

## Ultrasonik İşlemin Linyit Süspansiyonunun Yağ Aglomerasyonu Üzerine Etkisi

### *The Effect of Ultrasonic Treatment on Oil Agglomeration of Lignite Suspension*

Kiraz EŞMELİ\* 

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 42000, Konya

• Geliş tarihi / Received: 03.01.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 24.03.2023

#### Öz

Ultrasonik işlemin kullanımı çoğunlukla ince kömürlerin flotasyon işlemi için araştırılmıştır, ancak yağlarla aglomerasyona uygulanması son derece sınırlıdır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, gazyağı kullanılarak ultrasonik işleminin yağ aglomerasyon süreci üzerindeki etkisini araştırmaktır. Ultrasonik, ön işlem aşamasında ve aglomerasyon aşamasında olmak üzere iki farklı şekilde kullanılmış ve farklı sonuçlar bulunmuştur. Ön işlem aşamasında ultrasonik kullanımı linyit süspansiyonunun kül içeriğini azalttı ve yanabilir kömür verimini artırdı. Öte yandan, aglomerasyon aşamasında ultrasonik kullanımı kömürün yağ aglomerasyonunu olumsuz yönde etkilemiştir. Yağ aglomerasyon başarısını etkileyen diğer faktörler ultrasonik sistemin güç ve tedavi süresiydi ve düşük güç değeri ve kısa süreli ultrasonik işlem ile aglomerasyon başarısının arttığı sonucuna varıldı. Sonuç olarak, %26.02 kül içeriğine sahip kömür, optimum koşullar altında ultrasonik ön işleme %10.03 kül içeriği ve %79.06 yanabilir verim ile zenginleştirildi.

**Anahtar kelimeler:** Geometrik süreç, Hata ayıklama maliyeti, Moment fonksiyonları, Test etme maliyeti.

#### Abstract

The use of ultrasonic process has mostly been investigated for the flotation process in coal fines, but its application to agglomeration with oils is extremely limited. Therefore, the purpose of present study is to investigate the influence of ultrasound treatment on the oil agglomeration of lignite using kerosene. Ultrasonic process was used in two different ways, at the pretreatment stage and at the agglomeration stage, and different results were found. The use of ultrasonic at the pretreatment stage reduced the ash content of the lignite suspension and increased the combustible recovery. On the other hand, the use of ultrasonic at the agglomeration stage adversely affected the agglomeration of lignite. Other factors affecting the oil agglomeration were the power of ultrasonic and the duration of process, and it was concluded that the agglomeration success was increased by the low power value and the short-term ultrasonic process. As a result, coal with an ash content of 26.02% was cleaned with an ash content of 10.03% and a combustible recovery of 79.06% by ultrasonic pretreatment under optimal conditions.

**Keywords:** Lignite, Ultrasound treatment, Oil agglomeration

\* Kiraz Eşmeli; kesmeli@ktun.edu.tr

## 1. Giriş

### 1.1. Introduction

Ülkelerin ekonomik kalkınması büyük ölçüde enerji kaynaklarına bağlıdır. Kömür, modern sanayileşmenin temelini oluşturan ve enerji üretimi, çimento üretimi, çelik üretimi gibi çeşitli endüstriyel uygulamalar için hammadde görevi gören kaynaklardan biridir. Fakat gerek mekanize madencilik sistemleri gerekse boyut küçültme yöntemleri üretilen kömür içerisinde ince boyutlu kömürün (-100 mikron) miktarını artırmaktadır (Barma vd., 2018). Bu ince boyutlarında elde edilen kömür üretimi sonunda kömür kayıpları artmakta, susuzlandırma problemleri ile birlikte artık miktarı artmaktadır. Bu da artık bertaraf maliyetlerini yükseltmektedir. Bu nedenle kömür zenginleştirme işlemleri önem kazanmaktadır. İnce kömür zenginleştirilmesinde genellikle köpük flotasyonu, flokülasyon ve yağ aglomerasyonu gibi ayırma teknikleri kullanılmaktadır (Gurses vd., 1996). Yağ aglomerasyonunun avantajı, uygun seçiciliğe bağlı olarak, yüksek kül içeriğine sahip düşük dereceli kömür veya ayrılması zor ince kömür zenginleştirilmesinde bile etkili olmasıdır (Ozer vd., 2017).

Yağ aglomerasyon işlemi esas olarak yüzey özelliğine dayanmaktadır. Yağ aglomerasyonu karıştırma altındaki kömür-su bulamacına bağlayıcı yağın eklenmesi sonucunda kömür-yağ aglomereleri oluşması işlemidir (Capes, 1980; Capes & Jonasson, 1989). Literatürde bu tekniğin kömürün niteliği, kömür partikül büyüklüğü, yağ tipi, yağ dozajı, ajitasyon hızı, aglomerasyon süresi, pH ve ön arıtma işlemleri gibi birçok faktörden etkilendiği belirtilmiştir (Allen & Wheelock, 1993; Unal & Aktas 2001; Gence, 2006; Aslan & Unal 2011; Chary & Dastidar, 2010, 2012, 2013; Aslan, 2013; Sahinoglu & Uslu 2013, 2014). Ayrıca, mazot, gazyağı ve atık yağlar gibi çok çeşitli yağlar kullanılmış ve viskozitelerine bağlı olarak yanabilir kömür verimini iyileştirebilecekleri belirtilmiştir (Petela vd., 1995; Cebeci & Eroglu 1998; Unal & Aktas 2001; Alonso vd., 2002; Cebeci, 2003).

