



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ZONGULDAK ÇATALAĞZI LAVVARI
SİKLON ÜST AKIMI YÜKSEK KÜLLÜ
KÖMÜRÜN AGLOFLOTASYON
YÖNTEMİYLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

Nihat Yusuf USLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Nihat Yusuf Uslu tarafından hazırlanan “ZONGULDAK ÇATALAĞZI LAVVARI SİKLON ÜST AKIMI YÜKSEK KÜLLÜ KÖMÜRÜN AGLOFLOTASYON YÖNTEMİYLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması 01/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof.Dr. Mustafa ÇINAR
(Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi)

Danışman

Prof.Dr. Selma DÜZYOL
(Konya Teknik Üniversitesi)

Üye

Prof.Dr. Tevfik AĞAÇAYAK
(Konya Teknik Üniversitesi)

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt Uyan
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Nihat Yusuf USLU

Tarih: 01/07/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ZONGULDAK ÇATALAĞZI LAVVARI SIKLON ÜST AKIMI YÜKSEK KÜLLÜ KÖMÜRÜN AGLOFLOTASYON YÖNTEMİYLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

Nihat Yusuf USLU

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Selma DÜZYOL

2024, 53 Sayfa

**Jüri
Prof. Dr. Selma DÜZYOL
Prof. Dr. Mustafa ÇINAR
Prof. Dr. Tevfik AĞAÇAYAK**

Bu çalışmada, yüksek kül içerikli taş kömürünün agloflotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesi incelenmiştir. Zonguldak Çatalağzı lavvarından elde edilen kömür numunesi, deneysel olarak tasarlanmış yeni bir agloflotasyon hücresi kullanılarak çeşitli parametreler altında agloflotasyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Deneylerde pH, aglomerasyon süresi, bağlayıcı sıvı (evsel atık yağ) miktarı, karıştırma hızı, köpürtücü miktarı ve dispersant miktarının kömürün agloflotasyonu üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Deney sonuçları, konsantre kömürün kül içeriği, ağırlık verimi ve yanabilir kısım verimi üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, optimum pH değerinin doğal pH olduğunu göstermiştir, reaktif tüketimi ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Aglomerasyon süresi için optimum süre 5 dakika olarak belirlenmiş, bu sürenin kömür partiküllerinin sağlam bir aglomerat yapısı oluşturması için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Bağlayıcı sıvı miktarının artmasıyla yanabilir kısım verimi artmış ancak aşırı yağ kullanımı ile aglomeratlar yapışkan bir hal almıştır. Bu nedenle, optimum yağ miktarının 5 ml olduğu belirlenmiştir. Karıştırma hızı, agloflotasyon sürecinde önemli bir parametre olarak tespit edilmiş ve optimum hız 1000 dev/dk olarak belirlenmiştir. Köpürtücü miktarının agloflotasyon üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı, 0,1 ml köpürtücünün yeterli olduğu tespit edilmiştir. Dispersant ilavesi, konsantrenin kül içeriğini azaltmış ve yanabilir kısım verimini artırmıştır. Bu çalışmada elde edilen bulgular, yeni tasarlanan agloflotasyon hücresinin yüksek kül içerikli ve ince taneli taş kömürünün agloflotasyonunda etkili olduğunu göstermektedir. Deneysel tasarlanan agloflotasyon hücresi ile literatürde kesikli ve iki aşamalı gerçekleştirilen agloflotasyon işlemi tek aşamalı ve kesintisiz olarak gerçekleştirilmiş ve özellikle aglomerasyon süresini 30 dakikadan 5 dakikaya düşürerek zaman ve enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Agloflotasyon, aglomerasyon, flotasyon, kömür, selül.

ABSTRACT

MS THESIS

ENRICHMENT OF HIGH ASH COAL FROM ZONGULDAK ÇATALAĞZI WASHERY CYCLONE OVERFLOW BY AGGLOFLOTATION METHOD

Nihat Yusuf USLU

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mining Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Selma DÜZYOL

2024, 53 Pages

**Jury
Prof. Dr. Selma DÜZYOL
Prof. Dr. Mustafa ÇINAR
Prof. Dr. Tevfik AĞAÇAYAK**

In this study, the enrichment of high-ash content bituminous coal by agglomeration method was examined. The coal sample obtained from Zonguldak Çatalağzı washery was subjected to agglomeration processes under various parameters using a specially designed new agglomeration cell. In the experiments, the effects of pH, agglomeration time, amount of binder liquid (domestic waste oil), mixing speed, frother amount and dispersant amount on the agglomeration of coal were investigated.

The test results were evaluated based on the ash content, weight yield and combustible recovery of concentrated coal. The findings showed that the optimum pH value is natural pH because it provides advantages in terms of reagent consumption and cost. The optimum agglomeration time was determined as 5 minutes, and it was obvious that this time was sufficient for the coal particles to form a robust agglomerate structure. As the amount of binder liquid increased, the combustible recovery increased, but with excessive use of oil, the agglomerates became sticky. Therefore, the optimum amount of oil was determined to be 5 ml. Stirring speed was determined as an important parameter in the agglomeration process and the optimum speed was determined as 1000 rpm. It was assigned that the frother amount did not have a significant effect on agglomeration and 0.1 ml of frother was sufficient. The addition of dispersant reduced the ash content of the concentrate and increased the combustible recovery. The findings obtained in this study show that the newly designed agglomeration cell is an effective in the agglomeration of high-ash content and fine-grained bituminous coal. With the experimentally designed agglomeration cell, the agglomeration process, which is performed in batches and two stages in the literature, was carried out in a single stage and continuously, and time and energy savings were achieved, especially by reducing the agglomeration time from 30 minutes to 5 minutes.

Keywords: Agglomeration, agglomeration, flotation, coal, cell.

ÖNSÖZ

Öncelikle, yüksek lisans eğitimimde yalnızca akademik gelişimime değil, kişisel gelişimime de büyük önem veren, bütün sorularımı cevaplayan, yeri geldiğinde övgü yeri geldiğinde yapıcı eleştirileriyle hayatım boyunca kullanacağım yetkinlikleri bana kazandıran, her türlü fikir ve düşünceme saygıyla yaklaşan, bugün konumu bende apayrı hale gelmiş çok kıymetli hocam Prof. Dr. Selma DÜZYOL'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarında takıldığım noktada devreye girip sorunu çözen, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, her daim yardım eli uzatan sayın hocam Prof. Dr. Tevfik Ağaçayak'a ve laboratuvar çalışmaları sırasında cihazların kullanımında yardımcı olan Lab. Tek. İbrahim Küçük'e teşekkür ederim.

Araştırmamız için gerekli numune tedarikini en hızlı şekilde sağlayan TTK (Türkiye Taşkömürü Kurumu)'na, gösterdikleri özenden dolayı teşekkürlerimi iletirim.

Lisansüstü eğitimim boyunca desteklerini esirgemeyen tüm hocalarıma, sevdiklerime ve dostlarıma, zor zamanlarımda beni cesaretlendiren sevgili kardeşlerime teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca yanımda olduklarını bildiğim, tez çalışmaları kapsamında geliştirdiğimiz tasarımın hayata geçirilmesinde benden daha fazla emek veren, fikirlerimi dinleyip çözüm arayan sevgili babam Ahmet USLU'ya, sıkıştığımda orada olduğunu bildiğim, her konuda koşulsuz biçimde destek veren ve beni güldüren sevgili annem Zeliha USLU'ya minnettar olduğumu ve destekleri için ne kadar teşekkür etsem az olduğunu belirtmek isterim.

Nihat Yusuf USLU
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. Kömür	2
2.1.1. Kömür türleri	4
2.1.1.1. Linyit.....	6
2.1.1.2. Alt bitümlü kömür	7
2.1.1.3. Bitümlü kömür	8
2.1.1.4. Antrasit.....	9
2.2. Kömür Rezervleri	9
2.2.1. Dünyada kömür.....	10
2.2.2. Türkiye’de kömür	13
2.3. Çok İnce Boyutta Kömür Zenginleştirme.....	16
2.3.1. Yağ aglomerasyonu	16
2.3.1.1. Yağ aglomerasyonu proseslerinin tarihi	17
2.3.1.2. Kömürün yağ aglomerasyonunu etkileyen faktörler	17
2.3.1.3. Yağ aglomerasyonunda yapılmış çalışmalar	18
2.3.2. Flotasyon.....	20
2.3.2.1. Kömür flotasyonunda kullanılan reaktifler	21
2.3.2.2. Kömür flotasyonunu etkileyen faktörler	21
2.3.2.3. Flotasyon prosesinin tarihsel gelişimi.....	21
2.3.2.4. Kömür flotasyonunda yapılmış çalışmalar	22
2.3.3. Agloflotasyon.....	24
2.3.3.1. Agloflotasyonu etkileyen faktörler	25
2.3.3.2. Agloflotasyon ile yapılmış çalışmalar	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1. Materyal	28
3.2. Yöntem.....	33
3.2.1. Numunenin deneylere hazırlanması.....	33
3.2.2. Kömür analizleri	34
3.3. Agloflotasyon Deneyleri.....	34
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	37
4.1. pH Etkisi	38
4.2. Aglomerasyon Süresi Etkisi.....	40
4.3. Bağlayıcı Sıvı (Yağ) Miktarının Etkisi	41
4.5. Köpürtücü (MIBC) Miktarının Etkisi	44
4.6. Dispersant Miktarının Etkisi	46

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	48
5.1. Sonuçlar	48
5.2. Öneriler	50
KAYNAKLAR	50



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Dünya kömür rezervlerinin kömür kategorilerine göre dağılımı	12
Şekil 2.2. Ülkemizdeki kömür kaynaklarının dağılımı	13
Şekil 2.3. Türkiye'nin yıllara göre linyit üretimleri	14
Şekil 2.4. Türkiye'nin yıllara göre asfaltit üretimleri	14
Şekil 2.5. Türkiye'nin yıllara göre taş kömürü üretimleri	15
Şekil 2.6. Türkiye'nin yıllara göre kömür tüketimleri	15
Şekil 3.1. Denver flotasyon makinesi	29
Şekil 3.2. Kalori ölçümü için kullanılan Leco marka kalorimetre	31
Şekil 3.3. Deneysel olarak tasarlanan agloflotasyon hücresi	33
Şekil 3.4. Kümülatif Elek Altı (K.E.A.) Eğrisi	34
Şekil 3.5. Agloflotasyon deneyleri akım şeması	36
Şekil 4.1. pH'ının agloflotasyona etkisi	39
Şekil 4.2. Aglomerasyon süresinin agloflotasyona etkisi	40
Şekil 4.3. Yağ miktarının agloflotasyona etkisi	42
Şekil 4.4. 2ml yağ kullanılarak karıştırma hızının agloflotasyona etkisi	43
Şekil 4.5. 5ml yağ kullanılarak karıştırma hızının agloflotasyona etkisi	44
Şekil 4.6. Köpürtücü miktarının agloflotasyona etkisi	45
Şekil 4.7. Dispersant miktarının agloflotasyon etkisi	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. ASTM D388-23 standartlarına göre kömür sınıflandırmada
kalori değerleri

6

Çizelge 2.2. Ülkeler ve kıtalara göre 2020 dünya kömür rezervi

11



1. GİRİŞ

Madenler, tarih boyunca büyük bir öneme sahip olmuş ve hatta medeniyet, tarihinde kullanılan madenlere göre isimlendirilmiştir. Günümüzde de madenlerin önemi devam etmekle birlikte özellikle enerji kaynağı olarak kullanılabilen madenler, çıkarıldığı ülkenin ekonomik zenginliğine önemli katkılarda bulunmaktadır. Bu durum, ülkeler arasında zaman zaman sorunlara neden olabilmekte gelişmiş veya komşu ülkeler, bu zenginliklere sahip olma arzusuyla çeşitli çatışmalara yol açabilmektedir (Şahin & Kablay, 2015).

İnsanlığın varoluşunun başlangıcından itibaren, dünyayı kendi geleceği için dönüştürme isteği, gereken enerji ihtiyacının karşılanması temelindedir. Eğer bugün birçok şeyi kolaylıkla elde edebiliyorsak, bunu büyük ölçüde kömürün katkılarına bağlamak mümkündür (Aktaş, 2011).

Kömürün üretimi sonrasında endüstrinin ihtiyacına uygun hale getirilmesi için kömür hazırlama ve zenginleştirme işlemleri uygulanmaktadır. Bu işlemlerin kendi içinde alt parametreleri ve kısıtları mevcuttur (Grainger & Gibson, 1981).

Bu tez çalışmasında çok ince boyutta kömür zenginleştirmesinde henüz endüstride kullanılmayan halen geliştirilmekte olan agloflotasyon yöntemi taş kömürü numunesi kullanılarak detaylı olarak araştırılmış ve çalışmanın planlama aşamasında tez çalışmasının ilgili kısımlarında nedenleriyle birlikte detaylı açıklanmış olan gereksinimlerden dolayı yeni bir deneysel hücre tasarlanması düşünülmüştür. Tasarlanan hücre ile elde edilen sonuçların olumlu olması neticesinde bu tez çalışmasında, kömürün agloflotasyon davranışı detaylı olarak araştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kömür

Kömür, bitki kalıntılarının karmaşık biyokimyasal, fizikokimyasal ve jeokimyasal süreçlerle dönüşmesi sonucunda oluşan, katı halde bulunan ve yanabilir özellikte olan organik bir kaya olarak tanımlanabilir. Kömür, büyük oranda organik madde ve az miktarda inorganik mineral içerir. Organik madde karbon, hidrojen, oksijen, azot ve organik kükürtten oluşur. Bu elementler arasında karbon, hidrojen ve oksijen, toplam organik madde miktarının %95'ten fazlasını oluşturur (Grainger & Gibson, 1981; Cheng vd., 2021).

Araştırmalar, özellikle homojen yapıdaki örneklerle çalışmanın önemli olduğunu vurgular ve kömürün homojen bir yapıya sahip olup olmadığı sıkça sorulan bir sorudur. Elde edilen örnekler ne kadar iyi seçilirse seçilsin, kömürün yapısı, turbadan antrasite doğru başkalaşımında değişiklikler gösterir, bu da kömürün yapısını tam olarak anlamayı zorlaştırır. Kömürün temel yapısının, üç boyutlu polimerik bir sisteme benzerlik gösterdiği düşünülmektedir (Demirbilek, 1987). Kömür genellikle büyük aromatik halkalar ve yan zincirlerle birleşmiş halkalardan oluşur. Halka sıralaması arttıkça karbon içeriği artar, hidrojen ve oksijen içeriği azalır, azot içeriği ise hafifçe azalır (Cheng vd., 2021).

Kömür, fosil yakıtlar arasında mevcut en önemli enerji kaynağı olarak bilinmektedir ve kömür, fosil yakıt kaynakları arasında en büyük payı temsil eder (Grainger & Gibson, 1981).

Kömür oluşumu, karmaşık ve çok aşamalı bir süreçtir. Başlangıç koşulları, sulak veya bataklık bir ortam, hızlı bitki büyümesi için uygun iklim koşulları ve bitki kalıntılarının çürümesi sırasında oksijen temasını engellemek veya ciddi şekilde sınırlamak için yeterli su derinliğini içerir. Bu çevresel koşullar, bitki materyallerinin korunması ve kömürleşme sürecinin başlaması için gereklidir. Bitki materyali, ağaç gövdeleri, dallar, yapraklar, kabuk ve sporlar gibi çeşitli organik bileşenlerden oluşabilir (Grainger & Gibson, 1981). Kömür, fosil veya organik sedimanter bir kaya olarak kabul edilir ve oluşum süreci iki ana aşamada gerçekleşir. İlk aşama olan turbalaşma veya saprofikasyon, bitki kalıntılarının biyolojik parçalanma yoluyla çözülmesi, birleşmesi ve birikmesi sürecini ifade eder. Bu aşama, genellikle tuzlu bataklıklar, göller ve sığ denizler gibi yer yüzeyine yakın ortamlarda gerçekleşir. Mikroorganizmaların etkisiyle bitki kalıntıları sürekli olarak biyojeokimyasal etkiler altında çözülür ve sapropel veya turba

şeklinde birikir (Cheng vd., 2021). Kömürleşme sürecinin ikinci aşaması, kömürleşme aşaması olarak adlandırılır. Bu aşamada, turbalaşma sırasında oluşan turba veya sapropel, yer kabuğunun çökmesiyle derinlemesine gömülür. Artan sıcaklık ve basıncın etkisiyle, biyolojik parçalanma fizikokimyasal reaksiyonlara dönüşür. Bu süreç, kömürün kimyasal ve fiziksel özelliklerinde belirgin değişiklikler meydana getirir. Kömürleşme süreci ayrıca diyajenez ve metamorfizma olarak iki alt aşamaya ayrılabilir. Diyajenez, turbadan genç linyite dönüşüm sürecini ifade ederken, metamorfizma, genç linyitten yaşlı linyit, bitümlü kömür hatta antrasite dönüşüm sürecini kapsar (Grainger & Gibson, 1981; Demirbilek, 1987). Diyajenez aşamasında, organik materyalin gömülme derinliği ve sıcaklığı artar, bu da kimyasal yapıların yeniden düzenlenmesine yol açar. Metamorfizma aşamasında ise, daha yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında, karbon içeriği artar, hidrojen ve oksijen içeriği azalır. Bu aşamalar, kömürün enerji içeriğini ve yanma özelliklerini belirleyen temel faktörlerdir (Cheng vd., 2021).

Jeolojik zaman ölçeğinde uzun süreler alır ve bu süreçler sırasında birçok çevresel ve kimyasal değişim meydana gelir. Kömür, başlangıçta suya doymuş bitki materyalinin anaerobik koşullar altında çürümesi ile başlar. Bu materyal, daha sonra, sedimentlerle kaplanarak gömülür ve yüksek basınç altında sıkışarak kömür haline gelir. Kömürleşme sürecinin detayları, bitki türü, çürüme süresi, örtü derinliği, basınç ve sıcaklık gibi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu faktörler, kömürün farklı türlerinin ve kalitelerinin oluşmasına neden olur. Örneğin, turba düşük dereceli bir kömür türüdür ve genellikle genç ve tam olarak kömürleşmemiş organik materyalden oluşur. Linyit, bitümlü kömür ve antrasit ise, giderek artan kömürleşme derecelerine sahip olan kömür türleridir (Ward & Suarez-Ruiz, 2008).

Renk açısından genellikle siyah veya kahverengimsi siyah olarak bilinir. Parlaklık derecesine göre metalik bir parlaklığa sahip olabileceği gibi mat da olabilir. Dokusal olarak ise, kömür çeşitli türlerde bulunabilir; antrasit en sert, linyit en yumuşak tür olarak bilinmektedir (Grainger & Gibson, 1981; U.S.G.S., 2013).

Kömür yapısı, karmaşık ve heterojen bir bileşimden oluşur. Kömür, başlıca karbon, hidrojen, oksijen, azot ve kükürt elementlerini içeren organik maddeler ile inorganik minerallerin birleşiminden meydana gelir. Kömürün organik kısmı, aromatik ve alifatik hidrokarbonların bir matrisi oluşturduğu, çeşitli fonksiyonel grupların bağlandığı bir yapıdır. Mikroyapı düzeyinde, kömürün gözenekli yapısı, gaz ve sıvıların taşınmasını etkileyen önemli bir faktördür. Kömürün bünyesinde bulunan gözenekler, özellikle düşük dereceli kömürlerde suyun varlığı ve hareketi ile yakından ilişkilidir. Bu

gözenekler, kömürün kurutulması sırasında suyun hareketini ve kömür yapısındaki değişiklikleri etkiler. Kömürün yapısal birimi, kömürün organik maddesinin ana bileşenlerini temsil eden moleküler yapı taşlarından oluşur. Bu yapısal birimler, kömürün fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirler. Kömürün moleküler yapısının anlaşılması, kömürün reaktivitesi ve enerji üretimindeki verimliliği açısından kritiktir. Kömürün makro yapısı ise, kömürün büyük ölçekli özelliklerini ve genel morfolojisini ifade eder. Bu bağlamda, kömürün yapısal özellikleri, kömürün kullanılabilirliğini ve enerji üretimindeki verimliliğini doğrudan etkiler. Kömür yapısının detaylı incelenmesi, kömürün kullanım alanlarının belirlenmesi, çevresel etkilerinin azaltılması ve verimli enerji üretimi için büyük önem taşır. Kömür yapısının anlaşılması, kömürden elde edilen ürünlerin kalitesini ve kömürün işlenmesi sırasında ortaya çıkan sorunları çözmek için gereklidir. Örneğin, kömürün düşük sıcaklıklarda oksidasyonu, gözenek yapısının ve kömür bileşiminin oksidasyon hızını nasıl etkilediğinin incelenmesi, kömürün depolanması ve taşınması sırasında güvenlik önlemlerinin alınması için önemlidir (Özbayoğlu, 1982; Yu vd., 2013; Qin, 2018; Pan vd., 2019; Ezra D., 1976).

