



Endüstriyel Sızıntı Suyundan Pb(II) Giderimi İçin Genleştirilmiş Perlit Kullanımı: Kinetik Çalışmalar

Fulya Aydın Temel*

Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 28200 Giresun, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Araştırma Makalesi

Geliş 08 Aralık 2017
Kabul 17 Ocak 2018

Anahtar Kelimeler:
Genleştirilmiş perlit
Adsorpsiyon
Kurşun
Arıtım
Kinetik.

*Sorumlu Yazar:

E-mail: fulya.temel@giresun.edu.tr

Ö Z E T

Bu çalışmada, genleştirilmiş perlit kullanılarak endüstriyel sızıntı suyundan adsorpsiyon yöntemi ile Pb(II) giderimi araştırılmıştır. Pb(II) gideriminde pH, temas süresi ve adsorbent miktarının etkisi değerlendirilmiştir. Adsorpsiyon mekanizmasını değerlendirmek için Elovich modeli, partikül içi difüzyon (Weber-Morris) ve yalancı ikinci derece reaksiyon kinetiği modeli olmak üzere üç kinetik model test edilmiştir. Sonuç olarak, genleştirilmiş perlit üzerine Pb(II) adsorpsiyonu için en iyi uyum gösteren kinetik model olarak yalancı ikinci derece reaksiyon kinetiği modeli tanımlanmıştır ($R^2 > 0.99$). Kimyasal adsorpsiyon, endüstriyel sızıntı suyundan kütle transferi yerine adsorpsiyon işleminin belirleyici aşamasıdır. Partikül içi difüzyon modelinden elde edilen verilere göre, adsorpsiyon birden fazla adımdan oluşmaktadır. Son kısımdaki adsorpsiyonun partiküller arası difüzyon olduğu gerçeğine dayanırken birinci bölümdeki adsorpsiyon film difüzyonudur. Pb(II)'nin genleştirilmiş perlit üzerindeki adsorpsiyonunda film difüzyonu ve partikül içi difüzyon işlemleri anlamlıdır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, genleştirilmiş perlitin endüstriyel sızıntı suyundan adsorpsiyon yoluyla Pb(II)'nin giderilmesi için etkili bir alternatif adsorbent olduğunu göstermektedir.

Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 6(3): 360-364, 2018

The Use of Expanded Perlite for Pb(II) removal from Industrial Leachate: Kinetic Studies

ARTICLE INFO

Research Article

Received 08 December 2017
Accepted 17 January 2018

Keywords:
Expanded perlite
Adsorption
Lead
Removal
Kinetik.

*Corresponding Author:

E-mail: fulya.temel@giresun.edu.tr

ABSTRACT

In this study, the removal efficiency of Pb(II) from industrial leachate was investigated by using expanded perlite by adsorption. The effects of pH, contact time, and adsorbent dosage were examined on the Pb(II) removal. The adsorption kinetics were tested to understand the adsorption mechanism using three kinetic models, i.e., Elovich, intraparticle diffusion, and the pseudo second order reaction kinetic models. As the result, the best conformity kinetic model for Pb(II) adsorption on expanded perlite was described as the pseudo second-order ($R^2 > 0.99$). It is indicated that chemisorption is the determining step of adsorption process rather than mass transfer from industrial leachate. According to the data obtained from intraparticle diffusion model, the adsorption is composed of more than one step. This can be attributed to the fact that the adsorption in the final portion was the intraparticle diffusion while the adsorption in the first portion was the film diffusion. Both film diffusion and intraparticle diffusion processes in the adsorption of Pb(II) on expanded perlite are significant. This study indicated that expanded perlite was an influential alternative adsorbent for the removal of Pb(II) by adsorption from industrial leachate.

