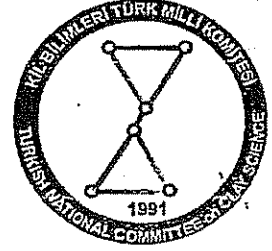




KİL'2009

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Kil Bilimleri Türk Milli Komitesi



14. Ulusal Kil Sempozyumu

Bildiriler Kitabı

Proceedings of 14th National Clay Symposium

KTÜ / TRABZON, 2009



KROM (VI)'NİN MODİFİYE EDİLMİŞ TİREBOLU BENTONİTİ ÜZERİNE ADSORPSİYONU

Chromium(VI) Adsorption onto Modified Tirebolu Bentonite

Duygu ÖZDEŞ¹, Celal DURAN¹, Volkan Numan BULUT¹,
Hasan Basri ŞENTÜRK¹, İbrahim ALP²

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, FEF, Kimya Böl., 61080, Trabzon

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, MMF, Maden Müh. Böl., 61080, Trabzon

e-posta: duyguozdes@hotmail.com, eduran@yahoo.com, volkannuman@yahoo.com, senturk@ktu.edu.tr,
ialp@ktu.edu.tr

ÖZET: Bu çalışmanın amacı; Cr(VI)'nın sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında adsorban olarak kil minerallerinin kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaçla; Tirebolu (Giresun) yöresine ait bentonit türü kil minerali katyonik bir yüzey aktif madde olan setil trimetil amonyum bromür (CTAB) ile modifiye edilmiştir. Daha sonra doğal ve organobentonitin karakterizasyonu X-ışınları difraktometresi (XRD) analizleri ile gerçekleştirilmiş ve pH, denge süresi, sıcaklık gibi çeşitli analitiksel parametrelerin adsorpsiyon üzerine etkileri incelenmiştir. Sonuçlardan optimum pH 4.0 ve denge süresi 1.0 saat olarak belirlenmiştir. Organobentonitin maksimum adsorpsiyon kapasitesi 51.0 mg/g olarak bulunmuştur. Sıcaklığın 0°C'den 40°C'ye yükseltilmesiyle adsorpsiyon veriminin 15.0 mg/g'dan 13.9 mg/g'a azalması, adsorpsiyon prosesinin ekzotermik bir işlem olduğunu göstermiştir. Ayrıca elde edilen verilerden, adsorpsiyon entalpisi (ΔH°); -4.96 kJ/mol ve entropisi (ΔS°); -8.94 J/mol.K olarak hesaplanmışken, Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG°), 0-40°C sıcaklık aralığında -2.50 ile -2.14 kJ/mol değerleri arasında bulunmuştur. Cr(VI)'nın organobentonit yüzeyinden desorpsiyonu, pH değeri 9'a ayarlanmış deiyonize suyla %90.3 oranında ve 0.1 M NaOH çözeltisi ile %85 oranında gerçekleşmiştir.

Bu sonuçlar, sulu çözeltilerden Cr(VI) gibi toksik ağır metallerin uzaklaştırılmasında adsorban olarak modifiye edilmiş kil minerallerinin etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: adsorpsiyon, atık su, ağır metaller, Krom (VI), bentonit

ABSTRACT: The objective of this study was to investigate the potential usage of clay minerals as adsorbents in removal of Cr(VI) from aqueous solutions. For that purpose; the bentonite, which was obtained from Tirebolu (Giresun) region, was modified with a cationic surfactant, cetyl trimethyl ammonium bromide (CTAB). And then the characterization of natural and organobentonite were carried out by X-Ray diffraction (XRD) analysis and the effects of some analytical parameters such as pH, contact time, temperature upon the adsorption process were evaluated. From the results, optimum pH was specified as 4.0 and the contact time was determined as 1.0 hour. The maximum adsorption capacity of organobentonite was obtained as 51.0 mg/g. As the temperature

was increased from 0 to 40 °C, the removal efficiency of Cr(VI) decreased from 15.0 to 13.9 mg/g, indicating that the adsorption process was exothermic. Also the adsorption enthalpy (ΔH°) and entropy (ΔS°) values were calculated as -4.96 kJ/mol and -8.94 J/mol.K, respectively. The Gibbs free energy changes (ΔG°) were in the range of -2.50 and -2.14 kJ/mol, between the temperature range of 0 and 40°C. The desorption of Cr(VI) from loaded-organobentonite was achieved in the ratio of 90.3% by using deionized water at pH 9 and 85% by using 0.1 M NaOH solution.

