

KROM CEVHERİNİN KURU VE YAŞ ÖĞÜTME KİNETİĞİ VE PÜLP YOĞUNLUĞUNUN ETKİSİ

Alper ÖZKAN, Selma DÜZYOL, Havvanur UÇBEYİAY, Tevfik AĞAÇAYAK
Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kampus/Konya

Geliş Tarihi : 29.12.2004

ÖZET

Bu çalışmada, çeşitli besleme boyutlarındaki krom cevherinin kuru ve yaş öğütme kinetikleri laboratuvar ölçekli bir seramik bilyalı değirmen kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, özgül kırılma hızı (S_i) ve belirli bir boyutun altına net üretim oranı üzerine pülp yoğunluğunun etkisi araştırılmıştır. Krom cevherinin tüm boyut aralıklarının kuru ve yaş öğütülmesi birinci dereceden kırılma yasasını takip etmektedir ve besleme boyutu irileştikçe S_i değerleri artmıştır. Üstelik, bu farklı besleme boyutların yaş öğütülmesi kuru S_i değerleri ile karşılaştırıldığında 2.0-2.6 kat kadar daha yüksek S_i değerleri vermiştir. Pülp yoğunluğunun öğütme işlemine etkisi üzerine yürütülen deneysel çalışmalardan, en yüksek özgül kırılma hızı (S_i) değeri hacimce %45 katı pülp yoğunluğunda elde edilmiştir. Aynı pülp yoğunluğu değerinde, -75 μ m tane boyutuna net üretim oranı da en yüksek değere ulaşmıştır.

Anahtar Kelimeler : Kinetik, Kuru öğütme, Yaş öğütme, Pülp yoğunluğu

DRY AND WET GRINDING KINETICS OF CHROMIUM ORE AND EFFECT OF PULP DENSITY

ABSTRACT

In this study, the kinetics of dry and wet grinding of various feed sizes of chromium ore has been determined using a laboratory scale ceramic ball mill. In addition, the effect of pulp density on the specific rate of breakage (S_i) and net production rate to finer than specified size were investigated. The dry and wet grinding of all the size intervals of chromium ore followed the first-order breakage law, and the S_i values increased as the feed sizes became coarser. Moreover, the wet grinding of these various feed sizes gave higher S_i values by a factor of 2.0 to 2.6 comparing to the dry S_i values. From the experimental studies performed on the effect of pulp density on the grinding process, the highest S_i value was obtained at a pulp density of 45 % solids by volume. At the same pulp density value, the rate of net production of -75 μ m particle size also reached the highest value.

Key Words : Kinetics, Dry grinding, Wet grinding, Pulp density

1. GİRİŞ

Öğütme ile boyut küçültme işlemi cevher hazırlama, metalurji, enerji, toz ve seramik endüstrilerinin önemli işlemlerinden biri olup, önemli bir maliyet faktörü olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, süregelen çalışmalar bu maliyetleri azaltmak

yönünde olmaktadır. Öğütme koşullarının yeni yaklaşımlarla daha iyi optimizasyonu, öğütmeye yardımcı katkı maddelerinin kullanımı ve yeni tip öğütücülerin geliştirilmesi bu çalışmalara örnektir.

Cevher hazırlama işlemlerinde öğütme kuru veya tercihen yaş olarak yapılır. Yaş öğütmenin kuru öğütmeden daha verimli olduğu iyi bilinir. Bond

