



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



Kırmızı çamur içindeki skandiyum ve lityumun çözünme davranımlarının incelenmesi

Investigation of dissolution behavior of scandium and lithium from red mud

Hüseyin BAŞTÜRKCÜ^{a*}

^aEsan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, İstanbul, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Kırmızı Çamur,
Skandiyum, Lityum, İki
Kademe Liç, Kinetik.

ÖZ

Bu çalışma kapsamında, kırmızı çamurdan skandiyum ve lityumun atmosferik basınç altında, karıştırma liçi yöntemi ile asidik ortamda kazanımı incelenmiştir. Liç deneyleri 2 aşamada yürütülmüştür. Birinci aşamada görece yüksek pH değerinde Na ve Al gibi iyonik safsızlıklar uzaklaştırılmıştır. Birinci kademenin liç keki, katı-sıvı ayırımı takiben, ikinci aşama liç beslemesi oluşturmuş olup, sonucunda %95,1 Sc ve %94,7 Li çözünme verimleri elde edilmiştir. Her 2 kademe toplamı düşünüldüğünde ise Sc ve Li kazanımları sırasıyla %82,4 ve %86,5 olarak tespit edilmiştir. Liç kinetikleri incelendiğinde, Sc ve Li metallerinin hem kimyasal reaksiyon hem de kül film difüzyonu kontrolünde gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bu durumda, aktivasyon enerjileri Sc ve Li için sırasıyla 29,52 ve 30,22 kJmol⁻¹ olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, kırmızı çamur üzerinde doğrudan H₂SO₄ liçi yapıldığında fiziksel ve kimyasal açıdan ciddi sorunlarla karşılaşılırken, bu çalışmada önerilen 2 kademe liç ile alternatif bir çözüm üretilmekte ve yüksek katı oranında bile H₂SO₄ liçine olanak sağlanmaktadır.

Geliş Tarihi: 14.05.2020

Kabul Tarihi: 27.05.2021

Keywords:

Red Mud, Scandium,
Lithium, Two-Stage
Leaching, Kinetics.

ABSTRACT

In this study, scandium and lithium extractions were investigated using the atmospheric pressure agitation leaching method at acidic medium. The leaching tests were carried out at two stages. To remove the ionic impurities such as Na and Al first stage leaching was performed at relatively higher pH. Following solid-liquid separation of leach cake of the first stage leaching, it was subjected to the second stage leaching. The second stage leaching resulted in 95.1% Sc and 94.7% Li extractions. The overall Sc and Li recoveries were determined as 82.4% and 86.5%, respectively. Regarding the kinetic studies, it was understood that scandium and lithium leaching processes were controlled by a combination of chemical reaction and ash diffusion models. In this case, the activation energies were determined as 29.52 and 30.22 kJmol⁻¹, respectively for scandium and lithium. As a result, while direct H₂SO₄ leaching of red mud is a challenge due to physical and chemical problems, an alternative solution was suggested using H₂SO₄ even at high solids ratios.

1. Giriş

Kırmızı çamur, boksit cevherlerinden alüminyum üretiminde kullanılan Bayer prosesinin artığı olarak isimlendirilmektedir. 1 ton alüminyum üretiminden

1,5 ton kırmızı çamur ortaya çıkmaktadır (Zhang vd., 2011; Evans, 2015). Böylesine yüksek miktarlar göz önünde bulundurulduğunda yüksek alkaliniteye sahip bu artıkların depolanmasında ekonomik ve çevresel

*Başvurulacak yazar: Hüseyin BAŞTÜRKCÜ, hbaturku@gmail.com

açından riskler bulunmaktadır. Bu sebeple kırmızı çamurların yönetimi, alüminyum üreticileri için oldukça önemli bir konu olarak öne çıkmaktadır Liu vd., 2007; Wang vd., 2013a).

Yakın zamanda, kırmızı çamurlardan farklı ürünler eldesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Bunların arasından yapı malzemeleri, çimento ve cam seramik üretiminde kullanımı dikkat çekmektedir (Liu vd., 2012; Chen vd., 2013; Teixeira vd., 2014). Diğer yandan kırmızı çamurlar ikincil hammadde olarak da değerlendirilmekte olup, değerli bazı metallerin kazanımı çalışmaları da yer almaktadır. Literatür verilerine göre kırmızı çamurların ortalama kimyasal bileşimi %14-45 Fe, %5-14 Al, %1-9 Si, %1-6 Na ve %2-12 Ti olarak ifade edilmektedir. Nadir ve radyoaktif elementler arasında ise skandiyum (60-120 ppm), galyum (60-80 ppm), itriyum (60-150 ppm), uranyum (50-60 ppm) ve toryum (20-30 ppm) varlığından söz edilmektedir (Ercag ve Apak, 1997; Smirnov ve Molchanova, 1997; Kumar vd., 2006). Ek olarak, literatürde kırmızı çamurdan Li kazanımı üzerine detaylı çalışma olmamakla birlikte, bazı boksit cevherlerinin Li içeriklerine ilişkin birtakım bilgiler bulunmaktadır. Örneğin, Fransız Alplerinde

bulunan bazı boksit mercceklerinde 460-1.620 ppm arasında değişen Li içeriklerine rastlanmıştır. Çin'deki Dazhuyuan boksit yatağında ise 2.691 ppm'e varan Li içerikleri tespit edilmiştir (Verlaguet vd., 2011; Wang vd., 2013b; Christmann vd., 2015).

Kırmızı çamurlardan bu metallerin kazanımı için hidro ve/veya pirometalurjik yöntemler uygulanması gerekmektedir. Son yıllarda vanadyum, galyum ve seryum özelinde çalışmalar yapılmıştır (Okudan vd., 2015a, b; Abdulvaliyev vd., 2015; Gladyshev vd., 2015; Baral vd., 2016). Yapılan çalışmaların genel bir sonucu olarak, asit derişiminin artması ve katı oranının düşmesi ile birlikte metal çözünmelerinin arttığı dikkat çekmektedir. Bu durum, beraberinde yüksek oranda Fe ve Al, S, P, Na, Ca, Mg, Si gibi iyonların çözeltiye geçişine sebep olmaktadır. Yüklü çözeltide bulunan bu safsızlıkların uzaklaştırılması ise çözündürme sonrası gelen çöktürme, sementasyon veya solvent ekstraksiyon gibi aşamalarda gerçekleşmektedir. Bu aşamalarda değerli metallerin de safsızlıklarla birlikte hareket etmesi kayıplara yol açmaktadır (Fulford vd., 1991; Hammond vd., 2013; Borra vd., 2015). Yapılan bazı çalışmalara ilişkin detaylar Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Çizelge 1- Kırmızı çamur üzerinde yapılan literatür çalışmalarına ait özet.

