



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 11.12.2020
Kabul Tarihi : 31.05.2021

Received Date : 11.12.2020
Accepted Date : 31.05.2021

KENTSEL NİTELİKLİ ANAEROBİK ÇÜRÜTÜLMÜŞ ÇAMURDAN KİREÇ İLE FOSFOR GERİ KAZANIMINDA pH ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF pH EFFECT ON PHOSPHORUS RECOVERY WITH LIME FROM ANAEROBIC DIGESTED SEWAGE SLUDGE

*İsmail Yiğit SEÇKİN*¹ (ORCID: 0000-0003-1212-656X)
*Mahmut ALTINER*² (ORCID: 0000-0002-7428-5999)
Turan YILMAZ^{3*} (ORCID: 0000-0003-1265-7117)

¹ Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

² Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

^{3*} Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Turan YILMAZ, tyilmaz@cu.edu.tr

ÖZET

Atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan arıtma çamurları, bertarafı ve yönetim maliyetleri bakımından tüm dünyada önemli bir sorun haline gelen atıklardır. Evsel atıksu arıtma tesislerinde, anaerobik stabilizasyon sonrası ortaya çıkan arıtma çamurları bu atıklar içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Son yıllarda arazide ve tarımda direk olarak kullanımı birçok ülkede kısıtlanan bu çamurlar için yeni bertaraf yöntemleri araştırılmaktadır. Kaynağı giderek tükenen fosfor elementinin arıtma çamurlarından geri kazanımı da son yıllarda önem verilen araştırma konularından bir tanesidir. Bu çalışmada anaerobik olarak stabilize edilmiş evsel atıksu çamuru, asidifikasyona tabi tutularak, sıvı fazdaki çözünmüş fosfor konsantrasyonu artırılmıştır. Asidifikasyon ön işlemine tabi tutulan çamur santrifüj edilerek katı faz uzaklaştırılmıştır. Fosfor geri kazanımı için elde edilen sıvı faz 5 basamaktan oluşan ardışık kesikli reaktöre beslenerek, her basamakta farklı pH derecelerinde kireç ile çöktürme işlemine tabi tutulmuştur. pH 5, 6, 7, 8 ve 10 değerlerinde ayrı ayrı çalışan seri bağlı ardışık 5 reaktörde elde edilen çöktürülen içeriği, reaktörlerde giderilen orto-fosfat (o-P), Zn, Fe, Al, Cr, Ca ve Mg konsantrasyonları açısından değerlendirilmiştir. Maksimum o-P geri kazanım verimi ve elde edilen fosfor içerikli üründe safsızlık oluşturan metal içeriğinin minimize edilmesi açısından optimum değer pH 6 olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: fosfor geri kazanımı, çamur bertarafı, arıtma çamurları, fosforun çöktürülmesi, asidifikasyon

ABSTRACT

Waste sludge from wastewater treatment plants has become a major problem all over the world in terms of disposal and management costs. Amount of anaerobic stabilized sewage sludge is significant part of these wastes. Due to some limitations legislated for utilization sewage sludge in agriculture for many countries. Different valorization methods have been investigated for these sludges in recent years. Phosphorus recovery from sewage sludge is one of the important research area because of depletion resources of phosphorus. In this study, anaerobic stabilized sewage sludge acidified for enhancement phosphorus concentration in liquid phase. Supernatant of acidified sample obtained by centrifugation and then was fed to sequencing batch reactor that consist of 5 stage. Phosphorus precipitation was performed with lime addition. Each stage of reactor was operated at different pH

To Cite: SEÇKİN, İ.Y., ALTINER, M., & YILMAZ, T., (2021). KENTSEL NİTELİKLİ ANAEROBİK ÇÜRÜTÜLMÜŞ ÇAMURDAN KİREÇ İLE FOSFOR GERİ KAZANIMINDA pH ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24, 3.

levels that 5, 6, 7, 8, 10 incrementally. Contents of precipitates discussed for each reactor, according to removal rates of ortho-phosphate (o-P), Zn, Fe, Al, Cr, Ca and Mg concentrations at pH 5, 6, 7, 8 and 10 separately. pH 6 value was specified for maximum o-P removal rate and minimizing metal content that caused impurity in recovered phosphorous precipitate.

