

Makale Gönderim Tarihi: 17.10.2018

Yayına Kabul Tarihi: 20.11.2018

Madencilik Endüstrisinde Kurutma İşlemi ve Alternatif Kurutucu Tiplerinin Tanıtılması

Drying Process in Mining Industry and Introduction of Alternative Dryer Types

Hasan Hacıfazlıoğlu *

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Müh. Bölümü, Avcılar, İstanbul, Türkiye

**Sorumlu Yazar: hasanh@istanbul.edu.tr*

Özet

Madencilik işlemleri sonucunda üretilen ürünlerin çoğunluğu sulu prosesler sonucunda elde edilmekte olup, içeriklerinde önemli miktarlarda su barındırmaktadırlar. Bu su, öncelikle susuzlandırma yöntemleri (santrifujleme, filtrasyon vb.) ile giderilmekte ve daha sonra kurutucularla nihai susuzlandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Günümüzde madencilik sektöründe kullanılmakta olan ve kullanım potansiyeli bulunan pek çok kurutucu tipi mevcuttur. Kurutucu tipinin doğru seçilememesi durumunda hem kurutma süresi hem de kurutma maliyetleri artmaktadır. Bu çalışmada, alternatif kurutucu tiplerinden olan; akışkan yataklı, döner, mikrodalga, kızılötesi, tambur, ohmik, şoklu, solar, rezistanslı, dondurmalı, kızgın buharlı ve seramik kurutucular ele alınmış, avantaj ve dezavantajları ortaya konmuş ve kurutucu seçimine ışık tutulmuştur.

Anahtar Kelimeler: akışkan yataklı kurutucu, döner kurutucu, kızılötesi ışınımlı kurutucu mikrodalga kurutucu, kızgın buharlı kurutucu, solar kurutucu, şoklu kurutucu, tambur kurutucu

Abstract

Most of the products produced at the end of the mining process are produced by aqueous processes and contain considerable amounts of water in their contents. This water is first removed by dewatering methods (centrifugation, filtration, etc.) and then subjected to final dewatering with dryers. Today, there are many types of dryers that are used in the mining industry and have the potential to be used. If the dryer type is not selected correctly, both drying time and drying costs increase. In this study, alternative types of dryers (fluidized bed, rotary, microwave, infrared, drum, ohmic, solar, resistance, freezing, superheated steam ceramic) are discussed and their advantages and disadvantages are revealed and the choice of the dryer was shed light.

Keywords: fluidized bed dryer, rotary dryer, infrared dryer, microwave dryer, superheated steam dryer, solar dryer, freezing dryer, drum dryer

1.Giriş

Maden ürünlerindeki nem miktarı bu ürünlerin taşınmasını, depolanmasını ve akıcılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Çok ince taneli konsantreler %10'dan daha fazla nem içeriyorsa, titreşim etkisi ile çok daha akıcı hale gelebilmekte ve stoklardan akararak kaybolabilmektedir. Yine, gemi taşımacılığında yüksek nem oranı, konsantrelerin sağa sola kaymasına neden olmakta ve taşımacılığı tehlikeli hale sokabilmektedir. Taneli konsantrelerde genellikle %4 ile %8 arasındaki nem ideal olup, bu nem içeriklerinde malzeme daha homojen halde kalmaktadır. Daha düşük nem içeriklerinde tozuma gibi çevre problemleri ve toz malzeme kayıpları meydana gelmekte, daha yüksek nemlerde ise yukarıda sayılan problemler oluşmaktadır. Ancak, sülfürlü metal konsantreleri ya %4'ün altındaki nemlerde ya da %8'in üstündeki nemlerde tutulmalıdır. Aksi halde, %4 ile %8 arasındaki nem, metal sülfür konsantresinde hava geçişini kolaylaştırmakta, poroziteyi arttırarak, sürekli oksijen teması ile sinterleşme ve kendiliğinden yanma yatkinliğini arttırmaktadır. Kömür stoklarında ise ideal nem içeriği %8 ile %10 arasında olup, daha düşük nem tozuma, daha yüksek nem ise kömürün kalorifik değerinin düşmesine neden olmaktadır (İpekoğlu ve Polat, 2014). Öyle ki; kömürdeki %1'lik nem artışı ile, kömür tipine göre kalorifik değerde 40 ile 60 kalorilik bir düşüş yaşanır (Hacifazlıoğlu, 2016). Yukarıda anlatılan nedenlerden dolayı maden ürünlerinin belirli bir nem değerde tutulması gerekir. Mevcut durumda, konsantrelerde ki nem temelde iki yöntemle giderilebilir. Bunlardan ilki "susuzlandırma" ikincisi ise "kurutma" yöntemidir. Susuzlandırma mekanik bir işlem olup, nem giderimi yüzey nemi ile sınırlıdır. Oysa, kurutma yönteminde termal bir işlem vardır ve bu işlemle malzemenin bünye nemi dâhil hemen hemen %100'e kadar nem giderimi sağlanabilir.

Kurutma işleminde, enerji ile kurutulacak malzeme arasındaki ısı iletişimi üç farklı şekilde gerçekleşmektedir (Şekil 1). Bunlardan ilkinde, ısı ya da ateş kaynağı ile malzeme direkt temas ettirilirken, ikincisinde ısı hava ortamı ile malzemeye iletilir, üçüncü sistemde ise tuğlar veya borular ısıtılarak malzeme ile temas ettirilir (Yıldız, 2014). Isı kaybının en düşük olduğu sistem direkt ısı kaynağı ile malzemenin temas halinde olduğu birinci sistemdir. Ancak, yanıcı ve patlayıcı malzemelerin kurutulmasında (taşkömürü, linyit vb.) bu kurutma şekli uygulanmaz. Yine, yüksek saflık ve kirlenme riski olan maddelerin (kaolen, alüminyum hidroksit, manyezit ve çeşitli kimyasal gibi) kurutulmasında dolaylı kurutma yöntemleri olan ikinci ve üçüncü sistemler tercih edilmelidir.

Kurutma işleminin gerçekleştirilebilmesi için kurutulacak malzemeye ısı transferi yapılır. Bu ısı malzemenin içerisindeki suyu buharlaştırarak malzemenin kurummasını sağlar. Termodinamik kanunlarına göre, ısı transferinin yönü yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğrudur ve bu ısı transferi, kondüksiyon (iletim), konveksiyon (taşıma) ve radyasyon (ışıma) yoluyla yapılabilir. Klasik kömür kurutucularında kondüksiyon ve konveksiyonla ısı transferi gerçekleşirken, son yıllarda özellikle düşük enerji tüketimleri nedeniyle mikrodalga, kızılötesi ışın, radyo dalgası gibi radyasyon yoluyla kurutma çalışmalarına ağırlık verilmektedir (Kowalski ve Rajewska 2009; Riadh, 2015; Delele ve ark., 2015; Hacifazlıoğlu, 2016). Ancak, uygulamalarda karşılaşılan zorluklar nedeni ile genellikle küçük kapasitelerde ve gıda maddelerinin kurutulması için kullanılmakta olan radyasyon kurutması, madencilik sektöründeki büyük kapasiteleri sağlayamaması nedeniyle bu alanda çok fazla tercih edilmemektedir.



Şekil 1. Kurutucuda ısı-malzeme iletişim yöntemlerinin şematik görünümü

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 bağlamda, madencilik sektöründe en yaygın kullanılan kurutucu tipleri; döner kurutucu (direk ya da dolaylı ısıtmalı) ve akışkan yataklı (klasik, titreşimli, püskürtmeli ve pnömatik tip) kurutuculardır. Bantlı ve helezon (Holo-flite gibi) tipi kurutucular ise son dönemde uygulamaya girmiş kurutucu tipleridir. Kullanım potansiyeli bulunan diğer kurutucular ise; güneş enerjili kurutucu, şoklu kurutucu, tambur tipi kurutucu, Ohmik, mikrodalga, kızılötesi ve RF ışınımlı kurutuculardır (Karthikeyan ve ark., 2009; Jangam ve Majumdar, 2010; Tahmasebi ve ark., 2011; Eskibalcı ve Işıқтаş, 2017).

2. Alternatif Kurutma Teknolojileri

2.1 Döner Kurutucu

Madencilik endüstrisinde en yaygın kullanılan kurutucu tipidir. Genellikle ince ve akışkan taneli malzemelerin kurutulması için uygundur. Döner kurutucular; direkt ısıtmalı, dolaylı ısıtmalı (yanma tehlikesi olan malzemeler için) ve ikisinin karışımından oluşan döner kurutucular olmak üzere üç tipte üretilebilmektedir. Temelde bunların hepsi hemen hemen yataya yakın (2-80) olarak dönen uzunca bir silindirden ibarettir (Şekil 2). Ancak içyapı tasarımı bakımından kurutucular arasında önemli farklar olabilir. Silindir içinde sıcak gazlarla veya sıcak borularla malzeme direkt temas halindedir. Kuru ürün çıkış ucu besleme ucundan biraz daha aşağıdadır. Silindir iç çeperlerinde kurutulacak malzemeyi kaldırarak sıcak kurutma gazlarının içine dökme kaldırıcılar bulunur. Ayrıca bu kaldırıcıların yönü ayarlanarak kurutulacak malzemenin kurutucu silindir içerisinde kalma süresi ayarlanır. Standart döner kurutucular 30 m uzunlukta ve %8'e kadar eğimli olarak imal edilebilmektedir. Silindir çapları uzunluğun %7-10'u arasında değişmektedir. Dönme hızları 2-25 dev/dk olarak çalıştırılan döner kurutucularda malzemeyle sıcak hava aynı veya ters yönde, basınç ise emme veya doğal halde verilebilir. Basınçlı çalışmada döner silindirin izolasyonu büyük önem taşır. Emmede izolasyon minimum olabilir. En iyi sistem silindirin iç basınç ile dış basıncını dengeleyen üfleme-emme sistemidir. Sızıntı ve ısı kaybı problemleri en iyi bu sistemle kontrol edilebilir (Delele ve ark., 2015).