The results of this study demonstrated that the clay minerals can be used as an effective adsorbents for removal of toxic heavy metals such as Cr(VI) from aqueous solutions.

Key Words: adsorption, wastewater, heavy metal, chromium (VI), bentonite

GİRİŞ

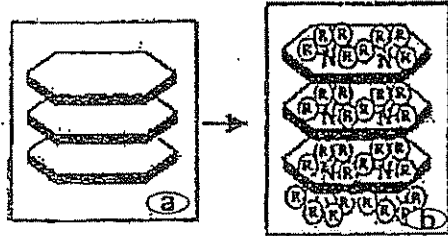
Ağır metaller, organik kirleticilerin aksine doğada biyolojik olarak parçalanamadıklarından canlı organizmalarda birikerek toksik etkilere neden olurlar. Bilinen en toksik ağır metallerden biri olan Cr(VI), CrO_4^{2-} veya HCrO_4^- şeklinde hücre membranlarından kolaylıkla difüzlenererek, insanlarda kanserojenik ve mutajenik etkilere neden olurlar (Krishna vd., 2000). Dünya Sağlık Örgütü tarafından içme sularında ve endüstriyel atık sularda bulunabilecek maksimum Cr(VI) değerleri sırasıyla 50 ve 200 µg/L olarak belirlenmiştir (World Health Organization (WHO), 2004). Bu nedenle endüstriyel atık sular çevreye verilmeden önce Cr(VI) ve diğer ağır metallerin uzaklaştırılması gerekmektedir.

Adsorpsiyon tekniği; ekonomik oluşu, kolay uygulanabilirliği ve çok düşük konsantrasyonlardaki metal iyonlarının bile sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasındaki etkinliği açısından son zamanlarda en yaygın olarak kullanılan ayırma ve saflaştırma yöntemlerinden biridir.

Adsorpsiyon işlemlerinde kullanılacak olan adsorbanlar; çevre için zararsız olmalı, ucuz ve kolay elde edilebilir olmalı, adsorbanlarla etkileşime girebilecek fonksiyonel gruplar bulundurmamalı, suda çözünmemeli, geniş yüzey alanına sahip olmalı, geri kazanımı kolay olmalı ve bilimsel olarak kullanılabilirliği kabul edilmiş olmalıdır. Bu özelliklerin hemen hemen tamamına sahip olan kil mineralleri, adsorpsiyon işlemlerinde en yaygın kullanılan doğal adsorbanlar arasındadır (Wang vd., 2007).

Bentonit, büyük ölçüde montmorillonitten izomorfik iyon değişimi ile türemiş olan hektorit, nontronit ve saponit gibi mineralleri içeren bir kil çeşididir (Grim, 1968). Bentonit mineralleri, yapısal iskeletlerinde sürekli bir negatif yük taşıdıklarından, Cr(VI) gibi, sulu çözeltilerde anyonik formda bulunan türlerle aralarında elektrostatik itmeler meydana gelir. Dolayısıyla doğal bentonit mineralleri anyonik türlerin adsorpsiyonu için uygun değildir. Bentonitlerin adsorplama kapasite-

lerini ve anyonik türlere karşı afinitelerini artırmak amacıyla organobentonitler sentezlenmektedir. Doğal bentonitin yapısındaki değişebilir inorganik katyonlar basit iyon değişim tepkimeleri ile birçok organik katyon ile yer değiştirebilir (Yıldız, 2002). Bu işlem için çoğunlukla, setil trimetil amonyum bromür (CTAB) gibi $(CH_3)_3NR^+$ yapısındaki alkil amonyum tuzları kullanılmaktadır. İyon değişim tepkimesi sonucunda, bentonit minerallerinin katmanları arasındaki değişebilir katyonlar yerine bu büyük organik katyonlar geçer ve bentonitin katmanları arasına yerleşerek bentonit yüzeyinin pozitif yüklenmesini sağlar (Şekil 1).



