

KÖMÜRDE MİKRODALGA İLE ÖNİŞLEM UYGULAMALARI

Applications of Microwave Pretreatment in Coal

Öner Yusuf TORAMAN (*)

Tolga DEPÇİ (**)

ÖZET

Mikrodalgalar, elektrik ve manyetik alandan oluşan elektromanyetik enerjinin bir formudur. Mikrodalga enerji, kömür endüstrisinde özellikle öğütme, kükürt giderimi ve susuzlaştırma gibi uygulamalarla önemli bir potansiyele sahip bulunmaktadır.

Bu çalışmada; kömürün mikrodalga ile muamelesindeki son gelişmeler sunulmakta, ısınma özellikleri, öğütülebilirlik, kükürt uzaklaştırma ve susuzlaştırma gibi farklı uygulamalarına yer verilmektedir.

Anahtar Sözcükler: Mikrodalga, Kömür, Isıtma, Öğütülebilirlik, Kükürt Uzaklaştırma, Susuzlaştırma

ABSTRACT

Microwaves are a form of electromagnetic energy associated with electric and magnetic fields. Microwave energy has a great potential in coal industry in comminution, desulphurisation and drying processes.

This paper presents a review of the advances in the microwave treatment of coal and many different applications are considered, including the heating rate investigations, grindability, desulphurisation and dewatering studies.

Key Words: Microwave, Coal, Heating, Grindability, Desulphurisation, Dewatering

(*) Yrd. Doç. Dr., Niğde Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, NİĞDE, otoraman@nigde.edu.tr

(**) Araş. Gör., ODTÜ, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ANKARA

1.GİRİŞ

Mikrodalga enerjisi, 300 MHz ile 300 GHz aralığında frekansa sahip iyonize olmamış elektromanyetik ışınım (radyasyon) olup, iletişim alanında yoğun bir uygulamaya sahip olmakla birlikte; endüstriyel, bilimsel, tıbbi (ISM) uygulamalar için ancak belirli frekanslara müsaade edilmektedir (Schiffmann, 1995).

Bir mikrodalga ışınımın frekansı ne kadar yüksek olursa, o ışınımın oluşturulabilmesi için harcanması gereken enerji miktarı da o kadar yüksek olmaktadır (Stephen, 1997). Mikrodalga enerjisi, 2.450MHz için yaklaşık %50-72, 915MHz için yaklaşık %80-87'lik bir dönüşüm verimiyle elektrik enerjisinden elde edilebilmektedir. Mikrodalgalar; görünür, ultraviyole ya da infrared ışık gibi diğer elektromanyetik enerji şekillerinden daha yüksek dalga boylarına ve daha düşük enerji miktarına sahiptirler (Haque, 1999).

Mikrodalga'nın başlangıçta gıda, kimya ve kağıt sanayine yönelik araştırma ve uygulamaları söz konusuken daha sonraları cevher hazırlama ve metalürji sanayinde de kullanılması önerilmeye başlanmıştır (Standish ve Worner, 1991; Kingman ve Rowson, 1998).

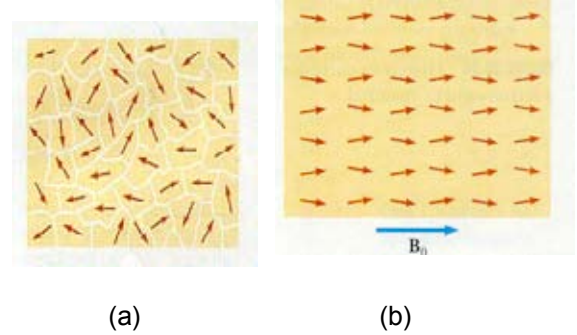
Mikrodalga ile ısıtma, numunenin derinliklerine nüfuz edebilen elektromanyetik enerji formunda olduğu için klasik ısıtmadan farklıdır (Jones vd., 2002). Klasik ısıtma sistemleri taşınım (konveksiyon), iletim (kondüksiyon) ve yayılma gibi standart ısı transfer mekanizmasından geçerek numuneyi dışarıdan ısıtırken, mikrodalga ile ısıtma seçimli ve matriksteki bazı fazların diğerlerinden çok daha hızlı ısınabilmesi avantajına sahiptir. Bu avantajlar ise mikrodalga enerjinin cevher/kömür hazırlama ve ekstraktif metalürji endüstrisinde kullanımını teşvik etmektedir (Kingman ve Rowson, 2000).

Bu derlemede; mikrodalga ile ısıtmanın temel prensipleri detaylı bir şekilde ele alınmış ve kömür hazırlamadaki uygulamaları (öğütülebilirlik, kükürt giderimi ve kurutma gibi) üzerinde durulmuştur.

2. MİKRODALGA İLE ISITMANIN (DİELEKTRİK ISITMA) PRENSİBİ

Mikrodalgalar, iyonik parçacıkların göçü ve/veya

dipolar parçacıkların rotasyonu ile moleküler bir harekete sebep olurlar. Dolayısıyla, iyonik iletim ve dipolar rotasyon mikrodalga enerjisi kaybının (malzemedeki enerji dağılımı) iki önemli mekanizmasını oluşturmaktadır (Kingston ve Jassie, 1985). İyonik iletim uygulanan elektromanyetik alandaki çözünen veya titreşen iyonların göç etmesini, dipol rotasyon ise polarize olmuş moleküllerin bir düzene (hizaya) sokulmasını (Şekil 1) ifade etmektedir (Decareau, 1985).



Şekil 1. a) Gelişigüzel hareket eden polar moleküller b) Elektromanyetik alanla hizaya sokulan moleküller (Anon (a), 2007)

Bir malzemeyi mikrodalga ile ısıtma işlemi büyük oranda malzemenin tüketme (dissipation) faktörüne (dielektrik kayıp tanjantı, $\tan\delta$) bağlıdır. Belirli bir frekans ve sıcaklıkta elektromanyetik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülme yeteneği olan bu faktör, malzemenin dielektrik kaybı veya "kayıp" faktörünün (ϵ'') dielektrik sabitine (ϵ') oranı [$\tan\delta = (\epsilon'' / (\epsilon'))$] olarak ifade edilir.

