

KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE TALKIN YAŞ ÖĞÜTÜLMESİNDE SÜSPANSİYON KARARLILIĞININ ETKİSİ

Diler KATIRCIOĞLU BAYEL (ORCID ID: 0000-0002-0336-8770) *

Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

Geliş / Received: 03.11.2016

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 17.03.2017

Kabul / Accepted: 23.03.2017

ÖZ

Karıştırmalı bilyalı değirmende (attritör), mikron altı ve nano boyutlu tanelerin öğütmede sergilediği davranış ve elde edilebilir en küçük tane boyutu süspansiyonun kararlılığından oldukça fazla etkilenmektedir. Bu çalışma kapsamında, yaş öğütmede talkın süspansiyon kararlılığı pH ölçümü ile araştırılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, karıştırmalı bilyalı değirmende belli bir süre sonunda boyutta çok fazla bir küçülme olmadığı ve ortalama ürün boyutunun (d_{50}) arttığı gözlenmiştir. Bunun asıl sebebi olarak, mikron altı boyutta partikül üretiminin daha çok tane-tane etkileşimine yol açtığı ve sonuç olarak süspansiyonun pH değerinin zamanla azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan deneylerde beş farklı pH değerinin (5- 6,5- 8- 9,5 ve 11) etkisi araştırılmış ve sonuç olarak süspansiyonun kararlılığının öğütme süresi ile değiştiği ve dolayısıyla süspansiyonun kararlılığının boyut küçültmeyi de etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karıştırmalı bilyalı değirmen, yaş öğütme, talk, pH, süspansiyon kararlılığı

EFFECT OF SUSPENSION STABILITY IN WET GRINDING OF TALC IN STIRRED MEDIA MILL

ABSTRACT

Grinding behaviour of submicron and nanoparticles in stirred media mill (attritor) and the minimum achievable particle size are pretty much influenced by the suspension stability. In the present work, suspension stability of talc in a wet milling process was investigated by measuring pH. It was found that after a certain time in an attritor mill, there is no more size reduction and the average product particle size (d_{50}) increases. One of the main reasons is that the production of submicron particles causes more particle-particle interactions and consequently pH of the suspension decreases with grinding time. The effect of pH was investigated by the experiments carried out at five pH values (5- 6.5- 8- 9.5 and 11). It was determined that the suspension stability was found to be affected by grinding time and hence, the size reduction was affected by pH of the suspension.

Keywords: Stirred media mill, wet grinding, talc, pH, suspension stability

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstrinin hemen hemen her alanında yaygın olarak kullanılan mikron altı ve nano boyuttaki ürünlere talep her geçen gün artmaktadır. Mineral dolgu maddeleri, kâğıt, mürekkep, plastik, elektronik, optik, seramik, metalürji, eczacılık gibi çeşitli endüstrilerde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Dolgu malzemesi kullanılması, ürünün fiyatını düşürmekte ve kompozit malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini arttırmaktadır.

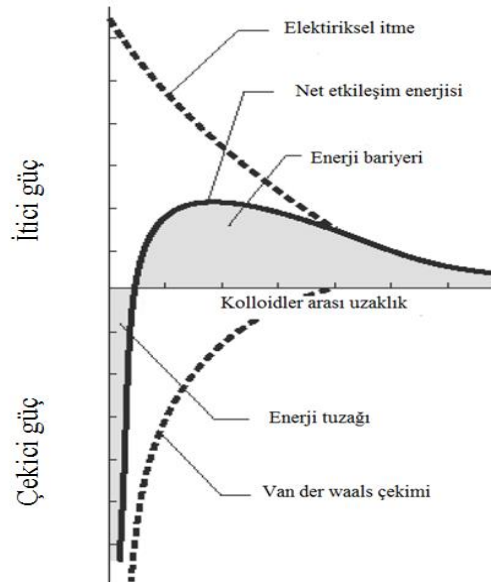
*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 388 225 4015; e-mail / e-posta: dkatircioglu@ohu.edu.tr

D. KATIRCIOĞLU-BAYEL

Talk, kimyasal tepkisizlik, yumuşaklık, beyazlık, yüksek termal stabilite ve düşük elektrik iletkenliği nedeniyle kâğıt, kozmetik, boya, polimer, seramik, refrakter malzemeleri ve ilaç sanayi gibi birçok alanda geniş uygulama alanlarına sahiptir.

