도성을 바탕으로 높은 에너지 밀도와 함께 넓은 전위창을 유지할 수 있으며

다이아몬드의 기계적 특성으로 인해 안정성 또한 충족된다는 장점이 있다. 또한, 전극표면의 오염에 의한 활성 저하 현상에 대한 저항성이 강하여 전기화학적 폐수 처리 분야에 있어 매우 효과적인 전극이다(Ornelas Dávila et al., 2021).

최근 처리하기 어려운 폐수를 다양한 전극을 적용한 전기화학적 방법을 이용하여 성공적으로 처리한 결과가 보고되고 있다. 대부분의 경우, 유기물 제거가 주목적이며, 폐수에 따라 COD<sub>Cr</sub>의 높은 제거효율을 나타내며 질소화합물의 제거도 가능한 것으로 보고되고 있으나(Shin, 2019) BDD 전극을 이용한 축산폐수 처리에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 BDD 전극이 적용된 회분식 전해조를 이용하여 전류 밀도 변화에 따른 유기물, 색도 및 암모니아성 질소 제거효율 및 반응속도를 분석하였다. 또한 조건별 에너지 소모량 분석을 통하여 고농도 축산폐수의 효율적인 전기화학적 처리에 관한 연구를 수행하고자 하였다.

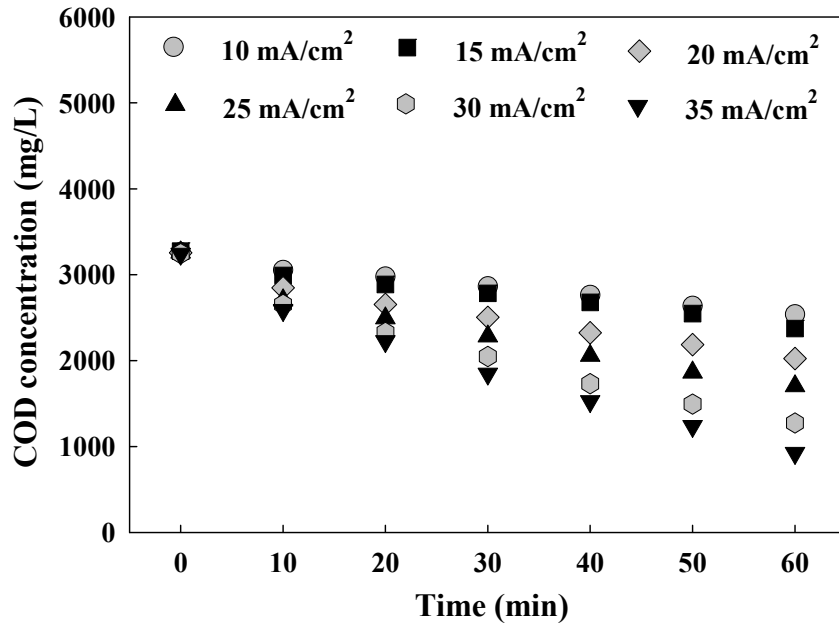


Fig. 2. Results of COD concentration at different current density.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 유입수 성상 및 실험재료

실험에 사용된 축산폐수 유입수는 국내 J군 가축분뇨 공공처리시설에서 전체 처리과정 중 생물반응조로 유입되기 직전의 고액분리된 폐수를 직접 채수하였으며 실험실로 이송한 뒤 바로 실험에 사용하였다. 채취된 유입수의 평균 COD<sub>Cr</sub>은 3,256.3(3,243.0~3,275.0) mg/L로 분석되었으며, 암모니아성 질소는 827.3(822.0~835.0) mg/L, 색도는 5,932.7(5,918.0~5,948.0) Pt-Co로 나타났다. 양극(Anode) 전극으로 사용된 BDD 전극은 티타늄 기판에 필라멘트 가열 화학 기상 증착법(Hot filament chemical vapor deposition, HFCVD)으로 제조된 두께 3 mm의 전극(50 mm × 80 mm)을 사용하였으며, 음극(Cathode) 전극은 양극 전극과 동일한 크기의 티타늄 기판의 전극을 사용하였다.

### 2.2. 실험장치 및 운전조건

실험에 사용된 반응기는 유효용적 1 L (85 mm × 85 mm × 150 mm)의 아크릴 재질 반응기를 사용하였다(Fig. 1). 반응기 상단에는 양극, 음극 한쌍의 전극을

고정시킬 수 있도록 고정 장치를 구성하였으며, 양극과 음극의 전극 간격은 10 mm로 유지하였다. 전체 실험과정 중 원수의 원활한 혼합을 위하여 마그네틱 바 및 교반기를 이용하여 120 rpm으로 교반을 진행하였다. 또한 각 전극에 인가되는 전압은 0~15 V (Voltage), 전류는 0~30 A (Amper)까지 조절이 가능한 직류 전원 공급장치(KPS1530D, Wanptek, China)를 사용하였다. 전류밀도 변화에 따른 실험조건은 전류밀도를 10, 15, 20, 25, 30 및 35 mA/cm<sup>2</sup>으로 단계적으로 증가시키며 실험을 실시하였다. 각 전류밀도 변화에 따른 반응기 운영은 1시간까지 회분식 운영을 실시하였으며, 10분 간격으로 채수를 실시하여 수질분석을 실시하였다. 실험실 규모 반응기의 운전조건은 Table 1에 나타났다.

