



Orijinal Araştırma / Original Research

TRİBOELEKTROSTATİK AYIRMA İLE İNCE BOYDA KÖMÜR ZENGİNLEŞTİRİLMESİNİN İNCELENMESİ

THE INVESTIGATION OF FINE COAL BENEFICIATION WITH TRIBOELECTROSTATIC SEPARATION

Ergin Gülcan^{a,*}, T.Onur Dizdar^{b,**}, Gizem Kocausta^{b,***}, Özcan Y.Gülsoy^{a,****}

^a Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

^b Labris Madencilik, Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 12 Mayıs / May 2020

Kabul Tarihi / Accepted : 05 Haziran / June 2020

Anahtar Sözcükler:

Triboelektrostatik ayırım,
Kömür.

Keywords:

Triboelectrostatic separation,
Coal.

ÖZ

Bu çalışma kapsamında bir triboelektrik ayırım düzeneği tasarımı ve bu düzeneğin ülkemizdeki belli başlı kömür cevherlerinin ince boyda zenginleştirilmesinde kullanımı incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Tunçbilek ve Soma bölgelerinde konumlanmış, işletmesi devam eden dört farklı lavvardan kömür numuneleri temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde geliştirilen triboelektrostatik ayırım düzeneği 35 kV'a kadar statik yük üretebilmektedir. Gerekli statik yükün sürtünme ile sağlanmasına ilişkin öncül testleri takiben kömür numuneleri ile zenginleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İki ayrı bölgeden temin edilen dört farklı kömür numunesi ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, triboelektrostatik ayırım ile kömürün yapısına bağlı olarak ince tane boylarında %50'leri aşan kül uzaklaştırma verimleri elde edilebildiği görülmüştür.

ABSTRACT

The scope of this study is to design a triboelectric separation equipment and to investigate its use in the enrichment of the major coal samples in our country. Coal samples were obtained from four different operating plants in Tunçbilek and Soma regions for the use in experimental studies. Triboelectrostatic separation mechanism developed in Hacettepe University Mining Engineering Department was proved to provide up to 35 kV for the use in experimental studies. Following the preliminary tests regarding the required static load by friction, enrichment processes were carried out with coal samples. As a result of the experimental studies carried out with four different coal samples obtained from two different regions, it has been observed that with the triboelectrostatic separation, ash removal efficiencies exceeding 50% in fine grain sizes can be obtained depending on the structure of the coal.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: ergingulcan@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-8861-8061>

** dizdaronur@gmail.com

*** gizemkocausta@gmail.com

**** ogulsoy@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-7063-7432>

GİRİŞ

Cevher zenginleştirme süreçleri, minerallerin fiziksel, kimyasal, elektriksel, manyetik ve optik özelliklerinden yararlanarak değerli mineralleri değersiz minerallerden ayırmayı amaçlar. Elektrostatik ayırıcı ile malzemelerin zenginleştirilmesi bu yöntemlerden biridir ve ilk olarak 1800'lü yılların sonunda kullanılmaya başlanmıştır (Kelly ve Spottiswood, 1982). Elektrostatik ayırma temelde, malzemelerin iletken, yarı iletken veya yalıtkan özellikte olmalarından faydalanılarak gerçekleştirilen bir ayırım türüdür (Mular vd., 2002). İletken malzemeler düşük iletkenlik direncine sahiptirler ($10 \cdot 10^{-2} \Omega.m$). Yarı iletken malzemeler ise $1 \cdot 10^{-2}$ ile $10^2 \Omega.m$ arasında iletkenlik direncine sahip olmakla birlikte yalıtkan malzemelerin iletkenlik direnci $10^{12} \Omega.m$ olarak hesaplanmıştır (Telford vd., 1990).

Günümüzde elektrostatik ayırıcı çeşitleri levha tipi ayırıcılar ve döner tambur tipi elektrotlu ayırıcılar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki tip elektrostatik ayırıcı, tanelerin yüzey iletkenliğine bağlı olarak çalışmaktadırlar (Hangsubcharoen, 1999(a)(b); Wills ve Munn, 2006). Elektrostatik kuvvetlerden yararlanılarak yapılan ayırmalarda etkin parametre, bir tanenin yüküne bağlı olarak farklı bir yüke sahip bir elektrot tarafından çekilmesi veya itilmesidir. Burada etkileşim içerisinde olan yüklerin büyüklüğü ayırım performansı açısından önem kazanmaktadır. Çizelge 1'de minerallerin farklı yükleme metotları ve farklı yükleme ekipmanlarıyla zenginleştirilmesi ve belli başlı bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Bu yöntemlerden triboelektriklenme, tribo-yüklenme (tribocharging) etkisiyle tanelerin doğal yüzey yüklerinin değiştirilmesi prensibine dayanır. Birbirine dokunan/sürtünen taneler arasında moleküler düzeyde kimyasal bağlar oluşmakta, bu oluşan bağların kopması ile birlikte de moleküller arasında elektron alışverişi gerçekleşmektedir (Bittnera vd., 2014; Iuga vd., 2001). Triboelektrik seri ise, farklı malzemelerin birbirlerine dokundurulmaları/ sürtülmeleri ile oluşacak yüklerin miktarı ve yönü hakkında oldukça genel bir bilgi veren malzeme skalasına verilen addır. Birbirinden oldukça farklı polimer yapılar, metaller, mineraller, günlük hayatta kullandığımız birçok malzeme triboelektrik seride

farklı yerlerde bulunmaktadır. Triboelektrik serinin pozitif tarafında bulunan bir malzeme ile negatif tarafta bulunan herhangi bir malzemeye sürtüldüğünde/dokundurulduğunda bunlardan birisi pozitif, diğeri negatif yükle yüklenir. Bu malzemeler triboelektrik seri üzerinde birbirlerine ne kadar uzaklarsa, yük yoğunluğu da o kadar fazla olmaktadır (Diaza ve Felix-Navarro, 2004; Park vd., 2008; Wu vd., 2013; Panat vd., 2014).