2.1.1. Kömür türleri

Kömürün çeşitli özelliklerini anlamak, verimli ve sorumlu bir şekilde kullanımı için önem arz etmektedir. Amerikan Test ve Malzeme Kurumunun (American Society for Testing and Materials, bundan sonra ASTM olarak bahsedilecektir.) belirlemiş olduğu kömür kategorizasyonu için bir standart olan D388 bu çalışmada baz alınmış olup, kömürü kalitesine göre sınıflandırmak için kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. ASTM tarafından sağlanan kömürleşme derecesine dayalı sınıflandırmayı anlayarak kömürün çeşitli doğası hakkında bilgiler edinilebilmektedir. Bu standartta sınıf, kömürün jeolojik zaman boyunca ısı ve basınç etkisiyle maruz kaldığı metamorfizma derecesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Sınıflandırma sistemi, kömürü iki ana parametreye dayanarak dört ana sınıfa ayırır; sabit karbon içeriği (kuru, mineral madde içermeyen bazda) ve brüt kalorifik değer (nemli baz). Daha yüksek dereceli kömürler, kuru bazda sabit karbon içeriğine göre sınıflandırılırken daha düşük dereceli kömürler ise nemli bazda brüt kalorifik değere göre sınıflandırılmaktadır.

- Kuru, mineral madde içermeyen bazda %69 veya daha fazla sabit karbon içeren kömürler, brüt kalorifik değerine bakılmaksızın sabit karbon içeriğine göre sınıflandırılmaktadır.
- Kuru, mineral madde içermeyen bazda %69'dan daha az sabit karbon içeren kömürler, nemli, mineral madde içermeyen bazdaki brüt kalorifik değerine göre sınıflandırılmaktadır.

Bu parametreler, kömür metamorfize olurken uçucu madde ve nemin kademeli olarak kaybolmasını ve buna karşılık sabit karbonun artmasını yansıtmaktadır. Kategorizasyon, kömürün madencilik, hazırlama ve kullanım alanları hakkında genel tahminlerde bulunmak için kullanışlı olan fiziksel ve kimyasal özellik aralıklarını göstermektedir. Bununla birlikte belirli endüstriyel işlemler için kömür seçimi, kömür karıştırma stratejileri ve kömür kullanımının çevresel etkileri gibi alanlarda bilinçli karar vermenin temelini oluşturabilmektedir. Sürdürülebilir bir gelecek için çalışmalar yürütülürken, kömürün potansiyelini kullanırken, çevresel etkisi araştırılırken sınıflama standart gereksinimi karşılamaktadır (ASTM, 2023).

En düşük sınıf kömür olan linyit, bu sıralamanın başlangıcında yer almaktadır. Odunsu dokusu, yüksek nem içeriği (%30'u aşan) ve düşük sabit karbon içeriği (%45'ten az) ile karakterize edilen linyit kolayca yanar ancak nispeten düşük ısı üretmektedir. Sınıflama ölçeğinde yukarı doğru ilerledikçe, alt bitümlü kömürler ile karşılaşırız. Bu kömürler daha kuru yapıları (%15 ile %30 arasında nem içeriği) ve daha yüksek sabit karbon içeriği (%45 ile %70) ile ayırt edilmektedir. Bu kömürler linyite göre daha yüksek bir ısı çıkışı ile yanmaktadır. Bir üst sınıfta ise bitümlü kömürler yer almaktadır. Bitümlü kömürler (en az %14 ile %31'i aşan uçucu madde) kendi içlerinde farklı alt kategorilere sahiptirler. Bu kategoriler arasında daha yüksek uçucu maddeye sahip olanlar kolayca tutuşurken, daha az uçucu madde içerenler ise daha zor tutuşmalarına karşın yoğun ısı üretirler. Son olarak, sınıflamanın zirvesinde antrasit adında metamorfik, son derece kaliteli kabul edilen bir kömür tipi yer almaktadır. Yüksek sabit karbon içeriği (%90'ın üzerinde), düşük nem içeriği (%8'den az) ve parlak ve kaya benzeri görünümü ile ayırt edilen antrasit, yoğun ısı ve minimum dumanla yanabilmektedir. Çizelge 2.1.'de sınıflandırma kalori değerlerine göre sınıflandırma sistemi verilmiştir (ASTM, 2023).

Çizelge 2.1. ASTM D388-23 standartlarına göre kömür sınıflandırmada kalori değerleri

Sınıf	Kalori Aralığı (kcal/kg)
Meta-antrasit	> 8100
Antrasit	7700 - 8100
Yarı-antrasit	7200 - 7700
Düşük uçuculu bitümlü kömür	6700 - 7200
Orta uçuculu bitümlü kömür	6200 - 6700
Yüksek uçuculu A bitümlü kömür	5700 - 6200
Yüksek uçuculu B bitümlü kömür	5200 - 5700
Yüksek uçuculu C bitümlü kömür	4700 - 5200
Alt-bitümlü A kömür	4200 - 4700
Alt-bitümlü B kömür	3700 - 4200
Alt-bitümlü C kömür	3200 - 3700
Linyit A	2700 - 3200
Linyit B	< 2700

2.1.1.1. Linyit

Linyit, genellikle kahverengi kömür olarak da bilinen, kömürleşmenin en erken aşamasını temsil eden, yumuşak, kahverengi siyah bir sedimanter kayaç türüdür. Turba birikintilerinin doğal sıkışması sonucunda oluşan linyit, nispeten düşük ısı içeriğine ve yüksek nem içeriğine sahip olması nedeniyle kömür sınıf sıralamasında en düşük sıraya yerleştirilmektedir (U.S.G.S., 2020). Kömür, bataklık ortamlarındaki bitki maddesinin birikimi ve kısmi çürümesinden oluşumu başlamaktadır. Zaman içerisinde, gömme ve sıkışma bu organik malzemeyi turbaya dönüştürmektedir. Artan basınç ve sıcaklık da dahil olmak üzere diğer jeolojik süreçler, nem ve uçucu bileşenleri uzaklaştırmakta, karbonu yoğunlaştırmakta, bitümlü ve antrasit gibi daha yüksek dereceli kömürleri de ortaya çıkarmaktadır. Bu dönüşüm sonucu, ASTM sınıflamasında kömür olarak kabul edilen en alt sınıf olan linyit, orijinal neminin önemli bir kısmını korumaktadır ve daha yüksek sınıf kömürlere göre daha düşük karbon içermektedir (Higman vd., 2018; L.E.C., 2020; E.E., 2020; ASTM, 2023).

Linyitin yüksek nem içeriği de dahil olmak üzere, diğer kömür türlerine göre daha düşük bir ısı değeri göstermektedir. Ayrıca, daha yumuşak ve kırılabilir bir malzeme olup, bu özellikleri nedeniyle uzun mesafelere taşınması durumuna daha az uygun hale getirmektedir. Bu sınırlamalara rağmen, temel olarak elektrik enerjisi üretiminde başlıca

uygulama alanı olarak kullanılmaktadır. Elektrik santrallerinin linyit yataklarına yakın konumlanması, enerji üretimi için sık kullanılmasına olanak tanır. Ancak daha düşük enerji verimliliği ve daha yüksek emisyon seviyeleri nedeniyle çevresel etkisi daha fazla olabilmektedir (U.S.G.S., 2020; Kopp, 2023). Linyitin yanması, diğer kömür türlerine göre daha az verimli olsa da elektrik enerji arzı için öneme sahiptir. Ayrıca, linyitin madenciliği ve işlenmesi, hava ve su kirliliği gibi olumsuz çevresel sonuçlara yol açabilmektedir, buna karşın araştırmacılar tarafından her geçen gün daha çevre dostu yöntemler geliştirilmektedir (Maciejewska vd., 2022).

2.1.1.2. Alt bitümlü kömür

Alt bitümlü kömür aynı zamanda siyah linyit olarak da bilinmektedir. ASTM'ye göre linyit ile bitümlü kömür arasında bir ara sınıf olarak tanımlanmaktadır. Alt bitümlü kömür, genellikle Kuzey Amerika, Asya ve Avustralya'da bulunmakla beraber dünya kömür rezervlerinin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır. Alt bitümlü kömür, ıslak, mineral madde içermeyen bir temelde %0,2 ila %2 kükürt içeriğine sahip olabilmektedir. Termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi için kullanıldığı gibi endüstriyel ve evsel ısıtma amaçları için de kullanılabilir.

Alt bitümlü kömür, başlıca kömürle çalışan enerji santrallerinde elektrik üretimi yanı sıra endüstriyel ve evsel ısıtma amaçları için de kullanılabilir. Alt bitümlü kömürün yüksek nem içeriği, düşük kalorifik değeri ve spontan yanma eğilimi gibi bazı dezavantajları vardır (U.S.E.P.A., 2023). Yüksek nem içeriği, yanmanın verimliliğini düşürmekte ve taşıma ve işleme maliyetlerini arttırmaktadır. Düşük kalorifik değer, aynı enerjiyi üretmek için daha fazla kömürün kullanılması anlamına gelmektedir, bu da yakıt tüketimini ve karbon dioksit emisyonlarını artırmaktadır. Kendiliğinden yanma eğilimi, depolama ve taşıma sırasında yangın ve patlama riski oluşturmakla birlikte özel önlemler ve izleme gerektirebilir (Lim vd., 2016).

2.1.1.3. Bitümlü kömür

Bitümlü kömür, yüksek miktarda uçucu madde ve karbon içeren bir kömür türüdür. Bu özellikleri sayesinde enerji üretimi, metalurji ve kimyasal üretim gibi çeşitli endüstriyel uygulamalara uygun görülmektedir. Bitümlü kömür, milyonlarca yıl süren alt bitümlü kömürlerin metamorfizmasıyla birlikte organik maddeye termal ve jeolojik değişim sonucunda oluşur. Kömürleşme derecesi, yani alt bitümlüden, bitümlü kömüre dönüşümü, kömürün sıcaklık, basınç, zaman ve gömülme derinliğine bağlı olmaktadır. Bitümlü kömür, özellikleri arasında kalorifik değer, kül içeriği, kükürt içeriği, nem içeriği ve koklaşabilme yeteneği gibi özelliklerine göre farklı sınıflara ayrılmıştır (Ning vd., 2019).

Bitümlü kömürün ana özelliklerinden biri, kok kömür üretilebilme yeteneğidir, kok kömürü havasız ortamda piroliz yoluyla elde edilen katı bir yakıt türüdür. Kok, demir ve çelik üretimi için gerekli olan ısıyı ve redüktan maddeleri sağladığından, demir ve çelik endüstrisi için esas bir hammadde olarak kabul edilir. Kokun kalitesinin kömürün sınıfı, kompozisyonu, yapısı ve plastisitesi gibi özelliklere bağlı olduğu bilinmektedir. Kömürün plastisitesi, kömürün belirli bir sıcaklık aralığında yumuşayabilme ve tutarlı bir kütle oluşturabilme yeteneğini temsil etmektedir, bu da plastik bölge olarak bilinmektedir. Plastik bölge, kömürün organik bileşenleri olan karbon içeriği, mineral madde içeriği ve nem miktarı tarafından değişkenlik gösterebilir (Miroshnichenko vd., 2015).

Bitümlü kömürün diğer bir özelliği de gazlaştırılabilme yeteneğidir. Bu, kömürün buhar, hava, oksijen veya karbon dioksit ile yüksek sıcaklık ve basınçlarda reaksiyona girerek hidrojen, karbon monoksit, metan ve karbon dioksit gibi gazlı ürünlere dönüştürülebilme imkanı sağlamaktadır. Gazlaştırma, enerji üretimi için kömürü temiz ve etkili bir şekilde kullanmanın bir yolu sayılabilir çünkü kirletici ve sera gazı emisyonlarını azaltabilir, enerji üretim sistemlerinin verimliliğini ve esnekliğini artırabilir. Kömürün gazlaştırılma yeteneği, reaktivitesi (gazlaştırma reaksiyonunun hızı ve ölçüsü) ve kül erime davranışı (külün erime eğilimi ve gazlaştırma performansını etkileyebilecek bir cüruf oluşturma eğilimi) gibi faktörlere bağlıdır. Kömürün reaktivitesi ve kül erime davranışı ise kömürün sınıfı, kompozisyonu, yapısı ve mineral madde içeriği gibi faktörlerden etkilenmektedir (Zhao vd., 2020).

2.1.1.4. Antrasit

Antrasit, sert kömür veya kara kömür olarak da bilinen, kömür dünyasında ayrı bir tür olarak öne çıkar. Sertliği, kompakt yapısı ve metalik parlaklığıyla karakterize edilen antrasit, ASTM kömür sınıflandırmasının en yüksek seviyesini temsil eder (ASTM, 2023), birçok açıdan da bitümlü ve linyit kömür türlerini geride bırakır. Bu ayrıcalık, en az %92 olarak kabul edilen yüksek karbon içeriği, minimum düzeyde safsızlık ve tüm kömür türleri arasında en yüksek enerji yoğunluğu gibi özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Chen vd., 2017).

Antrasitin özellikleri jeolojik geçmişine atfedilmektedir. Diğer kömürlerden farklı olarak antrasit, uzun süreler boyunca yoğun ısı ve basınca maruz kalan daha kapsamlı bir metamorfizma sürecinden geçmiştir. Bu metamorfizma, metan ve hidrojen gibi uçucu maddeleri uzaklaştırır ve sabit karbon içeriğini yoğunlaştırır, bunun sonucunda antrasitin karakteristik sertliği, yüksek enerji yoğunluğu ve temiz yanma özellikleri ortaya çıkmaktadır. Dahası, antrasitin %8'in altında olan düşük nem içeriği, yanma sırasında verimliliği ve minimum duman oluşumu sağlamaktadır (Zou vd., 2016).

Antrasitin eşsiz özellikleri, pratik açıdan birçok avantaja dönüşebilir. Özellikle yüksek enerji yoğunluğu, antrasitin birim kütle başına diğer kömürlere göre daha fazla ısı üretmesine imkan tanımaktadır. Endüstriyel fırınlar ve ev ısıtma sistemleri gibi uygulamalarda daha fazla verimlilik anlamına gelmekle beraber istenen ısı çıktısını elde etmek için daha az kömür gerektirmektedir. Ek olarak, antrasitin düşük kükürt ve uçucu madde içeriğinden kaynaklanan temiz yanma özelliği, diğer kömür türlerine kıyasla hava kirliliği emisyonlarını en aza indirmektedir. Bu özellik, özellikle gelişmiş emisyon kontrol teknolojileri ile kullanıldığında, antrasitin çevresel açıdan cazip bir yakıt kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır (Hou vd., 2021).

2.2. Kömür Rezervleri

Kömür rezervleri farklı endüstrilerde kullanılmakta olup kömürün doğal depolama alanlarını ifade etmektedir. Bu rezervler genellikle yer altındaki belirli şartların sağlanması sonucu yataklanma bölgelerinde bulunmakta ve enerji arzı için günümüzde vazgeçilmesi zor bir kaynak olarak görülmektedir. Enerji talebinin karşılanmasında kömür rezervleri, bir ülkenin enerji güvenliği açısından stratejik rol oynadığı bilinmektedir. Bu rezervlerin etkili bir şekilde yönetilmesi, kullanılması, enerji politikalarının belirlenmesi ve sürdürülebilir enerji çözümlerine odaklanması açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

2.2.1. Dünyada kömür

Kömür rezervleri, bu fosil yakıtın bulunabilirliği ve sürdürülebilirliğini anlamak için temel veri olarak alınabilir (OWID, 2020). Dünya kömür rezervlerinin boyutunu anlamak birkaç önemli görülen nedenden dolayı kritik görülmektedir. Kömür rezerv verileri; stratejik enerji planlaması, ekonomik tahmin ve çevresel yönetim için vazgeçilemez veri olarak kabul edilmektedir (SME, 2021).

İlk olarak kömür, özellikle elektrik üretimi için önemli bir enerji kaynağı olarak kalmakta ve çelik üretimi gibi endüstriler için temel bir hammadde olarak kullanılmaktadır. Mevcut kömür miktarını bilmek enerji güvenliği ve endüstriyel gelişim için plan yapmada yardımcı veri olarak kullanılabilir. Doğru rezerv verileri aynı zamanda ekonomik karar alıcıları bilgilendirir, bunlar madencilik şirketlerinin değerlemesini etkiler ve altyapı ile teknolojiye yapılan yatırımı yönlendirebilmektedir. Dünya temiz enerji kaynaklarına geçerken, bu geçişi yönetmede ve geçiş sırasında istikrarlı bir enerji arzını sağlamada yardımcı olabilmektedir. Kömür rezervleriyle ilgili veriler sadece ekonomik olarak geri kazanılabilir kömür miktarını değil aynı zamanda kömürün bir enerji kaynağı olarak ömrünü de gösteren göstergeler olarak görülmektedir. Örneğin, rezerv-üretim (R/P) oranı mevcut üretim hızında, mevcut rezervlerin ne kadar süreyle dayanabileceğini gösterir. Bu bilgi enerji politikası, çevresel etki ve alternatif enerji kaynaklarına yatırım konusunda bilinçli kararlar almak için kullanılabilir. Ayrıca, rezerv verileri gelecekteki piyasa dinamiklerinin, örneğin arz eksikliğinden veya talep fazlasından kaynaklanan fiyat değişikliklerinin potansiyel sinyal vericisi olabilir. Kömür, bol miktarda bulunmasına ve uygun fiyatlı, güvenilir enerji sağlamasına rağmen aynı zamanda CO₂ emisyonunun önemli bir kaynağı olarak görülmektedir. Rezervlerin bilgisi (Çizelge 2.2), enerji ihtiyacını çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle dengelemede yardımcı olabilirken aynı zamanda da kömür kullanımının karbon ayak izini azaltmak için gerekli olan temiz kömür teknolojileri ve depolama çözümlerinde yenilik yapılmasını teşvik edebilir (Kopp, 2016; SRWE, 2023; IEA, 2023).

Şekil 2.1’de dünya kömür rezervlerinin kömür kategorilerine göre dağılımı görülmektedir.

