

TAŞKÖMÜRÜ FLOTASYONUNDA SEÇİMLİLİĞİ
ETKİLEYEN BAZI FAKTÖRLERİN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ

ELİF AKGÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
2011

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAŞKÖMÜRÜ FLOTASYONUNDA
SEÇİMLİLİĞİ ETKİLEYEN BAZI FAKTÖRLERİN
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ELİF AKGÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. ÜNAL AKDEMİR

SİVAS
2011

Bu alışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan Prof.Dr. Meftuni YEKELER _____

Üye (Danışman) Prof.Dr. Ünal AKDEMİR _____

Üye Yrd.Doç.Dr. Nazmi OTLU _____

ONAY

Bu tez çalışması, 28/06/2011 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa DEĞİRMENCİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 24.09.2008 tarihli ve 009 sayılı toplantısında kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

Çalışma sırasında bana destek olan aileme, danışmanıma ve tüm arkadaşlarıma...

ÖZET

TAŞKÖMÜRÜ FLOTASYONUNDA SEÇİMLİLİĞİ ETKİLEYEN BAZI FAKTÖRLERİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Elif AKGÜL

Yüksek Lisans Tezi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ünal AKDEMİR

2011, 62 sayfa

Bu çalışmada, Türkiye Taşkömürü Kurumu Zonguldak Karadon Müessesesi'nden getirilen toz taşkömürünün flotasyon ile zenginleştirilmesinde etkili olan çeşitli parametreler incelenmiştir. İki farklı köpürtücü reaktif kullanılarak, orijinal ve öğütülmüş numuneler ile deneyler yapılmıştır. Tane boyutu, karıştırma hızı, pülp yoğunluğu, toplayıcı ve köpürtücü miktarının etkileri irdelenmiştir. Köpürtücü olarak Aero 65 ve Aero 88, toplayıcı olarak da gazyağı kullanılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda flotasyonda gerek verimi, gerek seçimliliği etkileyen en önemli faktörün tane boyutu olduğu görülmüştür. Genel olarak tane boyutu incelidikçe ürün külü önemli ölçüde yükselmiş, buna karşılık yanabilir verimlerin büyük ölçüde artmadığı görülmüştür. Ayrıca üst boyutun 1 mm gibi bir değere kadar çıktığı anlaşılmıştır. Flotasyonu etkileyen diğer faktörler ise, karıştırma hızı, gazyağı ton miktarı, köpürtücü türü ve miktarı olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Taşkömürü, flotasyon, tane boyutu, seçimlilik, verim

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SOME PARAMETERS INFLUENCING SELECTIVITY IN HARD COAL FLOTATION

Elif AKGÜL

Master of Science Thesis, Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ünal AKDEMİR

2011, 62 pages

In this study, the bituminous-coal which was taken from Turkish Institute of Hardcoal-Karadon Region was used and some parameters that effects coal flotation were investigated. Two different frothers were used and the experiments were made with original and ground samples. The effects of particle size, impeller speed, pulp density, frother and collector were investigated. Aero 65 and Aero 88 were used as frother and kerosene was used as collector.

The experiments indicated that, the most important factor influencing both recovery and selectivity was particle size. Generally, as the size decreased ash of clean coal increases considerably while the combustible recovery didn't increased too much. In addition, top size in some cases reaches up to 1 mm other parameters that affect the separation were found as impeller speed, kerosene amount and the type and concentration of frother.

Key words: Hard coal, flotation, particle size, selectivity, recovery

TEŞEKKÜR

Danışmanım Prof. Dr. Ünal Akdemir'e tez boyunca yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Tezin laboratuvar çalışmaları aşamasında yardımcı olan Uzman İbrahim Kulaksız ve Tekniker Feramuz Çiftçi'ye teşekkür ederim.

Her konuda sabırla yardımcı olan ve beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

Maden mühendisliği tüm öğretim üyeleri, öğretim elemanları ve diğer çalışanlara teşekkür ederim.

Fen bilimleri enstitüsünde görevli tüm öğretim üyeleri ve çalışanlara teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. Kömür Hakkında Genel Bilgiler	2
2.2. Kömür Hazırlama.....	5
2.3. Kömür Flotasyonu.....	9
2.4. Kömür Flotasyonu Konusunda Yapılan Bazı Çalışmalar	13
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	21
3.1. Malzeme.....	21
3.2. Yöntem.....	22
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	23
4.1. Farklı Boyut Fraksiyonlarıyla Yapılan Çalışmalar	23
4.2. Farklı Karıştırma Hızlarında Yapılan Deneysel Çalışmalar	30
4.3. Farklı Katı Oranlarında Yapılan Deneysel Çalışmalar	34
4.4. Farklı Gazyağı Konsantrasyonlarında Yapılan Deney Sonuçları	41
4.5. Temizleme Deney Sonuçları	49
5. DENEY SONUÇLARININ TARTIŞILMASI.....	50
5.1. Tane Boyutunun Etkisi.....	50
5.2. Öğütmenin Etkisi	51
5.3. Karıştırma Hızının Etkisi	52
5.4. Pülp Yoğunluğunun Etkisi	53
5.5. Gazyağı ve Köpürtücü Miktarının Etkisi	53
5.6. Flotasyon Kinetiği.....	54
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Orijinal cevherin –1mm fraksiyonuyla farklı sürelerdeki kül, yanabilir verim ve kül kazanımları	25
Şekil 2. Orijinal cevherin +1 mm'nin havanda öğütülmesiyle (–1 mm'lik fraksiyonla) farklı sürelerdeki kül, yanabilir verim ve kül kazanımları.....	26
Şekil 3. Orijinal kömürün 2 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları	27
Şekil 4. Orijinal kömürün 5 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları,	28
Şekil 5. Orijinal kömürün 15 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları	29
Şekil 6. 1000 devir/dak. karıştırma hızında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları.....	30
Şekil 7. 1250 devir/dak. karıştırma hızında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları.....	31
Şekil 8. 1550 devir/dak. karıştırma hızında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları.....	31
Şekil 9. 1000 devir/dak. karıştırma hızında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları.....	32
Şekil 10. 1250 devir/dak. karıştırma hızında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları....	33
Şekil 11. 1550 devir/dak. karıştırma hızında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları....	33
Şekil 12. %5 katı oranında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları... ..	35
Şekil 13. %10 katı oranında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları.....	36
Şekil 14. %20 katı oranında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları.....	36
Şekil 15. %30 katı oranında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları.....	37
Şekil 16. %5 katı oranında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları... ..	39
Şekil 17. %10 katı oranında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları.....	39
Şekil 18. %20 katı oranında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları.....	40
Şekil 19. 0 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 88 ile yapılan deney sonuçları.....	41
Şekil 20. 200 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 88 ile yapılan deney sonuçları.....	42
Şekil 21. 400 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 88 ile yapılan deney sonuçları.....	42
Şekil 22. 0 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 65 ile yapılan deney sonuçları.....	44
Şekil 23. 200 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 65 ile yapılan deney sonuçları.....	44
Şekil 24. 400 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 65 ile yapılan deney sonuçları.....	45
Şekil 25. 150 gr/ton AERO 88 kullanılarak yapılan deney sonuçları.....	47
Şekil 26. 300 gr/ton AERO 88 kullanılarak yapılan deney sonuçları.....	47
Şekil 27. 450 gr/ton AERO 88 kullanılarak yapılan deney sonuçları.....	48
Şekil 28. 750 gr/ton AERO 88 kullanılarak yapılan deney sonuçları.....	48

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1. Kömürlerin A.S.T.M. Sınıflandırması (A.S.T.M., 1991; Şimşek, 2007)	4
Çizelge 2. Kömür flotasyon reaktifleri (Laskowski, 2001)	11
Çizelge 3. Kuru Kömür Analiz Değerleri	21
Çizelge 4. Tüvenan Kömürün Elek Analizi ve Boyuta Göre Kül İçerikleri.....	21
Çizelge 5. -710 µm malzemeye yapılan deneyde elde edilen yüzen üründeki farklı tane fraksiyonlarının flotasyon davranışları	23
Çizelge 6. -1 mm malzemeye yapılan deneyden elde edilen yüzen üründeki farklı tane fraksiyonlarının flotasyon davranışları.....	24
Çizelge 7. -710 µm malzemeye yapılan deneyden elde edilen yüzen üründeki farklı tane fraksiyonlarının flotasyon davranışları ve suyla sürüklenme faktörleri.....	24
Çizelge 8. Orijinal cevherin -1 mm'lik fraksiyonuyla farklı sürelerde elde edilen ürünlerin flotasyonu	24
Çizelge 9. Orijinal cevherin +1 mm'nin havanda öğütülmesiyle (-1 mm'lik fraksiyonla) farklı sürelerde elde edilen ürünlerin flotasyonu.....	25
Çizelge 10. Farklı sürelerde öğütülen orijinal malzemenin tane boyu dağılımları.....	26
Çizelge 11. Orijinal kömürün 2 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları	27
.....	27
Çizelge 12. Orijinal kömürün 5 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları	27
.....	27
Çizelge 13. Orijinal kömürün 15 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları ..	28
.....	28
Çizelge 14. Farklı boyutlu orijinal kömürün AERO 88 köpürtücü ile flotasyon ve suyla taşınma davranışı	29
Çizelge 15. Farklı boyutlu orijinal kömürün AERO 65 köpürtücü ile flotasyon ve suyla taşınma davranışı	29
Çizelge 16. Farklı karıştırma hızlarında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları.....	30
Çizelge 17. Farklı karıştırma hızlarında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları	32
Çizelge 18. Farklı katı oranlarında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları	34
Çizelge 19. Farklı katı oranlarında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları	38
Çizelge 20. Farklı gazyağı konsantrasyonlarında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları	41

Çizelge 21. Farklı gazyağı konsantrasyonlarında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları	43
Çizelge 22. Farklı köpürtücü miktarlarında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları	46
Çizelge 23. AERO 88 ile yapılan bir kademe temizleme deney sonuçları	49
Çizelge 24. AERO 65 ile yapılan bir kademe temizleme deney sonuçları	49

1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde sürdürülebilir bir kalkınma, enerji kaynaklarının varlığına ve değerlendirilmesine bağlıdır. Enerji kaynakları içerisinde ise, rezervi ve yaygınlığı en fazla olan kömürdür. Kömür bu önemini gelecekte de koruyacaktır.

Kömür madenciliğinde mekanizasyonun yaygın bir şekilde uygulanması, nakliye ve zenginleştirme sırasında iri kömürlerin ufalanması nedeniyle ince kömür miktarı sürekli artmaktadır. Kömürün tane iriliği azaldığında ise serbestleşme derecesi artmakta, bu durum ise daha kaliteli temiz kömürlerin yüksek verimle üretilebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca bazı alanlarda ince kömür kullanılması bu kömüre olan talebi arttırmış ve bunun sonucunda da ince kömürün zenginleştirilmesi önem kazanmıştır. İnce kömürlerin zenginleştirilmesi, tesis ve ülke ekonomisine katkıları yanında daha temiz bir çevre oluşmasına da imkân sağlayacaktır.

Kömürün tane iriliği azaldıkça, zenginleştirme işlemlerindeki davranışı da değişmekte ve buna bağlı olarak uygulanan zenginleştirme yöntemleri de farklılıklar göstermektedir. İnce tanelerin kazanılmasında yaygın olarak kullanılan yöntem ise flotasyondur.

Bu çalışmada Zonguldak bölgesinden alınan taşkömürünün flotasyonu yapılmıştır. Flotasyonda etkili olan tane boyutu, pülp yoğunluğu, gazyağı ve köpürtücü miktarı, karıştırma hızı, flotasyon kinetiği gibi parametreler incelenmiştir. Bir kısım deneyler orijinal malzeme ile yapılırken, bir kısım deneyler ise farklı sürelerde öğütülmüş malzeme ile yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Kömür Hakkında Genel Bilgiler

Kömür, dünya genelinde önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Birincil enerji kaynakları grubunda, fosil katı yakıtlar içerisinde yer alan kömür, havanın oksijeni ile doğrudan yanabilen ve %50-95 arasında serbest veya bileşik karbon içeren organik kayaç olarak tanımlanır (Şengüler, 2007).

Dünyanın çoğu bölgesinde bulunan kömüre, yerin yüzeye yakın bölümlerinde ya da çeşitli derinliklerde rastlanır. Kömür çok miktarda organik kökenli maddenin kısmi ayrışması ve kimyasal dönüşüme uğraması sonucunda oluşan birçok madde içerir. Bu oluşum sürecine kömürleşme denir.

Kömür kömürleşme derecesi ile kimyasal kompozisyonu değişen organik sedimanter bir kayaçtır. Karbon içeriğine bağlı olarak turbadan antrasite kadar geniş bir yelpazede değişim göstermektedir (Laskowski, 2001). Kömür heterojen bir yapıya sahiptir. En basit ifadeyle kömür organik madde (maseral) ve inorganik maddelerin (mineral) bir karışımıdır. Organik maddeler, kömürleşme derecesi olarak tanımlanan biyokimyasal ve metamorfik değişimlere uğramış bitkilerin birleşmesi yoluyla meydana gelmektedir. Kömürün kömürleşme derecesine (rank) bağlı olarak, organik kısmın kompozisyonu ve kömür özellikleri değişmektedir. Kömürdeki maseraller üç gruba ayrılır. Bunlar vitrinit, eksinit ve inertittir. Bu maserallerin elementer kompozisyonu, nem içeriği, sertliği, yoğunluğu ve petrografik özellikleri farklı olup bu özellikler kömürleşme derecesine bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı bu maserallerin yüzey ve flotasyon özellikleri de önemli bir biçimde farklılık göstermektedir (Laskowski, 2001; Ateşok, 2004).

Kömürlerin fiziksel özelliklerine kabaca bakılırsa; Yoğunlukları, içerdikleri inorganik madde ve nem oranına bakarak artmasına rağmen 1.1 ile 2.2 gr/cm³ arasında değişmektedir. Poroziteleri, kömürleşme derecelerine bağlı olarak %3 (antrasit) ile %25 arasında değişmektedir. Sertlikleri (Vickers), 30 (linyit)-120 (antrasit) kg/mm² arasında değişmektedir.

Kömürle birlikte bulunan en yaygın mineral maddeler; kil mineralleri, karbonatlar (dolomit, siderit, kalsit gibi), oksitler (kuvars gibi) ve sülfürlerdir (pirit gibi) (Ateşok, 2004; Laskowski, 2006). Kömürün zenginleşme kalitesini gösteren en yaygın kriter ilgili ürünün içeriğidir. Zenginleştirme esnasında düşük küllü partiküller ile

yüksek kül içeren partiküller birbirinden ayrılır. Kömürdeki mineral maddeler, kömür bünyesinde bulunan mineral madde ve harici mineral maddeler olmak üzere ikiye ayrılır. Başka bir ifadeyle fiziksel zenginleştirme yöntemleri ile ayrılanlar ve ayrılamayanlar şeklinde de söylenebilir. Ayrıca kükürt de kömürün kullanımını etkileyen en önemli bileşenlerden biridir (Laskowski, 2001, 2006).

Kömürler çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Genel olarak kömürleri üç gruba ayırabiliriz: Antrasit, taşkömürü ve linyit. Antrasit en değerli kömür türüdür %95'i karbondan oluşur. En sert kömür türü olup yandığında diğerlerinden daha fazla ısı verir. Taşkömürünün %70'i, linyitin %50'sinden daha az bir kısmı karbondur.

Kömürleşme derecesine göre yapılan A.S.T.M. sınıflandırma sistemi, yüksek kömürleşme derecesine uğramış kömürlerde kuru ve külsüz esasa göre sabit karbon ve uçucu madde yüzdeleri; düşük kömürleşme derecesine uğramış kömürlerde alt kalorifik değer, koklaşma ve havanın etkisiyle bozulma özellikleri göz önünde tutularak ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde en çok kullanılan bu sistem Çizelge 1'de verilmiştir. Bu sınıflama, kömürün sabit karbon içeriğini ve ısıl değerini esas almaktadır. Ayrıca, kömürlerin kekleşme özelliğinden de yararlanılmaktadır. Çizelge 1'den görüldüğü gibi, bu sınıflamada kömürler; antrasit, bitümlü kömür, alt bitümlü kömür ve linyit olmak üzere dört sınıfa ve bunlarda alt sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflamada, alt bitümlü kömür-bitümlü kömür ayırımı, kömürlerin kekleşme özelliklerinden yararlanılarak yapılmaktadır. Kekleşme göstermeyen alt bitümlü kömür sınıfında; kekleşme gösterenler bitümlü kömür sınıfında yer almaktadır. Özellikle ticari kömür sınıflamalarında ana sınıf olarak sözü edilen linyit, yarı bitümlü, bitümlü ve antrasit kömürlerinin standart özellikleri aşağıda verilmiştir (Ateşok, 2004):

Linyit Kömürleri: Kahverengi renk, düşük ısıl değer (3000-4610 Kcal/kg), masif görünüm, odunsu ve uniform, uçucu madde miktarı sabit karbondan yüksek, yüksek nem içeriği (%20-40).

Yarı Bitümlü Kömürler: %40 civarı uçucu madde, mat siyah renk, yüksek ısıl değer (4610-6390 Kcal/kg), su kaybında ufalanma, düşük nem.

Bitümlü Kömürler: Koyu siyah renk, bloksu kırılma, normal uçucu madde miktarı, sabit karbon miktarı (%65-85), yüksek ısıl değer (6390-8535 Kcal/kg), sarı renkli bir duman ile yanar.

Yarı Antrasit Kömürler: Uçucu madde (8-14), sabit karbon (%80-85), az dumanlı yanma, antrasitten düşük sertlik.

Antrasit Kömürler: Parlak siyah renk, yüksek yoğunluk, sert ve dayanıklı yapı, düşük kül içeriği, düşük uçucu madde (%8'den küçük), yüksek karbon miktarı, yavaş tutuşma, hafif alevli ve dumanlı yanma.

Çizelge 1. Kömürlerin A.S.T.M. Sınıflandırması (A.S.T.M., 1991; Şimşek, 2007)

Ana Sınıflar	Alt Sınıflar	Külsüz Baza Göre Sabit C %	Külsüz Baza Göre Uçucu Madde %	Nemli Baza Göre Alt Kalorifik Değer Kcal/kg	Özellikler
I Antrasit	1. Meta Antrasit	98	2		Koklaşmaz
	2. Antrasit	92	8		Hava etkisi ile bozulmaz
	3. Semi Antrasit	89	14		
II Taşkömür (Bitümlü Kömür)	1. Düşük Uçucu K.	78	22		Koklaşır
	2. Orta Uçucu K.	69	31		
	3. Yüksek Uçucu K.A			7800	
	4. Yüksek Uçucu K.B	69	31	7200-7800	Hava etkisi ile bozulmaz
	5. Yüksek Uçucu K.C			6000-7200	
III Yarı Taşkömür (Yarı Bitümlü)	1. Yarı Taşkömür A			6000-7200	Koklaşmaz
	2. Yarı Taşkömür B			5200-6000	Hava etkisi ile bozulur
	3. Yarı Taşkömür			4600-5200	
IV Linyit	1. Linyit A			4600	Sağlam yapı
	2. Linyit B			4600	Gevşek yapı (koklaşmaz)

Taşkömürü, en eski kömür çeşididir. 300 milyon yıl öncesinde yeryüzündeki alt oluşlar sırasında ormanların sular altında kalması, kil, çamur ve kum katmanları arasında sıkışıp kalmasıyla oluşmuştur. Bu oluşum sırasında katmalar arasında havasız kalan ağaçlar bakterilerin etkisiyle ayrılmış ve büyük bir bölümü kömürleşmiştir. Tortul kayaların arasında kalan kömür kaya gibi sertleşmiştir. Taşkömürü katmanlarının kalınlığı bir ya da birkaç metreyi bulur. Taşkömürü ne kadar eskiye dayanırsa, o derece kömürleşmiş olur. Taşkömürünün ilk oluşum aşaması olan antrasit, ısıtma gücü yüksek kömürdür (Şengüler, 2007).

Kömürler yaygın biçimde yakıt olarak, kok üretimi amacı ile veya farklı ürünler elde etmek için kaynak materyal olarak kullanılmaktadır. Günümüzde kömürden faydalanma yoğun olarak elektrik üretimi ve kok yapımı ile ilgilidir. Enerji üretmek amacı ile kullanılan kömürlerin zenginleştirilmesinin esas amaçları kömürün ısı değerini arttırmak ve kömürün çevreye olan etkisini azaltmaktır. Kok üretmek amacıyla, kullanılacak kömürleri zenginleştirmenin amacı ise belli oranlarda maseral karışımları içeren kömür üretmektir (Laskowski, 2001; Laskowski, 2006).

Günümüzde dünya kömür rezervlerinin petrol ve doğal gaza göre çok daha yeterli olduğu açık olan bir gerçektir. 2006 yılı sonu itibariyle dünya toplam kanıtlanmış kömür rezervi 909 milyar ton olup, bu miktarın 479 milyar tonu antrasit ve bitümlü kömür, 430 milyar tonu ise alt bitümlü ve linyit kömürüdür (Tamzok, 2007).

9.300 milyon ton linyit ve 1.327 milyon ton taşkörü rezervinin (DPT, 2007) bulunduğu Türkiye’de üç ana firma kömür sektöründe faaliyet göstermektedir. Bunlar kamu kuruluşları olan Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK), Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) ve Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ)’dir.

