

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KESİKLİ BİR BİYOREAKTÖRDE AKTİF KARBONUN
OKSİJEN TRANSFER KATSAYISI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

154627

Kimya Müh. N. Gökçe BERKYÜREK

**FBE Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Kimya Mühendisliği Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Belma KIN ÖZBEK

Prof. Dr. Belma Kin Özbek
Prof. Dr. Ülker Beker
Prof. Dr. Kutlu Ülgen

Belma
Ülker
Kutlu

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1 GİRİŞ.....	1
2 BİYOREAKTÖRLERDE OKSİJEN TRANSFERİ	3
2.1 Kütle Transfer Modelleri.....	3
2.1.1 İki-Film modeli	4
2.1.2 Penetrasyon modeli.....	4
2.1.3 Yüzey Yenileme modeli	5
2.2 $k_L a$ Ölçüm Yöntemleri	5
2.2.1 Gazın uzaklaştırılması yöntemi	6
2.2.2 Sülfid oksidasyonu yöntemi	7
2.2.3 Dinamik yöntem	7
2.3 Literatürde Oksijen Transferi İle İlgili Önceki Çalışmalar	9
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	16
3.1 Deney Düzenegi	16
3.1.1 Karıştırmalı biyoreaktör	16
3.1.2 Kontrol modülleri	19
3.2 Kullanılan Materyaller	20
3.2.1 Tutuklayıcı malzeme	20
3.3 Deneyin Yapılışı.....	21
4. DENEY BULGULARI	23
4.1 Oksijen Transfer Katsayısı Üzerine Proses Değişkenlerinin Etkisi	23
4.1.1 Oksijen transfer katsayısı üzerine karıştırıcı hızının etkisi	24
4.1.1.1 Destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi	24
4.1.1.2 Gliserin+destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi	25
4.1.1.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi.....	27
4.1.1.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi.....	29
4.1.2 Oksijen transfer katsayısı üzerine hava debisinin etkisi.....	30
4.1.2.1 Destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi.....	30
4.1.2.2 Gliserin+destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi ..	32
4.1.2.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi.....	33

4.1.2.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi.....	34
4.1.3	Oksijen transfer katsayısı üzerine sıcaklığın etkisi.....	36
4.1.4	Oksijen transfer katsayısı üzerine viskozitenin etkisi.....	37
4.1.5	Oksijen transfer katsayısı üzerine tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının ve parçacık boyutunun etkisi.....	39
4.1.5.1	Tutuklayıcı malzeme+destile su için % yükleme miktarının ve parçacık boyutunun oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi	39
4.1.5.2	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için % yükleme miktarının ve parçacık boyutunun oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi	41
4.2	Oksijen Transfer Katsayısı İçin Deneysel Verilerden Elde Edilen Korelasyonlar	43
4.2.1	Güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi.....	43
4.2.1.1	Destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi.....	44
4.2.1.2	Gliserin+destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi	47
4.2.1.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi	48
4.2.1.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi	49
4.2.2	Reynolds sayısının (N_{Re}) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi	50
4.2.3	Yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi.....	52
4.2.3.1	Destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi.....	52
4.2.3.2	Gliserin+destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi	55
4.2.3.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi.....	56
4.2.3.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi	57
4.2.4	Sıcaklığın (T) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi.....	58
4.2.5	Viskozitenin (μ) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi	59
4.2.6	Tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi.....	60
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....		62
KAYNAKLAR.....		64
EKLER		67
Ek 1	k_La 'nın Hesaplanmasına Ait Bir Örnek.....	68
Ek 2	Karıştırıcı Hızları İçin Elde Edilen k_La Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	70
Ek 3	Hava Debileri İçin Elde Edilen k_La Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri.....	72
Ek 4	Sıcaklık Değerleri İçin Elde Edilen k_La Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	74
Ek 5	Viskozite Değerleri İçin Elde Edilen k_La Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	75

Ek 6	%Yükleme Miktarları İçin Elde Edilen k_{La} Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	76
Ek 7	Karıştırıcı Hızlarını Karşılık Hesaplanan Güç Sayıları	77
Ek 8	Güç Sayısı ve k_{La} Arasındaki İlişkiyi Belirleyen Korelasyonlara Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	78
Ek 9	Karıştırıcı Hızlarını Karşılık Hesaplanan Reynolds Sayıları	80
Ek 10	Hava Debilerine Karşılık Hesaplanan Yüzeysel Hava Hızları.....	81
Ek 11	% Yüklem Miktarı ve k_{La} Arasındaki İlişkiyi Belirleyen Korelasyonlara Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	82
	ÖZGEÇMİŞ.....	83



SİMGE LİSTESİ

a	Birim sıvı başına spesifik gaz sıvı ara yüzeyi (cm^{-1})
C^*	Doyma noktasındaki sıvı fazdaki oksijen konsantrasyonu (g.cm^{-3})
C_L	Herhangi bir zamanda sıvı fazdaki oksijen konsantrasyonu (g.cm^{-3})
$(C^* - C_L)$	Kütle transferine sebep olan itici güç (g.cm^{-3})
D	Karıştırıcı çapı (cm)
d	Reaktör çapı (cm)
D_L	Moleküler difüzyon hızı ($\text{cm}^2.\text{dak}^{-1}$)
F_s	Yüzeyin yenilenmesi ile ilgili ortalama oluşum hızı (dak^{-1})
g	Yerçekimi ivmesi (cm.dak^{-2})
k ve k'	Orantı sabitleri
k_L	Sıvı fazı kütle transfer katsayısı (cm.dak^{-1})
k_{La}	Hacimsel sıvı fazı kütle transfer katsayısı (dak^{-1})
N	Karıştırıcı hızı (rpm, karıştırıcının bir dakikadaki dairesel dönüş sayısı)
N^3D^2	Güç sayısı ($\text{cm}^2.\text{dak}^{-3}$)
P	Gaz sıvı dağılımında mekanik karıştırma gücü (W)
R	Birim alan başına absorpsiyon hızı ($\text{g.dak}^{-1}.\text{cm}^{-2}$)
T	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
t	Zaman (dak)
t_e	Temas zamanı (dak)
V_L	Sıvı hacmi (cm^3)
v	Hava debisi (l. dak^{-1})
v_s	Yüzeysel gaz (veya hava) hızı (cm.dak^{-1})
x_L	Film kalınlığı (cm)
α	Güç sayısının üssü
β	Yüzeysel gaz (veya hava) hızının üssü
ρ	Sıvı yoğunluğu (g.cm^{-3})
σ	Sıvı yüzey gerilimi (dyn.cm^{-1})
μ	Sıvı viskozitesi (cpoise)
μ_G	Gaz viskozitesi (cpoise)
C	Sabit
q	Mikroorganizmanın spesifik soluma hızı (g oksijen/ g biyomas.dak)
x	Biyomas konsantrasyonu (g.cm^{-3})

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Gazın uzaklaştırılması yöntemine ait verilerin grafiksel sunumu	6
Şekil 2.2 Dinamik yöntem ile q_x 'in belirlenmesi.....	8
Şekil 2.3 Dinamik yöntem ile $k_L a$ 'nın belirlenmesi	8
Şekil 3.1 Karıştırmalı biyoreaktör ve kontrol modüllerinin şematik diyagramı	18
Şekil 4.1 Destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi.....	25
Şekil 4.2 Gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi	27
Şekil 4.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi.....	28
Şekil 4.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi.....	30
Şekil 4.5 Destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi.....	31
Şekil 4.6 Gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi	33
Şekil 4.7 Tutuklayıcı malzeme+destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi.....	34
Şekil 4.8 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi.....	35
Şekil 4.9 Destile su için oksijen transfer katsayısının sıcaklık ile değişimi	37
Şekil 4.10 Gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının viskozite ile değişimi.....	38
Şekil 4.11 Tutuklayıcı malzeme+destile su için oksijen transfer katsayısının % yükleme miktarı ile değişimi.....	40
Şekil 4.12 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının % yükleme miktarı ile değişimi.....	43
Şekil 4.13 Destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi.....	45
Şekil 4.14 Gliserin+destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi	47
Şekil 4.15 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi.....	49
Şekil 4.16 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+gliserin (%50)+destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi.....	48
Şekil 4.17 Destile su için Reynolds sayısının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi.....	52
Şekil 4.18 Destile su için yüzeyel hava hızının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi.....	54
Şekil 4.19 Gliserin+destile su için yüzeyel hava hızının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi.....	55
Şekil 4.20 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+destile su için yüzeyel hava hızının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi	56
Şekil 4.21 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+gliserin (%50)+destile su için yüzeyel hava hızının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi.....	57
Şekil 4.22 Destile su için sıcaklığın fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi	58
Şekil 4.23 Gliserin+destile su için viskozitenin fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi	59
Şekil 4.24 Tutuklayıcı malzeme+destile su için tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi.....	60
Şekil 4.25 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi.....	61
Şekil Ek1.1 Destile su için zamana karşılık elde edilen çözünmüş oksijen konsantrasyon değerleri	69

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Biyoreaktör ile ilgili komponentler ve değerleri	17
Çizelge 4.1	Destile su için karıştırıcı hızına karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri	25
Çizelge 4.2	Gliserin+destile su için karıştırıcı hızına karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri	26
Çizelge 4.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için karıştırıcı hızına karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri.....	28
Çizelge 4.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için karıştırıcı hızına karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri	29
Çizelge 4.5	Destile su için hava debisine karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri	31
Çizelge 4.6	Gliserin+destile su için hava debisine karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri	32
Çizelge 4.7	Tutuklayıcı malzeme+destile su için hava debisine karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri.....	34
Çizelge 4.8	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için hava debisine karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri.....	35
Çizelge 4.9	Destile su için sıcaklığa karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri.....	36
Çizelge 4.10	Gliserin+destile su için viskoziteye karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri	38
Çizelge 4.11	Tutuklayıcı malzeme+destile su için % yükleme miktarına karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri.....	40
Çizelge 4.12	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için % yükleme miktarına karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri	42
Çizelge 4.13	Destile su için literatürden alınan ($N^3 D^2$) ve (P/V_L)'nin üsleri	46
Çizelge 4.14	Destile su için literatürden alınan (N_{Re})'nin üsleri	51
Çizelge 4.15	Destile su için literatürden alınan (V_S)'nin üsleri.....	53
Çizelge Ek1.1	Destile su için çözülmüş oksijen konsantrasyon değerleri.....	68
Çizelge Ek2.1	Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	70
Çizelge Ek2.2	Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri	70
Çizelge Ek2.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	71
Çizelge Ek2.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	71
Çizelge Ek3.1	Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	72
Çizelge Ek3.2	Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri	72
Çizelge Ek3.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	72
Çizelge Ek3.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	73
Çizelge Ek4.1	Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	74
Çizelge Ek5.1	Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri	75
Çizelge Ek6.1	Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	76
Çizelge Ek6.2	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	76
Çizelge Ek7.1	Karıştırıcı hızına karşılık hesaplanan güç sayıları	77
Çizelge Ek8.1	Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri	78
Çizelge Ek8.2	Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	78

Çizelge Ek8.3	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	79
Çizelge Ek9.1	Karıştırıcı hızına karşılık hesaplanan Reynolds sayıları.....	80
Çizelge Ek10.1	Hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları.....	81
Çizelge Ek11.1	Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	82
Çizelge Ek11.2	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	82



ÖNSÖZ

Bu tezin bana verilmesini sağlayan Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Sabriye Pişkin'e, çalışmamın her aşamasında beni yönlendirerek, yardımlarını ve desteğini benden esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Belma Kın Özbek'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca beni destekleyen arkadaşlarıma ve her zaman yanımda olacağını bildiğim aileme teşekkür ederim.



ÖZET

Bu çalışmada karıştırılmalı bir biyoreaktör içinde proses değişkenlerinin, oksijen transfer katsayısı, k_{La} , üzerine etkileri gazın uzaklaştırılması yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Proses değişkenleri; karıştırıcı hızı, hava debisi, sıcaklık, viskozite ve tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarı olarak seçilmiştir. Biyoreaktör içerisinde dört ayrı ortam kullanılmış olup, bunlar sırası ile destile su, gliserin+destile su, tutuklayıcı malzeme+destile su ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su'dur. Çözeltinin viskozitesi gliserin ilavesi ile arttırılmış olup, tutuklayıcı malzeme olarak ise aktif karbon parçacıkları kullanılmıştır.

300 rpm karıştırıcı hızı, 0.3 l.dak⁻¹ hava debisi, 37 °C sıcaklık ve pH 7 deney şartlarında destile su ile yapılan çalışmada elde edilen k_{La} değeri 2.361 dak⁻¹'dir. Aynı şartlar sabit tutulduğunda, gliserin (%50)+destile su için k_{La} değeri 1.305 dak⁻¹, tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı, 0-0.2 mm parçacık boyutu)+destile su için k_{La} değeri 1.115 dak⁻¹ ve tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı, 0-0.2 mm parçacık boyutu)+gliserin (%50)+destile su için k_{La} değeri 0.581 dak⁻¹ olarak bulunmuştur. Deney sonuçlarına göre, destile suya gliserin ve tutuklayıcı malzeme ilavesi ile elde edilen k_{La} değerleri, aynı proses şartlarında destile su için elde edilen k_{La} değerlerinden daha düşüktür. Destile su referans alındığında k_{La} değerlerindeki azalmaların; gliserin+destile su için %44.7, tutuklayıcı malzeme+destile su için %52.7, tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için %75.3 oranlarında olduğu görülmüştür.

Çalışmalardan elde edilen k_{La} değerleri, proses değişkenlerinin fonksiyonu olarak incelenmiş ve yapılan korelasyonlar sonucunda üssel değerler elde edilmiştir. Yukarıda bahsedilen dört ayrı ortam için elde edilen üssel değerler literatürde belirtilen üssel değerler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Oksijen transfer katsayısı, karıştırılmalı biyoreaktör, aktif karbon

ABSTRACT

In this study the effects of process variables on the volumetric liquid phase mass transfer coefficient, $k_{L,a}$, in a stirred bioreactor were investigated by the gassing-out method. The process variables chosen were stirrer speed, air flow rate, temperature, viscosity and loading ratio (%) of immobilised material. In the experiments, the solutions used were distilled water, glycerol+distilled water, distilled water with immobilised material and glycerol+distilled water with immobilised material. The viscosity of the solution was increased by the addition of glycerol and activated carbon particles were used as an immobilised material.

In this work, $k_{L,a}$ value was obtained as 2.361 min^{-1} in the distilled water by using the stirrer speed 300 rpm, air flow rate $0.3 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, temperature $37 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and pH 7. By using same process conditions, $k_{L,a}$ values obtained in glycerol (50%)+distilled water, distilled water with immobilised material (loading ratio 25%, particle dimension 0-0.2 mm) and glycerol (50%)+distilled water with immobilised material (loading 25%, particle dimension 0-0.2 mm) were 1.305 min^{-1} , 1.115 min^{-1} and 0.581 min^{-1} , respectively. The experimental results showed that the addition of glycerol and immobilised material into distilled water results in a reduction of the overall liquid phase mass transfer coefficient compared with the $k_{L,a}$ values obtained in distilled water (without addition). The reductions of the $k_{L,a}$ values were 44.7% for glycerol+distilled water, 52.7% for distilled water with immobilised material and 74.3% for glycerol+distilled water with immobilised material.

The $k_{L,a}$ values obtained from this study were used to establish correlations as a function of the process variables. The exponents representing the dependence of the $k_{L,a}$ on the process variables were compared with the literature values.

Keywords: Oxygen mass transfer coefficient, stirred bioreactor, activated carbon.

1.GİRİŞ

Fermentasyon yolu ile yeni organik ve biyokimyasal maddelerin üretimi çağımız teknolojisinin en güncel konuları arasında yer alır. Fermentasyon teknolojisinde ve buna bağlı olarak biyokimya mühendisliğinde kullanılan ana maddelerden biri kuşkusuz mikroorganizmalardır. Önemli endüstriyel mikrobiyal proseslerin çoğu aerobiktir. Bazı aerobik fermentasyonlarda, yeterli miktarlarda oksijen sağlanması çok büyük bir problem olabilir. Oksijen su da az çözünür. Oda sıcaklığında hava ile doyurma yalnızca 6 veya 7 mg/l oksijen sağlar. Bazı biyoteknolojik prosesler için, havalandırma durdurulduğunda birkaç saniye içinde çözülmüş oksijen tüketilebilir. Bu yüzden, çoğu endüstriyel aerobik mikrobiyal proseslerde oksijen limitasyonu söz konusudur. Bunun sonucu olarak biyoreaktör sistemlerinin dizaynında, oksijen transferi dolayısıyla oksijen transfer katsayısı, k_{La} , dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan biridir.

Karıştırmalı biyoreaktörler, yüksek kütle transfer katsayıları ve mükemmel karışma sağlarlar. Bu tip reaktörler, sıvının asılı katı maddeler içermesi durumunda veya akışkana oksijen en önemli faktör olduğu fermentasyon endüstrilerinde çok kullanışlıdır. Benzer prensipler, atık su proseslerine de uygulanabilir. Karıştırmalı reaktörlerde gaz fazdan sıvı faza oksijen transferi karıştırıcı bir sistem kullanılarak artırılır. Karıştırma, oksijen transferini dört yönüyle kolaylaştırır.

- Havayı akışkan ortam içine, küçük kabarcıklar halinde dağıtarak oksijen transferi için mevcut alanı artırır.
- Hava kabarcıklarının akışkandan uzaklaşmasını geciktirir (gazın sıvı içinde tutulmasını artırır).
- Hava kabarcıklarının birleşmesini engeller.
- Akışkan ortam içinde türbülans oluşturarak, gaz-sıvı ara yüzeyinde sıvı film kalınlığını azaltır.

Dolayısı ile, fermentasyonun etkili işletimi, gaz fazdan sıvı faza oksijen transferinin mükemmel olmasına bağlıdır (Wiseman, 1977).

Mekanik olarak karıştırılan biyoreaktörlerde, destile suda ve fermentasyon sıvılarında oksijen transferinin incelenmesi, birçok teorik ve deneysel çalışmaların konusu olmuştur. Bu

çalışmada da oksijen transferi destile su, gliserin+destile su, tutuklayıcı malzeme+destile su ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su çözeltilerinde incelenmiştir. Destile su, literatürde mevcut olan verilerle karşılaştırma yapabilme amacıyla çalışılmıştır. Gliserin ise, fermentasyon işlemi sırasında mikroorganizmaların üremesi sonucu çözeltinin viskozitesi arttığından, artan viskozitenin $k_{L,a}$ üzerindeki etkisini incelemek amacıyla kullanılmıştır. Tutuklayıcı malzemeler ise, enzimlerin veya mikroorganizmaların tutuklanmasında kullanılmaktadır. Biyoteknoloji alanındaki son gelişmeler, tutuklanmış hücre ve enzimlerin yoğun araştırmalara konu olduğunu göstermektedir. Bu çalışma için tutuklayıcı malzeme olarak aktif karbon parçacıkları kullanılmış olup, bu malzemenin $k_{L,a}$ üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Sonuç olarak, deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, kütle transfer katsayısının, $k_{L,a}$, sistem değişkenlerinin fonksiyonu olarak tanımlanmasında kullanılmıştır. Elde edilen $k_{L,a}$ değerleri daha önceki çalışmalardan elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Bölüm 2’de biyoreaktörlerde oksijen transferi hakkında geniş bilgi, kütle transfer modelleri, hacimsel kütle transfer katsayısı, $k_{L,a}$, ölçüm yöntemleri ve oksijen transferi ile ilgili önceki çalışmalar kısaca verilmiştir. Bölüm 3’de deneylerde kullanılan materyaller ve yöntem hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 4’de deneylerden elde edilen bulgular çizelge ve grafik halinde sunulmuştur. Bölüm 5’de ise sonuçlar ve öneriler tartışılmıştır.

2. BİYOREAKTÖRLERDE OKSİJEN TRANSFERİ

Kimya endüstrisindeki birçok proseste, gaz-sıvı kütle transferi yer alır. Bu proseslerden biri de aerobik fermentasyon sistemleridir. Aerobik mikroorganizmaların, büyümeleri ve ürün oluşturmaları için oksijene ihtiyaçları vardır. Biyoreaktörlere yeterli oksijen sağlanması, bu elementin suda az çözünmesi nedeniyle problem oluşturur. Bunun yanında, aerobik fermentasyonların verimliliği oksijen transfer hızıyla sınırlıdır. Oksijen tüketim hızı, kesikli prosesler sırasında değişebilir. Uygun çalışma şartlarını seçebilmek için, çözülmüş oksijen konsantrasyon değerini ve transfer katsayısını, $k_L a$ 'yı bilmek gerekir.

Karıştırmalı reaktörler, gaz-sıvı dağılımını sağlamada ve oksijeni mikroorganizmalara iletmede başarıyla uygulanır.

2.1 Kütle Transfer Modelleri

Karıştırmalı reaktörlerde, oksijen transferinin mekanizması aşağıdaki denklem ile açıklanır (Kıral, 1987; Aksak, 1990; Atkinson ve Mavituna, 1991).

$$\frac{d(V_L C_L)}{dt} = k_L a (C^* - C_L) V_L \quad (2.1)$$

Sabit hacim için, iyi karışmış sıvı faz kütle denkleği aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C^* - C_L) \quad (2.2)$$

k_L : Sıvı fazı kütle transfer katsayısı (cm.dak^{-1})

a : Birim sıvı hacmi başına spesifik gaz-sıvı ara yüzeyi (cm^{-1})

$k_L a$: Hacimsel sıvı fazı kütle transfer katsayısı (dak^{-1})

t : Zaman (dak)

$(C^* - C_L)$: Kütle transferine sebep olan itici güç

C^* ve C_L , sırasıyla doyma noktasında ve herhangi bir zamanda sıvı faz oksijen konsantrasyonlarıdır (g.cm^{-3}).

Gaz-sıvı ara yüzeyinin ve kütle transfer katsayısının bağımsız olarak belirlenmesi çok zor olduğundan, k_L ve a terimleri genellikle, $k_L a$ 'yı (dak^{-1}), hacimsel kütle transfer katsayısını oluşturacak şekilde birleştirir. Absorpsiyon hızının yalnızca sıvı tarafındaki dirence bağlı olduğu kabul edilir.

Gaz-sıvı kütle transferi üzerine birçok model belirlenmiştir.

2.1.1 İki-Film modeli

Whitman ve Lewis'in (1924) (Aksak, 1990, tarafından kaynak olarak verilmiştir) film teorisine göre, gaz moleküllerinin gaz fazdan sıvı faza kütle transferine olan direnci, iki durağan tabaka arasında (gaz ve sıvı) olur. Transfer, moleküler difüzyon ile gerçekleşir. Bu temelde, transfer katsayısı k_L , moleküler difüzyon hızı, D_L ($\text{cm}^2 \cdot \text{dak}^{-1}$), film kalınlığına, x_L (cm), oranı olarak tanımlanır.

$$k_L = \frac{D_L}{x_L} \quad (2.3)$$

O halde, birim alan hızıyla absorpsiyon hızı aşağıdaki ifadeyle verilebilir.

$$R = \frac{D_L}{x_L} (C^* - C_L) \quad (2.4)$$

R: Birim alan için absorpsiyon hızı ($\text{g} \cdot \text{dak}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Transfer denklemi de aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{1}{a} \frac{dC_L}{dt} = k_L (C^* - C_L) \quad (2.5)$$

2.1.2 Penetrasyon modeli

Higbie'nin (1935) (Aksak, 1990, tarafından kaynak olarak verilmiştir) penetrasyon teorisine göre, absorpsiyon moleküler difüzyona göre olur. Bu modelde yeni sıvı tabakaları, gaz ile sınırlı bir zaman süresi için temas ederler. Bu temas zamanı her tabaka için eşittir. k_L , hava kabarcıkları ve sıvı faz arasındaki temas zamanının kare köküyle orantılıdır.

$$k_L = 2 \sqrt{\frac{D_L}{\pi t_e}} \quad (2.6)$$

Böylece transfer denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{1}{a} \frac{dC_L}{dt} = 2 \sqrt{\frac{D_L}{\pi t_e}} (C^* - C_L) \quad (2.7)$$

t_e : Temas zamanı (dak)

2.1.3 Yüzey yenileme modeli

Danckwerts'in (1951) (Aksak, 1990, tarafından kaynak olarak verilmiştir) önerdiği bu modelde, bütün tabakalar için temas zamanı sabit alınır ve k_L , gaz kabarcıklarını çevreleyen sıvı filmin yer değiştirme süresinin kareköküyle orantılıdır.

$$\frac{1}{a} \frac{dC_L}{dt} = \sqrt{\frac{D_L}{\pi t_e}} (C^* - C_L) F_s e^{-F_s t_e} dt_e \quad (2.8)$$

F_s : Yüzeyin yenilenmesi ile ilgili ortalama oluşum hızı (dak^{-1})

Bu denklemin t_e 'ye göre integrasyonu, $0 < t_e < \infty$, aşağıdaki denklemi verir.

$$\frac{1}{a} \frac{dC_L}{dt} = \sqrt{D_L F_s} (C^* - C_L) \quad (2.9)$$

$$k_L = \sqrt{D_L F_s}$$

2.2 $k_L a$ Ölçüm Yöntemleri

Oksijenin hacimsel kütle transfer katsayısı, $k_L a$, deneysel olarak aşağıda özetlenen yöntemlerle belirlenebilir (Atkinson ve Mavituna, 1991).