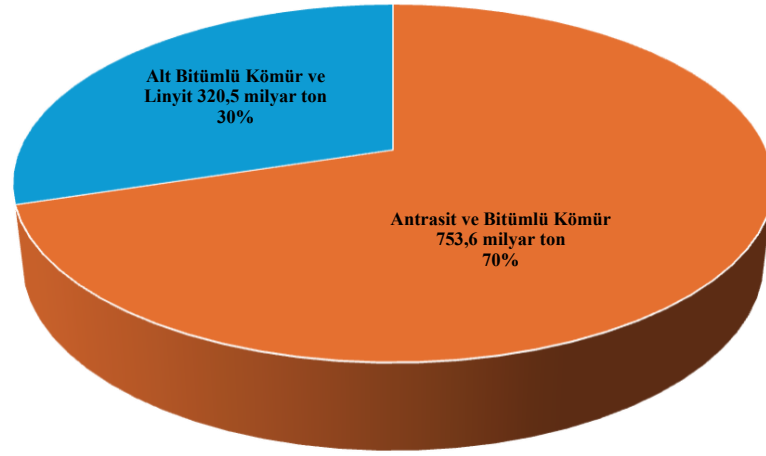
Çizelge 2.2. Ülkeler ve kıtalara göre 2020 dünya kömür rezervi (BGR, 2021)

Ülke	Antrasit ve Taşkömürü (milyon t)	Linyit (mt)	Toplam (mt)	Toplamın Payı	R/P Oranı
Kanada	4.346	2.236	6.582	%0,6	166
Meksika	1.160	51	1.211	%0,1	185
ABD	218.938	30.003	248.941	%23,2	*
<i>Kuzey Amerika Toplamı</i>	<i>224.444</i>	<i>32.290</i>	<i>256.734</i>	<i>%23,9</i>	<i>484</i>
Brezilya	1.547	5.049	6.596	%0,6	*
Kolombiya	4.554	-	4.554	%0,4	90
Venezuela	731	-	731	%0,1	*
Diğer Güney & Orta Amerika	1.784	24	1.808	%0,2	*
<i>Güney & Orta Amerika Toplamı</i>	<i>8.616</i>	<i>5.073</i>	<i>13.689</i>	<i>%1,3</i>	<i>240</i>
Bulgaristan	192	2.174	2.366	%0,2	192
Çek Cumhuriyeti	1.081	2.514	3.595	%0,3	113
Almanya	-	35.900	35.900	%3,3	334
Yunanistan	-	2.876	2.876	%0,3	205
Macaristan	276	2.633	2.909	%0,3	475
Polonya	22.530	5.865	28.395	%2,6	282
Romanya	11	280	291	◆	19
Sırbistan	402	7.112	7.514	%0,7	189
İspanya	868	319	1.187	%0,1	282
Türkiye	550	10.975	11.525	%1,1	168
Ukrayna	32.039	2.336	34.375	%3,2	*
Birleşik Krallık	26	-	26	◆	16
Diğer Avrupa	1.109	5.172	6.281	%0,6	189
<i>Avrupa Toplamı</i>	<i>59.084</i>	<i>78.156</i>	<i>137.240</i>	<i>%12,8</i>	<i>299</i>
Kazakistan	25.605	-	25.605	%2,4	226
Rusya Federasyonu	71.719	90.447	162.166	%15,1	407
Özbekistan	1.375	-	1.375	%0,1	333
Diğer BDT	1.509	-	1.509	%0,1	336
<i>Toplam BDT</i>	<i>100.208</i>	<i>90.447</i>	<i>190.655</i>	<i>%17,8</i>	<i>367</i>
Güney Afrika	9.893	-	9.893	%0,9	40
Zimbabve	502	-	502	◆	153
Diğer Afrika	4.376	66	4.442	%0,4	280
Orta Doğu	1.203	-	1.203	%0,1	*
<i>Toplam Orta Doğu & Afrika</i>	<i>15.974</i>	<i>66</i>	<i>16.040</i>	<i>%1,5</i>	<i>60</i>

Avustralya	73.719	76.508	150.227	%14,0	315
Çin	135.069	8.128	143.197	%13,3	37
Hindistan	105.979	5.073	111.052	%10,3	147
Endonezya	23.141	11.728	34.869	%3,2	62
Japonya	340	10	350	◆	453
Moğolistan	1.170	1.350	2.520	%0,2	58
Yeni Zelanda	825	6.750	7.575	%0,7	*
Pakistan	207	2.857	3.064	%0,3	396
Güney Kore	326	-	326	◆	320
Tayland	-	1.063	1.063	%0,1	80
Vietnam	3.116	244	3.360	%0,3	69
Diğer Asya Pasifik	1.421	726	2.147	%0,2	33
<i>Toplam Asya Pasifik</i>	<i>345.313</i>	<i>114.437</i>	<i>459.750</i>	<i>%42,8</i>	<i>78</i>
<i>Toplam Dünya</i>	<i>753.639</i>	<i>320.469</i>	<i>1.074.108</i>	<i>%100,0</i>	<i>139</i>

* 500 yıldan fazla

◆ %0,05'ten az



Şekil 2.1. Dünya kömür rezervlerinin kömür kategorilerine göre dağılımı (BGR, 2021)

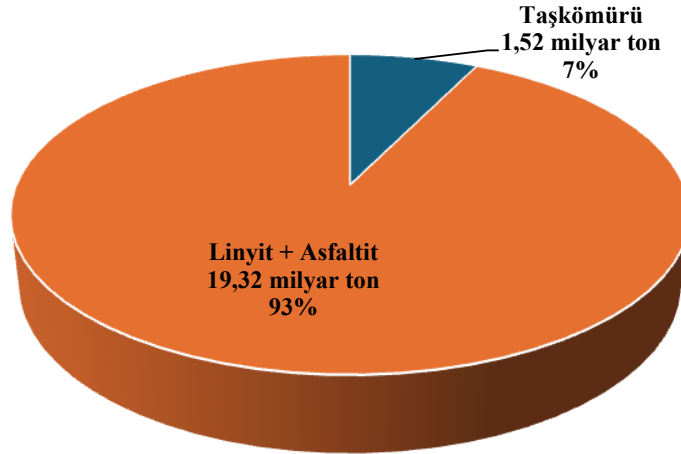
Dünya antrasit ve bitümlü kömür rezervlerinin çoğu, 218,94 milyar tonla (%29,1) ABD’de bulunmaktadır. ABD’yi, sırasıyla 135,07 milyar tonla (%17,9) Çin, 105,98 milyar tonla (%14,1) Hindistan, 73,72 milyar tonla (%9,8) Avustralya ve 71,72 milyar tonla (%9,5) Rusya takip etmektedir. Dünya alt bitümlü kömür ve linyit rezervlerinin ise en büyük kısmı, 90,45 milyar tonla (%28,2) Rusya Federasyonu’nda bulunmaktadır. Rusya’yı sırasıyla 76,51 milyar tonla (%23,9) Avustralya, 35,90 milyar tonla (%11,2)

Almanya, 30,00 milyar tonla (%9,4) ABD, 11,73 milyar tonla (%3,7) Endonezya ve 10,98 milyar tonla (%3,4) Türkiye izlemektedir (BGR, 2021).

2.2.2. Türkiye’de kömür

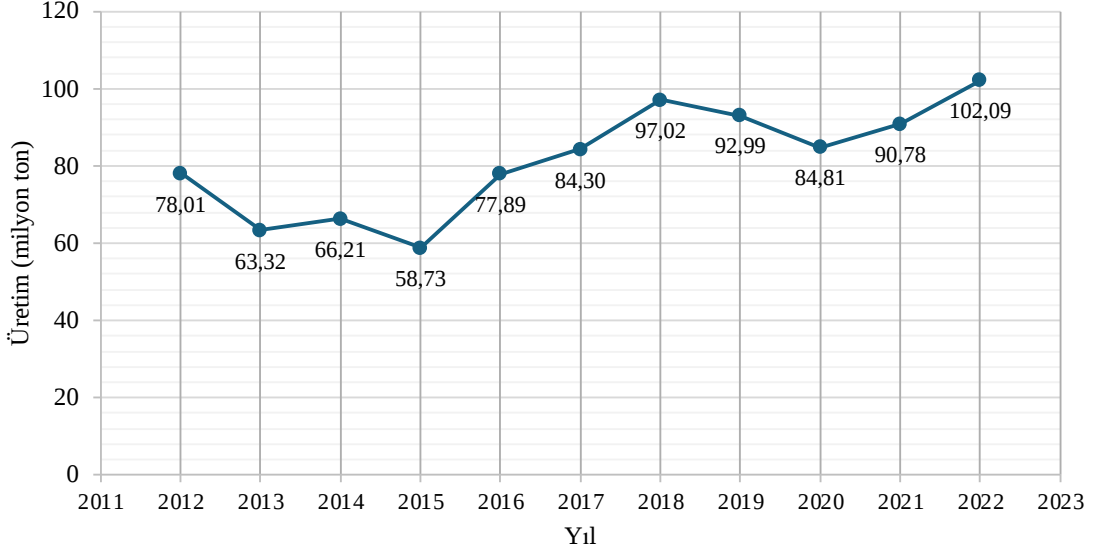
Türkiye’deki kömür rezervleri, üretimi ve tüketimi, ülkenin enerji güvenliği ve ekonomik istikrarı için öneme sahiptir. Kömür, Türkiye’nin enerji talebinin önemli bir bölümünü karşılar ve enerji ihtiyaçlarının yerli kaynaklarla karşılanmasına yardımcı olur. Bu da enerji ithalatına olan bağımlılığı azaltır ve enerji arz güvenliğini artırır. Ayrıca, kömür madenciliği ve yan sanayiler, istihdam yaratma ve yerel ekonomileri destekleme açısından önemlidir. Kömür, özellikle elektrik üretimi için kullanılır ve Türkiye’nin elektrik üretim kapasitesinin önemli bir bölümünü oluşturur. Bu nedenle, kömür rezervlerinin yönetimi ve kullanımı, Türkiye’nin enerji politikalarının ve ekonomik stratejisinin bir parçasıdır (Aktaş, 2011; TKİ, 2024).

Ülkemizdeki kömür rezervleri, 19,32 milyar ton linyit ve asfaltit ile (%92,7) ve 1,52 milyar ton taş kömürü (%7,3) olmak üzere toplamda yaklaşık 20,84 milyar ton olarak hesaplanmaktadır (Şekil 2.2). Taş kömürlerinin alt ısı değeri 6.200 ile 7.250 kcal/kg arasında değişmektedir. Linyit kaynaklarının ise ısı değerleri 1.000 kcal/kg ile 4.200 kcal/kg arasında değişmektedir, ancak yaklaşık %79’unun alt ısı değeri 2.500 kcal/kg’nin altındadır (ETKB, 2023).

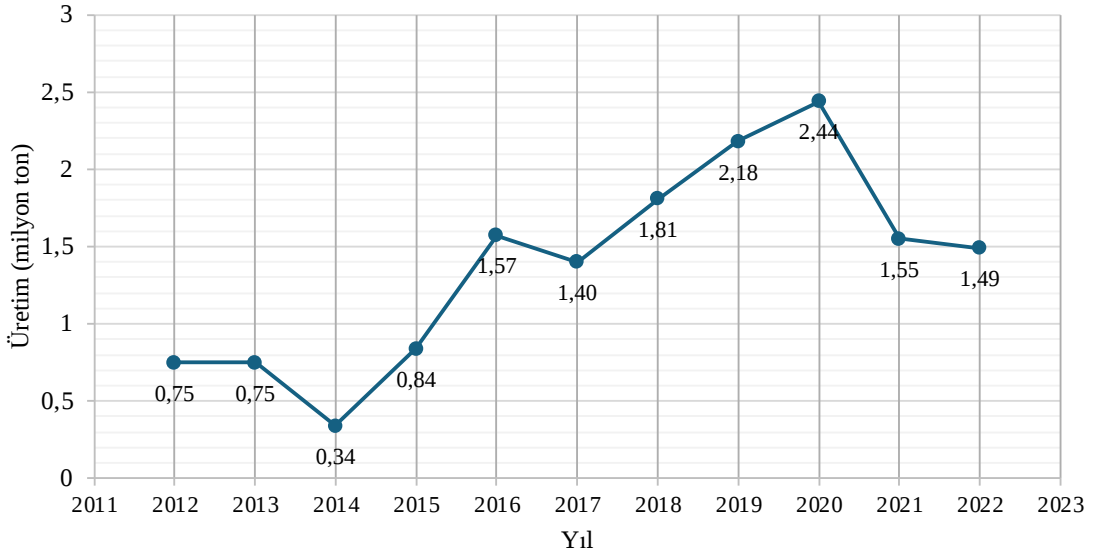


Şekil 2.2. Ülkemizdeki kömür kaynaklarının dağılımı (ETKB, 2023)

2022 yılında Türkiye’de kaydedilen toplam kömür üretimi, linyit için 102,09 milyon ton, asfaltit için 1,49 milyon ton ve taş kömürü için ise 1,79 milyon ton olmak üzere, toplamda 105,37 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (Şekil 2.3 ve Şekil 2.4) (ETKB, 2023).



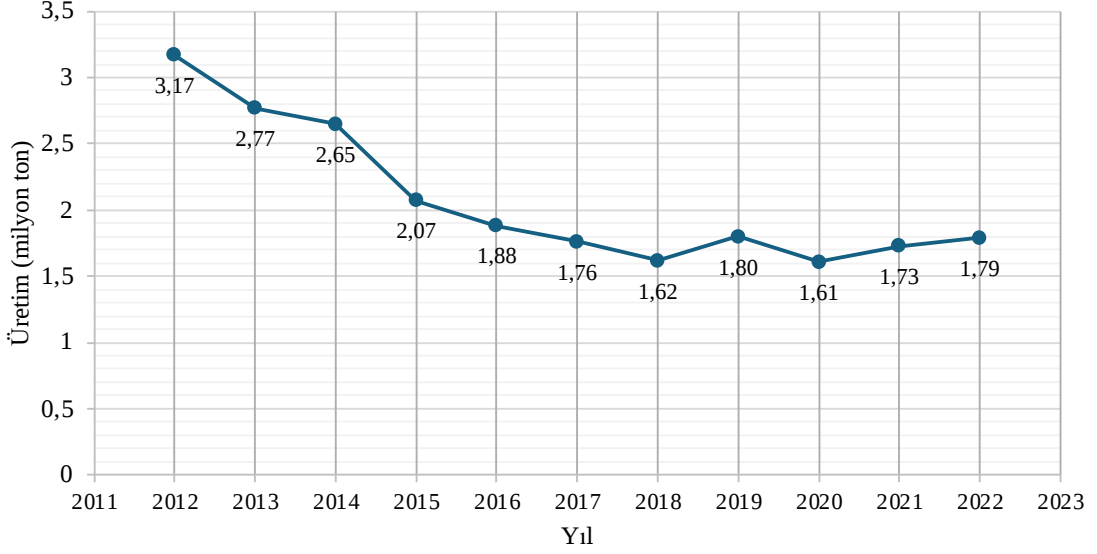
Şekil 2.3. Türkiye'nin yıllara göre linyit üretimleri (ETKB, 2023)



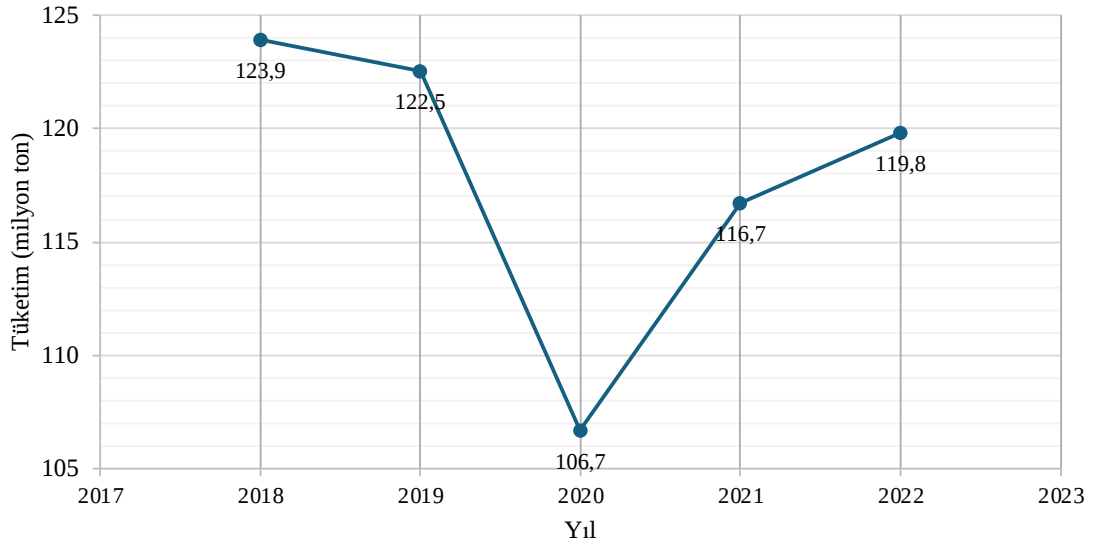
Şekil 2.4. Türkiye'nin yıllara göre asfaltit üretimleri (ETKB, 2023)

Ülkemizde 2022 yılında, toplamda 119,8 milyon ton kömür tüketilmiştir. Bu miktarın içinde 35,1 milyon ton taş kömürü, 79,1 milyon ton linyit ve asfaltit, 5,6 milyon ton taş kömürü koku bulunmaktadır. Taş kömürü ile linyit tüketimlerinde, termik santrallerin payı sırasıyla %60,2 ve %83,5 oranındadır. Ülkemizin 2018-2022 yılları arasındaki ortalama kömür (taş kömürü, taş kömürü koku, linyit ve asfaltit) tüketimi yaklaşık olarak 118 milyon ton olmuştur (ETKB, 2023).

Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da Türkiye'nin taşkömürü üretimi ve kömür tüketimi verilmiştir.



Şekil 2.5. Türkiye'nin yıllara göre taş kömürü üretimleri (ETKB, 2023)



Şekil 2.6. Türkiye'nin yıllara göre kömür tüketimleri (ETKB, 2023)

2022 yılında, yerli kaynaklara dayalı kömür santrallerinden elde edilen elektrik miktarı 49.556,15 GWs olup (liniyit+asfaltit+taş kömürü), ithal kaynaklara dayalı kömür santrallerinden ise 63.259,66 GWs olarak kaydedilmiştir. Kömüre dayalı santraller toplamda 112.815,81 GWs elektrik üretmiştir. Kömüre dayalı santrallerin 2022 yılındaki toplam elektrik üretimindeki payı %36,18 olup yerli kömürün (liniyit+taş kömürü+asfaltit) payı ise %15,89 seviyesindedir. Aralık 2022 itibarıyla, ülkemizde 1 adet asfaltit, 46 adet liniyit, 4 adet taş kömürü ve 16 adet ithal kömürle çalışan olmak üzere toplamda 67 kömürle çalışan elektrik üretim santrali bulunmakla birlikte kömüre dayalı

santral kurulu gücü, toplam kurulu gücün %21'ine denk gelmektedir. Yerli kömüre dayalı kurulu gücün toplam kurulu güce oranı ise %11 düzeyindedir (ETKB, 2023).

Haziran 2023'te Türkiye Cumhuriyeti, kömürle çalışan enerji üretiminde ilk kez Almanya ve Polonya'yı geride bırakmıştır. Kömür tüketiminde genel bir azalmaya rağmen (%0,7 azalma), kömürle çalışan enerji üretimindeki artış, ithal taş kömürün daha fazla kullanılması ve düşük kalorifik değere sahip yerli linyit kaynaklarından daha az enerji üretilmesi nedeniyle gerçekleşmiştir. Veriler, 2026 yılına kadar kömür talebinde 109 milyon tonluk bir düşüş öngörmekte olup, yenilenebilir enerji kaynaklarının kömürle çalışan enerji üretiminin önemli bir kısmını yerine getirmesi beklenmektedir (IEA, 2023).

2.3. Çok İnce Boyutta Kömür Zenginleştirme

2.3.1. Yağ aglomerasyonu

Yağ aglomerasyonu, ince partiküllerin toplu halde bir araya getirilmesini sağlayan bir teknik olarak bilinmektedir. Kömür tanelerinin pülp içindeki bir bağlayıcı yağ ile bir araya getirilmesi işlemidir. Kömür-hava arayüzeyinin güçlenmesini ve temiz kömür elde edilmesini mümkün kılar (Guan vd., 2018).

Yağ aglomerasyonunun başlıca amacı, kömürün kükürt ve kül gibi istenmeyen bileşenlerinden arındırılmasıdır. Bu işlem, kömürün yanma verimliliğini artırırken çevresel kirleticilerin salınımını azaltır. Kükürt, kömür yandığında asidik gazlara dönüşerek hava kirliliğine ve asit yağmurlarına neden olabilmektedir. Yağ aglomerasyonu, kükürdün kömürden ayrılmasını sağlayarak bu tür çevresel sorunların da önüne geçmeyi amaçlamaktadır (Calkins, 1994).

Ayrıca, bu yöntemle kömür atıklarının geri kazanımı da literatürde çalışılmıştır. Kömür madenlerinden çıkan atıklar, çevresel kirliliğe yol açabilir. Ancak yağ aglomerasyonu sayesinde bu atıklar, yeniden işlenerek kullanılabilir kömür ürünlerine dönüştürülebilir. Bu da ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar. Özellikle, kömür madenlerinin bulunduğu bölgelerde ekonomik fayda sağlamak için bu tür teknolojilerin ekonomik biçimde kullanımını önemlidir (Calkins, 1994).

Yağ aglomerasyonu, sadece kömür için değil, aynı zamanda diğer mineral ve metal partiküllerin ayrılması için de kullanılabilir. Literatürde, bazı metal madenlerinin de zenginleştirilmesi için yağ aglomerasyonu teknolojisi, değerli metal partiküllerinin konsantre edilmesi ve istenmeyen bileşenlerden arındırılması için uygulanabilmektedir (Hornn vd., 2020).

2.3.1.1. Yağ aglomerasyonu proseslerinin tarihi

Yağ aglomerasyonu, ilk olarak 20. yüzyılın ortalarında kömür temizleme teknolojilerinin geliştirilmesi sırasında ortaya çıkmıştır. İlk çalışmalar, kömür partiküllerinin su ortamında bir araya getirilmesi ve organik bir bağlayıcı kullanılarak ayrılması üzerine odaklanmıştır. Bu süreç, kömürün yanma verimliliğini artırmak ve çevresel kirleticileri azaltmak amacıyla geliştirilmiştir (Shen & Wheelock, 1998).

1970'lerde ve 1980'lerde, yağ aglomerasyonu teknolojisi daha da geliştirilmiş ve özellikle kömür literatürde yaygın olarak çalışılmaya başlanmıştır. Bu dönemde, farklı bağlayıcı türlerinin ve karıştırma tekniklerinin etkileri üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Bu dönemde yapılan çalışmalar, yağ aglomerasyonunun etkinliğini ve verimliliğini artırmayı amaçlamıştır. Özellikle, bağlayıcı sıvıların türü ve konsantrasyonu, karıştırma hızları ve kömürün fiziksel özellikleri gibi faktörlerin aglomerasyon sürecine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmalar, yağ aglomerasyonunun daha verimli yöntem olarak geliştirilmesine olanak tanısa da ekonomik açıdan sürdürülebilir endüstriyel uygulama sağlayamamıştır (Shen & Wheelock, 1998).

