

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GIDA ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN AL ELEKTROD
KULLANARAK ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ İLE
ARITIMININ İNCELENMESİ**

ŞEYDA ECREN ÇEBİ

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

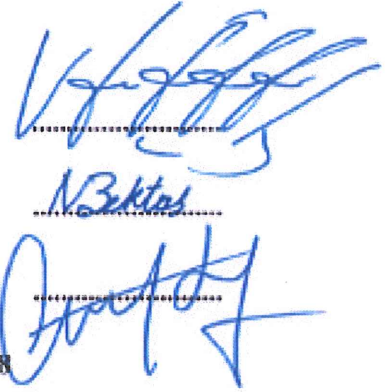
YÜKSEK LİSANS TEZİ

GIDA ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN AL ELEKTROD
KULLANARAK ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ İLE
ARITIMIN İNCELENMESİ

ŞEYDA ECREN ÇEBİ

Prof.Dr. Sevil VELİ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof.Dr. Nihal BEKTAŞ
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniversitesi
Doç.Dr. Ayla ARSLAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.07.2018



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütücülüğünü üstlenen, çalışmamın her aşamasında yardım, bilgi ve tecrübelerini aktaran tez danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Sevil Veli'ye,

Deneysel çalışmamın laboratuvar sürecinde yardımları ve önerileri ile tezin gelişimine destek olan değerli hocalarım, Doç. Dr. İsmail Özbay, Doç. Dr. Bilge Özbay, ve ileri arıtım laboratuvarında çalışmama imkan sunan Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı tüm hocalarına,

Lisans ve yüksek lisans öğrenim hayatım boyunca beraber yol aldığımız, tez süresince her türlü yardım ve desteğini gösteren nişanlım, Çevre Müh. Mertcan Bilgin'e,

Öğrenim hayatım boyunca bugünlere gelmemi sağlayan her koşulda yardım ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz - 2018

Şeyda Ecren ÇEBİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
GİRİŞ	1
1. GIDA ENDÜSTRİSİ VE ATIKSU ARITIM TEKNOLOJİLERİ.....	3
1.1. Gıda Endüstrisi Tanıtımı	3
1.1.1. Patates cipsi endüstrisinin tanıtımı	4
1.1.2. Patates cipsi üretim prosesleri	5
1.1.2.1. Hammadde alımı ve boyutlandırma	5
1.2.1.2. Ayıklama-soyma.	5
1.2.1.3. Yıkama-boylama	6
1.2.1.4. Dilimleme-papates dilimlerinin yıkanması	7
1.2.1.5. Kurutma ve/veya kızartma	7
1.2.1.6. Tuzlama-çeşilendirme.	7
1.2.1.7. Paketleme-depolama.	8
1.2. Gıda Endüstrisi Atık Suyu	8
1.2.1. Gıda endüstrisi atık suyu arıtım yöntemleri	9
1.2.1.1. Fiziksel arıtma yöntemleri	9
1.2.1.2. Biyolojik arıtma yöntemleri.	9
1.2.1.3. Kimyasal arıtma yöntemleri.	10
1.2.1.4. İleri arıtma yöntemleri	10
2. ELEKTROKİMYASAL ARITIM.	11
2.1.Elektrokimyasal Arıtım Uygulama Alanları	12
2.2.Elektrokimyasal Arıtımda İşletme Şartlarının Etkisi	12
2.2.1. Elektrotların yerleşimi	12
2.2.2. Akım yoğunluğu	13
2.2.3. pH	13
2.2.4. Arıtım süresi	13
2.2.5. İletkenlik ve sıcaklık	13
2.3. Elektrokimyasal Arıtım	14
2.4. Elektroflotasyon	15
2.5. Elektrokoagülasyon (EC)	16
2.5.1. EC'nin uygulama alanları.....	17

2.5.2. EC prosesinin mekanizması	17
2.5.3. EC prosesinin avantaj ve dezavantajları.....	21
2.5.4. EC ile yapılmış çalışmalar	22
3. DENEYSEL TASARIM.	25
3.1.Varyans Analizi (ANOVA).....	27
3.2. Merkezi Kompozit Dizayn	27
3.3. Cevap Yüzey Yöntemi	29
3.3.1. Cevap yüzey yöntemi avantaj ve dezavantajları	30
4. MATERYAL METOT	32
4.1. Atıksu Karakterizasyonu	32
4.2. Kullanılan Kimyasallar	32
4.3. Analitik Prosedür.....	32
4.4. Elektrokoagülasyon Düzeneği.....	34
4.5. Optimizasyon Çalışmaları	36
4.6. EC Prosesi ile KOİ Gideriminin İstatistiksel Analizi.....	38
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	39
5.1. Ph'm Etkisi.....	39
5.2. İletkenliğin Etkisi.	40
5.3. Akım Yoğunluğunun Etkisi	41
5.4. Elektroliz Süresinin Etkisi	41
5.5. EC Model Reaktörü ile Optimizasyon Çalışması	42
5.5.1. Varyans analizi.....	43
5.5.2. Doğrulama deneyi	45
5.5.3. Cevap yüzey grafikleri	46
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR.....	50
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	55
ÖZGEÇMİŞ	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. ABD’deki işlenmiş patates ürünleri.....	4
Şekil 1.2. Cips Üretim Teknolojisi.....	6
Şekil 2.1. Elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin parçalanması.....	15
Şekil 2.2. Elektrokoagülasyon prosesindeki giderim mekanizması	19
Şekil 2.3. Sulu ortamda alüminyum kompleksleri ve pH ilişkisi.....	20
Şekil 2.4. Sulu ortamda demir kompleksleri ve pH ilişkisi.....	20
Şekil 3.1. Merkezi kompozit dizayn kısımları	28
Şekil 3.2. Üç değişkenli merkezi kompozit dizaynın analitik düzlemde gösterimi.....	29
Şekil 4.1. Hach Lange DR 5000 spektrofotometre cihazı.....	33
Şekil 4.2. Hach DRB 200 ısıtıcı cihazı	33
Şekil 4.3. pH-metre cihazı.....	33
Şekil 4.4. İletkenlik ölçüm cihazı.....	34
Şekil 4.5. Elektrokoagülasyon deney düzeneğinin şematik görünümü.....	35
Şekil 4.6. EC Güç kaynağı ve deney düzeneği	35
Şekil 5.1. pH’ın KOİ giderim verimine etkisi.....	39
Şekil 5.2. İletkenliğin KOİ giderim verimine etkisi	40
Şekil 5.3. Akım yoğunluğunun KOİ giderim verimine etkisi.....	41
Şekil 5.4. Reaksiyon süresi-KOİ ilişkisi	42
Şekil 5.5. Öngörü modelleri KOİ giderimi	44
Şekil 5.6. KOİ Giderimi için yüzey yanıt modelinin doğrulanması.....	45
Şekil 5.7. KOİ giderim verimliliği için yüzey grafikleri a) akım yoğunluğu ve süresi b) pH ve iletkenlik c) pH ve akım yoğunluğu d) pH ve zaman e) iletkenlik ve zaman f) iletkenlik ve akım yoğunluğu	46

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları	18
Tablo 4.1. Atıksu Numunesinin Karakterizasyonu	32
Tablo 4.2. Merkezi birleşik tasarım faktör ve seviyeler.....	36
Tablo 4.3. Merkezi birleşik tasarım deney planı	37
Tablo 5.1. EC reaktörü ile KOİ giderimi için deney sonuçları	42
Tablo 5.2. Al elektrotların kullanıldığı EC prosesinde KOİ giderimi için ANOVA analizi.....	44
Tablo 5.3. Doğrulama deneyi dizayn ve sonuçları	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
HO	: Hidroksi radikalleri
H ₂	: Hidrojen Gazı
N	: Azot
P	: Fosfor
Pt	: Platin
Ru	: Rutenyum
Ti	: Titanyum

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AKM	: Askıda Katı Madde
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
CCD	: Central Composite Desing (Merkezi Birleşik Tasarım)
COD	: Chemical Oxygen Demand
EC	: Electrocoagulation (Elektrokoagülasyon)
İOP	: İleri Oksidasyon Prosesleri
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
SFA	: Snack Food Association (Atıştırmalık Gıda Birliği)

GIDA ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN AL ELEKTOD KULLANARAK ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ İLE ARITIMININ İNCELENMESİ

ÖZET

Gıda işleme endüstrileri atık suları genellikle yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), askıda katı madde (AKM) ve azot, fosfor (N,P) gibi çeşitli inorganik bileşenler içermektedirler. Elektrokoagülasyon prosesi, kimyasal koagülasyon prosesine göre kimyasal madde kullanmadan, elektrolitik oksidasyonu ile koagülantların oluşumu, kirleticilerin, partiküler çözeltinin destabilizasyonu ve emülsiyonların kırılması, floklardan destabilize fazların birleşmesi gibi avantajları nedeniyle tercih edilen bir proses haline gelmiştir. Bu çalışmada bir gıda endüstrisi atıksuyunun alüminyum elektrot kullanılarak kesikli sistemde elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı incelenmiştir. Çalışılan atıksuyun özellikleri karakterizasyon çalışması ile belirlenmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinin etkinliği KOİ parametresindeki değişim gözlenerek değerlendirilmiştir. Çalışmada pH, iletkenlik, akım yoğunluğu ve süre gibi parametrelerin etkileri incelenmiştir. pH=7, iletkenlik=3,5mS/cm, akım yoğunluğu =1,82 mA/cm² ve süre=30 dak. olarak belirlenmiştir. Çalışmada, Box-Behnken ile deneysel tasarım yapılmıştır. Deneysel tasarım sonucu %93 KOİ giderim verimi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Elektrot, Elektrokoagülasyon, Gıda Endüstrisi Atıksuyu, KOİ Giderimi.

INVESTIGATION OF FOOD INDUSTRY WASTE WATER TREATMENT WITH ELECTROKOAGULATION PROCESS BY USING AL ELECTROD

ABSTRACT

Food processing industries discharge large volumes of waste water that are generally characterized by high chemical oxygen demand (COD), large amounts of suspended solids, and various inorganic constituents including N and P. The electrocoagulation process has become a preferred process due to the advantages such as the formation of coagulants by the electrolytic oxidation of sacrificial electrodes, the destabilization of the pollutants, colloids and the destruction of the emulsions, the combination of the destabilizing phases from the flocs, without using any additional chemicals when considering chemical coagulation process. In this study, the treatment of a food industry wastewater by electrocoagulation method with using aluminum electrode was investigated in batch system. The characteristics of the wastewater were determined by the characterization study. The effectiveness of the electrocoagulation process was evaluated by monitoring the change in the values of COD parameter. The effects of parameters such as pH, conductivity, current density and reaction time were studied in the study. Optimum conditions were determined by designing with Box-Behnken test method; conditions were pH= 7, conductivity= 3,5 mS/cm, current density= 1,82 mA/cm² and reaction time= 30 min. In these optimum conditions, 93% recovery of COD was achieved.

Keywords: Aluminium Electrode, Electrocoagulation, Food Industry Wastewater, Removal of COD.

GİRİŞ

Günümüzde artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla, üretim faaliyetlerinin artması ve endüstrinin gelişmesi çevre kirliliği problemini de beraberinde getirmektedir.

Endüstriyel kaynaklı atık sular, yerleşim yerlerinden kaynaklanan atık sular ve yaygın kaynaklardan oluşan atık sulara göre önemli farklılıklar göstermektedir. Endüstriyel sistemlerde atık suları oluşturan kaynaklar sayı ve tür olarak çok çeşitlilik arz etmektedir. Atıkların ve atık suların miktarları su kaynağının özelliğine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu sebeple atıkların ve atık suların miktarlarının belirlenmesi için kaynakların ayrıntılı olarak değerlendirilmesi gerekir. Endüstrinin oluşturduğu kirlenme, üretim faaliyetlerinin bir sonucudur ve kirlenmeyi üretimin bir fonksiyonu olarak değerlendirmek gerekir (Tunışık, 2002).

Gıda işleme endüstrileri yüksek biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) ve kimyasal oksijen talebi (KOİ) ile karakterize güçlü atıksu üretimi nedeniyle ciddi çevresel sorunlara neden olur (Keenan ve Sainkov, 2000).

Gıda sanayi atıksuyunun yüksek organik kirlilik yükü, büyük bir çevresel problemi temsil etmektedir.

Atık su arıtımı ile ilgili daha sıkı düzenlemelerin kurulmasıyla, geleneksel arıtım metotların yanında suyun dekontaminasyonu için yeni teknolojilerin ve prosedürlerin geliştirilmesine artan bir ilgi vardır (Beltran De Heredia ve diğ., 2004).

Elektrokoagülasyon (EC), konvansiyonel koagülasyon, flotasyon ve elektrokimyanın su ve atık su arıtımındaki fonksiyonlarını ve avantajlarını birleştiren yeni bir teknolojidir. Bu temel tekniklerin her biri ayrı ayrı geniş çapta çalışılmıştır (Holt ve diğ., 2005).

EC ile arıtım 20. Yüzyılın büyük bir bölümünde kullanılan bir yöntemdir. 20 yıl boyunca EC prosesinin kullanımı yüksek yatırım maliyetleri sebebi ile daha uygun maliyetli diğer kimyasal arıtım yöntemlerinin tercih edilmesi sebebi ile azalmıştır (Chen ve diğ., 2004).

Bununla birlikte, atık su arıtma için daha etkili arıtma yöntemi arayışına girilmiştir.

Bu ve çevre dostu olma, araştırma konusu olarak elektrokoagülasyonda küresel ilginin artmasına yol açmıştır. Son birkaç on yıl boyunca, çevre sektöründeki literatür, EC tarafından farklı tipteki atık suların arıtılmasına yönelik artan bir ilgi göstermiştir. Özellikle son birkaç yılda, AB uygulamaları ile ilgili yayınlanmış literatürün önemli ölçüde arttığı görülmektedir (Kuokkanen, 2013).

Bu çalışmada, patates cipsi üreten bir gıda endüstrisi anaerobik arıtma çıkışından alınan ham atıksuyun Al elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı incelenecektir. İşletme parametreleri olarak belirlenen; pH, İletkenlik, Akım yoğunluğu ve reaksiyon süresinin, atıksuyun Kimyasal Oksijen İhtiyacındaki (KOİ) giderimine etkisi araştırılacak ve yüzey yanıt yöntemi ile optimizasyonu yapılacaktır.



1. GIDA ENDÜSTRİSİ VE ATIKSU ARITIM TEKNOLOJİLERİ

1.1. Gıda Endüstrisi Tanıtımı

Gıda sanayi, tarımdan sağladığı bitkisel ve hayvansal hammaddeyi, uyguladığı bir veya daha fazla işlemle, raf ömrü uzun ve tüketime hazır ürünlere dönüştüren bir imalat sanayi koludur (Ekşi ve diğ., 2011).

Bu süreçte, en önemli adım üretimdir. Üretimden başlayarak tüketicide sona eren süreçte ise sağlıklı hammadde temininden enerji kullanımına, kaynak kullanımından atık idaresine, ambalajlamadan dağıtım kanallarına kadar birçok unsur yer almaktadır. Gıda zincirini, 'tarladan sofraya' ilkesinden hareketle; çiftçiler, sanayiciler, tedarikçiler, nakliyeciler, perakendeciler ve tüketicileri de içine alan farklı gruplar oluşturmaktadır.

Sektörün alt başlıkları; Et ve Et Ürünleri, Süt ve Süt Ürünleri, Un ve Unlu Ürünler, Meyve ve Sebze Ürünleri, Katı ve Sıvı Yağlar, Şeker ve Şekerli Ürünler, Alkolsüz İçecekler, Alkollü İçecekler, Fermente Ürünler, Hazır Tüketilen Gıdalar ve Bebek Mamaları olarak özetlenebilir (Dünya Gazetesi, 2015).

Günümüzde 361 milyar ABD doları büyüklüğünde olan dünya gıda ticareti içinde, Türkiye %1 gibi oldukça düşük bir pay almaktadır. Sektör içinde önemli yer işgal eden bitkisel yağlar, hububat, süt ürünleri ve tavuk etinde ise ülkemizin payı %0,1 gibi çok daha düşük orandadır. Dünya ticaretinde 60 milyar ABD dolarının üstünde ihracata ulaşan su ürünleri ihracatında payımız sadece %0,3'tür. Dünyada talebi giderek artan ve ülkemiz koşullarının üretimine elverişli olduğu organik tarım ürünlerinin dünya ihracatı ise 21 milyar ABD dolarının üstündedir ve ülkemiz ihracatının payı ise %0,2'dir (Erkan, 2017).

Zengin tarımsal kaynakları ile gıda sanayi, Türkiye ekonomisinde ilk kurulmuş sektörlerden biridir. Cumhuriyetin kurulmasından sonra Türkiye'nin sanayileşme süreci bu sektörle başlamıştır (Donduran ve diğ., 2007). Türkiye gıda sanayi, özellikle gıda teknolojisinde kaydedilen gelişmeler sonucunda sektörde doğrudan ihracat yönelik üretim oluşturarak, uluslararası piyasalarda rekabet edebilir konuma ulaşmıştır (Bulu ve diğ., 2007). Bugün Türk Gıda sektörü dünyanın 130 ülkesine ihracat yapmaktadır (Çetin, 2007).

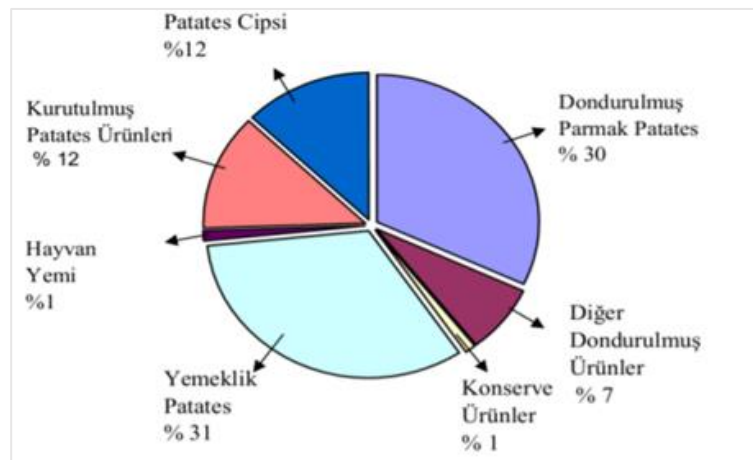
1.1.1. Patates cipsi endüstrisinin tanıtımı

İnsanların yaşam biçimlerindeki değişimler sebebiyle günümüz şartlarında hazır, paketlenmiş, taşınabilen ve yoğun hayat temposu nedeniyle hızlı tüketimin yeri beslenmede önemli bir paya sahiptir. Bunun sonucunda teknolojinin gelişmesiyle de çeşitli hazır gıdaların üretimi artar duruma gelmiştir.