Giriş

Ağır metal kirliliği küresel bir sorun oluşturan en önemli çevre problemlerinden biridir (Ozay ve ark., 2009; Deng ve ark., 2013). Ağır metaller biyolojik olarak parçalanamayan, ekosistemde kısa ve uzun vadede risk taşıyan ve canlıların dokularında birikebilen toksik kirleticilerdir (Saadat ve Karimi-Jashni, 2011). Ağır metal kirliliğinin temel kaynakları endüstrileşme, tarımsal aktiviteler, yanma olayları ve trafiktir (Akpomie ve Dawodu, 2014; Malamis ve Katsou, 2013).

Pb (II), ağır metaller arasında öncelikli bir kirletici olarak tanımlanan oldukça toksik bir metaldir (Modal, 2009). Pil imalatı, tabakhane, baskı, metal kaplama, petrol işleme, madencilik, seramik ve cam endüstrileri Pb(II) deşarj eden başlıca endüstrilerdir (Fan ve ark., 2009; Ahmad ve ark., 2009). Pb(II), insanlarda hepatit, anemi, sinir hastalıkları, nefrit sendromu ve böbrek yetmezliği gibi hastalıklara yol açabilmektedir (Naiya ve ark., 2009; Karatas, 2012; Xu ve ark., 2008). Ağır metal giderim için kimyasal çöktürme, flotasyon, iyon değiştirme, elektrokimyasal arıtım, solvent ekstraksiyonu, membran filtrasyon, elektroliz, ters ozmos, koagülasyon-flokülasyon ve adsorpsiyon gibi pek çok yöntem kullanılmaktadır (Malamis ve Katsou, 2013; Paliulis, 2016; Olgun ve Atar, 2012). Bu teknolojiler arasında adsorpsiyon, su ve atıksudan ağır metal gideriminde etkili, pratik ve ekonomik yöntemlerden biridir (Olgun ve Atar, 2012). Son yıllarda, literatürde aktif karbona alternatif olarak daha düşük maliyetli ve yüksek metal adsorpsiyon kapasitesine sahip olan pirinç çeltiği (Ponnusami ve ark., 2007), vermiculite (Turan ve Ozgonenel, 2013), zeolite (Aydın Temel ve Kuleyin, 2016), diatomit (Salman ve ark., 2016), gyttja (Aydın Temel, 2017) gibi pek çok doğal adsorbent materyallerin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan geliştirilmiş perlit ise çok önemli bir doğal materyaldir.

Çalışmanın amacı geliştirilmiş perlit kullanarak endüstriyel atık sızıntı suyundan adsorpsiyon yöntemi ile Pb(II) giderimini araştırmasıdır. Giderim verimi üzerinde pH, adsorbent dozu ve temas süresinin etkisi incelenmiş ve optimum değerler belirlenmiştir. Adsorpsiyon mekanizmasını ve adsorpsiyon karakteristik sabitlerini belirlemek için adsorpsiyon kinetik çalışmaları yürütülmüştür.

Materyal ve Metot

Endüstriyel Atık

Endüstriyel atık Çorum ilinde, Türkiye'nin önde gelen çelik, sfero ve pik döküm tesislerinden biri olan Kızılırmak Döküm San. ve Tic. A.Ş'den temin edilmiştir. Endüstriyel atıktan sızıntı suyu EPA'nın SW846'da yer alan TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) yöntemine göre oluşturulmuştur (EPA, 2008). Bu yöntemde, atık, 1: 20 oranında ekstraksiyon sıvısı ile özütlenmekte ve ardından, sıvı ve katı fazlar filtrasyon işlemi ile ayrılmaktadır.

Metal analizi için ekstraktların pH değeri, HNO₃ kullanılarak 2'nin altına düşürülmüştür. Numuneler analiz edilinceye kadar soğutma (4°C) altında saklanmıştır. Elde edilen endüstriyel sızıntı suyunun özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 Endüstriyel sızıntı suyunun özellikleri

Table 1 Properties of industrial leachate

Parametre	Değer
pH	4,98±0,11
E, İletkenlik, mS/cm	5,45±0,41
Zn, mg/L	367,25±23,43
Cu, mg/L	45,51±4,01
Pb, mg/L	24,43±3,43
Fe mg/L	15,81±2,21
Cd, mg/L	9,41±2,13

Adsorbent

Bu çalışmada kullanılan geliştirilmiş perlit örnekleri İzmir-Bergama'dan temin edilmiştir. Geliştirilmiş perlitin kimyasal kompozisyonu Tablo 2'de verilmiştir. Geliştirilmiş perlit örnekleri elektren geçirilmiş ve yürütülen deneylerde 1 mm partikül boyutuna sahip geliştirilmiş perlit kullanılmıştır.

