

## Koagülasyon/Flokülasyon Prosesiyle Peyniraltı Suyunun Fizikokimyasal Arıtılabilirliği

Engin GÜRTEKİN

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ  
e-posta: egurtekin@firat.edu.tr

Geliş Tarihi: 09 Aralık 2011; Kabul Tarihi: 23 Şubat 2012

### Özet

Bu çalışmada, peyniraltı suyunun koagülasyon/flokülasyon yöntemiyle fizikokimyasal arıtılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, koagülant olarak alüminyum sülfat (alum), demir (III) klorür ve demir (II) sülfat kullanılmıştır. Koagülasyon/flokülasyon yönteminde farklı pH değerlerinin ve koagülant dozajlarının etkisi karşılaştırılmış ve optimum şartlar en yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve askıda katı madde (AKM) giderme verimine göre belirlenmiştir. Koagülant ile polielektrolit birlikte kullanılarak polielektrolitin farklı dozajlarının etkisi de çalışılmıştır. Alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat için optimum pH (alum için: 6, demir (III) klorür için: 5, demir (II) sülfat için: 5), koagülant dozu (alum için: 300 mg/L, demir (III) klorür için: 400 mg/L, demir (II) sülfat için: 400 mg/L) ve polielektrolit dozu (her üç koagülant için: 20 mg/L) bulunmuş ve bu optimum alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat değerlerinin kullanılması sonucu sırasıyla %34, %31 ve %29 KOİ giderme verimi ve %90, %92 ve %80 AKM giderme verimi elde edilmiştir. Polielektrolit ve koagülant dozunun birlikte kullanılması ile, yalnız koagülant kullanılması durumuna göre çamur hacmi üretimi alum için %45, demir (III) klorür için %32 ve demir (II) sülfat için %23 azalmıştır. Bu çalışmadan, koagülasyon/flokülasyon prosesinin peyniraltı suyunun ön arıtımında yararlı bir proses olacağı sonucu çıkarılmıştır.

### Anahtar kelimeler

Koagülasyon/Flokülasyon;  
Peyniraltı Suyu;  
Alüminyum sülfat; Demir  
(III) klorür; Demir (II)  
sülfat.

## Physicochemical Treatability of Cheese Whey by Coagulation/ Flocculation Process

### Abstract

In this study, the physicochemical treatability of cheese whey by coagulation/flocculation process was investigated. Aluminium sulphate, ferric (III) chloride and ferrous (II) sulphate were used as a coagulation agent. The effect of different pH values and coagulation dosages in the coagulation/flocculation method was compared and optimum conditions were determined according to the highest removal efficiency of chemical oxygen demand (COD) and suspended solid (SS). The effect of different dosages of polyelectrolyte using polyelectrolyte with coagulant was also studied. The optimum pH (6 for alum, 5 for ferric (III) chloride and ferrous (II) sulphate), coagulant dose (300 mg/L for alum, 400 mg/L for ferric (III) chloride and ferrous (II) sulphate) and polyelectrolyte dose (20 mg/L for alum, ferric (III) chloride and ferrous (II) sulphate) for alum, ferric (III) chloride and ferrous (II) sulphate was determined, %34, %31 and %29 removal of COD and %90, %92 and %80 removal of SS were achieved as a result of the use this optimum alum, ferric (III) chloride and ferrous (II) sulphate values, respectively. The combined use of coagulant and polyelectrolyte resulted in the production of sludge volume with reduction of %45, %32 and %23 of the amount produced for alum, ferric (III) chloride and ferrous (II) sulphate, respectively, when coagulant was solely used for the treatment. It can be concluded from this study that coagulation/flocculation may be a useful pretreatment process for cheese whey.

### Key words

Coagulation/Flocculation;  
Cheese Whey;  
Aluminium sulphate;  
Ferric (III) chloride;  
Ferrous (II) sulphate.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Süt endüstrisinden kaynaklanan artıklardan, en büyük kirletici kaynağı peynir üretimi sonucu oluşan ve kirletici vasfı yüksek olan peyniraltı sularıdır. 1 kg

peynir yapımı sırasında 9 kg peyniraltı suyu oluşur. Dünyada,  $145 \times 10^6$  ton'dan fazla peyniraltı suyu üretilmektedir (Güven vd., 2008).

