

Προς:

την υπεύθυνη του Εργαστηρίου

Βιοχημικών Διεργασιών & Περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας
του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης
κ. Παντίδου Αριάδνη

Σας παραδίδω την τεχνική έκθεση που αντιστοιχεί στην δεύτερη εργαστηριακή άσκηση του μαθήματος 'Τεχνική Χημικών & Βιοχημικών Διεργασιών' με θέμα «Υπολογισμός του ρυθμού οξυγόνωσης σε βιοαντιδραστήρα με παρουσία μικροοργανισμών» , η οποία διεξήχθη 13/12/2019 στο προπτυχιακό εργαστήριο του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης (κτίριο K1 – ΜΗΠΕΡ).

Με εκτίμηση,

ο υπεύθυνος της εργαστηριακής άσκησης

και συγγραφέας της τεχνικής έκθεσης

Κανναβιάς Χρύσανθος



Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Μηχανικών

Περιβάλλοντος Έτος 2019

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΟ ΒΑΘΜΟ ΑΠΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΙΟ FENTON

Εργαστήριο Βιοχημικών Διεργασιών και Περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας
Συντελεστής της τεχνικής έκθεσης: Κανναβιάς Χρύσανθος
Ημερομηνία παράδοσης: 10/01/2020

Λοιπά Μέλη Εργαστηριακής Ομάδας :

- Ευαγγέλου Παναγιώτης
- Ολύμπιος Πέτρος
- Χατζηαθανασίου Χρύσω

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργαστηριακή άσκηση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της δυναμικής οξυγόνωσης, κάτω από παρουσία μικροοργανισμών, με σκοπό τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς μάζας ($k_L a$) και αν η συμπεριφορά αυτού είναι αναμενόμενη από υπάρχουσες συσχετίσεις. Επίσης ακόμα ένας άλλος σκοπός ήταν ο πειραματικός υπολογισμός του ειδικού ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου (q_{O_2}) σε mg- O_2 / g-ξηρού βάρους βιομάζας από τους μικροοργανισμούς. Το πείραμα μας εκτελέστηκε δύο φορές σε μόνιμες, σταθερές πειραματικές συνθήκες αλλάζοντας μόνο την παροχή οξυγόνου Q στον βιοαντιδραστήρα. Ακόμα, κατά την διάρκεια κάθε πειράματος λαμβάναμε τιμές του διαλυμένου οξυγόνου DO κάθε 15 δευτερόλεπτα. Όταν η τιμή του πλησίαζε αρκετά την αρχική τιμή DOss, κλείναμε την παροχή οξυγόνου ενώ όταν η τιμή στον αισθητήρα έφτανε κοντά στο 10% ανοίγαμε και πάλι την παροχή. Έπειτα, κατασκευάσαμε τα διαγράμματα C_{O_2} .vs.t και $\ln(DOss-DO)$.vs.t και για τις δύο παροχές. Από την κλίση του πρώτου διαγράμματος (C_{O_2} .vs.t) υπολογίσαμε τα $q_{O_2} x_v$ (όπου x_v η ζωντανή βιομάζα) ενώ από την κλίση του δεύτερου διαγράμματος ($\ln(DOss-DO)$.vs.t) τα $k_L a$. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των $k_L a$ που προέκυψαν κατασκευάσαμε το διάγραμμα $k_L a - Q$ προκειμένου να διαπιστώσουμε τη σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη. Επιπλέον, υπολογίσαμε και τις θεωρητικές τιμές των συντελεστών μεταφοράς μάζας $k_L a$ και ακολούθησαν οι κατάλληλες συγκρίσεις ούτως ώστε να υπάρξει αξιολόγηση των πειραματικών μετρήσεων. Τέλος, έγινε η σύγκριση του πειραματικού q_{O_2} με τιμές από την βιβλιογραφία. Από τις πιο πάνω συσχετίσεις και υπολογισμούς παρατίθενται πίνακες και διαγράμματα καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο της έκθεσης για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

❖ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εξώφυλλο.....	σελ. i
Περίληψη.....	σελ. ii
Περιεχόμενα.....	σελ. iii
Πίνακας συμβόλων.....	σελ. iv

❖ ΚΥΡΙΟ ΜΕΡΟΣ

Εισαγωγή.....	σελ. 1
Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	σελ. 2
Μεθοδολογία.....	σελ. 7
Πειραματικά Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	σελ. 8
Συμπεράσματα.....	σελ. 20
Βιβλιογραφία.....	σελ. 21

❖ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα 1 ^ο : Πειραματικές μετρήσεις.....	σελ. 21
Παράρτημα 2 ^ο : Ανάλυση δεδομένων.....	σελ. 22
Παράρτημα 3 ^ο : Προγράμματα Η/Υ.....	σελ. 25

Πίνακας Συμβόλων

Σύμβολο	Ορισμός
$k_L a$	Συντελεστής μεταφοράς μάζας από την αέρια στην υγρή φάση (s^{-1})
P_g	Ισχύς που μεταφέρεται από τον αναδευτήρα στην υγρή φάση για αεριζόμενο βιοαντιδραστήρια (W)
V_R	Όγκος του βιοαντιδραστήρα (της υγρής φάσης) (L)
u_s	Φαινομενική ταχύτητα του αέρα ($u_s = F_{air}/A_R$)
Q	Ογκομετρική παροχή του αέρα (L/min)
A_R	Εμβαδόν διατομής του βιοαντιδραστήρα (m^2)
D_R	Διάμετρος αντιδραστήρα (m)
N	Ρυθμός περιστροφής του αναδευτήρα (RPM)
P_u	Η απαιτούμενη ισχύς σε μη αεριζόμενο αντιδραστήρα
D_i	Η διάμετρος του αναδευτήρα (m)
C^*	Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στην υγρή φάση σε ισορροπία με την αέρια φάση (mg/L)
C_L	Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου την χρονική στιγμή t (mg/L)
C_{L0}	Η τιμή του C_L στην t_0 (mg/L)
DO	Διαλυμένο οξυγόνο
$DO_{0\%}$	Υποθέτουμε όταν το διαλυμένο οξυγόνο είναι 0%, ο μετρητής δείχνει μια τιμή διαφορετική του μηδενός την οποία συμβολίζουμε $DO_{0\%}$
$DO_{100\%}$	Υποθέτουμε όταν το διαλυμένο οξυγόνο είναι 100%, ο μετρητής δείχνει μια τιμή διαφορετική του 100% στην οποία συμβολίζουμε με $DO_{100\%}$
DO_{ss}	Αρχική ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου
q_{O_2}	ειδικός ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου (mg- O_2 /g _{ξηρού βάρους βιομάζας})
x_v	Η συγκέντρωση της ζωντανής βιομάζας (gr/L)
T	Θερμοκρασία σε $^{\circ}C$
t	Χρόνος(sec)

ΚΥΡΙΟ ΜΕΡΟΣ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός του πειράματος αυτού ήταν η εξοικείωσή μας με τη μέθοδο της δυναμικής οξυγόνωσης και να υπολογίσουμε με τη χρήση της την πειραματική τιμή του συντελεστή μεταφοράς μάζας ($k_L a$) κατά την παρουσία μικροοργανισμών και την πειραματική τιμή κατανάλωσης οξυγόνου (q_{O_2}) από τους μικροοργανισμούς. Επίσης να εξετάσουμε κατά πόσο η συμπεριφορά του πειραματικά υπολογιζόμενου $k_L a$ είναι η αναμενόμενη από ήδη υπάρχουσες συσχετίσεις.

Η μέθοδος της δυναμικής οξυγόνωσης που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς μάζας ($k_L a$) από την αέρια στην υγρή φάση αποτελεί υποκατηγορία του γενικού επιστημονικού πεδίου της μεταφοράς μάζας (Gas-Liquid Mass Transfer) από αέρια σε υγρή φάση μέσω της οξυγόνωσης βιοαντιδραστήρων. Πρακτικά η μεταφορά μάζας σε μια εκ των δύο φάσεων πραγματοποιείται λόγω της κατανάλωσης του οξυγόνου (O_2). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συγκέντρωση του ($C^*_{O_2}$) να είναι μικρότερη στη μια και εξαιτίας της ισορροπίας των φάσεων να μεταφέρεται μάζα από την φάση με την υψηλότερη συγκέντρωση οξυγόνου στην άλλη.

Η μελέτη του φαινομένου της μεταφοράς μάζας από αέρια σε υγρή φάση έγινε μέσω της οξυγόνωσης σε βιοαντιδραστήρα (παρουσία μικροοργανισμών). Η οξυγόνωση ενός βιοαντιδραστήρα πραγματοποιείται με συνεχή παροχή αέρα αν και στο συγκεκριμένο πείραμα ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα η παροχή σταματούσε.

Οι βιοαντιδραστήρες διακρίνονται σε βιοαντιδραστήρες διαλείποντος έργου, βιοαντιδραστήρες ημιδιαλείποντος έργου και βιοαντιδραστήρες συνεχούς λειτουργίας (σταθερές τιμές συγκεντρώσεων).

Για την ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών σε βιοαντιδραστήρα είναι απαραίτητη η συνεχής παροχής αέρα (O_2), προκειμένου η τιμή του στην αέρια φάση να διατηρείται σταθερή.

