

Basınçlı liç ile Küre masif zengin bakır cevherinden metalik değerlerin kazanımı

K. Tahsin PEREK*, Fatma ARSLAN

İTÜ Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, Küre masif zengin bakır cevherinin basınç altında liçi çalışılmıştır. Deneylerde süre, sıcaklık, oksijen kısmi basıncı, katı konsantrasyonu, asit konsantrasyonu ve katalizör olarak gümüş iyonları ilavesinin metal çözünme verimleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Optimum çözündürme koşulları 160 °C sıcaklık, 0.4 M başlangıç H₂SO₄ konsantrasyonu, 20 bar oksijen kısmi basıncı, 50 g/l katı konsantrasyonu ve 120 dak liç süresi olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda bakır %95, kobalt %70 ve çinko %97 verimle çözeltilmiş alınabilmektedir. Ortama az miktarda gümüş iyonları ilavesinin liç prosesini hızlandırıcı etkisi olduğu belirlenmiştir. Bakır çözünme kinetiği incelenmiş ve çözünme reaksiyonunun aktivasyon enerjisi 52,74 kJ/mol olarak bulunmuştur. Bu değer reaksiyonun difüzyon kontrollü olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kalkopirit, bakır cevheri, basınçlı liç.

Extraction of metallic values from Küre massive rich copper ore by pressure leaching

Abstract

Several hydrometallurgical treatments such as chloride, sulfate, nitrate, and amine based processes are used for leaching of chalcopyrite, sphalerite, and galena concentrates as alternative to pyrometallurgical processes. Sulfate-based hydrometallurgical processes are usually employed as ferric sulfate leaching, oxygen pressure leaching, or bacterial leaching. The aim of this study was to investigate the possibilities of recovering metallic values from Küre massive rich copper ore by pressure leaching. Massive rich copper ore, taken from Küre and containing 7.43 % Cu, 0.044 % Pb, 0.33 % Zn, 0.08 % Co, 0.002 % Ni, 1 (g/t) Au, 14 (g/t) Ag, was subjected to this experimental study. In the leaching tests, the effects of leaching time, temperature, partial oxygen pressure, solids concentration, initial acid concentration, and silver ion addition as a catalyst on metal leaching recoveries were investigated and optimum leaching conditions were determined. The optimum leaching conditions were found as 160 °C temperature, 0.4 M initial H₂SO₄ concentration, 20 bar partial oxygen pressure, 50 g/l solids concentration, and 120 min leaching time. Approximately 95% of copper, 70% of cobalt and 97% of zinc were extracted under these conditions. It was also shown that silver ions could be added in small quantities for enhancing the leach process. Copper leaching kinetics was also studied and an activation energy for copper dissolution reaction was found as 52,74 kJ/mol which shows diffusion controlled process.

Keywords: Chalcopyrite, copper ore, pressure leaching.

Giriş

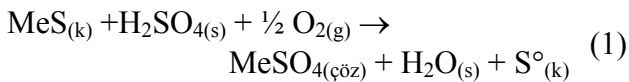
*Yazışmaların yapılacağı yazar: Tahsin PEREK. perek@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 61 70.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Maden Fakültesi'nde tamamlanmış "Küre masif zengin cevherinin basınç altında çözündürülmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 28.01.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 09.04.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Eski çağlardan beri Anadolu madenciliğine önemli katkıları bulunmuş olan Küre bakır yatağı dissemine, masif zengin, piritik bakır ve masif piritik cevher oluşumlarından meydana gelmiştir. Bu cevherler %0.2 ile %7.6 arasında değişen oranlarda bakır içermektedir. Bunun yanı sıra değişen oranlarda değerli (Au ve Ag) ve nadir metaller de (Se, In, Te, Bi) bulunmaktadır. Bu cevherler ortalama %1.7 Cu içerecek şekilde harmanlanarak, Küre bakır flotasyon tesisine beslenmektedir. Tesiste yaklaşık %80 verimle %15-17 Cu içerikli bakır konsantresi ve %46 S içerikli pirit konsantresi üretilmektedir (Küre Projesi, 1994).

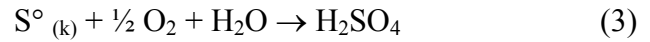
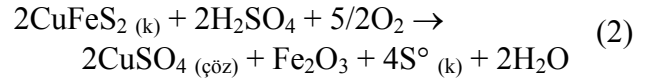
Dünya’da genellikle bakır konsantresinden piro-metalurjik yöntemlerle bakır (flaş ergitme) üretimi gerçekleştirilmektedir. Ancak günümüzde pirometa-lurjik işlemlerin yerini giderek hidrometalurjik işlemler almaktadır. Kalkopirit galen, sfalerit gibi sülfürlü minerallerin ve/veya konsantrelerin doğrudan çözündürülmesinde, klorür, sülfat, nitrat ve amin esaslı çözücüler kullanılmaktadır (Dutrizac, 1992; Mulak vd., 1994; Havlik vd., 1995; Jin vd., 1993). Sülfat esaslı hidrometalurjik işlemler, genellikle ferrik sülfat liçi, oksijenli ortamda basınçlı liç ve bakteri liçi şeklinde uygulanmaktadır.