"Relatif geçirgenlik" olarak da tanımlanan dielektrik sabiti (ϵ'), mikrodalga enerjisinin malzeme içerisinden geçmesi esnasında bu enerjinin malzeme tarafından tutulabilme/ alıkoyma yeteneğinin bir ölçüsüdür. Bu büyüklük, enerjinin ne kadarının malzeme tarafından adsorplanıp ısıya dönüştüğünü ve ne kadarının hava-malzeme ara yüzeyinde yansıdığını göstermektedir.

Dielektrik (kayıp) faktörü (ϵ'') ise malzemenin enerjiyi tüketmesinin bir ölçüsüdür. Diğer bir deyişle, "kayıp" faktörü, giren mikrodalga enerjisinin malzeme içinde ısı olarak tükenmesiyle kayıp miktarını vermektedir. Kayıp kelimesi malzemeye nüfuz edip ısı olarak dağılan kayıp mikrodalga enerjisi göstermek amacıyla kullanılmaktadır ve malzemenin, gelen enerjinin

ne kadarını ısıya çevirebildiğinin bir göstergesidir. Bu nedenle, yüksek “kayıp” faktörlü bir malzeme mikrodalga enerji ile kolayca ısıtılabilir.

Mikrodalga ısıtmadan dolayı bir malzemede depolanan termal enerji miktarı şu faktörlere bağlıdır (Lindroth, 1986; Whittless vd, 2003):

- Elektrik alan gerilimi (güç yoğunluğu)
- Mikrodalga ışınımın frekansı
- Malzemenin dielektrik özellikleri

Bir malzemenin birim hacim başına güç soğurma (enerji depolama) yoğunluğu ise aşağıdaki şekilde formüleştirilmektedir:

$$P_d = \Omega |E_0|^2 = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |E_0|^2 \quad (1)$$

Burada;

- P_d : Güç yoğunluğu (W/m^3)
- Ω : Toplam geçirgenlik
- f : Mikrodalga enerji frekansı (Hz)
- ϵ_0 : Boşluğun geçirgenliği (8.854×10^{-12} F/m)
- ϵ'' : Malzemenin dielektrik kayıp faktörü
- E_0 : Mikrodalga enerji elektrik alan magnitudü (V/m)

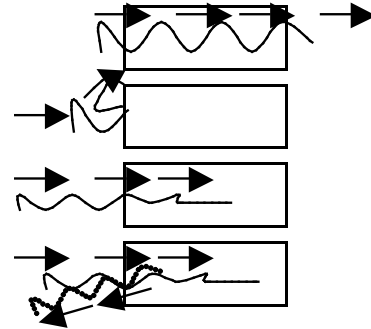
Malzemeleri mikrodalga ile etkileşimleri bakımından üç kategoriye ayırmak mümkündür:

- Mikrodalga'nın herhangi bir kayba uğramadan geçtiği geçirimli (transparan) *düşük kayıplı malzemeler*,
- Herhangi bir nüfuz olmadan yansıtan malzemeler,
- Dielektrik kayıp faktörü değerine bağlı olarak mikrodalgayı absorbe eden (soğuran) yüksek kayıplı malzemeler

Malzeme tipi	Mikrodalga'nın nüfuz edilmesi	Isınma özelliği
1 Geçirimli (Transparan)	Tamamen geçirgen	Isınma yok
2 İletken (Kondüktör)	Yok (Yansıma sebebiyle)	Isınma yok
3 Soğurucu (Absorbe edici)	Tamamen absorbe edici	Malzeme ısınır

Bir malzemenin farklı dielektrik özellikte iki veya daha çok faz içermesi durumunda, mikrodalga enerjinin geçirimli fazdan geçerken soğurucu fazı

seçimli olarak ısıtıldığı dördüncü bir kategori (karma) oluşmaktadır (Clark vd, 2000) (Şekil 2). Kömür, heterojen yapısı nedeniyle bu kategori içerisine girmekte ve klasik ısıtma sisteminde mümkün olmayan “seçimli ısıtma” mikrodalga sayesinde gerçekleştirilebilir.

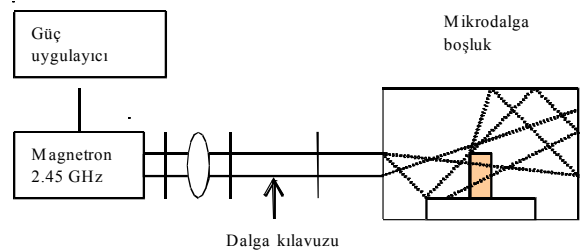


Şekil 2. Malzeme ile mikrodalga'nın etkileşimi a) geçirimli b) iletken c) soğurucu d) karma

Mikrodalga ısıtma sistemi dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

- 1- Güç uygulayıcı,
- 2- Güç kaynağı, mikrodalga üreten (elektrik enerjisini mikrodalgaya dönüştüren) vakum tüpü, *magnetron*
- 3- Jeneratörden gelen mikrodalgaları aplikatöre ileten, dalga-rehberi
- 4- Hedef malzemenin ısıtılmasını sağlayan rezonans boşluk, (örneğin fırın)

Mikrodalga ısıtma sisteminin basit gösterimi ise Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Mikrodalga ile ısıtma sisteminin şematik gösterimi.

Şekilden de görüldüğü gibi, malzeme mikrodalga fırına yerleştirilmekte ve ısınma tamamlandığında çıkarılmaktadır. Mikrodalga enerji bir dalga rehberiyle yönlendirilmektedir. Sürekli besleme ise genellikle yalıtkan bir malzemedan yapılan

bant konveyörle gerçekleştirilmektedir. Genel olarak endüstriyel ölçekli bir mikrodalga ısıtma sistemi ortalama 6.000 saat çalışma ömrü olan ve 75 kW'ya kadar çıkabilen bir magnetronla 915 MHz frekansta uygulanmaktadır (Smith, 1993).

