

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015801 (315-323)

AKU J. Sci. Eng. 18 (2018) 015801 (315-323)

DOI: 10.5578/fmbd.66813

Çok İnce Boyutlu Kömürün Fizikokimyasal Yöntemlerle Temizlenmesi

Ercan Şahinoğlu*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon.**e-posta: ercansahinoglu@ktu.edu.tr*

Geliş Tarihi:04.12.2017

; Kabul Tarihi:09.04.2018

Özet

Anahtar kelimeler

Çok ince boyutlu kömür;
Flotasyon;
Yağ aglomerasyonu;
Agloflotasyon.

Kömür madenciliğinde mekanize kazı yöntemlerinin uygulanmasıyla birlikte oluşan çok ince boyutlu kömür miktarında artış gözlenmiştir. Bu kömürlerin temizlenmesinde teknik zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle, çok ince boyutlu kömürlerin temizlenmesi amacıyla teknik açıdan uygun yöntem(ler)in belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, yüksek kül (%35,65) ve kükürt (%7,91) içerikli çok ince boyutlu ($d_{80}= 43,47 \mu\text{m}$) Müzret kömürünün flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon yöntemleri ile temizlenebilirliği araştırılmıştır. En yüksek yanabilir verime (%93,45) sahip konsantre agloflotasyon yöntemi ile elde edilmiştir. En fazla verim indeksi değerine %41,68 flotasyon ile ulaşılmıştır. Yağ aglomerasyonu deneylerinde %10 atık yağ miktarında elde edilen en yüksek yanabilir verim %87,15 iken, agloflotasyonda %1 atık yağ miktarında %92,18 yanabilir verim elde edilmiştir.

Cleaning of Ultra-fine Coal by Physicochemical Methods

Abstract

Keywords

Ultra-fine coal;
Flotation;
Oil agglomeration;
Aggloflotation.

An increase in amount of ultra-fine coal particles was observed due to the implementation of mechanized production methods in coal mining. Technical difficulties were encountered in beneficiation of those coals. Therefore, it is of importance to determine technically suitable methods for cleaning of ultra-fine coals. In this study, amenability of ultra-fine ($d_{80}= 43.47 \mu\text{m}$) Müzret coal with high ash (35.65%) and sulphur (7.91%) to cleaning using flotation, oil agglomeration and aggloflotation methods was investigated. The concentrate with highest combustible recovery (93.45%) was obtained by aggloflotation method. The highest efficiency index 41.68% was achieved by flotation. In oil agglomeration tests, the highest combustible recovery was found to be 87.15% using 10% waste oil, while, in aggloflotation tests, 92.18% combustible recovery was obtained using 1% waste oil.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Son yıllarda kömür endüstrisinde uygulanan modern üretim metotları çok ince boyutlu (genellikle $-74 \mu\text{m}$) kömür miktarını sürekli olarak arttırmaktadır (Peng ve ark. 2015). Geçmiş yıllarda, oluşan bu ince boyutlu kömürlerin çoğu atılıyor ve ekonomiye kazandırılmayan atıl bir yatırım olarak kalıyordu. Günümüzde artan madencilik maliyetleriyle birlikte bu ince boyutlu kömürlerin kazanılması, hem ekonomik hem de çevresel olarak zorunlu hale gelmiştir (Aksay vd. 2010). Çok ince tane boyutundaki kömürün klasik zenginleştirme yöntemleri ile kazanılması zordur. İnce boyutlarda ayırma hassasiyeti ve verimin düşük olması klasik yöntemlerin kullanılmasını sınırlamıştır. Bunların

yerine fizikokimyasal özellik farklılığına dayanarak zenginleştirme yapan flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon yöntemleri kullanılabilir (Canpolat 2003). Flotasyon ince kömürlerin zenginleştirilmesi için yaygın kullanılan bir yöntemdir (Peng ve ark. 2015). Kömür flotasyonunda kömür tane boyutunun $0,5 \text{ mm}$ 'nin altında olması yeterlidir (Jaiswal ve ark. 2015). Bu yöntemde kömür ve gang minerallerinin yüzey hidrofobisite farklılığına bağlı olarak ayırma işlemi gerçekleştirilir (Tan ve ark. 2015). Kömürden piritik kükürt ve külün uzaklaştırılmasında flotasyon en yaygın kullanılan yöntemdir. Flotasyonda verim $75 \mu\text{m}$ 'in altındaki kömürlerde, kil oranının yüksek olduğu kömürlerde ve oksitlenmiş kömürlerde düşmektedir (Canpolat 2003). İnce boyutlu

kömürlerin zenginleştirilmesinde kullanılan ve flotasyona alternatif olarak geliştirilen bir diğer yöntem ise yağ aglomerasyonu yöntemidir. Özellikle flotasyonla zenginleştirilemeyen çok ince boyutlu tanelerin kazanılmasında oldukça etkili bir yöntemdir (Aksay vd. 2010). Yağ aglomerasyonu, kömürün ve beraberindeki mineral maddelerin yüzey özelliklerindeki farklılıklardan yararlanarak seçimli ayırım yapabilen bir temizleme yöntemidir (Hoşten ve Uçbaş 1989). Sulu süspansiyon içinde ince boyutta dağılmış kömür taneleri, kömür tanelerini tercihen ıslatan ve birinci sıvı ile karışmayan ikinci bir sıvı (genellikle yağ) ile işleme tabi tutulur (Şimşek 1999). Bilindiği gibi kömür, beraberinde bulunan diğer mineral maddelere göre daha hidrofobiktir. İnce boyutlu kömürün sudaki süspansiyonuna yağ eklenip karıştırıldığında, hidrofobik kömür taneleri, yüzeylerindeki yağın da bağlayıcılık etkisiyle birbirine tutunarak aglomeratları oluştururlar. Hidrofilik özellikteki mineral maddeler (gang mineralleri) ise dağılmış halde sulu fazda kalırlar (Doymuş 1997). Oluşan aglomeratlar, su ile ıslanabilen özellikteki pirit ve killi minerallerden, eleme veya flotasyon yöntemleri ile ayrılabilirler (Aksay vd. 2010). Yağ aglomerasyonu yönteminin yüksek verimi, oksitli ve killi kömürlere uygulanabilirliği gibi avantajları vardır (Mehrotra ve ark. 1983). Bununla birlikte yağ aglomerasyonunun en belirgin dezavantajı tüketilen yağ miktarının fazla olmasıdır (Cebeci ve Eroglu 1998). Flotasyon ve aglomerasyon yöntemlerinin dezavantajlarını gidermek amacı ile geliştirilen agloflotasyon yöntemi çok daha ince boyutta zenginleştirmeyi ve daha az yağ sarfiyatını mümkün kılmıştır (Canpolat 2003).