Keywords: phosphorus recovery, sludge disposal, sewage sludge, phosphorus precipitation, acidification

GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada evsel atıksular genellikle aktif çamur, damlatmalı filtre ve havalandırılmalı lagünler gibi aerobik metabolizmalara dayanan arıtma prosesleri ile arıtılmaktadırlar. Bu yöntemlerin içinde en yaygın olarak kullanılan teknoloji ise aktif çamur prosesidir. Aktif çamurda gerçekleşen aerobik metabolizma faaliyetlerinde, hücre tarafından metabolize edilen organik maddenin yaklaşık %33'ü yıkım olayları için kullanılırken, %67 oranındaki organik fraksiyon anabolik faaliyetler için kullanılmaktadır. Bu sebeple aktif çamur prosesleri sonrasında ciddi miktarlarda atık çamur meydana gelmektedir (Van Haandel & Lettinga, 1994; Kalbar vd., 2013). Anaerobik çürütme, atık arıtma çamurlarının hacimlerinin azaltılması ve stabilize edilmesi açısından yaygın olarak tercih edilen bir prosestir. Ayrıca, arıtma çamurlarının anaerobik çürütme ile stabilizasyonu sonucunda elde edilen biyogaz, enerji geri kazanımında kullanılarak tesis maliyetlerinin düşürülmesi açısından avantaj teşkil etmektedir (Pinto vd., 2016; Walter vd., 2019). Yine de anaerobik çürütme prosesi sonrası ortaya çıkan çamurlar atık niteliği taşımakta ve bu atıkların yönetimi gerekmektedir (Burgos-Castillo vd., 2018).

Anaerobik olarak stabilize edilmiş çamurların (ASC), içerdikleri organik madde, azot, fosfor ve potasyum gibi bileşenleri nedeniyle gübre olarak tarımsal alanlarda yeniden kullanımları en kolay ve yaygın bertaraf yöntemidir (Quist-Jensen vd., 2018). Fakat, çamur içeriğinde bulunan ağır metaller, patojen ve diğer kirleticiler (endokrin bozucular, ilaçlar, vs.) nedeniyle çamurların tarımsal amaçla kullanımına belirli sınırlar getirilmiştir. Ayrıca çamur uygulamalarının, bitki ihtiyacının üstündeki miktarlarda yapılması bitki ve tohum gelişimini engellemektedir. Bu uygulamalarla ek olarak, azot ve fosfor toprakta birikmekte, buna bağlı olarak yer altı ve yüzeysel su kaynakları kirlenmektedir (Ito vd., 2013; Fontmorin & Sillanpää, 2017; Selçuk Kuşçu & Çelik, 2019). Bu nedenle, arıtma çamurlarının sahip oldukları içerik ve özelliklere göre farklı geri kazanım yöntemleri ile değerlendirilmeleri, atık yönetimi açısından uygun bir seçenek haline gelmektedir (Devi & Saroha, 2017).

Doğal kaynakların korunması amacıyla; karbon, azot ve fosforun geri kazanım çalışmaları, atık çamurların önde gelen değerlendirme konuları arasındadır (Yu vd., 2017; Yuan vd., 2011). Alıcı su ortamlarında ötrofikasyona neden olması ve buna bağlı olarak arıtılmış sulardaki deşarj limitlerinin giderek düşürülmesi nedeniyle fosfor, arıtma sonucu atıksu arıtma çamurlarında daha çok birikmekte ve gerikazanım için cazip bir element haline gelmektedir (Pakdil & Filibeli, 2007). Ayrıca; dünyadaki fosfor kaynaklarının 100 ile 250 yıl arasında tükeneceğine dair elde edilen bulgular ve fosfat yataklarının Avrupa Birliği Komisyonu tarafından kritik öneme sahip 20 kaynak arasına alınması, fosfor geri kazanımının sürdürülebilir çevre uygulamaları açısından büyük önem taşıdığını ortaya koymaktadır (Shu vd., 2006; AB Komisyonu, 2014).

Atık çamurda fosfor geri kazanımı, çamurun kendisinden veya çamurun yakılması sonucu geriye kalan kül muhtevassından gerçekleştirilmektedir. Çamur külünden fosfor geri kazanımı sürdürülebilir bir yöntem olsa da, uygulamanın maliyeti bu işlemin kullanımını sınırlamaktadır (Vaneekhaute vd., 2017). Atık arıtma çamurundan fosfor gerikazanımı ise genellikle fosforun çözünür forma geçirilerek daha sonrasında çözeltilen ayrılması prensibine dayanmaktadır (Pakdil & Filibeli, 2007).

