

# 키토산을 이용한 탄진수 응집제 개발 및 평가

홍웅길 · 나재운<sup>†</sup> · 정경원\*<sup>†</sup>

순천대학교 공과대학 고분자공학과, \*조선이공대학교 생명환경화학공과  
(2021년 1월 8일 접수, 2021년 1월 28일 수정, 2021년 1월 28일 채택)

## Development and Evaluation of Coal-dust Water Flocculant using Chitosan

Woong-Gil Hong, Jae-Woon Nah<sup>†</sup> and Gyeong-Won Jeong\*<sup>†</sup>

Department of Polymer Science and Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

\*Department of Bioenvironmental & Chemical Engineering, Chosun College of Science and Technology, Gwangju 61453, Korea

(Received January 8, 2021; Revised January 28, 2021; Accepted January 28, 2021)

### 초 록

석탄 화력발전소는 석탄을 주원료로 사용하고 있으며, 석탄 이동 시에 석탄의 분진 및 자연 발화가 발생하게 되는데, 이를 방지하기 위해 물을 분사하는 작업을 수행한다. 이로 인해 석탄의 분진과 물이 함께 섞여 흘러나오는 일명 ‘탄진수(coal-dust water)’라고 불리는 폐수가 흘러나와 환경오염을 초래한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 미세한 분진까지 응집하여 물을 정화할 수 있는 키토산 기반의 천연 응집제를 개발하고, 그 응용성을 입증하고자 하였다. 탄진수에 다양한 농도의 응집제를 투여하여 최적의 흡착농도가 4 ppm임을 규명하였고, 투과도 및 탄진 제거효율을 통해 개발된 물질의 탄진 응집능이 매우 우수함을 확인하였다. 또한, MTT assay를 통해 응집제의 세포독성을 평가하여 독성이 전혀 없음을 입증함으로써, 본 연구에서 개발된 응집제가 인간 및 자연 생태계에 영향을 주지 않고 효과적으로 탄진을 응집할 수 있는 물질임을 규명하였다.

### Abstract

Coal-fired power plants use coal as the main raw material, and when a coal is moved, a dust generation and spontaneous ignition of coal occur. To prevent this, water is sprayed. As a result, wastewater called “coal-dust water” flows out of coal dust and water mixed together, causing environmental pollution. In this study, in order to solve this problem, we developed a natural flocculant that can purify water by aggregating fine dust using chitosan and tried to prove its applicability. It was found that the optimum flocculation concentration was 4 ppm by adding various concentrations of flocculant to the coal-dust water, and it was confirmed that the developed material had very good coal-dust flocculation capacity through permeability and coal-dust removal efficiency. In addition, the cytotoxicity of the flocculant was evaluated through the MTT assay and it was found that there is no toxicity at all. We believe that the flocculant developed in this study can effectively adsorb coal-dust without affecting human and natural ecosystems.

**Keywords:** Chitosan, Coal-dust water, Flocculation, Flocculant, Ecosystem

## 1. 서 론

화력발전은 현재 우리 실생활에 밀접하게 연관된 전기 에너지 생산을 하는 방법 중에 하나이다. 화력 발전의 경우 석탄을 태움으로써 나온 증기로 터빈을 돌려 전기를 생산 하는 것으로 우리나라에서 제일 많은 비중을 차지하고 있을뿐더러, 입지 장소 및 초기 발전 비용이 적

게 든다는 장점을 가지고 있다[1].

전국의 석탄 화력 발전소의 경우 59개소에 달한다. 이중 29개소는 충남 지역에 위치해 있으며, 2029년까지 신설될 발전소까지 합하면 우리나라는 전국의 79개소의 석탄 화력 발전소가 있는 셈이다[2]. 석탄 화력발전소는 석탄을 주원료로 사용하고 있으며, 증기 생산에 이용되는 석탄은 석탄 저장고라고 불리는 곳에 쌓이게 된다. 석탄 저장고 및 석탄 이동 시에 석탄의 분진 발생 및 자연 발화가 발생하게 되는데, 이를 방지하기 위해 물을 분사하는 작업을 수행한다. 이로 인해 석탄의 분진과 물이 함께 섞여 흘러나오는 일명 ‘탄진수(coal-dust water)’라고 불리는 폐수가 흘러나오게 된다. 이러한 폐수는 관을 통해 모이게 되고 침전 과정을 거친 후 상층액은 매립지로 이동하게 된다. 하루에 나오는 ‘탄진수’의 양은 적게는 2톤에서 많게는 3톤까지 발생하고 있다. 하지만 탄진수의 발생되는 양이 많아 침전과정을 거치지

