

## Tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtılması: Teknik ve ekonomik değerlendirme

Murat EYVAZ<sup>\*1</sup>, Mahmut BAYRAMOĞLU<sup>2</sup>, Mehmet KOBYA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü, Gebze, 41400, Kocaeli

<sup>2</sup>Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Bölümü, Gebze, 41400, Kocaeli

### Özet

*Bu çalışmada, bir tekstil atıksuyunun elektrokoagülasyon (EC) ile arıtılmasının sonuçları ortaya konmuştur. Demir ve alüminyum elektrotlar, monopolar paralel, monopolar seri ve bipolar seri bağlantı şekli ile kullanılmıştır. Arıtma verimliliğinin ölçülmesinde KOİ ve türbidite giderimleri dikkate alınmıştır. KOİ gideriminde, her iki elektrot materyalinde asidik ortam daha uygun olup; demir elektrot için, Bipolar Seri (BP-S) bağlantı şekli etkili olurken, alüminyum elektrotlarda ise her üç bağlantı şekli için birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Türbidite gideriminde; optimum pH'nın elektrot materyaline bağlı olduğu, alüminyum elektrotlar için asidik ortamın, demir elektrotlar için ise nötral ortamın daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak, yüksek akım yoğunluklarının yüksek KOİ ve türbidite giderme verimleri sağladığı görülmüştür. Düşük akım yoğunluğunda ( $30 \text{ A.m}^{-2}$ ) demir elektrotlarda sadece Monopolar Paralel (MP-P) sistemden verim alınmıştır. Alüminyum elektrotlarda ise; KOİ giderimi bağlantı şekline göre değişirken, türbidite giderimi bağlantı şekline göre bağımsızdır. Diğer yandan, EC prosesi alüminyum elektrotlarla daha hızlı ilerlediğinden; her üç bağlantı için de 5 dakikalık bir süre etkili olurken, demir elektrotlarda ise; seri bağlantı sistemleriyle en az 10 dakikalık bir işlem süresine ihtiyaç duyulmakta, MP-P bağlantı şekli ise daha fazla işlem süresi gerektirmektedir. Ekonomik analizde, bir tekstil fabrikasının  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{gün}^{-1}$  debide atıksuyunun EC ile arıtılmasının işletme giderleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada EC prosesinin, kimyasal koagülasyona göre daha az materyal tüketen ve daha az çamur üreten, daha hızlı ve daha ekonomik bir proses olduğu belirlenmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Ekonomik analiz, elektrokoagülasyon, elektrot malzemesi, KOİ, tekstil atıksuları, türbidite.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Murat EYVAZ. meyvaz@gyte.edu.tr; Tel: (262) 605 32 43.

Bu makale, 07-09 Haziran 2006 tarihleri arasında İstanbul'da düzenlenen 10. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumunda sunulan bildirilen arasından, İTÜ Dergisi/e Su Kirlenmesi Kontrolü dergisinde basılmak üzere seçilmiştir. Makale metni 02.11.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 06.12.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation: technical and economic evaluation

### Extended abstract

Electrocoagulation (EC) is an effective method for wastewater treatment. This paper presents the results of the treatment of a textile wastewater by EC process. Two electrode materials, aluminium and iron, were connected in three modes namely, monopolar-parallel (MP-P), monopolar-serial (MP-S), and bipolar-serial (BP-S). In MP-P mode; anodes and cathodes are in parallel connection, the current is divided between all the electrodes in relation to the resistance of the individual cells. Hence, a lower potential difference is required in parallel connection, when compared with serial connections. In MP-S configuration; each pair of sacrificial electrodes is internally connected with each other, because the cell voltages sum up, a higher potential difference is required for a given current. Otherwise, in BP-S connection; there is no electrical connection between inner electrodes, only the outer electrodes are connected to the power supply. Outer electrodes are monopolar and inner ones are bipolar. This connection mode has simple setup with and has less maintenance cost during operation.

The effects of wastewater pH, current density and operating time are presented separately for two sacrificial electrode materials, Fe and Al, and three electrode connection modes mentioned above. COD and turbidity removals were selected as performance criteria. The following conclusions may be drawn from the experimental results; acidic medium is preferable for a high COD removal for both electrode materials; iron electrode performs clearly better with BP-S mode, while the performance of aluminium is not strongly dependent on connection mode. For a high turbidity removal, the optimum pH depends on the electrode material; aluminium electrode connected in BP-S mode performs better in acidic medium, while the poor filterability of the flocs dictates pH 7 to be more suitable for the iron electrode connected in MP-S mode. High current density is generally favorable for high COD and turbidity removals in the case of iron; at low current density, MP-P mode performs better, while at high current densities, the three modes perform equally well. In the aluminium case, the effect is more pronounced on COD removal and it depends strongly on the connection mode, but it has nearly a negligible

effect on the turbidity removal which also unaffected by the connection mode. In the case of aluminium, steady removal efficiencies are reached within 5 min for all three systems, while for iron electrode, serial connection systems, BP-S and MP-S reach steady values in 10 min, while MP-P needs longer operating time.

For a complete technical analysis, it is worth to compare EC with conventional chemical coagulation, in regard with removal efficiencies and various important aspects. For this purpose, jar-tests were performed at laboratory scale in order to determine the adequate coagulant dosage. After choosing the best amount, same experiments have been performed to determine optimum pH value for each coagulant. Experimental conditions, removal efficiencies and some other pertinent data of electrocoagulation and chemical coagulation process variations are shown in text. At first sight, it is clearly seen that EC is faster, consumes less material and produces less sludge than chemical coagulation for similar COD and turbidity removal levels. The process using aluminium electrodes connected in MP-S mode seems to be the best choice. Meanwhile, an economic analysis is, of course, needed for a final selection. In economic analysis; the total operation cost was calculated using various experimental dataset such as; energy consumption, sacrificial electrode material, chemicals and sludge amounts per  $m^3$  of wastewater for a textile plant with  $1000 m^3 \cdot day^{-1}$  of wastewater. Iron is preferred as a low cost one for electrocoagulation. On the other hand,  $FeCl_3$  is the preferable salt in view of its techno-economic performance for CC. Finally, when EC and CC are compared both technically and economically, the following results may be drawn; the COD removal performance of CC is 10% higher than EC, the turbidity removal is nearly the same, but in 60% longer retention time. With the same initial pH, the final pH is 7.9 in EC, but 2.9 in CC. The final acidic and chloride bearing medium is an important drawback of CC, causing severe corrosion problems which may necessitate high-cost building materials. From this point,  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 7H_2O$  may be used despite of its higher operating cost. High coagulant consumption in CC means high chloride concentration in the effluent. Finally, and more importantly, the operating cost of CC is 3.2 times as high as the operating cost of EC.