Ultrasonik ses dalgaları, nadir ve sıkıştırma döngüleri olarak ardışık bir şekilde yayılırken, nadir döngüde oluşan mikro kabarcıklar, sıkıştırma döngüsünde anlık bir çökmeye neden olarak lokalize bir enerji patlaması oluşturur. Buna kavitasyon denir ve ultrasonik işlemin en belirgin özelliğidir (Celik, 1989; Ozkan & Kuyumcu 2006, 2007). Kavitasyon işlemi, sıvının içindeki katı yüzeyler üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır. Son yıllarda, ultrasonik prosesin kömür flotasyonu üzerine etkisini araştıran birçok çalışma mevcuttur (Ozkan ve Kuyumcu 2006, 2007; Altun vd., 2009; Ozkan, 2012; Xu vd., 2017; Mao vd., 2019a, 2019b, 2020). Bu çalışmalarda ultrasonik işlemin kavitasyon etkisi ile birçok nano kabarcıklar oluştuğu ve bu kabarcıkların yüzdürme başarısını artırdığı belirtilmiştir (Yasuda vd., 2019; Mao vd., 2019a, 2019b, 2020; Wang vd., 2020; Jin vd., 2021). Ayrıca bu çalışmalarda ultrasonik işlemin reaktiflerin sıvı içinde daha iyi dağılmasını sağlayarak aktivitesini arttırdığı ve böylece flotasyon verimliliğini iyileştirdiği belirtilmiştir. Bunlara ek olarak, akustik kavitasyonun partikül yüzeylerini temizlediği ve reaktiflerin etkisini kolaylaştırmak için şlam kaplamaları en aza indirdiği ve böylece reaktif tüketimini azalttığı da kaydedilmiştir. Öte yandan ultrasonik işlemin minerallerin sedimantasyonu üzerindeki etkisini araştıran çok az çalışma vardır ve bu çalışmalarda ultrasonik işlemin faydalı etkisine dikkat çekilmiştir (Onal vd., 2003; Burat vd., 2014). Mekanizması aglomerasyona benzer olan ultrasonik titreşiminin flotasyon üzerindeki olumlu etkisini gösteren birçok çalışma olmasına rağmen, kömürün yağ aglomerasyonu üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma ultrasonik muamelenin kömürün aglomerasyonu üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamıştır.

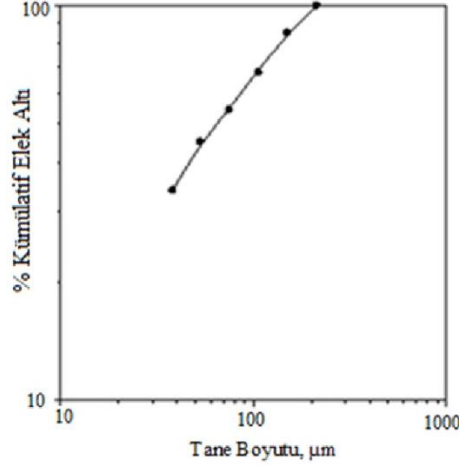
## 2. Materyal ve metot

### 2.1. Material and method

Deneysel Konya'nın Ilgın ilçesinden temin edilen linyit örneği kullanılmıştır. Linyit numunesinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Partikül boyut analizi bir lazer kırınım ölçer (Malvern Mastersizer 2000, UK) kullanılarak yapıldı. Linyit numunesi çubuk değirmen kullanılarak kuru öğütülmüş ve öğütülmüş numunenin partikül boyut dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, tamamı 38 mikron boyutu altına öğütülen numunenin % 80'i 140 µm'de geçmektedir. Köprüleme sıvısı olarak kullanılan gazyağı, yerel petrol bürosundan tedarik edildi ve gazyağının yoğunluğu 0,8 g/cm<sup>3</sup> olarak bulundu. Bu çalışmada Bandelin (Sonopuls HD 3200) marka ultrasonik cihaz kullanılmış ve cihaz 20Khz frekansa sahiptir (Şekil 2).

**Table.1.** Linyit örneğinin kuru bazda özellikleri*Table 1. Characteristics of the lignite sample on a dry basis.*

Kül (%)	Nem (%)	Sabit Karbon (%)	Kalori Değeri (kcal/kg)
26.02	24.5	16.9	3367.7

**Şekil 1.** Öğütülmüş numunenin tane boyut dağılımı*Figure 1. Particle size distribution of the ground sample*

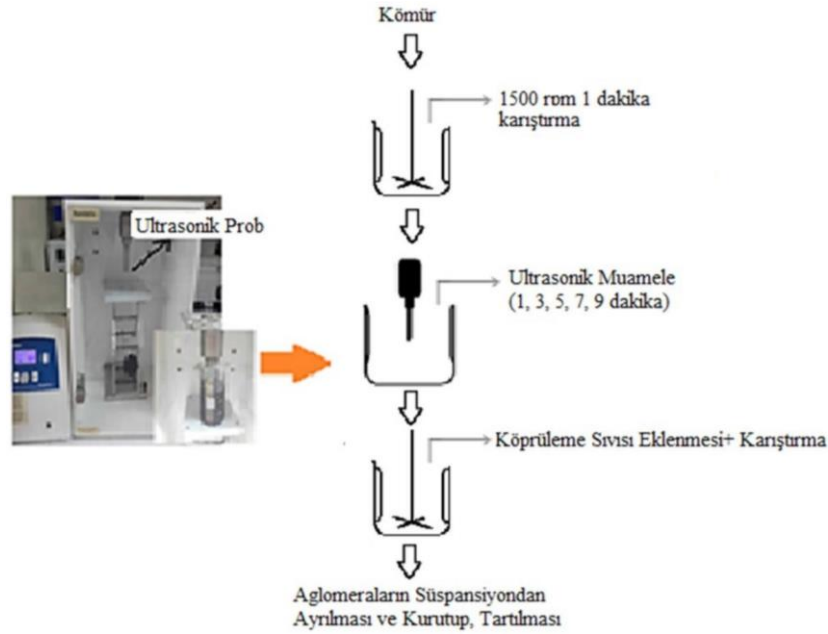
## 2.1. Aglomerasyon deneyleri ve ultrasonik aglomerasyon işlemi

