

반도체 공정에서 발생하는 유해물질 제거를 위한 흡착 및 촉매 공정에 대한 고찰

윤성진^a, 김유진^b, 강유진^a, 장민혁^a, 조형근^a, 한경재^a, 서동진^b, 조혜령^b, 박주일^{c†}

Reviews on Adsorption and Catalyst Technology for Removal of Hazardous Substances from Semiconductor Process

Seong-Jin Yoon^a, Yu-Jin Kim^b, Yu-Jin Kang^a, Min-Hyeok Jang^a, Hyung-Kun Jo^a,
Gyoung-Jae Han^a, Dong-Jin Seo^b, Hye-Ryeong Cho^b, Joo-Il Park^{c†}

(Received: Oct. 19, 2022 / Accepted: Nov. 2, 2022)

ABSTRACT: This paper investigated catalytic and adsorption equations among the technologies for removing hazardous substances generated in the semiconductor process. As the semiconductor industry develops, harmful substances used and discharged in the semiconductor process are also increasing. Hazardous substances adversely affect the global environment in terms of atmospheric and water quality. As regulations on the emission of harmful substances are strengthened in the 21st century, it is expected that there will be limitations in industrial development in the future. Therefore, technology for removing harmful substances generated in semiconductor processes is essential. In this paper, the goal is to remove PFCs, which are harmful substances, through adsorption technology and catalyst technology. Descriptions from the semiconductor process to the technology in which harmful substances generated are removed were summarized.

Keywords: Semiconductor process, PFCs, Removal technology, Adsorption, Catalyst

초 록: 본 논문은 반도체 공정에서 발생하는 유해물질의 제거기술들 중 촉매식과 흡착식에 대해 알아보았다. 반도체 산업이 발전함에 따라 반도체 공정에서 세척을 위해 사용되어 배출되는 유해물질 또한 증가하고 있다. 유해물질들은 지구 환경에 대기, 수질적으로 악영향을 준다. 21세기에 들어서면서 유해물질 배출에 대한 규제가 강화됨에 따라 향후 산업발전에 한계가 생길 것으로 예상된다. 따라서 반도체 공정에서 발생하는 유해물질의 제거기술이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 흡착기술과 촉매기술을 통해 유해물질인 PFCs의 제거를 목표를 두고 정리하였다. 반도체 공정에서부터 생성되는 유해물질이 제거되는 기술까지의 설명을 집약하였다.

주제어: 반도체 공정, 과불화탄소, 제거기술, 흡착, 촉매

^a 한밭대학교 화학생명공학과 석사과정(Graduate Course, Department of Chemical and Biological Engineering, Hanbat National University)

^b 한밭대학교 화학생명공학과 학사과정(Undergraduate Course, Department of Chemical and Biological Engineering, Hanbat National University)

^c 한밭대학교 화학생명공학과 부교수(Associate Professor, Department of Chemical and Biological Engineering, Hanbat National University)

† Corresponding author(e-mail: jipark94@hanbat.ac.kr)

1. 서론

현재 반도체는 전자산업의 근간을 두고 있다. 1974년부터 시작된 반도체 산업은 현재 우리나라 제조업비중 5%, 수출비중 12%로, 점차 늘어나는 추세이다. 앞으로의 4차 산업혁명에서 반도체산업은 계속해서 성장할 것이고 비례해서 반도체 산업에서 생성되는 유해 배출가스, 유해물질의 양 및 종류 또한 증가할 것이다¹⁾. 반도체 공정에서 배출되는 과불화합물 (PFCs: Perfluoro compounds)는 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential)가 매우 높으며 수명이 거의 영구적이기 때문에 이산화탄소와 비교했을 때 지구온난화에 수 천배 이상 영향을 준다 (Table 1). 또한 PFCs는 Non-CO₂계 온실가스 중 하나로 반도체나 LCD 공정 등에서 필수적으로 사용되고 있고, 전력, 냉매, 플라스틱, 알루미늄 제조공정 등 다양한 산업 활동에서 발생된다. PFCs의 양은 1993년 2ktCO₂에서 2019년 3,003ktCO₂까지 약 1500배 증가하였다. PFCs는 반도체 8대 공정(Wafer - Oxidation - Photolithography - Etching - Deposition - Attach leads - Test- Packaging) 중 Etching 및 Deposition 공정에서 세정을 위해 많이 사용되고 있다. 이때 사용되는 PFCs는 CF₄, C₂F₆, C₃F₈, C₄F₁₀, CHF₃, ClF₃ 등의 형태를 가진다²⁻⁴⁾.

