

SİKLOJETHÜCRESİNDEBİTÜMLÜŞLAMKÖMÜRÜNFLOTASYONUVEJAMESON HÜCRESİ İLE FLOTASYON PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Flotation of Bituminous Coal Slimes in the Cyclojet Cell and a Comparison of Cyclojet Cell and Jameson Cell in Terms of Their Flotation Performance

Hasan HACİFAZLIOĞLU (*)
İhsan TOROĞLU (**)

ÖZET

Bu çalışmada, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümünde geliştirilmiş olan Siklojet hücrenin çalışma ilkeleri ayrıntılı olarak anlatılmış ve bitümlü kömür şamlarının temizlenmesi için denenmiştir. Deneylerde kullanılan bitümlü şlam kömürün %80'i 53 mikronun altında olup kül içeriği yaklaşık %49'dur. Söz konusu şlam kömürlerden Siklojet hücresi ile %11,32 küllü temiz kömür %72,80 yanabilir madde verimi ile kazanılmıştır. Aynı kömürlerle Jameson hücresinde yapılan çalışmalar sonucunda %14,40 küllü temiz kömür, %73,82 yanabilir madde verimi ile kazanılmıştır. Ayrıca, Siklojet hücrenin flotasyon performansının değerlendirilebilmesi ve Jameson hücresi ile karşılaştırılabilmesi için mekanik hücrede kömür şamlarına "release test" uygulanmıştır. Sonuçta, Siklojet hücrenin Jameson hücresine göre daha temiz ürünler verdiği ve flotasyon veriminin ise yaklaşık olarak aynı olduğu saptanmıştır. Bunun arkasında yatan temel neden, Siklojet hücresindeki siklonik jet hareketi (santrifüj kuvvetleri ile) ve hücre yüzeyinde meydana gelen girdap akımıdır.

Anahtar Sözcükler: Siklojet Hücresi, Kömür Flotasyonu, Jameson Hücresi

ABSTRACT

This study is aimed at describing in detail the working principle of a Cyclojet cell developed by the Department of Mining Engineering of Zonguldak Karaelmas University, Turkey, and testing it to find out whether it can be used in cleaning bituminous coal slimes. 80% of the bituminous coal slime used in the tests was finer than 53 µm and it had an ash content of approximately 49%. By using the Cyclojet, the coal slimes yielded clean coal products having 11,32% ash content with 72,80% combustible matter recovery. Tests conducted in the Jameson cell with the same coal slimes produced clean coals having an ash content of 14,40% with 73,82% combustible matter recovery. A release test was also applied to the coal slimes in a mechanical cell in order to assess the flotation performance of the Cyclojet cell and compare it with that of Jameson cell. In conclusion, it has been established that the Cyclojet cell produces cleaner products than the Jameson cell with approximately the same flotation yields. The underlying reason is the cyclonic jet action (by centrifugal forces) occurring in the Cyclojet cell and a vortex flow on the cell surface.

Keywords: Cyclojet Cell, Coal Flotation, Jameson Cell

(*) Maden Yük.Müh., Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Müh. Böl., Zonguldak, hhacifazlioglu@yahoo.com
(**) Prof. Dr., Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak,

1. GİRİŞ

Köpüklü flotasyon, sulu bir ortam içerisinde hava kabarcığı oluşturmak ve bu kabarcıklarla cevher içinde genellikle az olan kıymetli minerali yüzdürme yoluyla yapılan bir ayırma ve zenginleştirme işlemidir. Kömür flotasyonunda ise, oluşturulan hava kabarcığına kömür gibi hidrofob tanelerin yapışmasıyla kömür yüzdürülmekte, kabarcığa yapışmayan kil ve silis gibi hidrofil gang taneleri ise su içerisinde kalmaktadır. Bu işlemin en yaygın olarak yapıldığı makineler, mekanik karıştırılmalı Denver ve Wedag gibi klasik mekanik hücrelerdir. Ancak, günümüzde endüstriyel ölçekte kullanılan kolon ve Jameson hücresi gibi gelişmiş alternatif flotasyon hücreleri de bulunmaktadır. Bugün itibariyle yılda yaklaşık 142 milyon ton toz kömür bu flotasyon yöntemleriyle zenginleştirilmektedir (Honaker ve Das, 2004).

Yüksek tenörlü cevher yataklarının tükenmesi ve çok ince boyutlarda serbestleşen (Örneğin ~30- 40 mikron gibi) kıymetli tanelerin artmasıyla birlikte cevherler çok daha ince boyutlara öğütülmekte ve bu boyutlarda flotasyon işlemine tabi tutulmaktadır. Ayrıca, madencilikte mekanizasyonun artmasıyla birlikte oluşan toz boyutlu malzeme miktarı da artmakta ve gerek çevresel gerekse ekonomik nedenlerden ötürü bu tozların zenginleştirilmesi bir zorunluluk haline gelmektedir. Diğer taraftan daha temiz enerjiye olan talep kömürlerin serbestleşme boyutuna kadar (genellikle -20 mikron) öğütülüp bunlardan süper temiz kömür üretimini zorlamaktadır (Mankosa vd, 1989; Heiser,1996).

