

**YARI BİTÜMLÜ KÖMÜRLERİN  
FLOTASYON YOLU İLE  
TEMİZLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**MEHMET ERGİM İMAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**2006**

**The Cleaning of Semi Bituminous  
Coals Research by  
Flotation Techniques**

**Mehmet Ergim İMAN**

**Thesis of Graduate**

**Branch science of Mining Engineer**

**2006**

Mehmet Ergim İMAN'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Yarı Bitümlü Kömürlerin Flotasyon Yöntemiyle Temizlenebilirliğinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye : Prof. Dr. Sabiha KOCA

Üye : Doç. Dr. Ayşegül AŞKIN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Derya ÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun.....tarih ve..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

### TEŞEKKÜR:

*Bu tezin yazımında hem laboratuvar çalışmaları sırasında hem de tezin yazımında bana maddi manevi her türlü konuda yardımcı olan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Derya ÖZ'e ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Prof. Dr. Sabiha KOCA'ya;*

*Hayatım boyunca bana her türlü konuda maddi ve manevi olarak karşılıksız destek olan aileme,*

*Laboratuvar çalışmaları sırasında her türlü konuda bana fikir veren ve laboratuvar aletlerini kullanmamı sağlayan Lab. Göv. Maden Mühendisi Haydar ŞAHAN'a;*

*Hem yoğun süren laboratuvar çalışmaları süresince hem de yazım aşamasında çok kritik zamanlarda bana izin vererek tezin tamamlanmasını kolaylaştıran saygıdeğer hocam Anadolu Üniversitesi Bilecik MYO Müdürü Yrd. Doç. Dr. Zakir POYRAZ'a;*

*Mesai saatleri içerisinde tez çalışmaları ve yazımı sırasında Eskişehir'de olmamdan dolayı, Bilecik MYO'da benim yerime işlerimi yapan ve bu tezin yazımında her türlü desteği bana veren Döküm Programı Öğretim Elemanlarına, oda arkadaşım Öğr. Göv. Pınar UYAN'a ve Tek. Ersoy GÜRSOY'a;*

*Bazı analizleri yapmak için bize laboratuvarlarının kapılarını açan ve çalışmalarımıza yardımlarını esirgemeyen çok değerli Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarına;*

*Ve bu tezin tamamlanmasında az-çok katkı sağlayan, buraya tek tek isimlerini yazamayacağım, diğer Osmangazi, Anadolu ve Dumlupınar Üniversiteleri'nde görev yapan tüm hocalarıma ve eş, dost akrabalarıma,*

**TEŞEKKÜRÜ BİR BORÇ BİLİRİM...**

**Mehmet Ergim İMAN**

## **ÖZET:**

Artvin Yusufeli Müzret Bölgesi'nin bitümlü ve yüksek kükürt içerikli kömürlerinin flotasyon yöntemi ile temizlenebilirliği çalışılmıştır.

Çalışmalarda önce yüzdürme-batırma deneyleri ve ürünlerin binoküler mikroskopla incelenmeleri tamamlanmıştır.

Binoküler mikroskop incelemelerinde iri boyutlu pirit tanelerinin yanında hem silikat hem de karbonatlı ganga rastlanmıştır.

Daha sonra yapılan mikroflotasyon ve mekanik flotasyon çalışmalarında kömürün kükürt içeriği 1,5'un altına indirilememiş ve kömürün flotasyon ile temizlenmeye uygun olmadığına karar verilmiştir.

## **SUMMURY:**

In this work, the cleanin of high sulphur content Arvin Yusufeli Müzret region lignites was studied buy flotation techniques.

Firstly, float and sink anaysis of the sample were compleated. Secondly, microscobic studies were carried out. Microscopic studies revealed that coarsa pyrite particles as well as silicious and carbonates gaunge were present in the sample.

Finally the microflotation and the mechanical flotation experiments were carried out. Unfortunataly, the sulphur content was unable to be lonered less than 1,5%, and it was found that this coal sample was not suitable for cleaning by flotation techniques.

## İÇİNDEKİLER

|                                            | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------|--------------|
| TEŞEKKÜR.....                              | III          |
| ÖZET.....                                  | IV           |
| SUMMARY.....                               | V            |
| İÇİNDEKİLER .....                          | VI           |
| TABLolar DİZİNİ .....                      | X            |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                      | XII          |
| 1. GİRİŞ .....                             | 1            |
| 2. KÖMÜR HAKKINDA GENEL BİLGİLER .....     | 3            |
| 2.1. Tanımı .....                          | 3            |
| 2.2. Kömürlerin oluşumları .....           | 3            |
| 2.3. Kömürlerin kullanım alanları .....    | 4            |
| 2.4. Kömürlerin sınıflandırılması.....     | 5            |
| 2.5. Kömür Minerolojisi .....              | 9            |
| 2.5.1. Mineraller .....                    | 10           |
| 2.5.2. Kömürün içerdiği safsızlıklar ..... | 12           |
| 2.5.2.1. <u>Nem</u> .....                  | 12           |
| 2.5.2.2. <u>Kül</u> .....                  | 12           |
| 2.5.2.3. <u>Kükürt</u> .....               | 12           |
| 2.6. Kömürlerin Petrografisi .....         | 16           |

## **İÇİNDEKİLER(2)**

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6.1. Kömürlerin makroskobik bileşenleri(Litotipler)..... | 16        |
| 2.6.2. Kömürlerin mikroskobik bileşenleri(Maseraller)..... | 17        |
| 2.7. Antrasitlerin özellikleri.....                        | 19        |
| <b>3. ARTVİN YUSUFELİ MÜZRET BÖLGESİ</b>                   |           |
| <b>GENEL JEOLJİK ÖZELLİKLERİ .....</b>                     | <b>20</b> |
| 3.1.Yusufeli(Müzret) Bölgesinin özellikleri .....          | 21        |
| 3.1.1. Petrografik özellikleri .....                       | 21        |
| 3.1.2. Fiziksel ve teknolojik özellikleri .....            | 22        |
| 3.2.Yusufeli(Müzret) Kömürlerinin Değerlendirilmesi.....   | 23        |
| <b>4. KÖMÜR HAZIRLAMA .....</b>                            | <b>25</b> |
| 4.1.Fiziksel ve Fizikokimyasal Yöntemler .....             | 26        |
| 4.1.1. Yoğunluk farkına göre .....                         | 28        |
| 4.1.2. Yüzey özellik farklılıklarına göre .....            | 30        |
| 4.1.3. Elektrostatik ve manyetik özelliklerine göre .....  | 32        |
| 4.2. Kimyasal Yöntemler .....                              | 33        |
| 4.3. Biyolojik Yöntemler .....                             | 33        |
| <b>5. KÖMÜR FLOTASYONU .....</b>                           | <b>34</b> |
| 5.1. Giriş .....                                           | 34        |
| 5.2. Kömür Flotasyonu .....                                | 35        |
| 5.2.1. Kömür yapısının flotasyona etkisi .....             | 36        |

## **İÇİNDEKİLER(3)**

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.2. Oksidasyonun etkisi .....                                | 37 |
| 5.2.3. Tane boyutunun flotasyona etkisi .....                   | 38 |
| 5.2.4. Katı oranının flotasyona etkisi .....                    | 38 |
| 5.2.5. pH'ın flotasyona etkisi .....                            | 38 |
| 5.2.6. Reaktif miktarlarının flotasyona etkisi .....            | 39 |
| 5.3. Flotasyon reaktifleri .....                                | 39 |
| 5.4. Kömür flotasyonunda son yıllarda yapılmış çalışmalar ..... | 40 |
| 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....                                     | 42 |
| 6.1. Numune.....                                                | 42 |
| 6.2. Yöntem.....                                                | 43 |
| 6.2.1. Minerolojik incelemeler .....                            | 43 |
| 6.2.2. Mikro flotasyon çalışmaları.....                         | 43 |
| 6.2.3. Mekanik flotasyon çalışmaları.....                       | 45 |
| 6.3. Deney sonuçları.....                                       | 47 |
| 6.3.1. Yüzdürme-Batırma ve mikroskop çalışmaları.....           | 47 |
| 6.3.2. Mikroflotasyon çalışmaları.....                          | 49 |
| 6.3.2.1. <u>Düz mikro flotasyon çalışmaları</u> .....           | 49 |
| 6.3.2.1. <u>Ters mikro flotasyon çalışmaları</u> .....          | 51 |
| 6.3.3. Mekanik Flotasyon Çalışmaları.....                       | 52 |

## **İÇİNDEKİLER(4)**

|                                                                 |      |
|-----------------------------------------------------------------|------|
| 6.3.3.1. <b><u>Düz mekanik flotasyon çalışmaları</u></b> .....  | 52   |
| 6.3.3.2. <b><u>Ters mekanik flotasyon çalışmaları</u></b> ..... | 53   |
| <b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....                               | 57   |
| <b>KAYNAKLAR DİZİNİ</b> .....                                   | XIII |

## **TABLÖLAR DİZİNİ:**

|                                                                                                                            | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Tablo 2.1. Uluslararası Genel Kömür Sınıflaması.....                                                                       | 7                   |
| Tablo 2.2. Çeşitli Ranklarda (Kömürleşme Derecelerinde) Kömür Özellikleri.....                                             | 7                   |
| Tablo 2.3. Genel Sınıflandırmada Yer Alan Kömürlerin Tanıtıcı Özellikleri.....                                             | 8                   |
| Tablo 2.4. Amerikan Standartı Kömür Sınıflaması (ASTM).....                                                                | 9                   |
| Tablo 2.5. Bitümlü Kömürlerin Litotipleri ve özellikleri.....                                                              | 18                  |
| Tablo 2.6. Kömürlerin mikroskopik bileşenleri.....                                                                         | 18                  |
| Tablo 3.1. Artvin Yusufeli Müzret kömürlerinin petrografik bileşenleri (hacimce %)...                                      | 21                  |
| Tablo 3.2. Artvin Yusufeli Müzret Kömür örneklerinin havada-kuru ve kuru-külsüz analiz değerleri ve sınıflandırılması..... | 22                  |
| Tablo 6.1. -150 mikron malzemenin boyut dağılımı.....                                                                      | 42                  |
| Tablo 6.2. Düz mikro flotasyon deney parametreleri.....                                                                    | 50                  |
| Tablo 6.3. Düz mikro flotasyon deney parametreleri ve ürün miktarları.....                                                 | 50                  |
| Tablo 6.4. Ters mikro flotasyon deney parametreleri.....                                                                   | 51                  |
| Tablo 6.5. Ters mikro flotasyon deney parametreleri ve ürün miktarları.....                                                | 51                  |

## **TABLolar DİZİNİ(2):**

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 6.6. Düz mekanik flotasyon deney parametreleri.....  | 52 |
| Tablo 6.7. Farklı toplayıcılarda kükürt dağılımı.....      | 53 |
| Tablo 6.8. Ters mekanik flotasyon deney parametreleri..... | 53 |
| Tablo 6.9. Farklı toplayıcılarla kükürt dağılımı.....      | 54 |
| Tablo 6.10. . Farklı boyutlarda kükürt dağılımı .....      | 55 |
| Tablo 6.11. . Farklı pH’larda kükürt dağılımı .....        | 55 |

## **SEKİLLER DİZİNİ:**

### **Sayfa**

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Dünyada kömür kullanım alanları.....                                                      | 4  |
| Şekil 2.2. Kömürün niteliğine göre kullanım alanı.....                                               | 5  |
| Şekil 6.1. Mikroflotasyon deney düzeneği .....                                                       | 44 |
| Şekil 6.2. -8+14 mesh batan ( $\rho: 2 \text{ g/cm}^3$ ) ürünün binoküler mikroskop görüntüsü....    | 47 |
| Şekil 6.3. -8+14 mesh yüzen ( $\rho: 2 \text{ g/cm}^3$ ) ürünün binoküler mikroskop görüntüsü....    | 48 |
| Şekil 6.4. -18+35 mesh batan ( $\rho: 2 \text{ g/cm}^3$ ) ürünün binoküler mikroskop görüntüsü....   | 48 |
| Şekil 6.5. -18+35 mesh batan ( $\rho: 1,64 \text{ g/cm}^3$ ) ürünün binoküler mikroskop görüntüsü..  | 49 |
| Şekil 6.6. -18+35 mesh yüzen ( $\rho: 1,64 \text{ g/cm}^3$ ) ürünün binoküler mikroskop görüntüsü... | 49 |

## 1. GİRİŞ

Ülkemizde kömürler işlem gördükleri zenginleştirme yöntemlerine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadırlar.

- a. Tüvenan Kömür: Hiç bir zenginleştirme işlemine tabi tutulmaksızın, ocaktan üretildiği şekilde piyasaya arz edilen kömürdür.
- b. Krible Kömür: Eleme işleminden geçirilerek boyutlandırılmış kömürdür.
- c. Lave Kömür: Elenmiş ve yıkama işlemine tabi tutulmuş kömürdür.

Son yıllarda, çevre kirliliğine yol açmaları nedeni ile kullanılacak kömür özelliklerinde belli standartlar istenmeye başlanmıştır. Bu doğrultuda Çevre Bakanlığı'nın getirdiği düzenlemeler ile CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HC, Asılı Partikül Madde, O<sub>3</sub> ve kurşun emisyonlarında standartlar belirlenmiştir. Ülkemizde uygulanmakta olan ve yukarıda belirtilmiş satış öncesi işlemler bu standartların sağlanması için yeterli olmamaktadır. Dolayısıyla ülkemiz kömür rezervlerinin önemli bir bölümünün kullanımına kısıtlamalar getirilmiştir.

Sonuç olarak petrol ve petrol ürünleri açısından tamamen dışa bağımlı olan ülkemiz kömür tüketiminde de dışa bağımlı bir hale gelmektedir. Kömürlerin katı yakıt olarak kullanımının vazgeçilmez olduğu ülkemizde, yerli linyit tüketiminin yasaklanarak, doğal gaz ve ithal linyit kullanımının uzun vadede bir çözüm olamayacağı açıktır. Böyle bir çözüm arayışı, ekonomik sıkıntı içerisindeki ülkemize getireceği yükün yanında, kendi yer altı kaynaklarımızın değerlendirilememesi, üretim sahalarının küçülerek istihdam kaybına neden olması gibi olumsuzlukları da beraberinde getirecektir.

Konu mali açıdan düşünüldüğünde ise, Tavşanlı Belediyesi'nin (GLİ kömürü) 2005 yılı itibarı ile kömür satış fiyatları toz için 80 YTL/ton ve parça kömür için ise 144 YTL/ton'dur. Yüksek ısı değerli, düşük kül ve kükürt içerikli ithal kömürün satış fiyatı ise parça kömür için 290 YTL/ton, briket kömür için ise yaklaşık 250 YTL/ton'dur. Bu fiyat verileri kömür hazırlama için harcanacak paranın geri kazanılıp uzun vadede kara geçilebileceğinin göstergesidir.

Energy Statistics of NON-OECD Countries (1999) verilerine göre 1997 yılı itibarı ile katı organik yakıtların (taşkömürü, linyit vd.) birincil enerji üretimindeki payı %38 civarlarındadır. Diğer kısmı ise petrol, doğalgaz ve elektrikten karşılanmaktadır. Bugünkü

tüketim seviyeleri ile, dünya petrol rezervlerinin 40 yıl, doğalgaz rezervlerinin 60 yıl ve kömür rezervlerinin ise 200 yılda tükeneceği tahmin edilmektedir (hali hazırda, günümüz teknolojileri ile ekonomik üretimi mümkün olan). Bu veriler de kömürün daha uzun yıllar enerji kaynağı olarak önemini koruyacağını ispatlamaktadır. Çevresel baskının artışı ile ileride *TEMİZ KÖMÜR* kullanımının istisnasız bir zorunluluk olacağı da bir gerçektir. Bu sorun, uzun zamandır dünya gündeminde ve giderek önemi artan bir konu olma özelliğini korumaktadır.

Dolayısıyla ülkemizde de daha etkin yöntemlerle kendi yer altı kaynaklarımız olan kömürlerimizin bir an önce çevresel kısıtlamalara uygun oranda temizlenip tekrar yaygın kullanımının sağlanmasının gerekliliği açıktır.

## 2. KÖMÜR HAKKINDA GENEL BİLGİLER:

### 2.1. Tanım

Kömür yanabilen sedimanter organik bir kayadır. Kömür başlıca karbon, hidrojen ve oksijen gibi elementlerin bileşiminden oluşmuş olup, diğer kaya tabakalarının arasında damar haline uzunca bir süre (milyonlarca yıl) ısı, basınç ve mikrobiyolojik etkilerin sonucunda meydana gelmiştir.

### 2.2. Kömürlerin oluşumu

Kömürleri meydana getiren bataklıkların olduğu ortamlar,

- Deltalar (en kalın kömür damarlarının olduğu ortamlardır),
- Göller (göl kıyıları, kalın kömür damarlarının meydana geldiği uygun bataklık ortamlarıdır),
- Lagünler (deniz etkisinin olduğu ince kömür damarcıklarını meydana getirirler),
- Akarsu taşma ovaları (ince kömür damarcıklarını oluştururlar) (Şahin, 2004)

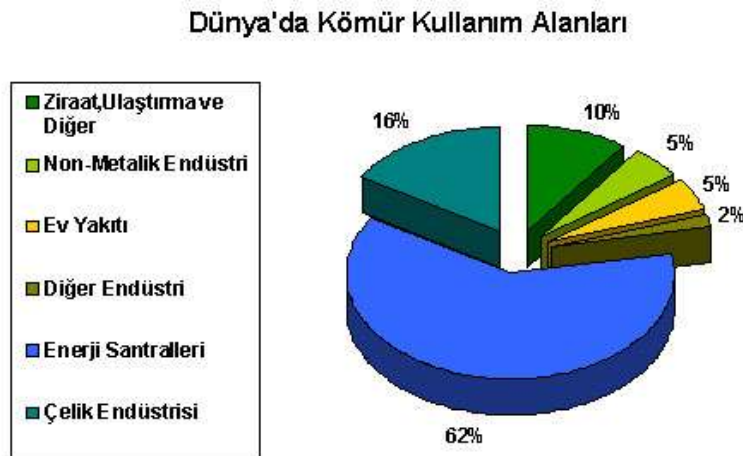
Çoğunlukla bitkisel maddeler ya da bitki parçaları uygun bataklık ortamlarda birikip, çöker ve jeolojik işlevlerle birlikte yer altına gömülürler. Yerin altında, bu organik kütleler, gömüldükten sonra, önceleri gömülmenin oluşturduğu basınç şartları, daha sonrada ortamın ısısal şartlarından etkilenirler. Bu etkilenme sonucu bu organik maddenin bünyesinde fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelir. Önceleri turba olarak adlandırılan ve kömürlerin ataları olarak bilinen bu organik maddeler zamanla daha koyu renklere ve daha sert yapıya sahip olurlar. Sıcaklık ve basınç şartlarının bu kütlelere etkimesi sonucu, bu ortamdan, sırasıyla önceleri (turbadan-taşkömürü aşamasına kadar) su ve su buharı, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ve en ileri aşamada H<sub>2</sub> (antrasit aşamasında) uzaklaşır. Tabii ki bu süreçte ideal şartlar ve ortamın ısısal şartlarının uzun bir dönem içerisinde (binlerce yıl) baskın olması ve artması gerekmektedir. Yer ısısı her 30 metrede 1<sup>0</sup>C artmaktadır. Şüphesiz sıcaklık artışı ideal ve normal şartlar için geçerlidir. Bu şartların dışında (volkanik faaliyet, fay hareketleri, radyoaktif elementlerin bulunduğu ortamlarda) yerin ısısı olağan üstü bir şekilde ve normalden çok fazla artmaktadır. Yerin ısısı arttıkça önceleri "turba" olarak adlandırılan ama kömür sayılmayan bu organik madde, önce "linyit" daha sonra "alt bitümlü kömür",

sonra "taşkömürü", "antrasit" ve en sonunda şartlar uygun olursa "grafit" e dönüşür. Bu ilerleyen olgunlaşma sürecine "Kömürleşme (Coalification)" denmekte, her seviyeye de "kömürleşme derecesi (Rank)" denmektedir(TKİ, 2003).