PFCs의 처리법으로는 열분해, 흡착 그리고 촉매식 처리 등이 있다. 분해를 통해 처리할 경우 PFCs는 난분해성 가스 중 하나로 매우 안정한 화학적 특성을 가지기 때문에 고온의 열에너지나 플라즈마 에너지를 사용하여 분해한다.

분해 방법에 사용되는 설비로는 연소 소각식 스

크리버, 열 플라즈마 스크리버 등이 있다. 이 중 연소 소각식 스크리버는 일반적인 PFCs 제거기술에서 사용되며, 산화제(LNG 연료, 산소, 공기 등)에 의해 형성된 고온의 화염을 사용하여 과불화합물, 산성가스 등을 분해한다. 열 플라즈마 스크리버는 직류 아크 방전에 의해 발생된 중성입자, 전자, 이온으로 구성된 기체를 이용하여 고온의 고속 제트 불꽃 형태를 띠어 PFCs를 제거한다. 이 방법들은 제거 효율을 증가시키기 위해 큰 에너지를 필요로 하며 사용량 대비 낮은 처리 효율을 갖고 화염에 대한 부상, 날림 현상 등의 한계점을 가진다. 또한 PFCs를 열분해 시 재결합을 방지하기 위해 H₂O나 O₂ 등을 공급하는데, 이때 분해과정에서 HF, NO₂, CO₂, SO₂ 등 부가 유해물이 생성되며 이를 제거하기 위해 2차 공정이 필요하게 된다. 이런 유해물질의 생성을 최소화하기 위한 방법으로는 흡착식 방법과 촉매식 방법도 있다. 흡착식 방법의 경우 연소식 방법과 달리 활성탄을 이용하여 유해물질의 배출을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 촉매식 방법의 경우 H₂O나 O₂를 공급하지 않고 PFCs 가스를 직접 촉매와 반응시키기 때문에 유해물질의 생성을 최소화할 수 있고, 운전온도가 비교적 낮은 장점이 있다³⁾(Table 2).

본 논고에서는 반도체에서 발생하는 오염물과 오염물 처리에 대한 정보 및 PFCs 제거 방법인 흡착식 방법과 촉매식 방법에 대하여 기술하였다.

Table 1. Types of Hazardous Substances Emitted by the Process and Thermal Decomposition Temperature^{1,5)}

Classification	Process	Type	Molecular Weight (g/mol)	GWP CO ₂ =1	decomposition temp. (°C)	Lifetime (yr)
PFCs	Etching Cleaning	CF ₄	88.005	5,700	900	50,000
		C ₂ F ₆	138.01	11,900	1000	10,000
		C ₃ F ₈	188.02	8,600	1000	2,600
		C ₂ F ₄	100.016	-	-	10,000
		C ₄ F ₁₀	238.028	8,600	-	-
		C ₄ F ₈	200.031	-	-	3,200

Table 2. Comparison of PFCs Removal Process¹⁾

	Plasma decomposition type	Fuel-burn(Heat) type	Adsorption type	Catalyst type
Advantage	-Low thermal conductivity -Easy to operate equipment -Relatively efficient	-Proven technology	-No emissions -Simple equipment due to low temperature	-Less production of NOx -Low energy costs -Operating temperature below 900°C
Weakness	-Hard to handle large capacity -Requires high energy	-High risk of fire -Secondary by product generation	- Costs incurred due to periodical placement	-Hard to handle large capacity -Secondary pollutant generation(HF)

