



Contents lists available at *Dergipark*

Journal of Scientific Reports-C

journal homepage: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jsrc>



E-ISSN: 2717-8633

Sayı(Number) 12, Nisan(April) 2026

ARAŞTIRMA MAKALESİ/RESEARCH ARTICLE

Geliş Tarihi(Receive Date): 20.01.2026

Kabul Tarihi(Accepted Date): 21.04.2026

Anyonik flokülantların bakır flotasyon atıklarının çökeltme davranışlarına etkisinin araştırılması

Yasin Çınaroğlu^{a*}, Uğur Demir^b

^a*Acacia Maden İşletmeleri A.Ş. Hanönü, Kastamonu, TÜRKİYE, 37450, ORCID:0000-0002-4211-2882*

^b*Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, TÜRKİYE, 43000, ORCID:0000-0001-8828-4711*

Öz

Cevher hazırlama ve zenginleştirme tesisleri, madencilik sektöründe suyun çok fazla miktarlarda kullanıldığı yerlerdir. Bu tesislerin oluşturdukları atık sulardan temiz suyun elde edilerek yeniden kullanılması ekonomik ve çevresel açıdan faaliyetlerin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Atık suyun tesislerde defalarca kullanılması için tikinerler (çöktürme havuzları) kullanılmaktadır. Özellikle ince boyutlu atık ile sudan oluşan katı-sıvı karışımı bu tikinerlerde flokülasyon yöntemi ile çöktürülerek, temiz ve berrak su elde edilmekte, elde edilen su tesiste yeniden kullanılmaktadır. Bu çalışmada Kastamonu-Hanönü'nde faaliyet gösteren bir bakır zenginleştirme tesis atıklarının, iki farklı anyonik flokülant ile (Rheomax 1050 DK, MaxiFlox 530R) çeşitli çalışma şartlarının (dozaj, pülp te katı oranı (PKO) ve pH) atık tikiner çöktürme performansına etkileri araştırılmıştır. Rhomax 1050 DK ile yapılan çalışmalarda 4 ml dozaj, %20 PKO ve 9 pH değerlerinden en yüksek çökeltme hızı ve en düşük üst faz berraklık değerleri elde edilirken, MaxiFlox 530R ile yapılan deneylerde 3 ml dozaj, %20 PKO ve 9 pH değerlerinde en hızlı çökeltme hızları elde edilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda flokülant seçiminin tek bir parametreye göre değil, proses hedefleri doğrultusunda bütüncül bir yaklaşımla yapılması gerektiği ortaya koyulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Flokülasyon; Anyonik Flokülant; Çöktürme; Bulanıklık

* Corresponding author. Tel.: 05305678912

E-mail address: yasinrn19@gmail.com

Investigation of the effects of anionic flocculants on the settling behavior of copper flotation tailings

Abstract

Ore preparation and enrichment plants are places in the mining industry where large amounts of water are used. The reuse of clean water obtained from the wastewater generated by these plants ensures the economic and environmental sustainability of operations. Settling tanks are used to reuse wastewater multiple times in plants. In particular, the solid-liquid mixture consisting of fine-grained waste and water is settled in these tanks using the flocculation method to obtain clean and clear water, which is then reused in the plant. This study investigated the effects of two different types of anionic flocculants (Rheomax 1050, MaxiFlox 530R) and operating conditions (dosage, pulp solids ratio, and pH) on the sludge settling performance of a copper enrichment plant operating in Kastamonu-Hanönü. In the experiments conducted with Rhomax 1050, the highest settling rate and upper phase clarity values were obtained at a dosage of 4 ml, 20% PKO, and a pH value of 9, while in the experiments conducted with MaxiFlox 530R, the fastest settling rates were obtained at a dosage of 3 ml, 20% PKO, and a pH value of 9. It is demonstrated that in industrial applications, flocculant selection should be based on a holistic approach aligned with process objectives rather than a single parameter.

Keywords: Flocculation; Anionic Flocculant; Sedimentation; Turbidity

1.Giriş

Madencilik sektörü, suyun kullanılması ve atık su oluşumunu bakımından önemli ve dikkat edilmesi gereken bir konudur. Su kullanımı madenciliğin rezerv belirleme aşamasında sondaj makinelerinden başlayarak, açık ocak ve yeraltı madenciliğinin çeşitli aşamalarında, değerli minerallerin hazırlama ve zenginleştirme aşamalarının hemen hemen tüm aşamalarında söz konusudur [1]. Belirtilen madencilik faaliyetlerinin herhangi bir aşamasında oluşan atık su genellikle katı-sıvı karışımı halinde oluşmaktadır [2,3]. Madencilik faaliyetleri sonucu oluşan bu atık suyun iyi bir şekilde yönetilerek, defalarca kullanılması sağlanmalıdır. Dünya genelinde madencilik dahil pek çok sektör ciddi su problemleri ve su kısıntıları ile karşı karşıya kalacak, geri kazanım ve yeniden kullanım öncelikler arasında yer alacaktır [4]. Bu atık suların yeniden kullanılmadan önce içerdiği katı partiküllerin, çeşitli organik ve sentetik kimyasalların uzaklaştırılmaması, atık suyun kullanıldığı prosesin verimini önemli ölçüde etkileyecektir [1].

