

İnce ve Çok İnce Öğütme için Alternatif Değirmen Tiplerinin Tanıtılması

Hasan Hacıfazlıoğlu^a

^a İstanbul Üniversitesi, Maden Müh. Bölümü, 34320, Avcılar / İstanbul
e-posta: hhacifazlioglu@yahoo.com

Özet

Madencilik sektöründe, yüksek tenörlü cevher yataklarının tükenmesi ile birlikte tane serbestleşme boyutu çok küçük olan ve çok düşük tenörlü maden yataklarının işletilmesi artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu cevherlerin zenginleştirilmesi aşamasında ise gerekli olan enerjinin büyük bir kısmı öğütmeye harcanmaktadır. Mikronize öğütmelerde ise konvansiyonel (çubuklu ve bilyalı gibi) değirmenler verimini kaybetmekte ve ekonomik olmaktan çıkmaktadırlar. Bilindiği gibi, konvansiyonel değirmenlerde harcanan enerjinin büyük bir kısmı doğrudan boyut küçültmede kullanılmakta, önemli bir bölümü ise faydalı bir iş yapmadan (boyut küçültme) ısı ve ses olarak kaybedilmektedir. Ayrıca, 75 mikronun altındaki öğütmelerde konvansiyonel değirmenlerin verimi çok azalmakta (enerji tüketimi aşırı artmakta) ve öğütme ekonomik olmaktan çıkmaktadır.

Bu çalışmada, kömür ve cevher hazırlama tesisleri için alternatif ince ve çok ince öğütme için kullanılan değirmenler tanıtılmış ve çalışma prensipleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Değirmen; İnce öğütme; Mikronize Öğütme; Mineral.

Introduction of Alternative Mills for Fine and Ultra Fine Grinding

Abstract

Due to a depletion of high-grade ore deposits, the mining industry inevitably began using low-grade ore deposits whose particle liberation size is relatively fine. During the processing stage of these minerals, a large amount of energy is necessarily expended for grinding. Grinding below a few micrometers, conventional tumbling mills (rod and ball) lose their efficiency and become less economic. Already known, some of the energy consumed in conventional tumbling mills is directly used in size reduction; however, a relatively large amount of it is expended through heat and sound. Furthermore, in grindings below 75 micron, the efficiency of the tumbling mills decreases considerably while energy consumption vastly increases. As a consequence, grinding is not economical.

In this study, alternative fine and ultrafine grinding mills for coal and ore preparation plants, were introduced and their operating principles is explained, in detail.

Key Words: Mill, Fine grinding, Ultrafine grinding, Mineral

1. Giriş

Öğütme, boyut küçültme işleminin son aşaması olup, 25 mm'den daha küçük tane boyutlarına uygulanır. Cevherin toz haline getirilmesi için kullanılan bu araçlara ise 'öğütücü' ya da 'değirmen' adı verilir. Değirmenlerde öğütülecek malzeme; darbe, ezme, kesme ve sürtme kuvvetleri ile toz haline getirilir (Wills, 1997). Bir tesiste cevher veya kömürü öğütmenin başlıca üç amacı vardır:

1. Tane serbestleşmesini sağlamak ve belirli bir zenginleştirme işlemi için uygun tane boyutlu malzemeyi hazırlamak (örneğin çeşitli cevherle-

rin flotasyonu veya liçi için boyutunun küçültülmesi)

2. Mevcut haliyle kullanılabilir olan bir ürünün, başka bir kullanım alanı için gerekli olan tane boyutuna indirilmesi (örneğin termik santrallerde kömürün toz haline getirilerek yakılması gibi)

3. Teknolojik nedenler (Örneğin çimentonun hazırlanması için hammaddelerin öğütülme zorunluluğu veya albit ve kolemanit gibi bazı endüstriyel minerallerin ticari kullanımının toz boyutlarında olması)

Öğütme "kuru" veya "yaş" olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir. Kuru öğütmenin enerji sarfiyatı yaş öğütmeye göre yaklaşık %30 daha

fazladır (Kaytaş, 1990). Bunun başlıca nedeni; kuru öğütmede ince tanelerin daha hızlı topaklanması ve öğütücü ortamla teması keserek yastıklama etkisi sonucunda öğütmeyi yavaşlatmasıdır. Bu yüzden kuru öğütmelerde topaklanmayı önleyici bazı dağıtıcı kimyasallar da kullanılabilir. (Ateşok vd., 2005). Ayrıca, birim değirmen ve öğütücü ortam ağırlığı dikkate alındığında kuru öğütme yaş öğütmeye göre kapasite yönünden daha düşüktür. Kuru öğütmenin bir diğer sakıncası ise değirmen gövdesinin aşırı ısınması ve bunun sonucunda yüksek hızlarda çalıştırılmamasıdır. Bu yüzden cevher hazırlama tesislerinde öğütme genellikle yaş olarak yapılmaktadır.

Halen ince öğütmede en yaygın kullanılan değirmen tipi konvansiyonel bilyalı değirmenlerdir. Ancak, bilyalı değirmenlerde kullanılan en küçük bilya boyutu 25 mm olmasından dolayı, değirmen içindeki çarpma hareketlerinden öğütülen cevhere aktarılacak enerji, küçük boyutlarda küçültme için yeterli olmamaktadır. Küçük tanelerin ufalanmasında basınç ve kesme kuvvetleri gereklidir. Çarpma ve aşınma kuvvetlerinin baskın olduğu bilyalı değirmenlerde öğütme iri boyutta kalmaktadır. Bilyalı değirmenlerin ekonomik öğütme sınırları 100 µm' ye kadardır. Bu sınırların altına inildiğinde bilyalı değirmenlerin spesifik enerjileri üstel olarak artış gösterir (Liddell, 1986).

Bilindiği gibi endüstriyel tesislerde öğütme, enerjinin en yaygın ve en verimsiz olarak kullanıldığı işlem kademesidir. Özellikle, tane boyutu küçüldükçe tanelerin kırılmaya karşı olan dirençlerinin artmasıyla birlikte tüketilen enerji miktarları da aşırı bir şekilde artmaktadır. Öğütme konusunda yapılan çalışmaların çoğunda enerji-boyut küçültme arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece, en az enerji ile en fazla boyut küçültmenin yolları araştırılmıştır. Bilindiği gibi, konvansiyonel değirmenlerde (çubuklu ve bilyalı) harcanan enerjinin bir kısmı doğrudan boyut küçültmede kullanılmakta, önemli bir bölümü ise faydalı bir iş yapmadan ısı ve ses olarak kaybedilmektedir. Ayrıca, 100 mikronun altındaki öğütmelerde konvansiyonel değirmenlerin verimi çok azalmakta (enerji tüketimi aşırı artmakta) ve öğütme ekonomik olmaktan çıkmaktadır (Bond, 1951; Zheng vd.,1996; Fidan ve Arol, 1990; Gao

ve Forssberg, 1993; Jankovic, 2003). Bu yüzden son yıllarda öğütme maliyetini düşürmek ve öğütme verimliliğini arttırmak için değişik prensiplerle çalışan çok sayıda değirmen tasarlanmıştır. Bunlardan en dikkat çekici olanı yatay ve düşey shaftlı karıştırmalı değirmenlerdir. Bu değirmenler ile 10 mikronun altında bile ekonomik öğütme yapmak mümkündür. Bunun arkasında yatan temel neden, karıştırmalı değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle, enerji tüketiminin konvansiyonel değirmenlerle karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmasıdır (Mankosa vd.,1986; Kwade, 1996; Pilevneli, 2003; Dikmen ve Ergün, 2006). Konvansiyonel değirmenlere alternatif olarak geliştirilmiş değirmen tipleri ise dönen silindirik (valsli) değirmenler, yüksek basınçlı merdaneli değirmenler, titreşimli değirmenler, jet tipi değirmenler, Sarkaç değirmenler, halkalı, çivili ve yörüngesel değirmendir.