Basınç altında çözündürme işlemi hem asidik hem de bazik ortamda yapılabilmektedir. Yüksek sıcaklık ve basınç uygulamasının yanısıra oksitleyici gazların kullanılması nedeniyle atmosferik koşul-larda yapılan liçe kıyasla, daha avantajlıdır. Metal sülfürlerin basınç altında çözündürülmesinde asidik ortamda gerçekleşen reaksiyonları, sülfürik asit ve oksijen kullanılan ortamda genel olarak aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir (Habashi, 1970):



Bu eşitlikteki metal sülfür (MeS) uygulamada Cu, Ni, Zn, Co, Ni-Co, Ni-Cu gibi basit ve kompleks metal sülfürler olabilmektedir.

Asidik ortamda basınç altında çözündürme işlemi sırasında elementer kükürt oluşmaktadır. Ortamın asitlik derecesi $\text{pH} \leq 3$ civarında tutularak mevcut demirin demir hidroksit $\text{Fe}(\text{OH})_3$ şeklinde artıktaki kalması, buna karşılık Cu, Ni, Co, Zn vb. benzeri metallerin çözeltiliye alınması mümkündür. Kalko-pirit minerali için çözünme reaksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir:



Düşük sıcaklıklarda oksijen basıncı altında kalkopiritin çözünmesi oldukça yavaştır. Sülfatlı çözeltilerde oluşan elementer kükürt henüz çözünmemiş tanelerin yüzeylerini kaplayarak bir diffüzyon tabakası oluşturmakta, çözünme reaksiyonunun hızını yavaşlatmaktadır (Munoz vd., 1979). Kükürdün bu olumsuz etkisini ortadan kaldırmak veya azaltmak amacıyla çözünme öncesi mekanik (çok ince öğütme, mekanik aktivasyon) (Gock, 1978) veya çözündürme esnasında kimyasal (gümüş iyonları, küprik, ferros iyonları veya lignosol-sodyum lignosülfonat ilavesi) (Hackl vd., 1995) yöntemler kullanılmaktadır.

Küre cevherleriyle yapılan daha önceki çalışmalarda, flotasyon ile zenginleştirme esnasında değerli ve nadir metallerin baz metallerle birlikte ara ürünlerde toplandığı gözlenmiş ve bu metallerin kazanılmasına yönelik olarak sülfatlayıcı kavurma + kalsinelerin asitli ortamda çözündürülmesi + artıklardan siyanür liçi ile Au ve Ag kazanılması işlemleri uygulanmıştır (Arslan vd. 1995). Bir başka çalışmada ise değerli ve nadir metal içerikleri açısından daha zengin olan masif zengin cevher numunesinden ferrik sülfat, ferrik klorür ve kuprik klorür liçi çalışılmıştır (Bulut vd. 2001).

Bu çalışma kapsamında, sülfat esaslı hidrometalurjik yöntemlerden oksitleyici basınç liç yöntemi uygulanarak, sıcaklık, süre, katı konsantrasyonu, başlangıç asit konsantrasyonu,

oksijen kısmi basıncı ve katalizör olarak gümüş iyonları ilavesinin metallerin çözünme verimleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve bakır çözünme kinetiği incelenmiştir.

Malzeme

DeneySEL çalışmalarında Küre bakır cevheri yatağından alınan -0,1 mm boyutundaki masif zengin bakır cevher numunesi kullanılmıştır. Kalkopirit ve bornitçe zengin örneklerde kesitlerden yapılan mineralojik incelemeler ve X-Işınları (Phillips PW 1130/90) cihazında yapılan analizler sonucunda, ana cevher minerallerinin kalkopirit ($CuFeS_2$), pirit (FeS_2) ve bornit (Cu_5FeS_4) olduğu ayrıca, sfalerit (ZnS), galen (PbS), tennantite ($(Cu,Fe,Zn,Ag)_{12}As_{14}S_{13}$), karolit ($CuCo_2S_4$), nabit altın, kuvars ve kalsit minerallerinin bulunduğu gözlenmiştir. Perkin - Elmer Marka ICP (Inductively Coupled Plasma) cihazı kullanılarak yapılan kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Küre masif zengin cevherinin kimyasal analiz sonuçları

Element	%	Element	g/t
Fe	41.7	Au	1
Cu	7.43	Ag	14
Co	0.08	Ge	<30
Ni	0.002	Se	n.n.
Zn	0.33	Te	<40
Pb	0.044		
SiO ₂	4.52		
S	45.0		

Yöntem

Basıncılı liç deneylerinde, Ernst Haage 1220 tip, toplam hacmi 2 litre olan, periyodik olarak numune alınabilecek şekilde dizayn edilmiş laboratuvar ölçekli otoklav kullanılmıştır. Otoklav dıştan ısıtılmakta ve karıştırma manyetik pervaneli karıştırıcı ile yapılmaktadır. Oksijen bir boru vasıtasıyla doğrudan pülp içine gönderilmektedir. Gövdesi ve içi korozyona dayanıklı titanyum alaşımlı metalden yapılmış olan otoklavın maksimum çalışma kapasitesi 1,5

litre, sıcaklığı 350°C, basıncı 200 bar ve karıştırma hızı 1000 devir/dakikadır.