Bakır mükemmel bir iletken (elektrik ve ısı) olması, korozyona dayanıklı ve kolaylıkla şekillendirilebilmesi nedeniyle en çok tercih edilen metal elementidir. Özellikle güç kablolarında, jeneratör, elektrik motorları, transformatör ve yenilenebilir enerji üretiminde çok kullanılmaktadır. Doğada genellikle sülfürlü (kalkopirit, bornit, kalkositi kovellin), oksitli (azurit, brokantit, krisokol, kuprit, tenorit, malahit), kompleks mineral ve nadiren de nabit olarak bulunmaktadır [5].

Bakırın zenginleştirilmesinde, fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal yöntemler uygulanmakta, bunların içinde fizikokimyasal yöntemlerden biri olan flotasyon yöntemi çok yaygın olarak tercih edilmektedir [5]. Bakır flotasyonu ile ilgili birçok çalışma literatürde bulunmaktadır. Özellikle flotasyon işlemi sonrasında elde edilen katı-sıvı karışımı halindeki konsantr ve atığın susuzlandırılması, büyük miktarlarda suyun gerekli olduğu tesislerde, atık suyun istenilen özelliğe getirilerek defalarca kullanılması büyük önem arz etmektedir [6]. Bu amaçla tikinerlerde (çöktürme havuzları) flokülasyon yöntemi uygulanarak katı-sıvı karışımındaki ince boyuttaki katı tanecikler çöktürülerek temiz ve berrak su elde edilmekte, elde edilen bu atık su tesiste yeniden kullanılmaktadır [2]. Bu geri kazanım hem ekonomik hem de çevresel açıdan önem arz etmektedir.

Flokülasyon yöntemi, katı-sıvı ayrımı işleminde oldukça fazla tercih edilen bir yöntemdir [7], bu yöntemin

gerçekleştirildiği endüstriyel ekipmana tikiner denilmektedir [8]. Bu yöntemde, yüksek molekül ağırlıklı organik ve sentetik maddelerin (flokülant) etkisi ile süspansiyon içindeki katı taneler arasında fiziksel bir köprü oluşturularak salkımlaşma meydana getirilmektedir [6,8]. Flokülasyon yöntemi ile oluşan salkımlara flok denilmektedir.

Sentetik polimer flokülantlar, yüklerine göre non-iyonik, anyonik ve katyonik olarak üç grupta değerlendirilmektedir [1]. Non-iyonikler herhangi bir elektrik yükü taşımazlar ve süspansiyonun pH değişiminden etkilenmezler, negatif yük taşıyan anyonik flokülantlar nötr-alkali pH aralığında kullanılırlarken pozitif yüklü katyonik flokülantlar asidik pH aralığında yüksek salkımlaşma eğilimi sergilemektedir. Flokülasyon mekanizması ile ilgili ayrıntılı bilgiye [1 ve 5]'den ulaşmak mümkündür.

Flokülasyon yönteminin uygulanması sırasında flokülant türü ve dozajı, karıştırma hızı ve süresi, ortamın pH'sı, pülpte katı oranı ve tane boyutu gibi parametreler katı-sıvı ayırım performansını etkilemektedir [1,3,9,10,11]. En uygun çalışma parametrelerinin belirlenmesi ile yüksek hızlarda çökeltme ve düşük bulanıklık sağlanabilmekte, atık suyun tesiste geri kullanılabilme olanağını arttırabilmektedir.

Zhang ve diğ. (2020) [4] tarafından yapılan çalışmada Çin-Tibet'te bulunan bakır madeninden alınan atık numunelerinin çökeltme ve reolojik davranışları incelenmiş, bu amaçla Polietilenimine (PEI) türü flokülant kullanılmıştır. PEI türü flokülantın ağır metal iyonları (Cu^{2+} , Pb^{2+} ve Zn^{2+}) üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için farklı dozaj ve molekül ağırlıklarının çökeltme hızı ve viskoziteye etkisi araştırılmıştır. Peng ve Jin (2019) [6] tarafından yapılan çalışmada Çinde faaliyet gösteren bir bakır madeni atık tikiner girişinden alınan numune üzerinde çökeltme ve tesis şartlarının belirlenmesinde poliakrilamid (PAM) tipi anyonik, katyonik ve nonyonik flokülantlar denenmiş, en uygun çökeltme hızı ve berraklık değerlerinin anyonik flokülant ile elde edildiği belirtilmiştir. Castillo ve diğ. (2019) [8] tarafından yapılan çalışmada ise Şili'de bulunan flotasyon yöntemi ile bakırın zenginleştirildiği bir tesisten alınan iri ve ince olarak tanımlanan atıkların çökeltme davranışları incelenmiş, bu amaçla süspansiyon suyunun tuzluluk derecesi (saf su, deniz suyu ve saf su-tuz karışımı) ve flokülant dozajı gibi parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Süspansiyon suyunun tuzluluk oranı artıkça çökeltme hızında belirgin bir azalma meydana geldiği belirtilirken, berraklık oranında da belirgin bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bian ve diğ. (2018) [10] tarafından yapılan çalışmada Çin-Jiangxi bölgesinde faaliyet gösteren bakır maden atıklarının, yeraltı üretim yöntemi uygulanan maden ocağında ayak arkasında dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmış, bu amaçla atıkların susuzlandırılarak istenilen özelliklerin elde edilebilirliği araştırılmıştır. Tikinerlerde gerçekleştirilen bu işlemde, atıkların çökeltme davranışları ve çökeltmeye etki eden faktörler (flokülant tipi, molekül ağırlığı, dozajı, pülpte katı oranı, tarak hızı ve besleme hızı) incelenmiştir.

