

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 χωρίς μικροοργανισμούς» , η οποία διεξήχθη 22/11/2019 στο προπτυχιακό εργαστήριο του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης (κτίριο Κ1 – ΜΗΠΕΡ).

Με εκτίμηση,

ο υπεύθυνος της εργαστηριακής άσκησης

και συγγραφέας της τεχνικής έκθεσης

Χατζηαθανασίου Χρύσω



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: Χατζηαθανασίου Χρύσω
Ημερομηνία παράδοσης: 06/12/2019

Λοιπά Μέλη Εργαστηριακής Ομάδας :

- Ευαγγέλου Παναγιώτης
- Κανναβιάς Χρύσανθος
- Ολύμπιος Πέτρος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη συγκεκριμένη τεχνική έκθεση περιλαμβάνεται ο πειραματικός υπολογισμός του ρυθμού οξυγόνωσης σε βιοαντιδραστήρα στον οποίο δεν περιέχονται μικροοργανισμοί. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να επιτευχθεί αυτό είναι αυτή του δυναμικού αερισμού μέσω της οποίας προκύπτει ο συντελεστής μεταφοράς μάζας ($k_L a$) από την αέρια στην υγρή φάση. Κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος πραγματοποιήθηκαν έξι μετρήσεις σε βιοαντιδραστήρα κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές προέκυπταν από την μεταβολή ενός ή περισσότερων παραγόντων κάθε φορά. Πιο συγκεκριμένα οι παράγοντες που μεταβλήθηκαν στο πείραμα είναι οι εξής:

1. Ο όγκος του βιοαντιδραστήρα (V_R)
2. Η ογκομετρική παροχή του αέρα (F_{air})

Με αυτόν τον τρόπο λήφθηκαν τιμές για το διαλυμένο οξυγόνο (DO%) στον βιοαντιδραστήρα ανά 10'' μέχρι να φτάσει τον πλήρη κορεσμό του εκάστοτε υδατικού διαλύματος. Με βάση αυτές τις πειραματικές τιμές κατασκευάζονται τα διαγράμματα $\ln(100-DO)$ ως προς το t από την κλίση των οποίων υπολογίζεται ο συντελεστής μεταφοράς μάζας ($k_L a$) καθώς και τα διαγράμματα του $k_L a$ ως προς Q και παραμετρικά ως προς N (rpm). Τέλος, εξετάζεται ο συντελεστής μεταφοράς μάζας ως προς την συμπεριφορά του με ήδη υπάρχουσες τιμές.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

❖ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εξώφυλλο	i
Περίληψη	3
Περιεχόμενα	4
Πίνακας Συμβόλων	5

❖ ΚΥΡΙΟ ΜΕΡΟΣ

Εισαγωγή	1
Θεωρητικό Υπόβαθρο	1
Μεθοδολογία	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση	7
Συμπεράσματα	15
Βιβλιογραφία	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

❖ Παραρτήματα

Παράρτημα 1: Πειραματικές μετρήσεις	15
Παράρτημα 2 : Ανάλυση δεδομένων	16
Παράρτημα 3 : Προγράμματα Η/Υ	18

Πίνακας Συμβόλων

Σύμβολο	Ορισμός
k_{La}	Συντελεστής μεταφοράς μάζας από την αέρια στην υγρή φάση
P_g	Ισχύς που μεταφέρεται από τον αναδευτήρα στην υγρή φάση για αεριζόμενο βιοαντιδραστήρια
V_R	Όγκος του βιοαντιδραστήρα (της υγρής φάσης)
u_s	Φαινομενική ταχύτητα του αέρα ($u_s = F_{air}/A_R$)
F_{air}	Ογκομετρική παροχή του αέρα
A_R	Εμβαδόν διατομής του βιοαντιδραστήρα
N	Ρυθμός περιστροφής του αναδευτήρα (RPM)
P_u	Η απαιτούμενη ισχύς σε μη αεριζόμενο αντιδραστήρα
D_i	Η διάμετρος του αναδευτήρα
C^*	Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στην υγρή φάση σε ισορροπία με την αέρια φάση
C_L	Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου την χρονική στιγμή t
C_{L0}	Η τιμή του C_L στην t_0
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 $DO_{100\%}$
T	Θερμοκρασία σε $^{\circ}C$

ΚΥΡΙΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

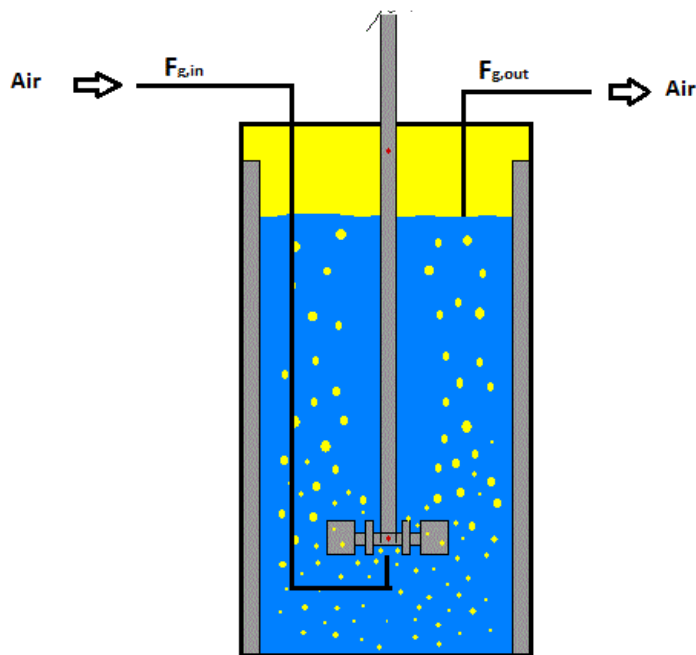
Σκοπός του πειράματος είναι η εξοικείωση με την απλή βαθμονόμηση ενός μετρητή διαλυμένου οξυγόνου (D.O. meter) καθώς και ο πειραματικός υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς μάζας ($k_L a$) από την αέρια φάση στην υγρή με την μέθοδο του δυναμικού αερισμού. Ακόμη εξετάστηκε κατά πόσο η συμπεριφορά του πειραματικά υπολογιζόμενου ($k_L a$) είναι η αναμενόμενη από υπάρχουσες συσχετίσεις.