Şekil 1. a) Doğal kil yüzeyi b) Alkil amonyum tuzu ile modifiye edilmiş kil yüzeyi.

Böylece anyonik türlerin bentonit yüzeyine adsorplanması sağlanmış olur.

Bu çalışmada; Tirebolu (Giresun) yöresine ait bentonit türü kil minerali Cr(VI)'nın sulu çözeltilerden adsorpsiyon yöntemiyle uzaklaştırılmasında adsorban olarak kullanılmıştır. Doğal bentonit, CTAB

ile modifiye edilmiş ve XRD ile karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çeşitli deneysel şartların adsorpsiyon üzerine etkileri incelenmiş ve sonuçlardan bentonitin Cr(VI) için uygun bir adsorban olduğu görülmüştür.

MATERYAL ve YÖNTEM

Organobentonitin hazırlanması

Na-bentonit hazırlamak için 0.15 mm parçacık boyutuna kadar öğütülmüş olan bentonite, 1M Na_2CO_3 çözeltisi ilave edilip magnetik karıştırıcıda 800 rpm hızda 3 saat süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra süspansiyon haldeki karışım süzülerek deiyonize suyla birkaç kez yıkanmıştır. Elde edilen Na-bentonit $110^\circ C$ 'de etüvde (Nüve FN 400) bir gün bekletilerek kurutulmuştur.

Katyonik organobentonit, Na-bentonitin katyonik yüzey aktif madde (CTAB) ile iyon değiştirme tepkimesine girmesi sonucu sentezlenmiştir. Bu işlem için, kurutulmuş olan Na-bentonitten 20 g tartılıp, üzerine 200 mL %4'lük (a/v) CTAB çözeltisi ilave edilerek magnetik karıştırıcıda 24 saat süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra karışım süzülmüş ve elde edilen organobentonit deiyonize suyla yıkanıp $70^\circ C$ etüvde 4 saat bekletilerek kurutulmuştur (Al-Asheh vd., 2003).

Karakterizasyon

Doğal bentonit ve organobentonitin yüzey alanları daha önce yapılan bir

çalışmada sırasıyla 32.6 ve 26.2 mg/g olarak, doğal bentonitin katyon değişim kapasitesi (KDK) ise 33.0 meq/100g olarak bulunmuştur (Şentürk vd., 2009). Doğal ve organobentonit türlerinin mineral içerikleri ve kristal yapıları, Cu K α radyasyonu ve Ni filtre kullanılarak X-ışınları difraktometresinde (XRD-Rigaku D-Max III) belirlenmiştir. Ayrıca Langmuir izoterm çalışmaları sonucunda bentonitin maksimum adsorpsiyon kapasitesi bulunmuştur.

Adsorpsiyon ve Desorpsiyon Deneyleri

Adsorpsiyon deneyleri kesikli (batch) sistemle yürütülmüş olup deneyler için; 10 mL hacminde, 100 mg/L konsantrasyonundaki Cr(VI) çözeltileri, pH değerleri 0.1 M NaOH veya HCl çözeltileriyle 4.0'a ayarlandıktan sonra, 5 g/L derişimindeki organobentonit süspansiyonlarıyla mekanik çalkalayıcıda (Edmund Bühler GmbH) 400 rpm hızda dengeye ulaşınca kadar (1 saat) çalkalanmış ve karışım süzöldükten sonra süzöntüdeki Cr(VI) konsantrasyonu, 1,5 difenilkarbazit ile renklendirildikten sonra UV spektrofotometresiyle (Unicam) 540 nm dalga boyunda analiz edilerek belirlenmiştir.