### 2.3. 분석방법

유입수 및 처리수 시료의 유기물(Cheical Oxygen Demand, COD)은 Reactor digestion method (Hach method 8000), 색도(Color)는 Platinum-Cobalt standard method (Hach method 8025), 암모니아성 질소(Ammonia nitrogen)는 Nessler method (Hach

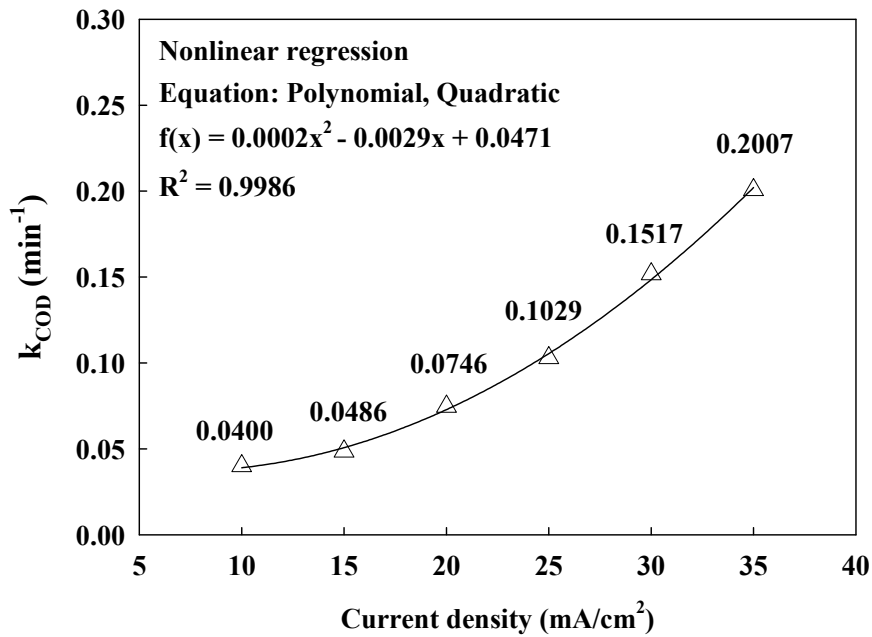


Fig. 3. Results of COD reaction rate constants ( $k_{\text{COD}}$ ) at different current density.

method 8038)에 준하여 흡광광도계(DR-3900, Hach, USA)를 이용하여 분석하였으며 실험조건 및 분석항목 변경 시에는 새로운 유입 원수를 사용하였다. 에너지 소모량(Specific energy consumption,  $E_{\text{sp}}$ )은 조건별 운전시간 동안 소모된 전력량을  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  농도로 표준화하여 산정하였다(Huang et al., 2018).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 유기물 제거효율

전체 운전조건에서의 유기물 제거 거동을 Fig. 2에 나타냈다. 운전결과 전류밀도가 증가함에 따라 유기물 제거량 또한 증가하는 경향을 나타냈다. 전류밀도가 10에서 35  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 까지 증가함에 따라 유기물 제거량은 723에서 2,319  $\text{mg}/\text{L}$ , 제거효율은 22.2에서 71.5%까지 증가하였다. 주목할만한 점은 전류밀도 15  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 에서 20  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 로 증가할 때의 제거량이 다소 큰 폭으로 증가하여 제거량의 변동폭이 큰 것을 관찰할 수 있었다. 일반적으로 전류밀도가 증가할수록 유기물 산화반응이 촉진되기 때문에 오염원 제거효율 또한 증가하지만 전력량 증가에 의한 운영비용이 증가하는 결과가

나타난다. 따라서 전기분해를 적용하고자 하는 폐수에 대한 최적의 전류밀도를 도출하는 것이 중요하다. 축산 폐수의 경우, 일반 하·폐수와는 달리 난분해성 유기물이 포함되어 있기 때문에 분해성 유기물 대비 제거가 어려우며, 본 전기분해를 통하여 일정량 이상의 전류밀도 적용이 필요한 점을 확인할 수 있었다. 실험결과를 바탕으로 대상 축산폐수는 20  $\text{mA}/\text{cm}^2$  이상의 전류밀도 적용이 필요할 것으로 판단된다. Shin(2015)은 물 재이용 시스템 설계를 위하여 Ti/IrO<sub>2</sub>를 양극으로 적용한 전해조를 운영하였으며, 10 V, 30 mA의 조건을 적용한 결과,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 은 평균 22.5%의 제거효율을 나타냈다고 보고하고 있으며, Okur et al.(2022)는 BDD 및 Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> 전극을 13~93  $\text{mA}/\text{cm}^2$  범위의 다양한 전류밀도 조건에서  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  제거효율을 검토한 결과, 80  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 조건에서 75%의 제거효율을 얻었음을 보고하고 있다. 또한, BDD 전극을 이용하여 본 연구와 유사한 유입수  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  농도의 매립지 침출수 처리를 수행한 Anglada et al.(2011)에 의하면 약 70  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 조건에서도 20% 이하의 COD 제거율을 나타내 본 연구 대비 다소 낮은 효율을 나타내고 있다. 이는 전해조 운영방법, 처리시간, 기타 오염원 농도의 차이에 기