**Keywords:** COD, economic analysis, electrocoagulation, electrode material, textile wastewaters, turbidity.

## Giriş

Son yıllarda, çevresel önemi ve ekonomik verimi nedeniyle elektrooksidasyon ve elektrokoagülasyon gibi elektrokimyasal arıtma metotları dikkat çekmektedir (Cameselle vd., 2005; Chen, 2004; Mollah vd., 2001). EC prosesinin kirleticileri uzaklaştırmadaki prensibi koagülasyon, adsorbsiyon, çöktürme ve flotasyon giderme mekanizmalarının biri veya birkaçına dayanmaktadır. Alüminyum ve demir gibi metal anotların anodik çözülmeye uğraması ve hidrolizi ile metal hidroksitleri oluşmaktadır. Birçok avantajından dolayı EC prosesi, farklı endüstriyel atıksuların arıtılmasında etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Tekstil atıksuları genellikle yüksek pH ve renk içeriği, düşük biyolojik parçalanabilirlik gibi özellikleri ile kirli atıksular arasında yer almaktadır (Lin ve Chen, 1997). Tekstil ürünlerinin çeşitliliğindeki artış ve buna bağlı olarak yüksek değişkenlikte kimyasal özelliklere sahip birçok boyarmaddenin kullanılması, bu sektörün atıksularının arıtılmasını daha zor hale getirmektedir (O'Neill vd., 1999). Bu amaçla, adsorbsiyon, biyolojik arıtım, oksidasyon, koagülasyon ve flokülasyon gibi konvensiyonel metotlar kullanılmaktadır (Jia vd., 1999). Ancak adsorbsiyon prosesinde adsorban rejenerasyonunun zorluğu (Daneshvar vd., 2004), kimyasal koagülasyonda kimyasal ilavesi sonucu istenmeyen reaksiyonların meydana gelmesiyle ekstra kirlilik ve fazla çamur oluşumu (Lin ve Chen, 1997), biyolojik arıtımda bazı boyarmaddelerin mikroorganizmalar üzerindeki toksik etkilerinden dolayı başka metotlar geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, bu metotlar genellikle pahalı ve tekstil atıksularının bileşenlerinin çok çeşitli olmasından dolayı etkisiz kalmaktadır (Vlyssides vd., 1999). Pek çok çalışma tekstil atıksularının arıtımında KOİ, türbidite ve çözülmüş katı maddelerin EC prosesi ile etkili bir şekilde giderildiğini göstermektedir (Bayramoglu vd., 2004; Daneshvar vd., 2004; Kobya vd., 2003; Can vd., 2003; Lin ve Chen, 1997).

EC ünitesinin geliştirilmesi ve optimizasyonu için; pH gibi atıksuya ait karakteristikler, akım yoğunluğu ve uygulama süresi gibi proses de-

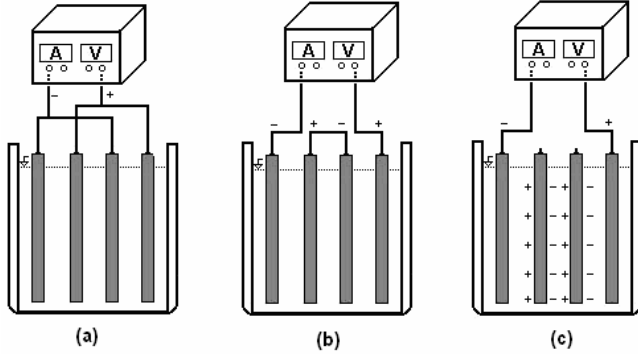
ğişkenleri ve elektrot materyalinin tipi ile bağlantı şekli gibi proses konfigürasyonlarının ayrıntılı bir şekilde göz önüne alınması gerekmektedir. Bu çalışmada elektrot materyali ve bağlantı şeklinin etkisi de dikkate alınarak tekstil atıksularının EC ile arıtılmasının KOİ ve türbidite giderme verimi üzerine etkileri ortaya konmuştur. Bu amaçla, konvensiyonel kimyasal koagülasyonla da karşılaştırma yapılarak en yüksek kirletici giderimlerinin meydana geldiği ve ekonomik verilerin de aynı zamanda minimum olduğu şartlar bulunarak hem teknik hem de ekonomik yönden EC prosesinin analizi gerçekleştirilmiştir.

## Deneysel çalışma

Çalışmada kullanılan tekstil atıksuyu Gebze'de bulunan ve günde 1000 m<sup>3</sup> atıksu açığa çıkaran bir tekstil fabrikasının birkaç çeşit boyarmadde çözeltileri içeren bir çıkış tankından alınmıştır. Atıksu karakteri; KOİ: 2031 g.m<sup>-3</sup>, TAKM: 102 g.m<sup>-3</sup>, iletkenlik: 2310 µScm<sup>-1</sup>, türbidite: 671 NTU şeklindedir. Atıksu, çalışmalardan önce kaba filtreden geçirilerek (Whatman 541, 25 µm gözenek çaplı) büyük boyuttaki askıda katı maddelerin giderimi sağlanmıştır.

