



T. C.

SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİNYİT KÖMÜRÜNÜN FLOTASYON YÖNTEMİ İLE
ZENGİNLEŞTİRİLMESİNDE BAZI İŞLETME FAKTÖRLERİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şeyda KAYA

(20199221008)

Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yakup CEBECİ

2. Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Turan KILINÇ

SİVAS

OCAK 2024

Şeyda KAYA'ın hazırladığı ve “**LİNYİT KÖMÜRÜNÜN FLOTASYON YÖNTEMİ İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİNDE BAZI İŞLETME FAKTÖRLERİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı **Prof. Dr. Yakup CEBECİ**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Alper ÖZKAN**
Konya Teknik Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç. Dr. Özlem KAYA**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Şeyda KAYA, 2024

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

17.01.2024

Şeyda KAYA

ÖZET

LİNYİT KÖMÜRÜNÜN FLOTASYON YÖNTEMİ İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİNDE BAZI İŞLETME FAKTÖRLERİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Şeyda KAYA

Yüksek Lisans Tezi

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yakup CEBECİ

2. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Turan KILINÇ

2024, 100+xvii sayfa

Küresel olarak kömür önemli bir fosil enerji kaynağıdır ve aynı zamanda farklı endüstriler için hammadde niteliğindedir. Kömür başta gelişmemiş bölgeler olmak üzere gelecekte enerji üretimindeki yerini koruyacaktır. Kömür yakıldığında çeşitli çevresel problemlere sebep olmaktadır. Bundan dolayı kömürün yakılmadan önce zenginleştirilmesi, kömürdeki istenmeyen bileşenleri azaltacaktır. Bu nedenle çevresel problemler de azalacaktır. Linyit genel olarak yüksek kül, nem ve uçucu madde içeriğine sahiptir. Aynı zamanda linyit kolay bir şekilde kendiliğinden yanma özelliği göstermektedir. Linyit yüzeyi yüksek miktarda oksijen içeren, fonksiyonel gruplara sahiptir.

Flotasyon, mükemmel ayırma performansı nedeni ile ince tane boyunda ki ($<0,5$ mm) kömürleri zenginleştirmek için çok etkili bir yöntemdir. Flotasyonda organik kısım ve mineral madde arasındaki yüzey hidrofobluk farklılığı nedeniyle, kömür ve gangın seçimli ayrımı sağlanmaktadır. Gazyağı ve fuel oil gibi klasik kollektörler, linyitin yüksek hidrofilik davranış göstermesi nedeni ile linyit flotasyonu için uygun değildir. Bu kollektörlerle, linyiti kabul edilebilir randıman değerleri ile zenginleştirebilmek için yüksek miktarlara ihtiyaç duyulmaktadır. Linyitin düşük yüzebilirlik davranış göstermesi, karboksil ve hidroksil gibi oksijen içeren fonksiyonel grupları yüksek miktarda içermesinden kaynaklanmaktadır. Polar oksijen içeren fonksiyonel gruplar, su ile hidrojen bağı oluşturmaktadır. Bundan dolayı, linyit ve hava kabarcığı arasındaki sıvı

filmin incelme hızı yavaştır. Böylece tanecik kabarcık tutunması önlenmektedir. Ayrıca linyitin yüksek oranda gözenek içermesi de flotasyon esnasında aşırı reaktif tüketimine sebep olabilmektedir. Linyitin flotasyon ile zenginleştirilmesinde düşük flotasyon verimi, yüksek kollektör tüketimi ve bunun sonucu olarakta yüksek maliyetler ana problemlerdir. Linyitin flotasyon performansı; öğütme, reaktif uygulaması, ısıtma işlemi gibi flotasyon öncesi ön işlemler uygulanarak artırılabilir.

Bu çalışmada, Edirne bölgesinden alınan linyitin flotasyon ile zenginleştirilmesinde değişik kollektörlerin etkileri incelenmiştir. Çalışmada gazyağı, mazot, oleik asit ve bunların karışımları kullanılmıştır. Karışımların etkisi %25, %50 ve %75 ağırlık oranlarında incelenmiştir. Flotasyon performansı yanabilir verim, kül atımı ve verim indeksi ile değerlendirilmiştir. En iyi sonuçlar oleik asitle elde edilmiştir. Bununla birlikte, karışımdaki oleik asit miktarı arttığında gazyağı ve mazotun flotasyon performansı artmıştır. Karışımlardan en iyi sonuçlar oleik asit/gazyağı ağırlık oranı 3/1 olduğunda elde edilmiştir.

Ayrıca pH, bastırıcı miktarı (sodium silikat), köpürtücü miktarı, katı oranı ve flotasyon süresinin yanabilir verim, kül atımı ve verim indeksine olan etkileri araştırılarak optimum koşullar belirlenmiştir. Optimum koşullarda elde edilen kaba konsantreye temizleme flotasyonu uygulanarak, %46,00 kül içeren kömürden %21,33 kül içeren temiz konsantre, %38,89 yanabilir verim ile üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kömür, Linyit, Flotasyon, Yanabilir Verim, Verim İndeksi, Kül atımı.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SOME OPERATIONAL FACTORS ON THE ENRICHMENT OF LIGNITE COAL BY USING FLOTATION METHOD

Şeyda KAYA

Master of Science Thesis

Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Yakup CEBECİ

2. Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Turan KILINÇ

2024, 100+xvii pages

Globally, coal is an important fossil energy source and is also a raw material for different industries. Coal will maintain its place in energy production in the future, especially in undeveloped regions. When coal is burned, it causes various environmental problems. Therefore, enriching the coal before it is burned will reduce the undesirable components in the coal. Therefore, environmental problems will also decrease. Lignite generally has high ash, moisture and volatile matter content. At the same time, lignite is easily self-combustible. Lignite surface has functional groups containing high amount of oxygen.

Flotation is a very effective method for enriching fine-grained (< 0.5 mm) coals due to its excellent separation performance. In flotation, selective separation of coal and gangue is achieved due to the difference in surface hydrophobicity between the organic part and the mineral matter. Conventional collectors such as kerosene and fuel oil are not suitable for lignite flotation due to the highly hydrophilic behavior of lignite. With these collectors, high amounts are required to enrich the lignite with acceptable yield values. The low flotability behavior of lignite is due to its high content of oxygen-containing functional groups such as carboxyl and hydroxyl. Functional groups containing polar oxygen form hydrogen bonds with water. Therefore, the thinning rate of the liquid film between the lignite and the air bubble is slow. Thus, particle bubble adhesion is prevented. In addition, the high porosity of lignite may cause excessive reagent consumption during flotation.

Low flotation efficiency, high collector consumption and as a result, high costs are the main problems in the enrichment of lignite by flotation. Flotation performance of lignite; It can be increased by applying pre-treatments such as grinding, reagent application, heat treatment before flotation.

In this study, the effects of different collectors on the enrichment of lignite from Edirne region by flotation were investigated. In the study, kerosene, diesel oil, oleic acid and their mixtures were used. The effect of the mixtures was investigated at 25%, 50% and 75% weight ratios. Flotation performance was evaluated by combustible recovery, ash removal and efficiency index. The best results were obtained with oleic acid. However, the flotation performance of kerosene and diesel oil increased when the amount of oleic acid in the mixture increased. The best results from the mixtures were obtained when the weight ratio of oleic acid/kerosene was 3/1.

In addition, the effects of pH, depressant (sodium silicate) amount frother amount, pulp density and flotation time on combustible recovery, ash removal and efficiency index were studied and optimum conditions were determined. The rougher concentrate obtained at optimum conditions was cleaned and a clean coal containing 21.33% ash was produced with 38.89% combustible recovery from the feed coal containing 46.00% ash.

Key Words: Coal, Lignite, Flotation, Combustible recovery, Efficiency index, Ash removal

KATKI BELİRTME ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Yakup CEBECİ ve 2. Danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Turan KILINÇ ‘a çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince bilgi ve deneyimleri ile yardımını esirgemeyen değerli hocalarım; Doç. Dr. Özlem KAYA, Dr. Öğr. Üyesi Güler BAYAR ve Öğr. Gör. Mehmet İbrahim KULAKSIZ ‘a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta babam ve annem olmak üzere tüm aileme, değerli arkadaşlarıma ve hayatımda yer edinmiş tüm güzel insanlara çok teşekkür ederim.

Son olarak kendime olan inancım, emeklerim ve çabalarım için, yaşadığım tüm zorluklara, endişelerime, hayatın getirdiği tüm acılara rağmen her pes ettiğimde tekrar ayağa kalkma gücü bulduğum için kendime teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ETİK	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KÖMÜR HAKKINDA GENEL BİLGİLER	2
2.1. Kömürün Özellikleri	2
2.2. Kömürün Petrografik İçeriği	3
2.2.1. Vitren	4
2.2.2. Klaren	4
2.2.3. Düren	4
2.2.4. Füzen	4
2.2.5. Mineraller	4
2.2.5.1. Kil mineralleri.....	5
2.2.5.2. Karbonatlar	5
2.2.5.3. Silikatlar ve diğer mineraller	5
2.2.5.4. Tuzlar	6
2.2.5.5. İz ögeler	6
2.3. Kömür Türleri	6
2.3.1. Turba.....	6
2.3.2. Linyit	7
2.3.3. Taş kömürü	8
2.3.4. Antrasit	8
2.3.5. Grafit.....	8
2.4. Kömürün içerdği safsızlıklar	8
2.4.1. Nem.....	8
2.4.2. Kül	9
2.4.3. Kükürt	9
2.5. Kömür Rezervleri.....	10
2.5.1. Dünya kömür üretimi ve tüketimi	10

2.5.2. Türkiye kömür üretimi ve tüketimi	12
2.5.3. Linyitin Enerji Sektöründe Kullanımı	13
2.6. Kömürün Zenginleştirilmesi	13
2.6.1 İri kömürün zenginleştirilmesi	15
2.6.1.1 Ağır ortam ayırması	15
2.6.1.2. Jig.....	16
2.6.2 İnce kömürün zenginleştirilmesi	16
2.6.2.1 Ağır ortam siklonları.....	16
2.6.2.2 Sarsıntılı masalar.....	17
2.6.2.3 Reichert konileri	17
2.6.2.4 Multi gravite ayırıcısı (MGS)	17
2.6.3 Toz (Çok İnce) kömürün zenginleştirilmesi.....	18
3. FLOTASYON.....	19
3.1. Flotasyonun Tanımı	19
3.2. Flotasyon Makineleri	21
3.2.1. Mekanik karıştırmalı flotasyon.....	21
3.2.2. Kolon flotasyon hücreleri	22
3.2.3. Jet flotasyon hücreleri.....	24
3.2.4. Jameson flotasyonu	24
3.3. Flotasyon Reaktifleri	25
3.3.1. Toplayıcı reaktifler	25
3.3.2. Köpürtücü reaktifler	27
3.3.3. Yardımcı reaktifler	29
3.4. Kömür Flotasyonu.....	29
3.5. Flotasyon İle İlgili Yapılmış Çalışmalar	30
4. MATERYAL VE METOT.....	34
4.1. Materyal	34
4.1.1. Linyit kömür örneğinin XRD analizi	34
4.1.2. Fırın ölçümleri	35
4.2. Metot	35
4.2.1. Numune hazırlama.....	35
4.2.2. Elek analizi	37
4.2.3. Kömürün kısa analizi.....	38

4.3. Flotasyon Deneylerinin Yapılışı	41
4.4. Hesaplamalar	44
4.5. Temas Açısı Ölçümü	45
5. FLOTASYON DENEY SONUÇLARI.....	46
5.1. Toplayıcı Türü ve Miktarının Araştırılması	46
5.1.1. Tekli toplayıcıların etkisinin araştırılması	48
5.1.1.1. Mazotun etkisinin araştırılması	48
5.1.1.2. Gazyağının etkisinin araştırılması	50
5.1.1.3. Oleik asitin etkisinin araştırılması	51
5.2. Kullanılan Reaktiflerin (Gazyağı, Mazot, Oleik Asit) Karşılaştırılması.....	52
5.3. İkili Toplayıcı Karışımlarının Etkisinin Araştırılması	54
5.3.1. Oleik asit ve mazot karışımının etkisinin araştırılması	55
5.3.1.1. %25 oleik asit + %75 mazot etkisi.....	55
5.3.1.2. %50 oleik asit + %50 mazot etkisi.....	56
5.3.1.3. %75 oleik asit + %25 mazot etkisi.....	58
5.3.2. Oleik asit ve gazyağı karışımının etkisinin araştırılması.....	59
5.3.2.1. %25 oleik asit + %75 gazyağı etkisi.....	59
5.3.2.2. %50 oleik asit + %50 gazyağı etkisi.....	60
5.3.2.3. %75 oleik asit + %25 gazyağı etkisi.....	62
5.4. Karışımların Etkisinin Toplu Değerlendirilmesi.....	63
5.5. Karışımlar ve Saf Toplayıcıların Etkisinin Değerlendirilmesi.....	65
5.6. pH'ın Etkisinin Araştırılması	66
5.7. Bastırıcı (Sodyum Silikat) Miktarının Etkisinin Araştırılması	68
5.8. Köpürtücü (Çamyacı) Miktarının Etkisinin Araştırılması	70
5.9. Katı Oranının Etkisinin Araştırılması	72
5.10. Köpük Alma Süresinin Etkisinin Araştırılması.....	73
5.11. Flotasyonda Temizleme Devreleri	75
5.12. Fır bulgularının değerlendirilmesi	76
6. TARTIŞMA ve SONUÇLAR.....	78
6.1. Tartışma.....	78
6.2. Sonuçlar.....	79
KAYNAKLAR	82
EKLER	93

EK-1 Linyit Örneğinin XRD Analizi	93
EK-2 Tez Çalışması Fotoğrafları	94



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Elektrik üretimlerinde kömüre dayalı ülkeler ve kömürün payı (TTK, 2018).....	11
Şekil 2.2 Kömür arzının sektörlere göre tüketim dağılımı (TKİ, 2018).....	12
Şekil 2.3 Dört adet paralel devreyi birleştiren modern bir kömür zenginleştirme akım şeması (Honaker and Forrest, 2003).....	15
Şekil 3.1 Köpük flotasyonunun prensibi (Wills and Finch., 2016).	19
Şekil 3.2 (a) Hava kabarcığına tutunan partikül ve (b) temas açısı ve yüzey gerilim kuvvetlerinin klasik gösterimi (Wills and Finch., 2016).	20
Şekil 3.3 Outokumpu flotasyon hücresi (Hacıfazlıoğlu, 2009).	22
Şekil 3.4 CPT kolonu görüntüsü (Hacıfazlıoğlu, 2009).	23
Şekil 3.5 Klasik jet flotasyonu (Hacıfazlıoğlu, 2009).	24
Şekil 3.6 Jameson flotasyon hücresi (Hacıfazlıoğlu, 2009).	25
Şekil 4.1 Numune hazırlama akım şeması.....	36
Şekil 4.2 Kümülatif elek altı ve kümülatif elek üstü eğrileri.....	37
Şekil 4.3 Çeneli kırıcı	39
Şekil 4.4 Halkalı değirmen	39
Şekil 4.5 Çubuklu değirmen	40
Şekil 4.6 Elektro- manyetik etüv	40
Şekil 4.7 Fırın	41
Şekil 4.8 Flotasyon akım şeması	43
Şekil 4.9 Deneylerde kullanılan flotasyon cihazı	44
Şekil 5.1 Mazot miktarının flotasyona etkisi.....	49
Şekil 5.2 Gazyağı miktarının flotasyona etkisi.....	51
Şekil 5.3 Oleik asit miktarının flotasyona etkisi.....	52
Şekil 5.4 Reaktiflerin külünün karşılaştırılması	53
Şekil 5.5 Reaktiflerin yanabilir verimlerinin karşılaştırılması	53
Şekil 5.6 Reaktiflerin verim indeksinin karşılaştırılması	54
Şekil 5.7 %25 oleik asit + %75 mazotun linyit flotasyonuna etkisi	56
Şekil 5.8 %50 oleik asit + %50 mazotun linyit flotasyonuna etkisi	57
Şekil 5.9 %75 oleik asit + %25 mazotun linyit flotasyonuna etkisi	59
Şekil 5.10 %25 oleik asit + %75 gazyağının linyit flotasyonuna etkisi	60
Şekil 5.11 %50 oleik asit + %50 gazyağının linyit flotasyonuna etkisi	61

Şekil 5.12 %75 oleik asit + %25 gazyağının linyit flotasyonuna etkisi	62
Şekil 5.13 Toplu karışımların flotasyonda yanabilir verime etkisi	64
Şekil 5.14 Toplu karışımların flotasyonda verim indeksine etkisi	64
Şekil 5.15 Karışımlar ve saf toplayıcıların flotasyonda yanabilir verime etkisi	65
Şekil 5.16 Karışımlar ve saf toplayıcıların flotasyonda verim indeksine etkisi	66
Şekil 5.17 pH'ın flotasyona etkisi	67
Şekil 5.18 Bastırıcı (sodyum silikat) miktarının flotasyona etkisi	69
Şekil 5.19 Köpürtücü (çamyacı) miktarının flotasyona etkisi.....	71
Şekil 5.20 Katı oranının flotasyona etkisi	73
Şekil 5.21 Köpük alma süresinin flotasyona etkisi.....	74
Şekil 5.22 Flotasyonda temizleme devre akım şeması	76
Şekil 5.23 Ftır grafiği.....	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Kömürün petrografik içeriği (DPT, 2001)	4
Çizelge 2.2 Linyitle turbayı ayıran ölçütler (Özpeker, 1991).....	7
Çizelge 2.3 Dünya kömür üretimi (milyon ton) (BP, 2018).....	10
Çizelge 2.4 Kömür rezervlerinin kalitesine ve bölgelere göre dağılımı (milyon ton) (BP, 2018).(TTK, 2018).....	11
Çizelge 3.1 Polar minerallerin sınıflandırılması (Wills ve Napier-Munn, 2006).....	26
Çizelge 4.1 Kömür numunesinin özellikleri.....	34
Çizelge 4.2 Flotasyonda kullanılan reaktifler ile kimyasal malzemelerin kullanım amacı ve yoğunlukları	34
Çizelge 4.3 Kömür örneği elek analiz sonuçları.....	37
Çizelge 5.1 Toplayıcı (gazyağı, mazot ve oleik asit) miktarının belirlenmesinde flotasyon deney koşulları	47
Çizelge 5.2 Mazot miktarının deney sonuçları	49
Çizelge 5.3 Gazyağı miktarının deney sonuçları.....	50
Çizelge 5.4 Oleik asit miktarının deney sonuçları.....	51
Çizelge 5.5 Karışımlara ait flotasyon deney koşulları.....	55
Çizelge 5.6 %25 oleik asit + %75 mazot miktarı deney sonuçları	56
Çizelge 5.7 %50 oleik asit + %50 mazot miktarı deney sonuçları	57
Çizelge 5.8 %75 oleik asit + %25 mazot miktarı deney sonuçları	58
Çizelge 5.9 %25 oleik asit + %75 gazyağı miktarı deney sonuçları	60
Çizelge 5.10 %50 oleik asit + %50 gazyağı miktarı deney sonuçları	61
Çizelge 5.11 %75 oleik asit + %25 gazyağı miktarı deney sonuçları	62
Çizelge 5.12 pH'ın belirlenmesinde flotasyon deney koşulları.....	67
Çizelge 5.13 Bastırıcı miktarının belirlenmesinde flotasyon deney koşulları.....	68
Çizelge 5.14 Bastırıcı (sodyum silikat) miktarının sonuçları	69
Çizelge 5.15 Çamyağı miktarının belirlenmesinde flotasyon deney koşulları.....	70
Çizelge 5.16 Köpürtücü (çamyağı) miktarının sonuçları	71
Çizelge 5.17 Katı oranının belirlenmesinde flotasyon deney koşulları.....	72
Çizelge 5.18 Katı oranının etkisinin deney sonuçları.....	72
Çizelge 5.19 Köpük alma süresinin flotasyon deney koşulları	73
Çizelge 5.20 Köpük alma süresinin sonuçları	74
Çizelge 5.21 Temizleme devresinin belirlenmesinde flotasyon deney koşulları	75

KISALTMALAR DİZİNİ

ÇATES	: Çatalağzı Termik Santraline
DF-200	: Dowfroth 200
DF-250	: Dowfroth 250
DF-40	: Dowfroth 40
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
ETKB	: Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
KB	: Kalkınma Bakanlığı
KEA	: Kümülatif Elek Altı
KEÜ	: Kümülatif Elek Üstü
MAPEG	: Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü
MGS	: Multi Gravite Ayırıcısı
MIBC	: Metil İzobütil Karbinol
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
XRD	: X-Işını Difraksiyonu

1. GİRİŞ

Enerji kaynakları ülkemizde ve dünyada rezervi, yaygınlığı ve kullanılan alan sayısının çok olması açısından kömür enerji kaynakları içerisinde önemli bir yerdedir. Enerji hammaddeleri içerisinde, maden kökenli kaynaklarda özellikle fosil kökenli enerji kaynaklarının (petrol, doğalgaz, kömür), dünya genelinde hammadde olarak kullanımı oldukça fazladır (KB, 2018). Enerji kaynaklarının kullanımına yönelik yapılan tahminlerde fosil yakıt olan kömürün, enerji ihtiyacını karşılamadaki payının artacağı öngörülmektedir (MTA, 2022). Kömür; elektrik üretiminde, ısınmada, demir çelik, çimento sanayi ve termik santraller gibi birçok endüstri alanında hammadde olarak kullanılan en yaygın enerji kaynaklarından biridir (ETKB, 2022). Kömür kaynaklarının, ülkemizde sadece üçte birinin etüt ve fizibilite çalışmaları tamamlanmış olduğundan, çok az bir bölümü rezerv olarak nitelendirilmektedir (ETKB, 2022).

Ülkemizdeki linyit kömürleri, nem ve kül içeriği yüksek ve ısı değerleri düşük olmakla birlikte ısı değerleri yüksek çok farklı linyit kömürleri de bulunmaktadır. Toplam linyit kapasitesinin sadece %3,70'i, %1'den az kükürt içerir, %20'den az nem içeren linyit oranı %15,14'tür. Isı değeri 4000 kcal/kg'dan fazla olan linyitlerin kapasitesindeki payı sadece %1,83'tür (Boylu & Ateşok, 1999). Aynı zamanda linyit kolay bir şekilde kendiliğinden yanma özelliği göstermektedir. Linyit yüzeyi yüksek miktarda oksijen içeren, fonksiyonel gruplara sahiptir.

Flotasyon yöntemi, günümüzde çok ince boyutlardaki kömürlerin temizlenmesi için kullanılmaktadır. Doğal olarak yüzebilme yeteneğine sahip kömürlerin flotasyonla zenginleştirilmesi daha yüksek verim ve daha düşük kül içeriği içindir. Bu anlamda linyitler hidrofiliktir ve düşük yüzebilirliklerinin nedeni; hidroksil, karboksil, karbonil, düşük karbon ve yüksek kül içeriği gibi polar grupların yüksek içeriğinden kaynaklanmaktadır (Pawlak ve ark., 1986; Misra ve ark., 1991). Flotasyonla temizleme yapılarak linyitlerimizin kül oranını düşürmek buna bağlı olarak da ısı değerlerini yükseltmek mümkün olmaktadır (Kural, 1991). Kömür flotasyonunda kollektör (toplayıcı) olarak, katran yağları, fuel oil, mazot, gazyağı kullanılmaktadır. Son yıllarda, flotasyon işleminin verimini ve seçiciliğini arttırmak amacıyla çeşitli kollektör kombinasyonları veya karışımlarının kullanılmasına odaklanılmıştır. (Saleh, ve ark., 2000). Linyitlerin değerlendirilmesine yönelik artan talep nedeniyle bu alanda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

2. KÖMÜR HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1. Kömürün Özellikleri

Organik sedimanter sınıfında yer alan kömür, kimyasal kompozisyonu kömürleşme derecesine bağlı olarak değişen bir kayaç türüdür. Karbon oranını göz önünde bulundurularak turbadan antrasite geniş bir yelpazede değişim gösterir (Laskowski, 2001). Heterojen yapıda olan kömürün özellikleri, kömürleşme derecesine ve organik kısmın kompozisyonuna bağlıdır. Kömür, organik (maseral) ve inorganik maddelerin karışımından oluşur. Organik yapıli maddeler temelde biyokimyasal ve metamorfik değişimlere uğramış bitkilerin birikmesiyle oluşurken; bu da kömürleşme derecesini belirler. Kömürde var olan maseraller 3 gruptan oluşur. Bunlar inertinit, vitrinit ve eksinitir. Her birinin kömürleşme derecesine bağlı olarak nem kapasitesi, yoğunluğu, elementler kompozisyonu ve petrografik özellikleri farklılık göstermektedir. Dolayısıyla bu minerallerin flotasyon ve yüzey özellikleri anlamlı ölçüde değişiklik gösterir (Aplan 1976; Osborne, 1988; Kural, 1991; Horsfall, 1992; Laskowski, 2001; Ateşok, 2004).

Kül içeriği, kömürün zenginleşme kalitesini belirten en önemli kriterdir. Zenginleşme işlemi sırasında düşük küllü parçacıklar ve yüksek küllü parçacıklar birbirinden ayrılır. (Laskowski, 2001). Kömür, ev yakıtı olarak kullanılmaktan başlayarak sıvılaştırılmış (likit) gaz üretimine kadar endüstriyel gelişimde en önemli temel tüketim malzemesi olması nedeni ile benzersizdir. Kömür üretiminin yaklaşık %80'inin metalurji sanayinin ihtiyaçlarını karşılaması, ekonomik açıdan kömürün zenginleştirilmesinin gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır. Kükürt, kömür tüketimini etkileyen bileşenlerden biridir ve birçok kömür içeriğinde yüksek miktarda pirit kükürdü bulunmaktadır. Yüksek fırın koku gibi sanayi alanlarında kullanılacak kömürlerdeki kükürtün dezavantajları iyi bilinmektedir. Bu nedenle, içeriğinde piritik kükürt bulunan kömürler belirli bir büyüklüğe kadar kırılarak yıkandığında, piritin bir kısmının atığa aktarılması ile temiz kömürdeki kükürt içeriği kısmen azaltılabilir. Günümüzde, yarı koklaşır taş ve linyit kömürlerinin büyük bir kısmının hiçbir zenginleştirme işlemine tabi tutulmadan ısınma (yakıt) amacıyla kullanıldığı görülmektedir. Kömürün %50'ye yakın tanımlanamayan materyal (artık) içeren nakliye maliyeti, kömür yakmakta ortaya çıkan güçlükler, tanımlanamayan materyaller tarafından emilen ısı kaybı, insan sağlığına ve çevreye olan nihai kirliliği göz önüne alındığında; kaliteli kömür elde etmek için mutlaka yıkanıp temizlenmesi gereklidir (Keskin, 1988).

Türkiye kömürleri, dünya kömürleri ile kıyaslandığında teknik ve ekonomik olarak işletilebilirlik açısından çok iyi konumdadır. Çünkü dünya jeolojik kaynaklarında çıkarılabilir rezervlerin yalnızca %6,32'si bulunabilirken, Türkiye'de bu değer %23,19'dur. Ek olarak, dünyanın diğer bölgelerinden farklı olarak Türkiye'de linyite göre taş kömürü çok daha az bulunmakta ve linyit kaynaklarının çıkarılabilirliği ise taşkömürüne göre çok daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir (Ateşok, 1986).

Linyit kömürleri, turba ve taş kömürü gibi diğer kömür türleri ile karşılaştırıldığında daha büyük bir alanı oluştururlar. Karbonlaşma derecesine bağlı olarak farklı oranlarda orijinal nem içerirler. Aynı zamanda linyit kömürleri, morfolojisine göre yumuşak ve sert olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yumuşak linyitler, sert linyitlere göre daha hassas bir yapıya sahiptir. Yapılan bir çalışmada, farklı tiplerdeki kömürlerin parça sağlamlığı 2,4 ile 9,4 kg/cm² arasında olduğu ölçülmüştür. Bu tür kömürler eğer fırın veya ocak gibi sıcak ortamlardan çıkarıldıktan hemen sonra depolanırlarsa, zamanla toz haline dönüşürler. Eğer su ile temas geçerlerse, tüm suyu içerisine emerek şişer ve parçalanırlar. Bu yüzden yumuşak linyitin sıcak ortamdan çıkardıktan sonra yakıt olarak kullanılması imkansızdır. Sert linyit ise yumuşak linyitten başlayarak taşkömürüne kadar geniş bir alan kaplayan kömür türüdür. Sert linyit, yumuşak linyit ile karşılaştırıldığında daha sağlam bir yapıya sahiptir. Aynı zamanda, sert linyitlerin kullanım alanları daha geniştir. Dolayısıyla, bu linyitlerin karbon içerikleri ve ısı oranları yumuşak linyitlere göre çok daha yüksektir (Kemal ve Arslan, 2005).

2.2. Kömürün Petrografik İçeriği

Gazlaştırma, koklaştırma ve sıvılaştırma alanlarında kömürün petrografik içeriğinden büyük ölçüde yararlanılır. Gözle görsel analiz edildiğinde taşkömürünün parlak ve donuk bantlardan oluştuğu gözlemlenir. Donuk bantlar durain ve füzen iken parlak bantlar vitren ve klarendir. Bunların hepsine kömür kayacı anlamına gelen litotip denir.

Maserallerin birleşmesiyle litotüler oluşurlar. Kömürlerin yapısındaki en ufak mikroskobik birimler olan maseraller, değişen oranlarda homojenlerdir. Aynı zamanda masrealler, inorganik kayaçların en ufak mineralleri ile benzerlik kurabilirler. Kömürün petrografik içeriği Çizelge 2.1'de verilmiştir (DPT, 2001).

Çizelge 2.1 Kömürün petrografik içeriği (DPT, 2001)

Makroskobik	Mikroskobik	
Kömür Kayaçları Litotipler	Maseral grupları	Maseraller
Vitren	Vitrinit	Kollinit, tellinit
Klaren	Vitrain çok, eksinit ve inertinit çok az bulunur.	Kollinit, tellinit, sporonit, kutinit, alganit, resinit, fusinit, mikrinit, skeleronit, semi fusunit
Düren	İnertinit çok, vitrinit eksinit az bulunur.	Fusinit, mikrinit, skeleronit, semi-fusinit, kollinit, tellinit, sporonit, kutinit, alginit, resinit
Füzen	İnertini	Fusinit

2.2.1. Vitren

Homojen yapıda olan vitren, parlak ve cilalı bir görünüme sahip olup kömür damarlarında birkaç milimetre veya daha kalın bantlar ve/veya mercekler gibi görünür (Kural, 1991).

2.2.2. Klaren

Klare, ince şeritler halinde parlayan bir formda bulunur. Klaren, Vitren ile karşılaştırıldığında daha az üniform homojenliğe ve parlaklığa sahiptir. Bunlara ek olarak, konkoidal kırılma da pek olası değildir (Kural, 1991).

2.2.3. Düren

Bant kalınlığı oldukça değişkenlik gösteren Düren'in mat, kompakt ve sert bir yapısı vardır (Kural, 1991).

2.2.4. Füzen

Genellikle siyah-gri renkte olan Füzen, tel tel formda olması yapısı ile anında eli kirletebilecek oranda toza dönüşebilir (Kural, 1991).

2.2.5. Mineraller

Yapılan araştırmalara göre kömür yapısında yaklaşık 50-60 türde mineral belirlenmiştir. Kil, karbonat ve demir mineralleri bunların arasında en önem arz edenleridir. Diğerlerinin çoğu %1'den az oranda gözlenmektedir (Kural, 1991).

2.2.5.1. Kil mineralleri

Mineral grubunun en çok gözlemleneni kil mineralleridir. Kömür ile ara katman olan kil minerali genelde tüm minerallerin yaklaşık %60-80'ini oluşturur. Katman kalınlığı 1-2 mm'den başlayıp 10 cm'ye kadar geniş bir aralığa sahiptir. Pratikte killi kömürler, kil/kömür hacim oranlarına göre sınıflandırılırlar. Kil/kömür hacim oranı %20'ye kadar olan mikrolitotiplere killi kömür, %20-60 arasında olanlara karbarjilit denir. Birinci grubun yoğunluğu 1.5 gr/cm^3 'ten azken; ikinci grubun yoğunluğu 2 gr/cm^3 'ten azdır.

Yoğunluk oranı 2 gr/cm^3 'ten daha yüksek olanlara "kömürlü kil" olarak adlandırılırlar. Killer, karbarjilitler ve kömürlü killer suyun etkisi altında şişebilir. Kömürle karıştırılmış olan killer üç tipe ayrılır:

- Karmaşık yaygılı kömürlü kil taşı
- Kaolen kömürlü kil taşı
- İllit kömürlü kil taşı

Yaş saptanması, kilin içerdiği zirkon ve sanidin kristallerine bağlıdır. Böylece, kömür katmanlarının anlaşılması ve buna bağlı olarak stratigrafik konumlarının analiz edilmesi mümkündür (Kural, 1991).

2.2.5.2. Karbonatlar

Kömür içeriğinde yer alan anterit, kalsit, dolomit ve sideritin yanı sıra çeşitli kompleks karbonatları oluşturan kalsiyum, magnezyum ve mangan da kömürde bulunan önemli bileşenlerdendir (Ural, 2002). Bu bileşenler birincil ve ikincil kökenli olarak ikiye ayrılırlar. Işınsal veya küresel yapısıyla öne çıkan Siderit, en yaygın birincil kökenli bileşendir. Şekli kristal veya kömür topu biçimindeki dolomit ise tipik olarak okyanus itme-çekme süreçleri sırasında oluşur. Kalsit ve ankerit genellikle ikincil karbonizasyon aşamasında kırık ve çatlaklar halinde oluşur (Kural, 1991). Karbonat içeriği %20-60 olan kömüre karbunklit adı verilir ve genellikle yoğunluğu yaklaşık 1.5 gr/cm^3 'dür (Özpeker, 1991).

2.2.5.3. Silikatlar ve diğer mineraller

Kuvars formunda büyük miktarlarda bulunur ve toplam mineral kütlelerinin %15-20'sini oluşturur (Ural, 2002). Silikatlar arasında kuvars kilden sonra en önemli ikinci maddedir. Kuvars genellikle kenarları yuvarlatılmış kristaller halinde taşınır. Sulak alan sularında çözünmüş silikanın uygun şartlarda çökmesiyle oluşan, mikrokristaller veya kalsedon

şeklinde gözlenmektedir (Kural, 1991). Diğer silikatlar ve mineraller de eser miktarlarda gözlenmektedir (Özpeker, 1991).