<sup>†</sup> Corresponding Author: J.-W. Nah: Suncheon National University, Department of Polymer Science and Engineering, Suncheon 57922, Korea;  
G.-W. Jeong: Department of Bioenvironmental & Chemical Engineering, Chosun College of Science and Technology, Gwangju 61453, Korea  
Tel: J.-W. Nah: +82-61-750-3566; G.-W. Jeong: +82-62-230-8833  
e-mail: J.-W. Nah: jwnah@suncheon.ac.kr; G.-W. Jeong: gwjeong@cst.ac.kr

만 미세 분진까지 침전이 되지 않고 그대로 매립지로 이동하게 되어 환경오염에 크게 문제가 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 키토산을 이용하여 미세한 분진까지 응집하여 물을 정화할 수 있는 천연 응집제를 개발 하고, 그 응용성을 입증하고자 하였다.

키토산은 게나 새우 등의 갑각류, 오징어 연골 연체류 등에 분포되어 있는 천연 고분자인 키틴을 농축 알칼리로 처리하여 얻어지는 물질로서  $\beta$ -(1,4)-glycosidic 결합으로 연결된 D-glucosamine과 N-acetyl-D-glucosamine 두 단위체로 구성된 생분해성 천연 다당류이다[3-6]. 키토산은 항암효과, 콜레스테롤 감소, 면역 활성 및 항균성 등이 우수한 생리활성을 갖는 것으로 잘 알려져 있다. 키토산을 이용한 응용 분야로는 화장품, 수처리, 의약품, 식품, 바이오산업 등이 있으며 최근에는 의료분야의 연구가 확대 되고 있다[7-9]. 수처리에 사용되는 키토산의 경우 키토산의 특성인 강한 양전하의 특성을 이용하여 멤브레인을 통한 정화 및 응집제로서의 응용이 많이 되어 왔다. 또한, 키토산은 낮은 독성의 특성을 갖고 있어 이를 이용하여 개발된 천연 응집제는 환경오염 및 생태계에 영향을 주지 않는 큰 장점을 가지고 있다[10-12].

본 연구에서는 이러한 키토산의 강한 양전하를 이용하여 탄진을 응집 시키고 침강 속도를 높여 가라 앉은 탄진을 회수하여 재이용하고 회수된 물을 다시 재활용함으로써 환경오염 문제를 해결하고자 키토산이 탄진에 대한 응집 능력을 규명하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1. 시약 및 재료

실험에 사용된 탄진수는 경남 하동 화력발전소에서 채취하여 상온에 보관하여 본 연구에 사용하였다. 흡착물질로 사용된 키토산(viscosity: 1188cP)은 속초물산(NANO BIOTECH Sokcho Co., Korea)에서 구입하여 사용하였으며, 불용성 키토산을 수용화하기 위하여 사용된 젖산(lactic acid)은 SIGMA-ALDRICH (USA)사에서 구입하였다. 세포독성에 사용된 HEK293 세포와 L929 세포는 American type culture collection (ATCC, Korea)에서 분양받았으며, 10% fetal bovin serum (FBS)가 함유된 Dulbecco's modified Eagles medium (DMEM)을 사용하여 배양하였다. 세포 실험에 사용된 ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), 3-(3-[4,5-dimethylthiazol-2-yl]-2,5-diphenyltetrazolium bromide (MTT) 및 DMEM은 Sigma-Aldrich사(USA)에서 구입하여 사용하였다. 기타 실험에 사용된 용매 및 시약 등은 일급 시약을 구입하여 정제하지 않고 사용하였다.

### 2.2. 키토산 용액 제조

탄진수 응집에 사용되는 키토산 용액은 다음과 같이 제조되었다. 키토산(viscosity: 1181 cP) 10 g을 증류수 1 L에 분산 시킨 후 lactic acid를 키토산의 60%의 무게 비율로 첨가하여 24 h 동안 교반 시켜 최종적으로 1% 키토산 수용액을 제조하여 연구에 사용되었다.

