공극수의 전해도에 따른 점토 광물의 팽창 특성

Swelling Characteristics of Clay Minerals According to the Ionic Strength in Pore Water

강석구* · 정종원**

Gang, Seok Gu*, and Jung, Jongwon**

Abstract

An experiment to evaluate the swelling characteristics during saturation of representative clay minerals, kaolinite, illite, montmorillonite, and bentonite, according to the ionic strength of the pore water, was conducted. The results showed that in distilled water (DW), the average swelling ratios of kaolinite, illite, and bentonite were 10.95%, 12.51%, and 26.60%, respectively. However, montmorillonite exhibited a relatively large swelling ratio of approximately 152.6%. In 1 M brine, kaolinite, illite, and bentonite exhibited swelling ratios of 12.42%, 16.23%, and 21.91%, respectively, while that of montmorillonite was relatively small (0.83%). In the case of the ground containing montmorillonite, a high swelling ratio is expected with an increase in saturation and conductivity.

Key words : Clay Mineral, Swelling, Electrostatic, Pore-clogging

요 지

공극수의 전해도 변화에 따른 대표적인 점토광물 카올리나이트(Kaolinite), 일라이트(Illite), 몬모릴로나이트(Montmorillonite) 및 벤토나이트(Bentonite)의 포화 시 팽창 특성 평가 실험을 수행하였다. 실험 결과 증류수(distilled water, DW)에서 평균적으로 카올리나이트는 10.95%, 일라이트는 12.51%, 벤토나이트는 26.60%의 평균 팽창률을 나타내고 있다. 하지만, 몬모릴로나이트는 152.6%로써 상대적으로 매우 큰 팽창률을 나타내고 있다. 1 M 소금물(1 M brine)에서 평균적으로 카올리나이트는 12.42%, 일라이트는 16.23%, 그리고 벤토나이트는 21.91%의 팽창률을 보이고 있다. 하지만, 몬모릴로나이트는 0.83% 로써 상대적으로 매우 작은 팽창률을 나타내고 있다. 몬모릴로나이트를 포함한 지반의 경우, 포화도 및 전해도의 상승과 함께 높은 팽창률이 예상된다.

핵심용어 : 점토광물, 팽창, 전해도, 공극막힘

1. 서 론

국내 연안 지역에는 2018년 기준으로 1,440만 명이 거주하고 있다. 2016년 기준 연안 지역에서 생산된 상품과 서비스에 의한 총생산은 52,152백억 원으로 국내 총생산의 33%를 차지한다. 또한, 개발의 증가와 함께 2012년 대비 2018년 주거지역은 855 km²에서 895 km², 상업지역은 125 km²에서 895 km² 그리고 공업지역은 697 km²에서 745 km²으로 증가하고 있다. 하지만, 지구 온난화에 따라 해수면의 상승은

연안 지역의 안전에 영향을 끼치고 있는 실정이다. 연안 지역에 분포하는 지반은 다량의 점토 성분을 함유하고 있다 (Kim et al., 1998). 점토는 지반 내 공극수의 Na⁺, K⁺, Mg⁺, Ca⁺ 등의 양이온 농도에 따라 물리·화학적 특성이 변화한다. 특히, 점토의 표면은 공극수의 전해도 변화에 정전기적으로 민감하게 반응하고 팽창 특성이 크게 변화한다.

대표적인 점토 광물로 카올리나이트(Kaolinite), 일라이트(Illite), 몬모릴로나이트(Montmorillonite) 및 벤토나이트(Bentonite)가 존재한다.

*정회원, 충북대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: seokgugang@naver.com)

Member, MS Student, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

**교신저자, 정회원, 충북대학교 토목공학부 부교수(E-mail: jjung@chungbuk.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

카올리나이트(Kaolinite)와 일라이트(Illite)는 몬모릴로나이트(Montmorillonite)와 벤토나이트(Bentonite)에 비해 팽창성이 작은 것으로 알려져 있다(Hamza and Bilsel, 2016). 카올리나이트는 수소결합에 의한 입자 구조를 형성하고 있고, 일라이트는 칼륨(K^+) 결합으로 중성의 입자 구조를 형성하고 있기 때문에 몬모릴로나이트에 비해 공극수의 전해도 변화에 의한 팽창 특성 변화가 크지 않은 것으로 알려져 있다(Hamza and Bilsel, 2016).