Peyniraltı suları, süt endüstrisinin peynir yapımı sırasında sütün kazeininin çöktürülerek alınması

işleminde ortaya çıkan yeşilimsi sarı renkte bir sıvıdır. Peyniraltı suyu, işlenen sütün hacminin %85-95'lik bir kısmını oluşturmakta ve sütün besinlerinin %55'ini bünyesinde bulundurmaktadır (Kotoupas vd., 2007). Sütün besinleri başlıca laktoz (44–52 g/L), protein (6–8 g/L) ve mineral tuzlardan (4–9 g/L) oluşmaktadır. Peyniraltı suları, yüksek biyokimyasal (40–60 g/L) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (50–80 g/L) değerlerine sahip olduğundan önemli bir organik kirletici kaynağıdır. Dünya peyniraltı suyu üretiminin hemen hemen yarısı herhangi bir arıtma işlemi uygulanmadan doğrudan alıcı ortama verilmektedir (Güven vd., 2008). Peyniraltı suyu üretiminin çok fazla oluşu ve yüksek organik madde içeriğine sahip olmasından dolayı önemli bir çevre sorunu haline gelmiştir (Kotoupas vd., 2007). Peyniraltı suyunu değerlendirme teknolojileri (ultrafiltrasyonla protein ve laktoz kazanımı, sprey kurutma ile peyniraltı suyunun tozlaştırılarak kullanılması gibi, vs.) veya peyniraltı suyunun direkt olarak hayvan besisi maddesi olarak kullanılması yöntemleriyle peyniraltı suyu işlenebilmektedir (Kalyuzhnyi vd., 1997; Güven vd., 2008). Ancak; ekonomik, sağlık ve yerel sebeplerden dolayı orta ve küçük ölçekli peynir üretim tesislerinde peyniraltı suyunun bu yöntemlerle değerlendirilmesi uygun olmamaktadır (Rodgers vd., 2004; Güven vd., 2008). Peyniraltı suyunun arıtımı için laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalar anaerobik (Wildenauer ve Winter, 1985; Lo ve Liao, 1986; Yan vd., 1993; Kalyuzhnyi vd., 1997) ve aerobik (Fang, 1990; Farizoğlu vd., 2004) şartlar altında yürütülmüştür. Ancak, bu arıtma yöntemlerinin çoğu peyniraltı suyunun deproteinize ve seyreltilmiş haline uygulanmaktadır (Kalyuzhnyi vd., 1997; Farizoğlu vd., 2004; Güven vd., 2008).

Koagülasyon/flokülasyon, su ve endüstriyel atıksu arıtımında önemli bir procestir (Tatsi vd., 2003). Alüminyum sülfat (alum), demir (II) sülfat, demir (III) klorür ve demir klorosülfat ( $FeClSO_4$ ), en yaygın olarak kullanılan koagülant maddeleridir (Amokrane vd., 2003). Her bir koagülant, ancak belli bir pH aralığında maksimum kirletici giderimi sağlayabilmektedir. pH aralığının büyüklüğü; koagülantın tipine, atıksu karakteristiğine ve koagülant dozuna bağlı olarak değişmektedir (Song vd., 2004).

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan koagülant maddelerden alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat ile peyniraltı suyu arıtılarak en uygun pH, koagülant tipi,

koagülant ile polielektrolitin birlikte kullanımının arıtma verimine ve çamur oluşumuna etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve metod