Günümüzde literatürden biliyoruz ki, yağ aglomerasyonu teknolojisi sadece kömür değil, diğer mineral ve metal partiküllerin zenginleştirilmesi için de araştırılmaktadır. Yağ aglomerasyon süreçleri, daha yüksek verimlilik ve daha düşük bağlayıcı sıvı tüketimi konusunda geliştirilmeye çalışılmaktadır (Şahin & Kablay, 2015).

Bu teknolojinin gelecekteki gelişimi, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik hedefleri doğrultusunda devam edeceği ön görülmektedir. Özellikle, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sürecinde, mevcut kömür rezervlerinin daha temiz ve verimli bir şekilde kullanılması önemlidir. Bu nedenle, yağ aglomerasyonu teknolojisinin sürekli olarak optimize edilmesi ve geliştirilmesi gerektiği düşünülmektedir (Shen & Wheelock, 1998).

2.3.1.2. Kömürün yağ aglomerasyonunu etkileyen faktörler

Bağlayıcı sıvı türü ve konsantrasyonu: Bağlayıcı sıvı türü ve konsantrasyonu, yağ aglomerasyonu sürecinin verimliliğinde kritik bir rol oynar. Kullanılan bağlayıcı sıvının özellikleri, kömür partiküllerinin bir araya gelme hızını ve stabilitesini etkiler. Optimal bağlayıcı türü ve konsantrasyonu, maksimum aglomerat verimini ve minimum enerji tüketimini sağlar.

Kömürün ıslanabilirlik özelliği: Kömürün ıslanabilirlik özelliği, yağ aglomerasyonunun başarısını doğrudan etkiler. Hidrofobik kömür partikülleri, yağ fazı

ile daha kolay birleşir ve daha sağlam aglomeratlar oluşturur. Bu nedenle, kömürün yüzey kimyasının ve mineralojik yapısının doğru analizi önemlidir.

Karıştırma hızı: Karıştırma hızı, aglomerasyon sürecinde bağlayıcı sıvının kömür partikülleri ile etkin bir şekilde temas etmesini sağlar. Yüksek karıştırma hızları, partiküllerin yüzeylerinin yağ ile kaplanmasını hızlandırır ve aglomerat oluşumunu artırır. Ancak, çok yüksek hızlar aglomeratların parçalanmasına neden olabilir.

Pülp katı oranı: Pülp katı oranı, kömür partiküllerinin konsantrasyonunu belirler ve aglomeratların verimliliğini etkiler. Düşük katı oranları, daha homojen bir karışım sağlar ve aglomeratların oluşumunu teşvik eder. Ancak, çok düşük oranlar ekonomik olmayabilir veya yüksek oranlar istenilen özelliklerde konsantreyi elde etmeyi zorlaştırabilir.

Pülp pH oranı: Pülp pH oranı, aglomerasyon sürecinde önemli bir parametredir. pH, bağlayıcı sıvının etkinliğini ve kömür yüzeyinin kimyasal özelliklerini etkiler. Optimal pH değerleri, kömür partiküllerinin daha etkili bir şekilde aglomere olmasını sağlar.

Tane boyutu: Tane boyutu, kömür partiküllerinin aglomerasyon davranışını belirler. Daha küçük partiküller, daha büyük yüzey alanına sahip olduğundan, bağlayıcı sıvı ile daha iyi etkileşime girer ve daha stabil aglomeratlar oluşturur. Ancak, çok ince partiküller, aglomeratların mekanik dayanıklılığını azaltabilir (Fan vd., 1989).

2.3.1.3. Yağ aglomerasyonunda yapılmış çalışmalar

Fan ve diğerleri (1989), heptan ile aglomerasyon yoluyla sulu süspansiyonlardan kömür geri kazanımında indüksiyon süresi ve diğer özelliklerin rolünü incelemiştir. Çalışmada, kömür parçacıkları heptan ile aglomere edilerek indüksiyon süresi, kömür tipi ve süspansiyon özelliklerinin aglomerasyon sürecine etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, indüksiyon süresinin geri kazanım oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve süspansiyon özelliklerinin doğru kontrol edilmesiyle aglomerasyon sürecinin verimliliğinin artırılabilirliğini göstermiştir.

Gabriel ve diğerleri (2021), kömürün yağ aglomerasyonu teknikleri ile temizlenmesini incelemiştir. Çalışma, aglomerasyon sürecini etkileyen çeşitli parametreler üzerinde yoğunlaşmış; yağ tipi, dozajı, karıştırma hızı ve pH seviyelerinin etkilerini araştırmıştır. Sonuçlar, seçilen yağın ve konsantrasyonunun aglomerat boyutu ve kömür geri kazanım oranını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Araştırma, yağ

aglomerasyonunun kül ve kükürt içeriğini azaltarak kömür kalitesini iyileştirmede uygulanabilir bir yöntem olduğunu vurgulamıştır.

Gaqa ve Watts (2018), farklı yağlar ve işletim koşullarının kömürün yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemiştir. Araştırma, kömür parçacıkları ile yağ damlacıkları arasındaki hidrofobik etkileşimlerin daha büyük aglomeratlar oluşturduğunu ve bu aglomeratların safsızlıklardan kolayca ayrılabilceğini belirtmiştir. Bulgular, yağ-kömür oranının ve karıştırma koşullarının optimize edilmesiyle aglomerasyon verimliliğinin ve kömür geri kazanım oranının önemli ölçüde artırılabilceğini göstermiştir.

Guan ve diğerleri (2018), ince kömürün yağ aglomerasyonunda karıştırma süresinin etkisini araştırmıştır. Çalışmada, aglomerasyonda bağlayıcı sıvı olarak gazyağı kullanılmış ve farklı karıştırma sürelerinde kömür aglomeratlarının dağılımı ve büyümesi incelenmiştir. Sonuçlar, daha uzun karıştırma sürelerinin daha büyük ve stabilize aglomeratlar oluşturduğunu, bunun da yanabilir madde geri kazanımını artırdığını ve kül içeriğini azalttığını ortaya koymuştur. Araştırma, optimal karıştırma süresinin kömür geri kazanımını ve kalitesini maksimize etmek için kritik olduğunu belirtmiştir.

Netten ve diğerleri (2016), kömürün yağ aglomerasyonu sürecinde parçacık boyutu ve yüzey özelliklerinin etkisini analiz etmiştir. Çalışma, farklı yağ dozajları ve emülsiyon yoğunluğu altında farklı kömür örneklerinin aglomerasyon davranışlarını karşılaştırmıştır. Bulgular, daha ince ve hidrofobik parçacıkların daha stabil aglomeratlar oluşturduğunu ve emülsiyon kullanımının yağ kullanım verimliliğini artırdığını göstermiştir. Araştırma, kömür temizleme performansını iyileştirmek için proses koşullarının optimize edilmesine yönelik bilgiler sağlamıştır.

Spoelstra (1989), kömür ince tanelerinin yağ aglomerasyonu için matematiksel bir model geliştirmiştir. Model, kömür parçacıklarının yağ ile kaplanma hızını ve sonrasında aglomerat oluşturma hızını ayrı adımlar olarak ele almıştır. Deneysel prosedürler modeli doğrularak aglomerasyon süreleri ve organik geri kazanım oranları ile iyi bir uyum göstermiştir. Çalışma, matematiksel modellemenin yağ aglomerasyonu süreçlerini optimize etmede potansiyelini vurgulamıştır.

Düzyol ve Ağaayak (2018) çalışmasında, Zonguldak/Karadon bölgesinden elde edilen kömür örneklerinin yağ aglomerasyonu üzerinde bazı fiziksel parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Araştırmada karıştırıcı paletlerin boyutu, hücre şekli ve bariyer sayısı gibi fiziksel parametreler seçilmiştir. Yağ aglomerasyon deneyleri belirli bir katı-sıvı oranında (0.01 g/cm^3), 1500 dev/dk karıştırma hızında ve süspansiyonun doğal

pH'ında 2 mL gazyağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan iki farklı hücre tipi (dikdörtgen ve silindirik) ve farklı sayıda bariyerler (2, 4 ve 6) ile çeşitli karıştırıcı palet boyutları (küçük, orta, büyük) araştırılmıştır. Silindirik hücrelerde bariyer sayısının artmasının kül uzaklaştırma ve yanabilir geri kazanım oranlarına olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir. Dikdörtgen şekilli hücrelerde ise bariyer kullanımının aglomerasyon verimliliği üzerindeki olumsuz etkisi gözlemlenmiştir. Küçük boyutlu karıştırıcı paletler kullanıldığında aglomerat verimlerinin düşük olduğu, orta ve büyük boyutlu paletlerde ise verimlerin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. En iyi sonuçlar, 6 bariyer ve büyük boyutlu karıştırıcı paletler kullanıldığında elde edilmiştir. Kömürün kül uzaklaştırma oranı yaklaşık %20 olmuştur. Deneysel tasarımdan kaynaklanan fiziksel koşulların yağ aglomerasyon prosesinde etkili olduğu gösterilmiştir.

2.3.2. Flotasyon

Flotasyon, katı-sıvı karışımlarından katı parçacıkların hava yardımıyla ayrılması amacıyla kullanılan fizikokimyasal bir yöntemdir. Bu proses, özellikle ince taneli mineral ve kömürlerin ayrıştırılmasında oldukça etkilidir. Flotasyon işlemi sırasında, hidrofobik özellikteki katı parçacıklar hava kabarcıklarına bağlanarak yüzeye çıkar ve böylece ayrıştırılmış olur. Bu yöntem, mineral işleme endüstrisinde önemli bir yer tutmakla birlikte, kömür hazırlama işlemlerinde de kullanılabilir (Brozek & Mlynarczykowska, 2013).

Flotasyonun önemi, düşük kaliteli kömürlerin ekonomik olarak kullanılabilir hale getirilmesini sağlayabilir. Yüksek kül içeriğine sahip kömürler, flotasyon sayesinde artırılarak enerji verimliliği artırılır ve çevresel etkiler azaltılır. Bu yöntem, aynı zamanda kömürün kükürt içeriğinin azaltılmasında da etkilidir, bu da enerji santrallerinin emisyonlarını düşürmek için öneme sahiptir (Cheng vd., 2018).

Flotasyonun amacı, kömürün kaliteli ve ekonomik olarak kullanıma uygun hale getirilmesini sağlamaktır. Bu, enerji üretiminde daha verimli ve çevre dostu bir yakıt kullanımı anlamına gelir. Özellikle ince taneli kömürlerin değerlendirilmesi, flotasyon yöntemiyle mümkün hale gelebilmektedir (Brozek & Mlynarczykowska, 2013).

2.3.2.1. Kömür flotasyonunda kullanılan reaktifler

Kömür flotasyonunda kullanılan reaktifler, flotasyon işleminin etkinliğini doğrudan etkileyen bileşenlerdir. Bu reaktifler arasında toplayıcılar, köpürtücüler ve dağıtıcılar yer almaktadır. Toplayıcılar, hidrofobik kömür parçacıklarının hava kabarcıklarına bağlanmasını sağlar. En yaygın kullanılan toplayıcılar, yağ asitleri ve alkilbenzen sülfonatlarıdır (Jia vd., 2002).

Köpürtücüler, hava kabarcıklarının stabilizasyonunu sağlayarak flotasyon hücresinde yeterli köpük oluşumunu sağlar. Alkol ve glikol türevleri, yaygın olarak kullanılan köpürtücüler arasındadır. Dağıtıcılar ise istenmeyen minerallerin yüzey özelliklerini değiştirerek, bu minerallerin flotasyon işleminde ayrılmasını sağlar. Sodyum silikat gibi dağıtıcılar kömür flotasyonunda dağıtıcı olarak kullanılabilir.

Reaktiflerin seçimi, kömürün türüne ve flotasyon prosesinin gereksinimlerine bağlıdır. Uygun reaktiflerin kullanımı, flotasyon verimliliğini artırmaktadır (Kurniawan vd., 2011).

2.3.2.2. Kömür flotasyonunu etkileyen faktörler

Kömür flotasyonunu etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler arasında kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri, flotasyon hücresinin tasarımı, kullanılan reaktifler ve işlem koşulları yer almaktadır. Kömür parçacıklarının yüzey özellikleri, flotasyon performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Hidrofobik kömür parçacıkları, flotasyon sırasında hava kabarcıklarına bağlanarak köpük zonuna yükselir.

Flotasyon hücresinin tasarımı ve operasyon koşulları da önemli rol oynamaktadır. Hücre boyutu, hava besleme hızı ve pülp yoğunluğu flotasyon verimliliğini etkileyen parametrelerdir. Ayrıca, pH değeri de flotasyon işleminde önemli rol oynar. Yüksek veya düşük pH değerleri, bazı reaktiflerin etkinliğini artırırken, bazı minerallerin flotasyonunu engelleyebilir (Somasundaran vd., 1991; Kurniawan vd., 2011).

2.3.2.3. Flotasyon prosesinin tarihsel gelişimi

Flotasyon prosesinin tarihsel gelişimi, madencilik endüstrisinde bir dönüşüm sağlamıştır. Flotasyon, ilk kez 1900'li yılların başında mineral ayrıştırma amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. İlk ticari flotasyon uygulamasının Avustralya'da gerçekleştirildiği bilinmektedir. Günümüze göre, flotasyon işlemi için kullanılan reaktiflerin ve ekipmanların oldukça basit ve ilkel düzeyde kalmış olması beklenebilir.

20. yüzyılın ortalarına gelindiğinde, flotasyon prosesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Daha etkili reaktifler ve daha verimli flotasyon hücreleri geliştirilmiştir. Bu dönemde, kömür flotasyonu da araştırılmaya başlanmıştır. 1970’li yıllarda, çevresel kaygıların artmasıyla, flotasyon prosesinin çevre dostu hale getirilmesi üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır (Jia vd., 2002).

2.3.2.4. Kömür flotasyonunda yapılmış çalışmalar

Bhattacharya ve Pascoe (2005) çalışmasında, kömür şamlarının flotasyonla zenginleştirilmesinde etkili olan parametreleri araştırmıştır. Deneylerinde, flotasyon hücresinin tasarımı, köpürtücü ve toplayıcı türleri ve miktarlarının flotasyon verimliliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma, gazyağı ve MIBC (Metil İzobütil Karbinol, bundan sonra MIBC olarak bahsedilecektir.) kullanarak farklı konsantrasyonlarda flotasyon deneyleri gerçekleştirmiştir. Bhattacharya, deney sonuçlarını analiz ederek optimum flotasyon koşullarını belirlemiştir ve bu koşullar altında kömürün kül içeriğini ve yanabilir verimliliğini değerlendirmiştir. Deneysel veriler, flotasyon performansını maksimize etmek için gazyağı ve MIBC’nin belirli oranlarda kullanılmasının gerekli olduğunu ortaya koymuştur.

Brozek ve Mlynarczykowska (2012) çalışmasında, kömür flotasyonunun iyileştirilmesi amacıyla yeni reaktifler ve flotasyon teknikleri araştırmıştır. Deneylerinde, çeşitli kimyasal reaktiflerin flotasyon verimliliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ayrıca, farklı flotasyon cihazlarının performansını karşılaştırmıştır. Brozek, optimum flotasyon koşullarını belirlemek için bir dizi deney gerçekleştirmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda, en etkili reaktif türlerini ve miktarlarını belirlemiştir. Çalışma, kömür flotasyonunun verimliliğini artırmak için kullanılan reaktiflerin ve cihazların önemini vurgulamaktadır.

Chang (2021) çalışmasında, kömür flotasyonunda yüzey kimyasının rolü incelenmiştir. Deneylerinde, çeşitli yüzey aktif maddelerin kömür yüzeyinde oluşturduğu kimyasal değişimlerin flotasyon verimliliği üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Chang, farklı pH seviyelerinde ve yüzey aktif madde konsantrasyonlarında deneyler gerçekleştirmiş ve bu parametrelerin kömürün yüzey özelliklerini nasıl etkilediğini incelemiştir. Çalışma, yüzey kimyasının kömür flotasyonunda kritik bir rol oynadığını ve uygun yüzey aktif maddelerin kullanımıyla flotasyon verimliliğinin artırılabilirliğini göstermektedir.

Cheng ve diğerleri (2018) çalışmalarında, ince kömür temizleme işlemlerinde yenilikçi flotasyon sistemlerinin uygulanmasını araştırmışlardır. Çalışma, yeni nesil flotasyon cihazları kullanarak kömürün zenginleştirilmesinde elde edilen verimliliği değerlendirmiştir. Deneylerde, gazyağı ve MIBC gibi geleneksel reaktiflerle karşılaştırıldığında, yeni flotasyon sistemlerinin performansını incelemişlerdir. Cheng ve arkadaşları, yeni flotasyon sistemlerinin, özellikle ince kömür partiküllerinin verimli bir şekilde zenginleştirilmesinde önemli avantajlar sunduğunu ve bu sistemlerin kullanımıyla flotasyon performansının arttığını tespit etmişlerdir.

Jia ve diğerleri (2002) çalışmalarında, kömür flotasyonunun iyileştirilmesi amacıyla kullanılan kimyasal reaktifleri araştırmışlardır. Çalışma, çeşitli reaktiflerin kömür yüzey özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve bu reaktiflerin flotasyon verimliliğini nasıl artırdığını değerlendirmiştir. Jia ve arkadaşları, farklı konsantrasyonlarda kimyasal reaktifler kullanarak deneyler gerçekleştirmiş ve optimum reaktif türleri ve miktarlarını belirlemişlerdir. Çalışma, kömür flotasyonunda kullanılan kimyasal reaktiflerin önemini vurgulamakta ve flotasyon performansını maksimize etmek için uygun reaktiflerin seçilmesinin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

Kurniawan ve diğerleri (2011) çalışmalarında, $MgCl_2$, $NaCl$ ve $NaClO_3$ çözeltilerinde kömür partiküllerinin flotasyonunu incelemişlerdir. Çalışma, bu tuz çözeltilerinin flotasyon performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Kurniawan ve ekibi, Dowfroth 250 köpürtücüsünün varlığında ve yokluğunda deneyler yapmış ve bu tuz çözeltilerinin kömür flotasyon verimliliğini nasıl etkilediğini analiz etmişlerdir. Deney sonuçları, $MgCl_2$ ve $NaCl$ çözeltilerinin kömür flotasyonunu önemli ölçüde iyileştirdiğini, $NaClO_3$ çözeltilerinin ise daha az etkili olduğunu göstermiştir. Çalışma, tuz çözeltilerinin flotasyon sistemlerinde kabarcık boyutu ve köpük kararlılığı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Somasundaran ve diğerleri (1991) çalışmalarında, kömürün oksitlenmesi ve bu oksidasyonun flotasyon üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma, kömürün yüzey özelliklerinin oksidasyon yoluyla nasıl değiştiğini ve bu değişimlerin flotasyon verimliliğini nasıl etkilediğini değerlendirmiştir. Deneylerde, farklı oksidasyon yöntemleri kullanılmış ve bu yöntemlerin kömür yüzeyinde oluşturduğu kimyasal değişiklikler analiz edilmiştir. Oksidasyonun, kömürün yüzey özelliklerini ve dolayısıyla flotasyon verimliliğini önemli ölçüde etkilediğini bulmuşlardır. Çalışma, kömür flotasyonunda oksidasyonun kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

2.3.3. Agloflotasyon

Agloflotasyon, kömür taneciklerinin yüzey aktif maddeler ve yağlar kullanılarak büyük aglomeratlar oluşturduğu ve bu aglomeratların hava kabarcıkları yardımıyla pülp yüzeyine çıkmasıyla konsantre elde edilen bir yöntemdir. Bu yöntem, diğer minerallerle birlikte ince kömür taneciklerinin zenginleştirilmesi ve geri kazanımı için de araştırılmaktadır. Agloflotasyon, geleneksel flotasyon yöntemlerinden farklı olarak, kömür taneciklerinin hidrofobik karakterini önce aglomerasyon kondüsyon hücresi yardımıyla artırarak, aglomeratlar oluşturur ve bu aglomeratlar flotasyon selülünde yüzdürülerek zenginleştirilir (Gence, 2006).

Agloflotasyonun temel prensibi, aslında aglomerasyon ve flotasyon işlemlerinin tek bir proses içinde uygulanmasına dayanır. İki farklı yöntem olarak literatürde bulunan aglomerasyon ve flotasyon, agloflotasyon ismiyle tek proses olarak incelenir. Bu proseste öncelikle minerale aglomerasyon işlemi uygulanır, sonrasında flotasyon selülüne alınan pülp köpürtücü muamelesinin ardından hava kabarcıkları yardımıyla köpük zonundan toplanır. Böylelikle agloflotasyon işlemi gerçekleştirilmiş olur. Bu işlem sırasında, kömür ve gang mineralleri arasındaki yüzey gerilim farkı kullanılarak seçici bir agloflotasyon sağlanır. Aglomeratların boyutu ve stabilitesi, kullanılan yağın türü, miktarı ve diğer koşullara bağlı olarak değişir. Kömürlerin agloflotasyonunda kullanılan yüzey aktif maddeler yani kömür özelinde yağlar, kömür taneciklerinin yüzey özelliklerini etkileyerek, hidrofobikliği artırır ve bu sayede aglomerat oluşumunu teşvik eder (Gence, 2005; Hacıfazlıoğlu vd., 2019).

