

İNCE ÖĞÜTME TEKNOLOJİSİNDE KARIŞTIRMALI ORTAM DEĞİRMENLERİ VE CEVHER HAZIRLAMADAKİ UYGULAMALARI

STIRRED MEDIA MILLS IN ULTRAFINE GRINDING TECHNOLOGY AND THE APPLICATIONS IN ORE DRESSING

Oktay CELEP^{*}, İbrahim ALP, Tuğba TÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği, Bölümü, 61080, Trabzon

Yayına Geliş (Recieved): 25.06.08, Yayına Kabul (Accepted): 29.01.09

^{*}Corresponding author

ÖZ: Karıştırmalı ortam değirmenleri minerallerin ve diğer malzemelerin birkaç mikron altı tane boyutuna çok ince öğütülmeleri için cevher hazırlama, plastik, seramik, boya, gıda ve kozmetik gibi farklı endüstri kollarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu değirmenler hız, geometri ve ortam karıştırma ya da karıştırıcı şekliyle tanımlanan farklı türlerde sınıflandırılırlar. Karıştırmalı değirmenlerin düşey ve yatay değirmenler olmak üzere iki temel tipi vardır. Karıştırmalı değirmenlerde öğütme için harcanan spesifik enerji yüksek şarj hacminden dolayı geleneksel değirmenlerde harcanan enerjiden daha azdır. Öğütme işleminde mineralin türü, spesifik enerji girdisi, ortam boyutu ve şarj oranı önemli rol oynamakta ve değirmen içinde oluşan stres şiddeti ve sayısını etkilemektedir. Bu çalışmada, karıştırmalı değirmenlerin genel özellikleri ve öğütmeyi etkileyen parametreler tartışılarak cevher hazırlama ve diğer endüstrideki uygulamaları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok ince öğütme, karıştırmalı değirmenler.

ABSTRACT: Stirred media mills are widely used for ultra fine grinding of minerals and other materials to particles size below a few micrometers in different industrial fields such as ore dressing, plastic, ceramics, paint, food and cosmetic. These mills can be classified into a number of different subcategories predominantly defined by the speed, geometry, and orientation of the media agitator or stirrer. Two basic types of stirred mills are available, the vertical stirred mill and the horizontal stirred mill. The specific energy consumption for grinding is less than that of tumbling mills due to the high media volumetric loading in stirred mills. In stirred mills, mineral type, and specific energy input, the bead size and load volume play an important role in the comminution process and influence the stress intensity and stress number taking place in mill. In this paper, the parameters effecting grinding and general properties of stirred mills are discussed and applications in ore dressing as well as other industrial fields are reviewed.

Key Words: Ultra fine grinding, stirred mills.

GİRİŞ

Madencilikte 1970'lerde cevher zenginleştirme standart besleme boyutu d_{80} 74 μ m iken 1980'lerde 38 μ m olmuştur. 1990'lara gelindiğinde gerekli serbestleşmeyi sağlamak için

8 μ m den daha küçük flotasyon besleme boyutuna ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla için ince ve çok ince öğütmeyi sağlayacak olan karıştırmalı değirmenler geliştirilmiştir (Gao vd., 2006).

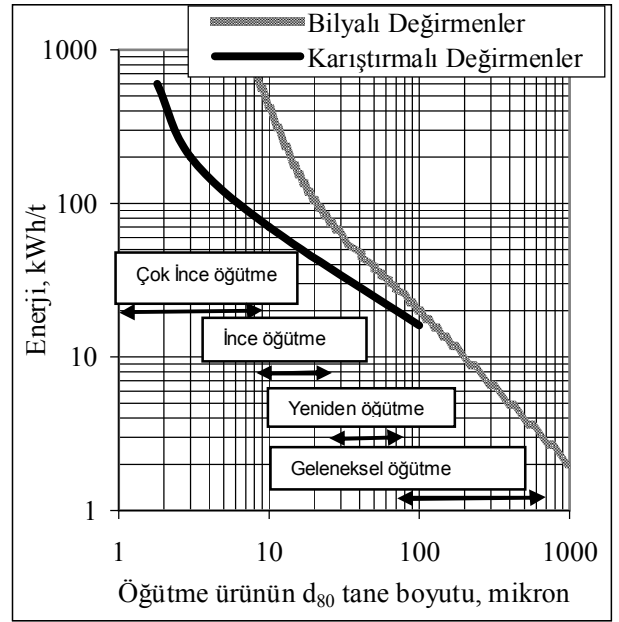
Geleneksel değirmenlerde daha iri öğütücü ortam kullanımından dolayı çok ince öğütme

gerçekleşemez (Jankovic, 2003). Cevher hazırlama işlemlerinde çubuklu ve bilyalı değirmenlerde harcanan enerjinin (toplam maliyetin %70'i) bir kısmı öğütmede harcanırken büyük bir kısmı ısı enerjisine dönüşerek harcanmaktadır (Gao ve Holmes, 2008). Ayrıca $75\mu\text{m}$ 'nin altındaki öğütmelerde aktarmalı değirmenlerin verimi çok azalmakta ve öğütme ekonomik olmamaktadır. Bilyalı değirmenlerde ince öğütme için temel problem, değirmenin düşük hızlarda çalışması ve kritik hızın üzerindeki hızlarda santrifüjün oluşmasından dolayı ince öğütmenin gerçekleşmemesidir. Ayrıca bilyalı değirmenlerde 20mm den daha büyük bilya kullanıldığı için $20\mu\text{m}$ den daha ince öğütme gerçekleşmemektedir. Ancak karıştırmalı değirmenlerde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle $10\mu\text{m}$ nin altında bile ekonomik öğütmeler yapmak mümkündür (Dikmen ve Ergün, 2004).

ÇOK İNCE ÖĞÜTME

Karıştırmalı Değirmenlerin Gelişimi

Cevher hazırlama işlemlerinde kullanılan mevcut değirmenler ile malzemelerin ekonomik olarak çok ince boyutlara öğütülmesinin fiziksel olarak mümkün olmaması nedeniyle karıştırmalı ve titreşimli bilyalı değirmenler kullanılmaktadır. Bu ekipmanların her biri kendine özgü avantaj ve dezavantajlara sahip olmakla beraber, son yıllarda madencilikte karıştırmalı bilyalı değirmenler üzerinde önemle durulmaktadır. Karıştırmalı bilyalı değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle bu tip ekipmanlarda özgül enerji tüketiminin tamburlu ve titreşimli bilyalı değirmenlerle karşılaştırıldığında oldukça düşük seviyede kalmaktadır (Wang ve Forssberg, 2007). Böylece artan enerji tüketimiyle birlikte bilyalı değirmenlerde elde edilen tane boyutu $>10\mu\text{m}$ iken karıştırmalı değirmenler ile $<10\mu\text{m}$ ürün boyutuna ulaşılabilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1: Karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketiminin değişimi (Jankovic, 2003).

Figure 1: Particle size versus energy consumption in stirred and ball mill (Jankovic, 2003).

Temel tasarımı 1920'li yıllara uzanan karıştırmalı değirmenler ilk kez 1960'lı yıllarda kaolinin öğütülmesi için kullanılmıştır. Karıştırmalı değirmenler; aşırı ısınmayı önlemek için etrafında bir su ceketini bulanan silindirik bir gövde ve bu gövde içinde yüksek hızda dönen bir karıştırıcıdan oluşmaktadır. Zamanla çeşitli ekipmanları değiştirerek farklı tiplerde değirmenler dizayn edilmiştir. Bunlar Tower mill, VertiMill, Isa mill, Svedala detritör, Sala agitated mill ve ANI-Metsoprotech SVM değirmenlerdir. Maxmill olarak adlandırılan değirmen tipinde gövde de dönmekte ve gövde içinde bulunan bir plaka yardımıyla malzemenin akışı değiştirilmektedir (Hacıfazlıoğlu vd., 2007).

