

Ultrasonik İşlemlerin Flotasyonda Kullanımında Farklı Yaklaşımlar

Can Güngören¹, Şafak Gökhan Özkan¹, Orhan Özdemir¹

¹İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

e-posta: sgozkan@istanbul.edu.tr

Geliş Tarihi: 13.03.2017 ; Kabul Tarihi: 03.08.2017

Özet

Ultrason insan işitme limitinin üzerindeki frekanslarda yayılan bir ses dalgası olup, yayılmak için maddesel ortama ihtiyaç duyar. Ultrason sıvılar içerisinde yayıldığında çeşitli sıra dışı koşullar yaratır. Bunların başında kavitasyon gelmektedir. Ultrason, cevher hazırlama ve zenginleştirme de dâhil olmak üzere endüstrinin birçok alanında kullanım alanı bulmuştur. Fizikokimyasal bir cevher zenginleştirme yöntemi olan flotasyon, kondisyon, yüzdürme (flotasyon), ürünlerin susuzlandırılması gibi değişik aşamalar içermektedir. Dolayısıyla, kompleks bir sistem olan flotasyonda ultrason kullanımı üzerinde yapılan çalışmalar çeşitlilik göstermiştir. Literatürde ultrason farklı cihazlar, frekanslar, yöntemler kullanılarak flotasyonun değişik aşamalarında ve farklı malzemelerin flotasyonunda uygulanmıştır. Ultrasonun pratikteki etkileri üzerine yoğunlaşan çalışmalar bulunduğu gibi, ultrasonun tane yüzeyine, tane-kimyasal ve tane-kabarcık etkileşimlerine etkisi hakkında yapılan çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmada, ultrasonun flotasyonda kullanımı ile ilgili yapılmış literatürde bulunan önceki çalışmalar derlenmiş, sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler

Ultrason;
Kavitasyon;
Enerji;
Cevher Hazırlama;
Flotasyon.

Different Approaches in the Use of Ultrasonic Treatments in Flotation

Abstract

Ultrasound is a sound wave propagates above human perception limit, and requires a material medium to propagate. Ultrasound creates some extraordinary conditions in liquids such as cavitation. Therefore, ultrasound can be used in various industries, including mineral processing. Flotation, which is a physicochemical mineral processing method, contains various stages such as conditioning, floating, and dewatering of products. For these reasons, the studies on the use of ultrasound in flotation in literature have been applied on the flotation of various materials using different devices, frequencies, and methods. There are several studies focused on the practical effects of ultrasound as well as the fundamental studies on the effect of ultrasound on particle-particle, particle-reagent, and bubble-particle interactions. In this study, the studies about the use of ultrasound on flotation have been reviewed in detail.

Keywords

Ultrasound;
Cavitation;
Energy;
Mineral Processing;
Flotation.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Flotasyon, minerallerin ara-yüzey özelliklerinden yararlanılarak, değerli mineral ile değersiz mineralin birbirinden ayrıldığı katı, sıvı ve gaz fazının bir arada bulunduğu fiziko-kimyasal bir cevher zenginleştirme yöntemidir. Flotasyonda cevher içerisindeki hedef mineral/mineraller çeşitli kimyasallarla hidrofobik (su sevmez) hale getirilir. Diğer mineraller ise çoğunlukla hidrofilik (su sever) haldedir. Böylece cevheri meydana getiren değerli

ve değersiz mineraller arasında bir yüzey farkı oluşturulmuş olur. Ayrımı gerçekleştirmek için ise havanın pülp içinde kabarcıklar halinde dağıtıldığı bir ortam kullanılır. Hidrofobik mineraller hava kabarcıklarına yapışarak köpük bölgesine yükselirler ve taşarak konsantreyi oluştururlar. Hidrofilik mineraller ise pülp içerisinde kalırlar (Atak, 1982; Leja, 1982; Nguyen ve Schulze, 2004; Rao ve Leja, 2004; Çilek, 2006; Yiğit ve Özkan, 2007).

Flotasyon bilim ve teknolojisinin geliştirilmesi için pek çok çalışma yapılmaktadır ve ultrason kullanımı da bu çalışmalar içerisinde kendine yer bulmuştur. Ultrason insan işitme limitinin üzerindeki frekanslarda (~20 kHz'den büyük) yayılan bir ses dalgasıdır.

Tüm ses dalgaları gibi ultrason da basınç ve gevşeme evrelerini içeren dalga serileri halinde yayılır. Yeterince güçlü bir gevşeme evresi sıvı ortam moleküllerinin arasındaki çekim kuvvetlerini yenerek sıvının kopma mukavemetini aşar ve sıvı içerisinde kavitasyon kabarcıkları adı verilen küçük kabarcıkların oluşmasına yol açar. Oluşan kavitasyon kabarcıklarının boyutu 100 µm civarındadır Oluşan kavitasyon kabarcıkları birkaç dalga çevrimi süresince içlerine ortamdaki gaz veya buhar alarak büyüyebilir ve bir süre sonra daha fazla büyüyemeyeceği kritik bir boyuta ulaşır. Çevredeki sıvı kabarcığın içine girer ve kavite patlar (Suslick, 1989, Mason, 1997)

Flotasyon kondisyon, yüzdürme (flotasyon), köpük alma, ürünlerin susuzlandırması gibi değişik aşamalar içerdiğinden ultrasonun flotasyonda kullanımı üzerinde yapılan çalışmalar da çeşitlilik göstermiştir. Literatürde ultrason farklı cihazlar, frekanslar, yöntemler kullanılarak flotasyonun değişik aşamalarında ve farklı malzemelerin flotasyonunda uygulanmıştır. Ultrasonun pratikteki etkileri üzerine yoğunlaşan çalışmalar bulunduğu gibi, ultrasonun tane yüzeyine, tane-kimyasal ve tane-kabarcık etkileşimlerine etkisi hakkında yapılan çalışmalar da mevcuttur(Stoev ve ark., 1992).