Bu çalışmada materyal olarak kullanılan ASC'den fosfor gerikazanımı için yapılan güncel çalışmalarda en yaygın kullanılan yöntem; asidifikasyon, ayırma ve fosforun çöktürülmesi işlemlerinin sırasıyla uygulanması şeklindedir (Quist-Jensen vd., 2018). Anaerobik çürütme esnasında mikroorganizmaların bir kısmı, hücre içinde depoladıkları fosforun bir bölümünü hücre dışına bırakırlar (Hu vd., 2018). Fosfor içeriğinin büyük kısmını oluşturan metal tuzları ise çamurun katı fazında kalmaktadır (Meulepas vd., 2015). Yapılan son çalışmalarda asidifikasyonun metal-fosfat bileşiklerinin çözünürlüğünü arttırdığı görülmüştür (Latif vd., 2015). Çözeltiye alınan fosforun ise yüksek pH değerlerinde çöktürülerek strüvit ve kalsiyum fosfat bileşikleri olarak geri kazanılabildikleri belirtilmiştir (Tarayre vd., 2016).

Yapılan bu çalışmada, anaerobik çürütücü çıkışından alınan çamur numunesi seçilen uygun pH değerinde asidifikasyona tabi tutularak katı fazdaki fosforun sulu çözeltilmeye alınması sağlanmıştır. Asidifikasyon sonrasında

santrifüjleme ile katı faz uzaklaştırılarak, fosfor içerikli düşük pH değerine sahip üst suya kireç dozlaması ile ardışık kesikli reaktörde basamaklı çöktürme prosesi uygulanmıştır. Bu çalışma ile farklı pH değerlerinde ve aralıklarında, fosfor ve beraberindeki içeriklerin çökeltme davranışları incelenerek, fosfor geri kazanımı için uygun pH değerlerinin seçilmesi amaçlanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Çalışmada kullanılan ASÇ numunesi, Adana ilinde yer alan, aktif çamur prosesi ile karbon giderimi yapılan bir evsel atıksu arıtma tesisinde bulunan, mezofilik anaerobik çamur çürütücülerin çıkış hattından temin edilmiştir. Numune ile ilgili analitik ve deneysel çalışmalar numunenin alındığı gün gerçekleştirilmiştir.

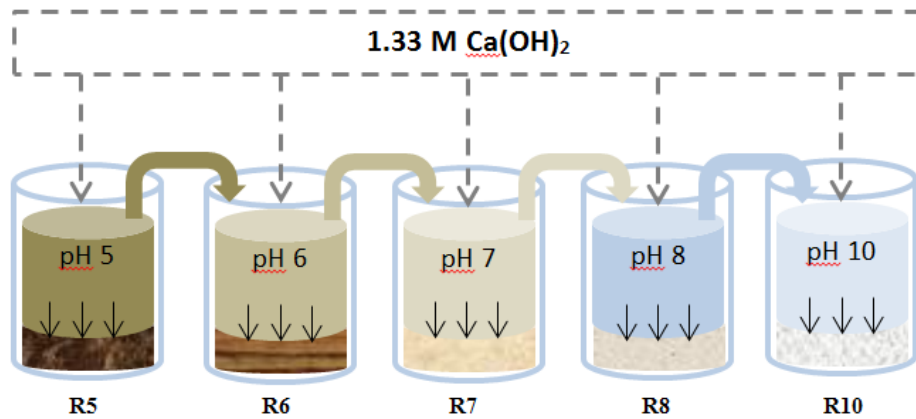
Deneyel Yöntem

Asidifikasyon İşlemi

Evsel atıksu arıtma tesisinden temin edilen ASÇ, 500 mL hacmindeki reaktörlerde %37'lik HCl ile pH 1, 2 ve 3 değerlerinde asidifikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Asidifikasyon işlemi, VELP Scientifica FC6S marka ve modelindeki jar test cihazında 120 rpm karıştırma hızında ve 1 saat süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Süre sonunda 3 ayrı pH değerindeki çamurlar için 2'şer ve 6'şar saatlik çökebilirlik deneyleri yapılmıştır. Çökeltme performansları, çöken çamur hacmi açısından karşılaştırılarak asidifikasyon için uygun pH seçilmiştir. Asidifikasyon işlemi sonrasında çamur, Eppendorf Centrifuge 5804R marka ve model santrifüj cihazı kullanılarak, 4000 rpm'de 5 dakika boyunca santrifüjleme işlemine tabi tutulmuştur. Santrifüjleme sonrası elde edilen sıvı üst faz, fosfor geri kazanım çalışmaları için 5 bölmeden oluşan ardışık kesikli reaktöre beslenmek üzere ayrılmıştır.