Tablo 2 Geliştirilmiş perlitin kimyasal özellikleri

Table 2 Chemical characterization of expanded perlite

Bileşen	% w/w
Na ₂ O	3,29
MgO	0,18
Al ₂ O ₅	11,9
SiO ₂	72,9
P ₂ O ₅	0,02
CaO	0,79
TiO ₂	-
MnO	0,05
K ₂ O	4,47
Fe ₂ O ₃	0,53

Deneyel Prosedür

Adsorpsiyon denemeleri 250 mL'lik erlen içerisinde 100 mL endüstriyel sızıntı suyu ile oda sıcaklığında ve 200 rpm karıştırma hızı ile inkübatörlü çalkalayıcıda gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon sürecinin ardından vakum filtrasyonu ile filtre edilen endüstriyel sızıntı suyundaki Pb(II) konsantrasyonu APHA (1985)'te verilen standart yöntemlere göre atomik adsorpsiyon spektrofotometresi (UNICAM 929) kullanılarak ölçülmüştür (APHA, 1985), pH 1 M NaOH ve 1 M HCl ile dijital pH metre (Sartorius PB20) kullanılarak ayarlanmıştır. Adsorpsiyon verimi ve adsorbent birim ağırlığı başına adsorbe olan Pb(II) miktarı (q) sırasıyla Eşitlik 1 ve 2 aracılığıyla hesaplanmıştır,

$$Verim (\%) = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

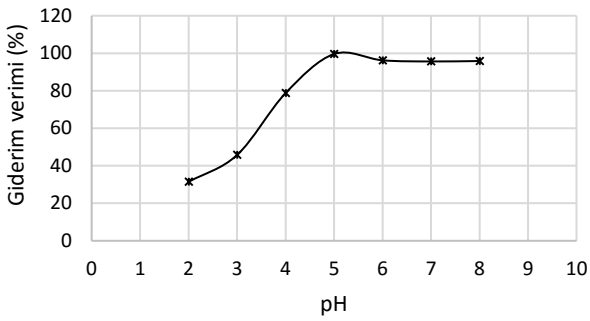
$$q (mg/g) = \frac{X}{m} = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (2)$$

Burada, C₀ ve C_e sırasıyla numune içinde bulunan başlangıçtaki ve arıtım sonrası Pb(II) konsantrasyonları (mg/L), V çözelti hacmi (L), m ise adsorbent miktarı (g)'dir,