Bu çalışmada, ultrasonun flotasyonda kullanımı ile ilgili yapılmış literatürde bulunan önceki çalışmalar derlenmiş, sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. Ultrasonun Üretimi ve Uygulanması

Ultrasonik dalgalar; mekanik, manyetostriktif, elektrostriktif yöntemler gibi çeşitli yöntemler ile üretilebilir. Ancak ticari ürünlerde en sık kullanılan yöntem piezoelektrik yöntemidir. Simetri merkezi

olmayan bir kristalin polar eksenlerinin uçlarına bir alternatif akım (AC) uygulandığında kristal şekil değiştirerek, yüksek frekanslarda titreşir, bu tür kristallere piezoelektrik kristaller adı verilir. Piezoelektrik kristallerin titreşimi sonucu çok yüksek frekanslarda ses dalgaları (ultrasonik dalgalar) ortaya çıkar. Bu yöntemle elektrik enerjisini ultrasonik enerjiye çeviren cihazlara ultrasonik dönüştürücüler adı verilir.

Ultrason pratikte ultrasonik probalar ve banyolar olmak üzere iki farklı cihaz ile uygulanır. Ultrasonik probalar ultrasonik dönüştürücüden aldığı ultrason enerjisini sabit bir noktaya odaklarlar. Ultrasonik banyolarda ise ultrasonik dönüştürücüler genellikle banyo haznesinin alt kısmına konumlandırılmıştır(Suslick, 1989, 1994; Suslick ve ark., 1999; Mason ve Lorimer, 2002; Ambedkar, 2012; Ensminger ve Bond, 2012).

3. Ultrasonun Flotasyonda Kullanımı

3.1.Ön işlem olarak kullanım

Flotasyonla zenginleştirilen minerallerden bir kısmını hidrofobik hale getirmek için pülp, flotasyondan önce veya flotasyon esnasında kondisyonlanmak zorundadır. Kondisyonlama süreci flotasyon süresi ve verimiyle doğrudan ilişkili olduğundan bu sürecin hızlandırılması veya daha verimli hale getirilmesi oldukça önemlidir.

Kowalski ve Kowalska (1978)yaptıkları çalışmada ultrasonu 25 kHz frekans ve 700 W güç çıkışı ile uygulanmıştır. Tek kademe flotasyon ile %15,5 P₂O₅ tenörlü cevherden %25 tenörlü bir konsantre %83 toplam verim ile elde edilmiştir. Benzer şartlarda ultrason uygulaması olmadan yapılan deneylerde ise %45 verimle %23 P₂O₅ tenörlü konsantre elde edilebilmiştir.

Ultrasonun kavitasyon etkisi ile ürettiği mikrojetler ve yine kavitasyon sonucunda meydana gelen yüksek sıcaklık-basınç farkları yüzey temizleme işlemlerinde sıklıkla kullanılmasına imkân tanımaktadır. Ultrason kavitasyon ve akustik akımlar yoluyla sıvı içerisinde bir karıştırma etkisi yarattığından reaktiflerin emülsifikasyonu ve

flotasyon öncesi kondisyon aşamalarında da kullanım imkânı bulmuştur(Özkan, 1998).

Aldrich ve Feng (1999) bir sülfür cevherinin flotasyonunda kondisyon sırasında ultrason uygulamışlardır. Çalışmada, ultrasonik kondisyonlamanın, mekanik kondisyonlamaya nazaran flotasyon tenörünü ve verimini arttırdığı, reaktif sarfiyatını ise ciddi şekilde azalttığı saptanmıştır. Ultrasonik uygulamadan sonra sülfürlü cevherlerin yüzebilirliği büyük ölçüde artmış, silikatlar da bastırılmıştır. Bu çalışma, klasik karıştırmalı kondisyon tankları düzgün enerji dağılımı sağlayamadıklarından, zor yüzeabilen sülfürlü cevherlerin flotasyon veriminin ultrasonik kondisyonlama ile arttırılabileceğini göstermiştir.

Çelik ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada kolemanit yüzeylerinden killi minerallerin uzaklaştırılması için kondisyonlama sırasında ultrason kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada ultrason uygulaması, ultrasonik banyo kullanılarak iki farklı yöntemle yapılmıştır. İlk olarak, kondisyonlama işlemi 9 dk manyetik karıştırma ve ardından 1 dk ultrasonik kondisyonlama ile yapılmış daha sonra numune mikro-flotasyon hücresine aktararak yüzdürülmüştür. Bu işlemle konvansiyonel kondisyonlama (10 dk manyetik karıştırma) arasında bir fark gözlenmemiştir. Diğer taraftan, numune 9 dk manyetik karıştırmanın ardından mikro-flotasyon hücresi ultrasonik banyonun içine yerleştirilerek yerinde (in-situ) ultrasonik kondisyonlamaya tabii tutulduğunda verimde dikkate değer bir artış gözlenmiştir. Ultrason uygulanmamış numunede flotasyon verimi %5 iken, 60 sn ultrasonik uygulamanın ardından verim %90'a yaklaşmıştır.