Literatürde flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyonun birlikte çalışıldığı ve de çalışmalarda kullanılan kömürün tane boyutunun çok ince boyutta olduğu çalışma sayısı sınırlıdır.

Canpolat (2003) çalışmasında yaklaşık %71'i -63 mikronun altında olan %16,13 küllü taşkömürünün flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon yöntemleri ile temizlenebilirliğini araştırmıştır. Flotasyon deneylerinde optimum koşullarda %92,06 yanabilir verim, %45,27 kül atımı ve %37,33 verim indeksi değerlerine ulaşmıştır. Yağ aglomerasyonu

deneylerinde optimum koşullarda %97,44 yanabilir verim, %30,06 kül atımı ve %27,50 verim indeksi değerleri elde etmiştir. Agloflotasyon deneylerinde ise yanabilir verimi %96,44, kül atımını %24,74 ve verim indeksini %21,18 olarak bulmuştur.

Gence (2006) çalışmasında ince boyutlu Zonguldak kömürünün aglomerasyon ve agloflotasyon ile temizlenebilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla kuru bazda %49,49 küllü kömürden, aglomerasyon deneyi ile %13,96 küllü ve %86,98 yanabilir verimle, agloflotasyon deneyi ile %10,87 küllü ve %92,17 yanabilir verimle konsantreler elde etmiştir.

Abakay Temel ve Bozkurt (2008) yaptıkları çalışmada kuru bazda %29,47 küllü ve %2,78 toplam kükürtlü Adıyaman-Gölbaşı linyit kömüründen; flotasyon deneyi ile %15,04 küllü, %1,19 toplam kükürtlü ve %27,59 yanabilir verimle, aglomerasyon deneyi ile %14,89 küllü, %1,45 toplam kükürtlü ve %80,38 yanabilir verimle, agloflotasyon deneyi ile %14,23 küllü, %1,71 toplam kükürtlü ve %86,59 yanabilir verimle konsantreler elde etmişlerdir.

Abakay Temel (2010) kuru bazda %43,80 küllü ve %7,12 toplam kükürtlü tamamı -106 mikronun altında olan kömürden agloflotasyon deneyi ile %38,67 küllü ve %3,17 toplam kükürtlü konsantre elde etmiştir.

Flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon yöntemlerinin teknik ve ekonomik açıdan pratikleşebilme potansiyelleri aşağıda özetlenmiştir. Flotasyon yöntemi 1920'li yıllardan beri ince kömür zenginleştirilmesinde başarı ile uygulanmaktadır (Bayat 2008). Bu yöntem endüstriyel ölçekte ince kömürlerin zenginleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemdir (Canpolat 2003). Yağ aglomerasyonu yöntemi ise 1920'li yıllarda geliştirilmesine rağmen (Mehrotra ve ark. 1983), teknik başarısını ticari anlamda gösterememiş ve uygulanamamıştır (Shrauti ve Arnold 1995). Birkaç tesis kurulmuşsa da uzun ömürlü olmamıştır (Kawatra ve Eisele 2001). İnce boyutlu kömürlerin temizlenmesinde kullanılan yağ aglomerasyonu yönteminin ticari başarısızlığın sebebi ise kullanılan bağlayıcı yağların maliyetidir (Shrauti ve Arnold 1995). Bitkisel atık yağların bu yöntemde

kullanılması yağ aglomerasyonunun ekonomik olarak uygulanmasının yolunu açabilir. Agloflotasyon yöntemi ile ilgili çalışmalar ise bu zamana kadar genellikle laboratuvar ölçeğinde yapılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda önce pilot çapta daha sonra da endüstriyel çapta denemelerin yapılması, elde edilen sonuçların başarılı olması, maliyet hesaplarının istenilen tutarda olması, agloflotasyon cihazlarının tasarlanması bu yöntemin endüstriyel ölçekte uygulanmasının önünü açabilir.

