

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTO ELEKTRO-FENTON PROSESİ İLE TEKSTİL
ATIKSULARININ ARITILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer Faruk KONT

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Beytullah EREN

Ağustos 2022

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTO ELEKTRO-FENTON PROSESİ İLE TEKSTİL
ATIKSULARININ ARITILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer Faruk KONT

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 12.08.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ömer Faruk KONT
TARİH

TEŞEKKÜR

Akademik eğitimimin yüksek lisans aşamasında her zaman yanımda olarak bilgisini, yardımını esirgemedi bana destek olan, bilgisiyle bana yön veren, bu süreci en iyi şekilde bitirmeme yardımcı olan çok sevgili akademik danışmanım Beytullah EREN'e, laboratuvar çalışmalarında bilgileriyle beni destekleyen ve yardımını esirgemeyen Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü Dr. Öğretim Üyesi Murat SOLAK'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimde ders aldığım değerli hocalarıma bana olan katkıları ve emeklerinden ve Çevre Mühendisliği Bölümü'nün bana sunduğu imkânlardan, dolayı teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarında laboratuvarını kullanmama izin veren Arıtsan Çevre Laboratuvarı sahibi Yakup AYVENLİ'ye teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın hiç kuşkusuz her aşamasında gerek sosyal gerek eğitim hayatımda hiçbir şekilde maddi ve manevi desteği benden esirgemeyen, düştüğümde yeniden ayağa kalkmama yardımcı olan, hiçbir zaman pes etmemeyi bana öğreten, hayatıma değer katan ve her zaman desteklerini yanımda hissettiğim çok kıymetli annem Arife KONT'a ve babam Ahmet KONT'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu süreçte manevi destekleriyle moral ve motivasyon veren, yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Ayşem GÖK, Ulaş BİNAY ve Esra BUDAK'a çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	i
TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ	iii
TABLolar LİSTESİ.....	v
ÖZET	vi
SUMMARY.....	vii
 BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
 BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Türkiye’de Tekstil Sektörü.....	3
2.1.1. Tekstil endüstrisi prosesleri.....	4
2.2. Tekstil Atıksularının Özellikleri.....	4
2.3. Tekstil Atıksularının Arıtımında Kullanılan Yöntemler	6
2.3.1. Fiziksel ve kimyasal yöntemler.....	8
2.3.1.1. Adsorpsiyon arıtım yöntemleri.....	8
2.3.1.2. Membran ile arıtım prosesleri	8
2.3.1.3. Koagülasyon-flokülasyon.....	9
2.3.2. Biyolojik yöntemler	10
2.3.3. Oksidasyon yöntemler.....	11
2.3.3.1. Kimyasal oksidasyon.....	11
2.3.3.2. İleri oksidasyon prosesleri.....	11
2.4. Elektrokimyasal İleri Oksidasyon Prosesinin Genel Özellikleri.....	17

2.4.1. Doğrudan metot.....	18
2.4.1.1. Anodik oksidasyon	18
2.4.2. Dolaylı metot.....	19
2.4.2.1. Elektro fenton	19
2.4.2.2. Fered fenton.....	20
2.4.2.3. Peroksi koagülasyon.....	21
2.4.2.4. Sono-elektro fenton	21
2.4.2.5. Anodik fenton.....	22
2.4.2.6. Fotoelektro fenton yöntemi	22

BÖLÜM 3.

MATERYALLER VE DENEYSEL UYGULAMA	24
3.1. Materyal	24
3.1.1. Kullanılan elektrot malzemeleri	24
3.1.2. Kullanılan çözelti ve reaktifler.....	24
3.2. Kullanılan Atıksuyun Özelliklerinin Belirlenmesi.....	24
3.3. Deney ve Analiz Yöntemleri.....	26
3.3.1. Deney düzeneği.....	26
3.3.1.1. Elektrot çiftinin belirlenmesi.....	28
3.3.1.2. Uygun pH değerinin belirlenmesi	28
3.3.1.3. Deneysel optimizasyon.....	28
3.4. Yapılan Analiz ve Yöntemler.....	28
3.4.1. Ph ve elektriksel iletkenlik	28
3.4.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı	29
3.4.3. Renk analizleri	29
3.6. Giderim Verimlerinin Hesabında Kullanılan Matematiksel Eşitlik Artım Verimliliği Hesabı.....	29

BÖLÜM 4.

BULGULAR ve TARTIŞMA	30
4.1. Elektrot Seçimi	30
4.2. Grafit Plaka-Grafit Plaka Deneysel Sistem Optimizasyonu	32
4.2.1. Grafit plaka elektrot kombinasyonu ile foto elektro-fenton denemeleri	32

BÖLÜM 5.

DEĞERLENDİRME VE SONUÇ	41
------------------------------	----

KAYNAKLAR	43
-----------------	----

ÖZGEÇMİŞ	48
----------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$(Al_2(SO_4)_3)$	:Alüminyum (III) Sülfat
$(AlCl_3)$	:Alüminyum (III) Klorür
$(Fe_2(SO_4)_3)$	:Demir (III) Sülfat
$(FeCl_3)$	:Demir (III) Klorür
BOİ	:Biyolojik Oksijen İhtiyacı
CO_2	:Karbon Dioksit
CWAO	:Katalitik Islak Hava Oksidasyonu
EİOP	:Elektrokimyasal İleri Oksidasyon
Fe^{2+}	:Demir
FEF	:Foto Elektro Fenton
FF	:Fered-Fenton
H_2O_2	:Hidrojen Peroksit
HCl	:Hidrojen Klorür
IOP	:İleri Oksidasyon Prosesleri
KOİ	:Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MBR	:Membranbioreaktör
MD	:Membran Damıtma
NF	:Nano Filtrasyon
O_3	:Ozon
OH	:Hidroksil
RO	:Ters Ozmoz
SO_4	:Sülfat
UF	:Ultra Filtrasyon
UV	:Ultraviyole
uv-C	:Ultraviyole Mikrop Öldürücü Işınlama

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Tekstil endüstrisinin ana kirletici parametreleri	4
Şekil 2.2. Tekstil Atıksularında Uygulanan Arıtım Prosesleri.....	7
Şekil 2.3. Tekstil Atıksularının Arıtımında Uygulanmakta olan Elektrokimyasal Prosesler.....	7
Şekil 2.4. Katalitik Ozon Prosesi	12
Şekil 2.5. Elektro Fenton işleminin reaksiyon mekanizmasının gösterimi.....	20
Şekil 3.1. Tesisin iş akış şeması.....	25
Şekil 3.2. Deney için kullanılan reaktör düzeneği	26
Şekil 4.1. Farklı elektrot çiftleri ile yapılan çalışmalara ait giderim verimleri.....	31
Şekil 4.2. Grafit plaka anot kullanılarak pH parametresinin giderim miktarı üzerindeki performansı.....	35
Şekil 4.3. Grafit plaka anot için farklı akım değerlerinde renk (Pt-Co) parametresi üzerindeki verim miktarının değişimi.....	35
Şekil 4.4. Grafit plaka anot için farklı akım değerlerinin Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) parametresi üzerindeki verim miktarının değişimi	36
Şekil 4.5. Grafit plaka anot için farklı Fe^{2+} dozlarının giderim veriminin renk (Pt-Co) parametresine ait değişimi	38
Şekil 4.6. Grafit plaka anot için farklı Fe^{2+} dozlarının giderim veriminin KOİ üzerindeki etkisi.....	39
Şekil 4.7. Grafit plaka anot için giderim veriminin zamana bağlı olarak KOİ ve Renk parametrelerinin üzerindeki etkisi	40

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Tekstil atık sularının bileşimi ve miktarı.....	5
Tablo 3.1. Kullanılan elektrot kombinasyonları	24
Tablo 3.2. Deneyde kullanılan atıksuyun parametreleri	26
Tablo 4.1. Farklı elektrotlar ile yapılan çalışmalara ait deney sonuçları.....	30
Tablo 4.2. Grafit plaka anot için uygun pH değerinin belirlenmesi	33
Tablo 4.3. Grafit plaka anot için I=0.35 A akımda elde edilen analiz sonuçları	34
Tablo 4.4. Grafit plaka anot için I=0.55 A akımda elde edilen analiz sonuçları	34
Tablo 4.5. Grafit plaka anot için I=0.75 A akımda elde edilen analiz sonuçları	34
Tablo 4.6. Grafit plaka anot için 1 mM Fe ²⁺ dozunda elde edilen sonuçlar	37
Tablo 4.7. Grafit plaka anot için 2 mM Fe ²⁺ dozunda elde edilen sonuçlar	37
Tablo 4.8. Grafit plaka anot için 3 mM Fe ²⁺ dozunda elde edilen sonuçlar	38
Tablo 4.9. pH, KOİ ve Renk Parametrelerine ait sonuçların yönetmelik limit değerleri ile karşılaştırılması	42

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Foto Elektro-Fenton, Grafit, Karbon, Tekstil Atık Suyu

Tekstil sektöründe oldukça fazla olan su tüketiminin azaltılması hem kaynakların kullanımı açısından hem de sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir. İleri oksidasyon prosesleri (İOP) de pek çok endüstriyel atık suyunun arıtımında çok kullanıldığı gibi tekstil endüstrisi atık suyunun arıtımında da etkili bir şekilde uygulandığı görülmektedir. Tekstil endüstrisi sektöründe yüksek konsantrasyon değerlerinde atıksularda inorganik ve organik kimyasal maddeler ile oldukça yüksek oranlarda renk ve kimyasal oksijen ihtiyacına (KOİ) sahiptirler. Bu çalışmada aktif olarak faaliyet gösteren tekstil atıksu (fabrikada direkt çıkış) için Foto elektro-Fenton (FEF) süreklilik performansı incelenmiş, sabit uv-C ışığı altında; farklı pH, farklı akım (I), farklı Fe^{2+} dozlarında ve farklı elektroliz zamanı (t) gibi FEF süreç parametreleri farklı elektrot kombinasyonlarında renk ve kimyasal oksijen ihtiyacı giderim veriminin etkinliği araştırılmıştır. Anot materyali olarak grafit plaka, çelik ve titanyum, katot materyali olarak grafit plaka kullanılmıştır. Öncelikle, sabit parametrelerde 3 farklı elektrot çifti için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. 60 dakika elektroliz süresinde 0.35 A'da 2 mM Fe^{2+} grafit plaka grafit plaka elektrot çifti için renk giderim verimi %83 iken, KOİ %71'dir. Bir sonraki aşama da grafit plaka elektrot çifti için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmaları neticesinde 60 dakikada uygun; pH 3, 2 mM Fe^{2+} , 0.55 A'da renk giderimi %81 iken KOİ giderim verimi %75'tür.

TREATMENT OF TEXTILE WASWATER USING PHOTO ELECTRO-FENTON PROCESS

SUMMARY

Keywords: Photo Electro-Fenton, Graphite, Carbon, Textile Waste Water

Reducing water consumption, which is quite high in the textile sector, is important both in terms of the use of resources and in terms of sustainability. It is seen that advanced oxidation processes (IOP) are also used effectively in the treatment of textile industry wastewater, as well as in the treatment of many industrial wastewater. In the textile industry sector, wastewater at high concentrations has inorganic and organic chemicals and a very high color and chemical oxygen demand (COD). In this study, photo-electro-Fenton (FEF) continuity performance was investigated for real textile wastewater (direct exit from the factory), under constant UV-C light; The effectiveness of color and chemical oxygen demand removal efficiency was investigated in different electrode combinations with different pH, different current (I), different Fe^{2+} doses and different FEF process parameters such as different electrolysis time (t). Graphite plate, steel and titanium were used as anode material and graphite plate was used as cathode material. First of all, optimization studies were carried out for 3 different electrode pairs with fixed parameters. While the color removal efficiency is 83% for the 2 mM Fe^{2+} graphite plate graphite plate electrode pair at 0.35 A at 60 minutes electrolysis time, the COD is 71%. In the next step, optimization studies were carried out for the graphite plate electrode pair. As a result of the optimization studies, suitable in 60 minutes; At pH 3.2 mM Fe^{2+} , 0.55 A, color removal is 81%, while COD removal efficiency is 75%.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Çeşitli endüstri faaliyetler arasında tekstil sektörü, özellikle üç açıdan öne çıkmaktadır: elyaf işlemede yüksek su tüketimi, girdilerin daha düşük kullanımı ve kalıntıları için geleneksel işlemlerin sınırlandırılmasıdır (Ramos, M. D. N.,2021). Tekstil üretim sürecinde ortalama günlük birkaç bin metre küp (m^3) su tüketilmektedir. Ortaya çıkan atıklar, birçok işlemi içeren kumaş üretimi sırasında deşarj olur: haşıl sökme, ağartma, boyama, baskı ve yıkama çok renkli olabilir ve biyolojik bozulmaya karşı dirençli olabilir. Tekstil endüstrisinde en sıkıntılı işlem boyama ve baskı renklendirme işlemlerinden kaynaklanan kirliliklerdir. Pek çok tekstil boyası mevcuttur ve bunların çoğunun karmaşık kalıntı yapıları nedeniyle renklerinin arıtılması zordur. Ayrıca boyama işleminde kullanılan boyaların bir kısmı arıtılmadan direkt olarak tekstil atık su borularına deşarj edilmektedir. Tekstillerin kimyasal işlem süreçlerinde kullanılan boyaların ve kimyasal ara maddelerin miktarlarının artışı ciddi çevre ve sağlık sorunlarına sebep olabilir. Sonuç olarak, çevre korumaya yönelik standartlar yasal düzenlemeler tarafından öngörülen atık su kalitesi, kirleticilerin atıksudan uzaklaştırılmasını gerektirir ve bu nedenle insan sağlığına ve çevreye zarar vermeden deşarj edilebilir. Kirliliğin niteliğine ve boyutuna bağlı olarak, atıkların saflaştırılması için özelliklerine ve istenen saflaştırma derecesine bağlı olarak farklı işlemler uygulanabilir (Stergiopoulos, D., 2014).

Son yıllarda, tekstil endüstrisinden atık sulardan kaynaklanan organik ve inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması ve çevre üzerindeki etkilerini azaltmak için inorganik veya organik matrisler üzerinde adsorpsiyon, fotokataliz, oksidasyon işlemleri, mikrobiyolojik veya enzimatik ayrışma, adsorptif kabarcık ayırma teknikleri dahil olmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Elektro-flotasyon, Fenton, elektro-Fenton, koagülasyon, elektrokoagülasyon prosesleri ve foto-Fenton, sono-Fenton, UV/ H_2O_2 , vb. gibi bu yöntemlerin bazı kombinasyonları da değerlendirilmiştir (Louhichi,

B., 2022). Günümüzde, İleri Oksidasyon Proseslerinin (İOP'ler) kullanımı, gerçek olmayan karbon içerikli bileşikler içeren endüstriyel atık suların arıtım verimliliğinin fazla olmasından dolayı uygulanan bir prosestir (Meijide vd, 2018). İOP'lerinde kirleticilerin parçalanmasındaki hızları ve giderim verimleri oldukça yüksektir. İOP'ler, organik kirleticilerin, esas olarak CO₂ ve suya homojen veya heterojen bozunmasından dolayı güçlü oksitleyici maddeler (O₃ ve H₂O₂ gibi) kullanır (Rajoriya, S., vd, 2018).

Foto-Elektro Fenton, atık sudaki kirleticilerin bozunması için yaygın olarak kullanılan İleri Oksidasyon Proseslerinden (İOP) biridir. HO radikal nokta radikalleri oluşturmak için hidrojen peroksit (Fenton reaksiyonu) ile Fe²⁺ reaksiyonuna dayanır ve diğer klasik oksidanlardan (ozon veya klorür gibi) daha yüksek bir oksidasyon potansiyeline sahiptir. UV ve H₂O₂ (UV/H₂O₂), UV ve ozon (UV/O₃) veya UV ile ozon ve H₂O₂ (UV/ H₂O₂/O₃) kombinasyonunu içerebilir. *OH oluşumu büyük ölçüde ışık yoğunluğu, H₂O₂ ve O₃ konsantrasyonları ve temas süresi gibi çalışma faktörlerine bağlıdır. Foto-Elektro Fenton, UV ışığı ve kimyasal oksidanlar (örn., H₂O₂ ve O₃) veya fotokatalistler, 2,80 V'luk bir indirgeme potansiyeline sahip yüksek oranda oksidatif radikal türler (örneğin *OH) üreterek kirleticileri parçalamak için sinerjistik olarak çalışır. Foto-Elektro Fenton kirleticileri ortadan kaldırmak ve arıtılmış suyun kalitesini iyileştirmek için geliştirilmiş umut verici bir ileri arıtma teknolojisini temsil eder (Rosa, J. M vd, 2020)

Tez çalışmasında tekstil atıksuyunun arıtılması amacıyla tekstil endüstrisinin direkt kanal çıkışından alınan numuneye Foto Elektro Fenton prosesinin uygunlabirliği incelenmiştir. Numune olarak kullanılan atıksular, Düzce-Konuralp'te etkinlik gösteren tekstil endüstrisinden temin edilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında 3 farklı elektrot çifti kullanılmıştır. Foto-Elektro Fenton prosesiyle tekstil endüstrisi atıksuyunda belirlenen sürelerde sabit uv-C ışığı altında yapılan deneysel çalışmalarda uygun akım, pH, demir dozu belirleyerek, Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), renk (Pt-Co), pH ve elektriksel iletkenlik parametrelerine ait arıtım giderimlerini inceleyerek tekstil atıksuyundaki düşük dozajlama, hızlı arıtım ve en önemlisi düşük maliyette arıtımın farklı elektrotlar ile giderim verimlerinin etkisi araştırılmıştır.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Türkiye’de Tekstil Sektörü

Tekstil endüstrisinde öncelik giysi tasarımı veya üretim ile tekstillerin dağıtımı ve kullanımı ile ilgili endüstriler için kullanılan bir terimdir. Kısaca, tekstil endüstrisi öncelikle iplik, kumaş ve giysilerin tasarımı, üretimi ve dağıtımı gibi konuları kapsamaktadır. Hammadde genellikle doğal veya sentetik gibi malzemeler kullanılabilir. Tekstil, doğal veya yapay liflerden (iplik veya iplik) oluşan esnek bir malzemeleri kapsamaktadır. İplik, uzun iplikler üretmek için yün, keten, pamuk, kenevir veya kullanılan diğer malzemelerin ham liflerinin eğrilmesiyle üretilmektedir (URL1, 2021).

