

Elektrokoagülasyon prosesi ile üretilen arıtma çamurlarının reaktif boyar madde gideriminde adsorban olarak kullanılabilirliği

OlcaY TÜNAY*, Emine METİN, Işık KABDAŞLI ve Tuğba ÖLMEZ-HANCI

İTÜ İnşaat Fakültesi, ÇevreMühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, elektrokoagülasyon (EK) prosesinden kaynaklanan arıtma çamurlarının tekstil son işlemleri boya banyolarında yaygın olarak kullanılan reaktif boyarmaddelerin adsorpsiyon yöntemi ile gideriminde adsorban olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Elektrolit olarak 1500 mg/L NaCl kullanılarak, 22.5 mA/cm² akım yoğunluğunda EK uygulamaları yürütülmüş ve 10 ile 90 dakika arasında değişen sürelerde elektrokoagülatörden alınan çamurların adsorban olarak kullanılabilirliği çelik ve alüminyum elektrodların kullanılması durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışma kapsamında adsorpsiyon özellikleri incelenen Reactive Black 5, Crimson HEXL ve Yellow HE4R reaktif boyar maddeleri, çelik elektrodların kullanıldığı elektrokoagülasyon uygulamalarında üretilen arıtma çamurları ile %90'ın üzerinde verimlerle giderilmişlerdir. EK prosesi ile üretilen Fe(OH)₃ çamurunun proste gerçekleşen oksidasyon redüksiyon reaksiyonları çerçevesinde yüzeyinin modifiye olup olmadığının araştırılması ve karşılaştırma yapmak amacı ile FeCl₃ kullanılarak gerçekleştirilen koagülasyon ve bu prosesle oluşturulan taze Fe(OH)₃ floklarının kullanımıyla yürütülen adsorpsiyon deneylerinde elde edilen giderim verimleri ise Reactive Black 5 için %2-14, Crimson HEXL için %10-12, Yellow HE4R için ise %13-18 olarak bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar ışığında EK uygulaması esnasında taze oluşturulan Fe(OH)₃ floklarının yüzeylerinin modifiye olduğu söylenebilmektedir. Alüminyum elektrodların kullanılması durumunda ise Reactive Black 5 boyar maddesi için ancak 5 g/L gibi çok yüksek adsorban dozajında %63 gibi bir giderme verimi elde edilebilmiştir. Crimson HEXL ve Yellow HE4R için ise 1 g/L adsorban dozajında %95'in üzerinde boyar madde gideriminin olduğu tespit edilmiştir. Alüminyum elektrodlar kullanıldığı EK prosesi ile oluşturulan Al(OH)₃ çamurunun adsorpsiyon kapasitesinin çelik elektrotlar ile oluşturulan Fe(OH)₃ çamuruna göre çok daha düşük olduğu elde edilen sonuçlar ışığında söylenebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, alüminyum elektrodlar, çelik elektrodlar, elektrokoagülasyon, reaktif boyar madde, tekstil endüstrisi.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: OlcaY TÜNAY, tunayol@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 65 75.

Bu makale, 04-06 Kasım 2009 tarihleri arasında İzmir'de düzenlenen 2. Ulusal Arıtma Çamurları Sempozyumu'nda sunulan bildiriler arasından, İTÜ Dergisi/e Su Kirlenmesi Kontrolü dergisinde basılmak üzere seçilmiştir. Makale metni 19.12.2009 tarihinde dergiye ulaşmış, 02.04.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.10.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Feasibility of the use of electrocoagulation process sludges as adsorbents for the removal of dyestuffs

