

MADENCILIK

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASIDERGİSİ
THE JOURNAL OF THE CHAMBER OF MINING ENGINEERS OF TURKEY

ARALIK
DECEMBER
2008

CILT
VOLUME
47

SAYI
NUMBER
4

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Hasan HACİFAZLIOĞLU 3 **Azdavay Kömürünün Yağ Aglomerasyonu ve Bazı Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi**
0/7 Agglomeration of Azdavay Coal and Determination of the Effects of Some Important Operating Parameters
- Halime ABAKAY TEMEL,
Volkan BOZKURT 13 **Ad.yaman-Gölbaş. Linyitinin Y.kama Olanaklarının Araştırılması**
Investigation of the Washing Possibilities of Adıyaman-Gölbaşı Lignite
- Hasan HACİFAZLIOĞLU, Selçuk SAMANLI
İhsan TOROĞLU 23 **Karıştırma Bilyalı Değirmende Kokaksu Boksitinin Öğütülmesinde Bazı Çalışma Parametrelerinin Öğütme Verimine Etkisi ve Bond Değirmeni ile Öğütme Verimliliklerinin Karşılaştırılması**
The Effect of Certain Operating Parameters on the Grinding Efficiency in Grinding the Kokaksu Bauxite in a Stirred Mill and Comparison of the Grinding Efficiency With that of the Bond Mill
- Fatma Deniz AYHAN,
Halime ABAKAY TEMEL 35 **Eskişehir-Mihalıççık Linyitinin Yıkabilme Özelliklerinin Araştırılması**
Investigation of the Washability Characteristics of Eskişehir-Mihalıççık Lignite

Teknik Not / Technical Note

MADENCILIK dergisi yazı dizini ve özetlerinin yer aldığı veri tabanları / INDEXED in IMM Abstracts, GeoRef, Aluminium Industry Abstracts, Cambridge Scientific Abstracts, PASCAL, Chemical Abstracts, ENCOMPLIT, ENCOMPLIT2, ENERGY, Compendex

Abone Koşulları:

Yıllık abone bedeli 100,00 YTL'dir.

Subscription

Annual subscription rate is 100,00 YTL. All subscription inquiries should be made to the correspondence address.

Banka Hesap No:

Türkiye İş Bankası Meşrutiyet Şubesi: 8120
T.C. Ziraat Bankası Kızılay Şb. 39009031-5001
Posta Çeki Hesap No: 86665

Baskı /Printed in: Gurup Matbaacılık, (0312) 384 73 44

ISSN: 0024-9416

MADENCİLİK DERGİSİ 2008 YILI HAKEM LİSTESİ

LIST OF REVIEWERS FOR THE JOURNAL OF MADENCİLİK IN 2007

Neşet Acarkan Fatma	İstanbul Teknik Üniversitesi
Arslan Vedat Arslan	İstanbul Teknik Üniversitesi
ÜmitAtalay Hakan	Dokuz Eylül Üniversitesi
Başarır Hakan	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Benzer Volkan	İnönü Üniversitesi
Bozkurt N. Metin Can	Hacettepe Üniversitesi
Mehmet Canbazoğlu	Osmangazi Üniversitesi
Yakup Cebeci Atilla	Hacettepe Üniversitesi
Ceylanoğlu Vedat	Cumhuriyet Üniversitesi
Didari Bülent Erdem	Cumhuriyet Üniversitesi
Murat Erdemoğlu Ş.	Cumhuriyet Üniversitesi
Levent Ergün İsmail	Karaelmas Üniversitesi
Girgin Özcan Gülsoy	Cumhuriyet Üniversitesi
Tevfik Güyagüler	İnönü Üniversitesi
Halil İpek	Hacettepe Üniversitesi
Selami İstanbulluoğlu	Hacettepe Üniversitesi
Erol Kaya Süha Oral	Hacettepe Üniversitesi
Yaşar Uçbaş	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Ercüment Yalçın A.	Osmangazi Üniversitesi
Ekrem Yüce Türker	Türkiye Kömür İşletmelerinden Emekli
Zorlubaş	Dokuz Eylül Üniversitesi
	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
	Osmangazi Üniversitesi
	Dokuz Eylül Üniversitesi
	İstanbul Teknik Üniversitesi
	Egemin Madencilik Ltd. Şti.

AZDAVAY KÖMÜRÜNÜN YAĞ AGLOMERASYONU VE BAZI ÖNEMLİ ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

Oil Agglomeration of Azdavay Coal and Determination of the Effects of Some Important Operating Parameters

Geliş (received) 28 Nisan (April) 2008; Kabul (accepted) 02 Haziran (June) 2008

Hasan HACIFAZLIOGLU(*)

ÖZET

Bu çalışmada, Azdavay (Kastamonu) kömürünün yağ aglomerasyonu ve bazı çalışma parametrelerinin aglomerasyon verimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneilerde kullanılan Azdavay bitümlü kömürünün ortalama kül, kükürt, uçucu madde ve sabit karbon içerikleri sırasıyla %29,40; %1,60; %26,40 ve %44,20'dir. örnek kömürün tamamı kademeli olarak merdaneli değirmende öğütülerek -212 ı.ım'lik eleğin altına geçirilmiştir. Yapılan aglomerasyon çalışmalarında, bağlayıcı yağ olarak heptan, hegzan ve gazyağı olmak üzere 3 farklı tipte yağ kullanılmıştır. Aglomerasyonda etkili olan katı oranı, karıştırma hızı ve karıştırma süresinin kömür kazanımı ve aglomerat külü üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneiler sonucunda, yağ tipinin ve miktarının diğer parametrelere göre aglomerasyon verimi üzerinde daha etkili olduğu ve gazyağının en yüksek verimi sağladığı görülmüştür. Hafif yağlardan heptan ve hegzan ise güçlü aglomeratlar oluşturamamış ve bu yüzden düşük kömür kazanımlarına neden olmuştur. Katı oranının optimum değeri %20 iken, karıştırma hızı ve süresinin optimum değerleri sırasıyla 800 dev/dak ve 10 dakika olarak bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Yağ Aglomerasyonu, Bitümlü Kömür, Heptan, Hegzan, Gazyağı

ABSTRACT

In this study, oil agglomeration of Azdavay (Kastamonu) coal and the effects of some operating parameters on agglomeration performance are investigated. The average amounts of ash, sulfur, volatile matter and fixed carbon contents of Azdavay bituminous coal used in the experiments are 29,40%; 1,60%; 26,40% and 44,20%, respectively. The whole sample coal was gradually ground in a roller-mill to pass through a 212-ı.ım sieve. In the agglomeration studies, three different oil types, namely heptane, hexane and kerosene were used as bridging oils. The influences of the solids ratio, mixing speed and mixing duration on coal recovery and agglomerate ashes were investigated. The results of the experiments demonstrated that, compared to other parameters, oil type and amount were more effective on agglomeration performance; and among all oil types, kerosene gave the best performance results. Light oils, heptane and hexane, could not form strong agglomerates and, therefore, caused poor coal recoveries. The optimum ratio of solid was 20% and optimum mixing speed and mixing duration were 800 rpm and 10 minutes, respectively.

Keywords: Oil Agglomeration, Bituminous Coal, Heptane, Hexane, Kerosene

(*) Maden Yük. Müh., hhacifazlioglu@yahoo.com

1. GİRİŞ

Yağ aglomerasyonu, ince boyutlu kömürlerden kül yapıcı mineral maddelerin ve inorganik kükürdün uzaklaştırılması için flotasyona alternatif olarak geliştirilmiş olan bir zenginleştirme yöntemidir. Genellikle, flotasyonla zenginleştirilemeyen çok ince boyutlu tanelerin kazanılmasında oldukça etkili bir yöntem olarak bilinmektedir. Flotasyonla karşılaştırıldığında en önemli avantajları; yüksek verim ve seçicilik sağlaması, kil, kül ve oksidasyonun daha az etkin olması, basit uygulanabilmesi ve çoğu zaman düşük nemli ürünler vermesi nedeniyle filtrasyona veya termal susuzlandırmaya ihtiyaç duyulmamasıdır (Yoon, 1991; Yamık vd., 1994; Uçbaşı vd., 1998; Cebeci vd., 2002).

Aglomerasyon yönteminde, bir tank içerisindeki su-kömür karışımına belli bir oranda (genellikle ağırlıkça %5-%30 kadar) yağ ilave edilmekte ve bu karışım yüksek hızlı bir karıştırıcıyla belli bir süre karıştırılmaktadır. Karıştırma esnasında, hidrofobik olan kömür tanecikleri önce yağ damlacıklarıyla kaplanmakta, daha sonra birbirleri ile çarpışarak kömür aglomeratlarını meydana getirmektedir. Bu esnada, kömüre göre daha düşük hidrofobluğa sahip şist, kritik bir yağ konsantrasyonunda yeterince yağ ile ıslanmadığı için ve/veya daha önceden su ile ıslandığı için aglomerat oluşturamamakta ve dağılık bir şekilde süspansiyon içerisinde kalmaktadır. Aglomerasyon sonucunda, elde edilen kömür aglomeratları ve dağılık şist, beslenen kömürün tane boyundan daha büyük bir açıklığa sahip eleklerle elenmesi durumunda, kömür aglomeratları elek üzerinde kalmakta, şist ise elek altına geçerek ayırma gerçekleştirilmektedir. Eleme ile ayırma yönteminde, oldukça iri ve sağlam aglomeratların oluşturulması aglomerasyon verimi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu yüzden, elemeli ayırma işleminde, yüksek miktarlarda yağ kullanılmakta (ağırlıkça %10-50) ve aglomeratların hem boyutları hem de sağlıkları artırılmaktadır. Daha sonra geliştirilen, "agloflotasyon" yönteminde ise ayırma işlemi flotasyonla gerçekleştirilmektedir. Flotasyonla ayırmada, çok iri ve çok sağlam aglomeratlara gerek duyulmamakta ve dolayısıyla yağ sarfiyatı da (ağırlıkça %1-%6) o derece düşük olmaktadır (Capes, 1991).

Yağ aglomerasyonu işleminde, verimi ve maliyeti etkileyen en önemli iki parametre kullanılan

yağ miktarı ve yüksek devirli karıştırma hızıdır. Kömürün ağırlıkça %10-50'si oranında kullanılan yağlar (bağlayıcılar); heptan, pentan, heksan ve toluen gibi hafif yağlar (<0,7 g/cm³); gazyağı, parafin ve motorin gibi orta yağlar ve fuel oil (No.6), kömür katranı, ham petrol ve kreosot gibi ağır yağlardır (>0,9 g/cm³). Bu yağlar ayrı ayrı kullanılabilir gibi, ekonomik ve etkili olması bakımından karışım halinde de kullanılabilir. Yağ maliyetinin önemli sakınca oluşturması nedeniyle, son yıllardaki çalışmalar daha çok yağı geri kazanma üzerine odaklanmıştır (Hoşten ve Uçbaşı, 1989; Capes, 1991; Özbayoğlu, 1998; Baruah vd., 2000). Özellikle pentan, heptan, 2-metil bütan, metil klorit, Freon 113 gibi düşük kaynama sıcaklığına sahip yağlarla çalışmalar devam etmektedir. Bu yağlar, buharlaştırma yolu ile diğer ağır yağlara (dizel, fuel oil vb) göre daha kolay geri kazanılabilmektedir. Örneğin, 2-metil bütan 28°C'de, pentan ise 36°C'de buharlaşmaya başlamakta ve kolaylıkla geri kazanılabilmektedir (Yoon, 1991). Diğer taraftan, aglomerasyonda yenilenebilir ucuz yağlara doğru bir yöneliş söz konusudur. Örneğin, bitkisel kökenli yağlardan soya, kolza, zeytin ve ayçiçek yağı ile yapılan aglomerasyon çalışmalarından olumlu sonuçlar alınmaktadır. Özellikle, kullanılmış artık yağların bu alanda kullanılması, gerek çevre gerekse maliyet açısından aglomerasyonu cazip hale getirmektedir. Bitkisel kökenli yağların heptan, pentan gibi pek çok hafif petrol yağları kadar iyi sonuçlar verdiği pek çok araştırmacı tarafından belirtilmektedir (Garcia vd., 1996; Alonso vd., 1999; Alonso vd., 2002; Valdes ve Garcia, 2006).

Yağ aglomerasyonu yöntemleri önemli avantajlara sahip olmasına rağmen, endüstriyel ölçekte çok fazla uygulama alanı bulamamıştır. En bilinen yağ aglomerasyonu yöntemleri; Trent, Convertol, Olifloc, Arcanum/Bechtel, Aglofloat, Agflotherm, Otisca-T, ve Likado yöntemleridir. Trent yöntemi, en basit ve ilk ticarileştirilen yöntem olup, yüksek miktarlardaki yağla (>%20) kömürün yüksek sürelerde ve yüksek hızlarda karıştırılması esasına dayanır. Daha sonra, yağ oranının ve karıştırma süresinin azaltılması amacıyla Almanya'da Convertol yöntemi geliştirilmiş ve kullanılan yağ oranı %2'lere, karıştırma süresi ise 15 saniyeye kadar düşürülmüştür (Yoon, 1991). Olifloc yöntemi ise, Convertol yönteminin gelişmiş bir versiyonu olup, siklon üst akımı kömürler için yeniden modifiye

edilmiştir (Bogenschnieder vd., 1976). Arcanum/Bechtel yöntemi, Olifloc yöntemi gibi olup, yalnızca aglomeratların büyütülmesi için %2-3 oranında asfaltit kullanılmaktadır (Huettenhain, 1991; Balzarini and Hucko, 1991). Aglofloat yönteminde, %1-5 oranındaki orta yağlıyüksek hızlı karıştırıcı ile karıştırılmakla ve elde edilen aglomeratlar flotasyonla alınmaktadır. Bu yöntemle özellikle kül ve pirilik kükürt %80-90'a varan oranlarda giderilebilmektedir (Ignasiak vd., 1994; Pawlak ve Szymocha, 1999). Agflotherm yöntemi, düşük ranklı kömürlerin zenginleştirilmesi için geliştirilmiş olan ve aglomerasyona ısısal müdahalenin yapıldığı bir yöntemdir (Pawlak, vd., 1998; Szymocha, 2003). Otisca-T yöntemi, özellikle yağın geri kazanımı üzerine geliştirilmiş olan bir yöntemdir. Bu yöntemde, ilk başlarda aglomera edici olarak düşük kaynama sıcaklığına sahip Freon 113 kullanılmıştır. Ancak, bu bağlayıcının ozon tabakasına zararlı etkisi nedeniyle yine düşük bir kaynama sıcaklığına sahip pentanla çalışmalara devam edilmiştir. Likada yönteminde, bağlayıcı olarak sıvı karbondioksit kullanılmaktadır. Sıvı karbondioksit kömür taneciklerini oldukça etkili bir şekilde aglomere etmektedir. Daha sonra, oluşan aglomeratlardan CO₂ kolaylıkla geri kazanılabilmektedir. Ancak bu yöntemde, CO₂'nin sıvı halde tutulabilmesi için yüksek basınç altında çalışılması zorunluluğu önemli bir maliyet oluşturmaktadır (Yoon, 1991).

Küresel aglomerasyon kavramı, önce hafif yağlarla yüksek hızlı karıştırıcıda mikro agromeratların oluşturulması, daha sonra ağır yağlarla düşük karıştırma hızında aglomerat çaplarının büyütülerek şist-aglomerat ayrımının gerçekleştirilmesini ifade etmektedir (Capes vd., 1976; Capes, 1991). Bu yöntemin en büyük avantajı, elde edilen ürünün %10 gibi düşük oranda nemli olması ve son aşamada kurulmaya çoğu zaman ihtiyaç duyulmamasıdır. Yukarıda belirtilen alternatif yöntemlerden Arcanum/Bechtel ve Olifloc yöntemleri küresel aglomerasyona örnek olarak verilebilir.

Literatürde, yağ aglomerasyonu ile ilgili çok fazla endüstriyel ölçekli çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak bu konu ile ilgili deneysel ölçekte pek çok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Hoşten ve Uçbaşı (1989) Zonguldak kömürleri ile yaptıkları çalışmada yüksek küllü (%45-50) bitümlü kömürden, %8-10 küllü temiz kömürler elde etmişlerdir. Aynı çalışmada,

aglomerasyonun flotasyona göre daha avantajlı ve ekonomik olduğu, ayrıca kullanılan yağın (gazyağı ve solvent nafta) verim üzerinde büyük bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Yamık ve arkadaşları (1994) Seyitömer linyitine ağırlıkça %20 gazyağı ilavesiyle aglomerasyon uygulamışlardır. Ancak, Seyitömer kömürünün yeterince hidrofob olmaması nedeniyle olumlu sonuçlar alınamamıştır. Ünal ve arkadaşları (2000) tarafından Zonguldak bitümlü kömürünün aglomerasyonu için farklı yağlar denenmiştir. Gazyağı, motorin ve Kerkük ham petrolu ile yapılan çalışmalar sonucunda en uygun yağın gazyağı olduğu belirtilmiş ve ağırlıkça %15 gazyağı ilavesi ile %8,32 küllü kömürler üretilmiştir. Aktaş (2002) tarafından Zonguldak kömürleriyle yapılan bir başka çalışmada ise aglomerasyona yüzey aktif madde Triton X-100 ilavesi yapılmış, ancak verimde bir artış sağlanamamıştır. Abakay ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan çalışmada, aglomerasyon için göl ve deniz suyu denenmiş, ancak sonuçlar musluksuyuna göre daha başarısız bulunmuştur. Uslu ve arkadaşları (2006), Yusufeli bitümlü kömürüne uyguladıkları aglomerasyon ile, pirilik kükürdü %5,26'dan %1,33'e düşürmüşlerdir. Deneylerde aglomere edici olarak kömür ağırlığının %27'si kadar gazyağı kullanılmış ve aglomeratlar (kömür) bir elekten, dağılmış pirit taneciklerinden ayrılmıştır. Gence (2006) %49,49 küllü Zonguldak kömürlerinin heptan, pentan, toluen ve hegzan ile aglomerasyonunu araştırmış ve en yüksek verimi hegzan ile elde etmiştir. Deneyler sonucunda %10,87 küllü temiz kömür %92,17 yanabilir verimle kazanmıştır. Abakay (2007) tarafından Hazro kömürü ile yapılan agloflotasyon çalışmasında ise, külün %43,98'i, kükürdün ise %39,15'i, %86,59'luk bir yanabilir verimle giderilmiştir. Şırnak asfaltitinden ise, külün %34,01'i, kükürdün ise %34,78'i, %74,74 ağırlıkça verim değeriyle giderilmiştir.

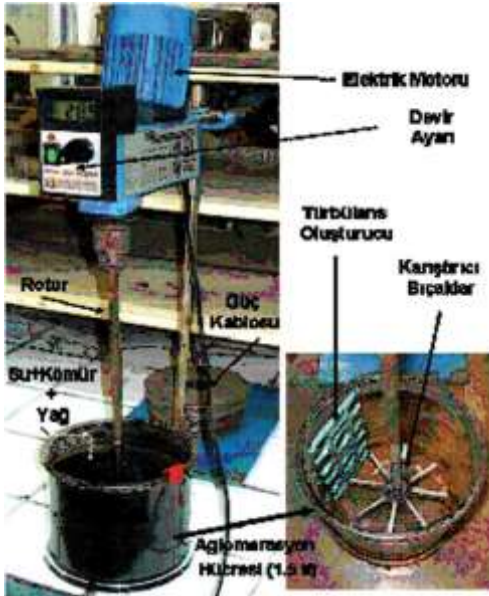
Bu çalışmada, Azdavay damar kömürünün aglomerasyonu ve aglomerasyon verimi üzerinde etkili olan bazı önemli parametreler incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Yağ Aglomerasyonu Deney Düzenliği

Yağ Aglomerasyonu deneyleri, Şekil 1'de gösterilen motor gücü 70 watt olan RW 20 DZM

markalı düşük devirli bir mekanik karıştırıcı ile yapılmıştır. Karıştırıcının en yüksek ve en düşük karıştırma hızları sırasıyla 1000 ve 100 dev/dk'dır. Karıştırma işlemi, 1,5 litrelik cam kap içerisinde ve kap tabanından 1 cm yükseklikte bulunan 8 adet karıştırıcı kanatçık (bıçak) ile yapılmıştır. Cam kap içerisine, tanecik-yağ çarpışmalarının artırılması ve daha etkili bir karıştırmanın sağlanması amacıyla, pülp akışını çeşitli yönlerde kesen bir türbülans oluşturuçu yerleştirilmiştir. Deneylerin tümünde musluk suyu kullanılmış ve aksi belirtilmediği sürece doğal pH (kömür+su+yağ karışımının pH'sı); katı oranı ağırlıkça %20; karıştırma süresi 5 dakika ve karıştırma hızı 800 dev/dak olacak şekilde ayarlanmıştır. İlave edilen bağlayıcı miktarı kömürün kuru bazda ağırlıkça yüzdesi olacak şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 1. Yağ aglomerasyonu deney düzeneği.

Aglomerasyon deneylerinde, zamandan tasarruf ve karıştırma maliyetinin azaltılması amacıyla ön kıvamlandırma süresi kısa (1 dakika) tutulmuştur. Daha sonra, su ve kömür karışımına bağlayıcı yağ ilavesi yapılmış ve 5 dakika karıştırılan pülp ile aglomeratlar elde edilmiştir. Deneyler esnasında, cam kaptaki kömürlerin aglomeratlar halinde pülpün üst kısımlarında biriktiği, artığın (şistin) ise kabın alt kısmında kaldığı gözlemlenmiştir. Daha sonra, aglomeratlar ve dağıntık şist 300 µm'lik bir eleğin üzerine dökülmüş, elek üstünde kalan aglomeratlar ile elek altına geçen artıklar elde edilmiştir. Her iki ürün asetonla yıkandıktan

sonra, önce açık havada, daha sonra 100-105°C derecelik bir etüvde kurutulularak kuru bazda temel analizleri yapılmıştır.

