

FLOTASYON ve FLOTASYON MAKİNELERİ

Flotation and Flotation Machines

İsmail BENTLİ*

ÖZET

Bu çalışmada, flotasyon yöntemi ve mevcut klasik flotasyon makineleri kısaca anlatılmıştır. Mekanik flotasyon makinelerinin tasarımında ve özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan geometrik, mekanik oranlar ve hidrodinamik numaralar ise özetlenmiştir.

Flotasyon makinelerinden yüksek kapasite, düşük maliyet, enerji tasarrufu, çok ince kabarcık çapı vs gibi özellikler istenmektedir. Flotasyon makineleri üzerinde yapılan çalışmalar üç temel noktada yoğunlaşmaktadır. Birincisi son yıllarda önemle üzerinde durulan, tesiste kullanılan mekanik flotasyon makinelerinin iyileştirilmesidir. İkincisi, büyük hacimli yeni tasarımlar geliştirmektir. Sonuncusu ise çevresel problemleri azaltmak amacıyla katı atıkların geri kazanılması ve atık suların temizlenmesinde artan bir şekilde kullanılmasıdır.

ABSTRACT

This paper mainly reviews flotation processes and conventional flotation machinery used in mineral processing applications. It also presents geometrical, mechanical ratios and hydrodynamic properties of mechanical flotation machines.

Some desired properties of flotation machines are high capacity, low operating cost, low energy consumption, great amounts of fine bubble creation and so on. The main development research activities concentrate on three basic categories. Primarily, the rehabilitation of existing flotation machinery are considered, which is most recently popular. Secondly, innovation and design of high capacity flotation machines are developed. Finally, research on flotation machines are carried out to reduce environmental hazards from waste disposal and clean waste/effluent water.

Anahtar Kelimeler : Flotasyon, Mekanik flotasyon makineleri, Flotasyon kolonu, Pnömatik flotasyon, Elektrofotasyon, Geometrik oranlar, Hidrodinamik numaralar.

Key Words : Flotation, Mechanical flotation machines, Column flotation, Pneumatic flotation, Geometrical ratios, Hydrodynamics numbers.

* Arş. Gör. Dr., Dumlupınar Üniversitesi Müh. Fak. Maden Müh. Böl., Kütahya

1. GİRİŞ

Flotasyon veya daha özel ismiyle köpük flotasyonu, ince boyutta serbestleşen cevherlerin (-0.2 +0.01 mm), fiziko-kimyasal özellik farklılıklarına dayanılarak yapılan bir zenginleştirme yöntemidir. Bugün madencilik ve madencilik dışı bir çok alanda kullanılan ve büyük tonajlara uygulanan en önemli ve verimli bir cevher zenginleştirme yöntemidir. Flotasyon, diğer yöntemlerle zenginleştirilmesi mümkün olmayan düşük tenörlü ve kompleks cevherlere uygulanabilirliği nedeniyle, madencilik endüstrisinin gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Wills, 1989; Aytekin vd, 1988).

Flotasyon işleminde mineral tanelerinin yüzey özelliklerinin farklılığından yararlanılır. Mineral taneleri çeşitli reaktiflerle işleme sokularak aralarındaki yüzey özelliklerinin farklılığı belirgin hale getirilmekte, böylece değerli ve değersiz mineraller birbirinden yüzdürme ile ayrılmaktadır. Yüzdürülmesi istenen mineral taneleri hava kabarcığına yapışarak pülp yüzeyine doğru yükselmekte ve yüzeyde bir köpük tabakası meydana getirmektedir. Köpük bölgesinde biriken köpük tabakası hücreden doğal olarak taşarak yada pedallarla sıyrılarak alınmaktadır.

Mineral taneleri flotasyon boyutundan iri ise, suyun kaldırma kuvvetinden yararlanılamamakta ve bu iri taneler hava kabarcığı tarafından taşınmamaktadır. İri boyutlu mineral taneleri ve hava kabarcığı arasındaki adhezyon (yapışma) kuvveti, mineral ağırlığından az olacağından kabarcık mineral tanesini taşıyamayarak aşağıya düşmektedir (Wills, 1989). Bu nedenle bir çok araştırmacı flotasyon ile zenginleştirmede tane boyutuna dikkat edilmesi gerektiğini bildirmektedir (Harris, 1976; Ross, 1997).

Bu makalede mevcut mekanik ve pnömatik flotasyon makineleri tanıtılmıştır. Bunlara ait çalışma parametreleri, hücre tipleri ve hidrodinamik parametreler kısaca özetlenmiştir.

2. FLOTASYONUN TARİHİ GELİŞİMİ

Mineral flotasyonu yöntemi ile ilgili olarak ilk patent 1860'da Haynes tarafından alınmıştır. İlk çalışmalar yağ-su ara yüzeyinde başlamıştır. Bu çalışmaların temeli minerallerin yağ ve su içinde farklı ıslanabilirliğine dayanmaktadır. Yağ flotasyonu metalik parlaklık gösteren minerallere uygulanmıştır. Bu yöntem ıslanabilirlik özelliğinden faydalanılarak çok daha fazla ıslanan gang minerallerinin yağ-su ara yüzeyinden geçirilerek ayrılması esasına dayanmaktadır. Ancak, kullanılan yağ miktarı çok fazladır. Yağ miktarı azaltılarak 10 kg/t mertebesine düşürülmesine rağmen, köpük flotasyonu için bugün kullanılan miktardan (0.3 kg/t) çok fazladır. Yağ miktarının azaltılması her cins yağın aynı flotasyon özelliğine sahip olmadığını göstermiştir (Kaya ve Laplante, 1986a).