Çok İnce Öğütmenin Teorisi

Karıştırmalı değirmenlerde öğütmenin gerçekleşmesi iki koşula bağlıdır. Bunlar, değirmen içinde birim zamanda meydana gelen çarpışma sayısı (stres sayısı=SN) ve her çarpışmada açığa çıkan enerji miktarıdır (stres yoğunluğu=SI). Değirmen içinde oluşacak olan stres şiddeti ve sayısı aşağıda verilen formüller yardımıyla hesaplanmaktadır (Dikmen ve Ergün, 2004; Kwade, 1999).

$$SI_m = D_m^3 (\rho_m - \rho) V_1^2 \quad (1)$$

Burada; D_m : öğütme ortam boyutu (m); ρ_m : öğütme ortam yoğunluğu (kg/m^3); ρ : pülp yoğunluğu (kg/m^3); V_1 : karıştırıcı çevresel hızı (m/s); SI_m : öğütme ortamının stres şiddeti (Nm) dir.

Karıştırmalı değirmenlerde proses optimizasyonunda kullanılan ve en ince ürün tane boyutuna ulaşılan bir optimum stres şiddeti aralığı vardır. Her stres yoğunluğu için ürün inceliği ile özgül enerji tüketimi arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır (Jankovic, 2001). Karıştırmalı değirmenlerde düşük stres şiddeti taneleri kırmaya yeterli olmadığından daha fazla enerji kullanılmalı yada stres sayısı artırılmalıdır. Stres yoğunluğunun artmasıyla ürün inceliği bir noktaya kadar azalmakta ve bu optimum noktadan sonra artmaktadır (Jankovic, 2001).

Öğütme işlemi özgül enerji ve stres yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Özgül enerji, değirmen içinde meydana gelen çarpışmalarda açığa çıkan toplam enerji miktarı ile orantılı olduğundan öğütme işlemi stres sayısı yani çarpışma sayısı ile de ilişkilendirilebilir.

$$E \propto SI.SN \quad (2)$$

Kesikli bir öğütme işleminde birim zamanda meydana gelen stres sayısı (SN), bilyaların temas sayısı (N_c), tanelerin yakalanma ve kırılma olasılığı (P_s) ve değirmen içindeki tane sayısı (N_p) ile orantılıdır.

$$SN = \frac{N_c \cdot P_s}{N_p} \quad (3)$$

Bilyaların temas sayısı karıştırıcı devri ve değirmendeki bilya sayısı ile orantılı olduğu varsayılırsa aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$N_c \propto n.t. \cdot \frac{V_D \cdot \varphi_b \cdot (1 - \varepsilon)}{\frac{\pi}{6} \cdot R_b^3} \quad (4)$$

Burada; V_D : değirmen hacmi (m^3); φ_b : dolum oranı (%); ε : bilyalar arası boşluk oranı (%); n : karıştırıcı devri (rpm), R_b : bilya çapı (m): t öğütme süresi (dk) dir.

Tanelerin yakalanma ve kırılma olasılığı değirmen içinde baskın olan öğütme mekanizmasına bağlıdır. Değirmen içinde kristal kafes yapısına sahip bir malzemenin öğütülmesi durumunda bu oran iki bilya arasındaki aktif hacim dolayısı ile bilya çapı ile orantılıdır (Dikmen ve Ergün, 2004).

$$P_s \propto R_b \quad (R_b: \text{bilya çapı, m}) \quad (5)$$

Değirmen içindeki tane sayısı tüm tanelerin hacmi ile orantılıdır.

$$N_p \propto \frac{V_D \cdot (1 - \varphi_b \cdot (1 - \varepsilon))}{\frac{\pi}{6} \cdot x^3} \quad (6)$$

Eşitlik 3'de eşitlik 4, 5 ve 6 yerine yazıldığında stres sayısı şöyle tanımlanabilir;

$$SN \propto n.t. \cdot \frac{\varphi_b \cdot (1 - \varepsilon)}{(1 - \varphi_b \cdot (1 - \varepsilon)) \cdot C_v} \cdot \frac{x^3}{R_b^2} \quad (7)$$

Burada; C_v katı konsantrasyonu (% hacimce), x : ortalama tane boyu (m) dir.

Karıştırmalı Değirmen Çeşitleri

Karıştırmalı değirmenler, karıştırıcı tipine göre sınıflandırılmaktadırlar. Karıştırıcılar; diskli, pinli ve halkalı olmak üzere üç şekilde adlandırılır. Bu değirmenler yatay veya dikey olarak ve yaş veya kuru olarak uygulanmaktadırlar (Kwade, 1999).

Üretilen ilk ekipmanlar, düşük hızlarda çalışmakta (<6 m/sn) ve aşındırıcı (attritor) olarak adlandırılmaktadırlar. Çoğunlukla, flotasyon öncesinde mineral yüzeylerinin temizlenmesi amacıyla kullanılmaktadırlar (Dikmen ve Ergün, 2004). İlerleyen yıllarda değirmen gövdesinin boy/çap oranının artmasına paralel olarak yüksek karıştırma hızına sahip değirmenler de geliştirilmiştir (Çizelge 1). Günümüzde dünyada cevher hazırlama alanında kullanılan birçok karış-

tırmalı değirmen mevcuttur. Bunlar düşük ve yüksek hızlı değirmenler olarak iki kısma ayrılmaktadır. Düşük hızlı değirmenler normalde 3m/s hızda yaklaşık 15 μ m (d_{80}), yüksek hızlı

değirmenler ise 15m/s hızda yaklaşık 5 μ m (d_{80}) öğütme ürün inceliğinde çalışmaktadırlar (Çizelge 2).

Çizelge 1: Bazı karıştırılmalı değirmenlerin üreticileri ve modelleri (Parry vd., 2006).

Table 1: The main stirred mill producers and its models (Parry vd., 2006).

Üretici Şirketler	Açıklama
1. Metso Mineral Corporation a. Vertimill b. Agitated Mill (SAM) c. Stirred Media Detritors	Metso üç farklı düşük hızlı karıştırılmalı değirmen üretmektedir.
2. Kubota	İlk düşük hızlı karıştırılmalı değirmendir. Dünyada baz metal madenciliğinde yeniden öğütme olarak pek çok uygulaması vardır ($d_{80} < 15\mu$ m).
3. ANI Metprotech	ANI Metprotech mill diğer bir düşük hızlı değirmendir. Değirmende en büyük problem karıştırıcıda oluşan aşınmadır.
4. Union process	ABD de üretilen ilk düşük hızlı karıştırılmalı değirmendir. Daha çok boya, kozmetik ve çimento endüstrilerinde kullanılmaktadır.
5. Mount Isa Mines ve Netzsch GmbH	Mount Isa Mines ve Netzsch GmbH Almanya'da IsaMill i geliştirmiştir.

Çizelge 2: Karıştırılmalı ortam değirmenlerinin karşılaştırılması (Lichter ve Davey, 2006).

Table 2: The stirred mill's comparison (Lichter ve Davey, 2006).