Kömür dünya üzerinde yaygın bulunması, üretilmesi, taşıma kolaylığı, fiyat istikrarı, depolama imkânlarının rahatlığı, kullanımının kolaylığı yönünden emniyetli ve kolay olması, kullanıcıya arzının diğer yakıtlara göre ucuz ve sürekli oluşu gibi özellikleri içermesi nedeniyle, vazgeçilmez bir enerji kaynağı olma özelliğini taşımaktadır. Ayrıca gelişen temiz kömür teknolojileri ile çevresel etkilerinin en aza indirilmesi ve diğer fosil yakıtlara (petrol ve doğal gaz) göre politik çekişmelerden uzak daha az riskli bölgelerde üretiliyor olması kömürün önemini daha da arttırmaktadır (Dağdelen, 2006).

2.2. Kömür Hazırlama

Kömür; kil, kum ve karbonat mineralleri gibi çeşitli özelliklerde bulunabilen malzemeler içermektedir. Aynı zamanda kömür hazırlama veya kömür yıkama/temizleme olarak da bilinen kömür zenginleştirme, daha temiz bir ürün elde etmek için tüvenan kömürden sözü edilen minerallerin ayrıldığı temizleme işlemidir. Aynı zamanda kömür, müşteri talepleri doğrultusunda boyutlandırılır. Kömür yıkama sülfür ve mineral miktarını düşürmek suretiyle kömürün kalorifik değerini ve dolayısıyla kalitesini artırır.

Üst boyutu 150-200 µm olan üretilmiş kömür tüm boyutlarda malzeme içerir. İri boyutlu kömürün daha pahalı olduğu dikkate alınarak, kömür hazırlamada gereksiz boyut küçültmelerden kaçınılmalıdır.

Kömür genellikle yıkama tesisine girmeden önce 100-150 mm’lik bir elekte elenir. Elek üstü malzeme yapısına göre elle ayıklanır veya 100-150 mm altına kırılıp, elek altı ile yıkama tesisine verilir. Tesislerde en yaygın yöntemler iri kömür için (~+10 mm) jig, ağır ortam ayırıcılar; ince kömür için (~0.5-10 mm arası) jigler, ağır ortam ayırıcılar, sarsıntılı masalar; çok ince (toz) boyut (-0.5 mm) içinse flotasyondur.

Son zamanlarda özellikle Avrupa’da küçük kapasiteli tesisler yerine az sayıda büyük kapasiteli tesisler kurulması ağırlıktadır. Yıkınması zor olan çok miktarda yakın yoğunluktaki malzeme içeren kömürlerde ise, ağır ortam ayırıcıları klasik gravite yöntemlerine göre daha verimli sonuçlar vermektedir.

Ağır ortam ayırıcılarda en çok kullanılan ortamlar manyetit ve ferrosilikondur. Manyetit ferrosilikona göre daha ucuz olup, genellikle 10-100 µm boyutunda kullanılır. Kullanılanlar ağır ortamın oranı arttıkça pülpün viskozitesi artmakta, bu da ayırımı olumsuz etkilemektedir. Ayrıca kil ve şlam boyutlu malzemede viskoziteyi arttırdığından, bunların oranları iyi kontrol edilmelidir. İri kömürler için statik (yerçekimi etkin) ayırıcılar, ince kömürler içinse genellikle dinamik (santrifüj kuvveti etkin) ayırıcılar tercih edilmektedir.

Ağır ortam ayırıcılarda yüzen kısım (lave) taşıma yoluyla batan kısım (şist) ise dipten alınarak önce süzme, daha sonrada yıkama eleklerine gönderilir. Elek altı malzemede kirlenmiş ve seyrelmiş ağır ortamdır. Bu ortam temizleme ve ayarlama ünitesinde kazanılıp yoğunluğu ayarlandıktan sonra yeniden ayırıcılara gönderilir.

Ağır ortam ayırımında çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar; tek bir seperatörde ayırım, farklı özgül ağırlıktaki bir seri seperatörde ayırım ve Cyanamid yoğunluk farkı olan tek bir seperatörde ayırımdır

Statik ağır ortam ayırıcılara örnek olarak ağır ortam teknesi, ağır ortam tamburu, Drewboy ayırıcı, Norwalt yıkayıcı verilebilir. Bu tür ayırıcılar iri kömürde kullanıldığından işletme maliyetleri daha düşüktür. 300 mm’ye kadar malzemenin yıkınabildiği bu tür ayırıcılarda kapasite 600 ton/saat’e kadar ulaşabilmektedir.

Genellikle ince kömürlerde kullanılan dinamik tür ağır ortam ayırıcılar az da olsa iri boyutta kullanılmaktadır. Tanelerin üzerine uygulanan santrifüj kuvvetinin etkisiyle verim ve ayırma hassasiyeti artmaktadır. Ağır ortam siklonları, Varsly seperatör, Dyna-Whirpool seperatör, Tri-Flo seperatör siklonik (dinamik) ağır ortam ayırıcılara örneklerdir. 0.1 mm’den 50 mm’ye kadar olan boyutlarda kullanılabilen bu ayırıcılarda kapasite yaklaşık 200 ton/saat’e kadar ulaşılabilir.

Eğik olarak çalışan ağır ortam siklonlarında yapısı ve çalışma prensibi hidrosiklonlara benzer. Bu ayırıcıda taneler üzerine etkiyen santrifüj kuvveti yerçekimi kuvvetinin 20-200 mislidir.

Jigin günümüzde kömür yıkama tesislerindeki yeri %50 civarındadır. Genellikle iri kömürlerde kullanılan jigler son zamanlardaki gelişmelerle ince boyutta da

kullanılmaktadır. Kömürde kullanılan jiglerin en önemlisi hava pülsasyonu ile çalışan Baum jigleridir. Bu jiglerde kısa aralıklarla verilen basınçlı hava, jig içindeki suyu hareketlendirerek basma etkisi doğurur. Baum jiginde emme etkisi bulunmamaktadır. Baum jiginden sonra daha büyük kapasiteli Batac jigleri geliştirilmiştir. Pülsasyon prensibi Baum jiglerle aynı olan bu jiglerde havanın jig içinde dağılımı daha homojendir. Batac jigi –40 mm kömürü saatte 540 ton kapasiteyle yıkayabilmektedir. Baum ve Batac jiglerinin dışında Jeffrey jigi, Norton jigi, Kelsey jigi gibi jigler de kömür yıkamada kullanılmaktadır. Elek eğimi ayarlanabilen Jeffrey jigi 200 mm'ye kadar kömürü 700 tph kapasiteyle yıkayabilmektedir.

Sarsıntılı masalar özellikle ince boyutlu kömürün yıkanmasında oldukça yaygın olarak kullanılırlar. 12 mm'nin altındaki kömürün temizlendiği masaların 2-3 katlı olanına Concenco adı verilir. Kapasiteleri 10-12 ton/saat olan bu masalarda, yakın yoğunluktaki malzeme oranı yükseldikçe ayırma verimi de düşebilmektedir.

Reichart Spirali 0.1-3 mm boyutlu kömürde kullanılmakta olup, bu spiraller düşük fiyatları ve yüksek performansları nedeniyle gitgide artan bir şekilde kullanılmaktadır. Belli başlı avantajları, pompa dışında hareketli aksamının olmaması, yatırım ve işletme maliyetinin düşüklüğü ve az yer kaplamalarıdır. Bir spiralin kapasitesi 2-3 tph civarında olup, bu kapasite birçok spirali beraberce çalıştırarak arttırabilmektedir.

0.5 mm'nin altındaki kömürün zenginleştirilmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biri flotasyondur. Birçok kömür türü özellikle antrasit ve taşkömürü doğal hidrofob özellik gösterdiğinden hiç toplayıcı kullanmadan bile yüzebilmektedir. Ancak linyitlerde bu özellik az olduğundan nötr hidrokarbonlar, kerosen tipi yağlar ve fueloil toplayıcı olarak kullanılırlar.

Kömür flotasyonunda gangın bastırılması ve şlamın olumsuz etkilerinin giderilmesi için bazı reaktifler kullanılabilir. Piriti bastırmak için kireç, kil minerallerini bastırmak içinse Na-silikat önemli kontrol reaktifleridir. Ayrıca genellikle çok ince boyuttaki kil minerallerinin kömür tanelerinin yüzeyini kaplamasını engellemek içinse kalgon ve Na-karbonat gibi reaktifler önerilmektedir.

Kömürün selektif flotasyonunda kullanılabilen bir başka alternatif ise, piritin ksantat gibi reaktiflerle yüzdürülüp, kömürün tanin, nişasta gibi organik reaktiflerle bastırılmasıdır (Ters flotasyon).

Kömür flotasyonunda karşılaşılabilen en önemli sorunlarda oksidasyon ve kil kaplamasıdır. Bir süre açıkta kalan kömür, oksitlenerek yüzeyinde OH^- ve COOH^- gibi gruplar oluşur. Polar özellik gösteren bu gruplar, kömürün yüzebilirliğini azaltırlar.

Kömür flotasyonu genellikle %15 gibi düşük katı oranlarında yapılır. Yapılan birçok çalışmada katı oranı azaldıkça, lave kalitesinin arttığı, buna karşılık yanabilir verimin düştüğü görülmüştür. Kömür flotasyonunda -0.5 mm malzeme kullanılabilir. Ancak özellikle $100 \mu\text{m}$ altındaki tanelerin flotasyonu çok verimli olmamaktadır. Bunun en önemli nedeni, ince gangın da suyla sürüklenme yoluyla köpükle kazanılması ve temiz kömür kalitesini düşürmesidir. Endüstriyel uygulamaların çoğunda kömür flotasyonunun nötr pH'da (pH 7) optimum olduğu bilinmektedir.

Son zamanlarda yeni flotasyon sistemleri geliştirilmektedir. Bunların başlıcaları; kolon flotasyonu, dolgulu kolon flotasyonu, mikrosel kolon flotasyonu, jet flotasyonu, taşıyıcılı flotasyon ve biyoflotasyondur.

Kolon flotasyonunun mekanik flotasyondan en önemli farkı, karıştırmanın olmaması ve hücre şeklinin farklılığıdır. Flotasyon için gerekli kabarcık üretimi özel bir sistemle sağlanır, ayrıca köpük üstten verilen bir yıkama suyuyla yıkanır. Kolonların yüksekli 9-15 metre, uzunluğu 0.5-2 metre aralığındadır. Dalgulu kolon flotasyonunda kolonun içinde gözenekli bir dolgu maddesi vardır. Alttan verilen hava bu gözenekli dolgu içinden geçerken hem daha küçük kabarcıklar oluşmakta hem de yukarıdan aşağıya doğru inen tanelerle daha iyi temas şansı bulmaktadır. Jet flotasyonunda pülp daha yüksek basınçla dar bir kesitten geçirilerek enerji ile yüklenmekte, bu enerji pülpün karıştırılmasında kullanılmaktadır. Bu sistemle, flotasyon süresi çok kısaldığından kapasite artmaktadır. 0.8 m^3 'lük bir jet flotasyon hücresiyle, saatte 7 ton kömür zenginleştirilebilmektedir.

Taşıyıcılı flotasyon yöntemi, kuvvetli hidrofobik iri tanelerin, daha az hidrofobik olan ince taneleri taşınması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemle, flotasyon özelliği zayıf olan ince linyit tanelerinin, flotasyon özelliği daha kuvvetli olan, iri taşkömürlerine yapışıp yüzdürülmesi sağlanabilir.

Biyoflotasyon yönteminde ise yüksek oranda pirit içeren kömürler, flotasyon öncesi bakterilerle şartlandırılarak, piritin yüzebilirliğini azaltılmaktadır. Bu amaçla Thiobacillus ferrooxidans bakteriler ve bazı mayalar kullanılmaktadır.

Yağ aglomerasyonu çok ince kömürün ($\sim 50 \mu\text{m}$) zenginleştirilmesinde kullanılacak bir yöntem olup endüstriyel uygulaması sınırlıdır. Bir yağ emülsiyonu

içine çok ince kömür tanecikleri atıldığında kömür yağ zerrecikleri etrafında toplanarak aglomere olmakta ve disperse durumdaki gangdan eleme yoluyla ayrılmaktadır. Yağ aglomerasyonunda en çok kullanılan yağlar; pentani heptan, gazyağı ve fueloil gibi yağlardır. Bu yağların emülsüyon durumuna getirilmesi için yüksek devirli karıştırıcılar kullanılır. Fazla yağ tüketimi ve kullanılan yağın geri kazanılmaması yöntemin en büyük dezavantajıdır.

2.3. Kömür Flotasyonu

Ülkemizdeki mevcut kömür rezervlerinin büyük bir kısmı yüksek kül ve kükürt içeriklidir. Günümüzde çevre kısıtlamalarından dolayı, kömür içindeki kükürdün ve külün belirli seviyelerin altında olması istenmektedir. Bu nedenlerle kömür kullanılmadan önce belirli yöntemlerle yıkanarak, belirli safsızlıkları büyük ölçüde giderilerek piyasaya sunulmaktadır. Kömür hazırlama günümüzde kömürün madenciliği ile kullanımı arasında vazgeçilmez bir işlem olarak görülmekte ve uygulanmaktadır.

Flotasyon yöntemi toz kömürlerin ($\sim 0.5\text{mm}$) zenginleştirilmesinde oldukça fazla kullanılan yöntemlerden birisidir. Ülkemizde uygulaması sınırlı olmakla birlikte Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya, Çin, Hindistan ve Rusya gibi ülkelerde önemli uygulamaları mevcuttur. Kömür flotasyonunun endüstriyel boyutta istenen seviyelerde kullanılmamasının bazı nedenleri toz kömür fiyatlarının düşük olması, düşük kömürleşme derecesine sahip ve oksitlenmiş kömürlerin flotasyonundaki zorluklar, ince taneli kömürlerin taşıma ve depolama problemleri ve araştırma geliştirme çalışmalarının yetersizliğidir. Bazı kömür türleri doğal hidrofob özellik göstermekte ancak düşük dereceli ve oksitlenmiş kömürlerde hidrofobluk yeterli olmadığından toplayıcı olarak genellikle hidrokarbon yağları kullanılmaktadır (Bentli, 2000; Kemal ve Arslan, 2005). Türkiye’de ise Zonguldak taşkömürlerini yıkayan lavvarlarda -0.5 mm kömürün zenginleştirilmesinde flotasyon üniteleri uygulanmakta idi. Ancak Zonguldak merkez ve Çatalağzı lavvarlarında bu üniteler 1990’lardan itibaren devre dışı bırakılmıştır (Özbayoğlu ve Bilgen, 1997).

Flotasyon işlemi kömürdeki inorganik malzemeyi uzaklaştırarak düşük kül ve kükürt içerikli bir ürün elde etmek amacının yanında, lavvardan atılan ve siyah su denilen proses suyunu temizleyerek çevre kirliliğini azaltmak ve kömür içindeki çeşitli maseralleri ayırarak koklaşabilir bir ürün üretmek amacıyla da kullanılabilir.

Değişik kömür cinsleri farklı flotasyon özelliği göstermektedir. Koklaşma özelliği olan orta uçuculu kömürler genellikle en iyi flotasyon özelliğine sahiptir. Antrasitler uçucu miktarı fazla olan taşkömürlerine göre flotasyon ile daha zor zenginleştirilirken, linyitler en zor zenginleştirilebilen kömür türüdür.

Kömür flotasyonunu etkileyen önemli bir faktör ise oksitlenme derecesidir. Genellikle havada kalmış ve yüzeyi okside olmuş kömürlerin flotasyonu düşük verimlerle olmakta ve bu tür kömürlere ters flotasyon yöntemi önerilebilmektedir. İnce kömürlerin yüzebilirliği ise genellikle daha problemlidir. Bu taneler suyla sürüklenme, şlam kaplama ve tuzaklanma gibi mekanizmalarla köpüğe taşınarak lavenin kalitesini düşürmektedir. Çok ince boyut dağılımında gerçek flotasyonla yüzen kömür verimi ise daha iri boyutlara göre daha düşüktür. Ayrıca tane boyutu azaldıkça artan yüzey alanı daha fazla reaktif tüketimine ve reaktiflerin seçimli olmayan adsorbsiyonlarına neden olmaktadır. Ayrıca büyük yüzey alanları nedeniyle bu tanelerin çözünürlüğü, hidrasyonu ve oksidasyonu artmaktadır (Tefek, 1984).

Kömürün doğal yüzebilirliği temas açısıyla belirtilir. Saf su içerisinde çeşitli kömür yüzeylerinde 20°-65° arasında değişen temas açıları ölçülürken düşük dereceli kömürlerde bu açı 0°'ye kadar düşmektedir. Temas açısı ölçümleri sonucunda, kömür litotipleri arasında yüzebilirliğin fusein, durain, vitrain doğrultusunda arttığı bulunmuştur (Ateşok, 2004).

Kömür saf su içinde negatif elektro kinetik potansiyel gösterir. Kömür heterojen bir madde olup yüzeyi anizotropik özellik gösterir. Bu anizotropik yüzeyler iki kısımdan oluşmakta olup birincisi, Van der vals bağlarının kırılmasıyla ortaya çıkan ve hidrofik özellik gösteren yüzeyler, diğeri ise iyonik veya kovalent bağların kırılmasıyla ortaya çıkan ve hidrofilik özellik gösteren yüzeylerdir. Birçok kömürde ölçülen sıfır yük noktası genellikle pH 2.5-5 arasında değişmekte olup potansiyel tayin eden iyonlar H⁺ ve OH⁻ iyonlarıdır. Yapılan çalışmaların bir çoğunda kömürün nötr pH'da (pH=7 civarında) en iyi yüzebilirlik özelliği gösterdiği bilinmektedir.

Kömür flotasyonunda nötr hidrokarbonlar, kerosen tipi yağlar ve fueloil en çok kullanılan toplayıcı reaktiflerdir. Taşkömürlerinin flotasyonunda 300-1500 gr/ton mertebesinde kullanılan bu yağların linyitlerde daha yüksek miktarda kullanılması gerekebilir. Kömür geniş bir pH aralığında negatif yüklü olduğundan, aminler gibi katyonik kolektörlerle de yüzdürülebilir. Genellikle havada kalmış ve okside olmuş kömürlere amin flotasyonu önerilmektedir. Flotasyonda en çok kullanılan köpürtücü

reaktifler ise kısa zincirli alkoller, çamyacı ve glikol türü reaktiflerdir. Köpürtücü türü ve miktarı köpük hacmi ve boyutunu kontrol ettiğinden verim ve seçimlilik açısından oldukça önemlidir (Atak ve Önal, 1991). Kömür flotasyonunda kullanılan tipik reaktifler Çizelge 2’de verilmektedir.

Çizelge 2. Kömür flotasyon reaktifleri (Laskowski, 2001)

Tipi	Flotasyonda Kullanım Amacı	Fonksiyonel Grup	Örnekler	Etkisi
Polar olmayan (suda çözünmez)	Kollektörler	-	Gazyağı, fueloil	Seçimli ıslatma ve yağ damlacıklarının kömür taneciklerine tutunması
Yüzey aktif (suda çözünür)	Köpürtücüler	Hidroksil, azotlu	Alifatik alkoller, piridin içeren katran yağları	Toplayıcı özelliği olabilir, aynı zamanda yağ tipi kollektörlerin emülsiyonunu iyileştirir
Emülsiyon oluşturucular (yağlı kollektörde çözünür)	İyileştiriciler	Hidroksil, karboksil, azotlu	Polietioksalat alkoller, yağ asitleri	Kollektörün emülsiyonunu ve kömür yüzeyinde kollektörün yayılmasını iyileştirir
İnorganik (suda çözünür tuzlar)	Düzenleyiciler	-	NaCl, CaCl ₂ , Na ₂ SO ₄ , CaO, H ₂ SO ₄	İyileştiriciler, pH düzenleyiciler, kükürt bastırıcılar
Kaplayıcı kolloidler	Bastırıcılar	Hidroksil, karboksil	Polimerler: nişasta, dekstrin, karboksilmetil selüloz ve diğ.	Flotasyonda düzenleyici ve kömür bastırıcı

Kömür flotasyonunda kül oluşturan minerallerin veya organik kısmın bastırılması gerekebilir. Kömürün bastırıldığı inorganik minerallerin yüzdürüldüğü flotasyona ters flotasyon denir. Organik kısmı bastırmak için tanin, nişasta, dekstrin, gibi organik ve yüzeyi oksitleyerek hidrofobluğu bozacak çeşitli inorganik oksitleyiciler kullanılır. Düz flotasyonda ise inorganik malzemeyi bastırmak için sodyum silikat, demir sülfat, kireç gibi reaktifler kullanılabilir.

Kömür flotasyonu endüstriyel ölçekte %10-30 katı oranında yapılmaktadır. Ancak pülp yoğunluğunun kömürün düşük özgül ağırlığı nedeniyle mümkün olduğunca düşük tutulmasında (%10-15) yarar vardır. Düşük yoğunlukta yanabilir verim genellikle biraz daha düşük olurken temiz ürün külü daha düşük olmaktadır. Katı oranı sadece verim ve seçimliliği değil flotasyon hızı ve köpükte kazanılan su ve gang miktarını da etkilemektedir. Flotasyonda hidrokarbon yağları kullanıldığında kondisyonlama önemlidir. Hem yağ damlacıklarının pülpde dağılması hem de kömür-yağ temasının sağlanması için genellikle uzun ve şiddetli bir kondisyonlama yararlı olmaktadır.

Kömür flotasyonu genellikle 0.5 mm malzemeye başarıyla uygulanırken bazı hallerde üst boyut 1 mm'ye kadar çıkabilmektedir. Ancak 0.5-1 mm arası malzemenin verimi nispeten düşük olabilmektedir. Flotasyonda yaklaşık 0.1 mm altındaki çok ince boyutlu malzeme genellikle problemler yaratabilmektedir. Bu tanelerin flotasyon hızı verimi ve hızı daha düşük olup suyla taşınma suretiyle temiz ürüne karışarak selektiviteyi olumsuz etkilemektedir. Ayrıca çok ince boyuttaki kil mineralleri kömür yüzeylerine kaplanarak verimi düşürmektedir (Sönmez vd., 2005).