Kang ve ark. (2008) 200 W gücünde, 20 kHz frekansında ultrasonik uygulamadan önce ve sonra yüksek kükürlü kömür ve pirit yüzeyleri üzerinde ultrasonun etkisini gözlemlemiş, X-ışını kırınım (XRD), taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve X ışınları flüoresans analizi (XRF) analizleri sonucunda kömürün ultrason ile aşınmış bölgelerinde aşınmamış bölgelere nazaran daha yüksek C ve daha düşük O, S ve Fe değerleri gözlemlemişlerdir.

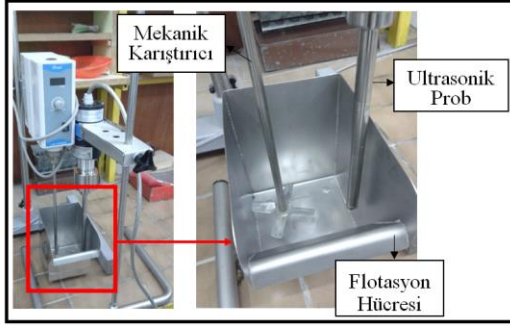
Aynı şekilde pirit yüzeyinde de ultrasonik uygulamadan sonra daha yüksek S ve Fe, daha düşük C değerleri gözlenmesi ultrasonik uygulama ile hem kömürün hem de piritin yüzeyinin temizlendiğini göstermektedir.

Altun ve ark. (2009) bitümlü şeyller üzerinde gerçekleştirdikleri bir başka çalışmada değişik güç ve sürelerde ultrason kullanımıyla flotasyon performansını arttırmayı amaçlamışlardır. Çalışmada Himmetoğlu-Bolu ve Beypazarı-Ankara Bölgeleri'nden alınan numuneler güç ayarlı, bir ultrasonik prob ile ultrasonik uygulamaya tabi tutulmuştur. Yazarlar çalışma sonucunda ultrasonik uygulamanın kül uzaklaştırmasında faydalı olduğu sonucuna varmışlardır. Çalışmada karşılaştırmalı XRD ve SEM analizlerine dayanılarak gözenek ve boşluklarda veya yüzeye tutulu olarak bulunan küçük boyuttaki tanelerin ultrasonik uygulama ardından verimli şekilde uzaklaştığını göstermişlerdir. Ayrıca, ultrasonun yüksek güçlerde kullanımının ise şlam oluşumuna yol açtığından flotasyonu olumsuz etkilediği belirtilmiştir.

Özkan ve Güngören (2012) çalışmalarında kolemanit minerali flotasyonunda bir ultrasonik banyo yardımı ile ortama ultrason uygulamış ve flotasyon verimi ve ürün tenöründe hafif bir iyileşme sağlamışlardır. Ultrasonik uygulama ile %49 tenörlü kolemanit konsantresi %80 verim ile elde edilebilmiştir. Ultrasonun flotasyon üzerinde olan etkisini, yüksek basınç ve sıcaklıktaki sıvı jetlerinin kolemanit yüzeyinde reaktif adsorbsiyonunu engelleyen kil ve şlam kaplamalarını uzaklaştırmasına bağlamışlardır.

Güngören ve ark. (2016) kömür artıklarının flotasyonla kazanımında kondisyonlama sırasında ultrasonik enerjinin etkisini araştırmışlardır. Ultrasonu mekanik karıştırmaya ek olarak bir ultrasonik prob yardımı ile 30 W gücünde ultrason uygulamışlardır (Şekil 1). Sonuç olarak ultrasonik kondisyonlamanın flotasyon verimini olumlu yönde etkileyerek ayırma verimini 200 g/t dizel dozajında %46'dan %58'e çıkardığını bildirmişlerdir. Ayrıca konvansiyonel flotasyonda %35-37 arasında olan yüzen kömürün kül içeriği, ultrasonik uygulama ile

dizel dozajına da bağlı olarak, %24'e kadar düşürülebilmektedir.



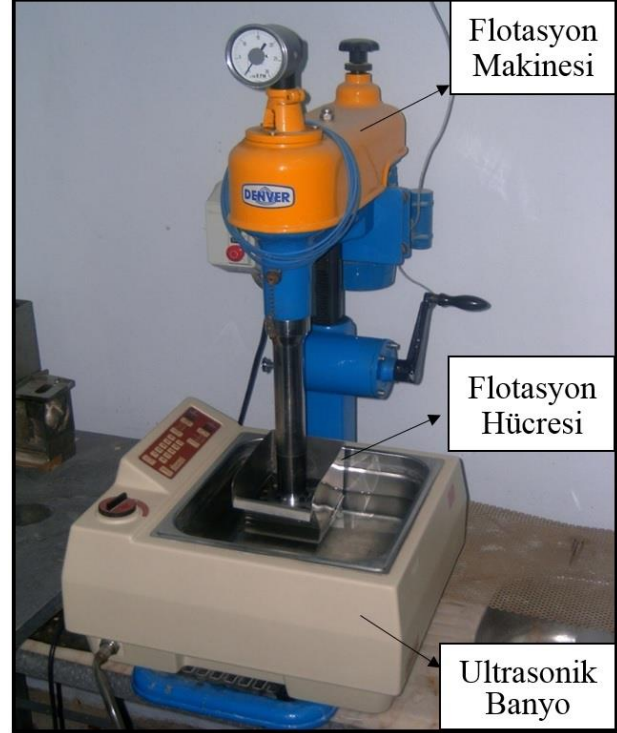
Şekil 1. Mekanik karıştırıcı ile ultrasonik probun birlikte kullanımı(Güngören ve ark., 2016).

