



Evaluation of Some Process Parameters with Combustible Recovery and Ash Content in Flotation Beneficiation of Lignite Coal

Özlem Kaya^{1,a,*}, Şaban Özütürker^{2,b}

¹ Sivas Cumhuriyet University, Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Engineering Department, 58140 Sivas, Türkiye

² Sivas Cumhuriyet University, Engineering Faculty, Mining Engineering Department, 58140 Sivas, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 14/05/2025

Accepted: 19/06/2025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

In this study, the effects of some basic process parameters on ash content and combustible recovery in the beneficiation of Yozgat/Sorgun lignite coal by flotation method were investigated. In the experimental studies, the parameters of pulp pH (2, 3, 5, 7, 9 and 12), solid ratio (10%, 15% and 20%), flotation time (2, 4, 5 and 6 minutes) and coal particle size (-75 µm, -125 µm, -250 µm and -500 µm) were optimized. According to the experimental results, the optimum flotation conditions were determined as pulp pH 7, 15% solid ratio, 5 minutes flotation time and coal particle size of -500 µm. Under these conditions, the ash content of the coal was reduced from 38.7% to 34.8% and the combustible recovery was obtained as 63.9%. In addition, the calorific value of the lignite coal was increased from 3563 kcal/kg to 4144 kcal/kg. The results obtained show that it is possible to enrich low quality lignite coal by flotation and that the choice of process parameters has a significant effect on product quality and recovery.

Keywords: Lignite coal, flotation, process parameters, ash content, combustible recovery

Linyit Kömürünün Flotasyon ile Zenginleştirilmesinde Bazı Proses Parametrelerinin Yanabilir Verim ve Kül İçeriği ile Değerlendirilmesi

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 14/05/2025

Kabul: 19/06/2025

ÖZ

Bu çalışmada, Yozgat/Sorgun linyit kömürünün flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesinde etkili olan bazı temel proses parametrelerinin kül içeriği ve yanabilir verim üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda; pülp pH'sı (2, 3, 5, 7, 9 ve 12), katı oranı (%10, %15 ve %20), flotasyon süresi (2, 4, 5 ve 6 dakika) ve kömür tane boyutu (-75 µm, -125 µm, -250 µm ve -500 µm) parametreleri optimize edilmiştir. Deney sonuçlarına göre optimum flotasyon koşulları; pülp pH'sı 7, katı oranı %15, flotasyon süresi 5 dakika ve kömür tane boyutu -500 µm olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda kömürün kül içeriği %38.7'den %34.8'e düşürülmüş ve yanabilir verim %63.9 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, linyit kömürünün kalorifik değeri 3563 kcal/kg'dan 4144 kcal/kg'a yükseltilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük kaliteli linyit kömürünün flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesinin mümkün olduğunu ve proses parametrelerinin seçiminin ürün kalitesi ve verim üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Linyit kömürü, flotasyon, proses parametreleri, kül içeriği, yanabilir verim

Giriş

Kömür, ASTM (American Society for Testing and Materials) (1991) standartına göre; antrasit, bitümlü kömür (taş kömürü), alt bitümlü kömür ve linyit olmak üzere dört ana sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmada linyit; kahverengi rengi, düşük kalorifik değeri (3800-4100 kcal/kg), yüksek nem içeriği (%25-65), yüksek kül içeriği (%5-45) ve yüksek uçucu madde oranı (%53-63) ile tanımlanan en düşük dereceli kömür türüdür (Ateşok, 2009; Cheng et al., 2020; Yu et al., 2013). Bu özellikler, linyitin doğrudan kullanımını hem ekonomik hem de çevresel açıdan verimsiz hale getirmektedir. Flotasyon yöntemi ile linyitin kül içeriğini düşürerek elde edilen ürünün kalorifik değerini yükseltmek mümkün olmaktadır.

