



Orijinal Araştırma / Original Research

MİKRODALGA KURUTMANIN LİNYİT KÖMÜRÜNÜN ÖĞÜTÜLEBİLİRLİĞİNE ETKİSİ

EFFECT OF MICROWAVE DRYING ON THE GRINDABILITY OF LIGNITE COAL

Can Güngören^a, Şafak Gökhan Özkan^a, Hasan Hacıfazlıoğlu^{a*}

^a İstanbul Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Böl., İSTANBUL

Geliş Tarihi / Received : 1 Kasım / November 2016

Kabul Tarihi / Accepted : 9 Aralık / December 2016

ÖZET

Anahtar Sözcükler:

Linyit,
Mikrodalga Kurutma,
Öğütme,
Hargrove Öğütülebilirlik İndeksi
(HGI)

Bu çalışmada Kastamonu-Tosya bölgesinden temsili olarak temin edilen linyit kömürü numuneleri etüvde ve mikrodalga fırında ayrı ayrı kurutulmuş ve ardından laboratuvar tipi çubuklu değirmende öğütülmüştür. Çeşitli sürelerde (10, 20, 30 ve 60 dakika) öğütülmüş numunelerin tane boyut analizi gerçekleştirilerek, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, etüvde kurutulan numunelerin, 10, 20, 30 ve 60 dakika öğütme sonunda, d80 tane boyutları sırasıyla 350, 183, 180 ve 100 µm olarak tespit edilmiştir. Diğer taraftan aynı sürelerde mikrodalga kurutma uygulanan numunelerin d80 tane boyutları sırasıyla 240, 175, 160 ve 97 µm olarak bulunmuştur. Ayrıca, iki farklı mekanizma ile kurutulduktan sonra öğütülen linyit numunelerinin Hardgrove öğütülebilirlik indeksi değerleri de hesaplanarak, birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

ABSTRACT

Keywords:

Lignite,
Microwave Drying,
Grinding,
Hargrove Grindability Index
(HGI)

In this study, the representative lignite coal samples supplied from Kastamonu-Tosya region were dried in a conventional drying oven and a microwave oven, and then they were ground by a laboratory rod mill. The particle size analyses of the ground samples at various grinding times (10, 20, 30, and 60 minutes) were carried out, and the results were compared. As a result, the d80 particle sizes of the samples, dried in the conventional drying oven, were determined as 350, 183, 180, and 100 µm after grinding for 10, 20, 30, and 60 minutes, respectively. On the other hand, the d80 particle sizes of the samples, dried in the microwave oven for the same drying times, were found as 240, 175, 160, and 97 µm, respectively. Besides, Hardgrove grindability index (HGI) values of ground lignite samples after drying with two different mechanisms were also calculated and compared to each other.

* hasanh@istanbul.edu.tr

GİRİŞ

Elektromanyetik dalgalar frekans aralıklarına göre çeşitli şekillerde isimlendirilmişlerdir. Mikrodalgalar frekansı 300 MHz ile 300 GHz arasında değişen elektromanyetik dalgalardır. Mikrodalgalar, diğer elektromanyetik dalga türleri gibi ışık hızında yayılırlar, yayılmak için maddesel bir ortama ihtiyaç duymazlar ve birbirine dik elektrik ve manyetik bileşenlerden oluşurlar (Uslu vd., 2003; Kutbay ve Kuşkonmaz, 2004; Eskibalci, 2007; Güngören, 2009; Özkan vd., 2009; Sayın, 2010; Guo vd., 2011; Eskibalci ve Özkan, 2012).

Mikrodalga ısıtma, mikrodalgaları absorbe edici malzemelerin içlerindeki asimetrik bir yük dağılımına sahip dipol moleküller sayesinde gerçekleşir. Bu moleküllerin başında su gelir. Malzeme içinde bulunan dipol moleküller bir elektrik alanına maruz bırakıldıklarında elektrik alanının doğrultusu boyunca dizilirler. Elektriksel alan ortadan kalktığında ise bu dizilim bozulur. Bu sebeple art arda oluşturulup ortadan kalkan elektriksel alan dipol moleküllerin hareket etmesine yol açar. Bu hareket ile meydana gelen iç sürtünme sonucunda bir ısı açığa çıkar. Sonuç olarak absorbe olan enerji sürtünmeye harcanmakta ve malzeme hızla hacimsel olarak ısınmaktadır (Vorster, 2001; Al-Harashsheh ve Kingman, 2004).