Fosforun Kireç ile Çöktürülerek Geri Kazanımı

Asidifikasyon ve çökeltme işlemleri sonrasında elde edilen çamur üst sıvı fazı; 500'er mL hacmindeki 5 adet ardışık kesikli reaktörden oluşan deney setindeki ilk reaktöre beslenmiştir (Şekil 1). İlk besleme yapılan reaktörden itibaren sırasıyla; R5, R6, R7, R8 ve R10 olarak adlandırılan deney setinde; reaktörlerin her birinde çöktürme işleminin hemen ardından, toplam numune hacminin %40'ına karşılık gelen üst sıvı faz bir sonraki reaktöre beslenmiştir. Reaktörlerde uygulanan çöktürme işlemine ait pH değerleri Şekil 1'de verilmiştir. Reaktörlerin çıkış sularından numuneler alınarak fosfor ve metal giderimleri incelenmiştir. Bu sayede her pH basamağı aralığında gerçekleşen değişimlerin incelenmesine olanak sağlanmıştır. Reaktörlerin tamamında istenen pH değerleri 1.33 M konsantrasyonundaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dozlaması ile sağlanmıştır. Deney setinde yer alan 5 reaktörün her birinde; istenilen pH değerlerine ulaşıldıktan sonra, 90 rpm karıştırma hızında 1 saat karıştırma ve sonrasında 30 dakikalık bekletme süresince çöktürme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 1. Ardışık Kesikli Reaktör Prensibine Dayalı Deney Setinin Şematik Gösterimi

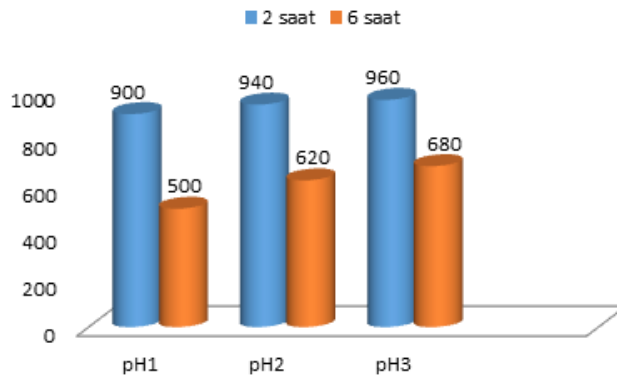
Analitik Yöntemler

Çalışmada katı ve sıvı numunelere ait toplam katı madde (TKM), uçucu katı madde (UKM) ve orto-fosfat (o-P) analizleri APHA metoduna göre gerçekleştirilmiştir (APHA, 2005). Sıvı numunelerdeki metal analizleri ise atomik absorpsiyon spektrofotometresi (Perkin Elmer PinAAcle 900 H) ile yapılmıştır. Metal ve orto-fosfat analizleri öncesinde numunelerdeki katı partiküllerin uzaklaştırılması amacıyla Eppendorf Centrifuge 5804R marka ve model santrifüj cihazı ve hemen ardından 0,45 µm gözenek çapına sahip Sartorius marka filtre kullanılarak ölçümlere hazır hale getirilmiştir. pH ölçümlerinde WTW 3110i marka ve modeline sahip cihaz kullanılmıştır. Analizler 3 tekrarlı olarak yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Asidifikasyon İşleminin Çamur Numunesi Üzerindeki Etkileri

Atıksu arıtma tesisinden alınan 7.41 pH değerine sahip ASÇ numunesine ait TKM ve UKM yüzde değerleri sırasıyla, %1.72 ve %50.7 olarak bulunmuştur. Literatürde yapılan bazı çalışmalarda, ASÇ numunesinin TKM oranının %13'lere kadar ulaştığı görülmektedir (Wang vd., 2019). Bu nedenle %37'lik HCl asit çözeltisi ile yapılan asidifikasyon işleminin sonunda, pH 1, 2 ve 3 değerlerindeki çamur numunelerinde 2'şer ve 6'şar saatlik çökebilirlik çalışmaları yapılarak katı partiküllerin sudan ayrılma eğilimleri kıyaslanmıştır.



Şekil 2. Çökeltme Deneyleri Sonunda Gözlenen Çöken Çamur Hacim Değerleri (mL/L)