3. KÖMÜRDE MİKRODALGA İLE ÖNİŞLEM UYGULAMALARI

Bugüne kadar mikrodalga enerjinin kömür üzerindeki etkisini araştıran bir çok çalışma yürütülmüştür. Yapılan bu çalışmaları dört temel bölüme ayırmak mümkündür:

- 1-Isıtma hızı üzerine araştırmalar
- 2-Öğütülebilirlik çalışmaları
- 3-Kükürdün uzaklaştırılması üzerine çalışmalar ve

4-Susuzlaştırma (kurutma) çalışmaları

Çeşitli kömürler üzerinde son yıllarda gerçekleştirilen mikrodalga ile önışlem çalışmalarının özeti Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Bu çalışmalar ayrıntılı bir şekilde aşağıda ele alınmaktadır.

3.1. Kömürün Isınma Özelliklerine Etkisi

Mikrodalga ile ısıtma, bir malzemedeki çeşitli fazların farklı dielektrik geçirgenlik ve kayıp faktöründen dolayı farklı (diferansiyel) ısınmasına ve bu sayede malzeme içerisinde termal çatlamalara sebep olabilmektedir (Wang vd, 2000). Bu ilke çeşitli araştırmacılar tarafından kömür için de gösterilmiştir (Marland vd, 2000, Marland vd, 2001).

Çizelge 1. Çeşitli kömürler üzerinde son yıllarda gerçekleştirilen mikrodalga ile önışlem çalışmaları

Mikrodalga araştırma konusu	Kömür türü	Deneysel şartlar	Elde edilen sonuçlar	Kaynak
Öğütülebilirlik	Yarı-bitümlü İngiliz kömürleri (termik santral) (%5 nem içerikli)	0,65 kW; 2,45 GHz; 1-8 dk.	İş indeksinde %50'ye varan düşüş, bünye neminin %55'ini uzaklaştırma	Marland vd, 2000
Kükürt giderimi	Linyit kömürü (Aşkale)	0,85 kW; 2,45 GHz; 20 dk.	Manyetit ilavesiyle mikrodalga ısınma ve piritik kükürdün uzaklaştırılması, %5'lik bir manyetit ilavesiyle birlikte piritik kükürtte %55 azalma	Uslu ve Atalay, 2003
Kömürün yapısına etkisi	Çeşitli ülkelerden farklı kömürler (farklı kimyasal ve petrografik özellikte)	3-15 kW; 2,45 GHz; 0,1 sn.	Mikrodalga ile etkileşimin kömürün türüne/nem-yakıt ve petrografik vb. özelliklerine göre değiştiği, uygulama süresinin etkili olduğu	Lester ve Kingman, 2004
Kömürün yapısına etkisi, Öğütülebilirlik	Çeşitli ülkelerden farklı kömürler	3-15 kW; 2,45 GHz; 0,1 sn.	Özgül kırılma hızlarında artış, ekonomik güç seviyelerinde kömürlerin öğütülebilirliğinde belirgin artış	Lester vd, 2005
Öğütülebilirlik	Bitümlü kömür (%10 nem içerikli)	0,90 kW; 2,45 GHz; 15-60 sn.	HGI değerlerinde %125, 74 µm altı fraksiyonda üretilen ince ürün miktarında %118 artış	Özbayoğlu ve Depci, 2006
Susuzlaştırma	İnce kömür pülpü (%52 su içerikli) (ABD)	0,80 kW; 2,45 GHz; 10-30 sn.	%80'in üzerinde susuzlaştırma verimi	Seehra vd, 2007

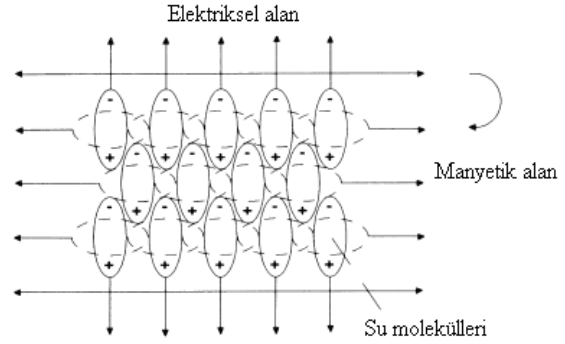
Kömürde uygulanan elektromanyetik dalgalara tepkinin (termal gerilme ve zorlamaların) her bir taneciğin içerisindeki bünye neminden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Zira, bütün bir malzeme olarak kömürün kayıp faktörü 0.25 gibi oldukça düşük bir değerdeyken (Marland vd, 2000; Marland vd, 2001), su, çok daha yüksek kayıp faktörüne (yaklaşık 12) sahiptir (Meredith, 1997) (Çizelge 2).

Çizelge 2. Kömür ve bünyesindeki safsızlıkların dielektrik kayıp faktörü değerleri *

Materyal	Kayıp Faktörü, (ϵ'')	Mikrodalga ile Isıtma	
Kömür	Düşük; <0,25	Zor	
Su	Yüksek; ~12	Kolay	
Mineral Madde	Pirit	Yüksek; ~17	Kolay
	Kuvars	Düşük	Zor
Organik Karbon	Düşük	Zor	

* Sıcaklık: 25°C, Frekans: 2,45 GHz

Kömürdeki organik bileşenler mikrodalga enerjiyi soğurucu özellikte değildir. Ancak, kömür gerek mikro-yapısı gerekse jeolojik lokasyonuna bağlı olarak değişik oranlarda su ihtiva eder. Su ise iyi bir mikrodalga soğurucu olarak değerlendirilmektedir (Chironis, 1986). Su molekülleri polardır ve alternatif elektrik alanına maruz bırakıldığında Şekil 4'te görüldüğü gibi moleküller uygulanan elektrik alanıyla aynı frekansta ve yönde konumlanır (Hulls, 1992). Saniyede milyonlarca kez oluşan bu hareket sonucu sürtünme ısısı oluşturur ve su ısınır. Suyun ortalama ısınma hızı 0.9 °C/sn olarak hesaplanmaktadır (Harrison, ve Rowson, 1997) (Çizelge 2). Bu şekilde kömür mikrodalga enerjiye maruz bırakıldığında içerisindeki su molekülleri ısınarak faz değiştirmekte, kömür matriksinde iç baskıların artması sonucu genişleşerek büyük olasılıkla da kömürün yapısını zayıflatmakta ve bu sayede kömürün ufalanabilirliği kolaylaşmaktadır.