Agloflotasyonun avantajları arasında, flotasyona göre yüksek verimlilik ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemin etkinliği, kullanılan kimyasalların türüne ve miktarına, işlem koşullarına ve kömürün fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Agloflotasyonun başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, optimum koşulların belirlenmesi gerekmektedir (Kasomo vd., 2018).

2.3.3.1. Agloflotasyonu etkileyen faktörler

Agloflotasyon sürecini etkileyen faktörler, kullanılan kimyasalların türü ve miktarı, kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri, karıştırma koşulları, aglomerasyon hücresi ve flotasyon hücresi gibi birçok parametreyi içermektedir. Bu faktörlerin her biri, aglomeratların oluşumu, büyüklüğü ve stabilitesi üzerinde doğrudan etkili olabilir.

Kimyasal Reaktifler: Kömürün agloflotasyonunda kullanılan ana kimyasal reaktif, yağlardır. Yağlar, bağlayıcı sıvı olarak kömür yüzeyine bağlanırlar. Kullanılan yağ tipi ve konsantrasyonu, aglomeratların boyutunu ve stabilitesini belirler.

Kömürün Özellikleri: Kömürün fiziksel özellikleri (örneğin, tane boyutu dağılımı ve şekli) ve kimyasal bileşimi (örneğin, organik madde içeriği ve kül içeriği), agloflotasyon sürecini etkiler. İnce taneli kömürlerin aglomerasyonu, daha büyük tanelere göre daha kolay olabilir. Ayrıca, yüksek kül içeriği, kömür taneciklerinin hidrofobikliğini azaltarak aglomerat oluşumunu zorlaştırabilir.

İşlem Koşulları: Karıştırma hız ve süresi, agloflotasyon sürecinde kritik bir rol oynar. Optimum karıştırma hızları, yağ damlacıklarının kömür taneciklerine bağlanmasını kolaylaştırır ve aglomeratların oluşumunu hızlandırır. Bununla birlikte, yoğun karıştırma, aglomeratların parçalanmasına neden olabilir.

pH: Pülün kimyasal bileşimi, agloflotasyon verimliliğini etkileyen diğer önemli faktörlerdendir. Pülp içerisinde bulunan çözünmüş iyonlar, yağların etkinliğini değiştirebilir.

Bu faktörlerin her biri, agloflotasyon sürecinin verimliliğini ve aglomeratların kalitesini etkiler. Optimum agloflotasyon koşullarının belirlenmesi, bu faktörlerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesini gerektirir (Gence, 2006; Temel, 2015; Şahinoğlu, 2018).

2.3.3.2. Agloflotasyon ile yapılmış çalışmalar

Chander ve Hogg (1993), kömürün temizlenmesi için mikro-aglomerat flotasyonunu incelemişlerdir. Amaç, bu işlemin teknik ve ekonomik olarak uygulanabilirliğini göstermek ve reaktif seçimi, sistem tasarımı ve işletimi için kriterler belirlemektir. Araştırma, ara yüzey, emülsifikasyon, aglomerat büyüme ve yapısını tanımlamak amacıyla yürütülmüştür. Çeşitli koşullar altında oluşturulan aglomeratların yüzebilirliğini değerlendirmek için standart flotasyon prosedürleri kullanılmıştır. Çalışma aglomerasyon ve flotasyon işlemlerinin birleşimi ile yüksek seçiciliğe ek olarak yüksek

verim sağlanabildiğini göstermiştir. Yüksek verimlilik korunurken reaktif maliyetinde azalma elde edilmiştir.

Hacıfazlıoğlu ve diğerleri (2019), Zonguldak'taki kömür yıkama tesis atıklarından temiz yakıt üretiminde soya yağının agloflotasyon kullanımını incelemiştir. Çalışma, %33,75 kül içeriğine sahip ince kömür atıklarının soya yağı ile karıştırılıp aglomere edilmesi ve ardından flotasyon hücresinde yüzdürülmesi üzerine odaklanmıştır. Sonuçlar, ağırlıkça %56,40 verim ile temiz kömür elde edildiğini ve kül içeriğinin %14,80'e düştüğünü göstermiştir. Net kalorifik değer 3620 kcal/kg'dan 5072 kcal/kg'a yükseltilmiştir. Gazyağı ile yapılan karşılaştırmalı testler, soya yağının verim ve seçicilik açısından yaklaşık %20 daha düşük performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ancak, düşük maliyeti ve yenilenebilir doğası nedeniyle soya yağı, alternatif bir bağlayıcı olarak değerlendirilmektedir.

Gence (2005), çeşitli petrol yağları (heksan, heptan, toluen ve pentan) kullanarak bitümlü kömürün agloflotasyon ile geri kazanımını incelemiştir. Araştırmanın amacı, ince bitümlü kömürden yüksek kalorifik değer ve düşük kül içeriği elde etmektir. İlk deneyler yağ aglomerasyonu üzerine odaklanmış ve ardından en uygun koşullarda agloflotasyon yapılmıştır. Temel parametreler arasında yağ türü ve dozu, pülp yoğunluğu, şartlandırma süresi, pH ve Na_2SiO_3 miktarı incelenmiştir. En iyi sonuçlar heksan ile elde edilmiştir, %92,17 yanabilir madde geri kazanımı ve %10,87 kül içeriği sağlanmıştır. Çalışma, agloflotasyonun ince bitümlü kömürlerin temizlenmesi için etkili ve ekonomik hale getirilmesi gereken bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Kasomo ve diğerleri (2018), ultra-ince kömürün agloflotasyonunda emülsifiye dizel yağı ve Flomin C 9202'nin performansını karşılaştırmıştır. Çalışma, kömürün ince partiküllere öğütülmesi, aglomere edilmesi ve ardından flotasyon işlemlerini içermektedir. Sonuçlar, Flomin C 9202'nin emülsifiye dizel yağından daha iyi performans gösterdiğini ve kül içeriğini %22,78'den %7,91'e düşürdüğünü ve yanabilir madde geri kazanımını %77,44'ten %92,85'e çıkardığını göstermiştir. Araştırma, ultra-ince kömür zenginleştirme için verimli ve maliyet etkin reaktiflerin seçiminin önemini vurgulamış ve Flomin C 9202'nin daha iyi geri kazanım ve daha temiz kömür elde etmede üstün olduğunu göstermiştir.

Yasar ve Uslu (2022) çalışmasında, Tunçbilek kömür yıkama tesisinden alınan atık kömürlerin agloflotasyon yöntemiyle geri kazanımı araştırılmıştır. Deneyler sırasında şartlandırma süresi, flotasyon süresi, karıştırma hızı, köpürtücü dozu ve partikül boyutunun etkileri incelenmiştir. Elde edilen temiz kömür, %30,5 kül ve 5198,9 kcal/kg

kalorifik değere sahipken, atık kömürler ise %54,6 kül ve 2720,7 kcal/kg kalorifik değere sahiptir. %92,2 yanabilir verim elde edilmiştir ve bu sonuçlar, yağ aglomerasyonu ile yapılan önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında agloflotasyonun daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Temel (2015) çalışmasında, bitümlü kömür-feldispat ve bitümlü kömür-kuvars karışımlarının agloflotasyonu incelenmiştir. Çalışma, pH ve dispersant türü ile miktarının agloflotasyona etkilerini araştıran iki grup deney ile gerçekleştirilmiştir. İlk grup deneylerde, pH, dispersant türü ve miktarının etkileri incelenmiştir. İkinci grup deneylerde ise, sodyum oleat kullanılarak gang minerallerinin agloflotasyona tepkisi araştırılmış ve ardından farklı dispersant türlerinin etkileri araştırılmıştır.

Şahinoğlu (2018) çalışmasında, Müzret kömürünün çok ince boyutlu ($d_{80} = 43,47 \mu m$) yüksek kül (%35,65) ve kükürt (%7,91) içeriğine sahip örneklerinin flotasyon, yağ aglomerasyonu ve agloflotasyon yöntemleri ile temizlenebilirliği araştırmıştır. Agloflotasyon yöntemiyle elde edilen konsantreler, %93,45 yanabilir verim ile en yüksek verimi sağlamıştır. Yağ aglomerasyonu deneylerinde ise %10 atık yağ miktarı kullanılarak %87,15 yanabilir verim elde edilmiştir. Agloflotasyon yöntemi, yağ aglomerasyonunun en büyük dezavantajı olan yüksek yağ tüketimini büyük ölçüde azalttığını tespit etmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kömür numunesi

Bu çalışmada kullanılan kömür numunesi Zonguldak ilinde faaliyet gösteren Türkiye Taşkömürü Kurumu'na (TTK) ait Çatalağzı lavvarından temin edilmiştir. Lavvardan temin edilen numune, siklon üstü akış olarak bilinen, şlam kıvamındaki ara üründen alınmıştır. Lavvarda siklon üstü akış doğrudan termik santrale beslenerek değerlendirilmektedir. Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarı'na getirilen kömür numunesi agloflotasyon deneylerine uygun olarak hazırlanmıştır.

3.1.2. Deneylerde kullanılan reaktifler

- *Hidroklorik asit (HCl) ve Sodyum hidroksit (NaOH)*: pH düzenleyici olarak %1'lik çözeltiler halinde hazırlanarak kullanılmıştır.

- *Evsel atık yağ*: Aglomerasyon işleminde bağlayıcı sıvı olarak kullanılmıştır. Aynı zamanda kömür yüzeylerinin hidrofobisitesini artırarak tanelerin aglomerasyonunu güçlendirmektedir. Evde mutfak kullanımı sonrası evsel atık yağ olarak elde edilmiştir.

- *Sodyum silikat (Na_2SiO_3)*: Sulu çözelti içinde veya katı olarak kullanılabilen saf bileşimleri, renksiz veya beyaz renkli olan kimyasal bir bileşiktir. Yoğunluğu 2,4 gr/cm³'tir. Deneylerde dağıtıcı reaktif olarak kullanılmıştır.

- *Metil izobütil karbonil (MIBC)*: Agloflotasyon prosesinde köpürtücü reaktif olarak kullanılmıştır. Renksiz, stabil, hafif kokulu alifatik bir alkoldür. Yoğunluğu 0,8 gr/cm³'tir. Nötral bir köpürtücü olduğundan hem asidik hem de bazik pülpde kullanılabilir.

3.1.3. Deneylerde kullanılan cihazlar

- *Flotasyon makinesi*: Agloflotasyon deneylerinde laboratuvar tip Denver flotasyon makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.1). Denver flotasyon makinesinin laboratuvar çalışmalarında oldukça yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Cihazın farklı hacimlerde hücreleri mevcut olup, hava kabarcıkları, özel tasarlanmış ve merkezde bulunan bir shaft ucuna yerleştirilen aynı zamanda karıştırma görevi gören uç kısımdan sisteme verilmektedir. Pülp halinde hücreye besleme yapılmakta ve gerekli reaktiflerin ilavesinden sonra hücreye hava verilmektedir. Oluşan hava kabarcıkları pülpün yüzeyine

çıkarken yüzdürülmesi istenen minerali de beraberinde yüzeye taşımakta ve köpük halinde yüzeyden taşma suretiyle alınmaktadır. Denver tipi flotasyon hücresi, cevherin yüzeyine hava kabarcıklarını homojen biçimde vermek için tasarlanmıştır. Hücre, cevherin karıştırıldığı bir selül, bu selül altında bulunan ve hava çıkış açıklıklarına sahip bir karıştırıcı sistem ve selül üst kısmında bulunan köpüğün sıyrıldığı, bir köpük bölümünden oluşur. Cihazın çalışma prensibi, cevherin karıştırıldığı selülün dip bölgesinden hava verilerek cevherin hava kabarcıkları ile doyurulması ve bu karışımın hava ile tutunarak hücrenin üst kısmındaki köpük toplama bölümüne gönderilmesi, istenen minerallerin burada birikmesi esasına dayanır. Proses sonucunda elde edilen köpük, istenilen mineralleri içerdiği için konsantre olarak değerlendirilirken, alt kısımda kalan gang ise istenmeyen mineralleri içerdiği için ayrıştırılarak atık olarak değerlendirilir.



Şekil 3.1. Denver flotasyon makinesi

- *Etüv*: Nem analizi, kömürün içerisindeki fiziksel su miktarını belirlemek için kullanılan temel bir yöntemdir. Bu analiz örnek hazırlama ve nem ölçümü olmak üzere iki adımda gerçekleştirilir. Belirli bir boyutta homojen hale getirilen numune daha sonra belirli bir sıcaklıkta kurutma işlemine tabi tutulur. Kurutma işlemi genellikle 105°C’de, sabit ağırlığa ulaşana kadar devam eder. Bu süreçte numune içerisindeki fiziksel su

buharlaşarak uzaklaşır ve numunenin ağırlık kaybı belirli zaman aralıklarında ölçülerek sabit bir değere ulaştığı anda nem içeriği hesaplanır. Nem analizi için kullanılan ekipmanlar arasında etüv, hassas terazi ve krozeler bulunur. Bu yöntem, kömürün yanma verimliliğini, depolama özelliklerini ve taşıma sırasında karşılaşılabilecek sorunları anlamak için öneme sahip olabilmektedir. Bu tez çalışmasında Piramid marka U-150 model etüv kullanılmıştır.

- *Kül fırını*: Kül analizi, kömür numunesindeki inorganik bileşenlerin miktarını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu analizde, kömür numunesi belirli bir sıcaklıkta, genellikle 850-950°C arasında yakılır. Yakma işlemi sonucunda organik maddeler yanarak gaz fazına geçerken, geride inorganik kül kalır. Kalan külün ağırlığı, başlangıçtaki kömür numunesinin ağırlığına oranlanarak yüzde kül içeriği hesaplanır. Kül analizi, kömürün kullanım amacına göre uygunluğunu belirlemek ve çevresel etkilerini değerlendirmek için yapılır. Özellikle enerji üretiminde kullanılan kömürlerde, kül miktarı önemli bir kalite göstergesidir çünkü yüksek kül içeriği enerji verimliliğini düşürür ve atık miktarını artırır. Kül analizi, kül fırını, krozeler ve hassas terazi kullanılarak ASTM, 2023 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir. Bu çalışmada Heraeus marka kül fırını kullanılmıştır.

-*Kalorimetre*: Kalori analizi, kömürün enerji içeriğini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu analizde, belirli bir miktarda kömür numunesi kontrollü bir ortamda tamamen yakılır ve açığa çıkan ısı miktarı ölçülür. Kalorimetre, kömürün yanması sırasında açığa çıkan ısıyı suyun sıcaklığındaki artış üzerinden hesaplamaktadır. Numunenin yanma sırasında verdiği enerji, kalorimetre hücresinde bulunan suyun sıcaklık değişimi ile ölçülür ve bu değer kömürün kalori değeri olarak ifade edilir. Kalori değeri, kömürün yakıt olarak verimliliğini belirlemek açısından öneme sahiptir. Yüksek kalori değeri, daha yüksek enerji üretimi anlamına gelirken, kömürün ticari değerini artırır. Kalori analizinde dikkat edilmesi gereken önemli hususlar arasında numunenin homojenliği ve doğru cihaz kalibrasyonu yer almaktadır. Bu çalışmada Leco marka AC-350 Model kalorimetre kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kalori ölçümü için kullanılan Leco marka kalorimetre

Ayrıca pH ölçümlerinde Hanna HI2002 edge® marka pH metre (Hanna Instruments, Woonsocket, RI, USA) kullanılmıştır.

3.1.4. Yeni tasarlanan agloflotasyon hücresi

Bu yüksek lisans tez çalışmasında yeni bir agloflotasyon hücresi tasarlanarak tüm deneyler bu yeni hücre içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda bu hücreye neden ihtiyaç duyulduğu ve hücrenin genel özellikleri ile avantajlarından bahsedilmiştir.

Aglomerat flotasyonu olarak da bilinen agloflotasyon çalışmaları temelde iki farklı sistemin kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Agloflotasyon işlemlerinde genellikle tercih edilen iki hücreli yaklaşımın temelinde, uygulanan aglomerasyon ve flotasyon proseslerinin farklı gereksinimlere ihtiyaç duyması yatmaktadır. İlk aşama olan aglomerasyon işleminde içerisinde bariyerler bulunan bir aglomerasyon hücresi (beherin iç duvarlarında konumlandırılan bu engeller, aglomerasyon işleminin daha etkili ve verimli bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanımaktadır) içerisinde aglomeratlar elde edildikten sonra flotasyon hücresine transfer edilmekte ve ikinci aşamada aglomeratların flotasyon yöntemiyle kazanılması gerçekleştirilmektedir. Ancak aglomerasyon işlemi sonrası aglomeratların flotasyon hücresine transferi esnasında sistemin kesikli olarak devam ettirilmesi gerekmekte, bu durumda hücreler arası pülpün transferi neticesinde katı oranı bozulmakla birlikte bir miktar numune kaybı gerçekleşebilmekte, dolayısıyla birtakım kayıplar yaşanabilmekte ve deney standartı her deney için sabit kalamayabilmektedir.

Bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen sorunlar nedeniyle, klasik iki aşamalı agloflotasyon süreci yerine, tüm işlemlerin tek hücre içerisinde gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu maksatla her iki hücrenin de (aglomerasyon hücresi ve flotasyon hücresi) gereksinimlerini karşılayabilecek temel özellikleri tek bir hücrede bir araya getirilmiştir. Bunun için Şekil 3.3'te verilen boyutlardaki silindirik bir hücrenin içerisine bariyerler yerleştirilmiştir. Bu bariyerler agloflotasyon işleminin aglomerasyon aşamasında gerekli olan çarpışma olasılığını arttırmaktadır. Bilindiği gibi aglomerasyon işleminin başarısı, hidrofobik tanelerin yağ ile temas ederek yağların yüzeylere yayılması ve bu şekilde yüzeyleri yağ ile kaplanmış tanelerin de yine birbirleri ile temas ederek aglomerat formunu alması ile artmaktadır. Dolayısıyla silindirik tasarlanan yeni hücrenin içerisine 4 adet ve 6.5cm, 2cm, 3cm boyutlarında bariyerler yerleştirilerek çarpışma etkisi artırılmıştır. Bu bariyerler aynı zamanda silindirik hücre içerisindeki türbülansı da azaltmaktadır. Tasarlanan hücrenin silindirik olarak tercih edilmesinin nedeni ise köşelerde numune sıkışma ihtimalinin ortadan kaldırılması içindir. Hücrede agloflotasyon sonrası hava kabarcıklarına tutunarak yüzeye çıkan köpükte bulunan mineraller taşma yoluyla konsantre olarak kazanılmaktadır. Hücrenin taşma oluşunun tasarımında Denver hücresinin dizaynı örnek alınarak boyutları benzetilmeye çalışılmıştır (Şekil 3.3).

Bu yaklaşımın benimsenmesiyle birlikte çeşitli avantajlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Farklı bir perspektifle, agloflotasyon sürecinin başlangıcından bitimine kadar olan sürecin tek bir hücre içinde tamamlanması ile sistemin daha kontrollü olarak sürdürülmesini sağlayarak verimlilik ve uygulanabilirlik açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Hücrenin avantaj ve dezavantajları sonuçlar kısmında açıklanacaktır.



Şekil 3.3. Deneysel olarak tasarlanan agloflotasyon hücresi

3.2. Yöntem

3.2.1. Numunenin deneylere hazırlanması

Laboratuvara ulaşan numune şlam formunda olduğu için kırma işlemlerine ihtiyaç duyulmamıştır. Konileme-dörtleme ile numune miktarı azaltılarak öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarda bulunan çubuklu değirmen (D 20cm L 35cm) ile numunenin tamamı, 50 mikronun altına elenerek hava ile temas etmeyecek şekilde plastik kutularda, tez çalışması süresince, muhafaza edilmiştir. Şekil 3.4.'de deneylerde kullanılan kömür numunesinin tane boyut dağılımı verilmektedir. Numunenin %80'inin geçtiği elek açıklığı olan d_{80} boyutu 25 mikron olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4. Kümülatif Elek Altı (K.E.A.) Eğrisi

3.2.2. Kömür analizleri

Deneyler için hazır hale getirilen numunenin, nem, kül ve kalori analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunenin nemi 2 adet ölçümün ortalaması alınarak %2,07, kül içeriği 2 adet ölçümün ortalaması alınarak %42,34 ve kalori değerleri ise 4 adet ölçümün ortalaması alınarak 4200 Kcal olarak tespit edilmiştir.

