

## Jameson hücresinde bitümlü şlam kömürün flotasyonu için en uygun köpürtücü ve toplayıcı tipinin araştırılması

---

**Hasan Hacıfazlıoğlu\***

*İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama ABD, 34320, Avcılar/İstanbul*

### Özet

*Flotasyon, sulu bir ortam içerisinde hava kabarcığı oluşturmak ve bu kabarcıklarla kıymetli cevheri yüzdürme yoluyla yapılan bir ayırma ve zenginleştirme işlemidir. Bu çalışmada, Zonguldak bitümlü şlam kömürünün Jameson hücresinde flotasyonu için en uygun toplayıcı ve köpürtücü cinsi araştırılmıştır. Flotasyon deneyleri 4 farklı tipte köpürtücü (MIBC, Dowfroth 250, Çamyacı, 2-etil hegzanol) ve 4 farklı tipte toplayıcı (gazyağı, fuel oil, motorin, benzin) kullanılarak yapılmıştır. En yüksek flotasyon verimi köpürtücü olarak MIBC, toplayıcı olarak gazyağının kullanılması durumunda elde edilmiştir. Diğer taraftan, en düşük küllü temiz kömürler 2-etil hegzanol köpürtücüsü ve benzin toplayıcısı ile elde edilmiştir. Sonuçta, Jameson hücresinde en uygun köpürtücü ve toplayıcı cinsi kullanılarak %48.80 kül içeren bitümlü kömür şamlarından, %78 yanabilir verim değeriyle, %15.48 küllü koklaşabilir özelliikte temiz kömürler üretilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** *Flotasyon, Kömür, Toplayıcı, Köpürtücü, MIBC, Gazyağı*

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hasan Hacıfazlıoğlu; hasanh@istanbul.edu.tr; Tel: (534) 947 30 58.

## **The investigation of the most suitable frother and collector type in the Jameson cell for flotation of bituminous coal slime**

### **Extended abstract**

*Froth flotation, as a process in which fine coal particles are separated selectively from associated minerals in water slurries, by attachment to rising air bubbles, has a long history in the coal enrichment industry. It is the most widely used method for fine (<1mm) and ultrafine (<0.1mm) coal cleaning and approximately 142 million tones of fine coals are cleaned by flotation worldwide annually. This process can be influenced by a large number of material, reagent, equipment and operational variables. Changing one of these variables certainly affect the results of flotation, such as ash content and combustible recovery significantly. The effectiveness of a flotation process mostly depends on the type and amounts of used reagents. The reagents used in flotation of coal are generally collectors and frothers.*

*The reagent collectors are used to promote the rigid adhesion of air bubbles to the coal surface. The purpose of the collector is to make the coal surface more hydrophobic. In coal flotation generally non-polar hydrocarbon oils, such as kerosene, fuel oil, diesel oil and gasoline are used as collector at the amount of 0.5-5 kg/t. They have been successfully*

*employed in coal industry to separate combustibles from the gangue minerals such as clay.*

*The frother addition is another important operating parameter which affects flotation performance. This reagent enables the production of smaller air bubbles and stabilization of the froth zone. The most commonly used frothers in coal flotation are MIBC, Dowfroth-250, Pine oil and 2-Ethyl hexanol at the amounts of 50-250 gr/t.*

*In this study, the most suitable frother and collector type for bituminous coal slime flotation was investigated. Flotation experiments were carried out using four different type frothers and four different type collectors (kerosene, fuel oil, diesel oil, gasoline) in the Jameson cell. In order to determine the most suitable frother type, a series of tests was conducted with MIBC, Dowfroth-250, pine oil and 2-ethyl hexanol. In these tests, the collector (kerosene) dosage was kept constant (1800 g/t), while frother amount ranged from 100-500 g/t. The highest flotation efficiency was obtained by using MIBC as frother and kerosene as collector. On the other hand, the lowest clean coal ash was achieved with 2-ethyl hexanol and gasoline. In conclusion, a coking clean coal with an ash content of 15.48% was obtained from the bituminous coal slime having 48.80% ash with a combustible recovery of 78 by using the most suitable collector and frother in the Jameson cell.*

**Keywords:** Flotation, Coal, Collector, Frother, MIBC, Kerosene

## **Giriş**

Flotasyon, sulu bir ortam içerisinde bir minerali yüzdürme yoluyla diğer minerallerden ayırma yöntemidir. Örneğin kömür flotasyonunda kömür çeşitli yağlarla yüzdürülürken silikat ve kil gibi gang mineralleri bastırılır ve bu yolla kömürün kül yapıcı mineralleri uzaklaştırılır. Flotasyon yöntemi ile ortalama kül içeriği %45-50 olan bitümlü kömürlerden %15'in altında kül içeren temiz kömürlerin elde edilebileceği belirtilmektedir (Hacifazlıoğlu, 2006).