### 2.3. 키토산 용액의 탄진수 응집 최적 농도 확립

탄진수를 동일한 양으로 준비하고 제조된 1%의 키토산 용액을 각각 0.1, 0.2, 0.4, 0.8%의 농도로 희석 시켜 탄진수에 처리하였다. 최적의 탄진 응집 농도는 응집 시간 및 응집 정도를 고려하여 선정하였다.

### 2.4. 응집제 처리 후 탄진수의 투과도 변화 측정

응집제의 탄진수 응집 효과를 규명하기 위해 응집제 처리 후 탄진수의 투과도 변화를 자외선 분광광도계(UV-Vis spectrometer, UV 1601,

Shimadzu, Japan)를 통하여 확인하였다. 탄진수 50 mL을 채운 비커에 0.2% 키토산 용액의 최적농도 4 ppm을 처리하여 교반 후 시간에 따라 상층액 2 mL을 각각 취하여 투과도를 측정하였다. 이때, 응집제의 응집 효과를 확실히 규명하기 위해 응집제를 처리하지 않은 control군도 동등한 시간 때에 각각 2 mL 취하여 투과도를 측정 하였다.

### 2.5. 응집제 처리 후 탄진수의 부유물질 제거효율

탄진수로부터 응집제의 부유물질 제거효율을 확인하기 위해 SS (suspended solids)제거 효율을 응용하여 계산하였다. 탄진수 100 mL에 0.2% 응집제 최적농도 4 ppm을 처리하여 20, 40, 160, 320 s 동안 교반 하였다. 그 후 상층액을 각각 30 mL씩 취하여 glass filters (Whatman, Diameter 47 mm 100 Circle, UK)로 부유물질을 거른 후 50 °C에서 24 h 건조하였다. 건조된 필터의 부유물질 양은 식 (1)을 이용하여 최종적으로 응집제의 부유물질 제거 효율을 계산하였다.

부유물질제거효율(%) =

$$100 - \left[ \left( \frac{\text{부유물질이포함된필터지}(g) - \text{필터지}(g)}{\text{탄진수용액}(L)} \right) \times 100 \right] \quad (1)$$

### 2.6. 응집제 처리 후 탄진수의 pH의 변화 측정

탄진수에 응집제를 처리한 후 pH의 변화를 pH meter (Thermo fisher scientific, Orion 3-star benchtop pH meter, USA)기를 이용하여 측정하였다. 먼저 탄진수 50 mL를 pH 측정 후에 0.2% 응집제를 4와 8 ppm을 각각 처리한 후 pH 변화를 관찰하였다.

### 2.7. 응집제 키토산 독성 평가

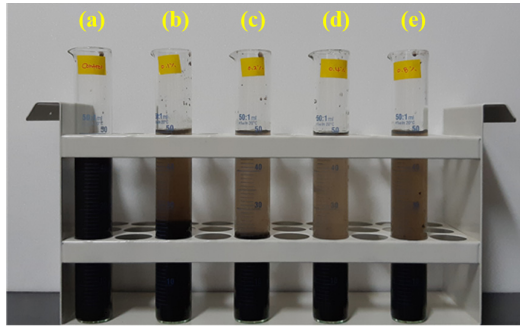
위 실험을 통하여 최적의 농도를 확립하여 제조된 0.2%의 키토산 용액의 독성 여부를 확인하기 위해 세포독성 실험을 실시하였다. 3-(3-[4,5-dimethyl-2-thiazolyl]-2,5-diphenyl-2H-tetrazolium bromide (MTT assay)를 통하여 규명하였으며, 정상 세포인 인간 유래 신장 세포(Human embryonic kidney cells, HEK293) 및 쥐 섬유아세포(Murine fibroblast cells, L929)를 이용하여 세포독성 여부를 측정하였다. HEK293 세포와 L929세포는 37%, 5 °C CO<sub>2</sub> 배양기에서 DMEM 배양액에서 culture dish에서 배양 후 trypsin-EDTA로 세포를 떨어뜨리고 5 × 10<sup>3</sup> cell/well 로 세포를 계산하여 96well-plate에 seeding하여 이를 동안 배양하여 세포를 안전하게 부착하였다. 이후 DMEM을 이용하여 0.2%의 키토산 용액을 200, 100, 50, 25, 12.5 6.25 3.13 1.56 μL/mL 농도로 희석하여 처리하고 48 h 동안 배양하였다. 이후 MTT 시약 1 mg/mL의 농도로 30 μL씩 처리한 후 incubator에서 4 h 동안 배양하여 환원시킨 후 MTT 시약을 모두 제거시켰다. 이후 96well-plate에 DMSO를 200 μL/well 처리하여 formazan을 형성 시킨 다음 최종적으로 micro plate reader를 사용하여 560과 670 nm에서 흡광도를 측정하였다. 세포 생존율은 다음과 같이 계산되었다.