Tribo-elektriklenme ile elektriklenme sonrası elektrostatik ayırıcıda ayırma ilişkin mevcut çalışmalardan bazıları potasyum klorür (sylvite), sodyum klorür (halite), barit, feldspat, florit, dolomit, kuvars, apatit, kil mineralleri, kömür, kalsit, fosfor olarak sıralanabilir (Li vd., 1999; Tao ve AL-hwaiti, 2010; Bittnera vd., 2014; Mirkowska vd., 2014; Wang vd., 2014).

Ülkemizde ve dünyada kömür zenginleştirme işlemleri genellikle yaş ve fiziksel yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. İri tane boylarında ve yüksek kapasitelerde oldukça verimli sonuçlar alınan bu yöntemlerin ince boylarda oldukça zor ve problemlili olduğu bilinmektedir. Bu sorunlardan bazıları düşük verim, susuzlandırma sorunu, yaş yöntemin neden olabileceği kimyasal drenaj, bozulmuş kimyasal içeriklerin tekrar kullanımı gibi kirlilik yaratabilecek durumların oluşması şeklinde sıralanabilir. Bu kapsamda kömür üretim ve zenginleştirme endüstrisinde ince boyda toz kömürün zenginleştirilmesine yönelik alternatif yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Tribo-elektriklendirme ile elektrostatik ayırmaya ilişkin birçok çalışma son dönemde literatürde yer bulmuştur. Bunlarla birlikte yanmamış karbonu külden ayırmak amacıyla uygulamalar da yapılmaktadır (Cangialosi vd., 2008; Dwari vd., 2009; Tao vd., 2009; Xin-xi vd., 2009; Tao vd., 2011; Zhang vd., 2012; Chen ve Honaker, 2015; Dwari vd., 2015). Chen ve Honaker (2015) döner tambur tipi triboelektrostatik ayırıcıyla saf silika ve kömür karışımı kullanarak gerçekleştirdiği testlerde kömürün %72,58'inin pozitif yüklenebildiğini tespit etmiş, buna rağmen yüksek kalitede nihai bir temiz ürün elde edilemediği sonucuna varmıştır. Dwari vd. (2015) ise oldukça düşük kaliteli ve düşük nemli Hint kömürlerinde yaptığı testlerde %53 kül içeriğine sahip kömür numunesinden %35 verimle %35 kül içeren bir ürün elde edilebildiğini rapor etmiştir. Literatürde sürtünme yoluyla elde edilen

statik yükün şist üzerindeki etkisinin incelendiği pek çok çalışma da mevcuttur. Bu çalışmalarda yüksek şist içeriğinin negatif, kömürün ise pozitif yüklendiği belirtilmektedir. Bu sayede kömür yapısındaki silikatlar, sülfürlü mineraller, karbonatlı içerikler (dolomit) ve benzeri safsızlıklar verimli bir şekilde uzaklaştırılabilmektedir (Alfano vd., 1985; Finseth vd., 1993; Dwari vd., 2009; Chen ve Honaker, 2015).

Ülkemiz kömürlerinin ince tane boylarında triboelektrostatik ayırma ile zenginleştirilmesinin incelenmesi yukarıda belirtilen sebeplerden ötürü önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında Soma ve Tunçbilek bölgelerinden temin edilen kömür numunelerinin, Hacettepe Üniversitesi laboratuvarlarında geliştirilen Triboelektrostatik ayırıcı ile zenginleştirilebilirlikleri incelenmiştir.

Çizelge 1. Minerallerin farklı yükleme metotları ve farklı yükleme ekipmanlarıyla zenginleştirilmesi

Yükleme Methodu	Yükleme Ekipmanı	Malzemeler (Ekipman referansları)
İndüksiyon	Döner Tambur	Cüruftan alüminyum ayırma (Kelly ve Spottiswood, 1982), Feldspat/kuvars (Mular vd., 2002), Bor mineralleri (Saeki, 2010), Yanmamış karbon (Hangsubcharoen, 1999(a)), Cu/Cam fiber/reçine (Hangsubcharoen, 1999(b); Wills ve Munn, 2006)
	Plaka	Rutil/Zirkon (Tilmatine vd., 2009) Titanyum
	Bant	Soğan tohumları, Çiçek (Younes vd., 2013)
Korona	Döner Tambur	Plastik/alüminyum (Zeghloul vd., 2016), Nadir Metal (Richard vd., 2016), Rutil/Zirkon/Kuvars (Tripathy vd., 2010), Çay yaprakları/Yaprak sapı (Higashiyama ve Asano, 1998), Cu/PVC (Bittnera vd., 2014; Iuga vd., 2001)
	Bant	Havuç/Kereviz tohumu (Das vd., 2009)
Triboelektriklenme	Silindirik Elektrot	KCl/NaCl(Allen, 2000)
	Siklon	Kömür (Iuga vd., 2016; Wei and Reaff, 2005)
	Döner Koni	Kömür (Çelik ve Yaşar, 1995)
	Yükleme Tüpü	Kömür (Li vd., 1999; Tao ve AL-hwaiti, 2010)
	Kaynar Yatak	Kömür (Mirkowska vd., 2014), Plastik (Wang vd., 2014)
	Elektrostatik elek	Kömür (Ban vd., 1997)
	Kırıcı	Kömür (Soong ve Schoffstall, 2001)
	Döner Boru	Plastik (Baltrus vd., 2002)
	Titreşimli Besleyici	Plastik (Dwari ve Hanumantha, 2006)

1. MALZEME VE YÖNTEM

1.1. Triboelektrostatik Ayırıcı Deney Düzenineğin Oluşturulması

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ayırıcıya ilişkin teknik ve operasyonel hususlar, yazarların önceki çalışmalarında detaylı olarak özetlenmiştir (Dizdar vd., 2018).