- Gazın uzaklaştırılması
- Sülfid oksidasyonu yöntemi
- Dinamik yöntem

2.2.1 Gazın uzaklaştırılması yöntemi

Gazın uzaklaştırılması yönteminde havalandırma, fermentasyon sırasında kesilir ve çözülmüş oksijenin sıfıra düşmesi beklenir. Mikroorganizmalar öldürülür veya soluma inhibitör eklenerek durdurulur. Çözülmüş oksijen konsantrasyonu (C_L), havalandırma tekrar başlatıldıktan sonra zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülür. Mikroorganizma olmayan sistemlerde ise sıvı fazdaki oksijen içeriği azot gazı verilerek sıfıra düşürülür.

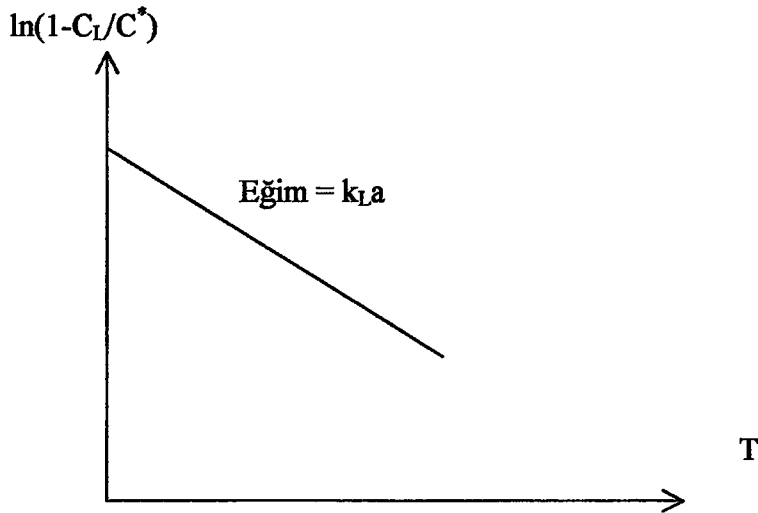
$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a \cdot t (C^* - C_L) \quad (2.10)$$

Bu eşitliğin $t=0$ zamanında, $C_L=0$ başlangıç şartını kullanarak integrali alınırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\ln\left(1 - \frac{C_L}{C^*}\right) = -k_L a \cdot t \quad (2.11)$$

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, $\ln(1-C_L/C^*)$ ve t arasında çizilen grafiğin eğimi $k_L a$ 'ya eşittir.

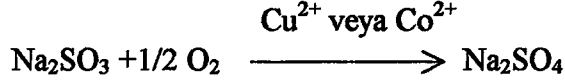
Bu yöntem, çözülmüş oksijen konsantrasyonlarının ölçülmesinde kullanılan probun hızlı cevap vermesini gerektirir.



Şekil 2.1 Gazın uzaklaştırılması yöntemine ait verilerin grafiksel sunumu

2.2.2 Sülfite oksidasyonu yöntemi

Bu yöntem, sodyum sülfite katalizör eşliğinde sodyum sülfate yükseltgenmesi esasına dayanır.



Oksijenin çözünmesi reaksiyona göre çok yavaş olduğu için, sodyum sülfite sıvı ortama girer girmez oksijen tükenir. Bu yüzden C_L sifira eşitlenir.

$$k_{La} = \frac{[\text{O}_2 \text{ transfer hızı}]}{C^* - C_L} = \frac{1}{2} \frac{d[\text{SO}_3^{2-}]}{dt} \frac{1}{C^*} \quad (2.12)$$

SO_3^{2-} oksidasyon hızı, düzenli zaman aralıklarında sıvı örnekleri alınarak ölçülür. Analiz, reaksiyona girmeyen SO_3^{2-} 'nin iyot ile titrasyonu yapılarak belirlenir.

Sülfite oksidasyon yöntemi; ekipmanın tipine, katalizörün yapısına, çözeltinin pH'ına ve sülfite çözeltisinin saflığına bağlıdır. Bu yöntem diğer tekniklerine göre daha yüksek k_{La} değerleri verir.

2.2.3 Dinamik yöntem

Bu yöntemde Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, sisteme sağlanan hava kesilir ve çözünmüş oksijendeki azalma kaydedilir. Çözünmüş oksijen konsantrasyonu kritik değerin altına düşmeden önce tekrar havalandırma başlatılır ve artan çözünmüş oksijen zamanın fonksiyonu olarak kaydedilir. Değişen çözünmüş oksijen konsantrasyonu aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a(C^* - C_L) - q \cdot x \quad (2.13)$$

q: Mikroorganizmanın spesifik solunum hızı (g oksijen/g biyomas.dak)

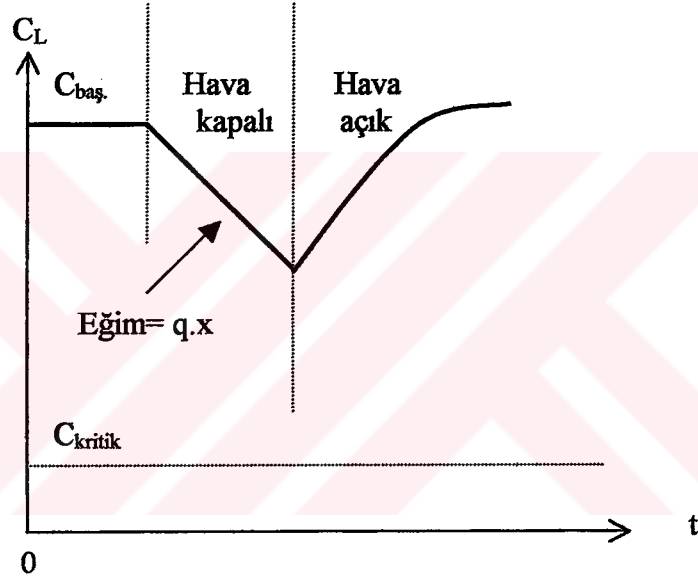
x: Biyomas konsantrasyonu ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

Eşitlik (2.13) yeniden düzenlenirse;

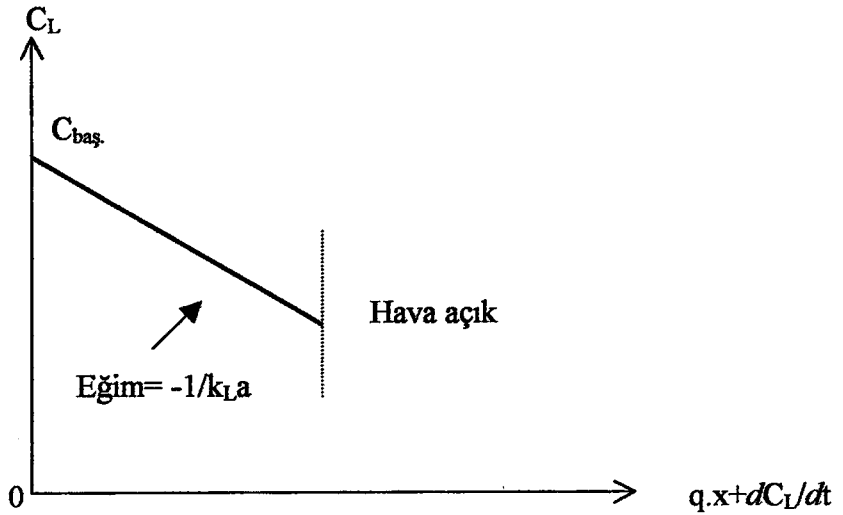
$$C_L = -\frac{1}{k_L a} \left(q \cdot x + \frac{dC_L}{dt} \right) + C^* \quad (2.14)$$

elde edilir.

Şekil 2.13'de verilen C_L ve $(q \cdot x + dC/dt)$ arasında çizilen grafikten $k_L a$ değeri bulunur.



Şekil 2.2 Dinamik yöntem ile $q \cdot x$ 'in belirlenmesi



Şekil 2.3 Dinamik yöntem ile $k_L a$ 'nın belirlenmesi

$k_{L,a}$ 'nın bu yöntemle belirlenmesi üç kabule dayanır.

- Sıvı faz mükemmel karışır.
- Kütle transferi için itici güç reaktörün her yerinde aynıdır.
- Oksijen elektrodunun çözülmüş oksijen konsantrasyonundaki değişime cevabı yeterince hızlıdır. Çoğu araştırmacılar elektrodun cevap zamanını dikkate almamışlardır. Bu yöntem özellikle şiddetli karıştırılmalı reaktörlere uygulanır.

Bu yöntemin dezavantajı ise, deneyde hava kullanıyorsa, oksijenle birlikte nitrojen de sisteme girebilir ve bu da oksijen transfer oranı düşürür (Gogate vd., 1999).

2.3 Literatürde Oksijen Transferi ile İlgili Önceki Çalışmalar

Gaz fazdan sıvı faza kütle transferini incelemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda farklı reaktör tipleri örneğin, gaz kabarcıklı kolon reaktörler, dolgulu reaktörler, karıştırılmalı reaktörler kullanılmıştır. Gaz kabarcıklı kolon reaktörler ve karıştırılmalı reaktörler çok düşük gaz hızlarında kullanılabilirler ve sıvıyı iyi karıştırabildikleri için idealdir.

Mekanik olarak karıştırılan reaktörlerde hacimsel sıvı fazı kütle transfer katsayısı, $k_{L,a}$, birçok parametrenin fonksiyonudur. Örneğin, karıştırıcının hızı, tipi ve çapı; reaktörün tabanından karıştırıcının yüksekliği; iyonların varlığı; sıvının viskozitesi; reaktörün geometrisi; katı maddelerin varlığı ve gaz akış hızı. 1970'lerden önce, araştırmacıların çoğu hava-su sistemleri için yapılmıştır. Eckenfelder (1959), Yoshida vd. (1960), Yoshida ve Akita (1965), hava-su sistemlerinde kütle transfer katsayısını inceleyen araştırmacılardan bazılarıdır.

Gaz sıvı kütle transferi, aerobik fermentasyon sistemlerinde genelde hız belirleyici adımdır. Bu sebeple, karıştırılmalı bir reaktörde, gaz sıvı dağılımı için gazın absorpsiyon hızının önceden bilinmesi gerekir. Yapılan tahminler genellikle kütle transfer katsayısının, $k_{L,a}$, birim hacmi için mekanik karıştırma gücü (P/V_L) ve yüzeysel gaz hızı (v_s) ile korelasyonlarına dayanır. Literatürde, iki tip kütle transfer korelasyonu vardır. Birincisi ve en çok kullanılanı, (P/V_L) ve (v_s) ile yapılan korelasyondur (Wiseman, 1977; Winkler, 1981; Kırıl, 1987; Aksak, 1990).

$$k_L a = C \left(\frac{P}{V_L} \right)^\alpha (v_s)^\beta \quad (2.15)$$

P: Gaz-sıvı dağılımında mekanik karıştırma (W)

V_L : Sıvı hacmi (m^3)

v_s : Yüzeysel gaz hızı ($m.s^{-1}$)

C: sabit

α ve β : üsler

$(P/V_L)^\alpha$ terimi yerine $N^{\alpha_1} D^{\alpha_2}$ terimi yazılırsa aşağıdaki denklem oluşturulur.

$$k_L a = C N^{\alpha_1} D^{\alpha_2} (v_s)^\beta$$

D: Karıştırıcı çapı (m)

N: Karıştırıcı hızı (s^{-1})

Kullanılan diğer korelasyon, boyut analizi yöntemiyle belirlenir. Bu yöntemde, gaz sıvı sistemini etkilediğine inanılan değişkenler seçilir. Boyutsuz gruplar oluşturacak şekilde düzenlenir. Bu tip korelasyon ilk olarak Sideman vd. (1966) tarafından kullanılmıştır. Mekanik olarak karıştırılan reaktörlerde, gaz-sıvı dağılımları için aşağıdaki korelasyon önemlidir.

$$\frac{k_L a \cdot D^2}{D_L} = f \left(\frac{D^2 N \rho}{\mu}, \frac{\mu}{\rho D_L}, \frac{\mu v_s}{\sigma}, \frac{\mu_G}{\mu} \right) \quad (2.17)$$

D: Karıştırıcı çapı (cm)

D_L : Moleküler difüzyon hızı ($cm^2.s^{-1}$)

N: Karıştırıcı hızı (s^{-1})

μ : Sıvı viskozitesi (poise)

μ_G : Gaz viskozitesi (poise)

σ : Sıvı yüzey gerilimi ($dyn.cm^{-1}$)

ρ : Sıvı yoğunluğu ($g.cm^{-3}$)

v_s : Yüzeysel gaz hızı ($cm.s^{-1}$)

Cooper vd. (1944), hava kabarcıklarından suya oksijen transferini çalışın ilk araştırmacılarıdır. Deneşlerinde, düş çarklı ve kanatlı disk karıştırıcılar ile silindirik bir tank kullanmışlardır. Oksijen transferini, sülfite oksidasyon yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Kanatlı disk karıştırıcı için aşağıdaki korelasyonları bulmuşlardır.

$$k_L a = k P^{0.95} \quad (2.18)$$

$$k_L a = k' v_s^{0.67} \quad (2.19)$$

k ve k' : orantı sabitleri

Hyman ve Van Den Bogaerde (1960) kütle transfer katsayısının, $k_L a$, karıştırıcı hızına (N), reaktör çapına (d) ve yüzeşsel gaz hızına (v_s) bağılı olarak değişimini aşağıdaki denklem ile ifade etmişlerdir.

$$k_L a = C(N.d)^{2.18} (v_s)^{0.17} \left(\frac{2}{d}\right)^{-0.50} \quad (2.20)$$

Bu çalışmada suda oksijen absorpsiyonu; 2, 4 ve 6 kanatlı türbin ve disk karıştırıcı silindirik bir reaktörde sülfite yöntemi ile belirlenmiştir. Ayrıca iki farklı tipte hava püskürtücü kullanılmış ve $k_L a$ 'da herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir.

Sideman vd. (1966) mekanik karıştırmalı bir reaktörde hava-su sistemini incelemişlerdir. Çözünmüş oksijen konsantrasyonunu, sülfite metoduna göre daha doğru sonuçlar veren bir oksijen analiz aleti ile ölçmüşlerdir. $k_L a$ korelasyonlarında, güç faktörünü ($N^3 D^2$), Reynolds sayısını (N_{Re}), yüzeşsel gaz hızını (v_s) ve sıcaklığı (T) esas almışlardır.

$$k_L a = C(N^3 D^2)^{0.37} (v_s)^{0.67} T^{0.34} \quad (2.21)$$

$$k_L a = (N_{Re})^{1.12} f(v_s, T) \quad (2.22)$$

Van't Riet (1979), suda ve iyonik çözeltilerde (P/V_L) ve (v_s)'ye bağılı olarak, kütle transferinin korelasyonunu elde etmişlerdir. İyonik çözeltilerin $k_L a$ değerlerinin (P/V_L)'ye suya göre daha

fazla bağımlı olduğunu bulmuştur. İyon konsantrasyonunun artmasıyla $k_{L,a}$ 'nın arttığını gözlemlemiştir. Saf su ve iyonik çözeltiler için elde ettiği $k_{L,a}$ korelasyonlarını iki denklem halinde vermiştir.

Saf su için,

$$k_{L,a} = 2.6 * 10^{-2} \left(\frac{P}{V_L} \right)^{0.4} (v_s)^{0.5} \quad (2.23)$$

İyonik çözeltiler için,

$$k_{L,a} = 2 * 10^{-3} \left(\frac{P}{V_L} \right)^{0.7} (v_s)^{0.2} \quad (2.24)$$

Mehta ve Sharma (1971), karıştırmalı bir reaktörde su için karıştırıcı hızının hacimsel sıvı fazı kütle transfer katsayısı üzerine etkisini incelemiştir. Düşük karıştırıcı hızlarında, $k_{L,a}$ değerinin karıştırıcı hızı ile artışının çok az olduğunu görmüşlerdir. Mehta ve Sharma'ya göre kritik bir karıştırıcı hızı vardır (200 rpm) ve bu hız aşıldığında $k_{L,a}$, karıştırıcı hızının artması ile lineer olarak artar.

Bewtra vd. (1970), bir havalandırma tankında su için, 10-30°C sıcaklık aralığında 2.5°C'lik artımlarla sıcaklığın oksijen transferi üzerine etkisini incelemiştir. Sıcaklığın artmasıyla çözülmüş oksijenin doyunurluk konsantrasyonu azaldığı için $k_{L,a}$ değerinin aynı oranda arttığını bulmuşlardır. $k_{L,a}$ 'nın sıcaklıkla değişimini aşağıdaki denklem ile vermişlerdir.

$$(k_{L,a})_T = (k_{L,a})_{20} (1.0192)^{T-20} \quad (2.25)$$

Winkler ve Thomas'a (1978) göre, sıcaklığın her bir °C artmasıyla, $k_{L,a}$ %2.48 oranında artmaktadır.

Yogi ve Yoshida (1971), karıştırmalı reaktörlerde newtonyen ve newtonyen olmayan akışkanlarda $k_{L,a}$ için korelasyon elde etmişlerdir. Newtonyen akışkan olarak gliserin ve akdari (buğdaygiller familyasından bir bitki türü, orijinal adı; Panicum miliaceum) peltesi çözeltilerini, newtonyen olmayan akışkan olarak ise sodyum poliakrilat ve sodyum karboksil

metil selüloz kullanmışlardır. Kullanılan bu polimer çözeltilerinin her ikisi de psödoplastik akışkanlardır. Deneysel verilerden, newtonyen akışkanlar için boyut analizi yöntemini kullanarak genel bir korelasyon elde etmişlerdir.

$$\frac{k_L a \cdot d^2}{D_L} = 0.060 \left(\frac{d^2 N \rho}{\mu} \right)^{1.5} \left(\frac{d N^2}{g} \right)^{0.19} \left(\frac{\mu}{\rho D_L} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu v_s}{\sigma} \right)^{0.6} \left(\frac{N d}{v_s} \right)^{0.32} \quad (2.26)$$

$$k_L a \propto N^{2.2} v_s^{0.28} \quad (2.27)$$

$$k_L a \propto (N^3 D^2)^{0.74} \quad (2.28)$$

Yagi ve Yoshida newtonyen olmayan akışkanlar için (2.26) denkleminde newtonyen viskozite yerine görünür viskozite kullanmışlardır. Newtonyen olmayan akışkanlarda, karıştırıcı hızı ve $k_L a$ grafiklerinde eğimlerin daha küçük olduğunu görmüşlerdir. Yani sodyum poliakrilat ve sodyum karboksil metil selüloz konsantrasyonlarının artmasıyla, karıştırma daha az etkili olmuştur. Bu çalışmada araştırmacılar newtonyen olmayan akışkanlarda, karıştırıcının çevresinde gaz kabarcıklarının çok daha az parçalandığını görmüşlerdir.

Andrew (1982), viskozitenin etkisini incelemek amacıyla gliserin ve su karışımlarını kullanmıştır. Viskozitedeki artışla $k_L a$ 'da bir azalma gözlemlenmiştir.

Pandit ve Joshi (1983), değişik konsantrasyonlarda gliserin çözeltileri kullanarak viskozitenin etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarına göre, sıvının viskozitenin artmasıyla transfer katsayısı azalmıştır. Düşük yüzeysel gaz hızlarında viskozitenin etkisi daha fazla önemli olmuştur. 100 cpoise'den daha büyük viskoziteler için, gaz fazı dağılımı çok zayıf olmuştur. Pandit ve Joshi, gaz fazın ağır davranışı yüzünden, gliserin çözeltileri için elde ettikleri verilerin korelasyonunu yapamamışlardır.

Albal vd. (1983), viskozitenin artmasıyla newtonyen ve newtonyen olmayan akışkanların her ikisinde $k_L a$ değerlerinin azaldığını bulmuşlardır. Aynı zamanda newtonyen olmayan akışkanlar için $k_L a$ değerlerinin, benzer şartlar altında gliserin çözeltilerinden daha az olduğunu görmüşlerdir.

Joosten vd. (1977), karıştırmalı bir reaktörde katı maddelerin gaz sıvı kütle transferine etkisini farklı boyutlarda cam parçacıkları, polipropilen kullanarak incelemişlerdir. Katı maddeler küçük bir oranda ilave edildiğinde $k_{L,a}$ değerinde bir artış saptamışlardır. Daha fazla katı madde ilave edildiğinde $k_{L,a}$ değerinin önce sabit kaldığını, daha sonra maddenin tipine ve parçacık boyutuna bağlı olarak azaldığını görmüşlerdir. Joosten'a göre, viskozitenin artmasıyla en az yoğunluktaki katı, $k_{L,a}$ 'da en hızlı azalmaya sebep olmuştur.

Miyachi vd. (1981), karıştırmalı bir reaktörde suda %20'den daha az konsantrasyonlarda CaCO_3 kullanarak, katı maddenin kütle transfer katsayısına etkisini araştırmışlardır. Madde konsantrasyonu arttıkça $k_{L,a}$ 'nın çok etkilenmemekle birlikte azaldığını görmüşlerdir. Verilerinden elde ettikleri diğer bir sonuç ise, aynı madde konsantrasyonunda, büyük parçacıklar ile elde edilen $k_{L,a}$ değerlerinin küçük parçacıklara oranla daha yüksek olmasıdır. Bunu, büyük parçacıklar için sıvı filmdeki türbülansın küçük parçacıklara göre daha şiddetli olması ile açıklamışlardır.

Iwanaka vd. (1985), mekanik karıştırmalı bir reaktörde suda cam parçacıkları ile çalışmışlar ve $k_{L,a}$ da önemli bir azalma olduğunu bulmuşlardır.

Verlaan ve Tramper (1987), polistiren ve kalsiyum aljinat taneciklerinin oksijen transferine olan etkisinin araştırmışlardır. Çalışabildikleri maksimum madde yükleme oranı %40'dır. Katı fazın, hacimsel oksijen transfer katsayısı üzerine etkisini %20 yüklemeye kadar incelemişlerdir. Bu durumda $k_{L,a}$ değerinin, katı faz içermeyen değerle karşılaştırıldığında %40 azaldığı sonucuna varmışlardır.

Frijlink (1987) (Verlaan ve Tramper, 1987, tarafından kaynak verilmiştir), yine kalsiyum aljinat tanecikleriyle karıştırmalı bir reaktörde oksijen transferini incelemiştir. Oksijen transfer katsayısının yükleme ile orantılı olarak azaldığını bulmuştur. %37 yükleme için, hava debisine bağlı olarak %55 - %59'a varan bir azalma olduğunu görmüştür.

Schumpe vd. (1987), suda aktif kömür ve kiselgurun oksijen transfer katsayısı üzerine etkisini incelediklerinde, aktif kömür için artan madde konsantrasyonuyla $k_{L,a}$ 'da monoton bir azalma olduğunu görmüşlerdir. Kiselgur için ise, düşük oranlardaki yüklemelerde $k_{L,a}$ 'da bir artma, belli bir konsantrasyondan sonra bir azalma olduğunu bulmuşlardır.

titanyum oksit ve çinko oksittir. Çalışılan konsantrasyon aralığında deniz kumunun k_{La} üzerine etkisi az iken, titanyum oksit ve çinko oksit için düşük hacim oranlarında bile k_{La} 'da büyük bir azalma olmuştur. Demir oksit ve kiselgur için ise, k_{La} değeri belli bir hacim oranından sonra önemli derecede azalmıştır.

YongHong vd. (2001), karıştırılmalı bir biyoreaktörde oksijen kütle transfer oranını geliştirmek için etanol kullanmışlardır. Karıştırıcı hızının ve etanol konsantrasyonunun etkisi incelenerek, havadan sıvı faza geçen oksijen transferinde ve ortalama kabarcık boyutunun belirlenmiş ve modellenmiştir. Sonuçlara göre, saf su için oksijen transfer oranı, karıştırıcı hızının ve etanol konsantrasyonunun artmasıyla yükselmiş, ortalama kabarcık boyutu ise küçülmüştür.

Vogelaar vd. (2000), sıcaklığın artmasıyla (20-55°C) musluk ve proses sularında oksijen transfer oranını incelemişlerdir. Oksijen transfer oranının, musluk suyunda belirli bir sıcaklık dağılımından sonra sabit, proses suyunda ise hafif bir yükselme gösterdiğini görmüşlerdir.

Garcia-Ochoa ve Gomez (1998), tarafından yapılan çalışmada karıştırılmalı bir tank reaktörde newtonyen ve newtonyen olmayan sıvıların 20 litre çalışma hacmindeki oksijen transfer katsayıları incelenmiştir. Hacimsel kütle transfer katsayısı xanthan reçineleri çözeltileri için birçok aralık ve uygulama koşullarında dinamik teknikle ölçülmüştür. k_{La} değerlerinin viskoziteyle çarpıcı bir şekilde azaldığı görülmüştür.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deney Düzenegi

Bu çalışmada kullanılan deney düzenegi; karıştırılmalı bir biyoreaktör ve bu biyoreaktöre bağlı kontrol modüllerinden (oksijen kontrol modülü, karıştırıcı hızı kontrol modülü, sıcaklık kontrol modülü ve pH kontrol modülü) oluşmaktadır. Düzenegi oluşturan biyoreaktör, karıştırıcı hızı kontrol modülü, sıcaklık kontrol modülü ve pH kontrol modülü Sanyo Gallenkamp firması tarafından (Model no: FER-195-010), oksijen kontrol modülü ise Lovibond firması tarafından üretilmiştir. Reaktör ile azot tüpü, oksijen kontrol modülü ve akış ölçerler arasındaki bağlantılar ile asit-alkali çözeltileri ilavesi için modüller üzerindeki pompalara olan bağlantılarda silikon borular kullanılmıştır. Kullanılan karıştırılmalı biyoreaktör ve kontrol modülleri Şekil 3.1’de şematik diyagram olarak verilmiştir.