Özellikle bakır cevherinin flotasyon yöntemi ile zenginleştirildiği tesislerde oluşan atığın, katı-sıvı ayırımı (flokülasyonu) ile ilgili yapılan çalışma sayısı oldukça sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada, daha önce benzer bir çalışmanın yapılmadığı Kastamonu-Hanön'ünde faaliyet gösteren, bakır cevherinin flotasyon yöntemi ile zenginleştirildiği tesiste, atık tikineri girişinden alınan atık numunesi kullanılmıştır. Atık tikinerindeki katı tanelerin çökeltme performansı iyileştirmek amacıyla farklı anyonik flokülantlar ile çeşitli çalışma parametrelerinin (dozaj, PKO ve pH) etkileri incelenmiş, en yüksek çökeltme hızı ve en düşük üst faz bulanıklık oranının elde edilebilmesini sağlayan en uygun çalışma şartları belirlenmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Malzeme

Flokülasyon deneylerinde kullanılan numuneler, Kastamonu-Hanönü'nde faaliyet gösteren bakır zenginleştirme tesisinin atık tikineri girişinden temsili olarak (7 gün boyunca günde 5-6 kg pulp şeklinde) alınmıştır. Katı-sıvı karışımı (%20 PKO) şeklinde alınan numuneler fiziksel, kimyasal ve minerolojik analizler yapılması için önce kurutulmuş,

ardından azaltma yöntemleri uygulanarak, paketlenmiştir. Kimyasal ve minerolojik analizler şirket imkanları ile gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan atık numunesinin genel özellikleri

Özellikler	Değer
Pülpte Katı Oranı (PKO)	%20
Tikiner pH değeri	8-9
Atık numune d80 tane boyutu	0,1 mm
Katı Yoğunluğu	303 gr/cm ³

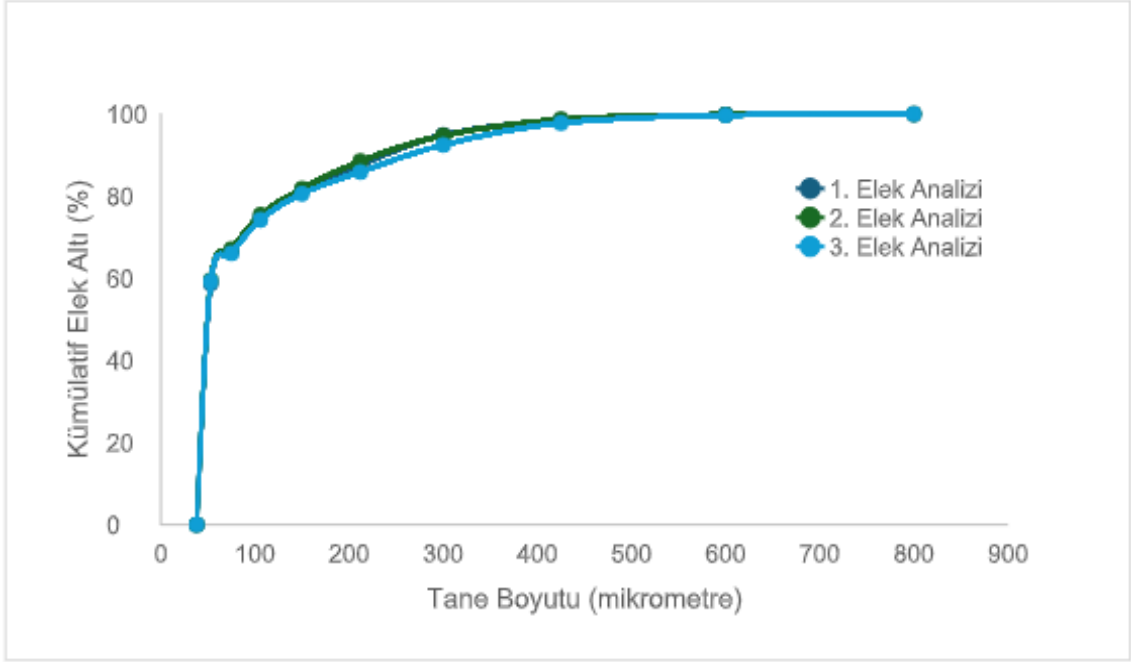
Tablo 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan atık numunesinin kimyasal analiz sonuçları

Özellikler	Değer (%)
FeS ₂	40-45
SiO ₂	20-25
Kloritler	20-25
CaCO ₃	8-10
CuFeS ₂ , ZnS	1-3
Talk, Pirotit	5-10

Tablo 2’den de görüldüğü gibi, flotasyon yöntemi ile zenginleştirilen bakır cevherinin atığı, önemli oranda pirit (FeS₂) ve kuvars (SiO₂) içermekte, ayrıca çeşitli karbonatlı ve sülfürlü yapılar da bulundurmaktadır. Çeşitli minerallerin (pirit, kuvars, galen, kaolin vs.) farklı pH değerlerinde zetapotansiyel ölçüm sonuçları literatürde bulunmakta [1], pirit ve kuvarın yüksek alkali pH (6-13) değerlerinden negatif yüzey yüklerine sahip olduğu belirtilmektedir. Ayrıca atık tikineri girişinden alınan numunenin d80 tane boyutunun 0,1 mm, yoğunluğunun 303 gr/cm³ ve tikiner tesis şartlarındaki pH değerinin 9 civarında olduğu Tablo 1’de verilmektedir.