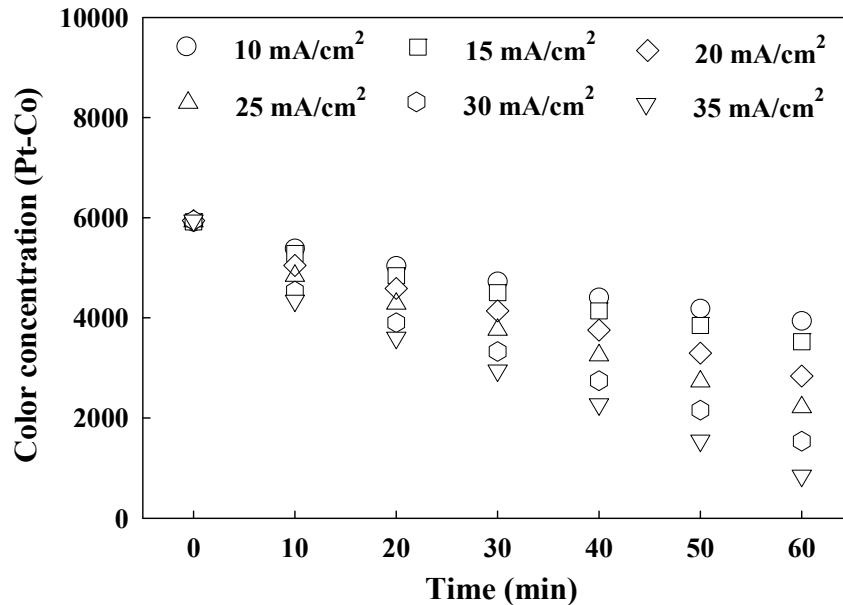


Fig. 4. Results of color concentration at different current density.

인한 것으로 판단된다. 섬유 산업 폐수 처리를 위해 전기분해 공정을 적용한 Radha et al.(2009)은 섬유 폐수의 유기물 분해는 28 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도가 가장 적합하며, 전류밀도가 증가함에 따라 반응속도는 증가하는 것으로 보고하고 있다.

전체 운전조건에서의 유기물 제거효율에 따른 반응속도 상수( $k_{COD}$ ) 도출 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 반응속도 경향은 1차 반응에서의 결정계수 값이 높은 것으로 나타나 1차 반응 결과로 산정하였다. 분석 결과 전류밀도가 10에서 35 mA/cm<sup>2</sup>까지 증가함에 따라 반응속도는 각각 0.0400, 0.0486, 0.0746, 0.1029, 0.1517 및 0.2007/min으로 점차 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 전류밀도에 따른 유기물 제거 반응속도 상수의 회귀분석 결과  $f(x) = 0.0002x^2 - 0.0029x + 0.0471$  ( $R^2=0.9986$ ) 형태의 함수로 나타났다. Piya-areetham et al.(2006)은 고농도의 증류 산업 농축 폐수를 처리하기 위한 전기분해 공정을 적용하였으며, 유기물 제거효율 및 반응속도를 검토한 결과, 1차 반응을 따르는 것으로 보고하고 있다. Rao et al.(2009)은 매립지 침출수 처리를 위한 전기분해 반응조를 적용하였으며, 1에서 3 A까지 전류 세기를 조절하였으며, 유기물 제거효율 및 반응속도 산정 결과 1차 반응의 결과로 보고하고 있으며, 본 연구와 동

일한 1시간 동안의 반응결과에 의한 반응속도는  $5.83 \times 10^{-3}/\text{min}$ 로 보고하고 있다. Ukundimana et al.(2018)은 매립지 침출수 처리의 후처리 과정으로 BDD, Pt 및 DSA 전극을 적용한 전기분해 실험을 진행하였으며, 본 연구와 마찬가지로 1차 반응의 결과로 유기물 반응속도를 설명하고 있다. 한편, Díaz et al.(2011)은 재순환 양식시스템의 양식수 처리를 위해 BDD 전극이 적용된 전기분해 공정을 적용한 결과, 유기물 제거는 0차 반응을 따르는 것으로 보고하고 있으며, 본 연구와는 다른 반응 차수를 나타냈다. 이는 대상 원수 성상의 차이 때문인 것으로 사료된다.

### 3.2. 색도 제거효율

전체 운전조건에서의 색도 제거 거동을 Fig. 4에 나타냈다. 유기물과 마찬가지로 전류밀도가 증가함에 따라 색도 제거량은 1,980에서 5,094 Pt-Co, 제거효율은 33.4에서 85.7%까지 증가하였다. 폐수 내 색도의 경우 부유성 및 콜로이드성 물질에 의해 유발되며 (Kumar et al., 2021), 유기물로 정량화된 색도와 오염 물질은 매우 복잡한 관계를 가지고 있다(Ismail and Sakai, 2022). 일부 폐수에서는 색도의 감소에 따라 유기물 함량도 감소되는 것으로 보고되고 있으나(Ghaly

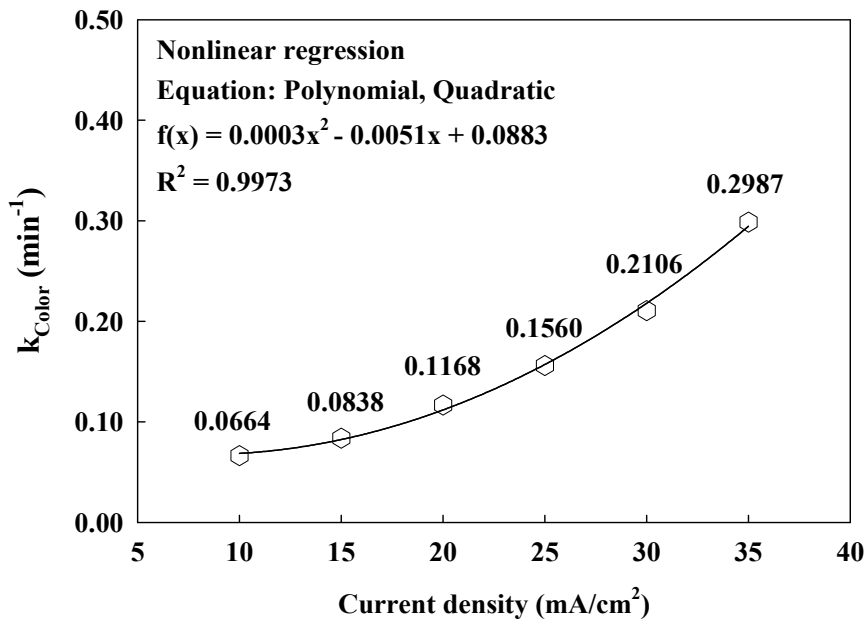


Fig. 5. Results of color reaction rate constants ( $k_{Color}$ ) at different current density.