Deneylerde belirlenen miktarlardaki numune ve liç çözeltisi reaksiyon kabına konularak otoklava yerleştirilmiş, daha sonra otoklav kapağı kapatılarak sistem ısıtılmaya başlanmıştır. Katının otoklav dibinde şişip kekleşmesini önlemek için deney başlangıcında çözelti karıştırılmaya başlanmıştır. Ayrıca belirli miktarda oksijen başlangıçta sisteme verilmiştir. Çözelti istenilen sıcaklığa ulaştığı an deney başlangıcı olarak kabul edilmiş, liç süresi bittiğinde oksijen verilmesi ve ısıtma durdurularak, otoklav bir su banyosunda su ile mümkün olduğu kadar kısa sürede soğutulmuştur. Otoklavın iç ısısı yaklaşık 55-60 °C'ye düşünce basınç tahliye vanası açılarak basınç boşaltılmış, daha sonra otoklav kapağı açılarak içinden reaksiyon kabı çıkarılmış ve pülp vakum filtreden süzölmüştür. Elde edilen yüklü liç çözeltisi ve artıkların kimyasal analizleri yapılmıştır.

Sonuçlar ve tartışma

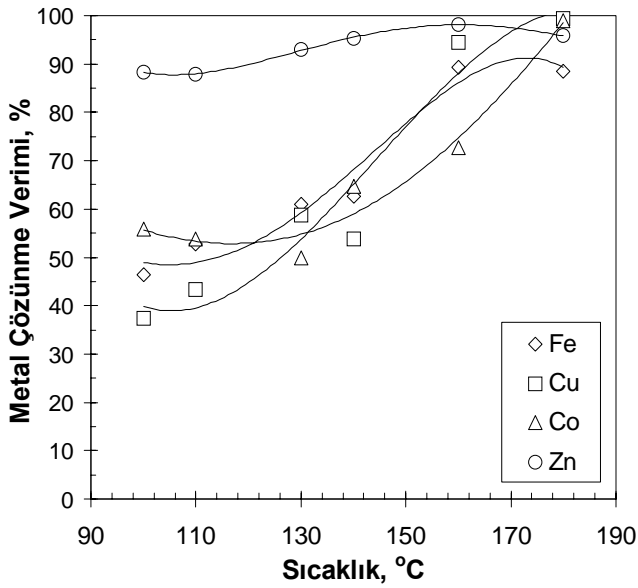
Basıncı altında liç deneylerinde yukarıda belirtilen parametrelerin metallerin çözünme verimleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Sıcaklığın ve sürenin etkisi

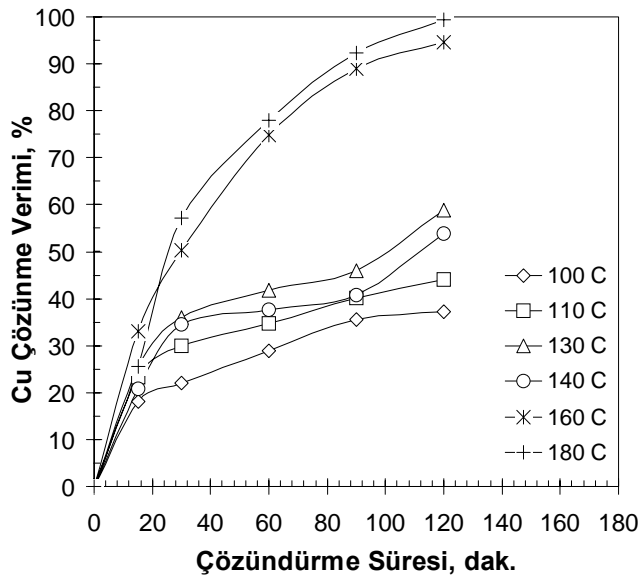
Sıcaklığın metal çözünme verimleri üzerindeki etkisinin belirlemek için 100, 110, 130, 140, 160 ve 180 °C sıcaklıklarda yapılan basınç altında çözüldürme deneylerinde, başlangıç asit (H_2SO_4) konsantrasyonu 0.4 M, oksijen kısmi basıncı 20 bar, katı madde konsantrasyonu 50 g/l, toplam liç süresi 120 dakika olarak alınmış olup deney sonuçları Şekil 1'de verilmiştir

Çözüldürme süresinin metal çözünme verimleri üzerindeki etkisi liç sırasında belirli aralıklarla çözeltiden numuneler alınarak belirlenmiştir. Yukarıda belirtilen deneysel koşullara göre oluşturulan süreye bağlı olarak Cu, Co, ve Zn metal çözünme verimleri sırasıyla, Şekil 2, 3, ve 4'te verilmiştir.

Şekil 1’de görüldüğü gibi, düşük sıcaklıklarda (100-120 °C) çözünme hızları yavaş olurken, sıcaklığın artmasıyla gözle görülür bir şekilde metal çözünme verimlerinde artış olmaktadır. Ancak, demirin 160°C sıcaklıktan itibaren çözün-mesi durmuş ve diğer metallerin çözümleri de yavaşlamıştır. 160 °C sıcaklıkta 2 saat çözdürme işlemi sonunda kobalt ve bakırın %99’u, çinkonun %95’i çözeltilmiş alınabilmiştir.