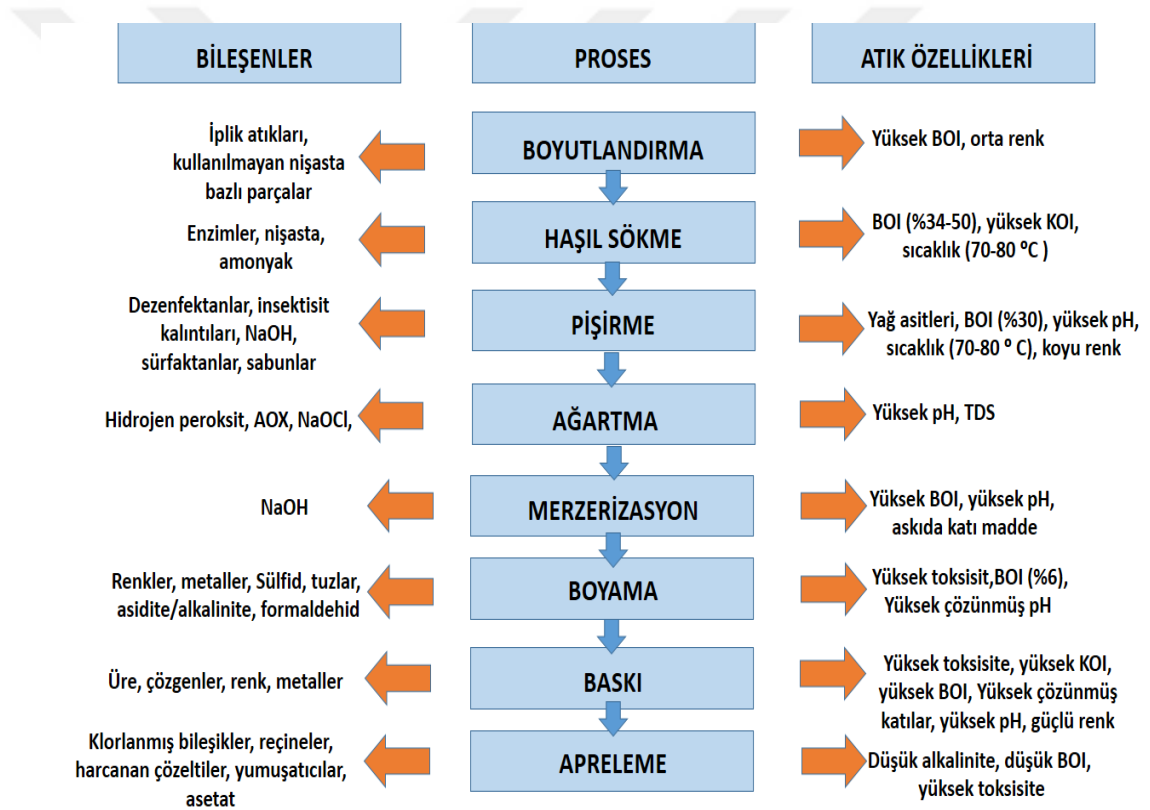
Türkiye’de tekstil üretiminin tarihi cumhuriyet tarihinden önceki dönemlere kadar uzanmaktadır. 16. ve 17. yy.’dan beri tekstil üretimi revaçta ve ileri düzeydeydi. Osmanlı Devleti sanayisinin ağırlıklı olarak tekstile yönelik olması, sektörün önemini açık bir şekilde göstermektedir.

20. yüzyılda hızla gelişen Türkiye, 1923-1962 yılları arasında büyük bir tekstil arz talep kapasitesi yaratmıştır. Tekstil endüstrisinin birincil hammaddesi olarak kullanılan pamuğun Türkiye’de yaygınlaşması ile beraber, tekstil sektörünün hızla gelişmesi ve bununla beraber büyümesine daha da katkıda bulunmuştur.

Tekstil ile alakalı ilk kalkınma planı 1972’de tamamlanmıştır. 1980-1989 arası dönem, dış pazarlara açılmaya başlanmıştır. Tekstil sektörü de hazır giyim sektörünün gelişimine önemli katkılar sağlamıştır. 1990’lı yıllarda tekstil sektörünün Türkiye’nin toplam ihracatı içindeki payı yüksek bir ihracat performansı göstererek %9,3’e ulaşmıştır (URL 2, 2018).

2.1.1. Tekstil endüstrisi prosesleri

Endüstriyel tüm sektörlerde olduğu gibi tekstil endüstrisinde de tüketimin büyük bir oranını su oluşturmaktadır. Üretilmekte olan tekstil ürününde yaklaşık olarak ton başına 200 m³ su tüketimi olmaktadır ve çıkan atıksu miktarı da bu bağlamda artmaktadır. (Holkar, C. R vd, 2016; Ramos, M. D. N vd, 2020). Suya olan talebin yüksek olmasının sebebi, yıkama işlemlerinin yanı sıra iplik ve kumaşların işlenmesi, baskı ve terbiye gibi liflere kimyasalların uygulanmasına yönelik esaslardan kaynaklanmaktadır. Farklı tekstil işleme aşamalarında oluşan atıkların özellikleri ve bazı kalıntıların listesi Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Tekstil endüstrisinin ana kirletici parametreleri (Ramos, M. D. N. vd, 2021).

2.2. Tekstil Atıksularının Özellikleri

Tekstil atık suları yüksek pH değerine, yüksek konsantrasyonda askıda katı madde, klorür, nitrat, manganez, sodyum, kurşun, bakır, krom, demir gibi metallere ve yüksek BOİ ve KOİ değerine sahiptir (Tablo 2.2.). Suyun rengi ise genellikle koyu kahverengi veya benzeri bir renge sahiptir. Farklı kirletici türlerinin konsantrasyonu, atık su

kaynağına göre değişir.

Suyun içeriğindeki farklılıklar, çoğu zaman kullanım işlemlerin değişkenliğinden, üretilen kumaşın tipinden ve kullanılan ekipman veya makinelerden kaynaklanmaktadır. Tekstil sektörü, kullanılan prosesler için yüksek su talebine ihtiyaç duymakta ve bu prosesler sonucu oluşan deşarjlar beraberinde taşıdığı kirletici türleri nedeniyle çevreye zarar vermektedir. Dikkat çekici çevresel etki su tüketimi ve atık su deşarjıdır (115–175 kg KOİ/ton son ürün, farklı organik kimyasallar, renk, tuzluluk ve düşük biyolojik bulunabilirlik) (Pal, P., 2017).

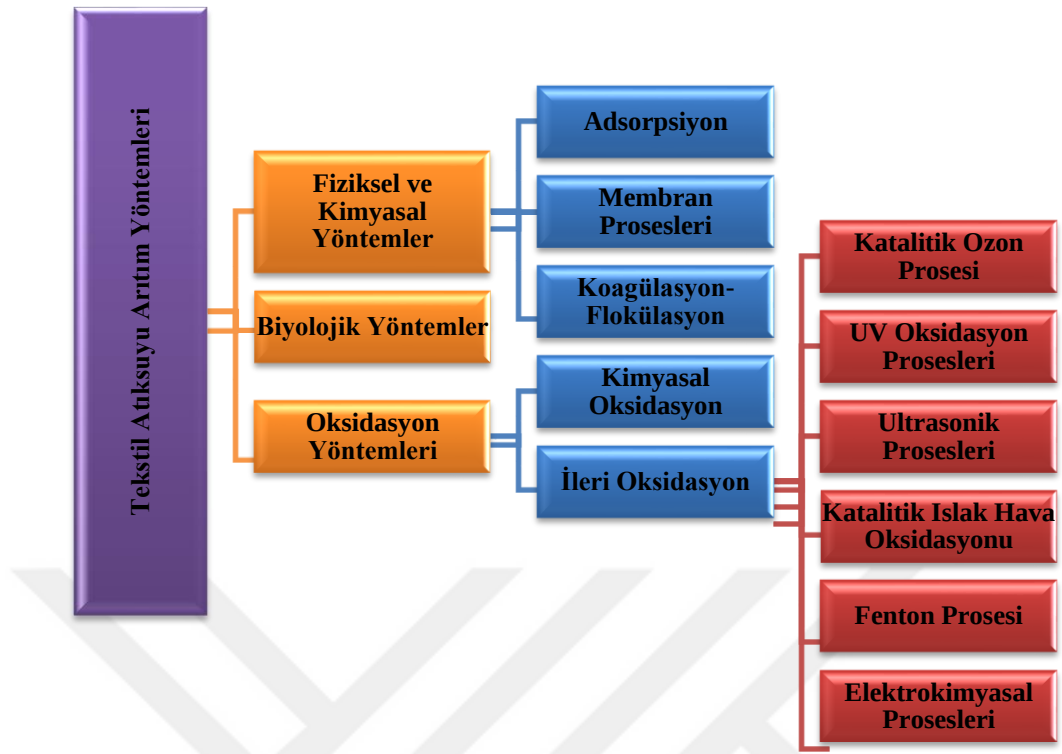
Tablo 2.1. Tekstil atık sularının bileşimi ve miktarı (Pal, P., vd, 2020)

Atıksu Parametreleri	Birim	Literatüre Dayalı Miktar
Boya Konsantrasyonu	mg/L	700
Klorür	mg/L	15.867
Sülfat	mg/L	1400
Toplam Nitrojen	mg/L	23
MORİNA	mg/L	1781
BOİ	mg/L	363
NH ₄	mg/L	17
NO ₃	mg/L	2
PO ₄	mg/L	17
CA	mg/L	43
Mg	mg/L	4
Na	mg/L	2900
Fe	mg/L	1.2
pH	-	10

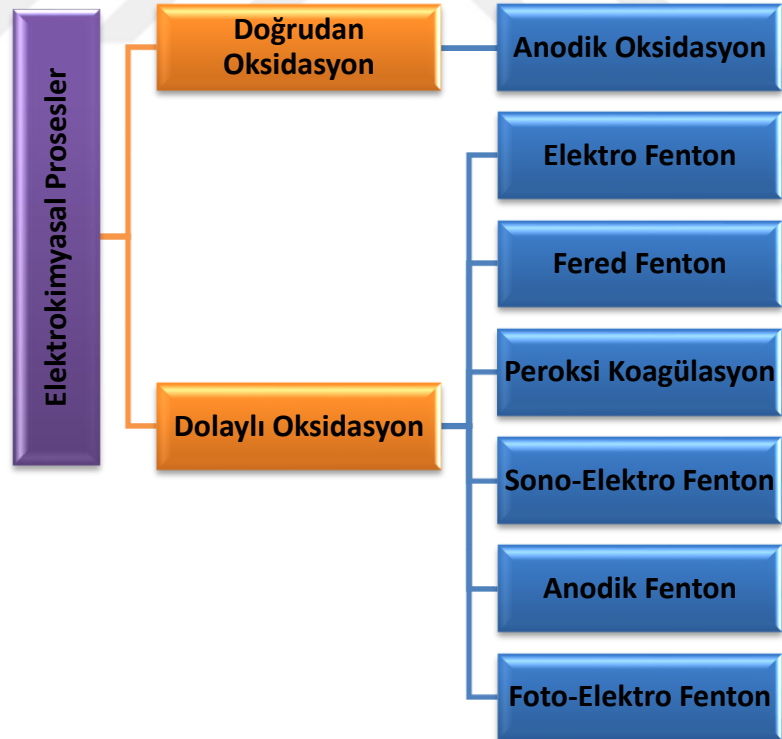
2.3. Tekstil Atıksularının Arıtımında Kullanılan Yöntemler

Su matrisindeki kirlilik, tüm canlı organizmaların sağlığını riske eden son zamanlarda çok dikkat edilmesi gereken ekolojik sorunlardan biri haline gelmiştir. Su kirliliği başta endüstriyel ve tarımsal uygulamalar kadar insan faaliyetlerinde önemli etkenler arasında yer almaktadır. (Sharma, Y. C vd, 2011). Tekstil, kağıt, petrokimya, ilaç, petrol, gıda endüstrilerinde büyük miktarlarda atık su deşarjı vardır. Fabrikaların faaliyetlerine göre kirletici türleri organik, inorganik, toksik, mutajenik, radyoaktif vb.'dir (Zhou, Y vd, 2015). Tekstil endüstrisinde çeşitli boyar maddeler, solventler, yapıştırıcılar, deterjanlar ve yağlayıcıların kullanıldığı elyaf üretimi, boyama, ağartma ve yıkama gibi farklı işlemler bulunmaktadır. Tekstil fabrikalarından büyük miktarlarda atıksu salındığından, kirleticilerin zararlı etkilerini en aza indirmek için etkili arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi önemlidir (Holkar, C. R vd, 2016).

İleri oksidasyon prosesleri (İOP'ler), dezenfeksiyon, renk giderme ve koku giderme potansiyelinin yanı sıra antropojenik ve biyolojik direnci yüksek organik kirleticileri biyolojik olarak bozunabilir bileşiklere dönüştürme olasılıkları nedeniyle son yıllarda su ve atıksu arıtım uygulamaları da artarak odak haline dönüşmüştür. Farklı kombinasyonlarla beraber farklı oksidanlar kullanılarak hidroksiller serbest radikallerin üretimi için İOP'ler geliştirilmiştir ve bu radikallerin bilenen oksidasyon proseslerinin yanında bertarafı edilemeyen bileşenlerin bozunmasını sağladığı gözlemlenmiştir (Hassaan vd. 2017). Şekil 2.2.'de ve Şekil 2.3.'de tekstil endüstrisi proseslerinden kaynaklanan atıksular için uygulanan atıksu arıtım prosesleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Tekstil Atıksularında Uygulanan Arıtım Prosesleri (Holkar vd, 2016)



Şekil 2.3. Tekstil Atıksularının Arıtımında Uygulanmakta olan Elektrokimyasal Prosesler (Nidheesh vd, 2018)

2.3.1. Fiziksel ve kimyasal yöntemler

2.3.1.1. Adsorpsiyon arıtım yöntemleri

Adsorpsiyon işlemi organik ve inorganik kirlilik yüklerinin uzaklaştırılması için diğer etkili arıtma yöntemidir. Adsorpsiyon, çeşitli kirlilik yüklerinin su matrislerinden uzaklaştırmak için kolay ve maliyet bakımında az olmasına rağmen, çevreye verilen tahribatı minimum olan yöntemdir ve kirleticiler bir fazdan diğerine aktarılır. Fakat adsorbanın geri kazanım ve bertaraf edilmesi işletme maliyetlerini artırmaktadır. Prosesin verimliliği adsorban materyalin tipine bağlıdır ve kalitesi yüksek olan adsorbanlar oldukça pahalı olabilir (Crini, G. vd, 2019). Bu nedenle, düşük maliyetli adsorbanların üretimine ve uygulanmasına artan bir ilgi vardır (De Gisi, S. vd, 2016).

Aktif karbon, atık su arıtma arıtım uygulamalarında sıkça kullanılan popüler adsorban malzemelerdendir. Düşük maliyetli aktif karbon üretimi için, yüksek karbon içeriği ve doğada bol miktarda bulunması nedeniyle tarımsal atıklar karbon kaynağı olarak kullanılmaktadır (Bulca, Ö. vd 2021).