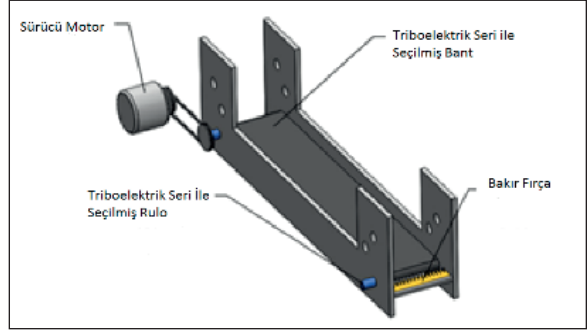
Tasarlanan triboelektrostatik ayırıcı temel olarak 2 bölümden oluşmaktadır. Ayırıcının birinci kısmı, sürtünme ile düzenli olarak elektriğin üretilebildiği bir düzenekten oluşmaktadır. İkinci kısımda ise geleneksel bir ayırım tamburu, besleyici ve birinci kısımda üretilen elektriğin aktarıldığı plakalar bulunmaktadır.

Birinci kısımda triboelektrik üretmek amacıyla triboelektrik serinin zıt uçlarındaki malzemelerden "rulo" ve "bant"lar üretilmiştir. Bantların ve ruloların değiştirilebilir olması sağlanarak en verimli statik yük üretim kombinasyonlarının denenmesi sağlanmıştır. Bant ve rulolar için kullanılan malzemelerin türleri Çizelge 2'de verilmiştir. Ruloların hepsi sabit uzunlukta olup çapları 2 cm olarak seçilmiştir.

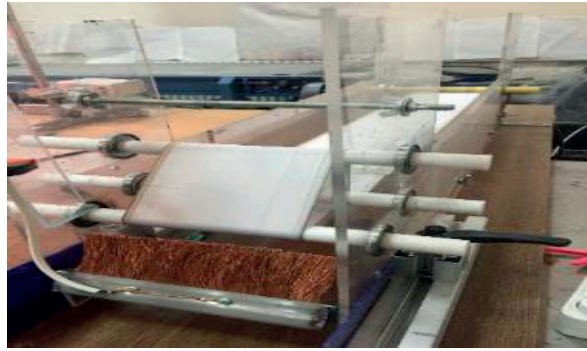
Çizelge 2. Statik elektrik üretiminde kullanılan malzemeler

Elektrik üretimi için kullanılan bant türleri	Naylon, Poliüretan (büyük delikli ve küçük delikli dokuma), Yün, Polyester, Polyester-akrilik, PVC, Fiber/naylon, Fiber
Elektrik üretimi için kullanılan rulo türleri	Teflon, Kestamid, Polyamid, Alüminyum, Delrin, Polietilen

Üretilen elektrik yüklerini toplamak amacıyla bakır fırçalar (toplaç) kullanılmıştır. Bakır fırçalar iletken bir kablo yardımıyla ayırım yapıldığı bölümde bulunan elektrotla bağlanarak ayırım yapılabilmesi için gereken elektriğin elektrotta toplanması sağlanmıştır. Elektrik üretim ünitesinin şematik ve genel görünümü Şekil 1'de ve Şekil 2'de verilmiştir. Testlerde farklı rulo tiplerinin etkisini belirlemek amacıyla seçilmiş olan malzemelerden hazırlanmış olan rulolar Şekil 3'te verilmiştir. Her bir rulodan 6 adet hazırlanmış ve isteğe bağlı olarak kullanılan rulo sayısı test sırasında değiştirilmiştir.



Şekil 1. Elektrik üretim ünitesi şematik çizimi



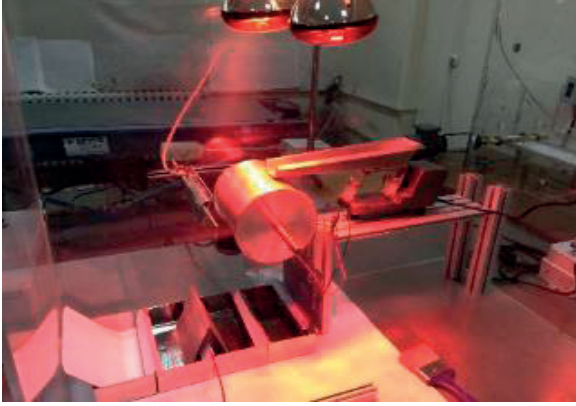
Şekil 2. Elektrik üretim düzeneği, rulolar, bant ve bakır fırça



Şekil 3. Düzenekte kullanılan rulolar

Zenginleştirme ünitesi tasarımında ise tamburlu elektrostatik ayırıcıdan esinlenilmiştir. Bu bağlamda ünite bir tambur, titreşimli besleyici ve elektrotlardan oluşmaktadır (Şekil 4).

