

99015

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARIŞTIRMALI BİR BİYOREAKTÖRDE OKSİJEN
TRANSFERİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN
İNCELENMESİ**

Kimya Müh. Sevgi GAYIK

**F.B.E Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ



Tez Danışmanı : Doç. Dr. Belma KIN ÖZBEK

E. Bolat
Prof. Dr. Efe Bolat

Külgen
Doç. Dr. Kutlu Ülgen

İSTANBUL, 2000

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
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 ile İlgili Önceki Çalışmalar.....	9
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	15
3.1 Deney Düzenegi.....	15
3.1.1 Karıştırmalı biyoreaktör.....	15
3.1.2 Kontrol modülleri.....	18
3.2 Kullanılan Materyaller.....	19
3.2.1 Tutuklayıcı malzeme.....	19
3.3 Deneyin Yapılışı.....	20
4. DENEY BULGULARI.....	22
4.1 Oksijen Transfer Katsayısı Üzerine Proses Değişkenlerinin Etkisi.....	22
4.1.1 Oksijen transfer katsayısı üzerine karıştırıcı hızının etkisi.....	23
4.1.1.1 Destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi.....	23
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.....	26
4.1.1.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi.....	28
4.1.2 Oksijen transfer katsayısı üzerine hava debisinin etkisi.....	29
4.1.2.1 Destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi.....	29

4.1.2.2	Gliserin+destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi.....	31
4.1.2.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi	32
4.1.2.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi	33
4.1.3	Oksijen transfer katsayısı üzerine sıcaklığın etkisi.....	35
4.1.4	Oksijen transfer katsayısı üzerine viskozitenin etkisi.....	36
4.1.5	Oksijen transfer katsayısı üzerine tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının ve parçacık boyutunun etkisi	38
4.1.5.1	Tutuklayıcı malzeme+destile su için % yükleme miktarının ve parçacık boyutunun oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi	38
4.1.5.2	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için % yükleme miktarının ve parçacık boyutunun oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi	40
4.2	Oksijen Transfer Katsayısı İçin Deneysel Verilerden Elde Edilen Korelasyonlar	42
4.2.1	Güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi.....	42
4.2.1.1	Destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi.....	42
4.2.1.2	Gliserin+destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi	45
4.2.1.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi	46
4.2.1.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için güç sayısının (N^3D^2) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi	47
4.2.2	Reynolds sayısının (N_{Re}) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi.....	48
4.2.3	Yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi.....	50
4.2.3.1	Destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi	50
4.2.3.2	Gliserin+destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi	52
4.2.3.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi	53
4.2.3.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi	54
4.2.4	Sıcaklığın (T) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi.....	55
4.2.5	Viskozitenin (μ) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi.....	56
4.2.6	Tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi	57
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	59
	KAYNAKLAR.....	61
	EKLER.....	64
Ek 1	k_{La} 'nın Hesaplanmasına Ait Bir Örnek.....	65
Ek 2	Karıştırıcı Hızları İçin Elde Edilen k_{La} Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	67
Ek 3	Hava Debileri İçin Elde Edilen k_{La} Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	69

Ek 4	Sıcaklık Değerleri İçin Elde Edilen k_{La} Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	71
Ek 5	Viskozite Değerleri İçin Elde Edilen k_{La} Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri.....	72
Ek 6	% Yükleme Miktarları İçin Elde Edilen k_{La} Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	73
Ek 7	Karıştırıcı Hızlarına Karşılık Hesaplanan Güç Sayıları.....	74
Ek 8	Güç Sayısı ve k_{La} Arasındaki İlişkiyi Belirleyen Korelasyonlara Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	75
Ek 9	Karıştırıcı Hızlarına Karşılık Hesaplanan Reynolds Sayıları.....	77
Ek 10	Hava Debilerine Karşılık Hesaplanan Yüzeysel Hava Hızları.....	78
Ek 11	% Yükleme Miktarı ve k_{La} Arasındaki İlişkiyi Belirleyen Korelasyonlara Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri	79
ÖZGEÇMİŞ.....		80



SİMGE LİSTESİ

a	Birim sıvı hacmi başına spesifik gaz sıvı ara yüzeyi (cm^{-1})
C^*	Doyma noktasında 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})
$k_L a$	Hacimsel sıvı fazı kütle transfer katsayısı (dak^{-1})
N	Karıştırıcı hızı (rpm, karıştırıcının bir dakikadaki dairesel dönüş sayısı)
$N^3 D^2$	Güçsayısı ($\text{cm}^2.\text{dak}^{-3}$)
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 solunum 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_{La} 'nın belirlenmesi.....	8
Şekil 3.1 Karıştırılmalı biyoreaktör ve kontrol modüllerinin şematik diyagramı.....	17
Şekil 4.1 Destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi	24
Şekil 4.2 Gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi	26
Şekil 4.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi	27
Şekil 4.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi	29
Şekil 4.5 Destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi.....	30
Şekil 4.6 Gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi	32
Şekil 4.7 Tutuklayıcı malzeme+destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi	33
Şekil 4.8 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi	34
Şekil 4.9 Destile su için oksijen transfer katsayısının sıcaklık ile değişimi.....	36
Şekil 4.10 Gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının viskozite ile değişimi	37
Şekil 4.11 Tutuklayıcı malzeme+destile su için oksijen transfer katsayısının % yükleme miktarı ile değişimi.....	39
Şekil 4.12 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının % yükleme miktarı ile değişimi.....	41
Şekil 4.13 Destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi.....	44
Şekil 4.14 Gliserin+destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi	45
Şekil 4.15 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme)+destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi	47
Şekil 4.16 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme)+gliserin (%50)+destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi.....	48
Şekil 4.17 Destile su için Reynolds sayısının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi	50
Şekil 4.18 Destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi.....	52
Şekil 4.19 Gliserin+destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi	53
Şekil 4.20 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme)+destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi.....	54
Şekil 4.21 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme)+gliserin (%50)+destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi.....	55
Şekil 4.22 Destile su için sıcaklığın fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi.....	56
Şekil 4.23 Gliserin+destile su için viskozitenin fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi.....	57
Şekil 4.24 Tutuklayıcı malzeme+destile su için tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi.....	58
Şekil 4.25 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi.....	58

Şekil E1.1 Destile su için zamana karşılık elde edilen çözünmüş oksijen konsantrasyon değerleri

66



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1	Biyoreaktör ile ilgili komponentler ve değerleri..... 16
Çizelge 4.1	Destile su için karıştırıcı hızına karşılık elde edilen k_{La} değerleri..... 24
Çizelge 4.2	Gliserin+destile su için karıştırıcı hızına karşılık elde edilen k_{La} değerleri 25
Çizelge 4.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için karıştırıcı hızına karşılık elde edilen k_{La} değerleri 27
Çizelge 4.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için karıştırıcı hızına karşılık elde edilen k_{La} değerleri..... 28
Çizelge 4.5	Destile su için hava debisine karşılık elde edilen k_{La} değerleri..... 30
Çizelge 4.6	Gliserin+destile su için hava debisine karşılık elde edilen k_{La} değerleri 31
Çizelge 4.7	Tutuklayıcı malzeme+destile su için hava debisine karşılık elde edilen k_{La} değerleri 33
Çizelge 4.8	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için hava debisine karşılık elde edilen k_{La} değerleri 34
Çizelge 4.9	Destile su için sıcaklığa karşılık elde edilen k_{La} değerleri..... 35
Çizelge 4.10	Gliserin+destile su için viskoziteye karşılık elde edilen k_{La} değerleri..... 37
Çizelge 4.11	Tutuklayıcı malzeme+destile su için % yükleme miktarına karşılık elde edilen k_{La} değerleri 39
Çizelge 4.12	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için % yükleme miktarına karşılık elde edilen k_{La} değerleri..... 41
Çizelge 4.13	Destile su için literatürden alınan (N^3D^2) ve (P/V_L) 'nin üsleri..... 43
Çizelge 4.14	Destile su için literatürden alınan (N_{Re}) 'nin üsleri..... 49
Çizelge 4.15	Destile su için literatürden alınan (v_s) 'nin üsleri..... 51
Çizelge E1.1	Destile su için çözünmüş oksijen konsantrasyon değerleri..... 65
Çizelge E2.1	Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 67
Çizelge E2.2	Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 67
Çizelge E2.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 68
Çizelge E2.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 68
Çizelge E3.1	Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 69
Çizelge E3.2	Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 69
Çizelge E3.3	Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 69
Çizelge E3.4	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 70
Çizelge E4.1	Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 71
Çizelge E5.1	Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 72
Çizelge E6.1	Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 73
Çizelge E6.2	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 73
Çizelge E7.1	Karıştırıcı hızına karşılık hesaplanan güç sayıları..... 74
Çizelge E8.1	Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 75
Çizelge E8.2	Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri..... 75

Çizelge E8.3	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	76
Çizelge E9.1	Karıştırıcı hızına karşılık hesaplanan Reynolds sayıları.....	77
Çizelge E10.1	Hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları.....	78
Çizelge E11.1	Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	79
Çizelge E11.2	Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri.....	79



ÖNSÖZ

Bu tezin bana verilmesini sağlayan Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Salih Dinçer'e, çalışmamı yönlendiren ve her aşamasında bana yardımcı olan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Belma KIN ÖZBEK'e, öğrenim hayatımın lisans ve yüksek lisans aşamalarında yetişmemi ve yönlendirmemi sağlayan tüm saygıdeğer Öğretim Üyeleri ve Araştırma Görevlilerine, Boğaziçi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Kutlu ÜLGEN'e, beni her zaman destekleyen ve motivasyonumu yükselten sevgili arkadaşlarım Emel AKYOL, Semra YÜCEER, Özlem EMANET ve Işık YAVUZ'a, yalnız öğrenim hayatım boyunca değil tüm yaşantım boyunca her zaman beni destekleyerek, maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

Bu çalışmada karıştırmalı 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. Gliserin ilavesi çözeltinin viskozitesinin artırılması için yapılmış olup, tutuklayıcı malzeme olarak ise Scotch Brite 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 2.766 dak⁻¹'dir. Aynı şartlar sabit tutulduğunda, gliserin (%50)+destile su için k_{La} değeri 1.383 dak⁻¹, tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme, 0.1625 cm³ parçacık hacmi)+destile su için k_{La} değeri 0.933 dak⁻¹ ve tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme, 0.1625 cm³ parçacık hacmi)+gliserin (%50)+destile su için k_{La} değeri 0.450 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 % 50, tutuklayıcı malzeme+destile su için % 66.3, tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için % 83.7 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.

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 (%) 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.

In this work, $k_{L}a$ value was obtained as 2.766 min^{-1} in the distilled water by using the stirrer speed 300 rpm, air flow rate 0.3 l.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 25%, particle volume 0.1625 cm^3) and glycerol (50%)+distilled water with immobilised material (loading 25%, particle volume 0.1625 cm^3) were 1.383 min^{-1} , 0.933 min^{-1} and 0.450 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 50% for glycerol+distilled water, 66.3% for distilled water with immobilised material and 83.7% 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.

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 birisi kuşkusuz mikroorganizmalardır. Önemli endüstriyel mikrobiyal proseslerin çoğu aerobiktir. Bazı aerobik fermentasyonlarda, yeterli miktarda oksijen sağlanması çok büyük bir problem olabilir. Oksijen suda 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, $k_{L,a}$, 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 sağlamanın 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 arttırılır. Karıştırma, oksijen transferini dört yönüyle kolaylaştırır.

- Havayı akışkan ortam içine, küçük kabarcıklar halinde dağıtarak oksijen transferi için mevcut alanı arttırır.
- Hava kabarcıklarının akışkandan uzaklaşmasını geciktirir (gazın sıvı içinde tutulmasını arttırır).
- 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 amacı ile 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 Scotch Brite parçacıkları (Özergin, 1989) 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 genel bilgi, kütle transfer modelleri, hacimsel kütle transfer katsayısı, $k_{L,a}$, ölçüm yöntemleri ve oksijen transferi ile ilgili önceki çalışmalar kısaca özetlenmiştir. Bölüm 3’te deneylerde kullanılan materyaller ve yöntem hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 4’te deneylerden elde edilen bulgular çizelge ve grafik halinde sunulmuştur. Bölüm 5’te 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 sebebiyle 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 (g.cm^{-3})

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 birleştirilir. Absorpsiyon hızının yalnızca sıvı tarafındaki dirence bağlı olduğu kabul edilir.

Gaz-sıvı kütle transferi üzerine birçok model önerilmiştir.

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 hızının, D_L ($\text{cm}^2.\text{dak}^{-1}$), film kalınlığına, x_L (cm), oranı olarak tanımlanır.

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

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

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

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

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 difüzyon ile 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.

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

Böylece transfer denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

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

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 kare köküyle orantılıdır.

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

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 yöntemi
- Sülfid oksidasyonu yöntemi
- Dinamik yöntem

2.2.1 Gazın uzaklaştırılması yöntemi

Gazın uzaklaştırılması yönteminde havalandırma, fermentasyon sırasında kesilir ve çözünmüş oksijenin sıfıra düşmesi beklenir. Mikroorganizmalar öldürülür veya soluma inhibitör eklenerek durdurulur. Çözünmüş 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.

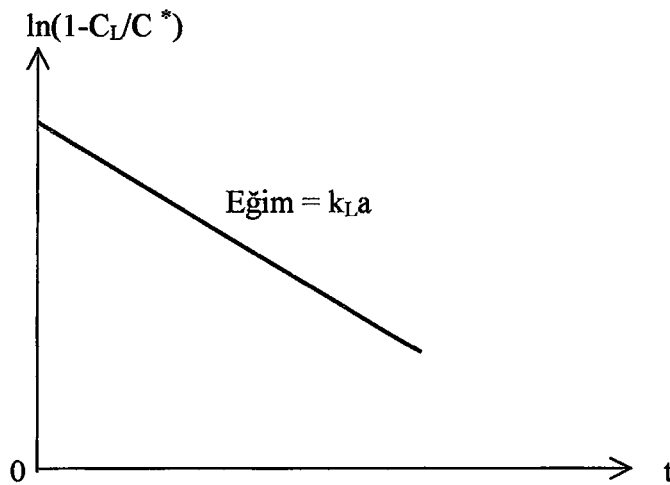
$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C^* - C_L) \quad (2.10)$$

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.

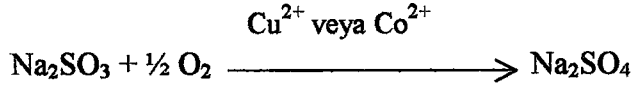
Bu yöntem, çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının ölçülmesinde kullanılan probun hızlı cevap vermesini gerektirir.



Şekil 2.1 Gazın uzaklaştırılması yöntemine ait verilerin grafiksel sunumu

2.2.2 Sülfid oksidasyonu yöntemi

Bu yöntem, sodyum sülfidın katalizör eşliğinde sodyum sülfata yükseltgenmesi esasına dayanır.



Oksijenin çözünmesi reaksiyona göre çok yavaş olduğu için, sodyum sülfid sıvı ortama girer girmez oksijen tükenir. Bu yüzden C_L sifıra eşittir.

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

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

Sülfid oksidasyon yöntemi; ekipmanın tipine, katalizörün yapısına, çözeltinin pH'ına ve sülfid çözeltisinin saflığına bağlıdır. Bu yöntem diğer tekniklere göre daha yüksek $k_L a$ 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 denklemle 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)

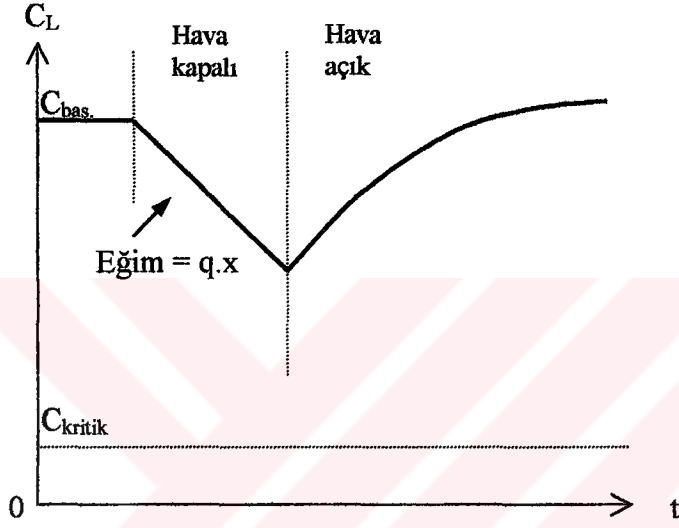
x: Biyomas konsantrasyonu ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

Eşitlik (2.13) yeniden düzenlenirse,

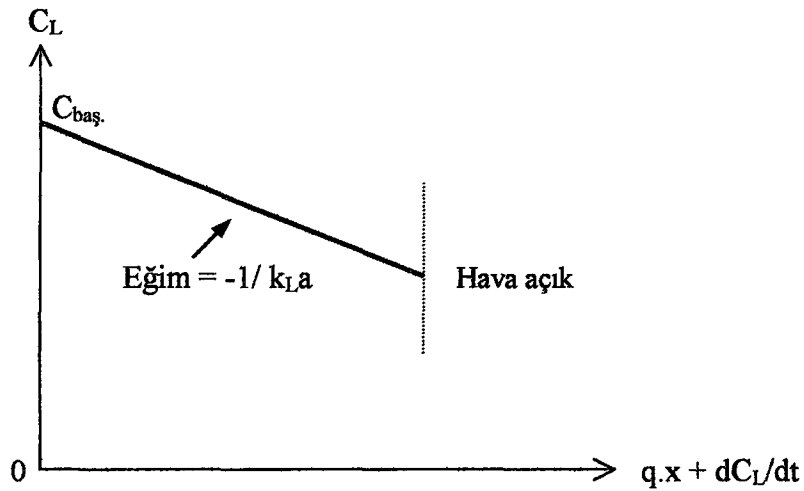
$$C_L = -\frac{1}{k_L a} \left(q \cdot x + \frac{dC_L}{dt} \right) + C^* \quad (2.14)$$

elde edilir.

