

BİR AYIRMA YÖNTEMİ OLARAK ELEKTROFLOTASYON

Gündüz ATEŞOK(*)

ÖZET

Bu çalışmada, madencilik sektöründe bir sorun teşkil eden ince taneli cevherlerin özellikleri ortaya konularak, son 10 yıl içinde ince taneli cevherlerin zenginleştirilmesinde kullanılan değiştirilmiş flotasyon yöntemleri öncelikle tanıtılmıştır.

Bölüm 1 'de, rodokrosit ve kuvars minerallerinin flotasyon özellikleri saptanmış ve rodokrosit'in klasik flotasyonu yapılmıştır.

Bölüm 2'de ise, rodokrosit + kuvars karışımı kullanılarak laboratuvar çapında dizayn edilen bir elektroflotasyon hücresinde rodokrosit'in elektro flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesine çalışılmıştır. Elektroflotasyon yönteminde önemli bir yeri olan köpüğün ve kullanılan elektrodların özelliklen saptanarak, elektroflotasyon yönteminde; mekaniksel karıştırma hızının, pulp yoğunluğunun, akım yoğunluğunun, hücre yüksekliğinin, ortam pH'sının ve pulp ısısının zenginleştirme üzerine etkileri incelenmiştir.

Ayrıca, elektroflotasyonla klasik flotasyonun arasındaki farklar ortaya konularak, iki yöntemin tartışılması yapılmıştır.

ABSTRACT

This paper attempts to present characteristics of electroflotation method as well as difficulties encountered in using the method for fine particles. The paper also presents the flotation methods developed during the last ten years for enrichment of fine particles

More specifically, section 1 analyzes flotation properties of Rodoksite and Quartz minerals as well as presenting the findings of conventional flotation of Rodokrosite.

Section 2 presents findings of the enrichment process, using electroflotation, applied on rodokrosite and quartz mixture. The process was carried in a electroflotation cell designed for laboratory applications. In the process, first, the properties of froth and electrodes were determined. Second, the effect on enrichment rate of several parameters, including mechanical mixing speed, pulp density, current density, cell height, pulp's pH, and pulp temperature were studied

Finally, by using the findings, of section 1 and section 2, comparison of conventional flotation and electroflotation was made, and differences were pointed out.

(*) Yrd.Doç.Dr., İTÜ Maden Fakültesi, Tesvikiye-İSTANBUL

1. GİRİŞ

Madencilik sektöründe ince tanelerin problemleri gün geçtikçe artmaktadır. Bilhassa son yıllarda yeraltı ve yerüstü üretim madencilğinde mekanizasyonun artması ile üretilen ince tane miktarı ve buna bağlı olarak da Cevher Hazırlama problemleri hızlı bir artış göstermektedir. 1 mikron altının koloidal, - 1 + 1 0 mikron arasının çok ince ve - 10 + 100 mikron arasının en ince malzeme olarak tanımlanan bu boyut gruplarından özellikle şlam malzemesi olarak adlandırılan ve 10 mikron boyutu altında bulunan bu fraksiyonun problemlerine teknolojiye ileri ülkeler hızlı bir şekilde çareler aramaktadır(1). Son 10 yıl içinde önemli aşamalar kaydedilmesine rağmen, henüz ekonomik ve verimli bir gerçek yöntem veya yöntemler bulunamamıştır. ABD'de Florida'daki fosfat madeninde üretilen cevherin 1/3'ü, Bolivya'daki üretilen kalay cevherinin 1/2'si ince malzeme olarak stok sahalarında depolanmaktadır. Dünya tungsten cevheri üretiminin 1/5'i ince cevher olarak değerlendirilememektedir(2).

Klasik cevher hazırlama flotasyon yöntemleri ince tanelerin pülp içerisinde fizikokimyasal değişimleri nedeniyle başarısız kalmaktadır. İnce tanelerin küçük kütleleri, pülp içinde flotasyon işlemi sırasında tanelerin köpüğe çarpışma ve yapışma olanağının azalması ve cevher içinde bulunan gang mineral incelerinin kontrol zorlukları nedeniyle hava-kabarcık köpük flotasyon yöntemi başarısız olmaktadır. Bunlara ilave olarak pülp içerisinde bulunan ince malzemenin artan yüzey alanları nedeniyle tükettikleri reaktif miktarları da göz önüne alınacak olursa, durumun önemi açıkça ortaya çıkmaktadır. Flotasyon yönteminde ince tanelerin taşıdığı özellikler Şekil 1'de blok diyagramı halinde gösterilmiştir. Çeşitli araştırmacıların ince taneler üzerinde yapmış oldukları flotasyon çalışmalarında, flotasyon sırasında kullanılan reaktiflerin adsorpsiyonunun bilhassa 20 mikron altındaki malzemede aşırı olduğu ve flotasyonda ana zorlukların 20 mikron altındaki malzemeden ileri geldiği saptanmıştır(15-18).

Son 7 yıl içinde, özellikle ABD'de ince tanelere uygulanmaya çalışılan klasik flotasyon yönteminde bazı değişiklikler yapılarak, bu yöntemin ince taneler üzerindeki etkinliğinin artırılmasına çalışılmaktadır(1,6,18). Bu yöntemler kısaca şu şekilde özetlenebilir.

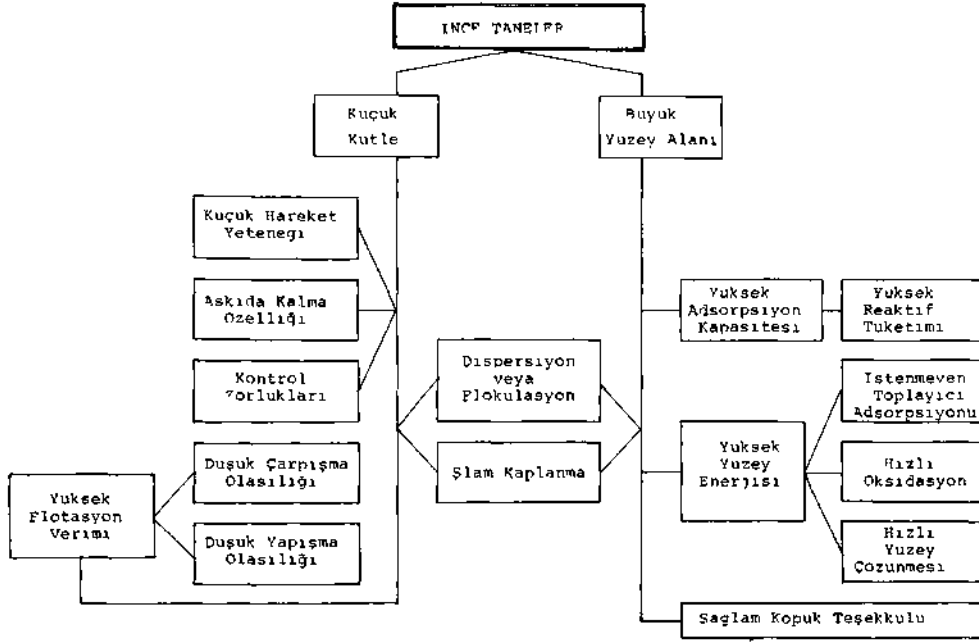
1.1. Hava-Kabarcık Flotasyonu

1.1.1. Yüksek Sıcaklık Flotasyonu

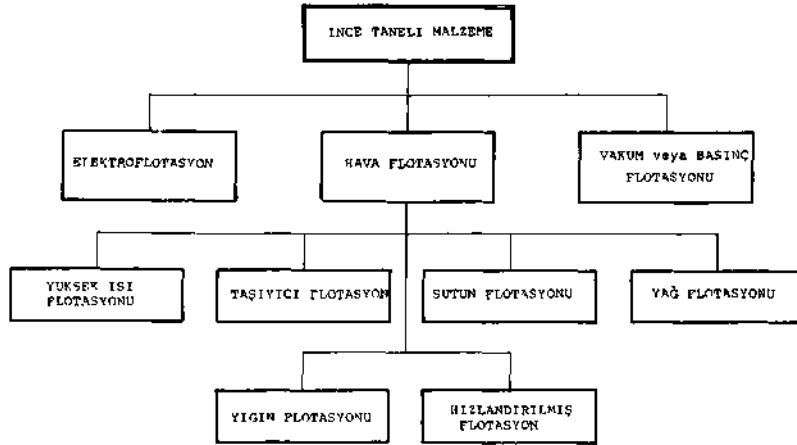
Çeşitli araştırmacılar sıcaklığın flotasyonda ince taneler üzerinde olumlu etkisini saptamışlardır. Özellikle 60-80°C'da kuvars'dan hematit'in, kuvars'dan ilmenit'in, kuvars'dan fluorit'in, kuvars'dan manyetit'in, silikatlardan şelit'in, galen'den kalkopirit'in flotasyonunu başarıyla yapmışlardır. Son yapılan çalışmaya göre(1), yüksek sıcaklık ince hematit'in oleatla flotasyonuna olanak sağlamış ve yüksek tenörlü konsantre elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık sayesinde;

- Kollektor sarfiyatı azalmış,
- İyi bir selektivite sağlanmış,
- Sıcaklık nedeniyle mineral yüzeylerinin aktivasyonu yükseltilmiştir.