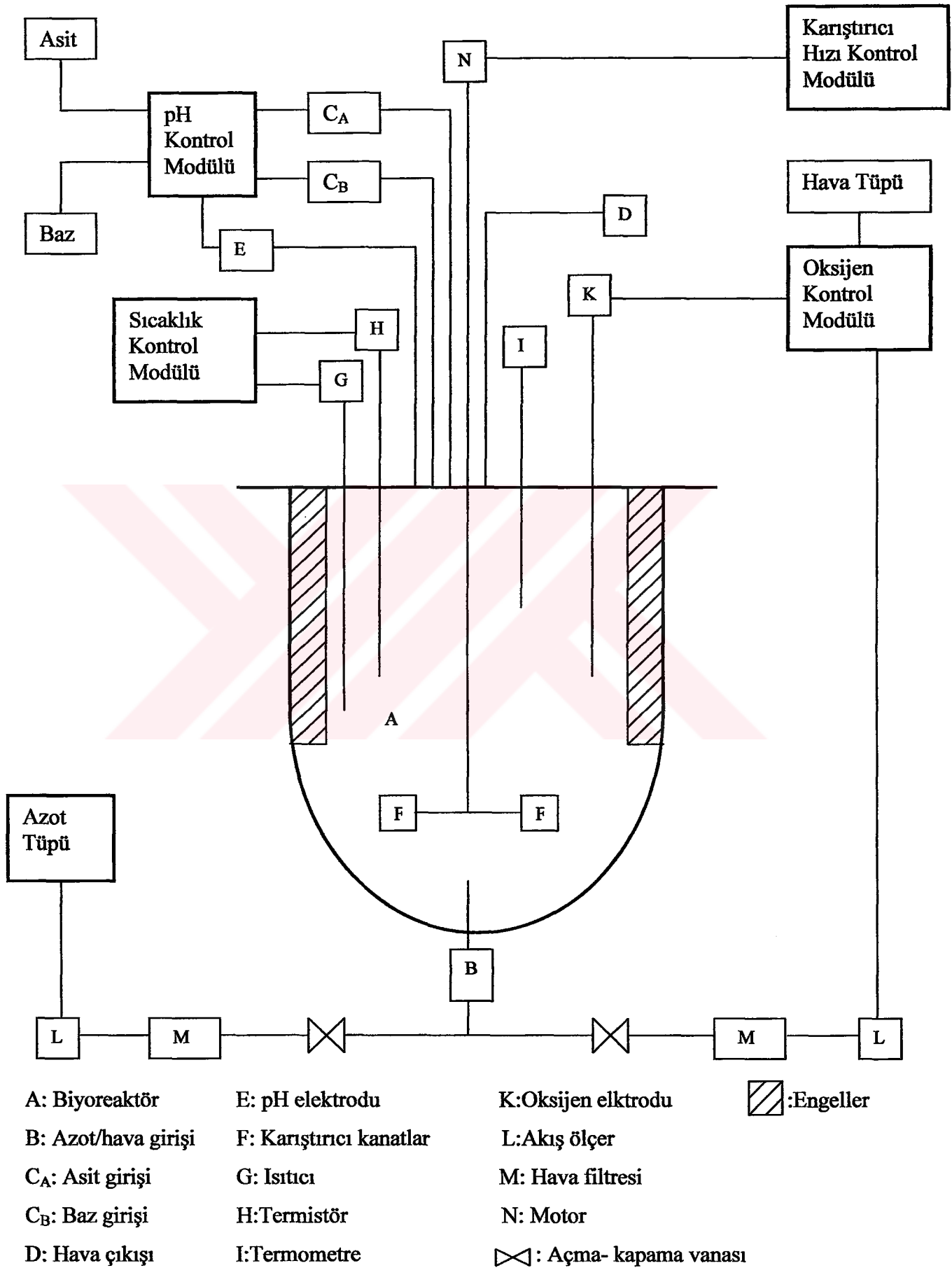
3.1.1 Karıştırılmalı biyoreaktör

Kullanılan biyoreaktör, 11cm. iç çapında ve 17 cm. yüksekliğinde, yuvarlak tabanlı, pyrex cam bir kaptan ibarettir. Çözelti ile temas halinde bulunan bütün komponentler paslanmaz çelik, cam veya silikon malzemelerden oluşmuştur. Kapak üzerine çeşitli büyüklükte toplam 15 adet giriş ve çıkışlar (oksijen elektrodu, pH elektrodu, ısıtıcı prob, termistör prob, hava giriş borusu, hava çıkış borusu, termometre ve bunun gibi benzeri parçalar için) bulunmaktadır. Deneylede kullanılmayan giriş ve çıkışlar silikon mantarlar ile kapatılmışlardır.

Çözeltinin karıştırılması, bir karıştırıcı motor (65W) ile gerçekleştirilmiştir. Karıştırıcı şaftına takılı, tek, ayarlanabilir altı kanatlı Rushton tipinde karıştırıcı bir palet mevcuttur. Reaktörde her biri 1.5 cm genişliğinde dört adet simetrik takılıp çıkarılabilir engel vardır. Hava biyoreaktör içine, karıştırıcının altına yerleştirilmiş bir havalandırma borusu ile gönderilmiştir. Kullanılan biyoreaktörün toplam hacmi 1 litre’dir. Biyoreaktör ve karıştırıcı boyutları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Biyoreaktör ile ilgili komponentler ve değerleri

Komponentler	Değerler
Reaktörün hacmi	1 litre
Reaktörün çalışma hacmi	0.6 litre
Reaktörün iç çapı	11 cm
Reaktörün dış çapı	12.1 cm
Reaktörün yüksekliği	17 cm
Karıştırıcı palet tipi	6 kanatlı Rushton
Karıştırıcı palet sayısı	1
Karıştırıcı palet çapı	4.8 cm
Karıştırıcı kanat genişliği	1.4 cm
Karıştırıcı kanat yüksekliği	1.9 cm
Reaktör tabanından karıştırıcının yüksekliği	3 cm
Engel sayısı	4 adet
Engel yüksekliği	13.5 cm
Engel genişliği	1.5 cm
Havalandırma borusunun iç çapı	2.5 mm



Şekil 3.1 Karıştırılmalı biyoreaktör ve kontrol modüllerinin şematik diyagramı

3.1.2 Kontrol modülleri

1 litre'lik toplam hacme sahip olan biyoreaktörün kontrol edilmesi için bağlı bulunan kontrol modülleri aşağıda sıralanmıştır.

- Oksijen
- Karıştırıcı hızı kontrol modülü
- Sıcaklık kontrol modülü
- pH kontrol modülü

Oksijen kontrol modülünün özellikleri ise aşağıda verilmiştir.

Aralık	% 0 -100
Doğruluk	± % 1
Elektrod tipi	galvanik
Hava akış hızı 1	0.06 -0.6 l.dak ⁻¹
Hava akış hızı 2	0.6 -5 l.dak ⁻¹

Oksijen kaynağı olarak kullanılan hava, oksijen kontrol modülü içindeki pompa yardımıyla biyoreaktöre gönderilmiştir. Akış ölçerden ve hava filtresinden geçirilen hava, havalandırma borusu ile karıştırıcının altından biyoreaktöre verilmiştir .

Oksijen kontrol modülüne bağlı oksijen elektrodu doyurulmuş esasına göre kalibre edilmiştir. Hava ile doyurulmuş ortam %100'e, daha sonra azot ile doyurulmuş aynı ortam %0'a ayarlanmıştır. Kalibrasyonun maksimum doğruluğunu sağlamak için bu işlem, çalışma şartlarında yapılmış ve 3 kez tekrar edilmiştir .

Karıştırıcı hızı kontrol modülünün özellikleri ise aşağıda verilmiştir.

Karıştırıcı hızı	50 - 1000 rpm
Karıştırıcı motor	65 W, 24 V d.c

Karıştırıcı hızının kalibrasyonu bir takometre ile yapılmıştır.

Sıcaklık kontrol modülünün özellikleri ise aşağıda verilmiştir.

Aralık	15 - 60 °C
Doğruluk	± %1

Isıtıcı tipi	dc rezistans
Isıtıcı gücü	24 V dc, 100 W
Termistör tipi	yarı iletken LM5DZ

Sıcaklık için ise kalibrasyon, bir termometre yardımı ile yapılmıştır ve ayrıca deneyler sırasında reaktör içindeki sıcaklık yine bu termometre ile kontrol edilmiştir.

pH kontrol modülünün özellikleri ise aşağıda verilmiştir .

Aralık	0-14 pH
Doğruluk	± 0.1 pH
Elektrolit	AgCl ile doyurulmuş 4M KCl

pH elektrodu, pH 4 ve pH 7 tampon çözeltileri ile kalibre edilmiştir.

3.2 Kullanılan Materyaller

- Destile su
- Gliserin
Deneylerde kullanılan gliserin Merck'den temin edilmiştir (Ürün no: 104093).
- Tutuklayıcı malzeme (Aktif karbon parçacıkları).
- Kuru hava
Deneylerde kullanılan kuru hava HABAŞ hava tüpünden sağlanmıştır.
- Azot gazı
Deneylerde kullanılan azot gazı HABAŞ azot tüpünden sağlanmıştır.
- 0.2 M HCl ve 0.2 M KOH
Çözeltilerin pH'ını ayarlamak için kullanılmıştır.

3.2.1 Tutuklayıcı malzeme

Tutuklayıcı malzemenin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisini incelemek için yapılan deneylerde tutuklayıcı malzeme olarak aktif karbon seçilmiştir ve TÜBİTAK'tan temin edilmiştir. Yüksek gözenekli yapısı ile çok geniş bir yüzey alanına sahip olduğu için tercih edilmiştir. En güçlü fiziksel adsorbsiyon gücüne veya en yüksek hacimde gözenekliliğe sahip malzemelerden birisidir. Saf aktif karbon parçacıkları, çok düşük konsantrasyonlarda bile kütle transferini arttırlar (Schumpe vd., 1987).

3.3 Deneyin Yapılışı

Yapılan deneyler aşağıdaki adımları içermektedir:

- a) Biyoreaktörde çalışma hacmi olarak 0.6 litre seçilmiştir. Deneylerde dört ayrı çözelti kullanılmıştır. Çözeltiler sırası ile destile su; gliserin+destile su (%10, %20, %30, %40, %50 ve %100 gliserin/destile su; hacim/hacim); tutuklayıcı malzeme+destile su (%5, %10, %15, %20 ve %25 tutuklayıcı malzeme/destile su; hacim/hacim) ve tutuklayıcı malzeme+ gliserin+destile su'dur (%5, %10, %15, %20 ve %25 tutuklayıcı malzeme ile birlikte %50 gliserin/destile su; hacim/hacim).
- b) Bütün deneylerde, çalışma sıcaklığı olarak 37°C seçilmiştir. Çünkü birçok mikroorganizmanın üremesi bu sıcaklıkta gerçekleşmektedir.
- c) Karıştırıcı hızı, 300 rpm olarak seçilmiştir (aksi belirtilmediği durumlar haricinde).
- d) 0.2 M HCl ve 0.2 M KOH çözeltileri kullanılarak çözeltinin pH'ı 7'ye ayarlanmıştır.
- e) Oksijenin hacimsel transfer katsayısını belirlemek için Bölüm 2.2.1' de anlatılan gazın uzaklaştırılması yöntemine göre, sıvı ortamdan oksijeni uzaklaştırmak için, biyoreaktöre 0.6 l.dak⁻¹ debisinde azot gazı gönderilmiştir. Bu işleme, reaktör içindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonu %0 olana kadar (yaklaşık 15 dakika) devam edilmiştir.
- f) Yukarıda bahsedilen işleme takiben 0.3 l.dak⁻¹ debisindeki hava, bir havalandırma borusu ile oksijenden arındırılmış çözeltiliye verilmiştir (aksi belirtilmediği durumlar haricinde).
- g) Hava gönderilmeye başlanır başlanmaz t=0 anından itibaren bir kronometre ile 5 s aralıklarla, sıvı fazda çözünmüş oksijen konsantrasyonları kaydedilmiştir. Havalandırma sırasında, çözünmüş oksijen konsantrasyonu doyma noktasına ulaştığında sabit kalmış ve bu noktada havalandırmaya son verilmiştir.
- h) Oksijen elektrodunun, çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişime cevabının yeterince hızlı olduğu kabul edilmiştir. (Bu çalışmadaki tüm k_La değerleri 0.1 s⁻¹'den küçük

olduğu için bu kabul yapılmıştır) (Aksak,1990; Kırıl,1987). k_{La} değerleri, oksijen elektrodunun zaman sabiti için endişelenmeksizin, $\ln(C^* - C_L)$ ve t arasında çizilen doğrunun eğiminden bulunmuştur.

4.DENEY BULGULARI

Çözünmüş oksijen konsantrasyonları destile su, gliserin+destile su, tutuklayıcı malzeme+destile su ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su'da oksijen kontrol modülü kullanılarak ölçülmüştür. Gazın uzaklaştırılması yöntemi (Bölüm 2.2.1) kullanılarak elde edilen veriler, oksijen transfer katsayısını hesaplamak için kullanılmıştır. $k_L a$ 'nın hesaplanması ile ilgili bir örnek Ek 1'de (Çizelge Ek1.1 ve Şekil Ek1.1) verilmiştir.

4.1 Oksijen Transfer Katsayısı Üzerine Proses Değişkenlerinin Etkisi

- Destile su'da incelenen proses değişkenleri
 - Karıştırıcı hızı (N)
 - Hava debisi (v)
 - Sıcaklık (T)
- Gliserin+destile su'da incelenen proses değişkenleri
 - Karıştırıcı hızı (N)
 - Hava debisi (v)
 - Viskozite (μ)
- Tutuklayıcı malzeme+destile su'da incelenen proses değişkenleri
 - Karıştırıcı hızı (N)
 - Hava debisi (v)
 - Tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarı
 - Tutuklayıcı malzemenin parçacık boyutu
- Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su'da incelenen proses değişkenleri
 - Karıştırıcı hızı (N)
 - Hava debisi (v)
 - Tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarı
 - Tutuklayıcı malzemenin parçacık boyutu

4.1.1. Oksijen transfer katsayısı üzerine karıştırıcı hızının etkisi

Karıştırıcının yerine getirmesi gereken 3 temel görevi vardır; bunlar katıların süspansiyonu, ihtiyaç duyulan oksijenin sıvı faza karışması, ihtiyaç duyulan oksijenin sıvı faza karışması ve dağılması, gaz ile sıvı faz arasındaki ara yüzeyi arttırmasıdır (Rossi, 2001). Karıştırıcının ürettiği kesme kuvvetleri kabarcık büyüklüğünde önemli bir rol oynar. Eğer karıştırıcı hızı çok yavaşsa kabarcıklar kırılmaz ve direkt yüzeye yükselme eğilimi gösterirler. Bu koşullar altında büyük kabarcıklar oluşarak karıştırıcının altında birikir ve düşük oksijen transfer oranı gözlenir. Benzer bir davranış havalandırma oranı çok yüksek olduğunda da gözlenir. Bu durumda oksijen transfer verimi düşük olur. Deneylerde karıştırıcı hızı 100-500 rpm arasında değiştirilirken, hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık 37°C ve pH 7 değerlerinde sabit tutulmuştur.

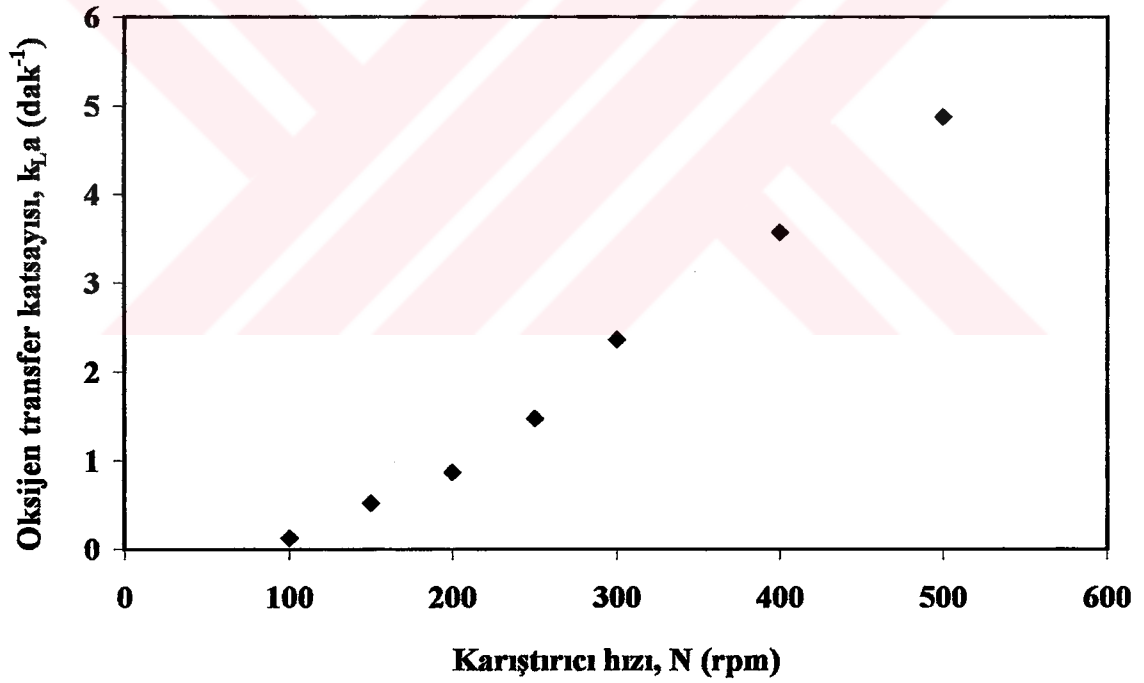
4.1.1.1 Destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerindeki etkisi

Destile su: 0.6 litre

Çizelge 4.1'de çözelti olarak destile su kullanılması halinde karıştırıcı hızına karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 2'de (Çizelge Ek2.1) sunulmuştur. Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi, karıştırıcı hızının arttırılmasıyla $k_{L,a}$ değerleri artmıştır. Karıştırıcı hızının 100 rpm'den 500 rpm'e arttırılması ile $k_{L,a}$ 'da yaklaşık 39 kat'lık bir artış saptanmıştır. Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi $k_{L,a}$ 'daki artış karıştırıcı hızının 300 rpm'den küçük olması durumunda çok azdır. Ancak 300 rpm'den büyük karıştırıcı hızlarında $k_{L,a}$ 'daki artış lineer olmuştur. Böyle bir davranış, Westerterp vd., (1963); Mehta ve Sharma (1971) ve Aksak (1990) tarafından da izlenmiştir. Westerterp vd.'ne göre, kritik bir karıştırıcı hızı (480 rpm) vardır ve bu hız aşıldığında $k_{L,a}$, karıştırıcı hızıyla lineer olarak artmaktadır. Mehta ve Sharma ise belli bir karıştırıcı hızının altında, $k_{L,a}$ değerinin karıştırıcı hızı ile artışının çok az olduğunu görmüşlerdir ve kritik karıştırıcı hızını 200 rpm olarak bulunmuştur. Aksak'da çalışmasında aynı sonuca varmış ve kritik karıştırıcı hızını 650 rpm olarak bulmuştur.

Çizelge 4.1 Destile su için karıştırıcı hızına karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri
(hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık 37°C ve pH 7)

Karıştırma hızı, N (rpm)	$k_{L,a}$ (dak^{-1})
100	0.126
150	0.324
200	0.864
250	1.468
300	2.361
400	3.571
500	4.876



Şekil 4.1 Destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi
(hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.1.1.2 Gliserin+destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

%10 gliserin için → destile su: 0.54 litre; gliserin: 0.06 litre

%20 gliserin için → destile su: 0.48 litre; gliserin: 0.12 litre

%30 gliserin için → destile su: 0.42 litre; gliserin: 0.18 litre

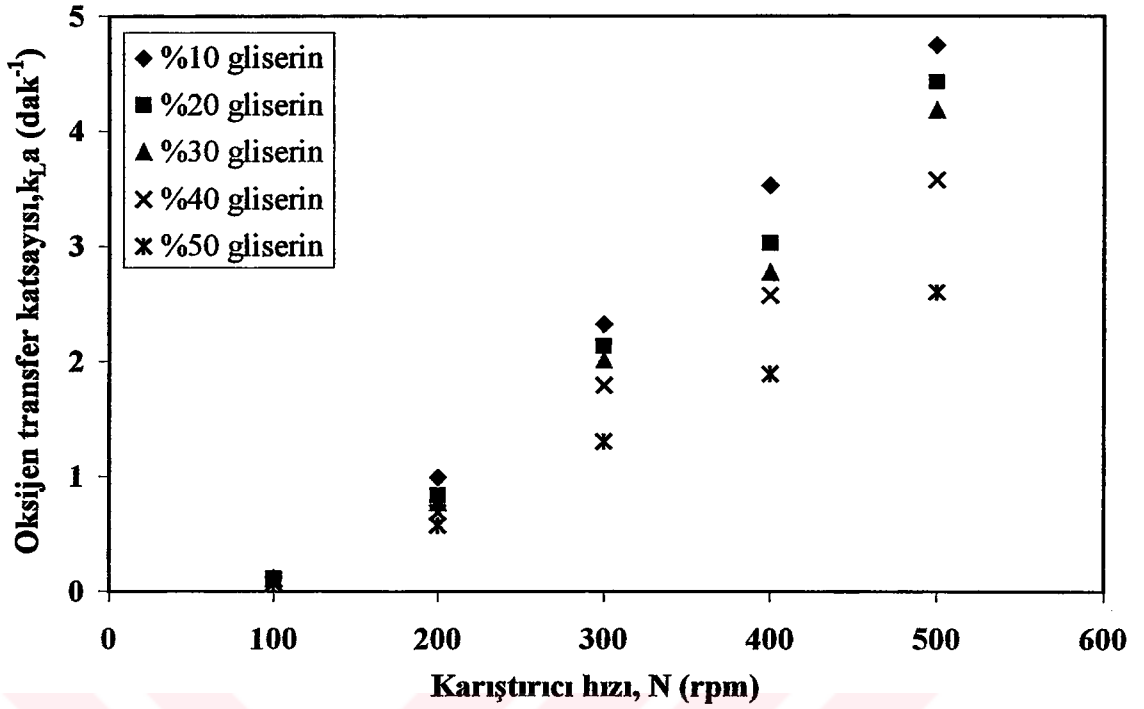
%40 gliserin için → destile su: 0.36 litre; gliserin: 0.24 litre

%50 gliserin için → destile su: 0.30 litre; gliserin: 0.30 litre

Çizelge 4.2’de çözelti olarak gliserin+destile su kullanılması halinde karıştırıcı hızına karşılık elde edilen k_{La} değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 2’de (Çizelge Ek2.2) sunulmuştur. Şekil 4.2’den de görüldüğü gibi, gliserin yüzdesi sabit tutulduğunda, karıştırıcı hızının arttırılmasıyla k_{La} değerleri artmıştır. Karıştırıcı hızının 100 rpm’den 500 rpm’e arttırılması ile k_{La} ’da %10 - 50 gliserin için yaklaşık 38 kat’lık bir artış saptanmıştır. Karıştırıcı hızı sabit tutulduğunda ise, gliserin yüzdesinin arttırılması ile k_{La} azalmıştır (%43.9 azalma). Gliserin yüzdesinin %10’dan %50’ye (hacim/hacim) arttırılması ile k_{La} ’nın destile suya göre, 100 rpm karıştırıcı hızında sırasıyla %4.8 - %45.2 ve 500 rpm karıştırıcı hızında ise %2.6 - %46.7 oranlarında azaldığı bulunmuştur. Bölüm 4.1.1.1’de destile su için izlenen davranış burada da izlenmiş ve kritik karıştırıcı hızının yine 300 rpm olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2 Gliserin+destile su için karıştırıcı hızına karşı elde edilen k_{La} değerleri (hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7)

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	k_{La} (dak ⁻¹)				
	%10 gliserin	%20 gliserin	%30 gliserin	%40 gliserin	%50 gliserin
100	0.120	0.114	0.108	0.102	0.069
200	0.990	0.835	0.722	0.686	0.576
300	2.320	2.131	2.005	1.795	1.305
400	3.524	3.024	2.772	2.572	1.893
500	4.748	4.425	4.180	3.572	2.600



Şekil 4.2 Gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi (hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.1.1.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

Destile su: 0.6 litre

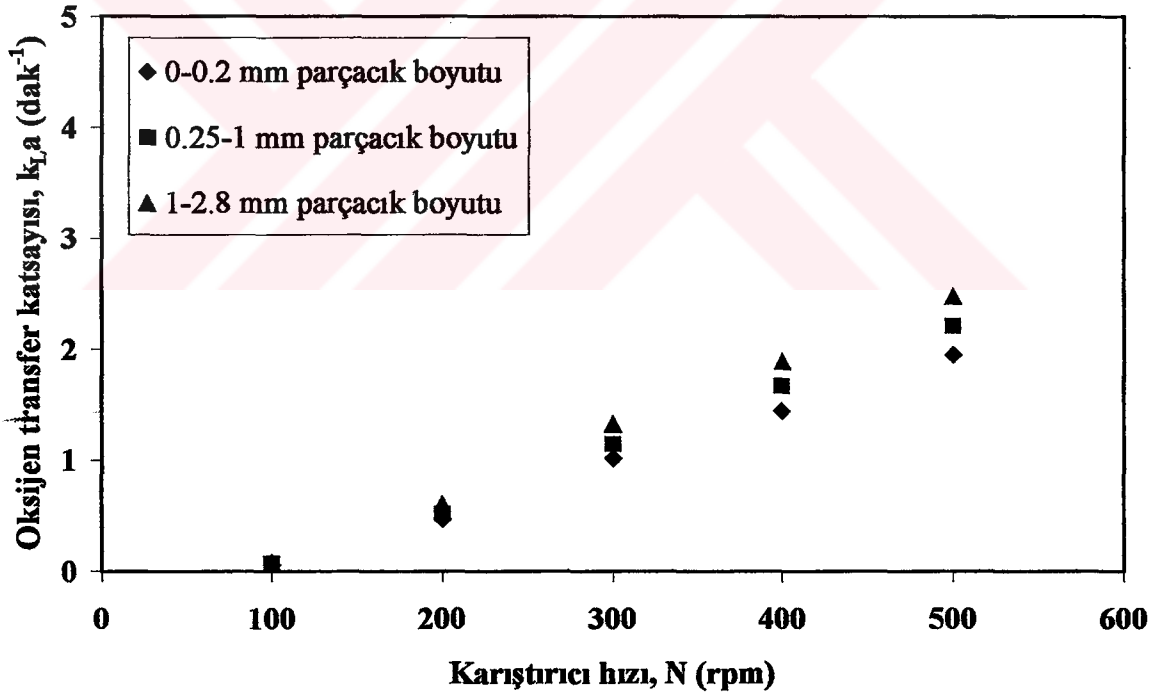
Tutuklayıcı malzeme : %25 Yükleme miktarı

Parçacık boyutu: 0-0.2 mm; 0.25-1 mm; 1-2.8 mm

Çizelge 4.3’de çözültü olarak tutuklayıcı malzeme+destile su kullanılması halinde karıştırıcı hızına karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 2’de (Çizelge Ek2.3) sunulmuştur. Şekil 4.3’den de görüldüğü gibi parçacık boyutu sabit tutulduğunda karıştırıcı hızının artırılmasıyla $k_{L,a}$ artmıştır. Karıştırıcı hızının 100 rpm’den 500 rpm’e artırılması ile $k_{L,a}$ ’da 0-0.2 mm, 0.25-1 mm, 1-2.8 mm parçacık boyutları için yaklaşık 33 kat bir artış saptanmıştır. Karıştırıcı hızı sabit tutulduğunda ise, parçacık boyutunun artırılması ile $k_{L,a}$ değeri artmıştır (%27 artış, 500rpm için). Parçacık boyutunun 0-0.2 mm’den 1-2.8 mm’ye artırılmasıyla $k_{L,a}$ ’nın destile suya göre, 100 rpm karıştırıcı hızında sırasıyla %53 - %40 ve 500 rpm karıştırıcı hızında ise %60 - %49 oranlarında azaldığı bulunmuştur.