Şekil 2.3’de verilen C_L ve $(q \cdot x + dC_L/dt)$ 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.

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, dolgu reaktörler, karıştırılmalı reaktörler kullanılmıştır. Gaz kabarcıklı kolon reaktörler ve karıştırılmalı reaktörler çok düşük gaz hızlarında kullanılabildikleri 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, araştırmaların çoğu hava-su sistemleri için yapılmıştır. Eckenfelder (1959), Yoshida vd. (1960), Yoshida ve Akita (1965) hava-su sistemlerinde kütle transfer katsayısını, $k_L a$, inceleyen araştırmacılardan bazılarıdır.

Gaz sıvı kütle transferi, aerobik fermentasyon sistemlerinde genelde hız belirleyici adımdır. Bu sebeple, karıştırılmalı bir biyoreaktörde, 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; Kıral, 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 gücü (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.

$$k_{La} = C N^{\alpha_1} D^{\alpha_2} (v_s)^\beta \quad (2.16)$$

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 korelasyonu önermişlerdir.

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

D: Karıştırıcı çapı (cm)

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

N: Karıştırıcı hızı (s^{-1})

μ : Sıvı viskozitesi (poise)

μ_G : Gaz viskozitesi (poise)

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

ρ : Sıvı yoğunluğu ($g \cdot cm^{-3}$)

v_s : Yüzeysel gaz hızı ($cm \cdot s^{-1}$)

Cooper vd. (1944), hava kabarcıklarından suya oksijen transferini çalışan ilk araştırmacılarıdır. Deneylerinde, düz 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 yüzeysel gaz hızına (v_s) bağlı olarak değişimini aşağıdaki denklem ile ifade etmişlerdir.

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

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

Sideman vd. (1966) mekanik karıştırmalı bir reaktörde hava-su sistemini incelemiştir. 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}), yüzeysel 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 bağlı olarak, kütle transferinin korelasyonunu elde etmiştir. 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 incelemişlerdir. Düşük karıştırıcı hızlarında, $k_L a$ değerinin karıştırıcı hızı ile artışının çok az olduğunu görmüşlerdir. Mehta ve Sharma'ya göre kritik bir karıştırıcı hızı (200 rpm) vardır 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 incelemişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla çözülmüş oksijenin doygunluk 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.

Yagi ve Yoshida (1971), karıştırmalı reaktörlerde newtonyen ve newtonyen olmayan akışkanlarda $k_L a$ için korelasyon elde etmişlerdir. Newtonyen akışkan olarak gliserin ve akdarı (buğdaygiller familyasına bağlı 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 herikisi 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 incelemiştir. Deney sonuçlarına göre, sıvının viskozitesinin 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 akış 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), karıştırılmalı bir reaktörde katı maddelerin gaz sıvı kütle transferine etkisini farklı boyutlarda cam parçacıkları, polipropilen kullanarak incelemiştir. 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), karıştırılmalı 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 karıştırılmalı 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 etkisini araştırmışlardır. Çalışabildikleri maksimum madde yükleme oranı %40'tır. 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 olarak verilmiştir), yine kalsiyum aljinat tanecikleriyle karıştırılmalı 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 konsantrasyonu ile $k_{L,a}$ '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.

Oguz vd. (1987), karıştırılmalı bir reaktörde suya çeşitli katı maddeler ekleyerek gaz sıvı kütle transferini incelemişlerdir. Bu maddeler deniz kumu, kiselgur, alüminyum oksit, demir oksit, titanyum oksit ve çinko oksittir. Çalışılan konsantrasyon aralığında deniz kumunun $k_{L,a}$ üzerine etkisi az iken, titanyum oksit ve çinko oksit için düşük hacim oranlarında bile $k_{L,a}$ 'da büyük bir azalma olmuştur. Demir oksit ve kiselgur için ise, $k_{L,a}$ değeri belli bir hacim oranından sonra önemli derecede azalmıştır.

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 ve modüller, Sanyo Gallenkamp firması tarafından üretilmiştir (Model No: FER-195-010). 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.

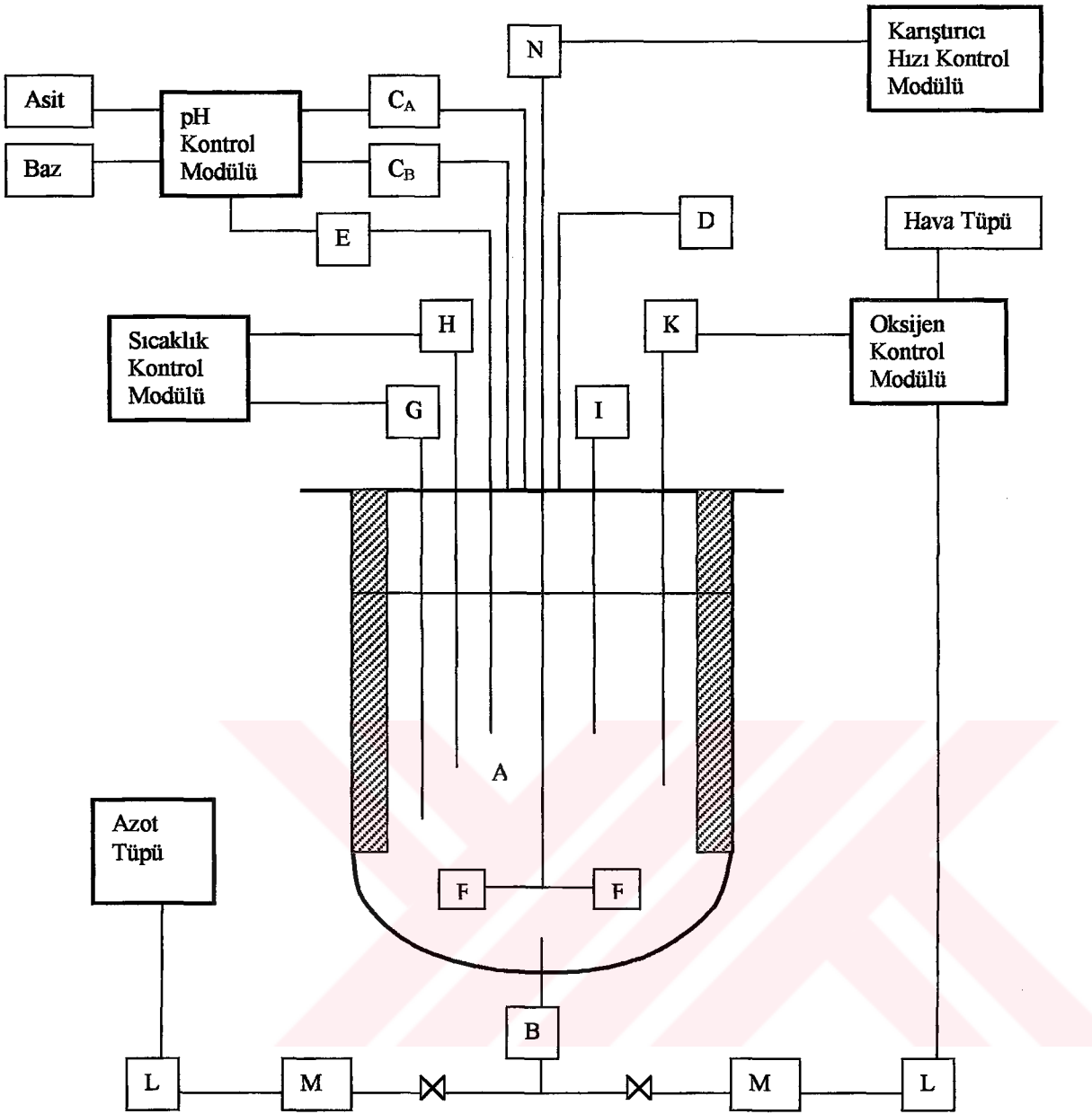
3.1.1 Karıştırılmalı biyoreaktör

Kullanılan biyoreaktör, 11 cm. 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 üzerinde çeşitli büyüklükte toplam 15 adet giriş ve çıkışlar (oksijen elektrodu, pH elektrodu, ısıtıcı prob, termistör prob, hava giriş borusu borusu, hava çıkış borusu, termometre ve bunun gibi benzeri parçalar için) bulunmaktadır. Deneylerde kullanılmayan giriş veya çıkışlar silikon mantarlar ile kapatılmıştır.

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



A: Biyoreaktör

B: Azot/hava girişi

CA: Asit girişi

CB: Baz girişi

D: Hava çıkışı

E: pH elektrodu

F: Karıştırıcı kanatlar

G: Isıtıcı

H: Termistör

I: Termometre

K: Oksijen elektrodu

L: Akış ölçer

M: Hava filtresi

N: Motor

⊗: Açma-kapama vanası

▨: Engeller

Şekil 3.1 Karıştırmalı biyoreaktör ve kontrol modüllerinin şematik diyagramı

3.1.2 Kontrol modülleri

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

- Oksijen kontrol modülü
- 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 doygunluk 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 (Scoth Brite 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 Scotch Brite parçacıkları kullanılmıştır. Scotch Brite parçacıkları içindeki boşlukları birleştiren ağ şeklinde bir yapıya sahiptir. Bu parçacıkların sahip olduğu üç boyutlu ağın karmaşık yapısı yüzünden, boşluk hacmini veya gözenek yoğunluğunu belirlemek mümkün değildir. Bu malzeme inerttir ve sterilize edilebilir. Sterilizasyon veya fermentasyon sırasında şeklini veya rengini değiştirmez. Bu avantajları

sebebiyle biyoteknolojide enzimlerin ve mikroorganizmaların pasif tutuklanmasında kullanılmaktadır (Özergin, 1989). Dolayısı ile bu çalışmada da, bu malzemenin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisini incelemek amacı ile kullanılmıştır.

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 veya %100 gliserin/destile su; hacim/hacim); tutuklayıcı malzeme+destile su (%5, %11, %18 veya %25 tutuklayıcı malzeme/destile su; hacim/hacim) ve tutuklayıcı malzeme+ gliserin+destile su'dur (%5, %11, %18 veya %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 çözeltilere 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.

Oksijen elektrodunun, çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişime cevabının yeterince hızlı olduğu kabul edilmiştir (Bu çalışmadaki tüm $k_L a$ değerleri, 0.1 s^{-1} den küçük olduğu için bu kabul yapılmıştır) (Aksak,1990; Kırıl,1987). Sonuç olarak $k_L a$ 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, k_{La} 'yı, hesaplamak için kullanılmıştır. k_{La} 'nın hesaplanması ile ilgili bir örnek Ek 1'de (Çizelge E1.1 ve Şekil E1.1) 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 malzeme+gliserin+destile su'da incelenen proses değişkenleri
Karıştırıcı hızı (N)
Hava debisi (v)
Tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarı

4.1.1 Oksijen transfer katsayısı üzerine karıştırıcı hızının etkisi

Karıştırıcı hızı, gaz fazdan sıvı faza kütle transferini etkileyen en önemli proses değişkenlerinden biridir. Mekanik karıştırma, akışkan içinde istenen türbülansı oluşturur ve gaz fazın küçük kabarcıklar halinde, spesifik ara yüzey alanında bir artış meydana getirerek, dağılmasına yardım eder. Deneylerde karıştırıcı hızı 100 – 500 rpm arasında değiştirilirken, hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ve pH 7 değerlerinde sabit tutulmuştur.

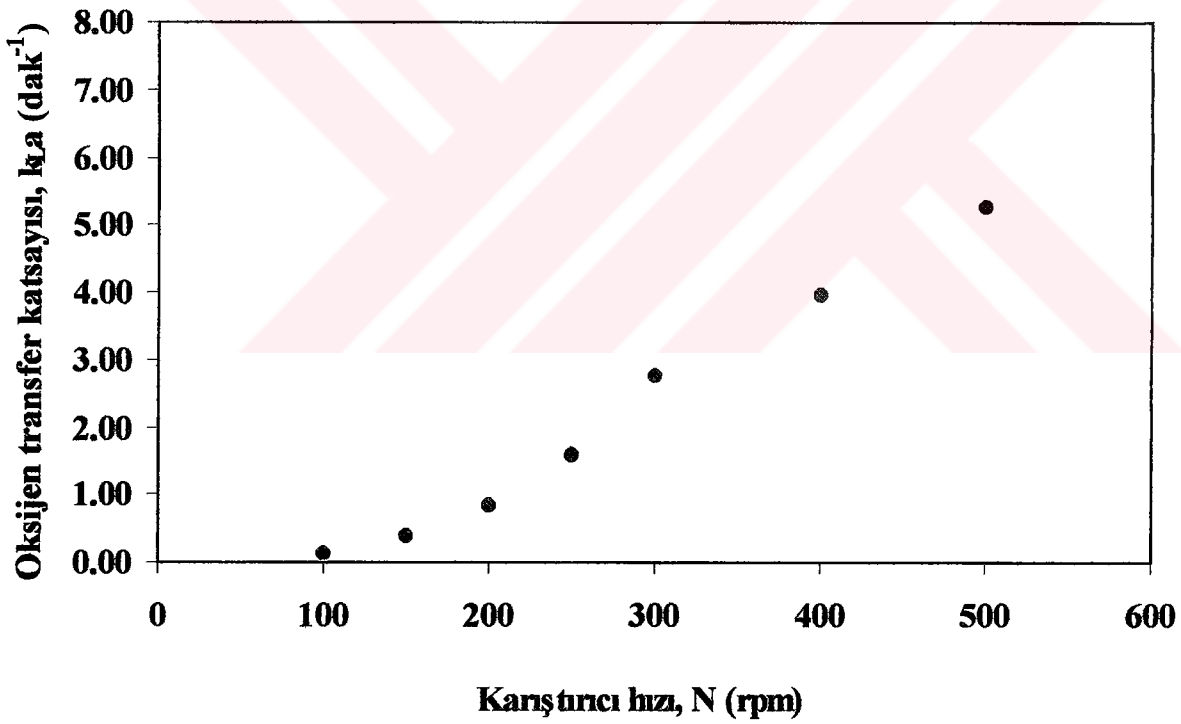
4.1.1.1 Destile su için karıştırıcı hızının oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

Destile su: 0.6 litre

Çizelge 4.1'de çözelti olarak 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 E2.1) sunulmuştur. Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi, karıştırıcı hızının artmasıyla k_{La} değerleri artmıştır. Karıştırıcı hızının 100 rpm'den 500 rpm'e artırılması ile k_{La} 'da yaklaşık 40 kat'lık bir artış saptanmıştır. Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi k_{La} 'daki artış karıştırıcı hızının 300 rpm'den küçük olması durumunda çok azdır. Ancak 300 rpm'den büyük karıştırıcı hızlarında k_{La} '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_{La} , karıştırıcı hızıyla lineer olarak artmaktadır. Mehta ve Sharma ise belli bir karıştırıcı hızının altında, k_{La} değerinin karıştırıcı hızı ile artışının çok az olduğunu görmüşlerdir ve kritik karıştırıcı hızını 200 rpm olarak bulmuşlardır. 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 $37 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve pH 7)

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	$k_{L,a}$ (dak^{-1})
100	0.132
150	0.383
200	0.850
250	1.583
300	2.766
400	3.966
500	5.274



Şekil 4.1 Destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi
(hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık $37 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 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

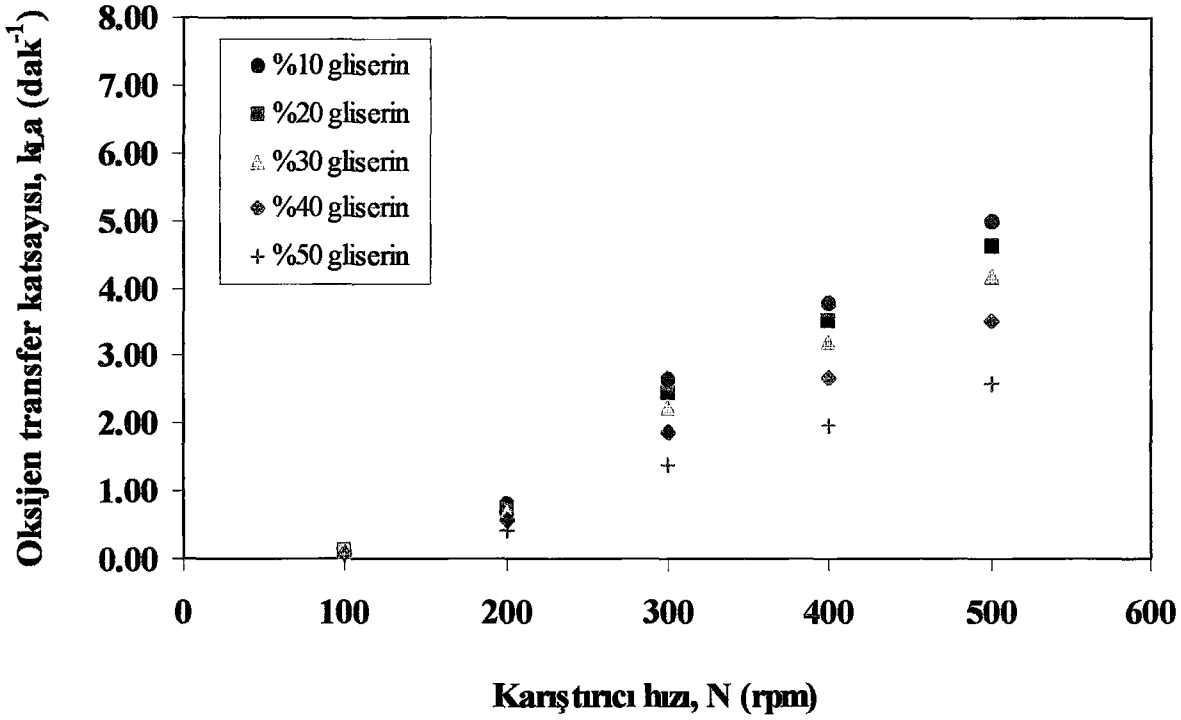
%40 gliserin için → destile su: 0.36 litre; gliserin: 0.24 litre