Dünyada ve ülkemizde çerez gıda grupları içerisinde üretim ve tüketim yönünden cipsler en önemli paya sahiptir. Ülkemizde talebi en fazla olan çerez tip gıdalar içerisinde patates ve mısır cipsleri ilk iki sırada yer almaktadır Bu nedenle cipslerin temel hammaddesi genellikle patates ve mısırdır (Keenan ve Sainkov, 2000).

Patates, çeşitli şekillerde hazırlanıp servis edilebilen karbonhidrat içeriği bakımından zengin bir besin kaynağıdır. Hasat edilen taze üründe ağırlıkça % 80 oranında su ve % 20 oranında kuru madde bulunmaktadır. Patatesin toplam kuru ağırlığının yaklaşık % 80'ini oluşturan karbonhidratların ortalama % 70'i nişasta, % 0.5-1'i sakkaroz, % 0.5-2'si indirgen şeker ve % 6-8'i diyet lifidir. Sakkaroz, glukoz, fruktoz patatesteki bulunan başlıca şekerlerdir. Patatesteki aminoasit miktarının yarısına yakını asparajin ve glutamin oluşturmaktadır (Tuta, 2009).

İşlenmiş patates ürünlerinin önemli bir kısmını kızarmış patates ürünleri oluşturmaktadır. Şekil 1.1 de gösterildiği gibi ABD'de patatesin % 31'i yemeklik patates, % 30'u dondurulmuş parmak patates, % 12'si patates cipsine işlenmektedir. ABD'de üretilen toplam patatesin % 42'sinin patates cipsi ve parmak patates olarak işlendiği görülmektedir. Dünyada dondurulmuş patates ürünleri üretimi 4.5 milyon tonun üzerinde olup, bu miktarın yaklaşık % 86'sı parmak patatesi oluşturmaktadır (Tuta, 2009).



Şekil 1.1. ABD'deki işlenmiş patates ürünleri (Tuta, 2009)

Kızartma veya cips olarak kullanılacak patatesin, parmak patates ve cips veriminin yüksek olması istenir. Ayrıca kızarma sırasında az yağ absorbe etmeleri hem sağlık yönünden hem de maliyetin düşük olması bakımından istenen bir özelliktir. Bu iki özellikten daha önemlisi, cips ve parmak patatesin rengidir. Cips ve kızarmış patatesin altın sarısı ve tekdüze bir renk göstermesi arzu edilir. Çabucak kahverengiye dönüşen, üzerinde lekeli yanıklar bulunan cipsler tüketici tarafından tercih edilmemektedir (Karadoğan, 1994).

1.1.2. Patates cipsi üretim prosesleri

Cipse işlenecek patateslerin bazı temel karakteristiklere sahip olması gerekmektedir. İlk olarak, patatesler en yüksek verimle hasat edilebilecekleri özel bir bölgede yetiştirilmelidirler. Yumrular kaliteli ve cipse işlenebilir boyutlara sahip, çevresel etkilere ve meydana gelebilecek hastalıklara karşı dirençli olmalıdır ve depolanmaları sırasında cipslik kalitelerini korumalıdır. Ayrıca patates yumrusu, cipse işlendiğinde kabul edilebilir bir renk sağlamalı (düşük indirgen çeker içeriği), yüksek kuru madde içeriğine sahip olmalı, kabuklarının soyulması sırasında yüksek verim sağlamalıdır. Yumrular leke, şekil bozukluğu gibi kusurlardan uzak ve son ürüne iyi bir tekstür ve aroma sağlayacak kalitede olmalıdır.

Cipse işlenebilir nitelikteki patatesler Şekil 1.2'deki işlem sırasıyla ürüne işlenir. Yüksek kalitede ve homojen bir cips üretimi için önemli olan bu işlem basamaklarının her biri spesifik parametrelere sahiptir (Lusas ve Rooney, 2001).

1.1.1.1. Hammadde alımı ve boyutlandırma

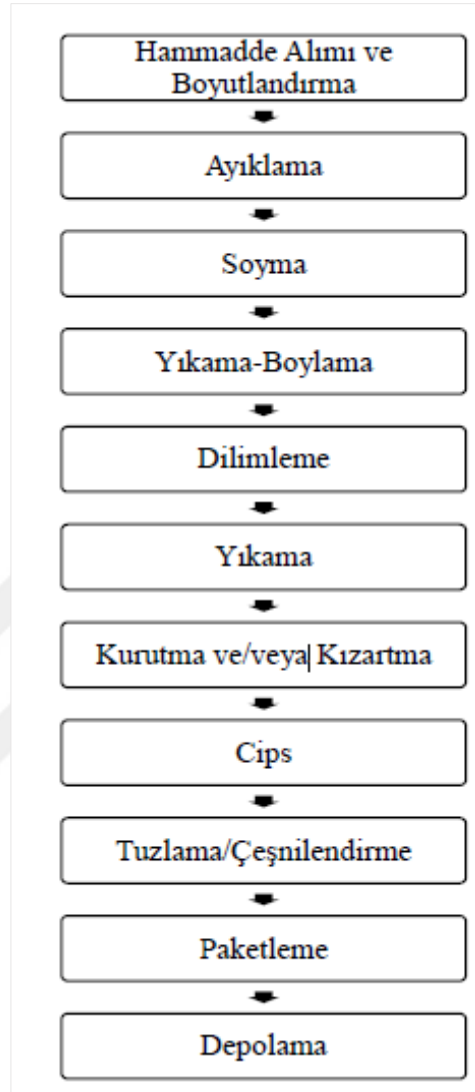
Patatesler cips fabrikasına geldiğinde tüm ürünler incelenir. Patatesler işletmeye çeşitli özellikler değerlendirilerek kabul edilir: yumruların sıcaklığı, kokusuz olması, kirlilik etmenlerinden arınmış olması, görünümü ve genel sertliği incelenir.

İşletmeye kabul edilen ürünler boyutlarına göre sınıflandırılır. Bazı yumrulardan elde edilen dilimler laboratuvar ortamında kızartılarak cips renk kontrolü yapılır. İndirgen şeker (% 0-0.15 arası) ve sakkaroz içeriği (% 1.5'ten az) kontrol edilir. Patatesler işlenmeye uygun ise, direkt üretim için ayıklama ünitesine gönderilir, üretim daha sonra gerçekleştirilecekse uygun koşullarda depolanır (Lusas ve Rooney, 2001).

1.1.1.2. Ayıklama-soyma

Patateslerin kasalanması sırasında karışmış olabilecek taş, metal, tahta parçası gibi etmenlerin uzaklaştırılması aşamasıdır. Bu gibi unsurlar ürünün cipse işlenmesi sırasında ekipmanlara ciddi zararlar vermekte ve dilimleme ünitesinde problemlere neden olabilmektedir. Ayıklama

işlemi, patates yumrularının dikey pervane sistemleri ya da ızgaralı yıkama sistemleri kullanılarak su içerisinde yüzdürülmesiyle yapılır. İyi bir şekilde ayıklanmış patates yumruları üretimin sonraki aşaması için taşıyıcı bantlara aktarılır (Lusas ve Rooney, 2001).



Şekil 1.2. Cips Üretim Teknolojisi

Yumruların kabukları kesikli ya da sürekli sistemler kullanılarak soyulabilir. Yumrunun yaşına bağlı olarak genellikle zımpara yüzeyli silindirik kabuk soyucular ya da fırçalı merdaneler kullanılır. Soyma işlemiyle birlikte yine yumrunun depolama yaşına, soyma ünitesinde kalma süresine ve soyucunun tipine bağlı olarak ağırlıkta yaklaşık olarak % 20 azalma meydana gelir (Lusas ve Rooney, 2001).

1.1.1.3. Yıkama - boylama

Bu üretim aşaması, patateslerden dilimleme öncesi tüm kusurların uzaklaştırılması, temiz ve düzgün patateslerin işlenmesi için önemli bir basamaktır. Kalitesiz patateslerin dilimleme ve

kızartılması işlemlerinden önce hammaddeden ayıklanması kolay ve etkili bir yöntemdir. Günümüzde kusurlu patateslerin ayıklanması için elektronik boylayıcılar kullanılmaktadır.

Bu sayede enerji ve yağ verimliliği sağlanmış ve daha etkin bir pişirme işlemi gerçekleştirilmiş olur (Lusas ve Rooney, 2001).

1.1.1.4. Dilimleme - patates dilimlerinin yıkanması

Dilimleme, bir patates cipsi üretiminin en önemli aşamasıdır. Kusursuz bir dilimin kenarları düzgün olmalı ve dilim yüzey dokusunda çatlama ya da doku zedelenmeleri bulunmamalıdır. İyi bir dilimin yağ absorbe etmesi daha az olur. Dilimleyicide çok sayıda bıçağın yer aldığı bölümler bulunur ve ürün bu bölümlerden geçerken istenilen kalınlıkta dilimler elde edilir. Dilimleyicinin bıçakları değişik şekil ya da kalınlıklara ayarlanabilir. Haznenin dönmesiyle oluşan merkezkaç kuvvetiyle, patatesler keskin bıçaklara doğru fırlatılır dilimlerin çıkması sağlanır. Sonunda patates dilimlerinin yıkanma aşamasına sıra gelir. Hepsi dev bir silindir içinde yaklaşık 1 dakika boyunca serin suyla döne döne yıkanır (Lusas ve Rooney, 2001).

1.1.1.5. Kurutma ve/veya Kızartma

Son üründe yağ içeriğinin önemli bir kriter olması bakımından prosesin bu aşaması oldukça önem taşımaktadır. Marketlerde düşük yağ içerikli/yağ içermeyen cipse duyulan ilginin artmasıyla cips üretim sürecinde değişimler meydana gelmiştir. Ürünün son nem değerine kurutulması işlemi yağda kızartma ile yapılabildiği gibi, fırınlama ve konvensiyonel kurutma ile de kuruma sağlanabilmektedir.

Son ürün yağ içeriğinin kontrol edilmesinde dikkat edilmesi gerekenler:

- Hammadde cinsi seçimi
 - Dilim kalınlığı ve yağ ile temas eden yüzey alanı
 - Kızartmanın daha yüksek sıcaklıkta daha kısa sürede gerçekleştirilmesi şeklinde sıralanabilir.
- Patates cipsi son nem değerine konvensiyonel yöntemler kullanılarak kurutuluyorsa işlem süresi daha uzun olur. Fakat renk ve nemin kontrolü daha kolay sağlanabilir (Lusas ve Rooney, 2001).

1.1.1.6. Tuzlama/Çeşnilendirme

Aperatif gıdaların tüketiciler için en önemli karakteristik özelliği son ürünün lezzetidir. Patates cipsi de dahil olmak üzere bir çok aperatif gıda tuzlanarak sunulmaktadır. Genellikle patates

cipsleri kızartma işleminin hemen ardından tuzlanarak, sıcak yağın tuz kristallerini tutması özelliğinden yararlanılır. SFA' nın (Snack Food Association) atıştırılabilir gıdalar için önerdiği tuz miktarı % 0.25-1.75 aralığıdır (Lusas ve Rooney, 2001).

1.1.1.7. Paketleme ve depolama

Aperatif gıdalar piyasada paketlenmiş halde bulunur. Ambalajlama ve kapatma makineleri kullanılarak çok katmanlı ambalajlarda paketlenen cips vb. aperatif gıdalar dünyanın çeşitli bölgelerine bu şekilde dağıtılır. Paketleme malzemesinin temelini metalik folyo oluşturmaktadır (Lusas ve Rooney, 2001).

Paketlenmiş cipsler depolarda dağıtım merkezlerine ya da mağazalara dağıtılmak üzere bekletilir. Depoların sıcaklığı raf ömrü süresince ürünün korunması için düzenli olarak kontrol edilmeli, oda sıcaklığının altında tutulmalıdır (Lusas ve Rooney, 2001).

1.2. Gıda Endüstrisi Atık Suyu

Gıda ve içecek endüstrilerinde su tüketimi çevresel sorunların başında gelmekte ve bu endüstrilerde çok farklı amaçlı su tüketimi gerçekleşmektedir. Gıda endüstrisinde atık sular, yıkama, pişirme, ısıtma, ekstraksiyon, reaksiyon ürünleri, ayırma, taşıma ve kalite kontrol işlemlerinden kaynaklanabilmektedir.

Türkiye'de gıda endüstrisi atıkları diğer endüstri atıklarının % 20'sini, gıda endüstrisi atık suları ise diğer endüstrilerin % 9'unu oluşturmaktadır (Şener, 2008). Gıda sanayi atık suları, kullanılabilir atık su kaynakları içinde yer almakla birlikte arıtılmış atık sular, sanayide soğutma suyu veya proses suyu olarak yeniden kullanılabilir (Kafkan, 2010).

Gıda endüstrisinde su; gıda maddelerinin hazırlanmasında, buhar üretilmesinde, ambalaj malzemelerinin temizlenmesinde, yıkama ekipmanlarında ve zeminlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gıda endüstrisinden gelen atık su deşarjının en temel özelliklerinden biri şekerler, karbonhidratlar ve fermente ürünler gibi yüksek organik madde yüküdür.

Gıda endüstrisindeki atık sudaki organik bileşikler; fabrikalarda, atık su arıtma tesislerinde, ve doğal çevrede sorunlara neden olmaktadır. Gıda işleme atık sularındaki katı ve sıvı yağlar bir araya toplanıp, boşaltma hatlarına ve yağ tutucularına yapışır. Aşırı miktarlarda mevcutsa, atık su arıtma tesislerinde mikrobiyolojik süreçlere müdahale ederler ve tedavi etkinliğinin azalması veya hatta tamamlanamamasına yol açarlar.

Cips, soyulmuş patates ve elma dilim patates vb. ürünler üreten patates işleme endüstrileri, yüksek konsantrasyonlarda kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), 5 günlük biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) ve askıda katı madde (AKM) içeren büyük miktarda nişastalı atık su üretir. Çoğu durumda, patates işleme atıksuları herhangi bir işlem görmeden ciddi çevresel tehditlere neden olan depolama sahalarına yönlendirilmektedir (Kosseva, 2009). Patates işleme endüstrisi atıksularının arıtımı için; aerobik biyoteknolojiler, lagünler, arazi uygulamaları, elektrokoagülasyon gibi farklı metotlar kullanılmış ve geliştirilmiştir (Abu ve diğ., 2000; Huang ve diğ., 2005; Mishra ve diğ., 2004).

Çevreye deşarj edildiğinde, yüzey filmlerinin oluşmasına ve kıyı şeridinin birikmesine ve çevresel bozulmaya neden olabilirler (Barrera-Dıaz, 2006).

1.2.1. Gıda endüstrisi atıksuyu arıtma yöntemleri

Gıda endüstrisi yüksek konsantrasyonlarda organik bileşikler ve refrakter organikler içeren ve fizikokimyasal yöntemlerle tamamen arıtılamayan atık su üretir (koagülasyon, flokülasyon, sedimentasyon) veya biyolojik prosesler (aerobik, anaerobik). Bu atık maddeler proses artıkları veya yeniden işlenmiş hurda olarak ortaya çıkar. Bu sebeple, çevresel deşarj limitlerine her zaman ulaşılammaktadır (Barrera-Dıaz, 2006).Endüstriyel nitelikli bu atık suların arıtılması; fiziksel arıtma, kimyasal arıtma, biyolojik arıtma ve ileri arıtma yöntemleri olmak üzere dört yöntemle yapılmaktadır.

1.2.1.1. Fiziksel arıtma yöntemleri

Atık su içerisindeki kirletici maddelerin fiziksel işlemlerle atık sudan alınması amacı ile kullanılan proseslerdir. Bu sistemlerden bazıları; ızgaralar, öğütücüler, elekler, dengeleme havuzları, yağ tutucular, kum tutucular, yüzdürme sistemleri ve çökertme havuzlarıdır.

Fiziksel arıtma sistemleri, daha çok atık su içerisindeki katı maddelerin tutulması ve arıtma sistemine girişte kirlilik yüklerinin azaltılması amacı ile ön arıtma yöntemi olarak kullanılmaktadır.

1.2.1.2. Biyolojik arıtma yöntemleri

Biyolojik arıtma atık suyun içinde bulunan askıda veya çözünmüş organik maddelerin bakterilerce parçalaması ve çökebilen biyolojik yumaklarla sıvının içinde kalan veya gaz olarak havaya kaçan sabit inorganik bileşiklere dönüşmesidir. Biyolojik arıtmanın esası organik kirleticilerin doğada yok edilmeleri için yer alan biyolojik yumaklaştırma ve mineralleştirme

süreçlerinin kontrolü ile çevrede ve en uygun koşullarda tekrarlanmasıdır. Böylece doğadaki tepkimelerin hızlandırılarak daha kısa bir sürede, güvenli ortamda gerçekleştirilmeleri sağlanmaktadır. Biyolojik arıtma sistemleri havalı(aerobik) ve havasız (anaerobik) olarak sınıflandırılırlar (Öztürk ve diğ., 2011).

1.2.1.3. Kimyasal arıtma yöntemleri

Koagülasyon, askıda ve kolloid formdaki atık maddelerin giderilmesinde kullanılan bir prostestir. Kolloidal maddelerin kararlılığı önemli ölçüde elektrostatik yüke bağlı olduğundan flokülasyon ve koagülasyonu sağlamak için bu yükün nötralizasyonu gerekmektedir. Elektrostatik yükün büyüklüğü dolayısıyla stabilizasyonun derecesi olan zeta potansiyeli düşürülerek, stabilizasyonun bozulması ve çökmenin sağlanması gerekmektedir. Endüstriyel atıksuların çoğunda kolloidal maddeler negatif yüklü olduğundan atıksuya yüksek değerlikli kation ilavesi ile zeta potansiyeli düşürülmektedir. Atıksu arıtımında en çok kullanılan koagülantlar FeCl_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, FeSO_4 ve $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 'dür (Hakseverenler, 2014).