3.3. Agloflotasyon Deneyleri

Agloflotasyon deneyleri, Denver flotasyon makinesinde ancak bu yüksek lisans tez çalışması için özel olarak tasarlanan agloflotasyon deney hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde monodistile su kullanılmıştır. Flotasyon makinesinin karıştırıcı kolu, hücre içerisine yerleştirilerek tabandan 1 cm yukarıda sabitlenmiştir. Böylece çok ince boyuttaki kömür ve gang minerallerinin karıştırma sırasında hücrenin taban veya dip çevresinde sıkışıp sabit kalmasını engellenmesi amaçlanmıştır. Agloflotasyon deneyleri Şekil 3.5.'te verilen akım şemasına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Aglomerasyon ve aglomerat flotasyonu birbirini takip edecek şekilde tek hücrede gerçekleştirildiği için agloflotasyon deneyleri herhangi bir kesintiye uğramadan tamamlanmıştır. Deneylerde; katı oranı %4 olarak sabit tutulmuştur. Yağ tipi

atık yağ, dispersant olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3), köpürtücü olarak MIBC, kondüsyon süresi 5 dakika, flotasyon süresi 3 dakika, köpük alma süresi 3 dakika olarak sabit tutulmuştur. Karıştırma hızı, pH, yağ miktarı, dispersant miktarı, köpürtücü miktarı ve aglomerasyon süresi parametreleri değişken olarak alınmış ve her bir parametrenin etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. pH ayarlaması ilk 10 dakikalık kondüsyon süresi içinde yapılmıştır. Şekil 3.5.'de deneylerin akım şeması gösterilmiştir. Agloflotasyon deneyleri sonrasında köpükten alınan konsantre filtre kağıdında süzülerek 105°C 'ye ayarlanmış etüvde 12 saat boyunca kurutulmaya bırakılmıştır. Kurutma sonrası 1gram tartılan numunelerin kül analizleri gerçekleştirilmiş olup konsantrelerin ağırlık verimi, nihai kül ve yanabilir kısım verimi hesaplamaları aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık Verimi (\%)} = \frac{KKA (g)}{BKA (g)} \times 100 \quad [1]$$

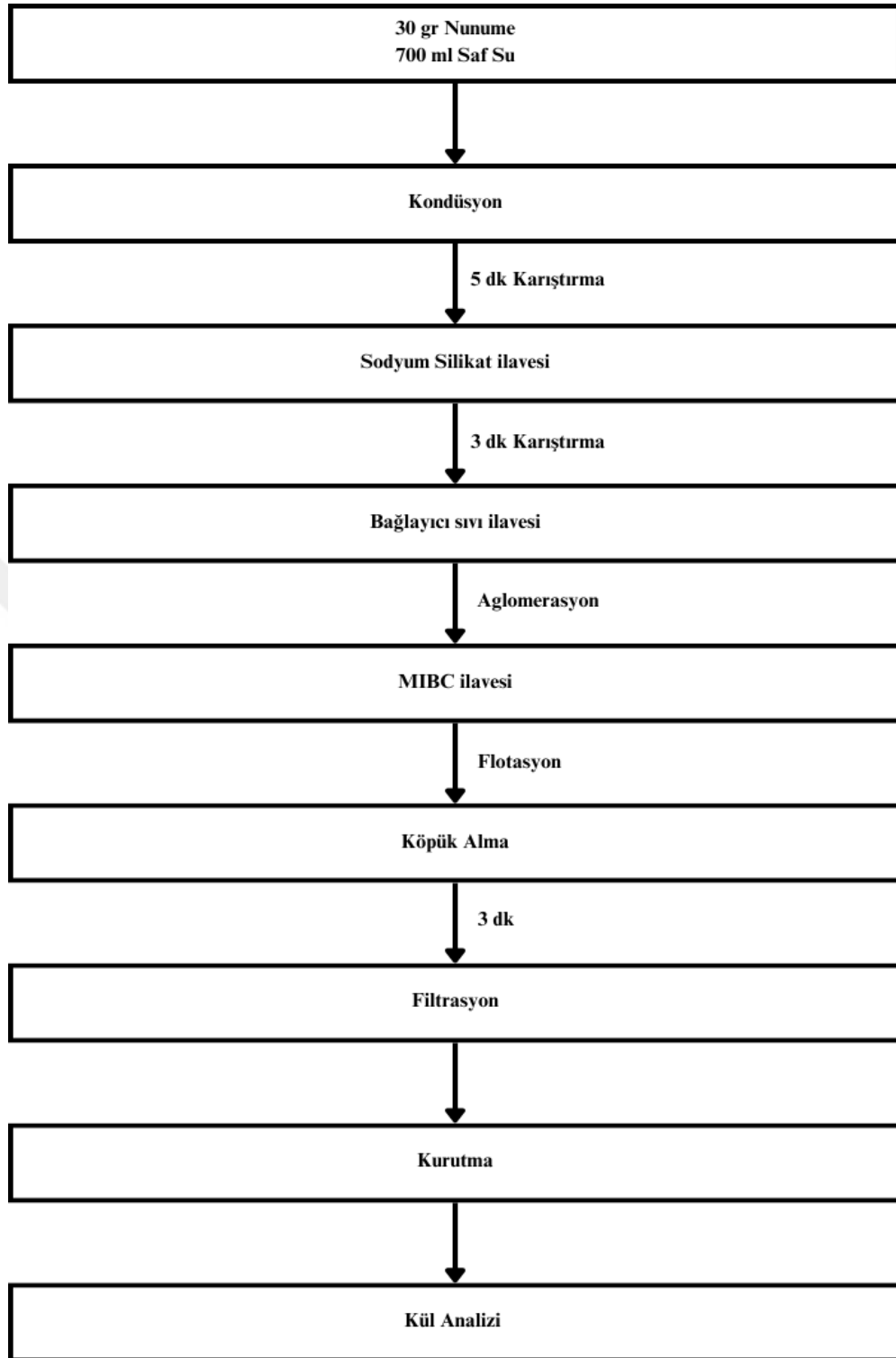
Burada; KKA; Konsantre kömür ağırlığı, BKA; Beslenen kömür ağırlığıdır.

$$\text{Kül (\%)} = \frac{KKA (g)}{BMA (g)} \times 100 \quad [2]$$

Burada; KKA: Kalan kül ağırlığı, BMA: Başlangıçtaki malzeme ağırlığıdır.

$$\text{Yanabilir Kısım Verimi (\%)} = \frac{AV (\%) (100 - \text{Kül}(\%))}{100 \times (100 - BKK(\%))} \times 100 \quad [3]$$

Burada; AV; Ağırlık verimi, Kül; Kalan kül miktarı ve BKK; Beslenen kömürün külüdür.



Şekil 3.5. Agloflotasyon deneyleri akım şeması

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Zonguldak Çatalağzı lavvarından elde edilen yüksek kül içerikli üst akım taşkömürü numunesinin, bu tez çalışması için özel olarak tasarlanmış yeni bir agloflotasyon hücresinde, agloflotasyon yöntemi ile zenginleştirilebilirliği çeşitli parametrelerin ışığında araştırılmıştır. pH, aglomerasyon süresi, bağlayıcı sıvı miktarı, karıştırma hızı, köpürtücü miktarı ve dispersant miktarının ince boyuttaki kömürün agloflotasyon üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Deneylerin sonuçları konsantrenin kül içeriği, ağırlık verimi ve yanabilir kısım verimi üzerinden değerlendirilerek yorumlanmıştır.

İnce boyuttaki kömürün zenginleştirilmesinde uygulanan zenginleştirme yönteminin seçiminde tane boyutunun kısıtlayıcı olduğu bilinmektedir. Yağ aglomerasyonu işleminde kullanılan yağ miktarının fazla olması nedeniyle yağ maliyeti fazla olmakta, flotasyon işleminde ise yine tane boyutunun küçük olması verimin az olmasına yol açmaktadır (Song vd., 1996; Gence, 2006). Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi araştırmacılar bu iki yöntemin kendi özelindeki eksikliklerini, yöntemleri birbiri ardına uygulayarak gidermeye çalışmışlardır. Bu kapsamda, agloflotasyon adı verilen yöntem uygulanmaktadır. Agloflotasyon yöntemi bu iki yöntemin temel problemine çözüm getirmeyi hedeflemektedir (Temel, 2015). Agloflotasyon yönteminin bilinen uygulanış şekli; öncelikle engelli bir beher içerisinde aglomerasyon işlemini gerçekleştirmek, sonrasında elde edilen aglomeratları eleme yoluyla almak yerine doğrudan flotasyon selülüne besleyerek prosesi devam ettirmek, ardından selül içerisindeki köpürtücü muamelesinden sonra, köpük zonundan konsantre kömürü elde etmektir (Chander & Hogg, 1993). Yöntemin ortaya çıkış ve uygulanış biçiminin temel amacı, her iki yöntemin de zayıf yönlerini güçlendirerek maliyet azaltmasıdır (Şahinoğlu, 2018).

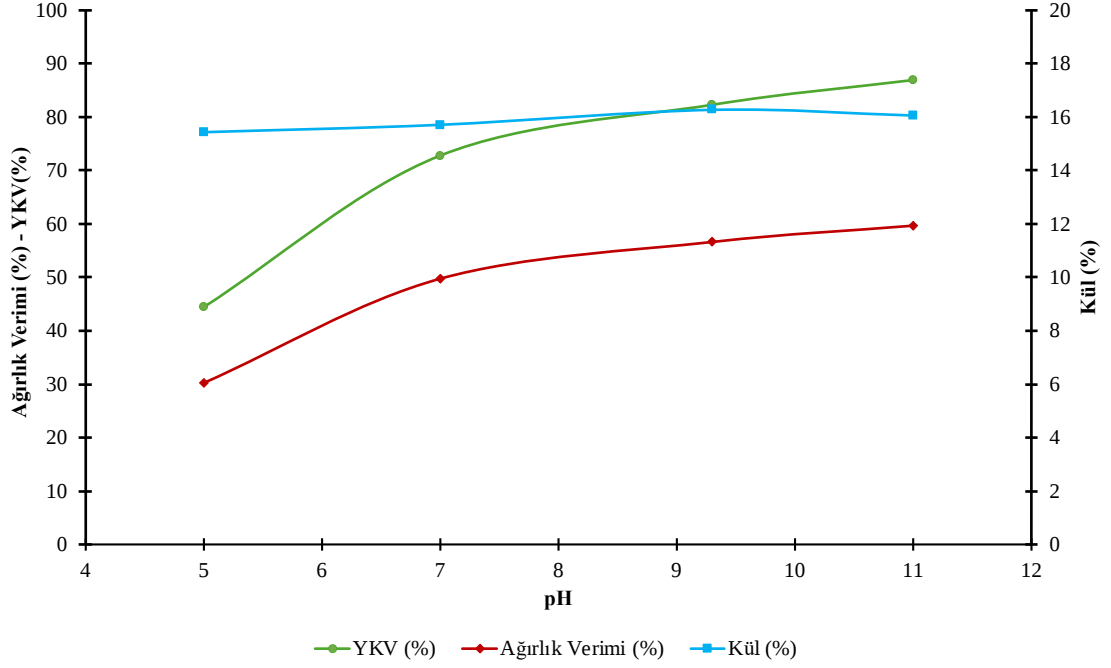
Eldeki bu bilgiler ışığında bu tez çalışmasında, kömürün agloflotasyon ile düşük maliyet ve yüksek verimde agloflotasyon davranışının belirlenmesi ve kabul edilebilir maliyet ile kömür zenginleştirilmesi yapmak üzere laboratuvar çalışmalarına başlanmıştır. Çalışmanın ilk planlamasında numunenin özelliklerini de belirlemek maksadıyla aglomerasyon ve flotasyon deneyleri ayrı ayrı hücrelerde yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde literatürde de bahsedildiği gibi maliyet ve verim açısından tatmin edici olmamıştır. Agloflotasyon deneyleri de yine literatüre sadık kalınarak, önce aglomerasyon ile aglomerat eldesi daha sonra bu aglomeratların flotasyon hücresine

transferi sonrasında flotasyon işlemi ile kurgulanmış ve deney şartları oluşturulmaya çalışılmıştır. Ancak, aglomerasyon ve flotasyon işlemlerinin iki farklı hücrede ayrı ayrı gerçekleştiriliyor oluşu nedeniyle sistemin kesikli çalışması dezavantaj olarak görülmüş, aynı zamanda pülpün flotasyon hücresine transferi esnasında katı oranı bozulmuştur. Bu sorunun üstesinden gelebilmek amacıyla basit ve etkili bir agloflotasyon prosesinin nasıl olabileceği üzerinde düşünülmüş ve her iki işlemin de tek bir hücrede uygulanabilir olup olmayacağı tartışılmıştır. Mevcut flotasyon hücresinde aglomerat kazanımının mümkün olamayacağı bilindiğinden agloflotasyon deneylerinde özel olarak kullanılan yeni bir deneysel agloflotasyon hücresi tasarlama fikri ortaya çıkmıştır.

Tasarlanan bu hücre ile gerçekleştirilen ilk deneyde aglomerasyon süresinin kısaldığı gözlenmiştir. Şöyle ki; iki aşamalı agloflotasyon deneylerinin aglomerasyon aşamasında 30 dakikalık bir karıştırma süresi sonrasında istenilen aglomeratlar elde edilirken deneysel tasarlanan hücrede 5 dakika gibi kısa bir sürede aglomerat oluşumu gözlenmiştir. Dolayısıyla çalışmanın devamında deneylere tasarlanan hücre kullanılarak devam edilmiştir.

4.1. pH Etkisi

Flotasyon, aglomerasyon, agloflotasyon gibi minerallerin yüzey özelliklerini kullanan zenginleştirme işlemlerinde pH belirleyici bir faktör olarak kabul edilmektedir. Çünkü pülpün pH'ı, elde edilen konsantrenin yanabilir kısım verimini, kömür taneleri ile pülp içerisinde kullanılan bağlayıcı madde, reaktifler ve hava gibi bütün arayüzeyler arasındaki etkileşimi büyük ölçüde etkilemektedir (Liu vd., 1994; Wang vd., 2019). Pülp pH'ının agloflotasyon üzerindeki etkisi Şekil 4.1'de verilmiştir. Ortam pH'ı doğal halde 9,2 ile 9,6 arasında değişmektedir.



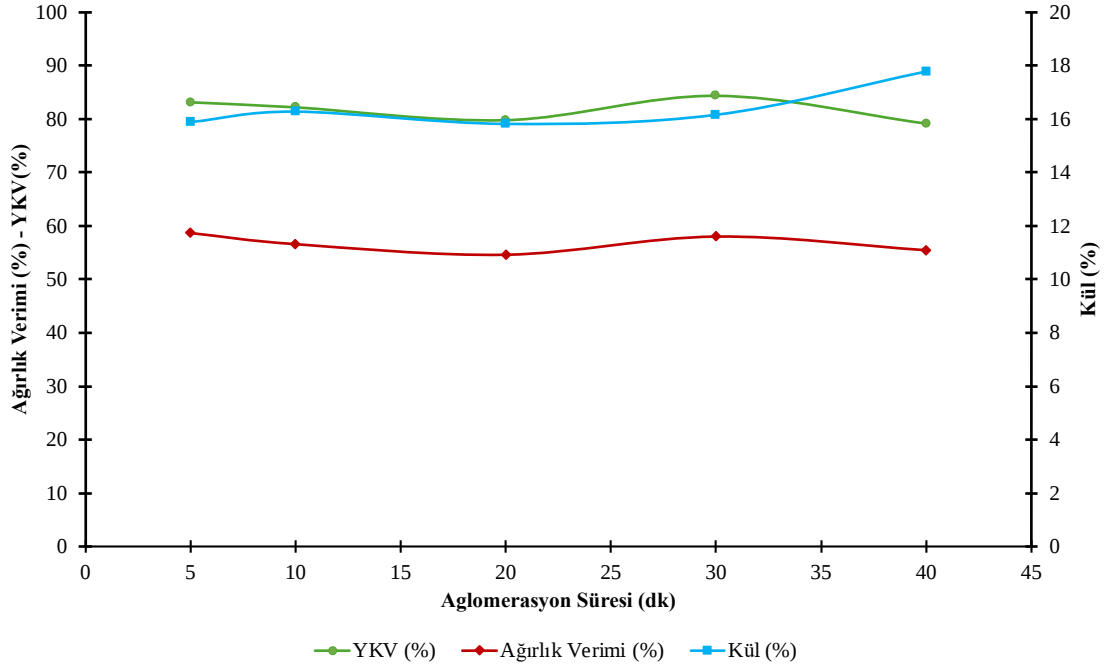
Şekil 4.1. pH'nın agloflotasyona etkisi (katı oranı %4, kondüsyon süresi 5 dk., pH değişken, köpük alma süresi 3 dk., flotasyon süresi 3 dk., karıştırma hızı 1000 dev/dk., 1 ml (20 kg/ton) MIBC, 2 ml (60 kg/ton) atık yağ ve aglomerasyon süresi 10 dk.)

Deneylerin sonuçları değerlendirildiğinde, asidik ortamdan alkali ortama doğru pül pH'nın artmasıyla ağırlık verimi ve yanabilir kısım veriminin yükseldiği, aynı zamanda kül içeriğinin kısmen de olsa az bir yükseliş sergilediği sonrasında tekrar azaldığı gözlemlenmiştir. Liang ve diğerleri, 2016'daki çalışmalarında, pül pH'nın bazik olması durumunda kömür ve kil minerali arasındaki dağılımın güçlendiğini tespit etmişlerdir. Dolayısıyla pH 11 de konsantrenin YKV'nin birkaç puan yüksek olmasına karşın doğal pH'ta reaktif sarfiyatının olmayacağı ve pH ayarlama işlemine gerek kalmayacağı düşüncesiyle çalışmanın devamında deneylerin süspansiyonun doğal pH'ında sürdürülmesine karar verilmiştir.

pH'ın, yüzeylerin potansiyelini etkileyen önemli bir parametre olmasının yanı sıra kömür yüzeyinin hidrofobikliğini de etkileyen aynı zamanda flotasyonun başarısında doğrudan bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir (Sarıkaya ve Özbayoğlu, 1995; Gui vd., 2020).

4.2. Aglomerasyon Süresi Etkisi

İyi bir aglomerasyonun gerçekleşebilmesi için kömür tanelerinin bağlayıcı yağ ile temasa geçebilmeleri, yağın kömür yüzeylerini yeterince ıslatabilmesi ve sonrasında yüzeyleri yağla kaplanmış olan tanelerin güçlü aglomerat yapısını oluşturabilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla tanelerin yağ ile ve birbirleriyle temas edebilecek kadar yeterli sürenin sağlanması şarttır. Elbette ki bu sürenin mümkün olabildiği kadar kısa olması enerji ve maliyet açısından istenen bir durumdur. Aglomerasyon süresinin etkisinin incelendiği deneylerde, karıştırma hızı 1000 dev/dk, 2ml atık yağ, 1 ml MIBC kullanılmış olup süspansiyonun doğal pH'ında agloflotasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2'de elde edilen sonuçlar verilmiş olup aglomerasyon süresinin artmasıyla konsantrenin YKV değerlerinde olumlu bir etkisinin olmadığı ancak kül içeriklerinin bir miktar azaldığı tespit edilmiştir. Ağırlık veriminin %57,71 nihai kül içeriğinin %16,89 ve yanabilir kısım veriminin ise %83,18 olduğu optimum aglomerasyon süresi 5 dakika olarak belirlenmiştir. Yani, yeni tasarlanan agloflotasyon hücresinde 5 dakikalık bir süre agloflotasyon için uygun ve güçlü aglomerat yapısının oluşması için yeterli olmuştur. Oysaki klasik kesikli agloflotasyon işleminde aglomerat yapısına ancak 30 dakika sonra ulaşılabilmişti. Aglomerasyon süresi, düzgün yapıda aglomerat oluşumunda konsantre kömürün kalitesini ve özelliklerini etkileyen temel faktörlerden birisi olarak görülmektedir (Fan vd., 1989; Quaiocoe vd., 2013).