### 2.1. Agglomeration experiments and ultrasound process

Yağ aglomerasyon deneyleri, 5 g kömür numunesi ve 300 cm<sup>3</sup> su karıştırılarak cam silindirik bir beherde gerçekleştirildi. Çarpışma olasılığının artırılması için beherin iç yüzeylerine birbirine eşit mesafede olacak şekilde 4 adet cam bariyer yapıştırılmıştır. Hazırlanan süspansiyon homojen dağılması için önce manyetik karıştırıcı ile 1500 rpm karıştırma hızında karıştırıldı. Daha sonra gazyağı eklenmeden önce süspansiyon belirlenen sürelerde ultrasonik işlem ile karıştırıldı. Ultrasonik işlemden sonra süspansiyona belirlenen dozajda gazyağı ilave edildi ve süspansiyon istenen aglomerasyon periyodu için manyetik karıştırıcı ile 750 rpm karıştırma hızında yeniden karıştırıldı. Son olarak sistem durduruldu ve elekten alınan aglomereler vakumla filtrelendi ve ardından aseton (1 g kömür için 25 ml aseton) ile yıkanarak yağdan arındırıldı. Deneysel akım şeması Şekil 2 'de sunulmuştur. Aglomereler kurutulduktan ve tartıldıktan sonra yanabilir kömür verimi Denklem (1) kullanılarak hesaplandı.

$$\text{Yanabilir kömür verimi (YKV, \%)} = 100 \times \frac{A(100 - A_{\text{kül}})}{B(100 - B_{\text{kül}})} \quad (1)$$

Burada, A= Temiz kömür yüzdesi, A<sub>kül</sub> = temiz kömür kül içeriği, B= besleme yüzdesi, ve B<sub>kül</sub> = besleme kül içeriği



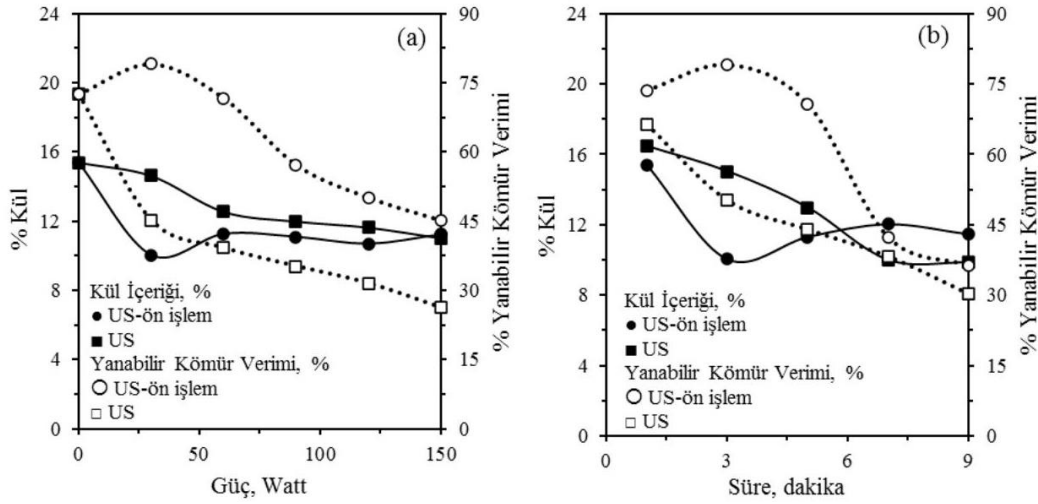
**Şekil 2.** Ultrasonik titreşim cihazı ve deneysel prosedürün şematik gösterimi

**Figure 2.** Ultrasonic vibration device and schematic representation of the experimental procedure

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

Ultrasonik ön işleme veya aglomerasyon aşamasında ultrasonik işleme tabi tutulan kömür süspansiyonunun ultrasonik sistem gücü ve tedavi süresinin bir fonksiyonu olarak kül ve yanabilir kömür verimi üzerindeki etkisi Şekil 3'te verilmiştir. Ultrasonik güç değerlerinin linyit süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi Şekil 3 (a)'da gösterilmiştir. Ultrasonik ön işlem kullanan deneylerde kül içeriği değerleri belirli bir ultrasonik sistem gücüne (30 W) kadar azalmış ve daha sonra güç değerlerine bağlı olarak artmaya başlamıştır. Kömür yanma verimi ultrasonik sistemin 30 watt güç değerine kadar yükselmiş ve daha sonra güç değerlerinin artmasıyla azalmıştır. Öte yandan, aglomerasyon aşamasında ultrasonik titreşim kullanımı, ultrasonik güç değerlerine bağlı olarak aglomerat olarak elde edilen linyitin kül içeriğini azaltırken, kömür yanma veriminde azalmaya yol açmıştır. Şahinoğlu ve Uslu (2013b), yağ aglomerasyon işleminde ultrasonik emülsifikasyonun etkisini araştırdılar ve benzer sonuçlar kaydetmişlerdir. Bu çalışmada, ultrasonik sistemin güç seviyelerinin yanabilir kömür verimi üzerindeki olumsuz etkisini kavitasyon sonucu oluşan küçük boyutlu yağ damlacıklarının aglomeratların sınırlı büyümesine yol açmasına bağlamışlardır. Ultrasonik muamele süresinin linyit süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi Şekil 3 (b)'de gösterilmiştir. Belirli bir uygulama süresi boyunca (3 dakika) ultrasonik uygulanması, aglomerat olarak elde edilen linyitin kül içeriğini azalttı ve yanabilir kömür verimini arttırdı. Bununla birlikte, muamele süresinin daha da uzaması sadece kül içeriğini arttırmakla kalmadı, aynı zamanda yanabilir kömür veriminde de bir azalmaya yol açtı. Şahinoğlu ve Uslu (2013a), ultrasonik işlem süresinin 28.5 Watt güç değerine kadar kül uzaklaştırma oranı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını, ancak yüksek güç değerlerinde kül uzaklaştırma oranını olumsuz etkilediğini belirtti. Flotasyon üzerine yapılan çalışmalarda ultrasonik güç değerinin ve uygulama süresinin süreçlerin başarısını önemli ölçüde etkilediği kaydedilmiştir (Altun vd., 2009; Gungoren vd., 2019; Chen vd., 2020; Hassanzadeh vd., 2020). Öte yandan, aglomerasyon aşamasında ultrasonik kullanımı, ultrasonik uygulama süresine bağlı olarak linyit süspansiyonunun kül içeriğini azaltırken, yanabilir kömür veriminde de azalmaya yol açmıştır.