Flotasyon, son 50 yıldır ince boyutlu kömürlerin (-500 µm) zenginleştirilmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, kömür ve gang mineralleri arasındaki yüzey özellikleri farkına dayanarak uygulanmaktadır. Kömür, doğal olarak hidrofobik özellikte olduğundan flotasyon ile zenginleştirilmesi genellikle kolaydır. Ancak, değişik kömür türleri farklı flotasyon özellikleri göstermektedir. Linyit gibi düşük dereceli kömürlerde, kömür yüzeyinde bulunan hidroksil (-OH), karbonil (C=O) ve karboksil (-COOH) gibi oksijenli fonksiyonel gruplar, kömürün hidrofobikliğini azaltmakta ve flotasyon verimini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle linyit, flotasyonla zenginleştirilmesi en zor olan kömür türü olarak kabul edilmektedir (Xu et al., 2023; Wang et al., 2025).

Flotasyon, birçok faktörden etkilenen karmaşık bir zenginleştirme işlemidir. Bu faktörler; malzeme özellikleri, proses koşulları, kimyasal parametreler ve ekipman tasarım parametreleri olmak üzere dört ana başlıkta sınıflandırılabilir. Kömürün mineralojik ve petrografik yapısı, kömürleşme derecesi, oksidasyon derecesi ve tane boyutu gibi malzeme özellikleri; flotasyon seçiciliği ve verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir. Etkin bir partikül-kabarık çarpışması ve bağlanmasının sağlanabilmesi için pülp pH'sı, pülp yoğunluğu, sıcaklık, karıştırma hızı ve flotasyon süresi gibi proses parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bastırıcı, toplayıcı ve köpürtücü reaktiflerin türü ve miktarı gibi kimyasal parametreler ise kömür tanelerinin hidrofobikliği ve ile köpük fazının stabilitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Flotasyon hücresinin tipi ve tasarımı, karıştırma sistemi ve hava dağıtma mekanizması gibi ekipman parametreleri ise flotasyon hücresi içindeki hidrodinamik davranışı belirleyerek proses performansını doğrudan etkilemektedir (Polat et al., 2003).

Bu çalışmada, Yozgat/Sorgun linyit kömürünün flotasyon ile zenginleştirilmesinde bazı proses parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Pülp pH'sı, katı oranı, flotasyon süresi ve kömür tane boyutu değişkenleri incelenmiştir. Deney sonuçları, temiz kömürün kül içeriği (%) ve yanabilir verim (%) ile birlikte değerlendirilmiştir.

Malzeme ve Yöntem

Malzeme

Bu çalışmada Yozgat/Sorgun bölgesinden temin edilen bir linyit kömürü numunesi kullanılmıştır. Numunenin kısa analizi ASTM D3172-13 (2021) standartına göre gerçekleştirilmiş olup, %6.6 nem ve %38.7 kül içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Numunenin kalorifik değeri ise 3563 kcal/kg olarak tespit edilmiştir.

Flotasyon deneylerinde; bastırıcı olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3), toplayıcı olarak gazyağı ve köpürtücü olarak metil izobütil karbinol (MIBC) kullanılmıştır.

Yöntem

Flotasyon deneyleri, 1.2 L kapasiteli laboratuvar tipi Denver flotasyon makinası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kömür + su karışımı, tam ıslanmanın sağlanması amacıyla 1100 dev/dk. hızında 5 dakika süreyle karıştırılmıştır. Deneylerde, Özütürker (2019) tarafından Yozgat/Sorgun linyit kömürünün flotasyonunda bastırıcı, toplayıcı ve köpürtücü reaktiflerin miktarlarının incelenmesi sonucunda belirlenen optimum reaktif miktarları kullanılmıştır. Bu kapsamda; bastırıcı reaktif olarak 750 g/t sodyum silikat (Na_2SiO_3), toplayıcı reaktif olarak 750 g/t gazyağı ve köpürtücü reaktif olarak 500 g/t metil izobütil karbinol (MIBC) kullanılmıştır. Reaktiflerin kömür taneleri ile etkin biçimde etkileşebilmesi için, her bir reaktif ilave edildikten sonra sistem 5 dakika süreyle karıştırılmıştır. Reaktiflerin eklenmesini takiben sisteme hava verilmiş ve oluşan köpük fazı toplanarak flotasyon işlemi tamamlanmıştır. İşlem sonunda, yüzen ürün (konsantre) ve batan ürün (artık) filtrelenerek susuzlandırılmıştır. Konsantre ürünler, 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulmuştur. Kurutulan ürünlerin (konsantreler) kül analizleri, ASTM D3174-12 (2020) standartına göre gerçekleştirilmiştir.