Bu ısınma mekanizmasından dolayı konvansiyonel sistemlerde ısınma dıştan içe doğru gerçekleşirken, mikrodalga ısıtma sistemlerinde içten dışa doğru gerçekleşir ve malzeme içerisinde bir termal gerilim ve iç basınç oluşur. Bu durum sonucunda malzeme içerisinde çatlaklar oluşmaktadır. Mikrodalga ısıtmanın bu özelliğinden faydalanmak üzere mikrodalgaların madencilik alanında kullanımı son yıllarda yapılan çalışmalar ile hızla artmakta, ısıtma, ergitme, kurutma, kömür desülfürizasyonu, liç, kavurma gibi işlemlerde uygulanabilmektedir (Marland vd., 2000; Uslu ve Atalay, 2003; Can ve Bayraktar, 2007; Eskibalci, 2007; Özbayoğlu vd., 2009; Sayın, 2010; Hacıfazlıoğlu, 2014; Tosun, 2015).

Kingman ve Rowson (1998) mikrodalgaların mineraller üzerinde kullanımı hakkında yapılan çalışmaları derlemiş ve bu konuda yapılan çalışmaların enerji minimizasyonu, frekans optimizasyonu ve ölçek büyütme üzerine yoğunlaşmasını önermişlerdir.

Jones vd. (2005) teorik bir kalsit numunesi üzerinde yaptıkları modelleme çalışmalarında mikrodalga ısıtmada mineral tanesinin içerisinde basma gerilimi baskınken, dış kısımlarında ma-

kaslama ve çekme gerilimlerinin baskın olduğunu ve ısıtılan tanenin boyutu küçüldükçe çatlak oluşturmak için daha fazla enerji gerektiğini bildirmişlerdir.

Ali ve Bradshaw (2010, 2011) mikrodalga uygulaması ile cevher üzerinde oluşan çatlakları matematiksel olarak modellemişler, çatlak boyut ve örüntüsünün uygulanan mikrodalganın gücüne ve absorbanın tane boyutuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Charikinya vd. (2015) sfalerit cevherine mikrodalga uygulamış ve cevher bünyesinde meydana gelen çatlakları bilgisayarlı X ışını tomografisi (XCT) ve taramalı elektron mikroskopu (QEM-SCAN) ile incelemişlerdir. Çalışma sonucunda mikrodalgaların oluşturduğu çatlakların sadece mineral tane sınırlarında oluşmadığına, farklı minerallerin içinden geçebildiğine değinmişlerdir.

Mikrodalgaların madencilik sektöründe en önemli kullanım alanlarından biri de öğütme için gerekli olan enerji ihtiyacını azaltmaktır. Bunun yanında değirmen kapasitesinin arttırılabildiği, ton cevher başına aşınmanın azaldığı, değirmen ürün boyutlarının çok daha iyi kontrol edilebildiği, şlam üretiminin azaltılabildiği gibi faydaları da bildirilmektedir (Kingman vd., 2000; Eskibalci, 2014).

Termik santrallere beslenen pülverize kömür tane boyutunun genellikle 75 µm altı olması istenmektedir. Çünkü bu tane boyutundan iri kömürler yakma esnasında sorunlara sebep olmaktadır. Bu amaçla kömür öğütme işlemlerine yüksek miktarlarda enerji harcanmaktadır. Kömürün mineralojik ve kimyasal yapısı, kalitesi ve sertliği öğütülebilirliğini ve dolayısıyla da öğütmedeki enerji tüketimini etkilemektedir (Marland vd., 2000; Lester ve Kingman, 2004; Demir, 2016).

Bu çalışmada, konvansiyonel bir etüvde ve mikrodalga fırında ayrı ayrı kurutulan ve farklı sürelerde öğütme deneyleri gerçekleştirilen linyitlerin Hardgrove öğütülebilirlik indeksi (HGI) değerleri temel alınarak öğütülebilirlikleri araştırılmıştır.

1. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Kastamonu - Tosya'da bulunan, özel bir maden işletmesinin kömür hazırlama tesisinden temin edilen %19,41 nem içeriğine sahip linyit kömürleri kullanılmıştır. Kömür numunesinin kuru bazda kısa analizi Leco marka analiz cihazı ile ASTM D 4239 (toplam kükürt),

ASTM D 5865 (üst ısıl değer), ASTM D 7582 (sabit karbon), ASTM D3175 (uçucu madde), ASTM D3174 (kül) standartlarına, kimyasal analizi ise ASTM D 5373 standardına uygun olarak yapılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 1'de görülmektedir.