Taneler arası etkileşim, azalan tane boyutuyla oluşan Brown hareketi ile artar [1]. Bu etkileşimler, özellikle tane boyutu 1 μm altında olduğu zamanlarda çok önemlidir. Taneler arası etkileşim, süspansiyonun reolojisinde ve stabilitesinde büyük bir etkiye sahiptir. Süspansiyonun stabilitesi düşük olduğunda viskozite artarak düşük akışkanlıktan dolayı öğütme başarısı azalır. Karıştırmalı bilyalı değirmenlerle öğütmede, nano boyutlu tanelerin sergilediği davranış ve minimum elde edilebilir tane boyutu süspansiyon kararlılığından oldukça fazla etkilenir. Öğütme süresi arttıkça ortalama tane boyutu zamanla azalır ve taneler arası çekici güçler daha baskın hale gelerek öğütme limitini etkiler ve aglomerasyona neden olur. Süspansiyonun yüksek viskozitesi öğütücü ortamın hareketini yavaşlatır ve böylece öğütücü ortamın stres enerjisini azaltır. Aglomerasyon, deaglomerasyon ve ufalamanın dengede olduğu bu durumda, artan enerji girişi ile birlikte daha fazla boyut küçültme elde edilemez [2]. Tane boyutunda bu sınırlama belirgin öğütme limiti olarak adlandırılabilir. Aglomerasyonda öğütülmemiş tanelerden daha büyük boyutta aglomeratlar üretilir ki bu aglomeratlar daha uzun sürelerde öğütülmeye dirençlidir. Bu olay, öğütmeyi etkisiz bırakan, re-aglomerasyon olarak tanımlanır ve ancak taneler arasında itici güçler yaratarak önlenir [3]. Yaş öğütmede maksimum elektrostatik güç, pH'nın ayarlanması ile sürdürülür. Karıştırmalı bilyalı değirmende süspansiyon kararlılığının yaş öğütme sürecinde etkileri literatürde birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve elde edilen bulgular ışığında, nano boyutlu tanelerin üretiminde süspansiyon stabilitesinin önemi özellikle vurgulanmıştır [4-9].

Nano boyutta öğütmeyi engelleyen çeşitli stabilizasyon mekanizmaları ve öğütme limiti olarak adlandırılan tane-tane etkileşimlerinin etkileri çeşitli stabilizasyon mekanizmaları ile azaltılabilir [2]. Muhtemelen mineraller için uygulaması en kolay mekanizmalardan biri elektrostatik stabilizasyondur. Yaş öğütmede inorganik tanelerin yüzey potansiyeli, süspansiyonun pH değerine bağlıdır. Bu yüzden de süspansiyonun pH'sı ayarlanarak taneler eşit yüklenir ve stabilize olur. Zeta potansiyelinin 0 mV olduğu bir değerde, sıfır yük noktası (i.e.p), taneler floküle olmaya eğilimlidir. Elektrostatik olarak stabilize olan süspansiyonların stabilitesini tahmin etmenin bir diğer yolu DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey, ve Overbeek) teorisidir. DLVO teorisinde, tane etkileşimleri tek bir etkileşimin toplamı olarak toplam etkileşim potansiyeli hesaplanarak belirlenir. Birbirine çok yakın moleküller arasındaki elektromanyetik dalgalanmalar bir diğerinin yük polarizasyonuna neden olur. Yüklü iki yüzey arasında etkileşimin şiddetini belirlemek için iki kuvvetin (elektrostatik ve van der Waals kuvvetleri) birlikte etkisi DLVO teorisi ile incelenebilir.



Şekil 1. DLVO enerji eğrisi [10]

Şekil 1'de görüldüğü gibi, çekme potansiyel eğrisi taneler arasındaki kısa mesafelerde baskındır ve net etkileşim potansiyel enerjisi minimumdur. Taneler arası mesafe arttıkça, elektrostatik itme enerjisi, London-van der Waals çekme enerjisinden daha hızlı bir şekilde düşer ve net etkileşim çekme enerjisi olarak görülür. Orta mesafelerde ise elektrostatik itme kuvveti baskındır ve net etkileşim maksimum itme potansiyelidir. Taneler arası çekme kuvveti, tanenin özelliğine ve büyüklüğüne bağlıdır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