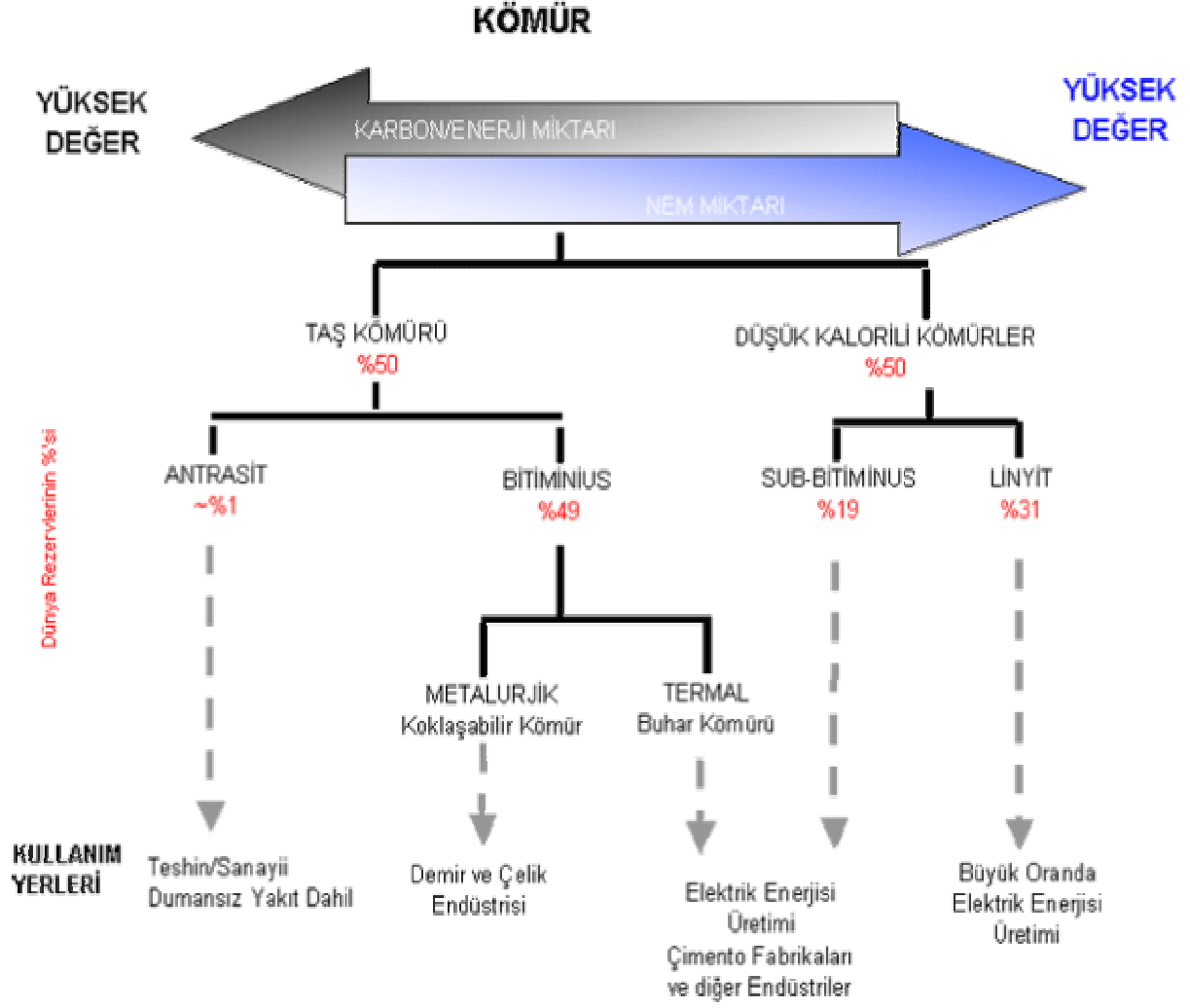
Linyit ve kısmen altbitümlü kömürler genellikle yumuşak, kırılgan ve mat görünüştedirler. Bu tip kömürlerin ana özelliği göreceli olarak yüksek nem içerirler ve karbon içerikleri düşüktür. Antrasit ve bitümlü kömürler ise genellikle sert ve parlak görünüştedirler. Göreceli olarak nem içerikleri düşük olup, karbon oranları yüksektir. Jeolojik olarak kömürlerin yaşları 400 milyon yıl ile 15 milyon yıl arasında değişir. Genellikle yaşlı kömürler daha kalitelidir.

### 2.3. Kömürün Kullanım Alanları

Kömür, termik santrallerde elektrik enerjisi üretiminde, konutlarda, sanayide, ulaşırmada, ısınma amaçlarıyla kullanılır. Kömür elektrik üretiminde, demir-çelik ve çimento imalatında, endüstriyel proseslerde buhar üretmek ve ısınma amacı ile kullanılır. Dünya'da elektrik üretiminin yaklaşık olarak %40'ı kömürden sağlanmaktadır. Birçok ülkede elektrik üretiminin önemli bir bölümü kömürden elde edilmektedir. Bu oran ABD'de ve Almanya'da %53, Yunanistan'da %69, Çin'de %75, Danimarka'da %77, Avustralya'da %83, Güney Afrika'da %93, Polonya'da %95'dir. Türkiye'de elektrik enerjisinin %32'si kömürden elde edilmektedir (Şahin, 2004). Güç Santralleri ve Çelik Endüstrisi taş kömürü sektöründe baskın konumdadır. Kömürün kullanım alanları Şekil 2.1'de, niteliğine göre kullanım alanları da Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Dünyada kömür kullanım alanları (www.maden.org.tr, 2003)



Şekil 2.2. Kömürün niteliğine göre kullanım alanı (TKİ, 2003)

#### 2.4. Kömürlerin Sınıflandırılması:

Kömürler bir çok değişik sınıflamalara tabi tutulurlar. Bunlardan birisi Nakoman tarafından yapılan sınıflamadır. Nakoman'a göre kömürler kimyasal, biyolojik-petrografik ve genetik olarak sınıflandırılırlar (Bilir, 1993).

Kimyasal sınıflama :

- 1- Turba
- 2- Linyit
- 3- Taşkömürü
- 4- Antrasit

Biyolojik ve petrografik sınıflama :

- 1- Kütin kömürleri
- 2- Linyo-selülozik kömürler
- 3- Karışık kömürler
- 4- Alg kömürleri

Jenetik sınıflama :

- 1- Turbalar
- 2- Linyitler
- 3- Taşkömürleri

Nakoman'ın yaptığı sınıflandırmanın yanında değişik tipte kömürlerin kullanım amaçlarına göre uluslararası sınıflandırılmasında; 1957 yılında çeşitli ülkelerden üyelerin oluşturduğu Uluslararası Kömür Kurulu'nca birçok ülkeden temin edilen numuneler üzerinde yapılan çalışmalar, Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) tarafından da desteklenerek genel bir sınıflama yapılmıştır. Bu sınıflamada; kalorifik değer, uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, koklaşma ve kekleşme özellikleri temel alınarak sert ve kahverengi kömürler olarak iki ayrı sınıfa ayrılmıştır:

a) Sert kömürler; ıslak ve külsüz bazda 5,700 Kcal/Kg'ın üzerinde kalorifik değerdedir. Uçucu madde içeriği, kalorifik değer ve koklaşma özelliklerine göre alt sınıflara ayrılırlar.

b) Kahverengi kömürler; ıslak ve külsüz bazda 5.700 Kcal/Kg'ın altında kalorifik değerdedir. Toplam nem içeriği ve kalorifik değere göre alt sınıflara ayrılırlar.

Uluslararası genel kömür sınıflaması Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Uluslararası kömür sınıflamasında kabul edilen diğer bir sınıflama işlemi ise Kömür rank sınıflamasıdır (kömürleşme derecesi sınıflaması). Bu sınıflandırmada karbon içeriği temel değişkendir. Yüksek ranklı (kömürleşme derecesi yüksek) kömürlerde uçucu madde içeriği, düşük ranklı (kömürleşme derecesi düşük) kömürlerde ise kalorifik değer baz alınarak sınıflandırılmıştır. Tablo 2.2.'de kömür rank sınıflaması ve özellikleri, Tablo 2.3.'de genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.1. Uluslararası genel kömür sınıflaması

| <b>A. SERT KÖMÜRLER</b>                                                                                         | <b>B. KAHVERENGİ KÖMÜRLER</b>                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. KOKLAŞABİLİR KÖMÜRLER</b><br>(Yüksek fırınlarda kullanıma uygun kok kömürü üretimine izin veren kömürler) | <b>1. ALT BİTÜMLÜ KÖMÜRLER</b><br>(4.165-5.700 KCal/Kg arasında kalorifik değerde olup topaklaşma özelliği göstermezler) |
| <b>2. KOKLAŞMAYAN KÖMÜRLER</b><br>a) Bitümlü Kömürler<br>b) Antrasitler                                         | <b>2. LİNYİT</b><br>(4.165 KCal/Kg'ın altında kalorifik değerde olup topaklaşma özelliği göstermezmezler)                |

(8.BYKP, Kömür Çalışma Grubu Raporu, 2001)

Tablo 2.2. Çeşitli ranklarda (kömürleşme derecelerinde) kömür özellikleri

| <b>RANK</b><br><b>(Kömürleşme</b><br><b>Derecesi)</b> | <b>UÇUCU</b><br><b>MADDE</b><br><b>İÇERİĞİ</b><br><b>% Ağırlık</b><br><b>Islak-Külsüz</b> | <b>KARBON</b><br><b>İÇERİĞİ</b><br><b>% Ağırlık</b><br><b>Islak-Külsüz</b> | <b>KALORİFİK</b><br><b>DEĞER</b><br><b>Btu/Lb</b><br><b>Mineral</b><br><b>Maddesiz</b> | <b>NEM</b><br><b>İÇERİĞİ</b><br><b>% Ağırlık</b> |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1. LİNYİT                                             | 69-44                                                                                     | 76-62                                                                      | 8.300-6.300                                                                            | 52-30                                            |
| 2. ALT BİTÜMLÜ                                        | 52-40                                                                                     | 80-71                                                                      | 11.500-8.300                                                                           | 30-12                                            |
| 3. BİTÜMLÜ                                            |                                                                                           |                                                                            |                                                                                        |                                                  |
| a) Yüksek Uçuculu-B                                   | 50-29                                                                                     | 86-76                                                                      | 13.000-10.500                                                                          | 15-2                                             |
| b) Yüksek Uçuculu-C                                   |                                                                                           |                                                                            |                                                                                        |                                                  |
| c) Yüksek Uçuculu-A                                   | 49-31                                                                                     | 88-78                                                                      | 14.000                                                                                 | 5-1                                              |
| d) Orta Uçuculu                                       | 31-22                                                                                     | 91-86                                                                      | 14.000                                                                                 | 5-1                                              |
| e) Düşük Uçuculu                                      | 22-14                                                                                     | 91-86                                                                      | 14.000                                                                                 | 5-1                                              |
| 4. ANTRASİT                                           | 14-2                                                                                      | 99-91                                                                      | 14.000                                                                                 | 5-1                                              |

(8.BYKP, Kömür Çalışma Grubu Raporu, 2001)

Tablo 2.3. Genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri

| <b>LİNYİT</b>                             | <b>ALT BİTÜMLÜ KÖMÜRLER</b>                                               | <b>BİTÜMLÜ KÖMÜRLER</b>                  | <b>ANTRASİT</b>                          |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| Kahverengi                                | Siyah                                                                     | Koyu siyah                               | Parlak siyah                             |
| Kırılğan, çabuk toz halinde ufalana       | Oksidasyon veya kurutma sonucunda ince parçalar veya toz halinde ufalanma | Bloksu kırılma                           | Merceksi kırılma                         |
| Masif, odunsu veya üniform kilsli doku    | Masif                                                                     | Bantlı ve kompakt                        | Sert ve Dayanıklı                        |
| Isı değeri 4.610 KCal/Kg'nin altında      | Isı değeri; 4.610-6.390 KCal/Kg'nin arasında                              | Isı değeri; 5.390-7.700 KCal/Kg arasında | Isı değeri; 7000 KCal/Kg'nin üstünde     |
| Uçucu madde miktarı ve nem içeriği yüksek | Uçucu madde miktarı ve nem içeriği bitümlü kömürlerden daha yüksek        | Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük | Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük |
| Düşük sabit karbon içeriği                | Sabit karbon içeriği bitümlü kömürden daha düşük                          | Sabit karbon içeriği yüksek              | Sabit karbon içeriği yüksek              |

(8.BYKP, Kömür Çalışma Grubu Raporu, 2001)

Bugüne kadar kömürler hakkında yukarıdaki gibi pek çok sınıflama yapılmıştır. En yaygınca kullanılan sınıflama ise, aşağıdaki çizelgede bulunan A.S.T.M (1981) ve uçucu madde, kalori değerini esas alan sınıflamadır. Bir inorganik maddeyi iyi tanımlayabilmek için bazen bu sınıflamalar yetmemekte ve organik petrografik incelemeleri de dikkate alınmaktadır. Tablo 2.4.'te Amerikan kömür sınıflamasını göstermektedir.

Tablo 2.4. Amerikan Standartı Kömür Sınıflaması (ASTM, 1981)

| SINIF                | ALT GRUP         | Sabit Karbon Sınırları(%)* |    | Uçucu Mineral Madde Sınırları(%)* |    | Isı Değeri (KCal/Kg) |       |
|----------------------|------------------|----------------------------|----|-----------------------------------|----|----------------------|-------|
|                      |                  | >=                         | <  | >                                 | <= | >=                   | <     |
| ANTRASİT             | 1.Meta-Antrasit  | 98                         |    |                                   | 2  | 7.780                |       |
|                      | 2. Antrasit      | 92                         | 98 | 2                                 |    | 7.780                |       |
|                      | 3. Semi-Antrasit | 86                         | 92 | 8                                 | 14 | 7.780                |       |
| BİTÜMLÜ KÖMÜRLER     | 1.Düşük uçuculu  | 78                         | 86 | 14                                | 22 | 7.780                |       |
|                      | 2. Orta uçuculu  | 69                         | 78 | 22                                | 31 | 7.780                |       |
|                      | 3. Y.uçuculu-A   |                            | 69 | 31                                |    | 7.780                |       |
|                      | 4. Y.uçuculu-B   |                            | 69 | 31                                |    | 7.220                | 7.780 |
|                      | 5. Y.uçuculu-C   |                            | 69 | 31                                |    | 5.835                | 7.220 |
| ALT BİTÜMLÜ KÖMÜRLER | 1 Alt Bitümlü-A  |                            | 69 | 31                                |    | 5.275                | 6.390 |
|                      | 2. Alt Bitümlü-B |                            | 69 | 31                                |    | 4.610                | 5.835 |
|                      | 3.Alt Bitümlü-C  |                            | 69 | 31                                |    | 3.500                | 5.275 |
| LİNYİT               | 1. Linyit-A      |                            | 69 | 31                                |    |                      | 4.610 |
|                      | 2. Linyit-B      |                            | 69 | 31                                |    |                      | 3.500 |

(\*) Kuru mineral maddesiz bazda

(8.BYKP,Kömür Çalışma Grubu Raporu,2001)

## 2.5. Kömür Mineralojisi

Kahverenginden siyaha kadar değişik renklerde görülen kömürler, koyu sarıdan siyaha kadar çizgi rengine sahiptirler. Karbon miktarına bağlı olarak toz rengi koyulaşır veya açılır.

Kömürün inorganik bileşenleri, mineraller ve iz elementlerdir. Kömürlerde gözlenen mineraller çokluk sıralarına, kökenlerine ve bulunuş oranlarına göre sınıflanırlar.

Kömürün mineral bileşenleri ve iz öğeleri 3 kaynaktan gelebilir:

- 1- İlksel öğeler ve mineraller
- 2- Birincil mineraller
- 3- İkincil mineraller

İlksel öğeler ve mineraller, kömürleşen bitkilerin yapısına giren minerallerdir. Bu öğeler kömürleşme evrelerinde biyokimyasal ve kimyasal tepkimelerin etkisiyle bileşiklere çevrilir ve göreceli olarak zenginleşirler.

İlksel ve birincil evre mineral ve öğelerden değişen koşullarda duraylı kalamayanlarla, yüzeysel veya hidrotermal kökenli akışkanlara bağlı öğeler, kömür katmanlarının kırıkları, çatlakları ve gözenekleri içinde yeni mineral bileşenleri oluşturabilirler. Bunlar ikincil mineralleşmelerdir. İkincil mineral bileşenler, birinci kökenlilerden kolayca ayırt edilebilirler.

### **2.5.1. Mineraller**

Kömür içerisinde gözlenen en önemli mineral grupları killeri, karbonatlar, sülfürler, sülfatlar, oksitler, silikatlar ve diğerleridir. Diğerlerinin toplamı %1'in altındadır.

Kil Mineralleri: En sık rastlanılan mineral grubudur. Genelde minerallerin %60-80'ini oluştururlar. Kömürle ara katmanlıdır ve katmanların kalınlığı 1-2 mm.'den birkaç cm'ye ulaşabilirler. %20'ye kadar kil içerenlere killi kömürler, %20-60 kil içerenlere karboarjilit adı verilir. Daha fazla kil içeriklilere kömürlü kil denilir.

Kömür içinde bulunan kil mineralleri illit, serisit, kaolenit, leverrierit ve montmorillonittir. Mikroskopta koyu gri olarak görülen bu kil minerallerinin kökenleri hakkında farklı görüşler vardır. En yaygın olanı, bu minerallerin hava veya su yoluyla taşınıp çöktikleri şeklindeki görüştür. Killerin içinde bulunan zirkon, sanidin ve plajiyoklas kristallerinden kömürlerin oluşum yaşları saptanabilir.

Karbonatlar: Birincil ve ikincil kökenli olabilirler. Birincil olanlarda en yaygın olanı dolomit ve siderittir. Siderit ışınal veya yuvarlak dokuludur. Dolomit ise deniz ilerleme süreçlerinde gelişir. Kalsit ve ankerit daha çok ikincil kömürleşme evresinde kırık ve çatlaklarda gelişir.

Sülfürler, sülfatlar ve oksitler: En yaygın olarak bilinen sülfür minerali pirittir. Oldukça küçük yuvarlaklar halinde gözlenir. Su altında oluşan kömürlerde oranı artar. Eş oluşumlu olduğu zaman kömür katmanlaşmasına uyumlu yaygılar yapar. Genelde melvikonitten türer, markasit ender bulunur ve ikincil olabilir. Diğer sülfürler olarak galenit, sfalerit ve kalkopirit bulunabilir.

Kömürlerde sülfatlar halinde kükürt az bulunmaktadır. Daha çok kömürün hava ile temas eden kısımlarında sülfat formunda ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ ) kükürde rastlanılmaktadır.