2.2.5.4. Tuzlar

Çoğu kömür eser miktarda klorür, sülfat ve nitrat içerir fakat jipstir bunların aksine en yaygın gözlenenidir. Genellikle ikincil kökenli olup çatlak veya kırıklarda dolgu olarak karşımıza çıkarlar (Kural, 1991).

2.2.5.5. İz ögeler

Minerallerle benzer kökende olan İz ögeler, %0,1'den daha az miktarda kayaç ve kömürlerin içerirler.

Bunlar bitkilerin kendisinden kaynaklanabileceği gibi, karbonizasyon işlemi sırasındaki besin maddelerinden veya çatlaklar, yarıklar ve gözeneklerde dolaşan yüzey veya derin sıvılardan da kaynaklanabilir (Kural, 1991).

2.3. Kömür Türleri

Kömür, hassas yapısı nedeniyle ortamdaki basınç ve sıcaklığın değişmesi özellikle artması ile yapısında bulunan su ve CO₂, O₂, CH₄ gibi uçucu maddeler zamana bağlı olarak azalmakta; karbon içeriğini ve kalorifik değeri ise artmaktadır. Değişen fiziksel ve kimyasal ortamlara göre sırasıyla; turba, linyit, alt bitümlü kömür, bitümlü kömür (taşkömürü), antrasit, grafit kömür türleri oluşmaktadır.

Turbadan grafitle geçişle birlikte metamorfizmanın yoğunluğu (basınç ve sıcaklığın etkisi), karbon oranı ve kalori miktarı artmakta olup aynı zamanda su ve uçucu maddelerin miktarı azalmaktadır. Ek olarak kömür daha sertleşerek toz oluşumu azalmaktadır (Kemal, 1991).

2.3.1. Turba

Turba, ilk defa biyokimyasal karbonizasyona uğrayan kömür türüdür. Diğer kömür türlerine göre daha yumuşak olan turbanın sarı, kahverengi ve siyah renkleri bulunur.

Turbalar çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterirler. Bu faktörler; oluşum koşulları, başlangıçtaki orijinal bitki türü ve bitkinin çeşitli kısımlarının farklı çürüme hızları gibi bitkilerin spesifik özellikleri olabilirler (Ateşok, 1986). Turbaların önemli özellikleri aşağıda listelenmiştir:

- Sulandırılmış alkali kimyasıyla tayin edildiğinde, içerisinde lif ve dal parçacıkları kalır.

- El ile sıkıştırıldığında su oranı düşer.
- Orijinal nem oranı %75'in üzerindedir.
- Çıplak gözle analiz yapıldığında morfolojileri bozulmamış bitkisel atıklar fark edilebilir (Kemal ve Arslan, 1999).

Turba ile linyit kömür türünü birbirinden ayırabilmek bazı özellikler vardır, bunlara Çizelge 2.2'te yer verilmiştir.

Çizelge 2.2 Linyitle turbayı ayıran ölçütler (Özpeker, 1991)

	Turba	Linyit
Rutubet %	>75	<75
Karbon %	<60	>60
Serbest selüloz	Var	Yok
Kesilebilirlik	Evet	Hayır

2.3.2. Linyit

Linyit kömürleri, turba ve taş gibi diğer kömür türleri ile karşılaştırıldığında daha büyük bir alanı oluştururlar. Karbonlaşma derecesine bağlı olarak farklı oranlarda orijinal nem içerirler. Aynı zamanda linyit kömürleri, morfolojisine göre yumuşak ve sert olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yumuşak linyitler, sert linyitlere göre daha hassas bir yapıya sahiptir.

Linyit, morfolojisine göre yumuşak linyit ve sert linyit olmak üzere iki türe ayrılır. Yumuşak linyitin orijinal nem içeriği %35-75'tir. Yumuşak linyitin tane mukavemeti çok düşüktür.

Bu tür kömürler eğer fırın veya ocak gibi sıcak ortamlardan çıkarıldıktan hemen sonra depolanırlarsa, zamanla toz haline dönüşürler. Eğer su ile temasa geçerlerse, tüm suyu içerisine emerek şişer ve parçalanırlar. Bu yüzden yumuşak linyitin sıcak ortamdan çıkardıktan sonra yakıt olarak kullanılması imkansızdır.

Sert linyit ise yumuşak linyitten başlayarak taşkömürüne kadar geniş bir alan kaplayan kömür türüdür. Sert linyit, yumuşak linyit ile karşılaştırıldığında daha sağlam bir yapıya sahiptir. Aynı zamanda, sert linyitlerin kullanım alanları daha geniştir. Dolayısıyla, bu linyitlerin karbon içerikleri ve ısı oranları yumuşak linyitlere göre çok daha yüksektir (Kemal ve Arslan, 2005).

2.3.3. Taş kömürü

Orijinal nem içerikleri çok düşük (%1-2) olan taş kömürünün karbon içeriği oldukça yüksektir. Taş kömürü, düşük nem içeriği ve güçlü yapısı nedeniyle taşıma ve depolama sırasında tane boyutunun büyük bir kısmını korur. Taş kömürünün diğer kömür türlerine kıyasla daha fazla ısı değeri olduğu için çeşitli sektörlerde kullanılabilirler (Kemal, 1991).

2.3.4. Antrasit

Antrasit ismiyle bilinen kömür türü Amerika’da sert kömür; Galler’de ise kaya kömürü olarak adlandırılır. Bu kömür türü özellikle demir gibi siyah rengi ve yarı metalik parlaklığıyla bilinir. Taşkömürüne oranla antrasitin ısı değeri daha düşüktür. Bu bilgi taş kömürünün yüksek sıcaklıklara süratla çıkamaması ile kesinleşmektedir. Öte yandan toz ve is üretmemesi, uzun süre durmadan yanması nedeniyle ev yakıtı olarak tercih edilir (Özpeker, 1991).

2.3.5. Grafit

Yumuşak, dokusu yağlı ve ince tabakalar biçiminde bulunan grafit kuvvetli bükülme özelliğine sahiptir. Sertliği 1, yoğunluğu 2 gr/cm³ dür. Renk seçeneği oldukça fazla olup, doğal ortamında özellikle siyah ve gri üzerinde kül renginde çizgi şeklinde bulunur.

Ayrıca doğada; kristal, pul ve ‘amorf’ diye tanımlanan formları da vardır ancak en iyi formu kristal grafitir ve en yüksek kaliteye sahiptir (DPT, 2001).

2.4. Kömürün içerdiği safsızlıklar

Nem, kül ve kükürt; kömürün içeriğinde bulunan kömür yıkamada önem arz eden safsızlıklardır (DPT, 2001).

2.4.1. Nem

Kömür arazide kuru ve yağlı görünse de içinde bol miktarda su bulunur. Bu nemin varlığına zemin nemi denir. Kömür içinde bulunan birçok çatlak ve gözenekte kömürün yüzeyinde olduğu gibi yoğun oranda nem vardır. Taşkömürü orijinal formunda tipik olarak %10'dan az nem içerirken, linyit kalitesine bağlı olarak yaklaşık %55'e kadar nem içerebilir (DPT, 2001).

2.4.2. Kül

Kömürün tamamı inorganik maddeler içerir. Kömürün yakılmasından sonra geriye kalan kalıntıya kül denir. Çoğu külün kimyasal bileşimi silikon, alüminyum ve demir oksittir. Kömürün iki çeşit külü vardır. Bünye külü (istihsal külü) ve harici kül (üretim külü).

Bünye külü yani bir diğer adıyla istihsal kül, kömürü oluşturan bitkisel kaynaklı inorganik maddelerden oluşur ve kömürlerdeki toplam kül içeriğinin yaklaşık %2-3'ünü oluşturur. Harici kül yani bir diğer adıyla üretim külü ise, kömürün içine karışan yabancı bir maddedir ve kömürü oluşturan bitkilerden elde edilmez.

Kömür, bu maddeler ile kömürleşme sırasında birleşeceği gibi kömürleşme işleminden bir süre sonra da damarlardaki çatlak ve kırıklardan ilerleyebilir.

Kil, şist, kumtaşı ve kireçtaşı bu yabancı maddeler arasında yer alabilir. Araştırmalar sonucunda bu yabancı maddeler, kömür yapısı içinde mikroskopik ölçülerde damarlar ve tabakalar halinde bulunurlar. Üretim sırasında tüvanan kömürü, tavandaki veya zeminin yan duvarlarındaki taşlardan gelen yabancı maddelerle kirlenmiş olabilir. Üretim (harici) külü bu faktörler oluştur. Yıkama yöntemleriyle bünye kül kömürden uzaklaştırılmasa da, harici kül belirli bir miktarda azaltılabilir (DPT, 2001).

2.4.3. Kükürt

Kükürt, tüm kömür türlerinin içeriğinde üç farklı formda bulunabilir. Bunlar organik, inorganik ve sülfat kükürdü olarak ayrılırlar.

Elementer kükürt ile bazı kömür türleri birbirleri ile karıştırılmaktadır. Fakat kömürün bir parçası olan organik kükürtün kömürden ayrılması oldukça zordur. Diğer bir kükürt türlerine göre kömür yapısında daha az bulunan sülfat kömürü ise jips (CaSO_4) formunda varlığını sürdürebildiği gibi, kömürün oksijen ile uzun süre reaksiyona girmesi sonrasında FeSO_4 'e dönüşebilir. Ek olarak pirit ve markazit minerallerine yoğunluğuna göre piritik kükürt de kömür yapısında bulunur. Kükürtler; bantlar, damarlar, merccekler, küresel veya dağınık parçacıklar gibi çeşitli şekil ve formlarda dağılırlar. Piritik kömür; kömürden salındığında flotasyon vb. zenginleştirme metotları kullanılarak temizlenebilen; makroskopik veya mikroskopik analiz seçenekleri sunan kömür türüdür (DPT, 2001).

2.5. Kömür Rezervleri

2.5.1. Dünya kömür üretimi ve tüketimi

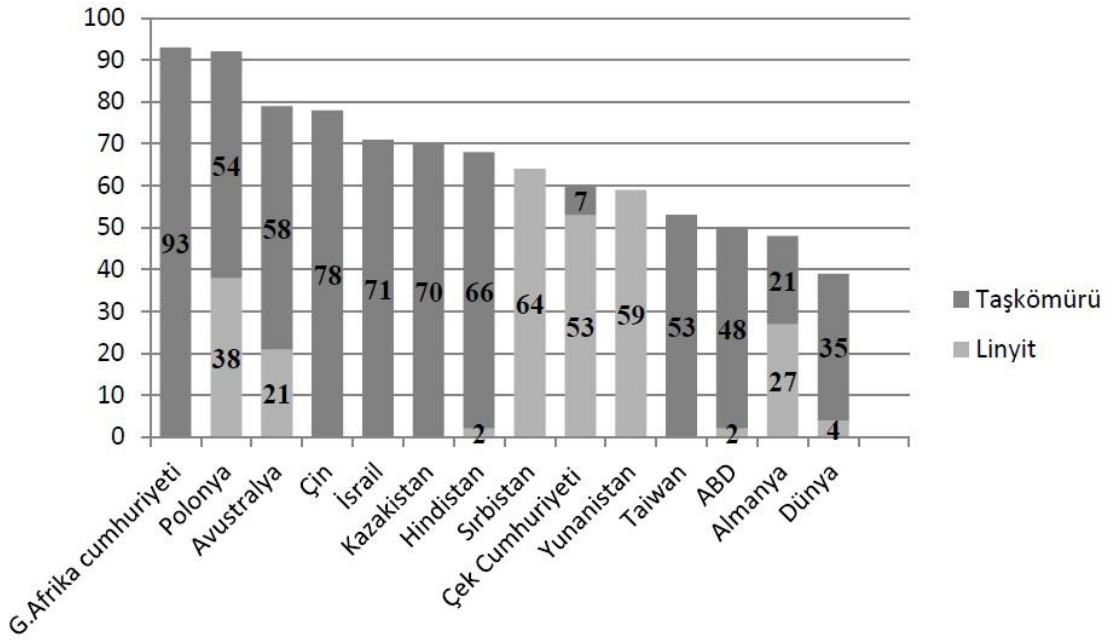
Dünya genelinde elektrik üretiminde kömürün payı yaklaşık olarak %36 seviyesindedir. ABD'de üretilen kömürün büyük bir kısmı, özellikle elektrik gücü üretimi için kullanılmaktadır ve bu oran %90'ın üzerindedir. Ayrıca, kömür endüstriyel amaçlar için, demir üretiminde kok yapımında ve ev ile ticari ısınma ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla da kullanılmaktadır (Ateşok, 2009).

Fosil kaynaklı enerji kaynaklarının tükenme süreleri göz önüne alındığında, kömür enerji kaynağı çeşitli avantajlara sahiptir. Petrol ve doğalgazın tükenme süresi genellikle 50-60 yıl arasında iken, kömürün tükenme süresi 100-120 yıl civarındadır. Kömür rezervlerinin geniş olması, 50'den fazla ülkede üretiliyor olması ve kömür kaynaklarının, petrol ve doğalgaza kıyasla politik açıdan daha istikrarlı bölgelerde bulunması, kömürün hammadde olarak önemini artırmaktadır. Dünya kömür üretimi Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Dünya kömür üretimi (milyon ton) (BP, 2018).

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Kuzey Amerika	566,4	573,1	534,9	519,1	525,5	466,1	386,2	407,9
Orta ve Güney Amerika	55,7	63,6	65,9	65,0	67,8	64,4	67,8	66,8
Avrupa	197,4	201,4	199,2	187,5	179	171,2	161,3	164,6
Afrika	146,8	146	151,9	152,4	157,7	151,6	149,6	154,5
Asya-Pasifik	2402,6	2636	2697	2790,6	2781,7	2756,7	2639,6	2702,3
Bağımsız Devletler Topluluğu	232	245,7	260,3	263,5	254	251,5	258,1	271,8
Dünya	3600,9	3865,8	3909,2	3978,1	3965,7	3861,5	3662,6	3767,9

Dünya genelinde kömür madenciliğinde kullanılan gelişmiş teknolojiler, kömür üretim maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamıştır. Bu durum, elektrik piyasasında kömürün ekonomik bir yakıt olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Elektrik üretimlerinde kömüre dayalı ülkeler ve kömürün payı (TTK, 2018).

Yüzyıllardır enerji kaynağı olarak kullanılan kömür, fosil bir yakıt olarak bilinir. 1960'lara kadar birincil enerji kaynağı olarak önemini koruyan kömür, ancak bu dönem sona erdiğinde yerini petrole bırakmıştır. Elektrik üretimindeki kömürün kritik rolü anlaşılmca, kömür tekrar dünya enerji kaynakları arasındaki önemli konumunu kazanmıştır. Dünyadaki mevcut kömür rezerv kalitesi ve bölgelere göre dağılımı Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Kömür rezervlerinin kalitesine ve bölgelere göre dağılımı (milyon ton) (BP, 2018).(TTK, 2018).

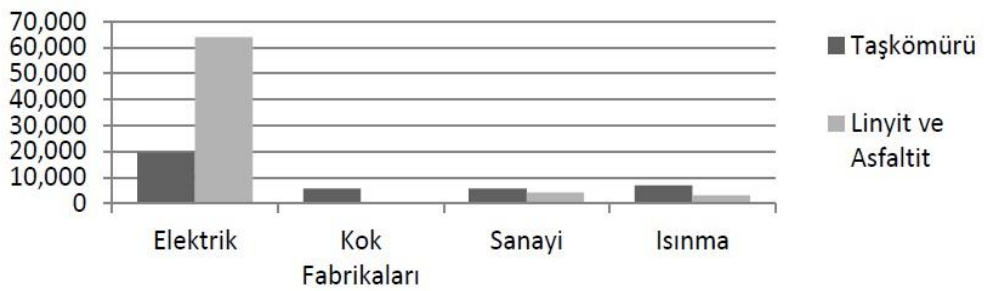
	Antrasit ve Bitümlü	Alt Bitümlü ve Linyit	Toplam	Yüzde (%)
Kuzey Amerika	226306	32403	258709	24,9
Orta ve Güney Amerika	8943	5073	14016	1,4
Avrupa	24220	76185	100405	9,7
Ortadoğu-Afrika	14354	66	14420	1,4
Asya-Pasifik	314325	109909	424234	41
Bağımsız Devletler Topluluğu	130162	93066	223228	21,6
Dünya	718310	316702	1035012	100

2.5.2. Türkiye kömür üretimi ve tüketimi

Ülkemizde 2017 yılında, en yüksek satılabilir kömür üretimi 71,46 milyon ton linyit olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, 1,41 milyon ton asfaltit ve 1,41 milyon ton taşkömürü de üretilmiştir (EIGM, 2018). 2017 yılı taşkömürü arzının %48,3'lük büyük bir kısmı elektrik üretimi için kullanılmış olup, %17,2'si ısınma amaçlı, %14,2'si ise sanayi amaçlı tüketilmiştir. Kok fabrikalarının payı ise %15,3 düzeyindedir (EIGM, 2018).

Petrol krizinin etkisiyle elektrik üretimi amacıyla linyit işletmelerine yapılan yatırımlar sonucunda, linyit üretimleri artış göstermiştir. 1970 yılında 5,8 milyon ton linyit üretilmiştir. 1988 yılında, üretim miktarı yaklaşık olarak 65 milyon ton düzeyinde gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, 1998 yılı sonrasında yapılan doğalgaz alım anlaşmalarının linyit üretimini olumsuz etkilediği ve sonuç olarak üretimin azalmaya başladığı gözlemlenmiştir. 2004 yılında en düşük seviyeye inen linyit üretimi 43,7 milyon ton olmuştur. 2008 yılına kadar artış gösteren linyit üretimleri, bu tarihte 76 milyon ton civarında gerçekleşmiştir. 2014 yılında 62,6 milyon ton, 2016 yılında 70,24 milyon ton ve 2017 yılında ise 71,46 milyon ton üretim gerçekleşmiştir (EIGM, 2018).

Ülkemizde çıkarılan linyit kömürleri, termik santrallerde elektrik üretimi, sanayi sektörlerinde ve konut ile işyerlerinde ısınma gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Kömür tüketiminin sektörlere göre dağılımı Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Ancak, 2001 yılı sonrasında bu dinamik değişmiş ve elektrik üretimindeki kullanım payı azalırken, sanayi sektörleri ile konut ve hizmetlerdeki kullanım payı yeniden yükselmiştir (TKİ, 2018).



	Miktar (*1000 ton)	
	Taşkömürü	Linyit ve Asfaltit
Elektrik	19.485	64.104
Kok Fabrikaları	5.797	0
Sanayi	5.759	4.154
Isınma	6.933	3.071

Şekil 2.2 Kömür arzının sektörlere göre tüketim dağılımı (TKİ, 2018).

2.5.3. Linyitin Enerji Sektöründe Kullanımı

Nüfus artışı, teknolojik gelişmelere bağlı sanayileşme ve yaşam koşullarındaki değişiklikler dünya çapında enerjiye olan talebi artırmaktadır. Açıkçası, bu artan talebi karşılamak için mevcut enerji kaynağı türlerinin sınırları vardır. Nükleer enerji, petrol ve doğalgaz bu talebi karşılamak için kullanılan öncelikli enerji kaynaklarıdır. Bu uzun vadeli ihtiyaçları karşılayacak yeterli rezervin bulunduğunu varsaymak yanlıştır. Yakın zamanda güneş ve rüzgar enerjisinin kullanımında olumlu ilerlemeler kaydedilmektedir. Ancak az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kömür rezervlerinden yararlanmaları gerekmektedir (Ateşok, 2014).

Linyit üretimi, önemli oranda açık işletme madenciliği yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Üretilen bu linyitin büyük miktarı termik santrallerde yakıt olarak kullanılırken aynı zamanda birçok ülkede de endüstriyel ve konut ısıtma sistemlerinde briket haline getirilmektedir.

2.6. Kömürün Zenginleştirilmesi

Doğada bulunan değerli mineraller, maden yataklarında birbirine bağlı parçacıklar halinde bulunur. Maden yatakları arasındaki bu bağımlılık, mineral fazın boyutuna ve madenin yapısına bağlı olarak farklı morfolojiler sergiler. Ayrıca, aynı cevher bloğunda aynı anda birden fazla değerli mineral bulunabilir. Bu nedenle, cevher zenginleştirme işlemi öncesinde madenler kapsamlı hazırlık işlemlerine (sınıflandırma, kırma, öğütme gibi) tabii tutulur (Keskin, 1988).

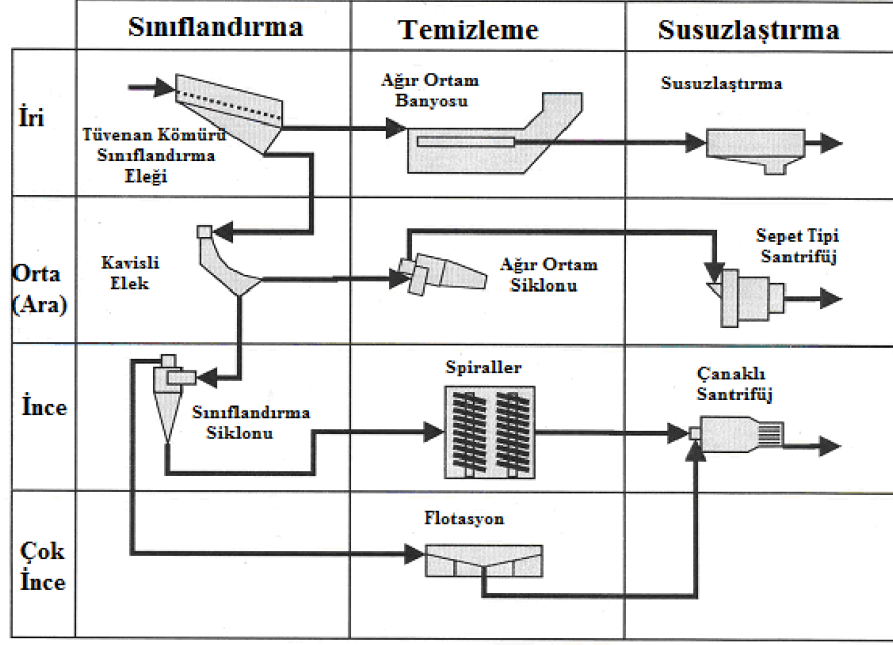
Kömürden kül ve kükürtün uzaklaştırılması için öncelikle kömürün temizlenme ve yıkama yöntemlerine uygun olup olmadığı belirlenmelidir. Bu işlem de yıkanabilirlik verilerinin toplanmasıyla mümkünleşir. Yıkanabilirlik testleri, kömürün fiziki özelliklerinin değerlendirilmesi anlamına gelir ve yıkama prosedürü sonunda kömürün kalitesinin ne kadar iyileştirebileceğini gösterir. Yani; kömürün yabancı madde olarak nitelendirilen kül ve piritik kükürttan arıtılmasının kolaylığı veya zorluğu, ortaya çıkan saf kömürün içeriği ve temizlenme verimliliği gibi özellikler temizlenebilirlik verilerinden elde edilebilir.

Temizleme yöntemlerinin teorik kategorileri yıkanabilirlik verilerinde yer alır. Yıkanabilirlik verilerinde, kükürt içeriğine, türüne ve her fraksiyonun kalori değerine oldukça dikkat edilir. Dolayısıyla hangi yoğunlukta ve miktarda piritik kükürt içeriğine

sahip kömürün hangi verimle elde edilebileceğini hemen tespit etmek mümkündür (Ateşok, 2004).

Tüvevan kömür, kömür yıkama işlemlerinde temiz kömür (lave), ara ürün (mikst) ve artıktır (şist) olmak üzere üç ürüne ayrılır. Yıkama Eğrileri; yalnızca iki ürünü ele alan yıkama işlemlerinde, temiz kömür ile artık miktarını, kül içeriğini ve yıkama yoğunluğunu belirlemek için uygundur. Aynı bilgileri üç ürünü ele alan bir yıkama işleminde elde etmek amacıyla iki set yıkama eğrisi çizilmesi gereklidir. Birinci set temiz kömürün, ara ürün ve atıktan; ikinci set ise ara ürünün atıktan saflaştırılması sonuçlarını görmek için kullanılır. Fakat sadece bir setten alınan veriler doğrultusunda hazırlanan kömür yıkama eğrisinden üç ürünü ele alan sonuçlar isteniyorsa, iki yoğunluk verileri kullanılarak elde edilir, dolayısıyla temiz kömür ve artık miktarları ile kül değerlerinden ara ürünün miktarı ve kül içeriğine oranla yaklaşık olarak belirlenebilir. Elde edilen sonuçlar güvenilir olmayıp yalnızca kömürün yıkanabilirliği üzerine bilgi vermektedir. M-eğrisi, iki yoğunluk kullanılarak yapılan üç ürünlü yıkama işleminde ihtiyaç duyulan tüm verileri (ayırma yoğunluğu, kül ve miktar) bir yıkama eğrisinde toplar. Böylece M-eğrisi, klasik yıkama eğrilerine kıyasla zaman ve enerji tasarrufu sağlamış olur. M-eğrisi, aynı zamanda mucidinin adıyla “Mayer eğrisi” olarak anılmakta ve kömür işlemede oldukça kullanılır (Ateşok, 2004).

Kömür madenciliğinde makineleşmenin yaygınlaşması ve ham kömürün taşıma ve yoğunlaştırma sırasında ezilmesi nedeniyle toz haline getirilmiş kömür miktarı sürekli artmaktadır. Kömür boyutunun küçülmesi serbestleşme derecesi arttırmakta ve dolaylı olarak temiz kömürün kalite düzeyini arttırmaktadır. Ayrıca birçok sektörde ince kömür tercih edilmesi bu kömüre olan talebi arttırmış ve böylelikle ince kömürün zenginleştirilmesi değerli hale gelmiştir. İnce kömürün zenginleştirilmesi; ülke sanayisine ve ekonomisine katkı sağlamasının yanı sıra çevrenin temizliğinde de önemli bir faktör olacaktır. Kömürün yüzey alanı küçüldükçe zenginleştirme prosedürlerindeki davranışı da farklılaşarak planlanan zenginleştirme yöntemleri de değişiklik göstermektedir. Yüzey özelliklerine bağlı prosedürlerin önem kazanması, klasik yoğunluğa bağlı zenginleştirme cihazların ince parçacıklardaki etkinliğinin yitirilmesi ile ilişkilidir (Şimşek, 2007). Şekil 2.3’te modern bir kömür zenginleştirme akım şemasını göstermektedir.



Şekil 2.3 Dört adet paralel devreyi birleştiren modern bir kömür zenginleştirme akım şeması (Honaker and Forrest, 2003).

2.6.1 İri kömürün zenginleştirilmesi

İri parçacıklı kömürlerin zenginleştirilmesinde, elek açıklığına bağlı olarak üst parçacık boyutu 150 veya 100 mm olarak seçilerek ağır yöntem ve jigler kullanılarak zenginleştirilir. Yıkınması zor olan kömürlerin temizliğinde ağır ortam zenginleştirilmesi tercih edilir (Önal ve Ateşok, 1995).

2.6.1.1 Ağır ortam ayırması

6 mm'den büyük parçacığa sahip büyük ağır taşıma yöntemiyle yıkanan kömürler statik (yer çekimi etkin); daha küçük (0,1 mm'ye kadar) parçacığa sahip olan kömürler ise dinamik (santrifüj kuvveti etkin) ayırıcılara beslenir. Sabit ve hareketli olarak ikiye ayrılan ağır ortam ayırma ve zenginleştirme işlemleri 150-2 mm boyutları arasında kömürlere uygulanabilmektedir (Ateşok, 2004). Ağır ortam ayırma yöntemleri, beslenen kömür ortamına yakın kömür yoğunluğuna sahip kömürler için ideal yıkayıcılardır (Weiss,1985). Laboratuvarlarda, farklı yoğunluktaki kömür ve minerallerin ayrıştırılmasını sağlar ve bu yöntem “Yüzdürme-Batırma” olarak da bilinir.

Ağır maddelerin ayrıştırılarak kömürün zenginleştirilmesi günümüzde oldukça önemli olmakla beraber aynı zamanda maddi açıdan da gerekli bir teknolojidir. Kömürün yoğunluğu 1,23-1,72 g/cm³ iken mineral maddenin yoğunluğu 2,0-2,7 g/cm³ aralığındadır

(Wright, 1984). Yoğunluktaki bu fark, belirli yoğunluktaki ağır bir ortamla kömür ile gangin ayrılmasını mümkün kılar.

Ağır ortam olarak üç tip ağır madde kullanılır: Tuzların sudaki çözeltisi, organik sıvılar ve katıların sudaki süspansiyonları (Doğan, 1994).

ZnCl₂ ve CaCl₂ genellikle tuz olarak kullanılırken, manyetit ise bir süspansiyon oluşturmak için katı olarak kullanılır. Sağlığa zararlı olması ve ekonomik açıdan pahalı olmalarından dolayı organik sıvılar ise yalnızca laboratuvar ölçekli kullanılırlar. 1,35 - 1,70 yoğunluğundaki sıvıları üretmek için CaCl₂ ve ZnCl₂ kimyasalları kullanılabilir. Özgül ağırlığı 1,3-2,0 g/cm³ arasında olan ağır ortamlı sıvılar hazırlanırken süspansiyonu oluşturan manyetitin derişiminin ayarlanması işlemin tamamlanmasına yardımcı olur (Cavallaro ve Deurbrouck, 1977; Yaman ve ark., 1998; Sönmez, 2006).

2.6.1.2. Jig

Jigin çalışma prensibi, parçacıkların yoğunluğuna dayanarak bir yatak içindeki bu parçacıkların tabakalaşmasını inceler. Suyun aşağıya ve yukarıya olan hareketi, tabakalı yoğunluğun tavandan başlayıp tabana doğru artışı sağlar (Killmeyer, 1980).

Jigler, 0,5-200 mm boyutlarındaki materyallerin zenginleştirilmesi için kullanılır. Ayırma işlemine bağlı olarak su dakikada yaklaşık 50-300 kez hareket eder. Jiglerde sıklıkla kullanılan elek boyutlarının açıklığı 2 -5 mm arasında değişmektedir. Kömürün temizlenmesinde jigler yaygın olarak tercih edilmektedir (Yıldız, 2010).

2.6.2 İnce kömürün zenginleştirilmesi

Kömür, toz atıklarının spiral gibi belirli zenginleştirme yöntemleri ile elde edilebilir. Ancak susuzlandırma işlemlerinin maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı çok toz kömür atıklarının (-0,2 mm) zenginleştirilebilmesi oldukça zordur. Bu nedenle artık baraj veya havuzlarında depolanan çok ince parçacıklı atıkların çoğu estetik kirliliğe neden olmaktadır. Ek olarak, ince parçacıklı atıkların depolandığı araziler atıl durumda kalmaktadır. Bu durumda ince parçacıklı kömürleri zenginleştirmek için; sarsıntılı masalar, ağır ortam siklonları, multi gravite ayırıcısı (MGS), ince kömür jigleri, spiraller ve koniler kullanılabilir (Ateşok, 2004).

2.6.2.1 Ağır ortam siklonları

Günümüzde, 2 mm altındaki kömürün temizlemesi için ağır ortam siklonları kullanılmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte siklona beslenen materyalin boyutu

0,4 mm'nin altına düşürülmüştür. Ağır ortam siklonlarının performansı, parçacıkların boyut dağılımına ve değişen ayrılma yoğunluklarına göre değişir (Ateşok, 2004). Bu durumda, ortam akışkanlığının azaltılması ile daha minimal ölçülerde hazırlanan bu materyallerin statik ayırıcılara göre yıkanması ile santrifüj kuvvetinde uygulanabileceği öngörülmektedir (Önal ve Ateşok, 1995).

2.6.2.2 Sarsıntılı masalar

Sarsıntılı masalar, diğer birçok yatay su akımı zenginleştirme aygıtlarına oranla kullanılabilirlik bakımından basit ve ayırma etkinliğinin iyi olması nedeni ile daha fazla tercih edilen bir yöntemdir (Wills, 1988).

Son yapılan çalışmalar doğrultusunda, cevherlerdeki üst boyut sınırı 3 mm olarak belirlenmiştir. Günümüzde faaliyet gösteren tesislerin birçoğunda 2 mm'den büyük boyutlarda besleme bulmak oldukça zordur. Bu bilgiler doğrultusunda kömürün zenginleştirilmesinde üst besleme boyut sınırı 10 mm'ye kadar ulaşmaktadır. Ancak yıkama suyu ve masa hareketi besleme alt boyutunda önemli bir faktördür çünkü masanın çalıştırılması anında pülpteki parçacıkların dibe çökmesine ve ağır partiküllerin konsantre ucunda birleşmelerine olanak sağlanmalıdır. Terry (1974) daha düşük besleme boyutunu 0,040 mm olarak belirtmesine rağmen; demir cevheri, kasiterit ve wolframite yoğunlukla doğrusal olarak parçacık boyutu 0.020 mm'ye kadar düşmektedir (Terry, 1974; Burt, 1975; Chong, 1978).

2.6.2.3 Reichert konileri

Reichert konileri; zaman zaman seri halinde kullanılmalarıyla meşhur, çapları 2m ve konik açıları yaklaşık 145° olan ince materyal ayırma aygıtları olarak bilinirler. Bu koniler 65–90 t/s işleme kapasitesine sahip olup parçacık boyutu 0,050-3 mm arasında olan kömürlerin yıkanması için kullanılırlar (Osborne, 1988). Koni içerisinde katı içeriği %35-45 olan pülp, bulunduğu koninin üst kısmından beslenir ve koninin yüzeyinden aşağı doğru akar. Düşük yoğunluklu parçacıklar ise su akışı tarafından çekilerek hızlandırılır ve yoğunluk arttıkça düşme daha yavaş olur çünkü parçacıklar koni yüzeyine sürtünürler (Ateşok, 2004).

2.6.2.4 Multi gravite ayırıcısı (MGS)

MGS adı verilen Multi Gravite Ayırıcısı bir tarafı açık uçlu ve tambur şeklinde gövdeye sahip olan bir ayırıcıdır. Mineral parçalarının tamburun üzerinde katı bir tabaka oluşturması ve yardımcı üniteler desteği ile zenginleştirilmesi, tamburun belirli bir hızla

dönerek mineral parçalarını merkezkaç kuvvetine maruz bırakması ile gerçekleşir. Tamburun hareketini yönlendiren tamburla aynı doğrultuda ve tambura oranla daha süratli dönen ayrıca üzerinde küreyicileri olan bir ünite bulunmaktadır. Çalışma esnasında bu küreyiciler, katı partikülleri tamburun dar ve açık olan dış ağzına taşımak üzere dizayn edilmiştir. Laboratuvar ölçeğiyle %20-50 katı oranında 0,2 t/s kapasiteye sahip MGS ünitesi, endüstriyel sektörde 2 t/s hızında çalışabilmektedir.