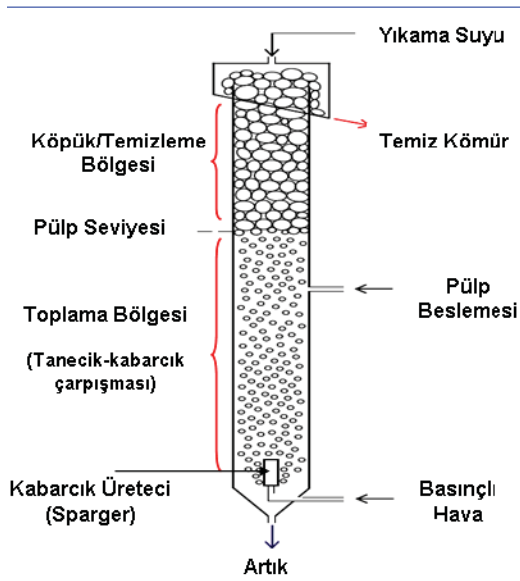
Bilindiği gibi klasik hücreler ile çok ince boyutlu kömürden yüksek yanabilir madde verimi ile düşük küllü ürünler elde etmek neredeyse imkansızdır. Bu makinelerde oluşturulan hava kabarcığı sayısının az olması ve boyutunun da büyük olması nedeniyle şlam boyutlu kömür tanelerinin kabarcıklarla çarpışma ve kabarcığa yapışma olasılığı daha düşük olmaktadır. Ayrıca, çok ince tanelerin artan yüzey alanları nedeniyle flotasyonda hem reaktif tüketimi hem de su ile temiz kömüre gang taşınımı artmaktadır. Bu nedenle, toz kömürler mekanik hücrelere beslenmeden önce bir tasnif siklonuna verilir. Siklon içerisinde şlam boyutlu (genellikle $d_{80} = 38$ mikron) tanelerden ayrılan nispeten iri boyutlu toz kömürler daha sonra flotasyon hücresine beslenir. Bu yolla hem reaktif tüketimi

azaltılır hem de daha yüksek verimle daha temiz kömürler elde edilebilir. Ancak, gün geçtikçe toz kömür miktarının artması siklon üst akımı olan şlam boyutlu kömürün de artmasına neden olmuştur. Toz kömür içerisindeki oranı yaklaşık %10-20 olan bu şlam kömürlerin gerek çevresel gerekse ekonomik nedenlerden ötürü birçok sakıncası bulunmaktadır. Bu şlamın klasik hücrelerle verimli zenginleştirilememesi yeni nesil flotasyon makinelerinin doğmasına neden olmuştur. Bu yüzden, son 40 yıl içerisinde farklı ilkelerle çalışan 100'ün üzerinde flotasyon hücresi tasarlanmıştır. Yeni geliştirilen bu flotasyon hücrelerinin en önemli ortak özelliği, çok ince boyutlarda ve çok sayıda kabarcık oluşturabilme yeteneğidir. Başka bir deyişle, yüksek kabarcık yüzey alanı sayesinde çok ince boyutlu tanelerin kazanılabilmesine olanak sağlamalarıdır. Ayrıca, bu flotasyon hücrelerinde sisteme yıkama suyunun verilmesi ve çok yüksek köpük kalınlıklarının elde edilebilmesi, köpükle taşınan mikron boyutlu gang tanelerinin pülp içerisine geri düşmesine imkan sağlamakta ve bu yolla daha temiz kömürler elde edilebilmektedir (Finch, 1995; Tao vd, 2002).

Kolon flotasyonunun, temel çıkış noktası klasik hücrelerde mekanik karıştırma ile meydana gelen yoğun türbülansın ve bunun sonucunda meydana gelen mekanik (hidrolik) taşınmanın önlenmesidir. Kolonda hava kabarcıkları mekanik karıştırma yerine, gözenekli bir malzemeye kompresörden hava verilmesiyle ya da sparger denen özel hava kabarcığı üreteçleri ile elde edilir. Ayrıca, kolon hücresi daha ince ve uzun olarak tasarlanmış olup daha yüksek köpük kalınlıklarının oluşmasına olanak sağlamıştır. Sisteme üst kısımdan verilen yıkama suyu ise daha temiz konsantrelerin elde edilmesini sağlamaktadır. Şekil 1'de gösterilen klasik bir kolon flotasyonunda, besleme kolonun orta kısmından yapılmakta ve bu sayede taneler mekanik hücredeki gibi karıştırılmadan hücre içerisinde askıda tutulmaktadır. Alt kısımdan verilen hava ile oluşan kabarcıklar yukarıya doğru yükselmekte ve taneciklerle çarpışmaktadır. Çarpışma sonucunda hidrofob taneler kabarcığa yapışmakta ve yükselerek köpük ürünüyle birlikte alınmaktadır. Kabarcığa yapışmayan tanecikler ise aşağıya doğru düşmekte ve artık kanalından artık olarak alınmaktadır.

