

황토를 이용한 Acid Orange II의 색도제거

박재홍[†]

영산강유역환경청 측정분석과

Decolorization of Acid Orange II from Aqueous Solutions using Loess

Jae Hong Park[†]

Measure and Analysis Division, Yeongsan River Basin Environmental Office

(Received 25 March 2010, Revised 1 February 2011, Accepted 28 February 2011)

Abstract

Loess, a natural clay, was evaluated as an adsorbent for the decolorization of Acid Orange II, an azo and reactive dye, from aqueous solution. Adsorption studies were performed at 30°C and the effect of reaction time, loess dosage, initial concentration, loess particle size, pH, agitation rate were investigated to determine the optimum operation conditions. The removal efficiencies of color were measured to evaluate the effectiveness of loess. From this study, it was found that optimal reaction time was 10 min. Color removal efficiencies of Acid Orange II were increased as higher loess dosage, initial concentration and agitation rate. However, color removal efficiencies decreased when pH is high and loess particle becomes large. Adsorption of Acid Orange II fitted to the pseudo-second-order rate kinetics more than first-order rate kinetics. Langmuir and Freundlich adsorption isotherm constants and correlation coefficients were calculated and compared. It was concluded that the adsorption data of Acid Orange II onto loess fitted to the Freundlich model more than Langmuir model.

keywords : Acid Orange II, adsorption, Color, Loess

1. 서론

매년 전 세계적으로 규모로는 약 10⁶톤, 종류로는 10,000 가지 이상의 합성염료와 안료가 생산되어 섬유, 가죽, 제지, 고무, 플라스틱, 의료, 식품 등 다양한 산업분야에서 광범위하게 사용되고 있다(Couto et al., 2001). 생산되는 염료 중에서 상당부분을 차지하고 있는 아조 염료를 포함한 염색폐수는 일반적으로 탈색이 잘 되지 않는 염료가 함유되어 있어 1 mg/L 이하의 저농도 염료가 존재할 지라도 색도를 띄며(백미화 등, 2009), 폐수내의 아조염료는 발암성, 독성을 띄고 있기 때문에 적절한 처리가 되지 않은 상태에서 환경계로 배출될 경우 생태계에 바람직하지 않는 영향을 미칠 수 있다(Kiriakidou et al., 1999). 이들 물질들은 호기성 분해율이 낮고(Brown and Laboureur, 1983; Pagga and Brown, 1986). 혐기성 조건에서는 발암성을 띤 방향족 아민류로 분해될 수 있다(Chung and Cerniglia, 1992; McCann and Ames, 1975).

합성염료는 다양한 색도 요구를 충족시키기 위해 종류마다 서로 상이하며, 안정적인 화학구조를 이루고 있는데 이러한 구조적 안정성으로 인해 기존의 물리적·화학적 처리 공정으로는 충분한 제거가 어려운 실정이다(Ahn and

Chang, 1999; Robinson et al., 2001).

염료폐수의 처리에는 물리/화학적 처리방법, 즉 응집, 침전, 활성탄 흡착, 오존산화, 여과 등의 방법이 적용될 수 있다(Ergene et al., 2009). 이들 방법 중 흡착을 이용한 처리기법은 용존 되어있는 염료농도를 빠르고 효과적으로 제거할 수 있는 방법의 하나로 고려되고 있다(Tsai et al., 2004). 폐수내의 유기화합물 제거를 위해 활성탄(Dhodapkar et al., 2006; Mohanthy et al., 2006), 천연 광물질(Tahir and Rauf, 2006), 산업폐기물 및 그 부산물(Dhodapkar et al., 2006) 등이 흡착제로 이용되어 왔다. 자연적으로 생성된 광물질들은 다양한 종류의 금속류(Rauf and Tahir, 2003; Viraraghavan and Kapoor, 1994), 유기화합물(Koumanova and Peeva-Antova, 2002), 염료(Tahir and Rauf, 2006) 제거에 효과적인 흡착제로 적용될 수 있음이 여러 문헌을 통해 입증되었다.

본 연구에서는 천연광물질 중 하나로 통기성이 우수하고, 손쉽게 얻을 수 있으며, 가격이 저렴하며, 생물에 해가 없고 환경친화적인(김상범 등, 2007; 윤종섭 등, 2003) 황토를 흡착제로 이용하여 반응성 염료인 Acid Orange II의 색도제거에 영향을 미치는 다양한 변수, 즉 반응시간, 황토 투입량, 염료의 초기농도, 황토 입자경, pH, 교반속도에 관하여 조사하여 황토의 적용가능성을 판단하는 기초 자료를 제공하고자 하였다.