Flotasyon, tane iriliği 1 veya 0.5 mm'nin altında olan ince boyutlu kömür ve cevherlerin zenginleştirilmesi için geliştirilmiş olan bir ayırma yöntemidir. Bu bağlamda, her yıl milyonlarca ton ince boyutlu malzemenin flotasyon işlemine tabi tutulduğu bilinmektedir. Dünya üzerinde yalnızca yılda yaklaşık 142 milyon ton toz kömür flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmektedir. Bakır, çinko, kurşun, nikel, gümüş, manganez, kromit, kobalt, tungsten, silvin, fluorit, silis kumu, bor ve kükürt gibi 100'den fazla mineralin zenginleştirilmesi için flotasyon yöntemi kullanılmaktadır. Ayrıca, su arıtımı, geri dönüşümlü kağıttan mürekkeplerin toplanması, endüstriyel atıklardan ağır metallerin giderilmesi, toprakların yıkanması gibi işlemlerde de yaygın olarak flotasyon işleminden faydalanılmaktadır. Flotasyon işleminin içinde gerçekleştirildiği en yaygın makineler ise mekanik hücreler, kolon hücresi ve Jameson hücresi olmak üzere başlıca üç tiptir (Atak, 1982; Yoon, 1993; Heiser, 1996; Honaker ve Das, 2004).

Flotasyon, yağ, film ve köpük flotasyonu olmak üzere başlıca 3 şekilde uygulanmaktadır. Yağ ve film flotasyonun günümüzde endüstriyel ölçekte uygulamaları bulunmamaktadır. Endüstriyel ölçekte uygulanan ve en yaygın kullanılan flotasyon yöntemi köpük flotasyonudur. Köpük flotasyonu fizikokimyasal bir yöntem olup, teknik bakımdan 3 kısma ayrılır:

1. Minerallerin reaktiflerle (kimyasallarla) muamele edilmesi

2. Sulu bir ortamda hava kabarcığının oluşturulması
3. Kabarcık-tanecik temasının sağlanması

Reaktiflerle muamele işlemi (kıvamlandırma); istenilen minerali yüzebilir hale sokmak ve diğer minerallerin yüzmesini engelleyecek durumu sağlamaktır. Bir mineralin yüzebilmesi bu mineralin su ile "ıslanmaması" (su sevmez ya da hidrofob olması) özelliğine bağlıdır. Islanmama özelliği bir katının yüzey moleküllerinin özelliklerine göre değişir; yani bu moleküllerin polar olup olmamasına bağlıdır. Polar moleküller iyonlardan oluşur ve su içerisinde iyonlaştıkları için ıslanabilir özelliktedirler. Bu yüzden bu tip cevherler flotasyon işlemi için elverişli değildir. Yüzeyleri polar olmayan doğal hidrofob kömür, grafit, talk, elmas ve kükürt gibi mineraller ise flotasyon işlemi için daha elverişlidir. Ancak, günümüzde kullanılan çeşitli reaktifler ile istenilen cevheri "ıslanabilir" ya da "ıslanamaz" hale getirmek mümkündür. Örneğin; hidrofob kömürün yüzebilirliği nişasta ve dekstrin (kısa zincirli nişasta) gibi organik bastırıcı reaktifler ile önlenir. Benzer şekilde, doğal yüzebilir piriti kireç (CaO) ile, killeri ise sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ile bastırmak mümkündür. Çoğu flotasyon uygulamasında kömür yüzdürülmesine karşın, yoğun pirit içermesi durumunda kömür bastırılır ve pirit yüzdürülür. Bu şekilde kömürden hidrofob piriti uzaklaştırmak mümkündür (Atak, 1982; Demirel, 1988; Aplan, 1993; Kawatra ve Eisele, 1997; Çilek, 2006).

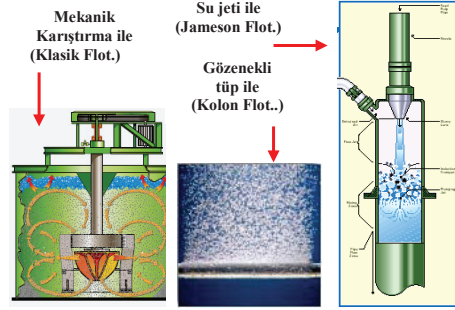
Kömürün yüzebilirliğini arttırmak ve daha güçlü kabarcık-tanecik bağları oluşturmak için genellikle gazyağı, fuel oil, motorin (mazot) gibi hidrokarbon kökenli polar olmayan yağlar kullanılmaktadır. Bu yağlar kömür yüzeyini bir film şeklinde kaplamakta ve hava kabarcığı ile tanecik arasındaki adhezyon kuvveti artırarak daha güçlü temasların oluşmasını sağlamaktadır. Bu yolla hem flotasyon hızı hem de yanabilir kısım kazanımı artmaktadır. Taşkömürü flotasyonunda yağların kullanım oranı genellikle 0.5-2 kg/t mertebelerinde iken, kömürleşme derecesi düşük olan linyit

flotasyonunda bu oran 6-8 kg/t seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Diğer taraftan, Pamak 1 gibi polar olan (iyonlaşan) toplayıcılarla da kömür flotasyonu yapmak mümkündür. Ancak bu toplayıcılar polar olmayan yağlar kadar verimli olmayıp yalnızca kül giderme açısından daha avantajlı olmaktadır (Cebeci, 2002; Jia vd., 2002; Sis vd., 2003; Ceylan ve Küçük, 2004; Sis vd., 2004; Sönmez ve Cebeci, 2006).