2.3.1.2. Membran ile arıtım prosesleri

Tekstil proseslerinde oluşan atıksuların arıtımında uzun vadede ve yaygın olarak uygulanan sistemlerden biridir. Ayrıca son yıllarda membran teknolojisi tekstil boya atık sularının arıtılması için iyi bir seçenek olabilir çünkü membranların dar gözenek boyutları boya bileşiklerini ortadan kaldırabilir ve yüksek kaliteli atık su tahliye edebilir. Membran teknolojileri ile boyaların uzaklaştırılması için birçok çalışma yapılmıştır (Keskin, B. vd, 2021).

Membran teknolojisi, suyun yeniden kullanımı için istenen su kalitesini elde etmek için yenilik, verimlilik ve saflık açısından en iyi yöntemlerden biridir (Keskin, B. vd, 2021). Membran prosesi, az yer kaplayan ve kimyasalların geri kazanılmasının yanı sıra suyun yeniden kullanılmasını sağlayan, uygulanması kolay, gelişmiş bir arıtma teknolojisidir. Bu arıtım tekniği ile kullanılan membranlar mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmoz (RO) olarak birkaç sınıfa

ayrılmaktadır. MF membranlar, koloidal boyaları arıtılması için pigment boyaları içeren boya ve yıkama banyolarında kullanılmıştır. Membran ömürlerini hızlı tüketip uzun vadede kullanılması için ön arıtma olarak da kullanılabilir (Shahmirzadi, M. A. vd, 2018). UF membranları genellikle yüksek moleküler ağırlıklı maddeleri, yardımcı kimyasalları ve direkt, indigo, dispers ve reaktif boyaları geri kazanmak için uygulanmıştır (Barredo-Damas, S. vd, 2012). NF membranlar, atık sularda bulunan organik bileşikler, iki değerlikli tuzları ve hidrolize reaktif boyaları atıksulardan uzaklaştırır. NF membranları, atık sularda bulunan organik bileşikler, iki değerlikli tuzları ve hidrolize reaktif boyaları ayırırken, RO membranları tüm mineral tuzları ve hidrolize reaktif boyaları tutabilir. Membran bağlı biyolojik prosesler, örneğin membran biyoreaktörler (MBR'ler), diğer biyolojik atık su arıtma yöntemlerine kıyasla daha az çamur üretir, daha fazla kirletici konsantrasyonuna uyum sağlar ve daha az yer kaplar. MBR'ler hem azo boyaları hem de aromatik aminleri tekstil üretim prosesleri sonucu oluşan atık sularından ayırabilir. Membran damıtma (MD), yüksek tuzlu su ve atık su dahil birçok çeşitli besleme suyunu arıtabilen, kendini sürekli geliştiren termal bazlı membran sistemidir. Tekstil atıksu arıtımında membran distilasyon sistemlerinin kullanımı, işletme maliyeti açısından düşük elektrik enerjisi tüketimi, uçucu özelliği olmayan ve çözünen kirlilik yüklerini tamamen arıtılması ve çalışma ortamındaki yüksek basınçları gibi birçok avantaja sahip olmasına rağmen, literatür kısmına bakıldığında diğer proseslere göre daha az çalışma yapılmıştır. Çoğu tekstil endüstrisindeki boyama proseslerinde kullanılan yüksek çalışma sıcaklıkları, suyu hızlı ve tek bir yoldan MD yoluyla geri kazanarak kullanılabilen atıksular elde edilmektedir. Gerçek atık suyun baskın bileşenlerini, yani boyaları, yüzey aktif maddeleri ve tuzları içeren sentetik atık suyun kullanımı, gerçek numunelerden bilinmeyen herhangi bir değişiklikten kaçınmak için seçilmiştir (Keskin, B. vd, 2021).

2.3.1.3. Koagülasyon-flokülasyon

Koagülasyon/flokülasyon prosesi, işletmesi nispeten kolay ve düşük maliyetli olduğundan, gerçek tekstil atıksu arıtımı için en yaygın olarak kullanılan tekniktir (Holkar, C. R vd, 2016). Hızlı ve kolay bir işlemi de koloidal, organik ve inorganik maddeleri su ve atıksulardan çok kolay bir şekilde uzaklaştırabilme kabiliyetine sahiptir (Verma, A. K vd, 2012). Ayrıca, suda renk giderme ve askıda katı maddelerin

yok edilmesinde önemli etkiye sahiptir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı, güvenli depolama alanlarına boşaltılması gereken riskli atıklar olarak sınıflandırılan büyük hacimli çamurların oluşmasıdır. Bu nedenle, pıhtılaşma prosesinin entegre bir arıtma sisteminin parçası olması tercih edilir, böylece daha az pıhtılaştırıcı kullanılır ve sonuç olarak daha az çamur boşaltılır. Pıhtılaştırma/flokülasyon prosesinin etkinliği, örneğin pıhtılaştırıcı tipi, dozaj, karıştırma koşulları, pH ve sıcaklık gibi bir dizi etkiye bağlıdır. Ortak kullanılan pıhtılaştırıcılar, etkinlikleri düşük maliyet ve kullanım kolaylığı nedeniyle alüminyum klorür ($AlCl_3$) alüminyum sülfat ($Al_2(SO_4)_3$) demir klorür ($FeCl_3$) ve demir sülfat ($Fe_2(SO_4)_3$) gibi alüminyum ve demir tuzlarıdır. Birkaç araştırmacı, gerçek tekstil atıksu arıtımı için $FeCl_3$ kullanımının üstün verimliliğini çalışmalarında aldıkları verimle kanıtlamıştır (Badawi, A. K vd, 2021).

2.3.2. Biyolojik yöntemler

Biyolojik yöntemler, ucuz ve çevre dostu olmaları nedeniyle fiziksel ve kimyasal yöntemlere göre potansiyel avantajlar sunmaktadır. Biyolojik bir muamelede, aerobik ve anaerobik bakteri ve mantarlar gibi farklı mikroorganizmaların boyanın renksizleşmesini katalize ettiği tespit edilmiştir (Dos Santos, A. B vd, 2007). Genel olarak mikrobiyal ekosistemlerde meydana gelen süreçler, hepsi birbiriyle yüksek derecede etkileşime sahip olan birçok farklı mikroorganizmanın eylemi tarafından yönetilir. Etkileşen mikrobiyal popülasyonun birlikte belirli ekolojik işlevleri, popülasyonun her bir üyesinin ayrı ayrı yapabileceğinden daha iyi yerine getirebileceğine inanılmaktadır. Karışık mikroorganizma kültürlerinden oluşan boya içeren tekstil atıklarında bulunanlar gibi bileşiklerin parçalanması için çeşitli avantajlara sahiptir. Ayrıca bir konsorsiyumun, tek bir türe kıyasla ko-metabolizma tarzında çalıştıkları için atık suda bulunan boyanın tam mineralizasyonu için daha fazla şansı vardır. Anaerobik mikroorganizmalar, özelliklerinden dolayı tekstil atıksularında azo boyaların renk giderimi için tercih edilebilir. Örneğin, azo bağını parçalamak için elektronlar üretirler (Türgan, O vd, 2011).

2.3.3. Oksidasyon yöntemler

2.3.1.1. Kimyasal oksidasyon

Kimyasal oksidasyon prosesleri, son yıllarda ortaya çıkan organik kirleticilerin dezenfeksiyonunda ve uzaklaştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bazı istenmeyen yan ürünler bu işlemlerde üretilir (Wang vd, 2011). Kimyasal oksidasyon, oksitleyici bir reaktiften oksitlenen kimyasal türlere elektron transferini içeren bir süreçtir. Su ve atıksu mühendisliğinde, kimyasal oksidasyon, çürüten kirletici maddelerin zararsız veya stabilize ürünlere dönüştürülmesi amacına hizmet eder. Kimyasal oksidasyon süreçleri doğal sularda gerçekleşir ve yüzey sularının doğal olarak kendi kendini temizlemesinde önemli bir mekanizma görevi görür. Gazlı sularda çözünmüş demir ve sülfür kirleticilerinin oksidatif olarak uzaklaştırılması önemli bir örnektir. Organik atık malzemelerin bozunması, doğal suyun kendi kendini temizlemesiyle ilişkili daha da önemli bir olguyu temsil eder. Doğal su organik oksidasyonlarının etkinliğinin, bir oksidan olarak çözünmüş oksijenin oldukça etkili kullanımını katalize etmeye hizmet eden mikroorganizmaların varlığından kaynaklandığı iyi bilinmektedir (Shammas, N. K. vd, 2005). Kimyasal Arıtma yöntemleri hem fiziksel hem de biyolojik arıtım yöntemleriyle bir olarak da kullanılmaktadır.

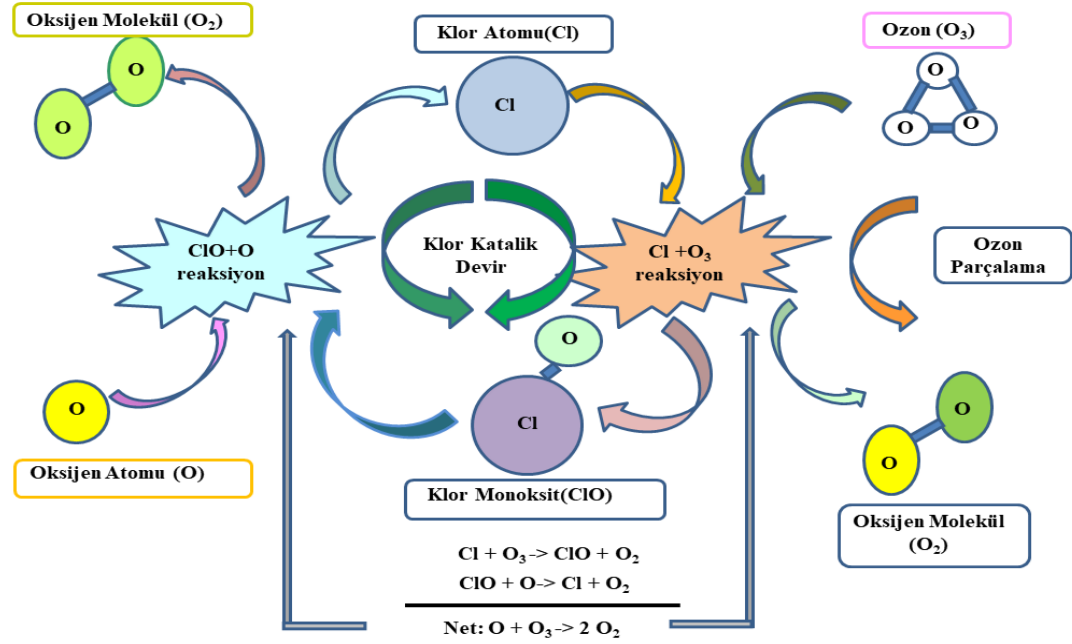
2.3.2.2. İleri oksidasyon prosesleri

Su arıtımında İOP'ler yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hidroksil radikalleri ($\bullet\text{OH}$), sülfat radikalleri ($\text{SO}_4\bullet^-$) ve süperoksit anyon radikalleri ($\text{O}_2\bullet^-$) gibi oldukça aktif türlerin yerinde üretilmesi nedeniyle, organik kirleticileri karbon dioksit (CO_2), suya mineralize etmek için (H_2O) ve küçük inorganik bileşikler, İOP'ler refrakter organik kirleticileri mineralize etmek için yaygın olarak uygulanmıştır. Genel olarak, atık sudaki refrakter organik kirleticileri güçlü oksitleyiciler (ozon, hidrojen peroksit, vb.) ile ayrıştırmak için kullanılan ozon oksidasyonu, Fenton oksidasyonu, Fenton benzeri oksidasyon, fotokimyasal oksidasyon ve elektrokimyasal oksidasyon dahil olmak üzere birçok gelişmiş oksidasyon prosesi vardır. Bununla birlikte, bu yöntemlerin, sistemin katı pH gereksinimlerine ek olarak (2 ~ 4) depolanmasını ve taşınmasını

kısıtlayan oksidanların zayıf stabilitesi gibi bazı sınırlamaları vardır. Bu nedenle, mevcut sorunu çözmek için yeni strateji geliştirilmelidir. Güçlü tek elektronlu oksitler olarak sülfat radikalleri ($\text{SO}_4^{\bullet-}$), birçok kirleticiyi seçici ve hızlı bir şekilde bozabilir ve birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir (Tian, K., Hu, L vd, 2021)

2.3.3.2.1. Katalitik ozon prosesleri

Katalitik ozonlama, katı bir malzemenin katalizör olarak kullanıldığı ve ozonun hem oksidasyon ajanı hem de serbest radikal üreticisi olarak kullanıldığı, ozon bozunması ve aktif radikallerin oluşumu ile sonuçlanan en gelişmiş oksidasyon proseslerinden biridir. Ozonun sudaki çözünürlüğünün düşük olması, su direncinin düşük olması ve bazı organik bileşiklerle yavaş reaksiyona girmesi nedeniyle, diğer mekanizmalarla, kombinasyonun önerildiği yerlerde organik bileşikleri uzaklaştırmak için bireysel ozonlama işlemi yaygın olarak kullanılmamaktadır (Şekil 2.4.) (Nasseh, N vd, 2020).



Şekil 2.4. Katalitik Ozon Prosesi (Gök, A. 2019).

Ek olarak, katalitik ozonlama işlemi, süpürücü fenomenden (kendi kendine radikalleşme veya tüketici araçları tarafından serbest radikal kullanımı) daha az etkilendir (Nasseh, N vd, 2020).

2.3.3.2.2. Uv oksidasyonları prosesleri

UV ileri oksidasyon prosesleri genellikle mikro kirleticilere karşı etkili bir bariyer olarak kullanılır. UV fotolizi ve hidroksil (OH) radikal reaksiyonlarının kombinasyonu, çok çeşitli bileşiklerin giderimini sağlar. Yaygın teknikler tek başına UV, UV/H₂O₂, UV/Fe³⁺, UV/H₂O₂/Fe³⁺, UV/O₃, UV/TiO₂, UV/klor ve UV ile diğer fotokataliz kombinasyonlarıdır. En önemli konulardan biri, UV ileri oksidasyon prosesleri ile spesifik hedef kirleticilerin giderim verimliliğidir. Kirleticilerin moleküler yapılarındaki varyasyonlar hem doğrudan fotoliz hem de radikal reaksiyonlar açısından UV İOP'lerin giderim oranlarında farklılıklara neden olur. Ayrıca su matrisi etkileri de giderim oranları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, optimal bir organik mikro kirletici kontrolü için, her UV İOP sistemi, kendi su matrisine ve hedeflenen kirletici gidermeye göre özel olarak çalıştırılmalıdır (Wols, B vd, 2012).

2.3.3.2.3. Ultrasonik prosesler

Su arıtma alanında, ultrasonikasyon yöntemi kirleticilerin verimli bir şekilde uzaklaştırılması sağlar. Ultrasonik arıtma, atık su arıtımı sırasında hız sınırlayıcı aşama olan hidrolizi destekleyen birkaç teknolojiden biridir. Ultrasonun temel prensibi hem bakteri hücrelerinin hem de bozunması zor organiklerin yok edilmesine dayanır. Atık suda, bakteri, virüs, selüloz ve nişasta dahil olmak üzere çeşitli maddeler ve ajanlar agrega ve pul şeklinde toplanır. Atık su, büyük ölçüde saldırgan, patojenik ve toksik maddelerden oluşur. Mevcut araştırma sonucunda, ultrasonik arıtmanın atıksu arıtma için çok etkili olduğunu gözlemlenmiştir (Kumar, R vd, 2014).

2.3.3.2.4. Katalitik ıslak hava oksidasyonu

Sanayinin hızlı gelişimi, ekonominin hızlı büyümesini destekledi, ancak çevre kirliliği ekonomik kalkınmanın kısıtlayıcı bir faktörü haline geldi ve yüksek konsantrasyonlar, toksisite, zararlılık, atıksu ve çamurun biyolojik arıtımındaki zorluk çevre kirliliğinin ana faktörlerindendir. Islak hava oksidasyonunun CO₂, H₂O ve diğer zararsız son

ürünlerle yüksek konsantrasyonlu, toksik ve tehlikeli organik bileşikleri yüksek sıcaklık ve basınç altında oksidan olarak oksijen kullanır. NO_x, SO₂, HCl, dioksin furanlar ve uçucu kül emisyonları olmadan ortadan kaldırmak için etkili teknolojilerden biri olduğu kanıtlanmıştır. Islak hava oksidasyonu, biyolojik teknolojinin arıtılması için çok toksik ve yakılarak bertaraf edilmesi için çok seyreltik olan atık suların arıtılması için tercih edilen bir prosestir. Bununla birlikte, ağır işletme koşulları ve yüksek maliyetler, atık su arıtımında uygulamasını sınırlandırmaktadır. Katalitik ıslak hava oksidasyonu (CWAO) bu nedenle biraz dikkat çekmiştir. Katalizörlerin eklenmesi çalışma koşullarını azaltır, reaksiyon hızını artırır ve reaksiyon süresini kısaltır. Son yıllarda, CWAO teknolojisi birçok başarıya imza attı ve CWAO işlemiyle atıksu arıtımı araştırmalarındaki ilerlemeler, reaksiyon mekanizması incelemesi, reaksiyon kinetiği çalışması ve katalizör geliştirme yönlerinde özetlenmesine neden oldu.