[†] To whom correspondence should be addressed.

jhong@korea.ac.kr

2. 연구방법

2.1. 황토 전처리

본 연구에 사용된 황토는 전라남도 해남군 인근 밭에서 채취하였으며 항량이 될 때까지 104°C의 oven에서 건조하였다. 건조된 황토는 불순물을 제거하고 분쇄한 후 체 거름하여 입자 크기별로 구분하여 사용하였다. 체 거름한 황토입자는 어떠한 물리적·화학적인 변형 없이 원형 그대로 사용하였다. 실험에 사용된 황토의 X-선 회절분석(X-Ray diffraction analysis(XRD), PAN analytical(X'pert Pro), USA), EDS(Energy dispersive X-ray Spectroscopy, JEOL KOREA OXFORD INSTRUMENT(JSM6500F 7557), Japan) 분석결과 SiO₂ 65.3%, Al₂O₃ 12.8%, MgO 5.9%, Fe₂O₃ 6.2%, K₂O 1.4%, TiO₂ 0.4%, CaO 8.0%의 화학조성을 나타내었으며, 비표면적과 밀도는 각각 55 m²/g, 2.4 g/cm³를 나타내었다.

2.2. 반응성 염료

본 연구에 사용된 반응성 염료인 Acid Orange II(Fig. 1)는 C₁₆H₁₁N₂NaO₄S의 분자식을 갖는 난분해성의 합성염료로써 염색 및 인쇄산업에 다양하게 사용되고 있다. Acid Orange II는 3차 증류수를 사용하여 필요한 농도로 제조하여 사용하였다.

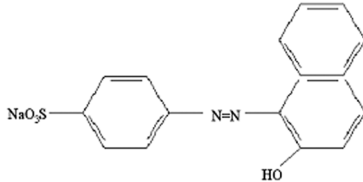


Fig. 1. Chemical structure of Acid Orange II.

2.3. 실험방법

흡착실험은 100 mL 갈색유리병에 Acid Orange II시료 40 mL을 주입하고, 반응변수인 교반시간, 황토주입량, Acid Orange II의 초기농도, 황토 입자경, 용액의 pH, 교반속도를 변화시켜 가며 교반배양기(IS-971R, JEIO TECH)를 이용하여 교반하였다. 교반된 시료는 시료로부터 황토입자를 제거하기 위해 원심분리기(Combi-514R, HANIL Science Industrial)를 이용하여 4,000 rpm에서 5분 동안 원심 분리한 후 상등액을 분취하여 흡광광도계(CARY 300 Conc., UV-Visible Spectrophotometer, VARIAN)를 이용하여 흡광도를 측정하였다. 색도 제거율은 흡광광도계로 190~900 nm의 파장을 측정하여 가장 높은 흡광도를 나타내는 파장에서의 흡광도 변화를 이용하여 나타내었다. pH는 0.1 M HCl과 0.1 M NaOH 용액을 사용하여 조정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 황토주입량에 따른 Acid Orange II의 색도제거

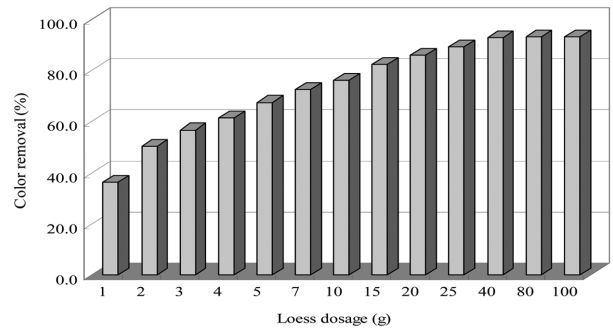


Fig. 2. Effect of loess dosage on the color removal of Acid Orange II on loess (reaction time: 60 min, agitation rate: 200 rpm, initial Acid Orange II concentration: 20 mg/L, pH 6.5, loess particle size \leq 45 μ m, and Temp.: 30°C).

황토주입량과 색도제거의 상관관계를 파악하기 위하여 황토 주입량을 1~100 g으로 변화시켜 가며 색도제거율을 측정하였다. pH는 Acid Orange II용액의 pH인 6.5로 설정하여 실험을 수행하였다. Fig. 2의 결과에서 나타난 바와 같이 황토주입량이 증가할수록 색도제거율도 꾸준히 증가하였다. 황토주입량 1~40 g 주입시 색도는 36.2~92.7%의 제거효율을 나타내었다. 이것은 황토의 주입량이 증가할수록 반응표면적과 흡착 site의 수가 증가하기 때문인 것으로 판단된다(Nadaroglu et al., 2010). 반면, 40 g 이상의 주입시에는 색도제거율의 변화가 거의 없어 40 g에서 평형상태에 도달한 것으로 판단된다. 이것은 Acid Orange II의 색도를 야기하는 물질의 거의 대부분이 황토표면에 결합되었기 때문이며 황토 표면과 Acid Orange II 용액 내의 염료분자가 평형상태에 도달하였다는 것을 의미한다(Akkaya and Özer, 2005; Bai and Abraham, 2001). 따라서 이후 실험에서는 적정 황토주입량을 40 g으로 설정하였다.