Kolon flotasyonu, yüksek tenörlü ürünler vermesi nedeniyle daha çok temizleme

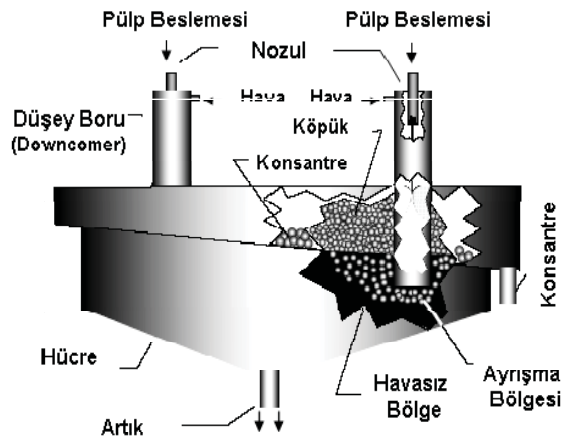
kademelerinde tercih edilmektedir. Türkiye’de kurulu olan tek kolon flotasyonu uygulaması Çayeli Bakır İşletmelerindedir. Söz konusu işletmede, dünyanın birçok yerinde olduğu gibi kaba flotasyon mekanik hücrelerle, temizleme işlemi ise kolon flotasyonu ile yapılmaktadır. Kolonun başlıca dezavantajları kapasitesinin düşük olması, hava üretici sistemlerinin sık sık tıkanması ve kolon yüksekliğinin tesislerde sorun oluşturmasıdır (Yang, 1988; Wills, 1997; Yen vd, 1998; Li vd, 2003).



Şekil 1. Klasik kolon flotasyonu hücresi.

Jameson flotasyon hücresi, 1989 yılında kolon flotasyona alternatif olarak geliştirilmiş yenilikçi bir flotasyon tekniğidir. Bu hücrede ne yükseklik problemi ne de kapasite sorunu bulunmaktadır. Ayrıca, hava atmosferden kendiliğinden emildiği için herhangi bir hava üreticine ya da kompresöre ihtiyaç duyulmamaktadır (Jameson, 1988; Mohanty ve Honaker, 1999). Jameson hücresinde, pülp yüksek basınçla bir nozuldan geçirilmekte ve enerji ile yüklenmiş olan bu pülp jet hareketi ile sıvı (pülp) dolu hücre içerisine girmektedir. Kabarçık oluşumu jet hareketinin dış ortamdan havayı emmesi ve sıvı içerisine kesme kuvvetleri ile gömmesi prensibiyle sağlanır (Şekil 2). Mekanik hücrelerde oluşturulan ortalama kabarçık çapı 1 mm iken, Jameson hücresinde 0,3 mm’dir. Kolon flotasyonunda ise bu değer 0,5-0,6 mm civarındadır (Rodrigues ve Rubio, 2003). Jameson hücresinde çok küçük çaplı

kabarçıkların oluşturabilmesi özellikle çok ince boyutlu tanelerin zenginleştirilmesi için olanak sağlamıştır. Basit yapısı, yüksek kapasitesi ve ince boyutlarda yüksek seçimliliği ile günümüzün en gözde flotasyon aygıtlarından biridir. Avustralyada hemen hemen her kömür hazırlama tesisinde şamların zenginleştirilmesi için kurulu bir Jameson hücresi bulunmaktadır. Dünya üzerindeki resmi sayısı 250, diğerleriyle birlikte 1000’in üzerinde olduğu tahmin edilmektedir. Bu teknoloji su arıtımı için de yaygın olarak kullanılmaktadır (Mohanty, 2001; Rubio vd, 2002).



Şekil 2. Jameson flotasyon hücresi.

Bu çalışmada, Jameson flotasyon hücresine alternatif olarak geliştirilmiş olan, Türk yapımı Siklojet hücresi tanıtılacak ve Jameson hücresi ile flotasyon performansları karşılaştırılacaktır. Bitümlü şlam kömürleriyle yapılan flotasyon çalışmaları sonucunda, Siklojet hücresinin Jameson hücresine göre daha temiz ürünler verdiği ve kömür kazanımı yönünden de Jameson hücresi ile hemen hemen aynı olduğu kaydedilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Siklojet Hücresi

Siklojet Hücresi, 2006 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği bölümünde geliştirilmiş olan yüksek yoğunluklu bir flotasyon hücresidir (Şekil 3). Bu sistemde pülpün hem jet hareketinden, hem de hücre

içerisinde oluşturulan merkezkaç kuvvetinden faydalanılmaktadır. Jameson hücresinde, jet hareketi bir nozul ile doğrusal olarak oluşturulmakta iken, Siklojet hücresinde bir hidrosiklon ile konik olarak oluşturulmaktadır. Başka bir deyişle, Siklojet hücresinde oluşturulan pülp jeti, siklonik bir hareket ile hücre içerisinde girmektedir. Bu yolla, pülp içerisindeki kesme kuvvetleri artırılmakta ve daha ince kabaçıkların



Şekil 3. Siklojet hücresi ve yardımcı ekipmanları.

oluşumu sağlanmaktadır. Jameson hücresine göre daha yoğun kabarcıkların gözlemlendiği bu hücrede, düşey boru (downcomer) yerine daha geniş ve aşağıya doğru daha da genişleyen bir "konik tüp" kullanılmaktadır (Şekil 4). Bu sayede, daha sıkışık ve daha yoğun (sağlam) bir köpük tabakası elde edilebilmektedir. Sıkışık ve yoğun köpük tabakası, Jameson hücresine göre daha yüksek ve sağlam köpük tabakalarının elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, geniş konik tüp yoğun karışma ile zaman zaman mekanik taşınan gang minerallerinin kolay bir şekilde köpük ürününe geçmesini önlemektedir.

Siklojet hücresinde oluşturulan siklonik jet, hücre içerisinde girdap akımı meydana getirmektedir

(Şekil 5). Bu girdap sayesinde, köpük tabakası hücrenin merkez eksenini etrafında dönme hareketi yapmaktadır. Bu hareketin büyüklüğü oluşturulan konik jetin uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak 5-10 cm'lik bir konik jet uzunluğu en hızlı girdap akımı (köpük tabakası dönüşü) için uygundur. Hızlı bir girdap akımı köpükle birlikte mekanik olarak taşınan gang tanelerinin titreşim ile geri düşmesine olanak sağlamakta ve bu yolla daha az yıkama suyu ile daha temiz kömürler üretilmektedir.



