

T.C.

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PİLOT ÖLÇEK JETLOOP MEMBRAN
BİYOREAKTÖR SİSTEMİNDE HACİMSEL
KÜTLE TRANSFER KATSAYISININ (K_{La})
BELİRLENMESİ VE YÜZEY AKTİF
MADDELER İLE YAĞIN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

**Yasemin KALKAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ**

GEBZE

2010

T.C.

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

**PİLOT ÖLÇEK JETLOOP MEMBRAN
BİYOREAKTÖR SİSTEMİNDE HACİMSEL
KÜTLE TRANSFER KATSAYISININ (K_{La})
BELİRLENMESİ VE YÜZEY AKTİF
MADDELER İLE YAĞIN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

**Yasemin KALKAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. AHMET KARAGÜNDÜZ**

GEBZE

2010



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07.06.2010 tarih ve 2010/25 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 18.06.2010 tarihinde tez savunma sınavı yapılan YASEMİN KALKAN'ın tez çalışması ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI): Doç. Dr. Ahmet Karagündüz

ÜYE

: Prof. Dr. Bülent Keskinler

ÜYE

: Doç. Dr. Aziz Tanrıseven

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../20.... tarih ve/.....sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : PİLOT ÖLÇEK JET LOOP MEMBRAN BİYOREAKTÖR SİSTEMİNDE HACİMSEL KÜTLE TRANSFER KATSAYISININ (K_{LA}) BELİRLENMESİ VE YÜZEY AKTİF MADDELER İLE YAĞIN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ
YAZAR ADI : YASEMİN KALKAN

Çalışmada, yüksek verimli kompakt bir reaktör olan pilot ölçek jetloop membran biyoreaktör sisteminin oksijen transfer özellikleri incelenmiş ve hacimsel kütle transfer katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca yüzey aktif maddelerin ve yağın kütle transfer katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Musluk suyu kullanılarak yapılan ölçümlerde, 500 L sıvı hacminde çalışılmıştır. 25-50 m³/saat arasında değişen sıvı debilerine bağlı olarak, temiz su ile yapılan ölçümlerde, jetloop reaktörün 0.864-186.48 saat⁻¹ arasında değişen k_{La} değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sıvı debilerinde ve hava değerlerinde kütle transferi daha iyi gerçekleşirken, 35 m³/saat altındaki sıvı debilerinde çevrimin oluşmadığı görülmüştür. Bu nedenle 35 m³/saat altındaki debilerde düşük k_{La} değerleri elde edilmiştir. Farklı miktarlarda yüzey aktif madde ve yağ kullanılarak yapılan ölçümlerde 40-50 m³/saat sıvı debilerine bağlı olarak, k_{La} değerleri 21.6-100.4 saat⁻¹ arasında değişmektedir. Artan madde miktarına bağlı olarak, k_{La} değerlerindeki düşüş miktarı da artmıştır. Temiz suda 25-50 m³/saat sıvı debisinde ve iki farklı noktada yapılan ölçümlere göre, standart oksijen verimi, %0.05-44.37, standart havalandırma verimi 5×10^{-4} -1.32 kg/kW/saat arasında bulunmuştur.

SUMMARY

TITLE OF THESIS : DETERMINATION OF VOLUMETRIC MASS TRANSFER COEFFICIENTS ($K_{L}A$) AND INVESTIGATION OF EFFECTS OF SURFACE ACTIVE AGENTS AND OIL IN A PILOT SCALE JET LOOP MEMBRANE BIOREACTOR SYSTEM

NAME OF WRITER: YASEMIN KALKAN

In this study, the oxygen transfer characteristics and volumetric mass transfer coefficients of a pilot scale jet loop membrane bioreactor system was investigated. The effects of surface active agents and oil on volumetric mass transfer coefficients were also studied. 500 L of tap water was used at the experiments. It was found that jet loop reactor had mass transfer coefficients varying from 0.864 to 186.48 h^{-1} depending on water flow rate, varying from 25 to 50 m^3/h , in clean water measurements. Mass transfer occurred better at high liquid flow rates and at high air supply. Loop didn't occur at liquid flow rates below 35 m^3/h . Therefore low $k_{L}a$ values were obtained at flow rates below 35 m^3/h . $K_{L}a$ values varied from 21.6 to 100.4 h^{-1} depending on flow rates, varying from 40 to 50 m^3/h , in water which had different amounts of surface active agents and oil. Increasing the amount of surfactants caused lower $k_{L}a$ values. According to experiments, which were practiced at two different points and liquid flow rates varying from 25 to 50 m^3/h , standard oxygen transfer efficiency and standard aeration efficiency varied from 0.05 to 44.37 % and from 5×10^{-4} to 1.32 $\text{kg}/\text{kW}/\text{h}$, respectively.

TEŞEKKÜRLER

Öncelikle Bölüm Başkanım Sayın Prof. Dr. Bülent Keskinler başta olmak üzere, danışmanlığımı üstlenerek, sistemin kurulumundan işletilmesine kadar çalışmanın her aşamasında yanımda olan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet Karagündüz'e ve tezin hazırlanmasında manevi desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Elif Erhan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmamın her aşamasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşım Yüksek Çevre Mühendisi Kevser Başer'e, bilgi ve manevi desteğiyle yanımda olan Yüksek Çevre Mühendisi Gökçen ACI'ya, büyük bir sabırla her türlü fedakârlığı yaparak bu günlere gelmemde katkıları olan ailemin tüm fertlerine en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| ÖZET | iii |
| SUMMARY | iv |
| TEŞEKKÜRLER | v |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ | vi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | xii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiii |
| | |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| | |
| 2. BİYOREAKTÖRLER | 3 |
| 2.1. Biyoreaktörlerde Kütle Transferi | 5 |
| 2.1.1. İki Film Teorisi | 7 |
| 2.1.2. Oksijen Transferini Etkileyen Faktörler | 12 |
| 2.1.2.1. Oksijen Doygunluk Değeri, C_s^* | 12 |
| 2.1.2.1.1. Basınç | 12 |
| 2.1.2.1.2. Sıcaklık | 12 |
| 2.1.2.1.3. Atıksu β Düzeltme Faktörü | 13 |
| 2.1.2.2. Hacimsel Kütle Transfer Katsayısı, $k_L a$ | 13 |
| 2.1.2.2.1. Sıcaklık | 14 |
| 2.1.2.2.2. Atıksu α Düzeltme Faktörü | 14 |
| 2.2. Tasarım Eşitlikleri | 17 |
| 2.2.1. Standart Oksijen Doygunluk Değeri ($C_{s,st,T}^*$, mg/L) | 17 |
| 2.2.2. Deneydeki Oksijen Doygunluk Değeri ($C_{s,p^*,T}^*$, mg/L) | 18 |
| 2.2.3. Temiz Suda Standart Oksijen Transfer Hızı (SOTR, kg/saat) | 18 |
| 2.2.4. Atıksu Karışım Sıvısında Standart Oksijen Transfer Hızı (α SOTR, kg/saat) | 18 |
| 2.2.5. Spesifik Oksijen Kapasitesi (SOTR _V , kg/m ³ /saat) | 19 |
| 2.2.6. Temiz Suda Standart Havalandırma Verimi (SAE, kg/kW/saat) | 19 |

| | |
|---|----|
| 2.2.7. Atıksu Karışım Sıvısında Standart Havalandırma Verimi (α SAE, kg/kW/saat) | 19 |
| 2.2.8. Standart Oksijen Transfer Verimi (SOTE, %) | 20 |
| 3. JET LOOP BİYOREAKTÖR SİSTEMLERİ | 21 |
| 3.1. Jet Loop Biyoreaktörlerin Atıksu Arıtımında Kullanımı | 25 |
| 3.2. Jet-Loop Reaktörlerde Kütle Transferini Etkileyen Parametreler | 27 |
| 3.2.1. Püskürtme Başlığı Çapının Etkisi | 27 |
| 3.2.2. Püskürtme Başlığının Emme Tüpüne Batma Derinliği Ve Sirkülasyon Süresinin Etkisi | 28 |
| 3.2.3. Emme Tüpü Çapının Reaktör Çapına Oranının (D_e/D_r) Etkisi | 30 |
| 3.2.4. Emme Tüpü Kesit Geometrisinin Etkisi | 30 |
| 3.2.5. Sıvı Debisinin Etkisi | 31 |
| 3.2.6. Gaz Debisinin Etkisi | 32 |
| 3.2.7. Suda Bulunan Katı Madde Konsantrasyonunun, Yoğunluğunun Ve Boyutunun Etkisi | 33 |
| 4. MATERYAL ve METOT | 34 |
| 4.1. Deney Düzenegi | 34 |
| 4.2. Deneysel Yöntem | 36 |
| 4.2.1. Deneyde Kullanılan Kimyasal Maddeler | 38 |
| 4.2.1.1. Sodyum Sülfid | 38 |
| 4.2.1.2. Kobalt Katalizörü | 38 |
| 4.2.1.3. Tween 40 ve Tween 85 | 39 |
| 5. BULGULAR ve TARTIŞMA | 40 |
| 5.1. Kullanılan Sodyum Sülfid Miktarı | 40 |
| 5.2. Hacimsel Kütle Transfer Katsayılarının Hesaplanması | 41 |
| 5.3. Standart Şartlarda Deneylerdeki Oksijen Doygunluk Değerleri Hesabı | 50 |
| 5.4. Standart Oksijen Transfer Hızı Hesabı | 50 |
| 5.5. Spesifik Oksijen Kapasitesi Hesabı | 51 |
| 5.6. Standart Oksijen Transfer Verimi Hesabı | 52 |
| 5.7. Standart Havalandırma Verimi | 54 |

| | |
|------------------|----|
| 6. SONUÇLAR | 58 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ | 62 |
| ÖZGEÇMİŞ | 64 |
| EK 1 | 65 |
| EK 2 | 67 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- a: Özgül yüzey alanı (m^2/m^3)
- A: Sıvının toplam arayüzey alanı (m^2)
- C: Oksijen konsantrasyonu (mg/L)
- C_A : Arayüzeyde sıvı film oksijen konsantrasyonu (mg/L)
- C_b : Na_2SO_3 içermeyen reaktörde çözülmüş oksijen başlangıç konsantrasyonu (mg/L)
- C_G : Gaz faz oksijen konsantrasyonu (mg/L)
- C_i : i maddesinin konsantrasyonu (mg/L)
- C_L : Hacim (bulk) sıvısı içindeki çözülmüş oksijen konsantrasyonu (mg/L)
- C_o : $t=0$ anındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu (mg/L)
- $C_{s,20}^*$: Standart şartlarda deneydeki oksijen doygunluk konsantrasyonu (mg/L)
- $C_{s,p^*,T}^*$: T sıcaklıkta p^* basınçta deneydeki oksijen doygunluk konsantrasyonu (mg/L)
- $C_{s,st,20}^*$: 20 °C, 1013 hPa'da standart oksijen doygunluk konsantrasyonu (9.09 mg/L)
- $C_{s,st,T}^*$: T sıcaklıkta 1013 hPa'da standart oksijen doygunluk konsantrasyonu (mg/L)
- $C_{s,T}^*$: T sıcaklığındaki oksijenin doygunluk konsantrasyonu (mg/L)
- C_s^* : Çözülmüş oksijenin doygunluk konsantrasyonu (mg/L)
- $C_{s,m}^*$: Musluk suyu (temiz su) çözülmüş oksijen doygunluk konsantrasyonu (mg/L)
- $C_{s,w}^*$: Atıksudaki çözülmüş oksijen doygunluk konsantrasyonu (mg/L)
- C_t : t anındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu (mg/L)
- $D/y = k_L$: Sıvı film kütle transfer katsayısı (s^{-1})
- D: Difüzyon katsayısı (m^2/s)
- E/V: Birim hacim başına harcanan güç (w/m^3)
- F/M: Besin/Mikroorganizma oranı (kg KOI/kg MLVSS.gün)
- H: Henry sabiti ($atm/mol/L$; $[mg/L]_{gaz} / [mg/L]_{sıvı}$)
- J: y yönündeki difüzyon kütle akısı ($g/m^2/s$)
- J_k : Konvektif akı ($g/m^2/s$)
- k_{La} : Hacimsel kütle transfer katsayısı (sa^{-1})
- k_{La20} : 20 °C sıcaklıkta hacimsel kütle transfer katsayısı (sa^{-1})
- k_{La_m} : Musluk suyu (temiz su) hacimsel kütle transfer katsayısı (sa^{-1})
- k_{La_T} : T sıcaklığında temiz su hacimsel kütle transfer katsayısı (sa^{-1})
- k_{La_w} : Atıksudaki hacimsel kütle transfer katsayısı (sa^{-1})
- MLSS: Karışım sıvısı askıda katı madde (mg/L)

- M_{So} : Sodyum sülfid miktarı (g)
- n : Ortamda bulunan farklı madde sayısı
- N : Toplam kütle transfer akısı ($g/m^2/s$)
- OTH: Birim zamanda sıvının birim hacmine düşen oksijen transfer hızı ($mg/L/s$)
- OTR_V : Herhangi bir sıcaklıkta ölçülen spesifik oksijen transfer hızı ($kg/m^3/saat$)
- P : Deney sırasında ölçülen toplam güç (kW)
- P_A : Arayüzeyde oksijenin kısmi basıncı (kpa, psi, atm)
- P_b^* : Deney sırasındaki barometrik basınç (hPa)
- $P_{b,St}$: Standart barometrik (atmosfer) basınç (1013 hPa)
- P_G : Gaz fazda oksijenin kısmi basıncı (kpa, psi, atm)
- Q_G : Hava debisi ($m^3/saat$)
- Q_L : Sıvı debisi ($m^3/saat$)
- SAE: Temiz suda standart havalandırma verimi ($kg/kW/saat$)
- SOTE: Standart oksijen transfer verimi (%)
- SOTR: Temiz suda standart oksijen transfer hızı ($kg/saat$)
- $SOTR_V$: Spesifik oksijen kapasitesi ($kg/m^3/saat$)
- T : Sıcaklık ($^{\circ}C$)
- t : Zaman
- TDS: Toplam çözünmüş madde konsantrasyonu (mg/L)
- t_M : Sabit karıştırmayı elde etmek için gerekli karıştırma süresi (dk)
- V : Sıvının toplam hacmi (m^3)
- V_G : Gaz sirkülasyon hızı (m/s)
- w_o : Oksijenin kütle debisi ($kg/saat$)
- y' : Gaz film kalınlığı (m)
- y : Sıvı film kalınlığı (m)
- y_g : Gaz yüksekliği (m)
- y_s : Sıvı derinliği (m)
- YAM: Yüzey aktif madde
- α : Atıksu için hacimsel kütle transfer katsayısı düzeltme faktörü
- ϵ : Gaz tutulma değeri (%)
- β : Oksijen doygunluğu için atıksu düzeltme faktörü
- γ_G : 20 $^{\circ}C$ sıcaklıkta havanın yoğunluğu ($1,204 kg/m^3$)

v_i : i maddesinin hızı (m/s)

v_k : Konvektif hız (m/s)

α_{SAE} : Atıksu karışım sıvısında standart havalandırma verimi (kg/kW/saat)

α_{SOTR} : Atıksu karışım sıvısında standart oksijen transfer hızı (kg/saat)

δ_c : Konsantrasyon sınır tabakası kalınlığı (m)

δ_d : Difüze alt tabaka kalınlığı (m)

θ : Transfer katsayısı için sıcaklık düzeltme faktörü

τ : Oksijen doygunluğu için sıcaklık düzeltme faktörü

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 2.1. Farklı Enerji Girdisine ve Karışıma Sahip Reaktör Modelleri | 4 |
| 2.2. Gaz Fazdan Sıvı Faza ve Sıvı Fazdan Hücre İçine Oksijenin Transferi | 6 |
| 2.3. İki Film Teorisi Gaz Transfer Şeması | 8 |
| 2.4. Temiz Suda Oksijen Transferi Üzerinde Türbülansın Etkisi | 16 |
| 2.5. Atıksuda Oksijen Transferi Üzerinde Türbülansın Etkisi | 16 |
| 3.1. İki Akışlı Püskürtme Başlığının Tabana Yerleştirildiği Jet Loop | 22 |
| 3.2. Püskürtme Başlığının ve Su Çıkışının Reaktörün Üst Bölmesinde Olan Jet Loop Modeli | 24 |
| 3.3. Püskürtme Başlığının Ayrıntılı Gösterimi | 24 |
| 3.4. Jet Loop Reaktörlerde Kullanılan Püskürtme Başlığı Ve Akış Tipleri | 27 |
| 4.1. Deneyde Kullanılan Jetloop Biyoreaktör ve Püskürtme Başlığı | 34 |
| 4.2. Jetloop Biyoreaktör Sistemi Akım Şeması | 36 |
| 5.1. Hazne İçi $k_L a_{20}$ Değerlerindeki Değişim | 43 |
| 5.2. Emme Tüpü $k_L a_{20}$ Değerlerindeki Değişim | 43 |
| 5.3. YAM ve Yağın $k_L a_{20}$ Değeri Üzerindeki Etkisi | 46 |
| 5.4. Farklı Noktalarda Yapılan Ölçümler Sonucu SOTE'deki Değişim | 53 |
| 5.5. Hazne İçi SAE Değerlerindeki Değişim | 55 |
| 5.6. Emme Tüpü SAE Değerlerindeki Değişim | 56 |
| 5.7. YAM ve Yağın SAE Değerleri Üzerindeki Etkisi | 57 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Cizelge</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 2.1. 1013 hPa'da Sıcaklığa Bağlı Standart Oksijen Doygunluk Değerleri (mg/L) | 17 |
| 5.1. Deneylerde Harcanan Sodyum Sülfid Miktarları | 40 |
| 5.1. (Devam), Deneylerde Harcanan Sodyum Sülfid Miktarları | 41 |
| 5.2. Temiz Su İçin Deneylerde Elde Edilen T Sıcaklıkta $k_L a$ Değerleri | 42 |
| 5.3. Temiz Su İçin 20 °C'deki $k_L a_{20}$ Değerleri | 42 |
| 5.4. YAM ve Yağ İçin Elde Edilen T Sıcaklıkta $k_L a$ Değerleri | 45 |
| 5.5. YAM ve Yağ İçin 20 °C'deki $k_L a_{20}$ Değerleri | 46 |
| 5.6. Hazne İçi-Havasız Deneylerde Ölçülen Parametreler | 47 |
| 5.7. Emme Tüpü-Havasız Deneylerde Ölçülen Parametreler | 47 |
| 5.8. Hazne İçi-Vana Açık Deneylerde Ölçülen Parametreler | 47 |
| 5.9. Emme Tüpü- Vana Açık Deneylerde Ölçülen Parametreler | 48 |
| 5.10. Hazne İçi-Blower Açık Deneylerde Ölçülen Parametreler | 48 |
| 5.11. Emme Tüpü-Blower Açık Deneylerde Ölçülen Parametreler | 48 |
| 5.12. 2,5 g YAM Kullanılan Deneylerde Ölçülen Parametreler | 48 |
| 5.13. 25 g YAM Kullanılan Deneylerde Ölçülen Parametreler | 48 |
| 5.14. 50 g YAM Kullanılan Deneylerde Ölçülen Parametreler | 48 |
| 5.15. 50 g Yağ Kullanılarak Yapılan Deneylerde Ölçülen Parametreler | 49 |
| 5.16. Yapılan Araştırmalardan Çıkarılan Modeller | 49 |
| 5.17. Farklı Çalışmalarda Elde Edilen $k_L a$ Değerleri | 49 |
| 5.18. Standart Şartlarda Temiz Su Deneylerindeki Oksijen Doygunluk Değerleri | 50 |
| 5.19. YAM ve Yağ Deneylerindeki Oksijen Doygunluk Değerleri | 50 |
| 5.20. Temiz Suda Standart Oksijen Transfer Hızı Değerleri | 50 |
| 5.21. YAM ve Yağ Deneyleri İçin Oksijen Transfer Hızı Değerleri | 51 |
| 5.22. Temiz Suda Spesifik Oksijen Kapasitesi Değerleri | 51 |
| 5.23. YAM ve Yağ Deneyleri İçin Spesifik Oksijen Kapasitesi | 51 |
| 5.24. Temiz Suda Standart Oksijen Transfer Verimi Değerleri | 52 |
| 5.25. Havalandırma Sistemlerinin Oksijen Transfer Verimleri | 53 |
| 5.25.(Devam), Havalandırma Sistemlerinin Oksijen Transfer Verimleri | 54 |

| | |
|---|----|
| 5.26. Temiz Su Deneyleri İçin Ölçülen Toplam Güç Miktarları | 54 |
| 5.27. Temiz Suda Standart Havalandırma Verimi Değerleri | 55 |
| 5.28. YAM ve Yağ Deneyleri İçin Ölçülen Toplam Güç Miktarları | 56 |
| 5.29. YAM ve Yağ Deneyleri İçin SAE Değerleri | 56 |

1. GİRİŞ

Endüstriyel gelişmeler, sanayi tesislerinin artması, hızla artan nüfus ve nüfusla birlikte tüketim çeşitliliğinin de büyümesi çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Birçok endüstriyel kuruluşun üretimi sonucu ortaya çıkan atık suların, arıtıma tabi tutulmadan çevreye verilmesi, canlı hayatını etkilemekte ve su sorununu ortaya çıkarmaktadır. Su, insan yaşamının en önemli ihtiyaçlarından biri olması nedeniyle atıksuların arıtılması için önlemler alınmaya başlanmış ve arıtma teknolojileri geliştirilmiştir. Günümüzde yüksek verimli çeşitli arıtma sistemleri çalışmaları yapılırken yatırım maliyeti, işletme maliyeti, kullanılan alanın azaltılması gibi ekonomik değerler yanında ürettiği atık miktarı ve kaynakların yeniden kullanılabilirliği de dikkate alınmıştır.

Son yıllarda geliştirilen modern reaktörler daha etkin ve düşük maliyette atıksu arıtımı sağlamaktadır. Yeni geliştirilen biyoreaktörler sayesinde, birçok temel işlem ve prosesi gerektiren klasik arıtma sistemleri yerine, çok daha az yer kaplayan, daha az enerji tüketen ve otomasyonu basit sistemler geliştirilmiştir.

Biyoreaktörler, özellikle atıksuların arıtılmasında kullanılan reaktörler olarak düşünüldüklerinde, en önemli görevlerinden biri, biyolojik arıtım prosesi için gerekli oksijeni mikrobiyal topluluklara ulaştırmaktır. Bu nedenle, biyoreaktörler birim enerji başına iletebildikleri oksijen miktarı ile orantılı olarak etkin bir arıtım gerçekleştirebilirler. Oksijen transferi hem evsel hem de endüstriyel atıksuların arıtılmasında anahtar bir süreçtir. Doğal proseslerde de atıkların zararsız ürünlere dönüştürülebilmeleri, su ortamı içerisindeki oksijen kazanım ve tüketim hızları arasındaki dinamik dengenin bir sonucudur. Sonuç olarak aerobik arıtım amacıyla kullanılan bir biyoreaktör, atıksuyun oksijen ihtiyacı kadar oksijeni suya zamanında transfer edebilmelidir.

Kompakt bir yapıya sahip olmaları ve işletmedeki yüksek esnekliği nedeniyle yeni nesil reaktörler arasında yer alan jet loop biyoreaktörler, oldukça kirli atıksuların biyolojik arıtımı için yüksek arıtma verimi ve düşük maliyet çözümü

sunmaktadır. Jet loop biyoreaktörler, basit inşası ve işletmesi, düşük ilk yatırım ve işletme maliyeti, iyi seviyede gaz dispersiyonu, yüksek karışım ve kütle transfer performansı ve nispeten düşük enerji gereksinimleri gibi birçok avantaja sahiptir. Bu reaktörlerde sisteme verilen enerji sıvının kinetik enerjisinden sağlanmaktadır. Yüksek oksijen transfer kapasitesi nedeniyle, yüksek biyokütle konsantrasyonları için gerekli oksijen rahatlıkla temin edilebilmektedir.

Bu çalışmada, atıksu arıtımında kullanımı giderek yaygınlaşan jet loop membran biyoreaktör sisteminin pilot ölçekte kütle transfer özellikleri incelenmiş ve hacimsel kütle transfer katsayılarındaki değişimler araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı hava değerlerinde ve sıvı debilerinde, farklı iki noktada temiz su ile yapılan ölçüm sonuçları ile farklı miktarlarda yüzey aktif madde ve yağ eklenen suda, farklı sıvı debilerinde ve tek hava değerinde yapılan ölçüm sonuçları karşılaştırılmış ve oksijen transferinin en etkin olduğu deney şartları belirlenmiştir.

2. BİYOREAKTÖRLER

Atıksu arıtımında biyoreaktörler, hammaddelerin mikroorganizmalar aracılığıyla biyolojik olarak özel ürünlere dönüştürüldüğü sistemlerdir. Mikroorganizmaların değişen ortam şartlarına adaptasyonu sağlanmalıdır. Bunun için biyoreaktördeki fiziksel ve kimyasal koşulların; substratın, besinsel tuzların, vitaminlerin, uygun sıcaklık ve pH'ın ve sistem aerobik ise oksijenin; sistemde yer alan mikroskopik canlıların istediği şekilde sürekli olarak sağlanması gerekmektedir. Biyokütle miktarı, biyokütlenin ve besleme suyunun sistemde bekleme zamanı gibi değişkenler prosesin devamlılığı açısından önemlidir. Bu değişkenlerin istenilen değerde tutulması ancak sistemin otomasyonu ile sağlanabilmektedir (Yıldız, 1999).

Çözünmüş oksijen miktarı, havalı arıtma sistemlerinde önemli bir parametredir. Suda çözünürlüğü az olan oksijenin sürekli sağlanması ve oksijen sınırlamasının önüne geçilebilmesi için, oksijen transfer hızının oksijen kullanma hızından daha büyük olması gerekir. Kritik oksijen konsantrasyonu, bakteri ve mantarlar için 1–2 mg/L arasındadır. Ortamda oksijen sınırlamasını gidermek için saf oksijen kullanılabilir gibi, sistem yüksek basınç altında da çalıştırılabilir (Akbayır, 2007).

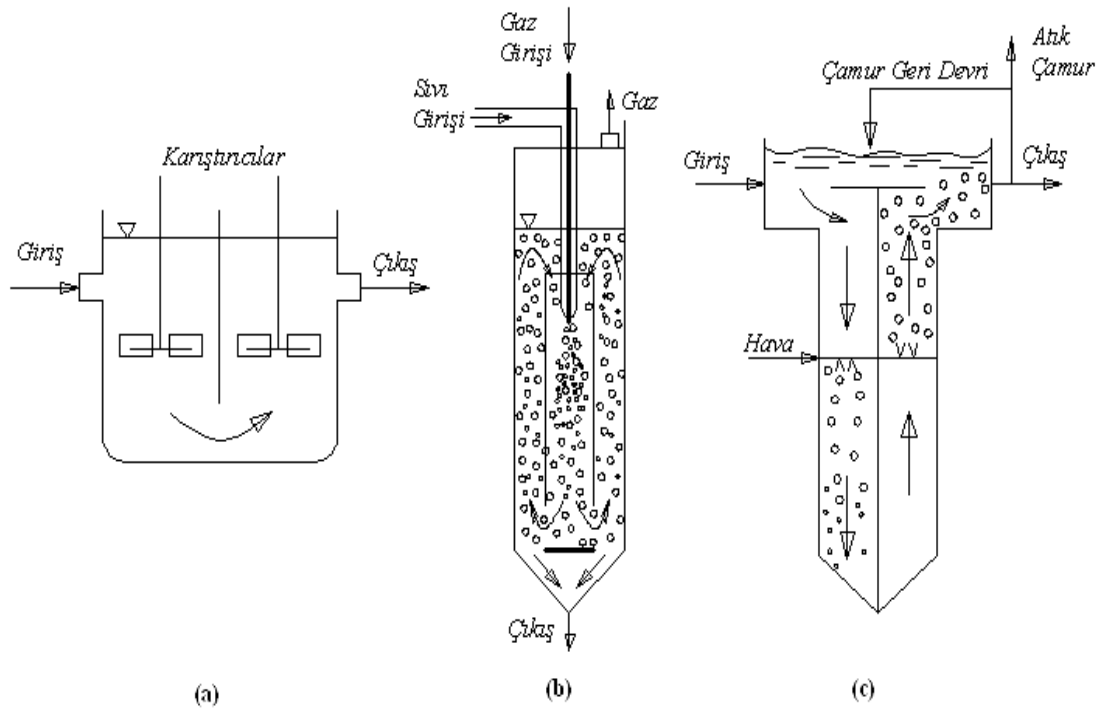
Biyolojik prosesler değişik şekillerde sınıflandırılabilirler. Ortamda oksijen varlığına göre havalı (aerobik) ve havasız (anaerobik) olarak sınıflandırılan bu sistemler kullanılan mikroorganizmaların sistemdeki durumuna göre askıda ve bağlı (biyofilm) prosesler olarak da sınıflandırılabilirler. Askıda sistemlere örnek olarak aktif çamur, oksidasyon hendekleri, havalandırılmalı lagünler, bağlı sistemlere ise damlatılmalı filtreler ve döner biyodiskler verilebilir. Bu sistemlerin karşılaştırılması yapılırken kütle transfer katsayılarına bakılmalıdır. Kütle transfer katsayıları askıda sistemlerde daha yüksektir. Bu sistemlerde türbülans taşınım baskın iken, bağlı sistemlerde moleküler difüzyon hakimdir. Kütle transfer katsayılarının askıda sistemlerde daha yüksek olmasının en temel sebeplerinden bir tanesi karışım hızının yüksek olmasıdır. Kütle transferini arttıran etmenlerden en önemlisi, yüzey alanının fazlalığı, bir başka ifadeyle mikroorganizmalar ile hammaddelerin mümkün olduğu

kadar temas yüzeyinin artırılmasıdır. Bu nedenle askıda sistemlerde kütle transferi bağlı sistemlere göre yüksektir (Yıldız, 1999; Akbayır, 2007).

Yüksek kütle transferi elde etmek için biyoreaktör içeriğinin karıştırılması gerekmektedir. Bu karıştırma reaktör içerisine enerjinin verilmesi ve bu enerjinin dağıtılması ile sağlanabilir. Karıştırma hammaddeler ve mikroorganizmalar arasındaki teması sağladığı kadar, reaktör dizaynına bağlı olarak oksijen transferini de sağlamaktadır. Biyoreaktörde enerji girdisi üç şekilde sağlanmaktadır:

- Mekanik olarak dönen karıştırıcılar ile
- Bir sıvı sirkülasyon pompası tarafından üretilen sıvının kinetik enerjisi ile
- Sıkıştırılmış gazın genişletilmesiyle

Bu üç reaktöre ait şematik gösterimler Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1., Farklı Enerji Girdisine ve Karışıma Sahip Reaktör Modelleri (Yıldız, 1999).

Şekil 2.1.(a)'da mekanik karıştırıcılara sahip klasik bir reaktör modeli gösterilmektedir. Bu reaktörde karışımın sağlanması için gerekli olan mekanik

ekipmanların zamanla reaktör içeriği ile etkilenmesi sorunu vardır. Yüksek enerji tüketimleri ve modern reaktörlere göre daha az performansları nedeniyle giderek kullanımı azalmaktadır. Şekil 2.1.(b)'deki sıvı sirkülasyon pompası ile enerjinin verildiği reaktörler ise aşağı veya yukarı akışlı, emme tüplü gibi modern reaktörleri temsil etmektedir. Sıkıştırılmış gazın verilmesi ile enerjinin sağlandığı, Şekil 2.1.(c)'deki gibi reaktörler de bulunmaktadır. Bu reaktörler ile Şekil 2.1.(b)'deki reaktörler arasındaki fark, reaktör içerisine öncelikle sıvı yerine gazın verilmesidir. Şekil 2.1.(b)'deki sistemlerde sıvı debisi yüksek iken Şekil 2.1.(c)'deki sistemlerde gaz debisi yüksektir. Atıksuların arıtılmasında kullanılan biyoreaktörler son derece büyük hacimlerde olduklarından, suya oksijen transferinin sağlanması ve karıştırma işlemi için veya bir başka ifadeyle sıvı sirkülasyonu için gerekli enerji çok fazla olmaktadır. Mekanik karıştırıcılı reaktörlerde yaklaşık 1000 m^3 'den daha fazla suyun karıştırılması zordur. Bu nedenle, atıksuların arıtılmasında kullanılan biyoreaktörlerde, karıştırma ve oksijen transferi işlemi sisteme alttan hava verilerek veya çok sayıda yüzen havalandırıcılarla yapılır. Günümüzde biyoreaktörlerin, daha da gelişmiş modelleri ortaya çıkmıştır. Gelişen bu modellerin eski türlere göre daha avantajlı olmaları sadece kütle transfer katsayıları ile değil, daha az yer kaplamaları, modüler olmaları ve düşük enerji tüketimleri ile de sağlanmaktadır (Yıldız, 1999).