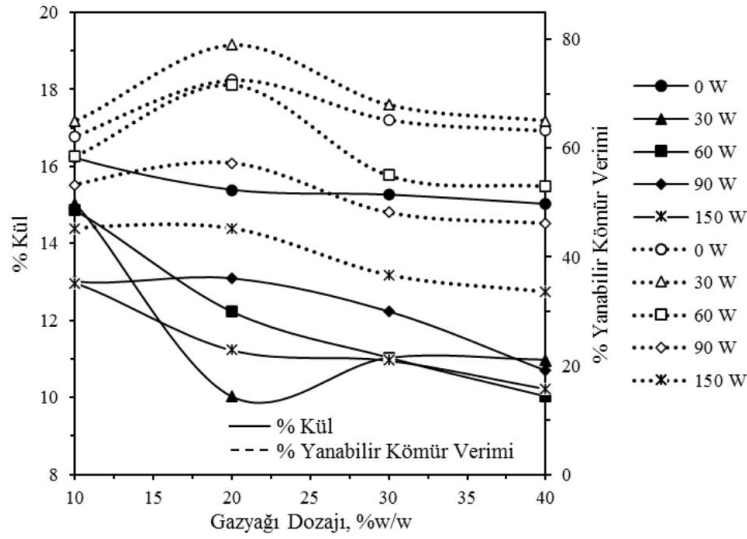
**Şekil 3.** Ultrasonik sistem farklı güç değerlerinin ve işlem sürelerinin linyit süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerine etkisi.

**Figure 3.** The effect of different power values and processing times of ultrasonic system on the oil agglomeration of lignite suspension

Yağ dozajına bağlı olarak farklı ultrasonik güç değerleri için kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu Şekil 4'te gösterilmiştir. 30 Watt'lık bir ultrason güç değerinde, % 20'lik bir gazyağı dozajına kadar, kül içeriği değerleri azaldı ve yanabilir kömür verimi arttı, ancak yağ dozajının daha fazla artması yanabilir kömür verimi ve kül içeriği değerlerini olumsuz yönde etkilemiştir. Fakat, ultrasonik işleminin diğer güç değerlerinde, gazyağı dozajına bağlı olarak kül içeriği değerleri azalmıştır. Şahinoğlu ve Uslu (2013a) 9.5-72.8 Watt / cm<sup>2</sup> ultrasonik güç değerlerinde ultrason güç değerindeki artışa bağlı olarak kömürden kül uzaklaştırma oranlarını arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada ultrasonik işlem uygulanan numunenin morfolojik analizini inceleyerek kaviteasyon sonucu kömür yüzeyinin lokal bölgelerinde çatlak ve kırıklar olduğunu, ultrasonik işlemden sonra kömür yüzeyinden bazı kil ve diğer ilgili mineral maddelerin uzaklaştırıldığını kaydetmişlerdir. Bu nedenle, ultrasonik işlemi ile kül içeriğindeki azalma, diğer bazı gang minerallerinin oksitlenmiş tabaka ile birlikte kömür yüzeyinden uzaklaştırılmasına bağlanabilir. Kömür flotasyonu ile yapılan birçok çalışmada, flotasyon verimliliğindeki artış, ultrasonik işleminin kaviteasyon etkisine bağlı olarak kömür yüzeyindeki oksitlenmiş tabakayı azaltması ve daha temiz kömür yüzeyleri ve boşlukları üretmesi ile ilişkilendirilmiştir (Ozkan & Kuyumcu, 2006; Kang vd., 2008, 2009; Ozkan, 2017). Ultrasonik kullanımının olumlu etkisinin bir başka nedeni, ultrasonik kaviteasyonun bir sonucu olarak su ve yağ arasındaki arayüzey geriliminin azalması ve daha büyük yağ damlacıklarının küçük kararlı damlacıklara bölünmesi, böylece aglomerasyon sürecini iyileştirmesi olabilir (De Castro & Priego-Capote, 2007; Gaikwad & Pandit, 2007; Kentish vd., 2008; Sahinoglu & Uslu, 2013b). Öte yandan, ultrasonik işlemin tüm güç değerleri için yanabilir kömür verim değerleri belirli bir yağ dozajına kadar yükselmiş ve daha sonra yağ dozajına bağlı olarak azalmaya başlamıştır. Benzer sonuçlar Şahinoğlu ve Uslu (2013a) tarafından da bulundu ve ultrasonik ön işlemin yağ aglomerasyonunda yanabilir kömür verimini azalttığını belirttiler. Bu durum ultrasonik işlemin kömür parçacıklarının ultrasonik işlemle parçalanması sonucu kömürün tane boyutunu azaltmasına bağlanabilir. Bu bulgu ile tutarlı olarak, ultrasonik işlemin kömür yapısı hakkında benzer etkileri farklı yazarlar tarafından rapor edilmiştir (Kang vd., 2007; Yazıcı vd., 2007; Ambedkar vd., 2011a; b; Royaei vd., 2012; Ozkan, 2017). Birçok çalışmada da kömür tane boyutunun değişiminin aglomerasyonu etkilediği belirtilmiştir (Unal & Ersan, 2005; Sahinoglu & Uslu, 2008; Zhang vd., 2012).

