

**JET ÇEVİRİMLİ REAKTÖRDE OZONUN KÜTLE
TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

İbrahim CENGİZ

**Y. Lisans Tezi
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Prof. Dr. Ergün YILDIZ
2011
Her Hakkı Saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Y. LİSANS TEZİ

**JET ÇEVİRİMLİ REAKTÖRDE OZONUN KÜTLE
TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

İbrahim CENGİZ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM

2011

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

JET ÇEVİRİMLİ REAKTÖRDE OZONUN KÜTLE TRANSFERİNİN
İNCELENMESİ

Prof.Dr. Ergün YILDIZ danışmanlığında, İbrahim CENGİZ tarafından hazırlanan bu çalışma 31/12/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr. Ergün YILDIZ

İmza

Üye : Doç.Dr. Osman Nuri ATA

İmza

:

Üye : Yrd.Doç.Dr. Zeynep CEYLAN

İmza

:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Enstitü Müdürü

Prof.Dr. Ömer AKBULUT

Bu çalışma Tübitak 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 107Y298

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

JET ÇEVİRİMLİ REAKTÖRDE OZONUN KÜTLE TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

İbrahim CENGİZ

Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ergün YILDIZ

Jet loop reaktörde ozonun kütle transferinin incelenmesi için yaptığımız çalışmada ilk önce sıcaklık, üretilen ozon gazı konsantrasyonu, reaktöre gönderilen gaz debisi, püskürtme başlığı çapı ve sirkülasyon debisi gibi parametrelerin kütle transferi üzerine etkisi araştırılmıştır. Daha sonra aynı şartlarda kabarcıklı kolonda yapılan denemeler ile jet loop reaktöründe ozonun kütle transferi açısından mukayese edilmiştir.

Sıcaklığın etkisi üzerinde pH=2,26'da yapılan çalışmada artan sıcaklık değerlerinde çözülmüş ozon konsantrasyonlarında azalma, hesaplanan $k_L a$ değerlerinde ise artış olduğu anlaşılmıştır. 15 °C'de 0,5 dak⁻¹ olan $k_L a$ değeri 30 °C'ye kadar %50 artışla 0,75 dak⁻¹'e çıkmıştır ve 35 °C'ye kadar sabit kalmıştır. Ozon gazı konsantrasyonunun etkisi için 3,6-17 g/m³ aralığında yapılan çalışmalarda $k_L a$ değerleri değişmemiş ve yaklaşık 0,47 dak⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Jet loop reaktöre gönderilen gaz debisinin etkisi için 50-250 L/saat aralığında çalışılmış ve artan gaz debileri $k_L a$ değerini 0,083'den 0,42'e kadar 5 kat artırmıştır. Sıvı sirkülasyon debisi etkisi incelendiğinde 40 L/dak.'dan 80 L/dak.'ya çıkıldığında $k_L a$ değeri yaklaşık %43 artmıştır. Ancak bu işlem için reaktör hacmi başına tüketilen güç 8 kat artarak 2,7 kW/m³ değerine ulaşmıştır. Yaklaşık 2,8 kW/m³ değerinden fazla olacak şekilde uygulanan sıvı sirkülasyon hızlarında $k_L a$ değerleri kabarcıkların birleşmesi ve yüzey alanının azalmasından dolayı azalmaktadır.

Aynı şartlarda kabarcıklı kolonda 1 kWh başına 1,6-2,2 kg ozon transferi gerçekleşirken, jet loop reaktörde bu değer 3,0-3,5 kg O₃/kWh değerine kadar çıkmıştır. Literatürdeki diğer ozonlama sistemleri ile kıyaslama ozon gazı kütleleri başına elde edilen maksimum $k_L a$ değerleri kullanılarak yapılmış ve jet loop reaktörün 1,56 saat⁻¹/g ile emsalleri arasında oldukça iyi bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

2011, 66 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kütle transferi, ozon, ozonlama, jet loop reaktör

ABSTRACT

MS Thesis

INVESTIGATION OF THE MASS TRANSFER OF OZONE IN JET LOOP REACTOR

İbrahim CENGİZ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ergün YILDIZ

In the study investigated for the mass transfer of ozone in jet loop reactor, first the effects of the parameters such as temperature, generated ozone gas concentration, gas flow rate into the reactor, nozzle diameter and the rate of circulation on mass transfer were investigated. Later, the results of the experiments conducted in bubble column and jet loop reactor were compared with respect to the mass transfer of ozone under the same conditions.

In the study conducted for the effect of the temperature at pH=2,26, it was observed that the dissolved ozone concentration at increasing temperature values decreased, the values of $k_L a$ increased. The value of $k_L a$ that is $0,5 \text{ min}^{-1}$ at $15 \text{ }^\circ\text{C}$ rised with %50 increase to $0,75 \text{ min}^{-1}$ up to $30 \text{ }^\circ\text{C}$, and stayed constant up to $35 \text{ }^\circ\text{C}$. In the study conducted for the effect of the ozone gas concentration in the range of $3,6\text{-}17 \text{ g/m}^3$, the value of $k_L a$ did not change and was calculated approximately as $0,47 \text{ min}^{-1}$. For the effect of the gas flow rate into the jet loop reactor, the experiments were conducted in the range of $50\text{-}250 \text{ L/hr}$, and the increasing gas flow rate enhanced the value of $k_L a$ from $0,083$ to $0,42 \text{ min}^{-1}$ as 5 times. In the study conducted for the effect of the liquid circulation flowrate, the value of $k_L a$ increased approximately %43 when the flow rate changed from 40 to 80 L/min^{-1} . But, the power consumed per reactor volume reached to $2,7 \text{ kW/m}^3$ by increasing 8 times. The values of $k_L a$ decreased at the liquid circulation velocities applied to be greater approxiametly than $2,8 \text{ kW/m}^3$ due to the coalescence of the bubbles and decrease of the surface area.

Under the same conditions in bubble column, while $1,6\text{-}2,2 \text{ kg}$ ozone transfer was realized per 1 kWh , this value in jet loop reactor rised up to $3,0\text{-}3,5 \text{ kg O}_3/\text{kWh}$. The comparison with other ozonation systems in the literature was conducted via the maximum $k_L a$ values obtained per unit ozone gas mass, and it was concluded that the jet loop reactor performed well with the similar ones for a values of $1,56 \text{ h}^{-1}/\text{g}$.

2011, 66 pages

Keywords: Mass transfer, ozone, ozonatin, jet loop reactor

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında bilgi ve emeği ile bana yardımcı olan, beni yönlendiren ve tecrübeleri ile karşılaştığım zorlukları kolayca aşmamı sağlayan, çalışmamın gerçekleştirilebilmesi için gerekli olanakların sağlanmasında her türlü desteği veren, hoşgörülü bir çalışma ortamı sunan değerli hocam ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Ergün YILDIZ'a,

Laboratuar çalışmalarım esnasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve birikiminden yararlandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Handan UCUN'a,

Tübitak projesi boyunca birlikte çalıştığım, bilgi birikiminden faydalanma olanağı bulduğum değerli hocam Sayın Uzman Nejdet DEĞERMENÇİ'ye göstermiş olduğu sabır ve hoşgörüden dolayı, proje boyunca deneyleri birlikte yürüttüğüm değerli arkadaşım Sayın Melahat Semin BARLAK'a,

Çalışmalarım esnasında bir aile ortamında çalışma imkânı sağlayan Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi ve araştırma görevlilerine,

Ayrıca bu çalışmam sırasında ve tüm hayatım boyunca yanımda olan, bana güvenen, ilgi ve sevgilerini benden esirgemeyen çok değerli aileme,

Sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim CENGİZ

Aralık, 2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1. Ozonun Tanımı.....	4
2.2. Ozonun Üretilmesi	4
2.3. Ozonla Oksidasyon.....	5
2.4. Su ve Atıksu Arıtımında Ozonun Kullanımı	6
2.4.1. İçme Suyu Arıtımında Ozonlama.....	6
2.4.2. Atıksu Arıtımında Ozonlama	8
2.5. Ozonun Kütle Transferi ve Kütle Transferini etkileyen Faktörler	9
2.5.1. Ozonun Kütle Transferi.....	9
2.5.2. Kütle Transferini Etkileyen Faktörler	9
2.6. Yeni Tip Reaktörler.....	10
2.7. Jet Loop Reaktörler (JLR).....	13
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	16
3.1. Deneysel Sistem	16
3.2. Ozon Gazının Üretilmesi ve Sisteme Verilmesi.....	22
3.3. Kabarcıklı Kolon Reaktörde Deneylerinin Yapılışı	23
3.4. Çözünmüş Ozon Gazı Konsantrasyonunun Belirlenmesi	23
3.4.1. Kullanılan Reaktifler	24
3.4.2. Yöntem	25
3.5. Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi	26
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	28
4.1. Jet Loop Reaktörde Kuru Hava Kullanılarak Yapılan Denemeler.....	28

4.1.1. Reaktöre Gönderilen Ozon Gazı Konsantrasyonun Etkisi.....	28
4.1.2. Reaktöre beslenen gaz debisinin etkisi.....	31
4.1.3. Jet Loop Sirkülasyon Debinin Etkisi	38
4.1.4. Sıcaklığın Etkisi	44
4.2. Jet Loop Reaktörde Saf Oksijen Kullanılarak Üretilen Ozon Gazı ile Yapılan Kütle Transfer Denemeleri.....	46
4.2.1. Ozon Gaz Konsantrasyonun Etkisi.....	46
4.2.2. Ozon Gazı Besleme Debinin Etkisi	49
4.3. Kabarcıklı Kolonda Yapılan Kütle Transferi Denemeleri	55
4.3.1. Sıcaklığın Etkisi	55
4.4. jet Loop ve Kabarcıklı Reaktörlerde Ozonlama İşleminin Karşılaştırılması	57
5. SONUÇLAR.....	62
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	67

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Özgül Yüzey Alanı
C	Konsantrasyon
C _s	Doygunluk konsantrasyonu
E	Enerji
H	Henry Kanunu sabiti
k _L a	Kütle Transfer Katsayısı
k _d	Ozonun Kendi Kendine Bozunma Sabiti
Q _L	Sıvı debisi
T	Sıcaklık (°C)
ΔP	Basınç Farkı
ρ	Yoğunluk

KISALTMALAR

HKR	Hava Kaldırmalı Reaktör
JLR	Jet Loop Reaktör
KKR	Kabarcıklı Kolon Reaktör
THM	Trihalometan

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Hava ile karıştırılan reaktör tipleri:	10
Şekil 2.2. Jet loop reaktör tipleri	15
Şekil 3.1. Denemelerde kullanılan jet loop reaktör sisteminin akış şeması.....	17
Şekil 3.2. Denemelerde kullanılan kabarcıklı kolon reaktör sisteminin akış şeması.....	18
Şekil 3.3. JLR'ün şematik resmi ve boyutları.....	19
Şekil 3.4. Püskürtme başlığının şematik görünümü	20
Şekil 3.5. İyodimetrik yöntem ile çözünmüş ozon metrenin okuduğu değerlerin karşılaştırılması.....	26
Şekil 4.1. Farklı ozon gazı konsantrasyonları için reaktörde ölçülen çözünmüş ozon konsantrasyonlarının zamanla değişimi.....	29
Şekil 4.2. Farklı ozon gazı konsantrasyonları için reaktörde ölçülen çözünmüş oksijen değerlerinin zamanla değişimi	29
Şekil 4.3. Reaktöre gönderilen ozon gazı derişiminin zamanla değişimi	30
Şekil 4.4. Reaktöre gönderilen ozon gazı konsantrasyonu ile ozon ve oksijen için hesaplanan kütle transfer katsayıları ($k_{L,a O_3}$ - $k_{L,a O_2}$) ve çözünmüş ozon için elde edilen doygunluk değeri $C_{s(O_3)}$ değerlerinin değişimi.....	31
Şekil 4.5. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözünmüş ozon değerlerinin zamanla değişimi.....	32
Şekil 4.6. Farklı gaz besleme debilerinde reaktöre gönderilen ozon gazı derişiminin zamanla değişimi	32
Şekil 4.7. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözünmüş oksijen değerlerinin zamanla değişimi.....	33
Şekil 4.8. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözünmüş ozon değerlerinin zamanla değişimi.....	33
Şekil 4.9. Farklı gaz besleme debilerinde reaktöre gönderilen ozon gazı derişiminin zamanla değişimi.....	34
Şekil 4.11. Reaktöre gönderilen ozon gazı besleme debisi ile hesaplanan $k_{L,a}$ değerleri ve ortalama elde edilen ozon gazı konsantrasyonlarının değişimi.....	35

Şekil 4.12. Reaktöre gönderilen ozon gazı besleme debisi ile elde edilen kütlesele ozon gazı debilerinin değışimi	36
Şekil 4.13. Farklı gaz besleme debilerinde ozon ve oksijen için elde edilen kütle transfer değerlerinin karşılaştırılması.....	37
Şekil 4.14. Farklı gaz besleme debilerinde ozon ve oksijen için elde edilen kütle transfer değerleri'nin karşılaştırılması	37
Şekil 4.15. Reaktöre gönderilen gazın ozon gazı içerip içermemesinin çözünmüş oksijenin suya transferine etkisinin olmadığı gösterilmesi	38
Şekil 4.16. Farklı sıvı sirkülasyon hızlarında reaktördeki çözünmüş ozon konsantrasyonlarının değışimi	39
Şekil 4.17. Farklı sıvı sirkülasyon hızları ile k_{La} değerinin değışimi	40
Şekil 4.18. Farklı güç aktarımları ile k_{La} değerinin değışimi	42
Şekil 4.19. Farklı E/V değerleri ile k_{La} değerlerinin değışimi.....	43
Şekil 4.20. Farklı sıvı jeti hızları ile k_{La} değerinin değışimi	44
Şekil 4.21. pH=2.26	44
Şekil 4.22. pH=7.00	45
Şekil 4.23. Reaktör sıcaklığı ile k_{La} değerlerinin değışimi.....	45
Şekil 4.24. Farklı ozon gazı konsantrasyonları için reaktörde ölçülen çözünmüş ozon değerlerinin zamanla değışimi.....	47
Şekil 4.25. Farklı ozonizatör çalışma kapasitelerinde reaktöre gönderilen ozon gazı derişiminin zamanla değışimi	48
Şekil 4.26. Farklı ozonizatör çalışma kapasitelerinde reaktörde kalan çözünmüş ozonun hava ile sıyrılarak reaktörden uzaklaştırılması.....	49
Şekil 4.27. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözünmüş ozon değerlerinin zamanla değışimi	50
Şekil 4.28. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözünmüş oksijen değerlerinin zamanla değışimi	50
Şekil 4.29. Farklı gaz besleme debilerinde çözünmüş ozon ve oksijen için elde edilen kütle transfer değerlerinin karşılaştırılması	51
Şekil 4.31. Saf oksijen ile yapılan denemelerde gaz debisi ile kütlesele ozon gazı debisi ile reaktöre gönderilen ozon gaz konsantrasyonlarının değışimi	52

Şekil 4.32. Kuru hava ile yapılan denemelerde ozon ve oksijen için elde edilen kütle transfer değerlerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.33. pH=2.26	55
Şekil 4.34. pH=7.00	56
Şekil 4.35. Reaktör sıcaklığı ile k_{La} değerlerinin değişimi.....	56
Şekil 4.36. Kabarcıklı ve jet loop reaktörlerde aynı şartlarda çözünmüş ozon değerlerinin artışının karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.37. Kabarcıklı ve jet loop reaktörlerin oksijen transferi açısından karşılaştırılması	58
Şekil 4.38. Farklı kapasitelerde verilen ozon gazı konsantrasyonları ile kabarcıklı kolon reaktör içerisinde zamanla çözünmüş ozon konsantrasyonlarının değişimi-13,6 g/m ³ 'lük gaz konsantrasyonu ile yapılan jet loop reaktöre ait çözünmüş ozon konsantrasyon değişimi karşılaştırma için grafiğe ilave edilmiştir.....	59
Şekil 4.39. Kullanılan ozon jeneratörünün çalışma kapasitesi ile harcanan güç arasındaki ilişki	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Ozonlama ile inorganik bileşiklerin oksidasyonu.....	7
Çizelge 2.2 Tam ölçekli içme suyu arıtma tesislerinde mikrokirleticilerin giderme dereceleri	8
Çizelge 4.1. Kullanılan nozül çapları ile elde edilen nozül sıvı hızları ve 4.1 nolu eşitlik kullanılarak hesaplanan güç tüketimleri.....	42
Çizelge 4.2. Literatürdeki diğer bazı çalışmalarla bulunan sonuçların kıyaslanması.....	54
Çizelge 4.3 Farklı ozonizatör çalışma kapasitelerinde harcanan enerji başına sıfır çözülmüş ozon konsantrasyonunda suya aktarılabilen çözülmüş ozon miktarlarının karşılaştırılması	61

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki hızlı artış ve sanayileşmeye paralel olarak çevre kirliliği sorunları artmıştır. Çevre kirliliğine sebep olan kirleticiler hem miktar olarak artmış hem de daha kompleks hale gelmiştir. Çevre koruma açısından yeterli önemler alınmadığı ve uygun arıtım teknolojileri kullanılmadığı zaman çevre üzerinden olumsuz etkiler olmaktadır. Bu kirleticileri klasik yöntemlerle giderilmesi mümkün değildir. Bu yüzden son zamanlarda araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar var olan arıtma teknolojilerinin verimlerinin artırılması ya da yeni teknolojiler elde etmek için yapılan çalışmalardır. Ozonlama prosesleri bu araştırmalardan biridir.

Ozon içme suyu ve atıksu uygulamaları ilk kullanılmaya başladığından beri hem sayı olarak hem de çeşitlilik olarak büyük bir artış göstermiştir. Ozonlama prosesi içme suyu arıtımında, atıksu arıtımında ve endüstriyel atıksu arıtımında sürekli veya kesikli olarak işletilerek kullanılmaktadır. Genellikle ozonun kullanıldığı temel alanlardaki kullanım amaçları şunlardır;

- 1) Dezenfeksiyon
- 2) İnorganik bileşiklerin oksidaysonu
- 3) Organik bileşiklerin oksidaysonu
- 4) Tat, koku ve renk giderimi
- 5) Partikül madde giderimidir

Ozon tek başına kullanılabilirdiği gibi UV, Fe yada H₂O₂ ile birlikte kullanılarak ileri oksidayson proseslerinde de yer alır. Ozonlama prosesleri için bir çok araştırma yapılmış ve bir çok kontaktör incelenmiştir. Bu proses için dolgulu kolon, plaka kolon, püskürtme kulesi, karıştırılmalı borular, boru reaktörler ve kabarcıklı kolonlar incelenmiştir (Gottschalk *et al.* 2000; Mitani *et al.* 2005; Panda and Mathews 2008).

Ozon gazı, üretimi pahalı ve çabuk bozulan kararsız bir gazdır. Bu nedenle ozonlama prosesinde ozon gazı üretildiği gibi kullanılır ve bu kullanımda ozonu etkili bir biçimde kullanmak önemlidir. Ozonlama esnasında üretilen ozon gazı, gaz fazdan sıvı faza transfer edilir. Bu transfer esnasında ozon gazı sıvı içerisinde disperse hale getirilir ve bu durum kütle transferini artırır. Ozonun kütle transfer hızı sıvı fazda oluşan kabarcıkların boyutuna ve buna bağlı olarak oluşan gaz sıvı arayüzey alanının büyüklüğüne bağlıdır.

Kabarcıklı kolon gibi gaz transferi için kullanılan bazı kontaktörlerde yetersiz kütle transfer yetenekleri nedeniyle ilave olarak türbün tipi karıştırıcılarla donatılabilirler. Tüm bunlar zaten pahalı bir gaz olan ozonun maliyetlerine yansımaktadır. Bu nedenle ozon gazının daha etkili bir biçimde suya transferinde kullanılacak çeşitli tip reaktörlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Jet loop reaktörler (JLR) yüksek kütle transfer yetenekleri ile bilinmektedirler. Yeni nesil çevrimli (loop) reaktörler, mimarilerinden dolayı, sisteme verilen gazları daha uzun süre reaktör içerisinde tutabilmektedirler. Yüksek gaz-sıvı ara yüzey oluşturmaları dolayısıyla da kütle transferini artırmaktadırlar. Bu nedenle bu çalışmada ozonlama proseslerinde kullanımına yönelik detaylı araştırmaların yapılmadığı JLR kullanılarak ozon gazının kütle transfer özelliklerinin belirlenmesine yönelik araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Ozonun kütle transferi uzun zamandan beri çalışılan bir konudur. Bunun için çok çeşitli reaktörlerle çalışılmıştır. Ozonun kütle transferi için yapılan bazı çalışmaların özeti aşağıda verilmiştir;

Ozonun mikro gözenekli difüzör reaktör sistem kullanılarak yapılan bir çalışmada; $K_L a$ [s^{-1}] ile sıvı (L) ve gaz (G) ($m^3 s^{-1}$) debisi arasında kolerasyon olduğu ve $K_L a = AL^\alpha G^\beta$, $A=3,96 \times 10^8 [s^{-1}]$, $\alpha=1,53$, $\beta=0,40$ tespit edilmiştir. Reaktör temel olarak yüksek G ve L değerlerinde tapa akışlı davranış sergilediği belirtmiştir. Bu sistem yüksek ozon kütle transfer oranları elde ettiğini bildirmiştir (Mitani *et al.* 2005).

Panda and Mathews (2008) yapmış oldukları çalışmada ozon için K_La 0,77-1,14 dak.^{-1} değer aralığında bulmuşlardır.

Statik mikser ve bir enjektör ile donatılmış Karman kontaktöründe çeşitli gaz ve sıvı debilerinde ozon gazının kütle transfer özellikleri incelenmiş ve gaz ve sıvı debilerinin artmasına bağlı olarak k_La değerlerinde arttığı gözlenmiştir. k_La 0,5-1,5 dak.^{-1} olarak belirlenmiştir (Gao *et al.* 2004)

Tiwari and Bose (2007) İnce uzun counter current kabarcıklı kolon reaktörde yapmış oldukları çalışmada k_La 0,09-2,1 dak.^{-1} değer aralığında elde etmişlerdir.

Rhim and Yoon (2005) yaptıkları çalışmalarda hidrolik kalış sürelerine bağlı olarak k_La değerlerini 0,0441-0,0749 dak.^{-1} olarak tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada da ozonun suya transferinde son yıllarda sıkça çalışılan jet loop reaktörler kullanılmış ve aynı şartlarda (hacim, sıcaklık, pH, ozon gaz debi ve konsantrasyonu vb.) kabarcıklı kolondaki kütle transferi ile karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Ozonun Tanımı

Ozon, üç adet oksijen atomunun birbirlerine açılı ve simetrik bir şekilde bağlanması sonucunda oluşan son derece yüksek enerjili, oksijenin allotropik bir şekli olup özel bir oksidasyon maddesidir. Oda şartlarında açık mavi renkli ve keskin kokuya sahip kararsız bir gazdır. İnsan sağlığı için düşük konsantrasyonlarda bile zararlı olabilmektedir. Atmosferde 0,01-0,05 ppm gibi düşük konsantrasyonlarda bulunabilir. Atmosfer basıncında -111°C 'de kaynar ve suda kısmen çözünebilir. $0-30^{\circ}\text{C}$ sıcaklık derecelerinde sudaki ozonun çözünürlüğü Henry sabitine bağlıdır ($1940-5980 \text{ atm/mol}$). Sulu çözeltilerde kararlı değildir ve damıtık suda 20°C 'de yarılanma ömrü 165 dakikadır. Eğer suda oksidasyona maruz kalacak maddeler varsa yarılanma süresi dahada düşmektedir. Ozon kuru havada daha karardır ve atmosfer çevresinde yarılanma ömrü 13 saat olduğu EPA (Environmental Protection Agency) tarafından belirlenmiştir.

2.2. Ozonun Üretilmesi

Ozon elektrik deşarşıyla elektroliz, fotokimyasal reaksiyon ve radyokimyasal reaksiyonla üretilmektedir. Doğada genellikle ultraviyole ışınla ve şimşek çakmalarıyla oluşur. Elektriksel deşarj metodu ozonun en ucuz imal şeklidir (Tchobanoglous 2003).

Ozon, elektriksel olarak oksijeni tahrik ederek elde edilen kararsız bir gazdır. Bu nedenle kullanılacağı zaman imal edilir. Bu işlem, bir elektrik alanı üretmek için yüksek bir voltaj uygulayarak yapılır. Elektrik alanı, serbest elektronların kinetik enerjisini artırır ve onların çarpışmalarını sağlayarak oksijen tahrik edilir ve çözünmesi sağlanır. Parçalanmış oksijen atomları daha sonra ozon oluşturmak üzere moleküler oksijenle birleşir.



Fiziksel anlamda ozon üreten ortam veya plazma, elektron sıcaklığı ve elektron konsantrasyonu ile karakterize edilir. Ozon üreten plazmalar genellikle elektrik korona deşarjı ile oluşturulur ve 1-14 ev arasında ortalama bir enerjiye sahip elektronlar içerirler. Böyle plazmalara soğuk plazmalar denir. Ozon, birbirleri arasında yüksek alternatif akım uygulanan iki elektrot arasında hava veya oksijen geçirilerek üretilir. Düz bir deşarj sağlamak için, elektronların biri (veya her ikisi) bir dielektrik tablası ile örtülür. Elektronlar arasında uygulanan potansiyel fark; kullanılan dielektriğin yapısına ve kalınlığına, deşarj boşluğu genişliğine ve işletme basıncına bağlıdır. Bu fark genelde, 6000-18000 V arasındadır. Verilen bir potansiyel farklılık için, ozon jeneratör verimliliği, geometrik şekle, sıcaklığa ve soğuk plazma basıncına bağlıdır. Korona deşarjı metodu en yaygın kullanılan metottur (Langlais 1991; Tchobanoglous 2003).

