



BOR DERGISİ

JOURNAL OF BORON

<http://dergipark.gov.tr/boron>



Mikrodalga enerjisinin kolemanit cevherinin ufalanmasına ve flotasyonuna etkisi

İsmail Demir¹, Can Güngören², Şafak Gökhan Özkan^{3*}

¹İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 34320 İstanbul, Türkiye, ORCID ID orcid.org/0000-0003-0949-7706

²İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 34320 İstanbul, Türkiye, ORCID ID orcid.org/0000-0002-6664-1551

³İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 34320 İstanbul, Türkiye, ORCID ID orcid.org/0000-0002-7770-7480

MAKALE BİLGİSİ

Makale geçmişi:

İlk gönderi 24 Şubat 2017
Revize gönderi 18 Ağustos 2017
Kabul 18 Ağustos 2017
Online yayınlanması 25 Eylül 2017

Araştırma Makalesi

Anahtar kelimeler:

Mikrodalga,
Ufalama,
Fotasyon,
Kolemanit,
Bor mineralleri

ÖZET

Mikrodalga ısıtma sistemlerinde mikrodalgalar malzeme bünyesinde iç sürtünme meydana getirerek, bir termal gerilim ve iç basınç oluşturmaktadır. Bu durum malzeme özelliklerine bağlı olarak tane bünyesinde çatlaklar meydana getirebilmektedir. Bu etkisi sayesinde mikrodalgalardan çeşitli cevher hazırlama işlemlerinde faydalanılmaktadır. Bu çalışmada önemli bor minerallerinden biri olan kolemanitin ufalanması ve flotasyonuna mikrodalga enerjisinin etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda mikrodalga enerjisinin iri tane boyutunda ufalanma üzerinde olumlu etkisi olurken, ince tane boyutlarında önemli bir etki gözlenmemiştir. Çalışma kapsamında kullanılan kolemanit cevheri ham hali ile %32,21 B₂O₃ tenörüne sahiptir. Yapılan boyut küçültme işlemleri sonucunda numuneler flotasyon deneylerinde kullanılmak üzere +0,250, -0,250+0,038 mm ve -0,038 mm tane boyutlarına ayrılmıştır. Bu numunelerin tenörleri sırası ile %44, %40 ve %21 B₂O₃'tür. +0,250 mm tane boyutundaki numunelerin B₂O₃ tenörü yüksek olduğu için flotasyon işlemine tabi tutulmamıştır. -0,250+0,38 mm tane boyutundaki numunelere yapılan flotasyon deneylerinde konvansiyonel flotasyonla %44,76 B₂O₃ tenörlü konsantre %55,05 verimle, mikrodalga enerji uygulanan numunelerin flotasyonunda ise %42,99 B₂O₃ tenörlü konsantre %59,69 verimle kazanılmıştır. -0,038 mm tane boyutundaki numunelere yapılan flotasyon deneylerinde ise konvansiyonel flotasyonda %37,91 B₂O₃ tenörlü konsantre %24,79 verimle, mikrodalga enerji uygulanmış numunelerin flotasyonu sonucunda ise %37,21 B₂O₃ tenörlü konsantre %31,17 verimle elde edilmiştir.

Effect of microwave energy on the comminution and flotation of colemanite ore

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 February 2017
Received in revised form 18 August 2017
Accepted 18 August 2017
Available online 25 September 2017

Research Article

Keywords:

Microwave,
Comminution,
Flotation,
Colemanite,
Boron minerals

ABSTRACT

Microwaves create internal friction in the material body and hence thermal stress and internal pressure. This situation can generate fractures according to the material features. Therefore, microwaves can be used in various mineral processing processes owing to this effect. In this study, the effect of microwave energy on the comminution, and flotation of a colemanite ore, which is an important boron mineral, was investigated. As a result, a positive effect of microwave energy on the comminution of coarser particles was determined while no significant effect was observed on the comminution of finer particles. The colemanite ore as supplied has 32.21% B₂O₃ grade. The samples were sieved to +0.250, -0.250+0.038 mm, and -0.038 mm particle size fractions separately before the flotation experiments. The grades of these samples were 44%, 40%, and 21% B₂O₃, respectively. The samples coarser than 0.25 mm particle size were not subjected to flotation because of their high grades. In the flotation experiments of the particles at -0,250+0,38 mm particle size, a concentrate with 44.76% B₂O₃ grade was recovered with 55.05% recovery by conventional flotation. On the other hand, a concentrate with 42.99% B₂O₃ grade was recovered with 59.69% recovery in the flotation of microwave treated samples. In addition, in the flotation of the particles at -0,038 mm particle size, a concentrate with 37.91% B₂O₃ grade was recovered with 24.79% recovery by conventional flotation. On the other hand, a concentrate with 37.21% B₂O₃ grade was recovered with 31.17% recovery in the flotation of microwave treated samples.