(1960) benzer koşullarda yapılan endüstriyel boyutlardaki yaş öğütmenin kuru öğütmeye göre 1-3 kat daha fazla kapasite verebildiğini ifade etmiştir. Austin et al., (1984) ise yaş öğütme işleminin kuru öğütmeye göre farklı malzemeler için kırılma hızlarını 1.1-2.0 kat artırdığını belirtmişlerdir. Nihayetinde, yaş öğütme işleminin pülp yoğunluğunun çok viskoz olmayacak kadar koyu (kabul edilebilir kütle akış özellikleri olan) olması durumunda daha yüksek değirmen kapasiteleri vereceği açıktır. Ayrıca, çoğu malzemelerin yaş öğütme ile kuru öğütmeye oranla daha ince boyutlara öğütülmesi mümkün olmaktadır. Su ince tanelerin aglomerasyonunu ve bilyaların kaplanmasını önleyerek öğütme süresi ilerledikçe gelişen yavaşlama etkisini geciktirmekle beraber, suyun başlıca faydası öğütücü ortamın mekanik etkisinin tanelere daha iyi nakledilmesini sağlamasıdır. Böylelikle, daha yüksek kırılma hızları elde edilir. Kuru olarak çok ince boyutlara öğütme yapılması, tüm öğütme işleminin yavaşlamasına neden olabilir. Değirmendeki yavaşlama etkisi, öncelikle bilyaların ince malzemeyle kaplanması ve tanelerin aglomerasyonu şeklinde gözükabilir. Bununla birlikte, ince tanelerin oluşturduğu yatak akışkana benzer özellikler gösterir. Bu durumda, taneler bilyaların çarpışma bölgesinden kaçarak parçalanma için gerekli kuvvetlere maruz kalmazlar (Austin et al., 1984; Klimpel, 1997a; Yekeler ve ark., 2001; Özkan ve Yekeler, 2003).

DeneySEL çalışmalar malzemelerin kuru öğütülmesi üzerinde aglomerasyon etkisinin, yaş öğütmede ise pülp reolojisinin etkili olduğunu göstermiştir. Tane boyutu küçüldükçe, pülp reolojisinin etkisi daha çok hissedilip, sınırlandırıcı olmaktadır. Taneler 10 µm ve daha alt boyutlara öğütüldüğünde (örneğin pigmentler ve ince kimyasallar) öğütme işleminin verimliliği tamamen pülp reolojisiyle saptanır (Klompel, 1997a).

Pülpün reolojik özelliklerini belirleyen faktörler pülp yoğunluğu, tane boyut dağılımı ve kimyasal ortamdır. Bir pülpün baskın bir reolojik davranışa sahip olduğu belirtildiğinde, aslında öğütme sırasında iri boyuttan ince boyuta öğütülen pülpün birkaç farklı reolojik yapı sergilediği anlaşılmaktadır. Ancak, mevcut yapılardan biri öğütme sırasında baskın olacaktır. Bu kompleks değişen reolojik yapı, yüksek boyut küçültme oranı içeren kesikli öğütme işlemlerinde daha belirgindir (Klompel, 1982a; 1982b; 1983; 1997b).

Bu çalışmada, Konya-Beyşehir yöresine ait krom cevherinin kuru ve yaş öğütme özelliklerinin kinetik bakımdan ortaya konulması amaçlanmıştır. Ayrıca, yaş öğütme işleminde pülp yoğunluğunun etkisi yine kinetik bakımdan incelenmiş ve kırılma

hızlarının en yüksek olduğu ve en fazla ince boyuta üretimin gerçekleştiği koşullar belirlenmiştir.

2. TEORİ

Küçük ve büyük boyutlu ekipmanlar ile yapılan ayrıntılı çalışmalar, tanelerin ufalanmasının birinci derece kırılma kinetiği izlediğini göstermiştir. Buna göre, i boyutunun kırılmadan ileri gelen kaybolma hızı aşağıdaki gibi verilebilir (Austin ve Luckie, 1972; Klompel, 1997a):

$$i \text{ boyutunun kırılma hızı} = S_i w_i(t) W \quad (1)$$

Burada; w_i boyutundaki fraksiyonun ağırlıkça oranı, W öğütücüye beslenen malzeme miktarı, S_i i boyutunun özgül kırılma hızı (dak^{-1}) (*specific rate of breakage*) ve t ise öğütme süresidir. Eşitlik (1) analitik olarak ifade edilirse;

$$-d[w_i(t)W] / dt \propto w_i(t)W \quad (2)$$

W sabit olduğu için,

$$dw_i(t) / dt = -S_i w_i(t), \text{ olur.} \quad (3)$$

Eğer S_i zamana bağlı olarak değişmiyor ise;