2.3. Ozonla Oksidasyon

Ozon gazı flor gazından sonra ikinci güçlü oksitleyicidir. Bu özelliğinden dolayı içme suyu ve atıksu arıtımında önemli bir yer tutmaktadır. Ozon ilk kez Fransa'da 1900'lü yılların başında su dezenfeksiyonu için kullanılmıştır. Avrupada pek çok tesis ozon kullanımına ön ayak olmuştur. Klorlama neticesinde ortaya çıkan kanserojen yan ürünler sebebiyle, klorla dezenfeksiyon halk sağlığı açısından potansiyel bir tehlike olduğundan dezenfeksiyon amaçlı olarak ozon kullanımına olan ilgi son yıllarda artmıştır. Belirli süre sonunda hiçbir atık bırakmadan ana hammaddesi olan oksijene dönüşen ozon gazı, bu özelliğinden dolayı öncelikle tercih edilir. Ozon; su arıtımında dezenfeksiyon, suyun genel özelliklerinin iyileştirilmesi, demir ve mangan giderilmesi, kalıcı kirleticilerin ileri oksidasyonu ve flokleştirmayı kolaylaştıran bir reaktan olarak kullanıldığı gibi, çeşitli endüstriyel proseslerde de etkili bir yöntem olarak

kullanılmaktadır (Rice 1980; Langlais 1991; Traversay 2001; Beltran 2001; Gunten 2003).

Ozonun oksitleme yeteneği aşağıdaki yıkım reaksiyonlarıyla açıklanabilir.



Oluşan serbest radikaller olan H_2O ve HO oksitleme gücü oldukça yüksek ve muhtemelen dezenfeksiyonda aktif olan yapılardır.

2.4. Su ve Atıksu Arıtımında Ozonun Kullanımı

2.4.1. İçme Suyu Arıtımında Ozonlama

İçme suyu kaynakları doğal yer altı suları, yapay olarak çıkarılan yeraltı suları veya nehirden süzölmüş yüzey suyu, göl ve baraj rezervuarı ve nehir sularına dayanır. Bir çok ozon uygulaması su arıtma tesislerinde kirli yüzey suları temiz hale getirmek, demir ve magnezyum iyonlarını gidermek ve stabilizasyon için kullanılır (Beltran 2001; Gottschalk *et al.* 2000; Rice 1980).

Ozonun içme suyunda kullanımına olan ilginin artması klor ve klordioksinin parazit organizmaların giderimindeki başarısızlık ve dezenfeksiyon işlemindeki yan ürünü olan halojenlerin (THMs) oluşumudur. Ozonlamaya gelen suyun küçük partiköl maddelerden arındırılmış olması gerekir. Çünkü küçük partiköl maddeler hem parazitler için bariyer etkisi yaparak giderim verimini düşürür hem de çıkış suyunda biyolojik parçalanabilir

organik maderler oluşur. Böylece ozonun klorun yerine tercih sebebimiz ortadan kalkmış olur.

İçme sularda ozonlamanın asıl amacı dezenfeksiyon olmasına rağmen inorganik bileşiklerin oksidaysonu ve organik bileşiklerin oksidasyonu (doğal organik maddeler ve mikrokirleticiler) ikincil görevidir. Çizelge 2.1’de içme ve atıksularda ozonlamanın amacı, oluşan ürünler ve oksidayson hızlarına genel bir bakış verilmektedir (Gottschalk *et al.* 2000).

Çizelge 2.1. Ozonlama ile inorganik bileşiklerin oksidaysonu (Gottschalk *et al.* 2000)

Bileşik	Ürünler	Oksidasyon hızı	Yorum
Fe ²⁺	Fe(OH) ₃	Hızlı	İçecek endüstrisinde kullanılır, katılar için filtrasyon gereklidir.
Mn ²⁺	Mno(OH) ₃	Hızlı	İçecek endüstrisinde kullanılır, katılar için filtrasyon gereklidir.
Mn ²⁺	MnO ₄ ⁻	Hızlı	Yüksek kalıntı ozon konsantrasyonu ve filtrasyon gerekli
NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Hızlı	Nitrit toksik bir bileşiktir.
NH ₄ /NH ₃	NO ₃ ⁻	pH<9 yavaş pH>9 orta	
CN ⁻	CO ₂ , NO ₃ ⁻	Hızlı	Atıksu uygulamalarında
H ₂ S/S ²⁻	SO ₄ ⁻	Hızlı	
As-III	As-V	Hızlı	Ön oksidasyon için As çıkarılır
Cl ⁻	HOCl	Yaklaşık sıfır	
Br ⁻	HOBr/OBr ⁻	Orta	Organik maddelerin bromla reaksiyonunda muhtemel yan ürün olarak toksik bromat oluşur.
Br ⁻	BrO ₃		
I ⁻	HOI/OI ⁻ , IO ₃ ⁻	Hızlı	
HOCl/OCl ⁻	ClO ₃ ⁻	Yavaş	Serbest klor kaybı
Kloraminler		Orta	Klorlu bileşik kaybı
Bromaminler			
ClO ₂	ClO ₃ ⁻	Hızlı	Serbest klordioksit kaybı
Cl ₂ ⁻	ClO ₃ ⁻	Hızlı	
H ₂ O ₂	OH ⁰	Orta	Ozon hidrojen peroksitin temeli

Aşağıdaki listede organik grupların tam ölçekli içme suyu tesislerinde alınması beklenen niteliksel dereceleri sunulmaktadır.

Çizelge 2.2. Tam ölçekli içme suyu arıtma tesislerinde mikrokirleticilerin giderme dereceleri(Gottschalk *et al.* 2000)

Maddeler	Giderim derecesi, % aralığı
Tat ve koku	20-90
Alkanlar	<10
Alkanlar ve klorlanmış alkanlar	10-100
Aromatikler ve klorlanmış aromatikler	30-100
Aldehitler, alkoller, carbonik asitler	Düşük
Azot içeren alifatikler ve aromatikler	0-50
Petisitler	0-80
Poliaromatik hidrokarbonlar	Yüksek- 100 kadar

2.4.2. Atıksu Arıtımında Ozonlama

Tam ölçekli atık su ozon arıtımının özellikleri kabaca ozon üretim kapasitesi saatte 0,5 kg'dan fazla olan olarak tarif edilebilir. Tüm endüstri dallarında birçok uygulamaları bulunabilir ve hem hemen bütün atık sular arıtılabilir. Atık su ozonlama kullanılan işletme şartları endüstrinin türüne ve atık suyun cinsine bağlıdır.

Birçok tam ölçekli uygulamalarda enerji ve oksijen için değişken maliyetler ekonomik olarak belirleyicidir. Ozon ve maliyet tasarrufu ozonlama-biyolojik parçalanma kombinasyonu ile elde edilmiştir. Bugün birçok durumda atık suyun ozonlanması çok aşamalı olarak en azından biyolojik arıtmadan önce ve aynı zamanda sıklıkla sonrasında kimyasal oksidasyon basamağı olarak kullanılır (O₃-Bio-O₃ sistemler).

Tam ölçekli bir atık su arıtma sistemleri içinde en sık kullanılan kontaktörler difüzörler veya venturi enjektörler ile donatılmış kabarcık kolon reaktörlerdir, çoğunlukla sürekli akışlı moda çalıştırılan reaktörlerdir. Bir çok tam ölçekli ozon reaktörleri yüksek ozon

kütle transfer hızları elde etmek için yüksek basınçlarda işletilir (2-6 bar), buda proses verimini artırır (Gottschalk *et al.* 2000).

2.5. Ozonun Kütle Transferi ve Kütle Transferini etkileyen Faktörler

2.5.1. Ozonun Kütle Transferi

Ozon standart basınç altında ve sıcaklıkta elektrik akımından geçirilen hava ile ya da daha yüksek konsantrasyonda ozon gazı elde edebilmek için saf oksijen geçirilerek üretilir. Daha sonra ozon içeren gaz su ve atık sularla temas ettirilerek ozonlama işlemi yapılır. Ozon gaz fazdan sıvı transferi sırasında önce iki faz arasından geçmek zorundadır. Ozonun bir fazdan diğer faza geçmesi difüzyon ve konvektif kütle taşınımıdır. Sıvı fazdaki kütle taşınımı olayını açıklamak için birçok teori ve model öne sürülmüştür. En çok kullanılanlar film, penetrasyon ve yüzey yenileme teorileridir. (Beltran 2004; Gottschalk *et al.* 2000; Rice and Netzer 1982).

2.5.2. Kütle Transferini Etkileyen Faktörler

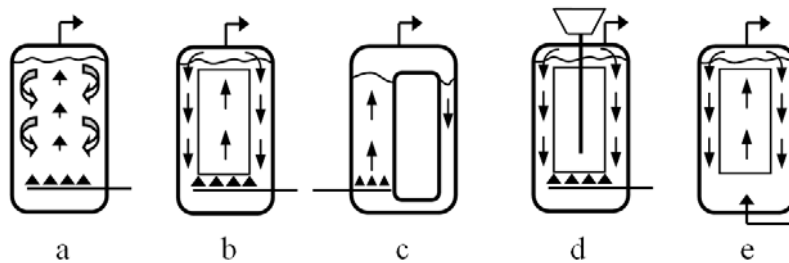
Kütle transfer hızını birçok parametre etkilemektedir. Bunları hidrodinamik ve kimyasal parametreler başlıklar altında toplayabiliriz. Hidrodinamik davranış moleküllerin hızları ile alakalıdır. Türbülans akış fazlar arasındaki teması artırır ve bundan dolayı yüksek kütle taşınım hızı elde edilir. Bu genellikle kütle transfer eşitliklerinde çözünmüş birim hacim başına düşen iki faz arasındaki ara yüzey olarak tanımlanır. Örneğin bir sıvı bir kolon yüzeyinden yavaş yavaş yükselen kabarcıkların yüzey alanı küçüktür ve bu yüzden genellikle kütle transfer hızlarında düşüktür. Eğer şiddetli karıştırma eklenirse kabarcıklar bölünür ve tamamen karışır, hem yüzey alanı hem de temas süresi artmış olur. Bu şartlar altında kütle transfer hızı bir hayli artacaktır (Gottschalk *et al.* 2000; Rice and Netzer 1982).

Ozonun kararsız yapısından dolayı ozon sistemleri için fiziko-kimyasal etkenler dikkate alınmalıdır. Ozonun sıvı fazda bozunmasından dolayı sürekli ozon talebi yaratır. Bu nedenle gerçek denge ya da çözünürlük elde edilmeyebilir.

Diğer fiziko-kimyasal etkenler sistemin sıcaklığı, basıncı ve kimyasal kompozisyonunu içerir. Basınç ile sıcaklık hem yayınımlı hemde çözünürlüğü etkiler. Genel olarak, gazların sıvılardaki çözünürlüğü basınç ve sıcaklık düştükçe artar (Gottschalk *et al.* 2000; Rice and Netzer 1982).

2.6. Yeni Tip Reaktörler

Kütle transferi, proseslerin işletilmesinde aktiviteyi, proses verimini ve enerji maliyetini etkileyen en önemli hidrodinamik parametredir. Evsel ve endüstriyel atıksu arıtımında uzun yıllardan beri kullanılmakta olan klasik arıtma sistemleri, artık istenilen miktarda ve verimde kütle transferine olanak sağlayamamaktadır. Son yıllarda geliştirilen yeni ve modern reaktörler daha etkin ve düşük maliyette atıksu arıtımı sağlamaktadır. Bu reaktörlerin göze çarpanları “hava kaldırmalı” (air-lift) ve kompakt reaktörler olarak bilinen “jet loop” reaktörlerdir. Bu reaktörlerin “kabarık” (bubble) kolonlar ile başlayan gelişimleri; gaz sirkülasyon reaktörleri, hava kaldırmalı ve aşağı veya yukarı akışlı jet loop reaktörler ile devam etmektedir. Bu tip reaktörlerin şematik gösterimi Şekil 2.1’de verilmektedir (Sajc 2000).



Şekil 2.1. Hava ile karıştırılan reaktör tipleri:

a. Kabarcık kolon

- b. Merkezlenmiş emme tüplü iç çevrimli hava kaldırmalı reaktör
- c. Dıştan çevrimli hava kaldırmalı reaktör
- d. Pervaneli loop reaktör
- e. Jet loop reaktör

Şekil 2.1.a'da gösterilen kabarcık kolonlar, günümüzde hali hazırda kullanılan ince kabarcıklı havalandırma sistemleri gibi, reaktörün altından hava verilmek suretiyle, hem oksijen transferinin hem de karışımın sağlandığı reaktörlerdir. Kabarcık kolon reaktörler basit inşaları ve işletimleri ile endüstride geniş ölçüde kullanılmakta olup hidrodinamik özellikleri nedeniyle dizaynları oldukça zordur. Önemli uygulamaları oksidasyon, hidrojenasyon, halojenasyon, ozonlama, karboksilasyon vb. fermantasyon ve atıksu arıtımını içermektedir (Sajc 2000; Dhotre 2004).

Yeni nesil reaktörlerin birincisi olan hava kaldırmalı looplü reaktörlerde (HKR) karışımın sağlanması ve katıların süspanse hale getirilmesi yalnızca havalandırma ile sağlanır. HKR'ler oldukça büyük boyutlarda inşa edildiklerinde bile yüksek oksijen ihtiyacını karşılayabilecek kapasiteye sahiptirler. Bu nedenle yüksek kirlilik içeren kentsel ve endüstriyel atıksu arıtımında ve biyoteknoloji endüstrisinde oldukça fazla dizayn avantajlarına sahiptirler. HKR'ler havanın sisteme alttan verildiği ve yukarı yönde akışın olduğu bir yükseltici (riser) ve hava olmayan bölgedeki statik basınçtan dolayı aşağı yönde sıvı akışının meydana geldiği bir aşağı çevirici (downcomer) bölgeden oluşmaktadır. Aşağı çevirici bir perde yapısı olabileceği gibi, Şekil 2.5.b ve c'de gösterildiği gibi iç çevrim ve dış çevrim oluşturacak şekilde de inşa edilmektedir. Bu reaktörlerde yükseltici ve aşağı çevirici bölgeler arasında meydana gelen yoğunluk farkından dolayı sürekli bir sirkülasyon meydana gelmektedir. Ancak asıl sürücü kuvvet sisteme gönderilen gaz debisidir (Couvert 2004; Jin 2006). HKR'lerde kesme kuvveti düşük olduğundan biyofilm sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Quan 2004; Kermanshahi 2005).

Hava kaldırmalı reaktörler, kabarcık kolonların bir sonraki adımındır. Bu reaktörlerde karışımın sağlanması ve katıların süspanse hale getirilmesi yalnızca havalandırma ile

sağlanır. Hava kaldırmalı reaktörler oldukça büyük boyutlarda inşa edildiklerinde bile yüksek oksijen ihtiyacını karşılayabilecek kapasiteye sahiptirler. Bu nedenle yüksek kirlilik içeren kentsel ve endüstriyel atıksu arıtımında ve biyoteknoloji endüstrisinde oldukça fazla dizayn avantajlarına sahiptirler (Velan 1992)

Yeni tip reaktörlerin ikinci versiyonunu yüksek performanslı jet loop reaktörler (JLR) oluşturmaktadır. Bu reaktörlerin hava kaldırmalı reaktörlerden en önemli farkı, sisteme verilen enerjinin sıvının kinetik enerjisinden sağlanmasıdır.

Bu reaktörler iyi tanımlanmış akım rejimleri, daha iyi dispersiyon etkileri, nispeten düşük güç tüketimleri ve yüksek kütle transfer performansları nedeniyle uzun yıllardan beri kimya ve ilgili endüstrilerde geniş kullanım alanı bulmuştur. Kimya sanayisinde son yıllarda kullanılan “jet loop reaktörler” (JLR) (Bakopoulos 2006) ve yüksek gaz hızlarının temin edilerek sistem verimliliğinin arttırıldığı “gaz kaldırmalı reaktörler”, klasik karıştırmalı reaktörlerle karşılaştırıldığında büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu reaktörler, mekanik karıştırıcı kullanılmadan, büyük spesifik ara yüzey alanları ve yüksek kütle ve ısı transferi sağlayabilmektedirler (Ghirardini 1992; Fadavi and Chisti 2005). Bu avantajları sağlamaları nedeniyle atıksu arıtımında kullanılmaya başlanmış ve geliştirilmişlerdir.

Fadavi *et al.* (2005), son yıllarda kullanımı oldukça artan loop reaktörlerin kütle transfer özellikleri üzerine çalışmışlardır. Loop reaktörlerin sahip olduğu güçlü sirkülasyon özelliği ile yüksek kütle transfer katsayısına sahip olduğu ve loop reaktörlerin bu özellikleri ile hem homojen bir karışım sağlandığı, hem de diğer reaktörlere göre daha küçük kabarcıklar elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu özellikleri ile loop reaktörlerin diğer hava üfleli reaktörlere göre daha yüksek performans sergilediklerini belirtmişlerdir.

Olvier *et al.* (2007), yapılan çalışmada kabarcıklı kolon reaktörler ile yeni nesil püskürtücü başlıklara sahip reaktörlerin kıyaslaması yapılmıştır. Gaz-sıvı transfer mekanizmalarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Yapılan deneyler sonucu püskürtücü

başlıkların hacimsel kütle transfer katsayılarının kabarcıklı kolon reaktörlerin hacimsel kütle transfer katsayısından 5 kat daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Atık su arıtımında mekanik karıştırıcılı reaktörlerde yaklaşık 1000 m³'den daha fazla suyun karıştırılması zordur. Mekanik karıştırıcılı reaktörlerin kullanımı karıştırma için gerekli mekanik aksamın zamanla reaktör içeriği ile etkilenmesi, yüksek enerji tüketimleri ve modern reaktörlere göre daha az performansları nedeniyle giderek azalmaktadır. Bu nedenle, atık suların arıtılmasında kullanılan reaktörlerde, karıştırma ve oksijen transferi işlemi sisteme alttan hava verilerek yapılmaktadır (Schugerl 1991; Tchobanoglous *et al.* 2003).

2.7. Jet Loop Reaktörler (JLR)

Son yıllarda özellikle fermantasyon, biyoteknoloji ve atıksu arıtma sistemlerinde JLR'ler üzerindeki ilgi oldukça artmıştır. JLR'lerde oluşturulan jet akışın hidrodinamik gücü ile oldukça yüksek derecede sıvı sirkülasyonu ve gaz dispersiyonu sağlanmaktadır. Atık su arıtımında bu jenerasyonun, iki akışlı bir püskürtme başlığının (nozzle) tabana veya reaktörün üstüne yerleştirildiği, hava kaldırmalı reaktörlerde olduğu gibi perdeli veya emme tüplü çok çeşitli dizaynları kullanılmaktadır. Şekil 2.2'da görüldüğü gibi jet loop reaktörlerin kare veya dairesel yapıları yanında su çıkışının alttan veya üstten olduğu farklı modifikasyonları mevcuttur. Ancak en yaygın olanı dairesel kesitli, emme tüplü, püskürtme başlığının reaktörün üstüne yerleştirildiği ve çıkışın yine üstten yapıldığı tipleridir (ÇAYDAG-107Y298, 2010).

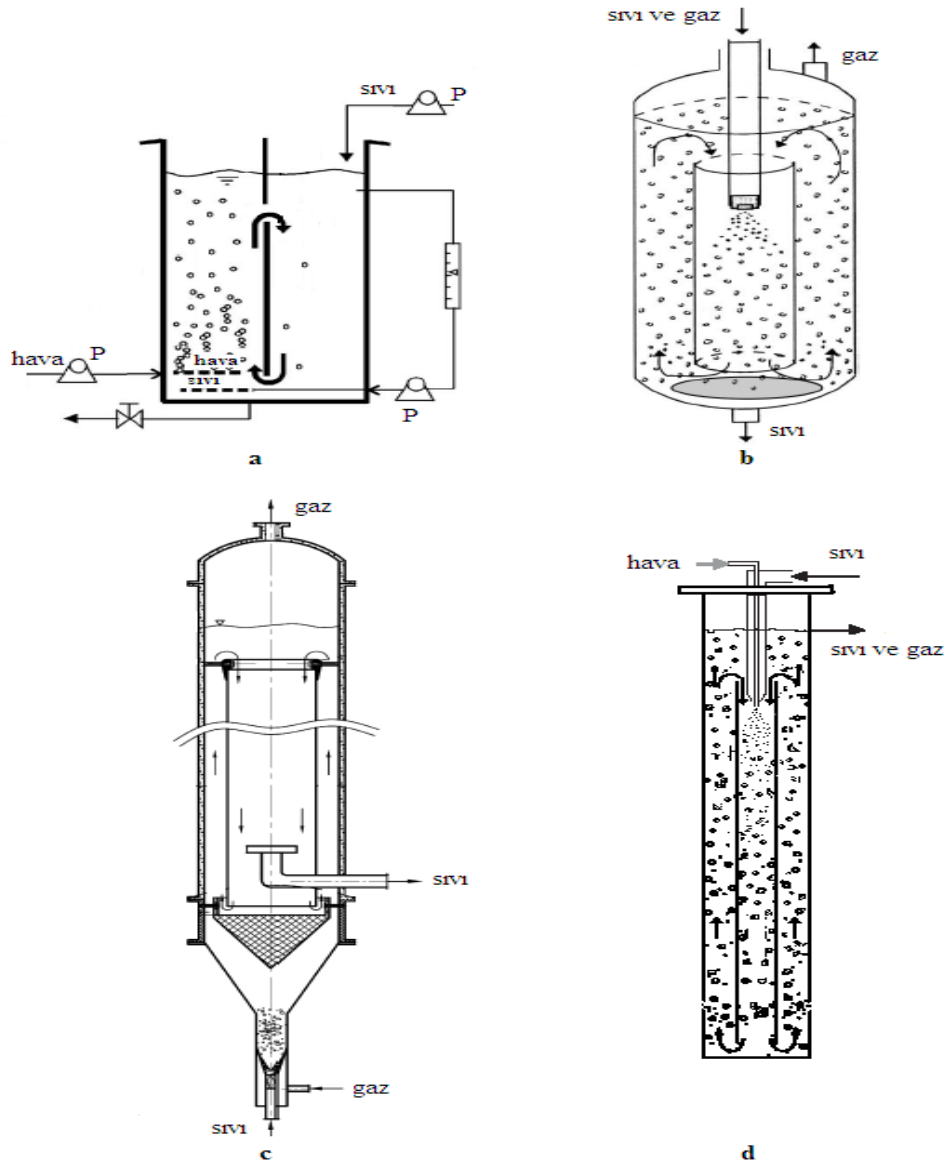
Püskürtme başlığının reaktör tabanına yerleştirildiği ve sıvı çıkışının reaktörün üstünden yapıldığı modifikasyonlar, atıksu arıtımında püskürtme başlığının tıkanması ihtimali ve oksijenin yeteri kadar sistemde kalamadan üst çıkıştan reaktörü terk etmesi gibi dezavantajlara sahiptir. Püskürtme başlığının reaktörün üstüne yerleştirildiği modifikasyonlar jet loop reaktörün geliştirilmiş versiyonudur. Püskürtme başlığının reaktörün üstünde, emme tüpünün içerisine yerleştirilmesi ile sadece püskürtme başlığının tıkanması önlenmekle kalmayıp aynı zamanda gaz kabarcıkları, suyun

kaldırma kuvvetinin aksi yönde hareket etmeye zorlandığı için kabarcıkların sistemde kalış süreleri de arttırılmış olmaktadır.

Bununla beraber su çıkışının tabandan yapıldığı reaktör tiplerinde, suyun sadece bir kısmı sirkülasyona girmekte ve önemli bir kısmı çıkışa yönelerek sirkülasyona girmeden reaktörü terk etmektedir. Bu nedenle sıvı fazın reaktör içerisinde kalış süresi azalmaktadır. Çoğu çalışmalarda bu çıkışın üstten yapılmasının $k_L a$ değerini iyileştirdiği gösterilmiştir (ÇAYDAG-107Y298, 2010).

Tüm bu değişimlere göre bir jet loop reaktör (JLR), püskürtme başlığının reaktörün üstüne emme tüpü içerisine doğru yerleştirildiği birbirine merkezlenmiş iki adet silindirik yapıdan oluşmaktadır. Bir sıvı sirkülasyon pompası tarafından reaktörün en üstüne gönderilen sıvı ve ayrı bir hattan gelen hava, bir jet meme içerisinden emme tüpünün içine püskürtülmektedir. Emme tüpünü boydan boya geçen hava ve sıvı karışımı reaktörün dibine ulaştığında iki silindirin arasından tekrar yükselir. Kesitteki değişimden dolayı sıvı hızı değişimi ile reaktörün üst kısmına gelen sıvı ve gaz kabarcıklarının bir kısmı, püskürtme başlığından çıkan sıvının sürüklenme kuvvetlerinden doğan hareket nedeniyle emme tüpüne tekrar girer. Geri kalan kısım ise reaktörün üst tarafındaki çıkıştan sistemi terk eder. Böylece su hava karışımının reaktör içerisindeki kalış süresi ve buna bağlı olarak da $k_L a$ artırılmış olur (ÇAYDAG - 107Y298, 2010).

JLR'ler klasik reaktörlerle karşılaştırıldıklarında gerek performans gerek verim açısından oldukça fazla avantajlara sahiptirler. Bu avantajlar; basit inşaat, düşük yatırım ve işletme maliyetleri, aynı enerji girdisiyle klasik reaktörlere göre daha fazla sirkülasyon, çok iyi seviyede gaz dispersiyonu, klasik karıştırılmalı reaktörlere göre yüksek ısı ve kütle transferi, oldukça homojen konsantrasyon ve ısı profilinin sağlanabilmesi, reaktör içerisinde hareketli hiçbir parçanın bulunmaması ve pilot tesis ölçekten endüstriyel ölçeğe rahat geçiş olarak sıralanabilmektedir (ÇAYDAG-107Y298, 2010).