Son zamanlarda flotasyon makinalarında önemli gelişmeler sağlanmıştır. Özellikle ince boyutlu malzemenin zenginleştirilmesinde daha uygun olan bu sistemler yüksek verimlerle klasik flotasyona göre daha temiz ürünler vermektedir. Bunlardan birisi olan flotasyon kolonlarını mekanik makinalardan ayıran en önemli özellik hücre şeklinin yanı sıra mekanik karıştırmanın olmamasıdır. Flotasyon için gerekli olan kabarcık üretimi özel bir sistemle sağlanmakta, ayrıca flotasyon köpüğü yıkama suyu ile yıkanmaktadır. Endüstride kullanılan kolonlar 9-15 metre yüksekliğinde 0.5-3 metre çapındadır. Dolgulu kolon flotasyon yönteminde ise alttan verilen hava gözenekli dolgu içinden geçerken hem daha küçük kabarcıklar oluşmakta hem de yukarıdan aşağıya doğru inen tanelerle daha iyi temas şansı bulmaktadır. Jet flotasyonu 1985 yılında geliştirilmiş, 20 µm'nin altında bile etkili ayırma yapabilmektedir. 1990'lı yıllarda Avustralya'da sisteme yıkama suyu ilave edilerek "Jameson Cell" adı altında tesislerde kullanılmaya başlanmıştır. Jet flotasyonunda herhangi bir karıştırma olmadan pülp yüksek basınçta dar bir kesitten hava ile birlikte geçirilerek enerji ile yüklenmekte ve bu enerji pülpün karıştırılmasında kullanılmaktadır. Diğer sistemlere oranla daha fazla ve küçük çaplı kabarcık üretimi mümkündür. Bu nedenle flotasyon süresi çok kısalmakta ve daha temiz ürün elde edilmektedir. "Micro Cell" kolon flotasyonu sisteminde kolonun alt kısmında bulunan bir düzenele kolondan pülp alınmakta ve bu pülpe köpürtücü ile hava verilerek kuvvetli kesme gerilimi uygulayan bir karıştırıcıdan geçirilmektedir. Bu işlem sonucu 0.1-0.6 mm boyutlu mikro kabarcıklar oluşmakta bu kabarcıklar flotasyon hızını, verimi ve kapasiteyi arttırmaktadır (Ateşok, 2004; Güney vd. 1997).

2.4. Kömür Flotasyonu Konusunda Yapılan Bazı Çalışmalar

Abkhoshk vd.'nin (2010) yaptığı bir çalışmada -75, 75-150, 150-300, 300-500 ve 500-850 μm 'lik fraksiyonların farklı sürelerdeki veri hız sabitleri belirlenmiştir. Sonuçlar -75 ve 500-850 μm 'lik fraksiyonlarda yanabilir verimin %70-75 civarında olduğunu diğer fraksiyonlarda ise %90 civarına yükseldiğini göstermiştir. %96.5 güven seviyesinde yapılan varyans analizinde (ANOVA) tane boyutunu flotasyon hız sabitini etkilediği belirlenmiştir.

Kütahya Ömerler bölgesine ait -500 μm 'lik bir linyit kömürüyle d_{80} 106, 250 ve 355 boyutlarıyla yapılan deneylerde $d_{80}=250$ μm malzeme kullanıldığında sonuçların hem verim hem de seçimlilik açısından $d_{80}=106$ μm 'ye göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Aynı çalışmada %5, %10 ve %20 katı oranlarıyla gerçekleştirilen deneylerde ise optimum sonuçlara %20 katı oranıyla elde edilmiştir (Vapur vd. 2010).

Jena vd.'nin (2008) koklaşabilir bir kömür kullanarak yaptığı araştırmalarda karıştırma hızı 1200-1600 devir/dak.'dan 1600 devir/dak.'ya doğru yükseldikçe yanabilir verimin az da olsa arttığı ancak selektivitenin bozularak temiz kömür külünün yükseldiği belirlenmiştir. Toplayıcı ve köpürtücü miktarlarının artması da aynı etkiyi yaratmıştır. Kolon flatsasyonunda ise mekanik flatsasyona göre aynı yanabilir verimlerle %14 küllü ürün yerine yaklaşık %10 küllü daha temiz bir ürün alınmıştır. %7.5 katı oranında yaklaşık %81 yanabilir verimle %13.8 küllü bir temiz kömür elde edilirken katı oranı %17.5'e yükseldiğinde yanabilir verim %89, ürün külü ise %15.9 olmuştur.

Yüksek kil içeren -0.5 mm bitümlü kömürle yapılan bir çalışmada tane-köpük yapışma (attachment) testleri ince kil tanelerinin kömür tanelerini kabarcığa temasını azalttığını göstermiştir. Dağıtıcı olarak kullanılan sodyum heksametafosfat ve sodyum silikatın önemli etkileri gözlenememiştir. Hidrosiklonla şlam atıldığında ise seçimlilik biraz bozulsa da yaklaşık %95'lik verimler elde edilmiştir (Oats vd. 2010).

Gupta vd.'nin (2009) farklı toplayıcı ve köpürtücülerle gerçekleştirdiği çalışmalarda bunların türü ve konsantrasyonun verim ve külü önemli ölçüde etkilediği, farklı köpürtücü karışımları kullanmanın flotasyon performansını önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir.

38-106, 106-250 ve 250-500 μm boyut fraksiyonlarıyla yapılan bir çalışmada tane boyutu arttıkça daha düşük küllü ürünlerin elde edilebildiği ancak yanabilir verimin de azaldığı gözlenmiştir. Aynı çalışmada yüksek Na^{+1} ve Mg^{+2} konsantrasyonlarında

köpürtücüsüz ve toplayıcısız flotasyonun mümkün olduğu bu şartlarda yapılan flotasyonun hızının çok hızlı gerçekleşerek 1 dakika sonunda yaklaşık %90 yanabilir verime ulaşıldığı gözlenmiştir (Özdemir vd. 2009).

Hacıfazlıoğlu ve Sütçü'nün (2007) Zonguldak bölgesine ait %47.50 küllü –150 µm boyutlu bir örneği kullanarak yaptığı kolon flotasyonu çalışmalarında köpürtücü ve toplayıcı miktarı arttıkça yüzen üründeki külün önemli ölçüde arttığı buna karşılık yanabilir verimin hemen hemen yükselmediği gözlenmiştir. Kolon flotasyonunda mekanik flotasyona göre aynı verimlerde daha düşük küllü ürün alınmıştır.

%34.6 küllü düşük dereceli bir kömürle yapılan araştırmada sadece köpürtücü miktarının değil toplayıcı konsantrasyonunda ince tane ve su kazanımını etkilediği belirtilmektedir. Sabit bir köpürtücü konsantrasyonunda toplayıcı olarak kullanılan yağ miktarı arttıkça suyla taşınım derecesi artmaktadır (Boylu vd. 2007).

Kilin kömürün flotasyon davranışına etkilerinin incelendiği bir araştırmada, kaolin ve illitin hemen hemen hiç olumsuz etkisi gözlenmezken %2 bir bentonit varlığında bile kömürün flotasyonu önemli ölçüde azalmıştır (Arnold ve Aplan, 1986). Kilin köpükle kazanılması ise sadece suyla taşınım değil mekanik tuzaklanma ve şlam kaplanması ile de açıklanmıştır. Ayrıca beslemedeki kil oranının artışı temiz ürünün külünü artırmaktadır.

Vamvuka ve Agritiodis'in (2001) –0.5 mm boyutlu bir linyit örneğiyle yaptığı flotasyon çalışmalarında farklı boyut fraksiyonlarının, reaktiflerin ve katı oranının etkileri araştırılmıştır. Optimum tane boyutu 75-300 µm olarak belirlenmiş, –75 µm'de en düşük küllü ürünler alınmasına rağmen yanabilir verimler daha düşük olmuştur. En iyi sonuçlar %15 katı oranında elde edilmiş, tek başına gazyağı kullanımı yerine gazyağının dodesilaminle kullanımı hem yanabilir verimi artırmış hem de ürünün külünü düşürmüştür.

Bir başka çalışmada flotasyon süresi, flotasyondan önce mekanik aşındırma, kolon flotasyonu kullanımı ve toplayıcı türünün etkileri araştırılmıştır. %48 küllü kömür atıklarının kullanıldığı çalışmada 10 dakikaya kadar flotasyonun devam ettiği, önce uygulanan mekanik aşındırma ise flotasyondan aynı küllü üründe yanabilir verimi artırmıştır. Fueloil-MIBC kombinasyonu ile %22-27 küllü ürünler %6-23 yanabilir verimlerle elde edilirken tek başına fueloil ile fueloil ve petrol sülfonat birlikte kullanıldığında yaklaşık %21 küllü temiz kömür %44 yanabilir verimle elde edilmiştir.

Birçok çalışmanın aksine kolon flotasyonu mekanik flotasyona göre daha düşük verim ve selektivite özelliği göstermiştir (Tao vd. 2002).

Denby vd.'nin (2002) çalışmalarında farklı tane fraksiyonlarının flotasyonunda 500 μm 'nin üzerindeki tanelerde ağırlık verimleri %10-20 gibi düşük seviyelerde kalırken 250 μm 'nin altındaki tanelerde ise bu değer %70-90 seviyelerine yükselmiştir.

%27.57 küllü Yozgat Ayrıdam linyitlerinin kullanıldığı bir çalışmada farklı toplayıcılarla yapılan deneylerde toplayıcı miktarı arttıkça yanabilir verim artmaktadır. Temiz kömürün külü ise önce düşmekte sonra yükselmektedir. Çeşitli reaktiflerle gazyağının emülsiyeye edilmesi ise pülp içinde daha iyi bir dağılımı sağlamıştır. Gazyağına emülsiyeye edici reaktifin yanında iyonik olmayan bir yüzey aktif madde de ilave edildiğinde flotasyon performansı daha iyi olmuştur (Cebeci, 2002).

İnce boyutlu kömürün iri boyutlu tanelere kaplanarak taşınması olarak tanımlanabilecek taşıyıcı flotasyon çalışmasında $-38 \mu\text{m}$ tanelerin 0.1-0.3 mm boyutlu tanelerle taşınarak yüzdürülmüştür. Optimum koşullarda %16.3 küllü bir beslemeden %8.3 küllü bir ürün %81 verimle elde edilmiştir. Bu taşınma taşıyıcı ve taşınan taneler arasındaki elektrostatik çekim kuvvetleriyle açıklanmıştır (Ateşok vd. 2001).

Kömürün yüzebilirliği büyük ölçüde oksitlenme derecesine bağlıdır. Oksitlenme sonucu yüzeyde oluşan metal bileşikler flotasyon verimini büyük ölçüde düşürürler. Yapılan çalışmalarda açık havada bırakılan kömürün kalma süresi uzadıkça ağırlık veriminin ve flotasyon performansının düştüğü ifade edilmiştir (Somasundaran vd, 2000; Fuerstenau vd. 1994).

-0.5mm ve 2 mm boyutlu, %23.62 kül içeren bir kömürün flotasyonun incelendiği bir çalışmada (Xiu-xiang vd, 2009) en iyi sonuçlar 74-500 μm boyutlu tanelerle elde edilirken $-74 \mu\text{m}$ 'lik taneler kullanıldığında seçimlilik düşmüştür. Kaba konsantrenin yeniden öğütülmesi ve aglomerasyon+flotasyon gibi yöntemlerin denediği çalışmada gazyağı ve köpürtücü miktarının artması, ürünün külünü ve ağırlık verimini artırmıştır. Optimum koşullarda %10-12 küllü ürünler %50-60 ağırlık verimleriyle elde edilmiştir.

Akdemir ve Sönmez'in (2000) Zonguldak bölgesine ait iki farklı taşkömürü örneğiyle yaptıkları araştırmalarda tane boyutu, karıştırma hızı, katı oranı, köpürtücü miktarı, kondisyonlama hızı ve süresi gibi parametrelerin flotasyona etkileri incelenmiştir. Tane boyutu kontrolü, ayırımdaki en önemli parametredir. Optimum

sonuçlar –500 µm malzeme kullanıldığında alınırken boyut küçüldükçe yanabilir verim artmasına karşılık ürünün külü de önemli ölçülerde artmıştır. Üst boyut 500 µm iken kül ve yanabilir verim değerleri yaklaşık %21 ve %85 olarak hesaplanmış, malzeme –106 µm’ye öğütüldüğünde bu değerler yaklaşık %35 ve %97 olmuştur. Bu durumun büyük ölçüde ağırlıklı olarak kaolinit ve illitten oluşan kül minerallerinin suyla taşınımından kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Karıştırma hızının da flotasyon performansını etkilediği belirlenen çalışmada, düşük hızlarda daha temiz bir ürün alınırken, hız arttıkça verim artmakta ancak selektivite bozulmaktadır. Çalışılan iki farklı örnekte optimum katı oranları %15 ve %10 olarak belirlenmiştir. %20 katı oranında ise ürün külü önemli ölçüde yükselmiştir. Farklı MIBC konsantrasyonlarında yapılan çalışmalarda ise yanabilir verim ve ürün külleri önemli ölçüde değişmiştir. Ayrıca bu miktar köpükteki su ve kül kazanımı üzerinde de önemli rol oynamıştır. Flotasyon öncesi kondisyonlamanın yüksek hızlarda yapılması daha düşük küllü bir ürün sağlarken verim üzerinde çok etkili olmamıştır.

Akdemir vd.’nin (1996) Zonguldak bölgesinden alınan ve %5.88 kül içerecek şekilde hazırlanan bir örnekle yaptıkları çalışmalarda, farklı tane fraksiyonlarının flotasyon verimi ve kinetiği incelenmiş, kolon flotasyonu ve konvansiyonel flotasyonun kinetik üzerindeki etkileri kıyaslanmış, ayrıca gazyağı ilavesinin flotasyon hızını nasıl değiştirdiği araştırılmıştır. Tane boyutu incelidikçe hız sabitinin artması ince boyutlarda flotasyonun daha hızlı olduğunu göstermektedir. 250 µm’den ince fraksiyonlarda %95’in üzerinde olan verim 250-355 µm fraksiyon için %71’e düşerken 355-500 µm fraksiyon için sadece %10 civarında olmuştur. Verimi düşük olan 250 µm’nin üzerindeki fraksiyonlarda gazyağı ilavesi verimlerde kısmi artışlar sağlamıştır. Gazyağı ilavesi sadece verimi değil flotasyon hız sabitini de artırmıştır. Kolon flotasyonu mekanik flotasyona göre hem daha yüksek verim hem de daha büyük bir hız sabiti sağlamıştır. Farklı pH’larda yapılan deneysel çalışmalarda ise pH 3-9 aralığında %85-90 verim elde edilirken pH 11 de verim önemli ölçüde düşmüş optimum sonuçlar ise nötr pH da (pH=7.8) alınmıştır.

Soma Eskieltek ve Zonguldak bölgelerinden 3 farklı kömürle yapılan bir araştırmada bitkisel kökenli yağların klasik yağlara alternatif olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Toplayıcı miktarının, pH’ın, flotasyon süresinin, katı oranının karıştırma hızının ve köpürtücü miktarının yanabilir verim ve kül atımı üzerindeki etkilerinin de incelendiği çalışmada Zonguldak ve Eskieltek kömürlerinde bitkisel yağların klasik

yağlarla yaklaşık aynı oranda başarılı olduğu bulunmuştur. Soma kömür kullanıldığında ise sadece pamukyağı ile klasik yağlara benzer performans elde edilmiştir. Zonguldak kömürüne toplayıcı olarak gazyağı ilave edilerek yapılan deneylerde flotasyonun çok hızlı olduğu, birkaç dakika içinde yaklaşık %95 yanabilir verim elde edildiği belirlenmiştir. %2.5-20 katı oranlarında yapılan deneylerde optimum katı oranı %10 olarak bulunmuştur. 850 devir/dak. gibi düşük bir karıştırma hızında ürün külü ve yanabilir verim sırasıyla %8.32 ve %86.04 iken hız 1500 devir/dak.'ya çıkarıldığında yanabilir verim %96'ya yükselmekte, ancak ürünün külü de %10.20'ye ulaşmaktadır. Köpürtücü olarak kullanılan çam yağı miktarını artışıyla ise yanabilir verim ve ürün külünün yükseldiği belirlenmiştir. Bitkisel yağlarla birçok faktör için yaklaşık benzer davranışlar görülmüştür (Şimşek, 2007).

Zonguldak bölgesinde %37.20 kül içeren bir bitümlü kömürle yapılan bir araştırmada pülp yoğunluğu ve özellikle karıştırma hızının flotasyon performansın ve hızı üzerindeki rolleri incelenmiştir. Flotasyon hız sabitinin belirlenmesinde klasik birinci derece model yerine *rigtangular distribution* modelini kullanıldığı çalışmada %90 yanabilir verim seviyesinde 1500 devir/dak. hızda yaklaşık %20 olan temiz kömür külü 900 devir/dak.da %18-18.5'e düşürülmüştür. Düşük karıştırma hızında daha yüksek gazyağı konsantrasyonuyla yüksek hızlara göre daha temiz bir ürünün elde edilebileceği gösterilmiştir. Optimum sonuçlar %5-10 katı oranında alınırken, %20 katı oranında hem yanabilir verim daha düşük hem de ürün külü daha yüksek olmuştur (Sönmez vd., 2005).

Sönmez ve Cebeci'nin (2006) Ukrayna kökenli, %4.02 küllü bir kömürle gerçekleştirdikleri flotasyon çalışmalarında yağlama yağlarının klasik yağlarla flotasyon performansı karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda bazı yağlama yağlarının flotasyonda gazyağı ve fueloile alternatif olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Yapılan bir araştırmada tane boyutu inceldikçe kömürün flotasyon hızının arttığı görülmüş (Jowett, 1983), buna karşılık Bennett ve diğerlerinin (1980) araştırmalarında yüzebilirliğin tane boyutu ile arttığı ve en hızlı yüzen fraksiyonun 250-500 µm olduğu belirlenmiştir.

Ersayın ve Apling'in (1989) flotasyon kinetiği üzerine yaptığı çalışmalarda flotasyon hızının orta boyutlar için maksimum olduğu ve tane boyutu arttıkça yüzebilirliğin hızla azaldığı belirlenmiştir. İnce boyutlar içinse flotasyon hızındaki düşüş daha küçük oradadır.

Klimpel ve Hansen'in (1987) çalışmalarına göre tane boyutunun kontrolü flotasyonu büyük ölçüde etkilemektedir. +0.5 mm boyutlarında verim hızla düşerken 50 µm'nin altında ise kül mineralleri de yüzerek köpüğe karışmaktadır. Köpürtücü miktarı ve yapısı da flotasyonda önemli role sahiptir. Aynı çalışmaya göre mekanik selüllerde karıştırma hızı sadece çok düşük ve çok yüksek değerlerde etkili olmakta geniş bir aralıkta ise flotasyonu çok etkilememektedir.

Şlam atma ine ve iri fraksiyonları ayrı devrelerde yüzdürme reaktiflerin kademeli eklenmesi ve kaba artığın sınıflandırılarak alt akımın yeniden yüzdürülmesi gibi devre tertibiyle ilgili parametrelerin Avustralya'daki bazı tesislerde olumlu etkileri belirtilmiştir. Aynı çalışmada kolon flotasyonu ve köpük yıkamanın verim ve seçimliliği artırdığı da belirtilmiştir (Nikol ve Bensley).

Yapılan bir araştırmaya göre (Stonestreet ve Franzidis, 1988) kül minerallerinin köpükle alınması önemli ölçüde suyla sürüklenme mekanizmasıyla açıklanmaktadır. Külün yüzdürülüp, organik kısmın bastırıldığı ters flotasyon uygulamasıyla düz flotasyona göre daha yüksek performans elde edilmiştir. Bu uygulamayla %92 kül giderimiyle, %54 küllü bir kömürden %12 küllü temiz ürün elde edilmiştir.

Rastogi ve Aplan (1985) kömürden piritik kükürtün uzaklaştırılmasında hava ve köpürtücü miktarıyla pervane hızının düşük olması gerektiğini belirlemişlerdir.

Yapılan pek çok çalışmada tanelerin suyla sürüklenmesinin özellikle ince ve çok ince boyutlarda oldukça önemli olduğu belirtilmektedir. Bu mekanizmayı etkileyen faktörler köpürtücü türü ve miktarı, köpürtücü toplayıcı etkileşimi, tane özgül ağırlığı, havalandırma hızı, katı oranı ve selül geometrisidir (Subrahmanyam ve Forsberg, 1988; Gülsoy, 1995).

Farklı linyitler kullanılarak modifiye flotasyon hücresinde gerçekleştirilen bir araştırmada tane boyutu katı oranı karıştırma hızı, toplayıcı ve köpürtücü miktarlarının etkileri araştırılmıştır. (Bentli, 2000). Gediz kömürüyle farklı boyutlarda yapılan deneylerde tane boyutu arttıkça temiz kömür külünün arttığı buna karşılık yanabilir verimin çok fazla değişmediği belirlenmiştir. %5-20 katı oranlarında yapılan deneylerde ise katı oranı arttıkça ürün külünün arttığı, ancak %10'un üzerindeki oranlarda yanabilir verimin azaldığı görülmüş ve optimum katı oranı %10 olarak seçilmiştir. MIBC konsantrasyonunun artması ise yanabilir verimleri düşük ölçüde arttırırken, kül oranlarını önemli ölçüde yükseltmiştir. Selüle verilen hava akış miktarı (lt/dak.) arttıkça yanabilir verim artmış ancak selektivite önemli ölçüde bozulmuştur. 6 lt/dak. seviyesinde %18

küllü bir ürün yaklaşık %70 yanabilir verimle elde edilirken bu miktar 10 lt/dak.'ya çıktığında yanabilir verim yaklaşık %80'e buna karşılık temiz ürün külü %24'e yükselmiştir. 800-1100 devir/dak. karıştırma hızlarında yapılan çalışmalarda en temiz ürünler 800 devir/dak. hızında elde edilmiştir. Ömerler kömürü ile farklı hızlardaki çalışmalarda da benzer eğilim görülmüştür. Ömerler kömürüyle farklı inceliğe öğütülmüş malzemelerle yapılan çalışmalarda tane boyutu (d_{80}) 120 μm 'den 320 μm 'ye çıkarıldığında daha düşük küllü ürünlerin elde edildiği, buna karşılık yanabilir kısım veriminin düştüğü gözlenmiştir.