Tambur ile alüminyum elektrot arasındaki mesafe ayarlanabilir şekilde kurulum gerçekleştirilmiştir. Titreşimli besleyici ise malzemeleri düzenli bir şekilde, istenilen hızda beslemeyi sağlamaktadır. Her ne kadar zenginleştirme öncesinde numuneler kurutulsa da konvansiyonel ayırıcılarda olduğu



Şekil 4. Ürün zenginleştirme düzeneği görüntüsü

Gerçekleştirilen öncül çalışmalarda, ilgili triboelektrostatik ayırıcı deney düzeneği ile, pozitif yüklü dokuma naylon-kestamid (35 kV) ile dokuma naylon-teflon (28 kV) ve negatif yüklü dokuma yün-delrin (Polioksümetilen) (28.6 kV) çiftleri kullanıldığında statik elektrik üretim performansının oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir (Dizdar vd., 2018). Kömür zenginleştirilmesine ilişkin deneysel çalışmalar, en yüksek performansı veren pozitif yüklü dokuma naylon-kestamid/teflon çifti bant ve rulo kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1.2. Kömür Numunelerinin Hazırlanması ve Deneysel Çalışmalar

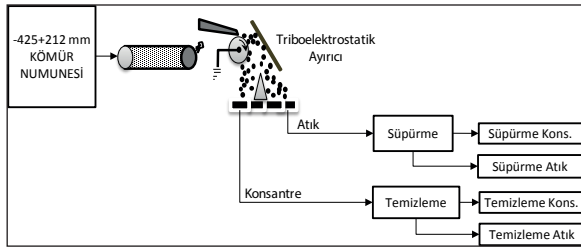
Bu çalışma kapsamında, ülkemizdeki farklı ocaklardan temin edilen kömür numuneleri triboelektrostatik ayırma uygun boyutlarda hazırlanmış ve deneylerde kullanılmıştır. Kömür numuneleri Tunçbilek-1, Tunçbilek-2 (Ömerler lavvarı), Soma-1 ve Soma-2 (Dereköy lavvarı) olmak üzere dört farklı lavvardan temin edilmiştir. Tunçbilek'te halen çalışmakta olan kömür yıkama tesisi beslemesinden alınan yığına konileme dörtleme yöntemi ile temsili alınan numuneler kırılarak $-425 \mu\text{m}$ tane boyuna indirilmiş ve elenerek $-425+212 \mu\text{m}$ tane boyu fraksiyonu elde edilmiştir. Benzer şekilde, Soma, Ömerler ve Dereköy kömür yıkama tesisi beslemesinden alınan yığınlar konileme dörtleme yöntemi ile temsili alınan numuneler kırılarak $-425 \mu\text{m}$ tane boyuna indirilmiş ve elenerek triboelektrostatik ayırma testlerinde kullanılmak üzere $-425+212 \mu\text{m}$ tane boyu fraksiyonları elde edilmiştir.

Tunçbilek kömürleri (Tunçbilek-1 ve Tunçbilek-2), düşük nem oranına sahip, parlak ve sert linyit türündedir. Linyitle taşkömürü arasında sınıflandırılan bu kömürler taşıma ve depolama esnasında çok az oranda tozlaşır ve ısı değeri yüksektir (Tunçbilek, 2020). Soma kömürleri ise (Soma-1 ve Soma-2) nispeten daha yüksek nemli, yüksek kül içeriğine ve daha düşük ısı değere sahiptirler. Düşük kömür tozlaşması sebebiyle Tunçbilek kömürleri ince boyda daha az kömür kaybına uğrarken, Soma kömürlerinin ince boyları yüksek karbon içeriğine sahip olmaktadır. Triboelektrostatik ayırma ince boylarda düşük verimli bir yöntem özelliği göstermektedir. Buna ek olarak tozlaşma kaynaklı ayırma verimi farklılıklarının önüne geçmek amacıyla deneysel çalışmalarda $-212 \mu\text{m}$ tane boyundaki numuneler kullanılmamıştır. Bununla birlikte tane boyunun ayırma etkisi üzerine yazarların çalışmaları devam etmektedir.

Triboelektrostatik kaba ayırma testlerinde kullanılan ekipman parametreleri Çizelge 3'te detaylı olarak verilmiştir. Yüksek voltajlı ayırılarda 5 cm'den düşük elektrot-tambur mesafesinde yük boşalmaları meydana gelebilmektedir. Bu sebeple konsantrenin temizlenmesi aşmasında tüm koşullar sabit tutulmuş ve düşük kapasite ile besleme sağlanmıştır. Süpürme aşamalarında ise elektrot-tambur mesafesi yine 5 cm olarak tutulurken, ayırıcı bıçak konumu 7,5 cm olarak değiştirilmiştir. Testlerde, Şekil 5'te verilen ayırma akım şemasının farklı versiyonları kullanılmıştır. Testlerde konsantrenin veya atığın bir adım daha temizlenmesine karar verilirken ürünlerin miktar ve görünümleri dikkate alınmıştır. Her triboelektrostatik ayırma testi 5 tekrarlı gerçekleştirilmiş, ürünler birleştirilerek gerekiyorsa sonraki temizleme/süpürme adımlarına geçilmiştir. Tekrarlı testlerde belirgin bir ağırlık farkı gözlemlenmemiştir. Triboelektrostatik ayırma uygulamada çok yüksek sayıda temizleme kademeleri gerektirebilen bir yöntemdir (Chen ve Honaker, 2015). Nihai ürünün saflık derecesinin önemli olduğu ve çok yüksek sayıda temizleme adımlarının gerçekleştirildiği uygulamalarda, düşük kapasite ve verim değerleri bir sorun olabilmektedir. Bu sebeple bu çalışma kapsamında ayırmanın uygunluğu, 2 kademeli ayırma ile elde edilen veriler kullanılarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 3. Triboelektrostatik testler esnasında sabit tutulan koşullar