Bu çalışmada kullanılan peyniraltı suyu, Elazığ ilinde bulunan bir sütün ve sütün işleme tesisinden temin edilmiştir. Tesisten alınan peyniraltı suyu numunesinin kirlilik karakteristikleri saptanmış ve elde edilen değerler Çizelge 1'de sunulmuştur. Peyniraltı suyu numunesi plastik bir kaba alınarak laboratuvara getirilmiş ve 4 °C'de muhafaza edilmiştir. Koagülasyon/flokülasyon deneyleri, klasik jar cihazıyla yapılmıştır. Peyniraltı suyu numunesinin pH'ı, 1.0 M  $H_2SO_4$  veya 1.0 M NaOH kullanılarak farklı pH değerlerine ayarlanmıştır. Alum ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ), demir (III) klorür ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ) ve demir (II) sülfatın ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) farklı dozları 1 L peyniraltı suyu numunesi bulunan erlenlere ilave edilmiştir. Koagülasyon deneylerinde, peyniraltı su numuneleri 5 dakika boyunca 100 rpm hızda hızlı karıştırıldıktan sonra 20 dakika boyunca 50 rpm hızda yavaş karıştırılmış ve 1 saat peyniraltı suyu numunesinin çökmesi için beklenmiş ve çökelen çamur hacmi belirlenmiştir (Song vd., 2004). KOİ ve AKM analizleri için erlenlerin üst sıvı yüzeyinin 2 cm altından numuneler alınarak Standart Metotlara (APHA, AWWA, WCPF, 1998) göre tayin yapılmıştır. Atıksuyun pH değerine koagülant ilavesinin etkisi de belirlenmiştir (Song vd., 2004).

Çizelge 1. Peyniraltı suyunun karakteristiği

Parametre	Konsantrasyon
pH	5.34
KOİ, mg/L	56000
AKM, mg/L	2400

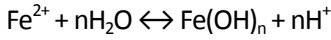
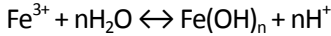
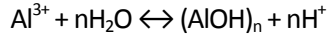
Koagülasyon prosesini optimize etmek için, jar testleri pH değeri 4-8 aralığında ve koagülant dozajı 100-500 mg/L aralığındaki seçilen değerlerle yürütülmüştür. Deneysel işlemlerin 1. aşamasında, 400 mg/L koagülant dozajı kullanılarak, optimum pH değerini bulmak amacıyla pH değeri 4, 5, 6, 7 ve 8'e ayarlanmıştır. 2. aşamada, 1. aşamada belirlenen optimum pH değeri kullanılarak optimum koagülant dozajını belirlemek amacıyla 100, 200, 300, 400 ve 500 mg/L koagülant

kullanılmıştır. 3. aşamada ise, 1. ve 2. aşamada belirlenen optimum pH değeri ve koagülant dozu kullanılarak, optimum polielektrolit dozajını belirlemek amacıyla 5, 10, 15, 20 ve 25 mg/L polielektrolit kullanılmıştır.

### 3. Bulgular ve tartışma

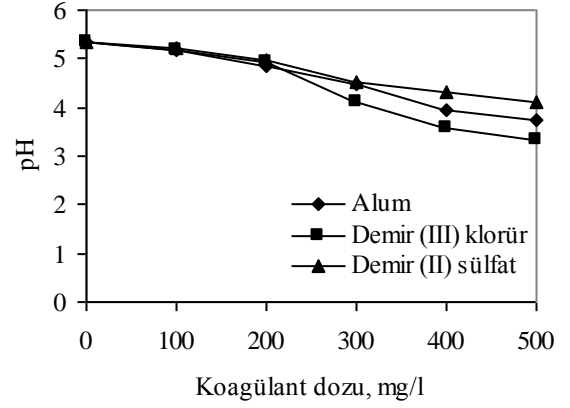
#### 3.1. Peyniraltı suyunun pH değerine koagülant dozunun etkisi

Peyniraltı suyunun başlangıçtaki pH değeri 5,34 olup, kimyasal koagülantların ilavesiyle suyun pH değeri azalmıştır. 500 mg/L alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat ilavesinden sonra pH değeri sırasıyla 3,75, 3,32 ve 4,12 değerine azalmıştır (Şekil 1). pH değerindeki bu azalma,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  ve  $Al^{3+}$  metallerinin asit karakteriyle açıklanabilir (Lewis asit) (Song vd., 2004). Çünkü, suya demir ve alüminyum tuzlarının ilavesiyle aşağıdaki hidroliz reaksiyonlarına göre  $H^+$  iyonu açığa çıkmaktadır.



