

CKD 추출액내 KCl 제거를 위한 이온교환수지 조업조건 최적화 연구

장영희^{1*} · 이예환¹ · 김지유² · 박일건³ · 이주열⁴ · 박병현⁴ · 김성철² · 이상문² · 김성수^{2†}

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과¹, 경기대학교 환경에너지공학과², 평화엔지니어링³, (주)에니텍⁴
(2019년 9월 23일 접수: 2019년 11월 29일 수정: 2019년 11월 29일 채택)

A study on the optimization of Ion Exchange Resin operating conditions for removal of KCl from CKD extract

Younghee Jang¹ · Ye Hwan Lee¹ · Jiyu Kim² · Il Gun Park³ · Ju-Yeol Lee⁴
Byung Hyun Park⁴ · Sang Moon Lee² · Sung Su Kim^{2†}

¹ Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi university

² Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi university

³ Pyunghwa Engineering Consultants, ⁴ Anytech

(Received September 23, 2019; Revised November 29, 2019; Accepted November 29, 2019)

요 약 : CKD 추출액은 시멘트공정에서 발생한 폐기물인 CKD를 시멘트 원료로 재사용하기 위해 공정 방해물질로 작용하는 KCl을 추출한 폐수이며, 폐수처리시설 증설 등의 문제로 추출액 무방류 및 이를 재이용하고자 하였다. 이온교환법을 적용하여 KCl을 제거한 결과, 이온교환 후 추출액의 pH는 12.7에서 pH 2 미만으로 감소하였으며 양이온교환수지의 H⁺가 이온교환을 거쳐 추출액에 용해되었음을 확인하였다. 이온교환의 선택성에 의해 Ca²⁺, K⁺ 순서로 제거되었으며, K⁺ 이온을 제거하기 위해 접촉시간의 증가가 필요함을 판단하였다. 이온교환수지와 직접접촉시간이 약 6배 높은 접촉시간을 갖는 회분식장치에서 연속흐름식장치 대비 4배 높은 K⁺ 제거 효율을, 7배 높은 Cl⁻ 제거 효율을 확인하였다. 양이온교환수지의 H⁺가 음이온교환수지의 OH⁻ 대비 1.2배 빠른 교환속도를 가짐을 추출액 pH 변화를 통해 확인하였다.

주제어 : 추출액, 이온교환수지, pH, 시멘트킬른터스트, 염화포타슘

Abstract : The CKD extract is wastewater from which KCl in CKD has been removed to reuse CKD as a cement raw material, and tried to reuse no extracts due to problems such as wastewater treatment facility expansion. As a result of removing KCl by the ion exchange method, the pH of the extract after ion exchange decreased from 12.7 to less than pH 2, and it was confirmed that H⁺ of the cation exchange resin was dissolved in the extract through ion exchange. In addition, the selectivity of the ion exchange was removed in the order of Ca²⁺, K⁺, it was determined that the

[†]Corresponding author

(E-mail: sskim@kyonggi.ac.kr)

increase in the contact time to remove the K^+ ions. The batch system had a contact time of 6 times or more, compared to the continuous system, and showed 4 times of K^+ removal efficiency and 7 times of Cl^- removal efficiency. It was showed by analyzing the pH of the extract that more H^+ of the cation exchange resin was extracted than OH^- of anion exchange resin as the pH of the extract was changed.