Amasra taşkömürleri kullanılarak yapılan bir çalışmada gazyağı kullanıldığında %15.82 küllü bir lave yaklaşık %75 yanabilir verimle elde edilirken toplayıcı olarak montanol 551 kullanıldığında %12.83 küllü daha temiz bir ürün %78 yanabilir verimle kazanılmıştır (Kaytas, 1988).

Gupta vd.'nin (2007) %24.5 kül içeren -1 mm boyutlu bir kömürle yaptığı çalışmada 3 farklı köpürtücünün farklı boyut fraksiyonlarındaki etkileri araştırılmıştır. Genel olarak MIBC en seçici köpürtücü olarak bulunurken, Dow-1012 ile daha hızlı flotasyon gerçekleşmiş ve buna bağlı olarak daha yüksek ağırlık verimleri sağlamıştır. %11 kül seviyelerinde Dow-1012'yle yaklaşık %20 ağırlık verimine ulaşılırken MIBC ile aynı seviyede yaklaşık %35'lik bir ağırlık verimi elde edilmiştir. Köpürtücülerin etkileri farklı fraksiyonlarda oldukça farklı bulunmuştur. -75 μm fraksiyonda MIBC ile en verimli ve selektif flotasyon sağlanırken 500-1000 μm fraksiyonu için Dow-1012 optimum sonuçları vermiştir. Ayrıca tane boyutu inceldikçe aynı kül seviyesinde elde edilen yanabilir verimler de yükselmektedir. 500-1000 μm fraksiyonunda %9-10 küllü kömürler yaklaşık %18 yanabilir verimle elde edilirken -75 μm fraksiyonu için bu verim çok daha yüksek (~%73) olmuştur.

Kütahya Değirmisaz bölgesine ait %48.48 küllü bir kömürden optimum şartlarda %27.26 küllü bir ürün yaklaşık %81 yanabilir verimle elde edilmiştir. Çalışmada optimum şartlar şu şekilde belirlenmiştir: pH=10, gazyağı=2 kg/ton, %15 katı oranı, 1000 devir/dak. karıştırma hızı (Bentli ve Kaya, 2004).

Farklı tane boyutlu kömürle yapılan bir çalışmada, tane boyutu inceldikçe köpükler arasındaki suyla taşınan malzeme miktarını arttığı belirlenmiştir. Tüm boyutlarda köpükte kazanılan su miktarı ile katı miktarı arasında lineer bir ilişki gözlenmiştir (Buntamante ve Warren, 1985).

Firth vd.'nin (1979) şlam atma ve farklı devre tertiplerinin kömür flotasyonundaki etkilerini araştırdığı bir çalışmada %59.6 ağırlık verimiyle %11.6 küllü bir ürün alınırken, flotasyon öncesi şlam atıldığında aynı verimle %8.2 küllü daha temiz bir ürün alınmıştır. Çalışmada iri ve ince tanelerin ayrı devrede yüzdürülmesi olumlu sonuçlar vermezken, reaktiflerin 2 kademedeki eklenmesi daha başarılı sonuçlar sağlamıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

Yapılan deneylerde Türkiye Taşkömürü Kurumu'nun Zonguldak Karadon Müessesinden getirilen tüvenan toz taşkömürü numunesi kullanılmıştır. Flotasyon deneyleri Cumhuriyet Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama laboratuvarında, kimyasal analizler ise kömür analiz laboratuvarında yapılmıştır. Toplayıcı reaktif olarak gazyağı kullanılmıştır. Köpürtücü reaktif olarak iki ayrı reaktif kullanılmış olup, bunlar AERO 88 ve AERO 65'dir. Kuru kömürde yapılan kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Kuru Kömür Analiz Değerleri

Kül (%)	34.20
Uçucu madde (%)	20.05
Sabit karbon (%)	45.75
Toplam kükürt (%)	0.62

Kullanılan malzemenin elek analizi ve boyuta göre kül içerikleri Çizelge 4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. Tüvenan Kömürün Elek Analizi ve Boyuta Göre Kül İçerikleri

Tane Boyu (μm)	Ağ. (%)	Kül (%)
1000	19,22	17,80
1000-710	8,86	22,56
710-500	10,28	25,16
500-250	22,52	33,36
250-106	18,12	46,69
-106	21,00	46,70
Toplam	100,00	33,79

Bazı deneysel çalışmalarda tüvenan kömür direkt olarak kullanılırken, bazı deneylerde ise -710 μm fraksiyonu (%39.44 kül) veya -1000 μm fraksiyonu (%37.59 kül) kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

Flotasyon deneyleri 1.2 lt hacimli selülde, 1050 devir/dak. karıştırma hızında (karıştırma hızının incelendiği deneyler hariç) Denver tipi flotasyon makinesinde, 50-200 gr malzeme kullanılarak yapılmıştır. Deneylerden sonra yüzen ürünler süzülüp 90°C’de kurutulmuş, ağırlık ve külleri belirlenmiş ve bu değerler kullanılarak yanabilir verimler hesaplanmıştır.

Flotasyon deney sonuçlarının değerlendirilmesinde yanabilir verim (%), ağırlık verimi (%) ve kül verimi (%) hesaplanmıştır. Hesaplamalarda aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$\text{Yanabilir Verim (\%)} = \frac{\text{Yüzen Ürünün Ağırlığı (gr)} \times (100 - \text{Yüzenin Küllü (\%)})}{\text{Beslemenin Ağırlığı (gr)} \times (100 - \text{Beslemenin Küllü (\%)})} \times 100 \quad [5.1]$$

$$\text{Ağırlık Verimi (\%)} = \frac{\text{Yüzen Ürünün Ağırlığı (gr)}}{\text{Beslemenin Ağırlığı (gr)}} \times 100 \quad [5.2]$$

$$\text{Kül Verimi (\%)} = \frac{\text{Yüzen Ürünün Ağırlığı (gr)} \times \text{Yüzenin Küllü (\%)}}{\text{Beslemenin Ağırlığı (gr)} \times \text{Beslemenin Küllü (\%)}} \times 100 \quad [5.3]$$

Tüm deneyler nötr pH’da (pH 7.8) yapılmıştır. Zaman artırımlı deneylerde maksimum flotasyon süresi 10 dakika olarak alınmıştır. Bunun nedeni 10 dakikadan sonra yanabilir verimin önemli ölçüde değişmemesidir.

Öğütme gerektiren deneylerde kullanılan malzeme, laboratuvar tipi bir bilyalı değirmende kuru öğütülerek hazırlanmıştır.

Kül içeren malzemenin suyla taşınmasının araştırıldığı deneylerde, flotasyon deneyi sonunda köpükte kazanılan su ve katı verimleri belirlendikten sonra, suyla sürüklenme faktörü (P_i) aşağıdaki formülle (Kirjavainen, 1989) hesaplanmıştır.

$$R_k = 1 - \exp(-P_i R_w) \quad [5.4]$$

P_i : Suyla sürüklenme (entrainment) faktörü

R_k : Kül kazanımı (fraksiyon)

R_w : Su verimi (fraksiyon)

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Farklı Boyut Fraksiyonlarıyla Yapılan Çalışmalar

Farklı tane boyutlarının flotasyonda davranışlarının belirlenmesi amacıyla, çeşitli fraksiyonları hiç öğütmeden farklı sürelerde köpükler alınmıştır.

Orijinal malzemeyle %20 katı oranı, 10 dakika flotasyon süresi, 300 gr/ton gazyağı, 300 gr/ton AERO 88, 1000 devir/dak. hızda yapılan deneylerde %33.79 küllü malzemeden, %17.04 küllü bir konsantre, %62.16 ağırlık verimiyle elde edilmiştir. Bu deney için, yanabilir verim %77.53 olarak hesaplanmıştır. Ancak, özellikle +1 mm'lik fraksiyonun veriminin düşük olduğu gözlenmiş, bu nedenle, -1 mm ve -710 µm fraksiyonlarıyla da çeşitli şartlarda deneyler yapılmıştır.

-710 µm malzemeyle yapılan deneyde elde edilen yüzen ürünün ağırlık, kül, yanabilir verim ve kül kazanımları Çizelge 5'de verilmektedir.

Çizelge 5. -710 µm malzemeyle yapılan deneyde elde edilen yüzen üründeki farklı tane fraksiyonlarının flotasyon davranışları
(Katı oranı: %20, Toplayıcı: 300 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88, Flotasyon Süresi: 10 dak.)

Tane Boyu (µm)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
500-710	17.78	9.97	98.67	32.48
250-500	33.40	17.69	86.80	37.30
106-250	25.92	31.22	87.46	45.33
106	22.90	24.70	72.99	27.33
Toplam	100.00	21.43	85.97	

-1 mm malzemeyle yapılan deneyde elde edilen yüzen ürünün çeşitli fraksiyonlarının ağırlık, kül, yanabilir verim ve kül kazanımları Çizelge 6'da gösterilmektedir.

Çizelge 6. –1 mm malzemeyle yapılan deneyden elde edilen yüzen üründeki farklı tane fraksiyonlarının flotasyon davranışları
(Katı oranı: %20, Toplayıcı: 300 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65, Flotasyon Süresi: 5 dak.)

Tane Boyu (μm)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
1000-710	7.32	5.16	54.04	10.10
500-710	11.50	7.03	74.22	16.71
250-500	28.26	14.60	85.90	29.33
106-250	22.62	28.06	89.97	40.08
106	30.30	34.00	95.44	56.10
Toplam	100.00	21.96	82.68	

Orijinal örneğin –710 μm 'lik kısmı kullanılarak AERO 65 köpürtücüyle yapılan deneyden elde edilen yüzen ürünün farklı fraksiyonlarının flotasyon verileri ve suyla sürüklenme faktörleri Çizelge 7'de verilmektedir.

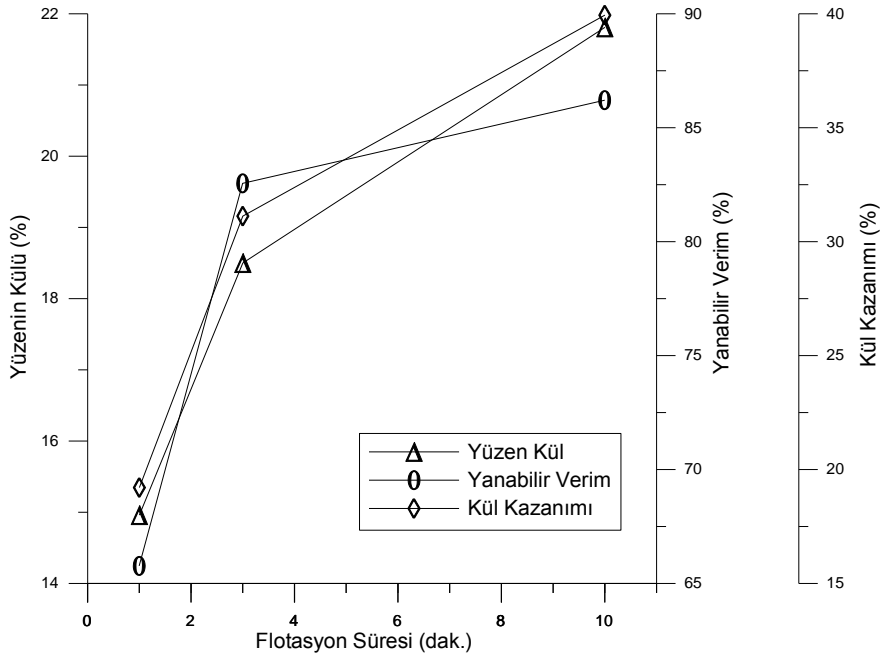
Çizelge 7. –710 μm malzemeyle yapılan deneyden elde edilen yüzen üründeki farklı tane fraksiyonlarının flotasyon davranışları ve suyla sürüklenme faktörleri
(Katı oranı: %20, Toplayıcı: 300 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65, Flotasyon Süresi: 5 dak.)

Tane Boyu (μm)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)	P_i
500-710	9.64	6.97	52.11	11.61	0.17
250-500	35.38	12.46	92.26	26.24	0.43
106-250	25.34	23.84	89.31	31.93	0.54
106	29.64	33.18	79.11	44.83	0.83
Toplam	100.00	20.96	81.13	33.03	0.56

Orijinal kömürün –1mm'lik kısmıyla farklı sürelerde elde edilen ağırlık, kül ve verim değerleri Çizelge 8'de sunulmaktadır.

Çizelge 8. Orijinal cevherin –1 mm'lik fraksiyonuyla farklı sürelerde elde edilen ürünlerin flotasyonu
(Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
1	48.27	14.96	65.77	19.21
3	63.23	18.50	82.56	31.12
10	68.82	21.81	86.21	39.94

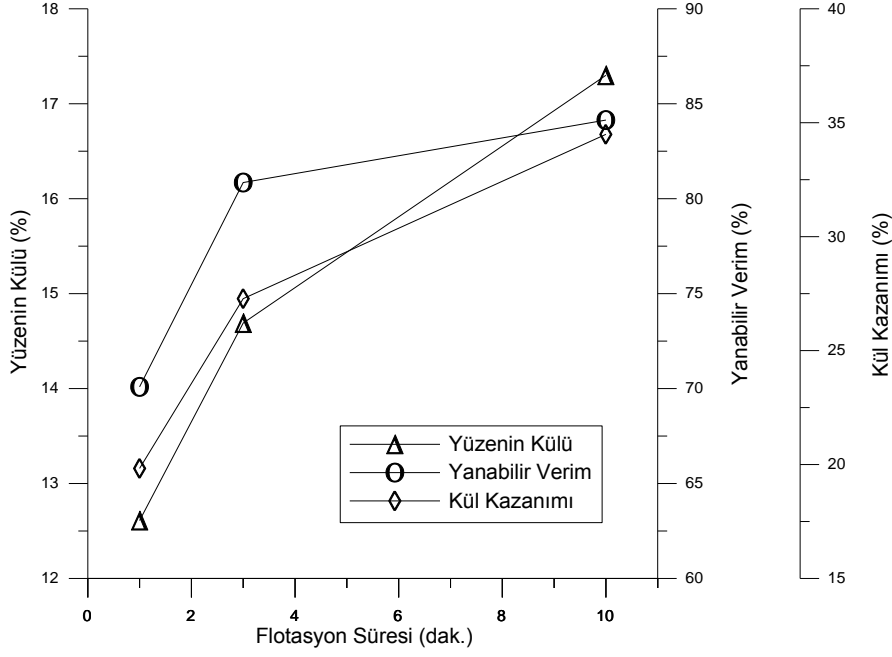


Şekil 1. Orijinal cevherin –1mm fraksiyonuyla farklı sürelerdeki kül, yanabilir verim ve kül kazanımları
(Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

Orijinal malzemenin +1mm fraksiyonunun havanda öğütülerek tüm malzemenin –1mm ye indirilerek farklı köpük alma sürelerinde yapılan deney sonuçları Çizelge 9’da verilmektedir.

Çizelge 9. Orijinal cevherin +1 mm’nin havanda öğütülmesiyle (–1 mm’lik fraksiyonla) farklı sürelerde elde edilen ürünlerin flotasyonu
(Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzen Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
1	53.11	12.61	70.09	19.83
3	62.75	14.69	80.85	27.28
10	67.37	17.30	84.14	34.49



Şekil 2. Orjinal cevherin +1 mm'nin havanda öğütülmesiyle (-1 mm'lik fraksiyonla) farklı sürelerdeki kül, yanabilir verim ve kül kazanımları (Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

Öğütmenin yanabilir kısım ve kül minerallerini flotasyona etkisinin belirlenmesi amacıyla orjinal kömür bilyalı değirmende 2, 5 ve 15 dakika öğütülerek deneyler yapılmıştır. Öğütülen malzemelerin tane boyu dağılımları Çizelge 10'da verilmektedir.

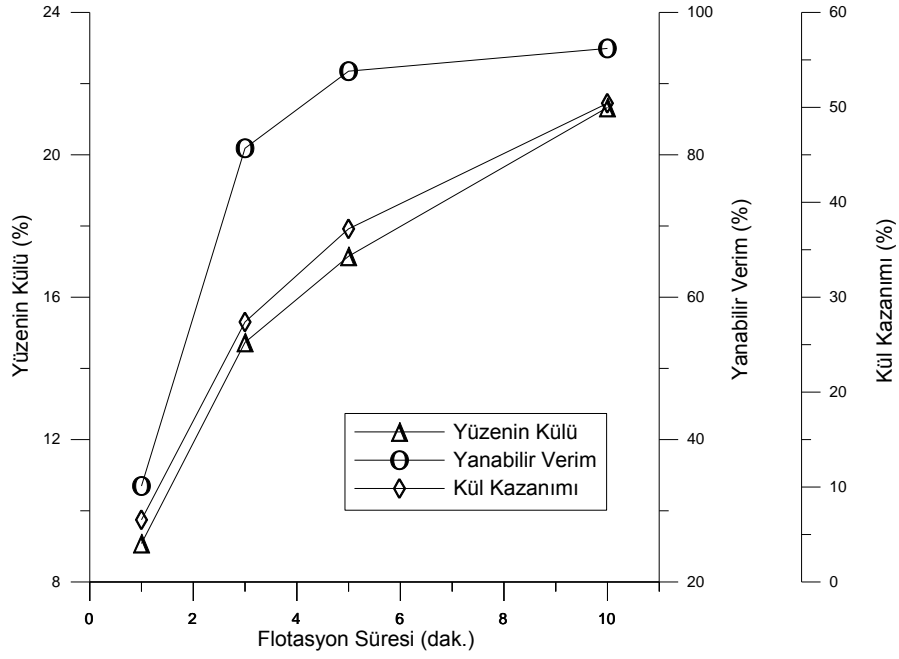
Çizelge 10. Farklı sürelerde öğütülen orjinal malzemenin tane boyu dağılımları

Tane boyu (µm)	Kümülatif elek altı		
	2 dak. Öğütme (dak.)	5 dak. Öğütme (dak.)	15 dak. Öğütme (dak.)
500	96.36	-	-
250	81.00	98.00	-
106	48.60	68.72	96.64
53	-	42.56	77.81

Çizelge 11, 12 ve 13'de belirtilen sürelerde öğütülen malzeme ile yapılan deney sonuçları verilmekte ve Şekil 3, 4 ve 5'de gösterilmektedir.

Çizelge 11. Orijinal kömürün 2 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları
(Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

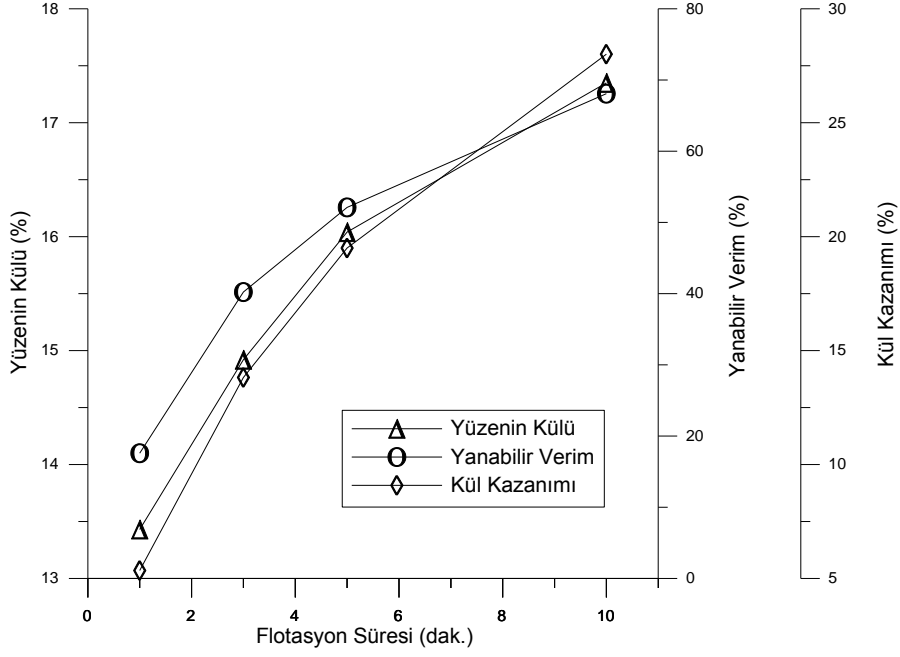
Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
1	24.38	9.08	33.48	6.55
3	62.84	14.73	80.92	27.39
5	73.32	17.15	91.75	37.20
10	79.90	21.33	94.94	50.43



Şekil 3. Orijinal kömürün 2 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları
(Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

Çizelge 12. Orijinal kömürün 5 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları
(Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

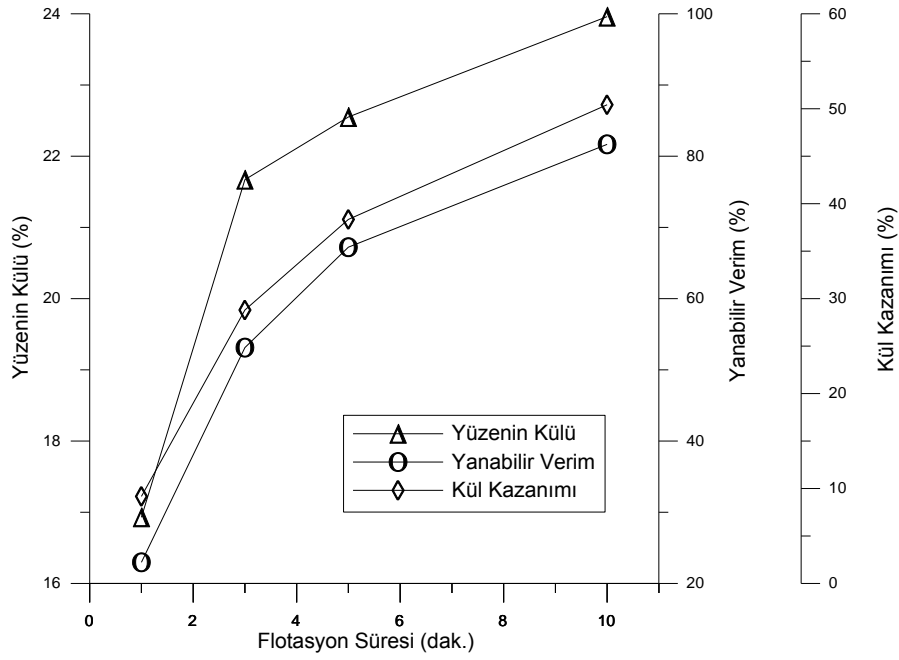
Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
1	13.46	13.43	17.59	5.35
3	31.30	14.92	40.22	13.82
5	41.10	16.04	52.11	19.50
10	54.54	17.35	68.08	28.01



Şekil 4. Orijinal kömürün 5 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları (Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

Çizelge 13. Orijinal kömürün 15 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları (Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
1	18.30	16.93	22.97	9.17
3	44.90	21.67	53.12	28.80
5	57.46	22.55	67.22	38.34
10	71.11	23.96	81.67	50.42



Şekil 5. Orijinal kömürün 15 dak. öğütülmesiyle yapılan flotasyon deney sonuçları (Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

Tane boyutunun su ve kül kazanımı üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan deneylere ait sonuçlar Çizelge 14 ve 15’de sunulmaktadır.