2 saatlik bekletme süresi sonucu gözlenen çöken çamur hacimleri pH 1, 2 ve 3 seviyelerinde sırasıyla 900, 940 ve 960 mL/L olarak belirlenmiştir. Daha sonrasında aynı şartlarda yapılan 6 saatlik gözlem sonunda ise çamurun çökeltme performansının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2). En iyi çökeltme performansı ise pH1 değerinde görülmüştür (500 mL/L). Shiba ve Ntuli (2016), anaerobik çürütücü sonrası çıkan atık anaerobik çamur ile yaptıkları çalışmada, düşük pH değerlerinde çamur viskozitesinin azaldığını belirtmişlerdir. Literatürde yapılan çamur susuzlaştırma çalışmalarında, viskozite değerinin azalması ile birlikte arıtma çamurunun susuzlaştırma performansının arttığı gözlemlenmiştir (Zhen vd. 2012). Bu nedenle pH 1 değerinde elde edilen çökeltme performansı, asidik ortamda çamur viskozitesinin azalması ile ilişkilendirilebilmektedir. Bu sonuç itibarıyla, ASÇ numunesinden fosfor geri kazanımında ön işlem olarak seçilen asidifikasyon prosesinin pH1 değerinde uygulanması uygun görülmüştür. pH1 değerinde asidifikasyona tabi tutulan çamurdan santrifüjleme işlemi ile elde edilen ve fosfor geri kazanımı için kullanılacak üst sıvı fazdaki metal ve o-P konsantrasyonları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. pH 1 Değerinde Asidifikasyon Ön İşlemi Sonrasında Elde Edilen ve Çöktürme İşleminde Kullanılacak Sıvı Fazdaki Metallerin ve Fosforun Konsantrasyon Değerleri (mg/L)

Parametre	Değer (mg/L)	Parametre	Değer (mg/L)
Zn	15,76	Al	34,98
Fe	55,12	Ca	165
K	184,8	Mg	160
Cr	0,549	o-P	165

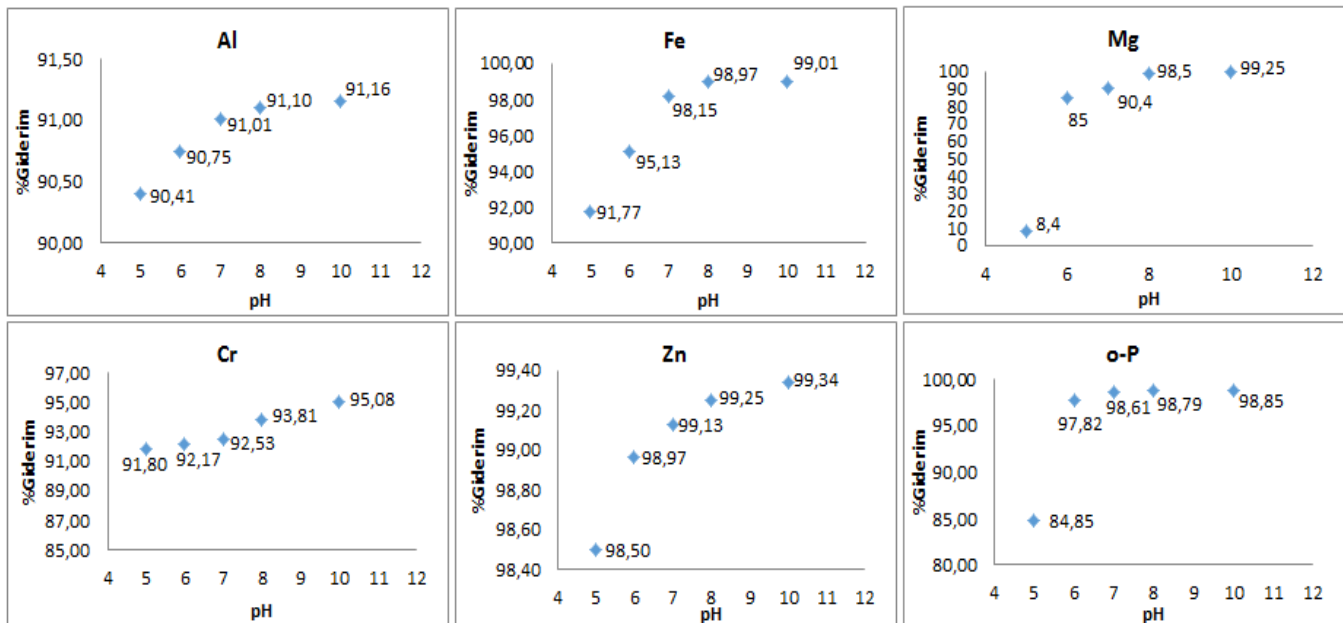
Kireç ile Fosfor Geri Kazanımı

Asidifikasyon sonrasında fosfor geri kazanımı amacıyla elde edilen sıvı faz, ilk reaktörden başlanarak sırasıyla R5, R6, R7, R8 ve R10 olarak adlandırılmış ve ardışık kesikli reaktör prensibine dayalı olarak işletilen deney setine beslenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda 5 reaktörün her birinden ayrı ayrı alınan çıkış suyu numunelerine ait o-P, Zn, Fe, K, Cr, Al, Ca ve Mg konsantrasyonları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kireç ile Çöktürme Sonrasında Reaktörlere Ait Çıkış Suyu Değerleri