Limonit en sık gözlenen demir oksit mineralidir. Lepidokrosit ve götit kristallerine rastlanır.

Silikatlar ve diğer mineraller: Killerden sonra en önemli silikat kuvarstır. Kuvars taşınmış malzeme ise, kenarları yuvarlanmış olarak bulunur. Bataklık suyunda çözülmüş silisin çökelimi ile oluşmuşsa, kriptokristalin veya kalsedon şeklinde bulunur. Bitkisel kökenli de olabilir. Kuvarsça zengin ara katmanlı kömürlerde kuvars katmanları, kömür katmanlarının karşılaştırılmasında bir kriter olabilir.

Diğer mineraller arasında klorür, sülfat ve nitrat tuzları bulunur. Jips genelde en çok rastlanılanıdır. Çoğunlukla ikincil kökenlidirler. Çatlak ve kırık dolgusu olarak görülürler.

İz elementler: Kayaç ve kömürler içerisindeki miktar %0,1'den daha az olan elementler, iz elementler olarak bilinir. İz elementler organik veya inorganik yapıcılara bağlıdır.

Sn, Pb, Mn, Y, Sc, Zr, La daha çok inorganik; Ga, In, Sr ve B organik kökenlidirler.

Kömür içindeki iz elementlerin dağılım ve oranlarının bilinmesi iki açıdan önemlidir:

- 1- Ekonomik değerlendirilebilme
- 2- Kömür teknolojisi

U, Ga, Ge gibi iz elementler kömürlerde veya küllerinde ekonomik boyuta ulaşabilirler ve yan ürün olarak değerlendirebilirler. İz elementlerin varlığı kömür teknolojisinde sorunlar çıkartabilir. Örneğin, fosfor içeriği metalurjik kok üretiminde istenmeyen elementtir (Kural, 1991).

### **2.5.2. Kömürün içerdiği safsızlıklar**

Kömürün içerdiği ve gerek kullanım gerekse kömür yıkamada önem taşıyan safsızlıklar üç grupta toplanmaktadır: Nem, kül, kükürt.

#### **2.5.2.1. Nem**

Kömür, yerindeyken, kuru ve yağlı gözükmeye karşı su ile doygunudur. Bu nem varlığı, yatak nemi olarak adlandırılır. Nem, kömürün yüzeyinde olduğu gibi, kömür içindeki çatlak ve gözeneklerde de bulunabilir. Taşkömürleri, orijinal bazda, genellikle %10'un altında nem içerirken, linyitler, kalitesine bağlı olarak %55'lere kadar ulaşan oranlarda nem içerebilirler (Şahin, 2004).

#### **2.5.2.2. Kül**

Bütün kömürler organik olmayan maddeler içerirler. Kömürün yanmasından sonra, yanmayan maddelerden oluşan artığa kül denir. Külün büyük bir kısmı kimyasal bileşim olarak silisyum, alüminyum ve demir oksitlerinden ibarettir. Kömürlerde iki türlü kül bulunur: Bünye külü ve harici kül (istihsal külü-üretim külü). Bünye külü, kömürü oluşturan bitkilerden gelen inorganik maddelerdir ve kömürdeki toplam külün % 2-3'ünü oluştururlar. Harici kül ise, kömürü oluşturan bitkilerin dışında kömüre karışan yabancı maddelerdir. Bu maddeler, kömüre, kömürleşme esnasında karışabileceği gibi, kömürleşmeden sonra da kömür damarları içindeki çatlak ve kırıklar boyunca yerleşebilir. Bu yabancı maddeler kil, şist, kumtaşı, kireçtaşı ve benzerleri olabilir. Bunlar, kömür içinde mikroskobik parçalar halinde bulunabileceği gibi, damarlar ve/veya tabakalar halinde de bulunabilir. Yabancı maddeler, tüvenan kömüre, üretim esnasında tavan ve taban yantaşlardan da karışabilir. Bunların hepsi harici külü oluştururlar. Bünye külü, kömürden, yıkama yöntemleriyle uzaklaştırılmazken, harici kül, kömür yıkama yöntemleriyle belli bir oranda azaltılabilir.

#### **2.5.2.3. Kükürt**

Bütün kömürler az miktarda da olsa, kükürt içerirler. Kömürlerde bulunan kükürt organik ve inorganik olmak üzere 2 formda bulunabilir. Bazı araştırmacılara göre ise

kömürdeki kükürt organik, piritik ve sülfatik olmak üzere üç ana başlıkta incelenmektedir. Elementel kükürt ise genelde rastlanmadığı veya eser miktarda olabildiği için ihmal edilebilir.

#### ***a) İnorganik Kükürt:***

Kömürün içerdiği inorganik kükürdün büyük kısmı, disülfür halinde demire bağlanmış olarak bulunmaktadır. Geriye kalan ise Ca, Fe, Na ve Mg metallerinin sülfat tuzları halindedir (Bilir, 1993). İnorganik kükürt genel olarak piritik kükürt, elementel kükürt ve sülfatik kükürt olarak 3'e ayrılır.

##### ***1. Piritik Kükürt:***

Piritik kükürt kömürde bulunan pirit ve markasitten meydana gelir. Bu iki mineralin kimyasal bileşimleri aynı olduğu halde kristal yapıları farklıdır. Piritin kristal yapısı kübik, markasitin ise ortorombiktir. Pirit, markasite göre daha çok bulunduğundan piritik kükürt ismi kullanılmaktadır. Demir sülfür dışında, kömürde birçok baz metalin sülfür formuna rastlanabilmektedir (Al, Zn, Pb vb.). Ancak daha önce de bahsedildiği üzere baskın mineral pirit olduğu için tüm diğer sülfür formları bu gruba dahil edilir (Ateşok, 1986; Kural, 1991; Baruah, 1998; Baruah, 1995,...).

Piritik kükürt, kömür içerisinde bantlar, damarlar, merccekler, küresel veya dissemine tanecikler halinde türlü şekil ve biçimlerde dağılabilirler. Gözle görülebilir, ya da mikroskopik olsun piritik kükürt, kömürden serbestleştiği takdirde flotasyon veya diğer zenginleştirme yöntemleriyle kömürden temizlenebilir (Şahin, 2004).

Pirit kömür içerisinde 3 halde bulunabilir:

- 1- Dar damarlar halinde: 150 mm'den birkaç yüz mm uzunluğuna kadar
- 2- Nodüller halinde: Bunlar oktahedral şeklinde kristalleşmiş framboidlerdir. Çapları yaklaşık 10-20 mikron arası değişmektedir.
- 3- Ayrı kristaller halinde: Genellikle 1-2 mikron çapındadır. Piritin bu normu fiziksel zenginleştirme metotları ile tamamen temizlenmez, çünkü kömürü bu boyutta öğütmek ekonomik değildir.

## 2. Elementel Kükürt:

Elementel kükürt, kömürde çok seyrek bulunur. Genel olarak kömürdeki oranı %0,15'lerde olduğundan, kükürt temizlemede pek dikkate alınmamaktadır.

## 3. Sülfat Kükürdü:

Sülfat kükürdü, kömürde toplam kükürdün çok az bir kısmını oluşturur. Jips ( $\text{CaSO}_4$ ) halinde bulunduğu gibi, kömürün hava ile uzun süre teması sonucu  $\text{FeSO}_4$  olarak da bulunabilir (Şahin, 2004). Sülfatık kükürt suda çözündüğünden, kömürün fiziksel yöntemlerle zenginleştirilmesinde bir sorun yaratmamaktadır.

### b) Organik Kükürt:

Kömürde hidrokarbon yapıya bağlı olarak bulunan kükürde, organik kükürt adı verilir. Organik kükürt, kömürün organik materyalinin bir parçasıdır. Bu nedenle, kimyasal bağlar kırılmadan, yani fiziksel yöntemlerle uzaklaştırılması mümkün değildir (Şahin, 2004). Fiziksel zenginleştirme yöntemleri ile kömürdeki kükürt miktarı bünyedeki organik kükürt seviyesine kadar indirilebilmektedir (Bilir, 1993).

Kömürlerde bulunan başlıca organik kükürt bileşikleri şunlardır:

- 1- Alifatik veya aromatik tiyoller (merkaptanlar, tiyofoneller):  $\text{R-SH}$ ,  $\text{Ar-SH}$
- 2- Alifatik, aromatik veya karşık sülfidler (tüyoeterler):  $\text{R-S-R}$ ,  $\text{Ar-S-Ar}$ ,  $\text{R-S-Ar}$
- 3- Alifatik, aromatik veya karışık disülfidler (ditiyoeterler):  $\text{R-S-S-R}$ ,  $\text{Ar-S-S-Ar}$ ,  $\text{R-S-S-Ar}$
- 4- Tiyofen tipin halkalı bileşikleri (dibenzotiyofenler)

Ayrıca 1990'lı yıllardan sonra yapılan araştırmalar kömürdeki kükürt formunun, kömür rankıyla bir ilgisi olduğu görüşünü gündeme getirmiştir. Evrelerine göre kükürt varlığı aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

Turba, sediman, kömür ve benzerlerinin organik maddelerin yapısındaki ikincil sülfür varlığı çeşitli araştırmacılarca çalışılmıştır. Fakat bunun oluşum mekanizması ve bağın muhtemel yapısı hiçbirisi tarafından gösterilememiştir. Bu tür yapılardaki ikincil sülfür

varlığını iki önemli araştırma desteklemektedir. ABD Evelgrades turboları üzerinde yapılan bir çalışmaya göre piritik sülfürün kaynağının organik sülfür olduğunu öne sürülmüştür. Diğer araştırma ise, Sri Lanka’da bir turba bölgesinde organik sülfür ve piritik sülfür arasında ters bir ilişkinin varlığı, dolayısıyla da piritin organik sülfürün bozuşması sonucu oluştuğunu göstermektedir. Bunlar piritin organik sülfürden oluştuğunu kanıtlayan raporlardır. Doğru bir yaklaşımla, organik kükürt karbon bağlı kükürt olarak kabul edildiğinden bu tür kükürt pirit oluşumuna yardımcı olmaz. Dolayısıyla organik malzemelere bazı demir sülfür bileşenleri eşlik ediyor olmalıdır ve bu bileşenler pirit oluşumundan sorumlu olmalıdır.

Doğal organik maddelerle beraber bulunabilen demir sülfür bileşenlerinin mümkün kaynakları olarak 3 önemli kaynaktan bahsedilebilir.

1. Organik maddeler içerisindeki demir sülfür bileşenleri bakterilerden türemiş olabilir. Desulphovibrio, Clostridium vb. bazı bakteriler doğal sistemde oldukça yaygın bulunurlar ve ferredoksin gibi farklı Fe-S metaloproteinleri ve ilişkili bileşikleri bu bakterilerden izole edilebilirler. Daha önce, bu bakteriler öldükten sonra, FeS metaloproteinlerinin organik maddeler boyunca depolandığı rapor edilmiştir. Bu bakteriler organik bir madde olan turbanın % 5-10’unu oluşturduğu için, doğal organik maddede çok küçük bir oran da olsa Fe-S bileşenlerinin varlığından sorumludurlar.

2. Sülfür içerikleri, cystein ve cystine gibi çeşitli asitler doğal ortamlarda meydana gelirler. Farklı çevrelerdeki demir taşıyan sular kompleks amino asit formundaki sülfürlerle reaksiyona girerler. Göl ve bataklıklarda demir cysteine, demir cystişne gibi; daha ileriki aşamalarda Fe-S bileşiklerinin doğal oluşumunu sağlayacak; bazı metal bağlı sülfürlü organik bileşikler oluşur. Saxby’nin resmi olmayan raporunda belirttiği gibi demir cytein kompleksi, 200°C’de ve indirgeyici koşullar altında demir sülfür oluşturur. O’na göre, karbonlu sedimanlar içerisindeki amino asitlerce zengin proteinlerden metal sülfür, özellikle de pirit oluşumundan bu mekanizma sorumludur.

3. 1984’te Baruah tarafından yapılan deneysel çalışmalarda Fe-S’nin kömür içerisinde başlangıçta organik madde olduğu tespit edilmiştir. Demir, hümik asitle reaksiyona girerek, demirli hümik asit kompleksleri oluşturur; H<sub>2</sub>S ile daha ileriki bir reaksiyonla Fe-S gibi sülfür içerikli kompleksler oluşur. Bu komplekslerden termal işlemlerle piritin serbest kaldığı

gözlendi. Aynı araştırmalar, bu dönüşümden elementel sülfürün değil bisülfürün sorumlu olduğunu göstermiştir. Bu form Fe-S bileşimini ikincil sülfür konuma getirmektedir.

Tüm bunlar üç önemli kaynak olduğunu kanıtlamaktadır. İlk ikisi; yani bakteriler ve sülfürlü amino asitler, organik maddelerde az miktarda bulunduğu için, Fe-S oluşumunun çok küçük bir oranından sorumludurlar. Bu nedenle sonuncu kaynak, organik malzemede Fe-S oluşumunun birincil sebebi olarak düşünülebilir.

Sonuç olarak kömür rankı ile, kömürün içerdii inorganik kükürt/toplam kükürt oranının birbirine bağlı olduğu söylenebilir. Diğer bir değişle turbadan linyit, yarı bitümlü kömür ve bitümlü kömürlere gidildikçe, kömürün içerdii inorganik kükürtün toplam kükürtteki oranı artmaktadır (Baruah, 1995). Bu görüş son yıllarda farklı araştırmacılar tarafından da desteklenmektedir.

## **2.6. Kömür Petrografisi:**

Kömürün petrografik içeriği, koklaştırma, sıvılaştırma ve gazlaştırma alanlarında büyük önem kazanır.

Daha önce de bahsedildiği gibi, kömür, organik ve inorganik bileşenlerden oluşur. Kömürün makroskobik organik bileşenlerine “Litotip”, mikroskobik organik bileşenlerine ise “Maserale” adı verilmektedir.

### **2.6.1. Kömürlerin makroskobik bileşenleri (Litotipler)**

Bir kömür parçası incelendiğinde onların değişik yüzeylere ve görünümlere sahip olduğunu görülür. Bazı kömürler kübik bölünmeler (taşkömürleri) şeklinde ufalanırlar. Turbalarda bitki parçaları (fiteraller) görünürken, bazı kömürlerde kalın, ince parlak ve mat bantlaşmalar görülmektedir.

Bir kömür parçasında üst kısımda bir tabakalaşma düzlemi mevcuttur ve daima, eğer bir kırılma, kırılmaya uğramamış veya yer değiştirmeye uğramamışlar ise, yer yüzeyine paralel olacak şekilde yatay konumda olurlar.

Kömürlerde tabakalaşma düzlemlerine dik olarak ve birbirlerine dik olacak şekilde, yan taraflarda "Klit" ("Cleat") denilen düzlemler bulunmaktadır. Bunlardan ön veya yüz ("face") kliti pürüzsüz iken, yan ("butt") kliti daha pürüzlü durumdadır. Yan klitler ortamın kayaçlarının kıvrım ekselerine paralel olurlar. Klitler ortamın dağ oluşumunu sağlayan faktörlerin etkisinde kalarak oluşurlar yani orojenik kökenlidirler. Klit açıları taşkömürü seviyesinde 90° civarında olup, daha düşük kömürleşme seviyelerinde (alt bitümlü kömür ve linyitlerde) bu açı daha küçük veya farklıdır. Antrasitlerde klitlerin sayısı ikiden daha fazla (üç) olup, bunlar birleşerek konkoidal bölünmeyi sağlamaktadırlar.

Özellikle taşkömürü seviyesinde kömürler bantlı görünümler ortaya koyarlar. Kömürlerin el ile incelendiğinde onların bantlı, mat, elde is bırakan nitelikte olan bileşenleri "Litotip" olarak adlandırılan birimleridir. Litotipler sonlarına "ain" takısı alırlar. Birbirinden farklı dört litotip mevcuttur. Bunlar Vitren ("Vitrin"), Klaren ("Clarain"), Düren ("Durain") ve Füzen ("Fusain")dir. Litotiplerin özellikleri detaylı olarak Tablo 2.5.'de gösterilmiştir. Tablo 2.5.'de ayrıca kil ve kömürün, -birbirleri ile ilişkili olarak kömürlü kil ve killi kömürler ile ilgili özellikleri de mevcuttur.

#### **2.6.2. Kömürlerin mikroskobik bileşenleri (Masareller):**

Maseraller, kömürleri oluşturan en küçük mikroskobik birimlerdir ve az veya çok homojen yapıya sahiptirler. İnorganik kayaçların en küçük birimleri olan minerallere benzetilebilirler. Tablo 2.6.'da Stopes-Harleen'in yaptığı kömür kayaç ve maseralleri sınıflandırılması verilmiştir. Maseraller bir araya gelip maseral gruplarını oluştururlar. Maseral grupları da gözle değil, sadece mikroskop altında görülebilirler. Vitrinit, inertenit ve eksinit terimleri bu maseral gruplarına verilen adlardır. Dört kömür kayacından sadece vitren ve füzen bir maseral veya maseral grubundan oluşur. Örneğin, vitren tamamen vitrinit ve füzen de tamamen inertenitdir. Düren ve klarende ise, bir maseral grubu hakimken diğer iki maseral grubu, bu kömür kayaçlarının az bir bölümünü oluştururlar.

Tablo 2.5. Bitümlü kömürlerin litotipleri ve özellikleri (TKİ, 2003)

| Tanım     | AYIRTMAN ÖZELLİKLER |             |                                                       |                                                       |                                                                                                                    |                                                       |
|-----------|---------------------|-------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Kaba yapı | Litotifler          | Tabakalanma | Yarılanabilme                                         | Kırılma şekli                                         | Parlaklık                                                                                                          | Diğer özellikler                                      |
| KÖMÜR     | Vitren              | Zayıf       | İyi                                                   | Küp şeklinde, Kısmen konkoidal                        | Çok parlak, Parlak                                                                                                 | Tabakalanma yönü nedik çok Sayıda çatlakları bulunur. |
| Düren     | Zayıf               | Kötü        | Düzensiz                                              | Mat                                                   | Bantların yüzeyleri pürüzlü olup, genellikle gri ve siyah görünüştedir.                                            |                                                       |
| Fuzen     | Bantsız             | Yok         | Düzensiz                                              | Siyah                                                 | İpeksi, lifsi dokuya sahip olup, yüksek oranda mineral içerebilmekte, ele değince siyaha boyamaktadır              |                                                       |
| Klaren    | İyi                 | Orta        | Viben ve Dürenin Karakteris tikleri Arasında değişir. | Vitren ve Dürenin Karakteristikleri arasında değişir. | Vitren, düren ve / veya füzen'in ince bantlarının Arddalaş masından oluşur. Bantların kalınlığı 1 cm den düşüktür. |                                                       |

Tablo 2.6. Kömürlerin mikroskobik bileşenleri

| Makroskobik                 | Mikroskobik                                   |                                                                                                      |
|-----------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kömür Kayaçları(Litotipler) | Maserale Grupları                             | Maseraller                                                                                           |
| Vitren                      | Vitrinit                                      | Kollinit, Tellinit                                                                                   |
| Klaren                      | Vitrain çok, eksinit ve inertenit az bulunur  | Kollinit, Tellinit, Sporinit, Kutinit, Alganit, Resinit, Fusinit, Mikrinit, Skeleronit, Semi-Fusinit |
| Düren                       | İnertenit çok, vitrinit ve eksinit az bulunur | Fusinit, Mikrinit, Skeleronit, Semi-Fusinit, Kollinit, Tellinit, Sporinit, Kutinit, Alginit, Resinit |
| Füzen                       | İnertenit                                     | Fusinit                                                                                              |

## 2.7. Antrasitlerin Genel Özellikleri

Ülkemizdeki kömürler; turba, linyit, taş kömürü ve antrasit olarak sınıflandırılırlar.