Çizelge 4.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için karıştırıcı hızına karşılık elde edilen k_{La} değerleri (hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık 37°C ve pH 7)

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	k_{La} (dak^{-1})		
	Parçacık boyutu 0-0.2 mm	Parçacık boyutu 0.25-1 mm	Parçacık boyutu 1-2.8 mm
100	0.059	0.068	0.075
200	0.467	0.491	0.598
300	1.115	1.198	1.322
400	1.491	1.75	1.816
500	1.947	2.203	2.475



Şekil 4.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi (hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.1.1.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

%50 gliserin → destile su: 0.3 litre; gliserin: 0.3 litre

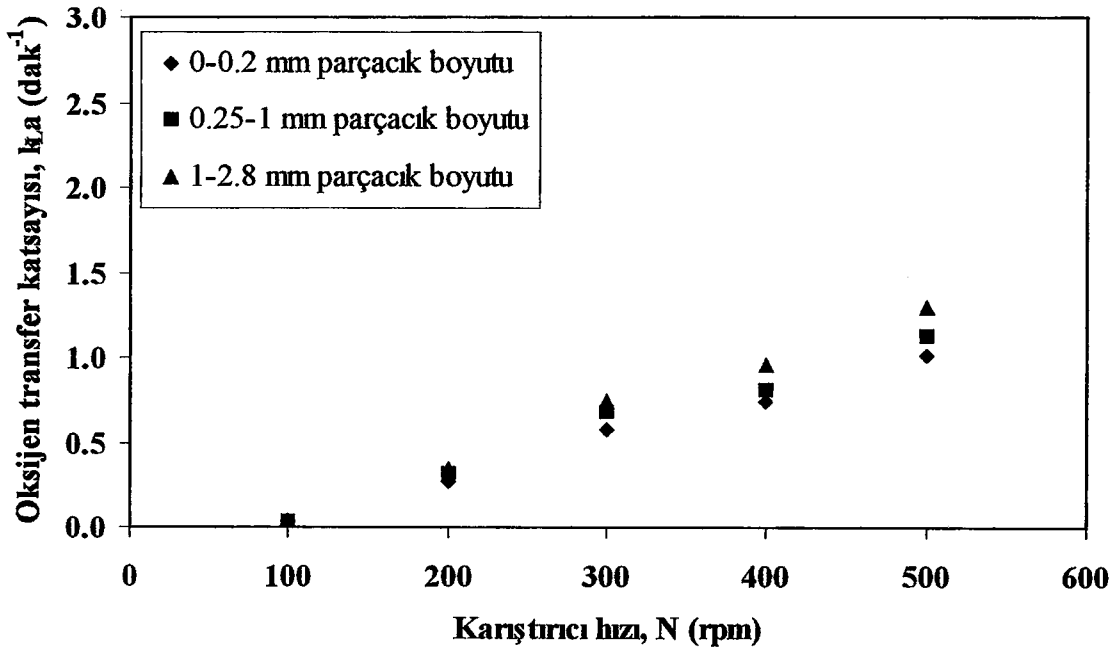
Tutuklayıcı malzeme: %25 Yükleme miktarı

Parçacık boyutu: 0-0.2 mm; 0.25-1 mm; 1-2.8 mm

Çizelge 4.4'te çözelti olarak tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su kullanılması halinde karıştırıcı hızına karşılık elde edilen k_{La} değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 2'de (Çizelge Ek2.4) sunulmuştur. Şekil 4.4'den de görüldüğü gibi parçacık boyutu sabit tutulduğunda, karıştırıcı hızının artmasıyla k_{La} artmıştır. Karıştırıcı hızının 100 rpm'den 500 rpm'e arttırılması ile 0-0.2 mm; 0.25-1 mm; 1-2.8 mm parçacık boyutu için k_{La} 'da yaklaşık 31 kat'lık bir artış saptanmıştır. Karıştırıcı hızı sabit tutulduğunda ise, parçacık boyutunun arttırılması ile k_{La} değerleri 100 rpm karıştırıcı hızında %24, 500 rpm karıştırıcı hızında ise %27 artmıştır. Parçacık boyutunun 0-0.2 mm'den 1-2.8 mm'ye arttırılması ile k_{La} 'nın destile suya göre, 100 rpm karıştırıcı hızında sırasıyla %73.8 - %67.5 ve 500 rpm karıştırıcı hızında ise %79.2 - %73.3 oranlarında azaldığı bulunmuştur.

Çizelge 4.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için karıştırıcı hızına elde edilen k_{La} değerleri (hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7)

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	k_{La} (dak ⁻¹)		
	Parçacık boyutu 0-0.2 mm	Parçacık boyutu 0.25-1 mm	Parçacık boyutu 1-2.8 mm
100	0.033	0.036	0.041
200	0.271	0.315	0.345
300	0.581	0.679	0.737
400	0.745	0.815	0.957
500	1.013	1.134	1.294



Şekil 4.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi (hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

4.1.2 Oksijen transfer katsayısı üzerine hava debisinin etkisi

Hava debisi de karıştırıcı hızı gibi gaz fazdan sıvı faza kütle transferini etkileyen önemli bir proses değişkenidir. Havalandırma ile oksijen, hava kabarcıklarından sıvıya transfer edilir. Kütle transfer katsayısı, k_L , ve ara yüzey alanı, a , hava akış hızının artmasıyla artar. Deneysel hava debisi destile su için 0.15 – 0.9 l.dak⁻¹ arasında değiştirilirken, diğer çözeltiler için 0.3 ve 0.6 l.dak⁻¹ hava debileri kullanılmıştır. Karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37°C ve pH 7 değerlerinde sabit tutulmuştur.

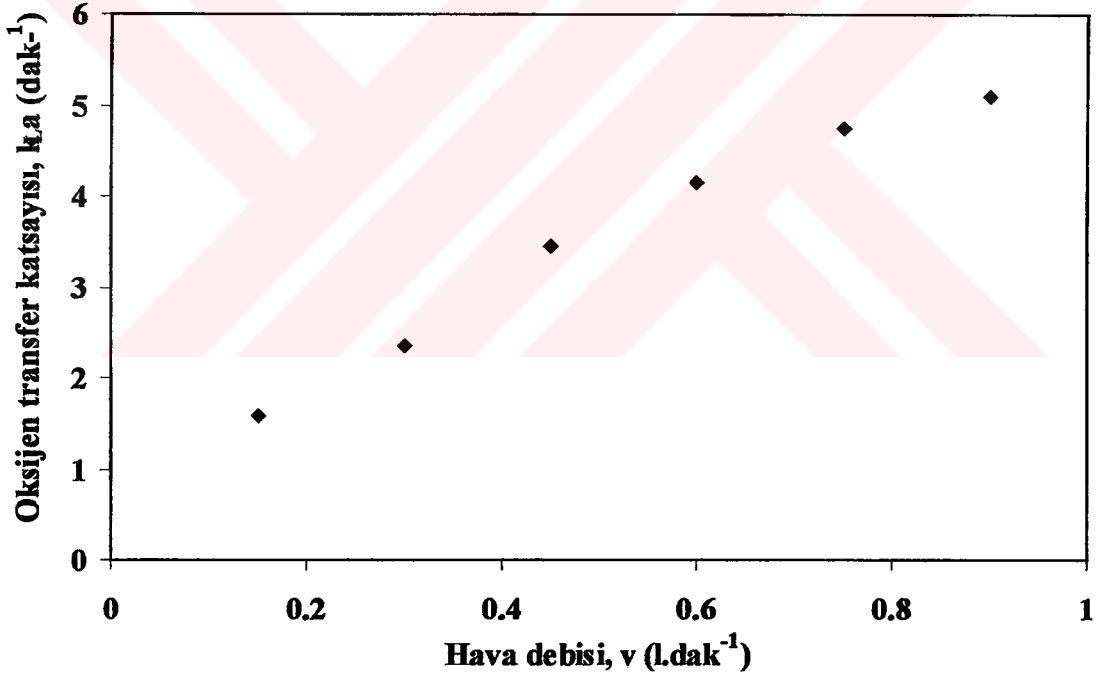
4.1.2.1 Destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

Destile su: 0.6 litre

Çizelge 4.5’de çözelti olarak destile su kullanılması halinde hava debisine karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 3’de (Çizelge Ek3.1) sunulmuştur. Şekil 4.5’den de görüldüğü gibi hava debisinin artmasıyla $k_L a$ artmıştır. Hava debisinin 0.15 l.dak⁻¹’den 0.9 dak⁻¹’e arttırılmasıyla $k_L a$ ’da yaklaşık 3.2 kat’lık bir artış saptanmıştır.

Çizelge 4.5 Destile su için hava debisine karşılık elde edilen k_{La} değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37°C ve pH 7)

Hava debisi, v (l. dak ⁻¹)	k_{La} (dak ⁻¹)
0.15	1.572
0.30	2.361
0.45	3.447
0.60	3.945
0.75	4.750
0.90	5.108



Şekil 4.5 Destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.1.2.2 Gliserin+destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

%10 gliserin için → destile su: 0.54 litre; gliserin: 0.06 litre

%20 gliserin için → destile su: 0.48 litre; gliserin: 0.12 litre

%30 gliserin için → destile su: 0.42 litre; gliserin: 0.18 litre

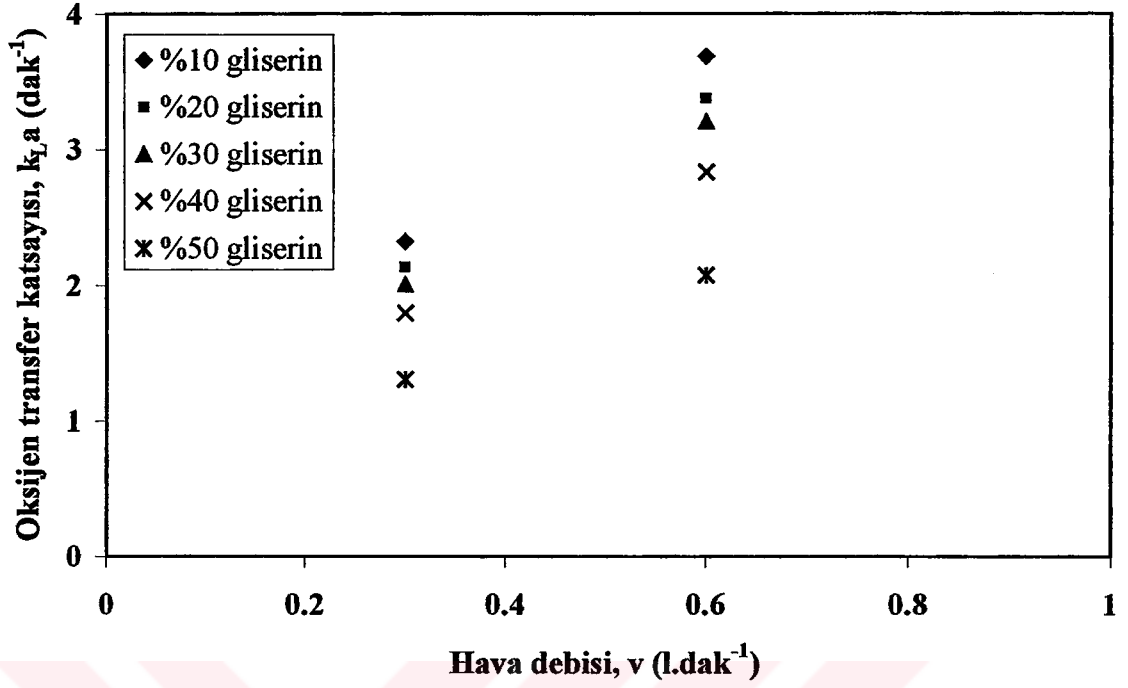
%40 gliserin için → destile su: 0.36 litre; gliserin: 0.24 litre

%50 gliserin için → destile su: 0.30 litre; gliserin: 0.30 litre

Çizelge 4.6'da çözelti olarak gliserin+destile su kullanılması halinde hava debisine karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 3'de (Çizelge Ek3.2) sunulmuştur. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi gliserin yüzdesi sabit tutulduğunda, hava debisinin artmasıyla $k_{L,a}$ artmıştır. Hava debisinin 0.3 l.dak⁻¹'den 0.6 l.dak⁻¹'e artırılması ile $k_{L,a}$ 'da %10-50 gliserin ilavesi için yaklaşık 1.6 kat'lık bir artış saptanmıştır. Hava debisi sabit tutulduğunda ise, gliserin yüzdesinin artırılması ile $k_{L,a}$ yaklaşık %44 azalmıştır. Gliserin yüzdesinin %10'dan %50'ye artırılması ile $k_{L,a}$ 'nın destile suya göre, 0.3 l.dak⁻¹ hava debisinde sırayla %1.6 - %45 ve 0.6 l.dak⁻¹ hava debisinde ise %6.5- %47.4 oranlarında azaldığı bulunmuştur.

Çizelge 4.6 Gliserin+destile su için hava debisine karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri
(karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37°C ve pH 7)

Hava debisi, v (l. dak ⁻¹)	$k_{L,a}$ (dak ⁻¹)				
	%10 gliserin	%20 gliserin	%30 gliserin	%40 gliserin	%50 gliserin
0.3	2.323	2.131	2.005	1.795	1.305
0.6	3.686	3.372	3.204	2.832	2.074



Şekil 4.6 Gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.1.2.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

Destile su: 0.6 litre

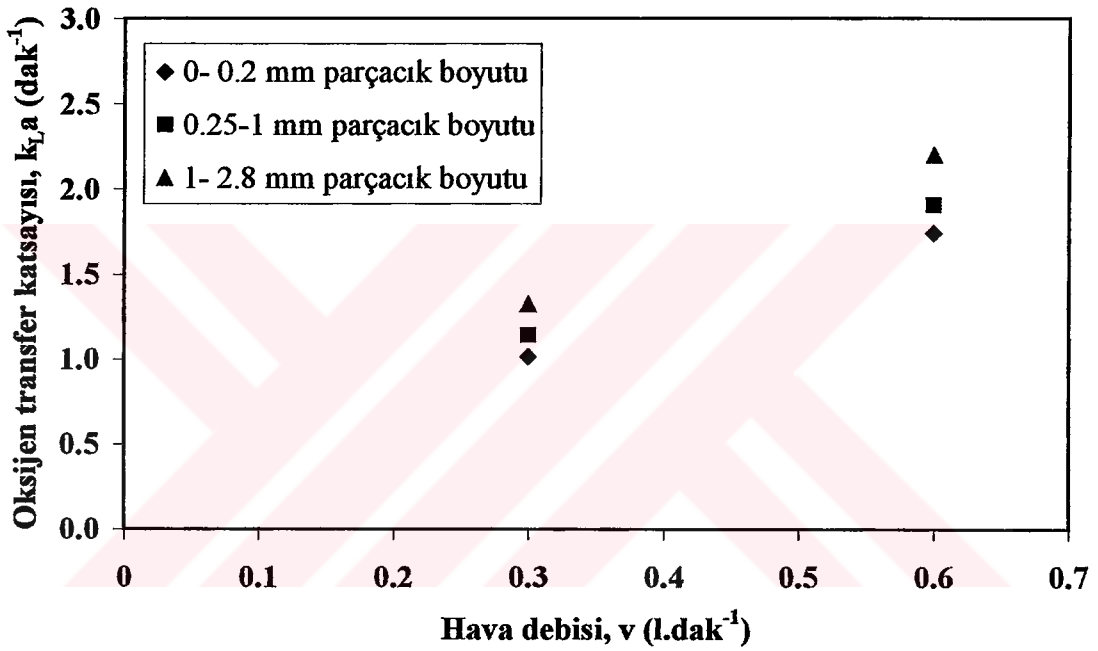
Tutuklayıcı malzeme: %25 Yükleme miktarı

Parçacık boyutu: 0-0.2 mm; 0.25-1 mm; 1-2.8 mm

Çizelge 4.7’de çözelti olarak tutuklayıcı malzeme+destile su kullanılması halinde hava debisine karşılık gelen $k_{L,a}$ değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 3’de (Çizelge Ek3.3) sunulmuştur. Şekil 4.7’den de görüldüğü gibi parçacık boyutu sabit tutulduğunda, hava debisinin artmasıyla $k_{L,a}$ artmıştır. Hava debisinin 0.3 l.dak⁻¹’den 0.6 l.dak⁻¹’e artırılması ile $k_{L,a}$ ’da 0-0.2 mm, 0.25-1 mm, 1-2.8 mm parçacık boyutu için yaklaşık 1.3 kat’lık bir artış saptanmıştır. Hava debisi sabit tutulduğunda ise, parçacık boyutunun artması ile $k_{L,a}$ değerleri artmıştır (%30 artış). Parçacık çapının 0-0.2 mm’den 1-2.8 mm’ye artırılması ile $k_{L,a}$ ’nın destile suya göre, 0.3 l.dak⁻¹ hava debisinde sırasıyla %57 - %44 ve 0.6 l.dak⁻¹ hava debisinde ise %66 - %56 oranlarında azaldığı bulunmuştur.

Çizelge 4.7 Tutuklayıcı malzeme+destile su için hava debisine karşılık elde edilen k_{La} değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37°C ve pH 7)

Hava debisi, v (l. dak ⁻¹)	k_{La} (dak ⁻¹)		
	Parçacık boyutu 0-0.2 mm	Parçacık boyutu 0.25-1 mm	Parçacık boyutu 1-2.8 mm
0.3	1.015	1.141	1.322
0.6	1.321	1.475	1.715



Şekil 4.7 Tutuklayıcı malzeme+destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

4.1.2.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

%50 gliserin → destile su: 0.3 litre; gliserin: 0.3 litre

Tutuklayıcı malzeme: %25 Yükleme miktarı

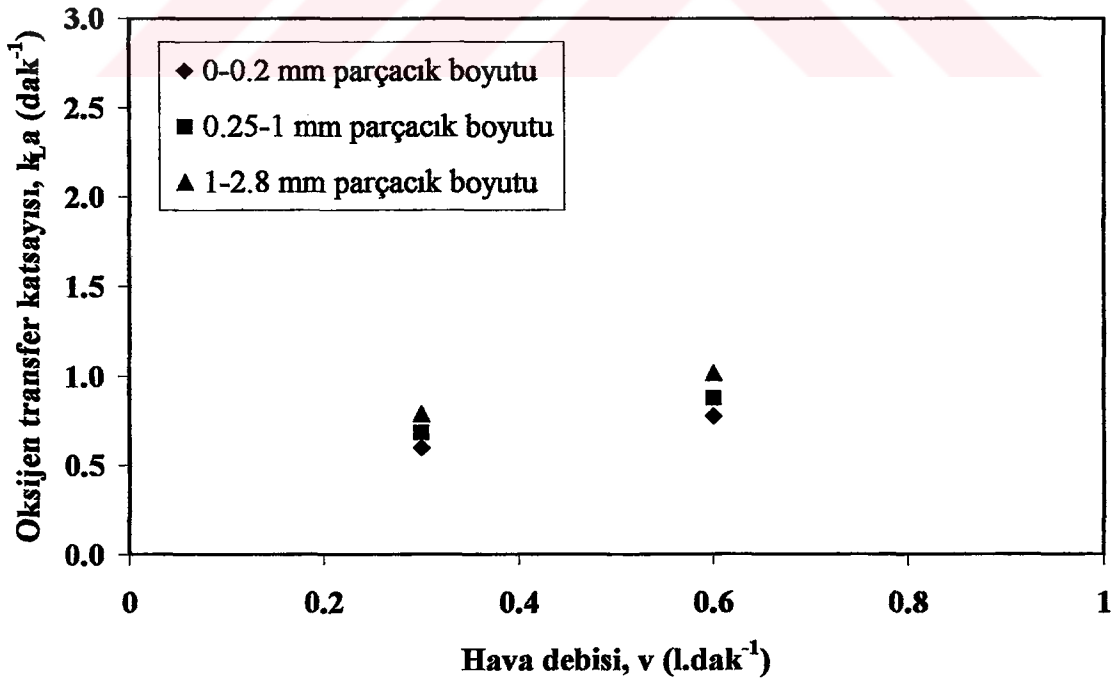
Parçacık boyutu: 0-0.2 mm; 0.25-1 mm; 1-2.8 mm

Çizelge 4.8’de çözelti olarak tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su kullanılması halinde hava debisine karşılık elde edilen k_{La} değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 3’de (Çizelge Ek3.4) sunulmuştur. Şekil 4.7’den de görüldüğü

gibi parçacık hacmi sabit tutulduğunda, hava debisinin artmasıyla $k_{L,a}$ artmıştır. Hava debisinin 0.3 l.dak⁻¹'den 0.6 l.dak⁻¹'e artırılması ile $k_{L,a}$ 'da 0-0.2 mm, 0.25-1 mm, 1-2.8 mm parçacık boyutu için tutuklayıcı malzeme+destile su için olduğu gibi yaklaşık 1.3 kat'lık bir artış saptanmıştır. Hava debisi sabit tutulduğunda ise, parçacık boyutunun artması ile $k_{L,a}$ değerleri artmıştır (%30 artış). Parçacık boyutunun 0-0.2 mm'den 1-2.8 mm'ye artırılması ile $k_{L,a}$ 'nın destile suya göre, 0.3 l.dak⁻¹ hava debisinde sırasıyla %75 - %69 ve 0.6 l.dak⁻¹ hava debisinde ise %80 - %74 oranlarında azaldığı bulunmuştur.

Çizelge 4.8 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için hava debisine karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37°C ve pH 7)

Hava debisi, v (l. dak ⁻¹)	$k_{L,a}$ (dak ⁻¹)		
	Parçacık boyutu 0-0.2 mm	Parçacık boyutu 0.25-1 mm	Parçacık boyutu 1-2.8 mm
0.3	0.581	0.679	0.737
0.6	0.772	0.874	1.013



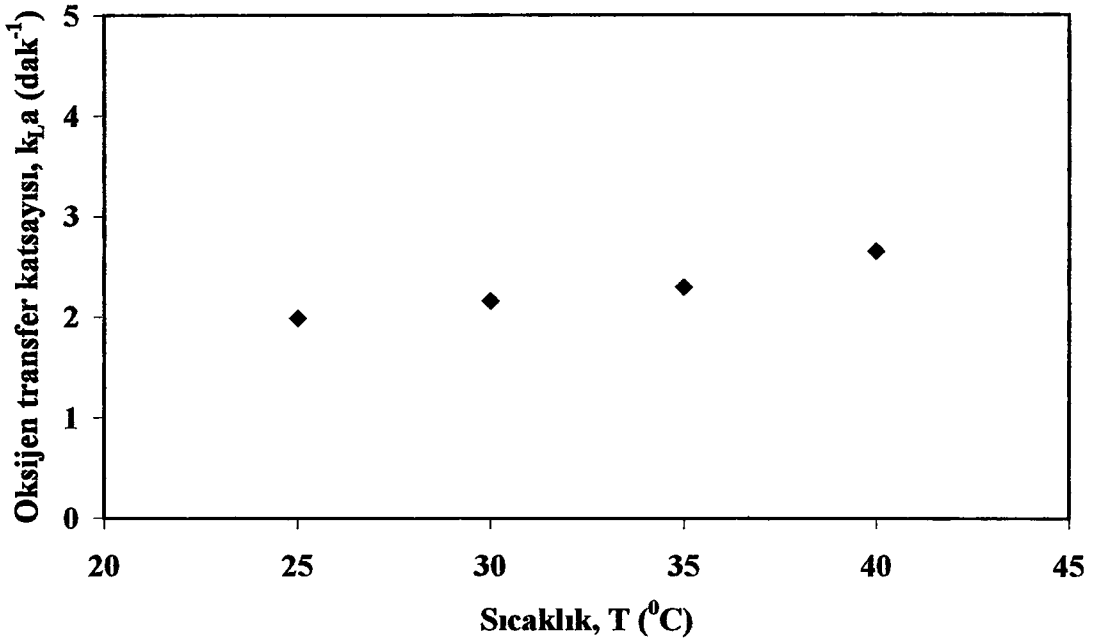
Şekil 4.8 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

4.1.3 Oksijen transfer katsayısı üzerine sıcaklığın etkisi

Destile su için (0.6 litre), sıcaklık 25 - 40 °C arasında değiştirilirken karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, pH 7 değerlerinde sabit tutulmuştur. Sıcaklıktaki artış ile kütle transfer katsayısı, k_L , artmaktadır. Bilindiği gibi, gazların çözünürlüğü sıcaklığın artmasıyla azalır. Örneğin, 25°C'de destile su için oksijenin çözünürlük konsantrasyonu 8.10 mg.l⁻¹ iken 35 °C'de 6.99 mg.l⁻¹'dir. Ancak sıcaklığın artmasıyla çözünürlükteki bu az miktardaki düşüş kütle transfer katsayısı üzerinde önemli bir etki göstermemektedir (Aksak, 1990). Çizelge 4.9'da çözültü olarak destile su kullanılması halinde sıcaklığa karşı elde edilen $k_L a$ değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 4'de (Çizelge Ek4.1) sunulmuştur. Şekil 4.9'dan da görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla $k_L a$ artmıştır. Sıcaklığın 25°C'den 40°C'ye artırılması ile $k_L a$ yaklaşık 1.33 kat'lık bir artış saptanmıştır.