Tabakhane atıksuyunun kimyasal yöntemle arıtımının yapıldığı bir çalışmada da, kimyasal koagülantların konsantrasyonlarının artmasıyla pH değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada pH değerindeki maksimum azalma 500-900 mg/L koagülant konsantrasyonunda meydana gelmiş olup, alum ve demir (III) klorür için sırasıyla atıksuyun pH değeri 9,2'den 6,6 ve 5,7 değerine azaldığı belirtilmiştir (Song vd., 2004).

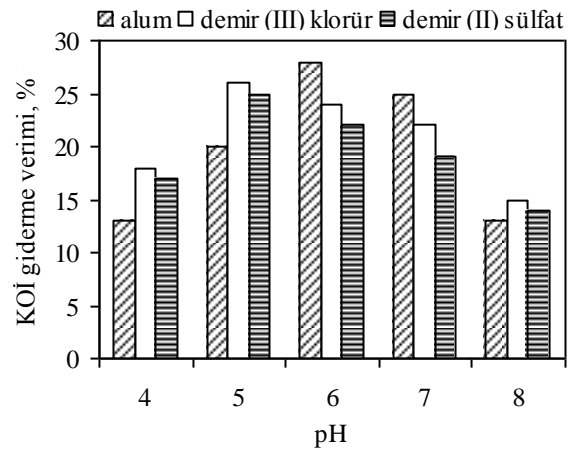
Arıtılmış atıksuların pH değerinin, alıcı ortamlar üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. pH değerinin 6,5-9,0 aralığında değişiminin çoğu balık ve diğer sucul yaşama zararı bulunmamaktadır. pH değeri 9,0'un üzerine çıktığı zaman çoğu sucul türler bundan ters yönde etkilenmektedir. pH değeri 11,0-11,5 aralığında ise, tüm balık türleri ölmektedir. Diğer yandan, pH değerindeki azalmada sucul ekosisteme zarar vermektedir. Bu nedenle, kimyasal arıtmadan sonra atıksu alıcı ortama deşarj edilecekse atıksuyun pH'ı göz önünde bulundurulmalıdır (EPA, 2003).



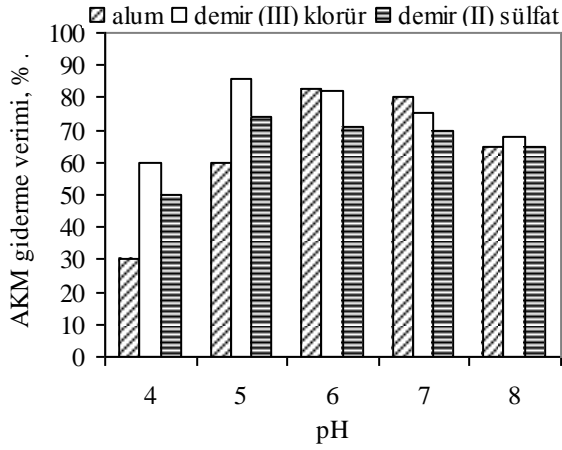
Şekil 1. Atıksuyun pH değerine koagülant dozunun etkisi

