

Chapter - F

**PHYSICAL SEPARATION /
FİZİKSEL ZENGİNLEŞTİRME**



Antalya Ferrochrom Cüruflarından Yeni Nesil Jig Teknolojisi ile (Apic Jigleri) Metal Geri Kazanımı Projesi (MRP) ve Cüruf Atıklarının Zenginleştirilmesi

Metal Recovery Project (MRP) and Processing of Antalya Ferrochrome Slag by Using of New Generation Jigging Technology (Apic Jigs)

A. Özözen

Maden Y.Müh., Atoll BV & Apic Toll Curuf Arıtma Ltd., Antalya Türkiye

B. Uygur

Maden Müh., Atoll BV & Apic Toll Curuf Arıtma Ltd., Antalya Türkiye

ÖZET 50 yılı aşkın geçmişi ile 1,7 m.ton hacme ulaşmış olan Antalya Ferrochrom Curufları, Türkiye’de bu konuda bir ilk olan, modern Apic Jigleri ve Geri Kazanım Prosesi ile işlenerek ve %100 geri kazanım yapılarak ülke ekonomisine yeniden kazandırılmıştır. Projenin anahtar teslimi tüm yatırımı Apic & Atoll tarafından 2007 yılında başlatılmış ve 4 yıl gibi kısa bir sürede proje tüm curufların işlenmesi ile sona ermiştir. Metal Geri Kazanım (MRP) Prosesi çatısı altında tüm curuflar, şehir içindeki fabrika sahasında kurulmuş olan tesislerde, tamamen kapalı devre tasarlanmış olan Apic Jig prosesi içerisinde zenginleştirilmiştir.

Apic’in MRP’si ile Türkiye’de ilk olan bu uygulama çok kısa sürede hayata geçirilmiş ve tamamlanmıştır. Proje sonunda ise yaklaşık 18 k.ton düşük karbonlu gerikazanılmış Ferrochrom (LCFeCr) metal ürünleri ülke ekonomisine kazandırılmıştır. İşleme sonucu projenin atığı formundaki geriye kalan tüm curuflar ise, inşaat, altyapı, beton vb. gibi sektörlerde ekonomiye yeniden kazandırılmış ve kaliteli bir agrega alternatifi olarak değerlendirilmiştir.

ABSTRACT With the history of over 50 years, which has reached a volume of 1.7 m.ton Antalya Ferrochrome slags, which is a first in Turkey, has been processed by modern Apic Jigs and Metal Recovery Process 100% recovery made with processed and re-gained the country's economy. All turn-key investment in the project was initiated in 2007 by Apic & Atoll in such a short period of 4 years and the project came to end with the processing of all the slags. Metal Recycling (MRP) Process all under the umbrella of slags, which was founded in the city in the factory area, fully enriched in closed-circuit process, which is designed Apic Jigging Process. Apic’s MRP application which is a first in Turkey has been implemented and completed in a very short time. At the end of the project approx. 18 kttons of recovered low-carbon ferrochrome (LCFeCr), metal products gained the country's economy. Whole slags as a result of process at the end of the project in the form of waste gained to economy and re-evaluated in construction, infrastructure, concrete and similar industries as a qualified aggregate alternative

1 CURUF İŞLEME VE METAL GERİ KAZANIM PROJESİ

Antalya Ferrochrom curuflarının işlenmesi projesi (MRP) 2007 yılında başlamıştır. Eti Elektrometalurji AŞ’ye ait curufların günümüzde şehir içinde kalarak çevresel

açından olumsuz etkilere neden olması, kuruluşundan bu yana (yaklaşık 50 yıl) fabrika sahasında stoklanan curuflar için yer kalmaması ve gerekse fabrika sahasında işgal ettiği alan açısından önemli problem teşkil etmesi ivedilikle bir Curuf İşleme projesini gerektirmiştir. Bu maksatla Eti Elektrometalurji AŞ ve Atoll BV arasında yap-işlet yöntemi ile Metal Geri Kazanım Projesi (MRP) devreye alınmış ve 4 yıl gibi kısa bir sürede 1.7 m.ton hacmindeki tüm curuflar işlenerek artırılmış ve metal gerikazanımı sağlanmıştır.

Bu proje Türkiye’de bir ilk ve örnek olmakla beraber, çok kısa zamanda kurulup-devreye alınan, - projenin tüm aşamaları ile devreye alınması 5 ay – tamamıyla çevreye duyarlı, sıfır deşarj ve emisyonlu, kapalı devre tasarlanıp, işletmeye alınan bir proje olarak gerçekleştirilmiştir. Birçok atık işleme işinde az veya çok miktarda yine de nihai proses atığı oluşmaktadır ve tamamen bertaraf edilmesi mümkün olmamaktadır. Ancak bu projede curuf ve içerisindeki tüm bileşenler uygun ekipman ve prosesler ile tamamıyla ekonomik ürüne çevrilerek bertaraf edilmiştir.

2 METAL GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ

Ferro alaşım ve metalurjik üretimler esnasında metal içeren curuflar ve/veya kaçak metaller muhtelif fiziksel ayırma yöntemleri ile geri elde edilebilmektedir. Bu tür kaçak metallerin geri kazanımındaki en önemli tekno-ekonomik kriter; Gerikazanım metaller doğrudan satılabilir, nihai ürün sıfatında olmalı ve Gerikazanım maliyeti, orjin cevherinden üretim maliyetini aşmamalıdır. Bu kriterler dahilinde metal geri kazanımı eldesi için başlıca uygulanan yöntemler; manyetik ayırıcılar, ağır ortam ayırıcıları (DMS), spiraller, sallantılı masalar, jigler ve sınıflayıcılar olarak sıralanabilir. Bu yöntemlerin çoğu gravimetrik esaslı ayırım yöntemleridir. Manyetik ayırma efektif bir ayırma yöntemi olmakla beraber sadece belli bir manyetik alınganlığa sahip alaşımlara uygulanabilir, dolayısı ile sınırlı uygulama alanına sahiptir. DMS uygulamaları ise göreceli olarak sadece ince metallerin geri

kazanımında uygulanabilir, ancak bu sistem oldukça pahalı olan FeSi medyası gerektirmektedir. Spiraller ise yine ancak ince tane boylarında uygulanabilen, yüksek verim ve kaliteli ürün eldesi için kontrol ve operasyonu zor olan ekipmanlardır, kapasiteleri sınırlıdır. Sallantılı masalarda sadece ince tane boylarında ve sınırlı kapasiteye sahip ayırıcılarıdır.

- Curuflardan metal geri kazanımında en iyi teknoloji ise Yeni Nesil Hidro-pnömatik jiglerin (iri ürün -40 mm, ince ürün -10 mm ve Sınıflayıcılar (classifier) (ultraince -1 mm) ile kombinasyonundan elde edilmiştir (P.Scott, Mintek). Ancak mekanik jiglerin kapasite ve verimleri modern hidro-pnömatik jiglere göre oldukça sınırlıdır.

Bu kombinasyondaki prosesler yüksek kapasitede ve verimde metal gerikazanımına olanak vermektedir. Ferroalaşım curuflarından yapılan gerikazanımlar konusunda bazı performans örnekleri Çizelge 1’de özet olarak verilmiştir.

Çizelge 1. Atoll, G.Afrika, Türkiye, Romanya MRP proje uygulamalarından örnekler

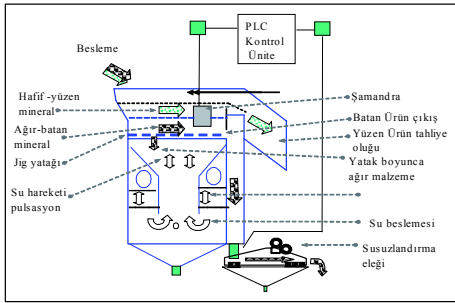
İşlenen Hammadde	Fraksiyon	Curuf Metal içeriği	Kazanım Verimi
Charge Krom	6-32 mm	2,10%	98,5%
	1-6 mm	3,40%	99,9%
	<1 mm	9,30%	~90 %
HC FeMn	10-25 mm	1,85%	98,4%
	4-10 mm	1,23%	98,6%
	< 4 mm	< %10	~90 %
SiMn	10-25 mm	1,70%	97,5%
	4-10 mm	1,40%	98,5%
	< 3 mm	<%10	~90 %
LC FeCr	6-25 mm	1,10%	99,0%
	0-6 mm	1,10%	97,0%
	< 1 mm	<5 %	~90 %

Çizelge 1’den görüleceği üzere modern hidro-pnömatik jigler ile oldukça yüksek (>%98) verimlerde geri kazanım sağlanmıştır. Curuflardan metal geri kazanım devreleri çoğunlukla ve öncelikle kırma-eleme bazende öğütme devresi gerektirmektedir. Zira genelde curufların bünyesinde gömülü-kontak halde metal bulunmaktadır. Dolayısı ile kırma-eleme-öğütme devreleri curuf-metal yapısının karakteristiğine ve serbestleşme kriterlerine bağlı olarak seçilmektedir.

Modern Jigler ile son yıllarda ferroalaşımların yanısıra başlıca demir, mangan, krom gibi metalik cevherler ile kömürlerin yıkanması ve zenginleştirilmesinde jig kullanımı yeniden popüler olmuştur (Bateman, Atoll). Yatak-altı hava-pulsasyonlu modern jiglerin, G.Afrika, Avustralya, Hindistan, Türkiye, Romanya, ABD gibi ülkelerde metalurjik curuflar, metalik cevherler ile endüstriyel mineraller ve kömürlerde kullanımı üzerine önemli kapasitelerde uygulamaları bulunmaktadır.

2.1 Modern Jigler ve Çalışma Prensipleri

Yatak-altı hava pulsasyonlu modern jiglerin temel çalışma prensibi, düşük basınçlı (<1 bar) havayı jig haznesi içindeki suyu jig yatağına doğru ivmelendiren hava hareketine dayanmaktadır. Çok kısa zaman diliminde su sütununu yukarıya doğru istenilen hız ve yüksek miktarda ötelemek ve bunu kısa zaman aralıklarında büyük güç ile yapmak için ise kontrollü hava kullanılmaktadır. Milisaniye mertebesine kısa zaman aralıklarında tekrarlı ve kontrollü yapılan bu döngü sayesinde jig pulsasyonu (nabız



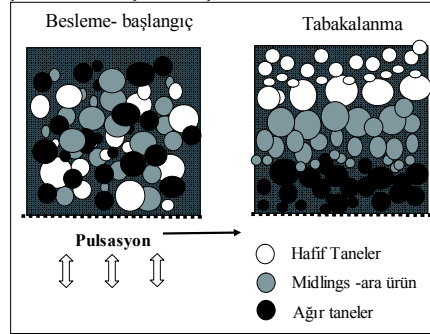
vuruşları) oluşturulmaktadır (Şekil 1).

Şekil 1. Yatak-altı Hava pulsasyonlu jig çalışma prensibi.(Apic Jigleri)

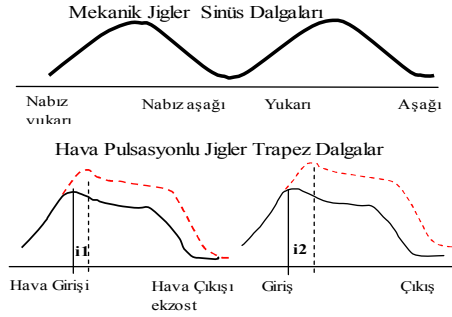
Jig yatağı üzerinde, yatak-altı hava pulsasyonu ile sürekli aşağı yukarı sağlanan kontrollü hareket sayesinde, jig haznesi içinde öncelikle homojen bir yapı olması sağlanmakta, kısa zaman aralıklarında tekrarlı olan bu düşey ivmelendirme ile yoğunluk farklılığına dayanan bir tabakalanma ve ayırım

gerçekleşmektedir. Bu ayırım ise akışkan bir ortamda engelli çökeltme prensibi ile sağlanır. Yoğunlukça ağır taneler batma eğiliminde olurken daha hafif olan taneler ise yüzme eğilimi ile yukarı yükselmektedir ve alttaki ağır tabakanın üzerinde tabakalanarak farklı yoğunluk katmanlarını oluşturmaktadır.

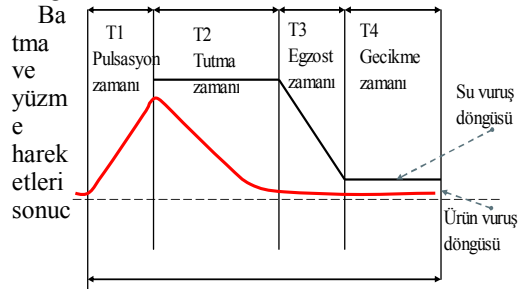
Bu işlem zamanının bir fonksiyonu olarak dinamik şekilde besleme ile tekrarlı devam etmektedir. Jiglemede daha keskin ve etkin ayırma, aşamalı olarak birbiri ile bağlı kompartmanlar şeklinde tasarlanan jigler sayesinde etkin bir ayırım ve birden fazla yoğunluğa göre ayırım ortamı ile sağlanmaktadır. Bu mekanizme Şekil 2 ve Şekil 3'te açıklanmıştır.



Şekil 2. Jig içerisindeki ideal tabakalanma



Şekil 3. Hava pulsasyonlu jiglerde jig döngüsü ve tabakalanma

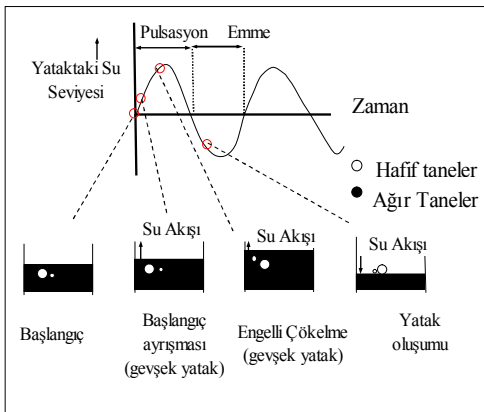


unda jiglerden tahliye düzeneği diğer önemli bir ayrıntı olup, Apic jiglerinde batanlar ve ara ürünler için yumuşak ve keskin ayırma sağlayan tahliye kapı sistemleri ve tasarımları geliştirilmiştir. Ayrımın karışmaması ve kaliteli bir ayırım için tahliye noktaları otomasyon ile donatılmış olup, istenilen yoğunluk ve/veya yoğunluk ara yüzeylerinde her mineral/cevhere göre farklı tahliye ve kapı sistemleri uygulanarak optimum verim sağlanabilmektedir.

Jiglemede ki en önemli parametreler ise;

- Pulsasyonun (nabızın) şekli
- Pulsasyon genliği,
- Pulsasyon frekansı
- Zaman periyodu olarak sıralanır

Pulsasyonun keskinliği -netliği- ise başlangıçtaki su sütununun ivmelenmesi ve sinuzoidal şekilden sapması şeklinde algılanabilir. Modern jigleri mekanik jiglerden farklı kılan bu önemli özellik Şekil 4’de basitçe temsil edilmiştir. Mekanik jiglerde sabit bir dalga boyu ve frekans söz konusu iken, modern jiglerde pulsasyonlar zamanın bir fonksiyonu olarak ayarlanabilen karakterdedir. Pulsasyon şekli ve pulsasyon süresince geçen zaman periyodu jiglemeye önemli etkisi olan diğer parametrelerdir. “Zaman periyodu” mineralin jig yatağı içerisinde askıda kalma, alıkonma süresidir.



Şekil 4. Pulsasyon keskinliği

Optimum bir tabakalanma kalınlığı için pulsasyon teşkil edildiğinde, ayrıca jig

içerisinde kalma süresi de teşkil edilmelidir (jigin genişliği, derinliği ve uzunluğu da hesaba katılarak). Özellikle tabakalanması zor olan ince ve/veya yakın yoğunluktaki malzemeler göz önüne alındığında yatak içerisinde tabakalanmalar önemli süre gerektirdiğinden ancak yukarıda ki prensiple çözüm üretilebilmektedir.

Şekil 5. Jig zamanlama periyodu ve evreleri

Pulsasyon şeklinin değişmesi, ayırma miktarını ve ayırma kalitesini etkileyen önemli bir parametre olarak tecrübe edilmiştir. Modern jigler sahip oldukları otomasyon ve hassas ayarlamalar ile bu parametrelerin kontrolüne izin vermektedir.

2.2 Jig Performans Modellemesi

Mekanik Jiglerden modern hidro-pnömatik jiglere geçişte ve jiglerin gelişiminde en önemli aşama; jiglerin çok hassas pulsasyon kontrol sistemi ile donatılarak jig içerisindeki tüm hareketlerinin kontrol ve kumanda edilebildiği JigScan vb. yazılım ve otomasyon sistemlerinin geliştirilmesi olmuştur. Bu maksatla geliştirilen ASTRAD (Advanced Stratification Transport Rate And Diffusion) simülasyon modellemesi öncü uygulamalardan birisidir (A.Jonkers, Mintek).

Astrad, yoğunluk ve tane boyut dağılımına göre bir jig ortamı içerisinde tabakalanma oranını tespit eden ve mükemmel ayırma sağlayan, ampirik değerler ile basitleştirilmiş fiziksel ayırma parametrelerinin beraber çalıştırıldığı pratik bir matematik modelleme olarak oluşturulmuştur. Bu modelleme yığın testleri ve pilot tesisler üzerinde uygulanarak endüstriyel ölçekli tesis tasarımı ve sonuçlarına ulaşma imkânı sağlanmıştır.

Astrad’ın temel özelliklerinden birisi de besleme oranına bağlı olarak jiglemedeki gelişmeleri ve iyileştirmeleri tespit etme yeteneğidir ve en optimum ve ekonomik jigin ve boyutlarının seçimine olanak tanımaktadır. Ayrıca bir cevher yığını üzerinde ulaşılabilecek verim aralıklarını da tayin edebilmektedir.

Modern jiglerin ayırma kabiliyeti başlıca beslemenin kalitesine (yoğunluk, tane boyu), jig pulsasyonuna - akışkan dinamiklerine- ve

jig içinde tanelerin askıda kalma, alıkonma sürelerine bağlıdır ve modelleme bu parametrelere göre çözümler üretmektedir.

Jigscan gibi PLC kontrol sistemleri ile çalışan Yatak-altı hava pulsasyonlu Jigler, milisaniye bazında tüm pulsasyon hareketlerini kontrol ve kumanda edilebilmekte ve tüm operasyon verileri stabilize edilmektedir.

Otomasyon (JigScan) kontrollü modern jigler ile;

- Besleme farklılıkları algılanarak otomatik ayarlama, kontrollü pulsasyon
- Stabilize edilmiş operasyon verileri
- Ürün kalitesi üzerinde hassas kontrol
- Üretim optimizasyonu
- Spesifik ürünlerde daha yüksek verim ve kaliteli ürün alma imkanı
- İnsan hatası-inisiyatifinin minimize edilmesi
- Kullanıcı kolaylığı yeniden ve kolay ayar verilmesi
- Yüksek ve stabil kapasite kullanımı sağlanmaktadır.

- Tek jig içerisinde birden fazla kesme yoğunlukları uygulaması,
- Kompak bir ekipman ile 700 tph varan çok yüksek kapasite elde etme imkanı.
- Kolay durma - kalma, herhangi bir protokole bağlı olmadan aynı ayarlar ile duruş ve kalkış imkânı,
- Şlamsız veya şlamlı geniş bir malzeme aralığında çalışabilme,
- Besleme düzensizliklerine karşın kolay adaptasyon ve otomatik ayarlama,
- Su haricinde başka bir sarf malzemesine gereksinim duymaması, hassas ve rafine su gerektirmemesi,
- Ağır ortama göre daha az aşınma maliyeti
- Düşük bakım ve planlı bakım imkânı

Modern Jiglerin kömürlerde uygulamasına gelince, G.Afrika, Avustralya, Hindistan gibi yerlerde özellikle kömür yıkamalarında bazı ağır ortam ayırıcıları yerlerini yeniden jiglere bırakmaktadır. Bu değişim ise hava pulsasyonlu jiglerin gelişimi ile olmuştur. (A.Jonkers, Batemann). Ağır ortam ayırıcılarına nazaran, sadece hava ve su tüketen, herhangi bir ağır ortam yapıcı malzemesi gerektirmeyen daha düşük operasyon maliyetleri ile çalışabilen (daha düşük kurulu güç gereksinimi) ve düşük bakım maliyetli yüksek kapasiteli sistemlerdir. (Dieudonne.V, 2001).

3 FERRO KROM CURUFLARININ JİG İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

3.1 Ferrokrom Curuflarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

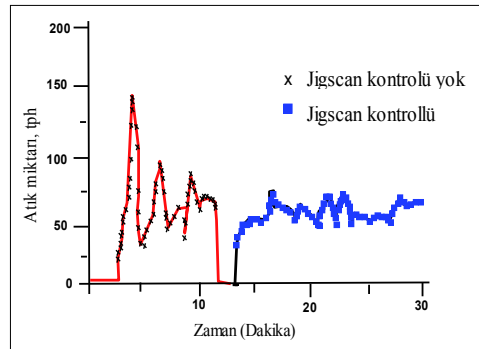
Uzun yıllara sair stoklanmış olan ferrokrom

Şekil 6. Kontrollü pulsasyonun etkisi

Kontrollü ve kontrolsüz pulsasyon arasındaki fark Şekil 6' daki gibidir.

Modern Yatak-altı Hava Pulsasyonlu jigler yukarıda bahsedilen otomasyon/modelleme imkânlarının yanı sıra, diğer mekanik donanımları ile aşağıdaki avantajlara sahiptir;

- Geniş bir tane boyu aralığında kullanım imkânı (>0,5 mm 0-150 mm),



curufları, fırınlarda metal eldesi sırasında

potalarda üst akım olarak eriyik halinde atılan metal dışı minerallerden oluşan yapılardır. Fırınlarda ve Potalarda FeCr metal üretimi ve dökümü esnasında oluşan curuflar yaklaşık 1.600 °C sıcaklıkta sistem dışına alınarak, 1500x1500 mm döküm kalıplarında doğal soğutmaya bırakıldıktan sonra curuf stoklama sahasına alınmaktadır. Geçmişten günümüze FeCr ve FeSiCr üretimine paralel olarak curuf stok sahasında da aynı kimyasal karakterde iki tip curuf oluşturulmuştur. Fabrikanın yıllara sair üretimi ağırlıkla düşük karbonlu ferrokrom (LCFeCr) üzerine olduğundan curuflar da düşük karbonlu pota curufları olarak adlandırılmaktadır. Eti AŞ tarafınca üretilen LCFeCr metaller ile curufların genel kimyasal kompozisyonları Çizelge 2 ve Çizelge 3 'deki gibidir.

Çizelge 2. LC Ferrokrom metallerin genel kimyasal bileşimi

İçerik	FeCr %	FeSiCr %
Cr	68-74	38 min.
Si	1 max.	38 min.
Fe	23-27	17-21
C	< 0,1	0,1 max
Özgül Ağ.	7,16	5,21
Erime Nok °C	1.545	1.495

Çizelge 3. LC Ferrokrom curuflarının genel kimyasal bileşimi

İçerik	%
SiO ₂	40 - 60
Al ₂ O ₃	6,5 - 13
Fe ₂ O ₃	0,3 - 0,7
CaO	3- 40
MgO	12- 16
Cr ₂ O ₃	2 - 4
C	0,05 - 2
S	0,1

LC ferrokrom curuflarının özellikle SiO₂, Al₂O₃ ve MgO bileşenleri curufa oldukça sert, mukavim ve aşındırıcı karakter vermektedir. Bu nedendir ki benzer olarak demir çelik curufları veya HC-yüksek karbonlu- curuflara nazaran oldukça dirençli malzemeler olmaktadır. Bu nedenle geçmişte LC curufların işlenmesi (kırılması veya öğütülmesi) gündeme geldiğinde kırılması

önemli sorun olmuştur. Kırma ve eleme parametreleri açısından, LCFeCr curufları yüksek iş indeksine sahip, $W_i > 24$ ve aşınma indeksi olarak da 0,1 gibi marjinal değerlere sahiptir. Bu nedenle curufların bu proje kapsamında kırılmasında ve boyutlamasında özel kırma-eleme ekipmanları kullanılmıştır.

3.2 Ferrokrom Curuflarının Metal İçeriği

Proje öncesi yapılan curuf stoğu metal içerik analizlerinde curufun yapısı ve metalin curuf içindeki düzensiz dağılımı sebebiyle sondajlama ve benzeri yöntemleri uygulamak mümkün olmadığından, ancak yarma ve örnekleme yöntemi uygulanmıştır. İlâveten metalurjik tesislerin geçmişten günümüze kadar olan hammadde balansları ve üretim değerleri de curuf içindeki metal oranı hakkında kayda değer bilgiler içermektedir.

Uzun yıllar geçmişe sahip curuf stokları, gerek geçmişten gelen farklı üretim ve yönetim alışkanlıkları ve dönemsel sosyo ekonomik değişkenlikler, gerekse curuf haricinde fabrikaların genel bir atık sahası olarak değerlendirilmesi ve geçmiş bilgilere ve kayıtlara her zaman ulaşılmaması nedeni ile metal içerikleri açısından bazı belirsizlikleri de içermektedir. Bu noktada metalurjik üretim madde balansı değerleri ile dünya global uygulamaları da gözönüne alınmaktadır. Eti AŞ curuflarında tahmin edilen % 1-2 civarındaki metal içeriği proje sonunda % 1,1 olarak gerçekleşmiştir ki bu değer fabrika üretim ve hammadde balansı ile uyumaktadır.

4 MRP PROSES VE EVRELERİ

Metal Gerikazanım Projesi (MRP) esas itibarı ile potalarda döküm esnasında curuf ile beraber kaçan veya curuf içerisinde gömülü olarak atığa kaçan FeCr/FeSiCr metalin geri kazanılması işlemidir. Atoll-Apic tarafından geliştirilen ve son yıllarda yaygın kullanıma sahip olan MRP prosesleri ana hatları itibarı ile aşağıdaki evrelerden oluşmaktadır;

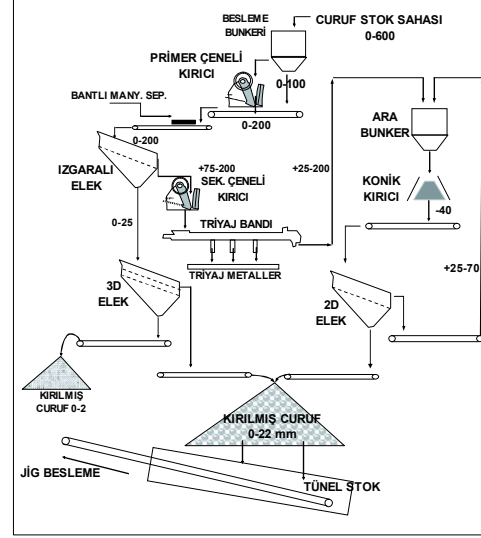
- Madencilik - Kazı

- Kırma Eleme (Pri.- Sek.- Ter. kırma)
- Ön yıkama - yaş eleme ve sınıflama
- Jigleme - Metal Geri Kazanımı
- Manyetik Seperasyon (opsiyonel)
- Susuzlandırma Tikner vb.
- Filtrasyon (opsiyonel)
- Nihai atık değerlendirme

Hiç kuşkusuz ki MRP projelerinin kalbi son 20 yılda büyük gelişme kaydeden, Hidro pnömatik prensiple çalışan, yüksek verim ve kapasite sunan, tam otomasyon kontrollü Yeni Nesil Modern Jig Sistemleridir (Apic-Atoll-Bateman). Mekanik klasik jiglerden tamamen farklı olan Yeni Nesil bu jigler “Yatak-altı Hava Pulsasyonlu Gravite Ayrıcıları” olarak anılmaktadır.

4.1 MRP, Kırma Eleme Devresi

Stok sahasında yıllara sair istiflenmiş curuflar, yüksek puzzolanik (çimentomu) tavrılarından dolayıda oldukça sıkı, sağlam ve aynı zamanda yerinde yoğunluğu yüksek bir yapı oluşturmuştur. Ancak Hidrolik kırıcılar ile sökülebilen curuflar açık işletme basamaklı üretim yöntemi ile istihraç edilip -600 mm'ye getirildikten sonra kırma eleme sistemine beslenmiştir. Atoll tarafından tasarlanan özel yapım Kırma Eleme tesisi akım şeması Şekil 7' de basitçe tariflenmiştir. Kırma Eleme tesisi yerleşim yerlerine yakınlığı ve çevresel koşullar göz önüne alınarak tek vardiyada Jig tesisinin tam gün çalışma kapasitesine (~ 2.000 ton/gün) cevap verecek şekilde tasarlanmıştır. Bu maksatla 500 tph primer besleme ve Jig tesis beslemesi ürünü olan -22 mm boyutunda ise 350 tph kapasiteye ulaşacak şekilde tasarlanmıştır. KE tesis tasarımında önem arz eden önemli bir nokta, -22 mm boyutuna inilirken kırma-eleme devresi en az şlam verecek ve öğünmenin en az miktarda (-1 mm) olacağı şekilde kırıcı seçimleri ve tesis tasarımı uygulanmıştır. Zira öğünmenin fazla olması -1 mm tane boylarında geri kazanılabilir metal kaybına da neden olmaktadır.