Çizelge 4.9 Destile su için sıcaklığa karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l. dak⁻¹ ve pH 7)

Sıcaklık, T(°C)	$k_L a$ (dak ⁻¹)
25	1.987
30	2.161
35	2.298
40	2.652



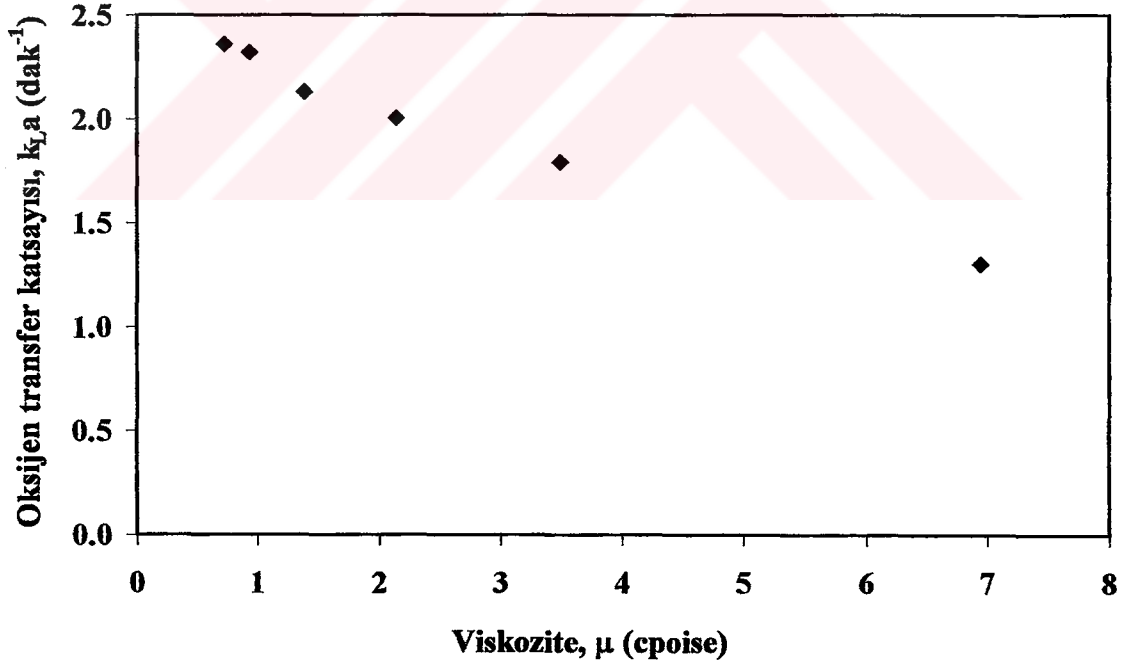
Şekil 4.9 Destile su için oksijen transfer katsayısının sıcaklık ile değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, pH 7)

4.1.4 Oksijen transfer katsayısı üzerine viskozitenin etkisi

Bu çalışmada, destile suya gliserin ilavesi ile (toplam hacim 0.6 litre), viskozitenin oksijen transfer katsayısına olan etkisi incelenmiştir. Literatürde, viskozitedeki artışın kütle transfer katsayısının azalmasıyla sonuçlandığını gösteren birçok deneysel ispat mevcuttur (Yagi ve Yoshida, 1971; Andrew, 1982; Pandit ve Joshi, 1983; Albal vd., 1983). Deneylerde gliserin ilavesi % 0-100 arası değiştirilirken, karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7 değerlerinde sabit tutulmuştur. %0-100 oranları arasında gliserin ilavelerine karşılık viskozite değerleri 0.729- 566.040 cpoise arasında değişmiştir (Shelly, 1932). Çözeltinin viskozitesinin artmasıyla kütle transferi azalmıştır. Destile sudan gliserin çözeltilerine geçişte ve viskozite artması ile k_L/d_B (ortalama kabarcık boyutu, m) oranında bir azalma gerçekleşmiştir (Winkler, 1981). Çizelge 4.10'da çözelti olarak gliserin+destile su kullanılması halinde viskoziteye karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 5'de (Çizelge Ek5.19) sunulmuştur. Şekil 4.10'dan da görüldüğü gibi viskozitenin artmasıyla $k_L a$ azalmıştır. Viskozitenin 0.729'dan 566.040'a arttırılması ile $k_L a$ 'da yaklaşık 28 kat'lık bir azalma saptanmıştır.

Çizelge 4.10 Gliserin+destile su için viskoziteye karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7)

% Gliserin (hacim/hacim)	Viskozite, μ (cpoise)	$k_{L,a}$ (dak ⁻¹)
0	0.729	2.361
10	0.935	2.323
20	1.391	2.131
30	2.144	2.005
40	3.396	1.795
50	6.948	1.305
100	566.040	0.083



Şekil 4.10 Gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının viskozite ile değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

4.1.5 Oksijen transfer katsayısı üzerine tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının ve parçacık boyutunun etkisi

Tutuklayıcı malzemenin (aktif karbon parçacıkları) çözeltiye ilave edilmesinin sebebi, bu maddelerin enzimlerin veya mikroorganizmaların pasif tutuklanmasında kullanılmasıdır. Bu çalışmada, tutuklayıcı malzeme+destile su ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için yükleme miktarı %5-25 (ağırlık/ağırlık) oranları arasında değiştirilirken, karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7 değerlerinde sabit tutulmuştur. Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için ise gliserin ilavesi %50 olarak (hacim/hacim) sabit alınmıştır. Toplam çalışma hacmi ise 0.6 litre'dir.

4.1.5.1 Tutuklayıcı malzeme+destile su için % yükleme miktarının ve parçacık boyutunun oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

Destile su: 0.6 litre

Tutuklayıcı malzeme: %5-25 Yükleme miktarı

Parçacık boyutu: 0-0.2 mm; 0.25-1 mm; 1-2.8 mm

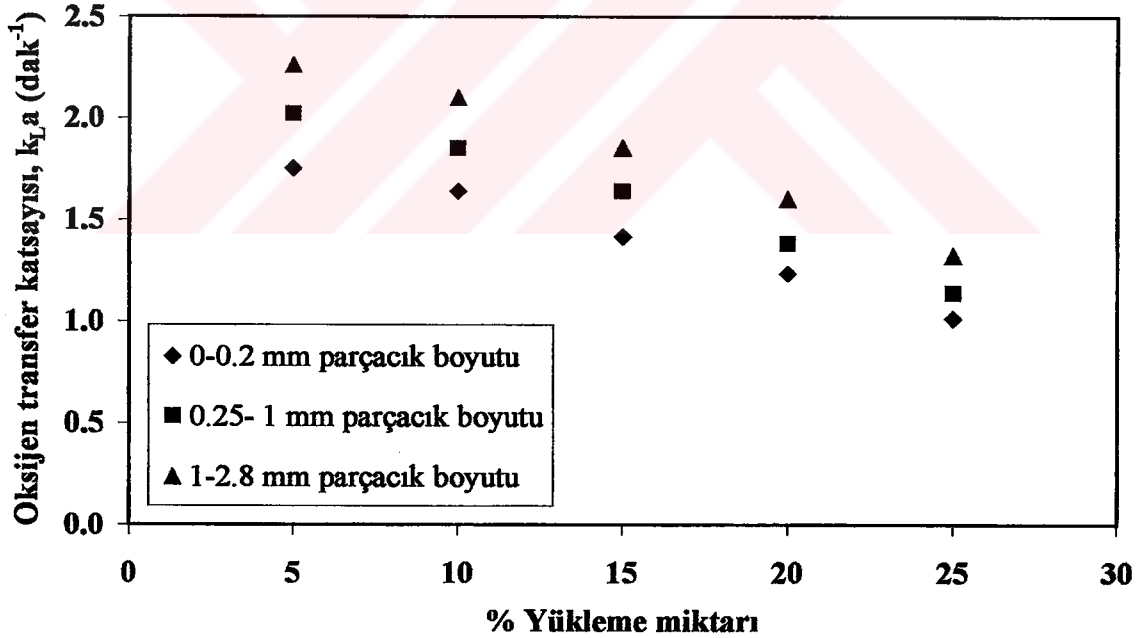
Çizelge 4.11'de çözelti olarak tutuklayıcı malzeme+destile su kullanılması halinde % yükleme miktarına ve parçacık boyutuna karşılık gelen k_{La} değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 6'da (Çizelge Ek6.1) sunulmuştur. Şekil 4.11'den de görüldüğü gibi parçacık çapı sabit tutulduğunda, % yükleme miktarının artmasıyla k_{La} azalmıştır. Yükleme miktarının %5'den %25'e artırılması ile k_{La} 'da 0-0.2 mm, 0.25-1 mm, 1-2.8 mm için yaklaşık 1.8 kat'lık bir azalma saptanmıştır. % yükleme miktarı sabit tutulduğunda ise, parçacık boyutunun artırılması ile k_{La} değerleri artmıştır (% 29 artış). Parçacık çapının 0-0.2 mm, 0.25-1 mm, 1-2.8 mm'ye artırılması ile k_{La} 'nın destile suya göre, %5 yüklemede sırasıyla %25.8 - %4.3 ve %25 yüklemede ise %57- %44 oranlarında azaldığı hesaplanmıştır.

Buna benzer bir davranış Joosten vd. (1977) tarafından da izlenmiştir. Joosten katı madde miktarının artırılmasıyla k_{La} değerinin maddenin tipine ve parçacık boyutuna bağlı olarak azaldığını görmüştür. Joosten'a göre en az yoğunluktaki katı, k_{La} 'da en fazla azalmaya sebep olmuştur. Yine bu çalışmadan elde edilen diğer bir sonuç ise, aynı % yükleme miktarında

parçacık boyutunun artmasıyla $k_{L,a}$ değeri artmıştır. Parçacık boyutu ile $k_{L,a}$ 'daki artışın muhtemel sebebi, büyük parçacıklarla işgal edilen alanın daha az olmasıdır.

Çizelge 4.11 Tutuklayıcı malzeme+destile su için % yükleme miktarına karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l. dak⁻¹ sıcaklık 37°C ve pH 7)

% Yükleme miktarı (ağırlık/ağırlık)	$k_{L,a}$ (dak ⁻¹)		
	Parçacık boyutu 0-0.2 mm	Parçacık boyutu 0.25-1 mm	Parçacık boyutu 1-2.8 mm
5	1.752	2.120	2.260
10	1.680	1.951	2.178
15	1.516	1.741	1.952
20	1.235	1.422	1.600
25	1.015	1.141	1.322



Şekil 4.11 Tutuklayıcı malzeme+destile su için oksijen transfer katsayısının % yükleme miktarı ile değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7)

Miyachi vd. (1981)'de çalışmalarında, aynı konsantrasyonda, büyük parçacıklar ile elde edilen $k_{L,a}$ değerlerinin küçük parçacıklara oranla daha yüksek olduğunu izlemişlerdir. Bunu, katı parçacıkların sıvı hacmini işgali yüzünden yüzey alanının azalması ve büyük parçacıklar

için sıvı filmindeki türbülansın küçük parçacıklara göre daha şiddetli olması ile açıklamışlardır.

Katı fazın varlığı havalandırmayı negatif olarak etkilemiştir. Çözelti hacminin katı parçacıklar tarafından işgali yüzünden kabarcıkların birleşmesi ve ara yüzey alanının, a , azalması sonucu k_{La} azalmıştır. Verlaan ve Tramper'de (1987) parçacıkların, kabarcıkların birleşmesine sebep olduklarını ve bunun sonucunda gaz-sıvı ara yüzeyinin dolayısıyla k_{La} 'nın azaldığını bulmuşlardır. Tutuklayıcı malzeme için bu azalma, mükemmel ıslanmış olması sebebiyle daha önemlidir. Kelkar ve Shah'a (1984) (Verlaan ve Tramper, 1987, tarafından kaynak olarak verilmiştir) göre, katıların ıslanabilirliği sıvı fazda birleşme eğilimlerini artırır. Frijlink (Verlaan ve Tramper, 1987, tarafından kaynak olarak verilmiştir) ise parçacıkların boyut ve yoğunluklarına bağlı olarak türbülansı azalttıkları sonucuna varmıştır. Bunlar da, bu çalışmada olduğu gibi, oksijen transferini azaltmıştır.

4.1.5.2 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için % yükleme miktarının ve parçacık boyutunun oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

%50 gliserin → destile su: 0.3 litre; gliserin: 0.3 litre

Tutuklayıcı malzeme: %5-25 Yükleme miktarı

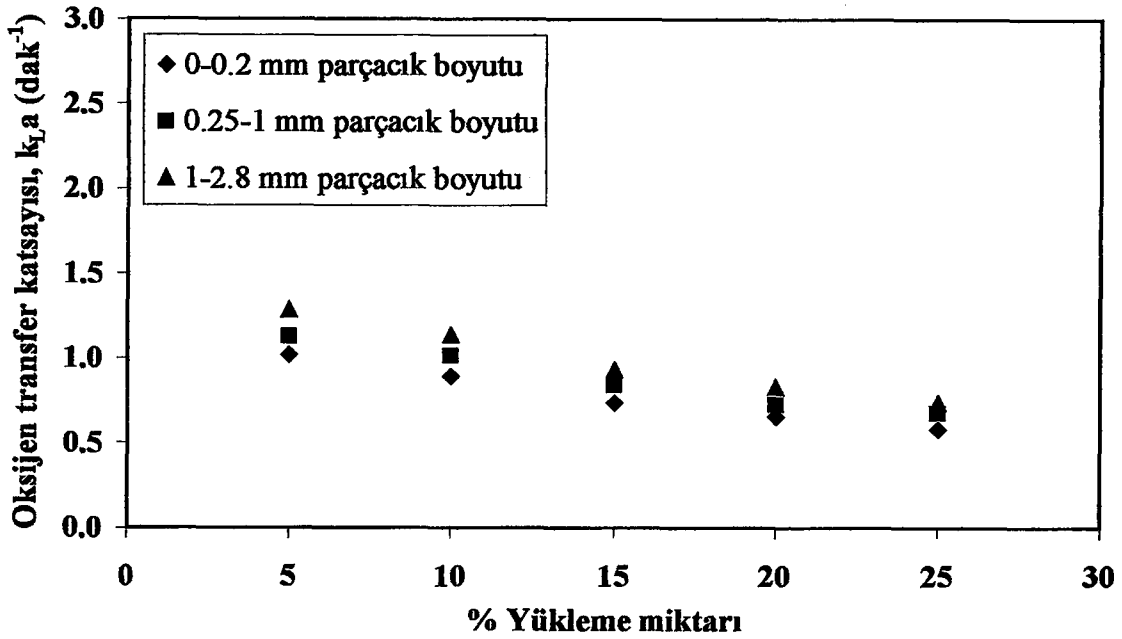
Parçacık boyutu: 0-0.2 mm; 0.25-1 mm; 1-2.8 mm

Çizelge 4.12'de çözelti olarak tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su kullanılması halinde % yükleme miktarına ve parçacık boyutuna karşılık gelen k_{La} değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 6'da (Çizelge Ek6.2) sunulmuştur. Şekil 4.12'den de görüldüğü gibi parçacık çapı sabit tutulduğunda, % yükleme miktarının artmasıyla k_{La} azalmıştır. Yükleme miktarının %5'den %25'e artırılması ile k_{La} 'da 0-0.2 mm, 0.25-1 mm, 1-2.8mm için yaklaşık 1.72 kat'lık bir azalma saptanmıştır. % Yükleme miktarı sabit tutulduğunda ise, parçacık boyutunun artırılması ile k_{La} değerleri artmıştır (% 27 artış). Parçacık çapının 0-0.2 mm, 0.25-1 mm, 1-2.8 mm'ye artırılması ile k_{La} 'nın destile suya göre, %5 yüklemede sırasıyla %56.9 - %45.7 ve %25 yüklemede ise %75.4 - %68.8 oranlarında azaldığı hesaplanmıştır. Bu çalışmada da Bölüm 4.1.5.1'de belirtilen gözlemler elde edilmiştir.

Gliserin ilavesi ile elde edilen $k_{L,a}$ değerleri, aynı şartlarda sadece destile su kullanılması durumunda elde edilen $k_{L,a}$ değerlerinden daha küçüktür. Bu azalma, viskozitenin artması sonucuna bağlıdır. Yine çözelti hacminin, aktif karbon parçacıkları tarafından işgali yüzünden ara yüzey alanının, a , azalması ve kabarcıkların birleşmesi sonucu $k_{L,a}$ azalmıştır. Tutuklayıcı malzeme+destile su'da olduğu gibi, aynı hacimde daha büyük boyuttaki parçacıklar için bulunan $k_{L,a}$ değerleri, küçük parçacıklar için bulunan $k_{L,a}$ değerlerinden daha yüksek olmuştur. Parçacık boyutu ile $k_{L,a}$ 'daki artışın muhtemel sebebi, tutuklayıcı malzeme+destile su'ya benzer olarak büyük parçacıklarda işgal edilen alanın az olmasıdır.

Çizelge 4.12 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için % yükleme miktarına karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l. dak⁻¹ sıcaklık 37 °C ve pH 7)

% Yükleme miktarı (ağırlık/ağırlık)	$k_{L,a}$ (dak ⁻¹)		
	Parçacık boyutu 0-0.2 mm	Parçacık boyutu 0.25-1 mm	Parçacık boyutu 1-2.8 mm
5	1.017	1.127	1.282
10	0.892	1.015	1.134
15	0.736	0.841	0.932
20	0.655	0.726	0.831
25	0.581	0.679	0.737



Şekil 4.12 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının % yükleme miktarı ile değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.2 Oksijen Transfer Katsayısı İçin Deneysel Verilerden Elde Edilen Korelasyonlar

Bu çalışmada, proses değişkenlerinin fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'yı veren korelasyonlar elde edilmiştir. Seçilen proses değişkenleri ise aşağıda verilmiştir.

- Güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$
- Reynolds sayısının (N_{Re}) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$
- Yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$
- Sıcaklığın (T) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$
- Viskozitenin (μ) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$
- % Yükleme miktarının fonksiyonu olarak $k_{L,a}$

4.2.1 Güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın incelenmesi

Sabit geometride karıştırılmalı bir reaktörde $k_{L,a}$ değerleri, sistemin dinamik değişkenlerine bağlıdır. Bu çalışmada, dört farklı çözelti için proses değişkenlerinin oksijen transferi üzerine etkisi aynı karıştırılmalı biyoreaktörde incelenmiştir. Bu değişkenlerden güç faktörü (N^3D^2), Reynolds sayısı (N_{Re}) ve yüzeysel hava hızına (v_s) karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri Şekil 4.13 – 4.21'de çizilmiştir. Bu grafiklerden, proses değişkenlerinin fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'yı

veren korelasyonlar elde edilmiştir. Seçilen proses değişkeni (diğer değişkenler sabit) ve k_{La} arasında üssel bir ilişki sağlamak için, grafiklerde logaritmik koordinatlar kullanılmıştır.

4.2.1.1 Destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi

Literatürde, k_{La} 'nın karıştırıcı hızına bağımlılığı, sıvının birim hacmi için karıştırıcı güç girdisi, (P/V_L) , şeklinde verilmektedir. Ancak gerçek güç girdisinin ölçülmesi oldukça zor olduğundan, birçok araştırmacı güç sayısını (N^3D^2) kullanmayı tercih etmektedir. Bu çalışmada da güç girdisi ölçüm aparatları olmadığından (P/V_L) yi temsil eden güç sayısı olarak (N^3D^2) kullanılmıştır.

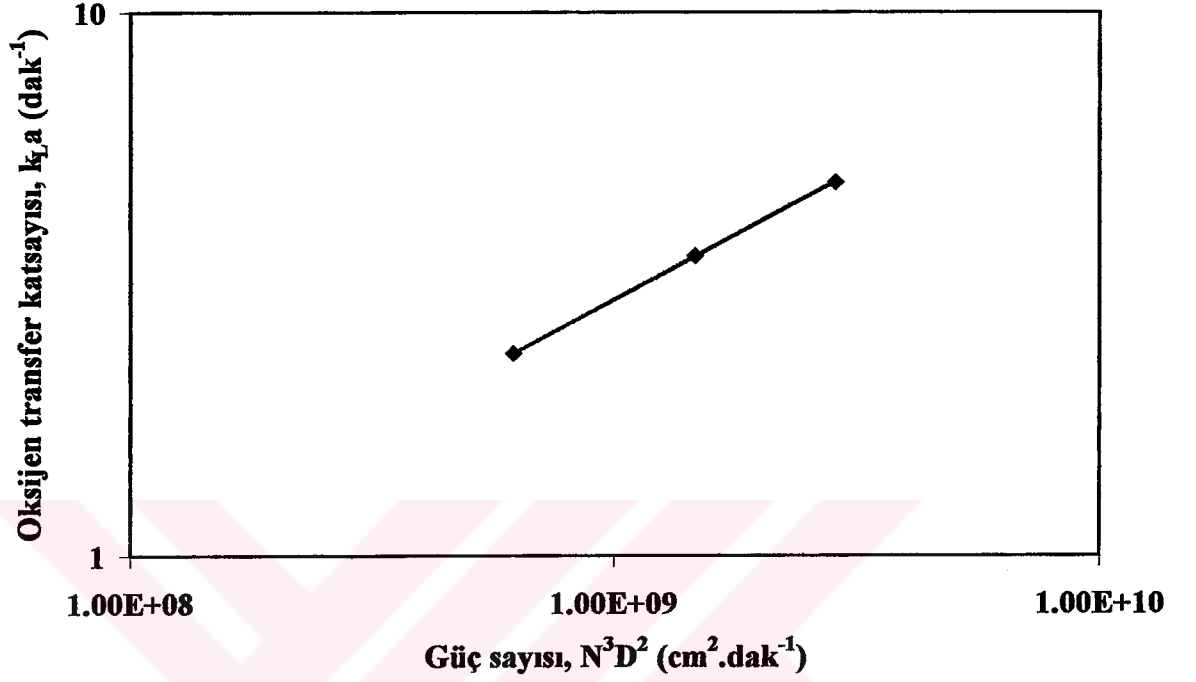
Şekil 4.1 – 4.4'de görüldüğü gibi, k_{La} 'nın N^3D^2 'ye bağımlılığı için iki bölge düşünülebilir. 300 rpm karıştırıcı hızının altında kalan bölgede k_{La} , karıştırıcı hızına daha az bağımlıdır. 300 rpm'in üzerinde ise k_{La} , karıştırıcı hızının artmasıyla artmaktadır. Aynı sonucu, Westerterp vd. (1963), Mehta ve Sharma (1971) kendi çalışmalarında da gözlemlemişlerdir. Westerterp vd., karıştırıcının gaz-sıvı içine etkili olarak dağıtılmasının ancak yüksek karıştırıcı hızlarında mümkün olduğu sonucuna varmıştır. Mehta ve Sharma'da, düşük karıştırıcı hızlarında, karıştırıcı hızının artmasıyla k_{La} değerlerindeki artışın az olduğunu belirtmişlerdir. Westerterp vd.'ne göre, kritik bir karıştırıcı hızı vardır. Bu hız aşıldığında k_{La} , karıştırıcı hızıyla lineer olarak artmaktadır. Bu çalışmada da aynı durum söz konusu olduğundan, karıştırıcı hızı 300 rpm ve yukarısı için korelasyon yapılmıştır.

Literatürde (Çizelge 4.13) destile su için, karıştırılmalı reaktörlerde, reaktörün geometrisine bağlı olarak, (P/V_L) 'nin üssü (α) geniş bir değişim göstermektedir ($0.35 < \alpha < 1.0$). Çizelge 4.13'den görüleceği gibi, (P/V_L) 'nin üsleri ile (N^3D^2)'nin üsleri oldukça benzerdir. Aralarındaki ilişki $(P/V_L) = c (N^3D^2)$ şeklinde yazılabilir. Sabit bir sayı olan c, reaktöre farklı gaz girişleri sonucu değişebilir. Bu yüzden, (P/V_L) 'nin üssü (N^3D^2)'nin üssünden farklı olabilir. (Kıral, 1987; Aksak, 1990).