Keywords : extraction, ion exchange resin, pH, cement kiln dust, KCl

1. 서론

시멘트 산업은 알루미늄과 강철 산업 다음으로 에너지소비가 많은 사업이며 과거부터 환경파괴 산업으로 인식되어 왔으나, 최근 폐기물의 연료화, CO_2 가스 저감화와 같은 온실가스 감축 및 저에너지 소모를 위해 많은 노력을 기울이고 있다[1-4]. 대표적으로 시멘트 폐기물 중 하나인 CKD (cement kiln dust)는 시멘트 제조 공정의 배출가스에서 포함된 비산분진을 집진한 부산물으로써 Table 1과 같은 성분으로 이루어져 있다[5-9]. 그 중 CKD를 이루고 있는 Ca^{2+} 는 CO_2 와 반응하여 $CaCO_3$ 자원을 생산할 수 있으며[10,11], 시멘트 원료로 다시 사용할 수 있는 이온이다. 그러나 Ca^{2+} 과 함께 함유되어 있는 K^+ , Cl^- 은 킬른 동체 내부 코팅 또는 링을 형성하여 원료 이송을 방해하며, 시멘트 품질 저하의 원인 중 하나이기 때문에 추출용제를 이용해 이온(KCl)들을 선택적으로 제거한 후 시멘트연료로 재사용해야 한다[12-15]. 그 후 CKD내 KCl을 제거한 후의 산업용수, 즉 폐수는 추출된 KCl 등이 함유되어 있어 이를 처리하기 위한 폐수처리 시설 증설 등 부지의 필요, 경제적 손실 등의 문제가 발생하고 있다. 또한 수질의 오염 처리에 대한 기술이 사회적 이슈로 집중되고 있음에 따라 KCl 잔존 폐수의 무방류를 위한 기술 개발이 필수적으로 요구되고 있다. 이에 따라 폐수를 재사용할 수 있는 공정, 즉 폐수 내 KCl을 제거하여 CKD의 KCl 추출 용제로써 다시 사용될 수 있으며 폐수무방류 시스템에 많은 관심이 집중되

고 있다.

추출액 재순환을 위한 다양한 기술로는 역삼투법(reverse osmosis), 전기투석법(electrodialysis), 정삼투법(forward osmosis), 막이용 증류법(membrane distillation), 증발법(evaporation), 침적법(precipitation), 이온교환수지법(ion exchange resin) 등 매우 다양한 기술이 활용되고 있다[16]. 그 중 삼투법과 전기투석법, 막이용 증류법은 고농도의 폐수에 활용될 수 없어 약 200,000ppm의 폐수 농도를 갖는 시멘트 산업에 적용하기 어려운 기술이다. 고농도에 활용될 수 있는 증발법은 물의 끓는점을 이용하여 고순도의 증류수를 얻을 수 있으며 KCl 형태로 석출되어 가장 높은 효율을 갖는 기술이다. 그러나 대형 산업인 시멘트산업에서 발생된 모든 폐수를 증류시키기에 너무나 많은 에너지 소비가 발생한다. 침적법의 경우 다양한 추출용매와 추출 조건에 따라 KCl이 높은 효율로 추출되지만, 2차 폐수가 발생하거나 회수시 열원 또는 응축 장비가 필요하여 에너지가 소비될 수 있다. 이온교환수지법의 경우 약영향이 없는 양이온과 음이온을 투입하여 KCl을 추출해 내며, 적은 에너지를 소모하여 높은 효율을 갖는 것이 큰 특징으로 다른 기술 대비 가격이 매우 저렴하고 폐수의 수질 처리를 위한 소재로 가장 많이 선택되고 있다[17]. Park의 연구(2014)에서는 폐수에 자성이온교환수지를 이용한 유기물 제거 연구를 수행하였으며[18], Hong 등의 연구(2004)는 이온교환수지를 이용한 크롬 폐수의 처리 및 재이용 가능성을 평가하였다[19]. 그러나 이들의 연구는 단순 폐수 내에 함유되어 있는 유

Table 1. Chemical composition of CKD (cement kiln dust) as determined by ICP

Elements	K	Ca	Mg	Al	Fe	Si
Content(%)	24.5	18.9	0.26	0.67	0.45	0.95

기물 또는 중금속 제거를 위한 가능성을 평가하였으며, 대부분 폐수 내 중금속 제거를 위한 연구가 활발하고 무기이온이 다량 함유되어 있는 CKD 재이용수의 사용을 위한 이온교환 연구는 미흡한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 시멘트 산업 공정 중 CKD 탄산화 공정에서 발생된 추출액(폐수)의 재이용을 위해 이온교환수지를 적용한 KCl 추출 조건을 제시하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료 및 방법