2.3.3.2.5. Fenton prosesi

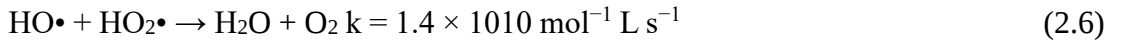
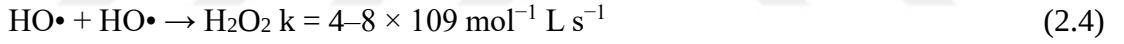
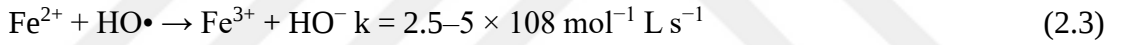
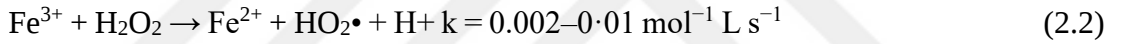
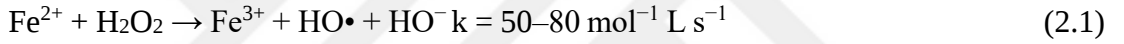
İOP'ler, seçici olmayan ve sıvı ve gaz fazlarındaki bileşiklerin yok edilmesinden ve katı matrislere emilmesinden sorumlu temiz arıtma teknolojileri olarak kabul edilir. Organik bileşikleri kısmen veya tamamen parçalayabilen yüksek reaktif oksijen türleri, özellikle hidroksil radikali üretmekten sorumludurlar (Ramos, M. D. N vd, 2021).

Flordan sonra, hidroksil radikali en yüksek standart indirgeme potansiyelini sunar ($E_0 = 2.81 \text{ V}$), çok reaktiftir (kısa bir ömre sahiptir) ve seçicilik göstermeden moleküllerin çoğuyla reaksiyona girer. İOP'ler aktif faza (homojen veya heterojen) ve HO• radikal oluşturma yöntemine (kimyasal, fotokimyasal, sonokimyasal veya elektrokimyasal) göre sınıflandırılır (Ramos, M. D. N vd, 2021).

Bilinen çeşitli İOP'ler arasında, özellikle tekstil atıksularının iyileştirilmesine yönelik uygulandığında Fenton reaksiyonuna (burada Fenton prosesleri olarak anılacaktır) dayanan yöntemleri belirtmektedir. Fenton prosesleri ve bununla ilgili diğer reaksiyonlar genellikle peroksitlerin (genellikle H₂O₂) radikal oksijen türlerine

ayrışmasında katalizör olarak demir iyonlarını içerir. Bu reaksiyon, bir asırdan fazla bir süre önce, 1894'te, H. J. H. Fenton, demirli tuzlar ve H₂O₂ varlığında tartarik asidin katalitik oksidasyonunu bildirdiğinde keşfedildi. Son yıllarda, sayısız çalışma, tekstil boyları gibi inatçı bileşikler içeren endüstriyel veya sentetik atıkların arıtılması için Fenton reaksiyonuna dayalı proseslerin verimli kullanımını yönelik araştırmalar yapılmıştır (Pliego, G vd, 2015; Ramos, M. D. N vd, 2021).

Klasik Fenton reaksiyonu, H₂O₂'nin Fe²⁺ iyonları tarafından hızlı katalitik bozunmasından oluşur (Denklem 2.1). Fe³⁺, özellikle daha bol olduğu ve Fe²⁺'dan daha düşük maliyetli olduğu için bir katalizör olarak da kullanılabilir (Fenton benzeri reaksiyon, (Denklem 2.2)). Ancak Fe³⁺ kullanımı ile HO• oluşumu daha düşüktür. Bu ikisinin yanı sıra, çözeltide eşzamanlı olarak başka karmaşık reaksiyonlar da meydana gelebilir (Denklem 2.3, 2.4, 2.5, 2.6).



Fenton reaktiflerini (Fe, H₂O₂) içeren tüm işlemlerin, ortamın pH'ı, demir, H₂O₂ ve organik kirletici konsantrasyonları ve sıcaklık gibi çalışma koşullarına bağlı olduğunu ve ayrıca etkileşim yapan maddelerin varlığının altını çizmektedir. Her bir hedef kirletici için optimal çalışma koşullarının test edilmesi ve değerlendirilmesi gerekli olduğundan, bu tür parametreler için ideal değerler mevcut değildir (Ramos, M. D. N vd, 2021).

pH ile ilgili olarak, homojen Fenton reaksiyonu maksimum oksidatif aktivitesini 2.5 ile 3.0 arasında gösterir ve bu aralığın artması veya azalması ile büyük ölçüde azalır. Daha yüksek pH değerlerinde Fe(OH)₃ ve H₂O₂ daha kolay O₂ ve H₂O'ya ayrıştığından Fe³⁺ çökelmeye başlar. Ayrıca, daha yüksek pH değerlerinde Fe²⁺ komplekslerinin

oluşumu, mevcut katalizör konsantrasyonunu azaltır. Öte yandan, 2.5'ten daha düşük pH'da, H_2O_2 ile yavaş yavaş reaksiyona girerek $HO\bullet$ oluşturan $[Fe(H_2O)_6]^{2+}$ kompleksi oluşabilir. Sıcaklığa bağlı olarak reaksiyon hızını artırır, ancak diğer yandan H_2O_2 'nin istenmeyen bozunmasını kolaylaştırır. H_2O_2 ve Fe^{2+} konsantrasyonları diğer iki ilgili parametredir ve yakından ilişkilidir. Başlangıç kirletici konsantrasyonuna göre, hedefin oksidasyona tepkisine ve kirletici yükünün azaltılması açısından amaca bağlı olmakla birlikte, reaksiyon sistemine eklenecek H_2O_2 miktarı tanımlanır. Maliyet ve kirletici konsantrasyonunun yanı sıra Fe ve H_2O_2 dozları da kontrol edilmelidir çünkü fazlalıkları radikal temizleyiciler olarak $HO\bullet$ oluşumunu azaltabilir (Denklem 2.3, 2.5).

Homojen bir sistemdeki Fenton reaksiyonunun çeşitli avantajları arasında şunlar vurgulanabilir: kısa reaksiyon süresi, nispeten basit çalışma prosedürleri, düşük maliyetli ve toksik olmayan katalizörler ve oda basıncı ve sıcaklığında gerçekleştirilmenin yanı sıra hidrojen peroksiti aktive etmek için harici enerjiye gerek yoktur. Öte yandan, büyük ölçekli uygulamalarını engelleyen bazı dezavantajlar, katı bir pH kontrolü (2.5-3.0), kompleks oluşumu nedeniyle katalizörün deaktivasyonu ve nötrleştirme adımı sonrası arıtma nedeniyle $Fe(OH)_3$ çamuru oluşumudur. Sonuncusu, kimyasal reaktifler (asit ve baz) gerekli olduğundan ve üretilen çamurun doğru varış yeri veya arıtılması göz ardı edilemeyeceğinden, işlemin işletme maliyetini artırır (Ramos, M. D. N vd, 2021).

Ayrıca, tekstil atıksuları, klorürler, sülfatlar ve karbonatlar gibi çoğu Fenton reaksiyonunun etkinliğini azaltan yüksek konsantrasyonda tuzlar sunar. Bu tür iyonlar, organik maddenin oksidasyonunu azaltan hidroksil radikallerini tutabilir.

Çeşitli çalışmalarda katalizör olarak hem Fe^{2+} hem de Fe^{3+} tuzları kullanılmıştır. Fenol kırmızısını ($30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) oksitlemek için düşük bir Fe^{2+} ve Fe^{3+} ($30 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) konsantrasyonunun H_2O_2 ($450 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) varlığında 30°C ve pH 2,5–3.0'de karşılaştırılması üzerine, Santana ve ark. hedef boyada sırasıyla %96 ve %14 renk giderimi gözlemledi (Santana, C. S vd, 2019). Test edilen farklı sıcaklıklar için Fe^{2+} varlığında daha yüksek reaksiyon hızı sabitleri gözlemlendi. Sonuç olarak, Fe^{2+} ile

reaksiyonların aktivasyon enerjisi daha düşüktü, bu da demirin bu oksidasyon durumu ile daha düşük enerji bariyerini gösteriyordu. Daha yakın zamanlarda, safranin T ve azo boyaları için benzer sonuçlar gözlemlendi (Nicodemos Ramos, M. D vd, 2022).

2.4. Elektrokimyasal İleri Oksidasyon Prosesinin Genel Özellikleri

Elektrokimyasal ileri oksidasyon prosesleri (EİOP), çok yönlülükleri, kolay kullanımları, güvenlikleri (hafif sıcaklık ve basınç koşulları altında çalıştırılırlar) ve temizlikleri sayesinde bu alanda cazibe kazanmıştır (Ana reaktif elektrondur, böylece tehlikeli kimyasalların eklenmesinden kaçınılır) (Sirés, I vd, 2014). Bu teknikler, birkaç dirençli bileşiğe seçici olmayan bir şekilde saldırabildiğini ve mineralize edebildiğini gösteren, başta hidroksil radikali olmak üzere güçlü oksitleyici ajanların yerinde üretilmesine dayanmaktadır (Moreira, F. C vd, 2017). EİOP'lar arasında, elektro-Fenton (EF), (Denklem 2.7)'de gösterildiği gibi iki elektronlu oksijen indirgeme reaksiyonu yoluyla katotta yerinde H_2O_2 üretimi ve Fenton'un $Fe(II)$ ile elektrokimyasal olarak üretilen H_2O_2 (Denklem 2.8) arasındaki reaksiyon yoluyla hidroksil radikallerinin etkili üretimi, 3 civarında optimal bir pH'ta gerçekleşir. Bu nedenle verimli bir teknik olarak kabul edilir (Poza-Nogueiras, V vd, 2022). EF reaksiyonları için katodun rolü esastır, çünkü yerinde H_2O_2 üretimine (ayırışma riskini en aza indirir), hidroksil radikalleri oluşturmak için indirgenmesine ve $Fe(II)$ türlerinin yenilenmesine izin verir (Zhang, M. H vd, 2019). Anotun rolü, (Denklem 2.9)'da belirtildiği gibi hidroksil radikallerinin tamamlayıcı bir üretimini sağlamak için de önemlidir; burada M anot malzemesini ve $M(\bullet OH)$ adsorbe edilen radikali temsil eder (Poza-Nogueiras, V vd, 2022).



Katot malzemesinin EF sürecindeki kritik rolüne rağmen, literatürdeki çoğu çalışma, esas olarak, katodun optimize edilmesine daha az dikkat edilerek (örn. bor katkılı elmas, PbO_2 , SnO_2), EF işlemi için oksijen oluşumu reaksiyonu için aşırı potansiyele sahip anot malzemelerinin optimizasyonuna odaklanmıştır (Nair, K. M vd, 2021). Bu

bağlamda, optimal katot malzemeleri, hidrojen oluşumu reaksiyonu için aşırı gerilim ve H_2O_2 ayrışması için düşük katalitik aktivite ile yüksek iletkenlik ve kararlılık göstermelidir. Aslında, grafit- grafit plaka veya en yaygın olarak kullanılanlar arasında ağsı camsı karbon dahil olmak üzere çeşitli karbon malzemeleri EF süreçleri için test edilmiştir. Bunlar arasında, karbon keçeler EİOP'ta en yaygın olarak kullanılan karbon katotlardır; bununla birlikte, farklı kirleticilerin bozunması için elde edilen iyi performansına rağmen, bu malzemenin maliyeti, büyük ölçekli kullanımını engellemektedir (Poza-Nogueiras, V vd, 2022).

2.4.1. Doğrudan metot

Doğrudan elektrokimyasal ileri oksidasyon prosesleri, dışarıdan ilave bir kimyasal madde olmadan reaktör içerisinde hidroksil radikallerinin üretilmesini amaçlar Anodik oksidasyon (aynı zamanda elektro oksidasyon olarak da bilinir), doğrudan elektrokimyasal ileri oksidasyon proseslerinin en iyi örneğidir.

2.4.1.1. Anodik oksidasyon

Anodik oksidasyona dayalı elektrokimyasal ileri oksidasyon süreçleri (EİOP), kalıcı organik kirleticilerle başa çıkmak için bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Anodik oksidasyon alanında yayınlanan ve çevre mühendisliği ve su kaynakları ile ilgili makalelerin sayısı, kısmen sulardan ve atıksulardan toksik organik bileşiklerin uzaklaştırılması için yöntemlerin geliştirilmesindeki aciliyetin artması nedeniyle, 2004 yılından bu yana büyük ölçüde artmıştır. Anodik oksidasyon, sülfat radikali ($SO_4^{\bullet-}$), sülfat radikali ($SO_3^{\bullet-}$), karbonat radikali ($CO_3^{\bullet-}$), klor radikali ($Cl^{\bullet}$), oksiklorür radikali ($ClO^{\bullet}$), süperoksit anyon radikali gibi aktif türler üretebilir. ($O_2^{\bullet-}$), hidroksil radikali ($\bullet OH$) ve tekli oksijen (O_2), bunların her biri değişen derecelerde organik bileşikleri tamamen ve/veya kısmen CO_2 ve/veya biyolojik olarak bozunabilir yan ürünlere indirgeme yeteneğine sahiptir. Bu radikaller arasında, $\bullet OH$, kimyasal ilave gerekmeden doğrudan su oksidasyonundan üretildiğinden ve elektrokimyasal sistemlerde üretilen en güçlü oksidanlardan biri olarak kabul edildiğinden, ilgilenilen birincil oksidandır (Jiangzhou Xie vd, 2022).

2.4.2. Dolaylı metot

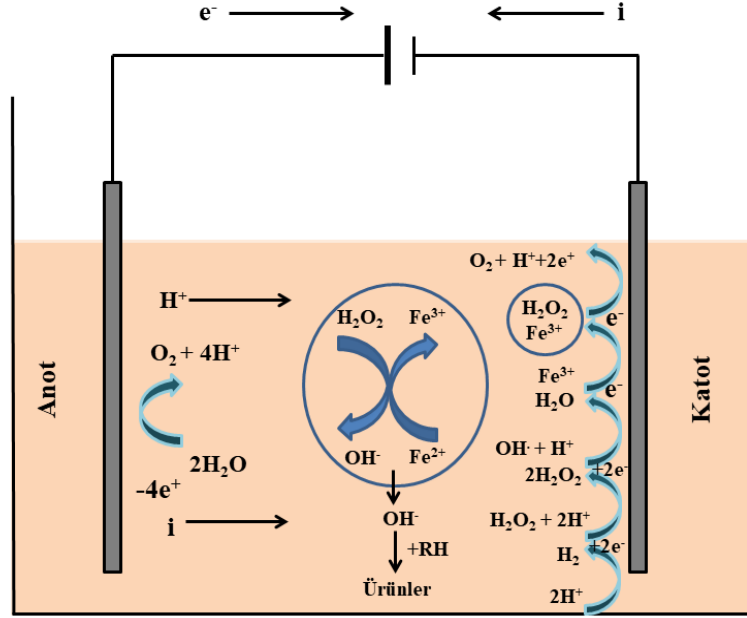
Doğrudan oksidasyonda, su elektrolizi ile üretilen hidroksil radikali (radikal dotOH), elektrot yüzeyinde kimyasal olarak adsorbe edilir; ayrıca, organik kirleticiler ve radikaller arasındaki reaksiyon, serbest radikallerin oksidasyonu ile karşılaştırıldığında zayıf oksidasyon kabiliyetine sahip olan doğrudan elektron transferi yoluyla gerçekleşir. Bu nedenle, organik kirleticiler sadece diğer formlara dönüştürülebilir ve tam mineralizasyonun elde edilmesi zordur. Bununla birlikte, dolaylı oksidasyonda, organik kirleticiler, elektrot yüzeyinde fiziksel olarak adsorbe edilen güçlü oksitleyici aktif türler ($\bullet\text{OH}$, HClO , $\text{SO}_4^{\bullet-}$ ve O_3 gibi) tarafından tamamen CO_2 ve H_2O 'ya mineralize edilebilir. Bununla birlikte, gerçek arıtma için hem doğrudan hem de dolaylı oksidasyon, elektro katalitik oksidasyondan bağımsız değildir.

Elektro katalitik oksidasyon mekanizmasının farklılığına göre, anot malzemeleri aktif elektrot (Pt ve IrO_2 gibi) ve inert elektrot (PbO_2 ve BDD gibi) olarak ayrılabilir. Farklı elektrotların farklı kirleticiler üzerindeki bozunma etkileri, birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (Li, A., Weng vd, 2021).