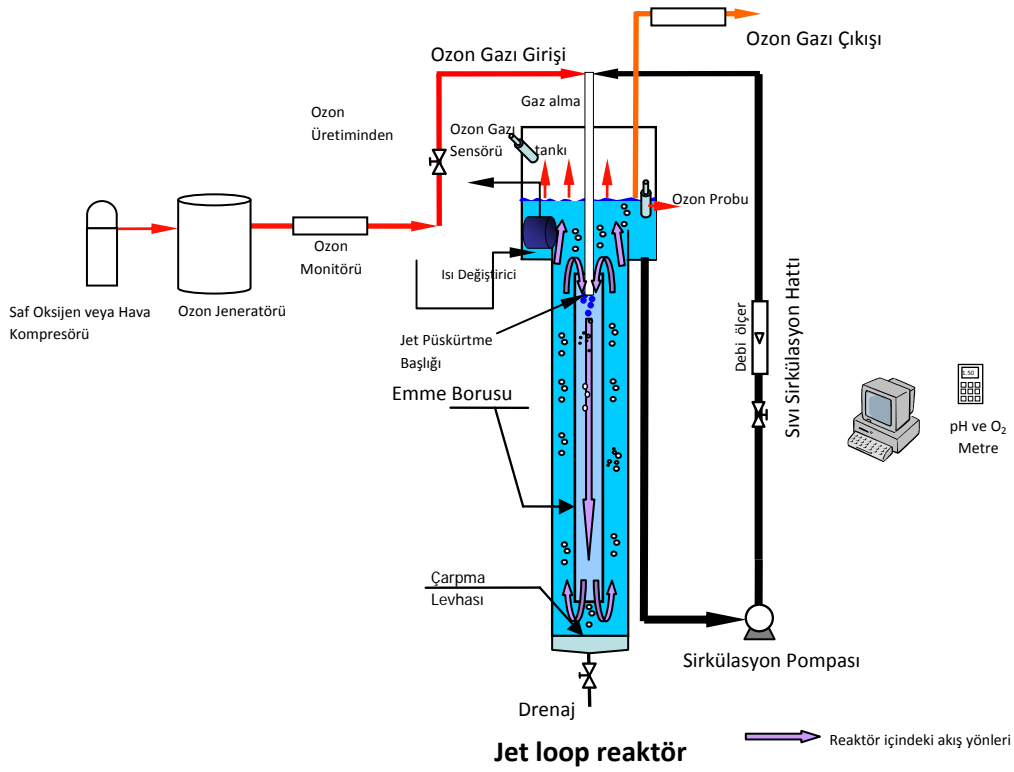
Şekil 2.2. Jet loop reaktör tipleri

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneysel Sistem

Yapılan deneyler paslanmaz çelik ve teflon malzemeden özel olarak imal edilen tam otomatik kontrollü bir jet loop reaktörde gerçekleştirilmiştir. Reaktör içerisini görebilmek için sisteme 5 bar basınca dayanıklı gözetleme camı konulmuştur. Proje için imal edilen reaktör hem JLR hemde kabarcıklı kolon reaktör (KKR) kullanılarak yapılan ozonlama deneyleri için uygun bir biçimde projelendirilmiştir.

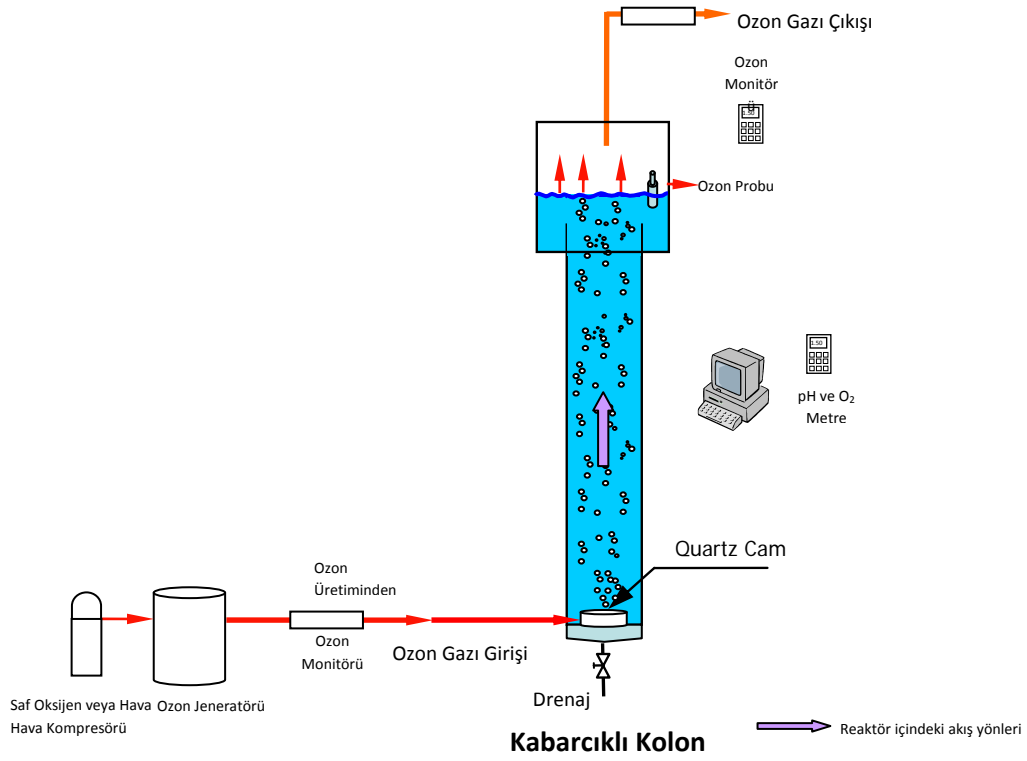
JLR için gereken denemeler tamamlandığında, reaktörün ortasındaki emme tüpü çıkartılmış ve JLR'nin tabanına bir difüzör yerleştirilerek kabarcıklı kolon reaktör olarak kullanılmıştır. Böylece imal edilen tek bir reaktörde her iki tür reaktör için gereken denemeler gerçekleştirilmiş ve iki reaktör için kütle transfer özellikleri mukayese edilmiştir. Her iki tip reaktör sistemi için genel akış şemaları Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Denemelerde kullanılan jet loop reaktör sisteminin akış şeması

Paslanmaz çelik reaktörün içindeki emme tüpü etrafındaki çevrimin görüntülenebilmesi için püskürtme başlığının (Jet nozzle) ve alttaki çarpma levhasının olduğu bölgeler 360 derece camdan imal edilmiştir. Gözetleme camı kullanılarak yapılan bu bölgelerdeki sızdırmazlık teflon malzemeden yapılmış contalarla sağlanmıştır. Bu sayede reaktörün içindeki emme tüpü etrafında bir sıvı sirkülasyon pompası ile gönderilen sıvının çevrim yapıp yapmadığı anlaşılabilmiştir. Reaktörün içindeki emme tüpü 4 cm çapında camdan imal edilmiştir.

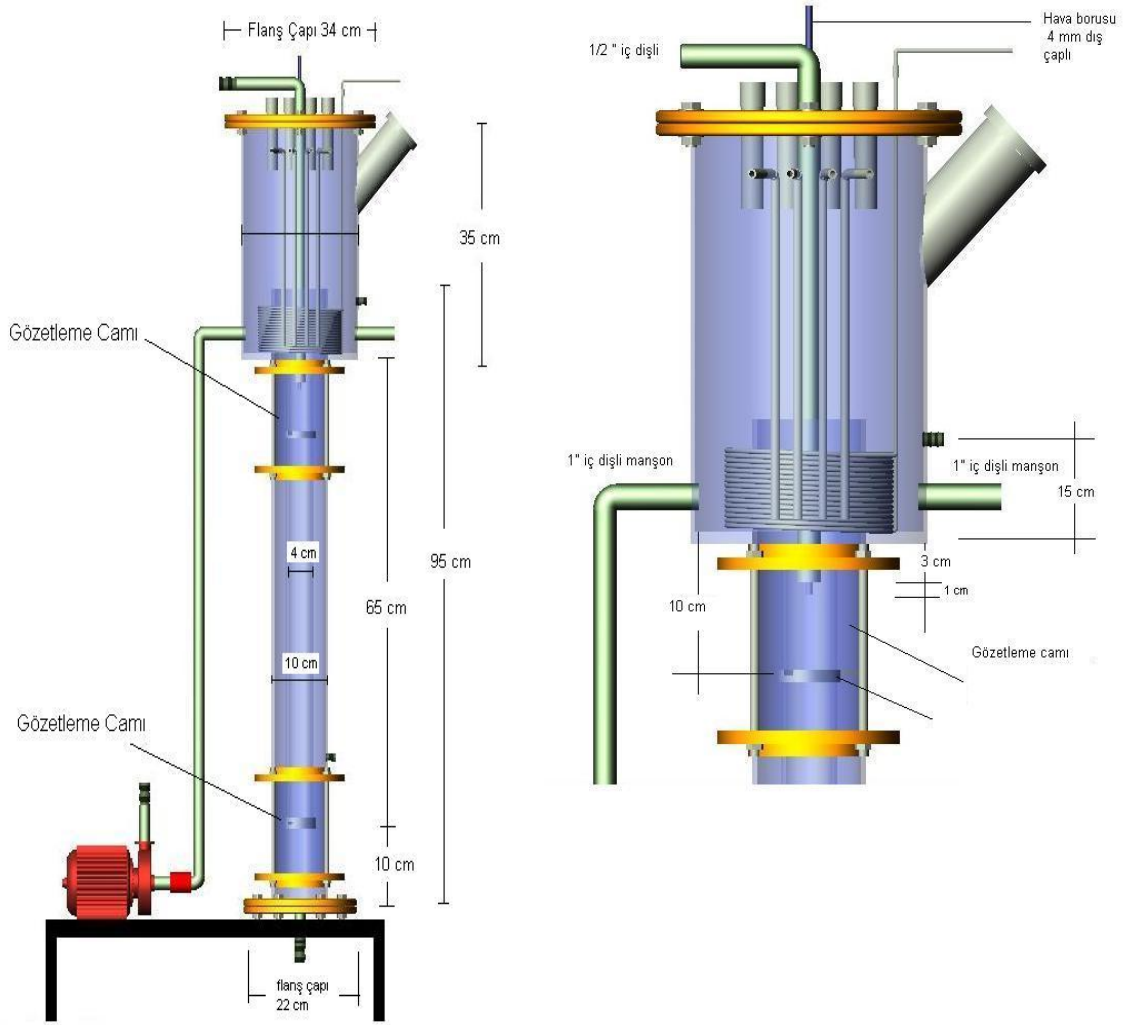
Kabarcıklı kolon reaktör denemeleri için reaktörün altından ozon gazının verilebilmesi için gereken gaz girişleri de reaktörün tabanına önceden monte edilmiştir. Kabarcıklı kolon denemelerinde içteki emme tüpü çıkartılmış ve böylece JLR aynı hacme sahip kabarcıklı bir kolon haline dönüştürülmüştür.



Şekil 3.2. Denemelerde kullanılan kabarcıklı kolon reaktör sisteminin akış şeması

Reaktörün üst kapağı ve üst taraftaki gaz alma bölmesinde de çeşitli besleme, numune alma ve ölçüm sistemleri için muhtelif portlar yerleştirilmiştir. Reaktör içindeki ozon gazının miktarını ölçmek ve reaktörden kullanılmamış ozon, oksijen ve diğer gazların tahliyesi için de çıkışlar konulmuştur.

Deneyleerde kullanılan reaktörün şematik görünümü ve boyutları ise Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekildeki tüm boyutlar hava borusu hariç cm olarak verilmiştir.



Şekil 3.3. JLR'ün şematik resmi ve boyutları

Deneysel sistemde çözülmüş oksijen, çözülmüş ozon, gaz ozon, pH, sıcaklık, sıvı sirkülasyon hızı ve gaz debisini ölçmek için çeşitli ölçüm sistemleri bulunmaktadır. Sistemdeki sıvı sirkülasyon hızı ve hava debisi analog inline tipi iki farklı su ve hava debi metresiyle ölçülmüş ve elle kumanda edilen vanalarla istenilen değerlere ayarlanmıştır. Çözülmüş oksijen, çözülmüş ozon, gaz ozon, pH ve sıcaklık değerleri ise bir PLC pano aracılığı ile bilgisayara kaydedilmiştir.

JLR iç içe geçmiş iki adet silindirik borudan oluşmaktadır. İçteki 4 cm çaplı daha küçük olana emme borusu adı verilir. Bir sıvı sirkülasyon pompası tarafından basılan sıvı ve ayrı bir hattan gelen ozon gazı bir jet püskürtme başlığı içerisinde geçerek emme

geniş bölme ise gaz alma tankı olarak isimlendirilir ve sirkülasyon pompasının ürettiği aşırı ısının giderilebilmesi için bir adet çelik soğutucu ile donatılmıştır.

Ozon jeneratöründen elde edilen ozon gazı teflon malzemeden yapılan bir boru hattı içerisinden reaktörün emme borusunun tam ortasından, sirküle ettirilen sıvı ile birlikte reaktörün içerisine püskürtülmüştür. Bu ilk püskürtme anında en yüksek karışım derecesi elde edilmektedir. Daha sonraki karışımlar ikincil karışımlar olarak adlandırılır. Dolayısıyla gaz-sıvı karışımının püskürtüldüğü jet meme başlığının yapısı önem taşımaktadır.

Kullanılacak olan reaktörde iki adet sirkülasyon hattı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi ana sirkülasyon hattı diğeri ise ozon ölçüm probunun bağlı olduğu hattır. Çözünmüş ozon konsantrasyonunun ölçülebilmesi için ozon ölçüm bölmesi içinden belli bir debide suyun geçirilmesi gerekmektedir. Denemelerde gerek bu bölmeden gerekse de ana sirkülasyon hattındaki debiyi sabit tutabilmek için hem ana hattın üzerine hem de çözünmüş ozon ölçüm hattının üzerine birer debi ölçer ve vanalar yerleştirilmiştir. Reaktördeki su hacmi 18 L'de sabit tutulmuştur. Bu işlem için reaktörün yan tarafından alınan bir çıkışa monte edilen şeffaf bir su seviye göstergesi kullanılmıştır. Tüm boru hatlarının tamamen su ile dolması sağlanmıştır.

Reaktördeki sıcaklığın sabit tutulması için reaktörün üst gaz alma bölmesi içine paslanmaz çelikten imal edilen bir adet serpantin (ısı değiştirici) yerleştirilmiştir. Reaktördeki sirkülasyon esnasında sürtünmeden dolayı reaktör içerisindeki suyun sıcaklığı yükselmektedir. Sabit sıcaklıkta deneylerin yapılması için serpantin içerisinden musluk suyu geçirilmektedir. Reaktördeki sıcaklık ölçülmekte ve musluk suyuna bağlı olan oransal bir vana aracılığı sistemin sıcaklığı otomatik olarak sabit tutulmaktadır.

Ozonlama işleminde reaktördeki pH değerinin sabit tutulabilmesi amacıyla da on – off kontrol şeklinde çalıştırılan iki adet peristaltik pompadan oluşan bir adet pH kontrol sistemi bulunmaktadır. Bu sistem ile biri asit biri baz gönderen iki adet peristaltik pompayı açıp kapatarak istenilen pH aralığında pH'ı tutmaktadır.

Üretilen ozon gazı konsantrasyonu ile reaktördeki pH, sıcaklık, çözülmüş oksijen ve çözülmüş ozon konsantrasyonu değerlerinin kayıt ve kontrolünün yapılabilmesi için bir adet PLC esaslı kontrol panosundan yararlanılmaktadır. Bu pano otomasyon ve kayıt amacıyla kullanılmaktadır. Bu pano sistemden topladığı tüm verileri RS 485 arabirimi ile bir bilgisayara iletmekte ve yine bilgisayardan gönderilen komutları sisteme geri göndermektedir. Ayrıca bu sistem bilgisayar olmadan da tüm işlemleri üzerindeki dokunmatik ekran sayesinde yerine getirebilmektedir.

Kullanılan otomasyon yazılımı ile sistemdeki istenilen herhangi iki değişkenin zamana bağlı olarak değişimi grafiksel olarak ve sayısal olarak takip edilebilir ve istenilen tüm değerlere istenilen sıklıkta kayıt altına alınabilir. Bu sayede sistemdeki değişimler kolaylıkla takip edilebilmektedir. Yine eğer kontrol yapılması isteniyorsa istenilen kontrol işlemi içinde menüler bulunmaktadır. Sisteme kuru hava veya saf oksijen gönderilmesi durumlarına göre de kontrol işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bahsedilen tüm sistem 10 ve 20 kW'lık iki adet kesintisiz güç kaynağına bağlanmış olup, düzenli olarak enerji akışına sahiptir.

3.2. Ozon Gazının Üretilmesi ve Sisteme Verilmesi

Ozon gazının üretilmesi için saf oksijen veya kuru havadan yararlanılmaktadır. Saf oksijen veya bir kompresörden (Dalgakıran DKC-150) gelen hava, hava kurutucusundan geçirilerek mümkün olduğunca nemden arındırılmaktadır. Kurutucudan önce bir adet ön nem ve toz tutucu ve kurutucudan sonra da bir adet basınç regülatörü monte edilmiş ve ozon jeneratörüne (Anseros marka COM AD-08) en fazla 1,2 bar basınçta gazın girişi sağlanmıştır. Kurutucudan çıkan kuru hava veya saf oksijen jeneratörünün arka tarafındaki girişten jeneratöre verilmekte ve verilen gaz miktarı ozon jeneratörünün ön yüzüne monte edilmiş bir debi ölçer ile ayarlanmaktadır.

Ozon jeneratörü saatte en fazla 300 L gazı işleyebilecek şekilde tasarlanmış olup, saf oksijen gazı geçirilmesi durumunda saatte en fazla 40 g O₃ gazı üretme kapasitesine sahiptir. Üretilen gaz içerisindeki ozon gazı konsantrasyonu ise en fazla 200 g/m³

olabilmektedir. Yapılan deneylerde 250 L/saat saf oksijen verilmesi durumunda 80 g/m^3 ozon gazı üretilebilmiştir. Kuru hava kullanıldığında ise elde edilebilen en yüksek ozon gazı konsantrasyonu 25 g/m^3 'dür.

3.3. Kabarcıklı Kolon Reaktörde Deneylerinin Yapılışı

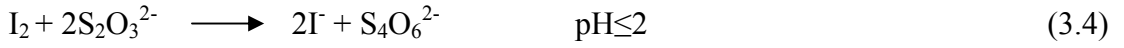
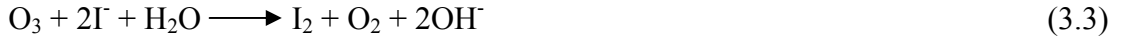
Yapılan çalışmada kütle transferini kıyaslamak amacıyla deneyler hem jet loop reaktörde hem de kabarcıklı kolon reaktörde yapılmıştır. Bu amaçla reaktörün altına bir adet difüzör yerleştirilmiş ve emme tüpü çıkartılarak reaktör kabarcıklı kolon reaktör olarak kullanılmıştır. Üretilen ozon gazının reaktörün altından verilebilmesi için quartz malzemedan yapılmış bir difüzör kullanılmıştır. Denemelerde kullanılan quartz difüzör tabandan tam 10 cm yukarıda reaktörün tam ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Difüzörün toplam yüzey alanı $17,3 \text{ cm}^2$ 'dir.

3.4. Çözünmüş Ozon Gazı Konsantrasyonunun Belirlenmesi

Çözünmüş ozon ölçümleri AuAu-600-OO-2-1-PG model numaralı potantistatik çözünmüş ozon probu kullanılarak ozonmetre aracılığı ile belli aralıklarda bilgisayara aktarılarak yapılmıştır. Kullanılan ozon probunun sudaki pas, organik madde ve kireç gibi unsurlardan dolayı kirlenmesi ve okuma hatalarına yol açtığı ön denemelerde belirlendiğinden, tüm denemeler deiyonize su kullanılarak yapılmıştır. Ancak buna rağmen kullanılan su içerisindeki safsızlıkların okuma hatalarına yol açıp açmadığının belirlenmesi için iyodimetrik yöntem kullanılarak da çözünmüş ozon ölçümleri yapılmış ve probun ölçtüğü değerler ile kıyaslanmıştır. Kullanılan iyodimetrik ozon ölçüm yöntemi ise aşağıda verilmiştir.



veya



Ozon gazının stabilitesi her sıcaklık artışında (donma noktasının üstünde) ve 3'ten yüksek pH artışında düşer. Ozon stabil olmadığından saklanamaz. Düşük sıcaklık ve pH'da olmalıdır.

İyodimetrik metot çoğu uçucu organikler olan birkaç girişim yapan maddeye bağlı olarak iyi tahmin yapabilen nicel bir yöntemdir. Ozon, bir potasyum iyodür çözeltisinde I_2 serbest bırakır. Doğru sonuçlar için ozon adsorpsiyonu sırasında çözelti alkali olur. Pratikte KI çözeltisi, proses esnasında hızlıca alkali hale gelir ve bu yüzden tamponlama gerektirmez. Sonra derhal asitlendirilir. Serbest I_2 standart 0,005 M sodyum tiyosülfat ile nişasta indikatörü katılıp titre edilir.

3.4.1. Kullanılan Reaktifler

Potasyum iyodür çözeltisi: %2'lik KI çözeltisi yerine yüksek ozon dozları nedeniyle %90 lık KI çözeltisi hazırlanmıştır.

- Sülfürik asit: 1N H_2SO_4
- Standart sodyum tiyosülfat: 0,1M
- Standart sodyum tiyosülfat titrantı: 0,005 M lık $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$.
- Nişasta indikatörü Kör test için Standart iyot: 0,1 M
- Standart iyot titrantı: 0,005 M

3.4.2. Yöntem

Jet loop reaktör zaten bir gaz yıkama şişesi gibi çalıştığı için ozonlanmış su numunesinden 50 ml alınır ve 10 ml %90 KI çözeltisinden katılır. Ozon adsorplayıcı ile çalkalandıktan sonra 1N H₂SO₄ ten 2,5 ml ilave edilerek pH değeri 2'nin altına düşürülür. 0,005 M Na₂S₂O₃ titrantı ile serbest iodyin sarı rengi çıkana kadar titre edilir. 0,5 ml nişasta indikatörü eklenir ve oluşan mavi rengin kaybolması için titrasyona devam edilir.

Kör test: 50 ml KI çözeltisi içine 2,5 ml 1N H₂SO₄ ve 0,5 ml nişasta indikatörü ilave edilir.

1. Mavi renk görünüyorsa mavi renk kaybolana kadar 0,005 M Na₂S₂O₃ titrantı ile titre edilip sonucu kaydedilir.
2. Hiç mavi renk yoksa 0,005 M iyot çözeltisi ile mavi renk oluşana kadar titre edilir. Sonra mavi renk kaybolana kadar 0,005 M Na₂S₂O₃ titrantı ile geri titre edilip sonucun farkı alınır.

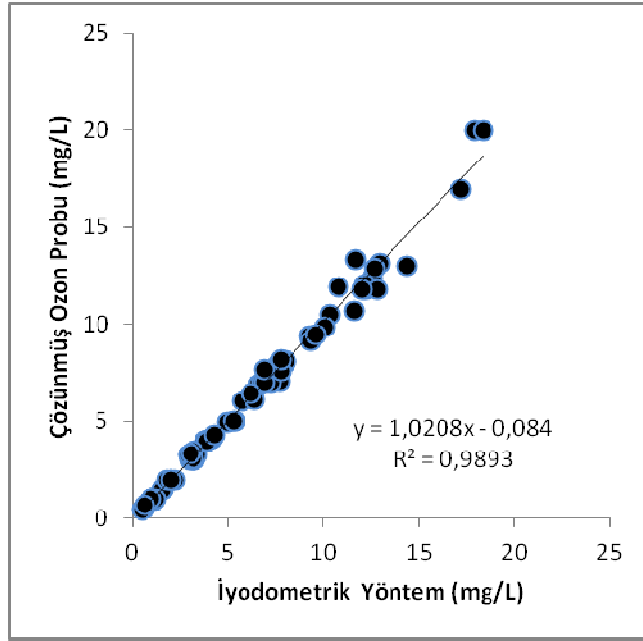
Ozon konsantrasyonu hesaplanmadan önce yukarıda elde edilen sonuç örneğin titrasyonundan çıkarılır veya eklenir. Ozon konsantrasyonu aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$mgO_3 / L = \frac{(A \mp B) \cdot M \cdot 24000}{\text{örnek (ml)}} \quad (3.5)$$

A= ml örneğin titrantı

B= ml körün titrantı (+ veya-)

M= Na₂S₂O₃ molarite



Şekil 3.5. İyodimetrik yöntem ile çözünmüş ozon metrenin okuduğu değerlerin karşılaştırılması

İyodimetrik yöntem 8 mg/L ozona kadar doğru sonuçlar vermektedir ancak daha yüksek konsantrasyonlarda adsorplayıcı yetersiz kaldığı için yanlış okumalara sebep olmuştur. Bu nedenle alınan numuneler uygun oranlarda seyreltilmişlerdir.

Tüm denemeler süresince zaman zaman bu denetimler yapılarak probdan kaynaklanan bir sorun olup olmadığı denetlenmiştir. Eğer ölçüm sonuçlarında hata miktarı artarsa üretici firmanın önerileri doğrultusunda çözünmüş ozon probu temizlenmiş ve kalibre edilerek tekrar kullanılmaya başlanmıştır.

3.5. Kütle Transfer Katsayısının Belirlenmesi

Ozon gazının hacimsel kütle transfer katsayısının hesaplanması için aşağıdaki 3.6 eşitliğinden yararlanılmıştır. Ozon gazı suda az çözünen bir gaz olduğundan gaz faz direnci ihmal edilir. Böylece sıvı fazdaki ozonun hacimsel kütle transfer katsayısı $k_{L,a}$;

$$\frac{dC}{dt} = K_L a. (C_s - C) - k_d \cdot C \quad (3.6)$$

C: Çözünmüş ozon konsantrasyonu (mg/L)

C_s: Ozonun doygunluk konsantrasyonu (mg/L)

k_d: Ozonun kendi kendine bozunma sabiti

k_d değeri ortama ozon gazı verildiğinde, çözünmüş ozonun zamanla azalmasından hareketle bulunabilir. Birinci dereceden bir hız ifadesiyle azaldığı bilinen ozon gazının dekompozisyon katsayısı (3.2) nolu eşitliğin sağındaki ilk teriminin 0 olduğu durumda;

$$\frac{dC}{dt} = -k_d \cdot C \quad (3.7)$$

İfadesiyle hesaplanır.