%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 E2.2) sunulmuştur. Şekil 4.2’den de görüldüğü gibi, gliserin yüzdesi sabit tutulduğunda, karıştırıcı hızının artırılmasıyla k_{La} değerleri artmıştır. Karıştırıcı hızının 100 rpm’den 500 rpm’e artırılması ile k_{La} ’da %10 – 50 gliserin için yaklaşık 39 kat’lık bir artış saptanmıştır. Karıştırıcı hızı sabit tutulduğunda ise, gliserin yüzdesinin artırılması ile k_{La} azalmıştır (%47.7 azalma). Gliserinin yüzdesinin %10’dan %50’ye (hacim/hacim) artırılması ile k_{La} ’nın destile suya göre, 100 rpm karıştırıcı hızında sırasıyla %4.5 - %49.2 ve 500 rpm karıştırıcı hızında ise %5.5 - %51 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 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)				
	%10 gliserin	%20 gliserin	%30 gliserin	%40 gliserin	%50 gliserin
100	0.126	0.118	0.107	0.091	0.067
200	0.816	0.750	0.683	0.583	0.425
300	2.650	2.466	2.233	1.883	1.383
400	3.800	3.530	3.200	2.700	1.983
500	4.983	4.633	4.183	3.539	2.583



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

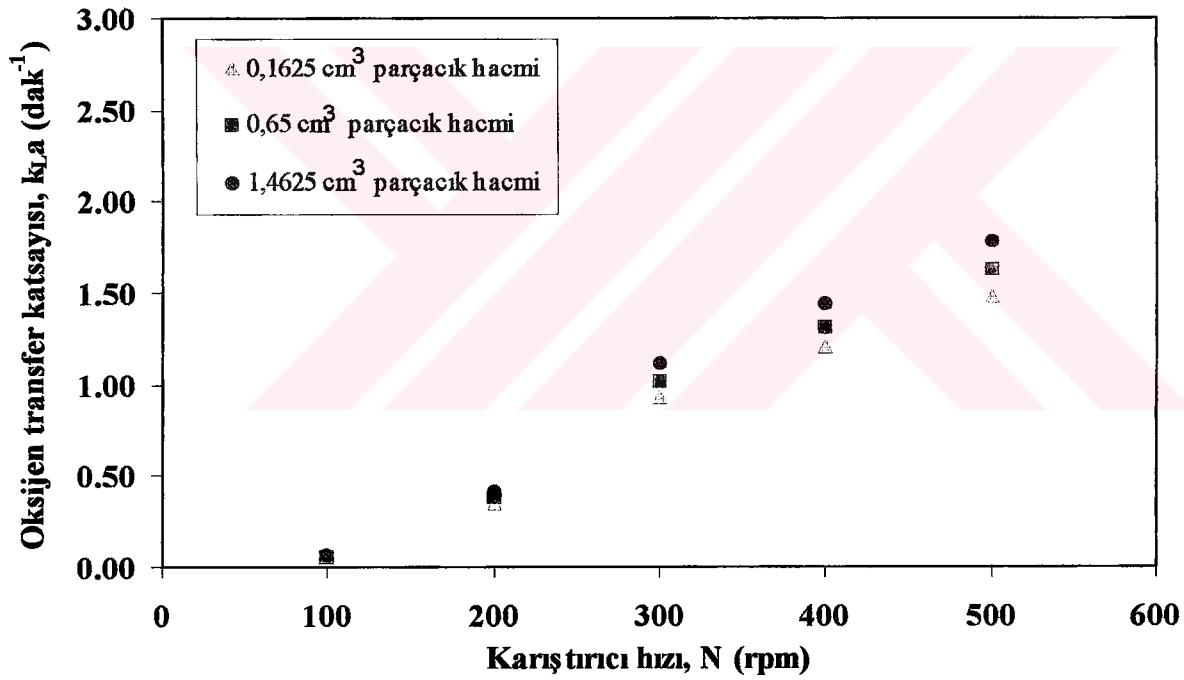
Tutuklayıcı malzeme: %25 yükleme

Parçacık hacmi: 0.1625 cm³; 0.65 cm³ ve 1.4625 cm³

Çizelge 4.3'de çözelti olarak tutuklayıcı malzeme+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 E2.3) sunulmuştur. Şekil 4.3'den de görüldüğü gibi parçacık hacmi sabit tutulduğunda karıştırıcı hızının arttırılmasıyla k_{La} artmıştır. Karıştırıcı hızının 100 rpm'den 500 rpm'e arttırılması ile k_{La} 'da 0.1625 cm³, 0.65 cm³ ve 1.4625 cm³ için yaklaşık 29 kat'lık bir artış saptanmıştır. Karıştırıcı hızı sabit tutulduğunda ise, parçacık hacminin arttırılması ile k_{La} değerleri artmıştır (%20.5 artış). Parçacık hacminin 0.1625 cm³'den 1.4625 cm³'e arttırılması ile k_{La} 'nın destile suya göre, 100 rpm karıştırıcı hızında sırasıyla %61.3 - %53.8 ve 500 rpm karıştırıcı hızında ise %72.1 - %66.2 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 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ve pH 7)

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	k_{La} (dak^{-1})		
	Parçacık hacmi 0.1625 cm^3	Parçacık hacmi 0.65 cm^3	Parçacık hacmi 1.4625 cm^3
100	0.051	0.056	0.061
200	0.345	0.383	0.419
300	0.933	1.016	1.116
400	1.200	1.316	1.450
500	1.473	1.626	1.780



Şekil 4.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için oksijen transfer katsayısının karıştırıcı hızı ile değişimi (hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 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

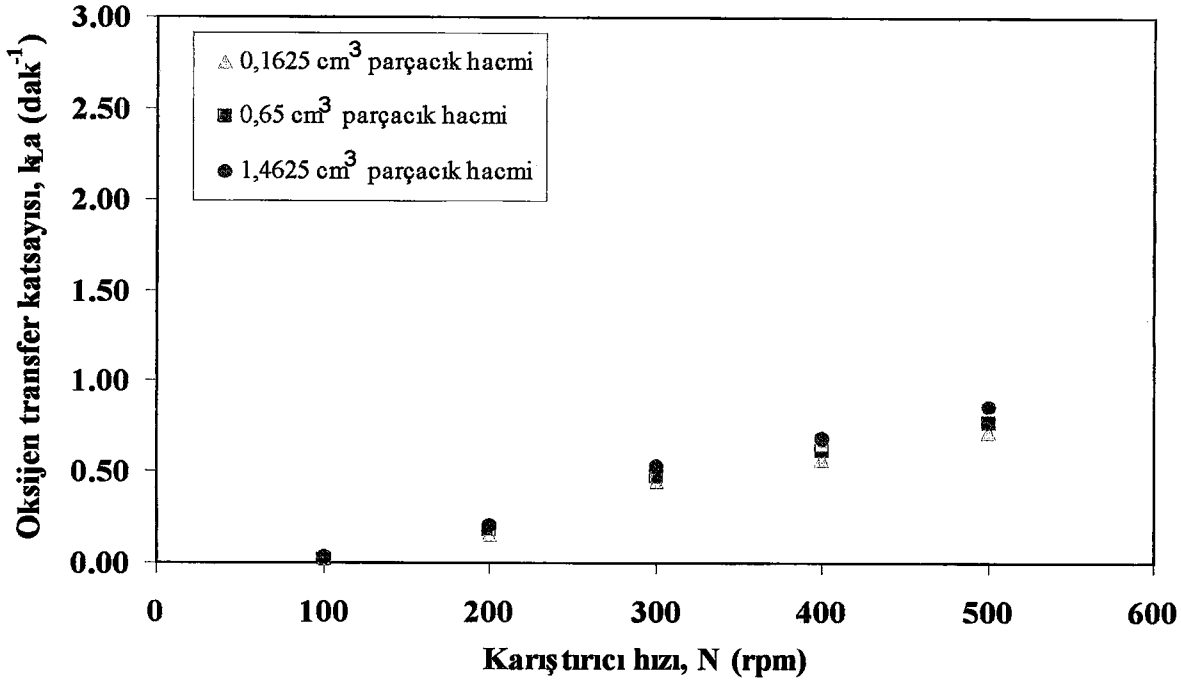
Tutuklayıcı malzeme: %25 yükleme

Parçacık hacmi: 0.1625 cm³; 0.65 cm³ ve 1.4625 cm³

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 E2.4) sunulmuştur. Şekil 4.4'den de görüldüğü gibi parçacık hacmi sabit tutulduğunda, karıştırıcı hızının artmasıyla k_{La} artmıştır. Karıştırıcı hızının 100 rpm'den 500 rpm'e artırılması ile 0.1625 cm³, 0.65 cm³ ve 1.4625 cm³ için k_{La} 'da yaklaşık 28.7 kat'lık bir artış saptanmıştır. Karıştırıcı hızı sabit tutulduğunda ise, parçacık hacminin artırılması ile k_{La} değerleri artmıştır (%19.7 artış). Parçacık hacminin 0.1625 cm³'den 1.4625 cm³'e artırılması ile k_{La} 'nın destile suya göre, 100 rpm karıştırıcı hızında sırasıyla %81.1 - %77.3 ve 500 rpm karıştırıcı hızında ise %86.4 - %83.6 oranlarında azaldığı bulunmuştur.

Çizelge 4.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+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 hacmi 0.1625 cm ³	Parçacık hacmi 0.65 cm ³	Parçacık hacmi 1.4625 cm ³
100	0.025	0.027	0.030
200	0.171	0.183	0.203
300	0.450	0.483	0.533
400	0.566	0.617	0.683
500	0.716	0.776	0.865



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. Deneylerde 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).

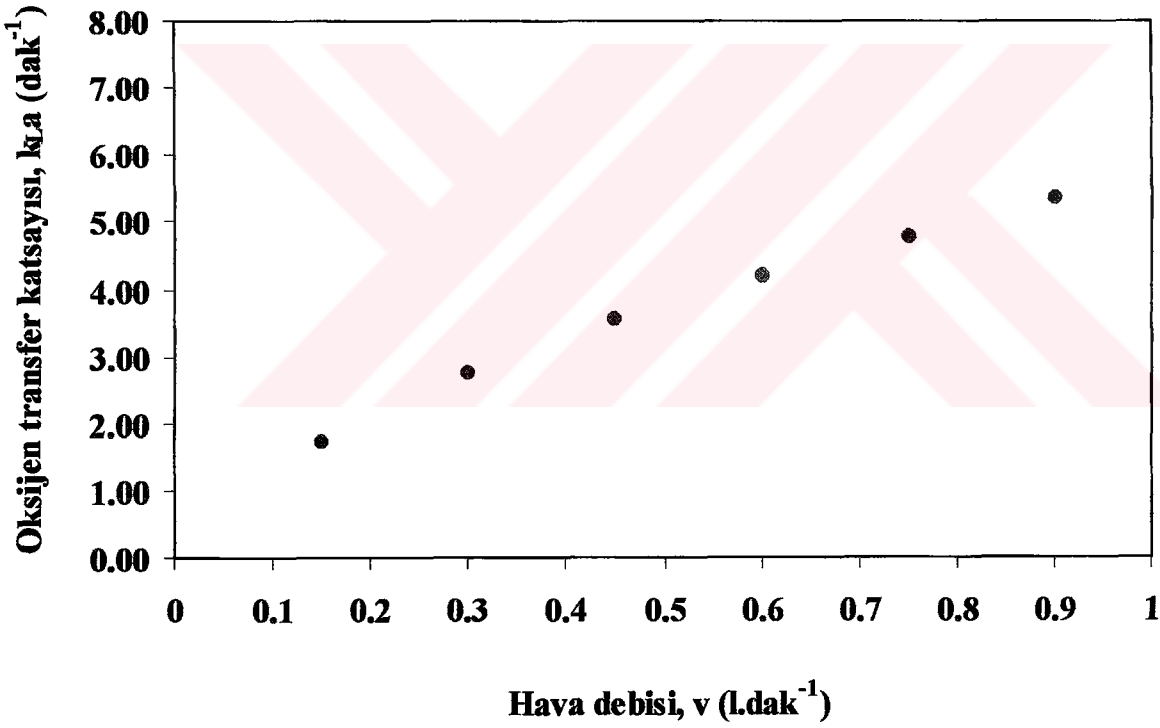
4.1.2.1 Destile su için hava debisinin oksijen transfer katsayısı üzerine etkisi

Destile su: 0.6 litre

Çizelge 4.5'te 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 E3.1) 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 l.dak⁻¹'e artırılması ile $k_L a$ 'da yaklaşık 3.1 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	1.728
0.30	2.766
0.45	3.566
0.60	4.200
0.75	4.800
0.90	5.350



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

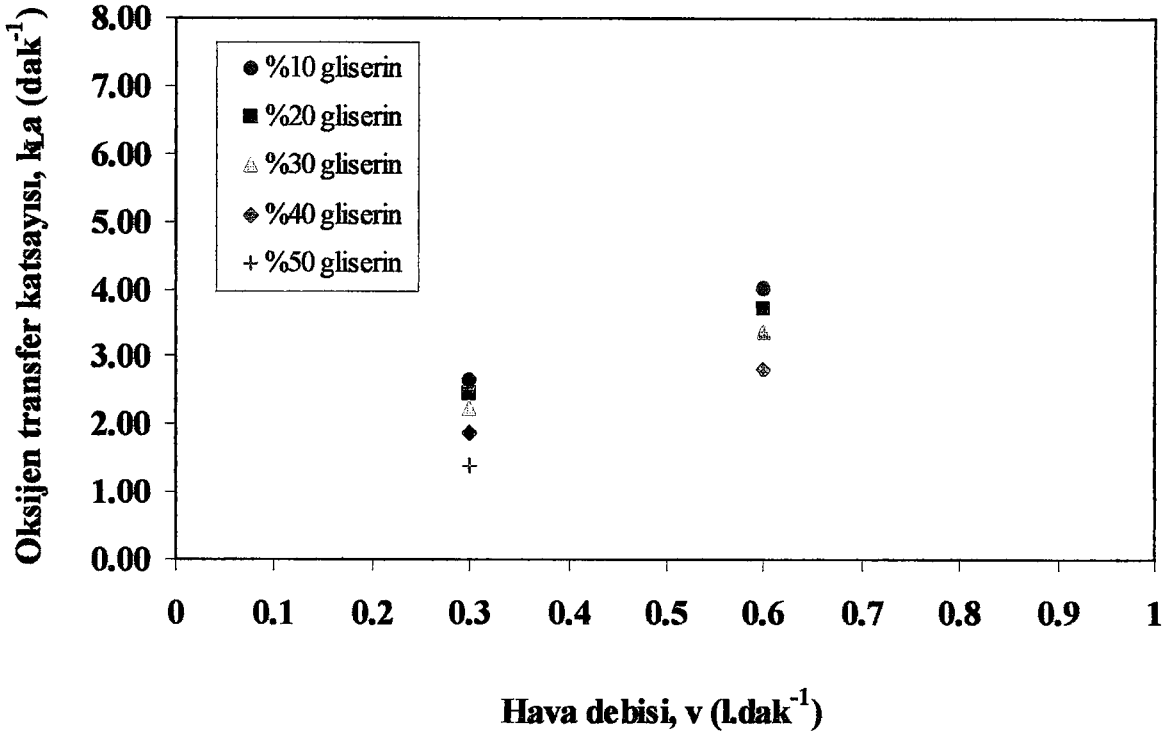
%40 gliserin için → destile su: 0.36 litre; gliserin: 0.24 litre

%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 E3.2) 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 için yaklaşık 1.5 kat'lık bir artış saptanmıştır. Hava debisi sabit tutulduğunda ise, gliserin yüzdesinin artırılması ile $k_{L,a}$ azalmıştır (%48 azalma). Gliserin yüzdesinin %10'dan %50'ye artırılması ile $k_{L,a}$ 'nın destile suya göre, 0.3 l.dak⁻¹ hava debisinde sırasıyla %4.2 - %50 ve 0.6 l.dak⁻¹ hava debisinde ise %4.4 - %50.5 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	2.650	2.466	2.233	1.883	1.383
0.6	4.016	3.733	3.366	2.833	2.078