2.4.2.1. Elektro fenton

Her şeyden önce, ne yazık ki, Elektro-Fenton adının, kullanılan elektrotlar veya bunların genel işlemdeki rolü ne olursa olsun, çalışan bir elektrokimyasal hücre içerisinde gerçekleşen herhangi bir Fenton tabanlı reaksiyonuna kabaca uygulandığına dikkat edilmelidir. Aktif şekilde kullanılan versiyonunda, H_2O_2 elektrojenere edilemez ama hücreye dışardan ilave edilir; burada Fe^{2+} , Fe^{3+} 'nın katodik indirgenmesi (Fered Fenton prosesi) veya bir demir içerikli anodunun oksidasyonu ile üretilir. Elektrojenleştirilmiş H_2O_2 ile EF prosesinde hem anodik hem de katodik kaynaklardan gelen radikal $\bullet\text{OH}$ radikalleri, atık sudaki organik kirleticileri derinden okside etmek için, esas olarak ya $\bullet\text{H}$ atomu soyutlama yoluyla ya da çoklu bağlara ve ara radikallere radikal $\bullet\text{OH}$ ilavesi yoluyla birlikte çalışırlar. (Şekil 2.5.). Ardışık oksidasyon adımlarının sonucu, özellikle Fe^{3+} kompleks iyonlarının varlığında radikal $\bullet\text{OH}$

tarafından daha fazla oksidasyona karşı nispeten kararlı olan kısa zincirli organik asitlerdir (örneğin oksalik asit). Sonunda, tam mineralizasyona ulaşılır.



Şekil 2.5. Elektro Fenton işleminin reaksiyon mekanizmasının gösterimi (Gök, A. 2019).

EF süreçleri, organik kirleticilerin mineralizasyon oranları, elektrokimyasal oksidasyon veya Fenton reaksiyonu kullananlardan daha yüksek olduğu için çekici hale gelmiştir. Bu yüksek verim kısmen, katotta Fe^{2+} 'nin sürekli yenilenmesinden kaynaklanmaktadır (Şekil 2.5.) (Casado, J. 2019).

2.4.2.2. Fered fenton

Fered Fenton arıtımı Elektrokimyasal arıtımında yalnızca harici hidrojen peroksit ilavesine ihtiyaç duyduğundan, Fered-Fenton (FF) arıtımı önerilmiş ve atık suların iyileştirilmesi için büyük ilgi görmüştür. Bu nedenle yüksek adaptasyon, kolay kurulum, otomasyon imkanı gibi birçok teknik üstünlük sağlayabilir. Fered-Fenton işleminde, elektriksel indirgeme ve reaksiyonda üretilen çamur, aynı anda ağır metallerin uzaklaştırılmasını teşvik edebilir. FF işleminde olduğu gibi, ağır metal iyonları indirgenebilir ve daha sonra katodun yüzeyinde biriktirilebilir. Ağır metallerin değerlik durumu ve organik maddelerin konsantrasyonu, uzaklaştırma verimliliğini etkileyen elektriksel indirgemeyi engelleyebilir. Ayrıca, üretilen çamur ağır metalleri,

kimyasal çöktürme ile etkin bir şekilde uzaklaştırabilir ve uzaklaştırma verimliliği esas olarak pH değeri ve çamur dozajından etkilenebilmektedir (Gong, C, 2022). Son zamanlarda, harici H_2O_2 ilavesini verimli bir şekilde katalize etmek için Fe^{2+} 'nın hızlı elektrokimyasal rejenerasyonunu benimseyen üçüncü EF tipi, yani Fered-Fenton prosesi geliştirilmiştir. H_2O_2 'nin katodik üretimi ile karşılaştırıldığında, Fe^{3+} 'nın ($Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$) elektrokimyasal indirgenmesi, daha düşük katot potansiyeli ve akım ile gerçekleşir. Sonuç olarak bu yöntem, düşük demir iyonları birikimi ile hızlandırılmış Fenton oksidasyonuna yol açacaktır. Bununla birlikte, demirin elektrokimyasal rejenerasyonu, Fenton reaksiyonu sırasındaki tüketiminden çok daha yavaş olduğundan, Fe^{3+} 'nın elektro indirgeme oranının iyileştirilmesi Fered Fenton yöntemi için hala büyük bir zorluklara neden olacaktır (Wang, C. 2020).

2.4.2.3. Peroksi koagülasyon

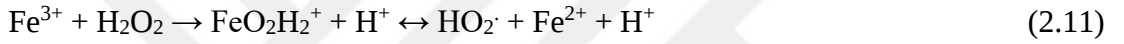
Peroksi Koagülasyon, aynı reaktörde aynı anda elektrokoagülasyon ve elektro oksidasyonun bir kombinasyonu gibi çalışan elektrokimyasal arıtma işlemlerinden biridir. Peroksi Koagülasyon süreci ile ilgili ilk çalışmalar birkaç on yıl önce başlamış olsa da çevresel uygulamalar için sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Peroksi Koagülasyon, kirleticilerin elektrojene $\bullet OH$ ile bozunmasını ve $Fe(OH)_3$ çökeltisi ile pıhtılaşmayı sağlar (Nayir, T. Y., 2020).

2.4.2.4. Sono-elektro fenton

Elektrokimyasal hücredeki çözeltinin aynı anda ultrasonla işlendiği Sono-Elektro Fenton işlemidir. Örneğin, Sonoelektro Fenton süresince, sonikasyon yoluyla çözünmüş oksijenin anottan katoda doğru artmasından dolayı yüksek elektrojenleştirilmiş H_2O_2 radikalinin verimine ulaşılmaktadır. Böylece, sonoelektroFenton prosesi, fiziksel ve kimyasal etkiler yoluyla kirleticilerin bozunmasını iyileştirir. Yüksek karıştırma oranları ve elektrot yüzeyinin temizlenmesi, elektrot ile çözelti arasındaki kütle transferini artırır. Öte yandan, kimyasal etkiler, moleküllerin homolitik bölünmesiyle oksitleyici türler oluşturan mikro-kabarcıkların şiddetli çöküşünden ve Fe^{2+} rejenerasyonundan kaynaklanmaktadır (Ramos, M. D. N vd, 2021).

2.4.2.5. Anodik fenton

Anodik Fenton prosesi, klasik Fenton işlemine ve elektrokimyasal Fenton işlemine göre çeşitli avantajlara sahip yeni bir teknolojidir. Anodik Fenton'un diğer Fenton arıtma teknolojilerine göre en önemli avantajları, Fenton reaksiyonunun kendi geliştirdiği optimal asidik koşullarda (pH=2–3) meydana gelmesi ve arıtma çıkış suyunun pH'ının anodik ve katodik yarı hücrelerden elde edilen solüsyonların birleştirilmesiyle kısmen nötralize edilebilmesidir. Anodik Fentonun diğer büyük avantajı, demir iyonunun, bir kurban demir anottan elektroliz yoluyla reaksiyon sistemine iletilmesidir. Bu, çok kolaylıkla oksitlenen büyük miktarda higroskopik demir tuzu işleme ihtiyacının üstesinden gelir (Wang, Q., 2002).



Bu deney prensibinde, anodik Fenton olarak bilinen H_2O_2 harici eklenmesiyle azaltılabilir (Nidheesh, P. V vd, 2018).

2.4.2.6. Foto-elektro fenton yöntemi

Foto-Fenton yöntemi, Fenton reaksiyonunun bilinen bir iyileştirmesidir. Orijinal EF yöntemine ek (Denklem 2.12) olarak atık suyun UV veya görünür ışıkla ışınlanmasını yöntemidir. EF'nin bu modifikasyonu şu anda Fotoelektro-Fenton (FEF) işlemi olarak bilinir. EF koşulları altında arıtılan atıksu, ya EF arıtımı sırasında ya da sonrasında UV/görünür ışığa maruz bırakılır, bu da radikal $\cdot\text{OH}$ tarafından zorlukla ayrıştırılan Fe(III)-karboksilat komplekslerinin fotodekarboksilasyonunu destekler (Casado, 2019):



Ve Fe^{3+} hidrokso-komplekslerinin fotolizi yoluyla homojen radikal $\cdot\text{OH}$ üretimi(Denklem 2.13):



FEF süreci, organik kirleticilerin atık sulardan uzaklaştırılması için en yaygın foto-destekli Fenton tabanlı EİOP'dir. Elektrot malzemeleriyle hücre konfigürasyonu, Fenton'un reaksiyonundan ana oksidan radikal dotOH'nin üretilmesi için kilit faktörler olan H_2O_2 üretme ve Fe^{2+} 'yı yeniden üretme yeteneğini belirler. Uygulanan akım, reaktanların konsantrasyonu ve matris bileşimi gibi deneysel değişkenler, elektrolitik sistemin oksidasyon gücünü etkiler ve en iyi çalışma koşullarının oluşturulmasına izin verir. FEF prosesi için tüm bu deneysel terimler bu bölümde analiz edilmekte, ardından sentetik ve gerçek atık sularda farklı kirleticilerin etkin arıtımı açıklanmaktadır (Brillas, E. 2020).

Solar foto-elektro-Fenton, güneş ışığının radyasyon kaynağı olarak kullanıldığı süreç olarak kabul edilir. Başlıca avantajı, enerji maliyetlerinin azaltılmasıdır. Bununla birlikte, sistem günlük saatlerle sınırlıdır, yapay ışık kullanımını gerektirir, geceleri veya güneş ışığının görülme sıklığının sınırlı olduğu bölgelerde UV lambaları kullanılır. Fotovoltaik panellerin kullanımı aynı zamanda işletme maliyetini de düşürür çünkü gündüzleri piller gece kullanılacak enerjiyi depolamak için kullanılabilir. Solar foto-elektro-Fenton prosesinin bir başka avantajı, organik kirleticileri mineralize etmenin foto-elektro-Fenton prosesinden normalde daha verimli olmasıdır. Bunun nedeni, Fe^{3+} ile oluşan kompleksler gibi fotoliz reaksiyonlarını artıran güneş ışığı tarafından sağlanan daha fazla miktarda UV ve görünür radyasyondur (Ramos, M. D. N.,2021).

FEF işlemi, organik yan ürünlerin yavaş mineralizasyonu nedeniyle uzun süreli yığın halinde gerçekleştirilir. Karıştırılmış cam silindirik veya kübik bölünmemiş tank reaktörleri tipik olarak laboratuvarında tezgah ölçeğinde kullanılır. Hücre, sırasıyla galvanostatik veya potansiyostatik çalışma için iki veya üç elektrotla yapılır. Anot ve katot arasındaki mesafe çok kısa (<2 cm) olarak seçilmiştir, bu da omik düşüşü en aza indirerek enerji tasarrufu sağlar. Elektrolitik sistem, çözeltiye gelen radyasyonu sağlamak için bir UV lambası ile donatılmıştır (Brillas, E. 2020).

BÖLÜM 3. MATERYALLER VE DENEYSEL UYGULAMA

3.1. Materyal

3.1.1. Kullanılan elektrot malzemeleri

Yapılan çalışmalarda 3 farklı anot çifti elektrot kullanılmıştır. Bunlar çelik, grafit plaka ve titanyumdur. Deney düzeneğinde 7 tane elektrot kullanılmıştır. Her bir elektrotun boyutu 10*2 cm'dir. Tablo 3.1.'de, kullanılan elektrotlar gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan elektrot kombinasyonları

Anot	Katot
Çelik	Grafit Plaka
Grafit Plaka	Grafit Plaka
Titanyum	Grafit Plaka

3.1.2. Kullanılan çözelti ve reaktifler

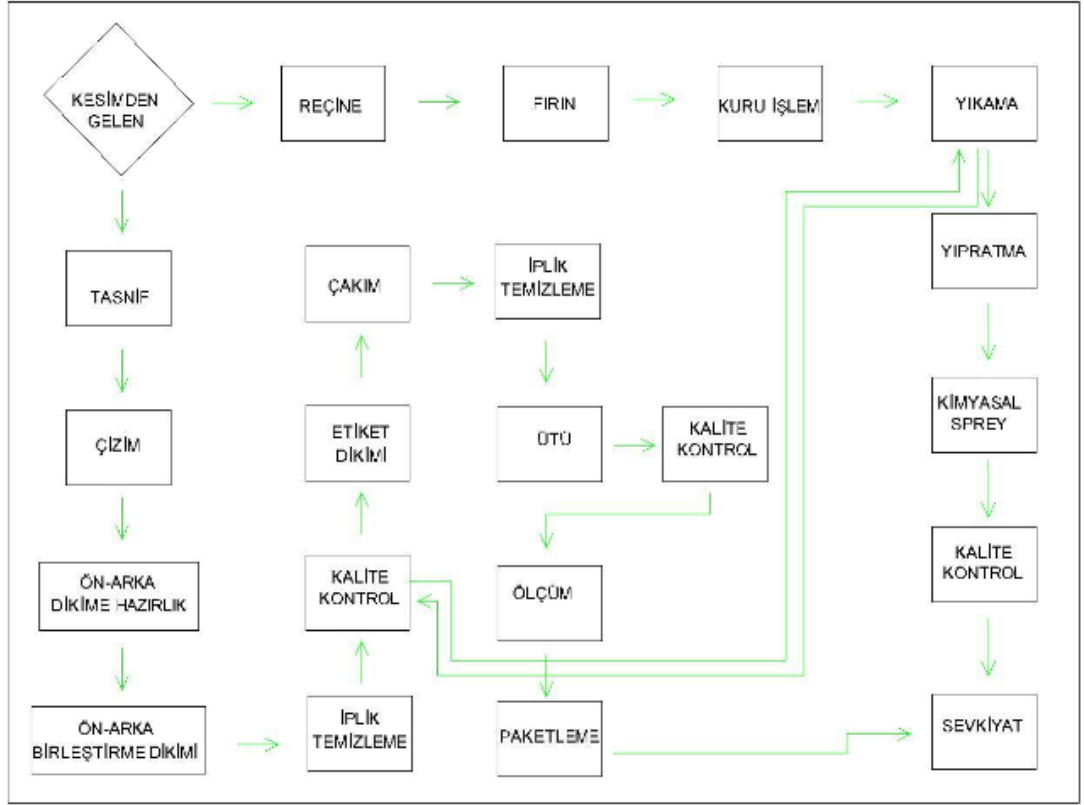
Tezde, ölçülen parametreler için gerekli çözeltiler ve deneylerde kullanılan katalizörler Standart metotlar 5220 D'ye göre hazırlanmıştır.

Fe³⁺ Çözeltisi:100 ml'lik ölçü kabına 27,033 gr. FeCl₃.6H₂O konularak ultra saf su eklenerek karıştırılmıştır.

3.2. Kullanılan Atıksuyun Özelliklerinin Belirlenmesi

Tekstil sektörünün önde gelen firmalarından Düzce Şubesi tesisinde, “Tekstil Ürünleri İmalatı, Denim Kumaştan Mamul Tekstil Ürünlerinin Yıkama Ağartılması” üretim faaliyetleri gerçekleştirilmektedir.

Düzce tesisimizde üretim, denim kumaşın depoya teslimi ile başlamaktadır. Kesim işlemleri yapılan ürünler tasnif ve metotları yapıldıktan sonra dikim bölümüne gönderilir. Dikim sonrası modelin reçetesine uygun bir şekilde kuru işlem, lazer, kimyasal sprej, kimyasal robot, reçine, yıpratma ve yıkama işlemleri uygulanır. Bitmiş ürünler ütü-paket bölümüne alınarak aksesuarları (düğme, rivet vb.) çakım makinelerinde çakılır. İplik temizlemesi yapılarak ütülenir, etiket ve paketleme aşamasından sonra ürünler yurt dışına sevk edilir (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Tesisin iş akış şeması

Ham su arıtma tesisi çıkışından alınıp laboratuvara ulaşır ulaşmaz Tablo 3.2.'de belirtilen analizler yapılmaktadır. Tablodaki değerler çalışma boyunca alınan her numune için yapılan analizler sonucunda elde edilen verilerin değişim aralığını ve ortalama değerleri vermektedir.