Οι πιο διαδεδομένοι τύποι βιοαντιδραστήρων είναι:

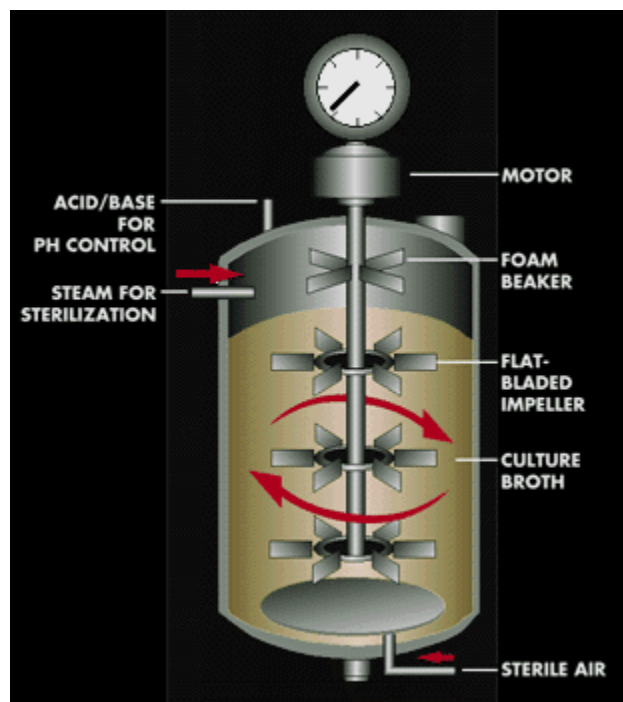
- βιοαντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης
- βιοαντιδραστήρας στήλης φυσαλίδων
- βιοαντιδραστήρας βρόχου
- βιοαντιδραστήρας κλίνης
- βιοαντιδραστήρας μεμβρανών
- βιοαντιδραστήρας ζύμωσης στερεάς κατάστασης

2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Βασικές έννοιες για την κατανόηση του πειράματος και την εξαγωγή των μετρήσεων:

- Βιοαντιδραστήρας

Βιοαντιδραστήρες είναι κατασκευές μέσα στις οποίες πραγματοποιούνται χημικές ή βιοχημικές διεργασίες υλικών με ή χωρίς την δράση ζωντανών κυττάρων ή ενζύμων και ονομάζονται αλλιώς και ζημωτήρες. Ταξινομούνται στις διάφορες κατηγορίες που προαναφέρθηκαν στην εισαγωγή με βάση τον τρόπο λειτουργίας τους, τον αριθμό των φάσεων που συνυπάρχουν σε αυτούς, τα πρότυπα ροής και ανάμιξης, το είδος του βιοκαταλύτη και τον τρόπο εισαγωγής και διατήρησης του βιοκαταλύτη.



- Οξυγόνωση βιοαντιδραστήρων

Η οξυγόνωση ενός βιοαντιδραστήρα γίνεται συνήθως με την συνεχή παροχή αέρος που περνά μέσα από την υγρή φάση υπό μορφή φυσαλίδων.

Μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς μάζας $k_L a$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφορά μάζας υπάρχουν τρεις βασικοί μέθοδοι:

α) Μέθοδος δυναμικού αερισμού, β) Μέθοδος χημικής οξείδωσης και γ) Μέθοδος δυναμικής οξυγόνωσης.

➤ Μέθοδος δυναμικού αερισμού (gassing-in method)

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε τον βιοαντιδραστήρα γεμάτο με νερό ή καλύτερα διάλυμα θρεπτικών ουσιών (περιοριστικό υπόστρωμα και άλλες θρεπτικές ουσίες συμπεριλαμβανομένων και των αλάτων). Δεν υπάρχουν ζωντανά κύτταρα στο διάλυμα. Γι' αυτό το λόγο, πολύ συχνά ερευνητές χρησιμοποιούν σωματίδια από αδρανή υλικά που έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα ζωντανά κύτταρα (μέγεθος και ειδικό βάρος).

➤ Μέθοδος χημικής οξείδωσης (sulfite oxidation method)

Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι η χημική οξείδωση του SO_3^- σε SO_4^- είναι πολύ γρήγορη με την παρουσία Cu^{++} ή Co^{++} ως καταλύτη. Επομένως μπορούμε να υποθέσουμε ότι το διαλυμένο οξυγόνο είναι πρακτικά μηδέν και ο ρυθμός δημιουργίας των ιόντων SO_4^- είναι ίσος με την μεταφορά οξυγόνου στο διάλυμα (oxygen transfer rate, OTR).

➤ Μέθοδος δυναμικής οξυγόνωσης (dynamic method - respirometer) → Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα

Στη μέθοδο της δυναμικής οξυγόνωσης με παρουσία μικροοργανισμών, χρησιμοποιείται όλος ο βιοαντιδραστήρας για την μέτρηση της αναπνοής. Κατά την διάρκεια του πειράματος ο βιοαντιδραστήρας λειτουργεί σε μόνιμες ή καλύτερα ψευδό-μόνιμες συνθήκες. Το πείραμα ξεκινάει έχοντας μια αρχική τιμή του διαλυμένου οξυγόνου DOss. Σε αυτό το σημείο διακόπτεται η παροχή αέρα και έτσι λόγω της κατανάλωσης του ήδη υπάρχοντος διαλυμένου οξυγόνου από τους μικροοργανισμούς, αυτό αρχίζει να μειώνεται. Από αυτό το σημείο του καμπύλης είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε το ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου από τη βιομάζα εντός του βιοαντιδραστήρα. Πρέπει να σημειωθεί ότι αφού σταματήσει η παροχή, η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου δεν πρέπει να προσεγγίσει τιμής πολύ κοντά στο μηδέν γιατί μπορεί να αλλάξει η φυσιολογική κατάσταση των μικροοργανισμών λόγω της απουσίας οξυγόνου. Επιπλέον εάν είναι γνωστός ο ειδικός ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου είναι εφικτό να προσδιοριστεί η συγκέντρωση της ζωντανής βιομάζας ή και το αντίστροφο. Αφού λοιπόν μειωθεί η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου και φτάσει στα κατάλληλα επίπεδα, η παροχή του αέρα θέτεται σε λειτουργία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου να αυξάνεται συνεχώς μέχρις ότου σταθεροποιηθεί στο επίπεδο στο οποίο η μονάδα λειτουργεί σε μόνιμες συνθήκες. Από αυτό το σημείο της καμπύλης (DO%-t) μπορούμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια το συντελεστή μεταφοράς μάζας εάν γνωρίζουμε από πριν το ρυθμό κατανάλωσης του οξυγόνου από τη βιομάζα. Δεδομένου ότι η συνολική διάρκεια του πειράματος είναι σχετικά μικρή, μπορούμε να υπολογίσουμε ότι η συγκέντρωση της βιομάζας δεν αλλάζει σημαντικά.

Κατά την διακοπή της παροχής αέρα (πρώτη περίοδος του πειράματος), η συγκέντρωση του οξυγόνου μειώνεται με βάση την εξίσωση:

$$\frac{dCO_2}{dt} = -q_{O_2} X_v \quad (1)$$

Όπου q_{O_2} : ειδικός ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου από τη βιομάζα
 x_v : συγκέντρωση ζωντανής βιομάζας

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση προκύπτει :

$$C_{O_2}(t) = C_{O_2}(t_0) - q_{O_2} x_v (t - t_0) \quad (2)$$

Από την παραπάνω εξίσωση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου από τη βιομάζα ($q_{O_2} x_v$) μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση του $C_{O_2}(t)$ ως προς τον χρόνο t .

Κατά τη διάρκεια της οξυγόνωσης η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = k_L a (C^*_{O_2} - C_{O_2}) q_{O_2} x_v \quad (3)$$

Όπου $C^*_{O_2}$ είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε ισορροπία με τη συγκέντρωση του οξυγόνου στην αέρια φάση.

Επιλύοντας αναλυτικά την εξίσωση (3), καταλήγουμε στην σχέση :

$$\frac{C^*_{O_2} - C_{O_2}(t) - \frac{q_{O_2} x_v}{k_L a}}{C^*_{O_2} - C_{O_2}(t_0) - \frac{q_{O_2} x_v}{k_L a}} = e^{-k_L a [t - t_0]} \quad (4)$$

Η οποία στην συνέχεια μετά από πράξεις μας δίνει :

$$C_{O_2}(t) = C^*_{O_2} - \frac{q_{O_2} x_v}{k_L a} - \left(C^*_{O_2} - C_{O_2}(t_0) - \frac{q_{O_2} x_v}{k_L a} \right) \cdot e^{-k_L a [t - t_0]} \quad (5)$$

Με την παραπάνω εξίσωση μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους $k_L a$ και $C^*_{O_2}$.