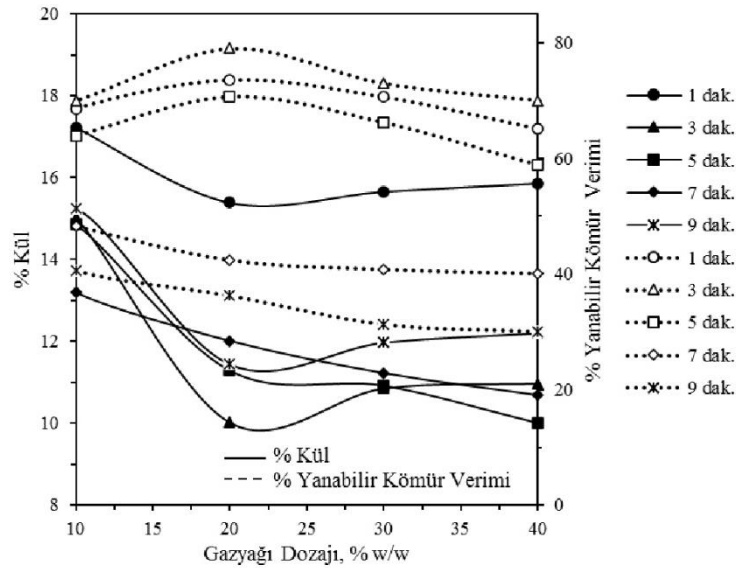
Ultrasonik işlem sürelerinin, gazyağı dozajına bağlı olarak linyit süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir kömür verimi üzerindeki etkisi Şekil 5'te sunulmuştur. Kömürün kül içeriği 5 ve 7 dakika periyotlarda ultrasonik ön işlemin uygulanması ile gazyağı dozajına bağlı olarak azalmıştır. Bununla birlikte, ultrasonik işlem muamelesinin diğer uygulanma sürelerinde, kül içeriği % 20'lik bir yağ dozajına kadar azaldı ve daha sonra artmaya başladı. Belirli bir süre ultrasonik işlem uygulanmasıyla kül içeriğinin azalması, ancak daha uzun işlem sürelerinin uygulanmasıyla artması, ultrasonun kömür yüzeyi üzerindeki güçlü kaviteasyon etkisinden kaynaklanıyor olabilir. Xu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, oksitlenmiş kömür yüzeyinin ultrasona maruz kalma süresine bağlı olarak daha pürüzsüz hale geldiği ve işlem süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını kaydetmişlerdir. Öte yandan, yanabilir kömür verimi, 1 ve 5 dakika aralığında % 20

yağ dozajına kadar artmış ve daha sonra yağ dozajının artmasıyla azalmaya başlamıştır. Fakat daha yüksek işlem süreleri yanabilir kömür verimini olumsuz yönde etkilemiştir. Sonuç olarak, kül içeriği ve yanabilir kömür verimi için optimal değerler 3 dakika ultrasonik ön işlem uygulanmasıyla elde edildi.



**Şekil 4.** Gazyağı dozajına bağlı olarak ultrasonun farklı güç değerlerinin linyitin kül içeriğine ve yanabilir kömür verimine etkisi (İşlem süresi: 3 dk)

**Figure 4.** The influence of different power values of ultrasound as a function of the kerosene dosage on the ash content and combustible matter recovery of lignite (Processing time: 3 min)

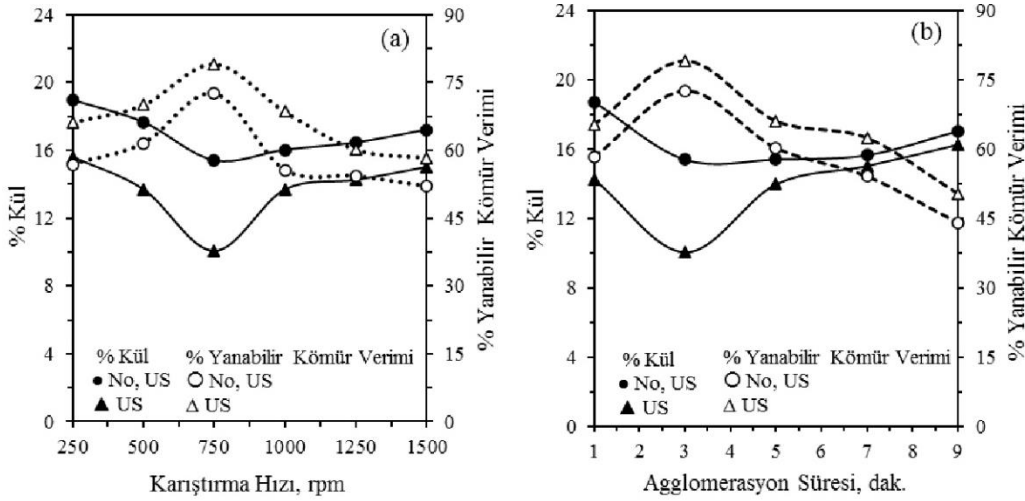


**Şekil 5.** Yağ dozajına bağlı olarak farklı ultrasonik muamele sürelerinin linyit süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir kömür verimi üzerindeki etkisi (Ultrasonik sistem güç değeri: 30 watt).