Şekil 4. Hızla ısı verilen bir elektrik alanında polar moleküllerinin yer değiştirmesi (Hulls, 1992)

Kömürdeki mineral maddeler (pirit, kuvars vs.) ise elektromanyetik ışınımı soğurma kabiliyetinde farklılıklar gösterir. Bazı mineraller (pirit gibi) uygulanan elektrik alanında hızla ısınırken, diğer mineraller (kuvars, feldspat gibi) elektromanyetik ışınımına karşı geçirimsiz özellik gösterir (Chen vd, 1984; McGill vd, 1988; Walkiewicz vd, 1988) (Çizelge 3). Kömürün içerisinde bulunan bu tür mineral maddelerin farklı genişleme hızlarından dolayı kömürde yapısal bir gevrekleşme beklenebilir (Chen vd, 1984). Bu davranış mineralin dielektrik sabitine, mineralin miktarına ve mineralin kömür yapısındaki konumuna bağlı olarak değişim gösterir.

Çizelge 3. Kömür ve bünyesindeki safsızlıkların ısınma hızı değerleri *

Materyal	Isınma Hızı, (°C/sn)	Mikrodalga ile Isıtma	
Kömür	Düşük; 0,2	Zor	
Su	Yüksek; 0,9	Kolay	
Mineral Madde	Pirit	Yüksek; 1,89	Kolay
	Kuvars	Düşük; 0,07	Zor
	Feldispat	Düşük; 0,1	Zor
Organik Karbon	Düşük	Zor	

* Frekans: 2,45 GHz, Güç: 0,65 kW

Mikrodalga ile ısıtmanın ufalama veya kırma işlemlerinin verimini arttırmada cazip bir yöntem olabilmesi mümkündür.

Heterojen cevherlerde minerallerin farklı ısınma özelliklerine sahip olması dolayısıyla ayırıcı (diferansiyel) ısınmanın termal çatlaklara sebep olabileceği çeşitli yazarlar tarafından gösterilmiş (Kingman, 1999; Wang vd, 2000) ve daha önce de belirtildiği gibi kömürdeki her bir fazın farklı mikrodalga absorblama özelliklerine veya farklı dielektrik geçirgenlik (Çizelge 4) ve kayıp faktörüne sahip olması nedeniyle kömür içinde selektif veya farklı ısınma hızlarının oluştuğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4. Kömür ve bünye suyunun dielektrik sabiti değerleri *

Materyal	Dielektrik sabiti, (ϵ)	Mikrodalga ile Isıtma
Linyit Kömürü	Düşük; 4,7-5,3	Zor
Su	Yüksek; 78,5	Kolay

* Sıcaklık: 25°C; Frekans: 0,615 GHz

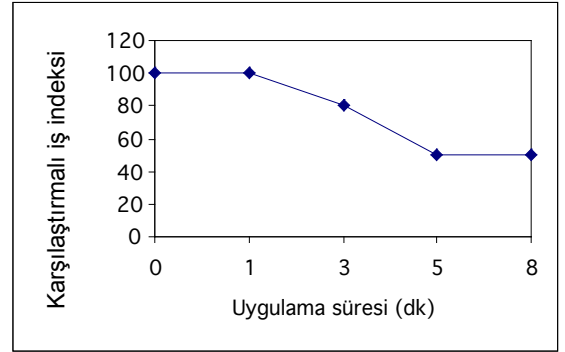
Dielektrik özellik ve kömür arasındaki ilişkinin daha ayrıntılı tanımı ise Marland vd (2001) tarafından yapılmış, cevher minerali gibi kömürün de mikrodalgaya duyarlı olduğu ve öğütülebilirliğin olumlu etkilenebileceği gösterilmiştir (Marland vd, 2000).

3.2. Kömürün Öğütülebilirliğine Etkisi

Bilindiği gibi ince öğütülmüş (pulverize) kömürle çalışan termik santraller büyük miktarlarda kömür tüketmekte ve tam yanmayı gerçekleştirmek için de öğütme/ufalama işlemi gerektirmektedir. Bu işlemde genellikle kömürün %70-80'inin 75 μ m altına geçmesi istenmektedir (Couch, 1995). Ufalama işlemlerinde etkili olan kömürün sertliği ise nem içeriği (Conroy ve Sligar, 1991) ve petrografik bileşim gibi faktörlere bağlı olmaktadır (Conroy, 1994; Klimpel, 1987). Öğütme öncesi kömürdeki yapısal kusur ve çatlaklara sebep olabilecek bir teknoloji ile aynı öğütme boyutunu elde etmek üzere değirmen çıkışı ürün miktarını arttırarak değirmen için gerekli enerji miktarını daha düşük seviyelere indirebilmek mümkündür (Cloke ve Lester, 1994). Bu bağlamda; kömürün öğütülebilirliğinde elde edilecek artışların değirmen için gerekli olan güç ihtiyacını azaltacağı açıktır.

