

Sodyum Feldispatın Karıřtırılmalý Bilyeli Deęirmende Kuru Olarak ok İnce Boyuta
Öğütülebilirliğinin Araştırılması

Hasan Serkan Gökçen

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2010

Investigation of Dry Grindability of Sodium Feldspar in Stirred Ball Mill to Micro Fine
Sizes

Hasan Serkan Gökçen

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mining Engineering

August 2010

Sodyum Feldispatın Karıřtırılmalý Bilyeli Deęirmende Kuru Olarak ok İnce Boyuta
Öğütülebilirliğinin Araştırılması

Hasan Serkan Gökçen

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Cevher Hazırlama Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Yaşar Ubaş

Ağustos 2010

ONAY

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hasan Serkan GÖKÇEN'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Sodyum Feldispatın Karıştırmalı Bilyeli Değirmende Kuru Olarak Çok İnce Boyuta Öğütülebilirliğinin Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ

Üye : Prof. Dr. Volkan BOZKURT

Üye : Doç. Dr. Halil İPEK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kemal BİLİR

Üye : Yrd. Doç. Dr. H. Levent HOŞGÜN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada, sodyum feldispatın karıştırmalı bilyalı değirmende kuru olarak çok ince boyutlara ($<10 \mu\text{m}$) öğütülebilirliği araştırılmıştır. Deneyler, 5 mm, 3 mm ve 5-3 mm karışım bilyalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öğütme süresi, malzeme boşluk doldurma oranı, bilya doluluk oranı, bilya karışım oranı ve karıştırma hızının öğütme üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, boyut ve tüketilen enerji göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir.

Kullanılan tüm bilyalar için öğütme süresi, bilya doluluk oranı ve karıştırma hızı arttıkça ürünün tane boyutu azalmakta, enerji tüketimi de artmaktadır. Malzeme doluluk oranının artmasıyla ise ürünün tane boyutu artarken, tüketilen enerji azalmaktadır. Karışım bilyada ise 3 mm bilya oranı arttıkça ürünün tane boyutu önce azalmakta daha sonra artmaktadır. Buna karşın tüketilen enerji önce artmakta sonra azalmaktadır.

Yapılan çalışmalar sodyum feldispatın $-120 \mu\text{m}$ 'dan kuru olarak karıştırmalı bilyalı değirmende 5 ve 5-3 mm bilya kullanılarak çok ince boyuta öğütülebileceğini göstermektedir. 3 mm'lik bilyaların kullanılması durumunda ise aynı başarı elde edilememiştir.

Anahtar Kelimeler: Sodyum feldispat, karıştırmalı bilyeli değirmen, çok ince öğütme

SUMMARY

In this study, dry grindability of sodium feldspar to micro fine size ($<10\ \mu\text{m}$) was investigated in the stirred mill. 5 mm, 3 mm and 5-3 mm bead mixture were used in the experiments. The effects of grinding times, powder filling ratio, bead filling, bead mixture ratio and stirring speed on grinding were investigated. The results were evaluated on the basis of particle size and energy consumption.

Particle size of the product for all beads decreases with an increasing grinding times, bead filling ratio, and stirring speed while energy consumption increasing. In the case of increasing powder filling ratio, particle size of the product increases while energy consumption decreasing. In the case of bead mixture, product particle size first decreases then increases with an increasing 3 mm bead ratio, in spite of that energy consumption first increases then decreases.

As a result of this study, it was found that sodium feldspar could be dry ground from $-120\ \mu\text{m}$ to micro fine sizes in the stirred mill using 5 and 5-3 mm beads. In the case of 3 mm beads, same success could not be achieved.

Keywords: Sodium feldspar, stirred ball mill, micro fine grinding,

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ'a, önerilerini/yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Volkan BOZKURT'a, Arş. Gör. Serkan ÇAYIRLI'ya ve 109M114 nolu TÜBİTAK projesinin bir kısmı olan tezimde proje ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ayrıca her konuda maddi ve manevi destek sağlayan, bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan sevgili aileme de şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜRLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. UFALAMA PRENSİPLERİ	3
3. DEĞİRMENLER	7
3.1. Çubuklu Değirmenler	9
3.2. Bilyeli Değirmenler	10
3.3. Çakıl Değirmenler	11
3.4. Otojen Değirmenler	12
3.5. Valsli Değirmenler	13
3.6. Kule Değirmenleri	14
3.7. Yüksek Basıncılı Öğütme Merdaneleri	15
3.8. Akışkan Enerjili Değirmenler	16
3.9. Titreşimli Değirmenler	17
3.10. Karıştırılmalı Değirmenler	19
4. FELDİSPATLAR	24
4.1. Alkali feldispatlar	24
4.2. Plajioklaslar	24
4.3. Feldispatların Kullanım Alanları	25
4.4. Feldispatların Tane Boyutu	26

İÇİNDEKİLER (devam)

	Sayfa
5. ÖNCEDEDEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	27
6. MALZEME VE YÖNTEM	30
6.1. Örnek	30
6.2. Örneğin Kimyasal ve Mineralojik Analizleri	31
6.2.1. Örneğin kimyasal analizleri	31
6.2.2. Örneğin mineralojik analizleri	31
6.3. Karıştırmalı Bilyeli Değirmen	32
6.4. Tüketilen Enerji Miktarının Hesaplanması	35
6.5. Değirmende Boşluk Doldurma Oranının Hesabı	36
6.6. Değirmende Bilye Yükünün Hesabı	37
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	38
7.1. Öğütme Süresinin Ürün Tane Boyutu ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi	38
7.2. Malzeme Doluluk Oranının Ürün Tane Boyutu ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi.....	43
7.3. Bilye Doluluk Oranının Ürün Tane Boyutu ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi	45
7.4. Bilye Karışım Oranının Ürün Tane Boyutu ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi.....	48
7.5. Karıştırma Hızının Ürün Tane Boyutu ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi	51
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
9. KAYNAKLAR DİZİNİ	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1. Çekme ve basma kuvvetlerinin oluşturduğu bir kristal kafesin birim deformasyonu	3
2.2. Çatlak ucundaki gerilim birikmesi	4
2.3. Kırılma ile parçalanma	6
3.1. Çubuklu değirmen	10
3.2. Bilyeli değirmen	11
3.3. Otojen değirmen	13
3.4. Valsli değirmen	14
3.5. Kule değirmenler	15
3.6. Yüksek basınçlı öğütme merdanesi	16
3.7. Akışkan enerjili değirmen	17
3.8. Titreşimli değirmen	18
3.9. Disk ve kol tipi atritör değirmenlerin şematik gösterimi	20
3.10. Öğütücü ortam hareketleri	21
3.11. Atritör değirmende meydana gelen öğütücü hareketler	21
3.12. Efektif bir öğütme için gerekli darbe ve kayma kuvvetleri	22
3.13. Karıştırmalı ve bilyeli değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketiminin değişimi	23
6.1. Deneyleerde kullanılan örneğin boyut analiz sonuçları	30
6.2. Sodyum feldipatın XRD sonuçları	32

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil	Sayfa
6.3. Karıştırmalı bilyeli değirmen	33
6.4. Değirmenin tankı, şaftı ve karıştırma kolu	33
6.5. Değirmenin 3 ve 5 mm çaplı bilyeleri	34
7.1. 3 mm bilye kullanıldığında öğütme süresinin ürün tane boyutu üzerine etkisi	39
7.2. 5 mm bilye kullanıldığında öğütme süresinin ürün tane boyutu üzerine etkisi	39
7.3. 5-3 mm bilye kullanıldığında öğütme süresinin ürün tane boyutu üzerine etkisi	40
7.4. Öğütme süresinin P ₈₀ boyutuna etkisi	41
7.5. Öğütme süresinin P ₅₀ boyutuna etkisi	41
7.6. Öğütme süresinin enerji tüketimine etkisi	42
7.7. Malzeme doluluk oranının P ₈₀ boyutuna etkisi	44
7.8. Malzeme doluluk oranının P ₅₀ boyutuna etkisi	44
7.9. Malzeme doluluk oranının enerji tüketimine etkisi	45
7.10. Bilye doluluk oranının P ₈₀ boyutuna etkisi	47
7.11. Bilye doluluk oranının P ₅₀ boyutuna etkisi	47
7.12. Bilye doluluk oranının enerji tüketimine etkisi	48
7.13. 5-3 mm bilye karışımında 3 mm miktarının P ₈₀ boyutuna etkisi	50
7.14. 5-3 mm bilye karışımında 3 mm miktarının P ₅₀ boyutuna etkisi	50
7.15. 5-3 mm bilye karışımında 3 mm miktarının enerji tüketimine etkisi	51
7.16. Karıştırma hızının P ₈₀ boyutuna etkisi	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil	Sayfa
7.17. Karıştırma hızının P_{50} boyutuna etkisi	53
7.18. Karıştırma hızının enerji tüketimine etkisi	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge		Sayfa
4.1.	Plajoklasların anortit içeriği	25
6.1.	Sodyum feldispat örneğinin kimyasal analiz sonuçları	31
6.2.	Deneylerde kullanılan boşluk doldurma oranları	36
6.3.	Deneylerde kullanılan bilye yükleri	37
7.1.	Öğütme süresinin etkisi deney koşulları ve bulgular	38
7.2.	Malzeme doluluk oranının etkisi deney koşulları ve bulgular	43
7.3.	Bilye doluluk oranının etkisi deney koşulları ve bulgular	46
7.4.	Bilye karışım oranının etkisi deney koşulları ve bulgular	49
7.5.	Karıştırma hızının etkisi deney koşulları ve bulgular	52

1. GİRİŞ

Sodyum feldispat, kil, kaolen ve kuvars gibi temel seramik hammaddelerinden biridir ve Ülkemizde bol miktarda bulunur. Seramik bünyesine (reçetesine) eritici (flaks) olarak katılan feldispat, bünyedeki diğer hammaddeler (kil, kaolen ve kuvars) ile reaksiyona girerek bu hammaddelerin erime sıcaklığını düşürür. Bunun sonucunda bir taraftan seramiğin pişme sıcaklığı düşerken, diğer taraftan da seramiğin pişme süresi kısalmır. Seramik üretiminde feldispat, diğer seramik hammaddeleriyle beraber, geleneksel bilyeli değirmenlerde 75 µm altına yaş olarak öğütülerek kullanılır. Bunun da en önemli nedeni geleneksel bilyeli değirmenler ile bu boyutun altına (ekonomik olarak) inilememesidir.

Günümüzde gelişen teknoloji ile beraber madencilik, seramik, boya ve gıda gibi farklı endüstri kollarında ince (<100 µm), çok ince (<10 µm) ve süper ince (<1 µm) olarak adlandırılan boyutlardaki malzemeye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Yüksek enerji tüketimli geleneksel bilyeli değirmenler ile malzemeleri bu boyutlara öğütmek (ekonomik olarak) mümkün değildir. Bu boyutlara öğütmede oldukça düşük enerji tüketimli karıştırmalı bilyeli değirmenler kullanılmaya başlanmıştır.

Öğütmenin en önemli nedenlerinden birinin de malzemenin yüzey alanını arttırarak malzemenin reaksiyon yeteneğini arttırmak olduğu bilinmektedir. Seramik ürünlerin elde edilmesinde ergitici olarak kullanılan -75 µm feldispatın bu yeteneği, feldispatın karıştırmalı bilyeli değirmende çok ince öğütülmesi ile daha da arttırılabilir.

Kayacı 2007'de yaptığı bir çalışmada mikrogranit (albit yerine), kil, kaolen ve kuvarsı içeren bir karışımı bilyeli değirmende yaş olarak 75 µm altına öğüterek porselen seramik karo üretmiş ve bu ürünlerin fiziksel özelliklerini saptamıştır. Ayrıca kil, kaolen ve kuvars karışımını yaş olarak geleneksel bilyeli değirmende 75 µm altına, mikrograniti ise tek başına karıştırmalı değirmende 10 µm altına öğüterek reçeteye göre bu iki ürünü harmanlayarak porselen karo üretmiş ve bunların da fiziksel özelliklerini saptamıştır. Çalışmanın sonucunda birinci koşulda üretilen seramiklerin fiziksel

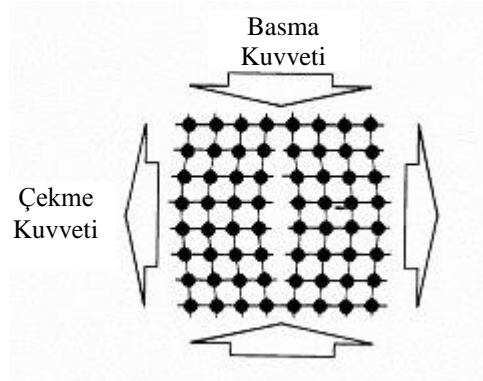
özelliklerine, ikinci koşulda daha düşük sıcaklıkta, daha kısa sürede ve daha az mikrogranit kullanılarak ulaşıldığını ileri sürmüştür (karıştırmalı değirmenden elde edilen mikrogranitin yüzey alanı arttığından).

Bu çalışmanın amacı, ülkemizde bol miktarda bulunan sodyum feldispatın karıştırmalı bilyeli değirmende çok ince boyutlara öğütülebilirliğini araştırmaktır.

2. UFALAMA PRENSİPLERİ

Boyut küçültme (kırılma ve öğütmeyle), mineral, metalürji, seramik endüstrisinde kullanılan önemli bir işlemdir. Endüstride malzemenin serbestleşmesini sağlamak, ortalama parça boyutunu düşürmek, parça gözenekliliğini azaltmak, kolloit içeriğini arttırmak ve parçanın şeklini değiştirmek için oldukça yoğun kullanılır. Ayrıca bazı öğütme işlemleri de etkili dağıtma ve karıştırma sağlar (Reed, 1995).

Birçok mineral atomların üç eksen boyunca düzenli olarak dizildiği kristal malzemelerdir. Atomların biçimi onları bir arada tutan fiziksel ve kimyasal bağların tipi ve boyutuyla belirlenir. Minerallerin kristal kafeslerinde bu atomlar arası bağlar sadece çok küçük mesafelerde etkilidirler ve bir çekme gerilmesiyle kolayca kırılabilmektedirler (Şekil 2.1).

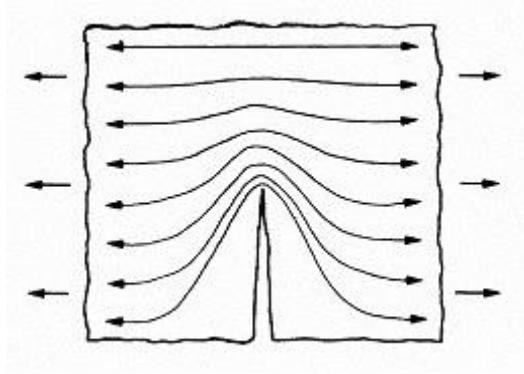


Şekil 2.1. Çekme ve basma kuvvetlerinin oluşturduğu bir kristal kafesin birim deformasyonu (Wills, 1997).

Kayaçlar, farklı tane boyutunda saçılmış değişik minerallerden oluştuklarından düzenli yüklendikleri zaman bile oluşan iç gerilmeler düzenli olarak dağılmazlar. Gerilme dağılımları her bir mineralin mekanik özelliklerine bağlıdır, fakat daha da

önemlisi gerilme birikimine yol açan matristeki kırık ve çatlakların varlığına bağlıdır (Şekil 2.2).

Inglis'e (1913) göre gerilmedeki artışın gerilme yönüne dik çatlak uzunluğunun karekökü ile orantılı olduğunu göstermiştir (Wills, 1997). Bu yüzden çatlak ucunda arttırılan gerilme seviyesinin o noktada kopardığı herhangi bir gerilim seviyesindeki çatlak boyu için kritik bir değeri vardır. Bağın bu biçimde koparılması çatlak uzunluğunu arttıracaktır. Böylece gerilme birikimi artacak ve matris yoluyla çatlağın hızlı bir şekilde yayılmasına neden olacak ve sonunda kırılma gerçekleşecektir.



Şekil 2.2. Çatlak ucundaki gerilim birikmesi.

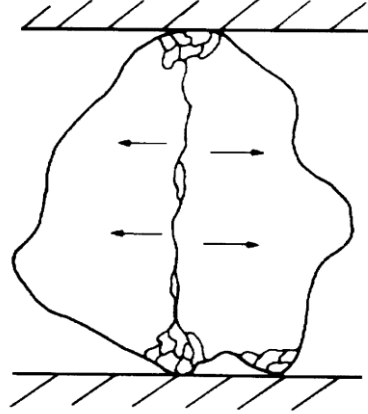
Ufalama teorilerinin malzemenin kırılman olduğunu farz etmelerine karşılık, aslında kristaller kırılma olmaksızın enerji depolayabilirler ve gerilme ortadan kalktığında bu enerjiyi serbest bırakabilirler. Bu hareket elastik davranış olarak adlandırılmaktadır. Kırılma gerçekleştiğinde depolanan enerjinin bir kısmı yeni üretilmiş yüzeylerdeki atomların potansiyel enerjisi olan serbest yüzey enerjisine dönüşür. Yüzey enerjisindeki bu artıştan dolayı, yeni oluşturulan yüzeyler çoğunlukla kimyasal olarak daha aktiftirler ve daha hızlı oksitlendikleri kadar flotasyon reaktiflerine de daha fazla uyumludurlar (İpek, 2003).

