

# OZONLAMA PROSESLERİNİN HİBRİT UYGULAMALARI İLE ENDÜSTRİYEL ATIKSULARDAN TEKSTİL BOYALARIN GİDERİMİ

## HYBRID APPLICATIONS OF THE OZONATION PROCESSES WITH ON THE REMOVAL OF TEXTILE DYES FROM INDUSTRIAL WASTEWATER

Dr. Öğr. Üyesi Murat KIRANŞAN<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Gümüşhane University, Gümüşhane Vocational School, Department of Chemistry and Chemical Processing Technologies, 29100, Gümüşhane, Turkey,

\*murat.kiransan@gumushane.edu.tr

### Özet

Ozon bilinen en etkili antimikrobiyal ve deodoranttır. Güneşin ultraviyole ışınları ve yıldırım anında ortaya çıkan elektrik arklarından oluşan Ozon, dünya çapında koruyucu bir kalkan olarak mevcuttur ve canlıları güneşin radyasyon etkisine karşı korur. Yıldırımdan oluşan O<sub>3</sub> havayı temizler. O<sub>3</sub>, üç oksijen atomundan oluşan kararsız bir gazdır. Kararsız bir gaz olan ozon, oksijen molekülü oksijen atomlarına ayrıldığında ve başka bir oksijen molekülü ile birleştirildiğinde oluşur. Ozon elektroliz, fotokimyasal ve radyokimyasal reaksiyonlarla veya oksijenin bulunduğu gazlı ortama elektrik boşalmasıyla elde edilebilir. Sıvı veya gaz halindeki ortamlardaki ozon oksijene dönüşme eğilimindedir. Ozon molekülü termodinamik olarak kararsızdır ve hemen oksijene dönüşür ve güçlü bir elektrofilik madde ile güçlü bir oksitleyicidir (E<sup>o</sup> = 2.07 V). İleri oksidasyon prosesleri arasında genellikle Ozon (O<sub>3</sub>), fenton, Hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), UV, ıslak hava oksidasyonu, sonikasyon ve aşağıdakiler gibi birkaç bağlı işlemi içeren birçok sinerji proseslerinden oluşurlar. Peroksit/Ozon (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), peroksitli ultraviyole ışık (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), Peroksit/Ozon ve ultraviyole ışık (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV), gibi sistemler örnek verilebilir. Mevcut farklı İOP'leri arasında, çamur ve artık ozon üretmeyen çok umut verici ve alternatif atıksu arıtım tekniği olarak ortaya çıkan ozonlama işlemi de su ve oksijene ayrılmaktadır. Ozon molekülü (O<sub>3</sub>) güçlü bir oksitleyici özelliğe sahiptir ve organik kirleticilerin ayrışması ve mineralizasyonu için etkili bir şekilde kullanılır. Bununla birlikte, zor ayrılan organik kirleticilerin bağımsız ozonlama sürecinin toksisitesindeki ve bertarafındaki artış, inatçı ve büyük moleküllü endüstriyel atık suların arıtılması için etkili ve sürdürülebilir bir çözüm değildir. Bu nedenle, endüstriyel atıksu arıtımı için hibrit ozonlama işleminin ve moleküler ozon reaktivitesinin başarısını arttırmak için reaksiyon mekanizmasının bir özeti gereklidir. Bu çalışma, iki farklı tekniğin bir kombinasyonunu ve hidroksil radikal (OH<sup>•</sup>) oluşumunu arttırmak ve böylece degradasyon verimliliğini arttırmak için bir sinerji etkisi olarak hibrid ozonlamanın ayrıntılı bir incelemesini sunmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Hidroksil Radikali, Ozon Molekülü, Oksidant, Atıksu Arıtımı, Tekstil Boyalar.