2. Aktarılan Ortamla Çalışan Konvansiyonel Tambur Değirmenler

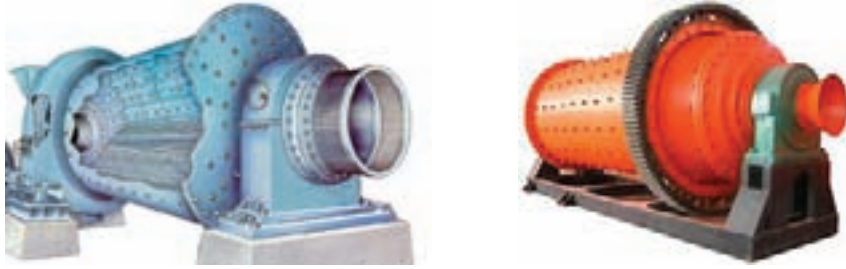
Aktarılan ortamla çalışan değirmenlerde öğütme işlemi dönen silindirik çelik gövdeli bir tambur içerisinde gerçekleştirilmektedir. Öğütücü ortam çelik bilya olduğunda "bilyalı değirmen", çelik çubuk olduğunda "çubuklu değirmen", çakıl olduğunda "çakıllı değirmen" ve öğütülen cevherin iri parçaları olduğunda "otojen değirmen" olarak adlandırılır. Öğütme işleminde parçacıklar genellikle 2.5 cm'den 10 mikron'a kadar ufalanır. Değirmen içerisinde öğütme, aktarılan ortamın boyutu, miktarı, hareket çeşidi ve aralarındaki boşluk gibi faktörlere bağlıdır. Değirmen gövdesi döndürüldükçe aktarılan ortam, su ve cevher karışımı; darbe, kesme ve aşındırma mekanizmalarının ortak etkisiyle hareket ederek cevheri öğütür (Wills, 1997).

2.1. Çubuklu Değirmenler

Çubuklu değirmenler genellikle birinci kademede öğütme devrelerinde kullanılır (Şekil 1). İri boyutta kaba öğütücüler olarak da bilinmektedir. Genellikle yaş öğütmede kullanılırlar. Kırma işleminden sonraki ürünü alıp bilyalı değirmene

hazırlarlar. Çubuklu değirmenlerde boy çap oranı (L/D) 1.5-2.5 arasındadır. Bu oranın 1.25'in altına olması durumunda, değirmen içindeki çubukların birbirine karışarak öğütme ortamını bozulmasına, oranının 2.5'den büyük olması durumunda ise çubukların kırılmasına, eğilmesine, istiflerinin bozulmasına neden olmaktadır.

Uygulamada kullanılan en uzun çubuk boyu 6.8 metredir. Kullanılan çubuk boyu, değirmenin iç alın astarı arasındaki mesafeden 10-15 cm daha kısa olmalıdır. Seçilecek en büyük çubuk çapı ise öğütülecek malzeme içerisindeki en büyük tane boyutundan biraz daha büyük olmalıdır (Demirel, 1994; Karadeniz, 1996; Wills, 1997; Yıldız, 2000).



Şekil 1. Çubuklu değirmenin genel görüntüsü

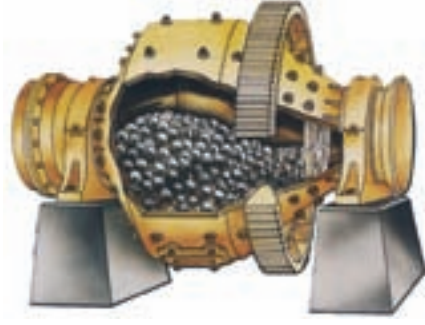
Çubuklu değirmenin döndürülmesi için gerekli güç, çubukların değirmen içinde kapladıkları hacme (şarj oranına), değirmenin kritik hızına ve değirmen iç çapına bağlıdır. Çubukların değirmen içerisindeki kapladıkları hacim genellikle %40-45 arasındadır. Çubuklu değirmenler kritik hızlarının %50-75'i hızlarda çalıştırılırlar. Bu sayede çubuklar serbest düşme yerine kayarak hareket eder ve yuvarlanarak taneleri öğütürler. Değirmenlerde malzeme, çubukların arasında bir hat boyunca öğütüldükleri için öğütme sonrası homojen bir ürün elde edilir. Bu nedenle çubuklu değirmenler bilyalı değirmenler öncesi açık devre olarak çalışırlar. Ayrıca şlam boyutunda az ürün verdikleri için flotasyon öncesi öğütme işlemi için de uygundur (Demirel, 1994). Çubuklu değirmenlerin diğer değirmenlere göre başlıca avantajları; 1) Öğütme şekli, ürünün tane boyut dağılımını kontrol ettiğinden kapalı devre öğütmeye gerek kalmaz, 2) Çubuklar arası boşluk az olduğundan öğütme verimi daha yüksektir, 3) Aşınan çubukların değiştirilmesi daha kolaydır

2.2. Bilyalı Değirmenler

Öğütme ortamı çelik bilyalardan oluşan değirmenlere "bilyalı değirmen" denir. Genellikle öğütmenin son kademesinde kullanılır. Çubuklu değirmenlere göre daha ince ürün veren bu değirmenlerde boyun çapa oranı 1 ile 1.5 arasında değişmektedir. Genel olarak ince öğütmelerde değirmenin boyu daha uzundur. Değirmen boyu-

nun çapa oranı 3 ile 5 arasında ise "tüp değirmen" olarak adlandırılır. Tüp değirmenler değişik beslemelere sahip kompartımanlara bölünmüştür ve genellikle klinker gibi kuru öğütmelerde kullanılmaktadır. Öğütücü ortam çelik bilya yerine çakmak taşı veya seramik çakıllardan oluştuğu zaman, buna "çakıllı değirmen" adı verilir. Bilyalı değirmenler, silindir gövdeli değirmen, silindirik konik gövdeli değirmen ve konik gövdeli değirmen olmak üzere farklı gövde şekillerine sahip olabilmektedir. Konik bir bilyalı değirmenin giriş tarafı silindirik çıkış tarafı ise konik şeklindedir (Şekil 2). Böyle bir gövdenin dönmesi ile küçük çaplı bilyalar ve malzeme çıkış tarafına, büyük çaplı bilyalar ve iri malzeme ise silindir kısmında toplanmaktadır.

Bilyalı değirmenlerde öğütme, bilyaların cevher taneleri ile noktasal teması sonucunda gerçekleşmektedir. Yeterli süre verilmesi durumunda bu değirmenler ile istenilen incelikte ürün alınabilmektedir. Bu yüzden bilyalı değirmenler ile 50 mikronun altına öğütme yapmak mümkündür. Ancak açık devre çalıştırılan bilyalı değirmenden elde edilen ürün çok geniş tane boyutuna sahiptir. Bu problemi halletmek için malzemenin değirmen içerisinde kalma süresinin az olduğu kapalı devre öğütme sistemi kullanılmaktadır. Başka bir deyişle bilyalı değirmenlerde öğütülmüş ince ürün, sistemden uzaklaştırılarak iri tanelerle öğütme işlemine devam edilmelidir (Demirel, 1994; Wills, 1997; Yüce, 2008).