3.2.Eşzamanlı kullanım

Literatür incelendiğinde ultrasonik enerjinin flotasyon esnasında uygulandığı çalışmaların da yapıldığı görülmektedir.Özkan ve Veasey (1996) kolemanit flotasyonunda ultrasonu eş zamanlı olarak uygulamışlardır. Flotasyon öncesi uygulanan şlam atma işlemi ile kil minerallerinden ayrılan kolemanitin flotasyonunda yüzen verimi ve tenöründe ciddi bir değişim gözlenirse de artığın B_2O_3 tenöründe %10-15 arasında bir düşüş meydana gelmiştir.

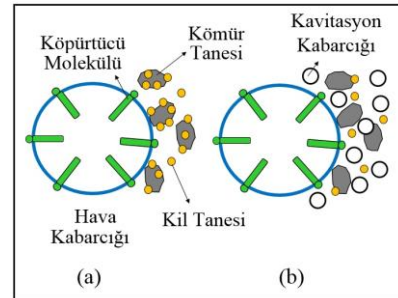
Özkan (2002)manyezit şlamlarının flotasyon ile kazanılmasının konu alındığı bir çalışmada ultrasonu bir ultrasonik banyo yardımıyla flotasyondan önce ve flotasyon esnasında uygulamıştır. Flotasyon öncesi ultrasonun uygulamasının ardından 10 μm tane boyutundan ince malzeme dekantasyon ile uzaklaştırılmıştır. Flotasyon ile eş zamanlı ultrasonik uygulama flotasyon hücresi banyonun içerisine yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Çalışma sırasında ultrasonik uygulama ile köpük boyutlarının küçüldüğü, köpük stabilitesinin ve flotasyon süresinin arttığı gözlemlenmiştir. 2000 g/t kollekor (sodyum oleat) dozajında %68,04 MgO olan flotasyon verimi, eş zamanlı ultrasonik uygulama ile %78,12'ye ultrasonik ön işleme ise %81,28'e çıkmıştır. Aynı şartlardaki konsantretenörleri ise konvansiyonel flotasyonda %67,56 eş zamanlı ultrasonik uygulama ile %77,44, ultrasonik ön işleme ise %80,83 olarak bulunmuştur. Yazar ultrasonik ön işlemin eş zamanlı uygulamaya göre daha iyi sonuçlar vermesini ultrasonik uygulama ile

şlamın flotasyon ortamından uzaklaştırılmasına bağlamıştır.



Şekil 2. Flotasyon hücresinin ultrasonik banyonun içine yerleştirilerek kullanımı(Özkan, 2002).

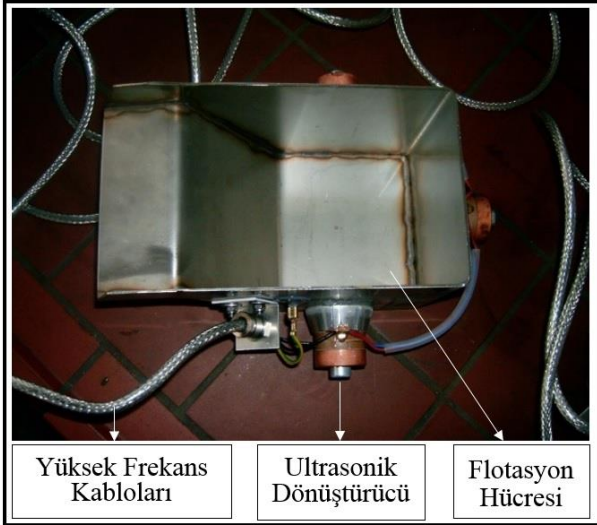
Özkan ve Kuyumcu (2005); Özkan (2006) ultrasonu farklı frekanslarda kömür flotasyonunda eş zamanlı olarak uygulamışlardır. Flotasyonda ultrason kullanımı ile toplam flotasyon süresinin azaldığını, hava kabarcığı ve köpük boyutlarının küçüldüğünü ve daha homojen bir dağılım gösterdiğini, reaktif tüketiminin ciddi şekilde azaldığını, artığın kömür içeriğinin azaldığını bildirmişlerdir. Yazarlar, bu olumlu etkinin sebebinin ultrasonun kömür üzerindeki killeri uzaklaştırarak, temiz yüzeyler oluşturmasına ve böylece reaktif adsorpsiyonunun iyileşmesine bağlı olabileceğini savunmuşlardır (Şekil 3).



Şekil 3. Ultrasonik kaviteasyonun flotasyon üzerindeki mekanizması (a) ultrasonuz (b) ultrasonlu flotasyon(ÖzkanveKuyumcu, 2005).

Özkan ve Kuyumcu (2007) çalışmalarında ise laboratuvar tipi bir flotasyon hücresine ultrasonik üreteçler monte ederek ultrason ile eş zamanlı flotasyon imkânı sağlamışlardır. Ürettikleri ultrasonik enerji destekli flotasyon hücresi Şekil 4'te görülmektedir. Bu flotasyon hücresi ile yapılan kömür flotasyonu çalışmalarında (Özkan ve Kuyumcu, 2006, 2007; Özkan, 2012) kullanılan reaktif miktarının ultrasonun yüzey temizleme etkisinin bir sonucu olarak, ciddi oranda azaldığı, bu reaktif miktarında elde edilen temiz kömürün yanabilir veriminin ve artıktaki kül içeriğinin ise arttığı bildirilmiştir.