Döner kurutucuların işletilmesinde korozyon önemli bir maliyet unsuru olabilir. Buna karşılık işletme maliyeti düşüktür. Bu kurutucularda ürünün belli limitler içinde kontrollü bir şekilde kurutulması mümkün olmaktadır (İpekoğlu,1994; Ateşok ve Kangal, 2012). Kurutulacak malzemeler, kurutucu uzunluğuna ve kurutma oranına göre 5 ile 50 dk arasında kurutucu içerisinde kalabilmektedir. Kurutucunun çapı arttıkça besleme kapasitesi, uzunluğu arttıkça da kurutma oranı artmaktadır. Daha uzun kurutucular, daha yüksek oranlarda nem gidermektedir ((Delele ve ark., 2015; Hacıfazlıoğlu, 2016).



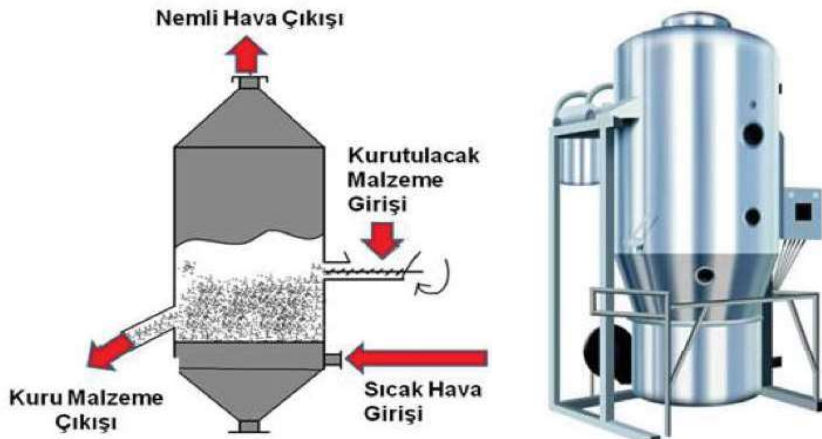
Şekil 2. Döner kurutucu ve yardımcı ekipmanlarının görüntüsü (Özsu,2017)

2.2 Akışkan Yataklı Kurutma Sistemleri

Akışkan yataklı kurutucularında taneler kurutucu içerisinde sıcak hava ile askıda tutularak kurutulur. Bu yüzden çok değişik tiplerde tasarlanabilmektedir. Bunlardan en önemlileri klasik, titreşimli, püskürtmeli ve pnömatik tipteki kurutuculardır. Akışkan yataklı sistemlerde kurutulan malzemelere örnek olarak kömür, endüstriyel hammaddeler, çeşitli kabuklar, dökümhane kumu, çeşitli cevherler, plastik, tıbbi malzeme ve yiyecekler verilebilir (Günerban, 2005; Gunn, 1978; Park ve ark., 2014; Si ve ark.,2015).

2.2.1 Klasik Akışkan Yataklı Kurutucu

Klasik akışkan yataklı kurutucular tabanı ızgaralı ve arasından sıcak gazın aşağıdan yukarıya doğru üflendiği düşey bir silindirden ibarettir (Şekil 3). Çıkış kurutucunun tavanına yakın bir yerden ve genellikle içindeki toz malzemeyi tutabilecek şekilde yapılmış bir boru içinden (dara- lan bir kısım, basınç odası veya siklon) geçerek silindiri terk ederler. Temas kısmında sıcak gaz hızı malzemeyi bir süspansiyon halinde tutup kaynamasını sağlayacak şekildedir. Döner kurutucularla karşılaştırıldığında ısı transfer oranı daha düşük, yapısı daha basit (mekanik ve dönen kısımlar yok) ve tesis içinde kapladığı alan daha küçüktür. Buna karşılık büyük ebatlarda yapılması problemlidir ve pahalı olabilir. Tanelerin ince olması yüzünden düşük hava hızları kullanıldığında istenilen alanın büyümesi veya daha yüksek hızlar kullanılıyorsa daha geniş ve pahalı bir toz tutma sistemi monte edilmesi gerekebilir (Gunn, 1978; Park ve ark., 2014)



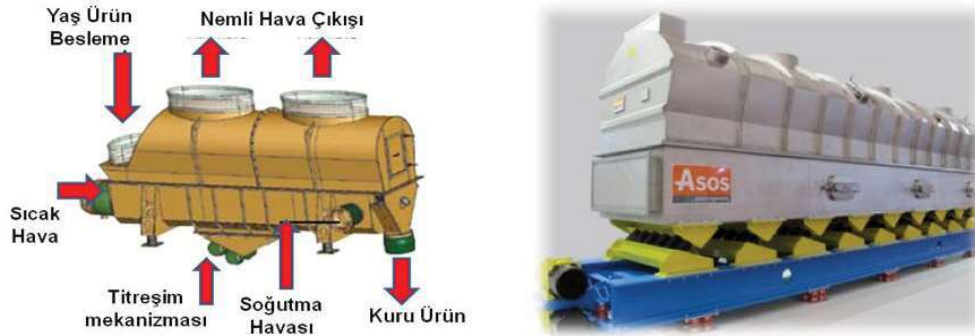
Şekil 3. Klasik akışkan yataklı kurutucu ve endüstriyel görüntüsü (Pharma, 2018)

Genel olarak bu tip kurutucularda istenilen hassasiyete kadar kurutma yapılabilir. Yakıt sarfiyatı oldukça düşük, kurutulmuş malzeme içindeki ince aksamın ayrılması ve bu kısmın çıkışta aglomere edilerek tekrar ana ürüne katılması mümkündür. Kurutma odasının korozyonu az, bakım masrafları oldukça düşüktür (Ateşok ve Kangal, 2012).

2.2.2 Titreşimli Akışkan Yataklı Kurutucu

Titreşimli akışkan yataklı kurutma sistemlerinde kurutulacak malzeme titreşimin etkisi ve havanın etkisi ile yatak üzerinde hareket halindedir (Şekil 4). "Akışkan yatak" kelimesi buradan gelmektedir. Ürünün bu iki hareket ile etkileşimi sonucunda kurutulurken sabit kalmaması, ısı transfer katsayısının yükselmesine ve aynı zamanda iyi bir karışımın sağlanıp üniform kurutma işleminin gerçekleşmesine yardımcı olur. Titreşimli kurutma işlemlerinde kullanılacak sıcaklık ve hava debisi öncelikli belirlenmesi gereken parametrelerdir (Eksis, 2016; Park ve ark., 2014; Si ve ark., 2015). Titreşimli akışkan yataklı kurutucuların teknik konsepti, dairesel titreşimli ünitelerden, doğrusal titreşimli ünitelerden veya rezonans hareketli makinelerden oluşmaktadır. 8 metreye kadar uzunluğu olan kurutucular, iki çift eksantrik motorlu, esnek hareketli üniteler olarak üretilmektedir. Daha büyük kapasiteler için 18m'ye kadar uzunluğu olan makineler imal edilebilmektedir. Bu durumda, daha büyük titreşimli kütlelerde daha az dinamik gücün ortaya çıkacağı, rezonans hareketli titreşim prensibi kullanılmaktadır. Titreşim vasıtasıyla aşağıdaki avantajlar elde edilmektedir:

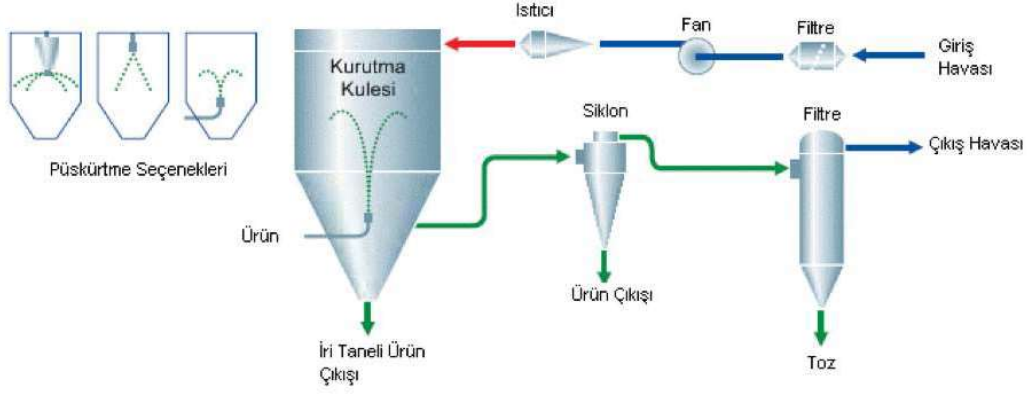
- İnce taneli ürünlerde akışkan yatakta kabarcık oluşumları önlenmekte ve böylece de daha iyi enerji kullanımı ortaya çıkmaktadır.
- Geniş tane fraksiyonu olan ürünlerde ayrışma önlenmektedir. Titreşim, iri taneler için de çözülme sağlanmaktadır.
- Taneciklerin titreşim yoluyla kurutucu içinde sevk edilebilmesinden dolayı kurutucu sorunsuzca boşaltılabilmekte ve böylece kolay ürün değişimi mümkün kılınmaktadır (Dryon, 2017; Si ve ark., 2015).