Şekil 2. Konik bilyalı değirmen ve tüp tipi bir değirmen

2.3. Otojen Değirmenler

Öğütücü ortam olarak iri cevher parçalarının kullanıldığı öğütme şekline “otojen öğütme” denir. Otojen değirmenler bir çeşit aktarılan ortamla çalışan tamburlu değirmenlerdir. Yaş veya kuru olarak çalıştırılabilirler. Değirmen içerisinde öğütme olayı çatlatma, kesme ve aşındırma kuvvetleri ile gerçekleştirilir. En büyük avantajı öğütücü ortamın olmaması ve klasik değirmenlere oranla daha az oranda şlam oluşturmalarıdır. Ancak öğütücü ortam sarfiyatındaki avantajına karşılık, öğütülen her ton cevher için %5-25 daha fazla güç tüketir. İşletmelerden edinilen tecrübelerle göre otojen değirmenlerde astar sarfiyatı çubuklu ve bilyalı değirmenlerin astar sarfiyatından daha fazladır. Ancak bilya aşınmasının önlenmesi ile toplam çelik sarfiyatında %50 azalma görül-

mekte ve işletim maliyeti önemli ölçüde düşmektedir (Demirel, 1994; Yıldız, 1999). Tesislerde otojen bir öğütme işlemi için; a) yeteri miktarda iri cevher parçası bulunmalı, b) iri cevher parçaları yuvarlak veya yuvarlağa yakın şekilli olmalı, c) İri parçalar orta sertlikte olmalı ve çabuk ufalanmamalıdır.

Yukarıdaki nedenlerden ötürü otojen değirmenler önceleri yalnızca bazı demir cevherlerinin öğütülmesi için kullanılmaktaydı. Özellikle bakır cevherinin çabuk ufalanır olması otojen değirmenlerin kullanımını engellemiştir. Ancak, son yıllarda bu değirmenlerin içerisine belirli boyutta bilya ilave edilerek yarı otojen değirmenler geliştirilmiştir (Şekil 3). Bu sayede otojen değirmenler bakır ve metalik olmayan diğer birçok cevherlerin öğütülmesinde yaygın olarak kullanılabilir olmuştur (Metso Minerals, 2009).



Şekil 3. Yarı otojen (SAG Mill) değirmenin görüntüsü (Metso Minerals).

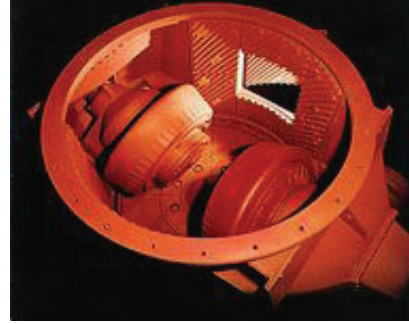
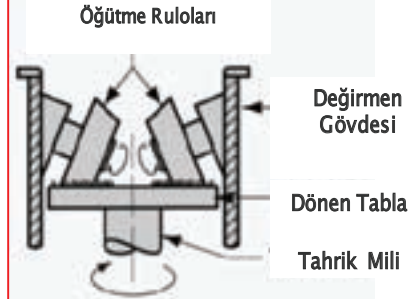
3. Valsli (Silindri) Değirmenler

Bu tür değirmenlerde öğütücü silindirler (rulolar), sabit veya hareketli bir tabla üzerinde dönmekte, tabla ve rulo arasında kalan cevher basma ve sürtünme kuvvetlerinin etkisi ile ufalanmaktadır (Şekil 4). Tablalar öğütme rulolarının şekline

göre düz veya oluklu olabilmektedir. Öğütme ruloları üzerine istenilen boyuta ve kapasiteye göre belirli bir basınç uygulanır. Öğütülmüş malzeme ortamdan havalı separatörlerin (emici fanların) oluşturduğu hava akımı ile ya da kömürün öğütülmesinde olduğu gibi sıcak inert gazlar ile sü-rüklenerek alınır. Klasifikatöre giren öğütülmüş

malzeme incesinden ayrılır ve irilerle tekrar öğütme devam edilir. Kapasiteleri cihaz gücüne ve boyutuna bağlı olarak 2 ile 600 ton/saat arasında

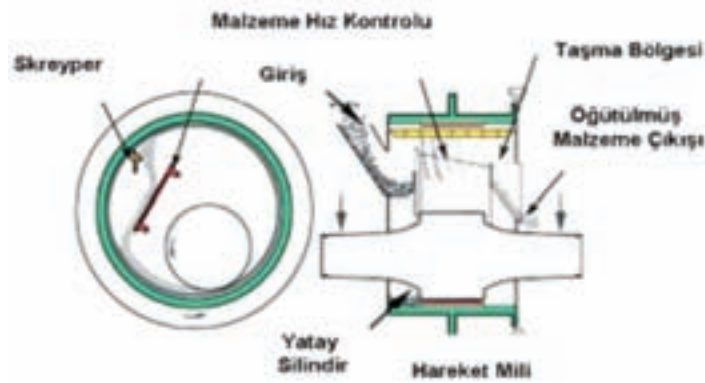
değişebilir. Motor güçleri ise 4000 kW'a kadar çıkabilmektedir (Yıldız, 1999; Kemal ve Arslan, 1999; Pilevneli 2003).



Şekil 4. Valsli değirmenin çalışma prensibi ve ruloların görüntüsü.

Valsli değirmenler yatay veya dikey olmak üzere başlıca iki tipte tasarlanmıştır. Dikey valsli değirmenlerin yüksek öğütme maliyeti ve sık aşınma sorununun giderilmesi için 1980'lerin sonlarına doğru yatay valsli değirmenler geliştirilmiştir. Bunlardan en dikkat çekici olanı İtalyan Fratelli Buzzi ve Fransız FCB firmalarının geliştirdikleri "Horomill" olarak bilinen yatay valsli değirmendir (Şekil 5). Bu değirmen kendi ekseninde dönen bir silindirik manto ve iç tamburdan oluşmaktadır. Öğütülecek malzeme değirmenin iç yapısı ve merkezkaç kuvvetlerinin etkisi ile değirmenin içinden değirmenin çıkışına doğru düzenli olarak hareket eder ve manto ile tambur arasında malzemeyi sıkıştırarak öğütür. Horomill 1993'den günümüze kadar birçok Çimento tesisinde kurulmuş ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Diğer değirmenlerle karşılaştırıldığında %30-70 arasında bir enerji tasarrufu sağladığı belirtil-

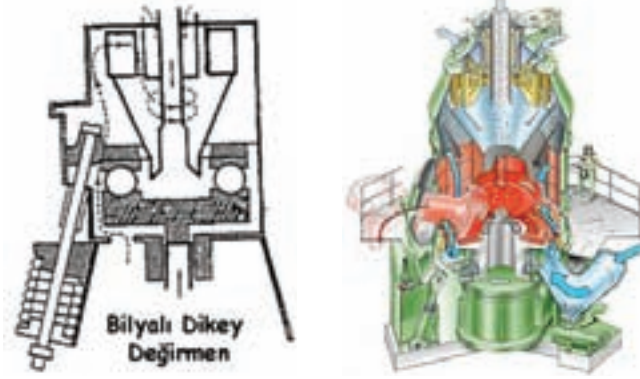
mektedir. Ayrıca gürültü seviyesi de diğer değirmenlere göre daha düşüktür. Az yer kaplaması, basit yapısı, işletme kolaylığı ve düşük titreşimli olması diğer avantajlarıdır (Kemal ve Arslan, 1999; Wills, 1997; Yıldız, 2007). Horomill prensibine benzer bir prensiple çalışan bir diğer önemli değirmen tipi ise CEMAX değirmenidir. Horomill ve Cemax değirmenleri arasındaki işletme açısından iki temel farklılık, Horomill'in kritik hızın üzerinde Cemax değirmeninin ise kritik hızın altında dönmesidir. İkinci husus ise öğütülen malzemenin değirmene girişinden çıkışına olan taşınma mekanizmasıdır. Cemax değirmeni hava süpürmeli bir değirmen olup, malzeme hava akımı ile taşınırken Horomill 'de malzemenin değirmen içinde taşınması bir sıyırıcı mekanizma ile yapılmakta ve değirmen dışına taşınması da 'patentli taşıma kutusu' adı verilen bir sistemle yapılmaktadır.