Bu çalışmada, yüksek kül (%35,65) ve kükürt (%7,91) içerikli çok ince boyutlu ($d_{80}= 43,47 \mu\text{m}$) Müzret kömürünün flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon yöntemleri ile temizlenebilirliği araştırılmıştır. Araştırmada bitkisel atık ayçiçek yağı, toplayıcı olarak flotasyon deneylerinde, bağlayıcı olarak da aglomerasyon deneylerinde kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

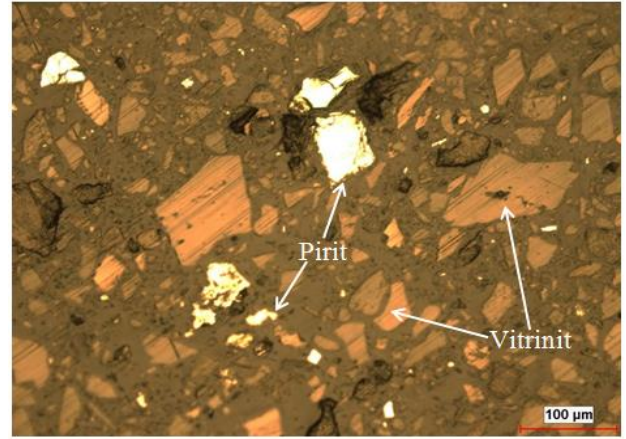
2.1. Materyal

Deneylerde Müzret (Artvin-Yusufeli) bölgesi kömür numunesi kullanılmıştır. Numuneler laboratuvar tipi çeneli ve merdaneli kırıcı yardımıyla $-1,00 \text{ mm}$ boyutuna indirilmiştir. Daha sonra çubuklu ve bilyalı değirmenler kullanılarak çok ince boyuta öğütülmüştür. Deneylerde kullanılan kömürün tane boyutu $d_{10}=3,29 \mu\text{m}$, $d_{20}=6,11 \mu\text{m}$, $d_{50}=19,57 \mu\text{m}$, $d_{80}=43,47 \mu\text{m}$, $d_{90}=58,65 \mu\text{m}$ 'dir. Kömür numunesinin özellikleri kimyasal ve minerolojik analizlerle belirlenmiştir. Çizelge 1'de Müzret kömürünün analiz sonuçları görülmektedir. Minerolojik analizler için, X-ışını difraktometresi (XRD) ve mikroskop altında parlak kesit incelemeleri yapılmıştır. Kömür örneğinin XRD analizinde, sülfür minerallerinden pirit, kil minerallerinden kaolinit, montmorillonit ve illit, karbonat minerallerinden kalsit, sülfat minerallerinden jips, silikat minerallerinden kuvars tespit edilmiştir. Beslemeden yapılan parlak kesit incelendiğinde (Şekil 1), vitrinitin kömür içinde baskın maseral olduğu, iri boyutlu piritlerin olduğu gibi çok küçük boyutlu piritlerin de yapıda yer aldığı görülmüştür.

Çizelge 1. Müzret kömürünün analiz sonuçları.

Bileşenler	Havada Kuru	Kuru
------------	-------------	------

Nem (%)	2,25	–
Kül (%)	34,85	35,65
Uçucu Madde (%)	10,73	10,98
Sabit Karbon (%)	52,17	53,37
Sülfat Kükürt (%)	0,99	1,01
Piritik Kükürt (%)	5,44	5,57
Organik Kükürt (%)	1,3	1,33
Toplam Kükürt (%)	7,73	7,91
Kalorifik Değer (kcal/kg) (Üst Isı Değeri)	4970	5084



Şekil 1. Beslemeden parlak kesit görüntüsü.

Bu çalışmada, bitkisel atık ayçiçek yağı flotasyon deneylerinde toplayıcı, aglomerasyon deneylerinde bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan atık ayçiçek yağı Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü kantininden temin edilmiştir. Atık yağ, içindeki fiziksel safsızlıkların giderilmesi amacıyla vakum filtre ile süzümüştür. Atık yağın, yoğunluğu Alla France tipi hidrometre ile $0,91 \text{ gr/cm}^3$, viskozitesi ise Tanaka AKV-202 tipi viskometre ile $35,81 \text{ mm}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur. Flotasyon ve agloflotasyon deneylerinde köpürtücü olarak çamyacı kullanılmıştır. Yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon deneylerinden elde edilen konsantrelerden atık yağı uzaklaştırmak için aseton kullanılmıştır.

2.2. Metot

Flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon deneylerinde aynı tane boyutunda olan kömür örnekleri kullanılmıştır.

Flotasyon deneyleri 1 L'lik flotasyon hücresinde, 1000 devir/dakika karıştırma hızında, %10 katı oranında, 100 g örnek kullanılarak Denver tipi flotasyon makinasında saf su kullanılarak yapılmıştır. Flotasyon deneylerinde ilk olarak kömür+su karışımı 3 dakika şartlandırılmış (1000 devir/dakika'da), daha sonra karışıma atık ayçiçek yağı ilave edilip (250; 500; 750; 1000 g/t) 5 dakika karıştırılmıştır (1000 devir/dakika'da) ve ortama çamyacı ilavesi yapıp (100 g/t) 2 dakika daha karıştırılmıştır (1000 devir/dakika'da). Flotasyon makinasının havası tam açılarak 3 dakika köpük alınmıştır. Tüm deneyler doğal pH'da gerçekleştirilmiştir. Flotasyon konsantresi ilk olarak vakum filtre ile susuzlandırılıp, daha sonra etüvde 105°C'de kurutulup tartılmış ve kül analizine tabi tutulmuştur.