Yazar	Detaylar
Ochsenkuhn-Petropulu vd. (1995)	Borat ve karbonat ile 1100° C'de 20 dk kavurma
	1,5 M HCl konsantrasyonunda liç
	Dowex-50 W X8 ile Fe, Al, Ti, Na uzaklaştırma
	HDHEHP (di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid) kullanılarak Sc-Y ayırımı
Ochsenkuhn-Petropulu vd. (1996)	H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , HCl
	0,5 M HNO ₃ ile %80 Sc, %96 Y verimi
	Kavurmanın gereksiz olduğu belirtilmiştir
Zhou vd. (2008)	6 M HCl ile 60°C sıcaklıkta 4 saat liç
	Yüklü çözeltide fazla miktarda Na, Fe, Al, Ti bulunmakta
	Aktif karbon ile modifiye edilmiş TBP (tri-butyl-phosphate) ile Sc kazanımı
Borra vd. (2016)	Sülfatlama-kavurma-liç prosesi
	700°C'de 1 saat sonunda Fe ve Al oksit forma geçmektedir
	48 saat liç sonucunda %60 Sc ve >80 nadir toprak elementi kazanımı
Deng vd. (2017)	Na tuzu ilavesi ile kavurma
	Kalsine ürün üzerinde manyetik ayırma
	Manyetik ürün, demir konsantresi olarak değerlendirilmiştir
	Non-manyetik kısma ise fosforik asit ile liç yapılmıştır
	Si zengin liç çözeltisi elde edilmiştir
	Liç keki ise alkali ortamda çözündürülerek Al kazanılmıştır
Alkali liç kekinde ise Sc ve Ti bulunmaktadır	

Yapılan çalışma, kırmızı çamurun skandiyum ile birlikte lityum açısından da olası bir kaynak olduğunu ortaya koymaktadır. Bu metallerle birlikte hareket eden safsızlıkların uzaklaştırılması ile de Sc ve Li kazanım verimlerinin artırılması amaçlanmıştır. Böylelikle, atmosferik basınç altında ve yüksek katı oranında H_2SO_4 liçinin uygulanabilirliği araştırılmış olup, bu işlem birbirini takip eden 2 aşama ile gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak Na, Ca, K ve Al gibi iyonik safsızlıkların uzaklaştırılması sağlanmıştır. Bu konuda yazara ait bir çalışma literatürde yer almaktadır (Baştürkçü, 2020). Aynı zamanda skandiyum ve lityumun kırmızı çamurdan kazanımında çözünme davranışı ilk defa ortaya konmuştur.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Malzeme

Kırmızı çamur numunesinin (Seydişehir) karakterizasyonu yapılırken, mineral fazlarını belirlemek amacıyla XRD (X-Işını Kırınım) yönteminden yararlanılmıştır. Kimyasal analiz ile elementlerin içeriğini tespit etmek için ise ICP (İndüktif olarak eşleşmiş plazma) yöntemi kullanılmıştır. Çizelge 2’de verilen sonuçlara göre, kırmızı çamur numunesinin %25,00 Fe, %9,45 Al ve

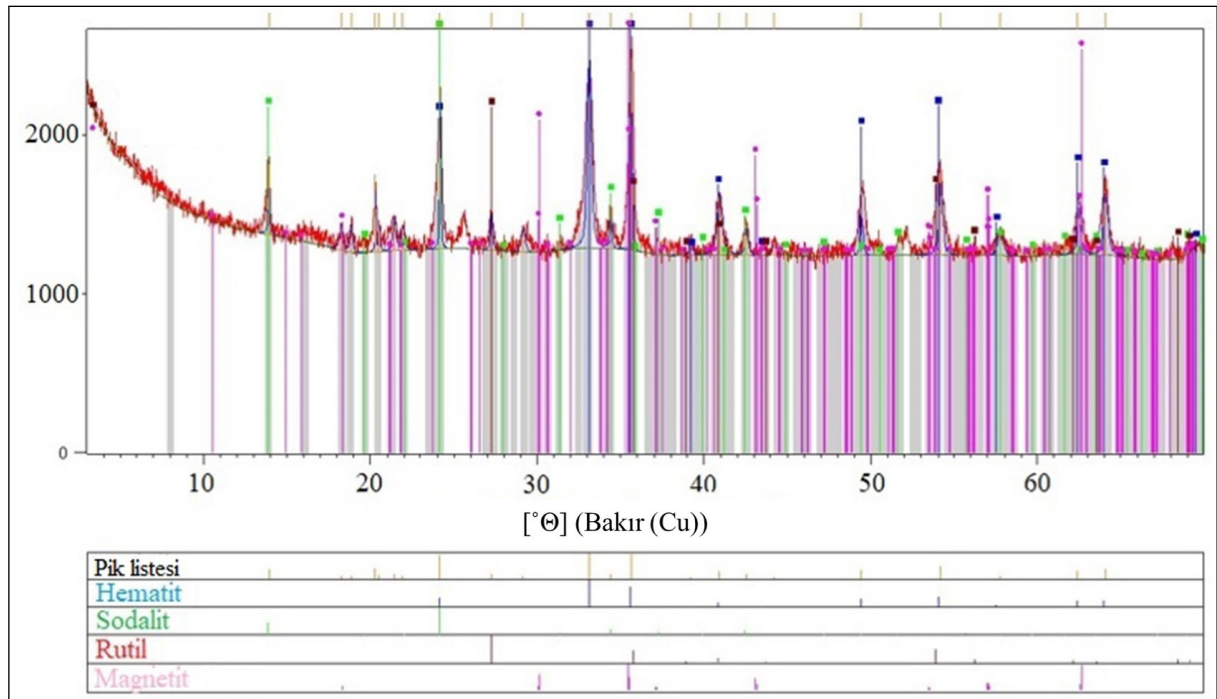
Çizelge 2- Kırmızı çamur numunesinin kimyasal analizi.