Bu çalışmada kütle transfer katsayıları belirlenmesi için yaptığımız deneylerde yüksek pH değerlerinde ozonun bozunma sabiti k_d'nin belirlenmesindeki güçlükler nedeniyle düşük pH değerlerinde çalışılmıştır. Düşük pH değerlerinde çalışarak k_d değeri ihmal edilebilecek seviye olduğu için k_d ihmal edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

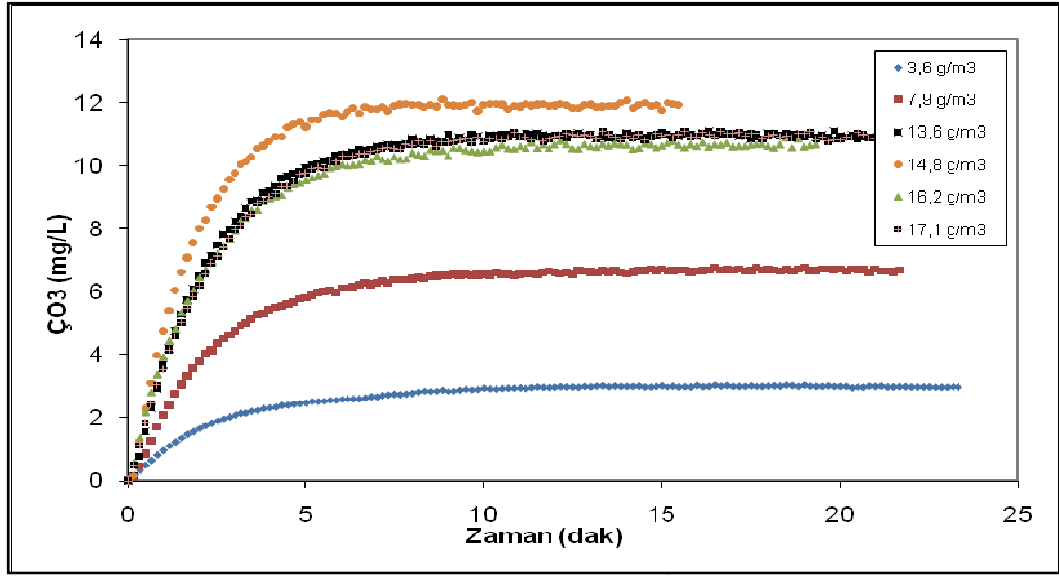
4.1. Jet Loop Reaktörde Kuru Hava Kullanılarak Yapılan Denemeler

Denemelerde gaz kaynağı olarak ilk önce kuru hava ile yapılan deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hava kompresöründen gelen hava ön filtreler ve hava kurutucusundan geçirildikten sonra 1 bar basınçla ozon jeneratörüne gönderilmiştir. Bu denemelerde ozon gazı konsantrasyonu ve gaz debisinin etkileri incelenmiştir.

Deneyler süresince reaktör sıcaklığı 20°C'de sabit tutulmuş ve jet loop reaktör 60L/dak. sirkülasyon debisinde çalıŐtırılmıŐtır. Çözünmüş ozon ölçüm hücresinin olduğu hattın içinden de 18L/dak. debide su geçirilmiş ve bu değer de tüm denemeler süresince sabit tutulmuştur. ÇalıŐmamızda bozunma hız sabitinin belirlenmesindeki güçlük nedeniyle düşük pH değerlerinde çalışılmış ve $k_d=0$ olarak alınmıştır.

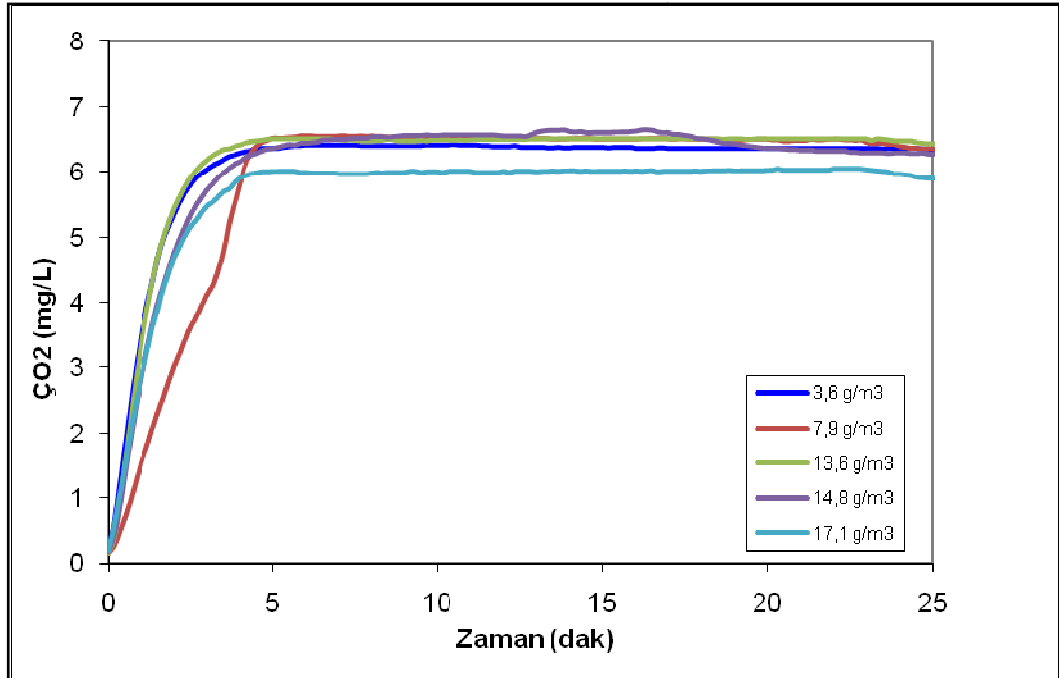
4.1.1. Reaktöre Gönderilen Ozon Gazı Konsantrasyonunun Etkisi

Reaktöre gönderilen ozon gazı konsantrasyonunun farklı değerleri için reaktörde elde edilen çözünmüş ozon ve çözünmüş oksijen değerlerinin zamanla değerimleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Farklı ozon gazı konsantrasyonları için reaktörde ölçülen çözülmüş ozon konsantrasyonlarının zamanla değişimi

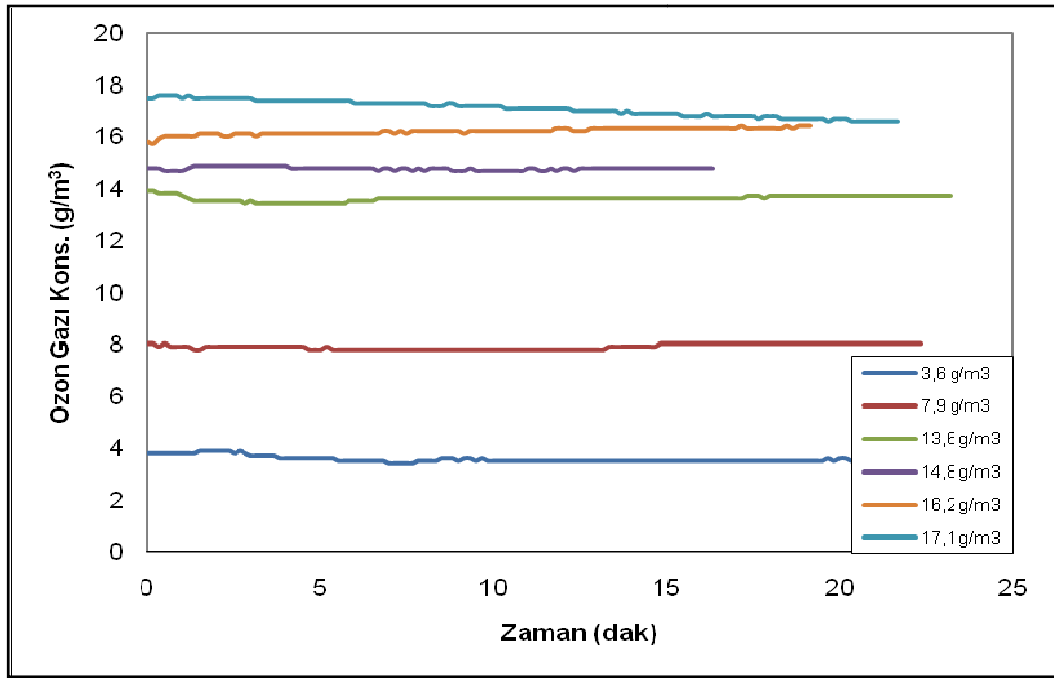
*T=20°C, pH=2,26, Gönderilen Gaz Debisi=250L/saat, Kuru Hava



Şekil 4.2. Farklı ozon gazı konsantrasyonları için reaktörde ölçülen çözülmüş oksijen değerlerinin zamanla değişimi

*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat

Reaktöre gönderilen ozon gazı konsantrasyonları ozonizatörün farklı çalışma kapasitelerinde çalıştırmasıyla elde edilmiştir. Örneğin $3,6 \text{ g/m}^3$ 'lük ozon gazı değeri ozonizatörün %10'luk bir kapasite ile çalıştırılması ile elde edilmiş ortalama değerdir. Şekil 4.3'de ozonizatörün farklı kapasitelerde çalıştırılması ile elde edilen ozon gaz konsantrasyonlarının zamanla değişim görülmektedir. Zamanla ölçülen bu değerlerin ortalaması alınarak reaktöre gönderilen ortalama ozon gazı konsantrasyonu bulunmuştur. Şekil 4.3'den ozonizatörün ürettiği ozon gazının deneyler süresince yaklaşık sabit kaldığı söylenebilir.

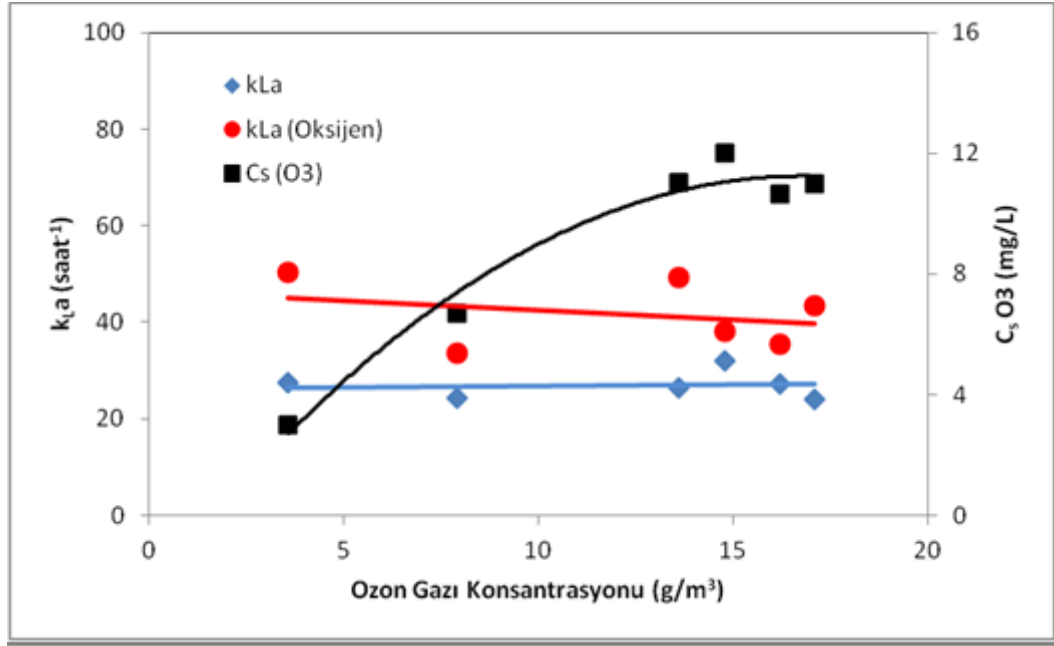


Şekil 4.3. Reaktöre gönderilen ozon gazı derişiminin zamanla değişimi

*T=20°C, pH=2,26, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Kuru Hava

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilen konsantrasyon – zaman değişimleri (3.6) numaralı ifade kullanılarak ozon ve oksijen bakımından kütle transferi katsayılarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Reaktörde sabit debide ve farklı konsantrasyonlarda verilen ozon gazı ile hesaplanan k_{La} değerlerinin değişimi ise Şekil 4.4'da verilmektedir. Şekil 4.3'den reaktöre beslenen gazın ozon gazı derişiminin k_{La} değeri üzerinde etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir. Bu beklenen durum kütle

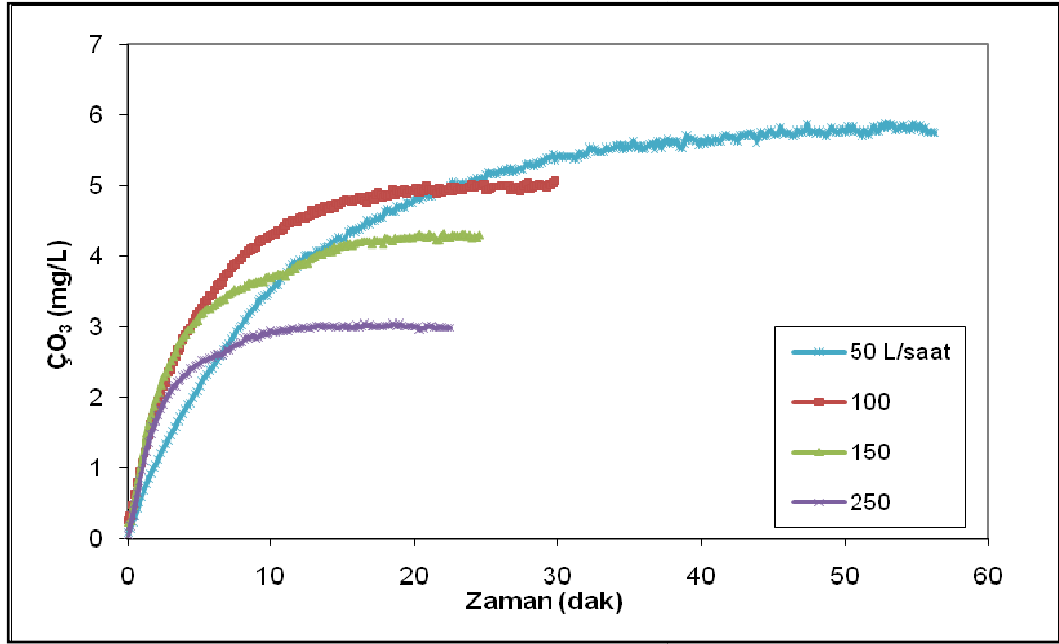
transferinde baskın etkenin sıvı-gaz ara yüzeyinin genişliği ile ilintili olması ile açıklanır. Gaz debisi sabit olduğunda ara yüzey değişmemekte ve kütle transferi artmamaktadır. Ancak bu durum gaz fazdaki konsantrasyonun fazla olması nedeniyle sıvıdaki ozon ve oksijenin doygunluk değerinin artışı ile sonuçlanır.



Şekil 4.4. Reaktöre gönderilen ozon gazı konsantrasyonu ile ozon ve oksijen için hesaplanan kütle transfer katsayıları ($k_{La\ O_3}$ - $k_{La\ O_2}$) ve çözülmüş ozon için elde edilen doygunluk değeri $C_{s(O_3)}$ değerlerinin değişimi
*T=20°C, pH=2,26, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Kuru Hava

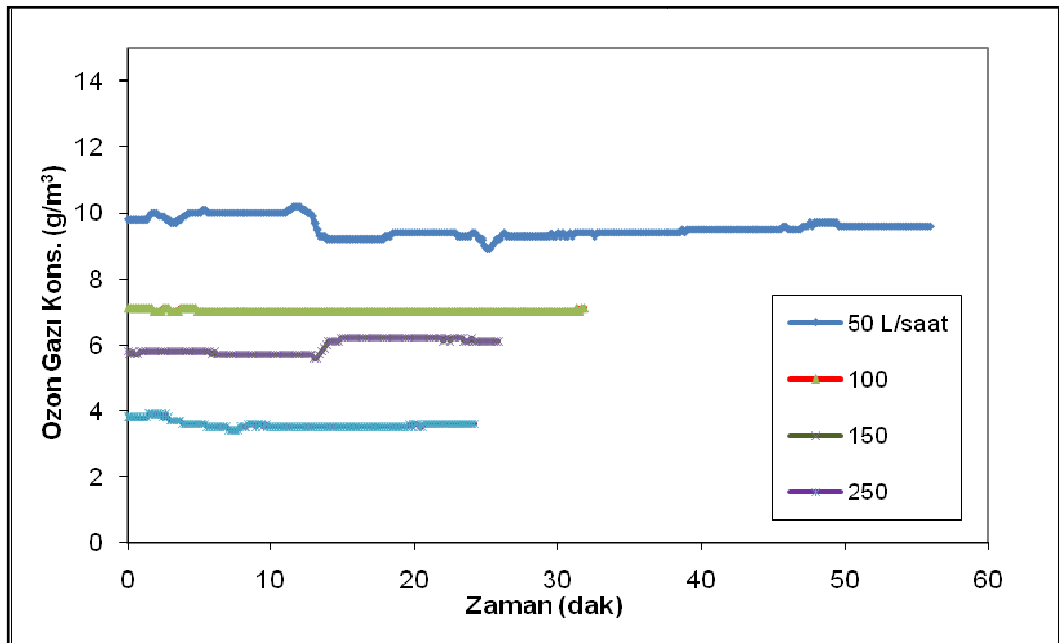
4.1.2. Reaktöre beslenen gaz debisinin etkisi

Bu aşamada ozonizatör cihazı %10 ve %20 gibi iki farklı sabit kapasite çalıştırılarak cihazın ön tarafında bulunan debi ölçer ile farklı debilere ayarlanarak reaktöre gönderilmiştir. %10 çalışma kapasitesinde zamanla ölçülen çözülmüş ozon değerlerinin değişimi Şekil 4.5'de, reaktöre gönderilen ozon gazı konsantrasyonlarının değişimi Şekil 4.6'da, çözülmüş oksijen konsantrasyonlarının zamanla değişimi ise Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



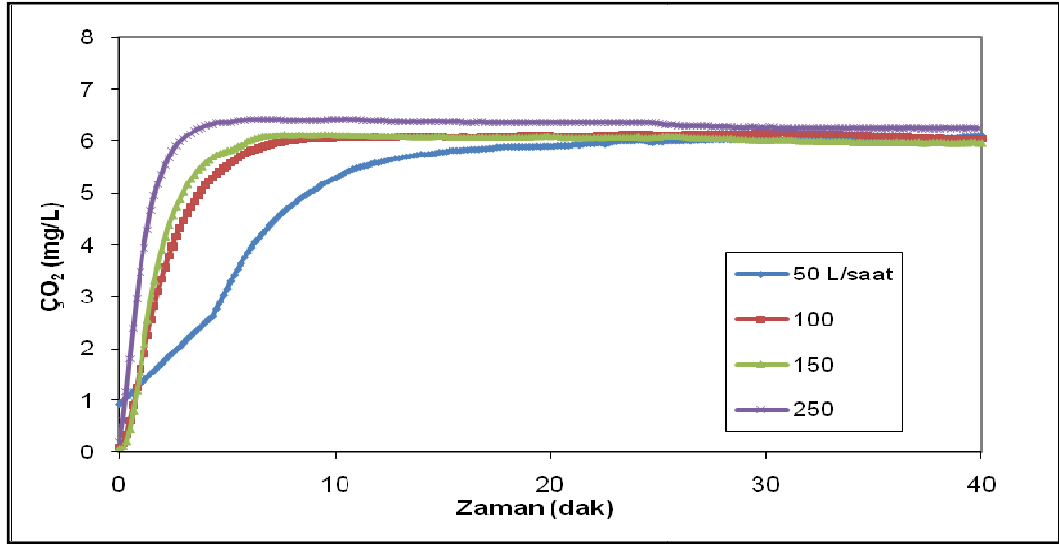
Şekil 4.5. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözülmüş ozon değerlerinin zamanla değişimi

*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10



Şekil 4.6. Farklı gaz besleme debilerinde reaktöre gönderilen ozon gazı derişiminin zamanla değişimi

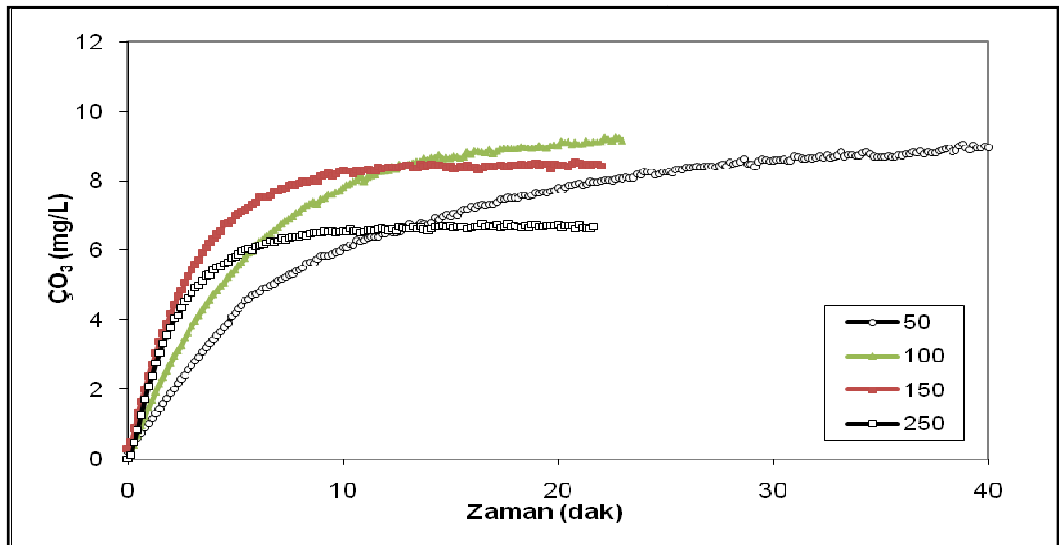
*T=20°C, pH=2,26, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10



Şekil 4.7. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözünmüş oksijen değerlerinin zamanla değişimi

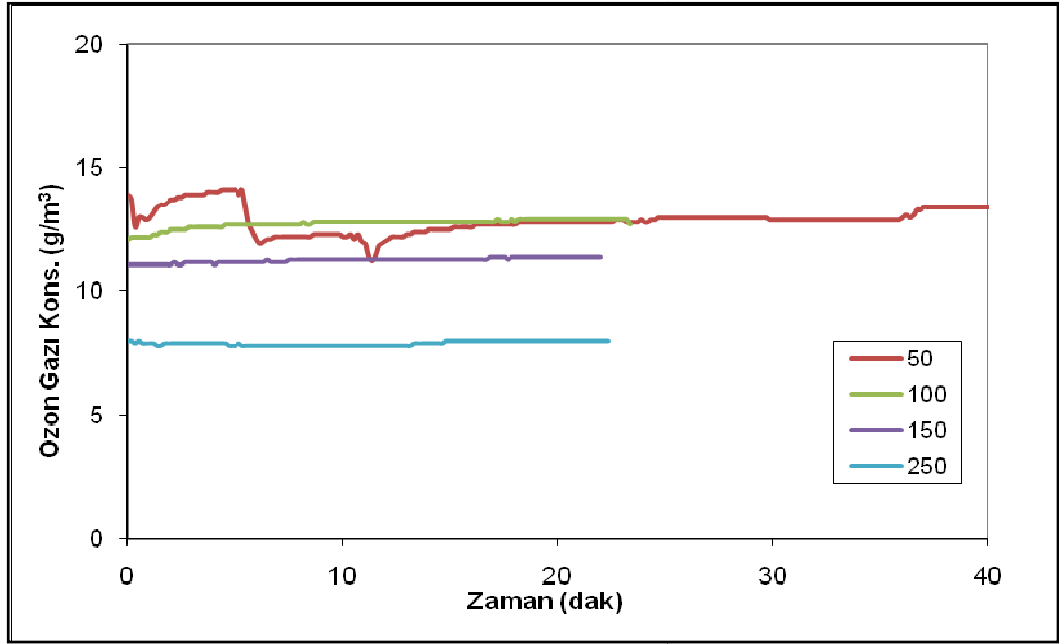
*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10

%20 çalışma kapasitesinde zamanla ölçülen çözünmüş ozon değerlerinin değişimi Şekil 4.8'de, reaktöre gönderilen ozon gazı konsantrasyonlarının değişimi Şekil 4.9'de, çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının zamanla değişimi ise Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



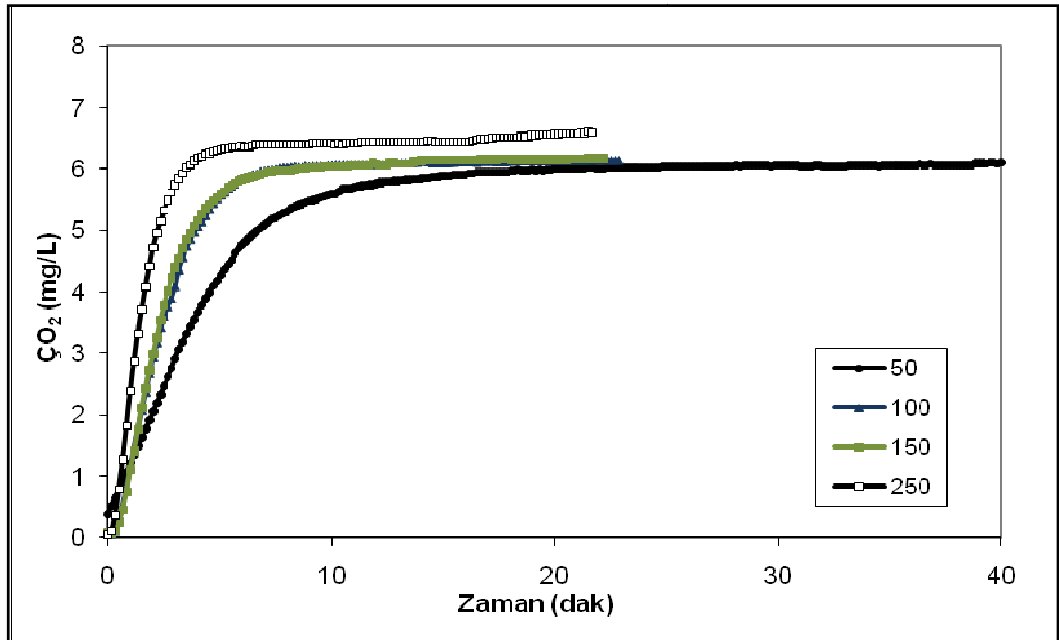
Şekil 4.8. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözünmüş ozon değerlerinin zamanla değişimi

*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%20



Şekil 4.9. Farklı gaz besleme debilerinde reaktöre gönderilen ozon gazı derişiminin zamanla değişimi