Extended abstract

The textile industry plays a significant role in the economy of several countries around the world. Dyeing is a fundamental operation during textile fiber processing. This operation causes the production of more or less colored wastewater, depending on the degree of fixation of the dyestuffs on the substrates, which varies with the nature of the substances, the desired intensity of coloration, and the application method. Little attention has been paid to color since it was considered a problem only of aesthetics. Recently the color in textile wastewaters has been investigated for its effects on wastewater treatment systems and on the environment. Color, depending on its origin, is not only a problem of aesthetics but also of toxicity and reduced biodegradability because of the complex nature of used dyestuff. Disposal of this colored water into receiving water may cause toxicity to aquatic life. The dyes can upset the biological activity in water bodies. They also pose a hazard because they may be mutagenic and carcinogenic and can cause severe damage to human beings. Various treatment methods including, physical, physico-chemical and chemical processes have been investigated for treating dye bearing effluents. All these methods have different color removal capabilities, capital and operating costs. Among these processes, adsorption has been found to be superior to other techniques for wastewater treatment in terms of initial cost, simplicity of design, ease of operation and insensitivity to toxic substances. For instance activated carbon which has a high adsorption capacity for organic molecules is commonly used as an adsorbent for color and organic material removal from wastewater. But the activated carbon is an expensive adsorbent and its recycling processes are extra costly for operation. Several wastes and residues have been investigated for the adsorption of dye bearing effluents with varying success. However, new economical and highly effective adsorbents are still needed. Electrochemical technologies contribute in many ways to a cleaner environment and cover a very broad range of techniques. There has been a growing interest in the use of environmental electrochemistry. Environmental electrochemistry involves electrochemical techniques in order to remove impurities and to prevent environmental pollution. Among these techniques, electrocoagulation (EC) is an electrolytic process that generates metallic hydroxide flocks in situ via electro-

dissolution of the soluble sacrificial anode immersed in the wastewater. The electrochemically generated metallic ions can be hydrolyzed next to the anode and generate a series of metal hydroxides. The generated metal hydroxides are believed to be responsible for the adsorption of the dissolved pollutants. Therefore the use of electrochemically generated metal hydroxide sludge can be a potential adsorbant for adsorptive removal of dyestuffs from aqueous solution.

In this study, use of sludges generated through the electrocoagulation process which is of a common interest, for the removal of reactive dyestuffs that are frequently used in the textile industry, by adsorption was investigated. Scope of the study included the adsorption of Reactive Black 5, Crimson HEXL and Yellow HE4R reactive dyes onto the sludges generated through electrocoagulation using stainless steel and aluminum electrodes.

Study results indicated that all dyestuffs were removed with efficiencies over 90% using the sludges produced by the use of stainless steel electrodes. 66 and 100% removals were observed for Crimson HEXL with 200 and ≥ 1000 mg/L of electrochemically generated $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sludge. The same trend was also seen for Reactive Black 5 and Yellow HE4R. This increase in color removal efficiencies was attributed to the increase in available adsorption area with the increase in adsorbent dose. The sludges produced by coagulation using FeCl_3 were used to compare the adsorption capacities of freshly coagulated $\text{Fe}(\text{OH})_3$ and electrochemically generated $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sludges. Fresh coagulation sludges provided removals 2-14%, 10-12% and 13-18% for Reactive Black 5, Crimson HEXL and Yellow HE4R, respectively. From the results of experimental studies it can be concluded that the surface modification of $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sludges occurred during electrocoagulation thus increasing the adsorption capacity. However, the sludges generated by the use of aluminum electrodes yielded over 95% removal of Crimson HEXL and Yellow HE4R dyes at 1 g/L solid doses, while Reactive Black 5 could be removed 63% at a high solid dose of 5 g/L. The results of the study indicated that electrochemically generated $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sludge is an effective adsorbent for reactive dye stuff. All studied reactive dyestuffs have been effectively removed by adsorption on electrochemically generated $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sludge.

Keywords: adsorption, aluminium electrodes, electrocoagulation, reactive dyestuff, stainless steel electrodes, textile industry.