3.2. 교반시간에 따른 Acid Orange II의 색도제거

적정 교반시간을 파악하기 위해 교반배양기의 교반 시간을 0~60분 사이에서 일정시간 간격으로 변화시켜 교반한 후 색도제거율을 분석하였다. 색도제거율은 교반초기에 급격히 증가하여 약 5분경에 거의 평형상태에 근접하였으며 교반시간 10분 이후로는 약 92%의 제거율을 유지하며 평형상태를 나타내었다. 따라서 적정 반응시간은 약 10분이 타당할 것으로 판단하여 이후 실험에서는 10분의 반응시간을 적용하였다.

3.3. 교반속도에 따른 Acid Orange II의 색도제거

교반속도는 bulk solution에서 용질의 분포에 영향을 미치기 때문에 흡착반응에서 중요한 요소 중 하나이다(Sağ and Aktay, 2000). 또한 교반속도는 두개의 다른 상, 즉 고체 흡착제인 황토와 액상의 피 흡착제인 Acid Orange II 용액의 접촉을 원활하게 하는 난류를 형성할 수 있으므로 중요한 반응 변수 중 하나이기도 하다(Larous et al., 2005).

교반 배양기의 교반속도(rpm)가 색도제거에 미치는 영향을 파악하기 위해 교반기의 회전속도(rpm)를 50, 100, 150,

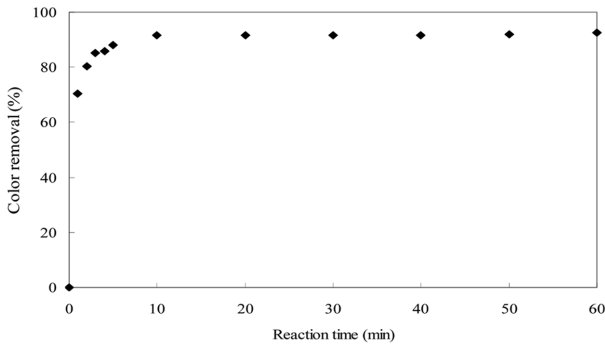


Fig. 3. Effect of reaction time on the color removal of Acid Orange II on loess (agitation rate: 200 rpm, initial Acid Orange II concentration: 20 mg/L, pH 6.5, loess dose: 40 g, loess particle size $\leq 45 \mu\text{m}$, and Temp.: 30°C).

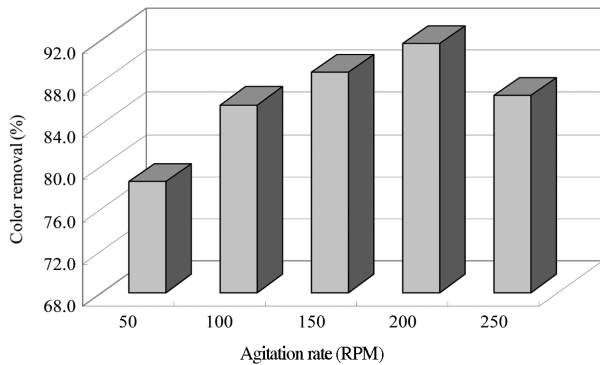


Fig. 4. Effect of agitation rate on the color removal of Acid Orange II on loess (pH 6.5, initial Acid Orange II concentration: 20 mg/L, loess dose: 40 g, reaction time: 10 min, loess particle size $\leq 45 \mu\text{m}$, and Temp.: 30°C).

200, 250로 변화시켜 실험을 수행한 결과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 50~200 rpm의 범위에서는 rpm이 증가할수록 색도제거율도 증가하였다. 반면, 교반속도가 250 rpm에서는 색도제거율이 오히려 감소되었다. 교반속도가 낮은 경우 황토입자와 시료내의 색도 유발 물질과의 접촉이 원활하지 않아 처리효율이 낮아질 수 있으며, 반면 과도한 교반은 황토입자에 응집 또는 흡착되었던 색도물질이 탈리됨으로써 색도제거율이 오히려 감소하는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 높은 교반속도에서는 강한 전단력이 흡착과정을 방해할 수 있으며 또한 흡착제인 토양입자에 물리적인 손상을 야기할 수 있기 때문인 것으로 판단된다(Kamari et al., 2009) 따라서 50 rpm 이하 또는 250 rpm이상의 교반은 지양하여야 할 것으로 판단되며 본 연구에서는 200 rpm의 교반속도가 색도제거에 가장 효율적인 것으로 나타났다.

