

MİKRODALGA ENERJİSİNİN CEVHER HAZIRLAMADAKİ UYGULAMALARI VE BOR MİNERALLERİNİN ÖĞÜTÜLEBİLİRLİĞİNE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

APPLICATION OF MICROWAVE ENERGY IN MINERAL PROCESSING AND INVESTIGATION OF ITS EFFECTS ON GRINDABILITY OF BORON MINERALS

M. Faruk ESKİBALCI *, Şafak G. ÖZKAN

İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar-İstanbul

Yayına Geliş (Received): 15.01.08, Yayına Kabul (Accepted): 15.07.08

*Corresponding author

ÖZ: Mikrodalga enerjisinin 25 yıldır madencilik alanındaki çalışmalarda kullanıldığı ve bu yöndeki araştırmaların hızla arttığı gözlenmektedir. Pek çok araştırmacının bu konuda bilimsel ve teknolojik çalışmaları ve yayınlanmış makaleleri bulunmaktadır. Bu çalışmalarda mikrodalga enerjisinin; öğütmede, kurutma ve susuzlaştırmada, refrakter altın cevherlerinin ön zenginleştirilmesinde, kömür desülfürizasyonunda, liç işlemlerinde, kavurmada, karbonun aktivasyonunda, oksitlerin karbotermik redüksiyonunda ve atıkların minimizasyonunda uygulama potansiyelinin olduğu belirtilmektedir. İlk yatırım maliyetinin yüksek olmasına karşılık en önemli avantajları arasında proses süresini kısaltması ve buna bağlı olarak düşük enerji tüketimi yer almaktadır. Özellikle kurutma ve anhidrasyon ile malzemenin öğütülebilirliğine olan etkileri üzerindeki çalışmalar oldukça ilgi çekicidir. Bu çalışmada; cevher hazırlama ve zenginleştirmede mikrodalga enerjisinin kullanımı ile ilgili geniş bir literatür taramasını takiben, hidrate bor minerallerinden olan kolemanit ve üleksitin öğütülebilirliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga enerjisi, Öğütülebilirlik, Cevher hazırlama, Kolemanit, Üleksit

ABSTRACT: The use of microwave energy in mining has been experienced for 25 years and the research studies were directed to its use. There are scientific and technological works of many researchers in this subject. The use of microwave energy has very high potential in grinding, drying, anhydration, pre-concentration of refractory gold ores, desulphurization of coal, leaching, roasting, activation of carbon, carbothermic reduction of oxides and reduction of quantities of wastes. The main advantage of the use of microwave energy is shortening duration of the process and consequently the low energy consumption. Particularly the research on drying, anhydration and grindability are very important. Within this paper, the effects of microwave energy on the grindability of colemanite and ulexite were investigated after the literature survey of the use of microwave energy in mineral processing and beneficiation.

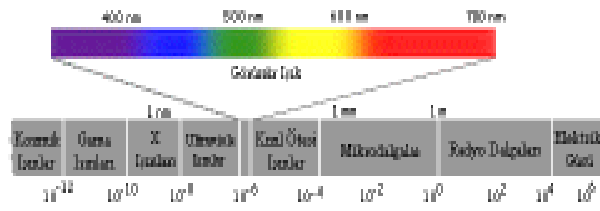
Key Words: Microwave energy, Grindability, Mineral processing, Colemanite, Ulexite

GİRİŞ

Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumun dalga boyu 1 mm'den 1 m ye kadar olan ve frekansı 300 MHz den 300 GHz'e kadar olan bölümüne denk gelen iyonize olmamış dalgalarıdır. Kızıl ötesi ışınlar ile radyo dalgaları arasında yer almaktadır (Jones ve diğ. 2002, Thostenson ve Chou 1999, Xia ve Pickles 1997, Yıldız ve Alp 2000, Haque 1999, Kingman ve diğ. 2001, Dieter 2003).

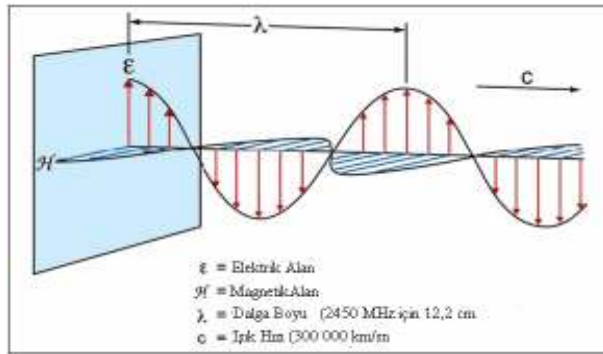
Şekil 1'de bir elektromanyetik spektrumun dalga boyuna bağlı olarak aldığı isimler şematik olarak verilmiştir (Kuantum 2006).

Mikrodalgalar; diğer elektromanyetik enerji formlarından (görülebilir, ultraviyole ya da kızılötesi ışınlar gibi) daha uzun dalga boylarına sahiptir. Bir elektromanyetik dalga, dalga boyu (λ), frekans (f) veya enerjisi ile karakterize edilmektedir. Şekil 2'de ise bir mikrodalga'nın görünümü verilmektedir (Barnhardt 2004).



Şekil 1. Elektromanyetik spektrum (Kuantum 2006).

Figure 1. Electromagnetic spectrum (Kuantum 2006).



Şekil 2. Mikrodalgalar (Barnhardt 2004).

Figure 2. Microwaves (Barnhardt 2004).

Elektromanyetik dalga birbirine dikey olan elektrik ve manyetik bileşenlerden oluşmaktadır (Kingman ve Rowson). Her ikisi de iletim yönüne dikey düzlemedir.

Mikrodalgalar, radyo ve televizyon yayınlarda kullanılan dalgalara yakın olduğundan, kullanım sırasında ortaya çıkabilecek etkileşimleri önlemek için

sadece, ulusal veya uluslar arası telekomünikasyon komisyonlarınca onaylanmış frekanslardan ısıtma amacıyla yararlanılır. Genel olarak ISM (Industrial, Scientific, Medical) bantlar olarak bilinen bu ışınlar 896, 915, 2450, 5800 ve 24125 MHz frekanslı ışınlardır (Stuchly 1983). Gıda sanayiinde kullanılan mikrodalga ışınlar, ev tipi fırınlarda 2450 MHz, sanayide ise 915 MHz frekanslı ışınlardır (Wang ve diğ. 2000).

Basit bir aynadan örneğin metalik bir levhadan yansıtılabilen mikrodalgalar, dielektrik arayüzeyde yansımaktadır ve parabolik yansıtıcılar ya da boru antenler ile odaklanabilmektedir. Mikrodalga enerji, 2450 MHz için yaklaşık %50 ve 915 MHz için yaklaşık %85 dönüşüm verimi ile elektrik enerjisinden elde edilebilmektedir (Chow ve Reader 2000, Bayraktar 2002).

MİKRODALGA FIRINLARIN

KULLANIM ALANLARI

Mikrodalga enerjisi ile ısıtma, bazı uygulamalarda, diğer ısı kaynaklarına göre büyük üstünlükler sağlamaktadır. Enerjinin maddenin içinde doğrudan ısıya dönüşmesi, anında kontrol edilebilmesine olanak sağlaması ve madde üzerinde onun yapısını bozacak elektrikselsel bir baskı yaratmamasıdır. Proses kontrolü, diğer yöntemlere nazaran daha hızlı yapılabilmektedir. Isıtma derecesine anında müdahale edilerek ve mikrodalga gücü değiştirilerek ısıtma hemen kontrol altına alınabilmektedir. Kontrol işlemi çok hızlı olduğundan, kullanılan ısıtıcıların boyutları küçük ve kapladıkları alan çok azdır (Artan 1997, Güngör ve Atalay 1999).

Mikrodalga ısıtma ile pişirme, haşlama, kurutma, pastörizasyon, buz çözme, sterilizasyon ve temperleme gibi işlemler yüksek verimle kısa zamanda yapılabilmektedir. Pişirme işlemi kısa zamanda, gıda maddesinin her noktasında homojen bir ısı dağılımı oluşturularak yapılan bir işlemdir. İşlemin süresi pişirilecek gıdanın su içeriğine, yoğunluğuna, dielektrik kayıp faktörüne ve kütlesine bağlıdır (Kanat 2001, Eskibalci 2007).

MİKRODALGAYI ENERJİYE DÖNÜŞTÜRMEDE

ETKİN OLAN FAKTÖRLER

Genel olarak bir malzemenin dielektrik özellikleri; sıcaklık, nem içeriği, yoğunluk ve malzeme geometrisi ile ilişkilidir (Chen ve diğ. 1984, Klark ve diğ. 2000).