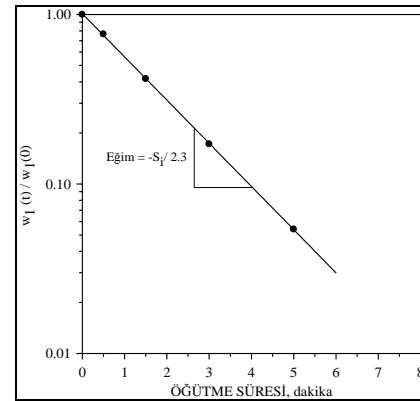
$$w_i(t) = w_i(0) \exp(-S_i t) \quad (4)$$

yani

$$\log[w_i(t)] = \log[w_i(0)] - S_i t / 2.3 \quad (5)$$

olarak ifade edilir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi, i boyutunun elek üstü oranının öğütme süresine karşı değişimi çizilirse, elde edilen doğrunun eğimi $-S_i/2.3$ olur.



Şekil 1. Birinci derece kırılma hızı eğrisi (Austin et al., 1984)

3. MALZEME VE YÖNTEM

3. 1. Malzeme

Öğütme deneylerinde kullanılan krom cevheri örneği Konya-Beyşehir yöresinden temin edilmiştir.

Örneğin kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Temin edilen numune çeneli kırıcıda kırıldıktan sonra öğütme testleri için -600 + 500 µm, -500 + 300 µm, -300 + 212 µm ve -212+106 µm tane boyut fraksiyonlarına hazırlanmıştır.

Tablo 1. Deneylerde Kullanılan Krom Cevherinin Kimyasal Analiz Sonuçları

Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	Isıtma kaybı
47.68	9.21	15.25	6.78	17.45	0.78	2.85

3. 2. Öğütme Deneyleri

Deneylerde 128 mm iç çapında ve 2500 cm³ hacminde laboratuvar tipi bir seramik değirmen kullanılmıştır. Öğütme üzerine yapılan çalışmalarda genellikle çelik bilyalı değirmen kullanıldığından, cevherlerin seramik değirmen ile belirlenen öğütme karakteristikleri sınırlıdır. Bu nedenle, seramik bilyalı değirmen tercih edilmiştir. Öğütme deney koşulları ve değirmen özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Deneylerde tek boyut fraksiyon tekniği

(Austin et al., 1984) kullanılarak her bir boyut fraksiyonundaki

numuneler belirli sürelerde değirmende öğütülmüştür. Öğütme deneyleri sonrası elde edilen ürünlerden konileme-dörtleme ile yaklaşık 45 gr kadar numune alınarak elek analizi yapılmıştır. Elek analizi sonuçlarının yardımıyla da ilgili tane boyutu fraksiyonunun özgül kırılma hızı (S_i) değeri belirlenmiştir.

Tablo 2. Seramik Bilyalı Değirmen Özellikleri ve Deney Koşulları

Seramik Değirmen	İç çapı, mm	128
	Uzunluğu, mm	212
	Hacmi, cm ³	2500
	Çalışma hızı, dev./dak.	77
Öğütücü ortam (Bilyalar)	Cinsi	Seramik
	Çapı, mm	20.24
	Sayısı	72
	Özgül ağırlığı	3.75
	Bilya şarj oranı, J [*]	0.20
Numune	Cinsi	Krom cevheri
	Yoğunluk, gr/cm ³	3.5
	Malzeme şarj oranı, f _c ^{**}	0.04
	Malzeme-bilya doluluk oranı, U ^{***}	0.50

$$*: J = \frac{(Bilya \text{ ağırlığı} / Bilya \text{ yoğunluğu})}{(Değirmen \text{ hacmi})} \times \frac{1.0}{0.6}; **: f_c = \frac{(Numune \text{ ağırlığı} / Numune \text{ yoğunluğu})}{(Değirmen \text{ hacmi})} \times \frac{1.0}{0.6}; ***: U = \frac{f_c}{0.4 J}$$

4. DENEYSEL BULGULAR

Değişik sürelerde kuru ve yaş olarak değirmende öğütülen -600 + 500 µm, -500 + 300 µm, -300 + 212 µm ve -212 + 106 µm tane boyutlarındaki krom cevheri numunelerinin özgül kırılma hızları (S_i) sırasıyla Şekil 2, 3, 4 ve 5'te verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, krom cevherinin çalışılan deney koşulları altında kuru ve yaş öğütülmesi işlemi birinci dereceden kırılma kinetiği sergilemektedir.