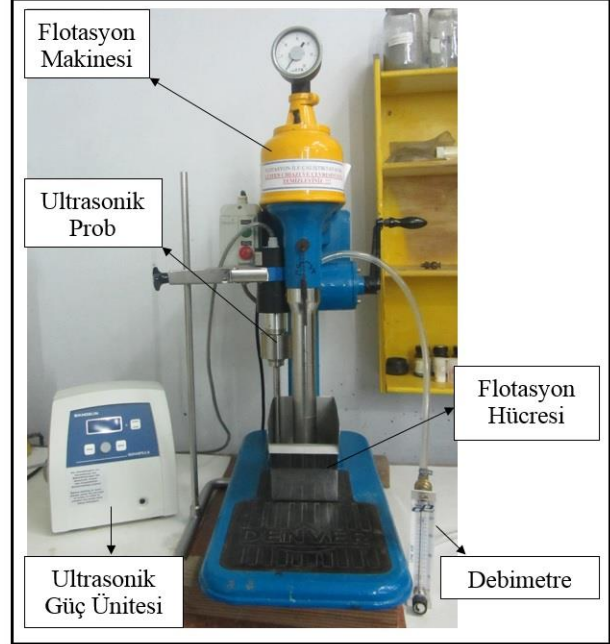
Bu çalışmalar ışığında yapılan benzer başka bir yayında aynı yöntemle yüzdürülen yeni alınmış ve 4 yıl beklemiş taşkömürü numuneleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ultrasonun kömür üzerindeki oksidasyon tabakasını aşındırarak yeni yüzeyler ortaya çıkardığını ve bunun da flotasyon verimine olumlu etkileri olduğunu göstermiştir (Özkan, 2012).



Şekil 4. Üretilen ultrasonik enerji destekli flotasyon hücresi (ÖzkanveKuyumcu, 2007).

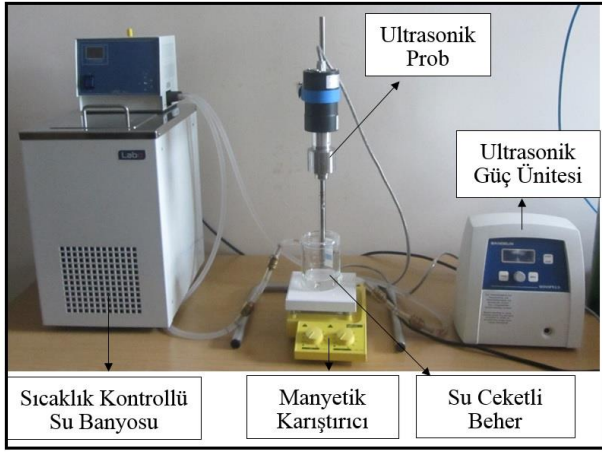
Güngören ve ark. (2015) kuvars-amin flotasyonu üzerinde ultrasonik uygulamanın etkisini araştırmışlardır. Ultrasonik uygulama bir ultrasonik prob yardımı ile gerçekleştirilmiş ve prob 1 L'lik Denver D12 flotasyon hücresinin içine konumlandırılmıştır (Şekil 5). Ultrasonik uygulama ayrı ayrı olarak, sadece kondisyon ve flotasyon aşamalarında ve hem kondisyon hem flotasyon aşamalarında gerçekleştirilmiştir. Konvansiyonel

flotasyonda verim %54,00 iken, sadece kondisyon aşamasında ultrason kullanıldığında,%73,56, yalnızca flotasyon aşamasında ultrason kullanıldığında %66,49 olmaktadır. Hem kondisyon hem de flotasyon aşamalarında ultrason kullanıldığında ise flotasyon verimi %60,37'ye çıkmıştır.



Şekil 5. Üretilen ultrasonik enerji destekli flotasyon hücresi(Güngörenveark., 2015).

Güngören ve ark. (2017) kuvars-amin flotasyonunda kondisyonlama esnasında ultrason kullanmışlar ve ultrason kullanımı ile artan pülp sıcaklığının flotasyona etkisini araştırmışlardır. Çalışma sırasında çeşitli ultrasonik güçler (30, 90, 150 W) denenmiş. 200 mL hacme sahip pülpün sıcaklığının 150 W güçte 10 dk ultrasonik uygulama ile 23 °C'den 75 °C'ye çıktığını belirlemişlerdir. 30 ve 90 W ultrasonik güçlerde ultrason kullanımı flotasyon verimini %45'ten sırasıyla %64 ve %66'ya çıkarmaktadır. Diğer taraftan ultrasonik güç 150 W'a çıkarıldığında flotasyon verimi %38'e düşmektedir. Çalışmada ayrıca pülp sıcaklığını kontrol etmek için sıcaklık kontrollü su banyosu ve su ceketli bir beher kullanılmıştır (Şekil 6). Pülp oda sıcaklığında sabit tutulduğunda ultrason kullanımı flotasyon verimini uygulanan ultrasonik güce bağlı olarak %15'e kadar düşürmektedir. Yazarlar kuvarsın amin ile kondisyonlanmasında ultrasonun pozitif etkisini sıcaklık artışına bağlamışlardır.



Şekil 6. Ultrasonik kondisyonlama sırasında sıcaklığı kontrol etmede kullanılan deney düzeneği(Güngörenveark., 2017).

