

Üleksitin Kurutulmasında Farklı Isıtıcıların Verimliliğinin İncelenmesi

Mehmet Faruk ESKİBALCI^{1*}, Onur Veysel IŞIKTAŞ¹

¹İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

(Geliş Tarihi/Received: 18.08.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 02.02.2017)

ÖZ

Bu çalışmada üleksit mineralinin kurutulmasında ısıtma mekanizmaları birbirinden farklı olan üç kurutucunun verimlilikleri incelenmiştir. Numune üzerinde yapılan DTA analizi neticesinde ~60 °C sıcaklıklarda numunenin kristal suyunu kaybetmeye başladığı tespit edilmiştir. Deneylerde sadece yüzey neminin giderilmesi hedeflendiği için her bir fırında uygulanan sıcaklık ~60 °C' de sabit tutulmaya çalışılmıştır. Konvansiyonel fırın, halojen fırın ve mikrodalga fırın ile yapılan deneylerde optimum kurutma sürelerinin sırasıyla 70 dk, 35 dk ve 540 W güç seviyesinde 5,5 dk olduğu, enerji maliyetlerinde sırasıyla 0,32 TL/kg, 1,312 TL/kg ve 0,524 TL/kg olduğu tespit edilmiştir. Her üç fırın birbiri ile mukayese edildiğinde ise 5,5 dk uygulama süresi ve 0,524 TL/kg enerji maliyeti ile 540 W güç seviyesinde mikrodalga fırın ile kurutma yönteminin ekonomik ve uygulanabilir olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kurutma, Üleksit, Mikrodalga Fırın, Halojen Fırın, Konvansiyonel Fırın.

Examination of the Efficiencies of Furnaces with Different Heating Mechanisms in Drying Ulexite

ABSTRACT

This study examines the efficiencies of driers with three different heating mechanisms in drying ulexite mineral. As a result of DTA analysis made on sample, it was found out that sample starts losing body water at a temperature of ~60 °C. Since in the experiments the temperature applied in each furnace is kept constant at 60 degrees. Optimum drying times on conventional furnace, halogen furnace and microwave furnace were obtained 70 min, 35 min and 5,5 min (at 540 W power level) respectively and energy costs were obtained 0,32 TL/kg, 1,312 TL/kg and 0,524 TK/kg respectively. When all three furnaces are compared, it was found out that drying with microwave furnace at 540 W was economic and applicable with 5.5 min exposure time and 0.524 TL/kg energy cost.

Keywords: Drying, Ulexite, Microwave Furnace, Halogen Furnace, Conventional Furnace.

1. Giriş

Bor mineralleri; bünyelerinde değişik oranlarda bor oksit (B₂O₃) içeren mineraller olup; ülkemizde yaygın olarak bulunan türleri; tinkal, kolemanit ve üleksittir (Yenialaca, 2009). Başta cam, seramik, emaye, metalürji, deterjan sanayi ve tarım

sektörü olmak üzere; nükleer enerji, jet ve roket yakıtı, eczacılık, kimya ve daha bir çok tüketim alanında kullanılmaktadır (Helvacı, 2003). Kimyasal formülü NaCaB₅O₉.8H₂O olarak ifade edilen Üleksit, içerisinde kalsiyum ve Sodyum bulunduran önemli bir bor mineralidir (Şahan, 2010).

Kurutma, bir maddenin bünyesindeki sıvıların ısı yöntemlerle buharlaştırılması ve sonra da bunların ortamdan uzaklaştırılması işlemlerini ifade etmektedir (Ersöz ve Doğan, 2009). Kurutma işleminde gerekli olan ısı enerjisi elektrik, yakıt olarak kullanılan sıvı petrol ürünleri veya petrol gazları kullanılarak elde edilmektedir. Küçük ölçekteki üretimlerde ısı enerjisi kaynağı olarak elektrik enerjisi kullanılırken, büyük ölçekteki üretimlerde belirtilen diğer ısı kaynakları kullanılarak öncelikle su buharı elde edilmekte, su buharı vasıtasıyla ısı, kurutma aletlerine dolaylı olarak kurutulacak maddenin içinde bulunduğu kabın veya kurutucunun cidarının ısıtılması sağlanmaktadır (Doğanay, 2009).

Katılarda bulunan su, serbest su ve bağlı su olarak sınıflandırılabilir. Serbest su bir kirlilik olarak kabul edilirken, kristal suyu veya hidrat suyu da denilen bağlı su kristal yapının bir parçasını oluşturmaktadır (Doğanay, 2009).

Kurutmanın yaygın olarak uygulandığı alanlar; gıda, deri, kimya, tekstil ve orman ürünleri endüstrisi, tarım sektörü ve maden sanayidir. Bu alanlarda uygulanan kurutma işlemi ile ürünlerin kalitelerinin iyileştirilmesi yanında, nemden korunması, hacimlerinin ve ağırlıklarının azaltılması, taşıma, depolama, işleme ve kullanım kolaylığı gibi üstünlükler kazandırılmaktadır (Ersöz ve Doğan, 2009).