Şekil 5. Horomill'in çalışma prensibi

Bilyalı dikey değirmenler, ezme prensibi ile çalışan değişik bir tip valsli değirmendir. Bu değirmenlerde vals yerine, 250-1000 mm çapındaki öğütücü bilyalar, öğütme kanallı iki yatay tabla arasına yerleştirilmiştir (Şekil 6). Alt tabla düşük bir hızda dönerken sabit olan üst tablaya hidrolik bir sistem ile belirli bir basınç uygulanarak öğüt-

me gerçekleştirilir. (Yıldız, 1999). Kömür öğütmede yaygın olarak kullanılan bir diğer valsli değirmen tipi ise Loesche değirmendir (Kemal ve Çiçek, 1996). Bu değirmende, verilen sıcak gazlarla, hem öğütülmüş kömür kurutulmakta hem de istenilen boyuta gelmiş olan kömür separatöre taşınmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Bilyalı dikey değirmen ve Loesche değirmeni.

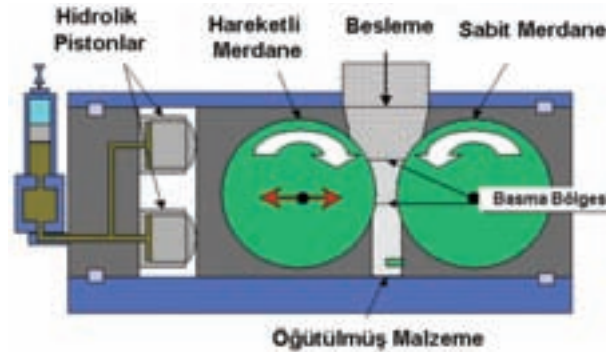
Valsli değirmenlerin en önemli dezavantajı ruloların ve tablanın çabuk aşınmasıdır. Bu yüzden daha çok kömür, kireçtaşı, fosfat ve dolomit gibi aşındırıcı olmayan gevrek cevherlerin öğütülmesi için tercih edilmektedir.

4. Yüksek Basınçlı Merdaneli Değirmenler

Yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerde birbirine doğru dönen iki adet geniş çaplı (75-250 cm) merdane bulunur. Bu merdanelerden birisi sabit bir yatağa oturtulmuşken diğeri hidrolik bir sistem aracılığıyla sabit merdaneye doğru itilmektedir. Bu esnada iki merdane arasına yapılan besleme ile taneler ezilerek ufalanmaktadır (Şekil 7). Ufalanmanın ölçüsü merdanelere uygulanan basınç ile kontrol edilmekte ve merdaneler arasındaki basınç cihazın büyüklüğüne göre 50 ile

150 kPa arasında değişmektedir. Bu değirmenler genellikle gevrek yapılı, kuru, yumuşak ve orta sertlikteki aşındırıcı olmayan malzemelerin öğütülmesi için uygundur.

Aktarılan ortamla çalışan değirmenlerde enerjinin büyük bir bölümü, öğütücü ortamın birbiriyle ve astarlarla çarpışmasında harcanmakta iken, yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerde öğütme malzeme yatağında gerçekleştiği için enerji kaybı daha az olmaktadır. Laboratuvar ölçeğinde yapılan çalışmalar sonucunda, yüksek basınçlı merdaneli değirmenin klasik bilyalı değirmene göre %40-50 oranında daha az enerji tükettiği kaydedilmiştir. Ayrıca, kapasitesinin de klasik bilyalı değirmene göre 1.5-3 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir (Schönert, 1988; Patzelt, 1992; Feige, 1993; Aydoğan ve Ergün, 2004).



Şekil 7. Yüksek basınçlı merdaneli değirmenin görüntüsü.

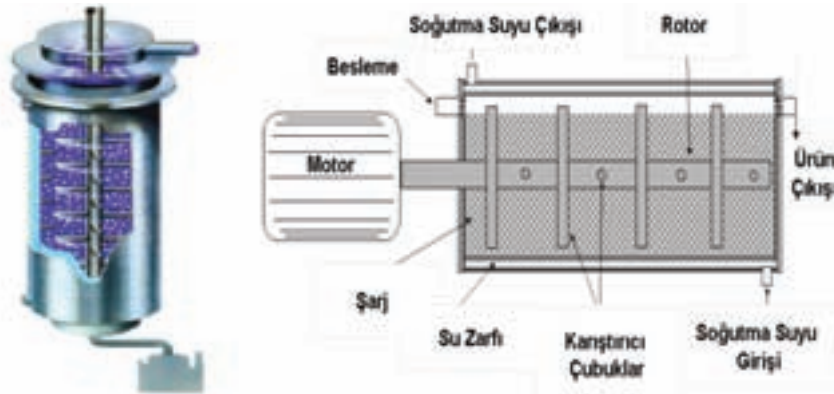
Yüksek basınçlı merdaneli değirmenler, 1985’den bu yana daha çok çubuklu ve yarı otojen değirmenlerin yerini almıştır. Endüstriyel ölçekte başta klinker olmak üzere kireçtaşı, dolomit, kimberlit, krom, altın, bakır, gümüş, çinko ve demir gibi cevherlerin öğütülmesinde kullanılmaktadır. Bu değirmenlerde malzemenin mineral faz sınırından kırılması daha iyi serbestleşme sağlamakta ve mikro çatlaklı bir ürün eldesi liç işleminde verimi arttırmaktadır. Özellikle siyanür liçinde diğer öğütme sistemlerine göre daha yüksek altın çözünme (liç) veriminin elde edildiği belirtilmektedir (Esna-Ashari ve Kellerwessel, 1989). Bu değirmenlerin en büyük dezavantajı cevherin ufalanabilmesi için merdanelere uygulanan yüksek basıncın ekipmanlarda mekanik sorunlara neden olması ve cevherin sertliğine bağlı olarak merdane yüzeylerinde hızlı aşınmanın meydana gelmesidir. Bu yüzden merdaneler yüzeyleri genellikle dayanıklı Nikel veya yüksek kromlu aşınma plakalarıyla kaplanmalıdır. Bir diğer önemli sakıncası ise bu değirmenlerden çıkan öğütülmüş

ürünün kek halinde olması ve kekin dağıtılması için ek bir donanıma ihtiyaç duyulmasıdır (Aydoğan ve Ergün, 2004; Sverak, 2007).

5. Karıştırmalı Bilyalı Değirmenler

Karıştırmalı bilyalı değirmenler, mikronize malzeme üretiminde kullanılan en popüler değirmenlerdir. Son 30 yıldan beri; seramik, metalurji, elektronik, boya, kimya, gıda, lastik, ziraat, ilaç, fotoğraf, kömür ve enerji gibi endüstrilerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Diğer öğütme yapan cihazlara göre işletimi daha kolay, öğütme süresi ve enerji tüketimi daha azdır.

Bir endüstriyel uygulamada, 20 ton/saat kapasiteli bir karıştırmalı değirmen ile 6 mikrona yapılan bir öğütme işlemi için harcanan enerjinin konvansiyonel bilyalı değirmene göre %60 daha az olduğu kaydedilmiştir (Mankosa vd., 1986; Kwade, 1999; Pilevneli, 2003; Jankovic, 2003). Şekil 8’de Union process Teknolojisinin geliştirmiş olduğu dikey ve yatay pinli karıştırmalı değirmenler gösterilmiştir.



Şekil 8. Dikey ve yatay pinli karıştırmalı değirmen (Union process,2009).