Gövde titreştikçe sıvı katmanındaki parçacıklara ek ayırma kuvvetleri uygulanır. Böylece ölçekli tabakalaşmayı elde etmek için özel olarak tasarlanmış küreyiciler ile tambur üzerindeki tabakayı küremeleri gerekir. Yoğunluğu fazla olan parçacıklar tambur üzerine hareket ettikleri için küreyiciler ile yukarı doğru hareket ettirerek üst çıkıştan, yoğunluğu az olan parçacıklar ise yıkama suyu kullanılarak alt çıkıştan toplanırlar (Yıldırım ve ark., 1995).

2.6.3 Toz (Çok İnce) kömürün zenginleştirilmesi

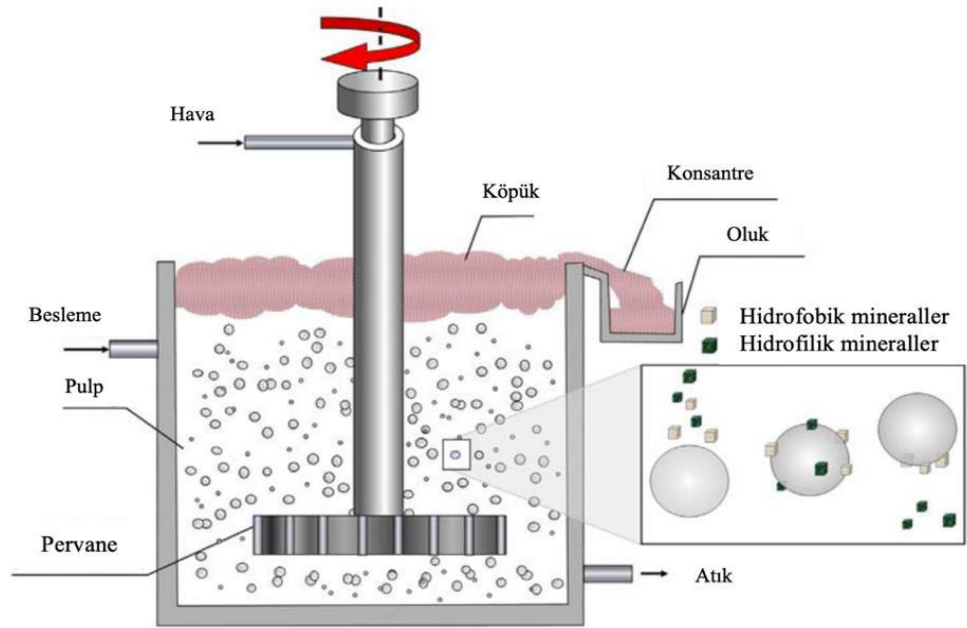
Son zamanlarda, 0,5 mm'den daha ince parçacıklı kömürler üzerine konuşulurken toz kömür kavramı öne çıkmaktadır. İnce parçacıklı kömürün zenginleştirilmesi için tercih edilen birçok cihaz aynı zamanda 0,1 mm boyutuna kadar kullanılabilir. Özellikle son çalışmalar incelendiğinde, toz kömürün zenginleştirilmesi için birçok yeni teknik geliştirilmiş olup bu konu üzerine çalışmalar devam etmektedir (Ateşok, 2004).

Cevher zenginleştirme işlemlerinde boyut küçültme prosedürlerinin kaçınılmaz sonuçlarından bir tanesi de ince veya çok ince parçacıklar elde etmektir. Belirtilen büyüklükteki gang ve değerli mineralleri zenginleştirme esnasında önemli problemler doğmaktadır. Bu nedenle literatürde yer alan geleneksel zenginleştirme yöntemleri bu büyüklükteki parçacıkların değerlendirilmesinde yetersiz kalmakta, dolayısıyla sektörde kullanılabilir yeni yöntemlerin geliştirilmesi önem arz etmektedir (Laskowski ve Ralston, 1992).

3. FLOTASYON

3.1. Flotasyonun Tanımı

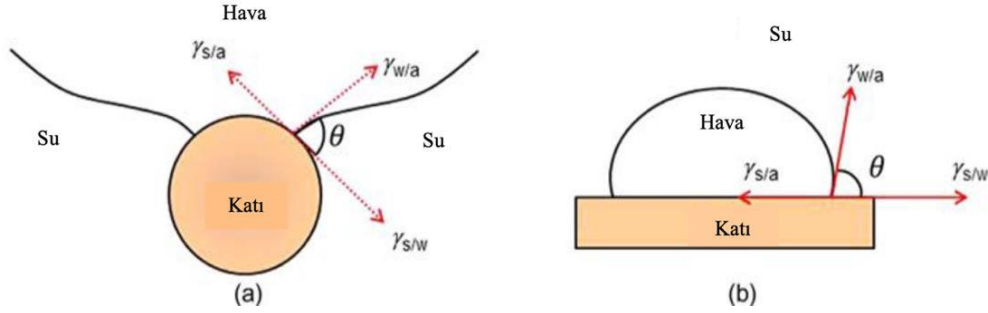
Mineral zenginleştirmesinde kullanılan flotasyon, ince boyutlu mineralleri ayırtmak için başvurulan bir fiziko-kimyasal yöntemdir. Bu teknikte, minerallerin yüzeye yapışarak hava kabarcıkları üzerinde yüzmesi esas alınır. Eğer mineraller uygun yüzey özelliklerine sahiplerse, doğal olarak hava kabarcıklarına yapışmazlar; ancak eğer bu özelliklere sahip değillerse, çeşitli reaktifler kullanılarak yüzey özelliklerinin değiştirilmesi sağlanarak hava kabarcıklarına tutunmaları mümkün olur. Diğer mineraller ise bu özelliklere sahip olmadıkları için su içinde ıslanarak batma eğilimindedir. Flotasyon, 0,5 mm'den başlayarak kolloid boyutlarına kadar (1-2 mikron) değişen aralıktaki cevherlere uygulanabilir. Ancak yüksek miktarda kolloid boyutlu malzemenin bulunması, flotasyon işlemini daha zorlu hale getirmektedir. Köpük flotasyonu hücre prensibi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Köpük flotasyonunun prensibi (Wills and Finch., 2016).

Şekil 1.9'da görüldüğü gibi, karıştırıcı, parçacıkların ve kabarcıkların pülp fazında etkili bir şekilde çarpışmasını sağlamak için yeterli türbülans oluşturur. Bu da hidrofobik parçacıkların kabarcıklara tutunarak (köpük-tanecik agregatları oluşturarak) verimli bir şekilde köpük fazına taşınmasını destekler (Wills and Finch., 2016).

Şekil 3.2 (a)'da, taneciklerin köpüğe tutunmasında önemli olan temas açısı (sıvı içinde ölçülen) ve yüzey gerilim kuvvetleri, Şekil 3.2 (b)'de gösterilmiştir. Bu gerilme kuvvetleri, mineral yüzeyi ile köpük yüzeyi arasında açı oluşmasına neden olmaktadır (Wills and Finch., 2016).



Şekil 3.2 (a) Hava kabarcığına tutunan partikül ve (b) temas açısı ve yüzey gerilim kuvvetlerinin klasik gösterimi (Wills and Finch., 2016).

Temas açısı büyüdükçe, tanecik ile kabarcık arasındaki adezyon kuvveti artar ve bu da sistemini aksi kuvvetlere karşı daha dirençli hale getirir. Bu sebeple, bir mineralin hidrofobikliği temas açısıyla artış gösterir. Yüksek temas açısına sahip olan minerallere genellikle aerofilik denir, yani suya göre hava ile daha yüksek bir çekim kuvvetine sahiptirler.

Genellikle, çoğu mineral doğal olarak su itici (hidrofobik) özellikte değildir ve pülp içine eklenen reaktifler sayesinde hidrofobik özellik kazanırlar. Bu önemli reaktifler, mineral yüzeylerinde adsorbe olan, yüzeyi hidrofobik hale getiren ve tanenin kabarcığa tutunmasını kolaylaştıran toplayıcılarıdır. Köpürtücüler, tanecik ve köpük çarpışma sıklığını artırarak ve istikrarlı bir köpük oluşumunu sağlamak için gereken ince kabarcıkları üretmeye yardımcı olmaktadır (Wills and Finch., 2016).

3.2. Flotasyon Makineleri

Flotasyon makinesi veya bilinen diğer adıyla flotasyon hücresi tanım olarak sıvı ortam aracılığıyla flotasyonu sağlayan elemanlardır. Bu makinenin görevi aşağıda sıralanmıştır: (Aksarı, 1998).

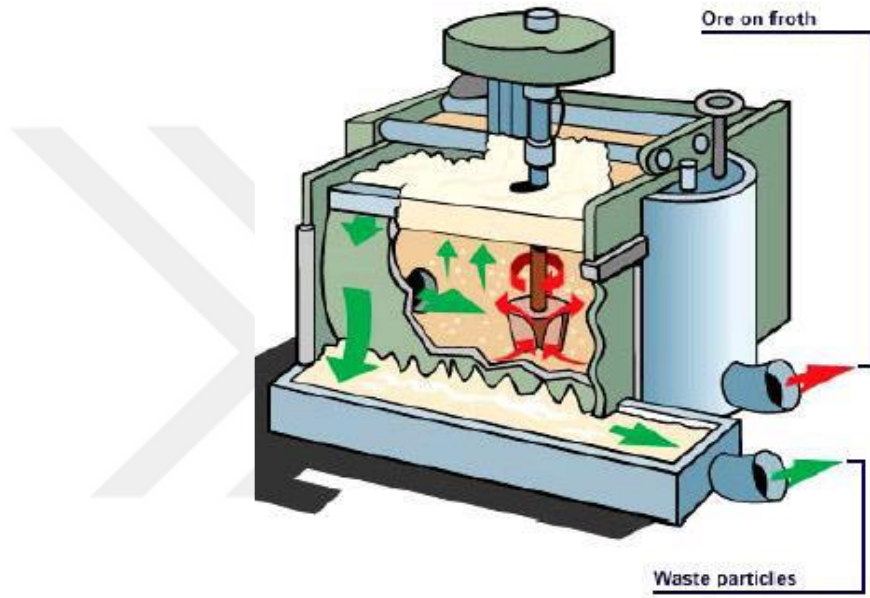
- Pülpdeki iri taneleri askıda tutabilecek hızda karıştırma yaparak pülpün süspansiyon halinde kalmasını sağlamak.
- Pülpde temas yüzeyinin alanının artırılabilmesi için hava kabarcıklarını üretebilmek adına uygun miktarda havanın verilebilmesi.
- Taneciklerin elde edilen hava kabarcıklarıyla karışmasını sağlaması.
- Damıtmanın yapılması için optimum köpük bölgesi kalınlığına sahip olması.
- Konsantre ve oluşan atık maddenin ayrı ayrı yerlerden uzaklaştırılması.
- Köpük bölgesi kalınlığı ya da hava kabarcığı yoğunluğu gibi parametrelerin kontrol edilebilmesine yönelik bir mekanizmaya sahip olması.

Flotasyon makineleri yukarıda özetlediğimiz nitelikleri kapsayacak şekilde tasarlanır. Flotasyonun hayata geçişinden bu yana, dünyada 14 büyük flotasyon makinesi üretim şirketi kurulmuş ancak bu şirketlerden yaklaşık olarak 10 tanesinin ticarileşmeye yönelik kullanım alanı olmuştur. Kolon flotasyonu hücrelerine verilebilecek en önemli makineler; Wedag, Turbokolon, Outokumpu flotasyon hücresi-Denver, Mikrocell ve CPT'dir. Basıncı hava mekanizmasıyla çalışan makineler ise birtakım Pnömatik tipteki flotasyon hücresi ve Jameson flotasyon hücreleridir. Sanayi alanında kabul görüp tercih edilen flotasyon makineleri bunlardandır. Günümüze dek geliştirilen hem laboratuvar ölçekli amaçlı hem de sanayi ölçekli flotasyon makinesini 4 (dört) ana başlık altında değerlendirebiliriz. Bunlar; mekanik flotasyon makineleri, jet flotasyonu makineleri, pnömatik (havalandırılmalı) flotasyon makineleri ve de santrifüj flotasyonu makineleridir.

3.2.1. Mekanik karıştırmalı flotasyon

Flotasyon işleminde kullanımı kabul görmüş en eski, en çok tercih edilen gruptur. Bu tarz makinelerde mineral taneciklerinin askıda kalabilmesi bir pervane aracılığıyla sağlanmaktadır (Şekil 3.3). Hava kabarcıklarını elde edebilmek adına, sisteme gerekli olan hava miktarı, rotorun dönme hareketi sırasında oluşan vakumla yahut hücrenin içine verilen basınçlı havayla sağlanır. Sanayide genellikle sisteme hava geçişini otomatik

olarak yapabilen flotasyon hücrelerinin tercih edildiğini görmekteyiz. Söz konusu makinelerin oldukça büyük sayılabilecek dezavantajı, makine içinde gerçekleşen sirkülasyondan ötürü hava kabarcıklarının yapısında bulunan tanecik bağlarının kopması ihtimalidir. Sığası düşük denebilecek bu makinelerin ürettiği hava kabarcıklarının ebatları da hayli büyük olmaktadır. Ardışık seriler şeklinde tasarlanan bu makinede, her bir hücre kendisinden bir önceki hücrenin ilettiği atığı almak üzere flotasyon işleminde kullanır. En çok bilinen türleri; Denver, Sala, Wemco, Outokumpu ve Wedag firmalarının üretimini yaptığı flotasyon makineleridir (Hacıfazlıoğlu, 2009).



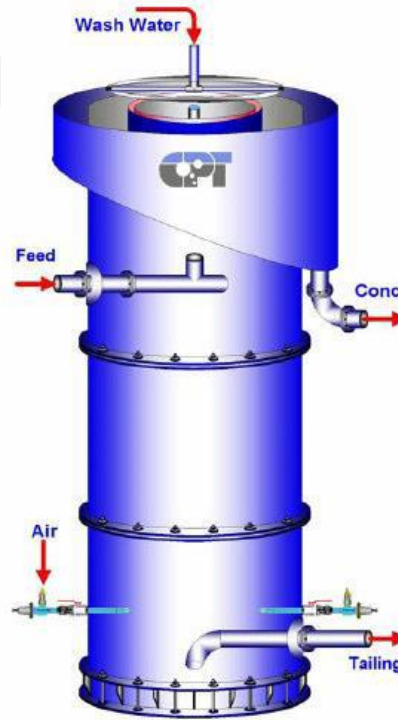
Şekil 3.3 Outokumpu flotasyon hücresi (Hacıfazlıoğlu, 2009).

Teknolojini gelişmesiyle beraber mekanik hücrelerin birtakım olumsuzluklarını ortadan kaldırmak ve de yüksek sığalara ulaşımını sağlamaya yönelik TankCell, High Grade ve Skim Air gibi oldukça yüksek sığalı flotasyon makineleri geliştirilmiştir. 2006'da Avustralya ülkesinde Outokumpu'nun önderliğinde 300 m³ sığaya sahip TankCell geliştirilmiştir. Bu makine dünyadaki en devasa flotasyon makinesi sıfatını almıştır.

3.2.2. Kolon flotasyon hücreleri

Mekanik flotasyonda makine içerisinde oluşan devinim sebebi ile hava kabarcığı-mineral tanecik birleşmesi hasar almakta ve aralarındaki bağ bazen kopmaktadır. Bununla birlikte, su aracılığıyla taşınımın sağlanması bu makinelerde konsantre kirliliğine sebep olabilmektedir. Bu dezavantajların bertaraf edilebilmesi için 1960'ta Bautin-Tremblay liderliğinde uzun, ince bir makine tasarlanmıştır. Kanada kolonu diye de bilinen bu öncü

niteliğindeki kolonda, hiçbir karıştırma mekanizması dizayn edilmeksizin minik yarıçaplı kabarcıklar üretilmiştir. Bu sistemde, kompresör vasıtasıyla gözenekli yapıdaki bir engelden geçişi sağlanan hava, makine altına gönderilmektedir. Besleme işlemi ise köpük katmanının alt tarafından gerçekleştirilmektedir. Kolon flotasyonu işleminde temel olarak iki kısım bulunmaktadır. Bu kısımlar; toplama ve yıkama alanları olarak bilinmektedir. Toplama alanı, hava kabarcığı-mineral tanecik füzyonunun olduğu yer, yıkama alanı ise köpük katmanının yıkandığı yerdir. Sanayide kolonun boyu 15 metre, çapı da 3 metreye kadar çıkabilmektedir. Kolon flotasyonu işlemindeki uygun ortam şartları, köpük katmanının üretilmesi, yıkamaya girmesi ve de küçük ebatta hava kabarcığının üretilmesi çok küçük yapıdaki minerallerin dahi optimum randıman olarak zenginleştirilebilmesini sağlamıştır. Kolon flotasyonu işleminde engellenemeyen en önemli sorun hava üreten sistemin (sparger) çok sık tıkanmasıdır. Bu ve bunun gibi sorunların giderilebilmesi adına birçok kolon çeşidi üretilmiştir, Şekil 3.4'te kolon flotasyon örneği görülmektedir (Garibay 2002; Li ve ark., 2003; Hacıfazlıoğlu, 2009).

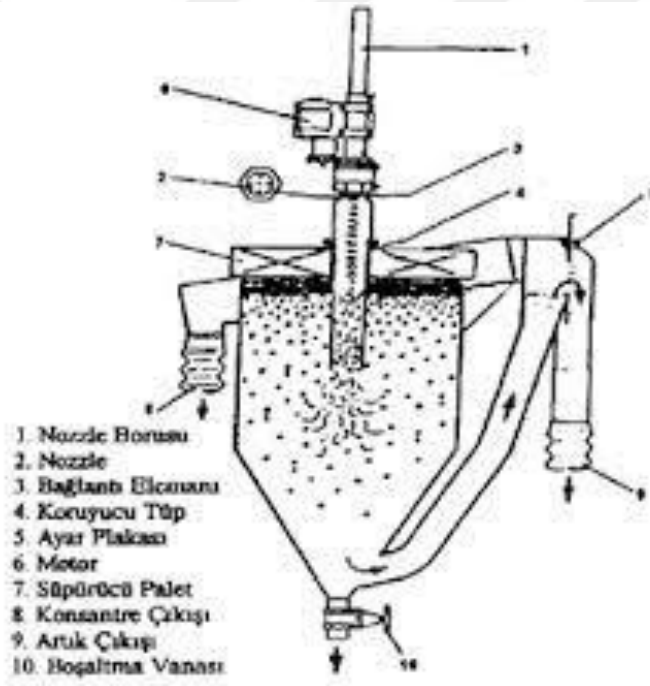


Şekil 3.4 CPT kolonu görüntüsü (Hacıfazlıoğlu, 2009).

3.2.3. Jet flotasyon hücreleri

Jet flotasyon makineleri, suyun hareket etmesinden faydalanarak hava kabarcıkları üreten makinelerdir. Klasik jet hücresi, jameson makinesi, hidrojetflotasyon makinesi bu türe örnektir.

Berlin Teknik Üniversitesi'nde 1980 yılında tasarlanan klasik jet kolonu ile ultra ince ebatlarda bile tesirli bir flotasyon işlemi gerçekleştirmek mümkün olmuştur. Diğer türlere nazaran hava kabarcığı çapının küçük ve sayıca fazla olması bu türün avantajıdır. Bu durum flotasyonun süresini oldukça kısa tutulmasını, sığasının da yüksek olmasını sağlamaktadır. Sanayi alanında birçok uygulaması yer almaktadır. Şekil 3.5'te klasik jet flotasyon örneği görülmektedir (Önal ve ark., 1996; Güney ve ark., 2002; Hacıfazlıoğlu, 2009; Yılmazel, 2010).

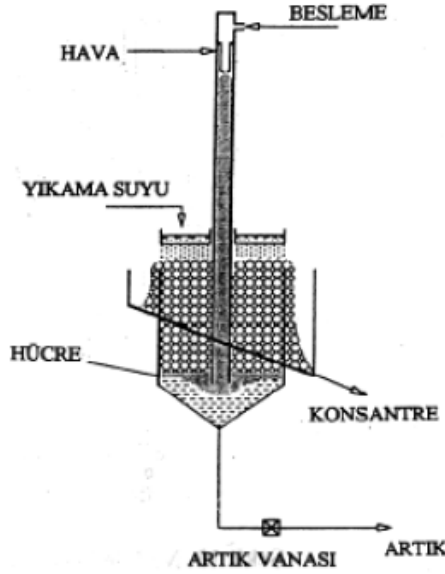


Şekil 3.5 Klasik jet flotasyonu (Hacıfazlıoğlu, 2009).

3.2.4. Jameson flotasyonu

Jameson flotasyon makinesi 1989 yılında Kimya dalında Profesör olan Greame Jameson öncülüğünde keşfedilmiştir. Genel anlamda, bir pompa yardımıyla basılan hava dikey hattaki borunun üst tarafında yer alan nozuldan fışkırmak üzere beslenir. Bu sırada atmosferden çekilen hava pülple karışır ve flotasyon makinesine dek dikey boru içinde ilerler. Bu teknikle elde edilen hava kabarcığı hem miktar bakımından daha çok hem de kabarcığın çapı daha ufaktır. Bahsedildiği gibi, küçük ebatlı kabarcıkların elde edilmesi

köpük yüzey alanı toplamının çoğalmasına, böylece flotasyondan alınacak verimin optimizasyonuna yol açmaktadır. Şekil 3.6’da jameson flotasyon hücresi verilmektedir (Hacıfazlıoğlu, 2009; Yılmazel, 2010).



Şekil 3.6 Jameson flotasyon hücresi (Hacıfazlıoğlu, 2009).

3.3. Flotasyon Reaktifleri

Reaktifler, flotasyonun temel bileşenleri arasında yer alan önemli unsurlardır ve toplayıcılar, köpürtücüler ve yardımcı reaktifler olmak üzere sınıflandırılabilirler.

3.3.1. Toplayıcı reaktifler

Su içerisinde çözünmeyen ve hidrojen bağı oluşturamayan apolar moleküller, hidrofobik olarak adlandırılır. Bu tip moleküller, su ile bağ kuramadıkları için diğer hidrofobik moleküllerle etkileşime girerler. Bu amaca ulaşmak için pülpe, toplayıcılar olarak adlandırılan yüzey aktif maddelerle zenginleştirilir. Bu katı maddeyi yüzdürebilmek için onun su ile etkileşimini azaltmak gereklidir. Tanecik su ile etkileşimden çıktığında, hava kabarcıkları onun üzerine yapışarak yüzmeyi sağlayabilir. Bu durumu elde etmek için toplayıcıların kullanılması amaçlanmaktadır (Atak, 2017).

Mineraller, polar gruplarının gücüne bağlı olarak beş alt grup içinde sınıflandırılırlar (Çizelge 3.1). Çizelgede grup numarası arttıkça, mineralin polaritesi de artmaktadır. 3(a) ve (b) gruplarındaki minerallerin polaritesi aynıdır. Ancak, 3(a) grubu mineraller, mineral

yüzeylerinin bazik pH değerlerinde sülfürlenmesi sonucunda hidrofobik bir yüzey elde ederler. Doğal metaller dışındaki grup 1 mineralleri, karbonat ve sülfat minerallerinin iyonik bağa göre daha zayıf olan kovalent bağlanmaları nedeniyle genellikle hafif polar olan sülfür içermektedir. Bu nedenle genel olarak, sülfür minerallerinden sülfatlara, karbonatlara, halitlere, fosfatlara vb. oksit-hidroksitlere ve nihayetinde silikatlara ve kuvarsa kadar polarite derecesi artmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006; Çilek 2006).

Çizelge 3.1 Polar minerallerin sınıflandırılması (Wills ve Napier-Munn, 2006).

I.Grup	2.Grup	3(a) Grup	4.Grup	5.Grup
Galen	Barit	Seruzit	Hematit	Zirkon
Kovelin	Anhidrit	Malakit	Magnetit	Hemimorfit
Bornit	Jips	Azurit	Götit	Beril
Kalkozin	Anglezit	Wulfenit	Kromit	Feldspat
Kalkopirit			İlmenit	Silimanit
Stionit		3 (b) Grup	Korundum	Galen
Arjantit		Florit	Piroluzit	Kuvars
Bizmut		Kalsit	Limonit	
Millerit		Witherit	Boraks	
Kobaltit		Manyezit	Wolframit	
Arsenopirit		Dolomit	Kolombit	
Sfalerit		Apatit	Tantalit	
Orpiment		Şelit	Rutil	
Pentlandit		Smitsonit	Kasiterit	
Saf Au, Pt,		Radokrozit		
Ag, Cu		Siderit		
		Monazit		

Mineral yüzeylerine hidrofobik özellik kazandırmak amacıyla pülp içine toplayıcılar eklenir ve bu toplayıcılar mineral yüzeyi tarafından absorbe edilir. Bu prosedür,

kıvamlandırma tankları olarak adlandırılan silindirik tanklarda gerçekleştirilir. Bu tanklar içinde karıştırıcı kanatlar bulunur ve bu aşamaya kıvamlandırma süresi denir. Tesislerde karışımın uygun süre boyunca kalabilmesi için, uygun hacimde tank kapasitesi seçilir ve bu şekilde süreklilik sağlanır. İyonlaşmayan toplayıcılar genellikle mineral yüzeyini kaplayacak şekilde suda çözünmeyen bir formda bulunurlar. Öte yandan, iyonlaşan toplayıcılar suda çözülebilen bir yapıya sahiptir. Bu tür toplayıcılar, flotasyon işleminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Yıldız, 2007).

Toplayıcıların polar bölümü ile mineral yüzeyi arasındaki kimyasal, elektriksel ve fiziksel etkileşimler, toplayıcıların polar kısmının mineral yüzeyi tarafından absorbe edilmesine yol açar; bu da minerale hidrofobik bir yüzey kazandırır. Mineral yüzeyinin ıslanmaması için flotasyonda gereken tek tabakalı bir yüzey oluşturacak kadar toplayıcı kullanılmalıdır. Maliyetleri artırmakla birlikte daha fazla toplayıcı kullanmak, minerale birlikte bulunan, ancak batırılması istenen diğer safsızlıkların da yüzme olasılığını artırabilir.

Toplayıcıların aşırı kullanılması, yüzdürülecek mineralin yüzeyinde çok sayıda tabakanın oluşmasına sebep olabilir, bu da mineralin yüzdürülebilirliğini azaltmaktadır. Flotasyon sürecinde genellikle birden fazla toplayıcı kullanılır; başlangıçta kullanılan toplayıcılarla yüksek yüzme özelliklerine sahip mineraller ayrılır. Daha sonra daha etkili toplayıcılar kullanılarak yüzme özellikleri daha düşük mineraller elde edilir (Yıldız, 2007).

3.3.2. Köpürtücü reaktifler

Flotasyonun başarısında önemli bir etkisi olan köpürtücüler, tüm reaktifler pülp içine eklendikten sonra ve hücre içine hava verilmeden önce pülp içine eklenen son flotasyon kimyasalıdır (Çilek, 2006). Geleneksel flotasyon, çok fazlı, çok maddeli ve çok ölçekli bir ayırma işlemidir. Yüzey hidrofobikliğini arttırmak için sıvı türbülansı yoluyla değerli mineralleri mineral parçacıklarıyla karıştırmak için genellikle bulamaca toplama maddeleri eklenirken, sıvı türbülansı da asılı mineral parçacıklarını yakalamak için kullanılır. Daha sonra yüzdürme odasına hava verilir ve türbülansın etkisi altında ince kabarcıklar oluşturulur. Kabarcıklar daha sonra mineral parçacıklarıyla çarpışır ve hidrofobik parçacıklar kabarcıklara yapışarak bir köpük tabakası oluşturmak üzere yükselirken, hidrofilik (suyu seven) parçacıklar flotasyon tankının dibine çökerek atık gider (Rosa ve Rubio, 2018; Wang ve ark., 2019; Mesa ve Brito-Parada, 2019).

Köpük maddeleri, minerallerdeki kabarcıkların boyutunu azaltmak için yaygın olarak kullanılan yüzey aktif maddelerdir (Zhang ve ark., 2012). Flotasyonda köpürtücüler, kağıt hamuru devresindeki ince kabarcıkların dağılımını teşvik etmek, kabarcıkların birleşmesini önlemek ve flotasyon sırasında stabil köpük oluşumunu sağlamak için kullanılır (Gupta ve ark., 2007). Fıskiye'nin en önemli işlevlerinden biri kaldırma kuvvetini önemli ölçüde arttırmaktır. "Seçici" ve "etkili" terimleri de yaygın olarak bu etkiyle bağlantılı şişirici maddeleri tanımlamak için kullanılır. Seçicilik, hidrofobik parçacıkların hava kabarcıklarına yapışmasını ifade eder ve çok ince parçacıkları yüzdürmek için kullanılabilir; "mukavemet" terimi ise şişirme maddesinin köpürme kabiliyetini belirtir ve daha iri parçacıkların yüzdürülmesinde daha iyi verimlilik ve performansı ifade eder (Khoshdast ve Sam, 2011).

Flotasyon sırasında yüzdürülecek mineralin suya yapışmaması ve nemlenmemesi sağlandıktan sonra hava kabarcıkları yapıştırılarak mineralin yüzeye çıkarılması gerekir. Köpüğün oluşabilmesi için havada ve suda olduğu gibi ortamda da köpürtücü kimyasalların bulunması gerekir. Bu amaçla flotasyonda köpük oluşturu kimyasallar kullanılır. Köpürtücü kimyasallar hava-sıvı ara yüzey gerilimini azaltarak köpük oluşturur (Atak, 2017).

Köpük yapıcı maddeler kimyasal olarak iyon temizleyicilere benzer. Oleatlar gibi birçok iyon temizleyici aynı zamanda güçlü köpük oluşturu maddelerdir. Köpük oluşturu lar genellikle heteropolar bir yapıya sahiptir. Köpüren moleküllerin polar olmayan grupları havaya, polar grupları ise suya dönüktür.

Köpürtücü maddeler hava-su arayüzündeki yüzey gerilimini azaltarak kabarcıkların sabit kalmasını sağlar. Bu kimyasalların suda eşit şekilde dağılabilmesi için suda çözünür olması gerekir. En çok kullanılan köpürtücüler:

- Karboksil $\text{OH C} = \text{O}$,
- Sülfö grup $-\text{OSO}_2\text{OH}_2-\text{SO}_2\text{OH}$,
- Karbonil $=\text{C}=\text{O}$,
- Amino grup ile $-\text{NH}_2$, Hidroksi OH 'dir.

Az miktarda köpük üretimi için yeterli olan bir köpürtücünün toplama özelliği olmamalıdır ve aynı zamanda flotasyon ortamındaki minerallerden ve diğer kimyasallardan etkilenmemelidir. Flotasyon işlemi sırasında mineralleri etkili bir şekilde

yüzeye taşıyabilen ve uzun ömürlü olan köpürtücüler tercih edilmelidir. Ayrıca, flotasyon sonrasında patlamaya neden olmayan ve maden ocaklarında sorun oluşturmeyen köpürtücüler arasında yaygın olarak kullanılanlar arasında çam yağı, okaliptüs yağı, kresilik asit ve uzun zincirli alkoller bulunmaktadır. Farklı ticari markalar altında satılan çeşitli köpürtücü ürünler bulunmaktadır (Atak, 2017). MIBC (metil izobütil karbinol, $C_6H_{14}O$ ve Dow froth 250 (Polipropilen glikol alkil eter, $CH_3O(C_3H_3O)_4H$), Çamyacı ve (2-Etilheksanol, $C_8H_{18}O$) ince kömür ayırma teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Harris ve ark., 2000).

Flotasyon makinesinin türüne ve çeşidine bağlı olarak, hava kabarcığı oluşumu flotasyon sürecinde değişiklik gösterebilir. Kabarcık oluşumu, flotasyon makinesinin tipine bağlı olarak farklı şekillerde gerçekleşebilir.

3.3.3. Yardımcı reaktifler

İyileştiriciler (promoters); yağın emülsiyon yeteneğini artırarak ve yağların kömür partiküllerine yapışmasını geliştirmek amacıyla kullanılır. Düzenleyiciler (modifiers); pH seviyelerini düzenleme, sülfürlü mineralleri bastırma veya iyileştirici olarak kullanma amacıyla kullanılır.

Bastırıcıların temel amacı, kömürün flotasyon sürecini engellemektir. Çünkü kömür, doğal olarak yüzeyde yüzebilen bir özelliğe sahiptir; ancak bu özelliği, yüzeyini hidrofilik (suyu sever) hale getirilerek bastırılabilir. Bu amaçla genellikle nişasta, dekstrin gibi organik malzemeler kullanılmaktadır (Laskowski, 2001; Şimşek, 2007).

3.4. Kömür Flotasyonu

Kömür kullanımının beraberinde getirdiği çevresel ve operasyonel sorunlar, kömürün karbonlu materyalinden kaynaklanan yanıcı olmayan atık minerallerin uzaklaştırılmasıyla azaltılabilir. Köpük flotasyonu, düşük sermaye ve alan gereksinimleri nedeniyle diğer kömür zenginleştirme yöntemlerine göre tercih edilmektedir (Özmaç ve Aktaş, 2006). Ayrıca, ince kömür elde etmek için en etkili yöntem flotasyondur (Ni ve ark., 2018). Kömür flotasyonunda etkili olan faktörler ise;

- Tane boyu etkisi,
- Kömürün petrografik yapısı,
- Katı oranı etkisi,

- Temas açısı,
- Pülp pH değeri olarak sıralayabiliriz.

Flotasyon sürecinde, ayırma işlemi pülp içinde hava kabarcıklarının üretilmesi ve bu hava kabarcıkları ile etkileşime giren maddelerin (hidrofoblar) yukarı yönlü hareketi, suyu emen taneciklerin (hidrofiller) ise aşağı yönlü hareketi ile gerçekleştirilir (Yeşilyurt, 2014). Bir mineralin yüzey özellikleri, bu mineralin su ile ıslanmama yeteneğine (hidrofobik olma) bağlıdır. Islanmama özelliği, katının yüzey moleküllerinin özelliklerine bağlı olarak değişir ve bu durum moleküllerin polar olup olmalarına bağlıdır. Kömür, yüzeyi polar olmayan doğal bir hidrofobik madde olarak bilinir. Bu özelliği nedeniyle flotasyon işlemi için uygun bir adaydır (Hacıfazlıoğlu, 2011). Ancak, farklı kömür türleri çeşitli flotasyon özellikleri sergileyebilir. En iyi flotasyon özelliklerine sahip kömürler, genellikle orta uçuculu kömürlerdir. Yüksek uçuculu taş kömürleri, antresitlere kıyasla daha kolay bir flotasyon gösterirken, linyitler flotasyonu gerçekleştirmesi en zor olan kömür çeşididir (Öney ve Bilgin, 2016).