2. 유해물 처리 공정

2.1. 흡착식 공정

활성탄을 이용한 PFCs 흡착의 자발적 여부를 결정하는데 열역학적 분석이 필요하다. 표준 엔탈피 (ΔH°), 표준 엔트로피(ΔS°) 그리고 표준 자유에너지(ΔG°)로 구성된 다음 방정식으로 흡착 반응이 가능하다는 것을 알 수 있다. (1)은 Van't Hoff 방정식, (2)는 일반적인 평형 상수 방정식이고 (3)은 Maxwell 방정식이다⁶⁾.

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (1)$$

$$K_d = \frac{C_{AB}}{C_B} \quad (2)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad (3)$$

(1)과 (3)에서 K_d 는 열역학적 흡착 평형 상수, T 는 절대온도, R 은 기체상수, C 는 적분상수를 의미한다. 이 후 나오는 Suh et al.⁷⁾의 연구에서 PFCs 흡착 실험에서의 ΔH° 는 음수값을 가지며 흡착에 의해 자발적인 특성을 나타냈다⁷⁾.

흡착등온도는 기체상에서의 흡착분압의 함수로서 흡착제의 흡착능력을 판단할 수 있는 정보다. Suh et al.⁷⁾의 연구에서 사용된 모델은 Langmuir, Sips 그리고 Toth 모델들이며 이 모델들은 흡착제의 표면 특성, 기공구조 및 흡착조건에 따라 값이 달라진다⁵⁾. 흡착모델인 Langmuir isotherm은 (4), Sips isotherm은 (5), Toth isotherm은 (6)에 나타내었다. 여

기서 q 는 흡착 용량, b 는 평형상수, q_{\max} 는 최대 흡착 용량, P 는 체적농도를 의미한다⁸⁾.

$$q = \frac{bq_{\max}P}{1 + bP} \quad (4)$$

$$q = \frac{bq_{\max}P^n}{1 + bP^n} \quad (5)$$

$$q = \frac{q_{\max}P}{(b + P^n)^{1/n}} \quad (6)$$

2.1.1. 온도에 따른 흡착특성

Suh et al.⁷⁾는 흡착제로 활성탄을 사용하여 N_2 와 CF_4 에 대한 흡착특성을 온도에 따라 비교하여 보고하였다. 활성탄에 대한 N_2 와 CF_4 의 흡착등온도는 시뮬레이션 결과(Langmuir isotherm) N_2 보다 CF_4 를 더 빠르게 흡착한 것을 알 수 있었다. 압력이 증가함에 따라 흡착량이 증가하였고, 온도가 증가함에 따라 흡착량이 감소하였다. Langmuir isotherm를 이용한 시뮬레이션의 자세한 결과는 흡착 평형은 Table 3에 정리하여 나타냈다. 또한 실험값과 Langmuir isotherm model 값이 비슷하였으므로 이 모델의 사용이 적절한 것을 알 수 있었다.

흡착용량 q 는 $1.35 \times 10^5 \text{ mol/K}^m \text{g}$, m 은 3.189다. 평형 상수 b 는 $1.124 \times 10^{-3} \text{ k/Pa}$, $-\Delta H$ 은 4.902 kJ/mol 의 값을 가졌다. 이러한 매개변수는 Break-through time을 추정하는 데 적합하다⁷⁾.

2.1.2. 재료에 따른 흡착특성

흡착식 처리공정에서는 다양한 Activated carbon, Alumina, Bauxite, Bone char, Decoloring carbon, Fuller's earth, Magnesia, Silica gel, Strontium sulfate 등과 같은 흡착제들이 흡착재료에 따라 목적에 맞게 사용된다(Table 4).

PFCs 흡착을 위해 주로 사용되는 흡착제는 Activated carbon, Silica gel, Zeolite 등이 사용되고 있다.