State of the art: Δεν βρέθηκε κάτι αξιόλογο να αναφερθεί σε αυτήν την αναφορά.

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

➤ Οξυγόνωση βιοαντιδραστήρων (Gas-Liquid Mass Transfer)

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



Εικόνα 1: Βιοαντιδραστήρας

Υπάρχουσες συσχετίσεις του συντελεστή μεταφοράς μάζας σε τροφοδοτούμενους με αέρα βιοαντιδραστήρες είναι της μορφής:

Αυτές είναι της ακόλουθης μορφής:

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

Η απαιτούμενη ισχύ για τον **αεριζόμενο αντιδραστήρα** (P_g) υπολογίζεται από την πιο κάτω συσχέτιση:

$$P_g \sim \left(\frac{P_u^2 N D_i^3}{F_{air}^{0,56}}\right)^{0,45}$$

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στην υγρή φάση αυξάνει με βάση την σχέση

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

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{C^* - C_L}{C^* - C_{L0}}\right) = -k_L a (t - t_0), \text{ όπου: } C_L = C^* \left(\frac{DO}{100}\right)$$

Επομένως:

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{100 - DO}{100 - DO_0}\right) = -k_L a (t - t_0)$$

Η εξίσωση είναι της μορφής $y=ax$ επομένως η τιμή του $k_L a$ μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας γραμμής στο διάγραμμα του $\ln(100 - DO)$ ως προς t .

Σημείωση: Οι παραπάνω συμβολισμοί ανευρίσκονται στον πίνακα συμβόλων

➤ **Βαθμονόμηση του μετρητή DO:**

1. Χρησιμοποιώντας άζωτο και συνεχή ανάδευση στο βιοαντιδραστήρα μετά από λίγη ώρα απομακρύνουμε όλο το οξυγόνο που είναι διαλυμένο στην υγρή φάση και επομένως ο μετρητής DO πρέπει να δείχνει 0%.
2. Χρησιμοποιώντας αέρα και συνεχή ανάδευση στο βιοαντιδραστήρα μετά από λίγη ώρα αυξάνουμε το οξυγόνο που είναι διαλυμένο στην υγρή φάση και φτάνουμε σε συνθήκες κορεσμού (C^*). Επομένως, ο μετρητής DO πρέπει να δείχνει 100% και γνωρίζουμε ότι αντιστοιχεί σε τόσα mg/L όσα υπολογίζονται από την σχέση διαλυτότητας του οξυγόνου για την θερμοκρασία του πειράματος.

➤ Η μέθοδος του δυναμικού αερισμού (gassing-in method)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε τον βιοαντιδραστήρα γεμάτο με νερό χωρίς να υπάρχουν ζωντανά κύτταρα στο διάλυμα. Για αυτό τον λόγο, πολύ συχνά ερευνητές χρησιμοποιούν σωματίδια από αδρανή υλικά που έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα ζωντανά κύτταρα (μέγεθος και ειδικό βάρος). Ξεκινώντας από μία χαμηλή τιμή του διαλυμένου οξυγόνου (όχι απαραίτητα μηδέν), αρχίζει η παροχή αέρος και έχουμε σταδιακή αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου το οποίο μπορούμε να μετράμε πολύ εύκολα (D.O. probe).

➤ Ανάλυση Αποτελεσμάτων με μη βαθμονομημένο μετρητή DO:

Για την διεξαγωγή του πειράματος θεωρούμε ότι ο μετρητής του διαλυμένου οξυγόνου δεν είναι βαθμονομημένος όταν διεξάγουμε τα πειράματα μας. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων μπορούμε να θεωρήσουμε τα εξής:

1. Υποθέτουμε όταν το διαλυμένο οξυγόνο είναι 0% ο μετρητής δείχνει μια τιμή διαφορετική του μηδενός και την οποία συμβολίζουμε $DO_{0\%}$.
2. Υποθέτουμε όταν το διαλυμένο οξυγόνο είναι 100% ο μετρητής δείχνει μια τιμή διαφορετική του 100% και την οποία συμβολίζουμε $DO_{100\%}$.

Επομένως η ένδειξη του διαλυμένου οξυγόνου (DO) από τον μετρητή θα συσχετίζεται με την συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου ως εξής:

$$\ln\left(\frac{DO_{100\%} - DO}{DO_{100\%} - DO_0}\right) = -k_L a(t - t_0)$$

η τιμή του $k_L a$ μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας γραμμής στο διάγραμμα του $\ln(DO_{100\%} - DO)$ ως προς t .

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ:

Για τον υπολογισμό του $k_L a$ σε οποιεσδήποτε συνθήκες (N , V_R , F_{air} , T) ξεκινάμε αρχικά με την απομάκρυνση του διαλυμένου οξυγόνου από την υγρή φάση με την συνεχή παροχή αζώτου.