Giriş

Tekstil endüstrisi ülkemiz ekonomisinde önemli bir paya sahiptir. Bu endüstri dalında çok çeşitli üretim prosesleri olması sebebi ile birim atıksu miktarı, atıksuda bulunan kirletici tür ve konsantrasyonları farklılık göstermektedir. Boyama işleminin yapıldığı tekstil endüstrisi atıksularının en karakteristik kirletici parametrelerinden biri renktir. Bu nedenle boyar maddelerin moleküler özellikleri ve çevresel açıdan taşıdıkları önem nedeni ile arıtılabilirliklerinin araştırılması ve arıtma seçeneklerinin ortaya konulması büyük önem taşımaktadır. Renk giderim yöntemleri arasında kimyasal çöktürme, kimyasal oksidasyon ve adsorpsiyon prosesleri sıralanabilmektedir (Southern, 1995; Tünay vd., 1996; Kabdaşlı vd., 2002; Joo vd., 2005). Bu arıtma yöntemleri arasında yer alan adsorpsiyon prosesi hem verimliliği hem de işletme kolaylığı açısından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte adsorpsiyon prosesinin uygulanmasındaki en önemli dezavantajlarından biri işletme maliyetidir. Bu çerçevede daha düşük maliyetli çeşitli adsorbanların boyar madde diğer bir ifadeyle renk gideriminde kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir (Al-Degs vd., 2008; Papic vd., 2004). Son yıllarda ağır metal çöktürme çamurlarının boyar madde gideriminde adsorban olarak kullanımı oldukça ilgi çekmekte ve bu konuda araştırmalar yürütülmektedir (Namasivayam vd., 1994; Netpradit vd., 2003; Santos vd., 2008). Buna karşın diğer kimyasal arıtma çamurlarının bu amaçla kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar sınırlıdır. Son yıllarda su ve atıksu arıtımında kullanılmaya başlanmış olan elektrokoagülasyon (EK) prosesi uygulanması kolay ve çoğu organik ve inorganik kirleticinin gideriminde etkili bir yöntemdir (Mollah vd., 2001). Dışarıdan koagülan ilavesi gerektirmeyen bu yöntemde, koagülan kurban elektrotların (anodun) elektrokimyasal reaksiyonlar ile çözünmesi sonucu sistemde oluşturulmaktadır (Chen, 2004). EK prosesinde ucuz olması ve kolay teminleri nedeniyle alüminyum, hurda demir, demir ve çelik elektrotlar yaygın olarak kullanılmaktadır. EK prosesi sonucu oluşan çamur temel olarak metal oksitleri/hidroksitleri içermesi nedeniyle kolay çökebilir ve susuzlaştırılabilir bir yapı sergilemektedir. Yerinde üretilen bu metal hidroksitlerin adsorplama kapasitelerinin sisteme dışarıdan eklenen metal tuzları ile elde edilenlere göre çok daha yüksektir (Metin, 2009). Dolayısıyla EK prosesi sonucu oluşan çamurların adsorban olarak kullanımının incelenmesi oldukça ilgi çekici bir araştırma konusudur.

len bu metal hidroksitlerin adsorplama kapasitelerinin sisteme dışarıdan eklenen metal tuzları ile elde edilenlere göre çok daha yüksektir (Metin, 2009). Dolayısıyla EK prosesi sonucu oluşan çamurların adsorban olarak kullanımının incelenmesi oldukça ilgi çekici bir araştırma konusudur.