Genellikle bir toplayıcı ilavesi ile bir tank içerisinde işlem görmüş kömürün yüzdürülebilmesi için su içerisinde hava kabarcığının oluşturulması ve kömür-kabarcık temasının sağlanması gerekir. Değişik flotasyon makinelerinde kabarcıklar değişik şekillerde oluşturulabilmektedir. Örneğin konvansiyonel flotasyon hücrelerinde (Denver ve Wedag gibi) kabarcıklar mekanik karıştırma işlemiyle, Jameson hücresinde suyun jet hareketiyle oluşturulur. Kolon flotasyonunda ise gözenekli tüp ile sparger denen özel hava üreteçlerine kompresörden hava verilerek kabarcık oluşturulmaktadır (Şekil 1). Flotasyon işlemi için flotasyon makinesinin oluşturduğu kabarcıklar genellikle yetersizdir ve oldukça büyük çaplıdır (birkaç milimetre). Bu yüzden, kabarcık boyutunu küçültmek ve kabarcık sayısını arttırmak için köpürtücü denen reaktifler kullanılır. Bu reaktifler hem daha sağlam köpük oluşumunu sağlamakta hem de mikro kabarcık üreterek toplam kabarcık yüzey alanını arttırmakta ve bu yolla çok ince boyutlu tanelerin (<0.075 mm) flotasyonuna olanak sağlamaktadır.

Flotasyonda köpüğün belli bir dayanıklılığın olması gerektiği gibi makineden alındıktan kısa bir süre sonra da sönmesi gerekir. Uzun süre dayanan ve sönmeyen köpük, flotasyondan sonraki tükürlerde çöktürme veya filtreleme gibi işlemlerde problemler yaratır. Birbirine sık olarak bağlanmış küçük kabarcıklı köpük ile yüksek flotasyon verimi elde edilir. Böyle bir köpük yapısı köpüğü saran minerali daha rahat taşır ve çökerek pülpe karışmasını önler. Diğer yandan, gevşek yapılı ve büyük kabarcıklı köpük taşınan gang parçalarının kolayca çökmesine sebep olarak büyük oranda verimin

düşmesine neden olur. Ancak, iri boyutlu kabarcıklar ile daha temiz ürünler elde edilir. Kömür flotasyonunda en yaygın kullanılan köpürtücüler; alkoller (MIBC, octanol, hegzanol), çamyadı, poliglikoller (DF 200, DF-250, DF-40) ve kresilik asittir (Atak, 1982; Tan vd., 2005; Gupta, 2007).



Şekil 1. Değişik flotasyon hücrelerinde değişik şekillerde kabarcık oluşturma mekanizmaları

Köpürtücü miktarının artmasına bağlı olarak kabarcık çapı küçülmesine rağmen, kullanılan makinenin cinsi de kabarcık çapını ve sayısını önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin mekanik hücrelerde oluşturulan ortalama kabarcık çapı 1 mm civarında iken, benzer köpürtücü ilavesi ile bu değer Jameson hücresinde 0.3 mm civarındadır. Dolayısıyla Jameson hücresinde daha yüksek “kabarcık yüzey alanı” elde etmek mümkündür. Bu yüzden, Jameson hücresi özellikle şlam boyutlu tanelerin kazanılması için kullanılmaktadır. Daha iri boyutlu tanelerin flotasyonu için daha iri kabarcıkların elde edildiği klasik mekanik hücreler kullanılır. Bu hücrelerde -1 mm boyutlu toz kömür önce bir tasnif siklonuna beslenmekte ve şlamından ayrıldıktan sonra siklon alt akımı olan malzeme flotasyon işlemine tabi tutulmaktadır. Bu yolla mekanik/hidrolik taşınma (entrainment) ve köpüğe kil sıkışması (entrapment) minimize edilmekte ve yıkama suyuna ihtiyaç duyulmadan oldukça temiz ürünler elde edilebilmektedir.

Çok ince boyutlu kabarcıkların elde edildiği yeni nesil flotasyon aygıtlarında yoğun mekanik

taşınma önemli bir problemdir. Bu problemin üstesinden gelmek için yeni nesil aygıtlarda sisteme yıkama suyu verilmektedir. Ayrıca köpük kalınlıkları yüksek tutularak tanelerin pülpe geri düşme olasılığı arttırılmakta ve bu yolla daha selektif konsantreler elde edilebilmektedir (Yoon, 1993; Zheng vd., 2006; Hacıfazlıoğlu, 2006).

Bu çalışma kapsamında, yeni nesil bir flotasyon makinesi olan Jameson hücreinde farklı toplayıcı ve köpürtücülerle bitümlü kömür şlamının flotasyonu gerçekleştirilmiştir.

