

Pulsed UV를 이용한 CSOs 소독시 반사체에 따른 처리효율 연구

한종훈¹ · 허지용¹ · 김강욱¹ · 이준영¹ · 박원석² · 이종열² · 허남국^{1*}

¹육군3사관학교

²아름다운환경건설

A Study of Treatment Efficiency of Reflectors for CSOs Disinfection by Pulsed UV

Jonghun Han¹ · Jiyong Hur¹ · Kangwook Kim¹ · Junyoung Lee¹ · Wonseok Park²
Jongyeol Lee² · Namguk Her^{1*}

¹Department of Chemistry and Environmental Sciences, Korea Army Academy at Young-Cheon

²Beautiful Environmental Construction Co., Ltd.

ABSTRACT

This study examined the disinfection in combined sewer overflows (CSOs) by pulsed ultraviolet (PUV). The reflectors (stainless steel, mirror, aluminium foil, aluminium (1050), aluminium (6061), aluminium (5052), and aluminium mirror) of PUV irradiation was performed in a 90 L stainless reactor at a constant temperature of 20°C and an applied power of 4000 W. The reflection efficiency of reflectors were showed 1.00 (aluminium mirror) ~ 1.48 (aluminium foil) does. The case of a rough surface analysis using SEM showed high reflectance, was the case of a smooth surface and a low reflectivity. Pseudo first-order rate constant calculated results, has a higher reflectivity values were more than twice as high compared to the low reflectivity. Affected Total coliforms disinfection time, depending on the type of reflector is considered.

Key words : CSOs, Total coliforms, PUV, Disinfection, Reflector

1. 서 론

기후 변화에 따라 우리나라의 강우 경향도 우기에 더욱 집중되는 형태를 보이고 있다. 기존 비점오염원의 하나로 꾸준히 연구되어 온 CSOs(combined sewer overflows) 처리는 이러한 강우 사상 변화에 따라 관심이 집중되고 있으며, 학계 및 산업계 등에서 적극적인 연구가 이루어지고 있다. 한편, 기존 CSOs 처리는 SS(suspended solid)에 국한되어 수인성 질병 등에 취약성을 보였으나, 최근 국내에서 병원성 대장균을 규제하지는 움직임이 보이고 있어, 기존 처리 방법에 추가적인 공정 및 새로운 공정이 요구되는 실정이다. 기존 소독 방법은 UV(Macauley et al., 2006; Parikh, 2007; Naddeo et al., 2009)를 이용하는 공정, pulsed UV(Ali et al., 2006; Sharifi-Yazdi and Darghahi, 2006; Elmnasser et al.,

2007; Maclean et al., 2008; Lee et al., 2008; Lee et al., 2009)를 이용하는 공정, Chlorine(David et al., 2005; Macauley et al., 2006; Gideon et al., 2008)을 이용하는 방법, 오존(Silva et al., 2010)을 이용하는 방법 등이 있는데, 염소 소독에 의한 소독 부산물의 발생, 오존의 낮은 경제성, UV 사용시의 전처리 공정 요구 등이 기존 소독의 문제점으로 대두되어 왔다. 반면, Pulsed UV를 이용한 공정은 소독 부산물이 거의 생성되지 않으며, 오존에 비해 경제성이 뛰어나고, 기존 UV 공정에 비해 SS 등에 의한 영향이 적으며, 반응시간이 매우 짧아 새로운 소독 방안으로 각광받고 있다.

이러한 PUV를 이용한 소독 공정의 원리는 일반적으로 UVC(185~280 nm)에 의한 작용이라 할 수 있는데, 미생물에 UV를 조사하면 DNA의 염기 중 티민의 분자구조가 집중적으로 파괴되고, 자외선을 흡수한 티민은 이웃한 티

*Corresponding author : namguk@daum.net

Received : 2014. 12. 6 Reviewed : 2015. 2. 25 Accepted : 2015. 2. 25

Discussion until : 2015. 4. 30

민이나 시토신과 중합되어 DNA 복제가 정상적으로 이루어지는 것을 방해함으로써 생명체로서의 기능을 정지시킴으로써 소독이 이루어진다. 이러한 기작은 화학적 방법에 의한 소독과는 달리 미생물의 면역성이 생길 가능성이 없고, 일반 UV 소독 후 발생하는 300~500 nm의 가시광선에 의한 광회복이 없어 유리한 공정이라고 할 수 있다.