Kömür flotasyonunda temel olarak kullanılan toplayıcılar, genellikle gazyağı, fuel oil, mazot ve bazı kömür distilantlarıdır (Sönmez ve Cebeci, 2006). Taşkömürü flotasyonunda, genellikle yağların kullanım oranı 0.5-2 kg/t arasındadır; ancak, kömürleşme derecesi düşük olan linyit flotasyonunda bu oran, 6-8 kg/t seviyelerine kadar çıkabilmektedir (Hacıfazlıoğlu, 2011). Kömür flotasyonunda yaygın olarak kullanılan bir alifatik alkol olan Metil İzobütil Karbinol (MIBC), aynı zamanda toplayıcı özelliklere sahiptir. Yüksek kil, silikat ve özellikle kuvars içeren kömürlerde, sodyum silikat, sodyum hegzametafosfat, lignin, polimerik sülfonatlar, quebrecho ve tanin gibi bastırıcılar kullanılmaktadır (Öney ve Bilgin, 2016).

3.5. Flotasyon İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Ayhan, Abakay ve Kahraman, (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Şırnak asfaltitlerinin flotasyonla kül düşürme olasılığı incelenmiştir. Başlangıçta asfaltitin %44,63 kül içeriği ve 4.796 kcal/kg ısı değeri sahiptir. Çeşitli deneylerde öğütme süresi, katı oranı, pH, toplayıcı miktarı, bastırıcı miktarı ve köpürtücü miktarının flotasyon üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde 0-1.500 g/t toplayıcı konsantrasyonu kullanılmış, ancak toplayıcısız flotasyon deneyleri daha başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca, optimum sonuçlar %5 katı oranı, pH 8, bastırıcı 150 g/t ve köpürtücü 100 g/t koşullarında elde edilmiştir. Sodyum silikat bastırıcı olarak, çamyağı ise

köpürtücü olarak kullanılmıştır. Deneylerin sonucunda %76,61 yanabilir verimle, %32,95 kül içeriğine sahip temiz asfaltit elde edilmiştir.

Bentli ve Kaya, (2004) tarafından yapılan bir çalışmada, Tavşanlı İlçesi'nde bulunan bir işletmede, hava kirliliği standartlarına uymayan ince boyutlu (-0,5 mm boyutlu) kömür, flotasyon işlemine tabi tutularak değerlendirilmiştir. Bu kömür, satılamayarak stoklanmış ve flotasyon sonucunda elde edilen lave kömür, sanayi yakıtı olarak kullanılmak üzere zenginleştirilmiştir. İlk kömür örneği %48,48 kül, %2,05 yanabilir kükürt ve 3.531 kcal/kg alt ısı değere sahiptir. Flotasyon sonucunda elde edilen ikinci lave kömür ise %27,26 kül, %2,19 yanabilir kükürt, 5.118 kcal/kg alt ısı değere sahip olup %81,09 yanabilir verimle kazanılmıştır. Bu işlemle elde edilen lave kömür, besleme başına 1000 kcal/kg için kükürt miktarı %0,58' den %0,43'e düşmüştür.

Sönmez, (2007) tarafından, Tunçbilek lavvarı tikiner altı atıklarından flotasyon ile iri boyuttaki yani -1,18 mm +0,106 mm kömürlerin kazanılması amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Numunedeki iri boyutlu malzeme miktarı %20,23'tür. -0,106mm ile +0,038 mm boyut aralığında ise %5,46 civarında malzeme bulunmakta olup geriye kalan -0,038 mm boyutta malzemenin oranı ise %74,31'dir. Flotasyona tabi tutulan -0,106 mm ile +0,038 mm boyutlu malzemeden, %49,91 kül içeriğine ve 2.742,24 kcal/kg ısı değere sahip ürün elde edilmiştir. Deneylerde -1,18 mm ile +0,425 mm ve -0,425 mm ile +0,106 mm boyutundaki malzemeler ayrı ayrı zenginleştirilmeye tabi tutulmuştur. Toplayıcı olarak gaz yağı, mazot ve gaz yağıyla mazot karışımları ayrı ayrı kullanılmış ve uygun reaktif miktarları belirlenmiştir. %80 gazyağı +%20 mazot karışımı uygun toplayıcı olarak belirlenmiş ve 25 kg/t oranında kullanılmıştır. Ayrıca iri boyuttaki minerallerin flotasyonunda etkili olan hold-up çalışma parametresinin etkileri de tüm boyutlar için çalışılmıştır. Hold-up değeri, -1,18 +0,425 mm ve -0,425 +0,106 mm boyutlu malzemelerin W ikisi içinde %20 olarak tespit edilmiştir. Bu koşullarda 0,106 mm üst boyutun iki ayrı kademede zenginleştirilmesi sonucunda (gazyağı + mazot) toplam kömürden %8,39 konsantre elde edilebilmektedir. Bu durumdaki konsantrenin kül içeriği yaklaşık olarak %18,98 ve kalorisi de 5823,94 kcal/kg olarak ölçülmüştür.

Bayat, (2008)'a göre Tunçbilek Ömerler lavvar tesisine ait kalorifik değeri 4390 kcal/kg olan %33,41 kuru kül ve %0,39 kükürt içeren numune üzerinde ara bitki yağ asitleri toplayıcı olarak kullanılarak flotasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Optimum koşullar: besleme %10, dikey boru daldırma derinliği 40 cm, köpük derinliği, değişken; yıkama suyu hızı, pH 7-7,5, yağ asidi/gazyağı oranı 1/1, 0,6 L/D, d80: 0,250 mm, katı çamur

oranı %20, kondisyonlama süresi 10 dakika, flotasyon süresi 3 dakika olup, araştırma sonucunda kül içeriği %10, kükürt %1,1, yanıcı maddeler ise %87,15 olup temiz kömür elde edilmektedir. Kalorifik değeri 6150 kcal/kg'dir.

Hacıfazlıoğlu, (2011) Zonguldak bitümlü kömürü üzerinde dört farklı köpürtücü (MIBC, Dowfroth 250, çamyacı ve 2-etilheksanol) ve toplayıcılar (hafif motorin, akaryakıt, 300 litre benzin ve motorin) kullanarak flotasyon çalışması yapmıştır. Sonuçlar MIBC ve 1800 g/t gazyağı kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışma, %48,80 kül içeriğine sahip temiz kömürden oluşan bitümlü kömür çamurundan %78 yanma verimliliği ve %15,48 koklaşma performansı elde etmiştir.

Yılmazel, (2012) Çatalağzı Termik Santraline verilen lavvar atıklarının optimum flotasyon koşullarında zenginleştirilmesi konusunu incelemiştir. Bu konuda yapılan çalışmalarda deneysel parametreler olarak katı oranı, kollektör dozu, köpürtücü dozu ve devir sayısı ölçülmüştür. Optimum koşullar altında pH değeri 6,5-7 arasındadır. Kollektör olarak dizel ve köpürtücü olarak MIBC'nin kullanıldığı deneysel çalışma, karıştırma hızı: 1300-1500 rpm, katı oranı: %10-30, toplayıcı dozajı: 300-3,375g/t, köpürtücü ajan dozajı: 30 -337,5 g/t arasındadır. Optimum flotasyon koşullarında, %10 katı oranı, 4 dakika flotasyon süresi, 1300 dev./dk. karıştırma hızı, 3375 g/t toplayıcı miktarı, 337,5 g/t köpürtücü miktarı ve 5 dakika kondüsyon süresi ile gerçekleştirilen deneysel çalışmada %96,91 verimle sonuç alınmıştır. Bu çalışma sonucunda, koklaştırılabilir ve ev yakıtı için uygun kaliteye getirilmiş, 6450-6600 kcal/kg arasında ısı değere sahip, %17,81 küllü kömür elde edilmiştir.

Öney ve Bilgin, (2016) tarafından yürütülen flotasyon çalışması kapsamında, Zonguldak Kozlu bölgesine ait kömürlerin %46,10 kül içeriğine sahip olan örnekleri kullanılmış ve uygun flotasyon parametreleri verimlilik indeksi ile belirlenmiştir. Deneyde tane boyutu, toplayıcı türü ve miktarı, köpürtücü türü ve miktarı, bastırıcı miktarı gibi çeşitli deneysel parametreler incelenmiştir. Kaba flotasyonda -1,170 mm tane boyutunda bulunan verimlilik indeksi 254,41 iken, -0,425 mm tane boyutunda bu indeks 292,34'e yükselmiştir. Bu sebeple, en elverişli tane boyutu -0,425 mm olarak belirtilmiştir. Toplayıcı miktarı arttıkça, kaba temiz kömürün kül oranı ve yanabilir verimi artmakta, fakat verimlilik indeksi azalmaktadır. En üst düzey verimlilik değerleri gazyağı kullanılarak elde edilmiştir. Gazyağı ile yapılan deneylerde (200 g/t), %64,63 ağırlıkça ve %24,52 küllü kaba temiz kömür %90,06 yanabilir verimle elde edilmiştir. MIBC ile gerçekleştirilen deneylerde (75 g/t), %57,80 ağırlıkça ve %21,11 küllü kaba temiz kömür

%86,01 yanabilir verimle elde edilmiştir. Sodyum silikat ile yapılan deneylerde (3000 g/t), %55,48 ağırlıkça ve %18,84 küllü kaba temiz kömür %84 yanabilir verimle elde edilmiştir. Sonuç olarak; temizleme flotasyonunda ağırlık olarak %36,43 oranında temiz kömür %12,78 kül içeriğinde elde edilmiş, verimlilik indeksi değeri 207 olarak hesaplanmıştır.

Kaya ve Taşdöğen'in, (2020) araştırmasında, Sivas/Gemerek ilçesine ait linyit numunesinin boyutu (-500 μ m) üzerindeki kömür tanelerini flotasyon yöntemiyle temizleme konusundaki etkili parametreler incelenmiştir. Deneylerde, sodyum silikatın bastırıcı reaktifi olarak 0-1000 g/t, gazyağının toplayıcı reaktifi olarak 50-3000 g/t ve MIBC'nin köpürtücü reaktifi olarak 15-1000 g/t miktarlarında kullanılarak flotasyonun üzerindeki etkiler araştırılmıştır. Optimal flotasyon koşulları, tane boyutu olarak -500 μ m, katı oran olarak %10, pülp pH değeri olarak 2 ve kondisyon süresi olarak 5 dakika olarak belirlenmiştir. Temiz kömür elde etmek için 250 g/t sodyum silikat, 250 g/t gazyağı ve 100 g/t MIBC kullanılarak gerçekleştirilen flotasyon sonucunda, ağırlıkça verim %37,18, yanabilir verim %40,11 ve kül içeriği %19,08'den düşürülerek %12,70 olarak elde edilmiştir.

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Materyal

Bu çalışmada, Edirne yöresinde üretilen linyit kömür numunesi uygun numune alma yöntemleri kullanılarak temin edilmiştir. Çizelge 4.1’de flotasyon deneylerinde kullanılan kömür numunesinin özellikleri verilmiştir. Flotasyon deneylerinde kullanılan reaktiflerin kullanım amacı ve yoğunlukları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Kömür numunesinin özellikleri

Orjinal Kömürde Toplam Nem (%)	Orjinal Kömürde Kaba Nem (%)	Kömürde Hidroskopik Nem (%)	Kuru Kömürde Ortalama Kül (%)	Kuru Kömürde Isıl Değer (kcal/kg)	Uçucu Madde Miktarı (%)
15.69	8.19	7.50	46.00	2711.82	32.82

Çizelge 4.2 Flotasyonda kullanılan reaktifler ile kimyasal malzemelerin kullanım amacı ve yoğunlukları

Reaktif Adı	Kullanım Amacı	Yoğunluk (g/cm ³)
Gazyağı	Toplayıcı	0.77
Mazot	Toplayıcı	0.81
Çamyacı	Köpürtücü	0.95
Sodyum Silikat (Na ₂ SiO ₃)	Bastırıcı	2.40
Oleik Asit	Toplayıcı	0.90

4.1.1. Linyit kömür örneğinin XRD analizi

Deneylerde kullanılan linyit örneğinin XRD sonuçlarına göre başlıca mineral maddelerin kuvars, kalsit, andezit, klorit, fosfalit, kaolin, markozit, vermikülit ve pirit olduğu görülmektedir. Linyit örneğinin XRD analizi Ek-1’de verilmektedir (Öksüz ve ark., 2019).

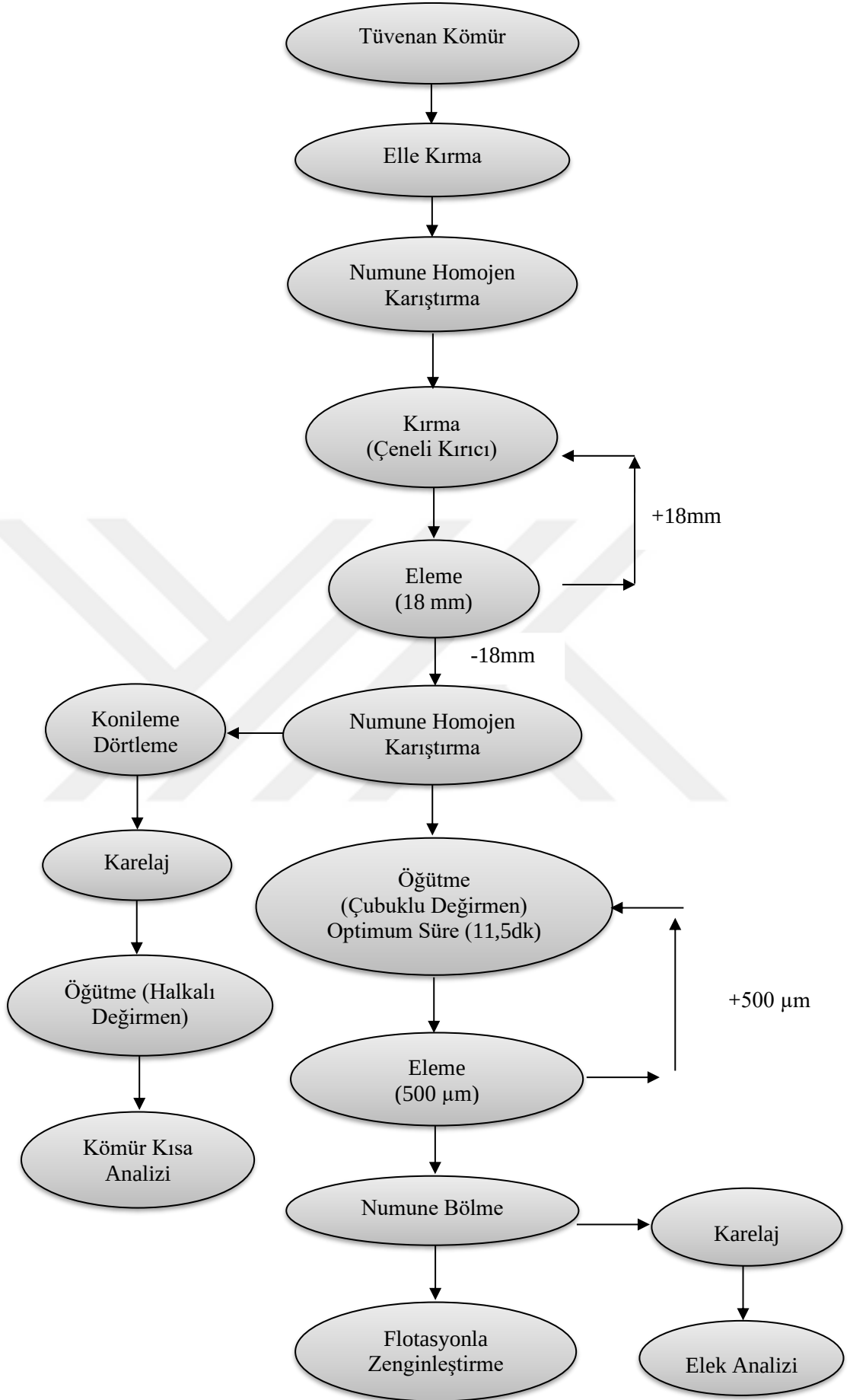
4.1.2. Fır ölçümleri

Fır ölçümleri 400-4000 dalga sayısı aralığında yapılmıştır. Ölçümler Bruker marka cihazında, ana numuneden 8000 g/t toplayıcı kullanılarak elde edilen ürünler üzerinde yapılmıştır.

4.2. Metot

4.2.1. Numune hazırlama

Edirne linyit kömür numunesi flotasyon deneyinde kullanılmak için, önce balyozla kırılarak numunenin tamamı çeneli kırıcıda kapalı devre -18 mm boyutuna hazırlanmıştır. Daha sonra konileme dörtlleme yöntemiyle numune azaltılarak tüvenan cevherin analizi için (1000 gr numune) alınmıştır. Numuneler Jones ızgarası ile homojen olarak bölünerek uygun kapalı ortamda stoklanmıştır. Optimum öğütme süresini belirlemek için; 3, 6, 9, 12 ve 15 dakika gibi farklı sürelerde öğütme yapılmıştır. Öğütme; 19,6 cm çapında, 30 cm uzunluğunda laboratuvar tipli çubuklu değirmende; 66 dev./dk. dönme hızında, 19 adet muhtelif (1.9-2.3-3 cm) çaplarda, 28 cm uzunluğunda yapılmıştır. Edirne linyit kömür numunesi için öğütme süresi 11,5 dakika sonunda verim %84 olduğu için, optimum öğütme süresi 11,5 dakika olarak belirlenmiştir. Kritik hız $Nk \frac{42,3}{\sqrt{D-d}}$ formülüne göre hesaplanmıştır (D: Değirmen çapı, cm; d: Bilya çapı, cm) (Yıldız, 1999). Kömür numunesinin tamamı -500 µm boyutuna öğütülmüştür. Daha sonra otomatik numune bölme cihazında 200 g olacak şekilde bölünerek numuneler torbalara konulmuştur. Şekil 4.1 'de Numune hazırlamaya ait akım şeması verilmiştir.



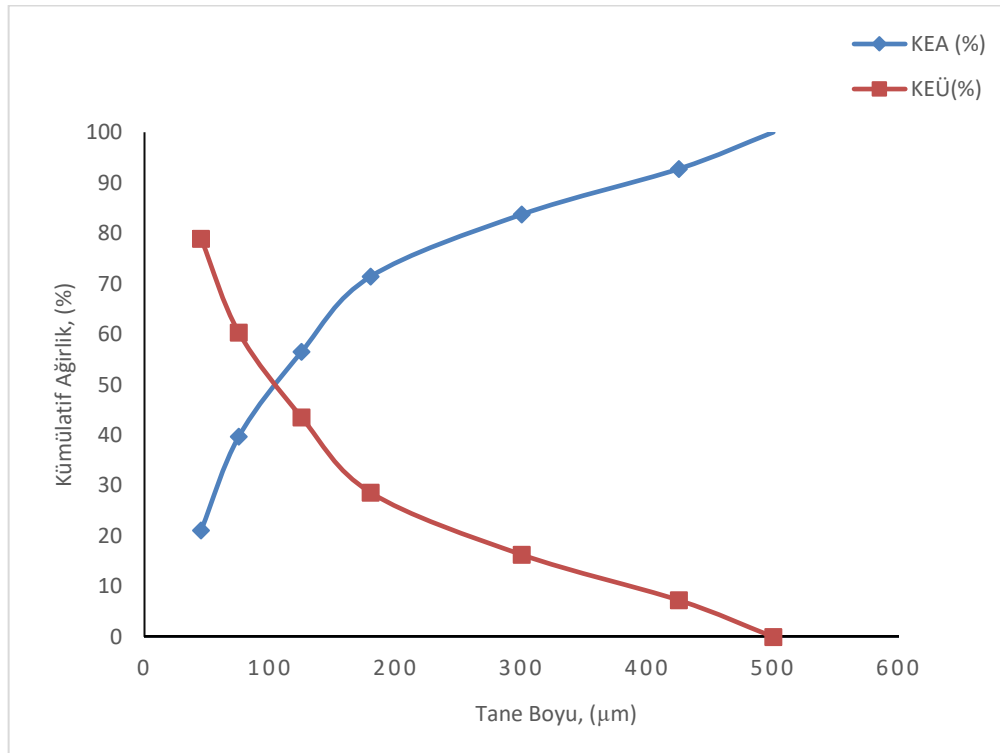
Şekil 4.1 Numune hazırlama akım şeması

4.2.2. Elek analizi

Edirne linyit kömür örneğini deneylerde kullanılmak üzere, tane boyu dağılımını belirlemek için öğütme sonrası karelej yöntemi ile numune alınarak yaş elek analizi yapılmıştır. Çizelge 4.3'te elek analizi sonuçları, kümülatif elek altı (K.E.A) ve kümülatif elek üstü (K.E.Ü) değerleri verilmiştir. Şekil 4.2'de ise K.E.A ve K.E.Ü eğrileri çizilmiştir. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.2'de görüleceği gibi kömür örneğinin % 83,72'si -300 μm 'nin altında olup, -45 μm miktarı ise %21,08 'dir.

Çizelge 4.3 Kömür örneği elek analiz sonuçları

Tane Boyu (μm)	Kümülatif Elek Altı (%)	Kümülatif Elek Üstü (%)
+500	100.00	-
-500+425	92.75	7.25
-425+300	83.72	16.29
-300+180	71.43	28.57
-180+125	56.52	43.48
-120+75	39.69	60.31
-75+45	21.08	78.92



Şekil 4.2 Kümülatif elek altı ve kümülatif elek üstü eğrileri

4.2.3. Kömürün kısa analizi

Tüvenan kömür çeneli kırıcıda kırılmıştır. Numune azaltma yöntemi kullanılarak, kömür numunesinden temsili örnek alınarak halkalı değirmende öğütülmüştür. Sabit tartımları $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de alınan krozelere 1'er g kömür numunesi konularak etüvde (Şekil 4.6) 2 saat bekletilmiş ve desikatörde soğutulduktan sonra tartımları alınmıştır. Etüvde kurutulan kömür numunesinden krozelere 1 g konulduktan sonra fırında (Şekil 4.7) 900°C 'de 4 saat bekletilmiş ve desikatörde soğutulduktan sonra tartımları alınmıştır. Daha sonra kömür numunesinin nem (%) ve kül (%) değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Isıl değeri ise kalorimetrede ölçülmüştür. Şekil 4.3'te kırma işleminde kullanılan cihaz verilirken; Şekil 4.4 ve 4.5'te öğütme işleminde kullanılan cihazlar verilmiştir.

Nem (%);

$$\text{Nem (\%)} = ((X+Y)(g)-Z(g) / Y(g)) * 100$$

X: Kroze Ağırlığı (g)

Y: Orijinal Numune ağırlığı (g)

Z: Kroze + Numune ağırlığı (g)

Kül (%);

$$\text{Kül (\%)} = ((Z(g)-X(g)/Y(g)) * 100$$

X: Kroze Ağırlığı (g)

Y: Numune ağırlığı (g)

Z: Kroze + Numune ağırlığı (Son Tartım) (g)



Şekil 4.3 Çeneli kırıcı



Şekil 4.4 Halkalı değirmen



Şekil 4.5 Çubuklu değirmen



Şekil 4.6 Elektro- manyetik etüv



Şekil 4.7 Fırın

4.3. Flotasyon Deneylerinin Yapılışı

Flotasyon deneyi Denver tipi flotasyon makinesinde karıştırıcı çapı 9,5 cm 4 delikli pervanesi olan 1,5 litre hacme sahip flotasyon selülünde, musluk suyu kullanılarak yapılmıştır. Katı oranı, bastırıcı miktarı, köpürtücü miktarı ve flotasyon süresi etkisinin araştırıldığı deneyler hariç tutulduğunda, çalışmalar genel olarak aşağıdaki koşullarda yapılmıştır. Deneyler;

Numune Miktarı: 100 g

pH : 8,5

Katı Oranı: %10

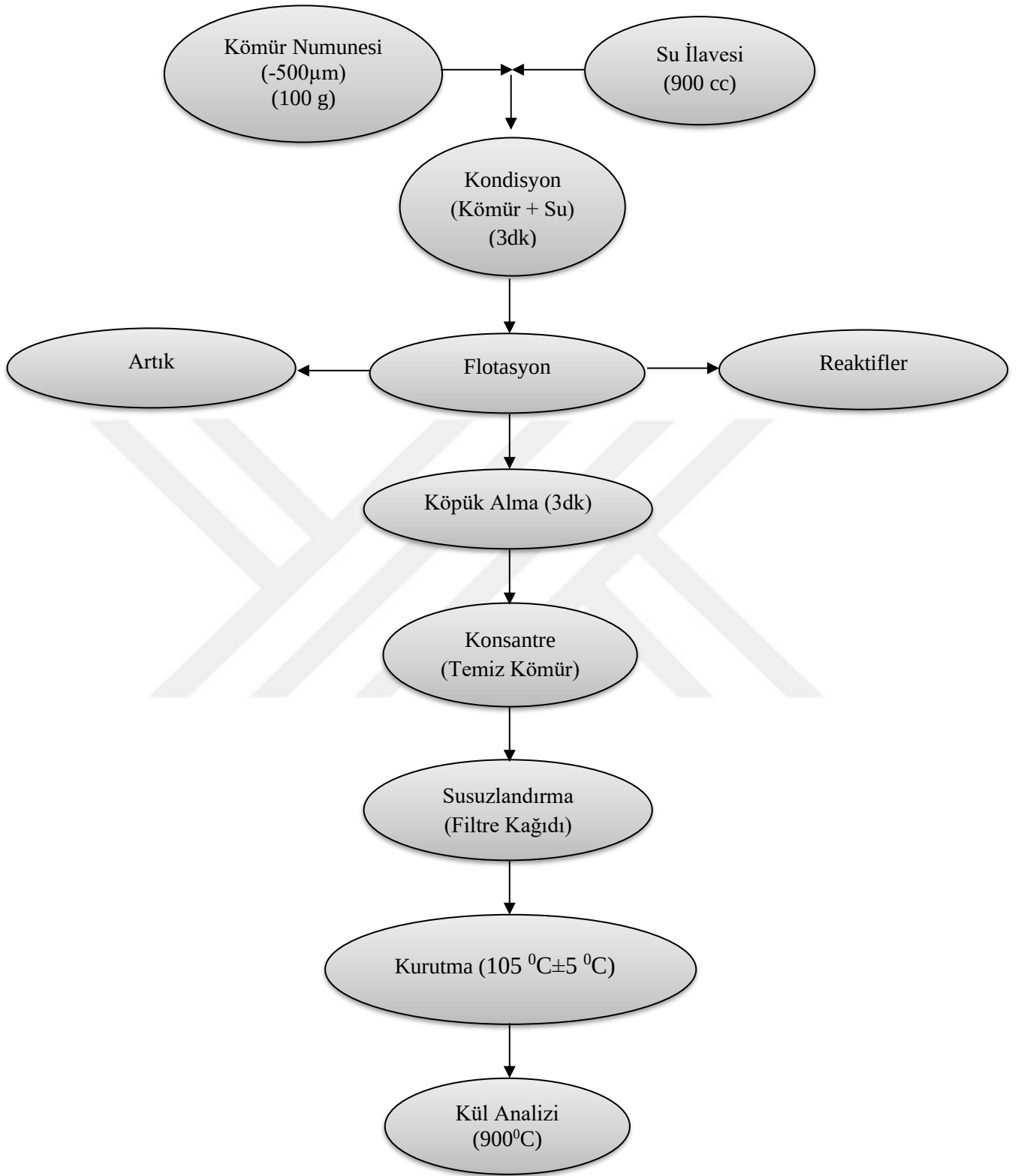
Karıştırma Hızı: 1100 dev./dk.

Kondisyon Süresi: 3 dk

Köpük Alma Süresi: 3 dk koşullarında yapılmıştır.

Linyit kömür numunesinden 100 g alınarak flotasyon cihazında ki selüle, 900 cc su ile beraber eklenerek 3 dakika kondisyon süresi başlatılmış pülpte homojen bir dağılım

sağlanmıştır. Sonrasında 3 ‘er dakikalık kondisyon süreleriyle sırasıyla bastırıcı, toplayıcı ve köpürtücü reaktifler eklenmiştir. 3 dakika daha karıştırma süresinden sonra flotasyon cihazının hava musluğu açılarak oluşan köpük bir kaba alınmış ve selülde kalan artılla ayrı ayrı filtre edilerek süzölmüştür. Süzölen konsantre numuneler 105 °C ‘de 24 saat kurutulduktan sonra (%) nem, daha sonra 900 °C ‘de küll analizi yapılmıştır. Flotasyon akım şeması Şekil 4.8’de verilmiştir. Deneyler de kullanılan flotasyon cihazı ise Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.8 Flotasyon akım şeması



Şekil 4.9 Deneylerde kullanılan flotasyon cihazı

4.4. Hesaplamalar

Flotasyon deneyleri sonunda; ağırlıkça verim (%), yanabilir verim (%), kül atımı (%) ve verim indeksi (%) aşağıdaki formülleri kullanarak hesaplanmıştır.

Ağırlıkça verim (%);

Kömürün flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmesi sonucunda ne kadarının konsantre olarak kazanıldığının yüzde olarak ifadesidir.

$$AV(\%) = (X(g)/Y(g)) \cdot 100$$

AV: Ağırlıkça verim (%)

X: Kömür ağırlığı (g)

Y: Beslenen kömür ağırlığı (g)

Yanabilir verim (%);

Yanabilir verim, beslemedeki organik kısmın ne kadarının konsantre bünyesinde kazanıldığının bir göstergesidir.

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

Kül atımı (%);

$$KA (\%) = 100 - [C * (c/f)]$$

Kül atımı, beslemedeki külün ne kadarının artığa gittiğinin bir göstergesidir.

Verim indeksi (%);

$$Vİ (\%) = (\text{Yanabilir verim} (\%) + \text{Kül atımı} (\%)) - 100$$

C: Konsantrenin ağırlığı (%)

c: Konsantrenin külü (%)

F: Beslemenin ağırlığı (%)

f: Beslemenin külü (%)

Yanabilir verimdeki artışa kül atımındaki azalma eşlik eder veya daha çok yanabilir verim demek düşük kül atımı anlamını taşımaktadır. Bu olgu yanabilir verim ve kül atımını beraberinde değerlendirecek bir kritere ihtiyaç duyulduğunu gösterir. Verim indeksi yanabilir verimi ve kül atımını birlikte değerlendiren bir kriterdir. Bu değer ne kadar fazla ise zenginleştirme işlemi o kadar başarılıdır.

4.5. Temas Açısı Ölçümü

Temas açısı ölçüm deneyi, toz kıvamına getirilmiş ana numuneden karelej yöntemi kullanılarak homojen peletler hazırlanarak yapılmıştır. Kömür peletlerinin üzerine su, gazyağı ve mazot damlatılmıştır. Temas açısı ölçümlerinde açılar elde edilemediğinden, okumalar yapılamamıştır.

5. FLOTASYON DENEY SONUÇLARI

Bu çalışmada, Edirne yöresinden alınan linyit kömürünün flotasyon ile zenginleştirilmesinde öncelikle toplayıcı türü ve miktarı belirlenmiş, daha sonra ise bazı işletme değişkenlerinin linyitin yüzdürülmesine olan etkileri araştırılmıştır. Çalışmada kömür flotasyonunda yaygın olarak kullanılan klasik yağlarla (gazyacı, mazot) linyit zenginleştirilmeye çalışılmış, bu reaktiflerin performansının iyi olmadığı anlaşıncı oleik asit ve karışımların etkisi araştırılmıştır. Karışımların etkisi %25, %50 ve %75 ağırlık oranlarda araştırılmıştır. Flotasyon performansı ağırlıkça verim (%), yanabilir verim (%) kül atımı (%) ve verim indeksi (%) bağli olarak değerlendirilmiştir.

5.1. Toplayıcı Türü ve Miktarının Araştırılması

Bilindiğı gibi linyitler gazyacı, mazot ve fuel oil gibi kollektörlerle düşük miktarlarda verimli bir şekilde zenginleştirilememektedir (Cebeci, 2002; Vamvuka ve Agridiotis, 2001; Kelebek ve ark.; 2008). Bazen kollektör gereksinimleri oldukça yüksek (50 kg/t) olabilmektedir (Aplan ve Arnold, 1991). Ayrıca yapılan bu çalışmada yalnızca dodekan kullanıldığında; 50 kg/t dodekan miktarında yaklaşık %15 civarında olan yanabilir verim, ağırlıkça 1/1 oranında dodekan ve 4-dodasilfenol kullanıldığında, aynı miktarda yaklaşık %50 yanabilir verim değerine ulaşmıştır. Fuel oil ve mazot karışımı kullanılarak düşük ranklı bir kömürün zenginleştirildiğı çalışmada; yalnızca mazot kullanıldığında yaklaşık 6 kg/t mazot miktarında %50 civarında olan yanabilir verim, ağırlıkça %25, %50 ve %75 oranında karışımlar kullanıldığında büyük ölçüde artış göstermiştir. En iyi bulgular %50 ağırlık oranında elde edilmiştir. 6000 g/t karışım miktarında, %90 'nın üzerinde yanabilir verim değerine ulaşmıştır (Ghiani ve ark., 1989).

Yukarıda belirtilen hususlar ve temas açısı bulguları dikkate alınarak deneyler nispeten yüksek toplayıcı miktarlarında yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda öncelikle tekli toplayıcıların, daha sonra karışımların performansı araştırılmıştır. Deneysel koşullar Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5.1 Toplayıcı (gazyacı, mazot ve oleik asit) miktarının belirlenmesinde flotasyon deney koşulları

Toplayıcı Reaktif	Parametreler	Değerler
Gazyacı Mazot Oleik Asit	Tane Boyu (µm)	-500
	Katı Oranı (%)	10
	Kondisyon Süresi (dk)	3
	Köpük Alma Süresi (dk)	3
	%5'lik Na ₂ SiO ₃ (Bastırıcı)	200 (g/t)
	%1'lik Gazyacı	2000,4000,6000,8000,10000 (g/t)
	%1'lik Mazot	2000,4000,6000,8000,10000 (g/t)
	%1'lik Oleik Asit	2000,4000,6000,8000,10000 (g/t)
	%1'lik Çamyacı (Köpürtücü)	200 (g/t)

5.1.1. Tekli toplayıcıların etkisinin araştırılması

Bu kapsamda, gazyağı, mazot ve oleik asit kullanılarak temiz kömürde yanabilir kısım kazanım verimi, kül atımı, kül içeriği ve verim indeksinin toplayıcı miktarına bağlı olarak değişimleri araştırılmıştır.