Όταν η τιμή του DO μετρούμενο από βαθμονομημένο αισθητήρα πλησιάζει το μηδέν (δεν είναι απαραίτητο να είναι μηδέν) κλείνουμε την ροή του αζώτου και ανοίγουμε την επιθυμητή παροχή του οξυγόνου. Από αυτή την στιγμή, αφού γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις των συνθηκών από την εργαστηριακή βοήθ, καταγράφονται οι μετρήσεις του DO ανά 10 δευτερόλεπτα, σε ένα πίνακα ($t(\text{min})/DO(\%)$) για ένα χρονικό διάστημα περίπου 3,5-4,5 λεπτών. Με βάση αυτές τις μετρήσεις με την χρήση υπολογιστικού φύλλου, στο EXCEL, κατασκευάζεται το σχετικό γράφημα και υπολογίζεται η κλίση της ευθείας που περνά από τα πειραματικά μας δεδομένα με σκοπό να υπολογίσουμε την τιμή του $k_L a$.

Πειραματικές συνθήκες:

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε για 4 διαφορετικές περιπτώσεις με σταθερή παράμετρο $N=300$ RPM (ρυθμός περιστροφής του αναδευτήρα). Αναλυτικότερα στην πρώτη περίπτωση ο όγκος του βιοαντιδραστήρα ήταν $V_R=1L$ ενώ η ογκομετρική παροχή του αέρα $F_{air}=1L/Min$. Στην δεύτερη περίπτωση είχαμε $V_R=1L$ και $F_{air}=2L/Min$, στην τρίτη $V_R=1L$ και $F_{air}=3L/Min$ ενώ στην τέταρτη περίπτωση $V_R=2L$ και $F_{air}=2L/Min$.

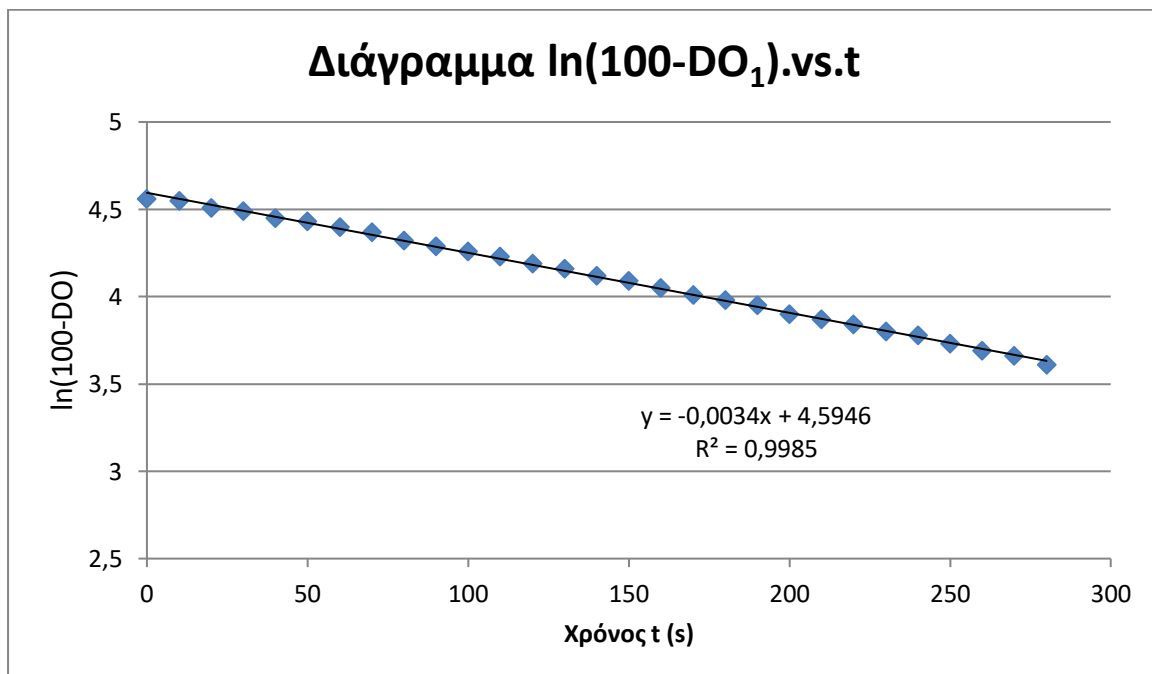
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συνθήκες με βάση τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα για $T=25^\circ C$.