Şekil 4. Konik tüp ve etrafında oluşan kabarcıklar.



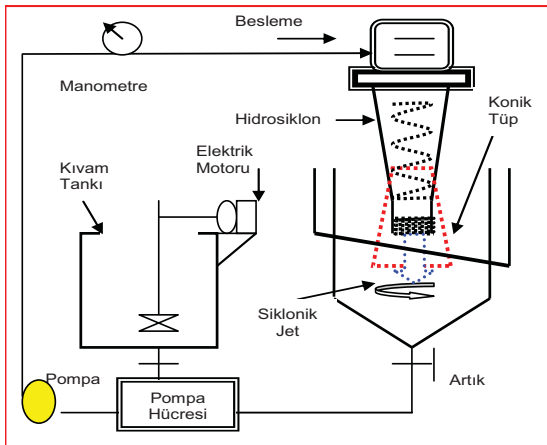
Şekil 5. Hücre yüzeyinde meydana gelen girdap akımının bir görüntüsü.

Siklojet hücresi deney düzeneği şematik olarak Şekil 6'da gösterilmiştir. 150 litrelik bir kıvam tankında toplayıcı ve köpürtücü ilavesiyle kıvamlandırılan pülp, bir pompa yardımıyla 25 cm çaplı hidrosiklon içerisine beslenmektedir (Hidrosiklonun üst akım çıkışı

borusu kapatılmıştır). Siklon apeksinden hızla fişkıran siklonik akışlı jet ile çok sayıda kabarcıklı oluşturulmakta ve kabarcıklara yapışan taneler hücrenin üst kısmından alınmaktadır. Kabarcığa yapışmayan taneler ise alt kısımdan artık olarak alınmaktadır. Artık bölümü pompa hücresi ile bağlantılı olup, çok kademeli (süpürme) zenginleştirmeye uygun olarak tesis edilmiştir.

2.2 Malzeme ve Yöntem

Deneyisel çalışmalarda Zonguldak (merkez) kömür havzasında yer alan özel bir işletmeye ait bitümlü kömür şamları kullanılmıştır. Bu işletmede -1 mm boyutlu toz kömür, önce bir tasnif siklonuna beslenmekte ve -0,150 mm boyutu ince kısım siklon üst akımı (şlam) olarak alınmaktadır. Siklon alt akımı olan -1+0,150 mm ise klasik flotasyon hücreğine (mekanik hücreye) beslenmektedir. Siklon üst akımı şlam ya da çamur olarak adlandırılmakta ve tikinlerde 8 g/t flokülant ilavesiyle çöktürülerek belt filtreler gönderilmektedir. Deneylerde söz konusu işletmeden alınan belt filtre kekleri örnek olarak kullanılmıştır. Bu örneğe ait yaş elek analizi sonuçları ve boyut aralıklarına göre kül ve yanabilir dağılımları Çizelge 1’de gösterilmiştir. Kuru bazda yapılan kimyasal analiz sonucunda örneğin %48,80 kül, %21,43 uçucu madde, %29,77 sabit karbon ve %0,70 toplam kükürten oluştuğu saptanmıştır. Örneğin üst ısıl değeri ise 4330 kcal/kg bulunmuştur.



Şekil 6. Siklojet hücrenin şematik görüntüsü

Çizelge 1. Örneğin Elek Analizi ve Boyut Guruplarına Göre Kül ve Yanabilir Verim Değerleri (Kuru bazda, %).

Boyut Aralığı (µm)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Madde Dağılımı (%)
-300 + 212	2,50	8,95	4,45
-212 + 150	2,32	9,10	4,12
-150 + 75	9,73	13,46	16,45
-75 + 38	10,22	25,70	14,83
-38	75,23	59,06	60,15
Toplam	100,0	48,80	100,0

Deneylere başlanmadan önce kömür şlamının yıkanabilme özelliklerinin belirlenmesi ve ideal ayırma eğrisinin çizilebilmesi amacıyla Dell (1964) tarafından geliştirilmiş olan “release flotasyon” testi uygulanmıştır. Elde edilen eğri daha sonra Siklojet ve Jameson hücrelerinin sonuçlarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Release testler 3 litrelik Humboldt-Wedag tipi laboratuvar ölçekli bir mekanik flotasyon hücreğinde yapılmıştır. Testin başlangıcında pülpte katı oranı %10 (300 gr), karıştırma hızı 1500 dev/dak’dır. Reaktif olarak 1200 g/t gazyağı ve 100 g/t MIBC kullanılmıştır. Testin ilerleyen aşamalarında toplam 300 g/t gazyağı ve 100 g/t MIBC ilavesi yapılmıştır. Siklojet ve Jameson hücresi deneyleri eş kapasiteli hücrelerde benzer pompa güçleri ile yapılmıştır. Hücre hacmi 100 lt, kullanılan pompa motorunun gücü ise 3 kW’tır. Deneylerde uygulanan program; “kaba flotasyon”, “kaba+süpürme”, “kaba+süpürme+süpürme” şeklindedir. Böyle bir uygulama süpürme kademesinin uygulanabilirliğinin daha kolay olmasından ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesi dolayısıyla seçilmiştir. Süpürme kademesi, artığın alt kanaldan alınarak bir boru ile sisteme tekrar beslenmesi şeklindedir. Başka bir deyişle kaba flotasyon için toplam flotasyon süresi 30 saniye iken, “kaba+süpürme” flotasyonu için 60 saniyedir (artık vanası açık).