Videla ve ark. (2016) bakır flotasyon verimini kondisyon, flotasyon, ve hem kondisyon hem flotasyon aşamalarında ultrasonik uygulama ile arttırmaya çalışmışlardır. Çalışmada yan duvarlarına ultrasonik dönüştürücüler monte edilmiş ultrasonik enerji destekli 8 L hacimli bir flotasyon hücresi kullanmışlardır. Çalışma sonunda yüzen tenörü %0,60 Cu'dan %0,77 Cu'ya kadar çıkarılabilmektedir. Yazarlar bu pozitif etkiyi kaviteasyonun mineral yüzeylerini temizleme etkisinden kaynaklanabileceğini bildirmişlerdir.

Ultrasonik işlemin flotasyon ile eş zamanlı uygulanmasının flotasyon verimine olumlu etkileri olduğu gibi olumsuz etkileri de gözlenmiştir. Gürpınar (2007)35 kHz frekansında ultrasonik dalgalar üreten bir ultrasonik banyo kullanarak, kuvars (kollektör: Armac T – Denver), kalsit (kollektör: sodyum oleat), barit (kollektör: sodyum oleat), pirit (kollektör: potasyum etil ksantat) ve galen (kollektör: potasyum etil ksantat) minerallerinin flotasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda kalsit, barit, pirit ve galen minerallerinin flotasyon verimi sırasıyla %4,00, %13,00, %5,20 ve %3,96 oranında artarken; kuvars mineralinin flotasyon verimi %20,45 oranında düşmüştür. Yazar, verimlerdeki iyileşmeyi ultrason dalgalarının etkisiyle reaktiflerin daha iyi disperse olmasına, ultrason etkisiyle mineral yüzeyinde oluşan pürüzlülüklerin mineralin yüzey alanını arttırmasına ve böylece mineral yüzeyine kollektör adsorbsiyonunun artmasına bağlamıştır. Kuvars

mineralinin flotasyon verimindeki düşüşe ise kullanılan kollektör kuvarsın üzerine fiziksel olarak adsorbe olduğundan ultrasonik enerjinin mineral-reaktif arasındaki fiziksel bağı kırmamasının dolayısıyla hidrofobisite düşüşünün neden olduğunu iddia etmiştir. Kalsit, barit, pirit ve galen mineralleri flotasyonda kullanılan kollektörlerle kimyasal bağ yaptığı için ultrasonik enerjinin fiziksel bağlardan çok daha güçlü olan bu kimyasal bağı kıramadığını belirtmiştir.

Ultrason flotasyon hücresi içerisinde pülp bölgesine uygulanabildiği gibi; köpük bölgesine de uygulanabilmektedir. Çilek ve Özgen (2009) yaptıkları çalışmada bu durumu incelemiş ve sülfürlü, oksitli ve silikatlı cevherler gibi farklı cevher türlerinin flotasyonu sırasında köpük bölgesine ultrason uygulanması yoluyla hem köpük bölgesi hem de toplam flotasyon bölgesi veriminin artırılması olanaklarını incelemişlerdir. Ayrıca flotasyon hücreleri içinde oluşan köpük bölgesine ultrasonik dalga göndererek, kabarcıklar arasında bulunan ince boyutlu tanelerin pülp bölgesine geri akış hızını artırma yollarını araştırmış ve bu etkinin köpük yüksekliği, hava akış hızı gibi değişkenler ile ilişkisinin belirlemeye çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, köpükte ultrason kullanımının özellikle ince boyutta serbestleşen ve değerli mineral oranı düşük sülfürlü cevherler (bakır gibi) için flotasyon başarısı açısından oldukça önemli katkılar sağladığı buna karşılık göreceli olarak iri boyutta serbestleşen ve değerli mineral oranı yüksek olan oksitli cevherler (barit gibi) için beklenen seçiciliği sağlamakta yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Köpük bölgesinde ultrason kullanımının hem mekanik taşınmayı azaltma etkisi ile flotasyon seçiciliğine önemli katkılar yaptığını hem de hücre içindeki mineral- kollektör etkileşimini daha arttırdığından flotasyon verimini arttırdığını bildirmişlerdir.

5. Tartışma

Flotasyonda ultrasonik enerjinin kullanıldığı çalışmalarda flotasyon sonucuna birçok parametre etki etmektedir. Bunlardan başlıcaları ultrasonun frekansı, gücü, ultrasonun uygulandığı flotasyon aşaması (flotasyon öncesi, esnası ve sonrası) ve

bölgesi (pülp bölgesi, köpük bölgesi), uygulama hacmi, ultrasonun uygulandığı cihaz (banyo, prob) ve yöntem (sürekli, kesikli), ultrasonik uygulama süresi, mineral türü, pülp katı oranı, pülp sıcaklığı ve pH'sı, reaktif türü ve dozajı olarak sayılabilir. Bu parametrelerin herhangi birinde meydana gelen bir değişiklik ultrasonik uygulamanın etkisini ve dolayısıyla flotasyon sonucunu doğrudan etkilemektedir.