Sabit Koşullar	
Tambur hızı (devir/dk)	54
Rulo dönüş hızı (devir/dk)	2170
Elektrot türü	Alüminyum
Elektrot tambur arası mesafe (cm)	5
Ayırıcı bıçak konumu (cm)	10
Fırça ile rulo arası mesafe (cm)	2
Besleme öncesi karıştırma süresi (dk.)	2
Rulo cinsi	3 teflon ve 2 kestamid(sürücü)
Bant cinsi	Naylon bant

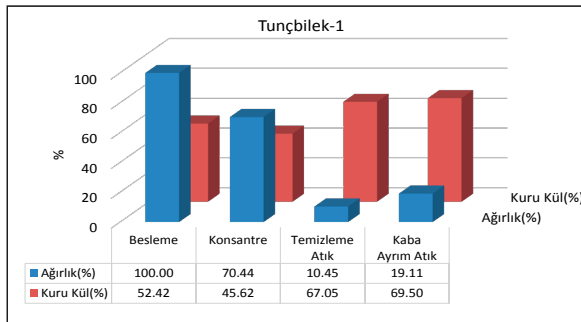


Şekil 5. Ayrımlarda kullanılan genel akım şeması

2. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

2.1. Tunçbilek-1 Lavvarı Tüvenan Numunesi ile Yapılan Testlerin Sonuçları

Tunçbilek kömür numunesi ile yapılan testlerde birinci kademe ayırmadan bir konsantre ve bir atık elde edilmiştir. Birinci kademe ayırım konsantresi temizleme aşamasına tabi tutularak nihai bir temizleme konsantresi ve temizleme atığı elde edilmiştir. Ayırım ürünlerine ilişkin sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir.



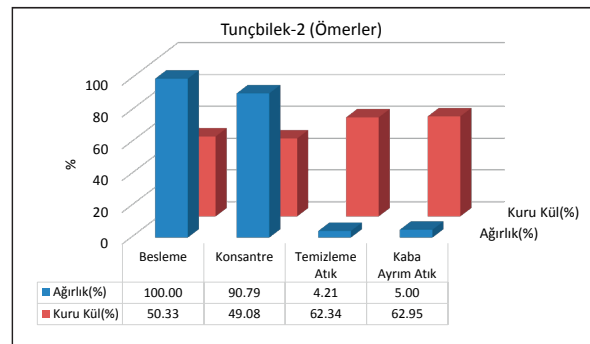
Şekil 6. Tunçbilek-1 numunesi triboelektrostatik ayırım sonuçları

Linyitin elektriksel direnci 9-200 ohm-metre ($\Omega.m$) arasında değerlendirilmektedir. Kömürün içerisinde bulunan ve uzaklaştırılmak istenen külün ise elektriksel direnci $10^9 - 10^{13}$ ohm-cm ($\Omega.cm$) arasında değişmektedir (Telford vd., 1990). Bu değerler bir malzemenin elektrik iletimine verdiği tepkiyi açıklamaktadır. Bu özellik malzemelerin iletken, yarı iletken veya yalıtkan olmalarına sebep olan özelliktir. Tunçbilek-1 kömür numunesine yapılmış olan ayırım testinin sonucunda düşük elektriksel dirence sahip yani iletken olan kül içeriğinin elektrot tarafından çekilerek bir ayrıma olanak sağladığı gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışma ile besleme numunesindeki %52,42'lük kül oranı %45,62'ye düşürülmüştür. Kaba ayırım atığında ise kül oranı %69,50'ye çıkarken temizleme aşaması atığı %67.05 kül oranına sahiptir. Alınan toplam atıkta, beslemedeki kül %38,70 verim ile uzaklaştırıldığı görülmüştür. Bu çalışma Tunçbilek kömür hazırlama tesisinde kullanılan kömür numunesinin triboelektrikleme ile üretilen statik yük kullanılarak zenginleştirilebileceğini göstermiştir.

2.2. Tunçbilek-2 Lavvarı Tüvenan Numunesi ile Yapılan Testlerin Sonuçları

Tunçbilek bölgesi Ömerler lavvarından elde edilen kömür numunesi ile yapılan testlerde birinci kademe ayırmadan bir konsantre ve bir atık elde edilmiştir. Miktarı nispeten fazla olan birinci kademe ayırım konsantresi temizleme aşamasına tabi tutularak nihai bir temizleme konsantresi ve temizleme atığı elde edilmiştir. Ayırım ürünlerine ilişkin sonuçlar Şekil 7'de verilmektedir.



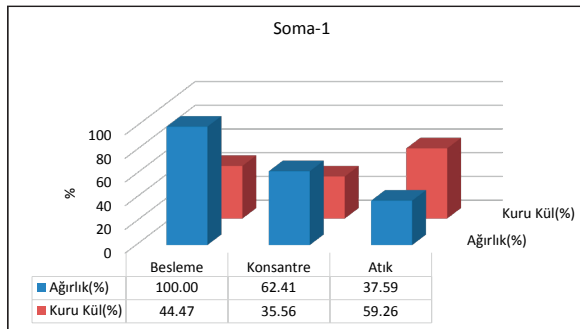
Şekil 7. Tunçbilek-2 numunesi triboelektrostatik ayırım sonuçları

Benzer şekilde Ömerler kömür numunesine yapılmış olan ayırım testinin sonucunda da düşük elektriksel dirence sahip yani iletken olan kül içeriği beklendiği gibi elektrot tarafından çekildiği gözlemlenmiştir.