### Malzeme ve Yöntem

DeneySEL çalışmalarda kullanılan şlam kömür, Zonguldak (Karadon) havzasında yer alan özel bir işletmenin kömür yıkama tesisinden temin edilmiştir. Söz konusu tesiste -1 mm boyutlu ince tüvenan kömür önce bir tasnif siklonuna beslenmekte ve siklonun üst akımından -53 mikronluk ( $d_{80}$ ) şlam alınırken, alt akımdan +53 mikronluk iri boyutlu kömür alınmaktadır. +53 mikronluk kömür mekanik flotasyon makineleri ile zenginleştirilmektedir. Ancak siklon üst akımı çok ince boyutlu şlam kömür mekanik flotasyon makinelerinde problem yaratmaktadır. Bu yüzden çok ince boyutlu şlam kömürler önce tüklerine gönderilmekte ve tüklerinde 8g/t anyonik flokülant ilavesi ile koyulaştırılmaktadır. Koyulaşan şlam kömür pres filtre ile susuzlandırılmaktadır. Deneylerde kullanılan malzeme, pres filtreden alınan susuzlandırılmış kek kömürdür. Bu şlam kömürün kimyasal analizi Tablo 1’de, elek analizi ise Tablo 2’de verilmiştir. Buna göre ortalama kül içeriği %48.80 olan bu kömürün kükürt içeriği %0.70 olup, örnek yüksek küllü ve düşük kükürtlü bir kömür olarak nitelendirilebilir. Yaklaşık tane boyutu ise 53 mikrondur ( $d_{80}$ ). Tanelerin %75.20’si 38 mikronun altındadır.

Flotasyon deneyleri, Şekil 2’de köpük görüntüsü verilen 100 litre hacimli Jameson hücreinde yapılmıştır. Sistemde besleme pülp basıncı 130 kPa, nozul çapı 2 mm olup sabit besleme hızı 140 l/dak.’dır. Toplayıcı olarak gazyacı, motorin, fuel oil ve benzin kullanılarak

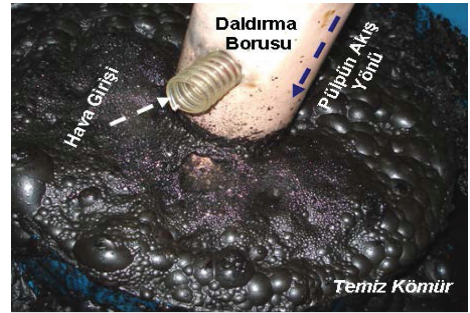
sabit koşullar altında ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. En uygun toplayıcı tipinin saptanması için yapılan deneylerde köpürtücü olarak 300 g/t oranında MIBC kullanılmıştır. Daha sonra değişik tipteki köpürtücüler (MIBC, Dowfroth 250, Çamyacı, 2-etil hegzanol) ile sabit bir toplayıcı miktarında (1800 g/t) deneyler yürütülmüştür. Sistemde yıkama suyu oranı 0.26 cm/s ve köpük kalınlığı 15 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Pülp yoğunluğu %6, kıvamlandırma süresi 4 dakikadır. Tüm deneyler 1 kaba, 2 süpürme kademesi şeklinde uygulanmıştır.

Tablo 1. Şlam kömürün kimyasal analiz sonuçları (kuru bazda, ağırlıkça %)

Analiz	Değeri
Kül (%)	48.80
Uçucu madde (%)	21.43
Sabit karbon (%)	29.77
Toplam kükürt (%)	0.70
Üst ısı değeri (kcal/kg)	4330

Tablo 2. Şlam kömürün elek analizi

Boyut (mikron)	Miktar (%)
+212	2.50
-212+150	2.30
-150+75	9.70
-75+53	5.10
-53+38	5.20
-38	75.20



Şekil 2. Jameson hücresi köpük görüntüsü.

Sonuçların değerlendirilmesi için temiz kömür külü ve yanabilir verim değerlerinden faydalanılmıştır. Yanabilir verim aşağıdaki formülle hesaplanmış olup, burada; ÜK temiz kömür külü; ÜM temiz kömür miktarı; BK besleme külünü ifade etmektedir.

$$\text{Yanabilir Verim (\%)} = \frac{(100 - \text{ÜK}) \times \text{ÜM}}{(100 - \text{BK})}$$

## DeneySEL Bulgular

### En uygun toplayıcı tipinin araştırılması

Bitümlü kömür şlamının Jameson hücresinde flotasyonu için en uygun olan toplayıcı tipinin saptanması için 4 farklı hidrokarbon kökenli yağ denenmiştir. Bu yağlar; gazyağı, motorin, fuel oil (No.4) ve benzin olup, Tüpraş rafinerisinde üretilen ticari yakıtlardır. Yağların yoğunluk ve vizkozite değerleri Tablo 3'de özetlenmiştir. Maliyet yönünden en ekonomik olanı sırasıyla; fuel oil, motorin, gazyağı ve benzindir.