Nem İçeriği: Nem içeriği ne kadar fazla ise ısıtma o kadar hızlı olur, kritik nem yüzdesinden sonra malzemede bozulmalar başlar.

Yoğunluk: Maddelerin yoğunluğu azaldıkça dielektrik özellikleri azalır, dolayısıyla daha zor ısınırlar. Havanın dielektrik sabiti 1'dir ve elektromanyetik dalgaların büyük bir kısmını geçirir.

Sıcaklık: Malzemenin özelliğine bağlı olarak bazı malzemelerin dielektrik sabiti sıcaklıkla artar, bazıları azalır. Genel olarak maddelerin donma noktalarının altında düşük dielektrik sabitleri vardır. Örneğin; 0 °C'deki buzun dielektrik sabiti 0.003 iken, aynı sıcaklıktaki suyun dielektrik sabiti 12 civarındadır.

Frekans: Dielektrik özellikler uygulanan mikrodalganın frekansı ile etkilenmektedirler.

Elektrik İletkenlik: Yüklü iyonların ortamda bulunması mikrodalga ısıtmada en kuvvetli etkindir. Kurutma sırasında buharlaşma sonucu konsantrasyon artışı, sona doğru ısıtma hızını hızlandırır.

Termal İletkenlik: Mikrodalga ısıtmalarda termal iletkenlik etkisi azdır. Çünkü mikrodalga çok hızlı bir ısıtma yöntemidir. Mikrodalga ışınının malzemeye işleme derinliğinin az olması halinde veya geometrisi düzgün olmayan şekillerde termal iletkenlik homojen ısıtma için önem kazanabilir [49].

Spesifik Isı: Maddenin ısı kapasitesi C_p ; m gram maddenin t_1 (°C) sıcaklığından, t_2 (°C) sıcaklığına ısıtılması için harcanması gereken ısı Q olarak ifade edilirse C_p aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

Mikrodalga'nın Malzemeye İşleme Derinliği: Büyük kütlelerin ısıtılmasında bu özellik çok önem taşımaktadır. Enerjinin mümkün olduğunca iç bölgelere işlenmesi gerekir. Malzemenin dielektrik sabiti (ϵ^1) ve dielektrik kayıp faktörü (ϵ^{11}) malzeme içerisine efektif enerji işleme derinliğinin hesaplanmasına imkan verir (Dincov ve diğ. 2004). İşleme derinliği Formül 1'deki gibi hesap edilebilir. İşleme derinliği frekans küçüldükçe artmakta, büyüdükçe azalmaktadır. Bu nedenle madde içerisinde elektromanyetik dalgalar ilerledikçe alan ve güç dağılımı gittikçe zayıflayacağından mikrodalga enerjisi ile ısıtılacak maddelerin kalınlıkları büyük önem taşımaktadır. Eğer numunenin kalınlığı dalganın işleme derinliğinden fazla ise, iç kısımların soğuk kalması olasıdır. Tablo 1'de değişik frekanslarda mikrodalga enerjinin işleme derinliği, Şekil 3'te ise frekans ile güç yoğunluğu ve işleme derinliğinin bağıntısı verilmiştir (Klark ve diğ. 2000, Kutbay ve Kuşkonmaz 2004, Al-Harashsh 2003, Bows 1999, Chow 2000).

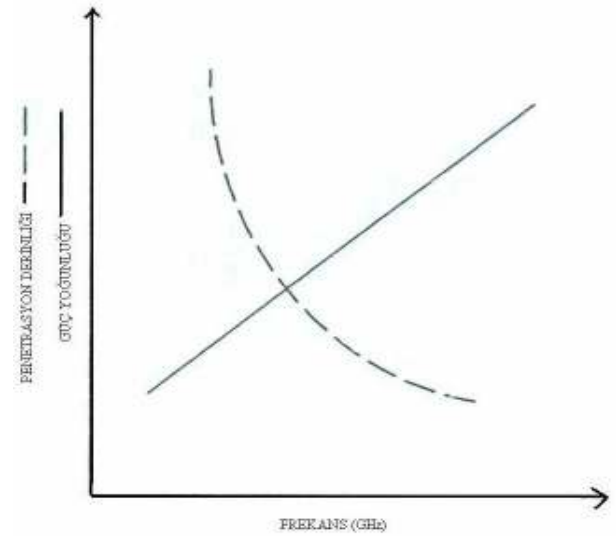
$$P_d = \frac{\lambda_0 \sqrt{2}}{2\pi} \left[\epsilon^1 \left(\sqrt{1 + (\epsilon^{11} / \epsilon^1)^2} - 1 \right) \right]^{-1/2} \quad (1)$$

P_d : İşleme Derinliği, cm
 λ_0 : Serbest yüzey dalga boyu, $\lambda_0 = c/f$ (c:ışık hızı, f: frekans)
 ϵ^1 : Dielektrik sabiti
 ϵ^{11} : Kayıp Faktörü

Tablo 1. Çeşitli frekanslarda işleme derinliği (Kocakuşak 2003)

Table 1. Penetration depth at various frequency (Kocakuşak 2003)

Frekans (MHz)	λ (m)	Derinlik (m)
5.00	60,000	23,9
13.56	21,100	8,8
27.12	11,100	4,4
40.00	7,500	3,0
915.00	0,328	0,130
2450.00	0,122	0,049



Şekil 3. Frekans ile güç yoğunluğu ve işleme derinliğinin bağıntısı (Chow 2000)

Figure 3. Relationship between frequency with power supply and penetration depth (Chow 2000)

MİKRODALGA ISITMADA TEMEL KAVRAMLAR

Mikrodalgaların endüstriyel, bilimsel, tıbbi ve evsel uygulamaları iki temel gruba ayrılabilir. Bunlar;

- Mikrodalga enerjinin ısıya dönüşümünü içeren güç uygulamaları,
- Düşük alan şiddetlerindeki mikrodalga alanlarında nesnelere ait testler için yardımcı uygulamalar.

Her iki grup içinde malzemenin elektromanyetik özellikleri çok önemli rol oynamaktadır. Mikrodalga ısıtma sistemlerinde elektromanyetik enerji doğrudan madde içerisinde ısıya dönüştüğü için mikrodalga ısıtma sistemlerinde ısı, konvansiyonel sistemlerin tam tersine maddenin içinden dışına doğru taşınır (Artan 1997).

Malzemelerin elektromanyetik alandaki etkileşimleri olarak tanımlanan malzeme özellikleri; kompleks dielektrik sabiti (permütivite) (ϵ^*), ve permeabilite (μ) dir (Dincov ve diğ. 2004). Permutivite elektrik alan içerisindeki malzeme davranışı olarak tanımlanır ve iki kısma ayrılır. Bunlar dielektrik sabiti ϵ^1 olarak tanımlanan gerçek kısım ve kayıp faktörü ϵ^{11} olarak tanımlanan imgesel kısımdır. Bunlar arasındaki bağıntı Formül 2’de verilmiştir (Artan 1997, Bradshaw 2005, Risman 1991).

$$\epsilon^* = \epsilon^1 - j\epsilon^{11} \quad (2)$$

- ϵ^* : Kompleks dielektrik sabiti; Elektrik alan içerisindeki malzeme davranışdır.
 j : $j=(-1)^{1/2}$
 ϵ^1 : Dielektrik sabiti; malzemenin, içinden geçen mikrodalga enerjini depolama kabiliyetinin ölçüsüdür
 ϵ^{11} : Kayıp faktörü; malzeme içerisindeki elektrik-alan enerjisinin ısı kaybı olarak tanımlanır.

Diğer bir deyişle, “kayıp” faktörü, giren mikrodalga enerjisinin miktarını simgelemektedir ve frekansa bağlı olarak değişir, bu enerji, malzeme içerisinde ısı olarak dağılmaya başlamasıyla kaybolmaktadır. Bu yüzden, yüksek kayıp faktörü olan bir malzeme, mikrodalga enerji ile kolayca ısıtılabilir (Haque 1999, Artan 1997, Kingman ve diğ. 2000).

Mikrodalga enerjisinin dielektrik madde ile olan etkileşimi çok karmaşık olup, bu ilişkide fiziksel parametreler çok önemli rol oynar (Yıldız ve Alp 2000). Madde içinde harcanan güç, yine madde üzerinde oluşan elektrik alan büyüklükleri kullanılarak hesaplanır. Maddenin dielektrik özelliğinden dolayı elektro manyetik alan dielektrik yapıya nüfuz ettikçe zayıflar. Bu nedenle işlenecek maddenin kalınlığı ile uygulanacak mikrodalga frekansı arasında çok önemli bir ilişki vardır. Buradan da anlaşıldığı gibi mikrodalga fırın içerisindeki elektrik alan şiddeti en önemli parametrelerden biridir (Dincov ve diğ. 2004, Artan 1997).