Bu çalışmanın amacı EK prosesi esnasında üretilen arıtma çamurlarının adsorpsiyon malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaçla EK prosesinin, farklı elektrod malzemelerinin kullanılması ve işletim sürelerinde çalıştırılması sonucunda üretilen çamurların adsorpsiyon özellikleri, reaktif boyar maddeler kullanılarak araştırılmıştır. Bu çamurların adsorpsiyon özellikleri geleneksel koagülasyon proseslerinden elde edilen çamurlar ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Materyal ve metot

Deneysel çalışmalar, Türkiye’de ve dünyada yaygın olarak kullanılan Yellow HE4R, Crimson HEXL ve Reactive Black 5 (RB 5) isimli üç farklı reaktif boyar madde ile hazırlanan sentetik numuneler üzerinde yürütülmüştür. Boyar maddeler deneysel çalışma öncesi hidroliz edilmiştir. Hidroliz işlemleri, pH 12 değerine ayarlanmış numunelerin 1 saat süre ile 50°C sıcaklıkta ısıtılması ile gerçekleştirilmiştir.

Elektrokoagülasyon ve koagülasyon uygulamaları

EK çamurlarının oluşturulması için yürütülen deneysel çalışmalarda polietilen malzemeden yapılmış, altı adet paralel bağlı elektrot ile donatılmış bir elektrokoagülatör kullanılmıştır. Elektrod materyali olarak her biri 38.5 cm² aktif yüzey alanına sahip alüminyum ve 316 (SS) paslanmaz çelik elektrotlar kullanılmış ve elektrotlar arası açıklık 3 mm olarak seçilmiştir. Yapılan ön deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında EK çamurlarının üretimi için optimum işletim parametreleri 1500 mg/L NaCl (elektrolit) konsantrasyonu ve 22.5 mA/cm² akım yoğunluğu olarak belirlenmiştir. Geleneksel koagülasyon prosesleri ile çamur üretimi için ise FeCl₃.6H₂O koagülanı kullanılmıştır.

Deneylerin yürütülüşü

EK çamurlarının üretiminde, güç kaynağında istenilen akım ayarlaması (5A) yapıldıktan sonra reaktör çalıştırılmıştır. Reaktörden 0., 10., 20., 30., 60., 90., 120. dakikalarda alınan çamur numuneleri boyar madde içeren sentetik numuneler üzerine ilave edilmiştir. $FeCl_3$ ile koagülasyon ve $FeCl_3$ koagülasyonu ile oluşturulan taze çamurun kullanımıyla yürütülen adsorpsiyon deneylerinde EK uygulamaları sırasında 30. dakikada elde edilen çamur miktarları ve bu süre sonunda ulaşılan pH değerleri dikkate alınmıştır. Adsorpsiyon deneyleri 200 rpm sabit karıştırma hızında ve $25 \pm 1^\circ C$ sabit sıcaklıkta orbital karıştırıcı kullanılarak kesikli düzende gerçekleştirilmiştir. Orbital karıştırıcıda 120 dakika boyunca adsorpsiyonu sağlanan boyar maddeler ilk olarak askıda katı madde tayini (AKM) için AP40 Millipore marka cam elyafı ve absorban ölçümleri için AG marka 0.45 μm 'lik selüloz asetat filtre kağıtlarından süzülümüştür. EK uygulaması sonucunda oluşan çamur miktarları AKM ölçümleri ile belirlenmiştir.

Analiz yöntemleri

Boyar madde konsantrasyonlarının belirlenmesinde Scinco marka spektrofotometre cihazı kullanılmıştır. Ölçümler her bir boyar madde için belirlenmiş olan spesifik dalga boylarında gerçekleştirilmiştir. Yellow HE4R için 410 nm, Crimson HEXL için 546 nm ve RB 5 için ise 598 nm dalga boylarında ölçümler yapılarak klibrasyon eğrileri çıkartılmıştır. Adsorpsiyon deneylerinde Thermo Forma marka orbital karıştırıcı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada pH ayarlamaları için HCl ve NaOH çözeltileri kullanılmış ve pH ölçümleri Thermo Orion model 720A+ pH metre ile yapılmıştır. Deneylerdeki ölçümler sırasında kullanılan tüm analiz yöntemleri Standart Yöntemlere (APHA, 2005) uygun olarak yapılmıştır.