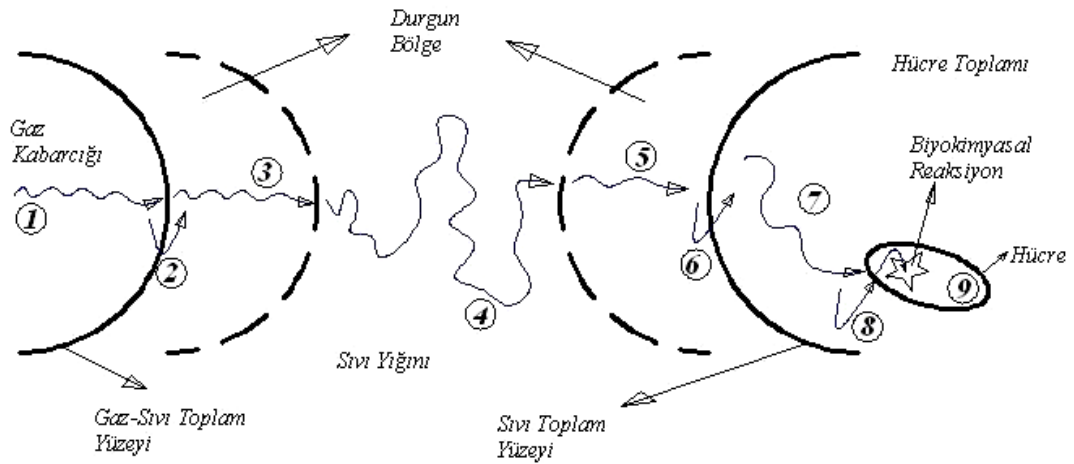
2.1. Biyoreaktörlerde Kütle Transferi

Biyoreaktörlerde kütle transferini etkileyen çok sayıda parametre vardır. Bu parametreler birbirleri üzerinde etkileşime sahiptir. İşletme koşulları ve biyoreaktörün geometrisinden kaynaklanan türbülans ile sistemin fiziksel özellikleri, karışım, kabarcık boyutu ve sistemde tutulan gaz miktarının bir ölçüsü olan gaz tutulma (ϵ) değerini etkilemektedir. Bu özellikler ise kütle transferine etki ederek sistemin performansının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Yıldız, 1999).

Oksijen transferi, evsel ve endüstriyel kaynaklı atık suların aerobik biyolojik prosesler ile arıtımında önemli rol oynamaktadır. Aerobik atıksu arıtımında mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğu oksijen, gaz fazdan sıvı faza, sıvı fazdan hücre içine kütle transferi ile sağlanmaktadır. Oksijen sistem içerisinde hava

kabarcıklarından süspanse haldeki mikroorganizmalara transfer edilirken, kütle transferi üzerindeki etkili dirençleri aşmak zorundadır. Bu dirençler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çözeltideki gaz ile gaz-sıvı ara yüzeyindeki gaz film direnci,
- Gaz-sıvı ara yüzeyindeki ara yüzey direnci,
- Ara yüzey ve çözelti sıvı fazı arasındaki sıvı film direnci,
- Mikrobiyal hücreleri çevreleyen sıvı film tabakasının oksijen transferine karşı sıvı faz direnci,
- Mikroorganizmaların etrafındaki sıvı film direnci,
- Mikrobiyal floklardan kaynaklanan hücreler arası direnç,
- Mikroorganizmaların oksijen tüketiminden kaynaklanan direnç.



Şekil 2.2., Gaz Fazdan Sıvı Faza ve Sıvı Fazdan Hücre İçine Oksijenin Transferi (Akbayır, 2007).

Şekilde:

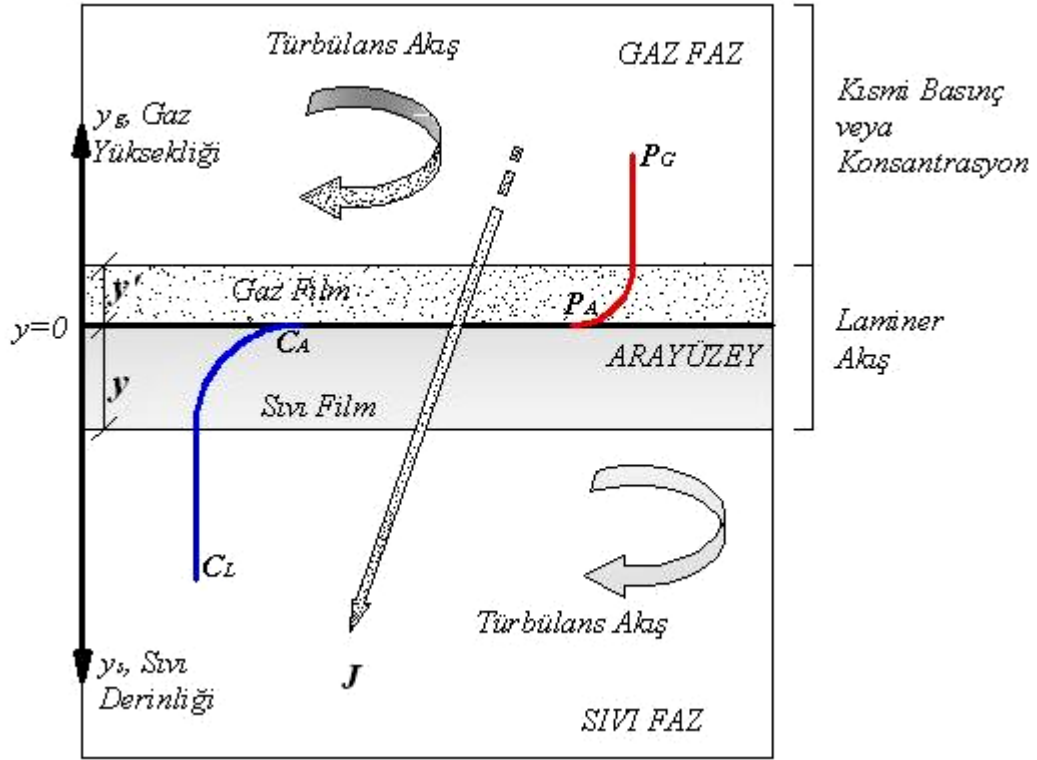
1. Gaz fazı,
2. Kabarcığın gaz-sıvı ara yüzeyinden geçişi,
3. Hava kabarcığının durgun sıvı tabakadan geçişi,
4. Hava kabarcığının sıvı yığılı ortamından geçişi,
5. Hava kabarcığının tekrar durgun bölgeye girişi,
6. Toplam sıvı yüzeyinden geçişi,

7. Hücre yapısından geçişi,
8. Hücrede biyokimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi,
9. Membran hücreye girişi (Akbayır, 2007).

2.1.1. İki Film Teorisi

Oksijen suda az çözünür ve düşük transfer hızına sahiptir. Bu nedenle normal koşullar altında aerobik ortam için yeterli oksijen, hava-su ara yüzeyinden su içerisine geçemez. Bunun için su içerisine hava vermek suretiyle dış kaynaklı olarak suyun havalandırılması sağlanabilir. Bazı havalandırma ekipmanları kullanılarak bu işlemin sağlanması yanında, farklı bir dağıtım yapısı da kullanarak, suyun damlacıklar halinde yayılması ile hava ile teması arttırılabilir. Atık suda yüksek miktarda nütrient ve iyonik tuzların bulunması nedeniyle mikroorganizmaların oksijen tüketimi artmaktadır. Bu durumda sisteme yeterli oksijen sağlanamazsa biyolojik proseslerin performansı düşmektedir. Bu yüzden oksijen transfer hızı ve oksijen transfer verimi sınırlayıcı parametredir ve kütle transfer katsayısının doğru hesaplanması çok önemlidir. Gaz transfer mekanizmasını açıklamak ve transfer katsayısını bulmak için kullanılan en yaygın yöntem iki film teorisidir. İki film teorisinin popüler olmasının sebebi, karşılaşılan durumların %95'inden fazlasında diğer kompleks teorilerden elde edilen sonuçlar ile aynı sonuçları vermesidir.

İki film teorisi, gaz-sıvı ara yüzeyinde iki film tabakasının oluşturduğu fiziksel bir modeldir. Bu tabakalardan biri sıvı diğeri gaz fazdan oluşmaktadır. Bu tabakalar gaz moleküllerinin gaz ve sıvı faz arasındaki geçişine direnç göstermektedir. İki film teorisinde oksijen transferi iki aşamada gerçekleşir. İlk aşamada oksijen gaz filmi boyunca, sıvı yüzeyine doğru hareket eder. İkinci aşamada gaz-sıvı arayüzeyinde çözünür, denge sağlanır ve sıvı filmi boyunca ve bu tabakadan da sıvının daha iç kesimlerine transfer edilir. Oksijenin sudaki çözünürlüğü son derece düşük olduğundan, ikinci aşama tüm prosesi kontrol eden aşamadır. Şekil 2.3.'de gaz transferi için iki film teorisinin şematik gösterimi verilmektedir (Akbayır, 2007).



Şekil 2.3., İki Film Teorisi Gaz Transfer Şeması (Mueller et al, 2002).

Kütle transferinde iki çeşit taşınım modeli önem kazanmaktadır. Bu modeller moleküler kütle transferi ve konvektif kütle transferidir. Moleküler kütle transferi, moleküllerin rastgele hareketinden kaynaklanır ve moleküler difüzyon olarak bilinir. Bu modelde konvektif akı söz konusu değildir ve sıvı içerisinde konsantrasyon gradienti (eğimi) vardır. Bu transfer prosesi Fick Kanunu ile tanımlanır.

$$J = -D \frac{dC}{dy} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1'de negatif işaret, azalan eğim yönünün yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona doğru olduğunu ifade etmektedir. Konvektif kütle transferinde türbülansın etkili olduğu bulk (yığın) hareketi vardır.

$$J_k = C * v_k \quad (2.2)$$

v_k , ortamdaki madde miktarı, konsantrasyonu ve hızına bağlı olarak yazılırsa kütle oranlı hız olarak ifade edilir:

$$V_k = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i * v_i}{\sum_{i=1}^{i=n} C_i} \quad (2.3)$$

Toplam kütle transfer akısı difüzyif ve konvektif akının toplamına eşittir. N toplam kütle transfer akısı olmak üzere aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$N = J + J_k \quad (2.4)$$

Transfer proseslerinde transfer hızı, transferi sağlayan sürücü kuvvet ile bir transfer katsayısının çarpımı olarak ifade edilir. Oksijenin suya transferinde sürücü kuvvet gaz fazdaki oksijen ile sudaki çözülmüş oksijen arasındaki aktivite farklılığından kaynaklanır. Biyoreaktörlerin kütle transfer hızlarının bulunmasında genellikle oksijenin sudaki konsantrasyon artışından yararlanıldığı için, çözülmüş oksijen konsantrasyonunun belirlenmesi son derece önem kazanmaktadır. Arayüzey ve sıvı arasında aktivite katsayısının değişmediği düşüncesiyle, kütle transferinin sıvı fazdaki konsantrasyon farklılığından ileri geldiği söylenebilir (Yıldız, 1999; Akbayır, 2007).

Oksijenin kütle transfer hızını ifade etmek için, çözülmüş oksijen konsantrasyonunun zamana bağlı olarak değişiminin ifade edilmesi gerekir. Bunun için iki film teorisinden ve toplam kütle transfer akısı ifadesinden yararlanılmalıdır. Gaz-sıvı filmleri arasında laminar akış söz konusu olduğu için Eşitlik 2.4'den konvektif akı çıkarılırsa toplam akı aşağıdaki ifadeye eşit olur:

$$N = J = -D \frac{dC}{dy} \quad (2.5)$$

$$N * dy = -D * dC \quad (2.6)$$

Bu eşitlik $y=0$ için $C=C_A$ ve $y=y$ için $C=C_L$ sınır şartlarında çözümlerse:

$$\int_{y=0}^{y=y} N * dy = \int_{C=C_A}^{C=C_L} -D * dC \quad (2.7)$$

$$N^*(y-0) = -D^*(C_L - C_A) \quad (2.8)$$

$$N = \frac{-D}{y}^*(C_L - C_A) \quad (2.9)$$

$$N = k_L^*(C_A - C_L) \quad (2.10)$$

Oksijen konsantrasyonunun zamanla değişim ifadesini sıvının toplam hacmiyle, Eşitlik 2.10'u sıvının toplam yüzeyalanı ile çarparsak birimleri aynı olan (kütle/zaman) iki ifade elde edilir.

$$V^* \frac{dC}{dt} = N^* A \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.11'de N yerine konulursa, birim zamanda sıvının birim hacmine düşen oksijen transfer hızı çözülmüş oksijen konsantrasyonları kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$OTH = \frac{dC}{dt} = k_L^* \frac{A}{V}^*(C_A - C_L) \quad (2.12)$$

$$OTH = \frac{dC}{dt} = k_L^* a^*(C_A - C_L) \quad (2.13)$$

Pratikte k_L ve a 'nın ayrı ayrı etkilerini belirlemek zordur. Bu nedenle $k_L a$ olarak tek bir parametre şeklinde değerlendirilmesi daha kolaydır. Bu durumda $k_L a$ hacimsel kütle transfer katsayısı olarak tanımlanır. Arayüzeydeki çözülmüş oksijen konsantrasyonu, genel olarak Henry kanununa uygun olarak, gaz fazdaki oksijenin kısmi basıncı ile dengede olan çözülmüş oksijenin doygunluk veya denge değeri kabul edilir. Böylece Eşitlik 2.13 aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\frac{dC}{dt} = k_L a^*(C_s^* - C_L) \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.14'ten de görüldüğü gibi, bir gaz fazıyla temas halinde olan ve toplam arayüzey alanı A, toplam hacmi V olan bir sıvı içine oksijen transferi

düşünüldüğünde, sıvı içerisinde oksijenin birim zamanda toplam transfer hızı, o andaki gazın denge konsantrasyonu ve çözeltideki konsantrasyonu farkı ile orantılıdır. Eşitlik 2.14'ün, $t=0$ için $C=C_0$, $t=t$ için $C=C_t$ aralığında integrali alınırsa;

$$\int_{C=C_0}^{C=C_t} \frac{dC}{(C_S^* - C_L)} = k_L a \int_{t=0}^{t=t} dt \quad (2.15)$$

$$\frac{(C_S^* - C_t)}{(C_S^* - C_0)} = e^{-k_L a^* t} \quad (2.16)$$

Eşitlik 2.16 lineerleştirilerek, sistemin hacimsel kütle transfer katsayısı $k_L a$ değeri hesaplanabilir.

$$\ln(C_S^* - C_t) = \ln(C_S^* - C_0) - k_L a^* t \quad (2.17)$$

y eksenini $\ln(C_S^* - C_t)$, x eksenini t olacak şekilde değerler grafiğe döküldüğünde elde edilen doğrunun eğimi $-k_L a^*$ 'yi verirken, kesim noktası $\ln(C_S^* - C_0)$ değerini verir. $(C_S^* - C_t)$ ve $(C_S^* - C_0)$ terimleri başlangıç ve sonuçtaki doygunluk eksikliğini gösterir. İlk konsantrasyon sıfır ($C_0 = 0$) ise doygunluk fraksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\frac{C_t}{C_S^*} = 1 - e^{-k_L a^* t} \quad (2.18)$$

Biyoreaktörlerde kütle transfer hızının artması ile reaktörün performansı artmaktadır. Kütle transfer hızını arttırabilmek için, iki film teorisiyle açıklanan ve direnç oluşturan gaz ve sıvı film tabakalarının kalınlıkları (y', y) azaltılmalıdır. Bunun için aşağıdaki işlemler uygulanabilir:

- Ortamdaki kesme kuvvetlerinin artırılması: Sisteme verilen enerji arttırılarak daha iyi karışımın sağlanması ile kesme kuvveti arttırılabilir. Özellikle viskozitesi yüksek sıvıların film kalınlıklarının daha fazla olması nedeniyle

kesme kuvvetinin artırılması sonucu, viskozite düşürülerek kütle transferi artırılabilir.

- A/V ifadesindeki A temas yüzey alanı değerinin artırılması: Bu iki şekilde gerçekleştirilir. Birincisi sisteme verilen gaz miktarının artırılması, ikincisi ise kesme kuvvetlerinin artırılması ile kabarcık boyutlarının azaltılması yoluyla yüzey alanının artırılmasıdır (Akbayır, 2007).

2.1.2. Oksijen Transferini Etkileyen Faktörler

2.1.2.1. Oksijen Doygunluk Değeri, C_s^*

Oksijenin sudaki çözünürlüğü azdır. Az çözünen bir gaz olduğundan çözünürlüğü, verilen sıcaklıkta, atmosfer basıncı ile doğrudan değişmektedir. Atmosferik oksijen ile su ortamındaki çözülmüş oksijenin dengede olduğu konsantrasyon oksijenin doyumluk değeridir. Çözülmüş oksijen doyumluk konsantrasyonunu etkileyen parametreler aşağıda verilmiştir.

2.1.2.1.1. Basınç

Oksijenin su içerisindeki çözünürlüğü kısmi basıncı ile doğru orantılıdır. Herhangi bir sıcaklıkta su içindeki çözünürlük Henry Kanunu'na göre hesaplanabilir. Henry Kanunu'na göre sabit sıcaklıkta, sıvı içinde çözünen gaz miktarı, doğrudan gaz basıncı ya da konsantrasyonuna bağlıdır (Mueller et al, 2002).

$$C_s^* = \frac{P_G}{H} = \frac{C_G}{H} \quad (2.19)$$

2.1.2.1.2. Sıcaklık

Oksijenin çözünürlüğü sıcaklık arttıkça azalır. 1 atm basınçta, oksijeninin çözünürlüğü 0 °C'de 14.62 mg/L ve 30 °C'de 7.56 mg/L'dir. Standart şartlar altında

($T=20^{\circ}\text{C}$, $P_{b,St}=1013\text{ hPa}$) deneydeki oksijen doygunluk değeri için sıcaklık düzeltme faktörü τ , aşağıdaki şekilde hesaplanır (Mueller et al, 2002):

$$\tau = \frac{C_{S,P^*,T}^*}{C_{S,20}^*} \quad (2.20)$$

2.1.2.1.3. Atıksu β Düzeltme Faktörü

Yüzey aktif maddeler, yağ, partiküller ve mineral tuzlar gibi atıksu bileşenlerinin oksijen doygunluğu üzerindeki etkilerini belirlemek için β düzeltme faktörü kullanılır. β faktörü atıksu ile musluk suyu arasındaki doygunluk oranıdır. Sudaki bileşenlerin miktarı, oksijenin sudaki çözünme yeteneğini etkiler. Saf su, yüksek mineral içerikli suya göre daha çok oksijen absorplayebilir. Deniz suyu ve kuyu suları, taze yüzey sularına göre daha az çözülmüş oksijen içerirler.

$$\beta = \frac{C_{Sw}^*}{C_{Sm}^*} \quad (2.21)$$

Atıksu doygunluk değeri üzerinde toplam çözülmüş maddelerin büyük etkisi vardır. Bu etki aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$\beta = 1 - 5.7 * 10^{-6} * TDS \quad (2.22)$$

Evsel atıksularda yaklaşık olarak $TDS < 1500\text{ mg/L}$, $\beta = 0.99$ iken endüstriyel atıksularda $TDS \approx 10000\text{ mg/L}$ ve $\beta = 0.94$ değerindedir (Mueller et al, 2002). Bir başka kaynağa göre β katsayısı $0.7-0.98$ arasında değişmekte ve atıksu arıtımında genellikle 0.95 olarak kullanılmaktadır (Yıldız, 1999; Akbayır, 2007).

2.1.2.2. Hacimsel Kütle Transfer Katsayısı, $k_L a$

$k_L a$, sıcaklık, havalandırıcının türü ve kapasitesi, reaktörün geometrisi ve sudaki maddelerden etkilenmektedir. Kullanılan havalandırıcının birim enerji başına

sisteme transfer edebildiği oksijen miktarı önemlidir. Sistemde bulunan hava miktarı ve hava kabarcıklarının boyutları da göz ardı edilmemelidir. Reaktördeki hava kabarcıklarının bekleme süresi oksijenin sudaki çözünme miktarını artırır. $k_L a$, belirli bir havalandırma ayarında ve belirli bir sıcaklıkta temiz su ile yapılan oksijen transfer deneyinin değerlendirilmesiyle belirlenir (Akbayır, 2007).

2.1.2.2.1. Sıcaklık

Oksijen transfer hızı üzerindeki önemli parametrelerden biri de sıcaklıktır. Kütle transfer katsayısı 20 °C sıcaklıktaki standart değerine aşağıdaki eşitlikle dönüştürülür:

$$k_L a_{20} = k_L a_T * \theta^{(20-T)} \quad (2.23)$$

θ katsayısı için yaygın olarak 1.024 değeri kullanılmaktadır (Yıldız, 1999; Akbayır, 2007).

2.1.2.2.2. Atıksu α Düzeltme Faktörü

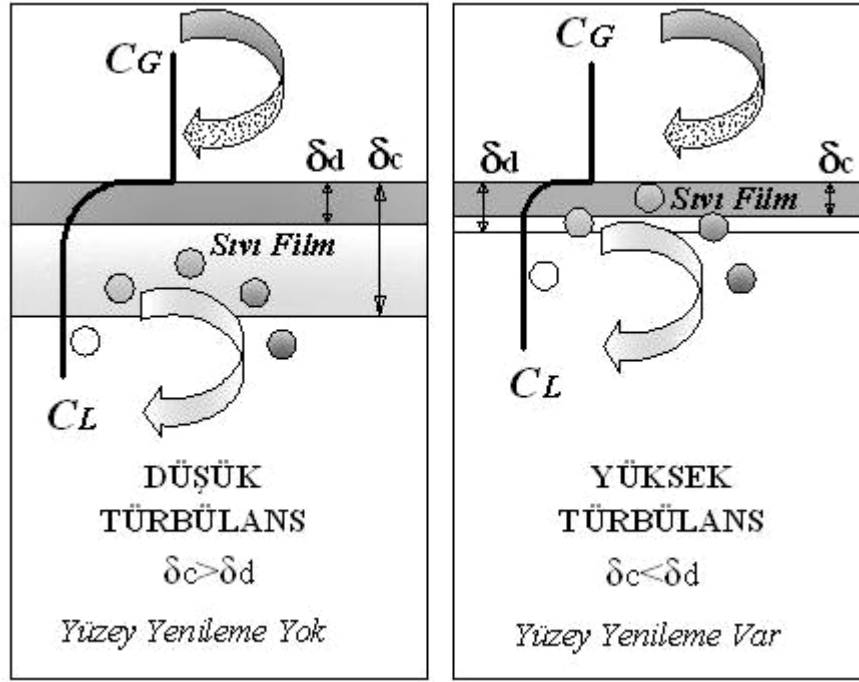
Oksijenin çözünürlüğü, suyun sıcaklığı ve diğer çözünen maddelerin miktar ve türlerine bağlı olduğundan, atıksu arıtımında kullanılacak oksijen transfer katsayısı temiz su için bulunan değerlerin, belli bir katsayı ile çarpılmasıyla bulunur. Bu katsayı α olarak bilinir ve su içerisindeki deterjanlar, yağlar ve floklu maddeler, çözülmüş organikler gibi kirleticilerden etkilenir. α katsayısı atıksuyun türüne göre 0.3-1.2 arasında değişir (Akbayır, 2007).

$$\alpha = \frac{k_L a_w}{k_L a_m} \quad (2.24)$$

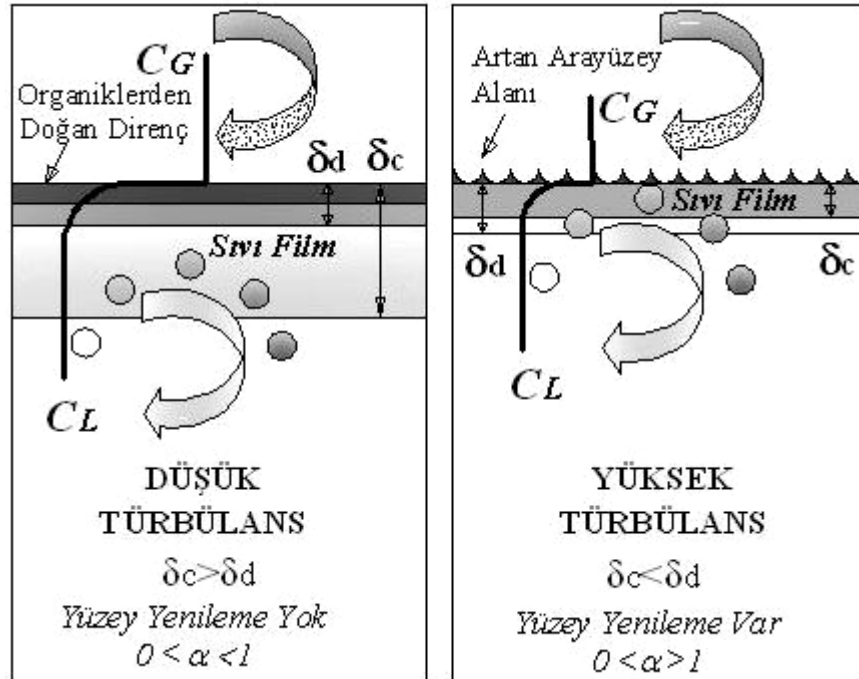
Yüzey aktif maddeler, yüzey gerilimini azaltıcı etkileri ile yüzey alanını artırarak ve sıvı film katsayısını azaltarak hacimsel kütle transfer katsayısına etki ederler. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te transfer prosesi üzerinde yüzey aktif maddeler ve türbülansın etkisi gösterilmektedir. Düşük türbülansın etkili olduğu temiz

arayüzeylerde, bulk (yığın, hacimsel) karışım nedeniyle oluşan girdaplar (eddy) yüzeye ulaşamazlar. Konsantrasyon sınır tabakası kalınlığı, δ_c , difüze alt tabaka kalınlığından, δ_d , daha fazladır. Bu nedenle girdapların sıvı faza dönmesinden önce doygunluğa ulaşması için yeterli difüzyon zamanı yoktur. Yüksek türbülans ise girdaplar yüzeye kadar ulaşabilirler ve burada kısa zamanda doygunluğa ulaşır sıvı faza dönerler. Bu türbülans kademesinde konsantrasyon sınır tabakası kalınlığı, δ_c , difüze alt tabaka kalınlığından, δ_d , daha azdır. Bu nedenle girdapların yüzeyden ayrılmadan önce doygunluğa ulaşması için difüzyon zamanı yeterlidir.

Düşük türbülans ve yüzeyde yüzey aktif madde varlığında δ_c artar. Temiz suyla karşılaştırıldığında organik maddeler nedeniyle artan direnç transfer hızını azaltmaktadır. Sıvı fazın laminar akışta olduğu durumlarda, oksijen transferine sıvı fazın direnci, yüzey aktif maddelerin neden olduğu yüzey direncinden daha yüksektir ve bu yüzey direncini maskeleymektedir. Düşük türbülans koşullarında, transfer hızı üzerinde sıvı faz direnci azken, yüzey aktif maddelerin neden olduğu yüzey direnci transfer hızı üzerinde hissedilir derecede azaltıcı etki yapmaktadır. Yüksek türbülans ise girdapların yüzeye kadar ulaşması ve yüzeyde hareketliliğe neden olması ile yüzey direncinin oksijen transferine etkisi azalmaktadır. Bu koşullar altında artan arayüzey alanından dolayı $\alpha > 1$ olabilir (Mueller et al, 2002).



Şekil 2.4., Temiz Suda Oksijen Transferi Üzerinde Türbülansın Etkisi (Mueller et al, 2002).



Şekil 2.5., Atıksuda Oksijen Transferi Üzerinde Türbülansın Etkisi (Mueller et al, 2002).

2.2. Tasarım Eşitlikleri

2.2.1. Standart Oksijen Doygunluk Değeri ($C_{s,st,T}^*$, mg/L)

Standart oksijen doygunluk değerleri, sabit su sıcaklığında ve 1013 hPa atmosfer basıncında doygunluğa sahip sularda yapılan ölçümlerle belirlenir. $C_{s,st,20}^*$, 20 °C'deki standart oksijen değeri olmak üzere bu değer 9.09 mg/L'dir. Sıcaklığa bağlı standart oksijen doygunluk değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir (Kayser et al, 1996).

Tablo 2.1., 1013 hPa'da Sıcaklığa Bağlı Standart Oksijen Doygunluk Değerleri (mg/L) (Kayser et al, 1996).

| T (°C) | +0.0 (°C) | +0.2 (°C) | +0.4 (°C) | +0.6 (°C) | +0.8 (°C) |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0 | 14.62 | 15.54 | 14.46 | 14.38 | 14.3 |
| 1 | 14.22 | 14.14 | 14.06 | 13.98 | 13.91 |
| 2 | 13.83 | 13.75 | 13.68 | 13.61 | 13.53 |
| 3 | 13.46 | 13.39 | 13.32 | 13.25 | 13.18 |
| 4 | 13.11 | 13.04 | 12.97 | 12.9 | 12.84 |
| 5 | 12.77 | 12.7 | 12.64 | 12.57 | 12.51 |
| 6 | 12.45 | 12.38 | 12.32 | 12.26 | 12.2 |
| 7 | 12.14 | 12.08 | 12.02 | 11.96 | 11.9 |
| 8 | 11.84 | 11.78 | 11.73 | 11.67 | 11.61 |
| 9 | 11.56 | 11.5 | 11.45 | 11.39 | 11.34 |
| 10 | 11.29 | 11.23 | 11.18 | 11.13 | 11.08 |
| 11 | 11.03 | 10.98 | 10.93 | 10.88 | 10.83 |
| 12 | 10.78 | 10.73 | 10.68 | 10.63 | 10.58 |
| 13 | 10.54 | 10.49 | 10.44 | 10.4 | 10.35 |
| 14 | 10.31 | 10.26 | 10.22 | 10.17 | 10.13 |
| 15 | 10.08 | 10.04 | 10 | 9.95 | 9.91 |
| 16 | 9.87 | 9.83 | 9.79 | 9.75 | 9.71 |
| 17 | 9.66 | 9.62 | 9.58 | 9.55 | 9.51 |
| 18 | 9.47 | 9.43 | 9.39 | 9.35 | 9.31 |
| 19 | 9.28 | 9.24 | 9.2 | 9.16 | 9.13 |
| 20 | 9.09 | 9.06 | 9.02 | 8.98 | 8.95 |
| 21 | 8.91 | 8.88 | 8.85 | 8.81 | 8.78 |
| 22 | 8.74 | 8.71 | 8.68 | 8.64 | 8.61 |
| 23 | 8.58 | 8.55 | 8.51 | 8.48 | 8.45 |
| 24 | 8.42 | 8.39 | 8.36 | 8.32 | 8.29 |
| 25 | 8.26 | 8.23 | 8.2 | 8.17 | 8.14 |
| 26 | 8.11 | 8.08 | 8.05 | 8.03 | 8 |
| 27 | 7.97 | 7.94 | 7.91 | 7.88 | 7.85 |
| 28 | 7.83 | 7.8 | 7.77 | 7.74 | 7.72 |
| 29 | 7.69 | 7.66 | 7.64 | 7.61 | 7.58 |
| 30 | 7.56 | 7.53 | 7.51 | 7.48 | 7.46 |

2.2.2. Deneydeki Oksijen Doygunluk Değeri ($C_{s,p^*,T}^*$, mg/L)

Belirli bir su sıcaklığında ($T, ^\circ\text{C}$), belirli havalandırma değeri ve barometrik basınçta (P_b^* , hPa) temiz suda yapılan oksijen transferi deneyinde bulunan oksijen doygunluk değeri. Bu değeri, aşağıdaki eşitlikle standart şartlara dönüştürülür.

$$C_{s,20}^* = C_{s,p^*,T}^* * \frac{C_{s,St,20}^*}{C_{s,St,T}^*} * \frac{P_{b,St}}{P_b^*} \quad (2.25)$$

2.2.3. Temiz Suda Standart Oksijen Transfer Hızı (SOTR, kg/saat)

Bir havalandırma cihazı veya sistemiyle donatılmış ve belirli bir havalandırma ayarında çalıştırılan, V hacminde temiz su ile doldurulmuş bir biyoreaktöre, standart şartlarda bir saatte aktarılan oksijen kütesidir. ATV-M 209E Alman Standart'ında oksijen transfer kapasitesi (OC) olarak adlandırılırken, TS EN 12255-15 Türk Standart'ı ve bazı kaynaklarda (Mueller et al, 2002) standart oksijen transfer hızı (SOTR) olarak da adlandırılmaktadır. Standart şartlar su sıcaklığının $T=20^\circ\text{C}$, barometrik basıncın $P_{b,St}=1013$ hPa ve çözülmüş oksijen konsantrasyonunun $C_L=0$ olduğu koşullardır. Oksijen transferi için maksimum sürücü kuvvetin belirlenebilmesi için çözülmüş oksijen konsantrasyonu sıfır alınmıştır. Formülde kullanılan hacim m^3 olarak verilmiştir.

$$SOTR = \frac{V * k_L a_{20} * C_{s,20}^*}{1000} \quad (2.26)$$

2.2.4. Atıksu Karışım Sıvısında Standart Oksijen Transfer Hızı (αSOTR , kg/sa)

Bir havalandırma cihazı veya sistemiyle donatılmış ve belirli bir havalandırma ayarında çalıştırılan, V hacminde karışım sıvısı ile doldurulmuş bir biyoreaktöre, standart şartlarda bir saatte aktarılan oksijen kütesidir.

$$\alpha SOTR = \frac{V * \alpha k_L a_{20} * \beta C_{S,20}^*}{1000} \quad (2.27)$$

2.2.5. Spesifik Oksijen Kapasitesi ($SOTR_V$, $kg/m^3/saat$)

Standart şartlarda birim sıvı hacmi başına birim zamanda transfer olan oksijen kütlesidir.

$$SOTR_V = \frac{SOTR}{V} \quad (2.28)$$

Herhangi bir sıcaklıkta ölçülen spesifik oksijen transfer hızı ile (OTR_V), standart şartlarda ölçülen spesifik oksijen transfer hızı ($SOTR_V$) arasındaki oran aşağıdaki eşitlikte verilmiştir:

$$\frac{OTR_V}{SOTR_V} = \frac{k_L a_t * C_{S,P^*,T}^*}{k_L a_{20} * C_{S,20}^*} = \theta^{(t-20)} * \tau \quad (2.29)$$

2.2.6. Temiz Suda Standart Havalandırma Verimi (SAE , $kg/kW/saat$)

Standart şartlarda temiz su oksijen transfer kapasitesinin deney sırasında ölçülen toplam güce oranıdır.

$$SAE = \frac{SOTR}{P} \quad (2.30)$$

2.2.7. Atıksu Karışım Sıvısında Standart Havalandırma Verimi (αSAE , $kg/kW/saat$)

Standart şartlarda atıksu karışım sıvısında oksijen transfer kapasitesinin deney sırasında ölçülen toplam güce oranıdır.

$$\alpha_{SAE} = \frac{\alpha SOTR}{P} \quad (2.31)$$

2.2.8. Standart Oksijen Transfer Verimi (SOTE, %)

Havalandırma sonucu sisteme verilen oksijenin ne kadarının sıvı içerisine transfer edilebildiğini ifade eder. Kuru havada oksijenin kütle oranı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\frac{gO_2}{ghava} = 0.2095 \frac{molO_2}{molhava} * 32 \frac{gO_2}{molO_2} * \frac{molhava}{28.964ghava} = 0.2315 \quad (2.32)$$

Oksijenin kütleli debisi, kuru havada oksijenin kütle oranı, havanın yoğunluğu ve sisteme verilen hava debisinin çarpımına eşittir.

$$w_o = 0.2315 * \gamma_G * Q_G = 0.278 * Q_G \quad (2.33)$$

Buna göre standart oksijen transfer verimi aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır (Mueller et al, 2002; Kayser et al, 1996; TS EN 12255-15, 2006):

$$SOTE = \frac{SOTR}{0.278 * Q_G} * 100 \quad (2.34)$$

3. JET LOOP BİYOREAKTÖR SİSTEMLERİ

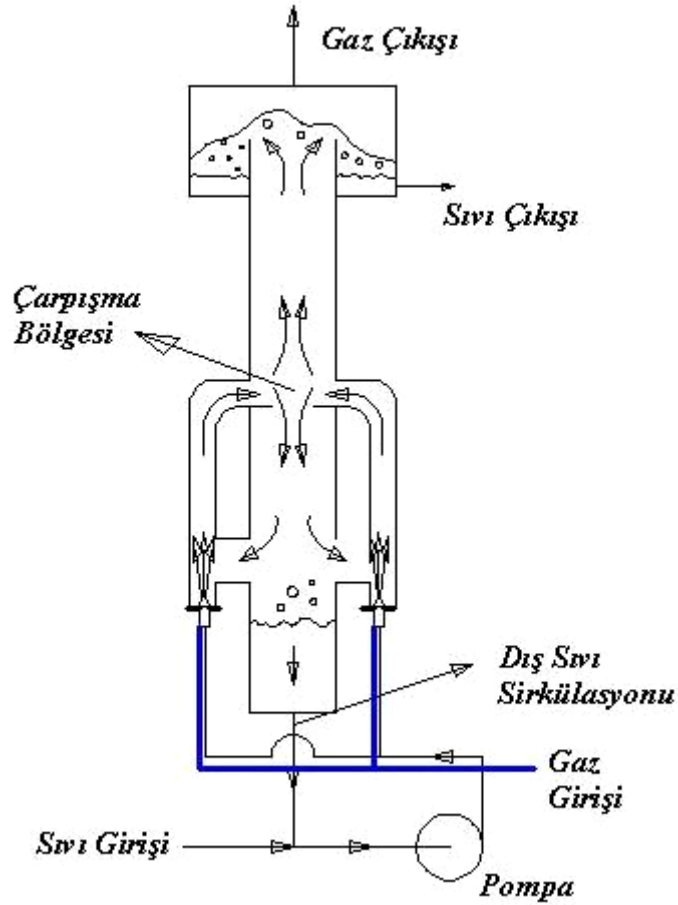
Klasik arıtım prosesleri uzun yıllardan beri evsel ve endüstriyel atıksuların arıtılmasında kullanılmaktadır. Ancak bu sistemlerin geniş alan gereksinimleri, koku ve emisyon problemleri gibi dezavantajları nedeniyle daha küçük ve daha kolay işletilebilir sistemlerin geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Geliştirilen modern biyoreaktörler, basit yapıları, işletim kolaylıkları, iyi tanımlanmış akım rejimleri, daha iyi dispersiyon etkileri, nispeten düşük güç tüketimleri ve yüksek kütle transfer performansları ile daha etkin atıksu arıtımının sağlanması gibi avantajlara sahiptir (Yıldız, 1999).