벤토나이트는 팽윤성과 흡착성이 높은 특성을 보인다. 따라서, 건설 재료, 고준위 방사성 폐기물 처분장 및 의약품 재료 등 다양한 분야에서 응용되고 있다. 특히, 채움재의 팽윤성과 방사성 핵종의 흡착성이 중요한 고준위 방사성 폐기물의 심지층 처분장(Deep Geological Site of High Radioactive Waste)에 공학적 방벽(Engineering Barrier)의 중요한 재료로 벤토나이트는 고려되고 있다(KAERI, 2006). 또한, 기존의 연구에 의하면 벤토나이트는 공극수의 NaCl과 $CaCl_2$ 의 농도가 증가함에 따라 팽창률이 감소하는 것으로 알려져 있다(Ye et al., 2015).

공극수 전해도에 따른 점토의 팽창 특성 변화는 점토 입자 간의 응집 및 이로인한 지반의 공극막힘을 유발한다. 이는 지반의 투수계수 저하 및 인장파괴 등에 영향을 끼친다(Cao et al., 2019). 예를 들어, 하이드레이트 지층에서 가스 생산 또는 저류층에서 원유생산 등은 다상유체의 흐름(Multiphase Fluid Flow) 및 공극수의 전해도 변화를 발생시킨다. 이러한 지반 공극 내에서 다상유체 흐름은 점토 입자의 이동을 유발한다. 또한, 공극수의 전해도 변화에 따른 점토의 팽창은 입자의 이동과 더불어 공극 막힘(clogging)을 유발하며, 이는 투수계수 또는 지반의 인장파괴에 영향을 주게 된다(Jung et al., 2018).

하지만, 공극수의 전해도에 따른 점토의 팽창 특성은 뚜렷하게 정량화 되어 있지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 공극수의 전해도에 따른 대표적인 점토광물 카올리나이트(Kaolinite), 일라이트(Illite), 몬모릴로나이트(Montmorillonite) 및 벤토나이트(Bentonite)의 팽창 특성을 규명하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 정전기적 상호작용이론

점토는 평균 입경이 $75 \mu m$ 이하인 미세 입자로 높은 비표면적으로 인하여 질량에 의한 힘(Mass-driven Forces)보다는 정전기적 힘(Electrical Forces)에 의한 영향을 주로 받는다(Lambe and Whitman, 1969). 점토 입자는 동형 치환(Isomorphous Substitution)에 의해 음전하를 형성한다. 카올리나이트와 일라이트는 실리카시트(Silica Sheet) 사이에 위치한 Si^{+4} 가 Al^{+3} 로 동형 치환하여 음전하를 형성한다. 이 중 음전하를 형성한 일라이트는 K^+ 와 결합으로 인해 최종적으로 전기적 중성을 형성한다. 따라서, 카올리나이트는 전기적으로 음성

Fig. 1. Characteristic Curve of DLVO Theory (Modified from Trefalt and Borkovec, 2014)

을 띠게 되고, 일라이트는 전기적으로 중성을 나타낸다. 또한, 몬모릴로나이트는 깁사이트시트(Gibbsite Sheet)에 위치한 Al^{+3} 의 Mg^{+2} 치환으로 전기적으로 음성을 나타낸다.

이러한 점토 표면의 전기적 음성 특성으로 인해 입자 주위에는 이중층(Double Layer)이 형성된다. 이중층은 흡착수와 자유수로 구분되며, 흡착수에는 다량의 양이온이 분포한다. 형성된 이중층은 입자 간의 반발력의 원인이 되고, 이중층의 두께는 입자의 배열에 영향을 준다.

카올리나이트와 일라이트는 쿨롱의 힘(Coulombic Forces)에 의해 입자 배열이 결정되는 특성을 나타내고 Eq. (1)과 같다.

$$|F| = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (1)$$

$|F|$: Coulombic forces

k : Coulomb constant ($8.998 \times 109 N \cdot m^2 / C^2$)

q : Magnitudes of the charges

r : Distance between the charges

몬모릴로나이트와 벤토나이트는 Derjaguin, Landau, Vervy and Overbeek (DLVO) 이론에 의해 입자 배열이 결정되는 특성을 나타낸다. DLVO 이론은 Van der Waals 인력(Attraction Forces)과 이중층(Double Layer)에 의한 반발력(Repulsion forces)으로 정의한다(Fig. 1).