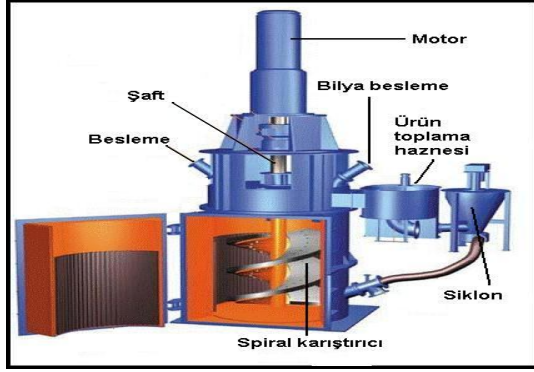
Parametre	Düşey Değirmenler		Yatay Değirmen
	Tower/Verti Mill	Pin Stirrer Mill	Isa Mill
Güç, kW/m ³	20-40	50-100	300-1000
Ürün boyutu, P ₈₀ , μ m	15-30	10-20	2-15
Katı akışı, t/h	\cong 100	az	az
Ortam boyutu, mm	9-20, ortalama 12, max 30	3-9	0,6-5
Su soğutma	yok	var	var
Sınıflandırma	Gerekli, hidrosiklon	Tercihen	Gerekli değil
Şaft dönme hızı, m/sn	3-düşük	11-orta	20-yüksek
Besleme tane boyutu	< 3mm	<50 μ m	30-300 μ m

Kule ve Düşey Değirmen

Kule ve düşey değirmen düşük hızlı (3m/sn) düşey karıştırılmalı değirmenlerdir. Kule değirmen 1950 lerde "Japan Tower Mill Company Ltd" tarafından geliştirilmiş daha sonra "Kubota Tower Mill Corporation" adını düşey değirmen olarak değiştirmiştir. Daha sonra Metso şirketi üretmeye devam etmiştir (Şekil 2). Bu değirmenler baz metal ve altın cevherleri için yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Karıştırılmalı düşey tip değirmende öğütme ortamı olarak çelik bilya, seramik bilya ve çakıl veya mineral kökenli aşındırıcı bir malzeme kullanılmaktadır. Değirmende öğütme ortamının karıştırılması ana şaftta monte edilmiş bir spiral ile sağlanmakta ve öğütme genellikle yaş olarak yapılmaktadır. Pülp değirmen üstünden beslenmekte, boyutu küçülmüş malzeme

içeren pülpün yukarıya doğru hareketi bir pompa vasıtasıyla sağlanmaktadır. Öğütme sırasında küçük taneler yukarı doğru çıkarken, iri taneler öğütücü ortamın içinde kalır. Öğütme ortamı spiral kanaldan yukarı yükselir ve spiral ile değirmen gövdesinden aşağıya düşmektedir (Gao vd., 2006; Gao ve Holmes, 2008). Değirmene beslenen maksimum tane boyutu 3mm ve elde edilen ürünün boyutu ise 70 μ m den daha küçüktür (P₈₀ <30 μ m). Kapasiteleri 50 ton/saatin üstündedir ve genel olarak 12mm çelik bilya kullanılır. Bu değirmenlerin avantajlarından biri 30mm ye kadar iri çelik bilya kullanılabilir olmasıdır. Böylece 3mm ye kadar iri tane beslemesine imkân vermektedir. Aynı kurulu güçle kıyaslandığında IsaMill ve Detritor'a göre hacim olarak en büyük karıştırılmalı değirmendir (Jankovic vd., 2008).



Şekil 2: Tower değirmenin kesit görüntüsü.

Figure 2: Tower mill cross-section.

Kule ve düşey değirmenler cevher hazırlama uygulamalarında yeniden öğütmede, sıklıkla küçük hidrosiklonla kapalı devre halinde uygulanırlar. Bu değirmenler standart 12mm ortam kullandıklarından sınırlı öğütme boyutu sağlamaktadır (d_{80} 20 μ m). Daha küçük ortam boyutu kullanıldığında taneler üzerine uygulanan enerji etkinliğinin artmasına karşın, 12mm den daha küçük ortam kullanımı öğütme esnasında bilyaların değirmenin üstünden kaçması gibi bir probleme sebep olmaktadır.

Çizelge 3. Avustralya'da düşey değirmen uygulamaları.

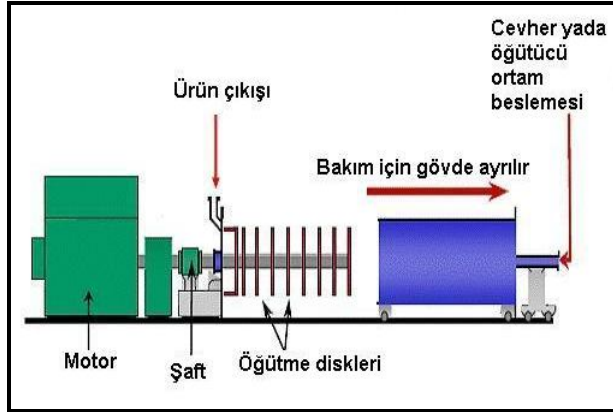
Table 3. Vertimill applications in Australia.

Şirket	Cevher	Tane boyutu d_{80} μ m	Kapasite t/h	Uygulama	Yıl
Granny Smith	Altın cevher atığı	20	12	Yeniden öğt.	1995
Pegasus Gold	Altın cevheri	15	34	Yeniden öğt.	1996
BHP Cannington	Zn-Pb kaba flt.	20	30,9-38,2	Yeniden öğt.	1996
BHP Cannington	Gümüş	20	9,8	Yeniden öğt.	1996
MIM Ernest Henry	Bakır cevheri	45	155	Yeniden öğt.	1997
Newcrest Cadia	Altın cevheri	53	54	Yeniden öğt.	1997
Wanadium	Manyetit	75	67	Yeniden öğt.	1999
Worsley Alumina	Kireçtaşı	45	18	Kireç Söndürme	1999

IsaMill

Mount Isa Mines ve Netzsch GmbH şirketleri Almanya'da boya endüstrisinde kullanılan yatay Netzsch karıştırılmalı değirmenlerden IsaMill'i geliştirmişlerdir. İlk olarak 1994 de Mount Isa Mine'de kurşun-çinko konsantratöründe dizayn edilmiştir (3000 litre, 1,1MW motor gücü). Dünyada IsaMill'in uygulandığı madenler Çizelge 4 de gösterilmektedir (Weller vd., 2008). IsaMill mineral endüstrisinde tek yüksek hızlı karıştırılmalı değirmendir. En büyük avantajları yüksek kapasiteye sahip olması (10t/saat), çok düşük ürün boyutu elde etmesi (d_{80} 7 μ m), düşük maliyetli doğal öğütme ortamı kullanımı ve yüksek enerji etkinliği sağlamasıdır.

Yatay bir şaft üzerine monteli diskli şaftın dönüşü ile karıştırma yapan bir değirmendir (Şekil 3). Bu diskler 20m/sn gibi yüksek bir hızda dönerek küçük öğütme ortamı kullanılarak etkin bir dönme hızına ulaşırlar. IsaMill de ayrıca elek kullanmadan, değirmen çıkışındaki oluşan yüksek santrifüjün etkisiyle ortam ve ürünün ayrılmasından dolayı ince öğütme ortamının değirmen içinde kalması sağlanır. En büyük IsaMill 2600kW motor gücünde olup değirmende 1-8mm arasında ortam kullanılır. Ortam boyutunu optimize etmek için besleme d_{80} boyutu 30-300 μ m arasında olmalıdır. Yapılan çalışmalarda IsaMill'in bilyalı değirmenlere göre %75 den daha fazla enerji tasarrufu sağladığı görülmektedir.



Şekil 3: IsaMill genel görünümü (Jankovic, 2008).

Figure 3: IsaMill general view (Jankovic, 2008).

Çizelge 4: Dünyada IsaMill in kullanıldığı madenler ve parametreleri.

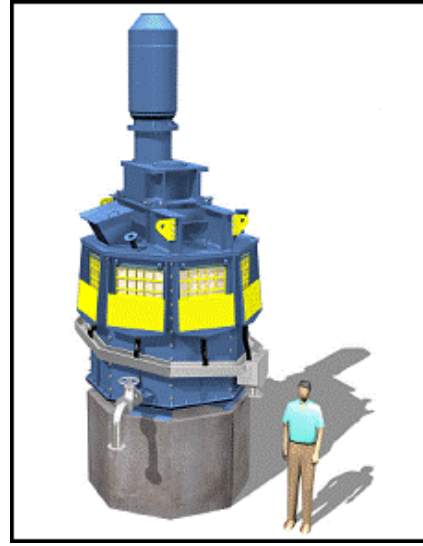
Table 4: IsaMills and operation parameters in world.