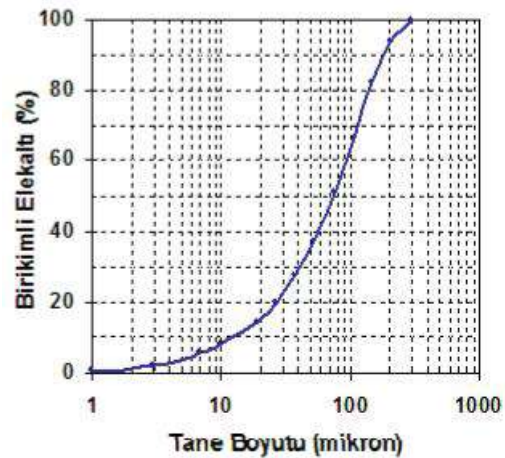
Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan yanabilir verim ve kül giderimi formülleri aşağıda verilmiştir. Burada; M_a : aglomeratın (temiz kömürün) kuru bazda ağırlığı (%), M_b : beslenen kömürün kuru bazda ağırlığı (%), K_a : aglomeratın (temiz kömürün) kuru bazda kül içeriği; K_b : Beslenen kömürün kuru bazda kül içeriğidir.

$$\text{Yanabilir Verim} = \frac{M_a \times (100 - K_a)}{M_b \times (100 - K_b)} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Kül Giderimi} = \left(1 - \frac{K_a}{K_b}\right) \times 100 \quad (2)$$

2.2 Kömür Örneğine Ait Özellikler

Aglomerasyon deneylerinde kullanılan kömür örneği, Azdavay (Kastamonu) damar kömürüdür. En büyük tane boyutu 10 cm olan kömür örneği önce çeneli kırıcıdan, daha sonra konili kırıcıdan geçirilerek tamamı 2,36 mm'nin altına kırılmıştır. Daha sonra merdaneli öğütücü (kırıcı) ile kademeli olarak tamamı 212 µm'nin altına indirilmiştir. Aglomerasyon deneylerinde kullanılan örneğin Malvern lazer boyut analiz cihazı ile belirlenen boyut dağılımı eğrisi Şekil 2'de, bu kömüre ait orijinal ve kuru bazdaki kısa kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Aglomerasyon deneylerinde kullanılan örneğin tane boyut dağılımı.

Çizelge 1. örnek Kömürün Kimyasal Analiz Sonuçları

Analiz	Orijinal bazda	Kuru bazda
Nem(%)	4,50	
Kül(%)	28,08	29,40
Kükürt(%)	1,53	1,60
Uçucu Madde (%)	25,21	26,40
Sabit Karbon(%)	42,21	44,20
üst Isıl Değer (kcal/kg)	5300	5520

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

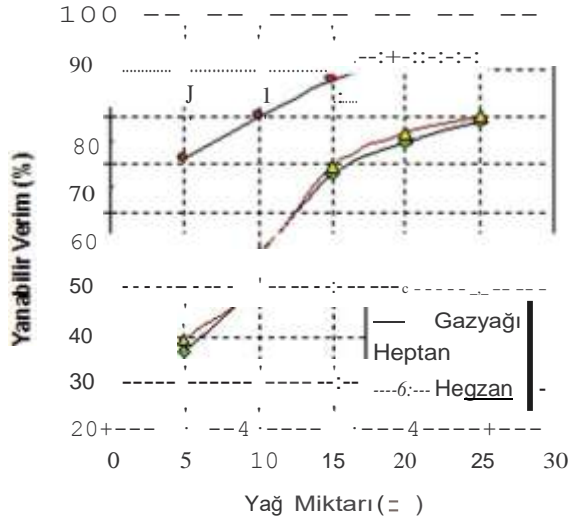
3.1 Bağlayıcı Tipi ve Miktarının Etkisi

Genellikle gazyağı, motorin ve fuel oil (No.2) gibi orta yoğunluklu ($0,7-0,9 \text{ g/cm}^3$) yağların yüksek kül giderimi ve yüksek kömür kazanımları sağladığı belirtilmektedir. Düşük yoğunluklu yağlar, düşük viskoziteleri nedeniyle kömür tanecikleri arasında zayıf hidrokarbon bağları oluşturmaktadır. Yüksek yoğunluklu yağlar ise, yüksek viskoziteleri ve yüksek yüzey gerilimleri nedeniyle daha güçlü bağlar oluşturmaktadır. Ancak, bu tip yağların pülp içerisinde homojen dağılamaması nedeniyle kömür kazanımını olumsuz yönde etkilemektedir (Capes, 1991; Yoon, 1991).

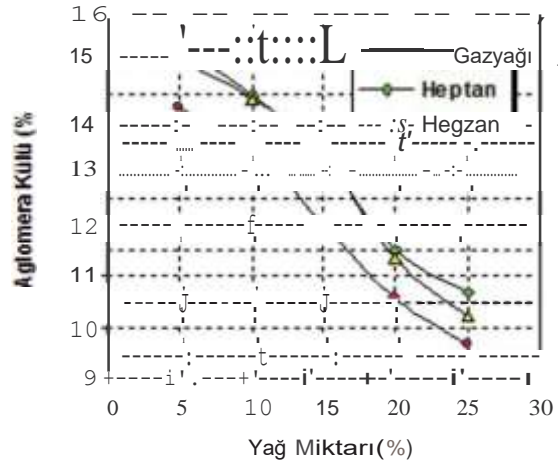
Azdavay kömürünün aglomerasyonu için hegzan (C_6H_{14}), heptan (C_7H_{16}) ve gazyağı olmak üzere 3 farklı tipte yağ denenmiştir. Bu yağların 25°C sıcaklıkta yoğunlukları sırasıyla $0,66$, $0,68$ ve $0,78 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Farklı yağlarla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 3 ve 4'de gösterilmiştir.

Şekil 3 ve 4'den görülebileceği gibi, Azdavay kömürünün aglomerasyonunda hafif yağlardan heptan ve hegzan ile yaklaşık olarak benzer yanabilir verimli ve benzer küllü aglomeratlar (temiz kömürler) elde edilmiştir. Ancak, heptan ve hegzan hem kül giderimi hem de yanabilir verim bakımından gazyağına göre daha kötü sonuçlar vermiştir. Gazyağı ile yanabilir verim %90'ı geçmekte iken, heptan ve hegzan ile %80'e kadar ulaşmıştır. Ayrıca, gazyağı miktarının %20 'yi geçmesi durumunda yanabilir verim çok fazla değişmezken, heptan ve hegzanın kullanılması durumunda yanabilir verim artışı %20'nin üzerindeki değerlerde de devam etmiştir. Bu durum, heptan ve hegzanın düşük yoğunlukları nedeniyle gazyağına göre daha fazla miktarlarda

daha etkili olduğunun bir göstergesidir. Başka bir deyişle, heptan ve hegzanın oluşturduğu zayıf bağlar, ancak onların daha yüksek konsantrasyonları sayesinde daha güçlü bağlara dönüşmektedir. Diğer yandan, yağ miktarının aşırı artması ile yeterince serbestleşmemiş kenetli tanelerde aglomere olmakta ve aglomerat küllü artmaktadır.



Şekil 3. Aglomerasyonda farklı bağlayıcı yağların yanabilir verime etkisi.



Şekil 4. Aglomerasyon da farklı bağlayıcı yağların aglomerat küllüne etkisi.

Genel olarak, yağ miktarının %5'den %25'e artırılmasıyla hem verim artmakta hem de aglomerat küllü düşmektedir. Ayrıca, deneyler esnasında, yağ miktarının artışına bağlı olarak, hem aglomerat boyutunun büyüdüğü hem de

elde edilen konsantrenin nem içeriğinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bir diğer deyişle, yüksek(>%15) yağ oranlarında daha sıkı ve daha az su boşluğu bulunan aglomeratlar elde edilmiştir. Dolayısıyla, yüksek yağ konsantrasyonunda, tüm boşlukların yağ ile dolması daha güçlü bağların oluşmasını sağlamış ve eleme/yıkama esnasında daha az miktarda aglomerat bozulması nedeniyle yüksek yanabilir verimler elde edilmiştir. Düşük yağ konsantrasyonlarında ise, aglomeratlar daha güçsüz olup, gevşek floklar şeklinde ve daha yoğun miktarda su barındırmıştır. Bu su ile birlikte hareket eden kil ve şist ise aglomerat külünün artmasına neden olmuştur. Ayrıca, eleme/yıkama esnasında, aglomeratların kolay bozulması nedeniyle yanabilir verimde de düşmeler meydana gelmiştir.

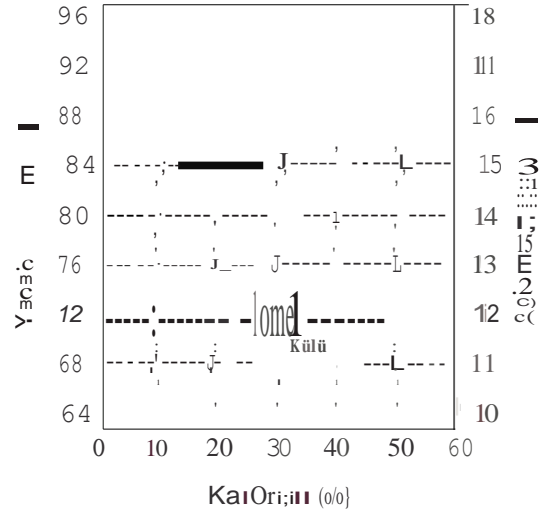
Gazyağının yüksek (örneğin %25) konsantrasyonlarında ırlı salkımlaşmalar (pastalaşma) meydana geldiği için aglomerat külü önemli ölçüde artmıştır. Bu durum yanabilir verim artışını olumsuz yönde etkilemiştir. Gazyağma göre daha zayıf bağlar oluşturan heptan ve hegzan ise %25'lik konsantrasyonlarda bile küresel aglomeratlar oluşturarak yanabilir verim artışına devam etmişlerdir.

3.2 Katı Oranın Etkisi

Azdavay kömürünün yağ aglomerasyonunda katı oranın verime büyük bir etkisinin olmadığı Şekil 5'den görülmektedir. Ancak, katı oranının %40'a kadar artmasıyla yanabilir verim az da olsa artmıştır. Bu durumun temel nedeni, artan katı miktarıyla kömür taneciklerinin yağ zerrecikleri ile çarpışma olasılığının artmış olmasıdır. Diğer taraftan, yoğun katı miktarı, taneciklerin birbirlerine daha fazla yaklaşmasına neden olmuş ve seçimlilik düşmüştür. Bir diğer deyişle, tanecikler ve/veya aglomeratlar arasında sıkışan çok sayıda şist aglomerat külünü artırmıştır. Kül artışının bir diğer nedeni ise, aglomeratların elek üzerinde yıkanmasının düşük katı miktarlarına göre daha zor olmasıdır. Öyle ki %50 katı oranında aglomerat külü %16'ıara kadar yükselmiştir.

%40'ın üzerindeki katı oranlarında, pülpün artan vizkozitesi ve taneciklerin hareketinin yavaşlaması nedeniyle ile aglomerat oluşumu ve aglomerat büyümesi yavaşlamaya başlamıştır. Ayrıca, deneyler esnasında yüksek

katı oranlarında motorun karıştırma gücü de yetersiz kalmış, istenilen karıştırma hızına çok zor ulaşılmıştır. Bu durum, özellikle endüstriyel ölçekte yapılacak olan yüksek katı oranlı aglomerasyon çalışmalarında gereğinden daha güçlü motorların kullanılmasını gerektirecek ve bu da enerji tüketiminin önemli ölçüde artmasına neden olacaktır. Bu yüzden, söz konusu kömürün aglomerasyonunda optimum çalışma koşulu olarak %20 katı oranı tercih edilmiştir.



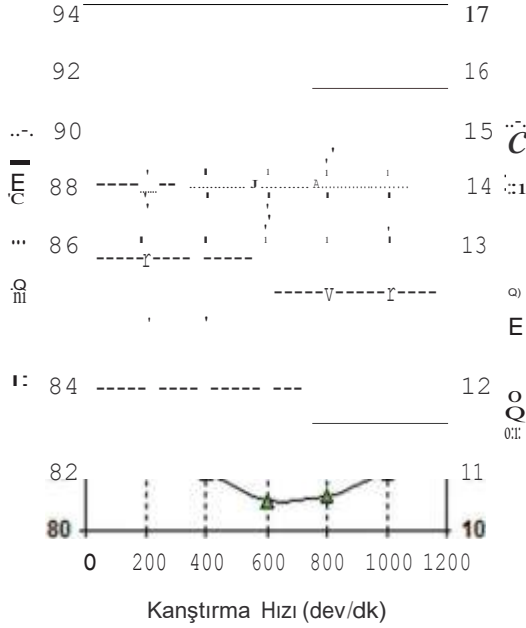
Şekil 5. Aglomerasyonda katı oranının yanabilir verim ve aglomerat külüne etkisi (%15 yağ ilavesi).

3.3 Karıştırma Hızının Etkisi

Agglomerasyon işleminde karıştırma, kömürün topaklanmasını sağlayan en önemli faktördür. Pülpün belli bir süre belli bir hızda karıştırılması verim üzerinde önemli etkiye sahiptir. Çünkü aglomerasyonda, yağ zerreciklerinin ince homojen dağıtılması ve kömür tanecikleri ile çarpıştırılması belli bir süre karıştırma ile mümkün olmaktadır.

Farklı karıştırma hızlarının aglomerasyon verimine etkisinin araştırılması için %15 gazyağı ilavesi, %20 katı oranında 5 dakika süresince aglomerasyon deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen bulgular Şekil 6'da gösterilmiştir. Buna göre, karıştırma hızının 200 dev/dak'dan 1000 dev/dak'ya çıkarılmasıyla yanabilir verimi %86,60'dan %91,60'a artmaktadır. Bu durum, karıştırma hızının artmasıyla taneciklerin birbiri ile ve yağ zerrecikleri ile çarpışma olasılığının artması ve

kömür topaklarını daha kısa sürede meydana gelirebilmesi ile açıklanabilir. Ayrıca, deneylerde ön koşullamanın yapılmaması, düşük hızlarda yağın yeterince dağılamamasına ve bunun sonucunda kömür kazanımının düşmesine neden olmuştur. Diğer taraftan, karıştırma hızının artırılması aglomerat külünde önemli bir değişiklik meydana getirmemiştir. Sonuç olarak, optimum karıştırma hızı olarak 800 dev/dak'lık bir karıştırma hızı tercih edilmiştir.



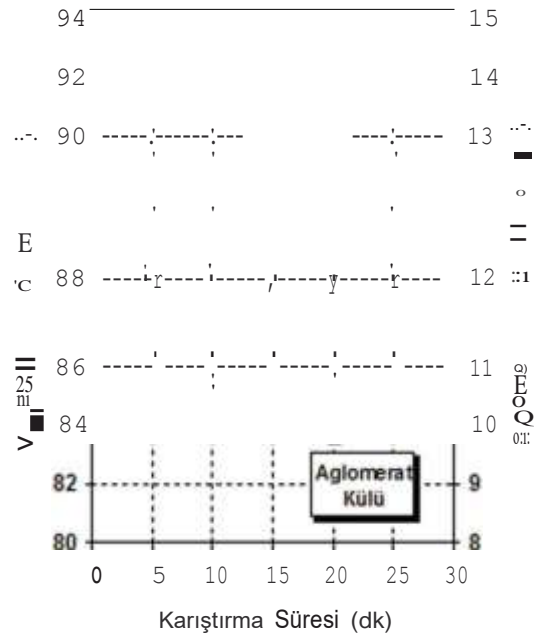
Şekil 6. Aglomerasyonda karıştırma hızının yanabilir verim ve aglomerat külüne etkisi (%15 yağ ilavesi).

3.4 Karıştırma Süresinin Etkisi

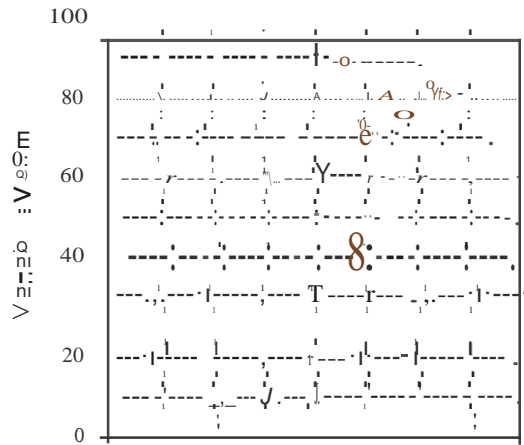
Aglomerasyonda karıştırma süresinin etkisini belirlemek amacıyla 5 farklı karıştırma süresinde (5, 10, 15, 20, 25 dakika), 800 dev/dak'lık bir karıştırma hızında deneyler yapılmıştır. Şekil 7'den görülebileceği gibi, 10-20 dakikalık karıştırma süreleri sonunda yanabilir verimde önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir. Düşük (5 dak) ve yüksek (25 dak) karıştırma sürelerinde yanabilir verim nispeten daha düşüktür. Düşük karıştırma sürelerinde, tanecik-yağ temasları ya da tanecik-yağ bağlanmaları daha düşük olmaktadır. Daha yüksek karıştırma sürelerinde

ise temas artmakta ve verim yükselmektedir. Çok yüksek karıştırma sürelerinde ise aglomeratlara şist ve bağlı taneciklerde dahil olmaktadır. Başka bir deyişle, zamanla şistler ve bağlı tanecikler de yağla ıslanmaya başlamaktadır. Bu da kül artışına paralel olarak yanabilir verimde küçük

temiz kömür kül içeriğine bakıldığı zaman, kül içeriğinin 20 dakikalık karıştırmaya kadar düştüğü görülmektedir. Bu durum, uzun karıştırma sürelerinde oluşan aglomeratların daha sağlam, daha az su içerikli ve daha küresel olmasıyla ilişkilidir. Bilindiği gibi, aglomerat yapısı gevşedikçe ve aglomerattaki su miktarı arttıkça aglomerata taşınan/sıkışan gang minerali miktarı artmaktadır. Gerçekten, 5 dakikalık karıştırma süresi sonucunda, 20 dakikalık karıştırmaya göre daha gevşek aglomeratlar oluşmuş ve bunun sonucunda daha yüksek küllü aglomeratlar elde edilmiştir.



Şekil 7. Aglomerasyonda karıştırma süresinin yanabilir verim ve aglomerat külüne etkisi (%15 yağ ilavesi).



düşüşler meydana getirmektedir.

Aglomerasyon süresinin artışına bağlı olarak,

0 10 20 30 40 50 60 70 80

Kül Giderimi (%)

Şekil 8. Aglomerasyonda çeşitli parametrelerin yanabilir verim ve kül giderimi üzerine etkisi.

4. SONUÇLAR

Bir aglomerasyon işleminde çeşitli çalışma koşullarının en uygun şartlarda olması gerekmektedir. Şekil 8'de değişik çalışma parametreleriyle yapılan deneylerin toplu sonuçları gösterilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, uygun olmayan çalışma koşullarında yanabilir verim %30'lara, kül giderimi ise %50'lere kadar düşebilmektedir. Optimum koşullarda ise yanabilir verim %90'ı geçmekte, kül giderimi ise %70'e kadar çıkabilmektedir.

Kömür kazanımı üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametre bağlayıcı yağın tipi ve miktarıdır. Hafif yağlardan, heptan ve heksan ile yüksek verimler elde edilememiş, gazyağı ile en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Azdavay kömürü için optimum gazyağı miktarı %15'dir.

Katı oranının %10-%40 arasındaki değişiminde, yanabilir verim çok fazla değişmemiştir. Ancak, katı oranının artırılması ile aglomerat külü de artmıştır. %50 katı oranından daha büyük değerlerde, yanabilir verim düşmeye başlamıştır.

Karıştırma hızı ve süresi, tanecik-yağ çarpışması olasılığı ile ilişkili olup, optimum bir değerde olmalıdır. Düşük hız ve sürelerde verim düşük, yüksek hız ve sürelerde verim nispeten daha yüksektir. Azdavay kömürü için optimum karıştırma hızı 800 dev/dak ve optimum karıştırma süresi ise 10 dakikadır.

Yağ aglomerasyonu yöntemi ile, merdaneli değirmende 212 µm'nin altına öğütülmüş olan %29,40 küllü Azdavay kömüründen, ideal koşullarda yaklaşık %10 küllü ürünler %90'ın üzerindeki bir yanabilir verimle elde edilebilmektedir. Kömürün daha ince öğütülmesi durumunda ise tane serbestleşmesinin daha da artacağı ve bunun sonucunda da daha düşük küllü ürünlerin elde edilebileceği tahmin edilmektedir.

KAYNAKLAR

Abakay, H. 2007; "Adıyaman-Gölbaşı Linyitinin Değerlendirilme Olanaklarının Araştırılması", Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği ABD, Eskişehir, s.178.

Abakay, H., Ayhan, F.D. and Kahraman, F., 2004; "Selective oil agglomeration in Simak asphaltite beneficiation", *Fuel*, **83**, 2081-2086.

Aktaş, Z., 2002; "Some factors affecting spherical oil agglomeration performance of coal fines", *International Journal of Mineral Processing*, **65**, 177-190.

Alonso, M.I., Valde's, A.F., Martınez-Tarazona R.M. and Garcia, A.B., 2002; "Coal recovery from fines cleaning wastes by agglomeration with colza oil: a contribution to the environment and energy preservation", *Fuel Processing Technology*, **75**, 85- 95.

Alonso, M.I., Valde's, A.F., Martınez-Tarazona R.M. and Garcia, A.B., 1999; "Coal recovery from fines cleaning wastes by agglomeration with vegetable oils: effect of oil types and concentration", *Fuel*, **78**, 753-759.

Valdes, A.F. and Garcia, A.B., 2006; "On the utilization of waste vegetable oils (WVO) as agglomerants to recover coal from coal fines cleaning wastes (CFCW)", *Fuel*, **85**, 607-614.

Balzarini, J. and Hucko, R.E. 1991; "Recent Developments in Coal Preparation", *Eight Annual International Pittsburgh Coal Conference*, October, 14-18, 218-223.

Baruah, M.K., Kotoky, P., Baruah, J. and Bora, G.C., 2000; "Cleaning of Indian coals by agglomeration with xylene and hexane", *Separation and Purification Technology*, **20**, 235-241.

Bogenschnieder, B., Behrenbeck, H. and Kubitza, B., 1976; "Preparation of fine coal slurries by selective agglomeration", *Gluckauf*, **23**, 112.

Capes, C.E. 1991; "Part 4: Oil agglomeration process principles and commercial application for fine coal cleaning", In *Coal Preparation Book*, (ed. Joseph W. Leonard & Byron C. Hardince), 1020-1041.

Capes, C.E., McIlhinney, A.E., McKeever, R.E., and Messer, L., 1976; "Application of spherical agglomeration to coal preparation", *Proceedings. International Coal Preparation Congress*, Sydney, 7, h2.