Siklojet ve Jameson hücreğine ait bazı tasarım ve çalışma parametrelerinin optimum değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Siklojet hücreğinde “konik tüp çapı” olarak belirtilen parametrenin Jameson hücreesindeki karşılığı “düşey boru (downcomer) çapı”dır. Her iki hücre tipinin enerji tüketimleri ve kapasiteleri yaklaşık olarak aynıdır.

Çizelge 2. Siklojet ve Jameson Hücresine Ait Tasarım ve Çalışma Parametrelerinin Değerleri

Tasarım ve Çalışma Parametreleri	Siklojet Hücresi	Jameson Hücresi
Besleme Basıncı(kPa)	50	130
Hücre Çapı/Boy (cm)	54/90	54/90
Konik Tüp Çapı (cm)	32	15
Yık. Suyu Hızı (lt/dak.)	2	4
Katı Oranı (%)	6	6
Köpük Yüksekliği (cm)	19-20	15-16
Köpürtücü, MIBC (g/t)	250	250
Toplayıcı, Gazyağı (g/t)	1600	1600

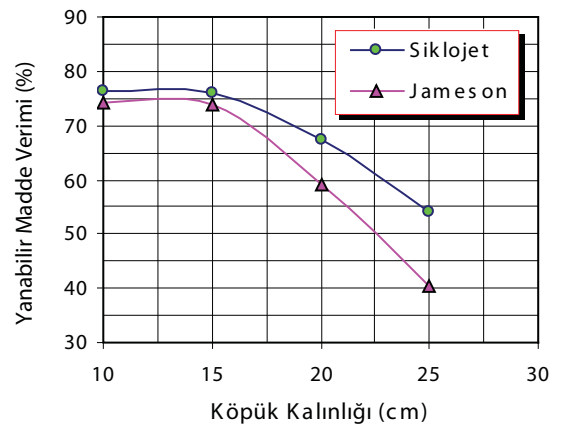
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yüksek küllü şlam kömürlerden, makul düzeyde yanabilir madde verimi ile %15'in altında kül içeren temiz kömürlerin üretimi amaçlanarak bir dizi deney yürütülmüştür. Deneyler her iki hücre tipinde benzer koşullar altında yapılmıştır. Siklojet ve Jameson hücresinde bazı parametrelerin değiştirilmesi flotasyon sonuçlarında benzer değişimlere neden olmuştur. Örneğin, pülpte katı oranının %6'dan %9'a çıkarılmasıyla her iki hücre tipinde verim düşmüş ve flotasyon süresi uzamıştır. Benzer şekilde toplayıcı ve köpürtücü miktarının belirli oranlarda artırılması ile her iki hücre tipinde yanabilir verim değeri benzer oranlarda artmıştır. Bu yüzden ortak bazı parametreler karşılaştırma ölçütü olarak alınmamış; köpük kalınlığı ve yıkama suyu debisi değiştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çünkü bu iki parametre farklı hücrelerde, farklı değerlerde optimum değeri almaktadır.

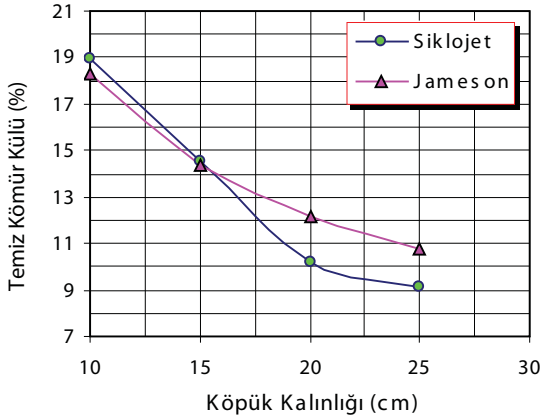
Siklojet ve Jameson hücresinde köpük kalınlığının flotasyon performansı üzerine etkisinin incelenmesinin nedeni, her iki hücre tipinde ulaşılan maksimum köpük kalınlığının farklı olmasıdır. Benzer çalışma koşullarında Siklojet'te ulaşılan maksimum köpük kalınlığı ~30 cm iken, Jameson hücresinde ~25 cm'dir. Şekil 7 ve 8'de farklı köpük kalınlıklarında yapılan deneyler sonucunda elde edilen temiz kömüre ait yanabilir madde verimi ve kül içerikleri gösterilmiştir. Jameson hücresinde, köpük kalınlığının 25 cm'e yükseltilmesi durumunda yanabilir madde verimi %40,40'a düşmüştür. Bunun nedeni, deneyler esnasında köpüğün nadiren 25 cm kalınlığa ulaşmasıdır. Başka bir deyişle, zaman zaman yükselen köpük sayesinde

%40,40'lık bir yanabilir verime ulaşılmıştır. Siklojet hücresinde ise 25 cm'lik köpük kalınlığına daha rahat ulaşılmış ve yanabilir madde verimi değeri yaklaşık %54,2 olarak bulunmuştur. Her ne kadar bu değer çok yüksek olmasa da %9,10 küllü ürün vermesi bakımından önemlidir. Ancak, verim de göz önüne alınarak Siklojet hücresi için optimum köpük kalınlığının 19-20 cm aralığında olduğu söylenebilir. Jameson hücresinde ise optimum köpük kalınlığı 15-16 cm'dir.