Kurutucu sistemler genel olarak 4 ana başlıkta toplanabilir. Bunlar; direkt sistemler (konveksiyon), indirekt sistemler

(kondüksiyon), kombine sistemler ve infrared sistemlerdir (Ayol, 2011). Güneşte kurutma (doğal kurutma) yöntemi yaygın olarak kullanılmasına karşın, beraberinde başta kontaminasyon olmak üzere birçok problem ortaya çıkarabilmektedir. Her yerde ve her zaman güneş ısısından faydalanarak kurutmanın mümkün olmaması, çok büyük kurutma alanlarına ihtiyaç duyması, ürünün dış etkiye maruz kalması vb. riski yapay kurutma sistemlerinin zamanla güneşte kurutmaya tercih edilme nedenleri arasında yer almaktadır (Biçer, 2009).

Solar kurutucular, doğal kurutmada ortaya çıkan olumsuzlukları elemine etmenin yanında enerji etkinliğini arttırmıştır. Bu sistemlerde kullanılan güneş enerjisi ürüne direkt etki etmeyip, ürün etrafında dolaşacak hava ısıtılmaktadır veya ısıtmada kullanılacak su buharlaştırılmaktadır. Direkt solar kurutucular düşük maliyetli olmalarının yanında, sıcaklık kontrolünün kolay yapılamaması gibi bir dezavantaja sahiptir. İndirekt solar kurutma ise daha pahalı ve zor kullanılan bir sistem olmasına rağmen sıcaklık kontrolü daha kolay yapılabilmektedir (Feralan, 1989).

Hava üfleli kurutma sistemleri ise basit tasarım ve düşük bakım-işletme masraflarına sahiptir. Bu fırınlarda kurutucu hava hızı, örnek kalınlığı ve sıcaklık kurutma özelliklerini ve hızını etkileyen faktörler arasındadır (Erbay ve Küçüköner, 2008). Vakum kurutma ise alternatif bir kurutma metodu olup yapılan çalışmalar bu metodun, kurutma işlem süresini diğer metotlara

nazaran çok kısalttığını göstermiştir (Erbay ve Küçüköner, 2008).

Son zamanlarda geliştirilen bir diğer kurutma sistemi mikrodalgalı kurutuculardır. Diğer kurutuculardan kurutma mekanizmasının farklı oluşu dolayısı ile ayrılmaktadır. Mikrodalga ısıtmanın temel prensibi; materyaldeki polar molekülleri etkileyerek elektromanyetik enerjinin termal enerjiye dönüşümünün sağlanmasıdır (Eskibalıcı, 2014). Isıtma malzemenin merkezinden dışarı doğru olmaktadır. 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. Ayrıca mikrodalga kurutucuların vakum kurutucularla kombine edilerek kullanılmaları da ürün kalitesi ile enerji verimliliğini arttırmaktadır (Eskibalıcı, 2007).

Bir diğer yeni teknoloji ısıtıcılardan olan halojen fırınların en önemli avantajı ortamı hızlı ve etkili ısıtmasıdır. Halojen ısıtıcıların ya da lambaların yüzeyinde yaratılan yüksek değerdeki ısı, bir reflektör aracılığıyla anında ve hiçbir enerji kaybı olmaksızın ısıtılacak bölgeye yansıtılır. Halojen lamba yüksek verimlidir, tükettiği elektrik enerjisinin %90'ını infrared (kızılötesi) ısıtmaya dönüştürür. Lamba içerisinde bulunan gaz ısı etkisi ile uyarılarak ışıması sağlanır. Bu lambalarda genelde ksenon, argon ve kripton kullanılmaktadır. Halojen lambalar genellikle, yüksek tavanlı, geniş hacimlerde,

bölgesel/noktasal ısıtma gereken yerlerde ve hava akımı çok fazla olduğu için konvansiyonel (elektrikli ya da doğalgazlı) sistemlerle ısınmanın zor ve pahalı olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Ayrıca bu lambalar, yemeklerin pişirildiği fırınlarda, gıdaların kurutulmasında ve malzemelerin nem tayininde (halojen nem tayin cihazı) kullanılabilir (Hacıfazlıoğlu, 2015).

Kurutma işleminin gerek ürün kalitesi ve gerekse işletmenin karlılığı açısından başarısı uygun bir kurutucunun seçilmesine bağlıdır. Her türlü kurutma işlemine uygun çok amaçlı bir kurutucu tipinin olmaması nedeniyle, ilk adım olarak, kurutma yöntemi ve kurutucunun doğru seçimine önem vermek gerekmektedir. Kurutulacak malzemenin özellikleri, ısıtıcı tipi, enerji kaynağı, kurutma havası ile malzeme arasındaki hidrodinamik koşullar özellikle ele alınmalıdır. Seçim sırasında teknolojik gereksinimler, ekonomik çalışma ve elde edilen kuru ürünün kalitesi de önemli kriterler arasındadır (Günerban, 2005).

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Deneysel çalışmalar; Eti Maden İşleri Genel Müdürlüğü Bigadiç Bor İşletme Müessesesi'nden temin edilmiş olan üleksit numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numune öncelikle laboratuvarında yüzey safsızlıklarından (kil vb.) temizlendikten sonra bir dizi boyut küçültme işleminden geçirilerek -2mm boyutuna indirilmiştir.

