Journal of Radiation Industry 15 (4) : 283~288 (2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.283

감마선과 Al_2O_3에 의한 sulfamethoxazole의 TOC 저감 연구

이 강[1] · 김태훈[1] · 김탁현[1] · 조상희[1] · 손지은[1] · 유승호[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

A Study on TOC Removal of Sulfamethoxazole in the Presence of Al_2O_3 under γ-ray Irradiation

Kang Lee[1], TaeHun Kim[1], Tak-Hyun Kim[1], Sang-Hee Jo[1], Jieun Son[1] and Seungho Yu[1,*]

[1]*Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongeup-si 56212, Republic of Korea*

Abstract - Sulfamethoxazole (SMX) is a widely used antibiotic for staving off bacterial growth in both human and animal medicines. It has been detected in various environments such as surface water, soils and groundwater. It is very difficult to achieve complete removal of antibiotics by the conventional biological wastewater treatment. Al_2O_3 with γ-ray irradiation has been used to treat SMX. This study focused on total organic carbon (TOC) removal of SMX in the presence of Al_2O_3 by γ-ray irradiation. TOC removal efficiencies of SMX can increase by hydroxyl radical (·OH) generation with adding Al_2O_3. For γ-ray irradiation with Al_2O_3, continuous mixing during the irradiation is very important for higher TOC removal efficiencies of SMX. In γ-ray irradiation, TOC removal efficiencies in acidic conditions (pH 3) are higher than those of neutral (pH 7) and alkaline conditions (pH 11). Al_2O_3 with γ-ray irradiation was very effective for TOC removal of SMX.

Key words : Sulfamethoxazole, Photocatalyst, pH, Gamma radiation, TOC

서 론

최근 인간과 동물의 질병 치료와 예방을 목적으로 다양한 종류의 의약물질들이 사용되고 있다. Sulfamethoxazole (SMX)은 동물과 인간에 적용할 수 있는 성공적인 항생제 중 하나로 사용되고 있다(Lee *et al*. 2018). SMX는 높은 환경 검출빈도, 잔류성, 생물 축적 및 독성을 고려할 때 최우선 의약품 화합물에 포함된다.

SMX는 뇨나 대변을 통해 대부분이 배출된다(Jjemba 2006). 또한, 체내에서 완전히 분해되지 않고 배출된 의약물질은 하수처리공정을 통해 쉽게 제거되지 않기 때문에 자연 수계로 유입될 수 있다. 동물성 항생제와 의약물질은 잠재적인 독성과 생태계에 대한 악영향으로 인해 비생분해성 오염물질로 분류된다. 일반적으로 의약물질은 수계에서 수 ng L^{-1}~μg L^{-1}의 농도범위에서 검출되고 있다(Miao *et al*. 2004; Clara *et al*. 2005). 이러한 의약물질은 저농도에도 불구하고 생물농축에 의해 인간 및 환경에 영향을 줄 수 있으며, 약물 내성생물의 출현을 야기할 수 있다.

또한, 공공수역의 난분해성 유기물질의 농도가 증가하는 추세와 더불어 산업폐수, 하수처리시설 등의 방류수 관리지표의 적정성에 대한 부정적인 의견과 함께 새로운 지표로 화학적산소요구량 과망간산칼륨법(COD_{Mn}) 대신 총유기탄소(Total organic carbon, TOC)가 새롭게 부각되었다. 2013

* Corresponding author: Seungho Yu, Tel. +82-63-570-3341, Fax. +82-63-570-3352, E-mail. yuse@kaeri.re.kr

년 환경 정책 개정에 따라 TOC 항목이 수질 및 수생태계 환경기준에 도입되었다. 2015년 방류수 수질기준에 TOC 항목 도입 방안을 마련하였고, 2021년부터 공공하수처리시설 및 분뇨처리시설의 방류수에 TOC 기준을 점진적으로 적용할 예정이다(Son *et al*. 2021). 2022년부터는 기존 폐수배출시설의 배출허용기준을 TOC로 전환할 예정이다.

의약물질과 같은 난분해성 물질은 기존 전통적인 처리방법에서 효과적으로 제거되지 않기 때문에, 의약물질의 처리 효율을 높이기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 의약물질 제거를 위하여 다양한 고도산화공정(Advanced oxidation processes, AOPs)이 시도되고 있다(Kim *et al*. 2010; Mohapatra *et al*. 2014; Alsager *et al*. 2018). 그러나, 하수처리시설 방류수 수질기준에 TOC 항목을 유기물질 법정 관리지표로 규정하고 있는 국가가 없어 TOC 제거에 관한 연구 사례가 부족하다.