Organobentonit üzerine adsorplanmış olan Cr(VI)'nın desorpsiyonu kesikli (batch) sistemle yürütölmüş olup deneyler için ilk aşamada; başlangıç konsantrasyonu

100 mg/L olan 10 mL hacmindeki Cr(VI) çözeltileri (pH 4), 5 g/L konsantrasyonundaki organobentonit süspansiyonlarıyla muamele edilmiştir. Dengeye ulaştıktan sonra Cr(VI) adsorplanmış organobentonit, karışımın süzölmesiyle alınmış ve süzöntüde kalan Cr(VI) konsantrasyonu UV spektrofotometresiyle analiz edilerek belirlenmiştir. İkinci aşamada; karışımından ayrılmış olan, Cr(VI) adsorplanmış organobentonit deiyonize suyla yıkandıktan sonra bir gün bekletilerek kurutulmuştur. Daha sonra sırasıyla 10 mL hacminde pH değeri 9'a ayarlanmış deiyonize su ve 0.1 M NaOH çözeltileri ile 1 saat 400 rpm hızda mekanik çalkalayıcıda muamele edilmiştir. Karışım süzölmüş ve süzöntüdeki Cr(VI) konsantrasyonu ölçölmüştür.

Desorpsiyondansonra

$$\% \text{ Desorpsiyon} = \frac{\text{çözeltidekalan Cr(VI)kons. (mg/L)}}{\text{Adsorplana Cr(VI)kons. (mg/L)}} \times 100$$

BULGULAR

Karakterizasyon

Doğal ve organobentonite ait XRD difraktogramları Şekil 2(a) ve 2(b)'de verilmiştir. Doğal bentonitin mineral yapısını saponit, hallosit, paligorskit ve muskovitin oluşturduğu buna karşılık organobentonitin illit, nakrit ve montmorillonit minerallerinden oluştuğı gözlenmiş olup modifikasyonla bentonitin mineral yapısının değıştiğı sonucuna varılmıştır.

Langmuir izoterm çalışmaları sonucunda organobentonitin maksimum adsorpsiyon kapasitesi 51.0 mg/g olarak bulunmuştur.