1902 yılında İtalya'da Froment ve Avustralya'da Potter gaz kabarcıklarının, yağlı sülfürlü mineral tanelerini taşımak için ideal bir yüzdürme ortamı olduğunu bulmuşlardır. Bu ve diğer araştırmacılar kabarcıkları, kimyasal reaksiyonlarla veya cevher pülpünün üstüne kısmi bir vakum uygulayarak meydana getirmişlerdir. 1906 yılında Ballot, Sulman ve Picard ilk olarak hava kabarcıklarını yükselen bir akış olarak kullanmış ve böylece gerekli yağ miktarı azaltılmıştır.

Köpük flotasyonunda toplayıcı (kollektör) olarak seçimli (selektif) olmayan yağların ve asidik pülpün kullanılmasıyla bir çok sülfürlü cevherlerin konsantrasyon olarak kazanılması ekonomik olarak mümkün olmuştur (Tablo 1). Bir çok seçici reaktifin ve çok yararlı flotasyon ekipmanlarının geliştirilmesiyle sülfürlü ve sülfür dışı cevherlerin flotasyon ile konsantrasyon olarak kazanılması mümkün hale gelmiştir. Modern flotasyonun, 1925 yılında Keller'in sülfürlü mineraller için toplayıcı olarak ksantat kullanımını keşfetmesiyle başlamış olduğu tahmin edilmektedir (Kaya ve Laplante, 1986a).

Tablo 1. Flotasyonun Gelişimi ve Köşe Taşları (Kaya ve Laplante 1986a).

Tarih	Bilim Adamları	Yapılan Keşif
1860	Haynes	Su ve yağla minerallerin farklı ıslanabilirliği
1886	Everson	Asitli suyun kullanımı
1902	Potter, Froment	Taşıyıcı ortam olarak gaz kullanımı
1906	Ballot, Sulman, Picard	Karıştırma ile giren hava sayesinde yağ miktarının azaltılması
1913	Bradford	Sfalerit için canlandırıcı olarak $CuSO_4$ kullanımı
1917	Corliss	α - Naphthylamine (ilk yağ olmayan toplayıcı)
1922	Sheridan ve Griswold	Pirit ve Sfalerit bastırıcı olarak siyanür kullanımı
1924	Sulman ve Edser	Yağ asidi sabunları kullanımı
1925	Keller	Toplayıcı olarak ksantat kullanımı
1926	Whitworth	Toplayıcı olarak organik ditiyofosfatların kullanımı
1952	Harris ve Fischback	Toplayıcı olarak dialkylthiocarbamate kullanımı
1966	Frommer	Silis flotasyonunu takiben taconite cevheri seçimli flokülasyon
1978	Klimpel	Flotasyon yönteminin matematik modellenmesi
1979	Hansen ve Meyer	Oksitli kömür flotasyon toplayıcısı
1980	Dobby-Finch	Kolon Flotasyonu
1985-1989	Greame Jameson	Jet flotasyonu ve Jameson flotasyon hücresi

2. 1. Flotasyon Yönteminin Avantajları

- İnce boyutta serbestleşen cevherlere kolaylıkla uygulanabilir (Mineraller için $-0.2+0.01$ mm, Kömür için -0.5 mm).
- Kompleks ve düşük tenörlü cevherler flotasyonla zenginleştirilebilir (örneğin bakır, kurşun, çinko, altın, antimuan gibi).
- Flotasyon ile zenginleştirmede özgül ağırlığın etkisi yoktur (örneğin 1.2 gr/cm³ olan kömür veya 19 gr/cm³ olan altın yüzdürülebilir).
- Yüksek kapasitelerde, düşük yatırım ve işletme masraflarına müsaade eden bir yöntemdir. Kapasite 50 yıl önce $500-600$ t/gün iken bugün $20000-150000$ t/gün'e kadar çıkmıştır.
- Flotasyon makinelerinin kapasiteleri günümüzde 100 m³'e kadar ulaşmıştır.
- Yeni ve son ürünün kalitesinin artırılmasına yardımcı olmaktadır (örneğin seramik sanayi veya HF asit üretimi için, florit cevherinden %95CaF₂ tenörü sadece flotasyon yöntemiyle üretilmektedir).

2. 2. Flotasyon Yönteminin Dezavantajları/Sakıncaları

- Enerji kullanımı fazla olan bir yöntemdir.
- Flotasyon reaktifleri pahalıdır ve ithal edilmektedir.
- Flotasyon yöntemi, tasarım ve cevher yapısı değişikliğine çok hassastır.
- Su tüketimi fazladır. Su kalitesi çoğu zaman önemlidir.

2. 3. Flotasyon Yönteminin Uygulama Alanı

Flotasyon yöntemi madencilik endüstrisinde, kompleks cevherlerden konsantride elde etmede kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. Mineral ve mineral dışı endüstrilerde flotasyonun kullanım alanları aşağıda verilmektedir (Kaya ve Kurama 1999):

Mineral Endüstrisi:

- Metalik cevherlerin konsantride olarak kazanılmasında (Cu, Pb, Zn, Fe, Mo, Co, Ni, As, Au, Ag vs),
- Katı yakıtların temizlenmesinde (Linyit, antrasit, bitümlü kömür, taşkömürü vs),
- Metalik olmayan cevherlerin ve endüstriyel hammaddelerin zenginleştirilmesinde (Fosfat, feldspat, florit, barit, potas, demir oksitler, tungsten cevherleri vs),

Mineral-Dışı Endüstriler:

- Artık kağıtlarından baskı mürekkebinin uzaklaştırılmasında (mürekkepsizleştirme),
- Kok fırını gaz soğutma kulelerinde naftalinin kazanılmasında,
- Gıda endüstrisinde, tahıl tanelerinden kabuklarının ayrılmasında,
- Çevre mühendisliğinde, kirli suların temizlenmesinde,
- Biyoloji ve eczacılıkta bakteri ve misel kristallerinin kazanılmasında,
- Fotoğrafçılıkta, banyo suları ve filmlerden gümüşün geri kazanılmasında,
- Endüstri ve rafineri tesis artıklarından yağların uzaklaştırılmasında,
- Tekstil endüstrisi, rayon banyolarından sülfürün uzaklaştırılmasında,
- Mezbaa atık sularından kanın uzaklaştırılmasında,
- Lalex, karbon siyahı, aktif karbon ve isin kazanılmasında,
- Artık sulardan boyar maddelerin uzaklaştırılmasında,
- Nükleer reaktör atıklarının işlenmesinde,
- Kanalizasyon arıtma tesislerindeki atık suların biyokimyasal oksijen ihtiyacını azaltmada,
- Kağıt endüstrisindeki beyaz atık suların işlenmesinde,
- Seramik endüstrisinde porselen sırrın kazanılmasında kullanılmaktadır.