5.1.1.1. Mazotun etkisinin araştırılması

Mazotun etkisinin araştırıldığı deneylerden elde edilen bulgular Çizelge 5.2 ve Şekil 5.1 'de verilmektedir. Çizelge 5.2 ve Şekil 5.1 'de görüleceği gibi mazot miktarı arttıkça yanabilir verim ve verim indeksi değerinde artış eğilimi görülmektedir. Kül atımı değerinde ise düşüş eğilimi görülmektedir. Ağırlıkça verim değerleri mazot miktarı arttıkça artmaktadır.

Hem yanabilir verim hem de verim indeksi değerleri dar bir aralıkta değişmekte olup ulaşılabilen maksimum değerleri 10000 g/t 'da yanabilir verim %30,33 verim indeksi ise %8,54 olarak elde edilmiştir. Tüm bulgular birlikte değerlendirildiğinde; mazotun Edirne bölgesi linyitini zenginleştirmede çalışılan miktar aralığında performansının yetersiz olduğu görülmektedir.

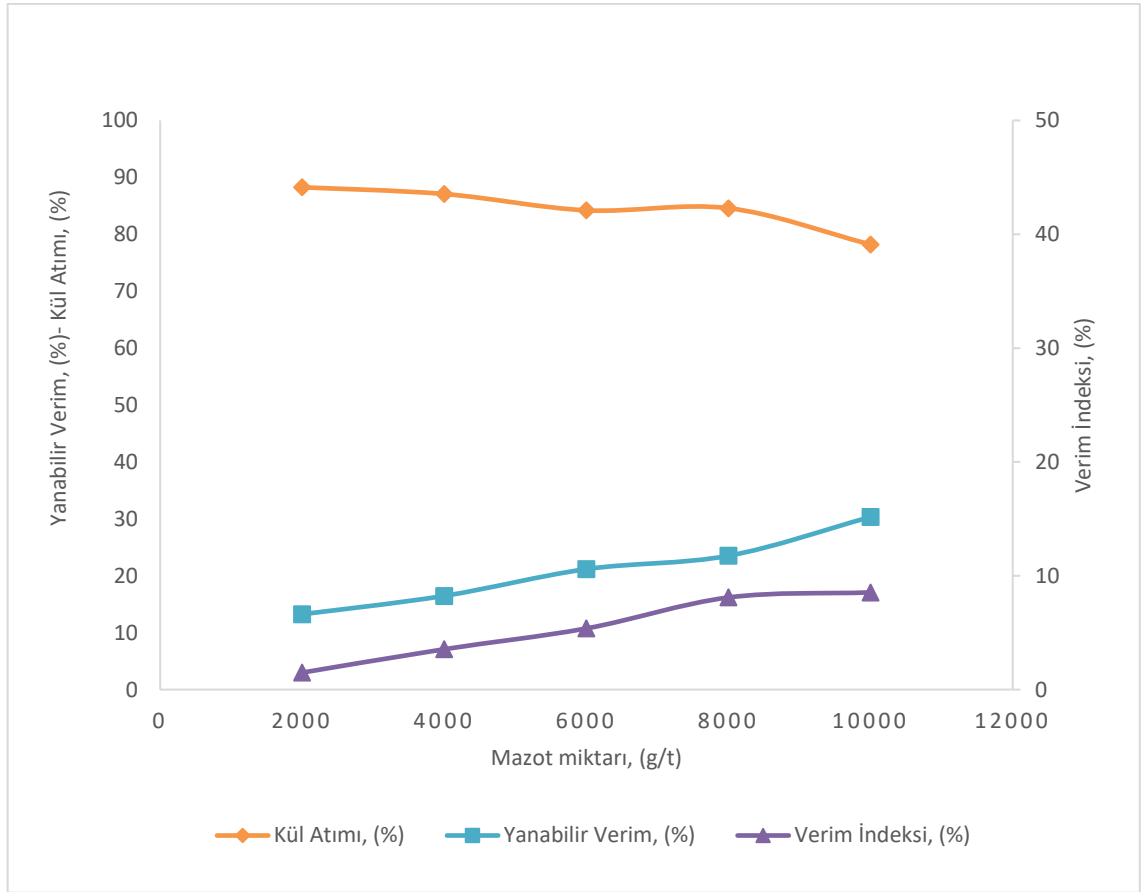
Bu durum, kömür yüzeyinin hidrofilik kısımlarına mazotun adsorbe olamadığını ve dolayısıyla kömür yüzeyine yeterli ölçüde yayılamadığını göstermektedir. Verim indeksi değerlerine göre karşılaştırma yapıldığında; gazyağı ve mazotun linyiti zenginleştirmede birbirine yakın performans gösterdiği söylenebilir.

Ayrıca, deneylerin yapıldığı pH değerinde linyitler genel olarak negatif zeta potansiyeli değerine sahiptir (Vamvuka ve Agridiotis, 2001). Benzer şekilde deneylerde gazyağı ve mazotta deneylerin yapıldığı pH değerinde nispeten daha negatif zeta potansiyeli değerine sahiptir (Ghiani ve ark., 1989; Laskowski, 2001).

Bu nedenle, linyitin hidrofobik kısımları ve gazyağı/mazot damlacıkları arasındaki elektrostatik itme kuvvetlerinin bu toplayıcıların kömür yüzeyine tutunmasını engellemesi, yanabilir verim değerlerinin düşük olmasında etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.2 Mazot miktarının deney sonuçları

Mazot Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
2000	12.56	43.05	13.24	88.25	1.49
4000	14.84	40.06	16.47	87.08	3.55
6000	18.70	38.86	21.17	84.20	5.37
8000	19.79	35.84	23.51	84.58	8.09
10000	26.41	37.97	30.33	78.20	8.54



Şekil 5.1 Mazot miktarının flotasyona etkisi

5.1.1.2. Gazyağının etkisinin araştırılması

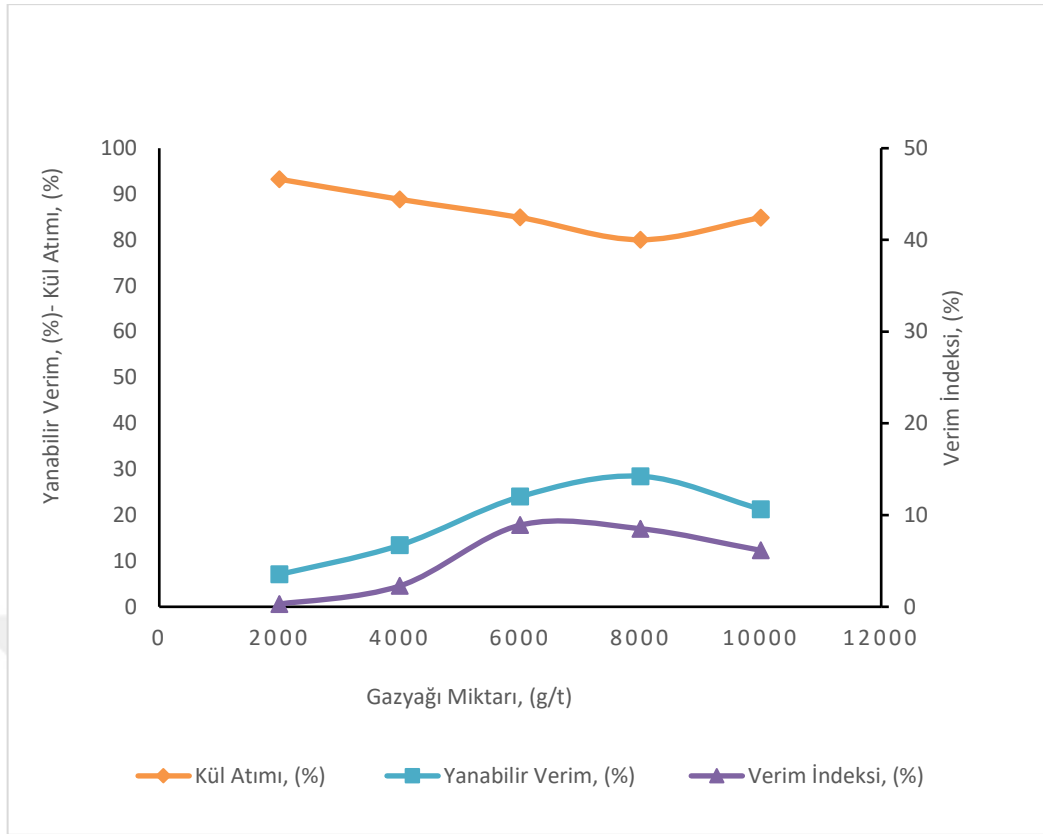
Gazyağının etkisinin araştırıldığı deneylerden elde edilen bulgular Çizelge 5.3 ve Şekil 5.2’de verilmektedir. Çizelge 5.3 ve Şekil 5.2 ‘de görüleceği gibi gazyağı miktarı arttıkça yanabilir verim ve verim indeksi değerinin arttığı, belli bir değerden sonrada düşüş eğilimi izlediği görülmektedir. Kül atımı ise, belli bir değere kadar düşüş eğilimi göstermekte ve daha sonra artmaktadır. Gazyağı miktarı 6000 g/t olduğunda en düşük kül içerikli (%34,90) konsantre üretilmiştir. Daha sonra ise konsantrenin kül içeriğinde artış eğilimi görülmüştür. Gazyağı miktarı 8000 g/t olduğunda en yüksek (%28,47) yanabilir verim değerine ulaşılmıştır. En yüksek verim indeksi değerine 6000 g/t gazyağı miktarında (%8.90) ulaşılmıştır.

Gazyağı ile düşük yanabilir verim değerinin elde edilmesi gazyağı damlacıklarının kömür tanesi yüzeyine yayılmasının sınırlı olması ve gazyağının kömür yüzeyindeki gözenekleri doldurma eğiliminin yüksek olmasına dayandırılabilir.

Sonuç olarak gazyağı kullanıldığında, çalışılan miktar aralığında yüksek yanabilir verimli konsantreler üretilmemiştir. Gazyağı kullanıldığında kül içeriğinde azalmanın da sınırlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.3 Gazyağı miktarının deney sonuçları

Gazyağı Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
2000	6.93	44.89	7.07	93.24	0.31
4000	12.38	41.43	13.43	88.85	2.28
6000	19.92	34.90	24.01	84.89	8.90
8000	24.56	37.39	28.47	80.04	8.51
10000	18.45	37.72	21.28	84.87	6.15



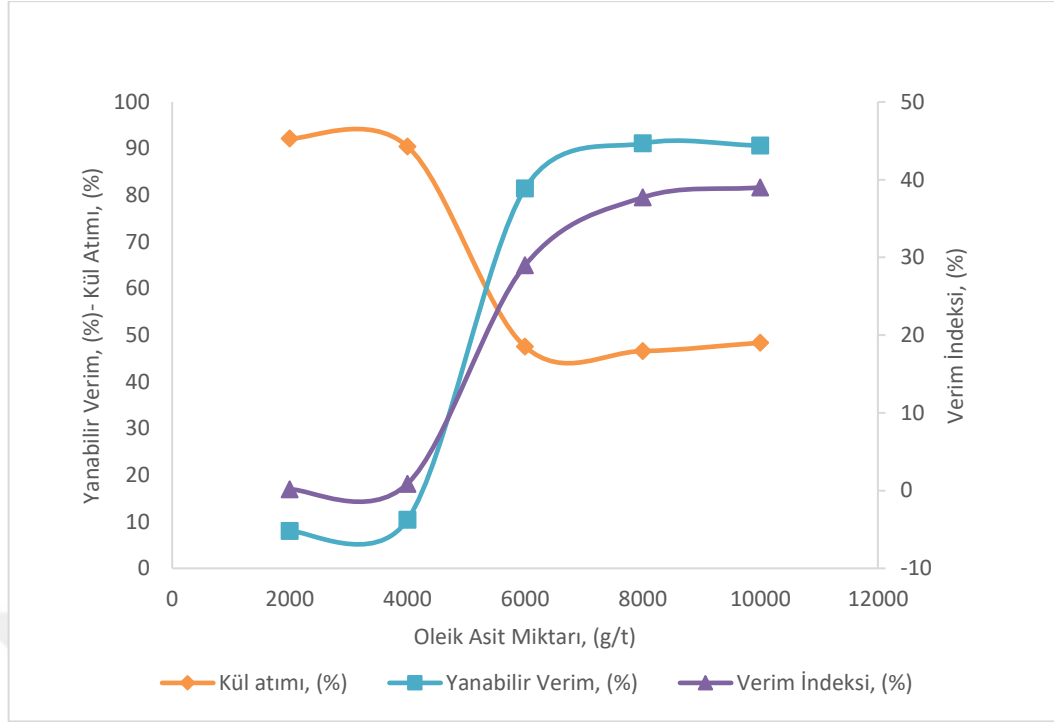
Şekil 5.2 Gazyağı miktarının flotasyona etkisi

5.1.1.3. Oleik asitin etkisinin araştırılması

Oleik asit etkisinin araştırıldığı deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.4 ve Şekil 5.3 'te verilmektedir. Gazyağı ve mazot ile yapılan deneylerde, kabul edilebilir yanabilir verim ve verim indeksi değeri elde edilemediği için oleik asit çeşitli konsantrasyonlarda denenmiştir. Oleik asit miktarı arttıkça yanabilir verim ve verim indeksinde de kademeli olarak artış görülmektedir. Buna bağlı olarak kül atımında da azalma gerçekleşmiştir. 8000 g/t oleik asit miktarında en yüksek yanabilir verim değeri %91,12 , verim indeksi ise %37,72 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.4 Oleik asit miktarının deney sonuçları

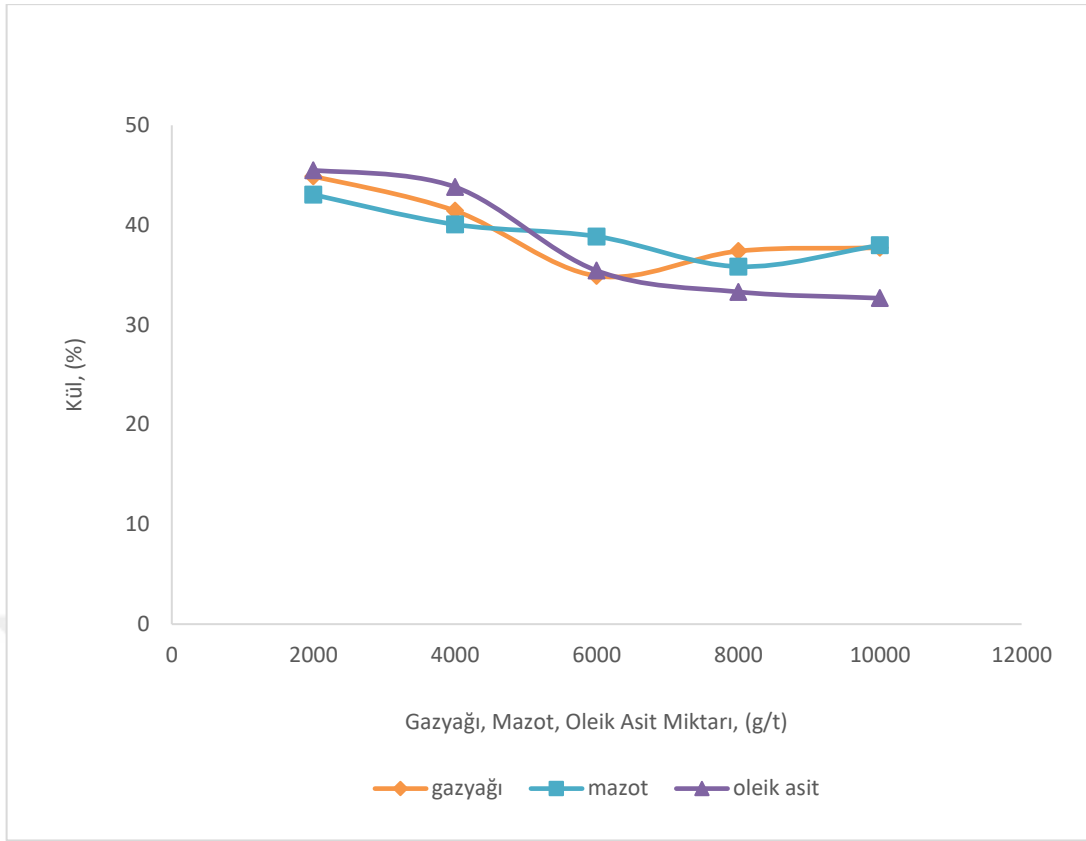
Oleik Asit Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
2000	7.92	45.5	7.99	92.17	0.16
4000	10.00	43.82	10.40	90.47	0.88
6000	68.13	35.43	81.46	47.53	28.99
8000	73.77	33.3	91.12	46.60	37.72
10000	72.70	32.67	90.64	48.37	39.01



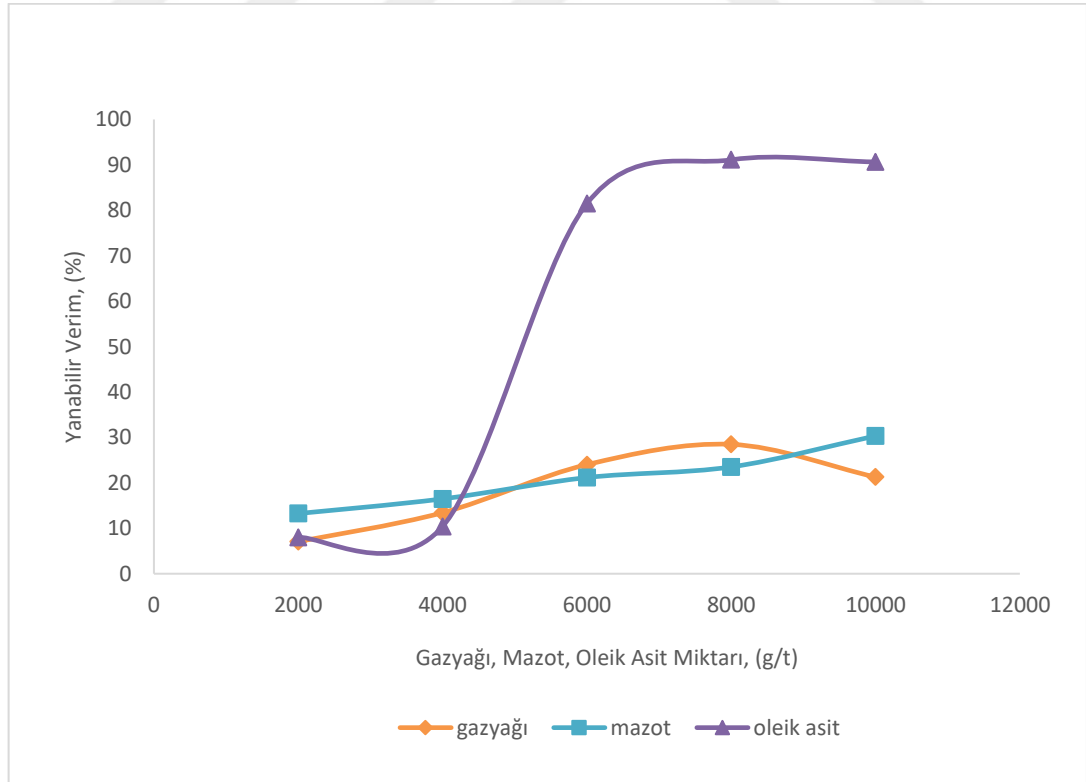
Şekil 5.3 Oleik asit miktarının flotasyona etkisi

5.2. Kullanılan Reaktiflerin (Gazyağı, Mazot, Oleik Asit) Karşılaştırılması

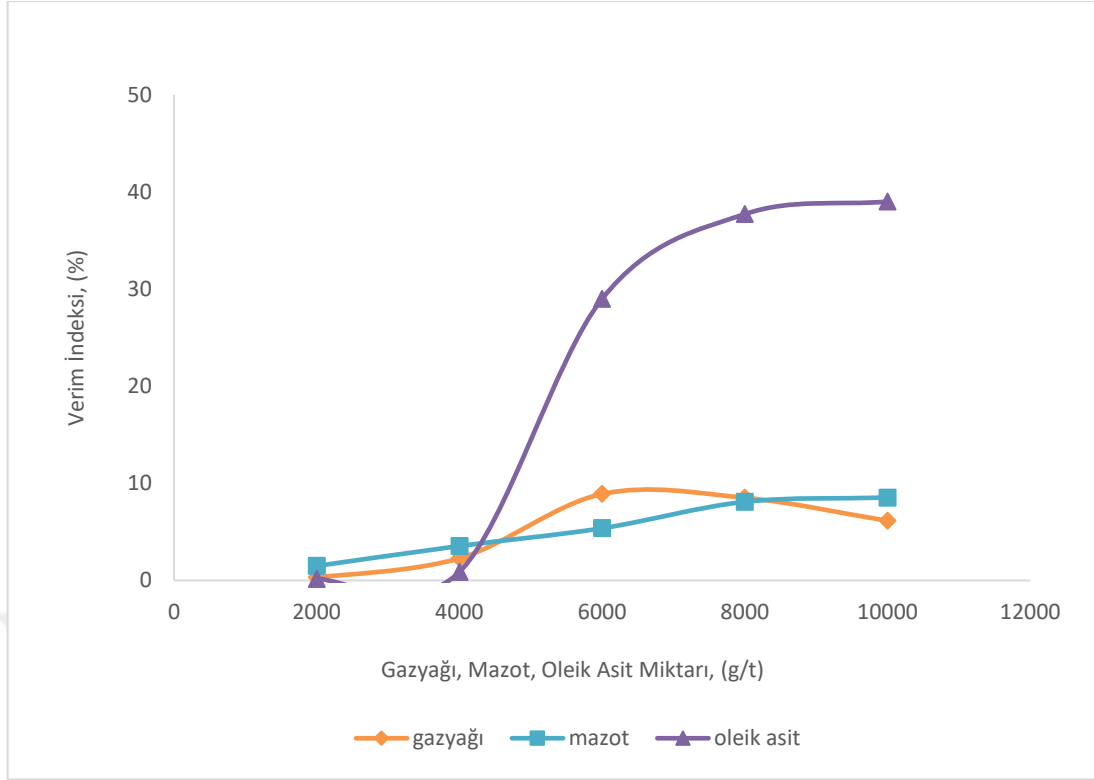
Deneylerde kullanılan gazyağı, mazot ve oleik asit reaktiflerinin konsantre kül içeriği, yanabilir verim ve verim indeksi Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da verilmektedir. Reaktiflerde konsantre kül içeriğini karşılaştırdığımızda, kaba konsantrenin külü %46,00 olup, toplayıcı miktarı artıkça 10000 g/t ‘da gazyağı ve mazot %37,00 iken oleik asitte %32,00’lere kadar düşüş eğilimi görülmektedir. Yanabilir verim değerlerinde ise, gazyağı ve mazot benzer değerlerde artış gösterirken oleik asitte 8000 g/t’da en yüksek yanabilir verim değeri %91,12’de üretilmiştir. Verim indeksinde ise, yanabilir verime orantılı olarak benzer artış eğilimi göstererek gazyağı ve mazotta yakın değerlerde iken, oleik asitte verim indeksi değeri %39,01’e ulaşılmıştır. Sonuç olarak en iyi konsantre kül atımı, yanabilir verim ve verim indeksi değerinin oleik asitte elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.4 Reaktiflerin külünün karşılaştırılması



Şekil 5.5 Reaktiflerin yanabilir verimlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.6 Reaktiflerin verim indeksinin karşılaştırılması

5.3. İkili Toplayıcı Karışımlarının Etkisinin Araştırılması

Gazyagi ve mazotla yüksek yanabilir verimli konsantrelerin üretilmemesi, oleik asitle %90'nın üzerinde yanabilir verime ulaşılması nedeniyle, linyitin flotasyon performansına oleik asit/mazot ve oleik asit/gazyagi karışımlarının etkileri araştırılmıştır. Böylece, kömür flotasyonunda yaygın olarak kullanılan polar olmayan yağların belli miktarda kullanılması sağlanarak hem toplayıcılık gücü hem de toplayıcı tüketimi açısından oleik asite göre bir avantaj sağlayıp sağlamadığı ortaya konulacaktır. Karışımlarla ilgili deneysel koşullar Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 Karışımlara ait flotasyon deney koşulları

Toplayıcı Reaktif	Parametreler		Değerler
Karışımlar	Tane Boyu (µm)		-500
	Katı Oranı (%)		10
	Kondisyon Süresi (dk)		3
	Köpük Alma Süresi (dk)		3
	%5'lik Na ₂ SiO ₃ (Bastırıcı)		200 (g/t)
	Toplayıcı Reaktif (g/t)	%25 Oleik Asit + %75 Mazot	%1'lik hazırlanmıştır
		%50 Oleik Asit + %50 Mazot	
		%75 Oleik Asit + %25 Mazot	
		%25 Oleik Asit + %75 Gazyağı	
		%50 Oleik Asit + %50 Gazyağı	
		%75 Oleik Asit + %25 Gazyağı	
	%1'lik Çamyacı (Köpürtücü)		200 (g/t)

5.3.1. Oleik asit ve mazot karışımının etkisinin araştırılması

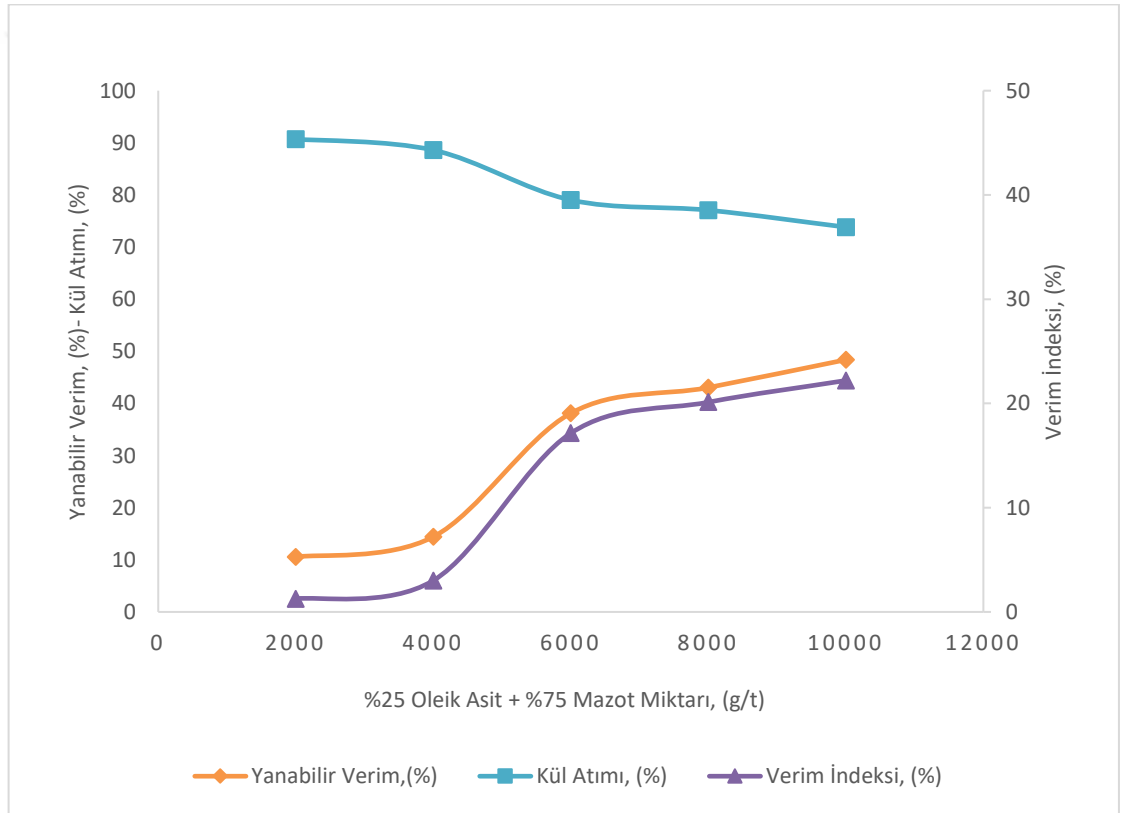
DeneySEL çalışmalar %25 oleik asit + %75 mazot, %50 oleik asit + %50 mazot ve %75 oleik asit + %25 mazot karışımlarıyla yapılmıştır.

5.3.1.1. %25 oleik asit + %75 mazot etkisi

%25 oleik asit + %75 mazot deneylerine ait bulgular Çizelge 5.6 ve Şekil 5.7'de verilmektedir. Şekil 5.7'de görüleceği gibi toplayıcı miktarı arttıkça yanabilir verim ve verim indeksi değerleri artış eğilimi göstermekte, kül atımı değerinde ise düşüş eğilimi izlenmektedir. Çizelge 5.6'da konsantrenin kül içeriği değerlerinin %42,87 – %31,21 arasında değiştiği görülmektedir. Yanabilir verim ve ağırlıkça verim değerlerinde mazota göre artış meydana geldiği görülmektedir. Bu durum mazotun oleik asit ile birlikte kullanılmasının linyit flotasyonu üzerinde olumlu etki yaptığını göstermektedir.

Çizelge 5.6 %25 oleik asit + %75 mazot miktarı deney sonuçları

%25 Oleik Asit + %75 Mazot Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
2000	9.98	42.87	10.56	90.70	1.26
4000	13.02	40.26	14.41	88.60	3.01
6000	30.23	31.91	38.12	79.03	17.15
8000	33.79	31.21	43.05	77.07	20.12
10000	38.16	31.55	48.37	73.83	22.20



Şekil 5.7 %25 oleik asit + %75 mazotun linyit flotasyonuna etkisi

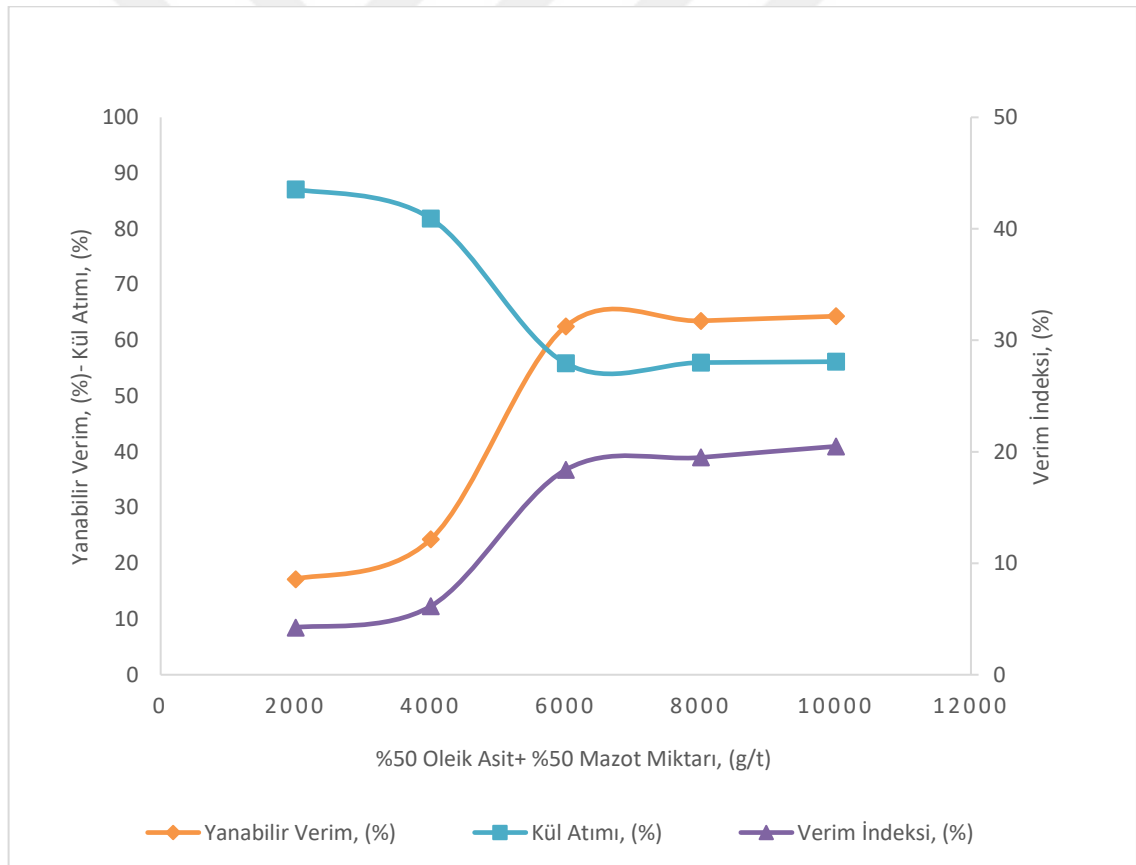
5.3.1.2. %50 oleik asit + %50 mazot etkisi

%50 oleik asit + %50 mazot deneylerine ait bulgular Çizelge 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmektedir. %50 oleik asit + %50 mazot karışımında, %25 oleik asit + %75 mazot karışımına göre daha yüksek ağırlıkça verim ve yanabilir verim değerlerine ulaşılmıştır. Konsantrenin kül içeriği dar bir aralıkta (%39,08 - %36,73) değişim göstermiştir. Bu

bulgular mazot/oleik asit karışımındaki oleik asit miktarı arttığında linyitin flotasyon performansının iyileştiğini göstermektedir.