Element	İçerik
Fe ₂ O ₃ , %	35,7
Al ₂ O ₃ , %	17,9
TiO ₂ , %	4,9
Na ₂ O, %	9,7
CaO, %	1,7
K ₂ O, %	0,3
Sc, ppm	119
Li, ppm	165
KK, %	14,5

%7,17 Na içerdiği tespit edilmiştir. Ek olarak 120 ppm Sc ve 165 ppm Li bulunmakta olup, mineral fazları hematit, sodalit, rutil ve manyetit olarak belirlenmiştir (Şekil 1). İlave olarak, Malvern particle sizer 2000 kullanılarak yapılan boyut dağılımı analizinde d_{80} ve d_{50} boyları sırasıyla 7 ve 3,5 μ m olarak belirlenmiştir.

2.2. Yöntem

Kimyasal analizlerde tespit edilen sodyum ve alüminyum gibi alkali iyonların oldukça yüksek miktarlarda bulunduğu görülmektedir. Bu iyonların liç aşamasında hızlı bir şekilde çözünüp



Şekil 1– Kırmızı çamur numunesinin XRD grafiği (Baştürkçü, 2020).

çözeltiye geçmesi beklenmektedir. İstenmeyen bu durumun önlenmesi amacıyla %20 katı oranında, pH 3'te (H_2SO_4 kullanılarak) ve 2 saat boyunca çözündürme yapılmasını kapsayan bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen liç keki, ikinci kademe liçin beslemesini oluşturmuştur. Öncelikle bu ürün üzerinde spesifik şartlar altında liç kinetiği incelenmiştir. Daha sonra ise 90 °C sıcaklık altında, farklı katı oranları, H_2SO_4 derişimleri ve liç sürelerinin çözünme verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Katı oranları ağırlıkça katı/sıvı oranını ifade etmektedir.

Liç testleri, 500 ml silindirik beherde 500 dev/dk sabit karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. pH ölçümlerinde aside dirençli prob kullanılmış olup, analitik kalitede H_2SO_4 tercih edilmiştir. Toplam asit tüketimi, maskeleye reaktifi ve 1 M NaOH varlığında belirlenmiştir. Çalışma boyunca izlenen deneysel program Şekil 2'de sunulmaktadır.

3. Deneysel Sonuçlar

Liç testleri 2 ana grupta incelenmiş olup bu bölümde ayrı başlıklar altında sunulmaktadır. 2 kademe liçin amacı, istenmeyen iyonların (Na^+ ve Al^{+3}) uzaklaştırılarak Sc ve Li açısından zengin bir katı malzeme elde etmektir.

3.1. Birinci Kademe Liç

Kırmızı çamur numunesinin orijinal pH değeri 10,4 olarak ölçülmüş olup H_2SO_4 ilavesiyle bu değer 3'e düşürülmüştür. Liç sonucunda %97,2 Na ve %69,3 Al çözünme verimlerine ulaşılmıştır

(Baştürkçü, 2020). Liç keki üzerinde yapılan XRD analizinde, sodalit [$Na_8(Al_6Si_6O_{24})Cl_2$] mineraline ait piklerin kaybolduğu gözlenmiştir (Şekil 3). Bu sonuç, kimyasal analizler ile mineralojik analizin uyumlu olduğunu, diğer bir ifadeyle birbirini doğruladığını ortaya koymaktadır.

Bu aşamada 314 kg/t H_2SO_4 tüketimi gerçekleştirilen Sc ve Li kayıpları sırasıyla %13,4 ve %9,6 olarak tespit edilmiştir. Birinci kademe liç keki %5,5 Al, %46 Fe, %0,3 Na, 184 ppm Sc ve 197 ppm Li içermektedir.

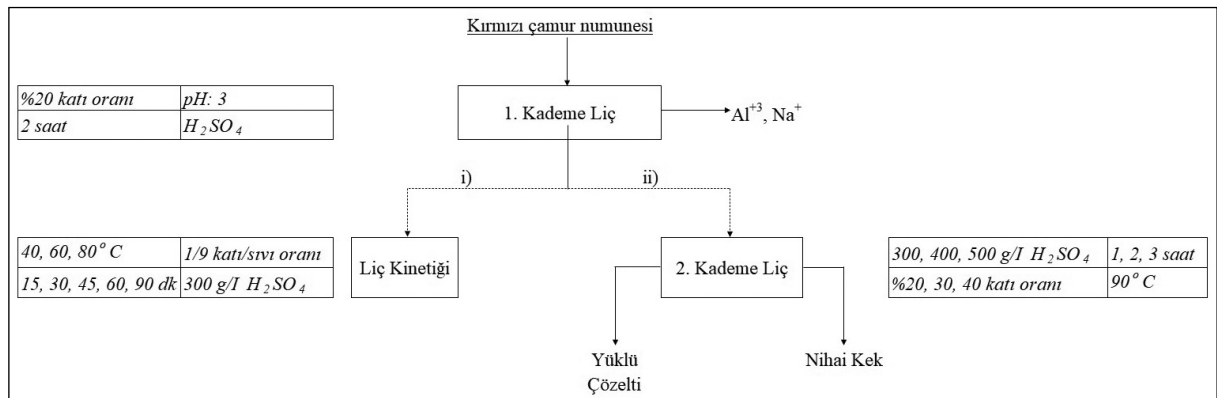
3.2. İkinci Kademe Liç

Çalışmanın bu aşaması, Sc ve Li çözünme kinetiğinin incelenmesi (3.2.1) ve farklı katı oranlarında H_2SO_4 derişimi – liç süresi ilişkisinin etkisi (3.2.2) olmak üzere 2 bölümde paylaşılmaktadır.