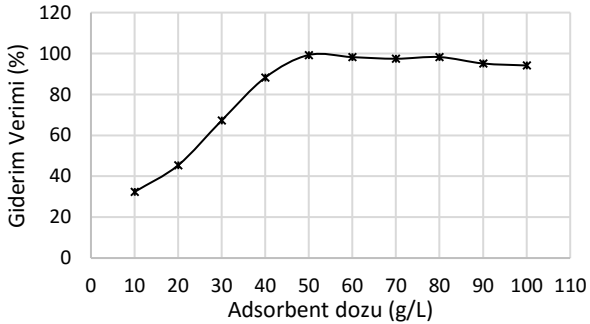
Bulgular ve Tartışma

pH'nin Etkisi

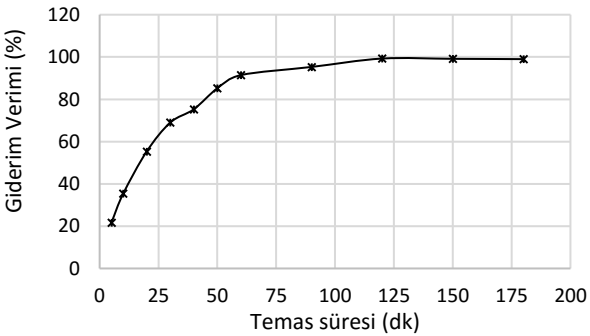
Su ve atıksulardan kirleticilerin giderimi için pH önemli bir parametredir, Adsorpsiyon prosesinde pH, adsorbent fonksiyonel gruplarının aktivitesini, iyonlaşma derecesini ve atıksuyun kimyasını etkilemektedir (Aydın Temel, 2017), pH'ın değişimleri adsorbe edilen iyonların türüne, adsorbent tipine ve atıksudaki davranışına bağlıdır (Bouljelben ve ark., 2009), Bu nedenle adsorpsiyon prosesinde farklı kirleticiler farklı pH değerlerinde optimum giderime ulaşmaktadır, Şekil 1'de geliştirilmiş perlitin Pb(II) adsorpsiyonunda pH'nin etkisi verilmiştir,



Şekil 1 Pb(II)'nin adsorpsiyonu üzerinde pH'nin etkisi
Figure 1 Effect of pH on Pb(II) adsorption



Şekil 2 Pb(II)'nin adsorpsiyonu üzerinde adsorbent dozunun etkisi
Figure 2 Effect of adsorbent dosage on Pb(II) adsorption



Şekil 3 Pb(II)'nin adsorpsiyonu üzerinde temas süresinin etkisi

Figure 3 Effect of contact time on Pb(II) adsorption

Ramesh ve ark, (2013) tarafından yapılan bir çalışmada benzer şekilde pH'daki artış ile adsorpsiyon kapasitesi artmıştır (Ramesh ve ark., 2013), Fakat alkali koşullarda, giderim verimi sabit kalmıştır, Bunun nedeni düşük pH'da pozitif yüklü Pb (II) türlerinin baskın olması ve geliştirilmiş perlit üzerindeki adsorpsiyonun daha hızlı gerçekleşmesidir, Fakat yüksek pH değerlerinde farklı yüklerle sahip Pb(OH)₂ ve Pb(OH)⁺ gibi pek çok kurşun türü vardır, Dolayısıyla kurşun uzaklaştırılması muhtemelen Pb(OH)₂'nin eşzamanlı olarak çöktürülmesi ve Pb(OH)⁺ nin emilmesi ile gerçekleştirilir (Gupta ve ark., 2011).

Genleştirilmiş Perlit Dozunun Etkisi

Adsorbent miktarı adsorpsiyon sürecini etkilemektedir, Adsorbent dozajındaki bir artış, temas yüzeyi ve adsorbat arasındaki etkileşimi artırır, Böylece, adsorbe edilen toplam kirletici miktarı artar (Malamis ve Katsou, 2013), Şekil 2'de Pb(II) adsorpsiyonunda adsorbent dozunun etkisi verilmiştir,

Pb(II) giderim verimi üzerinde adsorbent dozunun etkisini araştırmak için 150 rpm karıştırma hızında, 25°C sıcaklıkta 10-100 g/L adsorbent miktarlarında çalışmalar yürütülmüştür, Şekil 2'den görüldüğü gibi 50 g/L'lik optimum doza ulaşıncaya kadar adsorbent miktarının artmasıyla adsorpsiyon verimi artmıştır, 50 g/L'den sonra ise Pb(II) gideriminde dengeye ulaşılmıştır, Yürütülen diğer çalışmalarda optimum adsorbent dozu olarak 50 g/L kullanılmıştır,

Temas Süresinin Etkisi

Pb(II) adsorpsiyonu üzerinde temas süresinin etkisi değerlendirilmiştir, Bu denemelerde, belirlenen optimum pH değeri ve adsorbent dozu kullanılmıştır, Temas süresinin etkisini gösteren grafik Şekil 3'de verilmiştir,