Şekil 7. Curuf KE Tesisi Akım Şeması Antalya

Kırma Eleme Tesisinde, curuf stok sahalarının karakteristiği olarak muhtelif başka maddeler de (döküm parçaları, pota atıkları, muhtelif demir çelik imalat atıkları, endüstriyel atıklar vb.) içermesinden dolayı 300 tph kapasitede bantlı manyetik seperator ve iki aşamalı triyaj hattı ile donatılmıştır.

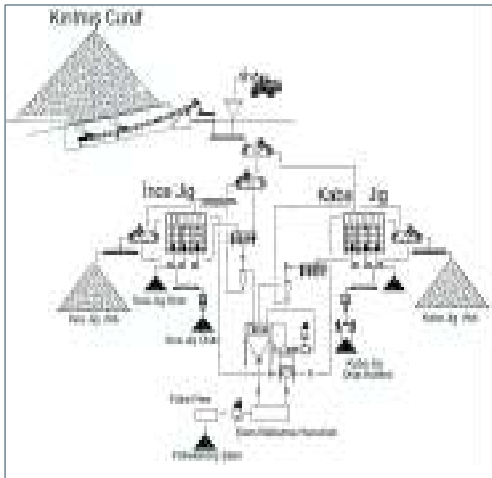
Triyaj hattında az oranda da olsa hem büyük ebatlı metallere > 100-200 mm geri kazanımının ilk safhası olarak elde edilmiş, hem de hurda metallere, dökümlere vb. parçaların kırma eleme sistemini korumak ve sürekliliğini sağlamak için bertaraf edilmiştir.

Triyaj hattı ile elde edilen birincil metallere ise daha sonra parti halinde, yüzey ve bünyesel curuflarından arındırmak için kırılarak nihai ürün haline getirilmiştir (dmax 80 mm). LCFeCr metalinin sertliği ve mukavemeti gözönüne alındığında, toplam geri kazanılmış metalin ancak ~%5'i olan bu safha kaliteli ürün ve sistemin sürekliliğinin korunması açısından oldukça önemli olmuştur.

4.2 MRP, Jig Devresi - Apic Jigleri

Antalya MRP prosesinde curuflardan metal geri kazanımı Yeni Nesil Yatak-altı Hava

Pulsasyonlu Jigler ile yapılmıştır. Projede her biri 50 tph kapasiteli ikiz Jig sistemi kullanılmıştır. -22 mm ye kırılan curuflar 1-6 mm ince jig ve 6-22 mm iri jig beslemesi şeklinde işlenmiştir ve aynı ebatlarda metal ürünleri elde edilmiştir. Jig tesisine ait basit akım şeması Şekil 8 'de temsil edilmiştir.



Şekil 8. Jig Tesisi Akım Şeması -Antalya

4.3 Antalya MRP Ferrokrom Geri Kazanımı

Apic Jigleri ile geri kazanılmış Ferrokrom ürünlerine ait analizler ve alınan ürünlerin boyuta göre dağılımı Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Ferrokrom curuflarından Geri

No	Geri Kazanım Metaller	Üretim %
1	1-6 mm FeCr / FesiCr	42,40%
2	6-25 mm FeCr / FesiCr	52,70%
3	2-80 mm FeCr	1,52%
4	2-80 mm FeSiCr	2,20%
5	Hurda Metal	1,18%

kazanım metallerin ürün bazında dağılımı

Antalya MRP projesi ikiz jig sistemi ile, iri jig 6-25 mm, ince jig ise 0-6 mm besleme gradasyonları şeklinde çalıştırılmıştır. Jiglerden de aynı ebatlarda ürün alınmıştır. Jiglerin gerikazanım performanslarında sistemin doğal ürünü olarak her iki jigde de ara ürünler (middlings) alınmıştır. Ara ürünün miktarı isteğe bağlı ve kalite talebine göre ayarlanabilmektedir. Genel ortalama olarak toplam beslemenin %8-10'u civarında jiglerden ara ürün alınarak bu ara ürünler jig sistemine yeniden beslenmiş ve toplam kazanım verimi artırılmıştır. Özellikle iri jig besleme ürününde kontak halde bulunan curuf-metal yapısındaki taneler, serbestleşme için tekrar konik kırıcıdan geçirilerek ara ürün oranı minimize edilmiştir. Geri kazanılmış metallerde jig sonrası curuf oranı ise hassas üretim ve kalite kontrolü ile <%1 seviyelerinde tutulmuştur ki bu değer uluslararası piyasalarda kabul edilir değer olarak işlem görmektedir.

Gerikazanım metaller jig sonrasında kendi aralarında metalurji endüstrisi taleplerine göre Cr ve Si içeriklerine göre iki katlı kuru manyetik seperator ile FeCr ve FeSiCr şeklinde ayırma tabi tutularak nihai ürün sınıflaması yapılmıştır. Manyetik ayırma esnasında jigleme sonucu gravite ile kazanılan hurda metal, fabrika imalat atığı metaller gibi safsızlıklarda nihai ürünlerden ayrılarak kalite artırılmıştır. Şekil 9 'da jig ile kazanılmış örnek metal ürünü görülmektedir.



Şekil 9. Jig ile geri kazanılmış FeCr

Geri kazanım metallerin kimyasal bileşimleri ve kalite spekleri ise Çizelge 5’ de tariflenmiştir ve bu ürünler doğrudan satılabilir ürün özelliklerine sahip ürünler olarak ağırlıkla ihraç edilmiştir.

Çizelge 5. Geri kazanım LC Ferrokrom metal spekleri

No	Gerikazanım FeCr 25 mm	% Dağılım- üretim	% Cr	% Fe	% C	% Si
1	Chu-1	25,6%	57-62	22-26	0,6 -1,20	5-8
2	Chu-234	14,2%	58-65	18-20	0,5- 0,10	6-10
3	Chu-5	45,7%	51-53	16-20	0,3 - 0,5	21-28
4	Mixed	13,3%	52-55	20-22	0,3 - 0,8	21-24
5	Hurda Metal (Fe)	1,23%				

No	Gerikazanım FeCr 1-6 mm	% Dağılım- üretim	% Cr	% Fe	% C	% Si
1	Chu-1	17,0%	51-54	24-30	0,7 - 1,40	4-7
2	Chu-234	14,3%	51-55	17-20	0,5 -0,9	6-9
3	Chu-5	68,7%	42-47	18-28	0,3 - 1,0	20-30
4	Mixed	-	46-49	16-18	0,5 -0,9	18-21
5	Hurda Metal (Fe)	0,00%				

No	Gerikazanım FeCr 20-80 mm	% Dağılım- üretim	% Cr	% Fe	% C	% Si
1	FeCr	40,90	68 -72	23-27	0,1 -0,2	0,5 -2
2	FeSiCr	59,10	57-62	27-33	0,1 -0,2	5-10

Antalya MRP projesi 7/24 çalışabilecek şekilde tasarlanmış olup, planlanan şekilde de çalışmıştır. Her biri 50 tph kapasiteye sahip olan jigler teorik kapasitelerinin min %85’ine ulaşarak yüksek çalışma veriminde işletilmiş olup, proje süresince aylık genel üretim ortalaması 45.000 ton olarak gerçekleşmiştir.

4.4 Antalya MRP Projesi Uygulama Zorlukları

MRP Projesinin kurulumu, devreye alınması ve işletimi esnasında bir takım zorluklarla karşılaşmıştır. Bunlar,

4.4.1 Çevresel Etkiler

Antalya MRP projesi bir madencilik ve cevher hazırlama projesi olmakla beraber tamamıyla şehir içinde ve yerleşim yerlerine çok yakın mesafede kurulan –kurulması gereken- karakterde proje sınıfı taşımıştır. Sadece ekipman ve tesislerin yerleşkesi için gerekli alanın 20 dönüm civarında olması, curuf kazı alanı, işlenmiş curuf stokları vb. yerleşkeler gözönüne alındığında toplam çalışma alanının 70 dönümlere ve curuf stoğunun yer yer 32 m ye varan yüksekliklere ulaşmış olması kritik çevresel önlemleri gerektirmiştir.

Projenin ekonomikliği açısından curuf stoklarının yerinde işlenmesi haricinde alternatif bulunmamaktaydı. Bu maksatla projenin başlangıcında çevresel etkileri minimuma indiren tüm tedbirler alınmış ve uygulanmıştır. Curufların bilhassa uzun yıllar çevre şikâyeti oluşturması gerek çevre halkı ve gerekse çeşitli idareler nezdinde önemle takip edilen ve çözüm aranan kronik bir sorun yaratmaktaydı. Bu maksatla tüm yetkili idari ve kontrol makamlarına projenin tüm detayları ve uygulamaları hakkında ayrıntılı bilgi verilerek taahhütlerde bulunulmuş ve tamamıyla kapalı devre olacak şekilde proje işletmeye alınmıştır. Bu bağlamda başlıca alınan çevresel önlemler;

- Yerleşim yerlerine çok yakın olması nedeniyle (~ 25-50 m) dolayı tüm tesis ve ekipmanlar üzerinde, özellikle açık havada

gürültüyü elimine edecek şekilde özel ses izolasyonu yapılmıştır. Bu maksatla özellikle yüksek kapasiteli kırma eleme sistemini izole etmek için yer yer 10 m yüksekliklere varan, hareketi kısıtlamayan ses izolasyonları ile münferit makina izolasyonları yapılmış ve 25 m mesafelerde gürültü miktarları 65 desibele kadar düşürülmüştür.

- Gerek üretim/tesis ortamında gerekse tüm çalışma alanlarında yaygın ve efektif dahili ve harici sisleme kullanılarak ortamda oluşan toz emisyonları dünya standartların 1/3 oranına kadar düşürülmüştür.
- Jig sisteminin yüksek miktarda su gereksinimi nedeni ile tüm tesis deşarj suları ve şlam atıkları beton havuz, tikiner, filtrepres, susuzlandırma elekleri, geri dönüş suyu kullanımı kombinasyonları ile kapalı devre içinde tutulmuş ve bertaraf edilmiştir ki yer darlığı nedeni ile tüm bu işlemler sadece 6 m servis yolu ile sınırlandırılan ve sadece 180 m³ atık havuzu yapılabilen işletme alanı içinde çözülmüştür.

4.4.2 Cüruf Yapısının Üretime Olumsuz Etkileri

Düşük karbonlu curufların çok iyi bir puzzolan bağlayıcı olmaları ve jig sisteminin de yaş proses olması nedeniyle, kısa sürede betonlaşan prizleşen curufların mukavemetli katı yapılar oluşturması, prosesin bir çok noktasında tıkanma ve operasyon zorluklarına neden olmuştur. Özellikle tüm malzeme akış ve transfer noktalarında, boru, pompa gibi hidrolik transfer hatlarında, yaş eleme mekanizmalarında, mekanik sistemlerin tahrik ünitelerinde, elektrik motorlarında, konveyör transfer hatlarında ve mekanik yapılarında iklim şartlarının da nemli olması nedeni ile kısa sürelerde betonlaşma derecesinde katılaşmalara ve tıkanmalara neden olmuştur. Bu sorunlara çözüm ise istikrarlı ve planlı periyodik bakımlar uygulanarak olumsuz etkiler minimuma indirilmiştir.

LC curufun diğer önemli bir yan etkisi ise son derece aşındırıcı karakterde olmasıdır. Proses evrelerinde curufla beraber LC ferrokrom metal tanelerinin (Şekil 9) kuru ve yaş sistemler içinde sürekli devinim halinde

olması aşınmaları max düzeye taşımıştır. Aşınmaları en aza indirmek için ise her noktaya ayrı ayrı spesifik olarak çözümler geliştirilmiştir. Bu çözümlerden bazıları, sulu sıyırıcılar, tungsten sıyırıcılar, yüksek basınçlı temizlik, bantlı aktarma ve besleme sistemleri ile spesifik kauçuk-astarlama ve aşınma malz. kullanımı, ferrokromdan yapılmış yine özel astarlama ve alaşım astar uygulamaları olarak sıralanabilir.

4.4.3 İşlenmiş Cürufların -Atıkların- Yeniden Değerlendirilmesi

Metal geri kazanımı sonrasında oluşan işlenmiş curuf atıkları, atık olarak isimlendirilmekle beraber sınıflanmış, kalibre edilmiş, yıkanmış agrega sıfatında ve en az muadilleri kadar kaliteli olan yapı malzemesine dönüştürülmüştür. Dolayısı ile birçok farklı sektörde tüketime sunulmuş ve kolaylıkla kullanım alanı bulmuştur. Curufların puzzolanik yapıları burada avantaj yaratmış olup, özellikle hazır beton gibi, çimento karışımı ürünlerde bilhassa tercih edilen ürün olmuştur. Curufların bir kaç defa yüksek basınçla çok iyi yıkanmış ürün olması ve tane boylarının da yaygın agrega standartlarına uygun olması tüketimi kolaylaştıran diğer olumlu parametrelerdir.

İşlenmiş curuf atıkları bir çok alt yapı, üst yapı, hazır beton, hazır sıva, yol yapımı, temel mekanik malzemesi, raylı sistem hatları, genel dolgu malz. vb. amaçlarla, gerek kamu, gerekse bir çok özel projede tüketilmiş ve en kapsamlı örnek olarak ise Antalya havalimanı dış hatlar apron yapımında bilhassa avantajlı mekanik özellikleri nedeni ile tercih edilen ve ciddi miktarda tüketilen bir ürün olarak kullanılmıştır. Proje sonunda ise tüm işlenmiş curuflar %100 geri dönüş sağlanarak metal harici mineral dolgu ve agrega formunda ekonomiye geri kazandırılmıştır. Zenginleştirilmiş pota curuflarının agrega vb. formlarda dünyada yaygın uygulamaları sözkonusu olup, özellikle bazı imar uygulamalarında bilhassa tercih edildikleri projeler de sözkonusudur (nükleer santral temelleri, yarış pistleri, baraj gövdeleri,

çimento katkı hammaddesi gibi) (National Slag Association, TS curufllu çimentolar

5 SONUÇ

Antalya Metal Geri Kazanım Prosesi ve Modern Jig uygulaması gerek cevher zenginleştirme, gerekse maden/metalurji atıklarının kapsamlı değerlendirilmesi açısından oldukça önemli ve öncü bir uygulama olarak başarı ile tamamlanmış bir projedir. Projede bahse konu modern jiglerin gravite ile zenginleşebilecek bazı metalik cevherler ile kömür ve endüstriyel hammadde zenginleştirmelerinde yüksek kapasiteli ve verimli uygulamalara ışık tutacağı ve örnek teşkil edeceği aşikârdır. Proje bir yandan da maden atıklarının kapsamlı bir proje dahilinde zenginleştirilmesi ve ülke ekonomisine kazandırılmasında öncü bir uygulama olmuştur.

KAYNAKLAR

- Atoll Engineering Applications Apic Jig Underbed Air-Pulsed Gravity Separator, www.atoll.co.za
- Atoll Engineering Applications Bateman Apic Jigs Process Coal in India, 2006
- Atoll Engineering Applications, Rising Demand for Bateman- APIC Jigs, www.atoll.co.za
- Atoll Engineering Applications, The APIC Jig Now Fitted with Jigscan, www.atoll.co.za
- Bateman Globe, No 31, February 2003, Large Capacity APIC Jig Commissioned, South Africa
- Dr Barcza, N, Guest, R, Dr Scott, P, 2003, Test Through The Canon Plant-Report, *Atoll Engineering Applications* www.atoll.co.za
- Dieudonne, V, Jonkers, A, Loveday, G, 2006, An Approach to confidently predicting jigging performance, *The Journal of The Southern African Institution Mining and Metallurgy*
- Dieudonne, V, 2001, Jigging the South-African Coals- A New Challenge
- Dr. Scott P., 2008, Techno Economics of Recovering Ferro Alloys from Dust and Slag, *Atoll Engineering Applications*
- Das, B, 2007, Effective Beneficiation Low Grade Iron Ore Through Jigging Operation, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 7, No1*
- Global Slag Magazine, *Periodicals, UK*
- Jonkers, A, A Modern Marvel, 2008, *Atoll Engineering Applications*
- National Slag Association, *Periodicals, USA*

TS EN 450 Uçucu Kül ve Curuf Satndartları, *TSE Yayınları*

Yang, C.D, VanReenan, R, Bhimsan, V, 2003, Separation of Metal from a Slag Using a Multi-cell-Jig, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol 2, No2, (ör. s.137-144)*

Advanced Sensor Based Sorting System for Mining Applications

J. Kolacz

Comex AS, Rud, Norway

ABSTRACT A new sensor based sorting system related to complex image analysis has been developed at Comex AS - Norway. It makes it possible to separate different mineral particles regarding their colour, shape, texture, size, density and indirectly their composition. The sorting system has been successfully tested and applied for sorting minerals providing high separation efficiency in the range of 95-99.9 %. The main advantage of this system is connected with its universality where many material parameters are analysed in the same processing unit by a single passage.

1 INTRODUCTION

Sensor based sorting systems available on the market today are not flexible enough to be applied in very different conditions without complicated reprogramming and mechanical reconstruction. Typical limitations for this type of technology are: a) inability to process small and large particles at the same time, b) limited analysis complexity, where the analysis is very often based on simple basic colour differences, c) inaccurate rejection due to particle trajectory variations and particle rotation. The newly developed sorting system from Comex eliminates the mentioned limitations and in addition, it makes it possible to separate different particles by sophisticated image processing. The analysing system includes an optical camera and the X-ray attenuation imaging in the same equipment. The sorting system can be used with both optical and XRT analysis or separately depending on an application.

2 COMPLEX ANALYSIS

The main advantage of the new system is related to its universality and at the same time very sophisticated image processing functions, which can be carried out in the same processing unit. Figure 1 shows the new system configuration, where many different analysed parameters can be used to provide particle separation. The image analysis system includes a camera installed either over the transport belt conveyor or at its discharge end. The system includes the X-ray attenuation analysis realized by the XRT system in the central part of the conveyor belt. The sorting system can be used with both optical and XRT analysis or separately depending on an application. Particle recognition used to separate different materials is based on a complex shape and colour analysis where the particles can also be identified by over 20 parameters used for shape description. Some of them are: diameter in different orientations, perimeter, centre of mass, moment of inertia, particle elongation factor, edge sharpness, etc. Additional combinations of these parameters can also be used for distinguishing particles of interest. The

surface of particles where different colours or contours vary in intensity and frequency can be analysed by FFT filtration (Fast Fourier Transformation) to recognize differences in texture and structure of the processed particles. This analysis brings much more complex information about the analysed particles rather than colour recognition alone. Finally, the XRT picture is integrated into the optical analysis, which provides a lot more information about the particle surface properties and its internal structure. All these sophisticated analysing functions require a lot of computation power and they have to be optimized to allow high capacity sorting. This is done by special program architecture and algorithm solutions allowing efficient management of the calculation routines and sorting priorities. This allows achieving still high separation capacity and extremely high efficiency where the product purity can reach even 99.9 %.

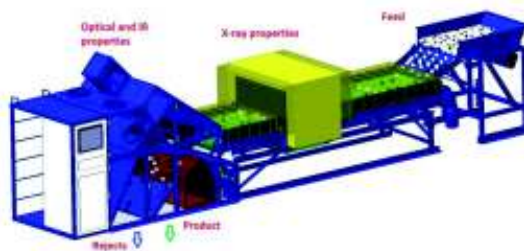


Figure 1. Sensor based sorting system from Comex – configuration example with the X-ray (XRT) analysis carried out over the transport belt and the optical properties at the discharge.

Figure 2 illustrates some examples of image processing where darker and coloured particles are defined and separated as waste from the white quartz material. In this case the separated particles are identified on the base of their colour, shape and texture. The picture shows four cases of different material combinations used during system tuning.

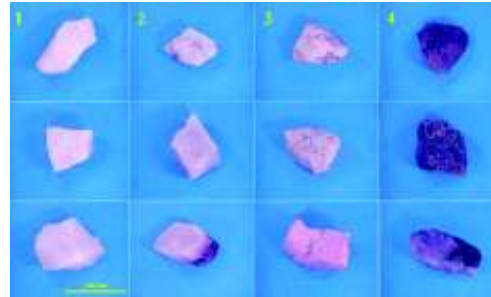


Figure 2. Identification and separation examples during purification of the white quartz particles. Section 1 and 2 illustrate the advanced texture analysis while section 3 and 4 show the typical colour analysis.

The first group of particles represents the clear product fraction without any contamination. The second group shows the product particles contaminated by the small intrusions of other minerals. The third group represents the particles contaminated by different colours and in different degree. Finally, the fourth group shows the particles having totally different colour. In the case of the first and the fourth group the separation is very clear, however in the case of the second and third group it is necessary to carry out texture analysis. In this case the particle contours are defined and the texture information is analysed in the software. Furthermore, the percentage of the “contaminated surface” is divided by the total projected particle surface to define if the analysed particle can be qualified as waste. The threshold can be adjusted by the user so the contamination level for the accepted material can be changed according to individual requirements. The combination of waste and product particles is then repeated for other particles being representative for the rest of the processed material. Furthermore, the software routines are defined for each combination to optimize processing time, since the clear colour differences do not need much processing time while particles with texture analysis require longer calculation procedures. Eventually, the algorithm is ready tuned for separation of the investigated material.

Some of the results from the practical applications are shown in Table 1, where the OSX sorting system has been used for purification of limestone with texture analysis algorithm. The initial material had a purity of 81.5 % of white particles and it has been defined as low quality filler. After sorting, the product material has been improved to 99.8 % of white particles and the waste fraction contained only 5.6 % of the white particles.

Table 1. Sorting results during purification of the limestone fraction in the size range 4-10 mm.

Parameter	Unit	Results
Feed material purity	%	81.5
Product fraction purity	%	99.8
Waste fraction purity	%	5.6
Product recovery	%	98.7
Waste recovery	%	99.0

Considering the recovery figures, it can be noticed that the product white particles were recovered to the concentrate fraction in 98.7 % and the contaminating particles were recovered to the waste fraction in 99%. This is the example of almost ideal separation process.

3 XRT ANALYSIS

X-ray transmission analysis (XRT) provides a new powerful tool for complex particle description. Separation examples are given on Figures 3 and 4, where XRT system is employed to separate coal and tungsten ore. In this case, the valuable information about the internal particle structure is of critical importance to calculate ratio between the impurities and the material of interests. For coal separation, the exact percentage of the rock contamination (shown by green and blue colour) can be calculated and each coal particle (orange) and can further be defined as waste or product for the separation process. For the tungsten ore, each particle can be evaluated in terms of tungsten

compound content shown by black colour against the regular rock material (green).

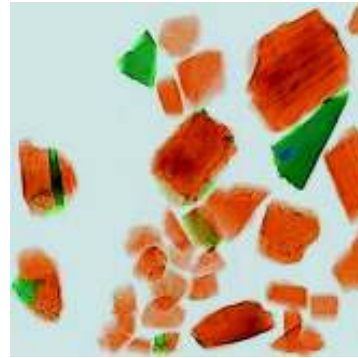


Figure 3. Separation of coal using XRT analysis. Green and blue areas show contaminating rock particles.

This information from the XRT system can easily be combined with the image processing employing texture analysis to recognize other objects contaminating our valuable materials. Separation of coal from rock impurities, metal pieces and wood particles can be an example of such advanced separation.



Figure 4. Separation of tungsten ore using XRT analysis. Black areas represent tungsten compounds.

Table 2 shows some of the results obtained during separation of iron ore, where the X-

ray based sorting system (CXR) has been used. The initial material had 58.8 % of Fe and it has been defined as good quality iron ore. However, this material could not be sent to the metallurgical process without pre-processing like crushing, grinding, gravity and magnetic separation etc, since the limit for metallurgical quality is defined as 63-64% of Fe. After sorting in the CXR unit in two stages, the product material has been improved to 63.6 % of Fe and it could be directly used for iron production without complicated processing. Regarding the weight distribution, this concentrate fraction corresponded to about 78 % of the material. It means that 78 % of the ore did not require complicated and costly processing before being sent to the ironworks. Only a small part of it (about 12%) required typical mineral processing and about 9.5% could be either processed in the same way or be completely wasted since it represented quite low quality material. The process provided dramatic efficiency increase regarding the processing cost and overall energy consumption for iron making.

Table 2. Sorting results during purification of the iron ore fraction in the size range 40-100 mm.

Fraction	Weight distribution [%]	Concentration of Fe [%]
Feed material	100.0	58.8
Product fraction	78.3	63.6
Middle fraction	12.2	49.8
Waste fraction	9.5	30.1

4 ADDITIONAL ALGORITHMS

Areas of particles where different colours are varying in intensity and frequency can be analysed by FFT filtration (Fast Fourier Transformation) to recognize differences in texture and structure of the processed

particles. This analysis brings much more complex information about the analysed particles rather than colour recognition alone. Finally, the XRT picture is integrated into the optical analysis, which provides a lot more information about the particle surface properties and its internal structure. All these sophisticated analysing functions require a lot of computation power and they have to be optimized to allow high capacity sorting. This is done by special program architecture and algorithm solutions allowing efficient management of the calculation routines and sorting priorities. Images which are exposed to digitisation can be further processed by a variety of electronic filters which can provide very advanced processing. Normally the digitised image is processed by analysing each pixel and setting up a number of thresholds for the light intensity in different colour planes. This method, however, provides a limited particle structure analysis when a particle has uneven lighting or has an irregular form with many surfaces positioned at different angles. This provides reflections which further disturb the important information. This problem can be solved when the frequency filtration is applied.

Frequency filters alter pixel values with respect to the periodicity and spatial distribution of the variations in light intensity in the image. Frequency representation is obtained through a function called the Fast Fourier transform (FFT). The spatial frequencies seen in an FFT image can be filtered (low pass or high pass filter) and the inverse FFT then restores a spatial representation of the filtered FFT image as shown on Figure 5.

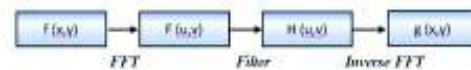


Figure 5. Illustration of the FFT filtration.

The $f(x,y)$ is the light intensity of the point (x,y) and (u,v) are the horizontal and vertical

spatial frequencies. The FFT transformation is defined as (j is a constant):

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) e^{-j2\pi(xu + yv)} dx dy$$

Inversely, a Fast Fourier Transform $F(u,v)$ can be transformed back into a spatial image $f(x,y)$ as shown below (N and M define an image resolution):

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{M-1} F(u,v) e^{-j2\pi(ux/N + vy/M)}$$

The FFT of an image $F(u,v)$, is a two-dimensional array of complex numbers, or a complex image. It represents the frequencies of occurrence of light-intensity variations in the spatial domain. The low frequencies (u,v) correspond to smooth and gradual intensity variations found in the overall patterns of the source image. The high frequencies (u,v) correspond to short-intensity variations found at the edges of objects, around noisy pixels and around details. This allows eliminating of noisy pixels from the image and distinguishing the important details.

The FFT transformation based filter, however, has a significant limitation related to the computation power of the image analysis system. It is therefore necessary to optimise the processing steps to obtain a reasonable response time. It is mainly to balance between the image resolution and FFT filtration, which does not need to be applied to high resolution images. Another optimisation method can be related to application of ROI (region of interests), where only parts of an image are processed by the advanced filtration tools. Anyhow, this type of image filtration based on FFT, provides a new dimension in the separation techniques.

5 MULTIPLE STAGE SORTING

General sensor based separation techniques are used in single operating stages. It means the separator is often used as an important part of the system and the process is carried out in a single stage. In many cases it is not economical and brings a lot of confusion about optical sorting generally. The result is often not satisfactory when compared to the operating and investment cost. This problem can be solved by a multiple stage separation procedure. Looking at other separation techniques like flotation, gravity separation, magnetic separation, it can be noticed that many of them are applied in multiple stage configuration thus providing a satisfactory result.

Sensor based separation is based on different scanning techniques, which very often perform a single “check” by which a particle is qualified as a waste or a product. It is therefore very probable that some of the scanned particles can accidentally be analysed in a wrong way and consequently be separated to a wrong fraction. Multiple separations can solve this problem when there is an extremely small chance that such particle is separated to a wrong fraction in two or three separation stages. The example of the multiple stage separation is shown on Figure 6 where the quartz material has been processed. The feed material contained 65% of the quartz and 35% of different impurities in form of various minerals. The first separation stage was adjusted to very strict separation criteria (high sensitivity threshold) to remove maximum of the impurities from the quartz fraction. The product had a purity of 99.8% which represented a very good result. However, there was a lot of quartz particles also removed from the feed material as the waste because some of the “good” quartz particles were analysed as impurities.