Şekil 4. Titreşimli akışkan yataklı kurutucu ve endüstriyel görüntüsü (Asos, 2018)

2.2.3 Sprey (Püskürtmeli) Akışkan Yataklı Kurutucu

Sprey kurutucunun patenti 1872 yılında Samuel Percy tarafından alınmıştır. Sanayide ilk kullanımı ise 1920'li yıllarda süt tozu ve deterjan üretimi olmuştur. Sprey kurutma gıda, ilaç, kozmetik, ziraat ve kimya sanayilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurutulacak malzeme püskürtülerek sıcak hava ile temas ettirilir ve konik bir hücre içerisinde kurutulur (Şekil 5). Son yıllarda toz kömürün ve endüstriyel çamurların kurutulmasında uygulaması yaygınlaşmıştır (İpekoğlu, 1994; Huang ve ark.,2003; Langrish ve Fletcher, 2003; Ateşok, 2004).

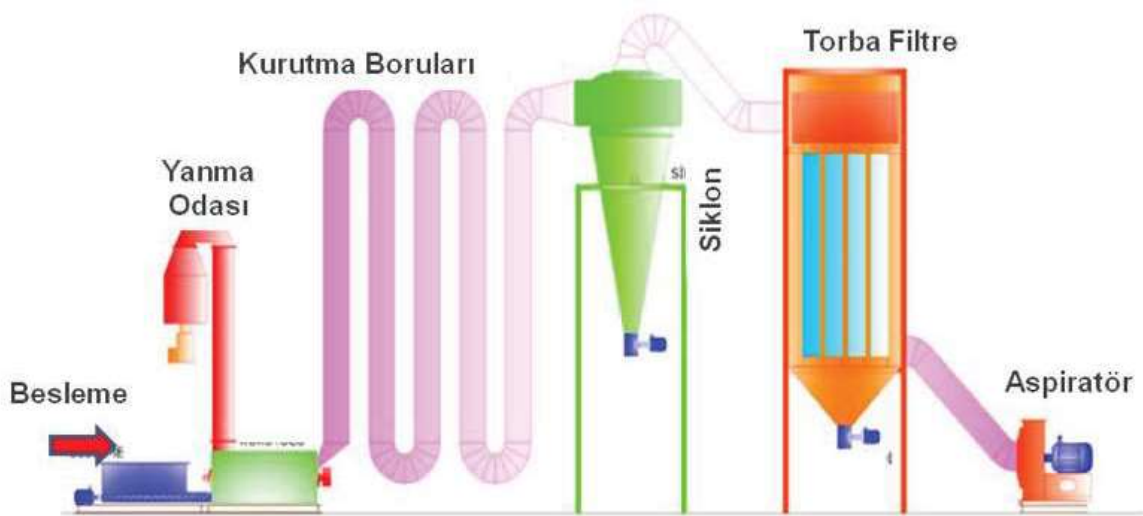


Şekil 5. Sprey (püskürtmeli) akışkan yataklı kurutucunun çalışma prensibi (Eksis,2017)

Sprey kurutucu tasarımında sıcak hava ve besleme akış yönleri değişebilir. Sıcak hava ile ürün aynı yönde akış gösterirse, ürün ilk olarak sıcak hava ile buluşacaktır ve sıcak hava enerjisini azaltarak üründe hızlı bir kuruma sağlanacaktır. Ürün çıkışta daha düşük sıcaklıkta olacaktır. Hava ile beslemenin ters akışlı olduğu durumlarda besleme sıcak hava ile daha düşük sıcaklıkta karşılaşacaktır. Ürünler daha yavaş kuruma meydana gelecektir (Odabaş, 2018).

2.2.4 Pnömatik (Flaş) Akışkan Yataklı Kurutucu

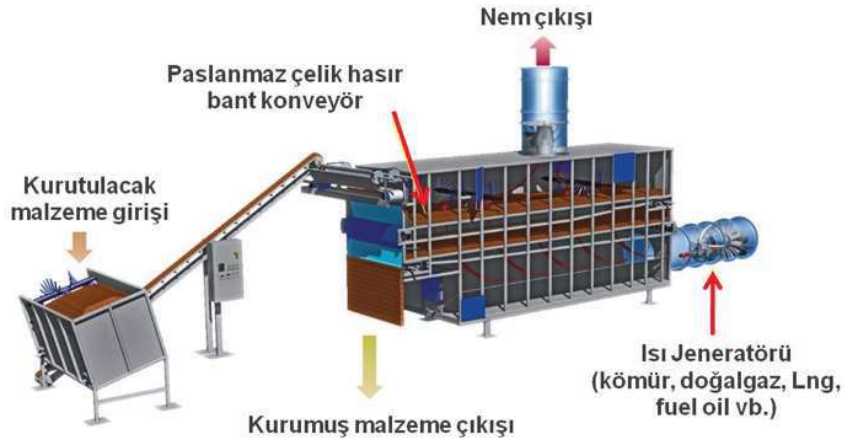
Basınçlı sıcak hava ile ince taneli malzemelerin (filtre ürünleri vb) karıştırılıp bir sistem içerisinde dolaştırılmasıyla malzemelerin kurutulması esasına dayanır. Çok değişik tiplerde tasarlanabilen pnömatik kurutucular hızlı kurutma yetenekleri ile bilinirler. İnce taneli malzemelerin kurutulması için en uygun yöntem olarak bilinmektedir (Karthikeyan ve ark., 2009). Boru tipi pnömatik kurutucunun çalışma prensibi Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu kurutucuda çok ince taneli malzemeler 20-200 metre arasında değişen bir boru içerisinde uçurularak sıcak hava ile kurutulur. Boru mesafesi, hava hızı, hava basıncı kurutma için önemli faktörlerdir. Ticari uygulamalarda; pigment (boya maddesi), sentetik reçine, yiyecek maddeleri, sulu bileşikler, alçıtaşı, kil ve tahta parçalarının kurutulması için kullanılmaktadır(Günerban, 2005; Eksis, 2016).



Şekil 6. Boru tipi pnömatik kurutucunun çalışma prensibi (Eksis,2017)

3. Bantlı Tünel Kurutucu

Kurutma, ısıya dayanıklı mikronize delikli bir çelik bant konveyör üzerinde gerçekleştirilir. Üst üste yerleştirilmiş delikli bant konveyörler üzerinde yer alan kurutulacak malzeme, bant konveyörlerin altından verilen sıcak hava ile temas ettirilerek kurutulur. Bant konveyör sürekli çalıştığı için sistemde sürekli bir kurutma söz konudur. Kurutma süresi uzun olan malzemeler için uygun bir sistemdir. Kurutucu içerisinde malzemenin sürekli hareket halinde olması nedeni ile üniform bir kuruma sağlamaktadır. Özellikle organik maddelerin (meyve, sebze, talaş, kimyasal ürünler vb.) kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Eksis, 2017; Günerban, 2005; Schmalko ve ark., 2007). Şekil 7’de bantlı kurutucunun çalışma prensibi gösterilmiştir. Bantlı kurutucularda sıcaklıktan etkilenmeyen bantların veya çelik hasırların kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, sıcaklık etkisi ile bantlarda genleşmelerin olabileceği ve buna uygun mekanizma ile tasarlanmaları gerekir. Başka bir deyişle bu tip kurutucularda genleşmeyi ortadan kaldırma için gerdirme mekanizmaları kullanılmalıdır.