## **Abstract**

Ozone is the most effective antimicrobial and deodorant known. Consisting of the sun's ultraviolet ray and electric arcs that appear at the moment of lightning, Ozone is available as a protective shield around the world and protects living things against the radiation effect of the sun. O<sub>3</sub>, formed by lightning, cleans the air. O<sub>3</sub> is an unstable gas consisting of three oxygen atoms. Ozone, an unstable gas, is formed when the oxygen molecule is separated into oxygen atoms and combined with another oxygen molecule. Ozone can be obtained by electrolysis, photochemical and radiochemical reactions or by electric discharge into the gaseous environment where oxygen is located. Ozone in liquid or gaseous media tends to convert to oxygen. The ozone molecule is thermodynamically unstable and immediately converts to oxygen and is a powerful electrophilic substance as well as a strong oxidant ( $E^0 = 2.07 \text{ V}$ ). Advanced oxidation processes usually consist of several synergy processes, including Ozone (O<sub>3</sub>), fenton, Hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), UV, wet air oxidation, sonication and several bound processes such as the following. Systems such as peroxide/Ozone (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), peroxide ultraviolet light (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), Peroxide/Ozone and ultraviolet light (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> /UV) are examples. Among the different AOPs available, the ozonation process, which has emerged as a very promising and alternative wastewater treatment technique that does not produce sludge and residual ozone, also decomposes into water and oxygen. Ozone has a strong oxidizing property and is used effectively for the decomposition and mineralization of organic pollutants. However, the increase in the toxicity and disposal of the independent ozonation process of difficult decompose organic pollutants is not an effective and sustainable solution for the treatment of stubborn and large-molecule industrial wastewater. Therefore, a summary of the reaction mechanism is required to increase the success of the hybrid ozonation process and molecular ozone reactivity for the treatment of industrial wastewater. This study provides a combination of two different techniques and a detailed review of hybrid ozonation as a synergy effect to increase hydroxyl radical formation and thus increase degradation efficiency.

**Keywords:** Hydroxyl Radical, Ozone Molecule, Oxidant, Wastewater Treatment, Textile Dyes.

## 1. GİRİŞ

Su, bir yaşamın en temel gereksinimidir ve farklı ev ve sanayi faaliyetlerini gerçekleştirmek için kullanılır. [1]. Son yıllarda, tüm dünya, farmasötik ilaç atıkları, damıtma tesisleri, tekstil, gübre, tabakhane ve madencilik endüstrileri gibi kirletici endüstrilerin hızla gelişmesi, artan yaşam standartları, artan insan popülasyonu ve kentleşme, tehlikeli kirleticiler içeren toksik ve yeniden kireçli atık suların üretimi nedeniyle su krizleriyle karşı karşıyadır. [2].

Artan kentleşme ve endüstri, çevre kirliliği için önemli iki temel faktördür. Sanayileşme, endüstriyel atıklar, kontrolsüz kentleşme ve hızlı nüfus artışı ve ile birlikte elverişli su kaynakları giderek azalmaktadır. Özellikle endüstrinin ve sanayinin gelişmesine bağlı olarak suya olan talebin artması nedeniyle, artılmış atık suların tekrar kullanımı ülkelerin su kaynaklarının kontrolü, planlanması ve geliştirilmesinde önemli bir parametre haline gelmiştir. [3].

Biyolojik ve kimyasal olarak atık suların yapısında bulunan ve bozunmayan organik bileşiklerin atık suda az da olsa varlığı, potansiyel kanserojenik özellikleri ve canlı organizmalar için toksik oldukları için halk sağlığında ciddi sorunlara neden olmaktadır. [4]. Bu biyolojik ve kimyasal olarak parçalanamayan ve tehlikeli kirleticiler çevreye öncelikle endüstriler aracılığıyla girmektedir. Bu nedenle endüstriyel atık suların öncelikli olarak arıtılması esastır. [5]. Çevre şartlarında bozunmadan kalabilen toksik organik maddelerin bir takım işlemlerden geçirilerek zararlı atık şekline dönüştürülmesi ekolojik döngü ve denge açısından zararlıdır. İleri oksidasyon prosesleri (İOP) suda mevcut olan organik kirleticileri gidermek amacıyla kullanılan ve prensip olarak hidroksil radikali üretimine dayalı olan yükseltgeme yöntemlerinin genel adıdır. Hidroksil radikalleri oksidasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesine, kirletici organik maddenin tamamen parçalanıp mineralizasyona uğramasına, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O gibi zararsız son ürünlerin oluşmasını sağlamaktadırlar. [6].