*Sorumlu yazar: sgozkan@istanbul.edu.tr

1. Giriş (Introduction)

Elektromanyetik dalga türü olan mikrodalgalar 300 MHz ile 300 GHz frekans aralığında yayılırlar. Evlerde kullanılan mikrodalga fırınlar 2450 MHz frekansa sahiptir. Bir malzemenin mikrodalga ile ısıtılabilmesi için mikrodalga enerjisini adsorbe edebilecek bir yapıya sahip olması gerekir. Bu tür malzemeler içerisinde bulunan çift kutuplu (dipolar) moleküller bir elektrik alan içerisine girdiklerinde elektrik alan doğrultusunda dizilirler. Elektrik alan ortadan kalktığında ise bu dizi bozulur. Bu yolla ortaya çıkan iç sürtünmenin bir kısmı ısı enerjisine dönüşerek malzemenin ısınması ile sonuçlanır [1, 2]. Isınma karakteristiği sebebiyle konvansiyonel ısıtma sistemlerinde ısıtma dıştan içe doğru gerçekleşirken, mikrodalga ısıtma sistemlerinde ise içten dışa doğru gerçekleşir.

Mikrodalga enerjisi madencilik alanında başta kurutma ve liç olmak üzere birçok alanda kullanılabilir [3-15]. Mikrodalga ile ısıtılan bir malzemenin içi dışından daha sıcak olduğu için bünyesinde bulunan su buharlaşırken malzemenin mukavemetine bağlı olarak bünyesinde çatlaklar oluşur. Mikrodalga enerjisi bu etkisi sayesinde madencilikte öğütme öncesinde malzeme bünyesinde süreksizlikler oluşturarak ve var olan süreksizlikleri artırarak cevherlerin öğünebilirliğini arttırmak amacıyla da kullanılmaktadır [16-23].

Örneğin Kingman ve ark. [24] mikrodalga destekli öğütmede cevher mineralojisinin etkisini araştırmışlar ve öğütme verimliliğinde büyük önemi olduğunda değinmişlerdir. Guo ve ark. [25] mikrodalga enerjisini ilmenit cevherinin öğütülmesinde uygulamışlar ve mikrodalgaların mineral ile matris arasında çatlaklara sebep olduğunu bildirmişlerdir. Zhu ve ark. [26] linyit öğütmesinde mikrodalga enerjisinin etkisini araştırdıkları çalışmalarında mikrodalga uygulanan linyitin öğünebilirliğinin ciddi oranda iyileştiğini açıklamışlardır.

Mikrodalganın flotasyonda kullanıldığı bir çalışmada Xia ve ark. [27] okside olmuş kömürlerin flotasyonu öncesinde kömürün yüzebilirliğini arttırmak amacıyla mikrodalga uygulamışlardır. Çalışma sonucunda mikrodalga uygulama süresine bağlı olarak yanabilir verimin arttığını bulmuşlardır.

Mikrodalgalar bor mineralleri üzerinde de çeşitli amaçlarla uygulanmıştır. Can ve ark. [28] kolemanitin mikrodalga destekli kalsinasyonunu çalışmışlar, mikrodalga destekli kalsinasyonun konvansiyonel kalsinasyona göre daha iyi sonuçlar verdiğini bulmuşlardır. Kocakuşak ve ark. [29] susuz boraks üretiminde mikrodalga ısıtma kullanmışlar ve mikrodalga ısıtma ile daha temiz ve daha hızlı üretim gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmada, mikrodalga enerjisinin ülkemizin stratejik yeraltı kaynaklarından olan bor elementinin [30] en önemli ticari minerallerinden biri olan kolemanitin ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) öğütülmesi ve flotasyonuna etkisi araştırılmıştır.

2. Malzemeler ve yöntemler (Materials and methods)

Çalışma kapsamında Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü Emet Bor İşletme Müdürlüğü'nden temin olarak edilen Hisarcık ocağına ait kolemanit cevheri numuneleri kullanılmıştır. Numunelerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de, mineralojik sonuçları ise Şekil 1'de verilmiştir.

Temsili cevher numunesinin ve deneyler sonucu elde edilen ürünlerin mineralojik ve kimyasal analizleri İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarında uluslararası standartlar göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Ocaktan alındığı haliyle tane boyutu -200 mm olan numuneler primer kırıcı olarak seçilen tek istinat kollu laboratuvar tipi çeneli bir kırıcı vasıtası ile iki kademe kırılmıştır. Böylelikle malzemenin tamamı -16 mm boyutuna getirilmiştir. Mikrodalga enerjisinin çeşitli tane boyutlarının ufalanması üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla, numuneler dar tane boyut aralıklarına (-16+10, -10+8, -8+5, -5+2 ve -2 mm) ayrılmıştır. Mikrodalga enerji uygulamalı ve uygulamaz deneylerde kullanmak üzere her fraksiyon iki kısma ayrılmıştır. Yarılanan numunelerin birinci kısmı doğrudan, ikinci kısmı ise mikrodalga enerjiye tabii tutulduktan sonra bir merdaneli kırıcı yardımıyla kırılmıştır.