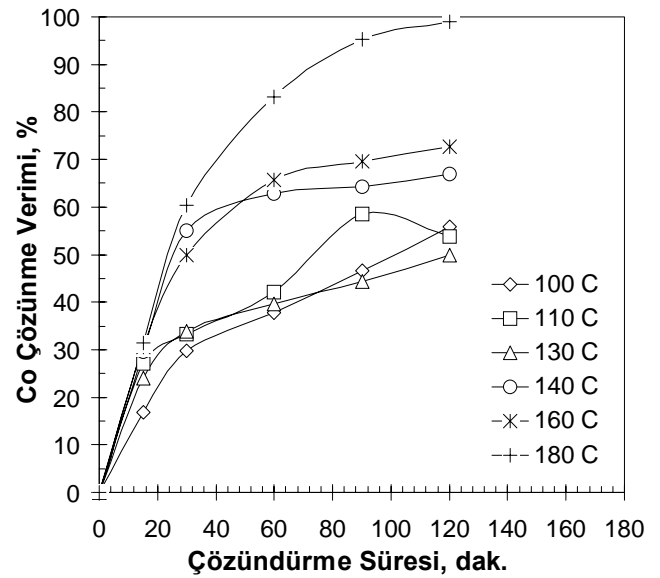


Şekil 1. Sıcaklık değişiminin metal çözünme verimlerine etkisi

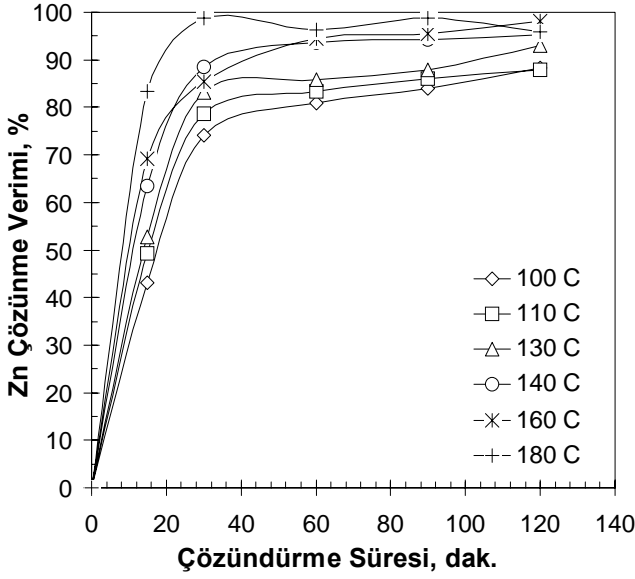


Şekil 2. Sıcaklık değişiminin zamana bağlı olarak Cu çözünme verimlerine etkisi

Şekil 2, 3 ve 4’ten de görüldüğü gibi metal çözünme verimleri ilk bir saate kadar oldukça hızlı bir artış göstermiş ve bu noktadan sonra zamana bağlı olarak parabolik bir değişim izlemiştir. Bunun nedeni de kükürdün ergime sıcaklığının (119°C) üzerinde yapılan basınç altında liç deneylerinde, ergimiş halde bulunan kükürdün reaksiyona henüz girmemiş tanelerin etrafını kaplaması sonucu pasif bir tabaka oluşturması ve metallerin çözünme hızlarının yavaşlamasına neden olmasıdır. Sıcaklık arttıkça metal çözünme verimi-çözündürme süresi eğrileri daha yüksek değerlere kaymaktadır.



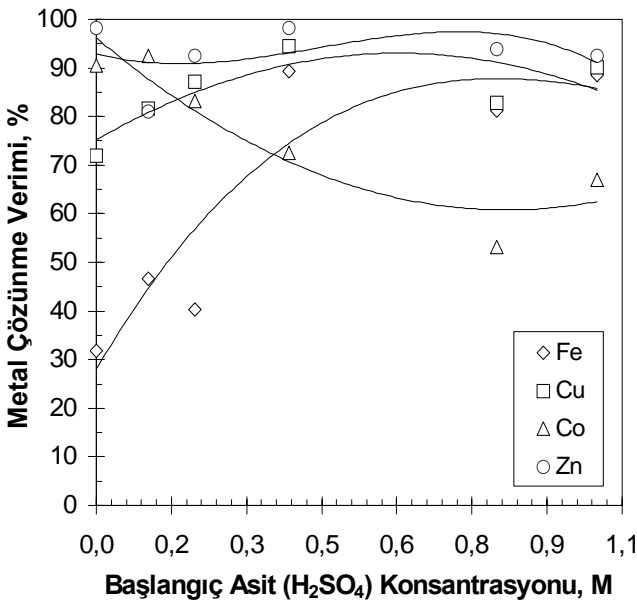
Şekil 3. Sıcaklık değişiminin zamana bağlı olarak Co çözünme verimlerine etkisi



Şekil 4. Sıcaklık değişiminin zamana bağlı olarak Zn çözünme verimlerine etkisi

Başlangıç asit konsantrasyonunun etkisi

Başlangıç asit konsantrasyonunun metal (Cu, Co, Zn, Fe) çözünme verimleri üzerindeki etkisinin belirlemek için 0, 0.1, 0.2, 0.4 0.8 ve 1.0 M başlangıç H₂SO₄ konsantrasyonlarında deneyler yapılmıştır. Deneylerde sıcaklık 160°C, oksijen kısmi basıncı 20 bar, katı madde konsantrasyonu 50 g/l ve liç süresi 120 dakika olarak alınmış olup deney sonuçları Şekil 5'te verilmiştir.