Temel tasarımı 1920’li yıllara kadar uzanan karıştırmalı değirmenler, ilk kez 1960’lı yıllarda kaolin’in öğütülmesi için kullanılmıştır (Conway-Baker vd, 1999). Karıştırmalı değirmen, temelde sabit bir silindirik yapı içerisinde silindir gövde içinde dönen bir rotordan oluşmaktadır. Rotor üzerine belli aralıklarla yerleştirilmiş çubuk (pin) veya diskler yardımıyla silindiri dolduran ortamı hareket ettirerek öğütme yapılmaktadır. Öğütücü ortam olarak birkaç yüz mikrondan birkaç milimetreye kadar değişebilen bilyalar kullanılmaktadır. Uygulama alanına bağlı olarak değirmenin

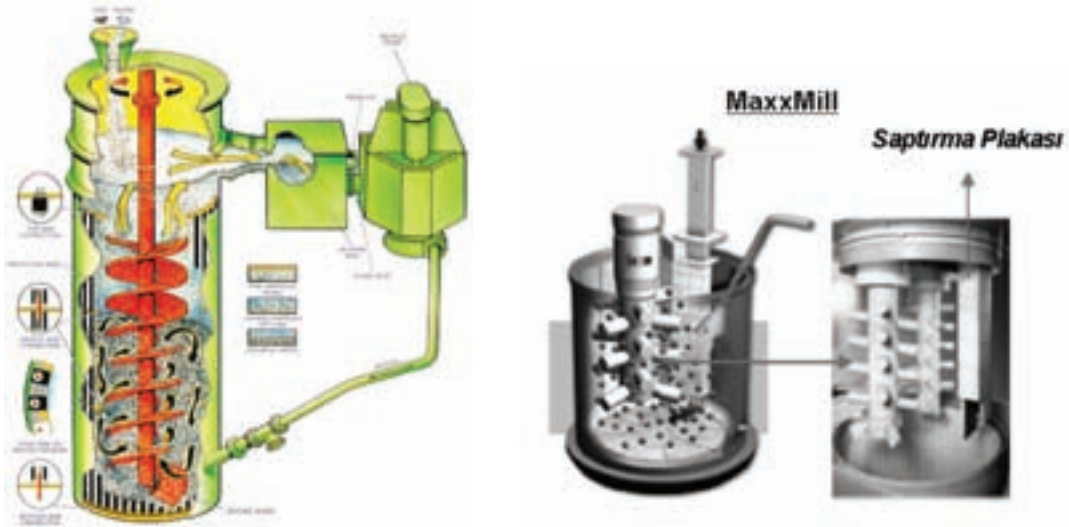
öğütücü ortamı boncuklar; çelik, seramik, cam (silis), alüminyum veya zirkon olabilmektedir. Öğütülecek malzemenin besleme boyutu da birkaç mikronla bir kaç milimetre arasında değişebilmektedir. Ancak, genellikle 100 µm’nin altındaki öğütmelerde enerji tüketiminin konvansiyonel değirmenlere göre daha az olduğu belirtilmektedir (Szegevari ve Yang, 1999; Hacıfazlıoğlu vd., 2008).

Çalışma prensibinden ötürü karıştırmalı değirmenlerde kullanılan kuvvetler, bilyalı ve çubuklu gibi aktarılan ortamla çalışan değirmenlerden

farklıdır. Aktarılan ortamla çalışan değirmenlerde öğütme, büyük ölçüde çarpma ve basınçla, kısmen de aşındırma kuvvetleri ile olurken, bu değirmenlerde aşındırma ve kesme kuvvetleri çarpmayla birlikte ağırlıklı olarak yer almaktadır. Çubuklu ve bilyalı değirmenlerde tambur hareket ettirilirken, karıştırırmalı bilyalı değirmenlerde yalnızca bir karıştırıcı yardımı ile ortam (ince bilya) hareket ettirilmektedir. Bu sayede değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarı tambur değirmenlerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek olmaktadır. Çünkü tambur değirmenlerde enerjinin büyük bir bölümü tamburu hareket ettirmek için kullanılmaktadır (Kwade, 199; Wang ve Forssberg, 2000; Szegvari ve Yang, 1999; Pilevneli, 2003; Dikmen ve Ergün, 2005).

Ticari olarak çeşitli parçaları değiştirilmiş ve değişik şekillerde tasarlanmış çok sayıda ka-

rıştırırmalı değirmen bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; Tower mill, Isa mill, Svedala detritör, Sala agitated mill, ANI-Metsoprotech SVM mill, MaxxMill, Pitt Mill ve Draismill'dir. Şekil 9'da kimi kaynaklarda kule değirmen olarak belirtilen Vertimill ve Maxxmill karıştırırmalı değirmen tipleri gösterilmiştir. Kule değirmen, dikey olarak yerleştirilmiş bir gövde ve dönen helisel kanatçıklardan oluşmaktadır. MaxxMill değirmeninde ise, değirmenin gövdesi de dönmekte ve gövde içerisinde bulunan bir plaka yardımıyla bilyaların akışı değiştirilmektedir. Bu sayede daha etkili bir öğütmenin yapıldığı ileri sürülmektedir (Wang, 2004). Draismill'de ise öğütme verimliliğini arttırmak için, öğütme duvarına dik olarak yerleştirilmiş çubuklar (pinler) bulunmaktadır (Tüzün, 1994).



Şekil 9. Helisel kanatlı karıştırırmalı değirmen (Vertimill/Tower mill) ve MaxxMill değirmeni (Weller and Gao, 2007; Sverak, 2007)

Karıştırırmalı değirmenler, karıştırıcı geometrisine göre de adlandırılabilirler (Weller and Gao, 2000). Karıştırıcılar; diskli, pinli ve boşluklu (annular) olmak üzere temelde üç şekilden oluşur. Disk yapılı bir karıştırırmalı değirmen ve

çeşitli karıştırıcı tipleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Karıştırırmalı değirmenler yatay veya dikey olarak kullanılabilirler gibi, yaş ya da kuru öğütme de yapabilmektedirler.

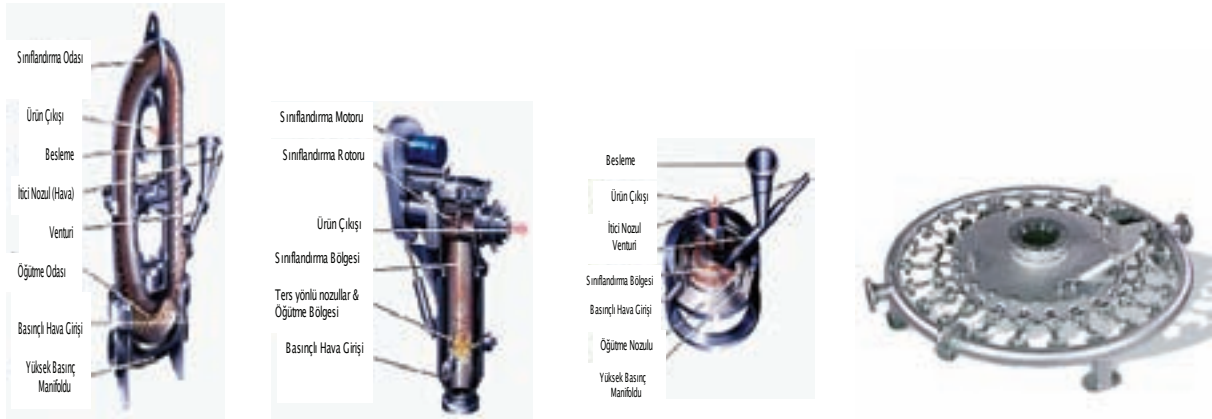


Şekil 10. Diskli karıştırıcı Pearl mill ve alternatif karıştırıcı şekilleri.