**Figure 5.** The influence of different treatment time of ultrasound as a function of the kerosene dosage on the ash content and combustible matter recovery of lignite (Ultrasonic power: 30 watt)

Karıştırma hızının kömürün yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi Şekil 6 (a)' da gösterilmiştir. Ultrasonik işlem kullanılmadan yapılan deneylerde, karıştırma hızı 250 rpm'den 750 rpm'ye yükseldiğinde kül içeriği değerleri azalmış ve daha yüksek karıştırma hızlarında artmaya başlamıştır. Literatürden, yüksek karıştırma hızlarının aglomereleri kırarak daha küçük parçalara ayrılmasına neden olduğu bilinmektedir (Cebeci & Sonmez, 2006; Gence 2006; Sahinoglu & Uslu, 2008; Duzyol vd., 2014; Duzyol 2015). Yanabilir kömür

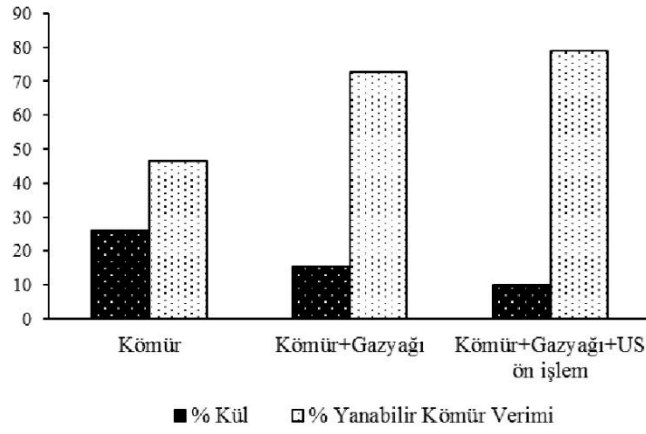
verim değerleri 750 rpm karıştırma hızı değerine kadar yükselmiş ve daha sonra karıştırma hızı değerlerinin artmasıyla azalmıştır. Yanabilir kömür veriminin 750 rpm'lik bir karıştırma hızında artması, hidrofobik kömür parçacıkları ile yağ damlacıkları arasındaki temasın arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, 750-1500 rpm karıştırma hızı aralığındaki yanabilir kömür verimliliğindeki azalma, kömür–yağ aglomereleri birbiriyle çarpıştığında ortaya çıkan ve aglomerelerin parçalanmasına neden olabilen daha yüksek dispersif kuvvetlere bağlanabilir. Literatürde karıştırma hızının kömür yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisini araştıran birçok çalışmada da benzer sonuçlar kaydedilmiştir (Sahinoglu & Uslu, 2008; Cebeci & Sonmez, 2002, 2006). Öte yandan, ultrasonik ön işleme tabi tutulan deneylerde kül içeriği ve verim eğrileri karıştırma hızına bağlı olarak benzer şekilde değişmekle birlikte ultrasonik kullanılmadan gerçekleştirilen deneylere kıyasla daha başarılı bir aglomerasyon işlemi elde edilmiştir. Şekil 6 (b), farklı aglomerasyon süreleri için kömürün kül içeriğini ve yanabilir kömür verim değerlerini göstermektedir. Ultrasonik ön işleme kullanılmadan yapılan deneylerde, kömür süspansiyonunun kül içeriği 1-3 dakika aglomerasyon süresi aralığında azalmış, ancak aglomerasyon sürelerinin uzamasıyla artmaya başlamıştır. Yanabilir kömür verim değerleri 3 dakika aglomerasyon süresine kadar artmış ve daha sonra aglomerasyon süreleri arttıkça azalmıştır. Aglomerasyon periyodu uzun tutulduğunda yanabilir kömür verimindeki azalma, hücre duvarı ile aglomere çarpışmalarının, birbirleriyle daha uzun temas dönemlerinde aglomere kopmalarını arttırmasından kaynaklanmış olabilir. Cebeci ve Sonmez, (2002) ve Chary ve Dastidar (2010), aglomerasyon süresinin kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisini araştıran çalışmalarında da benzer bulgular kaydetmişlerdir. Ultrasonik ön işlem olarak kullanıldığı deneylerde, kül içeriği ve yanabilir kömür verim değerleri, aglomerasyon süresine bağlı olarak benzerlik göstermiştir, ancak daha yüksek yanabilir kömür verim değerleri ve daha düşük kül değerleri elde edilmiştir.



**Şekil 6.** Karıştırma hızı ve aglomerasyon süresinin kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi (Gazyağı dozajı:% 20; Ultrasonik sistem güç değeri: 30 Watt)

**Figure 6.** The effect of stirring speed and agglomeration time on oil agglomeration of coal suspension (Kerosene dosage: 20 %; Ultrasonic power: 30 watt)

Şekil 7, ultrasonik ön işleminin kömür yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisini özetlemektedir. Ultrasonik ön işleme kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonunu arttırmıştır. Şekil 7'de gösterildiği gibi, %15.39 olan kül içeriği değeri, ultrasonik ön işleme ile %10.03 değerine düşmüştür. Ayrıca, ultrasonik ön işleminin uygulanması yanabilir kömür verim değerlerini arttırmıştır. Sonuç olarak, ultrasonik ön işleme ile linyit süspansiyonunun daha başarılı bir aglomerasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 7.** Ultrasonik ön işleminin kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi (Gazyağı dozajı: %20, Ultrasonik sistem güç değeri: 30 watt, Karıştırma hızı: 750 rpm, Aglomerasyon süresi: 3 dakika)

**Figure 7.** The effect of ultrasonic pretreatment on the oil agglomeration of coal suspension (Kerosene dosage: 20%, Ultrasound power value: 30 watt, Stirring speed: 750 rpm, Agglomeration time: 3 min)

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusion

Kömürün yağ aglomerasyon sürecini belirleyen en önemli faktörün ultrasonik sistemin kullanıldığı aşama (ön işlem veya aglomerasyon aşaması) olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ultrasonik güç değerleri ve işlem süreleri aglomerasyonun başarısını etkileyen diğer önemli faktörler olarak bulunmuştur. Düşük güç değeri aglomerasyon başarısını artırırken, güç değerlerinin daha yüksek seviyelere çıkması süreci olumsuz etkilemiştir. Öte yandan ultrasonik işlem süresinin uzaması da aglomerasyon başarısını olumsuz yönde etkilemektedir. Sonuç olarak, % 26.02 kül içerikli kömür, ultrasonik ön işlem ile %10.03 kül içeriği ve % 79.06 yanabilir kömür verim ile zenginleştirilmiştir.