3.4. Acid Orange II의 초기농도에 따른 색도제거

초기 염료 농도는 액상과 고상에서 물질전달의 저항을 극복하는데 필요한 driving force를 제공하는데(Hameed and Hakimi, 2008) 염료농도가 증가하면 흡착제와 염료사이의 물질전달 저항이 감소하며 접촉이 용이하게 된다. 초기농

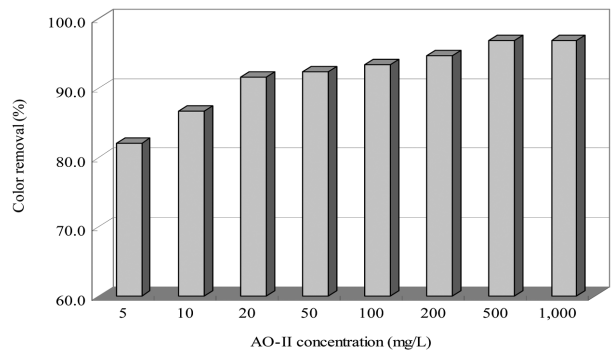


Fig. 5. Effect of initial Acid Orange II on the color removal of Acid Orange II on loess (reaction time: 10 min, agitation rate: 200 rpm, loess dose: 40 g, pH 6.5, loess particle size $\leq 45 \mu\text{m}$, and Temp.: 30°C).

도가 증가하게 되면 흡착제 부근의 염료분자가 증가하게 되고 흡착될 가능성이 크게 되어 그 결과 흡착이 증가하게 된다.

Acid Orange II의 농도에 따른 색도제거 정도를 파악하기 위해 Acid Orange II의 초기농도를 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1,000 mg/L로 조정하여 실험을 수행하였다. Fig. 5의 결과에서 나타난 바와 같이 초기농도가 증가할수록 색도제거율도 증가하였는데 초기농도가 5~500 mg/L로 증가함에 따라 색도제거율도 82.0~96.9%로 점차 증가되었다. 반면 초기농도가 1,000 mg/L일 경우는 색도제거율이 더 이상 증가하지 않고 96.8%를 나타내었다. 따라서 앞서 기술된 변수들에 대한 실험 조건하에서는 500 mg/L에서 가장 높은 색도제거율을 나타내었다.

3.5. 황토 입자경에 따른 Acid Orange II의 색도제거

황토의 입자경이 색도제거에 미치는 영향을 파악하기 위해 황토입자를 9가지 크기(45 μm 미만, 45~75 μm , 76~106 μm , 107~149 μm , 150~180 μm , 181~250 μm , 251~355 μm , 356~425 μm , 426~850 μm)로 체거름하여 40 g씩 시료에 주입하여 교반후의 색도제거율을 분석하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 황토입자경이 작을수록 색도제거율은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 입자경이 작을수록 반응 표면적이 증가하여 흡착에 보다 유리하기 때문으로 판단된다. 황토입자 크기가 425 μm 에서 46 μm 의 범위에서는 입자경이 작을수록 색도제거율이 증가하였으나 45 μm 미만과 426 μm 이상의 크기에서는 색도제거율이 각각 96.9%와 73.9%로 더 이상 증가하거나 감소하지 않았다. 따라서 입자 크기를 45~75 μm 로 유지함으로써 최적의 제거효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

3.6. pH에 따른 Acid Orange II의 색도제거

흡착에 관련된 문헌자료에 의하면 용액의 pH는 흡착제의 표면전하와 피 흡착제의 이온화에 영향을 미치기 때문에 흡착공정에서 중요한 변수 중 하나로 언급되고 있다(Gong et al., 2005; Imamoglu and Tekir, 2008; Waranusantigul et al., 2003).

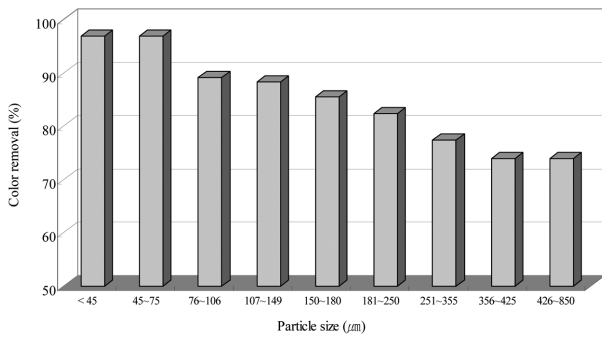


Fig. 6. Effect of loess particle size on the color removal of Acid Orange II on loess (reaction time: 10 min, agitation rate: 200 rpm, loess dose: 40 g, pH 6.5, initial Acid Orange II concentration: 500 mg/L, and Temp.: 30°C).