Çizelge 14. Farklı boyutlu orijinal kömürün AERO 88 köpürtücü ile flotasyon ve suyla taşınma davranışı (Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 300 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88, Flotasyon Süresi: 3 dak.)

Öğütme Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)	P_1
2	68.88	14.75	88.68	30.06	1.23
15	33.55	22.28	41.74	23.45	1.41

Çizelge 15. Farklı boyutlu orijinal kömürün AERO 65 köpürtücü ile flotasyon ve suyla taşınma davranışı (Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 300 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65, Flotasyon Süresi: 3 dak.)

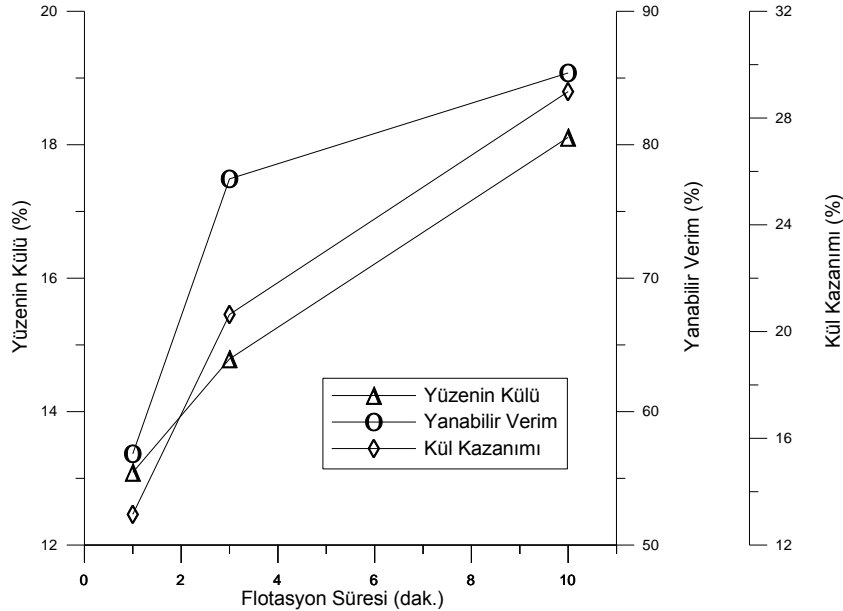
Öğütme Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)	P_1
2	54.34	12.52	71.79	20.14	0.96
15	37.62	18.13	46.51	20.18	1.04

4.2. Farklı Karıştırma Hızlarında Yapılan Deneysel Çalışmalar

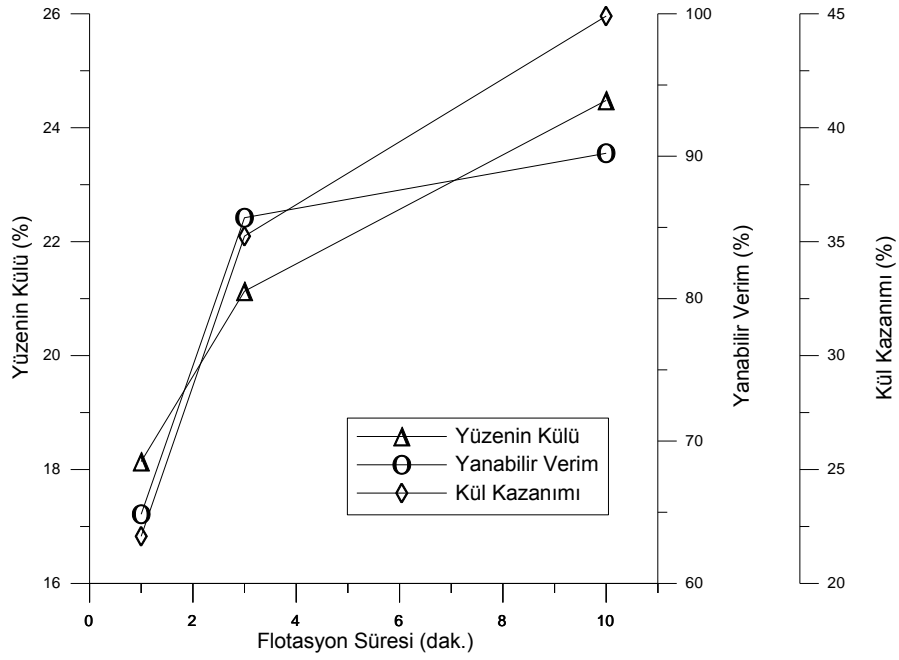
Flotasyon sırasındaki pervane hızının kömürün flotasyonuna etkisinin incelenmesi amacıyla köpürtücü olarak AERO 88 ve AERO 65 kullanarak, 1000, 1250 ve 1550 devir/dak. hızlarda yapılan çalışmaların sonuçları Çizelge 16 ve 17’de verilmekte, Şekil 6, 7, 8, 9, 10 ve 11’de gösterilmektedir.

Çizelge 16. Farklı karıştırma hızlarında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

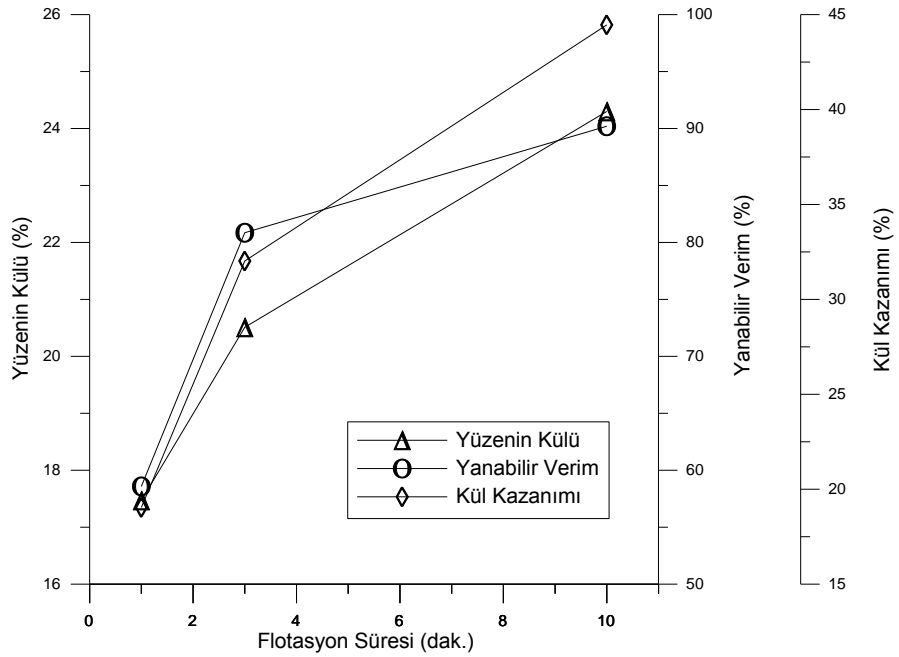
Karıştırma Hızı (devir/dak.)	Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
1000	1	39.61	13.09	56.84	13.15
	3	55.04	14.79	77.44	20.64
	10	63.14	18.11	85.38	28.99
1250	1	47.98	18.14	64.86	22.07
	3	65.78	21.13	85.68	35.24
	10	72.34	24.48	90.21	44.90
1550	1	42.98	17.47	58.58	19.04
	3	61.60	20.51	80.85	32.02
	10	72.16	24.30	90.20	44.46



Şekil 6. 1000 devir/dak. karıştırma hızında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)



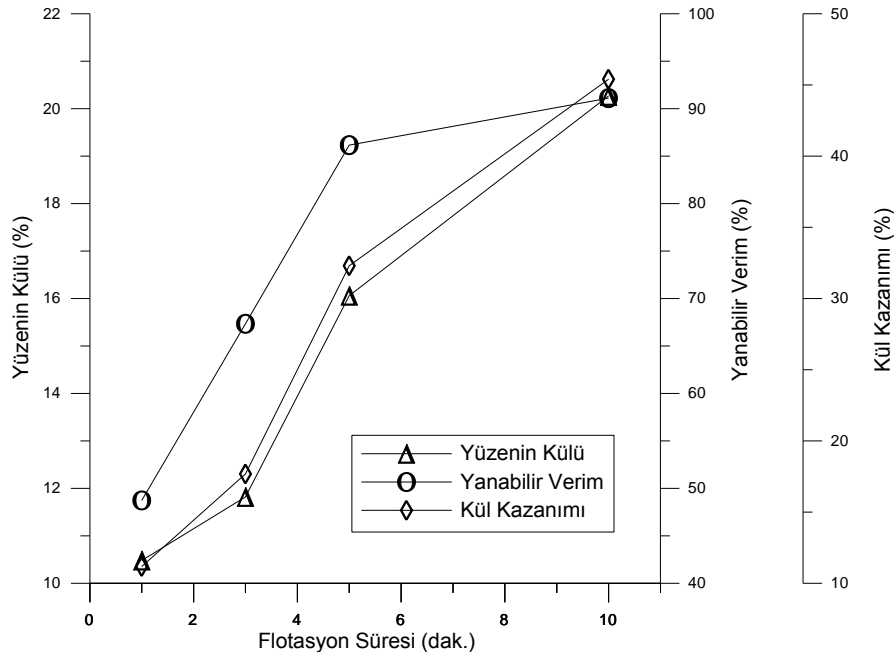
Şekil 7. 1250 devir/dak. karıştırma hızında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)



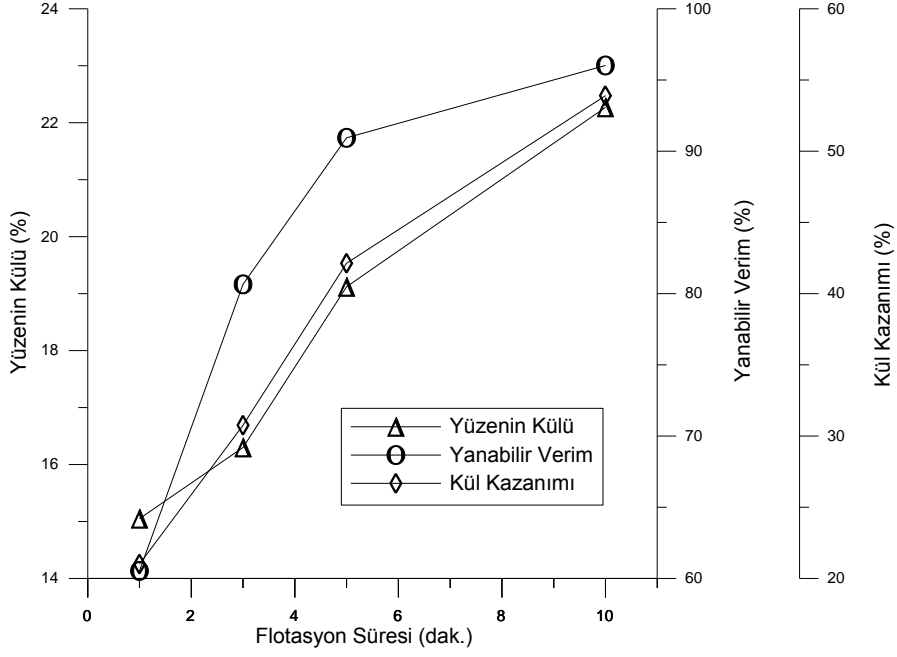
Şekil 8. 1550 devir/dak. karıştırma hızında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

Çizelge 17. Farklı karıştırma hızlarında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün -710 µm'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65)

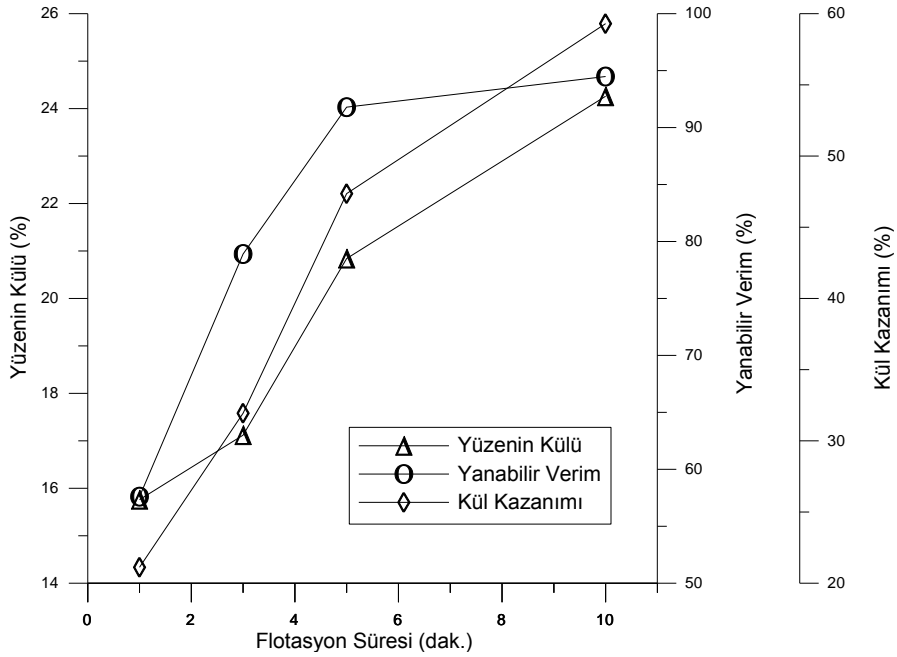
Karıştırma Hızı (devir/dak.)	Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
1000	1	36.04	10.48	48.73	11.18
	3	50.56	11.82	67.34	17.68
	5	67.96	16.06	86.16	32.30
	10	75.68	20.27	91.11	45.40
1250	1	47.18	15.05	60.53	21.01
	3	63.80	16.30	80.65	30.76
	5	74.44	19.12	90.94	42.13
	10	81.79	22.27	96.02	53.90
1550	1	45.28	15.76	57.60	21.12
	3	63.03	17.12	78.90	31.94
	5	76.78	20.84	91.79	47.36
	10	82.60	24.26	94.48	59.30



Şekil 9. 1000 devir/dak. karıştırma hızında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün -710 µm'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65)



Şekil 10. 1250 devir/dak. karıştırma hızında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65)



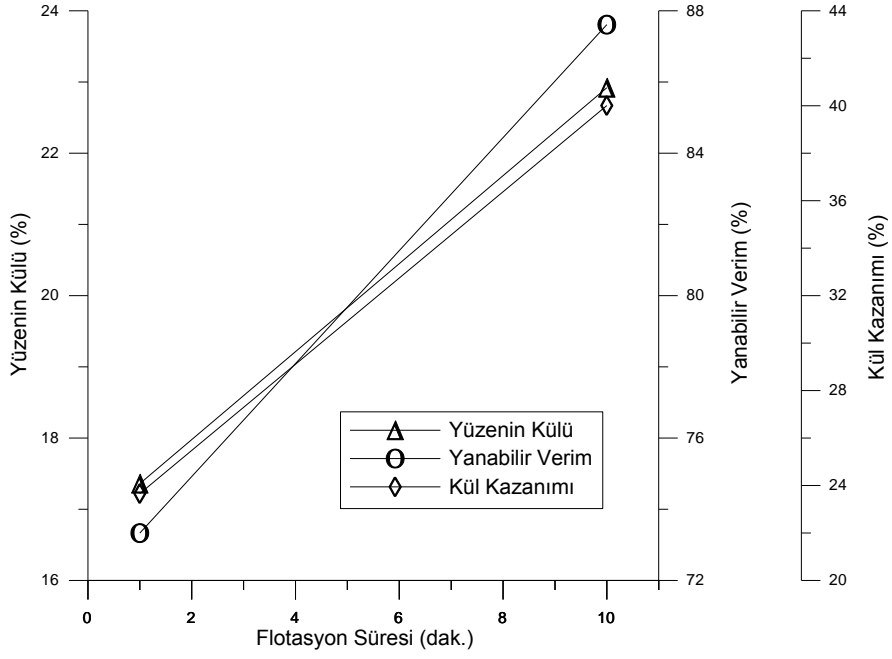
Şekil 11. 1550 devir/dak. karıştırma hızında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65)

4.3. Farklı Katı Oranlarında Yapılan Deneysel Çalışmalar

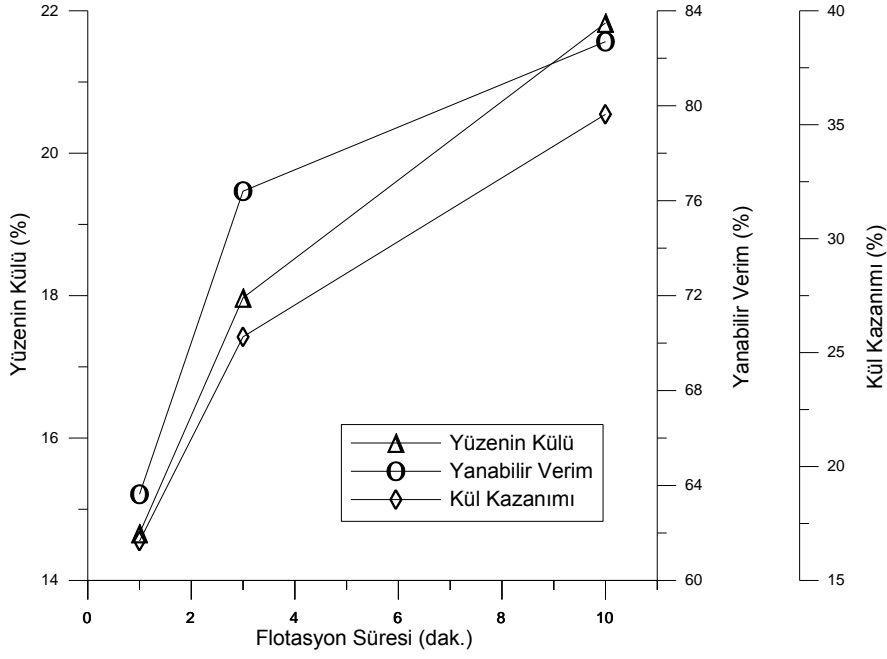
Katı oranının yanabilir kısmın ve kül oluşturan minerallerin flotasyonundaki rolünün belirlenmesi amacıyla %5den %30a kadar değişen ağırlıkça katı oranlarında köpürtücü olarak AERO 88 ve AERO 65 kullanarak bir seri deney yapılmıştır. AERO 88 ile yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 18’de verilmekte, Şekil 12, 13, 14 ve 15’de gösterilmektedir.