3. FLOTASYON MAKİNELERİNDE ARANAN ÖZELLİKLER

Karmaşık sistemler ve yenilikler flotasyon yönteminde de gereklidir. Flotasyon makinelerinde, tane süspansiyonu ve dağıtımı, havalandırma, kabarcık yapısı ve dağılımı, tane-kabarcık teması, sakın köpük fazı, pülpün havalandırılması ve karıştırılması ve sonuçta konsantrinin alınması gibi çeşitli değişiklikler aynı zamanda takip edilmeli ve buna göre yenilenmelidir. Mevcut hücreyle veya boyu uzatılan hücrelerle bu değişken şartların test edilmesi gereklidir (Kaya ve Laplante, 1986b).

Flotasyon makinelerinde aranan özellikler aşağıda verilmektedir (Harris, 1976; Young, 1982; Atak, 1982; Akar, 1985; Özbayoğlu, 1984) :

- Pülpün süspansiyon halinde tutulması gereklidir. Bunu başarmak için pülpdeki iri taneleri askıda tutabilecek hızda karıştırma yapılmalıdır. Hücre içinde çökelme engellenmelidir. Genel bir problem olarak kumlanma (tanelerin hücrenin tabanına çökmesi), hücre hacminin ve mineral veriminin azalmasına neden olmaktadır.
- Hücre boyunca havalandırma, ince hava kabarcıklarını dağıtmaya müsaade etmelidir. Havalandırma miktarı hücre hacminin her 1 m³ hacmi için dakikada 0.1-2 m³ arasında değişiklik gösterebilir. Tespit edilmesi gereken önemli bir faktör beslemenin ağırlıkça yüzde kaçının yüzdürülmesi gerektiğinin açıklığa kavuşturulmasıdır.
- Önemli bir faktör olarak flotasyon hücresinde küçük kabarcıklar (d_b: 1-5 mm) oluşturulmalı ve bunlar dağıtılmalıdır. Bu durum flotasyon makinelerinin temel bir fonksiyonudur. Pervaneler ölü bölge meydana getirmeden, flotasyon hücresine tüm havayı dağıtabilmelidir.
- Köpük fazın altında sakin pülp şartlarının sağlanması gereklidir. Bir çok flotasyon makineleri tanelerin süspansiyonunu sağlamak amacıyla türbülans şartlara göre imal edilmiştir. Yine bu hücrelerde türbülansı azaltmak için çoğunlukla hareketleri kontrol eden levhalar (bariyerler) kullanmıştır. Pülpdeki türbülans köpük fazına geçmemelidir. Aksi durumda köpük sağlamlığı ve mineral kazanma veriminde azalma meydana gelmektedir. Türbülans köpükle beraber gang tanelerinin mekanik taşınmasını arttırmakta ve seçimliliği azaltmaktadır.
- Köpük bölgesine istenmeden gelen gangların tekrar pülp içine drenaj olmasına (geri dönmesine) müsaade edilmelidir. Bunun için köpüğe yıkama suyu ilavesi çözüm olabilir.
- Köpük fazının içine istenen mineral taneleri taşınmalı ve seçici bir ayırım için tane kabarcık birleşmesi artırılmalıdır. Değerli ve gang taneleri arasında yüzey özelliği farklılığı ne kadar fazla olursa, seçimli ayırım da o derece başarılı olmaktadır.
- Pülp ve köpük bölgesi yüksekliği, pervane hızı ve hava akış miktarı ile otomatik olarak kontrol edilebilmelidir.
- Beslemenin artışı kısa devre yapması önlenmeli, hücreden-hücreye geçiş kolaylaştırılmalı ve devredeki artışı dışarı atmak için uygun tertibat yapılmalıdır.
- Konsantre ve artık ayrı ayrı yerlerden alınmalıdır.
- Bir arızadan sonra makine kolayca yeniden harekete geçirilmeli ve bakımı kolay olmalıdır.

Flotasyon makineleri tesiste genellikle seri halde çalışan hücreler şeklindedir. Bu nedenle hücreler bir önceki hücrenin artığını yüzdürmektedir. Her hücrenin köpük yüksekliği, artık akış plakasının yüksekliği (seviyesi değiştirilerek) veya vana ile ayarlanır. Pülpün ilk giriş hücresinde köpük yüksekliği fazla, artık çıkış hücresine doğru gidildikçe köpüğe yapışan mineralin azalmasından dolayı köpük yüksekliği azalmaktadır. Bu nedenle artık çıkış plakası son hücreye doğru kademeli olarak yükseltilir. Temizleme devrelerinde yüksek tenörlü konsantre elde etmek için pülp yoğunluğu az ve köpük kalınlığı yüksek olmalıdır. Artık çıkış plakası alçak seviyede tutularak, yüksek köpük kalınlığı ile temiz konsantre alınmaya çalışılır. Kaba ve temizleme devrelerinde ideal çalışma şartları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Kaba ve Temizleme Devrelerinde Hedefler (Kaya ve Laplante, 1986a).