Ayrıca, gerek kuru ve gerekse yaş öğütme işleminde değirmene beslenen tane boyutu inceldikçe, özgül kırılma hızlarının da azaldığı görülmektedir. Yaş

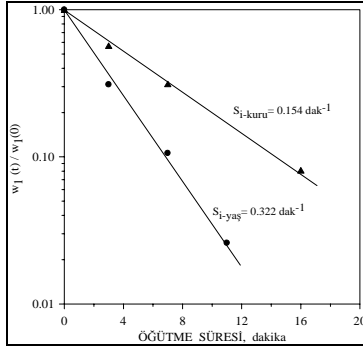
öğütme deneylerinde pülpün hacimce katı oranı % 45'tir.

Her bir tane boyut fraksiyonu için elde edilen özgül kırılma hızı (S_i) değerleri ve S_{i-yaş}/S_{i-kuru} oranları ise Tablo 3'te özetlenmiştir. Tablo 3'ten görüldüğü gibi krom cevherinin yaş öğütülmesi kuru öğütülmesine göre kırılma hızlarını besleme boyutuna bağlı olarak 2.0-2.6 aralığında artırmıştır.

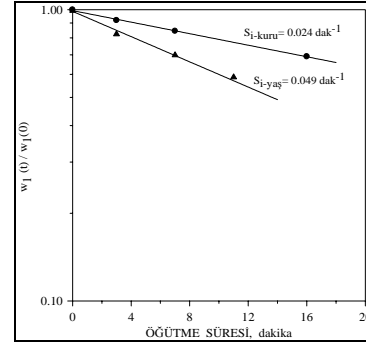
Çalışılan krom cevheri için pülp yoğunluğunun özgül kırılma hızına etkisi -500 + 300 µm tane boyut fraksiyonu için incelenmiştir. Farklı pülp yoğunlukları için elde edilen özgül kırılma hızları Şekil 6'da gösterilmiştir. Özgül kırılma hızının pülp yoğunluğuna bağlı olarak değişimi ise Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 3. Değişik Besleme Tane Boyutundaki Krom Cevherinin Kuru ve Yaş Öğütme ile Belirlenen Özgül Kırılma Hızları ve $S_{i\text{-yaş}} / S_{i\text{-kuru}}$ Oranları

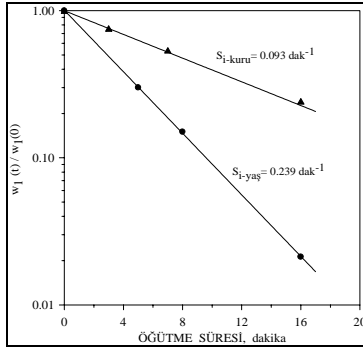
Besleme tane boyutu, μm	Özgül kırılma hızı (S_i), dak^{-1}		$S_{i\text{-yaş}} / S_{i\text{-kuru}}$
	Kuru öğütme	Yaş öğütme	
-600 + 500	0.154	0.322	2.09
-500 + 300	0.093	0.239	2.57
-300 + 212	0.083	0.217	2.61
-212 + 106	0.024	0.049	2.04



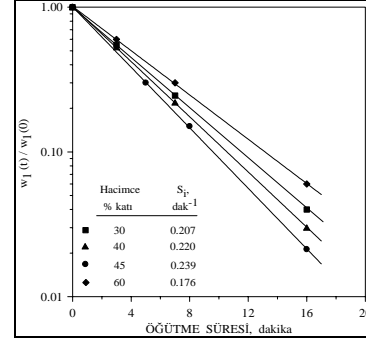
Şekil 2. -600+500 μm tane boyutundaki krom cevherinin kuru ve yaş öğütülmesi ile elde edilen özgül kırılma hızları.