Ahn et al.⁵⁾은 Activated carbon, Silica gel, Zeolite 5A, Zeolite 13X의 흡착 자발성을 파악하고 온도에 따른 각 흡착제의 CF₄와 C₂F₆에 대한 흡착데이터를 확인하여 보고하였다(Table 5).

Ahn et al.은 각 흡착제를 423K에서 10-4kPa 미만의 압력으로 12시간 진공상태로 전처리를 했으며

흡착등온도는 303K, 323K 의 온도에서 220kPa의 압력에서 측정하였다. Breakthrough Time은 일반적으로 30분 내외로 측정됐다⁵⁾.

220kPa까지 압력을 증가 시키면서 Zeolite 13X가 N₂, CF₄, C₂F₆에 대해 가장 많은 흡착량을 가졌고, 220kPa에서 CF₄는 1.2mol/kg, C₂F₆가 1.6mol/kg, N₂는 0.4mol/kg로 N₂보다 CF₄, C₂F₆가 더 많은 흡착을 하는 것을 확인 할 수 있었다. 더 많은 데이터를 얻기 위해 303K, 323K, 343K의 온도에서 Activated carbon 20 to 40mesh, Zeolite 5A, Zeolite 13X의 흡착등온도를 측정하였다. 실험 결과 CF₄와 C₂F₆는 흡착량이 압력과 비례하고 온도와 반비례하는 결과를 보였으며, 모든 흡착등온선은 Langmuir isotherm, Sips isotherm, Toth isotherm 모델이 알맞고 3kPa-220kPa 사이의 압력 범위에서 적합함을 알 수 있었다⁵⁾.

Table 3. Langmuir Isotherm Parameters and Heats of Adsorption

	q [mol/K ^m g]	b [k/Pa]	-ΔH [kJ/mol]
CF ₄	1.35×10 ⁵	1.124×10 ⁻³	4.902

2.1.3. 케미컬 필터

케미컬 필터는 반도체 산업에서 화학필터 부분의 공기청정 시스템에서 사용하는 휘발성 유기 화합물 및 유해가스 제거를 위해 제작된다. 먼지나 초미세

Table 4. Purpose of Adsorbent

Adsorbent	Purpose	Ref
Activated carbon	Solvent recovery, Odor removal, Gas purification	7
Alumina	Drying of gases, air and liquids	9
Bauxite	Removal of oil during petroleum refining, Drying of gas and solution	10
Bone char	Bleaching of sugar	11
Decoloring carbon	Removal of oils, pigments, oils and waxes, Decolorization of beverages	12
Fuller's earth	Refining of lubricant, fat, and wax	13
Magnesia	Petrol and refining solvent	14
Silica gel	Removal of impurities from caustic soda, drying and purification of gas	15
Strontium sulfate	Removal of iron from caustic soda solution	16

Table 5. Physical Properties of the Adsorbents

Adsorbents	BET surface area [m ² /g]	Total pore volume [cm ³ /g]	Mean pore size [Å]	Solid density [g/cm ³]
zeolite 13X 8 to 12 mesh	670.4	0.242	5.1	2.106
zeolite 5A 40 to 60 mesh	552.0	0.199	5.1	2.141
activated C 40 to 60 mesh	633.1	0.231	5.9	1.993
activated C 12 to 20 mesh	549.1	0.200	5.9	2.114
silica gel 30 to 60 mesh	583.7	0.215	6.5	2.021

먼지와 같은 입자상의 오염물과 가스상의 오염물질을 저감시키는 분야가 핵심적이다. 케미컬 필터는 반도체 뿐만 아니라 디스플레이와 이차전지 제조공정부터 차량용, 가정용, 건물 내부 대기질 개선에 이르기까지 넓은 분야로 적용되고 있다. 예를 들어, 반도체 제조공정은 고도의 정밀성을 필요로 하는 공정들로, 작은 먼지나 화학적 오염물에 의해 웨이퍼 손상을 일으킬 수 있기 때문에 케미컬필터를 통해 정화된 공기를 공급하고 공정 중에 생성된 오염물질과 미세먼지 등을 외부로 배출되도록 시스템을 구성한다.