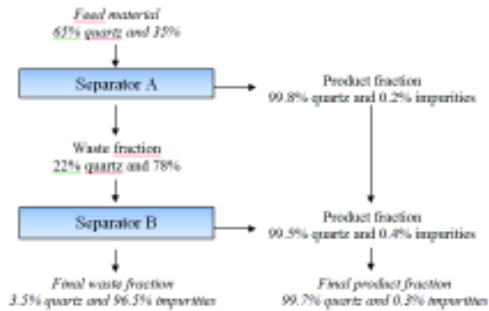


Figure 6. Example of sorting of quartz in multiple stage configuration.

The waste fraction still contained 22% of the quartz particles. In such cases, due to different light reflection conditions or inter-particle collisions, some quartz particles could be detected as the waste fraction. However, it is an extremely low probability that these particles can be analysed in a wrong way twice. Therefore when the second purification separation stage was applied to the waste fraction a lot of quartz particles were recovered back to the main product fraction. It resulted in very improved and robust separation process with limited losses of quartz particles. The final waste fraction contained only 3.5 % of quartz particles.

The similar separation configuration can be applied for the product fraction to provide further purification of the “clean” fraction, depending on the final purpose and process requirement. Finally, if necessary both fractions from the first separation stage can be processed by the next separators providing very high separation efficiency, high purity and high recovery. In any separation technique employing multiple stages, the cost of the separation equipment will play a decisive role for any process. It is therefore of critical importance that the separation equipment is not cost prohibitive. Optical separation equipment provided by Comex fulfils this main cost requirement for multiple stage separation keeping the total cost at a competitive level. The recent development and progress in microelectronics provided quite a number of

new possible solutions within automation and separation techniques. It is especially important in the light of criticism in the last years related to too high cost of the discussed equipment and this its limited potential. The total investment and operating cost of the discussed Comex equipment ranges between **USD 0.1-0.5 per ton** of the processed material depending on the particle size and working environment (optical or X-ray). It easily provides possibilities for multiple stage separation during processing of most of minerals.

6 CONCLUSION

Advanced sensor-based sorting provides new potential for continuous separation of particles having different size, colour, shape, texture and density. Application areas for such equipment are almost unlimited (minerals separation, recycling of metals, plastics, paper, rubber, wood etc.). It can be applied to the mineral industry in many different processing steps. Very significant savings are achievable when the separated material, representing rejects, can be removed from the process in the early stage. By shape, colour and XRT density analysis the material composition can be estimated indirectly. This may result in new possibilities for optimising the existing circuits and for making new installations more profitable.

7 REFERENCES

- Kolacz, J, 2008. High definition image analysis and its potential in mineral processing, International Mineral Processing Congress, Beijing, China
- Kolacz, J, Chmelar, J, 2001. Separation of metals. SINTEF report-Confidential.
- Kolacz, J, 2001. Separation of aluminium particles using X-ray systems and thermal cameras, SINTEF report-Confidential.
- Wortuba, H, Jungst, W, 2000. Optoelectronic Separation Process for the Sand and Gravel Industry, *Aufbereitungs Technik*, 41-2000, pp 71-79.

Triboelectric Belt Separator for Beneficiation of Fine Minerals

J. D. Bittner, S. A. Gasiorowski, F. J. Hrach,
Separation Technologies, LLC, Needham, Massachusetts USA

L. A. Canellopoulos, H. Guicherd
Separation Technologies, LLC, Athens, Greece

ABSTRACT Separation Technologies, LLC (ST) has developed a processing system based on triboelectric charging and electrostatic separation that provides the mineral processing industry a means to beneficiate fine materials with an entirely dry technology. Unlike other available electrostatic separation processes that are typically limited to particles greater than 75 μm in size, the ST belt separator is ideally suited for separation of very fine (<1 μm) to moderately coarse (300 μm) materials with very high throughputs. The highly efficient process is effective on fine materials that cannot be separated at all by the conventional electrostatic techniques. Since 1995, this triboelectric process has been extensively used for the beneficiation of coal fly ash with eighteen separators in place and over 130 machine-years of operation at locations in North America and Europe. The technology has been also successfully applied to the beneficiation of a variety of minerals including calcium carbonates, talc, and potash.

1 TECHNOLOGY OVERVIEW

The ST separator utilizes electrical charge differences between materials produced by surface contact or triboelectric charging. When two materials are in contact, material with a higher affinity for electrons gains electrons and thus charges negative, while material with lower electron affinity charges positive. This contact exchange of charge is universally observed for all materials, at times causing electrostatic nuisances that are a problem in some industries. Electron affinity is dependent on the chemical composition of the particle surface and will result in substantial differential charging of materials in a mixture of discrete particles of different composition.

In the ST separator (Figures 1 and 2), material is fed into the thin gap 0.9 – 1.5 cm (0.35 -0.6 in.) between two parallel planar electrodes. The particles are

triboelectrically charged by interparticle contact. For example, in the case of coal combustion fly ash, a mixture of carbon particles and mineral particles, the positively charged carbon and the negatively charged mineral are attracted to opposite electrodes. The particles are then swept up by a continuous moving open-mesh belt and conveyed in opposite directions. The belt moves the particles adjacent to each electrode toward opposite ends of the separator. The electric field need only move the particles a tiny fraction of a centimeter to move a particle from a left-moving to a right-moving stream. The counter current flow of the separating particles and continual triboelectric charging by carbon-mineral collisions provides for a multistage separation and results in excellent purity and recovery in a single-pass unit. The high belt speed also enables very high throughputs, up to 40 tonnes per hour on a single separator. By controlling various

process parameters, such as belt speed, feed point, electrode gap and feed rate, the ST process produces low carbon fly ash at carbon contents of 2 % \pm 0.5% from feed fly ashes ranging in carbon from 4% to over 30%.

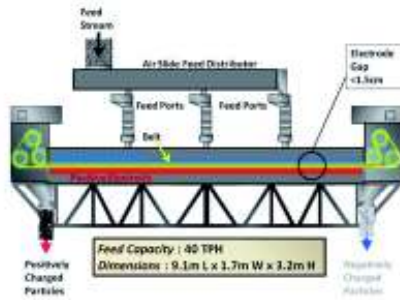


Figure 1. Schematic of ST triboelectric separator

The separator design is relatively simple. The belt and associated rollers are the only moving parts. The electrodes are stationary and composed of an appropriately durable material. The belt is made of plastic material. The separator electrode length is approximately 6 meter ft (20 ft.) and the width 1.25 meter (4 ft.) for full size commercial units. The power consumption is about 1 kilowatt-hour per tonnes of material processed with most of the power consumed by two motors driving the belt.



Figure 2. Detail of separation zone

The process is entirely dry, requires no additional materials and produces no waste water or air emissions. In the case

of carbon from fly ash separations, the recovered materials consist of fly ash reduced in carbon content to levels suitable for use as a pozzolanic admixture in concrete, and a high carbon fraction which can be burned at the electricity generating plant. Utilization of both product streams provides a 100% solution to fly ash disposal problems.

The ST separator is relatively compact. A machine designed to process 40 tonnes per hour is approximately 9.1 meter (30 ft) long, 1.7 meter (5.5 ft.) wide and 3.2 meter (10.5 ft.) high. The required balance of plant consists of systems to convey dry material to and from the separator. The compactness of the system allows for flexibility in installation designs.



Figure 3. Commercial ST separator

2 ST BELT SEPARATOR VERSUS OTHER ELECTROSTATIC SEPARATION PROCESSES

The ST separation technology greatly expands the range of materials that can be beneficiated by electrostatic processes. The most commonly used electrostatic processes rely on differences in the electrical conductivity of the materials to be separated. In these processes, the material must contact a grounded drum or plate typically after the material particles are negatively charged by an ionizing corona discharge. Conductive materials

will lose their charge quickly and be thrown from the drum. The non-conductive material continues to be attracted to the drum since the charge will dissipate more slowly and will fall or be brushed from the drum after separation from the conducting material. These processes are limited in capacity due to the required contact of every particle to the drum or plate. The effectiveness of these contact charging processes are also limited to particles of about 100 μm or greater in size due to both the need to contact the grounded plate and the required particle flow dynamics. Particles of different sizes will also have different flow dynamics due to inertial effects and will result in degraded separation. The following diagram (Figure 4) illustrates the fundamental features of this type of separator.

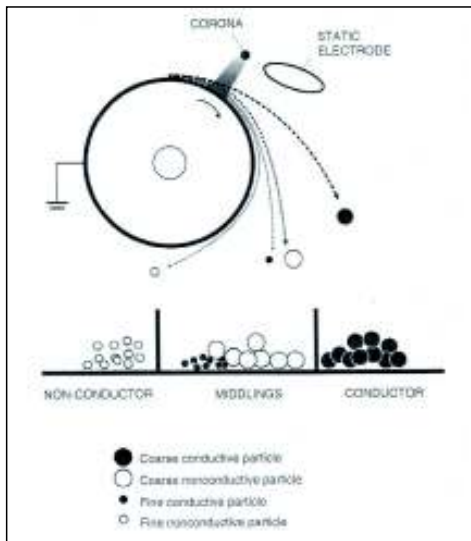


Figure 4. Drum electrostatic separator (Elder & Yan, 2003)

Triboelectrostatic separations are not limited to separation of conductive / non-conductive materials but depend on the well-known phenomenon of charge transfer by frictional contact of materials

with dissimilar surface chemistry. This phenomenon has been used in “free fall” separation processes for decades. Such a process is illustrated in Figure 5. Components of a mixture of particles first develop different charges by contact either with a metal surface, or by particle to particle contact in a fluidized bed feeding device. As the particles fall through the electric field in the electrode zone, each particle’s trajectory is deflected toward the electrode of opposite charge. After a certain distance, collection bins are employed to separate the streams. Typical installations require multiple separator stages with recycle of a middling fraction. Some devices use a steady stream of gas to assist the conveying of the particles through the electrode zone.

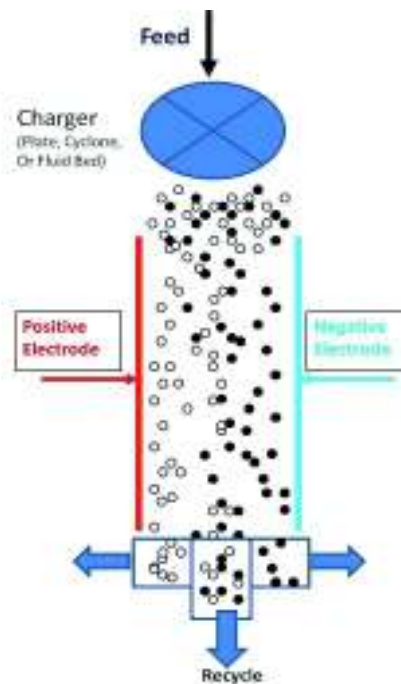


Figure 5. “Free fall” triboelectrostatic separator

This type of free fall separator also has limitations in the particle size of the

material that can be processed. The flow within the electrode zone must be controlled to minimize turbulence to avoid “smearing” of the separation. The trajectory of fine particles are more effected by turbulence since the aerodynamic drag forces on fine particles are much larger than the gravitational and electrostatic forces. The very fine particles will also tend to collect on the electrode surfaces and must be removed by some method. Particles of less than 75 μm cannot be effectively separated.

Another limitation is that the particle loading within the electrode zone must be low to prevent space charge effects, which limit the processing rate. Passing material through the electrode zone inherently results in a single-stage separation, since there is no possibility for re-charging of particles. Therefore, multi-stage systems are required for improving the degree of separation including re-charging of the material by subsequent contact with a charging device. The resulting equipment volume and complexity increases accordingly.

In contrast to the other available electrostatic separation processes, the ST belt separator is ideally suited for separation of very fine (<1 μm) to moderately coarse (300 μm) materials with very high throughputs. The triboelectric particle charging is effective for a wide range of materials and only requires particle – particle contact. The small gap, high electric field, counter current flow, vigorous particle-particle agitation and self-cleaning action of the belt on the electrodes are the critical features of the ST separator. The high efficiency multi-stage separation through charging / recharging and internal recycle results in far superior separations and is effective on fine materials that cannot be separated at all by the conventional techniques.

3 APPLICATIONS OF THE TECHNOLOGY

3.1 History of Separation Technologies, LLC

ST was founded in 1989 to develop commercial applications for a proprietary electrostatic separation process invented by David Whitlock, one of the company’s founders. By 1994, ST was focusing on processing fly ash that could be used in higher value concrete production rather than being placed in landfills. Installation of mandated NOx control equipment at coal-fired power plants which increased the carbon (Loss On Ignition, LOI) content of previously marketable fly ash created this opportunity to apply the ST separation process to fly ash beneficiation.

ST began operation of the first commercial fly ash processing plant to control the LOI content of fly ash in 1995. In 2002 ST was acquired by the Titan Cement Company S.A. Titan Cement Company, based in Greece, has operations in Europe, the Eastern Mediterranean, and North America and turnover of more than €1.5 billion. Titan America operations include cement plants, ready-mix concrete plants, concrete block plants, quarries, import and rail terminals, as well as fly ash production facilities

Controlled low LOI fly ash is produced with ST’s technology at twelve power stations throughout the U.S., Canada, the U.K. and Poland. The processed fly ash is marketed under the ProAsh[®] brand. ProAsh[®] fly ash has been approved for use by over twenty state highway authorities, as well as many other specification agencies in the USA. ProAsh[®] has also been certified under Canadian Standards Association and EN 450:2005 quality standards in Europe. ST ash processing facilities are listed in Table 1..

Table 1. ST commercial operations

Utility / power station	Location	Start of commercial operations	Facility details
Progress Energy – Roxboro Station	North Carolina USA	Sept. 1997	2 Separators
Constellation Power Source Generation - Brandon Shores Station	Maryland USA	April 1999	2 Separators
ScotAsh (Lafarge / Scottish Power Joint Venture) - Longannet Station	Scotland UK	Oct. 2002	1 Separator
Jacksonville Electric Authority - St. John's River Power Park, FL	Florida USA	May 2003	2 Separators Coal/Petcoke blends
South Mississippi Electric Power Authority R.D. Morrow Station	Mississippi USA	Jan. 2005	1 Separator
New Brunswick Power Company Belledune Station	New Brunswick, Canada	April 2005	1 Separator Coal/Petcoke Blends
RWE npower Didcot Station	England UK	August 2005	1 Separator
PPL Brunner Island Station	Pennsylvania USA	December 2006	2 Separators
Tampa Electric Co. Big Bend Station	Florida USA	April 2008	3 Separators, double pass
RWE npower Aberthaw Station (Lafarge Cement UK)	Wales UK	September 2008	1 Separator
EDF Energy West Burton Station (Lafarge Cement UK, Cemex)	England UK	October 2008	1 Separator
ZGP (Lafarge Cement Poland / Ciech Janikosoda JV)	Poland	June 2010	1 Separator

3.2 Mineral Applications

Electrostatic separations have been extensively used for beneficiation for a large range of minerals (Manouchehri, Hanumantha & Foressberg, 2000a). While most application utilize differences in natural or induced conductivity of materials with the corona-drum type separators, triboelectric charging behavior

with free-fall separators is also used at industrial scales (Manouchehri, Hanumantha & Foressberg, 2000b). A sample of applications of electrostatic processing reported in the literature is listed in Table 2. While this is not an exhaustive listing of applications, this table illustrates the potential range of applications for electrostatic processing of minerals.

Table 2. Reported electrostatic separation of minerals

Mineral Separation	Reference	ST Experience
Potassium Ore – Halite	Manouchehri, Hanumantha & Foressberg, 2000b Searls, 1985 Berthon & Bichara, 1975 Brands, Beier & Stahl, 2005	*
Talc – Magnesite	Fraas, 1962 Fraas, 1964 Lindley & Rowson, 1997	*
Limestone – quartz	Fraas, 1962 Lindley & Rowson, 1997	*
Brucite – quartz	Fraas, 1962	*
Iron oxide – silica	Manouchehri, Hanumantha & Foressberg, 2000a Brands, Beier & Stahl, 2005, Fraas, 1962 Inculet, 1984	*
Phosphate – calcite - silica	Fraas, 1962 Feasby, 1966 Stencel & Jiang, 2003	
Mica - Feldspar – quartz	Manouchehri, Hanumantha & Foressberg, 2000a Manouchehri, Hanumantha & Foressberg, 2002	*
Wollastonite - quartz	Manouchehri, Hanumantha & Foressberg, 2002	*
Boron minerals	Lindley & Rowson, 1997 Celik & Yasar, 1995	*
Barites – Silicates	Fraas, 1964	*
Zircon – Rutile	Elder & Yan, 2003 Manouchehri, Hanumantha & Foressberg, 2000a Brands, Beier & Stahl, 2005 Fraas, 1962	
Silver and gold slags	Manouchehri, Hanumantha & Foressberg, 2000b	
Carbon – Silica	Fraas, 1962	*
Beryl – quartz	Fraas, 1964	
Fluorite – silica	Fraas, 1947	
Fluorite – Barite - Calcite	Manouchehri, Hanumantha & Foressberg, 2000b	

ST has conducted extensive pilot plant and field testing of many challenging material separations in the minerals industry.

Examples of separations achievable with ST's technology are shown in Table 3.

Table 3. Examples, ST mineral separations

Mineral	Calcium Carbonate	Talc
Separated materials	CaCO ₃ – SiO ₂	Talc / Magnesite
Feed composition	90.5% CaCO ₃ / 9.5% SiO ₂	58% talc / 42% Magnesite
Recovered product composition	99.1% CaCO ₃ / 0.9% SiO ₂	95% talc / 5% Magnesite
Mass yield product	82%	46%
Mineral recovery	89% CaCO ₃ Recovery	77% Talc Recovery

Use of the ST triboelectric separator has been demonstrated to effectively beneficiate many mineral mixtures. Since the ST separator can process materials with particle sizes from about 300µm to less than 1 µm, and the triboelectric separation is effective for both insulating and conductive materials, the technology greatly extends the range of applicable material over conventional electrostatic separators. Since the ST process is entirely dry, use of it eliminates the need for material drying and liquid waste handling from flotation processes.

4 SUMMARY

The ST triboelectric separator provides the mineral processing industry a means to beneficiate fine materials with an entirely dry technology. The environmentally friendly process can eliminate wet processing and required drying of the final material. The ST process requires little, if any, pre-treatment of the material other than grinding and operates at high capacity – up to 40 tonnes per hour by a compact machine. Energy consumption is low, approximately 1 kWh/tonnes of material

processed. Since the only potential emission of the process is dust, permitting is typically relatively easy.

REFERENCES

- Berthon, R., & Bichara, M., (1975). *Electrostatic Separation of Potash Ores*, U.S. Patent # 3,885,673. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Brands, L., Beier, Peter-M., & Stahl, I., (2005). *Electrostatic Separation*, (Wiley-VCH verlag, GmbH & Co).
- Celik, M.S., & Yasar, E., (1995). Effects of Temperature and Impurities on Electrostatic Separation of Boron Materials, *Minerals Engineering*, Vol. 8, No. 7, pp. 829-833
- Elder, J., & Yan, E., (2003). eForce.- Newest generation of electrostatic separator for the minerals sands industry. *Heavy Minerals Conference, Johannesburg*, (South African Institute of Mining and Metallurgy).
- Feasby, D.G., (1966). Free-Fall Electrostatic Separation of Phosphate and Calcite Particles, *Minerals Research Laboratory*, Labs Nos. 1869, 1890, 1985, 3021, and 3038, book 212, Progress Report.
- Fraas, F., (1947). Notes on Drying for Electrostatic Separation of Particles, *AIME Tec.* Pub 2257 November.
- Fraas, F., (1962). Electrostatic separation of Granular Materials, *U.S. Bureau of Mines*, Bulletin 603.
- Fraas, F., (1964). *Pretreatment of minerals for electrostatic separation*, U.S. Patent 3,137,648. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Inculet, I. I., (1984). Electrostatic Mineral Separation, *Electrostatics and Electrostatic Applications Series*, Research Studies Press, Ltd, (John Wiley & Sons, Inc).
- Lindley, K.S., & Rowson, N.A., (1997). Feed preparation factors affecting the efficiency of electrostatic separation, *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 8 pp. 161-173.
- Manouchehri, H.R., Hanumantha Roa, K., & Foressberg, K.S.E., (2000a). Review of Electrical Separation Methods, Part 1: Fundamental aspects, *Minerals & Metallurgical Processing*, Vol. 17, No. 1 pp. 23 – 36.
- Manouchehri, H.R., Hanumantha Roa, K., & Foressberg, K.S.E., (2000b). Review of Electrical

- Separation Methods, Part 2: Practical Considerations, *Minerals & Metallurgical Processing*, Vol. 17, No. 1 pp. 139-166.
- Manouchehri, H.R., Hanumantha Roa, K., & Foressberg, K.S.E., (2002). Triboelectric Charge, Electrophysical properties and Electrical Beneficiation Potential of Chemically Treated Feldspar, Quartz, and Wollastonite, *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 11, No 1-2 pp. 9-32.
- Searls, James P., (1985). Potash, *Chapter in Mineral Facts and Problems*: 1985 Edition, United States Bureau of Mines, Washington DC.
- Stencel, J. M., & Jiang, X., (2003). Pneumatic Transport, Triboelectric Beneficiation for the Florida Phosphate Industry, Florida Institute of Phosphate Research, Publication No. 02-149-201, December 2003.
- Venter, J.A., Vermaak, M.K.G., & Bruwer, J.G., (2007). Influence of surface effects on the electrostatic separation of zircon and rutile, *The 6th International Heavy Minerals Conference*, (The Southern African Institute of Mining and Metallurgy).

Dry Coal Processing using X-ray Transmission Technology

J.M. Bergmann

Tomra Sorting GmbH, Wedel, Germany

ABSTRACT Many coal mines are considering dry coal beneficiation nowadays. Water and the related legal, economic, and environmental aspects are key issues. Therefore the idea of a dry coal “washing” plant is not new. Although known for almost 40 years, x-ray-transmission sorting technology started in industrial applications since 2004.

In the past, the benefits of dry sorting were well known, but these gave only comparably poor performance versus wet technologies. Today, highest efficiencies and recovery rates can be achieved using the latest technologies and lead to extremely competitive EPM-values. Latest computers and modern x-ray scintillators enabled high-performance units. The machines reached a status of real field stability and can support or even replace wet technologies for coal destoning or deshaling.

Economically, dry processing is cheaper compared to a wet plant, it offers a much better handling of product and tailings, and the product will show a higher caloric value.

1 INTRODUCTION

1.1 Coal and Water

In 2012 coal became the world’s largest source of energy, since China commissions more and more coal power plants to satisfy the energy hunger of its rapidly growing industry (Jenny 2012). Besides industrial use coal is still one of the provider of basic energy for heating and cooking in less industrialized areas.

Water is an as sensitive issue. For the future various scientists expect this commodity to be the main reason for wars. (Putzier 2012). So it should be clear to everybody not to waste this valuable good.

1.2 Wet Coal Beneficiation

Wet coal processing technologies are state of the art. Almost all coal preparation plants built since the 1960s have been based on wet processing technologies because they are able to handle damp and sticky run-of-mine coals (Frankland 2001). The success has also been driven by the high efficiencies ranging at around 0.01EPM. This average probable

error (EPM) is largely independent from coal quality and is one of the main marks to measure the separation efficiency of coal preparation units. It is, by definition (Sanders 2007), half the relative density difference between the 75% and 25% partition densities. It is expressed dimensionless as

$$EPM = \frac{D_{75} - D_{25}}{2}$$

The dominance of wet coal processing exists also due to the high abundance and therefore low cost of water in the coal processing regions.

But, there are also many negative aspects of wet coal processing:

- Water enhances the acid generation potential of materials inside the coal and can dissolve heavy metals;
- The coal will be physically degraded by pumping and handling, which leads to autogene pulps affecting the cut-point of dense medium separation processes and which also creates a lot of non-saleable fines;

- Wet processing reduces the calorific value of the coal due to more free surface moisture;
 - Since also the water has to be moved the wet process leads to more transport cost by using more energy;
- (Weitkämper, Wotruba and Sampaio 2010).

1.3 Dry Coal Beneficiation

Dry arid climates are a main driver for the application of dry coal processing. Typical arid coal producing areas are found in South Africa, Australia, India and China. In these regions not only the access to water and the costs thereof are affecting the economics of coal preparation plants, but also environmental legislation. Additionally, coal processing is competing for water with other stakeholders, in particular agriculture (Yongren et al 2001) (Zhenfu and Quingru, 2001, 2002).

Permitting becomes increasingly difficult with Environmental Impact Assessments affecting the lead times for coal mining projects negatively. In some regions water licensing can take up to three years. Modular dry processing methods can therefore step in to ensure fast cash flow in the beginning of the life of mine.

Despite being not as efficient as wet coal processing methods, dry coal cleaning can be effectively used to destone or deshale run-of-mine coal. Dry coal processing technologies have the benefit of working without extensive water circuits, water handling and cleaning systems. Dry technologies can be applied as semi-mobile plants which can be installed close to the mining face. Particularly XRT-sorting is well suited to process large volumes of coal with very compact installations. These semi-mobile installations can be relocated at regular periods keeping the distance to the coal face at a minimum (Kleine et al 2012).

Dry coal cleaning technologies have been successfully used to beneficiate coals at cut points higher than 1.85 relative density. The capital costs for dry coal processing installations are around US\$ 6200/tph dry in contrary to US\$13000/tph for wet coal processing installations. Regarding operating costs, including capital dry processing costs about 0.5US\$/t versus 1.95US\$/t for wet processing (Honaker and Lutrell 2006).

Taking into account that dry processing methods are not as effective they can still be technically and financially viable for easy coal processing tasks, namely destoning or deshaling. Advantages of semi-mobile destoning plants close to the mining operation are cost saving and providing additional production capacity in all downstream processes by unloading bottlenecks such as the sink stream of dense-medium separation (Kleine et al 2012).

2 DRY SORTING TECHNOLOGIES

2.1 General

Dry coal processing technologies are based on selective crushing and screening, gravimetric methods or sensor-based sorting.

Selective crushing and screening works only as a pre-concentration technology with low organic recovery. But this comminution process also creates large amounts of fines which are problematic to handle.

2.2 Sensor Based Sorting Technology

Sensor-based sorting (SBS) is the general expression for all applications where particles are singularly detected by a sensor technique and then ejected using a mechanical, hydraulic or pneumatic process (3).

During the SBS process all feed particles are spread on the vibratory feeder (1) and presented one by one to the sensor (2) where they are scanned.

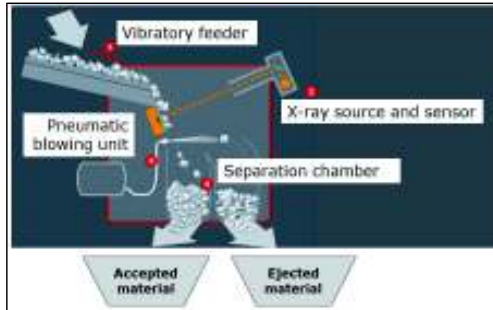


Figure 1

The resulting fractions of a sensor-based sorter are called “accepted fraction” and “ejected fraction” with one of them being the concentrate and one of them being the tailings. The fraction with the smaller mass flow is usually the ejected fraction to save energy at the of the ejection process.

The technique is generally applicable for particle sizes in the range of 0.5 mm until 300 mm. Since SBS is a single particle separation technique, the throughput and also the operating costs are linearly depending on the average particle size.

2.3 XRT-Detection Principle

This Dual Energy XRT-detection technology is widely known as it is used at airports in luggage scanners.

XRT detection is a transitive, non-contact and fast detection technology. The particulate stream is passing between an x-ray source and a line of x-ray detectors, which are detecting the radiation energy of two different energy levels.

Depending on the elemental composition and the thickness of the particles within the x-ray detection zone, the x-rays will be absorbed differently for different matter. To overcome the influence of thickness, two different energies of x-rays are used to mathematically exclude this factor when discriminating between coal and discard.

The XRT principle is a transmittance detection technology which literally reflects

the inside x-ray image of each particle. This has definite advantages for coal applications when compared to surface detection technologies. Surface detection technologies are only applicable for homogenous particles that do not show different compositions on the surface and in the core. Furthermore, surface detection technologies need clean surfaces with no water or dust adhesion that would influence the measurement.

2.4 The XRT-Sorting of Coal

For coal the XRT-technology is ideal. First, the pure coal looks very “transparent” to the x-rays, which means only a small quantity of the x-rays is attenuated. The barren rocks absorb much more of the x-rays and therefore the difference between the good and bad material can be “seen” very clearly by the sensor system (Erdmann, Kleine, 2010).