두 입자 간에 작용하는 자유 상호작용 에너지(U)는 입자 간에 작용하는 힘(F)을 적분하여 계산할 수 있다(Ep. (2)). 입자 간에 작용하는 힘(F)은 단위 표면적당 자유에너지(W)와 유효반경(R_{eff})을 변수로 계산된다(Eq. (3)). 단위 표면적당 자유에너지(W)는 Van der Waals 인력(W_{vdw})과 이중층 반발력(W_{dl})의 합으로 표현된다(Eq. (4)). Fig. 2는 공극수 이온도에 따른 DLVO 이론 특성 곡선을 나타내고 있다. 이온도 증가에 따라 Van der Waals 인력은 증가한다.

Fig. 2. Characteristic Curve of DLVO Theory According to Ionic Strength of Pore Water (Modified from Trefalt and Borkovec, 2014)

$$U(h) = \int_h^{\infty} F(h') dh' \quad (2)$$

$$F(h) = 2\pi R_{eff} W(h) \quad (3)$$

$$W(h) = W_{vdw}(h) + W_{dl}(h) \quad (4)$$

$$W_{vdw}(h) = -\frac{H}{12\pi h^2} \quad (5)$$

$$W_{dl}(h) = \frac{2\sigma_+ \sigma_-}{\epsilon_0 \epsilon k} \exp(-kh) \quad (6)$$

$F(h)$: 콜로이드 입자 간에 작용하는 힘

h : 표면 간격

$W(h)$: 단위 면적당 두 표면의 자유에너지

R_{eff} : $\frac{R_+ R_-}{R_+ + R_-}$, 유효면적

H : Hamker constant ($10^{-21} \sim 10^{-19}$)

σ_+, σ_- : 입자 표면의 단위 면적당 전하밀도

ϵ_0 : 진공 상태의 유전율

ϵ : 물의 유전 상수

k : 더비의 길이(카파의 역수)

3. 팽창 실험 장비 및 방법

3.1 1차원 팽창 실험 장비

점토광물의 일차원 팽창변형은 ASTM D4546-14 (2014) 기준에 부합하여 측정하였다. Figs. 3과 4는 횡방향 변형 구속 하에 일차원 팽창변형을 측정하기 위한 실험 장비의 모식도 및 사진을 각각 나타낸다. 변형률계(LPS-100S)는 시료의 변형율을 측정하고, 데이터 로거(Data Logger)는 측정된 변형율을 1초의 간격으로 저장한다.

Fig. 3. Experimental Set-Up for Soil Expansion Tests

Fig. 4. Experimental Devices for Soil Expansion Tests

3.2 시료 성형 및 실험 방법

가장 대표적인 점토 광물인 카올리나이트(Kaolinite), 일라이트(Illite), 몬모릴로나이트(Montmorillonite) 및 벤토나이트(Bentonite)를 본 연구의 시료로 사용하였다. 각 시료의 초기 함수비를 결정하기 위해 사전 실험으로 다짐실험을 수행하였다. 초기 함수비는 노상 다짐 기준으로써 최적 함수비(Optimum Moisture Content)의 건조 측 95% 함수비로 결정하였다(Table 1). 실험에 사용한 물은 증류수(distilled water, DW) 및 1 M 소금물(1 M brine)을 사용하였다. 챔버의 크기는 ASTM D4546-14 (2014) 기준에 의해 직경 6.25 cm (2.5 inch) 및 높이 2.54 cm (1 inch)이다.

실험의 준비 과정은 다음과 같다. 최적 함수비(Optimum Moisture Content)의 건조 측 95% 함수비를 유지한 시료는 준비된 챔버 안에 성형된다. 시료의 상하부에는 공극판이 놓여 물이 자유롭게 흐를 수 있다. 상부 공극판 위에는 1 kPa의 하중이 놓이게 된다(Fig. 3). 하중판 위에 변형률계(LPS-100S)가 위치하여 시료의 팽창을 측정한다. 전체 시스템은 물로 채워진 수조에 놓이게 되어, 시료는 물에 잠기게 된다. 따라서, 시간의 흐름에 따라 수조의 물은 시료 안으로 흐르게 되어 시료의 함수비는 증가하게 된다. 함수비의 변화에 따른