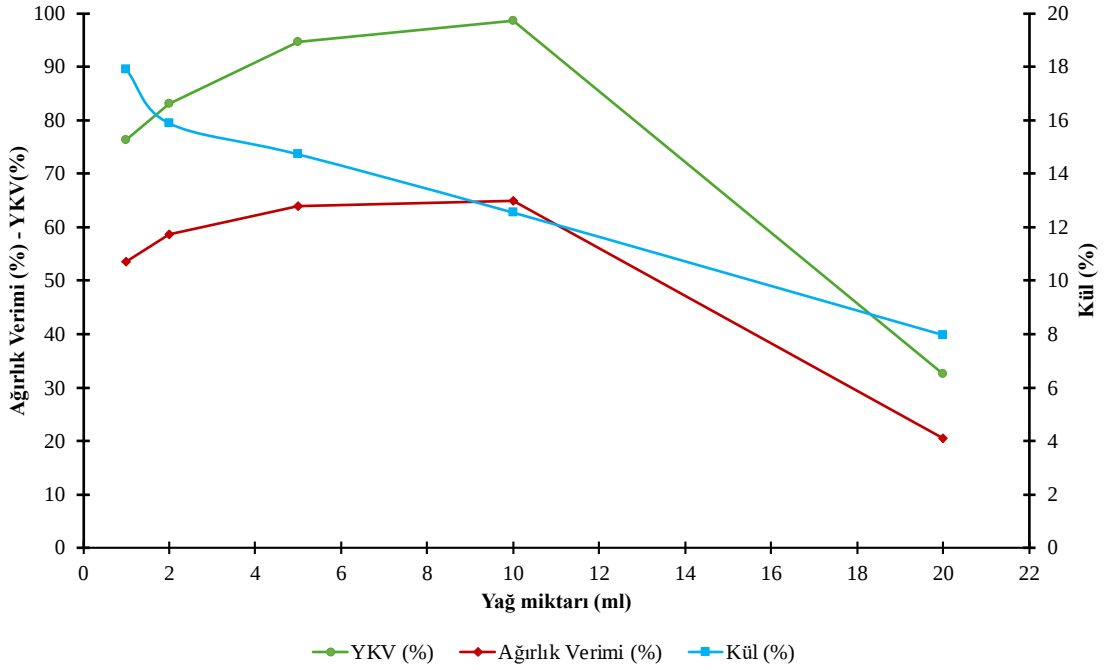
Şekil 4.2. Aglomerasyon süresinin agloflotasyona etkisi (katı oranı %4, kondüsyon süresi 5 dk., doğal pH, köpük alma süresi 3 dk., flotasyon süresi 3 dk., karıştırma hızı 1000 dev/dk., 1 ml MIBC, 2 ml atık yağ)

4.3. Bağlayıcı Sıvı (Yağ) Miktarının Etkisi

Agloflotasyonda kullanılan yağın kömür yüzeylerini kaplayacak yeterli miktarda ilave edilmesi agloflotasyon işleminin başarısını arttıracaktır. Kömür yüzeylerine adsorbe olan yağ yüzey enerjisini düşürerek yüzeylerin hidrofobikliğini artırmaktadır (Gence, 2006). Böylece kömür tanelerinin su fazından ayrılmasını ve birbirine yapışmasını kolaylaştırmaktadır. Optimum miktarda yağ kullanımı ile ağırlık verimi ve dolayısıyla yanabilir kısım verimi artarken kömür parçacıkları daha iyi aglomere olmaktadır. Ancak, fazla yağ kullanımı, sistemin dengesi bozabilmekte ve yüzeylerde aşırı miktardaki yağın küresel aglomerat yapısını bozabilmekte (Şahinoğlu, 2018) nihayetinde verimliliği düşürebilmektedir. Gang minerallerinin hidrofilik olması nedeniyle su tarafından ıslanmaları korunacak ve nihayetinde optimum miktarda yağ kullanımı kül içeriğinin azalmasına neden olmaktadır (Song vd., 1996).

Bu tez çalışmasında evsel atık yağ kullanılmıştır. Deneylerin kurgulanması esnasında literatüre bağlı kalınarak gazyağı ve evsel atık yağ ile yapılan çalışmalarda gazyağının evsel atık yağa göre aglomere etme kabiliyetinin çok düşük olması nedeniyle çalışmanın devamının atık yağ ile sürdürülmesinin uygun olacağına karar verilmiştir. Yağ miktarının agloflotasyona etkisini belirlemek amacıyla farklı yağ konsantrasyonlarında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'te verilmiştir. Ağırlık verimi, yanabilir kısım verimi ve kül oranları farklı yağ miktarlarında nasıl değişiklik gösterdiği bu grafikte detaylı bir şekilde incelenmektedir. Yağ miktarının artmasıyla yanabilir kısım verimi başlangıçta artış göstermekte ve 10 ml yağ miktarında en yüksek değere ulaşarak %98,60 oranında maksimum değere ulaşmaktadır. Yağ konsantrasyonu 20ml miktarına çıkarıldığında ise elde edilen konsantrenin YKV değeri hızla düşüşerek %32,60 seviyesine inmektedir. Bu durum, optimum yağ miktarının 10 ml olduğunu ve bu değerden daha fazla yağ kullanıldığında verimliliğin düştüğünü açıkça göstermektedir. Benzer bir eğilim ağırlık verimi için de gözlemlenmektedir. Ağırlık verimi, 10 ml yağ miktarına kadar sürekli artış gösterirken, bu miktardan sonra düşüş yaşamaktadır. Her ne kadar Şekil 4.3'te bu yağ konsantrasyonunda en iyi sonuçlar elde edilmiş olsa da deneyler esnasında bu miktarda yağ kullanımının uygulamada mümkün olmadığı tespit edilmiştir. Pülp içerisine 10ml atık yağ eklenmesi durumunda köpük alımı oldukça zor hale gelmiş, hücre duvarlarında ve karıştırıcının yüzeylerinde kömür topaklanmaları olmuş ve elde edilen aglomeratlar küresel formdan uzaklaşarak aşırı yapışkan, sakız bir kıvam almıştır. Yağın aşırı kullanımıyla aglomerat yapısının bozulduğu ve macun kıvamında bir yapıya dönüştüğü benzer durumlar literatürde başka

araştırmacılar tarafından da belirtilmektedir (Düzyol, 2009). Kül oranı, yağ miktarının artmasıyla genel olarak azalma eğilimindedir. 1 ml yağ miktarında yaklaşık %18 olan kül oranı, yağ miktarının 10 ml'ye çıkarılmasıyla %12,5'e kadar düşmekte ve 20 ml yağ miktarında ise %8 civarına kadar inmektedir. Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı %94,66 YKV, %64,01 ağırlık verimi ve %14,73 kül oranı değerlerine sahip konsantrenin elde edildiği 5ml atık yağ konsantrasyonu optimum değer olarak seçilmiştir. 5 ml ve 10 ml yağ konsantrasyonlarında elde edilen konsantrelerin yanabilir kısım verimleri ve kül içerikleri birbirleri ile karşılaştırıldığında 5 ml yağ kullanıldığı durumda kazanılan konsantrenin YKV değeri yaklaşık % değerinde daha az iken kül içeriği ise %2 daha yüksek olmuştur.

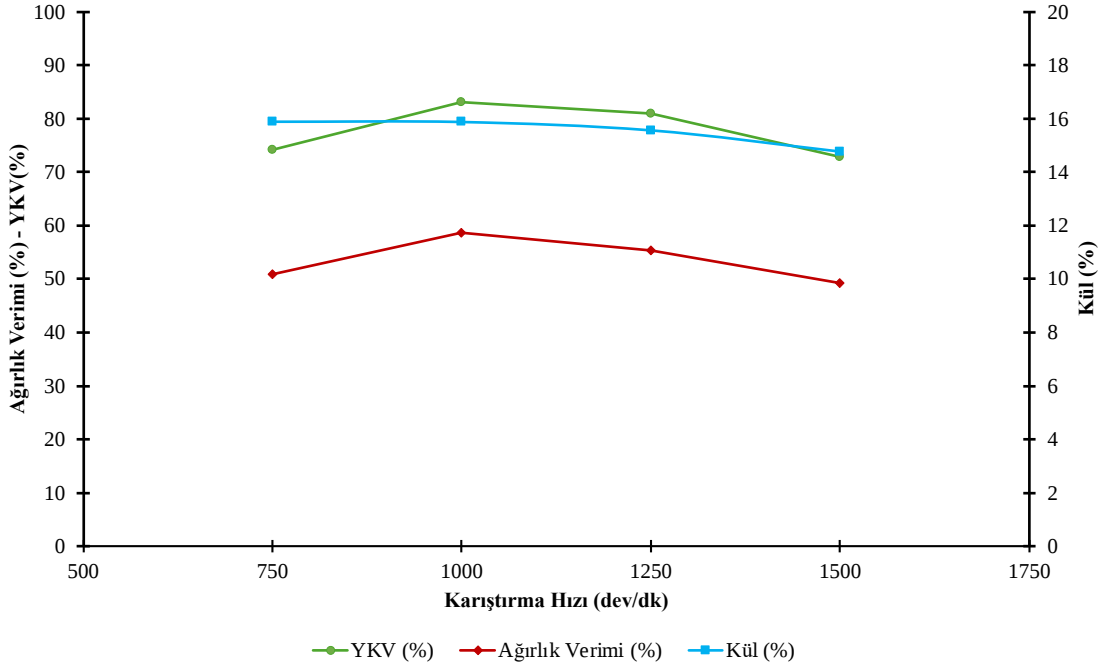


Şekil 4.3. Yağ miktarının agloflotasyona etkisi (katı oranı %4, kondüsyon süresi 5 dk., doğal pH, köpük alma süresi 3 dk., flotasyon süresi 3 dk., karıştırma hızı 1000 dev/dk., 1 ml MIBC ve aglomerasyon süresi 5 dk.)

4.4. Karıştırma Hızının Etkisi

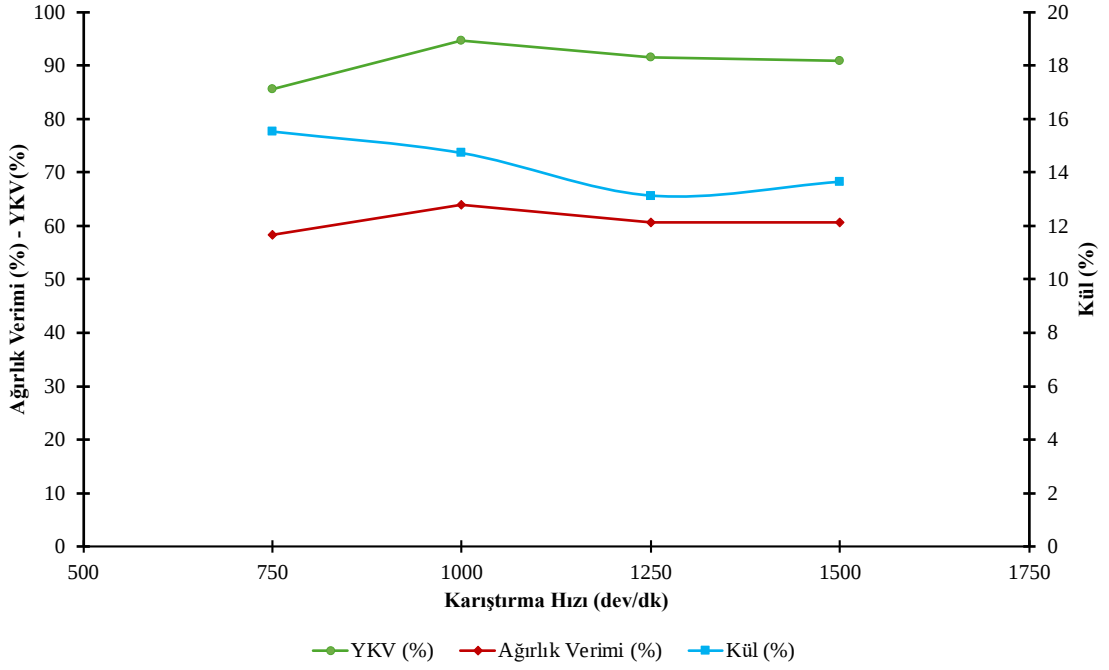
Karıştırma hızının agloflotasyona etkisi 2 ml (60 kg/ton) (Şekil 4.4) ve 5 ml atık yağ (150 kg/ton) (Şekil 4.5) ile incelenmiştir. İki farklı yağ konsantrasyonunda karıştırma hızının etkisinin incelenmesinin nedeni kullanılan yağ miktarını azaltabilme ihtimalinin değerlendirilmesi içindir. 2 ml atık yağ kullanılarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, karıştırma hızının artmasıyla yanabilir kısım verimi de

artmakta ve 1000 dev/dk'da en yüksek değer olan %83,18'e ulaşmaktadırdır. Bu noktadan sonra artan hız ile YKV'nin azaldığı görülmektedir. Ağırlık verimi ise yaklaşık %50-60 aralığında sabit kalmakta ve 1000 dev/dk'da %58,71 ile maksimuma ulaşmaktadırdır. Kl içeriklerinin artan hız ile bir miktar arttığı daha sonra azaldığı yani 750 dev/dk'da %16 iken, karıştırma hızı arttıkça hafif biçimde azalma eğilimi göstererek 1500 dev/dk'da %14,76 olduğu görülmüştür. Bu bulgular ışığıında, 2ml atık yağ ile optimum karıştırma hızının 1000 dev/dk olduğu belirlenmiştir.



şekil 4.4. 2 ml yağ kullanılarak karıştırma hızının agloflotasyona etkisi (katı oranı %4, kondüsyon süresi 5 dk., doğal pH, flotasyon süresi 3 dk., köpük alma süresi 3 dk., 1 ml MIBC, 2 ml atık yağ ve aglomerasyon süresi 5 dk.)

5 ml atık yağ kullanılarak yapılan deneyde ise, karıştırma hızı arttıkça yanabilir kısım verimi başlangıçta artış göstermekte ve 1000 dev/dk'da maksimum olan %94,66 değerine ulaşmaktadırdır (şekil 4.5). Karıştırma hızının daha da artması YKV'yi arttırmamış aksine hafif bir azalış görülmüştür. Ağırlık verimi, yaklaşık %55-65 aralığında değişmiş ve en yüksek değeri olan %64,01'e 1000 dev/dk'da ulaşılmıştır. 1000 dev/dk'da elde edilen konsantrenin kl içeriği %14,73 iken, karıştırma hızının artmasıyla bir miktar düşüş göstermektedir. Bu bulgular neticesinde optimum karıştırma hızı 1000 dev/dk olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.5. 5ml yağ kullanılarak karıştırma hızının agloflotasyona etkisi (katı oranı %4, kondüsyon süresi 5 dk., doğal pH, flotasyon süresi 3 dk., köpük alma süresi 3 dk., 1 ml MIBC, 5 ml atık yağ ve aglomerasyon süresi 5 dk.)

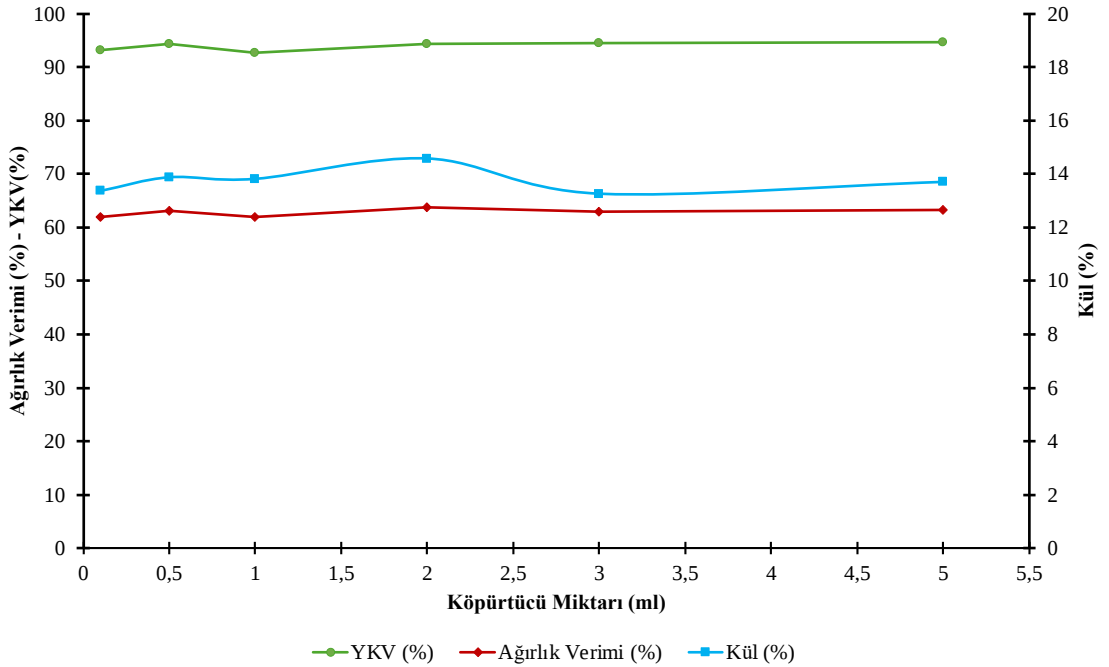
Her iki yağ konsantrasyonunda 1000 dev/dk karıştırma hızında en yüksek yanabilir kısım verimi değerlerine ulaşılmaktadır. Daha yüksek karıştırma hızlarında her ne kadar düşük küllü konsantreler elde edilse de yanabilir kütle veriminde ve ağırlık veriminde azalma eğilimi göstermektedir (Shi vd., 2019). Yağ miktarı 2 ml'den 5 ml'ye çıkarıldığında elde edilen konsantrenin yanabilir kısım verimi %83,18'den %94,66'ya çıkmakta dolayısıyla %10'dan daha yüksek bir artış sağlanmaktadır. Kül oranlarında ise %15,89'dan %14,73'e yani yaklaşık %1'lik düşüş gözlemlenmektedir. Bu bağlamda karıştırma hızının artmasıyla daha az yağ kullanmanın pek mümkün olmadığı aksine karıştırma hızının optimum 1000 dev/dk değerinde 5 ml yağ ile agloflotasyonda verimde %10'luk bir artışla beraber kül içeriğinde %1'lik bir azalış olduğu belirlenmiştir.

4.5. Köpürtücü (MIBC) Miktarının Etkisi

MIBC miktarının kömürün agloflotasyonuna etkisi incelenmiş ve Şekil 4.5'te elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Şekil 4.5'e göre, köpürtücü miktarının artmasıyla yanabilir kısım verimi başlangıçta hafif bir artış gösterirken, genel olarak sabit bir seviyede kalmakta ve yaklaşık %90-95 arasında değişmektedir. Bu durum, köpürtücü miktarının YKV üzerinde büyük bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Ağırlık verimi ise yaklaşık %63 civarında sabit kalmakta ve köpürtücü miktarının artışı ile önemli bir değişim

göstermemektedir. Kül içerikleri ise köpürtücü miktarının artmasıyla hafif dalgalanmalar göstermekle birlikte, genel olarak yaklaşık %13-15 arasında değişim göstermektedir. Köpürtücü miktarının artışı, kül oranında belirgin bir azalma veya artışa neden olmamaktadır. Her ne kadar MIBC miktarının artırılmasıyla konsantrelerin YKV ve kül içeriklerinde belirgin bir etkisi olmasa da 0,1ml köpürtücü ile selül yüzeyinde istenilen sıyrılabilir köpük zonu oluşmuş ve konsantre rahatlıkla elde edilebilmiştir. Bu nedenle 0,1 ml köpürtücü konsantrasyonu agloflotasyon için optimum değer olarak kabul edilmiştir. Maliyet açısından değerlendirildiğinde de bu konsantrasyon değerinin yeterli olduğu görülmektedir.

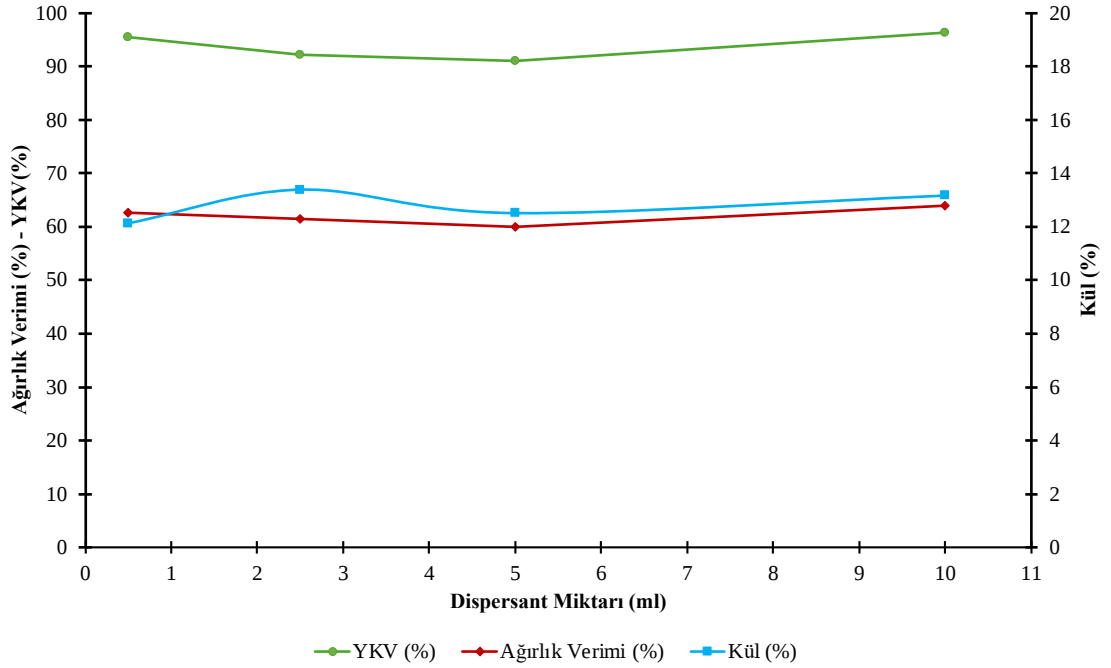
Kömürün flotasyon performansında MIBC köpürtücüsünün etkisini inceleyen çalışmalar, köpürtücü miktarının artmasının yanabilir kısım verimi ve kül oranı üzerinde ciddi değişikliklere neden olmadığını göstermektedir. Huang ve arkadaşlarının 2019'da yaptığı araştırmaya göre, MIBC ve diğer köpürtücüler kullanılarak yapılan deneylerde, MIBC miktarının flotasyon verimi üzerine ciddi performans değişikliklerine sebep olmadığını göstermişlerdir. Bu sonuçlar, köpürtücü miktarının kömürün flotasyon verimliliği üzerinde sınırlı bir etkisi olduğunu desteklemektedir.