Griffith'e (1921) göre birim deformasyon enerjisinin serbest kalmasıyla açığa çıkan enerjinin, üretilen yeni yüzey enerjisinden büyük olduğunda malzemelerin çatlak yayılması ile zayıfladıklarını göstermiştir (Wills, 1997; Sönmez, 1992). Dayanıklı malzemeler çatlak üretimi olmaksızın plastik akma mekanizmasıyla birim deformasyon enerjilerini boşaltmalarına karşılık, kırılma malzemeler çatlak üretimiyle birim deformasyon enerjilerini azaltırlar. Plastik akma mekanizmasında atomlar veya moleküller birbirlerinin üzerinden kayarlar ve enerji malzemenin şeklinin değiştirilmesinde tüketilir.

Ufalama için gereken enerji su ile düşürülebilir ve katılara absorblanan ilave kimyasallarla daha da düşürülebilir (Hartley,1978). Bu yüzey aktif maddenin çatlağın içersine girebilmesi ve kırılmadan önce çatlak ucundaki bağ gerilmesini düşürebilmesiyle adsorpsiyondaki yüzey enerjisinin azalmasından dolayı olabilir.

Gerçekte malzemeler düzensiz şekillerdedirler ve düzenli olarak yüklenememelerinden dolayı, yükleme kontaklarının küçük alanlarında veya noktasal olarak gerçekleşmektedir. Kırılma esas itibariyle sıkıştırma, darbe ve aşındırma mekanizmalarıyla gerçekleşmektedir ve bu üç tür kırma mekanizması kaya mekaniği ve kuvvet yükleme türüne bağlı olarak birbirinden ayırt edilebilmektedir (İpek, 2003).

Düzensiz şekilli malzemeler sıkıştırma ile kırıldığında çekme yenilmesi sonucu ortaya çıkan iri taneler ve yükleme noktası yakınında sıkışma yenilmesi veya çıkıntılardaki kesme ile ortaya çıkan ince taneler olmak üzere iki farklı tane dizisinde olan ürünler elde edilmektedir (Şekil 2.3). Üretilen ince miktarı yükleme alanının en aza indirilmesiyle azaltılabilir ve bu daima kıvrımlı kırıcı yüzeyi kullanan sıkıştırma kırıcıyla yapılır (Partridge, 1978).



Şekil 2.3. Kırılma ile parçalanma (İpek, 2003).

Darbe ile kırılmada hızlı yüklemekten dolayı tane, daha yüksek bir ortalama gerilime maruz kalır. Tanenin basit bir şekilde kırılması için gerekenden daha çok enerji soğurumunun ve de çekme yenilmesi ile çabucak ayrı taneler olarak kırılmaya eğimli olmasının bir sonucu olarak elde edilen tane irilikleri ve şekilleri birbirine benzemektedir.

Aşındırma (kesme yenilmesi) çok ince malzemeler üretir ve genellikle istenmemektedir. Uygulamada aşınma tanelerin birbirlerine sürtünmelerinden dolayı olmaktadır (taneler arası ufalama). Bu eğer kırıcıya malzeme çok fazla beslenirse parçaların birbirleriyle temasının artmasından dolayı gerçekleşmektedir. Böylece sıkıştırma gerilmesinin derecesi artacak ve sonuçta kesme yenilmesi açığa çıkacaktır (İpek, 2003).

3. DEĞİRMENLER

Öğütme, ufalama sürecinin en son aşamasıdır. Bu işlemde cevher taneleri şok ve aşındırma işlemleri sonucu, kuru veya yaş olarak ufalanmaktadır. Öğütme işlemi yatay eksenleri etrafında dönen ve değirmen adı verilen aygıtlarla yürütülür. Aygıt içerisinde öğütme ortamı denilen ve serbestçe hareket edebilen öğütme elemanları bulunur. Öğütme ortamı veya elemanları çelik çubuklar, bilyeler, sert kayalar bazı durumlarda cevherin kendisidir. Öğütme işleminde, boyutları 5 ile 50 mm arasında değişen cevher taneleri boyutları 10 ile 300 mikron arasında değişen tanelere indirgenirler.

Bütün cevherler için ekonomik bir tane iriliği söz konusudur. Ekonomik tane iriliği pek çok etkene bağlıdır. Bunların en önemlileri; değerli mineral tanelerinin cevher içindeki dağılımı ve öğütmeden sonra cevherin tabii tutulacağı işlemlerdir. Gereğinden az öğütme iri tane üretimine, buna bağlı olarak serbestleşmenin yeteri kadar sağlanamamasına neden olur. Gereğinden çok öğütme ise çok ince tane oluşturarak etkin bir zenginleşmeyi önlediği gibi gereksiz yere enerji tüketimine yol açar (Çayırılı, 2008).

Doğru bir serbestleşme derecesi öğütmenin ana amacı olmasına rağmen serbestleşmiş cevherin, geniş yüzey alanları elde etmek için daha da öğütülmesi gerekir. Bu durum, eğer cevher hidrometalurjik bir işleme sokulacaksa çok önemlidir.

Bir değirmendeki öğütme, öğütme ortamının miktarına, hareket şekline ve öğütücü elemanlar arasındaki boşluklara bağlıdır.

Bazı özel durumlar dışında (termik santral kömürünün öğütülmesi, alçı ve çimentonun öğütülmesi), öğütme genellikle yaş olarak yapılan işlemdir. Laboratuvar deneyleri dışında, öğütme sürekli işlemdir. Cevher ön görülen bir hızla, silodan değirmene beslenir, belli bir kalma süresinden sonra, taşımayla değirmeni terk eder. Öğütülen cevherin tane iriliği, öğütme ortamının tipi, değirmen dönme hızı, cevherin doğası ve kullanılan öğütme devresinin tipi tarafından kontrol edilebilir.

Değirmenlerin iç yüzeyleri astarlarla kaplıdır. Astarların iki görevi vardır. Birincisi, değirmen gövdesinin aşınma sonucu zarar görmesini önlemek, ikincisi ise öğütme elemanlarının değirmen içinde belirli bir yüksekliğe çıkmasını sağlamaktır. Değirmenin dönmesi sırasında öğütme elemanları ile astar arasındaki sürtünmeden dolayı, öğütme elemanları dinamik dengeye ulaşıncaya kadar yukarı kaldırılırlar. Öğütme elemanlarının bir kısmı, bu hareket sırasında geriye doğru kayarken bir kısmı biraz daha yükseldikten sonra düşmeye maruz kalırlar. Düşük dönme hızlarında veya astarların düz olması durumunda, öğütme elemanları yuvarlanarak aşağı kayarlar. Bu harekete kaskedon denir ve sonucunda aşınma ile öğütme gerçekleşir. Kaskedon hareketi, oldukça ince tane oluşumuna ve değirmen astarlarının daha fazla aşınmasına neden olur. Yüksek hızlarda veya değirmen astarlarının düz olmaması durumunda öğütücü elemanlar, değirmen içinde daha yükseğe çıkarılırlar ve buradan düşerler. Düşükleri yerlerde bulunan cevher parçalarını, şok ve aşındırma yoluyla öğütürler. Bu hareket ise katarkt adını alır ve daha iri ürün sağlandığı daha iri ürün sağlandığı gibi daha az astar aşınmasına neden olur.

Dönme hızı çok yüksek olursa, öğütme elemanları düşmeden değirmen astarına yapışık olarak kalırlar. Bu durumda öğütme söz konusu olmayacaktır. Öğütme elemanlarının değirmen iç yüzeylerine yapışarak, değirmenle birlikte dönmelerine neden olan değirmen hızı kritik hız (N_c) olarak tanımlanır (Özdağ, 1992).

$$N_c = 42,3 / (D - d)^{1/2} \quad (3.1)$$

D = değirmen iç çapı (m)

d = öğütme elemanlarının çapı (m)

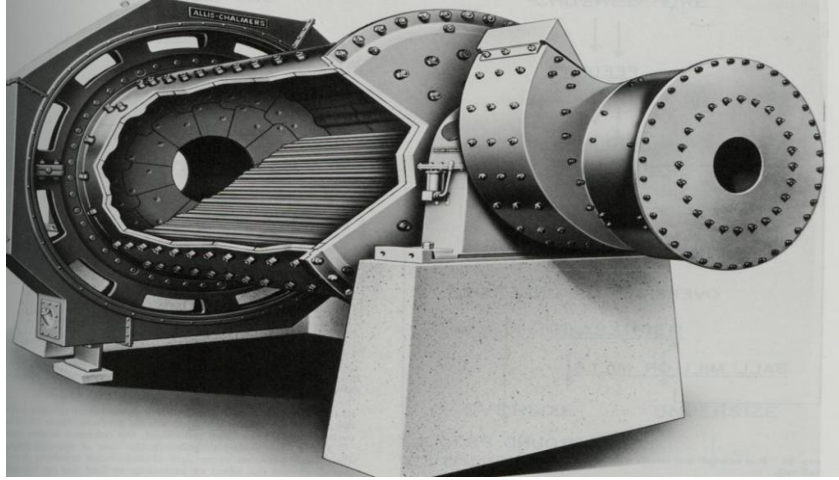
Eşitlik değirmen astarı ile öğütme elemanı arasında kayma olmadığını varsaymaktadır. Değirmenler, uygulamada kritik hızların % 50–90 arasındaki hızlarda çalıştırılırlar (Özdağ, 1992).

3.1. Çubuklu Değirmenler

Bu tür değirmenler, ince kırma aygıtları olarak ele alınabilecekleri gibi kaba öğütme araçları olarak ta değerlendirilebilirler. Çubuklu değirmenlerin en belirgin özelliği, uzunluklarının çaplarının 1,5 ile 2,5 katı olmasıdır. Uzunluk/çap oranının 2,5'den fazla olmaması gerekir. Aksi durumda değirmen iç çapından 10 ile 15 cm daha kısa olan çubukların çok uzun olmaları gerekmektedir. Çok uzun çubuklar, eğilme ve bükülme eğilimindedirler. Bu özellik değirmen uzunluğunu belirleyen bir unsurdur.

Çubuklu değirmenlere beslenen cevherin tane boyutunun, değirmende birikimlerin önlenmesi için 2,5 mm'den daha ince olması istenir. Beslenen cevherin nem oranının ya % 0 ya da %50'den daha yüksek olması ideal bir durumdur. Bununla beraber, çubuklu değirmen öğütmesi, genellikle yaş olarak yapılır. Kuru malzeme, düşük bir akıcılığa sahiptir ve çubukların bükülmesine ve kırılmasına yol açan çubuk şişmesine neden olurlar. Kok kömürü ve çimento klinkeri gibi özel durumlarda kuru öğütme kullanılmaktadır.

Çubuklu değirmenlerin iç yüzeyleri, aşınmaya dayanıklı astarlarla kaplanır. Astar malzemesi, Ni-Cr-Fe alaşımı, yüksek karbonlu çelik, manganez çeliği, lastik ve seramik olabilir. Çubuklar astarlarla çizgisel temasta bulunacağından, astarlara gelen yük, düzenli olarak dağılır. Bu nedenle çubuklu değirmenlerdeki astar tasarımının çok sağlam olması gerekmeyebilir. Şekil 3.1'de çubuklu değirmen kesiti gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Çubuklu değirmen (Yıldız, 2007).

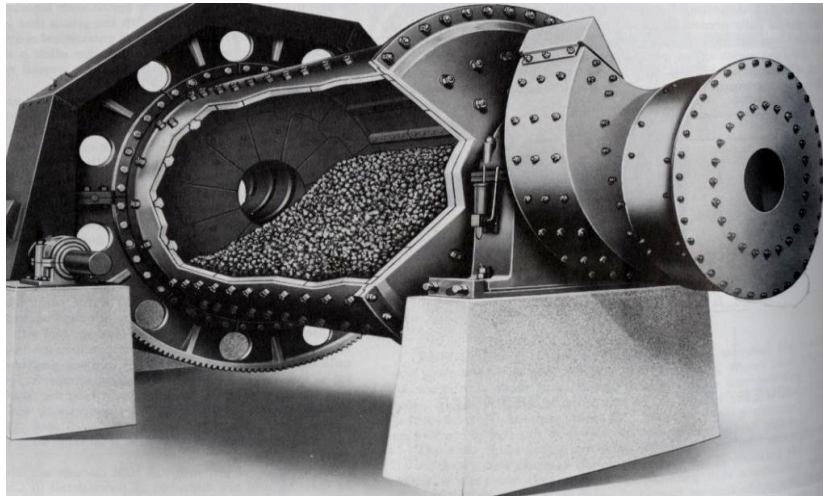
3.2. Bilyeli Değirmenler

Bilyeli değirmenler, ufalama sürecinin en son aşamasında kullanılan öğütme aygıtlarıdır. Birim ağırlık için bilye yüzey alanı çubuklardan daha fazla olduğu için bilyeli değirmen ince öğütme için daha uygundur. Bunların uzunluk/çap oranı 1–1,5 ile sınırlıdır. Bilyeli değirmenlerde öğütme işlemi, yaş veya kuru olarak yapılabilir. Kuru öğütme de, cevherin nem içeriğinin %1'den az olması istenir. Aksi durumlarda, nemli cevher hem bilyelere hem de astarlara sıvanır. İnce öğütme işlemi için en uygun besleme boyutunu 1 mm olduğu bulunmuştur. Bazen çok daha iri beslemede yapabilir. 3 cm çaplı bilyeler içeren bir değirmende beslenen cevher tane boyutu yaklaşık olarak 1mm'dir.

Bilyeler, dökme çelik, dökme demir veya dövme çelikten üretilebilirler. Genel olarak, Bilyeler küresel şekillidir. Bununla beraber, silindirik, konik ve diğer düzensiz şekilli olanlar da kullanılmaktadır. Bilyeler, normal olarak, değirmen hacminin %40 ile %50'si kadar bir yer kaplar. Bununla beraber ve biraz daha fazla olduğu durumlarda vardır. Değirmene verilmesi gereken enerji şarj miktarı ile artar. %50 şarj miktarında enerji maksimum olur. Optimum değirmen hızı da şarj hacmi ile artar. Bilyeli değirmenlerin öğütme verimini etkileyen birkaç faktör vardır. Beslenen cevherin pül

yoğunluğu mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Çok sulu pülp, bilyelerin birbiriyle temasının artmasına ve dolayısıyla ortam aşınmasına ve verimin düşmesine neden olur. Cevhere bağlı olarak, ağırlık olarak %65–80 katı pülp yoğunluğu tavsiye edilmektedir. İnce öğütmede daha düşük pülp yoğunlukları istenir. Pülpün viskozitesi ince tane miktarı arttıkça artar.

Bilyeli değirmenler genellikle çubuklu değirmenlerden daha yüksek hızlarda çalıştırılır. Bilyelerin katarakt etkisi ve dolayısı ile parça üzerinde darbe artırılır. Santrifüj etkisi olmadan mümkün olan en yüksek hızlar kullanılır. Bu hız kritik hızın %70-80'i kadardır (İpekoğlu, 1994). Çubuklu değirmen astarlarının aksine, bilye ile astar arasında noktasal değme söz konusu olduğundan, bilyeli değirmen astarlarının daha sağlam olmaları istenir. Şekil 3.2'de bilyeli değirmen kesiti gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Bilyeli değirmen (Yıldız, 2007).

3.3. Çakıl Değirmenler

Çakıl değirmenlerde, cevherin daha ince öğütülebilmesi için öğütücü olarak, otojen değirmenlerden alınmış kritik boyuttaki cevherin yanı sıra, çakmak taşı veya

seramik çakıl da kullanılmaktadır. Öğütücü akıl, kırma veya otojen öğütme devrelerinden cevher elenerek sağlanır. Bazen kullanılan çakıl, doğadan cevher olmayan kayalardan da elde edilebilir. Otojen ve yarı otojen değirmenler birinci, çakıl değirmenler, ikinci kademe öğütmede kullanılırlar (Yıldız, 1999).

Tek kompartımanlı ve öğütücü ortam olarak elekten geçirilmiş sert cevher parçaları kullanan değirmene çakıllı değirmen adı verilmektedir. Birim hacim için çakıl ağırlığı bilye ağırlığının %35-50'si kadar olduğunda ve güç sarfiyatı öğütücü ortam ağırlığı ile direk bağlantılı olduğundan, çakıllı değirmen kapasitesi ve güç sarfiyatı, bilyeliye göre düşüktür (İpekoğlu, 1994). Özellikle, cam kumu, seramik hammaddeleri gibi öğütülecek malzemelerde herhangi bir metal kirlenmesi istenmiyorsa, çakıl değirmenler kullanılabilir (Özdağ, 1992).

3.4. Otojen Değirmenler

Otojen ğütme, tüvenan veya iri kırılmış cevherin, herhangi bir öğütücü ortam kullanmaksızın, bir değirmende öğütülmesi işlemini ifade eder. Yarı-Otojen ğütme, tüvenan veya ince kırılmış cevherin, bir değirmende, metal bilyelerin da kullanılmasıyla öğütülmesi demektir. Parça ğütmesi, iri cevher parçalarının aynı cevherin ince tanelerini, bir değirmende, ğütmesi işlemini belirtmek için kullanılır. Bu işlemin olabilmesi için öğütülecek cevherin ince kırma işleminden geçirilmesi gerekmektedir (İpekoğlu, 1994). Şekil 3.3'de otojen değirmen gösterilmiştir.

