

Sülfatlaştırıcı Kavurma-Asit Liçi Yöntemi ile Kalkopirit Konsantresinden Bakırın Kazanılması

Nurdan Bahar

Tunceli University, Department of Chemical Engineering, 62000, Tunceli, Turkey

Yazışmalardan sorumlu yazar: E-mail: nbahar@tunceli.edu.tr

Özet

Kalkopirit konsantresinden durgun hava ortamında sülfatlaştırıcı kavurma-asit liçi yöntemi ile bakır (Cu(II)) kazanılması üzerine, kavurma sıcaklığının (200-800 °C), kavurma süresinin (15-120 dk) ve asit türünün (nitrik asit, hidroklorik asit ve sülfürik asit) etkileri incelendi ve yüksek bakır kazanımı için en uygun kavurma sıcaklığı, kavurma süresi ve asit türü belirlendi. Kavrulmuş kalkopirit konsantreleri, standart liç koşulları altında (oda sıcaklığı, 1 g/10 mL katı/sıvı oranı, 300 dev/dk karıştırma hızı, 60 dakika liç süresi, 0.5 N asit derişimi) liç edildi. Kavurma sıcaklığının artırılması, 500 °C' ye kadar bakır kazanımı üzerine olumlu etki meydana getirmiştir. 500 °C' nin üzerindeki sıcaklık artışları ise, bakır ekstraksiyon verimini düşürmüştür. Bu nedenle, 500 °C, kalkopiritin kavurma-asit liçi prosesi için en uygun kavurma sıcaklığı olarak seçilmiştir. En uygun kavurma süresi, 60 dakikadır. İleri kavurma sürelerinin bakır kazanımı üzerine önemli etkisi olmadığı gözlemlendi. Asit türüne göre bakır ekstraksiyon verimleri nitrik asit > hidroklorik asit > sülfürik asit şeklindedir. Nitrik asit çözeltisi liçinden elde edilen bakır kazanımı en yüksektir. Aynı zamanda, bu şartlarda çözelti ortamına geçen demir miktarının da en yüksek olduğu gözlemlendi. 500 °C' de kavrulmuş kalkopirit konsantrelerinin 0.5 N nitrik asit çözeltisi ile liçinden elde edilen bakır kazanımı %99.0' dur. Aynı şartlarda çözeltiye geçen demir miktarı %21.4' tür.

Anahtar Kelimeler: Asit liçi, Bakır kazanımı, Kalkopirit konsantresi, Kavurma.

Recovery of Copper from Chalcopyrite Concentrate by Sulphatation Roasting-Acid Leaching Method

Abstract

The effects of roasting temperature (200-800 °C), roasting time (15-120 min) and acid type (nitric acid, hydrochloric acid and sulfuric acid) on recovery of copper from chalcopyrite concentrate by roasting in stagnant air media-acid leaching method were investigated and most suitable roasting temperature, roasting time and acid type for high copper recovery were determined. The roasted chalcopyrite concentrates were leached under the standard leaching conditions (room temperature, 1 g/10 mL solid/liquid ratio, 300 rpm/min stirring speed, 60 minutes leaching time, 0.5 N acid concentration). Increase in roasting temperature up to 500 °C has positive effect on recovery of copper. Above 500 °C, increase of temperature does negative effect. 500 °C was chosen to be most suitable roasting temperature for roasting-acid leaching process of chalcopyrite concentrate. The most suitable roasting time is 60 minutes. There are no significant effect on the copper recovery of advanced roasting times. The recovery of copper obtained from leaching with nitric acid solution is the highest but iron amount passed to solution media under this condition is also the highest. The copper recovery obtained from leaching with nitric acid solution of 0.5 N of chalcopyrite concentrate

roasted at 500 ° C is 99.0%. The iron content of the solution is 21.4% under the same conditions.

Keywords: Acid leaching, Chalcopyrite concentrates, Copper Recovery, Roasting.