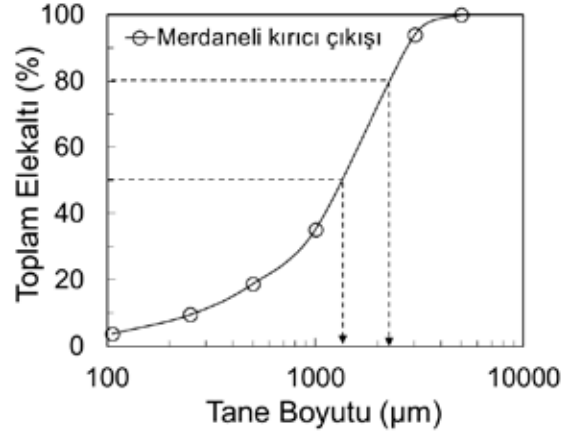
Çizelge 1. Kömür numunesinin analiz sonuçları

ANALİZ	DEĞER
Kül	%17,80
Uçucu Madde	%36,85
Sabit Karbon	%42,35
Toplam Kükürt	%8,77
Üst Isıl Değer	6200 (kcal/kg)
ELEMENTEL ANALİZ	
Karbon (C)	%60,53
Hidrojen (H)	%4,84
Azot (N)	%1,15

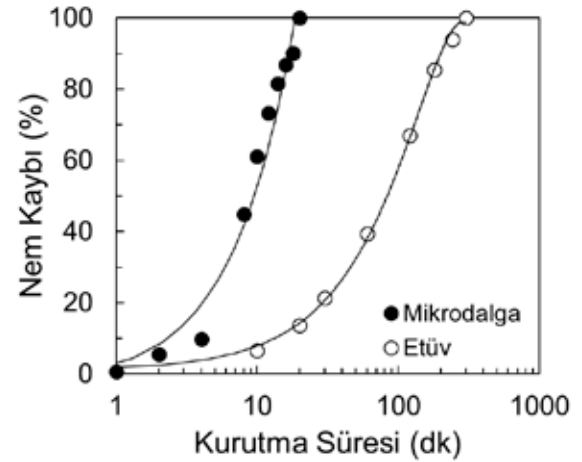
Kömür, bir çekiç vasıtasıyla -20 mm tane boyutuna kırılarak, laboratuvar tipi çeneli kırıcıya beslenmiştir. Çeneli kırıcıdan çıkan numune merdaneler arası mesafesi 3 mm olan merdaneli kırıcı yardımıyla öğütme deneylerine kullanılacak tane boyutuna indirilmiştir. Merdaneli kırıcı çıkışı numunenin tane boyut dağılımı Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü üzere merdaneli kırıcı çıkışı numunenin d_{50} tane boyutu 1450 μm , d_{80} tane boyutu ise 2400 μm 'dir.

Merdaneli kırıcı çıkışı numuneden 1000 g alınarak numune bölücü yardımıyla ikiye ayrılmıştır. Elde edilen 500 g'lık numunelerden biri etüvde 105 °C'de diğeri ise mikrodalga fırında kuru hale gelene kadar kurutulmuştur.

Mikrodalga kurutma uygulanan deneyler Moulinex Compact marka ev tipi mikrodalga fırın ile gerçekleştirilmiştir. 500 g kömür numunesi fırına dairesel kesitli ve ısıya dayanıklı cam kap içerisinde beslenmiştir. Mikrodalga fırın 700 W güçte çalıştırılmıştır. Nem kaybı değerleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Merdaneli kırıcı çıkışı numunenin tane boyut dağılımı



Şekil 2. Etüv ve mikrodalga kurutma ile nem analiz sonuçları

Şekil 2'deki nem analiz sonuçlarından görüldüğü üzere kömür etüv ile 300 dk'da kuru hale gelirken, bu işlem mikrodalga ile 20 dk sürmektedir.

Mikrodalga kurutma öncesinde ve sonrasında kömür numunesinin mikroskop fotoğrafları, polarize optik mikroskop ile "10x" büyütme oranında çekilerek kömür yüzeyinde meydana gelen değişimler gözlenmiştir.