Πείραμα	N(rpm)	F_{air} (L/min)	V(L)
1	300	1	1
2	300	2	1
3	300	3	1
4	300	2	2

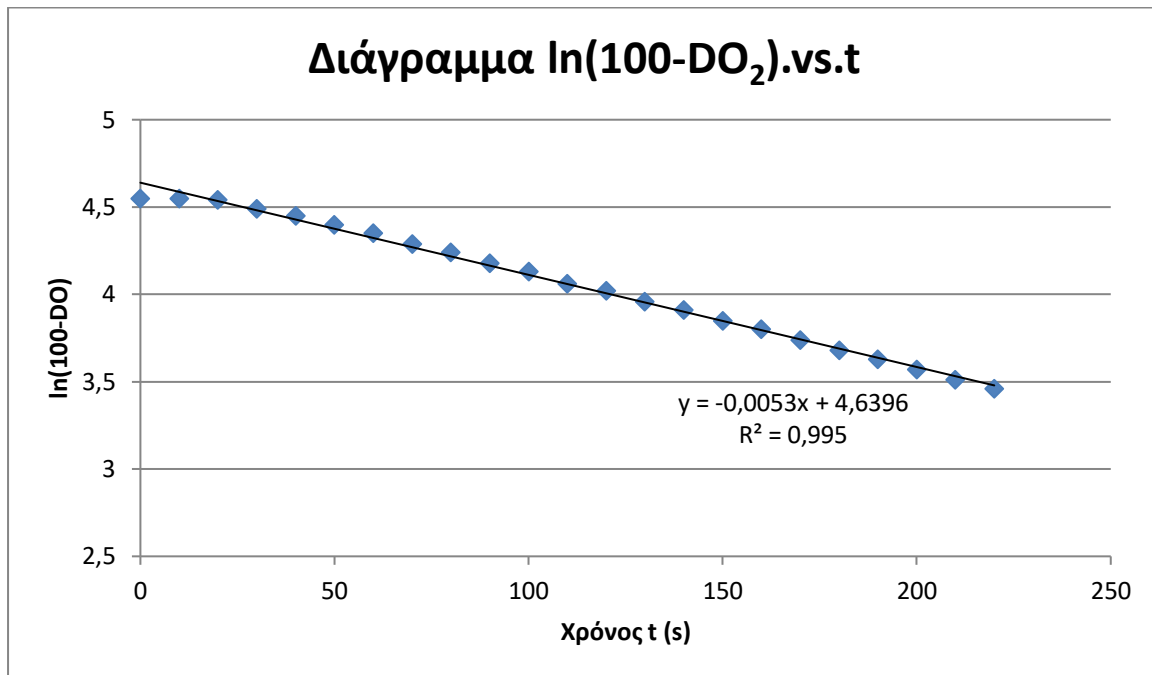
Βάση αυτών των συνθηκών έγινε η κατασκευή των διαγραμμάτων που παρουσιάζονται παρακάτω. Από αυτά προέκυψαν οι τιμές του $k_L a$ για κάθε μια από τις τέσσερις διαφορετικές συνθήκες κατά τις οποίες μετρήθηκε το διαλυμένο οξυγόνο (DO).

❖ Πείραμα 1: $V=1 L$, $N=300$ rpm, $F_{air} = 1 L/min$



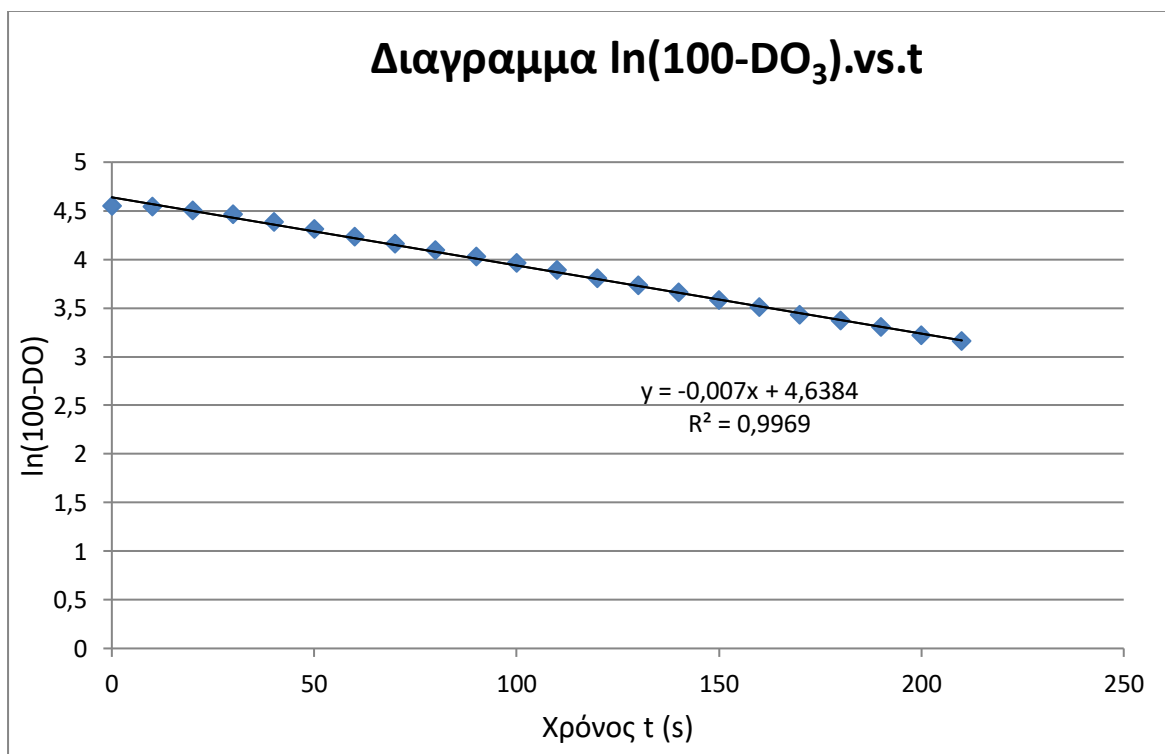
Η κλίση της ευθείας γραμμής που περνάει από τα πειραματικά δεδομένα ισούται με την τιμή του συντελεστή μεταφοράς μάζας: $k_L a = 0.0034$.