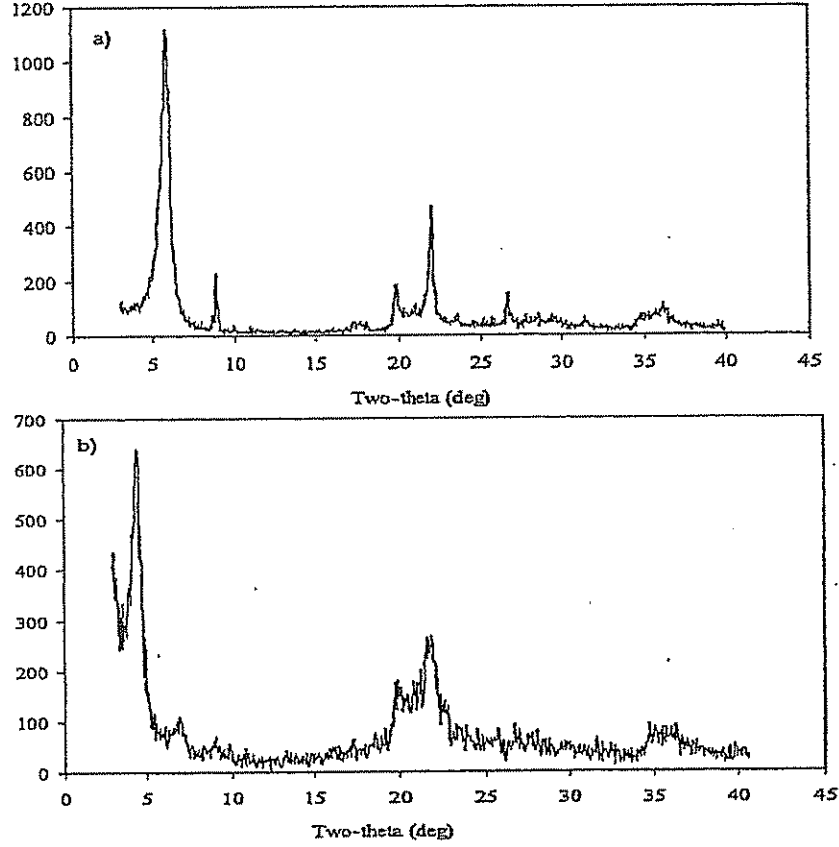
Başlangıç pH Etkisi

Adsorpsiyon ortamının pH'sı, adsorbanın yüzey yükünü ve adsorbatın iyonlaşma derecesini etkileyebilmektedir. Ayrıca metal iyonları OH⁻ ve H₃O⁺ iyonlarıyla yarışmalı olarak adsorban yüzeyine tutunduğundan, sulu çözeltinin pH'sı metal iyonlarının adsorpsiyonunu etkileyen en önemli parametrelerden biri olarak görülmektedir. Bu nedenle Cr(VI)'nın organobentonit üzerindeki adsorpsiyonuna başlangıç pH etkisi incelenmiş olup sonuçlardan; maksimum Cr(VI) adsorpsiyonunun (9.8 mg/g) pH 4'te gerçekleştiği ve pH'ın 4'ten 11'e yükseltilmesiyle, adsorpsiyon veriminin %80 oranında azaldığı gözlenmiştir (Şekil 3). Sulu çözeltilerde Cr(VI), ortamın pH'ına bağlı olarak asit kromat (HCrO₄⁻), kromat (CrO₄²⁻) ve dikromat (Cr₂O₇²⁻) şeklinde bulunmaktadır. Düşük pH değerlerinde Cr(VI)'nın baskın formu HCrO₄⁻ olup, organobentonitin yüzeyi H₃O⁺ iyonları derişimi bakımından daha yoğundur. Dolayısıyla HCrO₄⁻ iyonları ile pozitif yüklü adsorban yüzeyi arasındaki kuvvetli elektrostatik etkileşimin sonucu olarak adsorpsiyon verimi düşük pH'larda artmıştır. Yüksek pH değerlerinde ise Cr(VI)'nın baskın formu olan Cr₂O₇²⁻ iyonları ile negatif yüklü organobentonitin yüzeyi

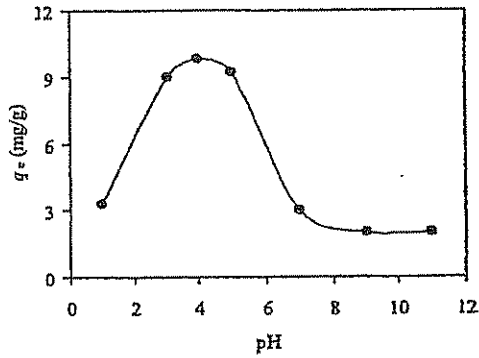
arasındaki elektrostatik itmeden dolayı ve aynı zamanda adsorpsiyon ortamında aşırı miktarda bulunan OH⁻ iyonlarının, organobentonit yüzeyindeki aktif adsorpsiyon bölgelerine tutunmak için Cr₂O₇²⁻ iyonlarıyla olan yarışmalı etkisi, adsorpsiyon veriminin azalmasına neden olmuştur (Pradhan vd., 1999). Sonraki deneyler için optimum başlangıç pH'ı 4 olarak seçilmiştir.

Denge Süresinin Optimizasyonu

Maksimum Cr(VI) adsorpsiyonu için gerekli olan denge süresini tespit edebilmek için; başlangıç konsantrasyonları 100 mg/L olan bir seri Cr(VI) çözeltisi (pH 4), 5 g/L konsantrasyonundaki organobentonit süspansiyonlarıyla, 1 ile 480 dakika zaman aralığında farklı çalkalama sürelerinde muamele edilmiştir. Sonuçlar Cr(VI) adsorpsiyonunun 3 aşamada gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 4). İlk aşamada (1-15 dakika zaman aralığında), organobentonit yüzeyindeki aktif adsorpsiyon bölgelerinin açık olmasından dolayı adsorpsiyon hızında çarpıcı bir artış gözlenmiştir. Bu aşamada Cr(VI)'nın fiziksel adsorpsiyonla (fizisorpsiyon) organobentonit yüzeyine tutunduğu söylenebilir. Takip eden daha yavaş adsorpsiyon (15-60 dakika zaman aralığında), organobentonitin gözenek içlerine doğru difüzyonunun gerçekleştiğini işaret etmektedir. Son aşamada (60-480 dakika zaman aralığında) ise adsorpsiyon.



Şekil 2. a) Doğal bentonite b) Organo-bentonite ait X-ışınları difraktogramları.