Numunenin komple kimyasal analizi Eti Maden A.Ş. Bigadiç Bor İşletmesi

laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. B₂O₃ ve H₂O analizleri volumetrik (titrimetrik), diğer analizler X-Ray Floresans cihazında yapılmıştır.

Üleksit mineralinin ısı uygulaması sırasında uzaklaşan bünye suyunun miktarı, bozunmanın sıcaklığı, bozunma ve yeniden kristallenmenin doğası ve mekanizmasını tespit edebilmek için Termo Gravimetrik Analiz (TGA) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) testleri yapılmıştır. Testler; Maden Tetkik Arama laboratuvarında bulunan RİGAKU Thermal Analyzer Ver.2, 22E1 model TG-DTA cihazında gerçekleştirilmiştir.

Numunenin mineralojik yapısının belirlenebilmesi için yapılan XRD (X-Ray Difraksion) analizleri İstanbul Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren Teknoloji Transfer Merkezi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan Rigaku D/Max-2200/PC XRD Cihazı 200 Vac 3q 20 A/50 Hz güç kapasitesine sahip bir cihazda gerçekleşmiştir.

Mikrodalga fırın ile yapılan deneylerde 2450 MHz frekansında çalışan ve 5 farklı güç seviyesi olan Arçelik MD595 model ev tipi bir fırın kullanılmıştır. Mikrodalga fırınlarda doğrudan sıcaklık ayarlaması yapılamadığı için Üleksit mineralinin farklı mikrodalga güç seviyelerine ve maruz kalma süresine bağlı olarak ulaştığı sıcaklık değerlerini ve nem kayıplarını belirleyebilmek için bir dizi deney yapılmıştır. Mikrodalga ile ısıtmada ısıtılacak olan malzemenin dielektrik özellikleri etken olduğu için İstanbul

Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında numunenin dielektrik özellikleri tespit edilmiştir. Yüksek frekanslarda dielektrik ölçmek için hazırlanan düzenekte Transmisyon borusu yöntemi kullanılmıştır.

Konvansiyonel fırında yapılan kurutma deneyleri Lenton Marka ısıtma fırınında gerçekleştirilmiştir. Maksimum 1500°C'ye çıkabilen, PID kontrolü ile sıcaklığı hassas olarak ayarlanabilen homojen bir ısıtma sağlanması amacıyla fırın içerisinde hava veya gaz sirkülasyonu yapılabilen fırındır.

Halojen ısıya bağlı kurutma deneyleri yeni nesil ev tipi Asel marka halojen fırında gerçekleştirilmiştir. Fırın 65-250°C ısı kontrolü (termostat) ve 0-60 dk zamanlayıcıya sahip bulunmaktadır. Fırın sıcak hava dalgası ile çalışmaktadır.

2.2. Metot

Numunelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan karakterizasyon çalışmalarından sonra, her üç fırın ile sıcaklık kontrollü olarak kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Fırınlarda uygulanacak sıcaklık değeri, numunenin yapılan DTA analizinden kurutma esnasında üleksitin kristal yapısının bozulmaması için, dehidrasyona başlama sıcaklığı olan 60°C olarak belirlenmiştir.

Her bir deney %10 yüzey nemi içeren 50 gr'lık (45 gr numune+5 gr su) numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her fırın ile yapılan kurutma uygulamalarında belirli

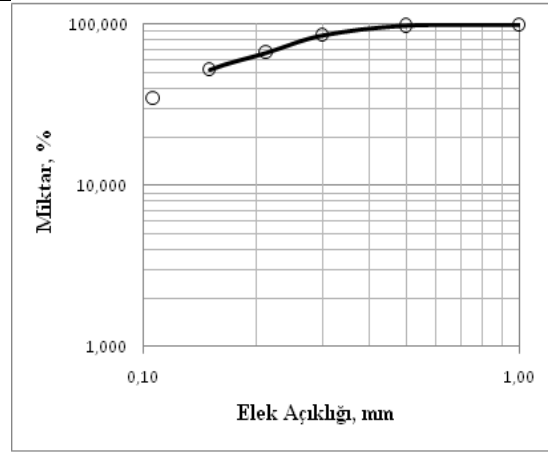
zaman aralıklarında malzeme fırından dışarı çıkarılıp tartılarak ağırlık kayıpları belirlenmiş, infrared termometre ile yüzey sıcaklıkları ölçülmüş ve zaman kaybetmeden tekrar fırın içerisine konulmuştur. Yapılan bu tartımlar yardımıyla yüzey neminin tamamen uzaklaştığı süre tespit edilmeye çalışılmıştır.