Reaktör	o-P (mg/L)	Zn (mg/L)	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Cr (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)
R5	25	0,236	4,534	3,356	0,045	110,4	146,6
R6	3,6	0,163	2,686	3,235	0,043	231,6	24
R7	2,3	0,137	1,021	3,143	0,041	264,4	15,36
R8	2	0,118	0,567	3,112	0,034	140,8	2,4
R10	1,9	0,104	0,543	3,092	0,027	141,6	1,2

Reaktörlerdeki giderim miktarları incelendiğinde, o-P ve diğer metal konsantrasyonlarının her reaktör çıkışında azaldığı görülmüştür. En yüksek giderim verimlerinin görüldüğü reaktörler, R5 ve R6 olarak belirlenmiştir. R7, R8 ve R10 reaktörlerinde giderim devam etse de, reaktörlere giren o-P ve metal konsantrasyonları düşük olduğundan, giderim miktarlarının da düşük olduğu görülmüştür (Tablo 2). Literatürde, evsel atıksulardan kireç ile fosforun giderilmesi ve gerikazanımı için yapılan çalışmalarda, alınan en iyi sonuçların pH 7 ile 9,5 aralığında olduğu rapor edilmiştir (Dursun & Oktaç, 2005; Yiğit & Mazlum, 2006). Fakat bu çalışmada, pH 5 ve 6 değerlerinde kümülatif o-P giderim verimlerinin sırasıyla %84,85 ve %97,82 olduğu görülmüştür (Şekil 3). Joko (1984), çözeltide kalsiyum konsantrasyonunun artmasıyla birlikte, fosfor çökeltme mekanizmasındaki kritik pH değerinin düştüğünü belirtmiştir. Buna bağlı olarak, bu çalışmada o-P gideriminin pH 5 ve 6 değerlerinde en yüksek değerlerine ulaşmasının nedeni, sisteme Ca(OH)_2 dozlaması yapılması olarak gösterilebilir. Literatürde kalsiyum-fosfat bileşiklerinin çöktürülmesine ait çalışmalarda, pH 5,6 ve nötr pH değerlerine yakın koşullarda oluşan kalsiyum-fosfat bileşiklerinin, dikalsiyum fosfat dihidrat ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve amorf yapıdaki kalsiyum fosfat oldukları rapor edilmiştir (Montastruc vd., 2003; Oliveira vd., 2007; Vasenko & Qu, 2017). Bu nedenle R5, R6 ve R7 reaktörlerinde elde edilen çöktürmelerde, fosforun $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ veya amorf kalsiyum fosfat formunda olduğu düşünülmektedir. pH 8 ve 11 aralığında kalsiyum ile fosforun çöktürülmesi ile ilgili çalışmalarda ise, elde edilen çöktürmelerde fosforun, pH 8’de hidroksiapatit ve pH 9-11 aralığında karbonatlı fosfat bileşikleri halinde olduğu vurgulanmıştır. Buna paralel olarak, R8 ve R10 reaktörlerinde elde edilen çöktürmelerde sırasıyla, hidroksiapatit ve karbonatlı fosfat bileşiklerinin bulunduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 3. Ardışık Kesikli Reaktör Deney Setinde Farklı Konsantrasyonlara Ait Kümülatif Giderim Verimleri

Metallerin kümülatif giderim verimleri incelendiğinde, R7 reaktöründen sonra ciddi bir verim artışına rastlanmamaktadır. Kalsiyum konsantrasyonu ise dışarıdan kireç dozlaması nedeniyle pH değişimi ile orantılı bir değişme göstermemektedir. pH 5 değerinde, Zn, Fe ve Al konsantrasyonlarının büyük kısmı R5 reaktöründe giderilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda fosforun Zn ve Fe yüzeyinde adsorplanabildiği ve Al ile organik fosforun düşük pH değerlerinde çökebildiği rapor edilmiştir (De Bashan & Bashan, 2004). Bu sebeple R5 reaktöründe elde edilen çökeltide fosforun kalsiyum dışında Zn, Fe ve Al metalleri ile de gerikazanıldığı düşünülmektedir.