Ancak, bu konuda sıcaklığın flotasyon ve adsorpsiyon kinetiği üzerindeki etkileri tam anlamıyla açıklığa kavuşturulamamıştır. Konunun daha birçok yönüne çareler aranmaktadır.



Şekil 1— Flotasyon yönteminde ince tanelerin taşıdığı özellikler



Şekil 2— İnce taneler için değiştirilmiş flotasyon yöntemleri

1.1.2. Taşıyıcı Flotasyon

Bu flotasyon tekniğinde, flotasyona yardımcı olması amacıyla flotasyon pülpüne uygun boyutta taşıyıcı olarak adlandırılan mineral taneleri ilave edilmektedir. Pülpe atılan bu uygun taşıyıcı mineral, pülp içinde flotasyonu arzu edilen incelerle temas ederek onları yüzeyine toplamaktadır. Daha sonra taşıyıcı mineral köpüğe yapışarak konsantre olarak alınmaktadır. Pülp içersinde bulunan ince minerale uygun bir taşıyıcı mineralin pülpe atılması şarttır. Ayrıca bu taşıyıcı mineralin kolayca flote olması gerekmektedir. Bu konuda laboratuvar ve endüstriyel çapta yapılan çalışmalar mevcuttur. Florida fosfat şlamlarına uygulanan bir çalışmaya göre; klasik flotasyonla elde edilen fosfat konsantresinin verimi % 3.6 iken, taşıyıcı flotasyonla bu verim % 22.4'e ulaştırılmıştır. Taşıyıcı mineral olarak sülfür kullanılmıştır(2). Bir başka yapılan çalışmada, kaolen flotasyonunda 60 mikron boyutunda taşıyıcı olarak kalsit minerali kullanılmış ve yüksek derecede kil konsantresi elde edilmiştir(3).

1.1.3. Sütun Flotasyonu

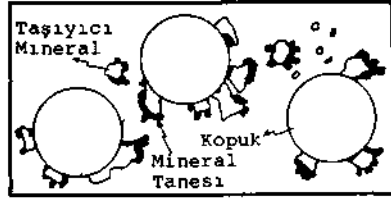
Bu flotasyon tekniğinin uygulanışı Şekil 3'de gösterilmiştir. Pülp içersine hava, flotasyon hücresinin en alt bölümünden verilerek hava kabarcığının ince tanelerle temas şansının artırılması sağlanmıştır. Besleme hücrenin hemen hemen üst seviyelerinden yapılmaktadır. Laboratuvar ve pilot çapta kullanılan hücrelerin çapları genellikle 7.6-22.8 cm arası değişmektedir. Hücre boyları çok değişik alınmakla beraber, bir çalışmaya göre 8.5 m en efektif bir yükseklik olarak kabul edilmiştir. Bu hücre yüksekliğinde, ince tanelerin köpük ile max. teması sağlanmıştır(3). Bu tür hücre ile yapılan bir sütun Rotasyonunda, grafit'in kil minerallerinden flotasyonu başarıyla yapılmıştır. Ancak, bu flotasyon tekniği, iri taneler için efektif değildir. 0.15 mm'den daha iri tanelerin flotasyonu olanaksızdır.

1.1.4. Yağ Flotasyonu

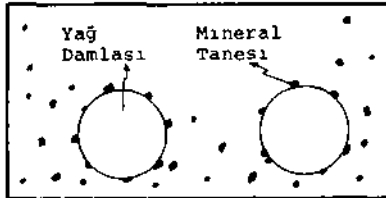
Bu flotasyon tekniğinin şematik şekli Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu teknikte, pülp içine ilave edilen yağ damlalarına ince taneler yapışarak yağ damlası çevresinde toplanmaktadır. Daha sonra yağ damlası pülpde oluşturulan hava kabarcığına yapışarak pülp yüzeyine çıkmaktadır. Bu flotasyon tekniğinin başarıyla yapılabilmesi için; en uygun yağ miktarının, toplayıcı konsantrasyonunun ve yağ damlacığının boyutunun saptanması gerekmektedir. Bu konuda yapılan bir çalışmaya göre, hematit kuvars'tan başarıyla flote edilmiştir(3). Bu teknikle yapılan çalışmalar özellikle ABD ve Sovyetler Birliği'nde sürdürülmektedir.

1.1.5. Yığın Flotasyonu

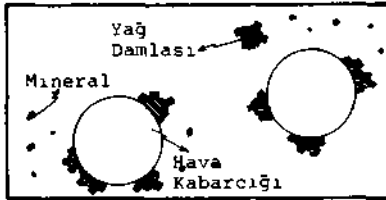
Bu flotasyon tekniğinin şematik şekli Şekil 3'de gösterilmiştir. Öncelikle pülp içersinde bulunan ince mineralin birbirleriyle külemenmesi-topaklanması sağlanmaktadır. Daha sonra bu mineral kümelerinin-yığınlarının hava köpüğüne yapışması temin edilmektedir(2,3). ABD'de yapılan bir çalışmada; 1 mikron boyutunda bulunan şelit'in topraklandırılmasıyla 20 mikron boyutuna getirilmiş ve sodyum oleatla flotasyonu başarıyla sağlanmıştır(2,3). Polimerlerin kullanılmasıyla elde edilen ince mineral yığınlarının flotasyonu bu teknikle başarıyla gerçekleştirilmektedir. Özellikle Sovyetler Birliği'nde yapılan çalışmalarda, bu teknikte büyük başarılar elde edilmiştir(3).



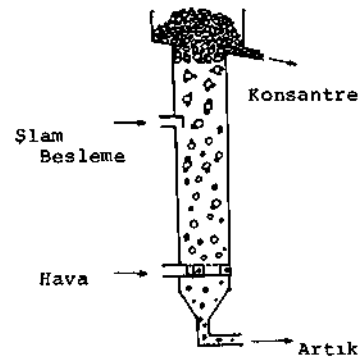
1. Taşıyıcı Flotasyon



3. Yağ Flotasyonu



4. Yığın Flotasyonu



2. Sutun Flotasyonu

Şekil 3— Değiştirilmiş flotasyon yöntemleri için bazı örnekler

1.1.6. Hızlandırılmış Flotasyon

Bu flotasyon tekniğinde, pülp içerisinde bulunan ince minerallere ilk kademede liç işlemi uygulanarak metal kıymeti artırılmaktadır. Daha sonra köpük flotasyonu uygulanmaktadır. Bu yöntem küçük çapta Miami'de bulunan bir bakır şirketinde (Copper Company INC.) uygulanmaktadır. Bu yöntemin henüz birçok problemi mevcuttur.

1.2. Vakum veya Basınç Flotasyonu

Bu yöntemde, pülp içerisinde vakum veya basınç ile gaz kabarcıkları oluşturularak köpük meydana getirilmektedir. Bu yöntemle pülp içine gönderilen gaz kabarcıkları aynı zamanda ince tanelerin saikunlaşmasının da önüne geçebilmektedir. Bir basınç altında

pülpe dağılan gaz kabarcıkları ince taneleri birbirinden ayırarak bireysel olarak hareketlerini sağlamaktadır. Ancak bu teknikte, değerli minerallerle gang mineralleri beraber alınmaktadır. Bu yöntem şimdilik suların temizlenme işleminde kullanılmaktadır. Flotasyon yöntemine ve amacına uygulanabilirliği araştırılmaktadır.

1.3. Elektroflotasyon

1904 yılından beri çeşitli araştırmacılar tarafından ince malzemelerin değerlendirilmesi için araştırılan bu flotasyon yöntemi özellikle Sovyetler Birliği'nde geliştirilerek endüstriyel çapta kullanılmaya başlanmıştır. ABD'de ise son 10 yıldır üzerinde çalışılan bir konudur. Yöntem bir flotasyon hücresi içersinde elektrodlar vasıtasıyla elde edilen gaz kabarcıklarına dayanır. 1946 yılından beri yapılan çalışmalarda, elektroflotasyon tekniğinin çeşitli sorunlarına çareler aranmış ve zaman zaman geliştirilen hücre dizaynlarına gidilmiştir. Elektroflotasyon yönteminde en önemli faktörlerden olan hücre şekli, elektrodların cinsi ve yerleşim düzeni, gaz kabarcıklarından elde edilen köpüğün durumu, elektrolitik gazların pülp içinde bulunan mineral yüzeyine etkisi ve mekaniksel karıştırma hızının elektroflotasyona etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından çeşitli mineraller ve cevherler üzerinde araştırılmış ve konunun açıklığa kavuşturulmasına çalışılmıştır. Ancak, bilhassa enerji tüketim maliyetlerinin düşürülmesi için konunun üzerinde çalışmalar halen devam etmektedir.