Mikrodalga enerjisi uygulamaları 2450 MHz sabit frekansta çalışan Arçelik MD595 model ev tipi bir mikrodalga fırın kullanılarak, 720 W güçte, 10 dk süre ile gerçekleştirilmiştir.

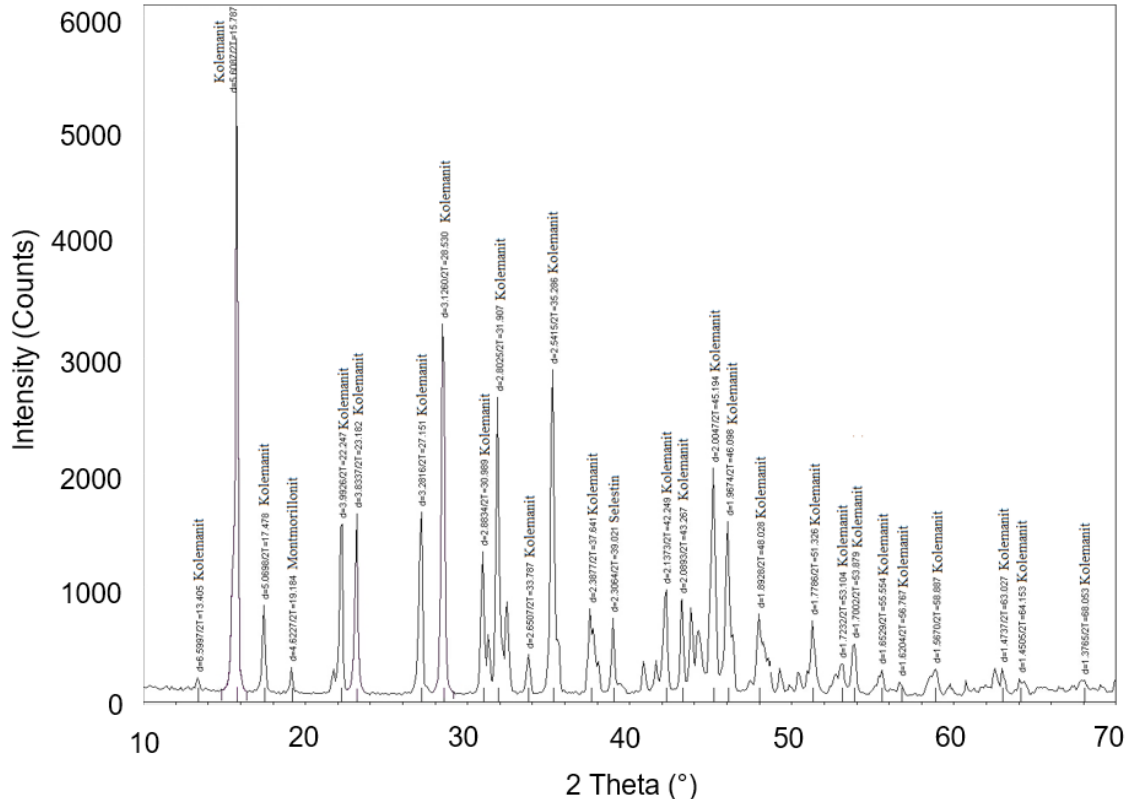
Merdaneli kırıcı ürünleri 1 ve 0,5 mm elek açıklıklı elekler ile kuru, 0,250 ve 0,038 mm elek açıklıklı eleklerle ise yaş olarak elenerek, tane boyut dağılımı analizi gerçekleştirilmiştir. Yaş olarak elenen fraksiyonlar, laboratuvar tipi bir etüvde 60-65 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Bu sıcaklıkların üzerinde kolemanit mineralinin kimyasal ve fiziksel yapısının bozulduğu daha önceki çalışmalardan bilindiğinden [5], numuneler kurutulurken sıcaklık değerinin bu seviyeleri geçmemesine dikkat edilmiştir.