Aromatik halka içeren boya moleküllerin kimyasal oksidasyona uğramaları sonucu bu aromatik halkalar kırılır. Bu yolla atık sulardaki parçalanmaya uğramayan boyarmaddelerin giderimi sağlanmış olur. En çok bilinen ve en etkili ileri oksidasyon prosesleri ozonlama, ozon-UV (Foto-ozonlama) ya da ozon-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kombinasyonu, Fenton, Foto-Fenton prosesleridir. [7]. Kimyasal oksidasyon yöntemlerinden ozon ile oksidasyon zehirlilik ve birikicilik özelliğine sahip istenmeyen bileşiklerin giderilmesi amacıyla tercih edilmektedir. Ancak kimyasal oksidan olarak kullanılan klor (Cl<sub>2</sub>), klordioksit (ClO<sub>2</sub>), ozon (O<sub>3</sub>), hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ve permanganatın (MnO<sub>4</sub>) uygulanması esnasında oluşacak yan ürünler ve oksidasyon kapasiteleri uygulama esnasında sınırlayıcı bir etki yapmaktadırlar. [6]. Klor gazından 1,52 kat daha yüksek oksidasyon potansiyeline sahip ozon gazının oksidasyon potansiyeli 2,07 eV'tur. Bu nedenle organik bileşiklerin çoğunu parçalayabilmekte ve ozon molekülü ile sulu çözeltide oluşan OH<sup>·</sup> radikalleri boya moleküllerinin yapısını oluşturan aromatik halkaları açabilmektedir. [8].

Teorik olarak, ozon gazı organik ve inorganik maddeleri en üst oksidasyon kademesine okside edebilmesine rağmen moleküler seçicilik ve bozunma hızları önem taşımaktadır. Ozon

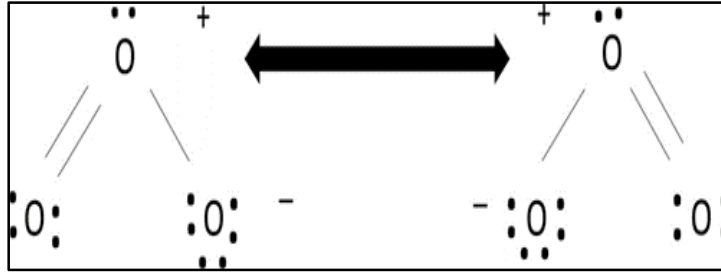
oksidasyonu sonucunda açığa çıkan ürünler oksitlenen maddeye göre farklılık göstermektedir. Ozonun seçici reaksiyonu, özellikle biyolojik ayrışmayı güçleştiren molekül yapılarını parçalamaktadır. Meydana gelen reaksiyon ürünleri, ozonla daha fazla okside olmaktadır. [6]. Ozonlama prosesi; su ve atıksu arıtımında kimyasal oksidasyon, renk ve koku oluşturma, istenmeyen bileşiklerin zararsız bileşiklere dönüştürülmesi ve daha sonraki arıtma işlemleri için uygun hale getirilmesi amacıyla da uygulanmaktadır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Ozon molekülü

Ozon molekülü ( $O_3$ ) oda sıcaklığında renksiz, kendine özgü kokusu olan bir gazdır. Ayrıca aktif oksijen diye de bilinmektedir. Ozon molekülü ( $O_3$ ), 1781 yılında içinden elektrik kıvılcımları geçirilen havada oluşan koku nedeniyle Van Marum tarafından fark edilmiş daha sonra 1840 yılında Christian Friedrich Schönbein tarafından yeniden keşfedilerek ozon ( $O_3$ ) adı verilmiştir. Marignac, Becquerel ve Fremy tarafından incelenerek yapısı ve Soret'in yaptığı araştırmalar sonucu da formülü bulunmuştur. [9,11].

Ozon molekülü ( $O_3$ ) bilinen en etkili mikrop öldürücü ve koku gidericidir. Güneşin ultraviyole ışını ve yıldırım anında ortaya çıkan elektrik arkları ile oluşan  $O_3$ , dünyanın etrafında koruyucu kalkan olarak mevcuttur ve canlıları güneşin radyasyon etkisine karşı korur. Yıldırımlar sonucu oluşan  $O_3$ , havayı temizler. Ozon molekülü ( $O_3$ ) üç oksijen atomundan oluşan stabil olmayan bir gazdır. Molekül yapısı Şekil 1.de gösterilmiştir. [10].