$$OD_{value} = (OD_{560\text{ nm}} - OD_{670\text{ nm}}) \quad (2)$$

$$\text{Cell viability (\%)} = \frac{OD_{\text{sample}} - OD_{\text{blank}}}{OD_{\text{control}} - OD_{\text{blank}}} \times 100 \quad (3)$$

**Table 1. Transmittance of Coal-dust Water according to Treated Flocculant**

Sample	Transmittance (%)				
	Time (min)				
	1	2	4	8	16
Control	0.25 ± 0.07	0.5 ± 0.00	0.85 ± 0.07	2.45 ± 0.07	4.95 ± 0.07
Treated flocculant	64.7 ± 0.14	65.8 ± 0.00	67.3 ± 0.07	67.1 ± 0.00	65.6 ± 0.07



**Figure 1. Investigation of flocculation effect and optimal concentration of flocculant from Coal-dust water. (a) Control, (b) 0.1%, (c) 0.2%, (d) 0.4%, (e) 0.8%.**

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1. 응집제의 탄진수 응집 효과 및 최적 농도 확립

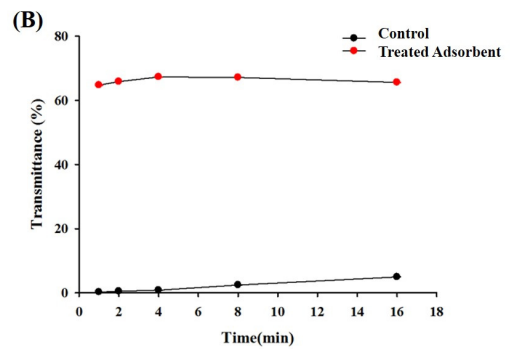
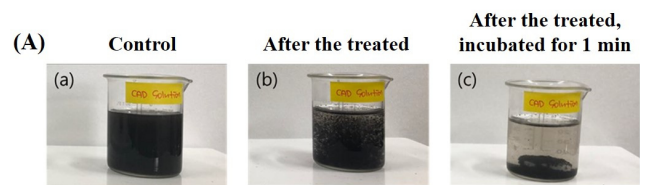
키토산의 탄진 응집 효과와 최적 농도를 규명하기 위해 다양한 농도를 처리하여 확인하였다. 탄진수 50 mL에 응집제 0.1, 0.2, 0.4, 0.8%의 농도를 각각 100 µL 처리하여 응집 정도를 관찰한 결과 응집제를 처리한 모든 농도에서 빠르게 흡착하여 침강하는 것을 확인하였고, 그 중에서 응집제 0.2% 농도에서 가장 좋은 효능을 보였다 (Figure 1). 이는 아민(-NH<sub>2</sub>) 작용기를 함유하는 키토산이 양전하를 띠어 음전하를 나타내는 탄진과 정전기적인 상호작용에 의해 응집이 일어나 밀도가 증가했기 때문인 것으로 사료 된다. 이러한 결과를 통해 0.2% 응집제가 4 ppm 농도에서 응집능이 가장 우수함을 규명함으로써 본 연구에서 개발된 물질이 탄진의 응집제로 응용이 가능할 것으로 사료된다.

#### 3.2. 탄진 응집시간에 따른 투과도 평가 및 pH 변화 측정

본 연구에서 개발된 응집제의 탄진 응집 효능을 한번 더 규명하기 위해 시간에 따른 투과도를 관찰하였다(Figure 2, Table 1). 응집제를 처리한 후 시간에 따른 투과도를 관찰한 결과 1 min 만에 빠르게 탄진이 응집되어 침강되는 것을 관찰하였으며, 그 탄진수 상층액을 취하여 투과도를 측정된 결과 64% 이상임을 확인할 수 있었다. 이는 응집제를 처리하지 않은 control군과 비교해봤을 때 60배 이상의 투과율의 차이를 나타냄으로써 응집제의 응집능이 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 또한, 1 min 이상 경과했을 시에 투과율이 차이가 거의 없음을 확인함으로써 응집제가 1 min 내에 탄진을 모두 응집할 수 있음을 확인하였다. 또한, 탄진수에 응집제 처리에 따른 pH의 변화를 Table 2에 정리하였다. 초기 탄진수 50 mL의 pH는 7.93 으로 약 알칼리 pH를 나타냄을 확인하였고, 탄진수에 응집제를 4와 8 ppm 농도를 각각 첨가하여 pH를 확인한 결과 7.75와 7.58의 결과를 확인할 수 있었다. 응집제의 첨가한 양이 증가할수록 탄진수의 pH가 감소하나 pH