Mikrodalga fırın ile yapılan kurutma deneylerine geçmeden önce; numunenin her bir güç seviyesinde maruz kalma süresine bağlı olarak ulaştığı sıcaklık değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu kapsamda öncelikle her bir güç seviyesi için numunenin zamana bağlı ulaştığı sıcaklık değerleri belirlenmiş ve bu değerlere bakarak hangi güç seviyesinde kaç dakika maruz kalma süresi uygulayacağımıza karar verilmiştir. Her bir fırındaki kurutma uygulaması için Energy Check 3000 model voltmetre cihazıyla, fırınların kurutma süreleri için tükettikleri enerji değerleri kWh cinsinden ölçülmüş ve birim elektrik fiyatı ile çarpılarak kurutma maliyetleri TL/kg olarak hesaplanmıştır.

3. Bulgular

3.1. Tane Boyutu Analizi

Deneylere esas olan -2 mm tane boyutundaki numunenin boyut dağılımını belirlemek için bir dizi elek kullanarak yaş elek analizi yapılmıştır. Şekil 1'de yapılan elek analiz sonuçları verilmiştir. Grafik incelendiğinde malzemenin ortalama (d50) boyutunun yaklaşık 0,3 mm ve d80 boyutunun yaklaşık 0,4 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 1: Numunenin kümülatif elek altı eğrisi

3.2. Kimyasal İnceleme

Numunenin yapılan tam kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Numunenin tam kimyasal analizi

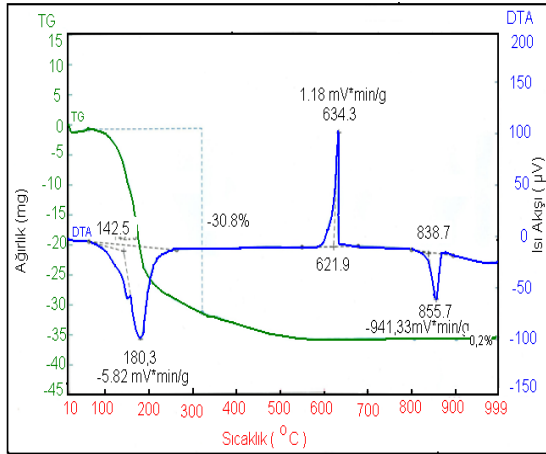
Bileşen	%
B ₂ O ₃	42,98
CaO	13,80
Na ₂ O	3,20
MgO	0,46
SiO ₂	1,78
SO ₄	0,20
SrO	0,74
Al ₂ O ₃	0,05
Fe ₂ O ₃	0,010
As	33,33
ppm	
Ateşzaiyatı	35,90

Numunenin B₂O₃ içeriğinin % 42,98 olduğu görülmektedir. Üleksit mineralinin

bünyesinde teorik olarak %43 B_2O_3 içerebileceği düşünüldüğünde numunemizin saflık oranının: % 99,95 olduğu belirlenmiştir.

3.3. Isıl Özelliklerin İncelenmesi

Bu testler; üleksit mineralinin ısı uygulaması sırasında uzaklaşan bünye suyunun miktarı, bozunmanın sıcaklığı, bozunma ve yeniden kristallenmenin doğası ve mekanizmasını tespit edebilmek için gerçekleştirilmiştir. Üleksit mineralinin TG ve DTA grafikleri Şekil 2.'de verilmiştir.

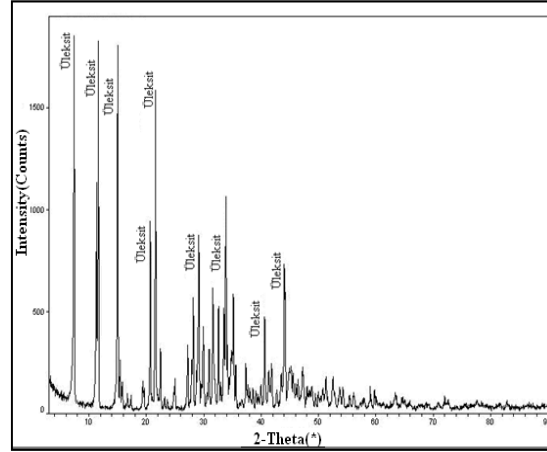


Şekil 2: Üleksit mineralinin TG ve DTA eğrisi

Grafik incelendiğinde Üleksitin termal bozunmasının 60 °C ile 500 °C aralığında olduğu ve üleksitin DTA eğrisi boyunca 3 ayrı reaksiyonun(iki endotermik ve bir ekzotermik) meydana geldiği göze çarpmaktadır. Grafikten üleksitin dehidrasyona başlama sıcaklığının 60 °C'olduğu ve ilk bir mol suyunu 105 °C'de kaybettiği görülmektedir (Eskibalıcı, 2007).

3.4. Mineralojik İnceleme

Temsili numune üzerinde mineralojik yapının belirlenmesi için yapılan XRD (X-Ray Difraksion) analizlerinde de numunenin saflık derecelerini teyit eder nitelikte üleksit pikleri tespit edilmiştir. XRD analiz sonuçları Şekil 3'de verilmiştir.