Kaba Flotasyon Devrelerinde Hedefler	Temizleme Devrelerinde Hedefler
Amaç: Yüksek verim. Tenör önemli değil.	Amaç: Seçimlilik ve tenör. Verim çok önemli değil.
Hava akış miktarı fazla (hava yumruları ve köpük kararsızlığı önlenmelidir).	Düşük pülpl yoğunluğu.
Sığ köpük (1-15 cm) derinliği.	Kalın köpük (15-40 cm).
Hızlı akış.	Gevşek ve sulu köpük (gangin drenajına izin verilmeli) akışı.
Yüksek pervane hızı.	
Köpükte düşük kalış zamanı.	Köpükte uzun kalış zamanı (drenaj için).
Uzun hücreli banklar (10-18 hücre, artıklar atılabilir).	Kısa hücreli banklar (artıklar atılmaz, geri döndürülür).
Açık akışlı hücre şekli.	Hücreden hücreye akış şekli.

Çeşitli flotasyon makinesi üreticileri, istenen özellikleri sağlayacak şekilde tasarım çalışmaları yapmaktadır. Bu çalışmalar devamlı gelişme halindedir (Önal 1996; Koivistoinen, 1991; Degner, 1990). Çeşitli yenilikler ile daha yüksek tenörlü konsantre elde edebilecek flotasyon makineleri üretilmeye çalışılmaktadır (Bentli, 2000). Meksika’da altın ve gümüş flotasyonunda kullanılmak üzere mekanik bir flotasyon hücresi geliştirilmiştir. Bu yeni hücre ile altın ve gümüş kazanma verimi %80’den %87’ye yükselmiş, güç tüketimi ve işletme maliyeti belirgin bir şekilde azalmıştır (Parga vd, 1996).

Denver flotasyon makinesinde pervane hızı, hücre büyüklüğüne ve pervane çapına bağlı olarak değişir. Pervane hızı arttıkça, hava girişi de artmaktadır. Yüksek hız fazla enerji tüketimine neden olacağından, hızı arttırmak yerine, az bir basınçla hava göndermek daha faydalıdır (Denver kataloğu). Flotasyonun başarısı için tane kabarcık karşılaşmasını, yapışmasını ve köpük bölgesi içine değerli minerali taşıma ihtimali arttırılmalıdır (Yoon, 1991; Arbiter vd, 1969; Harris, 1976; Wills, 1988; Bischofberger, 1998).

4. FLOTASYON MAKİNELERİ

Dünyada 14 büyük flotasyon makinesi üreticisi bulunmakta ve bunların ürettikleri makinelerin boyut ve işletme şartları birbirinden farklılık göstermektedir. 1980’li yıllarda flotasyon makineleri 50-60 m³ hacimli iken (Young, 1982; Aytekin vd, 1988), günümüzde 100 m³ gibi büyük hacimlere ulaşılmıştır (Leskinen, 1998). Bu durum ton başına işlenen cevher maliyetini azaltmıştır. Flotasyon makineleri ile ilgili geniş araştırmalar, Harris (1976), Young (1982) ve Kaya (1986a) tarafından yapılmıştır. 1980’li yıllarda güncellik kazanan kolon flotasyonu, yerini günümüzde Jemason flotasyon hücresine bırakmıştır (Ata ve Önder, 1997). Flotasyon makinelerini 5 ana gruba ayırmak mümkündür.

- Mekanik makineler
- Havalı makineler (Pnömatik),
- Köpük ayırıcıları,
- Kolon flotasyonu,
- Elektro-flotasyon makineleri.

4.1. Mekanik makineler

En yaygın flotasyon makine tipidir. Hava bir pervane yardımıyla pülp içinde dağıtılmaktadır. Bu makineler mükemmel karıştırma yapmaktadır. Son zamanlarda yüksek kapasiteye uygun olmasından dolayı, mekanik makineleri iyileştirme ve yeni dizaynlar elde etme çalışmaları hız kazanmıştır (Podopnik vd, 1985; Gorain, 1997). Şekil 1'de bazı flotasyon makine ve hücre şekilleri gösterilmektedir. Mekanik flotasyon makineleri pülp akışı, havalandırma şekli ve köpük alma şekline göre üçe ayrılmaktadır.

4.1.1. Pülp akışına göre

Açık akışlı hücreler : Pülpün hücreden hücreye geçişi sırasında herhangi bir engel bulunmamaktadır. Bugün 100 m³'lük hücreler mevcuttur. Büyük kapasiteli flotasyon hücreleri tesis içinde daha az yer kaplarlar, ton başına daha az güç gereksinimi gösterirler, bilgisayar ile otomatik kontrolleri kolaydır, az bakım gerektirirler ve kaba flotasyonda kullanılırlar. Denver, Sala, Outokumpu bu tip makinelere örnektir (Young, 1982). Outokumpu Güney Afrika Madenlerinde kullanılan 100 m³'lük tank hücrelerini üretmiştir (Leskinen, 1998).

Hücreden-hücreye akışlı : Pülp hücreden-hücreye geçerken bir engel ile karşılaşmaktadır. Bu hücre tipi küçük kapasiteli tesislerde veya temizleme devrelerinde kullanılmaktadır. Bunların yapısı açık akışlı hücrelerden daha karmaşıktır. Hücre hacimleri genellikle 3.5 m³'den daha küçüktür. Denver SubA kömür flotasyon makinesi örnek olarak verilebilir (Young, 1982).