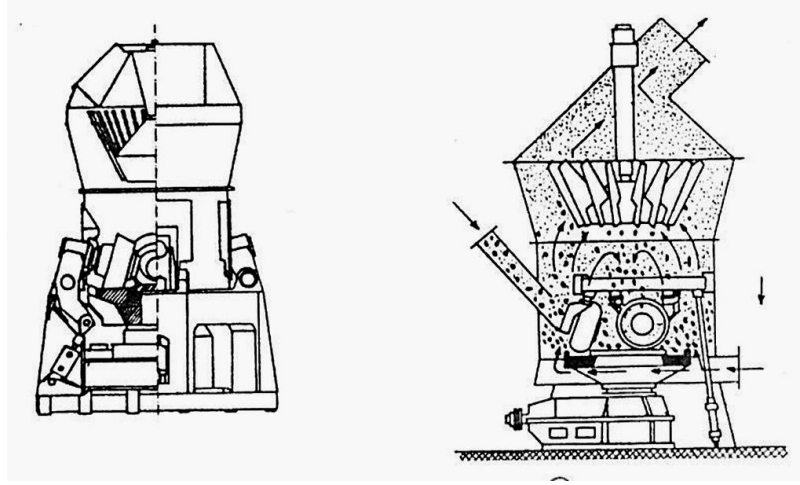


Şekil 3.3. Otojen değirmen (Yıldız, 2007).

3.5. Valsli Değirmenler

Valsli değirmenler, kömür, fosfat, kireçtaşı, bentonit, çimento gibi malzemelerin öğütülmesinde kullanılırlar. Bu değirmenlerde öğütücü rulolar sabit veya hareketli bir tabla üzerinde dönmekte, tabla ve rulo arasında kalan malzeme, sıkışma ile öğütülmektedir. Rulolar üzerine öğütülecek malzemeye, istenilen boyuta ve kapasiteye göre belirli bir basınç uygulanır. Öğütülen malzeme, ortamdaki fanların oluşturduğu hava akımı ile alınır. Son yıllarda 600t/h kapasiteli 4000 kW motor gücünde valsli değirmenler üretilmiştir.

Düşük enerji maliyeti, az yer kaplamaları, düşük ses seviyesi, malzemenin değirmende kalış zamanının az olması, öğütme ve sınıflandırmanın aynı makine içerisinde yapılabilmesi, toz emisyonunun olmaması başlıca avantajlarıdır. Bunların yanında yalnız kuru öğütme yapması, aşınma probleminin olması ve çok ince ürün eldesinin (10 mikron altı) zor olması dezavantajlarıdır. Şekil 3.4’de valsli değirmenler gösterilmiştir (Yıldız, 2007).

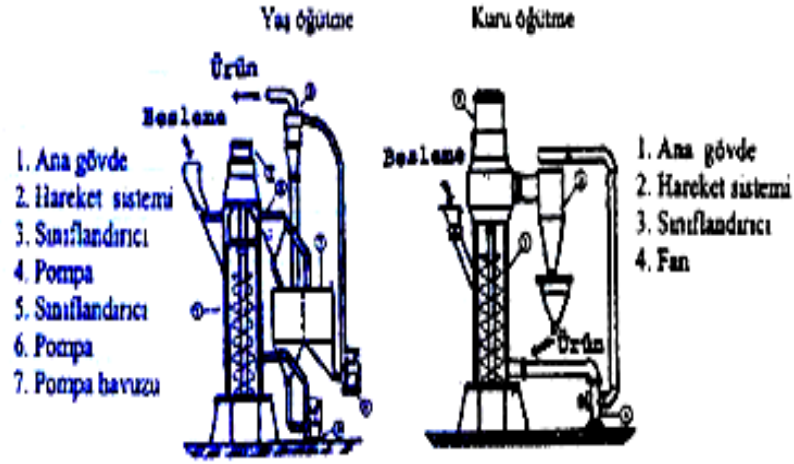


Şekil 3.4. Valsli değirmen (Yıldız, 2007).

3.6. Kule Değirmenleri

Aktarılan ortam değirmenlerinde öğütmede enerji masrafının çoğu ısı ve ses olarak kaybedildiği için bu değirmenler geliştirilmiştir. Kule değirmenler yaş ve kuru olarak özellikle çok ince öğütme de yaygın kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Çelik bilye, seramik veya doğal çakıllar ve diğer öğütücü malzemeler, çift sarımlı spiral ile karıştırılarak öğütme işlemi yapmaktadırlar. Karıştırma spirali, bilyeleri yukarı doğru kaldırırken daha çok aşındırma etkisi ve spirallerin üst kısımlarından düşen bilyeler ise basınç etkisi ile öğütme sağlarlar. Bir araştırmaya göre kule değirmenleri %35 - %40 oranında bilyeli değirmenlere göre daha az enerji harcarlar. -6,5 mm'lik malzemelerin öğütülmesinde kullanılır ve 5 mikronun altına çok kolay indirilebilmektedir. Kapasiteleri 50 t/h'den 100 t/h'e kadar çıkabilen değirmenler üretilebilmektedir.

Sonuç olarak kule değirmenler çok düşük çalışma maliyeti, az yer kaplama ve daha az gürültü ve titreşim gibi özellikleri ile tercih edilen bir değirmen olup, çok ince boyutlarda öğütme için önemli bir aygıt olmaktadır. Bunun yanında ise aşınma ve kapasite gibi dezavantajları da vardır. Şekil 3.5'de kule değirmenler gösterilmiştir (Yıldız, 2007).



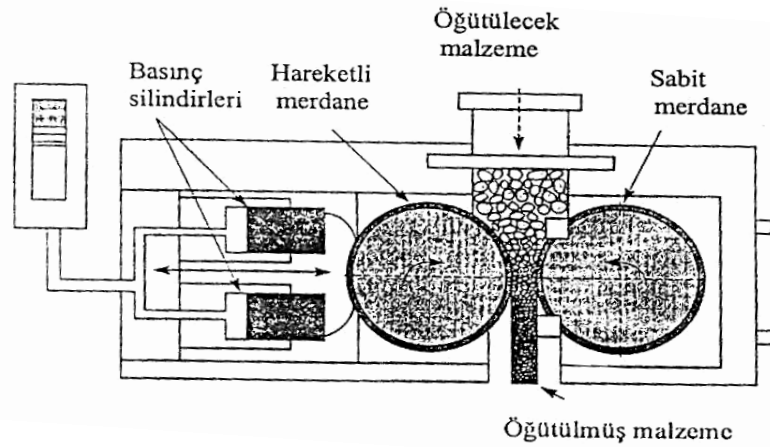
Şekil 3.5. Kule değirmenleri (Yıldız, 2007).

3.7. Yüksek Basınçlı Öğütme Merdaneleri

Yaygın olarak, çimento sektöründe klinker öğütülmesinde kullanılan yüksek basınçlı öğütme merdaneleri, kireçtaşı, dolomit, kurşun, çinko, altın, demir, elmas, bakır, krom gibi cevherlerin, kırma ve öğütme devrelerinde de kullanılmaktadır. Yüksek basınçlı öğütme sistemi, birbirine doğru dönen, iki adet geniş çaplı, dar yüzeyli merdanelerden oluşmuştur. Yüksek basınçlı öğütme merdanelerinin çalışma prensibi, hareket halindeki cevhere biri sabit diğeri hareketli yeterli büyüklükte bir basıncın uygulanmasına dayanır. Yüksek basınçlı öğütme merdaneleri, şekil olarak merdaneli kırıcılara benzemesine karşın uygulaması oldukça farklıdır. Basınçlı öğütme merdanelerinde, kırma bölgesinde uygulanan basınçtan dolayı işletme yoğunluğu, malzemenin özgül ağırlığının %85'i kadar yüksek olabilir. Bu nedenle kapasiteleri oldukça yüksektir.

Kullanılan merdaneler, aşınmaya dayanıklı Ni-hard yada yüksek Cr'lu aşınma plakaları ile kaplanmıştır. Yüksek basınçlı öğütme merdaneleri kullanılarak klasik boyut

küçültme teknolojilerine göre enerji tüketiminde %15-50 oranlarında tasarruf sağlanmıştır. Yüksek basınçlı öğütme merdanelerin uygulama alanları genellikle gevrek yapılı, yumuşak ve orta sertlikte az aşındırıcı malzemelerin öğütülmesi ile sınırlı kalmaktadır. Şekil 3.6'da yüksek basınçlı öğütme merdanesi gösterilmiştir (Yıldız, 2007).

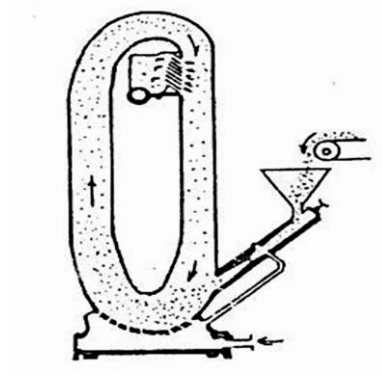


Şekil 3.6. Yüksek basınçlı öğütme merdanesi (Yıldız, 2007).

3.8. Akışkan Enerjili Değirmenler

Bu değirmenler, -325 mikron boyutundaki malzemeyi 1-4 mikron boyutuna kadar öğütebilir. Genellikle yumuşak ve az aşındırıcı malzemeler için kullanılan bu değirmenler, son yıllarda silis, feldspat, cam, zirkon, kömür gibi aşındırıcı malzemelerin öğütülmesinde de kullanılmaktadır.

Değirmende akışkan olarak genellikle 100-150 psi basınçlı hava, ya da 400°C üzerine ısıtılmış basınçlı buhar kullanılır. Bu değirmenlerde, basınçlı akışkan, nozullardan kırma bölgesine büyük bir hızla girer. Aynı bölgeye beslenen öğütülecek malzeme bu akışkanın hızının etkisiyle birbirine çarparak ya da sürtünerek ufalanır. Sistemdeki malzeme akışkanın hareketiyle taşınarak, istenen boyuttaki malzemeler sınıflandırıcıdan geçerek ortamdaki alınır. İri malzeme tekrar öğütme bölgesine geri döner. Şekil 3.7'de akışkan enerjili değirmen gösterilmiştir (Yıldız, 2007).



Şekil 3.7. Akışkan enerjili değirmen (Yıldız, 2007).

3.9. Titreşimli Değirmenler

Titreşimli Değirmenler dar bir boyut sağlayabilmeleri, düşük enerji tüketimleri düşük ürün kirliliği vs. gibi nedenlerden dolayı birçok endüstride minerallerin ince ve de süper ince boyutlara öğütülmesini sağlamak için kullanılmakta olan önemli bir değirmen türüdür. Bu değirmenlerde değirmenin kabı, bir boru olmaktadır ve hacminin %65–80'i öğütücü ortam ile doldurulur. Bilyeli değirmenlere göre daha düşük bir kapasiteye de sahiptir. Bu kapasite yaklaşık 18 ton/h civarındadır.

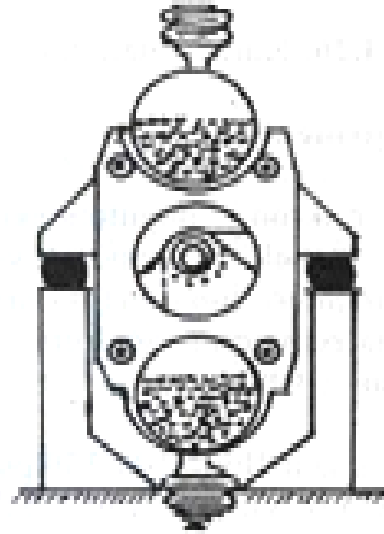
Öğütücü ortam bilyeler, çubuklar ya da silindirler olabilir. Öğütücü ortamın şekli ise ya boru şeklinde silindirik ya da halka şeklindedir. Sert ve aşındırıcı malzemelerin öğütülmesinde oldukça uygundur. Salınım çapı, alıkonma süresi vs. gibi parametrelerin ayarlanmasıyla beslemeleri de işleyebilmektedir. Bunlar kireçtaşı, alçıtaşı, boksit, dolomit, alumina, korundum, silimanit, manyezit, kromit, florit gibi malzemelerdir. Öğütme hem yaş hem de kuru olarak gerçekleştirilebilmektedir. Fakat yaş öğütme burada nadiren uygulanmaktadır.

Ayrıca titreşimli değirmenlerin bazı özel uygulamaları vardır.

- Kurutulmuş kömürün öğütülmesi
- Hidrometalurjide liç reaktörü olarak kullanımı

Besleme boyutu 30 mm'dır. Öğütülen ürünün %90'ının tane inceliği -5 μm kadar olabilmektedir.

Titreşimli değirmenlerde titreşim genlik ve frekansı, değirmen dolma oranı, öğütücü ortamın şekli, boyutu ve yoğunluğu, gibi parametreler öğütmeyi doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen parametrelerdir. Genellikle düşey bir düzlemde titreştirilecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.8'da titreşimli değirmen gösterilmiştir (Yıldız, 2007).



Şekil 3.8. Titreşimli değirmen (Yıldız, 2007).

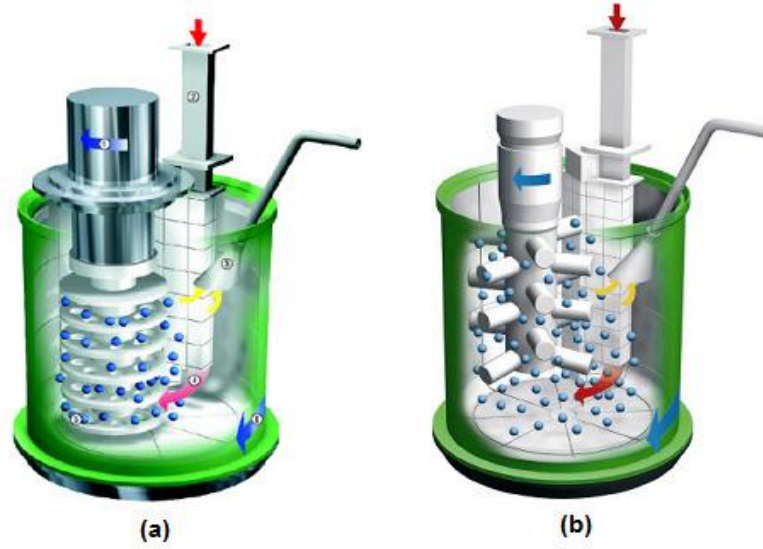
3.10. Karıştırılmalı Değirmenler

Temel tasarımı 1920'li yıllara uzanan karıştırılmalı değirmenler ilk kez 1960'lı yıllarda kaolinin öğütülmesi için kullanılmıştır. Karıştırılmalı değirmenler; aşırı ısınmayı önlemek için etrafında bir su ceketini bulunan 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 a).

İlk üretilenleri, düşük hızlarda çalışmakta (<6 m/sn) ve aşındırıcı (atritör) olarak adlandırılmaktadırlar. İlerleyen yıllarda değirmen gövdesinin boy/çap oranının artmasına paralel olarak yüksek karıştırma hızına sahip değirmenler de geliştirilmiştir (Tüzün vd., 1995). Karıştırılmalı değirmenler karıştırıcı tipine göre diskli, pinli ve halkalı olmak üzere üç şekilde adlandırılırlar. Bu değirmenler yatay veya dikey olarak ve yaş, kuru olarak uygulanmaktadırlar (Parry, et al., 2006; Jankovic, 2008). Karıştırılmalı değirmenlerin performansı değirmen boyutu, öğütücü ortam yoğunluğu şekli bileşimi, değirmen aşınması, karıştırma hızı, bilye çapı ve şarj oranı, pülp yoğunluğu veya viskozite gibi pek çok faktöre bağlıdır (Zheng, et al., 1996; Jankovic, 2001; Yue and Klein, 2006).

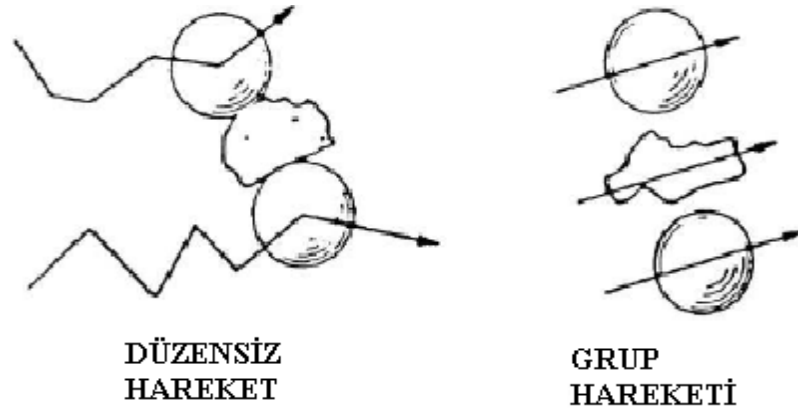
Atritör, çalkalanma etkisine sahip öğütücü ortamdan oluşan bir çeşit değirmendir. Genellikle "karıştırıcılı bilyeli değirmen" olarak bilinirler (Hassibi, et al., 1999; Schilling and Yang, 2000). Atritörlerin en önemli özelliği, sisteme verilen gücün geniş ve ağır olan öğütme tanklarının döndürülmesi veya titreştirilmesi yerine tamamının doğrudan öğütücü ortamın karıştırılmasında kullanılmasıdır (Nassetti, 2003; Vari, 2004). Atritör değirmenler mineral, metalürji, seramik, elektronik, pigment, boya, kimya, biyoteknoloji ve ilaç endüstrilerinde ince tane boyut dağılımı oluşturmada kullanılmaktadır (Zheng, 1997).

Atritör değirmenlerde öğütücü ortamı çalkalamaya yarayan üzerinde kollar ya da diskler bulunan bir shaft içermektedir (Şekil 3.9). Bu shaftın dönmesi sonucu öğütücü ortamın hareketi sağlanır ve öğütme etkisi yaratılır. Atritör değirmenlerde bulunan karıştırıcı kol öğütücü ortamın şiddetli bir şekilde hareket etmesini sağlar. Öğütücü ortam arasında yer alan partiküller öğütücü ortamın harekenden kaynaklanan gerilimlere maruz kalarak hızlı bir şekilde öğünür. Bunun yanı sıra değirmenin çeperi ve öğütücü malzemeler arasında kalan partiküller de öğütücü gerilimlere maruz kalır. Atritör değirmenlerde birim hacimde meydana gelen öğütücü gerilim sayısı diğer değirmenlere oranla daha çok olduğundan, daha az enerji tüketerek daha düşük tane boyutları elde edilebilmektedir (Küçüker, 2009).