But, as always, the middlings are the challenge for any technology. For this the precision of the mechanical presentation of the particles, the sensitivity and reliability of the scintillators and the accuracy of correlating the two energies are essential.

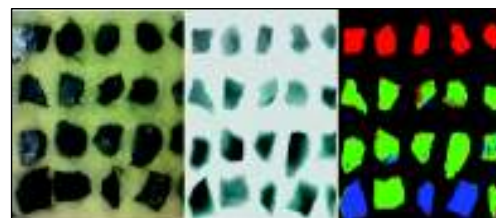


Figure 2

Figure 2 shows the physical particles on the left, the x-ray scan in the middle and the Dual-Energy image of the rocks on the right. The red color represents the coal, green are the middlings and blue are pure waste rocks.

Additionally to this, special, patented contrast filters can even see small inclusions of high density material (for instance pyrites) inside the coal pieces.

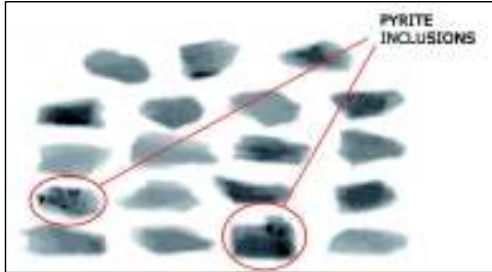


Figure 3

2.5 The XRT-Sorter for Coal

For the separation of discard and coal the robust and compact chute-type sorter (see Figure 1) has been selected. This machine has a small foot-print and few moving parts as the feed material is scanned, evaluated and ejected in free-fall. This also allows robust and compact semi-mobile plant installations.



Figure 4

For the separation of finer coal between 8 and 25 mm a belt based unit would be more efficient, but certainly has more moving parts.

3 THE SORTING RESULTS

3.1 Lignite from Turkey

The first presented results are from a lignite mine in Turkey, sorted in two grain sizes within a band of 10 to 110 mm material is sorted.

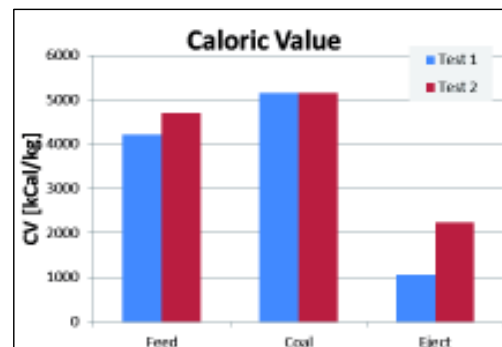


Figure 5

In test one 23% of the feed was ejected to the waste (mass pull to waste). This setting removed 53% of the ash and increased the caloric value of the product from 4.2 to 5.15 MJ/kg.

In test two 16% of the feed was ejected to the waste. This setting removed 40% of the ash and increased the caloric value from 4.6 to 5.15 MJ/kg.

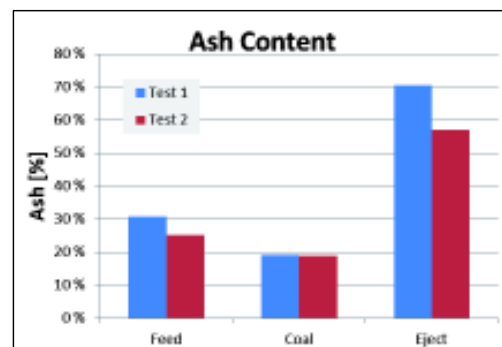


Figure 6

The ash content of the ejected material clearly demonstrates the “purity” of the waste and the efficiency of the sorting.

3.2 Hard Coal From South Africa

Several bituminous South African coals have been tested and the results compared. This coal is known to be difficult-to-treat.

To describe the results the main parameters used in the coal industry for the evaluation were determined: EPM-value, organic efficiency, float-in-sink, sink-in-float, and total misplaced. The term organic efficiency is used comparable to recovery of carbon. Float-in-sink describes the amount of material lighter than the cut point being displaced to the heavy fraction. Sink-in-float describes the amount of material heavier than the cut-point reporting to the light fraction. Total misplaced material is the sum of the two.

Parameter	Unit	Coal A	Coal B	Coal C	Coal D
Feed ash	[%]	31.2	43.0	33.8	27.7
Product ash	[%]	19.5	25.7	20.3	21.1
Discard ash	[%]	45.6	53.1	48.2	34.8
Product Yield	[%]	55.27	36.66	51.60	52.46
D50	[t/m ³]	1.677	1.633	1.679	1.615
Organic efficiency	[%]	79.2	63.1	78.1	66.1
Sink in float	[%]	6.59	10.79	7.88	8.66
Float in Sink	[%]	12.60	9.94	10.53	18.98
Total misplaced	[%]	19.19	20.73	18.40	27.63
EPM		0.113	0.1301	0.1205	0.1198

Table 1

These bulk tests (table 1) have shown the capabilities of XRT sorting for various South African coals. The results have proven that the XRT based dry sorting technology is feasible to treat coal in coarse particle size ranges between 30mm and 120mm at throughputs of 100tph or more. (Kleine 2012; Von Ketelhodt 2012).

3.3 Hard Coal From Turkey

Additional test work was executed on coal from Kozlu near Zonguldak in Turkey. This coal is known to be very high in ash. At this location a good performing beneficiation

plant is the key to guarantee the survival of the mines in that area.

Furthermore the existing processing plants are right in the middle of the city and growing awareness of environmental issues and the noise emissions force the operators to reassess their concept.

The test work was executed on three grain bands, 10-20, 20-35 and 35-100 mm. On the coarse material (35-100 mm) the following partition curve was generated:

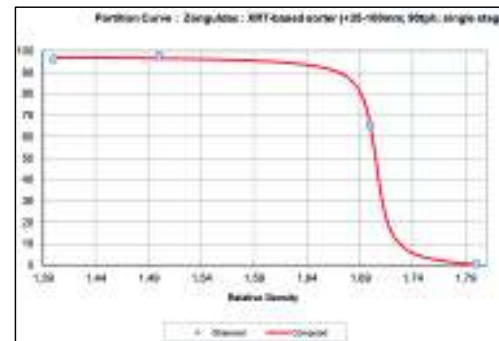


Figure 7

As expected, the results of the finer material look a little bit less perfect due to the sorters' resolution and valve grid, but the results are extremely competitive:

Parameter	Unit	10-20 mm	20-35 mm	35-100 mm
Feed ash	[%]	55.9	50.9	55.2
Product ash	[%]	16.9	19.3	23.2
Discard ash	[%]	64.3	55.1	56.2
Product Yield	[%]	17.7	11.8	3.1
D50	[t/m ³]	1.72	1.68	1.71
Organic efficiency	[%]	95.0	87.3	47.4
Sink in float	[%]	0.83	0.63	0.57
Float in Sink	[%]	0.96	0.63	0.14
Total misplaced	[%]	1.790	1.27	0.71
EPM		0.04	0.04	0.01

Table 2

When looking at above figures in table 2 one must not forget, the sorting objective was to generate a coal product with less than 20% ash. This objective seriously influences

the results since a XRT-cut point has to be programmed to eliminate the high-ash-middlings.

More interesting are the EPM-values, which are quite close to DMS results.

4 COMPARISON AND CONCLUSION

4.1 Comparison to DMS and Dry Jigs

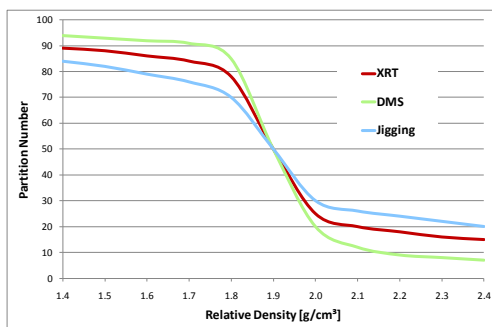


Figure 8

Comparing wet dense medium separation with sensor based XRT-sorting and dry jigging the results are clearly visible we are using the EPM-values, who are representing the separation accuracy of each technology.

For DMS values of 0.01-0.02 are typically achieved.

The dry jigging process is the least accurate of the three achieving EPM values of 0.2 - 0.3.

XRT-sorting is found right in the middle between the other two with values of 0.1-0.2 (de Korte 2009, Von Ketelhodt 2012). But introducing the latest results from Kozlu demonstrate that much better separations are achievable with the XRT-sorters with EPM-values of 0.04 or lower. This moves the XRT-sorting technology very close to DMS and makes it a competitive dry separation alternative.

4.2 Conclusion

XRT sorting is a flexible dry beneficiation technology that is technically viable for coal

destoning. Its' relatively small footprint and low infrastructure needs make it an ideal technology for near-face destoning with semi-mobile installations. The main components of a complete plant consist of a feeder breaker, screen, XRT sorter and a compressor station. The air consumption in relation to the high sorter throughput is comparably low. This, together with the lower capital expenditures, makes it an efficient and cost effective coal destoning technology for coals bigger than 8 mm and larger.

To base such a decision on hard facts, Tomra operates a complete test center for various mining applications and is in close collaboration with various universities.

REFERENCES

- Bartram, K, Kowalczyk, M, 2009, *New Developments in Sensor Based Sorting*, COM2009 Conference, Sudbury, ON, Aug 2009.
- Bergmann, J-M, 2011, *Sensor-Based Sorting*, Industrial Minerals, July 2011, pp58-62.
- Erdmann, T, Kleine, C, 2010, *X-Ray Sorting Technology with Spectral Resolving Detection for Primary Raw Material Processing*, Final Report Project No: 24444, German Environmental Fund.
- Frankland, S C, 2001. *Dry Beneficiation of Coal*, Report no. coal 063.
- Jenni, J, Moser, C, 2012, *2011: Weiterhin vorwärts in die problematische Vergangenheit An der Schwelle zu einem neuen Kohlezeitalter*, Jenni Energietechnik AG press release, Juli 2012.
- De Korte, G J, 2009, *High-density processing of coal*, Southern African Coal Processing Society Conference 2009.
- Kleine, C et al 2012, *Recent developments in dry coal sorting with X-ray transmission*, Paper IMPC 2012
- Putzier, K, 2012, *Der Krieg der Zukunft geht ums Wasser*, online article, „Die Welt Online“, 30.07.12.
- Sanders, G J, 2007. *The Principles of Coal Preparation*, Australian Coal Preparation Society, Fourth Edition, Newcastle, Australia.
- Von Ketelhodt, L, 2012, *Going Waterless: XRT Sorting Dry Coal Beneficiation*, Presentation at SACMA in Volksrust 2012.
- Weitkämper L, Wotruba H, Sampaio, C H, 2010. *Effective Dry Density Beneficiation of Fine Coal*

- Using a New Developed Fluidized Bed Separator*, Proceedings International Coal Processing Conference.
- Wotruba H, Harbeck H, 2010. *Sensor-Based Sorting*, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Yongren, Y, Shiyu, W, Schwerdtfeger, J, 2001. *State of the Art and Development Trends in Chinese Coal Preparation*, *Aufbereitungstechnik*, 42: pp363-370.
- Zhenfu, L, Quingru, C, 2001. *Effect of Fine Coal Accumulation on Dense Phase Fluidized Bed Performance*, *Mineral Processing*, 63: pp217-224.
- Zhenfu, L, Quingru, C, 2002. *Dry Beneficiation of Coarse Coal using an Air Dense Medium Fluidized Bed (ADMFB)*, *Coal Preparation*, 22: pp57-64.

Baskı Devre Kartlarından Fiziksel Zenginleştirme Yöntemleriyle Metal ve Plastik Geri Dönüşümü

Recycling of Metals and Plastics from Printed Circuit Boards (PCB) by Physical Separation Methods

M.Yıldız,K.T.Perek,F.Arslan

İ.T.Ü. Maden Fakültesi,Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, Maslak-İstanbul

ÖZET Bu çalışmanın amacı atık sınıfına geçmiş baskı devre kartlarından fiziksel ve kimyasal yöntemlerle metal ve plastik geri kazanımıdır. Geri dönüşüm atıklardan fiziksel ve kimyasal yöntemler uygulanarak yeniden kullanılabilir malzemelerin geri kazanım prosesidir. Çalışmada elektronik baskı devre kartlarından biri olan bilgisayar ana kartları kullanılmıştır. Geri dönüşüm prosesinde fiziksel yöntemlerden yararlanılmıştır. Öncelikle elle ayıklama işlemi uygulanarak kartlar üzerinde bulunan diğer parçalar (işlemci, soğutucu fanları vb.) ayrılmıştır. Plastik kırıcısı ile boyut küçültme işlemleri yapılarak kırılan bilgisayar ana kartları daha sonra gravite, manyetik ve elektrostatik ayırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Gravite ayırması deneylerinde ise havalı jig kullanılmıştır. Elde edilen ürünlerdeki metal çözüldürülerek metal ve plastik oranları tespit edilmiştir. Ayırma deney sonuçları karşılaştırılmış olup havalı jig ile ayırma sonucu %57,4 metal içerikli konsantre %86,4 verim ile elde edilmiştir.

ABSTRACT The purpose of this study is to recycle metals and plastics from waste printed circuit boards with physical separation methods. Recycling is reuse of materials that are recovered from wastes by using physical and/or chemical processes. Computer mainboards is used in this study as one of the printed circuit boards. Physical separation methods are used in recycling process. Computer mainboards are first crushed with crusher for plastics then gravity, magnetic and electrostatic separation methods are applied. Results of magnetic and electrostatic separation tests are not satisfactory. Air jig is used for gravity separation. As a result of gravity separation a concentrate with metal content of % 57,4 is recovered with %86,4 efficiency.

1 GİRİŞ

Elektronik baskı devreleri, üzerinde elektronik ekipman bulunan ve bütün elektronik cihazlarda bulunan devrelerdir. Teknolojinin vazgeçilmez bir parçası olan elektronik baskı devreleri, hızla gelişen teknoloji ile birlikte artmakta ve kullanım dışı kalmaktadırlar. Bahsi geçen kullanım dışı kalmış elektronik cihazlar genel olarak elektronik atık olarak adlandırılmaktadır. Son yıllarda artan kullanım ve gelişen

teknolojiyle birlikte gerek çevresel gerek ekonomik olarak önemi artmaktadır.

Türkiye istatistik kurumu tarafından 2011 yılında yayınlanan bilişim teknolojileri kullanımı ile ilgili bir araştırmada 16 ile 74 yaş grubundaki bireylerde bilgisayar ve internet kullanım oranları 2010 yılında sırasıyla %43,2 ve %41,6 iken 2011 yılında %46,4 ve %45,0 olarak belirtilmiştir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2011). Elektronik atıklar ülkemizde henüz çevresel bir tehdit olarak

gözükmesi de bu veriler yakın gelecekte karşılaşılabilecek problemi gözler önüne sermektedir.

UNEP tarafından açıklanan rakamlara göre Avrupa'da bir yılda 8,3 - 9,1 milyon ton elektronik atık ortaya çıkarken bu rakam dünya genelinde 40 milyon tona çıkmaktadır (Schluep ve ark.,2009). Bu veriler dünyadaki durumun ne kadar ciddi olduğunu göstermektedir.

E-atıklar temel olarak plastikler, metaller ve seramik vb. maddelerden oluşmaktadır. E-atıkların birçok (>1000) farklı organik (klorlu/bromlu alev geciktiriciler, farklı plastikler vb.), inorganik (Hg, Pb, Cd, Cu, Fe, Al vb.) maddeler ve seramik, cam vb. Malzemeler içerdiğini belirtilmiştir (Yazıcı ve Deveci, 2011). E-atıklarda bulunan çevreye zararlı bazı organik ve inorganik maddelerin buldukları bileşenler Tablo 2'de sunulmuştur (Yazıcı, ve Deveci, 2011).

Tablo 1.1 E-atıkların içerdiği organik ve inorganik maddelerin/malzemelerin oranları (Yazıcı ve Deveci, 2011)

Malzeme	Miktar (%)
<i>Metaller</i>	
Demir ve çelik	47,9
Alüminyum	4,7
Bakır	7,0
Demir dışı	1,0
Toplam metal	60,6
<i>Plastikler</i>	
Alev geciktirici içeren plastik	5,3
Alev geciktirici içermeyen plastik	15,3
Toplam plastik	20,6
Cam	5,4
Elastik polimer (kauçuk)	0,9
Ahşap, kontrplak	2,6
Seramik	2,0
Baskılı devre kartları	3,1
Diğer	4,6

Bu çalışmada elektronik atıklardan olan baskılı devre kartlarından fiziksel ve kimyasal zenginleştirme yöntemleriyle metal ve plastik geri kazanımı amaçlanmıştır.

2 GENEL BİLGİLER

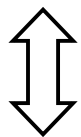
2.1 Atıklar ve Atık Yönetimi

İlkesel olarak öncelikle önlenmeleri, önlenemiyorsa yeniden kullanım veya geri dönüşüm olanaklarının araştırılması, bunların da mümkün olmadığı durumlarda çevreye ve insan sağlığını riske atmayacak şekilde bertaraf edilmesi gereken maddelere atık denir (Tenikler, 2007).

Sanayide, ulaşımda, tarımda, turizmde, inşaat sektöründe, üretim yaparken, hizmet verirken, çok sayıda madde ve malzeme biçim değiştirir. Bu faaliyetler için enerji sağlarken ve enerji kullanırken, gaz, sıvı ve katı halde atıklar ve artıklar ortaya çıkar. Bu atıkların bir bölümü nihai olarak bertaraf edilirken, bir bölümü geri kazanılarak, yeniden kullanılabilir. Atık yönetiminde genel ilke; atıkların kaynağında azaltılması, kaçınılmaz olarak çıkan atıkların da mümkün olan en yüksek oranda geri kazanılarak, yeniden kullanılması olmalıdır (ASO,2012, Çiftlik ve ark., 2009)

Atık yönetimi iyi planlandığı ve etkili yöntemlerle desteklendiği takdirde, sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik ve çevre boyutunun gerçekleştirilmesinde önemli bir konu haline gelmektedir. Atık yönetim hiyerarşisi Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1 Atık Yönetim Hiyerarşisi (Ergülen ve Büyükkelik, 2008)

En Çok Tercih Edilen	Önleme
	Azaltma
	Yeniden kullanım
	Geri dönüşüm
	Enerji için geri kazanım
En Az Tercih Edilen	Çöpe Atma

Atık yönetiminin yakın dönemlerden itibaren değişimine bakıldığında bu durum daha iyi anlaşılmaktadır. 1970'lerde atıkların sıkıştırılması ve yakılması gibi yaklaşımlar

kullanılmıştır. 1980'lerde ise bu yaklaşımlar zararlı maddelerin ortaya çıkmasını azaltacak şekilde teknik olarak geliştirilmiştir. 1990'larla birlikte atıkların azaltılması, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve enerji kazanımı gibi farklı yaklaşımlar atık yönetimi ile bütünleştirilmiştir. 2000'li yıllarda ise atık oluşumunu önlemeye yönelik hedefler oluşturulmaya başlanmıştır. Bu tarihsel ve teknolojik gelişimle birlikte atık yönetiminin sürdürülebilir kalkınmaya olan katkısı da artmıştır (Ergülen ve Büyükkelik, 2008).

2.2 Geri Dönüşüm

Atıkların çeşitli fiziksel ve/veya kimyasal prosesler sonucu hammadde olarak yeniden imalat sürecine kazandırılmasına geri dönüşüm denir. Geri dönüşüme olan ihtiyacın başlamasında savaşlar nedeniyle ortaya çıkan kaynak sıkıntıları etkili olmuştur.

Geri dönüşümün önemini dört başlık altında özetleyebiliriz (Çevko, 2012):

- 1- Doğal kaynaklarımızın korunmasını sağlar.
- 2- Enerji tasarrufu sağlar.
- 3- Atık miktarı azalır.
- 4- Ekonomiye katkı sağlar.

Sonsuz ihtiyaçlar karşısında sınırlı olan ve ekonomik olarak zenginleştirilmesi giderek zorlaşan doğal kaynaklar, geri kazanımı mümkün olan atıkların değerlendirilmesini ön plana çıkarmıştır. Belirli bir ekonomik değeri olan atıkların değerlendirilmeleri ülkemiz gibi kalkınma çabasında olan ülke ekonomilerine katkı sağlaması açısından önem taşımaktadır. Demir, çelik, bakır, kurşun, kağıt, plastik, kauçuk, cam, elektronik atıklar gibi maddelerin geri dönüşüm ve tekrar kullanılması, tabii kaynakların tükenmesini önleyecektir. Bu durum; ülkelerin ihtiyaçlarını karşılayabilmek için ithal edilen hurda malzemeye ödenen döviz miktarını azaltacağı gibi, kullanılan enerjiden büyük ölçüde tasarruf sağlayacaktır.

2.3 Elektronik Atıklar

Elektronik atıklar Avrupa Birliğinin WEEE (Waste of Electrical and Electronic Equipment) direktifinde: “ evlerde, her türlü ticari ve endüstriyel ortamlarda kullanılan ömrünü tamamlamış elektrik ve elektronik eşyalar” olarak tanımlanmaktadır (Ergülen ve Büyükkelik, 2008).

Gelişen teknoloji ile birlikte tüketim alışkanlıkları da hızla değişmekte buna bağlı olarak da yeni tür atık tipleri ortaya çıkmaktadır. Bunlardan biri de elektrikli ve elektronik atıklardır (E-Atık). Kendisini sürekli olarak yenileyen elektronik piyasası ürünleri, 1 ila 6 yıl içerisinde “iş görmez” veya “ tamiri yenisini almaktan daha pahalı” hale gelmektedir. E-Atık adı verilen atık türü de bu şekilde ortaya çıkmıştır (Çiftlik ve Ark., 2009). T.C Çevre Bakanlığı tarafından yapılan elektrikli ve elektronik eşya sınıflandırması verilmiştir Buna göre (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2007):

- 1- Büyük ev eşyaları
- 2- Küçük ev aletleri
- 3- Bilim ve telekomünikasyon ekipmanları
- 4- Tüketici ekipmanları
- 5- Aydınlatma ekipmanları
- 6- Elektrikli ve elektronik aletler
- 7- Oyuncaklar, eğlence ve spor aletleri
- 8- Tıbbi cihazlar
- 9- İzleme ve kontrol aletleri
- 10- Otomatlar

Bu cihazlar plastik, metal ve cam gibi geri dönüştürülebilir maddeler yanı sıra çeşitli zehirli maddeler içerdiklerinden çevre açısından bir tehdit oluşturmaktadırlar.

2.3.1 Türkiye’de Elektronik Atıklar

Ülkemizde de elektronik atık miktarı hızla artmaktadır. Birçok gelişmiş ülkede elektronik atık adı verilen kullanım dışı ürünler zorunlu olarak ayrı toplanmaktadır. Ayrı toplanan bu atıklar diğer atıklarla beraber çöpe atılmak yerine diğer şekillerde bertaraf edilme işlemine tabi tutulmaktadır. Ülkemizde henüz yeni şekillenmeye başlayan ayrı toplama sistemi birçok bölgede yaygınlaşmadığı için bütün atıklar çöpe gitmektedir (cevreonline.com, 2012).

2.3.2 Baskı Devre Kartları

Tek veya çift yüzeyi bakırla kaplı levhalar üzerine farklı yöntemler ile bir elektronik devre çiziminin aktarılıp, devre elemanlarının bağlantı yollarının çıkarılması ile oluşturulan elektronik devre kartlarıdır (robotiksistem.com, 2012). Bazı baskı devre kartları şunlardır:

- Bilgisayar ana kartları
- Modem, hub, switch kartları
- Santral kartları
- Pos cihazı kartları
- Server Kartları
- Cep telefonu kartları
- Telsiz ve telsiz telefon kartları
- Medikal cihaz kartları
- Lcd tv kartları
- Kontrol panelleri kartları
- Fotokopi makinası, yazıcı, tarayıcı vb. ekipmanlar
- Slot işlemci kartları
- Uydu alıcıları
- Uçak elektronik devre kartları
- Otomobil elektronik devre kartları

2.4 Baskı Devre Kartlarının Geri Dönüşümü

Yüksek miktarda geri dönüştürülebilir metal ve plastik ihtiva eden baskı devre kartları çeşitli yöntemlerle geri dönüşümü yapılır. Bu hem içerdikleri zehirli maddelerin doğaya ve insan sağlığına zarar vermesini engeller hem de ekonomik katkı sağlar. Baskı devre kartlarının geri dönüşümü amacıyla kullanılan çeşitli yöntemler vardır.

2.4.1 Geri Dönüşüm Öncesi Hazırlık İşlemleri

2.4.1.1 Elle Ayırma

Elektronik atık geri dönüşüm işlemlerinde elle ayırma geri dönüşümün ilk başlangıç aşamasında uygulanır. Elektronik baskı devre kartlarını kolay ayrılacakları plastiklerden ayırmak, tekrar kullanılabilir halde olan çeşitli devre elemanlarını ayırmak amacıyla veya kolay ayrılacak vida vb. aksamaları sistemden uzaklaştırmak amacıyla kullanılmaktadır.

2.4.1.2 Boyut Küçültme ve Boyuta Göre Sınıflandırma

Değerli metal ve plastik içeren elektronik atıklar metal serbestleşmesi sağlanması amacıyla boyut küçültme işlemine tabi tutulurlar. Boyut küçültme işlemi shredder veya çekiçli kırıcı ile gerçekleştirilmektedir. Daha sonra boyuta göre sınıflandırılan parçalar, amacına uygun olarak seçilen yöntem ile plastik ve reçineden metalin ayrılması amacı ile prosenin bir sonraki aşamasına geçer (Yoo ve ark. 2008).

2.4.2 Mekanik Ayırma İşlemleri

Manyetik Ayırma: Elektronik atık geri dönüşüm sistemlerinde demirin ayrılması amacıyla kullanılırlar. Demirin bazı durumlarda geri kazanılması, bazı durumlarda ise yapılacak hidrometalurjik işlemlerde problem yaratmaması açısından uzaklaştırılması önemlidir.

Elektrostatik Ayırma: Özellikle elektronik baskı devrelerinden metal geri kazanımına yönelik yapılan pek çok çalışmada elektrostatik ayırma kullanılarak plastik ve metali birbirinden ayırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçekte başarılı olsa da endüstriyel ölçekte düşünüldüğünde ciddi bir problem yaratacak olan ara ürün çokluğu nedeniyle klasik tek rulolu elektrostatik ayırıcı yerine aynı anda iki kademe elektrostatik ayırma yapan cihazların kullanılmasında ara ürün miktarında ciddi bir düşüş yaşandığı görülmektedir (Jiang ve ark., 2008). Elektrostatik ayırma yöntemlerinden biri olan Eddy current elektrostatik ayırıcısına beslenen kırılmış elektronik atıklardan, demir dışı metaller, metalik olmayan parçalar ve demirli metaller olarak üç ürün olarak alınır. Pek çok elektronik atık geri dönüşüm tesisinde eddy current ayırıcısının kullanılmaktadır fakat metal olmayan taneler arasında yüksek miktarda küçük tane boyutuna sahip demir dışı metal bulunur (Freeguard ve ark., 2007)

Yoğunluk Farkına Göre Ayırma: Çalışmalar gravite ayırmasının elektronik atık geri dönüşüm proseslerinde etkin bir biçimde

kullanılabileceğini göstermiştir (Zhang ve Frossberg, 1997). Taneler arası yoğunluk farkına dayanan bu ayırma işlemi ile metallerin birbirinden ayrılmasından ziyade elektronik kartların metal olmayan kısımlarının ayrılması amaçlanır. Bu amaçla kullanılan çeşitli tipte gravite ayırma cihazları vardır (Freegard ve ark., 2007): sarsıntılı masa, havalı masa, havalı jig, mozley masası ve zig zag gravite ayırıcısı.

3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada elektrikli ve elektronik ekipman atıkları sınıfına giren bir baskı devre kartı çeşidi olan bilgisayar ana kartlarından fiziksel yöntemlerle metal ve plastiklerin geri kazanımı amaçlanmıştır.

3.1 Malzeme ve Yöntem

Deneylerde atık sınıfına geçmiş bilgisayar ana kartları kullanılmıştır. Bu atıklar elektronik atık ticareti yapan bir hurdacıdan temin edilmiştir. Farklı üreticiler tarafından farklı tiplerde üretilen ana kartlar, aynı tip metalleri benzer miktarlarda içermektedirler. Bir devre kartının içerdiği metal analizi Tablo 3.1’de verilmiştir. Görüleceği üzere % 78,31 ile bakır ana kartlar içerisinde en çok bulunan metaldir.