1.2.1.4. İleri arıtma yöntemleri

İleri oksidasyon prosesleri (İOP), organiklerin oksidatif olarak parçalanması için hidroksil radikallerinin ($\text{HO}^\bullet$) üretilmesi prensibine dayanmaktadır. Hidroksil radikali ($\text{HO}^\bullet$) ozon ve hidrojen peroksitten daha hızlı reaksiyona girerek, büyük ölçüde arıtma maliyetlerini ve sistem boyutunu azaltmaktadır. Ayrıca $\text{HO}^\bullet$ radikali güçlü, seçici olmayan bir kimyasal oksidandır (Loraine ve Glaze, 1999). İOP'de, oksidanın oksidasyon potansiyeli ve temas süresine bağlı olarak tam mineralizasyon gerçekleşmektedir. Su ve atıksu arıtımında kimyasal oksidasyon kullanılmasının amacı istenmeyen kimyasal maddelerin zararsız hale dönüştürülmesidir. Kimyasal oksidasyon ile inorganik maddeler ve organik maddeler (fenoller, aminler, humik asitler, ve diğer renk, tat ve koku oluşturan, toksik bileşikler) arıtılabilmektedir. O_3 , $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, VUV, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, O_3/UV , $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, Fenton, foto-Fenton, sonokimyasal oksidasyon ($\text{US}/\text{H}_2\text{O}_2$, US/O_3 vb.), fotokataliz prosesi gibi kombine ileri oksidasyon proseslerinin yüksek oksidasyon kapasitesine sahip radikal üretimi yapan prosesler olduğu bilinmektedir (Legrini ve diğ., 1993; Zhou ve diğ., 2002; Gogate ve Pandit, 2004a, 2004b; Yonar, 2005).

İOP'nin farklı moleküler yapıdaki organik ve inorganik kirleticileri kısa sürede giderebilmesinin yanı sıra oksidanın seçici olmaması; pH, sıcaklık ve reaksiyon süresinin optimizasyonun/kontrolünün gerekliliği; türbidite, klorür ve alkaliniteden olumsuz yönde etkilenmesi ve yüksek işletim maliyeti (yüksek elektrik enerjisi tüketimi) İOP'lerinin dezavantajları olarak sayılabilmektedir (Hakseverenler, 2014).

2. ELEKTROKİMYASAL ARITIM

Elektrokimyasal atıksu arıtımında en çok elektrooksidasyon, elektroflotasyon ve elektrokoagülasyon prosesleri kullanılmaktadır. Bu prosesler birlikte veya ayrı olarak bir sistem içerisinde olabilir. Atıksuda bulunan kirleticiler bu prosesler ile okside, adsorbe veya reaktör yüzeyinde birikerek ayrımı sağlanmaktadır (Delipınar, 2007).

Son yıllarda elektrokimyasal arıtım prosesi çevreye uyumlu ve çok yönlü bir arıtım prosesi olmasından dolayı atıksu arıtımında kullanılacak alternatif bir metot olarak oldukça dikkat çekmektedir. Elektrokimyasal proseslerin en önemli farklılıkları prosesin şekli ve yapısıdır (Elektrot tipi, uygulanan akım, elektriksel gerilim ve prosesin tipi). Özellikle elektrot tipi sistemin elektrokoagülasyonu mu yoksa elektrooksidasyonu mu tetikleyeceğini belirleyen unsurların başında gelmektedir.

Elektrokimyasal arıtım başlıca 3 yöntemden oluşmaktadır. Bu sistemler tek tek çalışabildiği gibi bazı sistemlerde birkaç elektrokimyasal proses aynı anda, kombine şekilde kullanılabilir (İlhan, Kurt, ve diğ., 2007).

Örneğin elektrokoagülasyon prosesi esnasında doğal olarak oluşan gaz çıkışı ile kısmen bir elektroflotasyon da gerçekleşmektedir. Bu da elektrokimyasal arıtım yöntemlerinde kısa sürede etkin bir arıtım veriminin oluşmasına imkan vermektedir. (Chmielewski ve Urbanski, 1977).

Elektrokimyasal arıtım türleri aşağıda sıralandığı şekildedir.

- Elektrokoagülasyon
- Elektrooksidasyon
- Elektroflotasyon

2.1. Elektrokimyasal Arıtımın Uygulama Alanları

Elektrokimyasal tepkimelerden atıksu arıtımında da yararlanılmaktadır. Özellikle endüstriyel atıksuların arıtımında dirençli kirleticilere karşı son dönemlerde sıkça kullanılmaya başlanmıştır. İlave kimyasal madde gerektirmemesi ve buna bağlı olarak da çamur oluşumunun ve hammadde tüketiminin azalması, kullanımının yaygın olmasının temel nedenlerindendir. Bu yöntemin en önemli avantajı ana reaktifin elektron olması ve arıtım için gerekli ürünlerin işlem sonunda oluşmasıdır (Vardar, 2006; Karaoğlu 2007; Won ve diğ., 2008).

Elektrokimyasal arıtım yöntemleri basit ve verimli bir yöntem olarak birçok su ve atıksu arıtımında kullanılmaktadır.

Elektrokimyasal arıtım yöntemleri içme suyu arıtımı, evsel atıksu, tekstil atıksuları, restaurant atıksuları, boyalı atıksular, mezbaha atıksuları, süt endüstrisi atıksuları, sızıntı suları, kağıt endüstrisi atıksuları, deterjan atıksuları ve maden atıksuları gibi bir çok alanda uygulanmaktadır. Elektrokimyasal arıtım yöntemleri, deflorinasyon, ağır metal giderimi, yağ giderimi, organik madde giderimi, askıda katı madde giderimi, renk giderimi, nitrat giderimi, fenol giderimi, arsenik giderimi, poliaromatik organik kirlilik, lignin ve organik kirliliğin gideriminde yaygın olarak kullanılabilir (Ilhan ve diğ., 2007).

2.2. Elektrokimyasal Arıtma Yöntemlerinde İşletme Şartlarının Etkisi

Suların arıtımında kullanılan elektrokimyasal yöntemlerin verimine çeşitli parametreler etki etmektedir. Bu parametreler; suyun kimyasal yapısına ve içeriğine, iletkenliğine, pH değerine, iletkenliğine ve muhteviyatındaki partüküllerin büyüklüğüne bağlıdır. Bununla beraber reaktörde ki elektrotların dizilişine, tipine, yüzey alanlarına, reaksiyon süresine ve akım yoğunluğuna bağlıdır.

2.2.1. Elektrotların yerleşimi

Proses süreçlerinde uygun elektrot seçimleri önemi olduğu kadar elektrotların reaktör içerisinde yerleştirilme şekilleri de elektrokimyasal arıtımda oldukça önemli işletme şartlarıdır. Elektrot yerleşiminin yatay veya dikey olması, elektrotların monopolar ya da bipolar olarak kullanılması, elektrotların seri veya paralel bağlanması arıtım verimine etki eden faktörler arasındadır. (Kasap, 2017)

2.2.2. Akım yoğunluğu

Elektrokimyasal arıtım yöntemlerinde akım optimizasyonu çok önemlidir. Bu önemli değişkenin etkisi elektrokimyasal prosesi iki açıdan etkilemektedir. Birincisi; elektokoagülasyon proseslerinde, akım yoğunluğunun olması gerekenden az oluşu reaksiyon süresini uzatıp, beklenen verimin elde edilmesini etkileyebilir ya da akımın yoğunluğunun fazla oluşu arıtım süresini kısaltabilir ancak fazla çamur oluşumuna ve koku problemine neden olabilir. İkincisi ise; gereğinden fazla akım uygulanması artan elektrik kullanımından kaynaklı maliyet artışını ortaya çıkarabilir. (Kasap, 2017)

2.2.3. pH

Elektrolitik reaksiyonlar sulu ortamlarda gerçekleştiği için suların pH değerleri oldukça önemlidir. Suyun pH değeri, elektrooksidasyonda hidroksil radikallerinin oluşumunda, elektokoagülasyonda elektrot tipine bağlı olarak metal hidroksitlerin oluşumunda etkilidir. Arıtım yöntemlerinde hidroksil radikallerin oluşma oranları pH derecesine bağlı olarak azalabilir ve aynı şekilde elektokoagülasyonda çökecek bileşiklerin oluşumu olumsuz yönde etkilenebilir veya gerçekleşmeyebilir. Giderim verimleri başlangıç pH değerine bağlı olduğu kadar son durum pH değerine de bağlıdır. (Daneshwar, 2006)

2.2.4. Arıtım süresi

Arıtım süresi hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın çok önemlidir, aksi takdirde beklenen verim sağlanamayabilir. Bu sebeple arıtım süreleri için optimizasyon çalışması yapılması gerekir. Elektrokimyasal yöntemlerden elektokoagülasyon prosesinde yeterli bekleme süresi sağlanmazsa yeterli koagülant oluşumu sağlanamaz ve verim düşebilir. Çözeltilerden kirlenici parametrelerin giderilmesinde direkt olarak elektrotlar tarafından üretilen iyon konsantrasyonu önemlidir. Elektroliz süresi artarsa, iyonların konsantrasyonu ve onların hidroksit flokları artar. (Özyonar, 2012)

Ancak uzun süreli arıtmılarda fazla çamur ve koku oluşu gözlemlenebildiği gibi işlem maliyeti de artıracaktır.

2.2.5. İletkenlik ve Sıcaklık

Elektrokimyasal süreçlerde suyun iletkenliği bir diğer önemli husustur. Aksi takdirde iyonların transferi güçleşeceğinden beklenen reaksiyonların gerçekleşmesi zorlaşır. Bu sebeple iletkenliği olması gerekenden az olan sulara NaCl gibi tuz ilavesi yapılarak iletkenlik sağlanır. Ayrıca

işlem görecek suyun sıcaklığı bekleme ve reaksiyon süresinde oluşacak bileşikler ve geri bozunumlar açısından önemlidir. Yukarıda belirtilen tüm bu parametreler için uygun optimizasyon çalışmaları yapıldıktan sonra optimum giderim verime ulaşılmaya çalışılmalıdır (Kasap, 2017).

2.3. Elektrooksidasyon

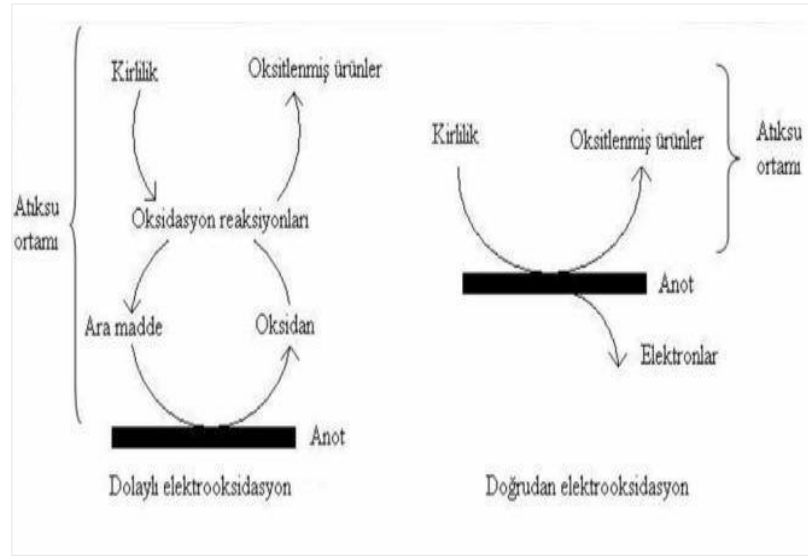
Elektrooksidasyon çözeltide bulunan birçok organik madde elektrot yüzeyinde oksidasyonla parçalanır. Bu olay eletrooksidasyon olarak bilinir. Organik maddeler bu yöntemle parçalanarak ortamdan uzaklaştırılabilir ya da bir başka organik maddeye dönüştürülebilir. 1834 yılında Faraday asetat anyonunun CO₂ de oksidasyonunun yapılabileceğini açıklamıştır. Birçok organik maddenin elektrooksidasyonu değişik şekillerde gerçekleşebilir.

Elektrooksidasyon, Ti, Ru, Pt, paslanmaz çelik gibi çözünmeyen elektrotların kullanılması sonucu oluşan O₂ ve H₂ gibi gazlar ile oksidasyonun sağlanmasıdır. Bu oksidasyon sayesinde birçok madde okside olurken aynı zamanda biyolojik olarak parçalanması zor olan maddeler kolaylıkla parçalanabilir organik bileşikler haline, CO₂ ve H₂O gibi son ürünlere dönüştürülür. Ayrıca; anotun yeteri kadar yüksek potansiyeli varsa, atıksuda bulunan klorür iyonları kloro dönüşebilir veya organik bileşiklerin doğrudan oksidasyonu gibi ikincil reaksiyonlar da ayrıca oluşabilir. Klor, güçlü oksidant yapısı nedeniyle bazı organik bileşikler okside edebilir. Yapılan çalışmalarda atıksu tipine bağlı olarak farklılık gösterse dahi elektrooksidasyon prosesinde ortalama % 90 oranında KOİ giderimi elde edilebilmektedir. Elektrooksidasyon prosesleri literatürde genellikle Ti/Pt-Ir, Ti/RhO_x-TiO₂, Ti/PdO-CO₃O₄,TiO₂/TiRuO₂, Ti/Pt, PbO₂/SnO₂, PbO₂/Ti, SnO₂, PbO₂, BDD vb. anot elektrotlar kullanılmaktadır (İlhan, Kurt ve diğ., 2007).

Bu proses temelinde inert özellik gösteren metal elektrotların kullanıldığı reaktörde organik maddelerin dolaylı veya doğrudan oksitlenmesine dayanır.

Doğrudan anodikproseste kirleticiler ilk önce anot yüzeyine adsorbe olurlar ve daha sonra anot yüzeyinden elektron transferi gerçekleşir.Organik kirleticilerin doğrudan oksidasyon hızı, anodun aktif noktalarına organik bileşiklerin difüzyon hızı ve uygulanan akım şiddeti yardımıyla anodun katalitik aktivitesine bağlıdır.

Dolaylı elektrooksidasyon süresince organik maddelerin oksidasyonunda etkili olan klor, hipoklorit, hidrojen peroksit ve ozon gibi ajanlar anodik olarak üretilebilir (Fil ve diğ., 2012). Şekil 2.1’de elektrooksidasyon prosesinin ilerleyişi verilmektedir.



Şekil 2.1. Elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin parçalanması (Naumczyk ve diğ., 1996)

2.4. Elektroflotasyon

Atıksu arıtımında kullanım alanı bulan bir diğer elektrokimyasal arıtım yöntemi ise elektroflotasyondur. Elektroflotasyon, çözülmüş ve çok küçük partiküler haldeki süspansiyon maddelerin (1g/Lye kadar) bulunduğu sıvı fazdan elektrik akımı geçirilerek kirleticilerin atıksulardan köpük şeklindeki bir faza dönüştürerek ayrıştırır (Turan ve diğ., 2003).

Genellikle tek başına değil de bir diğer elektrokimyasal prosesle birlikte kullanılan bu yöntem; prosesin gereği elektrotlardan açığa çıkan gaz kabarcıkların kirleticileri adsorbe ederek yüzeye çıkarması sonucu kirliliğin giderilmesi esasına dayanır. Elektrokoagülasyon prosesi esnasında da gerçekleşen bu proses, literatürde bilinen flotasyona benzemektedir. Yalnızca, proses gereği olarak eklenmesi gereken gaz, elektroflotasyonda belli ölçüde kendiliğinden oluşmaktadır. Elektroflotasyonda elektrotlarda oluşan reaksiyonlar Denklem (2.1) ve (2.2)'de gösterilmiştir.



Elektroflotasyonda oluşan gaz kabarcıklarının boyutları çok küçük olmasına rağmen çok yüksek dispersiyona sahiptir. Bu proseste gaz kabarcıklarının rolü çok büyüktür. Bu nedenle gaz kabarcıklarının optimum yoğunluğunu belirlemek amacıyla etkili olan parametreler üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılması gerekir. Elektrotun cinsi ve yüzey alanı en önemli parametre olmakla birlikte, akım yoğunluğu ve reaktör tipi de çok önemlidir.

Genel olarak elektroflotasyon prosesinin işletme şartlarının optimizasyonunda ise akım, elektrot tipi, pH ve sıcaklık gibi parametreler değiştirilerek sistem için optimum işletme şartlarının belirlenmesi gerekir.

Atıksulardan elektroflotasyon yöntemiyle giderilen kirleticiler daha çok yağ ve emülsiyonlar gibi düşük yoğunluklu maddeler olabildiği gibi askıda katı maddeler de olabilmekte ve özellikle bazı tesislerde problem oluşturan giderilemeyen KOİ'nin bir kısmı da bu yöntemle giderilebilmektedir. Bu gibi yararlı özelliklerinden dolayı elektroflotasyon çeşitli sanayilerde kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak metal kaplama, tekstil, boya ve kimya sanayileri verilebilir (Karadağ, 2009).

2.5. Elektrokoagülasyon (EC)

İleri atıksu arıtım uygulamaları arasında yer alan elektrokimyasal arıtım yöntemleri, günümüzde su ve atıksu arıtımında sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır.

Elektrokimyasal yöntem çeşitleri aşağıda verildiği gibidir;

- Elektrokoagülasyon, (EC)
- Elektroflotasyon,
- Elektrooksidasyon.

Elektrooksidasyon ve elektroflotasyon proseslerinde çözünmeyen elektrotlar kullanılırken, elektrokoagülasyon prosesinde çözünebilen elektrotlar kullanılmaktadır (Mollah ve diğ., 2001).

EC; ortama bir elektrik akımı girişi ile sulu ortamdaki askıda, emülsiyeye veya çözünmüş kirliliklerin dengesini bozan bir prosestir. Basit bir şekilde, bir elektrokoagülasyon reaktörü, bir anot ve bir katot ile bir elektrolitik hücreden ibarettir. İletken metal plakalar sacrificial elektrotlar olarak bilinir ve bunlar aynı veya farklı materyallerden (anot ve katot olarak) yapılabilir. EC kirlilik giderimi için elektrik yüklemesinin nötralizasyonuna sebep olan destabilize edici ajanların (Al, Fe, vb.) elektrokimyasal üretimidir. İlk önce yüklenir, bir kütle şeklinde küçük magnetlerle partiküller bağlanır. Bu proses sudan kirlilik gideriminde çok etkilidir ve çamur üretiminin azalması ile karakterize edilir, kimyasal kullanımına gerek yoktur ve uygulaması kolaydır. Yük nötralizasyonunda etkili olan kolloid ve destabilize edici ajanlar EC prosesinde elektroliz ile üretilir. Örneğin, geleneksel arıtma sistemlerinde Al kökenli koagülantların eklenmesi yerine aynı etkiye sahip olan alüminyum katyonlarını üretmek için alüminyum anotlar kullanılır (Emamjomeh ve Sivakumar, 2009).