Ultrason genellikle ultrasonik banyolar (Gürpınar, 2007; Özkan ve Güngören, 2012) veya problemler (Çilek ve Özgen, 2009; Güngören ve ark., 2015; 2016; 2017,) kullanılarak uygulanmaktadır. Ultrasonik banyolar problemlere kıyasla daha düşük güçte enerji üretirler. Problemlerde enerjiyi bir noktaya odaklama imkânı bulunurken banyolarda enerji daha homojen yayılır. Bu nedenle ultrasonik problemlerin ve banyoların mineral yüzeyinde ve pülp içerisinde yarattığı koşullar farklılık göstermektedir. Birçok ultrasonik probta güç ayarı yapılabilirken banyolar genellikle sabit güçte çalışmaktadır. Ayrıca problemler doğrudan pülp içerisine konumlandırılabilirken, banyolarda ultrason çoğunlukla içerlerine beher, flotasyon hücresi gibi farklı malzemelerden yapılan ve farklı geometrilerdeki kaplar yerleştirilerek uygulanmaktadır (Özkan ve Veasey, 1996; Özkan, 2002). Bu durumda da ultrasonik çeviriciden çıkan ultrasonik enerji önce banyonun içerisindeki suya ardından pülpün bulunduğu kaba oradan da pülp içerisine aktarılmakta bu geçişler sırasında enerji kayıpları yaşanmaktadır. Buna önlem olarak ultrasonik dönüştürücülerin doğrudan uygulama kabı üzerine monte edildiği çalışmalar kullanım imkânı bulmuştur (Özkan ve Kuyumcu, 2005; 2006; 2007; Özkan, 2006; 2012; Videla ve ark., 2016). Bununla birlikte ultrasonun aşırı kullanımı flotasyon sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Altunve ark.,2009).

Ayrıca ultrasonik uygulama sırasında da bazı parametreler değişmektedir. Örneğin, minerallerin yüzeyleri temizlenerek taze yüzeyler oluşabilmekte, taneler ufalanabilmekte, reaktifler daha iyi emülsifiye olabilmekte, pülp sıcaklığı artabilmektedir. Bu sebeple çeşitli araştırmacılar

yaptıkları çalışmalardan elde ettikleri sonuçların ultrasonun farklı etkilerinden kaynaklandığını ileri sürmüştür. Kowalski ve Kowalska (1978) ultrasonun flotasyon üzerindeki olumlu etkisini reaktif aktivitesini arttırmasına bağlarken, Aldrich ve Feng (1999) ise en önemli parametrenin ultrasonik kondiyon süresi olduğunu bildirmiştir. Ultrasonun pozitif etkisini mineral yüzeyinin temizlenmesi ile ilişkilendiren çok sayıda çalışma mevcuttur (Çelik ve ark.,2002; Özkan 2002; 2006; 2012; Özkan ve Kuyumcu 2005; 2006; 2007 Özkan ve Güngören,2012; Kang, 2008). Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre mineral tanesinin yüzeyini kaplayan kil ve şlam gibi küçük boyutlu taneler ultrasonik etki ile uzaklaştırılabilmekte ve açılan taze mineral yüzeylerine kollektör adsorbsiyonu iyileşmektedir. Güngören ve ark. (2017) kuvars-amin kondisyonunda görülen ultrasonun olumlu etkisini sıcaklık artışına ve bunun da aminin aktivitesini arttırmasına bağlamışlardır. Özkan ve Veasey (1996) ise mineral tane boyutunun ultrasonun etkisini ve dolayısıyla flotasyon sonuçlarını değiştirdiğini bildirmiştir.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Ultrason, flotasyon öncesinde yüzey temizleme, kondisyon verimini arttırma amaçlarıyla kullanılabilir. Flotasyon esnasında ultrason kullanılan çalışmalarda ise pülp bölgesine ve köpük bölgesine ultrason uygulanan çalışmalar mevcuttur. Literatürde ultrasonik uygulamanın flotasyon verimi üzerine etkisinin olumlu olduğunu belirten çalışmalar çoğunlukta olmakla birlikte ultrasonun olumsuz etkileri de gözlenmiştir. Burada ultrasonik uygulamanın gerçekleştirildiği cihaz, ultrasonik güç, mineral ve kimyasal dolayısıyla adsorpsiyon özellikleri, flotasyon cihazının teknik özellikleri, ultrasonun uygulama aşaması gibi değişkenler etkin rol oynamaktadır.

Ultrasonun flotasyon üzerine olumlu etkileri genellikle kavitasyon etkisi ile yüzey temizleme ve şlam uzaklaştırmadaki başarısına bağlanmıştır. Ultrasonun uygulandığı ortamın sıcaklığını arttırması da kondisyon ve flotasyonda etkili olmaktadır. Ultrasonun flotasyon üzerindeki olumsuz etkilerinin sebebinin ise

ultrasonun yarattığı türbülanslı ve kaotik ortamın ultrasonun mineral-kollektör arasındaki zayıf bağları kırması olabileceğine değinilmiştir.

Flotasyonda ultrason kullanımı ile ilgili çalışmalar bu zamana kadar genellikle laboratuvar ölçeğinde denenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda ölçek büyütme işlemleri yapılarak önce pilot daha sonra endüstriyel çapta denemeler yapılması, ultrasonik uygulamanın maliyet hesaplarının gerçekleştirilmesi, değişik frekans, güç kullanabilen ultrasonik enerji destekli flotasyon cihazlarının tasarlanması endüstriyel flotasyonda ultrason kullanımının önünü açacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nin 31626 no'lu projesi ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Aldrich, C. ve Feng, D., 1999. Effect of ultrasonic preconditioning of pulp on the flotation of sulphide ores, technical note. *Minerals Engineering*, **12** (6), 701-707.
- Altun, N.E., Hwang, J.-Y. ve Hicyilmaz, C., 2009. Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment. *International Journal of Mineral Processing*, **91** (1-2), 1-13.
- Ambedkar, B., 2012. Ultrasonic coal-wash for de-ashing and de-sulfurization, experimental investigation and mechanistic modeling. Doktora Tezi, Springer Theses, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, Hindistan, 125.
- Atak, S., 1982. Flotasyon İlkeleri ve uygulaması. İTÜ Maden Fak., İstanbul, 1-222.
- Çelik, M.S., Hancer, M. ve Miller, J.D., 2002. Flotation chemistry of boron minerals. *Journal of Colloid and Interface Science*, **256** (1), 121-131.
- Çilek, E.C., 2006. Mineral flotasyonu, Süleyman Demirel Üniversitesi. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Isparta, 1-158.