❖ Πείραμα 2: $V=1\text{ L}$, $N=300\text{ rpm}$, $F_{\text{air}} = 2\text{ L/min}$



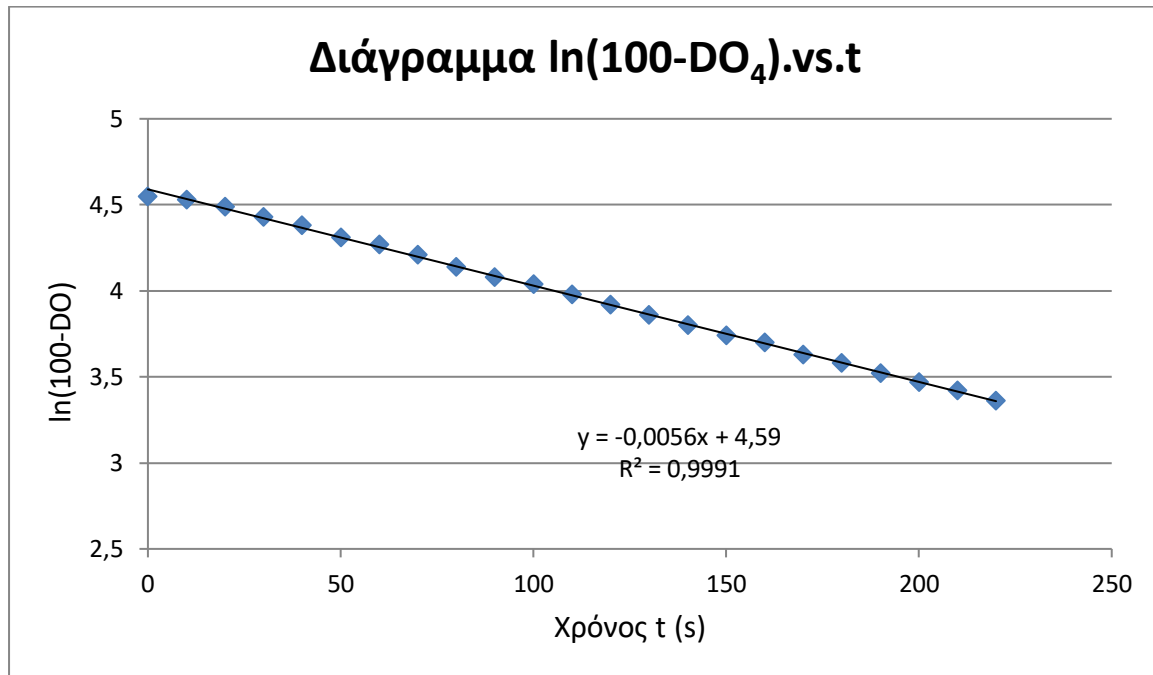
Η κλίση της ευθείας γραμμής ισούται με την τιμή του συντελεστή μεταφοράς μάζας:
 $k_L a = 0.0053$

❖ Πείραμα 3: $V=1\text{ L}$, $N=300\text{ rpm}$, $F_{\text{air}} = 3\text{ L/min}$



Ομοίως $k_L a = 0.007$

❖ Πείραμα 4: $V=2\text{ L}$, $N=300\text{ rpm}$, $F_{\text{air}} = 2\text{ L/min}$



Ομοίως $k_La = 0.0056$

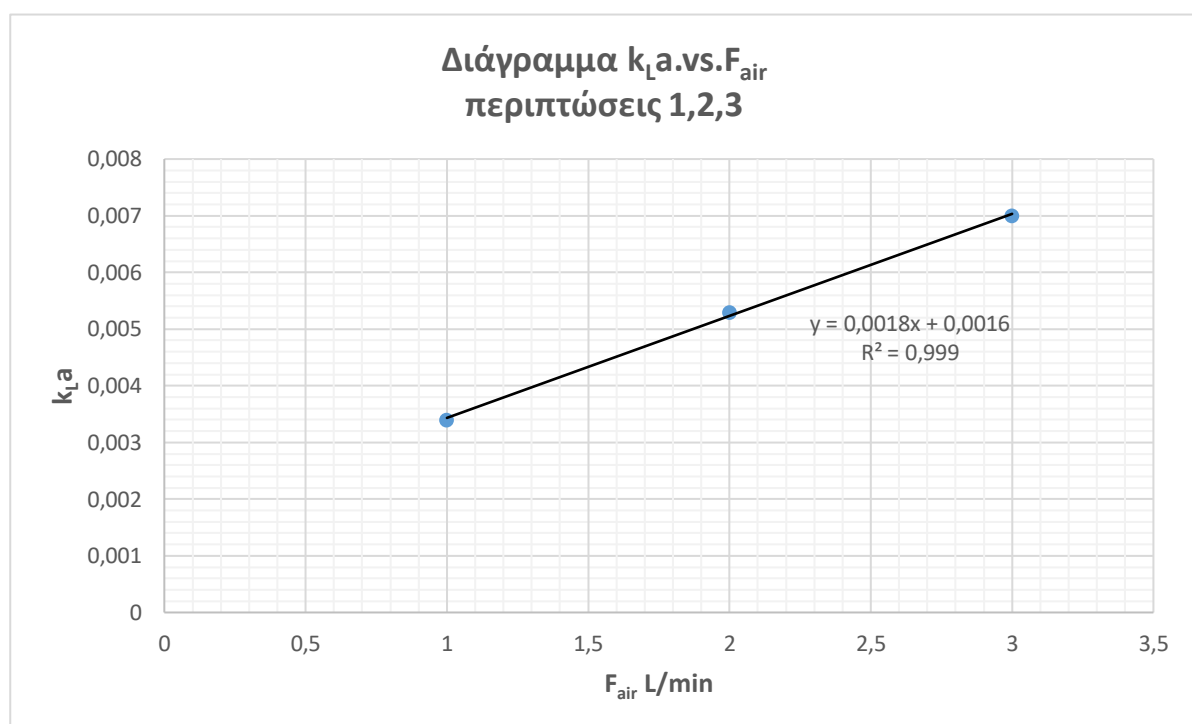
Πίνακας Πειραματικών Τιμών k_La

Πείραμα	Πειραματικές συνθήκες	Συντελεστής k_La
1	$V=1\text{ L}$, $N=300\text{ rpm}$, $F_{\text{air}} = 1\text{ L/min}$	0.0034
2	$V=1\text{ L}$, $N=300\text{ rpm}$, $F_{\text{air}} = 2\text{ L/min}$	0.0053
3	$V=1\text{ L}$, $N=300\text{ rpm}$, $F_{\text{air}} = 3\text{ L/min}$	0.0070
4	$V=2\text{ L}$, $N=300\text{ rpm}$, $F_{\text{air}} = 2\text{ L/min}$	0.0056

