

ATIK SU ARITIMINDA MANYETİK AYIRMA YÖNTEMİ; MANYETİK AŞILAMA TEKNİĞİ KULLANILARAK FOSFATIN ATIK SULARDAN UZAKLAŞTIRILMASI

Magnetic Separation Method in Wastewater Treatment; Removal of Phosphate from Wastewater Using Magnetic Seeding Technique

NiirayKARAPINAR"

ÖZET

Bu çalışmada, manyetik aşılama tekniği kullanılarak atık sulardan fosfatın uzaklaştırılmasında manyetik ayırma yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. 0,645 mmol P derişiminde, başlangıç Ca/P mol oranı hidroksiapatitin (HAP) teorik mol oranının katları, 1,67, 3,34 ve 5,01 olan çözeltiler kullanılmıştır. Manyetit minerali içeren çözeltilerde kalsiyum fosfat çökeleği oluşurru geniş bir pH aralığında incelenmiştir. pH'nın gerek toplam çökelek oluşumunu gerekse bunun manyetit minerali yüzeylerinde gerçekleşen oranını etkilediği tespit edilmiştir. pH'nın bu etkisi, temelde, çözeltilerin doygunluk derecesini belirleyen önemli parametre olmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim, doygunluk indeksi (SI) ile, manyetik olarak uzaklaştırılan fosfat oranı arasında 2. dereceden polinom bir ilişki olduğu bulunmuş, aşırı doymun çözeltilerde homojen çekirdeklenme kaçınılmaz olduğundan, toplam kalsiyum fosfat çökeleği miktarı artmasına rağmen, bunun manyetit tarafından uzaklaştırılan oranının azaldığı saptanmıştır. En iyi koşulda, manyetik ayırma yöntemi ile fosfatın yaklaşık %70'i uzaklaştırılabilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Manyetik Ayırma, Atık Su, Manyetik Aşılama, Fosfat Uzaklaştırılması

ABSTRACT

In this study, the applicability of magnetic separation method to the removal of phosphorous from wastewater using magnetic seeding technique was investigated. The solutions having an initial concentration of 0,645 mmol/l phosphorus and Ca/P molar ratios of 1,67, 3,34, and 5,01, which is equal to times of stichiometric calcium to phosphorous molar ratio of hydroxapatite (HAP) were used. Precipitation of calcium phosphate from solutions containing magnetite mineral was investigated at a wide pH range. It was concluded that the pH is a main parameter, which effects both total precipitation and the ratio of phosphate removed by magnetite to total precipitation. This effect of pH is-mainly a result of its contribution to the saturation conditions of solutions. Hence, a 2nd order polynomial function between SI of solution and the ratio of phosphate removed by magnetite to total precipitation was obtained. Since homogenous nucleation is unavoidable under the oversaturated solutions, -there is a decrease in the ratio of phosphate removed by magnetite to total precipitation although total precipitation was increased. At the best condition, 70% of phosphate was removed by magnetic separation method.

Keywords: Magnetic Separation, Wastewater, Magnetic Seeding, Phosphate Elimfhation

1. GİRİŞ

Manyetik ayırma, ayrımı yapılacak malzemeler arasındaki manyetik alınganlık farkına dayalı olarak gerçekleştirilen bir ayırma yöntemi olup cevher zenginleştirme ve geri kazanım endüstrisinde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Manyetik ayırma yönteminin bu alanlarda etkin kullanımı, özellikle 1970'li yıllarda yüksek alan şiddetli, yüksel alan gradyanlı yaş manyetik ayırıcıların (HGMS) endüstriye girişi, atık su arıtımında da kullanımını teşvik etmiştir. Aslında, sadece manyetik ayırma yöntemi değil, cevher zenginleştirme yöntemlerinin hemen hepsi çevre problemleri ile ilgili birçok alanda çözüm önerileri sunmaktadır. Manyetik ayırma yönteminin, atık sulardaki fosforun uzaklaştırılması ve geri kazanımında kullanımı da bu çözüm önerilerine bir örnek teşkil etmektedir.