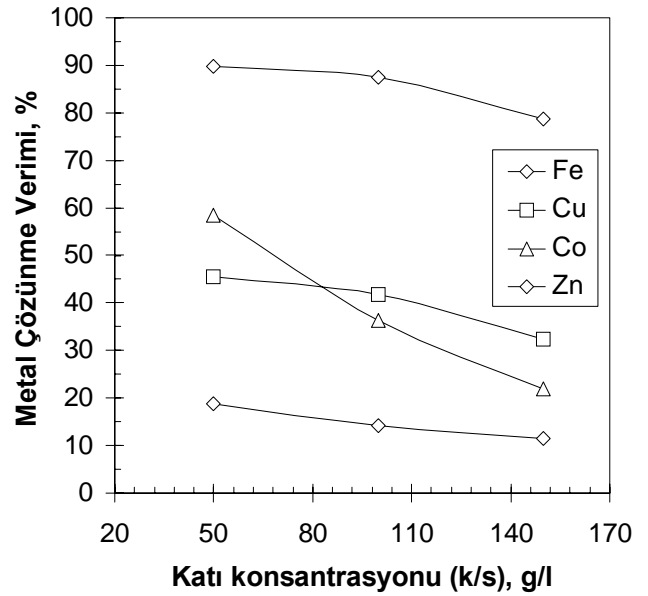


Şekil 5. Başlangıç H₂SO₄ konsantrasyonu değişiminin metal çözünme verimlerine etkisi

Şekilden de görüldüğü gibi 0,4 M başlangıç asit konsantrasyonuna kadar Fe, Cu ve Zn çözünme verimleri hızlı bir artış göstermekte ve bundan sonraki asit konsantrasyonu artışına rağmen fazla değişmemektedir. Ancak kobalt çözünme verimi artan asit konsantrasyonu ile azalmaktadır. Literatürde bakır çözünmesindeki yavaşlamanın ana nedenleri olarak: (a) belirli bir sıcaklıkta çözeltideki çözülmüş oksijen konsantrasyonunun asit konsantrasyonuna bağlı olarak değişmesi ve (b) asit miktarının artmasıyla ortamdaki sülfat iyonu konsantrasyonunun da artması ve böylece henüz reaksiyona girmemiş taneciklerin yüzey-lerinin bu sülfat molekülleri veya asit tarafından kaplanmasının çözümleri engellendiği şeklinde verilmektedir (Yu vd., 1973).

Katı konsantrasyonunun etkisi

Katı konsantrasyonunun metal çözünme verimleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 50 g/l, 100 g/l ve 150 g/l katı konsantrasyonlarında deneyler yapılmıştır. Deneylerde, sıcaklık 110 °C, oksijen kısmi basıncı 10 bar, liç süresi 180 dakika olarak alınmış ve deney sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.



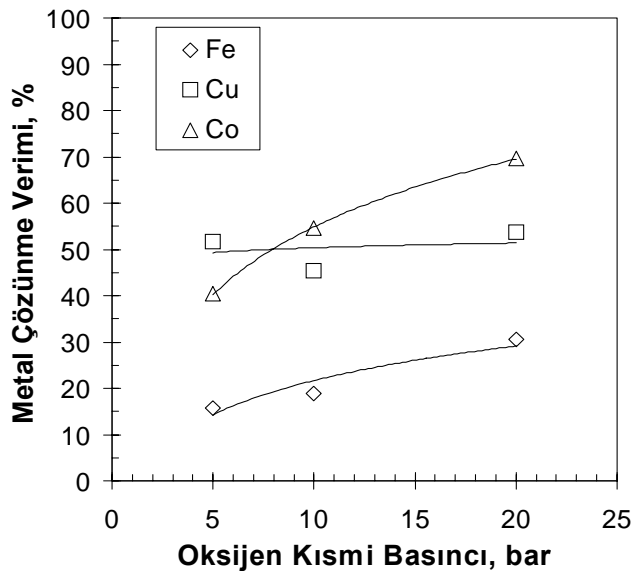
Şekil 6. Katı konsantrasyonu değişiminin metal çözünme verimlerine etkisi

Şekil 6'dan da görüldüğü gibi, metal çözünme verimleri katı konsantrasyonu arttıkça azalmaktadır. Deney başlangıcında beslenen katı madde miktarı arttıkça çözeltiliye sülfat haline dönüşerek geçen kükürt miktarı artmakta, böylece çözeltilinin pH'sı da oldukça düşmektedir. Ayrıca çözeltilinin asiditesine bağlı olarak çözeltideki demir hidrolize olmakta ve katıda hematit, jarosit veya demir hidroksit halinde çökelebilmektedir. Bu nedenle 50g/l katı konsantrasyonu deneysel çalışmalarda optimum değer olarak alınmıştır.