Με την προϋπόθεση ότι γνωρίζουμε με ακρίβεια τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε ψευδό-μόνιμες συνθήκες, και κάνοντας χρήση της εξίσωσης (3)

θέτοντας $\frac{dC_{O_2}}{dt} = 0$, έχουμε:

$$k_L a (C^*_{O_2} - C_{O_2} ss) - q_{O_2} x_v = 0 \quad (6)$$

Έτσι μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε το $C^*_{O_2}$ ως εξής:

$$C^*_{O_2} = C_{O_2} ss + \frac{q_{O_2} x_v}{k_L a} \quad (7)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις παράγεται η εξής εξίσωση:

$$\ln(C_{O_2} ss - C_{O_2}(t)) = \ln(C_{O_2} ss - C_{O_2}(t_0)) - k_L a [t - t_0] \quad (8)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι η τιμή του $k_L a$ μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας γραμμής στο διάγραμμα του $\ln(C_{O_2} ss - C_{O_2})$ ως προς τον χρόνο t .

Για ένα τέλεια βαθμονομημένο όργανο ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$DO = \left(\frac{C_{O_2}}{C^*} \right) \cdot 100 (\%)$$

Επομένως η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$C_{O_2} = C^* \left(\frac{DO}{100} \right)$$

Μετά από αντικατάσταση του C^* λόγω του ότι αντιστοιχεί σε καθορισμένες και γνωστές συνθήκες ισχύει:

$$\ln\left(\frac{DO_{ss} - DO}{DO_{ss} - DO_0}\right) = -k_L a [t - t_0]$$

Επομένως η τιμή του $k_L a$ μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας γραμμής στο διάγραμμα του $\ln(DO_{ss} - DO)$ ως προς τον χρόνο t .

Ισορροπία Φάσεων (Phase Equilibria)

Όταν έχουμε δύο φάσεις σε ισορροπία (π.χ. αέρας σε ισορροπία με υδατικό διάλυμα υποστρώματος) αναμένεται να υπάρχει συσχέτιση του διαλυμένου οξυγόνου του υδατικού διαλύματος του υποστρώματος με το οξυγόνο του αέρα. Η σχέση που συνδέει τις δύο φάσεις σε ισορροπία είναι η ισότητα της πτητικότητας του O_2 . Συνεπώς ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$f_{O_2}^V = f_{O_2}^L \rightarrow (\text{Henry's Law}) \rightarrow p_{O_2} = H \cdot C_{O_2} \rightarrow y_{O_2} \cdot p = H \cdot C_{O_2} \rightarrow C_{O_2} = y_{O_2} \cdot \frac{p}{H}$$

όπου :

- H : σταθερά του henry [$\text{atm} \cdot (\text{L} / \text{mg})$]
- P : η συνολική πίεση (atm)
- C_{O_2} : η συγκέντρωση του O_2 στην υγρή φάση (mg/L)
- $C^*_{O_2}$: η συγκέντρωση του O_2 που βρίσκεται σε ισορροπία με την αέρια φάση (mg/L)

Γενικότερα ο τύπος που συνδέει την διαλυτότητα του O_2 στο νερό σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία είναι ο εξής:

$$C^*_{O_2} = 14,16 - 0,394 \cdot T + 0,007714 \cdot T^2 - 0,000646 \cdot T^3$$

Όπου T : η θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)

Συσχετίσεις για το $k_L a$

Εξαιτίας της ιδιαίτερης σημασίας του $k_L a$ έχουν γίνει πολλές συσχετίσεις για τον προσδιορισμό του. Έτσι για βιοαντιδραστήρες με μηχανική ανάδευση έχουμε ότι:

$$k_L a \sim \left(\frac{P_g}{V}\right)^{0,4} \cdot (u_s)^{0,5} \cdot (RPM)^{0,5}$$

Όπου u_s : η ταχύτητα του αέρα μέσα στον βιοαντιδραστήρα

$$u_s = \frac{F_{air}}{A} = \frac{\text{Παροχή αέρα}}{\text{εμβαδό διατομής αντιδραστήρα}}$$

P_g : απαιτούμενη ισχύς για τον αεριζόμενο βιοαντιδραστήρα όγκου V , και υπολογίζεται ως εξής:

$$P_g \sim \left[\frac{P_u^2 (RPM) D_i^3}{F_{air}^2} \right]^{0,45}$$

Όπου:

- D_i : διάμετρος αναδευτήρα
- P_u : απαιτούμενη ισχύς για τον μη αεριζόμενο βιοαντιδραστήρα
- RPM: ταχύτητα περιστροφής του αναδευτήρα

Σε περιπτώσεις που υπάρχουν φυσαλίδες χωρίς να υπάρχει μηχανική ανάδευση ισχύει η σχέση:

$$k_L a \sim \frac{F_{air} h_L}{D_b^{1,5} u_b^{0,5} V}$$

Όπου:

- h_L : ύψος της υγρής φάσης του αντιδραστήρα
- u_b : η ταχύτητα με την οποία ανεβαίνουν οι φυσαλίδες μέσα στο βιοαντιδραστήρα

$$u_b = \frac{F_{air} h_L}{H_b V}$$

Όπου:

- H_b : ο χώρος που καταλαμβάνουν οι φυσαλίδες μέσα στο βιοαντιδραστήρα
- D_b : η διάμετρος των φυσαλίδων η οποία συνδέεται με την παροχή αέρα με την σχέση

$$D_b \approx (F_{air})^\gamma \quad \gamma = (0,2 - 1,0)$$

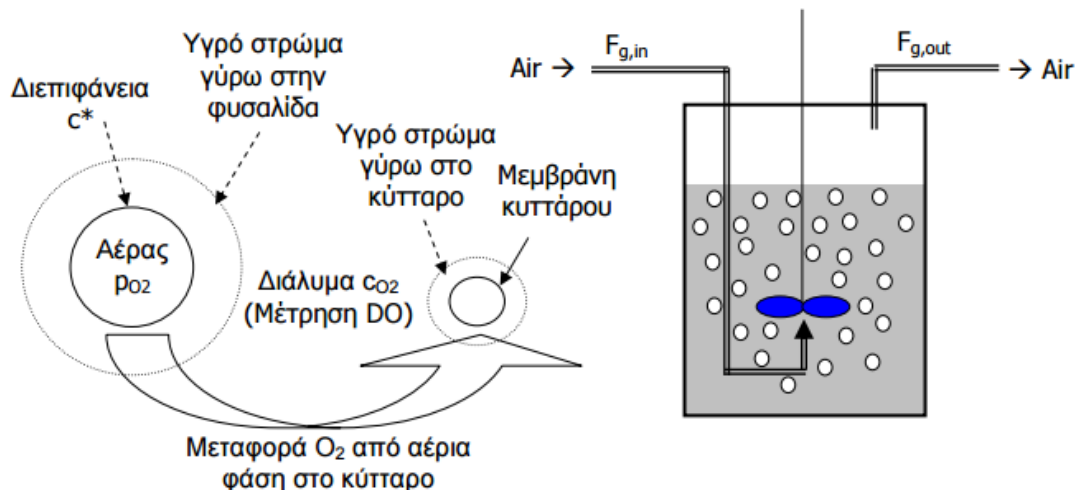
SACCHAROMYCES CEREVISIAE

Saccharomyces cerevisiae είναι ένα είδος του ζυμομύκητα, το οποίο ίσως να είναι το πιο χρήσιμο για την παραγωγή μαγιάς, αφού από τους αρχαίους χρόνους είχε καθοριστική σημασία για την διαδικασία της οينوποίησης, την ζυθοποιία αλλά και το ψήσιμο. Αποτελεί τον μικροοργανισμό που οφείλεται για το πιο κοινό είδος ζύμωσης. Ο μύκητας αυτός είναι ένας ευκαρυωτικός μικροοργανισμός, με χαρακτηριστικό λεμονοειδές σχήμα, ο οποίος πολλαπλασιάζεται αγενώς με μια διαδικασία γνωστή ως διαίρεση εκκολαπτόμενους. Τα κύτταρά του είναι στρογγυλά ή ωοειδές με διάμετρο 5-10 μm και αποτελεί έναν οξεόφιλο μικροοργανισμό αφού αναπτύσσεται κυρίως σε ελαφρώς ή μετρίου επιπέδου όξινο περιβάλλον ($\text{pH } 4,5 - 6,5$) και σε θερμοκρασίες $20 - 25^\circ\text{C}$.