Flokülasyon deneylerinde, Solenis firması tarafından üretilen Rheomax 1050 DK ve Scidev firması tarafından üretilen MaxiFlox 530 R anyonik özellikte iki farklı flokülant kullanılmıştır. Her iki anyonik flokülantın molekül ağırlığı (orta) ve teknik özellikleri ticari ürünler olduğu için firmalar tarafından paylaşılmamıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan flokülantlar %0,1’lik stok çözelti oluşturulacak şekilde 0,3 gr flokülant ile 300 ml saf su yaklaşık 1,5-2 saat süreyle mekanik karıştırıcı (VELP Scientifica FP4 Portable) (120 rpm) ile karıştırılarak oluşturulmuştur. Çöktürme deneylerinde ortam pH değerini ayarlamak için kireç sütü (Ca(OH)₂) ve H₂SO₄ kullanılmıştır. Ortam pH’ı WTW marka pH 3310 model pH metre ile takip edilmiş, çökelme işlemi sonrasında üst faz bulanıklık ölçümleri ise PCE Instruments marka PCE-TUM 20 model türbidimetre ile gerçekleştirilmiştir.

Daha önceden hazırlanmış 3 adet 100 g’lık numuneler üzerinde elek analizi yöntemi kullanılarak tane boyut dağılımı belirlenmiştir. Tane boyut analizi kapsamında, 600 µm ile 38 µm aralığında değişen standart elekler kullanılarak kuru elek analizi gerçekleştirilmiştir. Eleme işlemi sonucunda her bir elek üzerinde kalan malzeme miktarları tartılarak tane boyut dağılımı hesaplanmış ve elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Elek analizlerine ait sonuçlar Şekil 1’de verilmiştir. Yapılan elek analiz sonuçlarından atık tikiner girişinden alınan numunelerin d80 boyutu 0,11 mm olarak belirlenmiştir. Tesis akım şemasından atık tikinerine hem kaba flotasyon atığının hem de nihai flotasyon atıklarının gelmesi (farklı oranlarda) d80 boyutunun belirtilen boyutlarda çıkmasına neden olmaktadır.



Şekil 1. Bakır atığının tane boyut analizleri

2.2. Yöntem

Atık tikiner girişinden alınan ve kurutulan numune üzerinde önceden belirlenen çalışma şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. İki farklı flokülant (RHOMAX 1050 DK ve MaxiFlox 530 R) ile farklı dozajlarda (1-5 ml), farklı PKO (%15-35) ve farklı pH (7-10) değerlerinde flokülasyon testleri gerçekleştirilmiş, çökelme hızı ve üst faz bulanıklık değerlerindeki değişimler takip edilmiştir. Her bir flokülasyon deneyi, belirtilen katı oranının elde edilebilmesi amacıyla kuru formadaki atık numunesi ile su karıştırılarak elde edilmiş, jar test cihazında homejen bir karışım elde edilene kadar (10 dakika) 200 rpm karıştırma hızında karıştırma işlemi yapılmıştır. Karışıma daha sonra stok flokülant çözeltisinden alınan flokülant ilave edilmiş ve 120 rpm'de 2 dakika karıştırılmıştır. Şekil 2b'deki flokülasyon deney düzeneği ile 5 deney eş zamanlı olarak yapılmış, sıvı-katı ara yüzey yüksekliğinin zamana bağlı olarak değişimi video çekimi ile takip edilmiş, video dökümlerinden elde edilen veriler ile grafikler çizilmiştir. Flokülasyon işlemi tamamlandıktan sonra pipet yardımı ile üst fazdan yeteri kadar su numunesi alınarak türbidimetre ile bulanıklık ölçümleri birkaç defa yapılmış ve ölçüm ortalamaları alınarak kaydedilmiştir. Türbidimetre cihazı ile sıvıların bulanıklık seviyesi ölçülürken, ışığın sıvıdaki parçacıklar tarafından ne kadar saptırıldığı veya soğurulduğu belirlenmektedir, cihazın içine yerleştirilen dedektörler ile, ışığın ne kadarının ölçüm hücresine geri yansıdığı tespit edilmekte ve bu veri kullanılarak bulanıklık seviyesi ölçülmektedir. NTU (Nephelometric Turbidity Unit) bulanıklık birimi olarak kullanılmaktadır. Türbidimetreler, içme suyu arıtma tesislerinde, endüstriyel atık su arıtma tesislerinde, nehir ve göl suyu kalitesi izleme sistemlerinde, ilaç endüstrisinde, gıda endüstrisinde ve çeşitli laboratuvar uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