AOP는 기존의 산화공정보다 더 효율적으로 유기물과 난분해성 오염물질을 분해할 수 있기 때문에 관심을 받아왔다. 이러한 난분해성 유기물질의 처리에 있어 다양한 광화학적 분해, 광촉매 및 화학적 산화처리 공정은 좋은 예이다. 이 중 감마선 및 전자빔을 이용한 이온화 방사선방법(ionizing radiation)은 고도산화공정의 한 방법으로 연구가 진행되고 있으며(Yu *et al*. 2008; Kralchevska *et al*. 2012; Iqbal and Bhatti 2015; Kim *et al*. 2017) 높은 처리 효율을 나타내는 것으로 보고되었지만 TOC 제거에는 낮은 처리 효율을 나타내었다.

광촉매/감마선 공정은 감마선을 광촉매에 조사하여 광촉매 표면에 ·OH을 생성시켜 유기물을 제거하는 방법으로 단일 감마선 공정에 비해 적은 에너지를 이용하여 유기물을 제거할 수 있다. 광촉매는 빛을 흡수하여 가전자대(valence band, VB)로부터 전도대(conduction band, CB)로 전자를 여기 시킨다. 이때 생성된 전하쌍이 계면으로 이동하여 전자전이를 일으켜 다양한 산화환원반응을 일으킨다. 전자가 전이되는데 필요한 광에너지는 에너지 밴드 갭(energy band gap)에 해당하는 에너지가 필요하다(Gnanaprakasam *et al*. 2015).

SMX의 분해반응은 대부분 산화반응이므로 광촉매 VB 정공의 산화력은 중요하다(Giannakopoulou *et al*. 2017). 따라서, 정공의 산화력이 클수록 VB의 전기화학적 전위가 양의 값을 가질수록 산화반응에 유리하다(Curti *et al*. 2018). 대부분 넓은 에너지 밴드 갭을 지닌 광촉매들이 VB의 전기화학적 전위가 양의 값으로 크다. 정공에 의한 산화반응은 정공과 유기화합물의 직접반응과, 생성된 ·OH과 유기화합물이 반응인 간접반응으로 나뉜다(Cuerda-Correa *et al*. 2020). 광촉매 반응은 정공의 직접반응보다 간접반응(식(1), (2))에 의해 생성되는 ·OH이 오염물질 산화에 더 많은 기여를 하는 것으로 알려져 있다. 한편, 정공에 의한 산화반응은 CB 전자의 제거가 동반되어야 광촉매 반응이 증가하며 대부분의 광촉매 반응에서 O_2가 전자수용체로 역할을 한다(식(3)).

$$H_2O + h^+ \rightarrow \cdot OH + H^+ \quad (1)$$

$$OH^- + h^+ \rightarrow \cdot OH \quad (2)$$

$$O_2 + e_{cb}^- \rightarrow O_2^{\cdot -} \quad (3)$$

Al_2O_3는 다른 광촉매(예: CdS, SnO_2, Ta_2O_5, TiO_2, ZnS, ZrO_2 등)에 비해 넓은 에너지 밴드 갭과 VB의 전기화학적 전위가 양의 큰 값으로 산화반응에 유리한 밴드구조를 가지고 있다.

본 연구에서는 TOC 항목을 방류수 수질기준의 관리지표로 도입하는 경우를 대비하여 유기물 완전제거에 관한 연구를 목적으로 연구를 수행하였다. 효과적인 SMX의 TOC 제거를 위해 감마선에 광촉매 방법을 적용하였다. 감마선/광촉매 공정은 감마선을 광촉매에 조사하여 감마선에 의해 생성되는 라디칼과 광촉매 반응으로 추가적인 라디칼을 생성하는 것이다. Al_2O_3와 감마선 처리에 따른 SMX의 TOC 제거효율, 교반/혼합(mixing) 유무, 광촉매 농도, pH에 따른 제거 특성을 파악하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료

Sulfamethoxazole은 SIGMA ALDRICH사에서 구입하여 0.4 mM의 stock solution을 제조하였고 0.12 mM로 희석하여 실험에 사용하였다. 광촉매 Al_2O_3 (Aluminum oxide, nanopowder, ＜50 nm)는 SIGMA ALDRICH사에서 구입하였다.