Yüksek performanslı kompakt reaktör olarak adlandırılan jet loop biyoreaktörler geliştirilen modern reaktörlerden biridir. Bu reaktörlerde, sisteme verilen enerji sıvının kinetik enerjisinden sağlanmaktadır. Jet loop biyoreaktörlerde oluşturulan jet akışın hidrodinamik gücü ile oldukça yüksek derecede sıvı sirkülasyonu ve gaz dispersiyonu sağlanmaktadır (Akbayır, 2007).

Jet loop biyoreaktörlerin klasik reaktöre göre avantajları aşağıda verilmiştir:

- Yüksek karıştırma ve kütle transferi performansına sahiptir.
- Çok iyi derecede gaz dispersiyonu sağlanmaktadır.
- Aynı enerji girdisiyle daha fazla sirkülasyona sahiptir.
- Sıvının resirkülasyonu sırasında gaz faz ikinci kez dispersiyona uğrar.
- Reaksiyon bölgesinde homojen konsantrasyon ve ısı profili sağlanmaktadır.
- İnşaatı ve işletimi kolaydır.
- Düşük yatırım ve işletme maliyetine sahiptir.
- Enerji gereksinimi daha düşüktür.
- Reaktör içerisinde hareketli parça bulunmaz.
- Pilot tesis ölçekten endüstriyel ölçeğe geçiş rahattır (Yıldız, 1999; Akbayır, 2007).

Jet loop biyoreaktörlere ait geliştirilen ilk reaktör modeli, reaktör tabanına yerleştirilmiş iki akışlı bir püskürtme başlığından ve merkeze yerleştirilmiş bir emme tüpünden ibarettir. Sıvı çıkışı reaktörün üst kısmından yapılmaktadır. Bu modelin dezavantajları olarak, püskürtme başlığının tıkanma ihtimalinin bulunması ve gaz fazın yeteri kadar sistemde kalamadan reaktörü terk etmesi nedeniyle kalış süresinin az olması sayılabilir. Bu tür jet loop biyoreaktör modeli Şekil 3.1’de verilmektedir.



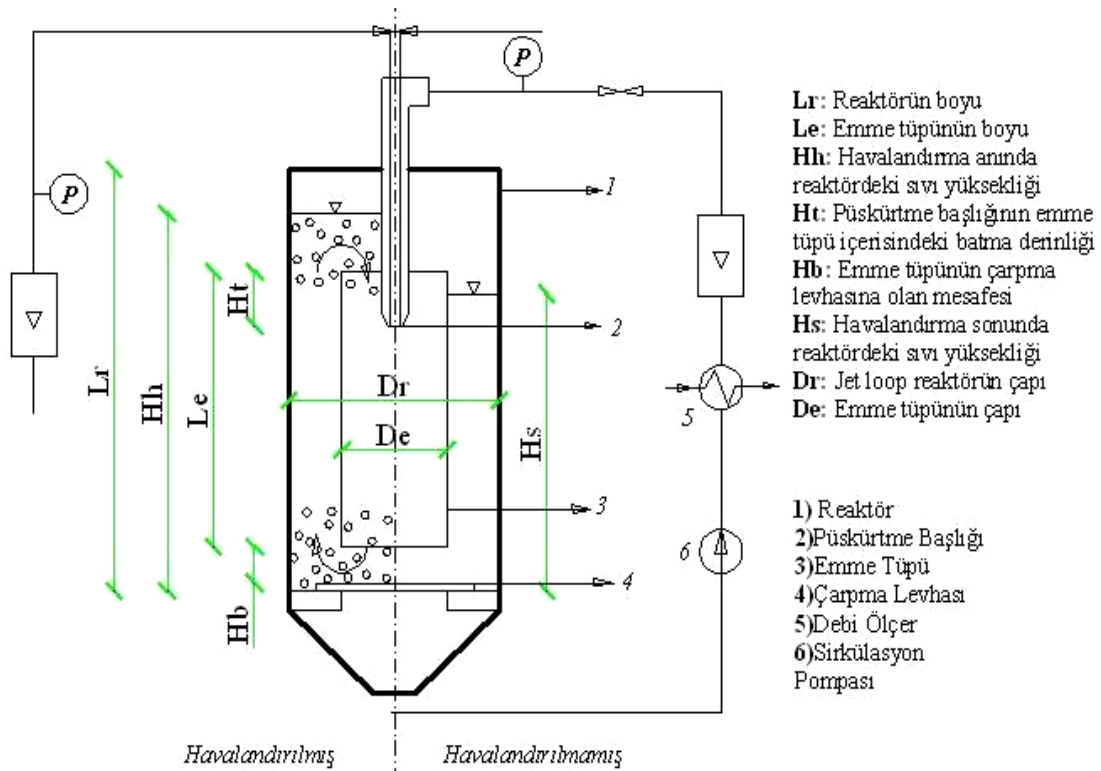
Şekil 3.1., İki Akışlı Püskürtme Başlığının Tabana Yerleştirildiği Jet Loop Modeli (Yıldız, 1999).

Jet loop biyoreaktörlerin diğer bir modeli, püskürtme başlığının reaktörün üstünde emme tüpünün içine doğru tasarlandığı ve su çıkışının reaktör tabanından yapıldığı jetloop modelidir. Bu modelde, su ve hava ayrı ayrı iki farklı püskürtme başlığından püskürtülerek reaktör içerisinde çarpıştırılır ve ön bir karışım sağlanır. Püskürtme başlığının reaktörün üstünde olması ile sadece başlığın tıkanması önlenmekle kalmayıp, aynı zamanda gaz kabarcıkları suyun kaldırma kuvvetinin aksi

yönünde hareket etmeye zorlandığından, kabarcıkların sistemde kalış süreleri artmış olur. Buna karşılık, su çıkışının reaktör tabanından yapılması nedeniyle suyun sadece bir bölümü sirkülasyona sokulurken önemli bir kısmı sirkülasyona sokulmadan reaktörden ayrılmaktadır. Bu nedenle sıvı fazın reaktör içerisinde kalış süresi azalmaktadır (Akbayır, 2007).

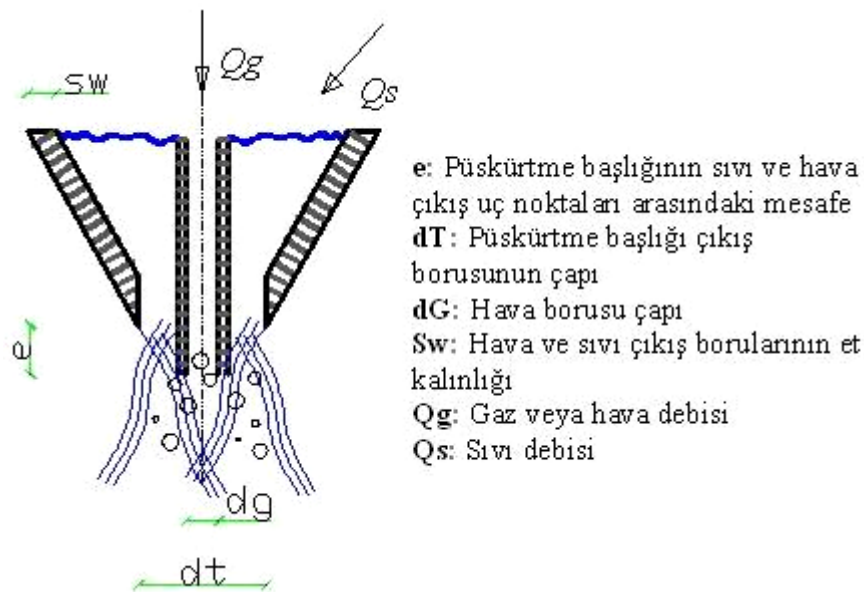
Jet loop biyoreaktörlerin son modelinde, reaktör, iç içe geçmiş iki silindirik yapıdan oluşmaktadır. Emme tüpü, reaktörün tam ortasında ve tank tabanından belirli bir mesafe yukarıdadır. Püskürtme başlığı reaktörün üstünde, emme tüpünü ortalayacak şekilde, emme tüpü içine doğru yerleştirilmiştir ve iç içe geçmiş sıvı ve gaz borularından oluşmaktadır. Su çıkışı, reaktörün üstünden yapılmaktadır. Püskürtme çevrimli reaktörün giriş yapısı emme tüpünün belli bir mesafe aşağısında biter. Reaktör tabanında bir çarpma levhası bulunmaktadır.

Bir sıvı sirkülasyon pompası yardımıyla reaktörün altından ya da üstünden alınarak bir ara tanka gönderilen ve buradan emilerek belli bir debide sisteme verilen sıvı ve hava kaynağı ile gönderilen hava, püskürtme başlığında karışarak büyük bir hızla reaktörün emme tüpü boyunca aşağıya doğru püskürtülür. Bu şekilde emme tüpünü geçen gaz ve sıvı karışımı, reaktörün altında bulunan çarpma levhasına ulaşır ve buradan yanlara doğru yayılarak emme tüpü ile ana reaktör arasında kalan ara bölgedeki boşluktan yukarı doğru çıkar. Burada sıvı hızı kesitteki değişimden dolayı değişir. Reaktörün en üstüne gelen gaz kabarcıkları ve sıvı taneciklerinin bir kısmı püskürtme başlığından çıkan sıvının sürüklenme kuvvetinden doğan hareket nedeniyle tekrar emme tüpüne girebilir. Böylece su-hava karışımının reaktör içerisindeki kalış süresi artmış olur. Bu tip jet loop biyoreaktör modeli Şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmektedir (Yıldız, 1999; Akbayır, 2007).



Şekil 3.2., Püskürtme Başlığının ve Su Çıkışının Reaktörün Üst Bölmesinde Olan Jet Loop Modeli (Yıldız, 1999).

Çok farklı püskürtme başlıkları vardır. Ancak temel olarak püskürtme başlığının ayrıntılı gösterimi Şekil 3.3'de verilmektedir. Bu yapı gaz ve sıvı fazların birleşerek reaktörün içerisine girdiği ve ilk dispersiyonun gerçekleştiği parçadır.



Şekil 3.3., Püskürtme Başlığının Ayrıntılı Gösterimi (Yıldız, 1999; Akbayır, 2007).

Jet-loop biyoreaktörlerde gaz fazın sıvı içerisindeki dispersiyonu iki şekilde gerçekleşir. İlk dispersiyon sıvı ve gaz fazların ilk buluştukları püskürtme başlığının çıkışında, diğeri ise sıvının reaktör içerisindeki dağılması sırasında meydana gelmektedir. Birinci dispersiyon bölgesinde son derece yüksek bir hızla gelen sıvı, gaz fazı çok küçük kabarcıklara parçalar. Daha sonra reaktörün altına doğru sürüklenen bu küçük kabarcıklar ikinci dispersiyon bölgesine girerler. Burada sıvı basıncının artmasıyla gaz fazın çözünürlüğü de yükselmektedir. Bunun sonucu olarak da 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 sistemde kalış süresini arttırmaktadır. Diğer bir önemli dispersiyon bölgesi ise sıvı ve gaz fazın emme tüpünü terk ettikten sonra reaktör tabanındaki çarpma levhasına çarparak gaz kabarcıklarının dağılması esnasında gerçekleşir (Akbayır, 2007).

3.1. Jet Loop Biyoreaktörlerin Atıksu Arıtımında Kullanımı

Jet loop reaktörler, son 15–20 yıldan beri özellikle endüstriyel atıksu arıtımında kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye için oldukça yeni bir sistemdir. Almanya, İtalya, Portekiz, İsveç ve Çin gibi ülkelerde başarılı bir şekilde işletilmektedir (Akbayır, 2007). Jet loop biyoreaktörlerin klasik aktif çamur sistemlere göre, havalandırma için pedal, türbin gibi mekanik gereç bulundurmaya, yüksek yükseklik/çap oranı (5–10/1) sayesinde inşası için az arazi ihtiyacı oluşu, birçok ünitenin yaptığı işi tek başına yaptığı için büyük enerji tasarrufu sağlaması gibi birçok avantajı vardır (Keskinler ve ark., 2004; Akbayır, 2007).

Klasik aktif çamur sistemlerinde çamur konsantrasyonu, sistemin arıtma verimini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Yüksek verim için yüksek MLSS istenen bir durumdur. Jet loop biyoreaktör sistemlerinde, yüksek oksijen transfer kapasitesi nedeniyle, yüksek biyokütle konsantrasyonları için gerekli oksijen rahatlıkla temin edilebilmektedir. Bu sonuç, biyoreaktörde çok yüksek MLSS değerlerine çıkılabilmemesine ve böylece yüksek organik yüklerin etkili bir şekilde arıtılabilmemesine imkân tanımaktadır. Ayırma prosesi olarak membran ünitelerinin

kullanıldığı jet loop biyoreaktörlerdeki yüksek oksijen transfer kapasitesinden dolayı, biyokütle klasik aktif çamur proseslerine nazaran çok daha hızlı stabilize olmaktadır. Bunun sonucunda çamur yaşı çok daha düşük, F/M oranı çok daha yüksek olmasına rağmen jet loop biyoreaktörlerde üretilen çamur miktarı daha az olmaktadır. Böylece arıtma sistemlerinde en önemli maliyetlerinden birisini oluşturan çamur bertaraf maliyeti de azaltılmaktadır (Akbayır, 2007).

Meydana gelen yüksek sirkülasyondan dolayı jet loop biyoreaktörde flok yapıları parçalanarak sistem içerisine dağılmaktadır. Jet loop biyoreaktörlerde flok boyutunun küçülmesi etkin yüzey alanının ve dolayısıyla kütle transferinin artmasına neden olmaktadır ve yüksek yüklerde etkili bir arıtım gerçekleştirilmektedir. Diğer taraftan flok boyutunun küçülmesi çamur çökmesinde sorunlar yaratmaktadır. Keskinler ve ark. tarafından 2004 yılında, peyniraltı sularının arıtımının gerçekleştirildiği bir çalışmada, oldukça yüksek biyokütle konsantrasyonlarına çıkılmasına rağmen biyoreaktördeki biyokütlenin çökme kabiliyetinin çok zayıf olduğu görülmüştür ve biyokütlenin çamurun hacim indeksi tespit edilememiştir. Bu duruma iki önemli etkenin neden olduğu düşünülmektedir. Birincisi hem jet loop reaktör hem de çapraz akış mikrofiltrasyon ünitesinin meydana getirdiği çok yüksek sirkülasyonlar nedeniyle oluşan büyük kesme kuvvetlerinin flokları parçalayarak boyutlarının oldukça küçülmesine sebep olmasıdır. İkinci etken ise peyniraltı sularının yağlı yapılarından dolayı yapışkan özellikte bir çamurun meydana gelmesidir. Dolayısıyla çalışmada katı-sıvı ayırımında membran ayırma tekniğinin kullanımı bir anlamda tek seçenek olarak görülmüştür.

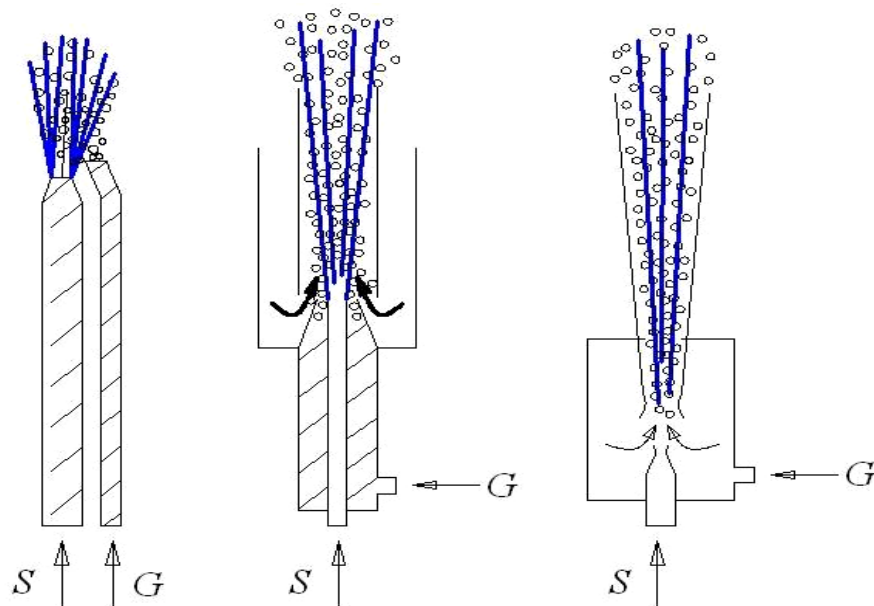
Pratikte biyolojik arıtma sistemlerinin havalandırma ünitelerinde, çözülmüş oksijen konsantrasyonunun 1.5–4 mg/L arasında olması tavsiye edilmektedir. Klasik sistemlerde, düşük sirkülasyonlar ve sistemde çözülmüş oksijen konsantrasyonunun sıfıra düştüğü ölü bölgelerin meydana gelmesi nedeniyle çözülmüş oksijen değerinin 2 mg/L civarında olması ve özellikle 2 mg/L'den düşük olmaması istenir. Jet loop biyoreaktörde yapılan çalışmalar sırasında yüksek besleme konsantrasyonu ve organik yüklemelerde çözülmüş oksijenin 1 mg/L'ye kadar düştüğü gözlemlenmiş, ancak sistemin performansının ve mikroorganizmaların olumsuz bir şekilde etkilenmediği tespit edilmiştir. Jet loop biyoreaktörde çok yüksek sirkülasyonlar

sonucunda elde edilen son derece yüksek karışım ve $k_L a$ nedeniyle mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğu oksijenin sürekli olarak temin edilmesinin, çözülmüş oksijenin reaktörde homojen olarak dağılmasının ve ölü bölgelerin meydana gelmemesinin bu sonucu doğurduğu düşünülmektedir (Akbayır, 2007).

3.2. Jet-Loop Reaktörlerde Kütle Transferini Etkileyen Parametreler

3.2.1. Püskürtme Başlığı Çapının Etkisi

Sıvının ve gazın reaktör içerisine girişi reaktör performansı açısından son derece önemlidir. Bu nedenle çok farklı yapılarda püskürtme başlıkları tasarlanmıştır. Bazı püskürtme başlıklarında hava ve sıvı aynı merkeze sahip, iç içe geçmiş iki boru ile sisteme gönderilirken, bazılarında ise ayrı ayrı bir karışım bölmesine püskürtülebilmektedir. Aşağıdaki şekilde jet loop reaktörlerde kullanılan farklı püskürtme başlıkları ve akış tipleri gösterilmektedir (Yıldız, 1999).



Şekil 3.4., Jet Loop Reaktörlerde Kullanılan Püskürtme Başlığı ve Akış Tipleri (Yıldız, 1999).

Sisteme aktarılması gereken enerji ve püskürtme başlığındaki sıvı hızı, hava ve sıvı borularının kesit alanları farkına bağlı olarak değişmektedir. Jet loop reaktörlerde sisteme aktarılan enerji miktarı, püskürtme başlığının ucundaki sıvı hızının kinetik enerjisi olarak ölçülür. Sıvı ve gaz debilerinin aynı olmasına rağmen püskürtme başlığı yapılarının farklı olması nedeniyle sisteme aktarılan enerjilerin değişmesi, kütle transferini önemli derecede etkiler. Aynı merkezden hava ve sıvının beslendiği püskürtme başlıklarında Şekil 3.3’de de gösterildiği gibi çok sayıda etkili parametre vardır (Yıldız, 1999; Akbayır, 2007).

Jianping ve ark. 2000 yılında yaptıkları bir çalışmada sıvı debisini 1.6 m³/saat, gaz debisini 1 m³/saat’te sabit tutarak, üç farklı püskürtme başlığı çapı kullanarak (5.4x10⁻³ m, 6.2x10⁻³ m, 6.8x10⁻³ m), yarıçap oranının (r/R), k_{La} üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir. Reaktör yüksekliği 0.82 m, çapı 0.102 m iken, emme tüpü yüksekliği 0.55 m ve çapı 0.06 m’dir. Püskürtme başlığının emme tüpüne batma derinliği 0.075 m’dir. 0-0.7 arasında artan r/R’ye karşılık k_{La} değerinin azaldığı görülmüştür. Aynı şekilde artan püskürtme başlığı çapı da k_{La} değerini düşürmüştür. r/R’nin artması, püskürtme başlığı yarıçapının artmasına, başka bir deyimle hava ve sıvı borularının kesit alanları farkının artmasına bağlıdır. Kesit alan farkı arttıkça püskürtme başlığından çıkan sıvı hızı azalmakta ve dolayısıyla iyi bir karışım ve dispersiyon sağlanamamakta ve k_{La}’nın azaldığı görülmektedir.

3.2.2. Püskürtme Başlığının Emme Tüpüne Batma Derinliği ve Sirkülasyon Süresinin Etkisi

Püskürtme başlığının emme tüpü içerisine batma derinliği, gaz tutulma değeri ve k_{La} üzerinde etkili olan önemli bir parametredir. Batma derinliği azaldıkça, bir yandan gazın geçtiği toplam biyoreaktör hacmi ve gaz tutulma değeri artarken, diğer yandan reaktörün altındaki çarpma levhasına, gaz kabarcıklarının çarpma şiddeti azalmakta ve buna bağlı olarak gaz tutulma değeri de azalmaktadır. Gaz kabarcıklarının çarpma levhasına çarpma şiddeti, kabarcıkların daha küçük parçalara bölünmesi ve yayılmasında etkilidir. Bu nedenle batma derinliğindeki azalış bu etkinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca batma derinliğindeki artış nedeniyle

kabarcıklar sıvı hızının etkisiyle daha küçük boyutlara parçalanamaz. Oluşan büyük boyutlu kabarcıklar, yükselmeye başlayarak sıvı ile karşılaşır ve çevrimi engellemeye çalışır. Ayrıca sıvı jetinin havayı emme etkisini azaltır. Yüksek gaz ve sıvı debilerinde gaz tutulma değeri için optimum püskürtme başlığı batma derinliğini 11.5 cm olarak tespit edilmiştir (Akbayır, 2007).

Jet loop reaktörlerde sirkülasyon süresi, sisteme üstten giren bir akışkan elemanının reaktörün en altına gidip, yeniden girdiği noktaya kadar gelmesi için gerekli süre olarak tanımlanır. Püskürtme başlık ucunun emme tüpünün girişine olan mesafesi arttıkça sirkülasyon süresi azalmaktadır (Yıldız, 1999). Diğer taraftan batma derinliği azaldıkça sirkülasyon yolu ve kabarcıkların sistemde kalış süreleri artmaktadır. Küçük batma derinliklerinde, emme tüpünün üst girişinde emme tüpünün dışındaki bölgeden gelen kabarcıkları tekrar sirkülasyona sokmak için daha büyük bir sürücü kuvvet oluşturulmaktadır. Bu durumda sirkülasyon süresi ve gaz tutulmalarda meydana gelen artışlardan dolayı, püskürtme başlığının batma derinliği azaldıkça k_{La} 'da artmaktadır (Akbayır, 2007).

Sirkülasyon süresi üzerinde etkili olan diğer parametreler, emme tüpünün çarpma levhasına olan uzaklığı, D_e/D_r oranı, püskürtme başlığının çapıdır. Düşük püskürtme hızlarında, emme tüpünün çarpma levhasına olan mesafesi 5 cm'den 7 cm'e arttırıldığında sirkülasyon süresi azalmaktadır. Bu durum daha yüksek püskürtme hızlarında ihmal edilebilir olmaktadır. Bu mesafenin optimum olarak 7 cm olduğu tespit edilmiştir. Emme tüpünün çarpma levhasına uzaklığı arttıkça, reaktör hacminin bir kısmı sirküle edilemez ve durgun kalır. Bu nedenle bu bölgede çözülmüş oksijen girişi ve transferi çok iyi gerçekleşmez. D_e/D_r oranı arttığında ise sirkülasyon hızı düşük püskürtme hızlarında hızlı bir şekilde azalmaktadır. Ayrıca püskürtme başlık çapının artışıyla sirkülasyon süresinin azaldığı tespit edilmiştir. İlk püskürtme çevrimli reaktörlerde sıvı üstten beslenip alttan alınmaktaydı. Ancak son yıllarda reaktör çıkışının üstten yapılması ile birlikte sirkülasyon süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum gaz tutulma değerlerinde dolayısıyla sisteme verilen oksijenin kullanımında artışa yol açmaktadır (Yıldız, 1999).

3.2.3. Emme Tüpü Çapının Reaktör Çapına Oranının (D_e/D_r) Etkisi

D_e/D_r oranı jet loop reaktörler için ve reaktör performansı için önemli parametrelerden biridir. k_{La} değerleri D_e/D_r oranının belli bir değerine kadar artmakta ve optimum bir değerden sonra azalmaktadır. Yapılan çalışmalarda k_{La} için optimum D_e/D_r oranı 0.4–0.6 olarak belirlenmiştir. D_e/D_r oranı emme tüpü çapının artışıyla artmaktadır. D_e arttıkça emme tüpü içerisindeki gaz dispersiyonu artarken, emme tüpü ile reaktörün dışı arasında kalan bölgenin kesit alanının azalmasına neden olmakta ve dolayısıyla ara bölgede sıvı hızının artmasına neden olmaktadır. Bu durum, daha fazla hava kabarcığının dış bölgeden tekrar emme tüpü içerisine girmesine ve hava kabarcıklarının daha uzun süre sistem içerisinde kalmasına yol açmaktadır. D_e/D_r oranı daha fazla arttırıldığında ise, emme tüpünün daha büyük kesit alanına sahip olması nedeniyle sıvı sirkülasyonu için gerekli sürücü kuvvet azalmakta ve dıştaki boşluk bölgesinde kabarcıkların oldukça büyük yükselme hızlarından dolayı, yükselen hava kabarcıkları emme tüpü içerisine çekilemeden sistemi terk etmektedir. Sistemde kabarcıkların kalış sürelerinin azalması k_{La} 'da düşümlere neden olmaktadır (Yıldız, 1999).

3.2.4. Emme Tüpü Kesit Geometrisinin Etkisi

Farazioğlu ve Keskinler, 2007 yılında, aynı kesit alanına sahip farklı geometrilerdeki (kare ve daire) iki emme tüpünü kullanarak, emme tüpünün kesit geometrisinin k_{La} üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Her iki emme tüpünün kesit alanı 30.2 cm^2 ve D_e/D_r oranı 0.19'dur. Deneyleerde hava debisi 4-16 L/dk, sıvı debisi 35-58 L/dk olmak üzere farklı debilerde çalışılmıştır. Reaktör yüksekliği 140 cm ve çapı 15 cm'dir. Püskürtme başlığında sıvı borusunun çapı 1.2 cm, hava borusunun çapı 0.64 cm ve hava borusunun sıvı borusundan uzaklığı 1.2 cm'dir. Birim hacim başına pompanın düşen güç $0.6-2.6 \text{ kW/m}^3$ arasında değişmektedir. Hava debisi 6 L/dk'da sabit tutularak, artan E/V değerine karşılık k_{La} değişimi incelendiğinde, her iki emme tüpünde de k_{La} 'nın arttığı görülürken, kare kesitli emme tüpünde k_{La} değerinin daire kesitli emme tüpüne göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde E/V değeri 1.9 kW/m^3 'te sabit tutularak, artan hava debisine karşı k_{La}

değişimi incelendiğinde, her iki emme tüpünde de k_{La} 'nın arttığı görülürken, kare kesitli emme tüpünde k_{La} değerinin daire kesitli emme tüpüne göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kare kesitli emme tüpünde k_{La} değeri, daire en kesitli emme tüpündeki k_{La} değerinden %11-13 daha fazladır.

3.2.5. Sıvı Debisinin Etkisi

Herhangi bir gaz hızında, hem gaz hem de sıvının tamamen sirkülasyonunun sağlanabilmesi için sıvı hızının kabarcıkların hızını aşması gerekmektedir. Gaz ve sıvı fazların tam bir sirkülasyonu için gerekli kritik sıvı hızı, sabit bir gaz hızında gereken minimum sıvı hızı olarak adlandırılır ve gaz hızının ve emme tüpünün çapının artışıyla artmaktadır. Emme tüpü çapının artması emme tüpündeki sıvı hızını azaltır. Bu nedenle kabarcıkların hızını aşmak için emme tüpü çapı arttıkça sıvı hızı da artmalıdır. Sistem kritik sıvı hızının altında işletilirse gaz kabarcıkları emme tüpünün içerisinde yukarı doğru yükselir. Sıvı hızının artışıyla gaz kabarcıkları sıvı içerisinde daha iyi sirküle edilmekte ve gaz kabarcıklarının tekrar sirkülasyona sokulan miktarı arttığından k_{La} 'da artmaktadır. Bu nedenle çalışılan sistemin minimum ve maksimum sıvı değerlerinin tespit edilmesi gerekmektedir (Akbayır, 2007).

Jianping ve ark. 2000 yılında yaptıkları bir çalışmada, hava debisini 1 m³/saat ve püskürtme başlığı çapını 2.98x10⁻³ m'de sabit tutarak, 1.2-1.6-1.8 m³/saat olmak üzere üç farklı sıvı debisinde ve 0-0.7 arasında değişen emme tüpü yarıçapı/reaktör yarıçapı oranında çalışmışlar ve bunların k_{La} üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 1.8 m³/saat sıvı debisinin diğer debilere göre en yüksek k_{La} değerini verdiğini ve yarıçap oranının artmasıyla k_{La} 'nın azaldığını tespit etmişlerdir.

Fadavi ve Chisti 2005 yılında k_{La} 'nın, hava hızındaki artışlara bağlı olarak 1 m³/saat ve 2 m³/saat sıvı debilerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Biyoreaktör çapı 0.1484 m, emme tüpü boyu 0.865 m ve iç çapı 0.083 m'dir. 2 m³/saat sıvı debisinin 1 m³/saat'lik debiye göre, artan hava hızı ile birlikte k_{La} değerlerini daha çok arttırdığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak da artan sıvı debisinin türbülansı

arttırması, daha ufak boyutta hava kabarcığı oluşturması ve hava kabarcıklarının en kesitte daha homojen dağılmasını sağlaması sayılmıştır.