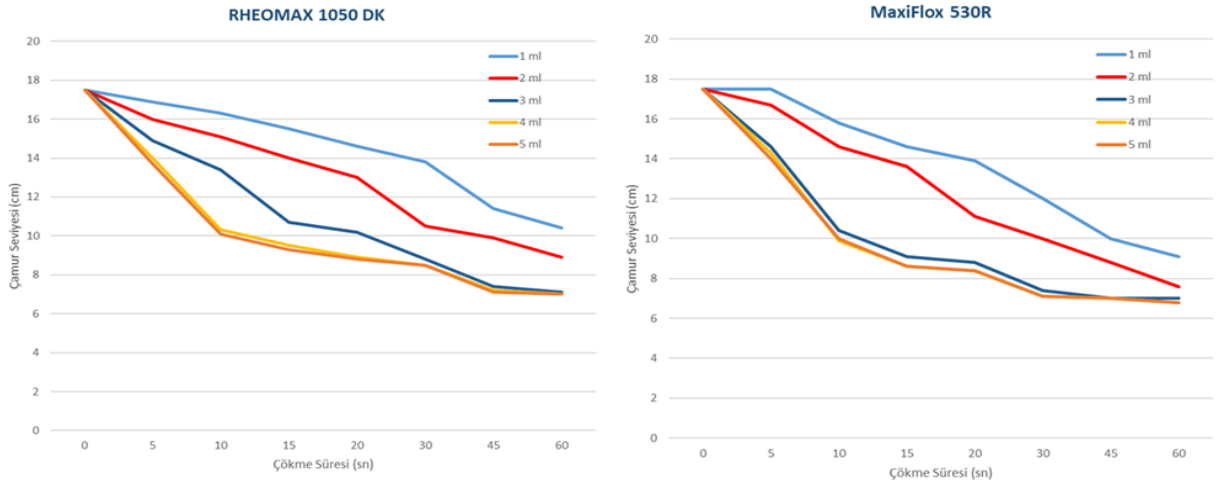


Şekil. 2. (a) Jar test cihazı; (b) Flokülasyon test cihazı.

3. Bulgular

3.1. Flokülant tipi ve Dozajının Etkisi

Flotasyon yöntemi uygulanan bakır zenginleştirme tesisi atık tükener besleme numunesinin flokülasyonu üzerine flokülant dozajının etkisini belirlemek amacıyla anyonik özellikteki RHEOMAX 1050 ve MaxiFlox 530R ile 1-5 ml dozajlarda (8,6-43 gr/t) flokülasyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve çökme hızı ve bulanıklık değerlerindeki değişimler takip edilmiş elde edilen sonuçlar Şekil 3 ve Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil. 3. (a) RHEOMAX 1050 DK (b) MaxiFlox 530 R çökme hızı üzerine etkisi

Tablo 3. Farklı flokülant ve dozajın bulanıklık (NTU) üzerine etkisi

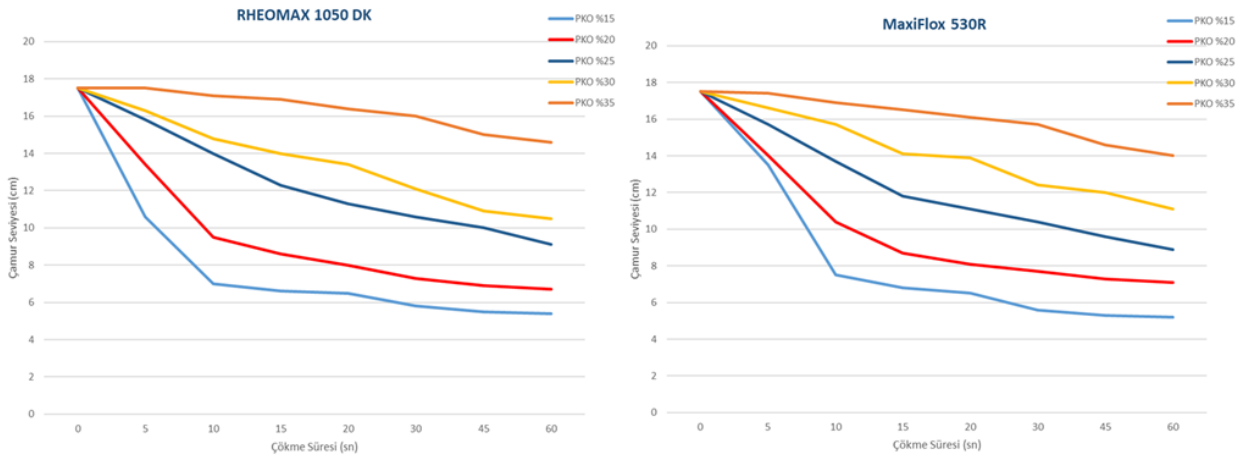
Flokülant tipi/Dozaj (ml)	1	2	3	4	5
RHEOMAX 1050 DK	171.5	100.5	75	67.5	84.5
MaxiFlox 530 R	204	136.5	91.5	95.5	64.5

Flokülant türü ve dozajı çökeltme davranışını etkileyen en önemli çalışma parametrelerinden birisidir [10]. Anyonik flokülantlar uzun hidrokarbon zincirlere sahiptirler, bu zincirler ile katı yüzeylerine tutunarak, taneler arasında köprü oluşturarak floklar meydana getirmektedir. Katı tanelerin yüzeylerine hidrojen bağı ile bağlanarak kararlı haldeki ince tanecikleri, kararsız hale getirmektedirler [9]. Flokülasyon işleminde kullanılması gereken flokülant dozajı, katı taneciklerin yüzey alanlarının yarısını kaplayacak miktar olarak tarif edilmektedir [11]. Süspansiyon içerisinde flokülant miktarının olması gerekenden fazla olması, tanelerin yüzeyinde flokülantların tutunabilmesine sağlayacak boşlukların kalmamasına ve flokülasyonu negatif yönde (sterik engel) etkileyecek durumun oluşmasına neden olmaktadır [11,12].