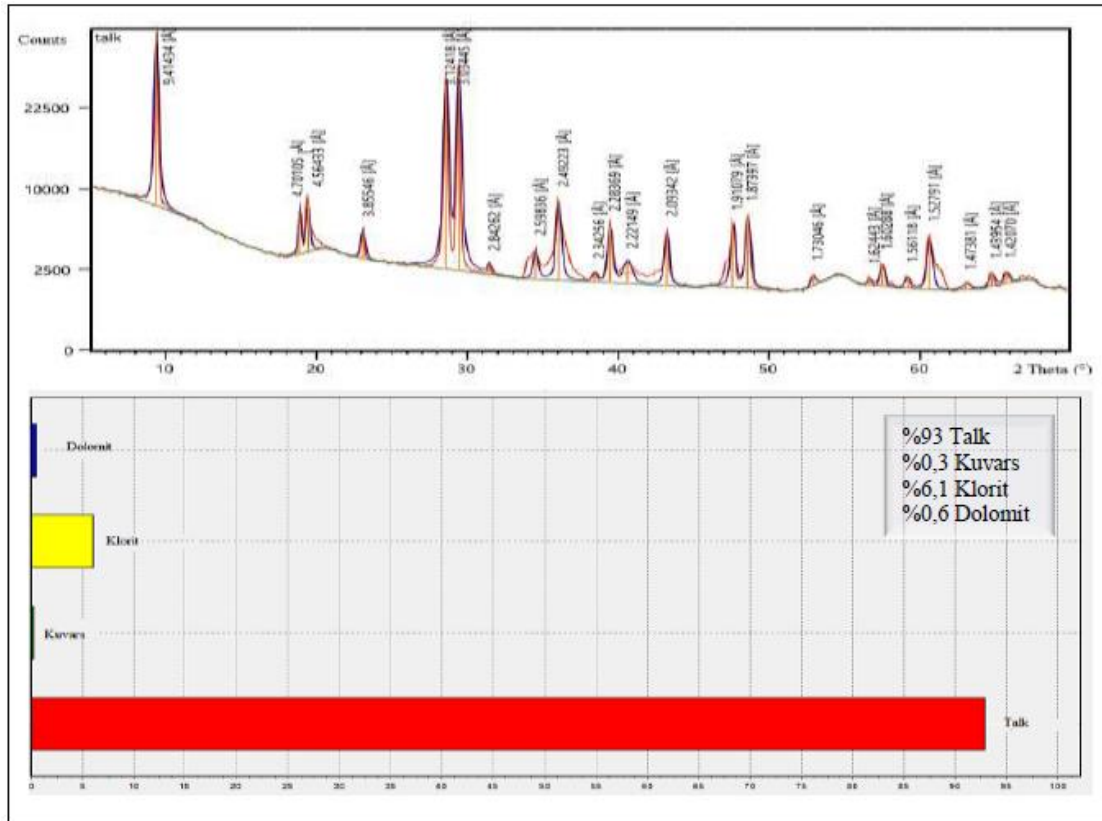
DeneySEL çalışmalarında Niğde bölgesinde faaliyet gösteren Mikron'S A.Ş firması tarafından üretimi yapılan talk örnekleri ($d_{50}=6 \mu\text{m}$) kullanılmıştır. Örneğin, XRF cihazı ile belirlenen kimyasal özellikleri Tablo 1'de, fiziksel özellikleri Tablo 2'de ve XRD analiz sonuçları ise Şekil 2'de verilmiştir. Talk örneğinin XRD sonuçları incelendiğinde pik kalitesi ve şiddeti yüksek pikler elde edilmiştir. Panalytical marka Empyrean model XRD Cihazı ile Cu X-Işını tüpü ($\lambda= 1,5405\text{Angstrom}$) kullanılarak yapılmış olup 2θ açısı $5^\circ\text{-}70^\circ$ arasında değişmektedir. Şekil 2'de verilen talk numunesinin X-Işını Difraktometresi Rietveld yöntemine göre yazılmış ve Siroquant yazılım programından yararlanılarak oluşturulmuştur. Bu sonuçlara göre; numunede ağırlıklı olarak talk mineraline, safsızlık olarak ise klorit, dolomit ve kuvars minerallerine rastlanmıştır.