**Table 2. pH Change of Coal-dust Water according to Treated Flocculant**

Control	Quantity of treated flocculant (ppm)	
	4	8
pH	7.93	7.58



**Figure 2. Transmittance of coal-dust water after the treated flocculant. (A) Images of Coal-dust water, (B) Transmittance of coal-dust water.**

변화가 거의 중성에 근접하기 때문에 자연 생태계에 전혀 문제가 없을 것으로 사료된다. 이러한 결과를 통해 본 연구에서 개발된 응집제가 빠른 시간 내에 탄진을 응집함과 동시에 물을 정화할 수 있는 우수한 물질로써 탄진의 응집제로 사용이 가능함을 확인할 수 있었다.

#### 3.3. 응집제 처리 후 탄진수의 부유물질 제거효율 및 독성평가

Figure 3과 Table 3은 탄진수로부터 0.2% 응집제 최적농도 4 ppm을 처리한 후 부유물질 제거효율을 시간에 따라 관찰하여 SS (suspended solids)의 계산법에 의해 확인한 결과이다. 초기 부유물질의 제거 효율은 0%인 반면에 응집제를 처리한 후 20 s가 경과했을 시 80%의 제거 효율을 보였으며, 시간이 더 경과했을 경우 제거 효율도 점점 증가하는 것을 확인하였고, 320 s에서 95% 이상의 매우 우수한 제거 효율을 보여주었다. 또한, 0.2% 응집제의 독성 여부를 평가하기 위해 정상세포 HEK293과 L929 세포에서 MTT assay를 수행하였다. 그 결과 응집제를 처리한 모든 농도에서 80% 이상의 세포 생존율을 보여줌으로써 독성이 전혀 없음을 확인하였다(Figure 4).

이러한 결과를 통하여 개발된 응집제는 탄진 응집능이 매우 우수하며, 세포독성이 전혀 없어 인간 및 자연 생태계에 매우 안전한 물질임

Table 3. SS Removal Efficiency according to Treated Flocculant

Time (sec)	0	20	40	160	320
Removal efficiency (%)	0	78.4 ± 1.8	90.9 ± 4.0	92.2 ± 2.2	95.3 ± 2.2

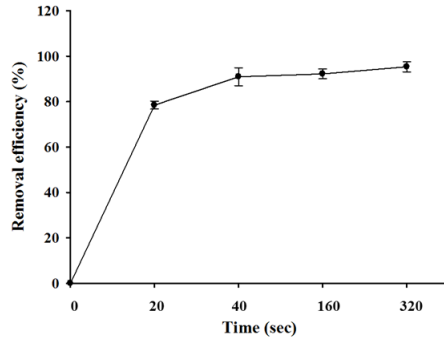


Figure 3. SS removal efficiency of flocculant from coal-dust water.

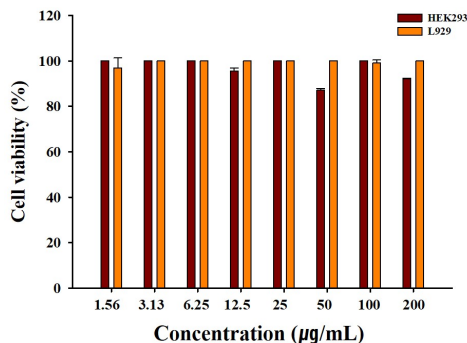


Figure 4. Cytotoxicity evaluation of flocculant at HEK293 and L929 cell lines.