GİRİŞ

Dünya' da üretilen bakırın %75-80' i, sülfürlü bakır cevherlerinin prometalurjik yöntem olarak adlandırılan ergitme, konverter ve elektroliz işlemlerini kapsayan geleneksel yöntem ile işlenmesinden elde edilmektedir (Qiu ve ark., 2007). Fakat günümüzde sülfürlü bakır cevherlerinin tenörünün düşmesi, üretim maliyeti yüksek olan bu prosesin ekonomikliğini yitirmesine sebep olmaktadır. Diğer taraftan pirometalurjik yöntem sırasında açığa çıkan SO₂ gazları çevresel açıdan sorun teşkil etmektedir (Hua ve Cai., 2006; Riveros ve ark., 2004). Açığa çıkan SO₂ gazlarından sülfürik asit üretmek mümkün olsa da, üretilen sülfürik asitin tümüne pazar bulmak mümkün görünmemektedir. Bu gibi ekonomik ve çevresel nedenlerden dolayı, pirometalurjik yöntem alternatif olabilecek bakır üretim yöntemleri üzerine araştırma yapma ihtiyacı doğurmuştur (Qui ve ark., 2007; Hua ve Cai, 2006; Al-Harashsheh ve ark., 2008). Alternatif araştırmalar, bir yükseltgeme vasıtası kullanarak sülfürlü bakır cevherlerinin liçi üzerine yoğunlaşmıştır (Olubambi ve ark., 2006; Marsden ve Wilmot, 2007). Bu amaçla, kalkopiritin liçi için çeşitli liç ajanlarının kullanıldığı pek çok araştırma yapılmıştır (Hirato ve ark., 1987; Hackl ve ark., 1995; Lu ve ark., 2000; Adebayo ve ark., 2003; Ruiz ve ark., 2011; Cai ve ark., 2012; Solis-Marcial ve Lapidus, 2013; Lu ve Dreisinger, 2013; Qian ve ark., 2014; Solis-Marcial ve Lapidus, 2014). Fakat, sülfürlü cevherlerin, sahip oldukları sıkı

dokuları nedeniyle direkt olarak liç edilmeleri güçtür (Dutrizac, 1989). Bu nedenle, kalkopirit gibi sülfürlü bakır cevherlerin liç edilmeden önce, metallerin serbest kalmasını sağlayacak ön işlemlere tabi tutulması gerekmektedir (Bahar, 2002). Bu ön işlemlerden biri de kavurma işlemidir. Bununla beraber, kalkopirit konsantresinin kavurmasına dair literatürde çok fazla çalışma yoktur.

Bu çalışmada, prometalurjik yöntem alternatif olabilecek, durağan hava ortamında gerçekleştirilen sülfatlaştırıcı kavurma-asit (nitrik asit, hidroklorik asit, sülfürik asit) liçi yöntemi ile kalkopirit konsantresinden hidrometalurjik usule göre bakır üretimi incelenmiş ve yüksek bakır kazanımı için en uygun kavurma sıcaklığı, kavurma süresi ve asit türü belirlenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Deneylerde kullanılan kalkopirit konsantresi Cengiz Holding bünyesinde bulunan Samsun Bakır İşletmelerinden temin edilmiştir. Örnek alma yöntemlerine uygun olarak alınan kalkopirit konsantresi, -100 mesh' e öğütüldükten sonra, 48 saat süre ile 50 °C' de etüvde kurutulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan kalkopirit konsantresinin kimyasal bileşimi Tablo 1' de verilmiştir.

Analitik Yöntem

Deneylerden ve analizlerden elde edilen çözeltilerdeki metal içerik analizi, atomik absorpsiyon spektrofotometrisi (Perkin Elmer,

Araştırma/Research

Analyst 800) kullanılarak gerçekleştirildi.

Tablo 1. Kalkopirit konsantresinin kimyasal bileşimi.

Bileşen	%, w/w
SiO ₂	1.54
Cu	17.90
Fe	35.29
S	37.8
Zn	1.85
Pb	0.07

Kalkopirit konsantresinin metalik yönden bileşimi LiBO₂ ergitme-HNO₃ çözünürleştirme yöntemi (Bailey ve Woods, 1974) kullanılarak belirlendi. Kükürt içeriği gravimetrik yöntem (Vogel, 1989) ile tayin edildi.