Tablo 1. DeneySEL çalışmalarda kullanılan talk örneklerinin kimyasal özellikleri (%)

SiO ₂	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	A.Z (1050°C)
61	31	0,7	0,3	0,5	93,5

Tablo 2. DeneySEL çalışmalarda kullanılan talk örneklerinin fiziksel özellikleri

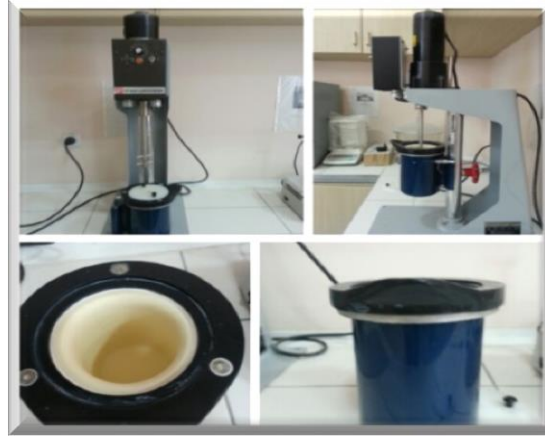
Yoğunluk (kg/m ³)	Mohs sertlik	Refraktif indeks	d ₅₀ (µm)	d ₉₇ (µm)	Spesifik yüzey alanı (m ² /g)
2780	1	1,57	6	21,23	1,46



Şekil 2. Deneylerde kullanılan talk örneklerinin X-Işını Difraktometresi (XRD)

2.2. Metot

Bu çalışmada öğütme işlemleri şematik görünümü aşağıda belirtilen Union Process (U.S.A.) tarafından üretilen Standart-01 model dikey pinli karıştırıcı değirmende gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Deneylede, 8,04 cm çapında ve 12,3 cm yüksekliğinde alümina bir tank kullanılmıştır. Aşınmaları azaltmak için öğütme haznesi seramikten yapılmıştır. Değirmende öğütücü ortamı karıştırmak için dikey bir şaft (Colmonoy kaplı) ve bu şaft üzerine monte edilmiş 4 adet karıştırma kolu vardır. Şaft uzunluğu 26,6 cm, her bir karıştırma kolunun uzunluğu 5,7 cm ve şaftın tank tabanından uzaklığı 0,635 cm'dir. Şaft 0,25 HP gücünde bir motora bağlı olup, şaftın dönme hızı 100-600 d/dk arasında değiştirilebilmektedir. Deneylede, 1 mm boyutlu yüksek yoğunluklu (6000 kg/m^3) ve dayanımı yüksek (kimyasal bileşimi: %93 ZrO_2 , %5 Y_2O_3 ve %2 diğerleri) yttria stabilizeli zirkonyum oksit bilyalar kullanılmıştır.



Şekil 3. Karıştırıcı bilyalı değirmenin (Attritör) ve karıştırma haznesinin değişik açılardan görünüşü

Karıştırılacak miktarda tartımı yapılan kuru malzemeye belirlenen oranda saf su eklenerek 3 dk süre ile 850 d/dk çalışma hızında önce mekanik karıştırıcıda karıştırılarak süspansiyon hazırlanmış ve süspansiyonun pH değeri sabitlenmiştir. Daha sonra, değirmenin sıcaklığı soğutma sistemi kullanılarak $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ye ayarlanmış, dikey şaft tank içine yerleştirildikten sonra karıştırma kolları tamamen kapanacak şekilde önce bilyalar tanka doldurulmuş, ardından da değirmen deneylede kullanılan hıza (600 d/dk) ulaştığında mekanik karıştırıcı da öğütülmek üzere hazırlanan süspansiyon değirmene eklenerek ve değirmenin kapağı kapatılmış ve süspansiyona her 30 dk'da NaOH eklenerek pH sabit tutulmuştur. Yapılan yaş öğütme deneylelerinde öğütme süresi (120 dk), karıştırma hızı (600 d/dk), bilya doluluğu (% 65), pülplü yoğunluğu (% 40), inorganik-aniyonik bir dispersant olan sodyum hegzametafosfat (SHMF) öğütme yardımcısı olarak kullanılmış ve miktarı katı ağırlığının % 2,4'ü olarak belirlenmiştir. Deneyleler boyunca sabit olarak kalacak şekilde farklı pH şartlarında (5-6,5-8-9,5 ve 11) deneyleler yapılmış ve deneyleysel sonuçlar ürün tane boyutu (d_{10} , d_{50}), spesifik yüzey alanı ve kırılma oranı ilişkisi dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Spesifik yüzey alanı, kırma ve öğütme gibi boyut küçültme işlemleri sonucunda elde edilen bir ürünün belli ağırlığı ve hacmindeki yüzey miktarı olarak ifade edilir. Spesifik yüzey alanı aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmış ve Eşitlik 1'de verilmiştir [11].

$$S_w = 6 / [\rho_s \times d_{(3,2)}] \quad (1)$$

S_w : Spesifik yüzey alanı (m^2/g)
 ρ_s : Numunenin yoğunluğu (t/m^3)
 $d_{(3,2)}$: Yüzey- hacim çapı