Şekil 1. Ozon molekülünün rezonans yapısı. [10].

Ozon molekülü ( $O_3$ ), bir tekli bağ ve bir güçlü çiftli bağdan oluşan çok güçlü bir oksitleyici maddedir. Ozonun birbirine dönüşebilen iki rezonans yapısı mevcuttur. Moleküler ozonun elektrofil veya nükleofil olarak bir dipol maddesi olarak reaksiyona girmesi nedeniyle oksitleyici özelliği yüksektir. [10]. (Şekil 1).

Ozon molekülü ( $O_3$ ), atmosferimizde doğal halde bulunan oldukça önemli bir maddedir. Günümüzde  $O_3$ 'un yapay olarak üretebilmek mümkündür. Ozon ( $O_3$ ), standart iki atom içeren oksijenden farklı olarak üç atoma sahip oksijenin bir formu şeklindedir. [9].  $O_3$ , gaz haldeyken mavi, sıvı ve katı haldeyken opak mavi-siyah renktedir. Normal sıcaklık ve basınç altında oldukça kararsız bir gaz olan  $O_3$ , suda kısmen çözünür, keskin bir kokuya sahiptir ve gıdalara

uygulanabilen en güçlü dezenfektanlardandır. [9,11]. O<sub>3</sub> (Ozon) yüksek sıcaklıkta kararlıdır; Buna karşılık soğukta dengesizdir, bozunarak oksijen verme eğilimi gösterir.

Ozon molekülü (O<sub>3</sub>) ne kadar derişikse, bozunma o kadar kolay olur ve 100°C'ye kadar ısıtmayla bile meydana gelir. [12]. O<sub>3</sub>, oksijen yoğunluğunun 1.5 katı yoğunluğa ve oksijen çözünürlüğünün 12.5 katı çözünürlüğe sahiptir. Standart koşullar altında gaz formunda bulunan Ozon molekülünün (O<sub>3</sub>) fiziksel kimyasal özellikleri Çizelge 1. de verilmiştir.

Ozon'un (O<sub>3</sub>) çözünürlüğü, büyük ölçüde sıcaklığa ve O<sub>3</sub>'ün kısmi basıncına bağlıdır; bu nedenle O<sub>3</sub>'ün çözünürlüğünün arttırmak için sıcaklık düşürülebilir, havadaki oksijen basıncı artırılabilir ve temas yüzeyi artırılabilir. [13]. Ozon molekülü (O<sub>3</sub>) su içerisinde çözüldüğü zaman iki yolla organik bileşiklerle reaksiyona girer. Direkt olarak moleküler O<sub>3</sub> şeklinde veya dolaylı olarak serbest OH<sup>•</sup> olarak reaksiyona girer. [14].

Çizelge 1. Ozon molekülünün (O<sub>3</sub>) fiziksel, kimyasal ve termodinamik özellikleri. [9,11].

Görünür renk mavi	$\tau_{\max}$	570-610 nm
UV-absorpsiyonu	$\tau_{\max}$	253,7 nm
Oluşum enerjisi	$\Delta H$	144, 42 kJ/mol
Kaynama noktası	$K_p$	-119,9 °C
Donma noktası	$K_d$	-192,5 °C
Kritik sıcaklık	$T_k$	-12,1 °C
Kritik basınç	$P_k$	53, 54 bar
Kritik hacim	$V_k$	111 cm <sup>3</sup> /mol
Yoğunluk	$D$	2,133 g/l
Bağ uzaklığı	$A$	127,8 pm
Valans açısı	$\alpha$	116°45