Kavurma ve Liç Deneyleri

Kavurma sıcaklığının etkisini belirlemek üzere, 5±0.05 g kalkopirit konsantresi tartıldıktan sonra bir porselen kapsüle (12 cm çapında ve 3 cm yüksekliğinde) konuldu.

Konsantre, kapsül içine ince bir tabaka halinde yayıldı. Kapsül, önceden istenilen sıcaklığa kadar ısıtılmış (300-800 °C arası sıcaklıklar) olan kül fırını içerisine yerleştirildi ve 60 dk bekletildi. Kavurma esnasında ortama ilave hava gönderilmedi. Ön görülen süre sonunda kavrulmuş kalkopirit konsantresi, fırından alınarak bir desikatöre konuldu ve kavrulmuş örneğin oda sıcaklığına kadar soğuması beklendi. Kavrulmuş kalkopirit konsantresi soğuduktan sonra tartıldı. Bu şekilde kavrulmuş olan kalkopirit konsantreleri, 150 mL hacmindeki erlenlere alındı ve üzerlerine 1 g/10 mL katı/sıvı olacak şekilde 0.5 N nitrik asit, hidroklorik asit veya sülfürik asit çözeltisi ilave edildi. Liç çözeltisinin ilavesinden sonra örnekler, oda sıcaklığında (yaklaşık 20 °C), 60 dakika süre ile 300 dev/dk hızla

liç işlemine tabi tutuldu. Daha sonra süspansiyon, mavi bant süzgeç kağıdı kullanılarak katı ve sıvı fazlarına ayrıldı. Sıvı fazda bakır ve demir analizleri yapıldı. Çözeltiye geçen metal miktarının, başlangıçta konsantrenin bünyesinde bulunan metalin miktarına oranının 100 ile çarpımından % kazanılan metal hesaplandı. 200 ve 250 °C' deki kavurma işlemleri, sıcaklığı 300 °C' ye kadar çıkabilen etüvde gerçekleştirildi.

Kavurma süresinin etkisini belirlemek amacıyla, 5±0.05 g kalkopirit konsantre örnekleri 500 °C' de 15-120 dakika arası değişen sürelerde kavruktan sonra 0.5 N nitrik asit, hidroklorik asit veya sülfürik asit çözeltisi ile oda sıcaklığında, 60 dakika süre ile 1 g/10 mL katı/sıvı oranında ve 300 dev/dk karıştırma hızında liç işlemine tabi tutuldu. Bu deney serisinden elde edilen veriler, sülfatlaştırıcı kavurma-asit liçi prosesi için en etkili asit türünün belirlenmesi için de kullanılmıştır.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, %17.90 Cu ve %35.29 Fe içeren, -100 mesh' e öğütülmüş kalkopirit konsantre örnekleri, çeşitli sıcaklıklarda ve sürelerde kavruktan sonra nitrik asit, hidroklorik asit ve sülfürik asit ile liç edildi. Düşük sıcaklıklardaki kavurma işlemi sayesinde, bakır, yüksek oranda sulu ortama geçebilen Cu²⁺ haline dönerken, kükürdün önemli bir kısmı, havanın oksijeni ile birleşerek sülfat formuna geçmektedir. Deneysel çalışmada, kavurma sıcaklığı, kavurma süresi ve asit türünün bakır kazanımı üzerine etkileri araştırıldı. Bunun için, bakırın yüksek verimle liç ortamına geçtiği, bununla beraber, liç çözeltisinden bakırın kazanılması esnasında sorun teşkil etmesi muhtemel

Araştırma/Research

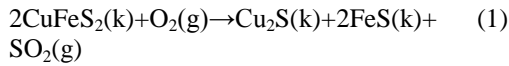
demirin ise düşük oranda liç çözeltilisine geçtiği, kavurma sıcaklığı ve kavurma süresi belirlenmeye çalışıldı. Ayrıca, bakır ekstraksiyon verimimin en yüksek olduğu asit türü tespit edildi.

Kavurma Sıcaklığının Etkisi

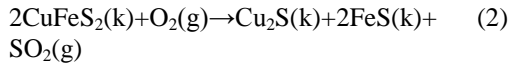
Kalkopirit konsantresinin 200-800 °C arası sıcaklıklarda kavurulması sonrasında nitrik asit, hidroklorik asit ve sülfürik asit liçi esnasında çözelti ortamına geçen bakır ve demir miktarları Şekil 1' de görülmektedir.