Şekil 7. Bantlı kurutucu ve yardımcı ekipmanlarının görüntüsü

4. Helezonlu (Vidalı) Kurutucu

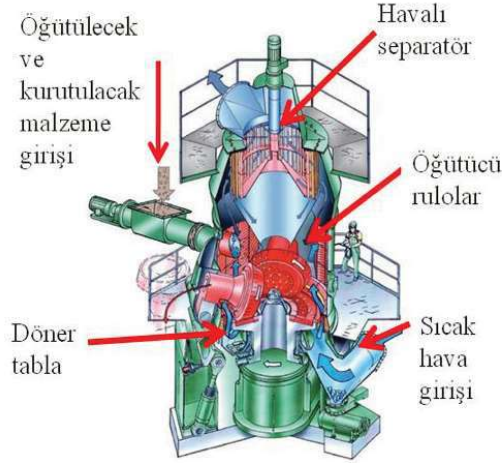
Yapışkan yapılı çamurların ve çok ince taneli konsantrelerin kurutulması için geliştirilmiş olan dolaylı ısıtmalı bir kurutucu tipidir (Şekil 8). Kurutucu içerisinde yer alan helezonlar özel bir yağ ile içten ısıtılmakta ve malzeme bu helezonla taşınırken ısınarak içersindeki suyu buharlaştırmaktadır. En bilinen tipi Metso firmasının geliştirmiş olduğu HoloFlite’dir. Isı transfer ortamının sıcaklığı ve helezonun dönme hızı kontrol edilerek kurutma işlemi kontrol edilebilmektedir. Endüstriyel ölçekte toz yada şlam diye tabir edilen pek çok ince ve yapışkan malzemenin kurutulması için kullanılmaktadır (Metso, 2017; Therma-Flite, 2017).



Şekil 8. Helezonlu kurutucu (Holo-flite) ve endüstriyel görüntüsü

5. Değirmen Tipi Kurutucu

Hem oğutme hem de kurutma yapabilen valsli değirmen tipidir. Pülverize kömür yakılan termik santrallerde ve imento hammaddelerinin oğtlmesinde ve kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Hacıfazlıoğlu, 2016). Şekil 9'da Loesche firmasının kurutmalı değirmen tipi gösterilmiştir. Bu değirmende, değirmen içerisine sıcak hava üflenerek hem ođtlmŐ olan ince malzeme taŐınmakta hemde bu esnada kurutma yapılmaktadır. Patlama ve yanma tehlikesi olan malzemelerin oğtlmesinde ve kurutulmasında değirmen içerisine azot gibi sıcak inert gazlar verilebilmektedir (Loesche, 2017). Ayrıca, klasik tambur tipi bilyalı ve ubuklu değirmenlere sıcak hava üflemesi yapılarak hem malzemenin akıŐı hemde kurutması yapılabilmektedir.



Şekil 9. Değirmen tipi kurutucunun görüntüsü

6. Vakumlu Kurutucu

Düşük atmosfer basıncında suyun kaynama noktasının düŐmesi ile buharlaŐmanın daha hızlı ve daha düşük sıcaklıkta olduğu bir kurutucu tipidir. Temelinde, mukavemetli bir kabin içerisinde vakum pompası ile atmosfer basıncının azaltılması ve içeride bulunan ısıtıcı, fan ve hareketli bir aktarma sistemi ile üründe kurutmanın sağlanmasıdır. Kurutma genellikle 100-150 °C arasında yapılmaktadır. Kurutma süresi diğer fırınlarla karşılaştırıldığında daha kısa sürmektedir (Erbay ve Küçüköner, 2008). Vakumlu kurutma fırını, düşük basınçta çalıştığı için ısıya duyarlı maddelerin (meyve, sebze vb.) düşük sıcaklıklarda kurutulmasına olanak sağlar. Bu fırınlarda ısı kaynağı olarak mikrodalga gücünden de faydalanılabilmektedir (Leiker ve ark., 2004; Eksis, 2016; MD, 2016; Rong ve ark., 2017). Mikrodalga vakumlu kurutma makinası Şekil 10'da gösterilmiştir. Ayrıca, Şekil 11'de grldğu gibi bantlı kurutucuya da vakum sistemi uygulanabilmektedir.



Şekil 10. Mikrodalga ısıtmalı vakumlu kurutma makinesi (Pueschner, 2016)



Şekil 11. Vakumlu bantlı kurutucu (Spxflow,2016)

7. Mikrodalga Işınlı Kurutucu

Mikrodalga kurutucularda, malzemelerin ısıtılması mikrodalgalarla (radyasyonla) sağlanır. Mikrodalga, “magnetron” adı verilen vakum tüpünden üretilen bir çeşit elektromanyetik dalgadır. Üretilen mikrodalgalar foton olarak adlandırılan ışın tanecikleri halinde yayılmakta ve malzemelerin içine nüfuz ederek onların ısınmasını sağlamaktadır. Mikrodalga ile ısıtma seçimli olup, bu tip kurutucularda ortam/hava ısınmadan sadece kurutulacak malzemedeki su/ nem ısınmaktadır. Endüstriyel mikrodalga ısıtma frekansı olarak 896-915 MHz aralığı kullanılmaktadır. Mikrodalga ile kurutmanın hem hızlı hem de daha ekonomik olduğu pek çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Mikrodalga kurutucular kullandıkları elektrik enerjisinin %50’sinden fazlasını nesnenin ısıtılması için kullanırken, bu oran konvansiyonel kurutucularda %10’lara kadar düşmektedir. Yüksek miktarlarda nem içeren çok ince taneli malzemeler için mikrodalga kurutucular en ideal kurutucu olarak görülmektedir. Ayrıca, mikrodalgalar kurutulacak malzeme üzerinde mikro ve makro çatlaklar oluşturmakta ve bu durum malzemelerin sonraki proseslerinde bazı avantajlar sağlayabilmektedir (Haque, 1999; Kingman ve Rowson, 2000; Hacıfazlıoğlu, 2016). Chironis (1986) ince boyutlu Colowyo kömürünün kurutulmasında mikrodalga fırının performansını test etmiş ve %97’lik bir kurutma verimi ile yüksek performans sağladığını rapor etmiştir. Mikrodalga enerjisinin ince tanelerin kurutulmasında çok etkili olduğunu belirtmiştir. Graham (2006), DryCol projesinde, mikrodalga enerjisi ile diğer konvansiyonel kurutucuların etkinliğini karşılaştırmış ve ince kömürün kurutulmasında mikrodalga enerjisinin daha avantajlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca konvansiyonel termal kurutmada yanma riskinin olduğundan ve ürünün özelliklerinde bozulma olabileceğinden bahsetmiş, mikrodalga enerjisinin serbest ve bünye nemini aynı anda giderebildiğini ve kömürün koklaşma özelliğini de değiştirmedeğini ifade etmiştir. Seehra ve ark.,(2007) kömür şlamalarının kurutulması için 800 W güçteki mikrodalga enerjisi ile konvansiyonel termal kurutmayı karşılaştırmışlar ve mikrodalga enerjisinin kurutmada daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, %10’luk bir nem düşüşü için yaklaşık maliyetin 3 \$/t olduğunu rapor etmişlerdir. Hacıfazlıoğlu ve Konuk (2018) ham manyezit numunelerini sırasıyla, mikrodalga, halojen ve elektrikli (rezistanslı) fırınlarda kurutarak fırın performanslarını karşılaştırmışlardır. Belli bir nem giderim değeri için en fazla güç tüketen fırın elektrikli fırın bulunmuştur. Halojen fırından elde edilen kuru ürünlerin yüzey sıcaklıkları ise diğer fırınlardan elde edilen ürün sıcaklıklarına göre daha yüksek bulunmuştur. En düşük ürün yüzey sıcaklık değerleri ise seçimli ısıtma yapması nedeniyle mikrodalga fırından elde edilmiştir. Endüstriyel ölçekli bir mikrodalga kurutucu Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Mikrodalga ışınli kurutucu (Max, 2017).

8. Kızılötesi ışınli Kurutucu

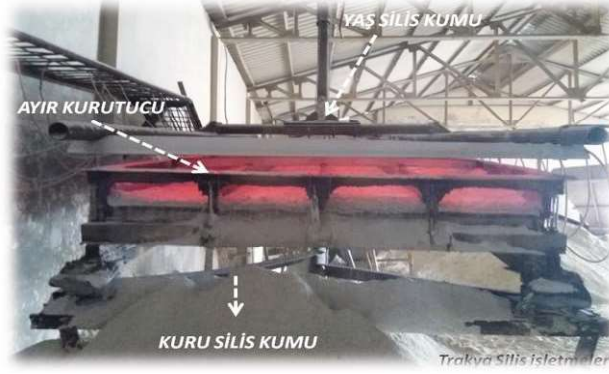
Kızılötesi (Infrared) ışınım, dalga boyu görünür ışıktan uzun, fakat terahertz ışınımından ve mikrodalgalardan daha kısa olan elektromanyetik ışınımdır (radyasyon). Kırmızı görünür ışığın en uzun dalga boyuna sahip rengidir. Kızılötesi ışınımın dalga boyu 750 nanometre ile 1 mikrometre arasındadır. Doğrudan alınan güneş ışığı %47 kızılötesi, %46 görünür ışık ve %7 morötesi ışınımından oluşur. Isının radyasyon yolu ile transferinde maddesel bir ortama ihtiyaç duyulmaz. Birbirini gören yüzeyler arasında sıcaklık farkı olduğu sürece radyasyonla ısı aktarımı mümkündür. Örneğin, güneş ışınları uzay boşluğunu geçip dünyamızı ısıtırlar veya evlerde kullanılan kızılötesi (infrared) ısıtıcılar odayı bu şekilde ısıtır. Radyasyonla ısıtma (dielektrik ısıtma), ultraviyole, radyo dalgaları, mikrodalga ve kızılötesi ışınma yoluyla gerçekleştirilebilir. Kızılötesi ışınım etraflarındaki havayı ısıtmadan sadece ışık geçirmeyen cisimleri ısıtmaktadır. Kızılötesi ısıtma sanayide boya kurutma, plastik üretimi, tavlama, plastik kaynaklama ve meyve kurutma gibi alanlarda da popüler olmaya başlamıştır. Bu tip uygulamalarda kızılötesi ısıtma yavaş yavaş geleneksel fırın ve ısıtma elemanlarının yerini almaktadır. Malzemenin karakteristiğine uygun kızılötesi frekans seçimi enerji verimliliğini de arttırmaktadır. Temelde 3 tip kızıl ötesi ışın vardır. Bunlar, kısa, uzun ve orta dalga kızılötesi ışınlardır. Aralarındaki temel fark radyasyonun işleme derinliğidir. Uzun dalgalar malzemenin sadece yüzeyini ısıtırken, kısa dalgalar malzemenin içine kadar işler. Orta dalga kızılötesi ışınlar ise uzun ve kısa dalgaların işleyebildiği derinliğin ortalaması kadar bir derinliğe işleyebilir. Kurutmada en avantajlı olan kısa dalga kızılötesi ışın olup, hızlı ve ekonomik kurutma yeteneğiyle bilinir (Kowalski ve Rajewsk, 2009; Riadh, 2017). Son dönemde, düşük enerji tüketimleri ile dikkat çeken “far infrared” bandında ısı veren karbonik film ısıtıcılarla kurutma çalışmaları devam etmektedir (Keleş ve Saçılık, 2017). FIR kısaltması ile tanınan bu dalga boyu 3-50 µm'den başlar, 1000 µm'ye kadar uzanır.