Konuya ilişkin yapılan ilk araştırmalarda, öğütme öncesi klasik yöntemlerle ısıtılmasının kömürün öğütülebilirliğini attırdığı ve bu sayede öğütmede %40'a varan enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmesine (Lytle vd, 1992) karşın, ön-ısıtma için gerekli enerjinin öğütülebilirliğin artmasıyla elde edilen enerji tasarrufundan daha fazla olduğu ve atık ısının ön-ısıtmada değerlendirilmesi halinde ancak ekonomik olabileceği tespit edilmiştir.

2000 yılına gelindiğinde, mikrodalga kömürün öğütülebilirliğine etkisinin anlaşılması yönündeki çalışmalar hız kazanmıştır. Elektromanyetik ışınımın farklı ısı değerine sahip kömürlerin öğütülebilirliğine etkisi araştırılmış, elde edilen ilk sonuçlar 5 dak.'lık mikrodalga uygulama süresinde karşılaştırmalı iş indeksi değerinde %50'ye varan düşüşler sağlandığı ortaya konulmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. Kömür için çeşitli uygulama sürelerinde iş indeksindeki değişim (Güç: 650 W, Frekans: 2,45 GHz) (Marland vd, 2000)

- Öğütülebilirlikteki bu artışın iki mekanizmanın sonucu olarak geliştiği, bu mekanizmaların geçirimli kömür matrisindeki kül ve piritin belirgin bir basınç yaratarak faz değişikliğine neden olması ve kömürün yapısında bulunan ve uzaklaştırılmayan bünye neminin ayırıcı genişmesi şeklinde açıklanabileceği,
- Mikrodalga ısıtmanın klasik kurutmada olduğu gibi kömürün kalorifik değeri (yakıt potansiyeli) üzerinde benzer minimal etkilere sahip olduğu ve kömürün ısı değerine önemli bir olumsuz etkisi olmadığı,
- Dahadüşük ısı değerli kömürlerin muhtemelen artan rutubet oranları dolayısıyla mikrodalga enerjiye daha duyarlı oldukları, su ve uçucu madde oranının kömürün öğütülebilirliğini arttırdığı,

- Pilot ölçekte (50-100 kg/saat) yapılacak ilave çalışmalarla uygulanan işlemin teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir (Marland vd, 2000).

Çeşitli İngiliz kömürleri üzerinde mikrodalga enerjinin kömür üzerindeki etkisini daha iyi anlamak üzere ilave çalışmalar yürütülmüş ve kömürün kalorifik değeriyle (kuru, mineral maddesiz) birlikte elektrik iletkenliğinde düşüşler olduğu ancak nem ve mineral madde içeriğinin kömürün elektrik iletkenliğini arttırdığı, düşük kalorili kömürler için iletkenlikte artışın mükemmel bir soğurucu olan artan nem içeriği ile açıklanabileceği belirtilmiştir (Marland vd, 2001).

Bir diğer çalışmada da; endüstriyel şartları temsil etmek üzere 8 kW'da 0,1 sn. uygulama süresinde tek modlu (single mode) rezonans boşlukta gerçekleştirilmiş ve ilk kez ekonomikliği olan güç seviyelerinde kömürlerin öğütülebilirliğinde önemli artış sağlanmış, uygulanan mikrodalga enerji miktarında ilave azalmaların ise daha iyi tasarım sistemleriyle elde edilebileceği ortaya konulmuştur (Lester vd, 2005).

Mikrodalga kömürün öğütülebilirliğine etkisinin araştırıldığı bir diğer çalışmada, %10 nem içeriğine sahip kömürlerin Hardgrove öğütülebilirlik indeksi (HGI) değerlerinde (2,45 GHz, 0,90 kW ve 60 sn. uygulama süresinde) %125, 74 µm altı fraksiyonda üretilen ince ürün miktarında %118 artış sağlandığı, nem içeriğinin tane boyutundan daha çok etkiye sahip olduğu ve klasik fırında 2 saatte elde edilen olumlu sonuçların mikrodalga ile 1 dakika gibi kısa uygulama süresinde elde edildiği tespit edilmiştir (Özbayoğlu ve Depci, 2006).

Son zamanlarda Nottingham Üniversitesi (İngiltere) *Mining and Mineral Centre*'de kömürün öğütme verimini arttırmak için mikrodalga ile yapılan çalışmalarda ise mikrodalga güç yoğunluğunun (volumetrik ısınma hızı) ve uygulama süresinin artırılarak 1 kW/t 'dan daha az mikrodalga enerji ile azalan ufalama enerjisi gibi önemli işletme avantajları elde edilebildiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, çok kısa sürelerde yüksek güç çıktılarını veren mikrodalga jeneratörlerin geliştirilmesi ve çok hızlı ısıtmaya elverişli yüksek elektrik alan gerilimi oluşturacak boşluk sistemlerinin tasarımı ile birlikte ekonomikliği olan mikrodalga enerji

girişlerinde kömür için gerekli öğütme enerjisinde önemli düşüşlerin mümkün olabileceği ayrıca belirtilmektedir (Anon (b), 2006).

3.3. Kömürden Kükürdün Uzaklaştırılmasına Etkisi

Bilindiği gibi, ham kömürdeki inorganik kükürt genellikle piritik ve sülfat formunda oluşmaktadır. Pirit mineralinin kömürden ayrılması klasik manyetik ayırma yöntemleriyle güçtürveyayırmanın performansı ancak piritin manyetik duyarlılığının artırılmasıyla mümkün olabilmektedir. Bunun "ısıtma yoluyla" gerçekleştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmış (Ergun ve Bean, 1968) ancak kömürdeki piritin ısıtılması sırasında kömürün de ısınmasıyla birlikte enerji kaybına dönüşmekte olduğu (Kelland vd, 1988) ve kömürün minimum ısı kaybı ile hızla ısıtılmasının yeterince yüksek enerji yoğunluğunda mikrodalga kullanılarak mümkün olabileceği tespit edilmiştir (Fanslow vd, 1980; Kelland vd, 1988).