Siklojet hücresinin, Jameson hücresine göre optimum köpük kalınlığının daha yüksek olmasının nedeni, Siklojet'te oluşturulan jetin Jameson hücresine göre daha etkin olmasından kaynaklanmaktadır. Daha etkin bir jet, konik jet sayesinde çok sayıda santrifüj kuvvetlerinin etkisi ile oluşturulmuştur. Bu yolla daha ince ve daha çok sayıda kabarcık oluşmuş ve daha yoğun bir köpük zonu elde edilmiştir. Dolayısıyla, düşük köpük kalınlıklarında (≤ 15 cm), Siklojet hücresinde daha yoğun mekanik (hidrolik) taşınma meydana gelmekte ve temiz kömür kül içeriği Jameson hücresi ürününe göre daha yüksek olmaktadır. Başka bir deyişle yoğun (bol) kabarcıklanma ile daha az hidrofob olan taneler ile gang (kil gibi) mineralleri köpük aralarında konsantreye taşınmıştır. Siklojet'teki düşük köpük kalınlığı nedeniyle gang tanelerinin pülpe geri düşme olasılığı azalmış ve bunun sonucunda konsantre külü artmıştır. Bu yüzden, Siklojet hücresi özellikle 15 cm'lik köpük kalınlığından daha sonraki yüksekliklerde daha iyi sonuçlar vermiştir. Siklojet hücresinde oluşan kabarcıklara ait bir görüntü Şekil 9'da verilmiştir. Bu resimden de görülebileceği gibi Siklojet hücresinde çok küçük çaplı kabarcıklar elde edilebilmektedir.



Şekil 7. Köpük kalınlığı-yanabilir madde verimi ilişkisi.



Şekil 8. Köpük kalınlığı-temiz kömür külü ilişkisi.

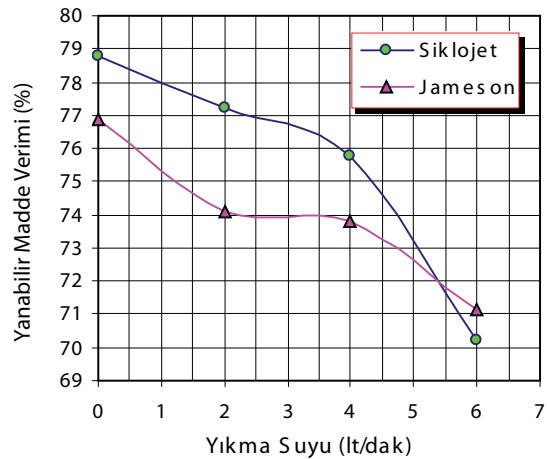
Her iki hücre tipinde yıkama suyu debisinin yanabilir madde verimi ve temiz kömür külüne etkisi Şekil 10 ve 11'de gösterilmiştir. Buna göre, her iki hücre tipinde yıkama suyu miktarının artışı yanabilir madde verimini azaltmıştır. Bunun nedeni su damlacıklarının köpük üzerine çarpmasıyla köpüklerin bir bölümünün sönmesi ve bu köpüklerle taşınan taneciklerin pülpe geri düşme olasılığının artmış olmasıdır. Bu sakıncasına rağmen, yıkama suyu pozitif bayes oluşturduğu için konsantrenin kül içeriğinin düşürülmesinde önemli etkiye sahiptir. Öyle ki, yıkama suyu yoluyla önemli miktarda hidrolik taşınan gang minerali geri yıkayabilmekte ve ürünün kül içeriği önemli ölçüde düşmektedir. Kabarcık aralarında hidrolik olarak yükselen gang minerallerinin yıkama suyu varlığındaki hareketi Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi yıkama suyu gang tanelerini pülpe geri yıkamaktadır/düşürmektedir.

Jameson hücresinde, yıkama suyunun 4 lt/dak'dan 0 lt/dak'ya düşürülmesi durumunda temiz kömürün kül içeriği %14,45'den %18,90'a yükselmiştir. Siklojette ise kül içeriği %14,52'den %17,12'ye çıkmıştır. Benzer değişimlerde Siklojet hücresinin Jameson hücresine göre daha düşük küllü ürünler vermesi, Siklojetteki girdap akımına bağlanabilir. Hücre içerisinde meydana gelen bu girdap akımı ile köpük tabakası konik tüp etrafında dönmekte ve köpük aralarından gang mineralleri titreşim yolu ile daha kolay süzülmemektedir. Başka bir deyişle hareketli köpük tabakası yıkama suyu görevi görmekte ve mekanik olarak gang taneciklerinin pülpe geri düşmesini sağlamaktadır. Zira yapılan pek çok

flotasyon çalışmasında, titreşimli ya da hareketli köpüğün, durgun bir köpük tabakasına göre verim ve kül giderme bakımından daha avantajlı olduğu iddia edilmektedir (Yalçın, 1995; Guo, 2001; Lai, 2002; Özkan ve Kuyumcu, 2005). Öyle ki, yapılan bir çalışma sonucunda, köpüğe titreşim verilerek, temiz kömür kül içeriği normal (titreşimsiz) flotasyona göre %20 daha düşük bulunmuştur (Stoev, 1991).