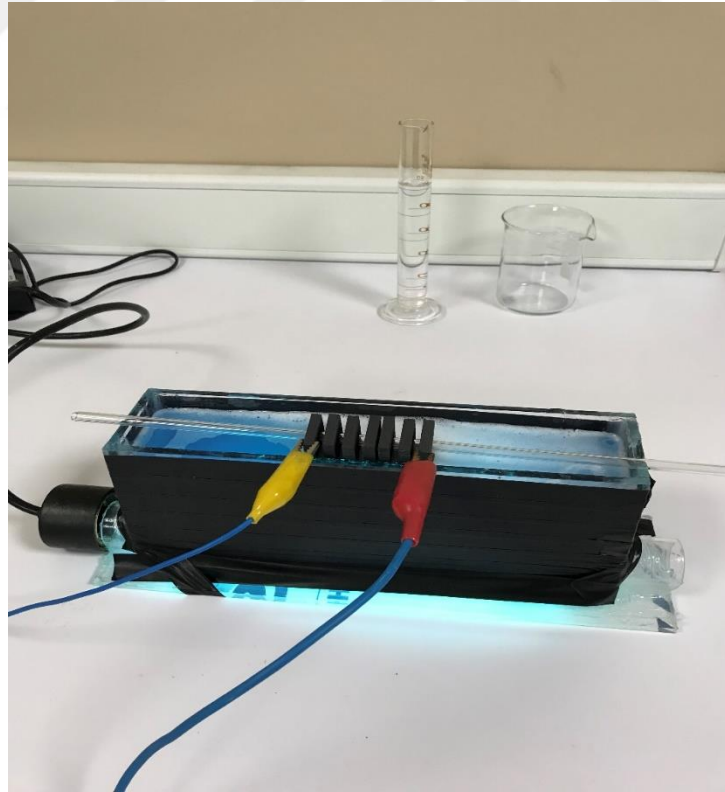
Tablo 3.2. Deneyde kullanılan atıksuyun parametreleri

Parametre	Değişim Aralığı
pH	6-9
İletkenlik (mS/cm)	2.10-2.60
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg/L)	90-400
Renk 465 nm (Pt-Co)	10-200

3.3. Deney ve Analiz Yöntemleri

3.3.1. Deney düzeneği

Yapılacak olan deneyler mevcutta işletilen bir tekstil firmasının üretimdeki proseslerinden ortaya çıkan atıksuların atıksu arıtma tesisinde bir elektrokimyasal arıtım sistemi olan Foto elektro-Fenton metodu kullanılarak arıtılabilirliğine dair Şekil 3.2.'deki gösterilen sistemde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Deney için kullanılan reaktör düzeneği

Yapılan çalışmada, her bir deneyde 500 ml atıksu kullanılmıştır. Deneysel hücreye ait ölçüler 18*10*6 cm ve dikdörtgen şeklinde tasarlanmıştır. uV ışınının suya tam anlamıyla işleyebilmesi adına reaktörün taban bölgesinin ortasından, yaklaşık dış çapı 2 cm olan ve içine uV-C Lambası girebilecek boru geçmektedir. Reaktör malzemesi tamamen pleksi glass malzemeden dan yapılmıştır. UV ışınlarının dağılımını önlemek amaç dış kısmı siyah bandaj yapılmıştır. Gerekli olan akımı GW Instek dijital ekranlı doğru akım sağlayan güç kaynağı (GPS-3303model) ile sağlanmıştır. AQUALİNE E-50 Pro Panolu UV (uv-C 254 nm) 14 Watt cihazı kullanılmıştır. Deneysel düzenekteki atıksu homojen olması için manyetik karıştırıcı (WiseStir MSH-20D Karıştırıcı) kullanılmıştır. Reaksiyon başlangıcında atıksuyun pH değerlerini ayarlayabilmek ve iletkenlik kontrolü sağlayabilmek, deney süresince ve deney sonrasında sonuçları düzgün okuyabilmek için bir adet Hach Lange HQ40D Portatif Multi Parametre Ölçüm Aygıtı kullanılmıştır. Elektrot ölçüleri 10*2 cm'dir, kalınlık hesaba katılmamıştır. Deneyde kullanılan elektrotların yaklaşık yüzey alanı 168 cm²'dir. Elektrotlar arasındaki mesafe 1 cm olarak belirlenmiştir ve toplam 7 elektrot (4 anot ve 3 katot) ile çalışma yapılmıştır. Kullanılan demir tozuna ait özellikler ise molarite 278,02 g/mol yoğunluk olarak ise 1.89 g/cm³(20°C). uv-C deney süresinde deneysel düzeneğine bağlı şekilde ve sabit, sistemle temas halinde olmuştur. Reaksiyon süresi boyunca sisteme sürekli akım verilmiştir ve homojen olabilmesi için karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan her bir deneme de 500 ml tekstil atıksuyu kullanılmıştır. Fenton tabanlı deneylerde suyun pH değerinin 3 civarında olması gerektiği literatürde yapılan çalışmalarda da desteklenmiştir. pH değerini sülfürik asit kullanarak istenilen değere getirilmiştir. Öncelikle uygun elektrot çiftini bulduktan sonra, belirlenen parametrelerde optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Süreye bağlı gerçekleştirilen çalışmalarda arıtım verimliliği incelenmiştir.

Foto elektrofenton deneyi; sabit uv-C ışığında demir II konsantrasyonu eklendiğinde akım verilerek başlatılır. Deney süresi sonunda reaksiyonu durdurmak için kalsiyum hidroksit eklenerek fenton reaksiyonu durdurulur. Numuneler santrifüjlenerek kirecin çökmesi sağlanır. Numuneler filtre edilerek belirlenen arıtım verimliliği incelenir.

3.3.1.1. Elektrot çiftinin belirlenmesi

Foto Elektro-Fenton deneyinde maksimum verim, minimum maliyetin sağlanması amacı ile 3 farklı kombinasyon denenmiştir. Deneylerde kullanılan farklı elektrot plakaları Tablo 3.1.'de verilmektedir.

Tablo 3.1.'de gösterilmiş olan elektrot plakaları ile sabit uv-C ışığında; akım, Fe^{2+} dozu (çelik elektrotu hariç) ve pH ve süre sabit tutularak kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve renk için arıtım verimliliği incelenmiştir. Giderim verimleri sonuçlarına göre uygun görülen elektrot seçimi yapılacaktır. Seçilen elektrot plakalar için en uygun şartları belirleyerek çalışmalar için bir sonraki aşamaya geçilmiştir.

3.3.1.2. Verimli arıtmadaki pH değerinin belirlenmesi

Fenton sistemi kullanılarak yapılan arıtma proseslerinde pH genelde 3 civarındadır. Bu çalışmada uygun pH'ı belirlemek için 3 farklı değerde uygun değeri bulmak amaçlanmıştır. pH; 2,5 – 3 – 3,5 aralıklarında çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.3.1.3. Deneysel optimizasyon

Fenton tabanlı deneylerin 60. dakikadan sonra dengeye geldiği literatürde yapılan çalışmalarla desteklenmiştir. Her deney 15 – 30 – 45 – 60 dakikalar arasında 0.35 A – 0.55A – 0.75 A akım, 1 – 2 – 3 mM Fe^{2+} dozlarında optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Her deney sonunda numuneler belirlenen arıtım verimliliği için incelenmesi için analize tabi tutulmuştur.

3.4. Yapılan Analiz ve Yöntemler

3.4.1. Ph ve elektriksel iletkenlik

Eİ ve pH analizleri için Hach Lange HQ40D Portatif Multi Parametre Ölçüm Cihazı ile gerçekleştirilmiştir

.

3.4.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı

Analizleri; Akredite Çevre Laboratuvarı'nda (Açık yakma titrimetrik Metot) SM 5220 B standart metot yöntemiyle yaptırılmıştır. Bu yöntem numune miktarı bilinen dikromat ile güçlü bir asit içinde yakma yapılır. Parçalanmadan sonra, kalan indirgenmemiş dikromat FAS ile titre edilerek, organik maddenin yükseltgenmesinde harcanan dikromat miktarı oksijen eş değeri cinsinden hesaplanma yöntemine dayanır.

3.4.3. Renk analizleri

Analizleri; Akredite Çevre Laboratuvarı'nda (Spektrofotometrik Metot) SM 2120 C standart metot yöntemiyle yaptırılmıştır. Spektrofotometre ile 450-465 nm dalga boyları arasında Platin-Kobalt çözeltisi standardıyla hazırlanan kalibrasyon eğrisinde numune absorbanslarına karşılık renk yoğunluklarının bulunmasına dayanır.

3.6. Giderim Verimlerinin Hesabında Kullanılan Matematiksel Eşitlik Arıtım Verimliliği Hesabı

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda arıtım verimliliği (Denklem 3.1)'teki gibidir.

$$V (\%) = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) * 100 \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte, C_0 atık suyun başlangıçtaki kirletici konsantrasyonunu (mg/L), C_e t süresince atık sudaki kirletici konsantrasyonunu mg/L cinsinden göstermektedir.

BÖLÜM 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

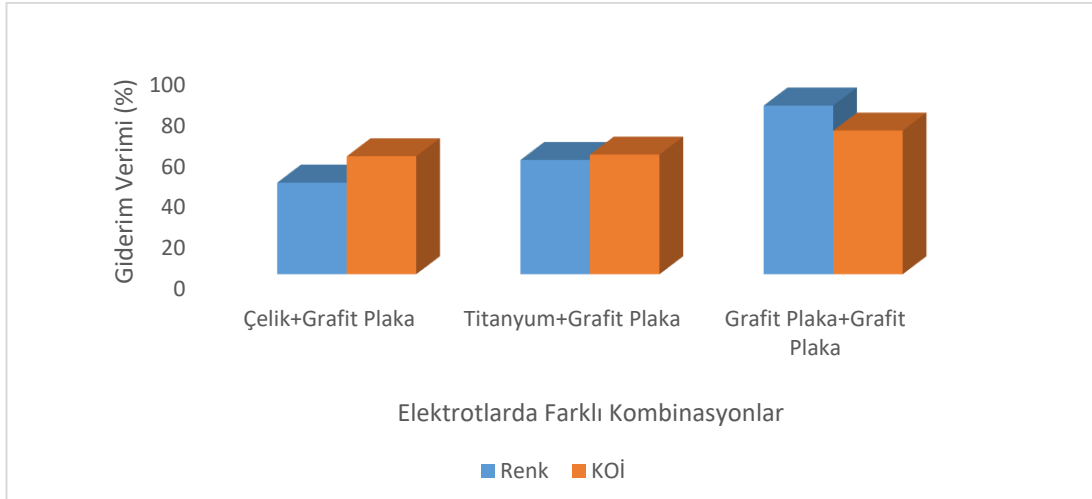
Bu bölümde yapılan çalışmadaki arıtım verimliliği ayrı ayrı incelenerek değerlendirilmiştir.

4.1. Elektrot Seçimi

Farklı plaka kombinasyonları denemiştir. Plakalar; Çelik-Grafit plaka, titanyum-grafit plaka ve grafit plaka-grafit plaka elektrotları kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda gözlemlenen veriler Tablo 4.1.'de, Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve Renk (Pt-Co) parametreleri için elde edilen giderim verimleri ise Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. Çalışmalar pH:3, Fe^{2+} :2mM (çelik bazlı anot plaka hariç), I:0.35A, t:60 dakikada belirlenen şartlarda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.1. Farklı elektrotlar ile yapılan çalışmalara ait deney sonuçları

Elektrotlar	pH	Eİ	Renk (Pt-Co)	KOİ (mg/L)
Giriş Suyu	7,14	2,44	182,716	400,0
Çelik-Grafit Plaka	3,65	2,30	100,665	168,8
Titanyum-Grafit Plaka	3,82	2,29	80,412	165,5
Grafit Plaka-Grafit Plaka	2,35	2,53	31,645	118,4



Şekil 4.1. Farklı elektrot çiftleri ile yapılan çalışmalara ait giderim verimleri (pH:3, Fe^{2+} :2 mM(çelik bazlı anot plaka hariç), I:0.35 A, t:60 dakika)

Bu çalışma çerçevesinde farklı elektrot kombinasyonları ile, sabit şartlarda foto elektro-fenton çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda KOİ ve renk parametreleri giderim verimleri incelenmiştir. Çelik(A)-Grafit Plaka(K) ve Titanyum(A)-Grafit Plaka(K) elektrot çiftleri renk giderim verimleri arasında pek bir fark olmadığı görülmüştür. Çelik(A)-Grafit Plaka(K) için renk giderim verimi %45 iken Titanyum(A)-Grafit Plaka(K) için %58 civarındadır. Renk giderim verimlerine bakıldığında en iyi verim %83 ile Grafit Plaka(A)-Grafit Plaka(K) elektrot çifti olmuştur.

Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) parametresine ait verim performansı incelendiğinde ise giderim verimi %50'inin üzerinde gerçekleşmiştir. Şekil 4.1. incelendiğinde en iyi verimin Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimini sağlayan elektrot kombinasyonu grafit plaka-grafit plaka olarak belirlenmiştir.

Beyazıt ve diğ. (2021), tarafından yapılan çalışmada sızıntı sularının arıtımı ve deşarjında önemli parametrelerden olan KOİ ve rengin foto-elektro-Fenton yöntemi ile giderimi araştırılmıştır. Sızıntı suyundan foto-elektro-Fenton yöntemi ile KOİ ve renk giderimi üzerine akım ($10-50 A/m^2$) ve pH (2.5-5.0) etkileri incelenmiştir. Optimum deneysel koşullar için (pH: 3, akım: $10 A/m^2$) maksimum %79,75 KOİ (90 dakika) ve %80,57 renk (45 dakika) giderimi elde edilmiştir. Bu sonuçlar, sızıntı

suyundan KOİ ve renk giderimi üzerine foto-elektro-fenton yönteminin başarı ile uygulanabileceğini göstermiştir (Beyazıt N. vd, 2021).

4.2. Grafit Plaka-Grafit Plaka Deneysel Sistem Optimizasyonu

Giderim verimleri incelendiğinde grafit plaka(A)-grafit plaka(K) optimizasyon çalışması için uygun olduğu belirlenmiştir.

4.2.1. Grafit plaka elektrot kombinasyonu ile foto elektro-fenton denemeleri

Bu bölümde; deneyde optimum parametreleri uygulamak amacı ile sabit uv-C dozunda uygun pH, optimum akım ve optimum Fe^{2+} dozunu belirlemek için elektroliz süresi ile farklılık gösteren deneyler gerçekleştirilmiştir.

- Uygun pH değerinin saptanması

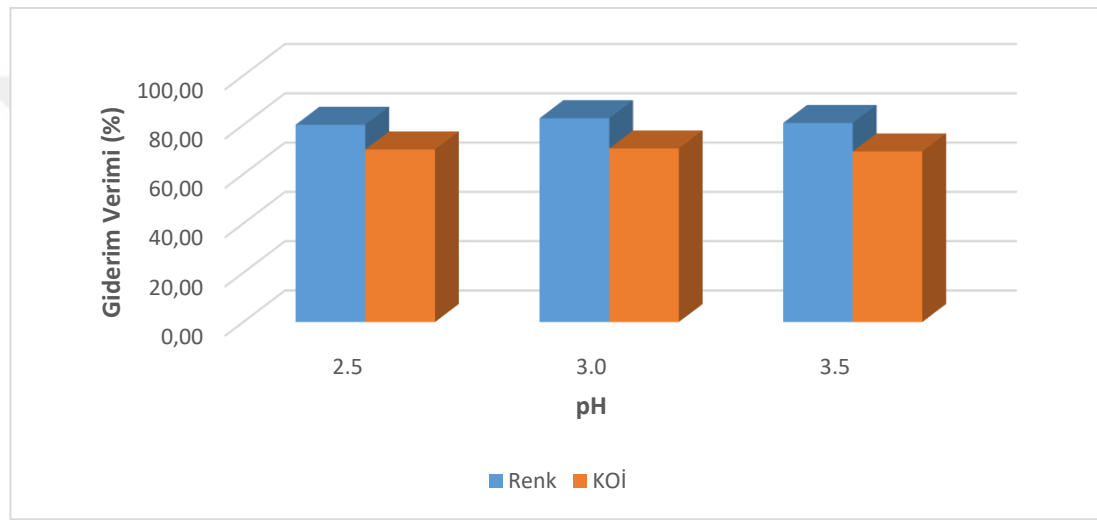
Fenton proses reaksiyonlarının gerçekleşmesinde pH parametresi oldukça önemli bir öneme sahiptir. Fe^{2+} ve H_2O_2 'nin redoks tepkimeleri asidik ortamda oldukça etkilidir. pH değeri 3.5'dan düşük olduğu zaman, hidrojen peroksit ve Fe^{2+} daha karardır. Fe^{2+} iyonları pH değeri 4'den fazla olduğunda kararsızdır ve hızlıca demir hidroksi kompleksleri üretmeye meyilli demir iyonları oluştururlar. Yüksek pH değerlerinde hidrojen peroksitin oksitleme yeteneği azaldığından kararsızdır (Kuru vd. 2020).

Deneylerde en önemli etkiye sahip olan pH etkisini incelemek için oksidasyon temelli ölçüm ve analizler önemli rol oynamaktadır. Hidroksil radikallerinin üzerinde pH etkisi etkenlerin başında gelmektedir.

Yapılan deneylerde; sabit uv-C ışığı, akım, Fe^{2+} dozu ve elektroliz deney süresi sabit tutulmuştur, pH değerleri ise 2.5-3-3.5 gibi farklı aralıklarda deney yapılmıştır. Yapılan deneylerde demir dozu Fe^{2+} :2mM, Akım I: 0.35 A, süre olarak t:60 dakikalık elektroliz süresinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Tablo 4.2.'de Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve Renk (Pt-Co) parametrelerinin giderim miktarları Şekil 4.2.'de grafik olarak sunulmuştur.