- Cebeci, Y., Ulusoy, U. and Şimşek, S. 2002; "Investigation of the effect of agglomeration time, pH and various salts on the cleaning of Zonguldak bituminous coal by oil agglomeration", *Fuel*, **81**, 1131-1137.
- Garcia, A.B., Martinez, T.M.R. Vega, J.M.G and Nava, A., 1996; "Cleaning of Spanish high-rank coals by agglomeration with vegetable oils", *Fuel*, **75(7)**, 885-890.
- Gence, N., 2006; "Coal recovery from bituminous coal by agglototation with petroleum oils", *Fuel Processing Technology*, **85**, 1138-1142.
- Hoşten, Ç. ve Uçbaş, Y. 1989; "Zonguldak Toz Kömürleri Üzerinde Yağ Aglomerasyonu Çalışmaları", Türkiye 11. Madencilik Kongresi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara, 355-366.
- Huettenhain, H., 1991; "Advanced physical fine coal cleaning—spherical agglomeration", Sixteen International Conference on Coal&Slurry Technologies, Clearwater, Florida, April.
- Ignasiak, I., Szymocha, K. , Pawlak, W., and J. Kramer, J. 1994; "Engineering development of selective agglomeration technology, new trends in coal preparation technologies and equipment", Proceedings of the 12th International Coal Preparation Congress, Cracow, Poland, May 23– 27, 515–520.
- Özbayoğlu, G. 1998 "Toz Kömürler İçin Gelişmiş Yıkama Teknikleri", *Oredressing*, **1**, 1-11.
- Uçbaş, Y., Öteyaka, B. ve Özdağ, H. 1998 "Manyezit cevherinin yağ aglomerasyonu ile zenginleştirilmesinde pH düzenleyici cinsinin proses verimi, aglomerat boyutu ve oleik asit tüketimi üzerine etkisi, *Oredressing*, **1**, 19-27.
- Uslu, T. Şahinoğlu, E., Alp, İ., Deveci, H. and Savaş, M., 2006; "Agglomeration of Müzret (Yusufeli-Artvin) bituminous coal by kerosene", Türkiye 15. Kömür Kongresi, Zonguldak, 283-290.
- Ünal, İ., Aktaş, Z. ve Olcay, A., 2000; "Bitümlü kömür ve linyitin yağ aglomerasyonu", Türkiye 12. Kömür Kongresi, Zonguldak, Ereğli, 251-260.
- Pawlak, W., K. and Szymocha, K., 1999; "POC-scale testing of oil agglomeration techniques", U.S. DOE Report, ARC, Edmonton, July 1999.
- Pawlak, W., Szymocha, K. and Ignasiak, L., 1998; "Agflotherm process for efficient simultaneous upgrading of low rank coals and heavy oils at atmospheric pressure in inert gas", *Coal Preparation*, **20**, 191– 205.
- Szymocha, K. 2003; "Industrial applications of the agglomeration process", *Powder Technology*, **130**, 462-467.
- Yamık, A., Tosun, Y.İ. ve Güneş, N., 1994; "Kömürden Külün ve Kükürdün Arındırılması", Türkiye 9. Kömür Kongresi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Zonguldak Şubesi, 201-210.
- Yoon, R.H., 1991; "Part 2: Advanced Coal Cleaning", in *Coal Preparation Book*, (ed. Joseph W.Leonard&Byron C. Hardince), 966-1005.

ADİYAMAN-GÖLBAŞI LİNYİTİNİN YIKAMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

Investigation of the Washing Possibilities of Adıyaman-Gölbaşı Lignite

Geliş (received) 29 Mayıs (May) 2008; Kabul (accepted) 16 Eylül (September) 2008

Halime ABAKAY TEMEL(*)
Volkan BOZKURT (**)

ÖZET

Bu çalışmada, Adıyaman-Gölbaşı linyitinin yıkama olanakları araştırılmıştır. Bu amaçla deneysel çalışmalar, kuru bazda %29,47 kül, %46,15 uçucu madde, %24,38 sabit karbon, %2,78 toplam kükürt ve 4271 kcal/kg üst ısı değerine sahip linyit numunesi üzerinde yapılmıştır. Öncelikle Adıyaman-Gölbaşı linyitinin yıkanabilme özellikleri incelenmiştir. Yüzdürme-batırma deneyleri sonucunda linyit numunesinin yıkanabilirliğinin iyi olmadığı belirlenmiştir. Daha sonra flotasyon, aglomerasyon ve agloflotasyon yöntemleri ile Adıyaman-Gölbaşı linyitinin kül ve kükürt içeriklerinin düşürülmesi araştırılmış ve deneysel sonuçlar sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Adıyaman-Gölbaşı Linyiti, Yüzdürme-Batırma Testi, Flotasyon, Aglomerasyon, Agloflotasyon

ABSTRACT

In this study, the washing possibilities of Adıyaman-Gölbaşı lignite were investigated. For this purpose, experimental studies were performed with the lignite sample having 29.47% ash, 46.15% volatile matter, 24.38% fixed carbon, 2.78% total sulfur and 4271 kcal/kg gross calorific value, all on dry basis. First, the washability properties of Adıyaman-Gölbaşı lignite were examined. As a result of sink and float experiments, it was determined that the washability of lignite sample was not satisfactory. Then, the desulfurization and deashing of Adıyaman-Gölbaşı lignite were investigated and the experimental results were presented.

Keywords: Adıyaman-Gölbaşı Lignite, Sink-Float Test, Flotation, Agglomeration, Aggloflotation

(*)Dr., Dicle Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Böl., 21280 Diyarbakır, habakay@dicle.edu.tr
(**) Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Böl., 26480, Eskişehir

1. GİRİŞ

Linyit kömürleri içerdikleri yüksek kükürt, kül ve nem oranları ile çevre şartları bakımından büyük sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle linyitlerin kullanımı esnasında çevreye verdikleri olumsuzlukların giderilmesi gerekmektedir (Renda, 2000).

Kömür jeolojik devirler boyunca dönüşüme uğrayarak, yüksek bir kalari değeri kazanmış bitki artıklarından oluşan, farklı fiziksel ve kimyasal özellikteki katı organik yakıtlara verilen isimdir (Yaman vd., 1998). Kömür ısınma ve ısıtma amacı ile termik santrallerde, konutlarda, sanayi ve kazan fırınlarında ve ulaşımda kullanılmakta olup enerji hammaddelerinin en önemlilerinden biridir. Kömürde bulunan en önemli safsızlıklar, inorganik maddeler, kükürt ve nemdir (Önal ve Atak, 1988).

Kömür hazırlamanın amaçları; mineral maddeleri ve nemi uzaklaştırarak ısı değeri yükseltmek, kükürdü uzaklaştırarak çevre kirliliği ve korozyonu önlemek ve kömürü teknolojinin istediği boyut gruplarına ayırmaktır (Demli, 1994). Kömür yıkanabilirlik verilerine göre fiziksel yöntemler ile kömürün ne ölçüde temizlenebileceği veya belli bir kalitede kömür elde etmek için verimin ne olacağı belirlenebilmektedir (Önal ve Güney, 1998).

Flotasyon yöntemi toz kömürün (-0,5 mm) zenginleştirilmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir (Önal ve Atak, 1991). Çok ince kömürlerin zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de yağ aglomerasyonudur. Yağ aglomerasyonu yönteminde yağ emülsiyonu içine çok ince kömür tanecikleri atıldığında, kömür tanecikleri yağ zerrecikleri etrafında toplanarak aglomere olmakta ve dağınık durumdaki gangtan eleme veya flotasyon yolu ile ayrılmaktadır. Yağ aglomerasyonunda en çok kullanılan yağlar; pentan, heptan, gazyağı gibi hafif yağlar ve dizel yağı, kreosot, fuel oil gibi orta yağlar şeklinde olup, bu yağlar ayrı ayrı veya karışım halinde kullanılmaktadır. Yağın, su içinde dağıtılarak ince partiküller halinde emülsiyon haline getirilmesi ise yüksek devirli karıştırıcılarla sağlanmaktadır (Kemal ve Arslan, 2000).

Agloflotasyon yöntemi kullanılarak önemli miktarda pirilik kükürt uzaklaştırılabilmektedir. Bazı araştırmacılar, beslenen kömürün kükürt

içerdiği ve piritin serbestleşmesine bağlı olarak pirilik kükürdü yaklaşık olarak %60-85 oranında uzaklaştırmıştır (Pawlak et al., 1985; Capes, 1991).

Bu çalışmada, Adıyaman-Gölbaşı linyitinin yıkama özellikleri irdelenerek flotasyon, aglomerasyon ve agloflotasyon yöntemleri ile Adıyaman-Gölbaşı linyitinin kül ve kükürt içeriklerinin azaltılabilecek olanakları araştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Deneyisel çalışmalar, Adıyaman ili, Gölbaşı ilçesinde bulunan Soykan kömür işletmesinden alınan temsili linyit örneği üzerinde yapılmıştır. Temsili linyit örneğinin kimyasal, başlıca element ve X-Ray analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 1, Çizelge 2 ve Şekil 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Adıyaman-Gölbaşı Linyitinin Kimyasal Analiz Sonuçları (Abakay Temel, 2007)

Bileşen	orjinal kömür	havada kuru kömür	tam kuru kömüre
Nem,%	48,66	14,15	
Kül,%	15,13	25,30	29,47
Uçucu Madde,%	23,69	39,61	46,14
Sabit Karbon,%	12,52	20,94	24,39
üst Isı Değeri, kcal/kg	2193	3667	4271
Alt ısı Değeri, kcal/kg	1650	3417	4062
Toplam Kükürt, %	1,43	2,39	2,78
Pirilik Kükürt,%	0,65	1,09	1,27
Sülfat Kükürt,%	0,11	0,18	0,21
Organik Kükürt,%	0,67	1,12	1,30

a 10S °C'de kurutulmuş

Çizelge 2. Adıyaman-Gölbaşı Linyitinin Başlıca Element Analiz Sonuçları (Abakay Temel, 2007)

Bileşen	(%)
Al ₂ O ₃	11,50
SiO ₂	32,55
Fe ₂ O ₃	5,80
TiO ₂	0,70
CaO	18,50
Nap	0,50
Kp	0,70
MgO	5,10
P2O5	0,70
MnO	0,10
Cr ₂ O ₃	0,20
BaO	0,80
SO ₃	15,98
Ateşte kayıp	6,87

Çizelge 3. Adıyaman-Gölbaşı Linyitinin Elek-Kül Analizi (Abakay Temel, 2007)

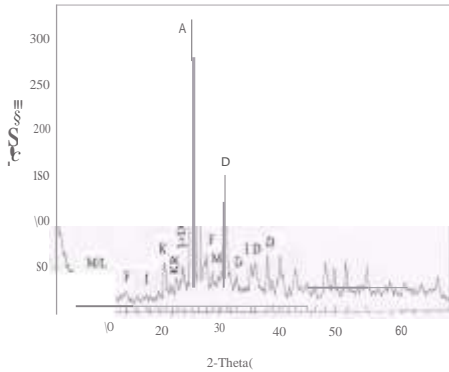
Tane Boyutu (mm)	Ağırlık(%)	Kül (%)
-50+20	60,41	29,61
-20+4,75	30,63	29,36
-4,75+0,5	7,87	28,97
-0,5+0,3	0,31	27,45
-0,3+0,1	0,38	27,81
-0,1+0,053	0,18	27,17
-0,053+0,038	0,02	32,73
-0,038	0,20	32,06
Toplam	100,00	29,47

2.2. Yöntem

Adıyaman-Gölbaşı linyitinin yüzdürme-batırma deneyleri -50+20 mm, -20+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm tane boyutlarında ZnCl₂ çözeltileri kullanılarak yapılmıştır. Karıştırma ve şlam atma deneyleri ve aglomerasyon deneyleri FRAMO-Geratetechnik, LR20 tipi mekanik karıştırıcı ile yapılmıştır. Deneyler 1 litrelik beherde gerçekleştirilmiştir.

Flotasyon deneyleri Denver laboratuvar tipi flotasyon cihazı ile yapılmıştır. Deneylerde 1 litrelik flotasyon hücresi kullanılmıştır. Toplayıcı olarak yağlı toplayıcılar (gazyağı, mazot, %80 gazyağı + %20 fuel oil, %80 mazot + %20 fuel oil, %80 gazyağı + %20 orfom, %80 gazyağı + %20 moly, %80 gazyağı + %20 phil flo.), çeşitli reaktifler (2-etil hegzanol, dodesil amin, dodesil sülfat), oleik asit (yağ asidi grubundan) ve Aero 825 (sülfonat grubu reaktif) kullanılmıştır. Moly bir apolar hidrokarbon olup molibdenitin yan ürün olarak kazanıldığı tesislerde molibdenit için son derece etkilidir. Moly mazot, gazyağı ve fuel oil'in yerini mükemmel şekilde almıştır. Phil flo. flotasyonda kullanılan fuel oil, gazyağı ve diğer benzer yağlardan daha düşük miktarlarda kullanılarak iri taneli partiküllerin flotasyonunu artırarak verimin yükselmesini sağlamaktadır. Orfom, molibden için çok etkili bir flotasyon yağıdır. Bastırıcı olarak Na₂SiO₃ ve kalgon (sodyum heksametafosfat) kullanılmıştır. Köpürtücü olarak çamyacı, MIBC, Aerofroth 88, Aerofroth 65 ve Aerofroth 76 A kullanılmıştır.

Aglomerasyon deneylerinde bağlayıcı olarak gazyağı, mazot, %50 mazot + %50 fuel oil, ayçiçek yağı, mısır yağı, %50 mazot + %50 orfom, %50 mazot + %50 moly ve %50 mazot + %50 phil flo. kullanılmıştır. Farklı tuzların aglomerasyon



Şekil 1. Adıyaman-Gölbaşı linyitinin X-Ray analiz sonuçları (A:Anhidrit, K:Kuvars, D:Dolomit, F:Feldspat, I:İllit, KR:Kristobalit, M:Mika) (Abakay Temel, 2007).

Adıyaman-Gölbaşı linyitinin tane boyut dağılımı ve tane boyutuna göre kül içeriğinin (kuru bazda) değişimi Çizelge 3'de verilmiştir.

Agloflotasyon çalışmalarında Şırnak ili, No:1 ocağından alınan asfaltit örneği ve Diyarbakır ili, Hazro ilçesinden alınan kömür örneği kullanılmıştır. Şırnak asfaltitli kuru bazda %44,8 kül ve %6 kükürt içermektedir. Hazro kömürü kuru bazda %25,27 kül ve %7 kükürt içermektedir.

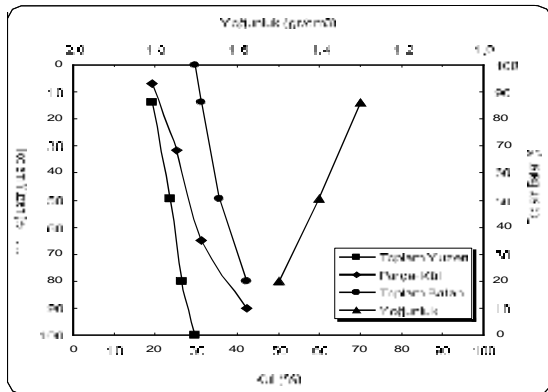
üzerindeki etkisini araştırmak amacı ile NaCl, MgCl₂ ve FeCl₃ tuzları kullanılmıştır. Deniz suyu ve göl suyunun flotasyon ve aglomerasyon üzerindeki etkisini araştırmak amacı ile İzmir'den alınan Ege denizi suyu, Van'dan alınan sodalı göl suyu, Zonguldak-Kdz. Ereğli'den alınan Karadeniz suyu ve Mersin'den alınan Akdeniz suyu kullanılmıştır.

Agloflotasyon deneylerinde, aglomerasyon aşamasında FRAMO-Geratedechnik, LR20 tipi mekanik karıştırıcı ve flotasyon aşamasında Denver Laboratuvar tipi flotasyon cihazı kullanılmıştır. Deneylerde 1 litrelik flotasyon hücresi kullanılmıştır. Agloflotasyon deneyleri üç aşamada yapılmıştır. 1. aşamada, şırnak asfaltiti/Hazro kömürünün aglomerasyonu yapılmış, 2. aşamada, 1. aşamadan elde edilen şırnak asfaltitin/Hazro kömürünün aglomeratları (konsantre) şlamdan uzaklaştırılmış linyite ilave edilmiştir. Daha sonra Adıyaman-Gölbası linyiti flotasyonunda belirlenen optimum toplayıcı ve köpürtücü miktarları ilave edilmiştir. 3. aşamada ise sistemde oluşan aglomeratlar flotasyon yöntemi ile kazanılmıştır. Flotasyon deneyleri doğal pH, pH 6, pH 7 ve pH 8'de yapılmıştır. Flotasyon, aglomerasyon ve agloflotasyon deneylerinde pH ayarlamasında, NaOH ve HCl kullanılmıştır.

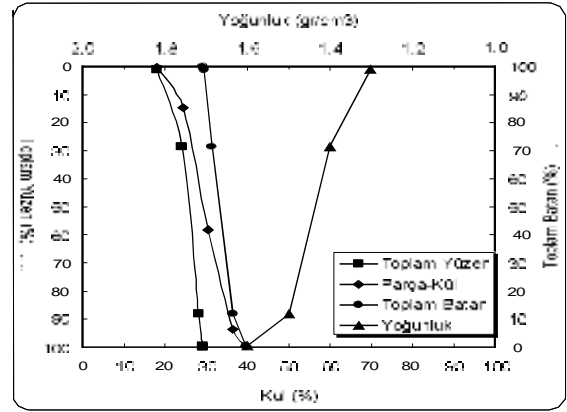
3. BULGULAR

3.1. Yüzdürme-batırma

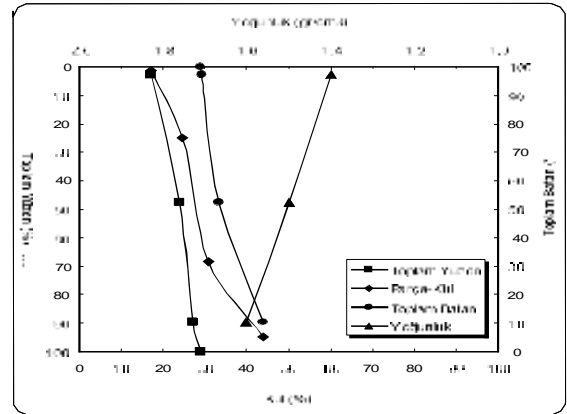
Adıyaman-Gölbası linyitinin yıkanabilme özelliklerini belirlemek amacı ile -50+20 mm, -20+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm boyut sınıflarında yüzdürme-batırma deneyleri yapılmıştır. Yıkanabilirlik eğrileri şekil 2, 3 ve 4'de verilmiştir.



Şekil 2. Adıyaman-Gölbası linyiti -50+20 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.



Şekil 3. Adıyaman-Gölbası linyiti -20+4,75 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.



Şekil 4. Adıyaman-Gölbası linyiti -4,75+0,5 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.

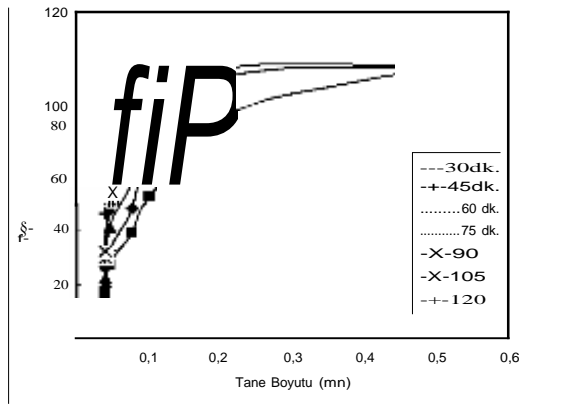
Yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre -50+20 mm tane boyutunda; 1,4 g/cm³ de ±0,1 yoğunluk ayırma değeri %66,39'dur. -20+4,75 mm tane boyutunda; 1,4 g/cm³ de ±0,1 yoğunluk ayırma değeri %87,23 ve 1,5 g/cm³ de ±0,1 yoğunluk ayırma değeri %71,04'dür. -4,75+0,5 mm tane boyutunda; 1,5 g/cm³ de ±0,1 yoğunluk ayırma değeri %86,77'dir. Ayırma yoğunluğuna yakın madde miktarının ayırım üzerindeki etkisi göz önüne alınarak Özbayoğlu ve Bilgen (1997) tarafından oluşturulan çizelgeye göre her üç tane boyutu için ±0,1 yoğunluk ayırma değeri 25'den büyük olmakta ve bu da ayırımın mümkün olmadığını göstermektedir. Linyit içerisinde çok ince boyutlarda kilin bulunması ve her üç tane boyutunda serbestleşmenin olmaması nedeni ile tane boyutu küçüldükçe yıkanabilme özelliğinde bir iyileşme olmamıştır.

3.2. Karıştırma ve şlam atma

Adıyaman-Gölbası linyiti üzerinde yapılan ön

deneylerde şlam uzaklaştırmanın aglomerasyon ve flotasyon üzerinde olumlu etkisinin görülmesinden dolayı aglomerasyon ve flotasyon çalışmalarından önce karıştırma ve şlam atma aşamasının optimum koşulları araştırılmıştır.

Adıyaman-Gölbaşı linyili üzerinde yapılan elek analizi fraksiyonlarının mikroskopta incelenmesi sonucu Adıyaman-Gölbaşı linyitinin, 0,1 mm'nin altında serbestleştiği belirlenmiştir. -0,1 + 0,053 mm tane boyutunda piritin % 80'nin üzerinde, -0,053 + 0,038 mm tane boyutunda piritin % 90'nin üzerinde ve -0,038 mm tane boyutunda piritin % 95'in üzerinde serbestleştiği belirlenmiştir. Adıyaman-Gölbaşı linyiti, farklı sürelerde öğütüldükten sonra elek analizine tabi tutulmuştur. Öğütme testlerinin toplu sonuçları Şekil 5' de verilmiştir.



Şekil 5. Adıyaman-Gölbaşı linyitinin öğütme testlerinin toplu sonuçları.

Adıyaman-Gölbaşı linyiti, su ortamında karıştırılarak 0,038 mm'lik elek ile elenmiş, katı oranının, NaOH ve HCl'in karıştırma ve şlam atma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Linyit numunesi, 75 dakika öğütüldükten sonra (%88'i -0,1 mm) karıştırma ve şlam atma deneylerinde kullanılmıştır. Optimum karıştırma ve şlam atma koşulları şu şekilde belirlenmiştir: katı oranı %10, koşullandırma süresi 20 dakika, elek 0,038 mm, karıştırma hızı 1800 devir/dakika. Optimum karıştırma ve şlam atma koşullarında %28,29 kül içeren + 0,038 mm'lik kısım, %75,24 yanabilir verimle elde edilmiştir.

3.3. Flotasyon

Kömür içinde çok ince partiküller şeklinde kilin bulunuşu kömürün flotasyon verimini azaltmakta ve reaktif tüketimini artırmaktadır.