Reaktörlerde Elde Edilen Çökeltilerin Organik İçerikleri

Reaktörlerde farklı pH değerlerinde elde edilen çökeltilerin organik madde oranları, yakma kaybına göre hesaplanarak kıyaslanmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Reaktörlerde Elde Edilen Çökeltilere ait UKM Oranları

Reaktör	Uçucu Katı Madde (%)
R5	40,62
R6	26,74
R7	11,66
R8	3,46
R10	8,18

Elde edilen çökeltilerin tamamında organik madde içeriği olduğu tespit edilmiştir. En yüksek organik madde içerikleri, R5 ve R6 reaktörlerinde elde edilmiştir. R5 ve R6 reaktörlerinde elde edilen çökeltilerdeki yüksek organik madde yüzdeleri, her iki reaktörde de çöken Al, Fe ve Mg metalleri ile doğru orantı göstermektedir. R7, R8 ve R10 reaktörlerinde giderilen Al ve Fe konsantrasyonlarının 1,5 mg/L'den küçük, Mg konsantrasyonunun ise R7 ve R8 reaktörlerinde ortalama 10 mg/L değerine yakın olduğu hesaplanmıştır. Bu nedenle R7 ve R8 reaktörlerinde gerçekleşen organik madde gideriminde kireç ile birlikte Mg metalinin etkili olduğu görülmüştür.

SONUÇ

Bu çalışmada anaerobik olarak stabilize edilmiş evsel atıksu çamuru asidifikasyon ön işlemine tabi tutulmuş ve asidifikasyon sonrası santrifüjleme yoluyla elde edilen sıvı fazdan kireç ile fosfor çöktürmesi yoluyla geri kazanım çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlara göre pH 1, 2 ve 3 değerlerinde yapılan asidifikasyon işlemlerinde; pH 1 değeri, katı partiküllerin sıvıdan ayrılma eğilimleri açısından en uygun değer olarak belirlenmiştir. pH 1 de yapılan asidifikasyon ön işlemi sonrasında fosfor geri kazanımı için santrifüjleme yoluyla elde edilen sıvı faz sırasıyla pH, 5, 6, 7, 8 ve 10 değerlerinde işletilen 5 basamaklı ardışık kesikli reaktöre beslenmiştir. Beslenen sıvı fazda bulunan o-P ve metal konsantrasyonlarının çökelme eğilimleri pH basamakları arasında ve kümülatif olarak incelenerek uygun geri kazanım pH değeri belirlenmeye çalışılmıştır. Toplam o-P konsantrasyonunun yaklaşık %98'inin çökeltilmeye alındığı pH 6 değeri, bu çalışmada uygulanan kireç ile fosfor geri kazanım prosesi için optimum değer olarak belirlenmiştir. Daha yüksek pH değerlerinde geri kazanılan fosfor içerikli çökeltilerin daha fazla Fe, Cr ve Mg içerdikleri ve bu nedenle safsızlıklarının arttığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

APHA-AWWA. WEF., (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21nd ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation Washington, DC, USA.

Burgos-Castillo, R., Sillanpää, M., Brillas, & E., Sirés, I., (2018). Removal of metals and phosphorus recovery from urban anaerobically digested sludge by electro-Fenton treatment. *Science of the Total Environment*, 644, 173–182.

De-Bashan, L.E., & Bashan, Y., (2004). Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). *Water Research*, 38, 4222–4246.