Maden	Güçü, kW	Adet	Uygulama	Yıl
Mount Isa, Avustralya	1,120	2	Pb/Zn cevheri	1994
McArthur River, Avustralya	1,120	6	Pb/Zn cevheri	1995
Mount Isa Avustralya	1,120	6	Pb/Zn cevheri	1999
KCGM, Avustralya	1,120	2	Altın cevheri	2000
Lonmin, G. Afrika	1,120	1	PGM	2002
Anglo Platinum, G. Afrika	2600	1	PGM	2003
Kumto Madeni, Kırgızistan	2600	1	Altın cevheri	2005

Karıştırmalı Ortam Aşındırıcı

Düşey bir karıştırmalı değirmen bu tip değirmen teknolojisi pigment endüstrisinde kullanılan kum değirmenlerinden geliştirilmiştir (Şekil 4). Öğütme

odasının en yüksek oranı birdir. Değirmen içerisindeki 11m/sn hızda dönen şaftta belli sayıda pinler bağlıdır (Gao ve Holmes, 2008). Günümüzde yaklaşık 200 tane kaolin ve kalsiyum karbonat zenginleştirme tesisinde kullanılmaktadır. Avustralya'da Zinifex Century Çinko madeninde altısı yeniden öğütme ve 15 i çok ince öğütme olmak üzere 21 tane karıştırmalı ortam değirmeni kullanılmaktadır (Çizelge 5). Bu değirmen öğütmesi öncesinde 2 inçlik siklonlar kullanılmaktadır.



Şekil 4: Karıştırmalı ortam aşındırıcısı genel görünümü.

Figure 4: Stirred media detritor general view.

Çizelge 5: Avustralya'da karıştırmalı ortam aşındırıcısı uygulamaları (Gao ve Holmes, 2008).

Table 5: Detritor applications in Australia (Gao ve Holmes, 2008).

Maden	Güçü, kW	Adet	Ürün boyutu, d_{80}	Uygulama
Zinifex Century Madeni	355	21	$<8\mu\text{m}$	Pb/Zn cevheri
Elura Madeni	185/355	4	$<15\mu\text{m}$	Pb/Zn cevheri
Zinifex Rosebery Madeni	355	1	$<20\mu\text{m}$	Pb/Zn cevheri
Copper Mines of Tasmania	355	1	$<85\mu\text{m}$	Cu cevheri
Thalga Madeni	185	1	$<25\mu\text{m}$	Cu cevheri

Devre beslemesinin d_{80} boyutu $44\mu\text{m}$ ve ürün d_{80} boyutu $7,5\mu\text{m}$ 'dir. Öğütme ortamı olarak 1-2 mm silika kum kullanılır ve genelde spesifik enerji tüketimi 34-37kWh/t arasında değişmektedir. Diğer doğal mineraller

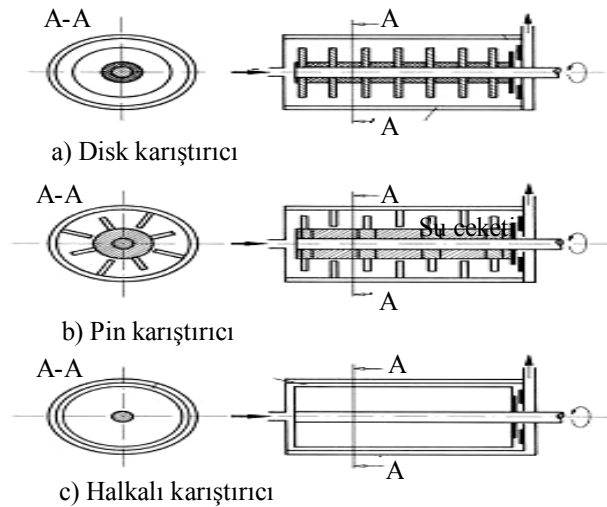
de öğütme ortamı olarak kullanılabilir. İri öğütme ortamı elek ve karıştırıcı aşınmasına sebep olduğu için tercih edilmemektedir. 1mm öğütme ortamı için besleme boyutu $d_{80} < 50\mu\text{m}$ dir. Besleme üstten yapılırken öğütülmüş ürün değirmeni öğütme ortamının geçmesine izin vermeyen $300\mu\text{m}$ 'luk elekten geçerek deşarj edilir.

ÖĞÜTMEYİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

Karıştırmalı değirmenlerin performansı üzerinde etki eden pek çok parametre vardır. Bu parametreler minimum enerji tüketimiyle istenen ürün inceliğine ulaşmak için optimize edilmelidir. Bu değişkenler tasarım ve işlem değişkenleri olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır (Dikmen ve Ergün, 2004).

Tasarım Değişkenleri

Tasarım değişkenleri grubunda değirmenin boy/çap oranı, karıştırıcı tipi, konumu ve sayısı, karıştırıcı shaft üzerinde bulunan disk veya çubukların boyutları ve shaft üzerindeki konumları gibi değişkenler bulunmaktadır. Tasarımlardaki bu değişiklikler değirmen içindeki akış karakterini değiştirmekte ve böylece bilya hareketini düzenlemektedir. Karıştırmalı değirmenlerin öğütme odası ve karıştırıcı geometrisine göre disk karıştırıcılı değirmen, pin karıştırıcılı değirmen ve halkalı karıştırıcılı değirmen olmak üzere üç farklı tasarımı vardır (Kwade, 1999; Orumwense ve Forssberg, 1992) (Şekil 5). Bunlardan en basit karıştırıcı geometrisi disk karıştırıcıdır. Bunlarda enerji karıştırıcıdan öğütme ortam ya da ürün üzerine diskli ve halkalı karıştırıcılarda çekme kuvveti (adhezyon) ile, pinli karıştırıcıda ise yer değiştirme kuvvetleri ile aktarılır. Pinli karıştırıcıda oluşan güç yoğunluğu disk karıştırıcıdan daha fazla iken en büyük güç yoğunluğu halkalı karıştırıcıda elde edilmektedir.



Şekil 5: Farklı karıştırıcı ve öğütme odası geometrileri.
Figure 5: Different stirrer and grinding chamber geometry.

İşlem Değişkenleri

Öğütme performansını etkileyen işlem değişkenleri öğütme ortam şekli ve bileşimi, karıştırma hızı, bilya yoğunluğu, bilya çapı ve şarj oranı, pülplü yoğunluğu veya viskozitedir (Jankovic, 2003; Zheng vd., 1996; Dikmen ve Ergün, 2004).

Karıştırma Hızının Etkisi

Karıştırmalı değirmenlerde öğütme santrifüj kuvvete bağlıdır.

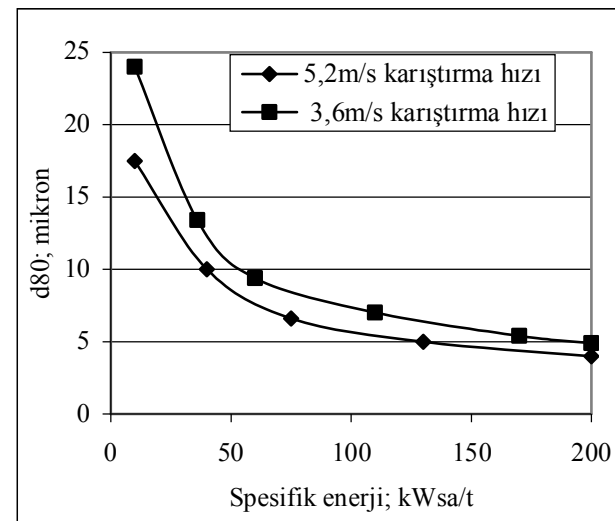
$$F = R \cdot m \cdot \omega^2 \quad (8)$$

Burada; F: santrifüj kuvvet (gr.cm.sn^{-2}); R: dönme yarıçapı (cm); m: cismin kütlesi (gr); ω : açıl dönme hızı (radyan.sn^{-1}) dir. Karıştırmalı değirmenlerde karıştırma hızının artmasıyla elde edilen ürünün tane boyutu küçülmekte ve değirmenin harcadığı güç artmaktadır. Böylece değirmenin birim hacminde harcanan özgül enerji miktarında bir artış olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda istenen ürün tane boyutuna daha kısa sürede ulaşılmakta ve değirmen kapasitesinde artış gerçekleşmektedir (Şekil 6). Bunlara karşın yüksek hızlarda endüstriyel ölçekte tasarımdaki güçlükler nedeniyle optimum bir hız seçimi gerekmektedir (Gao ve Forssberg, 1993).