Deney düzeneği Şekil 1'de gösterilmiştir. Termostatlı elektrokoagülatör 120 mm × 110 mm × 110 mm boyutlarında Plexiglas malzemeden yapılmış olup, magnetik karıştırıcı ile 250 rpm hızında karıştırma yapılmıştır. EC reaktörü içerisinde her bir konfigürasyonda yer alacak olan 4 adet elektrot kullanılmıştır. Demir ve alüminyum elektrotların (anot ve katot) her biri 45 mm × 53 mm × 3 mm boyutlarında olup toplam efektif alan 143 cm<sup>2</sup>'dir ve elektrotlar arasındaki mesafe 20 mm olarak ayarlanmıştır. Elektrotlar, bir dijital güç kaynağına bağlanmıştır ve galvanostatik modda kullanılmıştır (Topward 6306D; 30 V, 6A). Deney düzeneğinde Şekil 1'de gösterilen bağlantı şekilleri kullanılmıştır. MP-P sisteminde güç kaynağının (+) ve (-) uçları elektrotlara sırasıyla bağlanmıştır. Bu sistemde her bir elektrot anot ve katot olarak davranmaktadır. MP-S sisteminde sadece dış kenarlarda bulunan iki elektrot güç kaynağına bağlanırken, iç elektrotlar ise bir iletken vasıta-

sıyla birbirlerine bağlanmışlardır. Her bir elektrot anot ya da katot olarak görev yapmaktadır. BP-S sisteminde ise dış kenarlarda bulunan iki elektrot güç kaynağına bağlanmış olup, iç elektrotların güç kaynağı ile ya da kendi aralarında bir bağlantıları yoktur. Bu sistemde sadece dıştaki elektrotlar anot ve katot olarak görev yaparken, içteki elektrotların bir yüzeyi (+) yüke sahip iken, bir yüzeyi de (-) yüke sahiptir.



Şekil 1. (a) MP-P sistemi, (b) MP-S sistemi, (c) BP-S sistemi

Tüm deneyler 20 °C sabit sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyde elektrolitik hücreye 750 ml tekstil atıksuyu eklenmiştir. İstenilen akım yoğunluğuna karşılık gelen akım ayarlandıktan sonra koagülasyon işlemine başlanmıştır. Elektrokoagülasyon işleminden sonra çözeltili filtre edilmiş ve analiz edilmiştir.

Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam askıda katı madde (TAKM) ve türbidite analizleri Standart Metotlara (APHA, 1992) göre yapılmıştır. Analizlerde Shimadzu Model UV-160 çift ışınli spektrofotometre kullanılmıştır. AZ 8601 model pH metre ile pH ölçülmüş ve iletkenlik ölçümünde ise Lutron CD-4303 model kondüktivite metre kullanılmıştır.

### Teknik açıdan değerlendirme

Başlangıç pH'sının etkisini belirlemek için 30 A.m<sup>-2</sup> akım yoğunluğu ve 15 dakika reaksiyon süresi sabit şartları altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Demir elektrotlarla EC prosesinde pH değişimini en çok elektrot bağlantı şekilleri etkilemiştir. Alüminyum elektrotlarda ise özellikle

bazık şartlarda EC'nin pH üzerinde tamponlama kapasitesi olduğu görülmüştür.

KOİ giderim etkisinin pH değişimine kuvvetle bağlılığı Şekil 2'den görülmektedir. Demir elektrot ile asidik ortamda, bağlantı şekilleri birbirlerinden oldukça farklı giderme verimleri elde edilmiş ve BP-S sistemi pH 5'te yaklaşık %70 performansı ile en yüksek KOİ giderimini sağlamıştır. Demir elektrotlar kullanılması durumunda yüksek pH değerlerinde çalışıldığında ise, bütün elektrot bağlantı şekillerinde giderme verimlerinin düştüğü görülmüş ve MP-S sistemi diğerlerinden daha iyi bir performans sergilemiştir. Alüminyum elektrotlar kullanıldığında ise bağlantı şekillerinin arıtma verimine etkisi üzerinde fazla fark gözlenmemiştir. pH 5'te MP-S sistemi %63 KOİ giderimi ile maksimum performansı gösterirken; pH 10 değerinde ise bu değer %20 lere düşmüştür. Şekil 3 pH değişim-türbidite giderimi ilişkisini göstermekte olup, yürütülen bu denemelerde pH artışı ile türbidite gideriminde bir düşüş meydana gelmiştir. Demir elektrotlarda en iyi sonuç pH 6-7 değerlerinde çalışıldığında %90'a varan giderme verimiyle MP-S sistemine aittir.

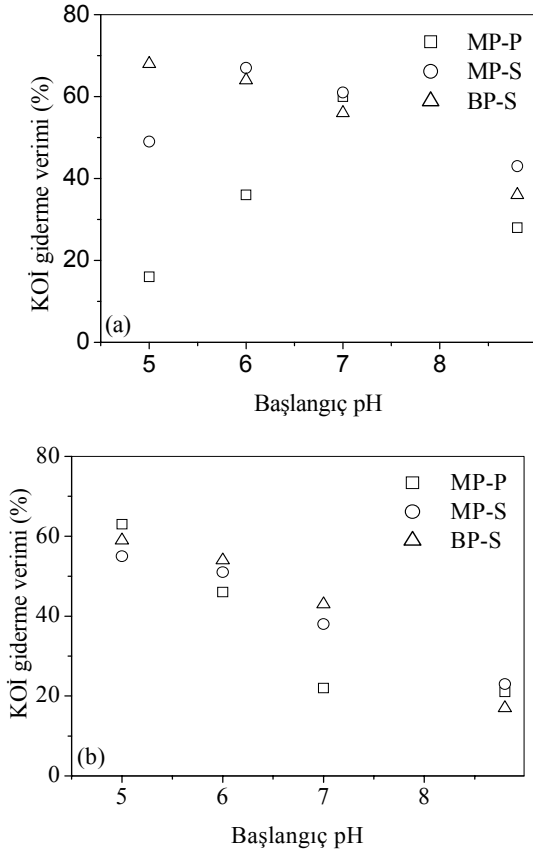
Düşük pH'da proses koloidal hidroksit floklarından dolayı atıksuyun türbiditesinde artış gözlenmiştir. Daha yoğun gözenekli bir filtre kâğıdı (Whatman 934-AH Glass Microfibre Filters, 1.5 µm gözenek çaplı) ile süzme yapıldığında ise pH 6 değerinde pH 7'deki kadar etkili giderim sağlanmış (giderim verimi Şekil 3'te siyah noktalar ile gösterilmiştir); pH 5'te ise etkin bir giderim elde edilmemiştir. Alüminyum elektrotlarda demirden farklı bir eğilim gözlemlenmektedir. Asidik ortam pH 5'te alüminyumun BP-S sistemiyle %90'ın üzerinde türbidite giderdiği görülmektedir.