Literatürde kalkopirit veya kalkopirit konsantresinin kavurulması üzerine yapılmış pek fazla çalışmaya rastlanmamaktadır. Fakat, bir çalışmada (Sokic ve ark., 2008), kalkopirit konsantresinin 300 °C' den 800 °C' ye ısıtılması durumunda meydana gelen reaksiyonlar TGA-TDA analizi ile tespit edilmiş ve sıcaklık artışı ile aşağıdaki reaksiyonların meydana geldiği belirlenmiştir:

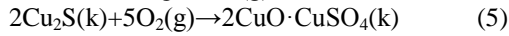
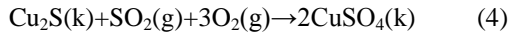
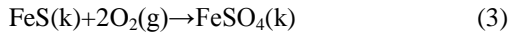
(330-357 °C)



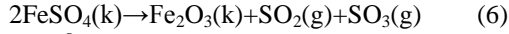
(404-440 °C)



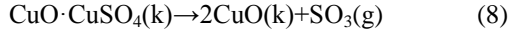
(502-555 °C)



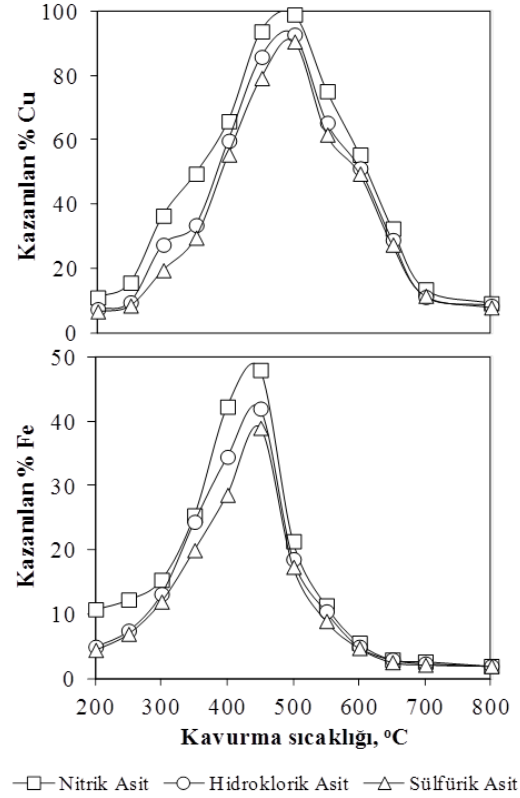
(555-613 °C)



(750 °C yukarısında)



4-5 nolu reaksiyonlardan görüleceği üzere, 500-550 °C arası sıcaklıklarda bakır, CuSO_4 veya $\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4$ formundadır. Yapılan bir çalışmada, 500 °C' de kavurma sonrası kalkopirit konsantresinin önemli ölçüde bakır sülfat formuna dönüştüğü ve kavurulmuş



Şekil 1. Kavurma sıcaklığının etkisi (kalkopirit konsantre kütlesi: 5.0 g; kavurma süresi: 60 dk; liç sıcaklığı: oda sıcaklığı; liç süresi: 60 dk; karıştırma hızı: 300 dev/dk; katı/ sıvı oranı: 1 g/10 mL).

ürünün su ile liç edilmesi sonrasında bakırın %60 civarında çözelti ortamına geçtiği belirlenmiştir (Bahar, 2014). 3 nolu reaksiyon gereği demir de bu sıcaklıklarda sülfat formunda bulunmaktadır. Fakat 6 ve 7 nolu reaksiyonlar incelendiğinde, demirin oksit formuna dönme sıcaklığının bakırın oksit formuna dönme sıcaklığından daha düşük olduğu görülmektedir. Sülfat bileşiklerinin oksit bileşiklerine göre sulu ortamdaki çözünürlükleri bir hayli yüksektir. Bu nedenle, bakırın yüksek miktarda sülfat formunda ve demirin de oksit formunda bulunduğu optimum kavurma şartlarında kavurulması, kalkopirit

Araştırma/Research

konsantresinden sülfatlaştırıcı kavurma yöntemi ile bakır kazanılmasını mümkün kılmaktadır.