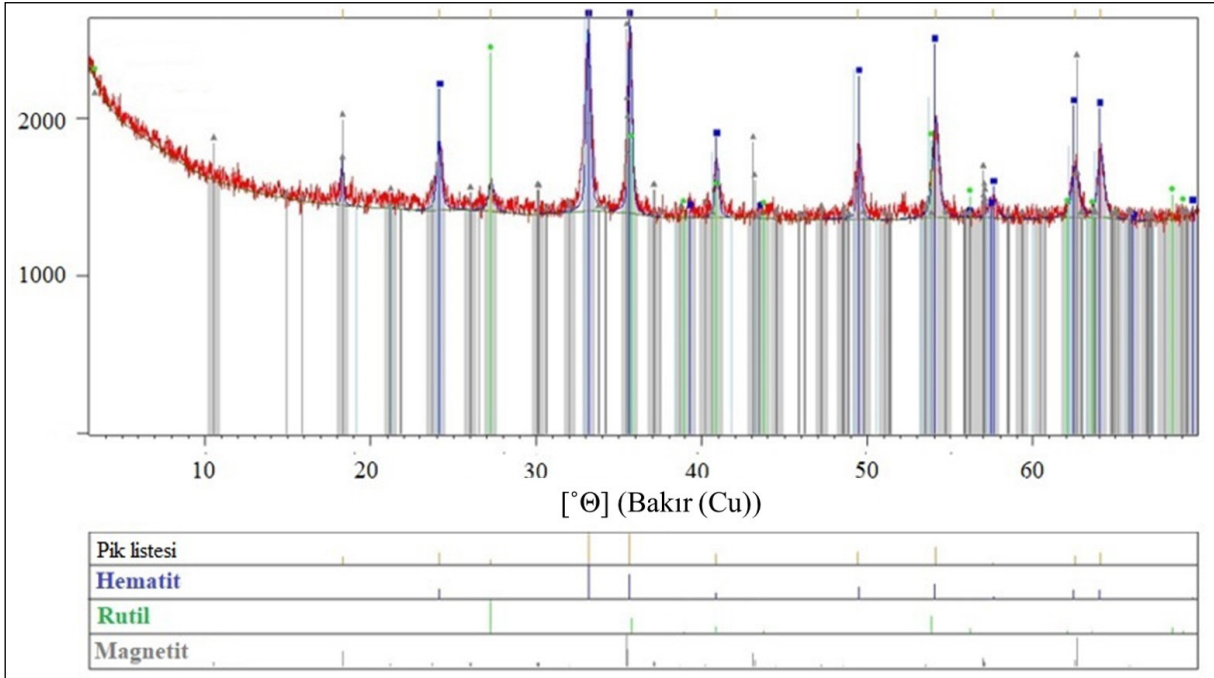
3.2.1. Liç Kinetiği

Liç mekanizmasını açıklayabilmek amacıyla çeşitli kinetik modelleri geliştirilmiştir. Bunların arasından küçülen çekirdek modeli en sık kullanılanı olmuştur. Sc ve Li liç kinetiğinin detaylı incelenmesinde, birinci kademe liç kekinin kullanıldığı bir dizi liç testi yapılmıştır. Katı/sıvı oranının 1/9 ve H_2SO_4 derişiminin 300 g/l olarak sabit tutulduğu testlerde, 40, 60 ve 80 °C sıcaklıklar için 15, 30, 45, 60 ve 90 dakika liç süreleri denenmiştir. Şekil 4 ve 5'te sunulan sonuçlara göre, sıcaklık artışı ile birlikte metal çözünme değerlerinde ciddi bir artış olduğu anlaşılmaktadır. Bu sayede kinetik modellerinin uygulanabileceği veriler elde edilmiş olup, hesaplamalar yapılmıştır.

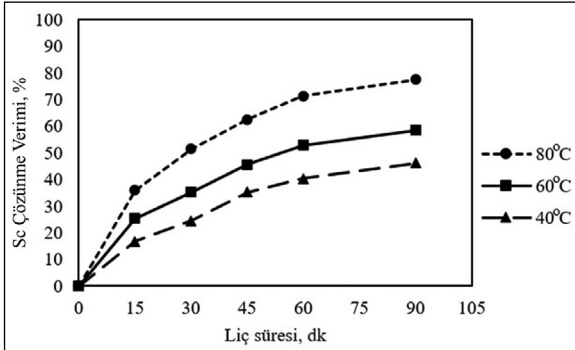
Küçülen çekirdek modelindeki denklemler uyarınca: 1 numaralı denklem hacimsel difüzyon



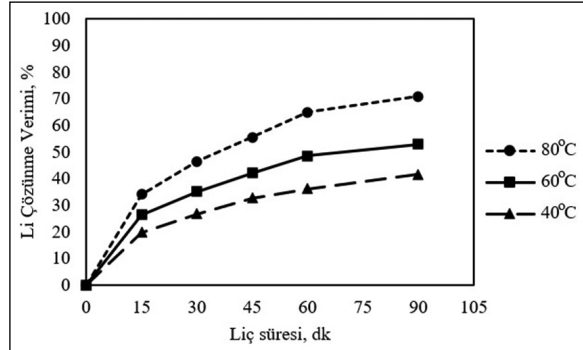
Şekil 2- Kırmızı çamur numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar.



Şekil 3- Birinci kademe liç kekine ait XRD grafiği.



Şekil 4- Sıcaklığa bağlı olarak Sc çözünme verimleri.



Şekil 5- Sıcaklığa bağlı olarak Li çözünme verimleri.

kontrolünü, 2 numaralı denklem kül film difüzyonu ve son olarak 3 numaralı denklem kimyasal reaksiyon kontrolünü açıklamaktadır. Burada x , çözünen metal fraksiyonunu; k , görünür sabiti ve t , süreyi ifade etmektedir.

$$x = kt \quad (1)$$

$$1-3(1-x)^{2/3} + 2(1-x) = kt \quad (2)$$

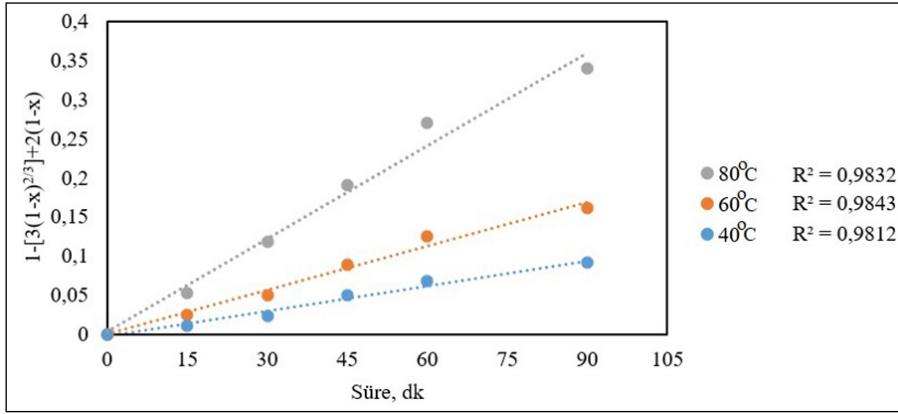
$$1-(1-x)^{1/3} = kt \quad (3)$$

Küçülen çekirdek modelinden elde edilen sonuçlar ile Arrhenius formülasyonu (4) üzerinden aktivasyon enerjisi hesaplanmaktadır. E_a (kJ mol^{-1}) aktivasyon enerjisini, R ($8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) ideal gaz sabitini,