Beslenen malzeme ve öğütme sonrasında elde edilen ürünün tane boyut dağılımının ağırlıkça %50 geçtiği boyut değeri tespit edilerek, Eşitlik 2 kullanılarak kırılma oranı belirlenir [12].

$$\text{Kırılma oranı} = F_{50} / P_{50} \quad (2)$$

F_{50} : Beslemenin ortalama tane boyutu
 P_{50} : Ürünün ortalama tane boyutu

2.3. Karakterizasyon

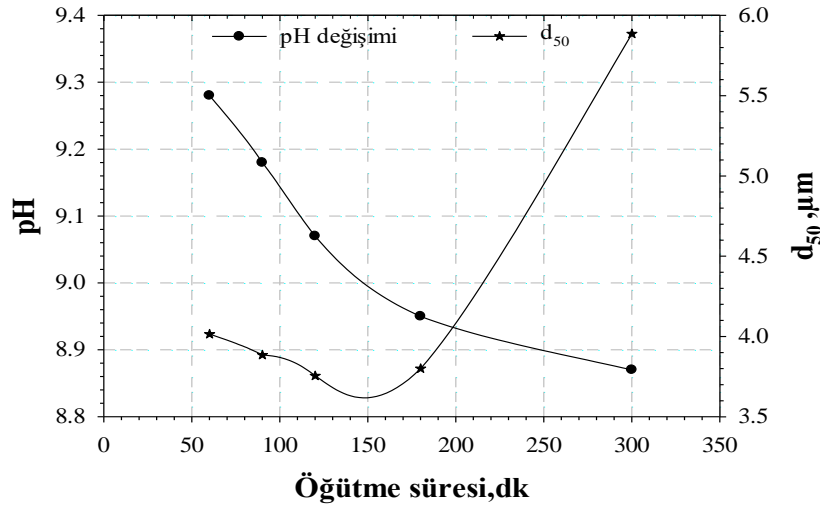
Besleme ve farklı şartlarda gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen ürünlerin tane boyut analizi Lazer Difraktometre yöntemiyle yaş çalışan tane boyutu ölçüm cihazı (Malvern Mastersizer Hydro 2000 MU-Malvern Co., Ltd., UK) ile gerçekleştirilmiştir. Her öğütme deneyi sonunda, ürünler örnek bölme kurallarına göre azaltılmıştır, azaltılan iki ayrı örnek alınıp, her biri ayrı ayrı analize tabi tutulmuştur. Ölçümler sonunda her bir deney için elde edilen analizlerin ortalamaları not alınarak sonuçların değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Öğütme Süresindeki Değişimin pH ve d_{50} Üzerine Etkisi

Karıştırmalı bilyalı değirmende belli bir süre sonunda ortalama ürün boyutunun değişmeksizin artmasının nedenini araştırmak için 60, 90, 120, 180 ve 300 dk öğütme sürelerinde deneyler yapılmıştır. Şekil 4 talk örneklerinin farklı öğütme sürelerinde pH değişimlerini göstermektedir.

Şekil 4'de öğütme süresindeki değişimin pH ve d_{50} üzerine etkisi incelendiğinde talk numunesinde öğütme süresi arttıkça pH değerlerinin azaldığı ve 120 dk öğütme süresinden sonra ortalama tane boyutunun (d_{50}) arttığı gözlemlenmiştir. Talk örneğinde başlangıç pH değeri 9,62 olarak belirlenmiş ve 300 dk öğütme sonrasında pH değeri 8,87 olarak kaydedilmiştir. Sakthivel ve ark. [8] silika üzerine yaptıkları çalışmada nano parçacıkların süspansiyon kararlılığını, yaş öğütme sürecinde öğütme süresinin bir fonksiyonu olarak pH ölçümü ile değerlendirmişlerdir. Attritör değirmende belli bir süre sonunda daha fazla bir boyut küçültme olmadığı ve ortalama ürün boyutunun arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak, mikron altı boyutta tane üretiminin daha çok tane-tane etkileşimine yol açtığı ve sonuç olarak süspansiyonun pH'sının zamanla azaldığı ileri sürülmüştür. Deneyler farklı pH şartlarında gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak süspansiyonun kararlılığının öğütme süresi ile değiştiği ve dolayısıyla süspansiyonun kararlılığının boyut küçültmeyi de etkilediği tespit edilmiştir.