Η αύξηση των ζυμών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον τους. Έτσι ως προαιρετικός αναερόβιος μικροοργανισμός, ο *Saccharomyces cerevisiae* μπορεί είτε να εκτελέσει τις βιολογικές του διεργασίες μέσω της παροχής οξυγόνου (διαδικασία της αναπνοής), είτε μέσω της αλκοολικής ζύμωσης (διαδικασία που πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου). Μάλιστα το είδος αυτού του μύκητα έχει επικρατήσει στην διαδικασία της αλκοολικής ζύμωσης καθώς είναι πολύ ανθεκτικό και ευπροσάρμοστο στις αντίξοες συνθήκες που διαμορφώνονται κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης διεργασίας

3.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ:

Με σκοπό να υπολογίσουμε το $k_L a$ σε οποιεσδήποτε συνθήκες, ξεκινάμε από ψευδό-μόνιμες συνθήκες όπου χρονική στιγμή $t=0$ κλείνουμε την παροχή του αέρα και ξεκινάμε την καταγραφή του διαλυμένου οξυγόνου. Η τιμή του DO μετρείται από βαθμονομημένο αισθητήρα. Όταν η τιμή αυτή πλησιάζει το 10% ανοίγουμε την επιθυμητή παροχή του αέρα. Στο σημείο αυτό καταγράφουμε την ώρα και συνεχίζουμε να παίρνουμε μετρήσεις μέχρι να φτάσουμε σε ψευδό-μόνιμες συνθήκες. Ταυτόχρονα, λαμβάνουμε και δύο δείγματα, ένα στην αρχή 10mL και ένα στο τέλος του πειράματος 8mL, όπου ζυγίζονται μαζί με το φίλτρο μετά την τοποθέτησή τους στον φούρνο ξήρανσης και από τα οποία προσδιορίζουμε την συγκέντρωση της βιομάζας στον βιοαντιδραστήρα σε g-ξηρού βάρους/L. Τέλος θεωρούμε ότι το ποσοστό των ζωντανών μικροοργανισμών είναι περίπου 100% ($X_T = X_v$) και έτσι από τον υπολογισμό του γινομένου $q_{O_2} X_v$ μπορούμε να υπολογίσουμε τον ειδικό ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου από τη βιομάζα q_{O_2} . Πρέπει να αναφερθεί, ότι με την χρήση υπολογιστικού φύλλου EXCEL έγιναν εύκολα τα σχετικά γραφήματα και υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων.



Πειραματικές συνθήκες:

T=20 °C, V=1,5L, N=300RPM

Το πείραμα μας εκτελέστηκε 2 φορές με την παροχή του οξυγόνου να είναι μόνιμη συνθήκη και συγκεκριμένα η μοναδική που δεν αλλάζει. Την πρώτη φορά που διεξήχθη το πείραμα, η παροχή ήταν $Q_1=3\text{L/min}$ ενώ την δεύτερη φορά η παροχή ήταν $Q_2=2\text{L/min}$.

Ακολουθεί ο πίνακας με τις μετρήσεις που πάρθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος.

Πίνακας 1

ΧΡΟΝΟΣ	DO%	
	$Q_1=3\text{L/min}$	$Q_2=2\text{L/min}$
0	60	55
0.15	57,8	53,1
0.30	53,8	48
0.45	46	40,1
1.00	39,1	33,8
1.15	32,1	26,9
1.30	25,4	21
1.45	19,5	15,1
2.00	14,1	10
2.15	8,7	5,3
2.30	4,6	6,6
2.45	13,9	17
3.00	24,5	25,6
3.15	33,7	32,3
3.30	40,8	38
3.45	45,8	41,5
4.00	48,9	44,5
4.15	52,3	46,8
4.30	54	48,9
4.45	55,4	50
5.00	56	50,4
5.15	56,9	51,8
5.30	58,6	52,8
5.45	59	52,9
6.00	56,2	51,2
6.15	50	45,9
6.30	43	38,9
6.45	35,9	32,3
7.00	29,1	26
7.15	23	20,1
7.30	17,2	14,6
7.45	11,8	9,6
8.00	7,2	5,2
8.15	3,7	5,5
8.30	14,1	14,4
8.45	24,1	23,2
9.00	33,5	29
9.15	40,9	33,8

9.30	46,8	40,2
9.45	49,8	41,9
10.00	52,7	43,9
10.15	55	45,4
10.30	57,2	46,5
10.45	56,5	48,3
11.00	57,4	50,4
11.15		50,6
11.30		50,5
11.45		50,7
12.00		51,3

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την διεξαγωγή του πειράματος έγινε λήψη δύο δειγμάτων από περίπου 10mL το καθένα με σκοπό τον προσδιορισμό της βιομάζας που υπήρχε στον βιοαντιδραστήρα (στο διάλυμα) για τις δύο παροχές. Ακολουθεί ο πίνακας στον οποίο φαίνονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας 2

Παροχή (L/min)	Όγκος δείγματος (ml)	Βάρος φίλτρου (gr)	Βάρος φίλτρου + βιομάζα (gr)	Βιομάζα (gr)
Q ₁	16	0,4040	0,4585	0,545
Q ₂	14,9	0,4334	0,4837	0,503

Για να συμπληρωθεί ο πίνακας πήραμε τιμές για τον όγκο του διαλύματος, για το βάρος φίλτρου μαζί με την βιομάζα αλλά και για το βάρος του φίλτρου χωρίς τη βιομάζα για κάθε παροχή. Χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος για τον υπολογισμό της βιομάζας.

$$\text{βιομάζα (gr/L)} = \frac{(\text{Βάρος φίλτρου} + \text{βιομάζας}) - (\text{Βάρος φίλτρου})}{\text{όγκος δείγματος}}$$

Παράδειγμα για Q₁:

$$\text{βιομάζα (gr/L)} = \frac{(0,4585 - 0,4040)}{10 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow \text{βιομάζα} = 5,450 \frac{\text{gr}}{\text{L}}$$

Στο σημείο αυτό γίνεται μετατροπή του DO σε συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου. Με την χρήση της εξίσωσης για την διαλυτότητα του οξυγόνου βρέθηκε η C*_{O₂} και από τον τύπο C_{O₂} = C*_{O₂} ($\frac{DO}{100}$) και την χρήση των δεδομένων του πίνακα 1 υπολογίζουμε την συγκέντρωση C_{O₂} για κάθε DO αντίστοιχα κατασκευάζοντας έτσι και τον πίνακα 3. Έπειτα, από τα στοιχεία του πίνακα 3, κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα C_{O₂}.vs.t (διάγραμμα 1 και διάγραμμα 2) για τις δύο παροχές αντίστοιχα. Από την κλίση των διαγραμμάτων αυτών υπολογίζεται το q_{O₂}x_v και έτσι γνωρίζοντας την βιομάζα x_v, η οποία υπολογίστηκε πιο πάνω μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα τον ειδικό ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου q_{O₂}.

Ακολουθούν τα διαγράμματα και ο πίνακας που προαναφέρθηκαν.

$$C^*_{O_2} = 14,16 - 0,394 * T + 0,007714 * T^2 - 0,000646 * T^3$$

Για $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$C^*_{O_2} = 14,16 - (0,394 * 20) + (0,007714 * 20^2) - (0,000646 * 20^3)$$

$$\Rightarrow C^*_{O_2} = 4,1976 \text{ mg/L}$$

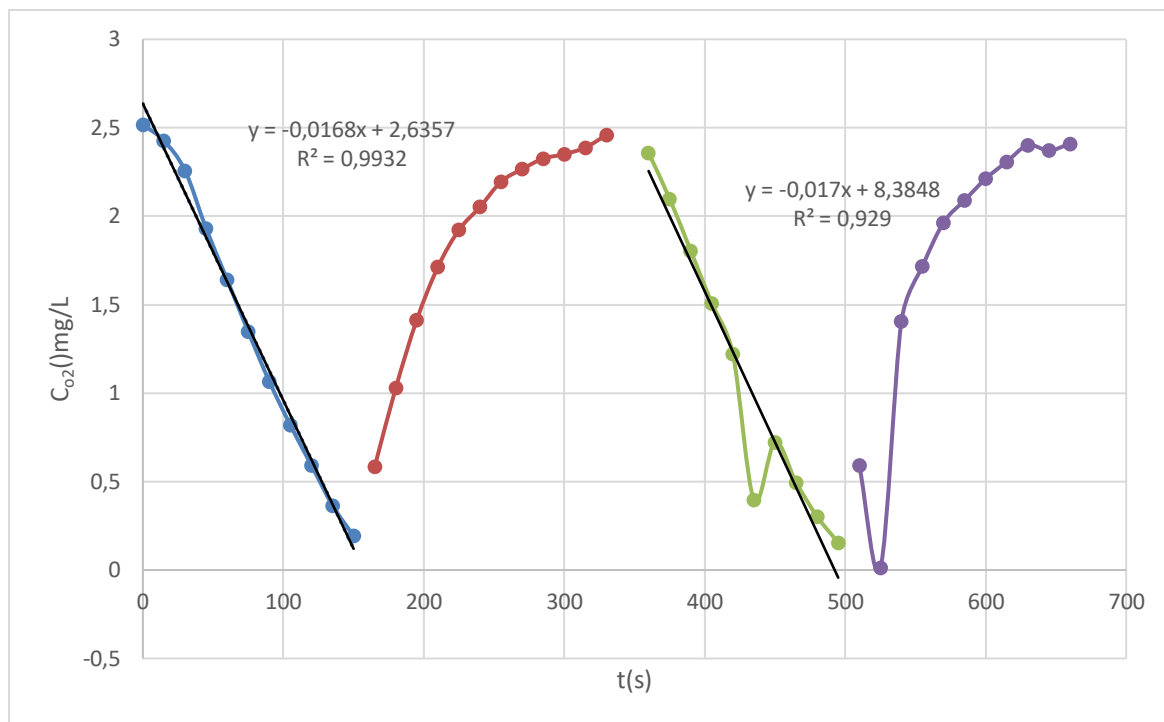
$$C_{O_2} = C^*_{O_2} \left(\frac{DO}{100} \right) \Rightarrow \text{Για παροχή } Q_1, \text{ χρόνος } 0\text{sec και } DO=60$$

$$\Rightarrow C_{O_2} = 4,1976 \cdot \left(\frac{60}{100} \right) \Rightarrow C_{O_2} = 2,5186 \text{ mg/L}$$