Şekil 3'den görüldüğü gibi adsorpsiyon kapasitesi ilk dakikalarda hızlıca artmış ve sonra dengeye ulaşmıştır, Denge anından sonra temas süresinin artması adsorpsiyon performansı üzerinde önemli değişimlere yol açmamıştır, elde edilen bulgulara göre denge anındaki adsorpsiyon kapasitesi 0,649 mg/g'dır,

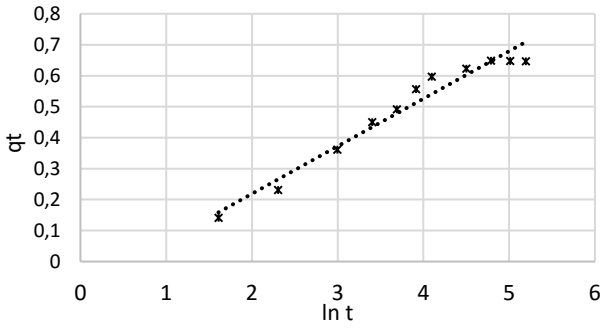
Kinetik Çalışmalar

Adsorpsiyon, adsorbent davranışını anlamak ve hız kontrol aşamasını değerlendiren adsorpsiyon mekanizmasını incelemek için çok sayıda kinetik model vardır, Bu çalışma kapsamında, geliştirilmiş perlitin Pb(II) adsorpsiyon oran sabitleri, Elovich, partikül içi difüzyon ve yalancı ikinci derece reaksiyon kinetiği modelleri ile hesaplanmıştır,

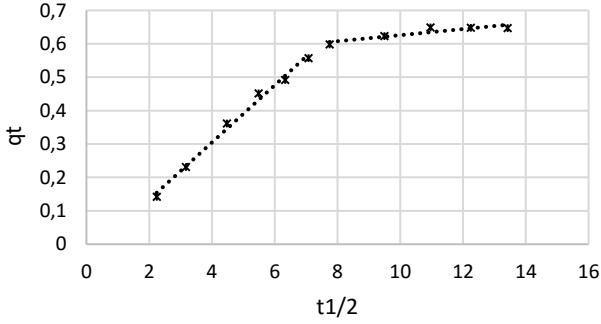
Elovich kinetik modeli kimyasal adsorpsiyonu karakterize etmektedir (Singha ve Das, 2011), Elovich eşitliği aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t \quad (3)$$

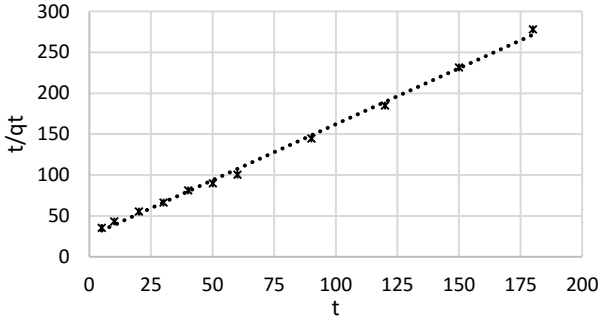
Burada, q_t , adsorpsiyonun t zamanındaki adsorpsiyon kapasitesi (mg/g); α , kimyasal adsorpsiyon hızını ifade eden Elovich model sabiti (mg/g dk); t , temas süresi (dk) ve β , kimyasal adsorpsiyon için aktivasyon enerjisi ve yüzey kapsamı için bir sabit (g/mg)'tir, Her iki model sabiti, q_t ile $\ln t$ arasındaki grafikten kesme ve eğimden belirlenmektedir (Şekil 4).