2. 감마선 처리 조건

감마선 조사는 한국원자력연구원(Jeongeup, Republic of Korea)내 선원 1.47×10^{17} Bq ^{60}Co source (MDS Nordion, Canada)를 이용하여 상온, 상압 및 공기분위기에서 수행하였다. 감마선 조사에 사용한 시료는 300 mL 유리병에 0.4 mM의 SMX 용액 60 mL 넣은 후 0.5, 1, 2, 5, 10 $g \cdot L^{-1}$의 농도로 Al_2O_3를 첨가하여 용액의 전체 용량을 200 mL로 조제하였다. 30분간 자석 교반기로 교반/혼합 한 후 분취하여 15 mL conical tube에 남은 공간 없이 각각 옮겨 담아 흡수선량 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 5 kGy (1 kGy = 1 $kJ \cdot kg^{-1}$)로 각각 달리하였으며, 감마선 조사선량률은 1 $kGy \cdot hr^{-1}$로 조사하였다. 조사하는 동안 회전 교반기를 이용하여 SMX 수용액을 교반/혼합하였다.

3. 기기분석 조건

반응 후 시료 중 처리대상 항생제 물질의 잔류 농도를 측정하기 위하여 실험에 사용한 Al_2O_3를 4000 rpm에서 15분간 원심분리하여 제거하였다. 원심분리 후 상등액을 취하여 0.45 μm filter를 이용하여 부유물을 제거한 뒤 분석에 사용하였다. 감마선 조사 후 SMX 무기화 정도를 측정하기 위하여 총유기탄소(TOC)는 Shimadzu사의 TOC-VCSN 기기를 사용하였다.

결 과

1. 교반/혼합에 의한 광촉매 반응과 TOC 변화

Al_2O_3와 감마선처리 하는 동안에 교반/혼합 유무에 따른 SMX의 TOC 제거효율을 비교해 본 결과 Fig. 1과 같은 결과를 확인하였다. SMX, Al_2O_3의 초기농도는 각각 0.12 mM, 2 g·L^{-1}에서 실험을 수행하였다. 5 kGy의 흡수선량에서, Al_2O_3 없이 SMX의 TOC 제거효율은 교반/혼합 유무의 차이는 거의 없었다. 반면에, 5 kGy의 흡수선량에서 교반/혼합을 이용한 Al_2O_3의 TOC 제거효율은 85.5%로 나타났으며, 교반/혼합 없이 대비 TOC 제거효율은 38.6% 증가하였다. 이런 상승효과는 다음과 같이 설명할 수 있다. 교반/혼합에 의해서 광촉매 표면과 오염물질의 접촉 가능성 증가로 인하여 TOC 제거효율이 증가되었을 가능성이 있다. 대조적으로, 교반/혼합 없는 조건에서는 광촉매의 침전으로 인해 광촉매 반응을 위한 광촉매 표면과 접촉 가능성이 감소할 수 있다(Sakthivel *et al*. 2003). 따라서, 교반/혼합 조건에서 광촉매의 분산에 의해 광촉매 표면과 반응물질의 접촉확률이 증가함으로써, 광촉매 반응이 증가할 수 있다(식(1)~(3)).

2. 광촉매 농도에 따른 SMX의 TOC 제거

Fig. 2는 Al_2O_3 농도에 따른 SMX의 TOC 제거효율을 나타내며, Al_2O_3의 농도가 증가함에 따라 흡착에 의해 TOC의 초기 농도는 감소하였다. 5 kGy의 흡수선량에서, TOC 제거효율은 2 g·L^{-1}의 Al_2O_3까지 증가하다가 그 이상의 농도에서 더 이상 증가하지 않았다. 이런 결과는 다음과 같이 설명할 수 있다. 광촉매의 농도가 증가할수록 광촉매 비표면적이 증가하지만 고농도의 광촉매에서 광촉매의 응집에 따라 광촉매 반응을 위한 실제적인 광촉매 비표면적이 더 이상 증가하지 않을 것으로 예상된다(Lee *et al*. 2007). Yurdakal, Li 등의 연구결과(Yurdakal *et al*. 2007; Li *et al*. 2010)에서도 광촉매 TiO_2의 농도가 증가할수록 TiO_2의 응집체 크기가 증가하였다. 촉매 농도가 증가함에 따라 광분해 속도가 증가하다가 일정 농도 이상에서 광분해 속도는 감소하였다