Fosfor, yaşayan organizmalar için temel besin maddelerinden birisi olup, hem tarımsal hem de endüstriyel gelişmeye temel katkısı olan önemli bir elementtir. Toprakta diğer elementlerle birlikte fosfat olarak bulunur ve fosfat kayası temel fosfor kaynağını oluşturur. Ancak, ötrifikasyona yol açması nedeniyle, fosforun, gerek tarımsal faaliyetler sonucu gerekse atık sulardan yüzey sularına girişine yasal sınırlamalar getirilmesi gereği ortaya çıkmış bu da evsel ve endüstriyel atık sulardan fosforun uzaklaştırılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu doğrultuda, Avrupa Birliği Komisyonu, 1991 yılında "Şehir Atık Suları Arıtım Kararnamesi"ni (Urban Wastewater Treatment Directive (UWWT) 91/271)" yürürlüğe koymuştur. Bu kararname ile hassas su alanlarına boşaltılacak belediye atık sularındaki tüm fosforun %75-80'inin uzaklaştırılması zorunlu hale getirilmiştir.

Sürdürülebilir kalkınma temelinde kaynakların devamlılığının sağlanması ve çevresel yönetime olan talep endüstriyel fosfor kontrolünü hedefleyen konvansiyonel fosfat uzaklaştırılması tekniklerine alternatiflerin geliştirilmesine yönelmiştir. Geliştirilen teknolojiler aynı zamanda fosforun geri kazanımı imkanlarını da sunmaktadır.

Fosforun uzaklaştırılması ve geri kazanımına yönelik geliştirilen bir çok teknoloji, laboratuvar, pilot ve tam ölçek uygulamaları içeren oldukça fazla miktarda çalışmalara rağmen henüz yaygın olarak uygulama alanı bulamamıştır (Brett et al, 1997). Fosfatın manyetik ayırma yöntemi ile uzaklaştırılması ve geri kazanımı mevcut yöntemler arasında yeni ve pek fazla bilinmeyen yöntem olarak yer almaktadır.

Manyetik ayırma yönteminin atık sulardaki fosforun uzaklaştırılmasına yönelik ilk çalışmalar 1970'li yıllarda De Latour ve arkadaşları (De Latour 1973; Bitton vd., 1973; De Latour ve Kolm, 1975; De Latour, 1976) tarafından yapılmıştır. Daha sonraki çalışmalara 1990'lı yıllarda rastlanmaktadır. Ancak, manyetik fosfat uzaklaştırılmasının ilk endüstriyel ölçekte uygulaması, bir Hollanda firması olan Smit Nymegen tarafından rapor edilmektedir (Van Valsen vd., 1991). Bu çalışma, özellikle atık su arıtımı için uygun bir yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcıların geliştirilmesini (Aquamag) içermektedir. Son yıllardaki bu alanda teknik ölçekteki çalışmalar, Almanya'da bir araştırma merkezinde (The Institute for Technical Chemistry of the Forshungzentrum Karlsruhe) yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar atık su arıtımında kullanılacak, sabit miktatsız manyetik ayırıcıların geliştirilmesini ve bunun atık sulardan fosfatın uzaklaştırılmasında kullanımını içermektedir (Franzreb vd., 1998; Franzreb, 2001).

Manyetik fosfat uzaklaştırılması, gerek kimyasal gerekse cevher olarak hazırlanan ve kuvvetli manyetik özellik taşıyan aşı malzemesinin kullanımını gerektirir. Manyetit minerali, kuvvetli manyetik özelliği ve uygunluğu nedeniyle en yaygın kullanılan manyetik aşı malzemesidir. Fosfatın manyetik olarak uzaklaştırılması, oluşan fosfat çöktürücülerin, manyetik aşı malzemesi ile aşılması, bir başka deyişle fosfatın aşı malzemesi üzerine yüklenmesi temeline dayanır. Ayırmanın başarısı, aşılama işleminin etkinliğine bağlıdır. Burada sunulan çalışmada da, manyetit tarafından aşılınmış sularda, fosforun kalsiyum fosfat olarak çökmesi ve aşı malzemesi üzerine yüklenmesi incelenmiş, etkili mekanizmaların ve optimum koşulların belirlenmesi hedeflenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Kalsiyum ve fosfor çözeltilerinin hazırlanmasında, analitik saflıkta kimyasallar ve de-iyonize su (0,7 mikrosiemens/cm) kullanılmıştır. Deneyler 20 ±0,5 °C'de yapılmıştır.