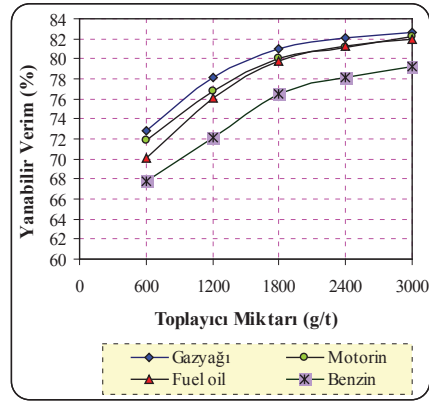
Toplayıcı olarak gazyağı, motorin ve fuel oil ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen benzin ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bunun nedenlerinden biri maliyetinin oldukça yüksek ve uçucu-patlayıcı özellikte olmasıdır. Bir toplayıcı olarak benzin, kömür flotasyonu için ilk kez bu çalışmada denenmiştir. Yapılan çalışmaların çoğunda kömür için en iyi toplayıcının gazyağı olduğu belirtilmektedir (Özbayoğlu, 1977; Cebeci, 1996; Cebeci, 2002; Sis vd., 2003; Sönmez ve Cebeci, 2006).

Tablo 3. Yağ tipi toplayıcıların yoğunluk ve vizkozite değerleri

Toplayıcı Cinsi	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Vizkozite (cSt)	Kükürt (%)
Fuel oil (No. 4)	0.96	35.05	0.50
Motorin	0.84	2.64	0.72
Gazyağı	0.78	1.50	0.90
Benzin	0.72	1.12	0.15

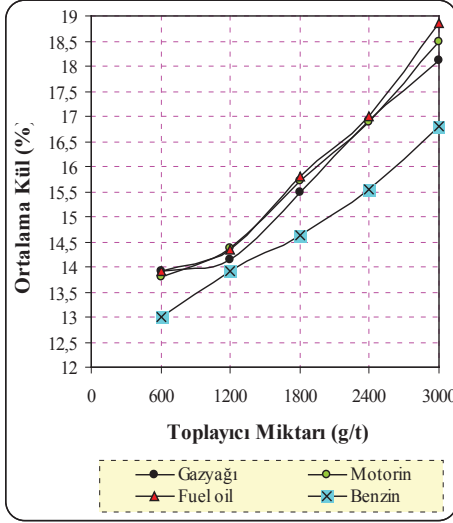
Deneyler 130 kPa pülp basıncında, 0.26 cm/s yıkama suyu hızında ve 15 cm'lik bir köpük kalınlığında bir kaba, 2süpürme kademesi şeklinde yapılmıştır. Köpürtücü olarak 300 g/t oranında MIBC kullanılmıştır.

Değişik toplayıcı miktarlarında (600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 g/t) yapılan flotasyon çalışmaları sonucunda elde edilen yanabilir verim ve temiz kömür kül içerikleri Şekil 3 ve 4'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, en yüksek yanabilir verim değerleri sırasıyla gazyağı, motorin, fuel oil ve benzin ile elde edilmiştir. Toplayıcı miktarının optimum değeri olarak 1800 g/t kabul edildiğinde; gazyağı, motorin, fuel oil, ve benzin ile sırasıyla %81.00, %80.10, %79.80 ve %76.46 yanabilir verim değerleri elde edilmiştir. Gazyağının en iyi sonucu vermesi, Cebeci'nin (1996) sözünü ettiği; gazyağının yüzey kaplama hızının yüksek olması ve pülp içerisinde çok iyi dağılarak homojen bir emülsiyon oluşturmaya dayandırılabilir. Fuel oil (No.4) ve motorin toplayıcısı ile gazyağı toplayıcısına göre daha düşük verimlerin elde edilmesinin başlıca nedeni yoğunluğunun ve vizkozitesinin diğerlerine göre daha yüksek olmasıdır. 4 dakikalık kıvamlandırma süresi sonunda yüksek yoğunluğu ve vizkozitesi nedeniyle pülp içerisine homojen dağılamayan fuel oil, kömür yüzeyini yeterince adsorplanamamıştır.



Şekil 3. Toplayıcı cinsinin ve miktarının yanabilir verim üzerine etkisi





Şekil 4. Toplayıcı cinsinin ve miktarının temiz kömür külü üzerine etkisi

Benzin toplayıcısı ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda, hem yanabilir verim değerleri hem de temiz kömür kül içeriği diğer toplayıcı sonuçlarına göre oldukça düşük değerde bulunmuştur. Kömür flotasyonunda benzinin toplayıcılık özelliği gazyağı, fuel oil (No.4) ve motorine göre daha düşüktür.

#### En uygun köpürtücü tipinin araştırılması

Bitümlü kömür şlamının Jameson hücresinde flotasyonunda, en uygun köpürtücü tipinin belirlenmesi için, 4 farklı tipte köpürtücü kullanılarak deneyler yapılmıştır. Bunlar; kömür flotasyonunda en yaygın kullanılan MIBC, Dowfroth-250, çamyacı ve 2-etil hegzanol'dur.

Söz konusu köpürtücülerin kimyasal bileşimleri ve çözünürlük değerleri Tablo 4'de özetlenmiştir. Köpürtücüler arasında MIBC ve Dowfroth-250'nin diğer köpürtüclere göre daha pahalı olduğu bilinmektedir.