Tablo 4.2. Grafit plaka anot için uygun pH değerinin belirlenmesi

Başlangıç pH'sı	pH	Eİ	Renk (Pt-Co)	KOİ (mg/L)
Giriş Suyu	7,14	2,44	182,716	400,0
2.5	2,16	2,42	36,470	120,0
3	2,35	2,53	31,650	118,4
3.5	2,46	2,45	35,150	123,2



Şekil 4.2. Grafit plaka anot kullanılarak pH parametresinin giderim miktarı üzerindeki performansı (t:60 dakika, I: 0.35 A, Fe^{2+} :2 mM,)

Gerçekleşen deney sonucundaki analiz verilerine istinaden giderim veriminin en yüksek olduğu değer pH: 3 olarak tespit edilmiştir. Giderim verimleri ise KOİ için %71, Renk (Pt-Co) için ise sırasıyla %83 bulunmuştur.

– Uygun akım ile giderim verimleri üzerindeki etkisi

Elektrotlara verilen akım arttıkça, fenton tabanlı reaksiyonlarda demirin reaksiyona girişi oldukça artmaktadır. Ancak hem yüksek akım hem enerji tüketimini arttırdığı gibi oluşan çamur miktarını da arttırmaktadır. Akım miktarı arttıkça giderim verimi de artacaktır ancak belirli bir seviyeden giderim veriminde bir artış olmayacaktır. Bu yüzden fenton tabanlı proseslerde akım miktarını önemli bir parametredir (Fil vd.

2012). pH, ortamda oluşan reaksiyonları direkt etkilediği için elektro-oksidasyon deneylerinde önemli rol oynamaktadır. Hidroksil radikallerinin oluşumunda pH birinci derecede etkilidir. Yapılan çalışmaların sonucunda anot malzemesinin türüne göre asidik ortamlarda yapılan denemelerde çok yüksek giderim verimleri alındığı görülmüştür (Gök vd. 2019). Uygun akımı belirlerken yapılacak olan çalışmalarda; sabit uv-C ışığında, Fe^{2+} dozu, pH 3'te sabit tutularak I=0.35A, 0.55A, 0.75A olacak şekilde farklı akım aralığında elektroliz süresine bağlı FEF deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar neticesinde elde edilen veriler Tablo 4.3., 4.4. ve 4.5.'da Kimyasal oksijen ihtiyacı KOİ ve Renk (Pt-Co) deney sonuçlarına istinaden giderim verimleri ise Şekil 4.3. ve 4.4.'da grafik olarak sunulmuştur.

Tablo 4.3. Grafit plaka anot için I=0.35 A akımda elde edilen analiz sonuçları

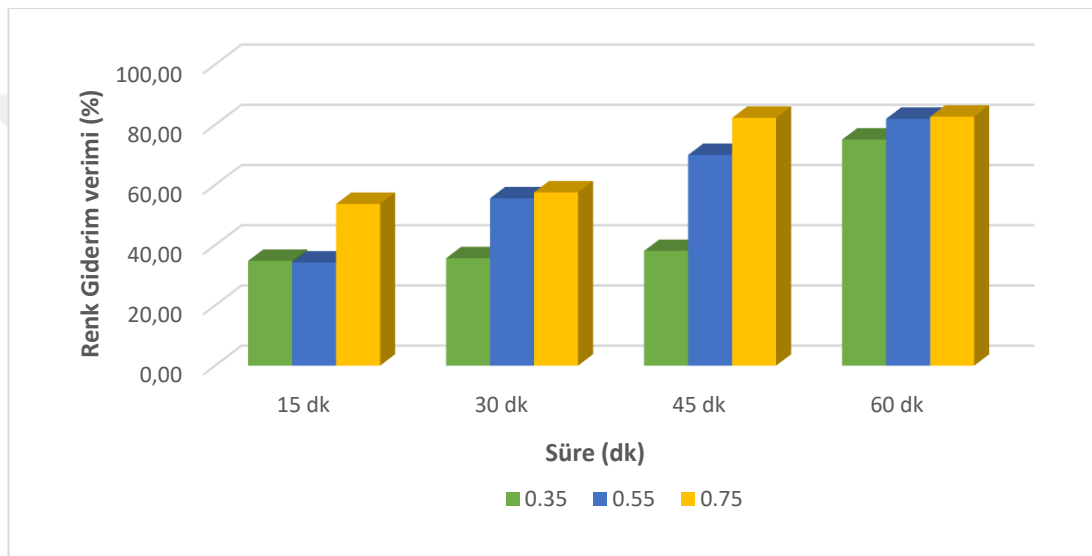
Zaman (dk)	pH	Eİ	Renk (Pt-Co)	KOİ (mg/L)
Giriş Suyu	7,16	2,44	182,716	400,0
15	2,52	2,47	119,141	137,6
30	2,49	2,42	117,540	126,4
45	2,47	2,41	113,112	122,3
60	2,41	2,50	45,540	119,3

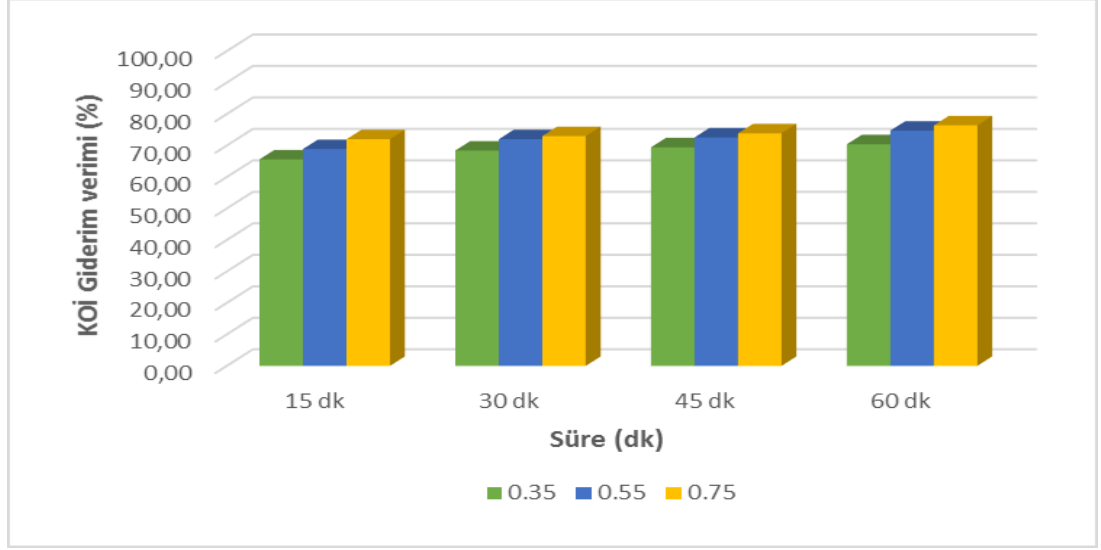
Tablo 4.4. Grafit plaka anot için I=0.55 A akımda elde edilen analiz sonuçları

Zaman (dk)	pH	Eİ	Renk (Pt-Co)	KOİ (mg/L)
Giriş Suyu	7,16	2,44	182,716	400
15	2,51	2,19	120,110	124,50
30	2,42	2,22	81,180	112,00
45	2,44	2,31	54,880	109,70
60	2,34	2,37	32,930	101,10

Tablo 4.5. Grafit plaka anot için I= 0.75 A akımda elde edilen analiz sonuçları

Zaman (dk)	pH	Eİ	Renk (Pt-Co)	KOI (mg/L)
Giriş Suyu	7,16	2,44	182,716	400,0
15	2,54	2,12	84,596	112,0
30	2,44	2,18	77,594	108,1
45	2,41	2,21	32,362	104,5
60	2,38	2,32	31,645	94,4

Şekil 4.3. Grafit plaka anot için farklı akım değerlerinde renk (Pt-Co) parametresi üzerindeki verim miktarının değişimi (pH:3, Fe²⁺: 2 mM)



Şekil 4.4. Grafit plaka anot için farklı akım değerlerinin Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) parametresi üzerindeki verim miktarının değişimi (pH:3, Fe^{2+} :2 mM)

Renk parametresi deney sonuçlarını incelediğimizde süre artışıyla birlikte 0.55 A ve 0.75 A'nın verimleri arasında fark olmadığı ancak 0.35 A göre daha iyi verim elde edildiği görülmüştür. En yüksek akımda ve uzun süredeki çalışmada görülen değişim diğerlerine göre çok fazla olmadığı gözlemlenmiştir.

KOİ parametresi için deney sonuçları incelendiğinde deney süresi uzadıkça giderim miktarı da paralel olarak artmaktadır. Bir diğer değişken faktör olan akım şiddetinin miktarı artmasıyla birlikte paralel olarak giderim verimine önemli ölçüde etki etmiş ve artış gözlemlenmiştir. Örneğin; KOİ parametresi incelendiğinde 60 dakikalık deney süresinde 0.75A için giderim miktarı yaklaşık %77 iken 60 dakika deney süresinde 0.55A için yaklaşık %75 giderim gerçekleşmiştir.

Deneyler incelendiğinde sonuç olarak KOİ parametresi için en iyi verimin alındığı uygun akım miktarı $I=0.55A$ seçilmiştir. Fakat renk parametresi için yüksek akımlarda verim bakımından çok fazla artış olmaması, özellikle akım miktarının artmasında ve buna bağlı olarak hem çamur miktarı hem de kullanılan elektrik miktarı göz önüne alındığında uzun vadede yüksek işletme maliyetinin yüksek olacağından tercih edilmemiştir. Sonuç olarak deney süresi bakımından $t=60$ dakikada ve akım $I=0.55A$ için; renk (Pt-Co) giderim verimi yaklaşık olarak %82 ve Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderim verimi %75 bulunmuştur.

– Fe^{2+} miktarının belirlenmesi

Deney yöntemi olarak Foto Elektro-Fenton prosesine sonradan ilave edilen demir II farklı konsantrasyonlarda (çelik anot hariç) denenmesi sonucunda Renk ve Kimyasal oksijen ihtiyacı parametreleri için giderim miktarlarının önemli ölçüde ve olumlu yönde değiştiği görülmüştür. Yapılan çalışmalarda; Farklı konsantrasyonlara sahip Fe^{2+} dozu denenerek yüksek verimlilik, optimum dozajlama ve buna bağlı olarak minimum işletme maliyeti hedeflenmektedir.

Sabit uv-C ışığında belirlenen uygun Akım ve pH değerleri sabit tutularak; Farklı dozajlardaki Fe^{2+} : 1mM, 2mM ve 3mM değerleri için değişken sürelerde Foto elektro-fenton çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar ve analizler sonucunda ulaşılan sonuçlar, Tablo 4.6., 4.7. ve 4.8.'de ve KOİ ve Renk (Pt-Co) parametrelerine ait artım verimleri Şekil 4.6. ve 4.7.'deki grafiklerde gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Grafit plaka anot için 1 mM Fe^{2+} dozunda elde edilen sonuçlar

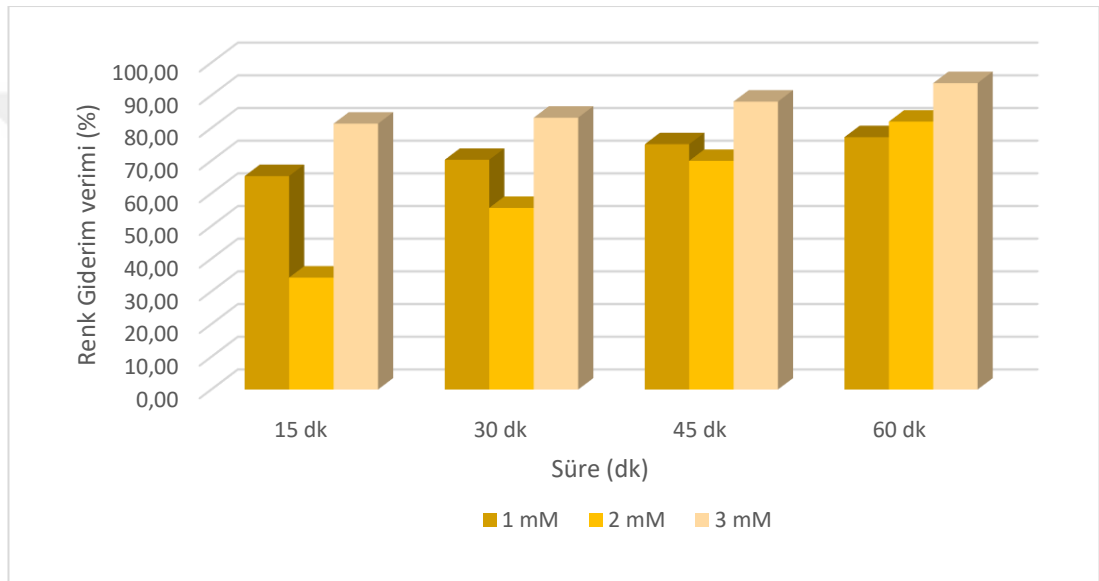
Zaman (dk)	pH	Eİ	Renk (Pt-Co)	KOİ (mg/L)
Giriş	7,16	2,44	182,716	400,0
15	2,47	2,15	63,370	144,0
30	2,43	2,19	54,278	132,8
45	2,40	2,25	45,554	129,3
60	2,38	2,29	41,607	126,4

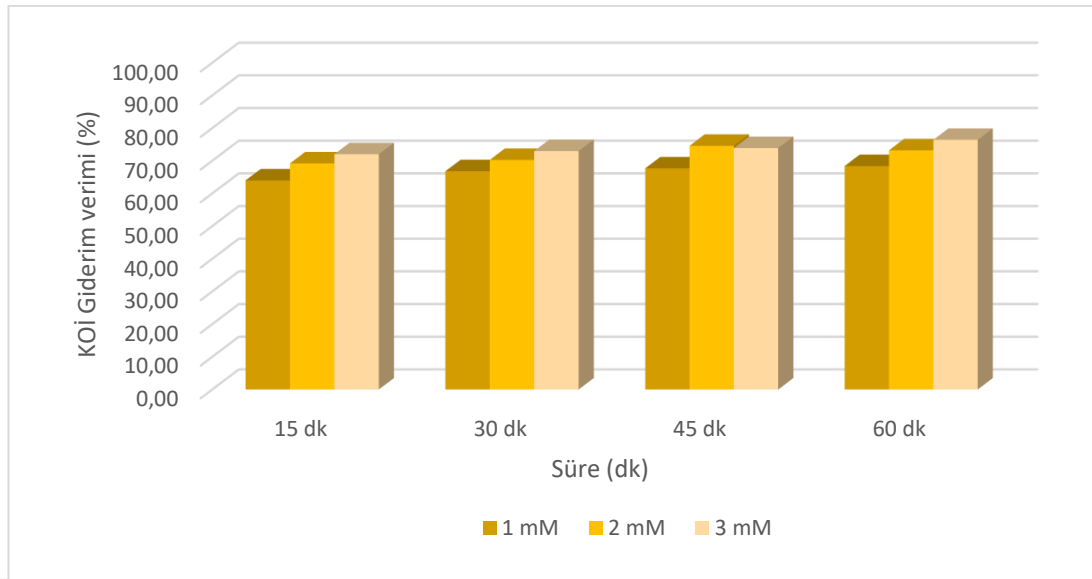
Tablo 4.7. Grafit plaka anot için 2 mM Fe^{2+} dozunda elde edilen sonuçlar

Zaman (dk)	pH	Eİ	Renk (Pt-Co)	KOİ (mg/L)
Giriş	7,16	2,44	182,716	400,0
15	2,51	2,19	120,110	123,2
30	2,42	2,22	81,178	118,9
45	2,44	2,31	54,878	101,7
60	2,34	2,37	32,928	101,2

Tablo 4.8. Grafit plaka anot için 3 mM Fe²⁺ dozunda elde edilen sonuçlar

Zaman (dk)	pH	Eİ	Renk (Pt-Co)	KOİ (mg/L)
Giriş	7,16	2,44	182,716	400,0
15	2,62	2,25	34,060	112,0
30	2,51	2,32	30,743	108,1
45	2,45	2,42	21,740	104,5
60	2,31	2,50	11,386	94,4

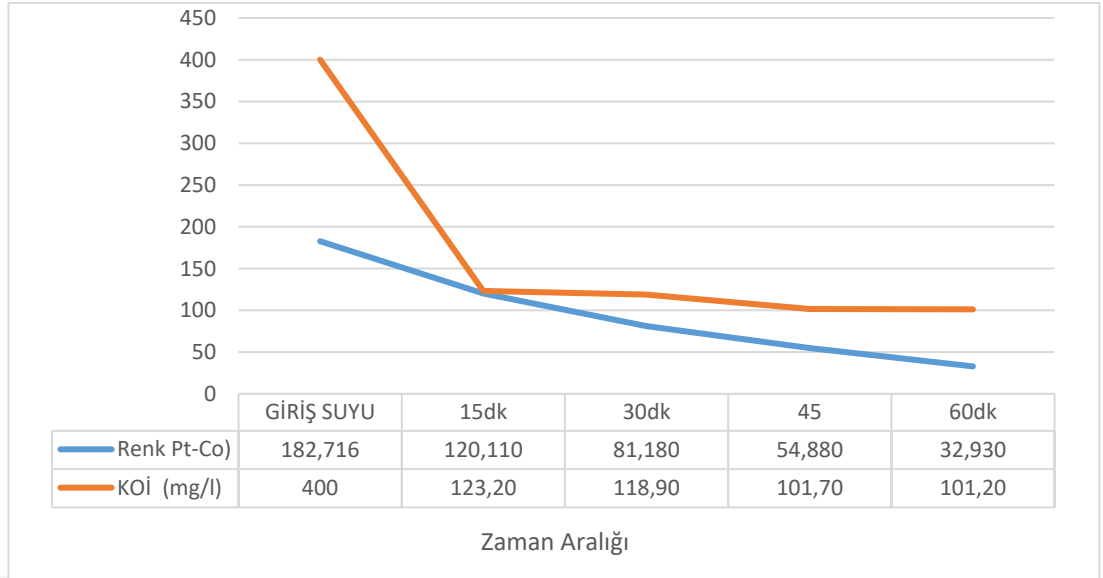
Şekil 4.5. Grafit plaka anot için farklı Fe²⁺ dozlarının giderim veriminin renk (Pt-Co) parametresine ait değişimi (I:0.55A, pH:3)



Şekil 4.6. Grafit plaka anot için farklı Fe^{2+} dozlarının giderim veriminin KOİ üzerindeki etkisi (pH:3, I: 0.55A)

Bu bölümdeki deney sonuçlarını incelediğimizde tüm Fe^{2+} için gerçekleştirilen farklı zaman aralıklarındaki sonuçların tümünde Renk parametresi için giderim verimlerinin süreye bağlı artışı gözlemlenmiştir. 3 mM Fe^{2+} konsantrasyonunda reaksiyon süresi arttıkça arıtım verimliliğinin de arttığı sonucu gözlemlenmiştir. Fe^{2+} konsantrasyonları için çalışılan zaman aralıklarının tümünde KOİ parametresi için giderim verimlerinde anlamlı bir artış olmadığı gözlemlenmiştir. Fe^{2+} konsantrasyonuna bağlı kullanımın fazla olmasında dolayı ortaya çıkan çamur miktarının arttığı ve tüketilen kimyasal madde oranından dolayı 3 mM değeri seçilmemiştir. 2 mM Fe^{2+} 60. Dakikadaki arıtım giderim verimleri sırasıyla %82 ve %75 olarak tespit edilmiştir.