Bu durum kömür partiküllerinin yüzeyinin çok ince bir kil tabakası ile kaplanmasına yol açarak kömürü hidrofilik yapmaktadır. Bu nedenle hava kabarcıkları ve kömür partikülleri arasındaki adhezyon (yapışma) kuvveti azalmakta ve flotasyon daha fazla güçleşmektedir (1/ven and Sun, 1981; Öney, 1993).

Bu nedenle, öncelikle optimum karıştırma ve şlam atma koşulları kullanılarak linyit numunesinden şlam uzaklaştırıldıktan sonra flotasyon yöntemi kullanılmıştır. Öğütme süresinin, pH'nın, katı oranının, toplayıcı türü ve miktarının, bastırıcı türü ve miktarının ve köpürtücü türü ve miktarının flotasyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Optimum flotasyon koşulları şu şekilde belirlenmiştir: öğütme süresi 90 dakika, katı oranı %20, pH 6, toplayıcı (%80 Mazot + %20 Fuel oil) miktarı 3 kg/ton, köpürtücü (MIBC) miktarı 0,5 kg/ton, bastırıcı miktarı 0 g/ton, köpük alma süresi 3 dakika.

Çeşme suyunda (pH 7,5) optimum karıştırma ve şlam atma koşullarında, şlam uzaklaştırıldıktan sonra optimum flotasyon koşullarında çeşme suyu, Ege denizi suyu ve sadalı göl suyunda üç aşamalı temizleme flotasyonu yapılmıştır. Ayrıca karıştırma ve şlam atma işlemi yapılmadan, optimum flotasyon koşulları kullanılarak üç aşamalı temizleme flotasyonu yapılmıştır. Farklı su ortamlarında yapılan flotasyon çalışmalarının toplu sonuçları Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Flotasyon Çalışmalarının Toplu Sonuçları

Flotasyon ortamı	Konsantre			
	Ağ. (%)	Kül (%)	T. kükürt (%)	Y. verim (%)
Çeşme suyunda (şlamdan uzaklaştırılmış)	23,33	15,04	1,19	27,59
Çeşme suyunda (şlamdan uzaklaştırılmamış)	12,17	22,11	2,25	13,44
Sadalı göl suyu (şlamdan uzaklaştırılmış)	12,44	17,67	1,08	14,25
Ege denizi suyu (şlamdan uzaklaştırılmış)	14,29	17,23	1,05	16,46

Flotasyondan önce şlamın uzaklaştırılması linyit yüzeyinde mikran mertebesinde bulunan

kilin uzaklaştırılması ve suda çok az çözünen minerallerin linyit numunesinden uzaklaştırılarak flotasyon üzerindeki etkisinin ortadan kaldırılması açısından flotasyon sonuçları üzerinde olumlu bir etki yapmıştır. Şlamin uzaklaştırılması kül ve toplam kükürt içeriği daha düşük olan konsantrenin elde edilmesini sağlamıştır.

Flotasyonda deniz suyu veya diğer artık suların kullanımındaki ana neden temiz su eksikliğidir. Ayrıca tuzlu ortamda yapılan flotasyonda, tanecikler çevresindeki elektriksel çift tabaka sıkıştırılmakta ve böylece hidrofobik yüzey alanlarının açılmasına yol açmaktadır. Bu alanlar daha sonra hidrofobik bağ ile partikülleri ve kabarcıkları çekebilmektedir. Bazı araştırmacılar, elektriksel çift tabakanın sıkışması sonucu zeta potansiyelinin azaldığını ve bunun sonucu kabarcık ve partikül arasındaki uzun mesafeli itici elektriksel kuvvetlerin azaltıldığını bildirmişlerdir (Yang et al., 1988; Yoon and Sabey, 1988).

Çeşme suyunda şlam uzaklaştırılmadan yapılan flotasyon deney sonucunda elde edilen konsantrenin kuru bazda alt ısıl değeri 4167 kcal/kg'dır. Çeşme suyunda şlam uzaklaştırılarak yapılan flotasyon deney sonucunda elde edilen konsantrenin kuru bazda alt ısıl değeri 5040 kcal/kg'dır. Ege denizi suyunun tuzluluk oranı sodalı göl suyu ve çeşme suyuna göre daha yüksektir. Flotasyon ortamında Ege denizi suyunun kullanımı toplam kükürt değeri daha düşük olan konsantrelerin elde edilmesini sağlamıştır.

3.4. Aglomerasyon

Optimum karıştırma ve şlam atma koşulları kullanılarak linyit numunesinden şlam uzaklaştırıldıktan sonra aglomerasyon yöntemi kullanılmıştır. pH, katı oranı, bağlayıcı türü ve miktarı ve elek boyutunun aglomerasyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Adıyaman-Gölbaşı linyiti için optimum aglomerasyon koşulları şu şekilde belirlenmiştir: pH 6, katı oranı %10, bağlayıcı (%50 Mazot + %50 fuel oil) oranı %20, elek 0,106 mm.

Optimum karıştırma ve şlam atma koşullarında, şlam uzaklaştırıldıktan sonra göl suyu, deniz suyu ve farklı tuz ortamlarında optimum aglomerasyon koşullarında aglomerasyon deneyleri yapılmıştır. Ayrıca karıştırma ve şlam atma işlemi yapılmadan, Adıyaman-Gölbaşı linyitinin optimum aglomerasyon koşulları kullanılarak aglomerasyonu yapılmıştır.

Farklı su ortamlarında yapılan aglomerasyon çalışmalarının toplu sonuçları Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5. Aglomerasyon Çalışmalarının Toplu Sonuçları

Aglomerasyon ortamı	Konsantre			
	Ağ. (%)	Kül (%)	T. kükürt (%)	Y. verim (%)
Çeşme suyunda (şlam uzaklaştırılmış)	68,95	16,60	1,33	80,03
Çeşme suyunda (şlam uzaklaştırılmamış)	47,71	27,48	2,62	49,06
300 mg/lt NaCl ortamında (şlamdan uzaklaştırılmış)	67,07	15,21	1,31	79,15
200 mg/lt MgCl ₂ ortamında (şlamdan uzaklaştırılmış)	67,98	15,44	1,27	80,00
200 mg/lt FeCl ₃ ortamında (şlamdan uzaklaştırılmış)	67,86	14,89	1,45	80,38
Sodali göl suyu (şlamdan uzaklaştırılmış)	67	18,25	1,20	76,23
Karadeniz suyu (şlamdan uzaklaştırılmış)	66,11	17,81	1,22	75,62
Akdeniz suyu (şlamdan uzaklaştırılmış)	66,07	17,23	1,13	76,11
Ege denizi suyu (şlamdan uzaklaştırılmış)	66,55	17,96	1,17	75,99

Aglomerasyon çalışmaları sonucunda, aglomerasyondan önce şlamin uzaklaştırılması, aglomerasyon sonuçları üzerinde olumlu bir etki yapmıştır. Şlamin uzaklaştırılması ile kül ve toplam kükürt içeriği daha düşük olan konsantre elde edilmiştir. Çeşme suyu yerine aglomerasyon ortamında göl suyu ve deniz suyunun kullanılması, toplam kükürt değeri daha düşük olan konsantreler elde edilmesini sağlamıştır. Aglomerasyon ortamında deniz suları ve göl suyunun kullanımı, hidrofilik linyit taneleri üzerinde hidratlanmış katyonların adsorpsiyonundan dolayı elde edilen yanabilir verim, çeşme suyunda şlam uzaklaştırıldıktan sonra yapılan aglomerasyonda elde edilen yanabilir verim değerinden düşük olarak elde edilmiştir.

Karadeniz, tuzluluk oranı (%18) az olan bir

denizdir. Ege denizi, tuzluluk oranı (%39) yüksek bir denizdir. Akdeniz dünya denizleri içinde oldukça yüksek (%39) tuzluluk oranına sahip bir denizdir (www.aof.edu.tr). Sodalı göl suyunun, tuzluluk oranı %19, pH'sı ise 9.8'dir (http://tr.wikipedia.org). Deniz sularında tuzluluk oranı arttıkça elde edilen konsantrelerin kül içeriği ve toplam kükürt içeriğinde azalma elde edilmiştir. Deniz sularında elde edilen konsantrelerin kül içeriği ve toplam kükürt içeriği açısından şu sıralama yapılabilir: Karadeniz > Ege denizi > Akdeniz. Aglomerasyon ortamında tuzun kullanımı, çeşme suyuna göre daha düşük kül içerikli konsantrelerin kazanımını sağlamıştır.

Çeşme suyunda şlam uzaklaştırılmadan yapılan aglomerasyon deney sonucunda elde edilen konsantrenin kuru bazda alt ısı değeri 4073 kcal/kg'dır. Çeşme suyunda şlam uzaklaştırılarak yapılan aglomerasyon deney sonucunda elde edilen konsantrenin kuru bazda alt ısı değeri ise 5035 kcal/kg'dır.

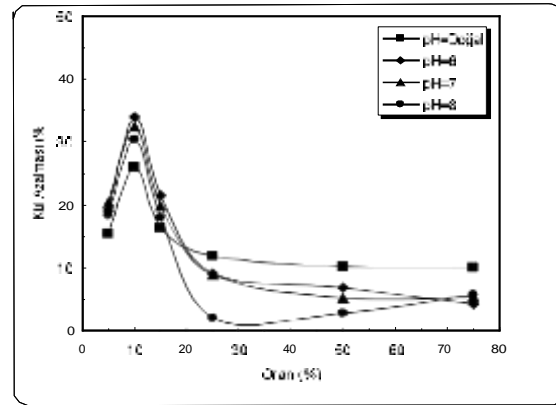
3.5. Agloflotasyon

Agloflotasyon çalışmalarında kullanılan Şırnak asfaltiti aglomeratları, Şırnak asfaltiti için belirlenen optimum aglomerasyon koşulları kullanılarak elde edilmiştir. Şırnak asfaltiti aglomeratlarının kül ve toplam kükürt içeriği sırasıyla %36,81 ve %3,12'dir.

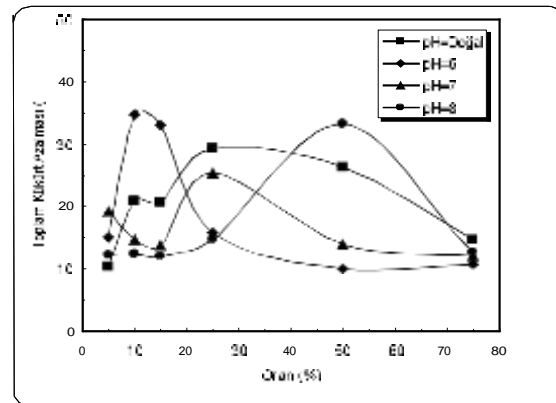
Şırnak asfaltitinin aglomeratları, farklı oranlarda şlamdan uzaklaştırılmış Adıyaman-Gölbaşı linyiti ile karıştırılması durumunda elde edilen malzemelerin özellikleri Çizelge 6'da verilmiştir. Agloflotasyon deney sonuçları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.

Çizelge 6. Farklı Oranlarda Şırnak Asfaltitinin Aglomeratları İle Karıştırılan Şlamdan Uzaklaştırılmış Adıyaman-Gölbaşı Linyiti İle Oluşturulan Malzemelerin Özellikleri

Şırnak asfaltiti aglomerat oranı (%)	Kül (%)	Toplam kükürt (%)	Doğal pH
5	28,58	2,74	6,80
10	29,02	2,76	6,88
15	29,45	2,78	6,91
25	30,31	2,82	7,03
50	32,48	2,92	7,13
75	34,64	3,02	7,20



Şekil 6. Şırnak asfaltiti aglomeratları ile yapılan agloflotasyondaki kül azalması.



Şekil 7. Şırnak asfaltiti aglomeratları ile yapılan agloflotasyondaki toplam kükürt azalması.

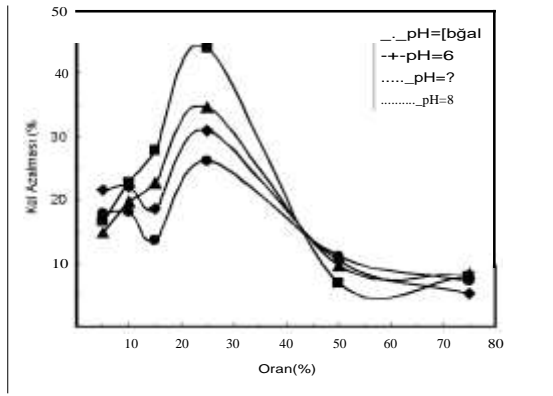
Şekil 6 ve Şekil 7'de görüldüğü gibi en iyi sonuç pH 6'da %10 Şırnak asfaltiti aglomeratları oranında elde edilmiştir. pH 6'da %10 Şırnak asfaltiti aglomeratları oranında yapılan deney sonucunda %74,74 ağırlık oranında konsantre, %19,15 kül, %1,80 toplam kükürt ve %85,13 yanabilir verimle kazanılmıştır. Toplam kükürt azalması %34,78 ve kül azalması %34,01 şeklinde olmuştur. Konsantrenin kuru bazda alt ısı değeri 4904 kcal/kg'dır.

Agloflotasyon çalışmalarında kullanılan Hazro kömürü aglomeratları, Hazro kömürü için belirlenen optimum aglomerasyon koşulları kullanılarak elde edilmiştir. Hazro aglomeratlarının kül ve toplam kükürt içerikleri sırasıyla %17,14 ve %3,09'dur (Abakay Temel ve Ayhan, 2006). Hazro kömürünün aglomeratları, farklı oranlarda şlamdan uzaklaştırılmış Adıyaman-Gölbaşı linyiti ile karıştırılması durumunda elde edilen malzemelerin özellikleri Çizelge 7'de verilmiştir.

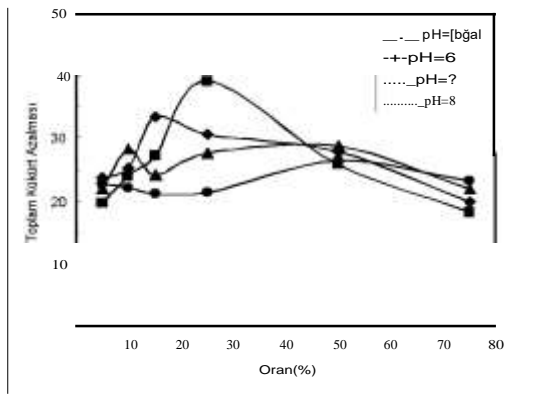
Agloflotasyon deney sonuçları sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.

Çizelge 7. Farklı Oranlarda Hazro Kömürünün Aglomeratları ile Karıştırılan Şlamdan Uzaklaştırılmış Adıyaman-Gölbaşı Linyiti ile Oluşturulan Malzemelerin Özellikleri

Hazro kömürü aglomerat oranı (%)	Kül (%)	Toplam kükürt (%)	Doğal pH
5	27,60	2,74	7,01
10	27,05	2,76	7,06
15	26,50	2,78	7,09
25	25,40	2,81	7,11
50	22,65	2,91	7,15
75	19,89	3,00	7,19



Şekil 8. Hazro kömürü aglomeratları ile yapılan agloflotasyondaki kül azalması.



Şekil 9. Hazro kömürü aglomeratları ile yapılan agloflotasyondaki toplam kükürt azalması.

Şekil 8 ve Şekil 9'da görüldüğü gibi en iyi sonuç doğal pH'da (7,11) %25 Hazro kömürü aglomeratları oranında elde edilmiştir. Doğal pH'da %25 Hazro kömürü aglomeratları oranının yapılan deney sonucunda %75,31 ağırlık oranında konsantre, %14,23 kül, %1,71 toplam kükürt ve %86,59 yanabilir verimle kazanılmıştır. Toplam kükürt azalması %39,15 ve kül azalması %43,98 şeklinde olmuştur. Konsantrenin kuru bazda alt ısı değeri 5393 kcal/kg'dır.

Hem Şırnak asfaltili hem de Hazro kömürü aglomeratlarının yüksek oranlarda kullanımının, kül azalması üzerinde olumlu biretkisi olmamıştır. Ayrıca, Şırnak asfaltili ve Hazro kömürü aglomeratlarının oranı arttıkça doğal koşullarda elde edilen konsantre miktarları da artmaktadır.

4. SONUÇLAR

Adıyaman-Gölbaşı linyili üzerinde yapılan yıkanabilirlik çalışmaları sonucunda linyit numunesinin yıkanabilirliğinin iyi olmadığı belirlenmiştir.

Flotasyon ve aglomerasyondan önce şlamın uzaklaştırılması; linyit yüzeyinde mikran mertebesinde bulunan kilin uzaklaştırılmasını ve suda çok az çözünen minerallerin linyit numunesinden uzaklaştırılarak flotasyon ve aglomerasyon üzerindeki olumsuz etkisini ortadan kaldırmıştır. Şlamın uzaklaştırılması kül ve toplam kükürt içeriği daha düşük olan konsantrelerin elde edilmesini sağlamıştır.

Adıyaman-Gölbaşı linyitinin hidrofilitik yapısı nedeni ile flotasyon ortamında yüzdürülmesi için yüksek miktarlarda toplayıcı (3 kg/ton %80 Mazot + %20 Fuel oil) ve köpürtücü (0,5 kg/ton MIBC) kullanılması gerekmektedir.

Çeşme suyuna göre aglomerasyon ortamında göl suyu ve deniz suyunun kullanımı, toplam kükürt değeri daha düşük olan konsantrelerin elde edilmesini sağlamıştır. Deniz sularında elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında kül içeriği ve toplam kükürt içeriği açısından şu sıralama yapılabilir: Karadeniz > Ege denizi > Akdeniz. Aglomerasyon ortamında tuzun kullanımı, çeşme suyuna göre daha düşük kül içerikli konsantrelerin kazanımını sağlamıştır.

Adıyaman-Gölbaşı linyitinin agloflotasyonu Şırnak asfaltili ve yarı taşkömürü niteliğindeki

Hazro kömüründen elde edilen aglomeratlar kullanılarak yapılmıştır. Agloflotasyon deneyleri sonucunda elde edilen konsantrelerin ağırlık, kül ve toplam kükürt değerlerinin kullanılan aglomeratın içeriği ile önemli şekilde değiştiği ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR

Abakay Temel H. ve Ayhan F.D., 2006; "Desulfurization and deashing of Hazro coal by selective oil agglomeration in various water mediums", *Energy&Fuels*, **20**, 2052-2055.

Abakay Temel, H. 2007; "Adıyaman-Gölbası Linyitinin Değerlendirilme Olanaklarının Araştırılması", Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, s.181.

Capes, C.E., 1991; "Oil Agglomeration Process Principles and Commercial Application for Fine Coal Cleaning", *Coal Preparation*, Colorado, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, part 4.

Demli, F., 1994; "Beypazarı ve Soma Linyitlerinin Yıkabilme Özelliklerinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Kimya Müh. Bölümü, Ankara.<http://tr.wikipedia.org>)

Deniz Kemal, M. Ve Arslan, V., 2000; "Toz Kömür Zenginleştirilmesindeki Yeni Gelişmeler", Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri V., (G. Önal, H. Dinçer, editör), Ankara, 139-152.

Önal, G. ve Atak, S., 1988; "Kömür Hazırlama ve Tesisleri", Kömür Kimyası & Teknolojisi (O. Kural, editör), 143-168.

Önal, G. ve Atak, S., 1991; "Kömür Hazırlama ve Tesisleri", Kömür (O. Kural, editör), 236-274.

Önal, G. ve Güney, A., 1998; "Kömür Hazırlama Yöntemleri ve Tesisleri", Kömür (O. Kural, editör), 269-295.

Öney, Ö., 1993; "The enrichment of Zonguldak fine coal by flotation", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniv., İzmir.

Özbayoğlu, G. ve Bilgen, S., 1997; "Türkiye'de kömür yıkama tesisleri", Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri IV, Yurt Madenciliğini

Geliştirme Vakfı, 107-123.

Pawlak, W., Goddard, R., Janiak, J., Turak, A., Ignasiak, B., 1985; "Oil Agglomeration of Low-rank Coals", Tenth Annual EPRI Contractor's Conference on Clean Liquid and Solid Fuels, California, 1-20.

Renda, D. 2000; "Temiz Kömür Üretiminde Yeni Bir Teknoloji", Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri V., (G. Önal, H. Dinçer, editör), Ankara, 153-163.

Wen, W.W. and Sun, S.C., 1981; "An electrokinetic study on the oil flotation of oxidized coal", *Separation Science Technology*, **16**, 1491-1521. www.aof.edu.tr

Yaman, S. ve Küçükbayrak, S., 1998; "Kömürün İçerdiği Mineral Maddenin Kullanımına Etkileri" (O. Kural, editör), İstanbul, 139-149.

Yang, G.C.C., Markuszewski, R., Wheelock, T.D., 1988; "Oil agglomeration of coal in inorganic salt solutions", *Coal Preparation*, **5**, 133-146.

Yoon, R.H. ve Sabey, J.B., 1988; "Coal flotation in inorganic salt solutions", *Coal Preparation Technology Volume 1*, (Ed:D.G. Osborne), London.

KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE KOKAKSU BOKSİTİNİN ÖĞÜTÜLMESİNDE BAZI ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN ÖĞÜTME VERİMİNE ETKİSİ VE BOND DEĞİRMENİ İLE ÖĞÜTME VERİMLİLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

The Effect of Certain Operating Parameters on the Grinding Efficiency in Grinding the Kokaksu Bauxite in a Stirred Mill and Comparison of the Grinding Efficiency With that of the Bond Mill
Geliş (received) 28 Nisan (April) 2008; Kabul (accepted) 15 Ara/tk (December) 2008

Hasan HACİFAZLIOĞLU (*)
Selçuk SAMANLI (**)
ihşan TOROĞLU (***)

ÖZET

Bu çalışmada, -3,35 mm'nin altına kırılmış olan Kokaksu (Zonguldak) baksitinin karıştırmalı bir değirmende öğütülebilirliği araştırılmıştır. Karıştırmalı değirmende çalışma parametrelerinden; bilya boyutu, karıştırma süresi ve karıştırma hızının ürün inceliği üzerinde önemli etkiye sahip olduğu ve bu parametrelerin enerji tüketimi ile doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir. Birim zamanda yapılan öğütme sonucunda, bilya boyutunun büyütülmesi ile hem daha ince boyutlu ürün elde edilmiş hem de enerji tüketimi artmıştır. Test edilen farklı çaptaki bilyalardan, besleme boyutu için optimum bilya boyutunun 6,5 mm olduğu saptanmıştır. Diğer taraftan, karıştırma süresi ve karıştırma hızının artırılmasıyla hem daha ince ürün elde edilmiş hem de enerji tüketimi artmıştır. Sonuç olarak, karıştırmalı değirmende ince ürün eldesinin daha çok birim zamanda tüketilen enerji ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Son aşamada, klasik Bond değirmeninde baksit örneği öğütülmüş ve öğütme verimlilikleri karıştırmalı değirmenle karşılaştırılmıştır. ince boyuttaki tanelerin (<140 µm) öğütülmesinde karıştırmalı değirmenin, iri boyuttaki tanelerin (>140 µm) öğütülmesinde ise Bond değirmeninin enerji tüketimi açısından daha avantajlı olduğu saptanmıştır. Ancak, her iki boyut grubunda da öğütme süresi bakımından karıştırmalı değirmenin daha avantajlı olduğu görülmüştür. Karıştırmalı değirmenle, birkaç dakikada birkaç mikranluk ürünler elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Karıştırmalı Bilyalı Değirmen, Bond Değirmeni, Boksit, ince Öğütme, HGI

ABSTRACT

This paper presents grindability of the Kokaksu (Zonguldak) bauxite crushed below -3.35 mm in a stirred mill. It was established that the operating parameters of the stirred mill such as the ball size, stirring time and the stirring speed have a considerable effect on the fineness of the product and these parameters are directly related to energy consumption. For grinding in a unit time, increasing the ball size yielded finer products and also increased the energy consumption. It was determined from the balls of various diameters tested that the optimal ball size for the feeding size was 6.5 mm. On the other hand, an increase in stirring time and stirring speed both yielded finer products and increased the energy consumption. To conclude, the yield of finer products by means of the stirred mill was established to be directly related to the energy consumed per unit time. In the last stage, the bauxite sample was ground in a conventional Bond mill and the grinding efficiency was compared with that of the stirred mill. It was established that the stirred mill is more advantageous in grinding fine particles (<140 µm), whereas the Bond mill is more advantageous in grinding coarse particles (>140 µm) in terms of energy consumption. However, for both size groups, the stirred mill was established to be advantageous in terms of grinding time. The stirred mill yielded products of a few micrometers in a few minutes.

Keywords: Stirred Ball Mill, Bond Mill, Bauxite, Fine Grinding, HGI

(*) Maden Yük. Müh., hhacifazlioglu@yahoo.com

(**) Ar.Gör.Dr., Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak

(***) Prof. Dr., Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 67100 Zonguldak

1. GİRİŞ

Madencilik sektöründe, mekanizasyonun ve ince öğütmeye olan ihtiyacın artmasıyla birlikte konvansiyonel tambur değirmenlerin yerini karıştırmalı bilyalı değirmenlere başlamıştır. Ayrıca, plastik, seramik, çimento, metalurji, boya ve gıda gibi diğer sektörlerde de ince ürüne olan talebin artması karıştırmalı değirmenlerin önemini daha da artırmaktadır. Günümüzde, ocaktan çıkarılan pek çok metalik cevherin zenginleştirilebilmesi için öncelikle bu cevherlerin serbestleşme boyutuna kadar öğütülmesi gerekmektedir. Öyle ki bazı cevher tiplerinde bu boyut birkaç mikrona kadar inebilmektedir. Ayrıca, ultra temiz kömür üretmek ve bazı endüstriyel hammaddeleri zenginleştirilebilmek amacıyla çok ince boyutlara kadar öğütme yapmak gerekir. Örneğin, feldispatın renk verici minerallerin giderilebilmesi için -100 µm, kömürden süper temiz kömür üretimi için -20 µm seviyelerine kadar öğütme yapmak gerekir (Mankosa vd., 1986; Bayraktar vd., 1999; Demir vd., 2001; Abd-El-Rahiem, 2003).

Endüstriyel tesislerde öğütme, enerjinin en yaygın ve en verimsiz olarak kullanıldığı işlemdir. Özellikle, tane boyutu küçüldükçe tanelerin kırılmaya karşı olan dirençlerinin artmasıyla birlikte tüketilen enerji miktarları da aşırı bir şekilde artmaktadır. Öğütme konusunda yapılan çalışmaların bir çoğunda enerji-boyut küçültme arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece, en az enerji ile en fazla boyut küçültmenin yolları araştırılmıştır (Bond, 1951; Mankosa vd., 1989; Zheng vd., 1996; Gao and Forsberg, 1993; Dikmen ve Ergün, 2004). Bilindiği gibi, konvansiyonel tambur değirmenlerde harcanan enerjinin bir kısmı doğrudan boyut küçültmede kullanılmakta, önemli bir bölümü ise ısı ve ses olarak kaybedilmektedir. Ayrıca, 75 µm'nin altındaki öğütmelerde tambur değirmenlerin verimi çok azalmakta (enerji tüketimi aşırı artmakta) ve öğütme ekonomik olmaktan çıkmaktadır (Jankovic, 2003). Oysa, günümüzde karıştırmalı değirmenlerin kullanılmasıyla 10 µm'nin altında bile ekonomik öğütmeler yapmak mümkün olmaktadır. Bunun arkasındayatan temel neden, karıştırmalı değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle, enerji tüketiminin tamburlu değirmenlerle karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmasıdır (Kwade, 1996; Dikmen ve Ergün, 2004; Sinnott vd., 2006; Celep ve Alp,

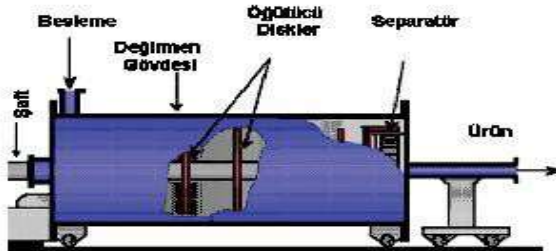
2008). Bir endüstriyel uygulamada, 20 ton/saat kapasiteli bir karıştırmalı değirmen ile 6 µm'ye yapılan öğütme sonucunda harcanan enerjinin konvansiyonel değirmenlere göre %60 daha az olduğu kaydedilmiştir (Mankosa vd., 1986).

Bilyalı değirmenlerde kullanılan en küçük bilya boyutu 25 mm olmasından dolayı, değirmen içindeki çarpma hareketlerinden öğütülen cevhere aktarılacak enerji, ince boyutlarda kırma için yeterli olmamaktadır. Küçük tanelerin ufalanmasında basınç ve burulma kuvvetleri gereklidir. Çarpma ve aşınma kuvvetlerinin baskın olduğu bilyalı değirmenlerde öğütme iri boyutta kalmaktadır. Bilyalı değirmenlerin ekonomik öğütme sınırları 100 µm'ye kadardır. Bu sınırların altına inildiğinde bilyalı değirmenlerin spesifik enerjileri üstel olarak artış gösterir (Liddell, 1986). Besleme boyutu 0,5 mm altında olduğunda, karıştırmalı değirmenlerin bilyalı değirmenlerden daha ekonomik olmaya başladığı ve tüp değirmenlere oranla karıştırmalı değirmenlerle orta dereceli öğütmelerde (d80 < 5 mm ürün inceliğinde) %25-50 enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmektedir. Ayrıca; az yerleşim alanı, yüksek kapasiteleri (50 ton/saat), düşük yatırım maliyetleri, düşük gürültü seviyesi (1 m' de <85 dB) gibi avantajlarının da olduğu belirtilmektedir (Anan, 2002). Çubuklu ve bilyalı değirmenlerde tambur hareket ettirilirken, karıştırmalı değirmenlerde yalnızca bir karıştırıcı yardımı ile ortam hareket ettirilmiştir. Temel tasarımı 1920'li yıllara kadar uzanan karıştırmalı değirmenler, ilk kez 1960'li yıllarda kaolinin öğütülmesi için kullanılmıştır (Kwade, 1999; Conway-Bakervd., 1999). Karıştırmalı değirmen, temelde sabit bir silindirik yapı içerisinde silindir eksenini üzerinde dönen bir rotardan oluşmaktadır. Öğütücü ortam olarak birkaç yüz mikrondan birkaç milimeireye kadar değişebilen boncuklar kullanılmaktadır. Uygulama alanına bağlı olarak boncuklar çelik, seramik, cam veya zirkon olabilmektedir. Öğütülecek malzemenin besleme boyutu da birkaç mikronla bir kaç milimetre arasında değişebilmektedir. Ancak, genellikle 100 µm'nin altındaki öğütmelerde enerji tüketiminin konvansiyonel değirmenlere göre daha az olduğu belirtilmektedir (Anon, 2002; Pilevneli, 2003; Jankovic ve Sincclair, 2006; Bilgili, 2007; Ding vd., 2007).

Karıştırmalı değirmenler kolay işletim koşulları, basit konstrüksiyon, yüksek boyut küçültme oranları, malzemenin öğütme ortamı tarafından

az kirlenmesi ve düşük enerji sarfiyatı yanında, dar boyut grubunda ürün istenen endüstri alanlarında son yıllarda yoğun olarak tercih edilmektedir (Wang ve Forsberg, 2000).

Karıştırmalı değirmenlerde ürün boyut inceliği (d_{97}) 200-10 μm arasında değişmektedir (Miranda ve Yaeger, 1998). 15 μm altına yapılacak öğütmelelerde diğer yöntemlere oranla daha ekonomik işlemleri mümkün kılmaktadır. Uygulamada, öğütme inceliğine göre cevherin kuru tonu başına harcanan enerji 1000-2000 kW-saat/ton olmaktadır (Orumwense and Forsberg, 1992). Karmaşıklaşan cevher yapısının ince boyutta serbestleşme gerektirmesinden ötürü çok ince öğütme kaçınılmaz hale gelmiştir. Klasik bilyalı değirmenler ile bu boyutta serbestleşme mümkün olamayacağı için yüksek kapasiteli karıştırmalı değirmenlerin imalatı zorunlu hale gelmiştir. Bazı eski tesislerdeki öğütme sistemlerinin yenileştirilmesinde, önceki bilyalı değirmenlere ekolarak tekrar öğütme devrelerinde karıştırmalı değirmenlere de yer verilmektedir. Son yıllarda en yüksek kapasiteli karıştırmalı değirmen Avusturalya Mount Isa madeninde ISAMILL adı altında, Mount Isa Mines Ltd. ve NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH (Germany) işbirliğiyle kurulmuştur. Cihaz, 3000 litre net hacim, sekiz karıştırıcı disk, 10 m/s üstünde disk hızı, %70-80 boncuk doluluk oranı, % 40-50 pulp katı oranı, 180-240 lt/dak pulp çalışma debisi ve 1120 kW güçte çalıştırılmaktadır (Young ve Gao, 2000; Weller vd., 2000). $d_{80}=19 \mu\text{m}$ boyutlu kurşun-çinko cevher beslemesinden $d_{80}=12$ ve $6,9 \mu\text{m}$ boyutlu ürün elde etmek için sırasıyla 7 ve 37 kW-saat/ton enerji yeterli olmaktadır (Johnson vd., 1998). Isa Mill'in baz metal madenlerindeki enerji verimli uygulamalarının ardından, altın madenlerinde zor serbestleşen cevherlerde pilot ölçekte denemeler yapılmış ve endüstriyel ölçekte kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 1. Yatay karıştırmalı değirmen-ISAMILL.

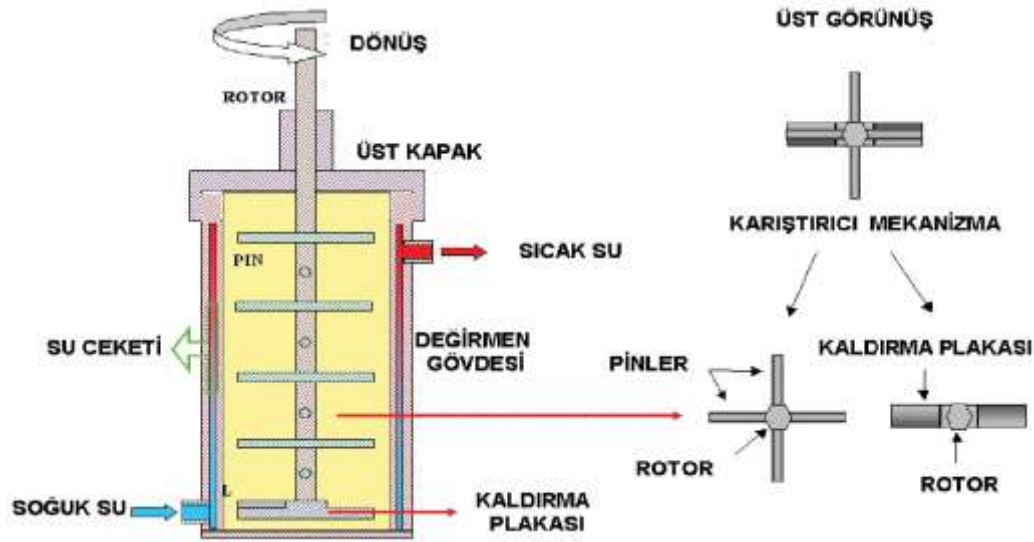
Zamanla çeşitli ekipmanları değiştirilerek değişik tiplerde karıştırmalı değirmenler tasarlanmıştır. Bunlardan bazıları Tower mill, Verti mill, Isa mill, Svedala detritör, Sala agitated mill ve ANI-Metsoprotech SVM mills'dir. Maxmill olarak adlandırılan karıştırmalı değirmen tipinde ise değirmenin gövdesi de dönmekte ve gövde içinde bulunan bir plaka yardımıyla malzemenin akışı değiştirilebilmektedir (Wang vd., 2004). Karıştırmalı değirmenler, karıştırıcı geometrisine göre de adlandırılabilirler. Karıştırıcılar; diskli, pinli ve halkalı olmak üzere temelde üç şekilden oluşur. Bu değirmenler yatay veya dikey olarak kullanılabilirler gibi yaş veya kuru öğütme de yapabilmektedirler (Kwade, 1999; Jankovic, 2003; Yue and Klein, 2005).

Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli dikey pinli kesikli tip bir karıştırmalı değirmende, 3,35 mm'nin altına kırılmış olan Kokaksu (Zonguldak) boksit cevheri kuru olarak mikronize boyuta öğütülmüştür. Ayrıca, Bond değirmeni ile öğütme performansları karşılaştırılmış ve bazı parametrelerin ürün inceliği üzerine etkileri araştırılmış ve tartışılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Dikey Pinli Karıştırmalı Değirmen

Şekil 2'de yerel imkanlarla imal edilmiş olan laboratuvar ölçekli, kesikli dikey pinli karıştırmalı değirmen (KD) gösterilmiştir. Donanım; değirmen gövdesi, AC motor (3kW), inverter ve 486 model PC olmak üzere dört ana ekipmandan oluşmaktadır. Değirmen gövdesinin içine dik inen karıştırıcı mil, altıgen kesitli olup üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmiş 16 adet 9,6x34 mm boyutlarında silindirik karıştırıcı pinlerden oluşmaktadır. Milin alt ucunda karıştırılan öğütücü ortamı yukarıya doğru kaldırma hareketi sağlaması için dönüş yönündeki uçları keskinleştirilmiş 25x20x100 mm ölçülerinde kaldırma plakası bulunmaktadır. Değirmen gövdesi 118x200 mm boyutlarında olup, karıştırıcının kapladığı hacim çıkarıldıktan sonra elde edilen efektif gövde hacmi 2.000 litre olmaktadır. Değirmen 2.2 kW'lık güce sahip, maksimum devri 1400 dev/dk olan bir motorla çalıştırılmaktadır. Farklı karıştırma hızlarında deney yapabilmek için Siemens Midi Master 1500 model sürücü (frekans inverteri) motora bağlanmıştır. Öğütme parametrelerinin ayarı ve kontrolü için PC bağlantısı yapılmıştır.



Şekil 2. Dikey pinli karıştırıcı değirmenin şematik görünümü.

Tane boyutunun analizinde esas olarak Malvern Mastersizer S lazer boyut analiz cihazından yararlanılmıştır. Bunun yanı sıra, 10-400 mesh arası ASTM standart elekleri de kullanılmıştır. Fakat 400 mesh elek altına geçen miktar önemli ölçülerde olmasından ve d_{50} ve d_{80} gibi karakteristik boyutların incelenmesine imkan vermediği için elek kullanımından vazgeçilmiştir. Lazer difraktometre yöntemiyle çalışan Malvern boyut analiz cihazı helyum-neon lazer ışın kaynağından yararlanarak ölçüm yapmaktadır. Yöntem 0.1-2000 μm arası boyut belirlenmesinde bir çok endüstri alanında tercih edilen standart bir yöntem haline gelmeye başlamıştır. 30 yıl kadar öncesine dayanan yöntem, saçınım açısı ile tane boyutu arasındaki ters orantı prensibine dayanmaktadır.

2.2. Malzeme ve Yöntem

Deneylerde kullanılan boksit örnekleri, Türkiye'nin Kuzeybatısında yer alan, Zonguldak iline bağlı Kokaksu beldesinden temin edilmiştir. Bölgeden görünüş özelliklerine bağlı olarak 4 farklı renkte alınan boksitler A, B, C ve D tipleri olmak üzere kodlanmıştır. Fikir vermesi açısından ve cevherin çoğunluğunu oluşturması bakımından B tipine ait boksit örneğinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. A, B, C ve D kodlu boksitlerin öğütülebilirliğinin araştırılması amacıyla öncelikli olarak standart Hardgrove testleri yapılmıştır. Bu yöntemde her biri $25,4 \pm 0,13$ mm çapında olan 8 adet bilyenin

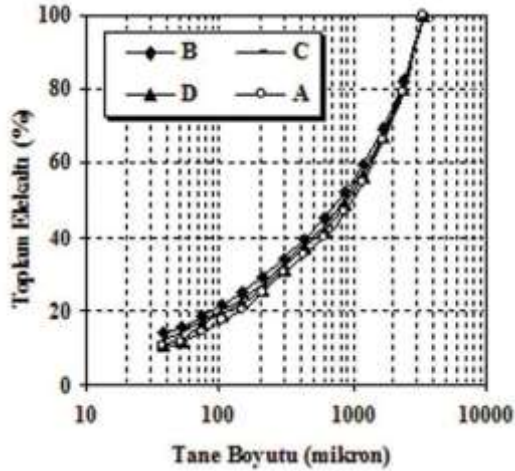
hareket ettiği 8 adet bilya yuvasından oluşan laboratuvar tipi değirmen kullanılmıştır. Sonuçta, Hardgrove indeks değerleri; A, B, C ve D tipi boksit örnekleri için sırasıyla 37, 41, 51 ve 47 olarak hesaplanmıştır. Buna göre, deneylere başlanmadan önce en zor öğütülen boksit tipinin A kodlu örnek olduğu saptanmıştır.

Çizelge 1. B Kodlu Örneğin Kimyasal Analizi

Analiz	İçerik (%)
MgO	0.28
Al ₂ O ₃	50.70
SiO ₂	8.65
CaO	0.16
Fe ₂ O ₃	23.16
SO ₃	0.46
K ₂ O	0.34
Na ₂ O	0.20
TiO ₂	3.45
Kızdırma Kaybı	12.21

Maksimum tane boyutu 150 μm olan boksit örnekleri önce çeneli kırıcıda 35 mm altına, daha sonra konili kırıcı ile tamamı 3,35 mm'nin altına kırılmıştır. Karıştırıcı ve Bond değirmenine kuru olarak boksit cevherinin -3,35 mm'lik fraksiyonu beslenmiştir. Besleme mallarına ait elekaltı eğrileri Şekil 3'de görülmektedir. Karıştırıcı değirmen deneylerinde, çapları 2,5, 3,5, 4,5 ve 6,5 mm olan çelik bilyalar ayrı ayrı gruplar halinde kullanılmıştır. Bu bilyaların, ortalama yoğunluğu 7 g/cm³ ve sertliği 40-50 HRc arasında değişmektedir. Bilya şarjı,

değirmen gövde efektif hacminin %40'ı kadar alınmıştır. Daha yüksek bilya şarj oranlarında karıştırıcının hareketi zorlanmış veya durmuştur. Boksit besleme miktarları ise bilyalar arasındaki boşluğu %100 oranında dolduracak kadar seçilmiştir. Karıştırmalı değirmene beslenen bilya ve boksit miktarları Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan Zonguldak iline bağlı Kokaksu beldesi boksit örneklerinin elekaltı eğrileri.

Çizelge 2. KD'ye Beslenen Bilya ve Boksit Miktarları

Bilya şarj oranı (%)	Bilya Çapı (mm)	Bilya ağırlığı (g)	Boksit Ağırlığı (g)
% 40	6.5	3 900	764
	4.5	4 000	746
	3.5	4 400	782
	2.5	4 600	764

Karıştırmalı değirmen deneylerinde öncelikle, bilya boyutu, karıştırma süresi ve karıştırma hızının öğütmeye etkisi araştırılmıştır. Bu parametrelerin araştırılmasında yalnızca B tipi boksit kullanılmıştır. Bilya boyutunun etkisi araştırılırken; 2,5, 3,5, 4,5 ve 6,5 mm çaplarında bilyalar kullanılmıştır. Her bilya grubu ile %40 şarj oranında, 1 dakika süresince, karıştırıcı hızı 1400 dev/dk olacak şekilde öğütmeler yapılmıştır.

Karıştırma süresinin etkisinin araştırılmasında ise optimum bilya boyutu (6,5 mm) kullanılmış ve farklı karıştırma sürelerinde (15, 30, 60, 120, 180 saniye) öğütmeler yapılmıştır. Bu deneylerde karıştırma hızı 1400 dev/dk olup, bilya şarj oranı benzer şekilde % 40'dır.

Karıştırıcı hızının etkisinin araştırılmasında ise 5 farklı karıştırma hızında çalışılmıştır. Bu karıştırma hızları; 600, 800, 1000, 1200, 1400 dev/dk'dır. Öğütme, 6,5 mm bilyalar ile %40 bilya şarj oranında ve 1 dakika süresince yapılmıştır.

Daha sonra, farklı öğütülebilirliğe sahip A, B, C ve D numuneleri ile benzer koşullarda 1'er dakikalık öğütmeler yapılmıştır. HGI ile KD'de boyut küçültme arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Öğütmeler %40 bilya şarjında, 1400 dev/dk karıştırma hızında ve 6,5 mm çapındaki bilyalar ile yapılmıştır.