Çizelge 5.7 %50 oleik asit + %50 mazot miktarı deney sonuçları

%50 Oleik Asit + %50 Mazot Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
2000	15.20	39.08	17.15	87.09	4.23
4000	21.48	38.89	24.30	81.84	6.15
6000	54.06	37.55	62.52	55.87	18.39
8000	54.52	37.12	63.49	56.00	19.49
10000	54.90	36.73	64.32	56.17	20.49



Şekil 5.8 %50 oleik asit + %50 mazotun linyit flotasyonuna etkisi

5.3.1.3. %75 oleik asit + %25 mazot etkisi

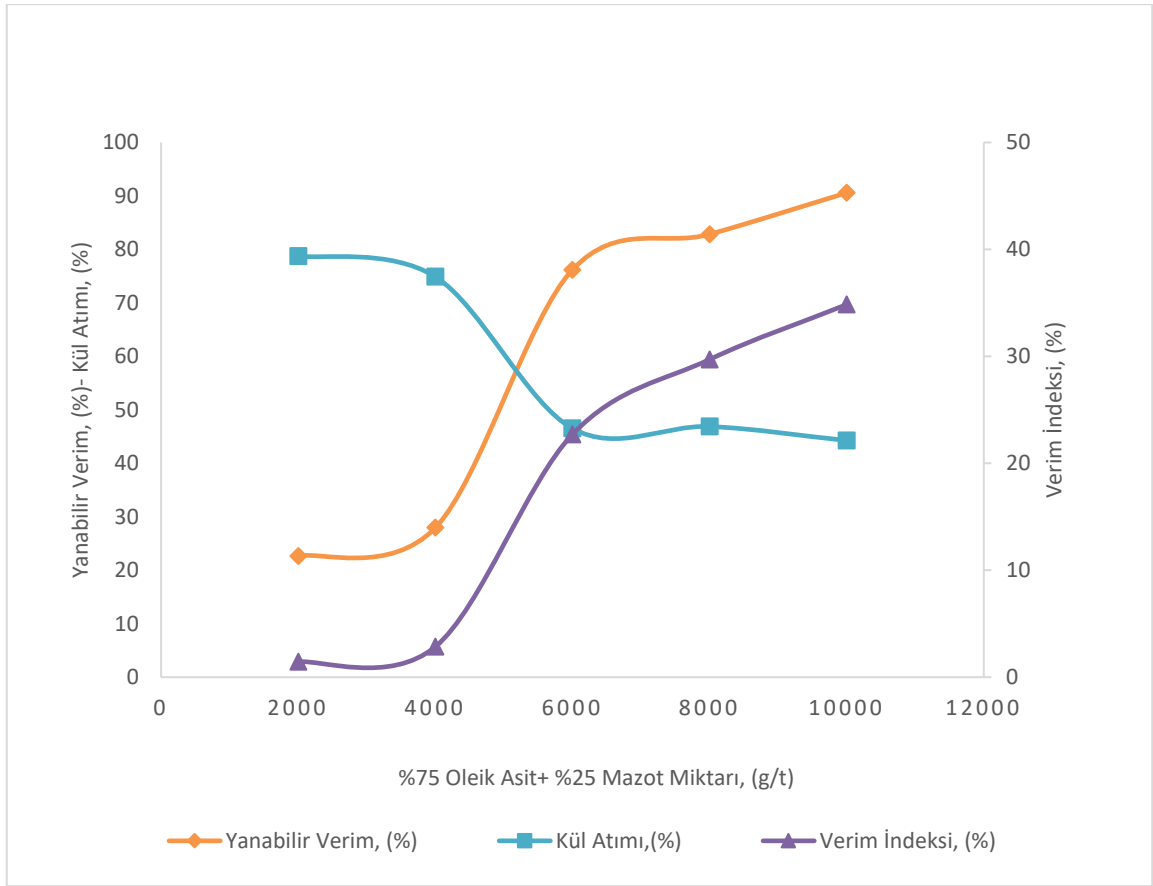
Çizelge 5.8 ve Şekil 5.9’da %75 oleik asit + %25 mazot karışımına ait sonuçlar verilmektedir. Diğer karışımlarla karşılaştırıldığında, ağırlıkça verim ve yanabilir verim değerinde önemli ölçüde artışlar meydana geldiği görülmektedir. Konsantrenin kül içeriği %44,38 - %34,39 arasında bir değişim göstermektedir.

Deneyssel bulgular topluca değerlendirildiğinde, karışımdaki oleik asit miktarı arttıkça; ağırlıkça verim ve yanabilir verim değerinde önemli ölçüde artış meydana gelmektedir. Konsantrenin kül içeriğinde ise önemli bir düşüş meydana gelmemiştir. Örneğin; 8000 g/t toplayıcı miktarında ağırlıkça %25, %50 ve %75 oleik asit içeren karışımlara ait yanabilir verim değerleri sırasıyla %43,05, %63,49 ve %82,83’tür. Benzer şekilde aynı ağırlık oranlarında ve aynı toplayıcı miktarında verim indeksi değerleri ise sırasıyla %20,12, %19,49 ve %29,71 olarak elde edilmiştir.

Bu bulgular, mazot ve oleik asit karışımı kullanıldığında linyitin flotasyon performansının iyileştiğini, özellikle yüksek toplayıcı miktarında (≥ 8000 g/t), oleik asit kullanıldığında, elde edilen değerlere yakın performans gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 5.8 %75 oleik asit + %25 mazot miktarı deney sonuçları

%75 Oleik Asit + %25 Mazot Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
2000	22.01	44.38	22.67	78.76	1.44
4000	27.57	45.24	27.96	74.89	2.85
6000	65.74	37.42	76.19	46.52	22.71
8000	69.16	35.33	82.83	46.88	29.71
10000	74.55	34.39	90.57	44.27	34.84



Şekil 5.9 %75 oleik asit + %25 mazotun linyit flotasyonuna etkisi

5.3.2. Oleik asit ve gazyağı karışımının etkisinin araştırılması

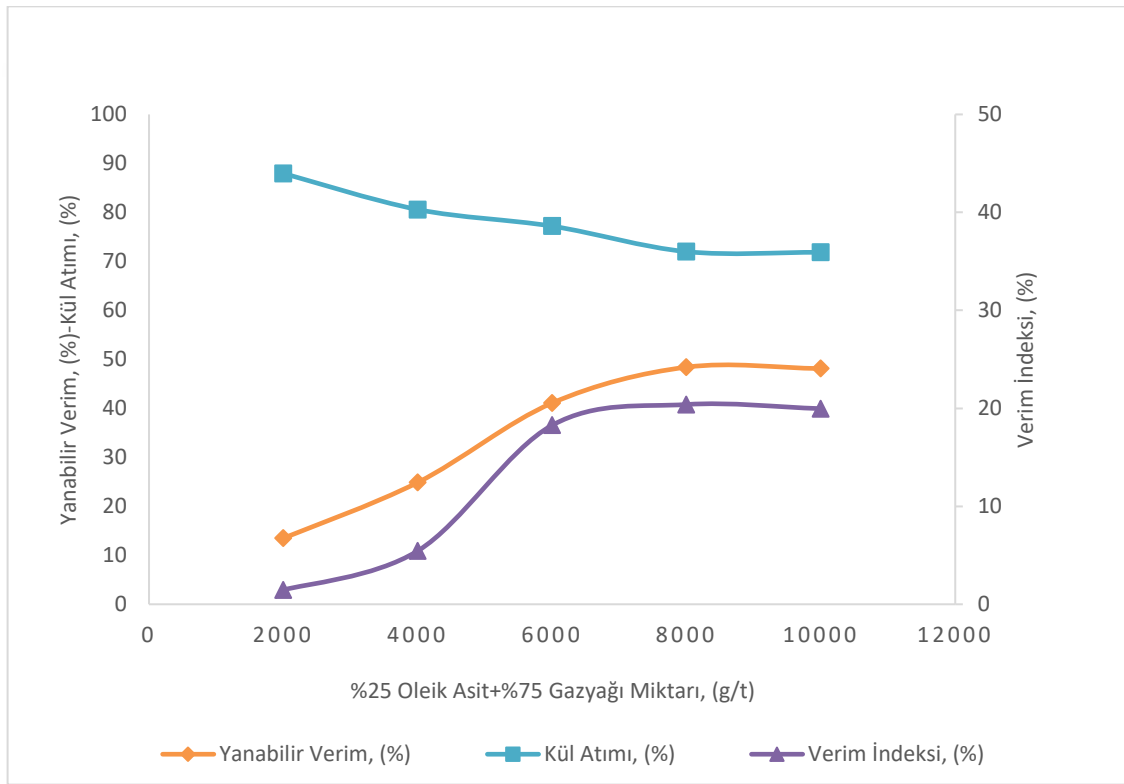
Bu grup deneylerde %25 oleik asit + %75 gazyağı, %50 oleik asit + %50 gazyağı ve %75 oleik asit + %25 gazyağı kullanılarak deneyler yapılmıştır.

5.3.2.1. %25 oleik asit + %75 gazyağı etkisi

Ağırlıkça %25 oleik asit + %75 gazyağı karışımına ait sonuçlar Çizelge 5.9 ve Şekil 5.10'da verilmektedir. Çizelge 5.9 ve Şekil 5.10'da görüleceği gibi, çalışılan toplayıcı miktarı aralığında (2000-10000 g/t) toplayıcı miktarı artıkça yanabilir verim ve verim indeksi değerleri artmaktadır. Yanabilir verim ve verim indeksi için ulaşılan en yüksek değerler sırasıyla %48,40 ve %20,39'dur. Gazyağı/oleik asit karışımı kullanıldığında linyitin flotasyon performansının iyileştiği görülmektedir. Konsantrasyona bağlı olarak konsantrenin kül içeriğinde düşüş meydana gelmektedir. Benzer şekilde kül atımı değerlerinde de düşüş meydana gelmektedir. Belirlenen kriterler açısından %25 oleik asit + %75 gazyağı karışımıyla istenilen başarının sağlanamadığı görülmektedir.

Çizelge 5.9 %25 oleik asit + %75 gazyağı miktarı deney sonuçları

%25 Oleik Asit + %75 Gazyağı Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
2000	12.83	43.18	13.50	87.96	1.46
4000	22.36	39.95	24.87	80.58	5.45
6000	32.67	32.11	41.08	77.19	18.27
8000	39.02	33.02	48.40	71.99	20.39
10000	38.93	33.26	48.11	71.85	19.97



Şekil 5.10 %25 oleik asit + %75 gazyağının linyit flotasyonuna etkisi

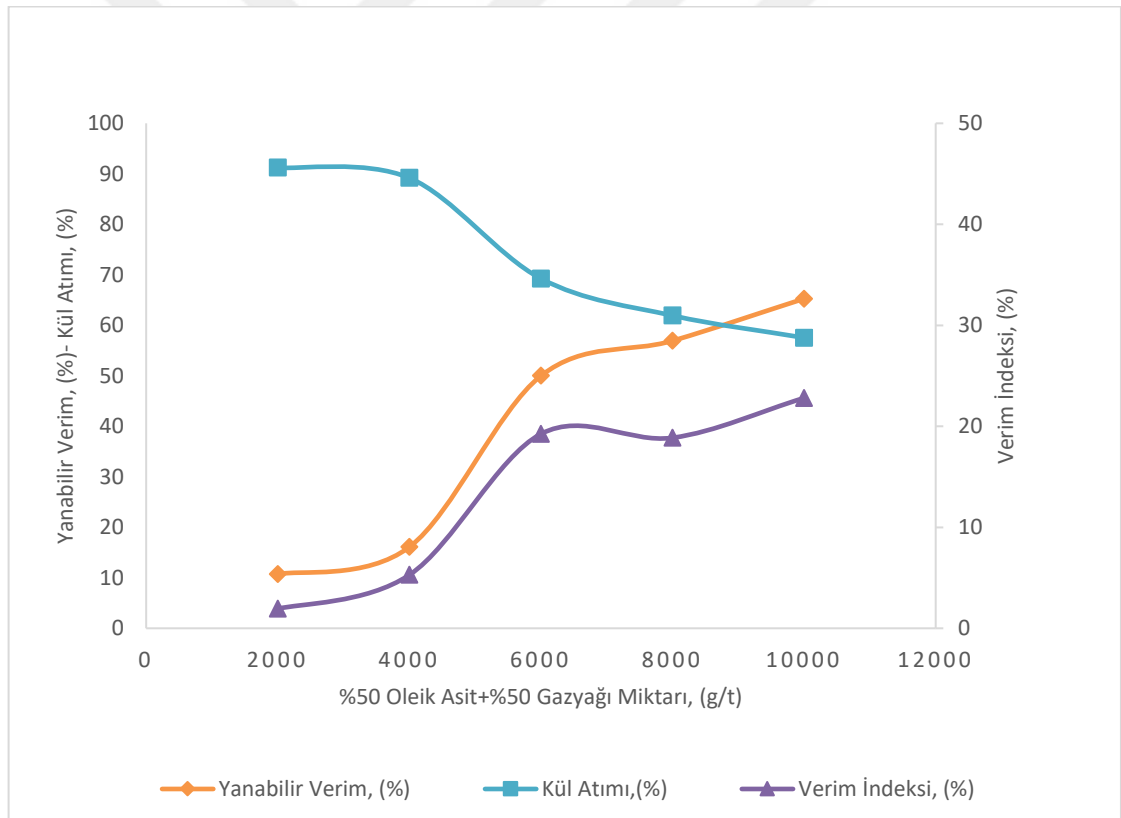
5.3.2.2. %50 oleik asit + %50 gazyağı etkisi

Ağırlıkça %50 oleik asit + %50 gazyağı karışımı kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmektedir. Şekil 5.11’de görüleceği gibi, toplayıcı miktarı arttıkça yanabilir verim ve verim indeksi değeri artış eğilimi göstermektedir. Özellikle yüksek toplayıcı miktarlarında yanabilir verim değerlerinde %25 oleik asit + %75 gazyağına göre yüksek artışlar meydana gelmektedir. 10000 g/t

toplayıcı miktarında %54,78 ağırlık oranındaki konsantre, %65,27 yanabilir verim ve %22,80 verim indeksi değeriyle üretilmiştir.

Çizelge 5.10 %50 oleik asit + %50 gazyağı miktarı deney sonuçları

%50Oleik Asit+%50 Gazyağı Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
2000	9.84	41.13	10.72	91.20	1.93
4000	13.66	36.4	16.09	89.19	5.28
6000	41.14	34.38	49.99	69.25	19.24
8000	48.26	36.29	56.93	61.93	18.86
10000	54.78	35.66	65.27	57.53	22.80



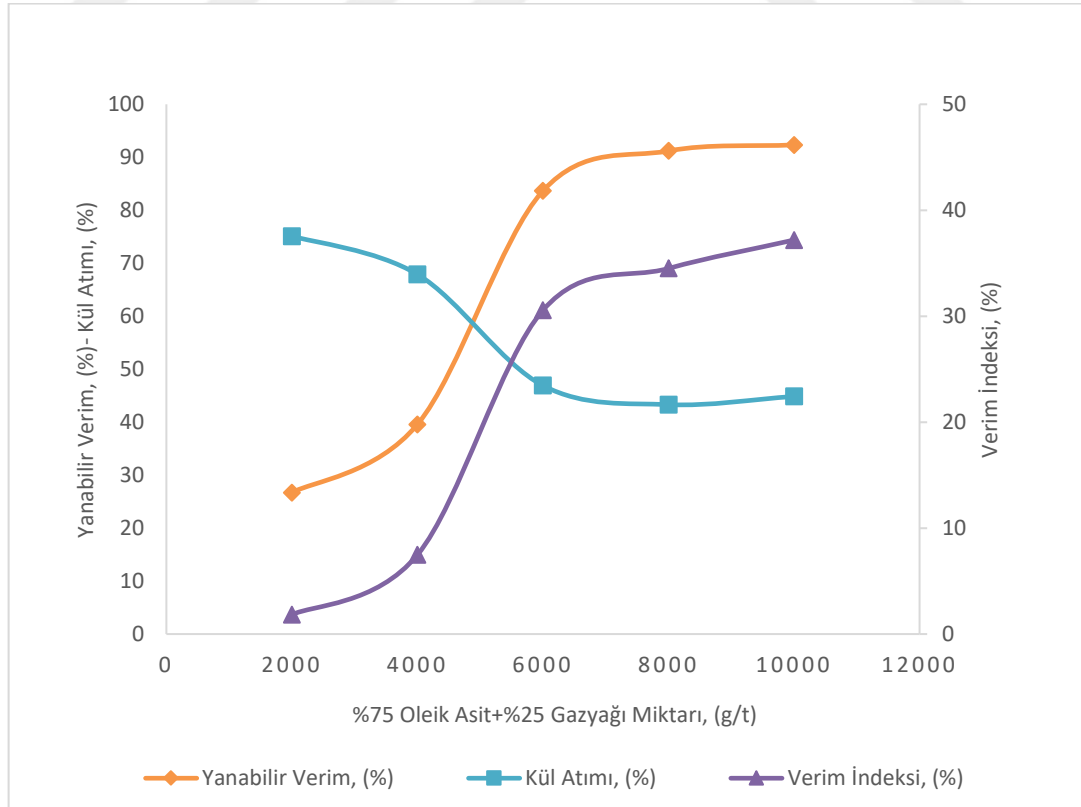
Şekil 5.11 %50 oleik asit + %50 gazyağının linyit flotasyonuna etkisi

5.3.2.3. %75 oleik asit + %25 gazyağı etkisi

Ağırlıkça %75 oleik asit + %25 gazyağı karışımı kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmektedir. Şekil 5.12’de görüleceği gibi, toplayıcı miktarı arttıkça yanabilir verim ve verim indeksi değerlerinde artışlar olduğu görülmektedir. %90’nın üzerinde yanabilir verim değerine bu karışım oranında 8000 g/t’nun üzerindeki toplayıcı miktarında ulaşılmıştır. Ayrıca en yüksek verim indeksi değeri de bu karışım oranında elde edilmiştir.

Çizelge 5.11 %75 oleik asit + %25 gazyağı miktarı deney sonuçları

%75Oleik Asit + %25 Gazyağı Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
2000	25.87	44.24	26.72	75.12	1.83
4000	36.14	40.86	39.58	67.90	7.48
6000	69.60	35.09	83.67	46.90	30.57
8000	75.33	34.62	91.20	43.31	34.51
10000	75.23	33.72	92.34	44.85	37.19



Şekil 5.12 %75 oleik asit + %25 gazyağının linyit flotasyonuna etkisi

5.4. Karışımların Etkisinin Toplu Değerlendirilmesi

Ağırlıkça belli oranlarda karışımlar kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen yanabilir verim ve verim indeksi sonuçları Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de toplu olarak verilmektedir.

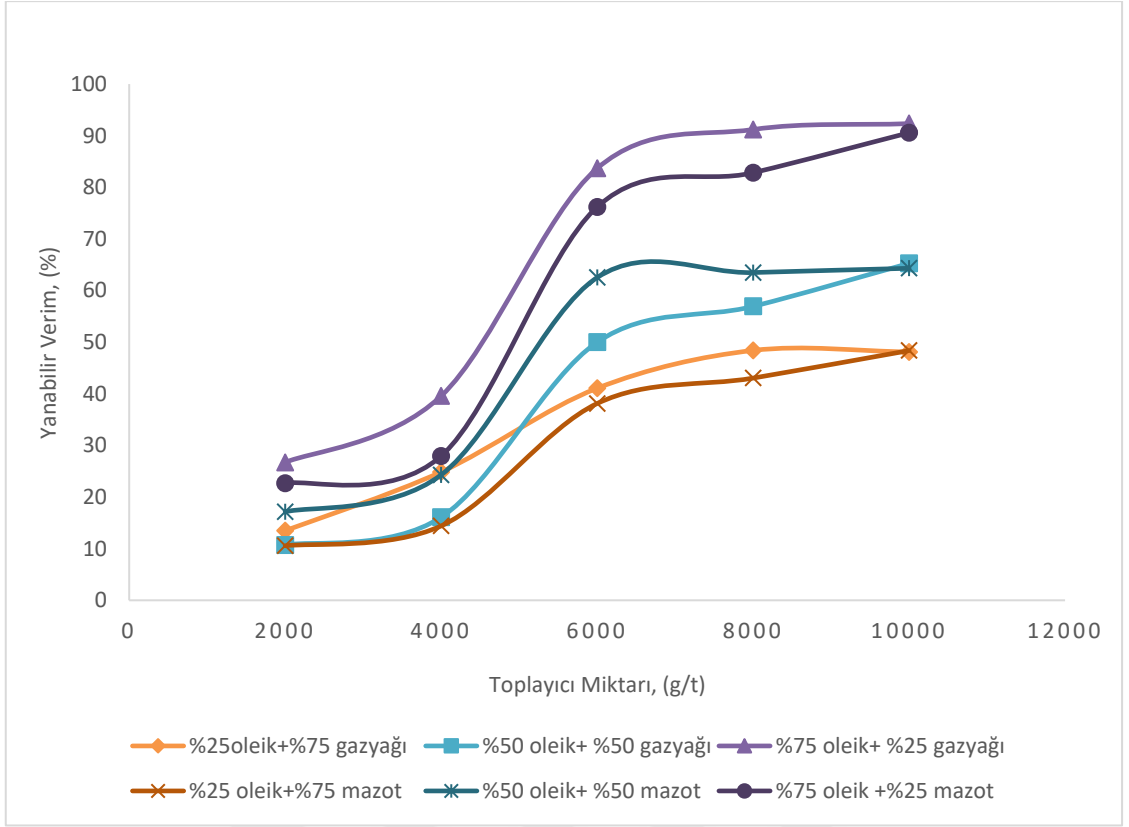
Elde edilen sonuçlar karışımdaki oleik asit miktarı arttıkça, flotasyon kriterlerinde iyileşme olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek toplayıcı miktarlarında bu iyileşme belirgin şekilde görülmektedir.

Hem gazyağı hem de mazot oleik asitle birlikte kullanıldığında etkileşimleri ve toplayıcılık yeteneğinde artış meydana gelmektedir.

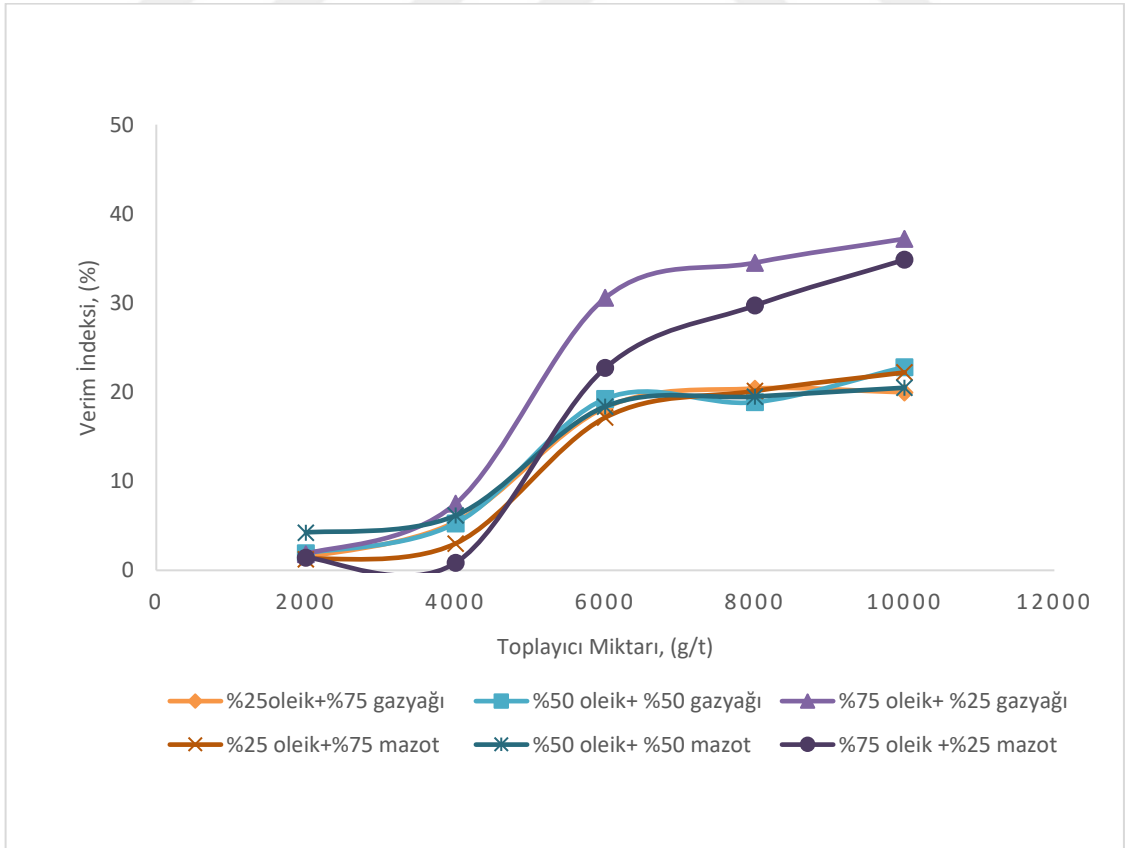
Ayrıca, oleik asit/mazot ve oleik asit/gazyağı karışımlarının flotasyon performansları karşılaştırıldığında, genel olarak benzer performans gösterdikleri ortaya konmuştur. Ancak, %75 oleik asit + %25 gazyağı/mazot karışımlarından, 8000 ve 10000 g/t miktarlarında daha yüksek yanabilir verim değerlerine ulaşılmıştır. Oleik asit+gazyağı/mazot karışımları gazyağı/mazota göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Karışımlarla yapılan çalışmalarda daha iyi sonuçlar elde edilmesi oleik asitin varlığında hem linyit yüzeyine toplayıcı adsorpsiyonundaki artış hem de gazyağı ve mazotun linyit yüzeyinde yayılma hızındaki iyileşmenin, linyitin flotasyon yeteneğini arttırmasıyla açıklanabilir.

Karışımların performansı oleik asitle karşılaştırıldığında; özellikle %75 oleik asit + %25 gazyağı karışımının oleik asit ile benzer performans gösterdiği söylenebilir. Ancak verim indeksi değerlerine göre bir karşılaştırma yapıldığında oleik asit ile elde edilen değerlerin daha yüksek olduğu Çizelge 5.4’te görülebilir. Bu nedenle diğer işletme değişkenlerinin etkisinin araştırılmasında oleik asit kullanılmıştır.



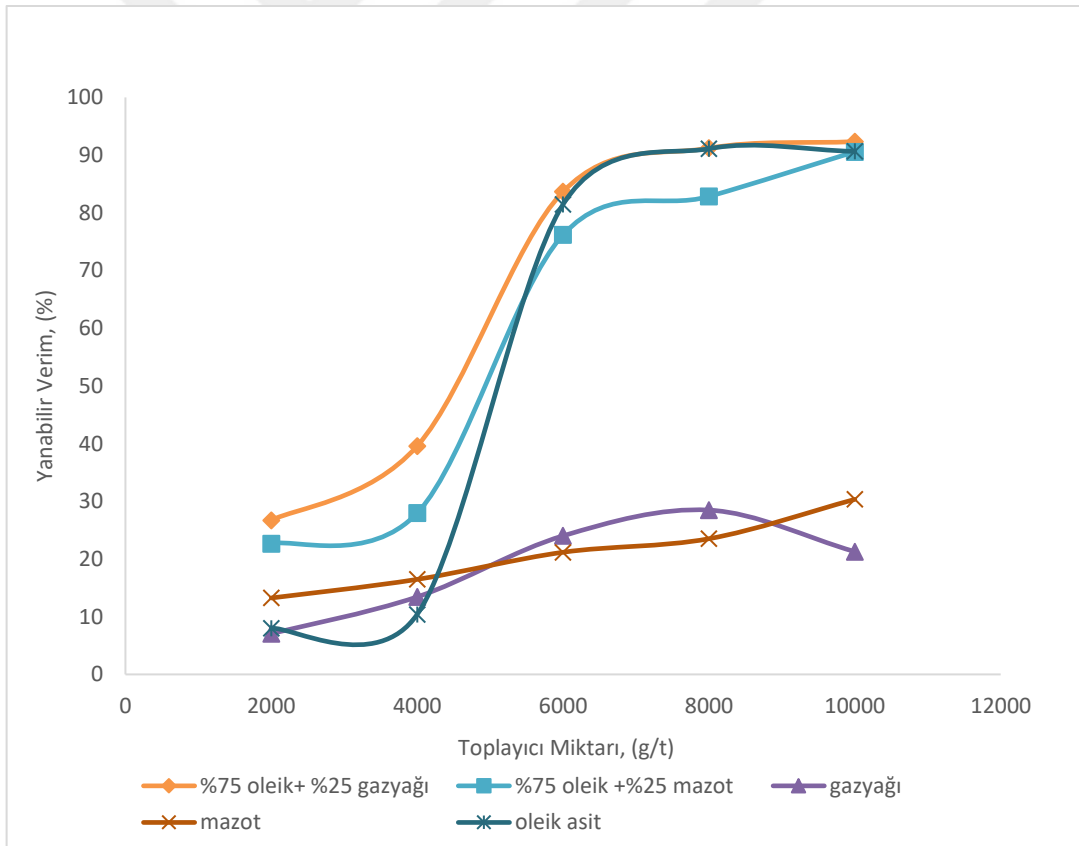
Şekil 5.13 Toplu karışımların flotasyonda yanabilir verime etkisi



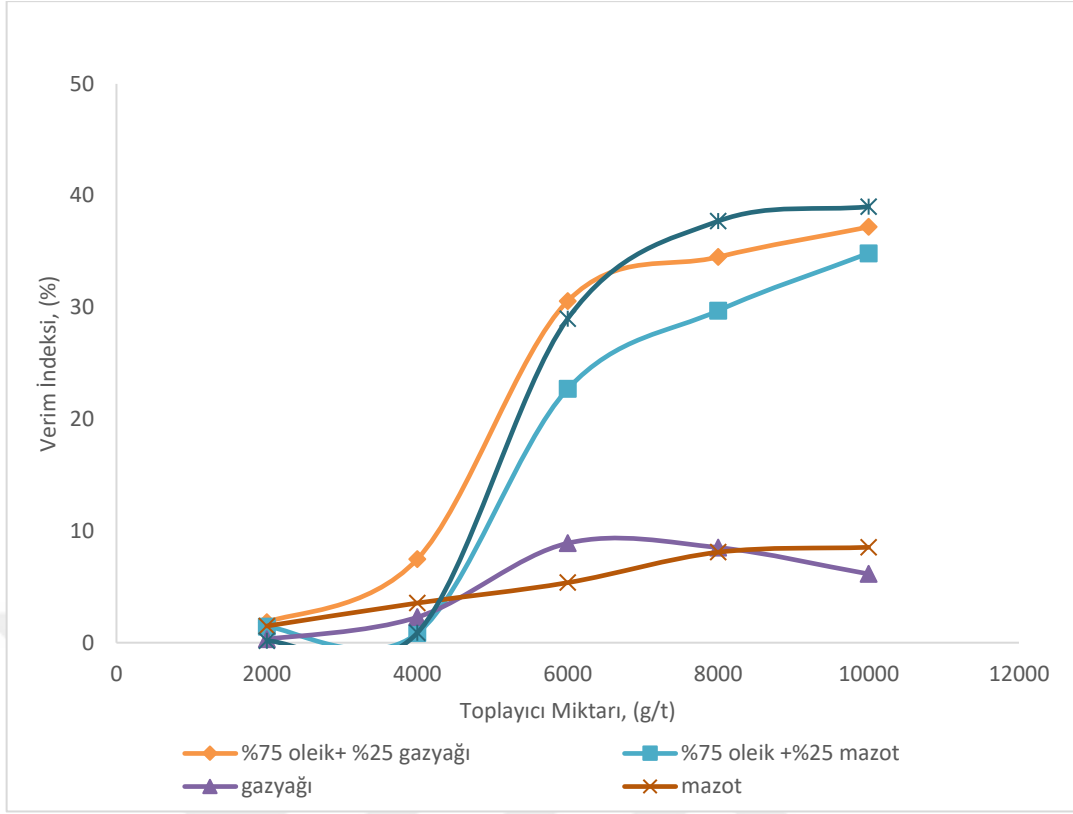
Şekil 5.14 Toplu karışımların flotasyonda verim indeksine etkisi

5.5. Karışımlar ve Saf Toplayıcıların Etkisinin Değerlendirilmesi

Karışımlarla yapılan deneylerde %75 oleik asit + %25 mazot/gazyağı karışımlarından elde edilen en iyi sonuçlar ile saf toplayıcıların yanabilir verim ve verim indeksi sonuçları Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da verilmektedir. Toplayıcı olarak kullanılan gazyağı ve mazotun birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Çalışılan miktar aralığında yüksek yanabilir verim ve verim indeksi üretilmemiştir. Mazot ve gazyağının kül içeriğinde de azalmanın benzer ve sınırlı olduğu görülmektedir. Oleik asit ve %75 oleik asit + %25 mazot/gazyağı karışımları ile %90’larda yanabilir verim elde edildiği, %30-40 civarlarında verim indeksi değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Sonuç olarak mazot/gazyağında, çalışılan miktar aralığında performansının yetersiz olduğu görülmektedir. Oleik asit ve %75 oleik asit + %25 mazot/gazyağı karışımlarında benzer performans gösterdiği söylenebilir. Ancak verim indeksi değerlerine göre karşılaştırma yapıldığında oleik asit ile elde edilen değerlerin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.15 Karışımlar ve saf toplayıcıların flotasyonda yanabilir verime etkisi



Şekil 5.16 Karışımlar ve saf toplayıcıların flotasyonda verim indeksine etkisi

5.6. pH'ın Etkisinin Araştırılması

Oleik asit, yüksek pH değerlerinde RCOO^- ve $\text{R}(\text{COO}_2)^{-2}$ iyonları halinde bulunur. Düşük pH değerlerinde ise nötral moleküller olarak bulunmaktadır. Orta pH değerlerinde ise, $\text{R}(\text{COO})_2 \text{H}^-$ kompleksi oluşmaktadır. Bu kompleksin miktarı; kollektör bileşiklerinin toplam miktarının %0,2'lik düşük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu kompleksin yüzey aktivitesinin oleat iyonunun aktivitesinden 7 kat daha yüksek, nötral oleik asit molekülünden 5 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Rao and Forssberg., 2007; Atrafi ve ark., 2012).