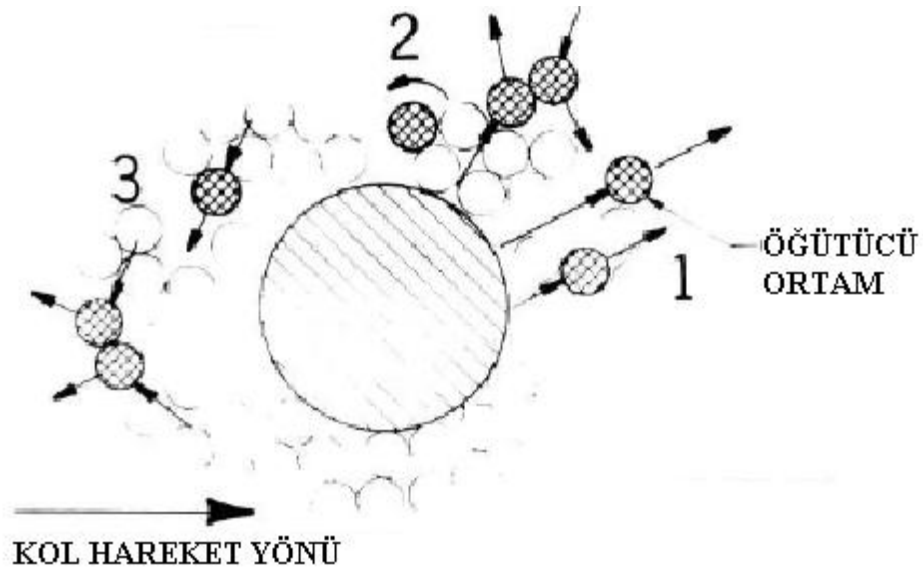


Şekil 3.9. Disk ve kol tipi atritör değirmenlerin şematik gösterimi (a); disk tipi, (b) kol tipi (Gerl and Weiden-hammer, 2006).

Öğütülecek olan malzeme öğütücü ortam ile birlikte sabit ya da hareketli olan tanka doldurulur, daha sonra malzeme ve öğütücü ortam yatay kollara sahip merkezci bir shaft ile çalkalanır. Yatay kollar öğütücü ortamın grup hareketinden ziyade düzensiz hareket etmesini sağlar (Şekil 3.10). Düzensiz hareketler ortamda darbe, dönme ve düşme etkisi yaratır (Şekil 3.11) (Hoppert, 1996; Schilling and Yang, 2000).



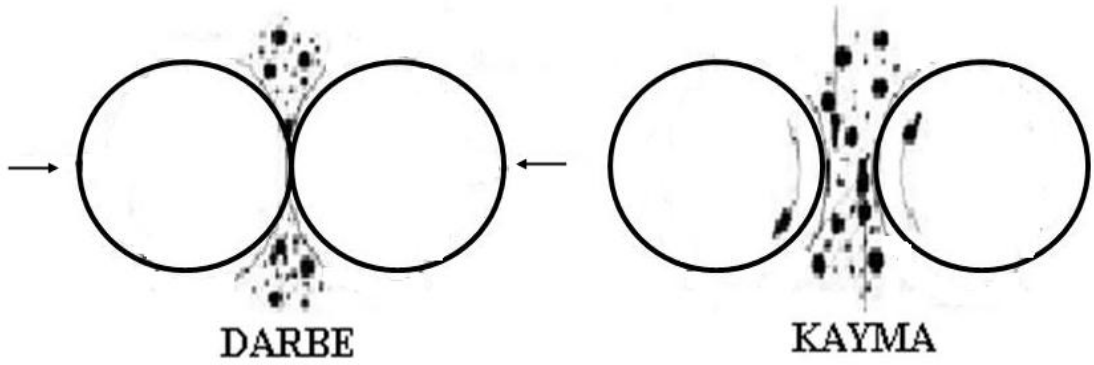
Şekil 3.10. Öğütücü ortam hareketleri (Schilling and Yang, 2000).



Şekil 3.11. Atritör değirmende meydana gelen öğütücü hareketler: 1. Darbe etkisi, 2. Dönme hareketi, 3. Düşme hareketi (Schilling and Yang, 2000).

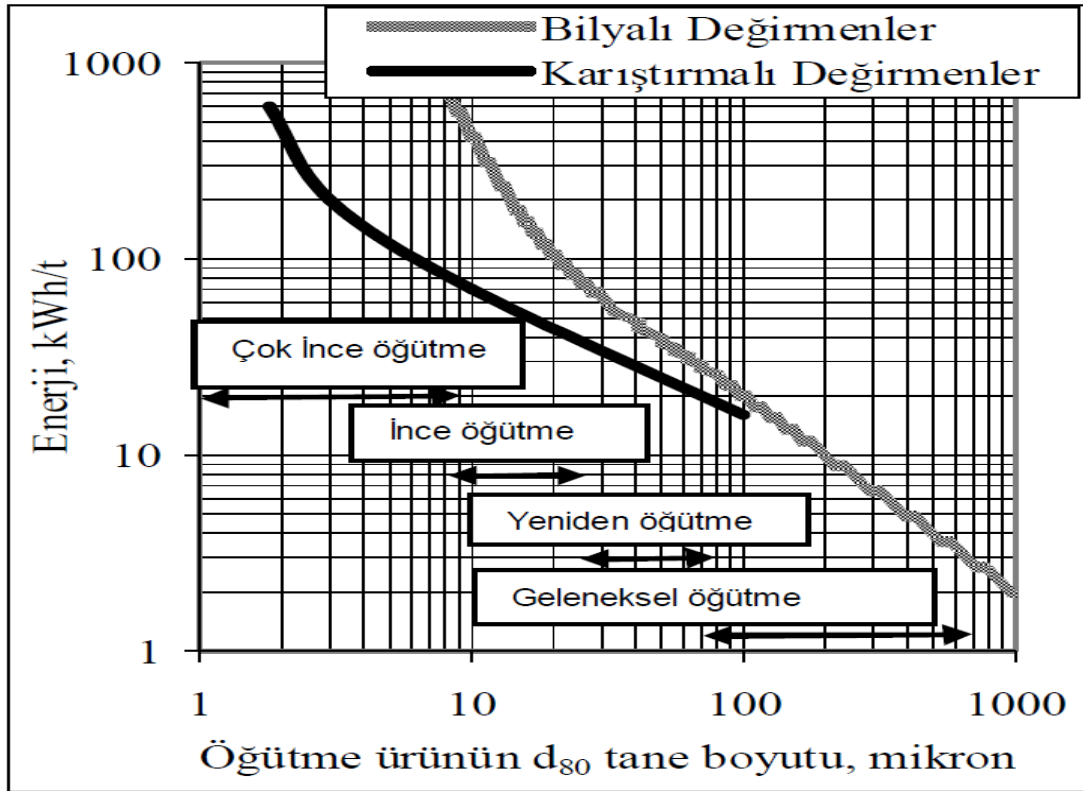
Efektif bir öğütme gerçekleşmesi için darbe ve kayma kuvvetleri mutlaka olmalıdır (Şekil 3.12). Atritör değirmende darbe etkisi öğütücü ortamın malzemeye çarpması sonucu oluşmaktadır. Kayma kuvveti ise bilyelerin düzensiz hareketleri sonucunda farklı yönlerde dönmeleri ile oluşur. Kayma ve darbe kuvvetlerinin

birleşmesi ile efektif bir şekilde boyut küçültme ve dağılımı sağlanır (Lorici and Contoli, 1995; Schilling and Yang, 2000).



Şekil 3.12. Efektif bir öğütme için gerekli darbe ve kayma kuvvetleri (Schilling and Yang, 2000).

Bilyeli değirmenlerde ince öğütme için temel problem, değirmenin düşük hızlarda çalışması ve kritik hızın üzerindeki hızlarda santrifüjün oluşmasından dolayı ince öğütmenin gerçekleşmemesidir. Ayrıca bilyeli değirmenlerde 20 mm den daha büyük bilye kullanıldığı için 20 μ m den daha ince öğütme gerçekleşmemektedir. Ancak karıştırmalı değirmenlerde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle 10 μ m nin altında bile ekonomik öğütmeler yapmak mümkündür (Dikmen ve Ergün, 2004). Şekil. 3.13’de karıştırmalı ve bilyeli değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketiminin değişimi verilmiştir.



Şekil 3.13. Karıştırmalı ve bilyeli değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketiminin değişimi (Jankovic, 2003).

Karıştırmalı değirmenlerin faydaları; hızlı ve verimli ince öğütme sağlar, ürün boyut dağılımı dardır, enerji tüketimi düşüktür (geleneksel bilyeli değirmenlerde öğütmede harcanan enerjinin büyük bir bölümü ortamı ve büyük-ağır gövdeyi döndürmek için kullanılırken, karıştırmalı bilyeli değirmenlerde sadece ortamı karıştırmak için kullanılır.), çalıştırılması kolaydır, sıcaklık kontrolü tamdır, bakım maliyeti düşüktür ve ayrıca az yer kaplar.

Karıştırmalı değirmenlerin sakıncaları; en verimli olarak ince öğütmede kullanılabilmesi (70 mikron altı ve çok daha ince boyutlar), süper ince boyutlar için yağ öğütme gerekmesidir (Szegvari and Yang, 1995; Szegvari and Yang, 1999; Schilling and Yang, 2001; Just and Yang, 1997; Goodson, et al., 1985; Padden and Reed, 1993; DowdleIII,1993).

4. FELDİSPATLAR

Feldispatlar; potasyum, sodyum, kalsiyum, nadiren baryumlu alüminyum silikatlar olup en önemli mineral grubunu oluştururlar. Bu mineraller monoklinik ve triklinik sistemde kristalleşmelerine rağmen tümünün kristal şekilleri, yüzey açıları birbirine benzer ve 90°'lik açı yapan iki iyi gelişmiş dilinimleri vardır. Sertlik derecesi Mohs skalasına göre 6, özgül ağırlıkları 2,55- 2,76 g/cm³'dür.

4.1. Alkali Feldispatlar

Kimyasal yapıları aynı, fakat farklı kristal şekillerine sahip bu grubun mineralleri ortoklas (KAlSi₃O₈), sanidin, mikroklin, anortoz (NaAlSi₃O₈) olup genel formülleri KAlSi₃O₈'dir. Sertlik derecesi Mohs skalasına göre 6, yoğunlukları 2,65 g/cm³'dür.

4.2. Plajioklaslar

Plajioklaslar, Na-Ca feldispat olup, saf albit (NaAlSi₃O₈) ile saf anortit (CaAl₂Si₂O₈) arasında sürekli bir katı eriyik yaparlar. Plajioklas bileşiminde Na ile Ca her oranda yer değiştirirken, bunu izleyerek yapıda meydana gelen elektrik yük fazlalığını yok etmek için Si yerini Al alır. Plajioklaslar xNaAlSi₃O₈ yCaAl₂Si₂O₈ genel formülü ile gösterilirler ve içerikleri anortit oranına göre 6 gruba ayrılırlar.

Çizelge 4.1. Plajoklasların anortit içeriği.

Mineral	% Anortit
Albit	0-10
Oligoklas	10-30
Andezin	30-50
Labrador	50-70
Bitovnit	70-90
Anortit	90-100

Plajoklasların ortalama Sertlik derecesi Mohs skalasına göre 6, yoğunlukları 2.62- 2.72 g/cm³ arasındadır.

4.3. Feldispatların Kullanım Alanları

Feldispatlar, genellikle seramik ve porselen (sofra eşyası, elektroporselen, sağlık gereçleri, karo fayans, karo-seramik), cam (kristal, optik, levha- pencere camı, renkli cam, sofra eşyası) sanayi ile diğer (yumuşak aşındırıcı, sabun, cila, sır, emaye vd.) alanlarında hammadde olarak kullanılır.

Feldispatlar cam imalinde, hammadde olarak kullanıldığında erimiş cam kütlesi içinde Al alkalilerle bir araya gelerek, erimiş cama kolay işlenebilirlik özelliği verir. İşlenmiş cama kimyasal duraylılık kazandırır, saydamlığının korunmasına yardım eder.

Seramik bünyelerde, K-Feldispatlar aranan feldispat grubudur. Özellikle eritici özellikler nedeniyle kullanılırlar. K-Feldispatın yumuşama ve ergime sıcaklık aralığı Na- Feldispat ve diğerlerine oranla daha geniş olup, ergime öncesi viskoz davranış gösterdiğinden tercih edilirler. Seramik ürünlerin reçetelerinde kullanılan feldispat, sinterleme noktasını düşürür.

4.4. Feldispatların Tane Boyutu

Feldispatların ince öğütülmesi (ortalama 0,074 mm), pişme renklerinin beyaz olması gerekir. Düşük erime sıcaklığına sahip plajioloklaslar daha çok sırlarda kullanılırlar. Cam endüstrisinde kullanılan feldispatların eritici özelliğinden yararlanılır. Burada kullanılacak feldispatların tane boyutu $-0,84$ mm ve demir içeriğinin de çok düşük (maksimum % 0,1) olması gerekir (Anonim).

5. ÖNCE DEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Wang ve Forsberg (2000)'de yaptıkları çalışmada dolomit örneklerinin yaş Drais karıştırılmalı değirmende ve kuru Sala karıştırılmalı değirmende öğütülmesi sonucu ürünlerin yüzey alanı-enerji ilişkileri incelenmiştir. Ayrıca öğütme deneylerinde öğütme ortamı, tipi ve değirmen hızı denenmiştir. Karıştırılmalı bilyeli değirmenlerde yapılan öğütme deneyleri sonucunda oluşan boyut dağılımları Rosin-Rammler-Bennett modeline uygun olduğu ortaya konmuştur.

Jankovic (2003) de yaptığı çalışmada çinko cevherini kule, Sam, Netzh ve pin değirmenlerinde öğütmüştür. Öğütme deneylerinde öğütme ortamı boyutu, yoğunluğu ve şekli, değirmen hızı ve pülöp özellikleri denenmiştir. Değirmenlerden çıkan ürünlerin stres yoğunlukları ölçülmüş farklı öğütücü ortamı boyutu, yoğunluğu, pülöp yoğunluğu ve değirmen hızı gibi parametrelerin öğütme verimi üzerine güçlü bir etkisi olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca ürün boyut dağılımları (P_{80}) enerji ilişkisi de ortaya konmuştur.

Pilevneli (2003) tarafından yapılan doktora tez çalışmasında; klinkerin (separatör geri dönüş malzemesi) iki tip bilyeli ve iki tip karıştırılmalı değirmende öğütülmesi sonucu ürün özellikleri ile spesifik enerji ilişkisi ortaya konulmuştur. Deney sonuçlarına göre her iki karıştırılmalı değirmende de, bilyeli değirmene oranla daha dar boyut grubunda malzeme üretildiği ortaya çıkmıştır. Enerji sarfiyatının da daha az olduğu ortaya koyulmuştur. 3-38 μm arası malzeme miktarında %20 oranında bilyeli değirmenden fazla malzeme üretilmiştir. Sonuç olarak separatör geri dönüş malzemesi öğütmede karıştırılmalı değirmenin bilyeli değirmenden daha verimli olacağı ortaya konulmuştur.

Hacifazlıoğlu vd. (2007 b) tarafından yapılan çalışmada ortalama tane boyutu 1 mm olan Armutçuk kömürünün laboratuvar ölçekli dikey pinli bir karıştırılmalı değirmende kuru olarak öğütülmesi araştırmıştır. Öğütücü ortam olarak 4 farklı çapta (6,5, 5,5, 4,5, 3,5 mm) granüle çelik bilye kullanılmış ve değişik sürelerde (2,5, 5, 10,

20, 40, 60, 120, 240 saniye) öğütmeler yapmıştır. Çapları 6,5, 5,5, 4,5 ve 3,5 mm olan bilyelerle 60 saniye öğütme sonucunda elde edilen ürünlerin P₅₀ boyutları sırasıyla 19, 18, 16 ve 11 µm bulmuştur.

Hacıfazlıoğlu vd. (2007 a) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise; besleme boyutu 510 µm olan Albit (Zonguldak) dikey karıştırmalı değirmende kuru olarak öğütülmesi araştırılmıştır. Öğütücü ortam olarak 2 farklı çapta(6,5, 5,5 mm) çelik bilye kullanılmış ve değişik karıştırma hızlarında (600, 1000, 1400 rpm) öğütmeler yapılmıştır. Sonuç olarak değişik öğütme sürelerinin (1, 2, 3, 4, 5 dak.) ürün inceliğine etkisi incelenmiştir. Öğütme deneyleri sonucunda ürünlerin P₈₀ boyutları incelendiğinde; 6,5 ve 2,5 mm çaplı bilyelerin 1400 rpm de 2 dakika öğütülmeleri sonucunda sırasıyla 26 ve 20 µm boyutlarına ulaşılmıştır. 4 dakikadan sonra ki öğütme deneylerinde öğütme veriminin azaldığı gözlenmiştir.