Mikrodalga enerjisi uygulanmış ve uygulanmamış numuneler, boyu 26,5 cm, çapı ise 20,5 cm olan labora-

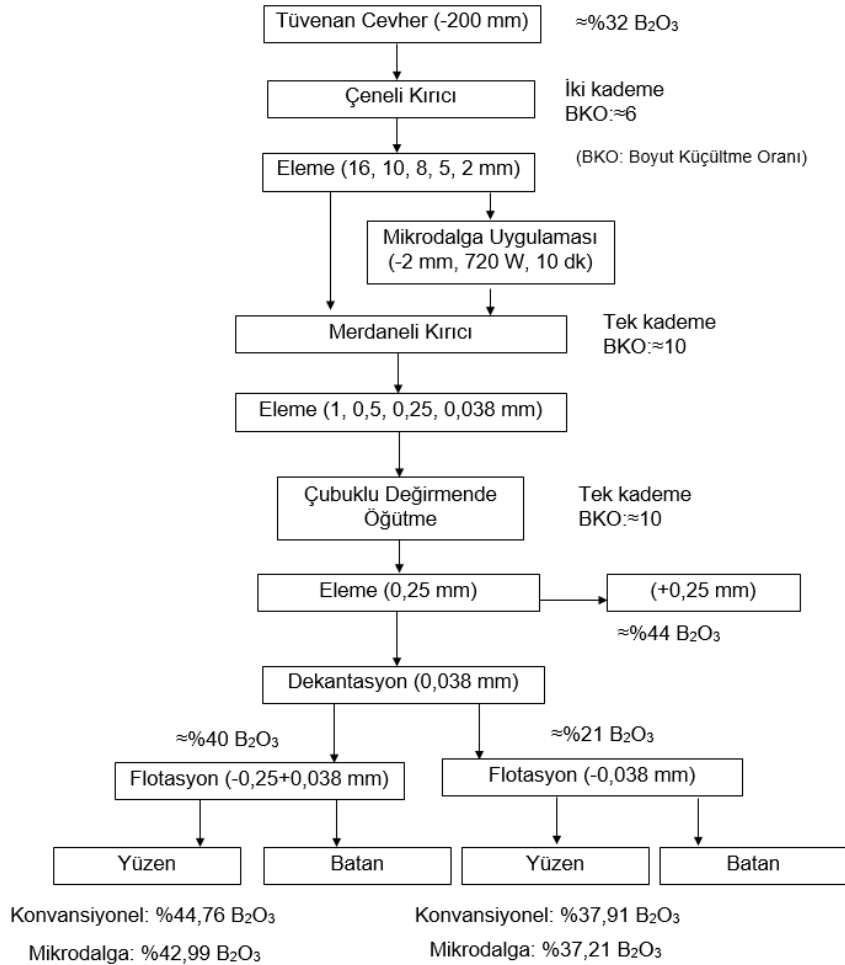
Çizelge 1. Numunenin kimyasal analiz sonuçları (The chemical analysis results of the sample).

B_2O_3	SiO_2	MgO	CaO	TiO_2	Al_2O_3	SrO	K_2O	Fe_2O_3	As	K.K.*
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(%)
32,21	11,52	5,56	21,43	0,09	1,28	0,52	0,68	0,61	6560	23,49

*: Kızdırma Kaybı (900 °C, 15 dk)



Şekil 1. Numunenin XRD analizi grafiği (The XRD analysis graph of the sample).



Şekil 2. Deney akım şeması (Experimental flowsheet).

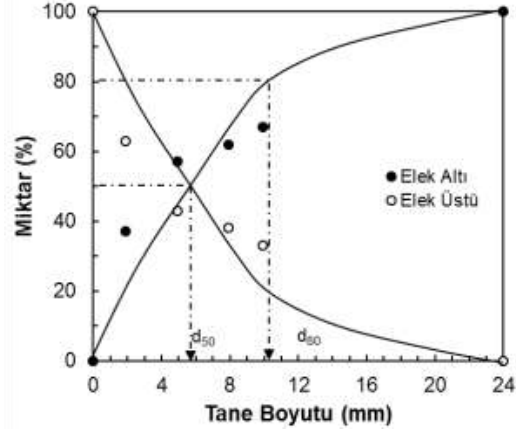
tuvar tipi çelik çubuklu bir değirmen kullanılarak ayrı ayrı öğütülmüştür. Değirmene, çapı 1 cm olan 79 adet çubuk şarj edilmiş ve değirmen dönüş hızı 60 dev/dk olarak ayarlanmıştır. Aşırı öğünmeyi engellemek için $-1+0,500$ mm tane boyutundaki numuneler 5 dk, $-0,500+0,250$ mm tane boyutundaki numuneler ise 3 dk süre ile öğütülmüştür. Değirmen çıkışı ürünlerin tane boyut dağılımı 1, 0,500, 0,250 ve 0,038 mm'lik elekler kullanılarak tespit edilmiştir.

Mikrodalga enerjisinin flotasyona etkisini belirlemek amacıyla numunelerin flotasyonu iki farklı tane boyut fraksiyonunda gerçekleştirilmiştir. İlk olarak $-0,250$ mm tane boyutundaki numunelere 0,038 mm tane boyutunda dekantasyon yoluyla şlam uzaklaştırması uygulanarak flotasyon yapılmıştır. Ayrıca şlam olarak ayrılan kısım içerisindeki borun kazanılması amacıyla $-0,038$ mm tane boyutuna da ayrıca flotasyon uygulanmıştır. Flotasyon deneylerinde Denver Sub 2A Flotasyon makinesi 1200 dev/dk karıştırma hızında kullanılmıştır. Deneyler 1 L hacimli selüllerde, %10 pülp'te katı oranında gerçekleştirilmiştir. Toplayıcı reaktif olarak, 1500 g/t Cytec R825 (anyonik tip, sodyum alkil sülfonat), köpürtücü olarak ise 100 g/t çam yağı kullanılmıştır.