Öğütme deneylerinde kullanılacak kömürler etüvde ve mikrodalga fırında belirlenen şartlarda ayrı ayrı kurutulduktan sonra, kurutulan her numunenin -3+1 mm boyutlu kısmından 600 g'lık numuneler alınarak 10, 20, 30 ve 60 dk'lık sürelerde laboratuvar tipi çubuklu çelik değirmende öğütülmüştür. Öğütülen numuneler, 75, 106, 212, 300, 500, 1000 ve 3000 μm 'luk ASTM standart elekler ile elenerek, tane boyut dağılım analizleri yapılmıştır. Öğütme koşulları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Öğütme koşulları

Parametre	Koşul
Değirmen Boyu/Çapı	26,5 / 20,5 cm
Çubuk Boyu/Çapı	26,2 / 1 cm
Çubuk Sayısı	78 adet
Çubuk Hacmi	20,57 cm ³
Değirmen Hacmi	8746,68 cm ³
Öğütücü Ortam Hacmi	1604,46 cm ³
Kritik Hız	93,42 dev/dk
Değirmen Dönüş Hızı	60 dev/dk

Kömürün öğütülebilirliğinin saptanmasında kullanılan en yaygın yöntemlerden bir tanesi Hardgrove öğütülebilirlik testidir. Çalışma kapsamında numunelere Hardgrove öğütülebilirlik testi de uygulanmıştır. Bu kapsamda, besleme tane boyutu -1,18+0,6 mm (18x30 mesh) olan 50 g havada kurutulmuş kömür örneği standart Hardgrove değirmeninde öğütülmüştür. Öğütme işlemi değirmenin 60 devir yapması ile sonlandırılmıştır. Daha sonra öğütülmüş malzeme 75 µm'luk elekten elenmiş ve elek altına geçen kömür tartılmıştır. Hardgrove öğütülebilirlik indeksi (HGI) Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır (Hardgrove, 1932; Tichanek, 2008; Kemal ve Arslan, 2009).

$$HGI = 13,6 + 6,93 \times M \quad (1)$$

Burada "M" 75 µm altı kömür ağırlığıdır (g).

Bulunan HGI değerine göre aşağıdaki yorumlar yapılabilmektedir:

HGI>70 ise kömür kolay öğütülebilir,

HGI=50-70 ise orta derecede öğütülebilirliğe sahip bir kömürdür,

HGI=30-50 ise zor öğütülebilir bir kömürdür.

Hardgrove testinden bulunan HGI değerleri Bond (1954)'e göre Bond iş indeksi (W_i) değerlerine dönüştürülebilmektedir (Denklem 2).

$$W_i = 88 / HGI^{0,5} \quad (2)$$

2. BULGULAR

Foto 1'de mikrodalga kurutma öncesinde ve sonrasında çekilen mikroskop görüntüleri verilmiştir. Burada mikrodalga kurutma sırasında kömür yüzeyinde meydana gelen çatlak oluşumu net olarak görülmektedir.

Ürünlerin tane boyut analizi sonucunda belirlenen malzemenin %80'inin elek altına geçtiği (d₈₀) ve

%50'sinin elek altına geçtiği (d₅₀) boyutları ise Şekil 3'te görülmektedir. Mikrodalga kurutmada, etüvde kurutmaya kıyasla her öğütme süresinde daha küçük d₅₀ ve d₈₀ tane boyutları elde edilmiştir. Düşük öğütme sürelerinde bu fark daha yüksek olmakta, öğütme süresi uzadıkça fark azalmaktadır. Düşük öğütme sürelerinde mikrodalga kurutma ile malzemede oluşan çatlakların öğünmeyi kolaylaştırdığı anlaşılmaktadır. Etüvde kurutulan malzemenin aynı tane boyutlara ulaşabilmesi için daha uzun öğütme sürelerine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