4.1.2. Havalandırma şekline göre

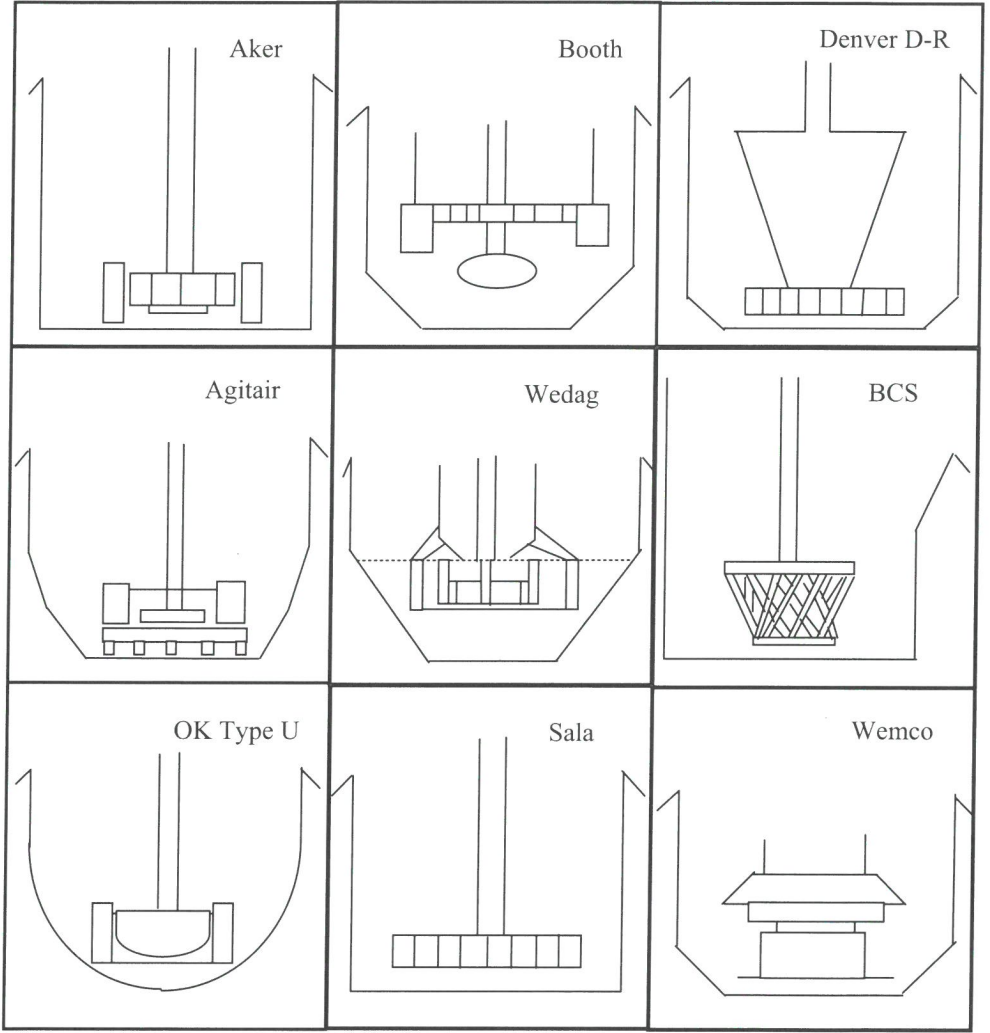
Kendinden havalandırılmalı makineler : Pervanenin altında ve dönüş hareketinin meydana getirdiği alçak basınç nedeniyle, hücre içine atmosferden hava emilmektedir. Örnek olarak Booth, Wemco ve Denver verilebilir. Güç sarfiyatı pervane dönüşü sırasında harcanan güce eşittir (Young, 1982).

Hava üflenen makineler : Bu makinelere dışardan bir üfleme veya kompresör tarafından hava verilmektedir. Bu gruba örnek olarak Agitair, Denver ve Aker verilebilir. Toplam güç sarfiyatı pervanenin çektiği güç ve hava üfleme için harcanan gücün toplamına eşittir. Verilen hava hücre içerisinde homojen olarak dağıtılmalıdır (Young, 1982).

4.1.3. Köpük alma şekline göre

Üstten taşmalı makineler : Köpük hücrenin ağzından doğal olarak taşmaktadır.

Köpük sıyırma yapan makineler : Köpük hem taşma ile hem de sıyırıcı pedallar ile alınmaktadır.

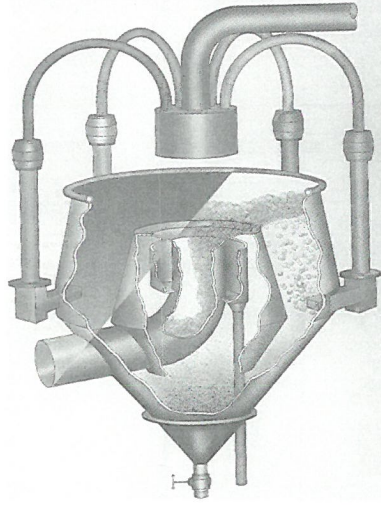


Şekil 1. Bazı Flotasyon Makinelerinin Kesiti.

4. 2. Havalı (Pnömatik) makineler

Bu makinelerin en önemli özelliği karıştırıcı pervanenin bulunmamasıdır. Basıncı hava alttan pülpü karıştırmakta ve havalandırmaktadır. Fagergren, Davcra, Swemac, Allflot ve Ekof bu gruba örnek olarak verilebilir. Havanın hücreye homojen dağıtılmasına ve kabarcıkların ufak boyutlu olmasına dikkat edilmelidir (Young, 1982).

Şekil 2'de gösterilen Ekof hücresinde şartlandırılan pülp, yüksek basınçta havalandırma reaktörüne pompalanır. Havalandırma reaktöründe havalandırılan pülp ayırma hücrelerine jet halinde beslenir. Hidrofobik taneler yüzeye çıkarken, hidrofilik taneler alta doğru çöker ve atık olarak tabandan alınır (Kaya ve Kurama, 1999).



Şekil 2. Ekof Flotasyon Hücresinin Görünüşü.