Flotasyon performansının değerlendirilmesinde, yanabilir verim (%) ve kül içeriği (%) hesaplamalarında aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

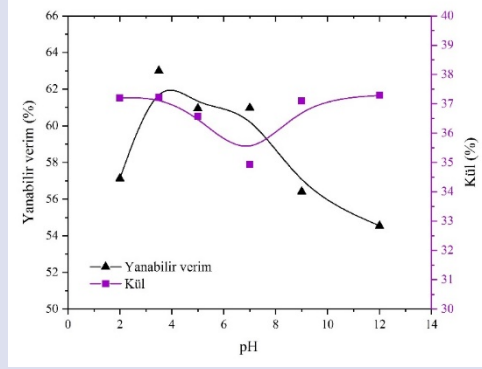
$$\text{Yanabilir verim (\%)} = \left(\frac{\text{Temiz kömür ağırlığı (g)}}{\text{Beslenen kömür ağırlığı (g)}} \right) \times \left(\frac{100 - \text{Temiz kömür külü (\%)}}{100 - \text{Beslenen kömür külü (\%)}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Kül (\%)} = \frac{\text{Kül analizi sonrası kalan artığın ağırlığı (g)}}{\text{Beslenen kömür ağırlığı (g)}} \times 100 \quad (2)$$

Bulgular ve Tartışma

Pülp pH'sının yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi

Flotasyonda pülp pH'sı, kömür ve gang minerallerinin yüzey yüklerini ve toplayıcıların adsorpsiyon davranışlarını değiştirerek flotasyon seçiciliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada, pülp pH'sının yanabilir verim (%) ve kül içeriği (%) üzerindeki etkisi 2-12 aralığında araştırılmıştır. Kullanılan kömür numunesinin doğal ortam pH değeri 3.0-3.5 aralığında ölçülmüştür. Elde edilen deney sonuçları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Pülp pH'sının flotasyon performansına etkisi
[Katı oranı: %10; flotasyon süresi: 5 dakika; kömür tane boyutu: -500 µm]

Şekil 1'de, düşük pH değerlerinde (özellikle pH: 2) yanabilir verimin düşük (%57.1) olduğu görülmektedir. Bu durum, pH: 2'de kömür yüzeyinde adsorbe edilen H^+ iyonu konsantrasyonunun artması ile yüzeyin pozitif yüklenmesi ve buna bağlı olarak kömürün hidrofobikliğinin azalması ile açıklanabilir. Birçok araştırmada, düşük ranklı ve oksitlenmiş kömürlerin izoelektrik noktalarına yakın pH aralıklarında yani pH: 3-5'de daha yüksek yüzeylilik gösterdiği belirtilmektedir (Molatlhegi and Alagha, 2016; Polat et al., 2003; Vamvuka and Agridiotis, 2001). Yapılan deneylerde kömür tanelerinin yüzey yükü, pH: 3 ve 4 değerlerinde izoelektrik noktasına yaklaşmış, bu da toplayıcı reaktiflerin kömür taneleri üzerindeki rekabetçi adsorpsiyonu azaltarak kömür-hava kabarcığı etkileşimini kolaylaştırmış ve dolayısıyla daha yüksek yüzeylilik ve yanıcı verim sağlamıştır. Yanabilir verim, pH: 7'de ise maksimum %61.0 olarak elde edilmiştir. Ancak, pH:7'den sonra, alkali ortama geçilmesiyle (pH: 9-12) yanabilir verimde belirgin bir düşüş gözlenmiş ve pH:12'de en düşük yanabilir verim %54.5 olarak elde edilmiştir. Bu düşüş, alkali pH koşullarında kömür tanelerinin yüzey yükünün daha negatifleşmesiyle, kömür taneleri ve hava kabarcıkları arasındaki elektrostatik itmenin artması, hidrofobikliğinin azalması ve dolayısıyla yüzeyliliğin düşmesiyle açıklanabilir (Molatlhegi and Alagha, 2016).