3.2.6. Gaz Debisinin Etkisi

Jet loop biyoreaktörlerde, özgül yüzey alanının (a), gaz sirkülasyon hızı (V_G) ve birim hacim başına harcanan güce (E/V) göre şu şekilde ifade edilebileceği gösterilmiştir.

$$a = 5.4 * 10^3 * V_G * (E/V)^{0.66}$$

Özgül yüzey alanı gaz sirkülasyon hızı ile orantılı olarak artmaktadır. Bu parametre aynı zamanda E/V değeri ile de artmaktadır. Dolayısıyla hem gaz sirkülasyon hızının hem de sisteme aktarılan enerjinin artması sistemin kütle transfer katsayısını arttırmaktadır. Fakat bu ifade belirli gaz debilerinde geçerlidir (Yıldız, 1999; Akbayır, 2007).

Keskinler ve ark. 2004 yılında yaptıkları çalışmada, farklı gaz debilerinin, farklı E/V değerlerinde, $k_L a$, oksijen kapasitesi ve oksijen transfer verimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kullanılan reaktör 141 cm yüksekliğinde ve 15 cm çapındadır. Emme tüpü 7 cm çapa sahiptir ve çarpma levhasından 7 cm yukarıda ve reaktör tavanından 27 cm aşağıda monte edilmiştir. Püskürtme başlığında sıvı borusu 1.2 cm çapa sahipken, hava borusu 0.64 cm çapa sahiptir ve hava borusunun püskürtme başlığı ucundan uzaklığı 1.2 cm'dir. 1.92-2.56-3.32-5.26 kW/m³ E/V değerlerinde artan hava debisinin $k_L a$ üzerindeki etkisi incelendiğinde, verilen bir E/V değerinde $k_L a$ 'nın artan hava debisiyle arttığı görülmüştür. Artan hava debisinin özgül yüzey alanını arttırması nedeniyle $k_L a$ 'nın arttığı tespit edilmiştir. Artan E/V değerlerinin etkisi ortalama bir hava debisine kadar $k_L a$ üzerinde artış göstermektedir. Grafik üzerinde $k_L a$ 'nın yaklaşık 201 dk⁻¹ değerine karşılık gelen sıvı değerinden sonra eğimde azalma meydana geldiği ve bu değerden sonra artan hava debilerinde $k_L a$ 'nın azalan değerde arttığı ve artan E/V değerinin düşük $k_L a$ değerlerine neden olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak hava debisine bağlı

olarak reaktör içerisindeki akış rejiminin değişimi gösterilmiştir. Artan türbülans nedeniyle reaktör içerisinde girdapların oluştuğu, bu girdapların hava kabarcıklarının sirkülasyonunu azalttığı ve hava kabarcıklarının birleşmesine neden olup özgül yüzey alanının ve dolayısıyla k_{La} değerinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Oksijen kapasitesi ve oksijen transfer veriminin E/V ve hava debisi değerlerine göre değişimi incelendiğinde, oksijen kapasitesinin düşük E/V değerinde (1.92 kW/ m^3) ve yüksek hava debilerinde daha yüksek olduğu, oksijen transfer veriminin ise yüksek E/V değerinde (5.26 kW/m^3) ve düşük hava debilerinde daha yüksek olduğu görülmüştür.

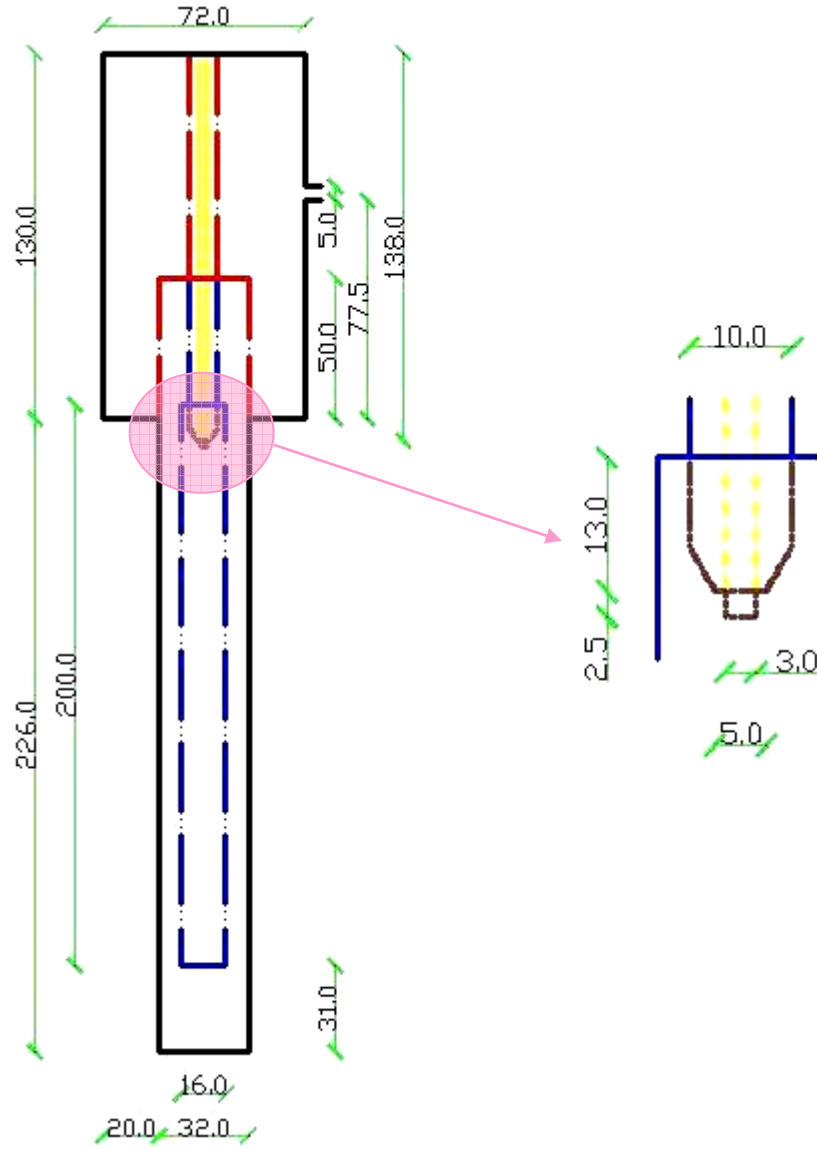
3.2.7. Suda Bulunan Katı Madde Konsantrasyonunun, Yoğunluğunun Ve Boyutunun Etkisi

Jet loop reaktörlerde, katı madde konsantrasyonunun artmasıyla birlikte biyoreaktör içerisindeki oksijen konsantrasyonu, dolayısıyla gaz tutulma miktarı ve kütle transfer katsayısı azalmakta ve çıkış suyu kalitesi bozulmaya başlamaktadır. Artan biyokütle konsantrasyonu, sıvının viskozitesini arttırmakta ve hava borusundan sisteme verilen kabarcıkların boyutunun azalmasına yol açmaktadır. Katı madde konsantrasyonundaki artış, gaz ve sıvı fazların sirkülasyonu ile elde edilen verimlerin sağlanabilmesi için daha fazla enerji harcanmasına yol açmaktadır. Jianping ve ark. 2000 yılında yaptıkları bir çalışmada, 0.1×10^{-3} - 0.18×10^{-3} - 0.2×10^{-3} - $0.22 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ farklı katı madde yüklemelerinde sistemin k_{La} üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları incelemeler sonucu düşük konsantrasyonlarda gaz sıvı kütle transferinin arttığını ve k_{La} değerlerinde %10–20 arasında artış olduğunu tespit etmişlerdir. k_{La} 'nın maksimum profili için optimum katı madde miktarını $0.18 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ve optimum katı konsantrasyonunu katıların hacimsel fraksiyonu olarak 0,028 olarak bulmuşlardır. Bunun nedeni olarak, katı konsantrasyonunun düşük olduğu durumda karışım sırasında hava kabarcıklarının etrafında oluşan film tabakasının katı partiküller tarafından dağıtılarak kütle transferini engelleyen direncin kırılması ile ilgili olduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek katı konsantrasyonlarında sistemdeki gazın tüm hacme olan oranında azalma görülmüş ve k_{La} değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Yüksek konsantrasyonlarda partiküllerin blok etkisinin daha baskın olduğu ve sıvı-gaz kütle transferi için gerekli arayüzey alanında azalma meydana geldiği ve k_{La} profilinde düşüş olduğu tespit edilmiştir.

4. MATERYAL ve METOT

4.1. Deney Düzenegi

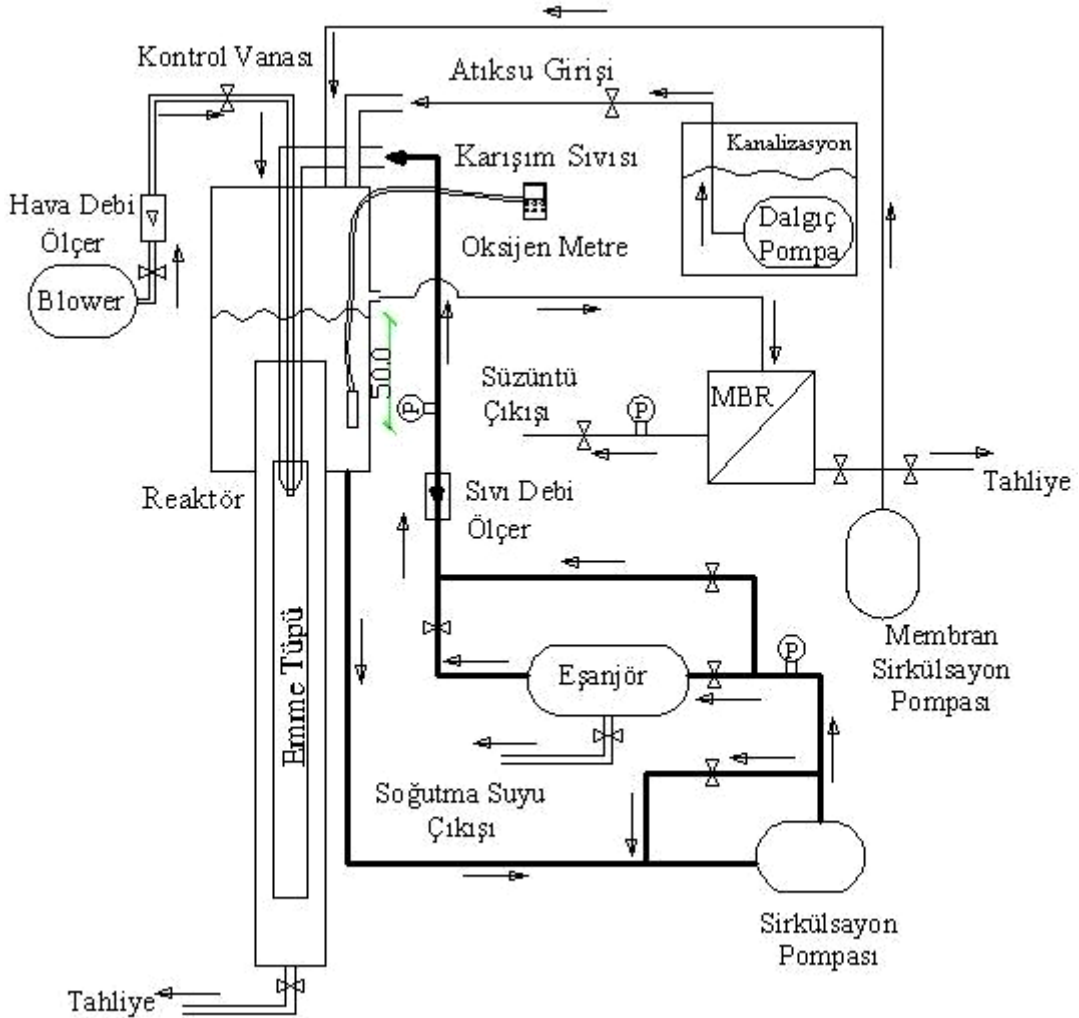
Çalışmada pilot ölçek jetloop membran biyoreaktör sistemi kullanılmıştır. Deneyde kullanılan jetloop reaktör ve püskürtme başlığının geometrik boyutları Şekil 4.1’de verilmiştir. Boyutlar cm olarak verilmiştir ve sistemde kullanılan malzemenin et kalınlığı ihmal edilmiştir.



Şekil 4.1., Deneyde Kullanılan Jetloop Biyoreaktör ve Püskürtme Başlığı

JLMB sistemi Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çayırova Kampüsü sınırları içerisinde bulunan Yabancı Diller Bölümünün batısındaki atıksu rogarına 6 m mesafede açık arazide kuruludur. 356 cm uzunluğunda ve 600 L'lik hacme sahip, paslanmaz çelikten yapılmış jetloop biyoreaktör iç içe geçmiş, çapları farklı iki silindirik yapıdan oluşmaktadır. Biyoreaktörün alt kısmı, emme tüpünü içine alan, çevrimin ve dolayısıyla arıtımın sağlandığı esas kısımdır. Bu bölümün uzunluğu 276 cm ve çapı 32 cm'dir. Emme tüpü bu bölüm içerisinde tabandan 31 cm yukarıda bulunmaktadır ve 16 cm çapa sahip dairesel en kesitten oluşmaktadır. Uzunluğu ise 200 cm'dir. D_e/D_r oranı 0.5 olarak ayarlanmıştır. Reaktör tabanı çarpma levhası olarak görev yapmaktadır. Reaktörün dışında soğutma amaçlı eşanjör kullanılmaktadır. 50 m³/saat kapasiteye sahip santrifüj pompa ile reaktörden alınan sıvı, eşanjörden geçerek reaktörün en üstünde, giriş bölümüne gönderilmektedir. Burada hava ile birlikte püskürtme başlığından reaktör içerisine püskürtülmektedir. Toplam sirkülasyon debisi Siemens marka Strains Mag5100 W 2009 model bir sıvı debi ölçerle kontrol edilmektedir. Püskürtme başlığı dairesel en kesite sahiptir ve emme tüpüne batma derinliği 15.5 cm'dir. Sistem için gerekli hava, İtalyan yapımı, Concorezzo marka SCL model blower ile sağlanmıştır. Toplam hava debisi Siemens marka M22 model, 8-127 m³/saat okuma aralığına sahip bir hava debi ölçerle kontrol edilmiştir. 8 m³/saat hava debisinde çalışılmıştır. Püskürtme başlığından çıkan hava akış hızı 0.32 m/s'dir. 72 cm çapa sahip reaktörün üst kısmı, hazne görevi görmektedir ve 130 cm yüksekliğindedir. Burada toplanan karışım sıvısı, hazne tabanından 77.5 cm yükseklikteki çıkıştan batık membran biyoreaktöre verilmektedir. Burada biyolojik aktivite sonucu oluşan aktif çamurun sudan ayrılması sağlanmaktadır. Membran biyoreaktörde kullanılan membran, 10 m² membran yüzey alanına ve 0.001 µm gözenek boyutuna sahip ultrafiltrasyon membranıdır. Membran sirkülasyon pompası ile istenen çapraz akış hızı ve membran basıncı sağlanmaktadır. Membran ünitesinde ayrıca havalandırma ve membran yüzey temizliğini sağlamak için difüzör, su seviyesini sabit tutmak amacıyla bir yüzey sensörü, membran süzütüsünü toplayan tek yönlü çalışan süzütü pompası ve motoru, transmembran basıncını ölçmeye yarayan manometre de kullanılmaktadır. Ham atıksu kanalizasyondan dalgıç pompayla çekilmektedir. Ham atıksudaki kaba ve yüzer maddeler dalgıç pompanın emme hattı ucuna yerleştirilen 2 mm aralıklı ızgarada tutulur. Sistemde ayrıca manometreler, kontrol vanaları ve bağlantı boruları da

kullanılan diğer ekipmanlardır. Şekil 4.2’de sistemin şematik gösterimi verilmiştir. Ek 1’de sistemin detaylı fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.2., Jetloop Biyoreaktör Sistemi Akım Şeması

4.2. Deneysel Yöntem

Kütle transfer hesaplamaları için reaktör içerisinde çözülmüş oksijen konsantrasyonları ölçülmektedir. Bu çözülmüş oksijen konsantrasyon değerleri yardımıyla $k_L a$ değerleri hesaplanmaktadır. Daha sonra $k_L a$ değerleri sıcaklık düzeltmeleri yapılarak son değerler elde edilmektedir. Çözülmüş oksijen konsantrasyonlarını ölçmek için, Türk Standart'ı olan TS EN 12255-15 ve Alman Standart'ı olan ATV-M 209E standartları esas alınmıştır. Bu standartlar, temiz suyla doldurulmuş aktif çamur havalandırma tanklarında havalandırma sistemlerinin

oksijen transfer hızının ve oksijen aktarım verimliliğinin ölçülmesini kapsar. Bu ölçme temiz su deneyi olarak bilinir.

Kütle transfer hesaplamaları için standartlardaki ölçüm metotlarından absorpsiyon deneyi uygulanmıştır. Absorpsiyon deneyine göre jetloop biyoreaktördeki çözünmüş oksijen önce sodyum sülfid kullanılarak sıfırlanmış ve daha sonra reaktör oksijen doygunluk değerine kadar havalandırılmıştır. Deney, çözünmüş oksijen konsantrasyonu sabit bir değere ulaştığı zaman tamamlanmıştır. Havalandırma süresince izlenen çözünmüş oksijen konsantrasyonlarındaki artıştan k_{La} değerleri tayin edilmiştir. Çözünmüş oksijen konsantrasyonlarındaki değişim Hach marka HQ30d model oksijen probuyla 10 s'lik zaman aralıklarıyla ölçülmüş ve bilgisayara kaydedilmiştir. 500 L sıvı hacminde, iki farklı noktada, üç farklı hava değerlerinde ve sırasıyla 50-45-40-35-30-25 m³/saat olmak üzere 6 farklı su debisinde çalışılmıştır. Oksijen probu ilk olarak reaktörün üst kısmında hazne içerisinde sabitlenmiştir ve “hava kaynakları kapalı, eşanjör çalıştırılarak; reaktörün üstünde hava vanası açık, eşanjör çalıştırılarak; blower ve eşanjör birlikte çalıştırılarak”, olmak üzere üç farklı hava değerinde ve her bir hava değerinde 6 farklı su debisi uygulanarak ölçümler yapılmıştır. Daha sonra aynı hava ve su değerlerinde, oksijen probu reaktörün alt kısmında emme tüpünün üstünde kalacak şekilde sabitlenmiş ve buradaki ölçümler yapılmıştır. Her bir deneyin başlangıcındaki ve sonundaki su sıcaklığı ile barometrik basınç da kaydedilmiştir. Ayrıca yüzey aktif maddelerin ve yağın kütle transferi üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için, hazne içinde, “hava vanası açık-eşanjör çalıştırılarak” olmak üzere tek bir hava değerinde ve 50-45-40 m³/saat olmak üzere 3 farklı sıvı debisinde ölçümler yapılmıştır. Musluk suyu ve yüzey aktif maddeli solüsyonlar, sıvı faz olarak kullanılmıştır. Yüzey aktif madde olarak Tween 40 ve Tween 85 kullanılmıştır. Ölçümlerde sırasıyla 5 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L (500 L için 2.5 g, 25 g ve 50 g) olmak üzere üç farklı Tween miktarında çalışılmıştır. Her miktarda Tween 40 ve Tween 85'ten eşit ekleme yapılmıştır. Yağın etkisinin incelendiği deneylerde ise 50 mg/L (500 L için 25 g) yağ kullanılarak 50-45-40 m³/sa sıvı debilerinde ölçümler yapılmıştır.

4.2.1. Deneyde Kullanılan Kimyasal Maddeler

4.2.1.1. Sodyum Sülfid

Oksijenin giderilmesi için teknik saflıkta sodyum sülfid (Na_2SO_3) kullanılmıştır. 1 kg çözünmüş oksijeni ortamdan kaldırmak için yaklaşık 8 kg Na_2SO_3 gerekmektedir. Çözünmüş katıların 1.13 kg'ı 1 kg Na_2SO_3 ile yükseltgenmektedir (TS EN 12255-15, 2006). Sülfidin ilavesinden önce çözünmüş oksijen probu yerleştirilmiş ve her deneyde suyun başlangıç çözünmüş oksijen miktarı kaydedilmiştir. Deney için gerekli Na_2SO_3 miktarı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$M_{\text{so}} = 8 * \left[\left(\frac{V * C_b}{1000} \right) + \left(\frac{t_M * OC}{60} \right) \right] \quad (4.1)$$

Karıştırma süresi, sabit karıştırmanın veya havalandırmanın denenecek ayarlamaya kurulmasından sonraki akış şartlarının elde edilmesi için gerekli olan zamandır. Na_2SO_3 çözelti halinde, havalandırma yapılmaksızın reaktöre eklenmiştir ve reaktör içerisindeki su uygun bir aparatla el ile karıştırılarak çözeltinin su içinde homojen olarak dağılması sağlanmıştır. Oksijen probu çalıştırılarak çözünmüş oksijenin sıfıra düşmesi beklenmiş ve sıfıra düştüğü anda sistem çalıştırılarak, artan çözünmüş oksijen değerleri proba kaydedilmiştir.

4.2.1.2. Kobalt Katalizörü

Oksijenin giderilmesi reaksiyonunu hızlandırmak için, teknik saflıkta kobalt klorür ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) veya kobalt sülfat ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. TS EN 12255-15 Standardında verilen bilgiye göre, ilave edilen kobalt miktarı 0.5 mg/L'yi aşmamalıdır. Bu nedenle 500 L'lik su hacmi için en fazla 0.25 g kobalt katalizörü kullanılmıştır. İlave edilmeden önce suda çözülmüştür ve reaktör içinde düzenli bir dağılım elde edilecek şekilde ilave edilmiştir. Aynı suyla yapılan bütün deneyler için sadece bir defa kobalt ilavesi yapılmıştır. Aynı suda en fazla üç deney yapılabilmektedir.

Çözünmüş oksijenin, sıfırlanması için kobalt klorür katalizörlüğünde sodyum sülfid kullanarak gerçekleştirilen reaksiyonu aşağıda verilmiştir. Reaksiyon stokiyometrisine göre 16 g/mol O₂ giderebilmek için 124 g/mol Na₂SO₃ gerektiğine göre 1 kg O₂ giderebilmek için 7.7 kg Na₂SO₃ gerekmektedir. Bu değer standartlarda 8 kg olarak verilmiştir.



4.2.1.3. Tween 40 ve Tween 85

Yüzey aktif madde olarak kullanılan Tween 40 ve Tween 85, bal rengi, yağlı, viskoz sıvı formundadır ve noniyoniktir. Molekül formülleri sırasıyla C₆₂H₁₂₃O₂₆ ve C₁₀₀H₁₈₈O₂₈'dir. Tween 40, 1.09 kg/L yoğunluğa, Tween 85, 1.03 kg/L yoğunluğa sahiptir. Suda, seyreltik asit ve alkali çözeltilerde ve birçok organik çözücülerde çözünürler. Tween 40 bitkisel yağlarda, Tween 85 aseton ve polietilen glikolde çözünemezler (Lee et al, 2005).

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

5.1. Kullanılan Sodyum Sülfid Miktarı

Pilot ölçek jetloop reaktör sisteminde, deneyler için gerekli ayarlamaların yapılmasından sonra istenen akış şartlarının elde edilmesi için geçen süre çok kısa olduğundan, kullanılan sodyum sülfid miktarı hesaplanırken Eşitlik 4.1'deki bu değer ihmal edilmiştir. Harcanan kimyasal miktarları her deney için Eşitlik 4.1 kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 5.1'de verilmiştir. Tabloda bazı hava değerlerinde, 30 ve 35 m³/saat sıvı debilerinden sonraki debiler görülmektedir. Bunun nedeni, bu sıvı debilerinden sonraki debilerde, reaktör içerisinde çevrimin oluşmaması, çözünmüş oksijen değerinde artış görülmemesi ve dolayısıyla ölçüm yapılamamasıdır.

Tablo 5.1., Deneylerde Harcanan Sodyum Sülfid Miktarları

| | Debi (m ³ /saat) | İlk Oksijen Konsantrasyonu (mg/L) | Kimyasal Miktarı (g) |
|--|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Hazne İçi-Hava Vanası Kapalı | 50 | 9.09 | 36.36 |
| | 45 | 12.05 | 48.2 |
| | 40 | 11.8 | 47.2 |
| | 35 | 11.93 | 47.72 |
| | 30 | 10.85 | 43.4 |
| | 20 | 6.28 | 25.12 |
| Hazne İçi-Hava Vanası Açık | 50 | 9.09 | 36.36 |
| | 45 | 11.7 | 46.8 |
| | 40 | 10.9 | 43.6 |
| | 35 | 10.56 | 42.24 |
| | 30 | 10.07 | 40.28 |
| | 20 | 5.72 | 22.88 |
| Hazne İçi- Blower Açık | 50 | 10.5 | 42 |
| | 45 | 11.42 | 45.68 |
| | 40 | 11.14 | 44.56 |
| | 35 | 11.4 | 45.6 |
| | 30 | 11.35 | 45.4 |
| | 25 | 11.2 | 44.8 |
| Emme Tüpü- Hava Vanası Kapalı | 50 | 9.09 | 36.36 |
| | 45 | 12.16 | 48.64 |
| | 40 | 11.5 | 46 |
| | 35 | 11.63 | 46.52 |

Tablo 5.1. (Devam), Deneyleerde Harcanan Sodyum Sülfid Miktarları

| | | | |
|---|----|-------|-------|
| | 30 | 10.58 | 42.32 |
| Emme Tüpü- Hava Vanası Açık | 50 | 11.67 | 46.68 |
| | 45 | 11.91 | 47.64 |
| | 40 | 11.61 | 46.44 |
| | 35 | 11.07 | 44.28 |
| Emme Tüpü- Blower Açık | 50 | 11.65 | 46.6 |
| | 45 | 11.42 | 45.68 |
| | 40 | 11.5 | 46 |
| | 35 | 12.1 | 48.4 |
| | 30 | 11.48 | 45.92 |
| | 25 | 11.27 | 45.08 |
| Hava Vanası Açık- Hazne İçi- 5 mg/L YAM | 50 | 10.9 | 43.6 |
| | 45 | 10.16 | 40.64 |
| | 40 | 9.52 | 38.08 |
| Hava Vanası Açık-Hazne İçi- 50 mg/L YAM | 50 | 10.77 | 43.08 |
| | 45 | 9.86 | 39.44 |
| | 40 | 9.28 | 37.12 |
| Hava Vanası Açık Hazne İçi- 100 mg/L YAM | 50 | 10.97 | 43.88 |
| | 45 | 9.5 | 38 |
| | 40 | 9.19 | 36.76 |
| Hava Vanası Açık-Hazne İçi- 50 mg/L YAĞ | 50 | 11.1 | 44.4 |
| | 45 | 10.21 | 40.84 |
| | 40 | 9.58 | 38.32 |

5.2. Hacimsel Kütle Transfer Katsayılarının Hesaplanması

Hacimsel kütle transfer katsayıları Eşitlik 2.17 kullanılarak her deney için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Deneyleerde zamana bağılı kaydedilen çözünmüş oksijen konsantrasyonları ve Alman Standart'ı ATV-M 209E'den alınan standart oksijen doygunluk değerleri kullanılarak Eşitlik 2.17'ye göre veriler oluşturulmuştur. Zamana karşı işaretlenen değerler grafikte bir eğri oluşturduğu için, eğrinin başlangıcındaki ve/veya sonundaki bir veya daha fazla oksijen konsantrasyon değeri ihmal edilmiştir. Elde edilen doğrunun eğiminden $k_L a$ hesaplanmıştır. Elde edilen grafikler Ek 2'de verilmiştir.

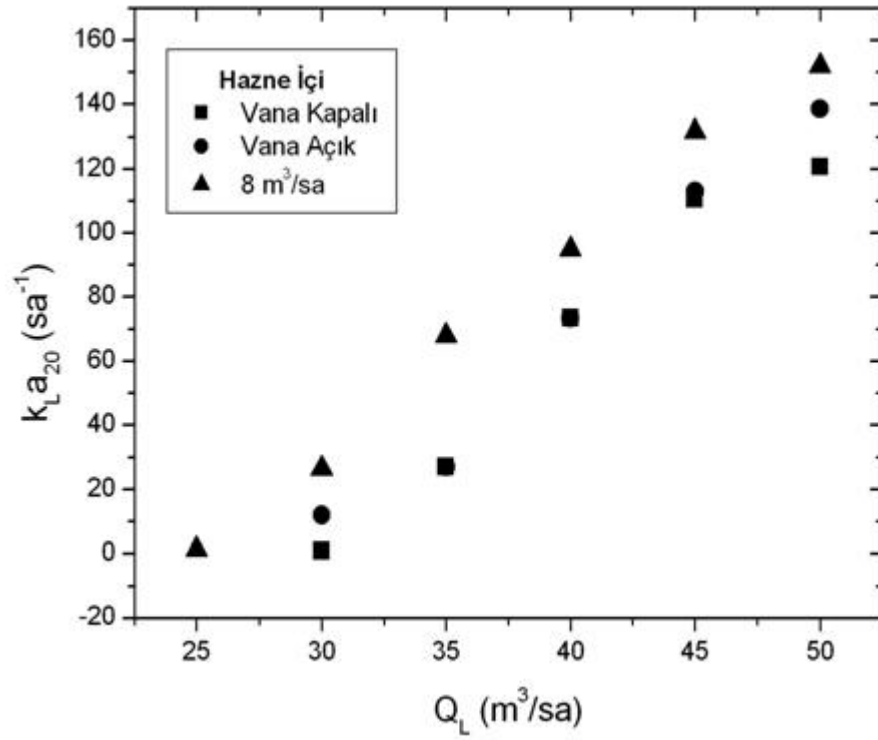
Tablo 5.2., Temiz Su İçin DeneYlerde Elde Edilen T Sıcaklıkta k_{La} Değerleri

| Sıvı Debisi $m^3/saat$ | Hazne İçi, k_{La} , saat ⁻¹ | | | Emme Tüpü, k_{La} , saat ⁻¹ | | |
|---------------------------|--|-----------|--------|--|-----------|--------|
| | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower |
| 50 | 97.56 | 121.32 | 139.68 | 117 | 132.48 | 158.76 |
| 45 | 91.8 | 103.32 | 121.32 | 110.52 | 123.48 | 129.96 |
| 40 | 63.36 | 70.2 | 104.04 | 70.92 | 73.44 | 111.96 |
| 35 | 24.12 | 27 | 62.64 | 18.36 | 29.16 | 68.76 |
| 30 | 0.72 | 10.08 | 26.64 | | | 31.68 |
| 25 | | | 1.44 | | | 9 |

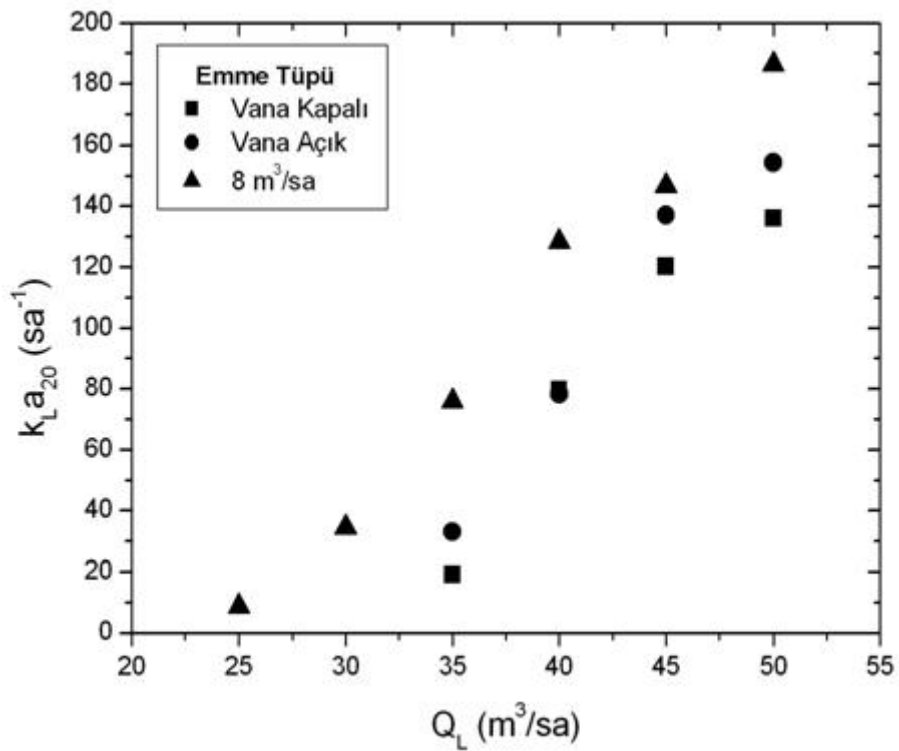
k_{La} değerleri 20 °C sıcaklıktaki standart değerine Eşitlik 2.23 kullanarak dönüştürülmüştür. Sıcaklık düzeltmeleri yapılarak elde edilen son değerler Tablo 5.3'te verilmiştir. Farklı hava değerlerinde, artan sıvı debilerine karşı, hazne içinde yapılan ölçümlerden elde edilen k_{La20} değerlerinin değişimi Şekil 5.1'de, emme tüpünde yapılan ölçümlerden elde edilen k_{La20} değerlerinin değişimi Şekil 5.2'de grafik olarak verilmiştir.