일반적인 UV system 공정의 효율 향상을 위해 적용되는 방법으로는 TiO₂를 이용하는 방법(Yu et al., 2003), silica-coated TiO₂를 이용하는 방법(Jaroenworuluck et al., 2006) 등이 연구되었으나, PUV에 적용된 사례는 미미하며, PUV를 이용한 소독의 경우 과거 상수도 및 하수 유출수를 대상으로 일부 연구된 사례는 있으나, CSOs에 적용된 사례는 거의 없어 운전인자 등의 추가 도출이 요구되고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 pulsed UV를 이용한 CSOs의 급속 소독 조건 도출을 위해 반사체를 적용하여 처리효율을 향상시키는 연구를 진행하여, 실제 CSOs 소독 공정에 적용 가능한 효과적인 인자들을 도출하고, 도출된 인자들에 대한 효율 향상 방안에 대한 연구를 진행하였다.

2. 연구방법

2.1. CSOs 소독을 위한 system 구성

본 연구에서 사용된 PUV system은 reactor와 power supply(PSMP-06240PC, Green & Tech.), Temp. controller로 구성되었으며, PUV reactor는 유효용적 90 L의 stainless 재질로 5 cm 간격마다 석영셀을 배치할 수 있도록 제작하였고, reactor 중앙에 PUV lamp를 설치하여 양 방향에서 동시 실험이 가능하도록 구성하였다. 운전은 기존 선행연구에서 도출된 운전인자(거리 20 cm(본 실험에서는 55 cm), 출력 4000 W, 조사시간 10 sec, 수중 SS 농도 20 mg/L(본 실험에서는 0 mg/L)에서 실험을 진행하였으며, 실험에 사용된 반사체는 최초 mirror, stainless steel, aluminium foil을 사용하여 기본 운전인자들에 대한 분석을 실시한 후, 실험 결과에 따라 우수한 사멸율을 보인 aluminium 종류 중 aluminium(1050), aluminium(6061), aluminium(5052) 및 aluminium mirror를 추가로 선정하여 사용하였으며, 석영셀 뒤에 수평이 되도록 장착하였고 비교 실험을 위해 PUV가 석영셀을 통과하는 실험을 병행하였다.

Fig. 1은 반응조 내부에 석영셀과 반사체를 위치시킨 모식도로, 반사체는 석영셀 크기와 동일한 가로 12 cm, 세로 25 cm로 제작하였으며, 셀과의 거리는 10 cm를 유지하였다.

2.2. 반사체 반사능력 평가를 위한 실험

Fig. 2는 각 반사체의 UVC 반사량 측정 실험의 모식도이다. PUV lamp로부터 반사체의 거리는 1 m였으며, 반사체로부터 UVC meter까지의 거리는 실제 실험 조건과 유사한 최장 거리 0.3 m를 유지하였다. UVC 측정은 Ultra-Violet Radiometer(Taiwan)을 이용하여 90° 각도에서 3회 측정하여 평균값을 나타내었다.

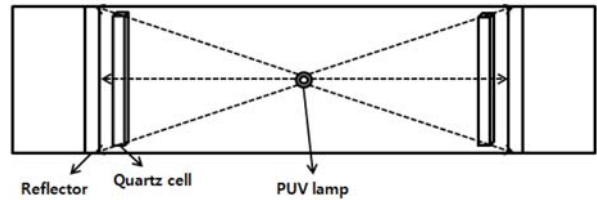


Fig. 1. Schematic diagram for PUV reflection test.

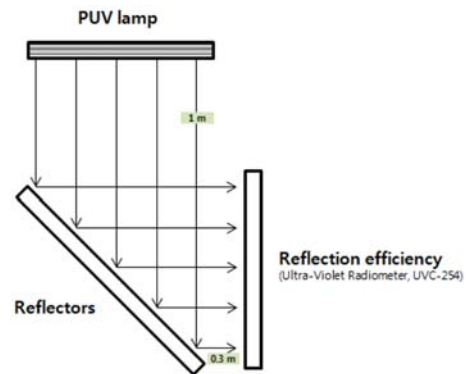


Fig. 2. Reflection efficiency of UVC with stainless steel, mirror, aluminium foil, aluminium (1050), aluminium (6061), aluminium (5052), and aluminium mirror.