Aşı malzemesi olarak, Türkiye Demir ve Çelik işletmelerinden (Divriği konsantratörü) sağlanan manyetit minerali kullanılmıştır. Manyetit numunesi, olası safsızlıkların uzaklaştırılması için, düşük alan şiddetli çapraz bantlı manyetik ayırıcıda temizleme işlemine tabi tutulmuş, süspansiyon içinde daha iyi karışım ve homojen

dağılımını sağlamak ve de daha büyük yüzey alanı oluşturmak amacıyla halkalı değirmende öğütülerek, ortalama tane boyu 13um olan manyetik aşı malzemesi olarak hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılmadan önce, manyetit, seyreltik HNO₃ çözeltisinde yıkanmış, saf su ile iyice temizlendikten sonra 105 °C'de kurutulmuş ve de kalıcı miknatıslanmanın yok edilmesi/en aza indirilmesi için de-magnetize edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan manyetit numunesinin, XRF yöntemi ile belirlenen kimyasal bileşimi; toplam Fe %67,7 ve SiO₂ %1,37, özgül yüzey alanı (BET yöntemi) ise 2,0 m²/g olarak tespit edilmiştir.

Çökelek oluşturma deneyleri, karıştırma işleminin mekanik karıştırıcı ile sağlandığı, 2,0 litre hacimli pyreks kap içinde yapılmış, 0,645 mmol/l P derişiminde ve başlangıç Ca/P mol oranları hidroksiapatitin (HAP) teorik mol oranının katları, 1,67, 3,34 ve 5,01 olacak şekilde çözeltiler kullanılmıştır. KNO₃ ilavesi ile iyonik şiddet 0,01 M olarak sabit tutulmuştur. Manyetit minerali içeren deney kabına sırasıyla; KNO₃ (katı halde), potasyum ve kalsiyum çözeltileri ilave edilmiş, sodyum hidroksit ilavesi ile pH istenilen değere ayarlanmıştır. Sodyum hidroksit ilavesi, heterojen çekirdek oluşumunu (heterogeneous nucleation) artırmak için yavaş yapılmıştır. Kullanılan manyetik aşı miktarı tüm deneyler için sabit olup, 1,0 g/l'dir.

Sistem istenilen pH değerine ayarlandıktan sonra, belirlenen reaksiyon süresi boyunca belirli aralıklarla yaklaşık 15 ml'lik 2'şer numune alınmış (manyetik aşının kullanıldığı deneyler için), bunlardan biri mem bran filtre kullanılarak filtre edilmiş (0,45 um göz açıklığı; Sartorius AG), ikinci numune ise, 0,5 Tesla'lık manyetik alana sahip el miknatısı ile manyetik ayırmaya tabi tutulmuştur. Hem filtre süzütüsü hem de manyetik ayırma sonrası elde edilen manyetik olmayan fraksiyonun, kalsiyum ve fosfor analizi yapılmıştır. İki örnek arasındaki fark, kalsiyum fosfatın manyetit minerali yüzeyinde gerçekleşen çökelek oluşum etkinliğinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Manyetik aşı malzemesinin kullanılmadığı deneylerde ise, belirlenen aralıklarla tek bir numune alınıp, filtre edildikten sonra ilgili analizler yapılmıştır.

Çözeltinin HAP'göre doygunluk indeksi (SI) çökelek oluşumunu belirleyen çalışma parametresi olarak değerlendirilmiş ve PHREEQC Version 2 bilgisayar programı, kullanılan çözeltilerin HAP'ye göre doygunluk indekslerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Hesaplama kullanılan denge sabitleri Song,Hahn ve Hoffman'dan (2002) alınmıştır.

Kalsiyum ve fosfor analizinde kompleks oluşum yöntemi kullanılmış, kalsiyum, titrasyon ile fosfor ise 700 nanometrede 2 UVA/IS lamba kullanılarak spektrometre ile (molybdenum heteropolyphosphate complex method) tayin edilmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR

3.1 Manyetit minerali varlığında kalsiyum fosfat çökeleği oluşumu

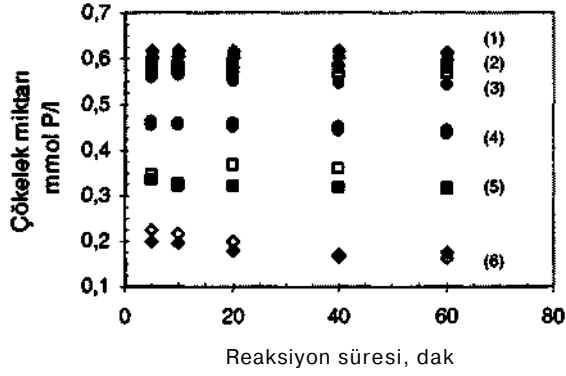
Manyetit mineralinin kalsiyum fosfat çökeleği oluşumuna etkisi, manyetit minerali içeren ve içermeyen çözeltilerle incelenmiş ve sonuçlar Şekil 1'de verilmiştir. Deneylerde başlangıç P derişimi= 0,645 mmol/l, başlangıç Ca/P mol oranı ve pH= (1) 5,01; 10,0 (2) 3,34; 9,5 (3) 5,01; 8,5 (4) 3,34; 8,5 (5) 1,67; 9,0 (6) 1,67; 8,5'dur.