Yağ aglomerasyonu deneyleri için, iç çapı 11,7 cm olan silindirik cam bir kap kullanılmış olup, cam kap içerisine genişlikleri 1,1 cm olan 4 adet plastik levha (baffle) koyulmuştur. Levha koymanın amacı, kömür ve yağ damlacıklarının kap çeperinde dönmeksizin birbiriyle etkin bir şekilde temasını sağlamaktır. Deneyler, RZR 2021 tipi hızı ayarlanabilen bir mekanik karıştırıcı vasıtasıyla, saf su kullanılarak yapılmıştır. Karıştırıcının pervane çapı 50 mm olup pervaneler yatayla 45° açı yapmaktadır. Karıştırma işlemi kap tabanından 8 mm yükseklikte yapılmıştır. Aglomerasyon deneyleri %10 katı oranında, 50 g örnek kullanılarak doğal pH'da gerçekleştirilmiştir. İlk olarak kömür-su karışımı, 1000 devir/dakika karıştırma hızında 5 dakika şartlandırılmıştır. Şartlandırılmış kömür-su karışımına %10 atık ayçiçek yağı (5 g) ilave edilip 10 dakika karıştırma işlemi yapılmış (1000 devir/dakika'da) ve kömürlerin aglomera olmaları sağlanmıştır. Daha sonra, elde edilen pülpler dört farklı (63 µm, 90 µm, 125 µm ve 250 µm) boyutlu eleğe beslenerek aglomeratlar elek üstü olarak kazanılmıştır. Aglomeratlar, yüzeylerine yapışan mineral maddelerin uzaklaşması için eleklerle birlikte içinde su olan bir kaba elek yüksekliğinin daha önce belirlenen seviyesine kadar daldırılmıştır (Eleğin belirlenen yüksekliğine kadar 1 kez yapılan daldırma işlemi 1,5 litre suya karşılık gelmektedir). Yıkama işlemi sonrası aglomeratlar elekten uzaklaştırılmıştır. Aglomeratlar, vakum filtreye konularak susuzlandırılmış, aseton ile yıkanarak da

yağı arındırılmıştır. Susuzlandırılmış ve yağından arındırılmış aglomerat (temiz kömür) örnekleri etüvde 105°C'de kurutulup tartılmış ve kül analizine tabi tutulmuştur.

Agloflotasyon deneylerinde aglomerasyon ve flotasyon deneylerinde kullanılan ekipmanlar kullanılmıştır. Bu yöntemde kömür ilk önce aglomerasyon deneyindeki koşullarda %10 katı oranında, 50 g örnek kullanılarak aglomerasyon işlemine tabi tutulup, herhangi bir ayırma yapmadan silindirik cam kap içindeki malzeme flotasyon hücresine beslenmiştir. Agloflotasyon deneylerinde aglomerasyon deneylerinden farklı olarak atık yağ miktarı %10 değil %1, %2, %3 ve %4 (Kömür ağırlığının yüzdesi olarak yağ miktarı) alınmıştır. Flotasyon deneyleri 100 g'lık malzeme kullanılarak yapıldığı için iki aglomerasyon deneyi ayrı ayrı yapıp flotasyon hücresine aktarılmıştır. Flotasyon hücresine aktarılan malzeme 1000 devir/dakika karıştırma hızında ortama çamyacı ilavesi yapıp (100 g/t) 2 dakika karıştırılmıştır. Flotasyon makinasının havası tam açılarak 3 dakika köpük alınmıştır. Agloflotasyon konsantreleri ilk olarak vakum filtre ile susuzlandırılmış, aseton ile yıkanarak da atık yağdan arındırılmıştır. Daha sonra etüvde 105°C'de kurutulup tartılmış ve kül analizine tabi tutulmuştur.

Aşağıdaki eşitlikler kullanılarak, yanabilir verim (YV, %), kül atımı (KA, %) ve verim indeksi (Vİ, %) hesaplanmıştır (Sönmez ve Cebeci 2006; Şimşek 2007).

Verim indeksi, hem yanabilir verimi hem de kül atımını birlikte değerlendiren bir kriterdir. Bu değer ne kadar yüksek ise zenginleştirme (temizleme) işlemi o kadar başarılıdır.

$$YV (\%) = [C(100 - c)/F(100 - f)] \times 100 \quad (1)$$

$$KA (\%) = 100 - [(C/F \times c/f) \times 100] \quad (2)$$

$$Vİ (\%) = YV (\%) + KA (\%) - 100 \quad (3)$$

Burada;

C: Konsantrenin ağırlığı (g)

c: Konsantrenin külü (%)

F: Beslemenin ağırlığı (g)

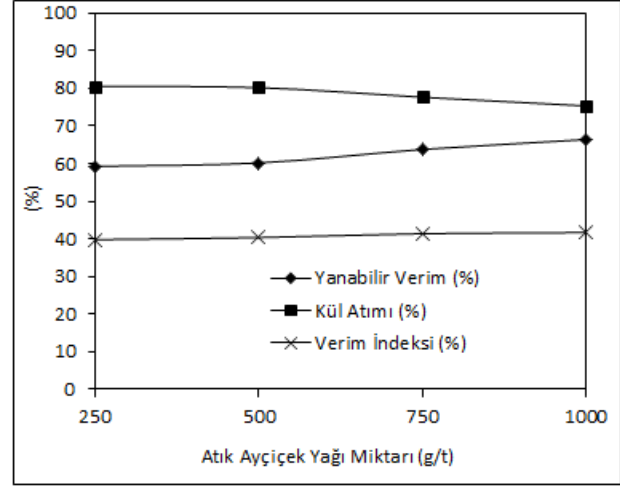
f: Beslemenin külü (%)