Çizelge 18. Farklı katı oranlarında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün –710 µm’lik kısmı, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı,
Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

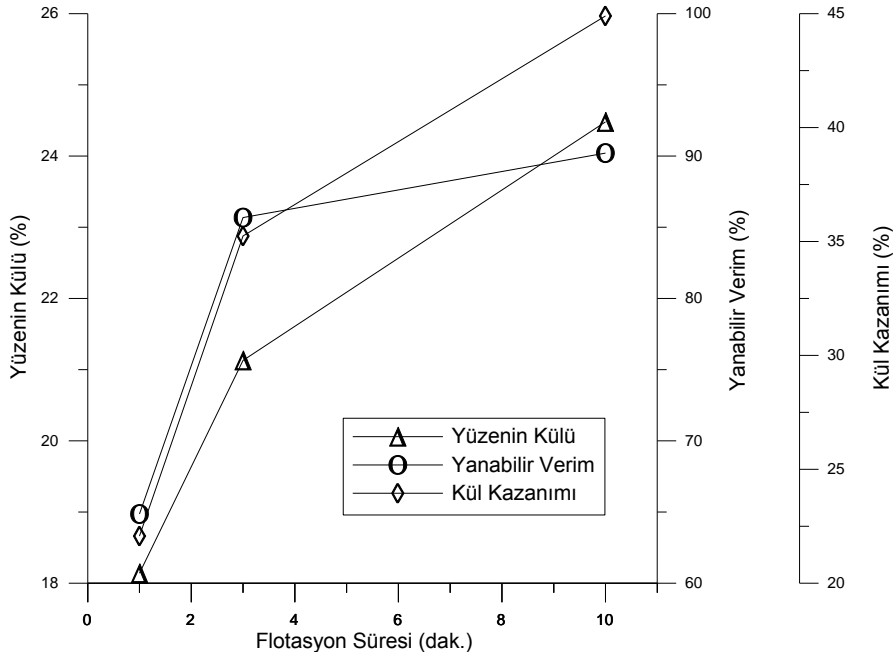
Ağırlıkça Katı (%)	Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
5	1	53.74	17.36	73.33	23.66
	10	68.84	22.92	87.61	40.01
10	1	45.01	14.66	63.63	16.73
	3	56.40	17.97	76.40	25.69
	10	64.07	21.83	82.70	35.46
20	1	47.98	18.14	64.86	22.07
	3	65.78	21.13	85.68	35.24
	10	72.34	24.48	90.21	44.90
30	1	42.84	15.40	59.85	16.73
	3	62.10	18.64	83.43	29.34
	5	67.16	20.79	87.85	35.40
	10	71.65	23.79	90.16	43.22



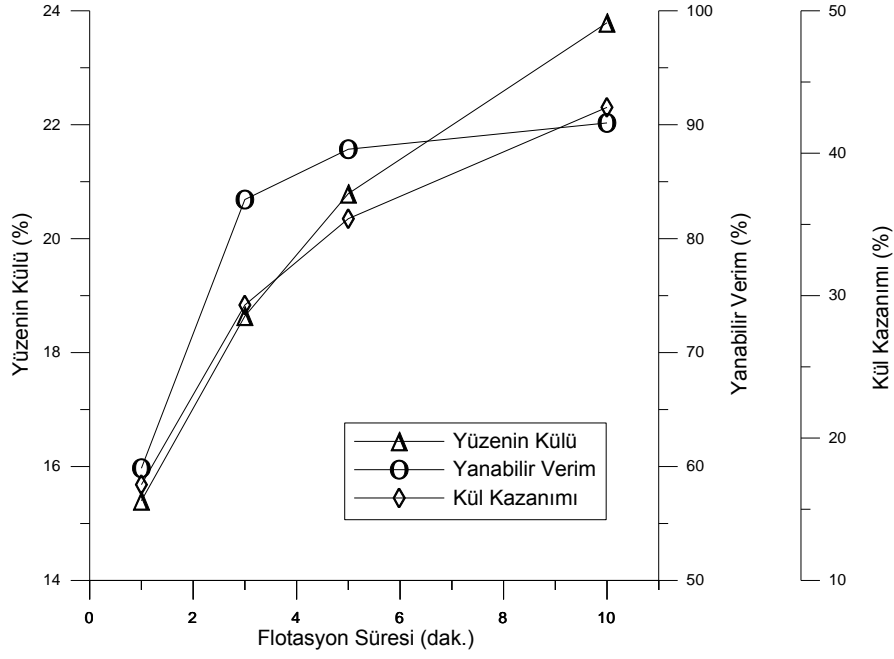
Şekil 12. %5 katı oranında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
 (Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı,
 Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)



Şekil 13. %10 katı oranında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı,
Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)



Şekil 14. %20 katı oranında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı,
Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

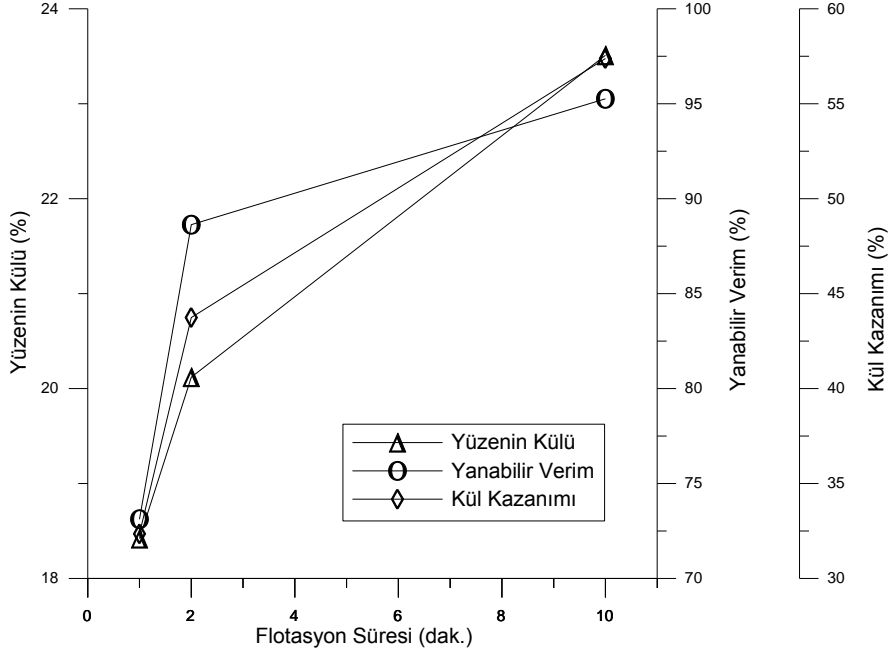


Şekil 15. %30 katı oranında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
 (Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı,
 Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

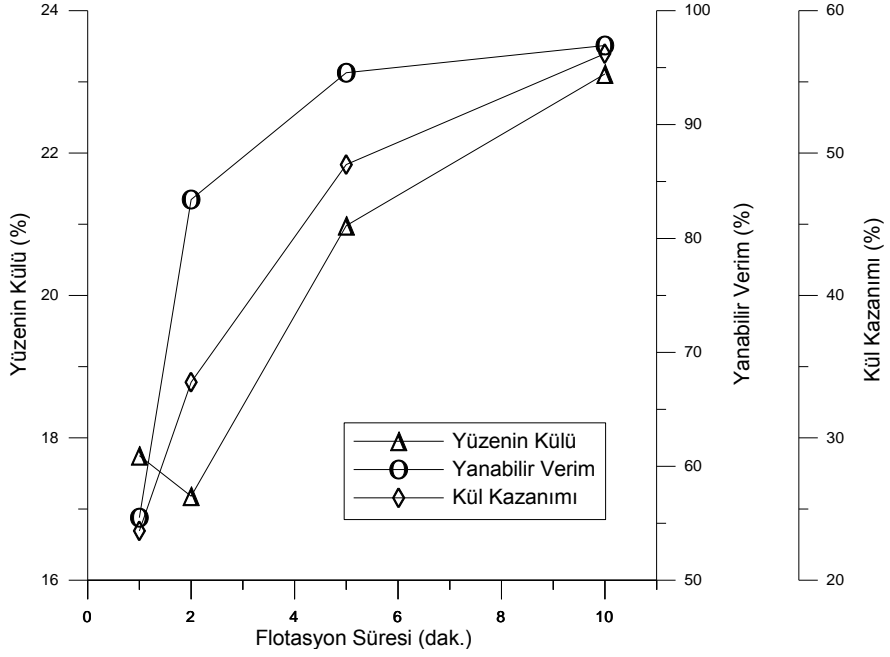
Çizelge 19 ve Şekil 16, 17 ve 18 ise AERO 65 ile farklı pülp yoğunluklarında yapılan çalışmaların sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 19. Farklı katı oranlarında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün -710 µm'lik kısmı, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı,
Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65)

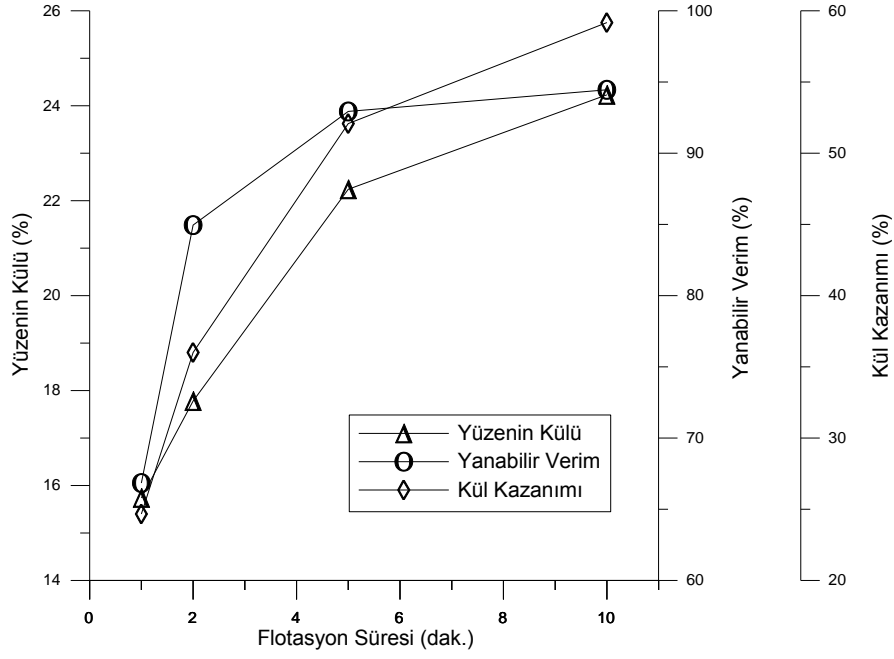
Ağırlıkça Katı (%)	Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
5	1	59.34	18.42	73.12	32.35
	2	73.46	20.12	88.63	43.74
	10	82.46	23.51	95.26	57.38
10	1	44.67	17.75	55.49	23.47
	2	66.69	17.18	83.42	33.91
	5	79.22	20.98	94.55	49.19
	10	83.11	23.11	96.94	56.98
20	1	52.52	15.74	66.84	24.67
	2	68.41	17.78	84.95	36.01
	5	79.12	22.24	92.93	52.08
	10	82.53	24.23	94.45	59.17



Şekil 16. %5 katı oranında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı,
Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65)



Şekil 17. %10 katı oranında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı,
Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65)



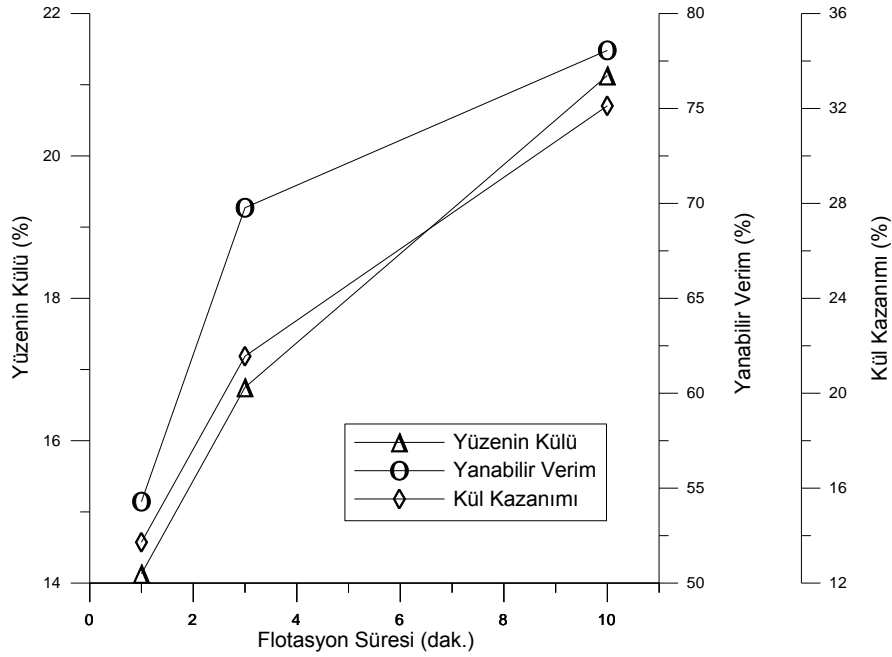
Şekil 18. %20 katı oranında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
 (Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı,
 Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65)

4.4. Farklı Gazyağı Konsantrasyonlarında Yapılan Deney Sonuçları

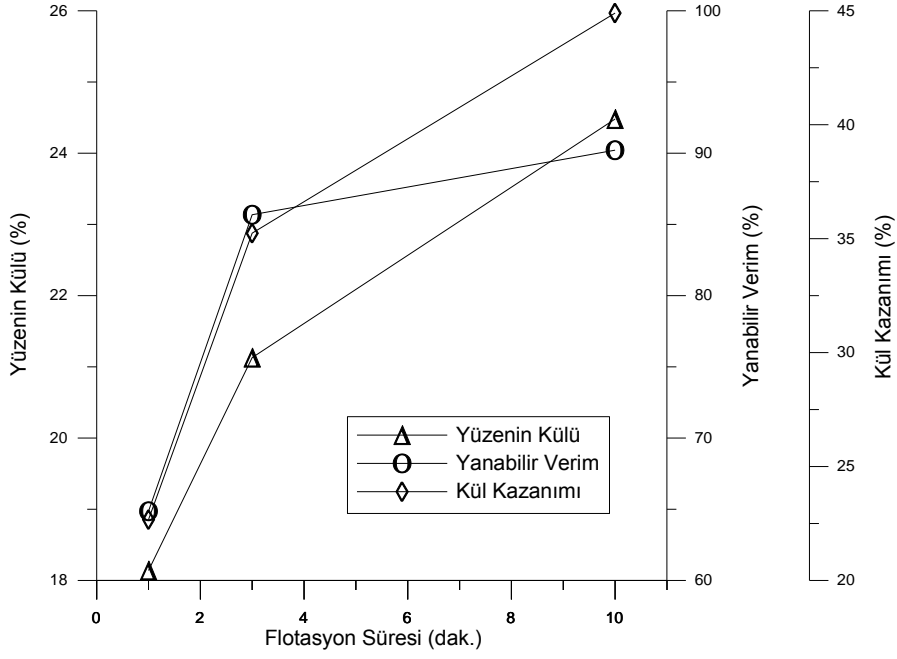
Gazyağı kullanmadan ve farklı gazyağı konsantrasyonlarında AERO 88 ile yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 20’de verilmekte, Şekil 19, 20 ve 21’de gösterilmektedir.

Çizelge 20. Farklı gazyağı konsantrasyonlarında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün –710 µm’lik kısmı, Katı Oranı: %20, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

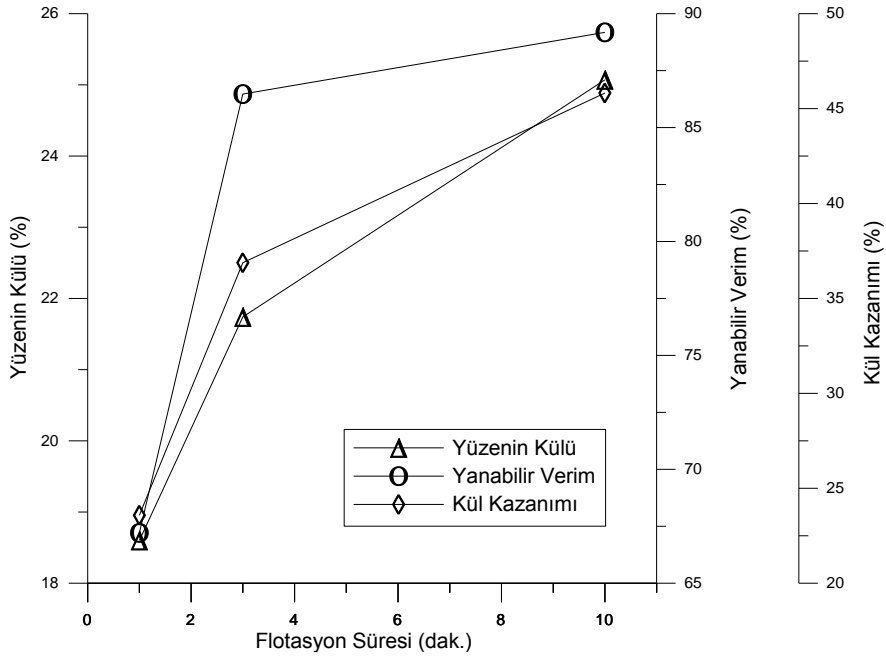
Gazyağı Konsantrasyonu (gr/ton)	Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
0	1	38.29	14.13	54.29	13.72
	3	50.76	16.75	69.77	21.56
	10	59.94	21.13	78.06	32.11
200	1	47.98	18.14	64.86	22.67
	3	65.78	21.13	85.68	35.24
	10	72.34	24.48	90.21	44.90
400	1	50.00	18.60	67.21	23.58
	3	66.91	21.74	86.47	36.88
	10	72.08	25.07	89.18	45.82



Şekil 19. 0 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün –710 µm’lik kısmı, Katı Oranı: %20, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)



Şekil 20. 200 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

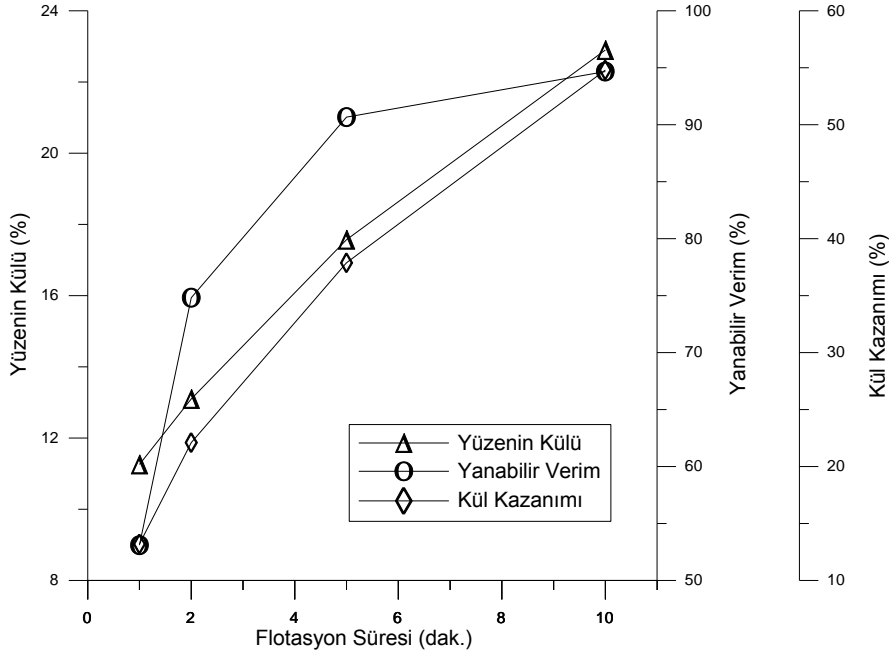


Şekil 21. 400 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88)

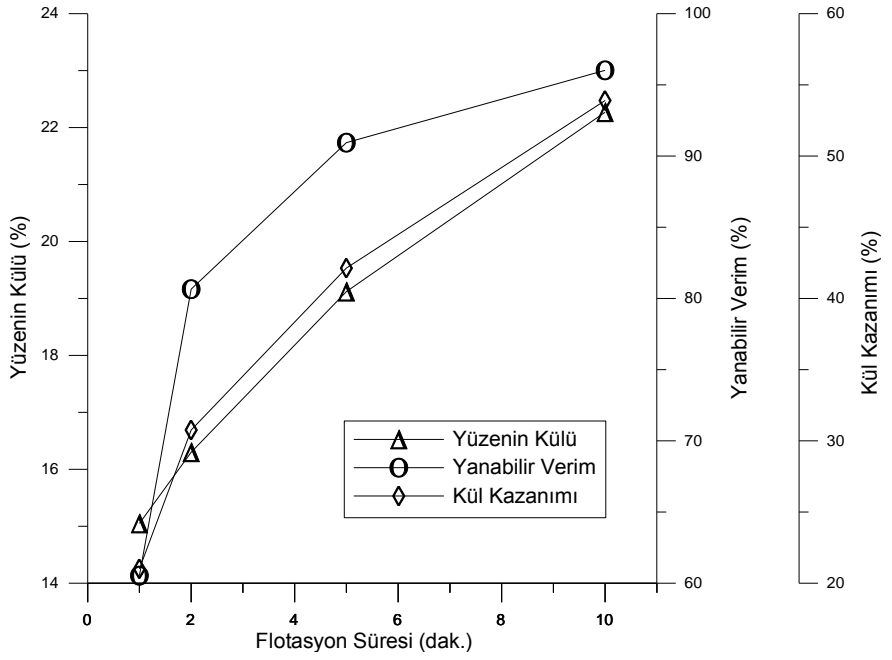
Çizelge 21 AERO 65 köpürtücü ortamında farklı gazyağı konsantrasyonlarında ve farklı flotasyon sürelerinde elde edilen yüzen ürünlerin ağırlık, kül ve yanabilir verimleriyle kül kazanımlarını göstermektedir. Aynı sonuçlar Şekil 22, 23 ve 24’de sunulmaktadır.