Sonuçlardan, manyetit varlığının kalsiyum fosfat çökeleği oluşumuna önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Bu deneylerden sonra, manyetit minerali varlığının kalsiyum fosfat çökeleği miktarına etkisi incelenmemiş, deneysel çalışma, çözeltide gerçekleşen toplam çökelek oluşumunun hangi etkinlikte manyetit minerali yüzeylerinde gerçekleştiği konusu üzerine yoğunlaştırılmıştır.

3.2. Kalsiyum fosfatın manyetik olarak uzaklaştırılması

Şimdiye kadar yapılan bir çok çalışmada, kum, kalsit ve hidroksiapatit gibi bir çok kalsiyum fosfat kristalleri aşı malzemesi olarak kullanılmış ve çökelek oluşum miktarı ve kinetiğine etkisi incelenmiştir. Manyetit mineralinin aşı malzemesi olarak kullanımının avantajı, manyetik alınganlığından dolayı çözeltiden kolaylıkla uzaklaştırabilmesi ve fosfatın aşı malzemesi yüzeyine yüklenmesi etkinliğinin kolayca belirlenebilmesidir. Manyetit minerali varlığında kalsiyum fosfat çökeleği oluşumu, geniş bir pH aralığında incelenmiştir. Şekil 2'de manyetit içeren çözeltilerde, kalsiyum fosfat çökeleği oluşumunun pH'ya bağlı değişimi, üç farklı kalsiyum derişimi için verilmiştir. Şekil 2'de hem toplam çökelek oluşumu, hem de manyetit mineralleri yüzeyinde gerçekleşen çökelek oluşumu değerleri görülmektedir.



Şekil 1. Manyetit minerali varlığının kalsiyum fosfat çökeleği oluşumuna etkisi, (içi dolu karakterler 1 g/l manyetit minerali içeren deney sonuçlarıdır)

pH'ya bağlı manyetit tarafından uzaklaştırılan fosfat miktarı artarken, çözeltideki toplam kalsiyum fosfat çökeleği oluşumuna göre bunun manyetit tarafından uzaklaştırılan yüzdesinin azaldığı görülmektedir. Manyetit ayırma yöntemi ile fosfatın yaklaşık %70'i uzaklaştırılabilmektedir (Şekil 3).

Kalsiyum fosfatın manyetik olarak uzaklaştırılması sonrasında manyetik olmayan kısımda kalan fosfat miktarı da Şekil 4'de verilmiştir.

Fosfatın manyetik ayırma yöntemi ile uzaklaştırılmasıyla, temizlenen atık suyun fosfor derişimini en iyi şartlarda 6 ppm'e düşürülmüştür.

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Manyetit minerali varlığının çökelek oluşumuna etkisi

Kalsiyum fosfat çökeleği oluşumuna, manyetit mineralinin olumlu ya da olumsuz önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür (Şekil 1)

Çökelek oluşumu reaksiyonunu başlatacak termodinamik itici kuvvet Gibbs serbest enerjisi, AG' dir ve

$$AG = -(RT/n) \ln (IAP/K_{sp}) \quad (1)$$

Eşitliği ile ifade edilir. Burada, R ideal gaz sabiti, T sıcaklık, IAP iyon aktiflik çarpımı, K_{sp} de çözünürlük çarpımıdır. $AG < 0$, olması durumunda, reaksiyon süreklidir, $AG = 0$ ve $AG > 0$ olması durumlarında ise sırasıyla çözelti

dengede ve reaksiyon mümkün değildir. Çözeltinin katı faza göre doygunluk indeksi, SI, ise çözeltide çökelek oluşum koşullarını ifade eden bir başka araç olup,

$$SI = \log(IAP/K_{sp}) \quad (2)$$

olarak tanımlanır. $SI > 0$ olması durumunda çözelti aşırı doygun ve çökelek oluşumu gerçekleşir.

Bu çalışmada çözeltinin, hidroksiapatite göre hesaplanan doygunluk indeksi çökelek oluşumunu belirleyen termodinamik itici kuvvet olarak değerlendirilmiştir. Şekil 5'de pH ve kalsiyum derişimine bağlı hesaplanmış, çözeltilerin doygunluk indeksi değerleri verilmiştir.