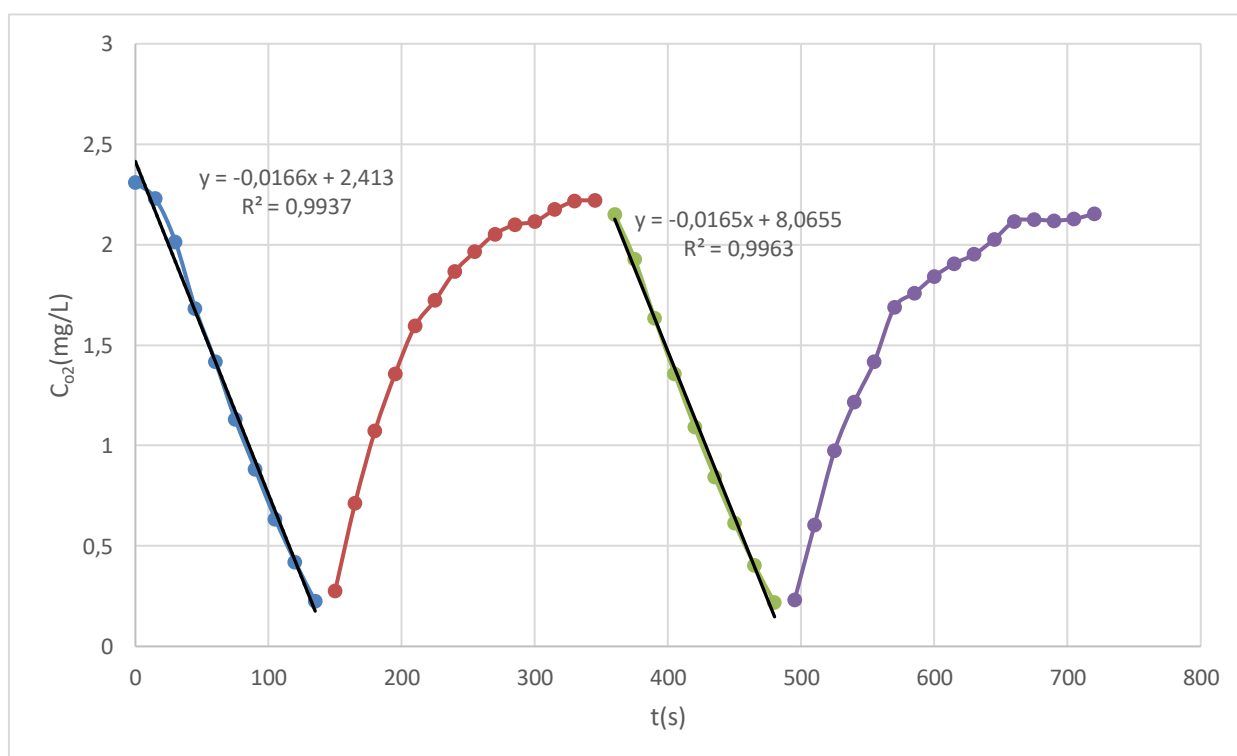
Με τον ίδιο τρόπο συμπληρώθηκε όλος ο πίνακας. (Πίνακας 3)

t (s)	C_{O_2} (mg/L)	
	$Q_1=3\text{L/min}$	$Q_1=2\text{L/min}$
0	2,5186	2,3087
15	2,4262	2,2289
30	2,2583	2,0148
45	1,9309	1,6832
60	1,6413	1,4188
75	1,3474	1,1292
90	1,0662	0,8815
105	0,8185	0,6338
120	0,5919	0,4198
135	0,3652	0,2225
150	0,1931	0,2770
165	0,5834	0,7136
180	1,0284	1,0746
195	1,4145	1,3558
210	1,7126	1,5950
225	1,9225	1,7220
240	2,0526	1,8679
255	2,1953	1,9644
270	2,2667	2,0526
285	2,3255	2,0988
300	2,3507	2,1156
315	2,3884	2,1744
330	2,4598	2,2163
345	2,4766	2,2205
360	2,3591	2,1491
375	2,0988	1,9266
390	1,8050	1,6328
405	1,5070	1,3558
420	1,2215	1,0913
435	0,9654	0,8437
450	0,7220	0,6128
465	0,4953	0,4029
480	0,3022	0,2182
495	0,1553	0,2308
510	0,5919	0,6044
525	1,0116	0,9738
540	1,4062	1,2173
555	1,7168	1,4188
570	1,9645	1,6874
585	2,0904	1,7588
600	2,2121	1,8427
615	2,3087	1,9057
630	2,4010	1,9518
645	2,3716	2,0274
660	2,4094	2,1156
675		2,1239
690		2,1198
705		2,1281
720		2,1534

Διάγραμμα 1: C_{O_2} vs. t για παροχή Q_1



Διάγραμμα 2: C_{O_2} vs. t για παροχή Q_2



Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα κατά τη διάρκεια της διακοπής της παροχής Q η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μειώνεται απότομα, όπως επίσης το ίδιο συμβαίνει και με την κατανάλωση του οξυγόνου από τη ζωντανή βιομάζα. Ανθέτως, με την αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου, παρατηρείται και αύξηση της κατανάλωσης του οξυγόνου από τη βιομάζα. Αυτή η ανάλογη, και σχεδόν γραμμική, σχέση αναμενόταν, καθώς όσο μικρότερη είναι η ποσότητα/συγκέντρωση του διαθέσιμου οξυγόνου τόσο λιγότερο είναι και το οξυγόνο που μπορεί να καταναλωθεί από τη βιομάζα.

Επίσης όπως ήδη προαναφέρθηκε και φαίνεται και στα διαγράμματα, η διαδικασία διακοπής και άνοιγμα της παροχής (Q_1 και Q_2) πραγματοποιήθηκε 2 φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος. Επομένως, καταλήξαμε σε δύο κλίσεις του $q_{O_2} \cdot x_v$. Συνεπώς προκειμένου να διεξάγουμε μία τιμή $q_{O_2} \cdot x_v$ για κάθε παροχή, θα χρησιμοποιήσουμε το μέσο όρο των δύο αυτών των κλίσεων για κάθε παροχή.

- Από το διάγραμμα 1 προέκυψαν οι κλίσεις: 0,0168 και 0,017 οι οποίες συμβολίζουν το γινόμενο $q_{O_2} \cdot x_v$. Έτσι ο μέσος όρος και των 2 που προκύπτει είναι: $q_{O_2} \cdot x_{v_1} = 0,0169 \text{ } \frac{mg}{L \cdot s}$.
- Επίσης από το διάγραμμα 2 προέκυψαν οι κλίσεις: 0,0166 και 0,0165 οι οποίες συμβολίζουν το γινόμενο $q_{O_2} \cdot x_v$. Έτσι ο μέσος όρος και των 2 που προκύπτει είναι: $q_{O_2} \cdot x_{v_2} = 0,01655 \text{ } \frac{mg}{L \cdot s}$.

Τώρα γνωρίζοντας τη βιομάζα, η οποία υπολογίστηκε νωρίτερα στον Πίνακα 2 και σε συνδιασμό με τα προηγούμενα μπορούμε να υπολογίσουμε τον ειδικό ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου όπου για κάθε παροχή ισχύει:

➤ Για παροχή Q_1 :

$$q_{O_{2_1}} = \frac{q_{O_2} \cdot x_{v_1}}{x_{v_{Q_1}}} = \frac{0,0169 \cdot \frac{10^{-3} gr}{L \cdot s}}{5,450 \frac{gr}{L}} \Rightarrow q_{O_{2_1}} = 3,1009 \cdot 10^{-6} \text{ } \frac{gr O_2}{gr - x \cdot s}$$

➤ Για παροχή Q_2 :

$$q_{O_{2_2}} = \frac{q_{O_2} \cdot x_{v_2}}{x_{v_{Q_2}}} = \frac{0,01655 \cdot \frac{10^{-3} gr}{L \cdot s}}{5,03 \frac{gr}{L}} \Rightarrow q_{O_{2_1}} = 3,2902 \cdot 10^{-6} \text{ } \frac{gr O_2}{gr - x \cdot s}$$

Από τις σημειώσεις του μαθήματος, γνωρίζουμε ότι για τους ζημομύκητες και ειδικότερα για τον μύκητα *Saccharomyces cerevisiae* η τυπική τιμή του ειδικού ρυθμού κατανάλωσης του οξυγόνου είναι:

$$q_{O_2} = 8 \left[\frac{mmol O_2}{gr dw cells \cdot h} \right].$$

Όπως φαίνεται παραπάνω η τιμή που βρέθηκε από τις σημειώσεις, έχει διαφορετικές μονάδες μέτρησης από τις πειραματικές τιμές που υπολογίστηκαν, γεγονός που καθιστά αδύνατη τη σύγκριση μεταξύ τους. Έτσι για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε τα πειραματικά μας αποτελέσματα πρέπει να μετατραπούν οι μονάδες μέτρησης της θεωρητικής τιμής σε μονάδες μέτρησης των πειραματικών τιμών.