Belçika yapımı Swemac hücreleri dairesel kesitli olup, üst üste bindirilmiş (genellikle 4 hücre) dikey hücre kulelerinden meydana gelmiştir. Az yer kaplarlar ve atık kağıt mürekkeplerinin uzaklaştırılmasında İsveç ve Japonya'da kullanılmaktadır (Kaya ve Kurama, 1999). Havalı flotasyon makinelerinin avantajları şunlardır:

- Seçimli flotasyona uygundur.
- Hücre hacmi daha azdır ve yatırım maliyeti düşüktür.
- Birim alan başına düşen enerji maliyeti azdır.
- Hareketli parça olmadığından aşınma maliyeti çok azdır.

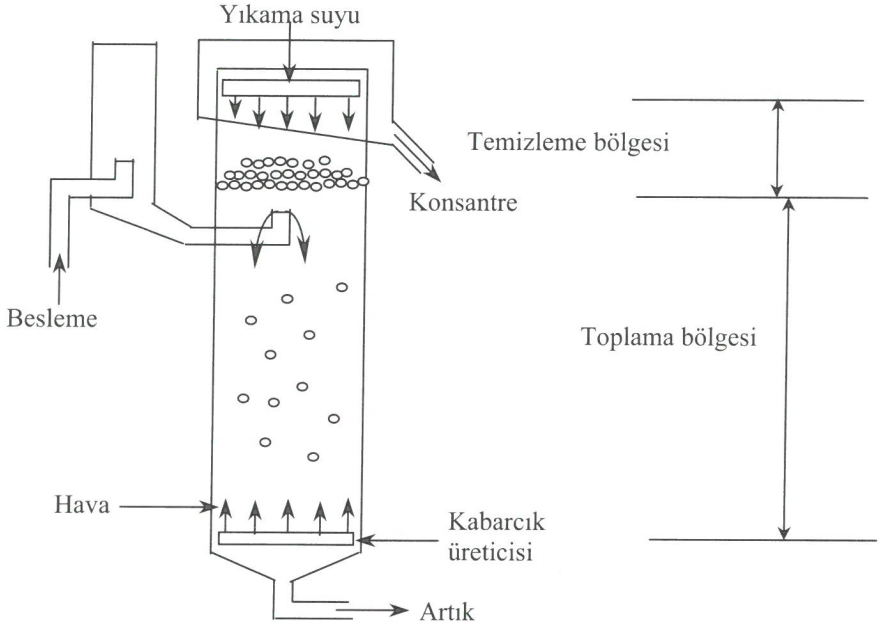
4. 3. Köpük ayırıcıları

Bu makinelerde besleme köpüğün üstüne yapılmakta ve hidrofobik taneler köpükte kalırken gang taneleri köpükten geçip aşağıya doğru akmaktadır. Rus yapımı olan bu makineler, daha çok yüksek tenörlü ve iri boyutlu cevherlerde (fosfat, potas, kömür gibi) kullanılır (Kaya, 1998).

4. 4. Flotasyon kolonu

Kolon flotasyonunda mekanik bir aksam bulunmamaktadır. Kolon flotasyonu hava kabarcıkları ile yıkama suyunun ters yönde karşılaştıkları bir yöntemdir. Kolon flotasyonunda yıkama suyu kullanıldıktan sonra mekanik flotasyona da yıkama suyu uygulanmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır (Kaya, 1989). Kolon flotasyonu daha ince boyutta (-0.1 +0.01 mm) serbestleşen ve pozitif biasla çalışan köpük zonu olmayan modifiye kolonlar ise iri boyutta (-1 mm) serbestleşen cevherlerde kullanılmaktadır (Öteyaka, 1998). Hava alttan kabarcık üreticisi ile verilir. Endüstriyel çapta daha çok Cu-Mo, Cu temizlemede ve Cu-Ni ayırmada kullanılan kolon flotasyonu 0.3-3 m çapında ve 2-10 m yükseklikte daire veya kare kesitli olarak imal edilmektedir (Şekil 3). Multotec şirketi

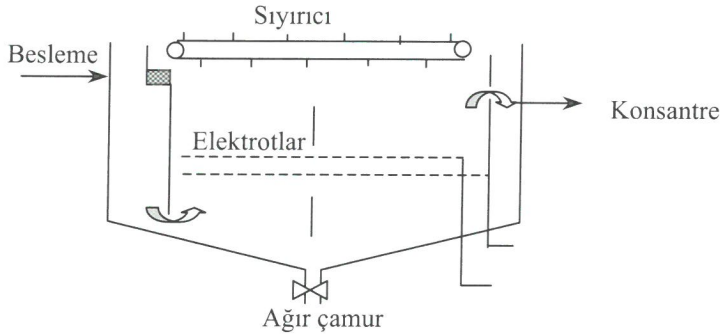
özellikle kömür zenginleştirme için beslemenin ön havalandırmadan geçirildiği Turbo flotasyon kolonunu geliştirmiştir (Terblanche vd, 1998).



Şekil 3. Kolon Flotasyonunun Şematik Görünüşü.

4. 5. Elektro-flotasyon makineleri

Elektroflotasyon makinelerinde, ince hava kabarcığı (-30 μm) meydana getirmek için doğru akım elektrolizi kullanılmıştır. Bu flotasyonda kabarcıklar daha ince ve türbülans daha azdır. Sudaki H^+ ve OH^- iyonlarının elektrotlara hareketi, kabarcık oluşmasına neden olmaktadır. Kabarcık boyutları akım yoğunluğu (elektrod yüzey alanı), iyon yoğunluğu ve elektrotlar arası mesafeye bağlı olarak değişmektedir. Elektroflotasyon makineleri tek bir tank ve tabanına yakın iki yatay elektrottan ibarettir (Şekil 4). Konsantre hücrenin en üstünden alınırken artık tabandan hücreyi terk etmektedir (Kaya ve Kurama 1999).