Elektrokoagülasyon/flotasyon proseslerinin tümünde 3 temel mekanizma vardır;

- Elektrot oksidasyonu,
- Gaz kabarcığı oluşumu,
- Oluşan flokların flotasyonu ve sedimantasyonu.

Genel olarak deneylerde hücre voltajı ve akım dijital olarak ölçülür ve kontrol edilir.

2.5.1. EC'nin Uygulama Alanları

Elektrokoagülasyon prosesi su ve atık suda bulunabilen ağır metal, askıda katı ve kolloid madde, yağ ve gres, kompleks organikler ve diğer bileşiklerin gideriminde son yıllarda etkili bir biçimde kullanılmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesinin uygulama alanları; yeraltı suyu temizlenmesi, evsel atıksu arıtımı, içme suyu arıtımı ve gıda, tekstil, alüminyum, plastik, otomobil üretimi, membran filtrasyonu öncesi ön arıtım, petrokimyasal ve gaz rafinerilerinden oluşan atıksuların arıtımıdır (Mollah ve diğ., 2004; Verressina ve diğ., 2001).

2.5.2. EC Prosesinin Mekanizması

Elektrokoagülasyon, elektroliz ürünü H_2 ve O_2 gazlarının üretimi, Fe ve Al gibi aşınabilen anotların oksidasyonundan kaynaklanan çok değerlikli katyonların oluşturulmasına dayalı olarak kombine bir sistemden oluşmaktadır.

Metal iyonları, H_2 gazının üretimi esnasında katotta oluşan OH^- iyonları ile reaksiyona girerek, çözünmeyen ve süspanse bileşenleri çöktürebilir veya ortamda mevcut olabilen negatif yüklü kolloidal tanecikleri nötralize ederek koagülasyona katkıda sağlayabilmektedir.

Belirli akım şiddetinde organik maddeler katotta indirgenerek daha küçük moleküllere parçalanabilirler. Bu organik moleküllerin elektroliz esnasında oluşan $Fe(OH)_3$ ya da $Al(OH)_3$ hidroliz ürünlerine absorblanması ve H_2 flotasyonu ile ortamdaki uzaklaştırılabilmektedir (Uğurlu, 2004).

Elektrokoagülasyon prosesinde, sulu ortamda askıda, kolloidal ya da çözünmüş halde bulunan kirleticiler koagülasyon, adsorpsiyon, absorpsiyon, çöktürme ve flotasyon mekanizmaları ile giderilebilmektedir (Aygün, 2012).

Elektrokoagülasyon prosesinin birbirini takip eden 3 aşamada gerçekleştiği bilinmektedir,

- Tükenebilir elektrotların elektrolitik oksidasyonu ile koagülantların oluşumu,
- Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması,
- Destabilize edilmiş fazlarda flokların toplanması.

Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyon kırılması mekanizmaları aşağıdaki maddelerle açıklandığı şekilde tanımlanabilir:

- Çözelti içinden geçen akımdan dolayı kullanılan elektrotun çözünmesiyle oluşan iyonların etkileşimleri sonucu yüklü türler etrafındaki yayılmış çift tabakanın sıkılaştırılması,
- Kullanılan elektrotların elektrokimyasal olarak çözünmesi ile üretilen zıt iyonların sebep olduğu, atıksu içerisindeki mevcut iyonik türlerin yük nötralizasyonu,
- Flok oluşumu (Mollah ve Morkovsky, 2004).

Elektrokoagülasyon ya da elektroflotasyonun eşlik ettiği zenginleştirilmiş koagülasyon, yeni ortaya çıkmış elektrokimyasal su ve atıksu arıtım teknolojisidir. Proseste anot çözünmesi ile koagülant türleri üretilir, bunun yanında eş zamanlı olarak katotta hidrojen gazı çıkar. Koagülant türlerinin, askıda katıların çökmesi ve eş zamanlı olarak çözünmüş kirleticilerin adsorbsiyonu yanında agregasyondan sorumlu olduğuna inanılıyor. Suyun elektrolizi boyunca oluşan hidrojen ve oksijenin ince kabarcıkları, hava kabarcıkları ile çarpışır ve kirletici partiküller yüzer (Ghosh ve diğ., 2008).

Literatürde karbon, yumuşak çelik, grafit, titanyum, demir ve alüminyum gibi farklı elektrotlar kullanılmaktadır. Fakat demir ve alüminyumun çok verimli olduğu ve uygulama şartlarında kirlilik gideriminde başarılı olduğu bildirilmiştir (Ghosh ve diğ., 2008).

Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları Tablo 2.1’de, Elektrot reaksiyonları Denklem (2.3) ve (2.4)’ deki gibi özetlenmiştir.

Tablo 2.1. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları (Eyvaz, 2005)

Anot Reaksiyonları	Katot Reaksiyonları
Anotta yükseltgenme (elektron verir)	Katotta indirgenme (elektron alır)
Anodik çözünme $Al_{(k)} \rightarrow Al^{+3} + 3e^-$	Katodik birikme $Cu^{+2} + 2e^- \rightarrow Cu$
Anyonlar anotta toplanır	Katyonlar katotta toplanır
Anolit bölge oluşur	Katolit bölge oluşur
Anotta oksijen $2H_2O \rightarrow O_2\uparrow + 4H^+ + 4e^-$	Katotta hidrojen $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow + 2OH^-$
Klor var ise anotta klor $2Cl^- - 2e^- \rightarrow Cl_2\uparrow$	Gazın indirgenmesi $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$



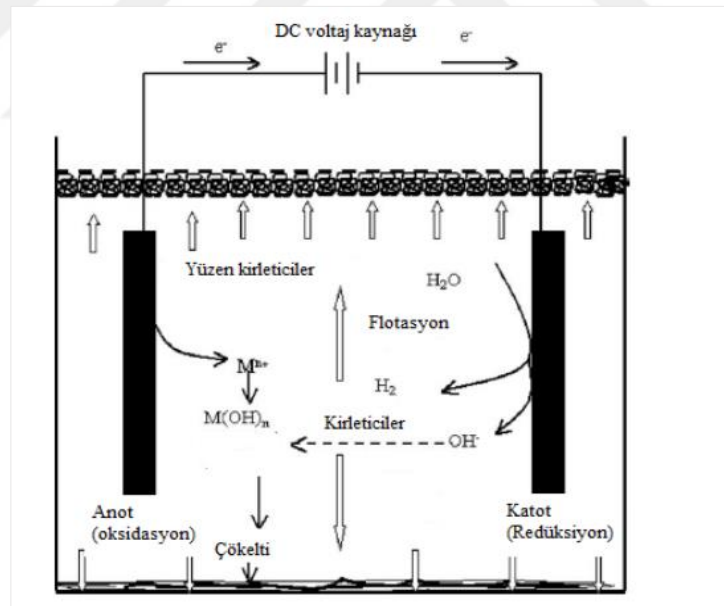
Son adımda koagüle olan agregatlar kabarcıklarla etkileşime girer ve yüzeye doğru yüzer ya da EC hücresinin tabanına çöker. Flotasyon, yüksek akımlarda kirlilik gideriminde baskınken,

sedimentasyon düşük akımlarda baskındır. Nitekim bizim çalışmamızda da yüksek akım uygulandığında köpük oluşumu fazla iken, diğer bir tabirle flotasyon ağırlıklı iken düşük akımlarda çamur oluşumunun fazla olduğu diğer bir tabirle sedimentasyon ağırlıklı olduğu gözlenmiştir. Düşük akımlardaki kabarcık sayısı agrega olan materyalleri gidermek için taşımada yetersiz kaldığından dolayı, bunu baskın olan çökeltme izler.

Elektrot reaksiyonları ile Al^{+3} ve OH^- iyonları üretilir ve $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)^+$, $Al_2(OH)_2^{+4}$, $Al(OH)^{4-}$ gibi çeşitli monomerik türlerle ve $Al_6(OH)_{15}^{+3}$, $Al_7(OH)_{17}^{+4}$, $Al_8(OH)_{20}^{+4}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{+7}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$ gibi polimerik türlerle reaksiyona girer. Son olarak da çökeltme kinetiğine göre Denklem (2.5)'te gösterilen $Al(OH)_{3(k)}$ 'ya dönüşür.

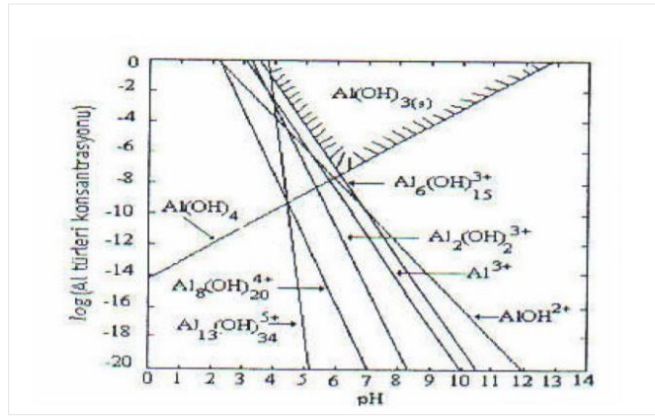


Oluşan şekilsiz $Al(OH)_{3(k)}$, geniş yüzey alanına sahip "süpürücü floklar" olarak adlandırılır. Bu floklar çözünebilir organik bileşiklerin hızlı bir şekilde adsorbsiyonunda rol alır ve kolloidal partikülleri yakalar ve H_2 yüzdürmesi (flotasyon) ya da sedimentasyon ile sulu ortamdan kolaylıkla ayrılır.



Şekil 2.2. Elektrokoagülasyon prosesindeki giderim mekanizması (Mollah ve diğ., 2004)

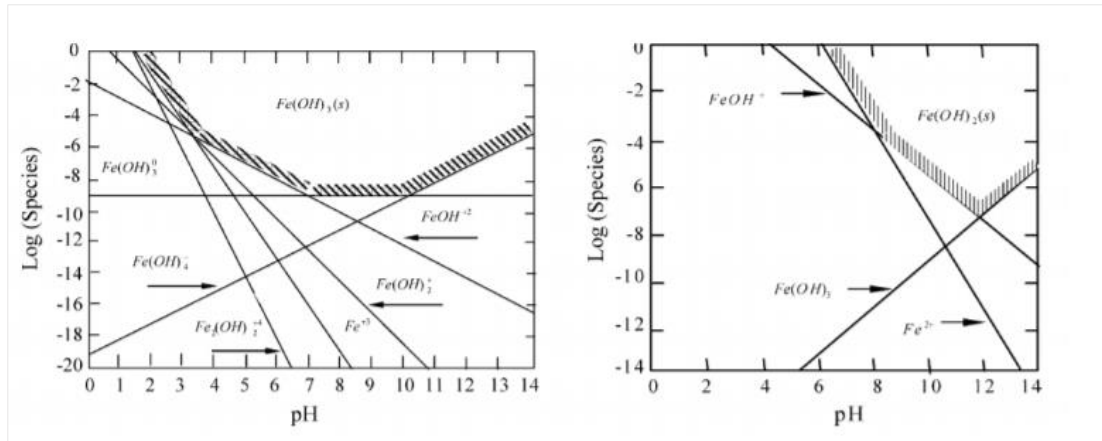
Al elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon prosesinde farklı pH'larda Al^{+3} 'ün hidrolizi ve bunun sonunda da Şekil 3.4'de görüldüğü gibi çeşitli alüminyum hidroksit polimer kompleks ve çökeltileri meydana gelmektedir (Avcu, 2010).



Şekil 2.3. Sulu ortamda oluşan alüminyum kompleksleri ve pH ilişkisi (Metcalf ve Eddy, 1991)

Oluşan amorf $\text{Al}(\text{OH})_3$ floklarının geniş yüzey alanına sahip olmaları, atıksudaki kirleticilerin hızlı bir şekilde adsorplanarak atıksudan uzaklaştırılmasını sağlamaktadırlar. Bu floklar $n\text{Al}(\text{OH})_3$ $\text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$ şeklinde polimerize olmakta ve ortamdan ya çökeltme ile ya da H_2 flotasyonu ile kolayca giderilebilmektedirler (Özyonar ve Karagözoğlu, 2012).

Demir elektrot kullanımı ile gerçekleşen reaksiyonlarda ise demir iyonları çözelti pH'ına bağlı olarak $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_2$ gibi monomerik hidrokompleks türleri ve $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$ ve $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{4+}$ gibi polimerik hidroksi kompleksleri oluşturmaktadır. Şekil 2.4'de sulu ortamda demir iyonlarının oluşturduğu hidroksil komplekslerin pH'ya bağlı değişimleri görülmektedir (Mollah ve ark. 2004).



Şekil 2.4. Sulu ortamda oluşan demir kompleksleri ve pH ilişkisi (Metcalf ve Eddy, 1991)

Demir için reaksiyon mekanizmaları Denklem (2.6) ve (2.7)'de ifade edilmiştir.



(İrdemez ve diğ., 2006)

3.5.3. EC prosesinin avantaj ve dezavantajları

Elektrokoagülasyon prosesinin diğer farklı prosesler gibi avantaj ve dezavantajlarının olduğu durumlar söz konusu olmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Elektrokoagülasyonun avantajları:

- İşletimi ve kurulumu için basit ekipmanlar ve işletme şartları gerektirmektedir.
- Arıtım sonrası çıkış suyunun kalitesi iyidir. Renksiz, kokusuz ve berraktır.
- Oluşan çamur, metal oksit ve hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla stabil hale getirilir ve susuzlaştırılabilir. Oluşan çamur miktarı azdır.
- Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte; daha büyük floklar olma eğiliminde ve daha az bağıl su içermektedirler. Asidik ortama dirençli ve stabil olup, filtrasyonla daha hızlı ayrılabilirler.
- Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında EC çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katı madde içerir. Eğer suyun yeniden kullanılması gerekirse, toplam çözünmüş katı madde seviyesi maliyet açısından katkı sağlayacaktır.
- EC prosesler en küçük kolloidal parçacıkları giderme avantajına sahiptirler. Çünkü cihazların uyguladığı elektrik alan onların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırır.
- EC’de kimyasal madde kullanımından kaçınılır ve böylece kimyasal koagülasyonda ilave edilen yüksek konsantrasyondaki kimyasal maddelerin sebep olduğu ikincil kirlenme olasılığı ve aşırı kimyasalların nötralizasyonu problemi ortadan kaldırılmış olunur.
- Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirleticileri çözelti yüzeyine taşıyabilir, daha kolay toplanmaları ve giderimleri sağlanır.
- EC hücresi içindeki elektrotlar sabit konumda olup, elektriksel olarak kontrol edilir. Böylece daha az bakım gerektirir.
- EC prosesi için, kırsal alanlarda elektrik prosese entegre edilerek güneş panellerinden temin edilebilir.

EC’nin dezavantajları;

- Oksidasyon sonucu tükenen elektrotların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir.
- Birçok yerde elektrik kullanımı pahalı olabilir.

- Katot üzerinde geçirimsiz bir oksit tabakasının oluşumu prosesin verimliliğini düşürebilir.
- Atıksu çözeltilerinin yüksek iletkenliğe sahip olması gerekmektedir (Uğurlu, 2004).

3.5.4. EC ile Yapılmış Çalışmalar

Gengeç ve diğ. (2012) tarafından ekmek mayası atıksuyu arıtımı anaerobik ve anaerobik-aerobik çıkış suyuna, alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon prosesi uygulanmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde renk, KOİ ve TOK giderim verimine etki eden üç ana bağımsız parametre olan pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresini baz alınmış, cevap yüzey yöntemi kullanarak renk, KOİ ve TOK gideriminin optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmanın amacı renk, KOİ ve TOK giderim verimlerini maksimuma çıkartmak ve EC prosesi işletme maliyetini minimuma indirmek olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda optimum proses şartları anaerobik çıkış suyunda, pH 4, akım 50 A/m^2 , elektroliz süresi 22 dakika olarak ve optimum şartlar altında giderim verimleri renk için %82, KOİ için %41 ve TOK için %39 olarak tespit edilmiştir. Anaerobik-aerobik çıkış suyu için ise optimum proses şartları pH 5, akım 11 A/m^2 , elektroliz süresi 18 dakika olarak ve optimum şartlar altında giderim verimleri renk için %77, KOİ için %36 ve TOK için %32 olarak belirlenmiştir. Elektrokoagülasyon gibi bir ileri arıtma yönteminin maya endüstrisi atıksularının arıtımında avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Chopra ve Sharma (2015) tarafından biyolojik olarak arıtılmış belediye kanalizasyon atık suyunun EC yöntemi ile Al elektrotlarla KOİ'nin giderimi incelenmiştir. Giderim etkinliğinin elektrolitik işlem boyunca akım yoğunluğuna, çalışma süresine ve başlangıç pH'ına bağlı olduğu bulundu. Optimum çalışma koşulları pH=7, akım yoğunluğu 7.52 mA/cm^2 ; 0.5 g/L NaCl konsantrasyonu ve 40 dakika operasyon süresi olarak kaydedilmiştir, bu şartlarda kanalizasyon atık suyunda %86 KOİ giderimi elde edilmiştir.

Roa-Morales G. ve diğ. (2007) makarna ve kurabiye işleme sanayi atık sularından kaynaklanan organik kirleticilerin Al elektrot kullanılarak Elektrokoagülasyon ve Elektrokoagülasyon / H_2O_2 kombinasyonu ile plot ölçekli kesikli reaktör kullanılarak arıtımı incelenmiştir.

Optimum koşullar altında (pH 4 ve akım yoğunluğu 18.2 mA /m^2) Elektrokimyasal yöntem, organik kirliliğin çok etkili bir şekilde çıkarılmasını sağlamıştır. Arıtım sonucunda, kimyasal oksijen ihtiyacını (KOİ) % 90, Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) %96, toplam katılar %95 ve dışkı koliformları % 99.9 oranında giderilmiştir.

Tchamango ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada Al elektrot kullanarak Elektrokoagülasyon yöntemi ile süt endüstrisi atıksularının arıtımını incelemişlerdir. Deneyler, süt tozu çözeltilerinden elde edilen yapay atık su üzerinde çözünebilir bir alüminyum anot kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Süzüntülerin analizi; kimyasal oksijen ihtiyacının (KOİ) % 61'e kadar azaldığını, fosfor, azot muhtevası ve bulanıklığın giderilmesinin sırasıyla % 89, %81 ve % 100 olduğunu göstermiştir.