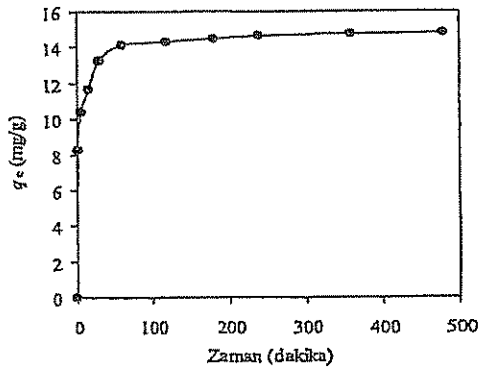
Şekil 3. Adsorpsiyon üzerine pH etkisi (Başlangıç Cr(VI) kons.: 100 mg/L, organobentonit kons.: 5 g/L, çalkalama süresi: 1 saat)

yüzeylerinin doygunluğa ulaşması sonucu adsorpsiyon hızında kaydadeğer bir değişme gözlenmemiştir. Bu nedenle Cr(VI)'nın organobentonit yüzeyine adsorpsiyonu için gerekli olan denge süresi 1 saat olarak belirlenmiştir.

Sıcaklığın Etkisi

Adsorpsiyon prosesi üzerine sıcaklığın etkisini incelemek için adsorpsiyon deneyleri 0-40°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık 0°C'den 40°C'ye

artırıldığında, adsorpsiyon verimi 15.0 mg/g'dan 13.9 mg/g'a azalmıştır (Şekil 5). Düşük sıcaklıklardan başlayarak, sıcaklığın artırılmasıyla adsorban yüzeyindeki gözeneklerin genişlemesi sonucu adsorpsiyon hızı belli bir seviyeye kadar artar. Ancak belli bir sıcaklık artışından sonra adsorpsiyon işlemi ekzotermikse hız azalırken, endotermikse hız artar. Dolayısıyla Cr(VI)'nın organobentonit yüzeyine adsorpsiyonunun ekzotermik bir işlem olduğu ve adsorpsiyonun düşük sıcaklıklarda daha uygun olduğu söylenebilir.



Şekil 4. Adsorpsiyon üzerine denge süresinin etkisi (Başlangıç Cr(VI) kons.: 100 mg/L, organobentonit kons.: 5 g/L, pH:4).

Termodinamik Parametreler

Termodinamik parametreler olan Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG°), entalpi (ΔH°) ve entropi değişimi (ΔS°)'nin incelenmesi Cr(VI)'nin organobentonit yüzeyine adsorpsiyonunun uygulanabilirliği ve

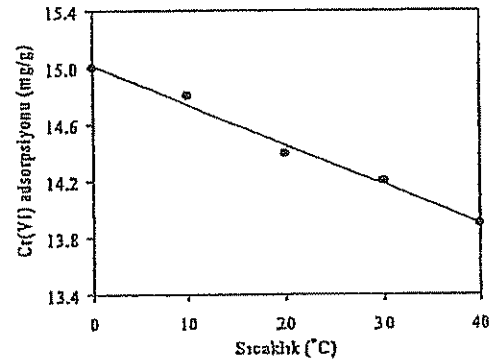
kendiliğinden gerçekleşebilirliğine karar verebilmek açısından önemlidir. ΔG° değeri aşağıdaki eşitliğin kullanılmasıyla hesaplanabilir (Smith & Ness, 1987);

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad (1)$$

R (8.314 J/mol.K); gaz sabiti, T (Kelvin); sıcaklık, K_d ise dağılım katsayısı olup aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır:

$$K_d = q_e / C_e \quad (2)$$

q_e (mg/L) ve C_e (mg/L) sırasıyla; dengede organobentonit yüzeyine adsorplanmış olan ve çözeltide kalan Cr(VI) konsantrasyonlarıdır.



Şekil 5. Adsorpsiyon üzerine sıcaklığın etkisi (Başlangıç Cr(VI) kons.:100 mg/L, organobentonit konsantrasyonu: 5 g/L).

Entalpi (ΔH°) ve entropi değişimi (ΔS°)'nin incelenmesi için aşağıdaki eşitliklerden yararlanılır;

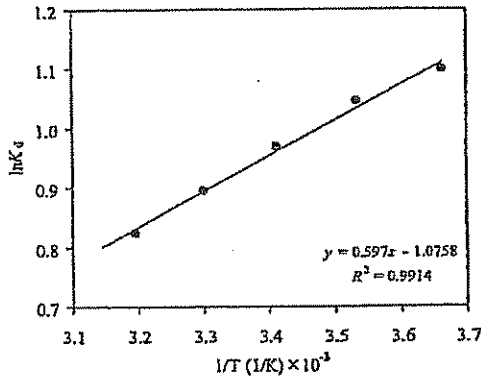
$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (3)$$

Eşitlik 3'ün düzenlenmesiyle;

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (4)$$

eşitliği elde edilir.