3. Bulgular

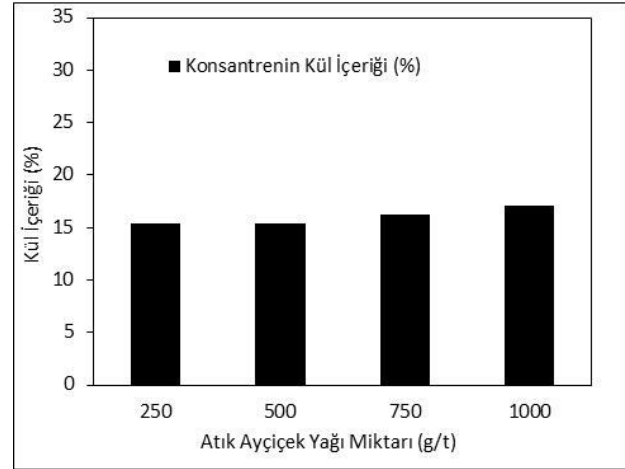
Çok ince boyutlu Müzret kömürünün flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon yöntemleriyle temizlenmesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Flotasyon deneylerinde, yanabilir verim %59,25–66,37 kül atımı %75,31–80,53 ve verim indeksi %39,78–41,68'dir (Şekil 2). En yüksek yanabilir verim 1000 g/t atık ayçiçek yağ miktarında %66,37 olarak bulunmuştur. Atık yağ miktarının artışına bağlı olarak yanabilir verimin arttığı görülmüştür. Atık ayçiçek yağ miktarı arttıkça yanabilir verimdeki artış ortamda daha fazla yağ damlası bulunması kömür taneleriyle yağ damlacıklarının çarpışma olasılığını arttırdığından kömür taneleri yüzeyine adsorplanan yağ miktarı artmaktadır. Yağ damlacıklarının kömür taneleri yüzeyine adsorblanması kömür tanelerinin hidrofobluğunun artmasına neden olmaktadır. Böylelikle kömür taneleri ile hava kabarcıkları arasındaki tutunmanın daha kuvvetli olması yanabilir verimi arttırmıştır. Atık ayçiçek yağ miktarı arttıkça kül atımının azaldığı görülmüştür. Bu durum atık yağ miktarı arttıkça yağ damlacıklarının mineral maddeler üzerine adsorbe olması sonucu yüzdürülen mineral madde miktarının artmasıyla açıklanabilir. Maksimum kül atımı 250 g/t atık yağ miktarında %80,53 olmuştur. Atık ayçiçek yağ miktarının artışıyla birlikte verim indeksinin az da olsa arttığı görülmektedir. Bu durum verim indeksinin hem yanabilir verimi hem de kül atımını birlikte değerlendiren bir kriter olmasından dolayı atık ayçiçek yağı miktarının artışıyla birlikte yanabilir verimdeki artış oranının, kül atımı değişimlerine göre daha fazla olmasıyla açıklanabilir. Verim indeksi değeri 1000 g/t atık ayçiçek yağ miktarında %41,68 olarak maksimum değere ulaşmıştır. Şekil 3'de görüldüğü gibi atık ayçiçek yağı miktarının artışına bağlı olarak konsantrelerin kül içerikleri artmaktadır. Atık ayçiçek yağ miktarı 250 g/t iken konsantrenin kül içeriği %15,40'a düşürülmüştür. Bu atık yağ miktarında yanabilir verim %59,25 olup verim indeksi %39,78'dir. Sönmez ve Cebeci (2006) çalışmalarında –500 µm'luk Ukrayna kömürünün flotasyon yöntemi ile temizlenebilirliğini farklı

toplayıcılar kullanarak araştırmışlar. Toplayıcı miktarlarının artışına bağlı olarak yanabilir verimin arttığını, kül atımının ise azaldığını rapor etmişlerdir. Verim indeksi değerlerinin toplayıcı miktarlarının artışına bağlı olarak arttığını ancak bazı toplayıcılarda belli yağ miktarlarından sonra verim indeksi değerlerinin azaldığını belirlemişlerdir.



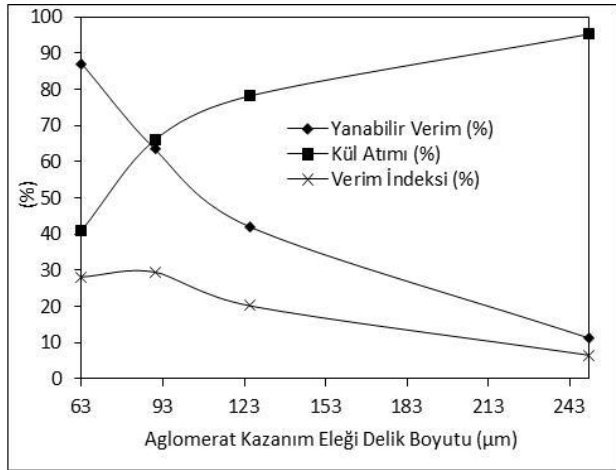
Şekil 2. Flotasyon deneylerinde yanabilir verim, kül atımı ve verim indeksi değerleri.



Şekil 3. Flotasyon deneylerinde konsantrelerin kül içerikleri.

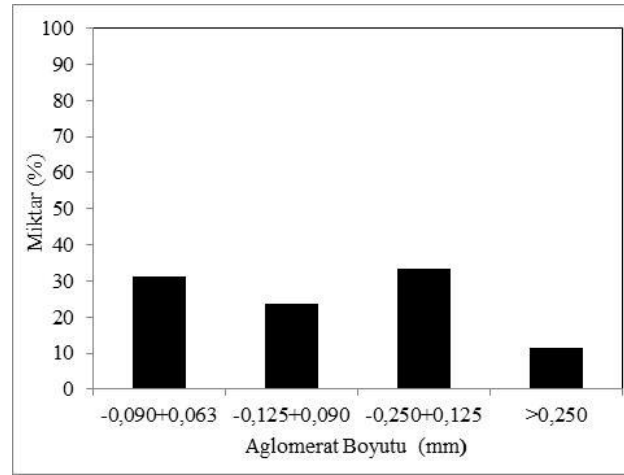
Yağ aglomerasyonu deneylerinde, yanabilir verim %11,26–87,15 kül atımı %40,99–95,24 ve verim indeksi %6,5–28,14'dir (Şekil 4). Aglomerat kazanım eleği delik boyutu arttıkça yanabilir verimin çok fazla miktarda azaldığı görülmüştür. Bu durum kömürün yağ aglomerasyonunda aglomerat kazanım eleği delik boyutunun ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Yanabilir verimdeki azalma, elde edilen aglomeratların boyutlarının çok fazla

büyümemesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 5’de görüldüğü gibi oluşan aglomeratların boyut dağılımı %31,31’i $-90+63 \mu\text{m}$, %23,54’i $-125+90 \mu\text{m}$, %33,56’i $-250+125 \mu\text{m}$, arasında iken %11,59’si $250 \mu\text{m}$ ’un üstündedir. Aglomerat kazanım eleği delik boyutu arttıkça kül atımı çok fazla miktarda artmaktadır. Bu durum, kazanım eleği delik boyutu arttıkça elde edilen aglomeratların boyutunun büyümesine bağlı olarak daha az toplam yüzey alanının oluşması ve dolayısıyla da daha az kül yapıcı minerallerin aglomeratların yüzeylerine yapışmasıyla açıklanabilir. Yavuz (2010) çalışmasında $-0,5 \text{ mm}$ ’lik kömürün yağ aglomerasyonu yöntemi ile temizlenebilirliğini araştırmıştır. Bağlayıcı olarak atık motor yağlarını kullandığı çalışmada, aglomerat kazanım eleği delik boyutlarının (0,5; 0,6; 0,85 ve 1 mm’lik elekler) artışına bağlı olarak yanabilir verimin çok fazla miktarda azaldığını rapor etmiştir.

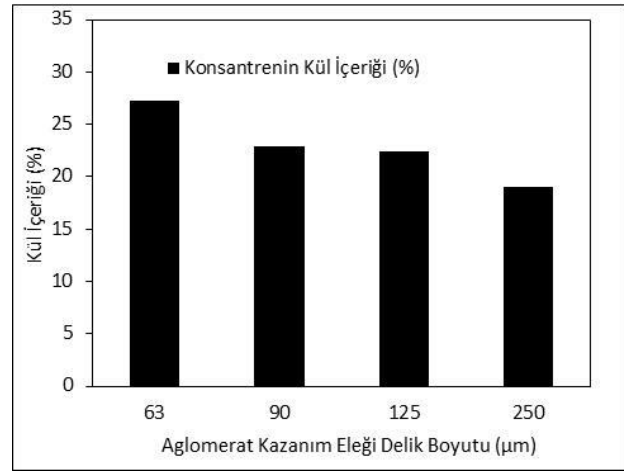


Şekil 4. Yağ aglomerasyonu deneylerinde yanabilir verim, kül atımı ve verim indeksi değerleri.

Verim indeksi değeri ne kadar yüksek ise temizleme işlemi o kadar başarılıdır. Bu açıklamadan verim indeksi değeri en yüksek olan değer %29,49 ile $90 \mu\text{m}$ ’luk aglomerat kazanım eleği delik boyutu kullanıldığında elde edildiği görülmüştür. Şekil 6’da görüldüğü gibi aglomerat kazanım eleği delik boyutu arttıkça konsantrelerin kül içerikleri azalmaktadır. En küçük kazanım eleği delik boyutunda ($63 \mu\text{m}$) konsantrenin kül içeriği %27,28 iken en büyük kazanım eleği delik boyutunda ($250 \mu\text{m}$) konsantrenin kül içeriği %18,97 olmuştur.

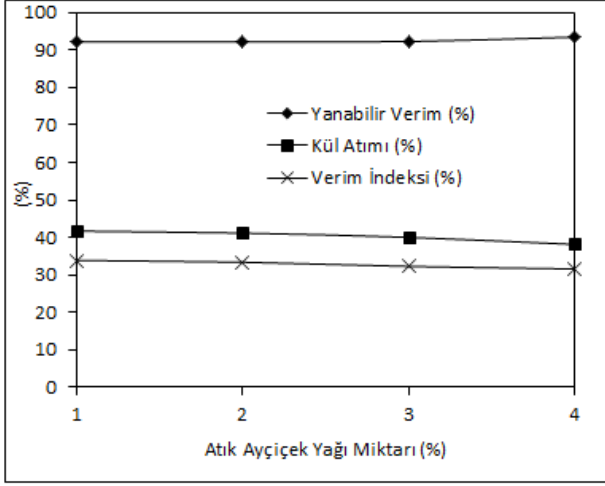


Şekil 5. Yağ aglomerasyonu deneylerinde oluşan aglomeratların boyut dağılımı.

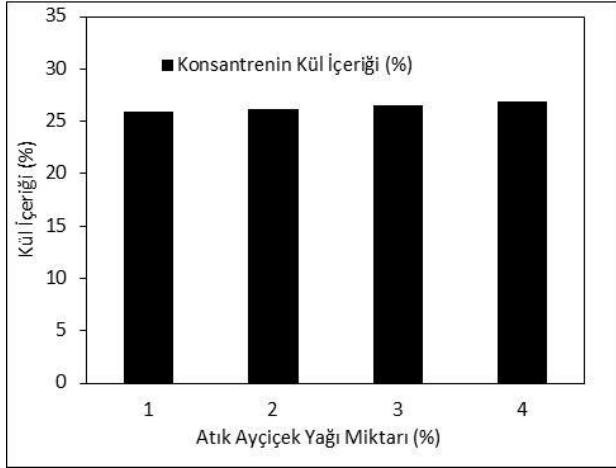


Şekil 6. Yağ aglomerasyonu deneylerinde konsantrelerin kül içerikleri.