Çizelge 6: Karıştırmalı ortam değirmenlerin karıştırma hızları.

Table 6: Stirring rates of stirred media mills.

Tipi	Tower Mill	Detritor	Isa Mill
Karıştırıcı hızı, m/s	3	11	20

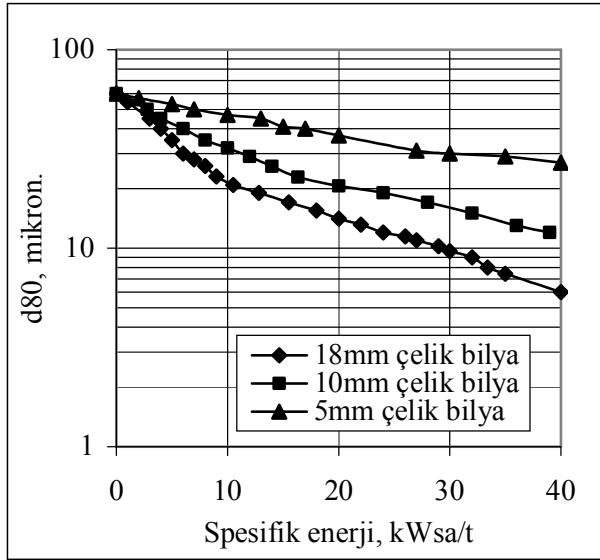


Şekil 6: Karıştırma hızının öğütme etkinliği üzerine etkisi (Jankovic, 2003).

Figure 6: Stirrer speed versus grinding efficiency.

Ortam Özelliği ve Şarj Oranının Etkisi

Kullanılan öğütücü ortam boyutu karıştırılmalı değirmenlerde en önemli faktördür. Ortam boyutu beslemedeki en iri taneyi kırabilecek kadar yeterince büyük olmalıdır. Karıştırılmalı değirmenlerde ortam boyutu besleme d_{80} boyutunun 20-30 katı olmalıdır. Ortam boyutu 1mm den 4mm ye artıkça tüketilen enerji miktarı altı kat artmaktadır (Gao ve Holmes, 2008). Öğütme ortamı olarak küçük bilya kullanıldığında elde edilen tane boyutunun incelendiği görülmektedir (Şekil 7) (Lichter ve Davey, 2006). Belli bir tane boyutundan küçük bilya kullanıldığında beslemedeki iri taneleri öğütmemektedir. Bilya boyutu ile tane boyutu arasındaki optimum oranın 7:1 ile 20:1 arasında olması gerekmektedir. İri bilya kullanılması durumunda düşük karıştırma hızının, ince bilya kullanılması durumunda ise yüksek karıştırma hızının öğütme üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir (Yue ve Klein, 2006).



Şekil 7: Bilya boyutunun öğütme üzerine etkisi.

Figure 7: Ball size versus grinding efficiency.

Düşük karıştırma hızı ve iri besleme kullanıldığı zaman bilyaların yoğunluğu azaldıkça (cam, otojen malzeme vb.) yüksek yoğunluklu bilyalara (çelik, demir vb.) oranla öğütme etkinliği azalmaktadır. Bunun nedeni, karıştırılmalı bilyalı değirmenlerde basma kuvvetinin makaslama kuvveti kadar etkin olmasıdır (Gao ve Forsberg, 1993; Tüzün vd., 1995). Geleneksel öğütmelerde şarj oranı yaklaşık %40 iken karıştırılmalı değirmenlerde değirmen hacminin %85 i kadar olması daha iyi öğütme enerjisi sağlanmasına neden olmaktadır. Öğütme ortamı düşey karıştırılmalı değirmenlerde üstten taşacağı ve yatay değirmenlerde ise aşırı ortam ve karıştırıcı aşınmasına neden olacağı için aşırı öğütme ortamı kullanımından kaçınılmaktadır.

Öğütme Ortamı Katkıları

Karıştırılmalı değirmenlerde öğütme esnasında oluşan ince taneler pülp viskozitesinin daha da yükselmesine neden olmakta ve öğütme performansını azaltmaktadır (Çizelge 7). Bu olumsuzluğu gidermek için öğütme ortamına çeşitli öğütme yardımcıları ilave edilmektedir. Bu reaktifler tane yüzeylerine adsorplanarak tanelerin yüzey yüklerini (zeta potansiyellerini) artırmakta ve viskozitenin düşmesini sağlamaktadırlar. Bu reaktifler özellikle yüksek katı konsantrasyonuna sahip pülpün akıcılığını artırarak değirmenin yüksek kapasitede çalışmasına yardımcı olmaktadır (Zheng vd., 1997; Bernhardt vd., 1999). Yapılan çalışmalarda polimerik kimyasalların inorganik kimyasallara göre öğütmede daha etkili olduğu görülmüştür. Polikarboksilik asit gibi polimerik kimyasalların küçük miktarlarında uygun bir pülp viskozitesi ayarlandığında etkili bir boyut küçültme ve enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Çizelge 7: Kullanılan öğütücü ortam yardımcıları (Wang ve Forsberg, 2008; Zheng vd., 1997).

Table 7: Used grinding media additives (Wang ve Forsberg, 2008; Zheng vd., 1997).

Kimyasal	Tip	Öğütülen malzeme	Öğütme
Tetrasodyum pyrofosfat	sıvı	dolomit	yaş
Sodyum hexametafosfat	sıvı	dolomit	yaş
Akrilik kopolimer	sıvı	dolomit	yaş
Polikarboksi asit	sıvı	dolomit, kireçtaşı	yaş
Sodyum hidroksit	sıvı	kireçtaşı	yaş
Sodyum oleat	sıvı	kireçtaşı	yaş
Oleik asit	sıvı	kireçtaşı	yaş
Sodyum karboksimetil selüloz	sıvı	kireçtaşı, jips	yaş
Trietanolamin	sıvı	dolomit	yaş/kuru
Trietanolamin/dietano - amine/etano lamine karışımı	sıvı	dolomit, kireçtaşı	kuru

Kullanılan Ortam Materyalinin Cinsi

Karıştırılmalı değirmenlerde önemli özelliklerden biri kullanılan doğal öğütme ortamıdır. Karıştırılmalı değirmenlerde kullanılacak ortamın seçimi aşınmaya, performansa, maliyete ve elde edilebilirliğe bağlıdır.

Kullanılacak materyal ucuz ve aşınarak ortamı kirletmeyecek özelliğe sahip olmalıdır. Örneğin çelik bilya kullanıldığında öğütmeden sonra oluşacak olan demir hidroksitlerin flotasyon seçiciliğini etkilemesi istenmektedir. Karıştırılmalı değirmenlerde kullanılan ortamlar Çizelge 8'de verilmektedir (Lichter ve Davey, 2006).

Çizelge 8: Kullanılan öğütücü ortam cinsi.

Table 8: Used grinding media types.