#### 3.2. pH değerinin etkisi

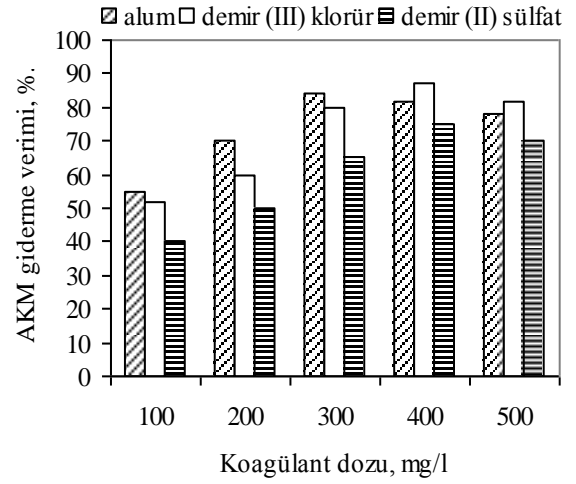
pH'ın atıksuda bulunan kirleticilerin giderim hızını etkilediği bilinmektedir (Robert ve Sheldon, 1996). Bu çalışmada, alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat kullanılarak peyniraltı suyunun koagülasyonu için yapılan jar testi sonucu elde edilen KOİ ve AKM giderme verimlerine pH'ın etkisi sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. Alum için optimum pH değeri 6, demir (III) klorür için 5 ve demir (II) sülfat için 5 olarak bulunmuştur. KOİ ve AKM giderme verimi, optimum pH değerlerinden daha yüksek ve düşük değerlerde azalmıştır. Her bir koagülant için KOİ ve AKM giderme verimlerinin pH'a göre değişimi benzer bir eğilim göstermiştir. Alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat kullanılarak elde edilen maksimum KOİ giderme verimleri sırasıyla, %28, %26 ve %25 olarak bulunurken, maksimum AKM giderme verimleri sırasıyla %83, %86 ve %74 olarak bulunmuştur.



Şekil 2. KOİ giderme verimine pH değerinin etkisi



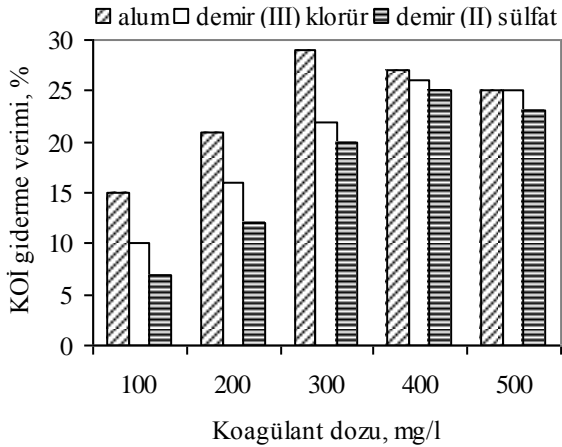
Şekil 3. AKM giderme verimine pH değerinin etkisi



Şekil 5. AKM giderme verimine koagülant dozunun etkisi

### 3.3. Koagülant dozunun etkisi

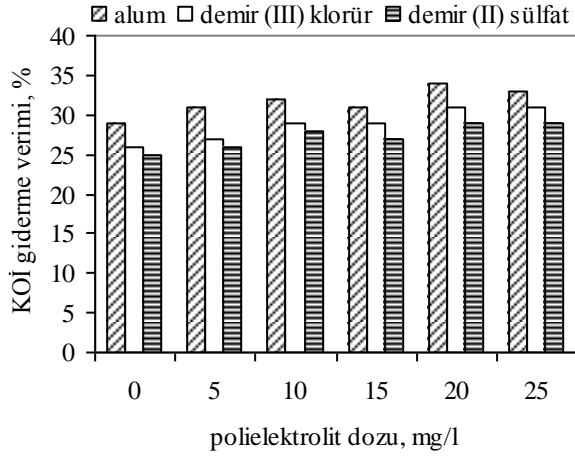
KOİ ve AKM giderme verimlerine alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat dozajının etkisi Şekil 4 ve Şekil 5’de verilmiştir. Alum için optimum dozaj 300 mg/L, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat için optimum dozaj 400 mg/L olarak bulunmuştur. Optimum dozajlarda alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat için elde edilen KOİ giderme verimi sırasıyla %29, %26 ve %25 olarak bulunurken, AKM giderme verimi sırasıyla %84, %87 ve %75 olarak bulunmuştur. Optimum dozajlardan daha yüksek dozlar, AKM giderme veriminin azalmasına neden olmuştur. Bu, koloidal partiküllerin sahip olduğu yükün tersine değişmesi (negatiften pozitif) ve partiküllerin restabilizasyonunun sonucu olabilir (Amuda ve Alade, 2006; Ghaly vd., 2006). Rusten vd. (1990) süt endüstrisi atıksuyuna 50-200 mg/L aralığında demir (III) klorürün uyguladıkları bir çalışmada, % 52-73 aralığında maksimum KOİ giderme verimi elde edilmiştir.