- Devi, P. & Saroha, A.K., (2017). Utilization of sludge based adsorbents for the removal of various pollutants: a review. *Sci. Total Environ.*, 578, 16–33.
- Dursun, Ş., & Oktaç, N.H., (2005). Evsel atık sudan çökeltilmeyle fosfat giderim metotlarının karşılaştırılması. *Selçuk Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen. Derg.*, 26, 51- 58.
- European Commission, (2014). 20 Critical Raw Materials - Major Challenge for EU Industry. Press Release, Brussels.
- Fontmorin, J.-M., & Sillanpää, M., (2017). Dewatering and removal of metals from urban anaerobically digested sludge by Fenton's oxidation. *Environ. Technol.*, 38, 495–505.
- Hu, P., Liu, J., Bao, H., Wu, L., Jiang, L., Zou, L., Wu, Y., Qian, G., & Li, Y.Y., (2018). Enhancing phosphorus release from waste activated sludge by combining high-voltage pulsed discharge pretreatment with anaerobic fermentation. *J. Clean. Prod.*, 196, 1044-1051.
- Ito, A., Takahashi, K., Suzuki, J., & Umita, T., (2013). Heavy metal removal and phosphorous retention using the Fenton process for sustainable recycling of anaerobically digested sewage sludge. *J. Water Environ. Technol.* 11, 309–318.
- Joko, I., (1984). Phosphorus removal from wastewater by the crystallization method. *Wat. Sci. Tec.*, 17, 121-132.
- Kalbar, P.P., Karmakar, S., & Asolekar, S.R., (2013). Assessment of wastewater treatment Technologies: life cycle approach. *Water and Environmental Journal*, 193, 1087-1093.
- Latif, M.A., Mehta, C.M., & Batstone, D.J., (2015). Low pH anaerobic digestion of waste activated sludge for enhanced phosphorous release. *Water Res.*, 81, 288-293.
- Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C., Biscans, B., Cabassud, M., & Domenech, S., (2003). A thermochemical approach for calcium phosphate precipitation modeling in a pellet reactor, *Chem. Eng. J.*, 94 (1), 41–50.
- Oliveira, C., Georgieva, P., Rocha, F., Ferreira, A., & Feyo de Azevedo, S., (2007). Dynamical model of brushite precipitation, *J. Cryst. Growth*, 305, 201–210.
- Pakdil, N.B., & Filibeli, A., (2007). Arıtma çamurlarında fosfor salınmasını etkileyen parametrelerin Box-Wilson deneysel tasarım metodu kullanılarak incelenmesi. *itüdergisi/e su kirlenmesi kontrolü*, 17(3), 25-32.
- Pinto, N., Carvalho, A., Pacheco, J., & Duarte, E., (2016). Study of different ratios of primary and waste activated sludges to enhance the methane yield. *Water and Environment Journal*, 30, 203–210.
- Selçuk Kuşçu, Ö., & Çelik, V.E., (2019). Biyolojik atık çamurdaki azot ve fosforun darbeleri elektrik alan tekniği ile geri kazanımı ve strüvit eldesi. *Pamukkale Univ. Muh. Bilim Derg.*, 25(6), 700-704.
- Shiba, N.C., & Ntuli, F., (2017). Extraction and precipitation of phosphorus from sewage sludge. *Waste Management*, 60, 191-200.
- Shu, L., Schneider, P., Jegatheesan, V., & Johnson, J., (2006). An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant. *Bioresour. Technol.* 97, 2211–2216.
- Tarayre, C., De Clercq, L., Charlier, R., Michels, E., Meers, E., Camargo-Valero, M., & Delvigne, F., (2016). New perspectives for the design of sustainable bioprocesses for phosphorus recovery from waste. *Bioresour. Technol.*, 206, 264-274.

Quist-Jensen, C.A., Wybrandt, L., Hanne Løkkegaard, H., Antonsen, S.B., Jensen, H.C., Nielsen, A.H., & Christensen, M.L., (2018). Acidification and recovery of phosphorus from digested and non-digested sludge. *Water Research*, 146, 307-317.

Van Haandel, A.C., & Lettinga, G. (1994). Anaerobic Sewage Treatment, A Practical Guide for Regions with a Hot Climate. Chichester: *John Wiley & Sons Ltd.* (Chapter 1).

Vaneekhaute, C., Lebuf, V., Michels, E., Belia, E., Vanrolleghem, P.A., Tack, F.M.G., & Meers, E., (2017). Nutrient recovery from digestate: systematic technology review and product classification. *Waste and Biomass Valorization* 8, 21-40.

Vasenko, L., & Qu, H., (2017). Effect of NH₄-N/P and Ca/P molar ratios on the reactive crystallization of calcium phosphates for phosphorus recovery from wastewater. *Journal of Crystal Growth*, 459, 61–66.

Walter, A., Probst, M., Franke-Whittle, I.H., Ebner, C., Podmirseg, S.M., Etemadi-Shalamzari, M., Hupfauf, S., & Insam, H., (2019). Microbiota in anaerobic digestion of sewage sludge with and without co-substrates. *Water and Environment Journal*, 33, 214–222.

Wang, J., Chon, K., Ren, X., Wu, H., Kou, Y., Hwang, M.H. & Chae, K.J., (2019). Combined use of polymeric ferric sulfate and chitosan as a conditioning aid for enhanced digested sludge dewatering. *Environmental Technology*, 40:20, 2695-2704.

Yu, Y., Lei, Z., Yuan, T., Jiang, Y., Chen, N., Feng, C., Shimizu, K., & Zhang, Z., (2017). Simultaneous phosphorus and nitrogen recovery from anaerobically digested sludge using a hybrid system coupling hydrothermal pretreatment with MAP precipitation. *Bioresource Technol.*, 243, 634–640.

Yiğit, N.Ö., & Mazlum, S., (2006). Kesikli işletim durumunda kimyasal çöktürme işlemiyle atıksudan fosfat geri kazanım potansiyeli. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10-1, 116-124.

Yuan, Q., Sparling, R., & Oleszkiewicz, J.A., (2011). VFA generation from waste activated sludge: effect of temperature and mixing. *Chemosphere*, 82, 603–607.

Zhen, G., Lu, X., Zhao, Y., Chai, X., & Niu, D., (2012). Enhanced dewaterability of sewage sludge in the presence of Fe(II)-activated persulfate oxidation. *Bioresource Technology*, 116, 259-265.