Son aşamada, klasik Bond değirmeni ile öğütmeler yapılarak, KD ile öğütme verimlilikleri karşılaştırılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

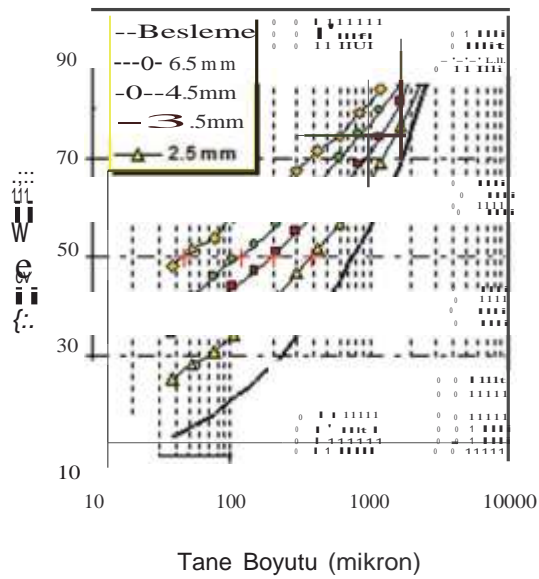
3.1. Bilya Boyutunun Ürün İnceliğine Etkisi

Bilya boyutu arttıkça kırılma hızı da artmaktadır. Bilya boyutunun en verimli olduğu bir tane boyutu vardır. Bu ideal tane boyutundan daha büyük taneler için kırılma hızında düşme meydana gelir. En iyi kırılma hızı için "bilya çapı/optimum tane boyutu" oranının 7-20 arasında olduğu bildirilmiştir (Mankosa vd., 1986; Orumwense, 1992). Fakat bu çalışmaya uymayan başka sonuçlar da bulunmaktadır. Örneğin, Young ve Gao (2000) iki ayrı boyutlu kurşun cevheri cevherini, bilya yerine kullandıkları çalışmalarında, aynı ürün inceliği için bilya/cevher çap oranlarından (db/dc, = 1600/30; 800/30) büyük değere sahip olanın daha iyi sonuç sağladığını göstermiştir (Pilevneli, 2003).

Bilya boyutunun incelendiği diğer çalışmalarda, ince bilya kullanılması ile elde edilen ürünün tane boyutu da incelmektedir. Bu eğilim besleme tane boyutu ile orantılı olarak belli bir bilya boyutuna kadar devam etmektedir. Daha ince bilyaların kullanılması durumunda ise, çarpışma anında açığa çıkan enerjinin azalması nedeniyle, bilyaların besleme malı içindeki iri taneleri parçalaması zorlaşmakta ve verim düşmektedir (Mankosa vd.,1986; Zheng vd, 1996; Jankovic, 2003; Dikmen ve Ergün, 2003).

Farklı boyutlardaki bilyalar ile yapılan 1'er dakikalık öğütme sonucunda elde edilen ürünlerin boyut dağılımları Şekil 4'de gösterilmiştir. Buna

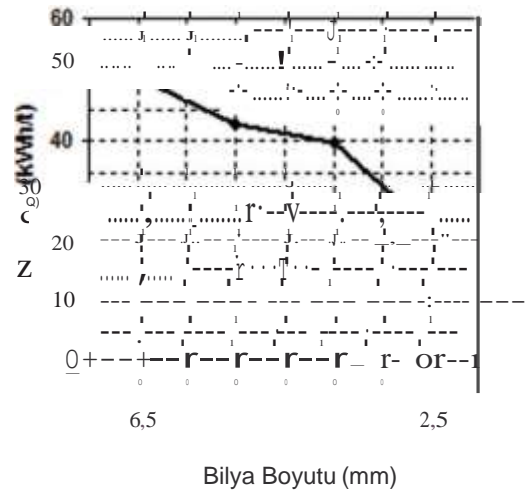
göre maksimum tane boyutu 3,35 mm olan B kodlu baksit örneğinin öğütülmesi için en uygun bilya boyutu 6,5 mm'lik bilyalardır. 6,5 mm çaplı bilyalar ile 1 dakikalık öğütme süresi sonunda elde edilen ürünün ortalama tane boyutu 45 μ m olmaktadır. Diğer taraftan, 2,5 mm'lik bilyalarla yapılan öğütme sonucunda ise ortalama tane boyutu 385 μ m olmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma için bilya boyutu ile tane boyutu arasındaki optimum oran değeri $6,5/0,78=8,33$ bulunmuştur.



Şekil 4. Kokaksu baksitinin KD'de öğütülmesinde bilya boyutunun ürün inceliğine etkisi.

Spesifik enerji başına elde edilen ürünün d_{50} boyutu, bilya boyutuyla birlikte azalmaktadır (Mankosa vd., 1986; Tüzün and Loveday, 1994). Bilya boyutu yarıya indirilirse, enerji sarfiyatı da aynı oranda azalır. Fakat, ürün boyutu da o oranda iri olacak ve aynı inceliği elde etmek için öğütme süresinde artış gerekecektir. Karıştırma hızının çok yüksek (11,4 m/s) olduğu durumlarda dahi, aynı spesifik enerji sarfiyatında ince boyutlu bilyalar, irilere oranla daha iri boyutta ürün verebilir (Wang and Forssberg, 2000). Bu hafif ve küçük bilyalar için belirtilen hızdaki çarpma olaylarının ve/veya çarpma şiddetinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Kırılma hızı, artan bilya boyutuyla artar ve doğrusallığa yaklaşır. Fakat, enerji sarfiyatı da artan bilya boyutu ile artacağından kırılma hızındaki artıştan kaynaklanan fayda nötrleşmiş olur (Pilevneli, 2003; Sinnott vd., 2006).

Farklı boyutlu bilyalar ile 1'er dakikalık öğütme süresi sonunda tüketilen enerji değerleri Şekil 5'de gösterilmiştir. Buna göre, bilya boyutu arttıkça enerji tüketimi de artmaktadır. Örneğin, 6,5 mm çaplı bilyaların kullanılması durumunda enerji tüketimi 50,3 kW-saat/ton iken, 2,5 mm'lik bilyaların kullanılması durumunda 25,7 kW-saat/ton olmaktadır. Bu durum, önemli ölçüde iri bilyaların değirmen içerisindeki hareketinin ince bilyalara göre daha zor olmasından ve bilyalar arasındaki sürtünme/kesme kuvvetlerinin daha büyük olmasından kaynaklanmıştır.



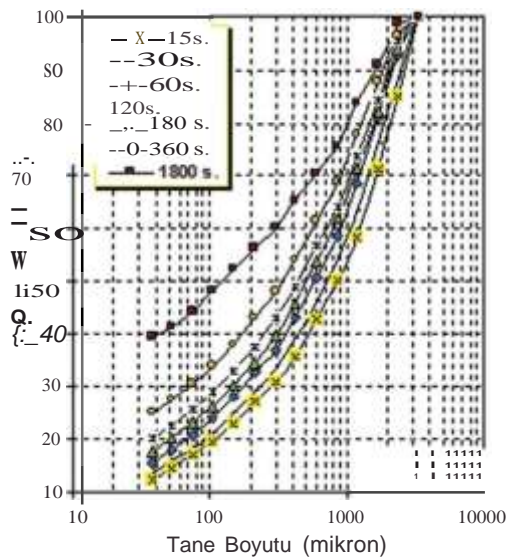
Şekil 5. Kokaksu baksitinin KD'de öğütülmesinde bilya boyutu-harcanan enerji ilişkisi.

2.3 Karıştırma Süresinin Ürün inceliğine Etkisi

Karıştırma süresinin ürün inceliğine etkisinin incelenmesi için 15, 30, 60, 120 ve 180 saniye olmak üzere toplam 5 farklı zaman aralığında karıştırma (öğütme) yapılmıştır. Deneylerde kullanılan örnek B kodlu boksit, karıştırıcı hızı 1400 dev/dk, ortam boyutu ise 6,5 mm'dir. Deneyler sonucunda elde edilen ürünlere ait elekaltı eğrileri Şekil 6'da enerji tüketim değerleri ise Şekil 7'de gösterilmiştir.

Şekil 6'dan, karıştırma süresi arttıkça elde edilen ürünün inceliğinin de arttığı görülmektedir. Besleme d_{50} boyutu 780 μ m olan baksit örneğinin 15 saniye öğütülmesi sonucunda ürünün d_{50} boyutu 430 μ m olmaktadır. Benzer şekilde; 30, 60, 120 ve 180 saniye öğütme için ürünün d_{50} boyutları sırasıyla 227, 45, 15 ve 5 μ m bulunmuştur. Harcanan enerji ise doğal olarak

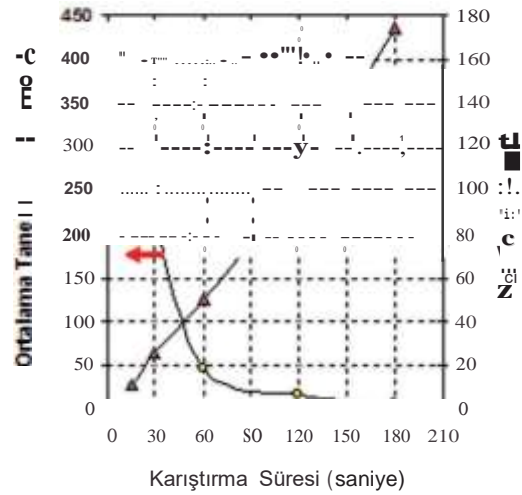
karıştırma süresi arttıkça artmıştır. Ancak, benzer boyut küçültme oranı için ince boyutlarda yapılan öğütme, iri boyutlarda yapılan öğütmeye göre daha fazla enerji sarfiyatına neden olmaktadır. İlk 60 saniye sonundaki boyut küçültme oranı $780/45=17,3$ iken, ikinci 60 saniyede $45/5=9$ 'dur. Harcanan enerji ise ilk 60 saniyede ton başına 50,30 kW-saat iken, ikinci 60 saniyede artarak 53,10 kW-saat olmuştur. Bunun nedeni, gözleme dayalı olarak açıklanacak olursa, ince tanelerin birbirine bağlanarak topaklar oluşturması ve öğütme yapan ortamla teması engellemesidir. Burada tavsiye edilebilecek bir uygulama sisteme bir dağıtıcının ilave edilmesi ya da ince ürünün bir separatörle sistemden alınmasıdır. Genellikle endüstriyel ölçekte ince ürün separatörle alınmakla ve öğütmeye kalan diğer irilerle devam edilmektedir.



Şekil 6. Kokaksu baksitinin KD'de öğütülmesinde karıştırma süresinin ürün inceliğine etkisi.

2.4 Karıştırma Hızının Ürün İnceliğine Etkisi

Karıştırma hızı ürün inceliğini ve enerji tüketimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Genel olarak karıştırma hızı arttıkça, kırılma hızı da artmakta ve ürün boyutu, buna orantılı olarak ekonomik ve verimli bir şekilde mikranize boyuta inmektedir. Ayrıca, boyut dağılımı da karıştırma hızıyla incelmekle ve daha dar boyut aralığına sahip ürünler elde edilmektedir. Karıştırma hızındaki farklılığın aynı spesifik enerji için ürün boyutu üzerinde % 12 kadar etkisi olacağı belirtilmiştir (Pilevneli, 2003).

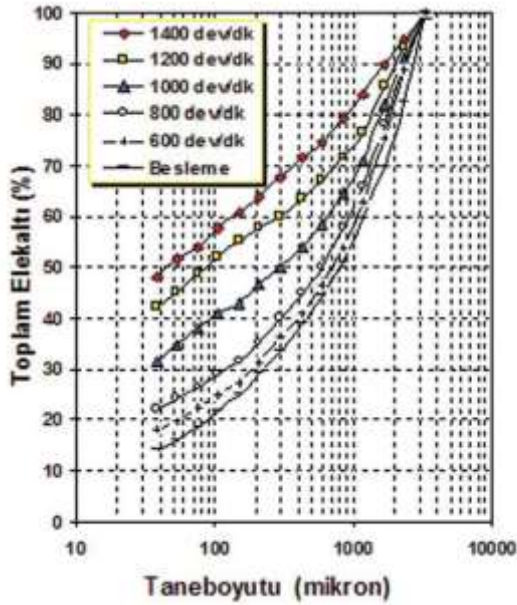


Şekil 7. Kokaksu baksitinin KD'de öğütülmesinde karıştırma süresi-tüketilen enerji ilişkisi.

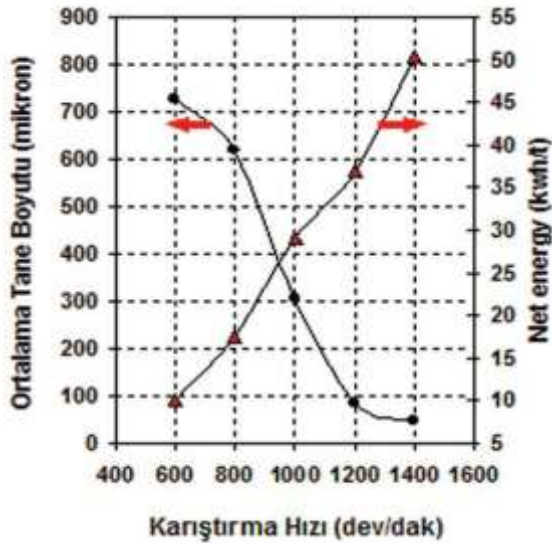
En verimli karıştırma hızı, bilyaların taneler arası kuvvetleri yenmeye başladığında elde edilmektedir. Bu hız aşıldığında, fazla olan enerjinin, elde edilen inceliğe ya da verime bir katkısı olmadığı gibi aşırı ısınmaya da neden olabileceği belirtilmektedir (Orumwense, 1992; Kwade vd., 1996; Fadhel ve Frances; 2001; Pilevneli, 2003).

Karıştırma hızının ürün inceliğine etkisini araştırmak amacıyla 1 dakika süresince 600, 800, 1000, 1200 ve 1400 dev/dk karıştırma hızlarında deneyler yapılmıştır. Deneylerde B tipi baksit ve 6,5 mm çaplı bilyalar kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen ürünlere ait elekalı eğrileri Şekil 8'de enerji tüketimleri ise Şekil 9'da verilmiştir.

Buna göre, karıştırıcı hızının artması ile birlikte elde edilen ürünün d_{50} tane boyutu da inceleşmektedir. Aynı zamanda, karıştırıcının hızı arttıkça tüketilen enerji miktarı da artmaktadır. Sonuç olarak, hız arttıkça değirmenin birim hacminde harcanan enerji de artmaktadır. Bu da, istenilen ürün tane boyutuna ulaşmak için gerekli olan sürenin azalmasını sağlamaktadır. Örneğin; 600 dev/dk karıştırma hızında 1 dakika öğütme sonunda elde edilen ürünün d_{50} boyutu 750 μm iken, 1400 dev/dk karıştırma hızında 45 μm 'dir. Bu durumda, 600 dev/dk karıştırma hızında 45 μm boyutuna öğütme yapabilmek için daha fazla zamana (> 1 dakika) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da zamanla enerji tüketiminin artmasına neden olacaktır.



Şekil.8. Kokoksü boksitinin KD'de öğütülmesinde karıştırma hızının ürün inceliğine etkisi.



Şekil.9. Kokoksü boksitinin KD'de öğütülmesinde karıştırma hızı-enerji tüketimi ilişkisi.

2.5 HGI Değerleri Farklı Olan Boksitlerin Karıştırmalı Değirmende Öğütülmesi

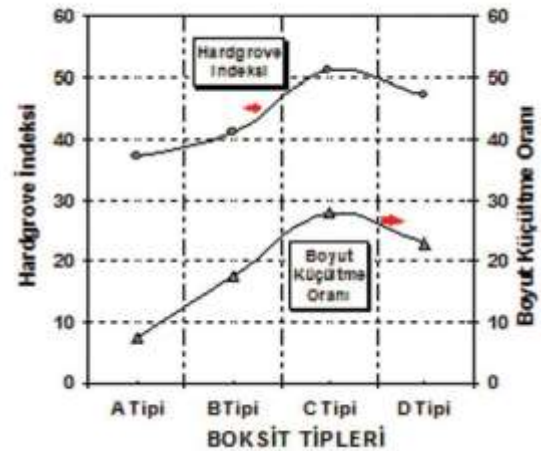
Farklı HGI değerlerine sahip olan A, B, C ve D kodlu boksit örnekleri 1400 dev/dak karıştırma hızında, 6,5 mm çaplı bilyalarla 1 dakika süresince öğütülmüştür. Bilya şarj oranı %40 olup, boksit miktarları bilyalar arasındaki boşlukları %100

oranında dolduracak kadar alınmıştır. Beslenen cevher türlerinin d_{50} boyutları ile 1 dakika öğütme sonunda elde edilen ürünlerin d_{50} boyutları Çizelge 3'de verilmiştir. Bu çizelgeden de görülebileceği gibi, farklı boksit türleri için elde edilen ürünlerin d_{50} boyutları 30 μ m ile 130 μ m arasında değişmektedir. Ancak, 1 dakikalık öğütme süresi sonucunda harcanan enerji boksitin öğütülebilirliğinden bağımsız olup, her örnek için ton başına 50,30 kS-saat'tir.

Çizelge 3. A,B,C ve D Kodlu Boksit Örneklerinin Besleme ve Ürün boyutları

	A	B	C	D
Besleme, d_{50} (μ m)	950	780	830	910
Ürün, d_{50} (μ m)	130	45	30	40
Boyut Küçültme Oranı	7.30	17.33	27.66	22.75

Karıştırmalı değirmende en yüksek boyut küçültme oranları, sırasıyla C, D, B, ve A tipi boksit örnekleri ile elde edilmiştir. Buna göre öğütülebilirliği en kolay olan C tipi, en zor olan ise A tipi boksit türüdür. Bu durum, HGI değerleri ile de tutarlılık içerisinde olup benzer eğilimler söz konusudur (Şekil 10). Zira, HGI değeri 51 olan C örneği en kolay öğütülebilen, HGI değeri 37 olan A tipi boksit ise en zor öğütülebilen boksit türüdür. Sonuç olarak, karıştırmalı değirmende yüksek HGI değerleri için yüksek boyut küçültme oranları elde edilmiştir.



Şekil 10. Kokoksü boksiti için Hardgrove indeksi değerleri ve KD'de boyut küçültme arasındaki ilişki.

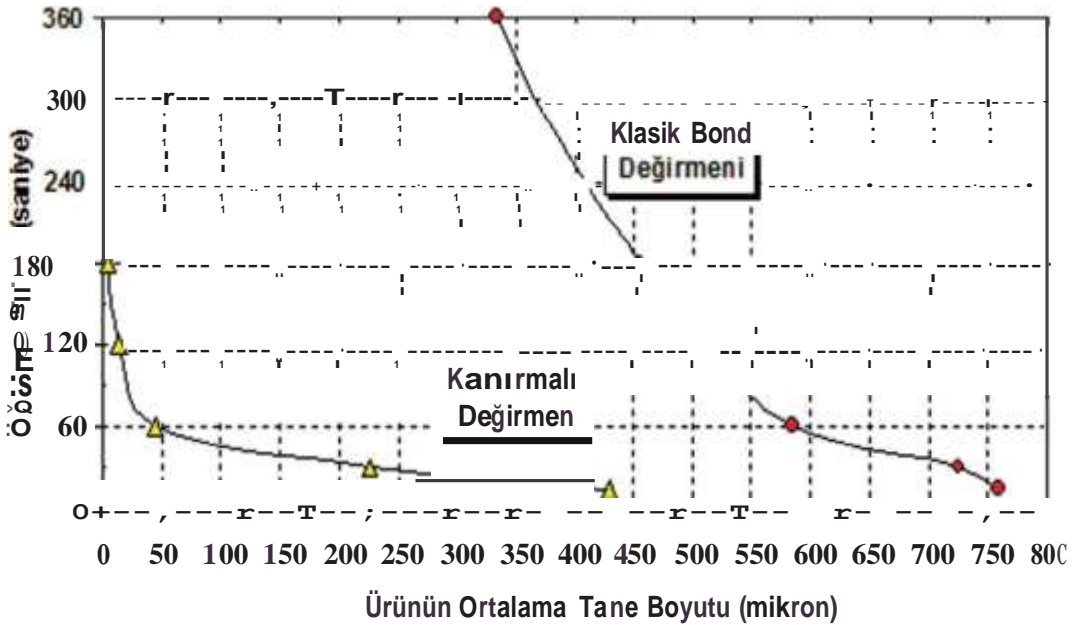
2.5 Bond Değirmeninde B Tipi Boksitin Öğütülmesi ve Karıştırmalı Değirmenle Karşılaştırılması

Deneylerde kullanılan Bond değirmeni, 30,5x30,5 cm boyutlarında ve dakikadaki dönüş hızı 70 devirdir. Değirmen içine öğütücü ortam olarak 43 adet 3,68 cm, 67 adet 2,97 cm, 10 adet 2,54 cm, 71 adet 1,90 cm ve 94 adet 1,15 cm çaplarında çelik bilyalar konmuştur. B tipi boksitin besleme miktarı bilyalar arasındaki boşluğu %100 oranında dolduracak kadar (3,5 kg) alınmıştır.

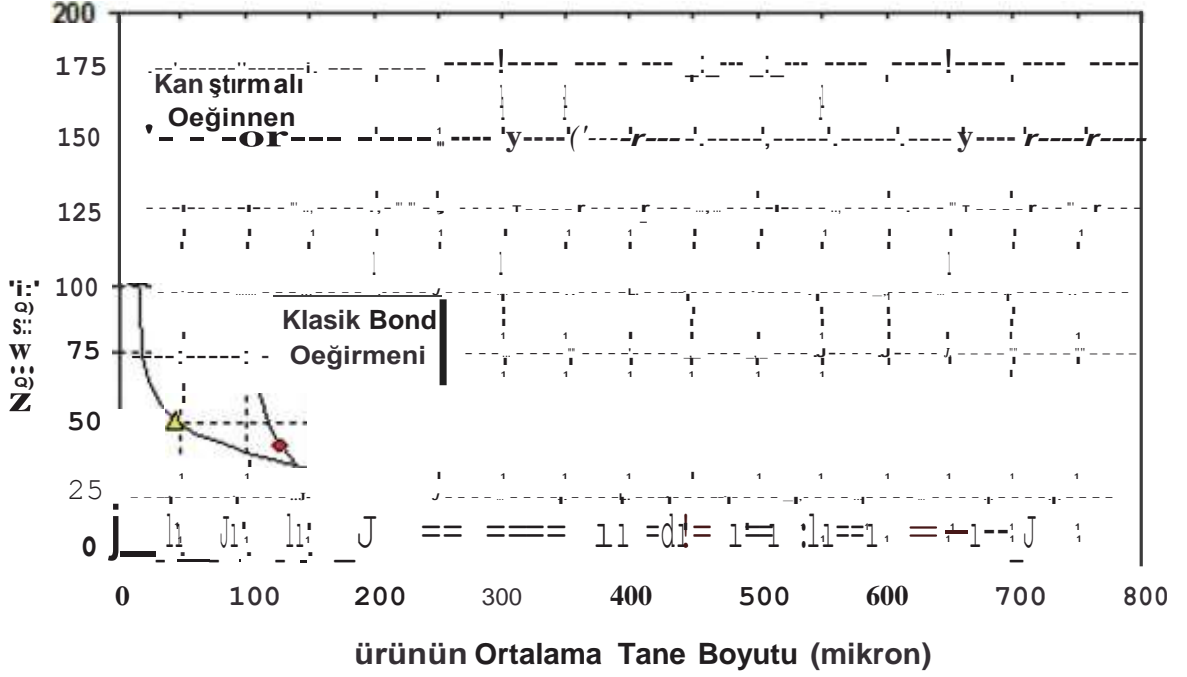
Bond değirmeni ile KD'nin karşılaştırılabilmesi için Bond değirmeninde farklı sürelerde öğütmeler yapılarak enerji tüketimleri ve ürün incelikleri belirlenmiştir. Şekil 11'de öğütme süresine bağlı olarak KD'den ve Bond değirmeninden elde edilen ürünlerin ortalama tane boyutları gösterilmiştir. Buna göre, öğütme süresinin 15, 30, 60, 120 ve 180 saniye olması durumunda KD'den elde edilen ürünlerin inceliği sırasıyla 430, 227, 45, 15 ve 5 μm olmakta iken; Bond değirmeninden elde edilen ürünlerin inceliği 750, 725, 585, 510 ve 455 μm olmaktadır. KD'de 180 saniyelik öğütme sonucunda ürünün ortalama tane boyutu 5 μm 'ye düşmekte iken, Bond değirmeninde 360 saniyelik öğütme sonunda bile ürünün ortalama tane boyutu 345 μm olmaktadır. Eğrilerin eğimlerinden de görülebileceği gibi, KD çok kısa sürelerde (15-30 saniye gibi) oldukça

ince ürünler verebilmektedir. Sonuç olarak, Bond değirmeninde 5 μm 'lik bir ürün eldesi için saatlerce öğütme yapmak gerekli iken, KD'de benzer ürün inceliğine birkaç dakikada ulaşmak mümkün olmaktadır.