pH 변화에 따른 색도제거율을 파악하기 위하여 Acid Orange II 용액의 pH를 산성, 중성, 알칼리성 영역인 2.12~13.03로 변화시켜 실험한 결과 산성, 중성, 알칼리성 영역의 순으로 제거율이 높게 나타났다. 이러한 경향은 강한 산성 조건에서 흡착제인 황토 표면은 (+) 전하를 띠게 되어 (-) 전하를 띤 염료 분자에 대해 강한 인력이 작용하게 되기 때문인 것으로 판단되며, 이는 다양한 피 흡착제에 대한 흡착 실험의 문헌자료(Oze et al., 2006; Palanisamy and Sivakuma, 2009)에서도 동일한 결과를 제시하고 있다. pH 2.12에서 12.11의 범위에서는 색도제거율이 완만하게 감소하는 경향을 나타내었으나 pH 13.03에서는 색도제거율이 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 알칼리성 조건에서는 황토 표면이 (-) 전하를 띠게 되어 (-) 전하를 띤 염료 분자에 대해 강한 반발력의 작용으로 제거율이 감소하는 것으로 판단된다. Palanisamy and Sivakuma (2009)와 Ozer 등(2006)이 음이온 염료인 Acid Blue 290와 Acid Blue 324로 수행한 연구결과에서도 pH가 높을 경우 제거율은 감소되는 결과를 나타내었다. 색도제거율은 pH 2.12에서 가장 높은 98.4%, pH 13.03의 높은 알칼리성 영역에서는 가장 낮은 50.2%를 나타내었다. Acid Orange II의 색도제거율만을 고려한다면

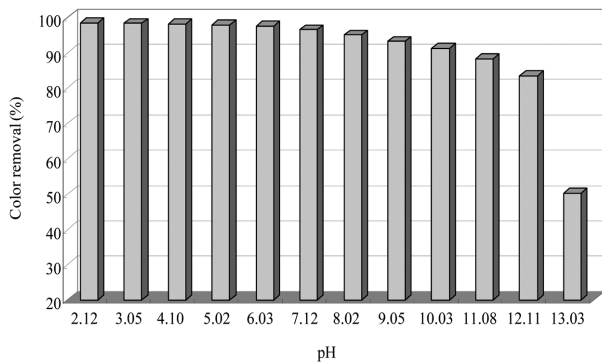


Fig. 7. Effect of pH on the color removal of Acid Orange II on loess (agitation rate: 200 rpm, initial Acid Orange II concentration: 500 mg/L, loess dose: 40 g, loess particle size: 45~75 μm, reaction time: 10 min and Temp.: 30°C).

용액의 pH를 매우 낮게 하여 최대의 효율을 유도할 수 있을 것이다. 하지만 Acid Orange II 용액 자체의 pH와 pH 2.12에서의 제거율 차이가 약 1.5% 정도로 크지 않고 강산성 조건을 맞추기 위한 비효율적 측면(약품주입, 비용 등)과 환경적 측면(처리수를 최종적으로 공공수계로 방류시 낮은 pH 문제, pH 중화 필요성)을 고려한다면 pH 조정 없이 용액 자체를 그대로 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3.7. Adsorption kinetic

용액의 흡착 mechanism을 설명하기 위해 다양한 kinetic 모델들이 사용되어 왔다. 이들 kinetic 모델들은 방류수처리 공정의 설계와 최적화에 유용하게 적용된다(Palanisamy and Sivakumar, 2009). 본 연구에서는 황토에 의한 Acid Orange II의 흡착 mechanism을 살펴보기 위해 pseudo-first-order와 pseudo-second-order kinetic model을 이용하였다. pseudo-first-order kinetic model은 고체상과 액체상의 흡착 mechanism을 설명하기 위해 Lagergren (1898)에 의해 제안되었으며 반응식은 식 (1)과 같다.

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - (k_1 t / 2.303) \tag{1}$$

식 (1)에서 q_t 는 반응시간 t 에서의 흡착 용량 (mg/g), k_1 은 반응상수(min^{-1})를 각각 나타내며, k_1 , q_e 는 $\log(q_e - q_t)$ 와 t 의 graph에서 기울기와 절편으로부터 결정된다. Fig. 8과 Table 1에 결과를 요약정리 하였다.