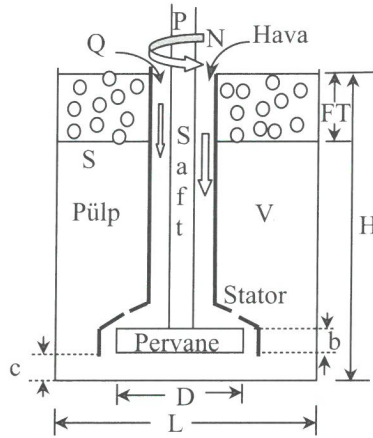


Şekil 4. Elektro-Flotasyon Hücresinin Kesiti.

5. FLOTASYON MAKİNELERİNDE ORANLAR

5. 1. Flotasyon Makinelerinde Geometrik Oranlar

Flotasyon makineleri ve hücreleri bir takım geometrik oranlara göre üretilmektedir (Şekil 5). Bu geometrik oranlar Tablo 3’de verilmektedir (Harris ve Lepetic, 1966).



Şekil 5. Bir Flotasyon Makinesinde Geometrik, Mekanik Oranların ve Hidrodinamik Numaraların Hesaplanması için Boyutlandırılması.

Tablo 3. Flotasyon Makine ve Hücreleri için Geometrik Oranlar.

İlişki	Oran	Tanım	Aralık
Pervane-Hücre Oranı	D/L	Pervane çapı/Hücre çapı	0.3 – 0.5
Pervane Oranı	b/D	Perv. Genişliği/Perv. Çapı	0.15 – 0.9
Hücre Hacmi-Boyut İlişkisi	$V = k * L^n$	V: Efektif hacim, k ve n her grup makine için sabit	$2 < n < 3, n_{ort} = 2.6$ $0.6 < k < 1.3, k_{ort} = 0.9$
Hücre Alanı-Hücre Hacmi Oranı	S/V	S: Hücre kesit alanı	Yüksek tenörlü cevherde yüksek S/V oranı, Düşük tenörlü cevherde ve temizleme devresinde düşük S/V oranı

5. 2. Flotasyon Makinelerinde Mekanik Oranlar

Flotasyonda mekanik oranlar pervane tasarımı, çalışma ve güç tüketimi ile ilişkilidir. Bu mekanik oranlar Tablo 4’de verilmektedir (Harris ve Khandrika, 1985).

Tablo 4. Flotasyon Makinelerinde Mekanik Oranlar.

İlişki	Denklem	Tanım	Aralık
Pervane Çevre Hızı	$s = \pi D N$	D : Per. çapı, N : Perv. hızı	335–550 m/dk
Güç Yayma Oranı	P/V	P : Tüketilen ortalama güç V: Birim hücre hacmi	490–195 W/m
Güç Oranı	P_{al}/P_1	P_{al} : Havalı ortamda güç tüketimi P_1 : Havasız ortamda güç tüketimi	

5. 3. Flotasyon Makineleri için Hidrodinamik Oranlar

Hidrodinamik olaylar flotasyon verimini çok etkilemektedir. Flotasyon hidrodinamiği Tablo 5’de verilen bir grup numaralarla ifade edilmektedir (Arbiter vd, 1969; Schubert ve Bischofberger, 1978; Kaya 1986a; Nelson, 2000).

Tablo 5. Hidrodinamik Numaralar.

Grup Numarası	Denklem	Tanım	Özellikler	Aralık
Weber Numarası	$We = \frac{\rho N^2 D^3}{\gamma}$	$\frac{\text{İç Kuvvetler}}{\text{Yüzey Gerilimi Kuvveti}}$	Hava dağıtım kapasitesini etkiler	
Hava Akış Numarası	$A_n = \frac{Q}{ND^3}$	$\frac{\text{Hava Miktarı}}{\text{Pervane Çevre Hızı}}$	Yükselme hızı- hız	0.01-0.2
Reynolds Numarası	$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu}$	$\frac{\text{İç Kuvvetler}}{\text{Viskozite Kuvveti}}$	Akış rejimleri arasındaki geçişi ifade eder	10^6-7*10^6
Güç Numarası	$P_n = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$	$\frac{\text{Uygulanan Kuvvetler}}{\text{İç Kuvvetler}}$	Güç tüketimini ifade eder	0.5-5
Froude Numarası	$F_n = \frac{N^2 D}{g}$	$\frac{\text{İç Kuvvetler}}{\text{Gravite Kuvveti}}$	Süspansiyon sağlamanın bir ölçüsüdür	0.1-5

ρ : Ortam yoğunluğu (t/m^3), N : Pervane hızı (dev/dk), D : Pervane Çapı (m)
 μ : Ortam viskozitesi (Pa/sn), γ : Yüzey gerilimi (N/m), Q : Hava miktarı (m^3/dk),
 P : Güç tüketimi (kws/m), g : Yer çekimi ivmesi (m/sn^2),

6. SONUÇLAR

Flotasyon makine üreticileri yüksek kapasite ve düşük maliyet sağlayan 50-100 m^3 'lük flotasyon hücreleri imal etmektedirler. Geliştirilen flotasyon makinelerindeki hedef ise, enerji tasarrufu sağlamak, flotasyon verimini ve konsantrasyonunu arttırmak, tane-kabarcık çarpışmasını arttırmak, ince kabarcık üretmek ve otomasyon sağlamak yönündedir. Günümüzde flotasyon teknikleri ile çevresel problemlere basit ve ekonomik çözümler getirilmektedir.