2.1.1. 칼슘이온 추출 및 CKD 추출액 포집

CKD 추출액을 제조하기 위해 상온에서 추출용제인 H₂O 100 mL에 CKD 40 g을 혼합하였다. 칼슘이온을 추출하기 위하여 magnetic stirrer를 이용하여 추출원과 추출용제를 교반하였다. 일정시간 교반한 뒤 GF/C filter (CAT no. 1822-047, Whatman)를 이용하여 용액과 고형물을 분리하였으며, 분리된 용액을 KCl 제거용 추출액(폐수)으로 적용하였다. 추출액의 pH는 12.7으로, pH조절이 필요할 경우 CO₂를 주입하였다. 또한 CKD는 시멘트 공정의 폐기물로서 균일한 이온조성에 대한 신뢰성 확보가 필요할 것이라고 판단하였다. 이에 따라 같은 추출조건으로 무작위로 포집한 CKD를 3회 반복 추출하였고, 각 추출액의 조성을 ICP 분석으로 확인하였다 (Table 2). 그 결과, 1 L의 추출액 내 Ca²⁺, K⁺, Cl⁻는 각각 평균 980 mg, 75385 mg, 68700 mg이 함유되어 있음을 확인하였다. 그 중 K⁺이 6.7% 내외로 오차율을 기록하였으나, 그 외의 이온은 거의 동일한 이온농도를 갖는다는 점에서 같은 추출 조건을 이용할 경우 유사한 추출액 이온농도를 함유할 수 있음을 확인하였다.

2.1.2. 이온교환수지를 사용한 CKD 추출액 내 KCl의 이온교환방법

본 연구에서는 KCl을 추출한 폐수인 CKD 추출액을 삼양 社의 강산성, 강염기성 이온교환수지와 접촉하여 K⁺와 Cl⁻를 제거하고자 하였다. 이온교환수지는 Fig. 1과 같은 (a) 회분식장치(batch system)를 또는 (b) 연속흐름식장치(continuous system)를 이용해 접촉시간별 성능 차이를 비교하고자 하였다. (a) 회분식장치의 경우 이온교환수지를 일정량 충전 한 후, shaking incubator를 이용하여 20 °C, 70 rpm으로 30 min동안 반응하였다. (b) 연속흐름식장치의 경우 이온교환수지를 일정량 충전 한 후, 5 ml/min의 속도로 추출액을 흘려 20 min동안 반응하였다. 또한 모든 반응 후 추출액은 pH 수치와 ICP 결과를 확인하였다. 제거된 K⁺와 Cl⁻은 각각 양이온교환수지(Samyang 社, SCR-BH)의 H⁺와 음이온교환수지(Samyang 社, SAR20MBOH)의 OH⁻와 접촉하여 제거되었으며, 이온제거효율로 전환하여 나타내었다. 사용된 각각의 이온교환수지의 명명법과 특성을 Table 3에 나타내었다.

2.2. 유도결합플라즈마 원자방출분광기 (inductively coupled plasma, ICP) 분석

폐수의 무방류 및 추출 용제로써의 재사용을 위하여 CKD 추출액 내 Ca²⁺, K⁺, Cl⁻의 농도를 분석하기 위해 Walters의 Waters 600E/431/125를 이용하였다. 표준용액을 이용하여 0-100 mg/L 사이의 검량선을 작성하였고, 추출원액을 50 - 2500 배 희석하여 산출하였다.

Table 2. ICP analysis of ion concentration in CKD extract solution (experiment conditions: S/L: 0.4 g/mL, room temperature)

Elements	Ca	K	Cl
Sample 1	604.0	81,172.5	69,931.5
Sample 2	974.5	73,165.0	68,709.0
Sample 3	1,358.0	71,817.5	67,497.0
Average	978.8	75,385.0	68,712.5

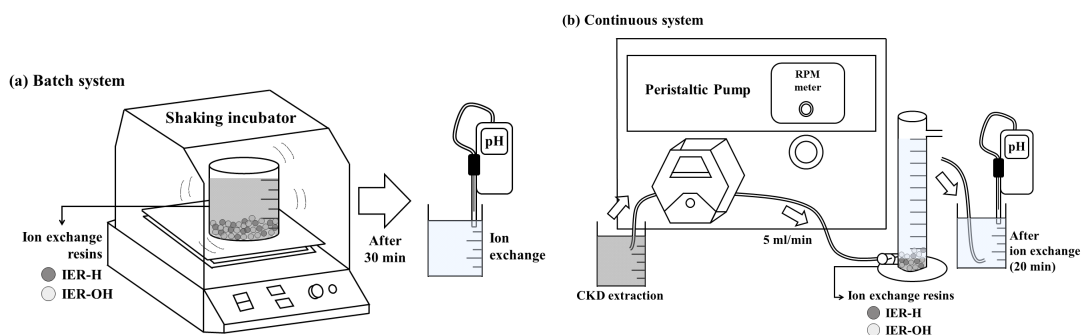




Fig. 1. schematic diagram of ion exchange system setup for removing KCl ions.