KOİ değerindeki zayıf azaltım miktarı için, laktozun bu tip arıtım yöntemlerinde verimli şekilde giderilmemesi kaynaklı olduğu belirtilmiştir.

Elektrokoagülasyona karşılaştırmalı bir çalışma olarak süt çözeltisi üzerinde gerçekleştirilen kimyasal koagülasyon, azot ve bulanıklık giderimi için neredeyse benzer arıtım oranları vermiştir. Ancak fosfor ve KOİ 'nin gideriminde kimyasal koagülasyon ile biraz daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir (%93, %64).

Bununla birlikte, elektro-pıhtılaşma ile muamele edilen atıksular, daha düşük bir iletkenlik ve nötr bir pH değeri sergilemektedir (kimyasal pıhtılaşma ile muamele edilen çözeltinin asit yapısının tersine). Bu sonuç (düşük iletkenlik, nötr pH), bazı endüstriyel kullanımlar için arıtılmış suyun geri dönüştürülmesinin mümkün olduğunu gösterme eğilimindedir.

Ayrıca, elektrokoagülasyon işleminde daha az reaktif madde kullanır, EC işlemi sırasında çözünen alüminyum anot kütlesi kimyasal koagülasyonda kullanılan alüminyum tuzunun miktarına göre daha düşüktür.

Bu iki gözlem sonucunda elektrokoagülasyon yönteminin elektrokoagülasyona göre daha uygulanabilir bir arıtım yöntemi olduğu belirtilmiştir.

Fosfor ve azotun elektrokoagülasyon yolu ile yüksek oranda uzaklaştırılmasından dolayı , bu elektrolitik teknik bir tamamlayıcı arıtım süreci olarak görülmektedir.

Inan H. ve diğ. (2004) zeytinyağı değirmeni atıksularında kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), renk ve askıda katı madde (AKM) giderimi elektro-koagülasyon (EC) kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır. Reaktörde eş zamanlı olarak alüminyum ve demir kullanılmıştır. Reaktör voltajı 12 V, akım yoğunluğu 10 ile 40 mA cm², pH 4, 6, 7 ve 9 birime eşit olarak alınmıştır ve süre 2–30 dk arasında değiştirilmiştir. 30 dakikalık bekleme süresinin altında, alüminyum anot ile % 52 KOİ giderilmiş, demir anot ile %42 giderim verimi sağlanmıştır. Akım yoğunluğunun KOİ giderim verimine karşı etkisi 10 dakikalık reaksiyon süresince ve pH 6,2 ± 0,2 aralığında incelenmiştir. KOİ giderim yüzdesinin de arttığı açıkça görülmüştür. Genel olarak tüm sonuçlar

artan reaksiyon süreci ile birlikte KOİ giderim veriminin de arttığını göstermektedir. Hem demir hem de alüminyum anotlar için, pH 6 değeri optimum değerdir, ancak alüminyum, KOİ giderimi için demirden daha iyi bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

Kobyay ve Delipinar (2008) ekmek mayası üreten bir işletmenin atıksularının Al ve Fe elektrotlar kullanarak arıtımını incelemişlerdir. Elektrokoagülasyon prosesinde pH, elektrot malzemesi (Fe ve Al), akım yoğunluğu ve çalışma süresi gibi süreç değişkenlerinin etkileri araştırılmıştır. KOİ , TOK ve bulanıklığın optimal çalışma koşulları altında, maksimum giderim verimleri; Al elektrot için pH 6.5 ve Fe için pH 7 'de, 70 A / m² akım yoğunluğunda ve 50 dakikalık çalışma süresinde, Al elektrot için sırasıyla % 71, %53 ve %90 ve Fe elektrot için %69, %52 ve %56 olarak tespit edilmiştir. Al elektrot, çözünmüş demirin renginden kaynaklanan girişim nedeniyle Fe elektroduna göre kat daha fazla bulanıklık verimine sahip olduğu belirtilmiştir.

3. DENEYSEL TASARIM

Deney tasarımı teknikleri sadece istatistiksel bir yaklaşım değil, tüm araştırma geliştirme faaliyetlerinde kullanılabilecek, kaliteyi artıran, maliyetleri düşüren, sonuçların güvenilirliğini sağlamlaştıran, tüm diğer kalite tekniklerini destekleyen ve tamamlayan tekniklerdir. Uygulamada getirdikleri avantajlar performans ve kalitenin artırılması, kaynakların verimli kullanılması, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin hızlandırılması, ürünün ve/veya prosesin kalite özelliklerini belirleyen değerlerin kontrol edilemeyen veya edilmesi zor/maliyetli faktörlere karşı daha az duyarlı olması şeklinde sıralanabilir (Kumaş, 2011).

Deneyisel tasarım; deneyel süreci etkileyen faktörlerin belirlenmesi, tanımlanması ve tasarımın deneyel modelinin geliştirilmesi amacıyla kullanılan çok önemli bir istatistiksel analiz metodudur. Bu teknik sayesinde minimum deney sayısı ile maksimum bilgi sağlanır. Deneyisel tasarım metodu ile daha az deney yapılarak kullanılan malzemeden ve en önemlisi de zamandan büyük ölçüde tasarruf sağlandığı bilinmektedir (Açıköz, 2012).

Deney tasarımında ilgilenilen durumlar / koşullar faktör olarak adlandırılır. Bunlar çıktı üzerinde etkisi olabilecek ve deneyde incelenen girdilerdir (Şenoğlu ve Acıtaş, 2010)

Deneyler genelde pek çok faktörü içermektedir. Bir deneyin amacı çoğunlukla bu faktörlerin çıktı üzerindeki etkilerini belirlemektir. Bir ürünün kalitesini etkileyen birçok faktör ve bu faktörlerin birden fazla seviyeleri bulunabilir. Deney yapan kişi faktörlerin, bu faktörlerin seviyelerinin ve faktörlerin birbiriyle etkileşiminin ürün üzerindeki etkisini araştırma konusu yapar. Faktörlerin seviyeleri belirlenirken bazı faktörler için düzeyler özel olarak bazıları için ise rastgele seçilir (Montgomery, 2001).

Deney tasarımının en temel amaçlarından biri deney hatalarını minimize etmektir. Deney tasarımı diğer bilimsel disiplinlere benzemezken kendine has terminoloji ve metodolojiye sahiptir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

Sebeup ve etki ilişkisini belirlemek için planlanmış bir yaklaşım olan deney tasarımı modelinin kurulması için şunlar gereklidir;

- Toplam deney sayısını azaltmak
- Tasarımcının formüle ettiği etkinliği eş zamanlı olarak değiştirebilmek
- Doğru bir deney stratejisi belirlemek

Eğer bir deney doğru bir şekilde tasarlanırsa, en iyi sonuç için veriler doğru bir şekilde toplanmış olacaktır. Bundan dolayı deney tasarımı yapılırken aşağıdaki sorulara cevap verilecek şekilde tasarım yapılmalıdır.

- Sonuçlar ve parametrelerin etkisi hesaplanabiliyor mu?
- Sonucu kaç tane parametre etkiliyor?
- Eş zamanlı olarak kaç tane parametre hesaba katılmalı?
- Kaç tane deney tekrarının yapılması gerekiyor?
- Ne tür bir veri analizi (regresyon, ANOVA) kullanılmalı?
- Etkiler üzerindeki hangi seviye farklılıkları ne kadar önemlidir?

Geleneksel deney tasarım metotları yüksek malzeme maliyeti, uzun süre ve kaynak gerektiren metotlardır. Her bir parametrenin deney üzerindeki etkisini araştırmak için diğer bütün parametreler sabit tutularak her seferinde bir parametre denenir. Örneğin 5 parametrelili bir çalışmada her bir parametre 5 seviyeye sahip olursa toplam $5^5=3125$ farklı kombinasyon denemesi gerekmektedir. Eğer deneysel hataları azaltmak için her bir deney en az 3 sefer tekrar edilmiş olsa toplam $3125 \times 3=9375$ deney yapılması gerekmektedir. Sonuç olarak klasik ya da geleneksel metotlarla yapılan deney çalışmalarında eş zamanlı analiz mümkün olamamaktadır. Bütün bu problemler istatistiksel deney tasarım metotları ile giderilebilir, aynı zamanda 25 deney ve istenilen tekrar sayısı ile çok yakın sonuçlar elde edilebileceği (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

İstatistiksel deney tasarım yöntemleri birinci dereceden tasarımlar ve ikinci dereceden tasarımlar olmak üzere iki başlık altında toplanabilir:

Birinci dereceden Tasarımlar:

- 2k tam Faktöriyel Tasarım
- Plackett-Burman Tasarımı

- Basitleştirilmiş Tasarım

İkinci dereceden tasarımlar

- 3k Faktöriyel Tasarım
- Box-Benken Tasarım
- Merkezi Birleşik Tasarım

Bu çalışmada ikinci dereceden Box-Benken tasarım yöntemi kullanılmıştır.

3.1. Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizinde amaç çok seviyeli modellerde birçok değişkene bağlı deneysel sonuçların hep beraber yorumlanmasıdır. Kısaca ANOVA olarak anılan varyans analizi, nicel ölçümleri kapsayan ve deneysel verilerin analizi tekniğidir. ANOVA ile elde edilen önem seviyeleri (anlamlılık düzeyi) sayesinde verilerin ne oranda güvenilir olduğu hakkında bilgi edinilir. Bu sayede anlamlılık düzeyleri deneylerden önce belirlenebilir. ANOVA’da anlamlılık düzeyinin 0,05 ve 0,01 aralığında olması tercih edilir bu da hata yapma olasılığı %1-5 aralığında olduğunu gösterir. ANOVA’da kurulan modele ait keyfi bir anlamlılık düzeyi seçilir (tahin edilen) ve anlamlılık düzeylerine göre hazırlanmış F tablolarında serbestlik derecelerinin kesişim noktasında bulunan F oranı değerleri ile kıyaslanır. F oranı, ANOVA tablosunda model varyansının hata varyansına oranını ifade eder. Modelin geçerliliği $F_{\text{hesaplanan}}$ ve F_{tablo} değerleri kıyaslanarak anlaşılır. Modelin geçerli olabilmesi için $F_{\text{hesaplanan}} > F_{\text{tablo}}$ olmalıdır (Ürküt, 2007).

3.2. Merkezi Kompozit Dizayn

Box ve Wilson (1951), 3k faktöriyel tasarımlara ek olarak merkezi kompozit dizaynı (CCD) önermiştir. Önemli istatistiksel özelliklere (dönersellik ve ortogonalite) sahip merkezi kompozit dizayn, ikinci dereceden bir cevap yüzeyi modelinin oluşturulması için en popüler yöntemlerden biridir.

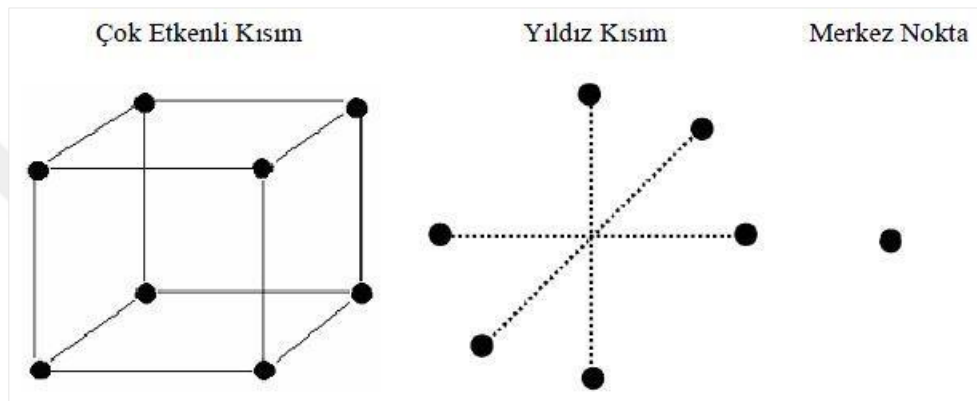
Merkezi kompozit dizayn üç kısımdan oluşmaktadır:

- k faktör sayısı olmak üzere 2k faktöriyel veya 2k-m kesirli faktöriyel tasarımıdır. Burada faktör seviyeleri -1, +1 değerleri ile kodlanır. Buna tasarımın faktöriyel parçası denir.
- n_0 adet merkez noktası ($n_0 \geq 1$) mevcuttur.
- Her bir tasarım değişkeninin eksenı üzerinde, tasarım merkezine uzaklığı α olan iki yıldız (veya eksen) noktasıdır. Bu kısım ise eksen parçası veya yıldız parçası olarak adlandırılır.

Burada toplam tasarım noktası sayısı $N = 2k + 2k + n_0$ olur. Oluşturulacak olan ikinci dereceden modelin ana etkileri ve birinci dereceden etkileşim etkileri $2k$ denemesinden elde edilirken, merkez noktalar yardımıyla sistemin eğriselliği test edilir. Şekil 3.1’ de merkezi kompozit dizayn kısımları verilmiştir (Subaşı, 2010).

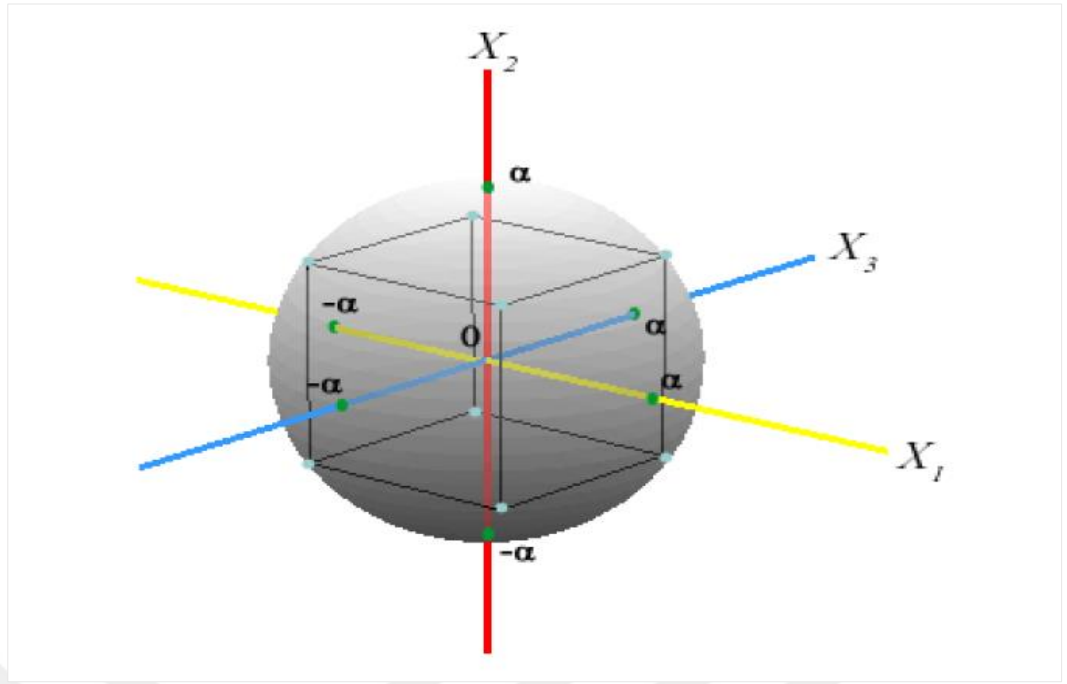
Merkezi karmaşık dizayn yöntemiyle;

- Faktörlerin doğrusal etkisi incelenebilir.
- Faktörlerin parabolik etkileri ve faktörler arasındaki etkileşim ve karesel ilişki incelenebilir.
- Optimum koşullar bulunabilir.
- Deneysel hata olup olmadığı kontrol edilebilir (Oba, 2012).



Şekil 3.1 Merkezi kompozit dizayn kısımları (Subaşı, 2010)

Merkezi kompozit dizayn yöntemi, ağır metal giderimi, renk giderimi, elektrokoagülasyon ve etanol üretimini gibi farklı mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır Şekil 3.2’de üç değişkenli merkezi kompozit dizayn analitik düzlemde gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Üç değişkenli merkezi kompozit dizaynın analitik düzlemde gösterimi (Subaşı, 2010)

3.3. Cevap Yüzey Yöntemi

Cevap yüzey aynı zamanda yanıt yüzeyi yöntemi olarak da bilinen yöntem ile $X_1, X_2, \dots, X_k$ şeklinde gösterilen bir grup değişken arasında yeterli bir fonksiyonel ilişki geliştirmek için matematiksel ve istatistiksel tekniklerin birlikte kullanıldığı bir yöntem olarak tanımlanmıştır. Deneysel planlama dahilinde, prosese etki eden faktörlerin aralığını belirlemek için ön deneyler yapılarak sınırlar araştırılır, sınırlar belirlendikten sonra programın ön gördüğü düzende deneysel çalışmalar tamamlanır ve program yardımıyla değerlendirilerek prosesin optimum koşulları ortaya konur.

Cevap yüzey yöntemi, ilk olarak Box ve Wilson tarafından 1951 yılında tanımlanmış ve geliştirilmiştir. Bu araştırmacıların oluşturduğu yaklaşımlar, mühendislerin, bilimci ve istatistikçilerin endüstriyel proseslerin geliştirilmesine bakış açılarının tamamıyla değişmesine neden olmuştur.

Cevap yüzey yöntemini uygulamalarında bir dizi istatistiksel ve matematiksel teknikler birbiri ardına uygulanmakta ve her bir aşamada elde edilen veriler bir sonraki aşamada kullanılmaktadır. İlk aşamada, bir takım fikirler öne sürülerek sistemi karakterize edebilecek performans ölçütleri ve bunlar üzerine etkili olabilecek faktörlerin ve değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Çoğu proseste bu faktörler oldukça fazladır. Bu nedenle bir takım ön denemeler yapılarak faktörlerin istatistiksel olarak en önemli birkaç tanesi seçilebilir. Bu

denemeler “eleme” olarak adlandırılır ve araştırmanın ilerleyen aşamalarında daha az deneme yapılarak maliyet ve zaman açısından önemli avantajlar elde edilmektedir (Aygün, 2012).