을 입증함으로써 탄진의 응집제로 응용이 가능함과 동시에 환경오염 예방에 도움이 될 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 석탄 화력발전소에서 배출되는 탄진수로부터 탄진을 응집할 수 있는 물질을 개발하여 그 사용 가능성을 규명하고자 하였다. 탄진수에 다양한 농도의 응집제를 투여하여 최적의 응집농도가 4 ppm임을 규명하였고, 투과도 및 응집 제거 효율을 확인함으로써 개발된 물질이 탄진의 응집제로 사용 가능함을 확인하였다. 또한, 응집제의 세포독성 평가를 통해 세포독성이 전혀 없음을 입증함으로써, 본 연구에서 개발된 응집제가 자연 생태계에 영향을 주지 않는 안전한 물질임과 동시에 탄진을 효율적으로 제거할 수 있어 환경오염을 예방할 수 있는 매우 우수한 물질임을 제안한다.

#### References

1. S. H. Lee, M. S. Wang, S. B. Wee, and Y. D. Son, A study on the improvement of optimal load range for sliding pressure operation of coal-fired power plant, *J. Inst. Korean Electr. Electron. Eng.*, **23**, 675-680 (2019).
2. M. C. Russell, J. H. Belle, and Y. Liu, The impact of three recent

coal-fired power plant closings on Pittsburgh air quality: A natural experiment, *J. Air Waste. Manag. Assoc.*, **67**, 3-16 (2017).

3. W. G. Hong, G. W. Jeong, and J. W. Nah, Evaluation of hyaluronic acid-combined ternary complexes for serum-resistant and targeted gene delivery system, *Int. J. Biol. Macromol.*, **115**, 459-468 (2018).
4. G. W. Jeong, S. C. Park, C. Choi, J. P. Nam, T. H. Kim, S. K. Choi, J. K. Park, and J. W. Nah, Anticancer effect of gene/peptide co-delivery system using transferrin-grafted LMWSC, *Int. J. Pharm.*, **488**, 165-173 (2015).
5. J. P. Nam and J. W. Nah, Target gene delivery from targeting ligand conjugated chitosan-PEI copolymer for cancer therapy, *Carbohydr. Polym.*, **135**, 153-161 (2016).
6. M. K. Yoo, S. K. Kang, J. H. Choi, I. K. Park, H. S. Na, H. C. Lee, E. B. Kim, N. K. Lee, J. W. Nah, Y. J. Choi, and C. S. Cho, Targeted delivery of chitosan nanoparticles to Peyer's patch using M cell-homing peptide selected by phage display technique, *Biomaterials*, **31**, 7738-7747 (2010).
7. Q. Zia, M. Tabassum, Z. Lu, M. T. Khawar, J. Song, H. Gong, J. Meng, Z. Li, and J. Li, Porous poly(L-lactic acid)/chitosan nanofibres for copper ion adsorption, *Carbohydr Polym.*, **227**, 115343 (2020).
8. U. Habiba, A. M. Afifi, A. Salleh, and B. C. Ang, Chitosan/(polyvinyl alcohol)/zeolite electrospun composite nanofibrous membrane for adsorption of Cr(6+), Fe(3+) and Ni(2+), *J. Hazard. Mater.*, **322**, 182-194 (2017).
9. K. C. M. Kwok, L. F. Koong, T. Al Ansari, and G. McKay, Adsorption/desorption of arsenite and arsenate on chitosan and nanochitosan, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, **25**, 14734-14742 (2018).
10. H. Moussout, H. Ahlafi, M. Aazza, O. Zegaoui, and C. El Akili, Adsorption studies of Cu(II) onto biopolymer chitosan and its nanocomposite 5% bentonite/chitosan, *Water Sci. Technol.*, **73**, 2199-2210 (2016).
11. S. Dandil, D. Akin Sahbaz, and C. Acikgoz, Adsorption of Cu(II) ions onto crosslinked chitosan/waste active sludge char (WASC) beads: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic study, *Int. J. Biol. Macromol.*, **136**, 668-675 (2019).
12. C. Zhang, H. Wen, Y. Huang, and W. Shi, Adsorption of anionic surfactants from aqueous solution by high content of primary amino crosslinked chitosan microspheres, *Int. J. Biol. Macromol.*, **97**, 635-641 (2017).

#### Authors

Woong-Gil Hong; B.Sc., Graduate Student, Department of Polymer Science and Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; ch4103@hanmail.net

Jae-Woon Nah; Ph.D., Professor, Department of Polymer Science and Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea; jwnah@suncheon.ac.kr

Gyeong-Won Jeong; Ph.D., Professor, Department of Bioenvironmental & Chemical Engineering, Chosun College of Science and Technology, Gwangju 61453, Korea; gwjeong@cst.ac.kr