Tablo 3.1 Bilgisayar Ana Kartı Metal Analizi

Element	İçerik %	Element	İçerik %
Cu	78,31	Ir	<0,001
Sn	10,41	Ru	0<0,000
Ag	2,63	Cd	<0,030
Zn	2,54	Co	0,012
Pb	2,04	Cr	0,044
Sb	1,24	Ga	0,012
Mo	0,90	In	<0,036
Fe	0,85	Mn	0,084
Ni	0,59	Nb	<0,010
Au	<0,02	Ti	0,094
Pt	<0,02	V	<0,014
Pd	<0,021	W	0,034
Rh	<0,002		

Deneysel çalışmalarda atık bilgisayar ana kartlarından metal ve plastik ve geri kazanımı için fiziksel zenginleştirme yöntemleri kullanılmıştır.

Sırasıyla boyut küçültme ve iki kademe havalı jig ile zenginleştirme uygulanmıştır. Ayrıca gravite ayırması ile karşılaştırma amacıyla sırası ile manyetik ve elektrostatik ayırma uygulansa da bu işlemlerden bir sonuç elde edilememiştir.

Deneyler sırasında boyut analizinin yanı sıra metal ve plastik miktarlarını belirlemek amacıyla kimyasal işlemler uygulanmıştır.

3.1.1 Elle Ayırma İşlemi

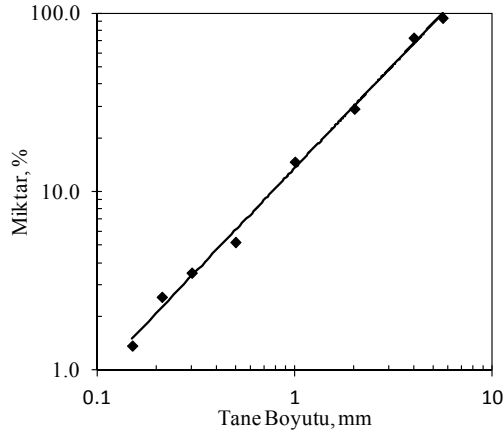
Bilgisayar ana kartlarından kolay ayrılacak kırıcıya zarar verebilecek özellikteki parçalar çeşitli el aletleri yardımıyla ayrılmışlardır

3.1.2 Boyut Küçültme

Bilgisayar ana kartlarının boyut küçültme işlemi Net Plasmak marka plastik kırıcı kullanılmıştır. Boyut küçültme işlemi sonrası -10 mm boyutunda ürün elde edilmiştir. Zenginleştirme deneylerinde ve analizlerde kullanılmak üzere; kırılmış ürünün homojen boyut dağılımına sahip olmadığından özenli bir şekilde kareyaj yöntemiyle numune alınmıştır

Tane boyut dağılımının incelenebilmesi için Amerikan Tyler serisine göre 5,6 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,3 mm, 0,212 mm ve 0,15 mm olan elekler seçilerek elek analizi yapılmıştır. Eleme sırasında, bilgisayar ana kartının temel maddesi olan fiberglasın (cam elyafı) kırma işlemi sonrası yünsü bir hal alması zorluk çıkarmıştır. Eleme verimini etkilememesi için eleme, laboratuvar eleklerinde el ile yapılmış ve azami derecede özen gösterilmiştir.

Eleme işlemi sonrası malzemenin %43,8 ile en çok -4+2 mm boyut aralığında olduğu görülmüştür. Bunun yanında numunenin %85,3’ünün +1 mm boyutunda olduğu saptanmıştır. Şekil 3.2’de Tane boyut dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 3.3 Tane Boyut Dağılım Grafiği

3.1.2.1 Kimyasal İşlemler

Kimyasal işlemler ilk önce her bir boyut dağılımının metal içeriğinin belirlenmesi ve daha sonraki zenginleştirme deneyleri sonuçları incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Herbir boyut grubu beherde kral suyu ilave edilmiştir. Bu şekilde numunlerin içerdiği metallerin tamamı çözünürken plastik kısımlar ise çözünmeden kalmıştır. Çözeltiler filtre edilerek süzülüş ve Filtre kâğıdında kalan plastikler yine ayrı ayrı asitlerinden arındırılması amacıyla yıkanmış ve etüvde kurutma işlemi tamamlandıktan sonra ağırlıkları belirlenmiştir. Boyut gruplarına göre metal dağılımı Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 Boyuta Göre Metal Dağılımı

Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Metal Dağılımı (%)
+5,6	5,56	6,31
-5,6 +4,0	21,47	19,84
-4,0 +2,0	43,80	33,99
-2,0 +1,0	14,46	19,92
-1,0 +0,5	9,50	15,94
-0,5 +0,3	1,71	1,75
-0,3 +0,212	0,94	0,46
-0,212 +0,15	1,20	0,65
-0,15	1,37	1,13
Toplam	100,00	100,00

3.1.3 Zenginleştirme Deneyleri

Zenginleştirme amacıyla havalı jig kullanılmıştır. Havalı jig esas olarak yoğunluk farkına dayanan bir gravite ayırıcısı olsa da ayırma işleminde şekil faktörünün de etkisi vardır. Havalı jig olarak All Air S500 kullanılmıştır. Gravite deneyleri ile karşılaştırma yapmak amacıyla manyetik ve elektrostatik ayırma deneyleri de yapılmış fakat bunlardan bir sonuç alınamamıştır.

Plastik yoğunluğunun 1-1,5 g/cm³ olduğu göz önüne alındığında metal taneleri ile plastik tanelerin kolaylıkla ayrılabilceği görülmektedir. Zenginleştirme iki kademe gerçekleştirilmiştir. Birinci kademe temiz artık ve kaba konsantre elde edilmiş daha sonra kaba konsantre tekrar beslenerek nihai konsantre elde edilmiştir.

Birinci kademe jig deneyinde en üst iki tabaka temiz atık olarak ayrılmış kalan dört tabaka ikinci kademe gravite ayırması için jige beslenmiştir. İkinci kademe jig deneyinde ise (temizleme) birinci deneyde elde edilen kaba konsantre beslenmiştir.

Deney sırasında elek analizinde yünüşü yapısı nedeniyle sorun oluşturan cam yünüşünün oldukça büyük bir kısmının filtreye çekildiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda kırılma sırasında levha haline gelmiş bazı metal parçalarının alt tabaka da olması gerekirken üst tabakalarda olduğu dikkat çekmiştir. Buna şekil faktörünün etkisi büyük olmuştur. İğne yapılı çeşitli soket girişlerindeki metallere ise elek altına geçmiştir. Altın kaplamalı parçaların gözle görülebilir şekilde çoğunluğunu oluşturan bu parçalar elek altından alınmıştır.

Tablo 3.4 Birinci Kademe Jig Deney Sonuçları

Ürünler	Miktar %	Metal %	Metal Dağılımı %
Kaba Konsantre	92,7	36,0	94,7
Artık 1	2,8	5,0	0,4
Artık 2	3,2	13,0	1,2
Elek Altı	1,3	99,0	3,7
TOPLAM	100	35,2	100,0

Tablo 3.5 İkinci Kademe Jig Deneyleri Sonuçları

Ürünler	Miktar %	Metal %	Metal Dağılımı %
Nihai Konsantre	45,6	54,7	60,0
Ara Ürün 1	16,8	31,1	12,6
Ara Ürün 2	23,5	33,3	18,9
Artık	12,5	16,4	4,9
Elek Altı	1,5	99,0	3,7
TOPLAM	100,0	41,6	100,0

Tablolarda verilen değerler (Tablo 3.4 ve Tablo 3.5) birleştirilerek bir metalurjik denge tablosu oluşturulmuştur (Tablo 3.6). Ara ürünün hesaben dağıtılmış hali Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.6 Birleştirilmiş Metalurjik Denge Tablosu

Ürünler	Miktar %	Metal %	Metal Dağılımı %
Konsantre	45,0	57,4	64,0
Ara Ürün	37,3	32,4	29,9
Artık	17,6	13,9	6,1
TOPLAM	100,0	40,4	100

Tablo 3.7 Ara Ürün Dağıtılmasından Sonra Metalurjik Denge Tablosu

Ürünler	Miktar %	Metal %	Metal Dağılımı %
Konsantre	60,9	57,4	86,6
Artık	39,0	13,9	13,4
TOPLAM	100,0	40,4	100,0

Havalı jig deneylerinde kullanılan All Air S500 havalı jigin elektronik atık geri dönüşümünde metal ve plastik ayrımı için uygun olduğu görülmüştür ancak kapasitesi yüksek olan bu cihazda daha verimli bir ayırma yapabilmek için daha yüksek miktarda elektronik atık kullanımı uygun olacaktır.

Havalı jig deneyi sırasında baskı devre olarak üzerinde serbestleşmemiş metal bulunan plastiklerin ara üründe bulunması gerekirken konsantreye, konsantreye gitmesi

gereken levha halini almış metallerin şekil faktörü etkisiyle ara ürüne geçtiği gözlemlenmiştir.

Havalı jig deneyi sırasında elek altına geçen malzeme ağırlıkça düşük miktarda olsa da hem metal oranının çok yüksek (%99) oluşu hem de altın kaplı olan metallerin büyük çoğunluğu buradan elde edildiği için ekonomik olarak değeri yüksektir. Elek üstü üründe elde edilen malzemenin metal miktarının büyük çoğunluğunu serbest haldeki metaller oluştururken ara üründeki metal miktarı deney sonuçlarında yüksek görüldüğü bu durum büyük çoğunluğunu serbestleşmemiş metal bulunan plastiklerden oluşmaktadır.

İki kademe gravite zenginleştirme uygulanan kırılmış atık bilgisayar ana kartlarının metal içeriklerinin tespit edilmesi amacıyla kimyasal analiz yapılmıştır. Analizlerde kral suyu kullanılmıştır. Bu şekilde metallerin tamamı çözülmeye alınırken plastikler çözünmeden kalmıştır. Metallerin ağırlıkça miktarı, deneylerde elde edilen ürünlerin miktarından çözüldürme sonrası kalan plastiklerin miktarı bulunmuştur.

Manyetik ve elektrostatik ayırma deneylerinde, yapılan diğer çalışmalarda olduğu gibi ilk önce manyetik daha sonra manyetik olmayan ürüne elektrostatik ayırma yapılmıştır. Kırma işleminden sonra bu deneyler için numune alınmıştır. Fakat eleme işleminde sorun yaratan cam yünü burada da toplanma yaparak tanelerin bir arada hareket etmesine sebep olarak manyetik ayırmayı mümkün kılmamıştır. Dolayısı ile elektrostatik ayırmaya gerek kalmamıştır.

İlk etapta manyetik ayırma deneyinden bir sonuç elde edilemeyince bu kez havalı jig deneyinde cam yünü sistemden uzaklaştığı için, havalı jig ara ürünü manyetik ayırma işlemine tabi tutulmuştur. Fakat bu deneyde ise beslenen numunenin tamamı manyetik olmayan ürün olarak çıkmıştır. Daha sonra manyetik olmayan ürün elektrostatik ayırma cihazına beslenmiş fakat baskı devre üzerinde bulunan metallerden dolayı bütün numune iletken kısma geçmiştir. Dolayısı ile bu işlemlerden de bir sonuç elde edilememiştir.

Elektrostatik ayırma deneylerinde kullanılan elektrostatik ayırıcı etkili olmamıştır ancak endüstriden ve yapılan diğer çalışmalarda kullanılan Eddy Current elektrostatik ayırıcısı kullanarak bir ayırma gerçekleştirmek mümkün olabilir. Manyetik ayırma deneylerinde de yüksek alan şiddetli manyetik ayırma kullanılabilir.

4 SONUÇLAR

- Plastik kırıcı ile metal ve plastik serbestleşmesi amacıyla yapılan boyut küçültme işlemleri sonucu deney numunesine yapılan elek analizi sonucu elde edilen boyut grupları içerisinde en fazla malzeme %43,80 ile -4+2 mm boyut aralığında olduğu tespit edilmiştir. Yapılan kimyasal analiz sonucu en yüksek metal içeriğinin % 33,31 oranıyla bu boyut grubunda olduğu ve % 33,4 dağılımı ile görülmektedir.
- Havalı jig deneyleri sonucunda elde edilen Ara ürünün hesaben dağıtılması sonucu, ağırlıkça % 60,9 oranında ve % 57,4 metal içerikli konsantr %86,6 verim ile elde edilirken; ağırlıkça %39 oranında %13,9 içerikli atık %13,4 verim ile elde edilmiştir.
- Manyetik ayırma ve elektrostatik ayırma deneyleri sonucu başarılı bir ayırma gerçekleştirilememiştir.
- Havalı jigin elektronik atık geri dönüşümünde metal ve plastik ayrımı için uygun olduğu görülmüştür, ancak kapasitesi yüksek olan bu cihazda daha verimli bir ayırma yapabilmek için daha yüksek miktarda elektronik atık kullanımı uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

- Çevre ve Orman Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel müdürlüğü Atık Yönetim Dairesi Başkanlığı, 2007, “Atık Elektrik Elektronik Eşyaların Kontrolü ve Yönetimi Yönetmeliği”.
- Çiftlik S., Handırı İ., Beyjan M., Akçil A., Ilgar M, Gönüllü M. 2009. “Elektrikli ve Elektronik Atıkların (E-Atık) Yönetimi, Ekonomisi ve Metal Geri Kazanım Potansiyeli Bakımından Değerlendirilmesi”, *Türkiyede Katı Atık Yönetimi*

- Sempozyumu*, İstanbul, Yıldız Teknik Üniversitesi Oditoryum ve Sergi Salonu, Haziran
- Ergülen A., Büyükkelik A., 2008, “ Sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik ve çevre boyutları açısından atık yönetimi ve e-atıklar” *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Aralık, Cilt: 1, Sayı: 2, s.19-30.
- Freegard K., Tan G., Frisch S., 2007. “*WEEE Plastics Separation Technologies*”, DEFRA Waste Research Team, Axion Recycling Ltd. <http://www.aso.org.tr/> (Temmuz, 2012) <http://www.cevko.org.tr> (Temmuz, 2012) <http://www.cevreonline.com> (Haziran,2012) <http://www.robotiksisitem.com> (Temmuz, 2012)
- Jiang W., Jia L., Zhen-Ming X., 2008. “A new two roll electrostatic separator for recycling of metals and non metals from waste printed circuit boards”, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 161, Issue 1, s. 257-262.
- Schluep M., Hagelueken C., Kuehr R., Magalini F., Maurer C., Meskers C., Mueller E., Wang F., “Recycling from e-waste to resources”, United Nations Environment Programme, 2009.
- Tenikler G., 2007. “Türkiye’de tehlikeli atık yönetimi ve avrupa birliği ülkeleri ile karşılaştırmalı bir analiz”, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Türkiye İstatistik Kurumu, 2011. “2011 yılı hanehalkı bilişim teknolojileri kullanım araştırması”, sayı : 85772, s. 1.
- Yazıcı, E.Y. ve Deveci, H., 2011, “E-Atıkların Çevresel Etkileri ve İkincil kaynak Olarak ekonomik potansiyeli, *Çevre Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (1302-5627) cilt:03-sayı:03, s.99-114
- Yoo J., Jeong J., Yoo K. Lee J., Kim W., 2008. “Enrichment of metallic components from waste pcb by a mechanical separation process using a stamp mill”, *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*, s.305-350.
- Zhang S., Frossberg E., 1997. “Mechanical separation - oriented characterization of electronic scrap”, *Resources Conservation and Recycling* Volume 21, Issue 4, s. 247-269.

Turkish Progress and Recent Trends in Chrome Beneficiation

B.Elçi

Project Manager, Yıldırım Holding, Istanbul

A.Malazgirt

Ph.D. CEO, Yıldırım Holding, Istanbul

ABSTRACT As the mineral processing process design and technology improved over the years, especially in the recent years, Turkey advanced fast forward in chromite beneficiation. With the impressive advent on the commodity prices in this decade, both established and entrepreneurial companies, domestic and foreign have flocked to Turkey and have followed the iterative approach to perfect the processing equipment locally manufactured aided by the establishment of separate mineral processing departments at the established Turkish universities. This will continue unabated because the ore grades are declining, cost cutting is prime goal and the innovative smelting technologies can now handle fines. This paper presents in some detail this recent success story.

1 INTRODUCTION

Clearly one of the best inventions of mankind has been the ability to explore and identify the valuable minerals in the ground, dig them up, extract the valuable parts and get rid of the waste. Many of the enabling technologies from producing pig iron in the blast furnace to copper floatation using surfactants have been instrumental in shaping our modern lives. And this impact will continue unabated in light of the wild gyrations in the commodity prices based on a foundation of economic fundamentals of supply and demand. Within this context mining and mineral processing constitute at an increasing rate the most important economic and industrial activities of our modern world. This is to be expected as the human population increases and a massive urbanization takes hold making demands for lithium extraction to be used in mobile phones, steel to be used for bridges and construction and chromium to be added to iron and nickel and to make stainless steel kitchenware to be used by the newly urbanized populace. Although there was a

dire prediction back in 1970s published by the club of Rome in this influential report called the limits to growth the recent trends and data indicate that there is plenty of mineral resources albeit with lower grades requiring and making ore beneficiation a critical element in the supply chain of metals and minerals. For example, for chromium, an essential element for the making of stainless steel and more or less the inspiration for this paper, only about one third of the total 4.72 billion tons in the world deposits can be classified as rich grade which makes mineral processing imperative.

2 "THE BENEFICIATION"

2.1 "What is it for?"

Chromite beneficiation aka processing is required to enrich low grade ores which is not economical to be sold under the market conditions. Currently market accepts + 30% grade of chromite ore but at a very low price. (open to fluctuation approx. 100-120\$/t FOB) Hence the most rational method in the utilization of poor grade chromite ores is to be able to provide sufficient grade of chromium in the feed material as well as

providing it in a suitable form for an efficient production, such as in the DC arc furnaces which is gaining ground vis-à-vis AC furnaces used in ferrochrome production. Therefore, within the supply chain of the mining industry, ore beneficiation or mineral enrichment becomes the essential link between the Earth's resources in the ground and a sellable commodity which can be used directly by a customer.

2.2 “Why is it needed?”

This is basically relying on the most basic principle of mineral processing which is not to transport the waste minerals. When the ore is mined out at a low grade, to be able to extract the valuable from the waste, it needs to be processed in a distance as short as possible so that it can have a market and or further processing value.

Of course the conventional wisdom is that beneficiation is more needed as the ore grade decreases and the energy needed to produce the final product increases. However, incremental improvements done in the mineral processing methods, better design of the beneficiation tools, and a push coming from the mineral industry to live up to its commitment to sustainability principles, hence spending more time and money in the planning, research and development and in the design and construction of the beneficiation plant are helping the growing demands of the market.

2.3 “What is chromite concentrate for?”

In the steel industry, chromite ore is used for ferrochromium production, which is another input for stainless steel production. A steel alloy which has a minimum of 10.5% chromium by mass is defined as stainless (inox) steel. Therefore, the stainless property of a steel comes from the ferrochromium and so from chromite ore itself. Concentrated, which is ground to usually -1mm chromite particles cannot be used directly into AC ferrochromium production furnaces. By the aid of new tech DC furnaces, fine chromite can be consumed with no problem as long as

it is of high grade at least 48%. Since concentrated chromite ore usually gives higher grade output on average grinding sizes, it makes this kind of process possible. This is not only the case for high carbon ferrochrome. The need for a higher grade chromium concentrate is even more essential in the making of low carbon ferrochrome.

Also, although currently Turkey has enough reserves to be able to precede production with lumpy ores through AC furnaces, in the future, with the depleting lumps, and lower grade, processed, i.e. enriched low grades will be the only resource for ferrochromium production.

3 “CONCENTRATE MARKET”

Concentrate demands in recent years increased so did the prices. Since China established more DC furnaces, their purchase of concentrate has risen up drastically. They learned how to ship their specs and gained benefit from the uptick in the concentrate market. As a result and simply, concentrate production has become so important.

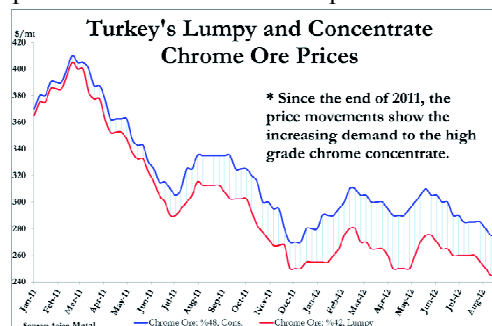


Figure 1. Price gap increasing between lumpy chromite ore and chromite concentrate

One thing that PGM producers discovered was that the chromite in the tailings after the platinum is extracted could actually be sold as chromite ore. These are UG2 Bushveld Complex ores where platinum could be found. Many South African companies did throw away their tailings although they contained already ground chromite which was ready for the production. Once they discovered this case, they began extracting it.

In fact, their chromite concentrate production costs were nearly zero to them. Only a few pumps and spirals were their capital and the overall operational costs. To be able to compete with 'nearly free' UG2 sourced chromite ores, Turkey must improve the local technology to lower the costs of per unit chromite concentrate. Competing with other world concentrate producers, Turkish companies definitely do need something, which is 'Government's Support' or sponsorship. It is a fact that when government eases the companies' burden, the sector thrives. India and Oman is a good example of such a sponsorship of government helping the concentrate production companies.

4 "CHROMITE PROCESSING"

Of course there are several mineral processing techniques available to mining companies like floatation, magnetic separation etc. but the one used most, and some of old-timer miners swear by it saying it is the most suited for Turkish chromium type ores is gravity concentration. It is probably 2000 years old and is now undergoing a renaissance of sorts as the mineral and mining industry focuses on mineral separation and beneficiation as the chrome ore grade decreases and the volumes to be treated increase exponentially.

Gravity processing utilizes the natural G force applied on the valuable and waste mineral. To hinder the overall material movement distances due to gravity, water is presented. In short, 'Chromite is separated from its waste according to their behavior inside water.'

Chromite processing requires suitable liberation size defined by liberation tests applied to the ore. Several tests like optical counting, dense medium tests etc. are available. When optimum size is determined, the feed material is crushed, ground to that size so that beneficiation can continue. Afterwards, jigs, dynawhirlpools, cones, spirals, shaking-tables, centrifugal concentrators take place to recover chromite from the ground complex.

In gravity concentration the efficiency of the process does not depend on the size of the particles as long as the mineral has been liberated from the rock. The other advantage of gravity concentration is that water is used as the medium with no expensive reagents added. In setting up the concentration plant on a hillside provides the necessary acceleration force and the convenience of designing the concentration plant in 3, 4, 5 levels as enrichment improves from top to bottom. In short, gravitational enrichment is cost-effective, uncomplicated, highly efficient and relatively easy to set up, and because of all these reasons, hence the renaissance in gravity concentration plants.

5 "CHROMITE MINING"

Although the country has some 70+ commodities being actively mined, the country still remains to be very much untapped and offers a large resource potential for an increasing number of global mining companies. The country's mining industry in the past has lagged behind the manufacturing industry and contributed very little to the overall GDP of Turkey. Then the Turkish government has recognized the importance of mining and has set a target to achieve some 5% of the GDP in 2023, the 100th anniversary of the Republic. Hence, the country along with the private investors and the government are preparing Turkey to become a vibrant mining country. Apart from Boron, Chromite is Turkey's largest metal product followed by gold, bauxite and base metals. During the financial crisis in 2009 Turkey's mining industry suffered a serious blow and then slowly recovered in 2010 and continuing to 2011 with the global recovery and increased demand, primarily from China and the other growth markets.

6 "PROCESSING IN TURKEY"

Turkey is a country where alpine type massive high grade chromite does exist. But since the reserves are dwindling, it has become unavoidable to start processing low grade ores and utilizing systems consuming

finer as an input. Although this is a scenario which will play in full force more in the near future, it is essential to prepare for this eventuality now. Therefore beneficiation of low grade ores and the science and the practice of mineral processing of chromite ore have become important in Turkey.

Earlier, not even 20% grades of chromite were worth processing but now, even 5% grade feed is considered rich enough to be processed. It is now possible to obtain, 48% grade concentrate and 5% (today's feed grade) tailings, 2.81:1 ratio (34.88% of feed as concentrate) from 20% grade feed. On the other hand, today's 5% grade of feed would only give a concentrate with a ratio of 13.28:1 (7.53% of feed material) where product is 48% and tailings are at 1.5%. Such a tailing grade like 1.5% is very hard to obtain under plant conditions and requires sophisticated instruments to constantly monitor and control the processing environment.

7 "KEF: A ROLE MODEL"

Early on, beneficiation of low grade ores was recognized and one of the best examples of such a modern concentration plant was erected at Kef, Elazığ with an 84 tph capacity. The factory was established in 1991 since the dry processing plant was not performing properly. The plant was entirely designed and set-up by a Finnish company from a to z. Some Turkish staff was trained only for a few days in the parent company's factory abroad and then it switched on. A plethora of problems ensued during the commencement of the operations. It was just because plant operators simply didn't know what to do, how to adapt the processing plant according to the fluctuations in the feed grades. Even though during sampling phase, actually where everything begins, the most important stage, to be able to set up the plant, the sample feed ore is washed, 'polished' and sent to Finland in a manner of showing off that 'Turkey's low grade is not that low'. (Sampling must be properly done to be able to represent the whole mass of ores that will be processed. There is no reason to clean up

the sample before putting it into some analysis. In fact, cleaning up the sample kills the purpose of sampling). When you check the project parameters, you can see that average feed grade is expected around 32% which means, the plant cannot process grades below 32% efficiently. Concentrate grade was targeted to 42%. Old plant tailings are around %20. When the recovery is calculated it is possible to see a value around %71 which sounds good. But the truth of the matter is a different thing indeed. Average feed grades were not going above 25% and so the recovery plummeted down to 49% and ever further.

One of the main problems of the plant was that it was modeled after the existing plants operated in the company's country designed according to the geography and topography of the native flat landscape. Inordinate amount of leveling was done to make the hilly landscape more flat instead of using the oldest force of separation referred above, gravity. This resulted in using some 30 slurry pumps continuously circulating the pulp inside the plant instead of the 9 or 10 needed if the slope could have been used with natural flow. This resulted in the undue increase in operational costs.

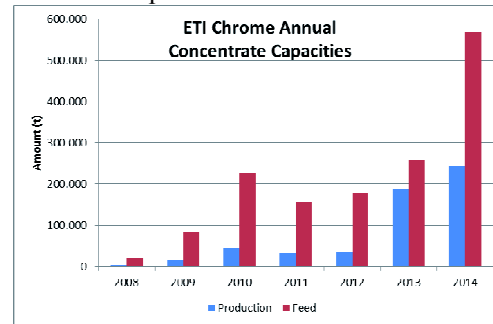


Figure 2. Annual concentrate production of ETI Chrome. Note the expected revisions projects completed at Kayseri and İskenderun

After the privatization of ETI Krom A.Ş. a transformational change took place, not only in the day-to-day operations but the whole plant was re-plumbed, re-wired and adapted to the very specifics of the feed, the environment, and the available engineering know-how. As a result, dramatic results were obtained and the improvements were noticeable. For example, even a minimum 11% feed grade could be fed to the plant and the recovery increased to 66%. Further improvements are constantly being made and the current project is focused on finer particles achieving a final recovery circa 75% and a grade around 48% but still, market demand and constraints are important for production amounts.

8 “KNOWLEDGE IN TURKEY”

With the dramatic rise of the commodity prices in the 2000's coupled with more liberal attitude of the Turkish government granting concession rights to the private sector, many of the domestic and foreign mining companies have shown a keen interest in exploring, mining and building beneficiation plants in Turkey. Not only the expertise in mineral beneficiation has improved, so has the expertise of the equipment suppliers, automation engineers, process engineers, safety and the environmental engineers.

There are 2 types of concentrate plants being built in Turkey which are the slovenly ones and the ones with proper infrastructure. From small to large companies, more of entrepreneurial fervor has caught fire and many miners and non-miners have now built their own concentration plants. Many of these plants are located in the well-known regions like Bursa-Orhaneli, Adana-Aladağ, Eskişehir-Kavak region, and Elazığ-Guleman Turkish companies are now capable of designing and building their own processing plants with their own and/or contracted engineering teams. Even mineral processing engineering has become a sub-branch on its own and a few of the universities, amongst them Istanbul Technical University,

Hacettepe and others have founded separate departments with research cadres performing truly world class research serving many of the local mining companies. Many mineral processing engineers have entered into the mining engineering market and they are capable of planning the whole plant, the beneficiation process flow, and any of them, including females, are now running whole shifts or the entire factories. With the estimates running around only 40 % of the mineral riches of Turkey have now been and/or are actively mined, the advent of mineral processing in Turkey will continue many years into the future.

9 “MADE IN TURKEY”

Not only equipment for chromite processing but in all sectors of mineral processing, there is a huge increase in local suppliers compared to say only 10 years ago. Most of these companies are small in scale primarily manufacturing customized gear for the processing industries and are primarily located in the Organized Industrial Zones (OIZ) near the bigger cities in the mining regions. Companies from Yıldırım – Bursa, Çayırova – Kocaeli, Tuzla – İstanbul, Mecidiyeköy – İstanbul, Ostim – Ankara can produce many mineral processing equipment and their spare parts like, rod mills, ball mills, screens, polyurethane spares, pumps, pump liners, mill liners, hydrocyclones, shaking tables, spirals and many more. With these local options available, mineral processing plant erection and machinery costs can go down substantially. For instance; an official quotation for a mineral processing plant project around 110M € can easily go down to 60M € with Turkish brand. Just in case of a misunderstanding; these companies are not sweatshop producers but pioneers of Turkey.