Bu çalışmanın konusunu elektroflotasyon yöntemi teşkil ettiğinden, tebliğin 2. bölümünde elektroflotasyon hakkında daha geniş bilgi verilerek, yapılan deneysel çalışmaların sonuçları tartışılacaktır.

2. FLOTASYON DENEYLERİ

Elektroflotasyon deneylerinde malzeme olarak Rodokrosit ($MnCO_3$) ve kuvars (SiO_2) kullanıldığından, elde edilen sonuçların değerlendirilmesine yardımcı olması amacıyla, bu bölümde rodokrosit'in flotasyon özellikleri saptanmıştır. Elektroflotasyon deneylerinde rodokrosit ve kuvars karışımı kullanılmıştır. Klasik flotasyon deneyleri Hallimond hücresinde gerçekleştirilmiştir.

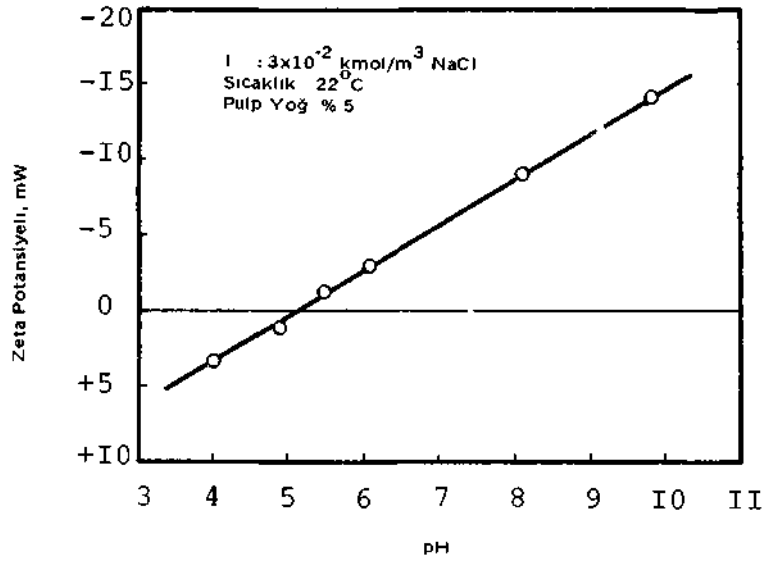
2.1. Numunelerin Hazırlanması

Çeşitli Amerikan şirketlerinden tabii kristal halinde elde edilen saf rodokrosit ve kuvars gerek klasik flotasyon deneyleri için ve gerekse elektroflotasyon deneyleri için gerekli olan boyutlara indirilerek kademeli olarak liç yapılmıştır. İçerdiği safsızlıklardan arındırılan bu numuneler saf duruma getirilmiştir. Elektroflotasyon deneylerinde kullanılacak olan minerallerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

Mineral	Tane Boyutu -mikron-	Spesifik Yüzey Alanı m^2/gr	Analiz Değeri '''
Rodokrosit	T [^]	52	100.00 $MnCO_3$
Kuvars	_20	5.7	100.00 SiO_2

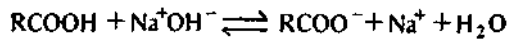
2.2. Rodokrosit'in Flotasyon Özellikleri

Manganez mineralleri içinde en kolay yüzdürülebilen mineral olan rodokrosit'in yüzey zeta potansiyel özelliklerini saptamak amacıyla, zeta-metre ile yüzey işareti ve yüzey potansiyel değeri çeşitli pH'larda ölçülmüştür. Neticeler Şekil 4'de verilmiştir. Rodokrosit'in sıfır yük noktası pH = 5 olarak bulunmuştur. pH = 5'den büyük değerlerde rodokrosit'in yüzey işareti negatif olmaktadır. pH = 5'den küçük ortamlarda ise rodokrosit'in yüzey işareti pozitifdir. pH = 7 civarında rodokrosit'in yüzey zeta potansiyel değeri -5 mV civarında olup çok küçük yüzey potansiyel değeri taşımaktadır.

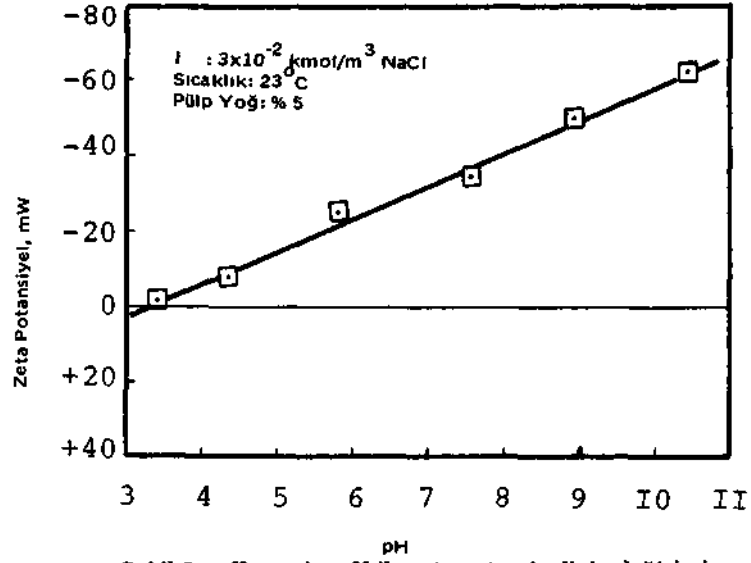


Şekil 4— Rodokrosit'in pH ile zeta potansiyelinin değişimi

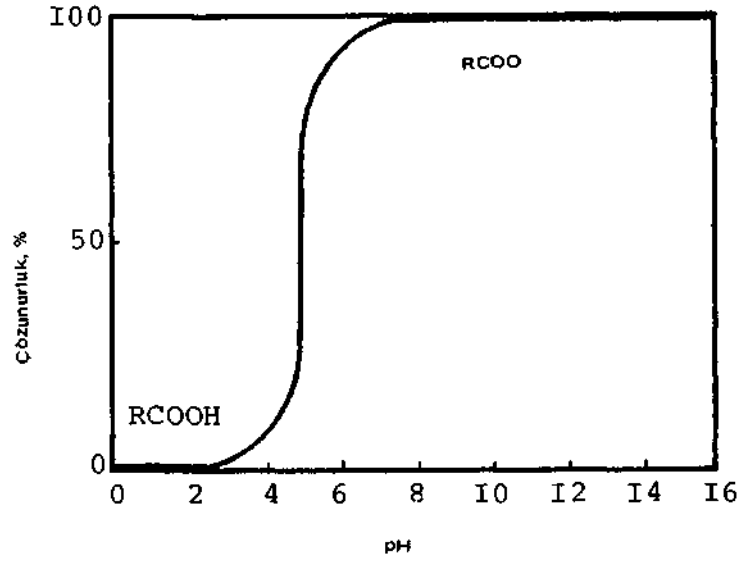
Oleik asit kullanılarak çeşitli pH değerinden Hallimond hücresinde yapılan rodokrosit'in flotasyon deneylerinde Şekil 7'de verilen neticeler elde edilmiştir. Şekil 7'den görüleceği üzere, maksimum flotasyon verimine pH =6 civarında ulaşılmıştır. Oleik asitin pH'nin5'den daha küçük değerlerinde su içindeki çözünürlüğü olmadığı için, pH =5 ve 5'den küçük değerlerinde flotasyon işlemine oleik asidin hiçbir etkinliği olmamaktadır. Oleik asidin su içindeki çözünürlüğünü gösteren eğri Şekil 6'da verilmiştir. Oleik asit su içindeki max. çözünürlüğüne pH 7 civarında ulaşmaktadır. Örneğin, pH = 10 civarında aşağıda verilen kimyasal reaksiyon gereği oleik asitin aktif grubunun tamamı RCOO⁻ olarak çözeltiye geçmektedir.



pH değeri arttıkça, yani ortam bazikleştikçe rodokrosit'in flotasyon verimi lineer olarak hızlı bir şekilde düşmektedir. Bu durum Şekil 7'de görülmektedir. Bunun nedeni;