케미컬필터는 공기 중의 오염물을 효과적으로 제거하고 긴 수명을 가져야 하며 점차 낮은 차압과 전체적인 공기흐름이 필터 단면적에 고르게 분포될 수 있는 구조체로 이루어지게 설계해야한다. 이러한 필터 구조체에 사용되는 흡착제¹⁾는 구형, 입자형 또는 사출형으로 제조되며, 이 흡착제의 평균 입경은 약 0.05~2.20mm 정도의 범위 내에서 여러 형태와 크기로 제조된다³⁾.

2.2. 촉매식 공정

기본적으로 촉매란 반응 중에 소모되지 않고 다른 용질의 반응을 돕는 것이다. 그러나 반도체 공정에서 처리장치에 적용되는 촉매는 촉매 자체가 가스와 반응하여 연속적으로 형태가 변하게 되어 짧은 수명을 가진다. 이런 이유로 촉매는 약재(Chemical absorber), 게터(Getter), 스케빈저(Scavenger) 등과 같은 말과 함께 쓰인다. 반도체 공정의 Eching process에서 PFCs 제거를 위해 사용되고 있고, 옥외에 설치되어 공정에서 생성되는 가스를 플랜트급의 중앙처리장치로 사용되고 있다.

반응설비는 촉열식 촉매 산화반응 시스템의 형태인데 촉열식 연소설비와 같이 열회수를 하지만 추가적으로 촉매를 사용하기 때문에 반응에 필요한 에너지를 낮출 수 있다는 장점이 있다. Kim et al.는 CF₄는 1600°C 이상의 고온에서 분해가 가능하지만 촉매 사용 시 700°C 정도의 온도에서도 분해된다고 연구하여 보고하였다³⁾. 또한 비교적 낮은 온도에서 시스템이 작동되므로 안전하고 질소산화물의 배출

이 적은 장점을 가진다⁴⁾.

2.2.1. CF₄ 분해 촉매

본 연구에서는 트리하이드록사이드(aluminum trihydroxide), 보에마이트(boehmite), 의사보에마이트(pseudo-boehmite)로 구성된 원료와 지르코니아(ZrO₂)를 물과 희석한 용매에서 혼합 후 건조 및 소성하였다. 지르코니아의 질량은 Al:Zr=100:0.01~50를 사용하였다.

실험에 사용된 촉매는 Zr/알루미나, Zn/Zr/알루미나, 습윤합침법 Zn-Zr/알루미나, 알루미나, Zn/알루미나로 총 5개의 촉매가 비교되었다.

각 촉매는 7.6g씩 3/4inch 인코넬 반응관에 채우고 외부히터를 사용해서 반응온도를 650~800°C로 조절하였다. SV 2000 h⁻¹의 조건에서 CF₄ 3000ppm, 공기 368ml/min, 증류수 0.04ml/min을 공급하면서 분해를 진행했다.

각각의 촉매는 차례대로 650°C에서 80.0, 85.9, 89.0, 72.6, 86.1의 제거율(%)를 보이고, 700°C에서 93.0, 95.0, 100, 91.0, 98.0의 제거율(%), 750°C에서 98.0, 99.5, 99.9, 98.2, 99.8의 제거율(%), 800°C에서 99.0, 99.9, 100, 99.8, 99.9의 제거율(%)를 보였다. 각 촉매들이 800°C 이상에서 더 높은 제거율을 가졌다. 본 연구를 통해 제거율을 알 수 있었고, 앞으로 지속성의 대한 연구가 필요하다고 사료된다¹⁷⁾.

2.2.2. SF₆ 분해 촉매

본 연구에서는 Zeolite 13X, AlPO₄ 그리고 γ -Al₂O₃를 사용했고, 반응기 온도를 700°C로 고정시키고 SF₆ : H₂O = 0.5 : 12.5 의 부피비로 공급하였다.