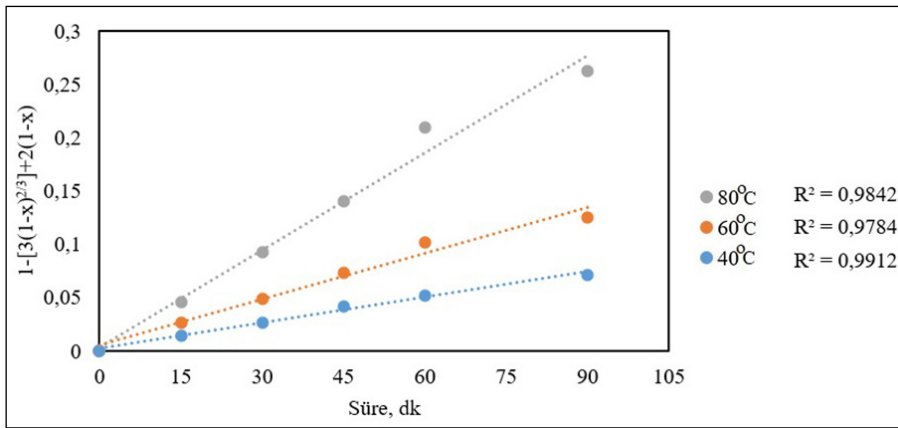
k_0 (min^{-1}) üstel öncesi değişmezini ve T (K) mutlak sıcaklığı temsil etmektedir.

$$k = k_0 e^{-E_a/RT} \quad (4)$$

Buna göre, kül film difüzyonu denkleminde uygun olacak şekilde Sc ve Li için yaklaşık 0,98 R^2 korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Şekil 6 ve 7'de oluşan kinetik grafiği sunulmaktadır. Diğer denklemlerde ise daha düşük değerler elde edilmiştir. Ek olarak, Arrhenius formülasyonu kullanılarak aktivasyon enerjisi hesabının yapılması amacıyla $\ln K$ değerine karşılık sıcaklık grafiği çizilmiştir (Şekil 7, 8). Sc ve Li için sırasıyla 29,52 ve 30,22 kJmol^{-1} aktivasyon enerjileri tespit edilmiştir.



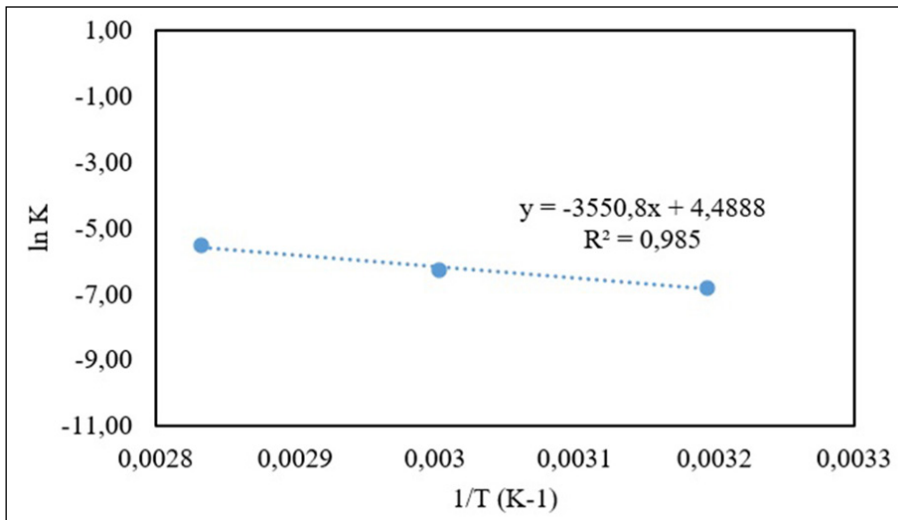
Şekil 6- Sc için kül film difüzyonuna ait dağılım.



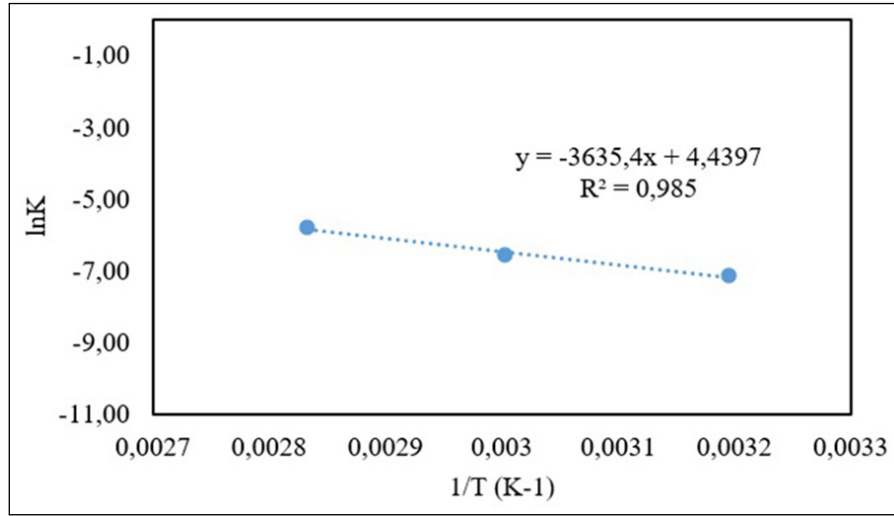
Şekil 7- Li için kül film difüzyonuna ait dağılım.

Kül film difüzyonu kontrolünde gerçekleşen reaksiyonlarda aktivasyon enerjileri genellikle 4–12 kJ mol⁻¹ arasında olmaktadır. Ea değerinin 41,8 kJ mol⁻¹ ve üzerinde olması durumunda ise kimyasal

reaksiyon kontrolünde gerçekleşen bir liç işlemi olduğu yorumu yapılabilmektedir (Şekil 8 ve 9). Ea değeri 12-41,8 mol⁻¹ arasında ise reaksiyonun hem kül film hem de kimyasal reaksiyon kontrolünde yapıldığı



Şekil 8- Sc için ln K – sıcaklık grafiği.



Şekil 9- Li için ln K – sıcaklık grafiği.