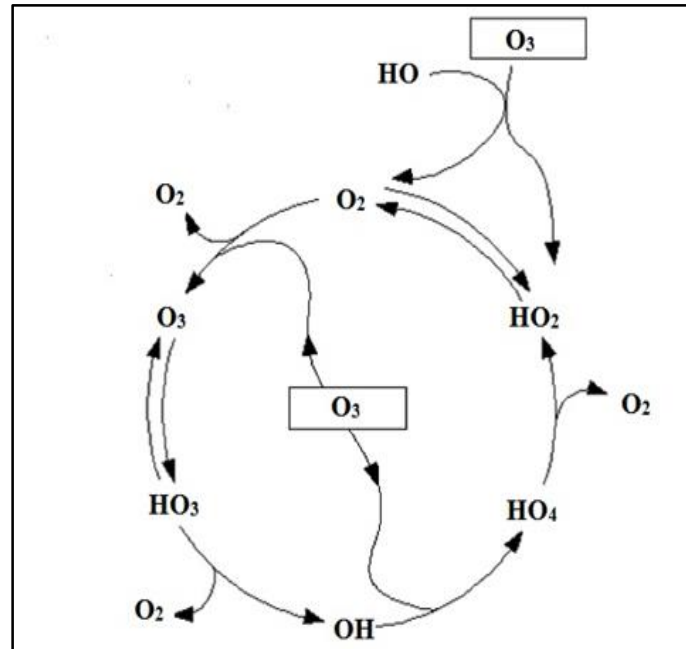
## 2.2. Ozon üretimi

Ozon molekülünün (O<sub>3</sub>) kararsız bir madde olması nedeniyle taşınması ve depolanması mümkün olmamaktadır; bu yüzden O<sub>3</sub>'ün kullanılacağı yerde ve anda üretilmesi gerekmektedir. Ozon (O<sub>3</sub>) üretiminde en çok kullanılan yöntemler, elektrik akımı ile çalışan O<sub>3</sub> jeneratörleri ve elektrolitik O<sub>3</sub> jeneratörleridir. Bunlardan en çok kullanılan yöntem olan elektrik akımı ile çalışan Ozon jeneratörleridir. [9]. Bunların çalışma prensibi; yüksek konsantrasyon ve miktarda ozon (O<sub>3</sub>) üretimi için, kuvvetli bir elektrikseldan oksijence zengin bir gaz geçirilerek gerçekleştirilir. Yoğun enerji nedeniyle bazı oksijen molekülleri parçalanır ve oluşan oksijen atomları diğer oksijen molekülleriyle birleşerek O<sub>3</sub> molekülünü oluşturur. [15,16].

### 3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

#### 3.1. Ozonlama prosesinin mekanizması

Dairesel zincir prosesi uyarınca  $O_3$ 'ün bozunması sonucunda meydana gelen başlıca türler, Şekil. 2'de sunulmuştur. Söz konusu proses,  $OH^-$  gibi bir bazın ilavesi veya  $H_2O_2$  verilmesi veya  $O_3$ 'ün fotolizi aracılığıyla başlamaktadır. [11]. Zincir bozunması mekanizmasının en belirgin özelliği, hidroksil radikallerinin ( $OH^\cdot$ )'nin oluşumudur. Hidroksil radikalleri ( $OH^\cdot$ ), neredeyse tüm organik maddelerle tepkimeye girebilen çok reaktif bir türdür. [17]. Bazı oksidanların oksidasyon potansiyelleri, Çizelge 2'de verilmiştir. Görüldüğü gibi oksidasyon potansiyeli  $O_3$ 'den büyük olan tek element, florudur. [18].



Şekil 2. Sudaki  $O_3$ 'ün  $OH^-$  iyonu tarafından başlatılan bozunması için dairesel zincir mekanizması. [9,11].

Yüksek oksidasyon kuvveti,  $O_3$ 'ün bakterilerin tahribatında tam etkin bir rol oynamasına sebep olur.  $O_3$  gazının dezenfeksiyon etkisi, aynı şartlar altında klor molekülünden 3125 defa daha fazladır. [9,11].

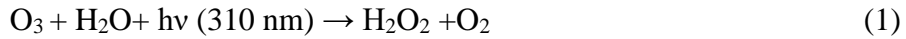
Çizelge 2. Oksidanlar ve oksidasyon potansiyelleri. [9,11].

Oksidant	Oksidasyon Potansiyeli (Volt)
F <sub>2</sub>	3.06
OH	2.80
O <sub>3</sub>	2.07
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1.77
O <sub>2</sub> H	1.70
HOCl	1.49
Cl <sub>2</sub>	1.39

Ozon molekülünün (O<sub>3</sub>) başlıca kullanıldığı alanlar arasında ortamdaki havanın temizlenmesi, suların dezenfeksiyonu, tat, renk, bulanıklık ve koku giderilmesi, ağır metallerin uzaklaştırılması, bakteri ve virüslerin dezenfeksiyonu, gıda depolanması, kırmızı ve beyaz et işleme tesisleri, soğuk hava depoları, gıda endüstrisinde şişe ve yemek kaplarının dezenfeksiyonu, veterinerlik ve hayvancılıkta enfeksiyon giderilmesi, alfa toksin arındırılması gibi alanlar sayılabilir. [9,11].