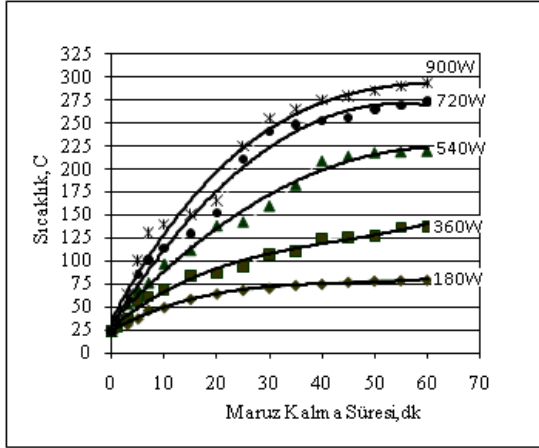


Şekil 3: Üleksit mineraline ait XRD analiz

3.5. Mikrodalgaya Bağlı Sıcaklık ve Nem Analizi

Üleksit minerali üzerinde mikrodalga güç seviyesine ve süreye bağlı olarak numunenin ulaştığı sıcaklıkları ve nem kayıplarını belirleyebilmek için 5 farklı güç seviyesinde farklı sürelerde numune üzerinde sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklıklar anlık olarak cihaz kapatılıp ölçüm alınmış ve tekrar çalıştırılıp ölçüme devam edilmiştir. İnfrared termometre ile ancak numunelerin yüzey sıcaklıkları ölçülebilmektedir. Numunenin yüzeyinde ölçülen sıcaklıkların numunenin merkezindeki sıcaklıktan bir miktar daha düşük olduğu bilinmektedir. Elde edilen ölçümler doğrultusunda üleksit için farklı

mikrodalga güç seviyelerinde zamana bağlı sıcaklık değişimleri Şekil 4’de verilmiştir.



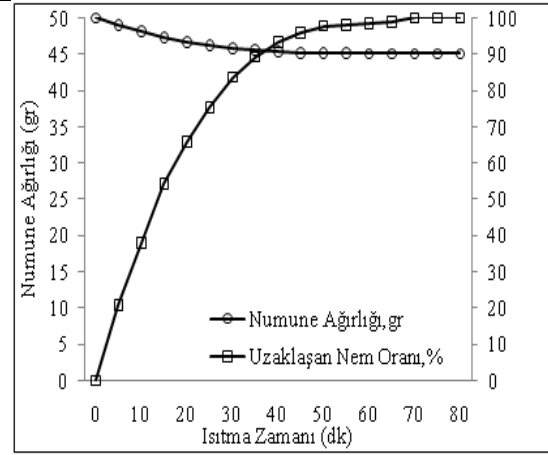
Şekil 4: Üleksitin farklı güç seviyelerinde zamana bağlı sıcaklık değişimleri

3.6. Dielektrik Özelliklerinin Tayini

Dielektrik sabiti; malzemenin içinden geçen mikrodalga enerjii depolama kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Numunenin dielektrik özelliklerinin tespiti için yapılan deneylerde Transmisyon borusu yöntemi kullanılmıştır. Deneyde kullanılan frekans bandı 8-12 GHz arasında değişmektedir. Bu kapsamda 11 GHz frekansta yapılan ölçümlerde; üleksitin kompleks dielektrik sabiti: $33,9758 (-1,8721/+5,6812)$ olarak ölçülmüştür.

3.7. Konvansiyonel Isıtmaya Bağlı Kurutma Deneyleri

Bu grup deneysel çalışmalarda fırın sıcaklığı 60 °C’a ayarlandıktan sonra numune fırına yerleştirilmiş ve her 5 dakikada bir fırındaki numunenin tartımı yapılarak meydana gelen ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler yardımıyla Şekil 5’deki numunenin zamana bağlı olarak uzaklaşan nem oranı yüzdesi grafiği çizilmiştir.



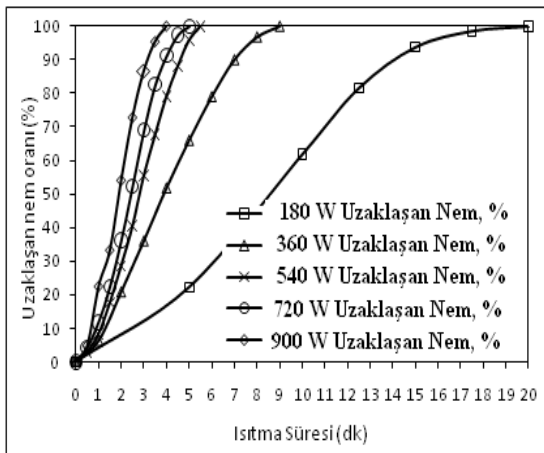
Şekil 5: Konvansiyonel fırında yapılan kurutma deney sonuçları

Şekil 5’den de görüldüğü üzere, numunenin yüzey neminin %100’ü 70 dakika sonunda numuneden uzaklaşmıştır. 70. dakikadan sonra yapılan ölçümler kontrol amaçlı yapılmış ve bu ölçümlerin sonunda malzemenin ağırlığında bir değişim gözlenmemiştir. Elde edilen bulgular ışığında, konvansiyonel fırın için optimum kurutma süresi 70 dakika olarak belirlenmiştir. Kurutma süresinin uzun olmasının sebebi fırının sahip olduğu kurutma mekanizması ile ilgili olup bu sıcaklıklarda su moleküllerinin buhar fazına geçmeleri yavaş olmaktadır. Fırının 70 dk boyunca tüketmiş olduğu enerji değeri 0,040 kWh olarak okunmuş ve elektriğin birim fiyatı olan 0,4151 TL/kWh (Ticarethaneleler için vergiler dahil edilmiş fiyat) baz alınarak kurutma maliyetinin 0,32 TL/kg olduğu hesaplanmıştır.