Cevap yüzey yönteminin ikinci aşamasında amaç, bağımsız değişkenlerin deneme bölgesi içerisinde belirlenen seviyelerinin sistemin hedefinde oluşturdukları değerin, optimum noktaya yakın sonuçları verip vermediğinin belirlenmesidir. Optimum noktaya yaklaştıkça oluşturulan cevap yüzeydeki eğrilik daha belirgin hale gelmektedir. Dolayısıyla, cevap yüzey yönteminin ikinci aşaması birinci dereceden modeller kullanılarak eğriliğin test edilmesini içermektedir. Birinci derece modeller sistemin yanıtını belirlemede yeterli olursa, seçilen deneme bölgesinin sistemin optimum performansından uzakta olduğu sonucuna varılır ve yeni deneme bölgesi seçilerek faktör ayarlamaları yapılır. Bu işlem cevap yüzeydeki eğriliğin önemli olduğu bölgeler tespit edilinceye kadar devam eder. Üçüncü aşama, işlem optimum noktaya ulaşıldığında başlamaktadır. Bu noktada araştırmacı, optimum nokta çevresinde doğru ve hassas bir şekilde yanıt fonksiyonunu tahmin etmektedir. Gerçek cevap fonksiyonu, optimum nokta çevresinde önemli değişiklikler göstermektedir. Bu eğriliğin tahmin edilmesinde genellikle ikinci dereceden modeller kullanılır. Bu modelde eğriliğin tahmin edilmesinde bir önceki aşamada uygulanan deneysel dizayna ek olarak deneysel noktaların eklenmesi gerekmektedir. Uygun bir model elde edildiğinde, bu model optimum nokta araştırmasında kullanılır.

Ancak bazı durumlarda, araştırmacının bir takım fiziksel kısıtlamalar nedeniyle, dizayn değişkenlerinin belirli aralıklar içerisinde incelemesi ve gerekirse değişiklik yapması gerekmektedir. Başka bir deyişle, deneme bölgesi ve işletme bölgesi aynıdır. Bu nedenle bölge taramasının yapılmasını gerektiren bir durum yoktur. Ayrıca, araştırmacı proses hakkında daha önceden detaylı bilgiye sahipse bahsedilen bu aşamalardan birkaçını kullanmayabilir. Bu sayede zaman ve maliyet açısından önemli kazançlar sağlanabilmektedir.

Cevap yüzey yönteminin başlıca aşamaları, denemelerin dizayn edilmesi, model geliştirilmesi (regresyon analizi), varyans analizi (ANOVA) ve optimizasyon çalışmasıdır (Eren, 2014).

3.3.1. Cevap Yüzey Yöntemi Avantajları ve Dezavantajları

Cevap yüzey yönteminin klasik deneysel ya da optimizasyon tasarım metotlarıyla karşılaştırıldığında avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Cevap yüzey yönteminin avantajları;

- Daha az deney ile daha fazla bilgi elde edilmesi,
- Bağımsız değişkenlerin etkilerini birlikte inceleme imkanı oluşturması,

- Sistemin matematiksel bir model ile tanımlanması, böylece bağımlı değişken ve bağımsız değişken arasındaki ilişkinin bu model ile ifade edilebilmesidir.

Cevap yüzey yönteminin dezavantajları ise;

- Elde edilen biyokimyasal süreçler gibi doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde başarılı olamaması,

- Hiperbolik ya da çan eğrisi şeklinde simetrik olmayan fonksiyonlar ile modellenememesidir (Gunst, 2012; Ürküt, 2007).



4. MATERİYAL METOT

4.1. Atıksu Karakterizasyonu

EC prosesi deneysel çalışmalarında kullanılan atıksu patates cipsi üreten bir gıda endüstrisinin anaerobik arıtma çıkışından temin edilmiştir. Ham atıksu karakterizasyon çalışmalarında farklı zamanlarda alınan örneklemelerin ortalaması alınmıştır, karakterizasyon değerleri Tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1. Atıksu Numunesinin Karakterizasyonu

pH	7,8
İletkenlik(mS/cm)	3,37
AKM (mg/L)	140
KOİ (mg/L)	350
TOK (mg/L)	100
Cl ₂ (mg/L)	114,96

4.2. Kullanılan Kimyasallar

Deneyselde pH ayarlamaları için 0,1N NaOH (sodyum hidroksit), 0.1N HCl (hidroklorik asit), çözeltileri kullanılmıştır. Her bir elektroliz işleminden önce, elektrot yüzeyi hacimce % 1’lik HCl çözeltisi içerisinde, 8 saat süreyle bekletilerek temizlenmiştir. EC işlemi sırasında elektriksel iletkenliğin sağlanması için 1N ve 6N Na₂SO₄ (sodyum sülfat) kullanılmıştır.

4.3. Analitik Prosedür

Deneysel çalışmalarda belirlenen parametreler Hach Lange DR 5000 spektrofotometresi kullanılarak ölçülmüştür. Isıtıcı olarak Hach marka DRB 200 ısıtıcı kullanılmıştır. Spektrofotometre cihazı ve ısıtıcı Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Hach Lange DR 5000 spektrofotometre cihazı



Şekil 4.2. Hach 200 ısıtıcı cihazı

Kimyasal Oksijen İhtiyacı analizleri için Lange LCK 514 kiti kullanılmıştır. LCK 514 kiti 100-2000 mg/l KOİ ölçüm aralığı için kullanılmıştır. Kitler birkaç defa çalkalandıktan sonra Şekil 4.2’de verilen ısıtıcıda 148°C’de 2 saat ısıtılmış, oda sıcaklığına geldikten sonra da Şekil 5.2’de verilen spektrofotometrede ölçüm yapılmıştır.

Atıksu numunelerinin pH ölçümlerinde Thermo Scientifi Orion Sta A211 model pH metre kullanılmıştır. pH metre ölçüm cihazı Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. pHmetre cihazı

Atıksu numunelerinin iletkenlik ölçümlerinde Lavibond Con 200 marka iletkenlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. İletkenlik ölçüm cihazı Şekil 4.4’de verilmiştir.



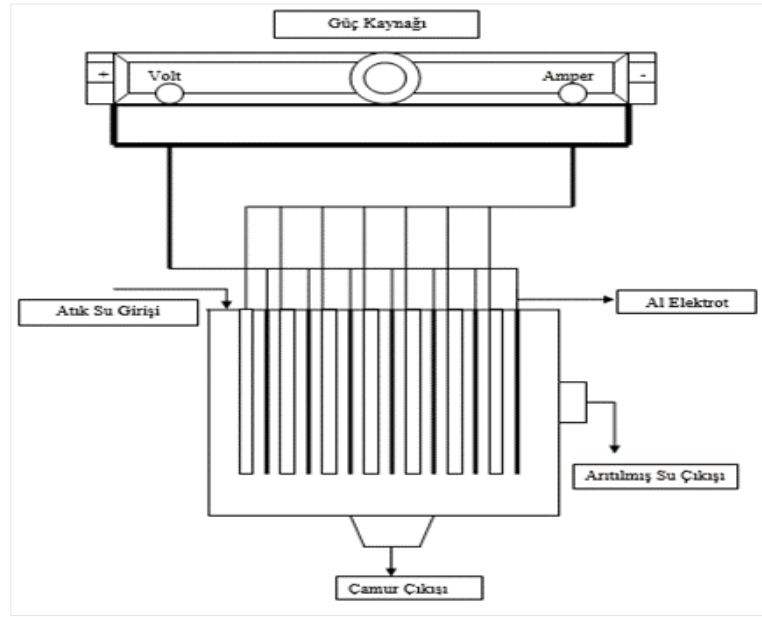
Şekil 4.4. İletkenlik ölçüm cihazı

4.4. Elektrokoagülasyon Düzenegi

EC prosesi ile deneysel çalışmalarda, akım ve voltaj kontrolü) MERSAN MR12 (24V-50A) model güç kaynağı ile sağlanmıştır.

Elektrokoagülasyon deneylerinde kullanılan reaktör 15cmx15cmx15cm boyutlarında ve 2 litre numune hacmine sahiptir. Karşılıklı 7 adet alüminyum elektrot 14 adet paralel levhadan oluşmakta ve her bir levha 11cmx16cm boyutlarındadır. Anot ve katot olarak elektrotların iki grubu dikey olarak yerleştirilmiştir ve elektrotlar tamamen çözelti içerisine batırılmıştır.

Anot ve katot elektrotların paralel olarak bağlanmasından dolayı akım her bir hücrenin direncine göre bölünür. Böylece, seri bağlantıya oranla daha düşük potansiyel fark gereklidir. Bu yüzden EC çalışmalarında paralel bağlı sistem seçilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan paralel bağlı EC prosesinin şematik gösterimi Şekil 4.5’de görülmektedir. Deneylerde kullanılan EC güç kaynağı ve EC düzenegi Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

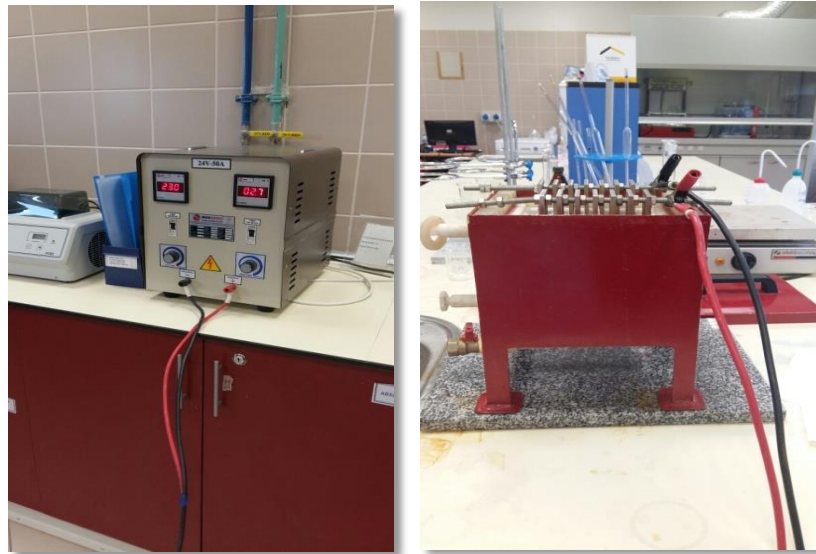


Şekil 4.5. Elektrokoagülasyon deney düzeneğinin şematik görünümü

EC prosesinde kullanılan alüminyum elektrot ile Al^{+3} 'ün hidrolizi ve bunun sonucunda çeşitli alüminyum hidroksit polimer kompleks ve çöktürleri oluşmaktadır. Alüminyum elektrot kullanıldığında anot ve katotta oluşabilecek reaksiyonlar aşağıda verilmiştir; Alüminyum elektrotlar kullanıldığı zaman alüminyum anotta çözünür ve katotta hidrojen gazı salınır. Elektrot reaksiyonları Denklem (4.1) ve (4.2)' deki gibi özetlenmiştir (Danacı, 2012).



Kullanılan alüminyum elektrot ucuzdur, üretimi basittir ve %99.52 saflıktadır.



Şekil 4.6. EC güç kaynağı ve deney düzeneği

4.5. Optimizasyon Çalışmaları

Optimizasyon çalışmalarında Minitab 16 (trial version) ve Design Expert 7.0 version) istatistiksel programları kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle, EC model reaktör ile atıksu gideriminde pH, akım yoğunluğu ve iletkenlik konsantrasyonu, zaman parametrelerinin etkisi kesikli deney şartlarında belirlenmiştir.

İstatistiksel modele, optimizasyon verileri girilmeden önce ön deneysel çalışmalar ile optimizasyon parametrelerinin aralıkları belirlenmiştir. EC model reaktörü üzerinde bağımsız değişkenlerin optimum değerlerini belirlemek amacıyla, paralel bağlı elektrotlar kullanılarak, pH 3,0-7,0 akım yoğunluğu 1,01-1,82 mA/cm² ve iletkenlik 3,5 - 4,5 mS/cm aralığında olacak şekilde istatistiksel analize göre hazırlanan deney serisi uygulanmıştır.

Optimize edilen deneysel şartlar ile sürekli akışlı EC prosesi tasarımı yapılmış ve optimize edilen parametreler reaktöre uygulanarak arıtma veriminin elektroliz süresi, iletkenlik değeri, akım yoğunluğu ve elektroliz süresine göre değişimi incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan kodlara karşılık gelen pH, iletkenlik, akım ve zaman değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Merkezi birleşik tasarım faktör ve seviyeler

Parametre	Birim	-2	-1	0	+1	+2
pH	-	4	5	6	7	8
İletkenlik	mS/cm	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50
Akım	mA/cm ²	1,01	1,22	1,42	1,62	1,82
Zaman	dakika	6	12	18	24	30

Merkezi bileşik tasarım;

- 1 ve +1 olarak kodlanmış tam faktöriyel tasarım deneyleri,
- merkezden eşit uzaklıktaki eksenel noktalardaki deneyler,
- deneysel hataları belirlenmesi amacıyla merkez noktada yapılan tekrar deneyleri olmak üzere üç ayrı bölümden oluşur.

Merkezi bileşik tasarım deney planı Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3 Merkezi birleşik tasarım deney planı

Deney No	pH	İletkenlik (mS/cm)	Akım (mA/cm ²)	Zaman (min)
1	-1	-1	+1	-1
2	0	0	0	0
3	+1	-1	+1	-1
4	-1	-1	+1	+1
5	0	+2	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	-2	0
8	-1	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	-1
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	+1	+1	-1	-1
13	+1	-1	-1	+1
14	+1	-1	-1	-1
15	+1	+1	-1	+1
16	0	-2	0	0
17	0	0	+2	0
18	-1	-1	-1	+1
19	0	0	0	0
20	+1	-1	+1	+1
21	+1	+1	+1	-1
22	0	0	0	0
23	+1	+1	+1	+1
24	-1	+1	-1	-1
25	0	0	0	0
26	0	0	0	-2
27	+2	0	0	0
28	-1	+1	+1	+1
29	0	0	0	+2
30	-1	+1	-1	+1
31	-2	0	0	0

4.6. EC Prosesi ile KOİ Gideriminin İstatistiksel Analizi

Deneysel çalışmaların sonuçlarının değerlendirilmesi amacıyla, Box-Behnken istatistiksel analizi kullanılmıştır. Box-Behnken, dizaynı yanıt yüzey dizaynlarından biri olup, ikinci derecedir. Diğer yanıt yüzeylerine göre daha az veri girişi gerektirir. Fraksiyonel faktöriyel dizayn içermeyen ikinci derece dizayndır. Yapılan tez kapsamında, çözeltinin pH değeri, akım yoğunluğu ve başlangıç fosfor konsantrasyonu bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. Box-Behnken istatistiksel analizi, Design Expert 7.0 trial versiyonu kullanılarak; ANOVA tablosu çıkarılarak, P , R^2 , F değerleri elde edilmiştir.

Dizayn tablosuna göre yapılan deneyler sonucunda bulunan fosfat giderim verileri kullanılarak aşağıda verilen denklemde b_1 , b_2 , b_3 ... Denklem (4.3)' deki katsayıları bulunmuştur.

Bu katsayılar kullanılarak fosfat giderim değerini maksimum seviyeye getirecek bağımsız parametrelerin alabileceği optimum değerler belirlenmiştir.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 +$$

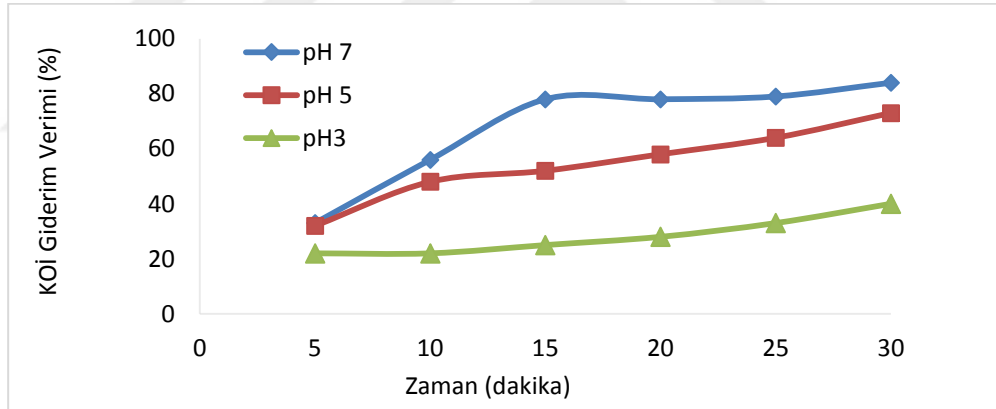
$$b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (4.3)$$

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. pH'ın Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde anot ve katotta oluşan reaksiyonlar sonucu çözeltinin pH değerinde değişimler olmaktadır. Ayrıca pH'daki değişim partiküllerin yüzey yükünü değiştirmekte, dolayısıyla atıksuda bulunan kirlilik yükünü etkilemektedir (Balmer, Faults, 1986).

Başlangıç pH'ın etkisini belirlemek amacıyla gıda endüstrisi atıksuyunun alüminyum elektrot kullanılarak yapılan elektrokoagülasyon çalışmasında 3.5mS/cm iletkenlik ve 1,82 mA/cm² akım yoğunluğunda ve farklı pH değerlerinde (3, 5 ve 7) deneyler yapılmıştır. Çalışmada periyodik numuneler alınarak 30 dakikada deneyler tamamlanmıştır. Sonuçlar Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. pH'ın KOİ giderim verimine etkisi (Reaksiyon şartları: Akım 1,82 mA/cm², İletkenlik 3.5 mS/cm, Süre 30 dak.