Maden ürünlerinin kurutulmasında kullanılan ticarileşmiş bir infrared kurutucu tipi Parsep kurutucudur (Şekil 13). Bu kurutucu, mekanik ve termal kurutma işlemlerinin kombinasyonu ile oluşturulmuştur. Kurutma vakum ortamında orta dalga boylu kızılötesi radyasyonla yapılmaktadır (Parsep, 2018).



Şekil 13. Parsep kurutucunun iç infrared görüntüsü ve dıştan görünümü

Ülkemizde silis kumunun kurutulması için madencilik sektörü alanında geliştirilmiş olan ilk yerli malı infrared kurutucu “Akışkan Yataklı IR (AYIR)” kurutucudur. 2 ton saat kapasiteli olarak kurulan bu kurutucunun saatlik elektrik tüketimi 65 kW’dır. Saatte ortalama %4-5 nem giderimi sağlayabilmektedir. Diğer endüstriyel hammaddelerin kurutulması için halen test aşamasındadır (Cengiz, 2017).



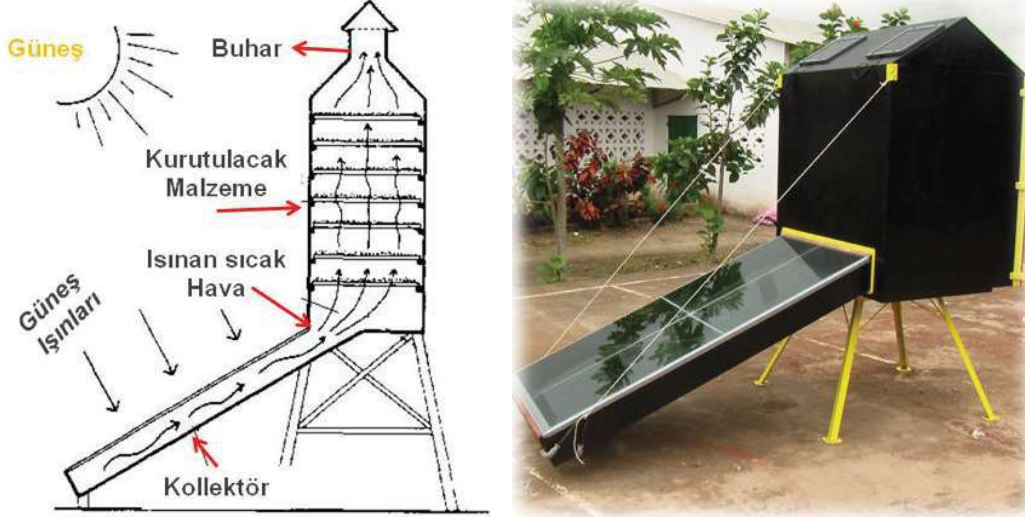
Şekil 14. Akışkan Yataklı IR kurutucu (AYIR)

Halojen kurutucular da bir çeşit kızılötesi kurutucular olup, kısa elektromanyetik dalga yaymaktadır. Isıtmayı sağlayan halojen lamba içerisinde, periyodik tablonun 7A grubunda bulunan ksenon, argon ve kripton gibi halojen gazlar bulunur. Halojen lamba yüksek verimlidir, tükettiği elektrik enerjisinin %90’ını infrared (kızılötesi) ısıtmaya dönüştürür. Lamba içerisinde bulunan gaz ısı etkisi ile uyarılarak ışınması sağlanır. Halojen fırındaki kısa kızılötesi dalgaların havadaki kayıpları daha az olduğu için malzemeleri yüksek oranda ısıtabilmektedir. Yapılan bir çalışmada filtre keki maden ürünlerinin halojen fırınlarla verimli bir şekilde kurutulabileceği belirtilmiştir. Mikrodalga fırınlara alternatif olarak önerilen halojen fırınlar, konvansiyonel elektrikli fırına göre en az %15 daha kısa sürede kurutma yapmakta ve en az %10 daha az enerji harcamaktadır. Ayrıca ilk yatırım maliyetinin düşük olması ve mikrodalga fırınlar gibi insan sağlığını olumsuz etkilememesi diğer önemli avantajlarıdır. Ayrıca, halojen lambaların sayısının arttırılmasıyla bu kurutucuların kapasiteleri de çok rahat bir şekilde arttırılabilmektedir (Hacifazlıoğlu ve Konuk, 2018). Eskibalci ve Işıktaş (2017) Halojen fırında üleksiti kurutmuş ve optimum kurutma süresini 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.

9. Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri

Güneş enerjili kurutma sistemleri konusunda, son 60 yıldan bu yana birçok ülkede araştırmalar yürütülmektedir. Öyle ki, güneş enerjisinin toplanması, depolanması ve kullanma verimliliğini arttıracak çeşitli sistemler önerilmektedir. Güneş enerjili kurutma yapılabilmesi için kurutma yapılan yerin güneşlenme süresi ve güneş ışınımı yoğunluğu oldukça önemlidir (Ceylan ve ark., 2006). Ülkemizde özellikle iç anadolu, akdeniz ve güneydoğu anadolu bölgeleri güneş verimliliğinin en yüksek olduğu bölgelerdir. Güneş enerjisi ile kurutma 2 farklı şekilde yapılabilir. Bunlar; “Güneş kolektörlü ısı kutu ile kurutma” ve “güneş enerjisi ile ısıtılmış hava ile kurutma (sera tipi)” şeklindedir. Güneş kolektörlü ısı kutu ile kurutmada üzerinde güneş enerjisini soğuracak bir kolektör bulunan kurutma kutuları kullanılır. Kolektörlerde toplanan enerji hava ya da su ile aktararak kurutulacak malzemeye iletilir. Sera tipi kurutucularda ise, kurutma alanı önce güneş ışığının geçmesi için saydam bir örtü tabakası ile kaplanır. Bu saydam örtü tabakasından geçen güneş ışınları, bu örtülerin altındaki yapı elemanlarınca absorbe

edilir ve ısı taşıyıcı akışkan olan hava yardımı ile taşınarak kurutulacak malzemelerin üzerine ulaşır. Bazen ısınmış havanın transferi için üfleyici fan da kullanılabilir. Havanın sıcaklığı arttıkça tutabileceği nem miktarı da artacağı için nemli malzemeden daha fazla suyunu buharlaşmasını sağlayacaktır. Hava 20 0C'de 17gr/m³ su buharı tutabilirken, 50 0C'de 83gr/m³ su buharı tutabilmektedir.

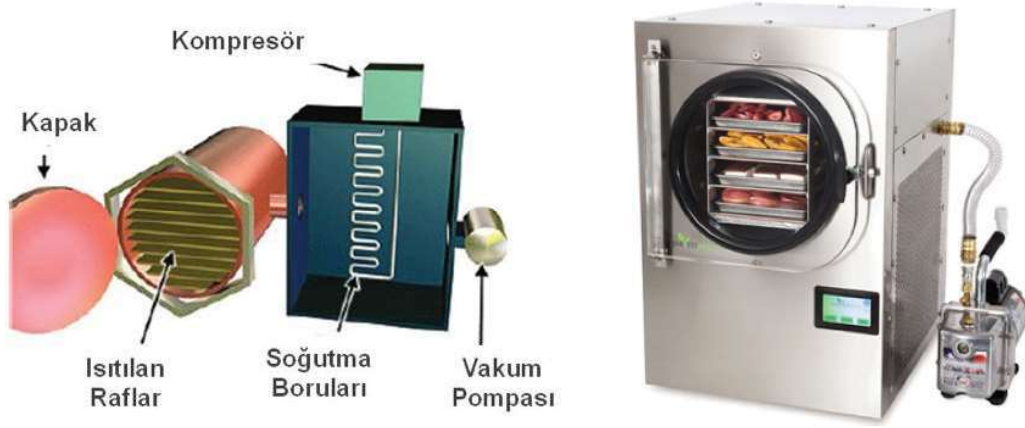


Şekil 16. Güneş enerjili kurutma sistemi ve uygulamasının görüntüsü

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 yapılabilir (Feralan, 1989; Eskibalci ve Işıқтаş, 2017).