10 “PROCESSING TECHNOLOGIES”

Today's chromite processing technology is nothing new and exploits the relative movement in response to gravity to separate the mineral from the dirt. For many years,

the basic design of the equipment and the process flow has not changed much dramatically but a better quantifiable understanding of the concentration processes have resulted in incremental changes. The fact that the proliferation of many entries into this field have produced a fast learning environment with producing a prototype followed by testing it with a certain type of ore-experimenting-copying-altering, and producing the final product by the well-known iterative innovation cycle. Still there is some rather new equipment available. All these stuff below are available to our country and being used to recover chromite in Turkish Processing Plants.

MGS (Multi Gravity Separator): This is modeled after a shaking table in action. Shaking table can only utilize G-force which naturally comes with earth downwards to the ground. But the shaking table rolls on itself and sticks with the ends, one ends up with a multi gravity separator. This cylinder rotates at a speed generating a centrifugal force and so another G-force is now created. The revolution speed allows one to control the force which is actually constant for the shaking table. MGS can be used for fine particles below 200 μ to 10 μ at a %55 max recovery performance. To get rid of -10 μ MGS must be utilized with a hydrocyclone group (usually mushroom type).

Centrifugal Concentrators: This semi-continuous (batch) concentrator is a specially designed fluidized centrifuge that separates heavy material, such as gold and platinum, from lighter background material such as quartz. The material must be ground to an appropriate size, mixed with water, and then fed into the machine. Equipment generally applied to materials in which the heavy component to be recovered is a very small fraction of the total material. For most primary applications the grade of the heavy material will be less than 500 grams/ton (0.05% by weight).

Centrifugal Jig: Yet another centrifugal concentrator but this time it is a jiggling machine rolled. It is used with a screen for collecting ragging materials (usually metal

balls with proper density). Processing can go down to 10 μ .

Apart from these rather new technology, many modified shaking tables (e.g. zig-zag), many different kinds of spirals utilized for different ore types both used and produced in Turkey by totally domestic companies. Furthermore some concentrator plants are capable of producing their own equipment totally customized to suit their own needs.

11 “CONCLUSION”

Turkey in recent times performed very well and excelled in chromite concentrating branch of mineral processing and the know how in the design, engineering, and the equipment have improved immensely following a reiterative method commonly seen in innovation models. There are chromite processing plants available for processing %7 feed grade at a capacity of 4000 tpd each with a total 8000 tpd which is world class. Turkish Universities are graduating good engineers with an engineering degree in mineral processing. The Turkish government’s focus on mining to improve its share in the overall country’s GDP is also encouraging for more exploration, assaying, and both established and entrepreneurial companies to start mining ventures, especially in chromite. Many local companies are producing high quality machinery which can now compete with their foreign competitors. “*A new era in Turkish chromite processing is being underway guided by Turkish engineers...*”

REFERENCES

- Görkem Kavçak, Market Analyst, Yıldırım Holding Aydın, M, 2001, *Etibank Guleman Kef Konsantratör Tesisi Artıklarının Değerlendirilmesi*, Diyarbakır. <http://www.knelsongravitysolutions.com/page352.htm>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Sepron_Mineral_Systems
- <http://mertamakina.com/>
- <http://www.remas.com.tr/en/profil.htm>
- <http://www.ersel.com/sayfa/2/anasayfa>

TTK Amasra Lavvarı Ağır Ortam Tamburu ve Siklonlarında Kömür Yıkama Performans Çalışması

The Evaluation of Coal Washability Performance of Heavy Media Drum and Cyclones in TTK Amasra Coal Washing Plant

A. Uçar, S. Süalp

Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya

ÖZET Bu çalışma kapsamında TTK'ya bağlı Amasra Lavvarı'nın performansı değerlendirilmiştir. Amasra Lavvarı'nda kaliteli kömür üretimi gerçekleştirmek için ocaktan çıkarılan tüvenan kömür -100+10 ve -10+0,5 mm boyut gruplarına sınıflandırılıp, bu boyut grupları sırasıyla ağır ortam tamburuna (AOT), ve iki adet ağır ortam siklonuna beslenmektedir. Performans değerlendirme kapsamında üç ayrı ağır ortam cihazının beslemelerinden, yüzen ürünlerinden ve batan ürünlerinden ayrı ayrı alınan numunelere yüzdürme-batırma testleri uygulanmıştır. Test sonucu elde edilen ürünlere kül analizi yapılmış ve her ağır ortam cihazının performans eğrileri çizilmiştir. Bu performans eğrilerinden bir performans kriteri olan hata faktörleri (E_p) saptanmış ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

Ağır ortam tamburunda yapılan performans çalışmaları sonucunda hata faktörü olan E_p değerinin ideal E_p değeri sınırlarının biraz üzerinde olduğu görülmüştür. Ağır ortam siklonu-1 (AOS-1) için hesaplanan E_p değeri araştırmacıların öngördüğü ideal E_p sınırları içerisinde kalmaktadır. Fakat ağır ortam siklonu-2 (AOS-2) üzerinde yapılan performans çalışmalarında elde edilen E_p değeri, birtakım araştırmacıların ağır ortam siklonları için öngördüğü ideal E_p sınırları içerisinde yer alırken, bazı araştırmacılara göre de ideal sınırların üzerinde yer almaktadır. Ayrıca AOS-2'de daha fazla olmak üzere bütün cihazlarda kesme noktası kayması olmuştur.

ABSTRACT In this study, performance of Amasra coal washing plant, which belongs to TTK, was evaluated. To perform high-quality coal production in this plant, run of mine coal extracted from the quarry is classified into -100 +10 and -10 +0.5 mm size fractions and these classified size fractions are respectively fed to heavy media drum and two heavy media cyclones. For the performance evaluation, float-sink tests were applied to samples taken separately from the feeds, concentrates and sink products of three heavy media devices. Ash analysis was made for the products obtained as a result of the test and performance curves of each heavy media device were plotted. The error factors (E_p), performance criteria, were determined from these performance curves and comparisons were performed.

As a result of the performance studies made in heavy media drum, E_p values of the error factor were found to be slightly above the limits of the ideal value of E_p . E_p value calculated for the heavy media cyclone-1 (HMC-1) remains within the ideal E_p boundaries envisaged by researchers. The value of E_p obtained from performance studies conducted on the heavy medium cyclone-2 (HMC-2) is located within the E_p boundaries set forth for an ideal by a number of researchers, while according to some researchers, located on the ideal borders. In addition, shifting of cut-off point has occurred in all the devices, including further for HMC-2.

1 GİRİŞ

Kömür, dünya çapında dağılmış büyük yataklara sahip olarak en çok bulunan fosil yakıttır ve genel olarak enerji üretiminde kullanılmaktadır. Dünya da kullanılan elektrik enerjisinin yaklaşık %35'i termik santrallerden elde edilmektedir ve bu oran giderek artmaktadır.

Bütün kömürler az ya da çok killer, silika (kuvars), karbonatlar (Ca, Mg veya Fe), ve sülfürler (genellikle pirit ve/veya markasit) gibi mineral maddeler içerirler (Larsen ve Gorbaty 2001, Smoot ve Baxter 2001).

Bu nedenle kömür, büyük çevresel sorunlara neden olduğu için üretildikten sonra doğrudan kullanıma sunulamamaktadır.

Günümüzde çeşitli kullanım alanlarında farklılık göstermekle beraber, genel olarak kömürde aşağıdaki özellikler istenmektedir.

- Düşük kül oranı,
- Düşük nem içeriği,
- Düşük kükürt, fosfor ve alkali içeriği,
- Belirli tane iriliği, kalorifik değer,
- Koklaşma yeteneği (Sönmez 2007, Şengül 2008).

Kömürün yukarıda belirtilen özellikleri sağlaması, uygun bir yöntem veya yöntemlerle etkili bir şekilde yıkanması ile mümkündür. Kömür yıkama, tüvenan kömür içerisindeki istenmeyen safsızlıkların, kömür ve yantaş arasındaki fiziksel ve/veya yüzey özellikleri farkından yararlanarak ayrılması işlemidir. Bu şekilde kömür yıkama işlemi sonucu, ürün özelliklerinde süreklilik sağlanmaktadır. Kömür yıkama için yöntem seçimi yapmadan önce mutlaka yapılması gereken ön çalışmalar vardır. Bunlar temsili numune alımı, tüvenan kömürün kimyasal analizi, elek analizleri ve yüzdürme-batırma testleridir. Kömür yıkama yöntemi seçimi öncesinde gerekli araştırmalar yapılmadığı takdirde, beklenen ürünler alınamamakta ya da verimde önemli kayıplar ortaya çıkabilmektedir (Arslan vd 2009).

Kömürün yıkanabilirlik özelliklerinin tespiti amacıyla yapılan yüzdürme-batırma testleri, kurulması planlanan bir kömür yıkama tesisinin tasarımı için gerekli çalışmaların ilk aşamasını oluşturmaktadır. Bu testler, kömürün farklı yoğunluk fraksiyonlarında dağılımı hakkında bilgi vermesi yanında, söz konusu kömürün yıkama işlemine tabi tutulması sonucunda elde edilebilecek ürünlerin miktarı ve kül oranı hakkında teorik bir bilgi vermektedir. Bu verilerin teorik olmasından, çoğu zaman uygulamada farklılıklar çıkmaktadır. Oysa, tesiste kullanılan cihazların ayırma performanslarının bilinmesi durumunda, yıkanması düşünülen kömürlerden elde edilecek temiz kömür ve şist miktarlarının önceden gerçeğe yakın değerler ile tahmini mümkün olabilmektedir (Deniz ve Umucu 2004).

1.1 Kömür Yıkama Tesislerinde Performans

Kömür yıkama tesisinin kurulması kadar, kuruluşunda hedeflenen doğrultuda sürekli çalışmasını sağlamak da önemlidir. Bu da ancak çalışma koşullarının devamlı denetimi, sonuçların değerlendirilmesi, hedeflerle kıyaslanması, gerekli düzeltmelerin yapılması ile mümkündür. Bu sürecin tümü performans ölçümü olarak adlandırılır. Performans ölçümü ile kayıp ve kaçakları kontrol altına alıp minimize etmek, maliyetleri en düşük seviyede tutmak, plan ile fiili durumu kıyaslamak, varsa planda ortaya çıkan hataları gidermek mümkündür (Arslan vd 2009).

Günümüzde en çok kullanılan yöntem Tromp eğrisi ile yapılan performans değerlendirmesidir. Tromp eğrisi, tüvenan kömürde belirli yoğunluktaki malzemenin ayırma sonunda temiz kömüre veya artık şiste geçen oranlarını gösteren bir eğridir. 1937'de ortaya çıkan ve günümüze kadar yaygın şekilde kullanılan Tromp eğrisi, şimdiye kadar ayırım eğrisi, dağılım eğrisi, partiyon eğrisi, hata eğrisi gibi isimler

altında kullanılmıştır. Bu eğriden gerçek ayırma yoğunluğu, hassasiyet faktörü (imperfeksiyon), hata faktörü (E_p) gibi bilgiler elde edilebilmektedir. Elde edilen bu bilgiler sayısal olduğu için kıyaslanabilir değerlerdir. Bu bilgiler sayesinde tesisin hedeflenen doğrultuda çalışıp çalışmadığı belirlenirken, aynı zamanda performansta düşüş varsa bunların sebeplerinin araştırılarak düzeltmelerin yapılması için gerekli bilgileri sağlama söz konusudur (Ateşok 1986, Arslan vd 2009).

Ağır ortam cihazlarında ortam yoğunluğunun ayırma yoğunluğuna eşit olduğu düşünülse de pratikte ortam yoğunluğu gerçek ortam yoğunluğuna eşit olmamaktadır. Tüvenan kömürde bulunan ve yoğunlukları ayırma yoğunluğuna eşit olan parçaların %50'sinin temiz kömüre, %50'sinin de artık şiste geçeceği kabul edildiğinden, Tromp eğrisinin geçtiği %50 dağılım noktasındaki yoğunluk değeri ayırma yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Tromp eğrisi ile gerçek ayırma yoğunluğu belirlenebildiğinde, bu değer ortam yoğunluğu ile kıyaslanabilmekte ve kesme noktasındaki kayma da rahatlıkla görülebilmektedir (Ateşok 1986, Şengül 2008).

Bütün Tromp eğrilerinde %25 ile %75 dağılım katsayıları arasında kalan doğrunun eğimi, prosesin etkinliğinin bir ölçüsüdür. Tromp eğrisinde, %25 ve %75 dağılım faktörlerine tekabül eden yoğunluklar farkının yarısı hata faktörü olarak tanımlanır ve E_p olarak ifade edilir. Hata faktörü, ayırma etkinliği hakkında bilgi vermektedir. Düşük bir E_p değeri iyi bir ayırma işaret ederken, büyük bir E_p değeri ayırmanın iyi olmadığını gösterir (Gupta ve Yan 2006, Burt 1984, Süalp 2012, Kemal ve Arslan 1999).

Bir ağır ortam cihazının performansı ile ilgili bir değerlendirme yapabilmek için Tromp eğrisine iki açıdan bakmak gerekmektedir. Bunlardan birincisi eğrinin dike yakın olup olmadığıdır. Ayırmanın %100 verimle yapıldığı bir ağır ortam

cihazına ait ideal bir Tromp eğrisi diktir. Fakat, ortaya sayısal bir değer konulamadığından, bu yöntemle yapılan bir performans analizinin pek sağlıklı olmayacağı açıktır. İkinci yöntem ise, hata faktörü olarak tanımlanan E_p değeridir. E_p değeri, performansı sayısal olarak ifade edebilen bir değer olduğundan, E_p değeri kullanılarak yapılan performans analizlerinin daha sağlıklı sonuç vereceği açıktır (Arslan vd 2009).

Ülkemizde devlet eliyle taşkömürü üretimi yapan tek kuruluş olan Türkiye Taşkömürü Kurumu'na ait yer altı ocaklarında üretilen kömürün açık ocaklara nazaran yeterince selektif bir şekilde kazanılamaması, ocak sonrası yıkama işlemlerinin önemini bir kat daha artırmaktadır. Büyük bir bölgesel potansiyele sahip olan TTK kömürünün yıkanması işlemleri, temiz kömür teknolojilerinin yaygınlaşması açısından da son derece önemlidir. Bu durumda TTK'ya ait kömür yıkama tesislerinin çalışma koşullarının denetimi, performansların ölçümü ve bu ölçüm sonuçlarının hedeflerle kıyaslanması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında TTK'ya bağlı Amasra Lavvarı'nın performansı değerlendirilmiştir. Amasra Lavvarı'nda kaliteli kömür üretimi gerçekleştirmek için ocağın çıkarılan tüvenan kömür sınıflandırılarak, -100+10 mm fraksiyonu ağır ortam tamburuna, -10+0,5 mm fraksiyonu ise iki adet ağır ortam siklonuna beslenmektedir.

2 KÖMÜR YIKAMA TESİSİ PERFORMANS ÖLÇÜMÜ

2.1 Malzeme ve Yöntem

TTK Amasra Taşkömürü İşletmesi Müessesesi yer altı ocaklarından çıkarılan ve -100 mm altına indirilerek yıkama ünitelerine gönderilen tüvenan kömürün elektrik analizi Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de

tane boyutu azaldıkça kül oranının da azaldığı görülmektedir.

Çizelge 1. Amasra kömürü elek analizi

Boyut (mm)	Miktar (%)	Kümülatif miktar (%)	Kül (%)
100+50	18,77	18,77	79,03
-50+18	28,12	46,89	63,44
-18+10	10,37	57,26	55,8
-10+6	5,86	63,12	49,96
-6+0,5	27,98	91,1	48,59
-0,5	8,9	100	46,4

Performans değerlendirme kapsamında Amasra Lavvarı'nda bulunan ağır ortam tamburu ve iki adet ağır ortam siklonunun besleme, yüzen ürün ve batan ürünlerinden ayrı ayrı numuneler alınmış ve her numuneye yüzdürme-batırma testleri uygulanmıştır. Test sonucu elde edilen ürünlerin kül analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlarla her bir ağır ortam cihazının performans eğrileri çizilmiştir. Bu performans eğrilerinden E_p performans kriteri saptanmış ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

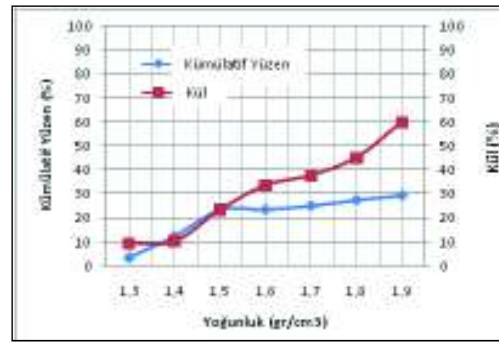
2.2 Yüzdürme-Batırma Testleri

Kömür hazırlamada, yüzdürme-batırma testleri kömürün yıkanabilirliği ile ilgili bilgiler üretmek ve kömür yıkama cihazlarının performanslarını belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu testler, fazla zaman alıcı ve sıkıcı olması nedeniyle sınırlı sayıda yoğunluklarda yapılmaktadır. Testlerden elde edilen veriler, yıkanabilirlik eğrilerinin çizimi için kullanılmaktadır (Leonard 1979, Osborne 1988).

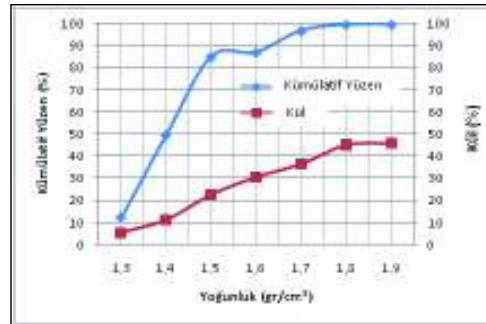
Yüzdürme-batırma testlerde kullanılan ağır ortam çözeltileri çinko klorür ile hazırlanmış ve 1,3-1,9 gr/cm^3 aralığında 0,1 gr/cm^3 artan ortam yoğunlukları kullanılmıştır. Testlerden alınan bütün yoğunluk fraksiyonlarındaki ürünler ayrı ayrı yıkanmış, kurutulmuş, tartılmış ve kül analizleri yapılmıştır.

2.2.1 Ağır Ortam Tamburu Yüzdürme-Batırma Test Sonuçları

-100+10 mm boyutlu iri kömürün yıkandığı AOT'nun besleme, yüzen ve batan ürünlerinden alınan numunelere yüzdürme-batırma testleri uygulanmış, elde edilen sonuçlarla oluşturulan kümülatif yüzen ve kül eğrileri Şekil 1-3'te verilmiştir.

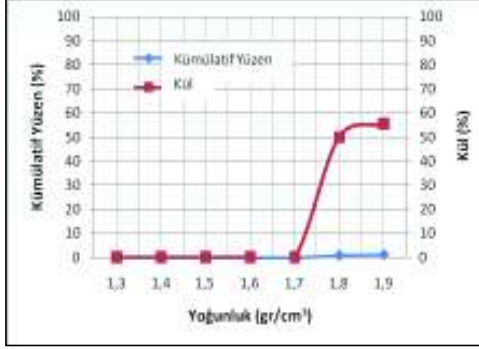


Şekil 1. Ağır ortam tamburu beslemesi kümülatif yüzen ve kül eğrileri



Şekil 2. Ağır ortam tamburu yüzen ürünü kümülatif yüzen ve kül eğrileri

AOT'dan alınan ürünlerin kümülatif yüzen eğrileri incelendiğinde ayırım yoğunluğunun yaklaşık olarak 1,8 gr/cm^3 olduğu anlaşılmaktadır. Yüzen üründe 1,8 gr/cm^3 'ten ağır tanelerin, batan üründe ise 1,8 gr/cm^3 'ten hafif tanelerin miktarları oldukça azalmaktadır.

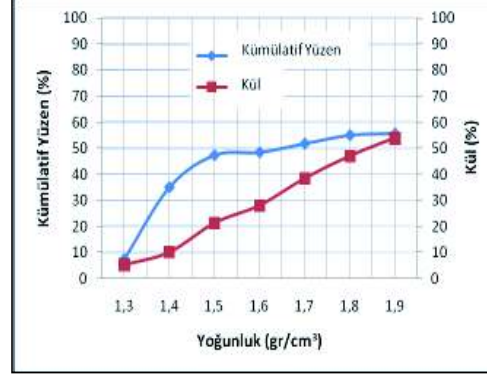


Şekil 3. Ağır ortam tamburu batan ürünü kümülatif yüzen ve kül eğrileri.

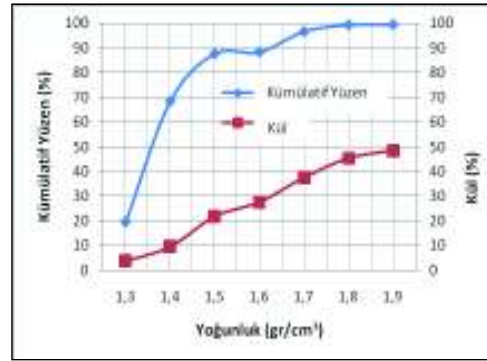
AOT'dan alınan ürünlerin kül eğrilerine baktığımızda temiz kömürde bulunan 1,7 gr/cm³'ten ağır, 1,8 gr/cm³'ten hafif tanelerin kül değerlerinin yaklaşık %45 olduğu anlaşılmaktadır. Ortam yoğunluğu olan 1,7 gr/cm³'ten hafif ve bir alt değeri olan 1,6 gr/cm³'ten ağır tanelerin kül değerlerinin ise %36 civarında olduğu görülmektedir. Bu iki kül değeri arasında oldukça fark bulunmasına rağmen, temiz kömürde bulunan 1,7 gr/cm³'ten ağır, 1,8 gr/cm³'ten hafif tanelerin toplam temiz kömür numunesinin %2,76'sına tekabül etmesi nedeniyle ayırım yoğunluğunun 1,8 gr/cm³'e kaymasının temiz kömür kalitesine fazla olumsuz etkide bulunmayacağı açıktır. Ayrıca batan üründe kül değerleri %50-56 arasında değişen %1,21 oranında kömür bulunmaktadır.

2.2.2 Ağır Ortam Siklonu-1 Yüzdürme Batırma Test Sonuçları

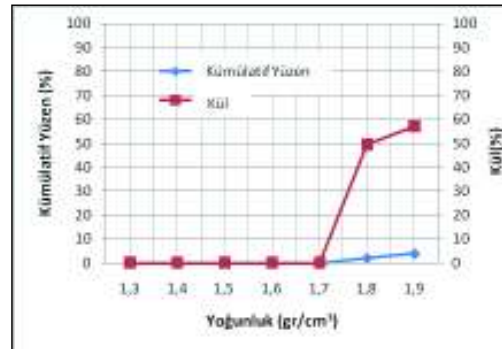
-10+0,5 mm boyutlu ince kömürün yıkandığı AOS-1'in besleme, yüzen ürün ve batan ürünlerinden alınan numunelere yüzdürme batırma testi uygulanmış, elde edilen sonuçlarla oluşturulan kümülatif yüzen ve kül eğrileri Şekil 4-6'da verilmiştir.



Şekil 4. Ağır ortam siklonu-1 beslemesi kümülatif yüzen ve kül eğrileri



Şekil 5. Ağır ortam siklonu-1 yüzen ürünü kümülatif yüzen ve kül eğrileri



Şekil 6. Ağır ortam siklonu-1 batan ürünü kümülatif yüzen ve kül eğrileri

Lavvarda AOS-1 ve AOS-2'nin batan ürünleri birleştirildiğinden her iki siklonun batan ürünü ortak alınmıştır.

AOS-1'den alınan ürünlerin kümülatif yüzen eğrileri incelendiğinde ayırım yoğunluğunun yaklaşık olarak 1,8 gr/cm³ olduğu görülmektedir. Yüzen üründe 1,8 gr/cm³'ten ağır tanelerin, batan üründe ise 1,8 gr/cm³'ten hafif tanelerin miktarları oldukça azalmaktadır.

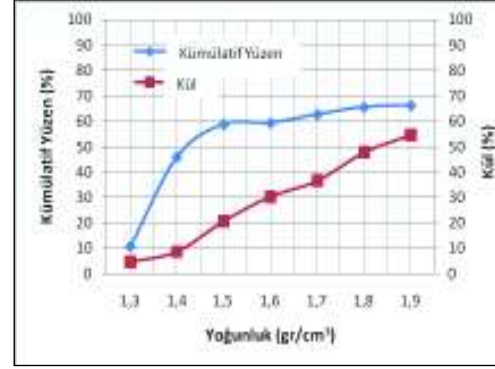
AOS-1'in kül eğrileri incelendiğinde temiz kömürde, ortam yoğunluğu olan 1,7 gr/cm³'ten hafif ve 1,6 gr/cm³'ten ağır tanelerin kül değerlerinin %37 civarında olduğu görülmektedir. Ayırım yoğunluğu olan 1,8 gr/cm³'ten hafif ve 1,7 gr/cm³'ten ağır tanelerin kül değeri ise %45'tir. Bu iki kül değeri arasında oldukça büyük bir fark olmasına rağmen, temiz kömürde bulunan 1,7 gr/cm³'ten ağır, 1,8 gr/cm³'ten hafif tanelerin toplam temiz kömür numunesinin %2,71'ine tekabül etmesi, ayırım yoğunluğunun 1,8 gr/cm³'e kaymasının temiz kömür kalitesine fazla olumsuz etkide bulunmayacağı açıktır. Ayrıca batan üründe %3,91 oranında kül değerleri %50-57 arasında değişen kömür bulunmaktadır.

2.2.3 Ağır Ortam Siklonu-2 Yüzdürme Batırma Test Sonuçları

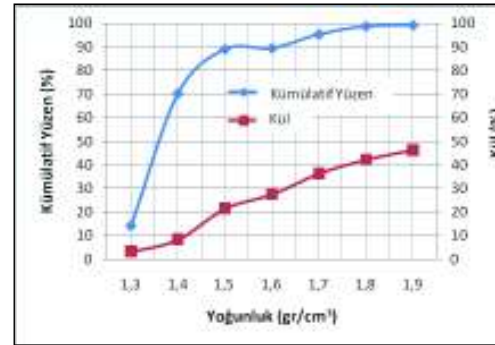
-10+0,5 mm boyutlu ince kömürün yıkandığı diğer ağır ortam cihazı olan AOS-2'den alınan numunelere uygulanan yüzdürme-batırma testi sonuçlarıyla oluşturulan kümülatif yüzen ve kül eğrileri Şekil 7-9'da verilmiştir.

AOS-2'den alınan numunelerin kümülatif yüzen eğrileri incelendiğinde ayırım yoğunluğunun 1,85 gr/cm³ civarında olduğu görülmektedir. Yüzen üründe 1,85 gr/cm³'ten ağır tanelerin, batan üründe ise 1,85 gr/cm³'ten hafif tanelerin miktarları oldukça azalmaktadır. AOS-2'ye beslenen kömürün yaklaşık %67'lik bir bölümünü 1,9 gr/cm³'den hafif taneler oluşturmaktadır. Bu özelliğiyle AOS-2'nin diğer iki ayırma

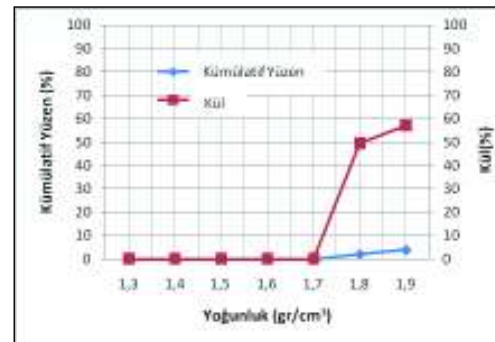
cihazından daha yüksek bir temiz kömür verimine sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 7. Ağır ortam siklonu-2 beslemesi kümülatif yüzen ve kül eğrileri



Şekil 8. Ağır ortam siklonu-2 yüzen ürünü kümülatif yüzen ve kül eğrileri



Şekil 9. Ağır ortam siklonu-2 batan ürünü kümülatif yüzen ve kül eğrileri

AOS-2'nin kül eğrileri incelendiğinde temiz kömürde ortam yoğunluğu olan 1,7 gr/cm³'ten hafif ve 1,6 gr/cm³'ten ağır tanelerin kül değerinin %36 olduğu görülmektedir. Ayırma yoğunluğu olan 1,85 gr/cm³'ten hafif ve ortam yoğunluğu olan 1,7 gr/cm³'ten ağır tanelerin kül değerleri %42 ile %46 arasında değişmekte ve bu taneler toplam temiz kömür numunesinin yaklaşık olarak %3,60'ına karşılık gelmektedir.