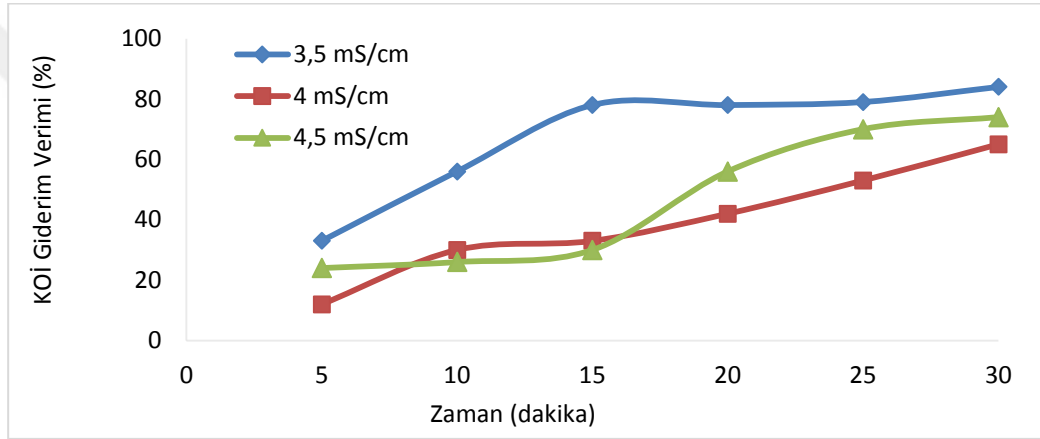
Şekil 5.1'den de görülmektedir ki, en yüksek KOİ giderim verimi pH:7 olduğu durumda %83 ile en iyi, pH:5 olduğu durumda %73 ile ikinci yüksek giderim verimini elde edilmiştir. Alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrolizle üretilen alüminyum iyonları, pH'ya bağlı olarak monomerik ve polimerik alüminyum hidroksit kompleks türlerini oluşturur. Bu kompleksler pH 4-7 aralığında polimerize olma eğilimindedirler. Bir çok monomerik ve polimerik alüminyum türleri ortaya çıkmaktadır. Yüksek pH değerlerinde kirleticiler için etkin olan $Al(OH)_3$, $Al(OH)^{+2}$, $Al_{17}(OH)_{32}^{+7}$ gibi kompleksler oluşmaktadır (Zaied ve Bellakhal, 2009). Dolayısıyla pH= 5,0-7.5 aralığında ortamda yeterli yumaklaştırıcının bulunması ve bu

aralıkta alüminyumun en düşük çözünürlüğe sahip olması maksimum arıtımın gerçekleştiğini göstermektedir. pH=7 değeri optimum değer olarak belirlenmiştir.

5.2. İletkenliğin Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde KOİ üzerine iletkenliğin etkisini araştırmak için belirlenen optimum pH=7 değeri, 1,82 mA/cm² akım yoğunluğunda ve farklı iletkenliklerde (3,5; 4,0 ve 4,5mS/cm) deneyler yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 5.2’de verilmiştir.

Şekil 5.2’den görülmektedir ki, en yüksek giderim verimi 3,5 mS/cm değerinde elde edilmiştir. Bu değer atıksuyun orijinal iletkenlik değerine yakındır. Maksimum giderim verimine proseste her hangi bir iletkenlik ayarı yapılmasına gerek olmadan ulaşılacağı gözlenmiştir

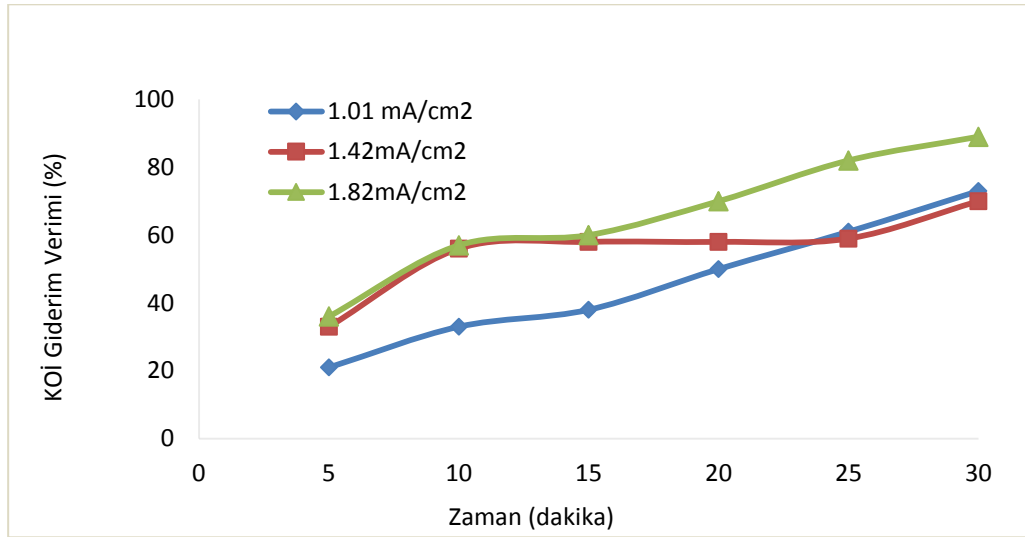


Şekil 5.2 İletkenliğin KOİ giderim verimine etkisi (Reaksiyon şartları: Akım 1,82 mA/cm², pH=7, Süre 30 dak.

6.3. Akım Yoğunluğunun Etkisi

EC prosesinde atıksu içerisinde iyon hareketleri söz konusu olduğundan akım, dolayısı ile akım yoğunluğu oldukça önemlidir.

Bu nedenle çalışmada farklı akım yoğunluklarında (1,01; 1,42 ve 1,82 mA/cm²) deneyler yürütülmüş ve sonuçlar Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3 Akım Yoğunluğunun KOİ giderim verimine etkisi (Reaksiyon şartları: iletkenlik 3,5 mS/cm, pH=7, Süre 30dak.)

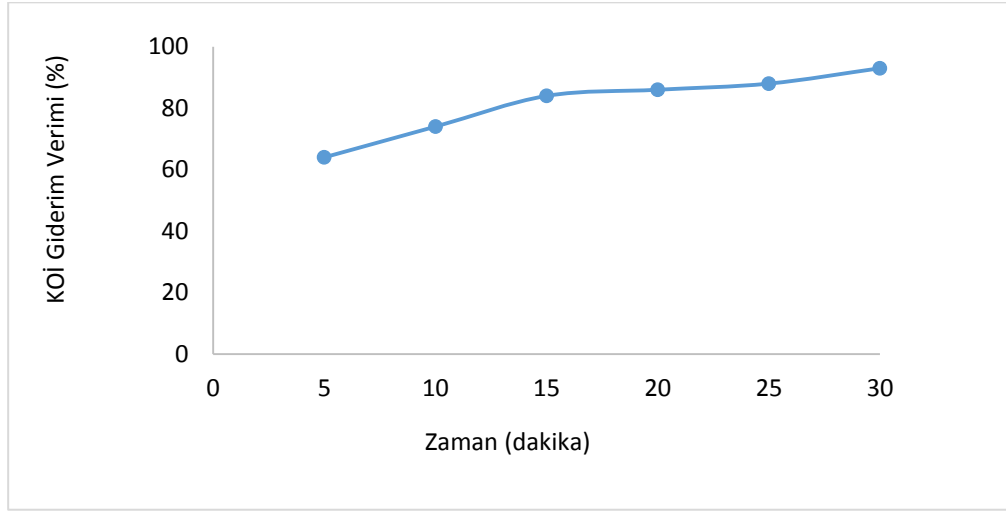
Akım yoğunluğu $1,82 \text{ mA/cm}^2$ de en yüksek verime ulaşılmıştır. Düşük akım yoğunluğunda kirletici gideriminin oldukça düşük kaldığı görülmektedir. Yüksek akım yoğunluğunda Faraday yasasına göre elektrotlarda üretilen iyon miktarı ve dolayısıyla H_2 kabarcıkları da artmaktadır. Buda kirleticilerin çözeltiden uzaklaşmasını sağlamaktadır (Ghosh ve diğ., 2008).

5.4. Elektroliz Süresinin Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde zamanın etkisini incelemek için belirlenen optimum şartlarda (pH=7 ve iletkenlik=3.5 mS/cm, akım yoğunluğu $1,82 \text{ mA/cm}^2$) deneyler gerçekleştirilmiştir. Elektroliz süresi 5-30 dak. arasında yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 5.3’de gösterilmiştir.

Bu prosede yeterli miktarda flokların oluşumu zamana bağlı olarak gerçekleşir. Şekil 5.4’den de görülmektedir ki, reaksiyon süresindeki artışa bağlı olarak kirleticilerin giderim verimlerinde artış sağlanmaktadır ve 30. dakikada KOİ giderim veriminin %93’e ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle uygun Elektrokoagülasyon süresi 30 dakika olarak bulunmuştur.

Bu prosede yeterli miktarda flokların oluşumu zamana bağlı olarak gerçekleşir. Şekil 5.4’den de görülmektedir ki, reaksiyon süresindeki artışa bağlı olarak kirleticilerin giderim verimlerinde artış sağlanmaktadır ve 30. dakikada KOİ giderim veriminin %93’e ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle uygun elektrokoagülasyon süresi 30 dakika olarak bulunmuştur.



Şekil 5.4 Reaksiyon süresinin KOİ giderim verimine etkisi (Reaksiyon şartları Akım 1.82 mA/cm², İletkenlik 3.5 mS/cm, pH=7)

5.5. EC Model Reaktörü ile Optimizasyon Çalışması

Bu çalışmada toplam 31 deney Merkezi Birleşik Tasarım tekniği kullanılarak tasarlanmıştır.. Tablo 4.3 'de verilen deney planına göre her bir deneysel çalışmada deney koşulları ve elde edilen cevap değerleri Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Tablo 5.1. EC reaktörü ile KOİ giderimi için deney sonuçları

Deney No	pH	İletkenlik (mS/cm)	Akım (mA/cm ²)	Zaman (min)	KOİ Giderimi (%)
1	5	3,75	1,62	12	45
2	6	4,00	1,42	18	55
3	7	3,75	1,62	12	59
4	5	3,75	1,62	24	58
5	6	4,50	1,42	18	57
6	6	4,00	1,42	18	56
7	6	4,00	1,01	18	44
8	5	4,25	1,62	12	48
9	5	3,75	1,22	12	27
10	6	4,00	1,42	18	56
11	6	4,00	1,42	18	57
12	7	4,25	1,22	12	45
13	7	3,75	1,22	24	60

Tablo 5.1. (Devam) EC reaktörü ile KOİ giderimi için deney sonuçları

14	7	3,75	1,22	12	47
15	7	4,25	1,22	24	68
16	6	3,50	1,42	18	51
17	6	4,00	1,82	18	65
18	5	3,75	1,22	24	28
19	6	4,00	1,42	18	54
20	7	3,75	1,62	24	74
21	7	4,25	1,62	12	57
22	6	4,00	1,42	18	57
23	7	4,25	1,62	24	3578
24	5	4,25	1,22	12	35
25	6	4,00	1,42	18	54
26	6	4,00	1,42	6	25
27	6	4,00	1,42	6	25
28	5	4,25	1,62	24	54
29	6	4,00	1,42	30	66
30	5	4,25	1,22	24	56

5.5.1. Varyans analizi

Al elektrotların kullanıldığı EC prosesinde KOİ giderimi için anova analizi Tablo 5.2’de verilmiştir. Analiz sonucunda, model parametreleri arasında birinci derece etkileşim olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5.2. Al elektrotların kullanıldığı EC prosesinde KOİ giderimi için ANOVA analizi

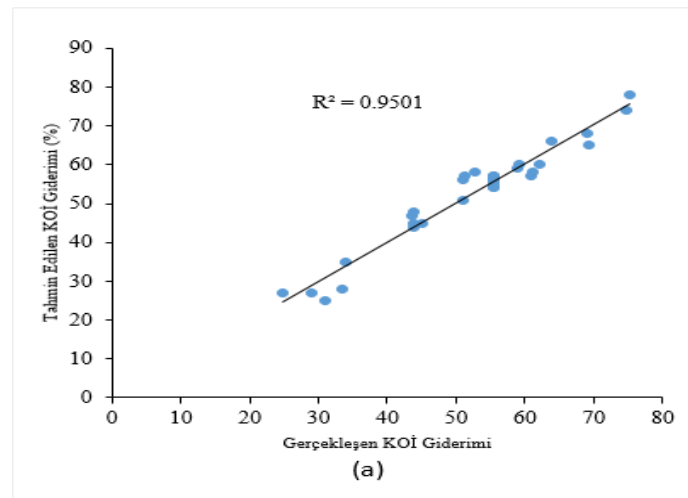
Kaynak	SD	Kareler Toplamı		Düzeltilmiş Kareler Toplamı		Adj MS		F değeri		P değeri	
		A	b	a	b	A	b	a	b	A	b
Regresyon	14	4974.44	2.341	4974.44	2.341	355.317	0.167	21.76	13.53	0.000	0.000
Lineer	4	4420.50	1.908	290.33	0.080	72.581	0.020	4.44	1.62	0.013	0.218
Karesel	4	280.57	0.227	280.57	0.227	70.142	0.057	4.30	4.60	0.015	0.012
Etkileşim	6	273.37	0.206	273.37	0.206	45.562	0.034	2.79	2.78	0.047	0.048
Artık Değer	16	261.30	0.198	261.30	0.198	16.331	0.012				
Uyumsuzluk	10	251.58	0.172	251.58	0.172	25.158	0.017	15.54	4.09	0.002	0.049
Saf Hata	6	9.71	0.025	9.71	0.025	1.619	0.004				
Toplam	30	5235.74	2.539								

S.D., Serbeslik derecesi

Gelişmiş öngörü modellerinin uygunluğunu gösteren yüksek korelasyon katsayıları elde etmemize rağmen, modellerin yeterliliğini ve önemini incelemek için varyans analizi (ANOVA) da yapılmıştır.

Modeller için ANOVA'dan elde edilen istatistiksel parametreler Tablo 5.2'de sunulmuştur. ANOVA testlerinin sonuçları, elde edilen kuadratik modellerin uygunluğunu doğrulamıştır. <0,05 olan modellerin p değerleri istatistiksel anlamlılığı göstermektedir.(Ahmadi ve diğ., 2005; Saini ve Kumar, 2016).

Ek olarak, regresyon modellerinin F değerleri, tablolama F'den (2,352) % 95 anlamlılıktan anlamlı derecede yüksektir. Şekil 6.5'de görülen bu sonuç aynı zamanda modellerin doğruluğunu da doğrulamaktadır (Hassani et al., 2016).



Şekil 5.5 Öngörü modelleri KOİ giderimi

6.5.2. Doğrulama deneyi

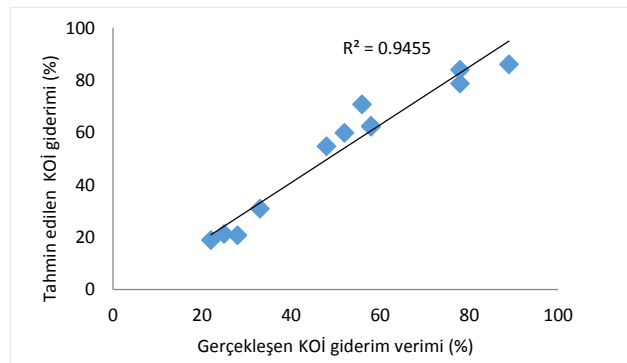
Oluşturulan matematiksel modelin KOİ giderim verimini tahmin etmek ve uygulanabilirliğini ortaya koymak için doğrulama deneyleri yapılmıştır. Doğrulama deneyleri işletme şartlarının belirlenmesinde deney planında ön görülen deney setlerinden farklılık göstermesine dikkat edilmiştir.

Bu amaçla, daha önce gerçekleştirilmemiş, Tablo 5.3'te gösterilen 12 farklı deney seti oluşturuldu.

Tablo 5.3. Doğrulama deney dizaynı ve sonuçları

No	pH	İletkenlik (mS/cm)	Akım (mA/cm ²)	Süre (min)	KOİ Giderimi (%)	
					Gerçekleşen Değer	Tahmin Edilen Değer
1	3	3.5	1.82	10	22	18.84
2	3	3.5	1.82	15	25	21.15
3	3	3.5	1.82	20	28	20.70
4	5	3.5	1.82	10	48	54.64
5	5	3.5	1.82	15	52	59.79
6	5	3.5	1.82	20	58	62.12
7	7	3.5	1.82	10	56	70.71
8	7	3.5	1.82	15	78	78.64
9	7	3.5	1.82	20	78	83.82
10	7	3.5	1.02	10	33	30.80
11	7	3.5	1.42	20	58	62.51
12	7	3.5	1.82	30	89	85.92

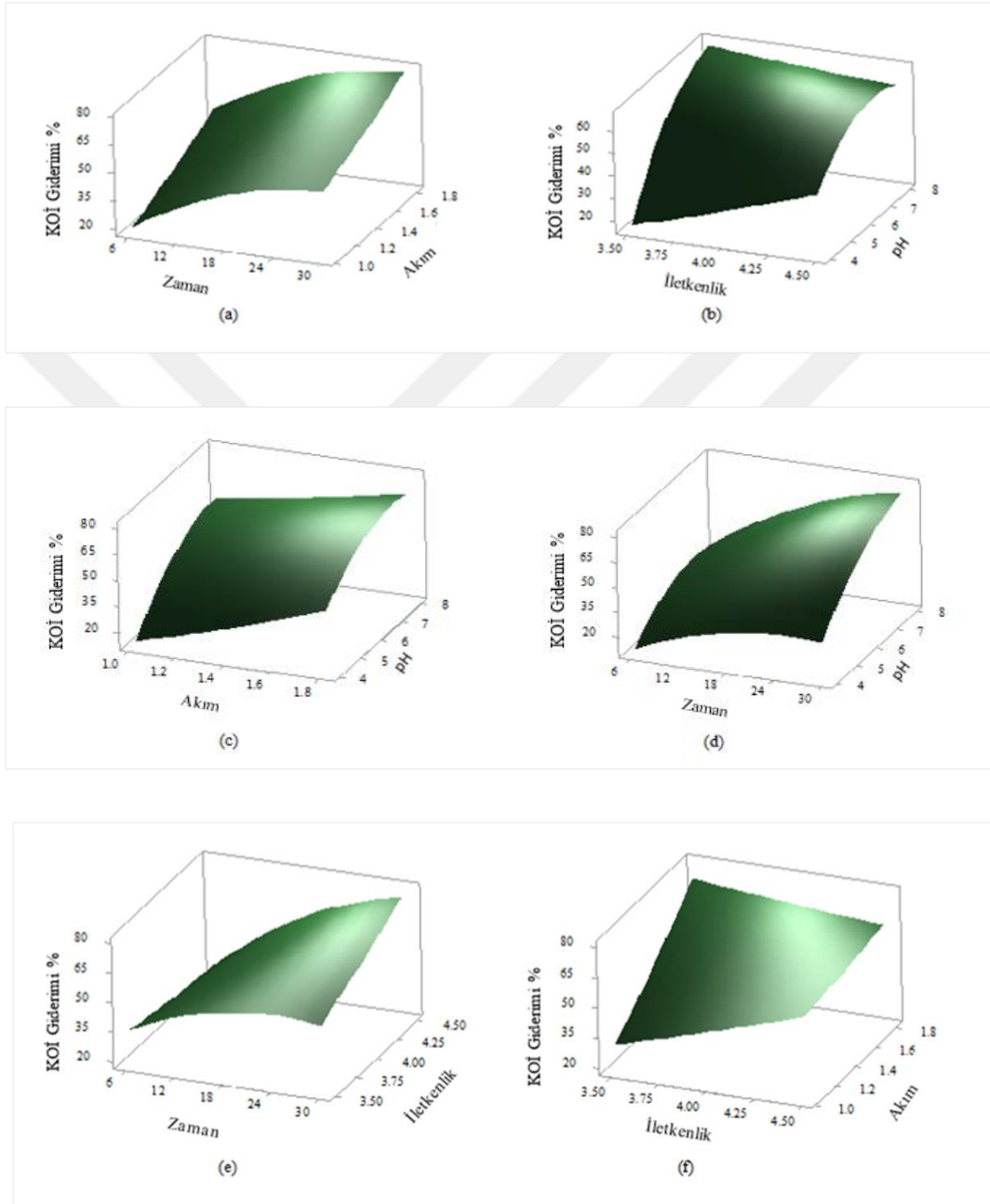
Tahmin edilen ve fiili KOİ giderim verimliliği arasındaki ilişki için yüksek bir korelasyon katsayısı belirlenmiştir. R^2 değeri 0,95 Şekil 5.6 modelimizin geçerliliğini göstermektedir.