Termodinamik parametrelerden ΔH° ve ΔS° değerleri, $1/T$ 'ye karşılık $\ln K_d$ grafiği çizilerek, sırasıyla grafiğin eğiminden ve ordinatı kestiği noktadan hesaplanmış ve -4.96 kJ/mol ve 8.94 J/mol.K olarak bulunmuştur (Şekil 6). Negatif ΔH° değeri adsorpsiyon prosesinin ekzotermik bir işlem olduğunu göstermiş olup bu sonuç sıcaklık arttıkça Cr(VI) adsorpsiyonunun 15.0 mg/g'dan 13.9 mg/g'a azalmış olmasıyla desteklenmiştir. ΔH° değerinin mutlak büyüklüğü adsorpsiyonun çeşidi hakkında fikir verir. Adsorpsiyon olayı genel olarak iki şekilde meydana gelmektedir (Khormaei, vd., 2007):



Şekil 6. Termodinamik parametreler için $1/T - \ln K_d$ grafiği.

i) Fiziksel adsorpsiyon (Fizisorpsiyon) ii) Kimyasal adsorpsiyon (Kemisorpsiyon). Fiziksel adsorpsiyonda entalpi değişimi genellikle 5 kJ/mol'den daha fazla olamayacağından, Cr(VI)'nın organobentonit yüzeyine fizisorpsiyon mekanizmasıyla tutunduğu söylenebilir. Dolayısıyla Cr(VI) ile

organobentonit arasında oldukça zayıf etkileşimler olan Van der Waals kuvvetleri etkili olup, sıcaklığın artışıyla bu bağların kopması adsorpsiyon verimini azaltmaktadır. ΔS° değerinin negatif oluşu ise sistemin düzensizliğinin azalmasıyla açıklanabilir. ΔG° değerleri 0 , 10 , 20 , 30 ve 40 °C için sırasıyla; -2.50 , -2.46 , -2.36 , -2.25 ve -2.14 kJ/mol olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi serbest enerji değişimi çalışılan her sıcaklıkta sıfırdan küçük değere sahip olmakta ancak mutlak değer sıcaklık artışıyla azalmaktadır. Bu durum çalışılan sıcaklık aralığında Cr(VI)'nın organobentonit yüzeyine adsorpsiyonunun kendiliğinden gerçekleşen istemli bir olay olduğunu ancak sıcaklık arttıkça adsorpsiyon prosesinin istemliliğinin azaldığını göstermektedir.

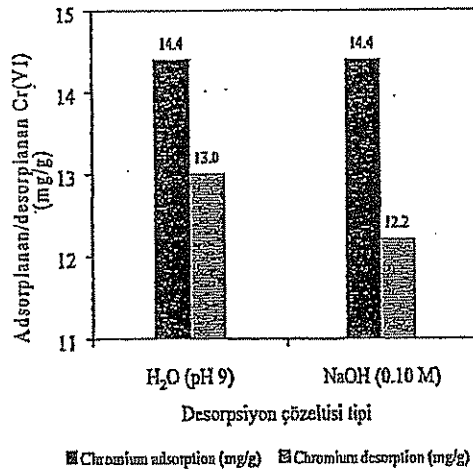
Cr(VI)'nın Desorpsiyonu

Desorpsiyon, adsorpsiyon işlemlerinde kullanılan adsorbanın rejenerasyonunu sağlayarak, sonraki işlemlerde tekrar kullanılmasına imkan verdiği için, adsorpsiyon prosesinin maliyetini azaltmak açısından önemlidir. Metal iyonlarıyla yüklenmiş olan adsorbanın desorpsiyon işleminden sonra orijinal haline tekrar dönebilmesi için kullanılacak olan desorpsiyon çözültüsünden zarar görmemesi gerekmektedir. Bu nedenle organobentonit üzerine adsorplanmış olan Cr(VI)'nın desorpsiyonu için pH değeri 9 ' ayarlanmış olan deiyonize

su ve 0.1 M NaOH çözeltisi kullanılmıştır (Şekil 7). Cr(VI)'nın desorpsiyonu, deiyonize suyla %90.3 oranında ve 0.1 M NaOH çözeltisi ile %85 oranında gerçekleşmiştir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Toksik ağır metallere biri olan Cr(VI)'nın sulardan ve atık sulardan adsorpsiyon yöntemiyle uzaklaştırılma-