Table 3. Properties of ion exchange resins

	SCR-BH	SAR20MBOH
shape		
notation	IER-H	IER-OH
matrix	polystyrene+DVB	
functional group	$-\text{SO}_3^-$ (sulfonate)	$-\text{N}^+(\text{CH}_3)_2\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$ (DMEA, Dimethylethanolammonium)
ionic form	H^+	OH^-
specific gravity*	1.20	1.12
shipping weight*	780	710
moisture retention, %	50-60	45-52
total capacity, eq/l	1.7 ↑	1.00 ↑
effective size, μm		400 ↑
uniformity coefficient	1.6 ↓	1.6 ↓
particle size, μm	300-1200	300-1200
operating temp., $^\circ\text{C}$	120 ↓	40 ↓
operating pH range		0-14
swelling rate, $\text{Cl}^- - \text{OH}^-$ *	10-11%	24%

*: 참고수치

3. 결과 및 고찰

3.1. 이온교환수지 충전 함량의 영향

본 연구는 시멘트 산업 폐수 재이용을 위해 이온교환법을 적용하여 폐수에 함유되어 있는 KCl을 제거하고자 하였다. 이온교환수지는 염류의 수용액과 접촉 시 이온의 농도차이로 인해 이온교환이 이루어지는 원리로서, 다양한 접촉횟수 및 접촉량에 따라 이온 교환 성능에 큰 영향을 미친다고 보고되어 있다[20,21]. 이에 따라 회분식장치를 이용하여 이온교환수지 함량에 따른 KCl 제거 효율 및 pH를 Fig. 2에 도시하였다. 그 결과, 이온교환수지의 함량이 증가함에 따라 Ca^{2+} , K^+ , Cl^- 이온의 제거 효율이 증가됨을 확인하였으며, 특히 K^+ 와 Cl^- 의 제거 효율이 약 15%에서 52%까지 급격히 증가함을 확인하였다. 이는 Ca^{2+} 대비 높은 농도를 갖고 있기 때문에 접촉할 수 있는 수지가 더욱 많기 때문이라고 판단하였다.

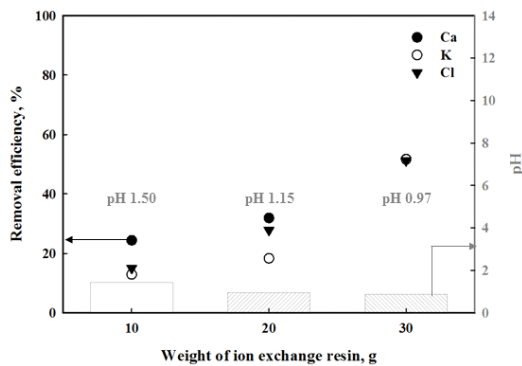


Fig. 2. Removal efficiency of KCl ion with various weight of ion exchange resins in batch system.

(experiment conditions: S/L: 0.4 g/mL, room temperature, reaction time: 30 min)

또한 반응 후 추출액의 pH 분석 결과, 이온교환수지의 함량과는 관계없이 모두 pH 2 미만으로 감소하였으며, 이는 음이온 교환수지의 OH⁻보다 양이온교환수지의 H⁺이온이 더 많이 추출액에 용해된 것임을 판단할 수 있었다. 실제 제거된 Ca^{2+} , K^+ , Cl^- 이온 농도를 ICP 분석으로 확인하였을 때 Cl^- 제거 대비 Ca^{2+} , K^+ 의 제거속도가 약 1.2배 빠름을 확인할 수 있었으며, 이는 이온교환수지 자체의 반응속도가 영향을 미쳤을

을 판단하였다.

회분식장치의 실험 결과는 이온교환수지의 함량 증가에 따라 모든 이온이 50%이상 제거되었다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 연속흐름식장치에 동일하게 적용한 결과를 Fig. 3에 도시하였다.