Birim hacim başına absorbe etme gücü P (W/m^3) ile ifade edilen dielektrik ısıtma ve iletkenlik arasındaki ilişki Formül 3’te verilmiştir.

$$P_v = kfE^2 \epsilon^1 \tan \delta \quad (3)$$

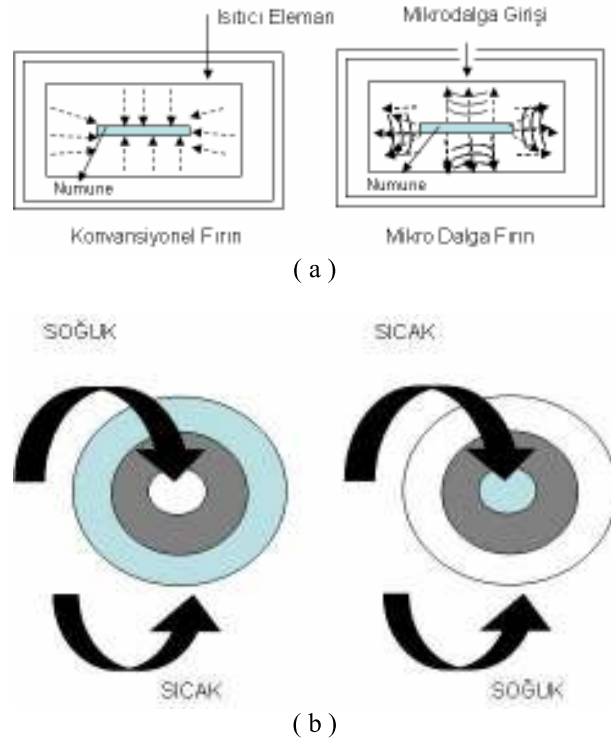
olduğunu biliyoruz, formülü yeniden düzenlediğimizde Formül 4 elde edilmektedir.

$$P_v = kfE^2 \epsilon^{11} \quad (4)$$

- E : elektrik alanı, (V/m)
 k : elektriksel iletkenlik, ($2\pi\epsilon_0=55,603 \times 10^{-12}$ F/m)
 f : mikrodalga frekansı, (Hz)
 ϵ^{11} : kayıp faktörüdür.
 ϵ_0 : boş alan geçirgenliği, $8,86 \times 10^{-12}$ F/m

Bu denklem malzeme tarafından absorbe edilen gücün, frekans, dielektrik sabiti, kayıp tanjantı ve elektrik alanın karesi ile doğru orantılı olarak değiştiğini göstermektedir (Artan 1997).

Konvansiyonel ve bir mikrodalga fırında ısıtma paternleri Şekil 4’te verilmiştir (Kocakuşak ve diğ. 2003).



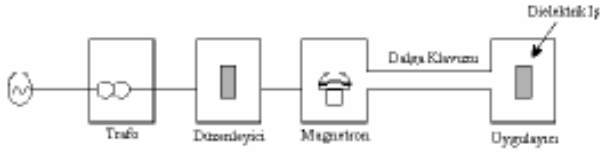
Şekil 4. Konvansiyonel ve mikrodalga fırınlarda ısıtma paternleri (Kocakuşak 2003).

Figure 4. Heating pattern at conventional and microwave oven (Kocakuşak 2003).

Şekil 4 incelendiğinde konvansiyonel ısıtmada numune dıştan içe doğru ısıtılırken, mikrodalga ısıtmada bunun tam tersi numune içten yani merkezden dışa doğru ısınmaktadır.

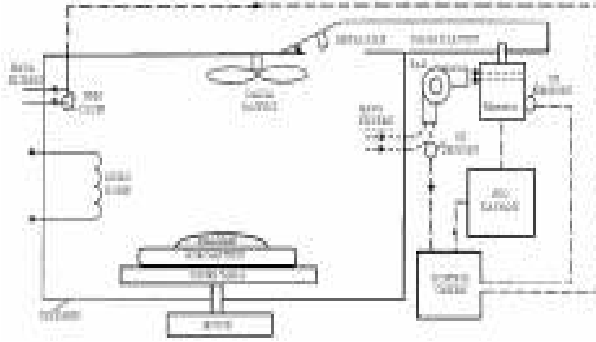
MİKRODALGA FIRINLARIN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

Mikrodalga fırınlarda ısıtma sistemi 4 temel kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; güç temini, magnetron, hedef malzemenin ısıtılması için uygulayıcı ve mikrodalgaların jeneratörden uygulayıcıya taşınması için kullanılan dalga klavuzudur. Şekil 5’te mikrodalga ısıtma sisteminin basitleştirilmiş diyagramı ve Şekil 6’da ise bir mikrodalga fırının yapısı verilmiştir (Thostenson 1999, Yıldız ve Alp 2000, Haque 1999).



Şekil 5. Bir mikrodalga ısıtma sisteminin basit diyagramı (Haque 1999)

Figure 5. A basic diagram of microwave heating (Haque 1999)



Şekil 6. Bir mikrodalga fırının yapısı (Chow 2000)

Figure 6. A scheme of microwave oven (Chow 2000)

Mikrodalgalar ışık hızında yayılırlar. Mikrodalga kaynağı açılır açılmaz, ısıtılacak kütleye nüfuz eder ve derhal enerji dönüşümünü başlatır. Kaynak kapatıldığında ısıtma prosesi derhal durur. Polar olmayan maddeler (teflon, hava, kuvars camı) mikrodalga enerjisini ısı enerjisine dönüştüremezler. Mikrodalgalar bu maddelerden geçerken zayıflamazlar. Genelde, enerji dönüşümünü yerine getiren ve ısı kaynağını temsil eden fırın, ısıtılacak maddeye mikrodalga gönderir. Metalik fırın muhafazası (mikrodalga bölme) sadece maddeye enerji yöneltmek için enerji kaybını önlemek ve personeli mikrodalga radyasyona maruz bırakmamak için kullanılmaktadır (Chow 2000).

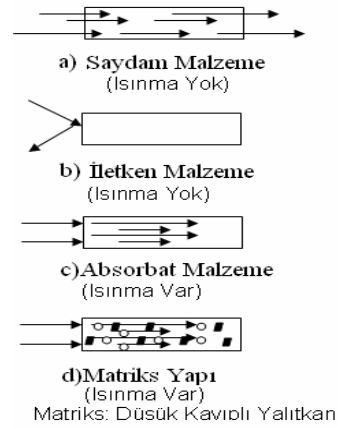
Cam, seramik ve hava gibi, saydam malzemeler yalıtkan olarak sınıflandırılmaktadır. Bunlar mikrodalgayı geçirirler veya çok az ısınır.

Mikrodalgalar metal yüzeylerinden yansıdıkları için absorbe edilemezler ve ısınmazlar. İletken malzemeler ısınma olmadığı için mikrodalga fırınlar içinde dalga klavuzu amacıyla kullanılmaktadır (Kutbay ve Kuşonmaz 2004, Klark ve diğ. 2000).

Mikrodalga enerjisinin en iyi absorblandığı malzemeler kolaylıkla ısıtılabilir ve bu malzemeler "dielektrikler" veya "absorbantlar" olarak sınıflandırılmaktadır. Su molekülleri içeren maddeler bunlara örnek olarak verilebilir (Artan 1997).

Dördüncü tip malzeme türü matris yapı dediğimiz bir kısmı yüksek kayıplı malzeme iken diğer kısmı düşük kayıplı malzemeden oluşan maddedir. Bu

tür malzemeler mikrodalga ısıtma teknolojisinde selektif ısıtma açısından önemli avantajlar sağlamaktadır ki, konvansiyonel yöntemlerde selektif ısıtma söz konusu olmamaktadır. Şekil 7'de malzemelerin mikrodalga enerji ile etkileşimi gösterilmektedir (Jones ve diğ. 2002, Haqua 1999, Jones ve diğ. 2005).



Şekil 7. Malzemeler ile mikrodalgaların etkileşimi (Haque 1999)

Figure 7. Interaction of the microwave and the materials (Haque 1999)

SICAKLIK ÖLÇÜMÜ

Mikrodalga radyasyonu sırasında sıcaklığın ölçümü en büyük problemlerden birini teşkil etmektedir (Chen ve diğ. 1984, Xia ve Pickles 1997). Luxtron fluoroptik ya da accufibre sistemleri, 400 °C üzerinde sıcaklık ölçümlerinde kullanılabilir, ancak pek çok endüstriyel uygulamalar için çok kırılkan olabilmektedir. Optik pyrometre ve thermocouple (metalik probe) yüksek sıcaklıkları ölçmek için kullanılabilir. Bir optik pyrometre olan thermovision infrared kamera ile sadece numunenin yüzey sıcaklığını kaydedilebilir ki, bu sıcaklık her zaman numunenin içsel sıcaklığından çok düşük olmaktadır. Thermocouple (metalik probe) sıcaklık ölçümü için kullanıldığı zaman, örnek ve thermocouple arasında oluşan ark, thermocouple performansında hatanın meydana gelmesine yol açabilmektedir. Son geliştirilen sıcaklık ölçüm gereçlerinden biri de ultrasonik ısı problemleridir ki, bunlar 1500 °C üzerinde sıcaklıkları ölçebilmektedir (Xia ve Pickles 1997, Haqua 1999).