Tablo 5.3., Temiz Su İçin 20 °C'deki k_{La20} Değerleri

| Sıvı Debisi $m^3/saat$ | Hazne İçi, k_{La20} , saat ⁻¹ | | | Emme Tüpü, k_{La20} , saat ⁻¹ | | |
|---------------------------|--|-----------|--------|--|-----------|--------|
| | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower |
| 50 | 120.6 | 138.6 | 151.92 | 136.08 | 154.44 | 186.48 |
| 45 | 110.52 | 113.04 | 131.76 | 120.24 | 137.16 | 146.88 |
| 40 | 73.44 | 73.44 | 95.04 | 79.56 | 78.48 | 128.52 |
| 35 | 27 | 27 | 68.04 | 19.08 | 33.12 | 75.96 |
| 30 | 0.864 | 11.88 | 26.496 | | | 34.56 |
| 25 | | | 1.332 | | | 8.892 |



Şekil 5.1., Hazne İçi $k_L a_{20}$ Değerlerindeki Değişim



Şekil 5.2., Emme Tüpü $k_L a_{20}$ Değerlerindeki Değişim

Reaktör içerisinde çözünmüş oksijen konsantrasyonu sıfırlandıktan sonra, herhangi bir hava kaynağından sisteme hava verilmeden, sadece suyun sirkülasyonunu sağlamak amacıyla eşanjör çalıştırıldığında dahi, 2-3 dakikalık çok kısa bir sürede, belirgin derecede, sistem içerisindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonlarında artış olduğu görülmüştür. Yıldız, 1999 yılında yaptığı çalışmada çözünmüş oksijen konsantrasyonlarındaki bu artışın nedenini aşağıdaki şekilde ifade etmiştir:

“Püskürtme çevrimli reaktörlerde, sisteme hava gönderilmesi iki türlü gerçekleştirilebilir. Bunlar ejektör ve injektör işlemler olarak isimlendirilirler. Ejektör işleminde, reaktörün püskürtme başlığının ucundaki ve dışarıdaki basınç farkından dolayı dışarıdan hiç hava verilmese dahi, sistemin içine hava emilir. Bu durumda E/V değerindeki artışlara göre emilen hava miktarı artar.”

20 °C sıcaklıktaki standart k_{La20} değerleri incelendiğinde, hazne içi ve emme tüpünde, hava kaynağı kullanılmadan yapılan ölçümlerde, 30 m³/saat sıvı debisi ve altındaki debilerde reaktör içerisinde çevrimin ve hava kabarcıklarının oluşmadığı, dolayısıyla proptan izlenen oksijen değerlerinin 0-0.05 mg/L arasında değiştiği ve artmadığı gözlemlenmiştir. Hava kaynaksız jet loop biyoreaktörün işletileceği durumlarda minimum sıvı debisinin 35 m³/saat olmasına karar verilmiştir. Hazne içi ve emme tüpünde hava vanası açılarak yapılan ölçümlerde de aynı durum gözlemlenmiştir. 30 m³/saat sıvı debisi ve altındaki debilerde reaktör içerisinde çevrim oluşmazken, minimum sıvı debisinin 35 m³/saat olmasına karar verilmiştir. Hava vanasının k_{La20} değerleri üzerindeki etkisi en çok 50 m³/saat sıvı debisinde görülmüştür. Diğer sıvı debilerinde elde edilen k_{La20} değerleri, havasız yapılan ölçümlerdeki değerlere yakın sonuçlar vermiştir. Bu nedenle, bu sıvı debilerinde vananın etkisinin çok fazla olmadığına karar verilmiştir. Ayrıca hava koşullarının, hava vanası açık yapılan deneylerde etkili olduğu görülmüştür. Durağan hava şartlarında vanadan hava emilimi düşükken, rüzgârlı havalarda vananın daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Blower ile yapılan ölçümlerde 8 m³/saat hava debisinde çalışılmıştır. k_{La20} değerleri incelendiğinde blowerin kütle transferinde daha etkili olduğu görülmüştür. 25 m³/saat sıvı debisi ve altındaki debilerde reaktör içerisinde çevrim oluşmazken, minimum sıvı debisi 30 m³/saat olarak tespit edilmiştir.

Şekil 5.1 ve 5.2'ye göre, artan hava değerleri ve sıvı debilerine bağlı olarak k_{La20} değerinin de arttığı görülmektedir. Jetloop biyoreaktör sisteminde, çevrim olayının gerçekleşebilmesi için sıvının kinetik enerjisinin, sisteme giren hava kabarcıklarının yeteri kadar emme borusunun içerisine sürükleyebilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla her sıvı debisi ve hava değerinde çevrim gerçekleşmemektedir. Bu nedenle Şekil 5.1 ve 5.2'ye göre yüksek sıvı debilerinde k_{La20} değerinin artışına, artan sıvı hızı ve kinetik enerji nedeniyle çevrim olayının daha iyi gerçekleşmesinin ve hava kabarcıklarının boyutlarının küçülmesinin neden olduğu düşünülmektedir. Hava kabarcıklarının boyutunun küçülmesi etkin yüzey alanını arttırdığı için kütle transferi daha etkili gerçekleşmektedir. Daha düşük sıvı debilerinde ise hava kabarcıkları emme tüpü içerisine girmeden reaktör boyunca yükselmekte ve sistemi terk etmektedir. Ayrıca daha yüksek hava değerlerinde sisteme daha fazla hava kabarcığı verildiğinden artan yüzey alanı ile k_{La20} değeri de artmıştır.

Tablo 5.3'e göre iki farklı noktada yapılan ölçümlere göre, emme tüpünde elde edilen değerler hazne içinde elde edilen değerlere göre daha yüksektir. Bunun nedeni, sistemin ana kısmını oluşturan reaktörün alt kısmında hava kabarcıklarının daha yoğun olması ve esas kütle transferinin burada gerçekleşmesidir. $30 \text{ m}^3/\text{saat}$ sıvı debisinde, vana kapalı ve vana açık olmak üzere her iki durumda da, hazne içinde ölçüm yapılabilmesine rağmen, emme tüpünde yapılamamıştır. Bunun nedeni, bu sıvı debisinde ve hava değerlerinde sisteme gerekli enerjinin ve hava kabarcıklarının sağlanamaması, az sayıda oluşan hava kabarcıklarının emme tüpüne girmeden hazne içinde yükselmesi ve burada etkili olmasıdır.

Yüzey aktif maddelerin ve yağın kütle transferi üzerindeki etkilerinin incelendiği deney sonuçları Tablo 5.4'de verilmiştir.

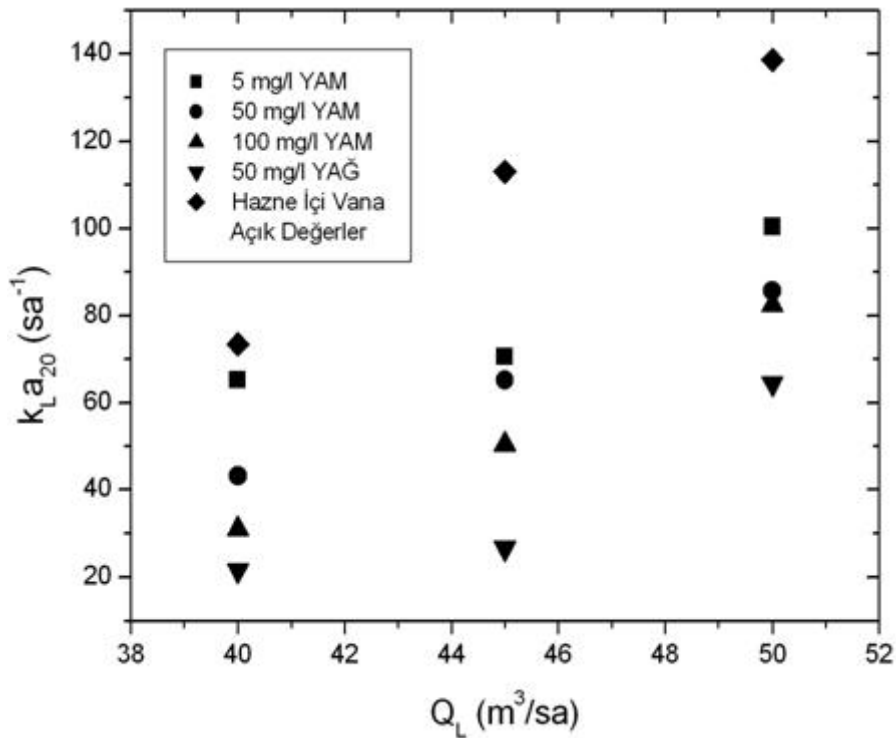
Tablo 5.4., YAM ve Yağ İçin Elde Edilen T Sıcaklıkta k_{La} Değerleri

| Sıvı Debisi m^3/saat | Hazne İçi- Vana Açık, k_{La} , saat^{-1} | | | |
|---|---|-------------|--------------|--------------|
| | 5 mg/L YAM | 50 mg/L YAM | 100 mg/L YAM | 50 mg/ L Yağ |
| 50 | 95.76 | 87.84 | 82.8 | 63.72 |
| 45 | 76.32 | 72.72 | 56.52 | 28.8 |
| 40 | 55.8 | 51.48 | 47.52 | 25.2 |

Yüzey aktif madde ve yağ için elde edilen $k_L a$ değerlerinin, 20 °C sıcaklıktaki standart değerine dönüştürülmüş hali Tablo 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.3'te ise farklı miktarlardaki yüzey aktif madde ve yağ kullanarak yapılan deneylerden elde edilen $k_{L a_{20}}$ değerindeki değişim şematik olarak verilmiştir.

Tablo 5.5., YAM ve Yağ İçin 20 °C'deki $k_{L a_{20}}$ Değerleri

| Sıvı Debisi $m^3/saat$ | Hazne İçi-Vana Açık, $k_{L a_{20}}$, $saat^{-1}$ | | | |
|---------------------------|---|-------------|--------------|-------------|
| | 5 mg/L YAM | 50 mg/L YAM | 100 mg/L YAM | 50 mg/L Yağ |
| 50 | 100.44 | 85.68 | 82.44 | 64.44 |
| 45 | 70.56 | 65.16 | 50.4 | 26.64 |
| 40 | 65.16 | 43.2 | 30.96 | 21.6 |



Şekil 5.3., YAM ve Yağın $k_{L a_{20}}$ Değeri Üzerindeki Etkisi

Şekil 5.3'e göre, hazne içinde, vana açıkken yüzey aktif madde ve yağ eklenerek yapılan deneylerden elde edilen $k_{L a_{20}}$ değerlerinin, temiz suda hazne içinde, vana açıkken elde edilen değerlerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak, yağın ve yüzey aktif maddelerin, hava-sıvı arayüzeyine absorbe olarak oksijen transferine karşı yüzey direncini arttırmaları verilebilir. Ayrıca yüzey aktif maddeler, yüzey gerilimini azaltıcı etkileri ile hava kabarcıklarının birleşmesini önleyerek yüzey alanının artmasına neden olurlar. Buna

ek olarak sıvı film kalınlığını arttırarak k_L katsayısının azalmasına neden olurlar. k_L katsayısı üzerindeki azaltıcı etkileri, yüzey alanını arttırıcı etkilerinden daha fazla olduğu için hacimsel kütle transfer katsayısının azalmasına neden olurlar. Ayrıca organik kirleticiler suyun viskozitesini arttırarak oksijen moleküllerinin su içerisindeki hareketliliğini azaltırlar. Viskozite artışı nedeniyle reaktörde daha büyük hava kabarcıkları oluşmakta ve $k_L a_{20}$ katsayısı azalmaktadır (Akbayır, 2007). Şekil 5.3'e göre yüzey aktif madde miktarı arttıkça $k_L a_{20}$ değeri azalmıştır. Bu azalma sıvı debisi düştükçe artmıştır.

Azalan sıvı debilerine paralel olarak, kütle transfer hızının azaldığı ve bu nedenle çözülmüş oksijenin doygunluğa ulaşması için geçen sürenin arttığı tespit edilmiştir. Yapılan ölçümlerde, çözülmüş oksijenin doygunluğa ulaştığı zaman, barometrik basınç, deneydeki doygunluk değeri ve dengeye ulaştığı andaki su sıcaklığı her deney için ayrı ayrı tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 5.6., Hazne İçi-Havasız Deneylerde Ölçülen Parametreler

| Sıvı Debisi (m ³ /saat) | Sıcaklık (°C) | P _b [*] (hPa) | Zaman (s) | C _{s,p*,T} (mg/L) |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| 50 | 11 | 1015 | 210 | 12.4 |
| 45 | 12.1 | 1095 | 230 | 12.34 |
| 40 | 13.7 | 1085 | 340 | 12.02 |
| 35 | 14.7 | 1082 | 470 | 11.07 |
| 30 | 11.6 | 1006 | 1790 | 6.23 |

Tablo 5.7., Emme Tüpü-Havasız Deneylerde Ölçülen Parametreler

| Sıvı Debisi (m ³ /saat) | Sıcaklık (°C) | P _b [*] (hPa) | Zaman (s) | C _{s,p*,T} (mg/L) |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| 50 | 13.6 | 1014 | 230 | 12.14 |
| 45 | 16.4 | 1032 | 270 | 11.38 |
| 40 | 15.2 | 1037 | 480 | 11.62 |
| 35 | 18.02 | 1022 | 730 | 10.09 |

Tablo 5.8., Hazne İçi-Vana Açık Deneylerde Ölçülen Parametreler

| Sıvı Debisi (m ³ /saat) | Sıcaklık (°C) | P _b [*] (hPa) | Zaman (s) | C _{s,p*,T} (mg/L) |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| 50 | 14.3 | 1082 | 280 | 11.84 |
| 45 | 16.2 | 1087 | 350 | 11.46 |
| 40 | 18 | 1076 | 420 | 11.02 |
| 35 | 19.7 | 1032 | 650 | 10.2 |
| 30 | 12.3 | 1019 | 250 | 4.9 |

Tablo 5.9., Emme Tüpü- Vana Açık Deneylerde Ölçülen Parametreler

| Sıvı Debisi (m ³ /saat) | Sıcaklık (°C) | P _b [*] (hPa) | Zaman (s) | C _{s,p*,T} (mg/L) |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| 50 | 13.5 | 1020 | 230 | 12.07 |
| 45 | 15.6 | 1012 | 290 | 11.56 |
| 40 | 17.2 | 1011 | 480 | 11.18 |
| 35 | 14.7 | 1082 | 910 | 10.92 |

Tablo 5.10., Hazne İçi-Blower Açık Deneylerde Ölçülen Parametreler

| Sıvı Debisi (m ³ /saat) | Sıcaklık (°C) | P _b [*] (hPa) | Zaman (s) | C _{s,p*,T} (mg/L) |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| 50 | 14.7 | 1053 | 230 | 11.5 |
| 45 | 16.5 | 1063 | 260 | 11.21 |
| 40 | 18.3 | 1062 | 310 | 10.87 |
| 35 | 16.5 | 1069 | 470 | 11.31 |
| 30 | 20.2 | 1049 | 950 | 10.55 |
| 25 | 23.6 | 1061 | 600 | 1.58 |

Tablo 5.11., Emme Tüpü-Blower Açık Deneylerde Ölçülen Parametreler

| Sıvı Debisi (m ³ /saat) | Sıcaklık (°C) | P _b [*] (hPa) | Zaman (s) | C _{s,p*,T} (mg/L) |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| 50 | 13.2 | 1021 | 280 | 12.31 |
| 45 | 14.8 | 1023 | 310 | 11.93 |
| 40 | 14.1 | 1026 | 350 | 12.09 |
| 35 | 15.9 | 1036 | 490 | 11.69 |
| 30 | 16.4 | 1017 | 750 | 11.48 |
| 25 | 20.4 | 1021 | 1180 | 8.87 |

Tablo 5.12., 5 mg/L YAM Kullanılan Deneylerde Ölçülen Parametreler

| Sıvı Debisi (m ³ /saat) | Sıcaklık (°C) | P _b [*] (hPa) | Zaman (s) | C _{s,p*,T} (mg/L) |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| 50 | 17,9 | 1021 | 270 | 10,65 |
| 45 | 23,2 | 1055 | 380 | 9,62 |
| 40 | 26,6 | 1085 | 480 | 9,04 |

Tablo 5.13., 50 mg/L YAM Kullanılan Deneylerde Ölçülen Parametreler

| Sıvı Debisi (m ³ /saat) | Sıcaklık (°C) | P _b [*] (hPa) | Zaman (s) | C _{s,p*,T} (mg/L) |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| 50 | 20,9 | 1086 | 310 | 9,96 |
| 45 | 24,5 | 987 | 570 | 9,17 |
| 40 | 27,4 | 988 | 460 | 8,84 |

Tablo 5.14., 100 mg/L YAM Kullanılan Deneylerde Ölçülen Parametreler

| Sıvı Debisi (m ³ /saat) | Sıcaklık (°C) | P _b [*] (hPa) | Zaman (s) | C _{s,p*,T} (mg/L) |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| 50 | 20.1 | 1001 | 520 | 10.2 |
| 45 | 24.7 | 974 | 570 | 9.1 |
| 40 | 21.8 | 997 | 570 | 9.68 |

Tablo 5.15., 50 mg/L Yağ Kullanılarak Yapılan Deneylerde Ölçülen Parametreler

| Sıvı Debisi (m ³ /saat) | Sıcaklık (°C) | P _b [*] (hPa) | Zaman (s) | C _{s,p*,T} (mg/L) |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|
| 50 | 19.5 | 1009 | 450 | 10.34 |
| 45 | 23.2 | 989 | 580 | 9.63 |
| 40 | 27 | 989 | 870 | 8.59 |

Yapılan birçok çalışmada, araştırmacılar kullandıkları sistemlerin ürettiği k_{La} değerlerini, sisteme verilen hava debisi ve sisteme aktarılan güce bağlı olarak modellemişlerdir. Çıkarılan modeller Tablo 5.16'da gösterilmektedir. Modellerdeki katsayılar, araştırmacıların sistemlerindeki dizayn parametrelerine, işletme değişkenlerine ve reaktör konfigürasyonlarına göre değişiklik göstermektedir.

Tablo 5.16., Yapılan Araştırmalardan Çıkarılan Modeller

| Model | Referans |
|---|------------------------------|
| $k_{La} = 19.91 * 10^{-3} * (e_T)^{0.361} * (\epsilon)^{0.667}$ | Fadavi and Chisti, 2005 |
| $k_{La} = 23.38 * (E/V)^{0.17} * (Q_g)^{0.8}$ | Farizoğlu ve Keskinler, 2007 |
| $k_{La} = 0.981 * (U_G)^{2.33} * (p/V_L)^{-1.891} * (\mu_{ap})^{0.126}$ | Jin et al, 2005 |
| $k_{La} = 0.0218 * (P_g/V_l)^{0.5} * (U_g)^{0.6}$ | Bouaifi, 2000 |
| $k_{La}^{\#} = k_{La} * (v/g^2)^{1/3}$ | Yıldız ve ark, 2004 |

Çeşitli kaynaklardan elde edilen k_{La} değerleri Tablo 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.17., Farklı Çalışmalarda Elde Edilen k_{La} Değerleri

| Sıvı Debisi (L/dk) | Hava Debisi (L/dk) | Çalışılan Hacim (L) | D _e /D _r | E/V (w/m ³) | k _{La} (saat ⁻¹) | Referans |
|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| | 8 | 19 | 0.46 | 1920 | 142 | Yıldız ve ark., 2004 |
| | | | | 2560 | 135 | |
| | | | | 3320 | 130 | |
| | | | | 5260 | 110 | |
| 33 | | 16,25 | 0.56 | 1200 | 205 | Fadavi and Chisti, 2005 |
| | | | | 800 | 64,8 | |
| 35-58 | 8 | 35 | 0.19 | 1000 | 122 | Farizoğlu ve Keskinler, 2007 |
| | | | | 1400 | 130 | |
| | | | | 1900 | 138 | |
| | | | | 2600 | 140 | |
| | 10 | | | 1000 | 150 | |
| | | | | 1400 | 157 | |
| | | | | 1900 | 163 | |
| | | | | 2600 | 176 | |

5.3. Standart Şartlarda Deneylerdeki Oksijen Doygunluk Değerleri Hesabı

Standart şartlarda deneylerdeki oksijen doyumluk değerleri Eşitlik 2.25 kullanılarak her deney için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Tablo 5.18., Standart Şartlarda Temiz Su Deneylerindeki Oksijen Doygunluk Değerleri

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne İçi, C _{s,20} * mg/L | | | Emme Tüpü, C _{s,20} * mg/L | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------|--------|-------------------------------------|-----------|--------|
| | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower |
| 50 | 10.20 | 9.84 | 9.91 | 10.60 | 10.46 | 10.58 |
| 45 | 9.65 | 9.88 | 9.94 | 10.37 | 10.57 | 10.60 |
| 40 | 9.83 | 9.96 | 10.02 | 10.28 | 10.58 | 10.56 |
| 35 | 9.28 | 9.95 | 9.97 | 9.60 | 9.16 | 10.51 |
| 30 | 5.24 | 4.14 | 10.22 | | | 10.62 |
| 25 | | | 1.62 | | | 8.87 |

Tablo 5.19., YAM ve Yağ Deneylerindeki Oksijen Doygunluk Değerleri

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne İçi- Vana Açık, C _{s,20} * mg/L | | | |
|-------------------------------------|--|-------------|--------------|-------------|
| | 5 mg/L YAM | 50 mg/L YAM | 100 mg/L YAM | 50 mg/L Yağ |
| 50 | 10.12 | 9.46 | 10.35 | 10.28 |
| 45 | 9.82 | 10.26 | 10.36 | 10.49 |
| 40 | 9.55 | 10.42 | 10.18 | 10.03 |

5.4. Standart Oksijen Transfer Hızı Hesabı

Temiz suda standart oksijen transfer hızı Eşitlik 2.26 kullanılarak her deney için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Tablo 5.20., Temiz Suda Standart Oksijen Transfer Hızı Değerleri

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne İçi, SOTR, kg/saat | | | Emme Tüpü, SOTR, kg/saat | | |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------|--------|--------------------------|-----------|--------|
| | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower |
| 50 | 0.61 | 0.68 | 0.75 | 0.72 | 0.81 | 0.99 |
| 45 | 0.53 | 0.56 | 0.65 | 0.62 | 0.72 | 0.78 |
| 40 | 0.36 | 0.37 | 0.48 | 0.41 | 0.42 | 0.68 |
| 35 | 0.13 | 0.13 | 0.34 | 0.09 | 0.15 | 0.40 |
| 30 | 0.002 | 0.02 | 0.14 | | | 0.18 |
| 25 | | | 0.001 | | | 0.04 |

Tablo 5.21., YAM ve Yağ Deneyleri İçin Oksijen Transfer Hızı Değerleri

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne İçi-Vana Açık, SOTR, kg/saat | | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|-------------|--------------|-------------|
| | 5 mg/L YAM | 50 mg/L YAM | 100 mg/L YAM | 50 mg/L Yağ |
| 50 | 0.51 | 0.41 | 0.43 | 0.33 |
| 45 | 0.35 | 0.33 | 0.26 | 0.14 |
| 40 | 0.31 | 0.22 | 0.16 | 0.11 |

5.5. Spesifik Oksijen Kapasitesi Hesabı

Spesifik oksijen kapasitesi Eşitlik 2.28 kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.22., Temiz Suda Spesifik Oksijen Kapasitesi Değerleri

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne İçi, SOTR _v , kg/m ³ /saat | | | Emme Tüpü, SOTR _v , kg/m ³ /saat | | |
|-------------------------------------|--|-----------|--------|--|-----------|--------|
| | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower |
| 50 | 1.23 | 1.36 | 1.51 | 1.44 | 1.61 | 1.97 |
| 45 | 1.07 | 1.12 | 1.31 | 1.25 | 1.45 | 1.56 |
| 40 | 0.72 | 0.73 | 0.95 | 0.82 | 0.83 | 1.36 |
| 35 | 0.25 | 0.27 | 0.68 | 0.18 | 0.30 | 0.80 |
| 30 | 0.005 | 0.05 | 0.27 | | | 0.37 |
| 25 | | | 0.002 | | | 0.08 |

Tablo 5.23., YAM ve Yağ Deneyleri İçin Spesifik Oksijen Kapasitesi

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne İçi-Vana Açık, SOTR _v , kg//m ³ /saat | | | |
|-------------------------------------|---|-------------|--------------|-------------|
| | 5 mg/L YAM | 50 mg/L YAM | 100 mg/L YAM | 50 mg/L Yağ |
| 50 | 1.02 | 0.81 | 0.85 | 0.66 |
| 45 | 0.69 | 0.67 | 0.52 | 0.28 |
| 40 | 0.62 | 0.45 | 0.32 | 0.22 |

Vaxelaire ve ark. tarafından 1995 yılında yapılan, aktif çamur sistemlerinde yüzeysel havalandırıcıların oksijen transfer etkilerinin incelendiği çalışmada, havalandırma tankında sıvı hacmi 28 litre (31-31-29 cm) ve standart havalandırma verimi 2.56 kgO₂/kW/saat'te sabit tutulmuş ve E/V değerine karşı spesifik oksijen kapasitesi değerleri incelenmiştir. E/V<20 W/m³ değerlerinde SOTR_v<0.08 kg/m³/saat bulunmuştur. 40<E/V<80 W/m³ değerlerinde ise 0.1<SOTR_v<0.2 kg/m³/saat bulunmuştur. Artan güç değerlerinin daha iyi karışım sağlayarak oksijen kapasitesi değerlerini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

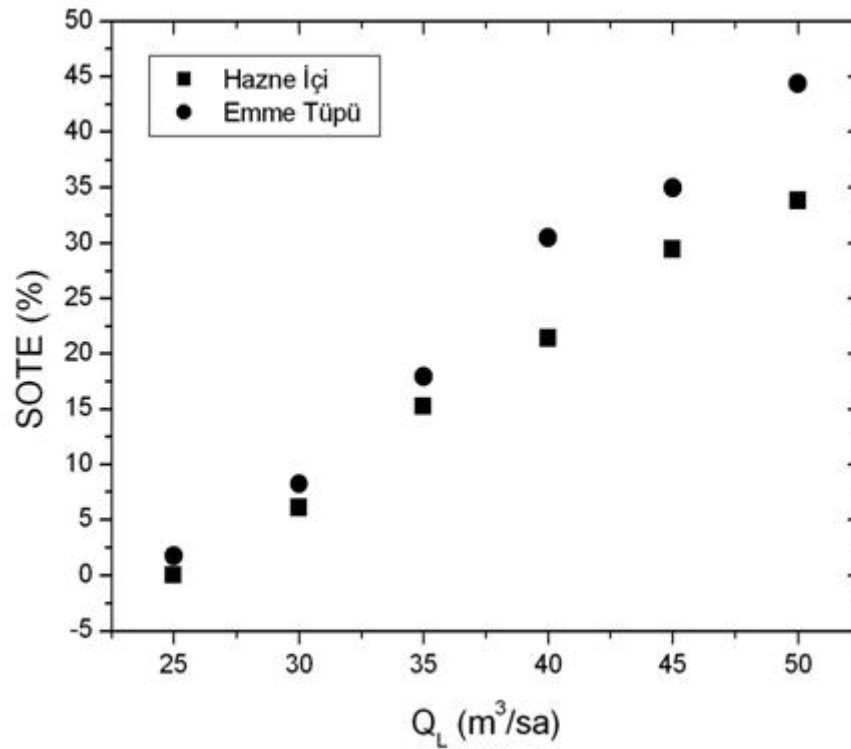
Henkel ve ark. 2009 yılında, membran biyoreaktörlerde oksijen transfer özelliklerini incelemişlerdir. Musluk suyu kullanarak yaptıkları deneylerde, 2600 L su hacmine, 2.5 m su derinliğine, 20 m² membranın yüzey alanına sahip reaktör A'da, 0.2 m³/saat sıvı debisi ve 8 m³/saat hava debisinde, ince kabarcıklı difüzör kullanarak 0.1 kg/m³/saat, kaba kabarcıklı difüzör kullanarak 0.057 kg/m³/saat spesifik oksijen kapasitesi elde etmişlerdir.

5.6. Standart Oksijen Transfer Verimi Hesabı

Temiz suda standart oksijen transfer verimi Eşitlik 2.34 kullanılarak blower deneyleri için hesaplanmıştır ve Tablo 5.24'te verilmiştir. Tablo 5.25'te ise çeşitli havalandırma sistemlerinin oksijen transfer verimleri verilmiştir. Şekil 5.4'de artan sıvı debilerine bağlı olarak, 8 m³/saat sabit hava debisinde, hazne içi ve emme tüpünde yapılan ölçümlerden elde edilen SOTE değerlerinin değişimi verilmiştir.

Tablo 5.24., Temiz Suda Standart Oksijen Transfer Verimi Değerleri

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne İçi, SOTE, % | Emme Tüpü, SOTE, % |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------|
| | Blower | Blower |
| 50 | 33.84 | 44.37 |
| 45 | 29.44 | 35.00 |
| 40 | 21.40 | 30.50 |
| 35 | 15.25 | 17.94 |
| 30 | 6.09 | 8.25 |
| 25 | 0.05 | 1.77 |



Şekil 5.4., Farklı Noktalarda Yapılan Ölçümler Sonucu SOTE'deki Değişim

Şekil 5.4'e göre, iki farklı noktada yapılan ölçümlerde, emme tüpünde elde edilen değerler hazne içinde elde edilen değerlere göre daha yüksektir. Bunun nedeni, sistemin ana kısmını oluşturan reaktörün alt kısmında hava kabarcıklarının daha yoğun olması ve esas kütle transferinin burada gerçekleşmesidir.

Tablo 5.25., Havalandırma Sistemlerinin Oksijen Transfer Verimleri (Mueler, 2002).

| Havalandırma Tipi ve Materyali | Konum | Hava Debisi (m ³ /saat) | Derinlik (m) | SOTE (%) |
|---|------------------|------------------------------------|--------------|----------|
| Gözenekli Boru Difüzör, Gözenekli Plastik | Izgara Zemin | 3.8-6.3 | 4.6 | 28-32 |
| | Çift Sarmal Rulo | 4.7-11 | 4.6 | 16-24 |
| | Tek Sarmal Rulo | 3.1-11 | 4.6 | 15-20 |
| Gözenekli Boru Difüzör, Delikli Membran | Izgara Zemin | 3-10 | 3 | 27-28 |
| | Çift sarmal Rulo | 0.8-18.8 | 4.6 | 21-36 |
| | Tek Sarmal Rulo | 0.8-10 | 4.6 | 26-35 |
| Gözeneksiz Sabit Orifis Difüzör | Tek Sarmal Rulo | 9.3-64.3 | 4.1-4.8 | 5-17 |
| | Merkez Genişlik | 6.6-18.8 | 4.6 | 11-13 |

Tablo 5.25.(Devam), Havalandırma Sistemlerinin Oksijen Transfer Verimleri (Mueller, 2002).

| | | | | |
|--------------------------------|--------------|----------|-----|-------|
| Jet Havalandırıcı | | 7.1-86.3 | 3 | 8-14 |
| | | 7.7-50.5 | 6.1 | 21-33 |
| Gözenekli Seramik Disk Difüzör | Izgara Zemin | 2.3-5 | 4.6 | 25-29 |
| Gözenekli Plastik Disk Difüzör | Izgara Zemin | 0.9-5.5 | 4.6 | 22-27 |

5.7. Standart Havalandırma Verimi

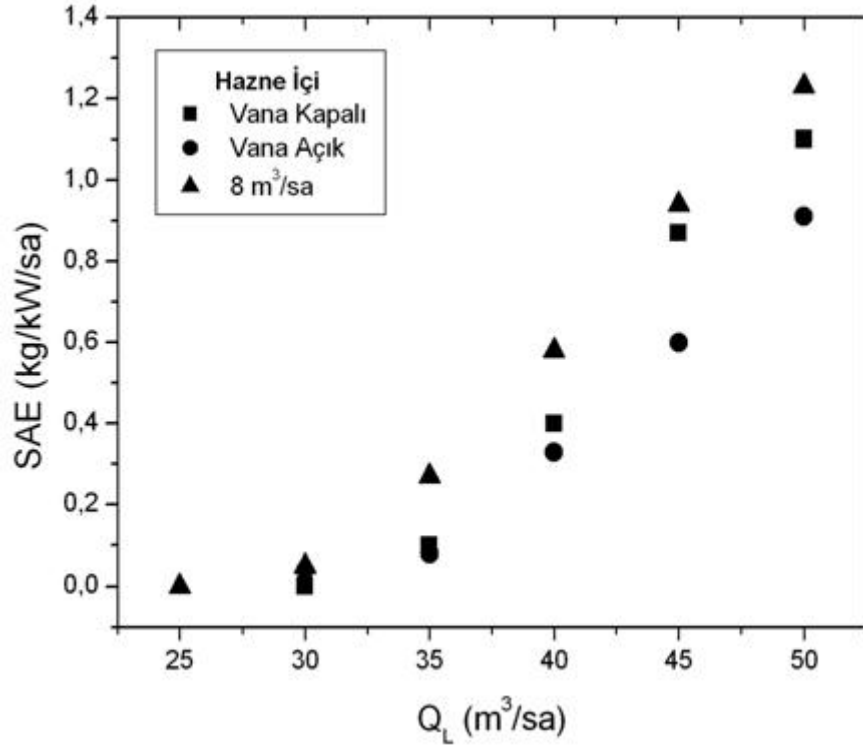
SAE hesabı için gerekli olan deney sırasında ölçülen toplam güç, deney sürelerinin kısa olması nedeniyle ölçülemedi. Bu nedenle sistemde saatlik güç ölçümü yapılmıştır. Bunun için eşanjör ve blower bir saat çalıştırılmış ve elektrik saatinden bir saat içinde harcanan toplam güç 9.6 kW olarak okunmuştur. Deney süreleri ve saatlik ölçülen güç kullanılarak doğru orantı yoluyla her deney için harcanan toplam güç bulunmuştur. Daha sonra Eşitlik 2.30 yardımıyla SAE değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen SAE değerleri Tablo 5.27 ve 5.29'da verilmiştir. Farklı hava değerleri ve artan sıvı debilerine karşı hazne içi SAE değişimi Şekil 5.5'de, emme tüpündeki SAE değişimi Şekil 5.6'da ve YAM ve yağın SAE üzerindeki etkisi Şekil 5.7'de grafik olarak verilmiştir.