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

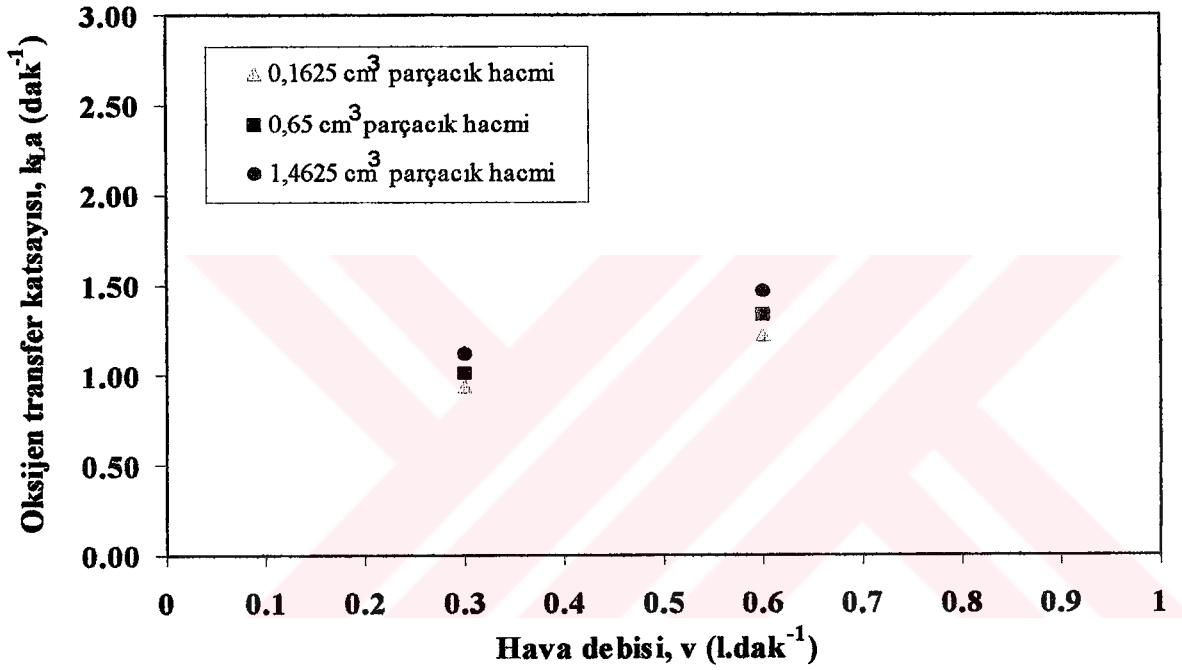
Tutuklayıcı malzeme: %25 yükleme

Parçacık hacmi: 0.1625 cm³; 0.65 cm³ ve 1.4625 cm³

Çizelge 4.7’de çözeltili olarak tutuklayıcı malzeme+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 E3.3) sunulmuştur. Şekil 4.7’den de görüldüğü gibi parçacık hacmi sabit tutulduğunda, hava debisinin artmasıyla k_{La} artmıştır. Hava debisinin 0.3 l.dak⁻¹’den 0.6 l.dak⁻¹’e artırılması ile k_{La} ’da 0.1625 cm³, 0.65 cm³ ve 1.4625 cm³ için yaklaşık 1.3 kat’lık bir artış saptanmıştır. Hava debisi sabit tutulduğunda ise, parçacık hacminin artması ile k_{La} değerleri artmıştır (%20.1 artış). Parçacık hacminin 0.1625 cm³’den 1.4625 cm³’e artırılması ile k_{La} ’nın destile suya göre, 0.3 l.dak⁻¹ hava debisinde sırasıyla %66.3 - %59.6 ve 0.6 l.dak⁻¹ hava debisinde ise %71 - %65.1 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 hacmi 0.1625 cm ³	Parçacık hacmi 0.65 cm ³	Parçacık hacmi 1.4625 cm ³
0.3	0.933	1.016	1.116
0.6	1.216	1.333	1.467



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

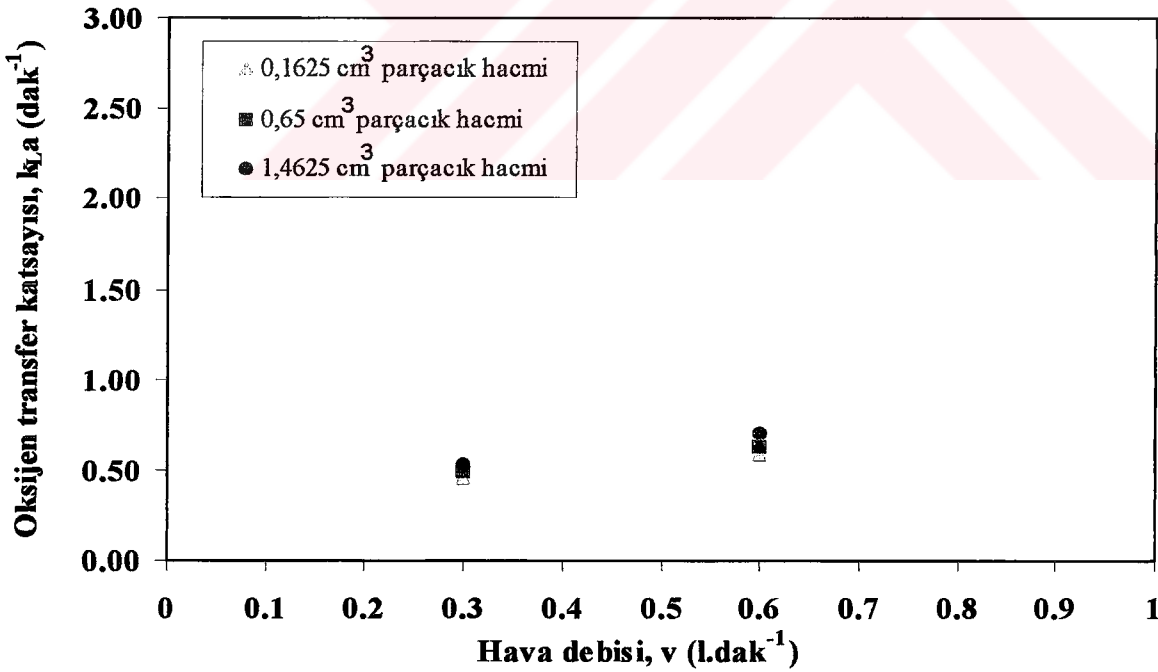
Parçacık hacmi: 0.1625 cm³; 0.65 cm³ ve 1.4625 cm³

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 E3.4) sunulmuştur. Şekil 4.8'den de görüldüğü

gibi parçacık hacmi sabit tutulduğunda, hava debisinin artmasıyla k_{La} artmıştır. Hava debisinin 0.3 l.dak⁻¹'den 0.6 l.dak⁻¹'e artırılması ile k_{La} 'da 0.1625 cm³, 0.65 cm³ ve 1.4625 cm³ için tutuklayıcı malzeme+destile suda olduğu gibi yaklaşık 1.3 kat'lık bir artış saptanmıştır. Hava debisi sabit tutulduğunda ise, parçacık hacminin artması ile k_{La} değerleri artmıştır (%19.2 artış). Parçacık hacminin 0.1625 cm³'den 1.4625 cm³'e artırılması ile k_{La} 'nın destile suya göre, 0.3 l.dak⁻¹ hava debisinde sırasıyla %83.7 - %80.7 ve 0.6 l.dak⁻¹ hava debisinde ise %86.1 - %83.3 oranlarında azaldığı bulunmuştur.

Çizelge 4.8 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+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 hacmi 0.1625 cm ³	Parçacık hacmi 0.65 cm ³	Parçacık hacmi 1.4625 cm ³
0.3	0.450	0.483	0.533
0.6	0.583	0.633	0.700



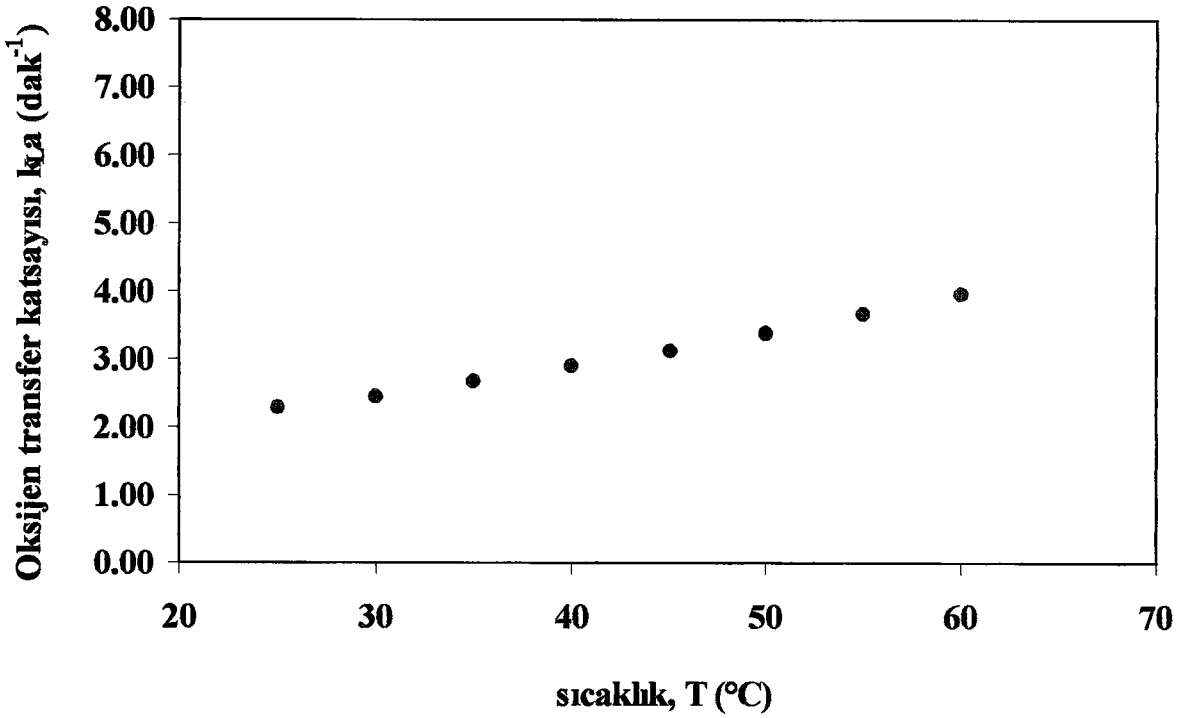
Şekil 4.8 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için oksijen transfer katsayısının hava debisi ile değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

4.1.3 Oksijen transfer katsayısı üzerine sıcaklığın etkisi

Destile su için (0.6 litre), sıcaklık 25 - 60 °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, $k_{L,a}$, 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 çözelti olarak destile su kullanılması halinde sıcaklığa karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 4'de (Çizelge E4.1) sunulmuştur. Şekil 4.9'dan da görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla $k_{L,a}$ artmıştır. Sıcaklığın 25 °C'den 60 °C'ye artırılması ile $k_{L,a}$ 'da yaklaşık 1.7 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	2.283
30	2.466
35	2.683
40	2.900
45	3.133
50	3.400
55	3.683
60	3.983



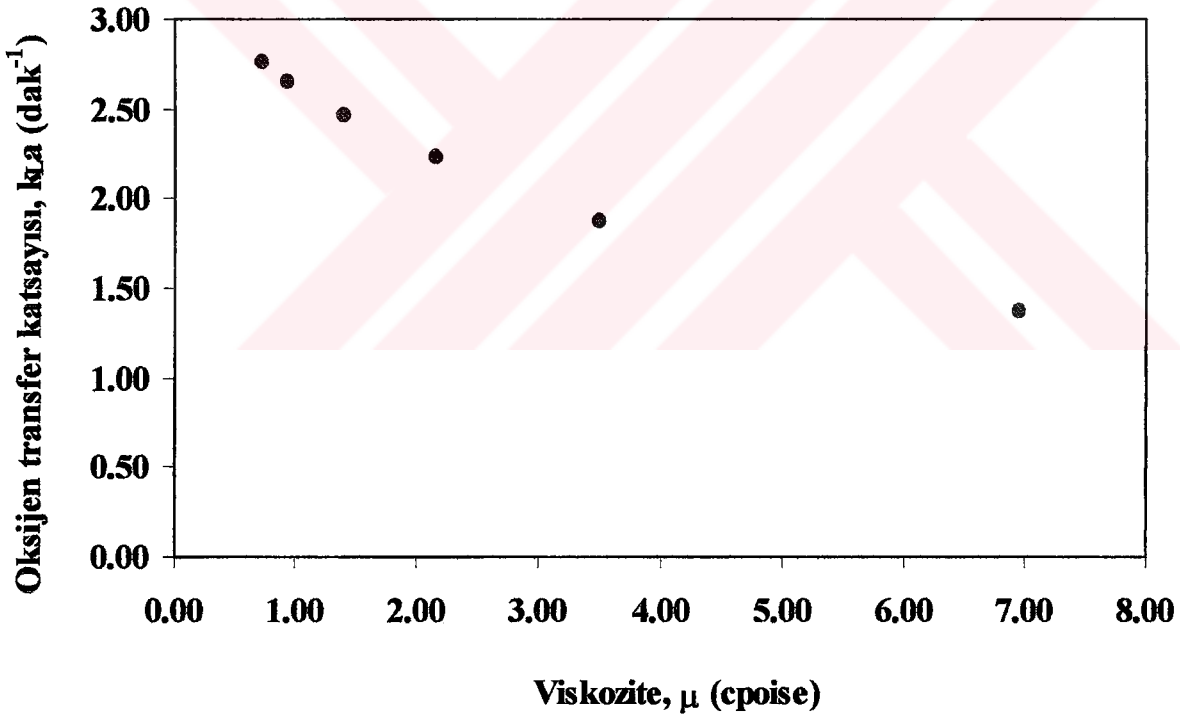
Şekil 4.9 Destile su için oksijen transfer katsayısının sıcaklık ile değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak⁻¹, pH 7)

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 arasında 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 viskozitenin 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 E5.1) 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 33 kat'lık bir azalma saptanmıştır.

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

% gliserin	Viskozite, μ (cpoise)	k_{La} (dak ⁻¹)
0	0.729	2.766
10	0.935	2.650
20	1.391	2.466
30	2.144	2.233
40	3.496	1.883
50	6.948	1.383
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 (Scotch Brite 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 (hacim/hacim) oranları arasında değiştirilirken, karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 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

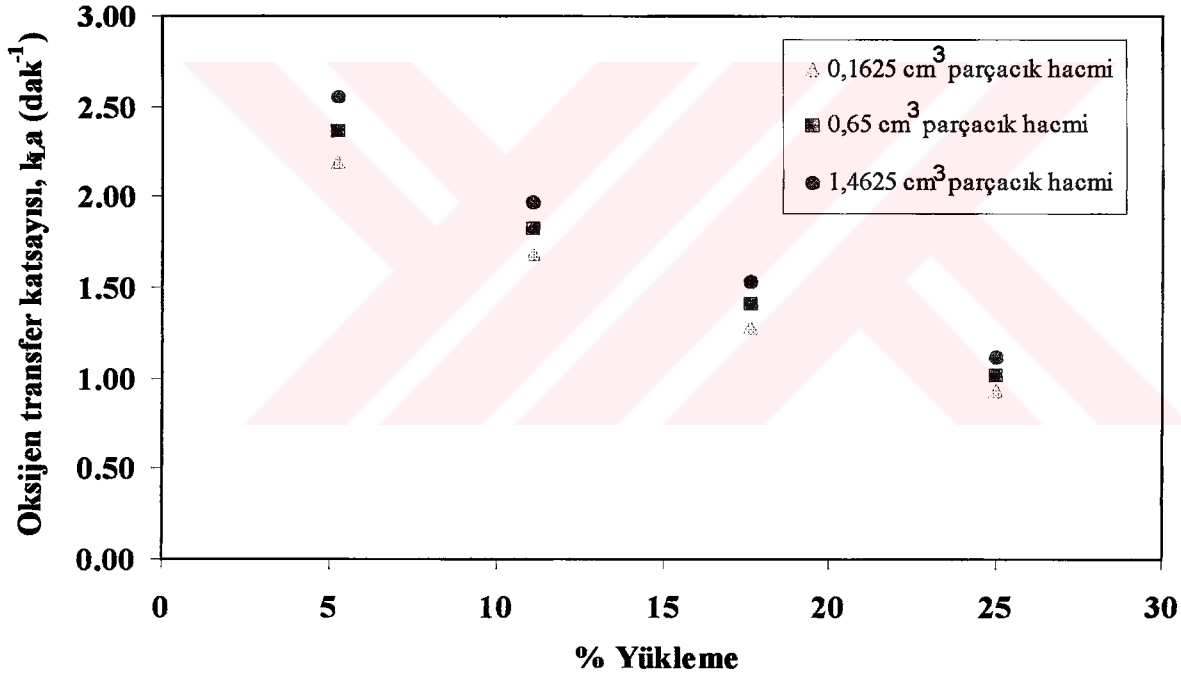
Parçacık hacmi: 0.1625 cm^3 ; 0.65 cm^3 ve 1.4625 cm^3

Çizelge 4.11'de çözelti olarak tutuklayıcı malzeme+destile su kullanılması halinde % yükleme miktarına ve parçacık boyutuna karşılık elde edilen k_{La} değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 6'da (Çizelge E6.1) sunulmuştur. Şekil 4.11'den de görüldüğü gibi parçacık hacmi sabit tutulduğunda, % yükleme miktarının artmasıyla k_{La} azalmıştır. Yükleme miktarının %5'den %25'e artırılması ile k_{La} 'da 0.1625 cm^3 , 0.65 cm^3 ve 1.4625 cm^3 için yaklaşık 2.3 kat'lık bir azalma saptanmıştır. % yükleme miktarı sabit tutulduğunda ise, parçacık hacminin artması ile k_{La} değerleri artmıştır (%18.1 artış). Parçacık hacminin 0.1625 cm^3 'den 1.4625 cm^3 'e artırılması ile k_{La} 'nın destile suya göre, %5 yüklemede sırasıyla %21 - %7.8 ve %25 yüklemede ise %66.3 - %59.6 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 çalışmada elde edilen diğer bir sonuç ise, aynı % yükleme miktarında parçacık hacminin artmasıyla k_{La} değeri artmıştır. Parçacık hacmi ile k_{La} 'daki artışın muhtemel sebebi, büyük parçacıklarda işgal edilen alanın daha az olmasıdır.