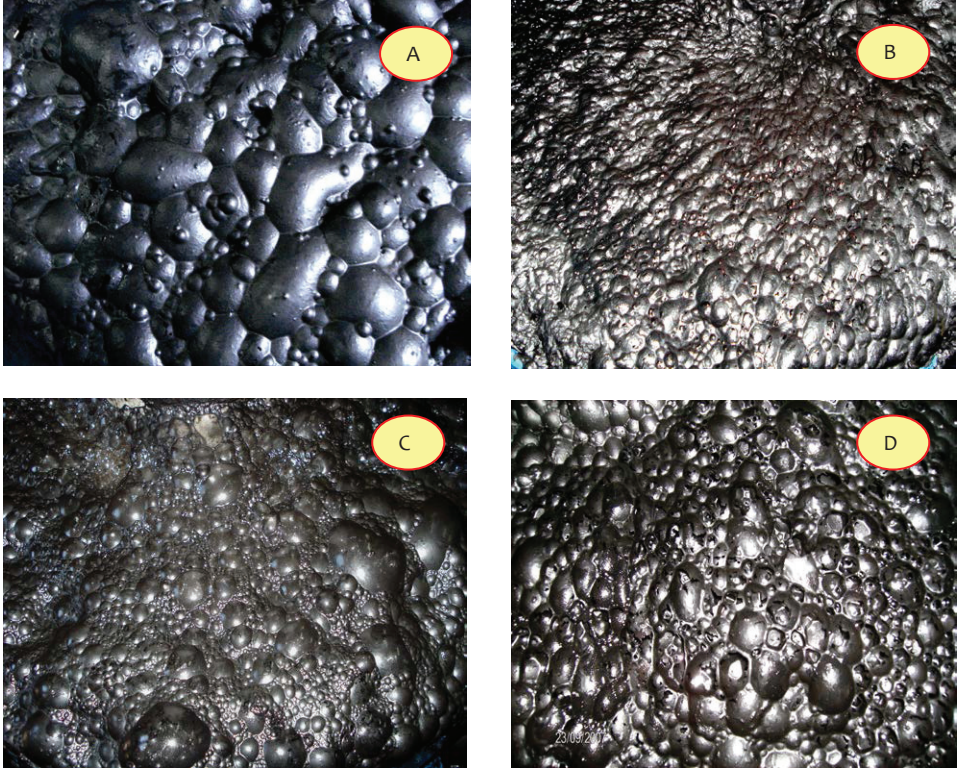
Tablo 4. Test edilen köpürtücülerin kimyasal bileşimi ve çözünürlükleri (Çilek, 2006)

Köpürtücü Cinsi	Kimyasal Bileşimi	Çöz. (g/L)
MIBC	$(CH_3)_2CHCH_2CHOHCH_3$	17
Dowfroth250	$CH_3-(O-C_3H_6)_n-OH$	Tam
Çamyacı	$CH_{10}H_{17}OH$	1.98
Hegzanol	$CH_3(CH_2)_4CH_2OH$	6

Jameson hücresinde değişik köpürtücülerle yapılan flotasyon çalışmalarına ait köpük görüntüleri Şekil 5'de verilmiştir. Bu deneylerde 1800 g/t oranında gazyağı toplayıcı olarak kullanılmış, diğer çalışma parametreleri değiştirilmemiştir.

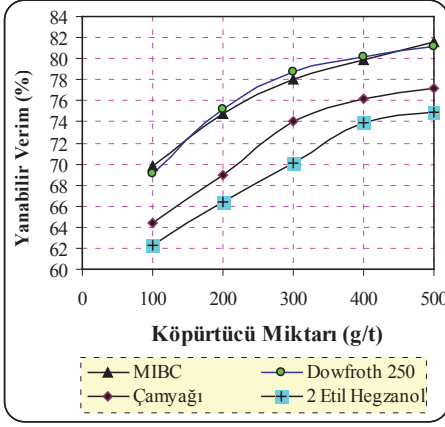
Literatürde, köpük görüntüsüne ve köpüğün yoğunluğuna göre o cevherin flotasyon performansı hakkında yorumlar yapılabileceği belirtilmektedir (Ekmekçi ve Şahin, 2006; Barbiana vd., 2007). Şekil 5'den de görülebileceği üzere, hücre yüzeyinde oluşan en iri boyutlu kabarcıklar 2-etil hegzanol ile en ince boyutlu kabarcıklar Dowfroth-250 ile elde edilmiştir. MIBC köpürtücüsünün kabarcıkları ise daha homojen ve orta boyutludur. Ayrıca en yoğun kabarcık oluşumu MIBC ile elde edilmiştir. Kabarcık boyutu küçüldükçe yanabilir verimin arttığı Şekil 6 ve Şekil 7'deki deneysel bulgulardan da açıkça görülmektedir.

Şekil 6 ve Şekil 7'de farklı köpürtücülerle yapılan deneyler sonucunda elde edilen yanabilir verim-temiz kömür kül ilişkileri gösterilmiştir. Buna göre, en yüksek yanabilir verim değerlerinin sırasıyla Dowfroth-250 ve MIBC ile elde edildiği görülmektedir. Ancak, MIBC, Dowfroth-250'ye göre daha temiz ürünler vermiştir. Başka bir deyişle, kömür şlamı için MIBC'nin seçimliliği Dowfroth-250 göre daha yüksektir. Diğer taraftan, Çamyacı, 2-etil hegzanol'a göre daha yüksek yanabilir verim sağlamıştır. Bunun başlıca nedeni çam yağının 2-etil hegzanol'a göre daha küçük çaplı ve daha sağlam (kolay sönmeyen) kabarcıklar oluşturabilmesidir.