Άρα:

Έχω ότι $1 \text{ mol O}_2 = 32 \text{ gr O}_2$

Με τη χρήση της σχέσης αυτής και γνωρίζοντας ότι $1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$ η θεωρητική τιμή μεταβάλλεται ως εξής:

$$\Rightarrow q_{O_2} = \frac{8 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \frac{32 \text{ gr O}_2}{1 \text{ mol}}}{\text{gr} - x \cdot 3600 \text{ s}} \Rightarrow q_{O_2} = 7,11 \cdot 10^{-5} \text{ gr O}_2 / \text{gr} - x \cdot \text{s}$$

Συγκρίνοντας τις τιμές που προέκυψαν από το πείραμα με την τιμή της βιβλιογραφίας φαίνεται ότι υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους.

Αυτή η απόκλιση πιθανότατα να οφείλεται στο γεγονός ότι ο μικροοργανισμός του οποίου χρησιμοποιήθηκε η τυπική τιμή του ειδικού ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου για τη σύγκριση, ενώ άνηκε στους ζυμωμύκητες όπως και ο μύκητας που χρησιμοποιήσαμε, δεν ήταν ο ίδιος μύκητας με αυτός του πειράματος. Ένα πιθανό σφάλμα θα μπορούσε να ήταν το ότι η σύγκριση έγινε με άλλο ζυμομύκητα και όχι με τον ίδιο με τον οποίο εκτελέστηκε το πείραμα.

Τέλος ένα ακόμα πιθανό σφάλμα είναι η διαφορά στις συνθήκες της διεξαγωγής του πειράματος. Δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία εμείς εκτελέσαμε το πείραμα ήταν οι 20°C και μπορεί να παρουσιάζει απόκλιση από τη θερμοκρασία στην οποία αναφέρονται τα δεδομένα της βιβλιογραφίας.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς μάζας $k_L a$ για κάθε παροχή, κατασκευάστηκε ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 3), καθώς τα ακόλουθα διαγράμματα $\ln(DO_{ss} - DO) .vs. t$, διαγράμματα 3 & 4. Από την κλίση των διαγραμμάτων υπολογίστηκαν οι συντελεστές μεταφοράς βιομάζας στον βιοαντιδραστήρα για κάθε παροχή ($k_L a$).

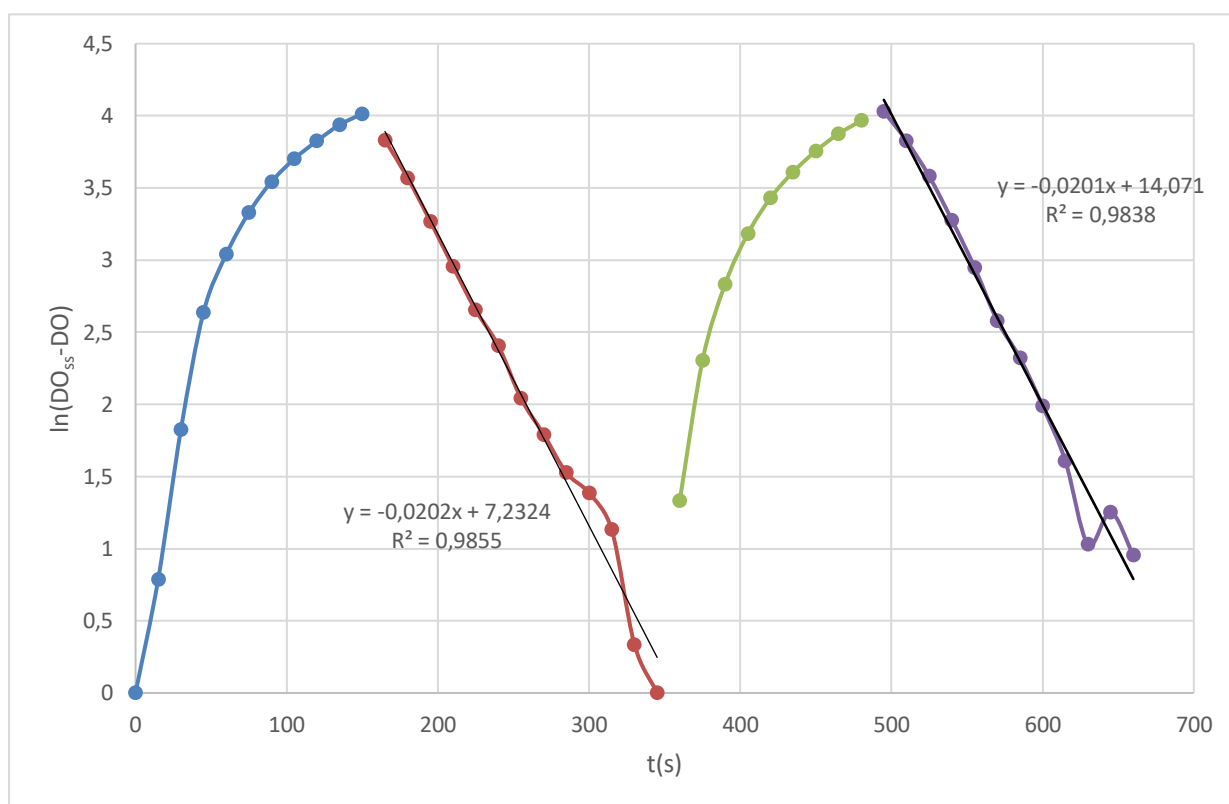
Πίνακας 4:

t (s)	ln(DO _{ss} – DO)	
	Q ₁	Q ₂
0	-	-
15	0,7884	0,6419
30	1,8245	1,9459
45	2,6390	2,7014
60	3,0397	3,0540
75	3,3286	3,3358
90	3,5438	3,5264
105	3,7013	3,6864
120	3,8264	3,8067
135	3,9376	3,9060
150	4,0145	3,8795
165	3,8308	3,6376
180	3,5695	3,3810
195	3,2695	3,1224
210	2,9549	2,8332
225	2,6532	2,6027
240	2,4069	2,3514
255	2,0412	2,1041
270	1,7917	1,8083
285	1,5260	1,6094
300	1,3862	1,5261
315	1,1314	1,1632
330	0,3364	0,7885
345	0	0,7419
360	1,3350	1,3350
375	2,3025	2,2082
390	2,8332	2,7788
405	3,1822	3,1223
420	3,4307	3,3672
435	3,6109	3,5524
450	3,7565	3,6988
465	3,8753	3,8155
480	3,9665	3,9080
495	4,0306	3,9020
510	3,8264	3,7038
525	3,5807	3,4595
540	3,2771	3,2581
555	2,9496	3,0540
570	2,5802	2,6946
585	2,3223	2,5726
600	1,9878	2,4069
615	1,6094	2,2618
630	1,0296	2,1400
645	1,2527	1,9021
660	0,9555	1,5260
675		1,4816
690		1,5041

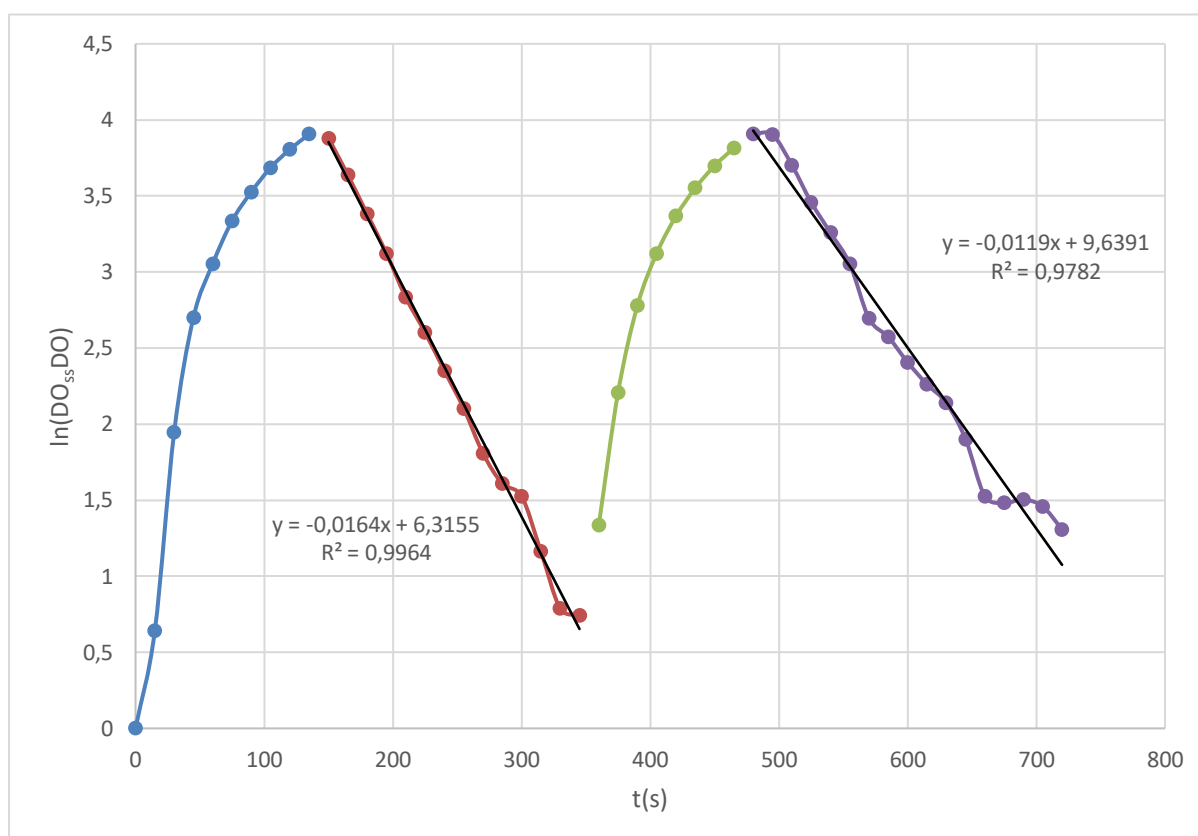
705		1,4586
720		1,3083

Σημείωση: Για τον χρόνο 0s και για τις 2 παροχές δεν θα ληφθούν υπ' όψιν λόγω μην αποδεκτής τιμής για τη συνάρτηση του $\ln(x)$, αφού για να ισχύει πρέπει $x > 0$ και στην περίπτωση μας $(DO_{ss} - DO) > 0$.