Şekil 3a ve 3b'de flokülant dozajı arttıkça çökeltme hızının arttığı görülmektedir. RHEOMAX 1050 DK ile yapılan deneylerde (Şekil 3a), 4 ve 5 ml dozajlarda en hızlı çökeltme hızları gözlemlenirken, 1, 2 ve 3 ml dozajlarda çok belirgin farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. 4 ve 5 ml dozajlarda birbirlerine çok yakın sonuçlar elde edilmiş, flokülant sarfiyatı dikkate alındığında 4 ml'lik dozajın en uygun olduğu belirlenmiştir. MaxiFlox ile yapılan deneylerde (Şekil 3b) ise 3, 4 ve 5 ml dozajlarda birbirlerine çok yakın çökeltme hızları elde edilmiş yine flokülant sarfiyatı dikkate alındığında 3 ml'lik dozajın MaxiFlox 530R için en uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca flokülant dozajına bağlı olarak üst faz bulanıklık değerlerinde (Tablo 3) Rheomax 1050 DK ile 4 ml dozajda en düşük bulanıklık değeri olan 67.5 NTU'un elde edilirken, MaxiFlox 530 R ile en düşük bulanıklık değeri 5 ml de 64,5 NTU olarak ölçülmüş fakat en uygun dozaj olarak belirlenen 3 ml dozajda bulanıklık 91.5 NTU olarak ölçülmüştür.

3.2. Pülpte Katı Oranının Etkisi

Atık tükener giriş numunesinin ile flokülant dozajı (3 ml MaxiFlox 530 R ve 4 ml Rheomax 1050 DK) ve pH (9) sabit tutularak farklı katı oranlarında yapılan flokülasyon deneylerinde, çökeltme ve bulanıklığa olan etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4 ve Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Pülpte katı oranının (a) RHEOMAX 1050 DK (b) MaxiFlox 530 R çökeltme hızı üzerine etkisi

Tablo 4. Farklı pülpte katı oranının bulanıklık (NTU) üzerine etkisi

Flokülant tipi/PKO (%)	10	15	20	25	30
RHEOMAX 1050 DK	114	88	58	163	112
MaxiFlox 530 R	162.5	105.5	92	56	122.5

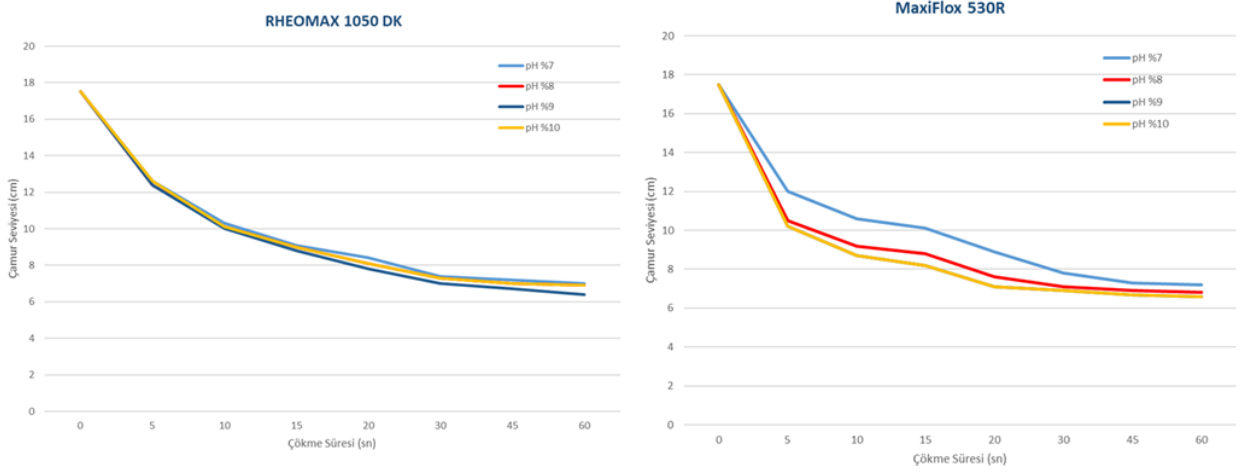
Şekil 4 a ve b incelendiğinde beklentilere uygun olarak pülpte katı oranı azaldıkça çökeltme hızının arttığı görülmektedir. Her iki flokülant için en yüksek çökeltme hızları %15 PKO'da elde edilmiştir. Çökeltme hızları arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Proses koşulları ve tesis kapasitesi dikkate alındığında (Şekil 4a) Rheomax 1050DK flokülant için % 20 PKO'nun en uygun çalışma koşulu olduğu değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, pülpte katı oranına bağlı olarak üst faz bulanıklık değerlerinde belirgin değişimler gözlenmiş, % 25 PKO'da en düşük bulanıklık değeri olan 58 NTU elde edilmiş olmasına rağmen, bir yüksek bulanıklık değeri olan 88 NTU %20 PKO'nda elde edilmiştir.

3 ml dozajda kullanılan MaxiFlox 530R ile yapılan farklı PKO'da yapılan deney sonuçları Şekil 4b'de verilmiştir. Şekil 4b'de görüldüğü gibi PKO'daki artış, çökeltme hızında belirgin azalmaların olmasına neden olmuştur. En yüksek çökeltme hızı yine %15 PKO'da elde edilmiştir. Fakat proses koşulları ve tesis kapasitesi açısından MaxiFlox 530R flokülantı için de %20 PKO'nun en uygun çalışma koşulu olduğu değerlendirilmiştir. %30 PKO'da en düşük bulanıklık değeri olan 56 NTU elde edilirken, %20 PKO'da 105.5 NTU bulanıklık değeri ölçülmüştür.