Deneysel sonuçlar

Elektrolit olarak 1500 mg/L NaCl kullanılarak, 22.5 mA/cm^2 akım yoğunluğunda yürütülen EK uygulamalarında, 10 ile 90 dakika arasında değişen sürelerde elektrokoagülatörden alınan çamurların adsorban olarak kullanılabilirliği çelik ve alüminyum elektrodların kullanılması du-

rumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışılan her üç boyar maddenin çelik elektrodlar kullanılarak üretilen çamurlar ile giderim verimleri Tablo 1'de verilmektedir. Tablo 1'den de görüldüğü üzere RB5 boyar maddesinin gideriminde, adsorban miktarının 1 g/L'nin üzerine çıktığı denemelerde %90'nın üzerinde giderim verimleri elde edilmiştir. Adsorban miktarının 1 g/L'nin altında kaldığı durumlarda ise azalan adsorban miktarıyla adsorpsiyon veriminde belirgin düşüşler meydana gelmiştir. Aynı EK işletme koşulları kullanılarak gerçekleştirilen EK uygulamasında oluşan çamurların Crimson HEXL boyar maddenin adsorpsiyonunda kullanıldığı deneysel çalışmada ise adsorban miktarının yaklaşık 1000 mg/L olduğu durumlarda boyar maddenin tamamen giderildiği görülmektedir. Adsorpsiyon veriminin %66 ile sınırlı kaldığı durumda ise ortamda 200 mg/L adsorban bulunması nedeniyle düşük giderim verimleri elde edilmiştir. Yellow HE4R boyar maddesi için ise adsorban dozajının 600 mg/L'nin altında kaldığı durumlarda %80 civarında boyar madde giderim verimleri elde edilmiştir. Adsorban dozajının 990 mg/L olduğu halde ise giderim verimi %88'e yükselmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarından da görüldüğü üzere çelik elektrodların kullanılması halinde çalışılan EK işletme koşullarında her üç boyar madde için de yüksek giderim verimleri elde edilmiş ve çamur (adsorban) miktarının prosesi önemli ölçüde etkilediği ve artan çamur miktarı ile giderim verimlerinin arttığı saptanmıştır.

EK prosesi ile üretilen $Fe(OH)_3$ çamurunun proste gerçekleşen oksidasyon redüksiyon reaksiyonları çerçevesinde yüzeyinin modifiye olup olmadığının araştırılması ve karşılaştırma yapmak amacı ile gerçekleştirilen $FeCl_3$ ile koagülasyon ve $FeCl_3$ koagülasyonu ile oluşturulan taze çamurun kullanımıyla yürütülen adsorpsiyon deneylerinin sonuçları her üç boyar madde için Tablo 2'de verilmektedir. Tablo 2'den de görüldüğü üzere $FeCl_3$ ile koagülasyonu ve $FeCl_3$ koagülasyonu ile oluşturulan taze $Fe(OH)_3$ çamurunun kullanımıyla yürütülen adsorpsiyon deneylerinde elde edilen giderim verimleri %10'lar mertebesiyle sınırlı kalmıştır. Elde edilen bu giderim verimleri EK arıtma çamuru kullanımıyla elde edilenlere göre oldukça

Tablo 1. RB5, Crimson HEXL ve Yellow HE4R boyar maddelerinin çelik elektrodların kullanıldığı EK çamurları ile giderimi (EK işletme koşulları: 1500 mg/L NaCl, 22.5 mA/cm²)

	EK süresi* (dk.)	Boyar madde giriş konsantrasyonu (mg/L)	Adsorpsiyon sonrası			
			pH	Boyar madde çıkış konsantrasyonu (mg/L)	Boyar madde giderimi (%)	Adsorban** (g/100 mL)
RB5	10	42	10.4	17.8	58	0.019
	20	42	10.8	6.6	84	0.074
	30	42	10.8	3.8	91	0.101
	60	42	9.6	1.5	96	0.181
	90	42	10.6	2.2	95	0.210
Crimson HEXL	10	58	10.7	19.7	66	0.021
	30	58	10.3	<1	100	0.099
Yellow HE4R	10	54	10.0	11.0	80	0.034
	20	54	10.3	9.0	83	0.056
	30	54	10.2	6.5	88	0.099