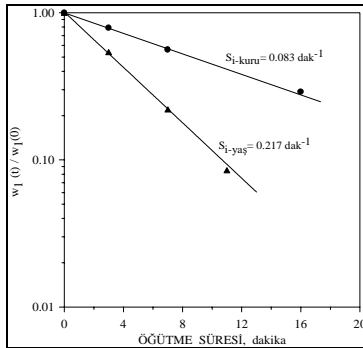
Şekil 5. -212+106 μm tane boyutundaki krom cevherinin kuru ve yaş öğütülmesi ile elde edilen özgül kırılma hızları



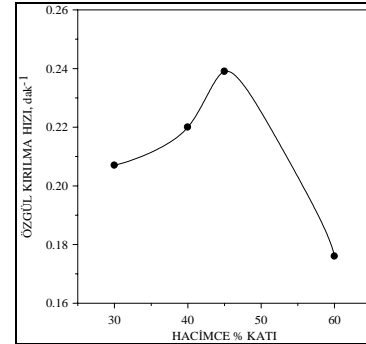
Şekil 3. -500+300 μm tane boyutundaki krom cevherinin kuru ve yaş öğütülmesi ile elde edilen özgül kırılma hızları



Şekil 6. Farklı pülp yoğunluklarında elde edilen özgül kırılma hızları



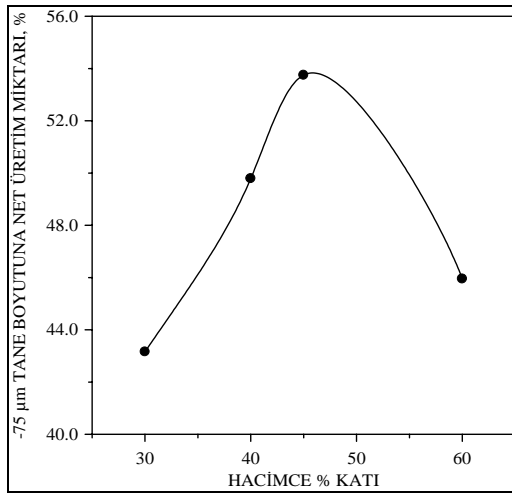
Şekil 4. -300+212 μm tane boyutundaki krom cevherinin kuru ve yaş öğütülmesi ile elde edilen özgül kırılma hızları



Şekil 7. Özgül kırılma hızının pülp yoğunluğu ile değişimi

Şekil 6 ve 7'den görüldüğü gibi, hacimce % 45 katı içeren pülp yoğunluğunda en yüksek özgül kırılma hızı değeri elde edilmiştir. Bu pülp yoğunluğu değerine kadar artan yoğunluk ile özgül kırılma hızlarında görülen artış, bilya-bilya çarpışma bölgesinde daha yüksek katı içeriğinin toplanmasından ileri gelmektedir. Ancak, bu pülp yoğunluğu değerinin üzerinde ise özgül kırılma hızında azalma görülmektedir. Bunun nedeni olarak, yüksek pülp yoğunluğu nedeniyle viskozitenin artışı sonucu değirmendeki malzeme akış koşullarının zorlaşması gösterilebilir.

Pülp yoğunluğuna bağlı olarak 30 dakikalık öğütme süresi sonunda -75 µm tane boyutuna net üretim miktarının değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü gibi, en yüksek üretim miktarı yine en yüksek özgül kırılma hızı (S_i) değerinin elde edildiği hacimce % 45 katı içeren pülp yoğunluğunda sağlanmıştır. Bu pülp yoğunluğunun üstünde ve altındaki yoğunluklarda ise yukarıda verilen nedenlerden dolayı ince boyutlu malzeme eldesi de azalmaktadır. Çalışılan krom cevheri için bulunan bu optimum pülp yoğunluğu değeri, çeşitli cevher ve kömür örnekleri için verilen değerlerle uygunluk taşımaktadır (Klimpel, 1983; Austin et al., 1984; Tangsathitkulchai and Austin, 1985). Aynı öğütme süresi için kuru öğütmeyle -75 µm tane boyutuna net üretim miktarı ise yaklaşık % 27'dir. Bu değer, en yüksek üretimin gerçekleştiği hacimce % 45 pülp yoğunluğuna göre yaklaşık 2.2 kat daha düşüktür. Bu sonuç, çalışılan krom cevheri için ince boyutlu malzeme eldesinde yaş öğütme işleminin etkinliğini açık olarak göstermektedir.