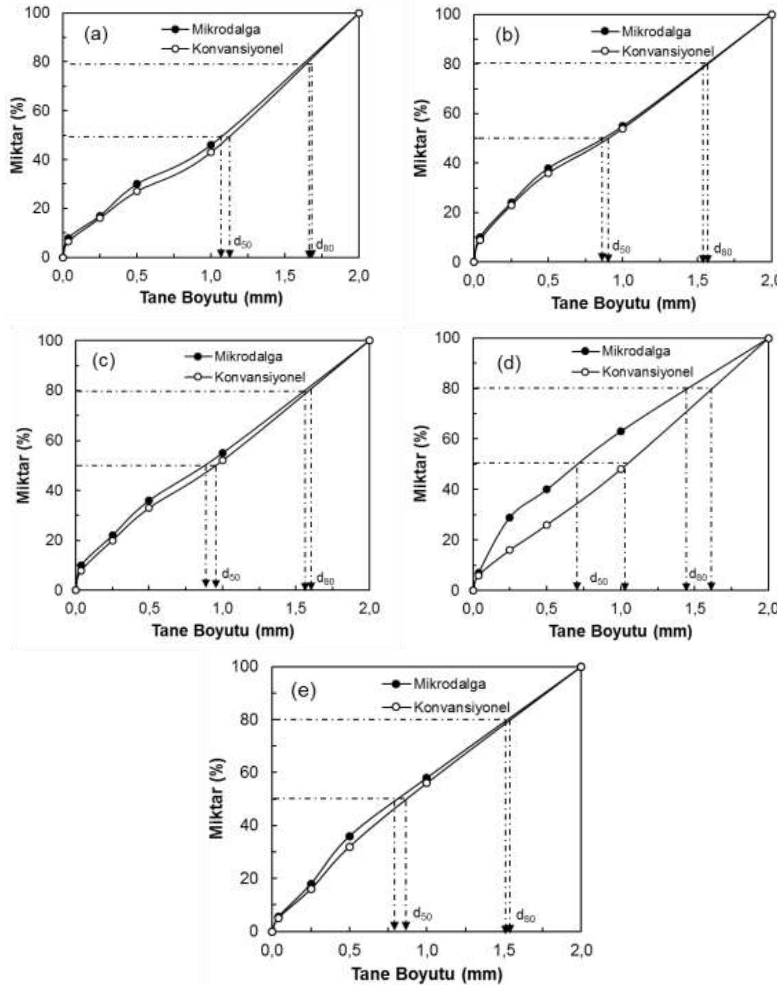
Bütün deneysel çalışmalara ait karakterizasyon ve zenginleştirme akım şeması Şekil 2'de verilmiştir.

3. Sonuçlar ve tartışma (Results and discussion)

Çeneli kırıcı çıkışından elde edilen ürün 16, 10, 8, 5 ve 2 mm'lik laboratuvar tipi elekler kullanılarak elek analizine tabii tutulmuştur. Tane boyut dağılım grafiği Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Numunenin çeneli kırıcı çıkışı tane boyut dağılımı (The particle size distribution of the sample from jaw crusher output).



Şekil 4. Merdaneli kırıcı çıkışı tane boyut dağılımları (Besleme tane boyutu: (a) $-16+10$ mm (b) $-10+8$ mm (c) $-8+5$ mm (d) $-5+2$ mm (e) -2 mm). (The particle size distributions of the sample from roll crusher output (Feed particle size: (a) $-16+10$ mm (b) $-10+8$ mm (c) $-8+5$ mm (d) $-5+2$ mm (e) -2 mm)).

Şekil 3'ten görüldüğü üzere çeneli kırıcıdan çıkan numunenin d_{50} ve d_{80} tane boyutları sırasıyla 5,600 ve 10,440 mm'dir. Çeneli kırıcıdan sonra boyut küçültme işlemlerine devam edilen numune Şekil 2'de görüldüğü üzere bir merdaneli kırıcı yardımıyla ufalanmıştır. Merdaneli kırıcıdan çıkan numunelerin elek analizi 1, 0,500, 0,250 ve 0,038 mm açıklıklı elekler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te farklı besleme tane boyutlarının tane boyut dağılımı grafikleri verilmiştir.