Şekil 1' den görüleceği üzere 500 °C' de kazanılan bakır miktarı, her üç liç vasıtası için en yüksektir. Her bir asit için, sıcaklık 200 °C' den 500 °C' ye artırılması ile elde edilen bakır verimi, sıcaklıkla doğru orantılı olarak artmakta ve 500 °C' de en yüksek değere ulaşmaktadır. 500 °C' de elde edilen bakır verimleri nitrik asit, hidroklorik asit ve sülfürik asit çözeltileri için sırası ile %99.0, %92.8 ve %90.6' dır. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda, bakır kazanımı sıcaklığın artması ile beraber azalmaktadır. Bu olayın, 500 °C üzerindeki sıcaklıklarda bakırın oksit formuna dönüşmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca Şekil 1' e bakılarak, tüm sıcaklık değerleri için nitrik asit çözeltisi ile elde edilen liç veriminin en yüksek olduğu söylenebilir. Demir, özellikle liç çözeltilerinden elektrolitik yöntem ile bakırın kazanılması sırasında çeşitli problemlere neden olmaktadır. Bu sebepten ötürü bakır içeren liç çözeltilerinde demir, istenmeyen bir metaldir ve demir derişimi mümkün olduğunda düşük bir seviyede tutulması gerekir (Bahar ve ark., 2012). Yine, Şekil 1 incelendiğinde, 450 °C' de çözelti ortamına geçen demir miktarı tüm liç çözeltileri için en yüksektir. Ayrıca, nitrik asit çözeltisi, bakır kazanımında olduğu gibi, demirin çözelti ortamına geçmesi için de hidroklorik asit ve sülfürik asitten daha etkili bir liç ajanıdır. 450 °C' de gerçekleştirilen kavurma işlemi sonrası yapılan nitrik asit, hidroklorik asit ve sülfürik asit liçi sonrası demirin, sırasıyla, %48.1, %42.0 ve %38.7' si çözelti ortamına geçmiştir. Bu değerler 500 °C' deki kavurma için, sırasıyla, %21.4, %18.6 ve 17.4' dir. Buna göre, nitrik asit liçi için, sıcaklığın 450 °C'

den 500 °C' ye çıkarılması ile çözeltiye geçen demir miktarı %48.1' den %21.4' e düşmüştür. Bu durumda çözeltinin demir muhtevası, 16.97 g/L' den 7.55 g/L' ye düşmüştür. 7.55 g/L demir içeriği, bakır kazanılacak bir çözelti için yüksek bir değerdir. Bu bilgiler ışığında, bakırın, metalik bakır halinde kazanılması işleminden önce çözeltinin demir içeriğinin azaltılması gerektiği söylenebilir.

Kavurma Süresinin Etkisi

Kalkopirit konsantresinden kavurma-asit liçi yöntemi ile bakır kazanılması üzerine kavurma süresinin etkisi Şekil 2' de verilmiştir. 60 dakikaya kadar artan zamanla beraber elde edilen bakır miktarının arttığı Şekil 2' den görülmektedir. 60 dakika süre ile kavrulmuş örneğin, nitrik asit çözeltisi ile liç edilmesi sonucunda bakırın %99.0' u sulu ortama geçmiştir. Zamanla bakır kazanımının artması, başlangıçta porselen kapsülde bulunan kalkopirit konsantresinin sadece üst kısmının havanın oksijeni ile temas ettiği, zaman ilerledikçe ise, hava ve dolayısı ile kavurmayı sağlayacak gerekli miktardaki oksijenin kapsülün tabanında bulunan malzemeye ulaşip orada kavurmayı sağladığı şeklinde yorumlanabilir. Öte yandan kavurma süresi arttıkça çözelti ortamına geçen demir miktarı da artmaktadır. Bu nedenle kavurma-asit liçi prosesi için en uygun kavurma süresi, 60 dakika olarak seçilmiştir.