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

% yükleme miktarı (hacim/hacim)	k_{La} (dak ⁻¹)		
	Parçacık hacmi 0.1625 cm ³	Parçacık hacmi 0.65 cm ³	Parçacık hacmi 1.4625 cm ³
5	2.185	2.366	2.550
11	1.683	1.833	1.966
18	1.283	1.416	1.533
25	0.933	1.016	1.116



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_{La} 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 $k_{L,a}$ azalmıştır. Verlaan ve Tramper' de (1987) parçacıkların, kabarcıkların birleşmesine sebep olduklarını ve bunun sonucunda gaz-sıvı ara yüzeyinin dolayısıyla $k_{L,a}$ '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

Parçacık hacmi: 0.1625 cm³; 0.65 cm³ ve 1.4625 cm³

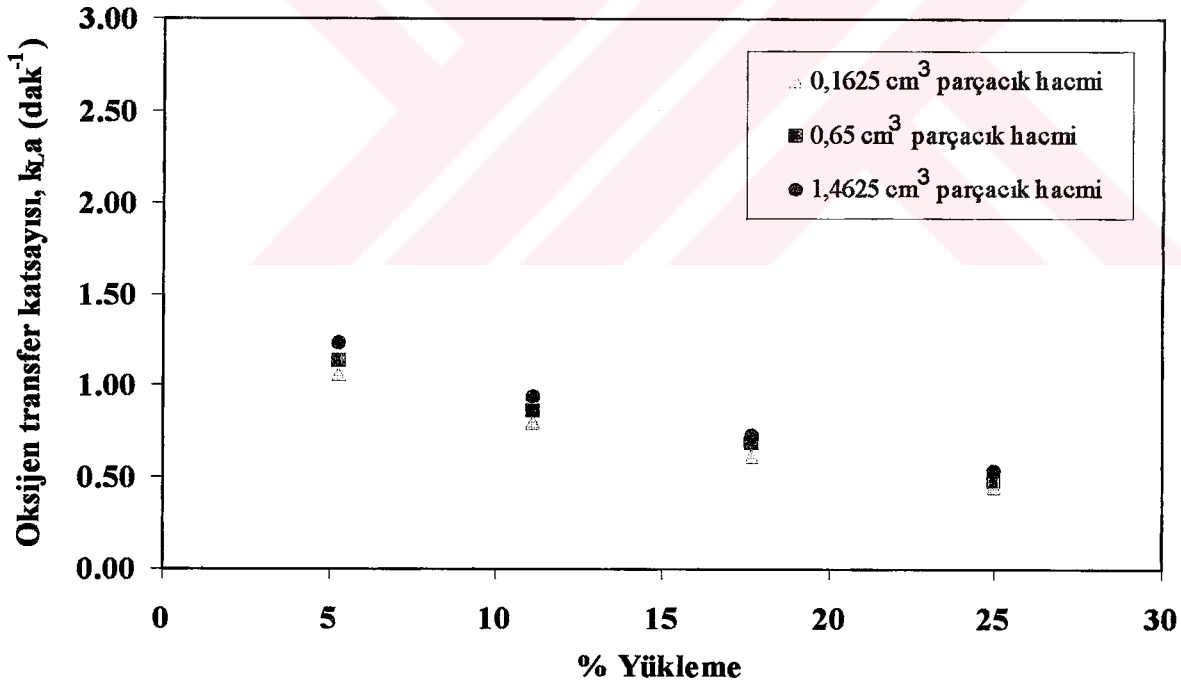
Çizelge 4.12'de çözelti olarak tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su kullanılması halinde yükleme miktarına ve parçacık boyutuna karşılık elde edilen $k_{L,a}$ değerleri verilmiştir. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 6'da (Çizelge E6.2) sunulmuştur. Şekil 4.12'den de görüldüğü gibi parçacık hacmi sabit tutulduğunda, % yükleme miktarının artmasıyla $k_{L,a}$ azalmıştır. Yükleme miktarının %5'den %25'e artırılması ile $k_{L,a}$ 'da 0.1625 cm³, 0.65 cm³ ve 1.4625 cm³ için tutuklayıcı malzeme+destile suda olduğu gibi yaklaşık 2.3 kat'lık bir azalma saptanmıştır. % yükleme miktarı sabit tutulduğunda ise, parçacık hacminin artması ile $k_{L,a}$ değerleri artmıştır (%17.7 artış). Parçacık hacminin 0.1625 cm³'den 1.4625 cm³'e artırılması ile $k_{L,a}$ 'nın destile suya göre, %5 yüklemede sırasıyla %61.8 - %55.4 ve %25 yüklemede ise %83.7 - %80.7 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 düşüktür. Bu azalma, viskozitenin artması sonucuna bağlıdır. Yine çözelti hacminin, Scotch Brite 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_{La} 'daki artışın muhtemel sebebi, tutuklayıcı malzeme+destile su'ya benzer olarak büyük parçacıklarda işgal edilen alanın daha az olmasıdır.

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

% Yükleme miktarı (hacim/hacim)	k_{La} (dak ⁻¹)		
	Parçacık hacmi 0.1625 cm ³	Parçacık hacmi 0.65 cm ³	Parçacık hacmi 1.4625 cm ³
5	1.056	1.131	1.233
11	0.800	0.866	0.933
18	0.616	0.683	0.733
25	0.450	0.483	0.533



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 $k_{L,a}$ arasında üssel bir ilişki sağlamak için, grafiklerde logaritmik koordinatlar kullanılmıştır.

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

Literatürde, $k_{L,a}$ '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 temsilen güç sayısı olarak (N^3D^2) kullanılmıştır.

Şekil 4.1 - 4.4'de görüldüğü gibi, $k_{L,a}$ 'nın N^3D^2 'ye bağımlılığı iki bölge içinde düşünülebilir. 300 rpm karıştırıcı hızının altında kalan bölgede $k_{L,a}$, karıştırıcı hızına daha az bağımlıdır. 300 rpm'in üzerinde ise $k_{L,a}$, karıştırıcı hızının artmasıyla artmaktadır. Aynı sonucu, Westerterp vd. (1963), Mehta ve Sharma (1971) kendi çalışmalarında da gözlemlemişlerdir. Westerterp vd., karıştırıcının gazı-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} değerindeki 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 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)
Yoshida vd. (1960)	0.43-0.68	-
Van't Riet (1979)	-	0.4
Hortaçsu (1965)	0.37	-
Robinson ve Wilke (1973) Hassan ve Robinson (1977)	-	(0.35 - 0.5)
Chandrasekharan ve Calderbank (1981)	-	0.57
Richards (1961)	-	0.4
Wu (1995)	-	0.67
Aksak (1990)	-	$0.4 < \alpha < 1.0$
Bu çalışma	0.42	-

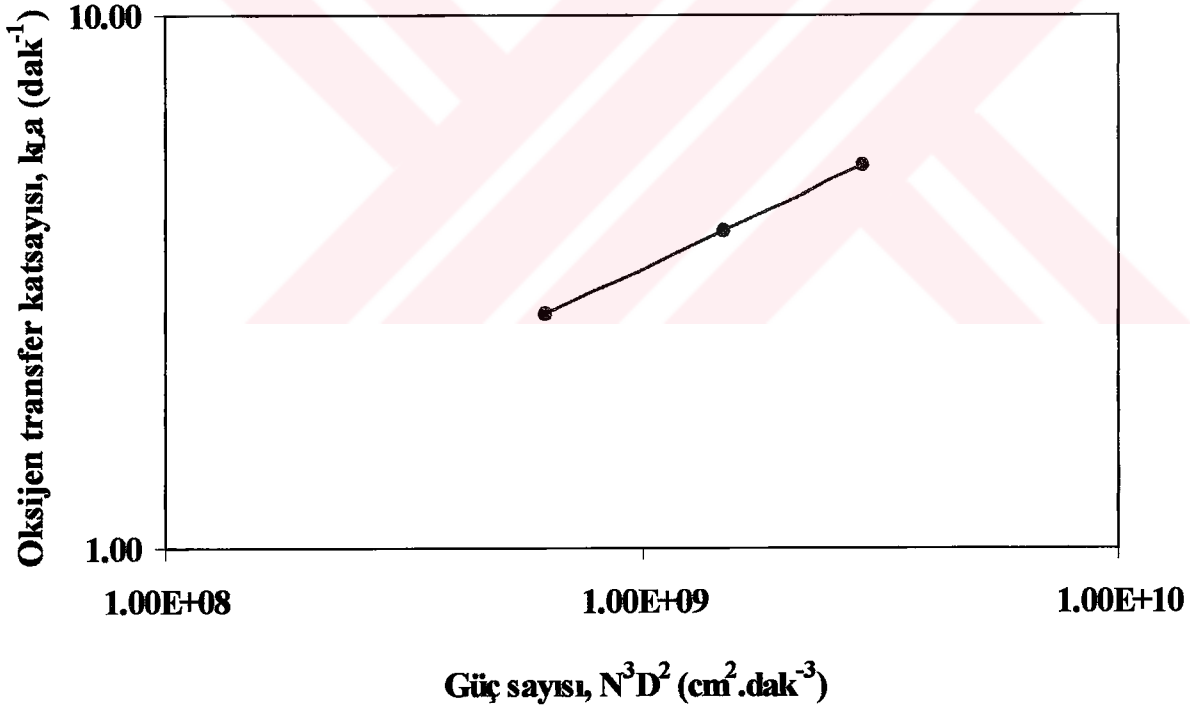
Çizelge 4.13'den görüldüğü gibi, (P/V_L) 'nin üsleri ile (N^3D^2) 'nin üsleri oldukça benzerdir. Aralarındaki ilişki $(P/V_L) = c (N^3D^2)$ şeklinde yazılabilir. Sabit bir sayı olan c, reaktöre farklı

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 (karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan güç sayıları Ek 7'de Çizelge E7.1'de verilmiştir.) elde edilen k_{La} değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.13'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda N^3D^2 'nin üssü 0.42 olarak bulunmuştur. Aynı zamanda verilere ait $R^2=0.9999$ ve standart sapma değeri, $\delta=0.00016$ olarak hesaplanmıştır.

$$k_{La} \propto (N^3D^2)^{0.42}$$

Bu değer ($\alpha=0.42$) Çizelge 4.13'te verilen araştırmacıların bulduğu değerlerin ($0.35 < \alpha < 1.0$) arasındadır.

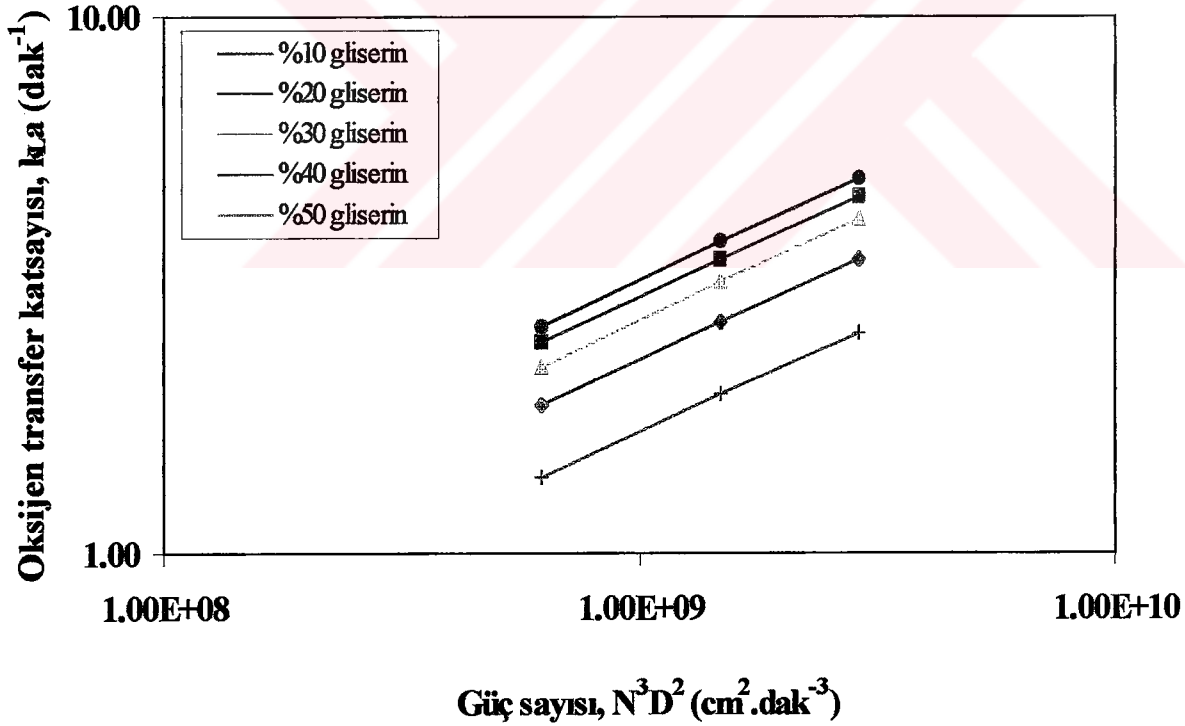


Şekil 4.13 Destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (yüzeysel hava hızı $3.156 \text{ cm.dak}^{-1}$, sıcaklık $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ve pH 7)

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

Bu çalışma için proses şartları daha önce Bölüm 4.1.1.2'de verilmiştir. Çizelge 4.2'de gliserin+destile su için güç sayısına karşılık (karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan güç sayıları Ek 7'de Çizelge E7.1'de verilmiştir.) elde edilen k_{LA} 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 E8.1) verilmiştir. Destile suya %10 – 50 oranlarında gliserin ilave edildiğinde k_{LA} '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 arttırılmış olmasına rağmen k_{LA} ile güç sayısı arasındaki ilişkiyi belirleyen üssel değer, (N^3D^2)'nin üssü, destile su için hesaplanan değere çok yakın bulunmuştur. Bu değer ise $\alpha=0.41$ 'dir.

$$k_{LA} \propto (N^3D^2)^{0.41}$$

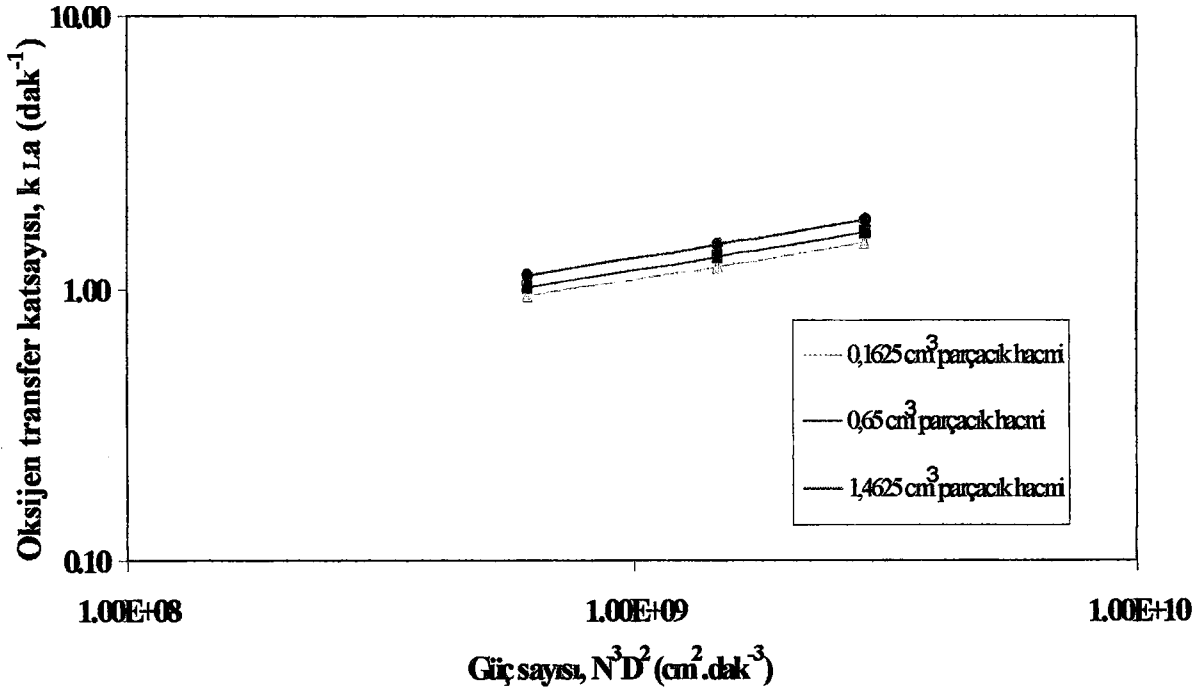


Şekil 4.14 Gliserin+destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak k_{LA} 'nın değişimi (yüzeysel hava hızı $3.156 \text{ cm} \cdot \text{dak}^{-1}$, sıcaklık $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ve pH 7)

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)+destile su için güç sayısına karşılık (karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan güç sayıları Ek 7'de Çizelge E7.1'de verilmiştir.) elde edilen k_{La} değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.15'de grafiksel olarak sunulmuştur. Aynı zamanda verilere ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Ek 8'de (Çizelge E8.2) verilmiştir. Hesaplamalar sonucunda N^3D^2 'nin üssü destile suya göre daha küçük (0.31) 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 parçacıkların 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 dağıtılamaz ve büyük kabarcıklar halinde biyoreaktörün ortasında yükselirler. Gücün büyük bir kısmının absorplandığı karıştırıcının çevresindeki bu büyük kabarcıkların varlığı, gaz-sıvı karışımının yoğunluğunu dolayısıyla güç tüketimini azaltır (Wiseman, 1977).