Kül değerleri arasında oldukça fazla fark olması ve kaçak kömürün temiz kömür içindeki miktarının çokluğu nedeniyle kesme noktası kayması, temiz kömür kalitesini diğer iki ağır ortam cihazına göre daha fazla olumsuz etkilemektedir. AOS-2'de ayırma yoğunluğu kayması 0,15 gr/cm³'dür ve bu kesme noktası kayması dolayısıyla temiz kömüre giren ortam yoğunluğundan ağır tanelerin miktarca yüzdesi, diğer iki ağır ortam cihazına göre yaklaşık %1 daha fazladır. Bu nedenle AOS-2'nin kesme noktası kaymasından ötürü elde edilen temiz kömüre en fazla olumsuz etki yaratan ağır ortam cihazıdır.

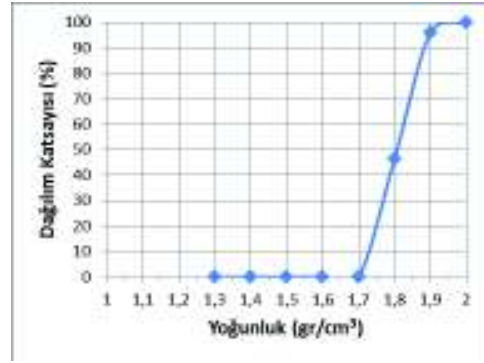
2.3 Ağır Ortam Cihazlarının Performansı

Numune alınan dönemde TTK Amasra Lavvarı'nda AOT ve AOS'ları etrafındaki akışlarda toplam yüzen ve batan miktarlar ile bu akışlardaki kül değerlerinin madde denkliliği oturtulmuştur. Buna göre ve alınan numuneler üzerinde yapılan yüzdürme-batırma testlerinden elde edilen veriler kullanılarak bu cihazların performans eğrileri çizilmiş ve performans kriterleri belirlenmiştir.

2.3.1 Ağır Ortam Tamburu Performansı

AOT performansını ortaya koyan ve Şekil 10'da verilen Tromp eğrisinin bir miktar yatık olduğu görülmektedir. Ağır ortam tamburuna ait E_p değeri 0,05 ve gerçek ayırım yoğunluğu 1,81 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. Ortam yoğunluğunun 1,7 gr/cm³ olduğu bu ağır ortam cihazında 0,11

gr/cm³'lük bir kesme noktası kayması bulunmaktadır. Bu durum, 1,7 gr/cm³'ten ağır ve 1,81 gr/cm³'ten hafif tanelerin de yüzen ürün içerisinde yer alması anlamına gelmektedir. Bu 0,11 gr/cm³'lük dilimde yüzerek temiz kömüre dahil olan kaçak kömür toplam temiz kömür numunesinin %2,76'sını oluşturmaktadır.

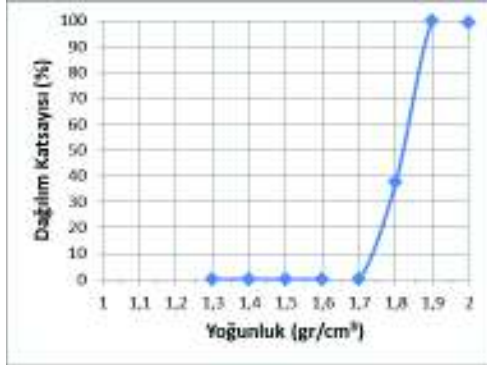


Şekil 10. Ağır ortam tamburu Tromp eğrisi

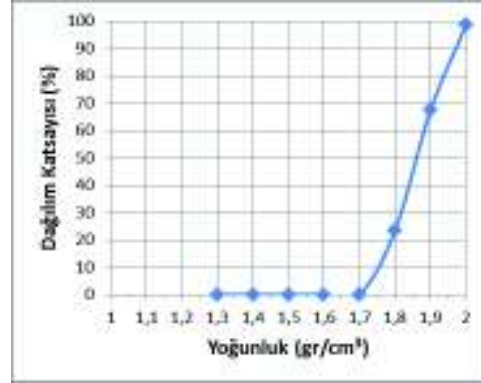
Temiz kömüre dahil olan bu kaçak kömür, E_p değerini de bir miktar yükseltmiştir. Laskowski'ye göre AOT olması gereken ideal E_p sınırları 0,03-0,04 iken bu sınırlar Leonard'a göre 0,02-0,028, Gupta ve Burt'a göre 0,01 ile 0,02 ve Wills'e göre ise 0,02 ile 0,04'tür. AOT'na ait E_p değerinin, bu sınırları biraz aştığı ve buna bağlı olarak da yıkama performansının biraz düşük olduğu görülmektedir (Burt 1984, Gupta ve Yan 2006, Wills ve Napier-Munn 2006, Leonard 1979, Laskowski 2001).

2.3.2 Ağır Ortam Siklonu-1 Performansı

Şekil 11'de verilen AOS-1'e ait Tromp eğrisinden gerçek ayırım yoğunluğunun 1,82 gr/cm³ ve E_p değerinin 0,045 olduğu görülmektedir. Bu 0,12 gr/cm³'lük kesme noktası kayması nedeniyle yüzerek temiz kömüre karışan kaçak kömür toplam temiz kömür numunesinin %2,75'ini oluşturmaktadır.



Şekil 11. Ağır ortam siklonu-1 Tromp eğrisi



Şekil 12. Ağır ortam siklonu-2 Tromp eğrisi

Ağır ortam siklonları için ideal E_p sınırları Laskowski'ye göre 0,03-0,08, Leonard'a göre 0,031-0,058, Burt'a göre 0,02-0,05, Guptay'a göre 0,01-0,04 ve Wills'e göre ise 0,025 ile 0,07 arasındadır (Burt 1984, Gupta ve Yan 2006, Wills ve Napier-Munn 2006, Leonard 1979, Laskowski 2001).

Kesme noktası kaymasına ve Tromp eğrisinin bir miktar yatık olmasına rağmen ağır ortam siklonu-1'in E_p değeri, araştırmacıların çoğunluğunun ağır ortam siklonları için öngördüğü ideal E_p değeri sınırları içerisinde yer almaktadır. Buna göre yıkama performansı da yüksek olmuştur.

2.3.3 Ağır Ortam Siklonu-2 Performansı

Şekil 12'de verilen AOS-2'nin performans eğrisine bakıldığında, eğrinin daha yatık, gerçek ayırım yoğunluğunun 1,86 gr/cm³ ve E_p değerinin 0,06 olduğu görülmektedir. AOS-2'deki 0,16 gr/cm³'lük kesme noktası kayması nedeniyle yüzerek temiz kömüre karışan kaçak kömür, toplam temiz kömürün %3,6'sını oluşturmaktadır.

AOS-2'nin 0,06 olan E_p değeri, Laskowski ve Wills'e göre ideal E_p değeri sınırları içerisindeyken, Leonard, Gupta ve Burt'a göre ideal sınırların üzerindedir. Bütün bu bilgiler ışığında ağır ortam siklonu-2'nin orta dereceli bir performans ile yıkama yaptığı söylenebilir.

3 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Her üç ağır ortam cihazında da kesme noktası kayması bulunmaktadır.
- Ağır ortam tamburundaki kesme noktası kaymasının performansa olumsuz etkisi olmaktadır.
- Ağır ortam siklonu-1'deki kesme noktası kayması, performansı olumsuz etkilememektedir.
- Ağır ortam siklonu-2'deki kesme noktası kayması performansı olumsuz etkilemektedir ve bu kesme noktası kaymasının temiz kömür kalitesine olumsuz etkisi diğer iki ağır ortam cihazından daha fazla olmaktadır.
- Ağır ortam tamburunun E_p değeri, araştırmacılar tarafından ortaya konulan ideal E_p değeri sınırlarının üzerindedir. Fakat performans eğrisinin fazla yatık olmaması, orta dereceli bir ayırma yaptığını göstermektedir.
- Ağır ortam siklonu-1'in E_p değeri, ağır ortam siklonları için araştırmacıların belirlediği ideal E_p sınırları içerisindeyken.
- Ağır ortam siklonu-2'nin E_p değeri, bazı araştırmacılara göre ideal sınırlar içerisindeyken, bazılarının öngördüğü ideal E_p sınırlarının üzerindedir. Bu durum ağır ortam siklonu-1'in orta dereceli bir ayırma yaptığını göstermektedir.

- TTK Amasra Lavvarı'nda en yüksek performansa sahip ağır ortam cihazı ağır ortam siklonu-1'dir.

4 ÖNERİLER

- Ağır ortam cihazlarında saptanan kesme yoğunluğu kaymalarının temiz kömür kalitesine olumsuz etkilerinin en aza indirgenmesi amacıyla cihazlar için ayırma yoğunluğunun, istenilen kül değerine göre, gerçek ayırma yoğunluğundan ortam yoğunluğu civarına çekilmesi gerekmektedir.

- Ağır ortam cihazlarının anlık takibinin manuel olarak kontrol altında tutulması yerine bilgisayarlı sistemlerle kontrol edilmesinde büyük fayda vardır. Bilgisayarlı sistemle kontrol sayesinde kesme yoğunluğu kaymaları da anında tespit edilerek gerekli müdahalenin zamanında yapılması mümkün olacaktır. Bu şekilde temiz kömüre şist, şiste de temiz kömür kaçakları minimum düzeye indirilerek cihazların performanslarındaki olası düşüşler en kısa zamanda engellenmiş olacaktır.

- Kömür yıkama tesisleri, özellikle sürece müdahale ve dolayısıyla farklı kalitede ürün almaya yönelik olarak verdiği esneklik sebebiyle ağır ortam cihazları dönemsel olarak değişik koşullarda ve dolayısıyla farklı performanslarda çalışmaktadır. Bu nedenle performans değerlendirmede tek bir döneme ait oluşturulmuş veriler üzerinde çalışmaktansa, farklı dönemlerde elde edilmiş veriler üzerinde cihazların dönemsel performanslarını ortaya koymak, kömür yıkama cihazlarının performanslarını değerlendirmede bir başka önemli noktadır.

KAYNAKLAR

Arslan, V., Tanrıverdi, M., Şen, S. ve Er, B., 2009, Türkiye'de kömür hazırlama tesisleri, performans ölçümünün önemi ve bir örnek uygulama, *Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, s.434-435.

Ateşok, G., 1986, *Kömür hazırlama*, Kurtiş Matbaası., İstanbul, 192s.

Burt, R. O, 1984, *Gravity concentration technology*, Developments in Mineral Processing, ELSEVIER Science and Technology Books, p601.

Deniz, V. ve Umucu, Y., 2004, Soma Buruyar şirketinin ağır ortam tamburu ve siklonunda kömür yıkama performans çalışması, *Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, Zonguldak, 161-170 s.

Gupta, A. and Yan, D. S., 2006, *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*, Elsevier, 693p.

Kemal, M. ve Arslan, V., 1999, *Kömür Teknolojisi*, DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayın no:33, İzmir, 370s.

Larsen, J. W. and Gorbaty, M. L., 2001, Coal Structure and Reactivity, Encyclopedia of Physical Science and Technology, Energy, Robert A. Meyers (Editor), 107-122p,

Laskowski, J. S, 2001, *Coal flotation and fine coal utilization*, Elsevier, 368 p.

Leonard, J. W. and Hardinge, B. C., *Coal preparation*, Society For Mining, Metallurgy and Exploration, INC., Littleton, Colorado, 680 p.

Leonard, J. W., 1979, *Coal Preparation*, Am. Inst. Min. Metali. Pet. Eng. 4th Edition

Osborne, D. G., 1988, *Coal Preparation Technology*, Graham & Trotman Ltd. Cilt. I, s. 179-188, London, UK.

Smoot, L. D. and Baxter, L. L., 2001, *Fossil Fuel Power Stations- Coal Utilization*, Encyclopedia of Physical Science and Technology, Energy, Robert A. Meyers (Editor), 121-144p,

Sönmez, H., 2007, *Tunçbük lavvarı tikner altı iri atık kömürlerin modifiye flotasyon kolonu ile zenginleştirilmesi*, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi, 45s.

Süalp, S., 2012, *TTK Amasra Lavvarı'nın çalışma koşulları ve performansı*, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi, 91 s.

Şengül, C. O., 2008, *TKİ-GLİ müessesesi Ömerler kömür hazırlama tesisinin performansının değerlendirilmesi*, Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, 90s.

Wills, B. A. and Napier-Munn, T., 2006, *Mineral Processing Technology*, Elsevier, p444.

Modifiye Su Siklonu ile İnce Boyutlu Taşkömürünün Zenginleştirilmesi

Fine Hardcoal Beneficiation by Using Modified Water-Only Cyclone

H. Hacıfazlıoğlu

İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul

ÖZET Su siklonu, ayırma sıvısı olarak mikron boyutlu sulu şlamı kullanan otojen ortam esaslı bir gravite ayırıcıdır. Klasik hidrosiklona göre temel farkı daha geniş koniklik açısına ($>100^\circ$) ve daha uzun vorteks borusuna sahip olmasıdır. İşletmelerde su siklonunun başlıca avantajları; manyetit süspansiyonu gerektirmemesi ve yüksek kapasiteli olmasıdır. Bu çalışmada, yerel imkanlarla tasarlanmış ve tesis ölçeğinde kurulmuş olan modifiye su siklonu ile -1 mm boyutlu (~%50 küllü) Zonguldak taşkömürünün zenginleştirilmesi için deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca, modifiye su siklonu ünitesinin yıkama performansında etkili olan ana parametrelerden; siklon çapı, vorteks çapı ve apeks çapının etkisi araştırılmıştır.

ABSTRACT The water-only cyclone is an autogenous medium separator that makes a gravity separation using slurry as the separating fluid. The main difference between WOC and hydrocyclone is that the former has a wide cone angle ($>100^\circ$), and long wortex finder whereas hydrocyclones have a small cone angle and a short vortex finder. The certain advantages of the WOC in plants are no magnetite suspension and high capacity. In this study, modified WOC was designed, plant scale installed via local facilities, and then implemented for the treatment of -1 mm (ash ~%50) fine hard coal. Besides, the effects of the major parameters of modified WOC, such as cyclone diameter, vortex finder diameter and apex diameter, on washing performance were investigated in detail.

1 GİRİŞ

Zonguldak havzasında yıllık 5 Mt civarında tuvönan taşkömürü üretilmekte ve bunun yaklaşık 3Mt'u kömür yıkama tesisine girmektedir.

Ortalama %50 oranında şist (kül) içeren Zonguldak tuvönan kömürü yıkama tesisi sonrasında %10 küllü temiz kömürlere dönüştürülmekte ve genellikle bu kömür

metalurji sanayisinde kok kömürüne dönüştürülerek kullanılmaktadır.

Tuvönan kömür üretim yöntemine ve kömürün kırılgenliğine bağlı olarak, farklı boyut gruplarında olabilmektedir. Genellikle, delme-patlatma ile yer altı ocaklarından çıkarılan kömürün ortalama tane boyutu 200-400 mm civarında ve belirli bir dağılıma göre sifıra kadar değişen farklı boyut gruplarında olabilmektedir. Tuvönan kömür,

yıkama tesisine girmeden önce, 100 mm açıklıklı bir elekten elenmekte ve elek üstü genellikle elle ayıklama (bant üstünde triyaj) yöntemi ile zenginleştirilmektedir. Ara ürünün fazla olduğu bazı uygulamalarda ise elek üstü kırılarak tamamı 100 mm açıklıklı eleğin altına indirilmekte ve yıkama tesisine girmektedir. Tuvönan kömürün tamamı 100 mm'nin altına indirildikten sonra, alt ve üst katlardaki elek açıklıkları 1 ve 18 mm olan çift katlı titreşimli ön-yıkama eleğinden geçirilir. Bu elekte -1 mm'lik ince kömür ayrıldıktan sonra, 1-18 mm boyut grubu ağır ortam siklonlarına beslenir. 18-100 mm boyut grubu ise genellikle Wemco tipi ağır ortam tamburlarıyla ya da Drewboy teknesi ile zenginleştirilmektedir. Bazı eski tesislerde ise halen jiglerle 1-100 mm boyutu tuvönan kömürün yıkaması yapılmaktadır.

Zonguldak kömürlerinin kırılğan yapıda olması ve üretim yöntemi nedeniyle aşırı ufalanması ince boyut grubunda tesis kayıplarını önemli ölçüde arttırmaktadır. Havzada üretilen tuvönan kömürün işletmelere göre %15 ile %30'u ince boyutlu kömür diye tabir edebileceğimiz -1 mm boyutlu kömürlerden oluşmaktadır. Bu durum, özellikle ince boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. 2005 yılı öncesinde ince boyutlu tuvönan kömürler zenginleştirilmeden Çatalağzı Termik Santraline gönderilirdi. Ancak, günümüzde rödevanslı sahaların ve dolayısıyla üretilen tuvönan kömürlerin miktarının artması ile birlikte oluşan ince boyutlu kömürlerin miktarı da artmış ve mevcut termik santrallerin yakma kapasitesinin çok çok üzerine çıkmıştır. Bu yüzden termik santrallerde yakılamayan arz fazlası kömürün zenginleştirilme ihtiyacı doğmuştur. Son 7 yılda Zonguldak havzasında üretilen ince boyutlu kömürler zenginleştirilmekte ve ortalama ısıl değerleri 6500 kcal/kg'ın üzerine çıkartılarak demir-

çelik sektöründe yüksek fırın yakıtı olarak değerlendirilmektedir.

Zonguldak havzasındaki ince boyutlu kömürlerin hemen hemen hepsi kömür spiralleri ile zenginleştirilmektedir. Bazı tesislerde ise, flotasyon ve sallantılı masa uygulamaları halen mevcuttur. Yaygın olarak kullanılan spiral ayırıcılarda genellikle verimsiz çalışma koşulları uygulanmakta (yüksek besleme miktarı vs gibi) ve bu cihazlardan istenen kül ve verim değerleri elde edilememektedir. Spirallerde yaşanan bir diğer önemli problem ise cihazdan çıkan atığın nihai atık niteliğinde olmamasıdır. Bu bakımdan kömür hazırlama sektöründe; kullanımı kolay, kapasitesi ve verimi yüksek ince kömür zenginleştirme cihazlarına olan talep günden güne artmaktadır. Her ne kadar yurtdışında MGS, Falkon, Knelson, Kelsey Jig, TBS ve Reflux gibi ileri teknoloji cihazlar ile ince boyutlu kömürler zenginleştirilse bile, ülkemizde henüz bu cihazlara sıcak bakılmamaktadır. Bunun muhtemel nedeni; ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, yan sanayisinin bulunmaması ve cihazın işletiminin karmaşık ve zor olmasıdır. Bu bağlamda, su siklonu gibi basit yapılu gravite cihazlarının verimlerinin artırılarak kullanılması işletmecilere önemli avantajlar sağlayacaktır. Endüstriyel ölçekte kullanımı çok yaygın olmayan su siklonları ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan öne çıkanlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:

Patil ve arkadaşları (1997) kaba kurşun konsantresinden grafiti uzaklaştırmak için 76 mm'lik su siklonu kullanmışlar ve %3'den daha az grafit içeren bir kurşun konsantresi elde etmişlerdir. Aynı çalışmada, özellikle vorteks çapının grafiti uzaklaştırmada önemli etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Rubiera ve arkadaşları (1997) çapı 50 mm, uzunluğu 67 mm olan bir su siklonu ile -0.2 mm kömürden kül ve kükürt giderme çalışmaları yapmışlardır. Su siklonu ile kül

ve kükürt değerinde yaklaşık %20'lik bir düşüşün sağlanabileceği ve köpük flotasyonun piriti gidermede verimsiz olduğu ve bu nedenle flotasyon öncesinde su siklonun kullanılmasının avantajlı olacağını belirtmişlerdir. Kim ve Klima (1998) ise su siklonunda siklon geometrisi ve işletim parametrelerinin performans üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Xia ve Li (2007) ağır ortam esaslı kömür yıkama tesisinde manyetit kayıplarını azaltmak ve flotasyona beslenen kömür miktarını azaltmak için su siklonu kullanmışlardır. Bu tesiste, -1 mm boyutlu Hindistan kömürü su siklonu kullanılarak zenginleştirilmiş ve flotasyona beslenen kısım -0.15 mm ile sınırlı kalmıştır. Su siklonundan elde edilen atık içerisindeki yanabilir maddelerin geri kazanılması için sisteme bir spiral konsantratör ilave edilmiştir. Su siklonundaki ayırma boyutunun 0.5 mm'den 1mm'ye çıkarılması manyetit kayıplarını da azaltmıştır. Kalyani et al. (2008) kesikli tip su siklonu ile yüksek kül içerikli ve okside olmuş Hindistan kömürlerini zenginleştirmişlerdir. Siklon performansında etkili olan parametrelerden siklon uzunluğu ve katı konsantrasyonun etkisini araştırmışlardır. En yüksek temiz kömür verimini 200 mm uzunluğundaki bir siklon ile %10 katı oranında elde edilmiştir. Bu siklonun çapı 100mm, vorteks uzunluğu ise 200 mm seçilmiştir. Aynı çalışmada, çalışma basıncı 98kPa, vorteks ve apeks çapları sırasıyla 50 ve 24 mm olarak belirlenmiştir. Literatürdeki son çalışmada, Majumder ve Barnwal (2011) su siklonunda bazı önemli tasarım parametrelerinin etkisini araştırmak için regresyon modelleri geliştirmişlerdir. Kömürü iyileştirmek için en hassas tasarım parametresinin vorteks çapı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, boyut gruplarına göre yapılan çalışmalar sonucunda su siklonu ile -0.075 mm kömürden kül

gideriminin oldukça zor olduğunu rapor etmişlerdir.

Bu çalışmada su siklonu modifiye edilmiş ve -1mm boyutlu Zonguldak taşkömürünün zenginleştirilmesi için test edilmiştir.

2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Kömür Numunesine Ait Özellikler

Deneysel çalışmalar, Zonguldak ilinde faaliyet gösteren özel bir şirkete ait ağır ortam esaslı kömür yıkama tesisinde yürütülmüştür. Bu bakımdan çalışmalarda kullanılan numuneler tesis beslemesi ve dolayısıyla ince zenginleştirme devresine ait olan -1mm boyutlu tüvönan kömürlerdir. Söz konusu tesiste, 3 ünlü Larcodems cihazına giren iri (+1-100 mm) tüvönan kömürün kül içeriği %45 ile %56 arasında değişmekte ve bu cihazdan %10 ile %12 küllü temiz kömürler üretilmektedir. -1 mm boyutlu kömürler ise eleklerle susuzlandırılarak termik santral yakıtı olarak değerlendirilmektedir.

TTK 13 No'lu rödevanslı üretim bölgesinden 25 tonluk kamyonlarla yıkama tesisine getirilen farklı kül değerlerindeki her tüvönan kömürden düzenli olarak 20'şer kg'lık numuneler alınmış ve bu numuneler 1 ayın sonunda harmanlanarak ortalama bir tüvönan kömür numunesi tespit edilmiştir. Söz konusu ortalama tüvönan kömürün elek analizi ve boyut gruplarına göre kül içerikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Tüvönan kömürün su siklonu ile zenginleştirilecek olan kısmı -1.0+0.2 mm boyut fraksiyonun yıkanabilirlik sonuçlarının tespiti için konvansiyonel yüzdürme-batırma testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de özetlenmiştir. Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi, tüvönan kömür tanelerinin gravite ayrımı yapılabilecek kadar serbest tanelerden oluştuğu ve modifiye su siklonuna beslenen kömürün ortalama kül

içeriğinin yaklaşık %50 olduğu açıkça görölmektedir.

Çizelge 1. Tuvönan kömürün elek analizi ve boyut grubuna göre kül dağılımları

Boyut Grubu (mm)	Miktar (%)	Kül (%)
-100+50	16.20	52.40
-50+18	17.10	50.20
-18+10	12.30	49.90
-10+5.0	15.20	51.20
-5.0+1.0	19.20	48.80
-1.0	20.00	50.10
Total	100.00	50.38

Çizelge 2. -1.0+0.2 mm tuvönan kömürün yüzdürme-batırma test sonuçları.

Yoğunluk (g/cm ³)	Yüzen		Toplamlı Yüzen		Toplamlı Batan	
	Miktar (%)	Kül (%)	Miktar (%)	Kül (%)	Miktar (%)	Kül (%)
-1.45	36.00	8.10	36.00	8.10	100.00	50.06
+1.45 -1.60	7.50	26.00	43.50	11.19	64.00	73.66
+1.60 -1.75	6.00	35.90	49.50	14.18	56.50	79.99
+ 1.75 -1.90	5.20	53.20	54.70	17.89	50.50	85.22
+1.90	45.30	88.90	100.00	50.06	45.30	88.90
Total	100.00	50.06	-	-	-	-

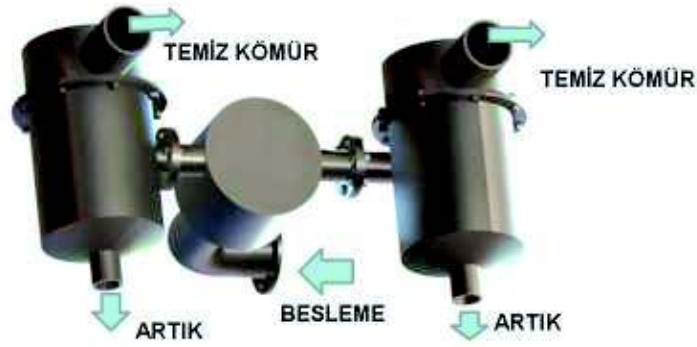
2.2 Modifiye Su Siklonun Tanıtılması

Modifiye su siklonu, klasik su siklonlarından farklı olarak yatay konumda çalıştırılmakta ve ortamdaki sulu şlamı “ayırma ortamı” olarak kullanmaktadır. Bu sayede manyetit süspansiyonuna ihtiyaç duyulmadan kömür-şist ayrımı yapılabilmektedir. Ayırmada etkili olan en önemli parametre siklon tasarımı (çap, boy v.s) ve iç basınç dengeli merkezi kolektörlü besleme sistemidir. Yapılan ön-çalışmalar sonucunda, su siklonunu dik ve tekli çalıştırmanın verimli olmadığı görölmüş ve bu yüzden siklon modifiye edilerek merkezi beslemeli, yatay ve çift siklonlu olarak tasarlanmıştır (Şekil 1). Modifiye siklonda ayırma, klasik hidrosiklonlardan farklı olarak çok düşük çalışma basınçlarda (<0.5 bar)

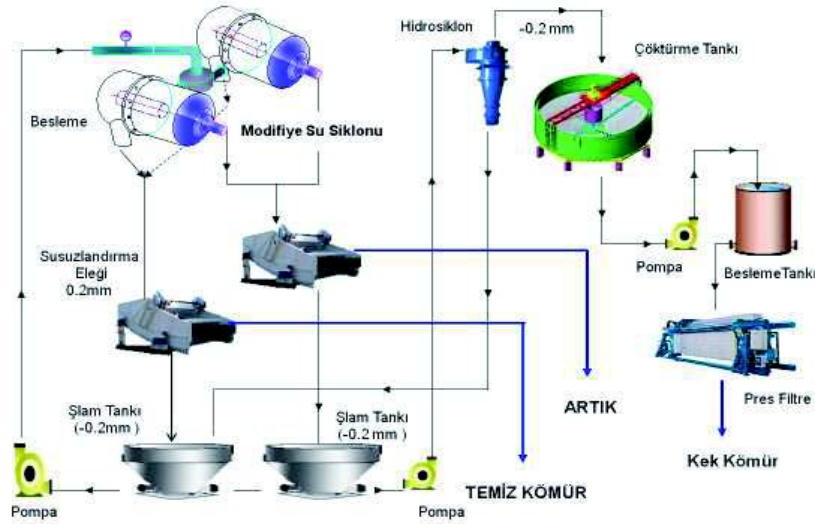
gerçekleştirilmektedir. Bu durum özellikle tesislerde aşınmaların engellenmesi açısından önemli avantaj sunmaktadır. Modifiye su siklonunda ayırma işlemi; santrifuj, hidrodinamik, yerçekimi ve taneler arasındaki sürtünme kuvvetlerinin toptan etkisi ile gerçekleştirilir. Şekil 1’de gösterilen 25 t/s kapasiteli Modifiye su siklonuna besleme 200 mm giriş ve 150 mm çıkış borularına sahip bir santrifuj pompa ile sağlanmaktadır. 37 kw’lık bir motorla tahrik edilen santrifuj pompa mili, %25-30 katı içeren pülp malzemesini 4 m yükseklikte bulunan cihaz içerisine beslemektedir. Cihazdan elde edilen 2 ürün (artık ve temiz kömür), 0.2 mm göz açıklığına sahip iki ayrı corima yüzeyle yüksek frekanslı titreşimli elek ile susuzlandırılmakta ve elek üstünden artık ve temiz kömür alınmaktadır. Elek

altına geçen -0.2 mm pülp tekrar santrifuj pompaya girmekte ve devridaim yapmaktadır. 10'uncu devridaimden sonra sistemde şlam oranı artmakta ve ayırma ortamın vizkozitesi yükselmektedir. Vizkoziteyi ve dolayısıyla otojen ortam yoğunluğunu sabit tutmak amacıyla belirli aralıklarla şlam 250 mm çapındaki bir hidrosiklonla beslenmekte ve hidrosiklonun

üst akımından elde edilen çok ince boyutlu şlam çöktürme tankına gönderilmektedir. Alt akım ise modifiye siklonun pompa tankına (elek altı besleme tanklarına) gönderilmektedir. Bu yolla otojen ortamın yoğunluğu sabit tutulmaktadır. ÇTA ve yardımcı ünitelerinin tesisdeki yerleşimi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Modifiye su siklonun merkezi kollektörlü görüntüsü



Şekil 2. Modifiye su siklonu ile zenginleştirme devresi genel akım şeması

3 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Literatür verilerinden görülebileceği gibi modifiye siklonun ayırma performansını etkileyen pek çok parametre bulunmaktadır (Kim ve Klima, 1998; Majumder ve Barnwal 2011). Bu çalışmada bu parametrelerden en önemlileri olan siklon çapı, vorteks ve apeks çaplarının siklon performansına etkileri incelenmiştir. Optimum siklon çapının belirlenebilmesi için 400, 600 ve 800 mm çaplarında siklonlar kullanılmış ve bu siklonlardan elde edilen yıkama verimleri Çizelge 3'de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda ortalama katı konsantrasyonu %25, sabit pompa besleme debisi 2.5 m³/dk seçilmiştir. Kullanılan 400, 600 ve 800 mm çaplı siklonlarda ölçülen iç basınç değerleri sırasıyla 20, 10 ve 2 kPa bulunmuştur. Basınç düşüşünün nedeni siklon çapının artmasıyla, siklon iç hacminin artması ve bunun sonucunda iç basıncın azalmış olmasıdır. Çizelge 3'den görülebileceği gibi, tuvönan besleme küllü %45 ile %56 arasında değişmektedir. Genel olarak, çeşitli çaplardaki siklonlarda besleme küllü arttıkça elde edilen temiz kömürlerin kül içeriği de artmıştır. Diğer taraftan, siklon çapının büyütülmesi ile elde edilen temiz kömürlerin kül içerikleri de artmıştır. Siklon çaplarının 400, 600 ve 800mm olması durumunda modifiye su siklonundan elde edilen temiz kömürlerin ortalama kül içerikleri sırasıyla %11.70, %18.00 ve %24.80 bulunmuştur. Bunun nedeni, siklon çapının büyütülmesi ile basıncın düşmesi ve bunun sonucunda tanelere uygulanan merkezkaç kuvvetinin büyüklüğünün azalmış olmasıdır. Diğer yandan; $V=Q/A$ eşitliğe göre; V (hız) değeri; su siklonun iç alanı (A) ile ters orantılı, volümetrik akış oranı (Q) ile doğru orantılıdır. Q değeri pompa beslemesi ile sabit olduğu için, siklon çapının artırılması ile V değeri azalmaktadır. V değerinin

azalması, tanelere uygulanan merkezkaç kuvvetinin büyüklüğünün azalması anlamına gelmektedir. Bu durum seperasyonun etkinliğinin azalması anlamına gelir. Siklon çapına bağlı yanabilir verim değerlerine bakılırsa, 400 mm'lik su siklonu için %47.61 iken, 800 mm'lik su siklonu için %43.43'e düşmüştür.