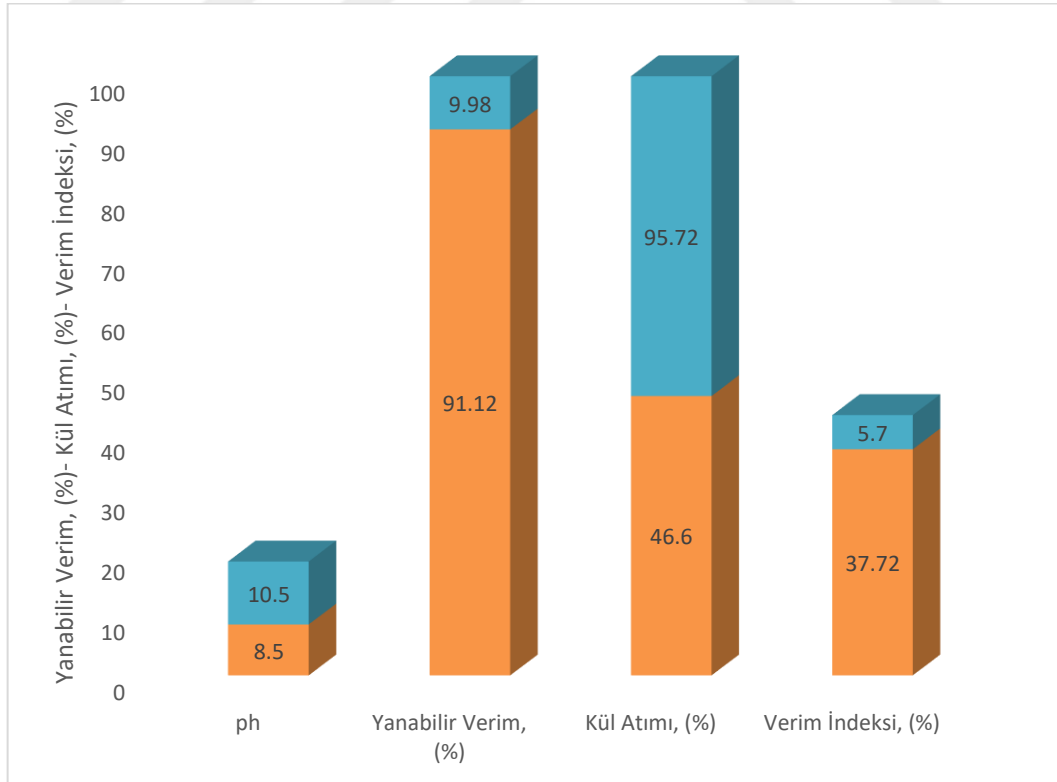
Asidik pH değerinde oleik asit damlacıklar, emülsiyon ve çözünmez filmler gibi çözünmeyen fazlar olarak bulunmaktadır (Quast, 2016; Fan ve ark, 2020; Cook & Gibson, 2023). Bu durumda toplayıcılık görevini yapamamaktadır. Deney sonucunda da görüleceği gibi yüzen ürün elde edilememiştir. Yüksek pH değerinde ($\text{pH}=10,5$) ortamda baskın olarak bulunan oleat iyonu $(\text{RCOO}^-)_2$ ve oleat dimer $((\text{COO})_2^{-2})$ 'nin kül oluşturu mineraler yüzeyine adsorpsiyonu nedeniyle seçimlilik azalmaktadır.

pH'ın etkisinin incelendiği flotasyon deney koşulları Çizelge 5.12'de, pH miktarının flotasyona etkisi Şekil 5.17'de verilmiştir. Suyun pH değeri 8,28 olarak ölçülmüştür.

Ortam pülp pH'ı ise 8,5'tur. pH 4,5'da yeterli miktarda konsantre elde edilemediği için sonuç alınamamış, pH 8,5 ve 10,5'da yanabilir verim ve verim indeksi açısından değerlendirildiğinde en iyi bulguların pülpün doğal pH değerinde elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 5.12 pH'ın belirlenmesinde flotasyon deney koşulları

PH deneyi ile yapılan deney parametreleri	Değerler
Tane Boyu(�m)	-500
Su Miktarı (ml)	900
Katı Oranı (%)	10
Kondisyon Süresi (dk)	3
Köpük Alma Süresi (dk)	3
pH (H ₂ SO ₄ , Ca(OH) ₂)	4.5- 8.5- 10.5
%5'lik Na ₂ SiO ₃ (Bastırıcı)	200 (g/t)
%1'lik Oleik Asit (Toplayıcı)	8000 (g/t)
%1'lik �amyadı (Köpürtücü)	200 (g/t)
Karıştırma hızı	1100 dev./dk.



şekil 5.17 pH'ın flotasyona etkisi

5.7. Bastırıcı (Sodyum Silikat) Miktarının Etkisinin Araştırılması

Sodyum silikat kömür tanelerinin yüzeyinde ki gang şlamını dispanse ederek, hidrofobik yüzeylerin açığa çıkmasını sağlamaktadır. Böylece sodyum silikat miktarı ile randımanda artış meydana gelmesi beklenmektedir (Naik ve ark., 2005).

Bastırıcı miktarının belirlenmesinde flotasyon deney koşulları Çizelge 5.13'te; flotasyon deney sonuçları ise Çizelge 5.14 ve Şekil 5.18'de verilmektedir.

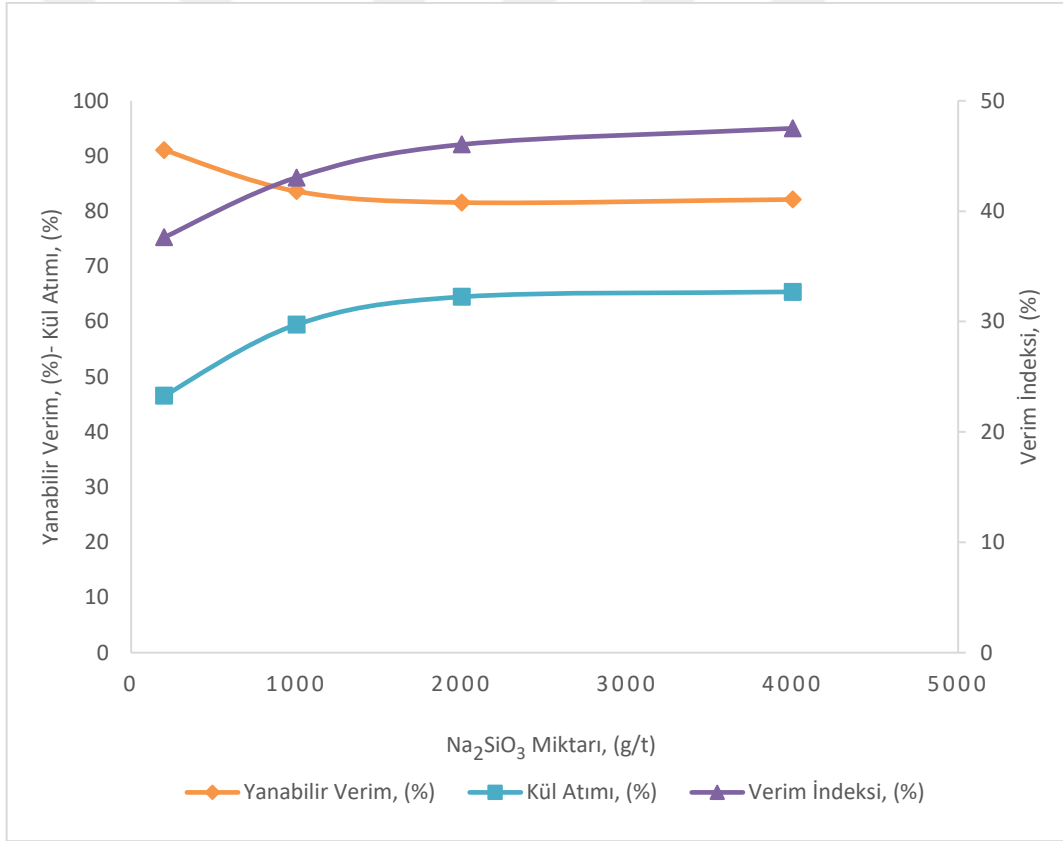
Bastırıcı olarak Na_2SiO_3 miktarının flotasyona etkisi diğer parametreler sabit tutulmak koşuluyla incelenmiştir. Sodyum silikat miktarındaki artışla önemli bir seçimlilik sağlanamamıştır. 2000 g/t sodyum silikat miktar bazında ekonomikliği düşünerek yeterli olduğu görülmektedir. Herhangi bir seçimliliğin sağlanamaması, kömür yapısındaki mineral maddelerin çok ince tane boylarında dağılım göstermesinin nedeni yeterli serbestleşmenin sağlanamamasıyla açıklanabilir.

Çizelge 5.13 Bastırıcı miktarının belirlenmesinde flotasyon deney koşulları

Bastırıcı deney parametreleri	Değerler
Tane Boyu (μm)	-500
Katı Oranı (%)	10
Kondisyon Süresi (dk)	3
Köpük Alma Süresi (dk)	3
%5'lik Na_2SiO_3 (Bastırıcı)	200,1000,2000,4000 (g/t)
%1'lik Oleik Asit (Toplayıcı)	8000 (g/t)
%1'lik Çamyağı (Köpürtücü)	200 (g/t)
Karıştırma hızı	1100 dev./dk.

Çizelge 5.14 Bastırıcı (sodyum silikat) miktarının sonuçları

Na ₂ SiO ₃ Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
200	73.77	33.33	91.08	46.55	37.63
1000	63.80	29.24	83.60	59.44	43.05
2000	60.38	27.06	81.56	64.48	46.04
4000	60.27	26.42	82.12	65.39	47.51



Şekil 5.18 Bastırıcı (sodyum silikat) miktarının flotasyona etkisi

5.8. Köpürtücü (Çamyağı) Miktarının Etkisinin Araştırılması

Bilindiği gibi köpürtücüler, hava/su ara yüzeyine adsorbe olarak kömür yüzeylerine hava kabarcıklarının tutunmasını sağlayan yüzey gerilimini düşürmektedir. Köpürtücü ilavesi hava kabarcıklarının sayısının artması ve bunun sonucunda partikül-kabarcık çarpışmasının iyileşmesi nedeniyle daima flotasyonu olumlu yönde etkilemektedir (Bharath ve ark., 2022).

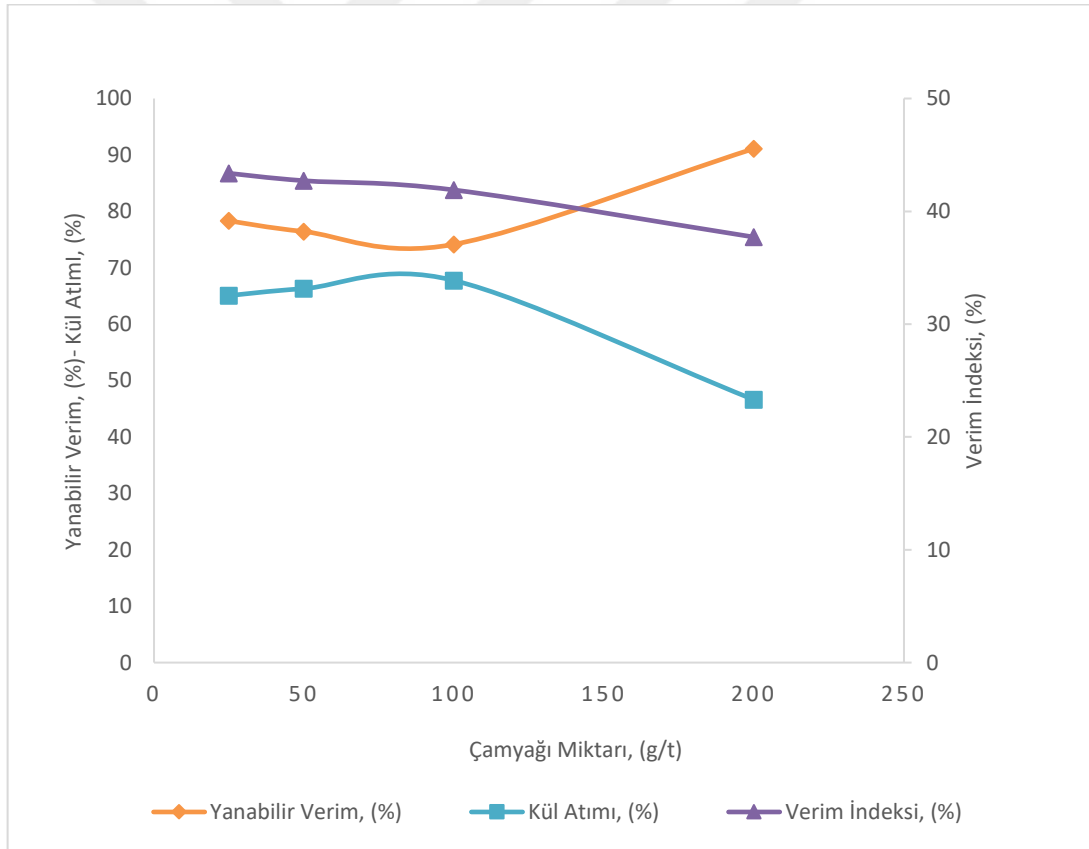
Köpürtücü miktarının etkisinin incelendiği flotasyon deney koşulları Çizelge 5.15’de, flotasyon deney sonuçları Çizelge 5.16 ve Şekil 5.19’da verilmiştir. Çalışılan köpürtücü miktarı değerlerinde, köpürtücü miktarına bağlı olarak konsantrenin kül içeriği artmaktadır. Bu durum polar yapıdaki köpürtücü moleküllerinin kül oluşturu mineral maddelere adsorbsiyonuna dayandırılabilir. Düşük köpürtücü konsantrasyonunda, verim indeksi değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Sonuç olarak 25 g/t köpürtücü miktarında, %43,37 verim indeksi değeri optimum olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.15 Çamyağı miktarının belirlenmesinde flotasyon deney koşulları

Köpürtücü deney parametreleri	Değerler
Tane Boyu (µm)	-500
Katı Oranı (%)	10
Kondisyon Süresi (dk)	3
Köpük Alma Süresi (dk)	3
%5’lik Na ₂ SiO ₃ (Bastırıcı)	200 (g/t)
%1’lik Oleik Asit (Toplayıcı)	8000 (g/t)
%1’lik Çamyağı (Köpürtücü)	25,50,100,200 (g/t)
Karıştırma hızı	1100 dev./dk.

Çizelge 5.16 Köpürtücü (çamyağı) miktarının sonuçları

Çamyağı Miktarı (g/t)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
25	58.36	27.54	78.31	65.06	43.37
50	56.77	27.31	76.42	66.3	42.71
100	54.88	27.07	74.15	67.74	41.89
200	73.77	33.30	91.12	46.6	37.72



Şekil 5.19 Köpürtücü (çamyağı) miktarının flotasyona etkisi

5.9. Katı Oranının Etkisinin Araştırılması

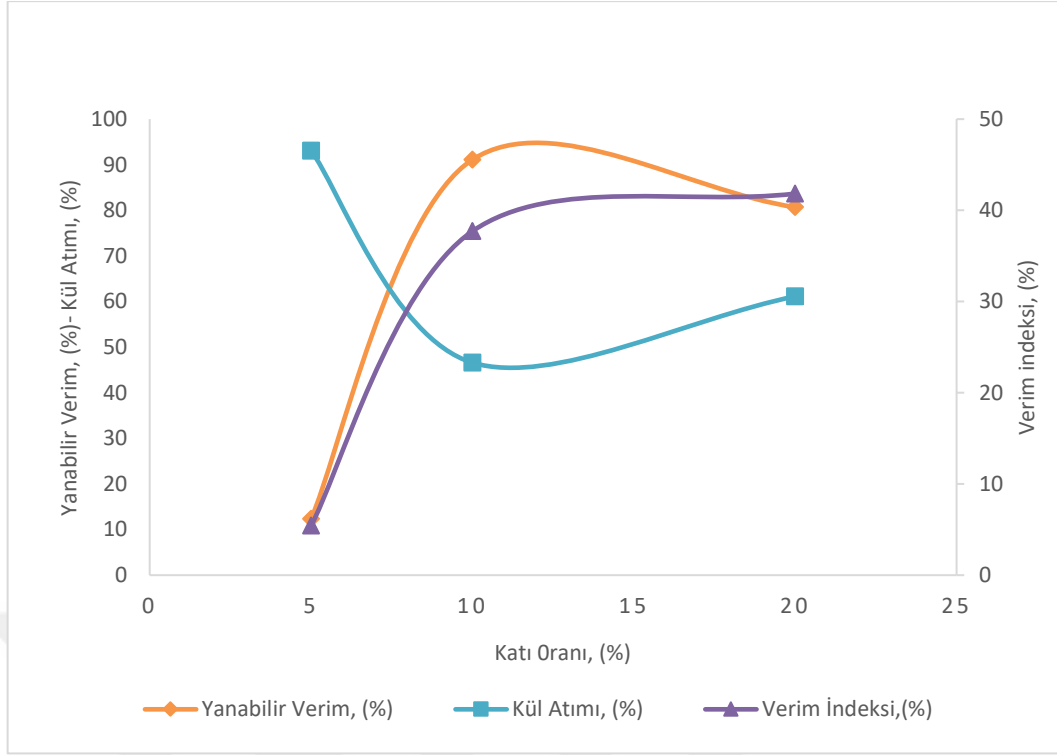
Katı oranı %20'e çıktığında, yanabilir verim ve verim indeksi önemli ölçüde azalmaktadır. Bu durum kömür taneleri ile hava kabarcığı arasındaki etkileşimin azalması ile açıklanabilir. Ayrıca verim indeksindeki azalma yüksek katı miktarında kömür yüzeyine oleik asitin tutulmasının azalması ile açıklanabilir. Düşük katı konsantrasyonunda, (yanabilir verim/verim indeksi) azalma oleik asitin kömür yüzeyine yeterli ölçüde adsorbe olmaması ve kömür hava kabarcığı tutunmasının azalması ile açıklanabilir. %10 katı oranı kullanıldığında en yüksek yanabilir verim değerine %91,12'de ulaşıldığı için optimum katı oranı %10 olarak kabul edilmiştir. Çizelge 5.17'de flotasyon deney koşulları, Çizelge 5.18 ve Şekil 5.20'de flotasyona etkisi ve sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 5.17 Katı oranının belirlenmesinde flotasyon deney koşulları

Katı Oranı ile yapılan deney parametreleri	Değerler
Tane Boyu (µm)	-500
Katı Oranı (%)	5, 10 ve 20
Kondisyon Süresi (dk)	3
Köpük Alma Süresi (dk)	3
%5'lik Na ₂ SiO ₃ (Bastırıcı)	0.2, 0.4 ve 0.9 ml
%1'lik Oleik Asit (Toplayıcı)	40, 80 ve 180 ml
%1'lik Çamyağı (Köpürtücü)	1, 2 ve 4.5 ml
Karıştırma hızı	1100 dev./dk.

Çizelge 5.18 Katı oranının etkisinin deney sonuçları

Katı Oranı (%)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
5	9.86	32.31	12.36	93.07	5.43
10	73.77	33.3	91.12	46.60	37.72
20	61.45	29.09	80.69	61.14	41.83



Şekil 5.20 Katı oranının flotasyona etkisi

5.10. Köpük Alma Süresinin Etkisinin Araştırılması

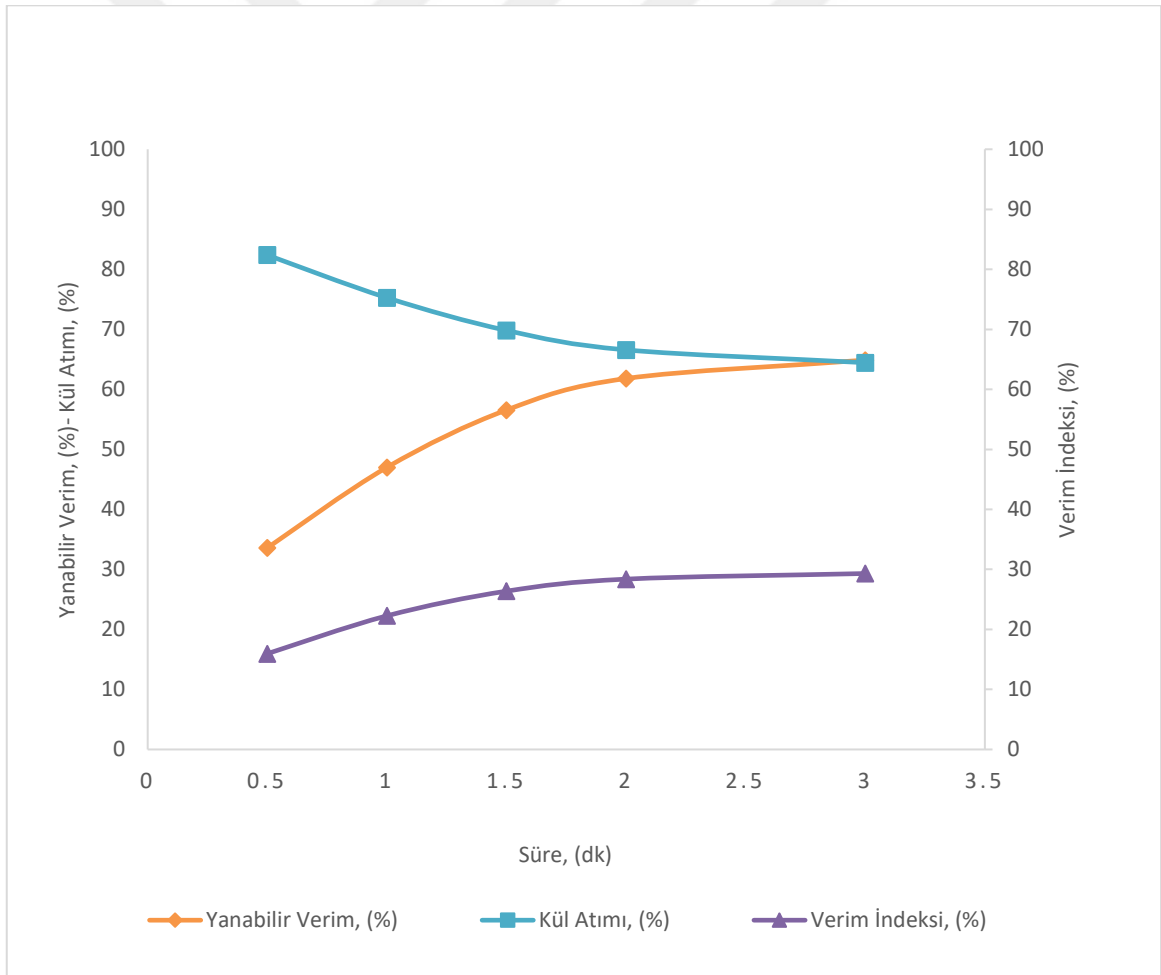
Köpük alma süresinin flotasyon performansına etkisinin deney koşulları Çizelge 5.19’da; köpük alma süresinin sonuçları ve etkisi Çizelge 5.20 ve Şekil 5.21’de verilmiştir. Köpük alma süreleri 30,60,90,120,180 sn olarak optimum seçilen diğer parametrelerle değerlendirildiğinde, en iyi yanabilir verim değeri %67,16 verim indeksi ise %33,06 ile en iyi optimum süre 3 dk (180 sn) olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.19 Köpük alma süresinin flotasyon deney koşulları

Köpük alma süresinin deney parametreleri	Değerler
Tane Boyu (µm)	-500
Katı Oranı (%)	10
Kondisyon Süresi (dk)	3
Köpük Alma Süresi (dk)	0,5-1-1,5-2-3
%5’lik Na ₂ SiO ₃ (Bastırıcı)	2000 (g/t)
%1’lik Oleik Asit (Toplayıcı)	8000 (g/t)
%1’lik Çamyağı (Köpürtücü)	25 (g/t)
Karıştırma hızı	1100 dev./dk.

Çizelge 5.20 Köpük alma süresinin sonuçları

Köpük Alma Süresi	Kümülatif Süre (Dakika)	Ağırlık (%)	Kül (%)	Σ Ağırlık (%)	Ortalama Kül (%)	Yanabilir Verim (%)	Kül Atımı (%)	Verim İndeksi (%)
Köpük 0-0.5	0.5	26.54	29.28	26.54	29.28	34.76	83.11	17.86
Köpük 0.5-1	1	10.64	29.48	37.18	29.34	48.66	76.29	24.94
Köpük 1-1.5	1.5	7.74	31.01	44.92	29.63	58.55	71.07	29.61
Köpük 1.5-2	2	4.37	32.78	49.29	29.90	63.98	67.96	31.94
Köpük 2-3	3	2.66	35.46	51.95	30.19	67.16	65.91	33.06



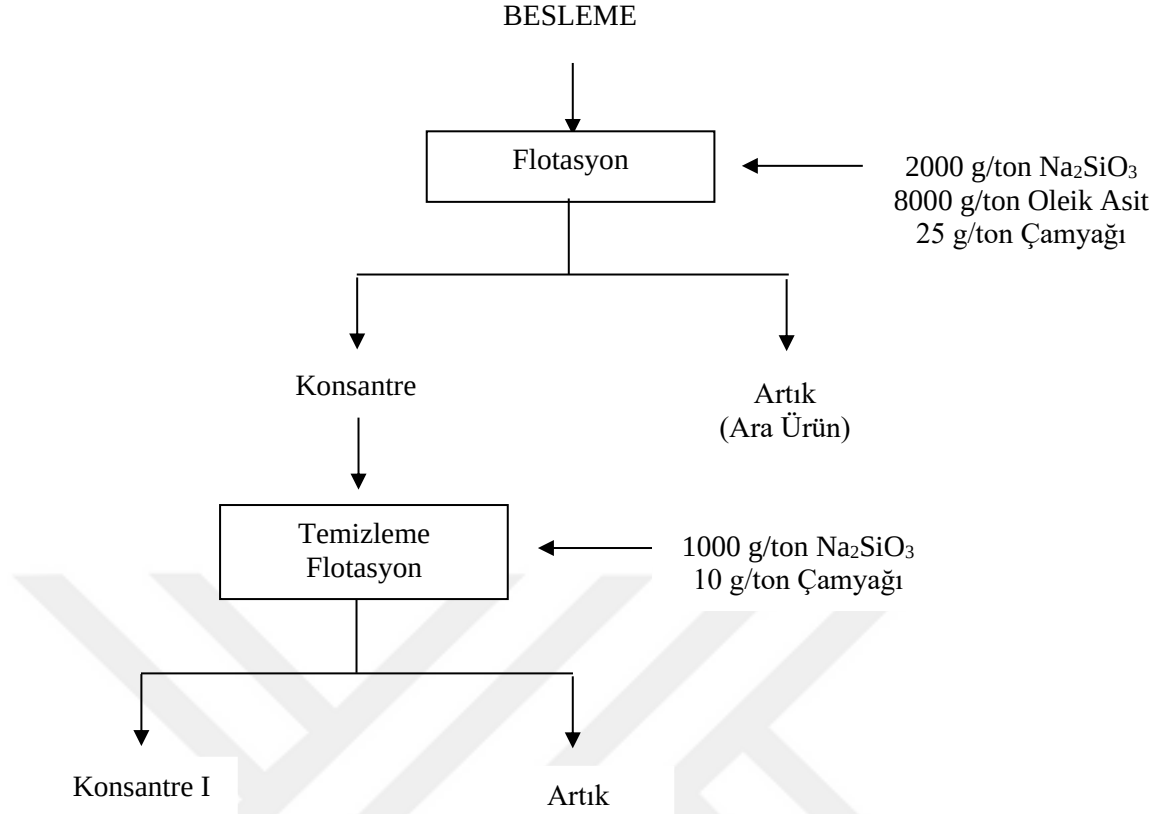
Şekil 5.21 Köpük alma süresinin flotasyona etkisi

5.11. Flotasyonda Temizleme Devreleri

Flotasyon temizleme devresi deney koşulları Çizelge 5.21’de ve devre akım şeması Şekil 5.22’de verilmiştir. Üretilen kaba konsantreye temizleme flotasyonu uygulanarak kül içeriği düşürülmeye çalışılmıştır. Temizleme flotasyonunun sonucunda %21,33 kül içeren temiz kömür, %38,89 yanabilir verim ile üretilmiştir. Kaba flotasyon aşamasında %46,00 kül içeren flotasyon beslemesinden %33,72 kül içeren kaba konsantre üretilmiştir.

Çizelge 5.21 Temizleme devresinin belirlenmesinde flotasyon deney koşulları

Temizleme Devresi İle Yapılan Deney Parametreleri	Değerler
Tane Boyu(μm)	-500
Su Miktarı (ml)	900
Katı Oranı (%)	10
Kondisyon Süresi (dk)	3
Köpük Alma Süresi (dk)	3
%5’lik Na_2SiO_3 (Bastırıcı)	2000, 1000 (g/t)
%1’lik Oleik Asit (Toplayıcı)	8000 (g/t)
%1’lik Çamyağı (Köpürtücü)	25, 10 (g/t)
Karıştırma hızı	1100 dev./dk.



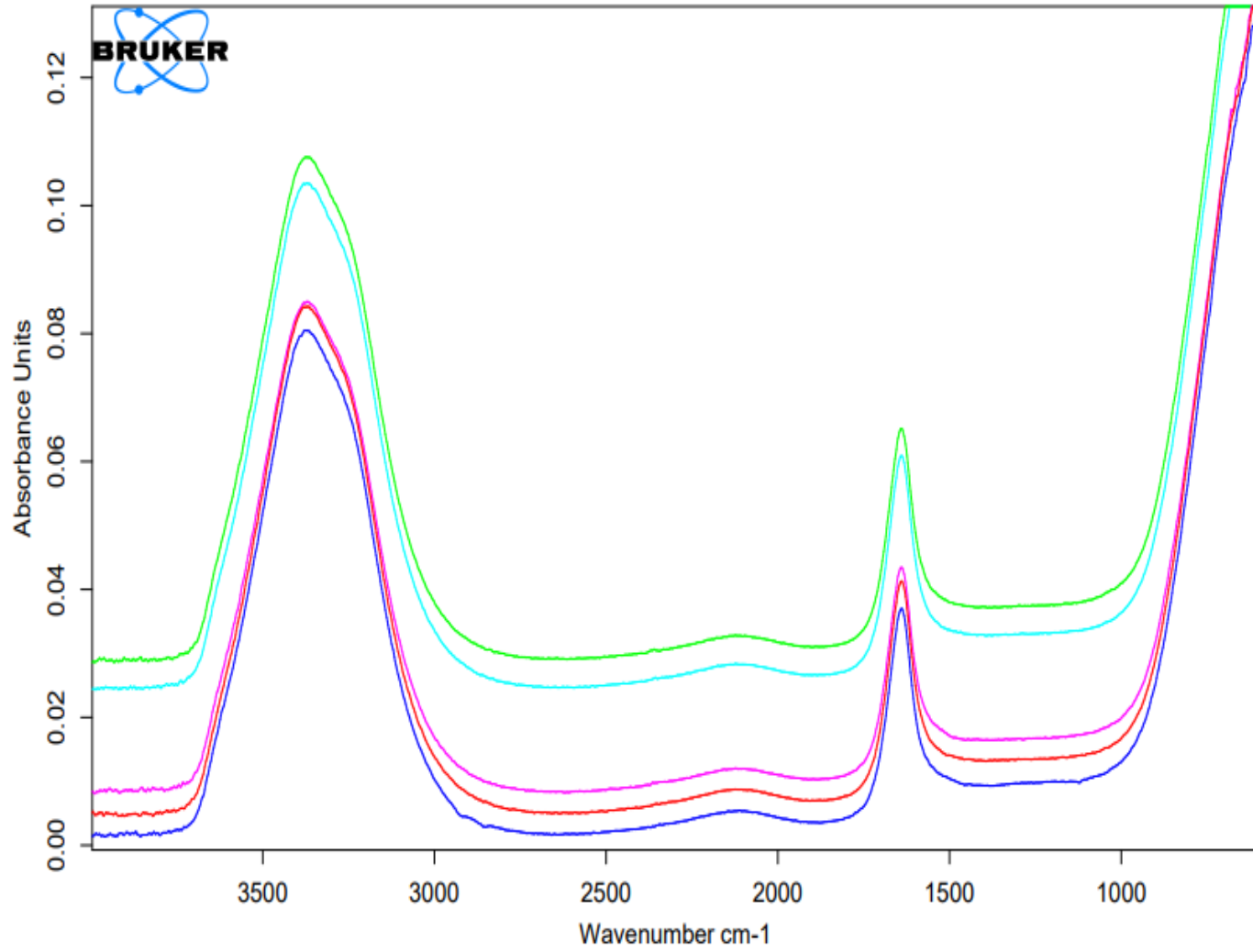
Şekil 5.22 Flotasyonda temizleme devre akım şeması

5.12. Ftır bulgularının değerlendirilmesi

3300-3500 aralığında OH grupları mevcuttur. Oleik asit+ gazyağı> oleik asit> mazot >gazyağı >kömür OH grupları bağ şiddetinde bir kayma gözlemlenmediğinden oleik asit, mazot, gazyağı ile kömürün etkileşimi yüzeyde OH gruplarının artmasına sebep olmuştur. Bu durum fiziksel adsorpsiyonla kömür yüzeylerin de toplayıcıların OH gruplarını göstermektedir.

1700-1600 C=O (Karbonil) ve COOH (Karboksil) gruplarına benzer şekilde, oleik asit+ gazyağı> oleik asit> mazot> gazyağı eğilimini göstermektedir. Bu durum da karbonil ve karboksil gruplarının kömür yüzeyinde fiziksel olarak adsorplandığını göstermektedir.

400-1000 arasında ki piklerde şiddet ve pik kaymasında önemli ölçüde gazyağı ve mazot varlığında bir değişiklik gözlemlenmezken oleik asit ve oleik +gazyağı karışımında pik şiddetinde hafif bir artış gözlenmiştir. Bu durum oleik asitin kömürün mineral içeriği ile fiziksel olarak bir etkileşimde bulunabildiğini gösterebilir (Ateş, 2024). Ana numune ve değişik reaktiflerle işlem görmüş Ftır analiz sonuçları Şekil 5.23'te verilmiştir.



C:\Users\Sivas-Lab\Documents\Bruker\OPUS 8.7.41\DATA\MEAS\REFERANS KÖMÜR.0	REFERANS KÖMÜR	Instrument type and / or	11/20/2023
C:\Users\Sivas-Lab\Documents\Bruker\OPUS 8.7.41\DATA\MEAS\GAZ YAGI KARISIMI.0	GAZ YAGI KARISIMI	Instrument type and / or	11/20/2023
C:\Users\Sivas-Lab\Documents\Bruker\OPUS 8.7.41\DATA\MEAS\MAZOT KARISIMI.0	MAZOT KARISIMI	Instrument type and / or	11/20/2023
C:\Users\Sivas-Lab\Documents\Bruker\OPUS 8.7.41\DATA\MEAS\OLEIK ASIT+GAZYAGI KARISIMI.0	OLEIK ASIT+GAZYAGI KARISIMI	Instrument type and / or	11/20/2023
C:\Users\Sivas-Lab\Documents\Bruker\OPUS 8.7.41\DATA\MEAS\OLEIK ASIT KARISIMI.0	OLEIK ASIT KARISIMI	Instrument type and / or	11/20/2023

Şekil 5.23 Ftır grafiği

6. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

6.1. Tartışma

Oleik asit kullanılarak yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Yağ asitlerinin ayrışma sabiti (pKa) 4,2 – 5,2 aralığında olan zayıf elektrolit kollektörler olarak değerlendirilmektedir. Bundan dolayıdır ki, bu asitler bazik ortamda ($\text{pH} > 7,5$) çeşitli bileşikler halinde ayrışır. Oleik asit ayrıca bir asit sabunu dimer kompleksi oluşturma eğilimindedir. Bu kompleks maksimum konsantrasyonu pH 7,8 civarında olup son derece yüzey aktif bir bileşiktir. Dimer kompleksi çözeltinin yüzey gerilimini minimize ederek flotasyon prosesini daha da iyileştirir. (Dube ve Honaker, 2019).