Böylece yapılan çalışma ile besleme numunesindeki %50,33'lük kül oranı %49,08'e düşürülmüştür. Kaba ayırım atığında ise kül oranı %62,95'e çıkarken temizleme aşaması atığı %62,34 kül oranına sahiptir. Alınan toplam atıkta, beslemedeki kül %11,47 verim ile uzaklaştırıldığı görülmüştür. Bu çalışma Ömerler kömür hazırlama tesisinde kullanılan kömür numunesinin sürtünme ile üretilen statik yük kullanılarak zenginleştirilebileceğini göstermiştir. İstenilen ürün özelliklerine göre temizleme ve süpürme aşamaları eklenebilmesi mümkündür.

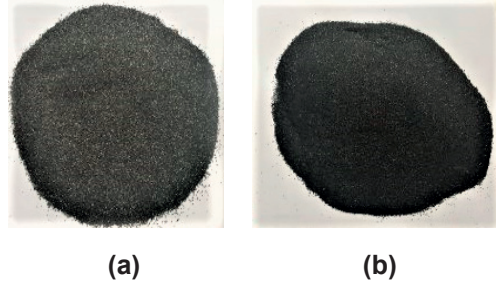
2.3. Soma-1 Lavvarı Kömür Numunesi ile Yapılan Testlerin Sonuçları

Soma-1 kömür numunesi ile yapılan testlerde birinci kademe ayırmadan bir konsantre ve atık elde edilmiştir. Ürünlerin görselleri ve benzer ağırlıktaki miktarlarından yola çıkarak ayırım burada sonlandırılmıştır. Ayırım ürünlerine ilişkin sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Ek olarak Şekil 9'da tekrarlı testlere örnek teşkil etmesi açısından bu kömürün ayırım ürünlerinden bir setin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 8. Soma-1 numunesi triboelektrostatik ayırım sonuçları

Dereköy kömür numunesine yapılmış olan ayırım testinin sonucunda düşük elektriksel dirence sahip yani iletken olan kül içeriği öngörüldüğü gibi elektrot tarafından belli oranda çekildiği gözlemlenmiştir.



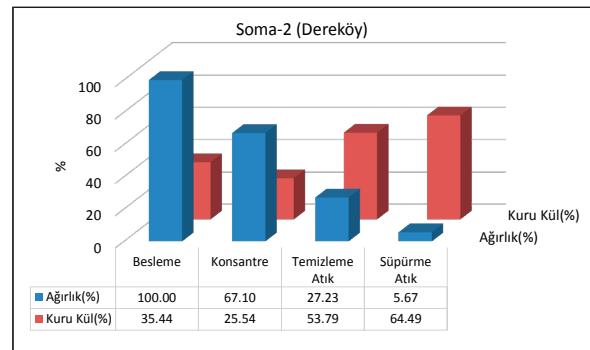
Şekil 9. Soma-1 kömür numunesi ayırım sonrası görüntüsüne ilişkin bir örnek (a: atık, b: konsantre)

Soma kömür numunesine yapılmış olan ayırım testinin sonucunda düşük elektriksel dirence sahip, yani iletken olan kül içeriği beklendiği gibi elektrot tarafından çekildiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak yapılan çalışma ile besleme numunesindeki %44,47'lik kül oranı %35,56'ya düşürülmüştür. Kaba ayırım atığında ise kül oranı %59,26'ya çıkmıştır. Alınan atıkta, beslemedeki kül %50,10 verim ile uzaklaştırıldığı görülmüştür.

2.4. Soma-2 Lavvarı Kömür Numunesi ile Yapılan Testlerin Sonuçları

Soma bölgesi Dereköy lavvarından elde edilen kömür numunesi ile yapılan testlerde birinci kademe ayırmadan bir konsantre ve atık bir elde edilmiştir. Ürünlerin görselleri ve miktarlarından yola çıkarak hem birinci kademe ayırım konsantresi hem de birinci kademe ayırım atığı temizleme aşamalarına tabi tutularak temizleme konsantre ve atıkları elde edilmiştir. Ayırım ürünlerine ilişkin sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir.



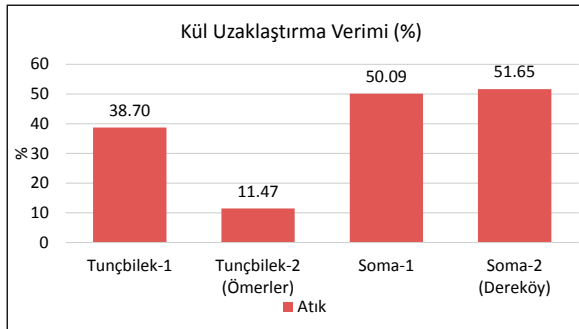
Şekil 10. Soma-2 numunesi triboelektrostatik ayırım sonuçları

Dereköy kömür numunesine yapılmış olan ayırım testinin sonucunda düşük elektriksel dirence sahip yani iletken olan kül içeriği öngörüldüğü gibi elektrot tarafından belli oranda çekildiği gözlemlenmiştir.