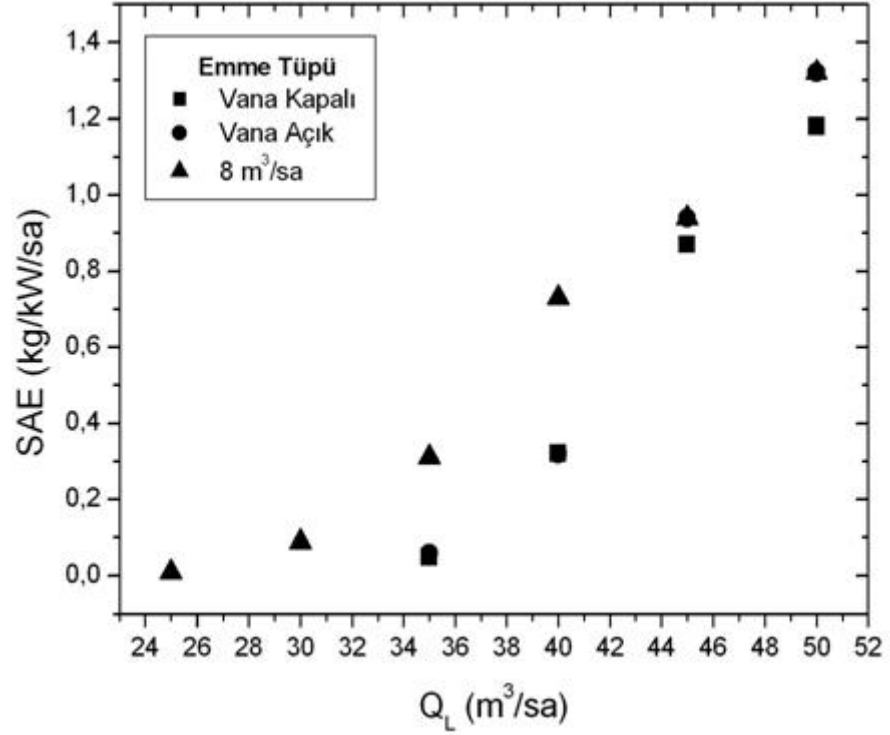
Tablo 5.26., Temiz Su Deneyleri İçin Ölçülen Toplam Güç Miktarları

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne içi-Harcanan Güç, kW | | | Emme Tüpü-Harcanan Güç, kW | | |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------|--------|----------------------------|-----------|--------|
| | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower |
| 50 | 0.56 | 0.75 | 0.61 | 0.61 | 0.61 | 0.75 |
| 45 | 0.61 | 0.93 | 0.69 | 0.72 | 0.77 | 0.83 |
| 40 | 0.91 | 1.12 | 0.83 | 1.28 | 1.28 | 0.93 |
| 35 | 1.25 | 1.73 | 1.25 | 1.95 | 2.43 | 1.31 |
| 30 | 4.77 | 0.67 | 2.53 | | | 2.00 |
| 25 | | | 1.60 | | | 3.15 |

Tablo 5.27., Temiz Suda Standart Havalandırma Verimi Değerleri

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne İçi- <i>SAE</i> , kg/kW/saat | | | Emme Tüpü- <i>SAE</i> , kg/kW/saat | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|-----------|--------|------------------------------------|-----------|--------|
| | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower | Vana Kapalı | Vana Açık | Blower |
| 50 | 1.10 | 0.91 | 1.23 | 1.18 | 1.32 | 1.32 |
| 45 | 0.87 | 0.60 | 0.94 | 0.87 | 0.94 | 0.94 |
| 40 | 0.40 | 0.33 | 0.58 | 0.32 | 0.32 | 0.73 |
| 35 | 0.10 | 0.08 | 0.27 | 0.05 | 0.06 | 0.31 |
| 30 | 0.0005 | 0.04 | 0.05 | | | 0.09 |
| 25 | | | 0.0007 | | | 0.01 |

Şekil 5.5., Hazne İçi *SAE* Değerlerindeki Değişim



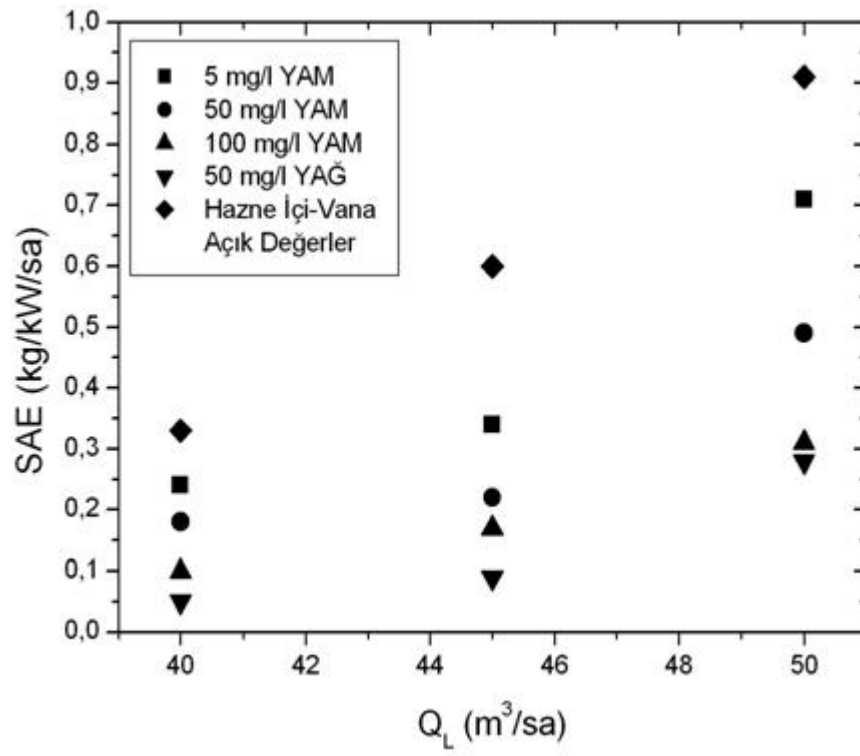
Şekil 5.6., Emme Tüpü SAE Değerlerindeki Değişim

Tablo 5.28., YAM ve Yağ Deneyleri İçin Ölçülen Toplam Güç Miktarları

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne İçi-Harcanan Güç, kW | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|-------------|--------------|-------------|
| | 5 mg/L YAM | 50 mg/L YAM | 100 mg/L YAM | 50 mg/L Yağ |
| 50 | 0.72 | 0.83 | 1.39 | 1.20 |
| 45 | 1.01 | 1.52 | 1.52 | 1.55 |
| 40 | 1.28 | 1.23 | 1.52 | 2.32 |

Tablo 5.29., YAM ve Yağ Deneyleri İçin SAE Değerleri

| Sıvı Debisi m ³ /saat | Hazne İçi-Vana Açık, SAE, kg/kW/saat | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------|--------------|-------------|
| | 5 mg/L YAM | 50 mg/L YAM | 100 mg/L YAM | 50 mg/L Yağ |
| 50 | 0.71 | 0.49 | 0.31 | 0.28 |
| 45 | 0.34 | 0.22 | 0.17 | 0.09 |
| 40 | 0.24 | 0.18 | 0.10 | 0.05 |



Şekil 5.7., YAM ve Yağın SAE Değerleri Üzerindeki Etkisi

6. SONUÇLAR

Pilot ölçek jet loop membran biyoreaktörde, musluk suyu ile gerçekleştirilen bu çalışmada, üç farklı hava değeri, altı farklı sıvı debisi, iki farklı ölçüm noktası, üç farklı yüzey aktif madde miktarı ve tek bir yağ değeri belirlenerek, ölçümlerde bu parametrelerin çeşitli kombinasyonları kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, yüzey aktif madde ve yağ kullanılmadan sadece temiz sudaki kütle transfer katsayıları belirlenmiştir. Bunun için ilk olarak oksijen probu hazne içine yerleştirilmiştir ve reaktör 500 L olacak şekilde su ile doldurulmuştur. Hava vanası kapalı konuma getirilerek sırasıyla 50-25 m³/saat arasındaki sıvı debilerinde çalışılmış ve çözülmüş oksijen değerlerindeki artış kaydedilmiştir. Daha sonra sırasıyla hava vanası açık konuma getirilerek ve blower 8 m³/saat hava debisinde çalıştırılarak ölçümler her sıvı debisi için tekrarlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında oksijen probu emme tüpüne doğru yerleştirilerek reaktör 500 L su hacmi olacak şekilde doldurulmuştur. Sırasıyla hava vanası kapalı, hava vanası açık ve blower 8 m³/saat hava debisinde çalıştırılarak, 50-25 m³/saat arasındaki sıvı debilerindeki ölçümler tekrarlanmış ve değişen oksijen değerleri kaydedilmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında ise oksijen probu hazne içine yerleştirilerek reaktör 500 L musluk suyu ile doldurulmuştur. Hava vanası açık konuma getirilerek 5 mg/L yüzey aktif madde solüsyonu reaktöre eklenmiş ve sırasıyla 50-40 m³/saat arasındaki sıvı debilerinde oksijen konsantrasyonlarındaki değişimler kaydedilmiştir. Aynı şekilde 50 mg/L, 100 mg/L yüzey aktif madde solüsyonu ve 50 mg/L yağ reaktöre eklenerek, her sıvı debisi için değişen madde konsantrasyonlarına göre ölçümler tekrarlanmıştır. Bütün bu bulgular ışığı altında sistem bütünü ile değerlendirilmiş ve elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Jet loop biyoreaktörde elde edilen hacimsel kütle transfer katsayıları ve SOTE değerleri, reaktörün çok yüksek kütle transfer yetenekleri olduğunu ortaya koymuştur.
- Ejektör nedeniyle, hava verilmemesine rağmen belirli sıvı debilerinde oksijen konsantrasyonunda artış görülmüştür. Standart k_{La20} değerleri incelendiğinde,

hazne içi ve emme tûpünde, hava kaynağı kullanılmadan yapılan ölçümlerde, 30 m³/saat sıvı debisi ve altındaki debilerde reaktör içerisinde çevrimin ve hava kabarcıklarının oluşmadığı görülmüştür. Hava kaynaksız jet loop biyoreaktörün işletileceği durumlarda minimum sıvı debisinin 35 m³/saat olmasına karar verilmiştir. $k_L a_{20}$ değerlerinin 19.08-136.08 saat⁻¹ arasında değiştirdiği tespit edilmiştir.

- Hazne içi ve emme tûpünde hava vanası açılarak yapılan ölçümlerde 30 m³/saat sıvı debisi ve altındaki debilerde reaktör içerisinde çevrim oluşmazken, minimum sıvı debisinin 35 m³/saat olmasına karar verilmiştir. Hava vanasının $k_L a_{20}$ değerleri üzerindeki etkisi en çok 50 m³/saat sıvı debisinde görülmüştür. $k_L a_{20}$ değerlerinin 27-154.4 saat⁻¹ arasında değiştirdiği tespit edilmiştir.
- Hava koşullarının, hava vanası açık yapılan deneylerde etkili olduğu görülmüştür. Durağan hava şartlarında vanadan hava emilimi düşüken, rüzgârlı havalarda vananın daha etkili olduğu tespit edilmiştir.
- $k_L a_{20}$ değerleri incelendiğinde blowerın kütle transferinde daha etkili olduğu görülmüştür. 25 m³/saat sıvı debisi ve altındaki debilerde reaktör içerisinde çevrim oluşmazken, minimum sıvı debisi 30 m³/saat olarak tespit edilmiştir. $k_L a_{20}$ değerlerinin 26.5-186.48 saat⁻¹ arasında değiştirdiği tespit edilmiştir.
- Artan hava değerleri ve sıvı debilerine bağlı olarak $k_L a_{20}$ değerinin de arttığı görülmüştür. Yüksek sıvı debilerinde $k_L a_{20}$ değerinin artışına, artan sıvı hızı ve kinetik enerji nedeniyle çevrim olayının daha iyi gerçekleşmesinin ve hava kabarcıklarının boyutlarının küçülmesinin neden olduğu düşünülmektedir. Hava kabarcıklarının boyutunun küçülmesi etkin yüzey alanını arttırdığı için kütle transferi daha etkili gerçekleşmektedir. Daha düşük sıvı debilerinde ise hava kabarcıkları emme tûpü içerisine giremeden reaktör boyunca yükselmekte ve sistemi terk etmektedir. Ayrıca daha yüksek hava değerlerinde sisteme daha

fazla hava kabarcığı verildiğinden artan yüzey alanı ile $k_L a_{20}$ değeri de artmıştır.

- Emme tüpünde elde edilen değerler hazne içinde elde edilen değerlere göre daha yüksektir. Bunun nedeni, sistemin ana kısmını oluşturan reaktörün alt kısmında hava kabarcıklarının daha yoğun olması ve esas kütle transferinin burada gerçekleşmesidir.
- 30 m³/saat sıvı debisinde, vana kapalı ve vana açık olmak üzere her iki durumda da, hazne içinde ölçüm yapılabilmesine rağmen, emme tüpünde yapılamamıştır. Bunun nedeni, bu sıvı debisinde ve hava değerlerinde sisteme gerekli enerjinin ve hava kabarcıklarının sağlanamaması, az sayıda oluşan hava kabarcıklarının emme tüpüne girmeden hazne içinde yükselmesi ve burada etkili olmasıdır.
- Hazne içinde, vana açıkken yüzey aktif madde ve yağ eklenerek yapılan deneylerden elde edilen $k_L a_{20}$ değerlerinin (21.6-100.44 saat⁻¹), temiz suda hazne içinde, vana açıkken elde edilen değerlerden (27-138.6 saat⁻¹) daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak, yağın ve yüzey aktif maddelerin, hava-sıvı arayüzeyine absorbe olarak oksijen transferine karşı yüzey direncini arttırmaları verilebilir. Ayrıca yüzey aktif maddeler, yüzey gerilimini azaltıcı etkileri ile hava kabarcıklarının birleşmesini önleyerek yüzey alanının artmasına neden olurlar. Buna ek olarak sıvı film kalınlığını arttırarak k_L katsayısının azalmasına neden olurlar. k_L katsayısı üzerindeki azaltıcı etkileri, yüzey alanını arttırıcı etkilerinden daha fazla olduğu için hacimsel kütle transfer katsayısının azalmasına neden olurlar. Ayrıca organik kirleticiler suyun viskozitesini arttırarak oksijen moleküllerinin su içerisindeki hareketliliğini azaltırlar. Viskozite artışı nedeniyle reaktörde daha büyük hava kabarcıkları oluşmakta ve $k_L a$ katsayısı azalmaktadır. Yüzey aktif madde miktarı arttıkça $k_L a_{20}$ değeri azalmıştır. Bu azalma sıvı debisi düştükçe artmıştır.

- Standart oksijen transfer verimlerine bakıldığında, jet loop biyoreaktörden elde edilen değerlerin, bir havalandırma havuzunda difüzör kullanılarak elde edilen değerlere göre düşük olduğu görülmüştür. Jet loop biyoreaktörde 50 m³/sa sıvı debisinde SOTE değeri %44.37'ye kadar çıkmıştır. Bu değer, ızgara zemin şeklinde oluşturulan gözenekli difüzörlerde hava debisine bağlı olarak %28-32 arasında değişmektedir.

Sonuç olarak jet loop biyoreaktörler yüksek kütle transfer yetenekleri ile membran prosesleri yardımıyla elde edilen biyokütlenin karıştırma ve oksijen ihtiyacını fazlasıyla karşılayabilecek konumdadır. Biyolojik atıksu arıtımında organik yüklerin karşılanabilmesi için oksijen transfer kapasiteleri yüksek reaktörlerin kullanılması zorunludur. Dolayısıyla jet loop reaktörler yüksek kütle transfer özelliklerinden atıksuların arıtılmasında rahatlıkla kullanılabilirler. Kapladıkları alan azlığı, işletme ve otomasyon kolaylıkları, düşük enerji tüketimleri ile jet loop biyoreaktörlerin kullanım potansiyeli yüksek görünmektedir. Daha uzun süreli ve pilot tesis ölçeğinde ayrıntılı çalışmaların yapılması bu sistemlerin kullanılabilirliğini arttıracaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- 1) Yıldız, E., 1999. Çapraz Akış Mikrofiltrasyon Sistemli Püskürtme Çevrimli (Jet Loop) Reaktörlerde Biyolojik Arıtım, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi
- 2) Akbayır, E., 2007. Jet Loop Reaktörler ve Atıksu Arıtımında Kullanımı, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- 3) Mueller, J.,A., Boyle, W.,C., Pöpel, H.,J., 2002. Aeration Principles and Practice, Water Quality Management Library, CRC Pres.
- 4) Kayser, R., Frey, W., Kapp, H., Teichgräber, B., Wagner, M., 1996. Measurement of the Oxygen Transfer in Activated Sludge Aeration Tanks with Clean Water and in Mixed Liquor, ATV-M 209E, German ATV Rules and Standards in Wastewater-Waste.
- 5) TS EN 12255-15, 2006. Atıksu Arıtma Tesislerinde Havalandırma Tanklarındaki Temiz Suda Oksijen Aktarımının Ölçülmesi, Türk Standartları Enstitüsü.
- 6) Keskinler, B., Farizoğlu, B., Yıldız, E., Çakıcı, A., 2004. Peyniraltı Sularının Arıtıldığı Jet Loop Membran Biyoreaktörün Membran Filtrasyonu Özelliklerinin Araştırılması, SKKD, Cilt 14, Sayı 2.
- 7) Jianping, W., Ping, N., Lin, H., Yunlin, C., 2000. Local Overall Volumetric Gas-Liquid Mass Transfer Coefficient in Gas-Liquid-Solid Reversed Flow Jet Loop Bioreactor with a Non-Newtonian Fluid, Elsevier; Biochemical Engineering Journal, 5, 225-229.

- 8) Farizoğlu, B., Keskinler, B., 2007. Influence of Draft Tube Cross-Sectional Geometry on k_La and ε in Jet Loop Bioreactors, Elsevier; Chemical Engineering Journal, 133, 293-299.
- 9) Fadavi, A., Chisti, Y., 2005. Gas-Liquid Mass Transfer in a Novel Forced Circulation Loop Reactor, Elsevier; Chemical Engineering Journal, 112, 73-80.
- 10) Yıldız, E., Keskinler, B., Pekdemir, T., Akay, G., Nuhoglu, A., 2004. High Strength Wastewater in a Jet Loop Membrane Bioreactor: Kinetics and Performance Evaluation, Elsevier; Chemical Engineering Science, 60, 1103-1116.
- 11) Vaxelaire, J., Roche, N., Prost, C., 1994. Oxygen Transfer in Activated Sludge Surface-Aerated Process, Environmental Technology, Vol16, pp 279-285.
- 12) Henkel, J., Lemac, M., Wagner, M., Cornel, P., 2009. Oxygen Transfer in Membrane Bioreactors Treating Synthetic Greywater, Water Research, 43, 1711-1719.
- 13) Jin, B., Lant, P., Ge, X., 2005. Hydrodynamics and Mass Transfer Coefficient in Activated Sludge Aerated Stirred Column Reactor: Experimental Analysis and Modeling, Wiley InterScience, DOI: 10.1002/bit.20516.
- 14) Bouaifi, E., Hebrard, G., Bastoul, D., Roustan, M., 2000. A Comparative Study of Gas Hold-up, Bubble Size, Interfacial Area and Mass Transfer Coefficients in Stirred Gas-Liquid Reactors and Bubble Columns, Elsevier; Chemical Engineering and Processing, 40, 97-111.
- 15) Lee, D., H., Kim, E., S., Chang, H., W., 2005. Effect of Tween Surfactant Components for Remediation of Toluene-Contaminated Groundwater, Geosciences Journal, Vol. 9, No. 3, p. 261-267.

ÖZGEÇMİŞ

Yasemin KALKAN 1984 yılında Kocaeli’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2003 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nden 2008 yılında Çevre Mühendisi unvanı alarak mezun oldu. 2008 yılında girdiği Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.

EK 1

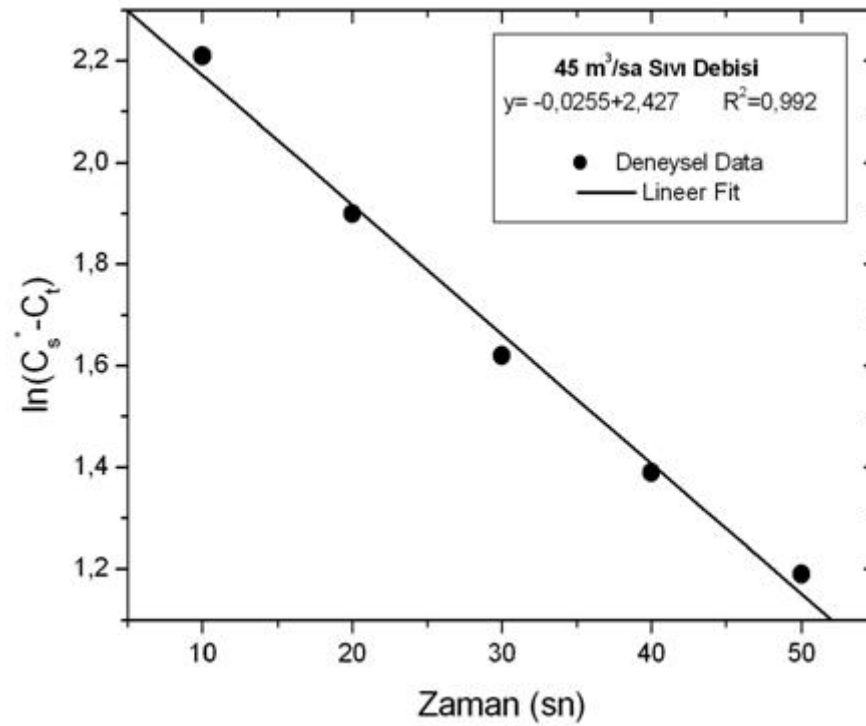
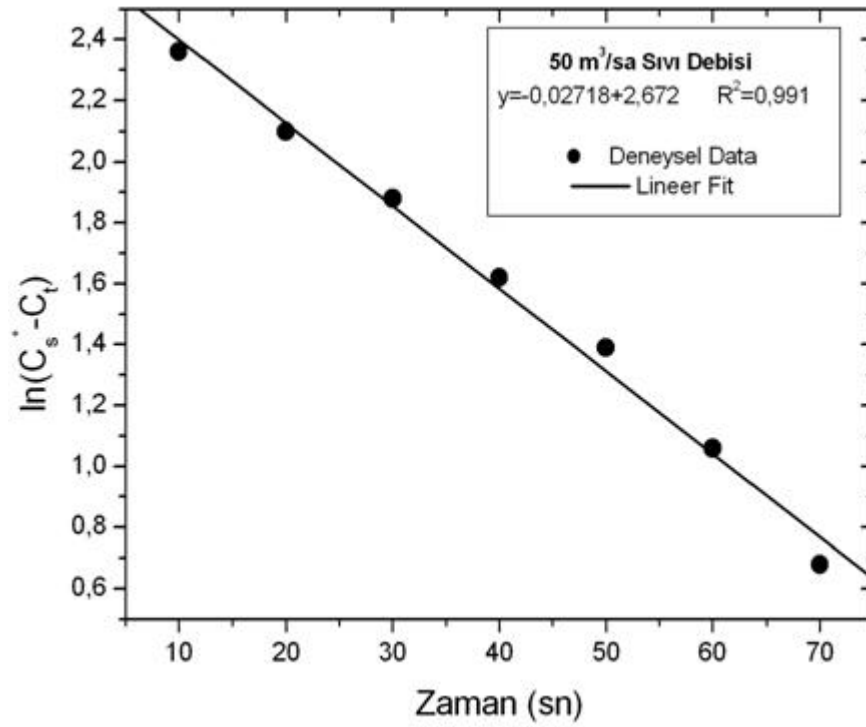
Pilot Ölçek Jet Loop Membran Biyoreaktör Sistemi Fotoğrafları

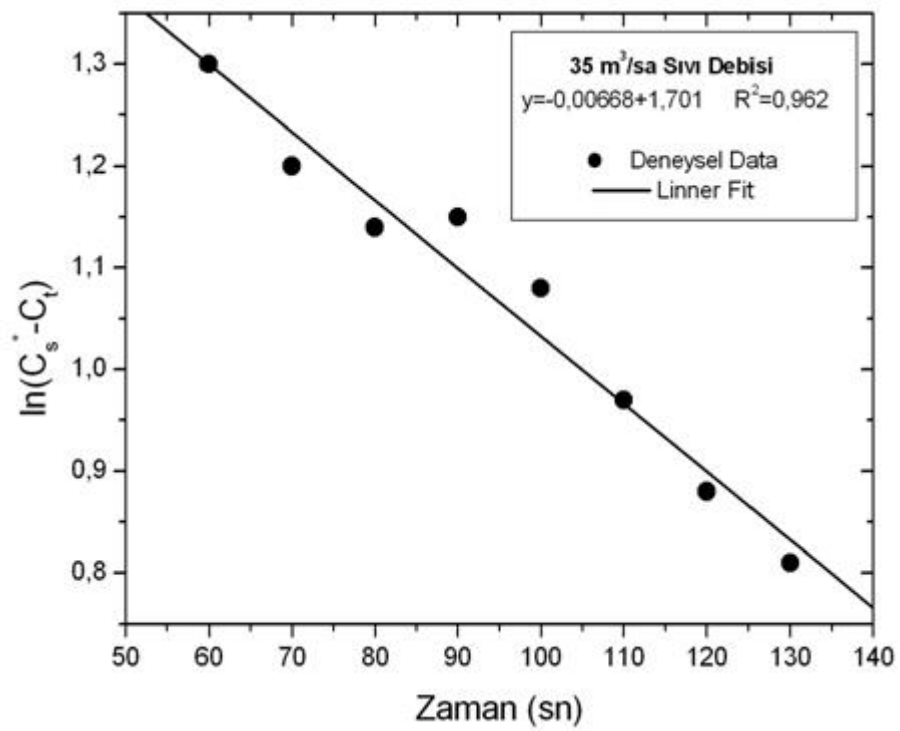
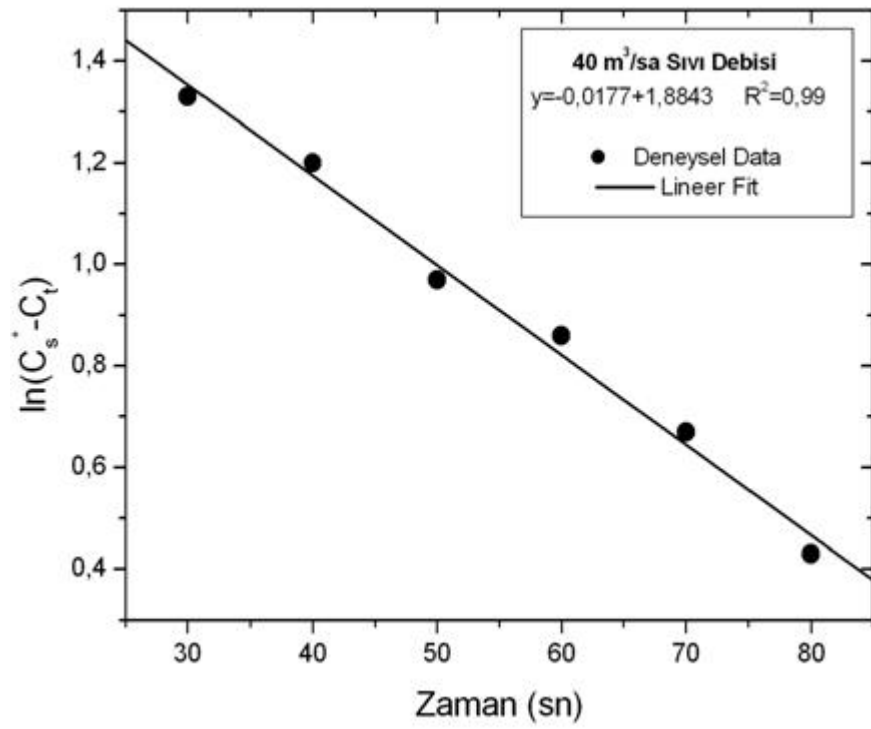


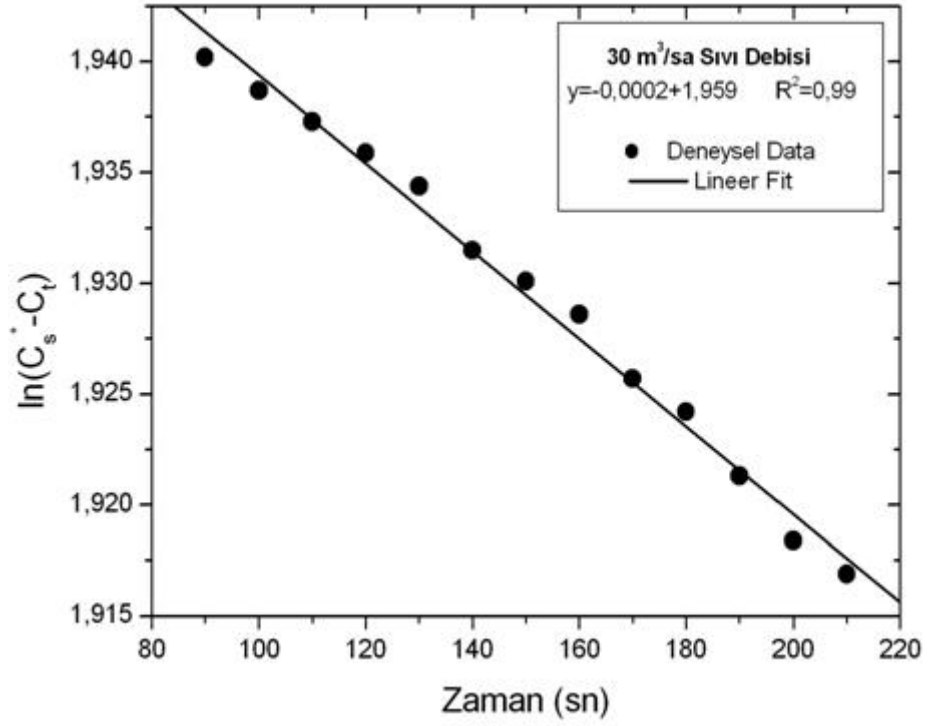


EK 2

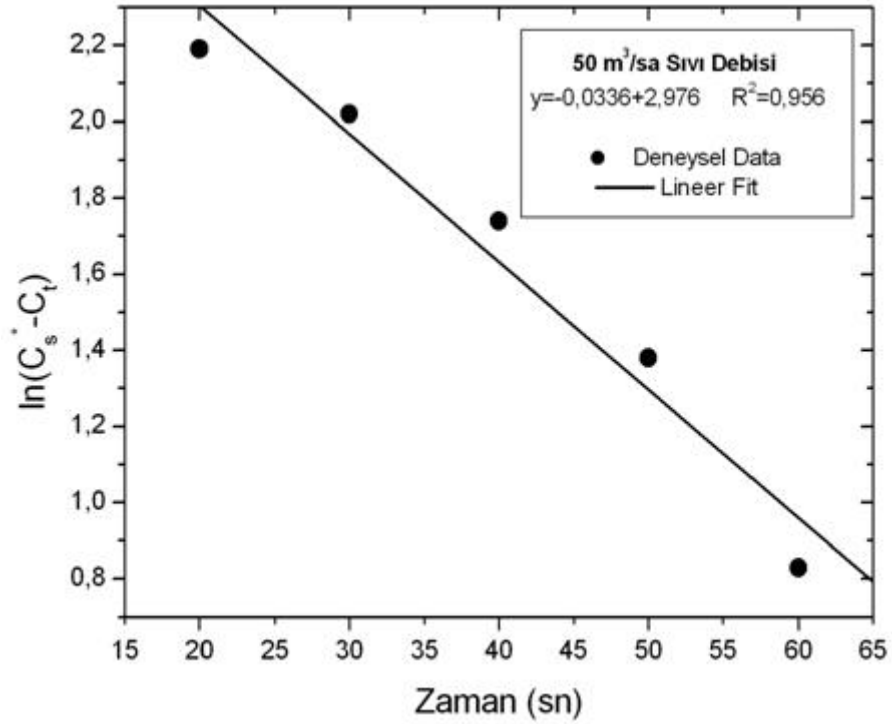
“Hazne İçi-Vana Kapalı” Deneylerden Elde Edilen Grafikler