Şekil 4 Pb(II) adsorpsiyonu için Elovich kinetik modeli
Figure 4 Elovich model for Pb(II) adsorption



Şekil 5 Pb(II) adsorpsiyonu için partikül içi difüzyon kinetik modeli
Figure 5 Intraparticle diffusion model for Pb(II) adsorption



Şekil 6 Pb(II) adsorpsiyonu için yalancı ikinci derece reaksiyon kinetik modeli
Figure 6 Pseudo-second order kinetic model for Pb(II) adsorption

Tablo 3 Genleştirilmiş perlitin Pb(II) adsorpsiyonunda kinetik model parametreleri
Table 3 The parameters of kinetic models for Pb(II) adsorption

Kinetik Modeller	Parametre	Değer
Yalancı ikinci derece reaksiyon kinetiği modeli	q_e mg/g	0,731
	k_2 g/mg dk	0,074
	R^2	0,997
Elovich modeli	α mg/g dk	0,273
	β g/mg	6,510
	R^2	0,960
Partikül içi difüzyon modeli	$K_{id,1}$ mg/g sa	0,086
	C_1 mg/g	0,038
	R_1^2	0,992
	$K_{id,2}$ mg/g sa	0,009
	C_2 mg/g	0,535
	R_2^2	0,819

Film difüzyonu, partiküller arası difüzyon ve adsorpsiyon, adsorbent partiküllerine adsorbat transferini belirleyen basamaklardır. Bu adımlar adsorpsiyon dinamikleri hakkında bilgi verir, Weber ve Morris tarafından önerilen partikül içi difüzyon modeli aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır (Allen ve ark., 1989):

$$q_t = K_{id}t^{1/2} + C \quad (4)$$

Burada, q_t , adsorpsiyonun t zamanındaki adsorpsiyon kapasitesi (mg/g); K_{id} , partikül içi difüzyon modelinin hız sabiti (mg/g sa); t , temas süresi (sa); C , sınır tabakası kalınlığı ile ilgili bilgi veren bir sabit (mg/g)'tir, K_{id} ve C değerleri, $t^{1/2}$ ile q_t arasındaki grafiğin eğimi ve kesim noktasından hesaplanmaktadır (Şekil 5).

Yalancı ikinci derece kinetik modeli, atıksudan boya, organik madde ve metal iyonlarının adsorpsiyonu için test edilmiştir (Wen ve ark., 2006). Bu model, adsorpsiyon işleminde kimyasal izolasyonun baskın olduğu varsayımına dayanmaktadır (Liao ve ark., 2012; Lagergren, 1989), Ho ve McKay tarafından geliştirilen model aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Ho ve McKay, 1999):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

Burada, q_e ve q_t sırasıyla denge ve istenen t zamanındaki adsorpsiyon kapasiteleri (mg/g); t , temas süresi (dk), k_2 , model hız sabiti (g/mg dk). Model hızı parametreleri, t/q_t ile t arasındaki grafiğin eğimi ve kesim noktasından bulunmaktadır (Şekil 6).

Genleştirilmiş perlit ile Pb(II) adsorpsiyonuna ait kinetik model parametreleri Tablo 3'de verilmiştir, Tablo 3'den görüldüğü gibi yalancı ikinci derece reaksiyon kinetiği modeline ait verilerden elde edilen korelasyon faktörü değeri diğer modellerin değerlerinden daha büyüktür. Bununla birlikte, hesaplanan denge adsorpsiyon kapasitesi (q_e) deneylerden denge adsorpsiyon kapasitesine daha yakın bulunmuştur. Bu veriler, yalancı ikinci dereceden reaksiyon kinetiği adsorpsiyon mekanizmasının baskın olduğunu ve Pb(II)'nin genleştirilmiş perlit üzerindeki kimyasal adsorpsiyonunu açıklamaktadır.