Table 1. Compaction Properties of Clay Minerals

Clay	Properties			
	OMC (%)	MDD (kN/m ³)	$w_{95\%}$ (%)	$r_d(95\%)$ (kN/m ³)
Kaolinite	27.02	14.19	22.90	13.48
Illite	17.99	16.39	12.16	15.57
Montmorillonite (Bera and Ghosh, 2011)	30.79	12.88	19.44	12.24
Bentonite (Fattah and Al-Lami, 2016)	33.30	12.71	23.99	12.08

Fig. 5. Swelling Ratio of Clay Minerals in Distilled Water **Fig. 6.** Swelling Ratio of Clay Minerals in 1 M Brine

시료의 변형은 변형율계를 통해 측정되고, 데이터 로거(Data Logger)를 통해 1초의 간격으로 저장된다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 팽창(Swelling) 실험 결과

Figs. 5와 6은 카올리나이트(Kaolinite), 일라이트(Illite), 몬모릴로나이트(Montmorillonite) 및 벤토나이트(Bentonite)의 증류수(distilled water, DW) 및 1 M 소금물(1 M brine)에서의 팽창률 실험결과를 나타낸다. 모든 실험은 3번씩 수행되었고, Figs. 5와 6은 평균값 및 표준편차를 나타낸다. 그 결과, 증류수(distilled water, DW)에서 카올리나이트는 10.95%, 일라이트는 12.51%, 벤토나이트는 26.60%의 평균 팽창률을 나타내고 있다. 하지만, 몬모릴로나이트는 152.6%로써 상대적으로 매우 큰 팽창률을 나타내고 있다(Fig. 5). 하지만, 1 M 소금물(1 M brine)에서 카올리나이트는 12.42%, 일라이트는 16.23%, 그리고 벤토나이트는 21.91%의 팽창률을 보이고 있다. 하지만, 몬모릴로나이트는 0.83%로써 상대적으로 매우 작은 팽창률을 나타내고 있다(Fig. 6).

증류수(distilled water, DW)에 비해 소금물(1 M brine) 내에서의 팽창률을 비교하면 카올리나이트는 0.88%, 일라이트는 0.77% 및 벤토나이트는 1.21%의 상대적으로 작은 팽창률 변화를 보이고 있다. 하지만, 몬모릴로나이트는 18,385.54%의 상대적으로 매우 큰 팽창률 감소를 보이고

Table 2. Relative Swelling Ratio of Clay Minerals between Distilled Water and 1 M Brine

Clay	Swelling ratio		
	DW (%)	1 M brine (%)	DW/1 M brine
Kaolinite	10.95	12.42	0.88
Illite	12.51	16.23	0.77
Montmorillonite	152.6	0.83	18,385.54
Bentonite	26.60	21.91	1.21

있다(Table 2). 몬모릴로나이트는 공극수의 염분 농도가 증가하면 이중층수의 두께가 감소하여, DLVO 이론에 의해 공극수의 염분 농도가 증가할수록 Van der Waals 인력이 지배적인 영향을 준다(Cao et al., 2019). 따라서, 1 M 소금물(1 M brine)에서 몬모릴로나이트 입자는 팽창률이 크게 감소하게 된다.

4.2 X-Ray Diffraction (XRD) 및 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) 분석

본 연구에서 사용한 점토광물의 X-Ray Diffraction (XRD) 및 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) 분석을 수행하였다. Table 3은 점토광물의 EDS 결과를 나타내며, Fig. 7은 XRD 분석 결과를 나타낸다. EDS 분석 결과, 카올리나이트

Table 3. Energy Dispersive Spectrometer Analysis Data of Clay Minerals

	C	O	Al	Si	K	Fe	Na	Mg
Kaolinite	5.59-8.26	60.77-63.78	17.2-11.04	0.53	0.61-0.7	-	-	-
Illite	6.82	50.31-55.36	7.17-14.13	6.85-18.30	2.27-4.08	8.14-26.56	-	-
Montmorillonite	14.98	52.11-56.03	1.27-5.59	9.76-17.23	4.53	2.16-29.7	2.76	1.09-1.26
Bentonite	7.92-15.05	50-51.2	3.23-5.71	6.51-26.61	1.12	3.90-28.74	-	-