$$k_{La} \propto (N^3D^2)^{0.31}$$

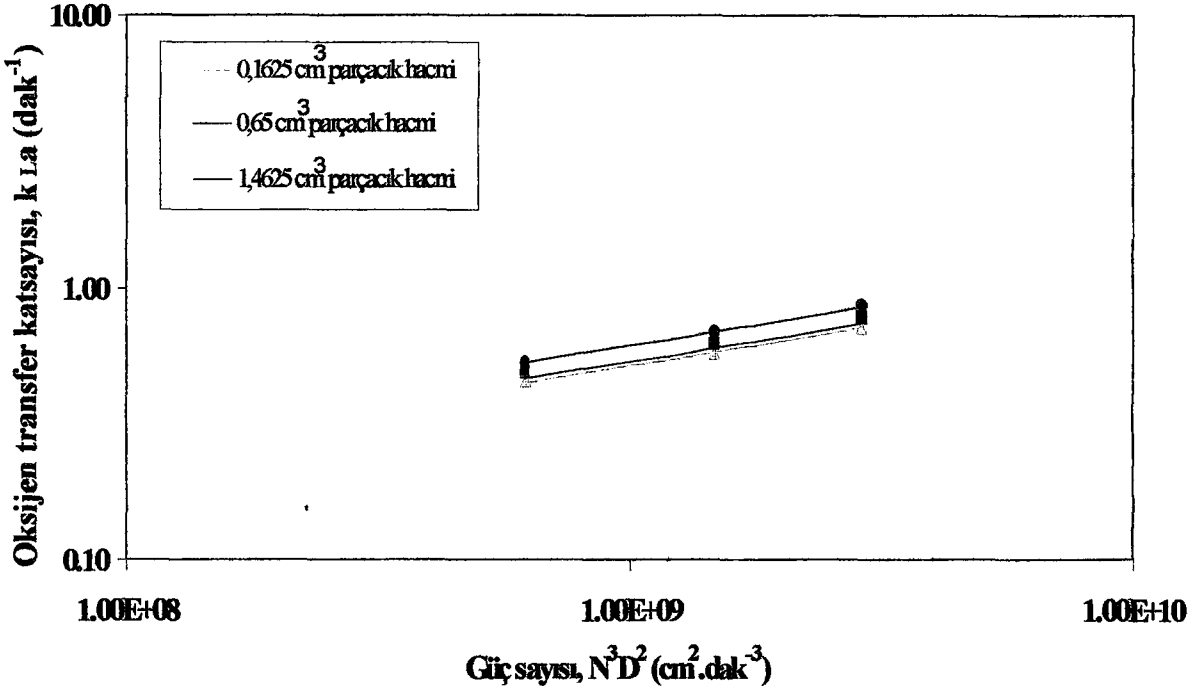


Şekil 4.15 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme)+destile su için güç sayısının fonksiyonu olarak k_La'nın değişimi (yüzeysel hava hızı 3.156 cm.dak⁻¹, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

4.2.1.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için N³D²'nin fonksiyonu olarak k_La'nın incelenmesi

Bu çalışmaya ait proses şartları daha önce Bölüm 4.1.1.4'de verilmiştir. Çizelge 4.4'de tutuklayıcı malzeme %25 (yükleme)+gliserin (%50)+destile su için güç sayısına karşılık (karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan güç sayıları Ek 7'de Çizelge E7.1'de verilmiştir.) elde edilen k_La değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.16'da grafiksel olarak sunulmuştur. Aynı zamanda verilere ait R² ve standart sapma (δ) değerleri Ek 8'de (Çizelge E8.3) verilmiştir. Hesaplamalar sonucunda güç sayısının (N³D²) üssü yine destile suya göre daha küçük (0.30) bulunmuştur. Bu durum ise, tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme)+ destile su'da olduğu gibi (Bölüm 4.2.1.3) karıştırmanın destile suya göre daha az etkili olduğu anlamına gelmektedir. Scotch Brite parçacıklarının %25 oranında ilavesi durumunda ara yüzey alanının azalması sonucu oksijen transferi azalmıştır.

$$k_{L}a \propto (N^3D^2)^{0.30}$$



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

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

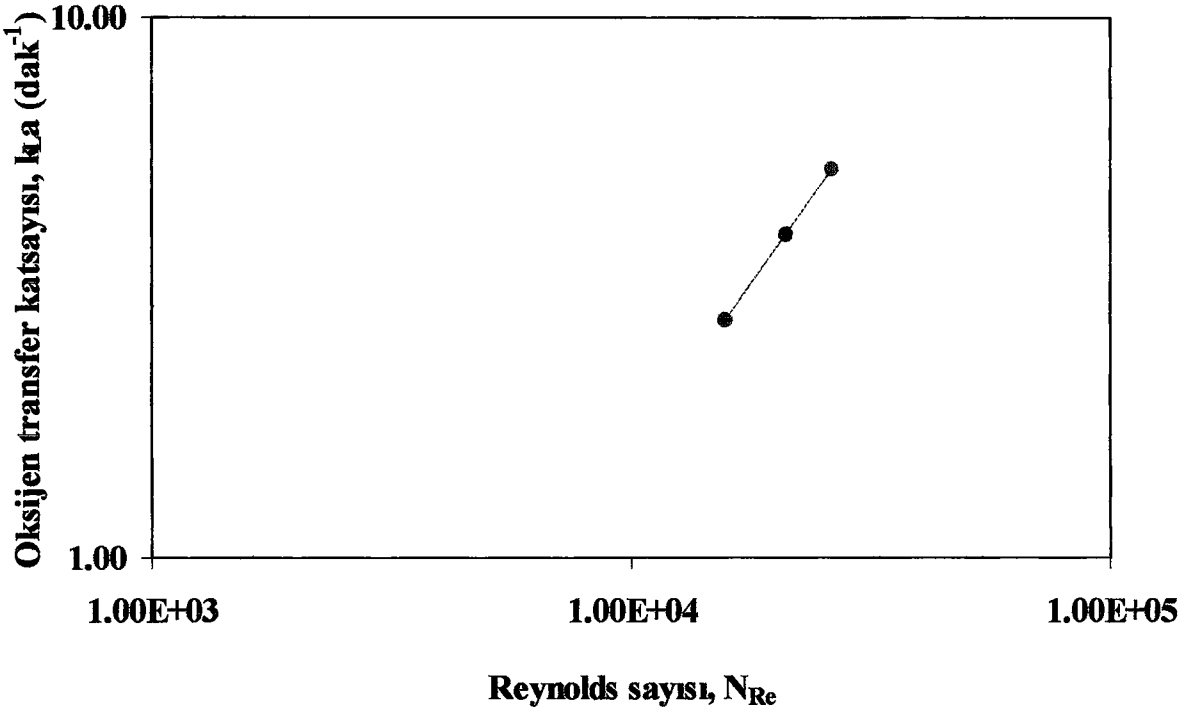
Reynolds sayısı, güç sayısı (N^3D^2) gibi karıştırıcı hızının (N) bir fonksiyonudur. Literatürde (Çizelge 4.14) destile su için, karıştırmalı reaktörlerde (N_{Re})'nin üssü geniş bir değişim göstermektedir ($0.67 < \alpha < 1.8$). Destile su için bu çalışmaya ait proses şartları daha önce Bölüm 4.1.1.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de destile su için Reynolds sayısına karşılık (karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan Reynolds sayıları Ek 9'da Çizelge E9.1'de verilmiştir.) elde edilen k_{La} değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.17'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda N_{Re} 'nin üssü 1.26 olarak bulunmuştur. Aynı zamanda verilere ait $R^2=0.9999$ ve standart sapma değeri, $\delta=0.00017$ olarak hesaplanmıştır.

$$k_{La} \propto (N_{Re})^{1.26}$$

Bu değer (1.26) 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

Liretarür verileri	(N_{Re})'nin üsleri
Hortaçsu (1965)	1.12
Aksak (1990)	1.13
Albal vd. (1983)	0.67
Sideman vd. (1966)	1.12
Ranade vd. (1978) (Aksak 1990, tarafından kaynak olarak verilmiştir.)	1.8
Yagi ve Yoshida (1971)	1.5
Bu çalışma	1.26



Şekil 4.17 Destile su için Reynolds sayısının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (yüzeysel hava hızı $3.156 \text{ cm.dak}^{-1}$, sıcaklık $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ve pH 7)

4.2.3 Yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi

Bu çalışmada, destile su için yüzeysel hava hızları $1.578 - 9.470 \text{ cm.dak}^{-1}$ arasında değiştirilirken, diğer çözeltiler için iki farklı yüzeysel hava hızı $3.156 \text{ cm.dak}^{-1}$ ve $6.313 \text{ cm.dak}^{-1}$ kullanılmıştır. Yüzeysel hava hızının etkisini incelerken iki nokta gerekli fakat yeterli değildir. Bu, kesin bir sonuca varmaktan çok, k_{La} '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_{La} değerleri Şekil 4.18 - 4.21'de verilmiştir. k_{La} ve v_s arasında üssel bir ilişki elde etmek için logaritmik koordinatlar kullanılmıştır. Dört farklı çözeltide k_{La} değerinin yüzeysel hava hızına bağımlılığını açıklayan üsler elde edilmiştir.

4.2.3.1 Destile su için yüzeysel hava hızının (v_s) fonksiyonu olarak k_{La} '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.

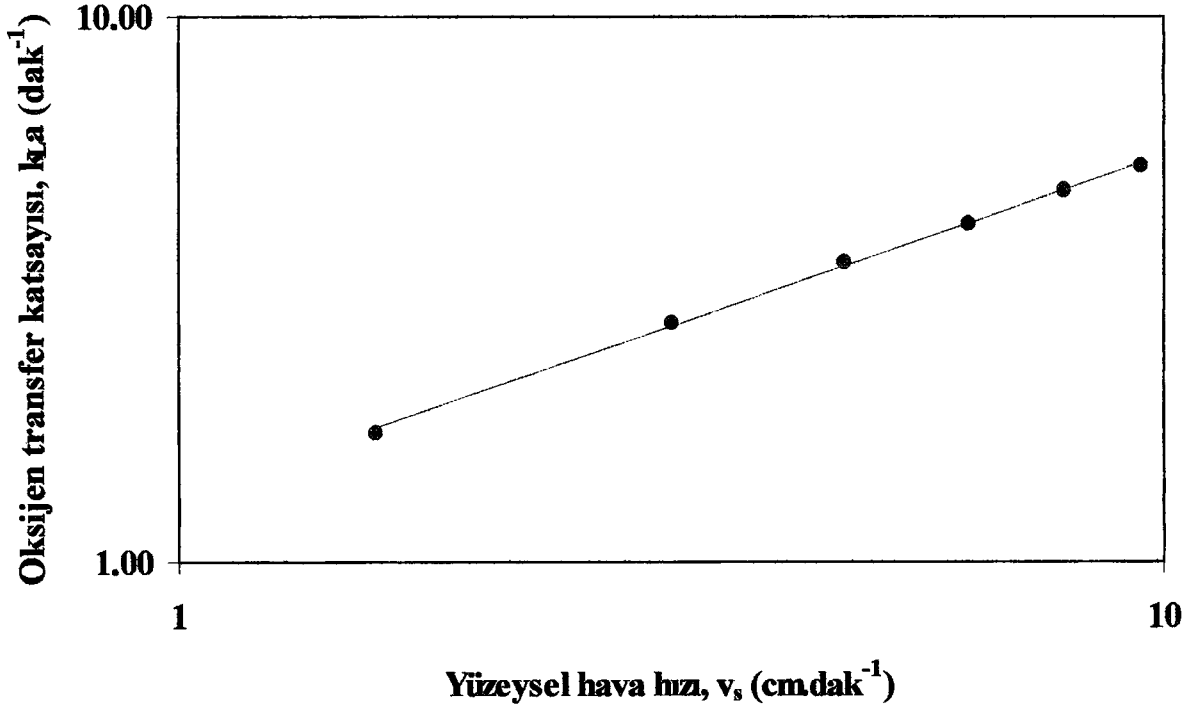
Çizelge 4.15 Destile su için literatürden alınan (v_s)'nin üsleri

Literatür verileri	(v_s)'nin üsleri (β)
Van't Riet (1979)	0.5
Robinson ve Wilke (1973) Hassan ve Robinson (1977)	(0.3 - 0.6)
Hortaçsu (1965)	0.67
Hyman ve Van Der Bogaerde (1960)	0.17
Cooper vd. (1944)	0.67
Chandrasekharan ve Calderbank (1981)	0.63
Gibilaro vd. (1985)	0.45
Aksak (1990)	$0 < \beta < 0.76$
Bu çalışma	0.60

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 E10.1'de verilmiştir.) elde edilen k_{La} değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.18'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda v_s 'nin üssü 0.62 olarak bulunmuştur. Aynı zamanda verilere ait $R^2=0.9995$ ve standart sapma değeri, $\delta=0.00075$ olarak hesaplanmıştır.

$$k_{La} \propto v_s^{0.62}$$

Bu değer ($\beta=0.62$), Çizelge 4.15'de belirtilen araştırmacıların bulduğu değerlerin ($0 < v_s < 0.76$) arasındadır.

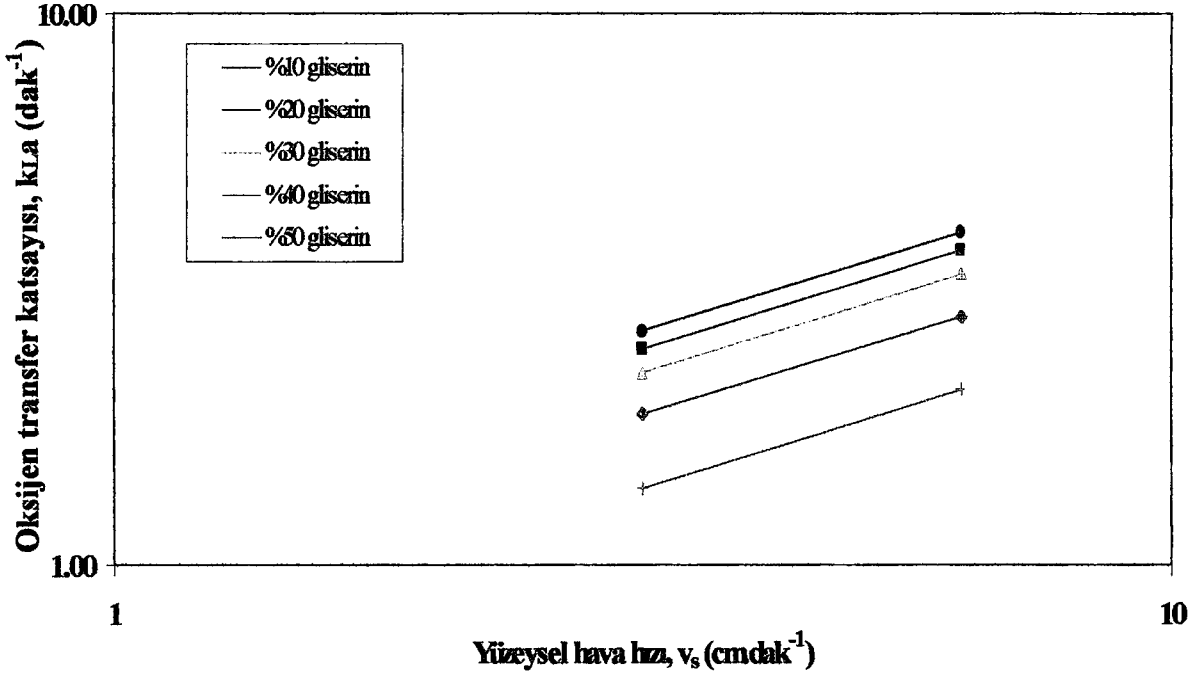


Şekil 4.18 Destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak $k_L a$ 'nın değişimi
(karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

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 gliserin+destile su için yüzeysel hava hızına karşılık (hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları Ek 10'da Çizelge E10.1'de verilmiştir.) elde edilen $k_L a$ değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.19'da 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 (0.59) olarak bulunmuştur. Gliserin yüzdesinin artmasıyla viskozitedeki artışa bakıldığında düşük viskoz sıvı olduğu görülür. Dolayısıyla $k_L a$ 'nın yüzeysel hava hızı ile artışı su ile aynı şekilde olmuştur.