Çilek, E.C. ve Özgen, S., 2009. Effect of ultrasound on separation selectivity and efficiency of flotation. *Minerals Engineering*, **22** (14), 1209-1217.

Ensminger, D. ve Bond, L.J., 2012. Ultrasonics fundamentals, technologies, and applications. CRC Press, Boca Raton, Florida, ABD, 1-687.

Güngören, C., Baktarhan, Y., Demir, İ., Şenol Arslan, D., Özdemir, O. ve Özkan, Ş.G., 2016. Evaluation of coal preparation plant tailings by ultrasonic flotation. *16th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP 2016)*, İstanbul, 1-5.

Güngören, C., Erbek, T.M., Özdemir, O. ve Özkan, Ş.G., 2015. Effect of simultaneous ultrasonic treatment on quartz-amine flotation system. *XVI Balkan Mineral Processing Congress*, Belgrade, Serbia, 483-490.

Güngören, C., Özdemir, O. ve Özkan, Ş.G., 2017. Effects of temperature during ultrasonic conditioning in quartz-amine flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, **53** (2), 687-698.

Gürpınar, G., 2007. Ses ötesi dalgaların cevher zenginleştirmede kullanılabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 108.

Kang, W., Xun, H. ve Hu, J., 2008. Study of the effect of ultrasonic treatment on the surface composition and the flotation performance of high-sulfur coal. *Fuel Processing Technology*, **89** (12), 1337-1344.

Kowalski, W. ve Kowalska, E., 1978. The ultrasonic activation of non-polar collectors in the flotation of hydrophobic minerals. *Ultrasonics*, 84-86.

Leja, J., 1982. Surface chemistry of froth flotation, Plenum Press. New York, 1-758.

Mason, T.J., 1997. Ultrasound in synthetic organic chemistry. *Chemical Society Reviews*, **26** (6), 443-451.

- Mason, T.J. ve Lorimer, J.P., 2002. Applied sonochemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1-293.
- Nguyen, A.V. ve Schulze, H.J., 2004. Colloidal science of flotation. Marcel Dekker, New York, 1-850.
- Özkan, Ş.G., 1998, Ultrasonik işlemlerin flotasyon üzerindeki etkileri, İstanbul Univ. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, **11** (1), 131-135.
- Özkan, Ş.G., 2002. Beneficiation of magnesite slimes with ultrasonic treatment. *Minerals Engineering*, **15**, 99-101.
- Özkan, Ş.G., 2006. Enhancement of coal flotation by ultrasound. *İ.Ü. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, **19** (2), 169-174.
- Özkan, Ş.G., 2012. Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes. *Fuel*, **93**, 576-580.
- Özkan, Ş.G. ve Güngören, C., 2012. Enhancement of colemanite flotation by ultrasonic pre-treatment. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, **48** (2), 455-462.
- Özkan, Ş.G. ve Kuyumcu, H.Z., 2005. Application of ultrasonics for coal flotation. *4. Kolloquium Sortieren Innovationen und Anwendungen*, Berlin, Germany, 220-228.
- Özkan, Ş.G. ve Kuyumcu, H.Z., 2006. Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation. *International Journal of Mineral Processing*, **81** (3), 201-203.
- Özkan, Ş.G. ve Kuyumcu, H.Z., 2007. Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **14** (5), 639-645.
- Özkan, Ş.G. ve Veasey, T.J., 1996. Effect of simultaneous ultrasonic treatment on colemanite flotation. *6th International Mineral Processing Symposium*, Kuşadası, Turkey, 277-281.
- Rao, S.R. ve Leja, J., 2004. Surface chemistry of froth flotation. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1-350.
- Stoev, S.M., Kuzev, L., Metodiev, M. ve Djendova, S., 1992. Vibroacoustic improvements of froth flotation, Innovations in flotation technology, nato asi series. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 383-407.
- Suslick, K.S., 1989. The chemical effects of ultrasound. *Scientific American*, 80-86.
- Suslick, K.S., 1994. The chemistry of ultrasound. *Encyclopedia Britannica*, 138-155.
- Suslick, K.S., Didenko, Y., Fang, M.M., Hyeon, T., Kolbeck, K.J., Mcnamara Iii, W.B., Mdleleni, M.M. ve Wong, M., 1999. Acoustic cavitation and its chemical consequences. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, **357**, 335-353.
- Videla, A.R., Morales, R., Saint-Jean, T., Gaete, L., Vargas, Y. ve Miller, J.D., 2016. Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery. *Minerals Engineering*, **99**, 89-95.
- Yiğit, E. ve Özkan, Ş.G., 2007. Flotasyon yöntemi ve uygulamaları. İ.Ü Mühendislik Fakültesi Yayınları, İstanbul Üniversitesi Basımevi, İstanbul, 1-170.