### 3.2. Ozon/UV radyasyonu (O<sub>3</sub>/UV)

Ozon ve UV radyasyonu ile ileri oksidasyon işlemi, ozon molekülünün fotolizi ile başlatılır. Ozon molekülünün foto depozisyonu, denklem 1 gösterildiği gibi 310 nm'den az UV radyasyonunda hidrojen peroksit ve hidroksil radikal oluşumuna yol açar.



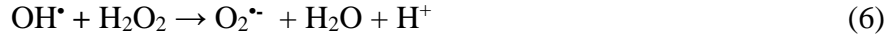
Ozon molekülünün hidrojen peroksit ile daha fazla reaksiyonunun,  $6.5 \times 10^{-2} \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  hız sabitiyle çok yavaş bir reaksiyon olduğu düşünülmektedir. [10].



Ek olarak, UV radyasyonu ile fotoliz üzerine hidrojen peroksit iki hidroksil radikali üretir. Ayrıca hidrojen peroksit, bir H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> ve hidroperoksil anyonu (HO<sub>2</sub><sup>-</sup>) oluşturmak için asit baz denge reaksiyonuna (pK = 11.65) tabi tutulur. [10].



Zincir yayılma reaksiyonunda, hem ozon hem de hidrojen peroksit, hidroksil radikali ile reaksiyona girerek sırasıyla hidroperoksil (HO<sub>2</sub><sup>•</sup>) ve süperoksit radikallerini (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>)  $1.1 \times 10^8 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  ve  $2.7 \times 10^7 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  hız sabitiyle oluşturur.



Süperoksit radikali, pH = 7.9' da hidroksil iyonu  $\text{OH}^-$  (hız sabiti  $1 \times 10^{10} \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) vermek üzere (denklem 7) hidroksil radikali ile reaksiyona girer. [10].



Hidroksil radikali hidroksil iyonu ile bile reaksiyona girerek  $\text{O}^{\bullet-}$  (hız sabiti  $1.3 \times 10^{10} \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) elde edilir. Diğer tarafta süperoksit radikali yine ozon molekülü ile reaksiyona girerek ozonid radikali ( $\text{O}_3^{\bullet-}$ ) oluşturur ( $k = 1.6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ). Ozonid ( $\text{O}_3^{\bullet-}$ ) radikali  $\text{H}_2\text{O}$  ile reaksiyona girerek hidroksil radikali ( $\text{OH}^\bullet$ ) ve hidroksil iyonu ( $\text{OH}^-$ ) verir (hız sabiti:  $9.4 \times 10^7 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ).



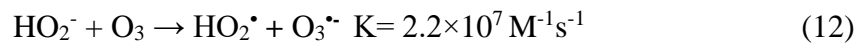
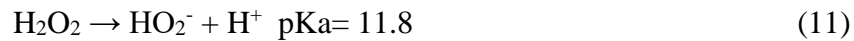
Bu sistem, hidroksil radikallerini ( $\text{OH}^\bullet$ ) üretmek veya sonraki reaksiyonlar için kirletici maddeleri oksitlemek için üç bileşen içerir, yani UV radyasyonu, Ozon ( $\text{O}_3$ ) ve hidrojen peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). [10,19].

Böylece deney koşullarına bağlı olarak kirletici ile doğrudan ve dolaylı ozon reaksiyonları mümkündür. Ayrıca UV,  $\text{O}_3$  ve  $\text{H}_2\text{O}_2$  kombinasyonu, genel sonuçlara katkıda bulunan hidroksil radikalleri ( $\text{OH}^\bullet$ ) üretebilir. [10,20].