Κατασκευή διαγραμμάτων k_{La} .vs. F_{air} και k_{La} .vs. N

➤ Διάγραμμα k_{La} ως προς F_{air}

Για να κατασκευαστεί το διάγραμμα k_{La} ως προς F_{air} εξετάστηκαν οι περιπτώσεις στις οποίες η παροχή (F_{air}) μεταβάλλεται και οι παράμετροι του όγκου (V) καθώς και του ρυθμού περιστροφής του αναδευτήρα (N) παραμένουν σταθεροί κατά την διάρκεια του πειράματος. Αυτές οι περιπτώσεις είναι οι εξής : α) περίπτωση 1 και 2, β) περίπτωση 2 και 3. Το διάγραμμα τους παρουσιάζεται παρακάτω.



➤ Συσχέτιση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων:

Προκειμένου να γίνει η συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων συγκρίνουμε το λόγο $\frac{(k_L a)}{(k_L a)_0}$ των θεωρητικών $k_L a$ με τον αντίστοιχο λόγο των πειραματικών $k_L a$. Επίσης, θεωρούμε ότι η τιμή του $(k_L a)_0$ αντιστοιχεί στις συνθήκες αναφοράς της περίπτωσης 2 ($V_R=1$, $N=300\text{rpm}$ και $F_{air}=2\text{L/min}$), δηλαδή $(k_L a)_0 = (k_L a)_2 = 0.0053$

Επομένως, για κάθε περίπτωση εξετάζουμε τις 3 συνθήκες που μεταβάλλουμε στο πείραμα μας από τις οποίες εξαρτάται και θεωρητικά το $k_L a$.

1. Χρησιμοποιείται η εξής σχέση για την απλούστερη λύση των υπολογισμών.

$$U_s = \frac{F_{air}}{A_R}$$

❖ Περίπτωση 1 : Για $F_{air}=1\text{L/min}$, $N=300\text{rpm}$ και $V_R=1\text{L}$

Πειραματικά: $\frac{(k_L a)_1}{(k_L a)_2} = \frac{0.0034}{0.0053} = \mathbf{0,64}$

2. Όπως έχει αναφερθεί θεωρητικά υπολογίζεται από την εξής σχέση:

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

$$\begin{aligned} \text{Θεωρητικά: } \frac{(k_L a)_1}{(k_L a)_2} &= \frac{\left(\frac{P_g}{V_{R1}}\right)^{0,4} (u_s)^{0,5} (N_1)^{0,5}}{\left(\frac{P_g}{V_{R2}}\right)^{0,4} (u_s)^{0,5} (N_2)^{0,5}} = \frac{\left(\frac{F_{air1}}{A_R}\right)^{0,5}}{\left(\frac{F_{air2}}{A_R}\right)^{0,5}} \\ &=> \frac{(k_L a)_1}{(k_L a)_2} = \left(\frac{F_{air1}}{F_{air2}}\right)^{0,5} = \left(\frac{1}{2}\right)^{0,5} = \mathbf{0.70} \end{aligned}$$

Άρα, $\sigma = \frac{|0.70-0.64|}{0.70} \cdot 100\% = 8,6\%$ απόκλιση.

❖ Περίπτωση 2 : Για $F_{air}=2\text{L/min}$, $N=300\text{rpm}$ και $V_R=1\text{L}$

Πειραματικά: $\frac{(k_L a)_2}{(k_L a)_2} = \frac{0.0053}{0.0053} = \mathbf{1}$

$$\begin{aligned} \text{Θεωρητικά: } \frac{(k_L a)_2}{(k_L a)_2} &= \frac{\left(\frac{P_g}{V_{R2}}\right)^{0,4} (u_s)^{0,5} (N_2)^{0,5}}{\left(\frac{P_g}{V_{R2}}\right)^{0,4} (u_s)^{0,5} (N_2)^{0,5}} = \frac{\left(\frac{F_{air2}}{A_R}\right)^{0,5}}{\left(\frac{F_{air2}}{A_R}\right)^{0,5}} \\ &=> \frac{(k_L a)_2}{(k_L a)_2} = \left(\frac{F_{air2}}{F_{air2}}\right)^{0,5} = \left(\frac{2}{2}\right)^{0,5} = \mathbf{1} \end{aligned}$$

Άρα, $\sigma=0\%$ απόκλιση.

❖ **Περίπτωση 3 :** Για $F_{air}=3L/min$, $N=300rpm$ και $V_R=1L$

Πειραματικά: $\frac{(k_L a)_3}{(k_L a)_2} = \frac{0.0070}{0.0053} = \mathbf{1,32}$

Θεωρητικά: $\frac{(k_L a)_3}{(k_L a)_2} = \frac{(\frac{Pg}{V_{R3}})^{0.4} (u_s)^{0.5} (N_3)^{0.5}}{(\frac{Pg}{V_{R2}})^{0.4} (u_s)^{0.5} (N_2)^{0.5}} = \frac{(\frac{F_{air3}}{A_R})^{0.5}}{(\frac{F_{air2}}{A_R})^{0.5}}$

$$\Rightarrow \frac{(k_L a)_3}{(k_L a)_2} = (\frac{F_{air3}}{F_{air2}})^{0.5} = (\frac{3}{2})^{0.5} = \mathbf{1,22}$$