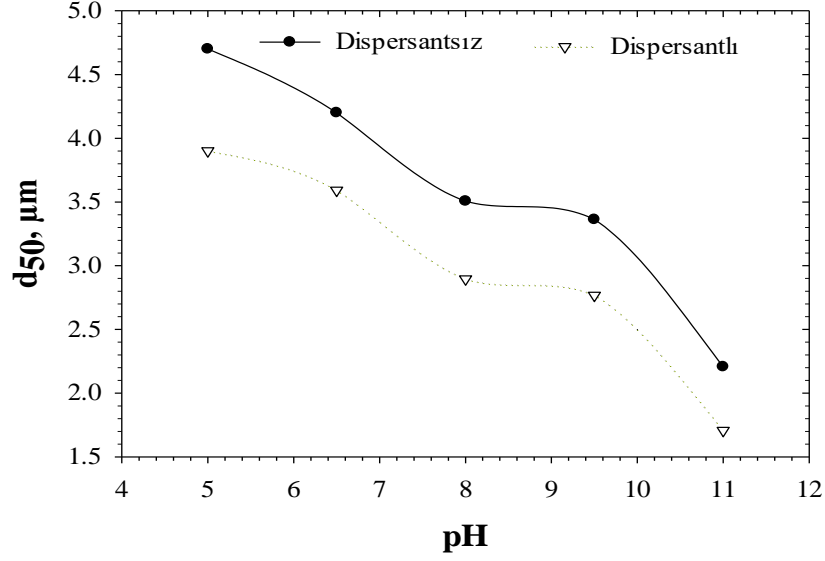


Şekil 4. Öğütme süresindeki değişimin pH ve d_{50} üzerine etkisi

3.2. Süspansiyonun pH Değişiminin d_{50} Üzerine Etkisi

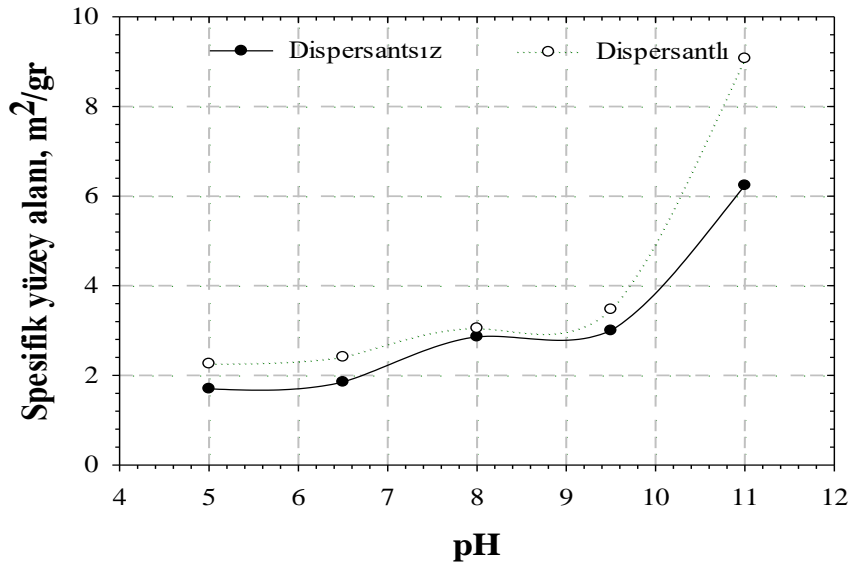
Süspansiyonun pH değişiminin öğütme verimi üzerine etkisini incelemek amacıyla talk örnekleri üzerinde farklı pH değerlerinde, dispersantlı ve dispersantsız deneyler yapılmıştır (Şekil 5). Yapılan bu deneylerde pH arttıkça d_{50} boyutunun azaldığı ancak çok çarpıcı bir azalmanın olmadığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak, dispersantlı ve dispersantsız olarak her iki şekilde yapılan deneyler ışığında talk minerali için sıfır yük noktasının (i.e.p) $pH < 5$ olduğu düşünülmektedir. Çünkü sıfır yük noktasına yaklaştıkça aglomerasyon artar dolayısıyla tanecik boyutu da artar. Bu noktadan uzaklaştıkça süspansiyon daha kararlıdır ve pH değişse bile tane boyutunda çok fazla azalma olmaz. Bu olay DLVO teorisinde belirttiği gibi, Hennart [13] tarafından elektrostatik itme kuvvetinde olan artışın, enerji bariyerinde yarattığı artıştan kaynaklandığı şeklinde açıklanmıştır.