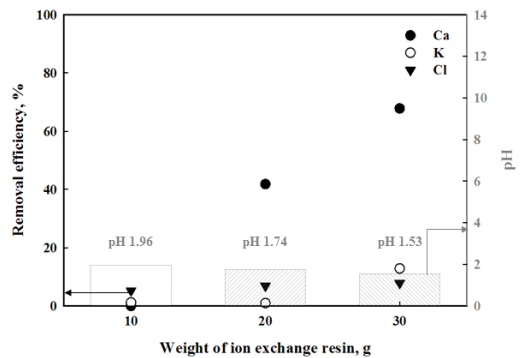


Fig. 3. Removal efficiency of KCl ion with various weight of ion exchange resins in continuous system.

(experiment conditions: S/L: 0.4 g/mL, room temperature, reaction time: 20 min)

그 결과, 10 g의 양, 음이온교환 수지를 충전 했을 경우 세 이온 모두 5% 미만의 제거율을 보였으나, 20 g, 30 g의 이온교환수지를 충전 한 장치에 추출액을 통과시켰을 경우 Ca^{2+} 이온이 약 42%, 68%, K^+ 이온이 약 1%, 13%, Cl^- 이온이 약 7%, 8% 제거되어 앞선 회분식장치와 이온교환 제거에 상반된 결과임을 확인하였다. 회분식반응의 경우 폐쇄된 반응장치 내에서 교반되기 때문에 이온교환수지와 접촉이 반복해서 일어나는 반면, 연속흐름식장치의 경우 충전되어 있는 이온교환수지와 접촉시간은 실제 5 min 이내로 단위 부피당 낮은 전환율을 갖는다는 것이 단점이다. 또한 Ca^{2+} 와 K^+ 두 양이온 사이에 Ca^{2+} 만 빠르게 제거되는 것은 양이온교환수지의 선택성 자체가 이온의 원자가가 높을수록, 원자번호가 높을수록 커지기 때문이며[22], 그 순서는 다음과 같다. 양이온의 경우 $Ca^{2+} > K^+ > Na^+ > H^+ > Li^+$ 순으로 선택성이 크며, 음이온의 경우 $SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > Acetate > OH^- > F^-$ 순으로 선택성이 크다. 따라서 짧은 접촉시간 내에 교환 가능한 이온이 한정되어 있을 경우, 선택성이 높은 Ca^{2+} 가 우선적으로 제거되며, CKD 추출액 내

Ca^{2+} 의 농도가 적기 때문에 일정 부분 Ca^{2+} 가 제거되었을 순간부터 K^+ 이 함께 제거될 수 있다고 판단하였다. 또한 초기 pH 12.7의 추출액이 이온교환수지를 통과하였을 때 충전 함량과 상관없이 pH 2 미만으로 감소하였으며, 이는 양이온교환수지에 결합되어 있는 H^+ 이온이 추출액으로 빠져나왔기 때문으로 앞선 연구결과와 일치하였다.

3.2. pH의 영향

추출용제의 pH는 추출효율에 큰 영향을 미치며, Lee 등(2018)은 pH가 낮을수록 Ca^{2+} 의 추출이 더욱 용이하다고 보고하고 있다[5]. 또한 pH는 H^+ 이온과 OH^- 이온의 농도에 따라 결정되므로, 본 연구에서 사용하고 있는 이온교환수지의 교환성과 연관성이 있다고 판단하였다. 이에 본 추출액의 기본 pH인 12.7에 CO_2 를 주입하여 pH 7로 조절한 후 이온교환수지 주입량별 이온 제거율을 비교하였다(Fig. 4). 그 결과, 이온교환수지의 주입량이 증가할수록 추출액 내 모든 이온의 추출효율이 감소하였으며, pH는 주입량이 증가할수록 pH 1.5, pH 1.15, pH 0.97로 점차 감소하였다. 도출된 결과는 앞선 결과와 같이 양이온교환수지의 H^+ 가 Ca^{2+} , K^+ 와 교환되어 추출액 내 용해되었고, 이에 따라 pH가 감소된 것으로 판단하였다. 또한 오히려 낮은 pH로 이온교환 중 H^+ 이온이 충분히 용해될 수 있는 OH^- 기가 부족함에 따라 오히려 이온교환반응속도를 저하시키는 요인이 될 수 있음을 확인하였다.