Ortam	Boyut, mm	Değirmen
Çelik bilya	12	Tower Mill
Nehir kumu	1-3, 3-6	IsaMill/Detritör
Ocak çakılı	3-5	IsaMill
Curuf	0,5-2	IsaMill
Granüle Pb	1-3	IsaMill

Pülp Yoğunluğu

Karıştırmalı değirmenlerde pülp yoğunluğunun artmasıyla elde edilen ürün inceliğinin arttığı gözlenmektedir. Pülp katı oranının ağırlıkça %75'in üzerine çıkması tanelerin kırılma hızlarını düşürmektedir. İnce besleme tane boyutu pülpün viskozitesini artırmakta ve öğütme performansını azaltmaktadır (Zheng vd., 1996; Bernhardt vd., 1999). Sülfid mineralleri için pülp yoğunluğu genelde ağırlıkça %55-65 oranındadır (Gao vd., 2006).

KULLANIM ALANLARI

Gelişen teknoloji ile beraber plastik, seramik, boya, gıda ve kozmetik gibi farklı endüstri kollarında ince (<100µm), çok ince (<10µm) veya süper ince (<1µm) olarak adlandırılan boyutlardaki malzemeye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Madencilik sektöründe ise, yüksek tenörlü cevherlerin tükenmesiyle birlikte, tane boyutu çok ince olan düşük tenörlü cevherler ve tesis artıklarının ekonomik olarak değerlendirilmesi önem kazanmaya başlamıştır. Her iki durum da malzemelerin çok ince boyutlara kadar öğütülmesi ihtiyacını doğurmaktadır (Dikmen ve Ergün, 2004).

Flotasyon Yöntemi

Flotasyon işleminde şlam oluşumundan dolayı ince öğütme işleminden kaçınılmaktadır. Bununla birlikte çoğu zaman cevherde minerallerin ince taneler şeklinde bulunmasından dolayı serbestleşmenin sağlanabilmesi için <10µm'ye öğütmenin gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu açıdan ince öğütme için geleneksel bilyalı değirmenlere nazaran karıştırmalı ortam değirmenleri kullanılmaktadır. Xstrata McArthur River Madeninde karıştırmalı değirmende cevher (kurşun-çinko) d_{80} ürün boyutu 7µm'a ve Mt Isa madeninde d_{80} 7-12µm'a öğütülmektedir. Her iki tesiste de şlam boyutuna öğütme iyi flotasyon verimi için gerekli olmaktadır. Bu tesislerde %80'in üzerinde <10µm'dan ince malzemenin öğütülmesiyle yapılan flotasyon konsantrasyon miktarı 1 milyon ton/yıl'dır (Pease, 2006).

Öğütme esnasında çelik bilya kullanıldığında oluşacak olan aşınmalardan dolayı öğütülen tanelerin yüzeylerine metal ve demir hidroksitler çökebilir. Bu durum flotasyon seçiciliğini etkileyerek daha yüksek reaktif tüketimine sebep olmaktadır. Bu nedenle çelik

bilya dışında kuvars gibi öğütücü ortamların kullanılmasıyla bu sorun önlenmektedir.

Mekanik Aktivasyon İşlemi

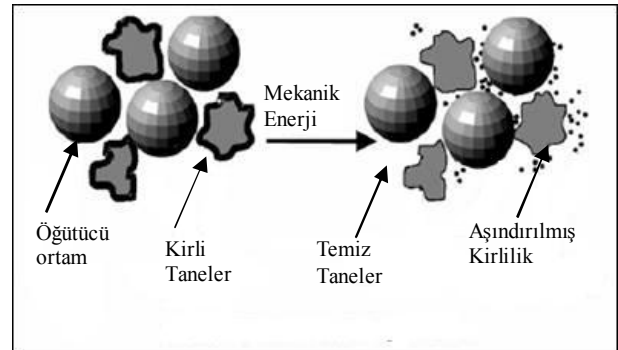
İnce öğütülmüş minerallerin çözünmesi üzerine mekanik aktivasyonun etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Son yıllarda geliştirilen karıştırmalı değirmenler ile cevher ya da konsantrelerin mekanik aktivasyon çalışmaları yapılmaktadır. Düşük reaksiyon sıcaklıkları, çözünme hızındaki artışlar, suda çözünebilir bileşiklerin oluşması, daha basit ve ucuz reaktör gereksinimi ve reaksiyon sürelerinin kısalması mekanik aktivasyonun temel avantajlarıdır (Welham, 2001; Balaz vd., 2003; Ficeriova vd., 2002 ve 2005a.b).

Mineraller fazla öğütmeye maruz bırakıldıklarında spesifik yüzey alanının artışının yanında oluşan mekanik aktivasyondan dolayı sonraki liç prosesini etkileyecek olan kimyasal yada fizikokimyasal dönüşümlere maruz kalırlar. Örneğin piritin öğütülmesi sonucunda demir sülfatın oluşması ile demirin çözülebilirliği artmaktadır. Bu durum sonucunda refrakter tip cevherlerde kapanım haldeki altının kazanımı mümkün olabilmektedir. Kavurma gibi proseslerdeki SO₂ gaz problemi mekanik aktivasyon işleminde yaşanmamaktadır (Balaz, 2000 ve 2003).

Yüzeyi Kirli Tanelerin Aşındırılması

Yüzeyleri kirli tanelerin flotasyon gibi bazı proseslerdeki dezavantajlarından dolayı onları temizlemek amacıyla aşındırma işlemi uygulanmaktadır. Karıştırmalı ortam değirmenlerde 20µm-1mm arasındaki aşındırıcı taneler kullanılarak 5µm altı kirlitici taneler uzaklaştırılabilirler (Şekil 8).

Tane kırılmasını önlemek için proses şartları düşük tane stresi, küçük öğütme ortamı, düşük enerji girişi ve yüksek katı içeriğiyle sağlanmaktadır. Aşındırma öğütme prosesinden sonra 10µm altı taneler ayrılmakta ve kirlilik derecesini belirlemek için kimyasal analize tabi tutulmaktadır.



Şekil 8: Yüzeyi kirli tanelerin aşındırılması.

Figure 8: Attrition of dirty particle surfaces.

Öğütücü ortam olarak, kuvars kum fraksiyonları (50-150 μ m) ya da çelik bilya (200-400 μ m) kullanılmaktadır. Yaş eleme ile birlikte aşındırılan materyal ve aşındırıcı ortam karıştırmalı değirmenin dışına alınmakta ve kalan öğütücü ortam tekrar kullanılmaktadır. Değirmenin aşırı yüklenmesini ve süspansiyonun aşırı ısınmasını engellemek için enerji girdisi kontrol edilmeli ve katı içeriği >%50 olmalıdır. Kumlu besleme materyali öncelikle şlamdan uzaklaştırılmalı ve sabit bir besleme hızında öğütücü ortamla birlikte karıştırmalı değirmene beslenmelidir (Neesse vd., 2004; Schaaff vd., 2004).

Nanotane Üretimi

Geleneksel olarak koloidal nano tane üretimi (100nm den daha küçük) termo-kimyasal ve faz değişimi teknikleriyle gerçekleştirilmektedir. Bu prosesler pahalı ve özel çevresel korumalar gerektirmektedir. Bununla birlikte mekanik araçlarla koloidal tanelerin üretiminin yüksek enerji gereksinimlerinden dolayı zor olacağı düşüncesi yaygındır. Son yıllarda yüksek enerji şiddetli karıştırmalı değirmenlerin kullanımı ile nano tanelerin üretimi mümkün olmaktadır. Karıştırmalı değirmenlerde öğütme etkinliği taneler ile öğütücü ortamın birim temas sayısı ve şiddetiyle orantılıdır. Kullanılan boncuk çapları genelde 0,1-0,5mm arasındadır (Balaz vd., 2004). Karıştırmalı ortam değirmenlerinde yaş öğütme ile birlikte 50nm tane çapında koloidal silika ve karbonat taneler üretilebilmektedir. Karbonatlı minerallerin karıştırmalı değirmenler ile mekanik işleme tabi tutulduğunda kristal yapısında deformasyonlar oluşur. Silikanın çok ince öğütülmesi kristal ve amorf yapısında değişikliklere neden olur (Wang ve Forssberg, 2006). Yapılan çalışmalarda karıştırmalı değirmenlerde fazla öğütme sonucunda bizmut-seramik (Bi/MgO, Bi/Al₂O₃, Bi/SiO₂) ve bakır-demir sülfid (Cu/FeS) nanokristalen materyalleri ve kurşun sülfid (PbS) nanokristalen taneleri elde edilmiştir (Balaz vd., 2004).