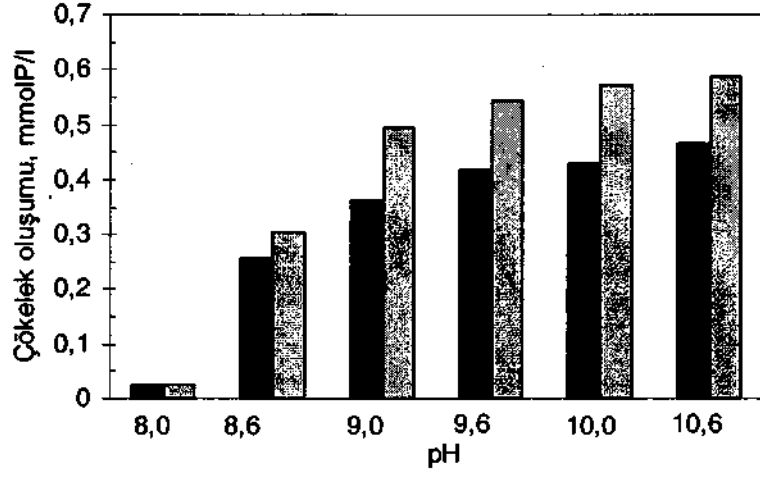
Aşırı doymun çözeltilerin ($SI > 14$) kullanıldığı bu çalışmada, çökelek oluşumu çok hızlı gelişmiş ve ilk 5. dakikadan sonra çökelek oluşum miktarında önemli bir değişim olmamıştır (Şekil 1).

Çökelek oluşumu reaksiyonlarında, aşırı malzemesinin varlığı, reaksiyonun başlaması için gerekli süreyi (induction time) azaltır, kritik doygunluk derişimini düşürerek daha düşük aşırı doymun çözeltilerde çökelek oluşumunun gerçekleşmesini sağlar (De Rooij vd, 1984; Dutrizac, 1996). Dolayısıyla daha düşük doygunluk derecelerinde aşırı malzemesinin etkisini görmek mümkün olacaktır. Nitekim, bu çalışmanın devamında doygunluk derecesi daha düşük çözeltilerde ($SI \approx 11$) çökelek oluşumu reaksiyonu yavaş gelişirken, manyetit mineralinin az da olsa olumlu etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Karapınar vd., 2003).

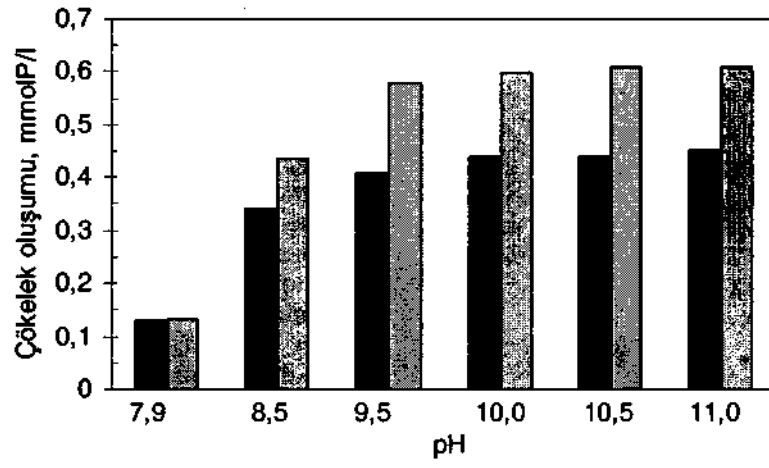
Bu çalışmada manyetit mineralinin kullanılması, çökelek oluşum etkinliğini artırmaktan çok, fosfatın, manyetik ayırma yöntemi ile uzaklaştırılmasını sağlayarak, çökelek oluşumunun manyetit minerali yüzeyinde gerçekleşmesi içindir. Tabii ki birinci durumun da sağlanması tercih edilir.