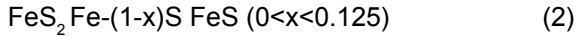
Kömürden kükürt uzaklaştırılması için yüksek frekanslı ısıtma konusunda ABD'de çalışmalar yürütülmüş, kömürün dielektrik özelliklerinin uygulanan frekansla ilişkisi araştırılmış, yüksek kükürt içerikli kömürden ayrılan yoğun pirit kaplı kısmın dielektrik kayıp faktörünün frekansla arttığı tespit edilmiştir (Nelson vd, 1981). Kömürdeki piritin 2,45 GHz'de "temiz kömür"den dokuz kat daha hızlı ısındığı ve mikrodalga ile ısıtılmış pirit örneklerinin manyetik duyarlıklarında artışın işlem süresi ve uygulanan güçle doğru orantılı olduğu (Fanslow vd, 1980), mikrodalga ile ısıtmanın numunede daha fazla manyetik malzeme ürettiği ve manyetik duyarlılığın arttığı, manyetik ayırmada da nispeten artış sağlandığı belirlenmiştir (Bluhm vd, 1986).

Kuzey Amerika'daki *General Electric* şirketi tarafından mikrodalga ile kömürdeki kükürdün uzaklaştırılması için yapılan pilot ölçekli çalışmalarda 15 kW'da çalışan bir mikrodalga konveyör sistemi kullanılmış, kömürdeki piritin pirotit formuna dönüşerek seçimli olarak ısınması sağlanmış, pirotit ise düşük alan şiddetli manyetik ayırmayla uzaklaştırılabilmektedir. Bir ton kömür için 22 \$'lık bir maliyet tespit edilmiş ve baca gazı desülfürizasyonu gibi 26 \$/ton arıtma maliyetine sahip geleneksel teknolojilerle kıyaslandığında oldukça avantajlı olabileceği belirlenmiştir (Rowson, 1986).

Piritin pirotite dönüştürülmesiyle, tipik İngiliz kömürlerinin kükürt içeriği %24, kül içeriği de %23 oranında düşürülmüştür. Pirotit piritten çok daha yüksek manyetik (100 kat) özelliğe sahip olduğundan temizleme işlemlerinde klasik manyetik ayırma uygulanabilmekte ve kömürün seçimli mineral madde gideriminde kısa sürede gerçekleştirilmektedir (Viswanathan, 1990).

Bir başka çalışmada ise kömürlerin mikrodalga ile kükürdünün gideriminde kostik liç işleminin rolü araştırılmış, ergimiş kostiklerin (NaOH veya KOH) mikrodalga ışıını etkin bir şekilde adsorbladığı, kömür/pirit fazının ayırıcı ısınmasını hızlandırdığı gösterilmiştir. Bunun özellikle normal şartlarda az ısının olduğu düşük pirit içerikli kömürler için geçerli olduğu belirtilmiş, düşük güç seviyelerinde (500 W) 2,45 GHz frekansta 60 sn.lik bir sürede gerçekleştirilen çalışmada toplam kükürt içeriğinde %70'lere varan azalmalar elde edilmiştir (Rowson ve Rice, 1990; Hayashi, 1990).

Mikrodalga ile maruz kalma sonrası ham kömürdeki mevcut piritin aşağıdaki reaksiyona göre pirotite dönüştüğü,



Maruz kalma süresinin artırılmasıyla reaksiyonun soldan sağa geliştiği, mikrodalga işlemi için 30-100 saniyelik uygulama sürelerinde inorganik kükürt giderim verimlerinin %5-44 elde edildiği, işlemin asitle yıkama ile birleştirilmesiyle kömürdeki inorganik kükürt içeriğinde %97'ye varan azalmayla bu verimlerin daha da artırılabilceği belirtilmiştir (Weng ve Wang, 1992).

Yine; piritin güçlü bir manyetik özelliğe sahip pirotit fazına bozularak dönüşmesinden dolayı manyetik duyarlılığının da önemli oranda artabileceği, piritik kükürdün kömürden uzaklaştırılmasında mikrodalga teknolojisinin kullanımının yakın bir gelecekte ticarileştirilebileceği, bunun disiplinler arası araştırmanın tesis edilmesiyle mümkün olabileceği belirtilmiştir (Uslu vd, 2003).

Ülkemizde Erzurum/Aşkale kömürleri üzerinde yapılan bir çalışmada, doğrudan manyetik ayırmayla piritik kükürtte %22'lik bir azalma elde edilirken, 850 W ve 2,45 GHz mikrodalga ısıtımaya manyetik özellikteki artışın kömürdeki piritik kükürdün uzaklaştırılması için yeterli

olmadığı (%37), ancak mükemmel bir mikrodalga soğurucu olan manyetit ilavesiyle mikrodalga ısınmanın ve piritik kükürt gideriminin mümkün olduğu, %5'lik bir manyetit ilavesiyle piritik kükürdün %55 azaldığı, yine kül içeriğinde %22 azalma ve kalorifik değerinde %20 artış elde edildiği belirtilmiştir (Uslu ve Atalay, 2003).

3.4. Kömürün Susuzlaştırılmasına Etkisi

Bilindiği gibi, kömür endüstrisinde kömürdeki kil vb. safsızlıkların uzaklaştırılması için yıkama işlemi gerçekleştirilmekte ve daha sonra taşınması ve termik santrale ulaştırılmasından önce bu suyun giderilmesi gerekmektedir. Mekanik susuzlaştırma yöntemleri (santrifüjler) ince kömür partikülleri için genellikle verimli olamamaktadır (Dzinomwa vd, 1997). Klasik kurutma yöntemleri ise su ve kömürü birlikte ısıttığından kömürün ısı değerinde düşümlere yol açmakta ve ekonomik etkinliğini kaybetmektedir. Bu yüzden ince kömür fraksiyonlarının çoğu atılmakta veya düzensiz depolanmaktadır.

Önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi, kömür matriksindeki nem diğer fazlardan daha yüksek kayıp faktörüne sahiptir. Bu sayede ısınma işlemi kömürle kıyaslandığında seçimli ve hızlı olmakta (Bluhm vd, 1986), her bir kömür tanesindeki basınç farkı ne kadar arttırılırsa çatlak formasyonu da maksimuma ulaşmaktadır.

Seehra vd, (2007) tarafından yapılan ve %52 nem içeren ince kömürlerin mikrodalga kullanılarak seçimli ısıtılmasıyla ilgili çalışmada; özel tasarlanmış bir bant konveyörle sürekli besleme yapılabilen laboratuvar ölçekli mikrodalga ısıtma (2,45 GHz ve 800 W) düzeneği ile %80'in üzerinde bir verime ulaşılmış ve nem oranı %10'luk bir seviyeye indirildiğinde tüketilen gücün 3\$/ton'luk bir maliyet (sermaye ve işçilik hariç) getirdiği, teknolojinin endüstriyel uygulamalara aktarılmasının ise kömür piyasasının ekonomisine bağlı olduğu belirtilmiştir.

4. SONUÇLAR

Mikrodalga enerjinin kömür endüstrisi ve madencilik sektöründe uygulanabilmesine yönelik çalışmalar çok fazla geriye gitmemektedir. Daha önce klasik ısıtma yöntemlerinin denenmesi ancak başarı elde edilememesi sebebiyle 1990'lı

yılların sonlarına doğru başlatılan araştırmalarla birlikte, özellikle kömürdeki kükürdün azaltılması başta olmak üzere öğütme performansının (daha az enerji tüketimi) artırılması ve ince kömürlerin susuzlaştırılması çalışmalarıyla bu alanda mikrodalga enerjinin potansiyeli konusunda önemli bir deneyim ve bilgi birikimi elde edilmiştir.

Ancak, bu çalışmalar çoğu kez mikrodalga teknolojisinin ekonomikliğinin sağlanamadığı şartlarda (düşük güç seviyeleri, yüksek uygulama süreleri gibi) gerçekleştirilmiştir.

Mikrodalga ısıtmanın genel endüstriyel uygulamaları ise oldukça yavaş gelişmektedir. Bu teknolojinin gelişmesinin önünde madencilik sektörünün kendine özgü zorlukları (örneğin yüksek tonajlı beslemelerin söz konusu olması gibi) ile birlikte yüksek yatırım maliyeti ve gerçekçi olmayan teknolojik beklentiler önemli engel oluşturmaktadır.

Özellikle çok kısa sürelerde yüksek güç çıktıları veren mikrodalga jeneratörlerin geliştirilmesi ve çok hızlı (0,1 sn. gibi) ısıtmaya elverişli yüksek elektrik alan gerilimi oluşturacak rezonans boşluk sistemlerin tasarımı ile birlikte ekonomik enerji girdilerinin oluşturulması sonucunda bu teknolojinin madencilik ve kömür endüstrisinde uygulama alanı bulması söz konusu olabilecektir.

Bu itibarla; fizik, elektrik ve elektronik mühendisliği, cevher hazırlama ve kimya mühendisliği gibi disiplinlerin ortak işbirliği ile çok-disiplinli bir yaklaşım ortaya konulması halinde endüstriyel sistemlerin geliştirilmesi ve hayata geçirilmesi mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

Anon (a), 2007; Advanced Manufacturing Tecknology, Wollongong University, Australia, <http://www.amttechnology.com>

Anon (b), 2006; Microwave Pre-Treatment of Coal and Coal Blends to Improve Milling Performance, <http://www.nottingham.ac.uk/scheme/nmmc/micro.php>.

Bluhm, D.D., Fanslow, G.E., Nelson, S.O., 1986; IEEE Transactions on Magnetics, **22**, 1887.

Bykov, Y.V., Rybakov, K.I., Semenov, V.E., 2001; "Topical Review. High-temperature Microwave Processing of Materials", J.Phys.D: Appl.Phys., **34**, 55-75.

Chen, T.T., Dutrizac, J.E., Haque, K.E., Wyslouzil, W., Kashyap, S., 1984; "Relative Transparency of Minerals to Microwave Radiation", Canadian Metallurgical Quarterly, **23**, (3), 349-351.

Chironis, N.P., 1986; "Microwaves Dry Fine Coal", Coal Age, **91**, (12), 64-65.

Clark, D.E., Folz, D.C., West, J.K., 2000; "Processing Materials with Microwave Energy", Mater.Sci.Eng. A., **287**, 153-158.

Cloke, M. ve Lester, E., 1994; "Characterization of Coals for Combustion Using Petrographic Analysis: A Review ", Fuel, **73**, 315-320.

Conroy, A.P., 1994; "Grinding Behaviour of Hard Coal", Combust News, **5**, 1-4.

Conroy, A.P. ve Sligar, N.J., 1991; "The Effect of Coal Content and Internal Recirculation on Vertical Spindle Mill Throughput and Wear", NERDDC Project, Australian Combustion Technology Centre, 87.

Couch, G.R., 1995; "Power from Coal-Where to Remove Impurities?" IEA Coal Res., 42.

Decareau, R.V., 1985; Microwaves in the Food Pcessing Industry, Academic Pres, Orlando Ma. USA.

Dzinomwa, G.P.T., Wood, C.J., Hill, D.J.T., 1997; "Fine Coal Dewatering Using pH and Temperature - Sensitive Super - Absorbent Polymers", Polm. Adv.Technol., **8**, 767-772.

Ergun, S. ve Bean, E.H., 1968; "Magnetic Seperation of Pyrite from Coals", Brueau of Mines Report of Investigation, 7181.

Fanslow, G.E., Bluhm, D.D., Nelson, S.O., 1980; "Dielectric Heating of Mixtures Containing Coal and Pyrite", Journal of Microwave power, **15**, (3), 187-190.

Haque, K.E., 1999; "Microwave Energy for Mineral Treatment Processes-a Brief Review", International Journal of Mineral Processing, **57**, 1-24.

- Harrison, P.C. ve Rowson, N., 1997; "The Effect of Heat Treatment on Coal Grindability", IChEME Research Event, Nottingham, UK.
- Hayashi, J.I., 1990; "The Role of Microwave Irradiation in Coal Desulphurisation With Molten Caustics", *Fuel*, **69**, (6), 739-742.
- Hulls, P., 1992; "Dielectric Heating for Industrial Process", *U.I.E.*, 6-18.
- Jones, D.A., Lelyveld, T.P., Mavrofidis, S.D., Kingman, S.W., Miles, N.M., 2002; "Microwave Heating Applications in Environmental Engineering-Areview", *Resources, Conservation and Recycling*, **34**, 75-90.
- Kelland, D.R., Lai-Fook, M., Maxwell, E., Takayasu, M., 1988; *IEEE Transactions on Magnetics*, **24**, 2434.
- Kingman, S.W., 1999; "Microwave Treatment of Ores and Minerals", PhD thesis, University of Birmingham, Birmingham, UK.
- Kingman, S.W. ve Rowson, N.A., 2000; "The Effect of Microwave Radiation on the Magnetic Properties of Minerals", *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, **35**, 144-150.
- Kingston H.M. ve Jassie, L.B., 1985; "Introduction to Microwave Sample Preparation-Theory and Practise", Chapters 2 and 3, *ACS Professional Reference Book*, Am.Chem.Soc.
- Klimpel, R., 1987; *Fine Coal Processing*, Mishra, S.K., Klimpel, R., editors, Noyes Publications, 19-58.
- Lester, E., Kingman, S., Dodds, C., 2005; "Increased Coal Grindability as a Result of Microwave Pretreatment at Economic Energy Inputs", *Fuel*, **84**, 423-427
- Lindroth, D.P., 1986; "Microwave Drying of Fine Coal", US Bureau of Mines, RI9005.
- Lytle, J., Choi, N., Prisbrey, K., 1992; "Influence of Preheating on Grindability of Coal", *International Journal of Mineral Processing*, **36**, 107-112.
- Marland, S., Han, B., Merchant, A., Rowson, N., 2000; "The Effect of Microwave Radiation on Coal Grindability", *Fuel*, **79**, 1283-1288.
- Marland, S., Merchant, A., Rowson, N., 2001; "Dielectric Properties of Coal", *Fuel*, **80**, 1839-1849.
- McGill, S.L., Walkiewicz, J.W., Smyres, G.A., 1988; "The Effect of Power Level on the Microwave Heating of Selected Chemicals and Minerals", *Mater.Res.Soc.Symp.Proc.*, Materials Research Society, Warrendale, PA, USA.
- Meredith, R., 1997; *Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating*, Institution of Electrical Engineers, 350.
- Nelson, S.O., Beck-Montgomery, S.R., Fanslow, G.E., Bluhm, D.D., 1981; "Frequency Dependence of the Dielectric Properties of Coal" *Journal of Microwave Power*, **16**, 319-326.
- Ozbayoğlu, G. ve Depci, T., 2006; "Microwave Radiation Effect on Coal Grindability" 15th International Coal Properation Congress, October 2006, Pekin / China.
- Rowson, N.A., 1986; "Desulphurisation of Coal by Microwave Energy", Ph.D. Thesis, University of Leeds, Ledds, UK.
- Rowson, N.A. ve Rice, N., 1990; "Desulphurisation of Coal Using Low Power Microwave Energy", *Minerals Engineering*, **3**, 3/4, 363-368.
- Schiffmann, R.F., 1995; "Commercializing Microwave Ssystems: Path to Success or Failure. Microwaves: Theory and Application in Material Processing" 111. In: Clark, D.E., Folz, D.C., Oda, S.J., Silberglit, R. (eds.), *Ceramic Transc.*, 59.
- Seehra, M.S., Karla, A., Manivannan, A., 2007; "Dewatering of Fine Coal Slurries by Selective Heating with Microwaves", *Fuel*, **86**, 829-834.
- Smith, R.D., 1993; *Large Industrial Mmicrowave Power Supplies. Proceedings: Microwave-Induced Reaction Workshop*, A-11-1—11-2, Pasific Grove, CA.
- Standish, N., and Worner, H., 1991; "Microwave Reduction of Iron Ores", *Iron and Steelmaking*, **18** (5), 59-61.
- Stephen, J.H., 1997; "Microwave-Enhanced

Chemistry: (Fundamentals, Sample Preparation, and Applications)", American Chemical Society, Washington DC., USA.

Uslu T., Atalay, U., Arol, A.I., 2003; "Effect of Microwave Heating on Magnetic Separation of Pyrite", Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, **225**,161-167.

Uslu T. ve Atalay, U., 2003; "Microwave Heating of Coal for Enhanced Magnetic Removal of Pyrite", Fuel Processing Technology, **85**, 21-29.

Viswanathan, M., 1990; "Investigation on the Effect of Microwave Pre-treatment on Comminution/Beneficiation and Desulphurisation of Coals", 11th International Coal Preparation Congress, Tokyo, 151-155.

Walkiewicz, J.W., Kazonich, G., McGill, S.L., 1988; "Microwave Heating Characteristics of Selected Minerals and Compounds", Miner. Metall.Process., **63**, 29-44.

Wang, Y., Forssberg, E., Svensson, M., 2000; Mineral Proc. On the verge of the 21st century, p.3-9. ISBN 905809172-4.

Weng, S.H. ve Wang, J., 1992; "Exploration on the Mechanism of Coal Desulphurisation Using Microwave Irradiation and Acid Washing Method", Fuel Processing Technology, **31**, (3), 233-240.

Whittless, D.N., Kingman, S.W., Reddish, D.J., 2003; "Application of Numerical Modelling for Prediction of the Influence of Power Density on Microwave-Assisted Breakage", Int.J.Miner. Process., **68**, 71-91.