Sınıflandırılmış numunelerin merdaneli kırıcı çıkışındaki d_{50} ve d_{80} tane boyutları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2'deki merdaneli kırıcıdan çıkan numunelerin d_{50} ve d_{80} tane boyutları incelendiğinde mikrodalga enerjisi uygulanmış numunelerin daha çok ufalandığı, en büyük etkinin ise -5+2 mm tane boyut aralığında olduğu görülmektedir. Burada mikrodalga enerji uygulanmamış numunenin d_{50} ve d_{80} boyutları sırasıyla 1,04

ve 1,62 mm iken mikrodalga enerji uygulanan numunenin ise sırasıyla 0,72 ve 1,45 mm olduğu görülmüştür.

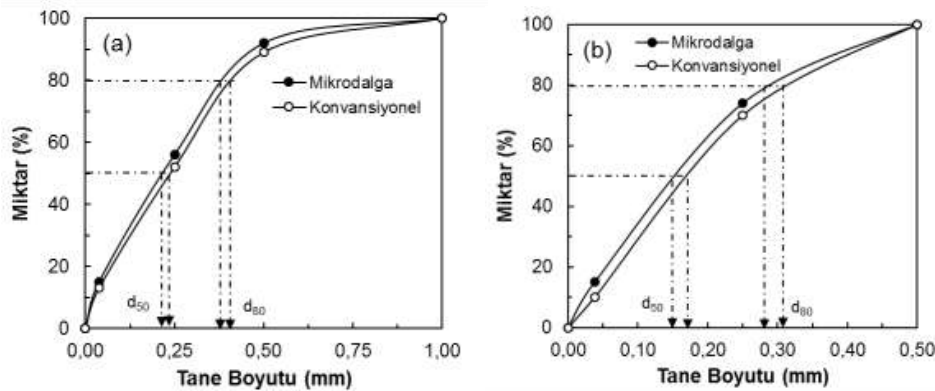
Şekil 5'te mikrodalga enerji uygulanmamış ve mikrodalga enerji uygulanmamış numunelerin değirmen çıkışı tane boyut analizleri verilmiştir.

Çizelge 3'te verilen öğütme sonucu elde edilen numunelerin d_{50} ve d_{80} tane boyutları incelendiğinde mikrodalga enerjisi uygulanmış numunelerin az da olsa daha iyi ufalandığı görülmektedir.

Öğütme sonucunda çıkan +0,250 mm tane boyutundaki numune yüksek oranda (%44) B_2O_3 tenörüne sahip olduğu için flotasyon uygulanmamıştır. -0,250 +0,038 mm ve -0,038 mm tane boyutuna sınıflanmış numunelerle ise mikrodalga enerjisinin etkisinin belirlenmesi amacıyla flotasyon deneyleri yapılmıştır. Flotasyon sonuçları Şekil 6'da detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 2. Merdaneli kırıcı çıkışı numunelerin d_{50} ve d_{80} tane boyutları. (The d_{50} and d_{80} sizes of the samples from roll crusher output).

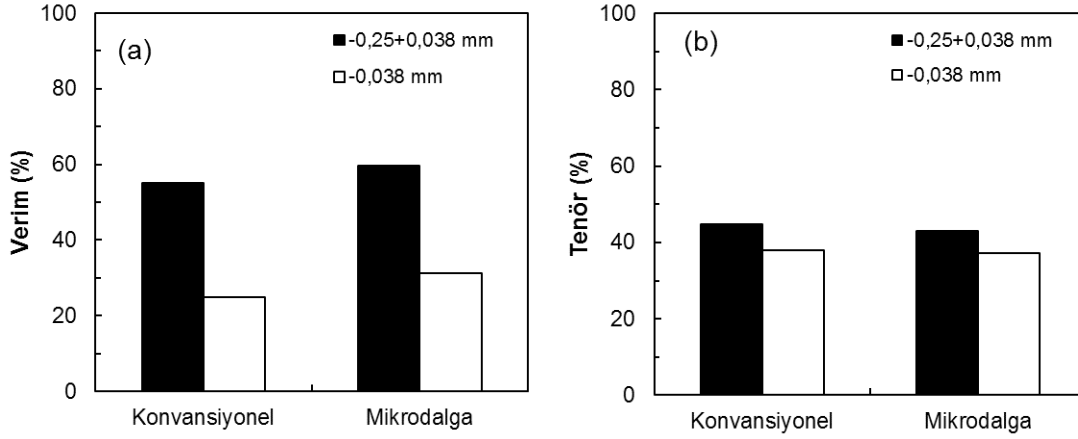
Merdaneli Kırıcı Besleme Boyutu (mm)		Konvansiyonel		Mikrodalga Enerjili	
(-)	(+)	d_{50} (mm)	d_{80} (mm)	d_{50} (mm)	d_{80} (mm)
16	10	1,14	1,66	1,08	1,64
10	8	0,90	1,57	0,87	1,56
8	5	0,95	1,59	0,87	1,56
5	2	1,04	1,62	0,72	1,45
2	0	0,87	1,54	0,81	1,52



Şekil 5. (a) -1,0+0,500 mm ve (b) -0,500+0,250 mm tane boyutu aralığındaki numunelerin değirmen çıkışı tane boyut dağılımı (The particle size distribution of the samples from rod mill output (a) -1.0+0.500 mm, and (b) -0.500+0.250 mm).