Destile su için bu çalışmaya ait proses şartları daha önce Bölüm 4.1.1.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de destile su için güç sayısına karşılık elde edilen k_{La} değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.13'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucu N^3D^2 'nin üssü 0.47 olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda verilere ait $R^2 = 0.9999$ ve standart sapma değeri $\delta = 0.0039$

olarak hesaplanmıştır. Bu değer Çizelge 4.13'te verilen araştırmacıların bulduğu değerlerin arasındadır.

$$k_{La} \propto (N^3 D^2)^{0.47}$$



Şekil 4.13 Destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (yüzeysel hava hızı $3.156 \text{ cm} \cdot \text{dak}^{-1}$, sıcaklık 37°C ve pH 7)

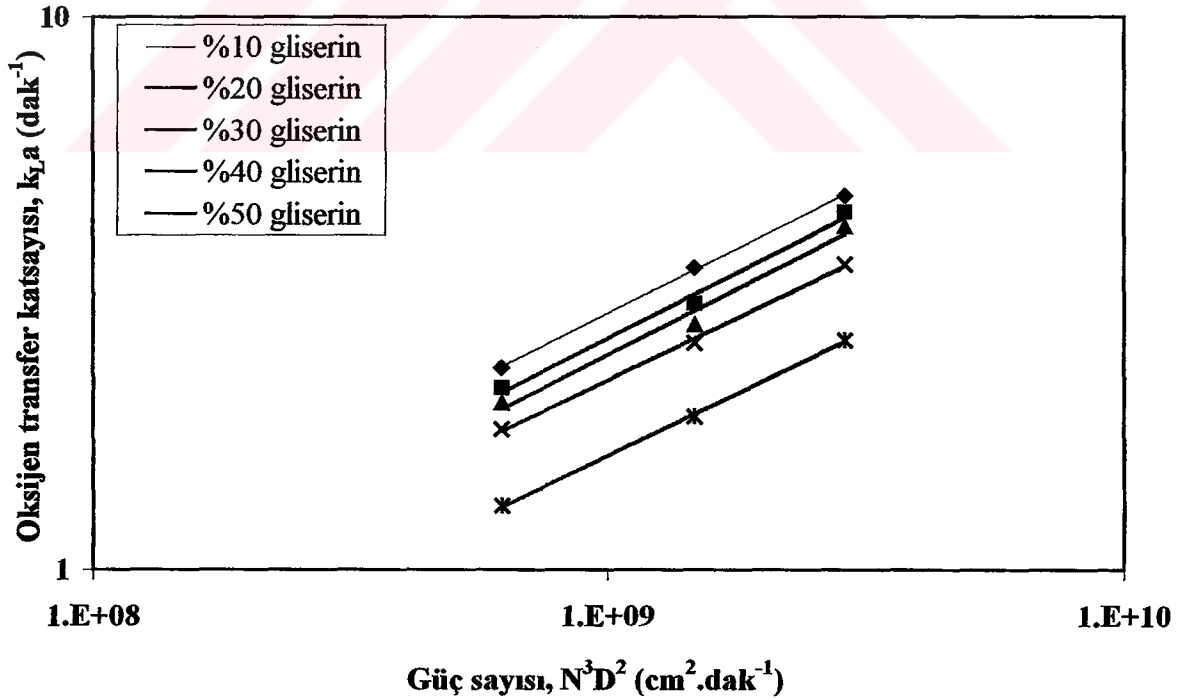
Çizelge 4.13 Destile su için literatürden alınan (N^3D^2) ve (P/V_L) 'nin üsleri

Literatür verileri	(N^3D^2)'nin üsleri (α)	(P/V_L)'nin üsleri (α)
Calderbank (1958)	-	0.4
Yoshida vd. (1960)	0.43-0.68	-
Richards (1961)	-	0.4
Hortaçsu (1965)	0.37	-
Robinson ve Wilke (1973) ve Hassan ve Robinson (1977)	-	0.35-0.5
Smith vd. (1977)	-	0.47
Linek vd. (1977)	-	0.59
Van't Riet (1979)	-	0.4
Chanderasekharan ve Calderbank (1981)	-	0.57
Hickman (1988)	-	0.4-0.54
Aksak (1990)	-	$0.4 < \alpha < 1.0$
Wu (1995)	-	0.67
Gayk (2000)	0.42	-
Zu vd. (2001)	-	0.4
Bu çalışma	0.47	-

4.2.1.2 Gliserin+destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın incelenmesi

Bu çalışma için proses şartları daha önce Bölüm 4.1.1.2'de verilmiştir. Çizelge 4.2'de gliserin+destile su için güç sayısına karşılık (karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan güç sayıları Ek 7'de Çizelge Ek7.1'de verilmiştir.) elde edilen $k_{L,a}$ değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.14'de grafiksel olarak sunulmuştur. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 8'de (Çizelge Ek8.1) verilmiştir. Destile suya %10-50 oranlarında gliserin ilave edildiğinde $k_{L,a}$ 'nın N^3D^2 ile değişimi destile su ile aynı bulunmuştur. Gliserin yüzdesinin artmasıyla ulaşılan viskozite değeri, 37 °C için 6.948 cpoise'dir. Viskozitenin yaklaşık 7 kat artırılmış olmasına rağmen $k_{L,a}$ ile güç sayısı arasındaki ilişkiyi belirleyen üssel değer, (N^3D^2)'nin üssü, destile su için hesaplanan değere çok yakın bulunmuştur. Bu değer ise $\alpha=0.46$ 'dir.

$$k_{L,a} \propto (N^3D^2)^{0.46}$$

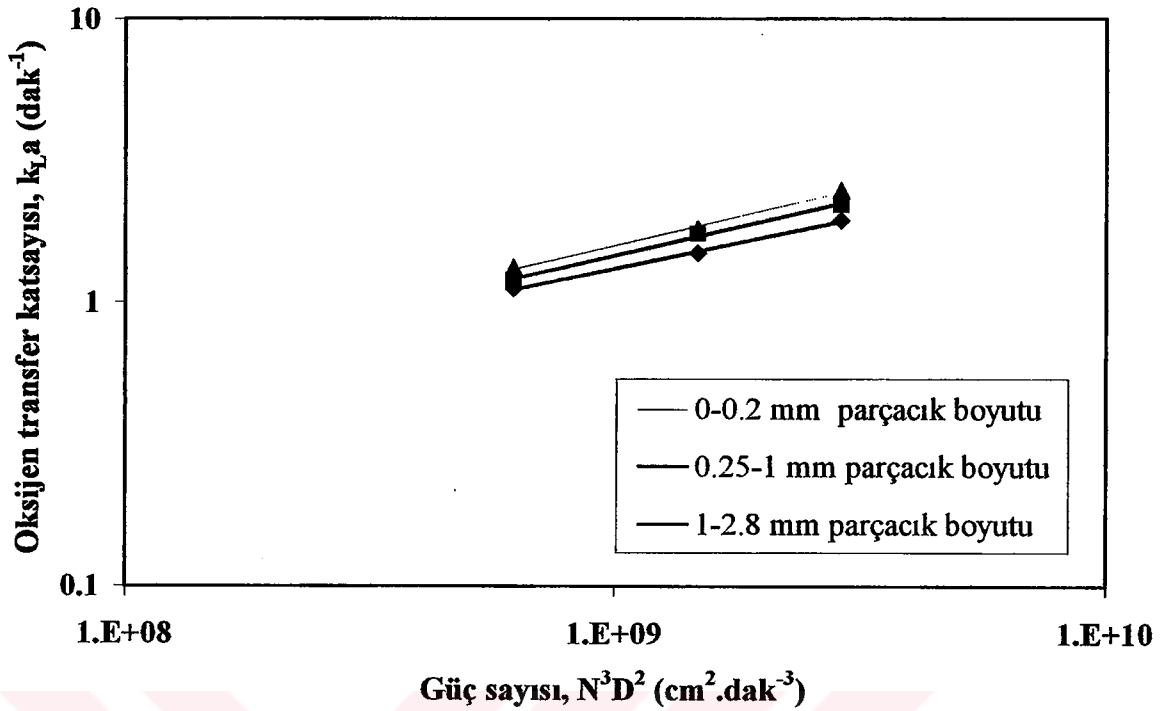


Şekil 4.14 Gliserin+destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın değişimi (yüzeysel hava hızı 3.516 $\text{cm} \cdot \text{dak}^{-1}$, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

4.2.1.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi

Bu çalışma için proses şartları daha önce Bölüm 4.1.1.3'de verilmiştir. Çizelge 4.3'de tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+destile su için güç sayısına karşılık (karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan güç sayıları Ek 7'de Çizelge Ek7.1'de verilmiştir.) elde edilen k_{La} değerleri daha önceden verilmiştir ve Şekil 4.15'de grafiksel olarak sunulmuştur. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 8'de (Çizelge Ek8.2) verilmiştir. Hesaplamalar sonucunda N^3D^2 'nin üssü destile suya göre daha küçük (0.39) bulunmuştur. Bu, karıştırmanın destile suya göre daha az etkili olduğu anlamına gelmektedir. k_{La} değerlerinin karıştırıcı hızıyla artışının destile suya göre daha az olmasının muhtemel sebepleri, tutuklayıcı malzemenin %25 oranında ilavesi ile viskozitenin artması, kabarcıkların birleşmesi ve ara yüzey alanının azalması sonucu kütle transferinin azalmasıdır. Katı maddelerin varlığı sıvı fazın özelliklerini (viskozite, yoğunluk) değiştirir (Miyachi vd., 1981; Verlaan ve Tramper, 1987). Literatürde katı maddelerin ilave edilmesi sonucu oksijen transferinin azaldığını gösteren birçok proses mevcuttur (Joosten vd., 1977; Iwanaka, 1985, Schumpe vd., 1987; Oguz vd., 1987). Viskozitenin artmasıyla güç tüketimi azalır. Düşük viskoziteli sıvılarda hava, bir karıştırıcı ile küçük kabarcıklar halinde sıvı içine iyi bir şekilde dağıtılır. Bu yüzden güç tüketimi yüksektir. Viskozitenin artmasıyla hava iyi dağılamaz ve büyük kabarcıklar halinde biyoreaktörün ortasına doğru yükselirler. Gücün büyük bir kısmının absorplandığı karıştırıcının çevresindeki bu büyük hava kabarcıklarının varlığı, gaz-sıvı karışımının yoğunluğunu, dolayısıyla güç tüketimini azaltır (Wiseman, 1977).

$$k_{La} \propto (N^3D^2)^{0.39}$$

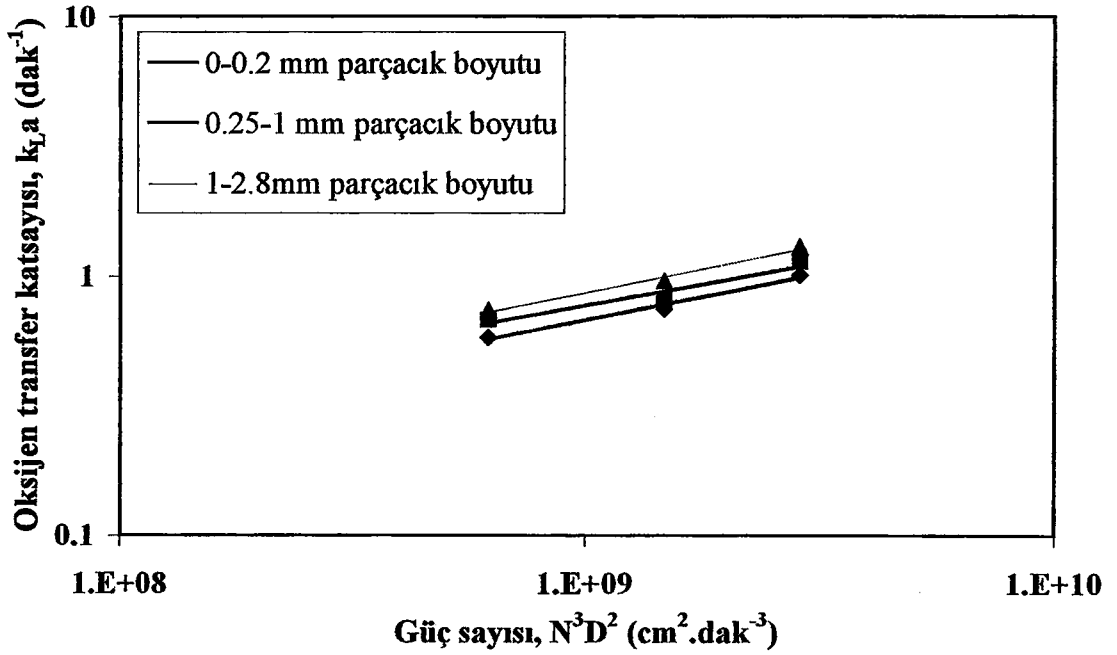


Şekil 4.15 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (yüzeysel hava hızı $3.156 cm.dak^{-1}$, sıcaklık $37^\circ C$ ve pH 7)

4.2.1.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi

Bu çalışma için proses şartları daha önce Bölüm 4.1.1.4'de verilmiştir. Çizelge 4.4'de tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+gliserin (%50)+destile su için güç sayısına karşılık (karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan güç sayıları Ek 7'de Çizelge Ek7.1'de verilmiştir.) elde edilen k_{La} değerleri daha önceden verilmiştir ve Şekil 4.16'da grafiksel olarak sunulmuştur. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 8'de (Çizelge Ek8.3) verilmiştir. Hesaplamalar sonucunda N^3D^2 'nin üssü yine destile suya göre daha küçük (0.35) bulunmuştur. Bu durum ise, tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+destile su'da olduğu gibi (Bölüm 4.2.1.3) karıştırmanın destile suya göre daha az etkili olduğu anlamına gelmektedir. Aktif karbon parçacıklarının %25 oranında ilavesi durumunda ara yüzey alanının azalması sonucu oksijen transferi azalmıştır.

$$k_{La} \propto (N^3D^2)^{0.35}$$



Şekil 4.16 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+gliserin(%50)destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (yüzeysel hava hızı $3.156 cm.dak^{-1}$ sıcaklık $37^\circ C$ ve pH 7)

4.2.2 Reynolds sayısının (N_{Re}) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi

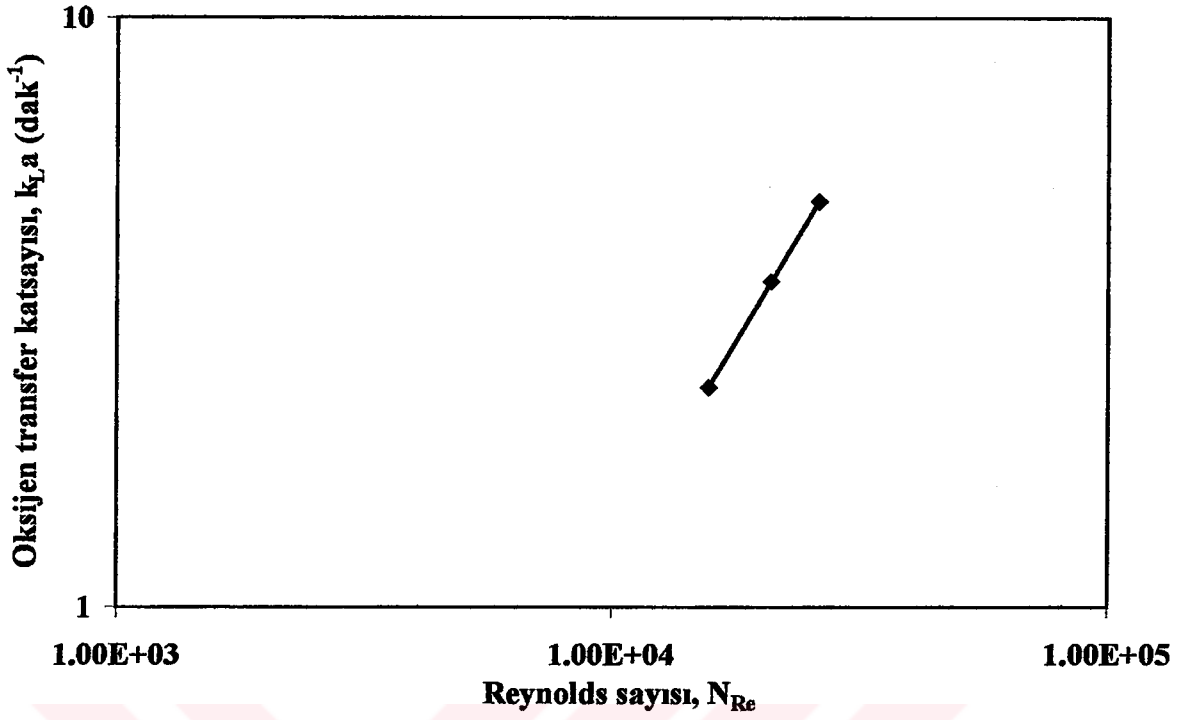
Reynolds sayısı, güç sayısı (N^3D^2) gibi karıştırıcı hızının (N) bir fonksiyonudur. Literatürde (Çizelge 4.14) destile su için, karıştırmalı reaktörlerde (N_{Re})'nin üssü geniş bir değişim göstermektedir ($0.67 < \alpha < 1.8$). Destile su için bu çalışmaya ait proses şartları daha önce Bölüm 4.1.1.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de destile su için Reynolds sayısına karşılık (karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan Reynolds sayıları Ek 9'da Çizelge Ek9.1'de verilmiştir.) elde edilen k_{La} değerleri daha önce de verilmiştir ve Şekil 4.17'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda N_{Re} 'nin üssü 1.42 olarak bulunmuştur. Aynı zamanda verilere ait $R^2 = 0.9999$ ve standart sapma değeri, $\delta = 0.0387$ olarak hesaplanmıştır.

$$k_{La} \propto (N_{Re})^{1.42}$$

Bu değer (1.42) Çizelge 4.14'te verilen araştırmacıların bulduğu değerlerin ($0.67 < \alpha < 1.8$) arasındadır.

Çizelge 4.14 Destile su için literatürden alınan (N_{Re})'nin üsleri

Literatür verileri	(N_{Re})'nin üsleri
Hortaçsu (1965)	1.12
Sideman vd. (1966)	1.12
Yagi ve Yoshida (1971)	1.5
Albal vd. (1983)	0.67
Smith ve Warmoeskeren (1985) (Archis vd. 2002, tarafından kaynak olarak verilmiştir)	1.1-1.2
Ranade vd. (1987) (Aksak 1990, tarafından kaynak olarak verilmiştir.)	1.8
Aksak (1990)	1.13
Smith (1991) (Archis vd. 2002, tarafından kaynak olarak verilmiştir)	0.7
Gayık (2000)	1.26
Bu çalışma	1.42



Şekil 4.17 Destile su için Reynolds sayısının fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın değişimi (yüzeysel hava hızı 3.156 cm.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.2.3 Yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın incelenmesi

Bu çalışmada, destile su için yüzeysel hava hızları 1.578-9.470 cm.dak⁻¹ arasında değiştirilirken, diğer çözeltiler için iki farklı yüzeysel hava hızı 3.156 cm.dak⁻¹ ve 6.313 cm.dak⁻¹ kullanılmıştır. Yüzeysel hava hızının etkisini incelerken iki nokta gerekli fakat yeterli değildir. Bu kesin bir sonuca varmaktan çok, $k_{L,a}$ 'nın v_s 'ye bağımlılığı üzerine hızlı bir kontrol sağlamak amacıyla yapılmıştır. Yüzeysel hava hızı değerleri, hava debisinin biyoreaktörün kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yüzeysel hava hızına karşılık çizilen $k_{L,a}$ değerleri Şekil 4.18 - 4.21'de verilmiştir. $k_{L,a}$ ve v_s arasında üssel bir ilişki elde etmek için logartimik koordinatlar kullanılmıştır. Dört farklı çözeltide $k_{L,a}$ değerinin yüzeysel hava hızına bağımlılığını açıklayan üsler elde edilmiştir.

4.2.3.1 Destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın incelenmesi

Literatürde (Çizelge 4.15) destile su için, yüzeysel hava hızının üssel değerleri (β), karıştırıcının hızına ve ekipmanın geometrisine bağlı olarak geniş bir aralık içinde ($0 < \beta < 0.76$) değişmektedir.

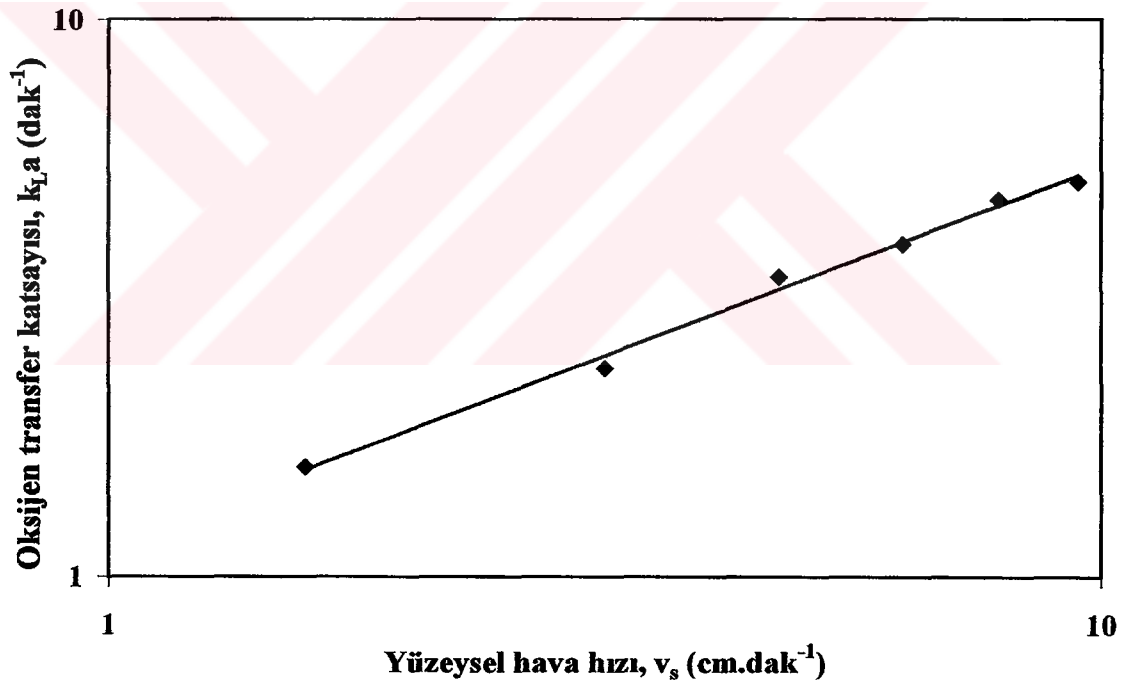
Çizelge 4.15 Destile su için literatürden alınan (v_s)'nin üsleri

Literatür verileri	(v_s)'nin üsleri (β)
Cooper vd.(1944)	0.67
Calderbank (1958) Van't Riet (1979)	0.50
Hyman ve Van Der Bogaerde (1960)	0.17
Hortaçsu (1965)	0.67
Robinson ve Wilke (1973) Hassan ve Robinson (1977)	0.30-0.60
Smith vd. (1977) (Archis vd. 2002, tarafından kaynak olarak verilmiştir)	0.40
Chandrasekharan ve Calderbank (1981)	0.63
Gibiliaro (1985)	0.45
Linek vd.(1987) (Archis vd. 2002, tarafından kaynak olarak verilmiştir)	0.40
Hickman (1988) (Archis vd. 2002, tarafından kaynak olarak verilmiştir)	0.68-0.57
Aksak (1990)	$0 < \beta < 0.76$
Whitton ve Nienow (1993) (Archis vd. 2002, tarafından kaynak olarak verilmiştir)	0.55
Neale ve Pinches (1994)	0.24-0.58
Gayık (2000)	0.60
Zhu vd. (2001)	0.50
Bu çalışma	0.68

Destile su için bu çalışmaya ait proses şartları daha önce Bölüm 4.1.2.1'de verilmiştir. Çizelge 4.5'de destile su için yüzeysel hava hızına karşılık (hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları Ek 10'da Çizelge Ek10.1'de verilmiştir.) elde edilen $k_L a$ değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.18'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda v_s 'nin üssü 0.68 olarak bulunmuştur. Aynı zamanda verilere ait $R^2=0.9933$ ve standart sapma değeri, $\delta= 0.2128$ olarak hesaplanmıştır.

$$k_L a \propto v_s^{0.68}$$

Bu değer ($\beta=0.68$), Çizelge 4.15'de belirtilen araştırmacıların bulduğu değerlerin ($0 < v_s < 0.76$) arasındadır.