6. Jet Değirmenler

Jet değirmenlerde, değirmen gövdesi içine çok yüksek basınçlarda verilen hava ile tanelerin birbirine ve değirmen gövdesine çarpması sonucu darbe ve aşınma etkisiyle öğütme gerçekleştirilmektedir. Değişik tiplerde tasarlanmış olan jet tipi değirmenler Şekil 11'de gösterilmiştir. Besleme boyutu genellikle 0.5 mm'nin altında olan bu tip değirmenler ile birkaç mikron düzeyine öğütme yapmak mümkündür. Bu sistemlerde, nozuldaki basınçlı havanın etkisi ile ivmelenerek çıkan malzeme hızla öğütme odasına girmektedir. Öğütme odası aşınmayı en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır. Malzeme bu bölge içerisindeki çepere ve birbirlerine çarparak veya sürtünerek ince taneler halinde dağılmaktadır. Sistemdeki

öğütülmüş malzeme ise akışkanın hareketi ile taşınarak havalı bir separatörden geçmekte ve ince taneler ayrıldıktan sonra iri tanelerle birlikte tekrar sisteme geri dönmektedir. Bu tip değirmenlerde akışkan ortam olarak; sıcak basınçlı buhar, hava veya herhangi bir inert gaz kullanılabilir. Gazların basınçları ise malzemenin sertliğine göre 100 ile 200 psi arasında olabilmektedir (Yıldız, 2007; Yüce, 2008). Jet değirmenler endüstriyel ölçekte yaygın olarak kullanılmasa da; bazı tesislerde silis, feldspat, cam ve zirkon gibi aşındırıcı malzemelerin öğütülmesi için kullanılmaktadır. Daha çok plastik, polimer, pigment ve pestisit gibi malzemelerin mikron boyutuna öğütülmesi için kullanılmaktadır. Kapasiteleri 0.5 ile 5000 kg/saat arasında değişmektedir.



Şekil 11. Çeşitli jet tipi değirmen tasarımları (Fluiden Energy, 2008).

7. Titreşimli Değirmenler

Titreşimli değirmenler, Şekil 12'de görüldüğü gibi üst üste yerleştirilmiş öğütme odalarından (hücrelerinden) oluşmaktadır. Lastik bir takoz veya yaylar üzerinde yer alan bu odalara belirli bir hızda titreşim verilerek oda içerisindeki malzeme ve bilyalar hareket ettirilmektedir. Hareket

eden bilyaların cevherleri ezmesi ve sıkıştırması sonucunda taneler ufalanmaktadır. Bilyaların boyutu ise 10-15 mm arasında değişmektedir. Öğütücü ortam olarak çubuklarda kullanılabilir. En büyük dezavantajı kapasitesinde yaşanan sorunlardır. Öyle ki; kapasitesi 5 ton/saat'in üzerine çıkması durumunda öğütmede sorunlar yaşan-

makta, ince öğütme verimini kaybetmektedir. Ayrıca, mekanik aksamların sık sık arızalanması nedeniyle bakım-onarım maliyeti de oldukça yüksektir (Smith, 1974).

Titreşimli değirmenler ile 10 mikron boyutuna kadar öğütme yapmak mümkündür. Öğütme odaları yatay olarak ta yerleştirilebilir. En önemli

avantajı ince öğütmede enerji verimliliğinin yüksek, ilk yatırım maliyetinin düşük olmasıdır. Genellikle linyit, taşkömürü, kireçtaşı, bentonit, jibs, boksit, bakır, demir, ferrosilikon ve alüminyum oksitlerin ince öğütmesi için kullanılmaktadır (Yıldız, 2007; Wills, 1997; Aubema, 1997).

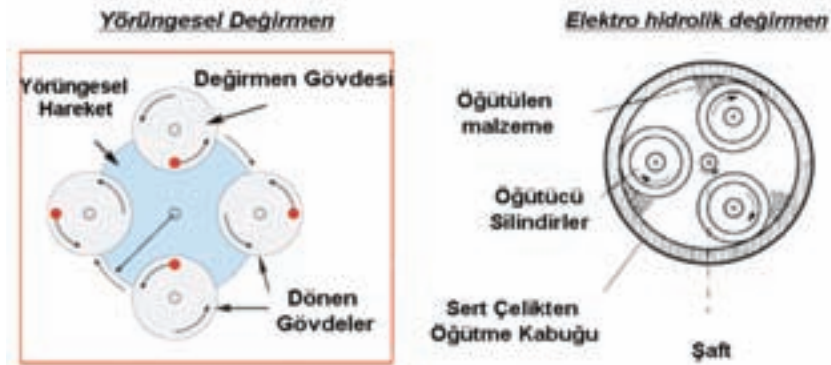


Şekil 12. Titreşimli değirmen ve kesit görüntüsü

8. Yörüngesel (Planeter) Değirmenler

Mikron ve mikronaltı boyutlarda öğütme yapmak için geliştirilmiş olan bir çeşit bilyalı değirmen tipidir. Planeter ismi, değirmen gövdesinin güneş etrafındaki gezegenlerin hareketi gibi dönmesinden gelmektedir. Bir yörüngesel değirmende, bir birine ters yönde olan iki hareket vardır. Birincisinde, yörüngesel değirmenin gövdeleri (4 adet), merkezi bir eksen etrafında tıpkı gezegenlerin güneş etrafındaki dönüşü gibi döner. Bu hareketi sayesinde merkez eksenine boyunca santrifüj alanı oluşur. İkinci harekette ise değirmen gövdeleri kendi eksenleri etrafında dönmektedir (Şekil 13). Dolayısıyla yörüngesel değirmen, yüksek dereceli bir yerçekimi alanında çalışmaktadır. Ayrıca, yüksek santrifüj alanı-

nın da etkisiyle değirmen içerisinde çok yüksek enerji açığa çıkmaktadır. Bu yüzden, yörüngesel bir değirmen ile klasik bilyalı değirmenlere göre daha kısa sürede çok ince boyutlu malzeme elde etmek mümkündür. Günümüzde karıştırmalı değirmenin kullanıldığı her alanda yörüngesel değirmen kullanılabilirliği olanaklı gözükmemektedir. Ancak, karıştırmalı değirmenlere göre öğütme maliyeti daha yüksek olup, mekanik aksamlarında sık sık problem yaşanmaktadır (Ding vd., 1997; Abd El-Rahman vd., 2001; Sverak, 2007). Şekil 13'de kısmen yörüngesel değirmenin çalışma prensibi ile çalışan elektro hidrolik değirmen gösterilmiştir. Bu değirmen tipinde, öğütücü silindirlere bir mil etrafında hareket etmekte ve öğütme kabuğu arasındaki malzemeyi ezerek ufalamaktadırlar.

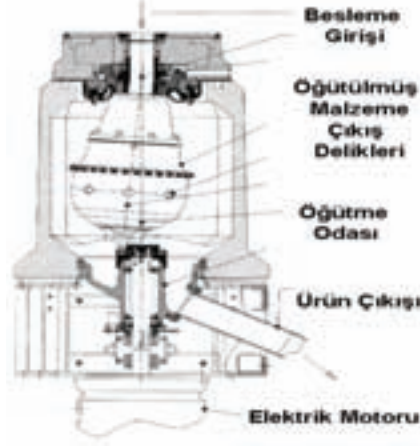


Şekil 13. Yörüngesel değirmen ve elektro hidrolik değirmen

9. Sarkaç Değirmenler

En bilinen sarkaç değirmen tipi, yüksek yoğunluklu, yarıküresel öğütme odalı Hikom

değirmenidir. Bu değirmen Şekil 14'de gösterilmiştir.