2.3. 대장균 분석

총 대장균은 3M Petrifilm™ Coliform Count Plates 방식을 사용하여 측정하였다. 실험결과를 대장균의 대사 산물인 Glucuronidase가 배지내의 염색지시약과 반응하여 균체를 푸른색으로 염색시키며 대부분의 대장균은 대사과정에서 CO₂ 가스를 발생시켜 균체 가장자리에 가스방울을 형성함으로써 발색된다. Total coliforms의 배양 온도는 35°C를 유지하였으며, 배양 시간은 48 hr이었다. 각 실험은 총 3회 측정하여 평균값으로 나타내었으며, 오차는 5% 미만이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소독 기본 운전인자에 따른 대장균 사멸율

Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 passed PUV, mirror,

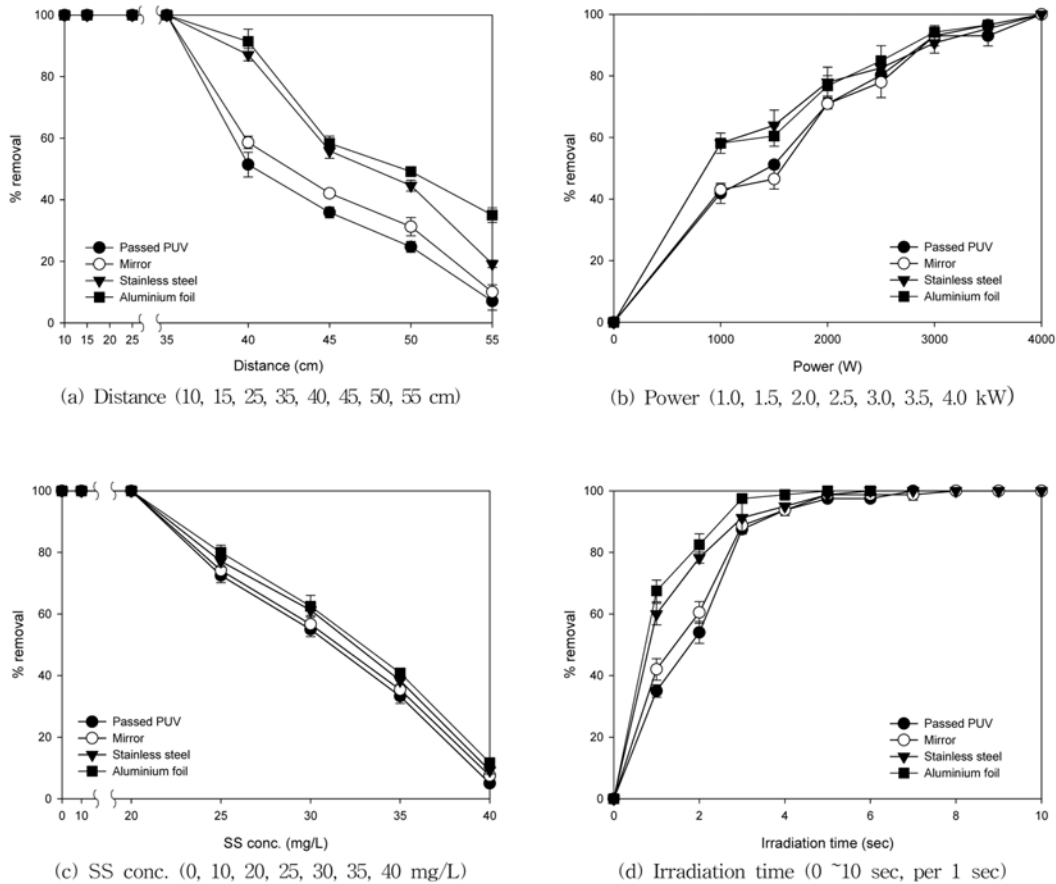


Fig. 3. Removal rate of total coliforms by PUV depending on the distance, power, SS conc., and irradiation time.

stainless steel, aluminium foil 모두 조사거리 35 cm까지 총대장균이 100% 사멸되었다. PUV의 조사거리가 멀어짐에 따라 사멸율은 감소하였고, 내부 코팅제에서 aluminium foil이 가장 높은 사멸율을 보였으며, stainless steel, mirror, passed PUV 순으로 사멸율이 낮게 나타났다.

Fig. 3(b)는 출력에 따른 사멸율을 나타낸 것으로 PUV의 출력을 4,000 W로 조사 시 내부 코팅제 모두 총대장균이 100% 제거되었고, 2,000 W 이하에서는 80% 미만의 제거율을 보였다. 내부 코팅제에서 aluminium foil이 가장 높은 사멸율을 보였으며, stainless steel, mirror, passed PUV 순으로 사멸율이 낮게 나타났다.

Fig. 3(c)는 SS 농도와 반응조 내부 코팅제에 따른 총대장균 사멸율을 나타낸 것이다. SS 농도가 20 mg/L일 때까지는 내부 코팅제 모두 총대장균이 100% 제거되었으나, 30 mg/L 이상에서는 제거율이 현저하게 낮아지는 경향을 보였다. 내부 코팅제에서 aluminium foil이 가장 높은 사멸율을 보였으며, stainless steel, mirror, passed PUV 순으로 사멸율이 낮게 나타났다.

Fig. 3(d)는 조사시간에 따른 총대장균 사멸율을 나타낸 것이다. PUV를 4초 조사하였을 때 passed PUV 93.8%, mirror 93.8%, stainless steel 95%, aluminium foil 98.8% 총대장균이 제거되었으며, 3초 미만에서 passed PUV, mirror의 경우 90% 미만의 제거율을 나타냈다. 즉, PUV를 이용한 CSOs 내 대장균 소독을 위해서는 4초 이상 PUV를 조사해야하며, 내부 코팅제 중 제거율이 높은 aluminium foil을 사용하는 것이 좋은 것으로 나타났다.

위 실험결과 aluminium foil의 경우가 모든 운전조건에서 우수한 사멸율을 나타내어 aluminium 종류인 aluminium(1050), aluminium(6061), aluminium(5052), and aluminium mirror를 추가하여 소독에 최적인 반사체를 선택하고자, 추가 실험을 진행하였다.

3.2. 반사체 종류에 따른 반사효율

Table 1은 반사체 종류에 따른 UVC 반사 효율이다. 연구결과 aluminium mirror의 경우 셀을 통과시킨 경우와 동일한 반사 배수를 보였으며, aluminium foil이 1.48

Table 1. UVC dose of reflectors

Aluminium mirror	Aluminium (6061)	Mirror	Aluminium (1050)	Aluminium (5052)	Stainless steel	Aluminium foil
1.00	1.01	1.03	1.13	1.15	1.16	1.48

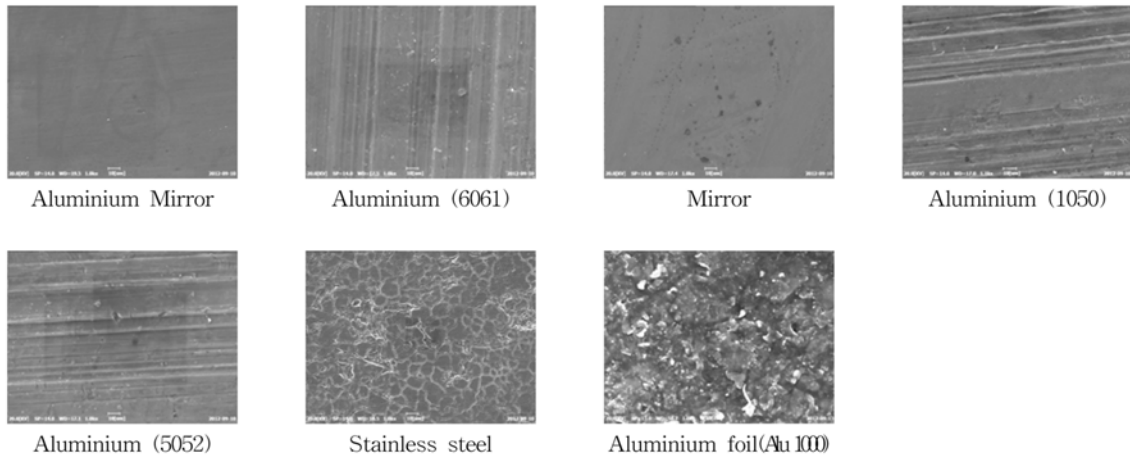


Fig. 4. SEM images of reflectors (stainless steel, mirror, aluminium foil, aluminium (1050), aluminium (6061), aluminium (5052), and aluminium mirror)

배의 UVC를 반사하여 대상 반사체 중 가장 높은 반사 효율을 보였다.