Sonuç olarak, alüminyum elektrot kullanılması durumunda denenen her üç bağlantı şeklinde de maksimum KOİ ve türbidite giderimleri pH 5 de elde edilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen bu sonuçlara göre söz konusu tekstil atıksuyunun elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımında optimum pH'nın 5 olduğu Şekil 2b'den de görülmektedir. Demir elektrotlar kullanılması du-

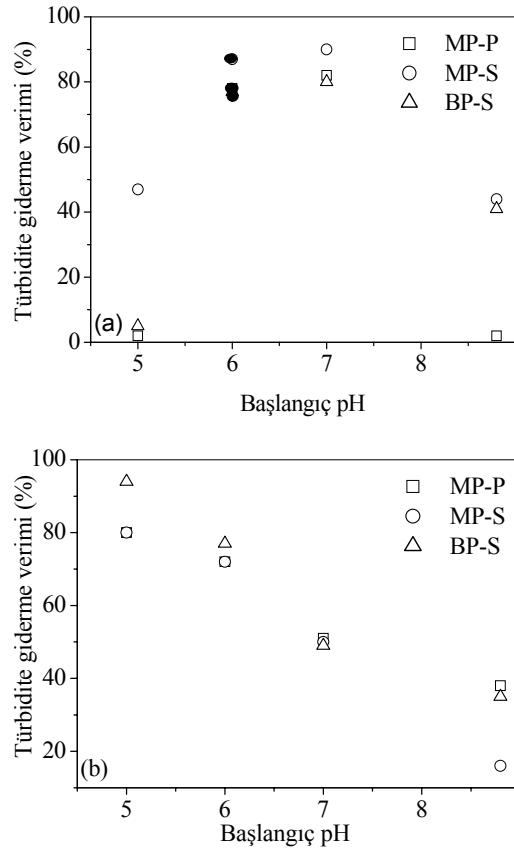
rumunda maksimum KOİ giderim verimlerinin elde edildiği pH değerleri BP-S bağlantı şekli için pH 5; MP-S için ise pH 6 ve MP-P için de pH 7 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla demir elektrot kullanılması durumunda KOİ giderme verimlerinin elektrotların bağlanma şekline etkilendiği ve her bir bağlantı şekli için optimum pH'nın değişim gösterdiği sonucuna varılmaktadır. Bunun ile birlikte KOİ ve türbidite giderimleri için topluca bir değerlendirme yapıldığında demir elektrot açısından BP-S bağlantısı dışındaki diğer bağlantı şekilleri için optimum pH 7 olarak kabul edilebilmektedir.

Türbidite gideriminde ise pH 5'in alüminyum için uygun olduğu göz önüne alınırsa bu pH değerinin alüminyum elektrot için optimum olduğu söylenebilir. Demir elektrotlarda ise pH 7 değeri daha uygundur.

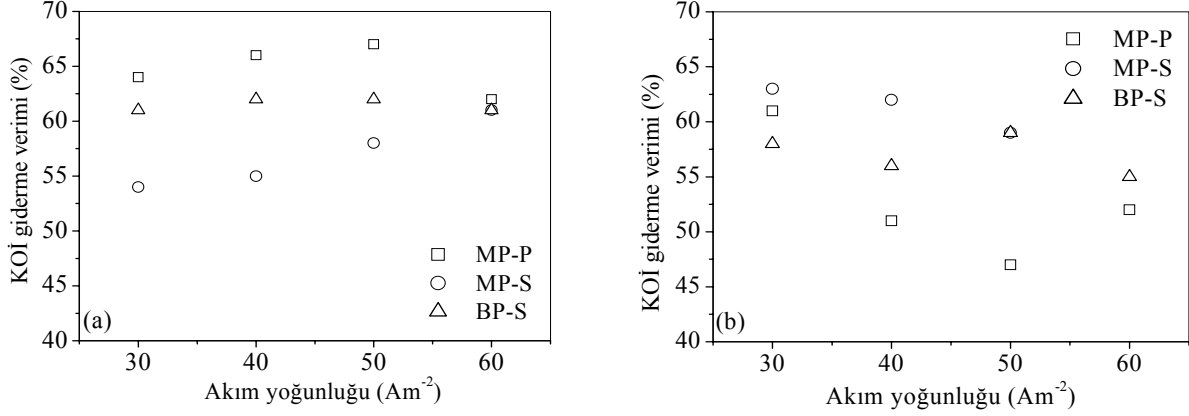
Şekil 4'te akım yoğunluğu değişiminin KOİ giderme verimi üzerine etkisi görülmektedir. Akım yoğunluğunun proses verimi üzerine etkisini belirlemek üzere yürütülen denemeler, demir elektrotlar için sabit pH, 7'de ve alüminyum elektrotlar için de sabit pH, 5'te ve 15 dakikalık deney süresi şartlarında gerçekleştirilmiştir. Akım yoğunluğundaki değişim özellikle MP-P ve MP-S sistemleri için arıtma verimini çok etkilememiştir. MP-S sistemi için 50 A.m<sup>-2</sup> akım yoğunluğunda KOİ giderimi % 67'dir. Alüminyum elektrotların ise akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerine etkisi MP-S sisteminde tespit edilmiştir. EC'nin ekonomik bir proses olması için düşük akım yoğunluğu tercih edilmelidir. Alüminyum elektrot kullanarak 30 A.m<sup>-2</sup> değerinde MP-S sisteminde maksimum % 63'lük KOİ gideriminin bu açıdan ekonomik olduğu söylenebilmektedir. Demir elektrotlarla