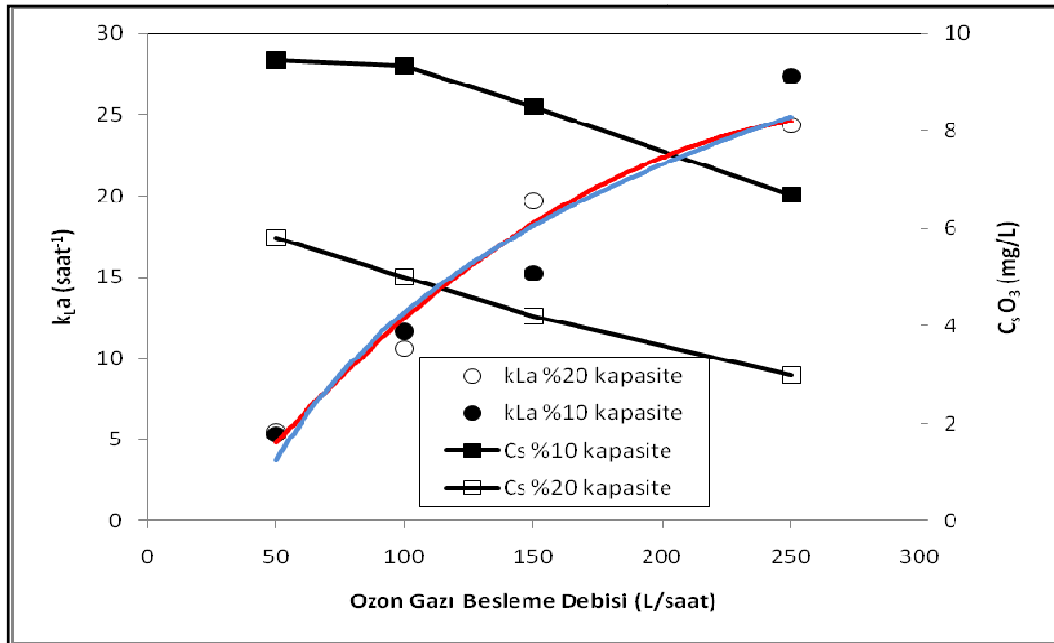
*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%20



Şekil 4.10. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözülmüş oksijen değerlerinin zamanla değişimi

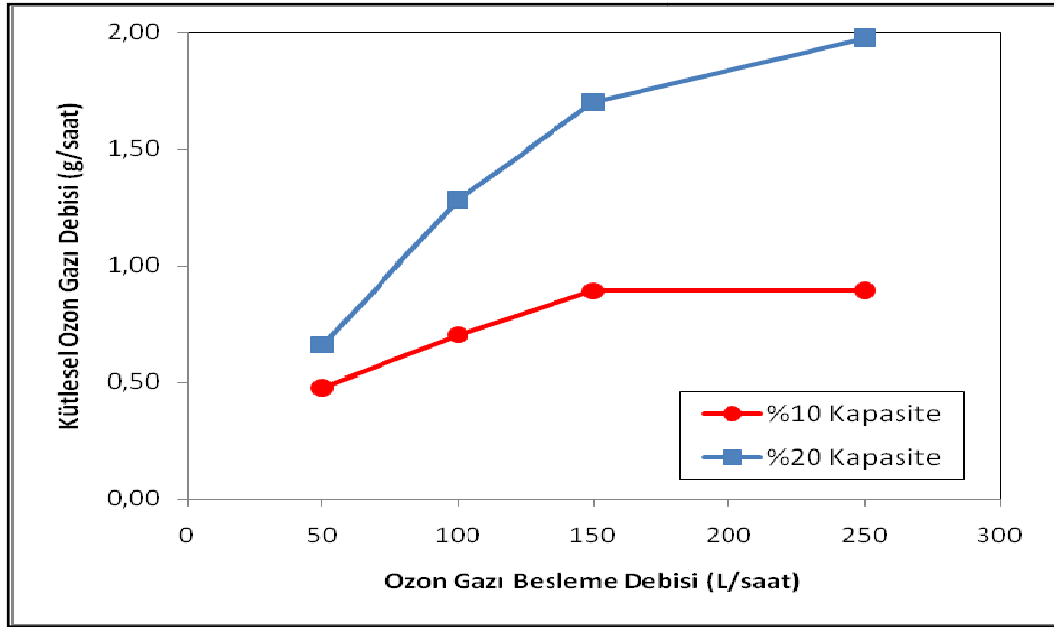
*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%20

Şekil 4.5, 4.7, 4.8 ve 4.10'deki verilerden yararlanarak eşitlik 3.6'ün kullanılmasıyla k_{La} değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan k_{La} değerlerinin gaz debileri ile değişimi Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Şekil 4.12'de ise farklı üretim kapasiteleri için ozon gazı debileri gösterilmektedir. Şekil 4.11'den artan gaz debilerinin k_{La} değerlerini artırdığı açıkça görülmektedir ve kapasiteden bağımsızdır. Ozonizatörün ozon üretim kapasitesi arttıkça üretilen gaz fazdaki ozon gaz konsantrasyonu da artmaktadır. Ancak ozon gaz konsantrasyonunun sabit gaz debisinde k_{La} üzerine herhangi bir etkisinin görülmemesi beklenen bir sonuçtur. Artan gaz debisi gaz-sıvı ara yüzey alanının artışı anlamına geldiğinden kütle transferine de artış olarak yansımaktadır. Gaz fazdaki gaz konsantrasyonu artışı sadece doygunluk ozon değerlerinin artışına yol açmaktadır. Besleme gaz debisinin azalması, ozon jeneratörüne gönderilen gazın jeneratörü içindeki elektriksel alanda kalış süresinin de artışı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bu durum üretilen ozon gazı konsantrasyonunun artışı ile neticelenmektedir.



Şekil 4.11. Reaktöre gönderilen ozon gazı besleme debisi ile hesaplanan k_{La} değerleri ve ortalama elde edilen ozon gazı konsantrasyonlarının değişimi
*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10 ve %20

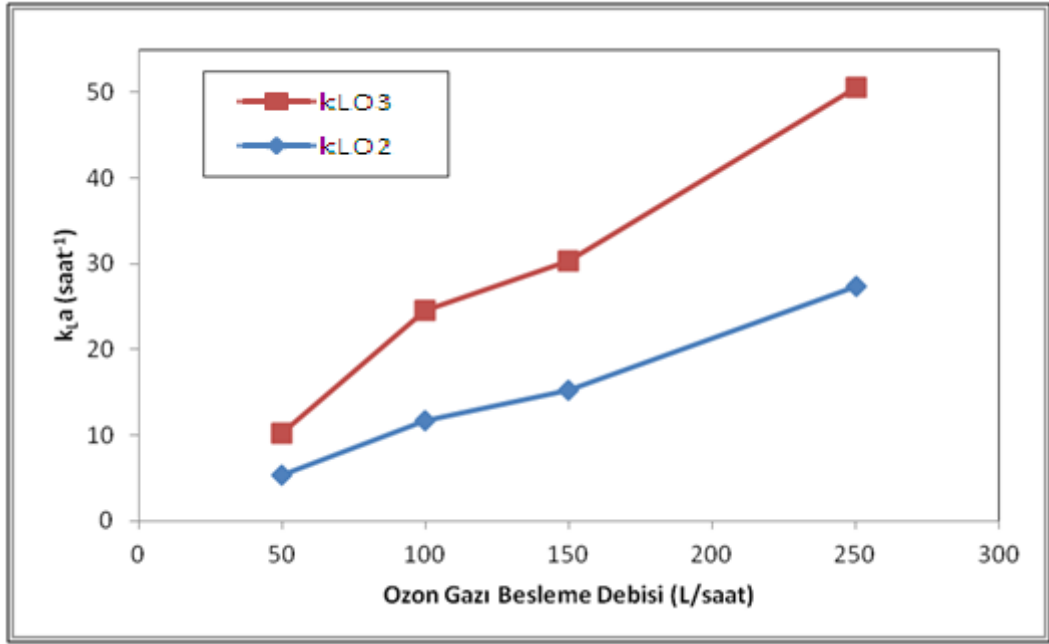
Şekil 4.12’de üretilen ozon gazı konsantrasyonu ile gönderilen ozon gaz debisinin çarpımından elde edilen kütleli ozon gazı debilerinin, gaz debisi ile olan değişimi gösterilmektedir. Artan gaz debilerinde daha düşük gaz konsantrasyonları elde edilmesine rağmen, yüksek debilerin etkisi ile doğal olarak daha yüksek kütleli ozon gazı değerleri elde edilmektedir. Bu durum birim zamanda reaktöre gönderilen ozon gazı miktarının artışı anlamına geldiğinden, k_{La} değerleri de daha yüksek olmaktadır. Bir başka ifade ile ozon gaz konsantrasyonundan ziyade asıl önemli olan birim zamanda reaktöre gönderilen ozon gazının kütleli debisidir. Tek başına gaz debisi ve konsantrasyonu ile k_{La} değişimlerini açıklamak zor olmaktadır.



Şekil 4.12. Reaktöre gönderilen ozon gazı besleme debisi ile elde edilen kütleli ozon gazı debilerinin değişimi

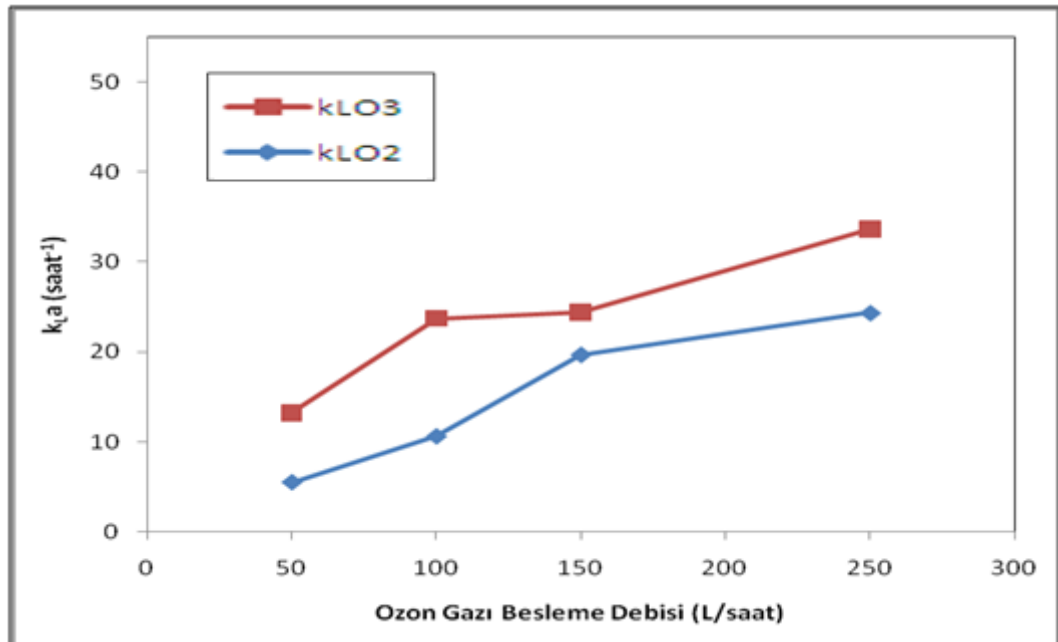
*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10 ve %20

Şekil 4.13’de %10, Şekil 4.14’de ise %20 ozonizatör çalışma kapasitesi için ozon ve oksijen için hesaplanan k_{La} değerlerinin değişimleri gösterilmektedir.



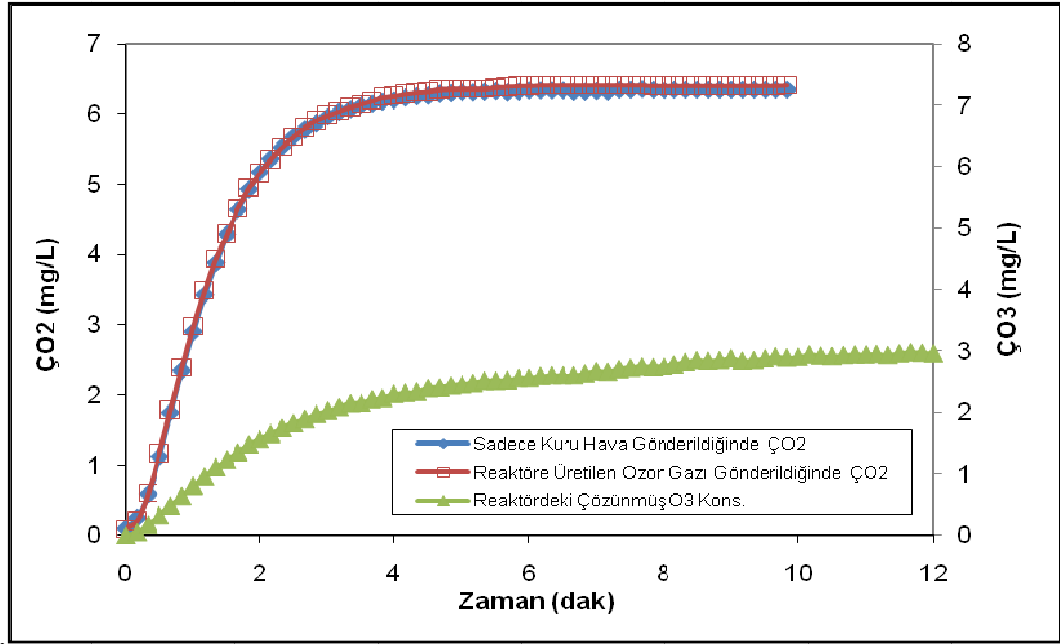
Şekil 4.13. Farklı gaz besleme debilerinde ozon ve oksijen için elde edilen kütle transfer değerlerinin karşılaştırılması

*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10



Şekil 4.14. Farklı gaz besleme debilerinde ozon ve oksijen için elde edilen kütle transfer değerleri'nin karşılaştırılması

*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%20



Şekil 4.15. Reaktöre gönderilen gazın ozon gazı içerip içermemesinin çözünmüş oksijenin suya transferine etkisinin olmadığını gösterilmesi

*T=20°C, pH=2,26, Kuru Hava, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%0 ve %10, gaz debisi=250 L/saat

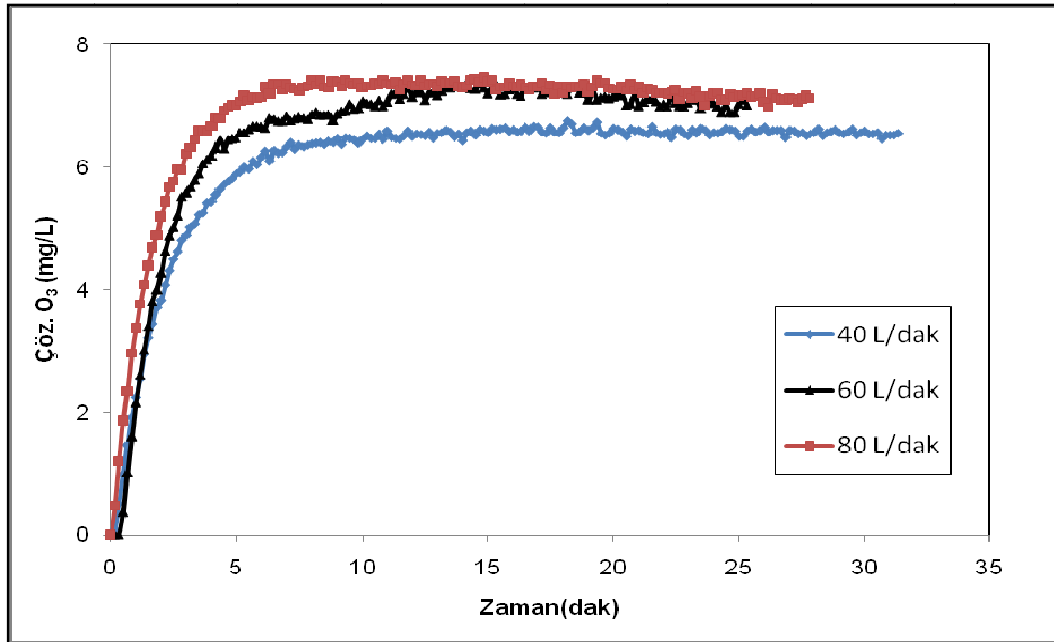
Şekil 4.15’de ise oksijen açısından jet loop reaktöre gönderilen gazın, ozon içerip içermemesinin oksijenin $k_L a$ ’sı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı gösterilmeye çalışılmıştır.

4.1.3. Jet Loop Sirkülasyon Debisinin Etkisi

Reaktörün üst gaz alma bölgesinden çekilen sıvı ana sirkülasyon hattından önceden belirlenmiş bir debide bir nozzle içerisine püskürtmektedir. Jet nozzle (püskürtme başlığı) içerisinden geçen sıvı hızının artışının kütle transferini artırdığı bilinmektedir. Bu artışa sıvının kinetik enerjisi yardımıyla aynı yerden verilen gazın daha küçük kabarcıklara dönüşmesi ve sonuç olarak gaz-sıvı yüzey alanının artmasının neden olduğu bilinmektedir. Ancak artan sıvı sirkülasyon hızı reaktörün birim hacme aktarılan gücün de artışı anlamına geldiği için her zaman arzu edilen bir durum değildir.

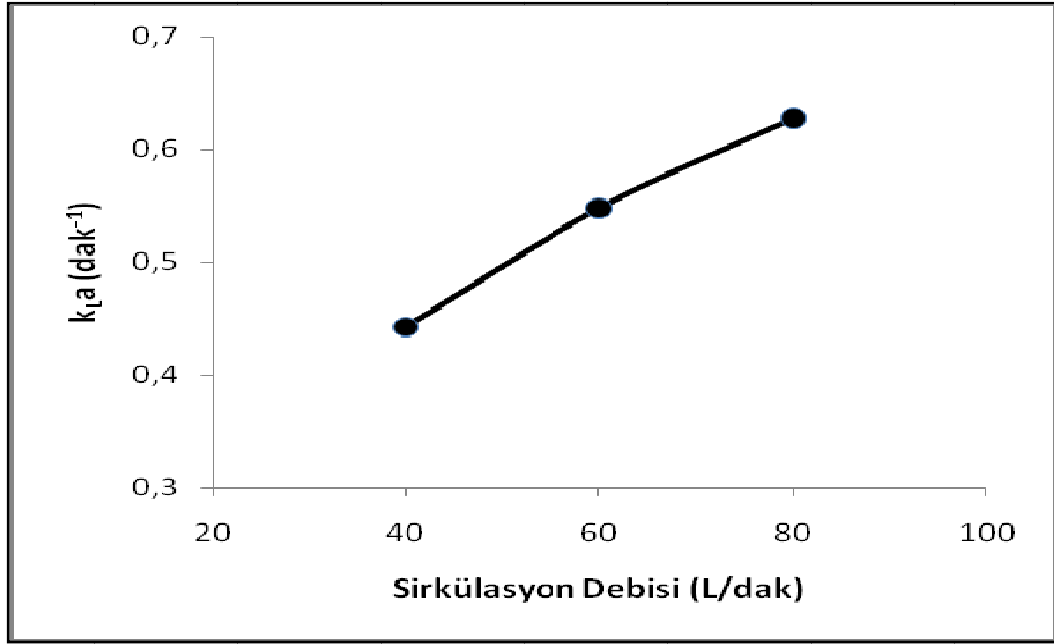
Nozül içerisinden geçen sıvı hızının artışı iki şekilde sağlanır. Bunlardan ilki geçen sıvı debisini artırmak, diğeri ise nozül çapını küçültmektir. Bu bölümde yapılan araştırmalar

bu her iki durumda da incelenmiş ve sonuçlar bir arada değerlendirilmiştir. Öncelikli olarak 15.5 mm çaplı nozül kullanılarak artan sıvı debileri ile ozon kütle transfer çalışmaları gerçekleştirilmiş, daha sonra ise farklı nozül sıvı jeti hızlarının etkisini incelemek için 10.0 ve 8.8 mm'lik iki farklı çapta nozül ile denemeler yapılmıştır. Şekil 4.16'da üç farklı sıvı sirkülasyon hızında gerçekleştirilen denemelerde reaktördeki çözülmüş ozon gazının zamanla değişimi görülmektedir. Nonlinear regresyon ile hesaplanan k_{LA} değerlerinin sıvı sirkülasyon hızları ile olan değişimi şekil 4.17'de gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Farklı sıvı sirkülasyon hızlarında reaktördeki çözülmüş ozon konsantrasyonlarının değişimi

*pH=2.26, T=20°C, Gönderilen Ortalama O₃ Gazı Konsantrasyonu=9.5 g/m³, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Gaz Tipi=Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%20, nozül çapı=15.5 mm



Şekil 4.17. Farklı sıvı sirkülasyon hızları ile k_{La} değerinin değişimi

*pH=2.26, T=20°C, Gönderilen Ortalama O₃ Gazı Konsantrasyonu=9.5 g/m³, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Gaz Tipi=Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%20, nozül çapı=15.5 mm

Jet loop reaktörlerde kullanılan çok farklı püskürtme başlıkları vardır. Ancak temel olarak bir püskürtme başlığının ayrıntılı bir gösterimi Şekil 3.4'de verilmiştir. Bu yapı gaz ve sıvı fazların birleşerek reaktörün içerisine girdiği ve ilk dispersiyonun gerçekleştiği parçadır.

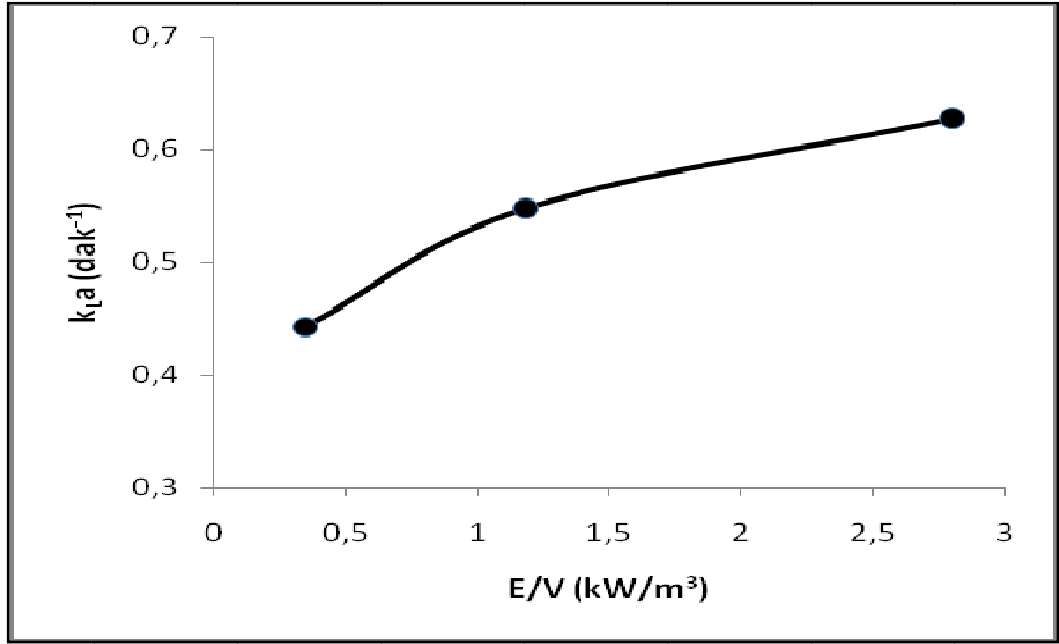
Hava borusu ve jetin iç çaplarının boyutları değiştikçe, sisteme aktarılması gereken enerji de önemli oranda değişir. Jet loop reaktörlerde sisteme aktarılan enerji miktarı püskürtme başlığının ucundaki sıvı hızının kinetik enerji olarak ölçülür ve (4.1) ifadesi yardımıyla kolaylıkla bulunabilir.

$$E = Q_L \cdot \Delta P = Q_L \cdot \left(\rho \cdot \frac{v^2}{2}\right) \quad (4.1)$$

(4.1) ifadesindeki sıvı hızı (v), jet yapısındaki hava ve sıvı borularının kesit alanları farkına bağlı olarak değişir. Aynı sıvı ve gaz debilerinde, ancak farklı püskürtme başlığı yapılarında sisteme aktarılan enerjilerin değişmesi, kütle transferi üzerinde önemli

etkilere sahiptir. Püskürtme çevrimli reaktörün giriş yapısı emme borusunun belli bir mesafe aşağısında biter. Sisteme bir sıvı sirkülasyon pompası ile gönderilen sıvı ve bir kompresör aracılığı ile gönderilen hava, püskürtme başlığında karışarak büyük bir hızla reaktörün emme borusu boyunca aşağıya doğru akar. Bu şekilde emme borusunu geçen sıvı karışımı reaktörün altında bulunan çarpma levhasına ulaşır ve buradan yanlara doğru yayılarak, emme borusu ile ana borusu arasında kalan dış bölgedeki boşluktan yukarı doğru çıkar. Burada sıvı hızı kesitteki değişimden dolayı değişir. Reaktörün en üstüne gelen gaz ve sıvı tanecikleri sıvının sürüklenme kuvvetlerinden doğan hareket nedeniyle tekrar emme borusuna girebilir. Püskürtme çevrimli reaktörlerde gaz fazın sıvı içinde iki türlü dispersiyonu gerçekleşir. Bunlardan birinci, sıvı ve gaz fazlarının ilk buluştukları püskürtme başlığında, diğeri ise sıvının reaktör içerisindeki dağılması sırasındaki dispersiyondur.