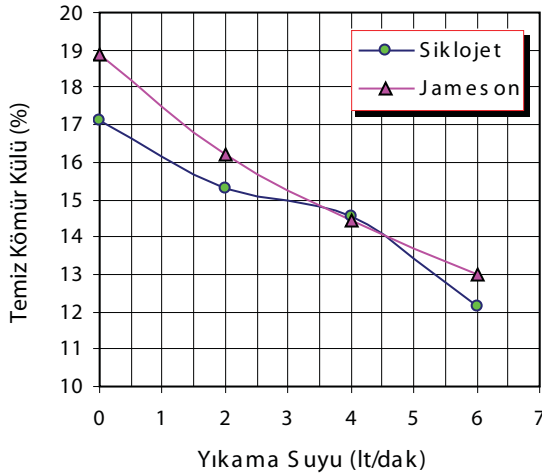


Şekil 9. Santrifüj kuvvetlerinin etkisi ile Siklojet hücresinde oluşan çok küçük çaplı kabarcıklar.

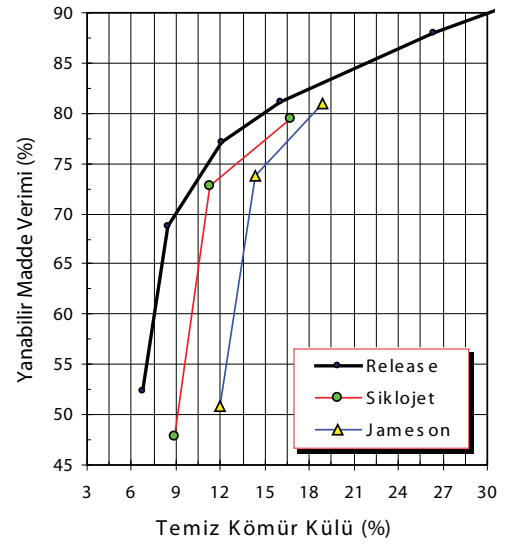


Şekil 10. Yıkama suyu –yanabilir madde verimi ilişkisi.

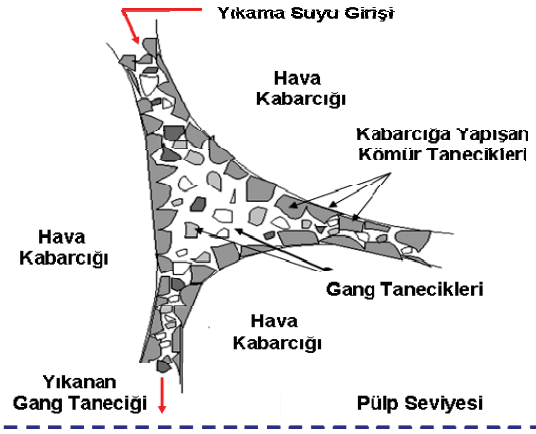
Her iki hücre ile optimum koşullar altında yapılan farklı flotasyon deneyleri sonucunda Çizelge 3'deki verilere ulaşılmıştır. Bu değerler release eğrisi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 13'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Yıkama suyu hızı-temiz kömür külü ilişkisi



Şekil 13. Siklojet ve Jameson hücrelerinin sonuçlarının release eğrisi ile karşılaştırılması.



Şekil 12. Yıkama suyu varlığında hidrofob (kömür) ve hidrofil (kil) taneciklerinin hareketi.

Çizelge 3. Siklojet ve Jameson Hücrelerinin Çeşitli Flotasyon Kademelerdeki Performansları

	Hücre Tipi	Temiz K. Külü(%)	Yanabilir Verim(%)
Kaba Flotasyon	Jameson	12,00	50,80
I. Süpürme	Siklojet	8,90	47,90
II. Süpürme	Jameson	14,40	73,82
	Siklojet	11,32	72,80
	Jameson	18,92	81,00
	Siklojet	16,75	79,43

Deneylerde diğer tüm parametreler sabit olmak üzere köpük kalınlığı Siklojet hücrelerinde 20 cm, Jameson hücrelerinde ise 15 cm alınmıştır. Yıkama suyu miktarı ise Siklojette 2 lt/dak, Jameson

hücrelerinde ise 4 lt/dak olarak ayarlanmıştır. Bu koşullar altında, yalnızca bir süpürme kademesinin uygulanmasıyla Siklojet hücrelerinde %11,32 külü temiz kömürler %72,80 yanabilir madde verimi ile kazanılmakta iken; Jameson hücrelerinde %73,82 yanabilir madde verimi ile %14,40 külü temiz kömürler elde edilmiştir. Bu deneylerin toplam flotasyon süresi 60 saniyedir. Flotasyon süresi artırıldığında verim ve kül içerikleri de artmaktadır (Örneğin II. Süpürme kademesi sonuçları). Şekil 13'den de görülebileceği gibi, release eğrisine en yakın olan değerler Siklojet hücreleri ile elde edilmiştir. Buna göre, Siklojet hücrelerinin flotasyon performansının Jameson hücrelerine göre daha iyi olduğu söylenebilir. Ancak, her iki hücrede de tek kademeli flotasyon (kaba flotasyon) ile yeterli verime ulaşamamıştır. Bu yüzden artı bir bölümünün alınıp tekrar flotasyon işlemine tabi tutulması verim artışı yönünden önemlidir.