Zeolite 13X, AlPO₄ 그리고 γ -Al₂O₃ 촉매상에서 SF₆ 가수분해반응으로부터 SF₆ 전화율을 나타내었는데 상대적으로 산세기가 높은 Zeolite 13X가 가장 전화율이 낮고, AlPO₄도 낮은 전화율을 보였다. 그러나, 상대적으로 산세기가 낮은 γ -Al₂O₃의 경우 촉매활성이 매우 높게 나타났다. 산 세기에 따른 촉매활성도는 정확하게 파악하기 어렵지만 γ -Al₂O₃ 촉매가 촉매활성도가 높은 것은 확실히 나타났다.

Al₂O₃촉매에다가 금속 조촉매를 담지한 촉매의

1) 흡착제 : 기체나 액체 분자들이 흡착할 수 있는 넓은 표면을 가진 고체 물질

가수분해 실험을 수행한 것은 반응온도를 650°C로 낮춤에 따라 Al₂O₃의 전화율이 65%가 된 것을 확인하였다. 전화율은 Ga 10wt% - Al₂O₃, Al₂O₃, Mg 10wt% - Al₂O₃, Zn 10wt% - Al₂O₃ 순으로 높게 나타났다¹⁸⁾.

2.2.3. 일반적인 촉매제 제조 방법

촉매제 제조 방법으로는 주로 함침법(Impregnation), 침전법(Precipitation), 이온교환법(Ion exchange)의 세 가지 방법으로 제조된다. 함침법은 접촉 기회를 증진시키기 위한 고표면적 담체와 활성금속수용액을 접촉시켜서 활성물질을 담지시키는 제조방법이다. 침전법은 침전반응을 통해 침전물을 회수하여 염을 제거하고 가열하여 금속산화물을 제거하는 방법이다. 이온교환법은 실리카, 알루미늄, 제올라이트 등의 담체에 활성금속들을 담지시킬 때 사용되는 방법이다. 이 담체들은 양이온의 교환이 쉽게 일어나므로 금속이온을 담지시킬 때 유리하다. 이온교환법은 균일하게 담지할 수 있는 장점이 있지만 담지량이 함침법이나 침전법에 비해서 적다는 한계가 있다⁴⁾.

3. 결론

다양한 환경오염들 가운데 대기오염은 산업화의 가속으로 인해 더욱 고조되고 있다. 그 영향으로 지구온난화, 광화학 스모그, 산성비, 미세먼지 등과 같은 심각한 환경문제가 나타나고 있다. 그중 반도체 공정에서 사용, 배출되는 PFCs가 대표적인 공정 유해물질이다. PFCs는 열역학적으로 안정성이 뛰어나기 때문에 분해를 위해서는 고온의 열을 사용하거나, 촉매제를 이용하여 비교적 낮은 온도에서 처리가 가능하다. 현재 고온의 열을 사용하여 PFCs를 저감하는 방법으로는 연소식과 플라즈마식이 있다.

두 가지 방법들은 높은 온도를 사용하기 때문에 안전에 관련된 장비운영과 안정성이 강조된다. 또한 잦은 부품 교체, 장치 부식, 내구성 강화의 문제 등의 문제점이 있다. 대기 및 악취 오염원의 발생을 제조공정에서 저감하기 위해 다양한 흡착제의 개발이 요구되고 있다. Ahn et al.의 연구에서 온도가 낮을