3.8. Mikrodalga Isıtmaya Bağlı Kurutma Deneyleri

Bu grup deneysel çalışmalarda, numune için daha önceden ölçülen farklı MD güç seviyelerinde süreye bağlı sıcaklık değişim değerlerinden yararlanılmıştır. Bu değerler yardımıyla fırın içerisindeki numunenin sıcaklığının kristal yapıyı bozmayacak olan 60-65 °C aralığında kalması için hangi MD güç seviyesinde kaç dakika maruz kalma süresi uygulanacağına karar verilmiştir.

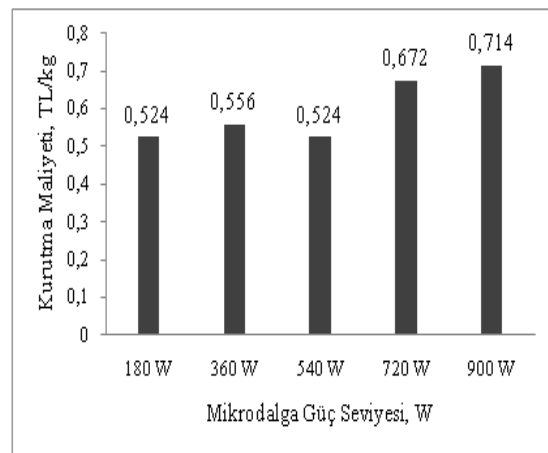
180 watt güç değerinde yapılan deneyler için maruz kalma süresi max 20 dakika; 360 watt güç değerinde yapılan deneyler için max 9 dakika; 540 watt güç değerinde yapılan deneyler için max 5,5 dakika; 720 watt güç değerinde yapılan deneyler için max 5 dakika ve 900 watt güç değerinde yapılan deneyler için max 4 dakika boyunca ölçümler yapılmış ve her bir numune için toplam nem kaybı değerleri yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Farklı Mikrodalga Güç seviyelerinde yapılan tüm deneylerin sonuçları Şekil 6'de bir arada verilmiştir.



Şekil 6: Mikrodalga ile yapılan deney sonuçlarının bir arada gösterimi

Şekil 6'da detaylı olarak görüldüğü üzere, mikrodalga fırının güç değeri yükseldikçe kurutma süresi azalmıştır. Dipol moleküllere en iyi örnek olarak su verilebilir. Dipol moleküller elektromanyetik alandaki frekans değişiminden etkilenerek polaritelerini hızla değiştirebilmektedirler.

Mikrodalgalar malzeme içerisinde geçerken polar moleküller kendilerini aynı sıraya dizmeye çalışırlar, elektromanyetik alanın kalkmasıyla gevşerler. Bu hareket saniyede birkaç milyon defa tekrarlanır. Böylece oluşan hareketler sonucunda ısınma meydana gelmektedir. Fırının güç seviyesinin artırılması ile kurutma süresinin kısılması buna bağlı olarak gerçekleşmektedir. Ancak optimum watt değeri belirlenirken, sürenin göz önüne alındığı gibi, ekonomik faktörünün de değerlendirilmeye tabi tutulması gerekmektedir. Şekil 7'de Mikrodalga fırın için farklı güç seviyelerinin hesaplanan kurutma maliyetleri verilmiştir.

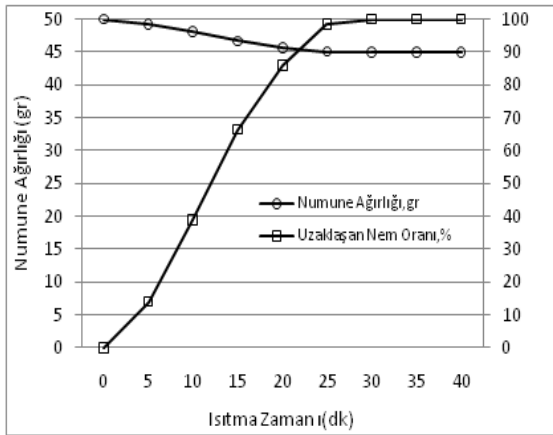


Şekil 7: Mikrodalga güç seviyelerine bağlı kurutma maliyet değerleri

Bu nedenle mevcut sonuçlar ışığında, mikrodalga fırında yapılan kurutma deneyleri için optimum güç seviyesinin maliyetler (0,524 TL/kg) ve süre (5,5 dk) dikkate alınarak 540 watt olduğu belirlenmiştir.