Ayırım sonucunda besleme numunesindeki %35,44'lük kül oranı %25,54'e düşürülmüştür. Kaba ayırım atığında ise kül oranı %64,49'a çıkarken temizleme aşaması atığı %53,79 kül oranına sahiptir. Alınan toplam atıkta, beslemedeki kül %51,64 verim ile uzaklaştırıldığı görülmüştür. Bu çalışma Dereköy kömür hazırlama tesisinde kullanılan kömür numunesinin sürtünme ile üretilen statik yük kullanılarak zenginleştirilebileceğini göstermiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tunçbilek yöresine ait kömürlerin linyitle taşkömürü arasında sınıflandırıldığı bilinmektedir. Tunçbilek kömürünün nem oranı düşüktür ve ince boylarda tozlaşma daha az görülür. Soma bölgesi ise nispeten daha yüksek küllü kömürlere ev sahipliği yapmaktadır. Bu kapsamda Şekil 11'de Soma kömürlerinden kül uzaklaştırma veriminin nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 11. Şekil 6'daki önerilere göre gözden geçirilmeli

Farklı kömür numuneleri üzerinde yapılan bu zenginleştirme çalışmaları, farklı kül içeriğine sahip kömür numunelerinin sürtünme ile üretilen statik yük kullanılarak zenginleştirilebileceğini ve içeriklerindeki kül oranlarının bu sayede düşürülebileceğini göstermiştir. Sonuçlar triboelektrostatik ayırmanın ince boyda kömür zenginleştirmede kullanılabilir alternatif bir kuru yöntem olduğunu göstermektedir. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen triboelektrostatik

ayırım ürünleri, iki kademe ayırım sonucunda elde edilmiştir. Ayırım kademelerinin artırılması ile ürün kalitesinin artması da ayrıca mümkün olacaktır. Bununla birlikte bu metodun uygulandığı tane boylarında yaş yöntemlere göre ekonomik olarak kıyaslaması da ileride yapılacak çalışmalarda incelenebilecektir.

TEŞEKKÜR

TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) araştırmaya finansal destek sağlamış ve bu makalenin yazılmasını teşvik etmiştir (Proje No: 1001-111M729). Finansal desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Alfano, G., Carbini, P., Carta, M., Ciccu, R., Del Fa, C., Peretti, R., Zucca, A., 1985. Applications of Static Electricity in Coal and Ore Beneficiation. J. Electrostat., 16, 315–328.

Allen R. C., 2000. Triboelectric Generation: Getting Charged Reproduced with Permission, EE-Evaluation Engineering, 1-6.

Baltrus J. P., Diehl J. R., Soong Y., Sands W., 2002. Triboelectrostatic Separation of Fly Ash and Charge Reversal. Fuel, 81, 757-762.

Ban H., Li T. X., Hower J. C., Schaefer J. L., Stencel J. M., 1997. Dry Triboelectrostatic Beneficiation of Fly Ash. Fuel, 76 (8), 801-805.

Bittner J. D., Hrach F. J., Gasiorowska S. A., Canellopoulos L. A., Guicherd H., 2014. Triboelectric Belt Separator for Beneficiation of Fine Minerals. 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry Procedia Engineering, 83, 122-129.

Cangialosi F., Notarnicola M., Liberti L., Stencel J. M., 2008. The Effects of Particle Concentration and Charge Exchange on Fly Ash Beneficiation with Pneumatic Triboelectrostatic Separation. Separation and Purification Technology, 62, 240-248.

Çelik M. S., Yaşar E., 1995. Effect of Temperature and Impurities on Electrostatic Separation of Boron Minerals. Mineral Engineering, Technical Note, 8 (7), 829-833.