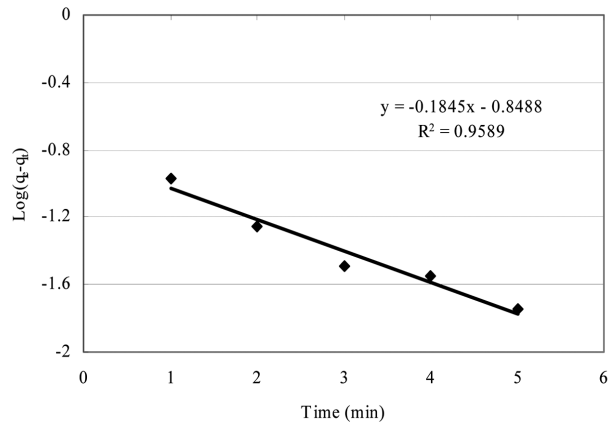


Fig. 8. Pseudo-first-order plot for the adsorption Acid Orange II on to loess effect of initial Acid Orange II concentration on the adsorption of Acid Orange II on loess (initial Acid Orange II concentration: 20 mg/L, agitation rate: 200 rpm, initial Acid Orange II concentration: 20 mg/L, pH 2.12, loess dose: 40 g, loess particle size: 45~75 μm, and Temp.: 30°C).

pseudo-second-order kinetic model (Ho and McKay, 1999)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + 1/q_e t \tag{2}$$

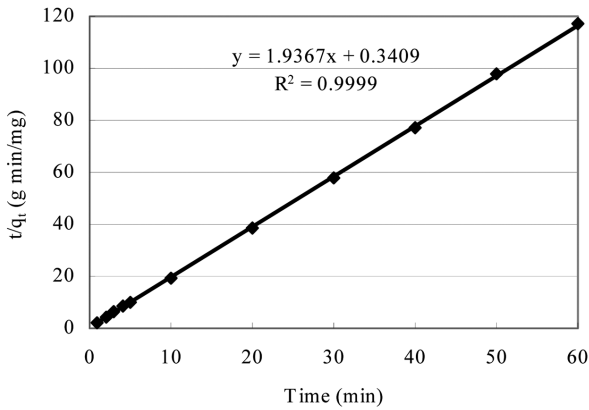


Fig. 9. Pseudo-second-order plot for the adsorption Acid Orange II on to loess effect of initial Acid Orange II concentration on the adsorption of Acid Orange II on loess (initial Acid Orange II concentration: 500 mg/L, agitation rate: 200 rpm, pH 2.12, loess dose: 40 g, loess particle size: 45~75 μm , and Temp.: 30°C).

식 (2)에서 k_2 는 pseudo-second-order rate 상수(g/mg min)를 나타내며 k_2 와 q_e 값은 t/q_t 와 t graph의 절편 및 기울기로부터 각각 산정된다. Fig. 9와 Table 1에 결과를 요약정리하였다. 만약 흡착반응이 2차식을 따른다면 t/q_t 와 t 의 plot은 선형관계를 갖는다. Fig. 9와 Table 1에 요약된 바와 같이 data는 pseudo-second-order에 더 적합한 것으로 판단된다.

3.8. Adsorption isotherms

황토의 Acid Orange II 흡착특성을 파악하기 위해 등온흡착모델을 적용하였다. 등온흡착식은 고상과 액상사이에서 피흡착제의 흡착평형상태를 잘 설명하기 때문에 흡착공정의 설계변수와 최적화를 위해 사용된다. 다양한 등온흡착식 중 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되고 있는 Langmuir 및 Freundlich식을 고려하였다.

Langmuir 등온흡착식은 흡착제의 최대 흡착능력을 평가하기 위해 종종 사용되고(Nadaroglu et al., 2010), 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m \cdot K_L} + \frac{C_e}{q_m} \tag{3}$$

식 (3)에서 q_e (mg/g)는 평형상태에서 흡착제의 흡착량, q_m (mg/g)은 Acid Orange II의 최대흡착량, C_e (mg/L)는 평형상태에 도달한 Acid Orange II 농도, K_L (L/mg)은 평형상수를 나타낸다.

한편 Freundlich 등온흡착식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$\ln q_e = \ln K_F + 1/n \ln C_e \tag{4}$$

q_e (mg/g)는 평형상태에서 흡착제의 흡착농도, C_e (mg/L)는 피흡착제의 평형농도, K_F (mg/g)와 n 은 Freundlich 상수를 나타낸다(Mohanthy et al., 2006).

pH 2.12, 황토주입량 40 g, 교반속도 200 rpm, 황토 입자경 45~75 μm , 온도 30°C의 조건에서 각 등온흡착반응식의 선형식으로 부터 도출된 등온흡착반응 상수들을 Table 2에 나타내었다. Table 2의 결과에서 보는 바와 같이 Freundlich 등온흡착식이 Langmuir식 보다 황토의 Acid Orange II 흡착특성을 보다 잘 나타내는 것으로 판단된다.