Kömürleşme sırası daha önce açıklanmıştı. Kısaca özetlersek:

Turba → Linyit → Alt Bitümlü Kömür → Taş Kömürü → Antrasit → Grafit

Taş kömüründen antrasite geçiş aşamasında uçucu madde içeriği hızla azalır, karbon içeriği az da olsa artar, nem içeriği azalır, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> uzaklaşır. H<sub>2</sub> hızlıca azalır, vitrinitin yansıtılması ve anizotropisinde hızla artış gösterir.

Antrasitlerin içerdiği kükürt içeriği çok düşüktür. Antrasitlerde kükürt içeriği % 0,5-1 arasındadır. Nem içeriği ise % 5-6 arasında değişir.

Antrasitler kömürleşme derecesi (ranklarına) göre 3' e ayrılırlar:

- 1-Meta Antrasit
- 2-Antrasit
- 3-Semi-Antrasit

Antrasitlerin karbon içerikleri % 92-98 arasında değişir. Meta Antrasite karbon içeriği daha fazla iken, semi-antrasitte bu oran düşmektedir.

Uçucu madde içeriklerinde de Meta-Antrasitte ya hiç uçucu madde görülmez veya çok düşük oranlarda görülür. Semi-Antrasitte ise bu oran % 10-15 lere kadar çıkabilmektedir.

Antrasitler yüksek kömürleşme derecesine sahiptirler. İnce kesitleri turba, linyit ve bitümlü kömürlere göre daha kolay yapılabilir. Mineral ile inertinit maserallerinin opak olarak görülmesi ve ince kesitler üzerinde vitrinit yansıtmasının ölçülememesi nedeniyle, sonradan parlak kesit (parlatma bloku veya parlatma briketi) yöntemi geliştirilmiştir

Liptinitlerin kimyasal karakteristikleri ve optik özellikleri ayrıca bunların ayırt edici özelliklerinin çoğu Antrasit aşamasında kaybolmaktadır...

### 3. ARTVIN YUSUFELİ MÜZRET BÖLGESİ GENEL JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

Müzret kömür sahası ,Artvin iline bağlı Yusufeli ilçesinin 10 km güney batısında bulunmakta ve Tortum G47 A2 paftaları içerisinde yer almaktadır.

Çalışma konusu bölgede temel kayalar ,metamorfik kayalar ve bunlara sokulum yapmış granitoidler oluşturmaktadır.Bu temel üzerine uyumsuz olarak volkano sedimanter kayalardan oluşan Liyas-Dogger ve üst Jura-Alt Kreteze yaşlı birimler gelmektedir.Liyas-Dogger yaşlı Hamurkesen formasyonunun en üst kesiminde 10-30 m kalınlığında şeyl ,kilaşı,kumtaşı ve ara katmanlarda kömür içeren bir istif bulunmaktadır.

Bölgede ilk kömürleşme süreci Erken Liyastaki sığ bataklık ortamlarında gelişmiş ve sonrasında bu bataklık ortamları hızlı bir şekilde denizel ortama dönüşerek kalın volkano-tortul çökeller geliştirmiştir. Havza Doggerde dolmuş ve tekrar sığlaşmıştır.Bölge geç Doggerde tekrar deniz ortamına dönüşmüş ve Alt kreteze sonuna kadar karbonat çökelmiştir.Bölgedeki kömür mostraları zaman zaman denizle irtibatlı küçük havalarda gelişmiştir.Sübsidans karakterde gelişen havzada çökmelimin süratli olması kömürleşmenin gelişimini engellemiş ve bunun sonunda ince kalınlıkta,kısa mesafelerde son bulan kömür damarları oluşmuştur.

İnceleme alanındaki kömür mostraları Müzret yaylasında yerleşim alanı yakınlarında ve Sinegara tepesinde görülmektedir.Burada kalınlıkları 0,5-3 m arasında değişen ve aralarında kilaşı seviyeleri bulunan 3 damar halinde bulunmaktadır.Kömürlü zonun toplam kalınlığı 15 m kadardır.Müzret mezrası sedimanter sahası 0,25 km<sup>2</sup>'lik bir alan kaplamaktadır.

Müzret mezrası batısında ve 500 m mesafede bulunan Sinegara mevkie bölgenin devamı olarak gözükmektedir.Arada bulunan bölgenin aşınma sonucu kaybolmuş olması kuvvetle muhtemeldir. Bölgenin şiddetli tektonik hareketler geçirmiş olması kömür damarlarının takip edilmesini zorlaştırmaktadır.Bölgede yaklaşık 250.000 ton kömür rezervinin olduğu tahmin edilmektedir.Kömürlü seviyenin üzerinde 15-50m arasında değişen örtü tabakası bulunmaktadır.

### 3.1.Yusufeli Müzret Kömürlerinin Özellikleri

Bölgede günümüze kadar sadece jeolojik arama çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışma ile bölge kömürlerinin çeşitli özellikleri araştırılmıştır. İncelemeye esas örnekler, üretim (Galeri 1 ve 2)ve arama (Galeri 3 ve 4) galerinden üretim ve arama amaçlı üretilmiş kömürlerden örnekleme yolu ile 100-120 kg olarak alınarak torbalanmıştır.

#### 3.1.1. Petrografik Özellikleri

Petrografik incelemeler Leitz Wetzlar-1432 marka cevher mikroskobu ile yağlı ortamda gerçekleştirilmiştir.Örneklerin maseral bileşimlerinin tayininde model analiz yöntemi uygulanmıştır. Galeri 1 den alınan kömür örneğine uygulanan petrografik incelemeler sonucunda;kömür örneklerinin %71'inin maseraller ve %29'unun minerallerden oluştuğu bulunmuştur. Maseraller içerisinde en yaygın grubu vitrinitler (%55) oluşturmaktadır.Bu petrografik bileşenler göz önüne alındığında bu kömürlerin orman bataklığından oluştuğu söylenebilir. Artvin Müzret kömürlerinin petrografik bileşenleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Artvin Yusufeli Müzret kömürlerinin petrografik bileşenleri (hacimce %).

| Maseraller (%) |            |              | Mineraller(%) |               |                 |
|----------------|------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|
| 71             |            |              | 29            |               |                 |
| Vitrinit(%)    | Eksinit(%) | İnertinit(%) | Pirit(%)      | Kalsit-Kil(%) | Diğ.Mineral.(%) |
| 55             | 8          | 8            | 15            | 12            | 2               |

(Alp vd; 2004)

Müzret kömürlerinin yansılmalı ışıktta ve yağ immersiyonunda tespit edilen petrografik bileşenleri: Vitrinit, inertinit, eksinit, pirit, kalsit, sklerotinittir. Kömür içerisinde pirit,masif ve fromboidal olarak çok geniş boyut aralığında (1-500 mikron) bulunmaktadır.Yapılan incelemelerde kömür içerisinde çok küçük boyutlarda breşik zonların bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu yapısal durum kömürün çok kırılgan bir özellik, ufalanabilirliğinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Örnek incelemeleri sırasında altın olması muhtemel nabit taneler tespit edilmiştir.

### 3.1.2. Fiziksel ve Teknolojik Özellikleri

Kömürlerin ASTM-D388-82 standardına göre sınıflandırılmasında, örneklerin kuru külsüz bazda uçucu madde, element karbon ve kalorifik değer, orijinal bazda nem değerleri gibi parametreler göz önüne alınmıştır. Müzret kömürlerinin kuru-külsüz bazda %14,03-32,64 uçucu madde ve %85,97-67,36 sabit karbon içeriği ve 8521-8641 Kcal/kg kalorifik değerine sahip olduğu bulunmuştur.

Farklı galerilerden alınan örneklerin kalorilerinde önemli bir fark yokken uçucu madde %'sinin önemli miktarlarda değişmesi bölgenin volkanik bir faaliyetten etkilenmiş olabileceğini göstermektedir. Bölge kömürleri günümüze kadar yapılan değerlendirilmelerde kömürleşme derecelerine bakılmaksızın genel bir yaklaşımla linyit olarak incelenmektedir. Yapılan analiz sonuçlarına göre ise bölge kömürleri “düşük” ve ”orta” uçuculu bitümlü kömür olarak sınıflandırılabilir. Son yapılan çalışmalarda da önceden linyit olarak tanımlanan çoğu kömürün alt bitümlü kömür tanımına giren kömürleşme derecelerine sahip oldukları belirtilmektedir. Artvin Müzret (Yusufeli) Kömür örneklerinin havada-kuru ve kuru-külsüz analiz değerleri ve sınıflandırılması Tablo 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.2. Artvin Yusufeli Müzret Kömür örneklerinin havada-kuru ve kuru-külsüz analiz değerleri ve sınıflandırılması (Alp vd; 2004).

| Fiziksel ve Kimyasal Özellikler |                                | Galeri 1                    | Galeri 2 | Galeri 3                   | Galeri 4 |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------|----------------------------|----------|
| Havada<br>Kuru                  | Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1,80                        | 1,72     | 1,59                       | 1,70     |
|                                 | Nem(%)                         | 1,24                        | 1,36     | 0,54                       | 1,26     |
|                                 | Kül(%)                         | 20,91                       | 24,26    | 20,21                      | 14,22    |
|                                 | Uçucu Madde(%)                 | 10,92                       | 11,59    | 23,54                      | 27,59    |
|                                 | Sabit Karbon(%)                | 66,93                       | 62,79    | 55,71                      | 56,93    |
|                                 | Yanar Kükürt(%)                | 5,59                        | 4,63     | 2,87                       | 6,52     |
|                                 | Kok(%)                         | 87,84                       | 87,05    | 75,92                      | 71,15    |
|                                 | Üst Kal. Değer(kcal/kg)        | 6674,5                      | 6338,2   | 6816,4                     | 7303,6   |
| Kuru<br>Külsüz                  | Uçucu Madde (%)                | 14,03                       | 15,58    | 29,70                      | 32,64    |
|                                 | Sabit Karbon (%)               | 85,97                       | 84,42    | 70,29                      | 67,36    |
|                                 | Üst Kal. Değer(kcal/kg)        | 8573,53                     | 8521,38  | 8601,14                    | 8641,27  |
|                                 | Üst Kal. Değer(kj/kg)          | 35895,65                    | 35677,31 | 36011,25                   | 36179,27 |
|                                 | Üst. Kal. Değer(Btu/lb)        | 15423,63                    | 15329,81 | 15473,30                   | 15545,50 |
| A.S.T.M Sınıflamasında Yeri     |                                | Düşük Uçuculu Bitümlü Kömür |          | Orta Uçuculu Bitümlü Kömür |          |

Kömürlerin ufalanabilirliği ile kalite sınırları arasında genel bir ilişki vardır. En düşük ufalanama oranları düşük uçuculu bitümlü kömürlerde görülür. Antrasitlerin ve alt bitümlü kömürlerin ufalanabilirlikleri birbirine benzemekte olup, her ikisi de bitümlü kömürlerden daha sağlamdırlar. Düşürme testi sonucunda bölgede Galeri 1'den üretilen kömürlerin ufalanabilirliğinin %61,8 olduğu tespit edilmiştir. Bu yüksek değer kömürün ait olduğu sınıfın özelliklerine uyum göstermektedir. Kömürün kolay ufalanabilir olması taşıma ve zenginleştirme işlemlerinde ince malzeme oranının artmasına neden olacak ve kayıpları yükseltecektir. Bu nedenle briketlenerek değerlendirilmesi gerekmektedir.

### **3.2. Artvin Yusufeli Müzret Kömürlerinin Değerlendirilmesi**

Müzret bölgesinde özel sektör tarafından iki adet galeri ile günlük 50 ton kadar üretim yapılmaktadır. Kömür üretimi orta kömür damarından yapılmakta olup 15 işçi tek vardiyalı olarak çalışmaktadır. 200 m uzunluğunda damar içerisinde ana nakliyat galerileri sürülmüş ve bu galerilerden üretim katlarına irtibatlar sağlanmıştır. Üretim işlemi martopikör ve kazma ile yapılarak ana nakliyat galerisine oluklar yardımı ile nakledilmektedir. Galeri boyunca raylar üzerinde hareket eden 200 kg kapasiteli vagonlara doldurulan kömür makaralı sistemle çelik halatlar yardımı ile çekilerek yeryüzüne çıkarılmaktadır. Tahkimat olarak ağaç tahkimat kullanılmakta olup havalandırma nefeslik yardımı ile doğal olarak veya gerektiğinde vantüpler ile yapılmaktadır. Galerilerin eğimi %15-25<sup>0</sup> arasında değişmektedir. Su geliri çok azdır.

Üretilen kömürler elenmektedir ve ince boyutlu kısmı briketlenerek tüketime sunulmaktadır. Tesiste ortalama 175 gr ağırlığında, oval şekilli briketler üretilmektedir. Briketleme soğuk olarak yapılmakta olup %7,5 oranında melas ve %4 oranında kireç ilavesi ile “*katkılı briketleme*” olarak yapılmaktadır. Kurutma doğal olarak yapılmakta olup %6 nem içeriğine sahip olduğunda briketler maksimum verimi vermektedir. Üretilen briketler 25kg'lık torbalara konularak paketlenmekte ve iri boyutlu kömürlerle birlikte ev ve sanayi yakıtı olarak pazarlanmaktadır.

Briketleme tesisinden elde edilen briketler; ortalama olarak %4,38 nem, %32,1 kül, %22,22 uçucu madde, %42,39 sabit karbon ve %4,44 kükürt içermektedirler. Briketlerin üst kalorifik değerleri de ortalama 5200 kcal/kg (21771,4 kJ/kg) olarak bulunmuştur. Kalorifik değerlerdeki düşme ve kül içeriğindeki artış katkı maddesi olarak kullanılan kireçten kaynaklanmaktadır. (Alp vd; 2004)

#### 4. KÖMÜR HAZIRLAMA

Kömürler genelde ocaklardan üretildiği gibi kullanılmazlar. Teknolojinin istediği kömür tipleri ve özellikleri çeşitli değişiklikler gösterirler. Bu özellikler arasında maksimum ve minimum tane boyutu, kül, kükürt, nem oranı, kalorifik değer, uçucu madde miktarı, koklaşabilme yeteneği gibi faktörler sayılabilir.

Sanayi dalları kendi teknolojilerine uygun özellikte kömür talep ederken hükümetlerin almış oldukları kısıtlayıcı tedbirleri de dikkate almaktadırlar. Nitekim 2.11.1986 tarihinde resmi gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren yönetmeliğe göre havada bulunması gereken SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve partikül madde miktarları belli standartlara bağlanmış ve ilk kez Türkiye’de bir kısıtlayıcı tedbir alınmıştır (Koca, 1991). Günümüzde çevre kirliliğinin artışı ile, giderek artan “temiz çevre” bilinci, insanları daha temiz yakıt kullanmaya yönlendirmekte ve sadece büyük sanayi kuruluşları için değil, bir çok büyük ilimizde (Ankara, Bursa, Eskişehir vb.) evsel kullanımda da belli standartlar getirilmiş durumdadır.

Üretilen kömürden istenen özelliklerde kömür elde etmek üzere yapılan işlemlerin tümüne “Kömür Hazırlama” denir.

Tüm bunlar düşünüldüğünde kömür hazırlama yapılmasını gerektiren iki etmenden bahsedebiliriz: Teknolojik etmenler ve çevresel etmenler. Son yıllarda mekanize kazının yaygınlaşması ile, ince kömür üretimindeki artış ve incelere karışan yan taşların temizlenmesi gerekliliği de kömür hazırlama gereğinin artışına ve özellikle temiz kömür kazanımında flotasyonun yaygınlaşmasına yol açan bir diğer önemli etkidir.

Daha evvel de bahsedildiği gibi kömürde bulunan en önemli safsızlıklar, nem, kül ve kükürttür (Bakınız 2.5.2). Basit yıkama teknikleri kullanılarak kül yüzdesinin düşürülmesi ile yanabilir kısım oranı yükseltilebilir. Böylece kömürün ısı miktarı yükseltilebildiği gibi yanmayan kısmın nakliyesi, ısıtılması ve stok hacminin boşuna işgal edilmesi de engellenmiş olur. Çevresel açıdan en önemli kirleticilerden olan kükürtün uzaklaştırılması ise biraz daha zor ve pahalı işlemler gerektirmektedir. Kömürün bünyesinde bulunan piritik kükürtün uzaklaştırılması basit yıkama yöntemleri ile kısmen mümkün olsa da, diğer inorganik külyapıcılar gibi iri boyutlarda kolayca başarılamaz. Kömürlerde bulunan ve toplam kükürt miktarının yaklaşık (kömür türüne ve bölgeye göre bu oran oldukça değişkendir) %50’sini

oluşturan bir diğer kükürt türü organik kükürtün ise yıkama ile uzaklaştırılması mümkün değildir. Kükürt gidermenin diğer kül yapıcıları uzaklaştırmaya göre daha karmaşık ve zor olması ve kullanılan kömürdeki kükürt içeriğine getirilen sınırlamaların yaygınlaşması nedeniyle, kömür hazırlamada yararlanılan yöntemler incelenirken, kül yapıcıların uzaklaştırılmasından çok kükürt gidermedeki etkinliği üzerinde durulacaktır.

Kömür Hazırlama Yöntemlerini;

1. Fiziksel ve fizikokimyasal Yöntemler
2. Kimyasal Yöntemler
3. Biokimyasal (Biyolojik) Yöntemler
4. Diğer Yöntemler

olarak dört ana gruba ayırmak mümkündür. Son grup daha çok yanma sonrası baca gazlarındaki kükürdün tutulmasına yönelik uygulanan yöntemler olduğu için burada değinilmeyecektir.

#### **4.1. Fiziksel ve Fizikokimyasal Yöntemler**

Yakma öncesi zenginleştirmede en eski, en yaygın kullanılan ve en ekonomik yöntemlerdir (Koca, 1995). Ancak daha çok kükürt dışı kül yapıcıların giderilmesinde etkindir. Kuru ve yaş olarak uygulanabilen farklı yöntemler mevcut olmasına karşın, kuru yöntemlerin kullanımı son yıllarda oldukça azalmıştır (Koca, 1995; Burt, 1984).

Daha önce de bahsedildiği gibi kömürde farklı kükürt bileşenleri mevcuttur. Bunlar kısaca inorganik kükürt (elementel kükürt, piritik kükürt ve sülfatik kükürt) ve organik kükürt olarak özetlenebilir (Bölüm 2.5.2.3). Fiziksel yöntemlerle kömürden kükürdün uzaklaştırılmasında, suda eriyebilen sülfat kükürdü, yıkama işlemleri sırasında giderilmekte ve herhangi bir sorun yaratmamaktadır. Organik kükürt ise kömürün bünyesine bağlı olduğundan fiziksel yöntemlerden etkilenmemekte ve kömürden uzaklaştırılmamaktadır. Bu nedenle, fiziksel yöntemler kömürden yalnızca piritik kükürdün uzaklaştırılmasını sağlar ki, bu da yöntemin toplam kükürt giderme etkinliğini, en ideal koşullarda bile, o kömürün piritik kükürt yüzdesi ile sınırlamaktadır. Yöntemin esası, piritle kömürün farklı fiziksel ve fizikokimyasal özelliklere sahip olmalarına dayanmaktadır (Kural, 1991, Ateşok, 1986).