et al., 2014), 유기물 제거에 의해 반드시 색도가 제거 되는 것은 아니라고 볼 수 있다. 한편 본 연구에서의 색도 제거효율은 전체 전류밀도 조건에서 유기물 제거효율 대비 다소 높은 점을 확인할 수 있었다. 또한, 제거효율 관점에서 색도의 제거효율은 15, 20 mA/cm<sup>2</sup> 전류밀도 조건에서 유기물 제거효율과 유사한 경향을 나타냈으며 다소 높은 제거효율을 나타냈다. 일반적으로 색도는 발색단(chromophore)이 제거됨에 따라 감소하지만 발색단 제거에 의한 중간분해 산물이 완전히 무기질화 되기까지 시간이 소요된다(Kim and Park, 2008). 따라서, 유기물 대비 색도의 제거효율이 높게 나타난 것으로 판단된다. Park(2008)은 전기분해와 UV 조사에 의한 수중 Rhodamine B 제거에 관한 연구를 수행했으며, 전기분해 반응을 이용한 염료 제거에서 비교적 제거하기 쉬운 염료의 발색단은 빠른 시간 내에 제거되지만 COD 제거에는 더 많은 에너지를 소요하여야 한다고 보고하고 있으며, 본 연구와 유사한 결과를 나타냈다. Piya-areetham et al.(2006)은 증류 산업 농축 폐수 처리를 위해 전기분해 공정에서 9 A의 전류세기를 적용한 결과, 색도 및 유기물 제거율은 각각 61, 52%로 나타났다고 보고하고 있다. 또한, Tang et al.(2022)는 본 연구와 동일한 Ti/BDD 전극을 이용하

여 25, 50, 75 및 100 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도 조건에서 염료폐수의 색도 제거에 관한 연구를 수행한 결과, 20 mA/cm<sup>2</sup> 조건 대비 50 mA/cm<sup>2</sup> 이상의 전류밀도 조건에서 색도 제거율의 차이가 크게 나타나 본 연구와 유사한 경향을 나타냈다. Tauchert et al.(2006)의 매립지 침출수의 전기화학적 처리에 관한 연구에서는 유기물 제거가 색도 제거 대비 느린 속도로 진행됨을 보고하고 있으며 본 연구와 유사한 경향을 나타냈다. RuO<sub>2</sub>/Ti 전극을 이용한 염료폐수의 전기분해에 관한 연구를 수행한 Han(2001)의 연구에 의하면 염료의 분해는 발색단인 azo기가 먼저 분해되고 조색단을 형성하는 방향족 화합물들의 분해로써 해석하고 있으며 전기분해에 색소 분해가 가능한 것으로 결론짓고 있다. de Toledo et al.(2022)는 BDD 전극을 활용한 BG (Brilliant Green) 염료의 색도 분해에 관한 연구를 수행하였다. 실험결과, 10분 동안의 반응시간 내 전류밀도가 증가함에 따라 색도 제거효율은 증가하는 결과를 나타내 본 연구와 유사한 경향을 나타냈으며 약 60 mA/cm<sup>2</sup> 이상의 조건에서 완전한 색도 제거가 이루어짐을 보고하고 있다. Radha et al.(2009)은 섬유 폐수의 색도 제거는 높은 전류밀도에서 효율적임을 보고하고 있으며, 최대 96%의 색도 제거효율을 얻었음을 보고하고 있다. Veli

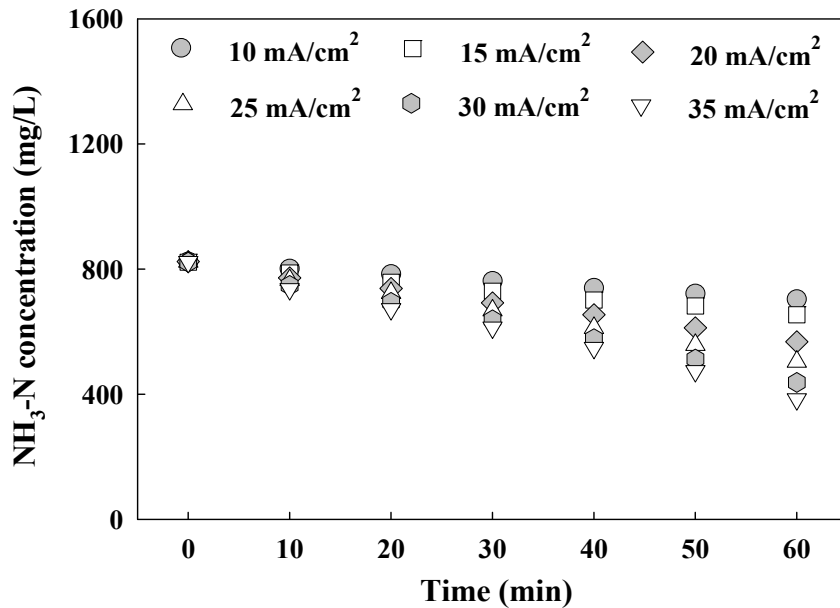


Fig. 6. Results of NH<sub>3</sub>-N concentration at different current density.

et al.(2021)은 매립지 침출수의 색도 제거를 위하여 2 L 규모의 전기분해 반응기 내 Fe-Cr 합금 전극을 적용한 실험을 실시하였으며, 60분의 반응시간과 4.05 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 적용한 결과 91%의 색도가 제거됨을 보고하고 있다.