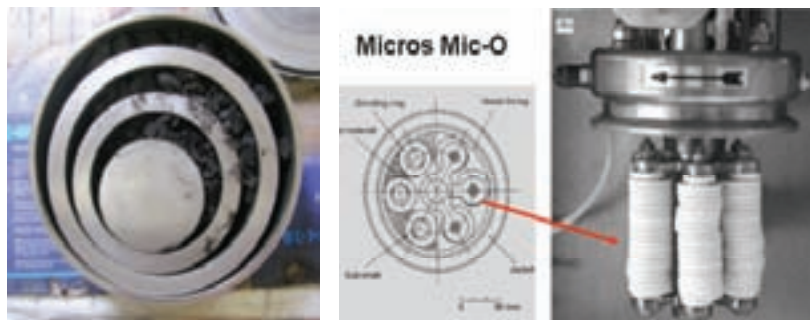
Şekil 14. Hikom değirmeninin çalışma prensibi ve kesit görüntüsü

Hikom değirmeninde, Şekil 14'de görüldüğü gibi öğütme odası askıda tutulmakta ve kendi ekseninde ivmeli bir hareketle 600-800 d/d'lık bir hızla döndürülmektedir. İçerisinde bulunan bilyalar yardımıyla taneler ufalanmakta ve öğütme odası üzerinde bulunan deliklerden öğütülmüş ürün dışarı çıkmaktadır. Daha sonra bu ürün separatörden geçirilmekte ve ince kısmından ayrılmaktadır. Şekil 15'de verilen 110/60 hikom değirmeninde, toplam öğütme odası hacmi 60 lt ve 110 kW'lık bir motorla işletilmektedir. Bu değirmen tipinde kimberlit gibi çok sert malzeme öğütülebileceği gibi, kireç ve talk gibi çok yumuşak malzemeler de etkili bir şekilde öğütülebilmektedir. Diğer değirmen tipleri ile karşılaştırıldığında %31 ile %70 arasında bir enerji tasarrufu sağladığı çeşitli çalışmalarda iddia edilmektedir (Hoyer vd., 1994; Hoyer vd., 1997; Braun vd., 2002).

10. Halkalı (Bilezikli) Değirmenler

Genellikle laboratuvar ölçeğinde kullanılan bu tip değirmenlerde, iç içe geçmiş halkalar bulunmaktadır (Şekil 15). Bu halkalar arasında yer alan malzeme, halkaların şaseler üzerindeki ekzantrik hareketi ile ezilmekte ve kısa sürede ufalanarak çok ince boyuta getirilebilmektedir.

Nara Makine tarafından geliştirilen bir diğer gelişmiş halkalı değirmen tipinde ise (Micros Mic-O), çok sayıda halka bir silindir oluşturacak şekilde üst üste yerleştirilmekte ve kendi içerisinde hareketli bir silindir oluşturmaktadır. Çok sayıdaki halka ile oluşturulan bu silindirler birbirleri ile sürtünerek aradaki malzemeyi öğütmektedir (Şekil 16). Kapasiteleri oldukça düşük ve endüstriyel ölçekte kullanımı oldukça zordur.



Şekil 15. Klasik halkalı değirmen ve silindirli Micros Mic-O değirmeni

11. Çivili Değirmenler

Çivili değirmenler, maksimum besleme boyutu 30-40 mm olan, kuru veya az nemli malzemenin 100 mikron'a kadar yüksek kapasiteyle öğütülmesinde kullanılır. Genellikle kimyevi ve gıda maddelerinin öğütülmesinde tercih edilmektedir.



Öğütme, yüksek hızda dönen çivili gövdenin tanelere uyguladığı kesme kuvvetleri ile sağlanır (Şekil 16). Saatlik kapasiteleri 5 ton'a kadar çıkabilmektedir. Yalnızca çivilerin bulunduğu rotorun hareket ettirilmesi ile önemli ölçüde enerji tasarrufu sağladığı belirtilmektedir.



Şekil 16. Çeşitli çivili değirmen tasarımları (www.mertlermakina.com)

Yukarıdaki bahsedilen değirmenlerin dışında sanayide ve laboratuvar ölçeğinde kullanılan diğer değirmen tipleri; Kafes değirmenler, Kesici Kanatlı değirmenler; Atoks Düşey Değirmeni, Raymond, Polysius, Alpine ve Szego değirmenleridir (Hohmann, 1977; Jimbo vd., 1980; Yutkin, 1955; Yıldız, 2007; Yüce, 2008).

9. Yorumlar ve Öneriler

Öğütme, cevher hazırlama işlemleri içerisinde halen en çok enerji tüketen işlem kademesi olup, bu alanda kullanılan toplam enerjinin yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Bu yüzden tesislerin iyileştirilmesi, doğru ekipmanlarla donatılması ve enerji tasarrufunu sağlayıcı yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. Bu bağlamda cevherin özelliğine uygun olmayan bir değirmenin seçilmesi işletme maliyetlerini daha da arttıracaktır.

Günümüzde cevherin özelliklerine ve istenilen tane boyutuna bağlı olarak alternatif değirmenler tasarlanmış ve tasarlanmaya devam etmektedir. Örneğin, klasik bir bilyalı değirmen ile birkaç mikron düzeyine öğütme yapmak hem zaman kaybına hem de maliyetlerin aşırı yükselmesine neden olmaktadır. Oysa bunun yerine karıştırmalı bir değirmen ile çok kısa bir sürede, daha düşük maliyetle, birkaç mikron düzeyine öğütme yapmak mümkündür. Benzer şekilde; kömür ve kliniker gibi gevrek yapıya sahip kuru malzemeler için klasik

tambur değirmenler yerine, daha yüksek kapasiteli valsli değirmenlerin kullanılması işletmenin yararına olacaktır. Ayrıca; öğütme sonrasında cevhere uygulanacak zenginleştirme yöntemi de değirmen seçiminde önemli rol oynamaktadır. Örneğin; yüksek merdaneli değirmenlerde öğütülen ürünün daha fazla çatlaklı yapıda olması, özellikle liç işlemlerinde verim artışı için daha avantajlı olmaktadır.

10. Sonuç

Enerji maliyetlerinin günden güne arttığı dünyamızda, daha uygun, daha yüksek kapasiteli ve daha ekonomik öğütme sistemlerine yönelinmesi, gerek işletmelerin geleceği gerekse ülkemiz doğal kaynaklarının verimli kullanımı açısından büyük önem arz etmektedir. Öyle ki, cevher zenginleştirme işlemlerinde öğütmenin önemli bir maliyet unsuru oluşturduğu özellikle belirtilmekte ve konvansiyonel tutumlardan dolayı mevcut değirmenlerde maliyetlerin düşürülmesi için çeşitli çalışmaların yürütüldüğü bilinmektedir. Bu bağlamda, maliyet düşürme tekniklerinin biri de gelişmiş teknolojinin takibi ve kurulum öncesinde uygun değirmenin seçimi olmalıdır.