Oksijen kısmi basıncının etkisi

Basınç altına çözüldürmede metallerin çözünme hızları oksijen kısmi basıncına bağlıdır. Ancak toplam basınç otoklavın maliyetini olumsuz yönde etkilemektedir.

Oksijen kısmi basıncının metal çözünme verimlerine etkisini belirlemek için 5, 10, ve 20 bar oksijen kısmi basınçlarında yapılan deneylerde sıcaklık 110°C, katı konsantrasyonu 50g/l ve toplam liç süresi 180 dakika olarak alınmış olup sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Oksijen kısmi basıncı değişiminin metal çözünme verimlerine etkisi

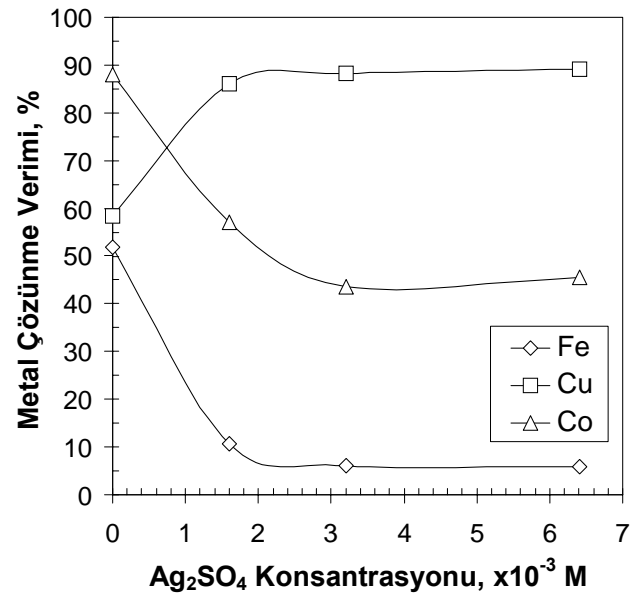
Şekil 7'den de görüldüğü gibi metallerin çözünme verimleri oksijen kısmi basıncına bağlı olarak değişmekte, basıncın artmasıyla Co ve Fe

çözünme verimleri artmakta Cu çözünme verimi fazla değişmemektedir. Maksimum çözünme verimi 20 bar basınçta elde edilmiştir.

Katalizör olarak Ag_2SO_4 ilavesinin etkisi

Kalkopiritin sülfatlı çözeltilerle çözüldürülmesi sırasında oluşan element haldeki sülfürün bir difüzyon engeli oluşturarak henüz çözünmemiş tanelerin çözünmelerini engellediği çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir (Miller vd., 1981; Dutrizac, 1989; Özdağ, 1985). Kükürdün bu etkisini ortadan kaldırmak veya azaltmak için ortama gümüş iyonları ilave edilerek metal çözünme verimleri üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda ortama eklenen gümüş iyonlarının katalitik bir etki yaptığı, gümüş iyonları ile serbest kükürdün Ag_2S oluşturduğu ve bunun da partikül yüzeyini kaplayan sülfür tabakasını çatlatarak reaksiyonu engelleyici etkisini ortadan kaldırdığı belirtilmiştir. (Dutrizac, 1989, Miller vd., 1981, Özdağ, 1983).

Deneysel olarak 0.0, 1.6×10^{-3} , 3.2×10^{-3} , 6.4×10^{-3} M konsantrasyonlarında gümüş sülfat ilavesi yapılmıştır. Liç deney koşulları olarak, sıcaklık 130°C, katı madde konsantrasyonu 50 g/l, toplam liç süresi 120 dakika olarak alınmış ve deney sonuçları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Başlangıç Ag_2SO_4 konsantrasyonu değişiminin metal çözünme verimlerine etkisi

Şekil 8'den de görüldüğü gibi gümüş sülfat konsantrasyonunun yaklaşık 2×10^{-3} M dan daha fazla artırılmasıyla metal çözünme verimlerinde bir değişiklik olmamaktadır. Bunun nedenini Miller ve diğerleri (1981), fazla miktardaki gümüşün reaksiyonu sınırladığı şeklinde açıklamışlardır. 1.6×10^{-3} M gümüş sülfat iyonları ilave edildiğinde bakır çözünme verimi %90'a yükselmekte, buna karşın Co ve Fe çözünme verimleri sırasıyla %50 ve %10 seviyelerine düşmektedir. Demir çözünme verimindeki düşüş daha sonraki çözeltilerden metallerin kazanılma aşamasında istenilen bir durumdur. Metalleri kazanım aşamasından önce çözeltilen demir uzaklaştırma masrafları azalacaktır.