4.2. Fosfatın manyetik ayırma yöntemi ile uzaklaştırılması

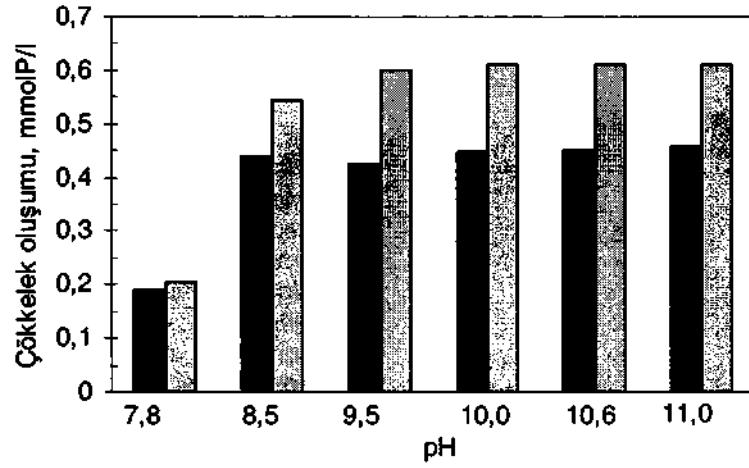
Kalsiyum fosfatın manyetik ayırma yöntemi ile uzaklaştırılması etkinliği, çökelek oluşumunun hangi oranda manyetit mineralleri yüzeyinde gerçekleştirilebildiğine bağlıdır. Deneysel sonuçlar bu oranın, çökelek oluşumunun gerçekleştirildiği pH değerine bağlı olduğunu ve pH'nın artışı ile azaldığını göstermiştir (Şekil 3).



(b)

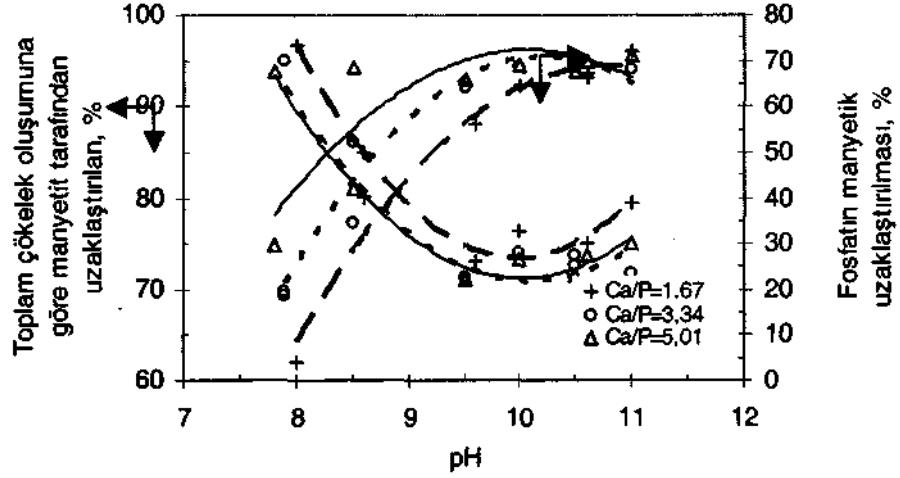


(c)



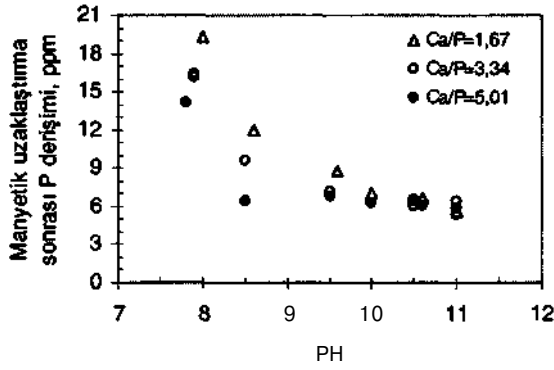
■ manyetit minerali yüzeyinde □ toplam

Şekil 2. pH'ya bağlı gerçekleşen kalsiyum fosfat çökeleği oluşumu, başlangıç P derişimi = 0,645 mmol/l, başlangıç Ca/P mol oranı (a) 1,67; (b) 3,34; (c) 5,01



Şekil 3. Kalsiyum fosfatın pH'ya bağlı manyetik olarak uzaklaştırılması

(a)

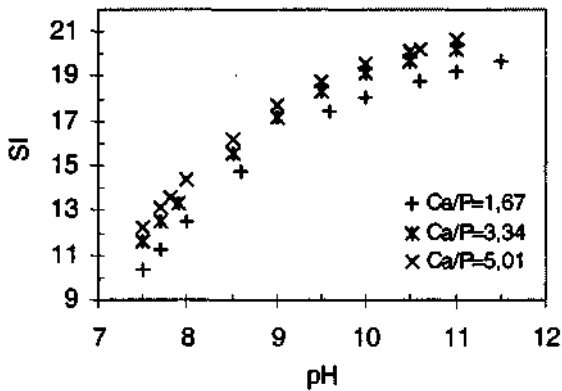


Şekil 4. Manyetik uzaklaştırma sonrası çözeltide kalan fosfat miktarı başlangıç P derişimi = 0,645 mmol/l)

Bilindiği gibi fosforun kalsiyum ile çökelek oluşumu, alkali tüketen bir reaksiyondur ve pH, çökelek oluşumu ve de çözeltisinin katı faza göre doygunluk indeksini belirleyen önemli bir parametredir. Dolayısıyla pH'nın fosfatın manyetik uzaklaştırılmasına etkisi, temelde, pH'nın çözeltinin doygunluk derecesine etkisi içinde değerlendirilmelidir.