Fiziksel yöntemlerle kömürlerin kükürt içeriklerinin azaltılması aşağıdaki koşullar geçerli ise olasıdır:

- Kömürdeki piritik kükürt/organik kükürt oranının yüksek olması (diğer bir deyişle toplam kükürt içeriğinin piritten gelen kısmının yüksek olması)
- Piritin tane boyutunun çok küçük olmaması (Piritin, kömür içinde mikroskobik tanecikler halinde dağılım oranı arttıkça, yöntemin başarısı için kömürün daha küçük tane boyutlarına öğütülmesi gerekir; bu da maliyeti arttıran ve verimi azaltan bir etkidir)
- Piritin serbest halde veya kömürle çok az bileşik halinde olması

Piritik kükürdün uzaklaştırılmasında uygun bir fiziksel yöntem seçimi için öncelikle kömürün mineral dağılımının bilinmesi gerekir. Kömürün mineral dağılım analizinde genellikle şu sınıflamalar yapılır.

- Serbest pirit tanecikleri (Hacimce %80'den fazlası pirit olan tanecikler) ,
- Kömür ile mineral maddenin birbiri içinde dağıldığı, hacimce %50-80 pirit içeren tanecikler,
- Kömür ile mineral maddenin birbiri içinde dağıldığı, hacimce % 50'den az pirit içeren tanecikler.
- Kömür ile mineral maddenin birbiri içinde dağıldığı, hacimce % 20'den fazla mineral madde içeren pirlisiz tanecikler,
- Saf kömür.

Bu analizde sınıflar arası fark arttıkça, yöntemin etkinliği artar (Ateşok, 1986; Kural, 1991).

Yukarıdaki koşullar kömürde bulunan piritik kükürdün tamamının fiziksel yöntemlerle kömürden uzaklaştırılmasının mümkün olmadığını vurgulamaktadır. Çok küçük taneli piritler, organik kükürt gibi kömürün asıl yapısı içinde kalmakta ve mekanik/fiziksel yöntemlerle kömürden uzaklaştırılamamaktadır. Kömürde bulunan böyle küçük pirit taneleri, piritin uzaklaştırılma verimi düşmekle kalmayıp, temiz kömürün kükürt yüzdesinin artmasına da neden olmaktadır. Belirtilen şekillerdeki piritlerle organik kükürt, kömürlerde “uzaklaştırılamayan kükürt” bileşenlerini oluşturur (Kural, 1991).

Kömür hazırlamada kullanılan fiziksel yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- a) Yoğunluk farkına göre temizleme yöntemleri(Jigler, sabir oluklar, siklonlar, tamburlar ve siklonlarla ağır ortam ayırması, spiraller, sallantılı masalar, MGS ayırması)
- b) Yüzey özelliklerindeki farklılıklarına göre temizleme yöntemleri (flotasyon, yağ aglomerasyonu, flokülasyon)
- c) Elektrostatik ya da manyetik temizleme yöntemleri

#### **4.1.1. Yoğunluk farkına dayalı ayırma**

- a) Jigler:

Etkin kuvvet gravitedir. Baum ve feldspatlı jigler 100 yıldan beridir kömür yıkamada kullanılmasına rağmen kükürt uzaklaştırılması söz konusu olduğunda pek etkili olamamaktadırlar. Genel olarak +5 mm'nin üzerinde kullanılıyor olması da diğer bir sorundur. Özellikle tane boyu küçüldükçe bu jiglerin ayırım verimi düşmektedir ve temiz kömürdeki pirit yüzdesi artmaktadır. 1974'lerde kullanılmaya başlayan KHD Humboldt Wedag Firması'nın Batac jigleri hem iri (10-100 mm) hem de ince kömürlerin (0,2-10 mm) yıkanmasında başarı ile uygulanmıştır.

Kömürlerin birçoğunda pirit serbestleşmesinin ancak 0,5 mm'nin altında gerçekleşmesi, ince kömürlerden piritik kükürdün maksimum düzeyde atılmasına olanak vermektedir. ABD'de 1977'de işletmeye açılan Homer City lavarında Batac jiglerle çok düşük kül ve kükürt içerikli yüksek kaliteli kömür üretilmektedir. Son yıllarda Almanya'da geliştirilen çift frekanslı basmalı Jiglerin, -2 mm boyutundaki kömürlerden serbest piritik kükürdün uzaklaştırılmasındaki etkinliği vurgulanmaktadır (Kural, 1991; Koca, 1995; Ateşok, 1986).

- b) Ağır ortam tamburları, siklonlar ve benzeri ayırıcılar:

Ağır ortam tamburlarında, kömürün özgül ağırlığının diğer minerallerden düşük olmasından yararlanılarak, ara özgül ağırlıkta bir sıvıya beslenen cevherde kömür yüzerken diğer minerallerin batması ile ayırma sağlanır. Ancak kullanılabildiği tane boyutu ağır ortam siklonları ve diğer yöntemlere göre oldukça iridir.

Siklonlar, genel olarak gravite kuvvetlerine ilave olarak merkezkaç kuvvetlerini de kullanan aygıtlar olarak tanımlanabilirler. İnce kömürlerin kükürt içeriğinin azaltılmasında siklonlar önemli bir rol oynarlar. – 0,5 mm’lik kömürlerin temizlenmesinde en etkin yöntem olan flotasyona alternatif olarak gösterilen su siklonlarında verim flotasyona göre düşük olmasına rağmen, siklonların düşük yatırım masrafları, onları uygulamada çekici yapmaktadır.

Ağır ortam siklonları ile ince kömürlerin temizlenmesi en çok uygulanan yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntemin tek sakıncası, ince tanelerde ortamın akışkanlığının ayırım verimini olumsuz yönde etkilemesidir. Ağır ortam siklonlarının uygulama alanları 12 veya 6 mm’nin altındaki taneler olup, 0,11 mm’ye kadar inerken, piritik kükürtün de önemli ölçüde azaltılabildiği gösterilmiştir (Edwards, 1984). Piritin serbest halde bulunduğu ince tane boyutlarında ağır ortam siklonları kesin ayırım yapabilmektedirler. Piritik kükürtün uzaklaştırılmasında, ağır ortam ayırıcılarının endüstriyel çaptaki uygulamalarında örnek olarak Stinson tesisi verilebilir. Bu tesiste 10-38 mm’lik taneler, konik tanklarda ve 1,30 özgül ağırlığında yıkanmakta ve % 0,75 kükürt içeren temiz kömür elde edilmektedir. Batan kömür ikinci bir konik tankta 1,45 özgül ağırlığında yeniden yıkanmakta ve %0,87 kükürt içeren temiz kömür elde edilmektedir. 0,5-10 mm’lik ince taneler ise ağır ortam siklonlarında 1,30 özgül ağırlığında yıkanmaktadır. Buradan elde edilen temiz kömürde %0,71 kükürt bulunmaktadır.

ABD’de kullanılan freon isimli ağır organik sıvı, ortamın akışkanlığının ince taneler üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaktadır. Otiska adı verilen bu yöntemde freon, saatte 100 ton kapasiteli olan bir tesiste uygulanmış ve çok yüksek ayırım verimi elde edilmiştir. Otiska yönteminin en önemli sorunu Freon’un kömür ve şisten geri kazanılmasıdır. Yöntemin geliştirilmesi siklonlarla çok ince tanelerin yıkanabilmesi yönünde çalışmalar devam etmektedir.

#### c) Spiraller:

Siklonlar gibi gravite ve merkezkaç kuvvetlerinin her ikisini de kullanan aygıtlardır. Bu da -0,15 mm’ye kadar ayırımı mümkün kılmaktadır. Avustralya, Güney Afrika Cumhuriyeti, Kanada ve ABD gibi ülkelerde kömürün temizlenmesinde başarı ile uygulanan spiraller ince kömürlerin kükürt içeriklerinin azaltılmasında da büyük bir potansiyel vaat etmektedirler.

Avusturalya'daki uygulamada, 300 t/saat kapasitesiyle çalıştırılan spiral devresinde 0,4-1,4 mm boyutundaki kömür yıkanmaktadır. (Koca, 1995; Kural, 1991)

d) Sallantılı masalar:

Masalar -10 mm'lik ince taneli kömürlerden piritik kükürdün uzaklaştırılmasında en etkin yöntemlerden bir tanesi olarak görülmektedir. Eski SSCB'deki uygulamada, yüksek kükürtlü Donbas havzası kömürleri sınıflandırılmakta ve fraksiyonlar masalarda ayrı ayrı yıkanmaktadır. Bu şekilde % 95'e varan pirit giderilmesi sağlanmaktadır. Buna karşın toplam kükürt oranı yalnızca %24'lk bir düşme elde edilebilmektedir. ABD'de kömürden piritik kükürdün uzaklaştırılmasında Concendo 77 denilen çift katlı masalar kullanılarak toplam kükürdün %40'ı ve piritik kükürdün ise %57'si kömürden uzaklaştırılabilmektedir. ABD'nin batısındaki kömürlerin piritten temizlenmesinde havalı sarsıntılı masalar kullanılmaktadır. Havalı masaların en büyük sakıncası ince kömürlerde ayırım yapamamasıdır.

in'de ince kömürlerden piritik kükürdün atılmasında SLY-1, 8 santrfj masaları kullanılmaktadır. Silindirik yzeeye sahip olan santrfj masaları ile çok ince boyutlarda (-40 mikron) bile piritik kükürt uzaklaştırılabilmektedir. Piritik kükürt içeriğindeki azalma % 55-77 arasındadır.

#### **4.1.2. Yüzey zelliklerindeki farklılıklara dayalı ayırma**

a) Flotasyon:

İnce kömürlerden piritin flotasyon ile uzaklaştırılması konusunda pek çok araştırma yapılmıştır. Bu alışmalar piritin ktrlp kömürün yzdrlmesi veya kömürün ktrlp piritin yzdrlmesi esasına dayanır.

Kömürlerde bulunan piritler sülfürlü cevherlerde bulunan piritlerden 40 defa daha aktif olduklarından kömür flotasyonu sırasında kolayca bastırılamayabilirler.

Amerikan Bureau of Mines firması tarafından yapılan çalışmalarda 2 aşamalı bir flotasyon sistemi geliştirilmiştir. İlk aşamada 35 mesh'e kadar öğütülmüş kömür nötr pH'da gazyağı ve MIBC ile yüzdürülmüş, 2. aşamada ise pH 6 da kömür "Aero Depressent 633"

eklenmesi ile bastırılmış, piritin ise K-Amil Ksantat ve MIBC ile yüzdürülmesine çalışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda piritin % 40-70 i uzaklaştırılabilmektedir.

Rastogi, R.C. ve Aplan F.F. (1985), kömürden piritik kükürdün atılmasında, pervane hızının, havalandırmanın ve köpürtücü miktarının düşük olması gerektiğini savunmuşlardır. Ayrıca flotasyon devrelerinin uzunluk ve hacimce uygun bir şekilde düzenlenmesinin ve buna bağlı olarak köpük yüksekliğinin iyi ayarlanmasının düşük kükürt içerikli bir ürünün elde edilmesine olanak sağladığı da bilinmektedir.

Bu çalışmanın temel konusunu oluşturduğu için flotasyon yöntemi ileride daha ayrıntılı olarak incelenecektir.

#### b) Yağ aglomerasyonu:

İnce kömürlerden piritik kükürdün ve diğer inorganik safsızlıkların atılmasında uygulanabilecek yöntemlerden birisi de yağ aglomerasyonudur. Yağ aglomerasyonun geçmişi 1920'lere kadar uzanmaktaysa da yakın zamanda Convertol Prosesi ve daha sonra da Almanların Olifloc Prosesi olarak ortaya tekrar çıkmıştır. Yağ aglomerasyonunda suda ıslanmayan ince kömürler hidrokarbonla birleşerek topaklandırılmakta; su ortamında kalan pirit ve şistler ise uzaklaştırılmaktadır. Convertol yönteminde şist parçacıklarının kömür topaklarından ayrılmasında santrüfjden, Olifloc yönteminde ise eleklerden yararlanılmaktadır. Optimum yağ miktarı ağırlıkça % 12-15 arasındadır. Yöntemin en çekici tarafı 50 mikronun altındaki kömür tanelerinin bile temizlenebilmesi ve düşük nem içerikli bir ürün elde edilmesine olanak sağlamasıdır.

İnce kömürlerin aglomerasyonunda yağdan başka heptan, pentan, perkloretilen ve sıvı karbondioksit de kullanılabilmektedir.

Yağ aglomerasyonu konusunda son gelişme, yağı dağıtılan (emulsifier) yüzey aktifleyici kullanmak suretiyle yağ sarfiyatının % 3'e kadar düşürülmesidir. Bu yöntemle flotasyon uygun olmayan oksitlenmiş veya sorunlu kömürler temizlenebilmektedir.

Yağ aglomerasyonu yönteminde kullanılan hidrokarbonun kalitesi çok önemlidir. Aglomerant olarak kullanılan yağın kükürt içeriği yüksekse, beslenen kömürün kükürt içeriğinden daha yüksek kükürtlü kömür elde edebilme olasılığı da vardır.

c) Flokülasyon:

Yüzey özellik farkından yararlanılarak zenginleştirme yapılan diğer bir yöntem de seçimli flokülasyondur. Çok ince taneli kömürlerin zenginleştirilmesinde kullanılan seçimli flokülasyon yönteminde çeşitli flokülantlar kullanılarak kömür tanecikleri floküle edilirken kül yapıcı inorganik madde ve piritik kükürt süspansiyonda dağılmış halde bırakılmaktadır (Dexter vd., 1973; Yazar vd., 1970 ve Lowe vd., 1986). Genellikle anyonik, katyonik ve nötr sentetik flokülantlar kullanılır. Bunların yanında selüloz, nişasta, sakız gibi doğal flokülantlar da kullanılmaktadır. Seçimli flokülasyon ile kömürlerin kül yapıcı mineral maddelerden zenginleştirilmesi kolaylıkla yapılırken, piritik kükürtün uzaklaştırılmasında genellikle yeterli kadar ilerleme sağlanamamıştır (Maher, 1983; Somasundaran, 1980; Koca vd., 1988).

#### **4.1.3. Elektrostatik ya da manyetik temizleme yöntemleri**

a) Elektrostatik ayırma:

Elektrostatik ayırma da kuru bir yöntem olup, mevcut nemin tamamen uzaklaştırılmasını gerektirir. Kömür ile diğer minerallerin farklı elektriksel yük ile yüklenmesi esasına dayanır. Triboelektrostatik ayırma yönteminde kömür tanecikleri pozitif elektrik yükü kazanırken diğer mineraller negatif yükle yüklenmekte, bunu takiben yapılan ayırmada önemli oranda piritik kükürt uzaklaştırılabilmektedir (Mills vd. 1993; Lockhard, 1984). Ancak endüstriyel ölçekte tercih edilen bir yöntem değildir. Almanya'da plot tesiste elektrostatik ayırıcıdan yararlanılmış ve piritik kükürt, uçucu maddesi düşük olan bir kömürde %0,5'den %0,4'e; orta uçuculu bir kömürde %1,1'den %0,5'e; uçucu maddesi yüksek olan bir taşkömüründe ise %1,9'dan %0,15'e düşürülmüştür (Kural, 1991).

b) Manyetik ayırma:

Manyetik ayırma ise serbestleşme boyutuna bağlı olarak yaş ya da kuru uygulanabilen bir yöntemdir. Manyetik alınganlıklarına göre mineralleri, alınganlık giderek artacak şekilde sırasıyla diamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik mineraller olarak üç gruba ayırmak mümkündür. Özellikle yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcıların geliştirilmesi ile manyetik alınganlığı düşük minerallerin de ayrılması mümkün olmuş, dolayısıyla yöntemin uygulama

alanı genişlemiştir. Kömür diamanyetik özellik gösterirken, pirit ve kömürdeki diğer bazı inorganik mineraller paramanyetik özelliktedirler. Bu farktan yararlanılarak matris tipi yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılardan geçirilen kömürde pirit ve kül yapıcı minerallerin ayrılması mümkündür (Liu, 1982; Özbayoğlu, 1986).

Bazı ısısal ve kimyasal işlemler sonucunda piritin manyetik duyarlılığın arttırılabileceği bulunmuş ve 200-300°C hava veya buharla muamele edilen kömürlerdeki paramanyetik sülfürlerin yüzeylerinde ferromanyetik bir oksit filminin oluşmasının manyetik duyarlılığının artmasına neden olduğu saptanmıştır. Yapılan bir araştırmada basınç altında yapılan oksitleyici bir alkali ekstrasyon işleminin kömür/pirit parçacıklarının manyetik duyarlılığı arttırdığını göstermiştir. Ekstraksiyon işlemi, manyetik yöntemle kükürt gidermede bir ön işlem olarak uygulanmıştır. 0,5 M NaOH ile 85°C'da ve 930 kPa'lık hava basıncında toplanmış kükürdün %50'sinin, piritik kükürdün ise %65'inin yüksek gradiyan manyetik ayırma yöntemi (HGMS) ile giderilmesi sağlanmıştır. Bir başka araştırmaya göre de yine bu yöntem ile %99 oranında piritik kükürdün uzaklaştırılabildiği belirtilmiştir (Lua vd. 1990).

#### **4.2. Kimyasal Yöntemler**

Kömürün kimyasal zenginleştirilmesi iki grupta incelenmektedir.

- Çeşitli gaz odalarında ısıtma işlemine bağlı yöntemler
- Yaş kimyasal yöntemler.

#### **4.3. Biyolojik Yöntemler**

Biyolojik yöntemler ile zenginleştirme, kömür içerisindeki piritik ve organik kükürdün mikroorganizmalar yardımı ile oksitlenip suda çözünebilen sülfatlara dönüşmesi temeline dayanmaktadır (Doğan ve Çelik., 1992).

## 5. KÖMÜR FLOTASYONU

### 5.1. Giriş

Flotasyon yöntemi kömürün ve içerdği kirleyticilerin yüzey özelliklerindeki farklılığa dayanır. Yöntem, ince boyutlu kömürün zenginleştirilmesinde kullanılan en etkin yöntemlerden birisidir; dahası piritik kükürtün uzaklaştırılması hedeflendiğinde endüstriyel ölçekte uygulanabilen tek yöntemdir (Miller vd., 1982; Le, 1981 ve Kaya, 1991).

Flotasyon yöntemi 1902 yılında mineral endüstrisinde uygulanmaya başlamış olmasına rağmen, kömürde ancak 1920 yılından itibaren uygulama alanı bulabilmiştir. İlk olarak Hollanda'da kömür flotasyonu yapılmıştır. Kil ve pirit parçacıklarının flotasyon ile uzaklaştırılmasının bu parçacıkların yeterli serbestleşme göstermelerine bağlı olması, ince öğütmeyi gerektirebilir. Fakat genel olarak kömür temizlemede serbestleşme amacı ile kırma ve öğütme işlemleri tercih edilmez. Kullanım alanları ve nakliye kolaylıkları bakımından kömürlerin iri boyutlarda mekanik yöntemlerle zenginleştirilmeleri tercih edilmelidir; genelde gravimetrik yöntemlerin uygulanamadığı çok ince kısım flotasyona gönderilir (Tefek, 1984, Göktepe, 2002). Günümüzde 0,5 mm altı ince kömürlerin temizlenmesinde köpük flotasyonu geniş bir şekilde uygulanmaktadır. Kömür madenciliğinde mekanizasyonunun gelişmesi nedeniyle elde edilen ince kömür oranının artması ve ince aksamda kül oranının yüksek olması, ekonomik nedenler ile incelerin de kazanılması, diğer bir deyişle kömürün flotasyonla temizlenmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Flotasyonu gerekli hale getiren diğer önemli bir nedense, özellikle son yıllarda artan çevre duyarlılığı nedeniyle kömürde kükürt başta olmak üzere kirleticilerin uzaklaştırılma zorunluluğudur.