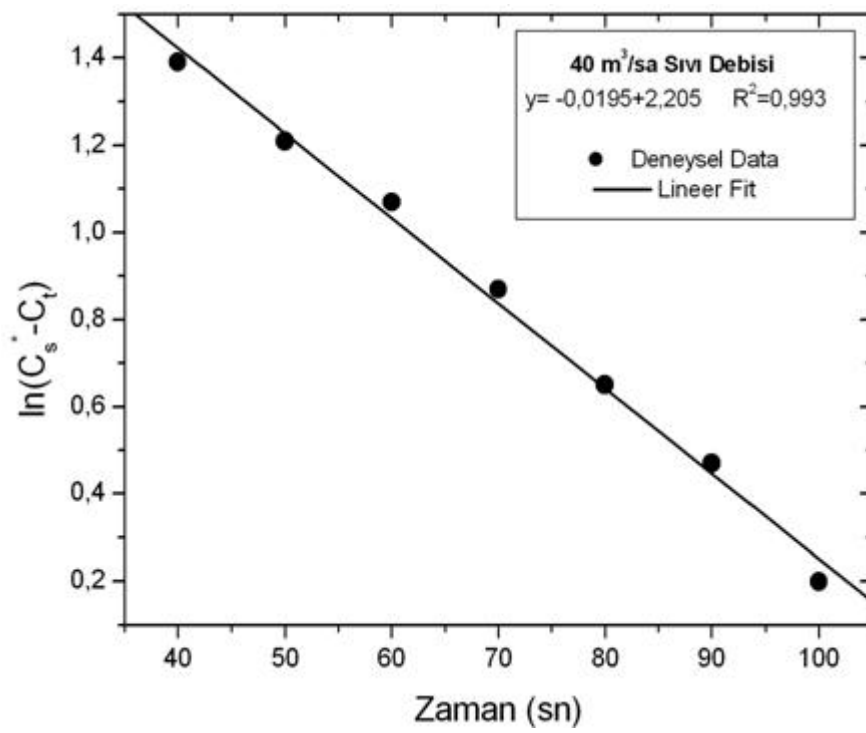
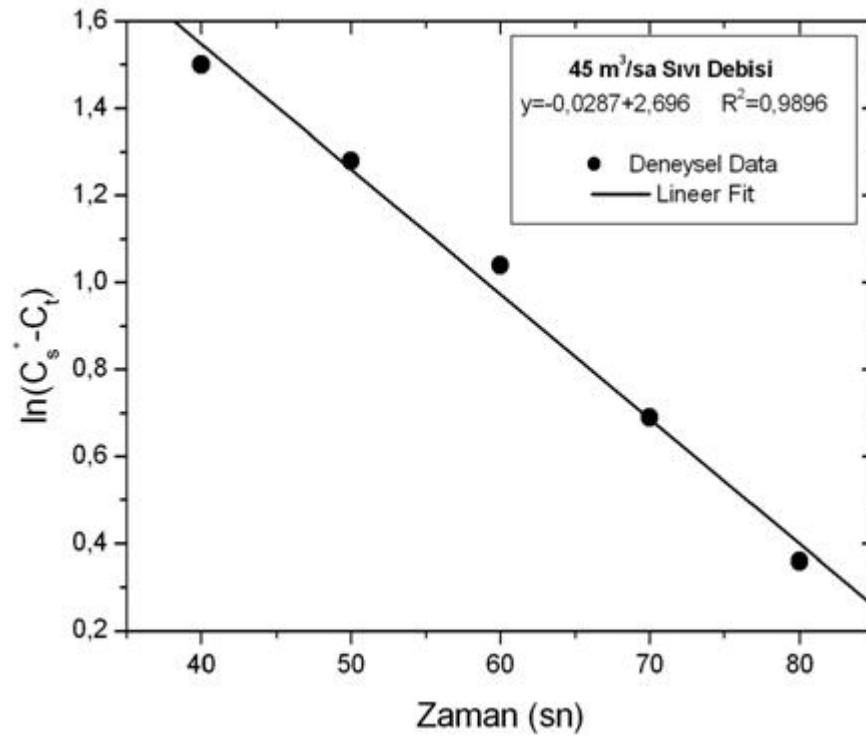


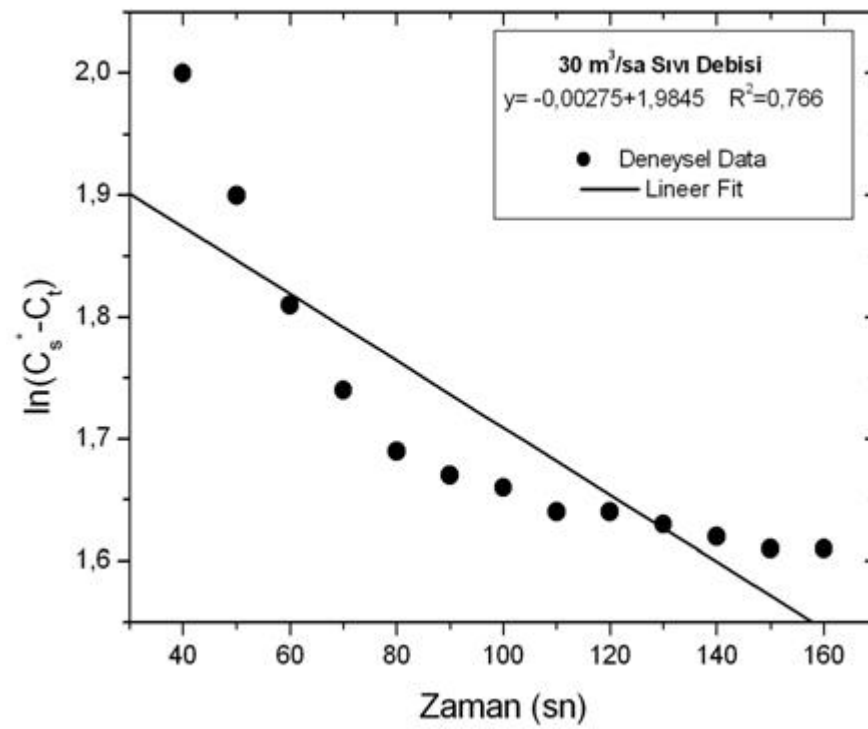
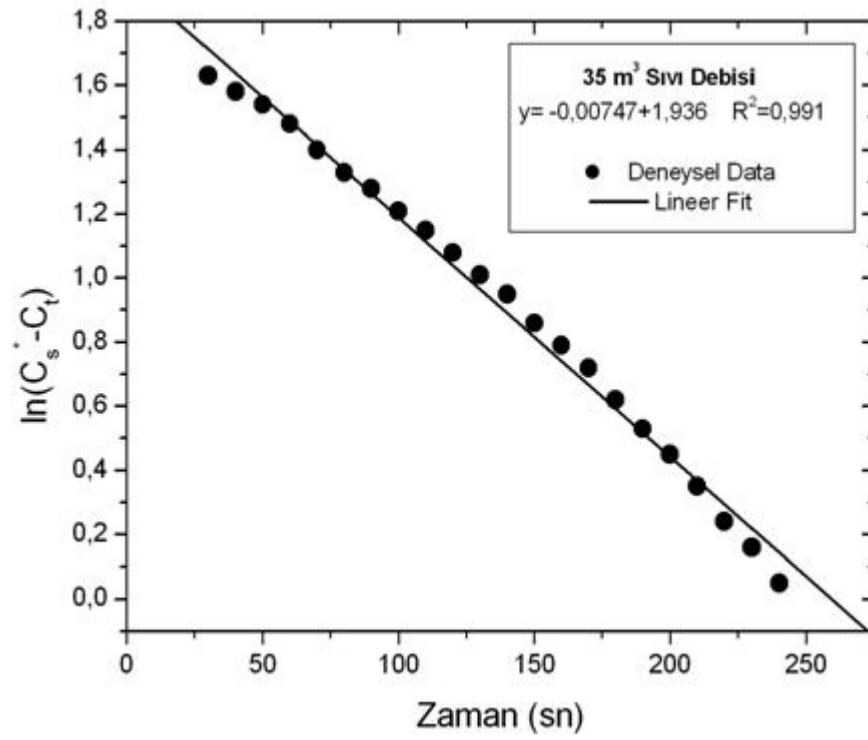




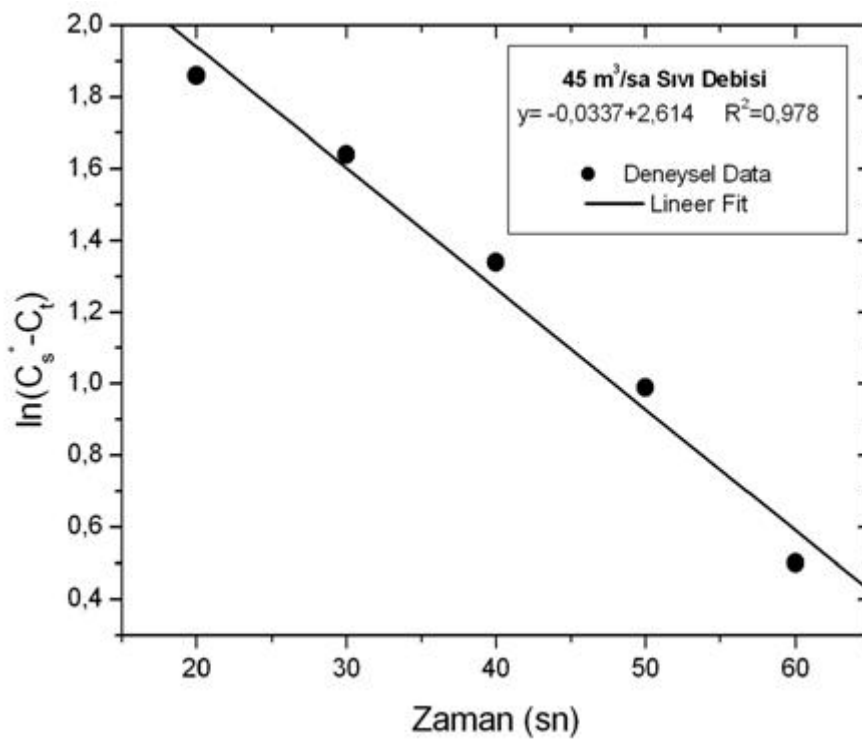
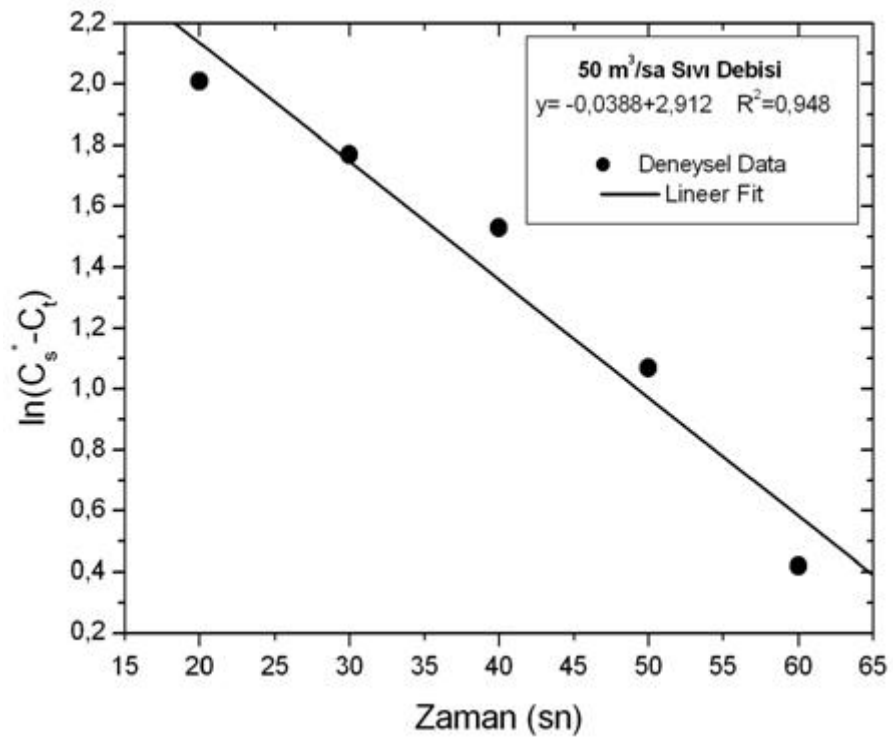
“Hazne İçi-Vana Açık” Deneylerden Elde Edilen Grafikler

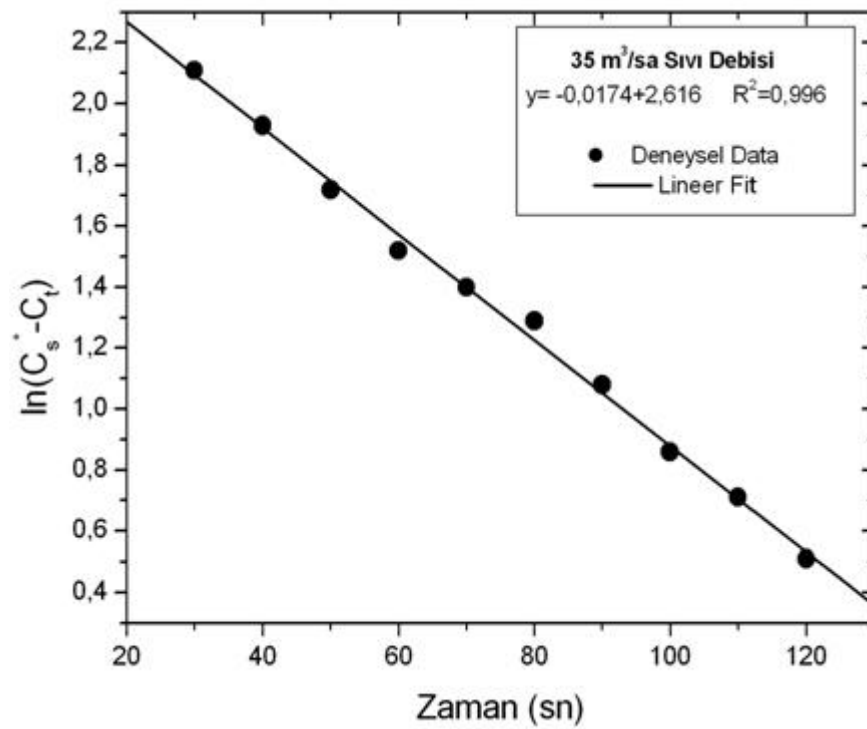
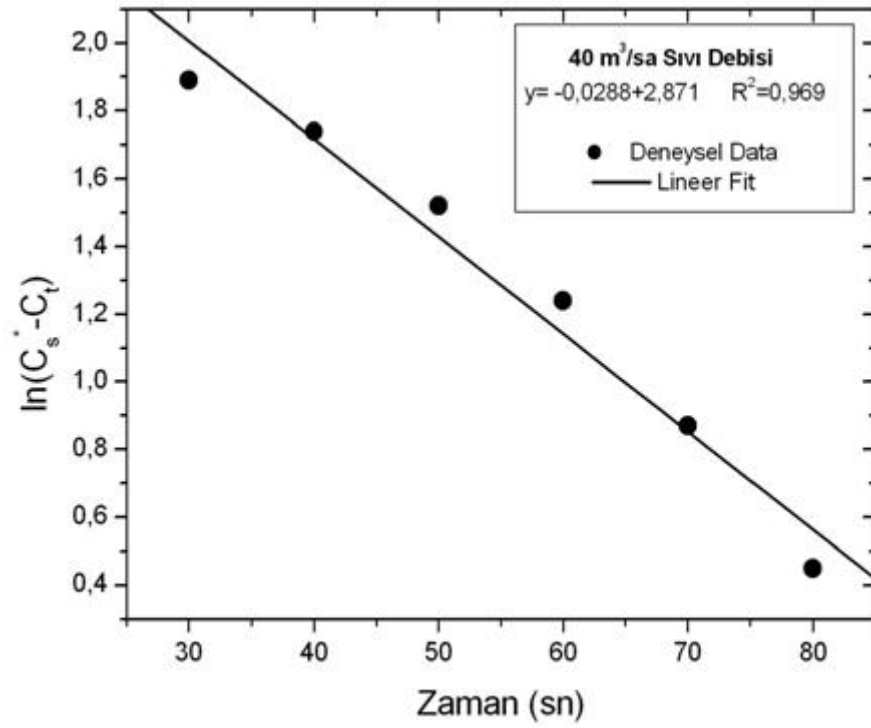


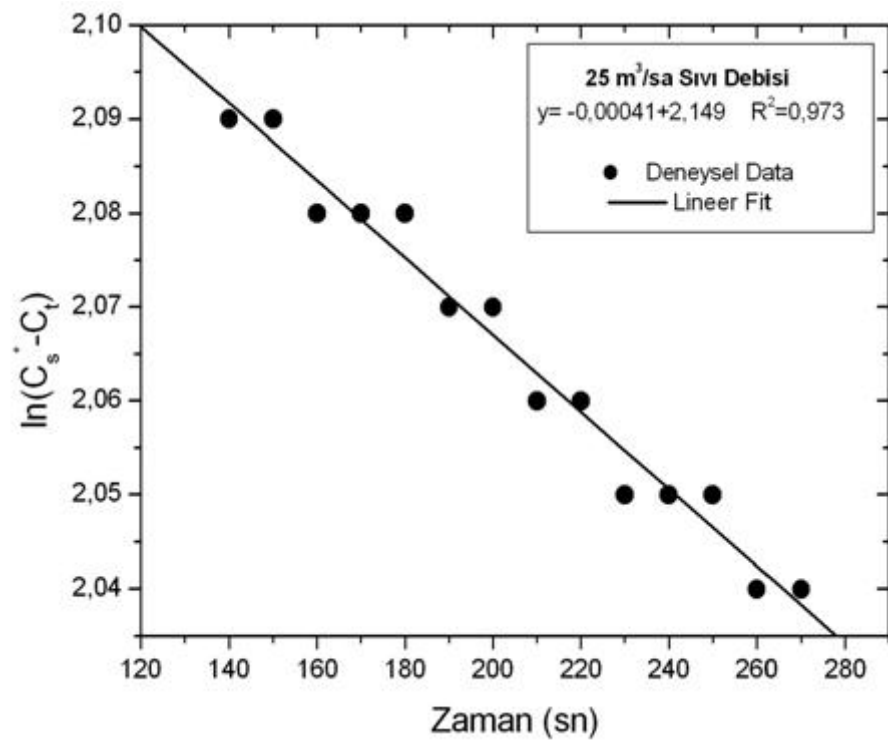
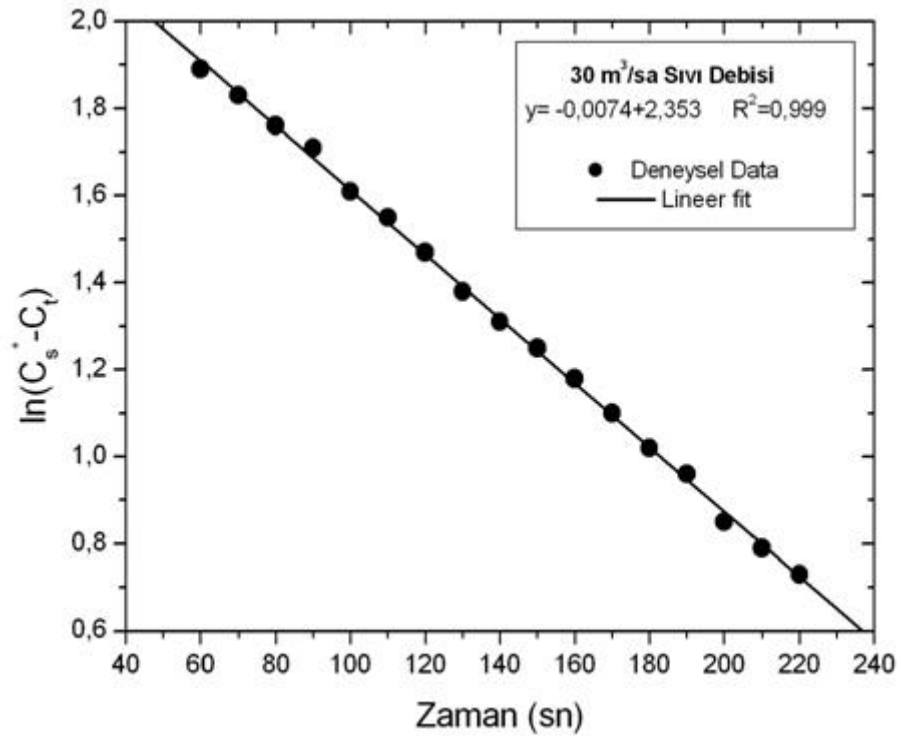




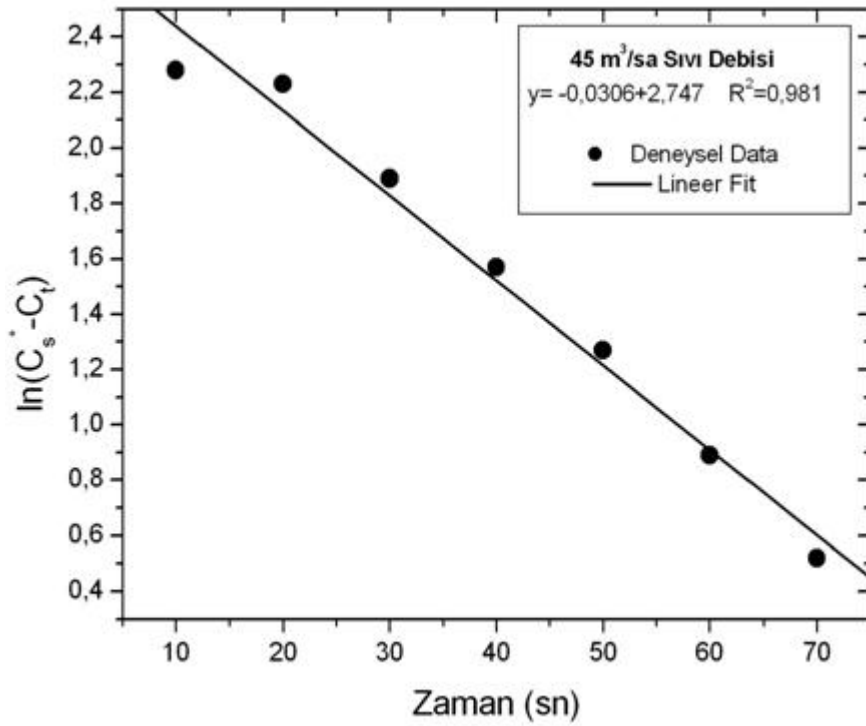
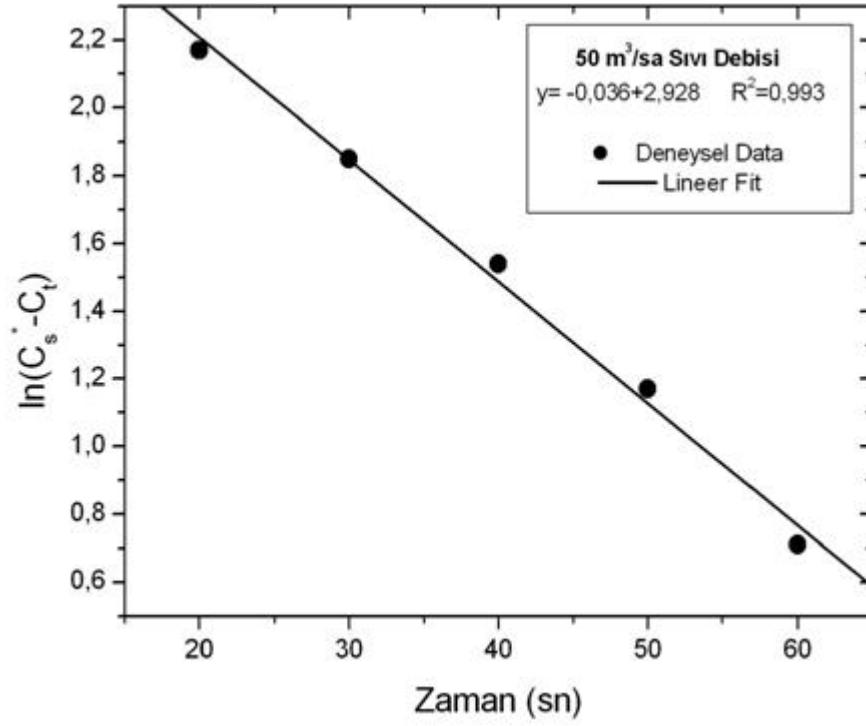
“Hazne İçi-Blower Açık” Deneylerden Elde Edilen Grafikler

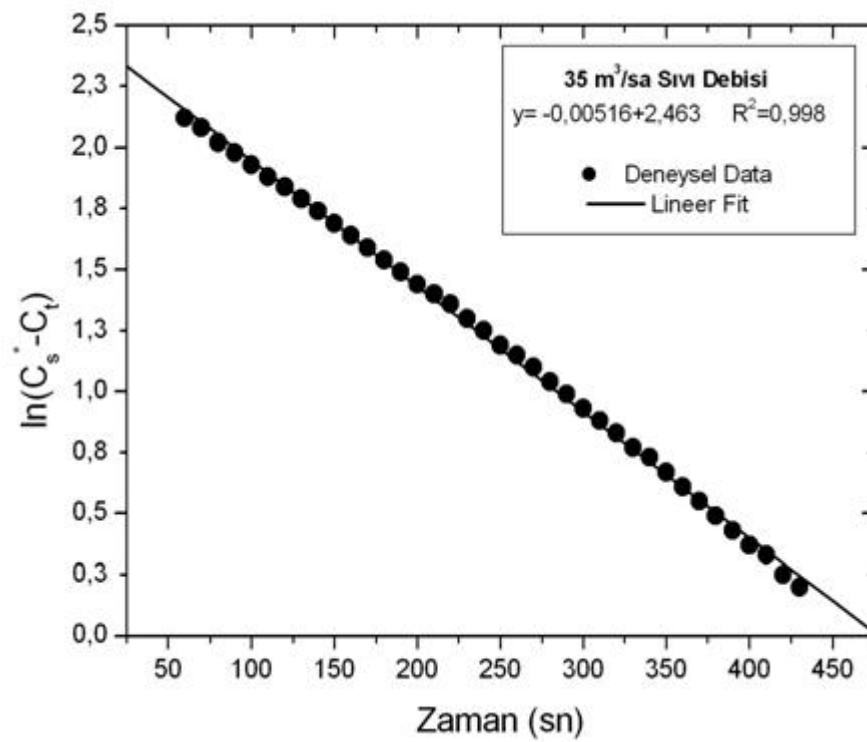
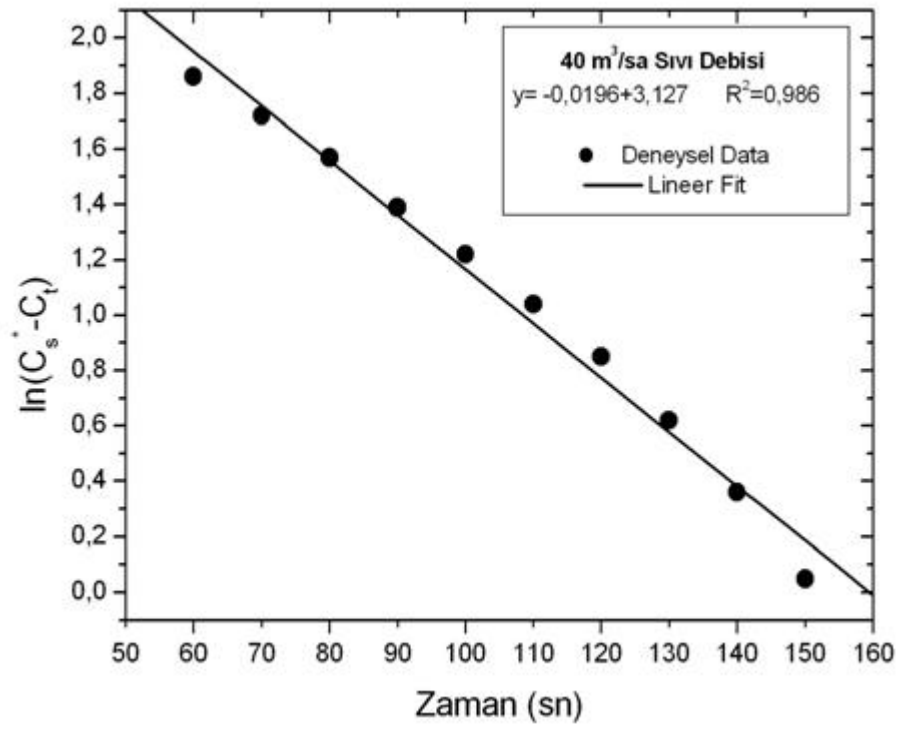




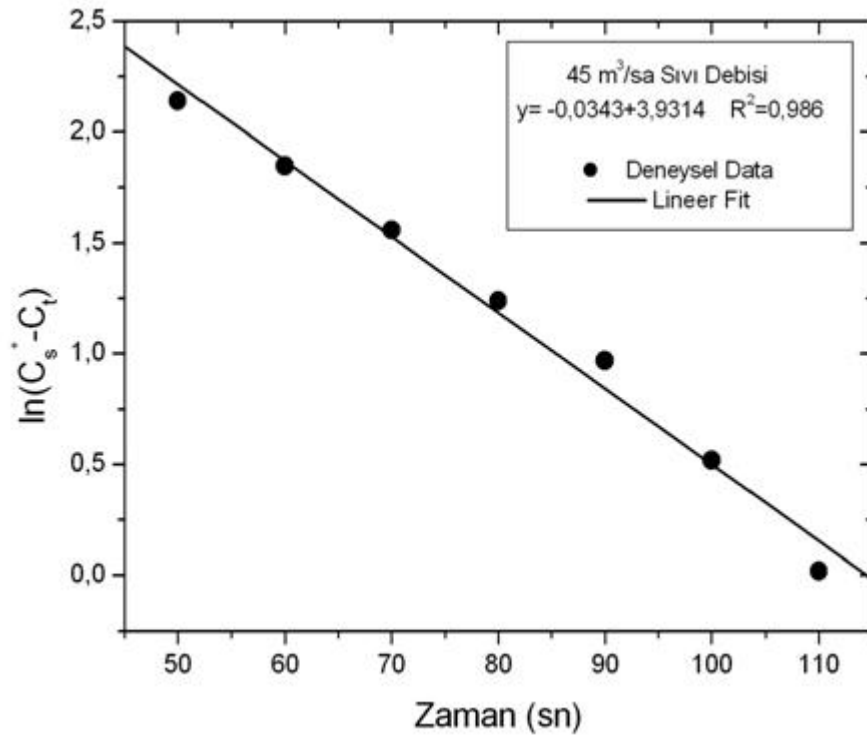
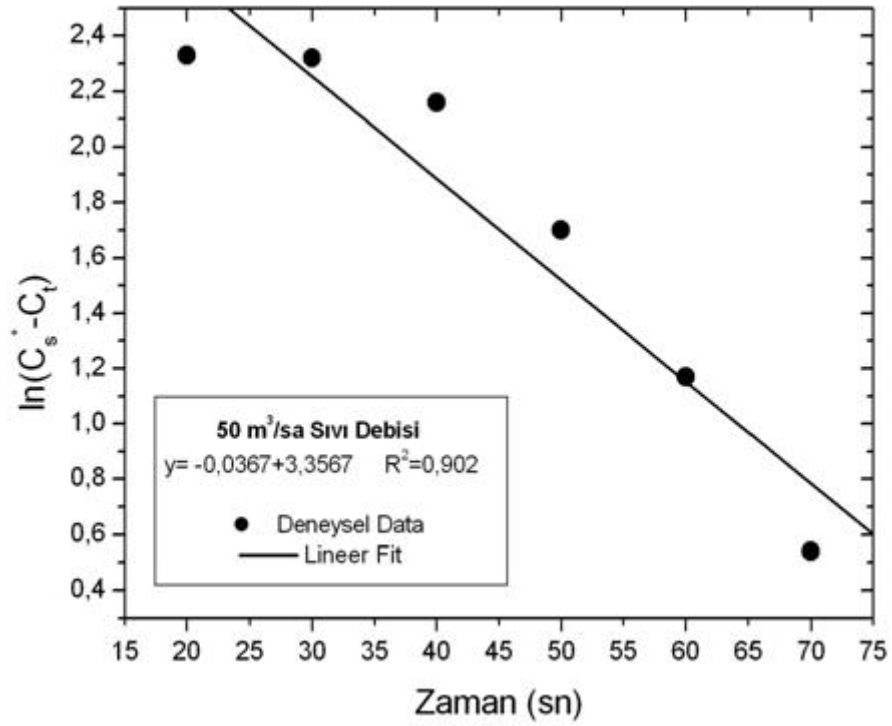


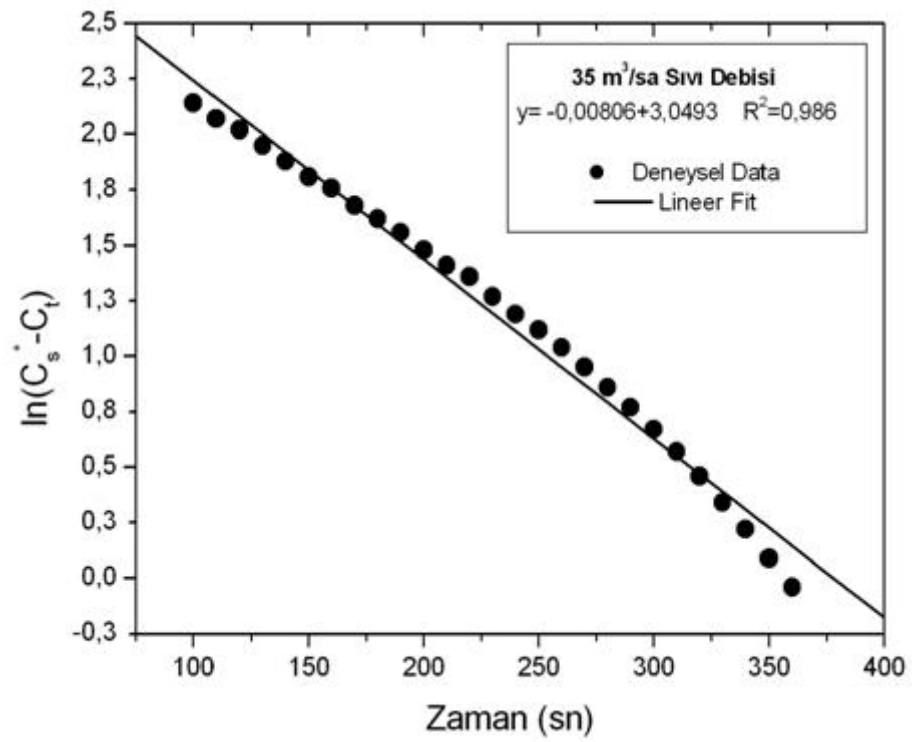
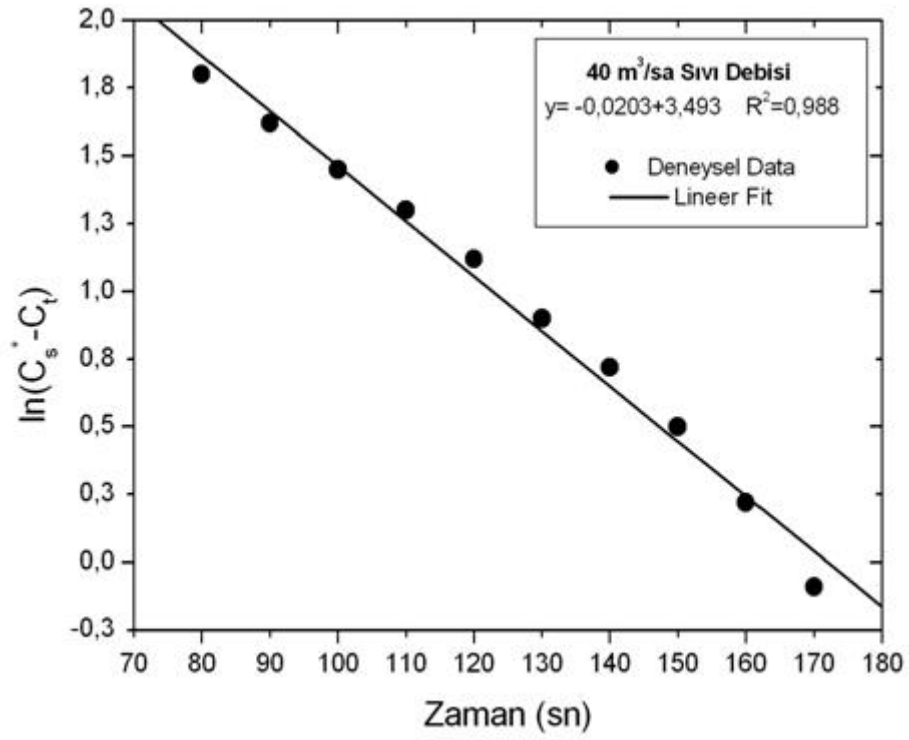
“Emme Tüpü-Vana Kapalı” Deneylerden Elde Edilen Grafikler