Şekil 7. Cr(VI) desorpsiyonu.

smada, adsorban olarak modifiye edilmiş Tirebolu bentonitin kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada; doğal bentonit ve organobentonitin karakterizasyonu XRD analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyonun pH'ya bağlı olduğu ve maksimum adsorpsiyonun pH 4'te gerçekleştiği gözlenmiştir. Maksimum Cr(VI) adsorpsiyonu için gerekli olan denge süresi 1 saat olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın 0 °C'den 40 °C'ye artırılmasıyla, adsorpsiyon verimi 15.0 mg/g'dan 13.9 mg/g'a azalmıştır. Ayrıca termodinamik

çalışmalar, Cr(VI)'nın organobentonit üzerindeki adsorpsiyonunun kendiliğinden gerçekleşen, ekzotermik bir işlem olduğunu göstermiştir. Organobentonit üzerine adsorplanmış Cr(VI)'nın desorpsiyonu ise pH değeri 9'a ayarlanmış olan deiyonize su ve 0.1 M NaOH çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak; Cr(VI)'nın sulu çözeltilerden adsorpsiyonla giderilmesi için, CTAB ile modifiye edilmiş Tirebolu bentonitin oldukça etkili bir adsorban olarak kullanılabileceği görülmüştür. Yaygın olarak bulunan ve çok düşük maliyetli Tirebolu bentonitin toksik Cr(VI)'nın sulardan uzaklaştırılmasında kullanılması maliyeti oldukça düşürmüştür. Ayrıca adsorpsiyon deneylerinde kullanılan organobentonitin rejenerasyonu da gerçekleştirildiğinden adsorpsiyon işleminin maliyeti daha da azaltılmıştır.

KAYNAKLAR

- Al-Asheh, S., Banat, F., Abu-Aitah, L., 2003. Adsorption of phenol using different types of activated bentonites. *Separation and Purification Technology*, 33, 1-10.
- Grim, R.E. 1968. *Clay Mineralogy*. 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Khormaei, M., Nasernejad, B., Edrisi, M., Eslamzadeh, T., 2007. Copper biosorption from aqueous solutions by sour orange residue. *Journal of Hazardous Material* 149, 269-274.

- Krishna, B. S., Murty, D. S. R., Prakash, B. S. J., 2000. Thermodynamics of Chromium(VI) Anionic Species Sorption onto Surfactant-Modified Montmorillonite Clay. *Journal of Colloid and Interface Science*, 229, 230-236.
- Pradhan J., Das S.N., Thakur R.S., 1999. Adsorption of Hexavalent Chromium from Aqueous Solution by Using Activated Red Mud. *Journal of Colloid and Interface Science*, 217, 137-141.
- Smith, J.M., Ness, H.C.V., 1987. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, fourth ed., McGraw-Hill, Singapore.
- Şentürk, H. B., Özdeş, D., Gündoğdu, A., Duran, C., Soylak, M., 2009. Sulu Çözeltilerden Fenolün Organobentonit Üzerinde Adsorpsiyonla Uzaklaştırılması. 14. Ulusal Kil Sempozyumu, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon (baskıda).
- World Health Organization (WHO), 2004. *Guidelines for drinking-water quality (third ed.)*, Recommendations. WHO, Geneva, 1, 334-335.
- Wang, W., Chen, H., Wang, A., 2007. Adsorption characteristics of Cd(II) from aqueous solution onto activated palygorskite. *Separation and Purification Technology*, 55, 157-164.
- Yıldız, N., 2002. *Süperkritik Akışkan Ortamında Adsorbantların Rejenerasyonu*. Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Ankara.