Διάγραμμα 3: $\ln(DO_{ss} - DO) . vs. t$ για παροχή Q_1



Διάγραμμα 4: $\ln(DO_{ss} - DO)$. vs. t για παροχή Q_2



Από τα πιο πάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι με την μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στο διάλυμα μειώνεται και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας προς τον βιοαντιδραστήρα. Αυτό είναι αναμενόμενο και υπάρχει και υπάρχει άμεση σχέση με τα διαγράμματα 1 και 2. Καλό είναι να αναφερθεί ότι όσο πιο μικρή είναι η ποσότητα του διαθέσιμου οξυγόνου τόσο λιγότερο είναι το οξυγόνο που καταναλώνει η ζωντανή βιομάζα και εξίσου μικρότερος είναι ο ειδικός ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου, άρα είναι μικρότερος και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας. Αντίθετα, όταν ενεργοποιούμε την παροχή οξυγόνου, η κατανάλωση του οξυγόνου αυξάνεται, το ίδιο και το $k_L a$. Συνεπώς, τα μεγέθη του ειδικού ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου, ο συντελεστής μεταφοράς μάζας καθώς και το διαλυμένο οξυγόνο εμφανίζουν μεταξύ τους μια ανάλογη σχέση.

Επίσης, ότι ακριβώς κάναμε για την εύρεση του ειδικού ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου, έτσι και εδώ επειδή η διαδικασία διακοπής και ανοίγματος της κάθε παροχής (Q_1 και Q_2) πραγματοποιήθηκε δύο φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος καταλήξαμε έτσι σε δύο κλίσεις, δηλαδή δύο $k_L a$. Για να διεξάγουμε μία μόνο τιμή του $k_L a$ για κάθε παροχή θα χρησιμοποιήσουμε τον μέσο όρο των δύο αυτών κλίσεων για κάθε παροχή.

- Από το διάγραμμα 3 προέκυψαν τα $k_L \alpha_1$ δηλαδή οι κλίσεις 0,0202 και 0,0201. Οπότε ο μέσος όρος των δύο είναι: $k_L \alpha_1 = 0,02015$

- Από το διάγραμμα 4 προέκυψαν τα $k_L \alpha_2$ δηλαδή οι κλίσεις 0,0164 και 0,0119. Οπότε ο μέσος όρος των δύο είναι: $k_L \alpha_2 = 0,01415$

Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε τις πειραματικές μας τιμές, χρησιμοποιήθηκε η συσχέτιση των πειραματικών $k_L \alpha_1$ και $k_L \alpha_2$ με των θεωρητικών τιμών και έγινε ο υπολογισμός των κλασμάτων $\frac{(k_L \alpha)_1}{(k_L \alpha)_2}$ τόσο για τις πειραματικές τιμές όσο και για τις θεωρητικές (η θεωρητική συσχέτιση υπάρχει στο θεωρητικό υπόβαθρο). Τα κλάσματα αναπτύσσονται με τον εξής τρόπο:

$$\frac{(k_L \alpha)_1}{(k_L \alpha)_2} = \frac{\left(\frac{P_g}{V_{R1}}\right)^{0,4} (u_{S1})^{0,5} (N)^{0,5}}{\left(\frac{P_g}{V_{R2}}\right)^{0,4} (u_{S2})^{0,5} (N)^{0,5}} = \frac{\left(\frac{Q_1}{A_R}\right)^{0,5} \cdot (N)^{0,5} \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{(N^3 \cdot D_i^5)^2 \cdot N \cdot D_i^3}{Q_1^{0,56}} \right)^{0,45}}{V_R} \right\}^{0,4}}{\left(\frac{Q_2}{A_R}\right)^{0,5} \cdot (N)^{0,5} \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{(N^3 \cdot D_i^5)^2 \cdot N \cdot D_i^3}{Q_2^{0,56}} \right)^{0,45}}{V_R} \right\}^{0,4}}$$

Επειδή $N_1 = N_2 = 300rpm$, $V_R = 1,5L$ και $A_{R1} = A_{R2}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{(k_L \alpha)_1}{(k_L \alpha)_2} &= \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{0,5} \cdot \left\{ \left[\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{0,56} \right]^{0,45} \right\}^{0,4} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{0,1008} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{0,3992} \\ \Rightarrow \frac{(k_L \alpha)_1}{(k_L \alpha)_2} &= \left(\frac{2}{3}\right)^{0,3992} \Rightarrow \frac{(k_L \alpha)_1}{(k_L \alpha)_2} = \mathbf{0.8506} \text{ (θεωρητική τιμή)} \end{aligned}$$

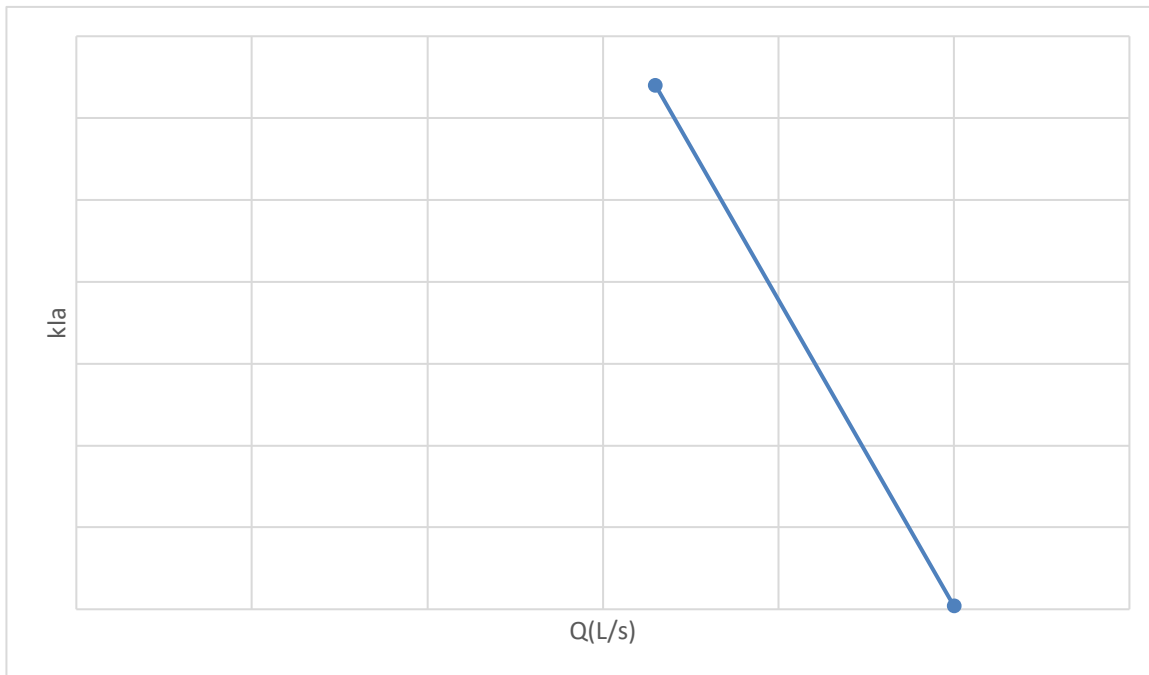
Ο πειραματικός λόγος είναι:

$$\Rightarrow \frac{(k_L \alpha)_1}{(k_L \alpha)_2} = \frac{0,02015}{0,01415} \Rightarrow \frac{(k_L \alpha)_1}{(k_L \alpha)_2} = \mathbf{1,4240} \text{ (πειραματική τιμή)}$$

Συγκρίνοντας την πειραματική με την θεωρητική τιμή παρατηρούμε ότι η απόκλιση είναι σχετικά μικρή. Πιθανόν, αυτή η απόκλιση αυτή να οφείλεται σε σφάλμα των μετρητών του διαλυμένου οξυγόνου ή σε σφάλματα των παρατηρητών κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

Πιο κάτω ακολουθεί το διάγραμμα συσχέτισης των πειραματικών τιμών $k_L \alpha$ με την παροχή Q. (Διάγραμμα 5)