Çözünme kinetiği

Küre masif zengin bakır cevherinde en fazla bulunan metal bakır (%7.43) olduğundan burada sadece bakır çözünme kinetiği verilmiştir. Diğer metallerin çözünme davranışlarının da benzer kinetik modelle açıklanabileceği bulunmuş ve cevherdeki içerikleri düşük olduğundan bu metallere yönelik kinetik çalışmalar burada sunulmamıştır. Deneylerden elde edilen veriler (Şekil 2) kullanılarak basınçlı liçin kinetiğini saptamak amacıyla farklı kinetik modeller denenmiş ve aşağıda verilen, Crank-Ginstling-Brounshtein kinetik modelinin en uygun olduğu saptanmıştır (Levenspiel, 1999):

$$1 - (2/3) \alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = k.t \quad (4)$$

yukarıda bahsedilen kinetik model eşitliğinde, α : çözünme verimini, k (sn^{-1}) reaksiyon hız sabitini, t (sn) zamanı ifade etmektedir. Sıcaklığa bağlı olarak reaksiyon hız sabitinin Arrhenius denkleminde göre değişimi ise:

$$k = A \cdot e^{-E_a/RT} \quad (5)$$

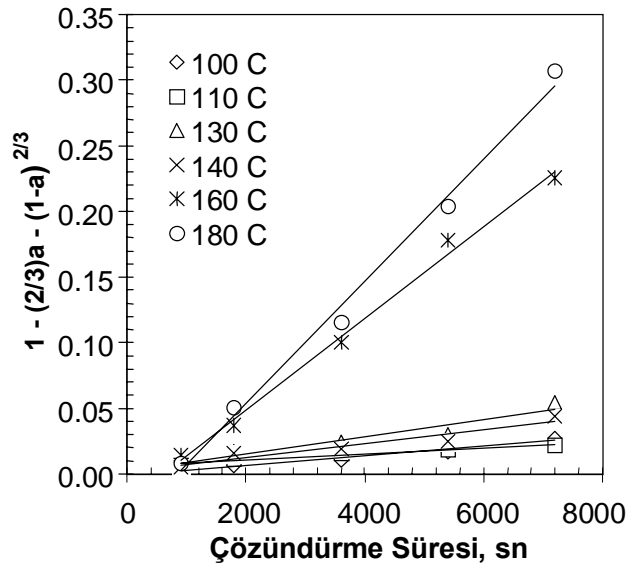
şeklinde verilmektedir. Burada, A: sabit sayı, E_a : aktivasyon enerjisi, T: sıcaklık (K) ve R: gaz sabitini ifade etmektedir.

Şekil 2'de sunulan verilerin (4) nolu eşitliğe göre uyarlanmış hali sıcaklığa bağlı olarak Şekil

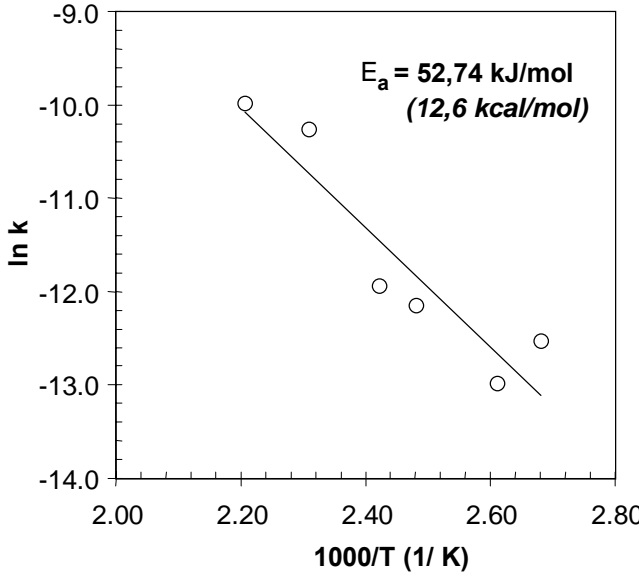
10'da verilmektedir. Her bir sıcaklık için k değeri hesaplanmış olup k değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi de grafiksel olarak Şekil 11'de sunulmaktadır. Arrhenius eğrisinden (Şekil 11) bakır çözünmesi için hesaplanan aktivasyon enerjisi 52.74 kJ/mol (13 kcal/mol) olarak bulunmuştur. Bu aktivasyon enerjisi değeri çözünme reaksiyonu-nun difüzyon kontrollü olduğunu göstermektedir. Bu değer literatürdeki verilerle uyum içersindedir (Lin vd. 1986).

Sonuçlar

Bu çalışma oksitleyici basınç liçi ile Küre masif zengin bakır cevherinden metalik değerlerin kazanılabileceğini ortaya koymuştur. Küre masif zengin cevherinin oksitleyici basınç liçinde, optimum liç koşulları, sıcaklık 160 °C, başlangıç asit (H_2SO_4) konsantrasyonu 0.4 M, oksijen kısmi basıncı 20 bar, katı konsantrasyonu 50 g/l ve çözündürme süresi 120 dak olarak bulunmuştur. Optimum liç koşullarında, yaklaşık olarak bakırın %95'i, kobaltın %70'i ve çinkonun %97'sinin çözeltilmeye alınabileceği saptanmıştır.