Şekil 8. Pülp yoğunluğu ile -75 µm tane boyutuna net üretim miktarının değişimi

Pülpün reolojik karakteri de bu bağlamda değerlendirilirse, kırılma hızlarının en yüksek ve ince boyuta malzeme üretiminin en fazla olduğu

hacimce % 45 katı içeren pülp yoğunluğunda, çalışılan krom cevheri için pülpün baskın reolojik karakterinin pseodoplastik olduğu söylenebilir. Bu yoğunluk değerinin üzerinde ise artan viskozite ile pülpün reolojik yapısının değirmendeki akışa direnç gösteren kayma gerilmeli pseodoplastik olduğu ifade edilebilir. Çeşitli cevher ve kömürler için pseodoplastik bölgenin yeri yoğunlukla hacimce % 45-55 katı oranlı olup, % 0-8 aralığında değiştiği belirtilmiştir (Klimpel, 1983).

5. SONUÇLAR

Farklı besleme boyutu sınıfındaki krom cevherlerinin hem kuru ve hem de yaş öğütülmesi işlemi birinci dereceden kırılma kinetiği izlemiştir. Değirmene beslenen tane boyutu arttıkça özgül kırılma hızı da artmaktadır. Çalışılan krom cevheri için yaş öğütme işlemi kuru öğütmeye göre kırılma hızlarında ortalama olarak 2.3 katlık bir artış sağlamıştır.

Yaş öğütme işleminde değirmendeki pülp yoğunluğu hacimce % 45 katı olduğunda, en yüksek özgül kırılma hızı (S_i) değeri ve -75 µm tane boyutunda net üretim miktarı elde edilmiştir. Bu tespit edilen pülp yoğunluğunun altında ve üstündeki yoğunluklar için ise bu değerler azalmaktadır. Ayrıca, en yüksek özgül kırılma hızının elde edildiği pülp yoğunluğunda -75 µm tane boyutuna net üretim miktarı kuru öğütmeyle elde edilenden 2.2 kat kadar daha yüksektir.

6. KAYNAKLAR

Austin, L. G. and Luckie, P.T. 1972. Methods for Determination of Breakage Distribution Parameters. Powder Technology, 5, 215-222.

Austin, L. G., Klimpel, R. R. and Luckie, P. 1984. Process Engineering of Size Reduction Ball Milling, SME, New York.

Bond, F. C. 1960. Crushing and Grinding Calculation. Brit. Chem. Eng., 6, 378-391, 543-548.

Klimpel, R. R. 1982a. Laboratory Studies of the Grinding and Rheology of Coal-Water Slurries. Powder Technology, 32, 267-277.

Klimpel, R. R. 1982b. Slurry Rheology Influence on the Performance of Mineral/Coal Grinding Circuits. Mining Engineering, 1665-1668.

Klimpel, R. R. 1983. Slurry Rheology Influence on the Performance of Mineral/Coal Grinding Circuits-Part 2. Mining Engineering, 21-26.

Klimpel, R. R. 1997a. Introduction to the Principles of Size reduction of Particles by Mechanical Means, Instructional Module Series 41 p. Series Ed. R. Rajagopalan, Particle Science Technology, Florida, USA.

Klimpel, R. R. 1997b. The Impact on Industrial Grinding Circuits of Changing and/or Controlling the Slurry Rheology; Comminution Practices pp. 1-9. Ed. S. Komar Kawatra, SME, Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc.

Littleton, Colorado, USA.

Özkan, A. and Yekeler, M. 2003. Fine Dry Grinding of Zeolite in a Laboratory Ball Mill. Particle & Particle Systems Characterization (20), 276-282.

Tangsathikulchai, C. and Austin, L.G. 1985. The Effect of Slurry Density on Breakage Parameters of Quartz, Coal and Copper Ore in a Laboratory Ball Mill. Powder Technology (42), 287-296.

Yekeler, M., Özkan, A. and Austin, L.G. 2001. Kinetics of Fine Wet Grinding in a Laboratory Ball Mill. Powder Technology (114), 224-228.