(a) XRD data of Kaolinite

(b) XRD data of Illite

(c) XRD data of Montmorillonite

(d) XRD data of Bentonite

Fig. 7. X-ray Diffraction Data of Clay Minerals

(Kaolinite), 일라이트(Illite), 몬모릴로나이트(Montmorillonite) 및 벤토나이트(Bentonite) 모두 산소(O)를 가장 많이 함유하고 있다. 이러한 결과는, 본 연구에 활용된 네 가지 점토 광물이 문헌에서 나타나는 고유 광물 특성과 매우 유사하게 나타나고 있음을 나타낸다(GTK, 2006; POSIVA, 2007; Egrani et al., 2018; Zimmermann et al., 2019).

XRD 분석 결과 카올리나이트와 일라이트는 Muscovite와 Alpha-SiO₂로 구성되어 있음을 확인하였다. 두 광물 모두 비 팽창성 광물로 알려져 있다. 몬모릴로나이트와 벤토나이트는 Beidellite, Sauconite, Nontronite, Berinrite 및 Stevensite를 다수 포함하고 있음을 확인하였다. 위의 광물들은 Smectite 속에 속하는 광물로서, 팽창성 광물 그룹으로 알려져 있다(Hwang et al., 1997; Viani et al., 2002; Jiang et al., 2010;

Wang et al., 2017).

XRD 분석은 팽창실험에서 몬모릴로나이트(152.6% DW) 및 벤토나이트(26.60%, DW)가 카올리나이트(10.95% DW)와 일라이트(12.51% DW)보다 상대적으로 팽창률이 높게 나온 결과와 일치하고 있음을 보여주고 있다.

4.3 점토 팽창에 따른 지반의 공극막힘과 투수 계수 저하

하이드레이트 지층에서의 가스 생산은 메탄 및 담수가 동시에 해리되어 나오기 때문에, 다상 유동 흐름 흐름뿐만 아니라 지반 내 공극수의 전해도 저하를 유발한다. 따라서, 몬모릴로나이트를 다수 포함한 지반의 경우, 입자의 이동과 함께 입자의 재배열에 따른 팽창에 의해 공극 막힘이 예상된

다. 이는 지반 투수계수의 저하에 영향을 끼칠 것이다. 또한, 메탄생산을 위한 지속적인 하이드레이트의 해리는 가스 및 담수의 공급에 의해 지반 내 과잉간극수압의 증가를 유발한다. 이로 인해, 지반의 인장파괴의 가능성까지 내포한다(Jung et al., 2012).

본 연구의 결과 몬모릴로나이트 및 공극수의 전해도 증가 조건이 만족될 경우에 입자이동에 따른 공극 막힘이 예상된다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 점토광물의 포화 시 공극수의 전해도 변화에 따른 점토의 팽창 특성을 평가하였다. 팽창실험을 수행하여 팽창률을 산정하고, XRD 및 EDS 실험을 통해 팽창 특성을 분석하였다. 또한, 기존 선행연구의 고찰을 통해, 팽창에 따른 유체의 공극 막힘 및 투수성 저하를 설명하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 증류수(distilled water, DW)에서 카올리나이트, 일라이트 및 벤토나이트는 비슷한 팽창률을 나타내고, 몬모릴로나이트는 상대적으로 매우 큰 팽창률을 나타낸다.
- (2) 소금물(1 M brine)에서 카올리나이트, 일라이트 및 벤토나이트는 DW에 비해 팽창률의 변화가 크지 않다. 하지만, 몬모릴로나이트는 팽창률이 매우 크게 감소하였다.
- (3) XRD 분석 결과 카올리나이트와 일라이트에는 비팽창성 점토광물인 Mica group의 점토광물이 함유되어 있음을 확인하였다. 몬모릴로나이트와 벤토나이트에는 팽창성 점토광물인 Smectite group의 점토광물이 함유되어 있음을 확인하였다.
- (4) 점토광물의 팽창성은 유체의 흐름에 따라 공극 막힘을 유발한다. 이는 투수계수 저하의 가능성을 내포하게 된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2018-MOIS31-009)을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

ASTM D4546-14. (2014). *Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils*.
Bera, A., and Ghosh, A. (2011). Regression model for prediction of optimum moisture content and maximum dry unit weight of fine grained soil. *International Journal of*