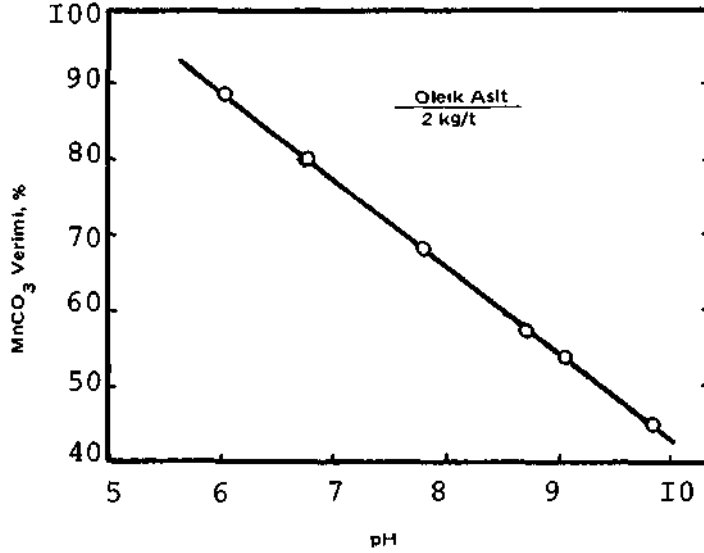


Şekil 5 - Kuvars'ın pH ile zeta potansiyelinin değişimi



Şekil 6— Yağ asitlerinin çeşitli pH'larda çözünme özelliği

Şekil 7'den de görüleceği üzere, yüksek pH değerlerinde rodokrosit'in yüzey zeta potansiyel mutlak değeri lineer olarak büyümekte ve ortaya çıkan yüksek negatif mutlak zeta potansiyel değeri nedeniyle oleik asitin aktif grubu ile (RCOO⁻) Elektrostatik olarak etkilenmekte ve oleik asit aktif grubu tarafından itilmektedir. Böylece rodokrosit'in yüzeyinde oleik asit adsorplanamamaktadır. pH = 6 civarında max. rodokrosit flotasyon verimi elde edilirken, rodokrosit yüzeyinde tam anlamıyla bir fiziksel adsorpsiyondan bahsedilemez. Zira gerek rodokrositin mutlak yüzey işareti ve gerekse oleik asitin aktif gru-



Şekil 7— pH'nın fonksiyonu olarak rodokrosit'in flotasyon özelliği

bunun işareti negatiftir. Ancak rodokrosit'in yüzey mutlak zeta potansiyel değeri çok küçük olduğundan büyük bir olasılıkla oleik asit ile kümeleşmekte-topaklaşmakta ve flotasyon kabiliyeti artarak yüzmektedir. Zira, genel olarak yüzey zeta potansiyel mutlak değeri +15 mV civarı ve daha küçük olan mineraller birbirleriyle kümeleşmekte-salkımlaşmakta veya bireysel olarak veya floklar halinde pülpe atılan toplayıcılarla kümeleşmektedirler. Bu durum iki malzemenin yüzey enerjilerinin çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda bu özelliği, ortamın şartları, mineralin yüzey özellikleri ve pülpe ilave edilen toplayıcıların davranışları etkilemektedir (12,19,37). pH = 6-7 civarında rodokrosit'in yüzeyinde kimyasal adsorpsiyonu kesinlikle kanıtlayacak herhangi bir kimyasal bileşiğe yapılan çalışmalarda tam anlamıyla rastlanmamıştır. Ancak çok zayıf olarak bazı mangan oleat bileşiğine adsorpsiyon çalışmalarında Infrared Spektrometresinde rastlanmıştır.

2.3. Kuvars'in Flotasyon Özellikleri

Kuvars oleik asitle yüzmeyen bir mineraldir. Elektroflotasyon deneylerinde rodokrosit'le beraber karışım halinde kullanılacağı için saf kuvars elde edilmiştir. Pülp içerisinde kuvarsı aktive edebilecek herhangi bir iyon da bulunmamaktadır. Kuvars'ın pH'nın fonksiyonu olarak zeta potansiyel değişimi Şekil 5'de verilmiştir. Kuvars için sıfır yük noktası pH = 3 civarı bulunmuştur. pH = 7 civarında kuvars'ın zeta potansiyel değeri -30 mV civarındadır. pH = 3'den büyük bütün pH değerlerinde kuvars'ın yüzey işareti negatif olup, mutlak değerce de yüksek değer taşımaktadır. Bu nedenle oleik asitle flotasyonu mümkün değildir.

Şekil 8'de kuvars'ın çeşitli sıcaklıklarda pH'nın fonksiyonu olarak zeta potansiyel değişimi verilmiştir. Pülp sıcaklığı arttıkça kuvars yüzeyinin negatif olarak mutlak zeta potansiyel değeri de artmaktadır. Bu nedenle, elektroflotasyon deneylerinde yüksek sı-

çaklıklarda kuvars'ın aktive olarak yüzmesi mümkün değildir. Artan sıcaklık kuvars için bastına rol oynamaktadır.

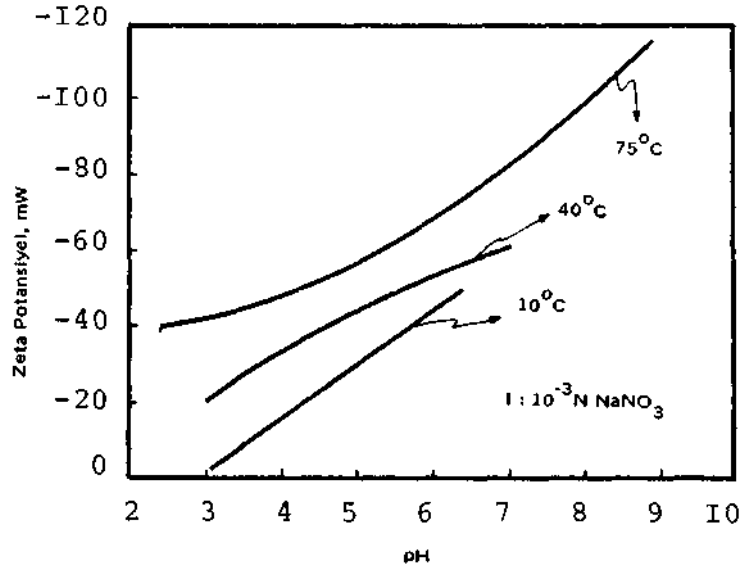
3. ELEKTROFLOTASYON DENEYLERİ

3.1. Genel Bilgiler

Elektroflotasyon esas olarak taşıdığı 3 ana özellik nedeniyle klasik flotasyondan ayrılır.

- Elektroflotasyon yönteminde yüzdürülecek olan minerali yüzeye taşıyan köpükleri pülp içinde elektrodlar vasıtasıyla meydana getirilen elektrolitik gaz kabarcıkları oluşturur. Pülp içerisinde elektroliz esasa dayanılarak meydana getirilen bu gaz kabarcıklarının boyutu 8 ila 15 mikron arasında değişmektedir(1). Gaz kabarcıklarının boyutunu etkileyen faktörler elektrolizin taşıdığı özelliklerdir. Klasik flotasyona nazaran elektroflotasyon yönteminde daha homogen dağılımlı bir köpük elde edilir. Gaz kabarcıklarının değiştirilmesi ortam şartlarına bağlıdır. Bilhassa, pülp içinde oluşturulan gaz kabarcıklarını etkileyen en önemli faktörler; akım yoğunluğu, ortamın pH değeri, flotasyon hücre dizaynı ve elektrodların etkin alanı olarak gösterilebilir. Elektroflotasyon yönteminde kullanılan elektrodun yüzeyinde, bir m²'sinde ortalama olarak 200 milyar gaz kabarcığı mevcuttur. Bu rakamın büyüklüğü elektroflotasyonda ince tanelerin köpükle çarpışma-yapışma şansını artırmakta ve dolayısıyla flotasyonu zor olan bu ince tanelerin flote olmaları sağlanmaktadır.

- Elektroflotasyon işlemi sırasında düzenli ve homojen olarak bir gaz kabarcığı üretimi mümkündür. Akım yoğunluğunun değiştirilmesi, elektrodların geometrisinin değişimi ve pülp pH değeri düzenli olarak gaz kabarcığı elde edilmesine en büyük etkenlerdir. Bu etkenlerin yanında pülpün fiziksel ve kimyasal özelliklerini de unutmamak gerekir.