Çizelge 3. Numunelerin öğütme sonrası d_{50} ve d_{80} tane boyutları. (The d_{50} and d_{80} sizes of the samples after grinding).

Öğütme Besleme Boyutu (mm)		Konvansiyonel		Mikrodalga Enerjili	
(-)	(+)	d_{50} (mm)	d_{80} (mm)	d_{50} (mm)	d_{80} (mm)
1,00	0,50	0,24	0,41	0,21	0,38
0,50	0,250	0,17	0,31	0,15	0,29



Şekil 6. Flotasyon sonuçları: (a) verim (b) tenör (Flotation results: (a) recovery and (b) grade).

Çalışma kapsamında kullanılan kolemanit cevheri %32,21 B₂O₃ tenörüne sahiptir. -0,250+0,38 mm tane boyutundaki numunelere yapılan flotasyon deneylerinde konvansiyonel flotasyonla %44,76 B₂O₃ tenörlü konsantr %55,05 verimle, mikrodalga enerji uygulanan numunelerin flotasyonunda ise %42,99 B₂O₃ tenörlü konsantr %59,69 verimle kazanılmıştır.

-0,038 mm tane boyutundaki numunelere yapılan flotasyon deneylerinde ise konvansiyonel flotasyonda %37,91 B₂O₃ tenörlü konsantr %24,79 verimle, mikrodalga enerji uygulanmış numunelerin flotasyonu sonucunda ise %37,21 B₂O₃ tenörlü konsantr %31,17 verimle elde edilmiştir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, ülkemizin en önemli bor minerallerinden biri olan kolemanitin ufalanması ve flotasyonuna mikrodalga enerjisinin etkisi araştırılmıştır.

Merdaneli kırıcıda boyut küçültme işlemleri sonucunda her boyut fraksiyonunda mikrodalga enerji uygulanmış numunelerin işlem uygulanmamış numunelere göre az da olsa daha iyi ufalandığı görülmüştür. Ufalanmadaki bu iyileşmenin nedeninin mikrodalga enerjisinin uygulanması sırasında malzeme içerisindeki suyun içten dışa doğru buharlaşırken malzeme bünyesinde meydana getirdiği çatlakların malzemenin ufalanma direncini azaltması olduğu düşünülmektedir. Ufalanmadaki en büyük farkın ise -5+2 mm boyut aralığındaki numunelerde olduğu saptanmıştır. Bu durumun mikrodalga enerjisinin malzeme içerisine penetrasyon derinliği ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Merdaneli kırıcı çıkışında elde edilen ürünler üzerinde yapılan öğütme deneylerinde ise mikrodalga enerji uygulanmış numuneler ile işlem uygulanmamış numunelerin öğünebilirliklerinde ciddi bir fark görülmemiştir. Bu durumun mikrodalga enerjisinin kırma öncesinde iri boyutta uygulanması nedeniyle malzeme bünyesinde oluşan çatlakların kırma esnasında etkili olduğu ancak öğütme öncesinde tekrar mikrodalga enerji uygulaması yapılmadığı için öğünmeyi etkileyecek özelliklerde

çatlak oluşmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Mikrodalga enerji uygulamasının kolemanit flotasyonu üzerindeki etkisi incelendiğinde flotasyon veriminde meydana gelen artışın mineral yüzeyine kollektör adsorpsiyonunu etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylece daha düşük tenörlü malzeme de yüzerek flotasyon verimini artırırken konsantr tenörünü düşürmüştür.

Kaynaklar (References)

- [1] Vorster W., The effect of microwawe radiation on mineral proceessing, Doktora Tezi, The University of Birmingham Birmingham, 2001.
- [2] Al-Harashsheh M., Kingman, S. W., Microwave-assisted leaching—a review, Hydrometallurgy, 73 (3-4), 189-203, 2004.
- [3] Marland S., Han B., Merchant A., Rowson N., The effect of microwawe radiation on coal grindability, Fuel, 79, 1283-1288, 2000.
- [4] Uslu T., Atalay Ü., Arol A. İ., Effect of microwawe heating on magnetic separation of pyrite, Colloids Surf. A, 225 (1-3), 161-167, 2003.
- [5] Eskibalci M. F., Cevher hazırlama ve zenginleştirmede mikrodalga enerjisinin kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2007.
- [6] Özbayoğlu G., Depci T., Ataman N., Effect of microwawe radiation on coal flotation, Energy Source Part A, 31 (6) 492-499, 2009.
- [7] Sayın Z. E., Altın konsantrinden doğrudan liç eldesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği, İzmir, 2010.
- [8] Tosun Y. İ., Microwave activated crushing and grinding of turkish coals and shale for cleaning and desulfurization, XVI Balkan Mineral Processing Congress, Belgrad, 2015.
- [9] Güngören C., Ultrasonik ve mikrodalga enerjilerinin kolemanit flotasyonunda ön işlem olarak kullanılma olanaklarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği, 2009.