Su siklonlarında vorteks ve apeks çapının ayırma verimini etkileyen en önemli dizayn parametreleri olduğu pek çok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır (Patil vd. 1997; Kim ve Klima, 1998; Majumder ve Barnwal 2011). Genel olarak vorteks çapı büyüdükçe, siklon üst akımına gidecek malzeme miktarı artmakta ve bunun sonucunda temiz kömürün kalitesi düşmekte, temiz kömürün miktarı ise artmaktadır. Vorteks çapının küçültülmesi ile daha düşük temiz kömür miktarları ile daha temiz ürünlerin alınabileceği belirtilmektedir. Diğer taraftan; siklonun apeks çapının büyütülmesi vorteks çapının küçültülmesinde gerçekleşen durumla benzerlik göstermektedir. Yani, apeksin büyütülmesi ile siklon üst akımına giden malzeme miktarı azalmakta ve dolayısıyla temiz kömür kazanımı düşmektedir. Fakat, daha düşük kül içerikli temiz kömürler elde edilmektedir (Patil vd. 1997; Xia ve Li, 2007).

Sabit bir besleme debisinde (2.5m³/dk.), 400 mm çaplı su siklonun vorteks çapının 100, 200 ve 300 mm olacak şekilde değiştirilmesi ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4'de verilmiştir. Buna göre, vorteks çapının artırılması ile elde edilen temiz kömürün kül içeriği de artmıştır. Vorteks çapının 100, 200 ve 300mm olması durumunda modifiye su siklonundan sırasıyla ortalama %9.90, %11.70 ve %15.50 küllü temiz kömürler elde edilmiştir. En yüksek küllü ürünler 100 mm çapındaki vorteks ile elde edilmişken, en düşük temiz kömür miktarı da 100 mm çapındaki vorteks ile elde edilmiştir. 100, 200 ve 300 mm

vorteks çaplarında, sırasıyla ortalama %24.40, %26.80 ve %28.10 temiz kömür miktarları sağlanmıştır. Bulunan sonuçlar literatür verileri ile benzerlik göstermekte olup, VFD'nin özellikle temiz kömürün kalitesini belirleyen bir parametre olduğu açıkça görülmektedir.

Sonuç olarak, Modifiye su siklonu için satılabilir metalurjik kalitede temiz kömür üreten ve en yüksek yanabilir verim değerini sağlayan 200mm'lik vorteks çapı sistem için en uygun vorteks çapı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3. Modifiye siklonda siklon çapının ayırma verimine etkisi

Siklon Çapı (mm)	Besleme Külü (%)	Temiz Kömür Külü (%)	Temiz Kömür Miktarı (%)	Yanabilir Verim (%)
400	54.00	13.00	25.50	48.23
	53.50	12.50	27.00	50.81
	49.00	12.00	26.50	45.73
	48.50	11.50	26.00	44.68
	46.00	9.50	29.00	48.60
<i>Ortalama</i>	<i>50.20</i>	<i>11.70</i>	<i>26.80</i>	<i>47.61</i>
600	55.00	20.10	25.00	44.44
	52.00	19.00	26.00	43.88
	51.00	18.00	26.00	43.51
	48.00	17.20	29.00	46.29
	45.00	16.00	30.00	45.82
<i>Ortalama</i>	<i>50.20</i>	<i>18.00</i>	<i>27.20</i>	<i>44.79</i>
800	55.00	29.00	27.00	42.60
	52.00	25.90	26.00	40.08
	50.50	25.00	29.00	43.94
	48.00	22.10	30.50	45.75
	46.00	22.00	31.00	44.78
<i>Ortalama</i>	<i>50.30</i>	<i>24.80</i>	<i>28.70</i>	<i>43.43</i>

Çizelge 3. Modifiye siklonda vorteks çapının ayırma verimine etkisi

Vorteks Çapı (mm)	Besleme Külü (%)	Temiz Kömür Külü (%)	Temiz Kömür Miktarı (%)	Yanabilir Verim (%)
100	54.00	11.50	23.00	44.25
	52.00	10.50	23.00	42.89
	51.00	10.00	25.00	45.92
	49.00	9.50	25.00	44.36
	46.00	8.00	26.00	44.30
<i>Ortalama</i>	<i>50.40</i>	<i>9.90</i>	<i>24.40</i>	<i>44.34</i>
	54.00	13.00	25.50	48.23
	53.50	12.50	27.00	50.81

200	49.00	12.00	26.50	45.73
	48.50	11.50	26.00	44.68
	46.00	9.50	29.00	48.60
Ortalama	50.20	11.70	26.80	47.61
	55.00	17.00	27.00	49.80
	52.00	16.00	27.00	47.25
300	50.00	15.50	27.50	46.48
	48.00	15.00	29.00	47.40
	45.00	14.00	30.00	46.91
Ortalama	50.00	15.50	28.10	47.57

Apeks çapının, modifiye siklon performans verimine etkisini araştırmak amacıyla 80, 100 ve 120 mm çaplarında apeksler kullanılmıştır. Apeksin etkisini araştırıldığı deneylerde bir önceki deneyde optimum olarak belirlenen 200 mm çapındaki vorteks kullanılmıştır. Sabit bir besleme debisinde, apek çapı büyüdükçe siklon iç basıncı 20 kPa'dan (0.2 bar) 5 kPa'a (0.05bar) kadar düşmüştür. Apeks çapının büyütülmesi ile tüm taneler apekse yönelmiş ve siklon üst akımına giden tane miktarı azalmıştır. Çizelge 4'den ortalama temiz kömür miktarları 80,

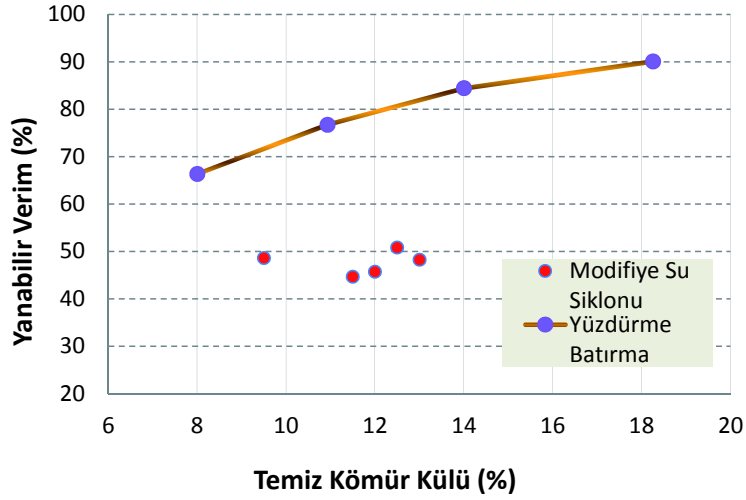
100 ve 120 mm çapındaki apekslerin kullanılması durumunda sırasıyla %30.40, %26.80 ve %21.40 bulunmuştur. 120 mm çapındaki apex ile en düşük kül içerikli (%8.60) temiz kömür elde edilmiştir. Ancak bu ürünün eldesinde, yanabilir verim değeri en düşük değerde olup %39.17 olarak hesaplanmıştır. Buna göre 120 mm çapındaki apeksin kullanılması durumunda, atıktaki yanabilir madde kaybı yaklaşık %61 olmaktadır. Atıktaki yanabilir kaybı azaltmak için apex çapı küçültülerek, beslenen pülpün su siklonundan kolayca çıkması önlenmeli ve siklonun konik kısımda taneciklerden oluşan “yoğun bir yatak (otojen ağır ortam)” yaratılmalıdır. Aksi

takdirde su siklonu, bir “gravite ayırıcısı” olarak değil bir “sınıflandırıcı” olarak görev yapacaktır. Apeks çapının 120 mm'den 80 mm'ye düşürülmesi ile siklonun konik kısmında yoğun bir yatak elde edilmekte ve böylece ortalama yanabilir verim %39.17'den %50.88'e yükselmektedir. Modifiye su siklonu için en uygun apeks çapı, temiz kömür kül içeriği de dikkate alınarak 100 mm olarak belirlenmiştir.

Modifiye su siklonundan elde edilen sonuçlar, yüzdürme-batırma eğrisi ile Şekil 3'de verilen tabloda karşılaştırılmıştır. Bu tabloya göre, modifiye su siklonu ile metalurjik kalitede temiz kömürlerin üretilebileceği açıkça görülmektedir. Elde edilen temiz kömürlerin kül içerikleri %8 ile %14 aralığında değişmektedir. Ancak yanabilir verim değerleri bakımından su siklonun performansının düşük olduğu aşikardır. Yanabilir verim değerleri %40 ile %50 arasında değişmektedir. Bu durum, modifiye siklonda artık içerisine kömür ya da ara ürün kaçaklarının olduğunun bir göstergesidir. Kaçakların önlenmesi bakımından cihazdan elde edilen artığa ilave bir süpürme kademesinin uygulanması elzemdir.

Çizelge 4. Modifiye siklonda apeks çapının ayırma verimine etkisi

Apeks Çapı (mm)	Besleme Külü (%)	Temiz Kömür Külü (%)	Temiz Kömür Miktarı (%)	Yanabilir Verim (%)
80	54.00	20.00	29.00	50.43
	53.50	18.10	30.00	52.34
	51.00	16.00	30.00	51.43
	48.00	17.00	31.00	49.48
	47.00	15.90	32.00	50.72
<i>Ortalama</i>	<i>50.60</i>	<i>17.40</i>	<i>30.40</i>	<i>50.88</i>
100	54.00	13.00	25.50	48.23
	53.50	12.50	27.00	50.81
	49.00	12.00	26.50	45.73
	48.50	11.50	26.00	44.68
	46.00	9.50	29.00	48.60
<i>Ortalama</i>	<i>50.20</i>	<i>11.70</i>	<i>26.80</i>	<i>47.61</i>
120	54.00	11.00	20.00	38.70
	52.00	9.00	22.00	41.71
	50.00	8.10	21.00	38.64
	48.00	8.00	22.00	38.92
	46.00	7.00	22.00	37.89
<i>Ortalama</i>	<i>50.00</i>	<i>8.60</i>	<i>21.40</i>	<i>39.17</i>



Şekil 3. Su siklonu sonuçlarının yüzdürme-batırma eğrisi ile karşılaştırılması

4 SONUÇLAR

Bu çalışma ile modifiye su siklonu ayırıcısının bazı önemli tasarım parametrelerinin etkileri araştırılmış ve daha sonra -1 mm ince Zonguldak taşkömürünün zenginleştirilmesi için ayırma performansı test edilmiştir. Buna göre; siklon çapının büyütülmesi ile elde edilen temiz kömürün kül içeriği artmış, temiz kömür verimi ise çok fazla değişmemiştir. Verimi test edilen 400, 600 ve 800 mm çapındaki siklonlardan sırasıyla ortalama %11.70, 18.00 ve 24.80 kül içeren temiz kömürler elde edilmiştir. Diğer taraftan siklondaki vorteks çapının artırılması ile temiz kömür miktarı artmış, ancak ürünün kalitesi düşmüştür. Apeks çapının büyütülmesi durumunda ise temiz kömür miktarı azalmış, ürün kalitesi artmıştır. -1 mm kömürün zenginleştirilmesinde optimum tasarım parametrelerinin; 400 mm çaplı siklonda, 200 mm çaplı vorteks ve 100mm çapındaki apeks olduğu görülmüştür. Optimum koşullarda %50.20 küllü tıvönan kömürden %11.70 küllü temiz kömürlerin %47.61'lik bir yanabilir verim değeri ile elde edilebileceği görülmüştür.

Sonuç olarak modifiye su siklonu ile manyetit süspansiyonu kullanmadan ince boyutlu Zonguldak tıvönan kömürlerinden metalürjik kalitede düşük küllü temiz kömürlerin üretilebileceği görülmüştür. Ancak yanabilir verim değeri nihai yıkanabilirliği veren yüzdürme-batırma sonuçlarına göre ortalama %30 daha düşük olmaktadır.

KAYNAKLAR

Kalyani, V.K., Gouri C.T., Haldar, D.D., Amelendu, S. and Nikkam, S. 2008. Coal-fine beneficiation studies of a bench-scale water-only cyclone using artificial neural network, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 28: 94-114.

Kim, B.H. and Klima, M.S. 1998. Density separation of fine, high density particles in a water-only cyclone, *Miner Metall Process*, 15 (4), 15-35.

Majumder, A.K. and Barnwal, J.P. 2011. Processing of coal fines in a water only cyclone, *Fuel*, 90, 834-837.

Patil, D.P., Bhaskar, K.U., Jakhu, M.R. and Rao, T.C. 1997. Removal of graphite from lead rougher concentrate using water-only cyclone, *International Journal of Mineral Processing*, 49, 87-96.

Rubiera, F., Hall, S.T., and Shah, C.L. 2007. Sulfur removal by fine coal cleaning processes, *Fuel*, 76, (13), 1187-1194.

Xia, Y. and Li, J.G. 2007. Fine coal circuitry considerations in treatment of soft coal with washabilities, *Fuel Processing Technology*, 88, 759-769.

Chapter - G

**UNDERGROUND MINING /
YERALTI MADENCİLİĞİ**

Sondaj Noktalarının Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi *Determination of Drilling Points with Artificial Neural Networks*

A. H. Özdeniz

Selçuk Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü

B. Karlık

Selçuk Üniversitesi Müh. Fak., Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

C. Şensöğüt

Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

ÖZET Maden aramalarında sondaj çalışmaları oldukça sık uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemle maden aranması, rezerv, tenör ve kalite gibi özelliklerinin belirlenmesi ciddi bir çalışma gerektirir. Ayrıca, sondaj çalışmaları ekonomik açıdan işletmelere önemli bir maliyettir. Madenin ekonomiye kazandırılması zorlu, fakat bir o kadar da gerekli bir süreçtir. Arama sondajlarından elde edilen veriler sayesinde sahada maden sondajı çalışmalarına yön verilmekte ve belirlenen noktalarda sondajlara devam edilmektedir. Bu çalışmada Ermenek/Konya bölgesinde bulunan bir kömür madeni işletmesine ait 28 adet sondaj verisinden yararlanılmıştır. Yeni sondaj yeri noktalarının yerini belirlemek için yapay sinir ağları (YSA) yazılımı gerçekleştirilmiştir. Bunun için araziden elde edilen sondaj değerleri danışmanlı öğrenmeye sahip bir YSA algoritması (Geriye yayılım) ile eğitilmiştir. Algoritmanın test aşamasında bulunan YSA sonuçları ile yeni sondajın yeri olarak kullanılacak deneysel çalışmaların karşılaştırılması yapılmıştır. Bulunan sonuçlar, muhtemel yeni yapılacak sondaj noktalarının en uygun yer tespiti için yapılmasında YSA kullanımının hem zaman hem de maliyet açısından büyük kazanç sağlayacağını göstermiştir.

ABSTRACT Drilling operations are widely used method in mine exploration. Mine exploration using this method is required a significant work to determine the mine characteristics such as reserves, grade and quality. In addition, drilling operations is an important outcome for mine companies. Evaluation of mines is so difficult however it is so necessary. Data obtained from exploration drilling is used to determine the new drilling points to direct the drilling work. In this study, drilling data was used obtained from 28 drilling well in a coal mine located at Ermenek region of Konya, Turkey. Artificial neural networks (ANN) software has developed to determine new drilling location points at this coal mine. A supervised neural network learning algorithm (Back-propagation) was used to train and test for a drilling data obtained from coal mine. Moreover, experimental and test results of ANN were compared. The results showed that determination of a new drilling points using ANN are provided great benefit in terms of both time and cost.

1 GİRİŞ

Madencilik, yer kabuğunda bulunan madenlerin buldukları yerden kazılıp çıkarılma, işleme ve üretim sonrası madencilik yapılan alanların çevreye yeniden kazandırılma faaliyetlerinin

bütünü kapsayan bir iş koludur. Dünyada ve Türkiye’de madencilik faaliyetleri günümüzde çevreyi koruma altına alacak şekilde düzenlenmiş kanun ve yönetmelikler doğrultusunda alınan izinler çerçevesinde

yapılmakta ve mevcut en iyi teknolojiler kullanılmaktadır(Kılıç ve Kılıç, 2008).

Günümüzde modern madencilik işlerinin planlanması toplam rezerv miktarının bilinmesinden daha fazlasını gerektirmektedir. Özellikle kömür madenciliğinde çıkarılacak kömürün kullanılmasını sınırlayan etmenlerden olan kül, nem, kalori, kükürt gibi kimyasal özelliklerinin de önceden incelenmesi gerekmektedir. Metal madenciliğinde ise bu sınırlamalar, cevher tenörünün sahadaki dağılımının daha önceden bilinmesi ve böylece yatağın ekonomik analizinde ortaya çıkmaktadır (Nasuf, 1982). Bütün bu işlemler için sahada yapılan sondajlar çok önem kazanmaktadır. Yapılan sondaj çalışmaları oldukça yüksek maliyetler tutmaktadır. Bu nedenle sondaj yerini tespit ederken oldukça iyi düşünülüp incelenerek araştırılması gerekmektedir. Gereksiz yapılan sondaj faaliyetleri işletmelere büyük yükler getirmektedir. Her sondaj yeri haritalara işlenerek, damarın eğimi yönü değerler göz önünde tutularak, bir sonraki yer tespit edilmektedir. Bu incelemeler ile ilgili veriler cevher yatağının aranması sırasında yapılan sondajlardan elde edilir. Bu verilerin ileride yapılacak planlamalar için uygun sayısal mühendislik parametreleri hâlinde değerlendirilmesi oldukça zaman harcayan bir işlem olup bunların matematiksel yöntemler ve bilgisayar yardımı ile çözümlenmesi kaçınılmazdır.

Cevher üretiminin planlanması ve jeolojik modelleme çalışmaları için bilgisayar desteği uzun zamandır kullanılmasına karşılık, son yıllardaki bilgisayar teknolojisi ve yazılım alanlarındaki gelişmelere bağlı olarak büyük ilerlemeler sağlanmış ve çok yönlü madencilik paket programları (Micromine, Surpac, Datamine, Mintec, Vulcan, vb.) geliştirilmiştir (Ergin ve ark., 1998).

2 ÇALIŞMA YAPILAN SAHANIN TANITILMASI

Batı Toroslarda bulunan Ermenek linyit havzası yaklaşık 620 km² lik bir alanı kapsamaktadır(Şekil 1). Ermenek havzasında farklı yörelerde, birbirinden bağımsız ve ekonomik olarak işletilen ocaklar dört

bölgeye ayrılır (Şensöğüt ve Çınar 1998). Bu bölgeler, Ermenek havzasının orta kesiminde yer alan Asar dağı baz alınmak üzere Asar dağı'nın doğusundaki Çanakçı çukuru ve Keşirlik bölgesi ile Asar dağı'nın kuzeybatısında yer alan Pamuklu-Tebebaşı yöresi ile Asar dağı'nın batısındaki Boyalık mevkiidir(Arslansan, 1996). Bölgede irili ufaklı birçok firma, yeraltı üretim yöntemiyle kömür üretimi yapmaktadır.



Şekil 1. Sondajların yapıldığı yer

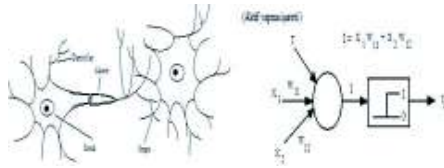
3 YSA VE HATANIN GERİYE YAYILMASI ALGORİTMASI

Yapay sinir ağları (YSA) canlılarda bulunan biyolojik sinir sisteminin çalışmasını elektronik ortama taşımayı hedefleyen bir programlama yaklaşımıdır. YSA' da canlılarda olduğu gibi öğrenme, hatırlama ve öğrendiklerini güncelleme gibi yeteneklerinin olması hedeflenmektedir. Sinir sisteminin davranışlarını kopyalayabilmek için yapısının da kopyalanması gerektiğini düşünen bilim adamları YSA modellerken de sinir sisteminin yapısını örnek almışlardır. Şekil 2'de gerçek sinir ağı ile yapay sinir ağı modeli (perceptron) görülmektedir (Rosenblatt, 1962).

Yapay sinir hücrelerinin birbirine bağlanmasıyla oluşan bir YSA öğrenme algoritmalarından herhangi birini kullanarak öğrenme sürecini tamamladığında kullanıma hazır hale gelir. YSA çalıştığı sürece öğrenme ve bilgilerini güncelleme yeteneğine de sahiptir. YSA'nın temel özellikleri aşağıda özetlenmektedir:

- Problemlerin nasıl çözümleneceğini öğrenen bilgisayarlardır
- Problem çözme örnek verilere ve öğrenme biçimine dayandırılır

- Uzman bilgisine gereksinim göstermezler
- Değişik örnekleri ayırt etmede önemli özellikleri ve bağlantıları kendi içlerinde tanımları için eğitilirler
- Gerçek zamanda gerçek veriler ile ya da örnek veriler ile öğretilirler
- Yeterli yetenekte uygun bir mimariye ve öğrenme yapısına gereksinim duyarlar.



Şekil 2. Gerçek sinir ağı ve yapay sinir ağı

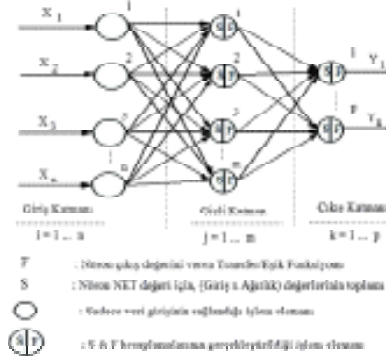
Eğitme ve Öğrenme aynı anlama gelmezler. Eğitme, ağı öğrenmesi için bir işlemdir. Öğrenme ise eğitme işleminin neticesidir. Eğitme ağa dışarıdan etkidir. Öğrenme ise ağı içerisinde geliştirilen bir aktivitesidir. Danışmanlı (supervised) ve danışmansız (unsupervised) olmak üzere iki tip öğrenme vardır.

Öğreticili eğitimde, elde doğru örnekler vardır. Yani eğitme örneklerinin tamamı için (x_1, x_2, \dots, x_n) şeklindeki giriş vektörünün; (y_1, y_2, \dots, y_n) şeklindeki çıkış vektörü, tam ve doğru olarak bilinmektedir. Herbir $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ çifti için, ağ doğru sonuçları verecek şekilde, seçilen bir öğrenme kuralı yardımıyla eğitilir. Bu yöntemde ağa giriş örnekler verilir ve performans seviyesi ile ilgili geri besleme bilgisi verilmez. Ağ giriş işaretine göre değiştirilmesi esastır. Bu durumda hiçbir eğiticieye ihtiyaç yoktur. Probleme ait veri girişlerine karşın çıkışlar mevcut değildir. Bu yüzden bu tür bir eğitme, giriş verilerini gruplandırarak eğittikten sonra verilen herhangi bir girişin eğitme sınıflarından hangi sınıfa ait olduğunu gösterebilir (Hopfield, 1987).

Çok katmanlı Perceptron (Perception-neuron bileşiminden oluşmuş özel bir kelime olup idrak-algılayıcı manasındadır) giriş ve çıkış katmanları arasında birden fazla katmanın kullanıldığı ileri beslemeli (feed-forward) YSA sistemidir. Gizli katman (hidden layer) olarak isimlendirilen bu ara

katmanlarda, düğümleri giriş ve çıkış katmanlarına doğrudan bağlı olmayan işlem elemanları vardır. Şekil 3'de çok katmanlı perceptronun genel yapısı verilmiştir. Çok katmanlı perceptronlar, tek katmanlı perceptronlara ait sınırlamaların birçoğunu ortadan kaldırmalarına rağmen, önceleri etkin eğitme algoritmalarının mevcut olmamasından ötürü uygulamaları yaygın değildi. Ancak yeni eğitme algoritmalarının geliştirilmesi ile bu durum değişmiştir (Karlık, 1994).

Çok katmanlı ağlarda, veriler giriş katmanı tarafından kabul edilirler. Ağ içinde yapılan işlemler sonucunda çıkış katmanında oluşan sonuç değer, istenen cevap ile karşılaştırılır. Bulunan cevap ile istenen cevap arasında herhangi bir ayrılık varsa, ağırlıklar bu farkı azaltacak şekilde yeniden düzenlenir. Girişteki değer, ağırlıklar uygun noktaya ulaşana kadar değişmez. Hesaplanan çıkışlar, istenilen cevaplarla karşılaştırılarak sonuçta gerekirse hata belirtilir. Hata işareti gizli işlem elemanlarından çıkış birimine olan ağırlıkları değiştirmekte kullanılır.



Şekil 3. (n.m.p) mimarisine sahip birçok katmanlı perceptronun yapısı

Hatanın geriye yayılması (Back-propagation) eğitme algoritması, çok katmanlı, ileri yayımlı bir perceptronun elde edilen çıkışlar ile eldeki hedef çıkışlar arasındaki hataların karesinin ortalamasını minimum yapmak için geliştirilmiş iteratif bir gradyan algoritmadır ve eğitme işlemi için genelleştirilmiş delta kuralını (Generalized Delta Rule) kullanır. Hatanın geriye yayılması algoritması genellikle iyi bir performans