#### Yazar katkısı

##### Author contribution

Birinci yazar makaleyi tasarladı, literatür taraması yaptı, deneysel çalışmalar ve analizler yaptı, sonuçları tartıştı ve makaleyi yazdı.

#### Etik beyanı

##### Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

#### Çıkar çatışması beyanı

##### Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Kaynaklar

##### References

- Alonso, M. I., Valdés, A. F., Martínez-Tarazona, R. M., & Garcia, A. B. (2002). Coal recovery from fines cleaning wastes by agglomeration with colza oil: a contribution to the environment and energy preservation. *Fuel Processing Technology*, 75, 85–95. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00233-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00233-8)
- Allen, R. W., & Wheelock, T. D. (1993). Effects of pH and ionic strength on kinetics of oil agglomeration of oil agglomeration of fine coal. *Mineral Engineering*, 6(1), 87–97.



- Altun, N. E., Hwang, J. Y., & Hicyilmaz, C. (2009). Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment. *International Journal Mineral Processing*, 91(1-2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.10.003>.
- Ambedkar, B., Chintala, T. N., Nagarajan, R., & Jayanti, S. (2011a). Feasibility of using ultrasound assisted process for sulfur and ash removal from coal. *Chemical Engineering and Processing*, 50(3), 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.02.008>
- Ambedkar, B., Nagarajan, R., & Jayanti, S. (2011b). Investigation of high-frequency, high-intensity ultrasonics for size reduction and washing of coal in aqueous medium. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(23), 13210–13219. <https://doi.org/10.1021/ie200222w>.
- Aslan, N. (2013). Use of grey analysis to determine optimal oil agglomeration with multiple performance characteristics, *Fuel*, 109,373–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.069>
- Aslan, N., & Unal, I. (2011). Multi-response optimization of oil agglomeration with multiple performance characteristics. *Fuel Processing Technology*, 92(6), 1157–63. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.029>
- Barma, S. D., Baskey, P. K., & Biswal, S.K. (2018). Chemical beneficiation of high-ash Indian noncoking coal by alkali leaching under low-frequency ultrasonication, *Energy Fuels*, 32(2), 1309–1319. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03291>
- Burat, F., Sirkeci, A. A., & Onal, G. (2014). Improved fine coal dewatering by ultrasonic pretreatment and dewatering aids, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(2), 129-135. <https://doi.org/10.1080/08827508.2014.898637>
- Capes, C.(1980). Principles and applications of size enlargement in liquid systems. *Fine Particles Processing*, 2, 1442-1462, 1980.
- Capes, C., & Jonasson, K. (1989). Application of oil–water wetting of coals in beneficiation. *Interfacial Phenomena in Coal Technology*, Surfactant science series, (1nd ed.), p. 115–155.
- Cebeci, Y., & Eroglu, N. (1998). Determination of bridging liquid type in oil agglomeration of lignite. *Fuel*, 77, 419–424 [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)80032-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)80032-X)
- Cebeci, Y. (2003). Investigation of kinetics of agglomerate growth in oil agglomeration process. *Fuel*, 82, 1645–1651. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00095-4)
- Cebeci, Y., & Sonmez, I. (2002). The investigation of coal-pyrite/lignite concentration and their separation in the artificial mixture by oil agglomeration. *Fuel*, 81, 1139–46. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00028-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00028-5)
- Cebeci, Y., & Sonmez, I. (2006). Application of the Box-Wilson experimental design method for the spherical oil agglomeration of coal. *Fuel*, 85, 289–97. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.07.017>.
- Celik, M. S. (1989). Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena. *Separation Science and Technology*, 24(14),1159–66.
- Chary, G. H. V. C., & Dastidar, M. G. (2010). Optimization of experimental conditions for recovery of coking coal fines by oil agglomeration technique. *Fuel*, 89(9), 2317–22. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.12.016>
- Chary, G. H. V. C., & Dastidar, M. G. (2012). Investigation of optimum conditions in coal–oil agglomeration using Taguchi experimental design. *Fuel*, 98, 259–64. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.027>
- Chary, G. H. V. C., & Dastidar, M. G. (2013). Comprehensive study of process parameters affecting oil agglomeration using vegetable oils. *Fuel*, 106, 285–92. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.002>
- Chen, Y., Truong, V. N. T., Bu, X., & Xie, G. (2020). A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, 104739. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104739>
- De Castro, M. L., & Priego-Capote, F. (2007). Ultrasound-assisted crystallization (sonocrystallization). *Ultrasonics Sonochemistry*, 14, 717–724. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.12.004>