Samanlı vd. (2008) yaptıkları çalışmada; Çatalağzı Termik Santralindeki değirmen beslemesinden alınan örneklerin öğütülebilirliği bilyeli ve karıştırmalı bilyeli değirmende incelenmiştir. İlk aşamada -425+300 µm'luk malzeme her iki değirmende öğütülmüş, karıştırmalı değirmenin spesifik kırma oranı bilyeli değirmene göre 5,5 kat fazla olduğu gözlenmiştir. İkinci aşamada ise -3350 µm luk malzeme her iki değirmende öğütülerek ürün incelikleri ve harcadıkları enerjiler karşılaştırılmıştır. Karıştırmalı bilyeli değirmende 0,25, 0,50, 1 ve 4 dakika öğütme sonucunda sırasıyla P₈₀ boyutları 190, 102, 78 ve 28 µm bulunmuştur. Bilyeli değirmende ise 1, 4, 8, 12 ve 24 dakika öğütme sonucunda sırasıyla P₈₀ boyutları 1802, 1130, 324, 167 ve 81 µm tespit edilmiştir. Karıştırmalı bilyeli değirmende bu öğütme deneyleri sonucunda P₈₀=78 µm ye 1 dakikada 10,53 kWs/t enerji harcayarak ulaşırken, bilyeli değirmen P₈₀=81 µm boyutuna 24 dakikada 72,73 kws/t enerji harcayarak ulaştığı ortaya çıkmıştır.

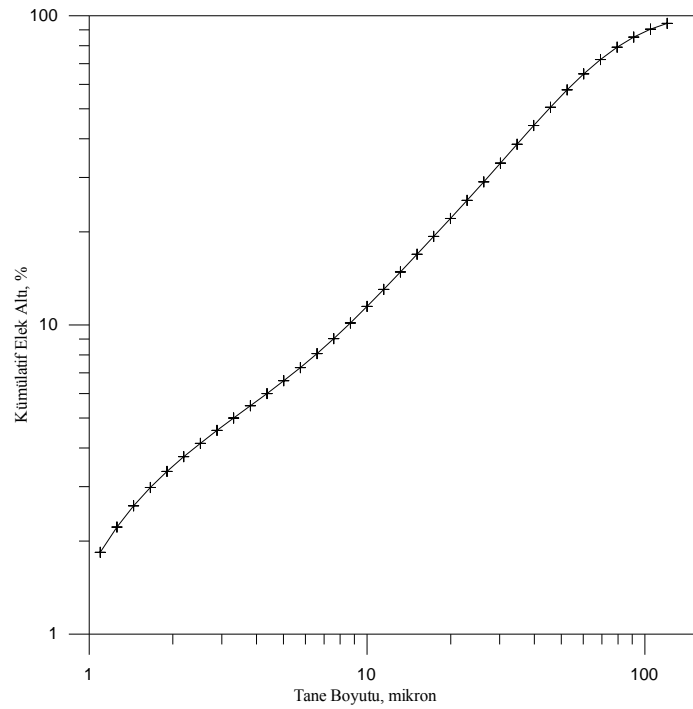
Celep ve Alp (2010) da yaptıkları çalışmada refrakter özellik gösterdiği tespit edilen Akoluk altın-gümüş cevherinin ince öğütülmesinde etkili olan öğütme parametrelerin araştırmışlardır. Öğütme çalışmaları laboratuvar tip dikey pinli karıştırmalı değirmen ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı boyutlarda çelik bilye ve kuvars ile yapılan öğütme deneylerinde farklı karıştırma hızlarında öğütme süresine

göre tane boyu küçülmesi ve enerji tüketiminin değişimi incelenmiştir. Ayrıca enerji etkinliğini değerlendirmek amacıyla karıştırmalı değirmendeki stres şiddeti ve sayısı ile tane boyutu ve tüketilen enerji miktarı arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışma sonuçları öğütme süresi ile enerji tüketiminin doğru orantılı olarak arttığı, tane boyutunun ise üssel olarak küçüldüğü ortaya çıkmıştır. Aynı sürelerde öğütme için karıştırma hızının azalması ve bilye boyutunun küçülmesi daha ince boyutlu ürün elde edilmesine sebep olurken, şarj oranının düşürülmesi daha iri boyutlu ürün alınmasına sebep olmuştur. Yaklaşık 5 μm (d_{90}) ürün tane boyutu; optimum olarak belirlenen bilye boyutu (3 mm) ve karıştırma hızında (750 dev/dak) 5 dak öğütme sonrasında elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda Akoluk cevherinin istenilen ince tane boyutlarına dikey pinli karıştırmalı değirmenler ile verimli bir şekilde öğütülebileceği öngörülmüştür.

6. MALZEME VE YÖNTEM

6.1. Örnek

Deneylerde Kaltun Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'inden sağlanan $-120 \mu\text{m}$ boyutundaki (S.EX 10 kodlu) sodyum feldispat örneği kullanılmıştır. Laboratuvarda piknometre ile yapılan yoğunluk tayinlerinden yoğunluğu $2,63 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Boyut analizi Malvern tane boyut ölçüm cihazı ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel olarak kullanılan örneğin boyut analiz sonuçları.

Şekil 6.1 incelendiğinde örneğin F_{80} değerinin (örneğin %80'sinin geçtiği boyut) $80,96 \mu\text{m}$, F_{50} değerinin $45,151 \mu\text{m}$ ve F_{10} değerinin $8,562 \mu\text{m}$ olduğu görülmektedir.

6.2. Örneğin Kimyasal ve Mineralojik Analizleri

6.2.1. Örneğin kimyasal analizi

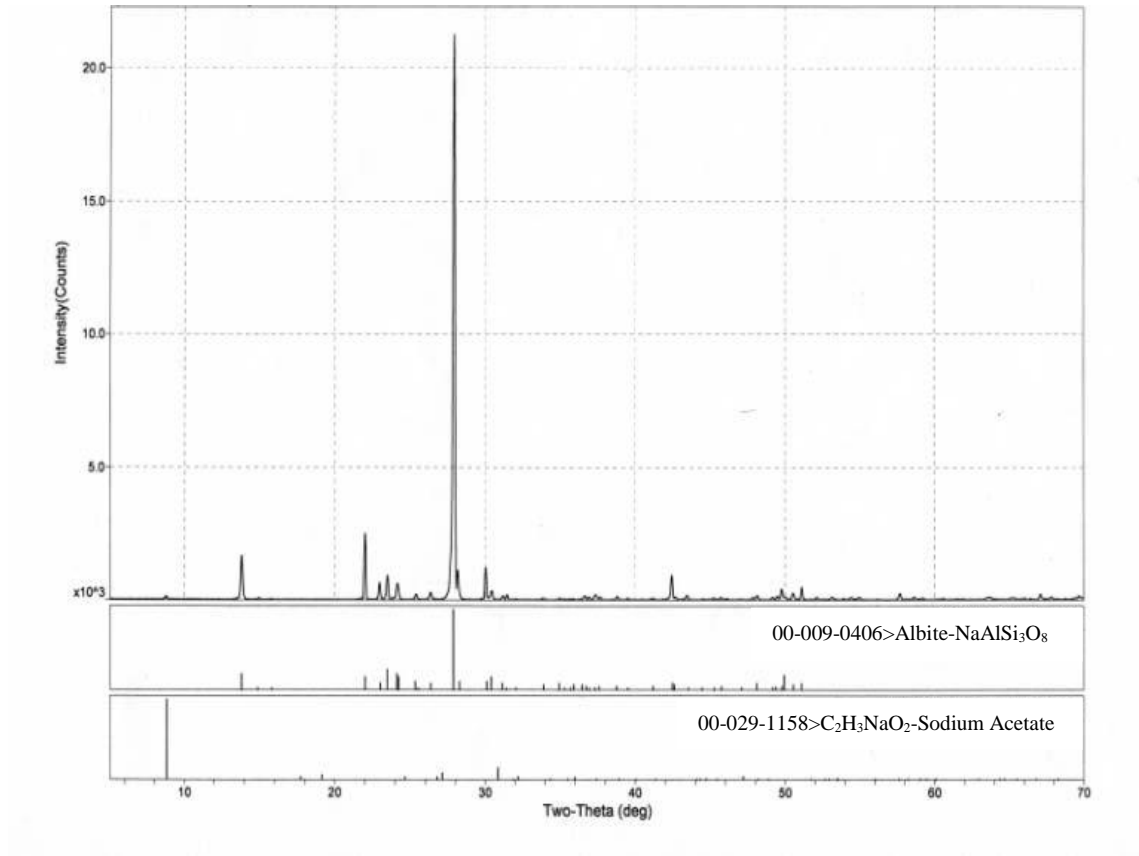
Örneğin Anadolu Üniversitesi'nde XRF cihazı ile yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.1'de verilmiştir. Çizelge 6.1 incelendiğinde, sodyum feldispatın %10,48 Na₂O ve %20,21 Al₂O₃ içerdiği görülmektedir. Saf sodyum feldispatın %11,19 Na₂O ve %20,35 Al₂O₃ içerdiği göz önüne alındığında deneylerde kullanılan örneğin saf'a yakın olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 6.1. Sodyum feldispat örneğinin kimyasal analiz sonuçları.

Örnek	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	A.Z. (%)
Na Feldispat	66,14	20,21	0,08	0,44	1,29	0,01	10,48	0,14	0,17	0,04

6.2.2. Örneğin mineralojik analizi

Anadolu Üniversitesi'nde XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları Şekil 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.2 incelendiğinde örneğin albit mineralinden oluştuğu görülmektedir. Analiz sonuçlarında başka minerallerin gözükmemesi yine örneğin saf'a yakın olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 6.2. Sodyum feldispatın XRD sonuçları.

6.3. Karıştırmalı Bilyeli Değirmen

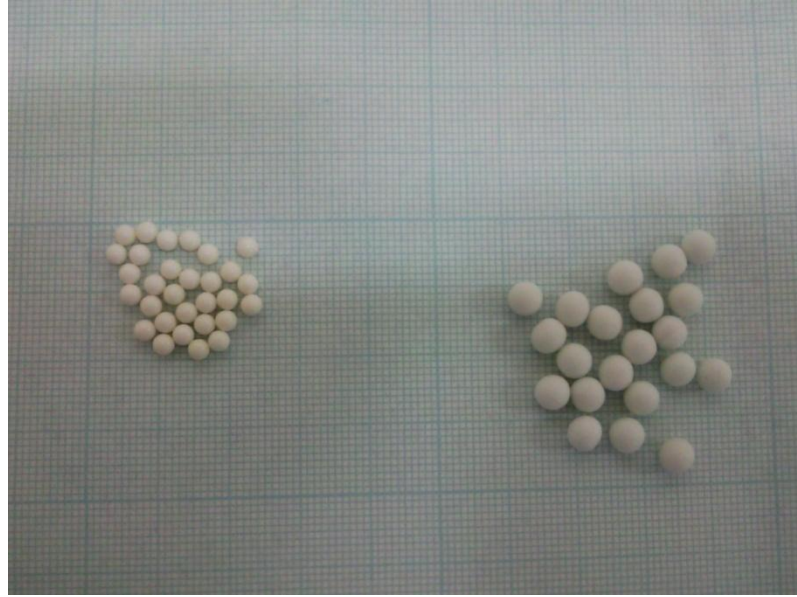
Deneylerde Union Process 01-HD araştırma tipi karıştırmalı bilyeli değirmen (atritör değirmen) kullanılmıştır. Değirmende öğütücü ortamı karıştırmak için dikey bir shaft (plastik kaplı) ve bu shaft üzerine monte edilmiş 4 adet karıştırma kolu (ZrO₂) vardır. Shaftın dönme hızı 100-600 devir/dakika arasında değiştirilebilmektedir. Deneylerde kullanılan değirmenin ve parçalarının fotoğrafları Şekil 6.3 - 6.5'de verilmiştir



Şekil 6.3. Karıştırmalı bilyeli değirmen.



Şekil 6.4. Değirmenin tankı, şaftı ve karıştırma kolları.



Şekil 6.5. Değirmenin 3 ve 5 mm çaplı bilyeleri.

Deneyler 8,06 cm çapında ve 12,15 cm yüksekliğinde (620 ml hacminde) alumina bir tank gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 3 ve 5 mm çaplarında alumina bilyeler ve üzerinde 57,15 mm uzunluğunda 4 adet karıştırma kolu bulunan bir şaft kullanılmıştır. Şaftın tank tabanından uzaklığı ise 7,35 mm'dir.

Deneylerde aşağıdaki yöntem kullanılmıştır:

- Şaft tank içine yerleştirildikten sonra önce öğütme ortamı (tercihen üst karıştırma koluna kadar) tanka doldurulmuş ve değirmen 200-300 dev/dak'da çalıştırılmıştır. Daha sonra öğütülecek kuru malzeme değirmene eklenerek değirmen kapağı kapatılmış ve devir istenilen değere getirilmiştir.

Değirmenin diğer özellikleri:

- Deney esnasında istenildiği anda değirmenin kapağı açılarak deneye müdahale edilebilmektedir.

- Tankın etrafında bulunan su ceketini sayesinde sıcaklık kontrolü sağlanabilmektedir.
- Bu değirmen yaş öğütme için daha uygun olmasına rağmen, kuru öğütme de yapılabilmektedir. Kuru öğütmede değirmene beslenecek malzeme boyutu 300 μm altı veya daha ince olmalıdır.
- Öğütme çarpma ve makaslama kuvvetlerinin etkisiyle gerçekleşmektedir.
- Karıştırma hızı arttıkça daha kısa sürede öğütme gerçekleşir. Fakat düşük katı konsantrasyonlu ve düşük viskoziteli süspansiyonlarda çok yüksek karıştırma hızı istenmez. Bu tip süspansiyonlarda yüksek karıştırma hızı bir taraftan bilye ve tank aşınmalarına neden olurken, bir taraftan da öğütülen malzemenin kirlenmesine neden olur.
- Tercih edilen şaft hızı en fazla 600 dev/dak'dır. Konsantre ve viskoz süspansiyonlarda hız artırılabilir.
- Değirmen bilgisayar yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Tork, karıştırma hızı ve tüketilen güç gibi veriler zamana bağlı olarak bilgisayara kaydedilebilmektedir.

6.4. Tüketilen Enerji Miktarının Hesaplanması

- Değirmenin şaftı değirmen tankı boş iken istenilen sürede ve istenilen dev/dakika'da döndürülmüş ve tüketilen güç (kW) sürekli olarak bilgisayara aktarılmıştır. Kaydedilen değerlerin ortalaması alınmıştır.
- Aynı işlem aynı aynı koşullarda bu kez tank bilye ve örnek ile yüklü iken yapılmıştır. Yine kaydedilen güç değerlerinin ortalaması alınmıştır.
- Değirmen yüklü iken tüketilen güçten, değirmen yüksüz iken tüketilen güç çıkartılarak öğütmede tüketilen net güç hesaplanmıştır.
- Net güç ile süre (saat cinsinden) çarpılarak tüketilen enerji kW's olarak hesaplanmıştır.
- Deneylerde kullanılan örnek miktarı için tüketilen bu enerji, 1 ton malzeme için tüketilecek enerjiye çevrilmiştir.

6.5. Değirmende Boşluk Doldurma Oranının Hesabı

Boşluk doldurma oranının hesabı bilye miktarı sabit tutularak (700 g) aşağıdaki eşitliklerden yararlanılarak yapılmıştır.

$$\%fc = \frac{\text{Malzeme Miktarı/Malzemenin Yoğunluğu}}{\text{Değirmenin Hacmi}} \times \frac{1.0}{0.6} \quad (6.1)$$

$$\%J = \frac{\text{Bilye Miktarı/Bilyenin Yoğunluğu}}{\text{Değirmenin Hacmi}} \times \frac{1.0}{0.6} \quad (6.2)$$

$$U = \frac{fc}{0.4 \times J} \quad (6.3)$$

J = Bilye yükü

fc = Malzeme yükü

U = Boşluk doldurma oranı

Bilye yükünün sabit tutulup malzeme yükünün ürün tane boyutu üzerine etkisinin incelendiği deneylerde hesaplanan boşluk doldurma oranları Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Deneylerde kullanılan boşluk doldurma oranları.

Değirmen	İç çap	8,06 cm				
	İç uzunluk	12,15 cm				
	Hacim	620 cm ³				
Bilye	Yoğunluk	3,9 g/cm ³				
	Bilye yükü (%J)	48,24				
Malzeme	Yoğunluk	2,63 g/cm ³				
	Malzeme yükü (% fc)	13,51	15,33	17,37	19,30	21,23
	Boşluk doldurma oranı (%U)	70	80	90	100	110

6.6. Değirmende Bilye Yükünün Hesabı

Bilye yükünün hesabı malzeme miktarı sabit tutularak (150 g) eşitlik 6.3'den yararlanılarak yapılmıştır. Malzeme yükünün sabit tutulup bilye yükünün ürün tane boyutu üzerine etkisinin incelendiği deneylerde hesaplanan bilye yükleri Çizelge 6.3'de verilmiştir. Bilye yükünün değişmesi ile boşluk doldurma oranları da değişmiştir.

Çizelge 6.3. Deneylerde kullanılan bilye yükleri.