Διάγραμμα 5: $k_L a$. vs. Q



Από το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας είναι ανάλογος της παροχής αέρα, δηλαδή με την αύξηση της παροχής του αέρα αυξάνεται και το $k_L a$. Αυτό γίνεται αντιληπτό ήδη από τις τιμές του $k_L a$ που βρέθηκαν αφού για παροχή ίση με 5 το $k_L a_1$ είναι μεγαλύτερο από ότι για παροχή ίση με 4 ($Q_1 > Q_2 \Rightarrow k_L a_1 > k_L a_2$). Παρόλο που είναι ανάλογα δεν μπορούμε να περιγράψουμε με σιγουριά την ακριβή σχέση ανάμεσά τους (γραμμική, εκθετική κ.τ.λ.) γιατί έχουμε μόνο δύο σημεία. Αυτό δεν αρκεί αφού είναι γνωστό πως κάθε ευθεία μπορεί να περνάει από δύο σημεία χωρίς όμως να γνωρίζουμε την μορφή που θα είχε αν είχαμε στη διάθεσή μας και άλλα σημεία.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργαστηριακή άσκηση, με βάση τους πίνακες και την μορφή των παραπάνω διαγραμμάτων συμπεραίνουμε ότι υπάρχει σημαντική εξάρτηση ανάμεσα στον ειδικό ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου από τη βιομάζα και της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου (DO). Επιπλέον, αρκετά διακριτή γίνεται η σχέση αναλογίας μεταξύ του ειδικού ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου από τη ζωντανή βιομάζα, του διαλυμένου οξυγόνου που παρείχαμε στο διάλυμα καθώς και του συντελεστή μεταφοράς μάζας. Ακόμα, μετά τον υπολογισμό των πειραματικών τιμών του q_{O_2} έγινε η σύγκρισή τους με τιμή από την βιβλιογραφία. Μετά την σύγκριση αυτή, παρουσιάστηκαν αποκλίσεις που είναι πιθανόν να οφείλονται σε σφάλματα όπως αυτά των μετρητών του διαλυμένου οξυγόνου ή σε σφάλματα των παρατηρητών κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος. Επιπρόσθετα, έγινε σύγκριση των πειραματικών και θεωρητικών τιμών του συντελεστή μεταφοράς μάζας και αποδείχτηκε ότι υπάρχει μια απόκλιση μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών τιμών η οποία είναι μικρή. Η απόκλιση αυτή, πιθανόν να οφείλεται είτε σε λάθος του οργάνου μέτρησης, είτε σε κάποιο σφάλμα των συμμετεχόντων κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος. Τέλος, με την κατασκευή διαγράμματος των πειραματικών τιμών του συντελεστή μεταφοράς, με την παροχή του οξυγόνου στο διάλυμα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι με την αύξηση της παροχής αυξάνεται και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας.

6.Βιβλιογραφία

- Εργαστηριακές σημειώσεις Μαθήματος (www.eclass.tuc.gr
→ Τεχνική Χημικών και Βιοχημικών Διεργασιών →
Έγγραφα → Εργαστήρια ΤΧΒΔ)
- Σημειώσεις Τεχνικής Χημικών και Βιοχημικών Διεργασιών

Παραρτήματα

Παράρτημα 1ο : Πίνακας πειραματικών μετρήσεων

ΧΡΟΝΟΣ	DO%	
	Q ₁ =3L/min	Q ₂ =2L/min
0	60	55
0.15	57,8	53,1
0.30	53,8	48
0.45	46	40,1
1.00	39,1	33,8
1.15	32,1	26,9
1.30	25,4	21
1.45	19,5	15,1
2.00	14,1	10
2.15	8,7	5,3
2.30	4,6	6,6
2.45	13,9	17
3.00	24,5	25,6
3.15	33,7	32,3
3.30	40,8	38
3.45	45,8	41,5
4.00	48,9	44,5
4.15	52,3	46,8
4.30	54	48,9
4.45	55,4	50
5.00	56	50,4
5.15	56,9	51,8
5.30	58,6	52,8
5.45	59	52,9
6.00	56,2	51,2
6.15	50	45,9
6.30	43	38,9
6.45	35,9	32,3
7.00	29,1	26
7.15	23	20,1
7.30	17,2	14,6
7.45	11,8	9,6
8.00	7,2	5,2
8.15	3,7	5,5
8.30	14,1	14,4
8.45	24,1	23,2
9.00	33,5	29
9.15	40,9	33,8

9.30	46,8	40,2
9.45	49,8	41,9
10.00	52,7	43,9
10.15	55	45,4
10.30	57,2	46,5
10.45	56,5	48,3
11.00	57,4	50,4
11.15		50,6
11.30		50,5
11.45		50,7
12.00		51,3

Πειραματικές συνθήκες:

Παροχή Q (L/min)	Θερμοκρασία T (°C)	Όγκος V (L)	Στροφές (rpm)
3	20	1.5	300
2	20	1.5	300

Βιομάζα των δύο δειγμάτων που συλλέξαμε κατά τη διάρκεια του πειράματος:

Παροχή (L/min)	Όγκος δείγματος (ml)	Βάρος φίλτρου (gr)	Βάρος φίλτρου + βιομάζα (gr)	Βιομάζα (gr)
Q ₁	16	0.4040	0.4585	0,545
Q ₂	14,9	0.4334	0.4837	0,503

Παράρτημα 2ο: Ανάλυση δεδομένων

Παροχή	Ειδικός ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου
Q ₁	$q_{O_{21}} = 10^{-4} \frac{gr O_2}{gr - x \cdot s}$
Q ₂	$q_{O_{22}} = 10^{-4} \frac{gr O_2}{gr - x \cdot s}$

t (s)	C_{O_2} (mg/L)	
	Q ₁ =3L/min	Q ₁ =2L/min
0	2,5186	2,3087
15	2,4262	2,2289
30	2,2583	2,0148
45	1,9309	1,6832
60	1,6413	1,4188
75	1,3474	1,1292
90	1,0662	0,8815
105	0,8185	0,6338
120	0,5919	0,4198
135	0,3652	0,2225
150	0,1931	0,2770
165	0,5834	0,7136
180	1,0284	1,0746
195	1,4145	1,3558
210	1,7126	1,5950
225	1,9225	1,7220
240	2,0526	1,8679
255	2,1953	1,9644
270	2,2667	2,0526
285	2,3255	2,0988
300	2,3507	2,1156
315	2,3884	2,1744
330	2,4598	2,2163
345	2,4766	2,2205
360	2,3591	2,1491
375	2,0988	1,9266
390	1,8050	1,6328
405	1,5070	1,3558
420	1,2215	1,0913
435	0,9654	0,8437
450	0,7220	0,6128
465	0,4953	0,4029
480	0,3022	0,2182
495	0,1553	0,2308
510	0,5919	0,6044
525	1,0116	0,9738
540	1,4062	1,2173
555	1,7168	1,4188
570	1,9645	1,6874
585	2,0904	1,7588
600	2,2121	1,8427
615	2,3087	1,9057
630	2,4010	1,9518
645	2,3716	2,0274
660	2,4094	2,1156
675		2,1239
690		2,1198
705		2,1281
720		2,1534

t (s)	ln(DO _{ss} – DO)	
	Q ₁	Q ₂
0	-	-
15	0,7884	0,6419
30	1,8245	1,9459
45	2,6390	2,7014
60	3,0397	3,0540
75	3,3286	3,3358
90	3,5438	3,5264
105	3,7013	3,6864
120	3,8264	3,8067
135	3,9376	3,9060
150	4,0145	3,8795
165	3,8308	3,6376
180	3,5695	3,3810
195	3,2695	3,1224
210	2,9549	2,8332
225	2,6532	2,6027
240	2,4069	2,3514
255	2,0412	2,1041
270	1,7917	1,8083
285	1,5260	1,6094
300	1,3862	1,5261
315	1,1314	1,1632
330	0,3364	0,7885
345	0	0,7419
360	1,3350	1,3350
375	2,3025	2,2082
390	2,8332	2,7788
405	3,1822	3,1223
420	3,4307	3,3672
435	3,6109	3,5524
450	3,7565	3,6988
465	3,8753	3,8155
480	3,9665	3,9080
495	4,0306	3,9020
510	3,8264	3,7038
525	3,5807	3,4595
540	3,2771	3,2581
555	2,9496	3,0540
570	2,5802	2,6946
585	2,3223	2,5726
600	1,9878	2,4069
615	1,6094	2,2618
630	1,0296	2,1400
645	1,2527	1,9021
660	0,9555	1,5260
675		1,4816
690		1,5041
705		1,4586
720		1,3083

Παροχές	Συντελεστής μεταφοράς μάζας
Q_1	$k_L a_1 = 0,02015$
Q_2	$k_L a_2 = 0,01415$

$\frac{(k_L a)_1}{(k_L a)_2}$ (θεωρητικό)	0,8506
$\frac{(k_L a)_1}{(k_L a)_2}$ (πειραματικό)	1,4240

Παράρτημα 3ο : Προγράμματα Η/Υ

Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την διεκπεραίωση της συγκεκριμένης εργαστηριακής άσκησης είναι τα εξής :

- ❖ Microsoft Office Excel 2010
- ❖ Microsoft Office Word 2010