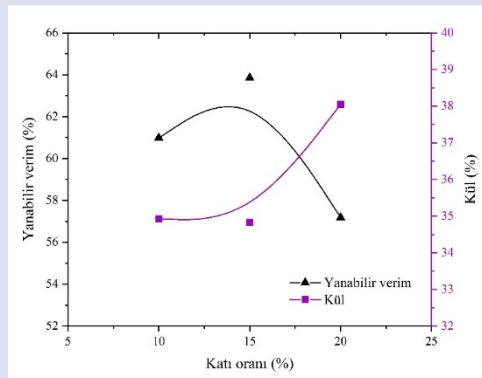
Benzer bir eğilim kül içeriği açısından da gözlenmiştir. Özellikle asidik koşullarda (pH: 2-5) kül içeriği yüksek

seviyelerdedir. Bu durum, asidik pH koşullarında gang minerallerinin (kil, silikat, pirit vb.) yüzeylerinin daha hidrofobik hale gelmesi ve kömür ile birlikte köpük fazında konsantreye taşınması ile açıklanabilir. Kül içeriği açısından en düşük değer, pH: 7'de %35.0 olarak elde edilmiştir. Öte yandan pH'nın alkali değerlere (pH: 9-12) yükselmesiyle birlikte kül içeriğinde yeniden bir artış meydana gelmiştir. Bu artış, alkali ortamda gang minerallerinin yüzeylerinin daha negatif hale gelerek hava kabarcıklarına tutunma eğilimlerinin artması ve köpük fazına taşınmaları ile açıklanabilir.

Deney sonuçları, pülp pH'sının flotasyon performansında önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Hem yanabilir verim hem de kül içeriği açısından değerlendirildiğinde, optimum koşulların nötr pH'da sağlandığını göstermektedir. pH:7'de en yüksek yanabilir verim (%61.0) ve en düşük kül içeriği (%35.0) elde edilmiştir. Bu nedenle, çalışmada optimum pülp pH'sı 7 olarak belirlenmiş ve diğer proses parametrelerinin etkisi incelenirken bu değer kullanılmıştır.

Katı oranının yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi

Flotasyonda katı oranının yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi %10, %15 ve %20 olmak üzere üç farklı katı oranlarında araştırılmıştır. Deney sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Katı oranının flotasyon performansına etkisi
[Pülp pH:7; flotasyon süresi: 5 dakika; kömür tane boyutu: -500 µm]

Şekil 2’de görüldüğü gibi, katı oranının artışı ile yanabilir verimde %15 katı oranına kadar artış eğilimi gözlenmiş, bu oranın üzerinde ise belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Düşük katı oranlarında (örneğin %10) sistemin seyreltik yapısından dolayı flotasyon reaktiflerinin kömür yüzeylerine yeterli düzeyde adsorplanmaması, kömür tanelerinin hava kabarcıkları ile etkileşimi sınırlanmakta ve bu durum yanabilir verimin düşük seviyelerde kalmasına neden olmaktadır. Buna karşılık, katı oranının %15’e yükseltilmesiyle, reaktiflerin kömür yüzeyine adsorpsiyonu ve hava kabarcıkları ile olan etkileşimi artmakta ve böylece verim maksimum düzeye ulaşmaktadır. Ancak, katı oranının aşırı yükseltilmesi (örneğin %20) ile çözelti viskozitesinin artması ve taneler arası çarpışmaların etkinliği azaltması nedeniyle reaktiflerin kömür taneleri ile temas süresi azalmakta, bu da tanecik-reaktif etkileşimini olumsuz etkileyerek yanabilir verimde düşüşe yol açmaktadır.