Şekil 7’den görüldüğü gibi agloflotasyon deneylerinde, yanabilir verim %92,18–93,45 kül atımı %38,15–41,69 ve verim indeksi %31,60–33,87’dir. Atık yağ miktarı arttıkça yanabilir verimin azda olsa arttığı kül atımının ise azda olsa azaldığı görülmüştür. Agloflotasyonda elde edilen konsantrelerin kül atımlarının düşük olması aglomerasyon aşamasında aglomeratlar arasında kalan ve aglomeratların yüzeyine yapışan mineral maddelerin flotasyon aşamasında köpükle taşınmasına dayandırılmıştır. Elde edilen bulgular literatürle uyumludur (Canpolat 2003). En yüksek verim indeksi değeri %1 atık yağ miktarında %33,87 olarak bulunmuştur. Şekil 8’de görüldüğü gibi agloflotasyon deneylerinde konsantrelerin kül içerikleri %25,95–26,83 arasındadır. En düşük kül içeriği %1 atık yağ oranında elde edilmiştir.



Şekil 7. Agloflotasyon deneylerinde yanabilir verim, kül atımı ve verim indeksi değerleri.



Şekil 8. Agloflotasyon deneylerinde konsantrelerin kül içerikleri.

Şekil 9'da agloflotasyon beslemesinin, konsantresinin ve atığının parlak kesitte görünüşleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Parlak kesitler incelendiğinde piritlerin daha çok atığa gittiği belirlenmiştir. Atıktaki piritlerin boyutlarının iri, orta ve küçük boyutlu piritler olduğu görülmüştür. Atıkta ayrıca küçük ve orta boyutlu kömür maserallerinde bulunduğu gözlemlenmiştir. Konsantrenin parlak kesiti incelendiğinde ise çoğunlukla iri, orta ve küçük boyutlu kömür maserallerinden oluştuğu, bununla birlikte az da olsa orta ve küçük boyutlu piritlerinde yapıda yer aldığı belirlenmiştir.

Yağ aglomerasyonu deneylerinde %10 atık yağ miktarı ile elde edilen maksimum yanabilir verim

değeri %87,15 iken, agloflotasyon deneyinde %1 atık yağ miktarında elde edilen yanabilir verim değerinin %92,18 olduğu bulunmuştur. Bu durum yağ aglomerasyonunun en belirgin dezavantajı olan fazla miktarda tüketilen yağ miktarının agloflotasyon yöntemi ile büyük oranda azaltılabileceğini ortaya koymaktadır.

Flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar birlikte karşılaştırıldığında en yüksek yanabilir verim %93,45 ile agloflotasyon deneyinde iken en düşük kül içeriği %15,40 ile flotasyonda ve en fazla kül atımı %95,24 ile yağ aglomerasyonu deneyinde elde edilmiştir. Maksimum verim indeksi değeri %41,68 ile flotasyon deneyinde bulunmuştur.

Flotasyon ve yağ aglomerasyonu deney sonuçları agloflotasyon deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında ise en yüksek yanabilir verimlere ve genel olarak en yüksek küllü konsantrelere agloflotasyon deneylerinde ulaşılmıştır. En düşük verim indeksi değerleri yağ aglomerasyonu deneylerinde, en düşük küllü ve en yüksek verim indeksi değerleri ise flotasyon deneylerinden elde edildiği görülmüştür.

4. Sonuçlar

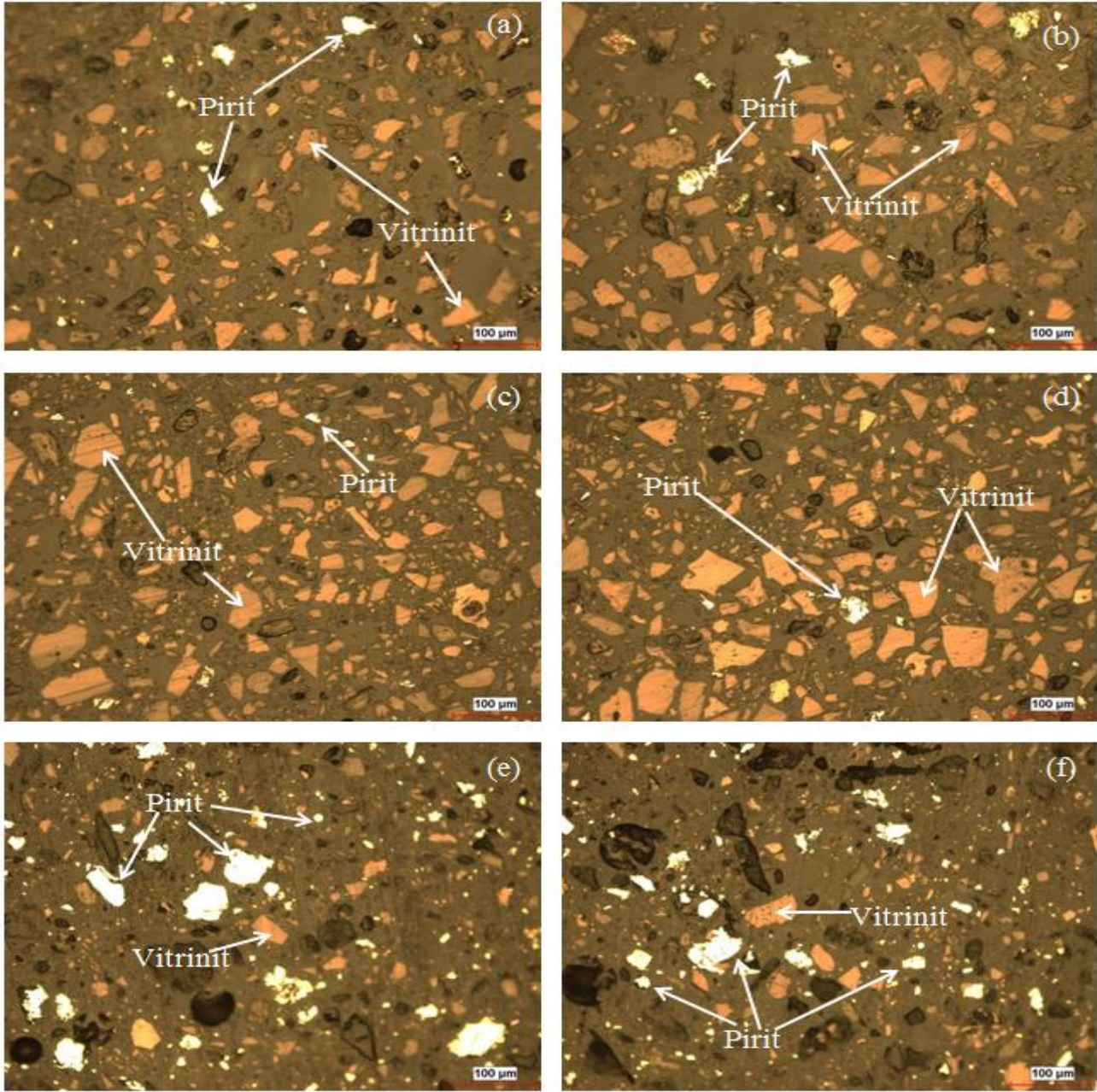
Çok ince boyutlu yüksek kül-kükürt içerikli kömürün fizikokimyasal yöntemlerle temizlenmesinde genel olarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında oldukça farklı sonuçların ortaya çıktığı görülmüştür.