Ayrıca ince kömür pulvarize yakıt olarak ve briket halinde kullanılabilir. Bu nedenle, bazı sorunlu kömürlerde kömürün tümünün öğütülerek flotasyon ile zenginleştirme yoluna da gidilmektedir. Bunun dışında ince kömür biriktelenerek; dumansız yakıt, karbon elektrotları, hidrojenasyon, karbonizasyon amacıyla kullanılır (Ateşok, 1986).

Flotasyon yöntemi kömürlere 4 amaç için uygulanır:

- Yıkama suyu içinde kalan toz kömürü kazanmak
- Lavvardan atılan ve siyah su (black water) denilen proses suyunu temizleyerek, çevre kirliliğini önlemek
- Kömürde bulunan kükürdüy gidermek
- Kömür içinde bulunan çeşitli masarelleri ayırarak koklaşabilir karışımlar hazırlamak.

## 5.2. Kömür Flotasyonu

Kömür, genel anlamda doğal hidrofobik bir mineraldir ve doğal hidrofilik özellik gösteren gangdan alkol ya da fenol tipi köpürtücülerle kolayca ayrılabilir. Ancak karmaşık, heterojen yapısı nedeniyle hidrokarbon yağları toplayıcı olarak ilave edilebilir. Kolay okside olma özellikleri nedeniyle her zaman düz flotasyona, geleneksel kömür toplayıcılarıyla iyi cevap vermez. Ancak piritin uzaklaştırılması biraz daha karmaşıktır (Glembotski vd. 1963; Nguyen vd., 1982; Carta vd., 1982; Miller vd. 1982).

Flotasyon yönteminin yaygın olarak kullanıldığı metal-sülfür cevherlerinden farklı olarak kömür yüzeyinin heterojen yapı göstermesi, yani yüzeylerin farklı derecelerde hidrofobik kısımlardan oluşması ve hatta hidrofilik kısımlar da bulundurabilmesi, kömür flotasyonunu metal cevherleri flotasyonundan ayırmakta ve doğal hidrofobik bir mineral olmasına rağmen kolayca ve etkin yüzdürülmesinde sorunların ortaya çıkmasına yol açmaktadır.

İnce kömürlerden piritik kükürdün flotasyonla uzaklaştırılması konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar, piritin çöktürölüp kömürün yüzdürölmesi veya kömürün bastırölüp piritin yüzdürölmesi esasına dayanmaktadır. Bazen her iki yöntem de bir arada uygulanmaktadır.

Kömür bastırölüp, pirit yüzdürölmeye çalışıldığında, doğal hidrofobik olan kömür de pirit konsantresine gelmekte ve bu da kömür kazanma verimini düşürmektedir. Tersine uygulandığında da; kömürde bulunan piritler, cevherlerde bulunan piritten 40 defa daha aktif olduğundan kömür flotasyonu sırasında kolayca bastırölulamakta, bu yüzden de etkin bir kömür/pirit ayırımı sağlanamamaktadır (Ateşok, 1986).

Kömür flotasyonunun, metalik mineral flotasyonundan önemli bir diğer farkı ise, flotasyon tane boyutunun daha iri oluşudur. Etkin diğer parametreler olarak, kullanılan reaktiflerin cinsi, kömür rankı ve yüzey oksidasyonu sayılabilir. Genel olarak kömür flotasyonundaki parametreler ve etkileri aşağıda ayrı ayrı ele alınmıştır.

### **5.2.1. Kömür yapısının flotasyona etkisi**

Kömürlerin flotasyon yeteneği; kömürleşme derecesi, petrografik elemanlar, kül yüzdesi ve kül yapıcı minerallerin cinsi, nem içeriği ve yüzey oksidasyonu gibi yapısal özelliklere bağlı olarak değişir. Bunlar; “temas açısı, nemin etkisi ve külün etkisi” alt başlıklarında kömürleşme derecesi ve karbon içeriği ile bağlantılı olarak ayrı ayrı incelenmiştir.

Kömürleşme derecesi bakımından çeşitli standartlara göre (ASTM, DIN) sınıflandırılan ve antrasitten linyite doğru uzanan fiziksel ve kimyasal özellikleri değişen kömür cinslerinden bahsedilebilir. Bu kömürler arasında flotasyon açısından en önemli özellikler nem içeriği, yüzey alanı ve yüzeydeki polar (-COOH-OH) bileşiklerdir. Polar bileşikler yüksek uçucu kısımlı taş kömürlerinden itibaren artarak, linyitlerde en yüksek oranda bulunur.

Çeşitli maseral gruplarının çeşitli pH’larda yüzey elektrik yükleri de değişmektedir. Fusain dışındaki maseral grupları ve bitümlü kömür, geniş bir pH aralığında negatif yüzey yükü taşımaktadır. Bu yüzden de bazı sorunlu kömürlerin katyonik kolektörlerle yüzdürülmesi mümkün olabilir (Kural, 1991).

### **Temas Açısı**

Bütün katılarda olduğu gibi kömürün de doğal yüzme özelliği temas açısıyla belirtilir. Bu açı kömürün kömürleşme derecesine bağlı olarak değişir. % 69 C içeren kömür en yüksek doğal yüzme özelliğine sahiptir. Karbon içeriği bu değerden daha fazla olursa, kömürün doğal yüzebilirliği azalır. Bunun nedeninin karbon atomlarının 3 boyutlu yapı oluşturmaya başlamasının olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Parçacık-kabarcık yapışmasında öncelikle kömürün heterojen yapısı ve yüzey kimyasal özellikleri

önemlidir. Yüzey özellikleri esas alınarak, yüzeye kimyasal olarak adsorbe olan toplayıcıların kullanımıyla, daha geniş çapta uzun mesafeli iç moleküler kuvvetlerin oluşması sağlanır. İç moleküler kuvvetlerin geniş çapta oluşması ise parçacığın kabarcığa yapışma eğilimini artırır. Temas açısı düşük karbonlu kömürlerde (linyit) karbon oranı arttıkça hızla artarken, yüksek karbonlu kömürlerde ise (semi antrasit-antrasit gibi) yavaşça azalmaktadır. Genellikle yüksek kömürleşme derecesindeki kömürlerde temas açısı 10-20° arasında değişirken, düşük kömürleşme derecesindekilerde 0°'ye kadar düşmektedir. Saf su içinde çeşitli kömür yüzeylerinde 20°-65° arasında değişen temas açılarının ölçüldüğü çeşitli kaynaklarda belirtilmiştir.

Kömürlerdeki maseraller, doğal flotasyon yetenekleri bakımından önemli rol oynarlar. Bazı maseral gruplarında belirli bir temas açısı ölçülememekte (fusain), bazılarında (vitrain) ise ölçülebilmektedir. Temas açısı ölçümleri sonunda, kömür litotipleri arasında yüzebilirliğinin Fusain, Durain, Vitrain doğrultusunda artışı bulunmuştur. (Ateşok, 1986, Tefek, 1984)

### **Nem**

Kömürün nem miktarı flotasyon verimini ters yönde etkiler. Linyit'ten antrasite doğru gidildikçe nem miktarı azalır. Buna bağlı olarak da kömürün yüzebilme yeteneği artar.

### **Kül**

Kömürün kül miktarında flotasyon üzerinde etkisi büyüktür. Kül yapıcı kısımlar kömürün ıslanma özelliğini etkileyebilir. Mineral maddeler (inorganikler) suda kolaylıkla ıslanabilir özellik gösterdiklerinden, kömürde kül miktarı arttıkça doğal yüzebilirlik ve temas açısı azalır. kül yapıcı malzemenin tipide önemlidir. Talk tipi kolay yüzebilir malzeme bulunduğunda, seçimli ayırma güçleşebilir (Ateşok, 1986, Kural, 1991).

#### **5.2.2. Oksidasyonun flotasyona etkisi**

Genellikle yeni üretilen bir kömürün bir süre açıkta kalan bir kömürden, daha iyi yüzdüğü bilinmektedir. Kömürün yüzeyinde oksitlenme neticesinde OH<sup>-</sup> ve COOH<sup>-</sup> gibi grupların oluştuğu saptanmıştır. Normal atmosfer sıcaklığında bile havanın oksijeni kömür

yüzeyini oksitleyerek flotasyon yeteneğini azaltır. Yüzdürülmesi istendiği zaman kömür potasyum permanganatla ( $\text{KMnO}_4$ ) işleme sokularak oksitlenmesi sağlanır. Oksit tabakasını bozmak gerektiğinde %1'lik NaOH çözeltisi ile kömür pülünü karıştırmak yeterlidir. Oksitlenme düşük nitelikli kömürlerde yüksek niteliklilerden daha fazladır. Buna bağlı olarak da düşük nitelikli kömürlerin flotasyon yeteneği azdır. Kömür litotiplerinden Vitrain çok çabuk oksitlenir. Oksitlenme özelliği Fusain Duarin Clarain ve Vitrain doğrultusunda artar (Ateşok, 1986).

### **5.2.3. Tane boyutunun flotasyona etkisi**

Diğer, özellikle metalik mineral flotasyonu ile kömür flotasyonu arasındaki en önemli farklardan birisi, tane boyutudur. Metalik mineral flotasyonunda ortalama tane boyutu -75 mikron civarında iken kömürde bu değer -6 mm'ye kadar çıkabilir; ancak tane boyutu büyüdükçe flotasyon zamanı uzamaktadır. Kömürün iri boyutlarda diğer fiziksel yöntemlerle kazanılması daha kolay olduğundan, flotasyon genellikle süzgeç elekleri (0,5 mm açıklıklı) altına geçen malzemelere uygulanır (Kural, 1991 ,Ateşok 1986).

### **5.2.4. Katı oranının flotasyona etkisi**

Katı oranı dikkate alındığında kömürün diğer cevherlere göre yarı yoğunlukta olduğu hesaba katılmalıdır. En iyi neticeler % 20-30 katı oranında elde edilmiştir. Ancak kömür flotasyonunda katı oranı kömürün düşük özgül ağırlığı nedeniyle mümkün mertebe düşük olmasında yarar vardır. Bu nedenlerden ötürü optimum katı oranı çeşitli araştırmacılar tarafından %12-15 olarak saptamış olmakla birlikte %12 dir. Bu orana kadar flotasyon hızı sabit kalmakta daha yüksek katı oranlarında ise hız azalmaktadır. Temiz bir kömür lavesi, ancak düşük pülp yoğunluklarında elde edilir. Elde edilen verim ise, yüksek pülp yoğunluğunda elde edilen toplam verimden daha düşük olur. Lavvarlarda amaca göre pülp yoğunlukları tayin edilir. Örneğin, karbon elektrotlar için çok temiz bir kömür istenir. Bu nedenle katı oranı tesiste düşük tutulur (Kural,1991,Ateşok, 1986,Göktepe ,2002).

### **5.2.5. pH'ın flotasyona etkisi**

Belirli pH aralıklarında flotasyonun zor olduğu iyi bilinmekte ve bundan hem verim hem de ürünlerin kalitesi etkilenmektedir. Genelde pH 6 ile 8 arasında iken engellenen pirit

flotasyonu nedeni ile daha yüksek verim elde edilir ve pH 9'un üzerinde verim düşüktür. Suda pH 7 civarında (nötr pH) kömür yüzeyleri negatif yüklü olup, potansiyel değeri çok küçüktür. Pülp asitlendirilecek olursa kömür yüzeyleri  $H^+$  iyonlarını adsorbe eder ve bir pH değerinde (genellikle 2,5-5,0 arası) sıfır yük değerine ulaşır. Bu değerde yüzeyinde hidrofilikliği maksimum olur. Daha yüksek asitlilik durumunda ise, kömür yüzeyi hidrojen iyonu konsantrasyonunun artması nedeniyle pozitif olur. Alkali pülpelerde ise, kömür tanelerinin yüzeyleri  $OH^-$  iyonlarını adsorbe edeceğinden negatif işaret taşır. Bu negatiflik pH aşırı asitliğe gittikçe artar. Her iki durumda da (aşırı asitlik ve aşırı alkalilik) kömür yüzeylerinin yüzebilme yeteneği azalır. Bu nedenle, kömürün en iyi yüzdürülebildiği pH değeri, nötr pH değerleridir. Endüstriyel çapta ekonomik açıdan pH ayarlaması için en sık kireç kullanılır. Güçlü hidrofobik kömürler, pH 3-11 gibi geniş bir aralıkta yüzebilirken, daha genç kömürler ise sadece pH=7 de yüzebilmektedirler (Göktepe, 2002, Ateşok, 1986).

#### **5.2.6. Reaktif miktarlarının flotasyona etkisi**

Kömürlerin doğal yüzebilirliğine rağmen kömürün flotasyon işleminde çeşitli reaktifler kullanılır. Genellikle toplayıcı ve köpürtücü reaktifler berabere emülsifiye edilerek kullanıldığında daha olumlu sonuçlar alınmaktadır. Kullanılacak reaktif miktarlarının çok dikkatli seçilmesi gerekir. Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen reaktif miktarları aşağıda verilmiştir.

-Kresilik asidin 50-100 mg/lt ilavesi ile flotasyon verimi en üst noktalara ulaşmaktadır.

-Köpürtücüler genellikle 0.05-0.25 kg/ton ve toplayıcılar ise 0.25-1.0 kg/ton arasında kullanılmalıdır (Ateşok, 1986).

#### **5.3. Flotasyon Reaktifleri**

Daha önce de belirtildiği gibi kömür teorik olarak doğal hidrofobik bir mineraldir ve hava kabarcığına yapışıp yüzme eğilimindedir. Ancak yüzeyinin heterojen yapısı yüzünden olduğu haliyle yapılan flotasyonlarda verim çok düşük olur. Kömür flotasyonunda gerek kömür kazanma verimini arttırmak ve gerekse kül oranını düşürmek için bazı reaktifler kullanılmaktadır. Genel olarak kullanılan reaktifleri kontrol reaktifleri, bastırıcılar, toplayıcılar ve köpürtücüler olarak gruplandırmak mümkündür.

**Kontrol Reaktifleri:** Kireç, sodyum siyanür sodyum karbonat ve sodyum silikat kömür flotasyonunda en çok kullanılan kontrol reaktifleridir. Kireç ve sodyum siyanür piriti bastırmada kullanılır. Sodyum karbonat, sodyum silikat ise kil ve şisti dağıtır.(Ateşok, 1986)

**Bastırıcı reaktifler:** Tannin, nişasta ve dekstrin gibi doğal organik kolloidler kömürü bastırır. Bunun yanında yüzeylerin oksidasyonu. kil şlamı ile kömür tanelerinin yüzeylerinin kaplanması ve pülp içine fazla miktarda sodyum klorür alüminyum klorür ve alüminyum sülfat konulması kömürü bastırmada rol oynar. (Kural, 1991,Ateşok,1986) Kömürün nötr yağlarla yüzdürülmesi durumunda, sülfürlü mineraller sodyum siyanür, demir sülfat veya kireç gibi reaktiflerle; diğer sodyum silikatlı mineraller ise sodyum silikatla bastırılarak, düşük küllü ve kükürtlü konsantrelerin kazanılmasına çalışılır.

**Toplayıcılar:** Toplayıcının köpürtücü ile birlikte kullanımının kömür flotasyon verimini önemli şekilde arttırdığı bilinmektedir. Toplayıcının amacı kömür yüzeyini daha fazla hidrofobik yapmaktır. Teorik olarak yüksek karbonizasyon dereceli kömürler oldukça fazla hidrofobiktir ve flotasyonları için toplayıcı gerektirmezler. Bununla beraber pratikte az miktarda fueloil kuvvetli hidrofobik kömürlere bile ilave edilerek, daha yüksek kömür verimi elde edilmekte ve iri parçaların yüzmesi sağlanmaktadır (Göktepe, 2002) Genellikle kömür flotasyonunda nötr hidrokarbonlar, kerosen tipi yağlar ve fueloil kullanılır.(Ateşok, 1986) Özellikle pirit ve markasit gibi kükürt kaynağı mineralleri uzaklaştırmak amacı ile, kömür bastırıldıktan sonra ksantat tipi bir toplayıcı bu mineralleri yüzdürebilir. Sülfür flotasyonunu takiben sabun veya sülfonatlarla diğer refakatçi minerallerin de yüzdürülmesi önerilmekte ise de bu yöntemin endüstriyel uygulaması yoktur. (Kural, 1991)

**Köpürtücü reaktifler:** Çam yağı, kresilik asit, izooktanol ve alkalilerin çeşitli türleri kullanılır. Kömürde en çok kullanılan sentetik köpürtücü MIBC'dir. (Ateşok 1986, Kural, 1991)

#### **5.4. Kömür Flotasyonunda Son Yıllarda Yapılan Çalışmalar**

Düşük ranklı ve yüzeyi okside olmuş kömürlerde Liu ve arkadaşları (1994) piritin yüzebilirliğinde pH'ın ve çözünmüş minerallerin etkisini çalışmış ve pH ve Ca iyonu artışının

pirit uzaklaştırmada olumlu etkisi olduğunu belirlerken; Renhe ve diğerleri (1999), aynı kömür üzerinde, düz flotasyonda oksijenleştirilmiş topplayıcıların konvensiyonel kömür topplayıcılardan daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Stonestreet ve Franzidis (1992) kömürde düz ve ters flotasyon karşılaştırması laboratuvar ölçekli flotasyon kolonunda yapılmışlardır.   alışmalar temiz kömür ve saf kuvarstan oluşan sentetik karışımlarla yapılmış ve ters flotasyonda kuvars topplayıcısı olarak amin, kömürün bastırılmasında dextrin ve köpürtücü olarak trimetil amonyum bromid kullanılmıştır; düz flotasyonda kömür topplayıcısı olarak Shellsol A kullanılmıştır. Köpüğün hidrofob tane taşıma kapasitesine bağlı olarak, ters flotasyonun küçük bir verim düşüşü ile çok daha etkin bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır. Sis ve arkadaşları (2003) kömür k  l  n   azaltma amaçlı yaptıkları flotasyon çalışmalarında geleneksel kömür reaktifleri ile iyonlaşan topplayıcıları karşılaştırmışlardır. Güney Afrika kömürleri üzerinde yapılmış kolon ve Jameson hücresi flotasyon sonuçlarının karşılaştırılmasında ise, Jameson hücresinin daha yüksek kapasite ile daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur (Haris vd., 1994). Düşük ve yüksek ranklı kömürlerde tane boyunun seçimlilik ve verim üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada, ince boyutlarda oluşan kömür-yağ ve kömür-kömür agregasyonlarının seçimliliği önemli ölçüde azalttığı, topplayıcının disperse halde sisteme verilmesinin olumlu yönde etkili olduğu gösterilmiştir (Polat vd., 2003). Erol ve arkadaşları (2003), bitümlü kömürlerde reaktiflerin flotasyon verimi ve k  l uzaklaştırmadaki etkinliği üzerine yaptıkları çalışmada, klasik kömür reaktiflerinde verim artarken, reaktif karışımlarının seçimliliği arttırdığını ve ayrıca tane boyunun da yanabilir verim ve k  l azaltmada oldukça etkin bir parametre olduğunu göstermişlerdir. Al Tawehel ve arkadaşları da (1986) tane boyutu ve yüzey özelliklerinin kömürün yüzebilirliği üzerinde direkt etkin parametreler olduğunu göstermişlerdir.