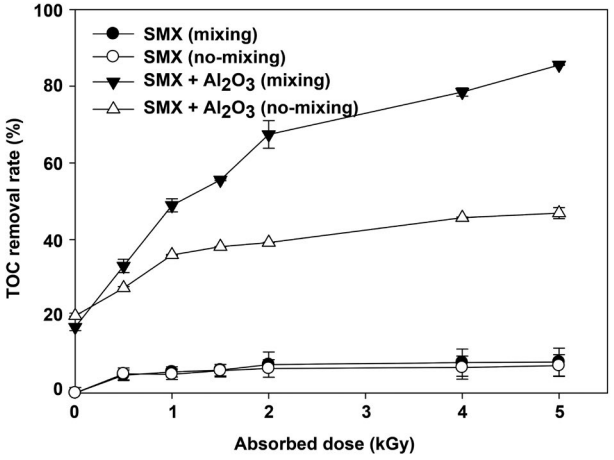

Fig. 1. Effects of mixing on the TOC removal by γ-ray irradiation in presence of Al_2O_3 ([SMX]$_0$ = 0.12 mM; dose rate = 1 kGy·h^{-1}; [Al_2O_3]$_0$ = 2 g·L^{-1}).

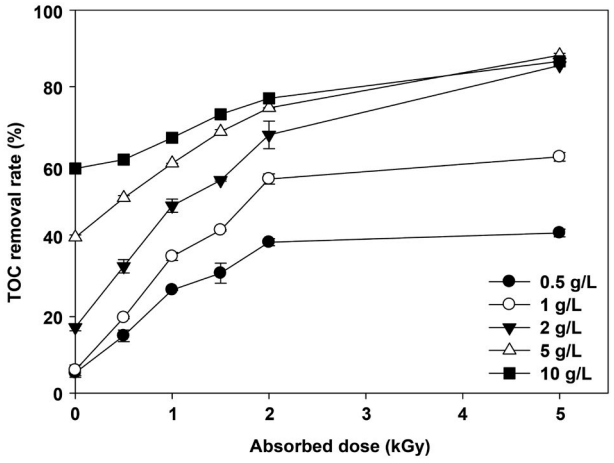

Fig. 2. Effects of initial concentration of Al_2O_3 on the TOC removal by γ-ray irradiation ([SMX]$_0$ = 0.12 mM; dose rate = 1 kGy·h^{-1}).

(Li *et al*. 2010). 따라서, 효율적인 SMX의 TOC 제거를 위해 광촉매의 적절한 농도 선정이 필요하다.

3. pH에 따른 영향

pH는 감마선과 광촉매 공정에서 산화환원반응에 영향을 미치는 주요 요인이다. 광촉매 없이 감마선 공정에서 라디칼 및 수화 전자는 물 가수분해의 생성물(H_3O^+, OH^-)과 반응할 수 있기 때문에 pH에 따라 초기 수율(G값)은 변한다(Fig. 3) (Getoff 1996). 감마선을 조사하였을 때 산성 조건(pH 3)에서 중성(pH 7)이나 알칼리 조건(pH 11)보다 TOC 제거 속도가 높았다(Fig. 4). 산성 조건에서 물의 방사분해로 수소 이온과 전자가 반응하여 ·H을 생성할 수 있다(식(4)). 반면에, 알칼리 조건에서 OH^-가 많을수록 전자의 생

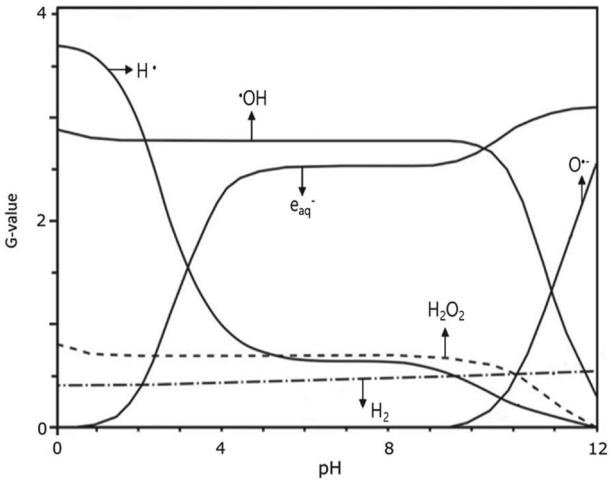

Fig. 3. The pH value impact on the main water radiolysis products (Getoff 1996).