Şekil 8— Sıcaklığın çeşitli pH'larda kuvars'ın zeta potansiyeli üzerine etkisi

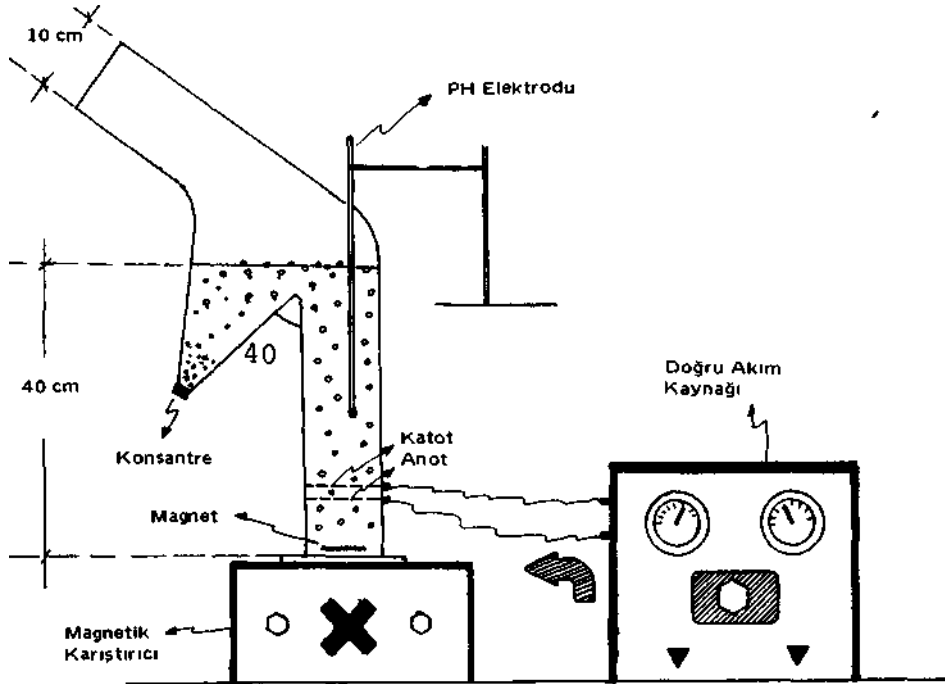
- Fizikokimyasal olarak elektroflotasyon sırasında pülp içinde oluşan gazların minerallerin yüzeylerine etkisi bazı durumlarda önem taşımaktadır. Genellikle elektroflotasyon tekniğinde hidrojen ve oksijen gazları ile çalışılmaktadır. Pülp içindeki bu gazlar nedeniyle elektrokimyasal reaksiyonlar, oksidasyon-redüksiyon olayları, iyon değişimi ve gazların mineral üzerine adsorpsiyonlar neticesi mineral yüzeylerinin özellikleri değişebilmektedir. Ancak, özellikle oksijen gazının sülfür minerallerine etkisi olumlu yöndedir. Elektrolitik oksijenin aktivasyon etkisi ile sülfür minerallerinin flotasyon kabiliyeti artmakta ve hatta pirit, kalkopirit ve sfalerit gibi bazı mineraller toplayıcıya gerek kalmadan yüzebilmektedirler. Bu özelliği ile elektroflotasyon özellikle sülfür minerallerinin flotasyonunda önem taşır. Oksit minerallerinin flotasyonunda, elektrolitik oksijen veya hidrojen gazlarının önemli bir etkisi bulunmamaktadır.

Bazı hallerde elektroflotasyon normal klasik flotasyon boyutuna uygun iri taneler içinde kullanılabilir, özellikle elektrolitik gazlar hava kabarcıkları ile beraber kullanıldıkları takdirde, pülp içerisinde bulunan iri taneleri aktive etmektedirler(39,40). Bu konunun üzerinde özellikle Sovyetler Birliği bilim adamları çalışmaktadırlar.

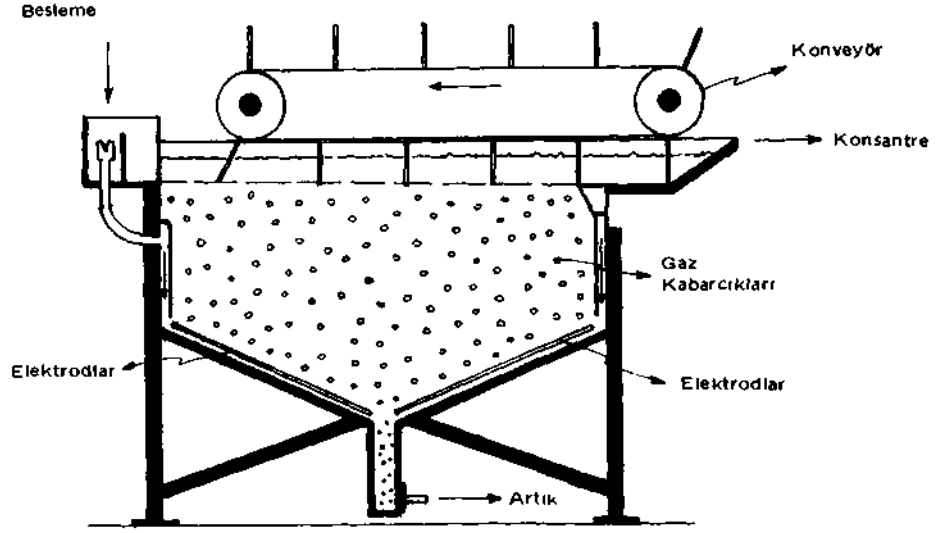
3.2. Elektroflotasyon Deneyleri

3.2.1. Elektroflotasyon Hücresinin Dizaynı

Elektroflotasyon deneylerinde Şekil 9'da şematik şekli gösterilen flotasyon hücresi kullanılmıştır. Hücre özel olarak elektroflotasyon amacı ile yapılmış olup, Hallimond hücresinin benzeridir. Hücre silindirikdir. Hücrenin alt kısmına koyulan elektrodlar delik-



Şekil 9— Elektroflotasyon deney düzeni ve elektroflotasyon hücresi



Şekil 10—Endüstriyel çapta geliştirilen elektroflotasyon hücresi

li olup plaka şeklindedir. Elektrotlar doğru akım veren bir güç kaynağına bağlanmışlardır. Elektroflotasyon hücresinin altında pülp karıştırmasını sağlayacak bir magnetik karıştırıcı bulunmaktadır.

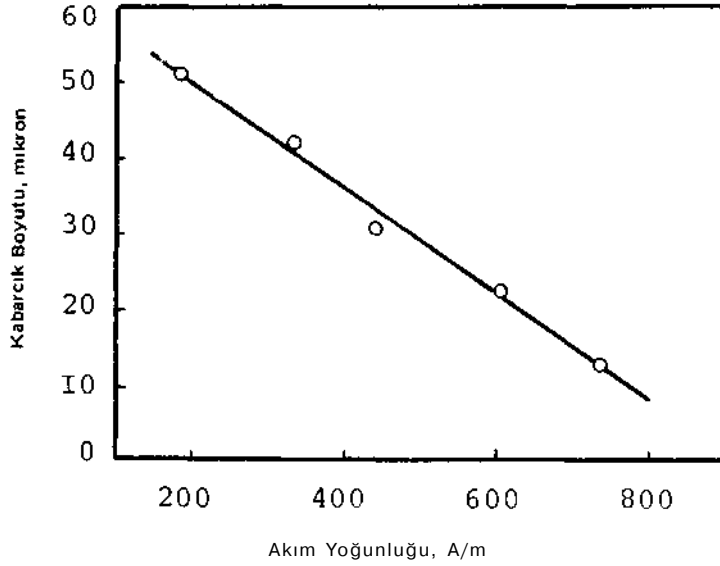
Elektroflotasyon deneylerinde kullanılacak olan numune (% 25 Rodokrosit + % 75 Kuvars) hücreye konulmadan önce bir beherin içinde 3×10^{-2} kmol/m³ NaCl'li damıtık su ile iyice karıştırılarak hazırlanmış ve daha sonra elektroflotasyon hücresine aktarılmıştır. Pülpün pH ayarı yapıldıktan sonra, Na₂SiO₃ ilave edilmiş ve 5 dakika kıvam zamanı verilmiştir. Daha sonra toplayıcı (Oleik asit) ilave edilmiş ve ek olarak bir 10 dakika daha kıvam zamanı verilmiştir. Sonra güç kaynağından elektroflotasyon hücresine elektrik verilerek flotasyona geçilmiştir. Hücreye elektrik verilmeden yarım dakika önce pülp köpürtücü reaktif ilave edilmiştir. Elektroflotasyon süresi genellikle köpüğün boş olarak gelmesine kadar devam etmiştir. Ortalama elektroflotasyon süresi 10 dakika alınmıştır. Flotasyon sırasında köpürtücü reaktif olarak çamyacı kullanılmıştır. Deney sonunda elde edilen konsantrenin analizi yapılarak konsantrenin özellikleri saptanmıştır.

3.2.2. Elektroflotasyonda Köpüğün Durumu

3.2.2.1. Akım Yoğunluğunun Etkisi

Elektroflotasyonda ortalama olarak 8 ila 15 mikron boyutunda olan gaz kabarcıklarının boyutu, normal olarak klasik flotasyonda elde edilen boyutun onda biri kadardır. Klasik flotasyonla elde edilen hava kabarcıklarının ortalama boyutu 100 ila 200 mikron arasındadır.

Elektroflotasyonda elde edilen bu gaz kabarcıklarının boyutu üzerinde, akım yoğunluğunun büyük etkisi bulunmaktadır. Şekil 11'de gaz kabarcıklarının boyutu üzerinde



Şekil 11—Elektroflotasyonda akım yoğunluğunun gaz kabarcığı boyutuna etkisi

akım yoğunluğunun etkisi gösterilmiştir. Akım yoğunluğu arttıkça gaz kabarcıklarının boyutu küçülmektedir. Deneyler sırasında elde edilen gaz kabarcıklarının boyutu fotoğrafla saptanmıştır.