D. KATIRCIOĞLU-BAYEL

Şekil 5. Süspansiyonun pH değişiminin d_{50} üzerindeki etkisi

3.3. Süspansiyonun pH Değişiminin Spesifik Yüzey Alanı Üzerine Etkisi

Talk örnekleri üzerinde karıştırılmalı bilyalı değirmenlerde yapılan çalışmalarda pH değişiminin boyut ile olan ilişkisinin yanı sıra yüzey alanı ile olan ilişkisi de incelenmiştir. Ortamda ince taneler üretildiği zaman spesifik yüzey alanı artar. Şekil 6 incelendiğinde, pH 5-11 arasında talk minerali için dispersantlı ve dispersantsız yapılan deneylerde en fazla spesifik yüzey alanı pH 11'de elde edilmiştir. Çünkü i.e.p noktasından uzaklaştıkça süspansiyonun kararlılığı artmaktadır.

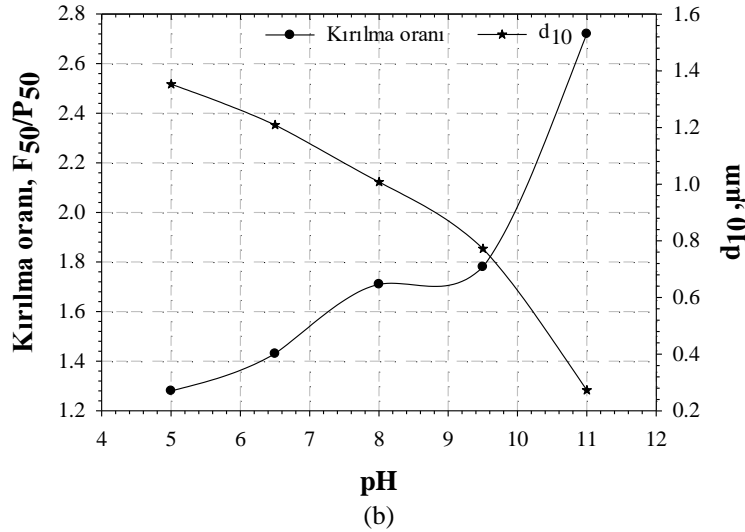
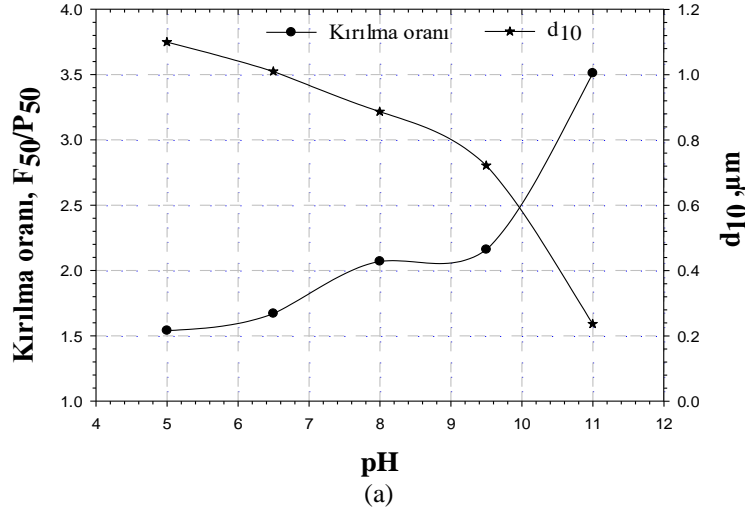


Şekil 6. Süspansiyonun pH değişiminin spesifik yüzey alanı üzerindeki etkisi

3.4. Süspansiyonun pH Değişiminin Kırılma Oranı Üzerine Etkisi

Dispersantlı ve dispersantsız yapılan deneylerde farklı pH değerlerinin d_{10} boyutu ve kırılma oranı üzerine etkisi Şekil 7'de verilmiştir. Her iki durumda da pH arttıkça d_{10} boyutunun azaldığı tespit edilmiştir. Sıfır yük noktasına yaklaştıkça kırılma oranları azalmaktadır. Bu azalışın nedeni, bu noktaya yaklaştıkça süspansiyonun kararlılığının azalması ve d_{50} boyutunda gözlemlenen artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir.

KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE TALKIN YAŞ ÖĞÜTÜLMESİNDE SÜSPANSİYON KARARLILIĞININ ETKİSİ



Şekil 7. Talk örneklerinin farklı pH değerlerinde (a) dispersantlı ve (b) dispersantsız kırılma oranı-d₁₀ ilişkisi

4. SONUÇLAR

Karıştırmalı bilyalı değirmende (atritör) talk örneklerinin mikron altı boyuta öğütülmesinde süspansiyon kararlılığının öğütme performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında ve sonunda elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Attritör değirmende belli bir süre sonunda daha fazla bir boyut küçültme olmadığı ve ortalama ürün boyutunun değişmeksizin arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak, mikron altı boyutta tane üretiminin daha çok tane-tane etkileşimine yol açtığı ve sonuç olarak süspansiyonun pH'nın zamanla azaldığı tespit edilmiştir. Deneyler farklı pH şartlarında gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak süspansiyonun kararlılığının öğütme süresi ile değiştiği ve dolayısıyla süspansiyonun kararlılığının boyut küçültmeyi de etkilediği tespit edilmiştir.
- Talk örnekleri için öğütme süresindeki değişimin pH üzerine etkisi incelendiğinde, öğütme süresi arttıkça pH değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Başlangıç pH değeri 9,62 olarak kaydedilmiş, 300 dk öğütme sonrasında pH değerinin 8,87 olduğu tespit edilmiştir.
- Dispersantlı ve dispersantsız yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, elde edilen bilgiler ışığında talk mineralinin sıfır yük noktasının pH<5 olduğu düşünülmektedir.

D. KATIRCIOĞLU-BAYEL

- Talk örnekleri üzerinde dispersantlı ve dispersantsız yapılan deneylerde, sıfır yük noktasına yaklaştıkça d_{10} , d_{50} boyutu artmakta iken kırılma oranı ve spesifik yüzey alanı değerleri azalmaktadır. Sıfır yük noktasından uzaklaştıkça süspansiyon daha kararlı bir hal almaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazar, numune temini ve analizler konusunda katkılarından dolayı Mikron'S A.Ş.'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- [1] PEUKERT, W., SCHWARZER, H.C., STENGER, F., "Control of Aggregation in Production and Handling of Nanoparticles", *Chemical Engineering and Processing*, 44, 245–252, 2005.
- [2] MENDE, S., STENGER, F., PEUKERT, W., SCHWEDES, J., "Mechanical Production and Stabilization of Submicron Particles in Stirred Media Mills", *Powder Technology*, 132, 64–73, 2003.
- [3] STENGER, F., PEUKERT, W., "The Role of Particle-Particle Interactions in Submicron Grinding in Stirred Ball Mills", *Aufbereitungs Technik*, 42, 477-486, 2001.
- [4] SCHMIDT, W.G., "Ultra-fine Grinding of Ceramic Powders for the Sintering Process", *Interceram*, 40, 15–8, 1991.
- [5] BEL FADHEL, H., FRANCES, C., MAMOURIAN, A., "Investigations on Ultra-fine Grinding of Titanium Dioxide in a Stirred Media Mill", *Powder Technology*, 105, 362–373, 1999.
- [6] PRESTIDGE, C.A., "Rheological Investigations of Galena Particle Interactions", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 126, 75–83, 1997.
- [7] WANG, Y., FORSSBERG, E., "Dispersants in Stirred Ball Mill Grinding", *Kona, Powder and Particle Journal*, 13, 67-77, 1995.
- [8] SAKTHIVEL, S., KRISHNAN VENTAKESAN, V., PITCHUMANI, B., "Influence of Suspension Stability on Wet Grinding for Production of Mineral Nanoparticles", *Particuology*, 6, 120-124, 2008.
- [9] SOMASUNDARAN, P., MOUDGIL, B.M., "Grinding Aids Based on Slurry Rheology Control, Reagents in Mineral Technology", *Surfactant Sci. Ser.*, 27, 179–93, 1998.
- [10] <http://zetarod.com/wp-content/uploads/Zeta-Potential-A-Complete-Course-in-5-Minutes.pdf> (erişim tarihi: 01.03.2016).
- [11] LECOQ, O., GUIGON, P., PONS, M.N., "A Grindability Test to Study the Influence of Material Processing on Impact Behavior", *Powder Technology*, 105, 21–29, 1999.
- [12] FUERSTENAU, D.W., ABOUZEID, A.-Z.M., "The Energy Efficiency of Ball Milling in Comminution", *International Journal of Mineral Processing*, 67, 161-185, 2002.
- [13] HENNART, S.L.A., WILDEBOER, W.J., VAN HEE, P., MEESTERS, G.M.H., "Stability of Particle Suspensions after Fine Grinding", *Powder Technology*, 199, 226-231, 2010.