Şekil 12'de her iki değirmen tipinde tüketilen enerjiye karşılık elde edilen ürünlerin incelikleri gösterilmiştir. Enerji tüketiminin 11,10 kW-saaU ton olması durumunda, Bond değirmeninde ürünün ortalama tane boyutu 345 μm olmakta iken, KD'de 430 μm olmaktadır. Benzer şekilde, 21,4 kW-sat/ton'luk enerji tüketimi için Bond değirmeninde ürünün ortalama tane boyutu 200 μm iken, KD'de 292 μm 'dir. Bu durumda, Bond değirmeni enerji tüketimi açısından KD'ye göre daha avantajlıdır. Başka bir deyişle iri boyutlu tanelerin öğütülmesinde Bond değirmeni daha az enerji tüketmektedir. Ancak, öğütme ürünün ortalama tane boyutunun 140 μm 'nin (çakışma noktası) altında olması durumunda, KD hem enerji tüketimi hem de öğütme süresi açısından daha avantajlı olmaktadır. Her iki tip değirmende enerji tüketiminin 81,3 kW-saat/ton olduğu **durumda, KD'nin ürününün ortalama tane boyutu 34 μm iken, Bond değirmeninin ürünü 101 μm olmaktadır.** Sonuç olarak, iri boyutlu boksit tanelerinin öğütülmesi (>140 μm) için Bond değirmeni, ince boyutlu tanelerin (<140 μm) öğütülmesi için KD daha ekonomiktir.



Şekil11. Kokaksu (Zonguldak) boksitin karıştırmalı değirmen (KD) ve Bond değirmeninde öğütülmesi durumunda her iki değirmene ait ürün inceliği-öğütme süresi ilişkisi.



Şekil12. Kokaksu (Zonguldak) baksitinin karıştırmalı değirmen (KD) ve Bond değirmeninde öğütülmesi durumunda her iki değirmene ait ürün inceliği-tüketilen enerji ilişkisi.

4. SONUÇLAR

Karıştırmalı değirmende, -3,35 mm altına kırılmış olan Kokaksu baksitinin öğütülmesinde çeşitli çalışma parametrelerinin ürün inceliği ve enerji tüketimi üzerinde önemli etkilere sahip olduğu saptanmıştır.

Boyutları 2,5, 3,5, 4,5 ve 6,5 mm olan bilyalarla yapılan 1'er dakikalık öğütme deneyleri sonucunda, en ince boyutlu ürün 6,5 mm'lik bilya grubuyla elde edilmiştir. Buna göre, birim öğütme süresi için optimum bilya boyutu/tane boyutu oranı 8,33'tür. Ancak, diğer taraftan bilya boyutunun artmasıyla tüketilen enerji miktarı da artmakta ve ürün inceliği daha çok enerji tüketimiyle ilişkili olmaktadır. Genel olarak, bilya boyutu arttıkça tanelerin ve bilyaların birbirine sürtme kuvvetleri de artmakta ve bu hem enerji tüketimini arttırmakta hem de cevherin öğütülmesini hızlandırmaktadır.

Karıştırma süresi ürün inceliğini etkileyen diğer bir önemli parametre olup, süre arttıkça hem enerji tüketimi artmakta hem de elde edilen ürünün boyutu incelmektedir. Karıştırmalı değirmende, birkaç dakikalık karıştırma (öğütme) süresi

sonunda tane boyutu birkaç mikrona kolaylıkla indirilebilmektedir.

Karıştırma hızının artırılması, tanelerin ve bilyaların birbiri ile çarpışma hızlarını da arttırmakta ve doğal daha ince ürünlerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Buna bağlı olarak, karıştırma hızının artışı ile birim hacimde harcanan enerji miktarı da artmaktadır.

Farklı HGI değerlerine sahip baksit cevherlerinin karıştırmalı değirmende öğütülmesi durumunda, yüksek HGI'ye sahip olanlar daha yüksek boyut küçültme oranları sağlamıştır. Karıştırmalı değirmende farklı baksit tiplerinin öğütülebilirliği ile, türlerin HGI değerleri arasında paralel bir ilişki söz konusudur.

Karıştırmalı değirmenin öğütme veriminin Bond değirmeni ile karşılaştırılması durumunda, ince (<140 µm) boyutlardaki öğütme için karıştırmalı değirmen, iri boyutlardaki öğütme (>140 µm) için Bond değirmeni daha avantajlı olmaktadır. Ancak her iki boyut grubunda da, benzer tane iriliği eldesi için, Bond değirmeninde karıştırmalı değirmene göre, kat kat daha fazla öğütme sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

Anonymous, 2002; "Energy saving ultra fine grinding with the SALA agitated mill", Zement-Kalk-Gips, **46**, 600-601.

Abd ElRahiem, F.H., 1999; "Some Aspects on Grinding the Albite Particles to Reach Liberation Size", Ore Dressing, **2**, 1-13.

Bayraktar, İ., Ersayın, S., Gülsoy, Y., Ekmekçi, Z., ve Can, M., 1999; "Temel Seramik ve Cam Hammaddelerimizdeki (Feldspat, Kuvars ve Kaolin) Kalite Sorunları ve Çözüm Önerileri", 3.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 14-15 Ekim, İzmir.

Bilgili, E., 2007; "On the consequences of non-first-order breakage kinetics in comminution processes: absence of self-similar size spectra", Particle&Particle Systems Characterization, **24**, 12-17.

Bond, F.C., 1951; "Third Theory of Comminution, Trans. AIME, Vol.193, pp. 484-494.

Celep, O ve Alp, İ., 2008; "Karıştırmalı Değirmenler ile İnce Öğütmenin Altın Cevherlerine uygulanabilirliğinin İncelenmesi, Madencilik, **47(3)**, s.15-26.

Cho, H., Waters, M.A. and Hogg, R.,1996; "Investigation of the Grind Limit in Stirred Media Milling", International Journal of Mineral Processing, **44-45**, 607-615.

Conway-Baker, J., Barley R.W., Williams R.A., Clarke A.J., Kostuch J.A. ve Parker D.J., 1999; "Investigation and Model Validation of Media Motion in a Vertical Stirred", 1st World Congress on Industrial Process Tomography, 244-248.

Demir, C., Abramov, A.A. and Çelik, M.S., 2001; "Flotation Separation of Na-Feldspar from K-Feldspar by Monovalent Salts, Minerals Engineering, **14(7)**, 733-740,.

Ding, Z., Yin, Z., Liu, L. and Chen, Q., 2007; "Effect of grinding parameters on the rheology of pyrite-haptane slurry in a laboratory stirred media mill", Minerals Engineering, **20**, 701-709.

Dikmen, S. ve Ergün, Ş.L., 2004; "Karıştırmalı Bilyalı Değirmenler", Madencilik, **43(4)**, 3-15.

Fadhel, H. and Frances, C., 2001; "Wet batch grinding of alumina in a stirred bead mill, Powder Technology, **119**, 257-268.

Gao, M.W. and Forssberg, E., 1993; "A Study on The Effect of Parameters in Stirred Ball Milling", International Journal of Mineral Processing, **37**, 45-59.

Jankovic, A., 2003; "Variables Affecting the Fine Grinding of Minerals Using Stirred Mills", Minerals Engineering, **16**, 337-345.

Jankovic,A. and Sinclair, S., 2006; "The shape of product size distributions in stirred mills", Minerals Engineering, **19**, 1528-1536.

Johnson, N. W., Gao, M., Young, M. F. and Cronin, B., 1998; "Application of the ISAMILL (a horizontal stirred mill) to the lead-zinc concentrator (Mount Isa Mines Ltd.), and the mining cycle", Australian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series (AusIMM 1998), No. 2, 291-297.

Kwade, A., 1999; "Wet Comminution in Stirred Media Mills-Research and Its Practical Application", Powder Technology, **105**, 14-20.

Kwade, A., Blecher, L. and Schwedes, J., 1996; "Motion and Stress Intensity of Grinding Beads in a Stirred Media Mill:Part 2" Powder Technology, **86**, 69-76.

Liddell, K. S., 1986; "Machines for fine milling to improve the recovery of gold from calcines and pyrite, Proceeding of the international conference on gold, Extractive Metallurgy of Gold, **2**, 405-417.

Mankosa, M. J., Adel, G.T. and Yoon, R.H., 1986; "Effect of Media Size in Stirred Ball Mill Grinding of Coal", Powder Technology, **49**, 75-82.

Mankosa, M. J., Adel, G.T. and Yoon, R.H., 1989; " Effect of Operating Parameters in Stirred Ball Mill Grinding of Coal", Powder Technology, **59**, 255-260.

Miranda, S., Yaeger, S. 1998; Homing on the best size reduction method, Chemical Engineering, **105**, 102-110.

Orumwense, O.A., 1992; The kinetics of fine grinding in an annular ball mill", Powder Technology; 73, 101-108.

Orumwense, O. A. and Forssberg, E., 1992; "Super-fine and ultra-fine grinding - a literature survey", Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, **11(1-2)**, 107-127.

Pilevneli, C.C., 2003; "Bilyalı Bir Karıştırıcı Değirmende ince Boyutlu Klinker Öğütmesinin İncelenmesi", ZKÜ Maden Müh. Böl., Doktora Tezi.

Sinnott, M., Clearly, P. W. and Morrison, R. 2006; "Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 1- media motion, energy consumption and collisional environment", Minerals Engineering, 19, 1537-1550

Tüzün, M.A. and Loveday, B.K., 1994; "Fine milling of chromite sand in a S-litre stirred ball mill", Minerals Engineering, **7(5/6)**, 551-560.

Wang, Y., Forssberg, E. and Sachweh, J. 2004; "Dry Fine Comminution in a Stirred Media Mill-MaxxMill", International Journal of Mineral Processing, **745**, 65-74.

Weller, K. R., Gao, M. And Bowen, P. , 2000; "Scaling-up horizontal stirred mills from a 4 litre test mill to a 4000 litre "ISAMILL", Mount Isa Mines Ltd.,

Young, M. F. and Gao, M., 2000; "Performance of the Isa Mills in the George Fisher Flowsheet", Proceedings of AusIMM Seventh Mill Operators' Conference, Kalgoorlie, Australia, 12-14 October, pp. 75-81.

Yue, J. and Klein, B., 2005; "Particle breakage kinetics in horizontal stirred mills", Minerals Engineering, **18**, 325-331.

Zheng, J., Harris, C.C. and Somasundaran, P., 1996; "A Study on Grinding and Energy Input in Stirred Media Mills", Powder Technology, 86, 171-177.

TEKNİK NOT

ESKİŞEHİR-MİHALIÇÇIK LİNYİTİNİN YIKANABİLME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Investigation of the Washability Characteristics of Eskişehir-Mihalıççık Lignite

Geliş (received) 06 Haziran (June) 2008; Kabul (accepted) 15 Ara/tk (December) 2008

Fatma Deniz AYHANC'I
Halime ABAKAY TEMELC'I

ÖZET

Bu çalışmada, Eskişehir-Mihalıççık linyitinin yıkanabilme özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, Eskişehir-Mihalıççık'da bulunan yer altı ve yerüstü linyit yataklarından alınan linyit örnekleri üzerinde yapılmıştır. Öncelikle -50+20 mm, -20+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm boyutlarında yüzdürme-batırma deneyleri yapılmıştır. Daha sonra yıkanabilme özelliklerinin değerlendirilmesi "Yıkanabilirlik numarası" ve "Yakın yoğunluktaki malzeme indeksi" kullanılarak yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Linyit, Yüzdürme-Batırma, Yıkanabilme özellikleri

ABSTRACT

In this study, the washability characteristics of Eskişehir-Mihalıççık lignite was investigated. Experimental studies were performed with the lignite samples taken from underground lignite fields and surface lignite field in Eskişehir-Mihalıççık, Turkey. Firstly, float-sink tests were made on -50+20 mm, -20+4.75 mm ve -4.75+0.5 mm size fractions. After, evaluation of the washability properties was made by using "Washability number" and "Near gravity material index" and the obtained results were presented.

Keywords: Lignite, Sink-Float, Washability Characteristics

(*)Yrd. Doç. Dr., Dicle Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, 21280 Diyarbakır, dayhan@dicle.edu.tr
(**)Dr., Dicle Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 21280 Diyarbakır

1. GİRİŞ

Kömür, bitki ve bitki artıklarının kömürleşmesi sonucu oluşan bir fosil yakıttır. Kömürün oluştuğu bitki ve artıklarının özelliklerine ve kömürleşme sürecindeki biyo ve jeokimyasal koşullara bağlı olarak değişik özelliklerde kömürler oluşmuştur (Kemal, 1991).

Ülkemizde elektrik enerjisi üretiminde ve ısınmada kömür kullanımı önemli bir paya sahiptir. Elektrik enerjisi üretimimizin yarısına yakını termik santrallerden gerçekleştirilmektedir. Termik santrallerde ise en büyük pay linyit yakan santraliere aittir. Bunun yanında konut ısıtmada da büyük oranda linyit kullanılmaktadır (Arslan, 1999).

Evsel ve endüstriyel yakıt olarak kullanılan kömürlerin kalitesi, oluşturduğu çevre kirliliğinden dolayı büyük önem taşımaktadır (Güney ve ark., 1995).

Kömür çoğu kez ocaktan üretildiği şekilde kullanılmamaktadır. Çeşitli teknolojilerin kullandığı kömür tipleri, özellikleri bakımından değişiklik gösterir. Bu özellikler arasında maksimum ve minimum tane boyutu, kül, kükürt ve nem oranı, kalorifik değer, uçucu madde oranı ve koklaşma yeteneği gibi önemli faktörler sayılabilir (Demli, 1994).

Hava kirliliği standartları kömür içindeki safsızlıkların azaltılmasını zorunlu hale getirmiştir. Çeşitli kullanım alanlarında kısmi farklılıklar göstermekle birlikte, kömürde safsızlık olarak bulunan kül, kükürt, nem, uçucu madde, fosfor ve alkali içeriğinin az olması istenmektedir (Güney ve ark., 1997).

Kömürde bulunan zararlı maddeler, kül yapıcı mineraller, kükürt kaynağını oluşturan organik ve inorganik bileşikler ve nemdir (Atak ve ark., 1991). Kömür hazırlamanın amaçları; kül ve nemi uzaklaştırarak kömürün ısı değerini yükseltmek, kükürdü uzaklaştırarak çevre kirliliği ve korozyonun önüne geçmek ve kömürü tüketim yerinin istediği boyut gruplarına sınıflandırmaktır (Çelik, 2002).

Kömür kullanımından kaynaklanan çevre sorunlarının giderilmesinde üç yol izlenmektedir. Bunlar, kömür hazırlama aşamasında, yakma aşamasında ve bacadan alınan tedbirlerle

oluşacak emisyanların minimuma indirilmesidir (Arslan, 1999).

Kömürlerin kül ve kükürtten arındırılabilmesi için öncelikle yıkamaya elverişli olup olmadıkları ve yıkama yöntemlerinin saptanması gerekmektedir. Bunun için yıkanabilirlik verilerinin elde edilmesi gerekmektedir. (Ateşok, 1986).

Kömürün yıkanabilirlik verilerine dayanarak fiziksel yöntemler ile kömürün ne ölçüde temizlenebileceği veya belli bir kalitede kömür elde etmek için verimin ne olacağı belirlenebilmektedir. Kömürlerin yıkanabilme özellikleri yüzdürme-batırma deneyleri ile saptanmaktadır.

Yüzdürme-batırma deneyleri kömür ve mineral madde yoğunlukları arasında seçilen değişik yoğunluklarda hazırlanmış, ağır sıvı banyolarında yapılır. Ağır sıvı olarak genellikle farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış çinko klorür çözeltileri kullanılmaktadır. Hazırlanacak yoğunluklar kömürün cinsine ve deneylerin özelliğine göre seçilmektedir. Çinko klorür ile 1,80 g/cm³ yoğunluğa kadar ağır sıvı yapmak mümkün olabilmektedir. Bunun üzerindeki yoğunluklarda ise karbontetraklorür-bromofom gibi ağır organik sıvıların karışımları kullanılır.

Kömür yıkama işlemlerinde çoğu zaman tüvenan kömür, temiz kömür (lave), ara ürün (mikst) ve artık (şist) olmak üzere üç ürüne ayrılmaktadır. Yüzdürme-batırma eğrileri sadece iki ürünlü (lave ve artık) yıkama işlemlerinde değerlendirme yapmaya uygundur. Mayer eğrisi üç ürünlü bir yıkama işleminde bilinmesi gerekli bütün bilgileri birtek grafik halinde vermektedir (Önal ve Güney, 1998).

Yıkama eğrileri ve Mayer eğrisi sadece temiz kömür miktarı/külü, temiz kömür miktarı/yıkama yoğunluğu gibi kömür bağımlı ilişkilerini göstermektedir. Çeşitli kömürler arasındaki yıkanabilme özelliklerinin karşılaştırılmasında temiz kömür miktarı, külü ve yıkama yoğunluğu kadar tüvenan kömür külünün de dikkate alınması gerekmektedir. Bütün bu parametreleri dikkate alan 'Yıkanabilme numarası' adı verilen bir bağıntı geliştirilmiştir (Ünlü, 1990).

Bu çalışmada, Eskişehir-Mihalıççık kömürünün yıkanabilme özellikleri irdelenerek, yıkanabilme numarası ve yakın yoğunluktaki malzeme indeksi kullanılarak yıkanabilme özellikleri değerlendirilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Deneysel çalışmalar Eskişehir-Mihalıççık'da bulunan yeraltı ve yer üstü linyit yataklarından alınan linyit örnekleri üzerinde yapılmıştır. Yer üstünden 4 farklı noktadan alınan linyit ve ara kesme örneğinin (A numunesi) ve yeraltından alınan (B numunesi) linyit ve ara kesme örneğinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. A Numunesi Kimyasal Analiz Sonuçları

Bileşen	Orijinal Bazda	Havada Kuru Bazda	Tam Kuru Bazda
Nem, %	29,23	5,30	-
Kül, %	39,06	52,27	55,20
Uçucu madde, %	20,16	26,98	28,49
Sabit karbon, %	11,55	15,45	16,31
Toplam kükürt, %	2,44	3,26	3,44

Çizelge 2. B Numunesi Kimyasal Analiz Sonuçları

Bileşen	Orijinal Bazda	Havada Kuru Bazda	Tam Kuru Bazda
Nem, %	24,17	3,06	-
Kül, %	40,73	52,07	53,71
Uçucu madde, %	21,22	27,13	27,99
Sabit karbon, %	13,88	17,74	18,30
Toplam kükürt, %	3,08	3,94	4,06

A numunesi ve B numunesinin tane boyut dağılımı ve tane boyutuna göre kül içeriğinin değişimi Çizelge 3 ve Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 3. A Numunesinin Elek-Kül Analizi

Boyut (mm)	% Ağ.	Havada kuru bazda % Kül	Tam kuru bazda % Kül
-50+20	50,34	54,03	57,51

Boyut (mm)	% Ağ.	Havada kuru bazda % Kül	Tam kuru bazda % Kül
-20+4,75	22,77	50,57	52,92
-4,75+0,5	11,58	48,02	51,04
-0,5	15,31	52,23	-
Toplam	100,0	52,27	-

Çizelge 4. B Numunesinin Elek-Kül Analizi

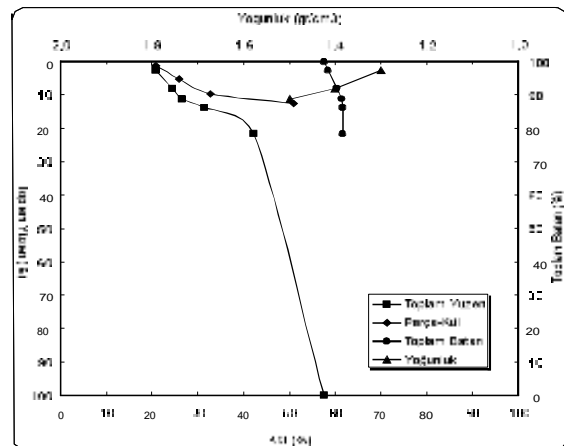
Boyut (mm)	% Ağ.	Havada kuru bazda % Kül	Tam kuru bazda % Kül
-50+20	55,85	53,79	55,92
-20+4,75	24,50	54,35	56,89
-4,75+0,5	11,49	51,02	52,38
-0,5	8,16	34,89	-
Toplam	100,0	52,07	-

2.2. Yöntem

Ave B numunelerinin yüzdürme-batırma deneyleri -50+20 mm, -20+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm tane boyutlarında ZnCl₂ çözeltileri kullanılarak yapılmıştır. Her iki numunenin -50+0,5 mm tane boyutuna ait yüzdürme-batırma deney sonuçları hesapla birleştirilmiştir.