Table 2. Adsorption isotherm constants for adsorption of Acid Orange II

Langmuir isotherm constant		Freundlich isotherm constant	
q_m (mg/g)	0.0339	K_F	0.0067
K_L (L/mg)	2.5754	n	0.6856
R^2	0.9147	R^2	0.9886

4. 결론

다양한 반응변수들의 실험을 통해 주변에서 흔하게 얻을 수 있는 황토가 반응성 염료인 Acid Orange II의 색도제거를 위한 흡착제로서 적용할 수 있는지를 파악하기 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

교반시간 10분에서 거의 평형상태에 도달하였으며 색도제거율은 91.6%를 나타내었다. 황토주입량의 증가에 따라 색도제거율 또한 36.2~93.0%로 증가하였으나 40 g 이상의 주입시에는 색도제거율에 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. Acid Orange II의 초기 농도가 증가함에 따라 색도제거율도 증가되나 500 mg/L 이상에서는 색도제거율이 증가되지 않았다. 황토의 입자경이 작을수록 색도제거율이 증가하였는데 45~75 μm 이하에서 96.9%의 최고효율을 나타내었지만 입자경이 더욱 작아지더라도 색도제거율은 동일하게 나타났다. 흡착제의 표면전하와 피 흡착제의 이온화에 영향을 미치는 pH는 산성, 중성, 알칼리성의 순으로 높은 색도제거율을 나타내어 pH 2.12에서 가장 높은 98.4%, 13.03의 높은 알칼리성 영역에서는 가장 낮은 50.2%의 색도제거율을 나타내었다. 한편 pH 3.05~6.03 범위에서는 색도제거율에 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 50~200 rpm 교반속도 범위에서는 교반속도가 증가할수록 색도제거율이 증가하였으나 과도한 교반속도에서는 오히려 제거율이 감소되는 것으로 나타났다. 또한 pseudo-second-order kinetic model과 Freundlich 등온흡착식이 황토의 Acid Orange II 흡착특성을 잘 나타내었다.

다양한 반응변수들의 실험결과로부터 황토가 Acid Orange

Table 1. A comparison of the pseudo-first-order and pseudo-second-order rate constants

Pseudo-first-order kinetic			Pseudo-second-order kinetic		
k_1 (min^{-1})	q_e (mg g^{-1})	R^2	$k_2 \times 10^2$ ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)	q_e (mg g^{-1})	R^2
0.425	0.142	0.7585	11.017	0.516	0.9999