Refrakter Altın Cevherleri İçin Ön İşlem

Avustralya'nın en büyük altın üreticisi olan Kalgoorlie Consolidated altın madeni (KCGM) (\approx 750,000 ons/yıl) toplam kapasitesi 20t/h olan iki adet ince öğütme devresinde refrakter altın cevherinin flotasyon konsantrisini kavurmaya alternatif olarak değerlendirmektedir. KCGM'de her bir ince öğütme devresi için 4,5 milyon \$ ilk yatırım maliyeti olmak üzere toplam 6 milyon \$ harcanmıştır (Deschenes, 2005). Yatay karıştırmalı IsaMill değirmende ince öğütme için 6mm boyutunda silika kum öğütücü ortam olarak kullanılmaktadır. Liç devresine uygun tane boyu beslemesi yapmak için ($d_{80}=10\mu$ m) değirmen siklon (ϕ 66mm) ile birlikte kapalı devre çalıştırılmaktadır. Öğütme tane boyutu 11-12 μ m olmakta ve altın kazanma verimi %75 den %90'a çıkarılabilmektedir (Çizelge 9)

(Ellis, 2008). Birinci durumda 12-15kg/t olan siyanür tüketimi yeni durumda azalarak 3,5-4kg/t olmuştur.

Çizelge 9: KCGM tesis parametreleri.

Table 9: KCGM plant parameters.

Parametre	Değer
Konsantre tane boyu, F ₈₀ , μ m	120
İnce öğütme besleme boyu, P ₈₀ , μ m	50
Konsantre altın tenörü, ppm	40-50
Altının bulunuşu	Serbest/tellürid
Konsantrenin mineralojisi	% 59,7 pirit, % 0,3 kalkopirit, % 38,2 gang
İnce öğütme besleme katı oranı, ağırlıkça %	45-55
İnce öğütme boyutu, P ₈₀ , μ m	10
Ortam boyutu, mm	6
Ortam malzemesi	silika kum
Altın verimi, %	92
Siyanür tüketimi kg/t	3,5-4

Endüstriyel Hammadde Üretimi

Endüstriyel hammaddelerin üretiminde gerekli ürün inceliğini elde etmek için ilk adım öğütme prosesidir. Seramik mühendisliğinde bu boyut genellikle 1mm nin altındadır. Öğütme işleminin maliyetli bir işlem olmasının yanında silikon karbid gibi sert seramiklerin öğütmeye karşı yüksek dirençli olmalarından dolayı öğütülmeleri güçtür. Bilyalı değirmenlerde bu materyallerin öğütülmesi sınırlı iken karıştırmalı ortam değirmenleri ile mikron altı boyutlara öğütülmeleri yaygın bir şekilde uygulanmaktadır (Becker ve Schwedes, 1999; Fadhel vd., 1999).

İnce öğütülmüş kalsiyum karbonat yaygın bir şekilde plastik, kauçuk gibi maddelerde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte karışıma uygun olacak şekilde kalsiyum karbonatı su sever özellikli yapmak gerekmektedir. Bu amaçla karıştırmalı değirmenlerde kalsiyum karbonatın yüzey modifikasyonu işlemi yapılmaktadır (Hao vd., 2007; Wang ve Forssberg, 2006).

Ayrıca kağıt, boya, polimer, kozmetik ve seramik sektörlerinde katkı yada dolgu malzemesi olarak kullanılan kilin karıştırmalı değirmende öğütülmesi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Baudet vd., 1999).

Temiz Kömür Üretimi

Dünyada çevresel kaygılardan dolayı temiz enerji üretimi yönünde araştırmalar artmaktadır. Kömürün çok ince boyutlara öğütülerek içerisindeki kirletici bileşenlerinden serbestleşmesi gerekmektedir. Bu boyut birkaç mikron ile 20 μ m arasında değişmektedir. Kömürün ince öğütülmesi karıştırmalı değirmenlerde başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir

(Bokanyi ve Csöke, 2003; Mankosa vd., 1986 ve 1989; Hacifazlıoğlu vd., 2007).

Çimento Üretimi

Günümüzde dünya çimento tüketimi 1,5 milyar ton/yıl'dır ve her yıl %1 artmaktadır. Çimento üretiminde harcanan elektrik enerjisi yaklaşık 110kWh/ton ve bu enerjinin %40'ı klinker öğütmesi ve %30'u hammadde hazırlamak için kullanılmaktadır. Artan bu çimento talebi ve enerji giderlerinden dolayı öğütme prosesleri geliştirmek için araştırmalar yapılmıştır.

Üretim maliyetleri ve çevresel sakıncalardan dolayı daha az enerji kullanma ihtiyacına ve daha çok enerji etkinliğine sahip öğütücü ve sınıflandırıcı makinelere dikkat çekilmiştir. Bu amaçla, bilyalı değirmenlere kıyasla çimento üretiminde karıştırmalı değirmenlerde küçük çaplı öğütücü ortam kullanarak daha ince öğütme yapılabilmektedir. Özellikle portland ve blane çimento gibi özel çimento üretimi için karıştırmalı kule değirmen daha etkili olmaktadır (Jankovic vd., 2004; Pilevneli vd., 2004).

SONUÇLAR

Çok ince öğütme geleneksel öğütme ekipmanlarının daha iri öğütücü ortam kullanımından dolayı gerçekleşemezken son yıllarda geliştirilen karıştırmalı değirmenlerde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle 10 µm'nin altında bile ekonomik öğütmeler yapmak mümkündür.

Endüstride cevher hazırlama, plastik, seramik, boya, gıda ve kozmetik gibi farklı dallarda çok ince boyuttaki malzemeye olan ihtiyacın gelecekte daha da artacağı düşünülürse, karıştırmalı değirmenlerin geleneksel değirmenlerle karşılaştırıldığında daha düşük enerji tüketimiyle kullanımlarının daha da artacağı görülmektedir.

Bununla beraber, kullanılan karıştırmalı değirmenlerin büyük ölçekte yapılması, ortam aşınmasının fazla olması ve işlem sırasında bilyaların çıkış ızgarasını tıkaması gibi problemlerin çözümü veya öğütme yardımcılarının etkisi de gelecekte araştırma konularını oluşturacaktır.

SUMMARY

Stirred milling technology may be regarded as relatively new in minerals processing. The latest development of this technology is in the area of "Nano-grinding" for grinding down to nano-sizes. Stirred mills used today in mining and minerals processing are equivalent to the early models of stirred mills used in parallel industries.

There has been a clear trend of increased usage of stirred mills in the mining industry over the last 10 years. Stirred mills are now considered standard

equipment for regrinding and fine grinding duties and there are indications that they are being considered for use in primary grinding circuits.

Stirred media mills are widely used for ultra fine grinding of minerals and other materials to particles size below a few micrometers in different industrial fields such as ore dressing, plastic, ceramics, paint, food and cosmetic. These mills can be classified into a number of different subcategories predominantly defined by the speed, geometry, and orientation of the media agitator or stirrer. Two basic types of stirred mills are available, the vertical stirred mill and the horizontal stirred mill. The specific energy consumption for grinding is less than that of tumbling mills due to the high media volumetric loading in stirred mills. In stirred mills, mineral type, and specific energy input, the bead size and load volume play an important role in the comminution process and influence the stress intensity and stress number taking place in mill.