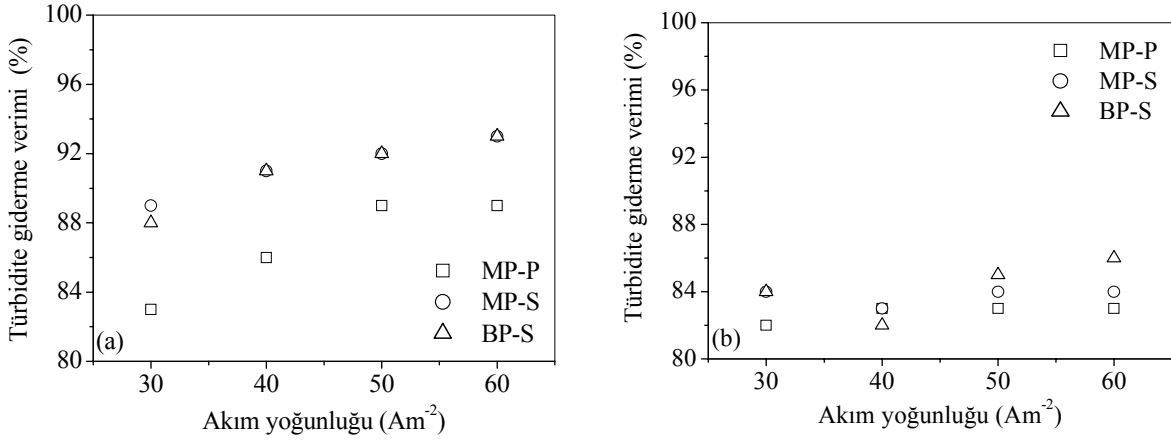
Şekil 2. KOİ giderme verimine pH'nın etkisi: (a) Demir elektrotların etkisi, (b) Alüminyum elektrotların etkisi



Şekil 3. Türbidite giderme verimine pH'nın etkisi: (a) Demir elektrotların etkisi, (b) Alüminyum elektrotların etkisi



Şekil 4. KOİ giderme verimine akım yoğunluğunun etkisi: (a) Demir elektrotların etkisi, (b) Alüminyum elektrotların etkisi



Şekil 5. Türbidite giderme verimine akım yoğunluğunun etkisi: (a) Demir elektrotların etkisi, (b) Alüminyum elektrotların etkisi

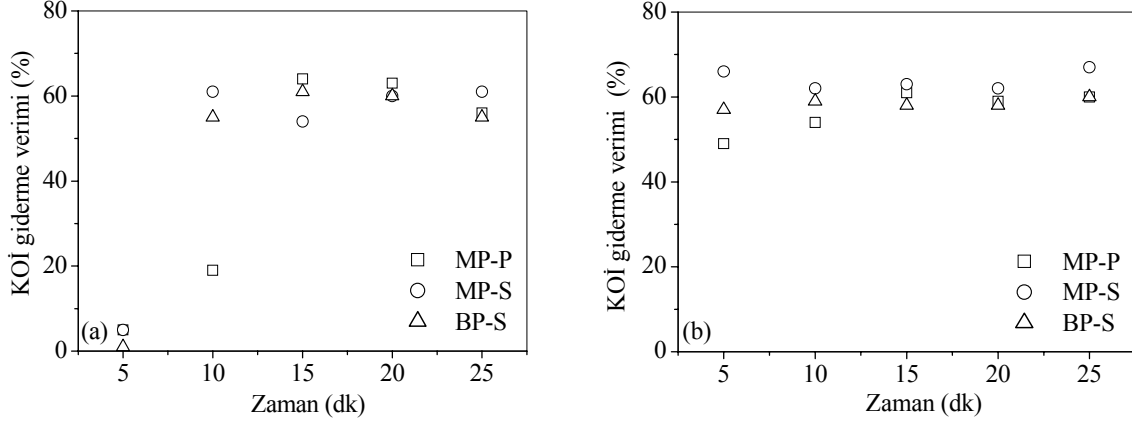
50 Am<sup>-2</sup> akım yoğunluğu değerinde MP-S ve BP-S sistemleri %92 KOİ giderimi sağlarken, MP-P sistemi %89'luk bir performans göstermiştir.

Alüminyum elektrotlarda, akım yoğunluğunun türbidite giderimi üzerinde hemen hemen bir etkisi olmadığı saptanmıştır.