Fuel oil ve oleik asit gibi yağ asitleri karışımlarının ilavesinin oksitlenmiş bitümlü kömürlerin flotasyon performansını arttırdığı bulunmuştur. Yanabilir verim değeri %15 ‘den %75’e kadar yükseltilmiştir. Ayrıca, konsantre kül içeriğinin %9’un altına düşürüldüğü bulunmuştur. Performanstaki bu değişimin pülpü PZC’sinin (şarjın sıfır noktası) negatiften pozitifte değişmesi nedeniyle olduğu ifade edilmiştir. Çalışmalarda pülp pH’nın 7,5 – 8 aralığında olduğu belirtilmiştir (Kadagala ve ark., 2021).

%20 oleik asit %80 gazyağı kullanarak koklaşabilir nitelikteki bir kömürü 1000 g/t toplayıcı kullanarak zenginleştirdikleri çalışmada %19,96 küllü beslemeden, %10,70 küllü konsantreyi %71,04 ağırlıkça verimle üretmiştir. Sadece gazyağı kullanıldığında yaklaşık aynı kül içeriğindeki konsantre 2000 g/t gazyağı miktarında %67,93 ağırlıkça verimle üretilmiştir (An ve ark., 2021).

Düşük ranklı bir kömürün oleik asit, dodekan ve oleik asit – dodekan karışımı kullanılarak zenginleştirme çalışmaları yapılmıştır. 3000 g/t toplayıcı miktarında oleik asit- dodekan karışımı, oleik asit ve dodekan ile elde edilen yanabilir verim değerleri sırasıyla yaklaşık olarak %90,00 %65,00 ve %45,00 olarak elde edilmiştir. Konsantrenin kül içeriği ise aynı sırada yaklaşık olarak %11,50 %14,50 ve %11,00 olarak belirlenmiştir. Bu çalışma oleik asit- dodekan karışımının daha iyi sonuç verdiği görülmektedir (An ve ark., 2021).

Oksitlenmiş bitümlü kömürle yapılan bir flotasyon çalışmasında; yalnızca fuel oil kullanıldığında yaklaşık %30 olan yanabilir verim değeri, %50 fuel oil ve oleik asit karışımı kullanıldığında yaklaşık %80’e ulaşmıştır. Çalışmalar 0,45 kg/t toplayıcı miktarında pH ~ 7,5 ve 4 dakikalık flotasyon süresinde ve 20 ppm MIBC miktarında yapılmıştır (Dube ve Honaker, 2019).

Havada kuru bazda %17,30 kül içeren bir kömürle yapılan flotasyon çalışmalarında, toplayıcı olarak mazot, oleik asit ve mazot-oleik asit karışımı (mazot/oleik asit = 3/1) kullanıldığında 2000 g/t toplayıcı miktarında sırasıyla mazot, oleik asit ve mazot – oleik asit karışımıyla elde edilen ağırlıkça verim değerleri yaklaşık %10,00, %35,00 ve %60,00 olarak bulunmuştur. Kül değerleri ise sırasıyla; mazot için %12,00, oleik asit için %15,00 ve karışım için %14,00 civarındadır. Ayrıca, aynı çalışmada metil oleatta kollektör olarak kullanıldığında sinerjik etki ile konsantrenin kül içeriğinin düştüğü, ağırlıkça verimin ise oleik asit- mazot karışımında elde edilen değere yakın olduğu belirlenmiştir (Bao ve ark., 2022).

Dodekan, oleik asit ve dodekan- oleik asit karışımının (Ağırlıkça %20) toplayıcı olarak kullanıldığı düşük ranklı kömür flotasyonunda; 3000 g/t toplayıcı miktarında elde edilen yanabilir verim değerleri yukarıda verilen sıralamaya göre yaklaşık olarak %40,00 %65,00 ve %90,00 olur. Aynı sıraya göre konsantrelerin kül içerikleri ise; %11,00 %14,50 ve %10,50 'dir (Liao ve ark., 2020).

Kollektör olarak oleik asitin kullanıldığı bir çalışmada Fe^{+2} iyonlarının oleik asitin toplayıcılık özelliğini iyileştirmesi araştırılmıştır. Çalışmada düşük kömürleşme dereceli (ranklı) kömür kullanılmıştır. Farklı pH değerlerinde deneyler yapılmıştır. Fe^{+2} iyonlarının varlığında konsantrenin ağırlıkça veriminde önemli artışlar elde edilmiştir. Çalışmalar; 2000 g/t oleik asit, $1 \cdot 10^{-2}$ mol/L Fe^{+2} konsantrasyonunda yapılmıştır. Deneylerde maksimum ağırlıkça verim pH=7-8 aralığında elde edilmiştir. Sadece oleik asit kullanıldığında %77,00 civarında olan maksimum verim, Fe^{+2} varlığında yaklaşık %94 'e ulaşmıştır (Ren ve ark., 2021).

6.2. Sonuçlar

Edirne linyit kömür numunesi kullanılarak yapılan flotasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar:

1. Gazyağı ve mazot gibi flotasyonda yaygın olarak kullanılan polar olmayan reaktiflerle önemli bir başarı sağlanamamıştır.
2. Klasik kollektörlerde elde edilen bulgular; gazyağında 8000 g/t'da %37,39 kül içerikli konsantre, %80,04 kül atımı, %28,47 yanabilir verim ve %8,51 verim indeksi ile üretilmiştir. Mazotta ise 1000 g/t'da %37,97 kül içerikli konsantre, %78,20 kül atımı, %30,33 yanabilir verim ve %8,54 verim indeksi ile üretilmiştir.

3. Oleik asit ile yapılan deneylerde en iyi bulgular 8000 g/t'da %33,30 kül içerikli konsantre, %46,60 kül atımı, %91,12 yanabilir verim ve %37,72 verim indeksi ile üretilmiştir. Olumlu etkileşim gerçekleşerek önemli bir başarı sağlanmıştır.
4. Mazot/oleik asit ve gazyağı/oleik asit karışımları ile yüksek oleik asit ağırlık oranlarında yüksek flotasyon performanslarına ulaşılmıştır. Bu durum gazyağı/oleik asit, mazot/oleik asit karışımının linyitin flotasyonunda olumlu etkileşim gösterdiğini ortaya koymaktadır.
5. Flotasyon indeksi açısından en iyi sonuç %75 oleik asit + %25 gazyağı karışımı ile 10000 g/t reaktif miktarında elde edilmiştir.
6. Karışımlarla yapılan deneylerde en iyi bulgular %75 oleik asit + %25 gazyağı karışımları ile elde edilmiş olup %33,72 kül içerikli konsantre, %44,85 kül atımı, %92,34 yanabilir verim ve %37,19 flotasyon verim indeksi ile üretilmiştir.
7. Karışımlarla yapılan çalışmalarda klasik yağlara göre daha iyi sonuçların elde edilmesi; oleik asit ilavesi ile gazyağı/mazot – su ara yüzey geriliminin önemli ölçüde azalması ile açıklanabilir. Bu durum linyit yüzeyi üzerinde, gazyağı ve mazotun yayılma performansının iyileştiğini göstermektedir.
8. Karışımlar kullanıldığında hem kollektör adsorpsiyonu, hem de yayılma hızındaki iyileşme, linyitin flotasyon yeteneğinde artışa sebep olmuştur.
9. Oleik asitin polar gurubu ve linyit yüzeyindeki oksijen içeren fonksiyonel gruplar arasındaki hidrojen bağı yoluyla oleik asit kömür yüzeyine adsorbe olmaktadır. Böylece bu kısımlarda gazyağı/mazot adsorpsiyonu iyileşmektedir. Gazyağı ve mazot ise linyit yüzeyinin hidrofobik kısmına hidrofobik veya van der waals kuvvetleriyle adsorbe olmaktadır.
10. Bastırıcı reaktif olarak kullanılan Na_2SiO_3 miktarının etkisinin incelendiği deneylerde; en iyi bulgular 2000 g/t'da optimum seçilerek %27.06 kül içerikli konsantre, %64,48 kül atımı, %81,56 yanabilir verim ve %46,04 verim indeksi ile üretilmiştir.
11. Köpürtücü reaktif olarak kullanılan çamyacı miktarının incelendiği deneylerde; en iyi bulgular 25 g/t'da optimum seçilerek %27,54 kül içerikli konsantre, %65,06 kül atımı, %78,31 yanabilir verim ve %43,37 verim indeksi ile üretilmiştir.

12. pH'ın flotasyona etkisi incelendiğinde; pH 4,5- 8,5- 10,5 denenerek yanabilir verim ve verim indeksi açısından değerlendirildiğinde en iyi optimum pH 8,5 olarak belirlenmiştir.

13. Katı oranının flotasyona etkisi incelendiğinde; %5 %10 ve %20 denenerek en iyi bulgular %10 katı miktarı optimum seçilerek, %91,12 yanabilir verim, %46,60 kül atımı ve %37,72 verim indeksi ile üretilmiştir.

14. Köpük alma süresinin flotasyon performansına etkisi incelendiğinde; köpük alma süreleri 30,60,90,120,180 sn olarak değerlendirildiğinde 3 dk (180 sn) optimum süre olarak belirlenmiş, %67,16 yanabilir verim %65,91 kül atımı ve %33,06 verim indeksi ile üretilmiştir.

15. Temizleme devresi flotasyon deney sonuçları incelendiğinde, temizleme flotasyonu %21,33 nihai temiz kömür külü, %87,62 kül atımı olarak elde edilmiştir.

16. Belirlenen optimum flotasyon koşullarında yapılan deneylerde; ağırlıkça verim %75,23 yanabilir verim %92,34 olarak elde edilmiş ve kaba konsantre aşamasında %46,00 kül içeren flotasyon beslemesinden %33,72 kül içeren konsantre elde edilmiştir. Ayrıca kömüre temizleme devre flotasyonu uygulanması sonucunda külü %33,72 'den %21,33 temiz kömür üretilmiştir.

17. Edirne linyit kömürünün belirlenen optimum flotasyon koşullarında zenginleştirilmesinde, işletme faktörleri etkisi araştırıldığında endüstriyel çalışmalarda uygulanmasının ekonomik olmadığı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Aksarı, B.**, (1998). Flotasyon kolonları temel çalışma prensipleri ve ayırma işlemine etki eden parametreler, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 37(2), 21-40.
- An M, Liao Y, Cao Y, Hao X, Ma L.** (2021). Improving low rank coal flotation using a mixture of oleic acid and dodecane as collector: A new perspective on synergetic effect. *Processes*, 9(3), 404.
- An, M., Liao, Y., Yang, Z., Cao, Y., Hao, X., Song, X., ... & Chen, L.** (2022). Energy Feature of Air Bubble Detachment from a Low-Rank Coal Surface in the Presence of a Dodecane–Oleic Acid Collector Mixture. *ACS Omega*, 7(22), 18315-18322.
- Aplan F. F.** (1976). Coal Flotation, in Flotation, A.M. Gaudin Memorial Volume, AIME, New York, Chapter 45, 1235-1264.
- Aplan F. F. and Arnold B. J.**, (1991). Part 2: Wet fine particle concentration. Section 3: Flotation. Coal Preparation, Hardinge, Littleton, Colorado, SME.
- Arslan, V., Kemal, M. ve Çiçek, T.** (1996). HÜSTAŞ Kömür Şlamının Spiralle Zenginleştirilme Olanakları, *Dokuz Eylül Üniversitesi*, Yayınlanmamış Çalışma.
- Atak S. ve Tolun R.** (1994) Cevher Hazırlama El Kitabı, Flotasyon, **G. Önal & G. Ateşok**, (Ed.), *Yurt Madenciligini Gelistirme Vakfı Yayını*, 207-295.
- Atak, S. ve Önal, G.** (1991). Kömür hazırlama ve tesisleri. Kömür, **Kural, O.** (Ed.), *İTÜ Mühendislik Fakültesi*, 236-374, İstanbul.
- Atak, S., & Tolun, R.** (1994). Flotasyon. *Cevher Hazırlama El Kitabı*, 185-236.
- Atak, S.**, (2017). Flotasyon: Cevher Hazırlamada 100 yıl. *İTÜ vakfı yayınları*, İstanbul.
- Ateş, A.** (2024). Kişisel Görüşme. *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı*. Sivas.
- Ateşok, G.** (1986). Kömür Hazırlama, *Kurtiş matbaası*, 2s.
- Ateşok, G.** (2004). Kömür Hazırlama ve Teknolojisi, *Beril Yayıncılık Matbaacılık Ltd.*
- Ateşok, G.** (2009) Kömür Kullanımı ve Temiz Kömür Teknolojileri. *Yurt Madenciligi Gelistirme Vakfı Yayınları*, 10s, İstanbul.
- Ateşok, G.** (2014). Kömürün Özellikleri. *Cevher Hazırlama El Kitabı*, (12), 263-284.

- Atrafi, A., Gomez, C. O., Finch, J. A., and Pawlik, M.** (2012). Frothing behavior of aqueous solutions of oleic acid. *Minerals Engineering*, 36, 138-144.
- Ayhan, F. D., Abakay H, Kahraman, F.,** (2003), Şırnak Asfaltitlerinden Külün Flotasyon Yöntemi ile Uzaklaştırılması. *Madencilik Dergisi*, 42(1), 27-34.
- Bao, X., Xing, Y., Liu, Q., Liu, J., Dai, S., Gui, X., ... and Yang, Z.** (2022). Investigation on mechanism of the oleic acid/methyl oleate/diesel ternary compound collector in low-rank coal flotation. *Fuel*, 320, 123894.
- Bharath, K. L., Nikkam, S., & Udayabhanu, G.** (2022). Beneficiation of high-ash Indian coal fines by froth flotation using bio-degradable-oil as a collector. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42(9), 2685-2702.
- Bayat, O.** (2008), Tunçbilek Kömür Yıkama Tesisi Ara Ürünün Jameson Hücresinde Flotasyonu. *Madencilik*, 47(1), 27-34.
- Bentli, İ., ve Kaya, M.** (2004), Kütahya Değirmisaz -0,5 mm Linyit Kömürünün Modifiye Flotasyon Hücresinde Zenginleştirilmesi, *Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, 02-04.06.2004, 371.
- Boylu, F., ve Ateşok, G.** (1999). Türkiye'de ki Kömür Politikaları ve Temiz Kömür Sempozyumu. Çevre Dostu Yeni Bir Enerji Hammaddesi: Kömür-Su Karışımları, 154-162s. Ankara.
- BP,** (2018). Statistical Review Of World Energy, 2017.
- Bulut, G. ve Göktepe, F.** (2012). Madencilik ve cevher hazırlama işlemlerinde kullanılan kimyasallar. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(1), Eskişehir.
- Burt, R. O.** (1975). “Development of the Bartles Crossbelt Concentration for the Gravity Concentration of Fines”, *Int. J. Min. Proc.*, 2, pp. 219-234.
- Cavallaro, J. A. and Deurbrouck, A. W.** (1977). An Overview of Coal Preparation, *ACS Symposium Series*, Vol.64, 35-37.
- Cebeci, Y.** (2002). The investigation of the floatability improvement of Yozgat Ayrıdam lignite using various collectors. *Fuel*, 81(3), 281-289.

- Cho, Y. S. and Laskowski, J.** (2002). Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability, *International Journal of Mineral Processing*, 64 (2-3), 69-80.
- Chong, S. P.** (1978). “Gravity Concentration Successfully Treats Iron Ore Fines at Carol Lake”, *Min. Eng.*, Dec., pp. 1639-1643.
- Cook, B. K., and Gibson, C. E.** (2023). A Review of Fatty Acid Collectors: Implications for Spodumene Flotation. *Minerals*, 13(2), 212.
- Çilek, E.C.** (2006). Mineral Flotasyonu, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Isparta.
- Doğan, Z.** (1994). Özgül Ağırlık Farkı (Gravite) ile Zenginleştirme, Cevher Hazırlama El Kitabı, Ed:Önal, G. ve Ateşok, G., 147-172.
- DPT.** (2001). Madencilik Özel İhtisas Komisyon Raporu Enerji Maddeler Alt komisyonu Kömür Çalışma Grubu. Ankara, DPT: 2605 - ÖİK: 616.
- Dube, R., and Honaker, R.** (2019). Improving the flotation performance of an oxidized bituminous coal source. *Minerals Engineering*, 142, 105937.
- EIGM.** (2018). EIGM Denge Tabloları. 2017 Yılı Sonu Denge Tablosu: <http://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Denge-Tablolari/Denge-Tablolari>.
- Ersoy, Ö.F.** (2014). Isıl işlemin Türk linyitlerinin tek ve çift değerlikli tuzlar varlığında flotasyonuna etkisinin araştırılması. *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Yüksek Lisans Tezi), 114s, İstanbul.
- ETKB.** (2022). Tabi kaynaklar, kömür. *Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı*. <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabii-kaynaklar-komur>.
- Fan, G., Wang, L., Cao, Y., & Li, C.** (2020). Collecting agent–mineral interactions in the reverse flotation of iron ore: A brief review. *Minerals*, 10(8), 681.
- Ghiani, M., Carhini, P., Ciccu, R. and Satta, F.** (1989). “Oils as Collectors in Low-Rank Coal Flotation”, *Advances in Coal and Mineral Processing using Flotation*, Society for Mining, Metallurgy and Exp., Inc, Florida, USA, Chapter 29, pp. 266-270.
- Gupta, A.K., Banerjee, P.K., Mishra, A., Satish, P. Pradip.** (2007). Effect of alcohol and polyglycol ether frothers on foam stability, bubble size and coal flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 82, 126–137.

- Gündoğan, A.C., Yaraç, N., Bogatır, O. B.** (2018). *Linyit Yanmaz, Yakar*. Erişim adresi: <http://ekoik.com/arsiv/linyit%20raporu%20biten.pdf>
- Güney, A., Önal, G. ve Ergut, Ö.,**(2002). “Beneiciation of ine coal by using the free jet lotation system”, *Fuel Processing Technology*, 75, 141-150.
- Hacıfazlıoğlu, H.** (2011). Jameson Hücresinde Bitümlü Şlam Kömürünün Flotasyonu için En Uygun Köpürtücü ve Toplayıcı Tipinin Araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 2(1), 34-41.
- Harris, G.H., Jia, R.** (2000). An improved class of flotation frothers, *International Journal of Mineral Processing*, 58, 35–43.
- Honaker, R. Q. and Forrest W. R.** (2003). Advances in Gravity Concentration, Society for Mining, *Metallurgy, and Exploration, Inc*, 82s.
- Horsfall, D. W.** (1992). Coal Preparation and Usage, *Coal Pulplifications Ltd*, Johannesburg, South Africa. <https://www.metalurjik.com/flotasyon-deneyi>
- Huang, Y. and Takaoka, M.** (2003). Chlorobenzenes Removal From Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash By Surfactant-Assisted Column Flotation. *Chemosphere*, 52, 735-743.
- Hüyükpınar, T.** (2010). Çeşitli Organik Asit Çözeltileri ve Sub-Kritik Su Kullanılarak Bazı Türk Kömürlerinin Deminerilizasyon ve Desülfürizasyonu, *Çukurova Üniversitesi*, (Yüksek Lisans Tezi). Adana.
- Jameson, A.** (1988). Kontrol teorisi yoluyla aerodinamik tasarım. *Bilimsel hesaplama dergisi*, 3, 233-260.
- Kadagala, M. R., Nikkam, S., and Tripathy, S. K.** (2021). A review on flotation of coal using mixed reagent systems. *Minerals Engineering*, 173, 107217.
- Kaya, Ö. ve Taşdöğen, N.,** (2020). An experimental study on the effects of some process parameters on lignite flotation. *Energy Sources Part A-Recovery Utilization And Environmental Effects*, 42 (19), 2397-2404.
- KB.** (2018). 11. Kalkınma Planı. Kalkınma Bakanlığı, *Madencilik Politikaları Özel İhtisas Komisyon Raporu*. Ankara.
- Kelebek, H., Canbas, A., & Selli, S.** (2008). Determination of phenolic composition and antioxidant capacity of blood orange juices obtained from cvs. Moro and

- Sanguinello (Citrus sinensis (L.) Osbeck) grown in Turkey. Food Chemistry, 107(4), 1710-1716.
- Kemal, M.,** (1991). Linyit Kömürü Değerlendirilmesi ve Kullanımında Kömür Özelliklerinin Etkileri, Önal, G., Ateşok, G., *Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri, Yurt Madenciliği Geliştirme Vakfı Yayınları*, 270-282s.
- Kemal, M., Arslan, V.** (2010). Kömür Teknolojisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları* No: 033, İzmir.
- Kemal, M., Arslan, V.,** (1999). Kömür Teknolojisi (Genişletilmiş 3. Baskı), *D.E.Ü., Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi*, İzmir.
- Keskin, Y.** (1988). Kömür Hazırlama Yöntemleri, *İlkadım Matbaası*, Zonguldak, 7s.
- Khoshdast, H., Sam, A.,** (2011). Flotation frothers; Review of their classifications, properties and preparation. *Open Mineral Processing Journal*, 26-35.
- Killmeyer, R. P.,** (1980). “Performance Characteristics of Coal Washing Equipment: Baum and Batac Jig.” *U.S. Depart. Of Energy*, RI-PMTC-Oct. Kitabı, Zonguldak.
- Kural, O.** (1991). Linyit ve kullanım alanları. Kömür Kitabı. 294-332, *Kurtiş matbaası*, 975s. İstanbul.
- Laskowski, J. S. and Ralston, J.** (1992). Colloid Chemistry in Mineral Processing, *Developments in Mineral Processing*, D. W. Fuerstenau / Advisory Editor, Volume 12, Elsevier.
- Laskowski, J. S.,** (2001). Testing flotation frothers, *Physicochemical problems of mineral processing* 38, 13-22.
- Leonard, J. W.** (1991). Coal Preparation, Fifth Edition, *Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.*, Littleton-Colorado.
- Mesa, D., Brito-Parada, P.R.,** (2019). Scale-up in froth flotation: a state of the art review. *Seperation. Purif. Technology*, 210, 950-962.
- Misra M, Kumar S, Chatterje F.** (1991). Flotability and dielectric characterization of the Intrinsic moisture of coal of different ranks, *Coal Prepr*,9, pp. 131-140.
- MTA,** (2022). Enerji hammadde arama ve araştırmaları. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/komur,aramaarastirmalari>

- Naik, P. K., Reddy P. S. R. and Misra, V. N.** (2005). “Interpretation of Interaction Effects and Optimization of Reagent Dosages for Fine Coal Flotation”, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 75, pp. 83-90.
- Ni, C., Bu, X., Xia, W., Peng, Y. and Xie, G.,** (2018), Effect of slimes on the flotation recovery and kinetics of coal particles, *Fuel*, 220, 159-166.
- Osborne, D. G.** (1988). Flotation, Agglomeration and Selective Flocculation, *Coal Preparation Technology*, Volume 1, Chapter 9, Graham and Trotman Limited Publishers, London.
- Önal, G., Acarkan, N. ve Güney, A.,** (1996). “Cevher Hazırlamadaki Yeni Gelişmeler” 21. Yüzyıla Girerken Türkiye Madenciliği, 20-22 Haziran, Sivas, 157-175.
- Önal, G., Ateşok, G.** (1995). “Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri III”, *Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayını*, Çayırhan-Ankara.
- Öney, Ö. ve Bilgin, E.,** (2016). Zonguldak İnce Taşkömürlerinin Optimal Flotasyon Parametrelerinin Verimlilik İndeksi ile Belirlenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 759-769.
- Özer, A., ve Öksüz, K.** (2019). The effect of yttrium oxide in hydroxyapatite/aluminum oxide hybrid biocomposite materials: Phase, mechanical and morphological evaluation. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 50(11), 1382–1390. <https://doi.org/10.1002/mawe.201800141>
- Özmk, M. ve Aktaş, Z.,** (2006). Coal Froth Flotation: Effects of Reagent Adsorption on the Froth Structure, *Energ & Fuels*, 20, 1123-1130.
- Özpeker, I.,** (1991). Kömür Oluşumu Petrografisi ve Sınıflandırılması, **Kural, O.,** (Ed.), *Kurtiş Matbaası*, İzmir, 8-74 s.
- Pawlak W, Turak A, Janiak J, Briker Y, Ignasiak B,** (1986). Oil agglomeration of low-rank coals and development of methods for recovery of oil from agglomerates, 11th Annual EPRI Contractor's Conference on Clean Liquid and Solid Fuels, California, vol. 20.1-20.
- Pawlik M, Laskowski JS,** (2003). Coal reverse flotation. Part II. Batch flotation tests. *Coal Preparation*, 23(3), 113-127.

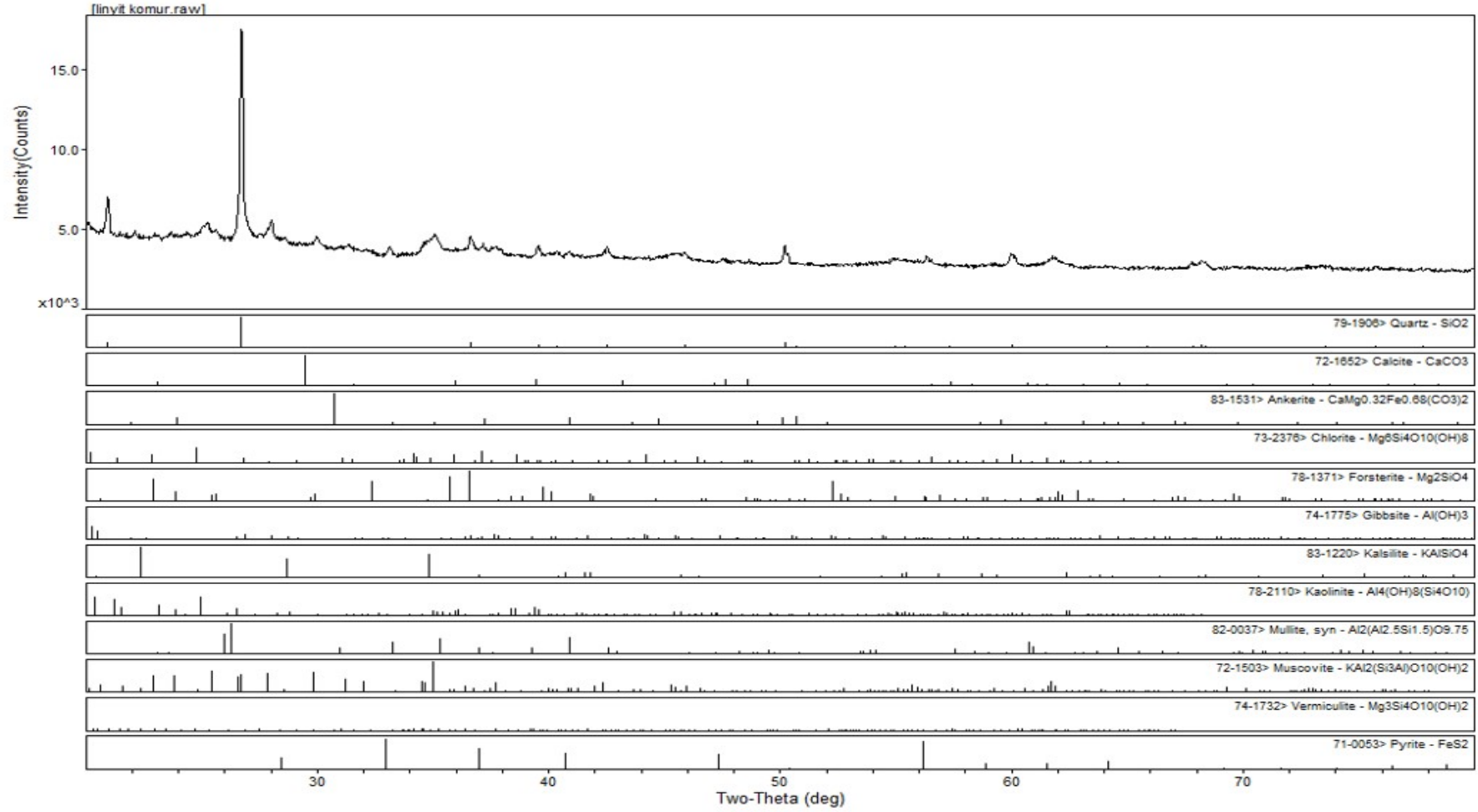
- Quast, K.** (2016). Literature review on the interaction of oleate with non-sulphide minerals using zeta potential. *Mining Engineering*, 94, 10-20.
- Rao, K.H. and Forssberg, K.S.E.** (2007). MILLER, J. D., et al. Flotation chemistry and technology of nonsulfide minerals. *Froth Flotation: A Century of Innovation; Fuerstenau, MC, Jameson, G., Yoon, RH, Eds*, 465-553.
- Ren, H., Liao, Y., Yang, Z., An, M., Hao, X., Song, X., and Liu, Z.** (2021). Effect of Fe²⁺ on low rank coal flotation using oleic acid as collector. *Powder Technology*, 393, 250-256.
- Rosa, A.F., Rubio, J.,** (2018). On the role of nanobubbles in particle-bubble adhesion for the flotation of quartz and apatitic minerals. *Minerals Engineering*, 127, 178–184.
- Saleh, A., M., Ramadan, A. M., Moharam, M. R.,** (2000). Study on effect of collector type and collector mixing in coal flotation, XXI. Int. Mineral Processing Congress, Rome, Italy. 177-184.
- Sönmez, H.,** (2007). Tunçbilek Lavvarı Tikiner Altı İri Atık Kömürlerin Modifiye Flotasyon Kolonu ile Zenginleştirilmesi. *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Yüksek Lisans Tezi), 45s. Kütahya.
- Sönmez, I. ve Cebeci, Y.,** (2006). Performance of classic oils and lubricating oils in froth flotation of Ukraine coal, *Fuel*, 85 (12-13), 1866-1870.
- Sönmez, G.,** (2006). Zonguldak Kömüründen Düşük Küllü Kömür Üretilebilirliğinin İncelenmesi. *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı*, (Yüksek Lisans Tezi), 107s. Sivas.
- Şimşek, S.,** (2007). Farklı Kömürlerin Flotasyon ile Zenginleştirilmesinde Klasik Flotasyon Yağları ile Bitkisel Kökenli Yağların Performanslarının Karşılaştırılması, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı*, Sivas.
- Terry, R. L.** (1974). “Minerals Concentration by Wet Tabling”, *Mineral Processing*, 15, p. 14. Toz Kömür Yakma Sistemindeki Rolü, Türkiye 13. Kömür Bildirileri.
- TKİ.** (2018). Türkiye Kömür İşletmeleri 2017 Yılı Faaliyet Raporu, Ankara.
- TTK** (2018) 2017 Yılı Taşkömürü Sektör Raporu, Zonguldak.

- Türe, A.** (2014). Sondaj verilerine göre Koyunağılı kömür havzası R sektörünün açık ocak planlaması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi*. (Yüksek Lisans Tezi), 55s Afyon.
- Türkkan, S. Y.** (2006). Tunçbilek Tikiner Altı Atık Kömürlerinin Kolon Flotasyonu Yöntemi ile Kazanılması. *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Yüksek Lisans Tezi), 59s. Kütahya.
- Ural, S., Yıldırım, M., ve Anıl, M.** (2002). Kömürün Mineral Madde İçeriğinin Toz Kömür Yakma Sistemindeki Rolü.
- Vamvuka, D. and Agridiotis, V.** (2001). “The Effect of Chemical Reagents on Lignite Flotation”, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 61, Number 3, pp. 209-224.
- Wang, H., Zhu, H., Zhu, J., Shao, S., Huang, D., Liu, J., Li, T.,** (2019). Effect of energy consumption on dispersion and recovery of coal slimes in a mechanical flotation cell. *Energy Sources Part a- Recovery Utilization and Environment Effects*, 42, 1882-1890.
- Weiss, N.L. ed.** (1985). “SME Mineral Processing Handbook”, *Section 13 and 24, Society of Mining Engineers of AIMM*, New York.
- Wills, B. A.,** (1988). “Mineral Processing Technology”, *4th Edt., Pergamon Press*, U.K.
- Wills, B., Napier-Munn, T.** (2006). *Wills’ Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, s. 278.
- Wills, B.A., Finch, J.,** (2016). *Wills' mineral processing technology*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Wright, A.** (1984). Magnetite Recovery Systems for Heavy-Media Cleaning Circuits, *Coal Age*, July, 89, 58-61.
- Xicheng, B., Yaowen, X., Qinshan L., Jincheng L., Şiki D., Xiahui G., ... & Zili Yang.** (2022). Fuel. Investigation on mechanism of the oleic acid/methyl oleate/diesel ternary compound collector in low-rank coal flotation., *Volume 320*, 123894.
- Yaman, S., Çelik, M.S. ve Küçükbayrak, S.** (1991). Kömür, **Orhan Kural, (Ed.),** *Özgün Ofset Matbaacılık A.ğ.*, 337-351.

- Yeşilyurt, Z.** (2014). Farklı yapıdaki non-iyonik sürfaktanların bitümlü kömür şlamı üzerinde flotasyon ve gang taşıma davranışları ile filtrasyon performanslarının incelenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi* (Yüksek Lisans Tezi), 83s. İstanbul.
- Yıldırım İ., Ateşok G., ve Çelik M.** (1995). Laboratuvar - Pilot Tip Multi Gravite Cihazı İle Kömür-Su Karışımları İçin Süper Düşük Küllü Kömür Üretimi, *Türkiye 14. Madencilik Kongresi*, ISBN 975-395-150-7, 443 – 448.
- Yıldız, N.** (2010). Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme, *Ertem Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.*, Ankara, 305-310.
- Yıldız, N.,** (1999). Öğütme teorisi, uygulaması değirmenler ve sınıflandırıcılar, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları*, Ankara, 4.31-7.96.
- Yıldız, N.** (2007). Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme, *Ertem basım yayın dağıtım sanayi ve tic ltd. şti.* 683 s, Ankara.
- Yılmazel, H. ve Vapur, H.** (2012). Çatalağzı Termik Santralinde (Çates) Kullanılan Lavvar Artıklarındaki Kömürün Kazanımında Optimum Flotasyon Koşullarının Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 55(4), 3-13.
- Yinfei, L., Xiaodong H., Maoyan A., Zhe Y., Longfei M. and Hourui R.** (2020). Enhancing low-rank coal flotation using mixed collector of dodecane and oleic acid: Effect of droplet dispersion and its interaction with coal particle. *Fuel*, 280, 118634.
- Zhang, W., Nasset, J.E., Rao, R., Finch, J. A.** (2012). Characterizing Frothers Through Critical Coalescence Concentration (CCC)95-Hydrophile-Lipophile Balance (HLB) Relationship, *Minerals*, 2, 208-227; ISSN 2075-163X.

EKLER

EK-1 Linyit Örneğinin XRD Analizi



EK-2 Tez Çalışması Fotoğrafları