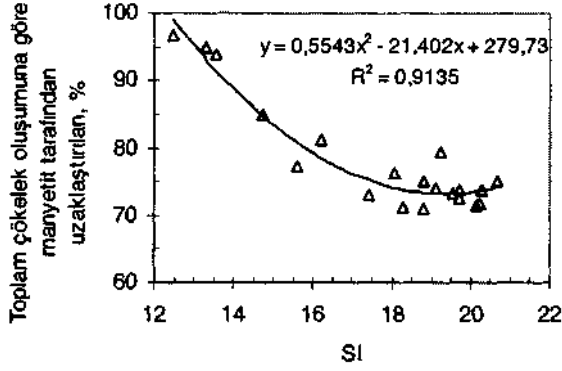
Şekil 6'da toplam çökelek oluşumunun manyetit minerali tarafından uzaklaştırılan oranının çözeltinin doygunluk indeksine göre değişimi görülmektedir.

Şekilden anlaşılacağı gibi, çözeltinin HAP'e göre doygunluk derecesi arttıkça, manyetit minerali tarafından uzaklaştırılan oranı azalmaktadır.



Şekil 5. Doymuluk indeksi (SI) değerleri (HAP'e göre)

Çökelek oluşumu temelde 3 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar; çekirdek oluşumu (nucleation), çekirdeğin makroskobik boyutlara büyümesi (growth) ve katıların aglomerasyonu ve olgunlaşmasıdır (Stumm ve Morgan, 1996). Çözeltilerde çekirdek, çökeleği oluşturan iyonlardan oluşuyorsa buna homojen çekirdeklenme, yabancı bir taneden oluşuyorsa buna da heterojen çekirdeklenme adı verilir. Çözeltide daha fazla çökelek oluşumu, ek çekirdek oluşumu ya da ortamda bulunan çekirdekler üzerine katıların birikmesi ile sağlanır. Eğer birincisi baskın gelirse, çok sayıda küçük taneler içeren bir çökelek elde edilir; eğer büyüme baskın olursa az sayıda daha büyük tanecikler elde edilecektir.



Şekil 6. Toplam çökelek oluşumuna göre manyetit tarafından uzaklaştırılan oranının doygunluk indeksine (SI) bağlı (HAP'ye göre) değişimi (başlangıç P derişimi = 0,645 mmol/l, veriler incelenen tüm Ca/P mol oranları içindir)

Fosfatın manyetik olarak uzaklaştırılmasını heterojen çekirdeklenme ve büyüme sağlayacaktır.

Şekil 6'ya göre, daha düşük doygunluk indeksine sahip çözeltilerde, oluşan kalsiyum fosfatın tamamına yakını manyetit tarafından uzaklaştırılmıştır. Çözeltinin doygunluk derecesi arttıkça, manyetit tarafından uzaklaştırılan oran azalma eğilimi göstermiştir. Bu durum, aşırı doygunluk derecesinin daha küçük olduğu çözeltilerde çekirdek oluşumunun aşı malzemesi üzerinde (heterojen çekirdeklenme) gerçekleştiğini, çözeltinin doygunluk derecesi arttıkça, homojen ve heterojen çekirdeklenme arasında yarış başladığını ve çözelti içinde çekirdek oluşumunun (homojen çekirdeklenme) kaçınılmaz hale geldiğini göstermektedir. Ayrıca çekirdek oluşum hızının, bağıl aşırı doygunlukla üstsel olarak attığı, tane büyümesi'nin ise bu parametre ile arasında yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki olduğu kabul edilmektedir (Skoog ve West, 1976). Aşırı doygunluğun büyük olduğu çözeltilerde çekirdek oluşumu tane büyümesine üstün gelmekte ve sonuçta homojen çekirdek oluşum etkinliği artarak, fosfatın manyetik olarak uzaklaştırılma etkinliği azalmaktadır.