- [10] Güngören C., Özkan Ş. G., Hacifazlıoğlu H., Mikrodalga kurutmanın linyit kömürünün öğütülebilirliğine etkisi, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 55 (4) 15-22, 2016.
- [11] Özkan Ş. G., Eskibalci M. F., Güngören C., Mikrodalga enerjisinin kolemanit ve uleksitin sudaki çözünürlüğüne etkisinin araştırılması, *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 22 (1) 85-93, 2009.
- [12] Chattopadhyay A. K., Gaona T., Bosley B., Microwave-assisted direct synthesis of boronated alkanolamine succinic anhydride esters as potential surfactants for various application, *BORON 1 (1)*, 28 - 32, 2016.
- [13] Buttress A. J., Katrib J., Jones D. A., Batchelor A. R., Craig D. A., Royal T. A., Dodds, C., et al., Towards large scale microwave treatment of ores: Part 1-Basis of design, construction and commissioning, *Miner. Eng.*, 109,169–183, 2017.
- [14] Jiang T., Zhang Q., Liu Y., Xue X., Duan P., Influence of microwave irradiation on boron concentrate activation with an emphasis on surface properties, *Appl. Surf. Sci.*, 385, 88–98, 2016.
- [15] Rattanadecho P., Makul N., Microwave-assisted drying: A review of the state-of-the-art, *Drying Technol.*, 34 (1), 1–38, 2016.
- [16] Eskibalci M. F., Konvansiyonel ve mikrodalga ısıtma işleminin kuvarsitin öğütülebilirliğine etkisinin incelenmesi, *EÜFEB Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7 (2) 169-190, 2014.
- [17] Delibalta M. S., Toraman O. Y., The effect of microwave energy on grindability of a Turkish high-ash coal, *Energy Sci. and Technol.*, 3 (2) 46-49, 2012.
- [18] Toraman O. Y., The effect of high power microwave energy on the grindability of Turkish Cayirhan lignite, *Energy Source Part A*, 32 (19) 1794-1800, 2010.
- [19] Toraman Ö. Y., Depçi T., Kömürde mikrodalga ile önışlemler uygulamaları, *Madencilik*, 46 (3) 43-53, 2007.
- [20] Samanlı S., Öney Ö., Geveze K., Mikrodalga kurutmanın kaolen numunesinin bilyalı değirmendeki özgül kırılma hızını artırıcı etkisi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19 (55) 267-278, 2017.
- [21] İpek H., Şahan H., Effect of heat treatment on breakage rate function of ulexite, *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 49(2) 651–658, 2013.
- [22] Can N. M., Bayraktar I., Effect of microwave treatment on the flotation and magnetic separation properties of pyrite, chalcopyrite, galena and sphalerite, *Miner. and Metall. Process.*, 23 (3) 185-192, 2007.
- [23] Batchelor A. R., Buttress A. J., Jones D. A., Katrib J., Way D., Chenje, T., Stoll, D., et al., Towards large scale microwave treatment of ores: Part 2 – Metallurgical testing, *Miner., Eng.*, 111, 5–24, 2017.
- [24] Kingman S. W., Vorster W., Rowson N. A., The influence of mineralogy on microwave assisted grinding, *Miner. Eng.*, 13 (3), 313-327, 2000.
- [25] Guo S., Chen G., Peng J., Chen J., Li D., Liu L., Microwave assisted grinding of ilmenite ore, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21 (9), 2122-2126, 2011.
- [26] Zhu X., Tao Y., Sun Q., Effects of microwave pretreatment on the grinding characteristic of coal, *Energy Source Part A*, 38 (18), 2741-2748, 2016.
- [27] Xia W., Yang J., Liang C., Effect of microwave pretreatment on oxidized coal flotation, *Powder Technol.*, 233, 186-189, 2013.
- [28] Can M. F., Helvacı A., Yazıcı Z. O., Akpınar S., Özdemir Y., Microwave assisted calcination of colemanite powders, *International Journal of Metallurgical & Materials Engineering*, 2 (2) 2016.
- [29] Kocakuşak S., Köroğlu J. H., Ekinci E., Tolun R., Production of anhydrous borax using microwave heating, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 881-885, 1995.
- [30] Tombal T. D., Özkan Ş. G., Kurşun Ünver İ., Osmanlıoğlu A. E., Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi, *BORON*, 1 (2), 86 - 95, 2016.