3.2.2.2. pH'nın Etkisi

Elektroflotasyonda kullanılan gaz kabarcıklarının boyutu pülp pH'sı ile yakından ilgilidir. Hidrojen gaz kabarcıklarının boyutu asit ortamda maksimum büyüklüktedir(34). Nötr ve alkali ortamlarda genellikle hidrojen gaz kabarcıklarının boyutu asit ortamda elde edilen boyuta nazaran küçülmektedir. En küçük gaz kabarcığı boyutuna nötr ortamlarda rastlanmıştır(38). Asit bir ortamda katot malzemesinin gaz kabarcıkları boyutu *üzerinde* etkisi de çeşitli araştırmacılar tarafından saptanmıştır. Bu etki katot'da kullanılan malzemelerin elektromotif serideki durumlarına göre değişik olmaktadır. Katodik malzemedeki değişiklik alkali ortamlarda pek fazla değişikliğe neden olmamaktadır. Keza, nötr ortamlarda pratik olarak katodik malzemenin özelliği gaz kabarcığı boyutunu etkilememektedir. Bazen bu etki çok az olarak görülmektedir(38).

Platin elektrodla yapılan bir deneyde, asit ortamda oksijen gaz kabarcıklarının boyutu minimum değerde olmakta (ortalama 25 mikron) ve ortam nötrden alkaliye gittikçe gaz kabarcığı boyutuda büyümektedir. Gaz kabarcığı boyutu nötr ortamda 30 mikron iken alkali ortamda 55 mikrona ulaşmaktadır.

3.2.3. Elektrodların Durumu

Elektroflotasyonda akım yoğunluğu ve ortam özellikleri kadar kullanılan elektrodların özellikleri de çok önemlidir. Elektroflotasyon yönteminde kullanılan elektrodların bazı özellikleri taşıması şarttır. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir.

1. Elektrod malzemesinin pülp içinde bulunan sıvının içinde çözünmemesi,
2. Elektrod malzemesinin korozyona karşı dayanıklı olması,
3. Elektrod malzemesinin yüksek iletkenlik (conductivity) özelliği göstermesi,
4. Elektrodların uygun geometride olması,
5. Elektrodların toplam etkin yüzey alanının mümkün mertebe büyük olması, gereklidir.

Gerek anod ve gerekse katot malzemelerinin seçimi için çeşitli deneyler yapılmıştır. Gereken özellikleri taşıyan anot elektrod için titanyumla kaplanmış kurşun dioksit en uygun malzeme olarak saptanmıştır. Ayrıca anod malzemesi için grafit'de iyi neticeler vermiştir. Titanyum özellikle korozyona karşı yüksek direnç göstermiş olup, uzun bir süre elektroflotasyon deneylerinde kullanılmıştır. Katot elektrod için paslanmaz çelik malzemesi en uygun malzeme olarak bulunmuştur.

Elektroflotasyon deneylerinde sağlıklı-homojen ve fazla gaz kabarcığı elde etmek için elektrodların etkin toplam yüzey alanı çok önemlidir. Bu değer ne kadar fazla olursa, elektroflotasyonun başarısı, bir dereceye kadar, o derece fazla olacaktır. Deneylerde genellikle delikli elektrod-plakalar kullanılmıştır. Zaman zaman si I in dirik-kafes elektrodla ra da yer verilmiştir. Silindirik elektrodlarla yapılan elektroflotasyon deneyleri daha başarılı ve daha kısa zamanda (Elektroflotasyon süresi olarak) sonuçlanmıştır. Elektrodla rın toplam yüzey alanının artırılması amacıyla endüstriyel amaçlar için yapılmış bir hücre dizaynı Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu hücre şekli elektroflotasyon için en uygun olan bir hücre dizayndır.

3.2.4. Mekaniksel Karıştırma Hızının Etkisi

Deneyler sırasında elektroflotasyon hücresinde bulunan pülp bir manyetik karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılmıştır. Gaz kabarcıklarının pülp içinde dağılmasının sağlanması için yapılan bu mekaniksel karıştırma çok önemlidir. Şekil 12'de yapılan bu deneyin sonuçları verilmiştir. Kullanılan hücre yüksekliğine bağlı olarak en uygun karıştırma hızı değişmektedir. Hücre yüksekliği arttıkça optimum karıştırma hızı da artmaktadır. Karıştırma hızının artırılması belli bir değerden sonra elektroflotasyonu ters yönde etkilemektedir. Bunun da nedeni, pülpün aşırı derecede karıştırılması ve mineral taşıyan gaz kabarcıklarının taşıdıkları mineralleri pülpde oluşan aşırı karışımdan dolayı tekrar geriye pülpde bırakmalarıdır. Ayrıca gaz kabarcık kontrolü da pülpde kaybolmaktadır.

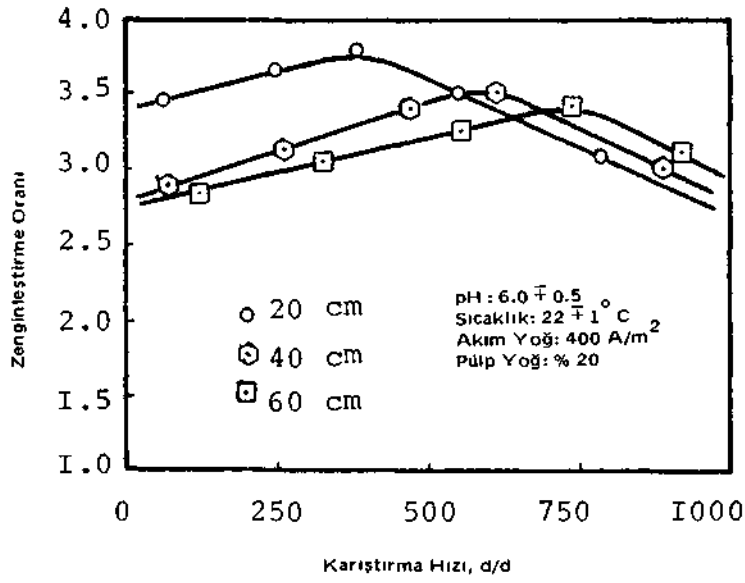
3.2.5. Pülp Yoğunluğunun Etkisi

Pülp yoğunluğunun elektroflotasyon üzerindeki etkisini gösteren deney sonuçları Şekil 13'de verilmiştir. Pülp yoğunluğu arttıkça zenginleştirme oranı az da olsa bir miktar artmaktadır.

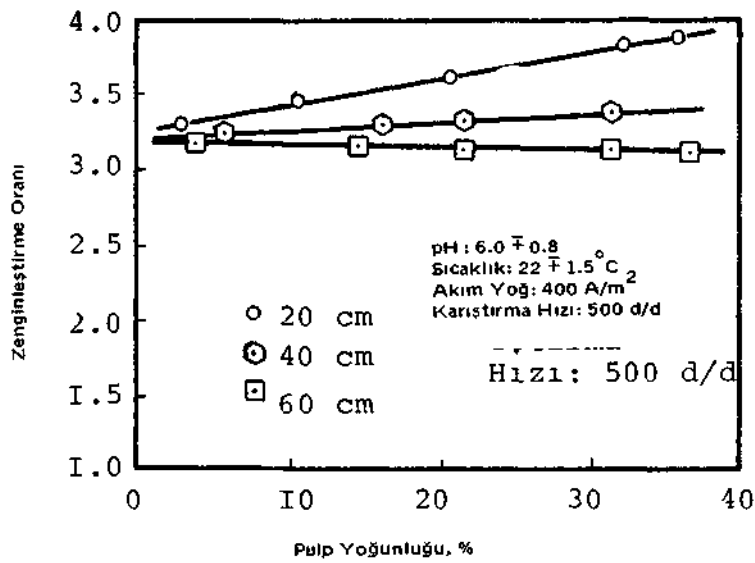
3.2.6. Akım Yoğunluğunun Etkisi

Akım yoğunluğunun elektroflotasyon üzerindeki etkisini gösteren deney sonuçları Şekil 14'de verilmiştir. Deneylerde en uygun akım yoğunluğu olarak 400-500 A/m² değeri saptanmıştır. Genellikle bu değere kadar rodokrosit'in zenginleştirme oranı art-

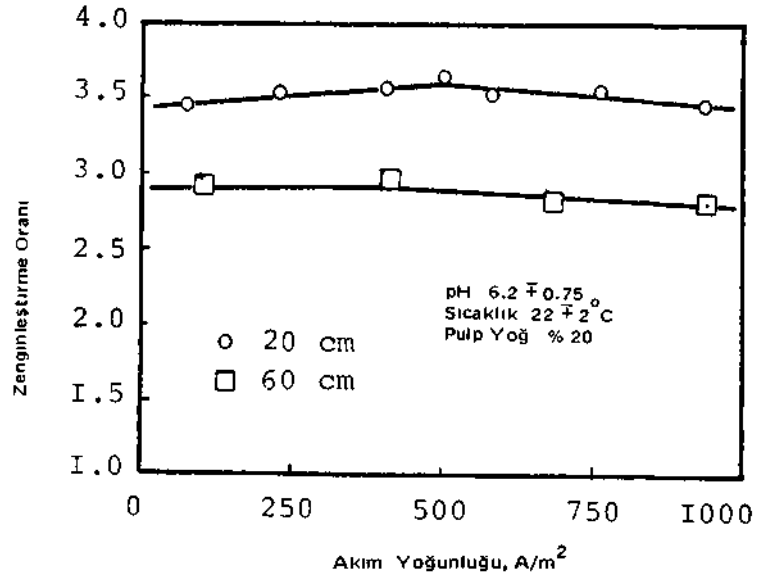
maktadır. Bu akım yoğunluğu değerlerinden itibaren rodokrosit'in zenginleştirme oranı düşmeye başlamaktadır.