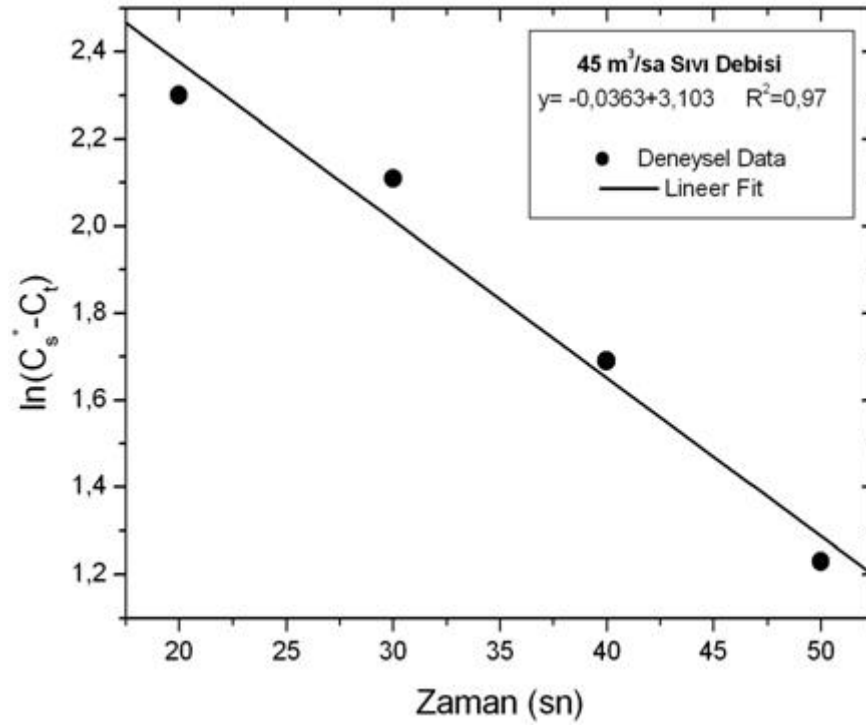
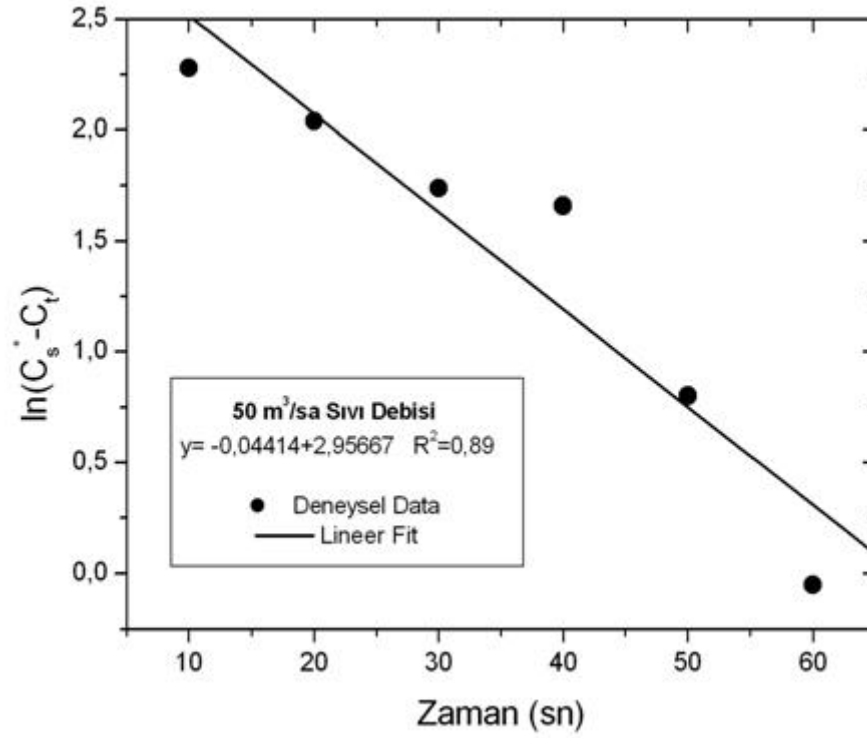


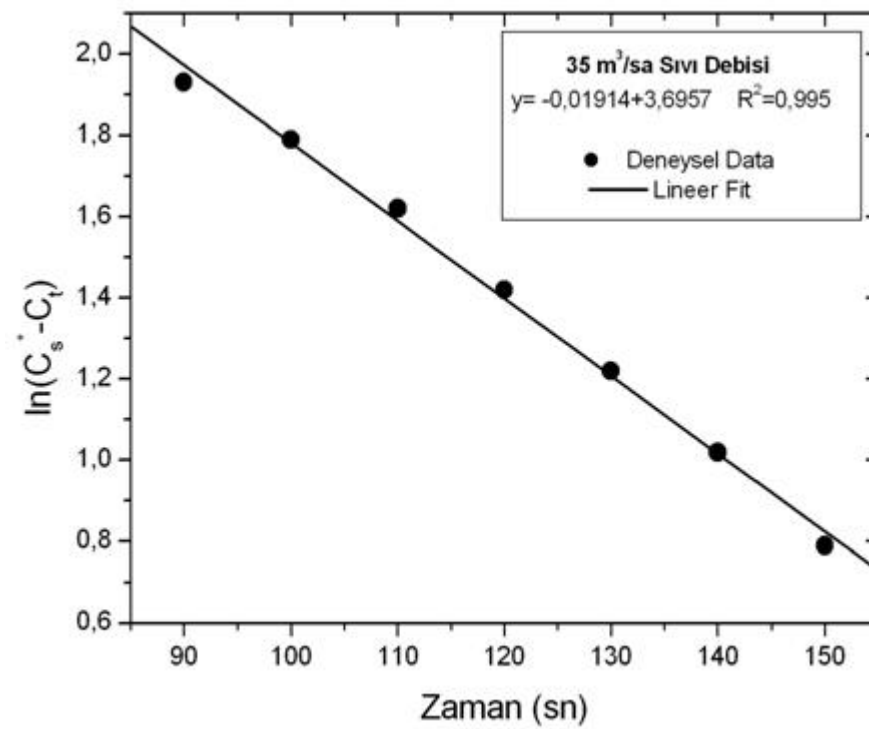
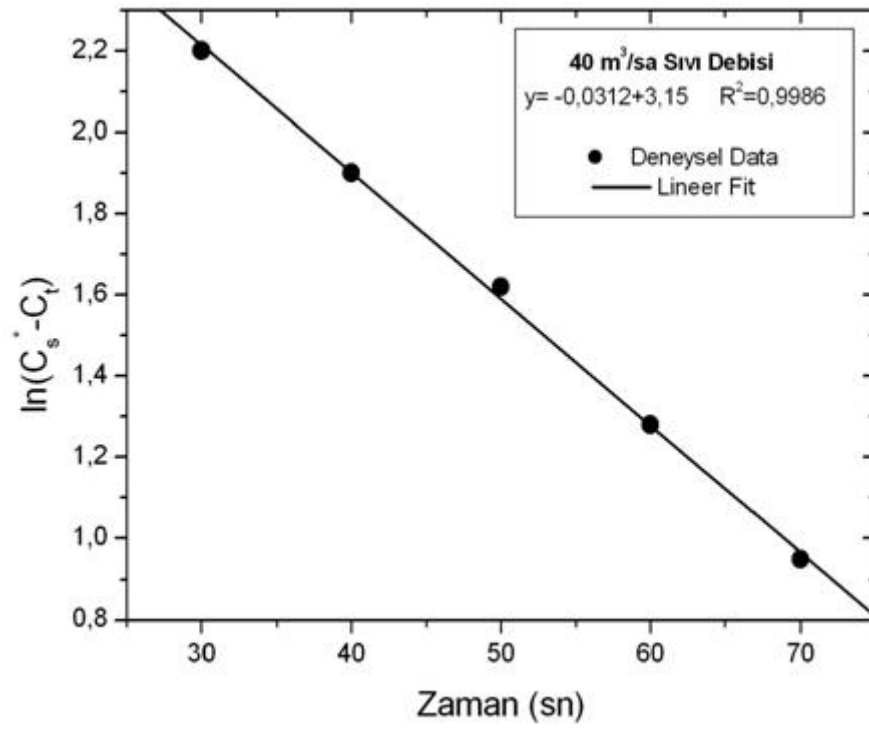
“Emme Tüpü-Vana Açık” Deneylerden Elde Edilen Grafikler

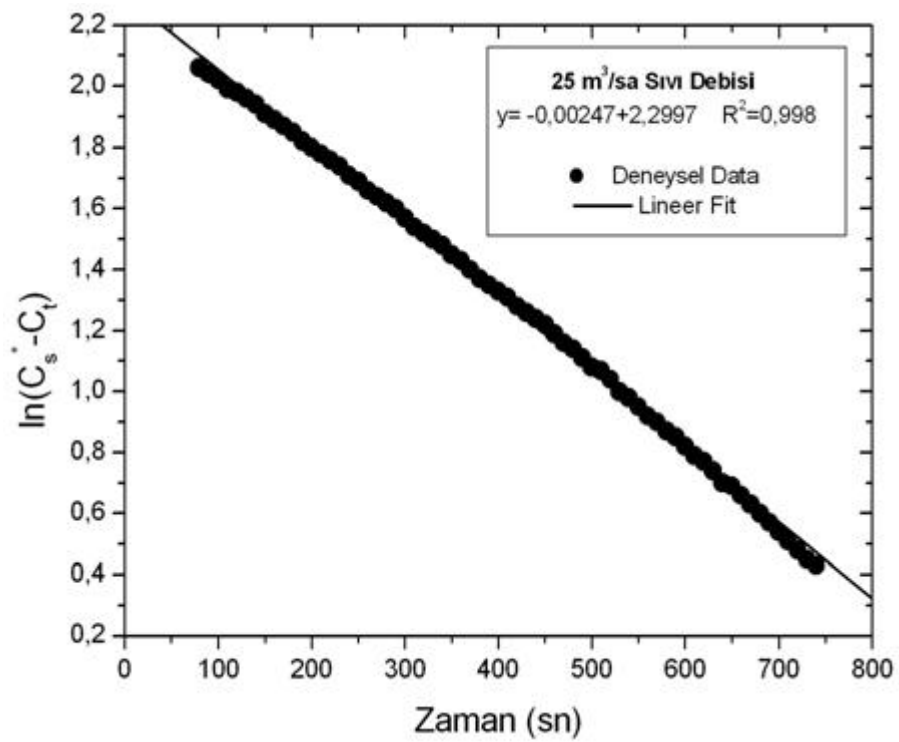
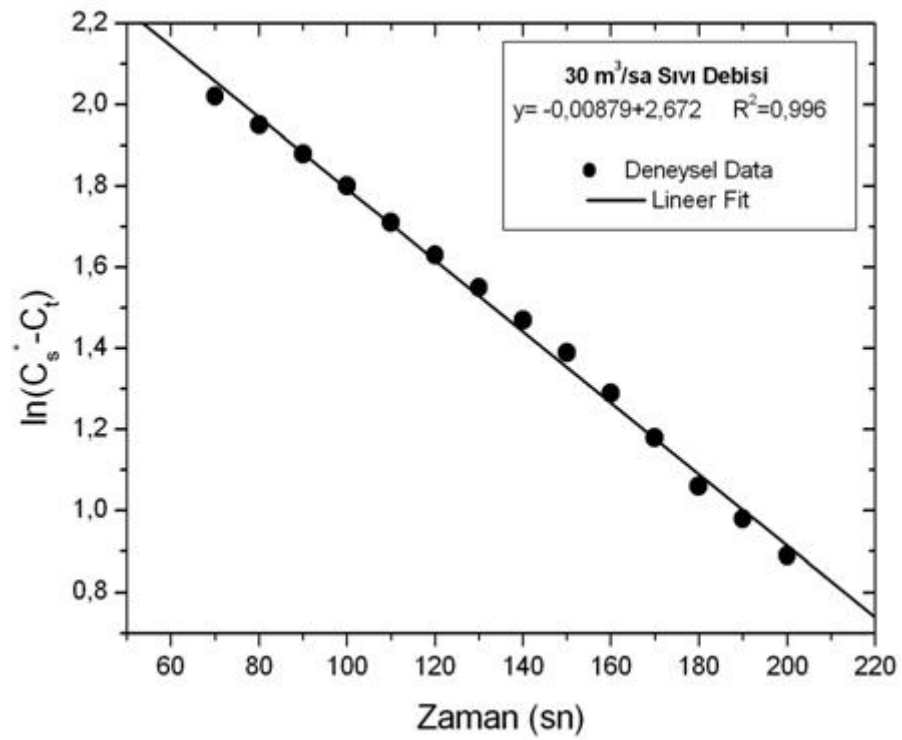




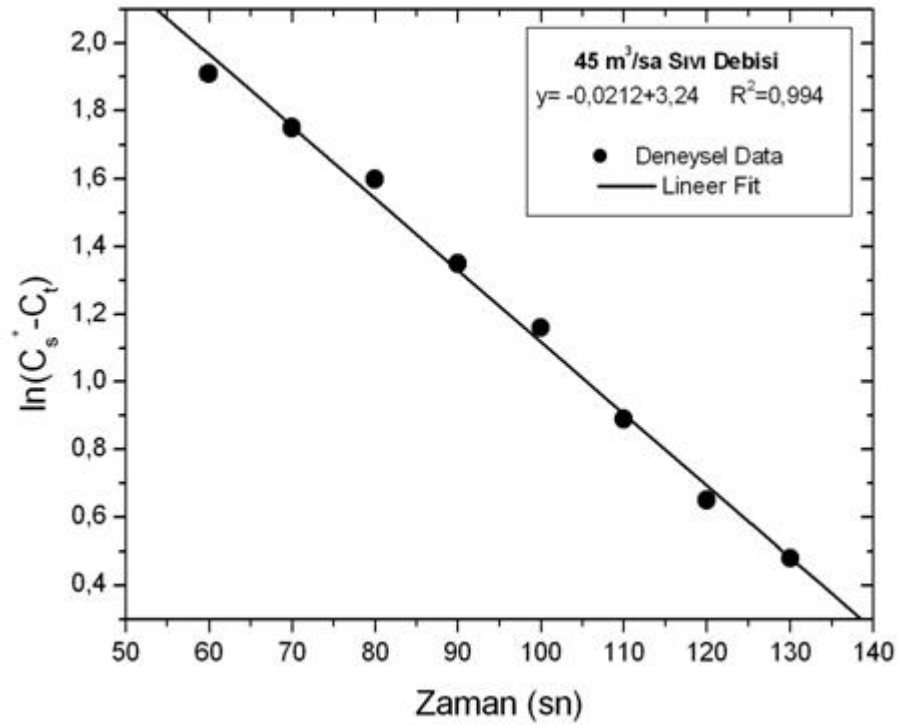
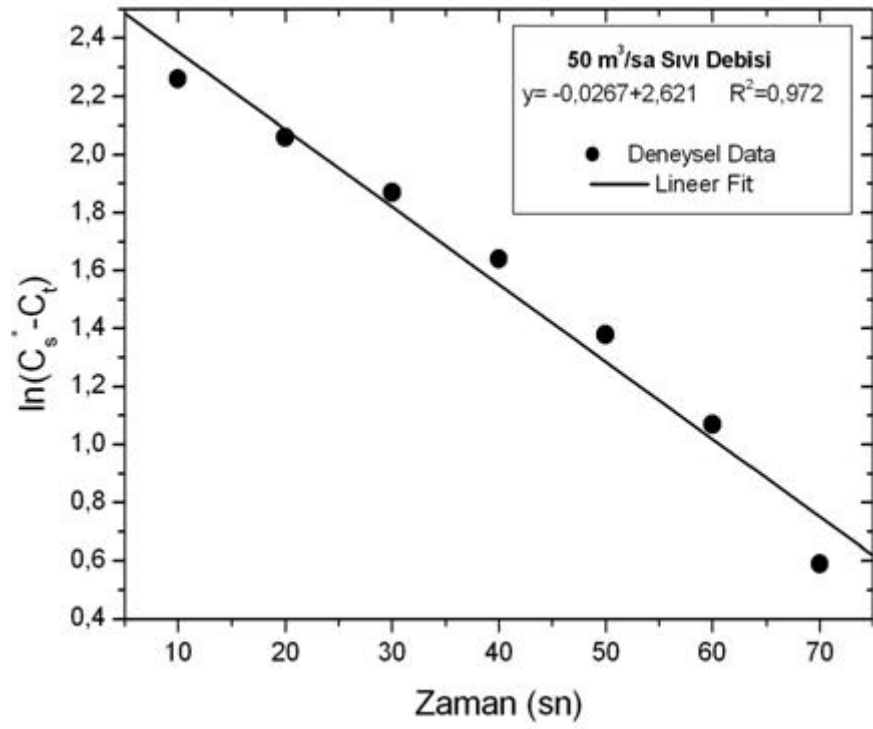
“Emme Tüpü-Blower Açık” Deneylerden Elde Edilen Grafikler

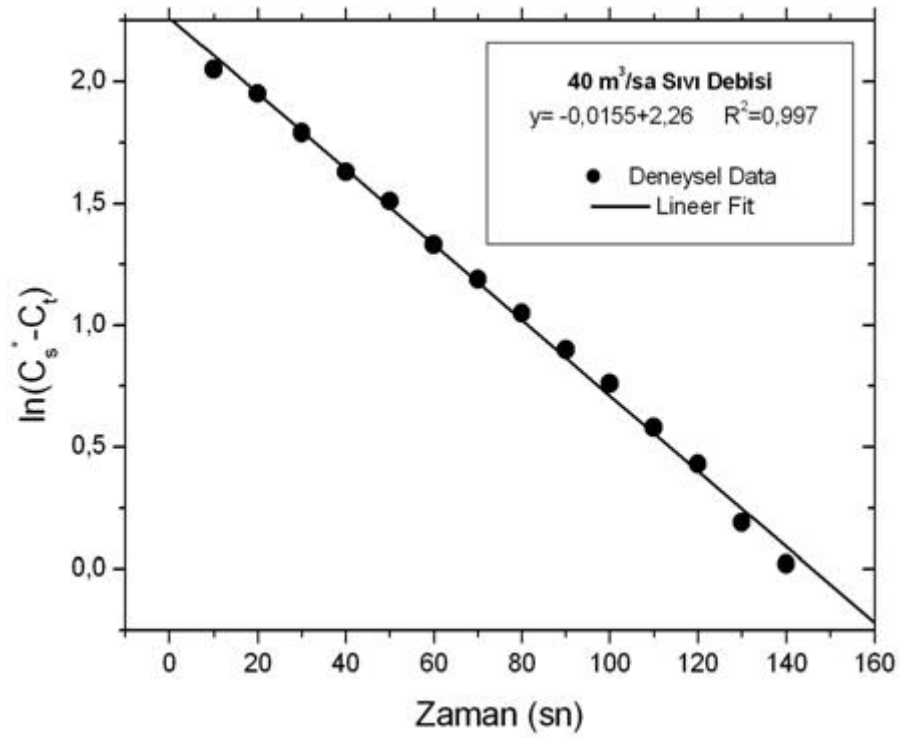




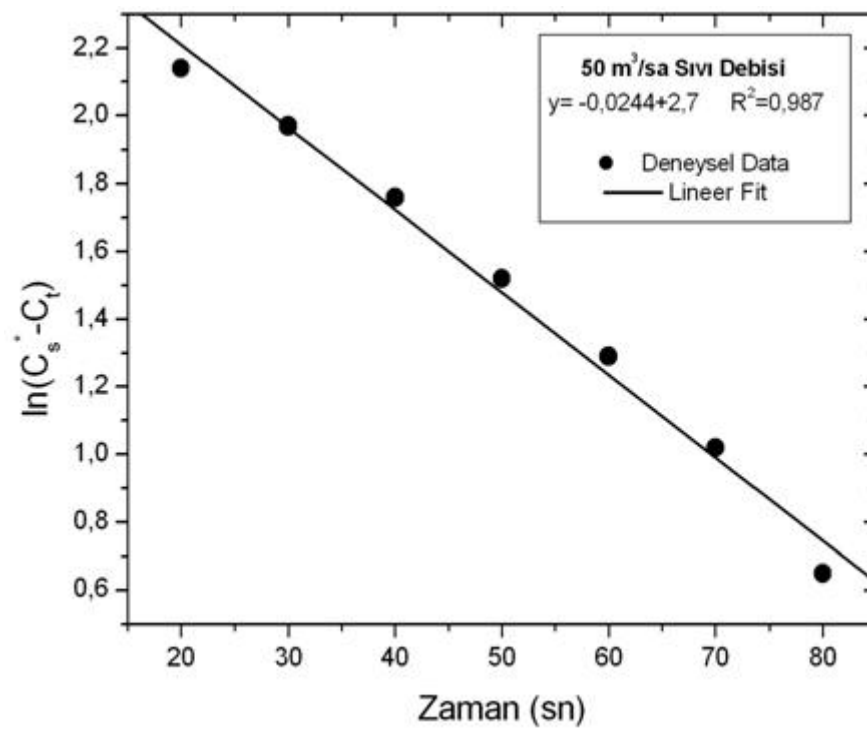


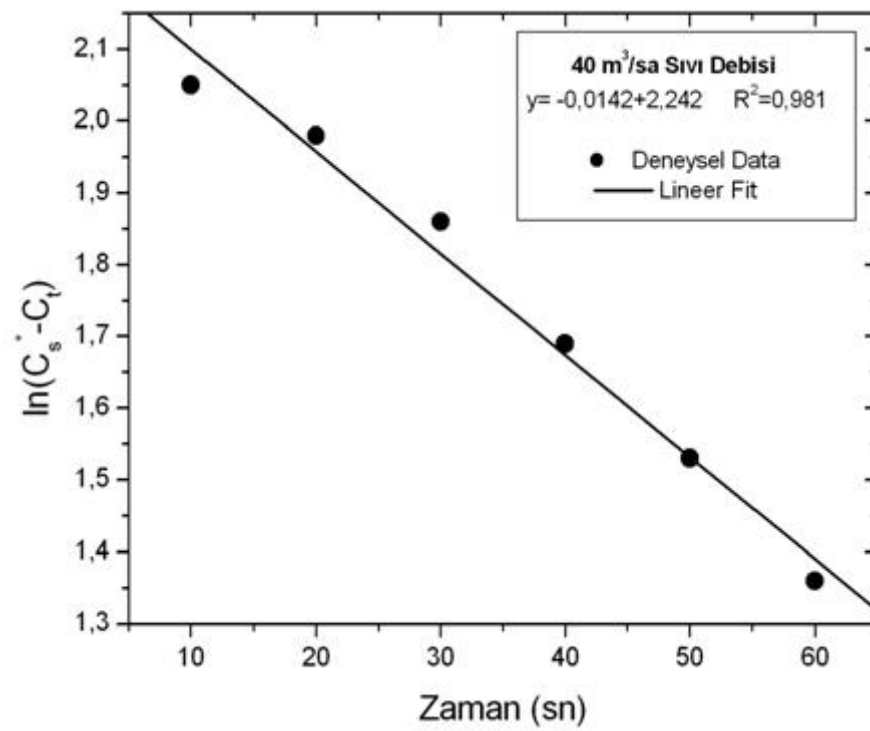
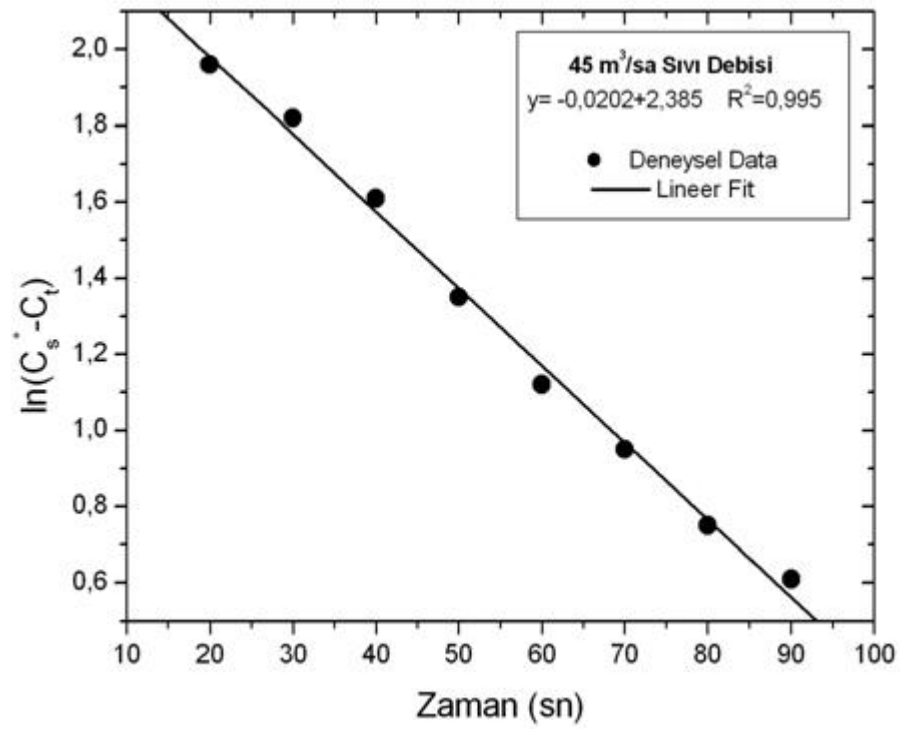
5 mg/l YAM Eklenen Deneylerden Elde Edilen Grafikler



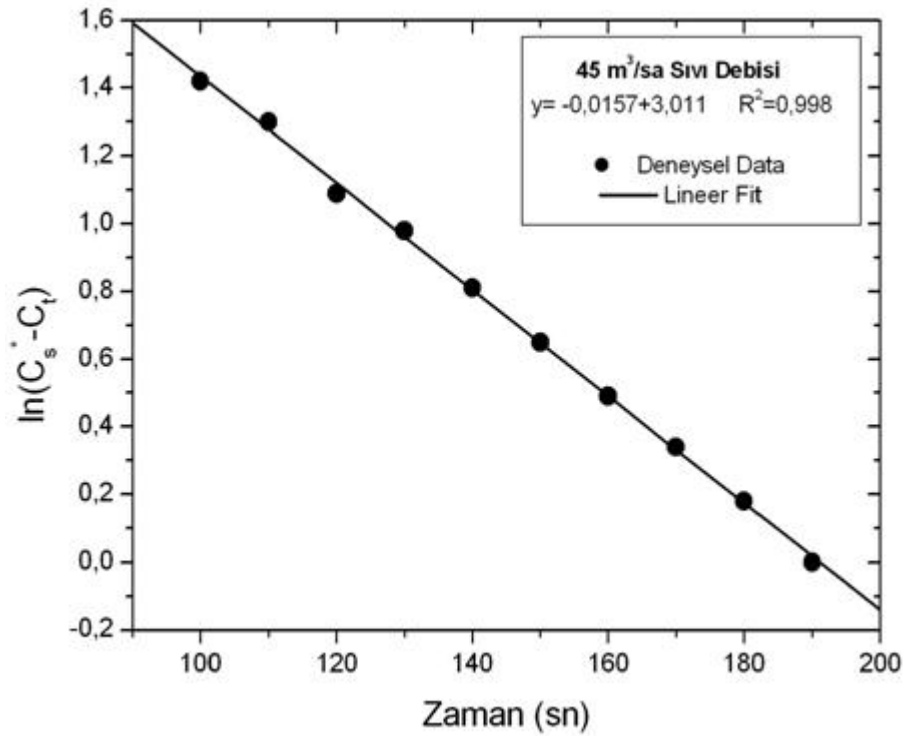
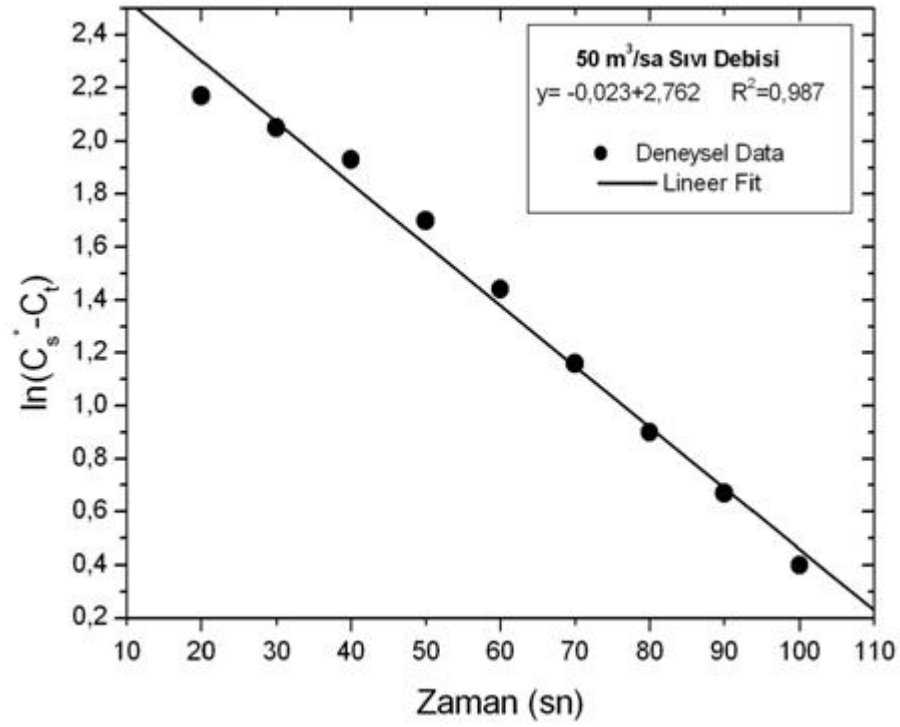


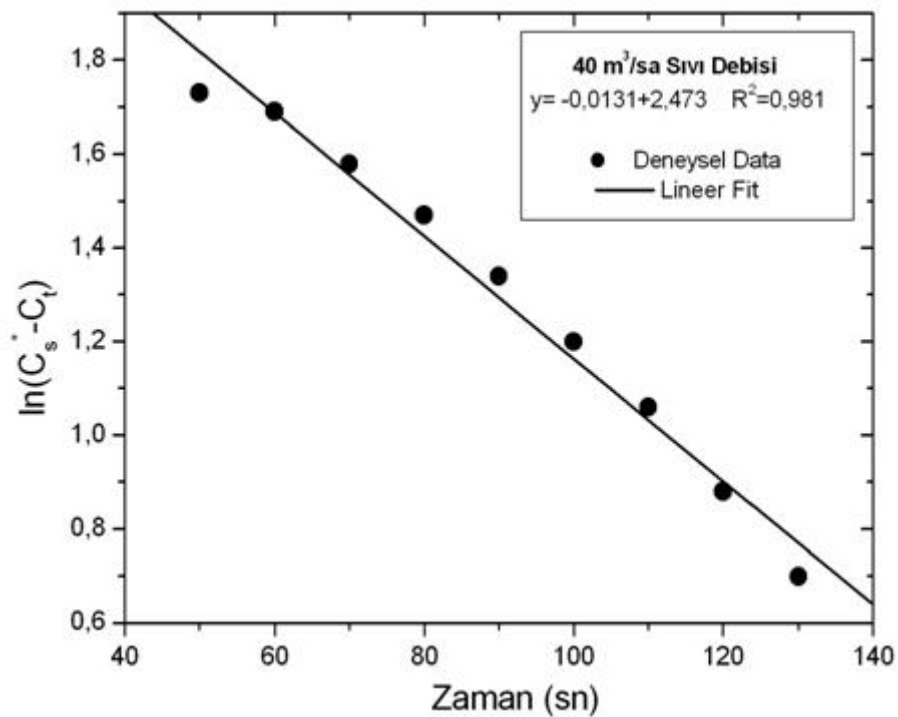
50 mg/l YAM Eklenen Deneylerden Elde Edilen Grafikler





100 mg/l YAM Eklenen Deneylerden Elde Edilen Grafikler





50 mg/l YAĞ Eklenen Deneylerden Elde Edilen Grafikler