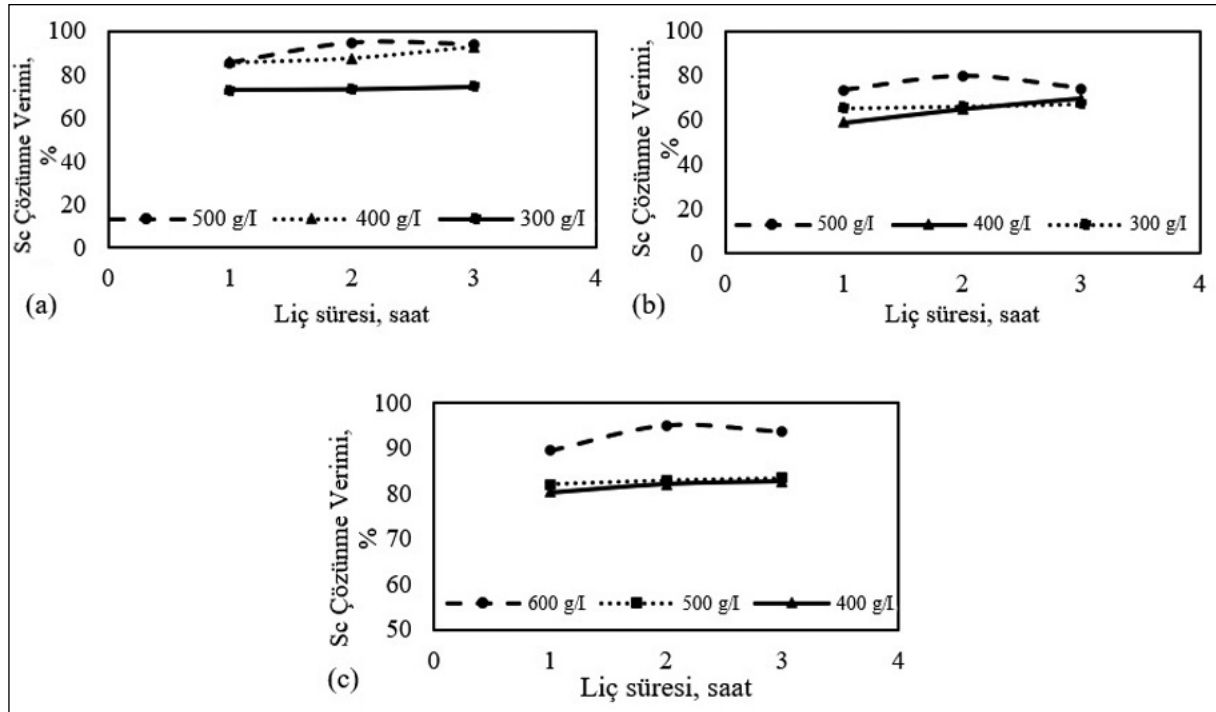
sonucuna varılmaktadır (Wang vd., 2017; Xu vd., 2018). Bu sebeple, Sc ve Li liç reaksiyonunun kül film difüzyonu ve kimyasal reaksiyon kombinasyonunda gerçekleştiği ifade edilebilir.

3.2.2. Liç Parametrelerinin Etkisi

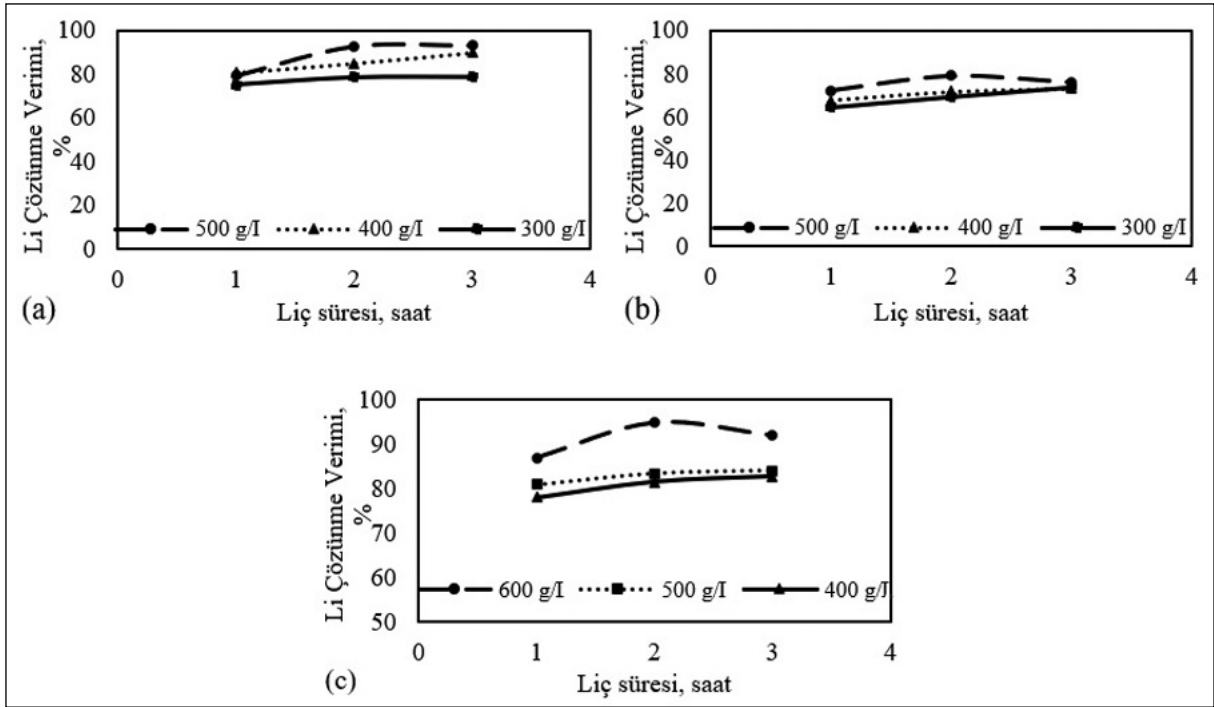
H₂SO₄ derişimi ve liç süresinin farklı katı oranları üzerindeki etkisi şu şartlar altında incelenmiştir: 90 °C sıcaklık, 400, 500 ve 600 g/l H₂SO₄ derişimi, 1, 2 ve

3 saat liç süresi, %20, 30 ve 40 katı oranları. Şekil 10 ve 11’de verilen sonuçlardan hareketle Sc ve Li çözünme verimlerinin birbirine benzer özellikler taşıdığı anlaşılmaktadır.