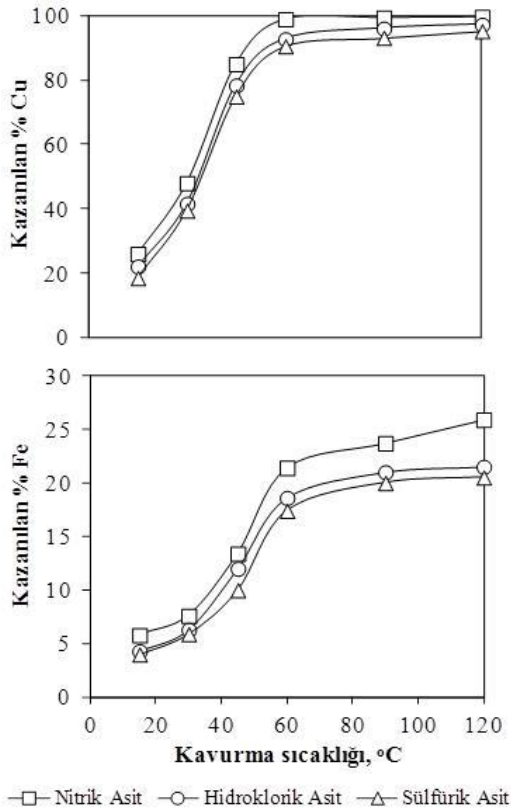
SONUÇLAR

Kalkopirit konsantresinden bakır elde etmek üzere, kalkopirit konsantresinin durgun atmosferik şartlarda kavurmayı müteakip nitrik asit, hidroklorik asit ve sülfürik asit ile liçi için, kavurma koşulları incelendiği

Araştırma/Research

bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. 500 °C' ye kadar artan kavurma sıcaklığı ile beraber kazanılan bakır yüzdesi artmış, bu sıcaklıktan sonra ise kazanılan bakır yüzdesinde azalmalar meydana gelmiştir. Bu nedenle, en uygun kavurma sıcaklığı, 500 °C olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Kavurma süresinin etkisi (kalkopirit konsantre kütlesi: 5.0 g; kavurma sıcaklığı: 500 °C; liç sıcaklığı: oda sıcaklığı; liç süresi: 60 dk; karıştırma hızı: 300 dev/dk; katı/ sıvı oranı: 1 g/10 mL).

2. Nitrik asit, hidroklorik asit ve sülfürik asit liçinden elde edilen bakır kazanım yüzdelere göre asitlerin etkinliği, nitrik asit> hidroklorik asit> sülfürik asit şeklinde sıralanmıştır.

3. 500 °C' de 60 dakika kavurulmuş kalkopirit konsantresinin, oda sıcaklığında, 1 g/10 mL katı/sıvı oranında, 0.5 N nitrik asit çözeltisi ile 300 dev/dk karıştırma hızında 60 dakika liç sonucunda bakırın %99.0' u liç çözeltisine geçmiştir. Aynı şartlarda çözeltiye geçen demir oranı %21.4' tür.
4. 500 °C' de, 15-120 dakika arası farklı sürelerde yapılan kavurma işlemleri, en uygun kavurma süresinin 60 dakika olduğunu göstermiştir.
5. En uygun koşullarda olan 500 °C' de 60 dakika kavurma sonucunda çözeltiye geçen demir miktarı 7.55 g/L' dir. Bu çözeltiden elektroliz yöntemi ile bakırın metalik halde kazanılması için, çözeltideki demir miktarının azaltılması gerekmektedir.
6. Nihai sonuç olarak kavurma-asit yöntemi ile kalkopirit konsantresinden bakır kazanılmasının mümkün olduğu söylenebilir.

Teşekkür

Yazar, projeye (Proje No: MFTUB13-21) verdiği mali desteğinden ötürü Tunceli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimine teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- Adebayo, A.O., Ipinmoroti, K.O., Ajayi, O.O., 2003. Dissolution kinetics of chalcopyrite with hydrogen peroxide in sulphuric acid medium. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 17:213-218.
- Al-Harabsheh, M., Kingman, S., Al-Harabsheh, A., 2008. Ferric chloride leaching of chalcopyrite: Synergetic effect of CuCl₂. *Hydrometallurgy*, 91: 89-97.