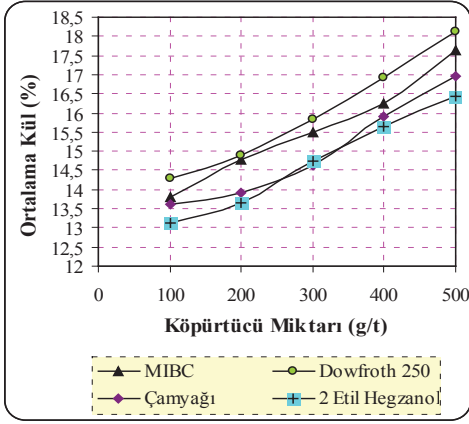


Şekil 5. Jameson hücresinde kullanılan değişik köpürtücülerle elde edilen köpük görüntüleri (A: 2-Etil Hegzanol; B: Çamyacı; C: Dowfroth-250; D: MIBC; gazyağı: 1800 g/t, köpük kalınlığı: 15 cm)





Şekil 6. Yanabilir verim-köpürtücü cinsi ilişkisi



Şekil 7. Kömür külü-köpürtücü cinsi ilişkisi

Dowfroth-250'nin sık ve birbiri ile birleşmeyen çok sayıda küresel mikro kabarcık oluşturabilmesi yüksek verim eldesinin başlıca nedenidir. Ayrıca en güçlü ve akıcı köpük tabakası Dowfroth-250 ile elde edilmiştir. Ancak yüksek köpük akıcılığı yoğun miktarda mineral maddenin (kül yapıcı bileşenlerin) köpük ürününe taşınmasına neden olmuş ve Dowfroth-250 ile en yüksek küllü ürünler elde edilmiştir. Örneğin 300 g/t Çamyacağı ilavesinde ürünün ortalama kül içeriği %14.63 iken, Dowfroth-250 ilavesinde ürün külü %15.85

bulunmuştur. MIBC, Dowfroth-250'ye göre daha düşük küllü ürünler vermiştir. Başka bir deyişle kömür flotasyonunda MIBC daha seçimli davranmıştır. Yanabilir verim değeri ise yaklaşık olarak Dowfroth-250 ile aynı sonucu vermiştir. Bunun başlıca nedeni MIBC'nin hem toplayıcı hem de köpürtücü özelliğinin bulunmasıdır (Gupta vd., 2006). Buna göre kömür flotasyonu için MIBC'nin kullanılması Dowfroth-250'ye göre daha uygun görülmektedir. Bu deneyler için optimum MIBC miktarı 300 g/t olup, bu ilave miktarında yanabilir verim değeri %78.00 ve temiz kömür kül içeriği %15.48'dir.

2-etil hegzanol'un, en düşük küllü ve en düşük yanabilir verimli ürünler vermesinin başlıca nedeni gevşek yapılı, kolay sönen ve büyük kabarcıklı köpükler üretmiş olmasıdır. Büyük kabarcıklı köpüğün toplam yüzey alanı, küçük kabarcıklı köpüğe göre daha az olduğu için daha az miktarda kömürün köpük ürününe taşınmasına sebep olmuş ve temiz kömür kazanımı ya da yanabilir verimi düşük bulunmuştur. Ayrıca, iri boyutlu kabarcıklarda köpükle taşınan gang mineralleri (entrainment) ve kabarcığa zayıf bağlı ara ürün taneleri daha kolay bir şekilde pülpe geri düşmekte ve dolayısıyla ürün külü de azalmaktadır.

Köpürtücü tiplerinin tümünün ilave miktarları artırıldıkça daha hareketli ve akışkan bir köpük tabakası elde edilmekte ve bunun sonucunda verim yükselirken elde edilen temiz kömürün kalitesi düşmektedir. Başka bir deyişle, köpürtücü miktarı arttıkça kül giderme başarısı azalmaktadır.

## Sonuçlar

Ülkemizdeki kömür yıkama tesislerinde çoğu zaman artık olarak çıkan bitümlü kömür şamları çok ince boyutları nedeni ile flotasyon dışındaki konvansiyonel yöntemlerle zenginleştirilememektedir. Bu çalışmada, kömür şamlarının zenginleştirilmesi için Jameson flotasyon hücresi kullanılmış ve farklı köpürtücü ve toplayıcıların flotasyon verimi

üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağında özetlenmiştir:

Flotasyonda uygun toplayıcı ve köpürtücünün kullanılmaması durumunda yanabilir verim %20 ile %30 aralığında azalmaktadır. Benzer şekilde, köpürtücü ve toplayıcı cinsi elde edilen temiz kömürün kül içeriğini de etkilemektedir.

Jameson hücreesinde en yüksek yanabilir verim toplayıcı olarak gazyağı köpürtücü olarak MIBC veya Dowfroth-250'nin kullanılması durumunda elde edilmiştir. Dowfroth-250, yanabilir verim bakımından MIBC ile yaklaşık olarak aynı sonucu vermişken, ürün kalitesi ya da seçimlilik yönünden daha düşük performans göstermiştir. 2-etil hegzanol köpürtücüsü en düşük yanabilir verimi sağlamıştır. Ancak, en düşük küllü ürünler bu köpürtücü ile elde edilmiştir.