10. Dondurarak (Şoklu) Kurutma Teknolojisi

Dondurarak kurutmadaki temel ilke, katı halden gaz haline doğrudan geçişi sağlayan süblimasyondur. Aynı buharlaşmada olduğu gibi, bir molekülü etrafındaki moleküllerden ayırmak için yeterli enerji sağlandığında süblimasyon gerçekleşir. Şoklu kurutucularda bu işlem düşük atmosfer basıncında ve düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Dondurarak kurutmanın, sıradan nem uzaklaştırmadan farkı, maddenin orijinal özelliklerini tümüyle korumasıdır. Bu bakımdan genellikle gıda ve ecza sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurutma maliyetinin fazla olması (klasik kurutuculara göre 3-4 kat daha pahalı) ve düşük kapasitelerde kullanılabilir olması nedeni ile henüz madencilik sektörüne girememiştir. Şoklu kurutma işlemi temelde 2 aşamadan meydana gelir. Birinci aşama, “malzemeyi dondurma” safhası, ikinci aşama ise “malzemeyi kurutma” aşamasıdır (Ratti, 2001; Sadıkoğlu ve Özdemir, 2003; Yöney, 2005).



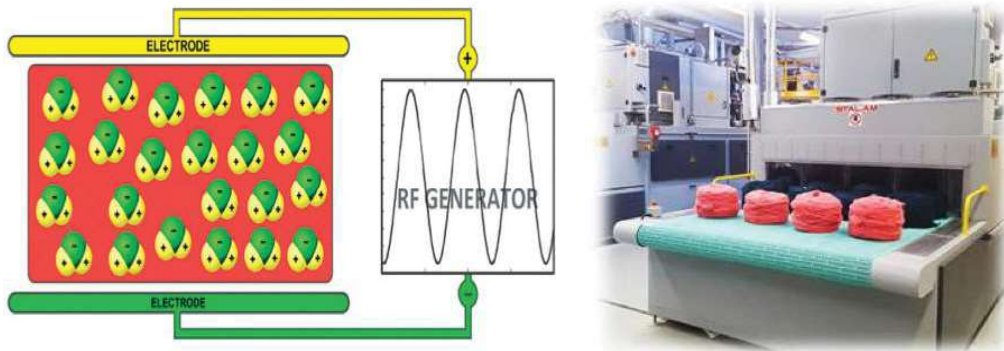
Şekil 17. Dondurarak kurutma yapan kurutucunun ana parçaları ve endüstriyel bir uygulaması

11. Rezistanslı Kurutucu

Rezistanslı kurutucular, elektrik enerjisinden yüksek sıcaklık elde etmeye ve içinde oluşan ısıyı belirli bir süre boyunca korumaya yarayan birimler içerir. Elektrik akımı, fırının içindeki “ısıtıcı rezistans” adı verilen ince borular üzerinden geçer. Bu boruların içinde bulunan teller, üzerlerinden akım geçtiğinde hızla ısınan özel bir metalden yapılmıştır. Isınan rezistans daha sonra havayı ve kurutulacak malzemeyi ısıtır ve kurumasını sağlar. Bu kurutucular küçük kapasitelerde genellikle “tavalı” veya “tepsili” olarak imal edilmektedir. Enerji verimlilikleri ve kapasiteleri düşüktür. Enerji tüketimleri diğer kurutuculara oranla oldukça fazladır. Hacı-fazlıoğlu ve Konuk (2018) manyezit keki kurutmada farklı tipteki fırınların performansını karşılaştırmış ve en fazla güç tüketen fırının rezistanslı elektrikli fırın olduğunu belirlemişlerdir. Rezistanslı fırında manyezitteki nemin %1’in altına düşürülebilmesi için gerekli olan net enerji miktarı 500 Watt’ın üstünde iken, Halojen fırında 400-500 Watt arasında, mikrodalga fırında ise 100-450 Watt arasında bulunmuştur.

12. Radyo Frekans (RF) Kurutma

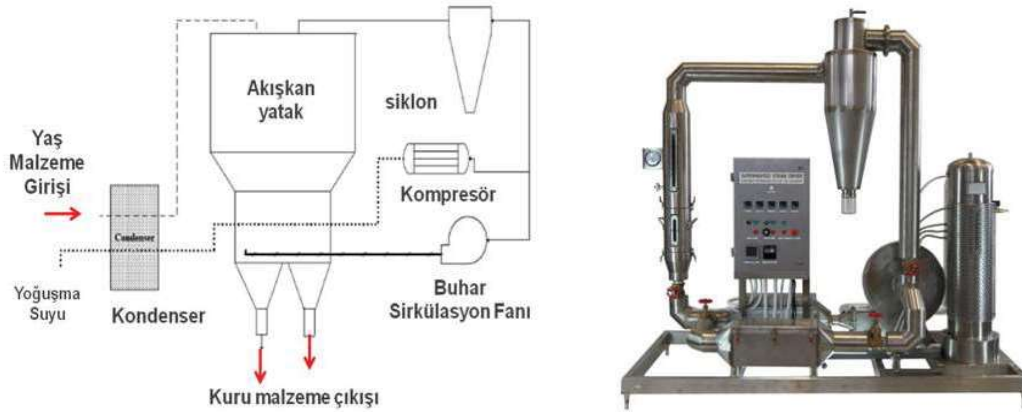
Radyo frekans kurutma için endüstride 13.56 MHz, 27.12 MHz ve 40.68 MHz bantları kullanılır. Radyo frekans ile mikrodalga teknolojisinin kullanım alanları birbirinden çok farklı değildir. Sahip oldukları dalga boylarının uygun olduğu işlemlerde kullanılırlar. Daha çok hassasiyet isteyen işler için mikrodalga uygun iken, radyo frekans daha basit işlerde kullanılır. Radyo frekans kullanımı daha kolay olan cihazlardır. Mikrodalgaya göre tehlikesi daha az bir teknolojidir (Karaaslan, 2008). Şekil 18’de pamuk, naylon ve poliester gibi tekstil ürünlerinin kurutulması için endüstriyel ölçekte kullanılan RF kurutucu gösterilmiştir. RF kurutucular farklı yüklü iki elektrot ve radyofrekans üretebilen bir jeneratörden oluşmaktadır (Djakonov ve Gorjaev, 1981).



Şekil 18. Radyo frekanslı kurutmanın mekanizması ve endüstriyel uygulaması

13. Kızgın Buhar Ortamında Kurutma

Bu yöntemde, yaklaşık 200-300 0C'ye ısıtılmış olan kızgın buhar (superheated steam) kullanılır. Bu buhar, bir kompresör yardımıyla yüksek basınç altında boruların içerisinde geçirmekte ve kurutulacak malzemenin sıcak boruya teması ile malzemedeki su buharlaştırılarak giderilmektedir. Termal verimliliği yüksek, kurutma maliyeti düşük, patlama ve yanma riski bulunan malzemeler için uygun bir kurutucudur. Bu kurutucuda malzemenin direk alevle teması söz konusu değildir. Ayrıca, klasik kurutuculara göre daha az tozuma yapmaktadır. Şekil 19'da akışkan yataklı kızgın buharlı kurutma sistemi gösterilmiştir. Bu tip kurutucularda 1 kg suyun uzaklaştırılması için gerekli olan enerji miktarı 450 ile 1750 kJ/kg arasında iken, klasik döner kurutucuda 2950 ile 3700 kJ/kg aralığında bulunmuştur. Akışkan yataklı kurutucularda ise enerji tüketimi 400 ile 3100 kJ/kg H₂O aralığındadır (Wilson ve ark., 1992; Karthikeyan ve ark., 2009; Kumar ve Mujumdar, 2015).