- Duzyol, S., Aksu, A. Ö., Erişir, H. S., Aspir, K., & Sensogut, C. (2014). Tunçbilek linyit kömürünün yağ aglomerasyonu ile zenginleştirilmesi. *Türkiye 19. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, (pp. 237-244), Zonguldak
- Duzyol, S. (2015). Investigation of oil agglomeration behavior of Tuncbilek clean coal and separation of artificial mixture of coal-clay by oil agglomeration. *Powder Technology*, 274, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.011>
- Gaikwad, S. G., & Pandit, A. B. (2008). Ultrasound emulsification: Effect of ultrasonic and physicochemical properties on dispersed phase volume and droplet size. *Ultrasonics Sonochemistry* 15(4), 554–563 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.06.011>
- Gence, N. (2006). Coal recovery from bituminous coal by agglomeration with petroleum oils. *Fuel*, 85, 1138–42. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.11.001>
- Gungoren, C., Ozdemir, O., Wang, X., & Ozkan, S. (2019). Miller J. Effect of ultrasound on bubble-particle interaction in quartz-amine flotation system. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 446–454. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.023>
- Gurses, A., Doymus, K., & Bayrakceken, S. (1996). Selective oil agglomeration of brown coal: a systematic investigation of the design and process variables in the conditioning step. *Fuel*, 75(10), 1175–80, [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(96\)00077-4](https://doi.org/10.1016/0016-2361(96)00077-4)
- Hassanzadeh, A., Sajjadi, S. A., Gholami, H., Amini, S., & Ozkan, S. G. (2020). An Improvement on selective separation by applying ultrasound to rougher and re-cleaner stages of copper flotation. *Minerals*, 10(7), 619. <https://doi.org/10.3390/min10070619>
- Jin, L., Wang, W., Tu, Y., Zhang, K., & Lv, Z. (2021). Effect of ultrasonic standing waves on flotation bubbles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105459. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105459>
- Kang, W., Xun, H., & Chen, J. (2007). Study of enhanced fine coal de-sulphurization and de-ashing by ultrasonic flotation. *Journal of China University of Mining and Technology*, 17(3), 358–362. [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(07\)60105-9](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(07)60105-9)
- Kang, W., Xun, H., & Hu, J. (2008). Study of the effect of ultrasonic treatment on the surface composition and the flotation performance of high-sulfur coal. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1337–1344. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.06.003>
- Kang, W., Xun, H., Kong, X., & Li, M. (2009). Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation. *Mining Science and Technology*, 19(4), 498–502, 507. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60093-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60093-4)
- Kentish, S., Wooster, T., Ashokkumar, M., Balachandran, S., Mawson, R., & Simons, L. (2008). The use of ultrasonics for nano emulsion preparation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.07.005>
- Mao, Y., Xia, W., Peng, Y., & Xie, G. (2019a). Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review. *Fuel Processing Technology*, 195, 106150. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106150>
- Mao, Y., Chen, Y., Bu, X., & Xie, G. (2019b). Effects of 20 kHz ultrasound on coal flotation: The roles of cavitation and acoustic radiation force. *Fuel*, 256, 115938. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115938>
- Mao, Y., Bu, X., Peng, Y., Tian, F., & Xie, G. (2020). Effects of simultaneous ultrasonic treatment on the separation selectivity and flotation kinetics of high-ash lignite. *Fuel*, 259(1), 116270. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116270>
- Onal, G., Ozer, M., & Arslan, F. (2003). Sedimentation of clay in ultrasonic medium. *Mining and Engineering*, 16 (2), 129–34. doi:10.1016/S0892-6875(02)00309-6.
- Ozer, M., Basha, O. M., & Morsi, B. (2017). Coal-agglomeration processes: a review. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 37(3), 31–167. <https://doi.org/10.1080/19392699.2016.1142443>
- Ozkan, S. G., & Kuyumcu, H. Z. (2006). Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation. *International Journal Mineral Processing*, 81(3), 201–203. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.011>

- Ozkan, S. G., & Kuyumcu, H. Z. (2007). Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(5), 639–645. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.001>
- Ozkan, S. G. (2012). Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes. *Fuel*, 93, 576–580. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.032>
- Ozkan, S. G. (2017). Further investigations on simultaneous ultrasonic coal flotation. *Minerals*, 7(10), 177, <https://doi.org/10.3390/min7100177>
- Petela, R., Ignasiak, B., & Pawlak, W. (1995). Selective agglomeration of coal: analysis of laboratory batch test results. *Fuel*, 74, 1200–1210 [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00047-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00047-9)
- Royaei, M. M., Jorjani, E., & Chelgani, S.C. (2012). Combination of microwave and ultrasonic irradiations as a pretreatment method to produce ultraclean coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 32, 143–155. <https://doi.org/10.1080/19392699.2012.663024>
- Sahinoglu, E., & Uslu, T. (2008). Amenability of Muzret bituminous coal to oil agglomeration. *Energy Convers Manage*, 49, 3684–90. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.06.026>
- Sahinoglu, E., & Uslu, T. (2013a). Increasing coal quality by oil agglomeration after ultrasonic treatment. *Fuel Processing Technology*, 116, 332–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.07.016>
- Sahinoglu, E., & Uslu, T. (2013b). Use of ultrasonic emulsification in oil agglomeration for coal cleaning. *Fuel*, 113, 719–725. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.06.046>
- Sahinoglu, E., & Uslu, T. (2014). Effect of particle size on cleaning of high-sulphur fine coal by oil agglomeration. *Fuel Processing Technology*, 128, 211–9. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.015>
- Unal, I., & Aktas, Z. (2001). Effect of various bridging liquids on coal fines agglomeration performance. *Fuel Processing Technology*, 69, 141–55. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(00\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(00)00137-5)
- Unal, I., & Ersan, M. G. (2005). Oil agglomeration of a lignite treated with microwave energy: effect of particle size and bridging oil. *Fuel Processing Technology*, 87, 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.08.001>
- Wang, H., Yang, W., Yan, X., Wang, L., Wang, Y., & Zhang, H. (2020). Regulation of bubble size in flotation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104070. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104070>
- Xu, M., Xing, Y., Gui, X., Cao, Y., Wang, D., & Wang, L. (2017). Effect of ultrasonic pretreatment on oxidized coal flotation. *Energy Fuels*, 31, 14367–14373. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02115>
- Yasuda, K., Matsushima, H., & Asakura, Y. (2019). Generation and reduction of bulk nanobubbles by ultrasonic irradiation. *Chemical Engineering Science*, 195, 455–461. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.044>
- Yazıcı, E. Y., Deveci, H., Alp, I., & Uslu, T. (2007). Generation of hydrogen peroxide and removal of cyanide from solutions using ultrasonic waves. *Desalination*, 216(1-3), 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.018>
- Zhang, H. X., Bai, H. J., Dong, X. S., & Wang, Z. Z. (2012). Enhanced desulfurizing flotation of different size fractions of high sulfur coal using sonoelectrochemical method. *Fuel Processing Technology*, 97, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.01.005>