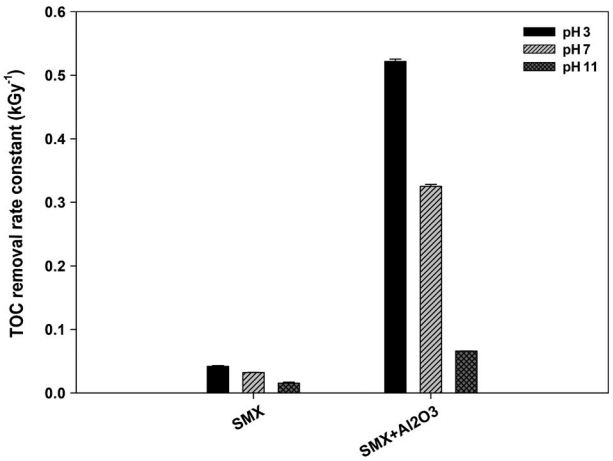

Fig. 4. Effects of initial pH on the TOC removal by γ-ray irradiation in the presence of Al_2O_3 ($[SMX]_0 = 0.12$ mM; dose rate = 1 kGy · h^{-1}; $[Al_2O_3]_0 = 2$ g · L^{-1}).

성이 증가한다(식(5)). 또한, 산화성이 강한 ·OH은 반응성이 상대적으로 약한 $O^{\bullet-}$과 $O_2^{\bullet-}$로 쉽게 전환될 수 있다(식(6), (7)) (Wang and Chu 2016). 따라서, 산성 조건에서 ·H와 ·OH이, 알칼리 조건에서는 전자의 G값이 증가함을 알 수 있다.

$$H^+ + e^- \rightarrow \cdot H \quad (4)$$

$$\cdot H + OH^- \rightarrow e^- + H_2O \quad (5)$$

$$\cdot OH + OH^- \rightarrow O^{\bullet-} + H_2O \quad (6)$$

$$\cdot OH + HO_2^- \rightarrow O_2^{\bullet-} + H_2O \quad (7)$$

Al_2O_3와 감마선을 병행하였을 경우, 감마선에 의해 생성되는 ·OH과 광촉매 VB의 정공(h^+)에 의해 추가적으로 생성되는 ·OH이 SMX의 TOC 제거효율을 증가시킬 수 있다. 또한, 광촉매 CB의 전자에 의해 $O_2^{\bullet-}$이 생성될 수 있다(식(1)). 산성 조건에서는 H^+가 많을수록 H_2O_2 생성이 증가할 수 있다(식(8), (9)). 생성된 H_2O_2는 광촉매의 전자-정공의 재결합을 방지하여 VB 정공의 지속시간을 증가시키고, ·OH을 생성시켜 광촉매 반응효율을 증가시킬 수 있다(식(10)) (Siwek and Edgecock 2020). 따라서, 감마선에 의해 생성되는 ·OH과 전자-정공의 재결합 방지에 의한 광촉매 반응효율 상승, 광촉매 반응으로 생성되는 추가적인 ·OH이 TOC 제거효율을 증가시키는 것으로 사료된다.

$$O_2^{\bullet-} + H^+ \rightarrow HO_2^{\bullet} \quad (8)$$

$$HO_2^{\bullet} + HO_2^{\bullet} \rightarrow H_2O_2 + O_2 \quad (9)$$

$$H_2O_2 + e_{cb}^- \rightarrow \cdot OH + OH^- \quad (10)$$

또한, 광촉매의 표면 전하는 영전하점(point of zero charge)과 관련이 있다. Al_2O_3의 영전하점이 pH 7~9이며 (Mui *et al*. 2016), 영전하점보다 pH가 낮으면 양전하(+)를, 영전하점보다 높으면 음전하(−)를 띄는 특성을 가지고 있다(Xu *et al*. 2007; Abdel-Aziz *et al*. 2020). SMX의 산 해리상수는 $pK_{a1} = 1.85 \pm 0.30$, $pK_{a2} = 5.60 \pm 0.04$이다 (Xekoukoulotakis *et al*. 2011). pH 1.85 미만에서 SMX의 양전하 형태, pH 5.6 이상에서 SMX의 음전하 형태가 우세하다. 알칼리 조건에서 광촉매의 표면이 음전하(−)를 띄기 때문에 SMX의 음전하와 흡착량이 감소하여 광촉매의 직접분해 반응이 감소할 수 있다.