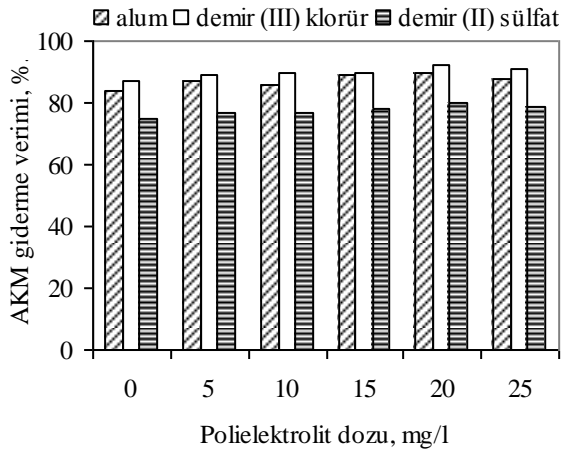
Şekil 4. KOİ giderme verimine koagülant dozunun etkisi

### 3.4. Koagülant ile birlikte polielektrolit kullanılmasının etkisi

Polielektrolitler, su ve atıksu arıtımında koagülant yardımcısı ve hatta koagülant maddesi olarak kullanılmaktadır (Amuda ve Amoo, 2007). Koagülantların optimum dozları kullanılmış ve KOİ ve AKM giderme verimlerine göre optimum polielektrolit dozunu bulmak için polielektrolit dozu 0-25 mg/L aralığında değiştirilmiştir. Farklı polielektrolit dozlarının KOİ ve AKM giderme verimlerine etkisi Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir. Polielektrolit dozunun artmasıyla KOİ ve AKM giderme verimi nispeten artmıştır. Bu çalışmada, optimum polielektrolit dozu 20 mg/L olarak bulunmuştur. KOİ giderme verimi, daha yüksek polielektrolit dozunda artmamıştır. AKM giderme veriminde ise, daha yüksek dozda az da olsa bir azalma görülmektedir. Bu azalma, artan polielektrolit dozuyla partiküllerin yeniden süspansiyon hale geçmesinden kaynaklanabilir (Tatsi vd., 2003; Amuda ve Alade, 2006).



Şekil 6. KOİ giderme verimine polielektrolit dozunun etkisi



Şekil 7. AKM giderme verimine polielektrolit dozunun etkisi

### 3.5. Çamur oluşumu

Koagülasyon/flokülasyon proseslerinde üretilen çamurun miktarı ve karakteristiği, kullanılan koagülanta ve işletme şartlarına bağlı olarak değişmektedir (Tatsi vd., 2003). Bu çalışmada, koagülant ve polielektrolitin birlikte kullanımı, sadece koagülant kullanılan durumla karşılaştırıldığında alum için %45, demir (III) klorür için %32 ve demir (II) sülfat için %23 daha düşük çamur oluşumuyla sonuçlanmıştır. Bu sonuç, önceki çalışmalarla uyumludur ((Tatsi vd., 2003; Amuda ve Alade, 2006; Aguilar vd., 2002).

### 4. Sonuçlar

Koagülasyon/flokülasyon yöntemi ile peyniraltı suyunun fizikokimyasal arıtımı gerçekleştirilmiştir. Burada, maksimum KOİ ve AKM giderimi elde etmek amaçlanmıştır. Koagülant dozu, pH, koagülant yardımcısı

olarak polielektrolit ilavesinin etkisi araştırılmış ve bunların peyniraltı suyunun fizikokimyasal arıtımında önemli parametreler olduğu bulunmuştur. Alum için optimum pH değeri 6 ve optimum koagülant dozu 300 mg/L, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat için optimum pH değeri 5 ve optimum koagülant dozu 400 mg/L olarak bulunmuştur. Koagülant yardımcısı olarak kullanılan polielektrolit için optimum doz her üç koagülant için 20 mg/L olarak elde edilmiştir. Alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat için bu optimum değerler kullanılarak, sırasıyla %34, %31 ve %29 KOİ giderme verimi ve %90, %92 ve %80 AKM giderme verimi elde edilmiştir. Polielektrolit ve koagülant dozunun birlikte kullanılması ile, yalnız koagülant kullanılması durumuna göre çamur hacmi üretimi alum için %45, demir (III) klorür için %32 ve demir (II) sülfat için %23 azalmıştır.