Zamana bağlı karakteristik değişim durumu Şekil 4.7.'de görüldüğü üzere 30.dk dan sonra stabil hale gelmeye başlamıştır.



Şekil 4.7. Grafit plaka anot için giderim veriminin zamana bağlı olarak KOİ ve Renk parametrelerinin üzerindeki etkisi (pH:3, I: 0.55A, Fe²⁺:2mM)

BÖLÜM 5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Tekstil endüstrisi fabrikanın direkt çıkış atıksuyundan alınan atıksu numunesi ve tekrar proseste kullanılabilmesi için İOP olan Foto elektro-Fenton sistemi ile suyun mevcut kullanılan sistem ile arıtılabilirliği incelenmiştir. Yapılan deneylerde sabit uv-C ışığı altında; pH, El, renk (Pt-Co) ve KOİ parametreleri incelenmiştir, optimum deneysel şartlar belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalarda öncelikli olarak 3 farklı elektrot kombinasyonu, optimal deneysel şartlarda FEF deneyleri yapılarak giderim verimleri araştırılmıştır. Deneyler neticesinde de grafit plaka anot optimizasyon çalışmaları için uygun görülmüştür ve giderim verimleri incelenmiştir.

Yapılan çalışmalarda fabrikanın çıkış suyu foto elektro-fenton yöntemi ile arıtma işlemi gerçekleştirilmiş ve sonucunda numune alınan fabrikanın su kirliliği kontrolü yönetmeliğinde tabi olduğu Tablo 10.2., Sektör: Tekstil Sanayii (Dokunmuş Kumaş Terbiyesi ve Benzerleri)'deki Renk ve KOİ parametrelerine ait deşarj standartlarını sağladığı görülmüş, sonuçların ve sınır değerlerin Tablo 4.9.'da karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.9. pH, KOİ ve Renk Parametrelerine ait sonuçların yönetmelik limit değerleri ile karşılaştırılması

Parametre	Birim	Yönetmelik Sınır Değeri	Elde Edilen Sonuçlar
pH	-	6-9	7,25
Renk	(Pt-Co)	280	81,180
KOİ	(mg/L)	300	118,90

Şekil 4.7.'de görüldüğü üzere 30. dakikadan sonra KOİ parametresinin stabil hale gelerek çok fazla değişiklik göstermemesi, işletme maliyeti göz önüne alınarak en verimli arıtım süresi 30 dakika olduğu uygun görülmüştür. Sonuç olarak Grafit Plaka anot elektrot çifti için deney süresinde sabit uv-C ışığı altında yapılan optimizasyon çalışmalarında pH;3 2 Mm Fe^{2+} 0.55 A'da giderim verimlerinin diğer parametrelere göre daha yüksek ve stabil olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürdeki diğer fenton tabanlı prosesler incelendiğinde giderim verimleri uv ışığı kullanılmayan çalışmalara göre azdır. Sonuç olarak tesise geri dönüşümü yapılacak olan atık suyun renk ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı içeriğinin Foto elektro-Fenton prosesi ile giderildiği görülmüştür ancak tüketilen enerjiden dolayı uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Badawi, A. K vd, 2021. Badawi, A. K., & Zaher, K. (2021). Hybrid treatment system for real textile wastewater remediation based on coagulation/flocculation, adsorption and filtration processes: Performance and economic evaluation. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101963.
- Barredo-Damas, S. vd, 2012. Barredo-Damas, S., Alcaina-Miranda, M. I., Iborra-Clar, M. I., & Mendoza-Roca, J. A. (2012). Application of tubular ceramic ultrafiltration membranes for the treatment of integrated textile wastewaters. *Chemical Engineering Journal*, 192, 211-218.
- Bulca, Ö. vd 2021. Bulca, Ö., Palas, B., Atalay, S., & Ersöz, G. (2021). Performance investigation of the hybrid methods of adsorption or catalytic wet air oxidation subsequent to electrocoagulation in treatment of real textile wastewater and kinetic modelling. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101821.
- Casado, J. (2019). Towards industrial implementation of Electro-Fenton and derived technologies for wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102823.
- Crini, G. vd, 2019 Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L. D., & Morin-Crini, N. (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 195-213.
- De Gisi, S. vd, 2016. De Gisi, S., Lofrano, G., Grassi, M., & Notarnicola, M. (2016). Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: a review. *Sustainable Materials and Technologies*, 9, 10-40.
- Dos Santos, A. B vd, 2007. Dos Santos, A. B., Cervantes, F. J., & Van Lier, J. B. (2007). Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource technology*, 98(12), 2369-2385.
- Eslami, A., Moradi, M., Ghanbari, F., and Mehdipour, F. (2013). Decolorization and COD removal from real textile wastewater by chemical and electrochemical Fenton processes: a comparative study. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 11(1), 31.
- Gong, C., Ren, X., Han, J., Wu, Y., Gou, Y., Zhang, Z., & He, P. (2022). Toxicity reduction of reverse osmosis concentrates from petrochemical wastewater by electrocoagulation and Fered-Fenton treatments. *Chemosphere*, 286, 131582.
- Gök, A. (2019). Tekstil endüstrisi atıksularının elektro-fenton prosesi ile arıtımı (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Hassaan, M. A., and El Nemr, A. (2017). Health and environmental impacts of dyes: Mini Review. *American Journal of Environmental Science and Engineering*, 1(3), 64-67.
- Kuru, K. (2020). Elektro-Fenton Prosesi İle Tekstil Atıksularının Arıtılması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Holkar, C. R vd, 2016. Holkar, C. R., Jadhav, A. J., Pinjari, D. V., Mahamuni, N. M., & Pandit, A. B. (2016). A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches. *Journal of environmental management*, 182, 351-366.
- Jiangzhou Xie , Changyong Zhang , T. David Waite , Hydroxyl radicals in anodic oxidation systems: generation, identification and quantification, *Water Research* (2022).
- Keskin, B. vd, 2021. Keskin, B., Ağtaş, M., Ormancı-Acar, T., Türken, T., İmer, D. Y., Ünal, S., ... & Koyuncu, İ. (2021). Halloysite nanotube blended nanocomposite ultrafiltration membranes for reactive dye removal. *Water Science and Technology*, 83(2), 271-283.
- Kumar, R vd, 2014. Kumar, R., Yadav, N., Rawat, L., & Goyal, M. K. (2014). Effect of two waves of ultrasonic on waste water treatment. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 5(3), 1.
- Li, A., Weng, J., Yan, X., Li, H., Shi, H., & Wu, X. (2021). Electrochemical oxidation of acid orange 74 using Ru, IrO₂, PbO₂, and boron doped diamond anodes: Direct and indirect oxidation. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 898, 115622.
- Louhichi, B., 2022. Louhichi, B., Gaied, F., Mansouri, K., & Jeday, M. R. (2022). Treatment of textile industry effluents by Electro-Coagulation and Electro-Fenton processes using solar energy: A comparative study. *Chemical Engineering Journal*, 427, 131735.
- Manohar, K. vd, 2009. Manohar, K., & Ramlakhan, D. (2009). Air pollution from air stripping of industrial VOCs: a mitigating alternative using renewable energy. *International Journal of Environment and Waste Management*, 4(1-2), 75-84.
- Mejjide vd, 2018. Mejjide, J., Rodríguez, S., Sanromán, M. A., and Pazos, M. (2018). Comprehensive solution for acetamiprid degradation: combined electro-Fenton and adsorption process. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 808, 446-454.
- Moreira, F. C., Boaventura, R. A., Brillas, E., & Vilar, V. J. (2017). Electrochemical advanced oxidation processes: a review on their application to synthetic and real wastewaters. *Applied Catalysis B: Environmental*, 202, 217-261.
- Nair, K. M., Kumaravel, V., & Pillai, S. C. (2021). Carbonaceous cathode materials for electro-Fenton technology: Mechanism, kinetics, recent advances, opportunities and challenges. *Chemosphere*, 269, 129325.
- Nasseh, N vd, 2020. Nasseh, N., Arghavan, F. S., Rodriguez-Couto, S., Panahi, A. H., Esmati, M., & A-Musawi, T. J. (2020). Preparation of activated carbon@ ZnO composite and its application as a novel catalyst in catalytic ozonation process for metronidazole degradation. *Advanced Powder Technology*, 31(2), 875-885.

- Nicodemos Ramos, M. D., Sousa, L. A., & Aguiar, A. (2022). Effect of cysteine using Fenton processes on decolorizing different dyes: a kinetic study. *Environmental Technology*, 43(1), 70-82.
- Nidheesh, P. V., Zhou, M., and Oturan, M. A. (2018). An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 197, 210-227.
- Pal, P. (2017). *Industrial water treatment process technology*. Butterworth-Heinemann.
- Pal, P., vd, 2020. Pal, P., & Kumar, R. (2020). Recent advances in biological treatment processes for wastewater and water treatment. *Current trends and future developments on (bio-) membranes*, 41-66.
- Pliego, G., Zazo, J. A., Garcia-Muñoz, P., Munoz, M., Casas, J. A., & Rodriguez, J. J. (2015). Trends in the intensification of the Fenton process for wastewater treatment: an overview. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(24), 2611-2692.
- Pouran, S. R., Aziz, A. A., and Daud, W. M. A. W. (2015). Review on the main advances in photo-Fenton oxidation system for recalcitrant wastewaters. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 53-69.
- Poza-Nogueiras, V., Gomis-Berenguer, A., Pazos, M., Sanroman, A., & Ania, C. O. (2022). Exploring the use of carbon materials as cathodes in electrochemical advanced oxidation processes for the degradation of antibiotics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107506.
- Rajoriya, S., vd, 2018. Rajoriya, S., Bargole, S., George, S., & Saharan, V. K. (2018). Treatment of textile dyeing industry effluent using hydrodynamic cavitation in combination with advanced oxidation reagents. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 1109-1115.
- Ramos, M. D. N vd, 2020. Ramos, M. D. N., Cláudio, C. C., Rezende, P. H. V., Cabral, L. P., Santos, L. A., Costa, G. G., ... & Aguiar, A. (2020). Análise crítica das características de efluentes industriais do setor têxtil no Brasil. *Revista Virtual de Química*, 12(4).
- Ramos, M. D. N., Santana, C. S., Velloso, C. C. V., da Silva, A. H. M., Magalhães, F., & Aguiar, A. (2021). A review on the treatment of textile industry effluents through Fenton processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 155, 366-386.
- Ramos, M. D. N., 2021. Ramos, M. D. N., Santana, C. S., Velloso, C. C. V., da Silva, A. H. M., Magalhães, F., & Aguiar, A. (2021). A review on the treatment of textile industry effluents through Fenton processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 155, 366-386.
- Rosa, J. M vd, 2020. Rosa, J. M., Tambourgi, E. B., Vanalle, R. M., Gamarra, F. M. C., Santana, J. C. C., & Araújo, M. C. (2020). Application of continuous H₂O₂/UV advanced oxidative process as an option to reduce the consumption of inputs, costs and environmental impacts of textile effluents. *Journal of cleaner production*, 246, 119012.

- Santana, C. S., Ramos, M. D. N., Velloso, C. C. V., & Aguiar, A. (2019). Kinetic evaluation of dye decolorization by Fenton processes in the presence of 3-hydroxyanthranilic acid. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(9).
- Shahmirzadi, M. A. A. vd, 2018. Shahmirzadi, M. A. A., & Kargari, A. (2018). Nanocomposite membranes. In *Emerging technologies for sustainable desalination handbook* (pp. 285-330). Butterworth-Heinemann.
- Sharma, Y. C vd, 2011. Sharma, Y. C., & Upadhyay, S. N. (2011). An economically viable removal of methylene blue by adsorption on activated carbon prepared from rice husk. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(2), 377-383.
- Sirés, I., Brillas, E., Oturan, M. A., Rodrigo, M. A., & Panizza, M. (2014). Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow. A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(14), 8336-8367.
- Stergiopoulos, D., 2014. Stergiopoulos, D., Dermentzis, K., Giannakoudakis, P., & Sotiropoulos, S. (2014). Electrochemical decolorization and removal of indigo carmine textile dye from wastewater. *Global NEST Journal*, 16(3), 499-506.
- Tian, K., Hu, L vd, 2021. Tian, K., Hu, L., Li, L., Zheng, Q., Xin, Y., & Zhang, G. (2021). Recent advances in persulfate-based advanced oxidation processes for organic wastewater treatment. *Chinese Chemical Letters*.
- Türgay, O vd, 2011. Türgay, O., Ersöz, G., Atalay, S., Forss, J., & Welander, U. (2011). The treatment of azo dyes found in textile industry wastewater by anaerobic biological method and chemical oxidation. *Separation and Purification Technology*, 79(1), 26-33.
- URL 1, 2021. Textile Industry Definition - Definitions for the Clothing & fabric Industry.
https://www.apparelsearch.com/definitions/fabric/textile_industry_definition.htm (Erişim tarihi: 15.03.2022)
- URL 2, 2018. HISTORY OF TURKISH TEXTILE.
<https://libertatextil.com/en/history-of-turkey-textile/> (Erişim tarihi : 15.03.2022).
- Verma, A. K vd, 2012. Verma, A. K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. *Journal of environmental management*, 93(1), 154-168.
- Wang, C., Liu, Y., Huang, M., Xiang, W., Zhou, T., Wu, X., & Mao, J. (2020). Synergistic degradation of sulfamethoxazole in an oxalate-enhanced Fered-Fenton system: The critical heterogeneous solid-liquid interfacial mechanism and an insight in practical application. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122268.
- Wang, Z., Xue, M., Huang, K., and Liu, Z. (2011). Textile dyeing wastewater treatment. In *Advances in treating textile effluent*. IntechOpen.
- Wols, B vd, 2012. Wols, B. A., & Hofman-Caris, C. H. M. (2012). Review of photochemical reaction constants of organic micropollutants required for UV advanced oxidation processes in water. *Water research*, 46(9), 2815-2827.

- Zhang, M. H., Dong, H., Zhao, L., Wang, D. X., & Meng, D. (2019). A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Science of the Total Environment*, 670, 110-121.
- Zhou, Y vd, 2015. Zhou, Y., Zhang, L., & Cheng, Z. (2015). Removal of organic pollutants from aqueous solution using agricultural wastes: a review. *Journal of Molecular Liquids*, 212, 739-762.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ömer Faruk KONT

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Çevre Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Bartın Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Çevre Mühendisliği	2016

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Arıtsan Çevre Laboratuvarı	Teknik Müdür

YABANCI DİL

İngilizce