pH 변화에 따라 광촉매의 입자 크기가 응집에 의해 변화할 수 있다. Li (Li *et al*. 2010) 등의 연구결과에서 산성 pH보다 중성 pH에서 광촉매 TiO_2의 입자 크기가 10배 이상 크게 나타난 것으로 보고되었고, 산성 pH에서 orange II의 분해가 증가하였다. 따라서, 감마선에 의해 생성되는 ·OH, 광촉매의 직접분해 반응의 감소, 광촉매의 응집에 의한 입자 크기 증가가 TOC 제거효율을 감소시키는 것으로 사료된다.

결 론

본 연구에서는 광촉매 Al_2O_3와 감마선 조사에 의한 항생제인 SMX의 TOC 제거 특성과 TOC 제거효율을 향상시키기 위한 조건을 확인하고자 하였다. Al_2O_3와 감마선을 함께 병행하였을 경우, 감마선 조사하는 동안 지속적인 mixing은 광촉매의 분산에 의해 광촉매 표면과 반응물질의 접촉확률이 증가하기 때문에 SMX의 TOC 제거효율 향상에 중요하다. 효율적인 SMX (0.12 mM)의 TOC 제거를 위해 Al_2O_3의 적절한 농도가 요구되며, 이 연구에서 최적 Al_2O_3의 농도는

$2\,g\cdot L^{-1}$였다. 산성 조건에서 감마선에 의해 생성되는 ·OH과 광촉매 반응에 의해 생성되는 추가적인 ·OH로 인해 SMX의 TOC 제거효율을 증가시켰다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부에서 시행하는 방사선기술개발사업 “전자선 이용 미세먼지 저감기술 개발(NRF-2018M2A2B3A06071698)”과제의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Abdel-Aziz R, Ahmed M and Abdel-Messih M. 2020. A novel UV and visible light driven photocatalyst $AgIO_4$/ZnO nanoparticles with highly enhanced photocatalytic performance for removal of rhodamine B and indigo carmine dyes. *J.o.P.,Chemistry, P.A*. **389**:112245.

Alsager O, Alnajrani M and Alhazzaa O. 2018. Decomposition of antibiotics by gamma irradiation: kinetics, antimicrobial activity, and real application in food matrices. *J.C.E.J*. **338**: 548-556.

Clara M, Strenn B, Gans O, Martinez E, Kreuzinger N and Kroiss H. 2005. Removal of selected pharmaceuticals, fragrances and endocrine disrupting compounds in a membrane bioreactor and conventional wastewater treatment plants. *J.W.r.* **39**(19):4797-4807.

Cuerda-Correa EM, Alexandre-Franco MF and Fernández-González C. 2020. Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water. An overview. *J.W.* **12**(1): 102.

Curti M, Kirsch A, Granone L, Tarasi F, Loópez-Robledo G, Bahnemann D, Murshed M, Gesing T and Mendive C. 2018. Visible-Light Photocatalysis with Mullite-Type $Bi_2(Al_{1-x}Fe_x)_4O_9$: Striking the Balance between Bandgap Narrowing and Conduction Band Lowering. *J.A.C*. **8**(9):8844-8855.

Getoff N. 1996. Radiation-induced degradation of water pollutants-state of the art. *J.R.P., Chemistry* **47**(4):581-593.

Giannakopoulou T, Papailias I, Todorova N, Boukos N, Liu Y, Yu J and Trapalis C. 2017. Tailoring the energy band gap and edges' potentials of g-C_3N_4/TiO_2 composite photocatalysts for NO_x removal. *J.C.E.J*. **310**:571-580.

Gnanaprakasam A, Sivakumar V, Sivayogavalli P and Thirumarimurugan M. 2015. Characterization of TiO_2 and ZnO nanoparticles and their applications in photocatalytic degradation of azodyes. *J.E., Safety, e*. **121**:121-125.