$$k_L a \propto v_s^{0.59}$$

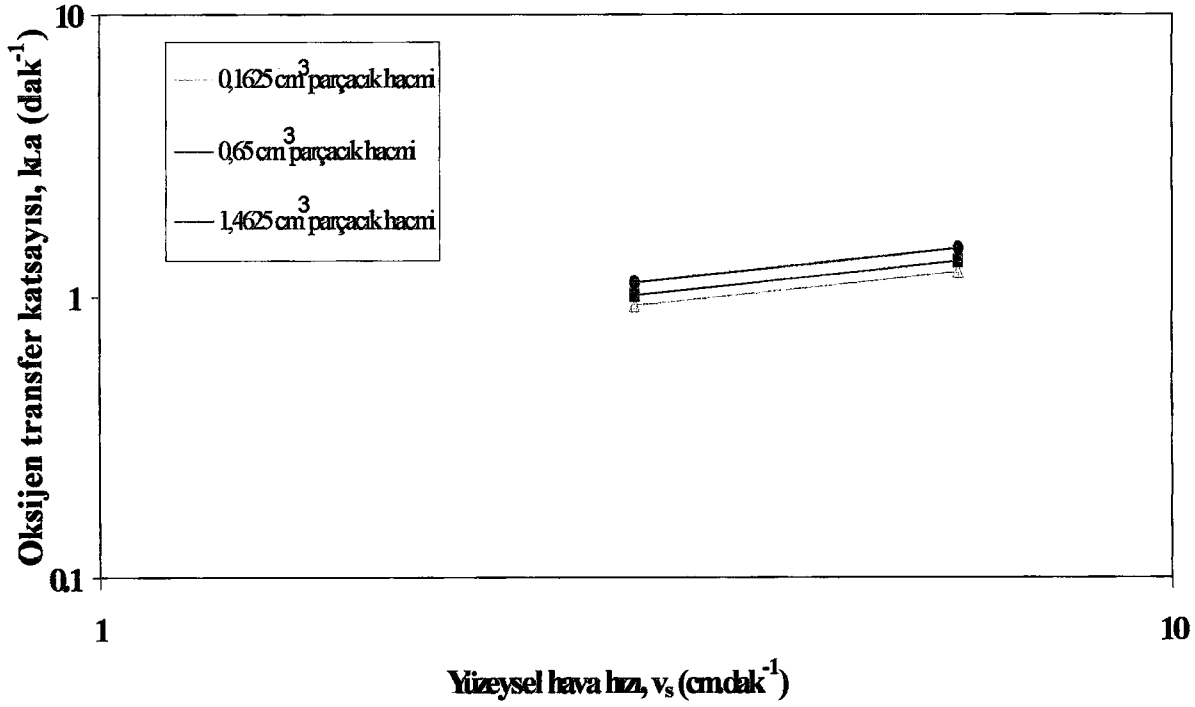


Şekil 4.19 Gliserin+destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

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

Bu çalışmaya için proses şartları daha önce Bölüm 4.1.2.3'de verilmiştir. Çizelge 4.7'de tutuklayıcı malzeme+destile su için yüzeysel hava hızına karşılık (hava debilerine karşılık hesaplanan yüzeysel hava hızları Ek 10'da Çizelge E10.1'de verilmiştir.) elde edilen k_{La} 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 (0.39) destile sudan küçük bulunmuştur. Bir başka deyişle yüzeysel hava hızı, k_{La} üzerine daha az etkilidir. Tutuklayıcı malzemenin ilave edilmesi, ara yüzey alanını azaltmakta ve çözeltinin fiziksel özelliklerinde bir 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.

$$k_{La} \propto v_s^{0.39}$$

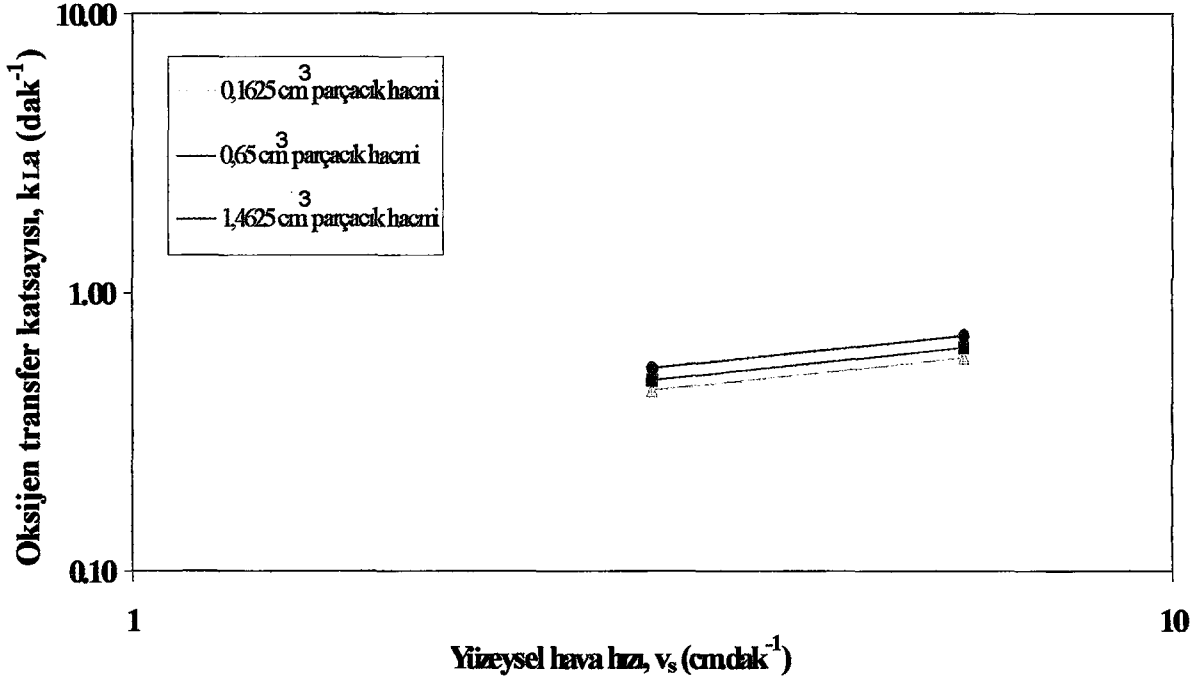


Şekil 4.20 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme)+destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

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 E10.1'de verilmiştir.) elde edilen k_{La} değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.21'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme)+gliserin (%50)+destile su için, yüzeysel hava hızının (v_s) üssü destile suya göre daha küçük (0.38) 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.

$$k_{La} \propto v_s^{0.38}$$

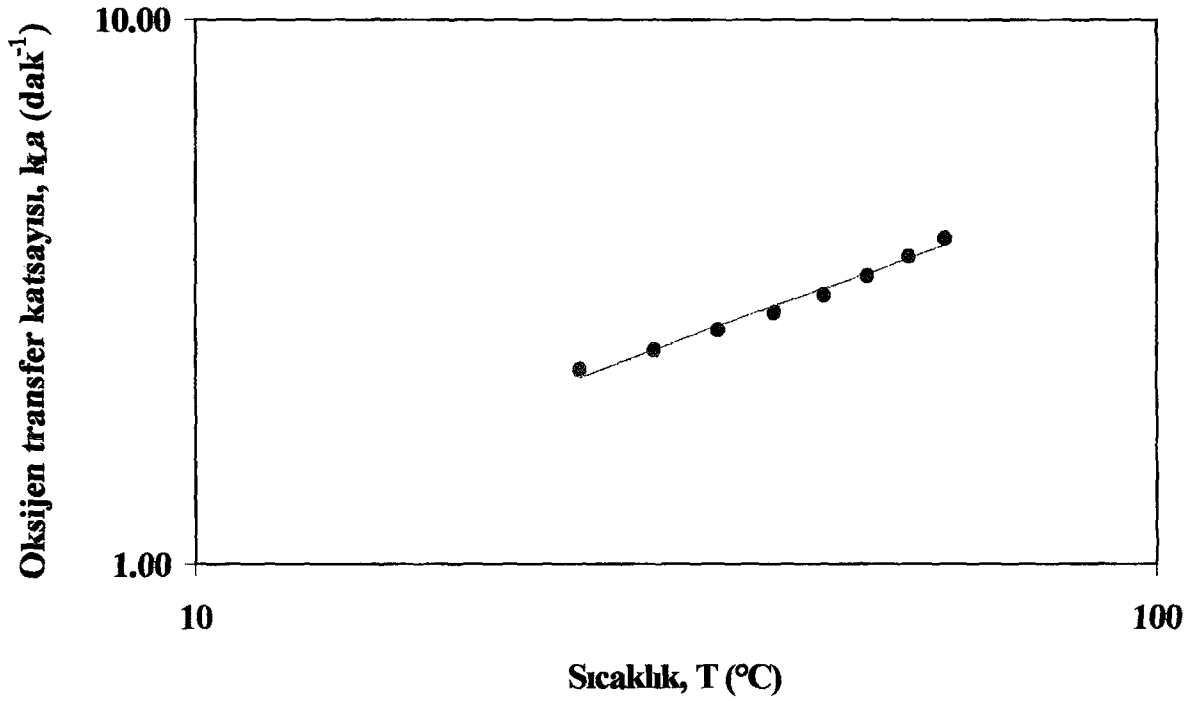


Şekil 4.21 Tutuklayıcı malzeme (%25 yükleme)+gliserin (%50)+destile su için yüzeysel hava hızının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, sıcaklık 37 °C ve pH 7)

4.2.4 Sıcaklığın (T) fonksiyonu olarak k_{La} '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_{La} değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.22'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda T'nin üssü 0.63 ve her 1 °C için k_{La} 'da %2.12'lik bir artış bulunmuştur. Aynı zamanda verilere ait $R^2=0.9928$ ve standart sapma değeri, $\delta=0.00128$ olarak hesaplanmıştır. Pirt (1985), sıcaklık ile k_{La} arasındaki ilişkiyi $k_{La} \propto T^{0.5}$ şeklinde ifade etmiştir. Aksak (1990), mekanik karıştırılmalı bir reaktörde destile su için, k_{La} ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi belirleyen üssü 0 – 30 °C aralığında 0.39 olarak bulmuştur. Sideman vd. (1966) ise k_{La} korelasyonlarında sıcaklığı esas aldıklarında $k_{La} \propto T^{0.34}$ olduğunu görmüşlerdir. Winkler ve Thomas (1978) ise, sıcaklığın her 1 °C artmasıyla k_{La} 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 k_{La} 'nın %2 oranında arttığını bulmuştur. T'nin üssünün Pirt ve Aksak' göre yüksek olması, çalışılan sıcaklık aralığından (25 – 60 °C) kaynaklanmaktadır. % olarak artış ise yukarıda bahsedilen araştırmacıların bulduğu değerlerin (2.0<2.12<2.48) arasındadır.

$$k_{La} \propto T^{0.63}$$



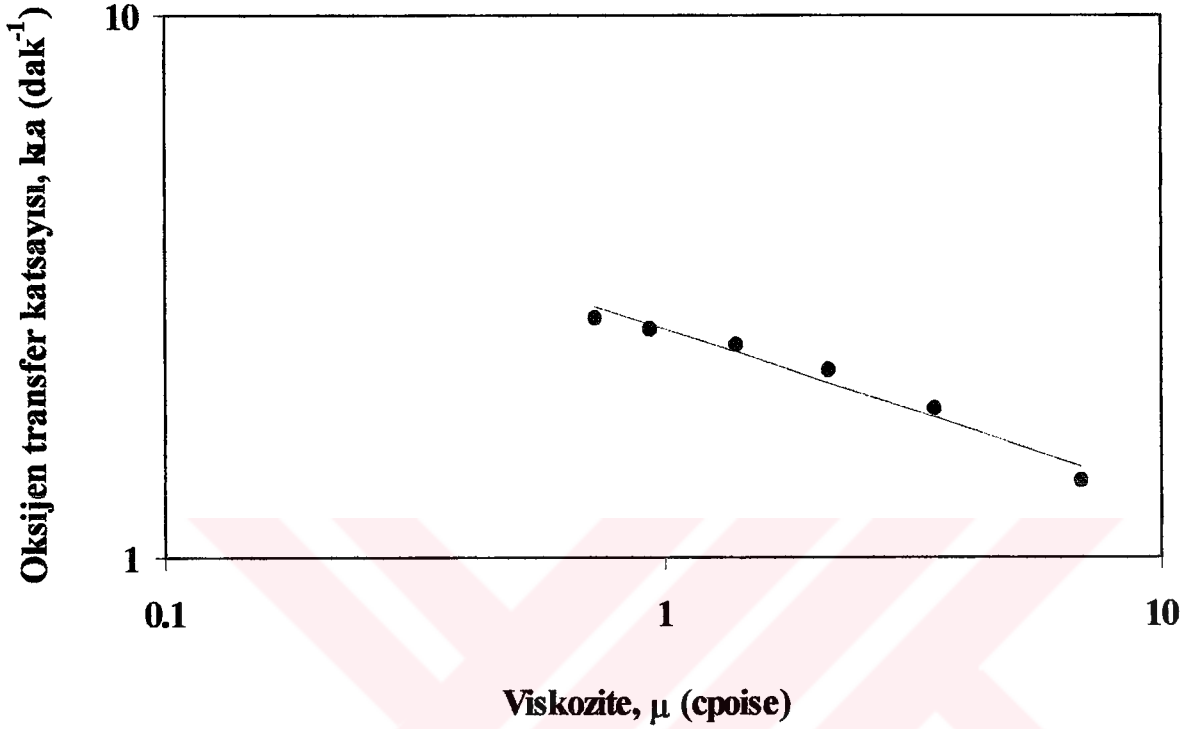
Şekil 4.22 Destile su için sıcaklığın fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, yüzeysel hava hızı 3.156 cm.dak⁻¹ ve pH 7)

4.2.5 Viskozitenin (μ) fonksiyonu olarak k_{La} '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_{La} değerleri daha önce verilmiştir ve Şekil 4.23'de grafiksel olarak sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda μ 'nün üssü -0.30 olarak bulunmuştur. Aynı zamanda verilere ait $R^2 = 0.9813$ ve standart sapma değeri, $\delta = 0.00187$ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada destile suya %10 - 100 oranlarında gliserin ilavesiyle viskozite arttırılmıştır. Çözeltinin viskozitesinin artmasıyla, beklendiği gibi kütle transferi dolayısıyla k_{La} azalmıştır. O'Connor, (Pirt, 1985, tarafından kaynak olarak verilmiştir.) viskozite ile k_{La} arasındaki ilişkiyi $k_{La} \propto \mu^{-0.5}$ şeklinde ifade etmiştir. Yagi ve Yoshida (1971) newtonyen akışkanlar için k_{La} ve viskozite arasındaki ilişkiyi belirleyen üssün -0.40 olduğunu bulmuşlardır. Albal vd. (1983) ise, k_{La} 'nın μ ile değişimini $k_{La} \propto \mu^{-0.17}$ şeklinde tanımlamışlardır. Hattori vd., (Pirt, 1985, tarafından kaynak olarak verilmiştir.) viskozitenin etkisini karboksil metil selüloz kullanarak incelemişlerdir. Viskozite ve k_{La} arasındaki ilişkiyi, viskozite değerinin 50 cp'den (kritik viskozite değeri) küçük olması durumunda $k_{La} \propto \mu^{-0.35}$, 50 cp'den büyük olması halinde ise $k_{La} \propto \mu^{-1.1}$ şeklinde ifade etmişlerdir. Bu çalışmada

bulunan değer (-0.30), yukarıda bahsedilen araştırmacıların bulduğu değerlerin (-0.17 < -0.3 < -0.5) arasındadır.

$$k_{La} \propto \mu^{-0.30}$$

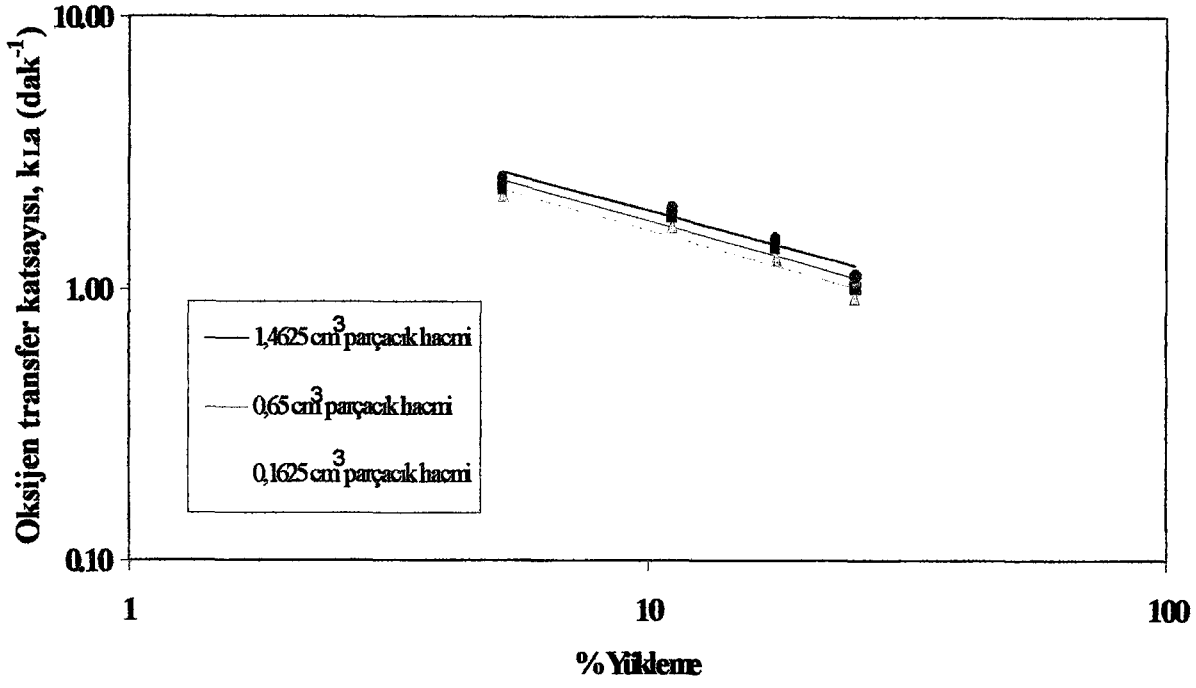


Şekil 4.23 Gliserin+destile su için viskozitenin fonksiyonu olarak k_{La} 'nın değişimi (karıştırıcı hızı 300 rpm, yüzeysel hava hızı $3.156 \text{ cm.dak}^{-1}$, sıcaklık $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ve pH 7)