### Kaynaklar

- Aguilar, M.I., Saez, J., Llorens, M., Soler, A. ve Ortuno, J.F. 2002. Nutrient removal and sludge production in the coagulation-flocculation process, *Water Research*, 36, 2910-2919.
- Amokrane, A., Comel, C. ve Veron, J. 1997. Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation, *Water Research*, 31, 2775-2782.
- Amuda, O.S. ve Alade, A. 2006. Coagulation/flocculation process in the treatment of abattoir wastewater, *Desalination*, 196, 22-31.
- Amuda, O.S. ve Amoo, I.A. 2007. Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment, *Journal of Hazardous Materials*, 141, 778-783.
- APHA, AWWA, WCP. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20<sup>th</sup> Edition, American Public Health Association, Washington, D.C.
- EPA. 2003. Effects of acid rains: Lakes and streams. Washington, DC. US Environmental Protection Agency.
- Fang, H.H.P. 1990. Treatment of wastewater from a whey processing plant using activated sludge and anaerobic processes, *Journal of Dairy Science*, 74, 2015-2019.
- Farizoğlu, B., Keskinler, B., Yildiz, E. ve Nuhoğlu, A. 2004. Cheese whey treatment performance of an aerobic jet loop membrane bioreactor, *Process Biochemistry*, 39, 2283-2291.
- Ghaly, A.E., Snow, A. ve Faber, B.E. 2006. Treatment of grease filter washwater by chemical coagulation, *Canadian*

- Biosystems Engineering, 48, 13-22.
- Güven, G., Perendeci, A. ve Tanyolaç, A. 2008. Electrochemical treatment of deproteinated whey wastewater and optimization of treatment conditions with response surface methodology, *Journal of Hazardous Materials*, 157, 69-78.
- Kalyuzhnyi, S.V., Martinez, E.P. ve Martinez, R. 1997. Anaerobic treatment of high-strength cheese-whey wastewaters in laboratory and pilot UASB-reactors, *Bioresource Technology*, 60, 59-65.
- Kotoupas, A., Rigas, F. ve Chalaris, M. 2007. Computer-aided process design, economic evaluation and environmental impact assessment for treatment of cheese whey wastewater”, *Desalination*, 213, 238–252.
- Lo, K.V. ve Liao, P.H. 1986. Digestion of cheese whey with anaerobic rotating biological contact reactor”, *Biomass*, 10, 243-252.
- Robert, J.S. ve Sheldon, J.B.D. 1996. Coagulation and precipitation of a mechanical pulping effluent. I: Removal of carbon, colour and turbidity, *Water Research*, 30, 1169-1178.
- Rodgers, M., Zhan, X.M. ve Dolan, B. 2004. Mixing characteristics and whey wastewater treatment of a novel moving anaerobic biofilm reactor, *Journal of Environmental Science and Health Part A*, A39, 2183-2193.
- Rusten, B., Eikebrokk, B. ve Thovaldsen, G. 1990. Coagulation as pretreatment of food industry wastewater”, *Water Science and Technology*, 22, 1-8.
- Song, Z., Williams, C.J. ve Edyvean, R.G.J. 2004. Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation, *Desalination*, 164, 249-259.
- Tatsi, A.A., Zouboulis, A.I., Matis, K.A. ve Samaras, P. 2003. Coagulation-flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates”, *Chemosphere*, 53, 737-744.
- Wildenauer, F.X. ve Winter, J. 1985. Anaerobic digestion of high strength acidic whey in a pH-controlled up-flow fixed-film loop reactor, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 22, 367-372.
- Yan, J.Q., Lo, K.V. ve Pinder, K.L. 1993. Instability caused by high strength of cheese whey in a UASB reactor, *Biotechnology and Bioengineering*, 41, 700-706.