Iqbal M and Bhatti I. 2015. Gamma radiation/H_2O_2 treatment of a nonylphenol ethoxylates: degradation, cytotoxicity, and mutagenicity evaluation. *J.o.h.m*. **299**:351-360.

Jjemba P. 2006. Excretion and ecotoxicity of pharmaceutical and personal care products in the environment. *J.E., Safety, e*. **63**(1):113-130.

Kim E, Kim T, Lee O, Choi D, Lee M and Yu S. 2010. Efficiency of bisphenol-A decomposition by Oxidants and gamma ray. *J.o.R.I*. **4**(2):125-131.

Kim H, Kim T, Cha S and Yu S. 2017. Degradation of sulfamethoxazole by ionizing radiation: Identification and characterization of radiolytic products. *J.C.E.J*. **313**:556-566.

Kralchevska R, Milanova M, Tsvetkov M, Dimitrov D and Todorovsky D. 2012. Influence of gamma-irradiation on the photocatalytic activity of Degussa P25 TiO_2. *J.o.M.S*. **47**(12):4936-4945.

Lee D, Lee J, Nam J and Kim H. 2018. Degradation of sulfonamide antibiotics and their intermediates toxicity in an aeration-assisted non-thermal plasma while treating strong wastewater. *J.C*. **209**:901-907.

Lee J, Kim J and Choi W. 2007. Oxidation on zerovalent iron promoted by polyoxometalate as an electron shuttle. *J.E.s*. **41**(9):3335-3340.

Li G, Lv L, Fan H, Ma J, Li Y, Wan Y and Zhao X. 2010. Effect of the agglomeration of TiO_2 nanoparticles on their photocatalytic performance in the aqueous phase. *J.o.c., Science. i*. **348**(2):342-347.

Miao X, Bishay F, Chen M and Metcalfe C. 2004. Occurrence of antimicrobials in the final effluents of wastewater treatment plants in Canada. *J.E.s., technology* **38**(13):3533-3541.

Mohapatra D, Brar S, Tyagi R, Picard P and Surampalli R. 2014. Analysis and advanced oxidation treatment of a persistent pharmaceutical compound in wastewater and wastewater sludge-carbamazepine. *J.S.o.t.T.E*. **470**:58-75.

Mui J, Ngo J and Kim B. 2016. Aggregation and colloidal stability of commercially available Al_2O_3 nanoparticles in aqueous environments. *J.N*. **6**(5):90.

Sakthivel S, Neppolian B, Shankar M, Arabindoo B, Palanichamy M and Murugesan V. 2003. Solar photocatalytic degradation of azo dye: comparison of photocatalytic efficiency of ZnO and TiO_2. *J.S.e.m., cells, s*. **77**(1):65-82.

Siwek M and Edgecock T. 2020. Application of electron beam water radiolysis for sewage sludge treatment - a review. *J.E.S., Research*. **27**:42424-42448.

Son D, Jeong D and Park K. 2021. Correlation analysis between TOC and organic matter indices in influent and effluent of public sewage treatment facilities. *J.o.C.f.I.T*. **11**(4):122-129.

Wang J and Chu L. 2016. Irradiation treatment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in water and wastewater: an overview. *J.R.P., Chemistry* **125**:56-64.

Xekoukoulotakis N, Drosou C, Brebou C, Chatzisymeon E,

Hapeshi E, Fatta-Kassinos D and Mantzavinos D. 2011. Kinetics of UV-A/TiO_2 photocatalytic degradation and mineralization of the antibiotic sulfamethoxazole in aqueous matrices. *J.C.T.* **161**(1):163-168.

Xu T, Cai Y and O'Shea K. 2007. Adsorption and photocatalyzed oxidation of methylated arsenic species in TiO_2 suspensions. *J.E.s., technology.* **41**(15):5471-5477.

Yu S, Lee B, Lee M, Cho I and Chang S. 2008. Decomposition and mineralization of cefaclor by ionizing radiation: kinetics and effects of the radical scavengers. *J.C.* **71**(11):2106-2112.

Yurdakal S, Loddo V, Bayarri Ferrer B, Palmisano G, Augugliaro V, Giménez Farreras J and Palmisano L. 2007. Optical properties of TiO_2 suspensions: influence of pH and powder concentration on mean particle size. *J.I., Research, e.c.* **46**(23):7620-7626.

Received: 8 December 2021
Revised: 15 December 2021
Revision accepted: 15 December 2021