Şekil 12— Mekaniksel karıştırma hızının etkisi



Şekil 13—Pülp yoğunluğunun etkisi



Şekil 14— Akım yoğunluğunun etkisi

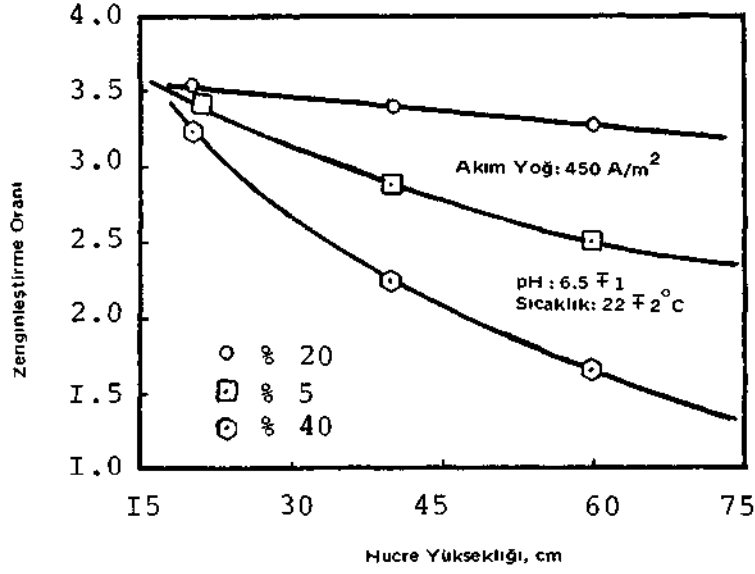
3.2.7. Elektrofotasyon Hücre Yüksekliğinin Etkisi

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda çeşitli hücre boyları denenmiş ve en uygun hücre yüksekliklerinin genellikle sisteme bağlı olarak bir metreye kadar olanları belirtilmiştir (36,38). Zaman zaman yapılan çalışmalarda kısa hücre boyları ile de başarılı neticeler elde edilmiştir. Sistem özelliklerine bağlı olarak yapılan elektrofotasyon çalışmaları değişik hücre boyları vermektedir. 1984 yılı içinde ABD'de Wemco ve Denver firmaları klasik flotasyon makinalarında değişiklik yaparak, flotasyon hücre çap/yükseklik oranlarını 0.5 değerinden 0.35-0.25 değerlerine getirmişlerdir. Hücre çaplarına nazaran hücre boylarının artırılması klasik flotasyonda daha iyi neticeler alınmasını sağlamıştır.

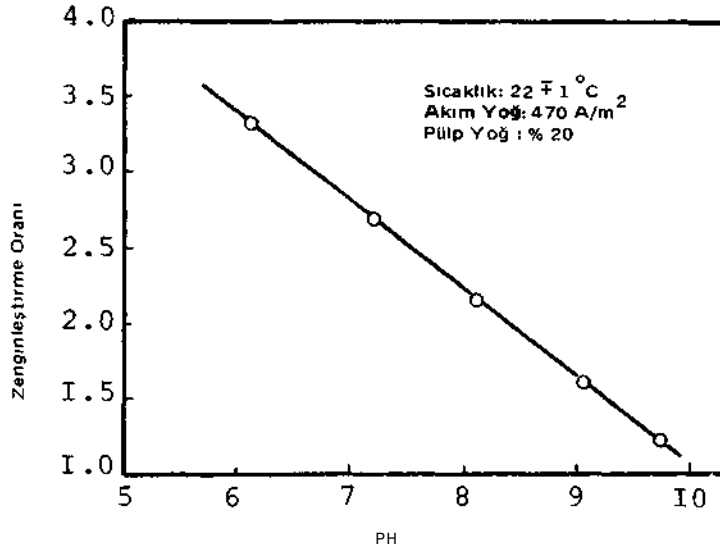
Şekil 15'de hücre boyları ile ilgili yapılan çalışmaların elektrofotasyon üzerindeki ilişkisi verilmiştir. Çeşitli pulp yoğunluklarında yapılan deneyler neticesinde, en uygun değerler sistem için 20 cm yüksekliğindeki hücrede elde edilmiştir. Flotasyonu daha zor olan malzemeler için yüksekliği daha fazla olan hücre boyları gereklidir.

3.2.8. Ortam pH'sının Etkisi

pH'nın elektrofotasyonda rodokrosit'in zenginleştirme oranına etkisi Şekil 16'da verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, max. flotasyon oranı nötr pH civarında elde edilmektedir. Ortam pH'sı yükseldikçe zenginleştirme oranı büyük bir hızla düşmektedir. Bunun nedenleri Bölüm 1'de anlatılmıştır. Benzer neticeler Bölüm 1'de rodokrosit'in klasik flotasyon deneylerinde de elde edilmiştir.



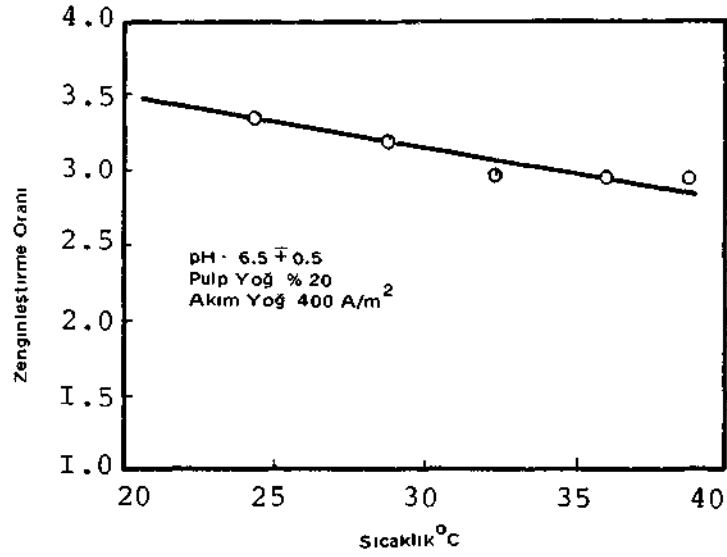
Şekil 15— Elektroflotasyon hucre yuksekliginin etkisi



Şekil 16—Ortam pH'sının etkisi

3.2.9. Pulp Sıcaklığının Etkisi

Elektroflotasyonda sıcaklığın zenginleştirme oranı üzerindeki etkisi Şekil 17'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, pulp sıcaklığı arttıkça rodokrosit'in zenginleştirme oranı düşmektedir. Bunun nedeni ise, sıcaklığının artmasıyla pulp viskozitesinin düşmesidir.



Şekil 17—Sıcaklığın etkisi

3.3. Elektroflotasyonun Ekonomisi

Elektroflotasyon klasik flotasyonla karşılaştırılacak olursa kısaca aşağıda belirtilen üstünlükleri ortaya çıkar.

1. Klasik flotasyona nazaran elektroflotasyonda daha az toplayıcı ve bastırma reaktif harcanır. Elektroflotasyon deneylerinde ortalama olarak 1 kg/ton oleik asit harcanmıştır. Bölüm 1 'de verilmiş olan rodokrosit'in klasik flotasyonunda ise ortalama olarak 2 kg/ton oleik asit harcanmıştır. Elektroflotasyon deneylerinde kullanılan malzemenin toplam yüzey alanı klasik flotasyonda kullanılan malzemeye nazaran çok büyük olmasına rağmen, sistemde kullanılan toplayıcının yarı yarıya azalmış olması büyük bir avantajdır.

2. Elektroflotasyonda çok yüksek flotasyon verimleri elde edilir.

3. Elektroflotasyonda elde edilen konsantrelerin kalitesi klasik flotasyonda elde edilenlerden çok daha üstün kalitededir.

4. Klasik flotasyonla zenginleştirilemeyen bazı cevherler elektroflotasyonla zenginleştirilebilmektedir.

Elektroflotasyonun klasik flotasyona nazaran tek dezavantajı, daha fazla enerji gereksinimine ihtiyacı olmasıdır. Bu konuda çeşitli çalışmalarda çok farklı değerler mevcuttur. Normal olarak bir klasik flotasyon makinasında 1 ton konsantr için 1-3 kWh enerji gereksinimine ihtiyaç vardır. Elektroflotasyonda bu enerji gereksinimi 1.5-5.7 kWh/ton konsantr olarak kabul edilmektedir. Genel olarak kabul edilen değer; 10 m³'lük bir hücre için enerji gereksinimi elektroflotasyonda klasik flotasyona nazaran % 65 daha yüksektir(38).