II의 색도제거를 위한 흡착제로서 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김상범, 이명화, 김용진, 박철환, 이종래, 김경수(2007). 음식물 쓰레기 및 황토 혼합물의 열분해를 통한 수질정화용 다공성 담체 개발. *대한환경공학회지*, **29**(3), pp. 289-296.
- 백미화, 전해인, 이지애, 김동수(2009). 활성탄과 유리섬유를 흡착제로 이용한 아조염료 함유 폐수의 처리. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(3), pp. 370-374.
- 윤종섭, 김승현, 윤조희(2003). 황토살포에 의한 적조생물 제거. *대한환경공학회지*, **25**(3), pp. 358-363.
- Ahn, D. and Chang, W. (1999). Dyestuff wastewater treatment using chemical oxidation, physical adsorption and fixed bed biofilm process. *Process Biochem.*, **34**, pp. 429-439.
- Akkaya, G. and Özer, A. (2005). Biosorption of Acid Red 274 (AR 274) on *Dicranella varia*: determination of equilibrium and kinetic model parameters. *Process Biochem.*, **40**, pp. 3559-3568.
- Bai, R. S. and Abraham, T. E. (2001). Biosorption of Cr (VI) from aqueous solution by *Rhizopus nigricans*. *Bioresour. Technol.*, **79**, pp. 73-81.
- Brown, D. and Laboureur, P. (1983). The degradation of dyestuffs: Part I Primary biodegradation under anaerobic conditions. *Chemosphere*, **12**(3), pp. 397-404.
- Chung, K. T. and Cerniglia, C. E. (1992). Mutagenicity of azo dyes, structure-activity relationships. *Mutat Res.*, **277**, pp. 201-220.
- Couto, S. R., Dominguze, A., and Sanroman, A. (2001). Photocatalytic degradation of dyes in aqueous solution operating in a fluidizedbed reactor. *Chemosphere*, **46**, pp. 83-86.
- Dhodapkar, R., Rao, N. N., Pande, S. P., and Kaul, S. N. (2006). Removal of basic dyes from aqueous medium using a novel polymer: Jalshakti. *Bioresour. Technol.*, **97**, pp. 877-885.
- Ergene, A., Ada, K., Tan, S., and Katircioğlu, H. (2009). Removal of Remazol Brilliant Blue R dye from aqueous solutions by adsorption onto immobilized *Scenedesmus quadricauda*: Equilibrium and kinetic modeling studies. *Desalination*, **249**, pp. 1308-1314.
- Gong, R., Ding, Y., Li, M., Yang, C., Liu, H., and Sun, Y. (2005). Utilization of powdered peanut hull as biosorbent for removal of anionic dyes from aqueous solution. *Dye Pigments*, **64**, pp. 187-192.
- Hameed, B. H. and Hakimi, H. (2008). Utilization of durian (*Durio zibethinus* Murray) peel as low cost sorbent for the removal of acid dye from aqueous solutions. *Biochem. Eng. J.*, **39**, pp. 338-343.
- Ho, Y. S. and McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochem.*, **34**, pp. 451-465.
- Imamoglu, M. and Tekir, O. (2008). Removal of copper (II) and lead (II) ions from aqueous solutions by adsorption on activated carbon from a new precursor hazelnut husks. *Desalination*, **228**, pp. 108-113.
- Kamari, A., Wane Ngah, W. S., Chong, M. Y., and Cheah, M. L. (2009). Sorption of acid dyes onto GLA and H₂SO₄ cross-linked chitosan beads. *Desalination*, **249**, pp. 1180-1189.
- Kiriakidou, F., Kondarides, D. I., and Verykios, X. E. (1999). The effect of operational parameters and TiO₂-doping on the photocatalytic degradation of Azo-dyes. *Catalysis Today*, **54**, pp. 119-130.
- Koumanova, B. and Peeva-Antova, P. (2002). Adsorption of p-chlorophenol from aqueous solutions on bentonite and perlite. *J. Hazard. Mater.*, **90**, pp. 229-234.
- Lagergren, S. (1898). About the theory of so called adsorption of soluble substances, *K. Sevenska Vetenskapsakad Handl.*, **24**, pp. 1-6.
- Larous, S., Meniai, A. H., and lehocine, M. B. (2005). Experimental study of the removal of copper from aqueous solutions by adsorption using sawdust. *Desalination*, **185**, pp. 483-490.
- McCann, J. and Ames, B. N. (1975). *Proc. Natl. Acad. Sci., U.S.A.*
- Mohanthy, K., Naidu, J. T., Meikap, B. C., and Biswas, M. N. (2006). Removal of crystal violet from wastewater by activated carbons prepared from rice husk. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**, pp. 5165-5171.
- Nadaroglu, H., Kalkan, E., and Demir, N. (2010). Removal of copper from aqueous solution using red mud. *Desalination*, **251**, pp. 90-95.
- Ozer, A., Akkaya, G., and Turabik, M. (2006). Biosorption of Acid Blue 290 (AB 290) and Acid Blue 324 (AB 324) dyes on *Spirogyra rhizopus*. *J. Hazard. Mater.*, **135**, pp. 355-364.
- Pagga, U. and Brown, D. (1986). The degradation of dyestuffs: Part II Behaviour of dyestuffs in aerobic biodegradation tests. *Chemosphere*, **15**(4), pp. 479-491.
- Palanisamy, P. N. and Sivakumar, P. (2009). Kinetic and isotherm studies of the adsorption of Acid Blue 92 using a low-cost non-conventional activated carbon. *Desalination*, **249**, pp. 388-397.
- Rauf, N. and Tahir, S. S. (2003). Thermodynamic studies of Ni (II) adsorption onto bentonite from aqueous solution. *J. Chem. Thermodyn.*, **35**, pp. 2003-2009.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., and Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent, a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresour. Technol.*, **77**, pp. 247-255.
- Sağ, Y. and Aktay, Y. (2000). Mass transfer and equilibrium studies for the sorption of chromium ions onto chitin. *Process Biochem.*, **36**, pp. 157-173.
- Tahir, S. S. and Rauf, N. (2006). Removal of cationic dye from aqueous solutions by adsorption onto bentonite clay. *Chemosphere*, **63**, pp. 1842-1848.
- Tsai, W. T., Chang, C. Y., Ing, C. H., and Chang, C. F. (2004). Adsorption of acid dyes from aqueous solution on activated bleaching earth. *Colloid and Interface Sci.*, **275**, pp. 72-78.
- Viraraghavan, T. and Kapoor, A. (1994). Adsorption of mercury from wastewater by bentonite. *Appl. Clay Sci.*, **9**, pp. 31-39.
- Waranusantigul, P., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., and Upatham, E. S. (2003). Kinetics of basic dye (methylene blue) biosorption by giant duckweed (*Spirodela polyrrhiza*). *Environ. Pollut.*, **125**, pp. 385-392.