반사율이 상이한 원인을 분석하기 위해 SEM을 이용하여 각 반사체의 표면을 분석해 보았다. 분석결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 상대적으로 낮은 반사율을 보이는 aluminium mirror, aluminium(6061), mirror의 경우 표면 굴곡이 적고, 평평한 경향을 보였으며, 상대적으로 높은 반사율을 보인 aluminium(1050), aluminium(5052), stainless steel 및 aluminium foil(Alu 1000)의 경우 표면의 굴곡이 크거나, 거친 표면을 관찰할 수 있었다. 즉, SEM 분석을 통해 반사체의 표면 특성이 UVC 반사율을 결정하는 인자 중 하나인 것을 확인할 수 있었다.

3.3. 반사체에 따른 대장균 사멸율

Fig. 5는 각 반사체에 따른 대장균 사멸율을 비교한 것인데, 기존 연구에 의해 aluminium foil의 경우 다른 운전조건이 동일한 경우 50 cm까지 100% 제거되는 것을 고려하여 본 연구에서는 순수한 반사체에 따른 처리효율 비교를 위해 PUV 램프로부터 셀의 거리를 55 cm로 유지하였다. 실험결과 UVC 반사율이 가장 높았던 Aluminium foil 및 Alu 1000에서의 대장균 사멸율은 81.0%(SD 4.6)와 80.4%(SD 2.3)로 가장 높게 나타났으며, UVC 반사율이 가장 낮았던 aluminium mirror는 62.5%(SD 1.8)에서 가장 낮은 제거율을 보였다. 한편, 다른 반사체들의 경

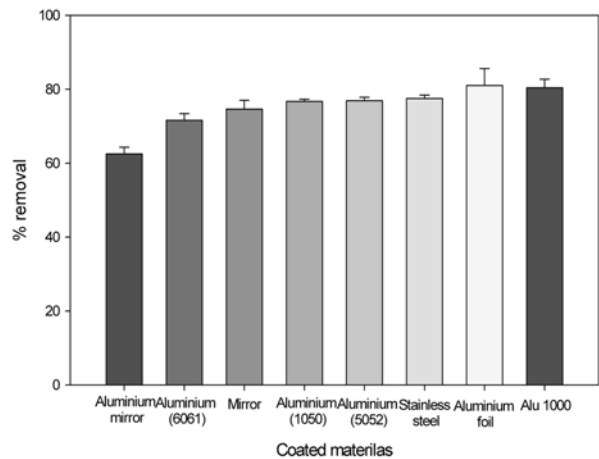


Fig. 5. Removal rate of total coliforms by with coated materials (irradiation time : 10 sec, SS conc. : 20 mg/L, power : 4000 W, distance : 55 cm).

우는 71.6%~77.5%의 제거율을 나타냈다.

Table 2는 대장균 사멸율을 유사일차반응속도상수(-kt)로 나타낸 것이다. 가장 높은 효율을 보였던 aluminium foil과 Alu 1000의 경우는 각각 2.11×10^{-2} 및 2.18×10^{-2} 의 값을 보였으나, 가장 낮은 제거율을 보였던 aluminium mirror의 경우는 4.70×10^{-2} 로 약 2.23배의 차이가 나는 것을 볼 수 있었다. 즉, 반사체 종류(반사능력)에 따라 단위 시간당 처리할 수 있는 대장균 수는 많은 차이를 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Pseudo first-order rate constant for the PUV degradation of Total coliforms ($\ln(E_t/E_0) = -kt$, sec^{-1})

Aluminium mirror	Aluminium (6061)	Mirror	Aluminium (1050)
4.70×10^{-2}	3.34×10^{-2}	2.93×10^{-2}	2.65×10^{-2}
Aluminium (5052)	Stainless steel	Aluminium foil	Alu 1000
2.63×10^{-2}	2.55×10^{-2}	2.11×10^{-2}	2.18×10^{-2}

4. 결 론

1) 반사체에 따른 UVC 반사 효율을 분석한 결과 aluminium foil 및 Alu 1000이 가장 높은 효율을 나타냈으며, aluminium mirror의 경우 거의 반사하지 않는 것을 확인하였다.