Elovich ve yalancı ikinci derece reaksiyon kinetiği modelleri difüzyon mekanizmasını tam olarak açıklayamamaktadır. Bu nedenle partikül içi difüzyon modeli verileri önemlidir. Şekil 2'de görüldüğü gibi adsorpsiyon birden fazla adımda gerçekleşmiştir. Grafiğin ikili yapısı deneylerin ilk ve son aşamalarında adsorpsiyonun değişebilir ölçüde olmasından kaynaklanmıştır. Son aşama adsorpsiyonun partikül içi difüzyon olduğunu gösterirken ilk aşama adsorpsiyon film difüzyonu ile açıklanabilir (Aydın Temel, 2017; Kumar ve ark., 2011). Şekil 2'de görüldüğü gibi, ağır metal iyonlarının, adsorpsiyon işleminin başlangıcında parçacıklar arasında hızla dağılmış olduğunu ve daha sonra, partikül içerisindeki difüzyonun yavaşladığını göstermektedir. Bu çizgilerin orijinden sapması, partiküllerin taşınmasında tek hız sınırlayıcı adım olmadığı anlamına gelmektedir.

Sonuçlar

Çalışmada, endüstriyel atık sızıntı suyundan Pb(II) giderimi kesikli adsorpsiyon çalışmaları ile geliştirilmiş perlit kullanılarak araştırılmıştır, Çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Geliştirilmiş perlit, endüstriyel atık sızıntı sularından Pb(II) gideriminde etkili ve ucuz bir alternatif adsorbent materyaldir,
- Geliştirilmiş perlitin maksimum Pb(II) adsorpsiyon kapasitesi 0,649 mg/g'dır ve
- Yalancı ikinci dereceden reaksiyon kinetik modeli, deneysel verilerin daha iyi korelasyonlarını ortaya koymuştur, Bu model çıktıları, hız sınırlayıcı adımın difüzyon yerine kimyasal adsorpsiyon olabileceğini önermektedir.

Çalışmadan elde edilen bulgular bütünüyle değerlendirildiğinde, geliştirilmiş perlitin iyi bir adsorpsiyon performansı olduğu ve endüstriyel sızıntı suyundan Pb(II) giderimi için başarıyla kullanılacağı sonucuna varılmıştır,

Kaynaklar

Ahmad A, Rafatullah M, Sulaiman O, Ibrahim MH, Chii YY, Siddique BM, 2009. Removal of Cu (II) and Pb (II) ions from aqueous solutions by adsorption on sawdust of Meranti wood, *Desalination*, 247: 636-646

Akpomie KG, Dawodu FA, 2014. Efficient abstraction of nickel (II) and manganese (II) ions from solution onto an alkaline-modified montmorillonite, *Journal of Taibah University for Science*, 8(4): 343-356

Allen SJ, McKay G, Khader KYH. 1989, Intraparticle diffusion of a basic dye during adsorption onto sphagnum peat', *Environmental Pollution*, 56(1): 39-50

APHA, AWWA, WEF. 1985. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (18th ed.), Washington, DC

Aydın Temel F, Kuleyin A. 2016, Ammonium removal from landfill leachate using natural zeolite: kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies, *Desalination and Water Treatment*, 57: 23873-23892

Aydın Temel F. 2017. Kinetics and thermodynamics of the Ni (II) ions sorption from industrial wastewater by Gytja, *International Journal of Exergy*, 23(4): 279-297

Boujelben N, Bouzid J, Elouear Z. 2009, Adsorption of nickel and copper onto natural iron oxide-coated sand from aqueous solutions: study in single and binary systems, *Journal of Hazardous Materials*, 163(1): 376-382

Deng Y, Gao Z, Liu B, Hu X, Wei Z, Sun C. 2013. Selective removal of lead from aqueous solutions by ethylenediamine-modified attapulgite, *Chem, Eng, J*, 223: 91-98

EPA 2008. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods', EPA publication SW-846, Third Edition, Final Updates I (1993), II (1995), IIA (1994), IIB (1995), III (1997), IIIA (1999), IIIB (2005), IV (2008), and V (2015)

Fan QH, Li Z, Zhao HG, Jia ZH, Xu JZ, Wu WS. 2009. Sorption of Pb (II) on palygorskite from aqueous solution: effects of pH, ionic strength and temperature, *Appl, Clay Sci*, 45: 111-116