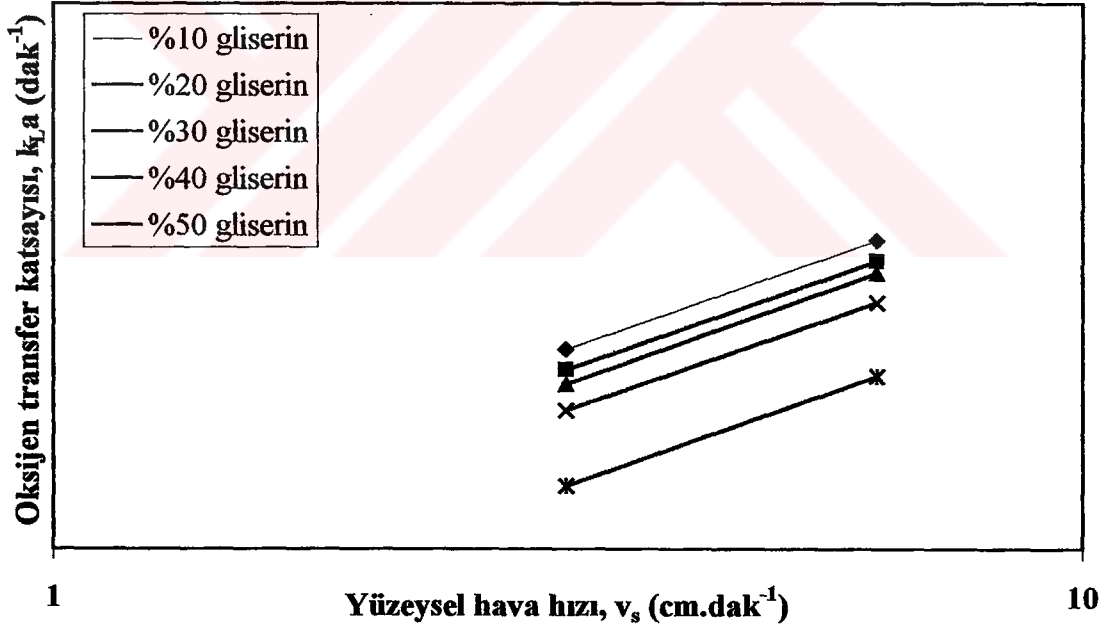


Şekil 4.18 Destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.2.3.2 Gliserin+destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın incelenmesi

Bu çalışmaya ait proses şartları daha önce Bölüm 4.1.2.2'de verilmiştir. Çizelge 4.6'da destile su+gliserin için yüzeysel hava hızına karşılık (hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları Ek 10'da Çizelge Ek10.1'de verilmiştir.) elde edilen $k_{L,a}$ değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.19'de grafiksel olarak sunulmuştur. Destile suya %10-50 oranlarında gliserin ilave edildiğinde $k_{L,a}$ 'nın v_s ile değişimini belirleyen üssel değer, destile su için bulunan değere çok yakın (0.66) olarak bulunmuştur. Gliserin yüzdesinin artmasıyla viskozitedeki artışa bakıldığında düşük viskoz sıvı olduğu görülmüştür. Dolayısıyla $k_{L,a}$ 'nın yüzeysel hava hızı ile artışı su ile aynı şekilde olmuştur.

$$k_{L,a} \propto v_s^{0.66}$$

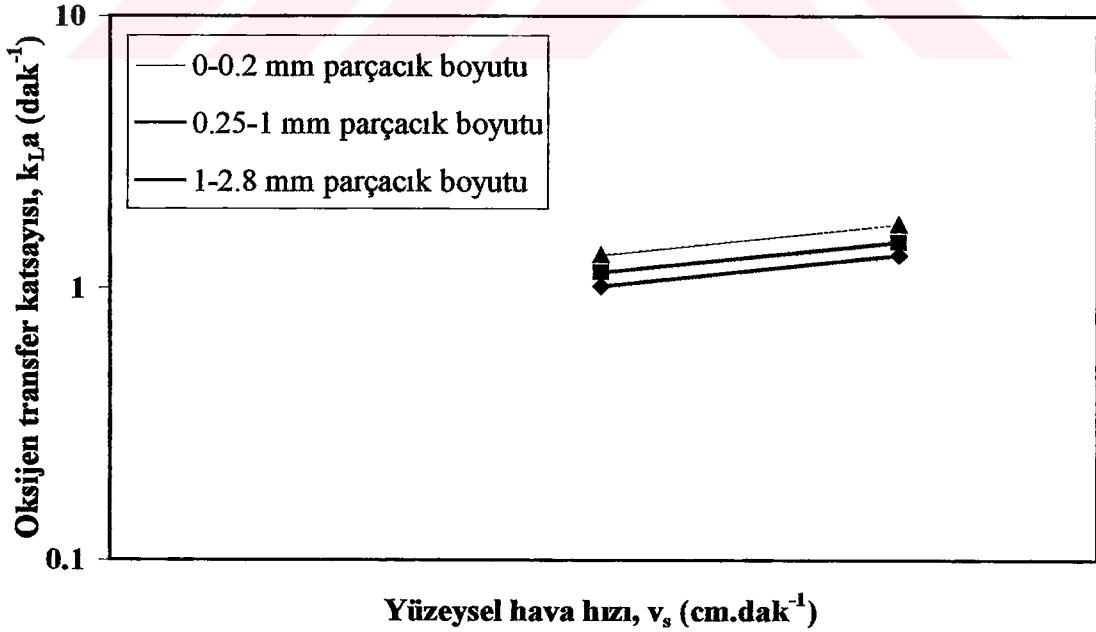


Şekil 4.19 Gliserin+ destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.2.3.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak $k_{L}a$ 'nın incelenmesi

Bu çalışmaya ait proses şartları daha önce Bölüm 4.1.2.3'de verilmiştir. Çizelge 4.7'da tutuklayıcı malzeme+destile su için yüzeysel hava hızına karşılık (hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları Ek 10'da Çizelge Ek10.1'de verilmiştir.) elde edilen $k_{L}a$ değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.20'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda destile suya %25 oranında tutuklayıcı malzeme ilave edildiğinde elde edilen v_s 'nin üssü (0.37) destile sudan küçük bulunmuştur. Bir başka deyişle yüzeysel hava hızı, $k_{L}a$ üzerine daha az etkilidir. Tutuklayıcı malzemenin ilave edilmesi, ara yüzey alanını azaltmakta ve çözeltinin fiziksel özelliklerinde değişime sebep olmaktadır. Viskozitenin artması ile de, çözeltideki birleşme ve büyük kabarcıklar sebebiyle, transfer alanında meydana gelen azalma yetersiz gaz dağılımı ile sonuçlanmaktadır (Joosten vd., 1977; Verlaan ve Tramper, 1987). Yüzeysel hava hızının transfer katsayısı üzerine etkisi, çözeltinin viskozitesinin artmasıyla azalmaktadır. Dolayısıyla, tutuklayıcı malzemenin varlığı sonucu elde edilen v_s 'nin üssü destile sudan küçüktür.

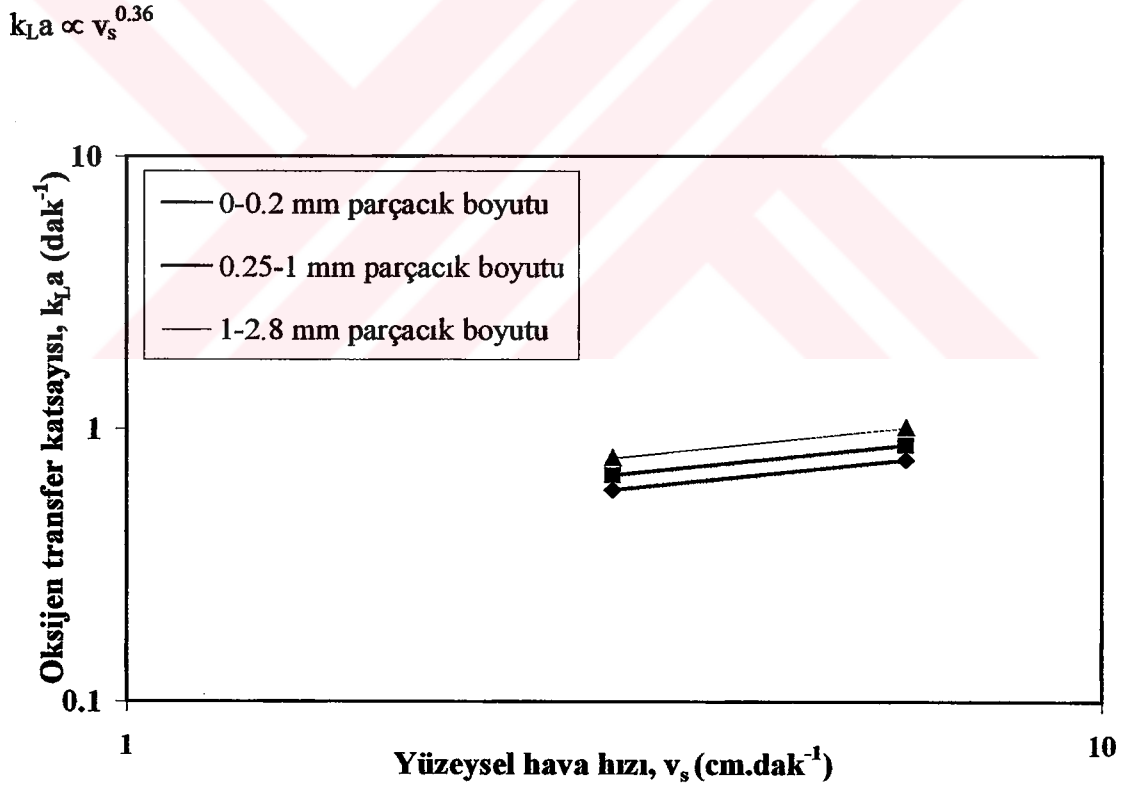
$$k_{L}a \propto v_s^{0.37}$$



Şekil 4.20 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+ destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak $k_{L}a$ 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, , sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.2.3.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_La 'nın incelenmesi

Bu çalışmaya ait proses şartları daha önce Bölüm 4.1.2.4'de verilmiştir. Çizelge 4.8'de tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için yüzeysel hava hızına karşılık (hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları Ek 10'da Çizelge Ek10.1'de verilmiştir.) elde edilen k_La değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.21'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+gliserin (%50)+destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) üssü (0.36) destile suya göre daha küçük bulunmuştur. Bu durum ise, yüzeysel hava hızının k_La üzerinde daha az etkili olduğu anlamına gelir. Tutuklayıcı malzeme+destile su'da (Bölüm 4.2.2.3) görülen yetersiz gaz dağılımı bu çalışmada da söz konusudur.

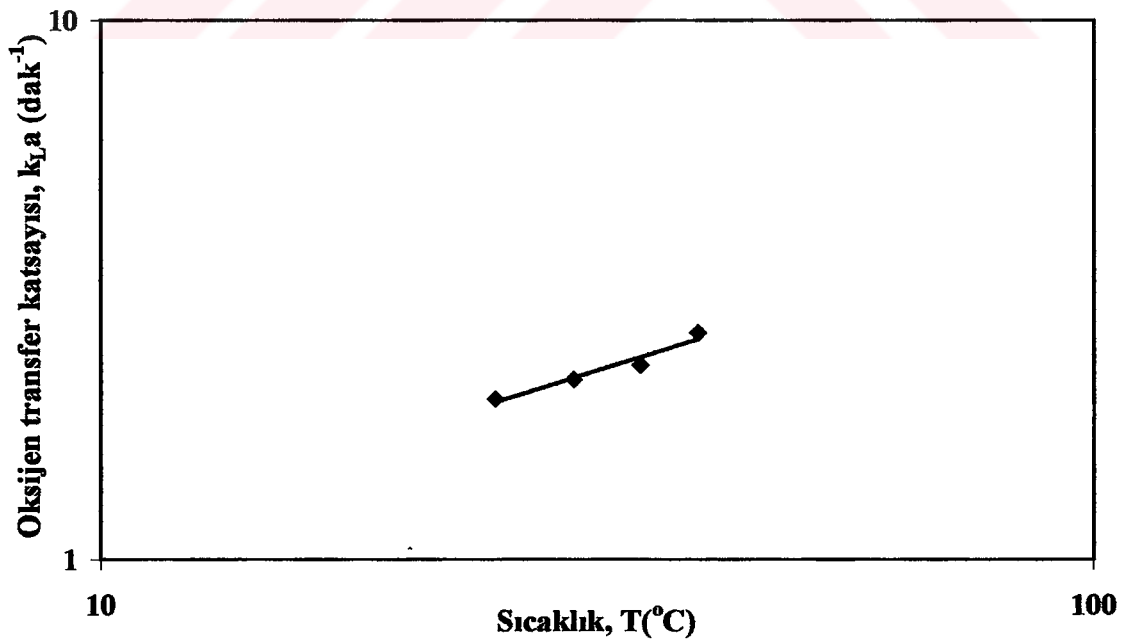


Şekil 4.21 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme miktarı)+ gliserin (%50) destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak k_La 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, , sıcaklık 37°C ve pH 7)

4.2.4 Sıcaklığın (T) fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın incelenmesi

Bu çalışma için proses şartları daha önce Bölüm 4.1.3'de verilmiştir. Çizelge 4.9'da destile su için sıcaklığa karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.22'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda T'nin üssü 0,57 ve her 1°C için $k_{L,a}$ 'da %2.16'lık bir artış bulunmuştur. Aynı zamanda verilere ait $R^2 = 0.9520$ standart sapma değeri, $\delta = 0.0676$ olarak hesaplanmıştır. Pirt (1985), sıcaklık ile $k_{L,a}$ arasındaki ilişkiyi $k_{L,a} \propto T^{0.5}$ şeklinde ifade etmiştir. Aksak (1990), mekanik karıştırma bir reaktörde destile su için, $k_{L,a}$ ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi belirleyen üssü 0-30°C aralığında 0.39 olarak bulmuştur. Sideman vd. (1996), ise $k_{L,a}$ korelasyonlarında sıcaklığı esas aldıklarında $k_{L,a} \propto T^{0.34}$ olduğunu görmüşlerdir. Winkler ve Thomas (1978) ise, sıcaklığın her 1°C artmasıyla $k_{L,a}$ değerinin %2.48 oranında arttığı sonucuna varmışlardır. Boon (1978) (Winkler, 1981 tarafından kaynak olarak verilmiştir.) ise bütün havalandırma sistemleri için 0-30°C aralığında sıcaklık artışıyla %2 oranında arttığını bulmuştur. T'nin üssünün Pirt ve Aksak'a göre yüksek olması, çalışılan sıcaklık aralığından kaynaklanmaktadır. % artış ise yukarıda bahsedilen araştırmacıların bulduğu değerlerin ($2.0 < 2.16 < 2.48$) arasındadır.

$$k_{L,a} \propto T^{0.57}$$

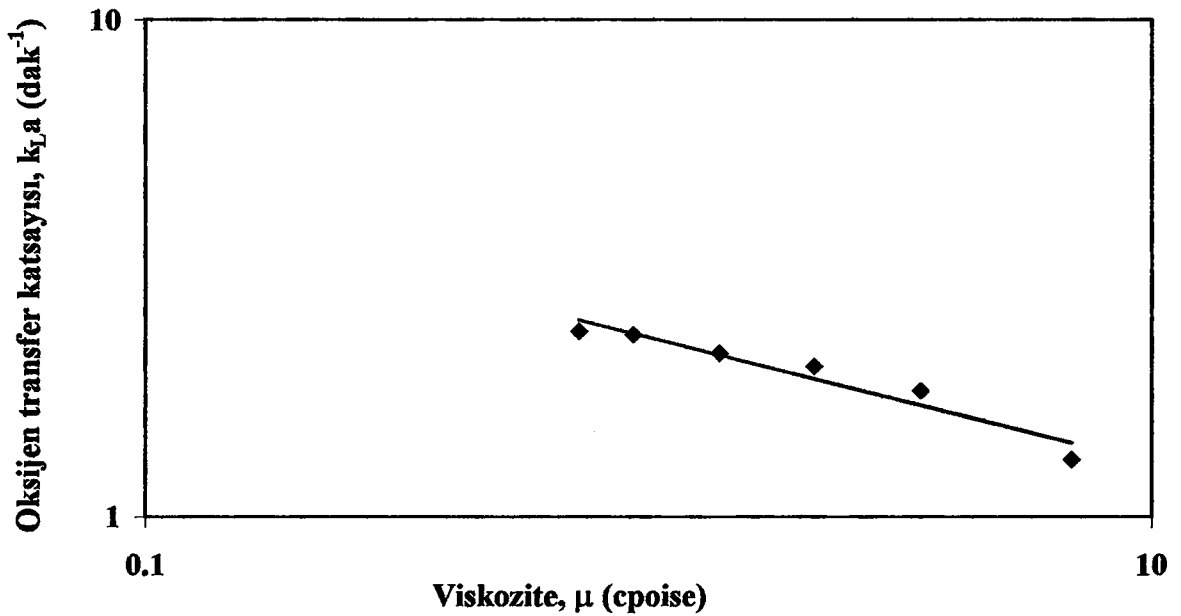


Şekil 4.22 Destile su için sıcaklığın fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, yüzeyel hava hızı 3.156 cm.dak⁻¹ ve pH 7)

4.2.5 Viskozitenin (μ) fonksiyonu olarak olarak $k_{L,a}$ 'nın incelenmesi

Bu çalışmaya ait proses şartları daha önce Bölüm 4.1.4'de verilmiştir. Çizelge 4.10'da gliserin+destile su için viskoziteye karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.23'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda μ 'nün üssü -0.25 olarak bulunmuştur. Aynı zamanda verilere ait $R^2 = 0.9318$ ve standart sapma değeri, $\delta=0.0662$ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada destile suya %10-100 oranlarında gliserin ilavesiyle viskozite artırılmıştır. Çözeltinin viskozitesinin artırılmasıyla, beklendiği gibi kütle transferi, dolayısıyla $k_{L,a}$ azalmıştır. O'Connor, (Pirt, 1985, tarafından kaynak olarak verilmiştir.) viskozite ile $k_{L,a}$ arasındaki ilişkiyi $k_{L,a} \propto \mu^{-0.5}$ şeklinde ifade etmiştir. Yagi ve Yoshida (1971) newtonyen akışkanlar için $k_{L,a}$ ve viskozite arasındaki ilişkiyi belirleyen üssün -0.40 olduğunu bulmuşlardır. Albal vd. (1983) ise $k_{L,a}$ 'nın μ ile değişimini $k_{L,a} \propto \mu^{-0.17}$ şeklinde tanımlamışlardır. Hattori vd. (Pirt, 1985, tarafından kaynak olarak verilmiştir.) viskozitenin etkisini karboksil metil selüloz kullanarak incelemişlerdir. Viskozite ve $k_{L,a}$ arasındaki ilişkiyi, viskozite değerinin 50 cp'dan (kritik viskozite değeri) küçük olması durumunda $k_{L,a} \propto \mu^{-0.35}$, 50 cp'dan büyük olması halinde ise $k_{L,a} \propto \mu^{-1.1}$ şeklinde ifade etmişlerdir. Bu çalışmada bulunan değer (-0.30), yukarıda bahsedilen araştırmacıların bulduğu değerlerin ($-0.17 < -0.25 < -0.5$) arasındadır.

$$k_{L,a} \propto \mu^{-0.25}$$

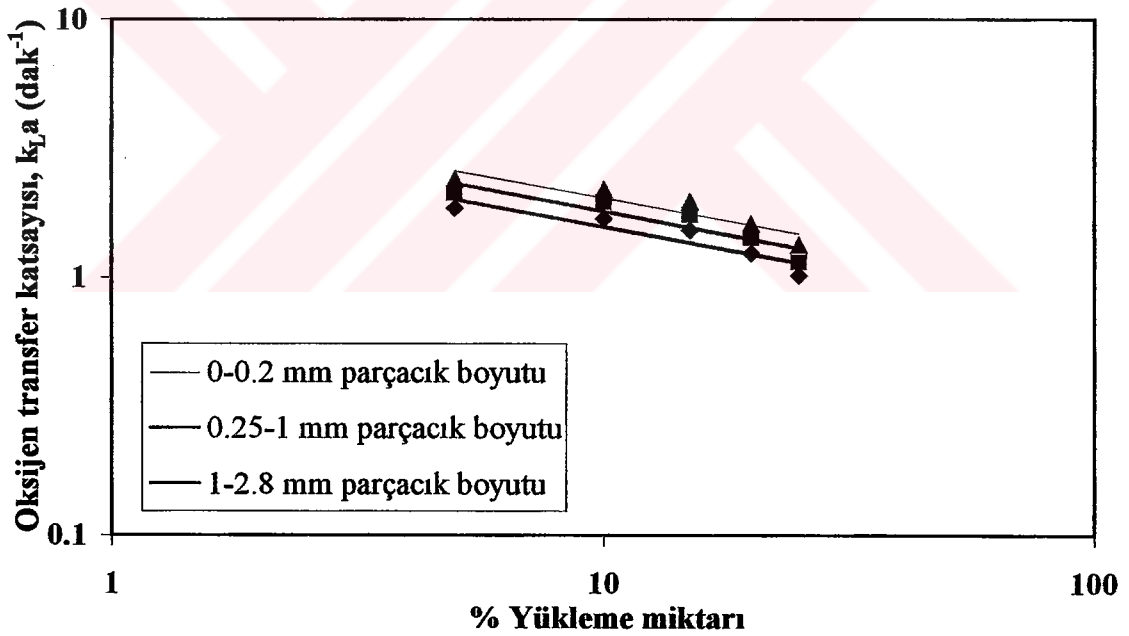


Şekil 4.23 Gliserin+destile su için viskozitenin fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, yüzeyel hava hızı $3.156 \text{ cm.dak}^{-1}$, sıcaklık 37°C ve pH 7)

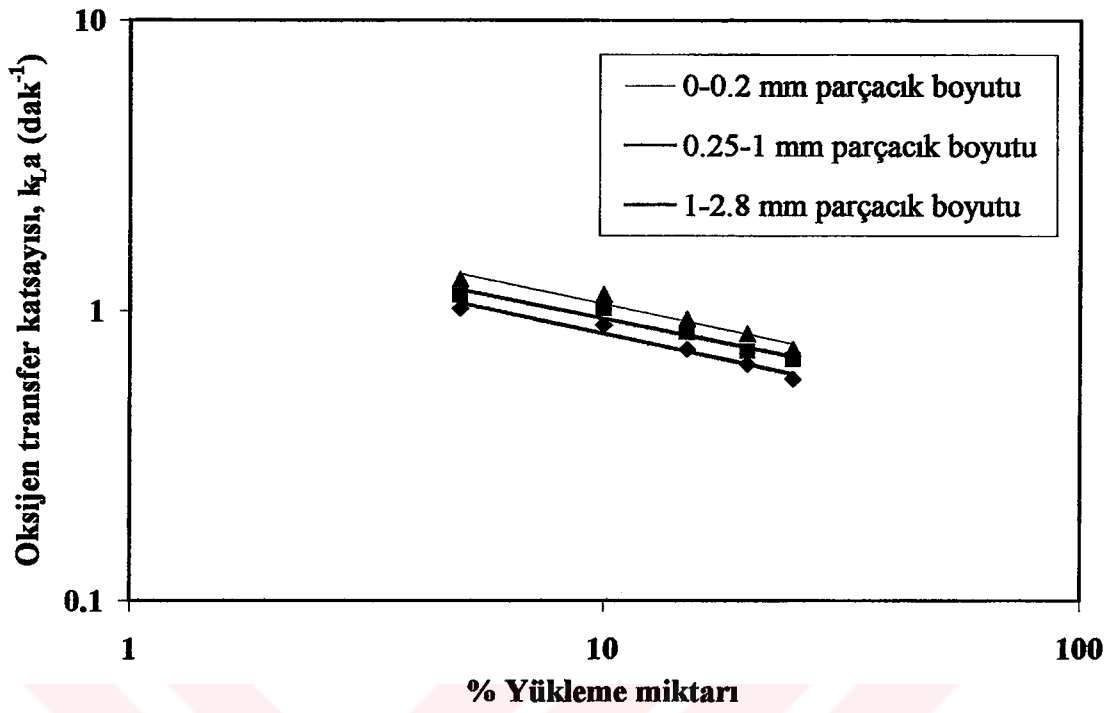
4.2.6 Tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın incelenmesi

Bu çalışmaya ait proses şartları daha önce Bölüm 4.1.5.1 ve Bölüm 4.1.5.2'de verilmiştir. Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de sırasıyla tutuklayıcı malzeme+destile su ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için % yükleme miktarına karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de grafiksel olarak sunulmuştur. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 11'de (Çizelge Ek11.1 ve Çizelge Ek11.2) verilmiştir. Hesaplamalar sonucunda % yükleme miktarı ve $k_{L,a}$ arasındaki ilişkiyi belirleyen üs -0.35 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla tutuklayıcı malzemenin $k_{L,a}$ üzerinde önemli bir etkisi görülmüştür.

$$k_{L,a} \propto (\% \text{ Yükleme miktarı})^{-0.35}$$



Şekil 4.24 Tutuklayıcı malzeme+destile su için tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının fonksiyonu olarak $k_{L,a}$ 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, yüzeysel hava hızı 3.156 cm.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7)



Şekil 4.25 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, yüzeysel hava hızı 3.156 cm.dak⁻¹, sıcaklık 37°C ve pH 7)

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen deney bulgularından yararlanarak çalışılan deney şartları için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1) Karıştırıcı hızına karşılık elde edilen $k_L a$ değerleri incelendiğinde, oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızına dolayısıyla güç sayısına ($N^3 D^2$) ve Reynolds sayısına (N_{Re}) bağımlılığı iki bölge içinde düşünülebilir. Kritik karıştırıcı hızının altında (300 rpm), $k_L a$ karıştırıcı hızına daha az bağımlıdır. Kritik karıştırıcı hızının üzerinde ise, $k_L a$ karıştırıcı hızının artmasıyla lineer olarak artmaktadır. $k_L a$ 'nın güç sayısına bağımlılığı; destile su için $k_L a \propto (N^3 D^2)^{0.47}$, gliserin+destile su için $k_L a \propto (N^3 D^2)^{0.46}$, tutuklayıcı malzeme+destile su için $k_L a \propto (N^3 D^2)^{0.39}$ ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için $k_L a \propto (N^3 D^2)^{0.35}$ olarak bulunmuştur. $k_L a$ 'nın Reynolds sayısına bağımlılığı ise, destile su için $k_L a \propto (N_{Re})^{1.42}$ olarak tespit edilmiştir.
- 2) Biyoreaktöre gönderilen havanın debisinin artırılmasıyla $k_L a$ artmaktadır. $k_L a$ 'nın yüzeysel hava hızına bağımlılığı; destile su için $k_L a \propto (v_s)^{0.68}$, gliserin+destile su için $k_L a \propto (v_s)^{0.66}$, tutuklayıcı malzeme+destile su için $k_L a \propto (v_s)^{0.37}$ ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için $k_L a \propto (v_s)^{0.36}$ olarak bulunmuştur.
- 3) Sıcaklığın $k_L a$ üzerine etkisi incelendiğinde, oksijen transfer katsayısının sıcaklığın artmasıyla arttığı görülmüştür. Gazların çözünürlüğünün sıcaklığın artmasıyla azalması kütle transfer katsayısı üzerinde önemli bir etki göstermemiştir. $k_L a$ 'nın sıcaklığa bağımlılığı, destile su için $k_L a \propto (T)^{0.57}$ olarak bulunmuştur.
- 4) Gliserin ilavesiyle viskozitenin artırılması sonucu beklendiği gibi oksijen transfer katsayısı azalmıştır. Gliserin+destile su için, $k_L a$ 'nın viskoziteye bağımlılığı, $k_L a \propto (\mu)^{-0.25}$ olarak bulunmuştur.
- 5) Tutuklayıcı malzeme (aktif karbon parçacıkları) ilavesi ile % yükleme miktarına bağlı olarak bütün parçacık hacimleri için oksijen transfer katsayısı azalmıştır. Elde edilen diğer bir sonuç ise, aynı yükleme miktarında parçacık hacminin artması ile $k_L a$ artmıştır. Parçacık hacmi ile $k_L a$ 'daki artışın sebebi, büyük parçacıklarda işgal edilen alanın daha az

olmasıdır. k_{La} 'nın % yükleme miktarına bağımlılığı, tutuklayıcı malzeme+destile su ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için $k_{La} \propto (\% \text{Yükleme})^{-0.35}$ olarak bulunmuştur.