2) 각 반사체의 표면을 SEM을 이용하여 분석한 결과 표면특성에 따라 반사율이 상이한 것을 유추할 수 있었다.

3) 반사체에 따른 대장균 사멸을 분석결과 UVC 반사율이 높은 반사체를 사용하는 경우 높은 제거율을 얻을 수 있었다.

4) 본 연구를 통해 효과적인 반사체 사용은 반사율 증가를 통해 빠른 시간에 많은 대장균 사멸을 가능하게 하며, 이는 PUV를 이용한 대장균 소독시 경제성 및 효율성을 확보할 수 있는 중요한 운전 인자가 될 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 토양지하수오염방지기술개발사업 (GAIA project)의 일환으로 수행되었으며(과제번호 2012 000550022), 이에 감사드립니다.

References

Ali, D.J.M., Irudayaraj, V.M.P., Bhushan, M.J., and Roy, E.Y., 2006, Decontamination of milk and water by pulsed UV-light and infrared heating, The Pennsylvania State University the Graduate School Department of Agricultural and Biological Engineering.

David, E.J., Charles, N.H., Nena, N., and Charles, P.G., 2005, Chlorine and ozone disinfection of *Encephalitozoon intestinalis* spores. *Water Research*, **39**, 2369-2375.

Elmnasser, N., Ritz, M., Leroi, F., Orange, N., Bakhrouf, A., and Federighi, M., 2007, Bacterial inactivation using pulsed light, *Acta Aliment.*, **36**(3), 401-408.

Jaroenworoluck, A., Sunsaneeyametha, W., Kosachan, N., and Stevens, R., 2006, Characteristics of silica-coated TiO_2 and its UV absorption for sunscreen cosmetic applications, *Surface and Interface Analysis*, **38**(4), 473-477.

Gideon, P.W., Lisa, M.A., Tom, S., and Bruce, J., 2008, Chlorine disinfection of grey water for reuse: Effect of organics and particles. *Water Research*, **42**, 483-491.

Lee, S.U., Joung, M.Y., Yang, D.J., Park, S.H., Huh, S., Park, W.Y., and Yu, J.R., 2008, Pulsed-UV light inactivation of *Cryptosporidium parvum*. *J. Parasitol. Res.*, **102**, 1293-1299.

Lee, E.Y., Lee, H.J., Jung, W.Y., Park, S.H., Yang, D.J., and Lee, K.S., 2009, Influences of humic acids and photoreactivation on the disinfection of *Escherichia coli* by a high-power pulsed UV irradiation. *Korean J. Chem. Eng.*, **26**(5), 1301-1307.

Macauley, J.J., Qiang, Z., Adams, C.D., Surampalli, R., and Mormile, M.R., 2006, Disinfection of swine wastewater using chlorine, ultraviolet light and ozone, *Water Res.*, **40**(10), 2017-2640.

Maclean, M., Murdoch, L.E., Lani, M.N., MacGregor, S.J., Anderson, J.G., and Woolsey, G.A., 2008, Photoinactivation and photoreactivation responses by bacterial pathogens after exposure to pulsed UV-light, *IEEE*, 326-329.

Naddeo, V., Landi, M., Belgiorno, V., and Napoli, R.M.A., 2009, Wastewater disinfection by combination of ultrasound and ultraviolet irradiation, *J. Hazard. Mater.*, **168**, 925-929.

Parikh, Priti P., 2007, Efficacy of Ultraviolet light and antimicrobials to reduce *listeria monocytogenes* in chill brines, *Food Sci. Technol.*, 20-24.

Sharifi-Yazdi and Darghahi, H., 2006, Inactivation of pathogenic bacteria using pulsed UV-light and its application in water disinfection and Quality control. *Acta Med. Iran.*, **44**(5), 305-308.

Silva, G.H.R., Daniel, L.A., Bruning, H., and Rulkens, W. H., 2010, Anaerobic effluent disinfection using ozone: Byproducts formation. *Bioresour. Technol.*, **101**, 6981-6986.

Yu, J.C., Ho, W., Lin, Jun., Yip, H., and Wong, P.k., 2003, Photocatalytic Activity, Antibacterial Effect, and Photoinduced Hydrophilicity of TiO_2 Films Coated on a Stainless Steel Substrate, *Environ. Sci. Technol.*, **37**(10), 2296-2301.