전체 운전조건에서의 색도 제거효율에 따른 반응속도 상수( $k_{Color}$ ) 도출 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 반응속도 경향은 유기물 제거효율과 마찬가지로 1차 반응에서의 결정계수 값이 높은 것으로 나타나 1차 반응 결과로 산정하였다. 분석 결과 전류밀도가 10에서 35 mA/cm<sup>2</sup>까지 증가함에 따라 반응속도는 각각 0.0664, 0.0838, 0.1168, 0.1560, 0.2106 및 0.2987/min으로 점차 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 전류밀도에 따른 색도 제거 반응속도 상수의 회귀분석 결과  $f(x)=0.0003x^2-0.0051x+0.0883$  ( $R^2=0.9973$ ) 형태의 함수로 나타났다. Değermenci(2021)은 티타늄 전극을 이용한 azo 염료의 색도 제거에 관한 연구를 수행하였으며, 0.87에서 1.74 mA/cm<sup>2</sup>의 다양한 전류밀도 범위 및 NaCl 첨가를 통한 색도 제거 반응속도를 도출하였다. 분석결과, 색도 제거에 따른 반응속도 상수는 1차 반응을 따르는 것으로 보고하고 있다. López-Grimau and Gutiérrez(2006)은 염색 폐수 처리를 위

해 낮은 전류밀도 조건에서의 색도 제거효율을 관찰하였으며, 다양한 전류밀도 조건에서의 색도 제거 반응속도 상수를 산정한 결과, 1차 반응을 따른다고 보고하고 있으며 본 연구와 유사한 경향을 나타냈다.

### 3.3. 암모니아성 질소 제거효율

전체 운전조건에서의 암모니아성 질소 제거 거동을 Fig. 6에 나타냈다. 전류밀도가 증가함에 따라 암모니아성 질소 제거량은 120에서 439 mg/L, 제거효율은 14.6에서 53.3%까지 증가하였다. 분석결과 암모니아성 질소의 경우, 전류밀도가 증가함에 따라 제거량은 증가하는 경향을 나타냈으나, 유기물 제거량과 비교하여 더 낮은 수준의 제거가 달성되었다. Pérez et al.(2010)은 역삼투압 농축수 처리를 위해 BDD 전극이 적용된 전기분해 반응조를 이용하였으며, 50 A/m<sup>2</sup>의 전류밀도 조건에서 8시간 반응 후, 60%의 암모니아성 질소 제거효율을 얻었으며, 200 A/m<sup>2</sup>의 전류밀도 조건에서는 5시간 반응 후, 100%의 암모니아성 질소 제거효율을 달성하였음을 보고하고 있다. Boo(2001)는 양식장 배출수 처리를 위해 Ti/IrO<sub>2</sub> 전극을 사용하여 전류밀도 증가에 따른 유기물과 암모니아성 질소의 처리효율을 검토하였으며, 전기분해 과정에서 형성되는 차아염소

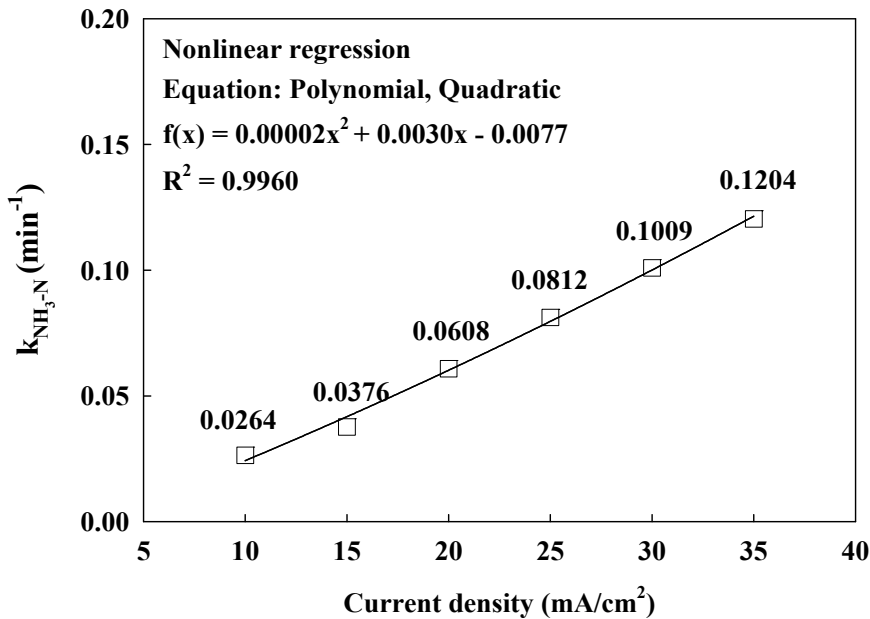


Fig. 7. Results of NH<sub>3</sub>-N reaction rate constants (k<sub>NH<sub>3</sub>-N</sub>) at different current density.