수록 흡착량이 많기 때문에 흡착공정에서 온도를 낮춰줄 수 있는 촉매식의 연구가 필요하다고 생각된다. 따라서 앞으로 난분해성 기체인 PFCs의 대용량, 고효율 처리기술과 스크러버에서 배출되는 2차 오염물질에 대한 최적화된 흡착, 흡수제의 효과적인 재활용 기술에 대한 개발이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2022년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Ministry of Environment, "Development of advanced eco-friendly treatment system for reducing the NOx, CO, and greenhouse gases emission in semiconductor processing", Sejong: Ministry of Environment. (2011).
2. Jeong, J. G., "Emission Control Technology of Semiconductor Process", Air Cleaning Technology, 29(4), pp. 19~29. (2016).
3. Kim, I. G. and Yun, S. J., "Cleanroom Gas Removal Technology Using Chemical Filters.", Air Cleaning Technology, 31(4), pp. 34~45. (2018).
4. Moon, Y. H. and Kim, D. W., "Catalytic equation of exhaust gas treatment technology", Air Cleaning Technology, 14(3), pp. 39~47. (2001).
5. Ahn, N. G., Kang, S. W., Min, B. H., & Suh, S. S., "Adsorption Isotherms of Tetrafluoromethane and Hexafluoroethane on Various Adsorbents", Journal of Chemical & Engineering Data, 51(2), pp. 451~456. (2006).
6. MacQueen, J. T., "Some observations concerning the van't Hoff equation", Journal of Chemical Education, 44(12), p. 755~756. (1967).
7. Suh, S. S., Ahn, N. G. and NA, B. K., "Adsorption and desorption characteristics of CF₄ on fixed bed column", Korean Journal of Chemical Engineering,

- 25, pp. 1518~1523. (2008).
8. Liu, Y., "Some consideration on the Langmuir isotherm equation, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 274(1-3), pp. 34~36. (2006).
 9. Hano, T., Takanashi, H., Hirata, M., Urano, K. & Eto, S., "Removal of phosphorus from wastewater by activated alumina adsorbent", *Water Science and Technology*, 35(7), pp. 39~46. (1997).
 10. Norouzi, S. H., Badii, K. H. and Doulati Ardejani, F., "Activated bauxite waste as an adsorbent for removal of Acid Blue 92 from aqueous solutions", *Water Sci Technol*, 62(11), pp. 2491~2500. (2010).
 11. Wang, H. and Luo, P., "Preparation, Kinetics, and Adsorption Mechanism Study of Microcrystalline Cellulose-Modified Bone Char as an Efficient Pb (II) Adsorbent", *Water, Air, & Soil Pollution*, 231, pp. 1~15. (2020).
 12. Sessa, D. J. and Palmquist, D. E., "Effect of heat on the adsorption capacity of an activated carbon for decolorizing/deodorizing yellow zein", *Bioresource Technology*, 99(14), pp. 6360~6364. (2007).
 13. Mgbeahuruike, A. C., Ejioffor, T. E., Christian, O. C., Shoyinka, V. C., Karlsson, M. & Nordkvist, E., "Detoxification of Aflatoxin - Contaminated Poultry Feeds by 3 Adsorbents, Bentonite, Activated Charcoal, and Fuller's Earth", *Journal of Applied Poultry Research*, 27(4), pp. 461~471. (2018).
 14. Mondal, P. and George, S., "Removal of Fluoride from Drinking Water Using Novel Adsorbent Magnesia-Hydroxyapatite", *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(8), pp. 1~15. (2015).
 15. Ramesh, P. S., Biplab, C. and Ranadip, K. D., "A review on adsorption cooling systems with silica gel and carbon as adsorbents", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, pp. 123~134. (2015).
 16. Jun, L., Shen, W. T., Long, Q., Qin, Y. H. & Dai, Y. D., "Carbon Nanotube-Prussian Blue Spongiform Adsorbent for Selective Capture of Cesium and Strontium", *Applied Mechanics and Materials*, 800, pp. 3~7. (2015).
 17. Choi, S. H. and Park, G. H., "Acid-resistant catalysts and applications for decomposition of perfluorinated compounds", KIPO. (2018).
 18. Park, H. G., Park, N. K., Lee, T. J., Kwon, W. T. & Chang, W. C., "Catalytic Decomposition of SF₆ by Hydrolysis over γ - Al₂O₃ Supported Metal Oxide Catalysts", *Clean Technology*, 18(1), pp. 83~88. (2012).