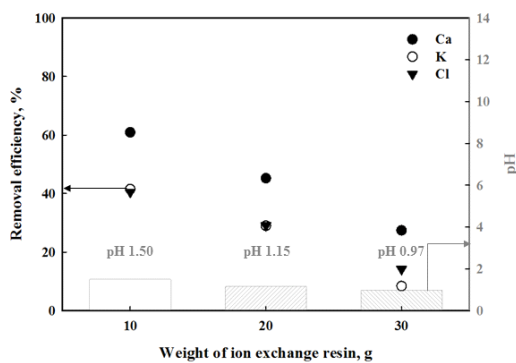


Fig. 4. Removal efficiency of KCl ion at pH 7 with various weight of ion exchange resins in batch system. (experiment conditions: S/L: 0.4 g/mL, room temperature, reaction time: 30 min)

4. 결론

본 연구에서는 CKD 추출액 폐수를 재이용하고자 공정의 효율을 저하시키는 KCl를 제거하기 위하였으며, 이온교환수지를 활용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 모든 반응공정에서 음이온교환수지와 양이온교환수지를 혼합하여 추출액의 KCl 제거 효율을 확인한 결과, 반응 후 추출액의 pH는 2 이하의 산성을 띄며, 이는 음이온교환수지에서 배출한 OH^- 이온대비 양이온교환수지에서 배출한 H^+ 이온이 과량 배출됨을 추출액의 pH 결과로 판단하였다. 위 결과는 양이온교환수지의 반응속도가 음이온교환수지 대비 빠른 반응속도를 가져 H^+ 와 OH^- 의 교환이 더 많이 이루어졌으며, 이에 따른 pH의 감소가 이루어질 수 있음을 양이온(Ca^{2+} , K^+)의 제거율 및 농도로 판단하였다.

2) 연속반응공정에서 이온교환수지 충전 함량을 증가시키기에 따라 Ca^{2+} 의 제거 효율이 4.3%, 41.8%, 67.8%로 증진됨을 확인하였으나 KCl의 이온교환은 발생되지 않았다. 이는 실제 이온교환수지와와의 접촉이 충분히 발생되지 않았으며 연속반응식을 사용하기 위해서는 이온교환수지와 용액(추출액) 간의 접촉시간 증진이 필요함을 확인하였다.

3) 회분식반응에서 이온교환수지 30 g을 충전한 후 pH 12.7의 추출액을 30 min 반응하였을 때 Ca^{2+} 51.7%, K^+ 51.7%, Cl^- 51.3%인 최적의 제거효율을 얻을 수 있었으며, 반응 후 추출액 pH는 0.88이었다. 또한 Ca^{2+} 만 제거되었던 연속반응식 대비 Ca^{2+} 와 K^+ 의 제거효율이 유사하게 나타났다. 이는 폐쇄된 공정 내 이온수지와 추출액과의 접촉이 계속해서 이루어졌음에 따라 이온선택성에 따른 제거뿐만이 아닌 이온교환수지와 K^+ 의 접촉시간 증가에 의하여 Ca^{2+} 와 K^+ 제거효율이 함께 증진됨을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20182010202100).