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 6.1. Numune

Numune Doğu Karadeniz Bölgesi'nden alınan yüksek kalorifik değerli ve yüksek kükürt içerikli kömürdür. -10 cm olarak gelen numunenin tümü önce -250 mikron'a indirilmiştir. Sonra yaklaşık 250 g'lık 5 temsili numune alınıp birisi -250 mikron'da bırakılmış, diğerleri 210, 142, 110 ve 75 mikron altına indirilmiştir.

Temsili numuneler üzerinde kül, uçucu, kalorifik değer ve kükürt tayinleri yapılmıştır. Toplam kükürt tayini için Escha yöntemi, kalorifik değer tayini için ise Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama laboratuvarındaki EPSON HX marka kalorimetre kullanılmıştır.

Numunenin yapılan analiz sonuçları;

Kül (%) : 8,97

Uçucu (%) : 33,05

Kükürt (%) : 2,07

Isıl değer : 6100 Kcal/kg

-150 mikron numunenin boyut dağılımı Tablo 6.1'de verilmektedir.

Tablo 6.1. -150 mikron malzemenin boyut dağılımı

| Boyut aralığı<br>(mikron) | Malzeme miktarı<br>(%) | Kümülatif miktar<br>(%) |
|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| -150+106                  | 57,84                  | -                       |
| -106+75                   | 3,97                   | 42,16                   |
| -75+61                    | 7,06                   | 38,19                   |
| -61                       | 31,13                  | 31,13                   |

## 6.2. Yöntem

Çalışmada, numunedeki kükürdün uzaklaştırılabilirliğinin araştırılmıştır. Çalışma;:

1. Mineralojik incelemeler
2. Mikroflotasyon çalışmaları
3. Laboratuvar ölçekli flotasyon deneyleri

olarak özetlenmiştir.

### 6.2.1. Mineralojik İncelemeler

Kömür numunesinden, cevherin aşırı gevrek yapısı sebebi ile düzgün parlak kesitler hazırlanamamıştır. Elde edilen, çok düzgün olamayan kesitler önce binoküler mikroskopta incelenmiştir.

Kırıcı çıkışından -1,90+1,30; -1,30+0,95 ve -0,57+0,32 mm boyutlarında numuneler alınmıştır. Bu numuneler bromoform ve alkol ile hazırlanmış 2 g/cm<sup>3</sup> ve 1,64 g/cm<sup>3</sup> yoğunluklarda yüzdürme-batırma işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen yüzen ve batan ürünler binoküler mikroskopta incelenerek kömürdeki gang mineralleri tanımlanmaya çalışılmıştır.

### 6.2.2. Mikroflotasyon çalışmaları

-150 mikron boyutundaki numunelerde 80 ml'lik mikroflotasyon hücresinde düz ve ters flotasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerden alınan ürünlerin kükürt içerikleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarındaki kükürt analiz cihazı ile saptanmıştır.

Numune, 30 ml 1500 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> içeren saf su bulunan 50 ml'lik behere alınmıştır. Manyetik karıştırıcı ile beherde silikatla şartlandırma yapılmıştır. Düz flotasyonda daha sonra toplayıcı şartlandırması yapılmış, ters flotasyonda ise önce kömür bastırıcısı olan dekstrin şartlandırmasını takiben toplayıcı ilavesi yapılmıştır. Reaktifler tamamlandıktan sonra pülp mikro flotasyon hücresine aktarılıp yine manyetik karıştırıcı ile karıştırarak hacme tamamlanmıştır. Son aşamada hücreye köpürtücü ilavesi ile hava verilerek deney tamamlanmıştır. Her iki çalışmada da 60 sn köpük toplanmıştır. Kullanılan deney düzeneği Şekil 6.1'de verilmektedir.



Şekil 6.1. Mikroflotasyon deney düzeneği.

**a) Düz flotasyon deneyleri:**

Düz flotasyon deneylerinde kömür yüzdürülmeye, demir-sülfür atıkta bırakılmaya çalışılmıştır. Bastırıcıya gerek görülmemiş, sadece sodyum silikat ile inceler dağıtılmaya çalışılmıştır. Deneyler doğal pH'da yapılmıştır. Hepsi petrol türevi olan çeşitli reaktifler toplayıcı olarak kullanılmıştır. Köpürtücü olarak literatürde kömür flotasyonlarında en yaygın kullanılan reaktiflerden biri olan MIBC iyi sonuç vermediği için tercih edilmemiştir.

Kullanılan reaktifler:

pH ayarlama : - (doğal pH'da çalışıldı)

Dağıtıcı :  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

Toplayıcı : Philflo; Orfom MCX; Orfom MCO; Molyflo; Gazyağı; Fuel-oil; Mazot

Köpürtücü : Çamyacı

### **b) Ters flotasyon deneyleri:**

Ters flotasyon deneylerinde metal-sülfürler; özellikle demir-sülfürler ksantatlarla yüzdürülürken, kömür bastırılarak atıkta bırakılmaya çalışılmıştır. Deneyler hem doğal pH'da, hem de pirit pH 5 ve altında etkin yüzdüğü için pH 5 civarlarında yapılmıştır.

Kullanılan reaktifler:

pH ayarlama :  $H_2SO_4$

Dağıtıcı :  $Na_2SiO_3$

Bastırıcı : Dextrin

Toplayıcı : Sodyum amil ksantat (NaAX), potasyum etil ksantat (KEX)

Köpürtücü : DF 250

### **6.2.3. Mekanik flotasyon çalışmaları**

Mekanik flotasyon çalışmaları Denver laboratuvar tipi flotasyon makinesinde, 1 lt'lik hücrede yapılmıştır. Karıştırma hızı 1200 devir/dakikada sabit tutulmuştur. Tüm deneylerde katı oranı %8.5'de tutulmuştur. Mikro flotasyon çalışmalarını kontrolü için bu çalışmalar da hem düz ve hem de ters flotasyon olarak iki şekilde yapılmıştır. Ürünlerin kükürt analizleri Escha yöntemi ile yapılmıştır.

### **a) Düz flotasyon deneyleri:**

Mikroflotasyon çalışmalarına paralel olarak düz flotasyon deneylerinde kömür yüzdürülmeye çalışılırken bastırıcıya gerek görülmemiş, sadece sodyum silikat ile inceler dağıtılmaya çalışılmıştır. Toplayıcı olarak, mikroflotasyon çalışmalarında iyi sonuç veren Cytec firmasının ürettiği petrol türevi Philflo adlı bir reaktif ile yine aynı firmanın Accoal adında sentetik yeni bir kömür toplayıcısı kullanılmıştır. Her iki toplayıcı ile alınan sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Köpürtücü olarak da yine aynı firmanın kullanılan toplayıcı ile iyi çalıştığını belirttiği AF 88 kullanılmıştır; MIBC iyi sonuç vermediği için tercih edilmemiştir. Bu çalışmanın koşulları aşağıda verilmektedir.

Deney koşulları:

%Katı : 8,5

Boyut : -150 mikron

pH : Doğal (6,5)

Dağıtıcı : Sodyum silikat  
D. Dozajı (g/t) : 2 000  
Şart. Süresi : 8 dk  
Toplayıcı : Philflo, Accoal  
T. Doz (g/t) : 2 000; 3 000; 5 000  
Şart. Süresi : 5 dakika  
Köpürtücü : AF 88  
K. Dozajı (g/t) : 20  
Şart. Süresi : 3 dakika  
Köp. Alma : 90 saniye

**b) Ters flotasyon deneyleri:**

Ters flotasyon çalışmalarında ise, toplayıcı olarak yine Cytec firmasının ürettiği, temiz ya da kısmen okside olmuş metal sülfürlerde, özellikle pirit için etkin olarak kullanılabileceği belirtilen ve dithiofosfat türünde bir toplayıcı olan DF 407 kullanılmıştır. Bu reaktifin etkinliği konusunda fikir edinebilmek için ayrıca ksantatla (sodyum amil ksantat) da bir deney yapılmış ve DF 407 ile karşılaştırılmıştır. Kömür flotasyonunda çok yaygın olarak kullanılan MIBC de köpürtücü olarak seçilmiştir. Ters flotasyon deneylerinin koşulları aşağıda verilmektedir.

Deney koşulları:

%Katı : 8,5  
Boyut (mikron) : -250; -210; -150; -106; -75  
pH : 5; Doğal (6,5); 8  
Bastırıcı : Dextrin  
B. Dozajı (g/t) : 2 500; 4000  
Ş. Süresi : 8 dk  
Toplayıcı : AF 407, NaEX  
T. Doz (g/t) : 150; 300; 450  
Şart. Süresi : 5 dakika  
Köpürtücü : MIBC  
K. Dozajı (g/t) : 20  
Şart. Süresi : 3 dakika  
Köp. Alma : 90 saniye

### 6.3. Deney Sonuçları

#### 6.3.1. Yüzdürme-batırma ve mikroskop çalışmaları

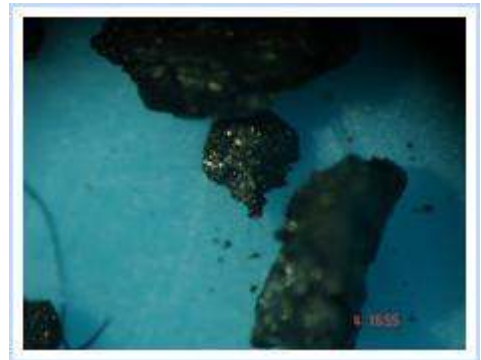
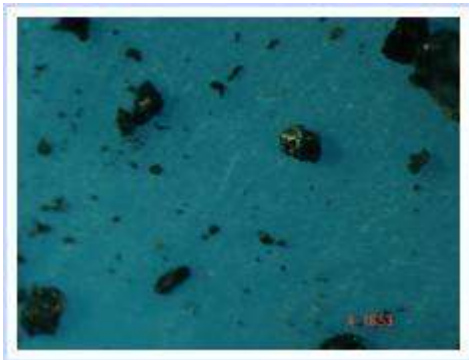
Binoküler mikroskopta yapılan ilk incelemede yan taş olarak hem kalsit vb. karbonatlar ve hem de silikatlar gözlenmiştir. Cevherdeki parlak metal mineralleri yanında, kömür yüzeylerinde de önemli oranda oksitlenmeye rastlanmıştır.

Daha sonra iri boyutlu cevher numunelerinde yapılan yüzdürme-batırma deneylerinin sonuçları aşağıda özetlenmektedir:

1.  $-1,90+1,30$  mikron;  $2 \text{ g/cm}^3$  yoğunlukta %11,84'sı batmış.
2.  $-1,30+0,95$  mikron;  $2 \text{ g/cm}^3$  yoğunlukta %7,13'sı batmış.
3.  $-0,57+0,32$  mikron;  $2 \text{ g/cm}^3$  yoğunlukta %6,41'si batmış.
4. ;  $-1,90+1,30$  mikron  $1,64 \text{ g/cm}^3$  yoğunlukta %12,63'si batmış.

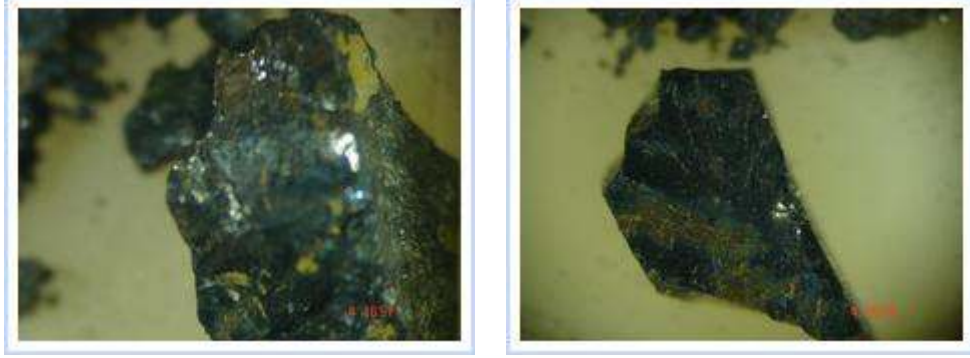
$2 \text{ g/cm}^3$  yoğunlukta boyut inceldikçe batan oranının artması, serbestleşmenin artması ile daha temiz gangın battığı düşüncesi ile yapılan mikroskop incelemelerinde de bu görülmüştür.

Alınan yüzdürme-batırma ürünleri daha sonra binoküler mikroskopta incelenmiştir. Şekil 6.2; 6.3; 6.4; 6.5; 6.6'da sırasıyla  $-1,90+1,30$  mikron batan ( $\rho: 2 \text{ g/cm}^3$ );  $-1,90+1,30$  mikron yüzen ( $\rho: 2 \text{ g/cm}^3$ );  $-0,95+0,57$  mikron batan ( $\rho: 2 \text{ g/cm}^3$ );  $-0,95+0,57$  mikron batan ( $\rho: 1,64 \text{ g/cm}^3$ );  $-0,95+0,57$  mikron yüzen ( $\rho: 1,64 \text{ g/cm}^3$ ) numunelerin binoküler mikroskopta çekilmiş fotoğraflarını göstermektedir.



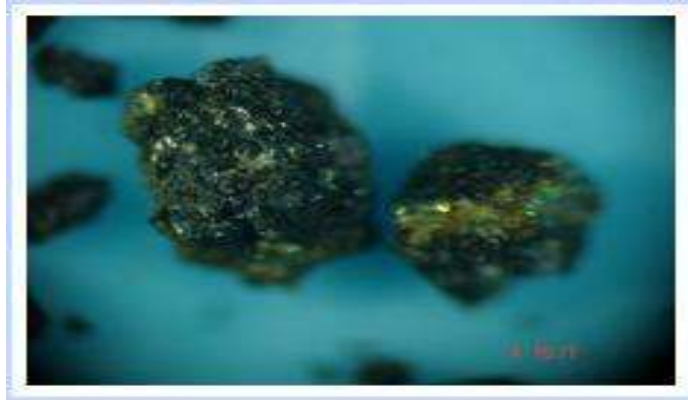
Şekil 6.2.  $-1,90+1,30$  mikron batan ( $\rho: 2 \text{ g/cm}^3$ ) ürünün binoküler mikroskop görüntüsü.

Şekil 6.2'deki ilk resimde görülen parlak tane serbest bir metal mineral tanesidir. İkinci resimde ise serbestleşmemiş bir kömür-metal minerali tanesi görülmektedir.



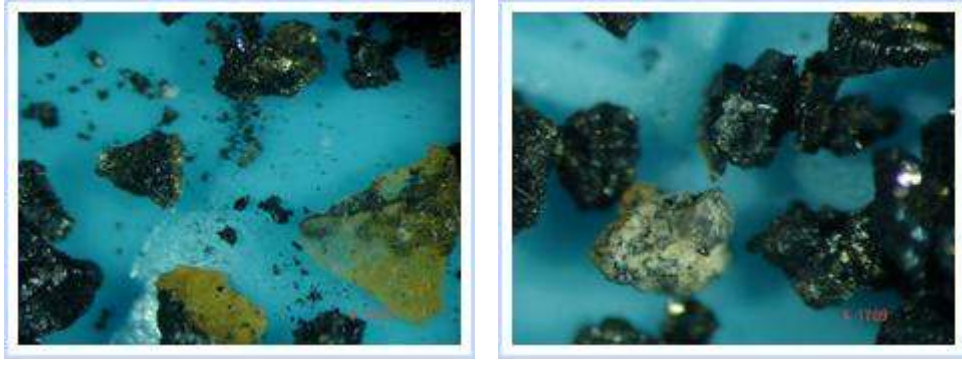
Şekil 6.3. -1,90+1,30 mikron yüzen ( $\rho: 2 \text{ g/cm}^3$ ) ürünün binoküler mikroskop görüntüsü.

Şekil 6.3'deki iki resim yüzeyi kirli serbest bir kömür tanesini göstermektedir.



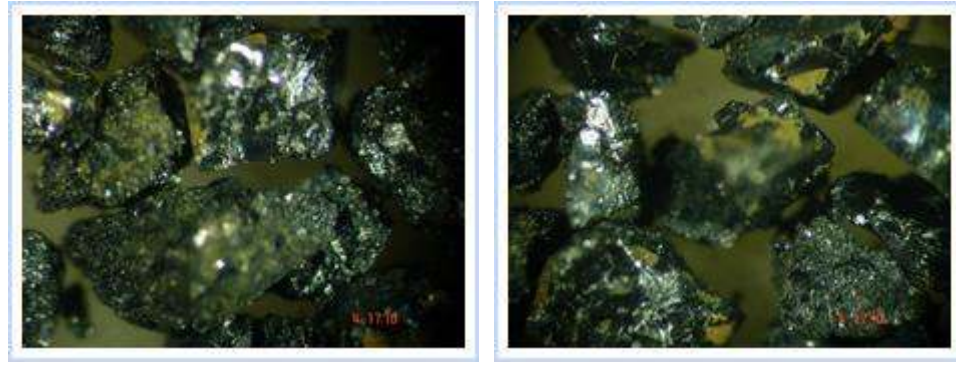
Şekil 6.4. -0,95+0,57 mikron batan ( $\rho: 2 \text{ g/cm}^3$ ) ürünün binoküler mikroskop görüntüsü.

Şekil 6.3'de görülen sağdaki tane, kenarlarında kömür bulunan, ortası metal minerali ve daha iç tarafta ise silikat kristalleri olan bağlı bir tanedir. Soldaki tane ise yine metal-kömür bağlı tanesidir.



Şekil 6.5. -0,95+0,57 mikron batan ( $\rho$ : 1,64 g/cm<sup>3</sup>) ürünün binoküler mikroskop görüntüsü.

Şekil 6.5’de, 1,64 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta batan ürünlerdeki metal dışı safsızlıklar net olarak görülmektedir.



Şekil 6.6. -0,95+0,57 mikron yüzen ( $\rho$ : 1,64 g/cm<sup>3</sup>) ürünün binoküler mikroskop görüntüsü.

Şekil 6.6’de verilen her iki resimde de serbest kömür taneleri yüzeylerinde kirlilikler görülmektedir.

### 6.3.2. Mikro flotasyon çalışmaları

80 ml’lik hücrede düz ve ters olarak iki şekilde yapılan Mikroflotasyon çalışmalarının sonuçları aşağıda ayrı ayrı verilmektedir.

#### 6.3.2.1. Düz mikro flotasyon çalışmaları

Deney parametreleri Tablo 6.2.’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Deney parametreleri

| Parametre                              | Değişim Aralığı                                                  |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Katı oranı (%)                         | 2                                                                |
| Boyut (mikron)                         | -150                                                             |
| Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g/t) | 1500                                                             |
| Şartlandırma (dk)                      | 5                                                                |
| pH                                     | Doğal (yaklaşık 8,5)                                             |
| Toplayıcı                              | Orfom MCO, Orfom MCX, Molyflo, Philflo, Mazot, Gazyağı, Fuel-oil |
| Toplayıcı doz (g/t)                    | 6500                                                             |
| Şartlandırma                           | 5                                                                |
| Köpürtücü                              | Çamyağı                                                          |
| Köpürtücü d. (g/t)                     | 1/3 damla                                                        |
| Şartlandırma (dk)                      | 2                                                                |

Aşağıdaki Tablo 6.3.'de ise yapılan deneyler ve elde edilen ürün miktarları görülmektedir.