Άρα, $\sigma = \frac{|1,22-1,32|}{1,22} \cdot 100\% = \mathbf{8\%}$ απόκλιση

❖ **Περίπτωση 4 :** Για $F_{air}=2L/min$, $N=300rpm$ και $V_R=2L$

Πειραματικά: $\frac{(k_L a)_4}{(k_L a)_2} = \frac{0.0056}{0.0053} = \mathbf{1,05}$

Θεωρητικά: $\frac{(k_L a)_4}{(k_L a)_2} = \frac{(\frac{Pg}{V_{R4}})^{0.4} (u_s)^{0.5} (N_4)^{0.5}}{(\frac{Pg}{V_{R2}})^{0.4} (u_s)^{0.5} (N_2)^{0.5}} = \frac{(\frac{1}{V_{R4}})^{0.4}}{(\frac{1}{V_{R2}})^{0.4}}$

$$\Rightarrow \frac{(k_L a)_4}{(k_L a)_2} = (\frac{V_{R4}}{V_{R2}})^{0.4} \cdot (\frac{N_4}{N_2})^{0.5} = (\frac{2}{1})^{0.4} = \mathbf{1,32}$$

Άρα, $\sigma = \frac{|1,32-1,05|}{1,32} \cdot 100\% = \mathbf{20,45\%}$ απόκλιση.

Σε περίπτωση που οι στροφές του βιοαντιδραστήρα αλλάξουν σε $N=400$ τότε όπως και είναι αναμενόμενο η ποιοτική απόκλιση της τιμής k_La θα είναι πολύ μεγαλύτερη αφού οι στροφές του βιοαντιδραστήρα αυξάνονται.

❖ Για παράδειγμα: $F_{air}=2L/min$, $N=400rpm$ και $V_R=1L$

$$\begin{aligned} \text{Θεωρητικά:} \quad \frac{(k_La)'}{(k_La)''} &= \frac{\left(\frac{Pg}{V_{R'}}\right)^{0.4} (u_s)^{0.5} (N')^{0.5}}{\left(\frac{Pg}{V_{R''}}\right)^{0.4} (u_s)^{0.5} (N'')^{0.5}} = \frac{\left(\frac{F_{air'}}{A_R}\right)^{0.5} (N')^{0.5}}{\left(\frac{F_{air''}}{A_R}\right)^{0.5} (N'')^{0.5}} \\ \Rightarrow \frac{(k_La)'}{(k_La)''} &= \left(\frac{F_{air'} N'}{F_{air''} N''}\right)^{0.5} = \left(\frac{2 \cdot 400}{2 \cdot 300}\right)^{0.5} = \mathbf{1,15} \end{aligned}$$

❖ Άλλο παράδειγμα: $F_{air}=2L/min$, $N=400rpm$ και $V_R=2L$

$$\begin{aligned} \text{Θεωρητικά:} \quad \frac{(k_La)'}{(k_La)''} &= \frac{\left(\frac{Pg}{V_{R'}}\right)^{0.4} (u_s)^{0.5} (N')^{0.5}}{\left(\frac{Pg}{V_{R''}}\right)^{0.4} (u_s)^{0.5} (N'')^{0.5}} = \frac{\left(\frac{F_{air'}}{A_R}\right)^{0.5} (N')^{0.5}}{\left(\frac{F_{air''}}{A_R}\right)^{0.5} (N'')^{0.5}} \\ \Rightarrow \frac{(k_La)'}{(k_La)''} &= \left(\frac{V_{R'}}{V_{R''}}\right)^{0.4} = \left(\frac{2}{1}\right)^{0.4} \cdot \left(\frac{400}{300}\right)^{0.5} = \mathbf{1,52} \end{aligned}$$

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η 3η εργαστηριακή άσκηση είχε ως σκοπό την εξοικείωση με την απλή βαθμονόμηση ενός μετρητή διαλυμένου οξυγόνου (D.O. meter) με στόχο τον πειραματικό υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς μάζας (k_La) από την αέρια φάση στην υγρή με την μέθοδο του δυναμικού αερισμού. Παράλληλα εξετάστηκε κατά πόσο η συμπεριφορά του πειραματικά υπολογιζόμενου (k_La) είναι η αναμενόμενη από υπάρχουσες συσχετίσεις.

Κατά την εκπόνηση της εργαστηριακής άσκησης έγιναν παρατηρήσεις οι οποίες μας βοήθησαν να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα. Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (D.O.) στο δείγμα νερού στον βιοαντιδραστήρα εξαρτάται από τους ακόλουθους τρεις παράγοντες :

-  Η ογκομετρική παροχή του αέρα F_{air}
-  Ο ρυθμός περιστροφής του αναδευτήρα N
-  Ο όγκος του βιοαντιδραστήρα V_R

Πιο συγκεκριμένα, από τις πειραματικές μας μετρήσεις παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η παροχή F_{air} , τόσο πιο γρήγορα έχουμε αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου (D.O.). Το ίδιο παρατηρείται και με τον όγκο V_R του βιοαντιδραστήρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας (k_La) αυξάνεται όταν αυξηθεί μία ή

περισσότερες από τις παραπάνω παραμέτρους. Αύξηση του $k_L a$ συνεπάγεται μεγαλύτερη κλίση στο διάγραμμα $\ln(100 - DO)_{\text{vs.}} t$, άρα πιο γρήγορη αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου (D.O.) στον βιοαντιδραστήρα. Αναλυτικότερα, το συγκεκριμένο γεγονός γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας την μείωση του χρόνου αύξησης του D.O. όταν αυξάνουμε την παροχή F_{air} διατηρώντας τις υπόλοιπες συνθήκες αμετάβλητες. Στην περίπτωση 1 καταγράφηκαν περισσότερες μετρήσεις αφού ο χρόνος αύξησης του D.O. ήταν μεγάλος. Ανάμεσα των πειραματικών και θεωρητικών λόγων του $k_L a$ υπάρχουν αποκλίσεις. Μεγαλύτερο σφάλμα έχουμε στην περίπτωση 4 με τιμή 20,45%. Ακολουθούν η περίπτωση 1 με τιμή 8,6%, η περίπτωση 3 με τιμή 8% και τέλος η περίπτωση 2 με $\sigma=0\%$. Αυτές οι αποκλίσεις πιθανόν να οφείλονται είτε στον παρατηρητή είτε στο μετρητή που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή άσκηση.