References

1. H. D. Song, J. H. Hong, Y. S. Um, S. B. Lee, D. G. Kim, J. S. Kim, "A study on the estimation of emission factors for greenhouse gas (CO₂) in cement industry", *Journal of korean society for atmospheric environment*, Vol.23, No.2, pp.158-168, (2007).
2. S. J. H. Oh, "Beneficial Uses of Cement Kiln Dust", *Ceramist*, Vol.20, No.1, pp.103-118, (2017).
3. J. V. Lombardi, R. Bazante-yamaguishi, F. F. Madeira, P. L. Concilio, N. P. P. Caruso, E. Barbieri, "Potassium chloride and sodium chloride as reference toxicants to assess quality of toxicity tests carried out with the microcrustacean cladocera ceriodaphnia dubia", *Inst. Pesca*, Vol.44, No.3, From: DOI: 10.20950/1678-2305.2018.311.
4. S. K. Yoon, S. J. Myeong, T. H. Jang, J. S. Kim, S. H. Lee, K. H. Kim, E. C. Jeon, "Development of CO₂ emission factors for alternative fuels with assessment of emission reduction in cement industry", *Journal of korean society for atmospheric environment*, Vol.24, No.2, pp.189-195, (2008).
5. Y. H. Lee, D. H. Han, S. M. Lee, H. K. Eom, S. S. Kim, "A study on the Cation Extraction and Separation in Cement Industrial By-products for Applications to the Carbonation Process", *Appl. Chem. Eng.*, Vol.30, No.1, pp.34-38, (2019).
6. H. S. Shin, S. Y. Yoo, W. B. Jeong, C. C. Pei, S. S. Kim, C. G. Han, "Quality Properties of Lightweight Foamed Concrete with Vartances in Incorporating Ratio of CKD and Adding Ratio of Stability Agent", *Korea Institute of Building Construction*, Vol.6, No.2, pp.67-70, (2006).
7. J. Jeon, M. J. Kim, "Carbon Dioxide Storage and Calcium Carbonate Production through Indirect Carbonation Using Paper Sludge Ash and Chelating Reagents" *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, Vol.28, No.3, pp.35-44, (2019).
8. R. Siddique, "Utilization of cement kiln dust (CKD) in cement mortar and concrete-an overview", *Resources Conservation & Recycling*, Vol.48, pp.315-338, (2006).
9. M. S. Konsta-Gdoutos, S. P. Shah, "Hydration and Properties of novel blended cements based on cement kiln dust and blast furnace slag", *Cement and Concrete Research*, Vol.33, pp.1269-1276, (2003).
10. C. G. Han, Y. S. Hwang, S. S. Kim, C. S. Cha, "Physical Properties of Cement Kiln Dust(CKD) and Engineering Properties of Cement Mortar Incorporating CKD", *Journal of the architectural institute of korea structure&construction*, Vol.20, No.11, pp.83-90, (2004).
11. S. Nasipude, S. bagwan, A. C. Ranveer, "Minimization of cement kiln dust", *International journal of innovations in engineering research and technology*, Vol.2, No.4, (2015).
12. K. Wang, S. P. Shah, A. Mishulovich, "Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.299-209, (2004).
13. L. Kalina, J. Koplik, F. Soukal, J. Masilko, L. Jaskowiecova, "Potential uses of geopolymers to immobilize toxic metals from by-products materials", *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol.11, No.3, pp.579-584, (2012).
14. M. Lachemi, M. Sahmaran, K. M. A. hossain, A. Lotfy, M. Shehata, "Properties of controlled low-strength materials incorporating cement kiln dust and slag", *Cement & concrete composites*, Vol.32, pp.623-629, (2010).

15. S. R. Hong, H. S. Kim, E. G. Kwak, S. G. Park, J. M. Kim, "Characteristics of Recycled Fine Aggregate by Sodium Carbonated Water", *Korean Recycled Construction Resource institute*, Vol.14, pp.97-102, (2011).
16. J. H. Sim, J. J. Seo, J. H. Seo, D. H. Kim, "Comparative Study on Recovery of Nickel by Ion Exchange and Electrodialysis", Vol.28, No.6, pp.640-647, (2005).
17. K. B. Park, J. H. Cho, S. B. Jeon, Y. Y. Lim, K. J. Oh, "Characteristics of Heat Stable Salts Treatment Using Anion Exchange Resins in CO₂ Absorption Process", *Clean Technology*, Vol.21, No.1, pp.22-32, (2015).
18. C. G. Park, H. S. Kim, J. M. Lee, "Applicability Evaluation of the Wastewater Treatment System Using Magnetic ion Exchange Resin in the Existing Wastewater Treatment Plant", *The KSFM Journal of Ruid Machinery*, Vol.17, No.2, pp.35-40, (2014).
19. S. S. Hong, N. Y. Jang, Y. S. Won, C. H. Lee, "The study of Treatment and reuse of chromium rince wastewater with ion exchange resins", *Proceedings of KSEE*, 29.April-1.March, (2004).
20. H. K. Ahn, I. H. Rhee, H. J. Jeong, "A study on Ion Exchange Characteristics: The Influence of composition and Concentration of Solution", *Theories and Applications of Chem. Eng.*, Vol.12, No.1, pp.447-450, (2006).
21. T. K. Moon, G. L. Foutch, "Mixed-Bed ion Exchange", *Chemical Industry and Technology*, Vol.11, No.1, pp.12-17, (1993).
22. S. K. Kwun, M. J. Yu, T. M. Jung, M. S. Kim, "Nitrate Removal in Rural Groundwater Using Ion Exchange Resin", *Korean Journal of Environmental Agriculture*, Vol.16, No.2, pp.193-198, (1997).