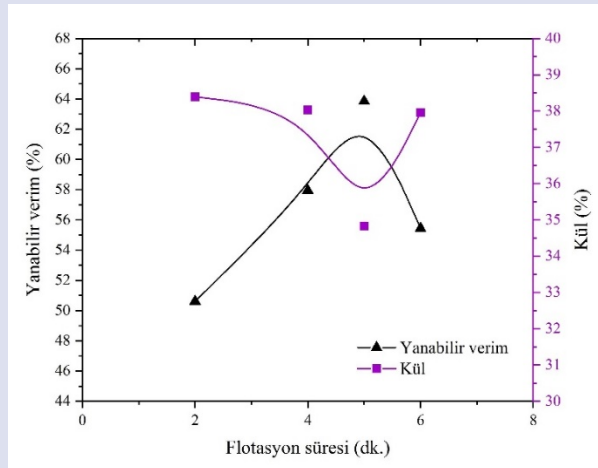
Kül içeriği açısından değerlendirildiğinde, katı oranı arttıkça kül değerlerinde belirgin bir yükselme eğilimi görülmektedir. Bu artış, özellikle ince taneli kül yapıcı gang

minerallerinin (örneğin kil ve silikat mineralleri) flotasyon sırasında köpük fazına taşınarak konsantrede birikmeleri ile açıklanabilir. Bu durum, yüksek katı oranlarında ayırma işleminin seçiciliğini olumsuz etkileyerek konsantrenin kül içeriğinin artmasına neden olmaktadır.

Kömürün özgül ağırlığının metalik cevherlere göre daha düşük olması nedeniyle, kömür flotasyonu genellikle düşük katı oranlarında gerçekleştirilir. Literatürde birçok araştırmacı, kömür flotasyonu için optimum katı oranının %12-15 aralığında olduğunu bildirmişlerdir (Ateşok, 2009; Kural, 1991). Bu çalışmada, %63.9 yanabilir verim ve %34.8 kül içeriği ile %15 katı oranı optimum olarak belirlenmiştir. Diğer proses parametrelerinin etkileri bu optimum katı oranında incelenmiştir.

Flotasyon süresinin yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi

Flotasyon süresinin yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi, farklı sürelerde (2, 4, 5 ve 6 dakika) incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçları Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Flotasyon süresinin flotasyon performansına etkisi
[Pülp pH: 7; katı oranı: %15; kömür tane boyutu: -500 µm]

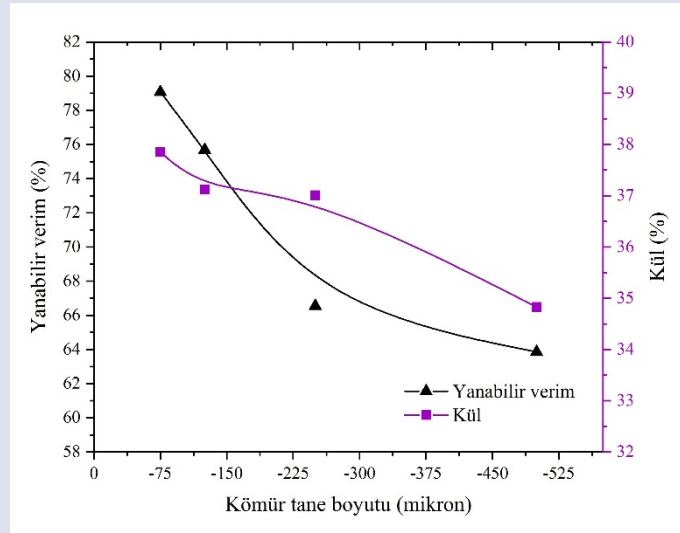
Şekil 3’de görüldüğü gibi, flotasyon süresinin artmasıyla birlikte yanabilir verim başlangıçta artış göstermiş ve 5 dakikada maksimum %63.9’luk yanabilir verim değeri elde edilmiştir. Ancak, flotasyon süresi 5 dakikanın üzerine çıktığında, yanabilir verim yeniden azalmaya başlamıştır. Benzer şekilde, kül içeriği 5 dakika flotasyon süresine kadar azalmakta, bu süreden sonra yeniden artış göstermektedir. Kısa flotasyon sürelerinde (2 ve 4 dakika), kömür taneleri ile flotasyon reaktifleri arasında temas süresinin yetersiz olması nedeniyle, hidrofobik kömür tanelerinin köpük fazına taşınması sınırlı kalmakta, dolayısıyla yanabilir verim düşük olmaktadır. Flotasyon süresi uzadıkça, kömürle birlikte ince taneli gang minerallerinin de köpük fazına sürüklenmesi işleminin seçiciliğini azaltmakta ve daha fazla kül oluşturan inorganik minerallerin konsantreye birikmesi ise kül