Tablo 6.3. Deney parametreleri ve ürün miktarları

| Deney no | Parametre<br>Toplayıcı cinsi | Yüzen (%) | Batan (%) |
|----------|------------------------------|-----------|-----------|
| 1        | Gazyağı                      | 26,28     | 73,72     |
| 2        | Mazot                        | 20,33     | 79,67     |
| 3        | Orfom MCX                    | 29,01     | 70,99     |
| 4        | Molyflo                      | 41,26     | 58,74     |
| 5        | Orfom MCO                    | 62,69     | 37,31     |
| 6        | Philflo                      | 64,23     | 35,77     |
| 7        | Fuel-oil                     | 69,48     | 30,25     |

Tablo 6.3.'den de görüleceği üzere sadece Orfom MCO, Philfo ve Fuel-oil'le malzeme etkin olarak yüzdürülebilmiş, diğer toplayıcılarda önemli miktarlarda kömür artıktaki kalmıştır.

Numunelerde yapılan kükürt analizlerinde ise yüzen ve batan üründe herhangi bir farklılık gözlenmemiş, dolayısıyla düz flotasyonla herhangi bir ayırım yapılamayacağına karar verilmiştir.

#### 6.3.2.2. Ters mikro flotasyon çalışmaları

Deney parametreleri Tablo 6.4.'te verilmiştir.

Tablo 6.4. Deney parametreleri

| Parametre                              | Değişim Aralığı        |
|----------------------------------------|------------------------|
| Katı oranı(%)                          | 2                      |
| Boyut(mesh)                            | -100                   |
| Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g/t) | 1500                   |
| Şartlandırma (dk)                      | 2                      |
| Bastırıcı                              | Dextrin                |
| Bastırıcı dozajı (g/t)                 | 1000-2000-3000         |
| pH                                     | Doğal(yaklaşık 8,5); 5 |
| Toplayıcı                              | EX; AX; %50 EX+%50 AX  |
| Toplayıcı dozajı (g/t)                 | 50, 125, 200           |
| Şartlandırma (dk)                      | 5                      |
| Köpürtücü                              | DF 250                 |
| Köpürtücü dozajı (g/t)                 | 1 damla                |
| Şartlandırma (dk)                      | 2                      |

Tablo 6.5. Deney parametreleri ve ürün miktarları

| Deney no | Parametre Toplayıcı cinsi | Değer (g/t) | Yüzen (%) | Batan (%) |
|----------|---------------------------|-------------|-----------|-----------|
| 8        | EX dozajı (dex. 100g/t)   | 50          | 16,67     | 83,33     |
| 9        | EX dozajı                 | 125         | 17,51     | 82,49     |
| 10       | EX dozajı                 | 200         | 25,11     | 74,89     |
| 11       | Dextrin miktarı           | 1000        | 25,30     | 75,70     |
| 12       | Dextrin miktarı           | 2000        | 20,18     | 79,82     |
| 6        | Dextrin miktarı           | 3000        | 14,55     | 75,45     |

Ters flotasyon deneylerinde ise, yüksek dextrin miktarında yüzen ürün oranı çok düşük, kükürt içeriği ise %3,5 civarlarında ölçülmüştür. Bu da yüksek dextrin dozajı ile, düşük pH

değerlerinde etkin bir metal-sülfür toplayıcısı ile metal sülfürlerin ayrılabilceğı düşüncesini oluşturmuştur.

### 6.3.3. Mekanik flotasyon çalışmaları

Düz flotasyon çalışlarında, mikroflotasyon çalışlarına paralel olması için -150 mikron malzeme kullanılmıştır. Mekanik hücrede de düz ve ters flotasyon çalışılmıştır.

#### 6.3.3.1. Düz mekanik flotasyon çalışmaları

Düz flotasyonda mikroflotasyon çalışmaları ile mekanik flotasyon çalışlarını karşılaştırmak için, önce mikro flotasyonda kullanılmış ve en iyi sonuçlardan birisinin alındığı philflo kullanılmıştır. İkincisinde ise yine Cytec firmasının ürettiğı ve kömür için sentetik bir toplayıcı olan Accoal kullanılmıştır. Burada sentetik ve yeni bir kömür toplayıcısı olan Accoal'un etkinliğı de araştırılmıştır.

Deney parametreleri Tablo 6.6'da verilmiştir. Tablo 6.7'de alınan ürünlerin miktarlarını, kükürt oran ve dağılımlarını göstermektedir.

Philflo ile alınan sonuç mikro flotasyon deneylerini desteklemektedir. Ayrıca Tablo 6.7.'de de görüldüğü gibi kullanılan kömür toplayıcıların her ikisi de kükürdü de yüzdürdüğü için düz flotasyonun uygun olmadığına karar verilmiştir.

Tablo 6.6. Deney parametreleri

| Parametre                              | Değişim Aralığı      |
|----------------------------------------|----------------------|
| Katı oranı (%)                         | 8,5                  |
| Boyut (mikron)                         | -150                 |
| pH                                     | Doğal (yaklaşık 6,5) |
| Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g/t) | 2000                 |
| Şartlandırma (dk)                      | 8                    |
| Toplayıcı                              | Philflo, Accoal      |
| Toplayıcı doz (g/t)                    | 3 000                |
| Şartlandırma (dk)                      | 5                    |

|                   |       |
|-------------------|-------|
| Köpürtücü         | AF 88 |
| Köpürtücü (g/t)   | 20    |
| Şartlandırma (dk) | 3     |
| Köpük alma (sn)   | 90    |

Tablo 6.7. Farklı toplayıcılarla kükürt dağılımı

| Değer (g/t) | Ürün  | Ağırlık (%) | Kükürt (%) | Dağılım(%) |
|-------------|-------|-------------|------------|------------|
| Philflo     | Yüzen | 23,60       | 2,36       | 26,92      |
|             | Batan | 76,40       | 1,98       | 73,08      |
| Accoal      | Yüzen | 27,70       | 2,41       | 32,24      |
|             | Batan | 72,30       | 1,94       | 67,76      |

### 6.3.3.2. Ters mekanik flotasyon çalışmaları

Ters flotasyonda önce mikroflotasyon çalışmalarında kullanılan ksantat ile, Cytec firmasının ürettiği ve metal-sülfürlere ve özellikle piritte karşı seçici, dithiofosfat türünde bir toplayıcı olan DF407 karşılaştırılmıştır. Diğer parametreler ve denenen değerleri Tablo 6.8. de verilmiştir. Ters flotasyon deneylerinin tümünde dağıtıcı olarak sodyum silikat yanında kömür bastırıcısı olarak dekstrin kullanılmıştır.

Tablo 6.8. Deney parametreleri

| Parametre                              | Değişim Aralığı              |
|----------------------------------------|------------------------------|
| Katı oranı (%)                         | 15                           |
| Boyut (mikron)                         | -250; -210; -150; -106; -75  |
| pH                                     | 5; Doğal (yaklaşık 6,5); 8,5 |
| Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g/t) | 2 500                        |
| Şartlandırma (dk)                      | 8                            |
| Bastırıcı (g/t)                        | 2 500; 4 000                 |
| Toplayıcı                              | Ksantat; DF 407              |
| Toplayıcı doz (g/t)                    | 150; 300                     |
| Şartlandırma (dk)                      | 5                            |
| Köpürtücü                              | MIBC                         |
| Köpürtücü (g/t)                        | 20                           |

|                   |    |
|-------------------|----|
| Şartlandırma (dk) | 3  |
| Köpük alma (sn)   | 90 |

İlk olarak ksantat ve DF407 karşılaştırılması yapılmıştır. Daha sonra boyut ve pH optimizasyonu yapılmıştır. Son olarak da farklı dekstrin ve toplayıcı dozajlarında, atıkta kalan kömürlerin kükürt içerikleri bulunmuştur.

#### a) Toplayıcı seçimi

150 g/t dozajında Ksantat ve DF407 karşılaştırması için yapılan deney sonuçları; ürün ve kükürt oranları ve kükürt dağılımları olarak Tablo 6.9.'da verilmektedir. Deneyler -150 mikronda yapılmıştır

Tablo 6.9. Farklı toplayıcılarla kükürt dağılımı

| Değer (g/t) | Ürün  | Ağırlık (%) | Kükürt (%) | Dağılım(%) |
|-------------|-------|-------------|------------|------------|
| DF 407      | Yüzen | 13,53       | 2,65       | 17,29      |
|             | Batan | 86,47       | 1,98       | 82,71      |
| Ksantat     | Yüzen | 10,00       | 2,34       | 11,30      |
|             | Batan | 90,00       | 2,04       | 88,70      |

Tablodan da görüldüğü gibi DF 407 ile daha seçimli ve yüksek verimle kükürt ayırımı sağlanmıştır.

#### b) Boyut Optimizasyonu

150 g/t dozajında DF407 ile -250; -210; -150; -106 ve -75 mikron boyutlarında yapılan deney sonuçları; ürün ve kükürt oranları ve kükürt dağılımları olarak Tablo 6.10'da verilmektedir.

Tablo 6.10. Farklı boyutlarda kükürt dağılımı

| Değer (μ) | Ürün  | Ağırlık (%) | Kükürt (%) | Dağılım(%) |
|-----------|-------|-------------|------------|------------|
| -250      | Yüzen | 7,60        | 2,72       | 9,36       |
|           | Batan | 92,40       | 2,02       | 90,64      |
| -210      | Yüzen | 7,12        | 2,51       | 12,33      |
|           | Batan | 92,88       | 2,02       | 87,67      |
| -150      | Yüzen | 13,53       | 2,65       | 17,29      |
|           | Batan | 86,47       | 1,98       | 82,71      |
| -106      | Yüzen | 9,00        | 2,47       | 10,76      |
|           | Batan | 91,00       | 2,02       | 89,74      |
| -75       | Yüzen | 10,85       | 2,48       | 13,00      |
|           | Batan | 89,15       | 2,04       | 87,00      |

Tablo 6.10. da görüldüğü gibi -150 mikron boyutunda ile daha seçimli ve yüksek verimle kükürt ayırımı sağlanmıştır. Daha ince boyutlarda seçimlilik düşmektedir.

### c) pH Optimizasyonu

150 g/t dojazında DF407 ile -150 mikron boyutunda pH 5; doğal ve 8,5’da yapılan deney sonuçları; ürün ve kükürt oranları ve kükürt dağılımları olarak Tablo 6.11’de verilmektedir.

Tablo 6.11. Farklı pH’larda kükürt dağılımı

| Değer (pH)  | Ürün  | Ağırlık (%) | Kükürt (%) | Dağılım(%) |
|-------------|-------|-------------|------------|------------|
| 5           | Yüzen | 17,84       | 2,30       | 19,82      |
|             | Batan | 82,16       | 2,02       | 80,18      |
| Doğal (6,5) | Yüzen | 13,53       | 2,65       | 17,29      |
|             | Batan | 86,47       | 1,98       | 82,71      |
| 8, 5        | Yüzen | 19,84       | 2,55       | 24,49      |
|             | Batan | 80,16       | 1,95       | 75,51      |

pH 8,5’da daha iyi verim alınıyor olmasına rağmen, alkali ortamda flotasyon pulpu oldukça kararsız olduğu için doğal pH seçilmiştir.

#### **d) Farklı dekstrin ve toplayıcı dozajlarında yapılan deneyler**

150 ve 300 g/t DF407 ile 2500 ve 4000 g/t dekstrin dozajlarında; -150 mikron boyutunda çalışılmıştır. Çalışma sonuçları aşağıda özetlenmektedir:

-150 g/t toplayıcı ve 4 000 g/t bastırıcı dozajında artık kükürt içeriği %1,92 olarak bulunmuştur.

-300 g/t toplayıcı ve 2 500 g/t bastırıcı dozajında artık kükürt içeriği 1,91 olarak bulunmuştur.

-300 g/t toplayıcı ve 4 000 g/t bastırıcı dozajında artık kükürt içeriği 1,89 olarak bulunmuştur.

Dekstrin dozajında 2 500 ile 4 000 g/t arasındaki değişimin ve toplayıcı dozajında 150 ve 300 g/t arasındaki değişimin atıktaki kömürün kükürt içeriğinde çok fazla bir değişime yol açmadığı görülmüştür.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mikroflotasyon deneylerinden çalışmada incelenen kömürün düz flotasyonla temizlenemeyeceği görülmüştür. Laboratuvar tipi Denver flotasyon hücresinde farklı reaktifle yapılan düz flotasyon çalışması da bu sonuca paralel çıkmıştır.

Ters flotasyon çalışmalarında, DF 407 Promoter'la kömürdeki kükürt yüzdürülebilmıştır, ancak artıktan alınan temiz üründe kükürt değeri istenen %1 veya %1,5'un altına indirilememiştir.,

Yapılan çalışmalara göre, farklı bastırıcı dozajları ve farklı flotasyon süreleri ile kükürt içeriğinin en az %1,5'un altına indirilmesi mümkün olabilir.

Çalışmalara ters flotasyonla, etkisi incelenmemiş parametrelerin optimizasyonu ile devam edilmesi önerilmektedir.

İlk başlangıçta yapılan yüzdürme-batırma deneyleri, +0,5 mm boyutunda yüzdürme-batırma ile daha temiz ürün alınabileceğini göstermiştir.

Son olarak bu kömürlerin flotasyondan çok, iri boyutlarda ağır ortam ayırmasına daha uygun olduğuna karar verilmiştir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ:

8. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Kömür Çalışma Grubu, 2001

Alp İ., Uslu T., Vıcıl M., Yılmaz O., Deveci H.; 2004; “Müzret (Yusufeli-Artvin) Kömürlerinin Özelliklerinin Araştırılması”; Türkiye 14. Kömür Kongresi; 02-04 Haziran; Zonguldak.

Ateşok, G., 1986, “Kömür Hazırlama”, Kurtiş Matbaası, İstanbul.

Baruah M. K.; 1995, “Letter To The Editor, The Theory of Genesis of Secondary Sulphur”, Department of Chemistry, NNS Colloge, Titibar, 785630, Assam, India

Baruah M. K. And Gogoi P.C., 1998, “A new form of sulphur in coal”; The discovery of an iron-sulphur coordinatio compound, Fuel, vol:77; No:9110, pp: 979-985

Bilir K.; 1993, “Kömürden Piritik Kükürtün Uzaklaştırılması”, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir

Burt, R.O.; 1984; “Gravity Concentration Technology”; Elsevier; New York.

Carta, M., Carbin, P., Circu, R. and Del, F.C., 1982, “Beneficiation Methods for Coal Desulphurisation”, Coal: Phenix of the 80s, In Proceedings 64th CIC Coal Symposium, A.M. Taweel Al, (ed.), Ottawa, Canada, pp. 164-173.

Dexter, R.W.; Osborne, D.G.; 1973; “Principles of the Selective Flocculation of Minerals from Mixtures Using High Molecular Weight Polyelectroletes”; J. Camborne School of Mines; vol: 73; pp:34-41

Doğan M.Z.; Çelik M.S.; 1992; “Latest Development in Coal Desulphurisation by Flotation and Microbial Beneficiation”; Pro. Of the 3th Min. Petroleum and Metal. Congress; Cairo; vol: 1; pp: 385-393.

## KAYNAKLAR DİZİNİ(2):

Edwards G.E.; 1984; “Coal Preparation and Marketing”; Coal Geology and Coal Technology; Ward, C.R. (ed.); Blacwell Scientific Publication; Australia; pp: 262-294.

Glembotski, V.A., Klassen, V.I. and Plaksin, I.N., 1963, Flotation, Primary Sources, New York.

Göktepe F.; 2002, “Kömür Flotasyonunda Bakteri İlavesinin Piritik Kükürt Uzaklaştırmaya Etkisi”, 13. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak

Kaya M.; 1991; “Flotasyon El Kitabı-1”, TEKAM Yayınları, Anadolu Üniversitesi Basımevi, Eskişehir.

Koca H., Colin, P. and Koca S., 1988, “İnce Taneli Kömürlerden Seçimli Pirit Flokülasyonu”, Türkiye 6. Kömür kongresi, Zonguldak, pp. 171-190.

Koca H.; 1991, “Kömür Hazırlama”, Cevher Hazırlama Sistemleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

Koca H., 1995, “Seyitömer Havzası Kömürlerinin Yıkanabilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Otisca Prosesinin Uygulanabilirliğinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi.

Kural O., 1991, “Kömürün Kükürdünün Giderilmesi”, Kömür kitabı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Le, H. U., 1981, “Flotability of Coal and Pyrite”, M.Sc. Thesis, Iowa State University, U.S.A.

Liu, D., Somasundaran, P., Vasudevan, T.V. and Haris, C.C. 1994, “Role of pH and Dissolved Mineral Species in Pittsburgh No.8 Coal Flotation System-II. Separation of Pyrite and Non-Pyritic Minerals from Coal”, Int. J. Miner. Process., 41, pp. 215-225.

### **KAYNAKLAR DİZİNİ(3):**

Lockhart, N.C., 1984, “Dry Beneficiation of Coal”, Powder Technology, 40, pp. 17-42

Lowe, N.R.S.; Littlefair, M.S.; “On the Selective Flocculation of Coal; Using Polystyrene Latex”; Journal of Int. Mineral Processing; v: 17.

Lua, A.C. and Boucher, R.F., 1990, “Sulphur and ash reduction in coal by HGMS”, Coal Preparation, 8, pp. 61-71.

Maden Mühendisleri Odası, [www.maden.org.tr](http://www.maden.org.tr) , 2003

Miller, K.J. and Deurbrouck, A.W., 1982, “Froth flotation to desulphurise coal”, Physical Cleaning of Coal”, Y. A Liu (ed.) Marcel Dekker Int. U.S.A. pp. 577-589.

Mills, O. and Cheng, Z., 1993, “Electrostatic coal beneficiation, In Proceedings of the 18th Int. Cong. On Coal Utilization and Fuel Systems, Florida, pp. 577-589.

Nguyen, Y.V. and Cheh, C.H., 1982, “Froth flotation studies on an Eastern US coal”, Coal: Phenix of the 80s, In Proceedings 64th CIC Coal Symposium, A.M. Taweel Al, (ed.), Ottawa, Canada, pp. 164-173.

Özbayoğlu, G., 1986, “Desulphurisation of lignites by HGMS”, The first Int. Mineral Processing Symposium, Vol. 2 İzmir, pp. 635-644.

Somasundaran, P., 1980, “Principles of flocculation, dispersion and selective flocculation”, Fine Particles Processing, Somasundaran, P., (Ed.), Volume 2, AIME, USA, pp. 947-975.

Şahin O.; 2004, “Sürdürülebilir Kalkınma ve Enerji Üretiminde Kömürün Rolü”, Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Tefek, M.; 1984, “İnce Kömür Flotasyonunda Parçacıkların Davranışları”, Türkiye 4. Kömür Kongresi, Zonguldak

#### **KAYNAKLAR DİZİNİ(4):**

Türkiye Kömür İşletmeleri, <http://www.tki.gov.tr> ; 2003

Yarar, B. and Kitchener, J.A., 1970, “Selective flocculation of minerals, Basic principles and experimental investigations, T. Ins. Min and Metal., 79, pp.C23-33.