산 등의 중간산화물이 암모니아성 질소를 우선적으로 산화하여 유기물 제거효율이 낮아지는 것으로 보고하고 있어 본 연구와는 상반되는 결과를 도출하였다. 이러한 결과는 양식수(해수) 내 함유된 풍부한 염소 이온에 의한 중간산화물 형성 가속화를 통하여 암모니아성 질소의 간접산화 작용에 유리한 조건이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 유기물과 암모니아를 동시에 제거하기 위하여 보다 높은 전류밀도를 적용해야 하는 것으로 보고되고 있다(Anglada et al., 2009). 그러나 높은 전류밀도를 적용하는 것은 운영비용 측면에서 매우 불리하다. 따라서 전류밀도와 더불어 전해조 형태 및 운영방법 변화 등 다양한 변수 제어를 통하여 암모니아성 질소 제거효율 증대를 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 전기분해를 통한 유기물 제거 공정을 전단으로 적용하고 후단 생물학적 처리공정 적용을 통하여 미처리된 암모니아성 질소를 제거하는 운영기법과 한편으로는 생물학적 처리공정을 전단으로 적용하고 후단 전기분해 공정을 적용하는 운영기법도 고려할 필요가 있다.

전체 운전조건에서의 암모니아성 질소 제거효율에 따른 반응속도 상수(k<sub>NH<sub>3</sub>-N</sub>) 도출 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 반응속도 경향은 유기물, 색도 제거효율과 마찬가지로

가치로 1차 반응에서의 결정계수 값이 높은 것으로 나타나 1차 반응 결과로 산정하였다. 분석 결과 전류밀도가 10에서 35 mA/cm<sup>2</sup>까지 증가함에 따라 반응속도는 각각 0.0264, 0.0376, 0.0608, 0.0812, 0.1009 및 0.1204/min으로 점차 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 전류밀도에 따른 색도 제거 반응속도 상수의 회귀분석 결과  $f(x)=0.00002x^2+0.0030x-0.0077$  ( $R^2=0.9960$ ) 형태의 함수로 나타났다. Ding et al.(2015)는 전기분해 공정이 포함된 eAND 공정을 적용하여 암모니아성 질소의 제거효율을 관찰하였으며, 반응속도는 1차 반응을 따르는 것으로 보고하고 있다. Yao et al.(2016)은 Ti/PbO<sub>2</sub> 전극을 이용한 암모니아성 질소 제거에 관한 연구를 수행하였으며, 다양한 pH 조건에서의 반응속도 상수를 도출한 결과, 반응속도는 1차 반응을 따른다고 보고하고 있으며, pH 3에서  $4.63 \times 10^{-4}$ /min, pH 5에서  $1.63 \times 10^{-3}$ /min, pH 7에서  $1.09 \times 10^{-4}$ /min, pH 9에서  $1.3 \times 10^{-3}$ /min의 결과를 제시하였다.

### 3.4. 에너지 소모량

Fig. 8에는 조건별 유기물 산화에 대한 에너지 소모량 산정결과를 나타냈다. 에너지 소모량은 전기분해 공



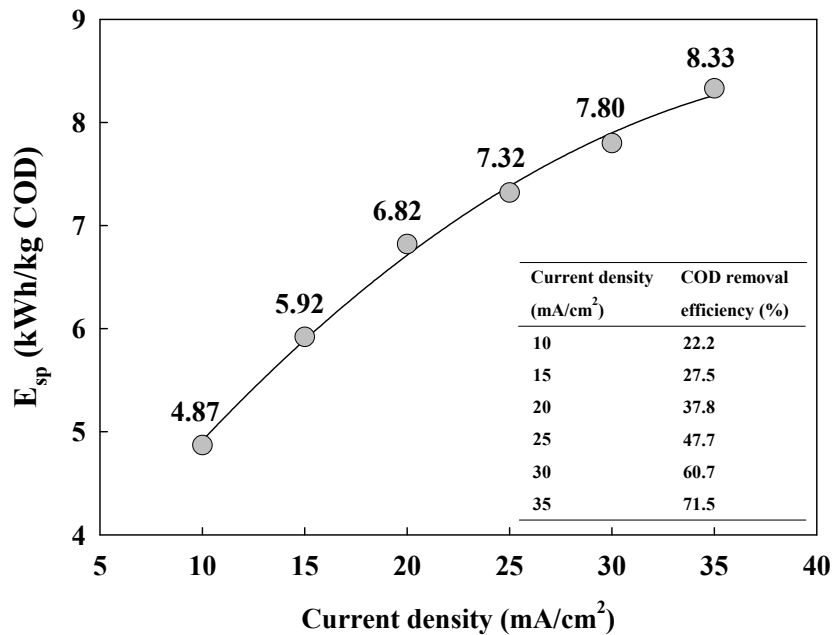


Fig. 8. Results of specific energy consumption ( $E_{sp}$ ) at different current density.

정의 효율성을 평가할 수 있는 지표로 활용이 가능하다 (Kang, 2020). 에너지 소모량 산정결과 전류밀도 증가에 따라 에너지 소모량 또한 증가하는 경향을 나타냈으며, 4.87에서 8.33 kWh/kg COD까지 증가하였다. 유기물 제거효율 관점에서 전류밀도 10 mA/cm<sup>2</sup> 조건에서 22.2%의 유기물 제거량이 35 mA/cm<sup>2</sup> 조건에서 71.5%까지 증가한 점을 고려해보면, 낮은 전류밀도 대비 높은 전류밀도에서 에너지 소모량 대비 유기물 제거효율이 더욱 효율적임을 확인할 수 있었다. 이는 매립지 침출수의 유기물 제거를 위해 전기분해 공정을 이용한 결과, 전류량 증가에 따라 유기물 제거를 위한 에너지 소모량이 증가한다고 보고하는 Anglada et al.(2011)의 연구와 유사한 경향을 나타냈으며, Photo-electro-Fenton 공정을 이용한 매립지 침출수의 유기물 제거 시, 전류밀도가 증가함에 따라 에너지 소모량은 증가한다고 보고하는 Asaithambi et al.(2020)의 연구와도 일치하는 경향을 나타냈다. 전류밀도 값이 낮을수록 오염원 제거에 오랜 시간이 필요하므로 더 큰 설비와 운영비용이 필요하며, 전류밀도 값이 높을수록 에너지 소모량 및 운영비용이 증가한다(Sahinkaya, 2013). 따라서 최소한의 전력으로 오염원 제거효율을 극대화하기 위