3.9. Halojen Fırınla Kurutma Deneyleri

Bu grup deneysel çalışmalarda, fırın sıcaklığı 60 °C'a ayarlandıktan sonra her 5 dakikanın sonunda numune fırından alınarak tartılmış ve elde edilen ağırlık kaybından yararlanılarak numunenin süreye bağlı yüzey nemi kaybı hesaplanmıştır. Şekil 8.'de deney sonuçları grafik olarak verilmiştir.

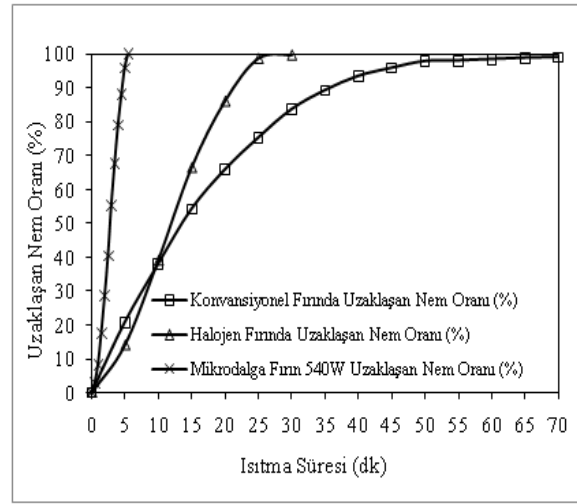


Şekil 8: Halojen ısıtmaya bağlı kurutma deneyi sonuçlarının grafiksel olarak gösterimi

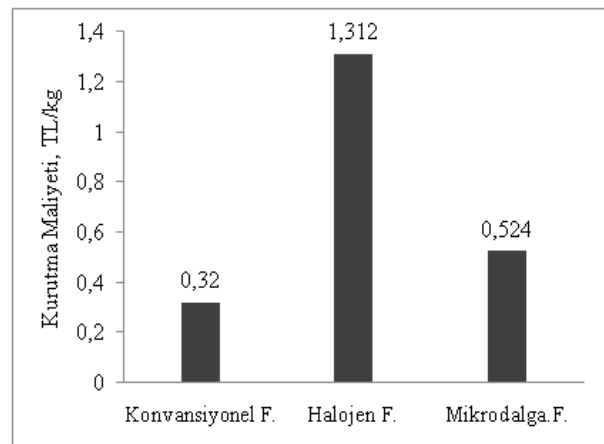
Şekil 8'deki grafik incelendiğinde; numunenin yüzey neminin tamamının 35 dakika sonunda uzaklaştığı tespit edilmiştir. 35. dakikadan sonra yapılan ölçümler kontrol amaçlı yapılmış ve bu ölçümlerin sonunda malzemenin ağırlığında bir değişim gözlenmemiştir. Enerji tüketim cihazıyla yapılan ölçümde 35 dk süre için fırının

harcamış olduğu enerji değeri 0,158 kWh olarak okunmuş ve Elektriğin birim fiyatı 0,4151 TL/kWh baz alınarak kurutma maliyeti 1,312 TL/kg olarak hesaplanmıştır.

Şekil 9'da her üç fırında yapılan deneylerden elde edilen optimum sonuçların mukayesesi, Şekil 10'da ise her üç fırın için optimum deney şartlarında belirlenen kurutma maliyetlerinin mukayesesi verilmiştir.



Şekil 9: Her bir fırın için belirlenen optimum deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 10: Fırınların kurutma maliyetlerinin karşılaştırılması

4. Sonuçlar ve Tartışma

Üleksit mineralinin yüzey neminin giderilmesi amacıyla ısıtma mekanizmaları birbirinden ayrı olan 3 farklı tip kurutucunun kurutma verimliliğini belirlemek amacıyla yapılan bu çalışma ile elde edilen sonuçları şu şekilde özetlemek mümkündür.

Malzemenin boyut dağılımını tespit etmek için yapılan yaş elek analizi ile malzemenin ortalama (d₅₀) boyutunun 0,3 mm ve d₈₀ boyutunun 0,4 mm olduğu tespit edilmiştir.

Üleksit numunesinin ısı özelliklerinin incelenmesi TGA-DTA eğrilerinden yararlanılarak yapılmıştır. Bu grafiklerden üleksitin termal bozunması 60 ile 500 °C aralığında meydana geldiği, üleksitin dehidrasyona başlama sıcaklığı 59 °C olduğu ve ilk bir mol suyunu 105 °C'de kaybettiği görülmüştür. Bu nedenle de numunenin kurutma sıcaklığı olarak 60 °C seçilmiştir.

Üleksit minerallerinin yapılan dielektrik ölçümünde kompleks dielektrik sabiti değeri: 33,9758 (-1,8721/+5,6812) olarak ölçülmüştür.

Konvansiyonel ısıtmaya bağlı kurutma deneylerinde, optimum kurutma süresi 70 dakika olarak belirlenmiştir. Elektriğin birim fiyatı 0,4151 TL baz alındığında kurutma maliyetinin 0,32 TL/kg olduğu hesaplanmıştır.

Mikrodalga fırın ile yapılan kurutma deneylerinde en iyi sonuçlar, 540 watt güç seviyesinde 5,5 dk maruz kalma süresinde alınmış ve kurutma maliyeti 0,524 TL/kg olarak gerçekleşmiştir.