* EK çamurunun alındığı süre, **AKM cinsinden kuru ağırlık

Tablo 2. Koagülasyon-flokülasyon ve taze oluşturulmuş Fe(OH)₃ ile adsorpsiyon deneyleri

		Giriş konsantrasyonu (mg/L)	Çıkış konsantrasyonu (mg/L)	Giderim (%)	pH*	Fe(OH) ₃ miktarı (g/100mL)
RB5	Koagülasyon	56	48	14	8.8	0.1730
	Adsorpsiyon**	56	55	2	8.5	0.1621
Crimson HEXL	Koagülasyon	60	53	12	8.0	0.0658
	Adsorpsiyon**	60	54	10	8.7	0.0546
Yellow HE4R	Koagülasyon	56	46	18	8.5	0.1034
	Adsorpsiyon**	56	49	13	8.5	0.0966

* Uygulama sonunda ulaşılan

** Koagülasyon çamuru ile

düşüktür. Elde edilen bu sonuçlar EK uygulaması esnasında taze oluşturulan Fe(OH)₃ floklarının yüzeylerinin modifiye olduğu görüşünü desteklemektedir.

Fe(OH)₃ katı fazının izoelektrik noktası pH 8.5 olarak literatürde verilmektedir (Parks, 1965). pH 8.5'in altında Fe(OH)₃ floklarının yüzey yükü pozitif değer almakta, pH 8.5'un üzerinde ise negatif yüklenmektedir. Reaktif boyar maddele-

rin yüklerinin negatif olduğu düşünüldüğünde pH 8.5 üzerinde yürütülen adsorpsiyon uygulamalarının başarısız olması beklenmektedir. Bu görüş Tablo 2'de verilen sonuçlar ile de doğrulanmaktadır. Bununla birlikte EK çamurları ile yürütülen çalışmalarda ise bu görüşün aksine oldukça yüksek giderim verimleri elde edilmiştir. Elde edilen bu yüksek giderim verimleri EK uygulaması esnasında üretilen çamurun yüzeyinin modifiye olması ile izah edilebilmektedir.

Bu yüzey modifikasyonu çözeltide oluşan pozitif yüklü demir hidrosokomplekslerinin $Fe(OH)_3$ flokları üzerinde yüzey kompleksi olarak bağlanması ve $Fe(OH)_3$ floklarının bu oluşumla tekrar pozitif yüklenmesi ile açıklanabilmektedir.

Çelik elektrotlarla mukayese yapabilmek amacıyla alüminyum elektrotları ile yürütülen EK uygulamasında da optimum işletme koşulları 1500 mg/L NaCl ve 22.5 mA/cm² akım yoğunluğu olarak seçilmiştir. Bu işletme koşullarında alüminyum elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen EK uygulaması esnasında üretilen çamurunun adsorban olarak kullanıldığı adsorpsiyon deneylerinde elde edilen sonuçlar her üç boyar madde için de Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde artan adsorban dozajıyla RB5 boyar maddesinin adsorpsiyon yöntemiyle