Şekil 4.6. Köpürtücü miktarının agloflotasyona etkisi (katı oranı %4, kondüsyon süresi 5 dk., doğal pH, flotasyon süresi 3 dk., köpük alma süresi 3 dk., karıştırma hızı 1000 dev/dk., 5 ml atık yağ ve aglomerasyon süresi 5 dk.)

4.6. Dispersant Miktarının Etkisi

Farklı dispersant miktarlarının kömür flotasyonu üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar incelendiğinde Shi ve arkadaşlarının (2019) dispersant ilavesinin, kömür kazanımını ve kül giderimini olumlu etkileyebileceğini, ancak optimum dozajın belirlenmesinin kritik olduğunu göstermiştir. Optimum dispersant miktarı ile kömür kazanımının maksimize edilebileceği düşünülmüştür. Bu kapsamda, daha önceki araştırılan parametrelerden elde edilen optimum şartlar altında sodyum silikat prosese dahil edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Dispersant miktarının agloflotasyon etkisi (katı oranı %4, kondüsyon süresi 5 dk., doğal pH, flotasyon süresi 3 dk., köpük alma süresi 3 dk., karıştırma hızı 1000 dev/dk., 0,1 ml MIBC, 5 ml atık yağ, aglomerasyon süresi 5 dk., dispersant kondüsyon süresi 5 dk.)

Yanabilir kısım verimi, dispersant miktarının artmasıyla hafif bir azalma göstermekte, ardından dispersant konsantrasyonunun 10 ml miktarına çıkarılmasıyla artmaktadır. En yüksek YKV değeri %96,27 ile 10 ml dispersant ile elde edilmişken, 0,5 ml dispersant kullanımında verim %95,47 olmuştur. Ağırlık verimi ise, dispersant miktarına bağlı olarak yaklaşık %60-65 aralığında seyretmekte ve büyük bir değişim göstermemektedir. Konsantrelerin kül içeriği karşılaştırıldığında 0,5 ml dispersant varlığında kazanılan konsantrenin kül içeriği %12,14 olarak saptanmış olup bu değer tüm deneylerde ulaşılan konsantrelerin sahip olduğu kül içerikleri arasında en düşük olanıdır.

Bu veriler dispersant varlığının ve miktarının kömürün agloflotasyonu üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır. Çalışmanın bu aşamasına kadar gözden geçirilen parametrelerde hem yanabilir kısım verimini artıran ya da koruyan hem de daha düşük kül seviyesine ulaşmayı sağlayan bir parametre tespit edilememiştir. Öyle ki, en düşük kül ve en yüksek verim seviyesine sahip, köpürtücü etkisi incelenirken 1ml köpürtücü kullanımında karşılaşılmış veri olan %13,82 kül içeriğine sahip deneyde YKV %92,62 olarak bulunmuş, ağırlık verimi ise %61,97 olmuştur. Bununla beraber kabul edilebilir kül içeriğine sahip ve en yüksek verimin elde edildiği değerde %14,73 kül içeriği, %94,66 YKV ve %64,01 ağırlık verimi ile elde edilebilen optimum değerleri göstermektedirler. Fakat, dispersantın en düşük dozajı olan 0,5ml kullanımında dahi elde edilen en düşük külden yaklaşık %2 daha az kül içerikli konsantre elde edilerek bu değer %12,14 olmuştur. Buradaki dikkat çekici kısım, kül içeriği düşürülürken aynı zamanda verimde de bir miktar artış elde edilmiş yani YKV değeri %94,66'dan %95,47 seviyesine yükselmiştir. Elde edilen veriler açık bir şekilde göstermektedir ki, dispersant dozajını artırmak verilerde ciddi bir değişiklik yapamamış fakat çok düşük dozajda kullanımı dahi, hiç kullanılmadığı deney verilerine göre, olumlu sonuçlar getirdiği gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Zonguldak Çatalağzı lavvarı üst akımdan elde edilen % 42,34 kül içerikli taşkömürü numunesinin bu tez çalışması için tasarlanmış yeni agloflotasyon hücresinde agloflotasyon yöntemi ile zenginleştirilebilirliği incelenmiştir. Çalışmanın ana hedefi aglomerasyon ve takibinde flotasyon olmak üzere iki farklı hücrede ve aşamalı olarak uygulanan agloflotasyon prosesini tek kademede ve tek bir hücre içerisinde gerçekleştirerek sonuçların irdelenmesi ve sistemin avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesidir. Bu kapsamda pH, aglomerasyon süresi, bağlayıcı sıvı miktarı, karıştırma hızı, köpürtücü ve dispersant miktarlarının kömürün agloflotasyonuna etkileri yeni agloflotasyon hücresi kullanılarak detaylı olarak araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

Alkali ortamda konsantrelerin yanabilir kısım verimi daha yüksek olurken kül içerikleri çok fazla değişmemektedir.

Aglomerasyon süresi dikkate alındığında %15,89 kül içerikli konsantre %83,18 yanabilir kısım verimi ile 5 dakika aglomerasyon süresinde kazanılmıştır. Bu süre kömür partiküllerinin yeterince sağlam bir aglomerat yapısına ulaşması için yeterli olmuştur.

Bağlayıcı sıvı (yağ) miktarının artmasıyla konsantrelerin yanabilir kısım verimi artmış ancak aşırı yağ kullanımı ile aglomeratlar küresel formdan uzaklaşarak sakız kıvamında yapışkan bir hal almıştır. Optimum yağ miktarının 5 ml (150 kg/ton) olduğu tespit edilmiş ve bu konsantrasyon değerinde %14,73 kül içerikli konsantre %94,66 yanabilir kısım verimi ile elde edilmiştir.

Karıştırma hızının agloflotasyon süresinde etkili bir parametre olduğu ve 1000 dev/dk'lık karıştırma hızının optimum olduğu belirlenmiştir. Bununla beraber iki farklı yağ konsantrasyonunda karıştırma hızının artışının bağlayıcı sıvı kullanımını etkin biçimde düşürdüğüne dair bir etkisi gözlemlenmemiştir.

Köpürtücü miktarının agloflotasyon üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı tespit edilmiş olup 0,1 ml (2 kg/ton) köpürtücünün agloflotasyon için yeterli köpük sağladığı tespit edilmiştir.

Dispersant ilavesinin konsantrenin külünü azalttığı ve yanabilir kısım verimini de az da olsa artırdığı belirlenmiştir. 0.5 ml (10 kg/ton) dispersant varlığında %42,34 kül içerikli kömür numunesinden %12,14 kül içerikli konsantre %95,47 yanabilir kısım verimi ile elde edilmiş olup bu değer bu tez çalışmasında ulaşılan en düşük kül içeriğidir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular ışığında;

Yüksek kül içerikli ve ince taneli taş kömürünün yeni tasarlanan agloflotasyon hücresinde agloflotasyon yöntemi ile düşük küllü konsantre yüksek yanabilir kısım verimi ile elde etmek mümkündür.

Agloflotasyon işleminin tek bir hücrede kesintisiz olarak yapılması ile tüm sistemin yürütülmesi kolay ve etkili olmaktadır. Daha az ekipman gerektirmesi, sistemin kontrollü ve sürekli olması avantajlarından sayılabilirken katı oranının düşük olması dezavantaj olmaktadır.

Deneyssel olarak tasarlanan hücrenin geometrik yapısının uygun modifikasyonu ile geliştirilmeye açıktır.

İki aşamalı agloflotasyon işleminde aglomerasyon sonrası pülpün flotasyon hücreğine transferi esnasında, katı oranını sabit tutmak mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla sistem bu hücre ile sürekli hale gelmekle birlikte bu sorun da ortadan kalkmaktadır.

Agloflotasyon hücresinde gerçekleştirilen agloflotasyon deneylerinde, iki aşamalı agloflotasyon deneylerine kıyasla çok daha kısa sürede aglomerat kazanımı sağlanmıştır. Bu durumda karıştırma süresinin azalmasıyla enerji maliyeti açısından avantajlı kabul edilebilir.

Agloflotasyon proses kontrolünü basitleştirmekte ve operasyonel karmaşıklığı azaltacağı düşünülmektedir. Tek hücreli sistem, daha az sayıda kontrol noktası gerektirerek, operasyonel verimliliği arttırabilir.

Sonuç olarak; tek hücreli agloflotasyon, katı oranı stabilizasyonu, enerji tasarrufu, düşük ilk yatırım maliyeti, proses kontrol kolaylığı gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedir.

KAYNAKLAR

- Aktaş, M. (2011). *Türkiye’de Kömür Madenciliği ve Enerjideki Rolü*. Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü 2011 Yılı Raporu.
- ASTM. (2023). Standard Classification of Coals by Rank. *American Society for Testing and Materials International*.
- BGR. (2021). *Energy Study*. Hannover: Federal Institute for Geosciences and Natural Resources.
- Bhattacharya, S., & Pascoe, R. D. (2005). Effect of Temperature on Coal Flotation Performance. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 26:1, 31-61.
- Brozek, M., & Mlynarczykowska, A. (2013). An Analysis of Effect of Particle Size on Batch Flotation of Coal. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49(1), 341–356.
- Calkins, W. H. (1994). The chemical forms of sulfur in coal - a review. *Fuel*, 73(4), 475-484.
- Chander, S., & Hogg, R. (1993). *Micro-Agglomerate Flotation for Deep Cleaning of Coal*. Pittsburg: U.S. Department of Energy.
- Chang, Z., Chen, X., & Peng, Y. (2017). Understanding and improving the flotation of coals with different degrees of surface oxidation. *Powder Technology*, 321:190-196.
- Chen, Z., Wang, Q., Wang, B., Zeng, L., Che, M., Zhang, X., & Li, Z. (2017). Anthracite combustion characteristics and NO_x formation of a 300 MW e down-fired boiler with swirl burners at different loads after the implementation of a new combustion system. *Applied Energy*, 189, 133–141.
- Cheng, G., Cao, Y., Zhang, C., Jiang, Z., Yu, Y., & Mohanty, M. K. (2018). Application of novel flotation systems to fine coal cleaning. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1-13.
- Cheng, Y., Liu, Q., & Ren, T. (2021). *Coal Mechanics*. Singapur: Springer Singapur.
- Düzyol, S. (2009). *Cevher Hazırlamada Islanabilirliğe Dayanan İşlemlerde Hidrofobisite ve Yüzey Geriliminin Etkisi*. Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Düzyol, S., & Ağaayak, T. (2018). Investigation of Some Physical Parameters on Oil Agglomeration of Coal. *Materials, Methods & Technologies*, 12:187-190.
- Demirbilek, S. (1987). Kömür kullanımı ve ilgili çevre kirlenmesi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 26(3), 33-43.
- EE. (2020). *Coal formation*. Energy Education: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coal_formation adresinden alındı.
- ETKB. (2023, Mart). *Kömür*. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı: <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabii-kaynaklar-komur> adresinden alındı.
- Ezra, D. (1976). *Coal Technology for Britain's Future*. Londra: Macmillan London Limited.
- Fan, C. W., Hu, Y. C., Markuszewski, R., & Wheelock, T. D. (1989). Role of Induction Time and Other Properties in the Recovery of Coal from Aqueous Suspensions by Agglomeration with Heptane. *Energy & Fuels*, 3, 376-381.
- Gabriel, B., Alsaqoor, S., & Alahmer, A. (2021). Using Agglomeration Techniques for Coal and Ash Waste Management in the Circular Economy. *Advances in Science and Technology*, 15(3), 264–276.
- Gaqa, S., & Watts, P. (2018). The Agglomeration of Coal Fines Using Wet Microalgae Biomass. *Journal of Energy in Southern Africa*, 29(2): 43–50.

- Gence, N. (2006). Coal recovery from bituminous coal by agglototation with petroleum oils. *Fuel*, 85, 1138–1142.
- Grainger, L., & Gibson, J. (1981). What is Coal. *Coal Utilisation* (s. 3-30). Springer, Dordrecht.
- Guan, W., Sha, J., Liu, P., Peng, Y., & Xie, G. (2018). Effect of stirring time on oil agglomeration of fine coal. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(1), 89–94.
- Gui, D., Chen, S., Wang, S., Tao, X., Liang, C., & Wang, R. (2020). Effect of pH on surface hydration of coal particles and its attachment with oily bubbles in flotation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*.
- Hacıfazlıoğlu, H., Eker, Y., & Korkmaz, A. V. (2019). Soya Yağı ile Kömür Yıkama Tesis Atıklarından Temiz Yakıt Üretimi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7-2, 200-204.
- Higman, B., McKittrick, E., & Coil, D. (2018). *Types and Composition of Coal*. Ground Truth Alaska: <https://groundtruthalaska.org/articles/TypesOfCoal> adresinden alındı.
- Hornn, V., Ito, M., Shimada, H., Tabelin, C. B., Jeon, S., Park, I., & Hiroyoshi, N. (2020). Agglomeration-Flotation of Finely Ground Chalcopryrite and Quartz: Effects of Agitation Strength during Agglomeration Using Emulsified Oil on Chalcopryrite. *Minerals*, 10(4), 380.
- Hou, Y., Yang, F., Yang, C., Feng, Z., Feng, L., Li, H., Ren, S., Wu, W. (2021). A study on the structure of anthracite based on benzene carboxylic acids. *Journal of the Energy Institute*, 98, 153–160.
- Huang, Q., Yang, X., & Honaker, R. Q. (2019). Evaluation of frother types for improved flotation recovery and selectivity. *Minerals*, 9(10), 590.
- IEA. (2023). *Coal*. International Energy Agency.
- Jia, R., Harris, G. H., & Fuerstenau, D. W. (2002). Chemical Reagents for Enhanced Coal Flotation. *Coal Preparation*, 22: 123–149.
- Kasomo, R. M., Ombiro, S., Rop, B., & Mutua, N. M. (2018). Investigation and Comparison of Emulsified Diesel Oil and Flomin C 9202 as a Collector in the Beneficiation of Ultra-Fine Coal by Agglo-Flotation. *International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering*, 6(4): 74-80.
- Kopp, O. (2016). *World Distribution of Coal*. Britannica: <https://www.britannica.com/science/coal-fossil-fuel/World-distribution-of-coal> adresinden alındı.
- Kopp, O. (2023). *Lignite*. Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/lignite> adresinden alındı.
- Kurniawan, A. U., Ozdemir, O., Nguyen, A., Ofori, P., & Firth, B. (2011). Flotation of coal particles in $MgCl_2$, $NaCl$, and $NaClO_3$ solutions in the absence and presence of Dowfroth 250. *International Journal of Mineral Processing*, 98, 137–144.
- L.E.C. (2020). *What is lignite*. Lignite Energy Council: <https://lignite.com/what-is-lignite> adresinden alındı.
- Liang, L., Peng, Y., Jiakun, T., Xia, W., & Xie, G. (2016). Effect of polyaluminium chloride on the flotation separation of coal from kaolinite. *International Journal of Mineral Processing*, 154:75-80.
- Lim, H., Shagdarsuren, L., Kim, S.-M., Hoshino, A., Yamashita, T., & Jeon, C.-H. (2016). The effect of blending of bituminous and sub-bituminous coals on ash fusibility and deposition formation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30:1413-1420.

- Liu, D., Somasundaran, P., Vasudevan, T., & Harris, C. C. (1994). Role of pH and dissolved mineral species in Pittsburgh No. 8 coal flotation system I. Floatability of coal. *International Journal of Mineral Processing*, 41:201-214.
- Maciejewska, A., Kuzak, L., Sobieraj, J., & Metelski, D. (2022). The Impact of Opencast Lignite Mining on Rural Development: A Literature Review and Selected Case Studies Using Desk Research, Panel Data and GIS-Based Analysis. *Energies*, 2-36.
- Miroshnichenko, D., Kaftan, Y., Desna, Y., & Sytnik, A. (2015). Oxidation of bituminous coal. 1. Expansion pressure. *Coke and Chemistry*, 58(10), 376–381.
- Ning, X., Wang, L., Zhang, J., Wang, G., Li, Y., & Jiang, C. (2019). Effect of ash on coal structure and combustibility. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 26(8), 973–982.
- OWID. (2020, Mart). *Coal proved reserves*. Our World In Data: <https://ourworldindata.org/grapher/coal-proved-reserves> adresinden alındı.
- Özbayoğlu, G. (1982). *Türkiye'nin yüksek kükürt içerikli linyitlerinin kömür hazırlama yöntemleriyle kükürten arındırılması*. Ankara: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu.
- Quaicoe, I., Nosrati, A., Skinner, W., & Addai-Mensah, J. (2013). Agglomeration behaviour and product structure of clay and oxide minerals. *Chemical Engineering Science*, 98:40-50.
- Sarıkaya, M., & Özbayoğlu, G. (1995). Flotation characteristic of oxidized coal. *Fuel*, 74(2):291-294.
- Shen, M., & Wheelock, T. D. (1998). *Development of a Gas-Promoted Oil Agglomeration Process*. Ames, Iowa: Chemical Engineering Department and Center for Coal and the Environment.
- Shi, C., Cheng, G., & Wang, S. (2019). Optimization of coal washery tailings by flotation process. *Energies*, 12(20), 3956.
- SME. (2021). *Coal's Importance to the World*. Smenet. Smenet: <https://www.smenet.org/What-We-Do/Technical-Briefings/Coal-s-Importance-in-the-US-and-Global-Energy-Supp> adresinden alındı.
- Somasundaran, P., Roberts, C. E., & Ramesh, R. (1991). Effects of Oxidizing Methods on the Flotation of Coal. *Minerals Engineering*, 4, 43-48.
- Song, S., Perkson, A., & Trass, O. (1996). *Flotation of oil-agglomerated coal for ash and pyrite removal - Simultaneous grinding and agglomeration*. Florida, United States.
- SRWE. (2023). *Statistical Review of World Energy*. Energy Institute. Statistical Review of World Energy.
- Suárez-Ruiz, I., & Ward, C. (2008). The Role of Petrology in Coal Utilization. *Applied Coal Petrology* (s. 1-18).
- Şahin, Ç., & Kablay, S. (2015). Türkiye Kömür Madenciliğinde Çalışma Rejiminin Evrimi ve Özyönetim Seçeneği. *İdealkent*, 6(16), 210-257.
- Şahinoğlu, E. (2018). Çok İnce Boyutlu Kömürün Fizikokimyasal Yöntemlerle Temizlenmesi. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 18, 315-323.
- Temel, H. A. (2015). The Aggloflotation of a Bituminous Coal-feldspat Mixture and a Bituminous Coal-quartz Mixture. *Energy Sources*, 37:1, 38-46.
- TKİ. (2024, Mart). *Enerji ve Kömür*. Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu: <https://www.tki.gov.tr/enerji-ve-komur> adresinden alındı.
- U.S.E.P.A. (2023). Bituminous And Subbituminous Coal Combustion. U.S. Environmental Protection Agency.

- U.S.G.S. (2013). *What are the types of coal?* USGS: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-types-coal> adresinden alındı.
- U.S.G.S. (2020). *What are the types of coal?* U.S. Geological Survey: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-types-coal> adresinden alındı.
- Wang, H., Zhu, H., Zhu, J., Jiajia, T., Dianqiang, H., & Shanmin, S. (2019). Optimizing oxidized coal flotation through pH adjustment and inorganic salt ion. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1-9.
- Ward, C., & Suarez-Ruiz, I. (2008). Introduction to Applied Coal Petrology. I. Suárez-Ruiz, & J. Crelling içinde, *The Role of Petrology in Coal Utilization* (s. 1-18).
- Yasar, O., & Uslu, T. (2022). Use of agglomeration for fine coal recovery from washery tailings. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42:5, 1279-1303.
- Zhao, W., Li, X., Wang, T., & Fu, X. (2020). Pore size distribution of high volatile bituminous coal of the southern Junggar Basin: a full-scale characterization applying multiple methods. *Frontiers of Earth Science*, 15(2), 237–255.
- Zou, C., Zhao, J., Li, X., & Shi, R. (2016). Effects of catalysts on combustion reactivity of anthracite and coal char with low combustibility at low/high heating rate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 126(3), 1469–1480.