해서는 전류밀도를 최적의 수준으로 운용해야 하며, 유입수 특성에 맞는 전류밀도 설정에 관한 고려가 필요하다. 전반적인 분석에 따라 본 연구에서의 축산폐수 처리를 위한 최적 전류밀도의 경우, 20 mA/cm<sup>2</sup>이며 해당하는 에너지 소모량은 6.824 kWh/kg COD로 산정되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 BDD 전극을 이용하여 전류밀도 변화에 따른 축산폐수 처리에 관한 연구를 수행하였으며 유기물, 색도, 암모니아성 질소 및 에너지 소모량을 평가하였다. 전류밀도는 10에서 35 mA/cm<sup>2</sup>까지 조절하였으며 유기물의 경우, 전류밀도가 증가함에 따라 제거효율은 22.2에서 71.5%까지 증가하였다. 색도의 경우, 유기물과 마찬가지로 전류밀도 증가에 따라 제거효율은 최대 85.7%까지 증가하였으며 제거효율 관점에서 유기물 대비 높은 제거효율을 나타냈다. 암모니아성 질소는 전류밀도 증가에 따라 제거효율은 14.6에서 53.3%까지 증가하였으나 유기물 대비 낮은 제거가 달성되었다. 또한, 유기물, 색도 및 암모니아성 질소의 제

거는 반응속도 분석결과, 1차 반응을 따르는 것으로 나타났다. 한편, 에너지 소모량은 4.87에서 8.33 kWh/kg COD를 나타냈으며, 높은 전류밀도에서의 유기물 제거효율이 더욱 효율적임을 확인할 수 있었다. 다양한 분석을 통하여 전류밀도 조건에 따른 축산폐수 처리효율을 평가하였으며, 본 연구에서의 축산폐수 처리를 위한 최적 전류밀도의 경우, 20 mA/cm<sup>2</sup>이며 해당하는 에너지 소모량은 6.824 kWh/kg COD로 산정되었다. 향후 연구는 전해조 형태 및 운영기법 변경, 생물 반응조와 전해조 연계를 통한 축산폐수 처리 최적화에 관한 범위를 탐색하는 데 초점을 맞출 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 경기도형 연구자 중심의 R&D지원(과제 번호#2022-011)에 의해 수행되었습니다.

### REFERENCES

- Anglada, A., Urriaga, A., Ortiz, I., 2009, Pilot scale performance of the electro-oxidation of landfill leachate at boron-doped diamond anodes, *Environ. Sci. Technol.*, 43, 2035-2040.
- Anglada, A., Urriaga, A., Ortiz, I., Mantzavinos, D., Diamadopoulou, E., 2011, Boron-doped diamond anodic treatment of landfill leachate: Evaluation of operating variables and formation of oxidation by-products, *Water Res.*, 45, 828-838.
- Asaithambi, P., Govindarajan, R., Yesuf, M. B., Alemayehu, E., 2020, Removal of color, COD and determination of power consumption from landfill leachate wastewater using an electrochemical advanced oxidation processes, *Sep. Purif. Technol.*, 233, 115935.
- Boo, C. S., 2001, The removal characteristics of organic matters and ammonia in the aquacultural effluents by electrolysis, M.S. Dissertation, Cheju University, Cheju, Korea.
- de Toledo, W. D. M. C., Pinheiro, R. A., Trava-Airoldi, V. J., Corat, E. J., 2022, Development of boron-doped diamond (BDD) deposited on carbon nanotubes (CNT) to form BDD/CNT structures relevant for electrochemical degradation, *Diam. Relat. Mater.*, 127, 109159.
- Değermenci, G. D., 2021, Removal of reactive azo dye using platinum-coated titanium electrodes with the electro-oxidation process, *Desal. Water Treat.*, 218, 436-443.
- Díaz, V., Ibáñez, R., Gómez, P., Urriaga, A. M., Ortiz, I., 2011, Kinetics of electro-oxidation of ammonia-N, nitrites and COD from a recirculating aquaculture saline water system using BDD anodes, *Water Res.*, 45, 125-134.
- Ding, J., Zhao, Q., Zhang, Y., Wei, L., Li, W., Wang, K., 2015, The eAND process: Enabling simultaneous nitrogen-removal and disinfection for WWTP effluent, *Water Res.*, 74, 122-131.
- Ghaly, A. E., Ananthashankar, R., Alhattab, M., Ramakrishnan, V. V., 2014, Production, characterization and treatment of textile effluents: a critical review, *J. Chem. Eng. Process Technol.*, 5, 1000182.
- Han, S. H., 2001, Preparations of platinum compound/Ti electrode and characteristics of electrolysis on dye wastewater, Ph. D. Dissertation, Kwangwoon University, Seoul, Korea.
- Huang, K. L., Wei, K. C., Chen, M. H., Ma, C. Y., 2018, Removal of organic and ammonium nitrogen pollutants in swine wastewater using electrochemical advanced oxidation, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 13, 11418-11431.
- Ismail, G. A., Sakai, H., 2022, Review on effect of different type of dyes on advanced oxidation processes (AOPs) for textile color removal, *Chemosphere*, 291, 132906.
- Kang, J. H., 2020, Characteristics of dyeing wastewater treatment using Electrolysis, Ph. D. Dissertation, Pusan University, Busan, Korea.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2008, Comparison study of dyestuff wastewater treatment by the coupled photocatalytic oxidation and biofilm process, *Chem. Eng. J.*, 139, 256-263.
- Kumar, A., Srivastava, N. K., Gera, P., 2021, Removal of color from pulp and paper mill wastewater- methods and techniques- A review, *J. Environ. Manage.*, 298, 113527.
- Lee, C. Y., 2008, Treatment of organic matter and nitrogen in wastewater using electrolysis, Ph. D. Dissertation, Wonkwang University, Iksan, Korea.
- Lee, J. H., Choi, H. L., 2015, Livestock manure nutrients flow analysis of integrated crop-livestock farming model reflecting the regional characteristics, *J. of KORRA*, 23, 36-46.
- Lee, S. H., Lim, C. S., Yinhu, Q., Kim, C. G., Im, J. B., 2022, Economic evaluation of manure treatment methods considering manure output and nutrient balance by regions, *Korean Journal of Agricultural*