giderim veriminde artış olduğu görülmektedir. Bununla birlikte en yüksek adsorban dozajında (4760 mg/L) bile %63’lük bir giderme verimi elde edilmiştir. Bu sonuçlar çelik elektrotlarla yürütülen deneylerden elde edilenlerle karşılaştırıldığında (Tablo 1) alüminyum elektrotların kullanımıyla üretilen EK çamurlarının RB5 boyar maddesini adsorplama kapasitesinin daha düşük olduğu sonucuna varılmaktadır. Benzer şekilde 2220 mg/L’ye kadar artan adsorban dozajlarında Crimson HEXL boyar maddesinin giderim veriminde artış meydana gelmiş ve 2220 mg/L ve üzeri dozajlarda ise boyar maddenin tamamı adsorplanmıştır. Yellow HE4R boyar maddesinin alüminyum elektrotların kullanıldığı EK çamurları ile adsorpsiyonunda adsorban dozajının 330 mg/L’den 610 mg/L’ye artması durumunda giderme verimi %78’den %91’e yükselmiştir. Bununla birlikte Yellow HE4R boyar maddesi için bu etki 610 mg/L’ nin

Tablo 3. RB5, Crimson HEXL, Yellow HE4R boyar maddelerinin alüminyum elektrotların kullanıldığı EK çamurları ile giderimi (EK işletme koşulları: 1500 mg/L NaCl, 22.5 mA/cm²)

	EK süresi* (dk.)	Boyar madde giriş konsantrasyonu (mg/L)	Adsorpsiyon sonrası			
			pH	Boyar madde çıkış konsantrasyonu (mg/L)	Boyar madde giderimi (%)	Adsorban** (g/100 mL)
RB5	10	42	8.6	35.5	15	0.036
	20	42	9.0	34.9	17	0.067
	60	42	8.9	29.4	30	0.225
	90	42	9.1	17.7	59	0.345
	120	42	9.1	15.7	63	0.476
Crimson HEXL	10	64	8.5	17.3	73	0.041
	20	64	8.8	7.6	88	0.063
	30	64	8.5	2.7	96	0.106
	60	64	8.8	<1	100	0.222
	90	64	8.9	<1	100	0.360
	120	64	9.1	<1	100	0.490
Yellow HE4R	10	52	8.5	11.4	78	0.033
	20	52	8.9	4.5	91	0.061
	30	52	8.5	2.6	95	0.101
	60	52	8.6	2.4	95	0.213
	90	52	8.8	1.4	97	0.360
	120	52	8.9	1.1	98	0.474

* Uygulama sonunda ulaşılan

**AKM cinsinden kuru ağırlık

üzerindeki adsorban dozajlarında daha az etkin olmaktadır. Adsorban miktarı 8 kat artması durumunda (610 mg/L'den 4740 mg/L'ye) adsorpsiyonla giderme veriminde sadece %7'lik ilave bir verim elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere alüminyum elektrotların kullanılması durumunda çelik elektrotlara göre boyar madde diğer bir ifadeyle renk giderme verimleri çok daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

Değerlendirme

Bu çalışmada tekstil endüstrisinde sıklıkla kullanılan reaktif boyar maddelerin adsorpsiyonunda, elektrokoagülasyon prosesinde çelik ve alüminyum elektrotların kullanımı ile üretilen çamurların adsorban olarak kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Bu deneysel çalışma çerçevesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Elektrokoagülasyon uygulamalarında çelik elektrotlar ile üretilen çamurların adsorban olarak kullanılması durumunda Reactive Black 5 boyar maddesi, 1 g/L ve üstündeki çamur miktarlarında %90 ve üstünde giderilmiştir. Crimson HEXL boyar maddesi ise 800 mg/L katı madde konsantrasyonunda tamamen giderilmiş, Yellow HE4R boyar maddesinin gideriminde %90 civarlarında verim elde edilebilmesi için 1 g/L adsorban dozajına ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.
- Karşılaştırma amacı ile gerçekleştirilen FeCl₃ ile koagülasyon ve FeCl₃ koagülasyonu ile oluşturulan taze çamurun kullanımıyla yürütülen adsorpsiyon deneylerinde elde edilen giderim verimleri sırası ile Reactive Black 5 için %2-14, Crimson HEXL için %10-12, Yellow HE4R için ise %13-18 olarak bulunmuştur. Bu verimlerin EK arıtma çamuru kullanımıyla elde edilen giderme verimlerinin çok altında kaldığı tespit edilmiştir.
- Çelik elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon uygulaması ile elde edilen çamurların izoelektrik noktasının değiştiği ve adsorpsiyon kapasitesinin arttığı deneysel sonuçlar ışığında söylenebilmektedir.
- Alüminyum elektrotları ile yürütülen EK çamurları ile gerçekleştirilen adsorpsiyon deneylerinde RB5 boyar maddesi için ancak 5