Araştırma/Research

- Bahar, N.**, 2004. Kalkopirit konsantresinin persülfatlı ortamda liçinin incelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ.
- Bahar, N.**, 2014. Recovery of copper from chalcopyrite concentrate by sulphation roasting-water and hydrochloric acid leaching. *Seoul International Conference on Engineering and Applied Science*, Seul.
- Bahar, N., Altundoğan, H.S., Tümen, F.**, 2012. Kalkopiritten elde edilen liç çözeltilerinden demirin uzaklaştırılması üzerine bir araştırma. *10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, 3-6 Eylül 2012, İstanbul.
- Bailey, N.T., Woods, S.I.**, 1974. A comparison of two rapid methods for the analyses of copper smelting slags by atomic absorption spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 69: 19-25.
- Cai, Y., Chen, X., Ding, J., Zhou, D.**, 2012. Leaching mechanism for chalcopyrite in hydrochloric acid. *Hydrometallurgy*, 113: 109-118.
- Dutrizac, J.E.**, 1989. Elemental sulfur formation during the ferric sulfate leaching of chalcopyrite. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 28: 337-344.
- Hackl, R.P., Dreisinger, D.B., Peters, E., King, J.A.**, 1995. Passivation of chalcopyrite during oxidative leaching in sulfate media. *Hydrometallurgy*, 39: 25-48.
- Hirato, T., Majima, H., Awakura, Y.**, 1987. The leaching of chalcopyrite with ferric sulfate. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 18: 489-496.
- Hua, Y., Cai, C., Cui, Y.**, 2006. Microwave enhanced roasting of copper sulfide concentrate in the presence of CaCO₃. *Separation Purification Technology*, 50: 22-29.
- Lu, J., Dreisinger, D.**, 2013. Copper chloride leaching from chalcopyrite and bornite concentrates containing high levels of impurities and minor elements. *Hydrometallurgy*, 138: 40-47.
- Lu, Z.Y., Jeffrey, M.I., Lawson, F.**, 2000. The effect of chloride ions on the dissolution of chalcopyrite in acidic solutions. *Hydrometallurgy*, 56: 189-202.
- Marsden, J.O., Wilmot, J.C.**, 2007. Medium-temperature pressure leaching of copper concentrates-Part I: Chemistry and initial process development. *Minerals and Metallurgical Processing*, 24: 193-204.
- Olubambi, P.A., Borode, J.O., Ndlovu, S.**, 2006. Sulfuric acid leaching of zinc and copper from Nigerian complex sulphide ore in the presence of hydrogen peroxide. *The Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 106: 765-770.
- Qui, T.S., Nie, G.H., Wang, J.F., Cui, L.F.**, 2007. Kinetic process of oxidative leaching of chalcopyrite under low oxygen pressure and low temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17: 418-422.
- Riveros, G., Marin, T., Puga, C.**, 2004. Lime-concentrate roasting studies-effect of activated limestone. *Minerals Engineering*, 17: 469-471.
- Ruiz, M.C., Montes, K.S., Padilla, R.**, 2011. Chalcopyrite leaching in sulfate-chloride media at ambient pressure. *Hydrometallurgy*, 109: 37-42.
- Sokic, M., Ilc, I., Zivkovic, D., Vuckovic, N.**, 2008. Investigation of mechanism and kinetics of chalcopyrite concentrate oxidation process. *Metabk*, 47: 109-113.
- Solis-Marcial, O.J., Lapidus, G.T.**, 2013. Improvement of chalcopyrite dissolution in acid media using polar organic solvents. *Hydrometallurgy*, 131: 120-126.
- Solis-Marcial, O.J., Lapidus, G.T.**, 2014. Chalcopyrite leaching in alcoholic acid media. *Hydrometallurgy*, 147: 54-58.
- Qian, G., Li, J., Li, Y., Gerson, A.R.**, 2014. Probing the effect of aqueous impurities on the leaching of chalcopyrite under controlled conditions. *Hydrometallurgy*, 149: 195-20.
- Vogel, A.I.**, 1989. Vogel's Textbook of quantitative chemical analysis. Fifth Edition, John Wiley and Sons, New York, USA, 906 p.