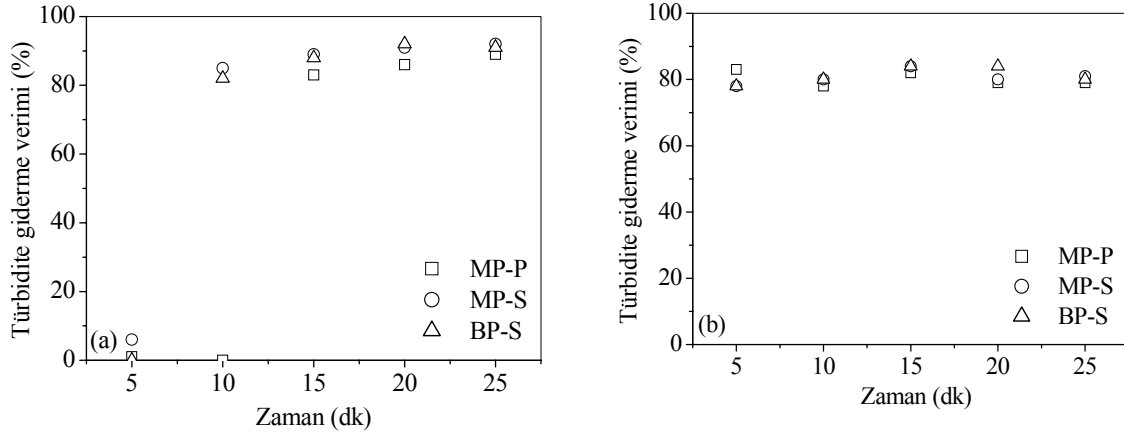
Demir elektrotların kullanıldığı MP-P sisteminde 50 A.m<sup>-2</sup> ve 15 dakikalık deney şartlarında %67 KOİ ve %89 türbidite giderimi gerçekleşmiştir. 30 A.m<sup>-2</sup> kullanıldığında ise %65 KOİ ve %83 türbidite giderimi elde edilmiş olup, maliyet için bu akım yoğunluğu tercih edilebilir. Diğer yandan alüminyum elektrotların kullanıldığı

MP-S sistemi için 30 A.m<sup>-2</sup> akım yoğunluğunda %63 KOİ ve %84 türbidite giderimi belirlenmiştir.

Sürenin sistem verimi üzerine etkisini belirlemek amacıyla yürütülen deneyler her bir elektrot için 30 A.m<sup>-2</sup>, demir elektrotlar için pH 7 ve alüminyum elektrotlar için ise pH 5'te gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, KOİ ve türbidite giderimi için sırasıyla Şekil 6 ve 7'de gösterilmiştir. Demir elektrot kullanılması durumunda KOİ giderim değerleri % 54-64 aralığında değişim göstermektedir. Şekil 6 (a) ve 7 (a)'dan da açıkça görüldüğü gibi 5 dakikalık deney süresi hem KOİ hem de türbidite giderimi için yetersiz kalmaktadır. En az 15 dakikalık bir işlem süresinde



Şekil 6. KOİ giderme verimine zamanın etkisi: (a) Demir elektrotların etkisi, (b) Alüminyum elektrotların etkisi



Şekil 7. Türbidite giderme verimine zamanın etkisi: (a) Demir elektrotların etkisi, (b) Alüminyum elektrotların etkisi

ancak giderim değerleri kararlı bir noktaya ulaşmış bu noktadan sonra fazla değişkenlik göstermemiştir.

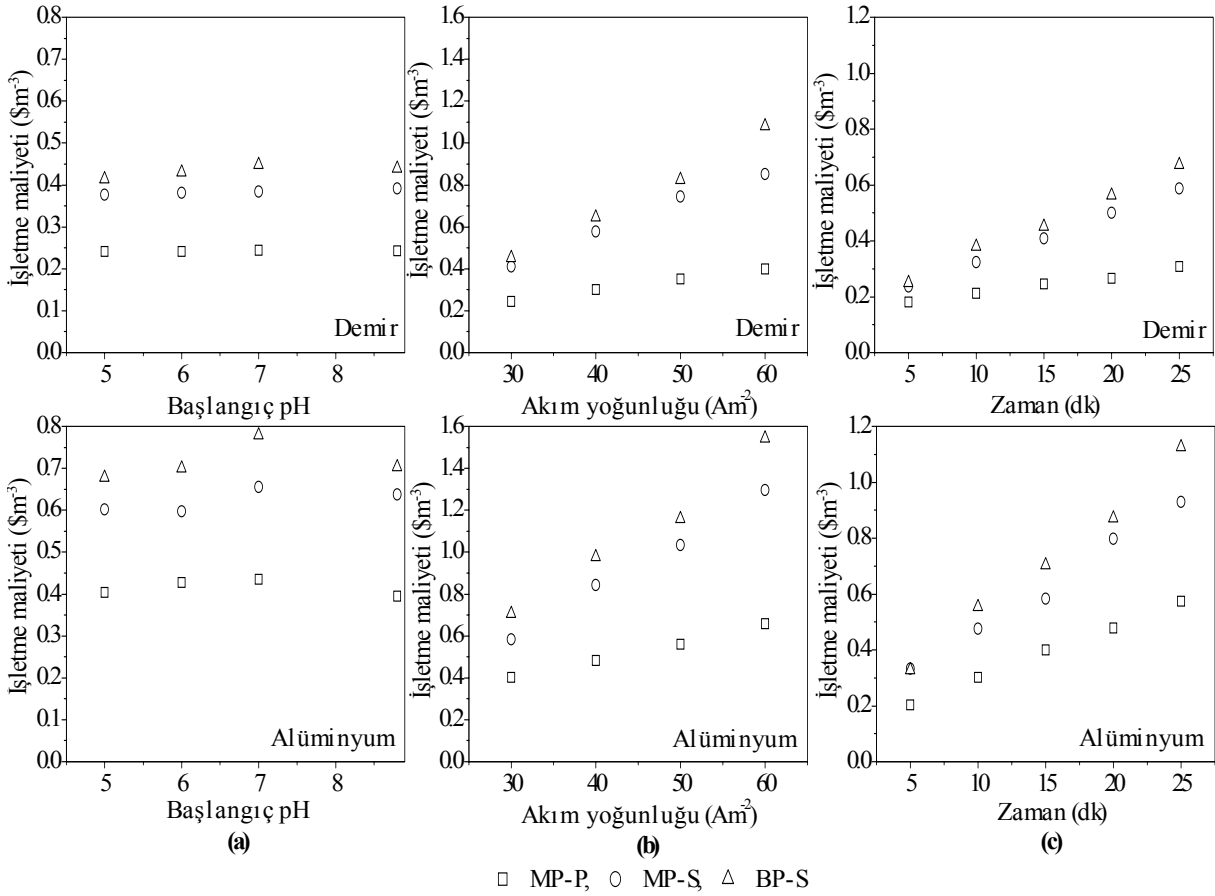
Alüminyum elektrotlarda her üç sistem için de 5 dakikalık işlem süresinin yaklaşık olarak kararlı giderim değerlerine ulaşmak için yeterli olduğu görülmüştür. MP-S sistemi % 65 KOİ ve % 78 türbidite giderimiyle en yüksek performansı göstermiştir.