Şekil 10. Bakırın çözünmesi için farklı sıcaklıklardaki reaksiyon hız sabitinin zamana bağlı olarak değişimi



Şekil 11. Masif zengin cevherin basınçlı liçinde bakır çözünmesi için Arrhenius eğrisi

Düşük konsantrasyonlarda gümüş iyonlarının ilavesinin demirin büyük çoğunluğunun demir oksit halinde katıda çöktürdüğü ve Cu çözünme hızını büyük ölçüde artırdığı görülmektedir. Demir dışı metallerin üretiminde çözüldükten metaller kazanılmadan önce demirin uzaklaştırılması gerektiğinden çözüldükteki demir konsantrasyonunun düşük olması olumlu bir sonuçtur.

Kinetik çalışmalar sonucu bakır çözünme reaksiyonunun difüzyon kontrollü olduğu belirlenmiş ve aktivasyon enerjisi 52.74 kJ/mol (12.6 kcal/mol) olarak hesaplanmıştır.

Kaynaklar

- Arslan, F., Acarkan, N., Perek, T., Önal, G., (1995). Recovery of precious metals from sulfidic flotation concentrates. *6th Balkan Conference on Mineral Processing*, 134-140, Ohrid-Macedonia.
- Bulut G., Kangal O., Perek K. T., Arslan F., (2001). Recovery of metallic values from Massive Rich Ore, *New Developments in Mineral Processing, IX. Balkan Mineral Processing Cong.*, Edts: G. Önal, S. Atak, A. Güney, M.S. Çelik, A.E. Yüce, 531-536, İstanbul.
- Dutrizac J. E., (1989). Elemental sulfur formation during the ferric sulfate leaching of chalcopyrite, *Canadian Metallurgical Quarterly*, **28**, 4, 337-344.

- Dutrizac, J. E. (1992). The leaching of sulfide minerals in chloride media, *Hydrometallurgy*, **29**, 1-45.
- Gock, E., (1978). Beeinflussung des löseverhaltens von Kupferkies durch Festkörperreaktionen bei der schwingmahlung, *Erzmetall*, **31**, 282-288.
- Habashi, F., (1970). *Principles of Extractive Metallurgy*, **2**, Gordon and Breach Science Publishers, New York, London, Paris.
- Hackl, R. P., Dreisinger D. B., Peters E., King, J. A., (1995). Effect of Sulfur-dispersing surfactants on the oxygen pressure leaching of chalcopyrite, *Proceedings of COPPER 95-COBRE 95 Int. Conf.* Edts: W.C. Cooper et.al., **3**: Electrorefining and Hydrometallurgy of Copper, 559-577, Montreal
- Havlik, T., Skrobjan, M., Balaz, P., Kammel, R., (1995). Leaching of chalcopyrite concentrate with ferric chloride. *International Journal of Mineral Processing*, **43**, 61-72.
- Jin, Z. M., Warren, G. W., Henein, H., (1993). An investigation of electrochemical nature of the ferric chloride leaching of sphalerites. *International Journal of Mineral Processing*, **37**, :223-238.
- Küre Projesi, (1994). Küre Bakırlı Pirit İşletmesi, bakır yatağının jeostatistik yöntemlerle değerlendirilmesi, flotasyon tesisi bakır konsantrasyonunun yükseltilmesi ve kolon flotasyonu uygulaması, İTÜ Yer Bilimleri ve Yeraltı Kaynakları-Uygulama Araştırma Merkezi, Haziran, İstanbul.
- Levenspiel, O., (1999). *Chemical Reaction Engineering*, 668 sh., John Wiley and Sons Inc., New York.
- Lin, H. K., Sohn, Y., Wadsworth, M. E., (1986). The Kinetics of leaching of chalcopyrite and pyrite grains in primary copper ore by dissolved oxygen., *Hydrometallurgical Reactor Design and Kinetics*, Edt. R. G. Bautista, R. J. Wessely, G. W. Warren, AIME, 149-168.
- Miller J. D., McDonough P. J., Potillo H. Q., (1981). Electrochemistry in silver catalysed ferric sulfate leaching of chalcopyrite, *In Process Fundamental Considerations in Selected Hydrometallurgical Systems*, Eds. Kuhn M., SME-AIME, New York, 327-338.
- Mulak, W., Wawrzak, D., (1994). Ferric chloride leaching of lead sulphide concentrate. *5th International Mineral Processing Symposium, Progress in Mineral Processing Technology*, Ed: H., Demirel, S., Ersayın, A.A. Balkema, 373-377, Rotterdam, Brookfield.
- Munoz, P. B., Miller, J. D. Wadsworth, M. E., (1979). Reaction mechanism for the acid ferric

- sulphate leaching of chalcopyrite, *Metallurgical Trans. B.*, **10B**, 149-158.
- Özdağ H. (1983). The dissolution of Çayeli ores in acidified ferric sulfate solutions, *Ph.D. Thesis* University of Birmingham, Birmingham, England.
- Yu P. H., Hansen C. K., Wadsworth M. E., (1973). A kinetic study of the leaching chalcopyrite at elevated temperatures, *International Symposium on Hydrometallurgy*, Eds. D. J. Evans and R. S. Shoemaker, 375-402, Chicago.