Tüm deneyler arasında maksimum yanabilir verim %93,45 olarak agloflotasyon deneyinde, en yüksek kül atımı ve verim indeksi ise flotasyon deneylerinde sırasıyla %80,53 ve %41,68 olarak elde edilmiştir.

Yağ aglomerasyonu deneylerinde %10 atık yağ miktarı ile elde edilen en yüksek yanabilir verim değeri %87,15 iken, agloflotasyon deneyinde %1 atık yağ miktarında elde edilen yanabilir verim

değerinin %92,18 olduğu bulunmuştur. Bu sonuç yağ aglomerasyonunda dezavantaj olarak karşımıza çıkan fazla miktarda tüketilen yağ miktarının agloflotasyon ile azaltılabileceğini göstermektedir.



Şekil 9. Agloflotasyon deneyi beslemesinin (a,b), konsantresinin (c,d) ve atığının (e,f) parlak kesit görüntüleri.

Kaynaklar

Abakay Temel, H., 2010. The agglomeration of a mixture of subbituminous coal and gangue minerals using Şirnak asphaltite and the concentrate obtained from Zonguldak bituminous coal. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **32**, 1248–1259.

Abakay Temel, H. ve Bozkurt, V., 2008. Adıyaman-Gölbaşı linyitinin yıkama olanaklarının araştırılması. *Madencilik*, **47** (4), 13–21.

Aksay., E.K., Arslan, V. ve Polat., 2010. Toz kömürlerin zenginleştirilmesinde yağ aglomerasyonu yöntemi ve yenilikler. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, **23** (2), 97–108.

- Bayat, O., 2008. Tunçbilek kömür yıkama tesisi ara ürününün jameson hücrelerinde flotasyonu, *Madencilik*, **47** (1), 27–34.
- Canpolat, L., 2003. Taşkömürünün yağ aglomerasyonu, flotasyon ve yağ aglomerasyonu-flotasyon yöntemiyle zenginleştirilebilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 88.
- Cebeci, Y. ve Eroglu, N., 1998. Determination of bridging liquid type in oil agglomeration of lignites, *Fuel*, **77** (5), 419–424.
- Doymuş K., 1997. Bazı Türk linyitlerinin seçimli yağ aglomerasyonu ile temizlenebilirliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 121.
- Gence, N., 2006. Coal recovery from bituminous coal by agglototation with petroleum oils. *Fuel*, **85**, 1138–1142.
- Hoşten, Ç. ve Uçbaş, Y., 1989. Zonguldak toz kömürleri üzerinde yağ aglomerasyonu çalışmaları. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 11. Kongresi, Maden Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 355–365.
- Jaiswal, S., Tripathy, S.K ve Banerjee, P.K., 2015. An overview of reverse flotation process for coal. *International Journal of Mineral Processing*, **134**, 97–110.
- Kawatra, S.K. ve Eisele, T.C., 2001. Coal desulfurization high-efficiency preparation methods, Department of Mining and Materials Processing Engineering Michigan Technological University, 240–224.
- Mehrotra, V.P., Sastry, K.V.S. ve Morey, B.W., 1983. Review of oil agglomeration techniques for processing of fine coals. *International Journal of Mineral Processing*, **11**, 175–201.
- Peng, Y., Liang, L., Tan, J., Sha, J. ve Xie, G., 2015. Effect of flotation reagent adsorption by different ultra-fine coal particles on coal flotation. *International Journal of Mineral Processing*, **142**, 17–21.
- Shrauti, S.M. ve Arnold, D.W., 1995. Recovery of waste fine coal by oil agglomeration, *Fuel*, **74** (3), 459-465.
- Sönmez, İ. ve Cebeci, Y., 2006. Performance of classic oils and lubricating oils in froth flotation of Ukraine coal. *Fuel*, **85**, 1866–1870.
- Şimşek, S., 1999. Taşkömürünün yağ aglomerasyonu ile zenginleştirilmesinde bazı işletme parametrelerinin etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 64.
- Şimşek, S., 2007. Farklı kömürlerin flotasyon ile zenginleştirilmesinde klasik flotasyon yağları ile bitkisel kökenli yağların performanslarının karşılaştırılması, Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 382.
- Tan, J., Liang L., Peng, Y. ve Xie, G., 2015. Grinding flotation of bituminous of different oxidation degrees. *International Journal of Mineral Processing*, **142**, 30–34.
- Yavuz, M., 2010. Kömürün yağ aglomerasyonu yöntemi ile temizlenmesinde atık motor yağlarının kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 115.