Flotasyon ile zenginleştirmede yüksek verim ve tenörde konsantrasyon elde etmek için, yüzey ve kolloid kimyası, süspansiyon dengesi gibi mikro düzeyde incelenen özellikler kadar makro açıdan incelenen flotasyon makine tasarımı, devre tertibi, hidrodinamik, kinetik olaylar ve mekanik değişiklikler de etkili olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akar, A., 1985, "Cevher Hazırlama Tesis ve Dizaynı" Dokuz Eylül Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. MM/MAD-85 EY 01, İzmir, 271 s.
- Arbiter, N., Harris, C.C., Yap, R.F., 1969, "Hydrodynamics of Flotation Cells" AIME Transactions, V:244, pp 134-148.
- Ata S., Önder, Y.Ü., 1997, "Yeni bir Flotasyon Teknolojisi: Jameson Flotasyon Hücresi" Madencilik, C: 36, No: 4, s 21-29.
- Atak, S., 1982, "Flotasyon İlkeleri ve Uygulamaları" İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul, 222s.
- Aytekin, Y., Yamık, A., İpekoğlu, Ü., 1988, "Cevher Hazırlama ve Zenginleştirmedeki Gelişmeler" Akdeniz Üniversitesi Isparta Müh. Fak. Dergisi, Maden Müh. Sektörünü, (Ed) Yamık, S:1, Isparta, pp 1-13.
- Bentli, İ., 2000, "Flotasyon Makine Tasarımı" Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 215 s.
- Bischofberger, C., Schubert, M., 1996, "On the Microprocesses Air Dispersion and Particle-Bubble Attachment in Flotation Machines" Aufbereitungs Technik, V:37, N:5 pp 193-202.
- Degner, V.R., 1990, "Mechanical Flotation Machine Design", Industrial Practice of Fine Coal Processing, SME-AIME, Ch.16, pp 135-146.
- Gorain, B.K., Franzidis, J.P., Manlapig, E.V., 1997, "Studies on Impeller Type, Impeller Speed and Air Flow Rate in an Industrial Scale Flotation Cell: Effect of Bubble Surface Area Flux on Flotation Performans" Minerals Engineering, V:10, N:4, pp 367-379.
- Harris, C.C., 1976, "Flotation Machines in Flotation" Gaudin Memorial Volume, SME-AIME, V:2, pp 753-815.
- Harris, C.C., Khandrika S.M., 1985, "Flotation machine design: Impeller-Stator Interaction" Powder Technology, V:43, pp 273-278.
- Harris, C.C., Lepetic V., 1966, "Flotation Cell Design" Society of Mining Engineering, September, pp 67-72.
- Kaya, M., 1998, Flotasyon El Kitabı, Osmangazi Üni. Müh.-Mim. Fak. Maden Müh., Tekam Yayın No: TN98-002-MK, 4.Baskı, Eskişehir, 146 s.
- Kaya, M., Kurama, H., 1999, "The Role of Flotation in Waste Recycling/Recovery" 8th Balkan Mineral Processing Conference, Belgrade, Yugoslavia, pp 729-736.
- Kaya, M., Laplante A.R., 1986a, "Factors influencing design, hydrodynamics, mixing, residence time distribution, scale-up, selection and sizing of mechanical flotation machines" Mineral Separation Systems, Seminar, McGill University 32 p.
- Kaya, M., Laplante A.R., 1986b, "Investigation of Batch and Continuous Flotation Kinetics in a Modified Denver Laboratory Cell" Canadian Metallurgical Quarterly, V:25 N:1, pp 1-8.
- Kaya, M., Laplante, A.R., 1989, "Froth washing in mechanical flotation cells" 21st Canadian Mineral Processors Meeting (CMP), pp 497-541.
- Koivistoinen P., 1991, "High Grade Flotation Machine", 17th International Mineral Processing Congress, Dresden, Almanya, sayfa 227-235.
- Leskinen, T., 1998, "Large Cell Flotation Improved Beneficiation", Industrial Minerals, July, pp 55-57.
- Nelson M.G., Lelinski, D., 2000, "Hydrodynamic Design of Self-Aeration Flotation Machine", Mineral Engineering, V:13, No:10-11, pp 991-998.

- Önal, G., Acarkan, N., Güney A., 1996, "Cevher hazırlamadaki yeni gelişmeler" 21.Yüzyıla Girerken Türkiye Madenciligi, Cumhuriyet Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Sivas, s 157-170.
- Öteyaka, B., Soto, H., 1992, "Modelling of negative bias column for coarse particle flotation", Proceedings of 4th Int. Proc. Sym., (Ed.) Özbayoğlu, Antalya, Turkey, V:1, pp 315-326.
- Özbayoğlu, G., Hiçyılmaz, C., 1984, "Geliştirilmiş Laboratuvar Flotasyon Hücresi" Madencilik, C: 23, No: 2, s 53-56.
- Parga, J.R., Mercado, H., Ojeda, H., Salazar, A., 1996, "New Flotation Cell for Precious Metal Recovery" Changing Scopes in Mineral Processing, (Ed) Kemal, Akar, Canbazoğlu, Printed in Balkema, Rotterdam, pp 365-370.
- Podobnik, D.M., Dunstan, P.L., Lawrence, G.A., 1985, "Performance Characteristics of Large Flotation Mechanisms Operating in a Copper Slime Circuit" Aufbereitungs Technik, V:11, pp 652-659.
- Ross, V.E., 1997, "Particle-Bubble Attachment in Flotation Froths" Minerals Engineering, V:10, N:7, pp 695-706.
- Schubert, M., Bischofberger, C., 1978, "On the Hydrodynamics of Flotation Machines" Int. Journal of Mineral Processing, 5, Elsevier, pp 131-142.
- Terblanche, A.N., Grobler, W.A., Önal G., Güney, A., 1998, "Turbo Flotation Column with Enhanced Flotation Performance" Proceedings of 7th Int. Proc. Sym., (Eds.) Atak, Önal, Çelik, İstanbul, Turkey, pp 257-262.
- Wills, B.A., 1988, "Mineral Processing Technology (4th edition)" Pergamon Press, New York, 584 p.
- Yoon R.H., 1991, "Hydrodynamic and Surface Forces in Bubble-Particle Interactions" 17th International Mineral Processing Congress, Dresden, Almanya, pp 17-31.
- Young P., 1982, "Flotation Machines" Mining Magazines, January, pp 35-59.