Şekil 5.6. KOİ Giderimi için yüzey yanıt modelinin doğrulanması

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi model yardımıyla tahmin edilen KOİ giderim verimi sonuçları ile deneysel olarak elde edilen KOİ giderim verimi sonuçları arasında önemli bir değişim bulunmamaktadır.

5.5.3. Cevap yüzey grafikleri



Şekil 5.7. KOİ giderim verimliliği için yüzey grafikleri a)akım yoğunluğuve ve süresi b) pH ve iletkenlik c) pH ve akım yoğunluğu d) pH ve zaman e) iletkenlik ve zaman f) iletkenlik ve akım yoğunluğu

Şekil 5.7 de verilen cevap yüzey grafiklerine göre elektrokoagülasyon düzeneğinde Al elektrot kullanılması durumunda elektroliz süresi, akım yoğunluğu ve iletkenlik arttıkça KOİ giderim veriminin de arttığı görülmektedir.

Cevap yüzey grafiklerinde görüldüğü gibi 30 dk elektroliz süresi ve 1.82 mA/cm^2 akımda %93 KOİ giderim verimi elde edilmiştir.

Elektroliz süresinin 24. dakikadan sonra artırılmasının verimi önemli derecede etkilemediği belirlenmiştir.

Cevap yüzey grafiklerinde görüldüğü gibi pH 7' de maksimum giderim verimi oluşmaktadır.

KOİ giderim veriminde en etkili parametrenin akım yoğunluğu olduğu, ardından iletkenlik ve pH'ın etkili olduğu tespit edilmiştir.

İletkenlik parametresindeki artışın, KOİ giderim verimi üzerinde akım yoğunluğunun etkinliğinin kısıtladığı görülmektedir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında patates cipsi üreten bir gıda endüstrisi atıksuyunun Al elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı gerçekleştirilmiştir. Cevap yüzey yöntemi kullanılarak, merkezi kompozit tasarım esas alınarak belirlenen deney tasarım programı çerçevesinde deneysel çalışmalar tamamlanmıştır.

Çalışma sonuçları, elektrokoagülasyon prosesinin patates cipsi endüstrisi atıksuyundan düşük enerji sarfıyatı ile yüksek kirletici giderim verimi sağlamak için, uygun bir arıtma alternatifi olduğunu göstermiştir. Kirletici giderim verimleri giriş pH, akım yoğunluğu, iletkenlik ve elektroliz süresinin bir fonksiyonudur. Box-Benkhen yöntemi, patates cipsi atıksularında elektrokoagülasyon prosesinin uygulanmasında başarılı bir şekilde uygulanmıştır. KOİ, giderimi üzerindeki giriş pH'ı, akım yoğunluğu, iletkenlik ve elektroliz süresi değişkenlerinin etkileri araştırılmıştır. Dört işletme parametresi, giriş parametreleri olarak; pH: 4-8, Akım: 1,01-1,82 mA/cm², iletkenlik: 3,50-4,50 mA/cm², t: 6-30 dakika aralıklarında; KOİ giderim oranı ise sistem hedefi olarak belirlenmiştir.

Oluşturulan her bir model için deney tasarım programından farklı olmak üzere bağımsız değişkenlerin farklı seviyeleri için doğrulama deneyleri yapılmıştır. Model

yardımla tahmin edilen KOİ giderimi ile deneysel çalışma sonucu elde edilen ve KOİ giderim verimleri arasında % 5'ten küçük hata olması, oluşturulan modellerin güvenilir olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışmada uygulanan model deneysel veriler ile model yardımıyla tahmin edilen değerler arasında yüksek korelasyon olduğunu göstermiştir. Varyans analizinin yüksek korelasyon katsayısı değerleri vermesi ikinci dereceden modelin deneysel veriler ile yeterli düzeyde uyum içinde olduğunu göstermektedir. Optimum şartlar altında Al elektrotlar kullanılarak sağlanan giderim verimleri, KOİ için %93 olarak belirlenmiştir. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Tablo 5.10 : Sektör: Gıda Sanayii (Bitki İşleme Tesisleri ve Benzerleri) KOİ deşarj kriteri 200 mg/L olarak belirlenmiştir. Çalışmamızda; anerobik arıtım çıkışından alınan, başlangıç KOİ değeri 350 mg/L olan atıksu numunesinin elektrokagülasyon ile arıtım sonucunda KOİ değeri 23 mg/L olarak ölçülmüştür. Tez çalışmasında kullanılan elektrokimyasal arıtım yöntemi, anaerobik arıtım sonrasında klasik aerobik arıtım yöntemlerine alternatif olarak kullanabileceği

görülmüştür. Çalışmada kullanılan Al elektrot ile plot ölçekli uygulama yapılabileceği gibi Fe gibi farklı elektrotlar kullanılarak da arıtımın gerçekleştirilebileceği tavsiye edilmektedir.

Sonuç olarak elektrokoagülasyon prosesinin gıda endüstrisi atıksuyunun arıtımında etkili bir yöntem olduğu belirlenmiştir.



KAYNAKLAR

Abu O. A., Tewe O. O., Losel D.M., Onifade A. A., Changes in Lipid, Fatty Acids and Protein Composition of Sweet Potato (*Ipomoea Batatas*) After Solid-State Fungal Fermentation. *Bioresource Technology*, 2000, **72**(2), 189-192.

Açıkgöz V., LPG Depolama Tanklarında Yangın ve Patlama Durumlarının Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 202551.

Ahmadi M., Vahabzadeh F., Bonakdarpour B., Mofarrah E., Mehranian M., Application of the Central Composite Design and Response Surface Methodology to the Advanced Treatment of Olive Oil Processing Wastewater Using Fenton's Peroxidation, *Journal of Hazardous Materials*, 2005, **123**(1-3), 187-195.

Aygün A., Tekstil Endüstrisi Reaktif Ve Dispers Boya Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon Prosesi İle Arıtımı: Yanıt Yüzey Yöntemi İle Optimizasyon, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2012, 315861.

Balmer L.M., Foulds A.W., Separation Oil From Oil In Water Emulsions by Electroflocculation/Electroflotation, *Filtration and Seperation*, 1986, **25**(6), 366-370.

Barrera-Díaz C., Roa-Morales G., Avila-Cordoba L., Pavo'n-Silva T., Bilyeu B., Electrochemical Treatment Applied to Food-Processing Industrial Wastewater, *Industrial and Engineering Chemical Research*, 2006, **45**(1), 34-38.

Beltran De Heredia J., Dom'Inguez J. R., Lopez L., Treatment Of Cork Process Wastewater By Successive Chemical-Physical Method, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, **52**(14), 4501-4507.

Cankurtaran, M., Kızartılmış Buğday Cipsi Üretimi Ve Elde Edilen Buğday Cipslerinin Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2011, 23226.

Chen G. H., Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment., *Seperation and Purification Technology*, 2004, **38**(1), 11-41.

Chmielewski A. G., Migdal U. W., Separation Technologies for Metals Recovery from Industrial Wastes, *Hydrometallurgy*, 1977, **45**(3), 333-344.

- Chopra A.K., Sharma A.K., Effect of Electrochemical Treatment on the COD Removal from Biologically Treated Municipal Wastewater, *Desalination and Water Treatment*, 2015, **53**(1), 41-47.
- Danacı, N., Elektrokoagülasyon Prosesi ile Kağıt Endüstrisi Atıksularının Arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2012, 209147.
- Daneshvar, N., Decolorization of Basic Dye Solutions by Electrocoagulation: An Investigation of the Effect of Operational Parameters, *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **129**(1-3), 116-122.
- Delipınar Ş., Maya Endüstrisi Atık Sularının Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon İle Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2007, 199647.
- Emamjomeh M. M., Sivakumar M., Review of Pollutants Removed By Electrocoagulation and Electrocoagulation/flotation Processes, *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(5), 1663-1679.
- Eren, İ., Patateslerin Osmotik Dehidrasyonunun “Response Surface” Metodu Kullanılarak Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2004, 149672.
- Erkan N., *Esnaf ve Sanatkârlar Özelinde Sektör Analizleri Projesi Gıda Sektörü*, 1.baskı, T.C. Gümrük ve Ticaret Bakanlığı Yayınları, Ankara, 2017.
- Eyvaz, M., Bayramoğlu, M., Kobyay, M., Tekstil Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon ile Arıtılması: Teknik ve Ekonomik Değerlendirme, *İTÜ Dergisi/e Su Kirlenmesi Kontrolü*, 2006, **16**(1-3), 55-65.
- Fil B., Boncukoğlu R., Yılmaz A., Bayar S., Antep Fıstığı İşleme Atıksularının Elektrokoksiasyon Yöntemiyle Ön Arıtım Çalışmaları, *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2012, **2**(2), 29-36
- Gengeç, E., Kobyay, M., Demirbaş, E., Akyol, A. ve Oktor, K., Optimization of Baker's Yeast Wastewater Using Response Surface Methodology by Electrocoagulation”, *Desalination*, 2012, **286**(1), 200-209.
- Ghosh D., Solanki H., Purkait M.K., Removal of Fe (II) From Tap Water by Electrocoagulation Technique, *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **155**(1-2), 135-143.
- Gogate P. R., Pandit A. B., A Review of Imperative Technologies for Wastewater Treatment: Oxidation Technologies at Ambient Conditions, *Advances in Environmental Research*, 2004a, **8**(3-4), 501-551.
- Gogate P. R., Pandit A. B., A Review of Imperative Technologies for Wastewater Treatment II: Hybrid Methods, *Advances in Environmental Research*, 2004b, **8**(3-4), 553-597.
- Gökçe B., Taşgetiren S., Kalite İçin Deney Tasarımı, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2009, **6**(1), 71-83.

Göncü, A., Farklı Tahıl Unları İlavesi İle Elde Edilen Fırınlanmış Buğday Cipsinden Kalite Niteliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2011, 317951.

Gunst F.R., Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, *Technometrics*, 2012, **38**(3), 284-286.

Haksevenler G.H., Kimyasal Arıtma Uygulamalarının Organik Maddelerin Yapıları Üzerindeki Etkisinin Araştırılması: Karasu İle Örnek Çalışma, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014, 363524.

Hassani A., Soltani R.D.C., Kıranşan M., Karaca S., Karaca C. and Khataee A, Ultrasound-Assisted Adsorption of Textile Dyes Using Modified Nanoclay: Central Composite Design Optimization, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2016, **33**(1), 178-188.

Holt P. K., Barton G. W., and Mitchell C. A., The Future for Electrocoagulation as a Localised Water Treatment Technology, *Chemosphere*, 2005, **59**(3), 355-367.

Ilhan F., Kurt U., Apaydın, Ö., Arslankaya E., Gönüllü, T., Elektrokimyasal Arıtım ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması, *AB Sürecinde Türkiye’de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 28-21 Mayıs 2007.

Ihara I., Kanamura K., Shimada E., High Gradient Magnetic Separation Combined with Electrocoagulation and Electrochemical Oxidation for the Treatment of Landfill Leachate, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, 2004, **14**(2), 1558-1560.

Inan H., Dimoglo A., Simşek H., M. Karpuzcu, Olive Oil Mill Wastewater Treatment by Means of Electro-Coagulation, *Separation and Purification Technology*, 2004, **36**(1), 23-31.

Karadağ E. K., Elektrokogülasyon Yöntemi ile Karışım Halindeki Tekstil Boyar Maddelerinin Renk Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2009, 245222.

Karadoğan T., Bazı Patates Çeşitlerinin Cips ve Parmak (Kızarmış) Patates Kalitesi Üzerinde Bir Araştırma, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1994, **25**(1), 30-38.

Karaoğlu M., Sulu Çözeltilerden Bazı Boyarmaddelerin Fizikokimyasal Yöntemlerle Giderimi. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2007, 177871.

Kaftan A., Entegre Et Tesislerinde Atık Suyun Yeniden Kullanımı, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 2010, **2**(1), 81-88.

Keenan D., Sainkov A., Biological Augmentation Eliminates Grease And Oil İn Bakery Wastewater, *Water Environment Research*, 2000, **72**(2), 141–146.

Kuokkanen V., Kuokkanen T., Rämö J., Lassi U., Recent Applications of Electrocoagulation in Treatment of Water and Wastewater—A Review, *Green and Sustainable Chemistry*, 2013, **3**(2), 89-121.

Kumaş E., Mühendisler için İstatiksel Deney Tasarımında Hazırlık Aşaması, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011, 343318.

- Kobya M., Delipinar S., Treatment of the Baker's Yeast Wastewater by Electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3), 1133-1140.
- Kosseva, M.R., Processing of Food Wastes, *Advances in Food and Nutrition Research*, 2009, **58**(1), 57-136.
- Legrini O., Oliveros E., Braun A. M., Photochemical Processes for Water Treatment, *Chemical Reviews*, 1993, **93**(2), 671-698.
- Lusas E.W., Rooney L.W., *Snack Food Processing*, 1st ed., CRC Press, United States of America, 2001.
- Metcalf&Eddy, *Wastewater Engineering Treatment - Disposal - Reuse Wastewater*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1991.
- Montgomery D.C., *Design and Analysis Of Experiment:Minitab Manual*, 7th ed., John Wiley and Sons Inc., NewYork, 2001.
- Mollah Y. M., Schennach R., Parga J.R., Cocke D. L., Electrocoagulation (EC)- science and applications, *Journal of Hazardous Materials*, 2001, **84**(1), 29-41.
- Mollah Y. M., Morkovsky P., Gomes A.G., Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, 2004, **114**(1-3), 199-210.
- Naumczyk J., Szpyrkowicz L., Zilio-Grandi F., Electrochemical Treatment of Textile Wastewater, *Water Science and Technology*, 1996, **34**(11), 17-24.
- Oba, Ş., Ekstraksiyon Koşulları Optimize Edilmiş Bazı Baharat Ekstraktlarının Köftenin Depolama Stabilitesi Üzerine Etkilerinin Cevap Yüzey Metodu Kullanılarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2012, 306799.
- Öztürk İ., Timur, H., Koşan, U., *Atıksu Arıtımının Esasları: Evsel Endüstriyel Atık Su Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü*, TC. Çevre ve Orman Bakanlığı, Türkiye, 2005.
- Özyonar F., Karagözoğlu B., İçme Sularından Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon ile Bulanıklık Giderimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2012, **27**(1), 81-89.
- Özyonar, F., Treatment of Textile Wastewater by Electrocoagulation Process, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2012, **28**(1), 29-37.
- Roa-Morales G., Campos-Medinaa E., Aguilera-Cotero J., Blyeu B., Barrera-D'iaz C., Aluminum Electrocoagulation with Peroxide Applied to Wastewater from Pasta and Cookie, *Separation and Purification Technology*, 2007, **54**(1), 124-129.
- Subaşı A., Yanıt Yüzey Yöntemi Yardımı ile Isı Değiştirici Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2010, 274666.
- Şenoğlu B., Acıtaş S., *İstatistiksel Deneysel Tasarımı; Sabit Etkili Modeller*, 3.baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, Türkiye, 2014.
- Tchamango S, Nanseu-Nijiki C.P., Ngameni E., Hadjiev D., Darchen A., Treatment of Dairy Effluents by Electrocoagulation Using Aluminium Electrodes, *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(4), 947-952.

Tuta, S., Dondurulmuş Patates Dilimlerine Uygulanan Mikrodalga ile Önçözdürme İşleminin Parmak Patatesin Akrilamid İçeriği ve Kalite Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2009, 258991.

Uğurlu, M., Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Kağıt Atık Sularında Bazı İnorganik Bileşenlerin Giderilmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2004, **17**(3), 85-99.

URL-1: <http://www.istekobi.com.tr/gidasektorunebakis/>, (Ziyaret Tarihi: 13 Mayıs 2018)

Ürküt, Z., Kalsiyum Aljinatta İmmobilize Edilmiş Aureobasidium Pullulans P56 Hücreleri ile Pullulan Üretiminin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007, 202096.

Vardar B., Tekstil Endüstrisi Reaktif Boya Banyolarının Elektrokimyasal Yöntemler ile Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 223587.

Won S., Han M., Yun Y., Different Binding Mechanisms in Biosorption of Reactive myersDyes According to Their Reactivity, *Water Research*, 2008, **42**(19), 4847-4855.

Yonar T., Fotokimyasal Oksidasyon Yöntemiyle Organik Kirliliklerin Giderilmesi ve Bu Yöntemin Küçük Yerleşim Bölgelerinden Kaynaklanan Atıksulara Uygulanması, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2005, 168276.

Zhou H., Smith D. W., Advanced Technologies in Water and Wastewater Treatment, *Journal of Environmental Engineering Science*, 2002, **1**(4), 247-264.

Zaied M., Bellakhal N., Electrocoagulation Treatment of Black Liquor from Paper Industry, *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **163**(2-3), 995-1000.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Veli S., Özbay B., Özbay İ., Arslan A., **Çebi E.**, Elektrokoagülasyon Prosesi İl Gıda Endüstrisi Atıksuyunun Arıtımında Optimum Koşulların Belirlenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, DOI: 10.19113/sdufbed.28988.



ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Kocaeli’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2011 yılında başladığı Koceli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nden 2015 yılında Çevre Mühendisi olarak mezun oldu. 2015-2018 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2016 yılından beri Kocaeli özel bir otomotiv firmasında Çevre Mühendisi ve İş Sağlığı Güvenliği Uzmanı olarak görev yapmaktadır.