EC prosesinin bütünüyle bir teknik analizini yapabilmek için konvensiyonel kimyasal koagülasyon (CC) prosesiyle karşılaştırmak yararlı olacaktır. Bu amaçla laboratuvar ölçekli bir jar-test çalışması yapılarak yeterli koagülant doza

belirlenmiştir. Uygun dozaj belirlendikten sonra aynı deneyler, her bir koagülant için optimum pH'ı saptamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. EC ve CC proseslerine ait ekonomik faktörler Tablo 1'de; deney şartları, giderim verimleri ve ilgili veriler Tablo 2'de; ekonomik ve teknik değerlendirme ise Tablo 3'te bir arada verilmiştir. Tablo 3'ten açıkça görülebileceği gibi EC prosesinin daha hızlı sonuca ulaşan, daha az materyal tüketen ve daha az çamur oluşumuna sebep olan; CC ile aynı KOİ ve türbidite giderme verimlerinde pH'da daha az değişim sağlayan bir proses olduğu anlaşılmaktadır. Teknik olarak bakıldığında alüminyum elektrotların kullanıldığı MP-S sistemi en iyi seçim olarak gözükmektedir.

Tablo 1. Proses maliyeti hesabında kullanılan ekonomik faktörler

Madde	Açıklamalar	Maliyet
Elektrik güç kaynağı (\$)	75kVA, 380 (440) V DC, frekans 50 (60)Hz	10000
EC tankı (\$)	40 \$.m <sup>-3</sup> havuz, V <sub>tank</sub> =50x(bekleme süresi)	500
Bakım/onarım (\$.m <sup>-3</sup> )		0.01
Elektrik donanım (\$/kWh)		0.06
İşçilik ücreti (\$.m <sup>-3</sup> )	8 saat vardiya ile 2 işçi, aylık 26 gün çalışma	0.06
Çamur taşıma ve uzaklaştırma (\$.kg <sup>-1</sup> )		0.01
Materyaller ve kimyasal maliyeti		
Fe elektrot (\$.kg <sup>-1</sup> )		1.8
Al elektrot (\$.kg <sup>-1</sup> )		0.3
Kimyasallar (\$.m <sup>-3</sup> )		0.025
FeCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O (\$.kg <sup>-1</sup> )		0.34
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 7H <sub>2</sub> O (\$.kg <sup>-1</sup> )		0.4
AlCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O (\$.kg <sup>-1</sup> )		0.8
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 18H <sub>2</sub> O (\$.kg <sup>-1</sup> )		0.4



Şekil 8. Toplam işletme maliyetleri



Tablo 2. EC ile CC arasında teknik karşılaştırma

Proses	Elektrokoagülasyon (EC)*		Kimyasal Koagülasyon (CC)				
	Elektrot/Koagülan	Fe elektrot	Al elektrot	FeCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 7H <sub>2</sub> O	AlCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 18H <sub>2</sub> O
Harcanan elektrot ya da koagülan tüketimi							
kg.m <sup>-3</sup> atıksu		0.163	0.058	1.500	1.500	1.000	1.500
kg/kg KOİ		0.126	0.048	1.761	1.586	0.828	1.896
Zaman** (dk)		15	5	25	25	25	25
Başlangıç pH		7.0	5.0	7.0	7.0	6.0	6.0
Son pH		7.9	5.7	2.9	3.1	4.1	4.1
KOİ giderimi (%)		65	65	71	68	68	59
Türbidite giderimi (%)		83	78	87	63	89	90

\* Bağlantı şekli : Fe elektrot: MP-P, Al elektrot: MP-S, Akım yoğunluğu: 30 A.m<sup>-2</sup>

\*\*Zaman : Kimyasal koagülasyon 5 dakikalık hızlı karıştırma (250 rpm) ve 20 dakikalık yavaş karıştırma (50 rpm) sürelerinden oluşmaktadır.

Tablo 3. EC ve CC prosesleri arasında teknik ve ekonomik verim üzerine karşılaştırma

Proses <sup>1</sup>	Elektrokoagülasyon (EC)		Kimyasal Koagülasyon (CC)				
	Materyal	Fe elektrot	Al elektrot	FeCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 7H <sub>2</sub> O	AlCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 18H <sub>2</sub> O
Deney Şartları <sup>2</sup>		AY =30 A.m <sup>-2</sup> MP-P sistemi	AY =30 A.m <sup>-2</sup> MP-P sistemi	KD = 1500 mg.l <sup>-1</sup>	KD = 1500 mg.l <sup>-1</sup>	KD = 1000 mg.l <sup>-1</sup>	KD = 1500 mg.l <sup>-1</sup>
Zaman <sup>3</sup> (dak)		15	15	25	25	25	25
Başlangıç pH		7.0	5.0	7.0	7.0	6.0	6.0
Son pH		7.9	6.3	2.9	3.1	4.1	4.1
KOİ giderimi (%)		64	63	71	68	68	59
Türbidite giderimi(%)		83	80	87	63	89	90
Koagülan tüketimi <sup>4</sup> (kg/kg KOİ)		0.126	0.096	1.761	1.586	0.828	1.896
Proses maliyeti (\$.m <sup>-3</sup> ) <sup>5</sup>		0.245	0.404	0.868	0.945	1.159	0.947

<sup>1</sup>Her prosese ait bütün veriler teknik ve ekonomik verim açısından maksimum performansın gösterildiği optimum deney şartlarına göre verilmiştir.

<sup>2</sup>Tabloda AY, akım yoğunluğunu; KD ise koagülan dozajını temsil etmektedir.