SANAYİDE KULLANILAN MİKRODALGA EKİPMANLARI

Sanayide kullanılan mikrodalga ekipmanları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir (Kocakuşak ve diğ. 2003, Suhm ve High 1999, Zettergren 1998, Sugisawa ve diğ. 1987).

- Hareketli Mikrodalga Cihazı (Traveling wave quide) (Elyaf, Kağıt ve Gıda sektörlerinde)
- Tek Hücreli Mikrodalga Fırın (Single Mode Cavity) (Seramiklerde, gıda, evlerde vb.)
- Çok Hücreli Mikrodalga Fırın (Multi Mode Cavity) (Seramik Sinterleme, Gıda ve Kimyasalların Kurutulması ve Dehidrasyonu)
- Sürekli Sistemlerde Kullanılan Rezonans Tipi (büyük hacimli cisimlerde)
- Hareketli Polarize Edilmiş Mikrodalga Cihazı (Homojen Isıtmalar için)
- Daldırılmalı Mikrodalga Cihazları (Horn Type) (Beton, Kaya Kırma ve Petrol Sondajında)
- Elektromanyetik Lensler (Tıbbi Uygulamalarda)

CEVHER ÖĞÜTÜLMESİNDE MİKRODALGA ÖN İŞLEM UYGULAMASI

Cevher hazırlama endüstrisinde boyut küçültme işlemleri son derece büyük bir enerji yoğun işlem olup, bu senede yüzlerce megawattlık bir büyüklüğe ulaşmaktadır. Boyut küçültmedeki önemli gelişmelerden pek çoğu, yüksek işletme maliyetlerini azaltmayı amaçlamıştır. Teoride ancak verilen enerjinin %1 kadarı yeni bir yüzey oluşturmak için kullanılabilir. Geri kalan enerji; ses, ısı, çarpışma vb. gibi dağılmaktadır.

Pek çok mineral doğada saf olarak bulunmaz, ancak değerli ve değersiz minerallerin bir arada olduğu karışım şeklindedir. Her bir mineralin sahip olduğu farklı dielektrik özellikler nedeniyle malzemenin ısıtılması sırasında da farklı davranışlar göstermektedirler. Tane arayüzeyleri boyunca farklı gerilimler oluşmaktadır (Kingman ve diğ. 2000).

Isıl destekli serbestleşme (boyut küçültme), öğütme için gerekli olan enerji ihtiyacını azaltmak ve mineral serbestleşmesini artırarak uygun cevherlerdeki minerallerin birbirinden ayrılmasını geliştirmek için ekonomik bir yöntem olarak mikrodalga ön ısıtma önerilmektedir. Bunun yanında değirmen kapasitesinin artırılabilirdiği, ton cevher başına aşınmanın azaldığı, değirmen ürün boyutlarının çok daha iyi kontrol edilebildiği, ince şlam üretiminin azaltılabildiği gibi faydaları da rapor edilmektedir (Kingman ve diğ. 2000, Ersayın ve diğ. 1994, Şener ve Özbayoğlu 1996).

Güngör ve Atalay (1996, 1999) Ülkemizdeki Kef kromit cevheri ve farklı kimyasal bileşimdeki üç bakır cevheri üzerinde mikrodalga destekli öğütülebilirlik çalışmalarını yapmışlardır. Bu çalışmalarda mikrodalga ısıtmanın cevher üzerindeki etkilerini görmek için orijinal ve ısı uygulanmış örneklerin iş indeksi, kırılma oranı ve kırılma dağılım fonksiyonlarını araştırılmışlardır. Kef kromit cevheri ve bakır cevherleri

üzerinde yaptıkları bu çalışmalarda mikrodalga ön uygulamanın sınırlı bir etki yaptığını, tespit etmişlerdir.

Walkiewicz ve diğ. (1991) absorblama özelliği olmayan gang yapıları içinde mikrodalga enerji absorblayan mineraller içeren cevherlerin hızlı ısıtılmasının termal gerilimler ürettiğini göstermişlerdir. Bu termal gerilim mineral tane sınırları boyunca mikro çatlaklar meydana getirmiştir. Sonuç olarak, bir cevher örneği öğütme için çok uygun hale gelmektedir. Yazarlara göre öğütme işlemi, cevher hazırlama işlemleri içerisinde kullanılan enerjinin %50-70'ini tüketmektedir. Bundan başka konvansiyonel öğütme proseslerinin enerji verimliliği yaklaşık olarak %1 dir. Bu çalışmada demir cevherinin mikrodalga ön ısıtılması ile öğütme veriminin %9,9'dan %23,9'a kadar artırılabilirdiği belirtilmiştir.

Wang ve diğ. (2000) kireçtaşı, dolomit, kuvars ve bakır cevherleri üzerinde mikrodalga ön uygulamanın öğütülebilirlik karakteristiklerine olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında tane boyutunun önemli etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Kireçtaşı ve kuvarsın iri tane boyutlarında bünyelerinde oluşan mikroçatlakların değirmende öğütme sırasında faydalı olduğunu belirtmişlerdir.

Özbayoğlu ve Depci (2006), mikrodalga enerjinin kömürün öğütülebilirliği üzerindeki etkilerini Hardgrove öğütülebilirlik indekslerini hesaplayarak incelemiş ve farklı tane boyutlarına, 0,17 ile 0,9 kW arasında 5 farklı mikrodalga güç ve 15 ile 60 sn arasında farklı sürelerde uyguladıkları testlerde öğütülebilirliğin artırılabilirdiğini belirtmişlerdir.

Kingman ve diğ. (2000) farklı mineralojilere sahip 4 farklı cevher üzerinde mikrodalga enerjinin cevherlerin öğütülebilirliğine olan etkilerini araştırmışlardır. Deneysel olarak ilmenit cevheri, masif sülfür cevheri, yüksek refrakter altın cevheri ve karbonatlı cevherler kullanılmıştır. Örneklerin tamamı 22,5 mm altına kırıldıktan sonra tane boyut guruplarına ayrılarak mikrodalga ile ve mikrodalgasız olarak öğütme işlemine tabi tutulmuş, iş indeksleri tesbit edilerek elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Uygulanan 2,6 kW mikrodalga enerjinin ilmenit ve karbonatlı cevherlerinin iş indekslerini büyük oranda azalttığı, masif sülfür cevherinin de mikrodalga enerjiye maruz kalma zamanı arttıkça iş indeksinde büyük düşme olduğu tesbit edilmiştir. Refrakter altın cevheri üzerinde ise önemli bir etki tespit edilememiştir.

Kömürle çalışan termik santrallarda pülverize kömür üretimi oldukça pahalı ve enerji yoğun bir prosesdir. Kömürün öğütülebilirliğinde ısı uygulamasının etkisini belirlemek için yapılan bir çalışmada 3 farklı yöntem denenmiş ve birbiri ile mukayese edilmiştir. İlk olarak 650 W ve 2450 MHz frekanslı bir mikrodalga fırında daha sonra 1,5 kW ve 2450 MHz frekanslı bir mikrodalga fırında son olarak da konvansiyonel muffle bir fırında kömür örnekleri ısı

ön işleme tabi tutulmuşlardır. Konvansiyonel ısıtma ve mikrodalga ısıtma işlemlerinden elde edilen veriler karşılaştırıldığında mikrodalga ısıtmanın kömürün kırılabilirliğini konvansiyonel ısıtmaya göre az da olsa bir miktar artırdığı tespit edilmiştir (Harrison ve Rowson 1997, Van Der Berg ve diğ. 1992).

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Malzeme ve Yöntem

Deneysel çalışmalarda kullanılan kolemanit ve üleksit numuneleri Eti Maden A.Ş.'ye bağlı Bigadiç Bor İşletmesinden temin edilmiştir. Ortalama tane boyutu 200 mm olan yüksek saflıktaki numuneler üzerinde ilk olarak yapılan işlem, temizleme yani kristal yüzeylerindeki kil gibi safsızlıkların uzaklaştırılması olmuştur. Daha sonra doğal kurutma işlemi yapılarak (açık havada) yüzey nemi giderilen numuneler, öncelikle birincil boyut küçültme işlemine tabi tutulmuşlardır.