Gupta VK, Agarwal S, Saleh TA. 2011. Synthesis and characterization of alumina-coated carbon nanotubes and their application for lead removal, *Journal of Hazardous Material*, 185: 17-23

Ho YS, McKay G. 1999. Pseudo-second order model for sorption processes, *Process Biochemistry*, 34: 451-465

Karatas M. 2012. Removal of Pb (II) from water by natural zeolitic tuff: kinetics and thermodynamics, *J, Hazard, Mater*, 199: 383-389

Kumar PS, Ramalingam S, Kirupha SD, Murugesan A, Vidhyadevi T, Sivanesan S. 2011. Adsorption behavior of nickel(II) onto cashew nut shell: Equilibrium, thermodynamics, kinetics, mechanism and process design, *Chemical Engineering Journal*, 167: 122-131

Lagergren S. 1898. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe, *Kungliga Svenska Vetenskapakademien, Handlingar* 24 (7): 1-3

Liao P, Yuan S, Zhang W, Tong M, Wang K. 2012. Mechanistic aspects of nitrogen heterocyclic compound adsorption on bamboo charcoal, *J Colloid Interface Sci*, 382: 74-81

Malamis S, Katsou E. 2013. A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: examination of process parameters, kinetics and isotherms, *Journal of Hazardous Materials*, 252-253: 428-461

Mondal MK. 2009. Removal of Pb (II) ions from aqueous solution using activated tea waste: adsorption on a fixed-bed column, *J, Environ, Manage*, 90: 3266-3271

Naiya TK, Bhattacharya AK, Mandal S, Das SK. 2009. The sorption of lead (II) ions on rice husk ash, *J, Hazard, Mater*, 163: 1254-1264

Olgun A, Atar N. 2012, Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies for the adsorption of lead (II) and nickel (II) onto clay mixture containing boron impurity, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 18(5): 1751-1757,

Ozay O, Ekici S, Baran Y, Aktas N, Sahiner, N. 2009. Removal of toxic metal ions with magnetic hydrogels, *Water Res*, 43: 4403-4411

Paliulis D. 2016. Removal of formaldehyde from synthetic wastewater using natural and modified zeolites, *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(1): 251-257

Ponnusami V, Krithika V, Madhuram R, Srivastava SN. 2007. Biosorption of reactive dye using acid-treated rice husk: Factorial design analysis, *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2): 397-403

Ramesh ST, Rameshbabu N, Gandhimathi R, Srikanth Kumar M, Nidheesh PV. 2013. Adsorptive removal of Pb(II) from aqueous solution using nano-sized hydroxyapatite, *Appl Water Science*, 3: 105-113

Saadat S, Karimi-Jashni A. 2011. Optimization of Pb(II) adsorption onto modified walnut shells using factorial design and simplex methodologies, *Chemical Engineering Journal*, 173(3): 743-749

Salman T, Temel Aydın F, Turan NG, Ardali Y. 2016. Adsorption of lead (II) ions onto diatomite from aqueous solutions: Mechanism, isotherm and kinetic studies, *Global Nest Journal*, 18(1): 1-10

Singha B, Das SK. 2011. Biosorption of Cr(VI) ions from aqueous solutions: kinetics, equilibrium, thermodynamics and desorption studies, *Colloids and Surfaces: B, Biointerfaces*, 84(1): 221-232

Turan NG, Ozgonenel O. 2013. Optimizing copper ions removal from industrial leachate by explored vermiculite-A comparative analysis', *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44: 895-903

Wen D, Ho YS, Tang X. 2006. Comparative sorption kinetic studies of ammonium onto zeolite, *Journal of Hazardous Materials*, B133: 252-256

Xu D, Tan XL, Chen CL, Wang XK. 2008. Adsorption of Pb (II) from aqueous solution to MX-80 bentonite: effect of pH, ionic strength, foreign ions and temperature *Appl, Clay Sci*, 41: 37-46