Şekil 19. Akışkan yataklı kızgın buharlı kurutma teknolojisi ve endüstriyel bir uygulaması

14. Tambur Kurutucu

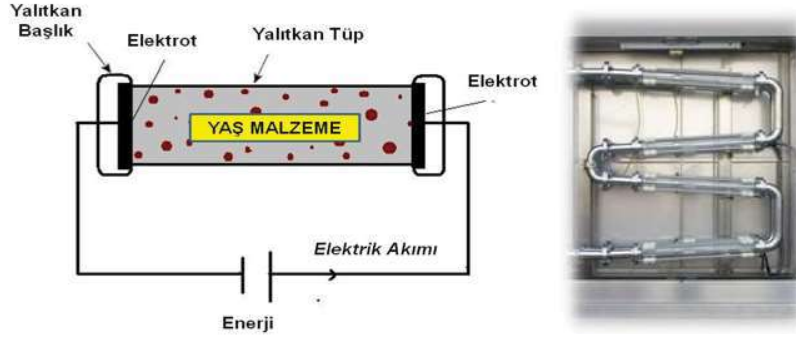
Bu tip kurutucuda, geniş çaplı tambur iç kısımdan ısıtılarak, pürüssüz dış yüzeyde malzeme kurutulmaktadır. Kurumuş malzeme tıpkı tambur filtrelerdeki gibi yüzeyden sıyrılarak alınır. Özellikle besin maddelerinin ve endüstriyel hammaddelerin kurutulmasında kullanılan bir kurutucu tipidir. Tambur tipi kurutucu Şekil 20'de gösterilmiştir (Simondryers, 2017).



Şekil 20. Tambur tipi kurutucunun görüntüsü

15. Ohmik Kurutma

Elektrik enerjisi kullanan pek çok yeni teknolojinin aksine ohmik ısıtma cihazları alternatif akım kullanmaktadır. Pratikte frekans değiştiricisine gerek kalmadan 50-60 Hz'lik düşük frekanstaki alternatif akımla ısıtma sağlanmaktadır. Kurutulacak malzeme devreyi tamamlayan bir parça olup (malzeme elektrotlarla direk temas eder), bu malzemenin elektriksel direncine bağlı olarak ısıtılması ilkesine dayanır (Şekil 21). Ohmik yöntem, homojen ve hızlı ısıtma sağlamanın yanında, maliyeti düşük ve atık potansiyeli az, minimal işleme yöntemi olarak son yıllarda tüm dünyada önem kazanmış durumdadır (Lebovka ve ark., 2006; Kırmızıyaya ve Çınar, 2015).

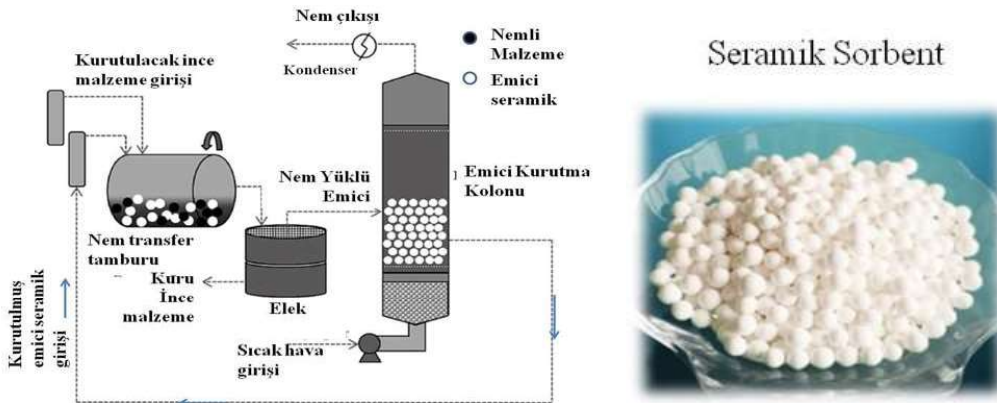


Şekil 21. Ohmik kurutma sisteminin çalışma prensibi ve ohmik ısıtıcının görüntüsü

Günümüzde ohmik ısıtma daha çok donmuş gıdaların çözünmesi, gıdanın renginin açılması, gıdanın pastörize edilmesi ve katı gıdaların ısıtılması işlemlerinde kullanılmaktadır. Ohmik ısıtmada işlemin etkinliği; malzemenin elektriksel iletkenliğine, termofiziksel özelliklerine, elektrik alan şiddetine ve uygulama süresine bağlı olarak değişmektedir.

16. Emici (Sorbent) ile Kurutma Teknolojisi

Genellikle seramik, silika ve alümina bazlı emicilerle laboratuvar ölçeğinde ince taneli malzemelerden önemli ölçüde nem giderilebilmektedir. Bu sistemde, sıcak hava emici seramiği kurutmak için kullanılırken, emici seramik (ceramic sorbent) kurutulacak malzeme içerisindeki nemi almak için kullanılır. Şekil 22'de deneysel ölçekte kullanılmakta olan seramik emicili kurutma sistemi gösterilmiştir. Bu düzenekle, ince taneli (-2+0.25 mm) kömürün nemi 10 dk'da %25 seviyesinden %5'lere kadar düşürülmüştür. Daha sonra 5 mm çaplı emici seramikler sıcak hava ile kurutulur ve tekrar tekrar kullanılmaktadır (Rensburg ve ark., 2017).



Şekil 22. Emici seramik ile kurutma sisteminin genel akım şeması ve seramik sorbentin görüntüsü

17. Sonuçlar ve Tartışma

Madencilik rnlerinin kurutulmasında, kurutma verimliliği ve enerji tkretimini azaltılması açısından dikkate alınması gereken pek çok faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerden en önemlisi öncelikli olarak doğru kurutucu tipinin seçilmesidir. Örneğin, çok ince boyutlu filtre keklerinin kurutulmasında helezonlu tip (Holoflite gibi) kurutucuların veya çok daha ince akışkan mikronize veya nano boyutlu tanelerde sprey tipi kurutucuların tercih edilmesi gerekir. Aksi durumda, tanelerin topaklanması ve yeterince karışmaması nedeni ile kurutma verimi düşmekte ve daha yüksek miktarlarda enerji gereksinimi doğmaktadır.

Kurutma süresi, özellikle ince taneli kömür gibi yanıcı ve patlayıcı malzemeler için büyük önem arz etmektedir. Bu tip malzemelerde, ısı kaynağı ile malzeme arasında kısa süreli temas oluşturan flash (hızlı) kurutucuların kullanılması daha uygun olmaktadır. Yine yanıcı ve patlayıcı maddelerin kurutulmasında dolaylı kurutma yapan (ateşle temas etmeyen) veya inert gazlı kurutucular tercih edilmelidir.

Hızlı ve pratik kurutma işlemleri için düşük tonajlarda mikrodalga ışın yayan kurutucular tercih edilebilir. Yine, ilk yatırım maliyeti düşük ve insan sağlığına zararlı etkisi olmayan infrared (kızılötesi) kurutucular da basit yapıları, hızlı ve kontaminasyonsuz temiz ürün vermeleri nedeni ile tercih edilebilecek olan diğer kurutuculardır. Bu alanda, karbonik film, halojen, ohmik, UV ve radyo dalgaları da araştırmaya değer ısıtma ve kurutma teknolojileridir.

Kurutma ekonomisi açısından ve kurutulmuş ürün kalitesi açısından, enerji/ısı kaynağının doğru seçilmesi gerekir. Enerji kaynağı olarak; mazot, fuel oil, doğalgaz, Lng, kömür, biomass ve odun kullanılabilir. Enerji kaynağı seçiminde pek çok faktörün göz önüne alınması gerekir. Bu faktörlerden bazıları, enerji kaynağının kalorifik değer (ısı değer), güvenliği ve ekonomiklidir. Kömür kurutma tesislerinde genellikle ekonomik olması nedeni ile kömür kullanılmakta, kirlilik istenmeyen endüstriyel minerallerin kurutulmasında ise daha temiz yakıtlar olan doğalgaz ve petrol ürünlerinden faydalanılmaktadır. Eğer kurutulacak malzeme kükürt dioksitle tepkimeye giriyor ve malzeme kalitesinde bir düşme meydana getiriyorsa kükürdü düşük olan yakıtlar tercih edilmesi daha doğru olacaktır.

Genel olarak ince ($d < 10\text{mm}$ $d > 0.5\text{mm}$) boyutlu malzemeler için ısı transferinin yüksek olması nedeniyle akışkan yataklı kurutucular, daha iri boyutlu taneler için daha geleneksel, ekonomik ve basit yapıda olan döner kurutucular tercih edilebilir. Eğer malzeme, kurutma sonrasında ğtlecekse, hem kurutma hem de öğütme yapabilen değer men tipi kurutucular tercih edilmelidir. Çok düşük nem oranlarının ($< 1\%$) istendiği uygulamalarda (magnezyum hidroksit sitrik asit, nişasta, borik asit vb.) ise mikrodalga ya da halojen tip kurutma fırınlarının kullanılması enerji tüketimi ve kurutma verimliliği açısından daha avantajlı görülmektedir.

Sonuç olarak kurutucu seçiminde, kurutulacak malzemenin özelliklerinden kurutma sıcaklığına, kurutma sresinden enerji kaynağına kadar pek çok faktör göz önüne alınarak en uygun kurutucu seçimi yapılmalıdır.

Kaynaklar

Ateşok, G. 2004. Kömür Hazırlama ve Teknolojisi, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları, ISBN: 975-7946-22-2, İstanbul.

Asos, 2018. Akışkan yataklı kurutma tesisi, <http://www.asosmekatronik.com/akiskan-yatakli-kurutma-tesisi.html>

Barrozo, M. A. S., Mujumdar, A., Freire, J.T. 2014. Air-Drying of Seeds: A Review, *Drying Technology*, 32,1127–1141.