Çizelge 21. Farklı gazyağı konsantrasyonlarında AERO 65 ile yapılan deney sonuçları (Besleme: 2 dakika öğütülmüş orijinal kömür, Katı Oranı: %20, Köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65)

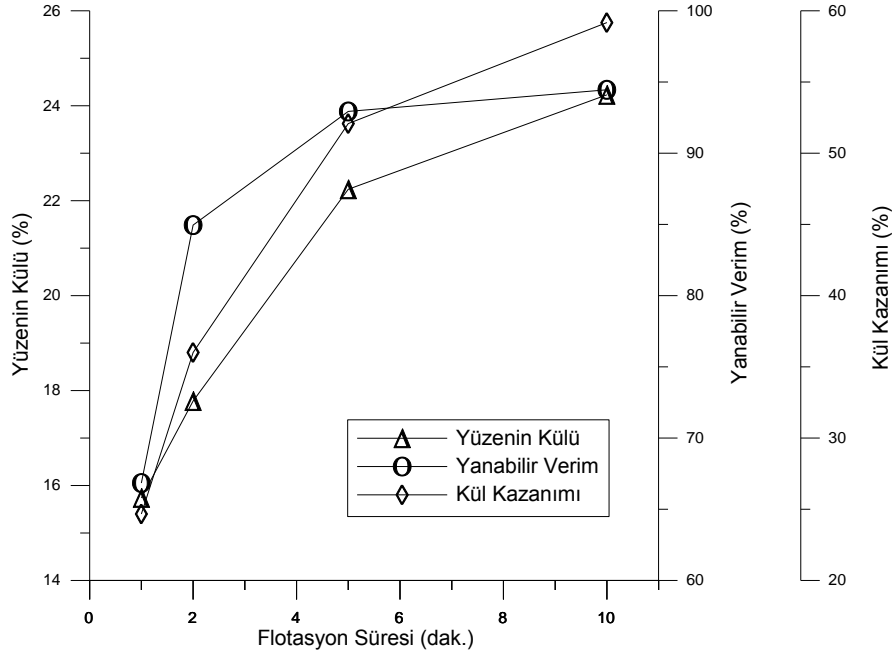
Gazyağı Konsantrasyonu (gr/ton)	Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
0	1	39.62	11.26	53.10	13.20
	2	57.00	13.10	74.82	22.10
	5	72.83	17.57	90.67	37.88
	10	81.20	22.90	94.67	54.80
200	1	47.18	15.05	60.53	21.01
	2	63.80	16.30	80.65	30.76
	5	74.44	19.12	90.94	42.13
	10	81.79	22.27	96.02	53.90
400	1	52.52	15.74	66.84	24.67
	2	68.41	17.78	84.95	36.01
	5	79.12	22.24	92.93	52.08
	10	82.53	24.23	94.45	59.17



Şekil 22. 0 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: 2 dakika öğütülmüş orijinal kömür, Katı Oranı: %20, Köpürtücü:
300 gr/ton AERO 65)



Şekil 23. 200 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: 2 dakika öğütülmüş orijinal kömür, Katı Oranı: %20, Köpürtücü:
300 gr/ton AERO 65)

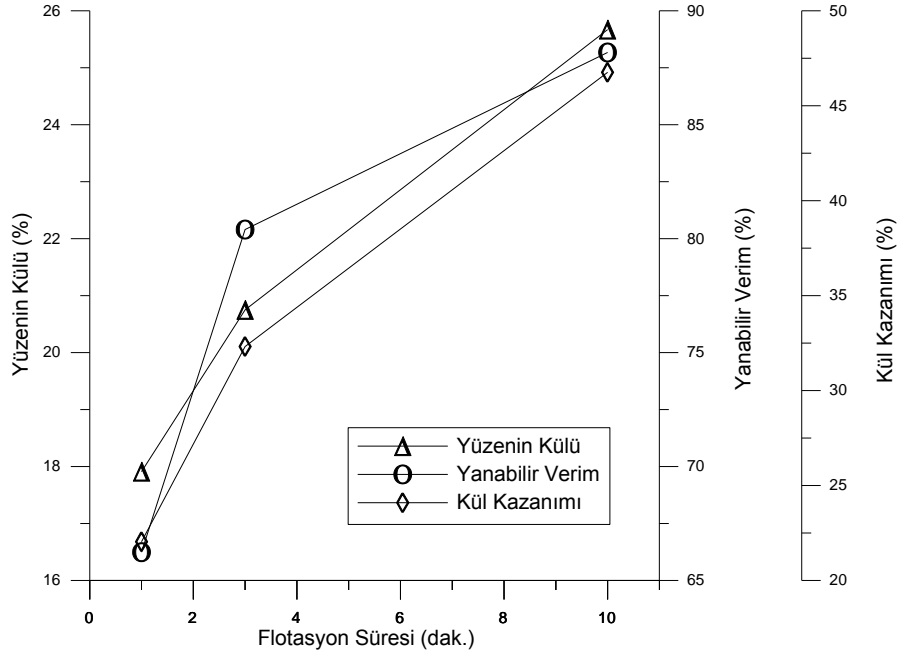


Şekil 24. 400 gr/ton gazyağı kullanılarak AERO 65 ile yapılan deney sonuçları
 (Besleme: 2 dakika öğütülmüş orijinal kömür, Katı Oranı: %20, Köpürtücü:
 300 gr/ton AERO 65)

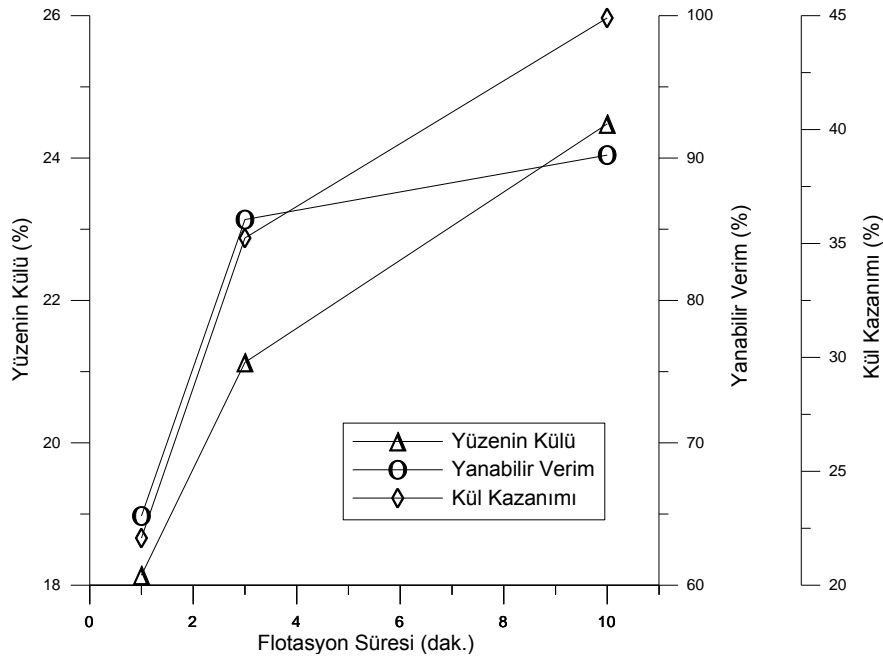
Farklı köpürtücü miktarlarında ve farklı flotasyon sürelerinde AERO 88 köpürtücü kullanılarak elde edilen yüzen ürünlerin ağırlık, kül ve yanabilir verimleriyle kül kazanımlarını Çizelge 22’de gösterilmektedir. Aynı sonuçlar Şekil 25, 26, 27 ve 28’de sunulmaktadır.

Çizelge 22. Farklı köpürtücü miktarlarında AERO 88 ile yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün –710 µm’lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 300 gr/ton gazyağı)

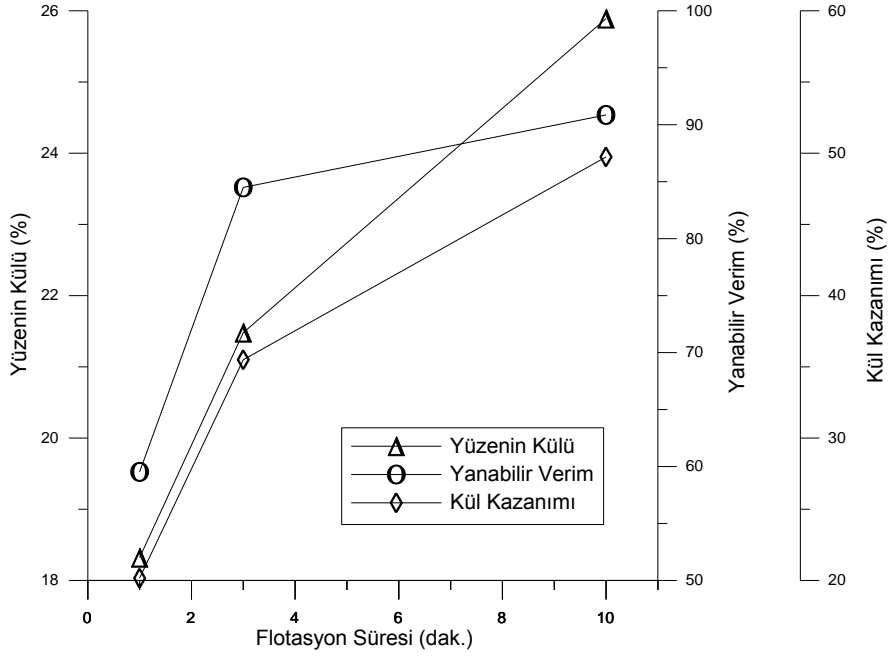
Köpürtücü Miktarı (gr/ton)	Flotasyon Süresi (dak.)	Ağırlık Verimi (%)	Yüzenin Külü (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Kazanımı (%)
150	1	48.81	17.91	66.24	22.04
	3	61.44	20.75	80.40	32.32
	10	71.84	25.67	88.17	46.76
300	1	47.98	18.14	64.86	22.07
	3	65.78	21.13	85.68	35.24
	10	72.34	24.48	90.21	44.90
450	1	43.40	18.32	59.53	20.16
	3	65.18	21.48	84.50	35.50
	10	74.24	25.89	90.86	49.74
750	1	49.59	18.99	66.34	23.88
	3	66.56	22.94	84.70	38.72
	10	73.48	27.24	88.28	50.75



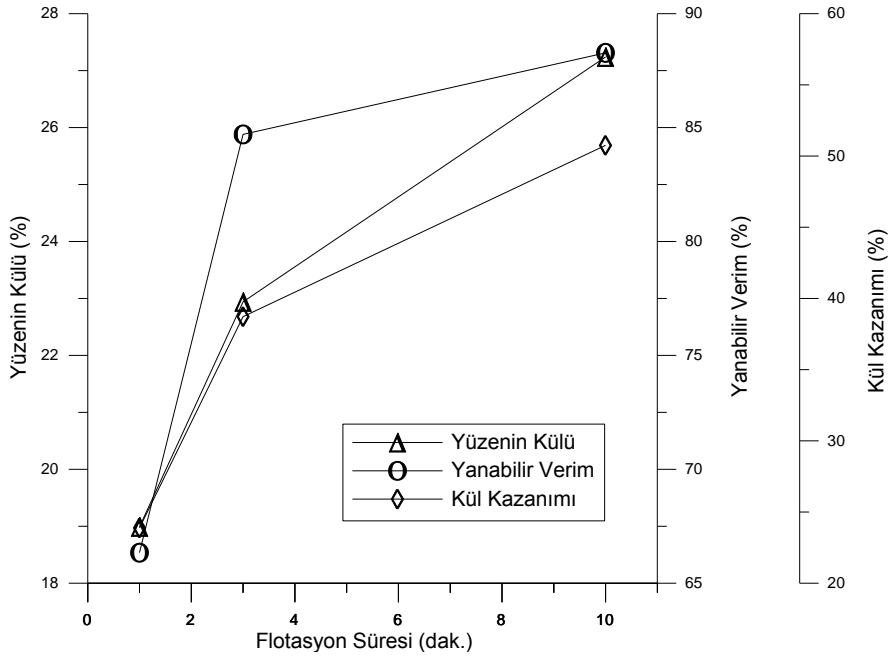
Şekil 25. 150 gr/ton AERO 88 kullanılarak yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 300 gr/ton gazyağı)



Şekil 26. 300 gr/ton AERO 88 kullanılarak yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 300 gr/ton gazyağı)



Şekil 27. 450 gr/ton AERO 88 kullanılarak yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 300 gr/ton gazyağı)



Şekil 28. 750 gr/ton AERO 88 kullanılarak yapılan deney sonuçları
(Besleme: Orijinal kömürün $-710 \mu\text{m}$ 'lik kısmı, Katı Oranı: %20, Toplayıcı: 300 gr/ton gazyağı)

4.5. Temizleme deney sonuçları

Kaba konsantreyi temizleme devresinde bir kademe daha zenginleştirmenin etkilerini belirlenmesi amacıyla AERO 88 ve AERO 65 ile yapılan deney sonuçları Çizelge 23 ve 24'de gösterilmektedir. Bu çalışmalarda 10 dakika süreli kaba konsantrasyondan sonra elde edilen kaba konsantre 1, 3 ve 7 dakika sürelerde temizleme devresinde zenginleştirilmiştir. Elde edilen ürünlerin ağırlık, yanabilir verim ve kül kazanımları kaba devreye yapılan beslemeye göre verilmiştir.

Çizelge 23. AERO 88 ile yapılan bir kademe temizleme deney sonuçları

(Kaba devre katı oranı: %20, 2 dak. öğütülmüş orijinal numune, kaba devre toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, kaba devre köpürtücü: 300 gr/ton AERO 88, temizleme deversi toplayıcı: %100 gr/ton gazyağı, temizleme devresi köpürtücü: 100 gr/ton AERO 88, karıştırma hızı 1000 devir/dak.)

Ürün	Beslemeye göre ağırlık (%)	Kül (%)	Beslemeye göre yanabilir verim (%)	Beslemeye göre kül kazanım (%)
Kaba konsantre	71.23	16.64	89.68	35.09
1 dak. temizleme konsantresi	44.31	10.81	59.69	14.17
3 dak. temizleme konsantresi	61.78	11.75	82.35	21.49
7 dak. temizleme konsantresi	67.90	13.60	88.35	27.26

Çizelge 24. AERO 65 ile yapılan bir kademe temizleme deney sonuçları

(Kaba devre katı oranı: %20, 2 dak. öğütülmüş orijinal numune, kaba devre toplayıcı: 200 gr/ton gazyağı, Kaba devre köpürtücü: 300 gr/ton AERO 65, temizleme deversi toplayıcı: %100 gr/ton gazyağı, temizleme devresi köpürtücü: 100 gr/ton AERO 65, karıştırma hızı 1000 devir/dak.)

Ürün	Beslemeye göre ağırlık (%)	Kül (%)	Beslemeye göre yanabilir verim (%)	Beslemeye göre kül kazanım (%)
Kaba konsantre	74.84	19.73	90.74	43.70
1 dak. temizleme konsantresi	37.91	12.57	50.06	14.10
3 dak. temizleme konsantresi	63.32	14.01	82.23	26.25
7 dak. temizleme konsantresi	69.69	16.03	88.72	33.19

5. DENEY SONUÇLARININ TARTIŞILMASI

5.1. Tane Boyutunun Etkisi

Orijinal numuneyi (yaklaşık %80 –1 mm) hiç öğütmeden yapılan deneyde yanabilir verimin yaklaşık %78 gibi düşük bir değerde olmasının nedeni özellikle +1 mm fraksiyonunun köpükte kazanılma oranının düşük olmasından kaynaklanmıştır. Çizelge 9 ve Şekil 2’de görülebileceği gibi bu fraksiyon havanda 1 mm’nin altına öğütüldüğünde 10 dakikalık bir flotasyon sonunda %17.30 küllü bir temiz ürün %84.14 yanabilir verimle elde edilmiştir. Çizelge 5 incelendiğinde 106 µm’un üstündeki tüm fraksiyonların yanabilir verimleri %87’nin üzerinde iken sadece –106 µm fraksiyonda bu verim yaklaşık %73 olmuştur. Orijinalin –1 mm’lik fraksiyonlarıyla yapılan ve Çizelge 6’da verilen deney sonuçları incelendiğinde ise 250-500, 106-250 ve –106 µm fraksiyonlarında yanabilir kısım kazanımları %85’in üzerinde iken 500-710 ve 710-1000 µm fraksiyonlarında bu değerlerin sırasıyla %74.22 ve %54.04 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde 710 µm üst boyutuyla bile yüksek verimler elde edilebileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca 710-1000 µm aralığındaki tanelerin de çok yüksek olmasa da makul sayılabilecek verimlerle yüzdüğü görülmektedir. Çizelge 5 ve 6 incelendiğinde, köpükle kazanılan kül oranının tane boyu incelidikçe arttığı görülmektedir. Örneğin, 710-1000 µm fraksiyonu için kül kazanımı yaklaşık %10 iken, –106 µm fraksiyonu için bu değer önemli ölçüde artarak %56’ya ulaşmaktadır.

Orijinal örneği hiç öğütmeden yapılan deneyde %17.04 küllü bir ürün %77.53 yanabilir verimle elde edilmiştir. Yapılan gözlemlerde, nispeten düşük sayılabilecek verimin nedeni, iri tanelerin yüzmemesi olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, özellikle +1 mm fraksiyon (%19.22) havanda öğütülerek aynı şartlarda yapılan deneyde ise (Çizelge 9, 10 dak. flotasyon süresi) hemen hemen aynı küllü ürün %84.14 gibi daha yüksek yanabilir verimle kazanılmıştır. Bu durum, +1 mm fraksiyonunun yüzebilirliğinin çok düşük olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5, 6 ve 7’de farklı tane fraksiyonlarının etkilerinin gösterildiği sonuçlar genel olarak irdelendiğinde 106-250 ve 250-500 µm fraksiyonlarında oldukça yüksek yanabilir verimler elde edilirken 500-710 µm, 710-1000 µm ve –106 µm fraksiyonlarında verimlerin biraz daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca –1 mm boyutlu ve %37.59 küllü bir beslemeyle yapılan deneyde (Çizelge 8, Şekil 1) %21.81

küllü bir temiz ürünün yaklaşık %86 verimle elde edilmesi, flotasyonda üst boyutun 1 mm'ye kadar çıkabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, köpükle kazanılan kül oranları tane boyutu inceldikçe artmaktadır. Örneğin, -1 mm boyutlu ve %37.59 küllü beslemeyle yapılan deneyde 710-1000 µm fraksiyonda kül kazanımı %10.10 iken, -106 µm fraksiyon için beslemedeki kül oluşturuucu minerallerin %56.10'u yüzen üründe kazanılmıştır (Çizelge 6). Bu durum, tane boyutu inceldikçe selektivitenin azalmasına yani daha yüksek küllü konsantrelerin elde edilmesine neden olmaktadır. Sonuçlar Akdemir ve Sönmez'in (2005) çalışmasında olduğu gibi, tane boyutunun ayırımındaki en önemli parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca yapılan bazı çalışmalarda da görüldüğü gibi (Abkhosk vd., 2010; Vamvuka ve Agridiotis, 20001; Xiu-xiang vd, 2009; Akdemir vd., 1996) kömür flotasyonu belli bir aralıkta optimum sonuçları verirken, bu aralığın altında ve üzerinde yanabilir verim seçimlilik azalmaktadır.

Yine bu kapsamda, Çizelge 7'de verilen farklı fraksiyonların kül ve su kazanımlarından hesaplanan suyla sürüklenme faktörleri incelendiğinde tane boyu inceldikçe bu değerlerin arttığı açıkça görülebilir. Örneğin 500-710 µm fraksiyonu için 0.17 olarak hesaplanan suyla sürüklenme faktörü, -106 µm için büyük ölçüde artarak 0.83 değerine yükselmiştir. Bu durum gang minerallerinin kazanılmasında önemli nedenlerden birinin suyla sürüklenme olabileceğini göstermekle birlikte şlam kaplanması, tuzaklanma gibi diğer nedenlerde etkili olabilir. Sonuçlar diğer bazı çalışmalarla uyumludur (Akdemir ve Sönmez, 2000; Klimpel ve Hansen, 1987; Buntamante ve Warren, 1985).

5.2. Öğütmenin etkisi

Çizelge 10, Şekil 3'deki deney sonuçları incelendiğinde, orijinal numune 2 dakika öğütüldüğünde (%96.36 -0.5 mm), 5 dakika süre sonunda %17.15 küllü ürünün yaklaşık %92 verimle alındığı görülmektedir. Bu sonuç, üst boyutun 1 mm yerine 0.5 mm olmasının aynı küllü malzeme için selektivite azalmadan yanabilir verimi yükselttiğini göstermektedir. Ancak daha uzun sürelerde elde edilen köpükle yanabilir verim çok fazla artmazken, kül kazanımı önemli ölçüde yükselmektedir. Çizelge 11'deki 5 ve 10 dakikalık flotasyon sürelerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yanabilir verim %92'den %95'e yükselirken, kül kazanımı daha büyük oranda artarak yaklaşık %37'den %50'ye yükselmiştir.

Çizelge 11 ve 12 ile Şekil 4 ve 5’de verilen sonuçlar ise, daha ince öğütmenin hem verimi hem de seçimliliği çok düşürdüğü göstermektedir. Besleme üst boyutu yaklaşık 250 ve 106 μm olan bu deneylerde istenen verimin ve seçimliliğin sağlanamadığı görülmektedir. Bu durum, tane boyutu incelidikçe flotasyon hızının azalması ve ince gang tanelerinin suyla sürüklenme, şlam kaplama gibi mekanizmalarla yüzen ürüne karışmasıyla açıklanabilir (Stonestreet ve Franzidis, 1988; Subrahmanyam ve Forsberg, 1988). Yapılan bir çalışmada (Akdemir vd, 1996) optimum boyutun -250 μm olması ise, farklı bölgelerden alınan kömürlerin farklı davranışlar gösterebileceğini, flotasyon gibi pek çok fiziksel ve kimyasal faktörün rol oynadığı bir yöntemde, her bir örnek için detaylı çalışmaların yapılması gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 14 ve 15’de verilen sonuçlar incelendiğinde, tane boyutu incelidikçe sadece yanabilir kısımların değil, kül ve su kazanımlarının da değişebileceği görülmektedir. Aero 65 köpürtücü kullanarak yapılan deneylerde (Çizelge 15) besleme üst boyutunun yaklaşık 500 μm ’den 106 μm ’ye düşürülmesinin, kül verimini değiştirmede, buna karşılık köpük kazanılan suyun azaldığını ortaya koymaktadır. Bu verilerden hesaplanan suyla taşınma derecelerinin önemli miktarda artmaması ise, gangin köpükle karışmasında sadece suyla taşınma değil, şlam-kaplanma, tuzaklanma gibi diğer bazı mekanizmaların da etkili olabileceğini düşündürmektedir.