içeriğinin artmasına neden olmaktadır (Laskowski, 2001; Fuerstenau et al., 2007).

Deney sonuçları, optimum flotasyon süresinin 5 dakika olduğunu ve bu sürenin hem en yüksek yanabilir verim (%63.9) hem de en düşük kül içeriği (%34.8) sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, diğer proses parametresinin etkisinin incelenmesinde flotasyon süresi 5 dakika olarak belirlenmiştir.

Kömür tane boyutunun yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi

Kömür tane boyutunun yanabilir verim ve kül içeriği üzerinde etkisi, -75 µm, -125 µm, -250 µm ve -500 µm olmak üzere dört farklı tane boyutunda araştırılmıştır. Deney sonuçları Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Kömür tane boyutunun flotasyon performansına etkisi
[Pülp pH:7; katı oranı: %15; flotasyon süresi: 5 dakika]

Şekil 4'de görüldüğü gibi, kömür tane boyutu küçüldükçe yanabilir verim değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle -500 μm tane boyutunda %63.9 olan yanabilir verim, -75 μm tane boyutunda %79.1'e yükselmiştir. Bu artış, ince tanelerin daha geniş yüzey alanına sahip olması ve flotasyon reaktifleri ile daha iyi etkileşime girmesi ile açıklanabilir (Laskowski, 2001). Benzer şekilde, kömür tane boyutu küçüldükçe kül içeriği de artmıştır. -500 μm tane boyutunda %34.8 kül içeriği, -75 μm tane boyutunda %37.9'a yükselmiştir. Bu durum, ince boyutlu kömür fraksiyonlarının daha yüksek oranda mineral madde (örneğin kil mineralleri, kuvars, pirit vb.) içermesi ve bu gang minerallerinin köpük fazına taşınarak konsantrenin kül içeriğini artırması ile açıklanabilir.

Deney sonuçlarına göre -500 μm kömür tane boyutu, yüksek yanabilir verim (%63.9) ve düşük kül içeriği (%34.8) sağladığı için optimum tane boyutu olarak seçilmiştir. Flotasyonda tane boyutu, prosesin seçiciliği ve verim üzerinde önemli etkiye sahip temel parametrelerden biridir (Bedekovic, 2016). Laskowski (2001), iri boyutlu kömür tanelerinin daha seçici flotasyon sağladığını ancak düşük yanabilir verim oranlarında yitirdiklerini; buna karşın daha ince boyutlu tanelerin ise yüksek verim ile çok iyi yitirdiklerini, ancak prosesin seçiciliğinin düşük olduğunu bildirmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmanın amacı, Yozgat/Sorgun linyit kömürünün flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesinde bazı proses parametrelerinin yanabilir verim ve kül içeriği üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesidir. İncelenen temel parametreler; pülp pH'sı, katı oranı, flotasyon süresi ve kömür tane boyutudur. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Pülp pH'sının etkisi değerlendirildiğinde, nötr ortam pH'sı 7'nin flotasyon için en uygun koşulları sağladığı

belirlenmiştir. Bu koşulda, %61.0 en yüksek yanabilir verim ve %35.0 en düşük kül içeriği elde edilmiştir.