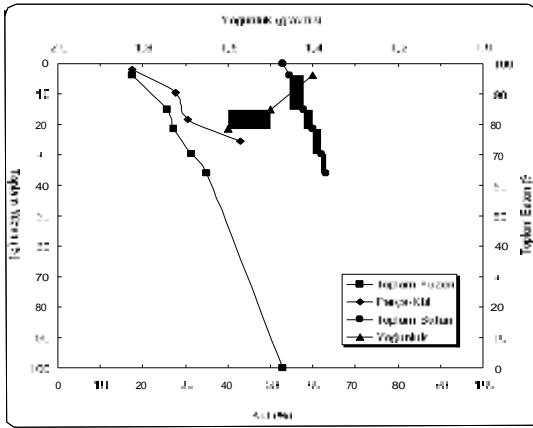
3. BULGULAR

Yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre elde edilen yıkanabilirlik eğrileri Şekil 1-8'de verilmiştir.

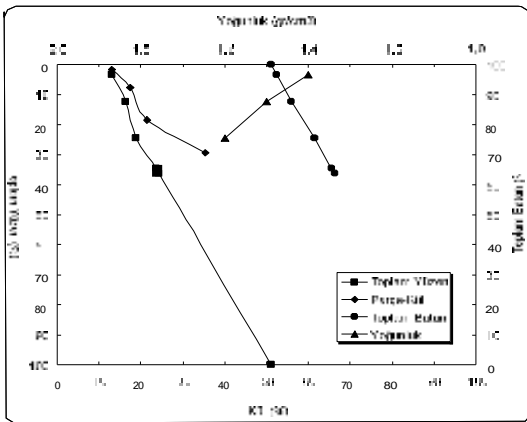


Şekil 1. A numunesi -50+20 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.

A numunesi -50+20 mm tane boyutunda yapılan yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre 1,6 g/cm³ yoğunluğunda ±0,1 yoğunluk değeri 5,76 şeklinde olup, Özbayoğlu ve Bilgen (1997) tarafından oluşturulan çizelgeye göre bu yoğunlukta kömürün yıkanabilirliği kolaydır. 1,7 g/cm³ yoğunluğunda ±0,1 yoğunluk değeri 10,59 şeklinde olup, bu yoğunlukta kömürün yıkanabilirliği zordur. 1,7 g/cm³ yoğunluğunda ağır ortam ayırıcıları kullanılabilir. A numunesi -50+20 mm tane boyutunda 1,6 g/cm³ yoğunluğunda yıkanması ile %11,17 oranında %26,61 küllü yüzen ürün elde edilirken 1,7 g/cm³ yoğunluğunda yıkanması ile %13,95 oranında %31,47 küllü yüzen ürün elde edilmiştir. Bu sonuçlardan görüleceği gibi yoğunluğun 1,6'dan 1,7 g/cm³'e artması elde edilen yüzen ürün miktarında küçük bir artışa yol açarken kül oranında büyük bir artış olmuştur.

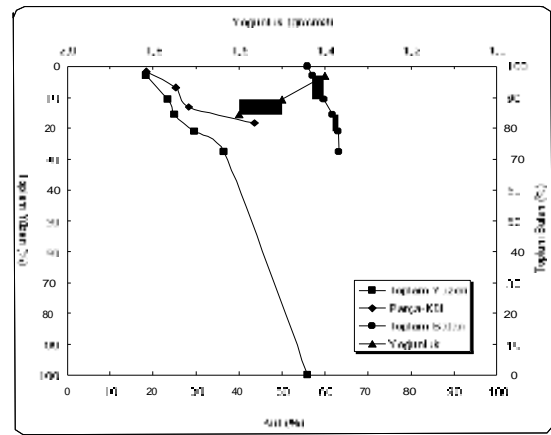


Şekil 2. A numunesi -20+4,75 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.



Şekil 3. A numunesi -4,75+0,5 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.

-20+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm tane boyutlarında yapılan yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre ±0,1 yoğunluk değerleri %10'nun üzerindedir. Bu nedenle bu boyutlarda A numunesinin yıkanabilirliği zordur. Her iki tane boyutunda, en düşük ±0,1 yoğunluk değeri 1,7 g/cm³ yoğunluğunda elde edilmiştir. Bu yoğunlukta ağır ortam ayırıcıları kullanılabilir. -20+4,75 mm tane boyutunda 1,7 g/cm³ yoğunluğunda yıkama yapıldığında %29,66 oranında %31,50 küllü yüzen ürün elde edilmiştir. -4,75+0,5 mm tane boyutunda 1,7 g/cm³ yoğunluğunda yıkama yapıldığında %34,53 oranında %23,71 küllü yüzen ürün elde edilmiştir.



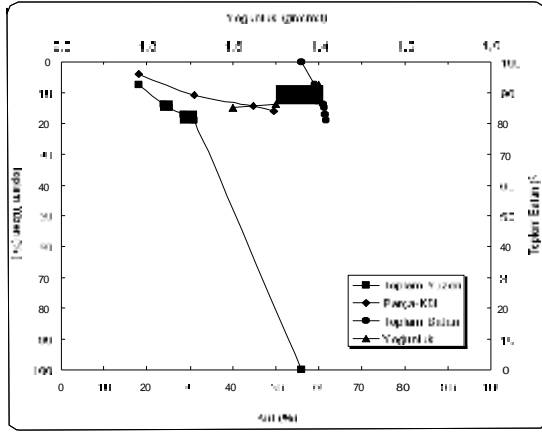
Şekil 4. A numunesi -50+0,5 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.

A numunesi için söz konusu tane boyutlarında elde edilen yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre ±0,1 yoğunluk değerleri Çizelge 5'de verilmiştir.

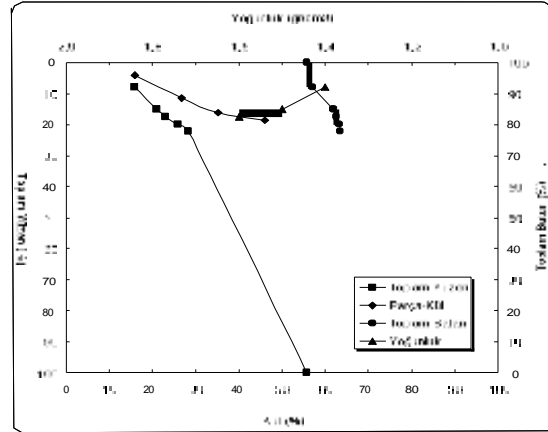
Çizelge 5. A Numunesi ±0,1 Yoğunluk Değerleri

Yoğunluk (g/cm ³)	-50+20 mm	-20+4,75 mm	-4,75+0,5 mm	-50+0,5 mm
1,5	8,67	17,57	21,03	12,74
1,6	5,76	14,63	22,27	10,40
1,7	10,59	14,41	12,02	11,81

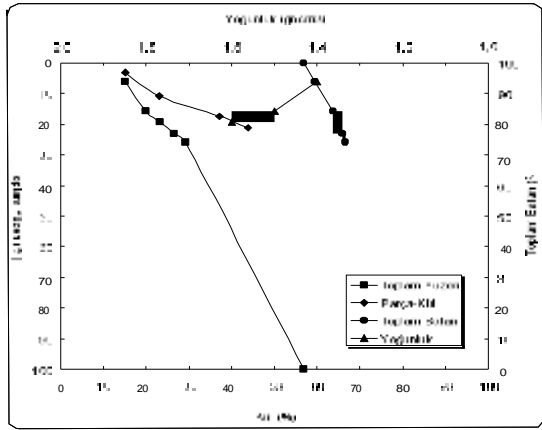
Çizelge 5'de görüldüğü gibi, tane boyutu azaldıkça elde edilen ±0,1 yoğunluk değerleri artmıştır. -50+20 mm tane boyutunda, ±0,1 yoğunluk değerleri diğer tane boyutlarına göre daha düşük elde edilmiştir. Bu nedenle A numunesinin -50+20 mm tane boyutunda yıkanabilirliği diğer tane boyutlarına göre daha kolaydır.



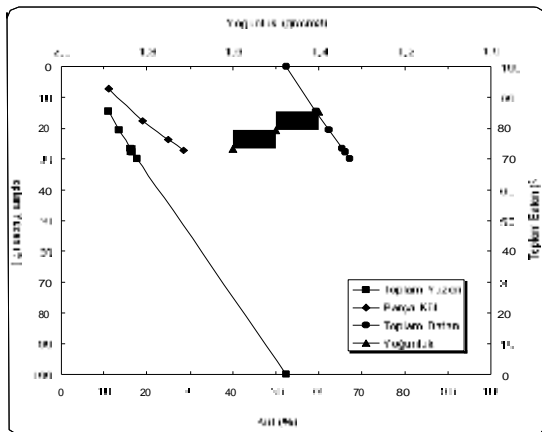
Şekil 5. B numunesi -50+20 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.



Şekil 8. B numunesi -50+0,5 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.



Şekil 6. B numunesi -20+4,75 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.



Şekil 7. B numunesi -4,75+0,5 mm tane boyutu yıkanabilirlik eğrileri.

B numunesi için söz konusu tane boyutlarında elde edilen yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre $\pm 0,1$ yoğunluk değerleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. B Numunesi $\pm 0,1$ Yoğunluk Değerleri

Yoğunluk (g/cm ³)	-50+20 mm	-20+4,75 mm	-4,75+0,5 mm	-50+0,5 mm
1,6	7,19	13,22	12,10	9,42
1,8	3,16	7,43	7,22	4,81
1,7	4,21	6,55	3,20	4,70

Çizelge 6'da görüldüğü gibi, B numunesinin tüm tane boyutlarında özellikle 1,6 ve 1,7 g/cm³ yoğunluklarında yıkanabilirliği kolaydır. A numunesine benzer olarak, -50+20 mm tane boyutunda elde edilen $\pm 0,1$ yoğunluk değerleri diğer tane boyutlarına göre daha düşüktür.

B numunesi -50+20 mm tane boyutunda yapılan yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre 1,6 ve 1,7 g/cm³ yoğunluklarında yıkama işlemi kolaydır. B numunesi -50+20 mm tane boyutunda 1,6 g/cm³ yoğunluğunda yıkanması ile %14,70 oranında %25,28 küllü yüzen ürün elde edilirken 1,7 g/cm³ yoğunluğunda yıkanması ile %16,90 oranında %28,44 küllü yüzen ürün elde edilmiştir.

-20+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm tane boyutunda yapılan yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre, her iki tane boyutunda, en düşük $\pm 0,1$ yoğunluk değeri 1,7 g/cm³ yoğunluğunda elde edilmiş olup B numunesinin yıkanabilirliği kolaydır. -20+4,75 mm tane boyutunda 1,7

g/cm³ yoğunluğunda yıkama yapıldığında %23,02 oranında %26,59 küllü yüzen ürün elde edilmiştir. -4,75+0,5 mm tane boyutunda 1,7 g/cm³ yoğunluğunda yıkama yapıldığında %27,80 oranında %16,60 küllü yüzen ürün elde edilmiştir.

B numunesi -50+0,5 mm tane boyutuna ait hesapla bulunan yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre en düşük ±0,1 yoğunluk değeri 1,7 g/cm³ yoğunluğunda elde edilmiştir. Bu tane boyutunda 1,7 g/cm³ yoğunluğunda yıkama yapıldığında %19,89 oranında %25,80 küllü yüzen ürün elde edilmiştir.

Yıkanabilirlik verilerinin değerlendirilmesinde yıkanabilirlik numarası (WN) (Ünlü, 1990) ve yakın yoğunluktaki malzeme indeksi (NGMI) (Majumder ve Barnwal, 2004) kullanılmıştır.

Yıkanabilme derecesi ve numarası ile ilgili eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$N = a - b \frac{1}{b} \times w \quad (1)$$

$$W_N = N_{opt} / b_{opt} \times 10 \quad (2)$$

Burada;

N = Yıkanabilme derecesi (%)

w = Temiz kömür miktarı (%)

a = Tüvenan kömür külü (%)

b = Temiz kömür külü (%)

WN = Yıkanabilme numarası

N_{opt} = Optimum yıkanabilme derecesi (%)

b_{opt} = Optimum yıkanabilme derecesindeki temiz kömür külü (%) (Ünlü, 1990).

A ve B numunelerinin -50+0,5 mm tane boyutu için yıkanabilme numarası hesaplaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Yıkanabilme Numarası Hesaplamasına Göre Elde Edilen Sonuçlar

	A numunesi	B numunesi
Optimum yıkanabilme derecesi, %	9,88	10,92
Optimum yıkama yoğunluğu, g/cm ³	1,7	1,8
Temiz kömür miktarı, %	20,99	22,12
Kül, %	29,61	28,22
Yıkanabilme numarası, W	3,34	3,87

Majumder ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmada Türkiye linyitlerinin yıkanabilirlik özelliklerine göre yıkanabilme numaraları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. Türkiye Linyitlerinin Hesaplanan Yıkanabilme Numaraları (Majumder ve ark., 2006)

Sıra No/Linyit	W
1-Çayırhan-Beypazarı	5,39
2-Soma-Manisa	8,12
3-Tunçbilek-Beke (Kütahya)	23,19
4-Aydın Şahinali (Aydın)	26,23
5-Kütahya-Hisarçık-Çatak (Kütahya)	24,36
6-Manisa-Soma-Deniş (1) (Manisa)	26,88
7-Edirne-Keşan-Küçükdoğanca (Edirne)	8,63

Yıkanabilirlik numarası arttıkça kömürün yıkanabilirliği artmaktadır. A ve B numuneleri için hesaplanan yıkanabilme numaraları, Çizelge 8'deki sonuçlarla karşılaştırıldığında görüleceği gibi A ve B numunelerinin yıkanabilirliği Türkiye'de bulunan diğer linyit örneklerine göre kötüdür.

Yıkanabilme numarası, çeşitli kömürler arasındaki yıkanabilme özelliklerinin karşılaştırılmasında, tüvenan kömürün yıkama öncesinde ufalanması gerekli üst tane boyutunun ve yıkama prosesinin seçiminde kullanılır (Ünlü, 1990). A ve B numunelerinin yıkanabilme numaraları 9'un altında olduğu için bu numunelerin uygulamada ufalanabileceği üst tane boyutu 10 mm veya 10 mm'nin altında olup yıkama prosesi olarak +0,5 mm kömür için ağır ortam siklonu kullanılabilir.

Yakın yoğunluktaki malzeme indeksinin hesaplanmasında öncelikle yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre kümülatif yüzen miktarına karşılık kül ve kül dışı bileşenlerin verim eğrileri çizilmektedir. Verim eğrilerinin çiziminde aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır.

$$RN = 100.X.(100 - CA) / 100 - HA \quad (3)$$

(Kül dışı bileşenlerin verimi)

$$RA = 100.X.CA / HA \quad (4)$$

(Kül bileşenlerinin verimi)

Burada;

X = Kümülatif yüzen kömür miktarı (%)
CA = Kümülatif yüzen kömür küllü (%)
HA = Tüvenan kömür küllü (%)

Verim eğrileri aşağıdaki şekillerde ifade edilmiştir.

$$R_n = aX + bX^2 + cX^3 \quad (5)$$

$$R_A = pX + qX^2 + rX^3 \quad (6)$$

Burada;

X = Kümülatif yüzen kömür miktarı (%)
a, b, c, p, q ve r sabit sayılar olup en küçük kareler yöntemi kullanılarak verim eğrilerinden hesaplanabilmektedir (Majumder ve Barnwal, 2004).

Bir kömür örneği için farklı yoğunluklarda yakın yoğunlukta malzeme indeksi örneğin 1,45 yoğunluğu için aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$NGMI = \frac{\{6(a-p)X^2 + 4(b-q)X^3 + 3(c-r)X^4\}}{12}$$

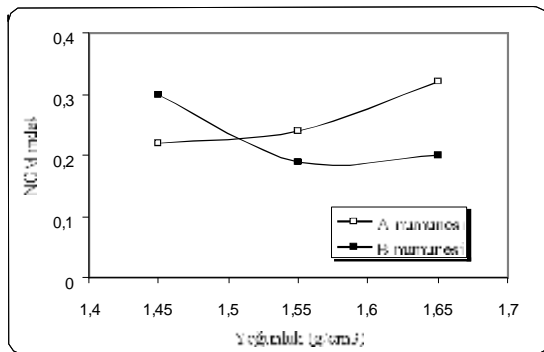
(Burada X: 1,55 yoğunluğunda yüzen kömür miktarı) –

$$\frac{\{6(a-p)X + 4(b-q)X^3 + 3(c-r)X^4\}}{12}$$

(Burada X: 1,35 yoğunluğunda yüzen kömür miktarı) /₂

$$\{6(a-p) + 4(b-q) + 3(c-r)\} / 12$$

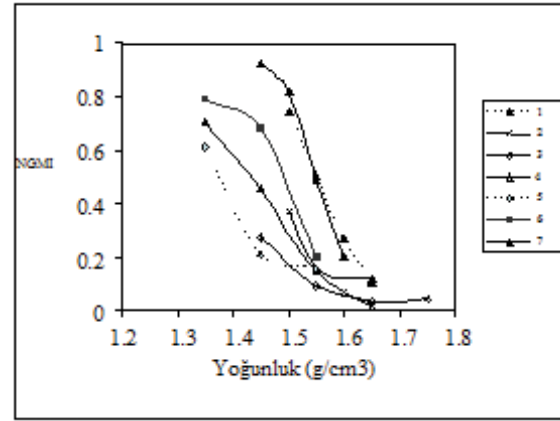
Yakın yoğunlukta malzeme indeksi (NGMI) hesaplamasına göre elde edilen sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. A ve B numunesi için NGMI indeksi hesaplaması.

NGMI indeksi 0 ile 1 arasında değişmektedir. NGMI indeksi 1'den 0'a azaldıkça yıkanabilirlik kolaylaşmaktadır. Şekil 9'da görüleceği gibi, A numunesinde yoğunluk artarken NGMI indeksi artmıştır, B numunesinde yoğunluk arttıkça NGMI indeksi azalmıştır. Bu nedenle B numunesinin yıkanabilirliği, yoğunluk arttıkça kolaylaşırken A numunesinin yıkanabilirliği yoğunluk arttıkça zorlaşacaktır.

Majumder ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmada Türkiye linyitlerinin yıkanabilirlik özelliklerine göre Çizelge 8'de verilen linyit örneklerinin NGMI indeksleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Türkiye linyitlerinin hesaplanan NGMI indeksleri (Majumder ve ark., 2006).

A ve B numuneleri için hesaplanan NGMI indeksleri, Şekil 10'da elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında görüleceği gibi Türkiye'de bulunan linyit örneklerinin yıkama yoğunluğu arttıkça yıkanabilirlikleri kolaylaşacaktır. Benzer olarak B numunesinin yıkanabilirliği, yüksek yıkama yoğunluklarında kolaydır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Eskişehir-Mihalıççık linyitinin yıkanabilirliği araştırılmıştır. Yer üstü (A numunesi) ve yeraltından (B numunesi) alınan linyit örneklerinin -50+20 mm, -20+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm tane boyutlarında yüzdürme-batırma deneyleri yapılmıştır.

A numunesi üzerinde yapılan yüzdürme-batırma

deney sonuçlarına göre -50+20 mm tane boyutunda elde edilen $\pm 0,1$ yoğunluk değerleri diğer tane boyutlarına göre daha düşük elde edilmiştir. Bu nedenle A numunesinin -50+20 mm tane boyunda yıkanabilirliği diğer tane boyutlarına göre daha kolaydır. 20+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm tane boyutunda yapılan yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre $\pm 0,1$ yoğunluk değerleri %10'nun üzerindedir. Bu nedenle bu boyutlarda A numunesinin yıkanabilirliği zordur.

B numunesi üzerinde yapılan yüzdürme-batırma deney sonuçlarına göre, B numunesinin tüm tane boyutlarında özellikle 1,6 ve 1,7 g/cm³ yoğunluklarında yıkanabilirliği kolaydır. B numunesinin -20+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm tane boyutlarında 1,7 g/cm³ yoğunluğunda yıkanabilirliği kolaydır.

Yıkanabilme numarası hesaplamasına göre A ve B numunelerinin yıkanabilme numaraları 9'un altında olduğu için bu numunelerin uygulamada ufalanabileceği üst tane boyutu 10 mm veya 10 mm'nin altında olup yıkama prosesi olarak +0,5 mm kömür için ağır ortam siklonu kullanılabilir.

Yakın yoğunluktaki malzeme indeksi (NGMI) hesaplamasına göre B numunesinin yıkanabilirliği, yoğunluk arttıkça kolaylaşırken A numunesinin yıkanabilirliği yoğunluk arttıkça zorlaşacaktır.

KAYNAKLAR

Arslan, V., 1999; "Tunçbilek kömürü kükürt içeriğinin yıkama yoluyla azaltılabilme imkanlarının araştırılması", Cevher ve Kömür Hazırlamada Yenilikler, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, 315-320.

Atak, S., Ateşok, G., Yıldırım, İ., 1991; "Kömür hazırlamada yenilikler", Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, 79-91.

Ateşok, G., 1986; "Kömür hazırlama", İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Çelik, H., 2002; "İnce kömürlerin temizlenmesinde köpük flotasyonu ve ağır ortam siklonlarının entegrasyonu", Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Demli, F., 1994; "Beyşehir ve Soma linyitlerinin yıkanabilme özelliklerinin belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Güney, A., Ateşok, G., Önal, G., Altaş, A., 1995; "Kömürzenleştirme teknolojisindeki yenilikler", Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri III, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, 59-82.

Güney, A., Ateşok, G., Önal, G., Atak, S., 1997; "Türkiye linyitlerine uygulanması gereken iyileştirme yöntemleri", Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri IV, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, 85-105.

Kemal, M., 1991; "Linyit kömürü değerlendirilmesi ve kullanımında kömür özelliklerinin etkileri", Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, 270-281.

Majumder, A.K., Barnwal, J.P., 2004; "Development of a new coal washability index", Minerals Engineering, 17, 93-96.

Majumder, A.K., Abakay Temel, H., Ayhan, F.D., Barnwal, J.P., 2006; "Washability characteristics of Turkish Coals, Lignites and Asphaltites", Proceedings of the International Seminar on Mineral Processing Technology, Chennai, India, 621-628.

Önal, G., Güney, A., 1998; "Kömür hazırlama yöntemleri ve tesisleri" (editör: Orhan Kural), İstanbul, 269-297.

Özbayoğlu, G., Bilgen, S., 1997; "Türkiye'de kömür yıkama tesisleri", Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri IV, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, 107-123.

Ünlü, M., 1990; "Linyitlerimizin yıkanabilme özellikleri ve yıkanma olanakları", 3. Uluslar arası Cevher Hazırlama Sempozyumu, İstanbul, 274-286.