Belirgin bir bulgu olarak, liç süresinin Sc ve Li çözünmesi için bağlayıcı olmadığı gözlenmektedir. 300-500 g/l H₂SO₄ derişiminde benzer sonuçlar alınmış olup, yüksek katı oranında yüksek asit



Şekil 10- Sc çözünme verimleri; a) %20 katı oranı, b) %30 katı oranı, c) %40 katı oranı.



Şekil 11- Li çözünme verimleri; a) %20 katı oranı, b) %30 katı oranı, c) %40 katı oranı.

derişiminin daha etkili olduğu belirlenmiştir. 400-500 g/l H₂SO₄ derişimi %20 katı oranı için yeterli olmasına rağmen, %40 katı oranında en yüksek metal çözünme verimlerine ulaşmak için 600 g/l gibi yüksek asit derişimine ihtiyaç duyulmaktadır.

Endüstriyel uygulamalar göz önünde bulundurulduğunda %40 katı oranında çalışmak gerektiğinden, optimum sonuç olarak 2 saat liç süresi sonunda %95,1 Sc ve %94,7 Li çözünme verimlerine ulaşılmıştır. Bu aşamada oldukça yüksek miktarda H₂SO₄ tüketimi gerçekleşmektedir (775,5 kg/t).

Elde edilen yüklü çözelti 0,13 g/l Sc ve 0,13 g/l Li ile 0,7g/l Na ve 6,92g/l Al içermektedir. 2 kademe liç uygulanmaması durumunda ise Al+Na derişiminin 40 g/L'den fazla olması beklenmektedir.

4. Sonuçlar

Kırmızı çamur numunesi üzerinde yapılan testlerden hareketle şu genel sonuçlara ulaşılmıştır:

- pH 3'te %20 katı oranında ve 2 saat süre uygulanan birinci kademe liç sonucunda %97,2 Na ve %69,3 Al çözünme verimine ulaşılmıştır. Bu aşamada %13,4 Sc ve %9,6 Li kaybedilmiştir.
- İkinci kademe liçe ise %40 katı oranı ve 2 saat liç

süresi sonucunda %95,1 Sc ve %94,7 Li çözünme verimleri elde edilmiştir.

- 2 kademe liç sonucunda toplamda Sc ve Li kazanımları sırasıyla %82,4 ve %86,5 olarak tespit edilmiştir.
- Nihai yüklü çözelti 0,13 g/l Sc, 0,13 g/l Li ve 0,7g/l Na ile 6,92 g/l Al içermektedir.
- Sc ve Li çözünmesini hem kül film difüzyonu hem de kimyasal reaksiyon kontrolünde gerçekleştiği belirlenmiş olup, aktivasyon enerjileri her iki metal için de sırasıyla 29,52 ve 30,22 kJmol⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Literatürde kırmızı çamurdan metal kazanımına yönelik olarak yapılan çalışmaların pek çoğu HNO₃ ve HCl kullanılarak gerçekleştirilmiş olup ortalama %75-80 Sc verimlerine düşük katı oranlarında ulaşılmıştır. H₂SO₄ kullanımında ise verimler %50 civarında kalmaktadır. Liç aşamasında H₂SO₄ kullanılan iki çalışmada; Okudan vd. (2015a) ve Uzun ve Gülfen (2007) liç işlemi öncesinde kavurma/kalsinasyon gibi ön işlem uygulamayı tercih etmişlerdir. Isıl işlem sonucunda bir takım faz dönüşümleri gerçekleşmekte, bu sayede metal çözünme değerleri %90 seviyelerine yükselmektedir.

Bu çalışmada, yüksek katı oranında (~%40) doğrudan H₂SO₄ liçi uygulandığında jelleşme gözlenmiş ve karıştırma işlemi durmuştur. Düşük katı oranlarında çalışıldığında ise böyle bir problemle karşılaşılmamaktadır. Literatür incelendiğinde, doğrudan liç uygulamalarında çoğunlukla H₂SO₄ ten farklı asit türlerinin denendiği dikkat çekmektedir. Bu çalışmada alternatif bir çözüm üretilerek 2 kademe H₂SO₄ liçi önerilmiştir. Bu sayede iyonik safsızlıklar uzaklaştırılmakta ve karıştırma işlemini engelleyen jelleşme probleminin önüne geçilmektedir. 2 kademe liç sonucunda Sc ve Li için sırasıyla %82,4 ve %86,5 çözünme verimlerine ulaşılmıştır.

Ayrıca, nihai çözültide 0,7 g/l Na ve 6,92 g/l Al bulunmaktadır. 2 kademe liç için uygulanmaması durumunda ise bu değer 40 g/l'den fazla olması beklenmektedir. Bu kadar yüksek derişimde safsızlığın başlangıçta uzaklaştırılması oldukça önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmanın bir sonucu olarak, birinci ve ikinci kademe olmak üzere 314 ve 775 kg/t H₂SO₄ tüketimi gerçekleşmiştir. Oldukça yüksek bir değer olmasına rağmen, boyut küçültme ihtiyacı duyulmayan bu artık üründen elde edilecek skandiyumun fiyatı (3,500 USD/kg) göz önünde bulundurularak ekonomik bir değerlendirme yapılması gerekmektedir.

Kırmızı çamurdaki saklı değerler olan Sc ve Li metallere kazanımının ortaya konması, kırmızı çamurların atık değil, artık bir malzeme olduğunu göstermektedir. Her ne kadar Sc açısından pek çok değerlendirme yapılmış olsa da, Li çözünme davranışı ilk defa açıklanmaktadır. Kırmızı çamur bir prosesin artanı, yani yan ürünü olarak değerlendirilmelidir.

İleriki çalışmalara öneri olması açısından, liç işlemini takiben elde edilen yüklü çözültiden bu değerli metallere seçimli bir şekilde kazanılması için solvent ekstraksiyon ve/veya metal çöktürme proseslerinin detaylı bir şekilde çalışmasında fayda bulunmaktadır. Ayrıca, skandiyum ve diğer nadir metallere mineralojik olarak incelemelerinin yapılması, hidrometalurjik aşamalara da büyük katkı sağlayacaktır.

Değinen Belgeler

Abdulvaliyev, R. A., Akcil, A., Gladyshev, S. V., Tastanov, E. A., Beisembekova, K. O., Akhmediyeva, N. K.,

Deveci, H. 2015. Gallium and vanadium extraction from red mud of Turkish alumina refinery plant: hydrogarnet process. *Hydrometallurgy* 157, 72-77.