In this paper, the parameters effecting grinding and general properties of stirred mills are discussed and applications in ore dressing as well as other industrial fields are reviewed.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Balaz, P., 2000**, Extractive metallurgy of activated minerals, Elsevier.
- Balaz, P., 2003**, Mechanical activation in hydrometallurgy, International Journal of Mineral Processing, 72, 341-354.
- Balaz, P., Ficeriova, J. ve Leon, C.V., 2003**, Silver leaching from a mechanochemically pretreated complex sulfide concentrate, Hydrometallurgy, 70, 113-119.
- Balaz, P., Godocikova, E., Krilova, L., Lobotka, P. ve Gock, E., 2004**, Preparation of nanocrystalline materials by high-energy milling, Materials Science and Engineering, 386, 442-446.
- Baudet, G., Perrotel, V. ve Seron, A., 1999**, Two dimensions comminution of kaolinite clay particles, Powder Technology, 105, 125-134.
- Becker, M. ve Schwedes, J., 1999**, Comminution of ceramics in stirred media mills and wear of grinding beads, Powder Technology, 105, 374-381.
- Bernhardt, C., Reinsch, E. ve Husemann, K., 1999**, The influence of suspension properties on ultra-fine grinding in stirred ball mills, Powder Technology, 105, 357-361.
- Bokanyi, L. ve Csöke, B., 2003**, Preparation of clean coal by flotation following ultra fine liberation, Applied Energy, 74, 349-358.
- Deschenes, G., McMullen, J., Ellis, S., Fulton, M. ve Atkin, A., 2005**, Investigation on the cyanide leaching optimization for the treatment of

- KCGM gold flotation concentrate-phase1, Minerals Engineering, 18, 832-838.
- Dikmen, S. ve Ergün, Ş.L., 2004**, Karıştırmalı bilyalı değirmenler, Madencilik Dergisi, 43 (4), 3-15.
- Ellis, S., 2008**, Ultra fine grinding- a practical alternative to oxidative treatment of refractory gold ores, <http://www.isamill.com>.
- Fadhel, H.B., Frances, C. ve Mamourian, A., 1999**, Investigations on ultra-fine grinding of titanium dioxide in a stirred media mill, Powder Technology, 105, 362-373.
- Ficeriova, J., Balaz, P., Boldizarova, E. ve Stanislav, J., 2002**, Thiosulphate leaching of gold from a mechanically activated Cu-Pb-Zn concentrate, Hydrometallurgy, 67, 37-43.
- Ficeriova, J., Balaz, P. ve Boldizarova, E., 2005a**, Combined mechanochemical and thiosulphate leaching of silver from a complex sulphide concentrate, International Journal of Mineral Processing, 76, 260-265.
- Ficeriova, J., Balaz, P. ve Villachica, C.V., 2005b**, Thiosulphate leaching of silver, gold and bismuth from complex sulfide concentrate, Hydrometallurgy, 77, 35-39.
- Gao, M.W. ve Forsberg, E., 1993**, A Study on the effect of parameters in stirred ball milling, International Journal of Mineral Processing, 37, 45-59.
- Gao, M., Holmes, R. ve Pease, J., 2006**, The latest developments in fine and ultrafine grinding technologies, XXIII. International Mineral Processing Congress, İstanbul, 30-37.
- Gao, M. ve Holmes, R., 2008**, Developments in fine and ultrafine grinding technologies for the minerals industry, http://www.iom3.org/divisions/mining_technology/fine.pdf.
- Hacifazloğlu, H., Pilevneli, C.C. ve Toroğlu, İ., 2007**, Dikey pinli karıştırmalı değirmende armutçuk kömürünün kuru öğütülmesi ve bilya boyutunun ürün inceliğine etkisi, Madencilik Dergisi, 46 (1), 33-41.
- Hao, D., Shou-ci, L., Yan-xi, D. ve Gao-xiang, D., 2007**, Mechano-activated surface modification of calcium carbonate in wet stirred mill and its properties, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 17, 1100-1104.
- Jankovic, A., 2001**, Media stress intensity analysis for vertical stirred mills, Minerals Engineering, 14 (10), 1177-1186.
- Jankovic, A., 2003**, Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills, Minerals Engineering, 16, 337-345.
- Jankovic, A., Valery, W. ve Davis, E., 2004**, Cement grinding optimisation, Minerals Engineering, 17, 1075-1081.
- Jankovic, A., 2008**, A Review of regrinding and fine grinding technology the facts and myths, <http://www.metsominerals.com>.
- Jankovic, A., Valey, W. ve La Sora, D., 2008**, Fine grinding in the australian mining industry, <http://www.metsominerals.com>.
- Kwade, A., 1999**, Wet comminution in stirred media mills - research and its practical application, Powder Technology, 105, 14-20.
- Lichter, J. ve Davey, G., 2006**, Selection and sizing of ultrafine and stirred grinding mills. advances in comminution, Kawatra S. (ed.), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- Mankosa, M.J., Adel, G.T. ve Yoon, R.H., 1986**, Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal, Powder Technology, 49 (1), 75-92.
- Mankosa, M.J., Adel, G.T. ve Yoon, R.H., 1989**, Effect of operating parameters in stirred ball mill grinding of coal, Powder Technology, 59(4), 255-260.
- Neese, Th., Schaaff, F. ve Tiefel, H., 2004**, High performance attrition in stirred mills, Minerals Engineering, 17, 1163-1167.
- Orumwense, O.A. ve Forssberg E., 1992**, Superfine and ultrafine grinding-a literature survey, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 11, 107-127.
- Parry, J., Klein, B. ve Lin, D., 2006**, Comparison of ultrafine grinding technologies, XXIII. International Mineral Processing Congress, İstanbul, 177-183.
- Pease, J.D., Curry, D.C. ve Young, M.F., 2006**, Designing flotation circuits for high fines recovery, Minerals Engineering, 19, 831-840.
- Pilevneli, C.C., Kızıgut, S., Toroğlu I., Cuhadaroğlu, D. ve Yiğit, E., 2004**, Open and closed circuit dry grinding of cement mill rejects in a pilot scale vertical stirred mill, Powder Technology, 139, 165-174.
- Schaaff, F., Schneider, M. ve Neese, Th., 2004**, Intensifying the attrition of mineral waste in stirrer mills, International Journal of Mineral Processing, 74, 291-298.
- Tüzün, M.A., Loveday, B.K. ve Hindle, A.L., 1995**, Effect of pin tip velocity, ball density and ball size on grinding kinetics in a stirred ball mill, International Journal of Mineral Processing, 43, 179-191.
- Wang, Y. ve Forssberg, E., 2006**, Production of carbonate and silica nano-particles in stirred bead milling, International Journal of Mineral Processing, 81, 1-14.
- Wang, Y. ve Forssberg, E., 2007**, Enhancement of energy efficiency for mechanical production of

- fine and ultra-fine particles in comminution, China Particuology, 5, 193-201.
- Wang, Y. ve Forsberg, E., 2008,** International overview and outlook on comminution.technology, <http://pure.ltu>
- Welham, N.J., 2001,** Mechanochemical processing of gold-bearing sulphides, Minerals Engineering, 14 (3), 341-347.
- Weller, K.R. ve Gao, M., 2008,** Ultrafine grinding, <http://www.csrio.com>.
- Yue, J. ve Klein, B., 2006,** Effects of bead size on ultrafine grinding in a stirred bead mill, Advances in Comminution, Kawatra S. (ed.), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- Zheng, J., Haris, C.C. ve Samasundaran, P., 1996,** A Study on grinding and energy input in stirred media mills, Powder Technology, 86 (2), 171-178.
- Zheng, J., Haris, C.C. ve Samasundaran, P., 1997,** The effect of additives of stirred media milling of limestone, Powder Technology, 91, 173-179.