### 3.3. Ozon/Hidrojen peroksit ( $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ )

Son yıllarda hidrojen peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), farklı endüstriyel atık sulardan inatçı ve bozunması zor kirleticileri uzaklaştırmak için bir oksidant olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. [21]. Birleşik  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$  sistemi, organik kirleticilerin daha iyi uzaklaştırılmasını sağlar, çünkü  $\text{H}_2\text{O}_2$ , aşağıdaki denklemlerle temsil edilen elektron transfer mekanizması tarafından hidroksil radikallerini oluşturmak için ozon molekülünün ( $\text{O}_3$ ) ayrışmasını hızlandırır. [22].

Ozon/Hidrojen peroksit ( $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ ) prosesi, peroksit olarak bilinen ve doğrudan ve dolaylı ozon reaksiyon mekanizmasıyla kirleticinin oksidasyonunu içeren  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$  işlemidir. Hidrojen peroksit, bir anyon,  $\text{HO}_2^-$  olarak bulunduğu anda ozon ile reaksiyona girer. Reaksiyon hızı, başlangıçtaki ozon/hidrojen peroksit konsantrasyonuna bağlıdır. [23].



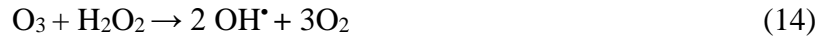


Ozonun, ozon ve hidrojen peroksit kaybına yol açacak ayrışmamış hidrojen peroksit ile reaksiyonu ihmal edilebilir.



Yukarıdaki denklemde üretilen hidroperoksil radikali  $\text{HO}_2^\bullet$  ve ozonid anyonu  $\text{O}_3^-$ , daha sonra  $\text{OH}^\bullet$  üretmek için dolaylı yolun zincir reaksiyonuna girer. [10].

Toplam reaksiyon, iki ozon molekülünün iki  $\text{OH}^\bullet$  ürettiği aşağıdaki şekilde tasvir edilebilir.



$\text{H}_2\text{O}_2$ , az miktarda ozonla olsa bile güçlü bir kirletici bozunma özelliğine sahiptir. Hidrojen peroksit sadece reaksiyon hızını arttırmakla kalmaz, aynı zamanda atık su kalitesini de artırır, fakat artık  $\text{H}_2\text{O}_2$  mikroorganizma ve çevre için zararlıdır. [10].

#### 4. TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu derleme, tekstil boyaların giderilmesinde, su ve atık sularda renk giderme ve dezenfeksiyonda hibrid ozonlama işleminin performanslarının ve bazı başarılı uygulamalarının yanı sıra prensipleri, avantajları ve sınırlamaları göstermiştir. Hibrit işlemin birleşik etkisinin bir sonucu olarak yoğun hidroksil radikal üretimi, geniş bir pH aralığında kirleticilerin etkili bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlar ve verimli kütle transferine ilişkin son derece geliştirilmiş ozon kullanımı teknolojiyi sürdürülebilir kılar.

Hibrid yöntemler, endüstriler tarafından bertaraf edilen büyük miktardaki atık suyu parçalamak için ekonomik olarak uygulanabilir teknikler olmamasına rağmen atık suyun kısmi bozunması veya atık suyun biyolojik olarak parçalanabilirliğinin artırılması için hibrit ozonlama işleminin kullanılması, böylelikle biyolojik yöntemler kullanılarak ve işlemin ekonomik olarak yapılabilir hale getirilmesi için daha fazla artırılması istenir.