SONUÇ

Atık sulardan fosfatın manyetik ayırma yöntemi ile uzaklaştırılması, manyetik aşılama tekniği kullanıldığında gerçekleştirilebilir. Çözelti

pH'sinin gerek çökelek oluşumunda gerekse bunun manyetik olarak uzaklaştırılmasında önemli bir parametre olduğu, pH'nın bu etkisinin temelde, çözeltinin, çökelek oluşumu gerçekleştirilecek katı faza göre doygunluk derecesini belirleyen önemli parametre olmasından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Doygunluk indeksi (SI) ile, çözeltide oluşan çökelek miktarının manyetik olarak uzaklaştırılan oranı arasında 2. dereceden polinom bir ilişki olduğu bulunmuş, aşırı doygun çözeltilerde, homojen çekirdeklenme kaçınılmaz olduğundan, toplam kalsiyum fosfat çökeleği miktarı artmasına karşın, bunun manyetit tarafından uzaklaştırılan oranının azaldığı tespit edilmiştir. Fosfatın manyetik olarak uzaklaştırılmasını sağlayacak heterojen çekirdeklenme ve büyüme daha düşük aşırı doygunluk derecelerinde gerçekleşmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Bursları (NATO-B1) Programı çerçevesinde desteklenmiştir. Yazar bu katkıdan dolayı TÜBİTAK'A teşekkür eder. Yazar ayrıca, bu çalışmaya imkan sağlayan Prof. Dr. Hermann H. Hahn (Institute for Aquatic Environmental Eng., Univ. Karlsruhe, Karlsruhe, Germany) ve Dip. Ing. Erhard Hoffmann'a (Institute for Aquatic Environmental Eng., Univ. Karlsruhe, Karlsruhe, Germany) ve SI değerlerinin hesaplanmasında yardımlarından dolayı Dr. Y. Song'a (Institute for Technical Chemistry of the Karlsruhe Research Center, Water Technology and Water Chemistry Department, Karlsruhe, Germany) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Bitton, G. Mitchell, R., De Latour, C, Maxwell, E., 1973, "Phosphate Removal by Magnetic Filtration", Water Research, Cilt 8, s.107-109.

Brett, S., Guy, J., Morse, G.K., and Lester, J.N., 1997, "Phosphorous Removal and Recovery Technologies", Selper Publications, London, UK.

De Latour, C, 1973, "Magnetic Separation in Water Pollution Control", IEEE Transactions on Magnetics, Mag-9, Cilt 3, s. 314-316.

De Latour C, 1976, "High-gradient "Magnetic Separation- a Water Treatment Alternative", J. Am. Water Works Assoc. Cilt AWWA 68, s. 325-327.

De Latour C. and Kolm, H., 1975, "Magnetic Separation in Water Pollution Control II", IEEE Trans. Magnetics, Cilt Mag-11, Sayı 5, s.1570-1572.

De Rooij J. F., Heughebaert, J. C. and Nancollas G. H., 1984, "A pH Study of Calcium Phosphate Seeded Precipitation", Journal of Colloid and Interface Science, Cilt 100, Sayı 2, s.350-358.

Dutrizac J. E., 1996, "The Effect of Seeding on the Rate of Precipitation of Ammonium Jarosite and Sodium Jarosite", Hydrometallurgy, Cilt 42, s.293-312.

Franzreb, M., 2001, "New Design of High Gradient Magnetic Separators Using Permanent Magnets", 6 World Congress of Chemical Engineering, Melbourne, Australia, 23-27 sept.2001.

Franzreb, M., Kampeis, P., Franz, M., and Eberle, S.H., 1998, "Use of Magnet Technology for Phosphate Elimination from Municipal Sewage", Acta Hydrochimica et Hydrobiologica, Cilt 26, Sayı 4, s.213-217.

Karapınar N., Hoffmann E., Hahn H. H., 2003, Magnetic Seeded Precipitation of Phosphate, yayımlanmamış.

Skoog D. A. ve West D. M., 1976, "Fundamentals of Analytical Chemistry", 3rd edition, Çeviri, H.Ü. Mühendislik Fak. Ders Teksirleri No: 11.

Song, Y., Hahn, H. H., Hoffmann, E., 2002, "Effects of Solution Conditions on the Precipitation of Phosphate for the Recovery: A Thermodynamic Evaluation", Chemosphere, Cilt 48, Sayı 10, s.1029-1034

Stumm, W. and Morgan, J.J., 1996, "Aquatic Chemistry", 3rd ed. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Van Valsen, A.F.M., Van der Vos, G., Boersma, R., and de Reuver J.L, 1991, "High Gradient Magnetic Separation Technique for Wastewater Treatment", Water Sei. Technol., Cilt 24, s.195-203.