Değirmen	İç çap	8,06cm		
	İç uzunluk	12,15 cm		
	Hacim	620 cm ³		
Bilye	Yoğunluk	3,9 g/cm ³		
	Bilye yükü (%J)	44,80	48,24	51,69
Malzeme	Yoğunluk	2,63g/cm ³		
	Malzeme yükü (%fc)	13,51		
	Boşluk doldurma oranı (%U)	85	80	74

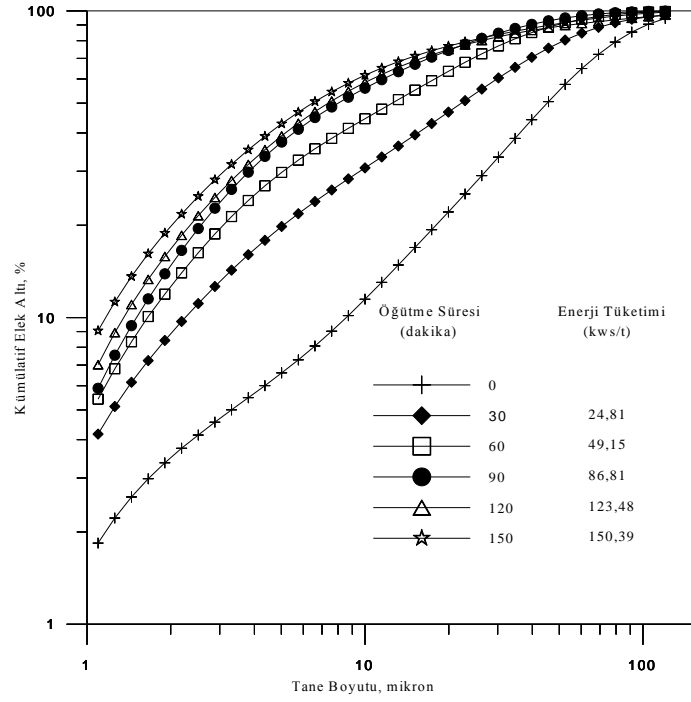
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

7.1. Öğütme Süresinin Ürün Tane Boyutu ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi

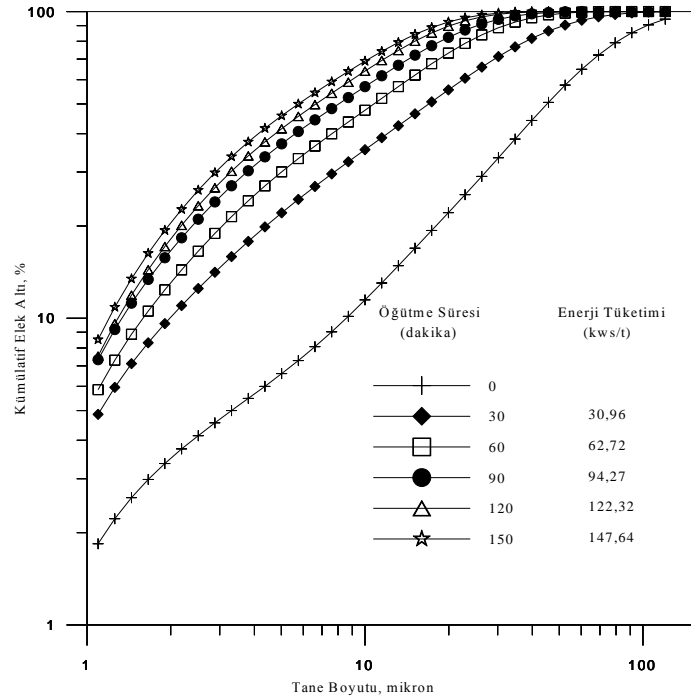
Öğütme süresi arttıkça değirmenden elde edilen ürünün tane boyutunun azaldığı ve enerji tüketiminin arttığı bilinmektedir. Öğütme süresinin ürün tane boyutu ve enerji tüketimine etkisini görmek amacıyla 300 dev/dak'da 3 ve 5 mm çaplı bilyeler ve bunların %50 karışımı ile bu grup deneyler yapılmıştır. Deney koşulları ve bulgular Çizelge 7.1'de ve Şekil 7.1-7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.1. Öğütme süresinin etkisi deney koşulları ve bulgular.

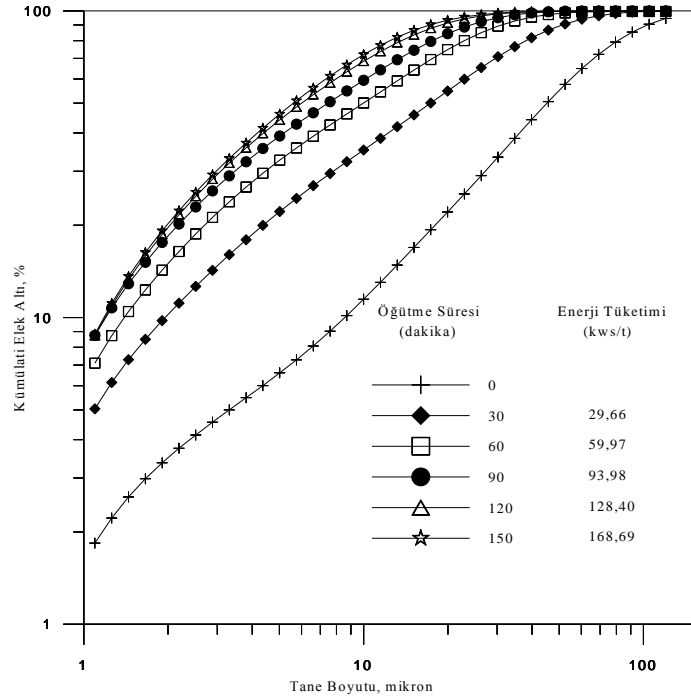
Örnek miktarı (g)		150			
Karıştırma hızı (dev/dak)		300			
Bilye miktarı (g)		700			
Besleme	F ₈₀ (µm)	80,96			
	F ₅₀ (µm)	45,151			
Bilye çapı (mm)		3	5	5-3	
Öğütme Süresi (dak)	30	Tüketilen enerji (kWs/ton)	24,81	30,96	29,66
		P ₈₀ (µm)	51,93	34,49	38,00
		P ₅₀ (µm)	22,20	16,97	17,34
	60	Tüketilen enerji (kWs/ton)	49,15	62,72	59,97
		P ₈₀ (µm)	33,44	23,66	22,90
		P ₅₀ (µm)	12,52	10,77	9,97
	90	Tüketilen enerji (kWs/ton)	86,81	94,27	93,98
		P ₈₀ (µm)	24,91	18,19	17,62
		P ₅₀ (µm)	7,99	7,84	7,45
	120	Tüketilen enerji (kWs/ton)	123,48	122,32	128,40
		P ₈₀ (µm)	24,81	14,93	13,65
		P ₅₀ (µm)	7,36	6,52	6,00
150	Tüketilen enerji (kWs/ton)	150,39	147,64	168,69	
	P ₈₀ (µm)	23,96	13,23	11,54	
	P ₅₀ (µm)	6,46	5,63	5,60	



Şekil 7.1. 3 mm bilye kullanıldığında öğütme süresinin ürün tane boyutu üzerine etkisi.



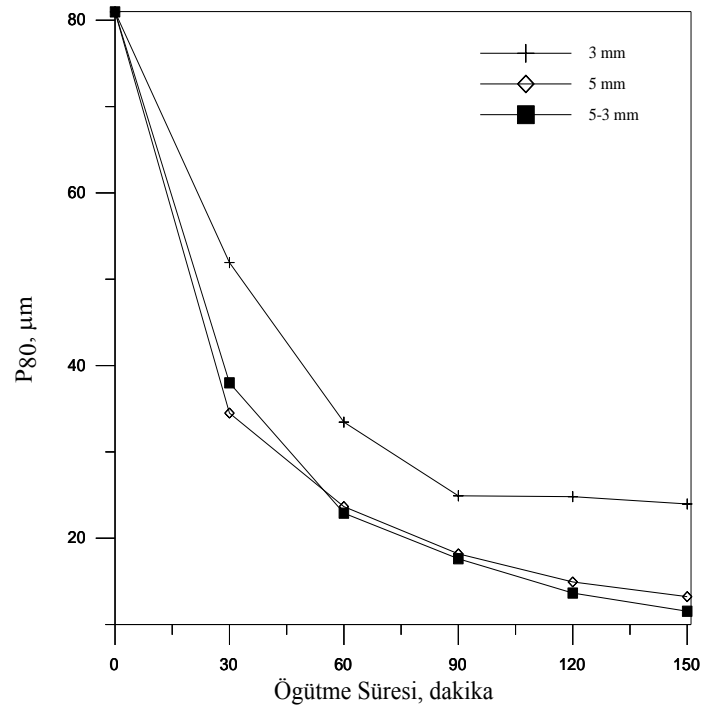
Şekil 7.2. 5 mm bilye kullanıldığında öğütme süresinin ürün tane boyutu üzerine etkisi.



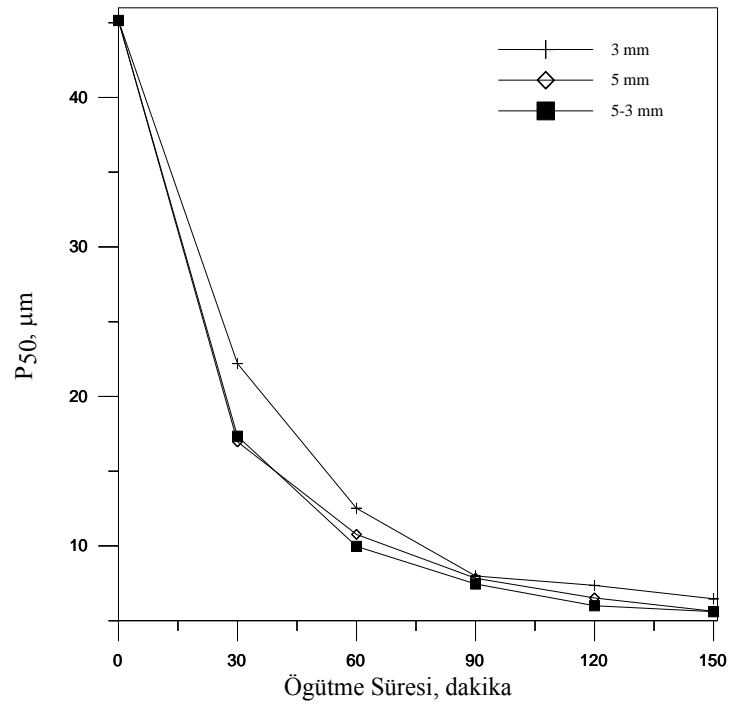
Şekil 7.3. 5-3 mm bilye kullanıldığında öğütme süresinin ürün tane boyutu üzerine etkisi.

Şekil 7.1-7.3 incelendiğinde kullanılan tüm bilyeler için öğütme süresi arttıkça ürün tane boyutunun azaldığı görülmektedir. 60 dakikanın üzerindeki öğütme sürelerinde öğünmenin yavaşladığı görülmektedir. Bunun nedenlerinden birisi ürün inceldikçe bilyelerin ve astarın ince malzemeyle kaplanarak öğütmenin yavaşlaması (yastıklama etkisi) olabilir. Bir diğer neden de ince tanelerin elastik davranıştan plastik davranışa geçmesi olarak açıklanabilir (Hacıfazlıoğlu, 2007a).

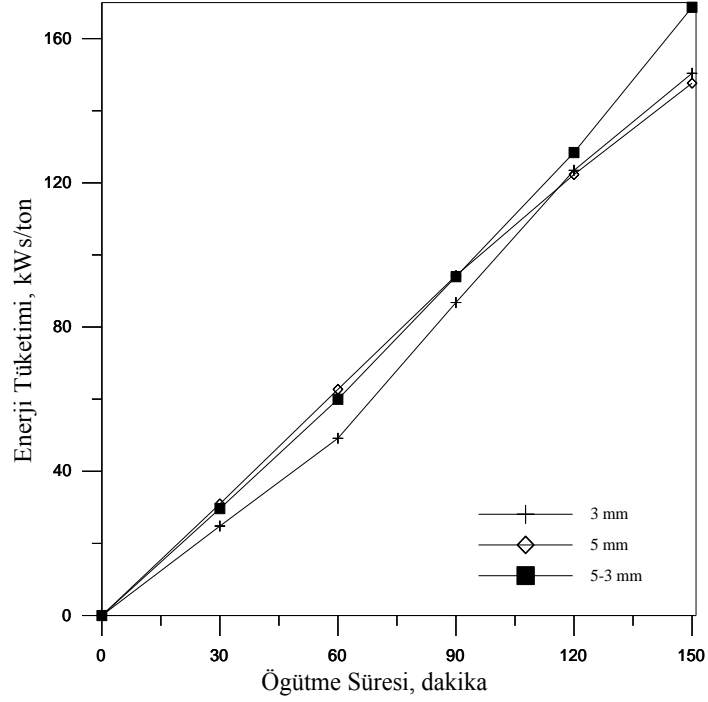
Deney sonuçları süre - P_{80} ve P_{50} 'ye göre verildiğinde ise Şekil 7.4-7.5'de gösterilen sonuçlar elde edilmektedir.



Şekil 7.4. Öğütme süresinin P_{80} boyutuna etkisi.



Şekil 7.5. Öğütme süresinin P_{50} boyutuna etkisi.



Şekil 7.6. Öğütme süresinin enerji tüketimine etkisi.

Şekil 7.4 incelendiğinde, öğütme süresi arttıkça P_{80} boyutlarının kullanılan tüm bilyeler için azaldığı görülmektedir. 5 mm ile 5-3 mm bilye benzer P_{80} sonuçları vermektedir.

Şekil 7.5'de ise kullanılan tüm bilyeler için P_{50} boyutlarının 90 dakikadan sonra benzer sonuçları verdiği görülmektedir. Bunun nedeninin 3 mm çaplı bilyenin belli bir boyutun altındaki malzemeyi daha etkin öğüttüğüdür. Ortam boyutu beslemedeki en iri taneyi kırabilecek kadar yeterince büyük olmalıdır. Belli bir tane boyutundan küçük bilye kullanıldığında beslenen malzemedeki iri taneleri öğütülememektedir. Bilye boyutu ile tane boyutu arasındaki optimum oranın 7:1 ile 20:1 arasında olması gerekmektedir (Gao at. all, 2006; Yue and Klein, 2006).

Şekil 7.6 incelendiğinde öğütme süresi arttıkça, beklendiği gibi, kullanılan tüm bilyeler için de enerji tüketiminin arttığı görülmektedir.

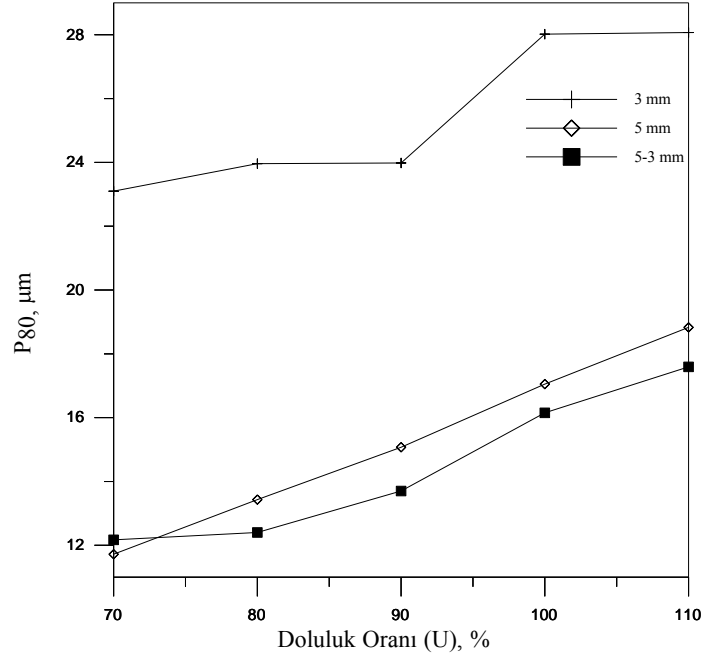
Yapılan süre deneyleri sonucunda uzun öğütme süresinin enerji tüketimini arttıracığı ve kapasiteyi azaltacağı için süre deneyleri 150 dakikada sonlandırılıp diğer parametrelerin etkisi bu öğütme süresinde incelenmiştir.

7.2. Malzeme Doluluk Oranının Ürün Tane Boyutu ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi

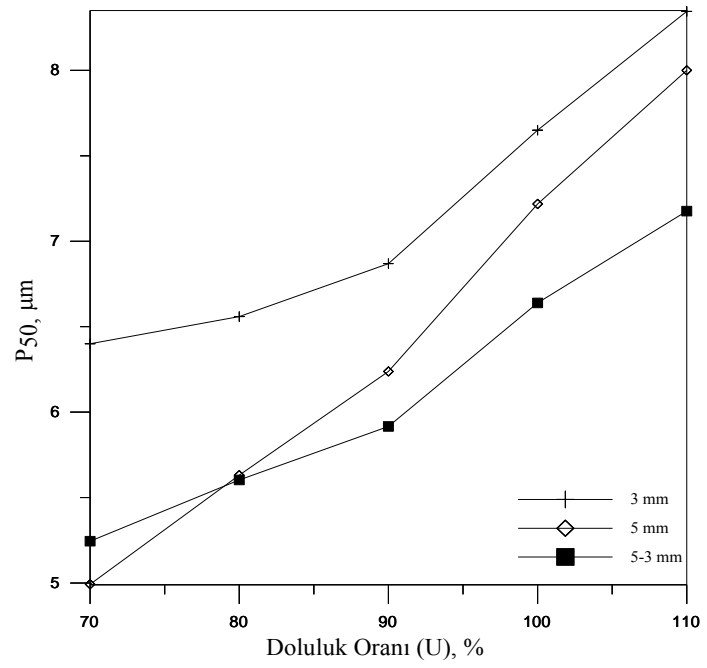
Öğütmede bilye ve astar aşınmasının önemli olduğu bilinmektedir. Değirmende örnek miktarı az olduğunda bilyeler birbirini, astarı ve pervaneyi aşındırır. Fazla olduğunda ise öğütme verimi düşer. Optimum doluluk oranını bulabilmek amacıyla bu grup deneyler yapılmıştır. Deney koşulları ve bulgular Çizelge 7.2’de ve Şekil 7.7-7.9’da verilmiştir.