- Katı oranının etkisi değerlendirildiğinde, %15 katı oranı optimum değer olarak belirlenmiştir.

- Flotasyon süresi açısından değerlendirildiğinde, en uygun sürenin 5 dakika olduğu belirlenmiştir. Bu sürede, %63.9 en yüksek yanabilir verim ve %34.8 en düşük kül içeriği elde edilmiştir.

- Kömür tane boyutu açısından değerlendirildiğinde, -500 μm tane boyutunun daha yüksek seçicilik ve verim sağladığı görülmüş ve bu nedenle optimum tane boyutu olarak seçilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, Yozgat/Sorgun linyit kömürünün flotasyon ile zenginleştirilmesinde optimum koşullar; pülp pH'sı 7, %15 katı oranı, 5 dakika flotasyon süresi ve -500 μm kömür tane boyutu olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda linyit kömürünün kül içeriği %38.7'den %34.8'e düşürülmüş ve %63.9 yanabilir verim değeri elde edilmiştir. Ayrıca, linyit kömürünün kalorifik değeri 3563 kcal/kg'dan 4144 kcal/kg'a yükseltilemiştir.

Kaynaklar

- ASTM. 1991. Annual book of ASTM standards. Part 26, Philadelphia.
- ASTM D3172-13. 2021. Standard practice for proximate analysis of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3174-12.2020. Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Ateşok G. 2009. Kömür hazırlama ve teknolojisi (Genişletilmiş 2. Baskı). İstanbul: Yurt Madencilik Geliştirme Vakfı Yayınları.
- Bedekovic G. 2016. A study of the effect of operating parameters in column flotation using experimental design. Physicochemical Problems of Minerals Processing. 52(2): 523-535. <https://doi.org/10.5277/ppmp160201>.
- Cheng G, Li Z, Cao Y and Jiang Z. 2020. Research progress in lignite flotation intensification. International Journal of Coal Preparation and Utilization. 40(1): 59-76. <https://doi.org/10.1080/19392699.2018.1541894>.

- Fuerstenau MC, Jameson GJ and Yoon RH. 2007. Froth flotation: A century of innovation. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME).
- Kural O. 1991. Kömür. İstanbul, Turkey: Kurtiş Matbaası.
- Laskowski JS. 2001. Coal flotation and fine coal utilization. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science B.V.
- Molatlıhegi O and Alagha L. 2016. Ash depression in fine coal flotation using a novel polymer aid. International Journal of Clean Coal and Energy. 5(4): 65-85. <http://dx.doi.org/10.4236/ijcce.2016.54006>.
- Özütürker Ş. 2019. Kömürün flotasyon yöntemi ile zenginleştirilebilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
- Polat M, Polat H and Chander S. 2003. Physical and chemical interactions in coal flotation. International Journal of Mineral Processing. 72(1-4): 199-213. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00099-1](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00099-1).
- Vamvuka D and Agridiotis V. 2001. The effect of chemical reagents on lignite flotation. International Journal of Mineral Processing. 61(3). [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(00\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(00)00034-X).
- Wang X, Ding R, Cui X, Qin Y, Cheng G, Abaka-Wood G and Li E. 2025. New insights for improving low-rank coal flotation performance via tetrahydrofurfuryl ester collectors. Minerals. 15(1): 78. <https://doi.org/10.3390/min15010078>.
- Xu M, Zhou Y, Hao Y, Cao Y, Xing Y and Gui X. 2023. Enhancing flotation performance of low-rank coal using environment-friendly vegetable oil. Minerals. 13(6): 717. <https://doi.org/10.3390/min13060717>.
- Yu J, Tahmasebi A, Han Y, Yin F and Li X. 2013. A review on water in low rank coals: The existence, interaction with coal structure and effects on coal utilization. Fuel Processing Technology. 106: 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.051>.