- 6) Bu çalışmada, elde edilen k_{La} değerlerinin proses değişkenlerine bağımlılığını ifade eden üssel değerler, literatürde belirtilen üssel değerlerin arasındadır. Çalışmalarda kullanılan reaktörün ve karıştırıcı paletin şekil ve boyutlarının farklı olması, farklı deney şartlarında çalışılması, farklı çözeltiler kullanılması nedeni ile elde edilen değerler birbirinden farklılıklar göstermiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda ise;

- 1) Bu çalışmada destile suya gliserin ilavesiyle viskozite arttırılmıştır. Gliserin yerine farklı maddeler kullanılarak (sodyum karboksil metil selüloz, silikon gibi) viskozite arttırılıp elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.
- 2) Farklı çapta birden fazla karıştırıcı kullanılarak oksijen transferine etkisi incelenebilir.
- 3) Karıştırıcının reaktör tabanından olan yüksekliği değiştirilerek oksijen transferine etkisi incelenebilir.
- 4) Farklı tutuklayıcı malzemeler kullanılarak (silikon diskler gibi) oksijen transferine etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

Aksak, N., (1990), **Gas Liquid Mass Transfer in Agitated Vessel for Newtonian and Non-Newtonian Liquids**, M. Sc. Thesis, Boğaziçi University.

Albal, R.S., Shah, Y.T., Schumpe, A., Carr, N.L., (1983), "Mass Transfer in Multiphase Agitated Contactors", *Chemical Engineering Science*; 27:61-67.

Andrew, S.P.S., (1982), "Gas Liquid Mass Transfer in Microbiological Reactors", *Trans. IChemE*, 60:3-13.

Atkinson, B. ve Mavituna, F., (1991), **Biochemical Engineering and Biotechnology Handbook**, New York.

Bewtra, J.K., Nicholas, W.R. ve Polkowski, L.B., (1970), "Effect of Temperature on Oxygen Transfer in Water", *Water Research*, 4:115-123.

Chandrasekharan, K. ve Calderbank, P.H., (1981), "Further Observations on The Scale-up of Aerated Mixing Vessels", *Chemical Engineering Science*, 36:819-823.

Cooper, C.M., Fernstrom, G.A. ve Miller, S.A., (1944), "Gas Liquid Contactors", *Ind. Eng. Chem.*, 36:504-509.

Danckwerts, P.V., (1951), "Significance of Liquid Film Coefficients in Gas Absorption", *Ind. Eng. Chem.*, 43:1460-1464.

Eckenfelder, W.W., (1959), "Absorption of Oxygen from Air Bubbles in Water", *J. San. Eng. Div. ASCE* 85 (SA4), 89-99.

Frijlink, J.J., (1987), **Physical Aspects of Gassed Suspension Reactors**, Thesis, University of Technology, Delft.

Garcia-Ochao F., Gomez E., (1998), "Mass Transfer Coefficient in Stirred Tank Reactors for Xanthan Gum Solutions", *Biochemical Engineering Journal*, 1:1-10.

Gibilaro, L.G., Davies, S.N., Cooke, M., Lynch, P.M. ve Middleton, J.C., (1985), "Initial Response Analysis of Mass Transfer in a Gas Sparged Stirred Vessel", *Chemical Engineering Science*, 40:1811-1816.

Gogate, Parag R. ve Pandit, Aniruddha B., (1999), "Survey Measurement Techniques for Gas-Liquid Mass Transfer Coefficient in Bioreactors", *Biological Engineering Journal*, 4:7-15.

Hassan, T.M. ve Robinson, C.W., (1977), "Stirred Tank Mechanical Power Requirement and Gas Hold-up in Aerated Aqueous Phases", *AIChE J.*, 23:48-56.

Higbie, R., (1935), *Trans. AIChE J.*, 31:365-369.

Hyman, D. and Van Den Bogaerde, J.M., (1960), "Small Bench Scale Stirred Reactors", *Ind. Eng. Chem.*, 52:751-759.

Hortaçsu, Ö., (1965), *Gas Liquid Mass Transfer in an Agitated Vessel: Air-Water System*, M.Sc. Thesis, The Graduate School of The Oklahoma State University.

Iwanaka, M., Tojo, K. ve Miyanami, K., (1985), "Mass Transfer Characteristics in a Slurry Reactor", *Chem. Eng. Commun.*, 34:205-212.

Joosten, G.E.H., Schilder, J.G.M. ve Janssen, J.J., (1977), "The Influence of Suspended Solid Material on The Gas-Liquid Mass Transfer in Stirred Gas-Liquid Contactors", *Chemical Engineering Science*, 563-566.

Kelkar, B.G., Shah, Y.T. ve Carr, N.L., (1984), "Hydrodynamics and Axial Mixing in a Three-Phase Bubble Column. Effects on Slurry Properties", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 29:308-313.

Kıral, D., (1987), *A Study of Oxygen Transfer in The Fermentation of E.Coli*, M.Sc.Thesis, Boğaziçi University.

Kluytman, J.H.J., Wachem van B.G.M., Kuster B.F.M., Schouten J.C., (2003), "Mass Transfer in Sparged and Stirred Reactors: Influence of Carbon Particles and Electrolyte", *Chemical Engineering Science*, 58: 4719-4728

Mehta, V.D. ve Sharma, M.M., (1971), "Mass Transfer in Mechanically Agitated Gas Liquid Contactors", *Chemical Engineering Science*, 26:461-468.

Miyachi, M., Iguchi, A., Uchida, S. ve Koide, K., (1981), "Effects of Solid Particles in Liquid-Phase on Liquid-Side Mass Transfer Coefficient", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 59:640-641.

Oguz, H., Brehm, A. ve Deckwer, W.D., (1987), "Gas/Liquid Mass Transfer in Sparged Agitated Slurries", *Chemical Engineering Science*, 42:1815-1822.

Özergin, Ş.K., (1989), *Studies on Ethanol Production by Fermentation*, M.Sc.Thesis, Boğaziçi University.

Pandit, A.B. ve Joshi, J.B., (1983), "Mixing in Mechanically Agitated Gas-Liquid Contactors, Bubble Columns", *Chemical Engineering Science*, 38:1189-1215.

Pirt, S.J., (1985), *Principles of Microbe and Cell Cultivation*, Blackwell Scientific Publications, Great Britain.

Richards, J.W. (1961), "Studies in Aeration and Agitation", *Prog. Ind. Microbiol.*, 3:143-172.

Robinson, C.W. ve Wilke, C.R., (1973), "Simultaneous Measurement of Interfacial Area and Oxygen Absorption in Stirred tanks", *Biotechnology and Bioengineering*, 15:755-782.

Rossi, G., (2001), "The Design of Bioreactors", *Hydrometallurgy*, 59:217-231.

Sideman, S., Hortaçsu, Ö. and Fulton, J.W., (1966), "Mass Transfer in Gas Liquid Contacting Systems", *Ind. Eng. Chem.*, 58:32-41.

Van't Riet, K., (1979), "Review of Measuring Methods and Results in Nonviscous Gas-Liquid Mass Transfer in Stirred Vessels", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 18:357-364.

Verlaan, P. and Tramper, J., (1987), "Hydrodynamics, Axial Dispersion and Gas-Liquid Oxygen Transfer in an Airlift-Loop Bioreactor with Three-Phase Flow", *International Conference on Bioreactors and Biotransformations*, 9-12 Nov. 1987, UK.

Vogelaar J.C.T., Klapwijk A., Van Lier J.B. and Rulkens W.H., (1999), "Temperature Effects on the Oxygen Transfer Rate Between 20 and 55°C", *Wat. Res.*, 3: 1037-1041.

Westerterp, K.R., Van Dierendonck, L.L., De Kraa, J.A., (1963), "Interfacial Areas in Agitated Gas-Liquid Contactors", *Chemical Engineering Science*, 18:157-168.

Whitman, W.G. and Lewis, W.K., (1924), *Ind. Eng. Chem.*, 16:1215-1221.

Winkler, M.A., (1981), *Biological Treatment of Waste Water*, John Wiley&Sons, New York.

Winkler, M.A. and Thomas, A., (1978), *Biological Treatment of Aqueous Wastes*, Ch.5 in *Topics in Enzyme and Fermentation Biotechnology*, Ellis Horwood/Wiley.

Wiseman, A. (1977), *Topics in Enzyme and Fermentation Biotechnology*, John Wiley&Sons, New York.

Wu, H., (1995), "An Issue on Applications of a Disk Turbine for Gas-Liquid Mass Transfer", *Chemical Engineering Science*, 50:2801-2811.

Yagi, H. and Yoshida, F., (1971), "Gas Absorption by Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Sparged Agitated Vessels", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 14:488-493.

Yawalkar Archis, Heesink Albertus, Versteeg Geert, Pangarkar Vishwas, (2002), "Gas-Liquid Mass Transfer Coefficient in Stirred Tank Reactors", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 80: 840-848.

YonHong Bi, Hill Gordon A., Sumner Robert J., (2001), "Enhancement of the Overall Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in a Stirred Tank Bioreactor", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 79:463-467.

Yoshida, F. and Akita, K., (1965), *AIChE J.*, 11:9-19.

Yoshida, F., Ikeda, A., Imakawa, S. and Miura, Y., (1960), *Ind. Eng. Chem.*, 58:32-40.

EKLER

- Ek 1 k_{La} 'nın hesaplanmasına Aait bir örnek
- Ek 2 Karıştırıcı hızları için elde edilen k_{La} değerlerine ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri
- Ek 3 Hava debileri için elde edilen k_{La} değerlerine ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri
- Ek 4 Sıcaklık değerleri için elde edilen k_{La} değerlerine ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri
- Ek 5 Viskozite değerleri için elde edilen k_{La} değerlerine ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri
- Ek 6 % Yükleme miktarları için elde edilen k_{La} değerlerine ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri
- Ek 7 Karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan güç sayıları
- Ek 8 Güç sayısı ve k_{La} arasındaki ilişkiyi belirleyen korelasyonlara ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri
- Ek 9 Karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan reynolds sayıları
- Ek 10 Hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları
- Ek 11 % Yükleme miktarı ve k_{La} arasındaki ilişkiyi belirleyen korelasyonlara ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

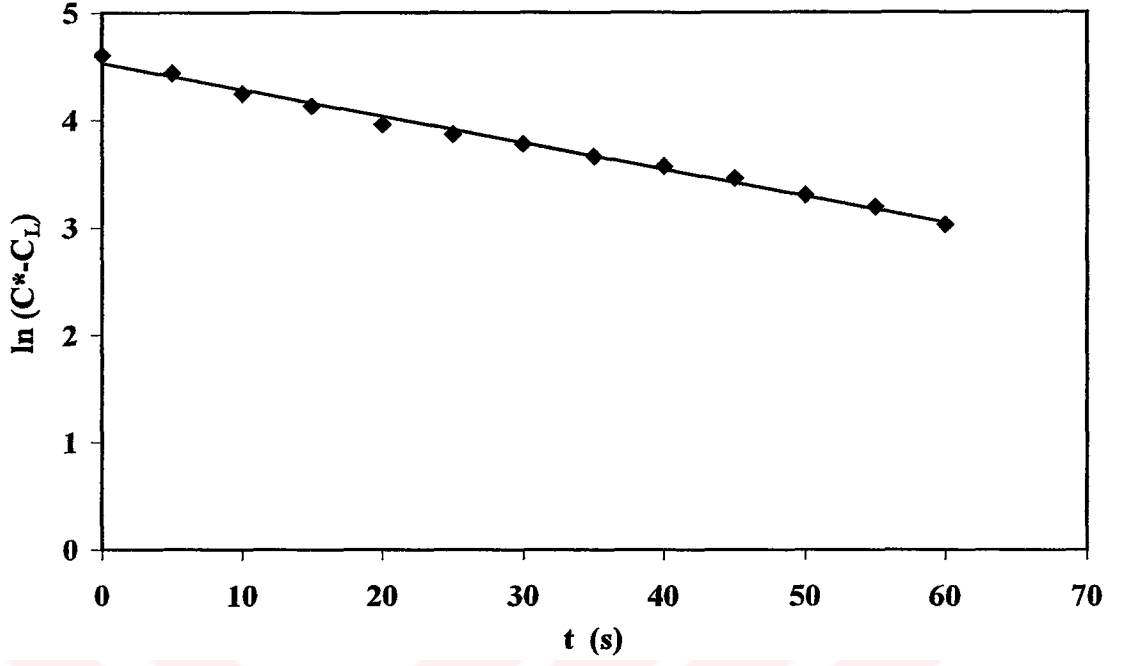
Ek 1 $k_L a$ 'nın hesaplanmasına ait bir örnek

Oksijenin hacimsel kütle transfer katsayıları, $k_L a$, daha önce anlatılan gazın uzaklaştırılması yöntemi ile belirlenmiştir. Örnek hesaplama destile su için, 300rpm karıştırıcı hızı, 0.3 l.dak^{-1} $k_L a$ hava debisi, sıcaklık 37°C ve pH 7 deney şartlarında yapılmıştır. Çözünmüş oksijen konsantrasyon değerleri, C_L , deneysel ve teorik olarak Çizelge E1.1'de verilmiştir.

Çizelge Ek1.1 Destile su için çözünmüş oksijen konsantrasyon değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık 37°C ve pH 7)

Zaman (s)	C_L (%) (Deneysel)	C_L (%) (Teorik)
0	0	0
5	15.6	20.6
10	30.0	36.9
15	37.7	49.9
20	47.7	60.2
25	52.7	68.4
30	56.4	74.9
35	61.2	80.1
40	64.6	84.2
45	68.4	87.4
50	72.9	90.0
55	75.7	92.1
60	79.4	93.7

$\ln(C^* - C_L) = -k_L a \cdot t$ denkleminde yararlanılarak $\ln(C^* - C_L)$ ve t arasında çizilen grafiğin eğiminden $k_L a$ (2.361 dak^{-1}) bulunmuştur (Şekil Ek1.1). verilere ait $R^2 = 0.9912$ ve standart sapma değeri, $\delta = 0.0197$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil Ek1.1 Destile su için zamana karşılık elde edilen çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

Ek 2 Karıştırıcı hızları için elde edilen k_{La} değerlerine ait R^2 ve standart sapma değerleri

Çizelge Ek2.1 Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	R^2	δ
100	0.9879	0.0046
200	0.9765	0.0238
300	0.9912	0.0422
400	0.9800	0.1079
500	0.9616	0.1486

Çizelge Ek2.2 Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

N, (rpm)	%10 gliserin		%20 gliserin		%30 gliserin		%40 gliserin		%50 gliserin	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
100	0.9912	0.0038	0.9958	0.0025	0.9913	0.0035	0.9955	0.0023	0.9894	0.0347
200	0.9778	0.0228	0.9946	0.0087	0.9935	0.0091	0.9940	0.0082	0.9921	1.0089
300	0.9925	0.0135	0.9925	0.0262	0.9918	0.0259	0.9883	0.0294	0.9967	0.0130
400	0.9837	0.0650	0.9841	0.0612	0.9866	0.0512	0.9818	0.0582	0.9937	0.0259
500	0.9971	0.0563	0.9987	0.0036	0.9930	0.0502	0.9820	0.0593	0.9894	0.0392

Çizelge Ek2.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	Parçacık boyutu					
	0-0.2 mm		0.25-1 mm		1-2.8 mm	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
100	0.9752	0.0064	0.9875	0.0039	0.986	0.0036
200	0.9986	0.0064	0.9975	0.0070	0.9968	0.0075
300	0.9954	0.059	0.9816	0.0418	0.997	0.0151
400	0.998	0.0229	0.9956	0.0385	0.998	0.0226
500	0.9955	0.0409	0.9933	0.0410	0.9781	0.0657

Çizelge Ek2.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	Parçacık boyutu					
	0-0.2 mm		0.25-1 mm		1-2.8 mm	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
100	0.9983	0.0027	0.9962	0.0237	0.9879	0.0073
200	0.9974	0.0042	0.9935	0.0412	0.9924	0.4902
300	0.9993	0.0254	0.9826	0.0763	0.9996	0.0088
400	0.9963	0.0527	0.9942	0.0060	0.9958	0.0345
500	0.9876	0.0033	0.9987	0.0521	0.9869	0.8921

Ek 3 Hava debileri için elde edilen k_{LA} değerlerine ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Çizelge Ek3.1 Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Hava debisi, v ($Ldak^{-1}$)	R^2	δ
0.15	0.9849	0.0285
0.30	0.9912	0.0422
0.45	0.9910	0.0509
0.60	0.9970	0.0326
0.75	0.9910	0.0578
0.90	0.9985	0.0371

Çizelge Ek3.2 Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

v , $Ldak^{-1}$	%10 gliserin		%20 gliserin		%30 gliserin		%40 gliserin		%50 gliserin	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
0.3	0.9986	0.0135	0.9925	0.0262	0.9918	0.0259	0.9883	0.0294	0.9967	0.0130
0.6	0.9973	0.0293	0.9957	0.0349	0.9964	0.0302	0.9966	0.0237	0.9941	0.0204

Çizelge Ek3.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

v , $Ldak^{-1}$	Parçacık boyutu					
	0-0.2 mm		0.25-1 mm		1-2.8 mm	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
0.3	0.9967	0.0632	0.9872	0.0782	0.9921	0.0605
0.6	0.9981	0.2790	0.9947	0.0287	0.9785	0.0328

Çizelge Ek3.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

v , $Ldak^{-1}$	Parçacık boyutu					
	0-0.2 mm		0.25-1 mm		1-2.8 mm	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
0.3	0.9984	0.0198	0.9862	0.0016	0.9981	0.0376
0.6	0.9976	0.1724	0.9948	0.0627	0.9979	0.0004

Ek 4 Sıcaklık değerleri için elde edilen k_{La} değerlerine ait R^2 standart sapma (δ) değerleri

Çizelge Ek4.1 Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Sıcaklık, T (°C)	R^2	δ
25	0.9950	0.0189
30	0.9950	0.0431
35	0.9949	0.0317
40	0.9917	0.0466

Ek 5 Viskozite değerleri için elde edilen k_L a değerlerine ait R^2 standart sapma (δ) değerleri

Çizelge Ek5.1 Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Viskozite, μ (cpoise)	R^2	δ
%10 gliserin	0.9986	0.0130
%20 gliserin	0.9925	0.0284
%30 gliserin	0.9918	0.0259
%40 gliserin	0.9896	0.0262
%50 gliserin	0.9967	0.0130

Ek 6 % Yükleme miktarları için elde edilen k_{1a} değerlerine ait R^2 standart sapma (δ) değerleri

Çizelge Ek6.1 Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

% Yükleme miktarı	Parçacık boyutu					
	0-0.2 mm		0.25-1 mm		1-2.8 mm	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
5	0.9953	0.0599	0.9785	0.0079	0.9921	0.0053
10	0.9971	0.1296	0.9737	0.0734	0.9838	0.1761
15	0.9916	0.0475	0.9981	0.0064	0.9988	0.0476
20	0.9859	0.0273	0.9827	0.0189	0.9928	0.0521
25	0.9962	0.1972	0.9918	0.0651	0.9947	0.0136

Çizelge Ek6.2 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

% Yükleme miktarı	Parçacık boyutu					
	0-0.2 mm		0.25-1 mm		1-2.8 mm	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
5	0.9961	0.0389	0.9856	0.0428	0.9921	0.0297
10	0.9829	0.0182	0.9928	0.0194	0.9838	0.1529
15	0.9957	0.0651	0.9994	0.0049	0.9988	0.0381
20	0.9917	0.0839	0.9761	0.0239	0.9928	0.0512
25	0.9973	0.0289	0.9932	0.0180	0.9947	0.0042

Ek 7 Karıştırıcı hızlarına karşılık hazırlanan güç sayıları

Bu çalışmada, güç girdisi ölçüm aparatları olmadığından (P/V_L) yerine güç sayısı olarak (N^3D^2) kullanılmıştır. Karıştırıcı hızına karşılık hesaplanan güç sayıları Çizelge Ek7.1'de verilmiştir.

Çizelge Ek7.1 Karıştırıcı hızına karşılık hazırlanan güç sayıları

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	Güç sayısı, N^3D^2 ($\text{cm}^2 \cdot \text{dak}^{-3}$)
100	23.040.000
200	184.320.000
300	622.080.000
400	1.474.560.000
500	2.880.000.000

Ek 8 Güç sayısı ve k_{La} arasındaki ilişkiyi belirleyen korelasyonlara ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Gliserin+destile su, tutuklayıcı malzeme+destile su ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için güç sayısı ve k_{La} arasındaki ilişkiyi belirleyen korelasyonlara ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Çizelge Ek8.2 ve Çizelge Ek8.3'de verilmiştir.

Çizelge Ek8.1 Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Gliserin+destile su	R^2	δ
%10 gliserin	0.9998	0.1687
%20 gliserin	0.9970	0.0436
%30 gliserin	0.9990	0.0445
%40 gliserin	0.9940	0.0851
%50 gliserin	0.9992	0.0794

Çizelge Ek8.2 Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Tutuklayıcı malzeme+destile su	R^2	δ
0-0.2 mm (parçacık boyutu)	0.9627	0.2212
0.25-1 mm (parçacık boyutu)	0.9586	0.2600
1-2.8 mm (parçacık boyutu)	0.9627	0.0826

Çizelge Ek8.3 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Tutuklayıcı malzeme+ gliserin+destile su	R^2	δ
0-0.2 mm (parçacık boyutu)	0.9821	0.00057
0.25-1 mm (parçacık boyutu)	0.9444	0.0290
1-2.8 mm (parçacık boyutu)	0.9869	0.0076

Ek 9 Karıştırıcı hıza karşı karşılık hesaplanan Reynolds sayıları

Reynolds sayılarının hesaplanması için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$N_{Re} = \frac{D^2 N \rho}{\mu}$$

D: Karıştırıcı çapı (cm)

N: Karıştırıcı hızı (s^{-1})

ρ : Yoğunluk ($g.cm^{-3}$)

μ : Viskozite (poise)

Karıştırıcı hıza karşılık hesaplanan Reynolds sayıları Çizelge Ek9.1’de verilmiştir.

Çizelge Ek9.1 Karıştırıcı hıza karşılık hesaplanan Reynolds sayıları

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	Reynolds sayısı, N_{Re}
100	5231
200	10462
300	15694
400	20925
500	26156

Ek 10 Hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları

Yüzeysel hava hızları, hava debisinin biyoreaktörün kesit alanına bölünmesi ile hesaplanmıştır.

Çizelge Ek10.1 Hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları

Hava debisi, v (l.dak⁻¹)	Yüzeysel hava hızı, v_s (cm.dak⁻¹)
0.15	1.578
0.30	3.156
0.45	4.735
0.60	6.313
0.75	7.891
0.90	9.470

Ek 11 %Yükleme miktarı ve k_{La} arasındaki ilişkiyi belirleyen korelasyonlara ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Tutuklayıcı malzeme+destile su ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için % yüklem miktarı ve k_{La} arasındaki ilişkiyi belirleyen korelasyonlara ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Çizelge Ek11.1 ve Çizelge Ek11.2'de verilmiştir.

Çizelge Ek11.1 Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Tutuklayıcı malzeme +destile su	R^2	δ
0-0.2 mm (parçacık boyutu)	0.8499	0.0483
0.25-1 mm (parçacık boyutu)	0.8306	0.0553
1-2.8 mm (parçacık boyutu)	0.8534	0.0401

Çizelge Ek11.2 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Tutuklayıcı malzeme+ gliserin+destile su	R^2	δ
0-0.2 mm (parçacık boyutu)	0.9591	0.0306
0.25-1 mm (parçacık boyutu)	0.9545	0.0383
1-2.8 mm (parçacık boyutu)	0.9459	0.0382

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	20.05.1979
Doğum yeri	Ankara
Lise	1989-1996 Tekirdağ Anadolu Lisesi
Lisans	1996-2001 Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalürji Fak. Kimya Mühendisliği bölümü
Yüksek Lisans	2001-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