Katı oranının artması, süspansiyon içinde bulunan taneciklerin hem flokülant hem de kendi aralarında meydana gelecek etkileşim, tanelerin bir araya daha kolay gelmelerini sağlarken, bazı durumlarda kullanılan flokülantın tüm taneciklere yeteri kadar bağ kuramamasına neden olmaktadır, bu nedenle artan katı oranının flokülasyona negatif yönde etki ettiği görülebilmektedir. Ayrıca süspansiyon içinde bulunan çok ince boyutlu tanecikler, flokülüle olamadıkları için bulanıklık değerlerinde de artışların olmasına neden olabilmektedir.

3.3. Ortam pH'nın Etkisi

Ortam pH'sının flokülasyon üzerine etkilerinin belirlenmesi amacıyla flokülant dozajı (3 ml MaxiFlox 530 R ve 4 ml Rheomax 1050 DK) ve PKO (%20) sabit tutularak, 7-10 pH aralıklarda deneyler gerçekleştirilmiş ve farklı pH'larda gerçekleştirilen testlerde belirlenen çamur seviyesinin zamana bağlı değişimleri Şekil 5'te ve türbidite değerleri de Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Ortam pH'nın (a) RHEOMAX 1050 DK (b) MaxiFlox 530 R çökeltme hızı üzerine etkisi

Tablo 5. Ortam pH'nın bulanıklık (NTU) üzerine etkisi

Flokülant tipi/pH	7	8	9	10
RHEOMAX 1050 DK	113	101.5	89	92
MaxiFlox 530 R	114.5	138.5	116.5	117

Çözeltilerin pH değeri, katı taneciklerin kararlılığını etkilemekte buna ilave olarak flokülantların iyonlaşma, hidroliz ve çözeltideki bulunuş şekillerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle çözeltilerin pH düzeyinin kontrol altında tutulması flokülasyon işleminde önem arz etmektedir [9, 13]. Anyonik özellikteki flokülantların yüksek pH değerlerinde (6-13) daha yüksek çökeltme hızı sağladığı bilinmektedir, bu aralığın dışındaki pH değerlerinde flokülantların anyonik grupları iyonize olamamakta, bu nedenle de flokülasyon etkinliği önemli oranda azalmaktadır. Ortam pH'sı katı taneciklerin yüzey yüklerini etkileyen ve belirleyen önemli bir unsurdur [9,12]. Katı taneciklerin yüzeylerinden net bir pozitif veya negatif yükün bulunmadığı pH değeri olan izoelektrik noktada elektriksel çift tabaka ortadan kalkmakta, katı tanecikler arasındaki itme kuvveti ortadan kalkarak taneciklerin bir araya gelmesini sağlayan çekme kuvvetleri etkili olmakta ve tanecikler topaklanmakta, flokülasyon meydana gelmektedir [1].

Şekil 5a'da görüldüğü gibi farklı pH değerlerinde birbirlerine çok yakın çökeltme hızları tespit edilmiştir. Tesis koşulları dikkate alındığında Rheomax 1050DK flokülant için pH 9 değerinin en uygun çalışma koşulu olduğu belirlenmiştir. Tablo 5'te farklı pH değerlerinde üst faz bulanıklık değerlerinde belirgin değişimler olduğu görülmekte, pH 9 ve 10 değerlerinde en düşük bulanıklık değeri olan sırasıyla 89 ve 92 NTU ölçülmüştür.

Şekil 5b'de görüldüğü gibi pH: 8, 9 ve 10 değerlerinde birbirlerine çok yakın çökeltme hızları elde edilmiştir. Bununla birlikte, pH değerine bağlı olarak üst faz bulanıklık değerlerinde de belirgin değişimler gözlenmiştir (Tablo 5). pH 8 ve 9 değerlerinde en düşük bulanıklık değeri elde edilmiş buna paralel olarak proses koşulları açısından MaxiFlox 530R flokülantı için pH 9 aralığının en uygun çalışma koşulu olduğu belirlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Özellikle bakır cevheri zenginleştirme tesislerinde gerçekleştirilen, atıkların susuzlaştırılması konusunda yapılan çalışmalarda anyonik, katyonik ve noniyonik flokülantlar kullanılmış [5,6,8,10], anyonik flokülantların çökeltme hızında ve bulanıklık değerlerinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Anyonik flokülantların kullanılması ile daha iri flokların oluşması ve böylece daha hızlı bir çökeltme hızı elde edilebildiği ifade edilmektedir [14]. Kastamonu-Hanönü bakır flotasyon atıkları ile yapılan çalışmada da anyonik flokülantlar tercih edilmiş ve çökeltme hızı ve bulanıklık değerlerinde önemli oranda iyileşmeler tespit edilmiştir. Anyonik flokülantların olumlu sonuçlar verdiği, bununla beraber artan flokülant dozajının hem çökeltme hızında hem de bulanıklık değerinde pozitif yönlü sonuçlar elde edildiği, ve elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, Kastamonu-Hanönü'nde faaliyet gösteren bakır zenginleştirme tesisi atık tikiner girişinden alınan temsili numunelerin üzerinden anyonik özellik taşıyan farklı firmalar tarafından üretilmiş flokülantların çökeltme davranışlarına etkileri araştırılmış, flokülant tipine ilave olarak flokülant dozajı, pülpte katı oranı ve ortam pH'nın etkileri ortaya konulmuştur.