Kütle transferinin yüksek oluşu, bu iki dispersiyonun bireysel özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Birinci dispersiyonda son derece yüksek hızla gelen sıvının, gaz fazı çok küçük kabarcıklar haline parçalaması ve daha sonra ikinci dispersiyonda reaktörün altına doğru giden bu kabarcıkların sıvı basıncının artışıyla daha kolay bir şekilde çözülmesi sonucunda kütle transferi artmaktadır. Özellikle reaktörün ortasında merkezlenmiş bir şekilde duran emme tüpü yardımıyla sıvının birkaç defa sirkülasyona uğraması sıvı faz içerisine dağılmış olan gaz fazın sistemdeki bekleme süresini arttırmaktadır. Bu genel bilgiler ışığı altında ozonlama için kullanılan jet loop reaktörde (4.1) nolu eşitlik ile hesaplanan güç tüketimleri, reaktör hacmine bölünerek, birim reaktör hacmi başına reaktöre aktarılan güçler hesaplanmış ve Şekil 4.18'de artan sıvı sirkülasyon debisinin $k_L a$ üzerine olan etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Farklı güç aktarımları ile k_{La} değerinin değişimi

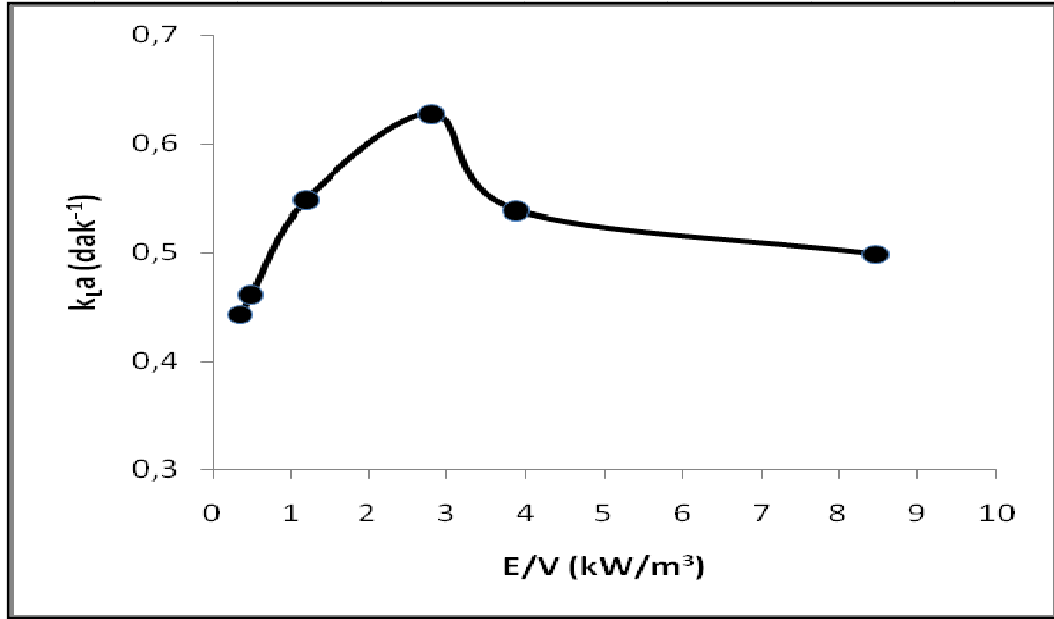
*pH=2.26, T=20°C, Gönderilen Ortalama O₃ Gazı Konsantrasyonu=9.5 g/m³, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Gaz Tipi=Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%20, nozül çapı=15.5 mm

Kullanılan sistemde elde edilen en yüksek sıvı sirkülasyon debisi 80 L/dak.'dır. Bu sirkülasyon debisi ile elde edilen en yüksek sıvı jet hızı 8.46 m/s olup, daha yüksek güç aktarımları için nozül çapı küçültülmüştür. Kullanılan nozüller ile çıkabilecek en yüksek sirkülasyon debileri, ulaşılan nozül sıvı hızları ve hesaplanan birim hacim başına güç aktarımları Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Kullanılan nozül çapları ile elde edilen nozül sıvı hızları ve 4.1 nolu eşitlik kullanılarak hesaplanan güç tüketimleri

Nozül çapı (mm)	QL (L/dak)	U _{nozül} (m/s)	E/V (KW/m ³)	k _{La} (saat ⁻¹)
15.5	40	4,2323	0,3498	0,44264
	60	6,3484	1,1806	0,54792
	80	8,4646	2,7985	0,62792
10.0	20	7,0372	0,4836	0,46082
	40	14,0744	3,8686	0,53868
8,8	38	21,3612	8,4657	0,49842

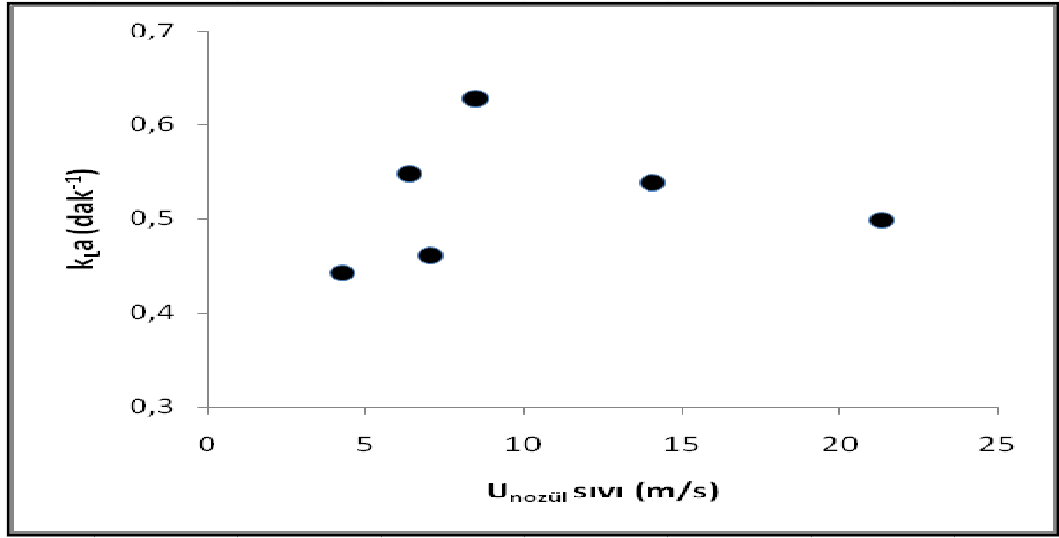
Çizelge 4.1'deki değerle yardımıyla E/V değerleri ile elde edilen k_{La} değerlerinin değişimi ise Şekil 4.19'de verilmektedir. Şekil 4.19'den artan E/V güç tüketimlerinin yaklaşık 2.8 kW/m^3 değerinden sonra k_{La} değerinde artışa neden olmadığı, aksine k_{La} değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.19. Farklı E/V değerleri ile k_{La} değerlerinin değişimi

*pH=2.26, T=20°C, Gönderilen Ortalama O₃ Gazı Konsantrasyonu=9.5 g/m³, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Gaz Tipi=Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%20

Şekil 4.19'dan k_{La} değerlerinin önce artıp daha sonra $2,8 \text{ kW/m}^3$ değerinden sonra azalması, akış rejiminin değişmesi, yüksek kinetik enerjiden dolayı ozon gaz kabarcıklarının birleşmesi ve yüksek hızdan dolayı emme tüpü çevresindeki sirkülasyon sayısının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan sıvı jet hızından dolayı emme tüpü içerisine giren ozon gaz kabarcık sayısında da azalma olması k_{La} değerlerinde azalmaya yol açmaktadır. Şekil 4.20'da jet nozül ucundaki sıvı hız ile k_{La} değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Yüksek hızlar bir dereceye kadar hacimsel kütle transferini artırmakla birlikte daha ileri jet hızlarında yukarıda sayılan nedenlerden dolayı k_{La} değerleri azalmaktadır.

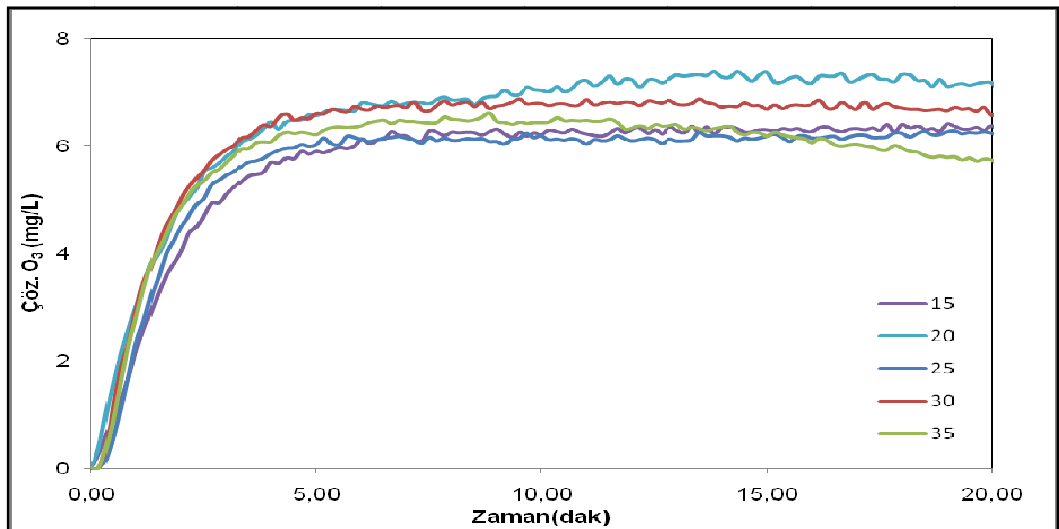


Şekil 4.20. Farklı sıvı jeti hızları ile k_{La} değerinin değişimi

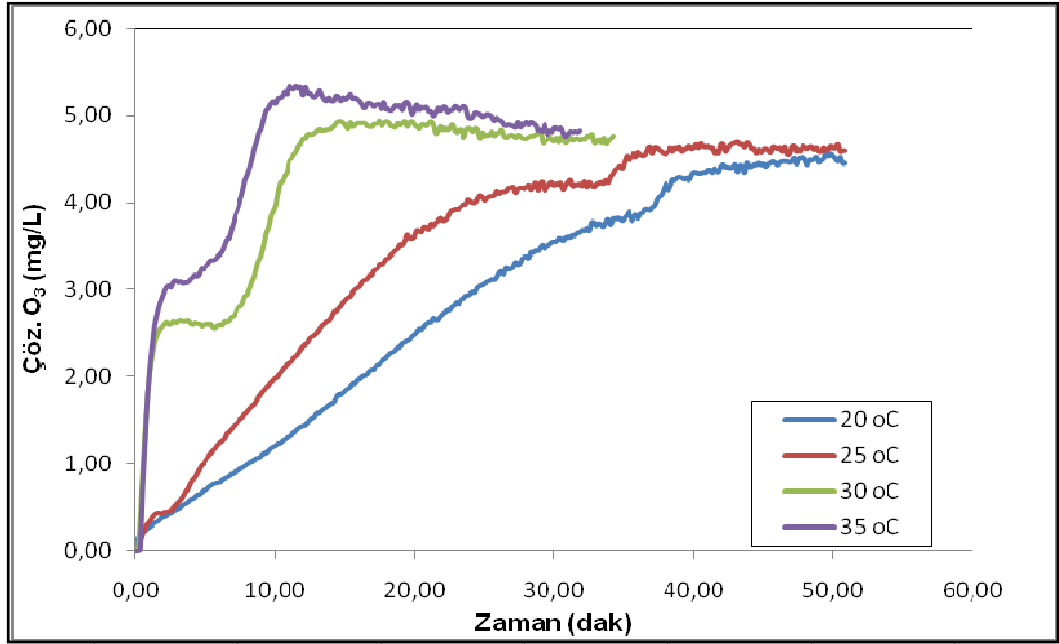
*pH=2,26, T=20°C, Gönderilen Ortalama O₃ Gazı Konsantrasyonu=9.5 g/m³, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Gaz Tipi=Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%20

4.1.4. Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklığın k_{La} değeri üzerine olan etkisinin incelenmesi için 15, 20, 25, 30 ve 35°C'de çalışılmış ve ilk önce pH=2,26'da sabit tutulmuştur. Elde edilen zaman bağılı olarak artan çözülmüş ozon değerlerinin değişimi Şekil 4.21'de gösterilmiştir. pH=7 için farklı sıcaklıklarda yapılan denemeler ise 4.22'de gösterilmiştir.

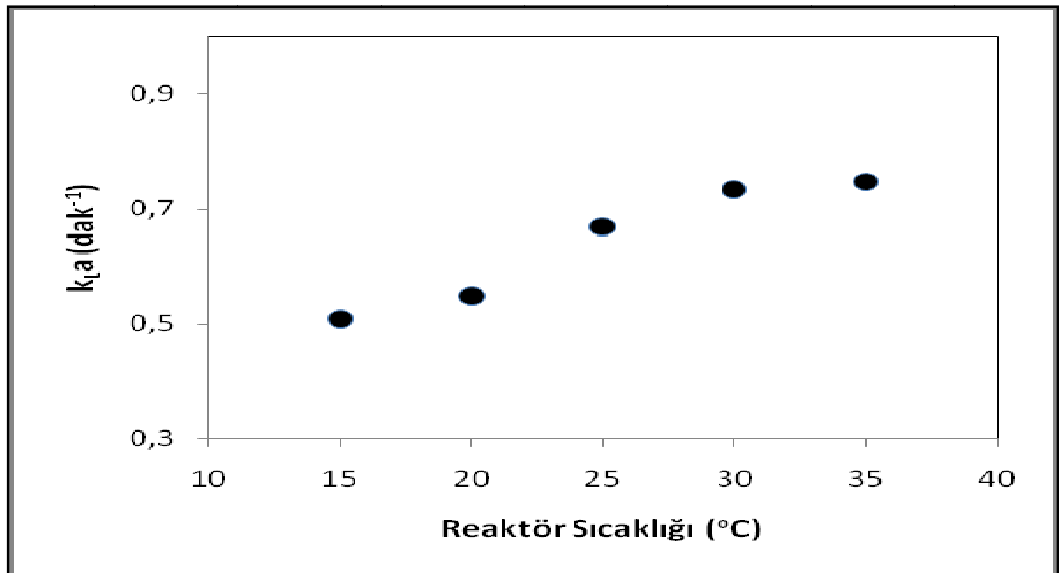


Şekil 4.21. pH=2.26



Şekil 4.22. pH=7.00

Şekil 4.21’de gösterilen değerlerden yararlanılarak pH=2,26 için hesaplanan $k_{L,a}$ değerleri ise Şekil 4.23’de verilmektedir.



Şekil 4.23. Reaktör sıcaklığı ile $k_{L,a}$ değerlerinin değişimi

*pH=2.26, T=20°C, Gönderilen Ortalama O₃ Gazı Konsantrasyonu=9.5 g/m³, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Gaz Tipi=Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%20

Artan sıcaklık çözünmüş ozon gazının çözünürlüğünü azaltır. Yapılan deneylerde 15°C'den itibaren artan k_{La} değerleri 30°C'den sonra daha fazla artmaktadır. Sıcaklık artışıyla k_{La} değerlerindeki bu artış jet loop reaktörde viskozitenin azalması ve yüzey geriliminin düşmesi neticesinde ortalama kabarcık çapının azalması ve buna bağlı olarak özgül yüzey alanının büyümesi ile açıklanmaktadır.

4.2. Jet Loop Reaktörde Saf Oksijen Kullanılarak Üretilen Ozon Gazı ile Yapılan Kütle Transfer Denemeleri

4.2.1. Ozon Gaz Konsantrasyonunun Etkisi

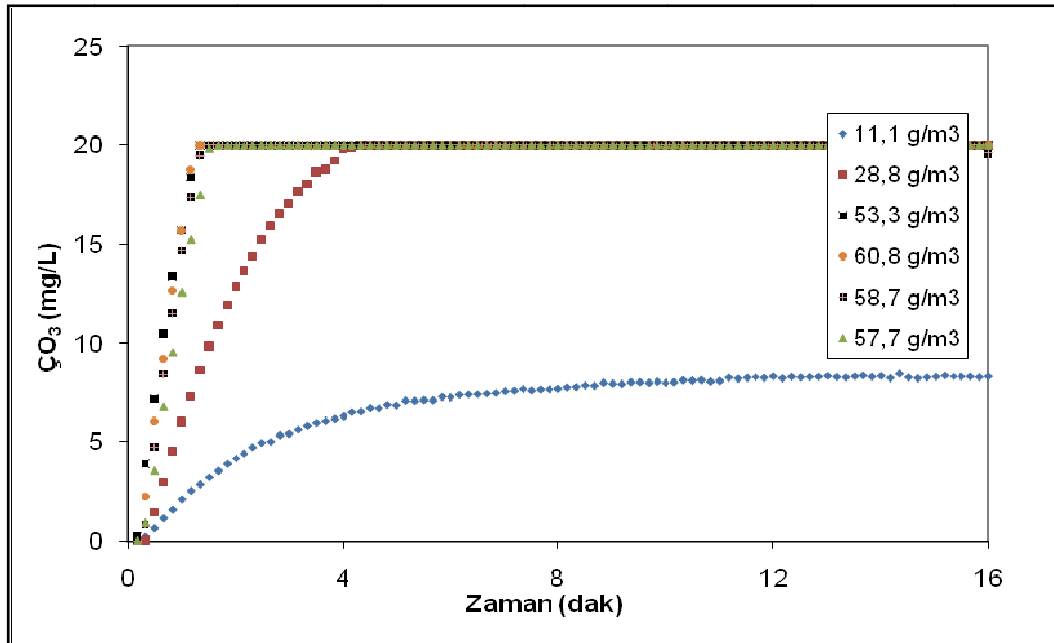
Bu bölümde saf oksijen kullanılarak ozon üretimi yapıldığı zaman sonuçları tartışılacaktır. Öncelikle ozonizatör 250 L/saat sabit gaz debisinde farklı kapasitelerde çalıştırılmış ve elde edilen farklı ozon gazı konsantrasyonlarındaki gaz karışımı, önceden saf azot gazı geçirilerek çözünmüş oksijenden arındırılmış reaktöre gönderilmiştir. Ozonizatör tarafından üretilen ozon gazının konsantrasyonunun değişmediği andan itibaren reaktöre gönderilen gaz jet loop reaktöre girip üsteki gaz alma bölgesinden teflon bir hortum vasıtasıyla alınmakta ve çeker ocağın içinden dışarı atılmaktadır.

Tüm bu işlemler sırasında reaktördeki sıcaklık 20°C'de sabit tutulmakta, pH, çözünmüş oksijen ve çözünmüş ozon değerleri kaydedilmektedir. Şekil 4.24'de farklı ozon gazı konsantrasyonları için elde edilen çözünmüş ozon konsantrasyonlarının zamanla değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.25'de ise Şekil 4.24'deki gaz değerlerini elde etmek için ozonizatörün farklı çalışma kapasitelerine ayarlanması neticesinde elde edilen ozon gazı değerlerinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.25'dan ozon gazı değerlerinin son derece stabil olduğu görülmektedir.

Artan kapasiteler beklenildiği gibi orantılı bir biçimde daha yüksek ozon gaz konsantrasyonunun oluşmasına yol açmamaktadır. Şekil 4.24'de jet loop reaktörde ölçülen çözünmüş ozon değerlerinin 11,1 g/m³'lük besleme ozon gazı değeri hariç 1 dakika

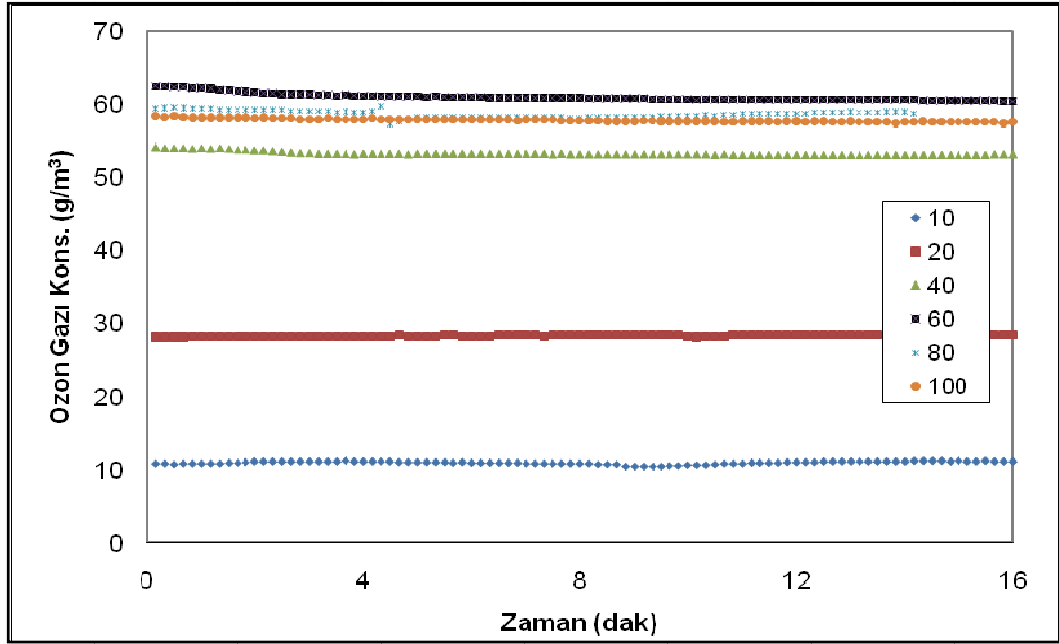
civarında 20 mg/L değerini aştığı görülmektedir. Sistemde kullanılan ozon metre 20 mg/L'nin üzerindeki çözülmüş ozon değerlerini ölçmemektedir. Dolayısıyla 20 mg/L'yi geçen değerler 20 mg/L olarak kaydedilmiştir.

Benzer şekilde çözülmüş oksijen içinde sistemin ölçebildiği en yüksek değer 25 mg/L'dir. Dolayısıyla bu değerlerin üzerindeki tüm ölçümler cihazların ölçebileceği üst sınırdaki sabit olarak kalmıştır. Bu durum bazı denemelerin $k_L a$ hesaplamalarının yapılamamasına yol açmıştır.



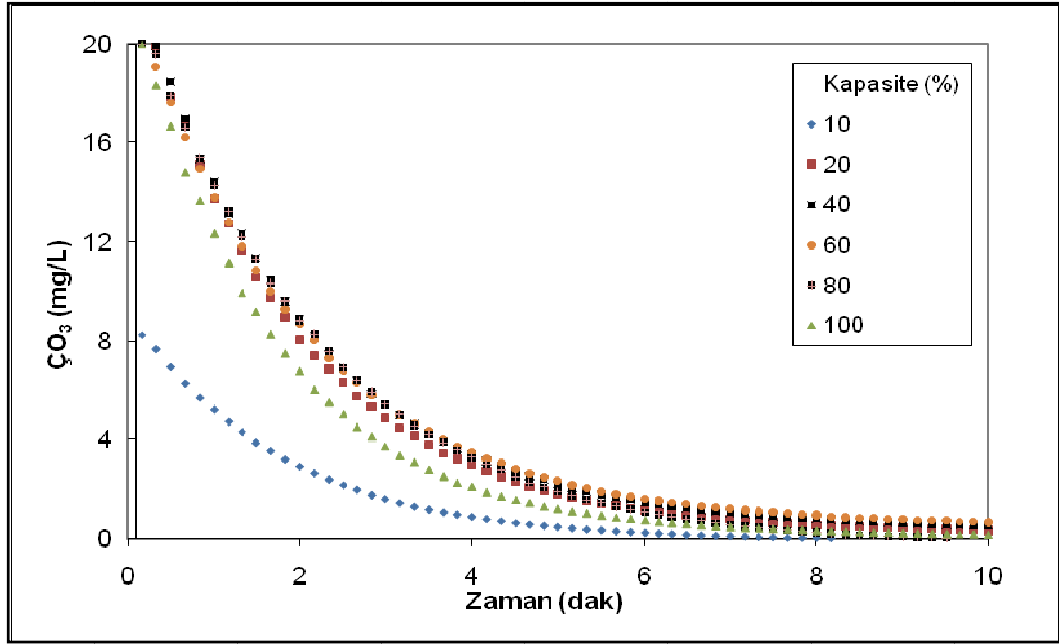
Şekil 4.24. Farklı ozon gazı konsantrasyonları için reaktörde ölçülen çözülmüş ozon değerlerinin zamanla değişimi

*T=20°C, pH=2,26, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, saf oksijen



Şekil 4.25. Farklı ozonizatör çalışma kapasitelerinde reaktöre gönderilen ozon gazı derişiminin zamanla değişimi
 *T=20°C, pH=2,26, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Saf Oksijen

Ozon gazı gönderilerek yapılan transfer deneyi tamamlandığında bir sonraki deneye geçmek için reaktör de kalan çözülmüş ozonun giderilmesi gerekmektedir. Bu işlem deneyin sonuna gelindiğinde gönderilen ozon gazının ozonizatörün kapatılması veya üretim kapasitesinin %0'a getirilmesiyle, jet loop reaktöre kuru havanın gönderilmeye başlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.26'de jet loop reaktördeki ozon gazının kuru hava ile sıyrılmasına ait grafik gösterilmektedir. Ozon gazının suda çözünerek 20 mg/L'ye çıkması 1-2 dakikada tamamlanırken (Şekil 4.24), tam tersi ozon gazı içermeyen kuru havanın 250 L/saat debide geçirilmesi ile ancak 8-10 dakika civarında jet loop reaktörden sıyrılmaktadır.