Numuneler öncelikle bir çekiç vasıtası ile çeneli kırıcıya girecek tane boyutuna yaklaşık 50 mm'ye indirildikten sonra primer bir kırıcı olan tek istinat kollu laboratuvar tipi çeneli kırıcı vasıtası ile iki kademe kırılmıştır. Böylelikle malzemenin tane boyutunun tamamı 8 mm altına indirilmiştir. Elde edilen kırılmış ürün 8, 4, 2 ve 1 mm'lik elekler kullanılarak tane boyut guruplarına ayrılmış ve her bir tane boyut gurubundaki malzeme ileriki deneylerde kullanılmak üzere naylon poşetlere alınarak arşivlenmiştir.

Öğütme deneyleri İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Öğütme öncesi yüzey modifikasyon işlemlerinde 2450 MHz frekansında, 5 farklı güç seviyesinde çalışan ev tipi bir mikrodalga fırın, ısı ölçümlerinde ise Voltcraft IR-1001A model infrared termometre kullanılmıştır. Her bir numuneden 100 gr'lık temsili örnekler alınarak her biri ayrı ayrı 180 W, 360 W, 540 W, 720 W ve 900 W mikrodalga güç

seviyelerinde ve farklı maruz kalma sürelerinde 5 dk, 10 dk, 15 dk ve 30 dk mikrodalga enerjiye tabi tutulmuşlardır.

Öğütme deneyleri kuru ortamda 2,5 lt hacimli seramik gövdeli ve bilyeli değirmen içerisinde gerçekleştirilmiştir. Öğütücü eleman şarj miktarı %40 ve öğütme süresi her bir deney için 15 dk olarak sabit uygulanmıştır. Deney sonunda numuneler otomatik eleme cihazı ile kuru eleme işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler ile tane boyut dağılımı grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerdeki kümülatif elek altı eğrileri yardımı ile mikrodalga enerjisinin kolemanit ve üleksit numunelerinin öğütülebilirliğine olan olumlu veya olumsuz etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Kimyasal Analizler

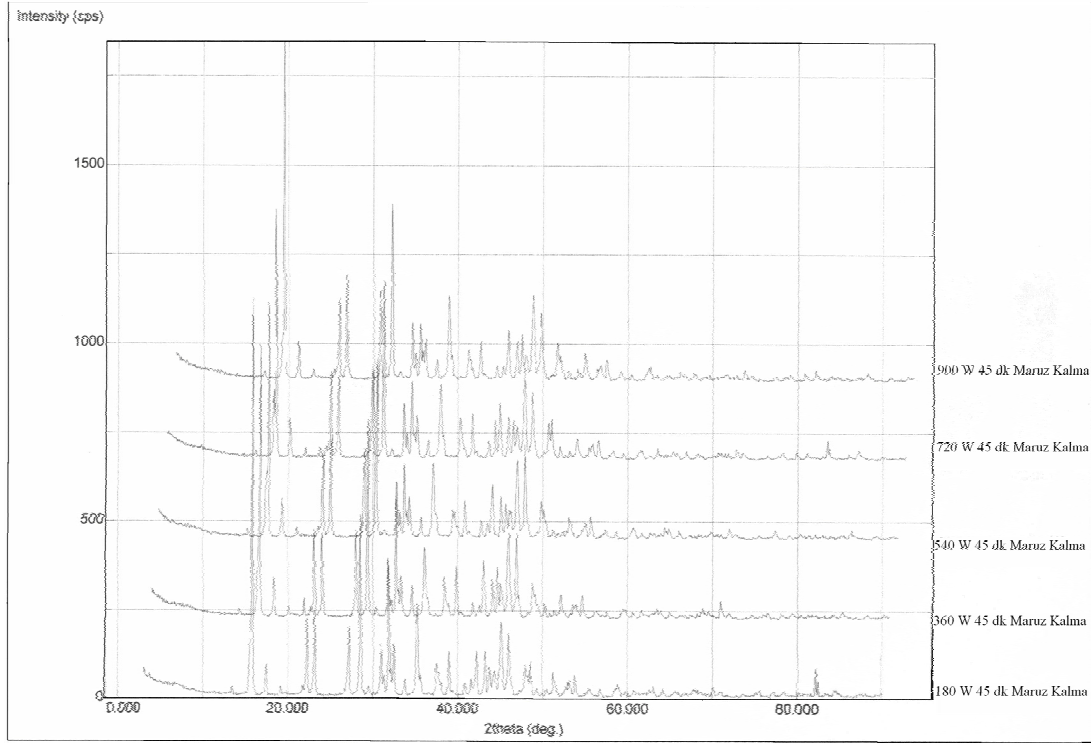
Karakterizasyon testleri kapsamında ilk olarak numunenin komple kimyasal analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler Eti Maden A.Ş. Bigadiç Bor İşletmesi laboratuvarlarında yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. B₂O₃ ve H₂O analizleri volumetrik (titrimetrik), diğer analizler X-Ray Floresans cihazında yaptırılmıştır.

Mineralojik Analizler

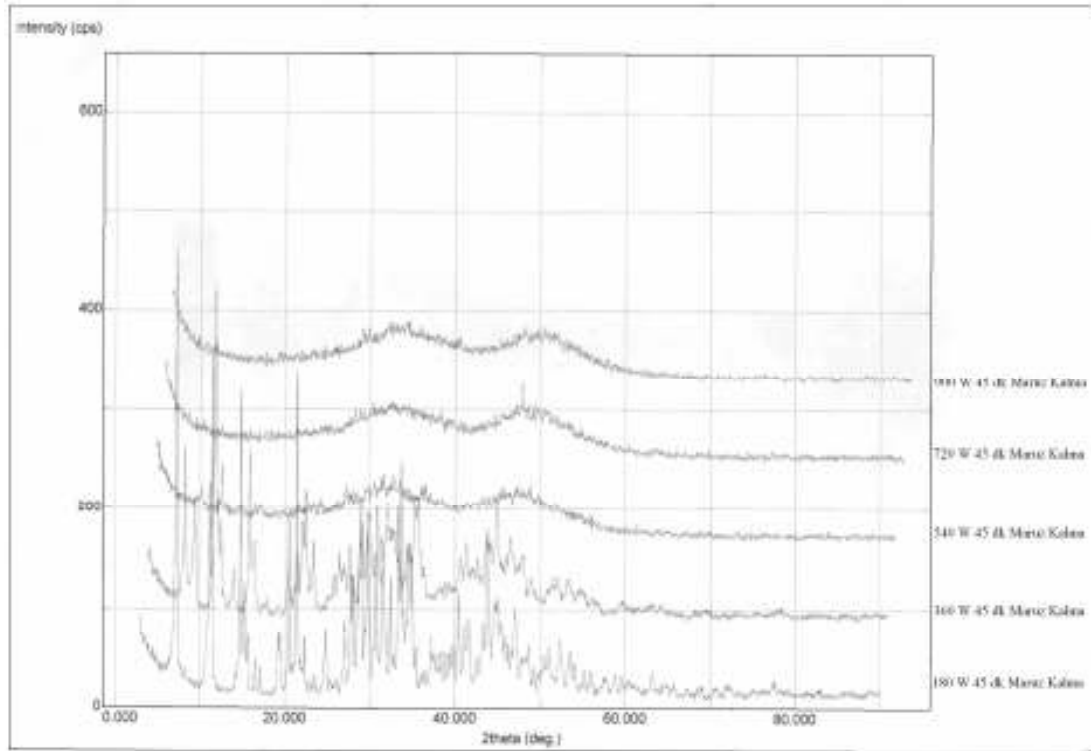
Temsili numuneler üzerinde mineralojik yapının belirlenmesi ve mikrodalga enerjiye maruz kaldıktan sonra oluşacak yeni yapıların tespit edilebilmesi için yapılan XRD (X-Ray Diffraction) analizlerinde de numunelerin saflık derecelerini teyit eder nitelikte kolemanit ve üleksit pikleri belirlenmiştir. Mikrodalga enerjiye farklı sürelerde maruz kalmış numunelerin XRD grafikleri Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Ölçümler İstanbul Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren İleri Analizler Laboratuvarı (İAL)'nda bulunan Rigaku D/Max-2200/PC XRD Cihazı 200 Vac 3q 20 A/50 Hz güç kapasitesine sahip bir cihazda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Numunenin kimyasal analizi
Table 3. Chemical analysis of the sample

Bileşen	B ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	SiO ₂	SO ₄	SrO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	As ppm	Ateş zayıtı
Kolemanit	49,17	26,71	0,25	1,27	2,95	0,26	0,09	0,08	0,012	3,030	19,01
Üleksit	42,98	13,80	3,20	0,46	1,78	0,20	0,74	0,05	0,010	33,33	35,90



Şekil 8. Kolemanitin farklı güç seviyelerinde 45 dk maruz kalma süresindeki XRD analizleri
Figure 8. XRD diagram of colemanite treated different power levels for 45 minutes



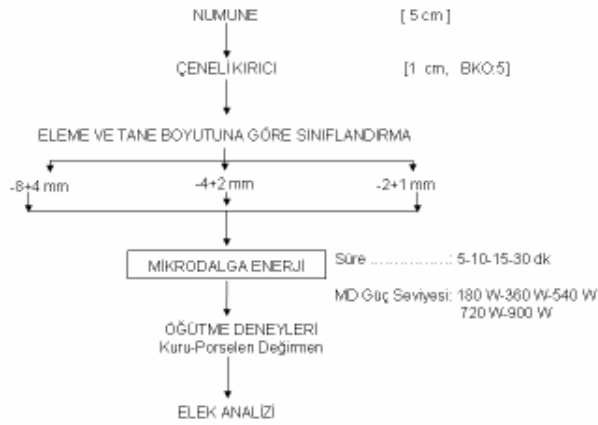
Şekil 9. Üleksitin farklı güç seviyelerinde 45 dk maruz kalma süresindeki XRD analizleri
Figure 9. XRD diagram of üleksitin treated different power levels for 45 minutes

Şekil 8 incelendiğinde uygulanan mikrodalga güç seviyelerinde kolemanitin kristal yapısında herhangi bir bozunmanın olmadığı buna karşılık, Şekil 9 incelendiğinde ise üleksitin 360 W güç seviyesinden sonra yapısının hızlı bir şekilde bozulmaya başladığı 540 W ve yukarısında ise yapısının tamamen bozulup amorf bir hal aldığı görülmektedir.

Öğütme Deneyleri

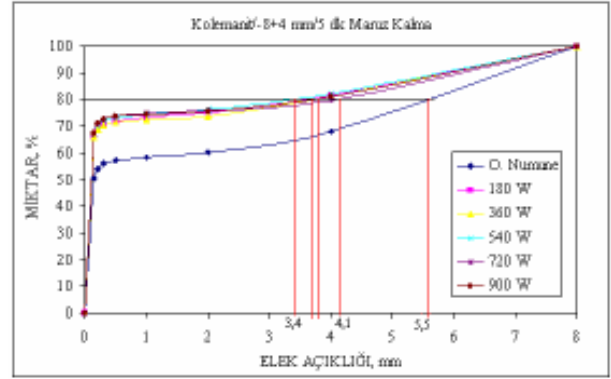
Öğütme deneyleri akım şeması Şekil 10'da verilmiştir.

100'er gramlık hazırlanan her bir kolemanit ve üleksit numuneleri üzerinde öncelikle referans bir değer elde etmek amacıyla doğrudan ve daha sonra karşılaştırma amacıyla 5 farklı mikrodalga güç seviyesinde 5 dk, 10 dk, 15 dk ve 30 dk maruz kalma süreleri ile mikrodalga enerjiye maruz bırakıldıktan sonra numunelerin öğütme testleri gerçekleştirilmiştir.

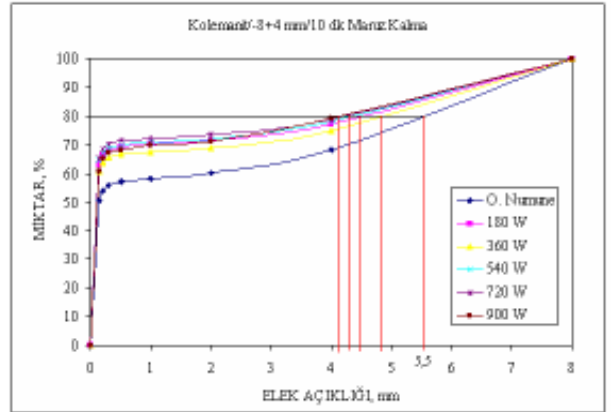


Şekil 10. Öğütme deneyleri akım şeması
Figure 10. Flowsheet of grinding experiments

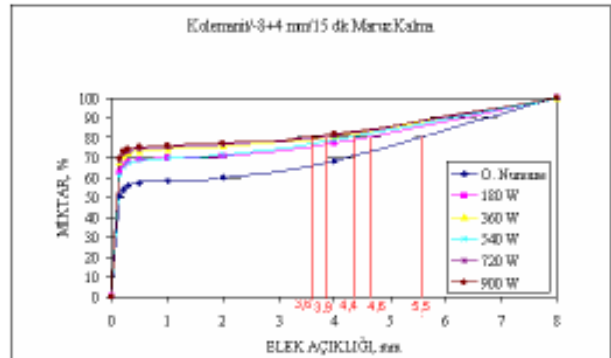
-8+4 mm tane boyutundaki kolemanit minerali üzerinde yapılan öğütme deneylerinden elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak çizilen kümülatif elekaltı eğrileri 5 dk maruz kalma için Şekil 11, 10 dk maruz kalma için Şekil 12, 15 dk maruz kalma için Şekil 13 ve 30 dk maruz kalma için Şekil 14'te gösterilmiştir.



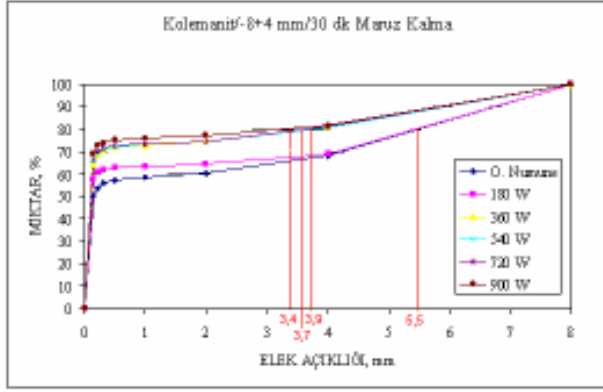
Şekil 11. 5 dk Maruz kalma deney sonuçları
Figure 11. Results of experiments for 5 mins. treatment time



Şekil 12. 10 dk Maruz kalma deney sonuçları
Figure 12. Results of experiments for 10 mins. treatment time



Şekil 13. 15 dk Maruz kalma deney sonuçları
Figure 13. Results of experiments for 15 mins. treatment time

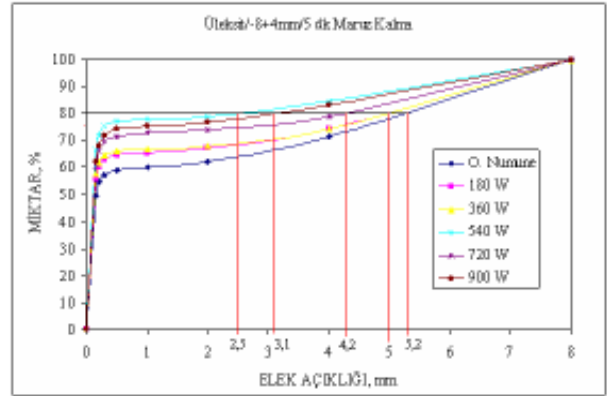


Şekil 14. 30 dk Maruz kalma deney sonuçları

Figure 14. Results of experiments for 30 mins. treatment time

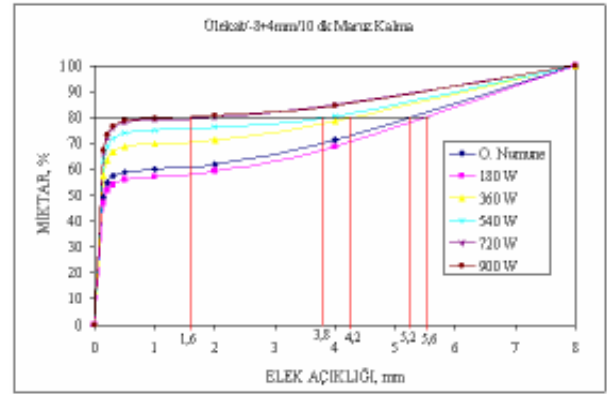
-8+4 mm tane boyutuna uygulanan öğütme deneylerinde öncelikle orijinal kolemanit numunesi üzerinde çalışılmış, mikrodalga enerjiye bağlı deneylerden elde edilecek sonuçları karşılaştırma yapabilmek için referans değerler elde edilmiştir. Orijinal numunenin kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde d_{80} tane boyutunun 5,5 mm olduğu tespit edilmiştir. Şekil 11'deki verileri incelediğimizde 5 dk farklı mikrodalga enerji seviyelerine maruz kalmış örneklerin d_{80} tane boyutlarında 3,4 mm seviyelerine kadar bir azalma göze çarpmaktadır. Bu orijinal numuneye göre d_{80} tane boyutunda %38,20 oranında bir azalmayı ifade etmektedir. Elek analiz verilerini rakamsal olarak incelediğimizde ise 0,150 mm tane boyutu altına inen malzeme miktarlarında da orijinal numuneye göre büyük artışlar olmuştur. Örneğin orijinal numunenin 0,150 mm tane boyutundaki malzeme miktarı %50,40 iken 540 W güç seviyesi 10 dk maruz kalma süresinde bu miktar %64,41, 900 W güç seviyesi 30 dk maruz kalma süresinde ise %69,16 ya çıkmıştır. 0,150 mm tane boyutu altına inen malzeme miktarlarında orijinal numuneye göre yaklaşık %20'lik bir artış söz konusu olmuştur. Bu deneylerden kolemanitin öğütülebilirliğinin artan güç seviyesine paralel olarak arttığı tespit edilmiştir.

-8+4 mm tane boyutundaki üleksit minerali üzerinde yapılan öğütme deneylerinden elde edilen sonuçlar dan yola çıkılarak çizilen kümülatif elekaltı eğrileri 5 dakika maruz kalma için Şekil 15, 10 dk maruz kalma için Şekil 16, 15 dk maruz kalma için Şekil 17 ve 30 dk maruz kalma için Şekil 18'de gösterilmiştir.



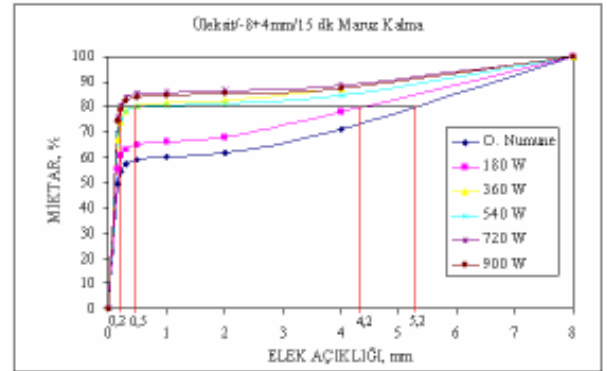
Şekil 15. 5 dk Maruz kalma deney sonuçları

Figure 15. Results of experiments for 5 mins. treatment time



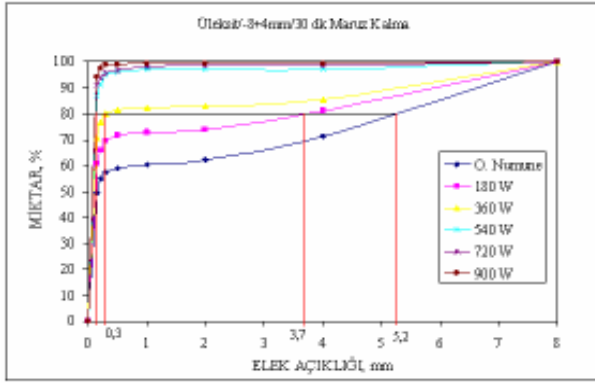
Şekil 16. 10 dk Maruz kalma deney sonuçları

Figure 16. Results of experiments for 10 mins. treatment time



Şekil 17. 15 dk Maruz kalma deney sonuçları

Figure 17. Results of experiments for 15 mins. treatment time



Şekil 18. 30 dk Maruz kalma deney sonuçları

Figure 18. Results of experiments for 30 mins. treatment time

-8+4 mm tane boyutuna uygulanan öğütme deneylerinde orijinal üleksit numunesi üzerinde yapılan elek analizi sonucunda d_{80} tane boyutunun 5,2 mm olduğu tespit edilmiştir. Şekil 15'teki verileri incelediğimizde; örneklerin d_{80} tane boyutlarında 5 dk maruz kalma süresinde 2,5 mm'ye, 10 dk maruz kalma süresinde 1,6 mm'ye, 15 dk maruz kalma süresinde 0,2 mm'ye ve 30 dk maruz kalma süresinde ise minimum 0,15 mm'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir. Bu orijinal numuneye göre d_{80} tane boyutunda %97 oranında bir azalmayı ifade etmektedir. Yine öğütme verilerini incelediğimizde; 0,150 mm tane boyutu altına inen malzeme miktarlarında da orijinal numuneye göre büyük artışlar olmuştur. Örneğin orijinal numunenin -0,150 mm tane boyutundaki malzeme miktarı %49,43 iken 540 W güç seviyesi 10 dk maruz kalma süresinde bu miktar %63,34 ve 900 W güç seviyesi 30 dk maruz kalma süresinde ise %94,34'e çıkmıştır. Orijinal numuneye göre yaklaşık %45'lik bir artış söz konusu olmuştur. Bu deneylerden üleksitin öğütülebilirliğinin artan güç seviyesine paralel olarak büyük oranda arttığı tespit edilmiştir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada; ülkemiz için son derece stratejik öneme sahip hidrate bor minerallerinden olan kolemanit ve üleksitin öğütülebilirliğinde mikrodalga enerjisinin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

- ❖ Bu güne kadar yapılan çalışmalarda mikrodalga enerjinin; öğütmede, kurutma ve suzuzlandırmada, refrakter altın cevherlerinin ön uygulamasında, kömür desülfürizasyonunda, liç işlemlerinde, kavurmada, karbonun aktivasyonunda, oksitlerin karbon termik redüksiyonunda, atıkların minimizasyonunda uygulama potansiyelinin olduğu belirtilmektedir.

- ❖ Bu çalışmada; -8 mm+4 mm tane boyut grubunda mikrodalga ön işlem uygulanmamış numuneler ile farklı sürelerde (5 dk, 10 dk, 15 dk ve 30 dk) mikrodalga enerjije maruz bırakılmış numuneler kullanılmıştır. Öğütme deneyleri porselen porselen değirmende sabit öğütme koşullarında yapılmıştır. Öğütme deneylerinden elde edilen her bir numune ise otomatik eleme cihazında 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,3 mm, 0,212 mm ve 0,150 mm'lik elekler kullanılarak kuru eleme işlemine tabi tutulmuştur. Elek analiz verilerinden yola çıkılarak çizilen kümülatif elek altı eğrileri yardımıyla sonuçlar yorumlanarak, mikrodalga enerjinin numunelerin öğütülebilirliğine olan etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır
- ❖ -8+4 mm tane boyut grubundaki kolemanit minerali için; 0,150 mm tane boyutu altındaki malzeme miktarı mikrodalga işlem görmemiş numune için %50,40'dır. 540 W güç seviyesinde 10 dk mikrodalga enerjisine maruz kalmış numune için bu miktar %64,41 olurken, 900 W güç seviyesinde 30 dk mikrodalga enerjije maruz kalmış numune için %69,16 ya çıkmıştır. -0,150 mm tane boyutu altına inen malzeme miktarlarında mikrodalga işlem görmemiş numuneye göre yaklaşık %38'lik bir artış söz konusu olmuştur.
- ❖ -8+4 mm tane boyut grubundaki üleksit minerali için; 0,150 mm tane boyutu altındaki malzeme miktarı mikrodalga işlem görmemiş numune için %49,43'tür. 180 W güç seviyesinde 30 dk mikrodalga enerjisine maruz kalmış numune için bu miktar %60,64 olurken, yine 30 dk maruz kalma süresinde 360 W'da %70,36'ya, 540 W'da %86,60'a, 720 W'da %90,74'e ve 900 W'da ise %94,34'e çıkmıştır. Bu verilerde bize 150 mikron tane boyutu altına geçen miktarın yaklaşık %90 oranında arttığını göstermektedir.
- ❖ Literatürde belirtildiği üzere her bir mineralin sahip olduğu farklı dielektrik özellikler nedeniyle numuneler mikrodalga enerjije maruz kaldıklarında kısa sürelerde yüksek sıcaklıklara ulaşmaktadırlar. Öğütme üzerine yapılan deneylerden elde edilen sonuçları incelediğimizde; bu ani sıcaklık artışı tane yapısında, tane ara yüzeyleri boyunca farklı termal gerilimler üretmekte ve mikro çatlaklar oluşturmaktadır. Oluşan mikro çatlaklar da numunenin öğütülmesine yardımcı olmaktadır.

- ❖ Hidrate bor minerallerinin karakterizasyon çalışmaları mikrodalga enerjisinin belli sıcaklık değerlerine ulaşıldığında mineral bünyesinde yapısal değişimlere yol açtığı, kristal sularını kaybettikleri ve bunun sonucu olarak da bor minerallerinin öğütülebilirliği- nin olumlu yönde etkilendiği söylenebilir.

Sonuç olarak; mikrodalga enerjisinin ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasına karşılık; işletim kolaylığı, daha iyi ve daha hızlı proses kontrolü sağlanması, düşük işletme maliyeti ve diğer pek çok avantajından dolayı gıda ve diğer endüstri dalları dışında madencilik sektöründe de kullanımına imkan verilmeli bu kapsamda pilot çalışmalar yapılmalıdır.

SUMMARY

This article reports the results of an investigation on the effects of microwave on the physical properties of colemanite and ulexite minerals and on the mineral processing of these minerals.

Firstly the general nature of microwave and the principles of microwave heating are given. In addition that microwave related research studies carried out in mineral processing operations so far is given. Finally the experimental research is presented.

In this study the characterization tests on colemanite and ulexite minerals are given. In this context complete chemical analysis, XRD and microscopic analysis, TG and DTA termic analysis of these minerals are mentioned. The surface characteristics of these minerals are determined also by scanning electron microscope. Dielectric properties of these minerals after microwave applications are determined.

Consequently, use of microwave energy caused structural changes on hydrated boron minerals. Colemanite mineral has lost 0.6 mol crystal water under microwave energy of 900 watt for duration of 45 minutes, and its surface temperature reached to 320 °C. Ulexite mineral has lost 7 mol crystal water and its surface temperature reached to 280 °C under similar microwave conditions.

The effects of microwave energy on the grindability of colemanite and ulexite were investigated by conducting a series of tests keeping similar conditions constant.

In the feed particle size range -8+4 mm of colemanite and ulexite minerals grindability increased with microwave energy treatment. After the grinding d_{80} size of colemanite decreased from 5,5 mm to 3,4 mm and d_{80} size of ulexite decreased from 5,2 mm to 0.15 mm. Grinding results of both minerals particularly of ulexite were enhanced substantially under the effect of microwave energy.

Finally the use of microwave energy on the hydrated boron minerals, colemanite and ulexite caused substantial structural changes which are very important in their beneficiations, particularly increasing the temperature of the medium in a very short time.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin T-576/17032005 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Artan E.T., 1997**, “Mikrodalga güç uygulama aparatlarında ısı dağılımının similasyonu”, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Al-Harashseh M. and S Kingman. W., 2003**, “Microwave-assisted leaching—a review”, *Hydrometallurgy*, Volume 73, Issues 3-4, June 2004, Pages 189-203.
- Bayraktar İ., 2002**, “Mikrodalga muamelesinin sülfürlü mineral yüzeylerine etkisinin incelenmesi”, *Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu*, Proje No: YDABÇAG-397.
- Barnhardt E.K., 2004**, Microwave Ring Expansion Reactions Performed at Sub-Ambient Temperatures, Presented at the 227th ACS National Meeting, (Anaheim, CA), March 29.
- Bradshaw S., Louw W., Al-Harashseh M., Kingman S. and Hankins A. N., Somerfield C., 2005**, “The influence of microwaves on the leaching kinetics of chalcopyrite”, *Minerals Engineering*, Volume 18, Issues 13-14, November 2005, Pages 1259-1268
- Bows J.R., 1999**, “Variable Frequency microwave heating of food”, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 34, No.4, pp:227-238.
- Chow Tse V. And Reader H.C., 2000**, “Understanding microwave heating cavities”, *ISBN 1-58053-094-X*, s:9-35.
- Chen T.T., Dutrizac J.E., Haque K.E., Wyslouzil W. and Kashyap S., 1984**, “The relative transparency of minerals to microwave radiation”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol 23, no 3, pp: 349-351.
- Dincov D.D., Parrott K.A. and Pericleous K.A., 2004**, “Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating”, *Journal of Food Engineering*, Vol:65, Issue: 3, December, p: 403-412.
- Eskibalci M.F., 2007**, “Cevher hazırlama ve zenginleştirmede mikrodalga enerjisinin kullanılabilirliğinin araştırılması”, *Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi*.

- Güngör A. and Atalay Ü., 1999**, “Grindability of Microwave-Heated Ores”, *SME Annual Meeting*, March 1-3, Denver, Colorado.
- Güngör A. and Atalay Ü., 1996**, “Microwave processing and grindability”, *Innovations in Mineral and Coal Processing*, 7. International Mineral Processing Symposium Istanbul/Turkey, Atak, Önal& Çelik (eds), pp: 13-16, Balkema, Rotterdam.
- Haque K. E., 1999**, “Microwave energy for mineral treatment processes-a brief review”, *International Journal of Mineral Processing*, Vol 57, pp: 1-24.
- Harrison P.C. and Rowson N.A., 1997**. “The effect of microwave and conventional heat treatment on the comminution of coal”, *Jubilee res. Event 1997* 1 33-36].
- Jones Da, Kingman Sw, Lelyveld Tp, Mavrofidis, S.D. and Miles Nj, 2002**, “Microwave heating applications in environmental engineering- A Review” Resources, *Conservation and Recycling*, vol. 34 pp: 75-90.
- Jones D.A., Kingman S.W., Whittles D.N. and Lowndes I.S., 2005**, “Understanding microwave assisted breakage”, *Minerals Engineering* 18, p 659-669.
- J Van Der Berg., Swart P. and Lacquet B., 1992**, “Microwave properties of phosphate rock”, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 27, No. 3, pp: 183-189.
- Kanat A., 2001**, “İ.T.Ü. KOSGEB’de geliştirilmekte olan mikrodalga fırında elma meyvesinin kurutulmasına yönelik bir çalışma”, Yüksek Lisans Tezi İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kingman Sw, Vorster W. and Rowson Na, 2000**, “The Influence of Mineralogy on Microwave Assisted Grinding”, *Minerals Engineering*, Vol 13, No. 3, pp. 313-327.
- Kingman Sw, Vorster, W. and Rowson Na, 2001**, “The Effect of Microwave Radiation upon the Processing of Neves Corvo Copper Ore”, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 63, 1, 29-44.
- Klark D.E., D Folz.C. and West J.K., 2000**, “Processing materials with microwave energy”, *Materials Science and Engineering*, A287, p: 153-158.
- Kocakuşak S., İşbilir F. ve Doğan H., 2003**, “Mikrodalga enerjisi ve sanayideki uygulamaları, seminer raporu”, *TÜBİTAK- MAM Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü*.
- Özbayoğlu G. and Depci T., 2006**, “Improvement of coal grindability by microwave pretreatment”, *XXIII International Mineral Processing Congress*, İstanbul/Turkey.
- Risman P., 1991**, “Terminology and notation of microwave power and electromagnetic energy”, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 26, No. 4, pp: 243-247.
- Suhm J. and High L., 1999**, “Microwave technology for drying of sensitive products”, *Asian Ceramics*, pp: 36-39, November.
- Sugisawa K.M., Yasushi T. and Kazimutsu H., 1987**, “Low pressure microwave drying apparatus”, *U.S. Patent No: 4, 637, 145* January 20.
- Şener S. and Özbayoğlu G., 1996**, “Effect of heat treatment on grindability of ulexite”, *Innovations in Mineral and Coal Processing*, 7. International Mineral Processing Symposium Istanbul/Turkey, Atak, Önal& Çelik (eds), pp: 29-31, Balkema, Rotterdam.
- Stuchly M. A. and Stuchly S. S., 1983**, “Industrial, scientific, medical and domestic applications ofmicrowaves”, *IEE Proceedings*, Vol 130, No 8, pp: 467502.
- Thostenson E.T. and Chou T.W., 1999**, “Microwave processing: fundamentals and applications”, *Composites: Part A* 30, p: 1055-1071.
- Wang Y., Forssbere. G. and Svenson M., 2000**, “Microwave assisted comminution and liberation of minerals”, *Mineral Processing on the Verge of the 21 st Century*, 8. *International Mineral Processing Symposium Istanbul/Turkey*, Özbayoğlu et al., (eds), Balkema.
- Walkiewicz. J.W., Clark A.E. and McGill S.L., 1991**, “Microwave-Assisted Grinding”, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol 27, No 2, pp: 239-243, Mart/April.
- Xia D. K. and Pickles C.A., 1997**, “Applications of microwave energy in extractive metallurgy, a review”, *CIM Bulletin*, Volume 90, No 1011, pp: 96-107, June.
- Yıldız K. ve Alp A., 2000.**, “Metalurjik proseslerde mikrodalga kullanımı”, *Metalurji Dergisi*, Cilt 24, Sayı:125, s. 24-29.

http://kuantum_x.sitemynet.com/page30.html

[Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2006]