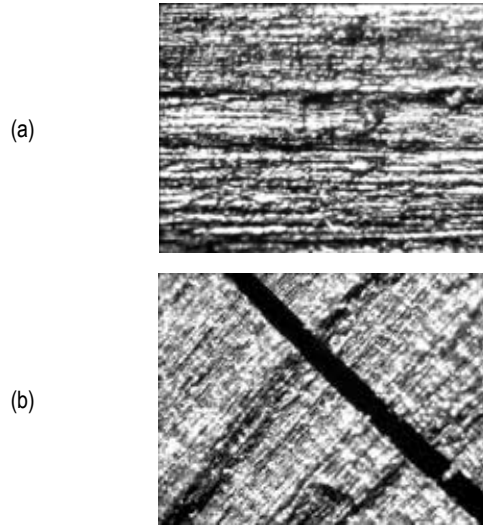
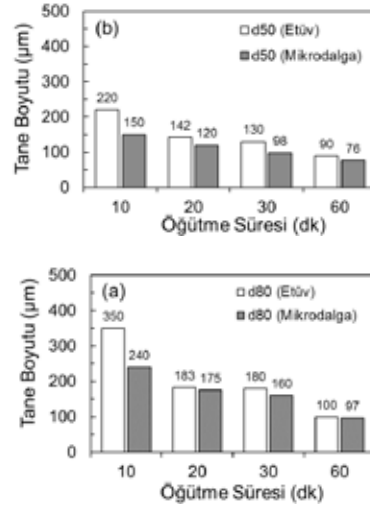
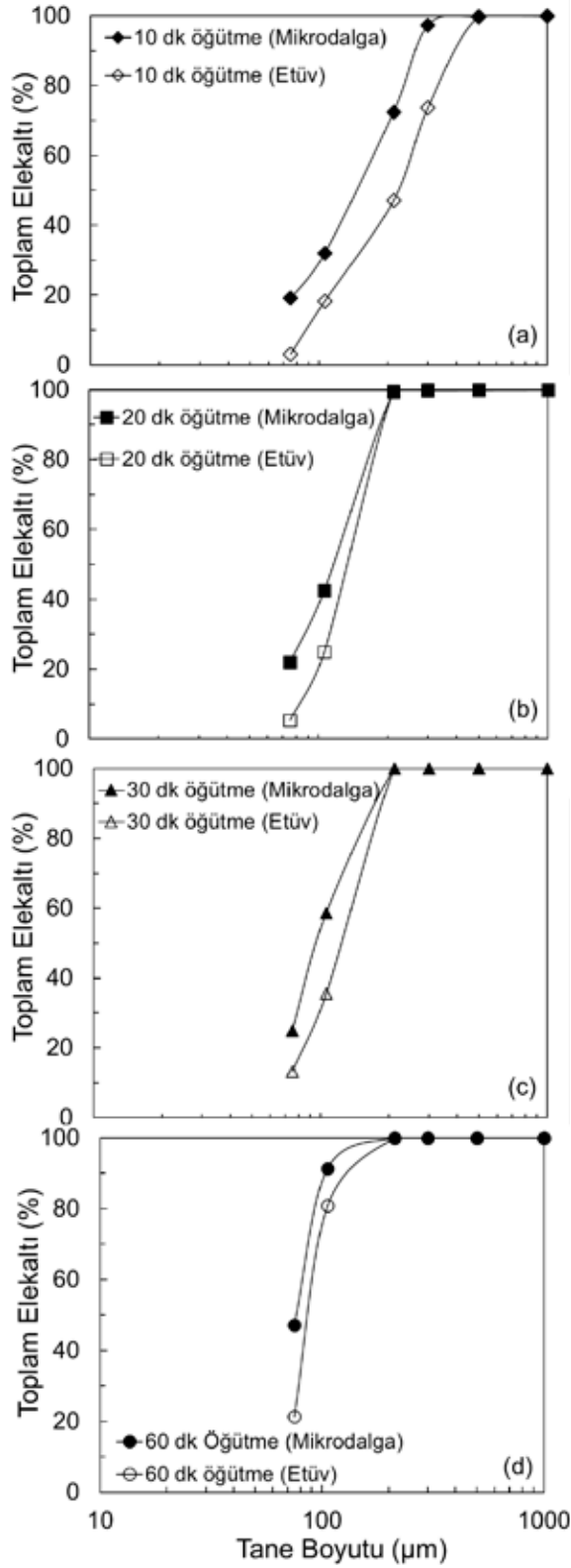


Foto 1. Kömür numunelerinin mikrodalga işlem öncesi (a) ve sonrası (b) mikroskop görüntüleri ("10x" büyütme)