<sup>3</sup>Zaman olarak kimyasal koagülasyon 5 dakikalık hızlı karıştırma (250 rpm) ve 20 dakikalık yavaş karıştırma (50 rpm) sürelerinden oluşmaktadır.

<sup>4</sup>Kimyasal koagülasyon için koagülan tüketimleri salt tüketim olarak belirtilmiştir, elektrokoagülasyon için de çözünen elektrot miktarları dikkate alınmıştır.

<sup>5</sup>Ekonomik değerlendirmede kullanılan maliyet verileri, 2005 yılının son çeyreği dikkate alınarak hesaplamalara katılmıştır.

## Ekonomik açıdan değerlendirme

Ekonomik analiz yuruteden deneysel çalışma işığında belirlenen optimum koşullar altında yapılmıştır. Diğer bir deyiş ile ekonomik analiz, bu çalışmada incelenen tım, elektrot bağlantı Şekilleri için 15 dakika ve 30 A.m<sup>-2</sup> akım yoğunluğunda, demir ve alıminyum elektrotlar kullanılması durumunda sırasıyla pH 7 ve pH 5’de yuruteden deneylerden elde edilen veriler için gerçekleştirilmiştir. İşletme maliyetinin hesaplanmasında kullanılan veriler Tablo 1’de verilmiştir. Şekil 8 toplam işletme maliyetlerini gostermektedir. Her iki elektrot materyali için de genel olarak elektrot ve enerji tuketimleri ile çamur oluşumuna pH’nın onemli bir etkisi bulunmamaktadır. Ancak MP-P sisteminin çoğunlukla her u parametre ve her iki elektrot için de en az tuketim ve oluşum değerleri gosterdiği açıktır. Akım yoğunluğu arttika elektrot ve enerji tuketimi ile çamur oluşumu artmaktadır. Her iki elektrot materyali de birbirine yakın değerler sergilerken; MP-P sistemi daha dışuk rakamlar gostererek birbirine yakın sonuçlar veren diğer iki sistemden ayrılmaktadır. Deney sonuçları, en fazla elektrot materyali ile en fazla enerji tuketken ve en fazla çamur oluşumuna sebep olan sistemin BP-S olduğunu gostermektedir. Zamanın artmasıyla iki elektrot materyali ve u sistem de akım yoğunluğu etkisine benzer Şekilde; elektrot enerji tuketimleri ve çamur oluşumları için artan bir eğilim sergilemektedir. Zamanın etkisinin elektrot materyalinden bağımsız olduğu slylenebilirken, bağlantı Şekline kuvvetle bağlı olduğu açıkça gorumektedir.

## Sonuçlar

Yukarıdaki değerlendirmeler işığında; her iki elektrot materyali için de KOİ gideriminde asidik ortamın daha uygun olduğu sonucuna varılmaktadır. Yuksek turbidite giderim verimi elde etmek için; optimum pH’nın belirlenmesi elektrot materyaline bağlıdır. Demir elektrotlar için yuksek KOİ ve turbidite giderim verimlerinde yuksek akım yoğunluğu daha onemlidir. Alıminyum elektrot materyalinde, akım yoğunluğunun KOİ giderimi uzerine onemli etkisi olduğu gorumektedir. Elektrot bağlantı Şekli KOİ gideriminde etkili iken; turbidite gideriminde ihmal edilebilir duzeydedir. Alıminyum elektrot materyalinde 5 dakikalık bir işlem suresi her u

sistem için de uygun gozukmektedir. Demir elektrotlarda ise seri bağlantı sistemleri için 10 dakika yeterli olurken MP-P sistemi daha uzun sureye ihtiyaç duymaktadır.

## Teşekkur

Bu alışma, TUBITAK tarafından ÇAYDAG – 104Y267 no’lu proje olarak desteklenmiş olup, verilen destek için teşekkur ederiz.

## Kaynaklar

- APHA (American Public Health Association) (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17th edn, Washington, DC.
- Bayramoglu, M., Kobyay, M., Can, O.T. ve Sozbir, M., (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater, *Separation and Purification Technology*, **37**, 117–125.
- Cameselle, C., Pazos, M. ve Sanromán, M. A., (2005). Selection of an electrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Optimisation and scale-up, *Chemosphere*, **60**, 1080–1086.
- Can, O. T., Bayramoglu, M. ve Kobyay, M., (2003). Decolorization of Reactive Dye Solutions By Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes, *Industrial Engineering Chemistry Research*, **42**, 3391–3396.
- Chen, G., (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, **38**, 11–41.
- Daneshvar, N., Sorkhabi, H. A. ve Kasiri, M. B., (2004). Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections, *Journal of Hazardous Materials*, **B112**, 55–62.
- Jia, J., Yang, J., Liao, J., Wang, W. ve Wang, Z., (1999). Treatment of dyeing wastewater with ACF electrodes, *Water Research*, **33**, 881–884.
- Kobyay, M., Can, O. T. ve Bayramoglu, M., (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminium electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, **B110**, 163–178.
- Lin, S. H. ve Chen, M. L., (1997). Treatment of textile wastewater by electrochemical methods for reuse, *Water Research*, **31**, 868–876.
- Murugananthan, M., Bhaskar, R. G. ve Prabhakar, S. (2004). Separation of pollutants from tannery effluents by electroflotation, *Separation and Purification Technology*, **40**, 69–75.

- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R. and Cocks, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)–science and applications, *Journal of Hazardous Materials*, **B84**, 29–41.
- O’neill, C., Hawkes, F. R., Hawkes, D. L., Lourenço, N. D., Pinheiro, H. M. ve Delée W. (1999). Colour in textile effluents – sources, measurement, discharge consents and simulation: a review, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **74**, 1009–1018.
- Vlyssides A. G., Loizidou M., Karlis P. K., Zorpas A. A. ve Papaioannou D. (1999). Electrochemical oxidation of a textile dye wastewater using a Pt/Ti electrode, *Journal of Hazardous Materials*, **B70**, 41 – 52.