Çökeltme hızı ve üst faz bulanıklık değerleri dikkate alındığında en uygun flokülant dozajı Maxiflox 530R için 3 ml Rheomax 1050 DK için 4 ml, her iki flokülant için %20 pülpte katı oranı ve 8-9 pH aralığı olduğu tespit edilmiştir. Üst faz berraklık değerlerin açısından değerlendirildiğinde MaxiFlox 530R, çökeltme hızı açısından Rheomax 1050 DK'nın iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Tesiste kullanılan flokülantlar ile bu çalışmada kullanılan flokülantların (Rheomax 1050 DK ve Maxiflox 530R) performansları karşılaştırıldığında, hem çökeltme hızında hem de bulanıklık değerlerinde belirgin iyileşmeler olduğu tespit edilmiştir.

Tikinerlerde yüksek kapasite ile katı taneciklerin çöktürülmesi ve üst faz bulanıklığın en düşük seviyeye indirilmesi amacıyla yapılan flokülant seçimlerinde, farklı flokülantlardan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, herbir flokülantın olumlu yanları dikkate alınarak atık numunesine özel bir flokülantın sentezlenmesi veya farklı flokülantların bir arada kullanılması, çökeltme performansını maksimize edebilecek iken maliyetlerin minimize edilmesine olanak sağlayabilecektir.

Yazar Katkı Oranları

Yasin ÇINAROĞLU: Araştırma, İnceleme, Deneysel Çalışmalar

Uğur DEMİR: Araştırma, İnceleme, Yazma, Düzenleme, Yorumlama

Teşekkür

Makalenin yazarları olarak, bu çalışmanın hazırlanması sürecinde teşekkür gerektiren herhangi bir kişi, kurum veya kuruluşun bulunmadığını beyan ederiz.

Kaynaklar

- [1] Özün S., (2020). Madencilikte atıksu yönetimi ve katı-sıvı ayrımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, vol:8(4), 1278-1289, DOI: 10.21923/jesd.828077
- [2] İpekoğlu Ü., (1997) Susuzlandırma ve Yöntemleri, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, 113 s. İzmir
- [3] Öteyka B., Yamık A., Uçar A., Şahbaz O., Yılmaz B., (2005) Seyitömer kollarının çökeltme davranışları, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET 2005, sy:297-303, İzmir, Türkiye
- [4] Zhang W., Sun C., Kou J., Xing Y., Gong D., Li S., Su M., (2020) The influence of polyethyleneimine dosages anf molecular weight on sedimentation and rheology behavior of copper tailings, Journal of Dispersion Science and Technology, vol:41, no:9, 1390-1400, doi.org/10.1080/01932691.2019.1623692
- [5] Amarjargal B., (2019) Bir bakır flotasyon atığının karakterizasyonu ve optimum susuzlandırma koşullarının belirlenmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi

- [6] Peng Y., Jin D., (2019) Screening tests of copper mine tailings flocculation with polyacrylamide, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 371, 042004, CCESEM 2019, doi:10.1088/1755-1315/371/4/042004
- [7] Sabah E., Cengiz İ., (2004) Poliakrilamidlerin iyonik grupların kömür hazırlama tesisi atıklarının çökeltme davranışına etkisi, Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, sy: 133-140, Zonguldak, Türkiye
- [8] Castillo C., Ihle C. F., Jeldres R. I., (2019) Chemometric optimisation of a copper sulphide tailings flocculation process in the presence of clays, Minerals, vol:9, 582, doi:10.3390/min9100582
- [9] Çiftçi H., Işık S., (2016) İnce boyutlu lavvar tesisi atıklarının anyonik flokülantlar ile susuzlandırılmasında çeşitli parametrelerin etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol: 16, 391-398, DOI: 10.5578/fmbd.28089
- [10] Bian J., Wang H., Xiao C., Zhang D., (2018) An experimental study on the flocculating settling of unclassified tailings, PLoS ONE, vol: 13 (9): e0201230. doi.org/10.1371/journal.pone.0204230
- [11] Çiftçi H., Işık S., (2017) Farklı anyonik, katyonik ve noniyonik flokülantların ince boyutlu lavvar tesisi atıklarının çökeltme davranışlarına etkileri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, cilt:21, sayı:1 13-19, DOI: 10.19113/sdufbed.06579
- [12] Ersoy B., (2003) Mermer işleme tesisi atık su arıtımında kullanılan flokülantların tanımı, *Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (MERSEM'2003)*, Afyonkarahisar, Türkiye, Haziran 2003, sy:449-462
- [13] Cengiz İ., Sabah E., Erkan Z. E., (2004) Geleneksel ve UMA (unique molecular architecture) teknolojisi polimerlerin flokülasyon performansı üzerine bir araştırma, *Madencilik*, vol:43(1), 15-23
- [14] Peng F. F., Lu Z. (1998) Polymer flocculation and coagulation for sedimentation of copper flotation tailings, *Mining, Metallurgy & Exploration*, doi.org/10.1007/bf03402781, Volume 15, pages 14–20