4. SONUÇLAR

1. Rodokrosit'in oleik asitle yapılan klasik flotasyonunda en uygun pH değeri olarak pH = 6 bulunmuştur.
2. Kuvars, pH =6 civarında oleik asitle yüzmektedir.
3. Elektroflotasyonda akım yoğunluğu arttıkça, gaz kabarcıklarının boyutu küçülmektedir.
4. Elektrolitik hidrojen gaz kabarcıklarının boyutu asit ortamda maksimum büyüklüktedir. Nötr ve alkali ortamlara geçildikçe, gaz kabarcıklarının boyutu küçülmektedir.
5. Asit ortamda elektrolitik oksijen gaz kabarcıklarının boyutu minimum değerde olmakta, ortam nötrden alkaliye gittikçe gaz kabarcıklarının boyutu büyümektedir.
6. Elektroflotasyon yönteminde anod elektrod için titanyum, katod elektrod için de paslanmaz çelik malzemeleri en uygun elektrod malzemesi olarak bulunmuştur.
7. Elektroflotasyon yönteminde, elektrodların toplam aktif yüzey alanının büyük olması, büyük bir avantaj sağlamaktadır.
8. Elektroflotasyonda pülpün mekaniksel olarak karıştırılması, gaz kabarcıklarının dağılması açısından faydalıdır.
9. Elektroflotasyonda pülp yoğunluğunun değişimi, zenginleştirme oranını bir miktar etkilemektedir.
10. Elektroflotasyonda akım yoğunluğu zenginleştirme oranını etkilemektedir. Sistemde en uygun akım yoğunluğu 400-500 A/m² olarak saptanmıştır. Kullanılan potansiyel değeri ise 15 Volt'dur.
11. Elektroflotasyonda hücre yüksekliğinin önemli etkisi bulunmaktadır. Sistemde en uygun hücre yüksekliği 20 cm olarak saptanmıştır.
12. Ortam pH'sının klasik flotasyonda olduğu gibi elektroflotasyonda da önemli etkisi bulunmaktadır. Sistemde en uygun pH değeri 6 olarak saptanmıştır.
13. Elektroflotasyonda pülp sıcaklığının zenginleştirme oranı üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. Sistemde pülp sıcaklığı arttıkça rodokrosit'in zenginleştirme oranı düşmektedir.
14. Elektroflotasyon klasik flotasyona nazaran;
 - Daha az reaktif sarfiyatı,
 - Yüksek flotasyon verimi,
 - Daha iyi konsantr kalitesi,
 - Klasik flotasyonla değerlendirilemeyen bazı minerallerin zenginleştirilmesi, açı sından avantajlı olmasına rağmen,
 - Klasik flotasyona nazaran % 50-70 oranında daha fazla enerji gereksinimine ihtiyaç duyduğundan dezavantajlıdır.

KAYNAKLAR

1. SOMASUNDARAN, P.: "Processing Mineral Fines", Eng. Min. Journal, Dec. 1979
2. SOMASUNDARAN, P.- "Fine Particle Treatment", Research Needs in Mineral Processing, Somasundaran, P., and Fuerstenau, D.W.

3. FUERSTENAU, D.W.: "Fine Particle Flotation", Proc. of Inter. Symp. on Fine Particle Processing, Feb'80. Vol. I
4. CHANDER, S.: "Recent Developments in the Flotability of Very Fine Particles-A Review", Trans. Ind. Inst. Metals, 31(1), '78, 12-18
5. GAUDIN, A.M., GROH, J.O., and HANDERSON, W.: "Effect of Particle Size on Flotation", A.I. M.E.Tech. Publ. 44, 1931, 3-23
6. TRAHAR, W.J., and WARREN, L.J.: "The Flotability of Very Fine Particles-A Review"
7. WAKSMUNDSKI, A. et. al.: "Mechanism of Carryover of Gangue Slimes During Flotation of Sulphur Ore", Trans. Inst. Min. and Met. 80, 1971, C 249-253.
8. ARBITER, N., and HARRIS, C.C.: "Flotation Kinetics", Froth Flotation, Fuerstenau, D.W., ed. AIME, 1962, p.347-364
9. JOWETTS, A.: "Gangue Mineral Contamination of Froth", Brit. Chem. Eng. 2:330-333, 1966
10. LYNCH, A.J.: "Optimization and Control of Mineral Concentration Plants", Symp. on opti. and control, 1974
11. MIKA, T.S., and Fuerstenau, D.W.: "A Microscopic Model of the Flotation Process", Proc. Int. Min. Pro. Cong. 8th, Leningrad, II: 246-269, 1968
12. SUTHERLAND, K.J.: "Kinetics of the Flotation Process", J.Phys. and Colloid. Chem. 52: 394-425, 1948
13. WOODBURN, E.T.: "The Effect of Particle Size Distribution on the Performance of a Phosphate Flotation Process", Metall. Trans., 2: 3163-3174, 1971
14. KAPUR, P.C.: "Phenomenological Model for Flotation Kinetics" Trans. Inst. Min. Metall. Sec. C 82:C229-C234, 1973
15. LEVICH, V.G.: "Physicochemical Hydrodynamics", Prentice-Hall, p. 226, 1962
16. CELEMENT, M.: "Untersuchungen Ueberdie Flotierbarkeit Sehr Feinkorniger Oxidescher Minerale", Freiberg, Forschungsh. A40 1, 1966, p. 53-76
17. TUWINER, S.B., and KORMAN, S.: "Effect of Conditioning on Flotation of Chalcocite", Mm. Eng. 2, 1950, p. 226-238
18. GAUDIN, A.M., FUERSTENAU, D.W.: "Slime Coating in Galena Flotation", Cand. Min. and Met. Bull. 1966. p. 960-963
19. GAUDIN, A.M.: "Flotation Kinetics II. The Effect of Size on the Behaviour of Galena", Tour. Phy. Chem. Vol. 46, 1942
20. DUGGAN, E.J.: "Fine Grinding and Concentration at Climax", Mm. and Met., June 1946, p. 323
21. ELMORE, F.: British Patent No. 13578, 1904
22. HANS, J., ZIMMER, VERFABRENSTECHNIK: "Purification of Sewage Effluents by Flotation of Waste Waters", Ger. I. 203, 702, 1965, LA 64
23. VICHER, A., and ZIMMER, G.: "Improved Flotation Cell for the Purification of Waste Waters", Ger. I, 204, 003, May II, 1967
24. SERGEEV, A.L.: "Use of Electric Current for Purification and Disinfection of Waste Water From Live Stock Forum Complexes"
25. BATOV, B.M.: "Electricflotation of Suspended Particles With the Use of Flotation Reagents", Akad. Nauk. SSR (3), 1966, p 80-82, CA 67, 1967
26. KRANZMAN, M.A.: "Complex Purification Process for Waste Waters From Rayon Fiber Manufacturing Plants", Khim. Volok. 15(4), 1973, p 16-19 (Russ), CA. 80, 1974
27. KRANZMAN, M.A.: "Factory Tests of Apparatus for the Electroflotation Purification of Waste-Water From Rayon Fiber Producing Plants", C.A. 84, 1976
28. SHIFRIN, S.M.: "Electrochemical Purification of Waste-Water", C.A. 86, 1977
29. ZHURKOV, V.S.: "Removal of Suspension Polystyren From Waste-Water", C.A. 87, 1977
30. MAMAKOV, A.A.: "Electroflotation Removal of Chromium From Tannery Waste Waters and Recovery of Cr From Flotation Products", C.A. 79, 1973, 83157 m
31. REVENKO, V.G., and MAMAKOV, A.A.: "Electroflotation Used to Purify Industrial Waste Waters", C.A. 85, 1976, 148494q
32. GOLMAN, A.M.: "Possibility of Using Electrolytic Flotation for Purifying Wastewaters", C.A. 75, 1971, 80062h
33. ICHI, MINORU: "Removal of Heavy-Metals From Wastewater by Electrolytic Flotation", C.A. 80, 1974, 7400iZ
34. MAMAKOV, A.A.: "Electroflotability of Cassiterite", C.A. 72, 1970, 46315w
35. RAMANOV, A.M.: "Extraction of Mn From Ores by Electroflotation", C.A. 79, 1973, 1068434
36. HOGAN, P., KUHN, A.T., TURER, J.F.: "Electroflotation Studies Based on Cassiterite Ores", Trans. Inst. Min. and Met. 88, 1979, p 83-87
37. LAN LEJA.: "Surface Chemistry of Froth Flotation" British Columbia, Canada, 1984
38. GLEMBOTSKY, V.A.: "Selective Separation of Fine Mineral Slimes Using the Method of Electric Flotation" Elektronnaja Obrabotka Materialov, 1973
39. KLASSEN, V.I.: "Introduction in Theory of Flotation", Moscow, Metallurgizdat, 1959
40. KLASSEN, V.I.: "Use of Gases From Solutions For Intensifying of Flotation" In Transactions of Institute of Mining (Scotchlnsky Institute), 1968