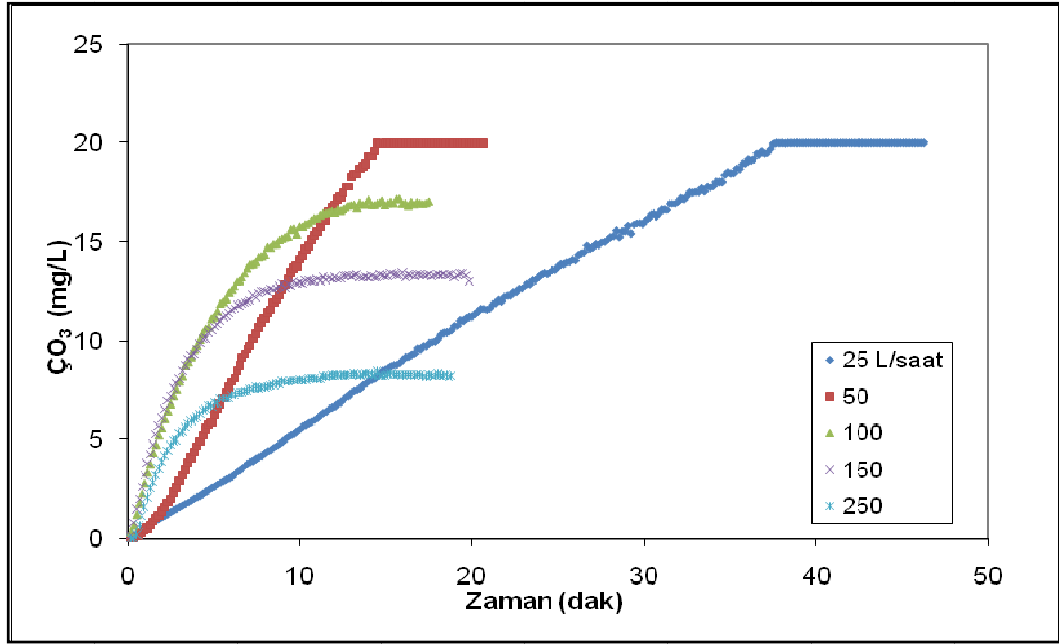


Şekil 4.26. Farklı ozonizatör çalışma kapasitelerinde reaktörde kalan çözünmüş ozonun hava ile sıyrılarak reaktörden uzaklaştırılması

*T=20°C, pH=2,26, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, kuru hava ile sıyrılma, %10 hariç tüm başlangıç değerleri 20 mg/L ÇO₃

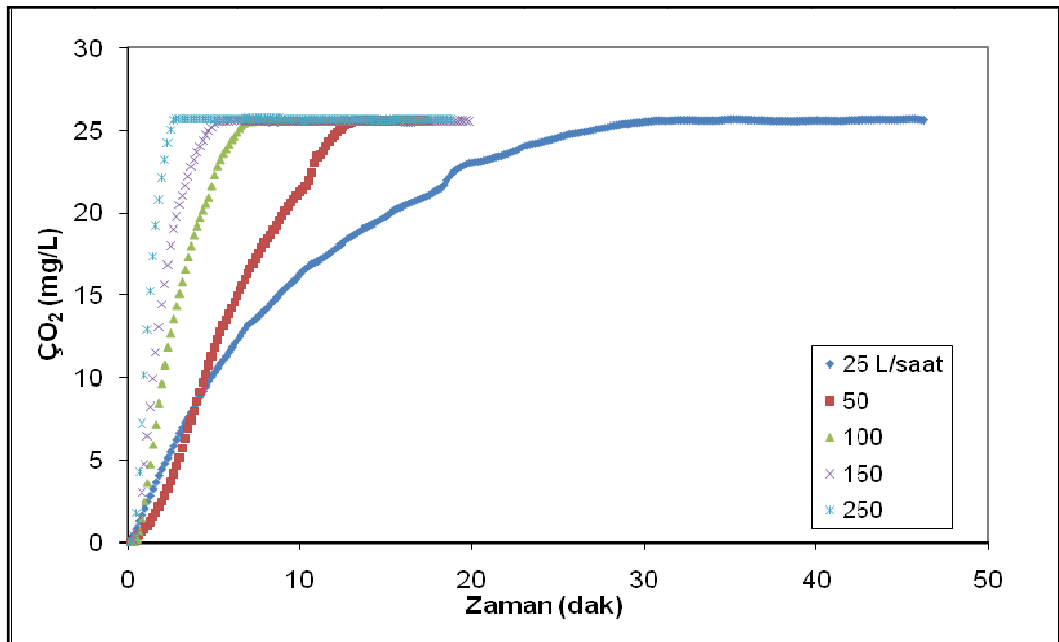
4.2.2. Ozon Gazı Besleme Debisinin Etkisi

Farklı ozon gazı besleme debilerinde jet loop reaktörde elde edilen çözünmüş ozon değerlerinin değişimi Şekil4.27’de gösterilmiştir. aynı anda çözünmüş oksijen için elde edilen artışlar ise şekil 4.28’da verilmiştir. Şekil 4.24’de %10’luk bir çalışma kapasitesinin jet loop reaktördeki çözünmüş ozon gazının çok fazla yükseltmediği anlaşıldığından gaz debisi etkisi %10’luk kapasitede gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.27. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözülmüş ozon değerlerinin zamanla değişimi

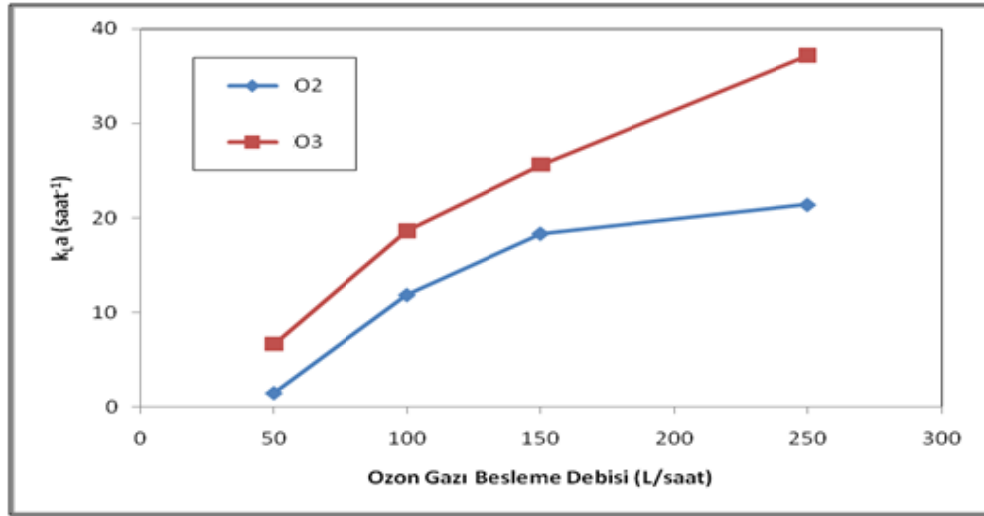
*T=20°C, pH=2,26, Saf Oksijen, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10



Şekil 4.28. Farklı gaz besleme debilerinde reaktörde ölçülen çözülmüş oksijen değerlerinin zamanla değişimi

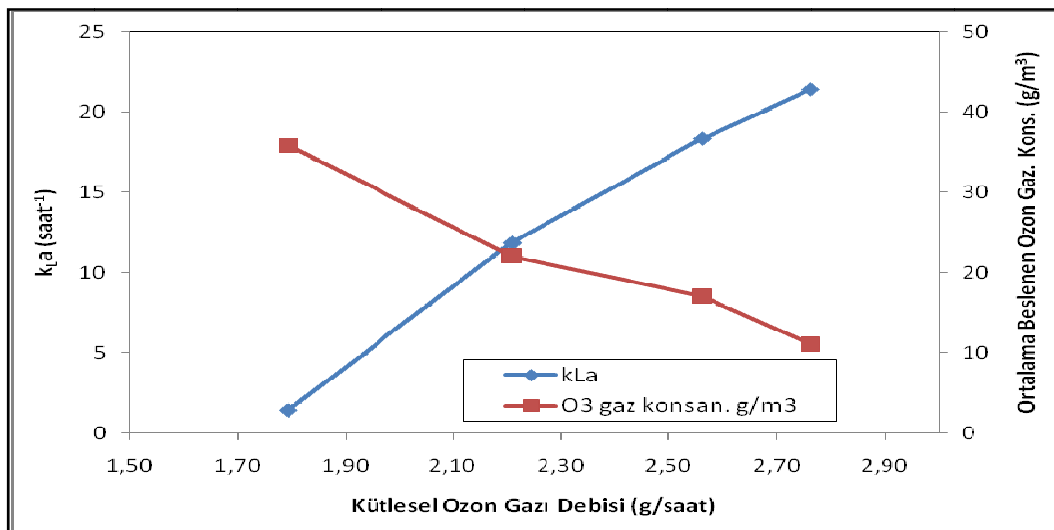
*T=20°C, pH=2,26, Saf Oksijen, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'daki verilen (3.6) numaralı lineer olmayan yöntemle çözülmesiyle hem ozon hem de oksijen için k_La değerleri elde edilmiş ve gaz debisi ile olan değişimleri Şekil 4.29'da verilmiştir. Ozon gazı besleme debisi ve kütleli ozon debileri ile k_La ve ozon gaz konsantrasyonlarının değişimleri ise Şekil 4.30 ve 4.31'de verilmiştir.



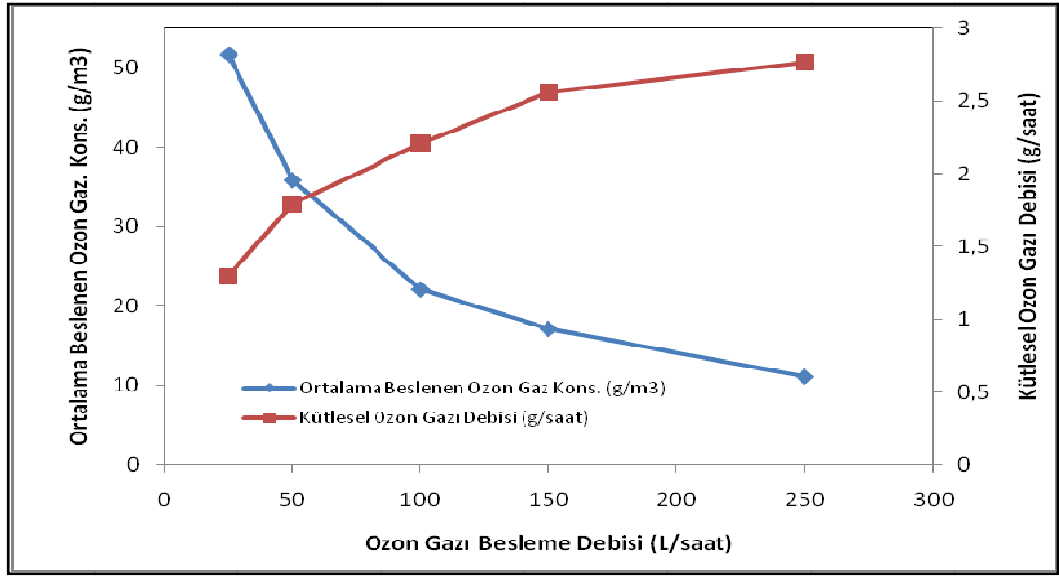
Şekil 4.29. Farklı gaz besleme debilerinde çözünmüş ozon ve oksijen için elde edilen kütle transfer değerlerinin karşılaştırılması

*T=20°C, pH=2,26, Saf Oksijen, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10



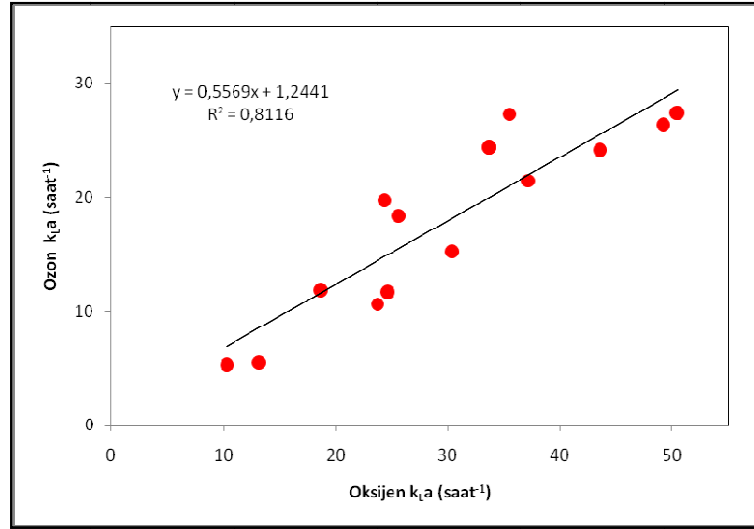
Şekil 4.30. Saf Oksijen ile yapılan denemelerde kütleli ozon gazı debisi ile ozon için elde edilen kütle transfer değerlerinin ve reaktöre gönderilen ozon gaz konsantrasyonlarının değişimi

*T=20°C, pH=2,26, Saf Oksijen, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10



Şekil 4.31. Saf oksijen ile yapılan denemelerde gaz debisi ile kütesel ozon gazı debisi ile reaktöre gönderilen ozon gaz konsantrasyonlarının değişimi
 *T=20°C, pH=2,26, Saf Oksijen, Ozonizatörün çalışma kapasitesi=%10

Farklı gaz debisi ve ozon gazı konsantrasyonlarında ozon ve oksijen için elde edilen $k_L a$ değerlerinin birbirleri ile olan ilişkisi ise Şekil 4.32’de gösterilmektedir. Şekil 4.32’de ozon ve oksijen için hesaplanan $k_L a$ değerlerinin arasındaki oran 0,55 olarak bulunmuştur. Literatürde bu oran 0,622 olarak verilmektedir ve reaktörün hidrodinamiğine yakından bağlıdır (Gottschal 2000).



Şekil 4.32. Kuru hava ile yapılan denemelerde ozon ve oksijen için elde edilen kütle transfer değerlerinin karşılaştırılması

*T=20°C, pH=2,26, Kuru hava ve saf oksijen değerleri bir arada

Hesaplanan k_{La} değerlerinin literatürdeki diğer bazı ozonizatör cihazları ile karşılaştırılması ise Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2’de yapılmaya çalışılan bu kıyaslama için tüm çalışmaların k_{La} değerleri 100 L’lik bir reaktör için düzeltilmiştir. Çünkü kütle transfer katsayısında transfer edilen sıvı hacmi göz önüne alınmak zorundadır. k_{La} terimindeki özgül yüzey alanının ifade eden a terimi A/V şeklinde açılıp, birim reaktör hacmi başına gaz ve sıvı temas yüzey alanı olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla artan temas yüzey alanı (A) ve azalan sıvı hacmi (V), k_{La} değerini artırır. Bu amaçla kıyaslama yapılırken bu durum göz önüne alınmaya çalışılmıştır. Kütle transferini artırmak için gaz debilerinin artırılması kimi zaman gaz kabarcıklarının birleşmesiyle ve toplam yüzey alanının küçülmesine neden olur. Bu durumda daha küçük çaplı kabarcıklar oluşturup yüzey alanını büyütmeye çalışmak gerekir. Kabarcık çaplarının küçültülmesi ise yük kayıplarının artışına neden olur. Neticede kütle transfer çalışmalarında suya transfer edilen gazın birim kütlesi başına ne kadar enerji harcandığı daha önemlidir. Harcanan birim enerji başına suya aktarılan gazın miktarı üzerinden kıyaslama yapılması en doğru kıyaslama şeklidir.

Çizelge 4.2. Literatürdeki diğer bazı çalışmalarla bulunan sonuçların kıyaslanması

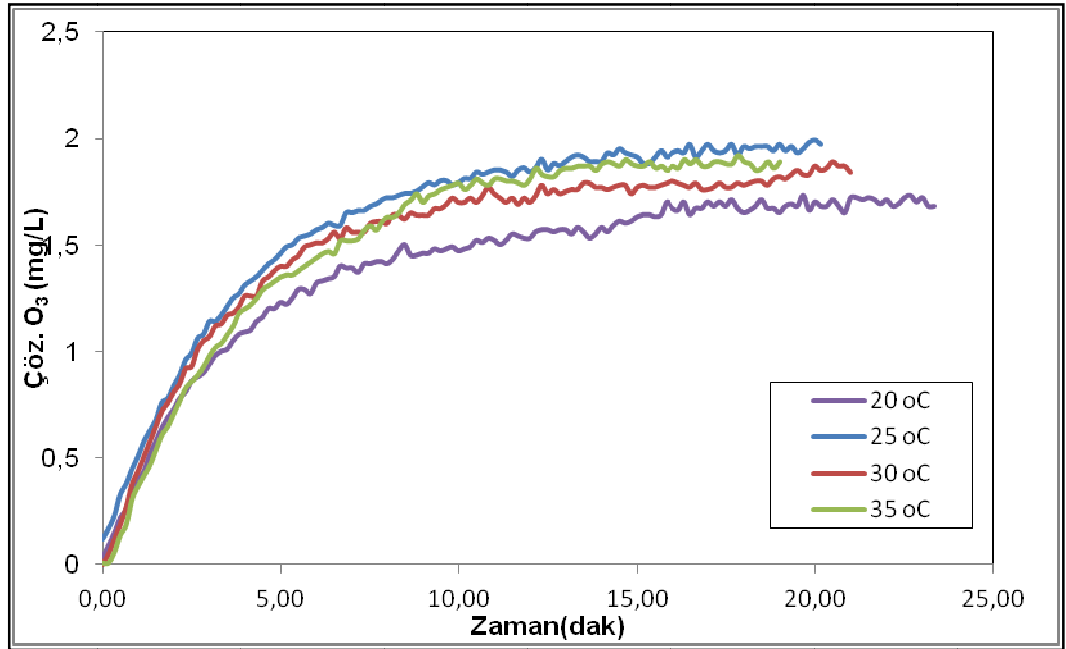
Reaktörün hacmi (L)	k_{La} (saat ⁻¹)	100 Litre için Düzeltilmiş k_{La} (saat ⁻¹)	Gaz debisi (L/saat)	Besleme Gaz Konsan. (g O ₃ /m ³)	Ozon gazı kütlesi başına elde edilen maksimum k_{La} (saat ⁻¹ /g saat ⁻¹)	Reaktör Tipi	Referans
4,6	180-396	8,3-18,2	95-335	-	-	Klasik Kabarcıklı Kolon	1
10	30-90	3-9	60-240	10	3,75	Karman Kontaktörü	2
1,47	54-126	0,8-1,85	30-60	36-100	0,3	İnce uzun counter current kabarcıklı kolon	3
97	10,8-72,0	10,5-69,8	300-1200	8-60	0,969	Uzun kabarcıklı kolon	2
1,5	22,8-49,2	0,342-0,738	15-30	30	0,82	Cocurrent yukarı akışlı paket reaktör (silika jel dolgulu)	4
1,32	0-90	0-1,18	0,125-0,30	10	393	Elektrosprayer	4
15,7	2,65-4,50	0,42-0,70	10-50	2,3-7,3	19,2	Kabarcıklı	5
8	26-67	2,08-5,36	303,5-537,6	20	0,50	İndüklenmiş gaz reaktör	6
30	259-486	77-145	250-450	20	16,1	Ejektör	8
2,5	54-102	1,35-2,55	250-450	20	0,28	Kabarcıklı	8
18	5,5-47	1-8,5	50-250	3,6-22	1,54	Jet loop reaktör	Bu çalışma

4.3. Kabarcıklı Kolonda Yapılan Kütle Transferi Denemeleri

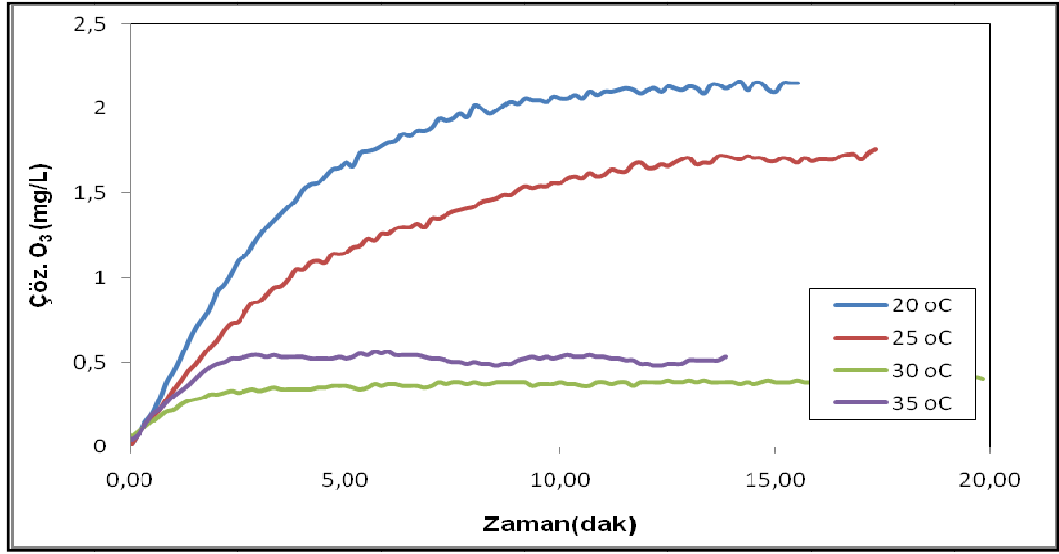
Bu denemeler için mevcut reaktörün içinde bulunan emme tüpü çıkarılmış ve reaktörün tabanından 10 cm yukarı yerleştirilen quartz bir difüzör ile farklı ozon gazı kütleli debileri ve sıcaklık ozon gazı kütle transfer deneyleri yapılmıştır. tüm deneyler jet loop için yapılan şartlarda gerçekleştirilmiş ve bu sayede karşılaştırmaları sağlanmıştır.

4.3.1. Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklığın $k_L a$ üzerine etkisini belirlemek için önceden sabit sıcaklığa getirilmiş olan reaktöre 250 L/saat debide 4 g/m^3 ozon gazı konsantrasyonunda ozon gazı verilmiş ve zamanla artan çözülmüş ozon konsantrasyonlarının değişimi Şekil 4.33 ve 4.34'de verilmiştir.

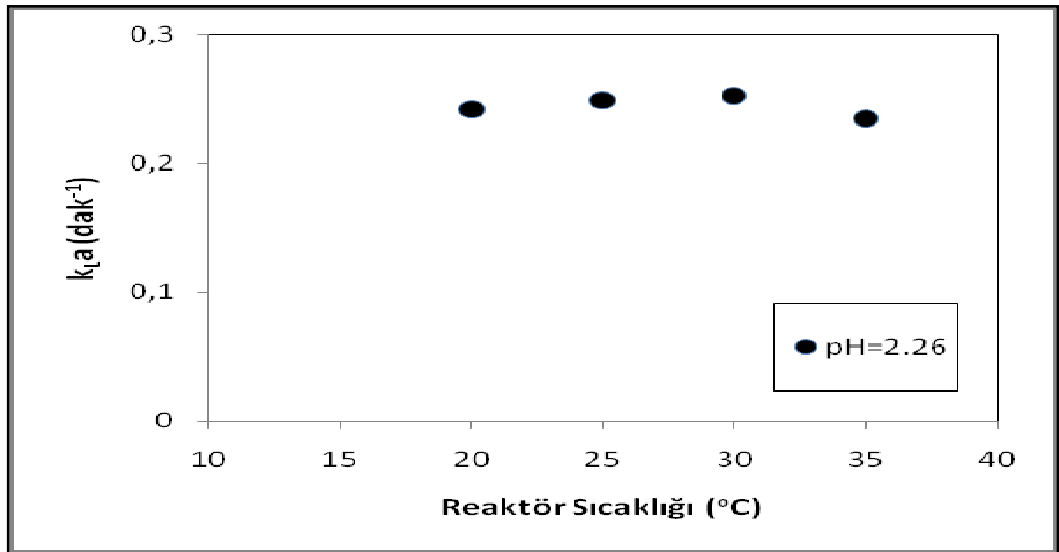


Şekil 4.33. pH=2.26



Şekil 4.34. pH=7.00

pH=2.26'da hesaplanan k_{La} değerlerinin sıcaklık ile olan değişimleri Şekil 4.35'de gösterilmiştir. Artan sıcaklığı jet loop reaktörde k_{La} değeri üzerinde etkili olmadığı görülmektedir. Yüksek pH değerlerindeki k_{La} hesaplamaları ise ozonun bozunma hız katsayısının belirlenmesindeki zorluk nedeniyle burada sadece düşük pH değerlerindeki k_{La} hesapları verilmiştir.



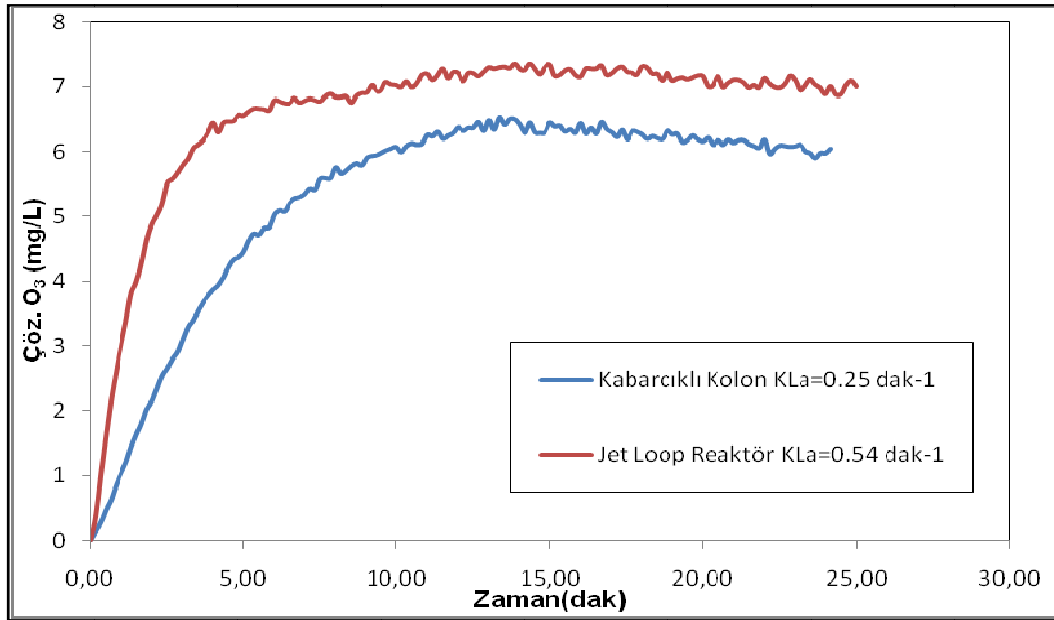
Şekil 4.35. Reaktör sıcaklığı ile k_{La} değerlerinin değişimi

*pH=2.26, T=20°C, Gönderilen Ortalama O₃ Gazı Konsantrasyonu=4.0 g/m³, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Gaz Tipi=Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%10

4.4. jet Loop ve Kabarcıklı Reaktörlerde Ozonlama İşleminin Karşılaştırılması

Bu bölümde aynı koşullar altında işletilen kabarcıklı kolon ve jet loop reaktörde ozonlama işleminin karşılaştırılması yapılacaktır.

Şekil 4.36 ve 4.37’de aynı koşullarda kabarcıklı ve jet loop şeklinde aynı hacimde işletilen reaktörlerdeki çözülmüş ozon ve çözülmüş oksijen artışları görülmektedir.