Halojen fırın ile yapılan kurutma deneylerinde, optimum kurutma süresi 35 dakika olarak belirlenmiştir. Bu süre içerisinde fırının harcadığı enerji maliyeti elektriğin birim fiyatı 0,4151 TL baz alındığında 1,312 TL/kg olarak hesaplanmıştır.

Deneylerde kullanılan her üç fırın; kurutma süreleri ve harcadıkları enerji maliyetleri göz önüne alınarak birbiri ile mukayese edildiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır.

Konvansiyonel fırın enerji maliyeti bakımından 0,32 TL/kg ile en düşük değere sahipken 70 dk'lık kurutma süresi diğer fırınlara nazaran çok fazla olmuştur. Şöyleki halojen fırına göre 2 kat, mikrodalga fırına göre 12,5 kat fazla kurutma süresine ihtiyaç duymuştur. Buda onu diğer fırınlar arasında dezavantajlı duruma düşürmüştür.

Halojen fırın ise kurutma süresi bakımından konvansiyonel fırına göre %50 daha kısa olmasına karşın baktığımızda enerji maliyeti bakımından konvansiyonel fırına göre 4 kat mikrodalga fırına göre 2,5 kat fazla olmuştur. Halojen fırında bu dezavantajı nedeniyle tercih edilmemiştir.

Kurutma işlemi sonrasında elde edilen ürün boyut dağılımlarında bir dekrepitasyon olayı yaşanmadığı için değişiklik gözlenmemiştir.

Deneylerde kullanılan fırınların farklı ısıtma mekanizmalarına sahip olmaları numunelerin kurutma zamanı ve karakteristiğini de etkilemektedir. Konvansiyonel fırında ısıtıcı önce fırın içerisindeki ortamı ısıtıp, numuneyi de en

dış yüzeyden başlayarak ısıtmakta, buda kurutma süresinin uzamasına ve numunenin en dış yüzeyinde bozulmalara neden olabilmektedir. Halojen fırında ise doğrudan ışıma ile ortamı ısıtmadan ışığın çarptığı numune yine dış yüzeyinden başlayarak merkeze doğru ısınmaktadır. Buna karşın mikrodalga fırın doğrudan numune ile birlikte bulunan su moleküllerini etkilemekte, hızlı ve verimli bir şekilde numunenin ısınması sağlanarak kurutma işlemi gerçekleşmektedir.

Kurutma işlemi ve kurutucu seçiminde dikkate alınması gereken temel etkenler istenen niteliklere sahip ürün eldesinde minimum enerji tüketimi ve mümkün olan maksimum kurutma hızına ulaşmaktır. Bu kapsamda bakıldığında; Konvansiyonel ve Halojen fırınların yukardaki dezavantajlarına karşın mikrodalga fırının 540 W güç seviyesinde elde edilen 5,5 dk'lık kurutma süresi ve 0,524 TL/kg hesaplanan enerji maliyeti üleksitin kurutulmasında onu diğerleri arasında öne çıkartmıştır. Mikrodalga fırının endüstride başarılı ve ekonomik bir şekilde yaygın olarak uygulanabilmesi bu çalışmadan elde edilen veriler ışığında daha büyük ölçekte testler yapılmasına ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesine bağlıdır.

5. Kaynaklar

Ayol, A., 2011. Atıksu Arıtma Çamurlarının Kurutulması, Bertaraf Edilmesi ve Yararlı Kullanım Alternatifleri. Tekirdağ İli Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesi Çalışmayı, İzmir.

Biçer, A., 2009. Farklı Kurutucular Kullanılarak Kuşburnunun Kurutulması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ.

Doğanay T., 2009. Kurutma, Modern Farmasötik Teknoloji. TEB Eczacılık Akademisi.

Ersöz M. A., Doğan, H., 2009. Isı Geri Kazanımlı Akışkan Yataklı Sürekli Kurutucunun Enerji Analizi. XI. Uluslararası Tesisat Mühendisliği Kongresi, 211-221.

Erbay B., Küçüköner E., 2008. Gıda Endüstrisinde Kullanılan Farklı Kurutma Sistemleri. Türkiye 10. Gıda Kongresi, Erzurum, 1045-1048.

Eskibalıcı, M. F., 2007. Cevher Hazırlama ve Zenginleştirmede Mikrodalga Enerjisinin Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Eskibalıcı M. F., 2014. Konvansiyonel ve Mikrodalga Isıtma İşleminin Kuvarsitin Öğütülebilirliğine Etkisinin İncelenmesi. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7 (2), 169-190.

Feralan A.E., 1989. Endüstriyel Kurutma Sistemleri. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

- Günerban H.,2005. Endüstriyel Kurutma Sistemleri. Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi, sayı 36.
- Hacıfazlıoğlu H., 2015. Kömür Hazırlama Ders Notları. İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Sayfa 50.
- Helvacı C., 2003. Türkiye Borat Yatakları Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 5.1.
- Şahan, H., 2010. Üleksit'in Öğütülebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yenialaca Ç., 2009. Bor ve Kullanım Alanları. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi, Ankara.