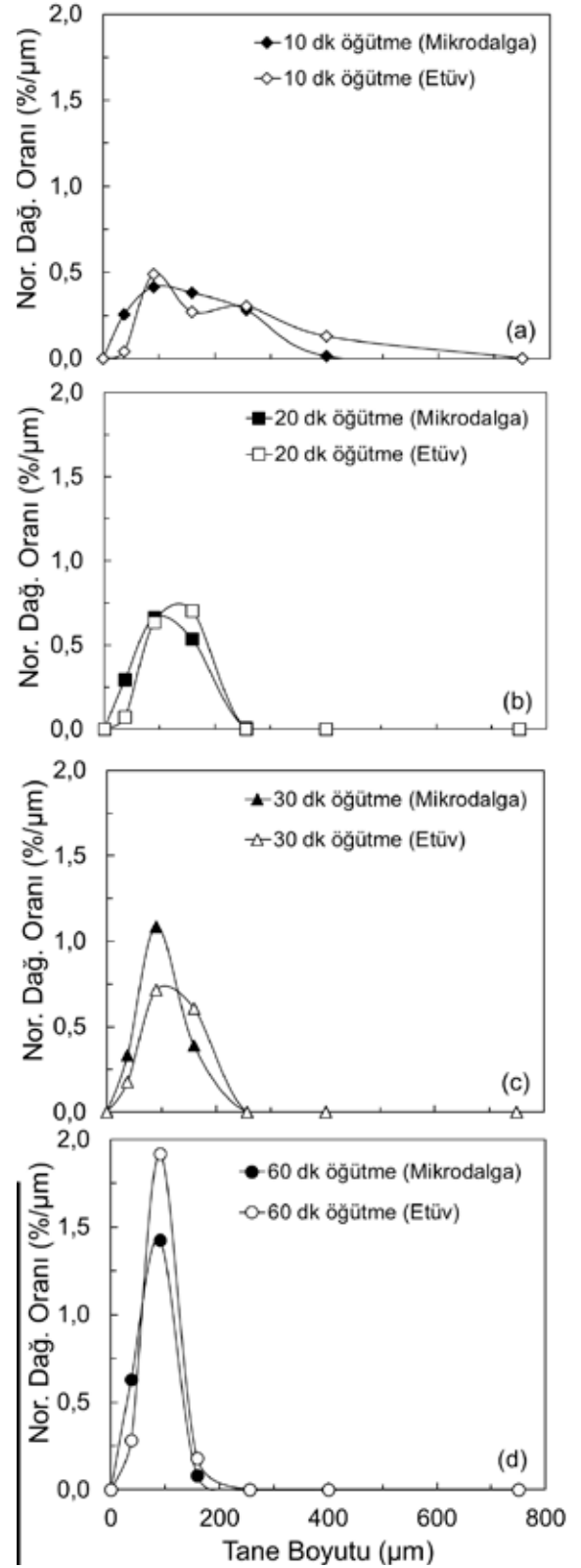


Şekil 3. Öğütme ürünlerinin (a) d₈₀ ve (b) d₅₀ boyutları Farklı sürelerde öğütme sonucunda elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları Şekil 4'te, normal dağılım grafikleri ise Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 4'ten görüldüğü üzere 10 dk öğütme sonu-



Şekil 4. (a) 10 dk, (b) 20 dk, (c) 30 dk ve (d) 60 dk öğütme için öğütme ürünlerinin tane boyut dağılımı



Şekil 5. (a) 10 dk, (b) 20 dk, (c) 30 dk ve (d) 60 dk öğütme için öğütme ürünleri tane boyutunun normal dağılım oranı

cunda etüvde ve mikrodalgada kurutulmuş numunelerin tamamına yakını 500 µm tane boyutunun altına inmektedir. 300 µm'un altına inen malzeme miktarı etüvde %73,72 olurken, malzeme mikrodalga ile kurutulduğunda bu oran %97,30'a çıkmaktadır. Mikrodalga kurutma uygulanan malzemenin %19,10'u 75 µm'un altına inerken, etüvde kurutulmuş malzemede bu oran %3,10'da kalmaktadır.

Etüvde ve mikrodalgada kurutulmuş numunelerin maksimum tane boyutu öğütme süresi ile azalmakta, 60 dk öğütmede öğütme ürünlerinin tamamı 212 µm altına inmektedir. Doğal olarak ince malzeme oranları artmaktadır. Etüvde ve mikrodalga fırında kurutulmuş malzemelerin 75 µm altı oranları 20 dk öğütmede sırasıyla %5,46, %22, 30 dk öğütmede %13,23, %24,9, 60 dk öğütmede ise %21,32, %47,2 olmaktadır.

Şekil 5 incelendiğinde etüvde kurutulmuş ve 10 dk öğütülen kömürün geniş bir tane boyut dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Oysa mikrodalga ile kurutulmuş kömürün maksimum boyutu düşmektedir. Öğütme süresi uzadıkça mikrodalga uygulaması etkisini yitirmekte, etüv ve mikrodalga ile kurutulmuş malzemenin maksimum boyutları aynı olmaktadır. 20 dk öğütmede malzeme 150 µm'da yoğunlaşmaktadır. Aynı öğütme süresinde mikrodalga ile kurutulmuş malzemenin biriktiği tane boyutu 90 µm'dur. Mikrodalga ön işlem her ne kadar 75 µm altı malzeme miktarını arttırsa da kömürün biriktiği tane boyutunu 90 µm'un altına indirmede yetersiz kalmaktadır. Ancak daha iri tanelerin ufalanmasını halen kolaylaştırmaya devam etmektedir. Etüvde kurutulmuş kömür numunelerine 60 dk öğütme uygulandığında iri boyuttaki taneler ufalanarak 1,92 %/µm normal dağılım oranı ile 90 µm civarında birikmektedir. Bu öğütme süresinde mikrodalga ile kurutulmuş kömür numunesi yine 90 µm'da birikmekle birlikte bu boyuttaki normal dağılım oranı etüvde kurutulmuş malzemeye oranla daha azdır. Bunun sebebi mikrodalga ile kurutulmuş malzemenin daha da ufalanarak 75 µm altına geçmesidir. 37,5 µm boyutunda etüvde kurutulmuş malzemenin normal dağılım oranı 0,28 %/µm iken mikrodalga kurutma ile bu oran 0,63 %/µm olmaktadır.