Mevcut çalışmada, farklı boyut fraksiyonlarının flotasyon sonuçları, tane boyutunun flotasyon kinetiğini de önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Zaman-verim ilişkileri incelendiğinde (Çizelge 8, 9, 11 ve 12) genel olarak yanabilir kısımların birinci derece modeline benzer davrandığı, kül minerallerinin ise lineer bir artışla kazanıldığı söylenebilir. Kül minerallerinin hız-verim ilişkisinin doğrusal olması, bunların kazanılmasında en önemli mekanizmanın suyla sürüklenme olabileceğini göstermektedir (Akdemir ve Sönmez, 2000; Gülsoy, 1995). Tane boyutu incelidikçe yanabilir verimlerin flotasyon hızı azalırken, kül minerallerinin flotasyon hızları artmaktadır.

5.3. Karıştırma Hızının Etkisi

1000, 1250 ve 1550 dev/dak.hızlarda Aero 88 ve Aero 65 ile yapılan ve sonuçları Çizelge 16 ve 17’de verilen Şekil 6-11’de gösterilen sonuçlar irdelendiğinde, karıştırma hızı arttıkça ağırlık verimi, yanabilir verim ve kül kazanımının arttığı, buna karşılık selektivitenin azalarak konsantrasyonun önemli ölçüde yükseldiği görülmektedir. Bu

sonuçlar literatürde birçok araştırmacının (Jena vd, 2008; Akdemir ve Sönmez, 2000; Bentli 2000) sonuçlarıyla benzerlikler göstermektedir. 1000 dev/dak. hızda ve Aero 88 ortamında %18.11 küllü ürün yaklaşık %85 yanabilir verimle elde edilirken, hızın 1250 dev/dak.'ya çıkarılmasıyla yanabilir verim yanabilir verim ~%90'a yükselmekte, buna karşılık ürünün küllü de önemli ölçüde yükselerek %21.13 olmaktadır. Benzer flotasyon davranışları Aero 65 köpürtücü kullanıldığında da gözlenmiştir. Hız arttıça hem yanabilir hem kül veriminin artması, artan hızlarda tanenin köpükle çarpışma ve köpüğe yapışma olasılığının artmasıyla açıklanabilir.

5.4. Pülp Yoğunluğunun Etkisi

Kömür flotasyonunda, temiz kömür elde etmek için %5-10 gibi düşük pülp yoğunlukları önerilmektedir (Klimpel ve Hansen, 1987; Rastogi ve Aplan, 1985). Mevcut çalışmada ise, katı oranının azalması selektiviteyi önemli ölçüde etkilememiştir. Çizelge 18 ve 19'da verilen ve Şekil 12-15'de gösterilen deney sonuçları, pülp yoğunluğunun flotasyonu önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir. Aero 88 ortamında, %30 katı oranında 5 dakika sürede ~%87 verimle %20.79 küllü bir ürün elde edilirken, diğer katı konsantrasyonlarında bu verimde elde edilen temiz kömür külleri bir miktar daha yüksek olmuştur. Aero 65 ile çalışılan katı konsantrasyonlarında ise (%5, %10 ve %20) verim ve selektivite açısından önemli bir fark gözlenmemiştir. Kısaca, katı oranı çalışma kapsamında etkili bir parametre olarak değerlendirilememiştir.

5.5. Gazyağı ve Köpürtücü Miktarının Etkisi

Bazı tür taşkömürlerinin kuvvetli hidrofobik olduğu ve hiç toplayıcı kullanmadan sadece köpürtücü ile yüzdüğu bilinmektedir. Mevcut çalışmada, farklı konsantrasyonlarda gazyağının kullanıldığı deneylerin sonuçları incelendiğinde (izelge 21, Şekil 19, 20, 21) kömürün özellikle Aero 65 ile yapılan deneyde toplayıcısız olarak çok yüksek verimlerle yüzdüğu açıkça görülmektedir. Bu deneyde hiç gazyağı kullanmadan 5 dakika flotasyon sonucu %17.57 küllü ürün, yaklaşık %91 yanabilir verimle elde edilmiştir. 200 ve 400 gr/ton gazyağı konsantrasyonunda ise yanabilir verim hemen hemen değişmezken, ürünün küllü yaklaşık %19 ve %22'ye yükselmiştir. Köpürtücü olarak Aero 88 kullanıldığında ise, 10 dakika flotasyon sonucu yanabilir verim yaklaşık %78 gibi nispeten düşük seviyelerde kalırken, gazyağı kullanıldığında bu değer ~%90'a çıkmakta, buna karşılık selektivite azalarak yüzen

ürünün külü yükselmektedir. Bunun nedeni gazyağının sadece yanabilir değil, kül verimini de önemli ölçüde arttırmasıdır. Örneğin Aero 88 ortamında, 10 dakika sonunda toplayıcısız ortamda ~%32 olan kül kazanımı, 200 gr/ton gazyağı kullanıldığında ~%45'e yükselmiştir. Bu sonuçlar, çalışmada kullanılan kömürün hidrofobik olduğunu, ancak bazı durumlarda verimi arttırmak için bir miktar gazyağının kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca Aero 65 ile toplayıcısız ortamda elde edilen yüksek verim, bu köpürtücünü toplayıcı etkisini ortaya koymaktadır.

4 farklı köpürtücü (Aero 88) dozajında yapılan deney sonuçları incelendiğinde (Çizelge 22, Şekil 22-28) köpürtücü miktarının kömürün ve kül-oluşturan minerallerin köpükte kazanılmasını etkilediği, ancak bu etkinin sınırlı olduğu görülebilir. Optimum sonuçlar 300 ve 450 gr/ton konsantrasyonlarda elde edilirken, yüksek (750 gr/ton) konsantrasyonda konsantre külü %24-25 seviyesinden, %27.24'e yükselmiştir.

5.6. Flotasyon Kinetiği

Mevcut tez kapsamında tanelerin hız sabitlerini belirlemeye yönelik analitik bir çalışma yapılmamakla birlikte, deneylerin birçoğunun zaman-artırımlı (time-incremented) gerçekleştirilmesi nedeniyle, hem yanabilir kısımların hem de kül minerallerinin kinetik davranışları izlenebilmektedir. Tüm bu deneyler incelendiğinde, yanabilir kısımların flotasyon kinetiğinin 1. derece davranışa benzer olduğu görülmektedir. Bu kısımlar çok hızlı bir şekilde yüzerek, 1 dakika flotasyon sonucu yanabilir verimler %40-60'a ulaşırken, daha sonra flotasyon hızı biraz yavaşlamakla birlikte, 5 dakika sonunda %70-85'e yükselmektedir. 5 dakikadan sonraki sürelerde ise, yanabilir verimler sadece birkaç puan artmaktadır. Kısaca kömürün flotasyonu yaklaşık 5 dakika sonunda hemen hemen tamamlanmaktadır.

Öte yandan, kül-oluşturucu minerallerin flotasyon hızı kömürden daha düşüktür. Çalışma kapsamındaki kül kazanımı-flotasyon süresi verileri incelendiğinde, lineere yakın bir ilişkiden söz etmek yanlış olamayacaktır. Bu tanelerin köpükte kazanımı 5 dakikadan sonrada devam etmektedir. Bu durumda, 5 dakikadan sonra yanabilir verimdeki artış çok sınırlı olurken, yüzen ürünün külü önemli ölçüde artabilmektedir. Örneğin Çizelge 18'de ağırlıkça %30 katı oranında yapılan deney sonuçları incelendiğinde 5 dakika flotasyonla %20.79 küllü ürün %87.85 yanabilir verimle kazanılabilirken, 10 dakika sonunda ürünün külü %23.79'a yükselmekte, ancak yanabilir verim çok kısmi bir artışla %90.16'ya çıkmaktadır. Bu sonuçlar, flotasyon

süresinin sistemden sisteme değişebilen önemli bir parametre olduğunu ve kül-verim dengesi gözetilerek optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir. Deneyler %34.20 kül içeren Zonguldak'tan gelen toz taşkömürü ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar yanabilir verim ve kül atımı yönünden incelenmiştir.

1. Orijinal numune ile yapılan flotasyonda verim yaklaşık %78 bulunurken, +1 mm'lik kısım havanda öğütüldüğünde verim %84.14 olmaktadır. Orijinal malzemenin -1 mm'lik kısmıyla yapılan deneylerde 500-106 µm tane aralığında %85'in üzerinden yanabilir verim hesaplanırken 500-1000 µm'de ise verimin düştüğü gözlenmiştir. Genel olarak bakıldığında -106 µm'de kül kazanımlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Çalışmalar tane boyutunun ayırımdaki en önemli parametre olduğunu göstermektedir.
2. Kömürün öğütülerek kullanıldığı flotasyon deneylerinde 2 dakika öğütülen malzeme 5 dakika flotasyon süresi sonucunda %17.15 küllü ürün ~%92 verimle elde edilmiştir. 5 ve 15 dakika öğütülen malzemelerle yapılan deneylerde ise 5 dakika flotasyon süresi sonunda sırasıyla %16.04 ve %22.55 küllü konsantreler %52.11 ve %67.22 yanabilir verimle elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde öğütme süresi arttıkça seçimliliğin çok düştüğü gözlenmektedir.
3. 1000, 1250 ve 1550 dev/dak. karıştırma hızlarda yapılan deneylerde, hız arttıkça ağırlık verimi, yanabilir verim ve kül kazanımlarının yükseldiği ve selektivitenin azalarak konsantre külünün önemli ölçüde arttığı görülmektedir.
4. Yapılan deneylerde pülp yoğunluğunun selektiviteyi önemli ölçüde etkilemediği gözlenmiştir. Katı oranı, çalışma kapsamında etkili bir parametre olarak değerlendirilmemiştir.
5. Toplayıcı (gazyağı) ve köpürtücü (Aero 88 ve Aero 65) reaktiflerin miktarlarının etkileri incelendiğinde Aero 65 ile yapılan deneyde toplayıcısız olarak kömürün çok yüksek verimlerle yüzdüğü belirlenmiştir (5 dak. flotasyon süresi, %17.57 kül, ~%91 yanabilir verim). Köpürtücü olarak Aero 88 kullanıldığında ise 10 dakika flotasyon süresi sonunda yanabilir verim %78 gibi düşük seviyelerde kalırken, gazyağı kullanıldığında bu değer ~%90'a çıkmaktadır. Optimum sonuçlar 300 ve 450 gr/ton konsantrasyonlarında elde edilirken, 750 gr/ton konsantrasyonunda konsantre külü %24-25 seviyesinden %27.24'e yükselmiştir.

6. Çalışmada tanelerin hız sabitlerini belirlemeye yönelik analitik bir çalışma yapılmamakla birlikte, birçok deneyin zaman artırımlı gerçekleştirilmesi nedeniyle yanabilir kısım ve kül minerallerinin kinetik davranışları izlenebilmektedir. 1 dakika flotasyon süresi sonucu yanabilir verimler %40-60'a ulaşırken, daha sonra flotasyon hızı biraz yavaşlamakla birlikte, 5 dakika sonunda %70-85'e yükselmektedir. 5 dakikadan sonraki sürelerde ise, yanabilir verimler sadece birkaç puan artmaktadır. Yüzen ürünün külü ise 5 dakikadan sonra önemli ölçüde artmaktadır.
7. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda optimum koşullar şu şekilde belirlenmiştir: Tane iriliği: %96 -500 µm; gazyağı miktarı: 200 gr/ton; Köpürtücü miktarı: 300 gr/ton; Karıştırma hızı: 1000 dev./dak.; Pülp yoğunluğu: %20 katı. Bu koşullarda yapılan deneyden elde edilen kaba konsantrenin bir kademe temizlenmesi sonucu %34.20 küllü orijinal kömürden %13.60 kül içeren bir konsantre yaklaşık %88 yanabilir verimle elde edilmiştir.
8. Bu konuda çalışabilecek araştırmacılara, tane boyutunun etkisinin daha detaylıca çalışılması, farklı reaktiflerin etkilerinin incelenerek ortaya konması ve tüm faktörlerin etkilerinin modelleme ile incelenmesi önerilebilir.

KAYNAKLAR

1. Abkhoshk, E., Kor, M. and Rezai, B. (2010). A Study on the Effect of Particle Size on Coal Flotation Kinetics Using Fuzzy-Logic, Expert Systems with Applications, 37, 5201-5207.
2. Akdemir, Ü., Sönmez, İ., Yekeler, M. ve Canbazoğlu, M. (1996). İnce Boyutlu Kömürün Flotasyon Kinetiği, 9. Mühendislik Sempozyumu, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 29-31 Mayıs, s. 75-78.
3. Akdemir, Ü. ve Sönmez, İ. (2000). Taşkömürü Flotasyonunda Fiziksel Faktörlerin Etkilerinin İncelenmesi, Cumhuriyet Üniversitesi Araştırma Fonu, No: M-139.
4. Arnold, B. J. and Aplan F.F. (1986). The Effect of Clay Slimes on Coal Flotation, Part I: The Nature of Clay, International Journal of Mineral Processing, 17, 225-242.
5. Atak, S. ve Önal, G. (1991). Kömür, Ed. Orhan Kural, Kurtiş Matbaası, İstanbul.
6. Ateşok, G. (2004). Kömür Hazırlama ve Teknolojisi, İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul.
7. Ateşok, G., Boylu, F. and Çelik, M.S. (2001). Carrier Flotation for Desulfurization and Deashing of Difficult-to-Float Coals, Minerals Engineering, 14, 661-670.
8. Bennett, A.J.R., Chapman, W.R. and Dell C.C. (1958). Froth Flotation of Coal, 3rd International Coal Preparation Congress, Liege, Belgium, June 1958, 452-462.
9. Bentli, İ. (2000). Flotasyon Makine Tasarımı, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
10. Bentli, İ. ve Kaya, M. (2004). Kütahya Değirmisaz -0.5 mm Linyit Kömürünün Modifiye Flotasyon Hücrelerinde Zenginleştirilmesi, Türkiye 14. Kömür Kongresi, Zonguldak, 2-4 Haziran, 229-235.
11. Boylu, F., Janusz, S. and Laskowski, S. (2007). Rate of Water Transfer to Flotation Froth in the Flotation of Low-Rank Coal That Also Requires the Use of Oily Collector, International Journal of Mineral Processing, 83, 125-131.

12. Bustamante, H. and Warren, L. J. (1985). Factors Affecting the Floatability of Australian Bituminous Coals, 15th International Mineral Processing Congress, Cannes, V.2, 232-243.
13. Cebeci, Y. (2002). The Investigation of the Floatability Improvement of Yozgat Ayırdam Lignite Using Various Collectors, Fuel, 81, 281-289.
14. Denby, B., Elverson, C. and Hal, S. (2002). The Use of Short Chain Volatile Fatty Acids in Fine Coal Preperation, Fuel, 81, 595-603.
15. Ersayın, S. (1989). Tane Boyu Dağılımının Kalkopirit Flotasyonunun Kinetik Parametreleri Üzerine Etkisi, 11. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi, Ankara, 24-28 Nisan, 417-430.
16. Firth, A.S., Swanson, A.S. and Nicol, S.K. (1979). Flotation Circuits for Poorly Floating Coals, International Journey of Mineral Processing, 5, 321.
17. Fuerstenau, D.W., Diao, J., Hanson, J.S., Sotillo, F. and Somasundaran, P. (1994). Effect of Weathering on the Wetting Behavior and Flotation Response of Coal, in: Blarends in Coal Preparation Technologies and Equipment, Gordon & Breach, 747-753.
18. Gülsoy, Ö.Y. (1995). Hidrofobik ve Hidrofilik Mineral Flotasyonu Üzerinde Su Kazanımının Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
19. Güney, A., Ateşok, G., Önal G. ve Atak, S. (1997). Türkiye Linyitlerine Uygulanması Gereken İyileştirme Yöntemleri, 4. Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri, Çayırhan, 85-106.
20. Gupta, A.K., Banerjee, P.K. and Mishra, A. (2009). Influence of Chemical Parameters on Selectivity and Recovery of Fine Coal Through Flotation, International Journey of Mineral Processing, 92, 1-6.
21. Gupta, A.K., Banerjee, P.K., Mishra, A., Satish, P. and Pradip (2007). Effect of Alcohol and Polyglycol Ether Frothers on Foam Stability, Buble Size and Coal Flotation, International Journey of Mineral Processing, 82, 126-137.
22. Hacıfazlıoğlu, H. and Sütçü, H. (2007). Optimization of some Parameters in Clolumn Flotation and Comparison of Conventional Cell and Column Cell in Terms of Flotation Performance, Journey of Chinese Institute of Chemical Engineers, 38, 287-293.

23. Jena, M.S., Biswall, S.K., Das, S.P. and Reddy, P.S.R. (2008). Comparative Study of the Performance of Conventional and Column Flotation When Treating Coking Coal, *Fuel Process Technology*, 89, 1409-1415.
24. Jowett, A. (1983). Particle Size Effect in Coal Flotation, *Proc. Symp. On Improving Froth Flotation Coal*, Univ. of NSW, Australia.
25. Kaytas, Y. (1988). Amasra Havzası Taşkömürlerinin ve Lavvar Artığı Şistlerin Yıkabilme Özellikleri, *Türkiye 6. Kömür Kongresi*, Maden Mühendisleri Odası, Amasra, 303-320.
26. Kirjavainen, V.M. (1989). Application of a Probability Model for the Entrainment of Hydrophilic Particles in Froth Flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 27, 63-74.
27. Klimpel, R.R. and Hansen, R.D. (1987). Chemistry of Fine Coal Flotation, *Fine Coal Processing*, S. Mishra and R.R. Klimpel (Eds.), Noyes Publications, pp. 78-106.
28. Laskowski, J.S. (2001). *Coal Flotation and Fine Coal Utilization*, D.W. Fuerstenau / Advisory Editor, Volume 14, Elsevier.
29. Laskowski, J.S. (2006). Coal Flotation-The Future, *Proceedings of XXIII International Mineral Processing Congress*, İstanbul/Turkey, 3-8 September, 2, 1101-1110.
30. Nikol, S.K. and Bensley, C.N. (1988). Recent Developments in Fine Coal Preparation in Australia, *Proc. of the Conference on Industrial Practice of Fine Coal Processing*, R.R. Klimpel and P.T. Luckie (Eds.) Hidden Valley, 147-158.
31. Oats, W.J., Özdemir, O. and Nguyen, A.V. (2010). Effect of Mechanical and Chemical Clay Removals by Hydrocyclone and Dispersants on Coal Flotation, *Minerals Engineering*, 23, 413-419.
32. Özbayoğlu, G. ve Bilgen, S. (1997). *Türkiye'deki Kömür Yıkama Tesisleri*, 4. Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri, Çayırhan.
33. Özdemir, O., Taran, E., Hampton, M.A., Karakasheu, S. I. and Nguyen, A.V. (2009). Surface Chemistry Aspects of Coal Flotation in Bore Water, *International Journal of Mineral Processing*, 92, 177-183.
34. Rastogi, R.C. and Aplan, F.F. (1985). Coal Flotation as a Rate Process, *Minerals and Metallurgical Processing*, 2.

35. Şengüler, İ. (2007). Asfaltit ve Bitümlü Şeylin Türkiyedeki Potansiyeli ve Enerji Değeri, TMMOB Türkşye VI. Enerji Sempozyumu Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye Gerçeği, 186-195.
36. 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.
37. Somasundaran, P., Zhang, L. and Fuerstenau, D.W. (2000). The Effect of Environment, Oxidation and Dissolved Metal Species on the Chemistry of Coal Flotation, International Journey of Mineral Processing, 58, 85-97.
38. Sönmez, İ., Akdemir, Ü. and Şahbudak, K. (2005). Inceasing Selectivity in Coal Flotation by Controlling Impeller Speed and Collector Concentration, Energy Sources, 27, 381-386.
39. Sönmez, İ. and Cebeci, Y. (2006). Performance of Classic Oils and Lubricating Oils in Froth Flotation of Ukraine Coal, Fuel, 85, 1866-1870.
40. Stonestreet, P. and Franzidis, J.P. (1988). Reverse Flotation of Coal-A Novel Way for the Beneficiation of Coal Fines, Minerals Engineering, 1, 343-349.
41. Subrahmanyam, T. V. and Forsberg, E. (1988). Froth Stability, Particle Entrainment and Drainage in Flotation, International Journal of Mineral Processing, 23, 33-53.
42. Tao, D., Li, B., Johnson, S. and Parekh, B.K. (2002). A Flotation Study of Refuse Pond Coal Slurry, Fuel Processing Technology, 76, 201-210.
43. Tefek, M. (1984). İnce Kömür Flotasyonunda Parçacıkların Davranışları, Türkiye 4. Kömür Kongresi, 261-267.
44. Vamvuka, D. and Agridiotis, V. (2001). The Effect of Chemical Reagents on Lignite Flotation, International Journey of Mineral Processing, 61, 209-224.
45. Vapur, H., Bayat, O. and Uçurum, M. (2010). Coal Flotation Optimization Using Modified Flotation Parameters and Combustible Recovery in a Jameson Cell, Energy Conversion and Management, 51, 1891-1897.
46. Xiu-xiang, T., Yi-jun, C., Jing, I., Kai-yi, S., Jin-yan, L. and Fan, M. (2009). Studies on Characteristics and Flotation of a Hard-to-Float High-Ash Fine Coal, Procedia Earth and Planetary Science, 1, 799-806.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Elif Akgül
Doğum Yeri ve Tarihi	İzmir, 16/05/1984
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 58140-Sivas
E-posta Adresi	eakgul@cumhuriyet.edu.tr

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	İzmir İnönü Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi, 2002
Lisans	Dokuz Eylül Üniversitesi, 2007

İş Tecrübesi

Cumhuriyet Üniversitesi Araştırma görevlisi, 2009-