Kaynaklar

1. Abd El-Rahman, M.K., Ma, N. ve Rajamani, R.K., 2001. Ultrafine Grinding of Some Oxides and Non Oksides Materials Using the Planetary Mill, *Ore Dressing*, 5, 11-23.
2. Anonymous, 2000. Energy Saving Ultra Fine Grinding With the SALA Agitated Mill, *Zement-Kalk-Gips*, 46, 600-601.
3. Ateşok, G., Müteveliöğlu, N.A., Dinçer, H. ve Boylu, F., 2005. Bazı Dağıtıcı Kimyasalların Kömürlerin Ögütülebilirliğine Etkisi, *Madencilik*, 44, (2), 25-35.
4. Aydoğan, N. ve Ergün, L., 2004. Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmenler, *Madencilik Dergisi*, 43, (3), 27-37.
5. Bond, F.C., 1951. Third Theory of Comminution, *Trans. AIME*, Vol.193, p.484.
6. Braun R.M., Kolacz J, Hoyer D.I., 2002. Fine Dry Comminution of Calcium Carbonate in a Hicom Mill With an Inprosys Air Classifier, Vol 15, p.123-129.
7. Conway-Baker, J., Barley R.W., Williams R.A., Clarke A.J., Kostuch J.A. ve Parker D.J., 1999. Investigation and Model Validation of Media Motion in a Vertical Stirred”, 1st World Congress on Industrial Process Tomography, 244-248.
8. Demirel, H. 1994. Ögütme”, *Cevher Hazırlama El Kitabı*, Yurt Madencilğini Geliştirme Vakfı Yayınları, Güven Önal&Gündüz Ateşok (ed), s. 58-71.
9. Ding, J., Tsuzuki, T. ve Cormick, P.G., 1997. Mechanochemical Synthesis of Ultrafine ZrO₂ Powder”, *Nanostructured Materials*, 8, (1), 75-81.
10. Dikmen, S. ve Ergün, Ş.L., 2004. Karıştırılmalı Bilyalı Değirmenler”, *Madencilik*, 43, (4), 3-15.
11. Esna - Ashari, M. ve Kellereessel, H., 1989.; Interparticle Crushing of Old Ore in Roller Presses Improves Leaching”, *Randol Gold Forum* 88, 141-146.
12. Gao, M. W. ve Forssberg, E., 1993, A Study on the Effect of Parameters in Stirred Ball Milling, *International Journal of Mineral Processing*, 37, 45-59.
13. Ergun, C., 2007. Seramik Malzemeler, IML 212.
14. Feige, F., 1993. Current State of Development in High Compression, *ZKG*, No.11, 586-595.
15. Fidan, B. ve Arol, A.İ. 1990. Küre Cevherinin Ögütme Özellikleri, *Madencilik Dergisi*, Cilt. XXX, No.3, 5-9.
16. Hacıfazlıoğlu, H., Samanlı, S. ve Toroğlu, İ. 2008. Karıştırılmalı Değirmende Kokaksu Boksitinin Ögütülmesinde Bazı Çalışma Parametrelerinin Ögütme Verimine Etkisi ve Bond Değirmeni ile Ögütme Verimliliklerini Karşılaştırılması, *Madencilik Dergisi*, , Vol. 47, No.4, 23-34.
17. Hoyer, D.I., Boyes, J.M., 1994. High-Intensity Fine and Ultrafine Grinding in the Hicom Mill. In: *Proceedings of the XVth CMMI Congress*, vol. 2. SAIMM, Johannesburg, pp. 435-441.
18. Hoyer, D.I., Lee, D.C., 1997. High-Intensity Autogenous Liberation of Diamonds from Kimberlite in the Hicom Mill. *Minerals Engineering* 5 (6), 671-684.
19. Hohmann, R.H., 1977. Grinding of Wheat and Limestone With the Szego Mill, M.Sc.Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Toronto, s.172.
20. Jankovic, A., 2003. Variables affecting the fine Grinding of Minerals Using Stirred Mills, *Minerals Engineering*, 16, 337-345.
21. Jimbo, G., Saito, Y. ve Kosaka, M. 1980. The Energy Efficient of Cryogenic Crushing of Grain and Vegetable Particles”, *Processing Europe Symposium, Particle Technology*, Amsterdam, 125-136.
22. Karadeniz, M., 1996. Cevher Zenginleştirme Tesis Artıkları Çevreye Etkileri Önlemler, MTA Genel Müdürlüğü, MAT Daire Başkanlığı, Cevher Zenginleştirme Servisi, s.41-71.
23. Kaytaz, Y., 1990. Cevher Hazırlama, İTÜ Maden Fakültesi Cevher Hazırlama ABD, Teknik Üniversite Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul, s.124.
24. Kemal, M. ve Arslan, V. 1999. Kömür Teknolojisi”, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, No.33, İzmir, ISBN: 975-441-142-5.
25. Kemal, M. ve Çiçek, T. 1996. İnce ve Çok İnce Ögütme, 21. Yüzyıla Girerken Türkiye Madenciligi, 20-22 Haziran SİVAS, pp. 97-111.

26. Kwade, A., 1999. Wet Comminution in Stirred Media Mills-Research and its Practical Application, Powder Technology, 105, 14-20.
27. Liddell, K. S., 1986. Machines for fine Milling to Improve the Recovery of Gold from Calcines and Pyrite, Proceeding of the International Conference on Gold, Extractive Metallurgy of Gold, 2, 405-417.
28. Mankosa, M. J. ve Adel, G.T. and Yoon, R.H., 1986. Effect of Media Size in Stirred Ball Mill Grinding of Coal, Powder Technology, 49, 75-82.
29. Patzelt, N., 1992. High Pressure Grinding Rolles, a Survey of Experience, IEEE Cement Industry Technical Conference, Dallas/Texas, 180.
30. Pilevneli, C.C., 2003. Bilyalı Bir Karıştırılmalı Değirmende İnce Boyutlu Klinker Öğütmesinin İncelenmesi, ZKÜ Maden Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, s.159.
31. Schönert, K., 1988. A First Survey of Grinding with High - Compression Roller Mills International Journal of Mineral Processing, No.22, 401-408.
32. Weller, K.R. ve Gao, M. 2000. Ultrafine-Grinding”, CSIRO Minerals and MIM Process Technologies, Australia.
33. Wang, Y. ve Forssberg, E. 2000. Product Size Distribution in Stirred Media Mills, Minerals Engineering, 13, 459-465.
34. Schönert, K., 1986. Advances in the Physical Fundamentals of Comminution, Advances in Mineral Processing Proceeding of a Symposium Honoring Nathaniel Arbiter on His 75th Birthday, Ed. P.Somasundaran, Littleton, 28.
35. Simith, E.A., 1974. Grinding Very Hard and Very Soft Materials Processing 16, November.
36. Sverak, T. 2007. Today’s Trends of Comminution Process”, Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering.
37. Szegvari, A. ve Yang, M. 1999. Attritor Grinding and dispersing equipment, Akron, Ohio.
38. Tüzün, M.A., 1994. A study of Comminution in a Vertical Stirred Mill, Doktora Tezi, Chemical Engineering Department, University of Natal.
39. Wills, B.A. 1987. Mineral Processing Technology, Pregmon International Library, London.
40. Wills, B.A., 1997. Mineral Processing Technology, Sixth Edition, Pregmon International Library, England, Chapter 7; s.142-176.
41. Yıldız, N. 1999. Öğütme Teorisi, Uygulaması Değirmenler ve Sınıflandırıcılar, Koza Ofset Matbaacılık, Ankara, s.217, ISBN: 975-9677-0-3.
42. Yıldız, N. 2007. Cevher Hazırlama”, Ertem Basım yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Ltd.Şti. Ankara, s.504, ISBN: 978-975-96779-1-6.
43. Yutkin, L.A., 1955. The Electrohydrolic Effect”, Moskow Mashgiz, English translation AD 267722.
44. Yüce, E., 2008. Boyut Küçültme (Kırma-Öğütme) ve Sınıflandırma Teknolojisi, Yenilikler ve Proses Maliyetlerine Etkileri, Cevher ve Kömür Hazırlama Tesislerinde İşletme Denetimi ve Verim Arttırma Kursu, 21-25 Ocak 2008, YMGV Yayını.
45. Union Process, 2010; Atritors, www.unionprocess.com
46. Metso Minerals, 2010; Grinding solution, www.metsominerals.com
47. Aubema, 2009; Products, www.aubema.com,
48. Fluid Energy, 2010; Jet mills, www.fluidenergype.com
49. Mertler Makine, 2010; Mikronize Öğütme değirmenleri, www.mertlermakina.com