Çizelge 7.2. Malzeme doluluk oranının etkisi deney koşulları ve bulgular.

Öğütme Süresi (dak)		150			
Karıştırma hızı (dev/dak)		300			
Bilye miktarı (g)		700			
Besleme	F ₈₀ (μm)	80,96			
	F ₅₀ (μm)	45,151			
Bilye çapı (mm)		3	5	5-3	
Örnek miktarı (g)	132,2 (%U=70)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	164,65	173,27	182,87
		P ₈₀ (μm)	23,10	11,72	12,17
		P ₅₀ (μm)	6,40	4,99	5,25
	150 (%U=80)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	150,39	147,64	168,69
		P ₈₀ (μm)	23,96	13,43	12,40
		P ₅₀ (μm)	6,56	5,63	5,60
	169,9 (%U=90)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	125,18	130,41	146,06
		P ₈₀ (μm)	23,98	15,07	13,70
		P ₅₀ (μm)	6,87	6,24	5,92
	188,8 (%U=100)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	101,96	113,85	124,48
		P ₈₀ (μm)	28,02	17,05	16,15
		P ₅₀ (μm)	7,65	7,22	6,64
	207,7 (%U=110)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	88,97	107,46	120,68
		P ₈₀ (μm)	28,07	18,83	17,59
		P ₅₀ (μm)	8,35	8,00	7,18

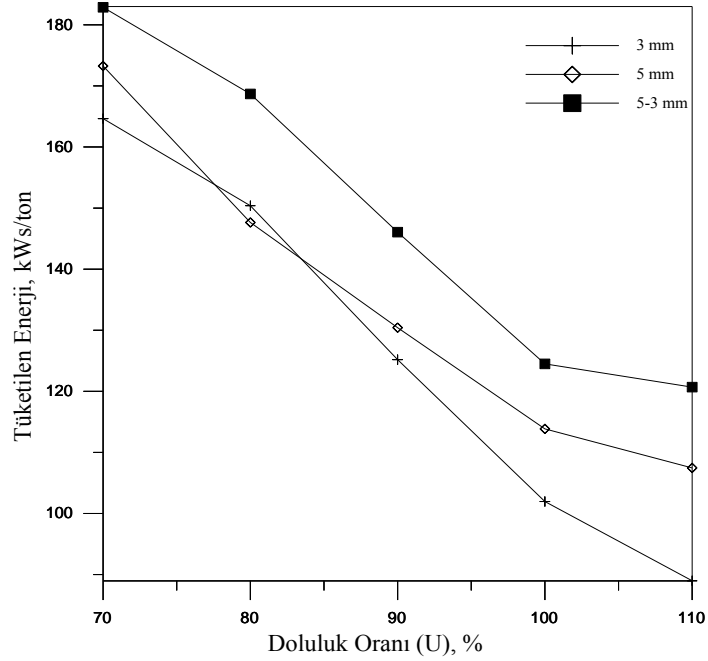


Şekil 7.7. Malzeme doluluk oranının P₈₀ boyutuna etkisi.



Şekil 7.8. Malzeme doluluk oranının P₅₀ boyutuna etkisi.

Şekil 7.7 ve Şekil 7.8 incelendiğinde doluluk oranı arttıkça kullanılan tüm bilyeler için ürünün P_{80} ve P_{50} boyutlarının arttığı görülmektedir.



Şekil 7.9. Malzeme doluluk oranının enerji tüketimine etkisi.

Şekil 7.9 incelendiğinde ise malzeme doluluk oranı arttıkça tüketilen enerjinin azaldığı görülmektedir.

7.3. Bilye Doluluk Oranının Ürün Tane Boyutu ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi

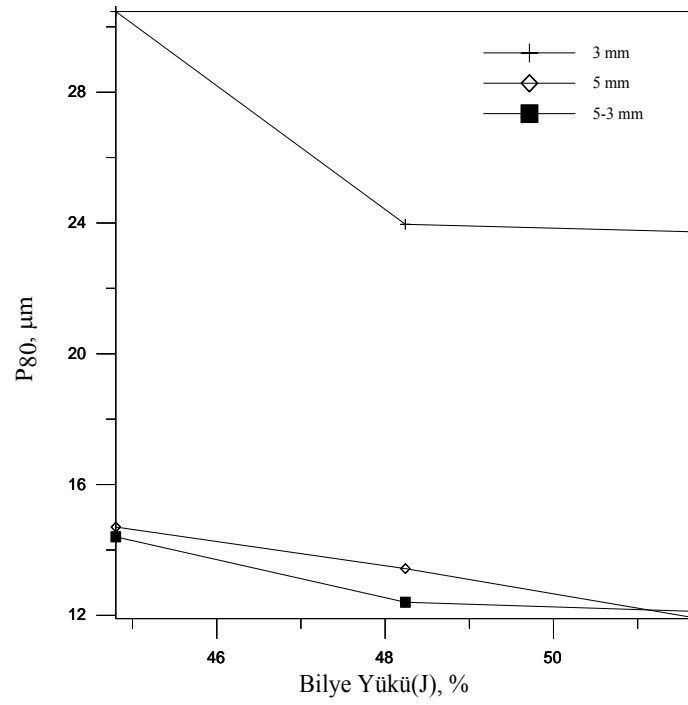
Yapılan çalışmalarda bilye doluluk oranının (bilye şarjının) artırılması ile tane boyutunun azaldığı ileri sürülmektedir (Celep ve Alp, 2008). Fakat bilye şarjının yeterinden fazla olması ortam ve pervane ve astar aşınmasını arttıracığı için fazla öğütme ortamı kullanımından kaçınılmaktadır. Karıştırmalı bilyeli değirmende bu etkiyi

görmek amacıyla bu grup deneyler yapılmıştır. Deney koşulları ve bulgular Çizelge 7.3’de ve Şekil 7.10-7.12’de verilmiştir.

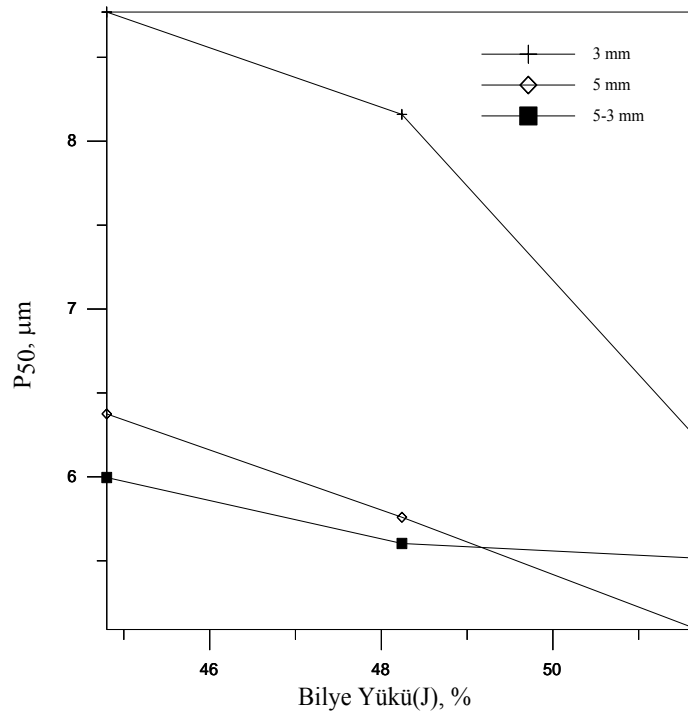
Şekil 7.10 ve Şekil 7.11 incelendiğinde bilye doluluk oranı arttıkça kullanılan tüm bilyeler için ürünün P_{80} ve P_{50} boyutlarının azaldığı görülmektedir. Şekil 7.12 incelendiğinde ise malzeme doluluk oranı arttıkça tüketilen enerjinin arttığı görülmektedir.

Çizelge 7.3. Bilye doluluk oranının etkisi deney koşulları ve bulgular.

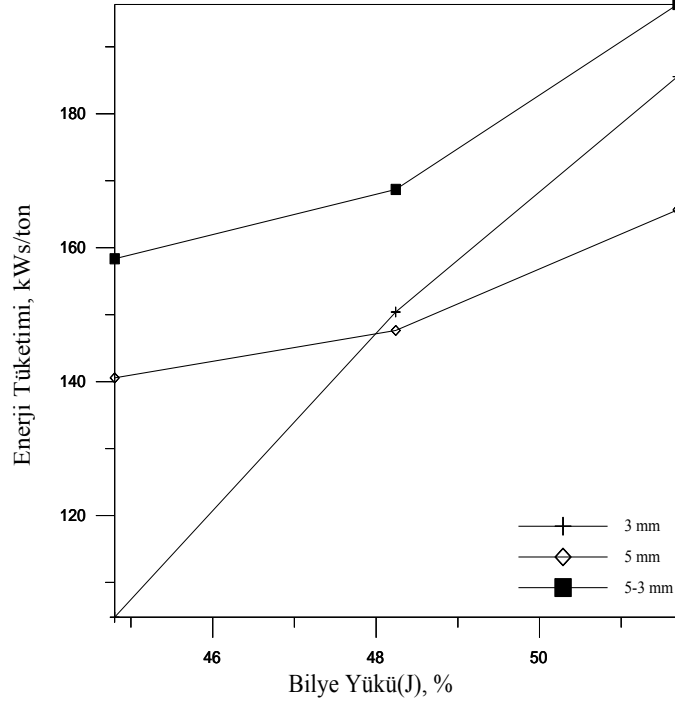
Öğütme Süresi (dak)		150			
Karıştırma hızı (dev/dak)		300			
Örnek miktarı (g)		150			
Besleme	P_{80} (μm)	80,96			
	P_{50} (μm)	45,151			
Bilye çapı (mm)		3	5	5-3	
Bilye miktarı (g)	650 (%J=44,80)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	104,82	140,55	158,35
		P_{80} (μm)	30,47	14,70	14,40
		P_{50} (μm)	8,77	6,38	6,00
	700 (%J=48,24)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	150,39	147,64	168,69
		P_{80} (μm)	23,96	13,43	12,40
		P_{50} (μm)	8,16	5,76	5,60
	750 (%J=51,69)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	185,55	165,65	196,33
		P_{80} (μm)	23,73	11,92	12,12
		P_{50} (μm)	6,22	5,09	5,52



Şekil 7.10. Bilye doluluk oranının P₈₀ boyutuna etkisi.



Şekil 7.11. Bilye doluluk oranının P₅₀ boyutuna etkisi.



Şekil 7.12. Bilye doluluk oranının enerji tüketimine etkisi.

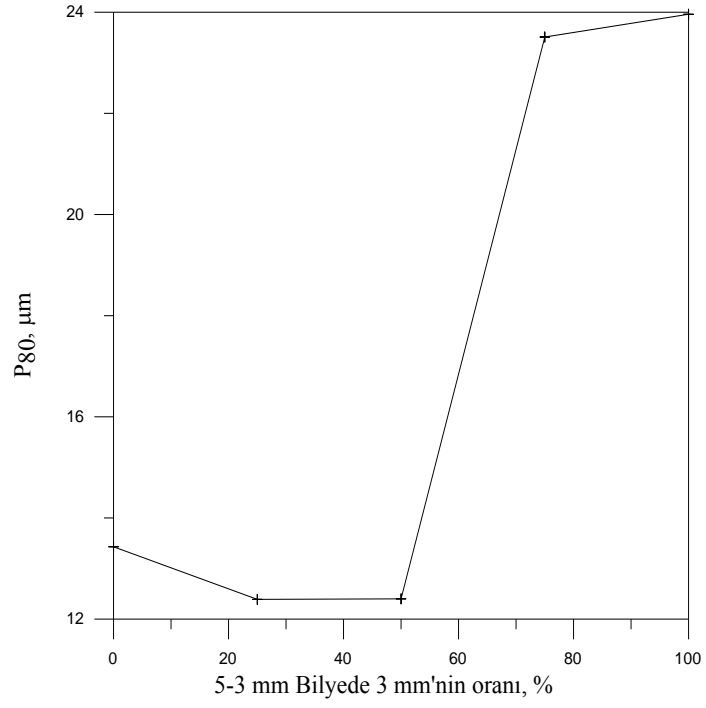
7.4. Bilye Karışım Oranının Ürün Tane Boyutu ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi

Daha önceki deneylerde 5-3 mm bilye oranı %50-%50 olarak kullanılmış, 5 mm bilyeler arası boşluğun 3 mm bilyelerle doldurulmasının etkisini görmek amacıyla bu grup deneyler gerçekleştirilmiş ve karışımda 3 mm bilye oranı değiştirilmiştir. Deney koşulları ve bulgular Çizelge 7.4'de ve Şekil 7.13-7.15'da verilmiştir.

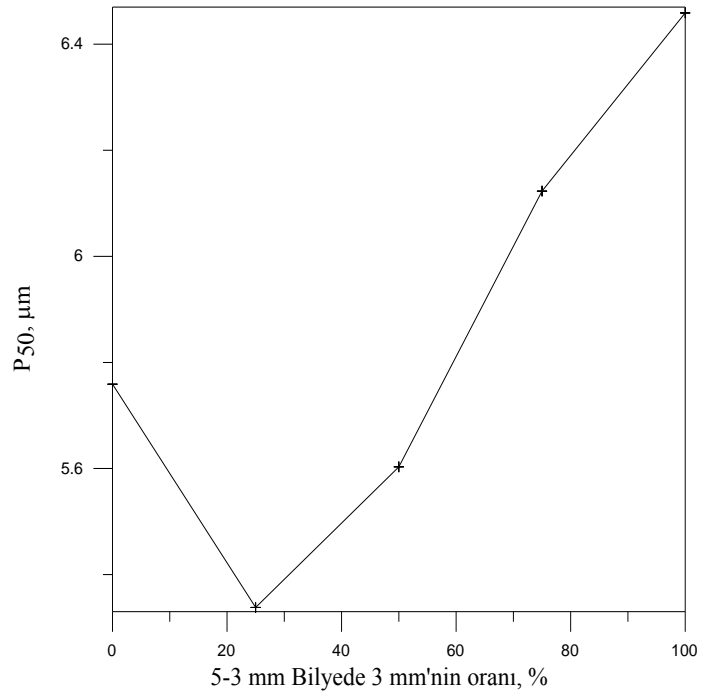
Şekil 7.13 ve Şekil 7.14 incelendiğinde karışımda 3 mm bilye oranı arttıkça ürünün P_{80} ve P_{50} boyutlarının önce azaldığı ve daha sonra arttığı görülmektedir. Başlangıçta 3 mm bilyeler 5 mm bilyeler arasındaki boşluğu düşürerek öğütme verimini arttırmaktadır. Şekil 7.15 incelendiğinde ise karışımda 3 mm bilye oranı arttıkça tüketilen enerjinin önce arttığı ve daha sonra azaldığı görülmektedir. Enerjideki bu artışın nedeninin bilyeler arasındaki sürtünmenin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 7.4. Bilye karışım oranının etkisi deney koşulları ve bulgular.

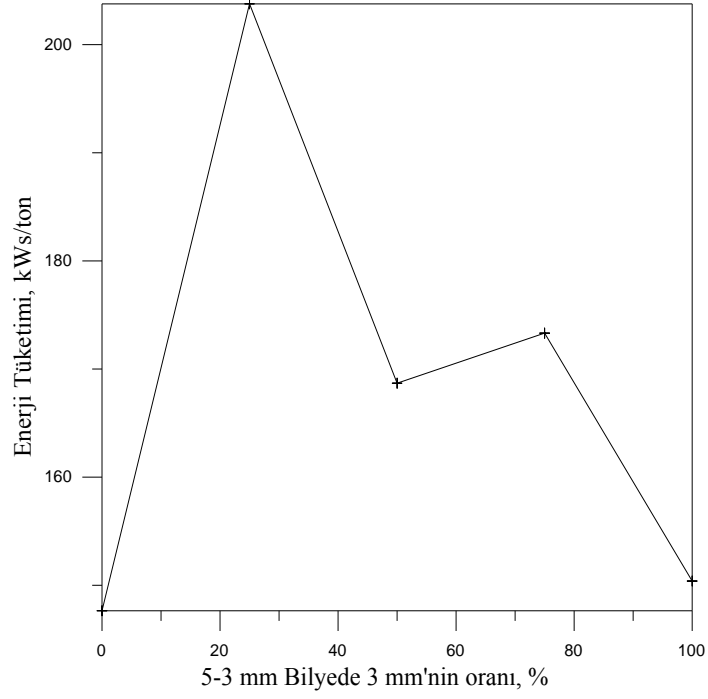
Örnek miktarı (g)		150	
Karıştırma hızı (dev/dak)		300	
Bilye miktarı (g)		700	
Öğütme Süresi (dak)		150	
Besleme	F ₈₀ (μm)	80,96	
	F ₅₀ (μm)	45,151	
Bilye çapı (mm)		5-3	
Bilye karışım oranı (%)	0 (3 mm) 100 (5 mm)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	147,64
		P ₈₀ (μm)	13,43
		P ₅₀ (μm)	5,76
	25 (3 mm) 75 (5 mm)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	203,78
		P ₈₀ (μm)	12,39
		P ₅₀ (μm)	5,34
	50 (3 mm) 50 (5 mm)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	168,69
		P ₈₀ (μm)	12,4
		P ₅₀ (μm)	5,60
	75 (3 mm) 25 (5 mm)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	173,32
		P ₈₀ (μm)	23,51
		P ₅₀ (μm)	6,12
	100 (3 mm) 0 (5 mm)	Tüketilen enerji (kWs/ton)	150,39
		P ₈₀ (μm)	23,96
		P ₅₀ (μm)	6,46



Şekil 7.13. 5-3 mm bilye karışımında 3 mm miktarının P_{80} boyutuna etkisi.