Geotechnical Engineering. Vol. 5. No. 3, pp. 297-305.
Cao, S.-C., Jang, J., Jung, J., Waite, W.-F., Collett, T.-S., and Kumar, P. (2019). 2D micromodel study of clogging behavior of fine-grained particles associated with gas hydrate production in NGHP-02 gas hydrate reservoir sediments. *Marine and Petroleum Geology*. Vol. 108, pp. 714-730.
Egirani, D.E., Latif, M.T., Poyi, N.R., Wessey, N., and Acharjee, S. (2018). Synthesis and characterization of CuO coated Montmorillonite and its effect on mercury (II) ions removal from aqueous media. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, Vol. 53, No. 5, pp. 830-840.
Fattah, M.-Y., and Al-Lami, A.-H.-S. (2016). Behavior and characteristics of compacted expansive unsaturated bentonite-sand mixture. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 629-639.
GTK. (2006). *Mineralogical and chemical study of some kaolin samples from the Kahdeksaisiensuo and Hyvääjärvi occurrences*. Virtasalmi SE Finland. M19/3232/2006/1/82.
Hamza, A., and Bilsel, H. (2016). *Volume change and strength behavior of expansive clay stabilized with scrap tire rubber*. Eastern Mediterranean University.
Hwang, J.Y., Park, S.W., and Hwang, H.S. (1997). Physico-chemical properties of the bentonites used for the civil engineering works in Korea. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 7, No. 2, pp. 127-137.
Jiang, M.Q., Jin, X.Y., Lu, X.Q., and Chen, Z.L. (2010). Adsorption of Pb(II), Cd(II), Ni(II) and Cu(II) onto natural kaolinite clay. *Desalination*, Vol. 252, pp. 33-39.
Jung, J.W., Jang, J., Santamarina, J.C., Tsouris, C., Phelps, T.J., and Rawn, C.J. (2012). Gas production from hydrate-bearing sediments: The role of fine particles. *American Chemical Society*, No. 26, pp. 480-487.
Jung, J., Cao, S.-C., Shin, Y.-H., Al Raoush, R.-I., Alshibli, K., and Choi, J.-W. (2018). A microfluidic pore model to study the migration of fine particles in single-phase and multi-phase flows in porous media. *Microsystem Technologies*, Vol. 24, pp. 1071-1080.
KAERI. (2006). *High-Level Radwaste Disposal Technology Development*. RR-2765.
Kim, S.K., Lim, H.D., and Moon, S.K. (1998). Clay minerals and their distribution in the soft ground deposited along the coastline. *Korea Geotechnical Society*, Vol. 14, No. 6, pp. 73-80.

- Lambe, T.-W., and Whitman, R.-V. (1969). *Soil mechanics*. Massachusetts Institute of Technology. pp. 52-60.
- POSIVA. (2007). *Illite K-Ar Dating of Fault Breccia Samples from ONKALO Underground Research Facility, Oliluoto, Eurajoki, SW Finland*. Working Report 2007-67.
- Trefalt, G., and Borkovec, M. (2014). *Overview of DLVO Theory*. www.Colloid.ch/dlvo
- Viani, A., Gualtieri, A.F., and Artioli, G. (2002). The nature of disorder in montmorillonite by simulation of X-ray powder patterns. *American Mineralogist*, Vol. 87, pp. 966-975.
- Wang, G., Wang, H., and Zhang, N. (2017). In situ high temperature X-ray diffraction study of illite. *Applied Clay Science*, Vol. 146, pp. 254-263.
- Ye, W.-M., Zhu, C.-M., Chen, Y.-G., Chen, B., Cui, Y.-J., and Wang, J. (2015). Influence of salt solutions on the swelling behavior of the compacted GMZ01 bentonite. *Environment Earth Science*, Vol. 74, pp. 793-802.
- Zimmermann, B.M., Silvestri, S., Leichtweis, J., Dotto, G.L., Mallmann, E.S., and Foletto, E.L. (2019). Effect of thermal treatment on the catalytic activity of a Fe-rich bentonite for the photo-Fenton reaction. *Cerâmica*, Vol. 65. pp. 147-152.

Received	September 29, 2021
Revised	September 29, 2021
Accepted	October 12, 2021