Παράρτημα 1ο : Πειραματικές μετρήσεις

ΧΡΟΝΟΣ	1	2	3	4
0:00	4,3	4,9	5,3	5,7
0:10	4,9	4,9	5,5	7,3
0:20	8,2	6,2	9,6	11,2
0:30	10,5	10,0	14,6	15,7
0:40	13,7	14,1	20,2	20,1
0:50	15,9	18,5	25,4	25,4
0:60	18,3	22,6	31,0	28,6
1:00	21,2	26,7	35,7	32,9
1:10	24,3	30,5	40,2	37,0
1:20	26,7	34,5	43,7	40,6
1:30	29,3	37,7	47,7	43,0
1:40	31,3	41,6	51,1	46,7
1:50	34,1	44,4	55,1	49,8
2:00	36,1	47,6	58,3	52,7
2:10	38,4	50,2	61,3	55,2
2:20	40,5	53,1	64,1	57,7
2:30	42,5	55,5	66,6	59,6
2:40	44,7	58,1	69,1	62,1
2:50	43,6	60,4	71,0	64,1
3:00	48,3	62,4	72,8	66,2
3:10	50,3	64,6	75,0	68,0
3:20	50,6	66,6	76,5	69,5
3:30	52,0	68,2		71,3
3:40	53,6			
3:50	55,3			
4:00	56,6			
4:10	58,4			
4:20	59,9			
4:30	61,3			
4:40	62,8			

Παράρτημα 2ο : Ανάλυση Δεδομένων

Πίνακας αποτελεσμάτων (100- DO(%))

ΧΡΟΝΟΣ	(100- DO(%))			
	1	2	3	4
0:00	95.7	95.1	94.7	94.3
0:10	95.1	95.1	94.5	92.7
0:20	91.8	93.8	90.4	88.8
0:30	89.5	90.0	85.4	84.3
0:40	86.3	85.9	79.8	79.9
0:50	84.1	81.5	74.6	74.6
1:00	81.7	77.4	69.0	71.4
1:10	78,8	73.3	64.3	67.1
1:20	75,7	69.5	59.8	63.0
1:30	73.3	65.5	56.3	59.4
1:40	70.7	62.3	52.3	57.0
1:50	68.7	58.4	48.9	53.3
2:00	65.9	55.6	44.9	50.2
2:10	63.9	52.4	41.7	47.3
2:20	61.6	49.8	38.7	44.8
2:30	59.5	46.9	35.9	42.3
2:40	57.5	44.5	33.4	40.4
2:50	55.3	41.9	30.9	37.9
3:00	53.4	39.6	29.0	35.9
3:10	51.7	37.6	27.2	33.8
3:20	49.4	35.4	25.0	32.0
3:30	48.0	33.4	23.5	30.5
3:40	46.4	31.8		28.7
3:50	44.7			
4:00	43.4			
4:10	41.6			
4:20	40.1			
4:30	38.7			
4:40	37.2			

Πίνακας αποτελεσμάτων $\ln(100-DO\ (%))$

ΧΡΟΝΟΣ	$\ln(100-DO(%))$			
	1	2	3	4
0:00	4.56	4.55	4.55	4.55
0:10	4.55	4.55	4.54	4.53
0:20	4.51	4.54	4.50	4.49
0:30	4.49	4.49	4.46	4.43
0:40	4.45	4.45	4.38	4.38
0:50	4.43	4.40	4.31	4.31
1:00	4.40	4.35	4.23	4.27
1:10	4.37	4.29	4.16	4.21
1:20	4.32	4.24	4.09	4.14
1:30	4.29	4.18	4.03	4.08
1:40	4.26	4.13	3.96	4.04
1:50	4.23	4.06	3.89	3.98
2:00	4.19	4.02	3.80	3.92
2:10	4.16	3.96	3.73	3.86
2:20	4.12	3.91	3.66	3.80
2:30	4.09	3.85	3.58	3.74
2:40	4.05	3.80	3.51	3.70
2:50	4.01	3.74	3.43	3.63
3:00	3.98	3.68	3.37	3.58
3:10	3.95	3.63	3.30	3.52
3:20	3.90	3.57	3.22	3.47
3:30	3.87	3.51	3.16	3.42
3:40	3.84	3.46		3.36
3:50	3.80			
4:00	3.78			
4:10	3.73			
4:20	3.69			
4:30	3.66			
4:40	3.61			

Πίνακας k_{La} σε κάθε περίπτωση

Πείραμα	Συντελεστής k_{La}
1	0.0034
2	0.0053
3	0.007
4	0.0056

Πίνακας για την δημιουργία των διαγραμμάτων k_La vs F_{air} και k_La vs N

Πείραμα	k_La	F_{air} (L/min)	N (rpm)
1	0.0034	1	300
2	0.0053	2	300
3	0.007	3	300
4	0.0056	2	300

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