4. SONUÇLAR

Siklojet hücreleri, siklonik jet hareketinden faydalanarak bir hidrosiklonun apeksinden fıskıran pülp ile kabarcık üreten yüksek yoğunluklu bir flotasyon makinesidir. Bu makine, benzer koşullar altında, Jameson hücrelerine göre yaklaşık benzer yanabilir madde verimi değerleri vermiştir. Ancak, kül giderme başarısı açısından Jameson hücrelerine göre daha iyidir.

Bunun arkasında yatan temel neden Siklojet hücresinde daha yüksek köpük kalınlıklarının elde edilebilmesi ve hücre içerisinde oluşan girdap ile hidrolik taşınan gang minerallerinin büyük ölçüde pülpe geri düşmesidir. Başka bir deyişle, titreşen ve dönen bir köpük tabakasının elde edilebilmesidir. Bu yüzden, Siklojet hücresinde yıkama suyu tüketimi de, Jameson hücresine göre nispeten daha düşük bulunmuştur.

Siklojet hücresinin klasik mekanik hücreye göre de birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi kapasitesinin mekanik hücreye göre daha yüksek olmasıdır. Öyle ki, 0,1 m³'lük bir hücre ile saatte 285 kg (%6 katı oranı için) kömür zenginleştirilebilmektedir. Tanelerin hücre içerisinde kalma süresi oldukça düşük olup, 30-40 saniye kadardır. Ayrıca, özellikle çok ince boyutlu şlam kömürlerin zenginleştirilmesinde mekanik hücreye göre oldukça düşük küllü ürünleri oldukça yüksek yanabilir madde verimi değerleriyle verebilmektedir. Basit yapıda olması ve az yer kaplaması diğer avantajlarıdır. Şekil 13'den de görülebileceği gibi, kolayca uygulanabilecek tek bir süpürme kademesi ile yüksek verimle, oldukça düşük küllü ürünler elde etmek mümkündür.

Sonuç olarak; Siklojet hücresi ile %48,80 kül içeren Zonguldak bitümlü kömür şlamlarından %72,80 verimle %11,32 küllü ürünler elde edilmiştir. Bu şlamların ısı değeri ise 4330 kcal/kg'dan 6960 kcal/kg'a yükseltilmiştir.

KAYNAKLAR

Dell, C.C. 1964; "An Improved Release Analysis Procedure for Determining Coal Washability", Journal of the Institute of Fuel, **37**, 149-156.

Guo, J.X., 2001; "Development and Theory of Centrifugal Flotation Cell", Queen's University, Ph.D. Thesis, Ontario, Kanada.

Finch J.A., 1995; "Column Flotation: A Selective Review: Novel Flotation Devices, Minerals Engineering, **8(6)**, 587-602.

Heiser, N., 1996; "Coal Flotation Technical Review", The Australian Coal Review, 34-36.

Honaker, R.Q. and Das, A., 2004; "Ultrafine Coal Cleaning Using a Centrifugal Fluidized-Bed

Separator", Coal Preparation, **24(1/2)**, 1-18.

Jameson G.J., 1988; A New Concept in Flotation Column Design, Sastry K.V.S., (ed.), Column Flotation'88, AIME, 281-286.

Lai, R.W., 2002; "Cyclonic Flotation Column for Minerals Benefication", Mining Engineering, **54(3)**, 1125-1140.

Li, B., Tao, D., Ou, Z. and Liu, J., 2003; "Cyclo-Microbubble Column Flotation of Fine Coal", Separation Science and Technology, **38**, 1125-1140.

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(4)**, 255-260.

Mohanty, M.K. and Honaker, R.K., 1999; "Performance Optimisation of Jameson Flotation Technology for Fine Coal Cleaning, Minerals Engineering, **12(4)**, 367-381.

Mohanty, M.K., 2001; "In-plant Optimisation of a Full-Scale Jameson Flotation Cell", Minerals Engineering, **14(11)**, 1531-1536.

Özkan, S.G. and Kuyumcu, H.Z., 2005; "Application of Ultrasonics for Coal Flotation", The 4th Kolloquium Sortieren, Innovationen und Anverwendungen, Technische Universität Berlin, Berlin, 6-7 October, 220-228.

Rubio, J., Souza, M. and Smith, R.W. 2002; "Overview of Flotation as a Wastewater Treatment Technique", Minerals Engineering, **15(3)**, 139-155.

Rodrigues, R.T. and Rubio, J., 2003; "New Basis for Measuring the Size Distribution of Bubbles", Minerals Engineering, **16(8)**, 757-765.

Stoev, S., 1991; "Vibroakustik Teknolojilerin Kömür Hazırlamaya Uygulanması", Önal, G.&Ateşok, G., (ed.), Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri, Yurt Madencilik Geliştirme Vakfı Yayınları, 202-215.

Tao, D., Li, B., Johnson, S. and Parekh, B.K., 2002; "A Flotation Study of Refuse Pond Coal Slurry", Fuel Processing Technology, **76(3)**, 201-210.

Wills, B.A., 1997; "Mineral Processing Technology", Sixth Edition, Pregmon International Library , England, Chapter 7; 142-176.

Yalçın, T., 1995;" The Effect of Some Design and Operating Parameters in the Cyclo Column Cell, Minerals Engineering, **8(3)**, 311-319.

Yang, D.C., 1988; "A New Packed Column Flotation System", Sastry, K., (ed), Column Flotation'88, AIME, 257-266.

Yen, W.T., Pindred, A., Guo J.X., Ding J. and Moore., 1998; "Froth Flotation with Modified Centrifugal Flotation Cell", Proceedings of 30th CMP Conference, Ottawa, 697-715.