## KAYNAKLAR

- [1] Liang, S., Can, B.W., Min, J. ve Fang, X.L., (2012), ‘‘COD removal and biodegradability enhancement of pharmaceutical wastewater using a multilayer internal electrolysis reactor,’’ Asian J. Chem., 24:112-116.
- [2] Kalra, S.S., Mohan S., Sinha A. ve Singh, G., (2011), ‘‘Advance oxidation processes for treatment of textile and dye wastewater: a review,’’ 2nd International Conference on Environmental Science and Development, IACSIT Press, Singapore.
- [3] İyizaman Ö., ‘‘Dispers boyama atık suyunun ozonlama ile geri kazanımı ve tekrar kullanımı’’, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 2014.
- [4] Bethatech, D.A., (1995), ‘‘Choose appropriate wastewater treatment technologies,’’ Chemical Engineering Progress, 12:32-51.
- [5] Sameena, N.M., Prakash, C.G., Atul, N.V., Vishal, W., Sera, D. ve Sandeep. N.M., (2017), ‘‘Comparison of coagulation, ozone and ferrate treatment processes for color, COD and toxicity removal from complex textile wastewater,’’ Water Science Technology, <https://doi.org/10.2166/wst.2017.062>.
- [6] Başar G., ‘‘Bir reaktif boya hammadresi olan 2-naftilamin 3,6,8 trisülfonik asit (k-asit)’in ozonlama prosesi ile oksidasyonunun incelenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [7] Langlais, B., Reckhow, D.A. ve Brink, D.R., (1991), ‘‘Ozone in Water Treatment Application and Engineering,’’ Lewis Publishers, U.S.
- [8] Muthukumar, M. ve Selvakumar, N., (2004), ‘‘Studies on the Effect of Inorganic Salts on Decolouration of Acid Dye Effluents by Ozonation,’’ Dyes and Pigments, 62:221-228.
- [9] Kabaş Z.Y., ‘‘Binalarda oluşan nem kaynaklı yüzeysel bozulmalarda ozonlama yönteminin kullanımının araştırılması’’, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, Isparta, Türkiye, 2012.
- [10] Sameena N. Malik, Prakash C. Ghosh, Atul N. Vaidya ve Sandeep N. Mudliar., (2020), ‘‘Hybrid ozonation process for industrial wastewater treatment: Principles and applications: A review,’’ Journal of Water Process Engineering, 35:101193.
- [11] Kırarşan M., ‘‘ZnO/montmorillonit nanokompozitin sentezi ve bazı organik kirleticilerin fotokatalitik-ozonlama prosesi ile gideriminde kullanım etkinliğinin incelenmesi’’, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 2015.
- [12] Alver A., ‘‘Katalitik ozonlama işlemi ile sulardan dezenfeksiyon yan ürünleri öncüleri gideriminin araştırılması’’, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, Aksaray, Türkiye, 2017.

- [13] Ikehata, K., El-Din, M.G. ve Snyder, S.A., (2008), “Ozonation and advanced oxidation treatment of emerging organic pollutants in water and wastewater,” *Science and Engineering*, 30:21-26.
- [14] Huang, W.J., Fang, G.C. ve Wang, C.C., (2005), “A nanometer-ZnO catalyst to enhance the ozonation of 2,4,6-trichlorophenol in water,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 260:45-51.
- [15] Sorlini, S. ve Collivignarelli, C., (2005), “Trihalomethanes formation during chemical oxidation with chlorine, chlorine dioxide and ozone of ten Italian natural waters,” *Desalination*, 176:103-111.
- [16] Bedük F., “Sentetik organik kirleticilerin katalitik ozonlamayla kimyasal oksidasyonu”, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2010.
- [17] Glaze, W.H., Kwang, J.W. ve Chapin, D. H., (1987), “Chemistry of water treatment process involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation,” *Ozone Science and Technology*, 9(4):335-352.
- [18] Gogate, P.R. ve Pandit, A.B., (2004), “A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions,” *Advances in Environmental Research*, 8:501-551.
- [19] Shang, N., Chen, Y., Ma, H., Lee, C., Chang, C., Yu, Y. ve Lee, C., (2007), “Oxidation of methyl methacrylate from semiconductor wastewater by O<sub>3</sub> and O<sub>3</sub>/UV processes,” *Journal of Hazardous Material*, 147:307–312.
- [20] Chin, A ve Berube P.R., (2005), “Removal of disinfection by-product precursors with ozone UV advanced oxidation process,” *Water Research*, 39:2136–2144.
- [21] Kılıç, M.Y., Yonar, T., ve Kestioglu, K., (2013), “Pilot-scale treatment of olive oil mill wastewater by physico-chemical and advanced oxidation processes,” *Environmental Technology*, 34:1521-1531.
- [22] Lester, Y., Avisar, D., ve Mamane, H., (2010), “Photodegradation of the antibiotic sulphamethoxazole in water with UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process,” *Environmental Technology*, 31:175–183.
- [23] Lee, M.T. Merle, Rentsch, D., Canonica, S. ve Gunten, U.V., (2016), “Abatement of polychloro1,3-butadienes in aqueous solution by ozone, UV- photolysis, and advanced oxidation processes (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/H<sub>2</sub>O),” *Environ. Sci. Technol.*, 51:497–505.