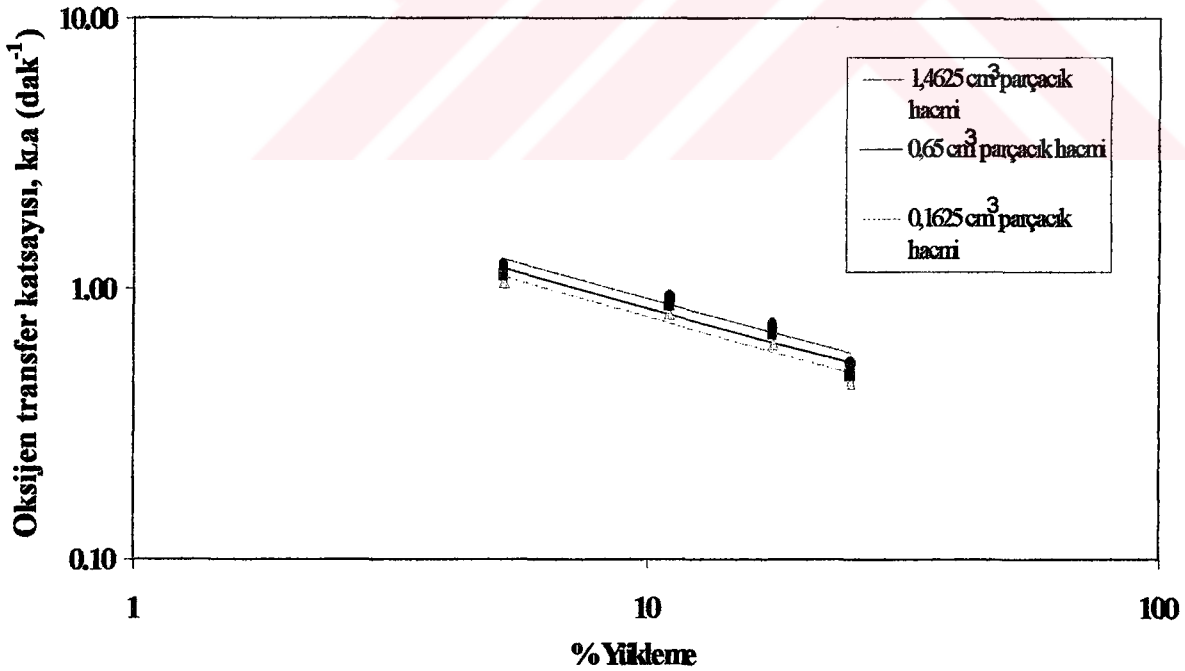
4.2.6 Tutuklayıcı malzemenin % yükleme miktarının fonksiyonu olarak k_{La} 'nın incelenmesi

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_{La} 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 E11.1 ve Çizelge 11.2) verilmiştir. Hesaplamalar sonucunda % yükleme ve k_{La} arasındaki ilişkiyi belirleyen üs -0.52 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla tutuklayıcı malzemenin k_{La} üzerinde önemli bir etkisi görülmüştür.

$$k_{La} \propto (\% \text{ Yükleme})^{-0.52}$$



Şekil 4.24 Tutuklayıcı malzeme+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)



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^3D^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 $k_{L,a} \propto (N^3D^2)^{0.42}$, gliserin+destile su için $k_{L,a} \propto (N^3D^2)^{0.41}$, tutuklayıcı malzeme+destile su için $k_{L,a} \propto (N^3D^2)^{0.31}$ ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için $k_{L,a} \propto (N^3D^2)^{0.30}$ olarak bulunmuştur. $k_{L,a}$ 'nın Reynolds sayısına bağımlılığı ise, destile su için $k_{L,a} \propto (N_{Re})^{1.26}$ olarak tespit edilmiştir.
- 2) Biyoreaktöre gönderilen havanın debisinin artırılmasıyla $k_{L,a}$ artmaktadır. $k_{L,a}$ 'nın yüzeyel hava hızına bağımlılığı; destile su için $k_{L,a} \propto (v_s)^{0.62}$, gliserin+destile su için $k_{L,a} \propto (v_s)^{0.59}$, tutuklayıcı malzeme+destile su için $k_{L,a} \propto (v_s)^{0.39}$ ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için $k_{L,a} \propto (v_s)^{0.38}$ 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 $k_{L,a} \propto (T)^{0.63}$ olarak bulunmuştur.
- 4) Gliserin ilavesiyle viskozitenin artırılması sonucu beklendiği gibi oksijen transfer katsayısı azalmıştır. Gliserin+destile su için, $k_{L,a}$ 'nın viskoziteye bağımlılığı, $k_{L,a} \propto (\mu)^{-0.30}$ olarak bulunmuştur.
- 5) Tutuklayıcı malzeme (Scotch Brite 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. $k_{L,a}$ 'nın % yükleme miktarına bağımlılığı, tutuklayıcı malzeme+destile su

ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için $k_L a \propto (\% \text{Yükleme})^{-0.52}$ olarak bulunmuştur.

- 6) Bu çalışmada, elde edilen $k_L a$ 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.
- 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.
- 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. ve 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.

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.

Schumpe, A., Saxena, A.K. ve Fang, L.K., (1987), "Gas/Liquid Mass Transfer in a Slurry Bubble Column", *Chemical Engineering Science*, 1787-1796.

Shelly, M.L., (1932), "Glycerol Viscosity Tables", *Ind. Eng. Chem*, 24:1060-1064.

Sideman, S., Hortaçsu, Ö. ve 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. ve 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.

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

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

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



EKLER

- Ek 1 $k_{L,a}$ 'nın Hesaplanmasına Ait Bir Örnek
- Ek 2 Karıştırıcı Hızları İçin Elde Edilen $k_{L,a}$ Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri
- Ek 3 Hava Debileri İçin Elde Edilen $k_{L,a}$ Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri
- Ek 4 Sıcaklık Değerleri İçin Elde Edilen $k_{L,a}$ Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri
- Ek 5 Viskozite Değerleri İçin Elde Edilen $k_{L,a}$ Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri
- Ek 6 % Yükleme Miktarları İçin Elde Edilen $k_{L,a}$ Değerlerine Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri
- Ek 7 Karıştırıcı Hızlarına Karşılık Hesaplanan Güç Sayıları
- Ek 8 Güç Sayısı ve $k_{L,a}$ Arasındaki İlişkiyi 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 $k_{L,a}$ Arasındaki İlişkiyi Belirleyen Korelasyonlara Ait R^2 ve Standart Sapma (δ) Değerleri

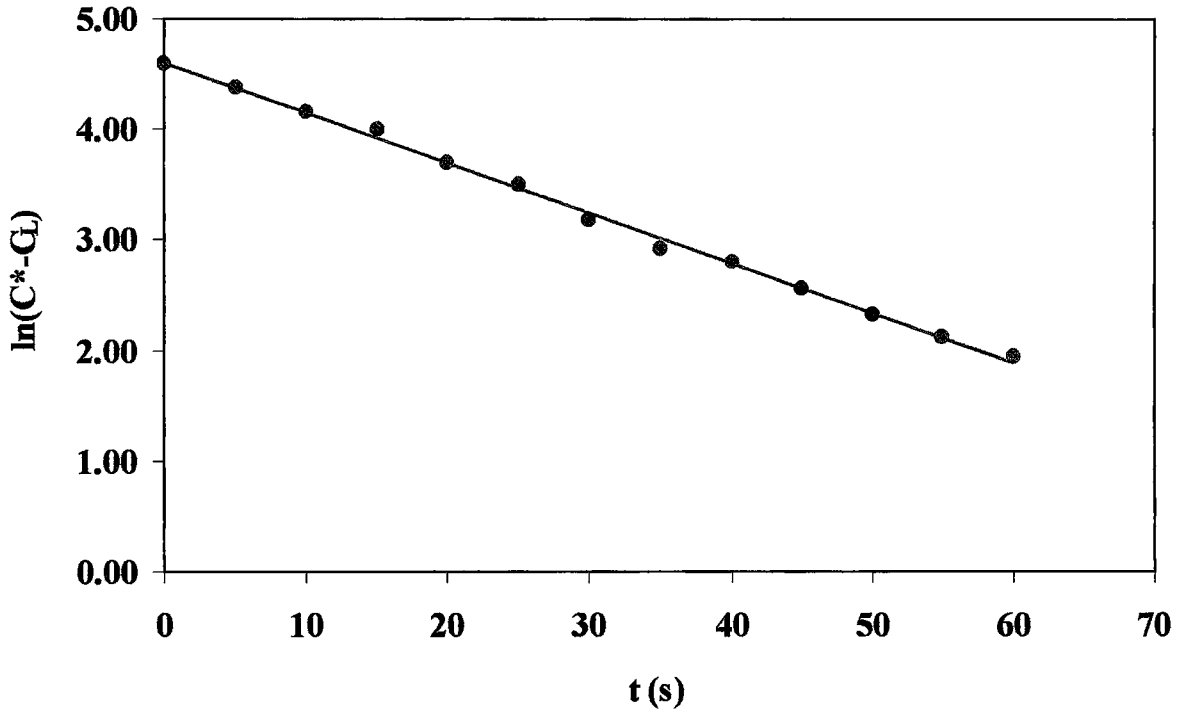
Ek 1 k_{La} 'nın hesaplanmasına ait bir örnek

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

Çizelge E1.1 Destile su için çözünmüş oksijen konsantrasyon değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ve pH 7)

Zaman (s)	C_L (%) (Deneysel)	C_L (%) (Teorik)
0	0	0
5	19.8	20.6
10	36.1	36.9
15	45.4	49.9
20	59.7	60.2
25	66.8	68.4
30	75.9	74.9
35	81.4	80.1
40	83.5	84.2
45	86.9	87.4
50	89.7	90.0
55	91.5	92.1
60	92.9	93.7

$\ln(C^* - C_L) = -k_{La}t$ denkleminde yararlanarak $\ln(C^* - C_L)$ ve t arasında çizilen grafiğin eğiminden k_{La} (2.766 dak^{-1}) bulunmuştur (Şekil E1.1). Verilere ait $R^2=0.9986$ ve standart sapma değeri, $\delta=0.0482$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil E1.1 Destile su için zamana karşılık elde edilen çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerleri (karıştırıcı hızı 300 rpm, hava debisi 0.3 l.dak^{-1} , sıcaklık $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ve pH 7)

Ek 2 Karıştırıcı hızları için elde edilen $k_L a$ değerlerine ait R^2 ve standart sapma değerleri

Çizelge E2.1 Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	R^2	δ
100	0.9987	0.2253
200	0.9943	1.2127
300	0.9996	0.0482
400	0.9725	1.7377
500	0.9961	0.9728

Çizelge E2.2 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	0.9999	0.0026	0.9998	0.0594	0.9994	0.1183	0.9998	0.0462	0.9967	0.8960
200	0.9947	0.0736	0.9995	0.0826	0.9962	0.5537	0.9972	0.5944	0.9985	0.6895
300	0.9775	1.0699	0.9713	1.1760	0.9991	0.1335	0.9743	1.5767	0.9855	1.3975
400	0.9802	0.6988	0.9865	0.7675	0.9742	1.9467	0.9708	1.9386	0.9731	2.6339
500	0.9750	1.0777	0.9780	0.8388	0.9818	0.6327	0.9865	0.7675	0.9925	1.2981

Çizelge E2.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

N, rpm	Parçacık hacmi					
	0.1625 cm ³		0.65 cm ³		1.4625 cm ³	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
100	0.9999	0.0117	0.9999	0.0157	0.9982	0.1352
200	0.9990	0.4862	0.9988	0.5713	0.9986	0.1108
300	0.9931	1.5554	0.9965	0.6316	0.9903	0.9356
400	0.9889	2.7001	0.9867	2.2106	0.9879	2.1533
500	0.9998	0.0219	0.9808	2.9501	0.9871	2.7868

Çizelge E2.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

N, rpm	Parçacık hacmi					
	0.1625 cm ³		0.65 cm ³		1.4625 cm ³	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
100	0.9999	0.0049	0.9989	0.0448	0.9931	1.9113
200	0.9997	0.1105	0.9972	0.4578	0.9996	0.1855
300	0.9983	0.7600	0.9991	0.0077	0.9977	1.0232
400	0.9974	1.1344	0.9969	1.3101	0.9962	1.5537
500	0.9959	1.6824	0.9952	1.9132	0.9941	1.7745

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

Çizelge E3.1 Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Hava debisi, v (l.dak ⁻¹)	R^2	δ
0.15	0.9780	0.9538
0.30	0.9996	0.0482
0.45	0.9878	0.7560
0.60	0.9992	0.1265
0.75	0.9873	0.7993
0.90	0.9741	1.9439

Çizelge E3.2 Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

v , l.dak ⁻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	0.9775	1.0699	0.9713	1.1760	0.9991	0.1335	0.9743	1.5767	0.9855	1.3975
0.6	0.9844	0.6572	0.9848	0.7103	0.9878	0.7960	0.9981	0.0693	0.9719	2.7618

Çizelge E3.3 Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

v , l.dak ⁻¹	Parçacık hacmi					
	0.1625 cm ³		0.65 cm ³		1.4625 cm ³	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
0.3	0.9931	1.5554	0.9965	0.6316	0.9903	0.9356
0.6	0.9881	2.8505	0.9887	2.8910	0.9906	0.8781

Çizelge E3.4 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

v , $l.dak^{-1}$	Parçacık hacmi					
	0.1625 cm^3		0.65 cm^3		1.4625 cm^3	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
0.3	0.9983	0.7600	0.9991	0.0077	0.9977	1.0232
0.6	0.9981	0.8148	0.9974	1.2037	0.9969	1.4707

Ek 4 Sıcaklık değerleri için elde edilen $k_{L,a}$ değerlerine ait R^2 ve standart sapma değerleri

Çizelge E4.1 Destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Sıcaklık, T (°C)	R^2	δ
25	0.9912	0.1446
30	0.9679	2.5667
35	0.9927	0.1141
40	0.9907	0.2654
45	0.9893	0.7369
50	0.9999	0.0285
55	0.9855	0.8389
60	0.9751	2.5444

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

Çizelge E5.1 Gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Viskozite, μ (cpoise)	R^2	δ
%10 gliserin	0.9775	1.0699
%20 gliserin	0.9713	1.1760
%30 gliserin	0.9991	0.1335
%40 gliserin	0.9743	1.5767
%50 gliserin	0.9855	1.3975

Ek 6 % yükleme miktarları için elde edilen $k_{L,a}$ değerlerine ait R^2 ve standart sapma değerleri

Çizelge E6.1 Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

% Yükleme	Parçacık hacmi					
	0.1625 cm ³		0.65 cm ³		1.4625 cm ³	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
5	0.9945	0.8899	0.9937	0.7940	0.9972	0.1877
11	0.9833	2.7016	0.9843	1.5767	0.9819	2.2925
18	0.9912	1.9460	0.9925	0.9917	0.9862	1.6574
25	0.9931	1.5554	0.9965	0.6316	0.9903	0.9356

Çizelge E6.2 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

% Yükleme	Parçacık hacmi					
	0.1625 cm ³		0.65 cm ³		1.4625 cm ³	
	R^2	δ	R^2	δ	R^2	δ
5	0.9925	1.7889	0.9914	0.0884	0.9893	2.0926
11	0.9956	1.5901	0.9926	0.0785	0.9931	1.1554
18	0.9969	0.8121	0.9962	0.0537	0.9975	1.0270
25	0.9983	0.7600	0.9991	0.0077	0.9977	1.0232

Ek 7 Karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan 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 E7.1'de verilmiştir.

Çizelge E7.1 Karıştırıcı hızlarına karşılık hesaplanan güç sayıları

Karıştırıcı hızı, N (rpm)	Güç sayısı, N^3D^2 ($cm^2.dak^{-3}$)
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 E8.1, Çizelge E8.2 ve Çizelge E8.3'de verilmiştir.

Çizelge E8.1 Gliserin+destile su için R^2 ve Standart sapma (δ) değerleri

Gliserin+destile su	R^2 değerleri	δ değerleri
%10 gliserin	0.9999	0.00027
%20 gliserin	0.9999	0.00014
%30 gliserin	0.9999	0.00014
%40 gliserin	0.9999	0.00017
%50 gliserin	0.9999	0.00014

Çizelge E8.2 Tutuklayıcı malzeme+destile su için için R^2 ve Standart sapma (δ) değerleri

Tutuklayıcı malzeme+ destile su	R^2 değerleri	δ değerleri
0.1625 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9999	0.00001
0.65 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9999	0.00004
1.4625 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9983	0.00049

Çizelge E8.3 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için için R^2 ve Standart sapma (δ) değerleri

Tutuklayıcı malzeme+ gliserin+destile su	R^2 değerleri	δ değerleri
0.1625 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9986	0.00015
0.65 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9930	0.00041
1.4625 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9974	0.00029

Ek 9 Karıştırıcı hızına 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 hızına karşılık hesaplanan Reynolds sayıları Çizelge E9.1’de verilmiştir.

Çizelge E9.1 Karıştırıcı hızına 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 E10.1).

Çizelge E10.1 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 $k_{L,a}$ arasındaki ilişkiyi belirleyen korelasyonlara ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Tutuklayıcı malzeme+destile su ve tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için % yükleme miktarı ve $k_{L,a}$ arasındaki ilişkiyi belirleyen korelasyonlara ait R^2 ve standart sapma (δ) değerleri Çizelge E11.1 ve Çizelge E11.2'de verilmiştir.

Çizelge E11.1 Tutuklayıcı malzeme+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Tutuklayıcı malzeme+ destile su	R^2 değerleri	δ değerleri
0.1625 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9799	0.00218
0.65 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9775	0.00247
1.4625 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9777	0.00257

Çizelge E11.2 Tutuklayıcı malzeme+gliserin+destile su için R^2 ve standart sapma (δ) değerleri

Tutuklayıcı malzeme+ gliserin+destile su	R^2 değerleri	δ değerleri
0.1625 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9848	0.00091
0.65 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9788	0.00115
1.4625 cm ³ (parçacık hacmi)	0.9794	0.00120

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	09.05.1974	
Doğum yeri	İzmit	
Lise	1988-1991	Körfez Yarımca Lisesi
Lisans	1991-1996	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak. Kimya Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1996-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