Hardgrove değirmeninde mikrodalga ve etüvde kurutulmuş olan kömür örnekleri ile yapılan testler sonucunda, mikrodalga ile kurutulmuş kömürün HGI değeri 41,20 bulunurken, etüvde kurutulmuş kömür örneğinin HGI değeri 38,40 bulunmuştur. Bu değerler Denklem 2'de yerine konulduğunda;

mikrodalga fırında kurutulmuş kömürün W_i değeri 13,70 kwh/t iken, etüvde kurutulmuş kömürün W_i değeri 14,21 kwh/t olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi mikrodalga kurutma sonunda yapılan öğütme işlemlerinde daha az enerji harcandığı açıkça görülmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mikrodalga kurutmanın öğütme üzerindeki olumlu etkisini mikrodalga sırasında malzeme üzerinde meydana gelen çatlaklara bağlamak mümkündür.

Mikrodalga ısıtma sistemlerinde, elektromanyetik enerji etkisi ile madde içerisindeki dipolar minerallerin hareketi sonucunda malzeme içerisinde oluşan termal gerilim ve iç basınç neticesinde mineral içerisinde çatlaklar meydana gelmektedir (Marland vd., 2000; Sayın, 2010). Konvansiyonel kurutma sistemlerinde ise malzeme dıştan içe doğru ısındığı için bu çatlaklar görülmez.

Ayrıca mikrodalga ile ısıtılan malzemenin içi daha sıcak olduğundan suyun içten dışa buharlaşması ve difüzyonu daha kolay olmaktadır (Lester ve Kingman, 2004; Sayın, 2010; Toraman, 2010; Samanlı, 2011).

Kömürün petrografik yapısının mikrodalga absorplama kabiliyetini değiştirdiği bilinmektedir. Kömürün organik bileşenleri görece zayıf mikrodalga absorbanlarıdır, ancak kömür içinde bulunan nem yani su molekülleri dipol moleküller olduklarından mikrodalga ile ısıtmada başlıca rolü oynarlar (Marland vd., 2000; Toraman ve Depçi, 2007).