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

Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H. 2006. Güneş Enerjili Kurutma Fırınında Elma Kurutulması, *Politeknik Dergisi*, 9 (4), 289-294.

Chironis, N.P., 1986. Microwaves dry fine coal, *Coal Age*, 91, 64-65.

Cengiz, T. 2017. Akışkan yataklı IR kurutucu deney raporu (yayımlanmamış), Trakya Bölgesi Silis İşletmeleri San.Tic.Ltd.Şti, Çatalca, İstanbul.

Djakonov, K. F. Gorjaev, A. A. 1981. Wood drying with high frequency current. Forest Management Publishing, 1981 Moskva.

Dryon, 2017. Titreşimli akışkan yataklı kurutucu, http://www.binderco.hk/downloads/minexx_20122013/MINEXX_tuerk_0512.pdf

Delele, M.A. Weiglera, F. Mellmann, J. Advances in the application of a rotary dryer for drying of agricultural products: A Review. *Drying Technology* 2015, 33(5), 541-558.

Eksis, 2017. Endüstriyel Kurutma Sistemleri, İnternet Sayfası, www.kurutma.net/boru%20tipi%20kurutucu.html.

Eskibalçı, M.F., Işıktaş, O.V.2017. Üleksitin Kurutulmasında Farklı Isıtıcıların Verimliliğinin İncelenmesi, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 11-22.

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

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

Gunn, D.J. 1978. Transfer of heat or mass to particles in fixed and fluidized beds. *Journal of Heat and Mass Transfer* 21(78), 467–476.

Graham, J. 2002. Microwaves for coal quality improvement: The Drycol Project, US Patent Application 20070151147, International Patents Pending.

Günerban, H. 2005. Endüstriyel Kurutma Sistemleri, Türk Tesisat Mühendisleri Derneği, Mart, 36. Sayının Eki.

Hacıfazlıoğlu, H. 2017. Comparison of Efficiencies of Microwave and Conventional Electric Ovens in the Drying of Slime-Coal Agglomerates, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 37, 169-178.

Hacıfazlıoğlu, H. 2016. Kömür Hazırlama Ders Notları, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, s.253.

Hacıfazlıoğlu, H., Konuk, Y. 2018. Ham Manyezit Kekinin Farklı Fırınlarda Kurutulması ve Fırın Performanslarının Etüdü, MT Bilimsel yer altı kaynakları Dergisi, 14, 45-56.

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

Huang, L.; Kumar, K. Mujumdar, A.S. 2003. A parametric study of the gas flow patterns and drying performance of co-current spray dryer: Results of a computational fluid dynamics study. Drying Technology 21 (7), 957–978.

Langrish, T.A.G.; Fletcher, D.F. 2003. Prospects for the modelling and design of spray dryers in the 21st century. Drying Technology, 21 (2), 197–215.

Keleş, C.Ö., Saçılık, K. 2017. İnfrared ısıtmalı fındık kurutma makinası tasarımı, Anadolu Tarım Bilim. Derg./Anadolu J Agr Sci, 32, 197-205.

Korte, G. J., 2001. Dewatering and drying of fine coal: Drying technology in non-coal industries, CoalTech, 2020.

Karaaslan, S. 2008. Sebze ve Endüstri Bitkilerinin Mikrodalgayla kurutulması üzerine çalışmalar, Çukurova Üni. Fen bilimleri Enst., Tarım Makinaları ABD., Doktora Tezi.

Jangam, S.V., Majumdar, A.S. 2010. Coal Dehydration, A Compilation of Relevant Publications and Technical Reports, 77.

Kingman, S.W., 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.

Kırmızııkaya, E.S., Çınar, İ. 2015. Gıda endüstrisinde ohmik ısıtma uygulamaları, Dünya Gıda, Aralık Sayısı.

Kowalski S. J., Rajewska, K. 2009. Convective Drying Enhanced with Microwave and Infrared Radiation, Drying Technology, 27 (7-8), 878-887.

Karthikeyan, M., Zhonghua, W. , Mujumdar A.S. 2009. Low-Rank Coal Drying Technologies—Current Status and New Developments, Drying Technology, 27, 403–415.

Kumar, P. Mujumdar, A.S. 2015. Superheated steam drying. In Handbook of Industrial Drying, 4th ed.; Mujumdar, A.S., Ed.; Taylor & Francis: Boca Raton, FL, 2015; 421–432.

Leiker, M. Adamska, M.A. Güttel, R. Mollekopf, N. 2004. Vacuum microwave drying of beech: property profiles and energy efficiency. Proceedings of COST E15 Intl. Conf. Wood Drying, Athens, Greece, 128-137.

Lebovka , N. I. , Shynkaryk , M. V., Vorobiev, E. 2006. Drying of Potato Tissue Pretreated by Ohmic Heating, Drying Technology, 24 (5), 601-608.

Loesch, 2017 .<https://www.loesche.com/en/products/dry-grinding-plants/coal-for-cement/>

Max, 2017. MAX Industrial Microwave, <http://www.maxindustrialmicrowave.com/>

Metso, 2017. [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/0B6F45D0BB8761CE42256B20005032EF/\\$File/Holoflite.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/0B6F45D0BB8761CE42256B20005032EF/$File/Holoflite.pdf)

MD, 2016. Yeni Nesil Vakumlu Kurutma Fırınları-Mikrodalga Vakumlu fırın, <http://vakumlukurutma.com/>

İpekoğlu, Ü., 1994. Susuzlandırma, Cevher Hazırlama El Kitabı, Bölüm 16, YMGV Yayını, 363-364.

İpekoğlu, Ü., Polat, H. 2014. Susuzlandırma, Cevher Hazırlama El Kitabı, YMGV Yayını, Bölüm 16, s.335-370.

Özdağan, S., Polat, M., Çelik, M.S. 1998. ‘Kömürün Susuzlaştırılması’, Kömür, Kural, O., Ed., Bölüm 18, 297-315.

Odabaş, M.T.T. 2018. Püskürtmeli kurutma, Gıda Analiz Teknikleri, 1-6.

Özsu, 2017. Kömür kurutma makinaları, http://www.ozsu.com.tr/default.asp?page=content&content_id=252

Parsep, 2018. Parsep dryers, <http://www.parsep.co.za/pages/Dryer%20Brochure.pdf>

Pueschner, 2016. Microwave vacuum dryer, <http://www.pueschner.com/en/products/vacuum-drying-freeze-drying>

Pharma, 2018. Fluidized bed dryer, <https://www.pharmapproach.com/fluidized-bed-dryer/>

Park, J.H. Lee, C.H. Park, Y.C. Shun, D. Bae, D.H. 2014. Drying efficiency of Indonesian lignite in a batch circulating fluidized bed dryer. Drying Technology 32(3), 268–278.

Ratti, C. 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review, Journal of Food Engineering, 49, 4, 311-319.

Rong, L.K.; Song, B.; Yin, W.Z.; Bai, C.H.; Chu, M. 2017. Drying behaviors of low-rank coal under negative pressure: Kinetics and model. *Drying Technology* 2017, 35(2), 173-181.

Rensburg, M.J.V., Roux, M.L., Campbell, Q.P., Peters, E.S. 2017. Contact sorption: A method to reduce the moisture content of coal fines, *Drying Technology* (yayımlanmamış).

Riadh, M.H., Ahmad, S.A.B., Marhaban, M.H., Soh, A.C. 2015. Infrared Heating in Food Drying: An Overview, *Drying Technology*, 33 (3), 322-335.

Seehraa, M.S., Kalrab, A., Manivannana, A. 2007. Dewatering of fine coal slurries by selective heating with microwaves, *Fuel*, 88, 829–834.

Simondryers, 2017. <http://www.pen-tas.com/uploads/yuklemeler/drumdryer.pdf>

Si, C., Wu, J. Wang, Y. Shang, X. 2015. Drying of low-rank coals: A review of fluidized bed technologies. *Drying Technology*, 33(3), 277-287.

Schmalko, M.E., Peralta J. M., Alzamora, S. M. 2007, Modeling the Drying of a Deep Bed of *Ilex paraguariensis* in an Industrial Belt Conveyor Dryer, *Drying Technology*, 25:12, 1967-1975

Spxflow, 2016. Vacuum belt dryers, <http://www.spxflow.com/en/extraction/pd-ee-vacuum-belt-dryers/>

Sadıkoğlu, H., Özdemir, M. 2003. Dondurarak Kurutma Teknolojisi ve Evreleri, *Gıda*, 28 (6), 643-649.

Tahmasebi, A., Yu J., Li, X., Meesri, C. 2011. Experimental study on microwave drying of Chinese and Indonesian low-rank coals, *Fuel Processing Technology*, 92,1821-1829.

Therma-Flite, 2017. <http://www.therma-flite.com/Coal-Fines-Dryer-Article.php>

Yöney, T. 2005. Gıdaları Dondurarak Kurutup Saklamak Nasıl Çalışır?, *Bilim-Teknik Dergisi*, s.101.

Wilson, W.G., Young, B.C. Irwin, W. 1992. Low-rank coal drying advances. *Coal* 1992, 24–27.