- Chen J., Honaker R., 2015. Dry Separation on Coal–Silica Mixture Using Rotary Triboelectrostatic Separator. *Fuel Processing Technology*, 131, 317-324.
- Das S., Samuila A., Dragan C., Dascalescu L., 2009. Behaviour of Charged Insulating Particles in Contact with a Rotating Roll Electrode. *Journal of Electrostatics*, 67, 189–192.
- Diaza A. F., Felix-Navarro R. M., 2004. A Semi-Quantitative Tribo-Electric Series for Polymeric Materials: The Influence of Chemical Structure and properties, *Journal of Electrostatics*, 62, 277-290.
- Dizdar T. O., Kocausta G., Gülcan E., Gülsoy Ö. Y., 2018. A New Method to Produce High Voltage Static Electric Load for Electrostatic Separation–Triboelectric Charging. *Powder Technology*, 327, 89-95.
- Dwari R. K., Hanumantha Rao K., 2006. Tribo-electrostatic Behaviour of High Ash Non-Coking, Indian Thermal Coal. *Int. J. Miner. Process*, 81, 93–104.
- Dwari R. K., Hanumantha Rao K., Somasundaran P., 2009. Characterisation of Particle Tribo-Charging and Electron Transfer with Reference to Electrostatic Dry Coal Cleaning. *Int. J. Miner. Process*, 91, 100-110.
- Dwari R. K., Mohanta S. K., Rout B., Soni R. K., Reddy P. S. R., Mishra B. K., 2015. Studies on the Effect of Electrode Plate Position and Feed Temperature on the Tribo-Electrostatic Separation of High Ash Indian Coking Coal. *Advanced Powder Technology*, 26, 31-41.
- Finseth, D., Newby, T., Elstrodt, R., 1993. Dry Electrostatic Separation of Fine Coal. In: Parekh, V.B.K., Gropps, J.G. (Eds.), *Processing and Utilization of High-Sulfur Coals*. Elsevier Science Publisher, B.V., Amsterdam, 91-98.
- Hangsubcharoen M., 1999(a). Thesis. A Study of Triboelectrification Mechanisms for Coal, Quartz and Pyrite. Blacksburg, Virginia Tech., 193-224.
- Hangsubcharoen M., 1999(b). Thesis. A Study of Triboelectrification Mechanisms for Coal, Quartz and Pyrite. Blacksburg, Virginia Tech., 1-25.
- Higashiyama Y., Asano K., 1998. Recent Progress in Electrostatic Separation Technology, *Particulate Science and Technology*, 16:1, 77-90.
- Iuga A., Cuglesan I., Samuila A., Blajan M., Vadan D., Ascalescu L., 2001. Electrostatic Separation of Muscovite Mica from Feldspathic Pegmatites, 0-7803-7116-X/01 (C) IEEE, 2249- 2255.
- Iuga A., Samuila A., Morar R., Bilici M., Dascalescu L., 2016. Tribocharging Techniques for the Electrostatic Separation of Granular Plastics from Waste Electric and Electronic Equipment. *Particulate Science and Technology*, 34 (1), 45-54.
- Kelly E.G., Spottiswood D.J., 1982. *Introduction to Mineral Processing*. Wiley-Interscience Publication, 291-300.
- Li T. X., Ban H., Hower J. C., Stencil J. M., Saito K., 1999. Dry Triboelectrostatic Separation of Mineral Particles: A Potential Application in Space Exploration. *Journal of Electrostatics*, 47, 133-142.
- Mirkowska M., Kratzer M., Teichert C., Flachberger H., 2014. Atomic Force Microscopy as a Tool to Explore Triboelectrostatic Phenomena in Mineral Processing. *Chem. Ing. Tech.*, 86 (6), 857-864.
- Mular A. L., Halbe D. N., Barratt D. J., 2002. *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control*. Editörler: Mular A. L. Vancouver: SME, Halbe D. Salt Lake City: SME, Barratt D.J. North Vancouver: SME. p.168.
- Panat R., Wang J, Parks E., 2014. Effects of Triboelectrostatic Charging Between Polymer Surfaces in Manufacturing and Test of Integrated Circuit Packages, *IEEE Transactions on Components, Packaging And Manufacturing Technology*, 4 (5), 943-946.
- Park C. H., Park J. K., Jeon H. S., Chul Chun B., 2008. Triboelectric Series and Charging Properties of Plastics Using the Designed Vertical-Reciprocation Charger. *Journal of Electrostatics*, 66, 578-583.
- Richard G., Touhami S., Zegloul T., Dascalescu L., 2016. Optimization of Metals and Plastics Recovery from Electric Cable Wastes Using a Plate-Type Electrostatic Separator. *Waste Management*. 60:112-122.
- Saeki M., 2010. Triboelectric Separation of Binary Plastic Mixture. *World Academy of Science. Engineering and Technology*, 4, 818-821.
- Soong Y., Schoffstall M. R., Link T.A., 2001. Triboelectrostatic Beneficiation of Ash. *Fuel*, 80, 879-884.
- Tao D., AL-hwaiti M., 2010. Beneficiation Study of Eshidiya Phosphorites Using A Rotary Triboelectrostatic Separator. *Mining Science and Technology*, 20, 0357–0364.

- Tao D., Fan M., Jiang X., 2009. Dry Coal Fly Ash Cleaning Using Rotary Triboelectrostatic Separator. *Mining Science and Technology*, 19, 0642–0647.
- Tao D., Sobhy A., Li Q., Honaker R., Zhao Y., 2011. Dry Cleaning of Pulverized Coal Using A Novel Rotary Triboelectrostatic Separator (RTS). *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 31, 187-202.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R., 1990. Electrical Properties of Rocks and Minerals. In *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press., pp. 283-292.
- Tilmatine A., Medles K., Bendimerad S.E., Boukholda F., Dascalescu L., 2009. Electrostatic Separators of Particles: Application to Plastic/Metal, Metal/Metal and Plastic/Plastic Mixtures. *Waste Management*, 29, 228–232.
- Tripathy S. K., Ramamurthy Y., Kumar C. R., 2010. Modeling of High-Tension Roll Separator for Separation of Titanium Bearing Minerals. *Powder Technology*, 201, 181–186.
- Tunçbilek Belediyesi. <http://www.tuncbilek.bel.tr/sayfa.php?id=52>. (Son erişim: 2020)
- Wang H., Chen S., Cai B., Ge L., Chen Q., 2014. Study on the Dynamics of Tribocharged Coal and Mineral Particles in Free-Fall Triboelectric Separator. *Separation Science and Technology*, 49, 2990–2998.
- Wei J., Realff M. J., 2005. Design and Optimization of Drum-type Electrostatic Separators for Plastics Recycling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 3503-3509.
- Wills B. A., Napier-Munn T., 2006. *Mineral Processing Technology an Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Editörler: Wills, B. A., Napier-Munn T. Elsevier Science & Technology Books, 365-372.
- Wu G., Li J., Xu Z., 2013. Triboelectrostatic Separation for Granular Plastic Waste Recycling: A Review. *Waste Management*, 33, 585–597.
- Xin-xi Z., Dai-yong D., Bing T., Jin-song W., Feng D., Hai-sheng L., Rui-xin M., 2009. Research on the Triboelectrostatic Separation of Minerals from Coal. The 6th International Conference on Mining Science&Technology *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, 845–850.
- Younes M., Younes A. Sayah H., Tilmatine A., Samuila A., Dascalescu L., 2013. Numerical and Experimental Study of Insulating Particles Behavior in Roll-Type Corona-Electrostatic Separators. *Particulate Science and Technology*, 31, 71–80.
- Zeghloul T., Touhami S., Richard G, Miloudi M, Dahou O., Dascalescu L., 2016. Optimal Operation of a Plate-Type Corona-Electrostatic Separator for the Recovery of Metals and Plastics from Granular Wastes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (3).
- Zhang L., Hou J., Bi X. T., Grace J. R., Janke T., 2012. Electrostatic Beneficiation of Fly Ash in A Free-Falling System. *Claudio Arato Particuology*, 10, 154-160.