Sonuçta; mikrodalga uygulanan kömürlerin öğütülmesi konvansiyonel öğütmeye göre daha kolay olabilmektedir. Burada, kömürün petrografik ve kimyasal bileşimi birinci derecede önemli rol oynarken, mikrodalga işlemin gücü ve süresi de etken parametrelerdir. Mikrodalgalar kömür ve cevher öğütülmesine kullanıldığında ekonomikliğinin sağlanabilmesi için fizik, elektrik-elektronik, cevher hazırlama, makine mühendisliği gibi farklı disiplinlerle ortak çalışmalar yapılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmaya 51401 No'lu proje kapsamında verdiği desteklerden dolayı İstanbul Üniversitesi BAP Birimine ve ayrıca çalışmalar sırasındaki katkılarından dolayı Maden Mühendisi Cengiz ÖZDAĞ'a ve Ali GEZER'e teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Al-Harashsheh, M., Kingman, S.W., 2004. Microwave-assisted leaching-a review. *Hydrometallurgy*, 73 (3-4), 189-203.
- Ali, A.Y., Bradshaw, S.M., 2010. Bonded-particle modelling of microwave-induced damage in ore particles. *Minerals Engineering*, 23 (10), 780-790.
- Ali, A.Y., Bradshaw, S.M., 2011. Confined particle bed breakage of microwave treated and untreated ores. *Minerals Engineering*, 24 (14), 1625-1630.
- Bond, F.C., 1954. Crushing and grinding calculations. *CIM Bulletin*, 47, 466-472.
- Can, N.M., Bayraktar, I., 2007. Effect of microwave treatment on the flotation and magnetic separation properties of pyrite, chalcopyrite, galena and sphalerite. *Minerals and Metallurgical Processing*, 24 (3), 185-192.
- Charikinya, E., Bradshaw, S., Becker, M., 2015. Characterising and quantifying microwave induced damage in coarse sphalerite ore particles. *Minerals Engineering*, 82, 14-24.
- Demir, İ., 2016. Güneş enerjisiyle çalışan bir sistem tasarlanarak kömürlerin kurutulması ve kalitelerinin artırılması. İstanbul Üniversitesi, İstanbul, s. 256.
- Eskibalci, M.F., 2007. Cevher hazırlama ve zenginleştirmede mikrodalga enerjisinin kullanılabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, s. 174.
- Eskibalci, M.F., 2014. Konvansiyonel ve mikrodalga ısıtma işleminin kuvarsitin öğütülebilirliğine etkisinin incelenmesi. *EÜFBED*, 7 (2), 169-190.
- Eskibalci, M.F., Özkan, Ş.G., 2012. An investigation of effect of microwave energy on electrostatic separation of colemanite and ulexite. *Minerals Engineering*, 31, 90-97.
- Güngören, C., 2009. Ultrasonik ve mikrodalga enerjilerinin kolemanit flotasyonunda ön işlem olarak kullanıma olanaklarının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, s. 112.
- Guo, S.-H., Chen, G., Peng, J.-H., Chen, J., Li, D.-B., Liu, L.-J., 2011. Microwave assisted grinding of ilmenite ore. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21 (9), 2122-2126.
- Hacıfazlıoğlu, H., 2014. Zonguldak şlam kömürünün kurutulmasında mikrodalga ve konvansiyonel fırının verimliliklerinin karşılaştırılması Türkiye 19. Kömür Kongresi,, Zonguldak, Türkiye, 291-301.
- Hardgrove, R.M., 1932. Grindability of coal. *ASME Transactions*, 54, 37-46.
- Jones, D.A., Kingman, S.W., Whittles, D.N., Lowndes, I.S., 2005. Understanding microwave assisted breakage. *Minerals Engineering*, 18 (7), 659-669.
- Kemal, M., Arslan, V., 2009. Kömür hazırlama teknolojisi. DEÜ Yayını, s. 53.
- Kingman, S.W., Rowson, N.A., 1998. Microwave treatment of minerals - a review. *Minerals Engineering*, 11 (11), 1081-1087.
- Kingman, S.W., Vorster, W., Rowson, N.A., 2000. The influence of mineralogy on microwave assisted grinding. *Minerals Engineering*, 13 (3), 313-327.
- Kutbay, I., Kuşkonmaz, N., 2004. Mikrodalga ısıtmanın seramik üretiminde kullanımı. *Metallurji Dergisi*, 137, 52-56.
- Lester, E., Kingman, S., 2004. The effect of microwave pre-heating on five different coals. *Fuel*, 83 (14-15), 1941-1947.
- Marland, S., Han, B., Merchant, A., Rowson, N., 2000. The effect of microwave radiation on coal grindability. *Fuel*, 79, 1283-1288.
- Özbayoğlu, G., Depci, T., Ataman, N., 2009. Effect of microwave radiation on coal flotation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31 (6), 492-499.
- Özkan, Ş.G., Eskibalci, M.F., Güngören, C., 2009. Mikrodalga enerjisinin kolemanit ve ulexitin sudaki çözünürlüğüne etkisinin araştırılması. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 22, (1), 85-93.
- Samanli, S., 2011. A comparison of the results obtained from grinding in a stirred media mill lignite coal samples treated with microwave and untreated samples. *Fuel*, 90 (2), 659-664.
- Sayın, Z.E., 2010. Altın konsntresinden doğrudan liç ile altın eldesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, s. 175.
- Tichanek, F., 2008. Contribution to determination of coal grindability using hardgrove method. *GeoScience Engineering* 54 (1), 27-32.
- Toraman, O.Y., 2010. The effect of high power microwave energy on the grindability of Turkish cayirhan lignite. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32 (19), 1794-1800.
- Toraman, O.Y., Depçi, T., 2007. Kömürde mikrodalga ile önışlem uygulamaları. *Madencilik*, 46 (3), 43-53.
- Tosun, Y.İ., 2015. Microwave activated crushing and grinding of Turkish coals and shale for cleaning and desulfurization. XVI Balkan Mineral Processing Congress, Belgrad, 622-629.
- Uslu, T., Atalay, Ü., 2003. Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite. *Fuel Processing Technology*, 85 (1), 21-29.
- Uslu, T., Atalay, Ü., Arol, A.I., 2003. Effect of microwave heating on magnetic separation of pyrite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*

Aspects, 225 (1-3), 161-167.

Vorster, W., 2001. The effect of microwave radiation on mineral processing. The University of Birmingham, Birmingham, p. 256.