Toplayıcı olarak, gazyağı, fuel oil (No.4), motorin ve benzin'in karşılaştırması durumunda; gazyağı en yüksek yanabilir verimi sağlamıştır. Benzin en düşük küllü temiz kömürü üretmiştir. Ancak, benzin toplayıcısının yanabilir verimi diğer toplayıcılara göre çok düşük bulunmuştur.

Optimum deney koşulunda; 1800 g/t gazyağı ve 300 g/t MIBC kullanılmıştır. Bu miktarların fazla olmasının nedeni flotasyona tabi tutulan numunenin çok ince boyutlu ve yüksek oranda kil ihtiva etmesidir. Numunenin yüzey alanının büyük olması fazla miktarda reaktifin yüzeye adsorplanmasına neden olmuştur.

## Kaynaklar

Aplan, F.F. (1993) Coal properties dictate coal flotation strategies, *Mining Engineering*, 83-96, January.

Atak, S., (1982). *Flotasyon ilkeleri ve uygulaması*, İTÜ Maden Fakültesi Yayınları, İstanbul.

Barbiana, N., Cilliers, J.J., Morarb, S., and Dee J. Bradshaw, D.J. (2007). Froth imaging, air recovery and bubble loading to describe flotation bank performance, *International Journal of Mineral Processing*, **84**, 81-88.

Cebeci, Y., (1996). Endüstriyel ölçekte kullanılan yağlarla linyit kömürlerin flotasyonu ile ilgili bir

çalışma, *C.Ü. Mühendislik Fakültesi Madencilik Bilim ve Teknolojisi Dergisi*, C.1, S.2. 55-62.

Cebeci, Y., (2002). The investigation of the floatability improvement of Yozgat Ayrıdam lignite using various collectors, *Fuel*, **81**, 281-289.

Ceylan, K. ve Küçük, M.Z., (2004). Effectiveness of the dense medium and the froth flotation methods in cleaning some Turkish lignites, *Energy Conversion&Management* **45**, 1407-1418.

Çilek, C.E., (2006). *Mineral Flotasyonu*, Süleyman Demirel Üniversitesi Yayın No:59, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Isparta, s.158

Demirel, H. (1988) Linyitlerde Piritik Kükürdün İki Aşamalı Flotasyonla temizlenmesi, *Türkiye 6. Kömür Kongresi*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Zonguldak Şubesi, s.191-204.

Ekmekçi, Z. ve Şahin, A.N. (2006) Köpük görüntüsü ve flotasyon performansı arasındaki ilişkinin görüntü analiz sistemi ile incelenmesi, *Madencilik Dergisi*, **45**, 2, 27-38.

Gupta, A.K., Benerjee, P.K., Mishra, A. ve Satish, P. (2007). Effect of alcohol and poliglycol eter frothers on foam stability bubble size and coal flotation, *Int. Jour. of Mineral Processing*, **82**, 126-137.

Hacıfazhoğlu, H., (2006). Jameson flotasyon hücre si ile Zonguldak kömür şlamının zenginleştirilmesi, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak, s.86.

Heiser, N., (1996). Coal flotation technical review, *The Australian Coal Review*, 34-36.

Jia, R., Haris, G.H. ve Fuerstenau, D.W., (2002). Chemical reagents for enhanced coal flotation, *Coal Preparation*, **22**, 123-149.

Kawatra, S.K. ve Eisele, T.C., (1997). Pyrite recovery mechanisms in coal flotation, *Int. Jour. of Mineral Processing*, **50**, 187-201.

Özbayoğlu, G., (1977). Determination of the flotation characteristics of several Turkish bituminous coal seams in Zonguldak, *Ph.D. Thesis*, METU, Ankara.

Sis, H., Özbayoğlu, G. ve Sarıkaya, M. (2004). Comparison of non-ionic and ionic collectors in the flotation of coal fines, *Minerals Engineering*, **16**, 399-401.

Sis, H., Özbayoğlu, G., Sarıkaya, M. (2003). Utilisation of fine coal tailings by flotation using ionic reagents, *Energy Source Part A*, **26**, 941-949.

*Jameson hücresinde bitümlü şlam kömürün flotasyonu*

- Sönmez, İ. ve Cebeci, Y., (2006). Performance of classic oils and lubricating oils in froth flotation of Ukraine coal, *Fuel*, **85**, 1866-1870.
- Tan, S.N., Pugh, R.J., Farnasiero, D., Sedev, R. ve Raltson, J., (2005). Foaming of polypropylene glycols and glycol/MIBC mixtures, *Minerals Engineering*, **18**, 179-188.
- Yoon, R.H. (1993) Microbubble flotation, *Minerals Engineering*, **6**, 4, 619-630.
- Zheng, X., Johnson, N.W. ve Franzidis, J.P. (2006) Modelling of entrainment in industrial flotation cells; water recovery and degree of entrainment, *Minerals Engineering*, **19**, 1191-1203.

# mühendislik dergisi