Baral, S. S., Shekar, R. K., Viswanathan, V., Surendran, G. 2016. Dissolution kinetics of cerium from red mud. *Separation Science and Technology* 52(5), 883-891.

Baştürkcü, H. 2020. Extraction of lanthanum and yttrium from red mud following elimination of ionic impurities. *Separation Science and Technology* 56(13), 2243-2252.

Borra, C. R., Pontikes, Y., Binnemans, K., Gerven, V. T. 2015. Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud). *Minerals Engineering* 76, 20-27.

Borra, C. R., Mermans, J., Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K., Gerven, V. T. 2016. Selective recovery of rare earths from bauxite residue by combination of sulfation, roasting and leaching. *Minerals Engineering* 92, 151-159.

Chen, X., Lun, A., Qu, G. 2013. Preparation and characterization of foam ceramics from red mud and fly ash using sodium silicate as foaming agent. *Ceramics International* 39, 1923-1929.

Christmann, P., Gloaguen, E., Labbe, J. F., Melleton, J., Piantone, P. 2015. Global lithium resources and sustainability issues. *Lithium Process Chemistry Resources, Extraction, Chapter 1. Batteries, and Recycling* edited by Alexandre Chagnes and Jolanta Swiatowska, Elsevier.

Deng, B., Li, G., Luo, J., Ye, Q., Liu, M., Peng, Z., Jiang, T. 2017. Enrichment of Sc₂O₃ and TiO₂ from bauxite ore residues. *Journal of Hazardous Materials* 331, 71-80.

Ercag, E., Apak, R. 1997. Furnace smelting and extractive metallurgy of red mud: recovery of TiO₂, Al₂O₃ and pig iron. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 70, 241-246.

Evans, K. 2015. Successes and challenges in the management and use of bauxite residue. *Bauxite Residue Valorization. Best Practice Conference*, 113-127.

Fulford, G. D., Lever, G., Sato, T. 1991. Recovery of rare earth elements from Bayer process red mud. *US5030424*.

Gladyshev, S. V., Akcil, A., Abdulvaliyev, R. A., Tastanov, E. A., Beisembekova, K. O., Temirova, S. S., Deveci, H. 2015. Recovery of vanadium and gallium from solid waste by-products of Bayer process. *Minerals Engineering* 74, 91-98.

- Hammond, K., Apelian, B. M. D., Blanpain, B. 2013. CR3 communication: red mud-a resource or a waste?. *Journal of the Minerals Metals and Materials Society* 65, 340-341.
- Kumar, S., Kumar, R., Bandopadhyay, A. 2006. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries. *Resources, Conservation and Recycling* 48, 301-314.
- Liu, W., Sun, S., Zhang, L., Jahanshahi, S., Yang, J. 2012. Experimental and simulative study on phase transformation in Bayer red mud soda-lime roasting system and recovery of Al, Na and Fe. *Minerals Engineering* 39, 213-218.
- Liu, Y., Lin, C., Wu, Y. 2007. Characterization of red mud derived from a combined Bayer process and bauxite calcination method. *Journal of Hazardous Materials* 146, 255-261.
- Okudan, M. D., Akcil, A., Tuncuk, A., Deveci, H. 2015a. Effect of parameters on vanadium recovery from by-products of the Bayer process. *Hydrometallurgy* 152, 76-83.
- Okudan, M. D., Akcil, A., Tuncuk, A., Deveci, H. 2015b. Recovery of gallium and aluminum from electrofilter dust of alumina calcination plant in Bayer process. *Separation Science and Technology* 50, 2596-2605.
- Ochsenkuhn-Petropulu, M., Lyberopulu, T., Parissakis, G. 1995. Selective separation and determination of scandium from yttrium and lanthanides in red mud by a combined ion exchange/solvent extraction method. *Analytic Chimica Acta* 315, 231-237.
- Ochsenkuhn-Petropulu, M., Lyberopulu, T., Ochsenkuhn, K. M., Parissakis, G. 1996. Recovery of lanthanides and yttrium from red mud by selective leaching. *Analytic Chimica Acta* 319, 249-254.
- Smirnov, D. I., Molchanova, T. V. 1997. The investigation of sulphuric acid sorption recovery of scandium and uranium from the red mud of alumina production. *Hydrometallurgy* 45, 249-259.
- Teixeira, I. F., Medeiros, T. P. V., Freitas, P. E., Rosmaninho, M. G., Ardisson, J. D., Lago, R. M. 2014. Carbon deposition and oxidation using the waste red mud: a route to store, transport and use offshore gas lost in petroleum exploration. *Fuel* 124, 7-13.
- Uzun, D., Gülfen, M. 2007. Dissolution kinetics of iron and aluminum from red mud in sulfuric acid solution. *Indian Journal of Chemical Technology* 14, 263-268.
- Verlague, A., Goff, B., Brunet, F., Poinssot, C., Vidal, O., Findling, N. 2011. Metamorphic veining and mass transfer in a chemically closed system: a case study in Alpine metabauxites (western Vanoise). *Journal of Metamorphic Geology* 29, 275-300.
- Wang, D. H., Li, P. G., Qu, W. J., Yin, L. J., Zhao, Z., Lei, Z. Y. 2013a. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China. *Science China Earth Sciences* 56(1), 145-152.
- Wang, W., Pranolo, Y., Cheng, C. Y. 2013b. Recovery of scandium from synthetic red mud leach solutions by solvent extraction with D2EHPA. *Separation and Purification Technology* 108, 96-102.
- Wang, H. H., Li, G. Q., Zhao, D., Ma, J. H., Yang, J. 2017. Dephosphorization of high phosphorus oolitic hematite by acid leaching and the leaching kinetics. *Hydrometallurgy* 171, 61-68.
- Xu, Y., Jiang, T., Wen, J., Gao, H., Wang, J., Xue, X. 2018. Leaching kinetics of mechanically activated boron concentrate in a NaOH solution. *Hydrometallurgy* 179, 60-72.
- Zhang, R., Zheng, S., Ma, S., Zhang, Y. 2011. Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossular hydrogarnet in hydrothermal process. *Journal of Hazardous Materials* 189, 827-835.
- Zhou, H., Li, D., Tian, Y., Chen, Y. 2008. Extraction of scandium from red mud by modified activated carbon and kinetics study. *Rare Metals* 27, 223-227.