Şekil 7.14. 5-3 mm bilye karışımında 3 mm miktarının P_{50} boyutuna etkisi.



Şekil 7.15. 5-3 mm bilye karışımında 3 mm miktarının enerji tüketimine etkisi.

7.5. Karıştırma Hızının Ürün Tane Boyutu ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi

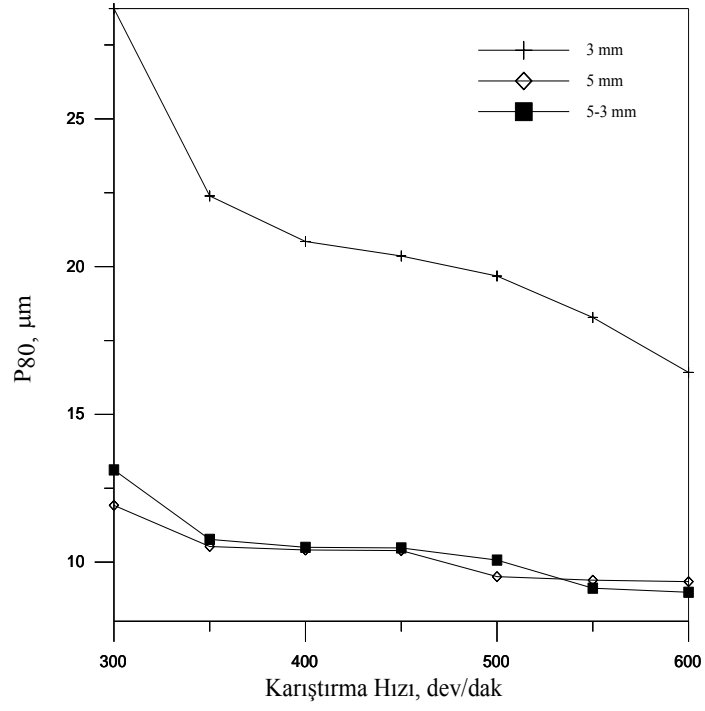
Gao and Forssberg, 1993'e göre karıştırmalı bilyeli değirmenlerde karıştırma hızının artmasıyla elde edilen ürünün tane boyutu azalmakta fakat değirmenin harcadığı güç artmaktadır. Karıştırma hızı arttıkça değirmenin birim hacminde ortaya çıkan özgül enerji miktarında bir artış olmaktadır. Bunun sonucunda istenen ürün tane boyutuna daha kısa sürede ulaşılmakta ve değirmen kapasitesinde artış gerçekleşmektedir.

Karıştırmalı değirmende karıştırma hızının ürün tane boyutu ve enerji tüketimi üzerine etkisini görmek amacıyla bu grup deneyler yapılmış, deney koşulları ve bulgular Çizelge 7.5'de ve Şekil 7.16-7.18'da verilmiştir.

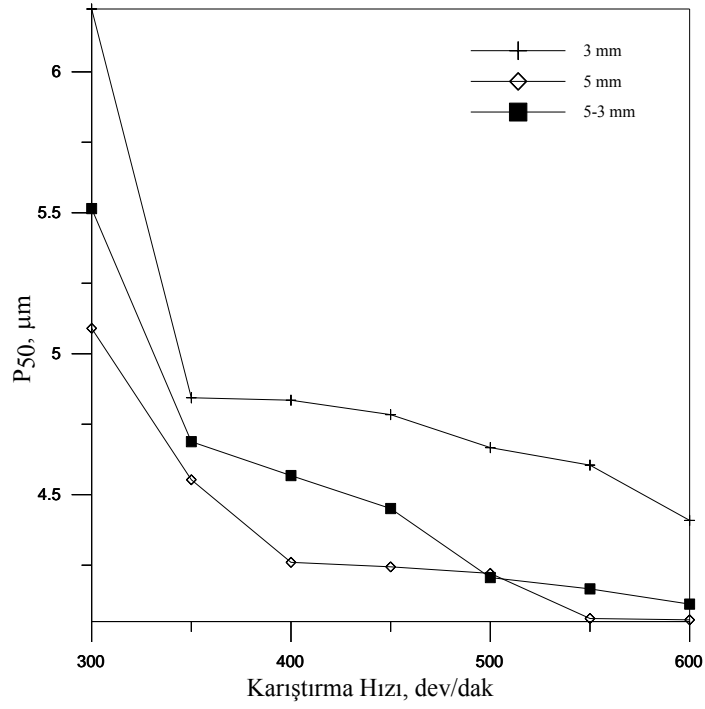
Şekil 7.16 ve Şekil 7.17 incelendiğinde karıştırma hızı arttıkça kullanılan tüm bilyeler için ürünün P₈₀ ve P₅₀ boyutlarının azaldığı görülmektedir. Şekil 7.18 incelendiğinde ise karıştırma hızı arttıkça tüketilen enerjinin de arttığı görülmektedir.

Çizelge 7.5. Karıştırma hızının etkisi deney koşulları ve bulgular

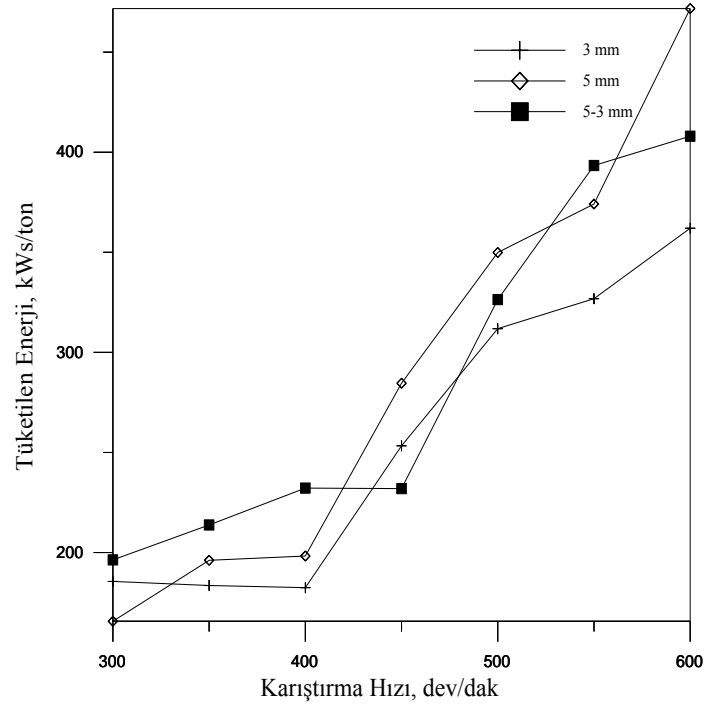
Öğütme Süresi (dak)		150			
Bilye miktarı (g)		750			
Örnek miktarı (g)		150			
Besleme	F ₈₀ (µm)	80,96			
	F ₅₀ (µm)	45,151			
Bilye çapı (mm)		3	5	5-3	
Karıştırma hızı (dev/dak)	300	Tüketilen enerji (kWs/ton)	185,55	165,65	196,33
		P ₈₀ (µm)	28,73	11,92	13,12
		P ₅₀ (µm)	6,223	5,09	5,515
	350	Tüketilen enerji (kWs/ton)	183,52	196,11	213,76
		P ₈₀ (µm)	22,39	10,53	10,77
		P ₅₀ (µm)	4,844	4,553	4,688
	400	Tüketilen enerji (kWs/ton)	182,44	198,28	232,20
		P ₈₀ (µm)	20,85	10,41	10,5
		P ₅₀ (µm)	4,835	4,26	4,568
	450	Tüketilen enerji (kWs/ton)	253,33	284,58	231,92
		P ₈₀ (µm)	20,36	10,39	10,48
		P ₅₀ (µm)	4,784	4,244	4,451
	500	Tüketilen enerji (kWs/ton)	311,85	349,90	326,39
		P ₈₀ (µm)	19,68	9,51	10,07
		P ₅₀ (µm)	4,667	4,221	4,206
	550	Tüketilen enerji (kWs/ton)	326,82	374,13	393,37
		P ₈₀ (µm)	18,28	9,39	9,12
		P ₅₀ (µm)	4,605	4,061	4,166
	600	Tüketilen enerji (kWs/ton)	362,05	471,79	407,99
		P ₈₀ (µm)	16,42	9,34	8,98
		P ₅₀ (µm)	4,409	4,056	4,112



Şekil 7.16. Karıştırma hızının P₈₀ boyutuna etkisi.



Şekil 7.17. Karıştırma hızının P₅₀ boyutuna etkisi.



Şekil 7.18. Karıştırma hızının enerji tüketimine etkisi.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kullanılan tüm bilyeler için öğütme süresi arttıkça enerji tüketimi artmakta fakat ürün tane boyutu azalmaktadır. Tüm bilyeler için 60 dakikanın üzerindeki öğütme sürelerinde öğütme yavaşlamaktadır.

Kullanılan tüm bilyeler için malzeme doluluk oranı arttıkça ürünün P_{80} ve P_{50} değerleri artmaktadır. Ancak, malzeme doluluk oranı arttıkça tüketilen enerji azalmaktadır.

Kullanılan tüm bilyeler için bilye doluluk oranı arttıkça ürünün P_{80} ve P_{50} değerleri azalmaktadır. Ancak, malzeme doluluk oranı arttıkça tüketilen enerji artmaktadır.

Kullanılan tüm bilyeler için karıştırma hızı arttıkça ürünün P_{80} ve P_{50} değerleri azalmaktadır. Ancak, karıştırma hızı arttıkça tüketilen enerji de artmaktadır.

Karışım bilye için karışım bilyede 3 mm bilye oranı arttıkça ürünün P_{80} ve P_{50} değerleri önce azalmakta ve daha sonra artmaktadır. Ancak, tüketilen enerji karışımda 3 mm bilye oranı arttıkça önce artmakta ve daha sonra azalmaktadır.

Yapılan çalışmalar sodyum feldispatın $-120 \mu\text{m}$ 'dan kuru olarak karıştırmalı bilyeli değirmende 5 ve 5-3 mm bilye kullanılarak çok ince boyuta öğütülebileceğini göstermektedir. Çalışmalar $-120 \mu\text{m}$ malzemenin 3 mm bilye kullanılarak öğütülmesinin 5 mm ve 5-3 mm'ye göre çok uygun olmadığını göstermektedir.

Kuru öğütme deneylerinde kuru öğütme kimyasalları kullanılarak daha küçük boyutlu ürünler daha az enerji ile üretilebilir. Bu konu başka bir araştırma konusu olabilir. Ayrıca, karıştırmalı bilyeli değirmende besleme boyutunun etkisi araştırılabilir.

9. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anonim, http://avanoscomlekclerdernegi.org/wp-content/uploads/seramik_hammadde_ler1.ppt
- Celep, O., Alp, İ. ve Türk, T., 2008, İnce öğütme teknolojisinde karıştırmalı ortam değirmenleri ve cevher hazırlamadaki uygulamaları, İstanbul Yerbilimleri Dergisi, 21, 2 s.
- Celep O. ve Alp, İ., 2010, Refrakte akoluk Au-Ag cevherinin karıştırmalı değirmen ile ince öğütülmesi, Madencilik Dergisi, 49, 2, 41-52.
- Çayırılı, S., 2008, Farklı tür pomzaların kesikli öğütme ortamındaki davranışlarının incelenmesi ve modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Dikmen, S. ve Ergün, Ş. L., 2004; Karıştırmalı bilyalı değirmenler, Madencilik Dergisi, 43(4), 3-15.
- DowdleIII, H. J., 1993, Grinding glazes, Ceramic Industry, October, 3 p.
- Gao, M. W., Holmes, R. and Pease, J., 2006, The latest developments in fine and ultrafine grinding technologies, XXIII International Mineral Processing Congress, İstanbul, 30-37.
- Gerl, S. and Weiden-Hammer, P., 2006, Optimized fine grinding of ceramic slip with the agitated media mill maxxmill, Ceram, Forum Int.
- Goodson, R., Larson, F. and Sheehan, L., 1985, Energy input monitoring during attritor milling, International Journal of Refractory and Hard Metals, June, 7 p.
- Hartley, J. N., Prisdrey, K. A. and Wick, O. J., 1978, Chemical additives for ore grinding: How effective are they?, Engng Min.
- Hassibi, M., Rogers, K. J. and Yang, M., 1999, Advances in fine grinding & mill system application in the fgd industry, EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium, Atlanta, Georgia USA, 16-20.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hacıfazlıoğlu, H., Bilgin, Ö., Samanlı, S., Sungur, B. and Toroğlu, İ., 2007 a, Dry grinding of Albite in a vertical pinned stirred mill, *Ore Dressing*, 9, 18, 25-31.
- Hacıfazlıoğlu, H., Pilevneli, C. C. ve Toroğlu, İ., 2007 b, Dikey pinli karıştırmalı değirmende Armutçuk kömürünün kuru öğütölmesi ve bilya boyutunun ürün inceliğine etkisi, *Madencilik Dergisi*.
- Hoppert, H., 1996, Do all grinding balls have the same quality, *Interceram*, 45, 3, 166-173.
- İpek, H., 2003, Seramik hammadde karışımlarının öğütülebilirlik özelliklerinin belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Eskişehir.
- İpekoğlu, Ü. ve Tanrıverdi M., 1994, *Cevher Hazırlama*, D.E.Ü., Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, Genişletilmiş II. Baskı, İzmir, 215 s.
- 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., 2008, A review of regrinding and fine grinding technology-the facts and myths, [Http://Www.Metsominerals.Com](http://www.Metsominerals.Com).
- Just, A. and Yang, M., 1997, Attrition dry milling in continuous and batch modes, *The Powder and Bulk Solids Conference/Exhibition*, Chicago, IL, 4 p.
- Kayacı, K., 2007, Karaköy (Bilecik) yöresi mikrogranitinin jeolojisi ve seramik bünyelerde kullanım olanaklarının araştırılması, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 223 s.
- Küçüker, A. S., 2009, Porselen karo üretiminde öğütme verimliliği ve üretim süreçlerine etkileri, *Doktora Tezi* Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 183 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lorici, L. and Contoli, L., 1995, Raw materials preparation: New developments in wet grinding, Cer. Acta, 7, 5-14.
- Nasseti, G., 2003, Application of the maxxmill for the final grinding of unglazed porcelanato tile mixes, Ceram, Forum Int., 80, 12-18.
- Özdağ, H., 1992. Cevher Hazırlama, D.E.Ü., Mühendislik Mimarlık Fakültesi, MMF/MAD-89, İzmir, 179 s.
- Padden, S. A. and Reed, J. S., 1993, Grinding kinetics and media wear during attrition milling, Ceramic Bulletin, vol. 72, 3, 101-112.
- Parry, J., Klein, B. and Lin, D., 2006, Comparison of ultrafine grinding technologies, XXIII International Mineral Processing Congress, İstanbul, 177-183.
- Partridge, A. C., 1978, Principles of comminution, Mine and Quarry 7 July/Aug., 70 p.
- Pilevneli, C. C., 2003, Bilyalı bir karıştırırmalı değirmende ince boyutlu klinker öğütmesinin incelenmesi, Doktora Tezi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi.
- Reed, J. S., 1995, Principles of ceramic processing, John Wiley & Sons Inc., 658 p.
- Samanlı, S., Çuhadaroğlu, D. and Kızıgüt, S., 2008, Comparison of grinding performance between stirred mill and ball mill, Ore Dressing, 10, 20, 24-29.
- Schilling, R. E. and Yang, M., 2000, Attritor grinding mills and new developments, Union Process Inc.
- Schilling, R. E. and Yang, M., 2001, New developments in attritors, Paint and Coating Industry, April, 6 p.
- Sönmez, B., 1992, Gümüş cevherinin kırılma parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi ve öğütme devresinin benzetimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 112 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Szegvari, A. and Yang, M., 1995, Versality of attrition milling (wet or dry process; batch or continuous mode), Seminar on Powder Production by Fine Grinding, The Pennsylvania State University, June 13, 7 p.
- Szegvari, A. and Yang, M., 1999, Attritor grinding and dispersing equipment, Seminar on Dispersion of Pigments and Resins in Fluid Media, Kent State University, April 29, Kent, Ohio, 7 p.
- Tüzün, M. A., Loveday, B. K. and 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.
- Vari, A., 2004, Raw materials preparation and forming of ceramic tiles, Sala, Modena, Italy.
- Wang, Y. and Forsberg, E., 2000, Product size distribution in stirred media mills, Minerals Engineering, 34, 459-465.
- Wills, B. A., 1997, Mineral processing technology, 6th Ed., Butterwoth&Henimann, 486 p.
- Yıldız, N., 1999. Öğütme teorisi, uygulaması değirmenler ve sınıflandırıcılar, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 4.31-7.96.
- Yıldız, N., 2007, Cevher Hazırlama, ERTEM Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Ankara, 41-193.
- Yue, J. and Klein, B., 2006, Effects of bead size on ultrafine grinding in a stirred bead mill, advances in comminution, society for mining, Metallurgy and Exploration, İstanbul Yerbilimleri Dergisi, 21, 2, 61-73.
- Zheng, J., 1997, Stirred media mills: Dynamics, performance and physicochemical aspects, Ph, D, Thesis, Columbia University, United States.
- Zheng, J., Haris, C. C. and Samasundaran, P., 1996, A study on grinding and energy input in stirred media mills, Powder Technology, 86(2), 171-178.