g/L gibi çok yüksek katı madde konsantrasyonunda %63 gibi bir renk giderme verimi elde edilebildiğini, Crimson HEXL için 2.2 g/L adsorban dozajı üzerinde ve Yellow HE4R için 4.74 g/L adsorban dozajı üzerinde pratik olarak rengin tamamının giderilebildiği tespit edilmiştir. Alüminyum elektrotların kullanılması halinde çelik elektrotlara göre renk giderme verimlerinin çok daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada elektrokoagülasyon uygulaması ile üretilen çamurların reaktif boyar maddelerin adsorpsiyon ile gideriminde kullanımının daha iyi değerlendirilebilmesi için oluşan çamurların katı faz özelliklerinin ne şekilde değiştiğinin daha ayrıntılı olarak incelenmesi yararlı olacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, maddi destekleri için İTÜ Araştırma Fonuna teşekkür ederler.

Kaynaklar

- Al-Degs, Y.S., El-Barghouthi, M.I., El-Sheikh, A. ve Walker, G.M., (2008). Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon, *Dyes and Pigments*, **77**, 1, 16-23.
- APHA, (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- Chen, G., (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, **38**, 11-41.
- Joo, D.J., Shin, W.S., Choi, J.-H., Choi, S.J., Kim, M.C., Han, M.H., Ha, T.W. ve Kim, Y.H., (2007). Decolorization of reactive dyes using inorganic coagulants and synthetic polymer, *Dyes and Pigments*, **73**, 59-64.
- Kabdaşlı, I., Ölmez, T. ve Tünay, O., (2002). Factors affecting colour removal from reactive dye bath by ozonation, *Water Science and Technology*, **45**, 12, 261-270.
- Metin, E., (2009). Kimyasal çöktürme çamurlarının organik madde adsorpsiyonunda kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R. ve Cocke, D.L., (2001). Electrocoagulation (EC)-science and applications, *Journal of Hazardous Materials*, **B84**, 29-41.
- Namasivayam, C., Jeyakumar, R. ve Yamuna, N.T., (1994). Dye removal from wastewater by adsorption on 'waste' Fe(III)/Cr(III) hydroxide, *Waste Management*, **14**, 7, 643-648.
- Netpradit, S., Thiravetyan, P. ve Towprayoon, S., (2003). Application of 'waste' metal hydroxide sludge for adsorption of azo reactive dyes, *Water Research*, **37**, 4, 763-772.
- Papic, S., Koprivanac, N., Bozic, A.L. ve Metes, A., (2004). Removal of some reactive dyes from synthetic wastewater combined Al(III) coagulation/carbon adsorption, *Dyes and Pigments*, **62**, 3, 291-298.
- Parks, G.A., (1965). The isoelectric points of solid oxides, solid hydroxides, and aqueous hydroxo complex systems, *Chemical Reviews*, **65**, 2, 177-198.
- Santos, S.C.R., Vitor, J.P., Rui, A.R. ve Boaventura, A.R., (2008). Waste metal hydroxide sludge as adsorbent for a reactive dye, *Journal of Hazardous Materials*, **153**, 3, 999-1008.
- Southern, T.G., (1995). *Technical solutions to the color problem: A critical review* in Cooper, P., eds, *Colour in Dyehouse Effluent*, Society of Dyers and Colorists, Alden Pres, Oxford.
- Tünay, O., (1996). *Endüstriyel kirlenme kontrolü*, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.