- Management and Policy, 49, 581-599.
- López-Grimau, V., Gutiérrez, M. C., 2006, Decolourisation of simulated reactive dye bath effluents by electrochemical oxidation assisted by UV light, *Chemosphere*, 62, 106-112.
- Okur, M. C., Akyol, A., Nayir, T. Y., Kara, S., Ozturk, D., Civas, A., 2022, Performance of Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> electrodes and comparison with BDD electrodes in the treatment of textile wastewater by electro-oxidation process, *Chem. Eng. Res. Des.*, 183, 398-410.
- Ornelas Dávila, O., Lacalle Bergeron, L., Dávila Jiménez, M. M., Sirés, I., Brillas, E., Roig Navarro, A. F., Beltrán Arandes, J., Sancho Llopis, J. V., 2021, Study of the electrochemical oxidation of 4,6-dimethyldibenzothiophene on a BDD electrode employing different techniques, *J. Electroanal. Chem.*, 894, 115364.
- Park, Y. S., 2008, Removal of Rhodamine B in water by ultraviolet radiation combined with electrolysis(I), *J. Env. Hlth. Sci.*, 34, 439-445.
- Patel, P. S., Bandre, N., Saraf, A., Ruparelia, J. P., 2013, Electro-catalytic materials (electrode materials) in electrochemical wastewater treatment, *Procedia Eng.*, 51, 430-435.
- Pérez, G., Fernández-Alba, A. R., Urriaga, A. M., Ortiz, I., 2010, Electro-oxidation of reverse osmosis concentrates generated in tertiary water treatment, *Water Res.*, 44, 2763-2772.
- Piya-areetham, P., Shenchunthichai, K., Hunsom, M., 2006, Application of electrooxidation process for treating concentrated wastewater from distillery industry with a voluminous electrode, *Water Res.*, 40, 2857-2864.
- Radha, K. V., Sridevi, V., Kalaivani, K., 2009, Electrochemical oxidation for the treatment of textile industry wastewater, *Bioresour. Technol.*, 100, 987-990.
- Rao, N. N., Rohir, M., Nitin, G., Parameswaran, P. N., Astik, J. K., 2009, Kinetics of electrooxidation of landfill leachate in a three-dimensional carbon bed electrochemical reactor, *Chemosphere*, 76, 1206-1212.
- Sahinkaya, S., 2013, COD and color removal from synthetic textile wastewater by ultrasound assisted electro-fenton oxidation process, *J. Ind. Eng. Chem.*, 19, 601-605.
- Shin, C. H., 2015, Design of a water reuse system combined with a fiber filtration and electrolysis, *J. Environ. Sci. Int.*, 24, 1385-1391.
- Shin, J. H., 2019, Removal of nitrogen compounds in wastewater through electrolysis, M.S. Dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Tang, Y., Liu, M., He, D., Pan, R., Dong, W., Feng, S., Ma, L., 2022, Efficient electrochemical degradation of X-GN dye wastewater using porous boron-doped diamond electrode, *Chemosphere*, 307, 135912.
- Tauchert, E., Schneider, S., Morais, J. L., Peralta-Zamora, P., 2006, Photochemically-assisted electrochemical degradation of landfill leachate, *Chemosphere*, 64, 1458-1463.
- Ukundimana, Z., Omwene, P. I., Gengec, E., Can, O. T., Koby, M., 2018, Electrooxidation as post treatment of ultrafiltration effluent in a landfill leachate MBR treatment plant: Effects of BDD, Pt and DSA anode types, *Electrochim. Acta*, 286, 252-263.
- Veli, S., Arslan, A., Isgoren, M., Bingol, D., Demiral, D., 2021, Experimental design approach to COD and color removal of landfill leachate by the electrooxidation process, *Environ. Chall.*, 5, 100369.
- Yao, J., Zhou, M., Wen, D., Xue, Q., Wang, J., 2016, Electrochemical conversion of ammonia to nitrogen in non-chlorinated aqueous solution by controlling pH value, *J. Electroanal. Chem.*, 776, 53-58.
- Zhang, Y. H., Zhu, L., Guo, X., Zhang, W. J., Shao, X., Yang, J., 2023, Modified W, Ti-doped IrO<sub>2</sub> anode for efficient organic contaminant oxidation in livestock wastewater, *J. Electroanal. Chem.*, 931, 117192.
- 
- Researcher. Hyun-Gu Kim  
BlueBank Co., Ltd.  
hgkim@bluebank.kr
  - Professor. Dae-Hee Ahn  
Department of Environmental Engineering and Energy,  
Myongji University  
dhahn@mju.ac.kr