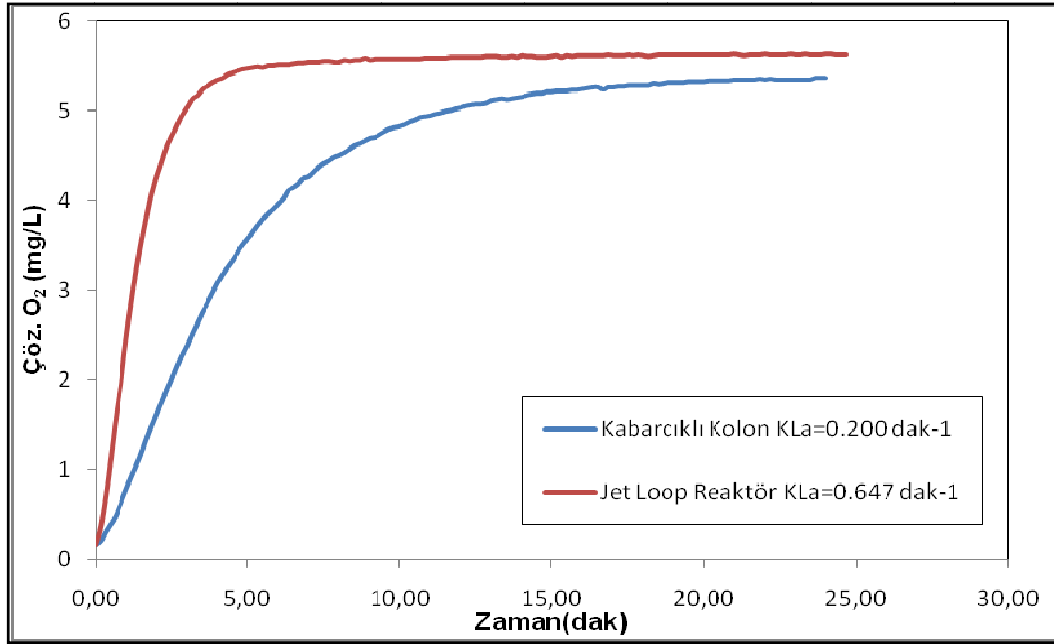


Şekil 4.36. Kabarcıklı ve jet loop reaktörlerde aynı şartlarda çözülmüş ozon değerlerinin artışının karşılaştırılması

*pH=2,26, T=20°C, Gönderilen Ortalama O₃ Gazı Konsantrasyonu=4,0 g/m³, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Gaz Tipi=Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%10, Reaktör hacmi=18 L

Şekil 4.36-4.37’den jet loop reaktörde çözülmüş ozon ve çözülmüş oksijen artış hızlarının kabarcıklı kolona kıyasla fazla olduğu açıkça görülmektedir ve bu durum k_La değerlerine de yansımıştır. pH=2,26’da jet loop reaktörde aynı şartlarda kabarcıklı kolona nazaran 2 kattan fazla k_La değeri elde edilmiştir. Çözülmüş ozon ölçüm değerlerinin yanı sıra çözülmüş oksijen değerlerine de bakıldığında benzer durum ile karşılaşılmaktadır. Şekil 4.37’de pH=2,26 için her iki reaktör için aynı şartlarda kaydedilen çözülmüş oksijen değerlerindeki artış gösterilmektedir. Şekil 4.37’den de çözülmüş oksijen jet loop reaktörün kabarcıklı kolona nazaran daha yüksek kütle

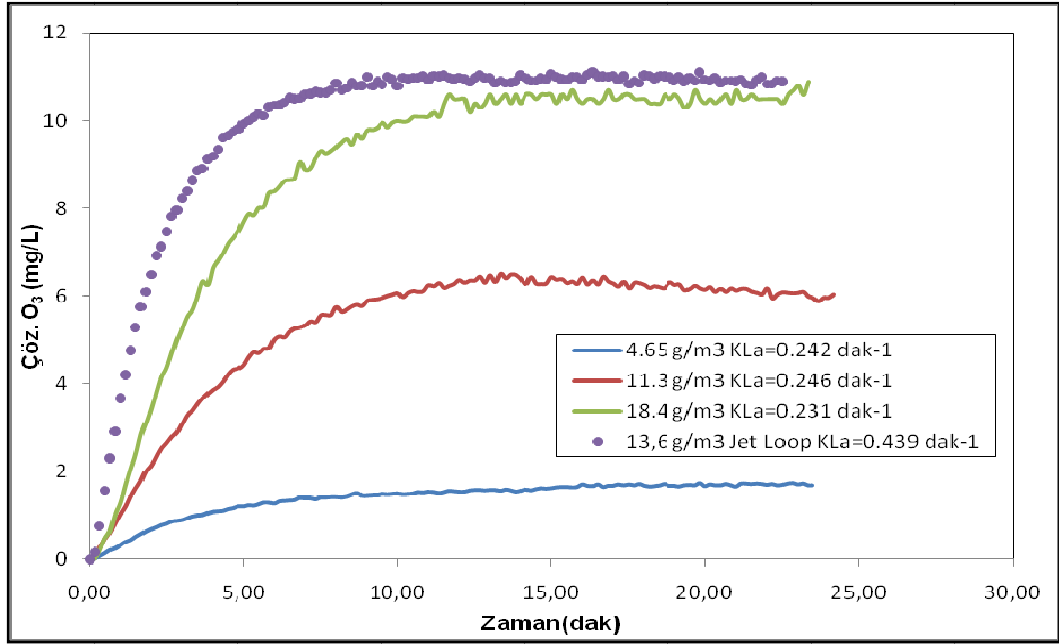
transfer başarabildiği görülmektedir. Jet loop reaktörde çözülmüş oksijen için hesaplanan kütle transfer katsayısı aynı koşullarda işletilen kabarcıklı kolonda elde edilene göre 3 kat daha fazla bulunmuştur.



Şekil 4.37. Kabarcıklı ve jet loop reaktörlerin oksijen transferi açısından karşılaştırılması

*pH=2.26, T=20°C, Gönderilen Ortalama O₃ Gazı Konsantrasyonu=4.0 g/m³, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Gaz Tipi=Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%10, Reaktör hacmi=18 L

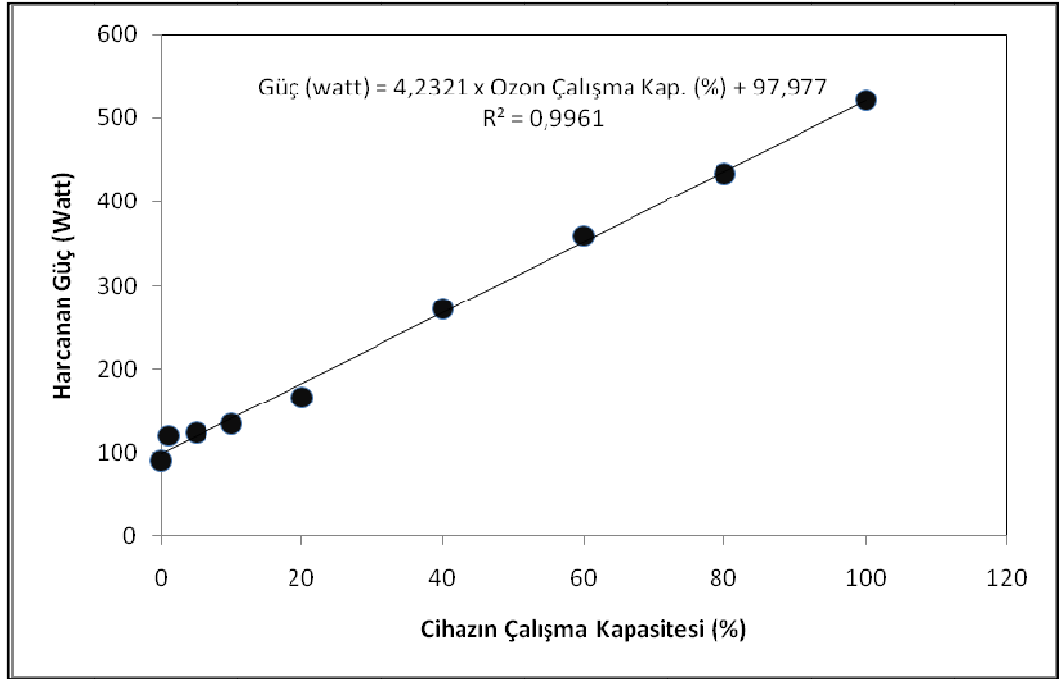
Şekil 4.38'da ise farklı ozon gaz konsantrasyonlarında kabarcıklı ve jet loop reaktörde elde edilen zamanla çözülmüş ozon konsantrasyonu artışlarının değişim gösterilmektedir. Jet loop reaktörde 13,6 g/m³'lük gaz konsantrasyonu kabarcıklı kolonda 18.4 g/m³'lük ozon gazına rağmen daha yüksek k_La değeri elde edilmesine yol açmıştır.



Şekil 4.38. Farklı kapasitelerde verilen ozon gazı konsantrasyonları ile kabarcıklı kolon reaktör içerisinde zamanla çözünmüş ozon konsantrasyonlarının değişimi-13,6 g/m³'lük gaz konsantrasyonu ile yapılan jet loop reaktöre ait çözünmüş ozon konsantrasyon değişimi karşılaştırma için grafiğe ilave edilmiştir.
*pH2,26, T=20°C, Gönderilen Gaz Debisi=250l/saat, Gaz tipi= Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%40, Reaktör Hacmi=18L

Kütle transferinde yüzey alanı çok önemlidir. Her iki reaktör tipinde aynı miktarda gaz verilmesine rağmen kütle transferinin iki kata varan oranda farklı olması yüzey alanı ile ilgilidir. Jet loop reaktörde sıvı jetinin yüksek hızı ve sonucunda oluşan küçük kabarcıklar yüzey alanının artışına yol açmaktadır. Bu artış $k_L a$ değerini artırmakla birlikte bu iş için harcanan enerjinin kıyaslanması daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

Havalandırma cihazları genel olarak tükettikleri birim kWh başına iletebildikleri oksijen miktarı ile birbirleri ile kıyaslanırlar. Bu çalışmada kabarcıklı ve jet loop reaktörlerin kıyaslanmasında harcadıkları birim enerji başına sıfır çözünmüş ozon durumunda suya aktarabildikleri ozon gazı miktarı ile kıyaslanması yapılmıştır. Kullanılan ozon jeneratörü üretim kapasitesi arttıkça daha fazla güç tüketmektedir. Şekil 4.39'de kullanılan ozon jeneratörünün üretim kapasitesine karşın ihtiyaç duyduğu güçler gösterilmiştir.



Şekil 4.39. Kullanılan ozon jeneratörünün çalışma kapasitesi ile harcanan güç arasındaki ilişki

Şekil 4.39'den ozon jeneratörü hiç ozon üretmese dahi 90 Watt'lık bir güç çekmektedir. Çözünmüş ozonu ölçmek için akış hücresi içinden (Flowcell) 18 L/dak. debide su geçirilmektedir ve bu su jet loop reaktörün üst gaz alma bölgesi denilen kısma dökülmektedir. Bu işlem üst tarafın kısmen karışmasına neden olmaktadır. Bu nedenle harcanan güç hesaplanırken tüm bu işlemler için kullanılan güçler dikkate alınmıştır. Sistemdeki tüm parçaların harcadıkları enerji, her bir cihazın besleme hattına bir avometre bağlanarak ölçülen amper değerlerinin sabit voltaj ile çarpılmasından elde edilmiştir. Sonuç olarak pH=2.26'da yapılan iki farklı ozon gaz konsantrasyonunda için kabarcıklı ve jet loop reaktörler için hesaplanan enerji tüketimi ve bu enerji ile sıfır çözünmüş ozon olması durumunda suya aktarılan ozon gazı miktarları ise Çizelge 4.3'de verilmektedir.

Çizelge 4.3. Farklı ozonizatör çalışma kapasitelerinde harcanan enerji başına sıfır çözünmüş ozon konsantrasyonunda suya aktarılabilen çözünmüş ozon miktarlarının karşılaştırılması (pH=2.26, T=20 °C, Gönderilen Gaz Debisi=250 L/saat, Gaz Tipi=Kuru Hava, Cihaz Çalışma Kapasitesi=%10 ve 40, Reaktör hacmi=18 L)

	Ozon Jeneratör Çalışma kapasitesi (%)	k_{La} (dak ⁻¹)	C_s (mg/L)	Güç Tüketimi (watt)		N=kg Ozon/kWh**
				Ozonizatör	Pompa	
Kabarcıklı Kolon	10	0.246	6.67	166	944*	1,6
	40	0.231	10.80	271	944*	2,2
Jet Loop Reaktör	10	0.540	7.15	166	1212	3,0
	40	0.439	11.01	271	1212	3,5

*Bu değer çözünmüş ozon ölçümü için 18 L/dak debi için harcanan gücü göstermektedir ve gaz alma bölgesinde karışma neden olmaktadır. ** $N=(k_{La})x(C_s-C_o)*V/kWh$

Jet loop reaktörün harcanan enerji göz önüne alındığında kabarcıklı kolon tip reaktörlere göre daha yüksek hızda ozon gazını suda çözebildiği görülmüştür. Bu durum ozonun suların ozonlanmasında daha etkin kullanılması anlamına gelmektedir. Yüksek k_{La} değerleri her zaman arzulanan bir durum olmakla birlikte, bu iş için harcanan enerjinin göz ardı edilmemesi gerektiğinden hareketle Çizelge 4.3’de bulunan sonuçlar ışığında jet loop reaktörün kabarcıklı kolona göre ozon kütle transferi açısından daha iyi sonuç verdiği gözlenmektedir.

5. SONUÇLAR

Jet loop reaktörde ozonun kütle transfer özelliklerinin test edildiği araştırmamızda iki aşamalı bir laboratuvar çalışması yürütülmüştür.

Birinci aşamada ozon gazının çeşitli koşullar altında jet loop reaktörde kütle transfer özelliklerinin belirlenmesi için sıcaklık, üretilen ozon gazı konsantrasyonu, reaktöre gönderilen gaz debisi, püskürtme başlığı çapı ve sirkülasyon debisi gibi parametreler ayrı ayrı incelenmiştir.

Ozon gazı konsantrasyonunun kütle transferine etkisi ile ilgili çalışmada $3,6-17 \text{ g/m}^3$ aralığında $\text{pH}=2,26$ 'da 250 L/saat gaz debisinde yapılan çalışmada $k_{L,a}$ değerleri beklenildiği gibi artmamış, sadece çözünmüş ozon değerleri yükselmiştir. Artan gaz konsantrasyonları ozonlama prosesinde birim zamanda reaksiyona girecek ozon miktarını artırması anlamında önemlidir. Yüksek yüklemelerde gereken ozon kütlesini iletme açısından artan çözünmüş ozon değerleri, sabit $k_{L,a}$ değerlerine rağmen kütle transfer miktarını artırır.

JLR'e gönderilen gaz debisinin etkisi incelendiğinde ise $50-250 \text{ L/saat}$ aralığında çalışılmış ve Şekil 4.11'den de görülebildiği üzere artan gaz debileri $k_{L,a}$ değerlerini 5 kata yakın artırmaktadır. Artan gaz debileri artan yüzey alanı demek olduğundan kütle transferi de artmaktadır. Ancak artan gaz debileri çözünmüş ozon denge değerlerinin azalmasına yol açmaktadır.

Sıvı sirkülasyon debilerinin etkisinin incelenmesi çalışmalarında ise iki ayrı durum incelenmiştir. Bunlardan birincisinde aynı jet başlığı ile ($15,5 \text{ mm}$ 'lik) farklı sirkülasyon debileri çalışılmış, ikinci kısımda ise farklı nozüller için farklı sıvı hızlarının etkisi incelenmiştir. 40 L/dak. 'dan 80 L/dak. 'ya çıkan sıvı sirkülasyon debileri $k_{L,a}$ değerleri $0,44 \text{ dak}^{-1}$ 'den $0,63 \text{ dak}^{-1}$ 'e yükseltmiştir. $k_{L,a}$ değerlerinin % 43 arttığı bu işlemde birim reaktör hacmi başına tüketilen güç ($E/V, \text{ kW/m}^3$) ise yaklaşık 8 kat artarak $2,7$

kW/m³ değerine ulaşmıştır. Yaklaşık 2,8 kW/m³ değerinden daha fazla olacak şekilde uygulanan sıvı hızlarında emme tüpü çevresindeki sıvı ve gaz hızlarındaki artış nedeniyle çevrime giren kabarcık sayısındaki azalma ve kabarcıkların birleşmesi (coalescence) gibi nedenlerle k_{La} değerleri azalmaktadır (Şekil 4.19).

Sıcaklığın etkisi üzerine yapılan çalışmada ise pH=2,26, ve 7’de her bir pH için 15, 20, 25, 30 ve 35°C değerlerinde çalışılmış ve artan sıcaklıkların her pH değerinde çözünmüş ozon konsantrasyonlarını azalttığı görülmüştür. Sadece pH=2,26’da hesaplanan k_{La} değerlerinin sıcaklıkla arttığı tespit edilmiştir. Sıcaklıkla k_{La} değerlerinin artışının; artan sıcaklığın viskoziteyi düşürmesi ve gaz kabarcık çapının küçülmesi neticesinde özgül yüzey alanının artışı ile ilişkili olduğu tahmin edilmektedir. 15 °C’de 0,5 dak⁻¹ olan k_{La} değeri 30°C arasında %50 artışla 0,75 dak⁻¹’e çıkmıştır ve 35°C’ye kadar sabit kalmıştır.

Jet loop reaktörde kuru hava kullanılarak üretilen ozon gaz konsantrasyonları yaklaşık 20 g/m³ ile sınırlı olduğundan, saf oksijen kullanılarak daha yüksek ozon gaz konsantrasyonları ile de bir kısım deneyler yürütülmüş ve bu denemelerde 61 g/m³ ozon gaz konsantrasyonlarına kadar çıkılmıştır. 250 L/saat gaz debisinde pH=2,26’da yürütülen deneylerde 11 g/m³ ozon gaz konsantrasyonu hariç tüm ozon gazı değerlerinde 20 mg/L çözünmüş ozon konsantrasyonu aşılmış ve ozon konsantrasyonu kaydedilemediği için k_{La} değerleri hesaplanamamıştır. 1-2 dakika içinde 20 mg/L ve üzerine çıkan ozon gazının tamamen aynı şartlarda sadece kuru hava ile sıyırılması ise ozonun sudaki sorpsiyonu dolayısıyla 8-10 dakikada tamamlanmaktadır. Saf oksijenle yapılan gaz debisinin etkisi hakkında olan çalışmada da aynı kuru havada olduğu gibi artan gaz debileri k_{La} değerlerini 5-10 kat kadar yükseltmiştir. Elde edilen değerler kuru hava ile yapılan, yani daha düşük ozon gaz konsantrasyonu deneylerindeki sonuçlar ile oldukça yakındır. Bu durum k_{La} değerlerinin gaz konsantrasyonundan ziyade gaz debisi ile alakalı olduğunu bir kez daha pekiştirmiştir.

İkinci aşamada ise jet loop reaktörün ozonlamada sıkça kullanılan kabarcıklı kolonlarla karşılaştırılmasını literatür değerleri ile yerine aynı koşullarda çalıştırılan bir kabarcıklı reaktörde yapmak daha doğru olacağından, kabarcıklı bir kolon kullanılarak da ozon

kütle transfer deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin neticesinde Çizelge 4.3'de verilen değerler hesaplanmış ve aynı şartlarda jet loop reaktörün kabarcıklı kolona göre 1,6-1,9 kat daha etkin olduğu ortaya konulmuştur. Kabarcıklı kolonda 1 kWh başına 1,6-2,2 kg ozon transferi gerçekleştirilirken, jet loop reaktörde bu değer 3,0-3,5 kg ozon / kWh değerine kadar çıkmaktadır.

Çözünmüş oksijen açısından yapılan karşılaştırma dahi jet loop reaktörün kabarcıklı kolona göre 3 kata varan bir kütle transfer katsayısı değeri üretebildiğini göstermiştir. Dolayısıyla jet loop reaktörün kabarcıklı kolon reaktörlere göre gerek k_{La} değerleri gerekse de birim enerji başına iletebildikleri ozon gazı kütlesi açısından daha etkin performans sergilemekte olduğu sonucuna varılmıştır.

Çeşitli koşullarda oksijen ve ozonun kütle transfer katsayıları oranlandığında ise ozonun k_{La} değerlerinin oksijenin k_{La} değerlerinin yaklaşık %55'i olduğu belirlenmiştir. Bu oran ile ilgili çeşitli değerler olmakla birlikte literatürde bu oran genelde %62 olarak verilmektedir.

Elde edilen k_{La} değerlerinin literatürdeki diğer ozonlama sistemleri ile kıyaslanması sonucunda jet loop reaktörün iyi sayılabilecek bir performans sergilediği görülmüştür. Reaktörlerin kütle transfer özellikleri birim güç tüketimi başına iletebildikleri gaz miktarı ile değerlendirilir. Örneğin oksijenlendirme araçlarının kapasiteleri kg O_2 /kWh birimi ile karşılaştırılır. Birim zamanda harcanan enerji başına reaktörde çözülebilir gaz miktarı, hacim, kütle transfer katsayısı ve gaz konsantrasyonlarının tamamını içine alan bir terimdir ve karşılaştırma için sıkça kullanılmaktadır. Ancak ozonlama için kullanılan reaktörlerde bu türden enerji tüketimleri başına iletebilen ozon gaz kütlesi verilmediğinden karşılaştırmada sadece, k_{La} değerleri ve gaz debileri göz önüne alınarak yapılmıştır. Çizelge 4.2'de verilenlerden, jet loop reaktörün gönderilen ozon gaz debileri de dikkate alınarak yüksek sayılabilecek k_{La} değerleri sağladığı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Bakopoulos A., Multiphase fluidization in large-scale slurry jet loop bubble columns for methanol and or dimethyl ether production, *Chemical Engineering Science*, 61, 2, 538-557, (2006).
- Beltran F.J., Ozone reaction kinetics for water wand wastewater systems, Lewis Publisher, CRC press company, Pp: 358, (2004).
- Beltran F.J., Garcia-Araya J.F., Alvarez P.M., Domestic Wastewater Ozonation: A kinetic model approach, *Ozone Science And Engineering*, 23, 3, 219-228, (2001).
- Beltran-Heredia J., Torregrosa J., Dominguez J.R., Peres J.A., Kinetics of the reaction between ozone and Phenolic acids present in agro-industrial wastewaters, *Water Research*, 35, 4, 1077-1085, (2001).
- Cakrillo-Pedroza F.R., Nava-Alonso F., Uribe-Salas A., *Minerals Engineering*, Vol. 13, No. 5, Pp. 541-548, (2000). [1]
- Chedeville O., Debacq M., Almanza M. F., Porte C., Use of an Ejector for Phenol Containing Water Treatment By Ozonation , *Separation and Purification Technology*, 57, 201-208, (2007). [8]
- Couvert A., Bastoul D., Roustan M., Chatellier P., Hydrodynamic and mass transfer study in a rectangular three-phase air-lift loop reactor, *Chemical Engineering and Processing*, 43, 11, 1381-1387, (2004).
- ÇAYDAG-107Y298, Yıldız E., Nuhoglu A., Jet Loop Reaktörde Fenol ve Klorlanmış Fenollerin Ozonlanarak Giderilmesi, 13-16, (2010).
- Dhotre M.T., Ekambara K., Joshi J.B., CFD simulation of sparger design and height to diameter ratio on gas hold-up profiles in bubble column reactors, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28, 5, 407-421, (2004).
- Fadavi A., Chisti Y., Gas-liquid mass transfer in a novel forced circulation loop reactor, *Chemical Engineering Journal*, 112, 1-3, 73-80, (2005).
- Gaddis E.S., Vogelpohl A., The Impinging-Stream Reactor: A High Performance Loop Reactor for Mass Controlled Chemical Reactions, *Chemical Engineering Science*, 47, 9-11, 2877-2882, (1992).
- Gao M., Hirata M., Takanashi H., Hano T., Ozone Mass Transfer In A New Gas-Liquid Contactor- Karman Contactor, *Separation and Purification Technology* 42, 145-149, (2005). [2]
- Ghirardini M., Donati G., Rivetti F., Gas lift reactors: hydrodinamic mass transfer and scale up, *Chemical Engineering Science*, 47, 9-11, 2209-2214, (1992).
- Gottschal C., Libra A.J., Saupe A., *Ozonization of water and wastewater*, Wiley-VCH New York, Pp: 21-34, 81-88, (2000).
- Gunten U., Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide iodide or chlorine, *Water Research*, 37, 7, 1469-1487, (2003).
- Hsu Y.C., Huang C-J., Ozone Transfer With Optimal Design Of a New Gas-Induced Reactor, *AIChE Journal*, Vol. 43, No. 9, 2336-2340, (1997). [6]

- JIN B., Yin P., Lant P., Hydrodynamics and mass transfer coefficient in three-phase airlift reactors containing activated sludge, *Chemical Engineering and Processing*, 45, 7, 608–617, (2006).
- Kermanshahi Pour A., Karamanev D., Margaritis A., Biodegradation of petroleum hydrocarbons in an immobilized cell airlift bioreactor, *Water Research*, 39, 15, 3704-3714, (2005).
- Langlais, B., Reckhow, D.A. and Brink, D.R., *Ozone in Water Treatment: application and engineering*, Lewis Publishers, Michigan, Pp: 569, (1991).
- Matheswaran M., Moon S. II, Influence Parameters In The Ozonation of phenol Wastewater Treatment Using Bubble Column Reactor Under Continuous Circulation, *Journal Of Industrial and Engineering Chemistry*, 15, 287-292, (2009). [4]
- Mitani M. M., Keller A.A., Sandall O.C., Rinker R. G., Mass Transfer of Ozone Using a Microporous Diffuser Reactor System, *Science and Engineering*, 27; 45-51, (2005).
- Panda K. K., Mathews A. P., Mass Transfer of Ozone In Situ Ozone Generator and Reactor, *Journal of environmental Engineering*, 860-868, (2008).
- Rice R. G. and Netzer A., *Handbook of Ozone Technology and Applications*, Ann Arbor Science, 105-142, (1982).
- Rhim A. J., Yoon H. J., Mass Transfer Characteristic and Overall Mass Transfer Coefficient In The Ozone Contactor, *Korean J. Chemistry Engineering*, 22 (2), 201-207 (2005). [5]
- Quan X., Shi H., Zhang Y., Wang J., Qian Y., Biodegradation of 2,4-dichlorophenol and phenol in an airlift inner-loop bioreactor immobilized with *Achromobacter sp.*, *Separation and Purification Technology*, 34, 1-3, 97-103. (2004).
- Sajc L., Grubisic D., Vunjak-Novakovic G., Bioreactors for plant engineering: an outlook for further research, *Biochemical Engineering Journal* 4, 2, 89-99, (2000).
- Schugerl C., *Bioreaction Engineering: Characteristics Features of Bioreactor*, Vol:2, John Wiley Sons, UK, Pp: 393, (1991).
- Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D., *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw-Hill, New York, Pp: 1820, (2003).
- Traversay C., Bonnard R., Adrien C., Luck F., Application of static mixers in drinking water treatment: the ozonation process, *Proc. Int. Symp. Mix. Ind. Process. Toulouse, France*, 4, Pp: 55, (2001).
- Velan M., Ramanujam T.K., Gas-Liquid Mass Transfer in a Down Flow Jet Loop Reactor, *Chemical Engineering Science*, 47, 9-11, 2871-2876, (1992).
- Tiwari G., Bose P., Determination of Ozone Mass Transfer Coefficient In Tall Continuous Flow Counter-Current Bubble Contactor, *Chemical Engineering* 132, 215-225 (2007). [3]

ÖZGEÇMİŞ

19.11.1986 tarihinde Erzurum'da doğdu. İlk, orta, lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2005 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nden, 2009 yılında, Çevre Mühendisi ünvanıyla mezun oldu. 2007 yılında çift anadal program ile başladığı İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2010 yılında tamamlayarak İnşaat Mühendisi ünvanını aldı. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Teknolojisi Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı.