

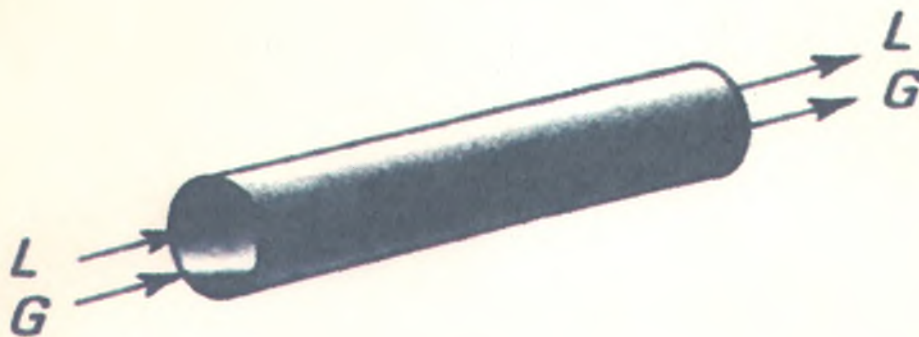


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ & ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ CO₂ ΣΤΟ ΝΕΡΟ ΣΕ ΣΥΜΠΑΓΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΠΑΦΗΣ



Διπλωματική Εργασία

Φοιτητής : Θεοχαρίδης Γεώργιος

Επιβλέπων : Μποντόζογλου Βασίλειος , αν. καθηγητής

**ΒΟΛΟΣ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1999**

αρ. εγσ. 156/π.Α.....



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΕΚΘΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΑΔΡΑΣΩΝ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

004000046468

ΑΠΟΡΡΟΦΗΝ CO2 ΣΤΟ ΝΕΡΟ
ΣΕ ΣΥΜΠΛΗΡΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΛΑΦΩΣ



Διαμορφωτική Εργασία

Επίβλεπων : Μηνόμοιρος Γεωργίου, Δρ. Καθηγητής
Υποεπιβλέπων : Τσιλιφός Γεώργιος

2019





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 737/1
Ημερ. Εισ.:
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
1999
ΘΕΟ

Στην οικογένειά μου

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Β. Μποντόζογλου για την επιλογή του αντικειμένου της εργασίας, τη συνεχή του καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επίσης ευχαριστώ τον λέκτορα κ. Π. Τσιακάρα για τις πληροφορίες και τη βοήθεια που προσέφερε σε διάφορα τεχνικά θέματα.

Ακόμη ευχαριστώ τον Δρ. Γ. Παπαπολυμέρου για το ενδιαφέρον του.

Έπειτα, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Υποψήφιο Διδάκτορα Μ. Βλαχογιάννη για την υλική και τεχνική υποστήριξη που μου παρείχε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συμφοιτητή μου Κ. Χριστοδούλου για την πολύτιμη βοήθειά του στην αντιμετώπιση διαφόρων προβλημάτων που ανέκυψαν κατά τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Με την παρούσα εργασία μελετήθηκε η απορρόφηση CO₂ στο νερό σε συμπαγή διάταξη επαφής. Έγινε χρήση αγωγού μήκους 155 mm και εσωτερικής διαμέτρου 2 mm. Το ποσοστό του CO₂ που απορροφήθηκε προσδιορίστηκε μετά από τιτλοδότηση των συλλεγόμενων δειγμάτων με δείκτες.

Κύριος στόχος της συγκεκριμένης εργασίας ήταν να εξεταστεί εάν μπορούν να εξασφαλιστούν μεγαλύτεροι από τους υπάρχοντες συντελεστές μεταφοράς μάζας. Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία για αγωγούς μικρής διαμέτρου. Επίσης υπήρχε η πεποίθηση μετά από μετρήσεις ότι όσο ελαττώνονταν η εσωτερική διάμετρος ότι η απόδοση της συσκευής θα αυξάνονταν. Ακόμη, η έλλειψη κάποιου χάρτη ροής για το συγκεκριμένο αγωγό εμπόδιζε το συσχετισμό του συντελεστή μεταφοράς με τα ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του διφασικού μείγματος.

Επίσης, μελετήθηκε η πτώση πίεσης στον αγωγό επαφής και συσχετίστηκε με τον συντελεστή μεταφοράς μάζας. Η πτώση πίεσης είναι σημαντικός παράγοντας που καθορίζει το λειτουργικό κόστος μιας συσκευής.

Έγιναν τέσσερις ομάδες μετρήσεων και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής:

- εξασφαλίστηκε μεγαλύτερος συντελεστής μεταφοράς μάζας από αυτούς της βιβλιογραφίας για αντίστοιχες συσκευές. Αυτό οφείλεται στη μικρή διάμετρο του αγωγού επαφής. Επίσης σε αυτό συμβάλλουν και τα έντονα φαινόμενα εισόδου όπου η ροή δεν είναι ανεπτυγμένη πλήρως και οι ρυθμοί μεταφοράς είναι υψηλότεροι.
- η πτώση πίεσης είναι περίπου ίδια με αυτή στις αντίστοιχες συσκευές μεγαλύτερης διαμέτρου και στις ίδιες συνθήκες ροής. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η δαπάνη λειτουργίας της συσκευής δεν αυξήθηκε.

Τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν ότι οι συμπαγείς διατάξεις επαφής πρέπει να διερευνηθούν περισσότερο. Προτείνεται να επαναληφθούν πειραματικές μετρήσεις σε αγωγό ίδιας διαμέτρου με συνθήκες ροής που να εξασφαλίζουν ότι θα υπάρχουν όλες οι δυνατές περιοχές ροής. Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητη η κατασκευή χάρτη ροής για αγωγό διαμέτρου 2 mm.

Περιεχόμενα

	σελ
1. Εισαγωγή _____	1
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση _____	3
Α. Φυσική απορρόφηση αερίου σε υγρό _____	3
Β. Ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό _____	8
3. Πειραματική Διάταξη και διαδικασία _____	15
4. Ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων _____	19
Α. Μεθοδολογία ανάλυσης μετρήσεων _____	19
Β. Μελέτη φαινομενικών ταχυτήτων υγρού – αερίου _____	22
Β1. Επίδραση της φαινομενικής ταχύτητας του CO ₂ στον ογκομετρικό συντελεστή μεταφοράς μάζας _____	25
Β2. Επίδραση της φαινομενικής ταχύτητας του νερού στον ογκομετρικό συντελεστή μεταφοράς μάζας _____	37
Β3. Επίδραση της φαινομενικής ταχύτητας του νερού στον ειδικό συντελεστή μεταφοράς μάζας του πίδακα _____	39
Γ. Σύγκριση των ογκομετρικών συντελεστών της παρούσας εργασίας με τους αντίστοιχους της διεθνούς βιβλιογραφίας _____	41
Δ. Μελέτη πτώσης πίεσης – Υπολογισμός του συντελεστή κατανάλωσης ενέργειας ϵ _____	45
Δ1. Υπολογισμός πτώσης πίεσης _____	45
Δ2. Υπολογισμός του συντελεστή κατανάλωσης ενέργειας ϵ _____	49
Δ3. Σύγκριση του ϵ της παρούσας εργασίας με το ϵ που υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία _____	50
5. Συμπεράσματα _____	52
6. Προτάσεις _____	54
7. Βιβλιογραφία _____	55
8. Παράρτημα _____	56
Α. Βαθμονόμηση αντλίας νερού _____	57
Β. Μηχανολογικό σχέδιο δοχείου _____	60

Γ. Βαθμονόμηση ψηφιακού μανομέτρου _____	62
Δ. Βαθμονόμηση ροομέτρου _____	63
Ε. Πίνακες αποτελεσμάτων _____	65

1. Εισαγωγή

Η απορρόφηση αερίων είναι διεργασία η οποία χρησιμοποιείται στη βιομηχανία προκειμένου να μεταβληθεί η σύσταση διαφόρων ρευμάτων. Σαν παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε την δέσμευση CO₂ / H₂S από το φυσικό αέριο με κατεργασία του με αμίνες προκειμένου να αυξηθεί η θερμογόνος δύναμή του . Επίσης με απορρόφηση γίνεται και η έκπλυση αερίων ρευμάτων που περιέχουν ατμούς οργανικών διαλυτών προκειμένου να μην εξέλθουν στην ατμόσφαιρα.

Υπάρχουν διάφορες συσκευές απορρόφησης. Οι περισσότερες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι στήλες και στο εσωτερικό τους υπάρχει πληρωτικό υλικό ή δίσκοι. Σε αυτές εφαρμόζεται η αρχή της αντιροής. Δηλαδή το υγρό και το αέριο ρέουν παράλληλα και αντίθετα εντός της συσκευής. Ωστόσο με αυτές τις συσκευές δεν εξασφαλίζονται υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς μάζας και ελλοχεύει πάντα ο κίνδυνος της πλυμμύρισης λόγω των απαιτήσεων σε μεγάλες παροχές υγρού και αερίου.

Μέσα από έρευνες επισημαίνεται ότι με την ομοροή θα μπορούσε να εξασφαλιστούν υψηλότεροι ρυθμοί μεταφοράς μάζας. Συσκευές που βασίζονται στην αρχή της ομοροής είναι αυτές της μιας βαθμίδας και αυτές που λειτουργούν με ταχεία χημική αντίδραση. Όμως τα μέχρι τώρα αποτελέσματα δεν επαρκούν ώστε να προβλεφθούν οι ρυθμοί μεταφοράς και να σχεδιαστεί κατάλληλη συσκευή.

Για να επιτευχθεί πρόοδος σε αυτή την κατεύθυνση είναι απαραίτητο να συσχετίσουμε τους ρυθμούς μεταφοράς μάζας με τις ρευστομηχανικές ιδιότητες του διφασικού μείγματος. Στη συσκευές απορρόφησης με διφασική ροή αυτά δεν είναι και τόσο γνωστά. Επίσης δεν είναι γνωστή και η διεπιφάνεια του μείγματος. Ακόμη δεν μπορούν να προβλεφθούν η πτώση πίεσης και το κλάσμα αερίου όγκου.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αγωγός εσωτερικής διαμέτρου 2 mm και μήκους 155 mm. Έγιναν μετρήσεις σε διάφορες παροχές αερίου και υγρού. Στόχος των διεξαγόμενων πειραμάτων είναι η σύνδεση των συντελεστών μεταφοράς με τα χαρακτηριστικά της ροής εντός του αγωγού. Επίσης διερευνείται η πτώση πίεσης στον αγωγό. Η τελευταία καθορίζει την κατανάλωση ενέργειας , σημαντικό παράγοντα για το σχεδιασμό μιας συσκευής.

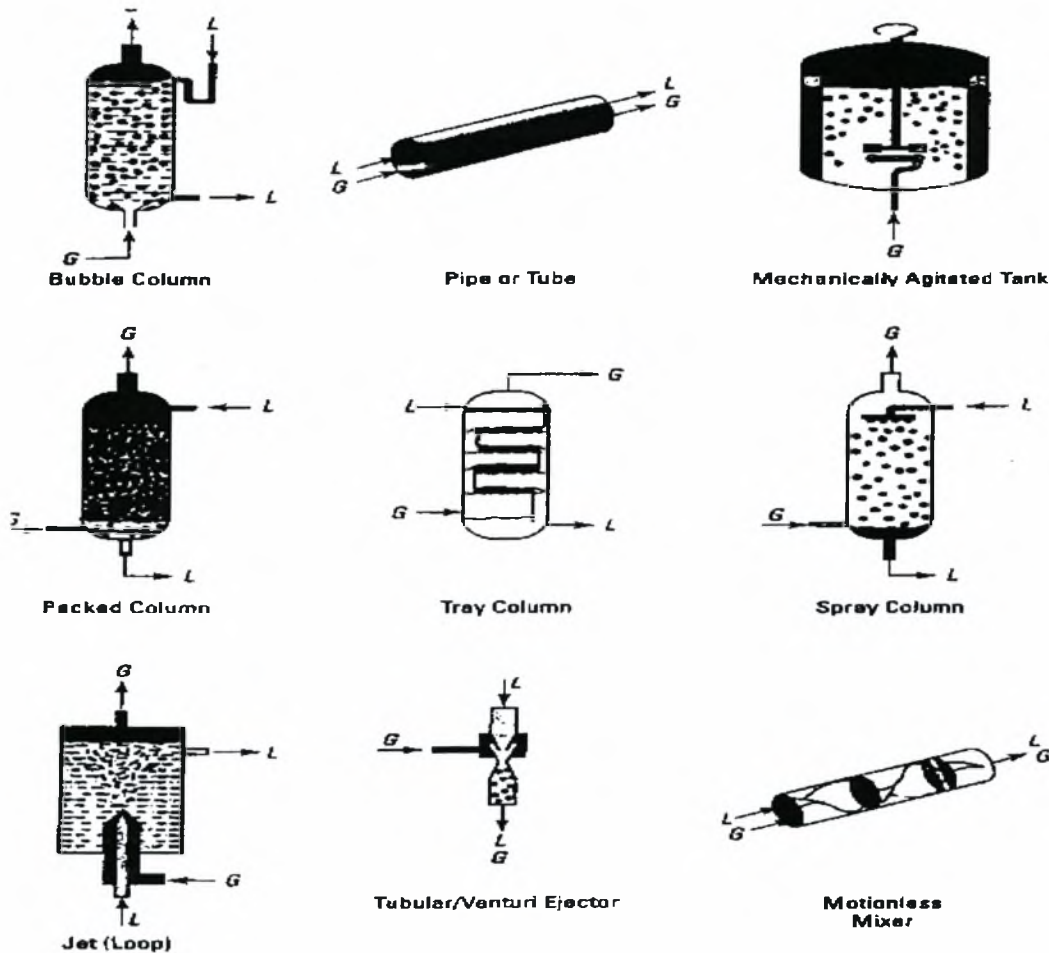
Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για αγωγούς επαφής μικρής διαμέτρου. Ειδικότερα, όλα τα πειραματικά αποτελέσματα αφορούν αγωγούς διαμέτρου 2,5-1000 mm. Τα αποτελέσματα από τη συγκεκριμένη εργασία θα συμβάλλουν στον ασφαλή σχεδιασμό συσκευών θερμικών διεργασιών όπου η ροή είναι διφασική, όπως εξατμιστήρες, συμπυκνωτές και ατμοπαραγωγούς και εναλλάκτες.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Παρακάτω παρατίθενται στοιχεία τη θεωρία που αφορά την πειραματική διαδικασία. Αρχικά αναφέρονται σχέσεις που χρησιμοποιούνται στην απορρόφηση υγρού από αέριο και στη συνέχεια γίνεται περιγραφή της ροής του μείγματος στον αγωγό επαφής.

A. Φυσική απορρόφηση αερίου σε υγρό

Κατά την απορρόφηση αερίου σε υγρό συμβαίνει μεταφορά μάζας από τη μία φάση στην άλλη. Μερικές από τις συσκευές που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απορρόφηση παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.1).

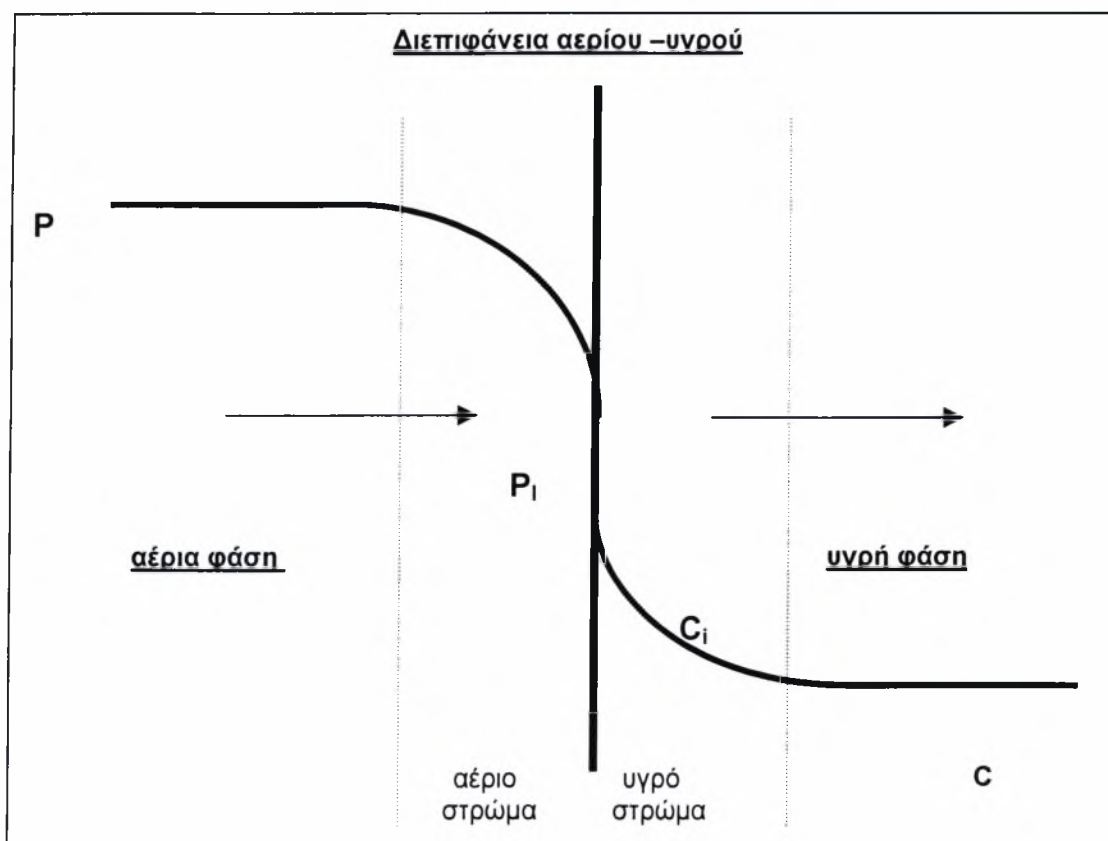


σχήμα 2.1 : τύποι συσκευών απορρόφησης

Στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη χρησιμοποιείται αγωγός επαφής. Ένα από τα χαρακτηριστικά των συσκευών του τύπου αυτού είναι ότι έχει μικρή διάμετρο, συνήθως μικρότερη από 4 ίντσες. Επίσης η θέση του μπορεί να είναι οριζόντια ή κατακόρυφη. Λειτουργεί σχεδόν αποκλειστικά σε κατάσταση ομορροής, η οποία είναι κατάλληλη για μη αντιστρεπτές μεταβολές που περιέχουν καθαρό αέριο. Υπερέχουν έναντι των άλλων συσκευών διότι η κατασκευή τους είναι συμπαγής, απλή και χαμηλού κόστους. Πετυχαίνουμε επίσης μεγάλο εύρος ροών και πίεσης. Τα μειονεκτήματά τους συνοψίζονται στην πτώση πίεσης που παρατηρείται και στις διαφορετικές μορφές ροής που παρουσιάζονται εντός του αγωγού. Αυτό επηρεάζει την απόδοση της συσκευής και περιπλέκει περισσότερο το σχεδιασμό της.

Η αρχή λειτουργίας που διέπει τις εικονιζόμενες συσκευές είναι οι ίδια για όλες. Στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, δεν συμβαίνει κάποια χημική αντίδραση ταυτόχρονα με την απορρόφηση του CO₂ στο νερό. Επομένως έχουμε φυσική διάχυση αερίου σε υγρό, της οποίας οι αρχές παρουσιάζονται στην ανάλυση που ακολουθεί.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.2) εικονίζεται ένα μικρό τμήμα της συσκευής απορρόφησης, όπου παρουσιάζονται οι κύριες φάσεις και είναι αμετάβλητες στο χρόνο.



σχήμα 2.2 : διεπιφάνεια αερίου υγρού

Η θεωρία του Witman των 2 λεπτών στρωμάτων είναι αυτή που διέπει τη μεταφορά μάζας μεταξύ φάσεων που βρίσκονται σε άμεση επαφή. Έστω ότι τα Α συστατικό βρίσκεται στην αέρια φάση G και διαχέεται στην υγρή φάση L. Επίσης, με P συμβολίζουμε την μερική πίεση του Α στην αέρια φάση και με C τη συγκέντρωσή του στην υγρή φάση. Το συστατικό Α διαχέεται στην υγρή φάση εάν η συγκέντρωση C είναι μικρότερη από τη συγκέντρωση κορεσμού του α στο υγρό.

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη θεωρία, η μερική πίεση P του Α μειώνεται όσο πλησιάζουμε στη διεπιφάνεια έως μια τιμή P_i. Συγχρόνως, η συγκέντρωση C του Α στην υγρή φάση αυξάνεται στο λεπτό υγρό στρώμα έως μια τιμή C_i. Οι αντιστάσεις των 2 λεπτών στρωμάτων είναι αυτές που συμβάλλουν στην αντίσταση της κύριας διάχυσης του Α από την αέρια στην υγρή φάση. Θεωρούμε αμελητέα την αντίσταση στη μεταφορά μάζας του Α στη διεπιφάνεια και στις κύριες μάζες. Επίσης, θεωρούμε ότι στη διεπιφάνεια το C_i βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το P_i.

Αν N_A / A ο ρυθμός μεταφοράς του Α στην αέρια φάση ανά μονάδα επιφανείας, ισχύει η σχέση:

$$N_A / A = k_G * (P - P_i) \quad (1.1)$$

με k_G : μερικός συντελεστής μεταφοράς μάζας στην αέρια φάση
και A : η επιφάνεια επαφής των 2 φάσεων

Ο ρυθμός μεταφοράς του Α στην υγρή φάση είναι ίδιος με αυτόν στην αέρια φάση. Άρα μπορούμε να γράψουμε:

$$N_A / A = k_L * (C_i - C) \quad (1.2)$$

με k_L : μερικός συντελεστής μεταφοράς μάζας στην υγρή φάση

Επειδή δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των συγκεντρώσεων στη διεπιφάνεια, δεν γίνεται χρήση των παραπάνω σχέσεων. Για το λόγο αυτό ορίζουμε τον ολικό συντελεστή μεταφοράς μάζας. Άρα μπορούμε να γράψουμε:

$$N_A / A = K_G * (P - P_e) \quad (1.3)$$

και

$$N_A / A = K_L * (C_e - C) \quad (1.4)$$

με K_G : συνολικός συντελεστής μεταφοράς στην αέρια φάση

K_L : συνολικός συντελεστής μεταφοράς στην υγρή φάση

P_e : μερική πίεση του A σε αέριο που βρίσκεται σε ισορροπία με υγρό συγκέντρωσης σε συστατικό A ίσης με C

C_e : συγκέντρωση του A σε υγρό που βρίσκεται σε ισορροπία με αέριο μερικής πίεσης του συστατικού A ίσης με P

Εφόσον έχουμε διαλυτότητα αερίου σε υγρό, ισχύει ο νόμος του Henry :

$$P_e = H * C \quad (1.5)$$

με H : η σταθερά του Henry [bar m³ / kmole]

Οι συνολικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας συνδέονται με τους μερικούς συντελεστές με τις παρακάτω σχέσεις:

$$1 / K_L = 1 / k_L + 1 / (H * k_G) \quad (1.7)$$

και

$$1 / K_G = 1 / k_G + H / k_L \quad (1.8)$$

Για τα διφασικά μείγματα υγρού-αερίου, η επιφάνεια αλλαγής A είναι συνήθως άγνωστη. Για το λόγο αυτό ορίζουμε την ειδική επιφάνεια εναλλαγής a που είναι ίση με τη διαθέσιμη επιφάνεια επαφής ανά μονάδα όγκου της συσκευής και δίνεται από τη σχέση:

$$a = A / (A_p * L) \quad (1.9)$$

με A_p : επιφάνεια διατομής του αγωγού επαφής

L : μήκος του αγωγού επαφής

Άρα μπορούμε να γράψουμε ότι ο ρυθμός μεταφοράς N_A δίνεται από τη σχέση:

$$N_A = (k_L * a) * (A_P * L) * (C_i - C) \quad (1.10)$$

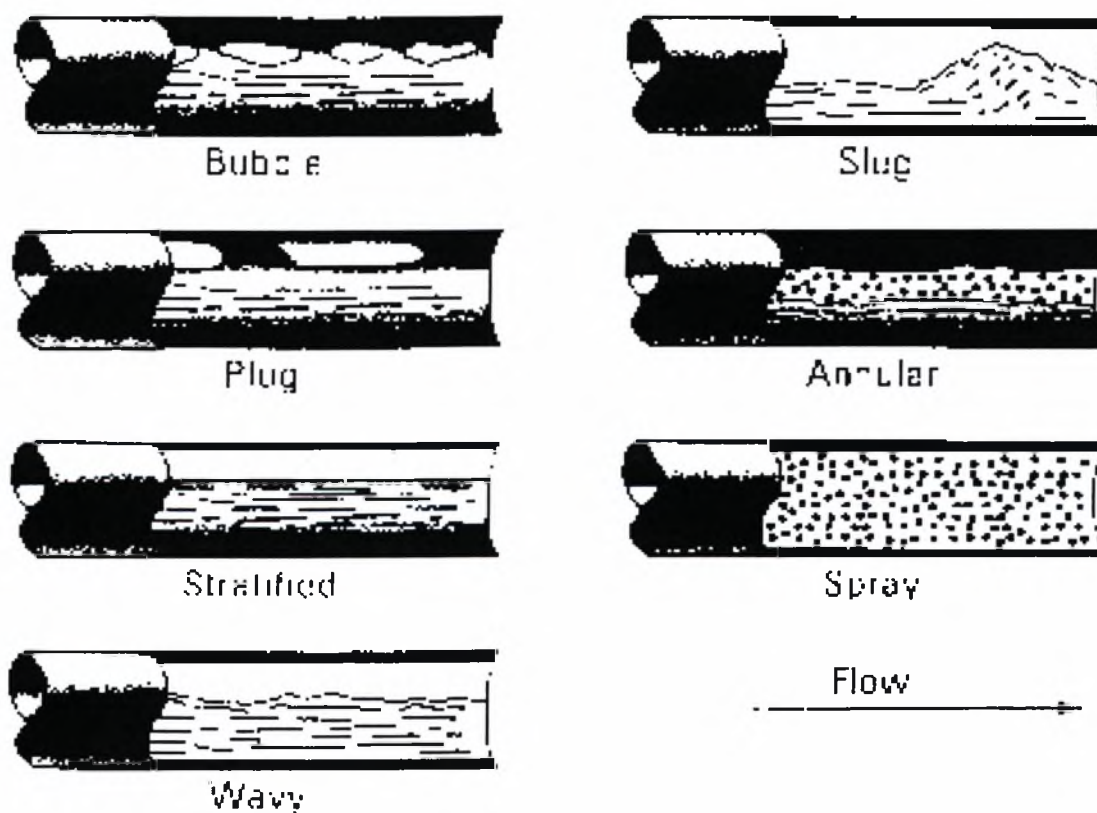
Με τα πειράματα που διεξάγουμε προσδιορίζουμε τον ογκομετρικό συντελεστή μεταφοράς μάζας της υγρής φάσης ($k_L * a$). Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από τις φυσικές ιδιότητες των δύο ρευστών και από τις συνθήκες ροής αυτών στις συσκευές μεταφοράς μάζας.

Β. Ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό

Η ροή αερίου υγρού σε οριζόντιο αγωγό επαφής είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. Ο μηχανισμός που οδηγεί σε διάφορα είδη ροής είναι άγνωστος για αγωγούς μικρής διαμέτρου. Για το λόγο αυτό είναι ανέφικτο προς το παρόν ο συσχετισμός μεταξύ ροής και μεταφοράς μάζας.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε η θεωρία των δύο λεπτών στρωμάτων. Εκεί αναφέρθηκε ότι η διεπιφάνεια μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης και οι συνθήκες ροής που επικρατούν στον αγωγό είναι αυτές που καθορίζουν την μεταφορά μάζας από τη μία φάση στην άλλη.

Η διεπιφάνεια έχει διάφορες μορφές που καθορίζονται από τις ταχύτητες των ρευστών, τις φυσικές ιδιότητες αυτών και τη διάμετρο του αγωγού επαφής. Έτσι η ομορροή υγρού –αερίου εντός αγωγού επαφής έχει τις μορφές που εικονίζονται στο παρακάτω σχήμα και περιγράφονται στη συνέχεια.



σχήμα 2.3 : ροή αερίου – υγρού εντός οριζόντιου αγωγού

Ροή με φυσαλίδες (bubble flow) :

Πρόκειται για το είδος ροής που το αέριο διασπείρεται σε μικρές φυσαλίδες. Αυτές τείνουν να συγκεντρωθούν στο επάνω μέρος του αγωγού επαφής

Ήπια διαλείπουσα ροή (plug flow) :

Το αέριο κινείται σε μεγάλες επιμήκειες μάζες οι οποίες συγκεντρώνονται στο επάνω τοίχωμα του σωλήνα.

Βίαιη διαλείπουσα ροή (slug flow) :

Εδώ έχουμε περιοδική διέλευση υγρών μαζών, διότι τα διεπιφανειακά κύματα συχνά κλείνουν τη διατομή του αγωγού. Αυτή η ροή πρέπει να είναι αποφευκταία διότι προκαλεί ταλαντώσεις στον αγωγό και τα εξαρτήματα σύνδεσής του.

Στρωματωμένη ροή (stratified flow) :

Στη ροή αυτή είναι διαχωρισμένη η υγρή από την αέρια φάση. Επίσης, η διεπιφάνεια είναι ατάραχη.

Κυματώδης ροή (wavy flow) :

Είναι όπως η στρωματωμένη ροή, μόνο που η διεπιφάνεια γίνεται κυματώδης όσο αυξάνεται η παροχή του αερίου συστατικού. Σε μικρές ταχύτητες υγρού και αερίου τα κύματα είναι διδιάστατα και το επάνω τοίχωμα του αγωγού δεν έρχεται σε επαφή με το υγρό. Όσο όμως αυξάνεται η ταχύτητα του υγρού αυξάνεται το πλάτος των κυμάτων και η επιφάνειά τους γίνεται τραχύτερη. Το υγρό τώρα κατορθώνει και έρχεται σε επαφή με το επάνω τοίχωμα του σωλήνα.

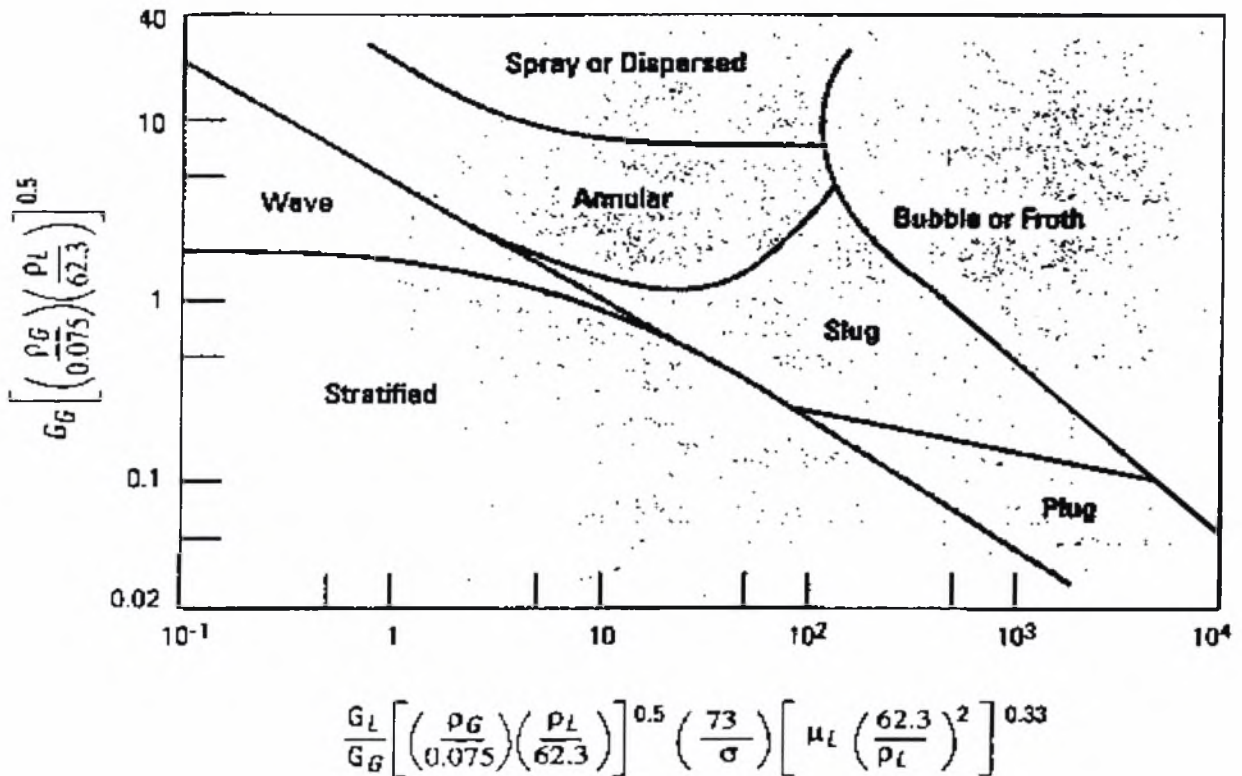
Δακτυλιοειδής ροής (annular flow) :

Το υγρό έχει τη μορφή δακτυλίου και βρίσκεται περιμετρικά του αγωγού. Το κάτω στρώμα του υγρού υμένα είναι πιο μεγάλο από το επάνω λόγω βαρύτητας. Στο κέντρο του αγωγού ρέει η κυρίως αέρια φάση η οποία περιέχει διεσπαρμένα υγρά σταγονίδια.

Ροή με σταγονίδια (spray flow) :

Η συγκεκριμένη ροή μοιάζει με την προηγούμενη, μόνο που ο δακτυλιοειδής υμένας είναι αρκετά λεπτότερος και έχει ομοιόμορφο πάχος σε όλη τη διατομή του αγωγού. Η αέρια φάση ρέει στο κέντρο αλλά περιέχει περισσότερα και μικρότερα υγρά σταγονίδια. Οι δύο τελευταίες ροές επιτυγχάνουν μεγαλύτερη επιφάνεια εναλλαγής.

Οι παραπάνω μορφές ροής παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία με τη μορφή χαρτών. Οι τελευταίοι είναι σχεδιασμένοι για συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων αερίου και υγρού. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν γενικοί χάρτες διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό, όπως ο παρακάτω.



σχήμα 2.4 : γενικός χάρτης διφασικής ροής σε οριζόντιο αγωγό

- με G_G : ένταση ροής αερίου [Kg / m²s]
- G_L : ένταση ροής υγρού [Kg / m²s]
- ρ_G : πυκνότητα αερίου [Kg / m³]
- ρ_L : πυκνότητα υγρού [Kg / m³]
- μ_L : ιξώδες υγρού [Kg / m / s]
- σ : επιφανειακή τάση ανάμεσα στο αέριο και το υγρό [kg / s²]

Οι χάρτες αυτοί είναι για μείγμα αέρα – νερού και όχι για μείγμα CO₂ – νερού. Έχουν επίσης κατασκευαστεί χάρτες για ροή αέρα – νερού σε σωλήνα διαμέτρου ≥ 4 mm μετά από πειραματικές μετρήσεις και δεν συμφωνούν με τους γενικούς χάρτες(σχήματα 2.5 , 2.6). Για το λόγο αυτό δεν ενδείκνυται η χρήση γενικών χαρτών. Όμως για ροή σε αγωγό διαμέτρου 2 mm δεν υπάρχει διαθέσιμος στη βιβλιογραφία χάρτης ροής. Αν είχαμε ροή σε σωλήνα διαμέτρου 4mm, θα χρησιμοποιούσαμε χάρτη όπως αυτούς που εικονίζονται στην επόμενη σελίδα.

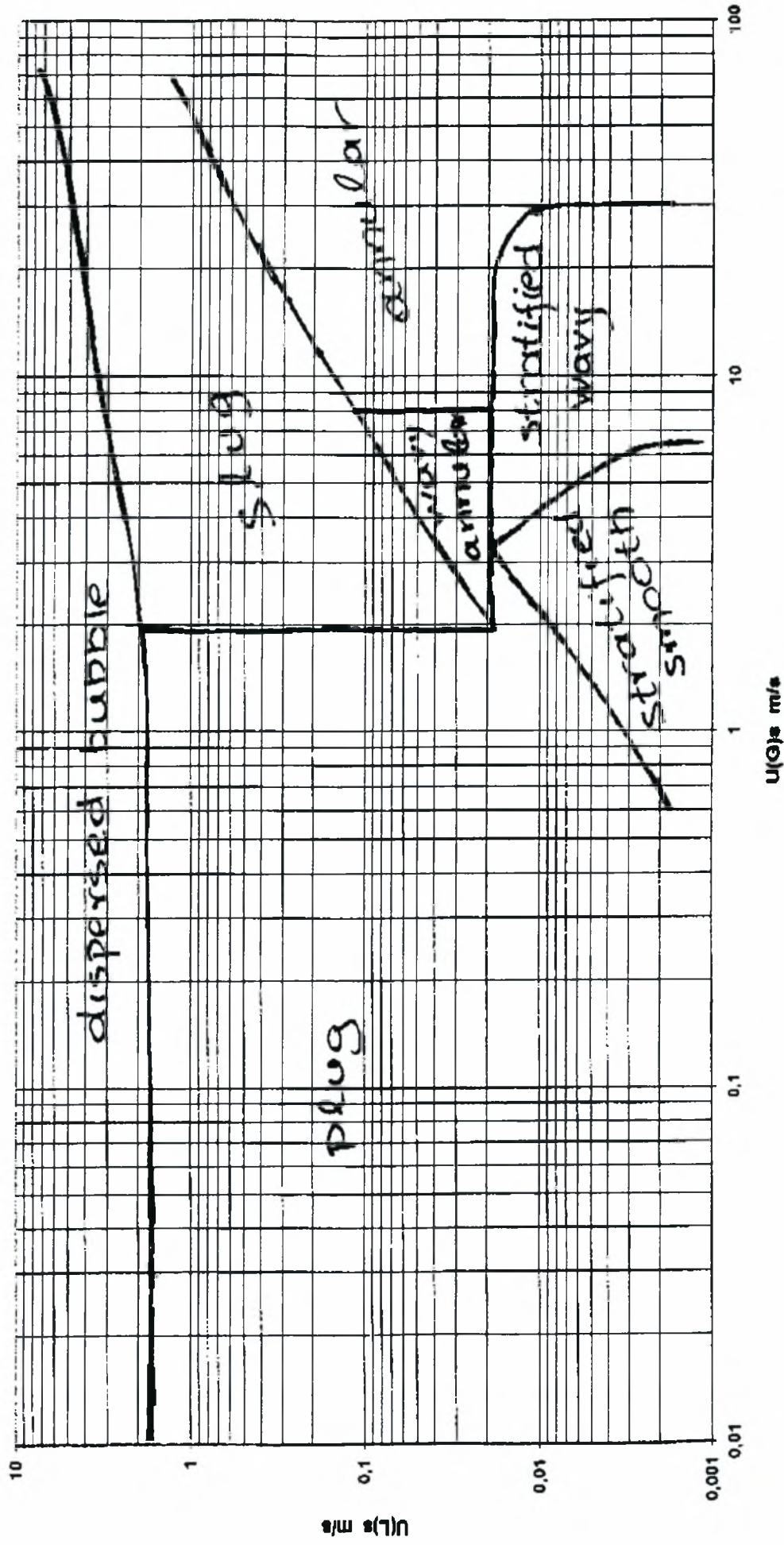
Αφού έχουμε διαφορετικά μείγματα, τα όρια μετάπτωσης από τη μια ροή στην άλλη θα είναι διαφορετικά. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα μοντέλα που μελετούν τον τρόπο με τον οποίο διάφοροι παράγοντες μεταβάλλουν τα συγκεκριμένα όρια.

Τα πρώτα μοντέλα προσπαθούν να ερμηνεύσουν το μηχανισμό μετάπτωσης από τη μια ροή στην άλλη βασιζόμενα σε φυσικές αρχές. Τα δεύτερα εμπειρικές σχέσεις βασισμένες σε πειραματικά αποτελέσματα για διάφορα είδη μειγμάτων και διαμέτρων αγωγών. Και τα δύο είδη μοντέλων απέτυχαν. Τα μεν πρώτα δεν επαλήθευσαν φαινομενικά αποτελέσματα σε μικρές φαινομενικές ταχύτητες υγρού και τα άλλα δεν προέβλεπαν πάντοτε πειραματικά αποτελέσματα σε συγκεκριμένες συνθήκες ροής.

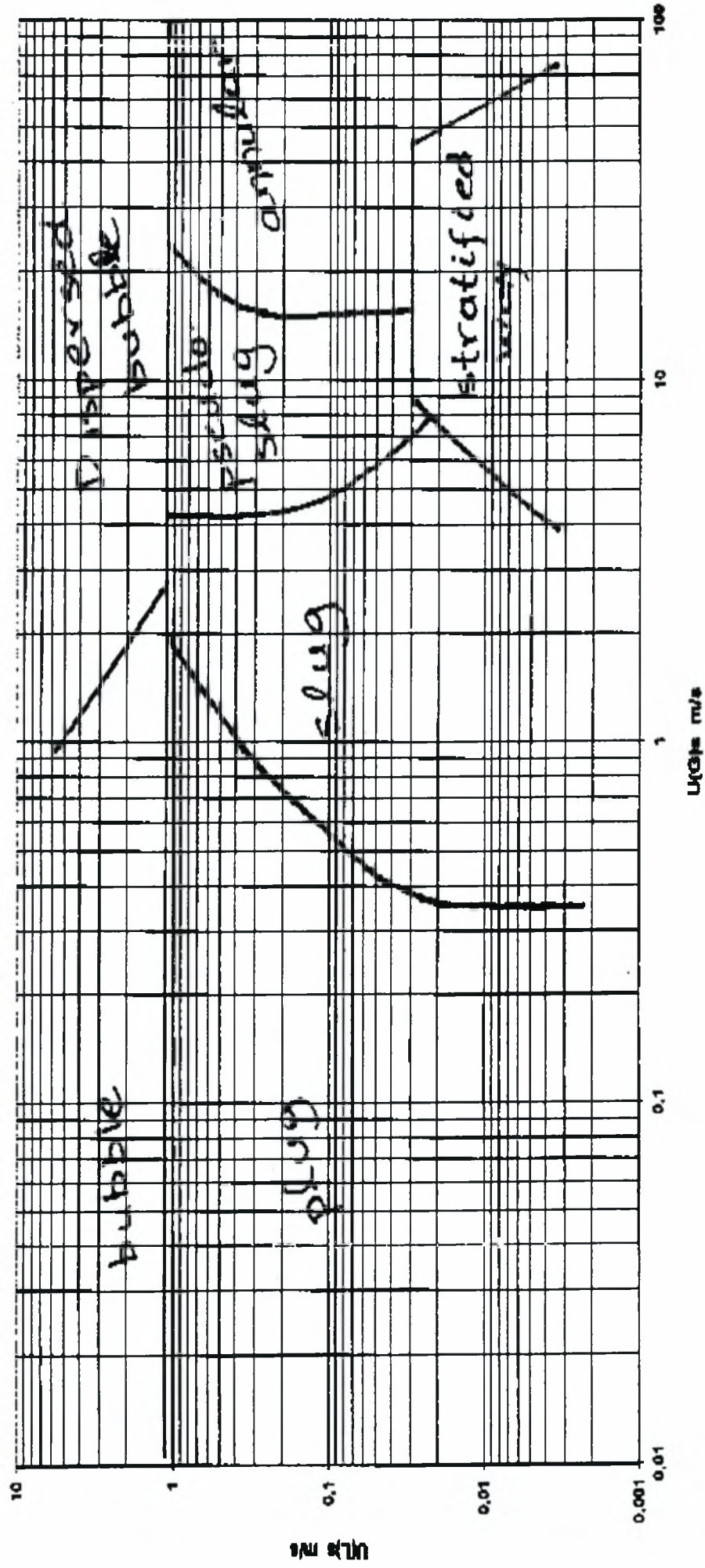
Άρα η χρήση κάποιου μοντέλου πρέπει να αποφευχθεί. Είναι προτιμότερη η χρήση κάποιου χάρτη για συγκεκριμένη διάμετρο. Στην περίπτωσή μας όμως δεν υπάρχει τέτοιος χάρτης. Υποθέτουμε ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων οι φαινομενικές ταχύτητες νερού και CO₂ είναι τέτοιες που δίνουν όλο το εύρος των περιοχών ροής που περιγράφηκαν παραπάνω.

Επίσης δεν είναι επιβεβαιωμένο εάν η ροή έχει την ίδια μορφή σε όλο το μήκος του αγωγού 2mm. Αυτή την αστάθεια την καθορίζουν τα φαινόμενα εισόδου. Στο τμήμα του αγωγού που παρουσιάζονται αυτά τα φαινόμενα η ροή δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Άρα και η διεπιφάνεια δεν θα έχει τη μορφή της πλήρους ανεπτυγμένης ροής. Συνεπώς και οι συντελεστές μεταφοράς μάζας είναι ίσως μεγαλύτεροι στην περιοχή όπου έχουμε φαινόμενα εισόδου. Σε αυτό συμβάλλει ο τρόπος ανάδευσης υγρού – αερίου. Στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη η γωνία εισόδου είναι 90° και προκαλείται έντονη ανάδευση.

Τέλος, η μεταφορά μάζας εξαρτάται και από τη ροή της υγρής μάζας. Η διάχυση του CO₂ στο νερό εξαρτάται από την ένταση της τύρβης στο εσωτερικό του νερού. Η τελευταία καθορίζεται από τη μεταφορά ορμών κατά την επαφή στη διεπιφάνεια.



σχήμα 2.5 : Χάρτης ροής για αγωγό διαμέτρου 4 mm από Barnea

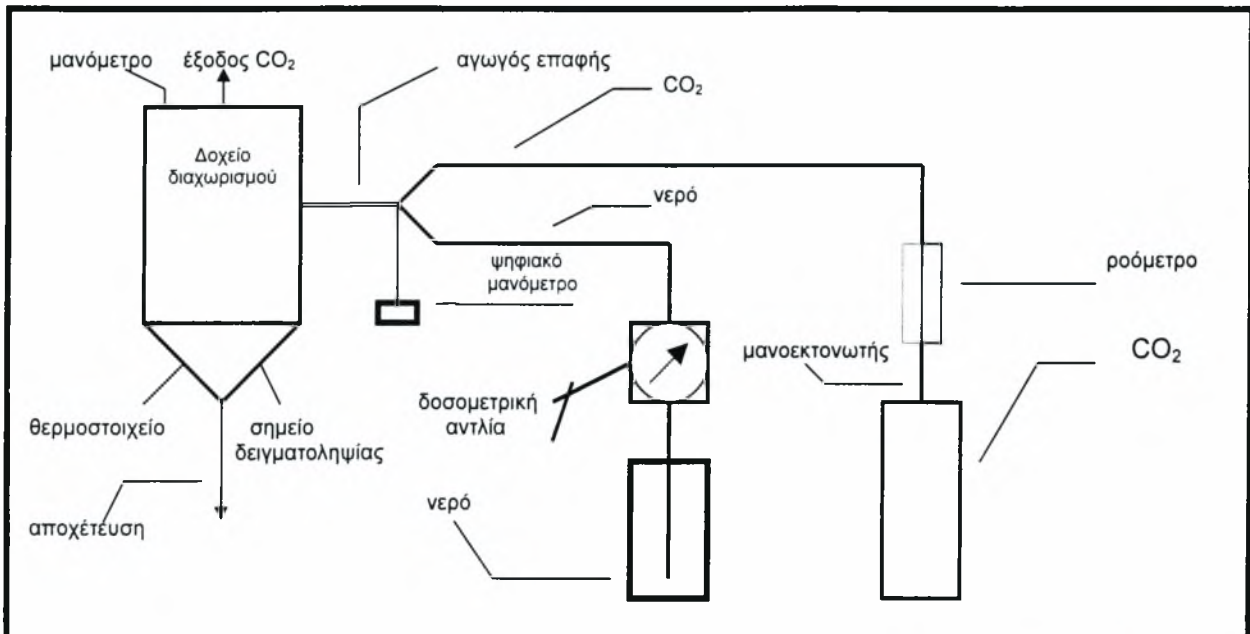


σχήμα 2.6 : Χάρτης ροής για αγωγό διαμέτρου 4 mm από Damianides

3. Πειραματική Διάταξη & Διαδικασία

A. Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Για την απορρόφηση CO₂ στο H₂O χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 3.1 : Πειραματική διάταξη

Το νερό που χρησιμοποιείται είναι απεσταγμένο και έχει αποσκληρυνθεί και λαμβάνεται από κλειστό διαφανές πλαστικό δοχείο. Η αντλία που χρησιμοποιείται για την άντλησή του έχει ισχύ 1/30 HP και μπορεί να μας δώσει παροχές από 13,5 έως 1050 ml/min, ανάλογα με το πιστόνι που χρησιμοποιούμε. Η βαθμονόμηση της επισυνάπτεται σε πίνακα του παραρτήματος.

Το CO₂ βρίσκεται σε μορφή ξηρού πάγου εντός φιάλης σε πίεση 60 bar. Στην έξοδο της φιάλης υπάρχει μανοεκτονωτής ο οποίος ρυθμίζει την πίεση του αερίου από 0,3 έως 2,5 bar. Για μεγαλύτερη όμως ακρίβεια τοποθετείται στη συνέχεια ροόμετρο το οποίο μετρά παροχές από 0 έως 5,3 lt/min. Αξιοσημείωτο είναι ότι σε μεγάλες παροχές αερίου σχηματίζονταν πάγος επάνω στον μανοεκτονωτή. Αυτό οφείλεται στο ότι ο μανοεκτονωτής είναι κατασκευασμένος από μπρούντζο, πολύ αγωγίμο υλικό. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με θέρμανση του μανοεκτονωτή με αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στη συνέχεια οδηγούνται το CO₂ και το νερό στο σωλήνα επαφής ο οποίος είναι διαμέτρου 2mm με διαφανή σωληνάκια πολυαιθυλενίου διαμέτρου 9mm. Στην αρχή του σωλήνα επαφής υπάρχει σύνδεσμος σε σχήμα ύψιλον κατασκευασμένος από γαλβανισμένο μπρούντζο ο οποίος επιτρέπει στα δύο ρευστά να εισέρχονται με εσωτερική γωνία 90°. Σε εκείνο ακριβώς το σημείο προσαρμόστηκε αισθητήρας από ψηφιακό μανόμετρο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της πτώσης πίεσης. Η βαθμονόμηση του οργάνου επισυνάπτεται στο παράρτημα.

Ο αγωγός επαφής συνδέεται με το δοχείο διαχωρισμού και με το ύψιλον μέσω κατάλληλων συνδέσμων κατασκευασμένων από ανοξείδωτο χάλυβα.

Το δοχείο είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα 316. Έχει ύψος 40 cm και εσωτερική διάμετρο 20 cm. Το μείγμα νερού και CO₂ εισάγεται σε σημείο που απέχει 27cm από τον πυθμένα. Στο ίδιο επίσης σημείο έχει προσαρμοστεί έλασμα σε σχήμα ζ το οποίο συμβάλλει στην οδήγηση της ροής στον πυθμένα του δοχείου. Ο τελευταίος είναι κωνικός, έτσι ώστε να συλλέγεται καλύτερα το μείγμα. Στον πυθμένα υπάρχουν επίσης δύο τάπες που επιτρέπουν την είσοδο σύριγγας για λήψη δείγματος και την είσοδο θερμοστοιχείου για τη μέτρηση θερμοκρασίας του δείγματος. Το θερμοστοιχείο είναι τύπου K και συνδέεται σε ηλεκτρονικό θερμόμετρο. Στη βάση του πυθμένα υπάρχει πολυστροφική βαλβίδα εξόδου που οδηγεί το μείγμα στην αποχέτευση.

Επίσης, στο δοχείο είναι προσαρμοσμένος γυάλινος σωλήνας ο οποίος επιτρέπει να έχουμε εικόνα της στάθμης του μείγματος εντός του δοχείου. Στην επάνω πλευρά του δοχείου υπάρχει έξοδος η οποία επιτρέπει στο CO₂ που δεν απορροφήθηκε από το νερό να φύγει ελεύθερο στην ατμόσφαιρα. Τέλος, υπάρχει και μανόμετρο το οποίο μας δείχνει την πίεση εντός του δοχείου.

B. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά την πλήρωση του δοχείου μέχρι συγκεκριμένου σημείου με το μείγμα και στη συνέχεια προσδιορισμό της συγκέντρωσης του CO₂ νερό με διαδοχικές τιτλοδοτήσεις συλλεγόμενων δειγμάτων.

Επιθυμητό είναι να μην υπάρχει κατά την έναρξη του πειράματος αέρας στο δοχείο διαχωρισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με ξέπλυμα του δοχείου ως εξής. Σταθεροποιείται η παροχή του CO₂ στην επιθυμητή τιμή και αφήνεται το αέριο να ρέει μόνο του για μικρό χρονικό διάστημα (3-5 λεπτά περίπου). Έτσι το CO₂ γεμίζει το δοχείο και συγχρόνως διώχνει τον βαρύτερό του αέρα, μην επιτρέποντας και την είσοδό του στο δοχείο.

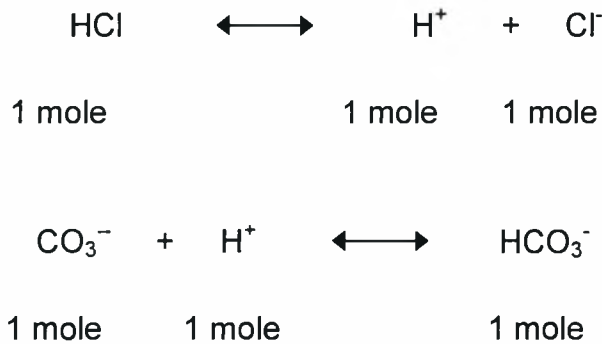
Στη συνέχεια θέτουμε σε λειτουργία την αντλία νερού, το ψηφιακό μανόμετρο και το θερμόμετρο. Το νερό συναντιέται με το αέριο στο ύψιλον που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια ρέουν μαζί στον αγωγό επαφής και καταλήγουν στο δοχείο διαχωρισμού. Το νερό με το διοξείδιο που απορροφήθηκε καταλήγουν στον πυθμένα του δοχείου, ενώ όσο CO₂ δεν απορροφήθηκε διαφεύγει ελεύθερο στην ατμόσφαιρα από την επάνω έξοδο του δοχείου. Πρέπει να σημειωθεί ότι για να αποτραπεί στις μικρές παροχές CO₂ είσοδος αέρα από την ατμόσφαιρα στο δοχείο, τοποθετούνταν στην επάνω έξοδο του τελευταίου κοχλίας χωρίς να τη φράζει ερμητικά κλειστή. Στη συνέχεια παρακολουθούμε την πλήρωση του δοχείου μέχρι ενός σημείου και καταγράφουμε την πτώση πίεσης και την θερμοκρασία του δείγματος καθ' όλη την διάρκεια της συγκεκριμένης διαδικασίας. Όταν φτάσει η στάθμη του δοχείου στο επιθυμητό σημείο γίνεται δειγματοληψία με σύριγγα από την ειδική τάπα που υπάρχει στον πυθμένα του δοχείου.

Τα δείγματα που συλλέγουμε είναι 4 ή 5 και ο όγκος του καθένα 5ml. Επειδή υπάρχει κίνδυνος εκρόφησης του CO₂ από το νερό στην ατμόσφαιρα, λόγω υποπίεσης στη σύριγγα, η τελευταία περιέχει διάλυμα NaOH 1N 1ml. Το NaOH είναι ισχυρή βάση και με το CO₂ αντιδρά και σχηματίζεται Na₂CO₃.

Για τον προσδιορισμό του CO₂ που έχει συγκρατηθεί στο δείγμα τιτλοδοτούμε το τελευταίο με φαινολοφθαλείνη και ερυθρό του μεθυλίου. Επειδή στο δείγμα υπάρχει περίσσεια NaOH, κατά την τιτλοδότηση το δείγμα χρωματίζεται κόκκινο. Στη συνέχεια εξουδετερώνουμε την περίσσεια του NaOH με διάλυμα HCl. Για εξοικονόμηση χρόνου χρησιμοποιούμε διαδοχικά διαλύματα 1N, 0,1N και 0,01N. Όταν το διάλυμα εξουδετερωθεί πλήρως, αποχρωματίζεται και γίνεται διαυγές. Στη συνέχεια τιτλοδοτούμε με ερυθρό του μεθυλίου το δείγμα και αυτό χρωματίζεται

κίτρινο. Τη στιγμή αυτή ζυγίζουμε το δείγμα σε ζυγαριά ακριβείας. Στη συνέχεια προχωρούμε σε δεύτερη εξουδετέρωση με διάλυμα HCl 0,01N και το διάλυμα χρωματίζεται κόκκινο. Τη στιγμή αυτή ξαναζυγίζουμε το δείγμα και από τη διαφορά τιμών προσδιορίζουμε την ποσότητα του HCl που απαιτήθηκε για να εξουδετερωθεί η ανθρακική ρίζα CO₃⁻.

Οι σχέσεις που περιγράφουν τη συγκεκριμένη εξουδετέρωση είναι οι παρακάτω:



Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι για κάθε mole CO₃⁻, άρα και για κάθε mole CO₂, απαιτείται 1 mole HCl.

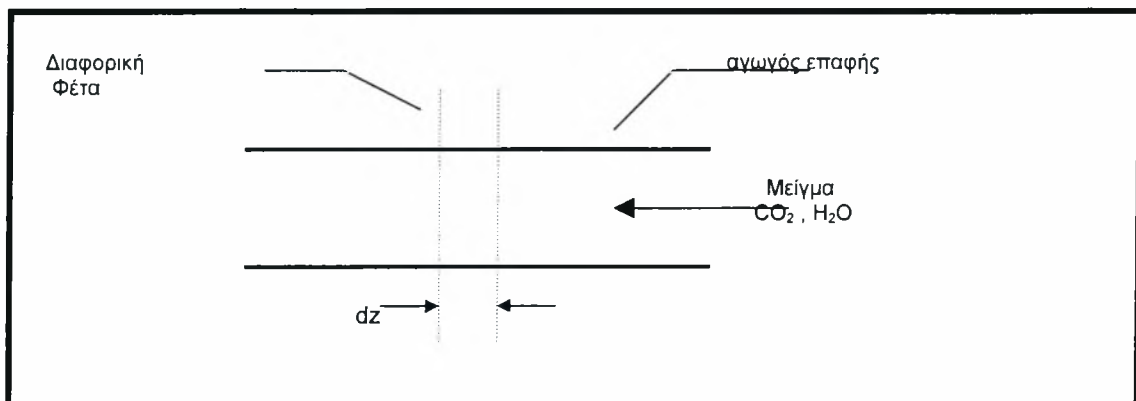
Κατά τον υπολογισμό λαμβάνουμε υπόψη ότι επειδή το HCl είναι πολύ αραιό, η πυκνότητά του είναι ίδια με αυτή του νερού και ίση με 1000 gr/m³. Αν κατά τη διαδικασία ενός πειράματος βρέθηκε ότι απαιτήθηκαν 15 ml HCl 0,01N, τότε το CO₂ που βρίσκεται στα 5 ml δείγματος είναι $15 \cdot 0,01 / 1000 = 0,00015$ moles ή 0,0066 gr. Άρα η συγκέντρωση του CO₂ είναι 1320 gr/m³.

4. Ανάλυση αποτελεσμάτων

A. Μεθοδολογία ανάλυσης μετρήσεων

Με την πειραματική διαδικασία που περιγράφηκε έχουμε σκοπό τον υπολογισμό της απορρόφησης που συντελείται σε ολόκληρη τη διάταξη επαφής, από την είσοδο του μείγματος στον αγωγό επαφής έως στην έξοδο από αυτόν. Όταν το μείγμα εξέρχεται από τον αγωγό σχηματίζεται πίδακας ο οποίος συντελεί και αυτός σε απορρόφηση του CO₂ από το νερό. Άρα αυτή η απορρόφηση που οφείλεται στον πίδακα πρέπει να υπολογιστεί και να αφαιρεθεί.

Στο παρακάτω σχήμα παριστάνεται η ροή των ρευστών σε μια διαφορική φέτα του αγωγού επαφής.



Σχήμα 4.1: διαφορική φέτα στον αγωγό επαφής

Αν θεωρηθεί ότι ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς μάζας είναι ο ίδιος σε όλο το μήκος του αγωγού, τότε ο ρυθμός μεταφοράς dN δίνεται από τη σχέση:

$$dN = Q_L * dC \quad (4.1)$$

όπου Q_L : η ογκομετρική παροχή νερού
και dC : η διαφορά των συγκεντρώσεων

Αν U_{LS} η φαινομενική ταχύτητα του νερού και A_p η επιφάνεια διατομής του αγωγού, η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$dN = A_p * U_{LS} * dC \quad (4.2)$$

Επίσης, ο ρυθμός μεταφοράς δίνεται από τη σχέση :

$$dN = k_p * a * A_p * dz * (C_e - C) \quad (4.3)$$

όπου k_p : ο ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας

a : η ειδική επιφάνεια εναλλαγής

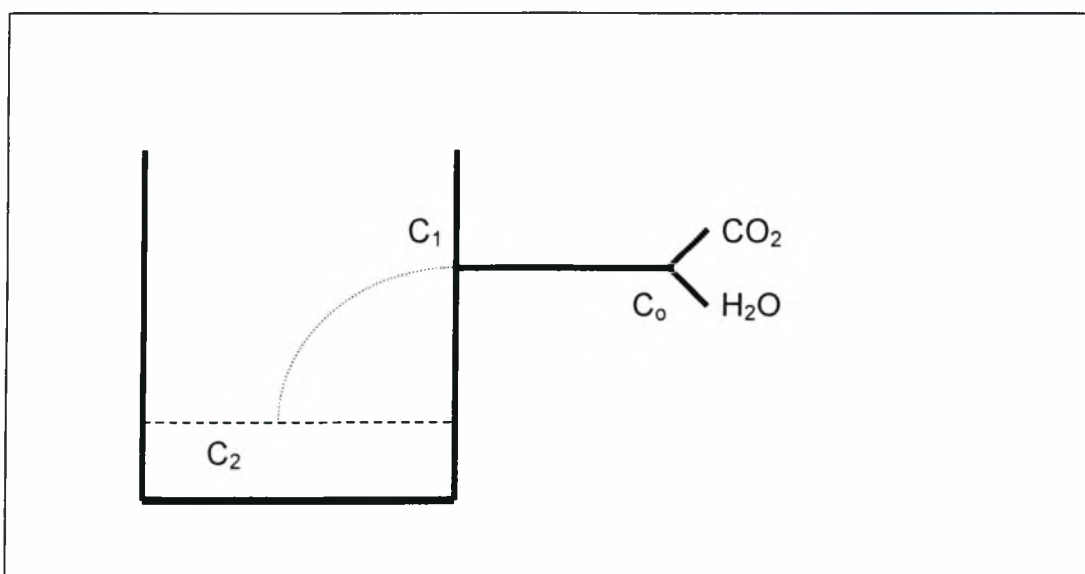
C_e : η συγκέντρωση κορεσμού του CO₂ στο νερό

και C : η συγκέντρωση του CO₂ στο νερό στη διαφορική φέτα dz

Αν το μήκος του αγωγού είναι L και η συγκέντρωση του CO₂ στην αρχή του αγωγού είναι C_0 και στο τέλος C_1 , τότε με εξίσωση και ολοκλήρωση των δύο τελευταίων σχέσεων προκύπτει ότι:

$$K_p * a = (U_{LS} / L) * \ln ((C_e - C_0) / (C_e - C_1)) \quad (4.4)$$

Όπως ειπώθηκε και πριν, πρέπει να υπολογιστεί η απορρόφηση που οφείλεται στον πίδακα ο οποίος σχηματίζεται με την είσοδο του μείγματος στο δοχείο διαχωρισμού. Αυτό γίνεται με την εξής διαδικασία. Αρχικά γεμίζουμε το δοχείο με CO₂. Στη συνέχεια μηδενίζουμε την παροχή CO₂ και θέτουμε σε λειτουργία την αντλία νερού. Αφού πάρουμε τις μετρήσεις με τη μηδενική παροχή αερίου υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης που οφείλεται στον πίδακα.



Αν C_2 η συγκέντρωση του CO₂ στο νερό στον πυθμένα του δοχείου, ο η μέση απορρόφηση N_v από τον πίδακα δίνεται από τη σχέση:

$$N_v = Q * (C_2 - C_1) \quad (4.5)$$

Αν ορισθεί η μέση συγκέντρωση του CO₂ στο νερό του πίδακα $(C_1 + C_2) / 2$ και $K_v * A$ ο μέσος ειδικός συντελεστής απορρόφησης, η μέση απορρόφηση από τον πίδακα δίνεται από τη σχέση:

$$N_v = (K_v * A) * (C_e - (C_1 + C_2) / 2) \quad (4.6)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$(K_v * A) = Q * (C_2 - C_1) / (C_e - (C_1 + C_2) / 2) \quad (4.7)$$

Επειδή κατά την εκτέλεση πειράματος με μηδενική παροχή CO₂ δεν υφίσταται απορρόφηση εντός του αγωγού επαφής, μπορούμε να θέσουμε στην τελευταία σχέση $C_1=0$, οπότε προκύπτει:

$$(K_v * A) = Q * C_2 / (C_e - C_2 / 2) \quad (4.8)$$

Από την τελευταία σχέση και με μετρημένες τις τιμές C_2 από τα πειράματα, υπολογίζεται ο μέσος ειδικός συντελεστής απορρόφησης στον πίδακα $K_v * A$. Από την προτελευταία σχέση, επιλύοντας ως προς C_1 έχουμε:

$$C_1 = (2 * Q * C_2 * + (K_v * A) * (C_2 - 2C_e)) / (2 * Q * - (K_v * A)) \quad (4.9)$$

Όπως γράφηκε και πριν γίνεται τροφοδοσία με απεσταγμένο και αποσκληρωμένο νερό το οποίο μετά από αναλύσεις βρέθηκε ότι περιέχει αμελητέα ποσότητα διαλυμένου CO₂. Άρα μπορούμε να αντικαταστήσουμε τη συγκέντρωση C_0 του CO₂ στο νερό με μηδέν. Τελικά προκύπτει ότι ο ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας είναι:

$$k_p * a = (U / L) * \ln (C_e / (C_e - C_1)) \quad (4.10)$$

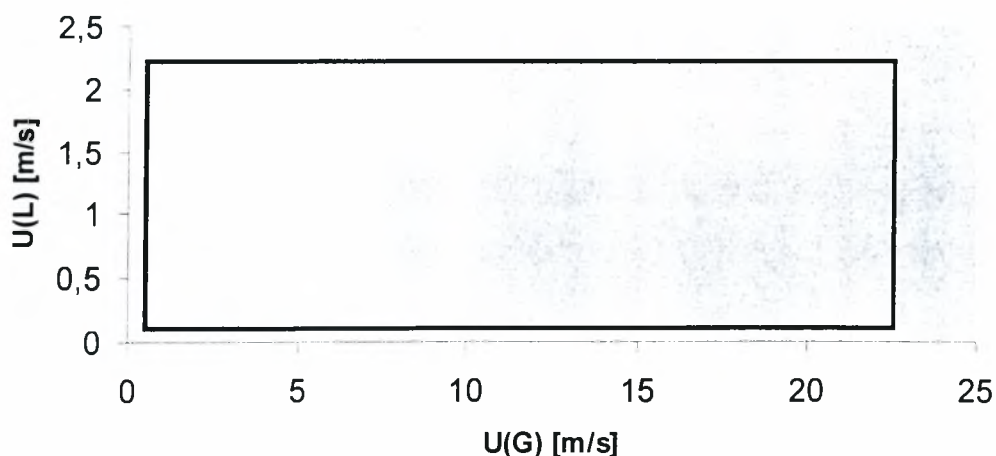
Με δεδομένο το C_2 από τις μετρήσεις και χρησιμοποιώντας τις τρεις τελευταίες σχέσεις, υπολογίζουμε τα C_1 , το λόγο C_1/C_e και τους συντελεστές $K_v * A$ και $k_p * a$.

B. Μελέτη φαινομενικών ταχυτήτων υγρού - αερίου

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης γίνεται με οπτικό τρόπο. Τιτλοδοτούμε τα δείγματα και ελέγχουμε οπτικά την εξουδετέρωση αυτών. Η μέθοδος αυτή ελλοχεύει τον κίνδυνο να μην ληφθούν σωστά αποτελέσματα. Για να επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε αγωγό διαμέτρου 4 mm και σε διάφορες συνθήκες ροής. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν συμφωνούσαν με αυτά που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο αγωγό και συνθήκες ροής τις ίδιες. Στη συνέχεια προχωρήσαμε σε πειραματικές μετρήσεις με αγωγό διαμέτρου 2mm. Επειδή ένας από τους στόχους της παρούσης εργασίας είναι η σύγκριση του ογκομετρικού συντελεστή απορρόφησης σε αγωγό διαμέτρου 2 mm με αντίστοιχο συντελεστή σε αγωγό 4 mm επιλέχθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες ροής οι οποίες αναφέρονται παρακάτω.

Η αντλία που ήταν προσαρμοσμένη στη διάταξη είχε τη δυνατότητα να λειτουργήσει με 2 έμβολα, 1/8" και 3/8". Η βαθμονόμησή της επισυνάπτεται στο παράρτημα. Οι παροχές που μπορεί να μας δώσει κυμαίνονται από 13,5 έως 1050 ml/min. Οι αντίστοιχες φαινομενικές ταχύτητες του νερού είναι 0,07 έως 5,5 m/s. Στην παρούσα εργασία τα πειράματα διεξήχθησαν με φαινομενικές ταχύτητες υγρού 0,14 , 0,5 , 1,1 και 2,22 m/s. Η επιλογή να γίνουν οι μετρήσεις στις συγκεκριμένες ταχύτητες υγρού βασίστηκε στην υπόθεση ότι σε αυτές τις τιμές εμφανίζονται όλες οι δυνατές περιοχές ροής.

Οι ταχύτητες αερίου κυμαίνονται από 0,506 έως 22,6 m/s. Στο παρακάτω σχήμα (4.2) παρουσιάζεται η περιοχή διερεύνησης της παρούσας εργασίας.



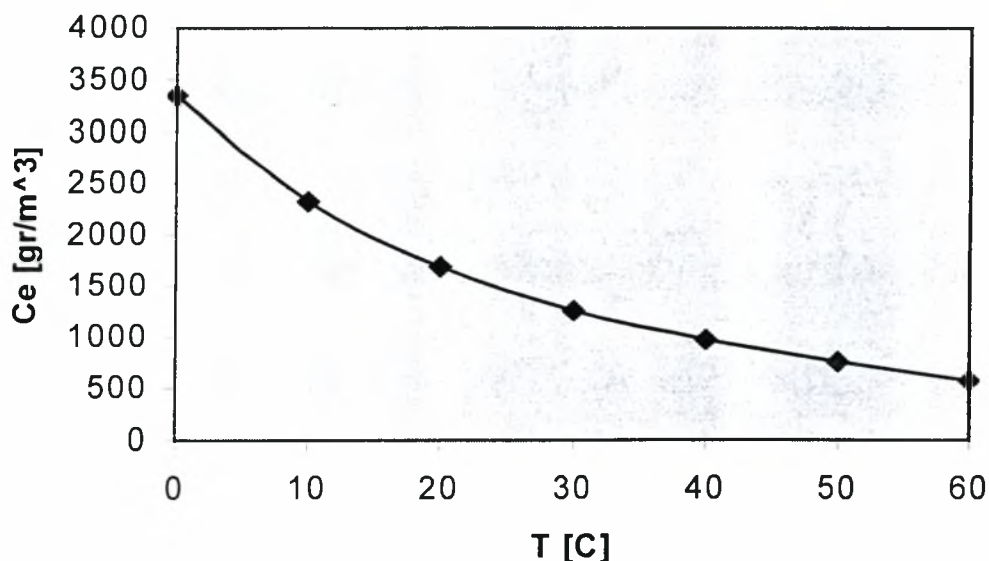
σχήμα 4.2 : περιοχή εργασίας

Από τα πρώτα πειράματα φάνηκε ότι στις ταχύτητες 22-25 m/s πλησιάζουμε στο σημείο κορεσμού. Δηλαδή, η συγκέντρωση του CO₂ στο νερό έφτανε στη μέγιστη δυνατή τιμή της. Η τελευταία εξαρτάται από τη θερμοκρασία νερού. Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, η συγκέντρωση κορεσμού μειώνεται. Στον παρακάτω πίνακα (4.1) παρουσιάζεται η συγκέντρωση κορεσμού σε κάθε θερμοκρασία.

θερμοκρασία T [°C]	συγκέντρωση Ce [gr/m ³]
0	3346
10	2318
20	1688
30	1257
40	973
50	761
60	576
100	0

πίνακας 4.1 :συγκέντρωση κορεσμού του CO₂ στο νερό (Perry&Chilton)

Επειδή η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις κυμαίνονταν από 22 έως 24 °C, για να υπολογίσουμε την ακριβή τιμή κορεσμού για κάθε θερμοκρασία κατασκευάζουμε την καμπύλη που ορίζουν τα σημεία του παραπάνω πίνακα και στη συνέχεια υπολογίζουμε την εξίσωσή της. Στο παρακάτω σχήμα (4.3) παριστάνεται γραφικά η καμπύλη θερμοκρασίας T και συγκέντρωσης κορεσμού Ce.



σχήμα 4.3 : συγκέντρωση κορεσμού σε κάθε θερμοκρασία

Η εξίσωση της συγκεκριμένης καμπύλης είναι πολυωνυμική 2^{ου} βαθμού

$$C_e = 0.9995T^2 - 92.85T + 3147 \quad (4.11)$$

με C_e : συγκέντρωση κορεσμού του CO₂ στο νερό [gr / m³]

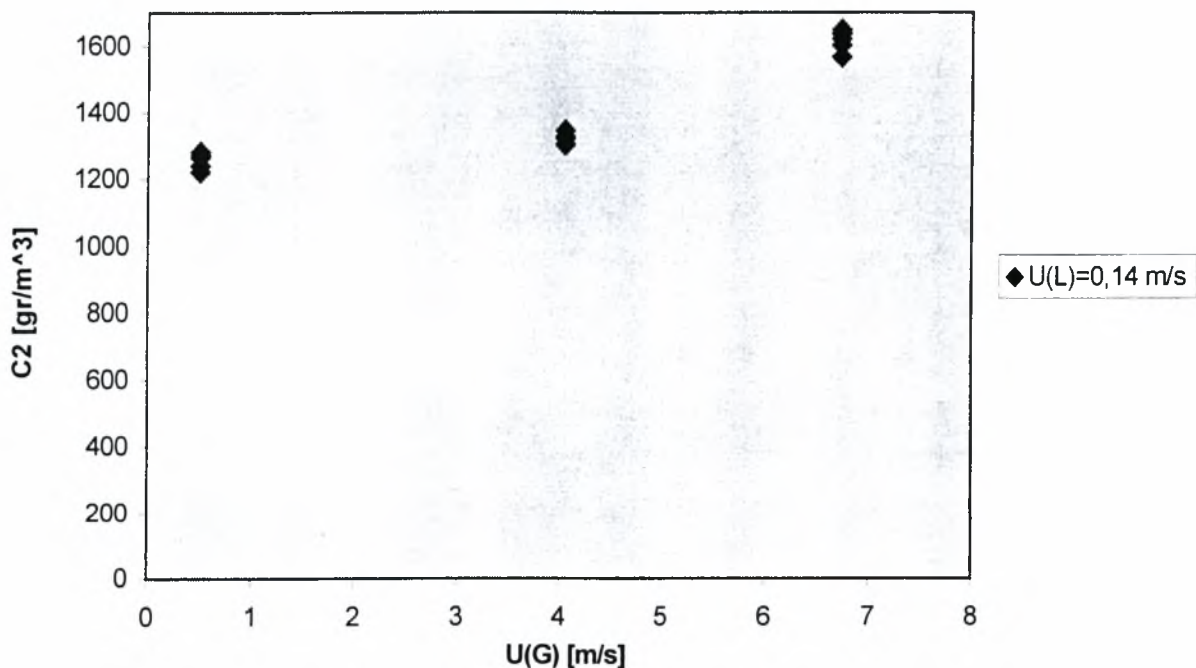
T : θερμοκρασία του νερού [°C]

Για να υπολογιστεί ο ογκομετρικός συντελεστής k^*a , έπρεπε η συγκέντρωση του CO₂ στο συλλεγόμενο δείγμα να είναι μικρότερη από τη συγκέντρωση κορεσμού. Για το λόγο αυτό οι περισσότερες μετρήσεις έγιναν βραδινές ώρες, όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν αισθητά χαμηλότερη. Όλα τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται σε λογιστικά φύλλα και απεικονίζονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη σε διαγράμματα διασποράς. Ειδικότερα παριστάνεται γραφικά η συγκέντρωση εξόδου του CO₂, ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς μάζας, ο ειδικός συντελεστής μεταφοράς μάζας που οφείλεται στον σχηματιζόμενο πίδακα, ο λόγος των συγκεντρώσεων εξόδου προς τη συγκέντρωση κορεσμού καθώς και συγκριτικά διαγράμματα του ογκομετρικού συντελεστή με αντίστοιχους της βιβλιογραφίας. Όλα τα παραπάνω μεγέθη μεταβάλλονται σε σχέση με τις φαινομενικές ταχύτητες υγρού και αερίου.

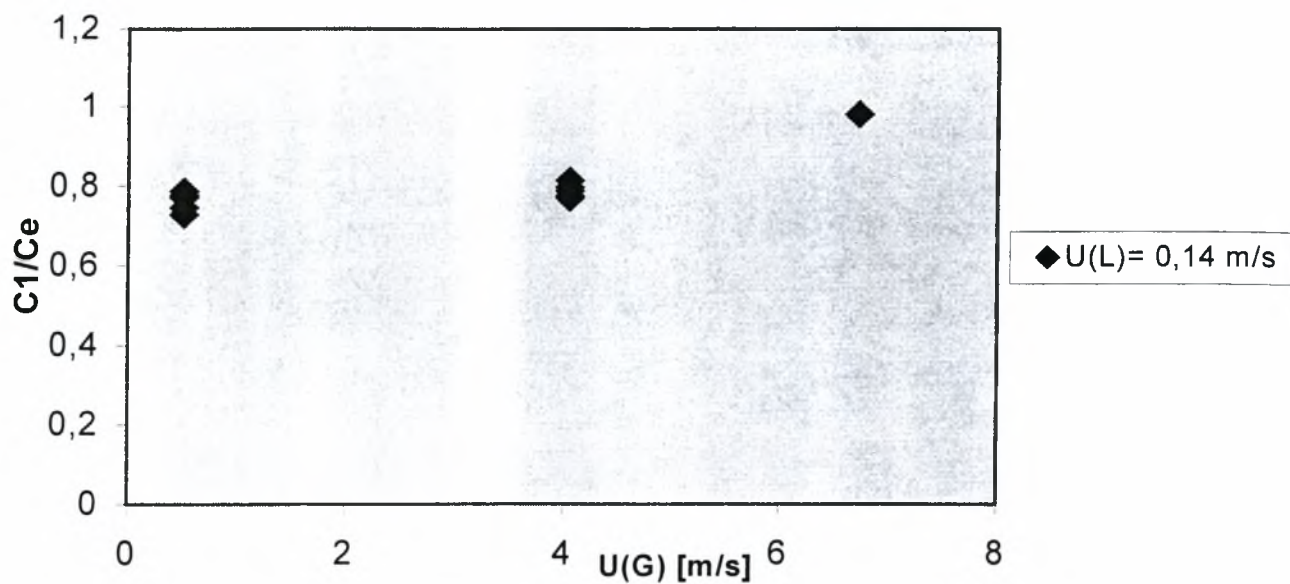
B1. Επίδραση της φαινομενικής ταχύτητας του CO₂ στον ογκομετρικό συντελεστή μεταφοράς μάζας

B1α. Ομάδα μετρήσεων με φαινομενική ταχύτητα υγρού $U(L) = 0,14$ m/s

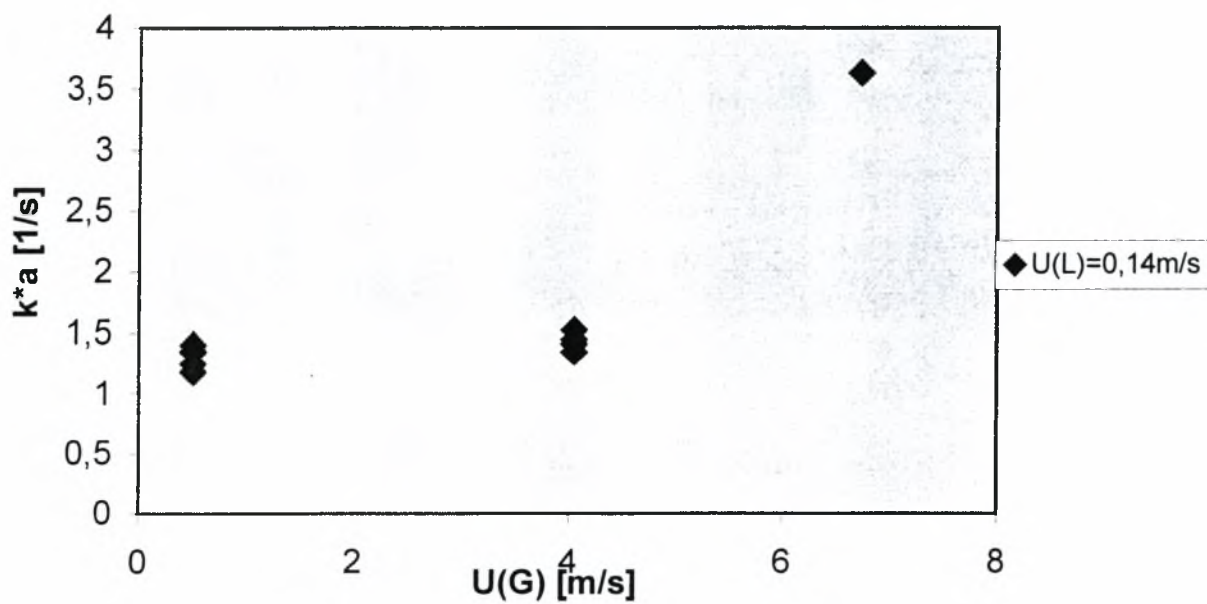
Η πρώτη ομάδα μετρήσεων έγινε με φαινομενική ταχύτητα υγρού ίση με $U(L)=0,14$ m/s. η αντίστοιχη παροχή νερού είναι $0,00162$ m³ ή 27 ml/min. Ο απαιτούμενος χρόνος πλήρωσης του δοχείου μέχρι τη στάθμη ασφαλείας είναι 5,5 ώρες περίπου. Η θερμοκρασία που επικρατούσε την ώρα διεξαγωγής του πειράματος ήταν 22 έως 24 °C. Η αντίστοιχη θερμοκρασία κορεσμού ήταν 1491,72 έως 1585,88 gr/m³. Η ταχύτητα του αερίου κυμάνθηκε από 0,506 έως 6,73 m/s. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η μεταβολή στη συγκέντρωση του αερίου στον πυθμένα, ο λόγος της συγκέντρωσης εξόδου προς τη συγκέντρωση κορεσμού και ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς μάζας σε σχέση με τη μεταβολή της ταχύτητας του αερίου. (σχήματα 4.4, 4.5, 4.6)



σχήμα 4.4 :συγκέντρωση CO₂ στον πυθμένα του δοχείου C2 σε συνάρτηση με την ταχύτητα U(G) του αερίου για ταχύτητα νερού U(L)=0,14 m/s



σχήμα 4.5 : λόγος της συγκέντρωσης εξόδου C1 προς τη συγκέντρωση κορεσμού C2 σε συνάρτηση με την ταχύτητα αερίου U(G) για ταχύτητα νερού U(L)= 0,14 m/s



σχήμα 4.6 : μεταβολή του ογκομετρικού συντελεστή k^*a σε συνάρτηση με την ταχύτητα αερίου U(G) για ταχύτητα νερού U(L)= 0,14 m/s

Οι συγκεντρώσεις εξόδου κυμαίνονται από 1224,38 έως 1546,88 gr/m³, οπότε και φτάνουμε στο σημείο κορεσμού. Επίσης παρατηρούμε ότι το ποσοστό της απορρόφησης είναι 70-78% περίπου για ταχύτητα αερίου 0,506 m/s. Στη συνέχεια το ποσοστό αυξάνεται σε 77-80% όταν αυξήσουμε την ταχύτητα αερίου στα 4,05 m/s. στη συνέχεια, πηγαίνοντας σε ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες αερίου το ποσοστό αυξάνει και φτάνει το 98% για ταχύτητα U(G)=6,73 m/s όπου φτάνουμε και στο σημείο κορεσμού.

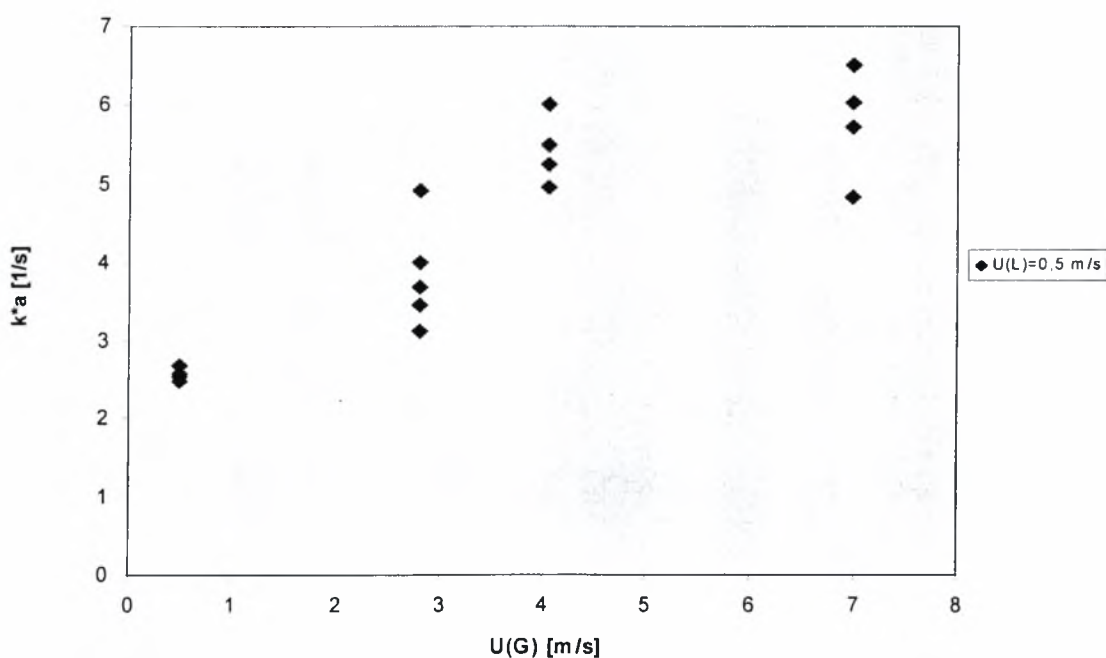
Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας συμπεριφέρεται αντίστοιχα. Για ταχύτητα αερίου ίση με 0,506 m/s κυμαίνεται από 1,17 έως 1,39 1/s και στη συνέχεια φτάνει στα επίπεδα του 1,52 1/s , όταν η ταχύτητα του αερίου γίνει 4,05 m/s. Στο σημείο κορεσμού ο συντελεστής k*a λαμβάνει την μέγιστη τιμή του ίση με 3,62 1/s.

Λόγω της ανυπαρξίας χάρτη ροής για αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 2mm, υποθέτουμε όπως ειπώθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ότι η περιοχές ροής θα είναι αυτές που απεικονίζονται στους χάρτες ροής για αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 4mm. Ειδικότερα, η ροή θα είναι διαλείπουσα, είτε ήπια (slug) κατά Barnea είτε βίαιη (slug) κατά Damianides για ταχύτητα αερίου ίση με 0,506 m/s. Στη συνέχεια για ταχύτητα αερίου 4,05 m/s η ροή παραμένει slug (Damianides) ή γίνεται pseudo-slug (Barnea). Η τελευταία είναι όπως η δακτυλιοειδής (annular) αλλά κινούνται εντός του δακτυλίου και υγρές μάζες. Για το λόγο αυτό ο k*a παραμένει στα ίδια περίπου επίπεδα. Τέλος, για ταχύτητα αερίου 6,73 m/s, έχουμε μετάπτωση μάλλον της περιοχής ροής σε δακτυλιοειδή (annular) και ο ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας αυξάνει διότι αυξάνει και η επιφάνεια εναλλαγής.

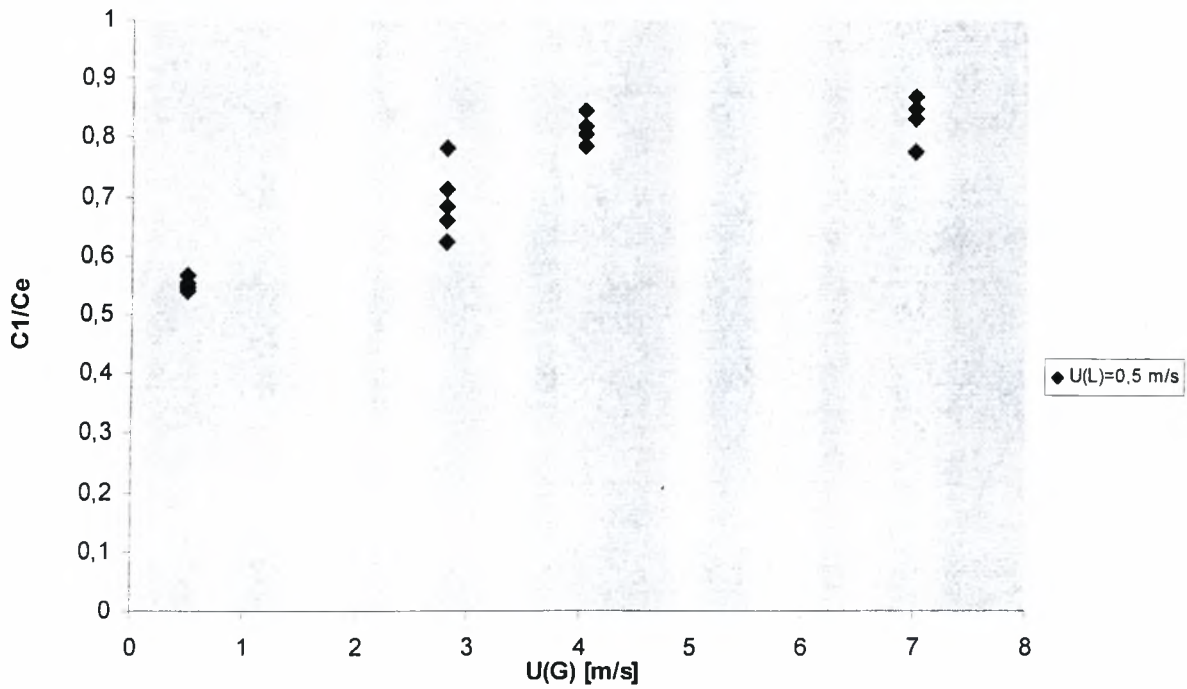
B1β.Ομάδα μετρήσεων με φαινομενική ταχύτητα υγρού $U(L) = 0,5 \text{ m/s}$

Η δεύτερη ομάδα μετρήσεων έγινε με νερό φαινομενικής ταχύτητας $U(L) = 0,5 \text{ m/s}$. Η αντίστοιχη παροχή της αντλίας είναι $0,00567 \text{ m}^3/\text{h}$ ή $94,5 \text{ ml/min}$. Η 2η ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με νερό φαινομενικής ταχύτητας $U(L) = 0,5 \text{ m/s}$. Η αντίστοιχη παροχή της αντλίας είναι $0,00567 \text{ m}^3/\text{h}$ ή $94,5 \text{ ml/min}$. Ο απαιτούμενος χρόνος πλήρωσης του δοχείου είναι περίπου 1,5 ώρες. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασιακές συνθήκες των $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Η συγκέντρωση κορεσμού που αντιστοιχεί σε αυτήν την θερμοκρασία είναι 1537 gr/m^3 .

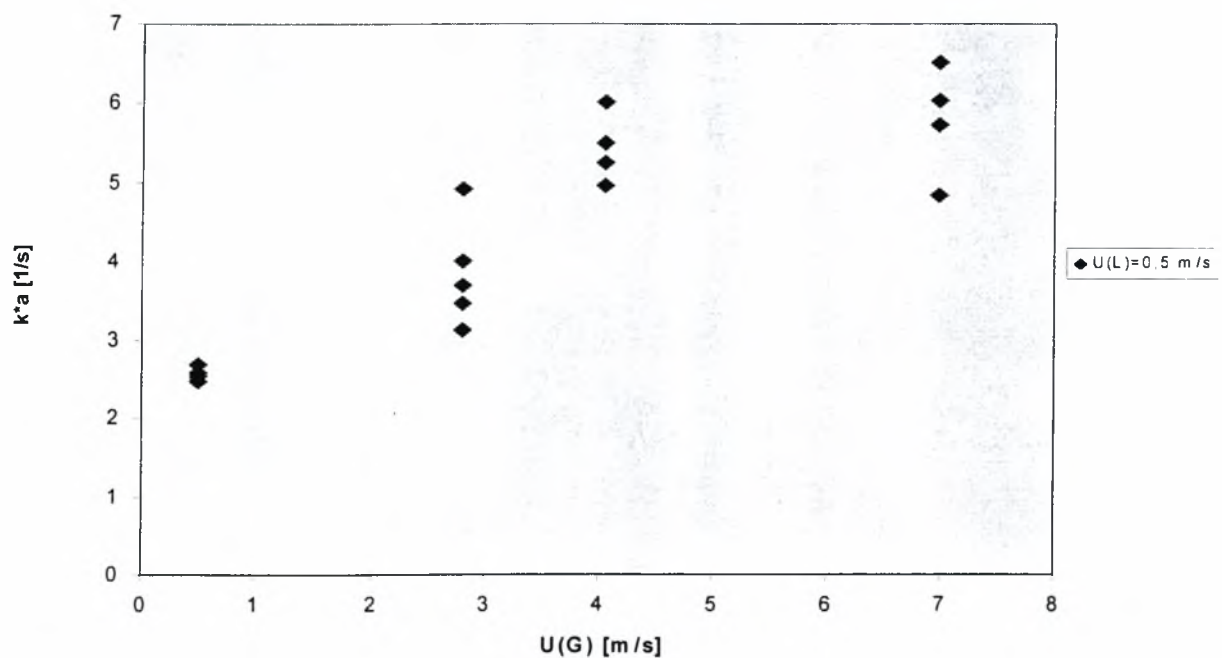
Η ταχύτητα του αερίου πήρε τιμές από $0,506$ έως $6,99 \text{ m/s}$. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παριστάνονται γραφικά οι μεταβολές της συγκέντρωσης CO₂ στον πυθμένα του δοχείου, του λόγου της συγκέντρωσης εξόδου προς η συγκέντρωση κορεσμού και ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς μάζας, πάντα σε συνάρτηση με τη μεταβολή της ταχύτητας για τη συγκεκριμένη ταχύτητα νερού (σχήματα 4.7, 4.8, 4.9).



σχήμα 4.7 :συγκέντρωση CO₂ στον πυθμένα του δοχείου C2 σε συνάρτηση με την ταχύτητα του αερίου U(G) για ταχύτητα υγρού $0,5 \text{ m/s}$



σχήμα 4.8 : Λόγος της συγκέντρωσης εξόδου C1 προς τη συγκέντρωση κορεσμού Ce συναρτήσει της ταχύτητας του αερίου U(G)



σχήμα 4.9 : ογκομετρικός συντελεστής k*a σε σχέση με την ταχύτητα αερίου U(G) για ταχύτητα υγρού U(L)=0,5 m/s

Όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα, η συγκέντρωση του CO₂ για τη συγκεκριμένη ομάδα μετρήσεων κυμαίνεται από 1132,472 έως 1421,2gr/m³. Επίσης, παρατηρείται ότι το ποσοστό απορρόφησης είναι 53-56% για

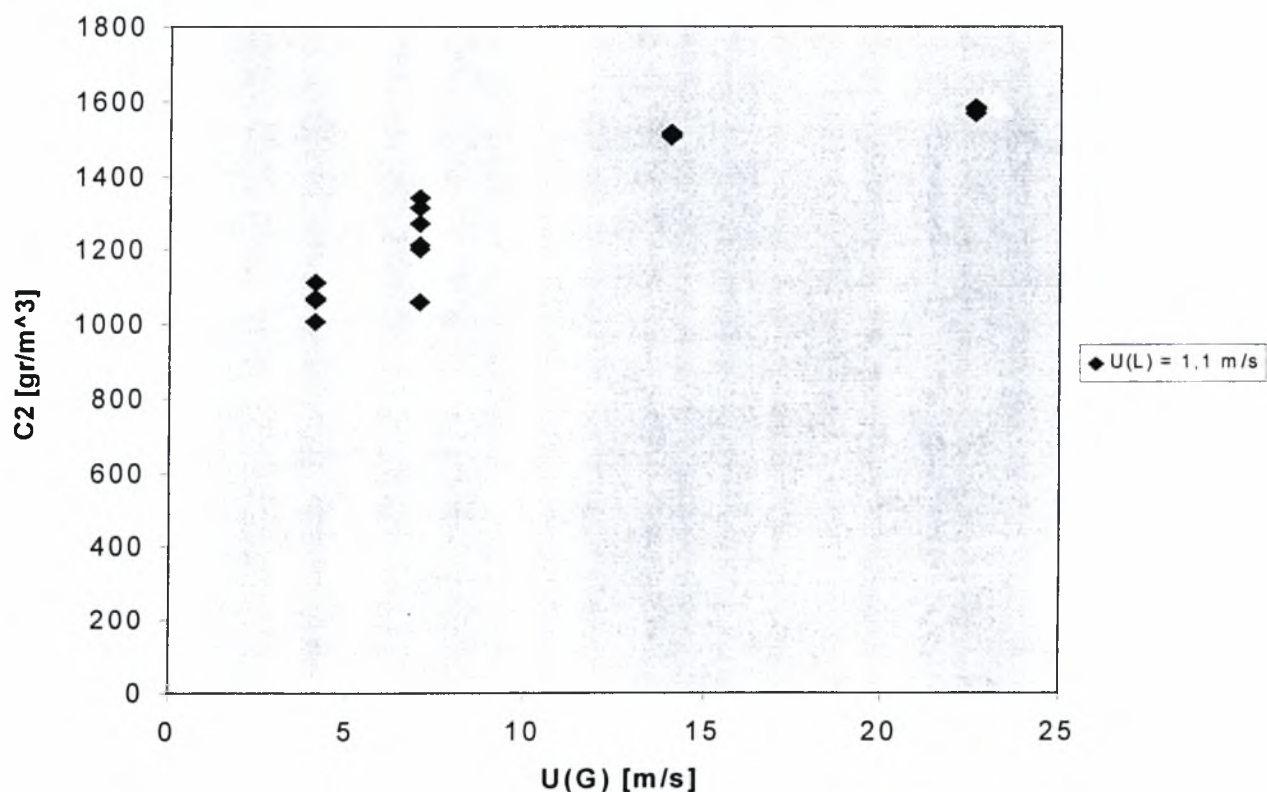
ταχύτητα αερίου ίση με 0,506m/s. στη συνέχεια ,το ποσοστό αυτό αυξάνεται όταν η ταχύτητα αερίου γίνει 2,8 m/s και γίνεται ίσο με 62-78%. Περίπου σε αυτά τα επίπεδα, ελαφρώς αυξημένο (78-84%) είναι και για $U(G)= 4,05$ m/s. για ταχύτητες αερίου κοντά στα 7m/s, το ποσοστό απορρόφησης παραμένει στα ίδια επίπεδα (77-86,7%)

Ο ογκομετρικός συντελεστής παρουσιάζει και αυτός τις ανάλογες διακυμάνσεις. Για ταχύτητες CO₂ κοντά στο 0,5 m/s, ο k^*a βρίσκεται ανάμεσα στα 2,48 και 2,69 1/s. στη συνέχεια, όσο αυξάνει η $U(G)$ και γίνεται 2,8 m/s, ο συντελεστής παίρνει τιμές από 3,12 έως 4,9 1/s. Επίσης, καθόσον αυξάνεται η ταχύτητα $U(G)$ και φτάνει τα 4 περίπου m/s, ο συντελεστής μεταβάλλεται από 4,94 έως 5,99 1/s. Τέλος, το μέγιστο συντελεστή απορρόφησης τον λαμβάνουμε για τη συγκεκριμένη ομάδα μετρήσεων σε ταχύτητα αερίου 6,99 m/s. Στην ταχύτητα αυτή ο συντελεστής παίρνει τιμές από 4,81 έως 6,49 1/s.

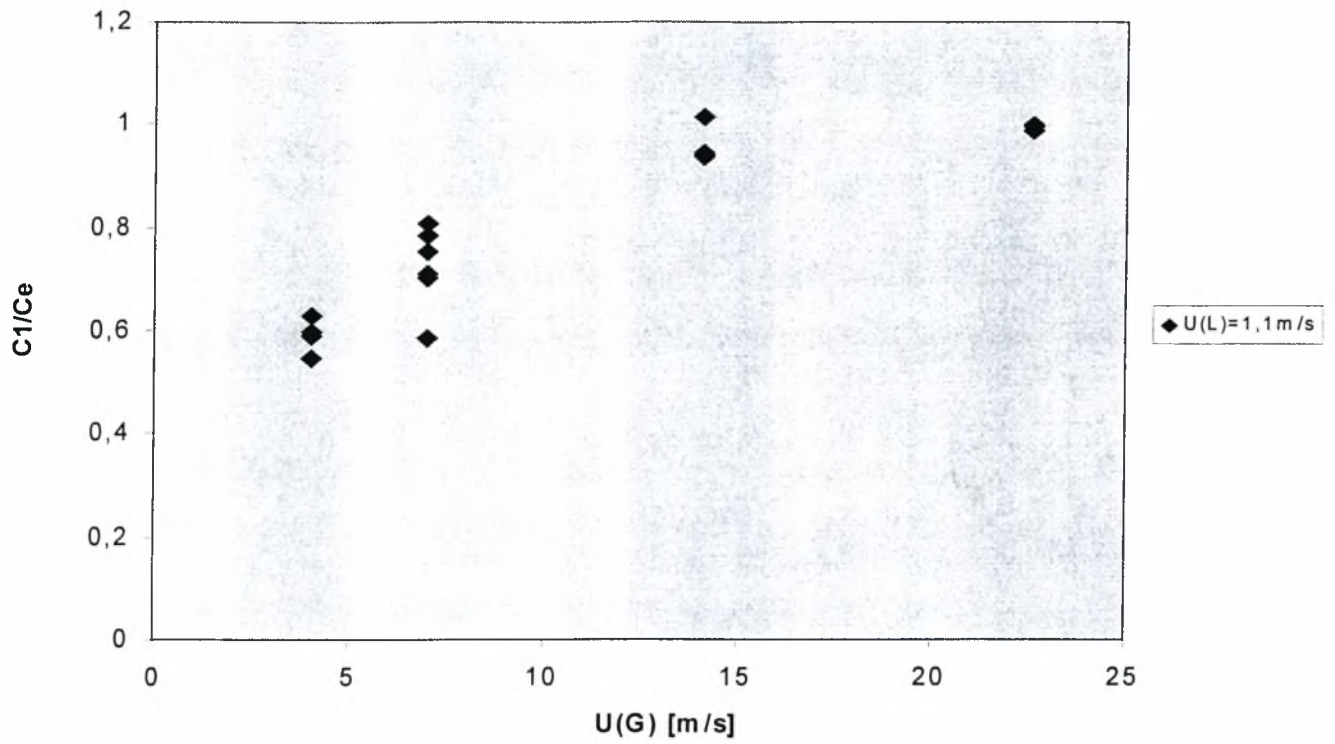
Όσον αφορά τις περιοχές ροής, θα προσπαθήσουμε να τις προσεγγίσουμε με μεγάλη επιφύλαξη. Παρατηρούμε ότι οι περιοχές ροής είναι παρόμοιες με αυτές της προηγούμενης ομάδας μετρήσεων. Αν ήταν διαθέσιμος κάποιος χάρτης ροής θα μπορούσαμε να συσχετίσουμε την περιοχή ροής και τον ογκομετρικό συντελεστή μεταφοράς μάζας k^*a και θα υπήρχε η δυνατότητα να βλέπαμε τα όρια μετάπτωσης από τη μια περιοχή στην άλλη.

B1γ. Ομάδα μετρήσεων με φαινομενική ταχύτητα υγρού $U(L) = 1,1 \text{ m/s}$

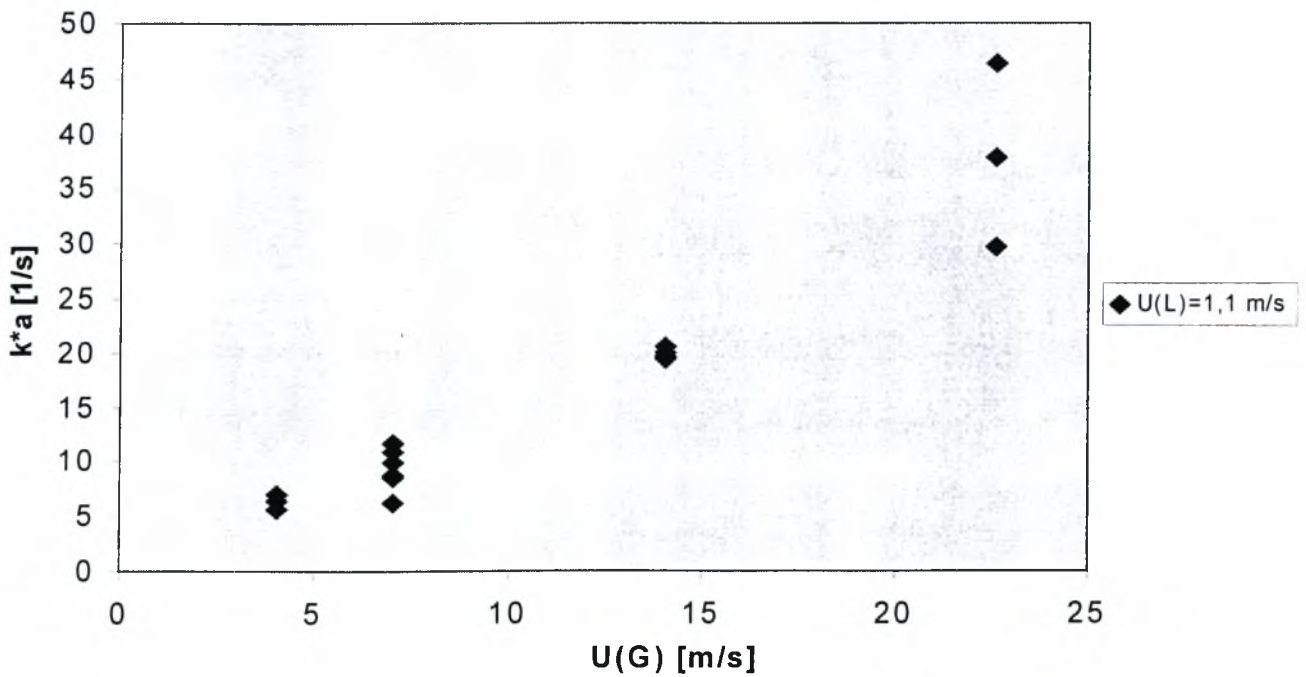
Η τρίτη ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με φαινομενική ταχύτητα νερού $U(L) = 1,1 \text{ m/s}$. Η παροχή της αντλίας που εξασφαλίζει τη συγκεκριμένη ταχύτητα είναι $0,0126 \text{ m}^3/\text{h}$ ή 210 ml/min . ο απαιτούμενος χρόνος πλήρωσης του δοχείου είναι περίπου 25 min . Η θερμοκρασία του μείγματος κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Η συγκέντρωση κορεσμού του CO₂ για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι $1585,88 \text{ gr/m}^3$. Η ταχύτητα του αερίου $U(G)$ κυμαίνεται από $4,05$ έως $22,6 \text{ m/s}$. Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται οι διακυμάνσεις της συγκέντρωσης στον πυθμένα, του λόγου συγκέντρωσης εξόδου προς συγκέντρωση κορεσμού και του ογκομετρικού συντελεστή μεταφοράς μάζας (σχήματα 4.10, 4.11, 4.12).



σχήμα 4.10 :συγκέντρωση CO₂ στον πυθμένα του δοχείου C2 σε συνάρτηση με την ταχύτητα του αερίου U(G) για ταχύτητα υγρού U(L)=1,1 m/s



σχήμα 4.11 : λόγος της συγκέντρωσης εξόδου $C1$ προς τη συγκέντρωση κορεσμού Ce συναρτήσει της ταχύτητας του αερίου $U(G)$ για ταχύτητα υγρού $U(L)=1,1$ m/s



σχήμα 4.12 : ογκομετρικός συντελεστής k^*a σε σχέση με την ταχύτητα αερίου $U(G)$ για ταχύτητα υγρού $U(L)=0,5$ m/s

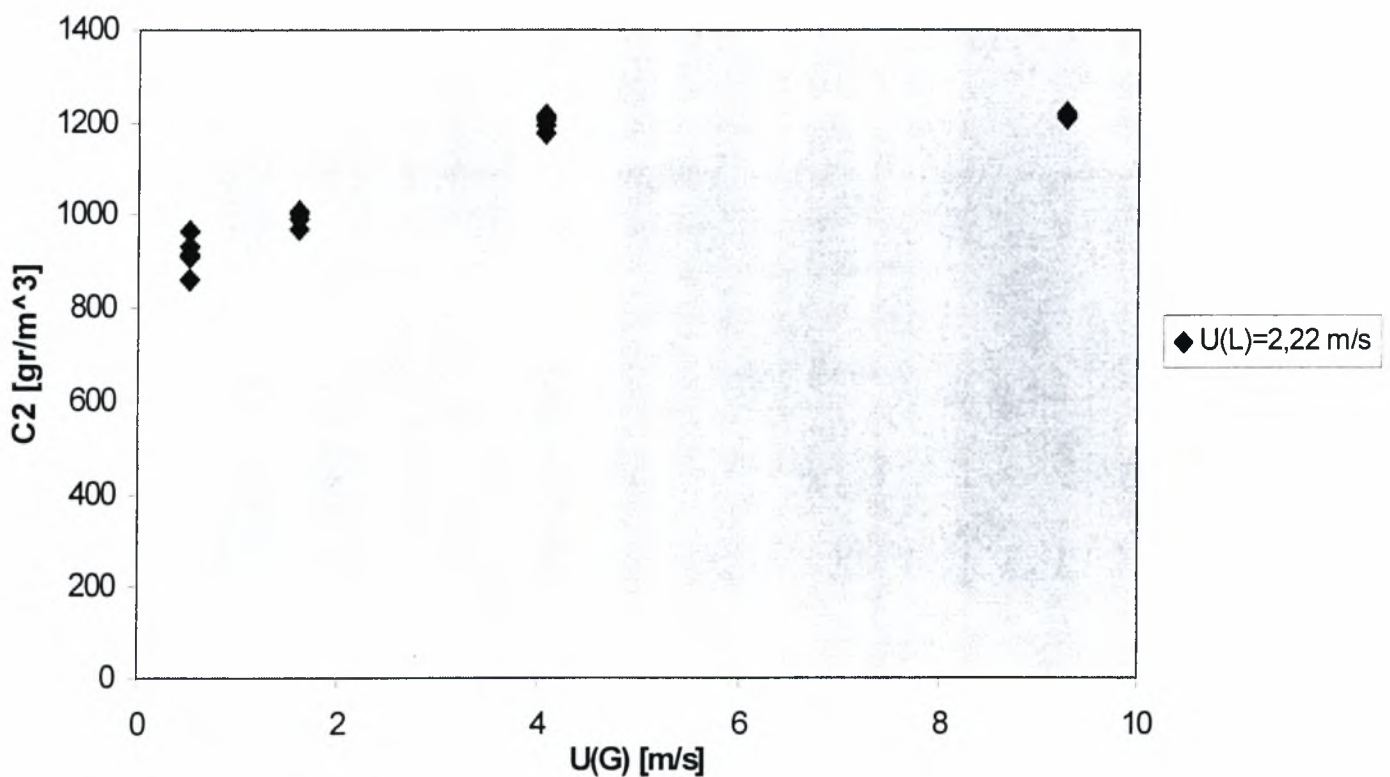
Η συγκέντρωση του CO₂ στον πυθμένα του δοχείου μεταβάλλεται από 1005 gr/m³ σε ταχύτητα αερίου U(G)=4,05 m/s και παίρνει τη μέγιστη τιμή 1584 gr/m³ φτάνοντας στον κορεσμό, σε ταχύτητα αερίου U(G)=22,6 m/s. Το ποσοστό απορρόφησης είναι για ταχύτητα αερίου 4,05 m/s 54-62%. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες (6,99 m/s), το ποσοστό κινείται στα πλαίσια του 58-80%. Αν διπλασιάσουμε την ταχύτητα, δηλαδή U(G)= 14,07 m/s , το ποσοστό αυξάνεται και γίνεται 93-94%. Τέλος, το μέγιστο ποσοστό απορρόφησης (98-99%) λαμβάνεται για ταχύτητα αερίου 22,6 m/s, όπου είναι και το σημείο κορεσμού.

Όσον αφορά τον ογκομετρικό συντελεστή απορρόφησης, γίνεται ίσος με 5,58 έως 7,02 1/s για ταχύτητα αερίου 4,05 m/s. Για ταχύτητα αερίου 6,99 m/s, ο k*a αυξάνεται έως την τιμή 11,69 1/s. Στη συνέχεια, αυξάνοντας την ταχύτητα του αερίου U(G) σε 14,07 m/s, ο συντελεστής κυμαίνεται από 19,33 έως 20,46 1/s. Η μέγιστη τιμή του k*a λαμβάνεται για ταχύτητα αερίου U(G)=22,6 m/s και είναι ίση με 46,27 1/s.

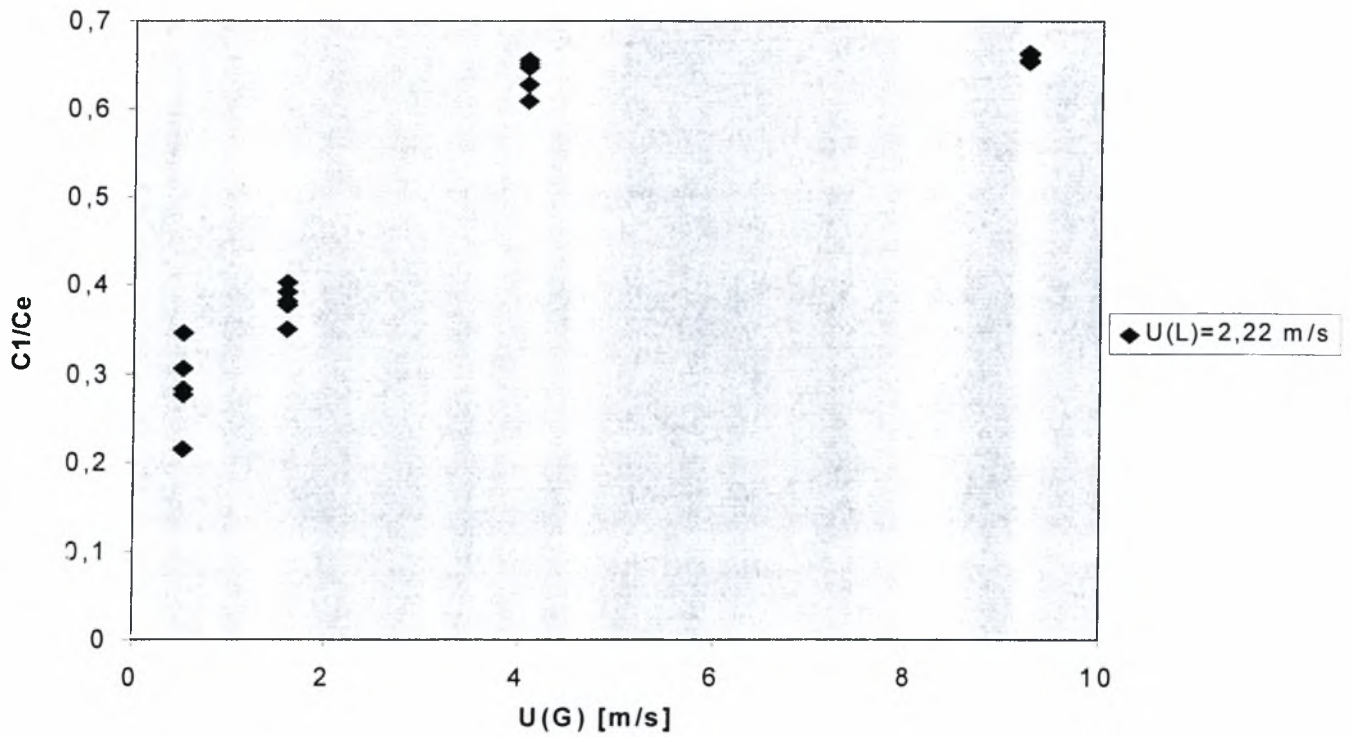
Όσον αφορά τις περιοχές ροής, για τη συγκεκριμένη ταχύτητα νερού είναι πολύ δύσκολο να τις προσεγγίσουμε. Και αυτό διότι αν δούμε τους χάρτες ροής για αγωγούς 4mm, η ταχύτητα υγρού U(G)=1,1 m/s είναι όριο μετάπτωσης από διαλείπουσα ροή σε ροή με φυσαλίδες. Άρα είναι περισσότερο παρακινδυνευμένο από οποιαδήποτε άλλη φορά να συσχετιστούν οι περιοχές ροής με τα εξεταζόμενα μεγέθη.

B1δ. Ομάδα μετρήσεων με φαινομενική ταχύτητα υγρού $U(L) = 2,22 \text{ m/s}$

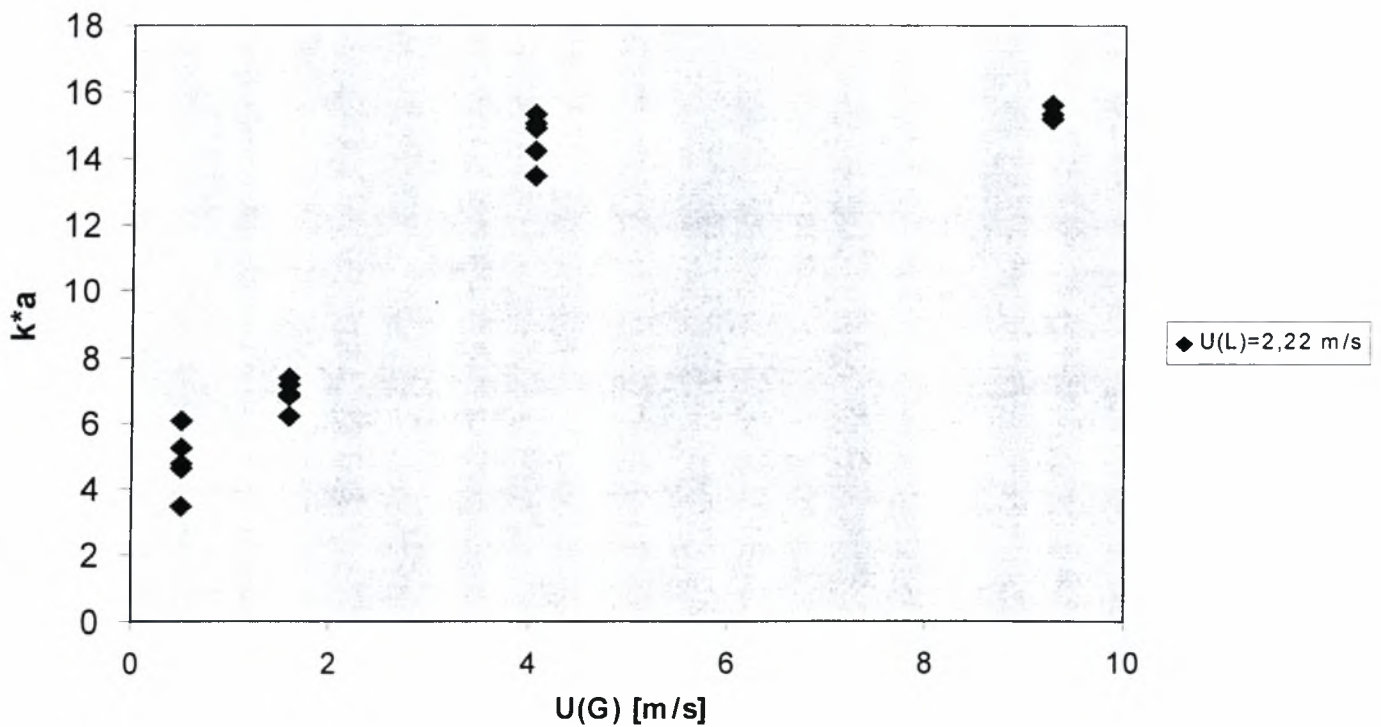
Η τέταρτη ομάδα μετρήσεων έγινε με παροχή νερού $0,0252 \text{ m}^3/\text{h}$ ή $420 \text{ ml}/\text{min}$, ώστε η φαινομενική ταχύτητα του υγρού να είναι $2,22 \text{ m/s}$. ο χρόνος που απαιτήθηκε για την πλήρωση του δοχείου ήταν περίπου 20 min . Η θερμοκρασία του μείγματος ήταν περίπου $24 \text{ }^\circ\text{C}$ κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Η αντίστοιχη συγκέντρωση κορεσμού C_e είναι $1431,72 \text{ gr}/\text{m}^3$. Το CO₂ εισήλθε στον αγωγό επαφής με ταχύτητες $0,506$ έως $9,26 \text{ m/s}$. Τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τις μεταβολές της συγκέντρωσης στον πυθμένα, του λόγου της συγκέντρωσης εξόδου προς τη συγκέντρωση κορεσμού και του ογκομετρικού συντελεστή, όσο η ταχύτητα του αερίου μεταβάλλεται, είναι τα παρακάτω (σχήματα 4.13, 4.14, 4.15).



σχήμα 4.13 : συγκέντρωση CO₂ στον πυθμένα του δοχείου C₂ σε συνάρτηση με την ταχύτητα του αερίου U(G) για ταχύτητα υγρού U(L)=2,22 m/s



σχήμα 4.14 : Λόγος της συγκέντρωσης εξόδου $C1$ προς τη συγκέντρωση κορεσμού Ce συναρτήσει της ταχύτητας του αερίου $U(G)$ για ταχύτητα υγρού $U(L)=2,22$ m/s



σχήμα 4.15 : ογκομετρικός συντελεστής k^*a σε σχέση με την ταχύτητα αερίου $U(G)$ για ταχύτητα υγρού $U(L)=2,22$ m/s

Στον πυθμένα, η συγκέντρωση του CO₂ στο νερό κυμάνθηκε από 858 έως 1220,56 gr/m³. Το ποσοστό απορρόφησης ήταν στην αρχή πολύ χαμηλό. Μόλις 21 έως 34% για ταχύτητα U(G) = 0,506 m/sec. Στη συνέχεια, με τριπλασιασμό περίπου της ταχύτητας του αερίου, το ποσοστό ήταν ανάμεσα στο 35 και το 40% (U(G)= 1.1 m/s). Έπειτα, αυξάνουμε και άλλο την ταχύτητα αερίου στα 4,05 m/s και παρατηρούμε το ποσοστό να αυξάνεται ανάμεσα στις τιμές 60-65%. Τέλος, με φαινομενική ταχύτητα αερίου U(G)= 9,26 m/s, το ποσοστό απορρόφησης λαμβάνει την τιμή 66% περίπου.

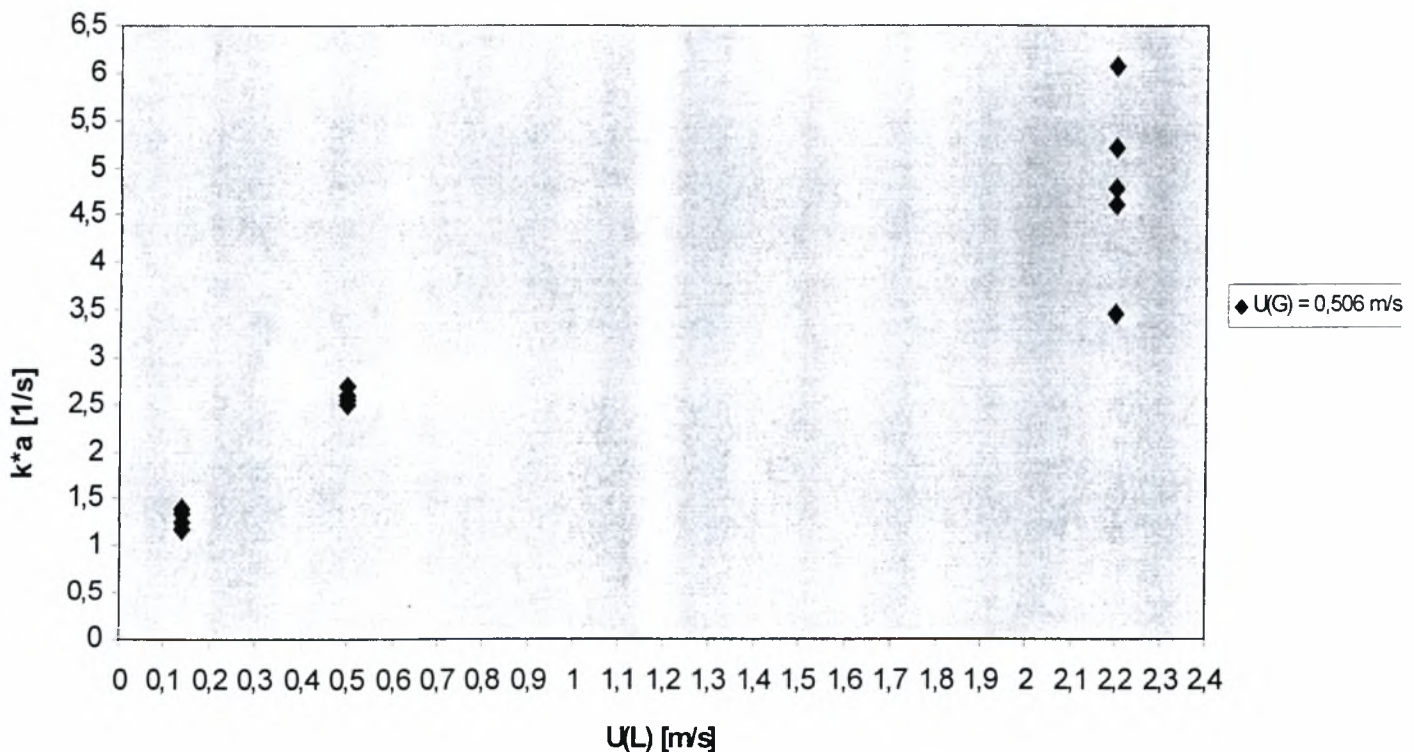
Η συμπεριφορά του ολικού συντελεστή μεταφοράς μάζας k*a είναι ανάλογη. Λαμβάνει τιμές 3,4 έως 6 1/s με ταχύτητα αερίου 0,506 m/s. Στη συνέχεια, για ταχύτητα 1,6 m/s ο k*a φτάνει τα 7,3 1/s, ενώ για ταχύτητες 4,05 m/s η τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή είναι ανάμεσα στα 13,4 και 15,25 1/s. Τέλος, η συγκεκριμένη ομάδα μετρήσεων καταλήγει με ταχύτητα αερίου 9,26 m/s όπου ο k*a παίρνει τη μέγιστη τιμή ίση με 15,6 1/s.

Όσον αφορά την περιοχή ροής, με βάση τις παραδοχές και υποθέσεις που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες ενότητες, πιστεύεται με επιφύλαξη ότι η ροή είναι με φυσαλίδες (bubble) για όλο το φάσμα των ταχυτήτων του αερίου.

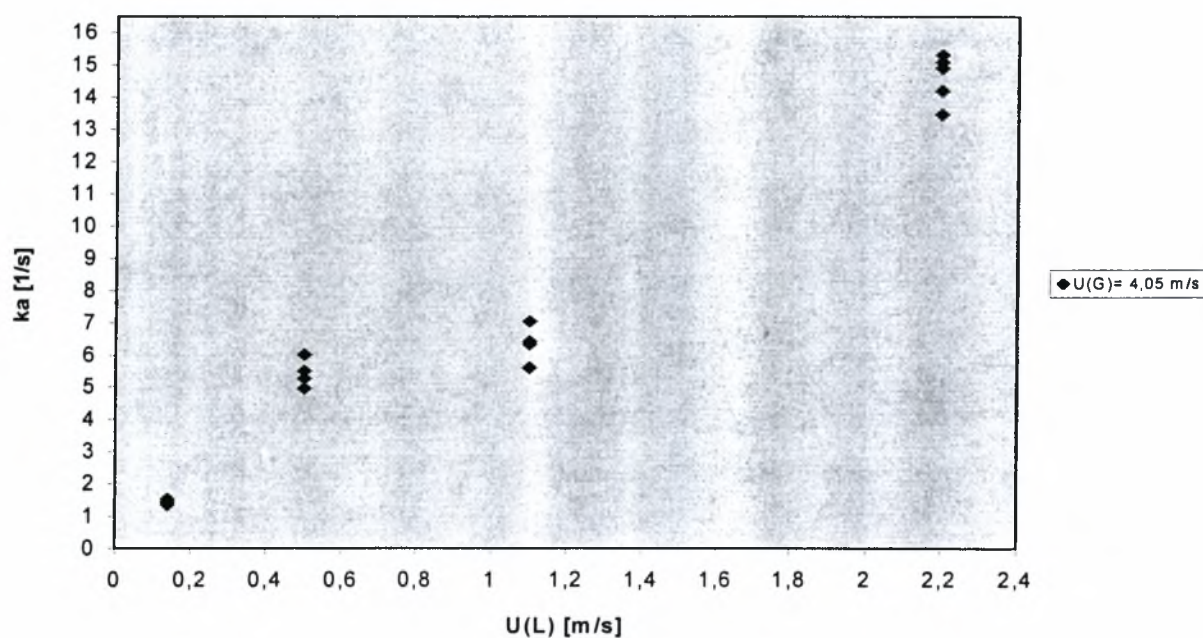
Β2.Επίδραση της φαινομενικής ταχύτητας του υγρού στον ογκομετρικό συντελεστή

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε κατά πόσο επηρεάζει η φαινομενική ταχύτητα του νερού τον ογκομετρικό συντελεστή k^*a . Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να απεικονίσουμε τη μεταβολή του k^*a σε διάφορες φαινομενικές ταχύτητες νερού, όταν η φαινομενική ταχύτητα του αερίου παραμένει σταθερή.

Στα σχήματα 4.16 και 4.17 βλέπουμε πώς μεταβάλλεται ο ογκομετρικός συντελεστής απορρόφησης σε συνάρτηση με την ταχύτητα υγρού για ταχύτητες αερίου 0,506 m/s και 4,05 m/s



σχήμα 4.16 : ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς μάζας k^*a σε σχέση με την ταχύτητα του υγρού U(L) για ταχύτητα αερίου U(G)= 0,506 m/s



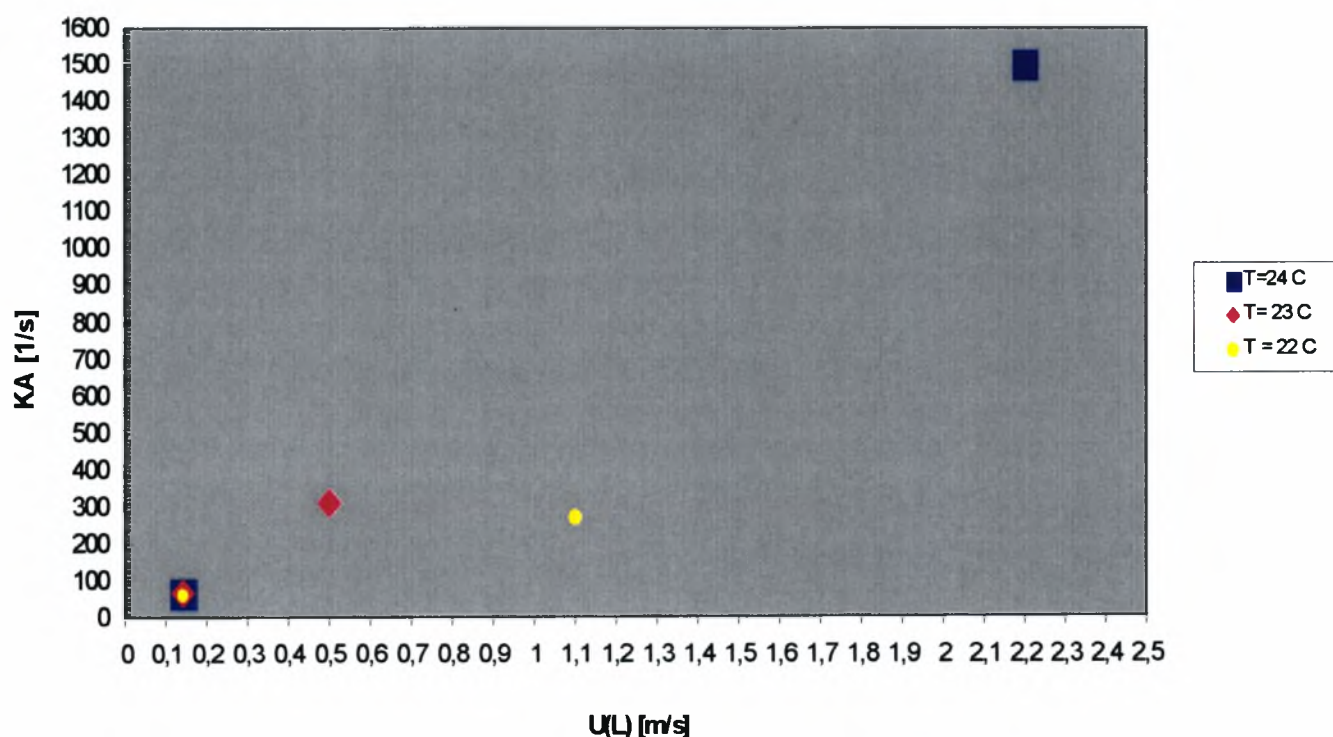
σχήμα 4.17 : ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς μάζας k^*a σε σχέση με την ταχύτητα του υγρού $U(L)$ για ταχύτητα αερίου $U(G) = 0,506$ m/s

Στους χάρτες ροής οι περιοχές είναι διαλείπουσες και με φυσαλίδες για τις συγκεκριμένες συνθήκες ροής. Βεβαίως, δεν διαθέτουμε χάρτη για 2mm αγωγό και αυτό δυσχεραίνει τη μελέτη ακόμη περισσότερο. Από τα παραπάνω διαγράμματα βγαίνει το συμπέρασμα ότι ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς μάζας αυξάνει καθώς αυξάνει η ταχύτητα του υγρού

B3. Επίδραση της ταχύτητας του υγρού στο συντελεστή απορρόφησης του πίδακα

Όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο η απορρόφηση λαμβάνει χώρα και στον πίδακα που σχηματίζεται όταν το μείγμα εξέρχεται από την έξοδο του αγωγού επαφής εντός του δοχείου. Για κάθε παροχή υγρού εκτελέστηκε πείραμα με μηδενική παροχή αερίου και υπολογίστηκε ο συντελεστής K^*A .

Ο τελευταίος όμως εξαρτάται και από τη συγκέντρωση κορεσμού του CO₂ στο νερό. Άρα εξαρτάται και από τη θερμοκρασία του H₂O. Για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του K^*A κατά τη μεταβολή της ταχύτητας του νερού, τοποθετούμε τις καταγεγραμμένες τιμές του για κάθε θερμοκρασία σε ένα διάγραμμα διασποράς (σχήμα 4.18).



σχήμα 4.18 : ογκομετρικός συντελεστής απορρόφησης του πίδακα σε συνάρτηση με την ταχύτητα του υγρού σε διάφορες θερμοκρασίες.

Για ταχύτητες υγρού 0,24 m/s ο συντελεστής παίρνει τιμές από 0,000614363 έως 0,000661055 1/s σε θερμοκρασίες 22 έως 24 °C. Στη συνέχεια με ταχύτητα υγρού ίση με 0,5 m/s, ο K*A αυξάνεται σημαντικά και παίρνει την τιμή 0,0030983 1/s σε θερμοκρασιακές συνθήκες T= 23 °C. Έπειτα, στην Τρίτη ομάδα μετρήσεων όπου η φαινομενική ταχύτητα υγρού είναι 1,1 m/s, ο συγκεκριμένος συντελεστής μειώνεται και παίρνει την τιμή 0,0027214 1/s. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι η θερμοκρασία είναι 22 °C. αφού η θερμοκρασία ελαττώθηκε, αυξάνεται η συγκέντρωση κορεσμού και τελικά ο K*A μειώνεται. Ακόμη η τελευταία ομάδα μετρήσεων με ταχύτητα υγρού 2,22 m/s παρουσιάζει συντελεστή απορρόφησης στον πίδακα αρκετά υψηλότερο των προηγούμενων και ίσο με 0,0150229 1/s. Τελικά, όπως διαπιστώνεται και από το διάγραμμα ο ειδικός συντελεστής απορρόφησης K*A αυξάνεται γενικά ,όσο αυξάνεται και η φαινομενική ταχύτητα του νερού.

Γ. Σύγκριση του ογκομετρικού συντελεστή k^*a της παρούσας εργασίας με αντίστοιχους της διεθνούς βιβλιογραφίας

Στη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζονται ογκομετρικοί συντελεστές για διάφορες συσκευές απορρόφησης. Ανάμεσα σε αυτές και για οριζόντιο αγωγό επαφής. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται από τους Charpetier και Lee&Tsui οι ογκομετρικοί συντελεστές για τις διάφορες συσκευές που υπάρχουν στη βιομηχανία.

Type of reactor	β (% gas-liquid volume)	k_G (g mole cm ⁻² gas cm ⁻¹ × 10 ⁴)	k_L (cm s ⁻¹ × 10 ²)	a (cm ² /cm ³ reactor)	$k_L a$ (s ⁻¹ × 10 ³)
Packed columns					
Countercurrent	2-25	0.03-2	0.4-2	0.1-5.5	0.04-7
Co-current	2-95	0.1-3	0.4-6	0.1-17	0.04-102
Plate columns					
Bubble cap	10-95	0.5-2	1-5	1-3	1-20
Sieve plates	10-95	0.5-6	1-20	1-2	1-40
Bubble columns	60-98	0.5-2	1-4	0.5-6	0.5-24
Packed bubble columns	60-98	0.5-2	1-4	0.5-3	0.5-12
Tube reactors					
Horizontal and coiled	5-95	0.5-4	1-10	0.5-7	0.5-70
Vertical	5-95	0.5-8	2-5	1-20	2-100
Spray columns	2-20	0.5-2	0.7-1.5	0.1-1	0.07-1.5
Mechanically agitated					
bubble reactors	20-95	—	0.3-4	1-20	0.3-80
Submerged and plunging jet	94-99	—	0.15-0.5	0.2-1.2	0.03-0.6
Hydrocyclone	70-93	—	10-30	0.2-0.5	2-15
Ejector reactor	—	—	—	1-20	—
Venturi	5-30	2-10	5-10	1.6-25	8-250

πίνακας 4.2 : ογκομετρικοί συντελεστές για διάφορες συσκευές απορρόφησης (Charpetier)

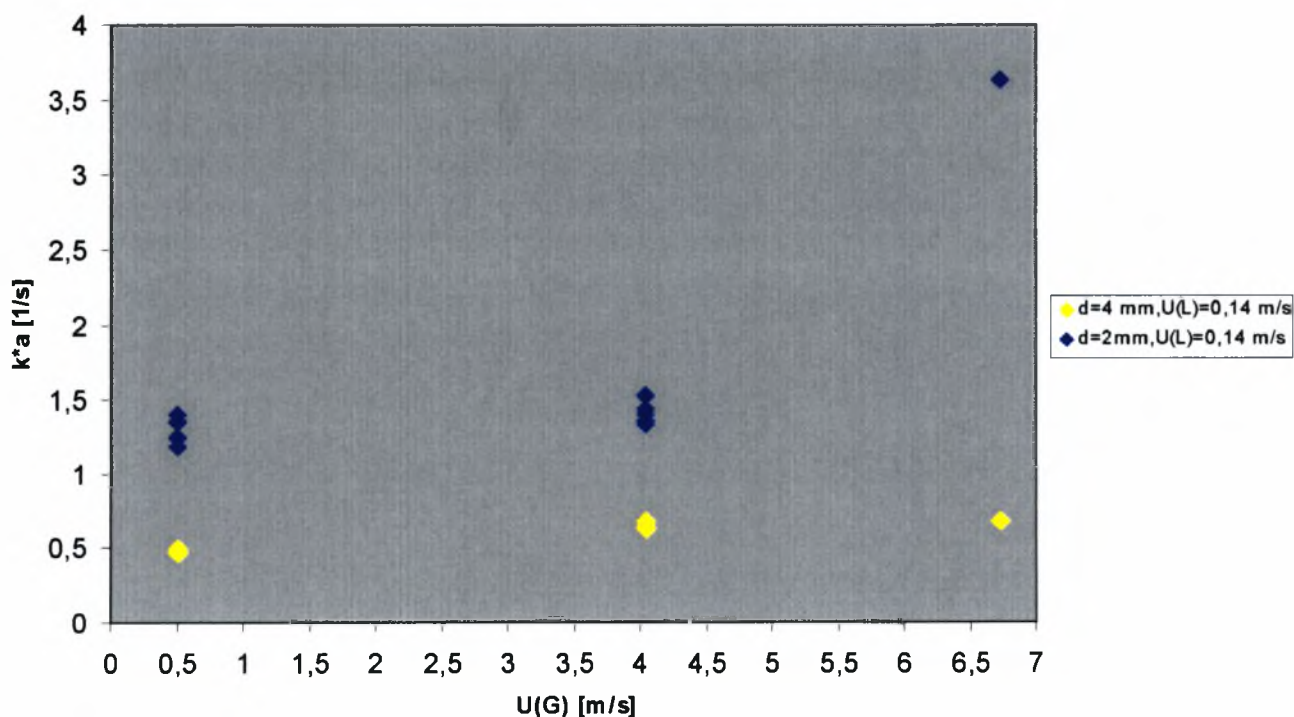
Configuration	$k_L a^*$ 1/s	R m ³ /m ³	F_g	V_g m ³	ϵ_v lit/m ³	Backmixing Liquid Flow	Backmixing Gas Flow
Bubble column excluding jet (loop)	0.005-0.01	~20	<0.2	0.002-300	0.01-1	CSTR-PFR	CSTR-PFR
Spray column	0.007-0.015	10-100	>0.0	—	—	CSTR	CSTR
Packed column, countercurrent	0.005-0.02	~200	>0.90	0.005-300	0.0-1.2	PFR	PFR
Plate column	0.01-0.05	100-400	>0.9	0.005-300	0.01-0.2	CSTR-PFR	CSTR-PFR
Pipe/tube	0.01-0.7**	50-2,000	0.05-0.95	—	0.1-100**	PFR	PFR
Mechanically agitated tank	0.02-0.2	~200	<0.1	0.002-100	0.5-4	CSTR	Intermediate-PFR
Jet (loop)	0.01-2.2	200-2,000	<0.5	0.02-100	0.0-50	CSTR- Intermediate	CSTR- Intermediate
Tubular/ejector reactor and molten jets mixer	0.1-3	1,000-7,000	0.5-1	<10	10-100	PFR	PFR

πίνακας 4.3 : ογκομετρικοί συντελεστές για διάφορες συσκευές απορρόφησης (Lee & Tsui)

Για τις συσκευές τύπου αγωγού επαφής (Tube / Pipe) παρατηρούμε στην εργασία του Charpetier ότι οι επιτεύξιμοι συντελεστές είναι 0,005 έως 0,7 1/s. Επίσης, οι Lee & Tsui δείχνουν ότι οι αντίστοιχοι συντελεστές είναι 0,01 έως 0,7 1/s. Και στις δυο εργασίες παρατηρείται ότι ο ογκομετρικός συντελεστής έχει μέγιστη τιμή τα 0,7 1/s.

Στην παρούσα εργασία οι συντελεστές ήταν σαφώς υψηλότεροι από τους προαναφερθέντες. Για να γίνει όμως ακριβέστερη σύγκριση θα πρέπει οι συνθήκες ροής να είναι παρόμοιες αν όχι ίδιες. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν δημοσιευμένοι ογκομετρικοί συντελεστές απορρόφησης σε αγωγό διαμέτρου 4 mm από την εργασία του Π.Γ.Τορτοπίδη.

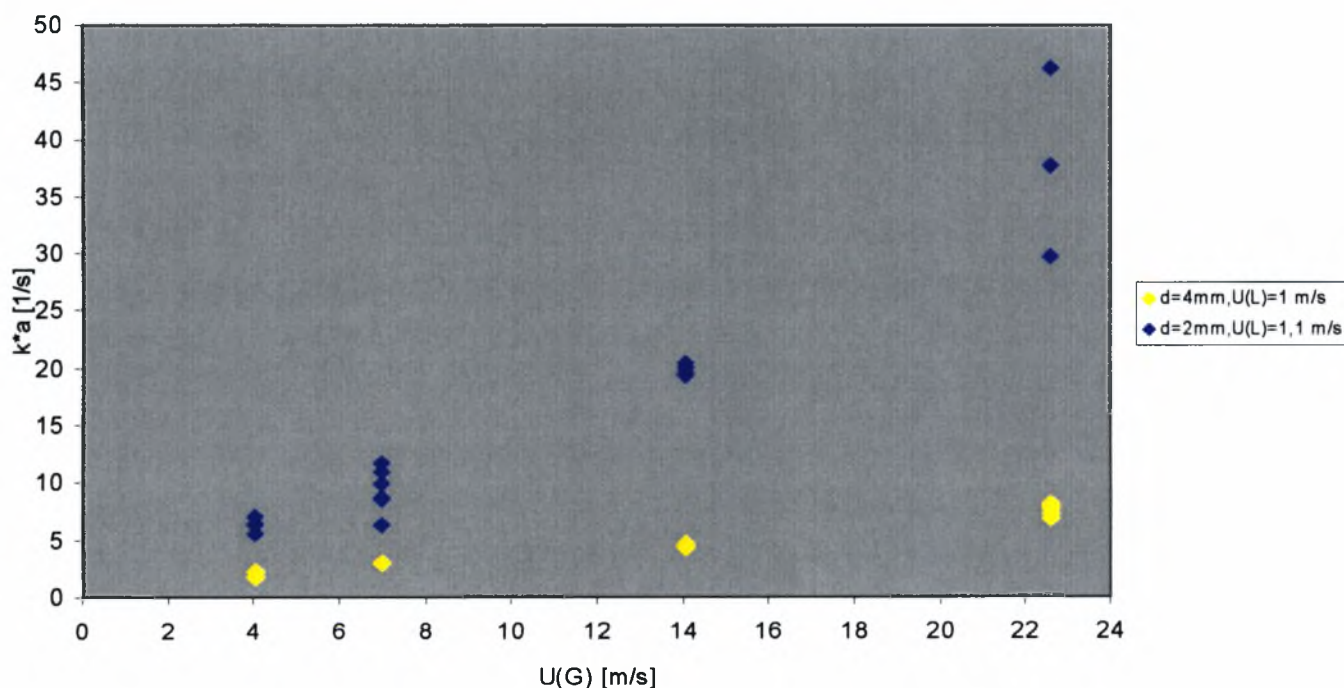
Στη συγκεκριμένη εργασία παρατηρούνται παρόμοιες ταχύτητες υγρού και αερίου με αυτές της παρούσης εργασίας. Συγκρίναμε τους συντελεστές k^*a για ταχύτητες υγρού περίπου ίσες με 0,14 και 1,1 m/s και για ταχύτητες αερίου 0,5 , 4 , 7 και 22,5 m/s περίπου. Παρακάτω απεικονίζεται το συγκριτικό διάγραμμα στις προαναφερθείσες ταχύτητες αερίου για ταχύτητα υγρού $U(L)=0,14$ m/s (σχήμα 4.19).



σχήμα 4.19 : σύγκριση ογκομετρικού συντελεστή μεταφοράς μάζας k^*a που εκλαμβάνεται από αγωγό διαμέτρου 2mm με τον αντίστοιχο συντελεστή από αγωγό διαμέτρου 4 mm για $U(L)=0,14$ m/s

Όπως παρατηρείται ο συντελεστής της παρούσας εργασίας είναι σαφώς υψηλότερος. Ειδικότερα, για ταχύτητα αερίου περίπου ίση με 0,5 m/s ο ογκομετρικός συντελεστής κυμάνθηκε στα επίπεδα του 0,5 1/s, σε αγωγό διαμέτρου 4mm ενώ σε αγωγό 2mm ο συντελεστής ήταν 1,1 έως 1,3 1/s για την ίδια ταχύτητα αερίου. Σε μεγαλύτερη ταχύτητα αερίου $U(G) = 4$ m/s περίπου, η βελτιστοποίηση του k^*a παρέμεινε σχεδόν η ίδια. Από τα επίπεδα των 0,62-0,67 1/s, αυξήθηκε στα 1,3 έως 1,5 1/s. Ακόμη σε ταχύτητες αερίου 7-8 m/s ο συντελεστής απορρόφησης βελτιώθηκε αισθητά. Έτσι σε αγωγό διαμέτρου 4mm ήταν περίπου 0,67 1/s, ενώ σε αγωγό διαμέτρου 2 mm η τιμή του έφτανε ως και 3,6 1/s.

Στη συνέχεια στο σχήμα 4.20 η ταχύτητα του υγρού γίνεται περίπου 1 m/s. Η σύγκριση πραγματοποιείται σε ταχύτητες αερίου 4, 7, 14 και 22,5 m/s περίπου.



σχήμα 4.20 : σύγκριση ογκομετρικού συντελεστή μεταφοράς μάζας k^*a που εκλαμβάνεται από αγωγό διαμέτρου 2mm με τον αντίστοιχο συντελεστή από αγωγό διαμέτρου 4 mm για $U(L)= 1$ m/s

Για ταχύτητες αερίου ίσες περίπου με 4 m/s επιτεύχθηκε k^*a 1,79 – 2,32 1/s σε αγωγό διαμέτρου 4 mm. Στην παρούσα εργασία ο συγκεκριμένος συντελεστής κυμάνθηκε από 5,58 έως 7,02 1/s στις ίδιες ταχύτητες αερίου. Η ίδια διαφορά παρατηρείται και όταν προχωρήσουμε σε μεγαλύτερες ταχύτητες αερίου ,όπως $U(G)= 7$ m/s περίπου. Εκεί ο ολικός συντελεστής μεταφοράς βελτιώθηκε αισθητά και από την τιμή 2,95 1/s που ήταν σε αγωγό 4 mm αυξήθηκε και πήρε τιμές από 6,26 έως 11,69 1/s.

Αυξάνοντας ακόμη περισσότερο την ταχύτητα του αερίου , η διαφορά ανάμεσα στους εξεταζόμενους συντελεστές είναι ακόμα πιο εμφανής. Έτσι για ταχύτητα αερίου κοντά στα 14 m/s από 4,4 - 4,69 1/s σε αγωγό διαμέτρου 4mm, κυμάνθηκε στα 19 έως 20 1/s στην παρούσα εργασία. Τέλος, σε μεγαλύτερες ταχύτητες αερίου όπως αυτή των 22,6 m/s, συναντούμε ογκομετρικό συντελεστή k^*a 7-8 1/s για τη μεγαλύτερη διάμετρο, ενώ στην παρούσα εργασία ο ογκομετρικός συντελεστής κυμαίνεται από 30 έως 46 1/s φτάνοντας στον κορεσμό.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές το συμπέρασμα ότι ο ολικός ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς μάζας είναι αισθητά υψηλότερος όσο προχωρούμε σε μικρότερες διαμέτρους.

Δ. Μελέτη πτώσης πίεσης – Υπολογισμός του συντελεστή κατανάλωσης ενέργειας ϵ

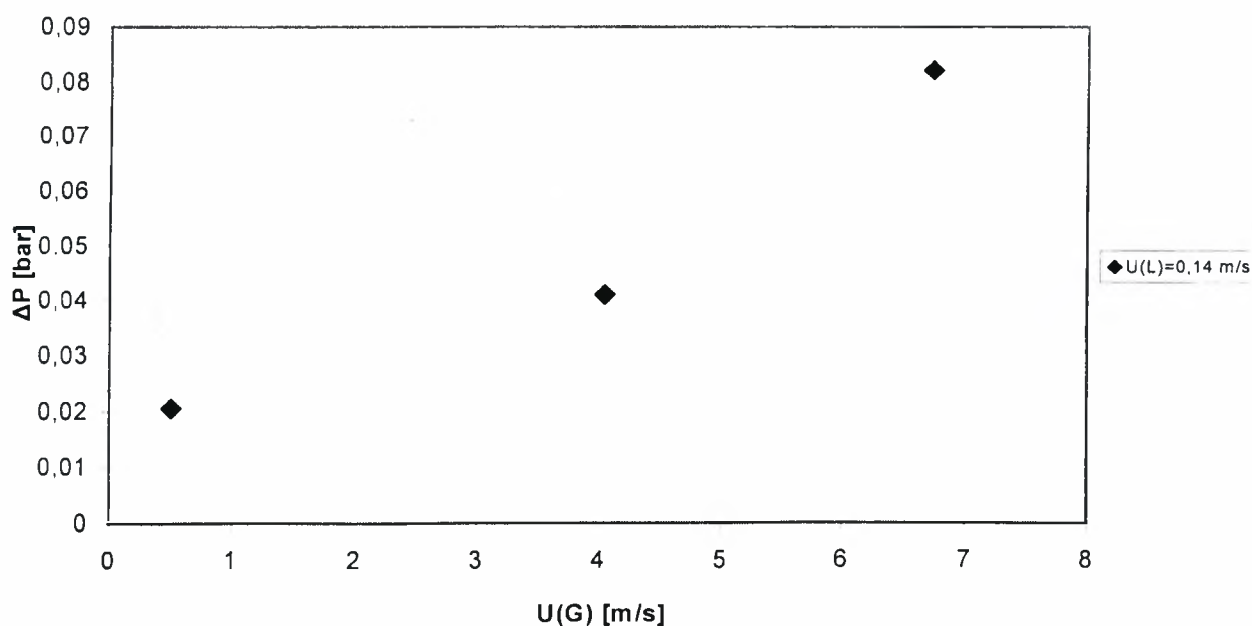
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα προσπαθήσουμε να συσχετίσουμε την πτώση πίεσης που παρατηρήθηκε στη συσκευή που χρησιμοποιήσαμε με τον ογκομετρικό συντελεστή k^*a

Δ1.Υπολογισμός πτώσης πίεσης

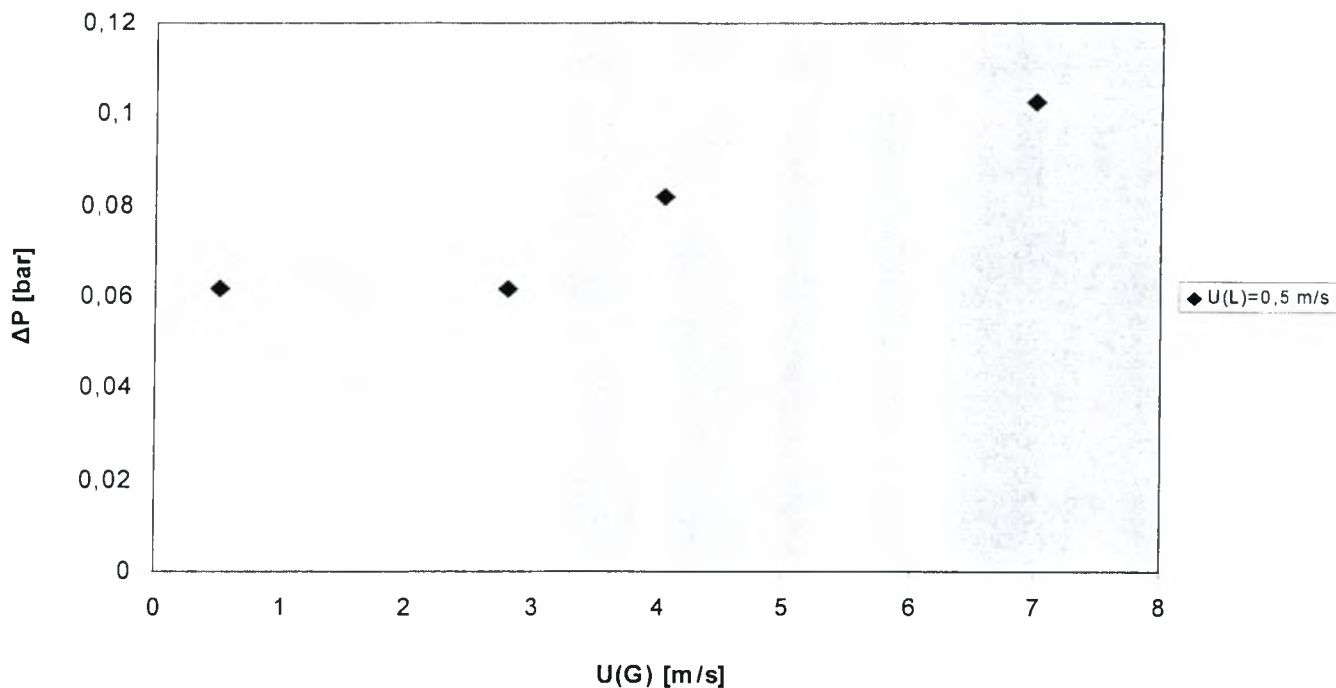
Η πτώση πίεσης μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ψηφιακό μανόμετρο του οποίου τον αισθητήρα τοποθετήσαμε στην είσοδο του αγωγού επαφής. Ειδικότερα τοποθετήθηκε στην είσοδο του αερίου CO₂ για να προστατευθεί καλύτερα από την υγρασία. Η βαθμονόμηση του οργάνου επισυνάπτεται στο παράρτημα.

Ο τρόπος που υπολογίζουμε την πτώση πίεσης είναι ο ακόλουθος. Το ψηφιακό όργανο δείχνει μια συγκεκριμένη ένδειξη (στην περίπτωσή μας 75) όταν έχουμε μηδενική ροή αερίου και υγρού. Η ένδειξη αυτή αντιστοιχεί στην ατμοσφαιρική πίεση (1 atm) που επικρατεί εντός του άδειου δοχείου συλλογής. Στη συνέχεια καταγράφονται σε κάθε μέτρηση οι ενδείξεις του οργάνου για κάθε ταχύτητα αερίου και υγρού. Η διαφορά των καταγεγραμμένων ενδείξεων από την αρχική ένδειξη (75) αντιστοιχεί στην πτώση πίεσης εντός του αγωγού.

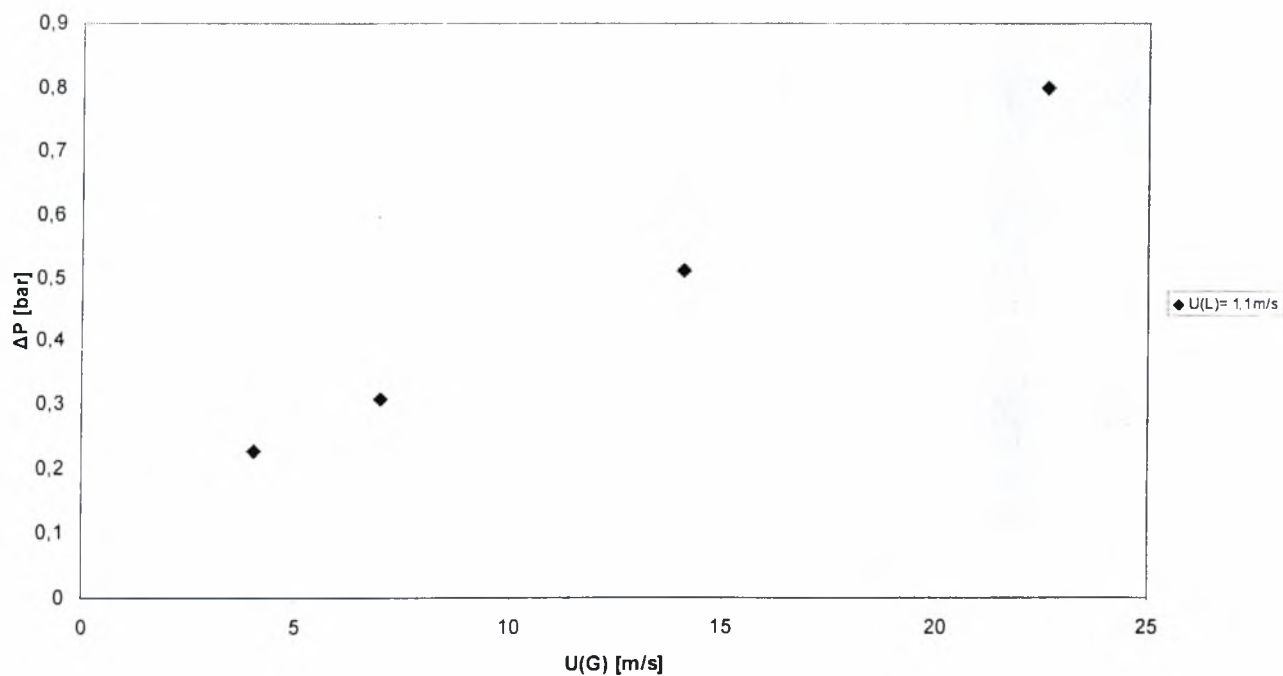
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η πτώση πίεσης ΔP [bar] για κάθε ομάδα μετρήσεων σε διάφορες ταχύτητες αερίου (σχήματα 4.21-24)



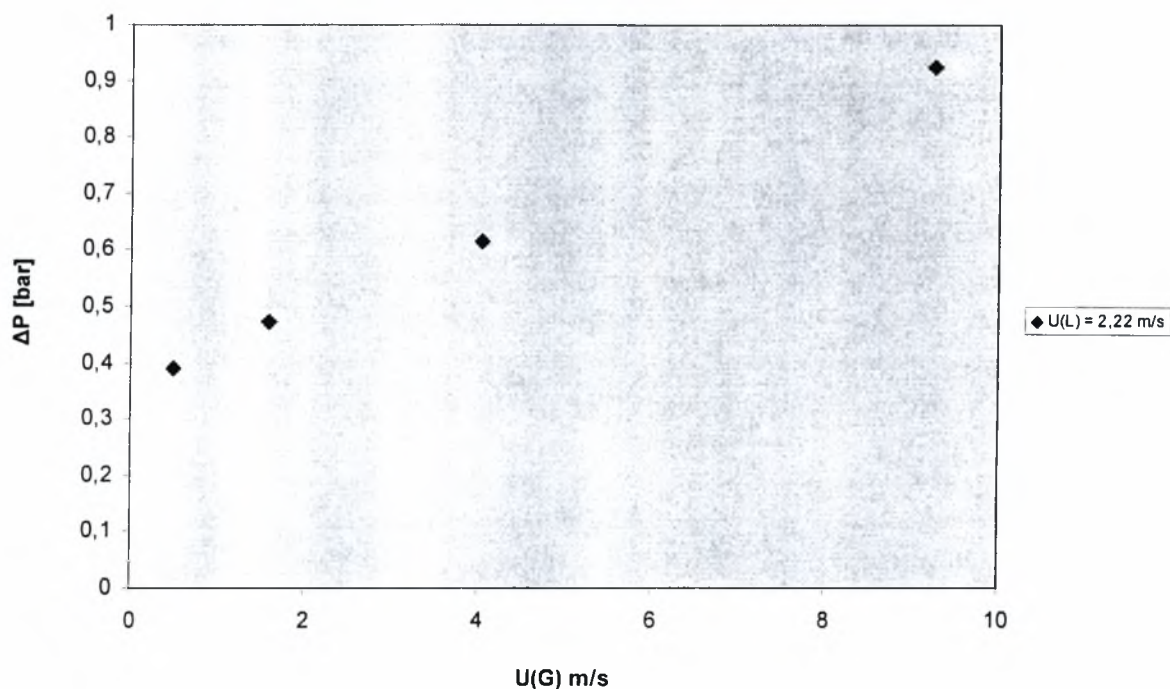
σχήμα 4.21 : πτώση πίεσης ΔP σε συνάρτηση με την ταχύτητα του αερίου $U(G)$ για ταχύτητα υγρού 0,14 m/s



σχήμα 4.22 : πτώση πίεσης ΔP σε συνάρτηση με την ταχύτητα του αερίου $U(G)$ για ταχύτητα υγρού 0.5 m/s

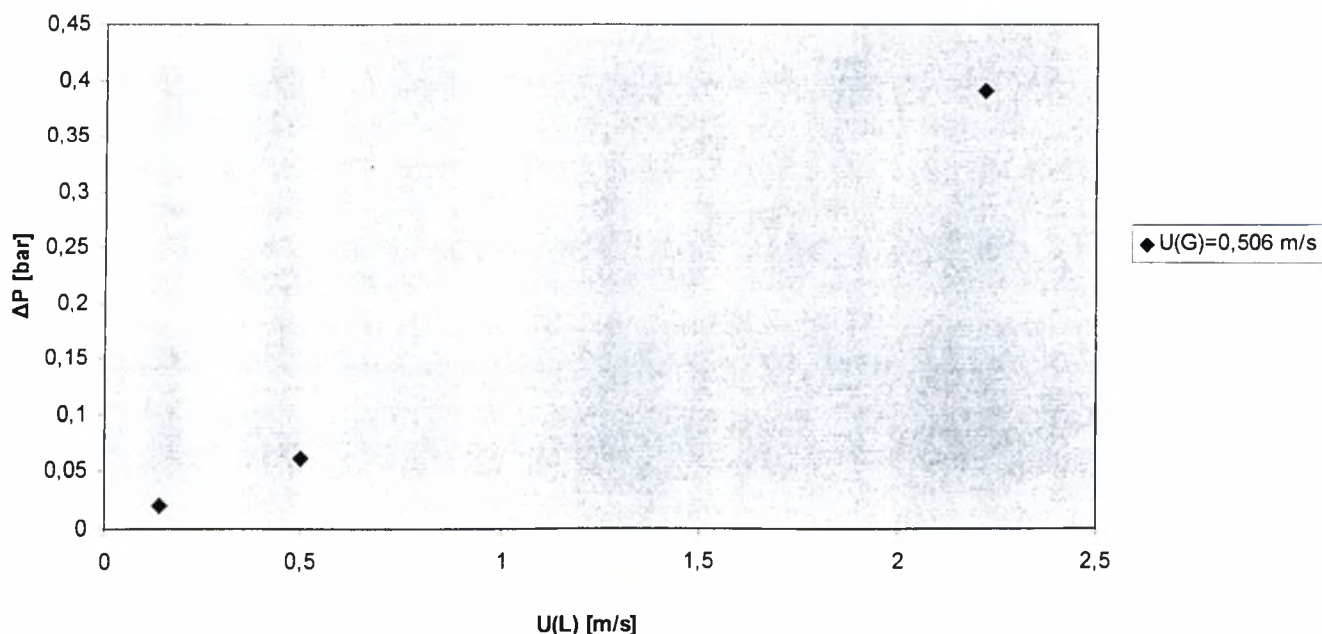


Σχήμα 4.23 : πτώση πίεσης ΔP σε συνάρτηση με την ταχύτητα του αερίου $U(G)$ για ταχύτητα υγρού 1.1 m/s

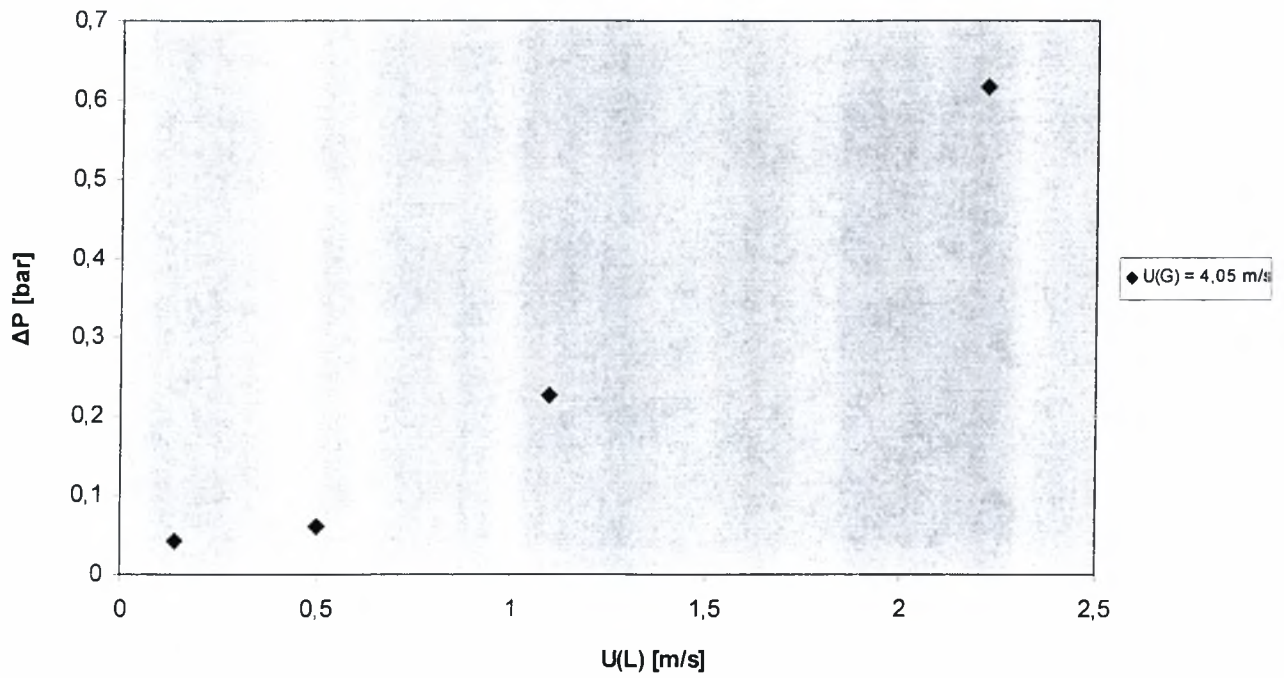


σχήμα 4.24 : πτώση πίεσης ΔP σε συνάρτηση με την ταχύτητα του αερίου $U(G)$ για ταχύτητα υγρού 2,22 m/s

Όπως φαίνεται, η ΔP αυξάνεται όσο η ταχύτητα του αερίου $U(G)$ αυξάνεται. Επίσης, η μεταβολή είναι γενικά γραμμική, αν εξαιρέσουμε την ομάδα μετρήσεων με φαινομενική ταχύτητα υγρού $U(L) = 0,5$ m/s. Επίσης, αν διατηρηθεί η ταχύτητα του αερίου σταθερή, η πτώση πίεσης ΔP αυξάνει όσο αυξάνει η φαινομενική ταχύτητα του υγρού (σχήματα 4.25, 4.26)



σχήμα 4.25 : πτώση πίεσης ΔP σε συνάρτηση με την ταχύτητα του υγρού $U(L)$ για ταχύτητα αερίου 0,506 m/s



σχήμα 4.26 : πτώση πίεσης ΔP σε συνάρτηση με την ταχύτητα του υγρού $U(L)$ για ταχύτητα αερίου 4,05 m/s

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα, όσο μεταβάλλεται η ταχύτητα του υγρού, η πτώση πίεσης ΔP αυξάνει.

Δ2.Υπολογισμός του συντελεστή κατανάλωσης ενέργειας ε

Ο Jepsen το 1970 συσχέτισε τον ογκομετρικό συντελεστή μεταφοράς μάζας με τον εμπειρικό παράγοντα κατανάλωσης ενέργειας ε. Ο τελευταίος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon = [U(L) + U(G)] * \Delta P / L \quad [\text{Pa/s}] \quad (4.12)$$

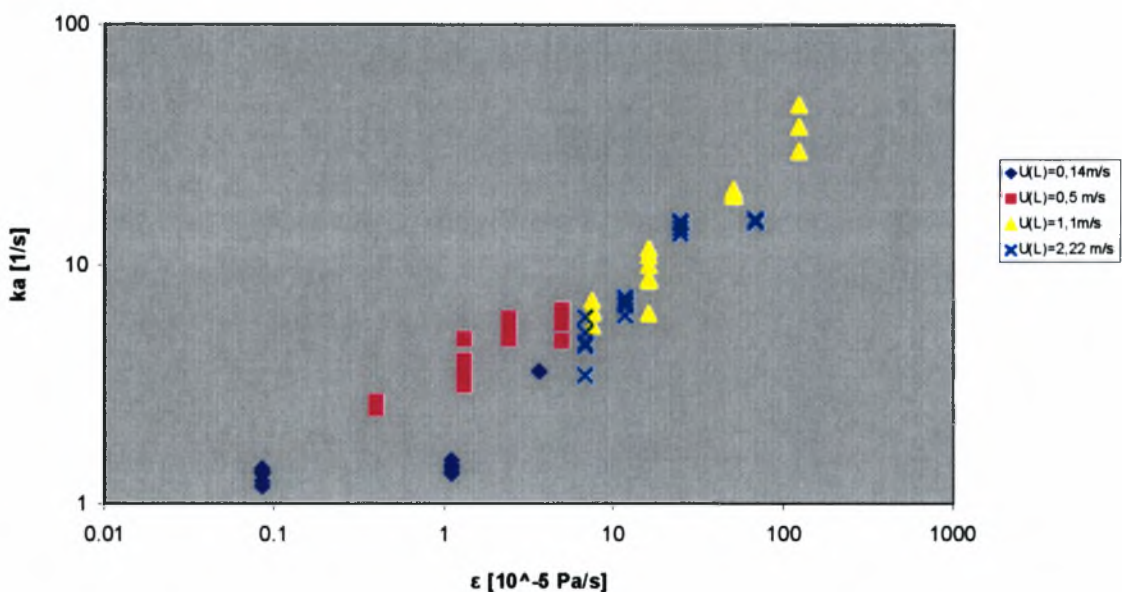
με $U(L)$: φαινομενική ταχύτητα υγρού [m / s]

$U(G)$: φαινομενική ταχύτητα αερίου [m / s]

ΔP : πτώση πίεσης [Pa]

L : μήκος αγωγού επαφής [m]

Στο παρακάτω διάγραμμα παριστάνεται γραφικά η μεταβολή του ογκομετρικού συντελεστή μεταφοράς μάζας k^*a σε συνάρτηση με τον παράγοντα ε για διάφορες τιμές ταχυτήτων υγρού (σχήμα 4.27)



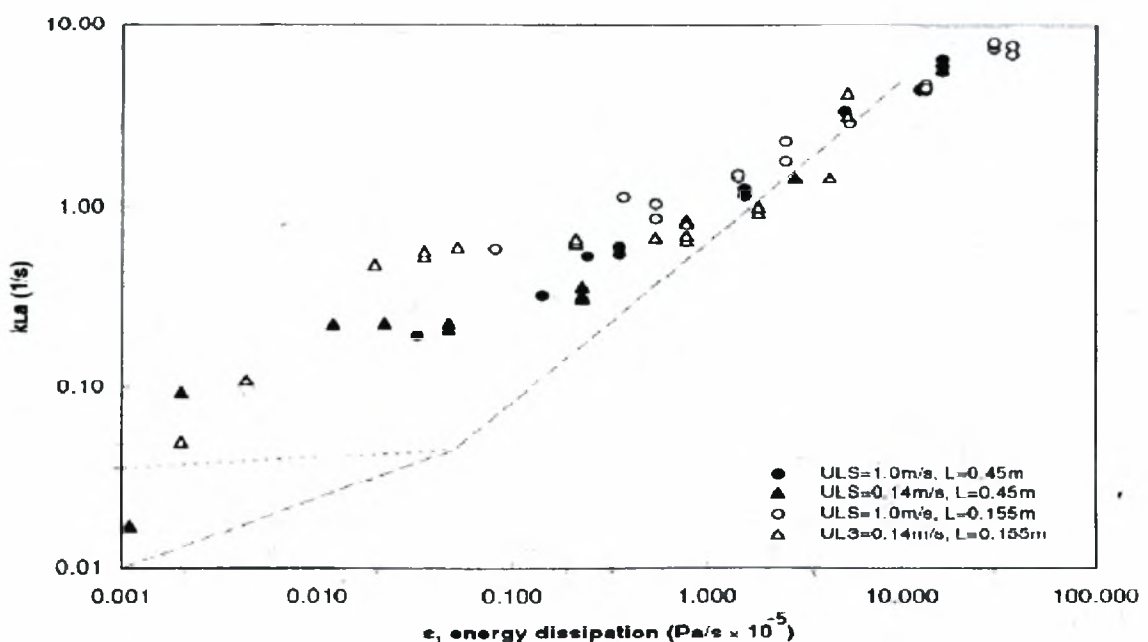
σχήμα 4.27 : μεταβολή του ογκομετρικού συντελεστή μεταφοράς μάζας σε συνάρτηση με τον παράγοντα ε, για διάφορες ταχύτητες υγρού.

Το παραπάνω διάγραμμα μας δίνει ποιοτικά την κατανάλωση ενέργειας ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ογκομετρικός συντελεστής. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι για τιμές $0,44 < \epsilon < 1,1$, ο k^*a κυμαίνεται από 1,1 έως 2,7. Στη συνέχεια, για $1,3 < \epsilon < 4$, ο συντελεστής αυξάνεται έως 6 1/s. Έπειτα, με περαιτέρω αύξηση του ϵ παρατηρείται και αύξηση του k^*a . ειδικότερα, το ϵ όταν κινείται ανάμεσα στο 5 και το 8 , ο συντελεστής k^*a φτάνει την τιμή 7. Έπειτα, παρατηρούμε ότι για $11 < \epsilon < 16$, ισχύει $7,3 < k^*a < 11,7$. Στη συνέχεια η τιμή του ϵ πλησιάζει το 70 και ο ογκομετρικός συντελεστής τα 20 1/s. Τέλος, για $\epsilon > 100$ ο k^*a παίρνει την τιμή 46 1/s, η οποία είναι και η μέγιστη που παρατηρείται.

Δ3. Σύγκριση του ϵ της παρούσης εργασίας με το ϵ της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Η πτώση πίεσης που παρατηρείται δεν είναι πολύ μεγάλη. Συνεπώς και η κατανάλωση ενέργειας θα είναι σε χαμηλά επίπεδα. Για να δούμε εάν η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγαλύτερη από αντίστοιχες συσκευές, συγκρίνουμε τον παράγοντα ϵ της παρούσης εργασίας με αντίστοιχα ϵ που έχουν ληφθεί από τη διεθνή βιβλιογραφία.

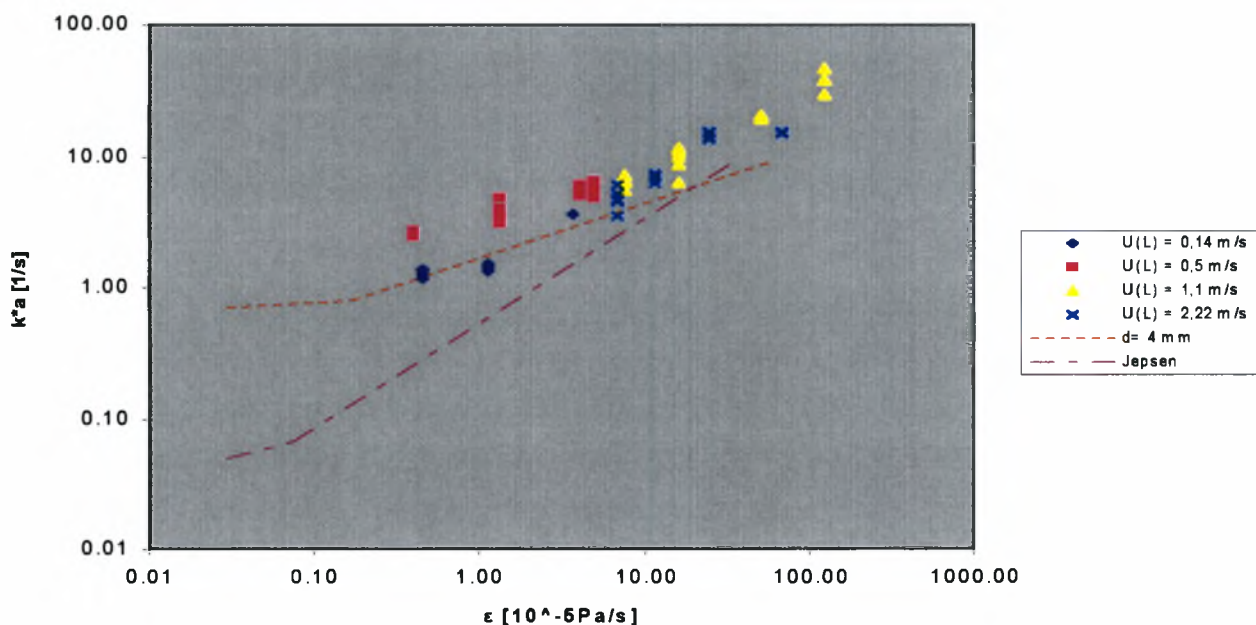
Στο παρακάτω διάγραμμα από την εργασία του Π.Γ.Τορτοπίδη, εικονίζεται ο ογκομετρικός συντελεστής k^*a σε σχέση με τον παράγοντα ϵ για αγωγό διαμέτρου 4 mm (σχήμα 4.28).



σχήμα 4.28 : ογκομετρικός συντελεστής k^*a συναρτήσει του ϵ για διάφορες ταχύτητες υγρού.

Επίσης, ο Jepsen το 1970 συσχέτισε τον παράγοντα ϵ με τον ογκομετρικό συντελεστή k^*a σε αγωγούς διαμέτρου 1-4 in και οι πληροφορίες αυτές απεικονίζονται στο παραπάνω διάγραμμα με τη διακεκομμένη γραμμή.

Για να είναι πιο ακριβής η σύγκριση λαμβάνουμε υπόψη μόνο τις τιμές για ταχύτητες υγρού 0,14 m/s και 1,1 m/s και μήκος αγωγού επαφής 0,155 m. Στη συνέχεια, τοποθετούμε όλα τα στοιχεία από τις εργασίες των Τορτοπίδη, Jepsen και τις μετρήσεις σε αγωγό διαμέτρου 2 mm σε λογαριθμικό διάγραμμα για να γίνει ακόμη πιο αντιληπτή η διαφορά στα μεγέθη (σχήμα 4.29).



σχήμα 4.29 : συγκριτικό διάγραμμα $\epsilon - k^*a$ σε αγωγούς 2 και 4 mm

Αυτό το οποίο παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα είναι ότι ο παράγοντας ϵ για αγωγό διαμέτρου 2 mm κινείται περίπου στα ίδια επίπεδα με τον αντίστοιχο παράγοντα για αγωγό διαμέτρου 4 mm. Ειδικότερα, όταν το ϵ βρίσκεται μεταξύ του 0,5 και του 1,5, επιτυγχάνεται ογκομετρικός συντελεστής μεταξύ του 1 και 10 1/s για αγωγούς διαμέτρου 2 mm και 4 mm. Για αγωγούς με μεγαλύτερη διάμετρο (Jepsen), τα ϵ συγκλίνουν όταν ο k^*a κινείται ανάμεσα στο 10 και το 100. Το τελικό συμπέρασμα της παραπάνω σύγκρισης είναι ενθαρρυντικό, διότι η κατανάλωση ενέργειας παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα. Άρα δεν επιβαρύνεται το λειτουργικό κόστος της συσκευής. Αυτό ήταν αναμενόμενο να συμβεί, διότι η τύρβη σε αγωγούς μικρής διαμέτρου είναι ασθενέστερη.

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η απορρόφηση CO₂ στο νερό σε συμπαγή διάταξη επαφής. Για να επιτευχθεί αυτό έγινε χρήση αγωγού επαφής με εσωτερική διάμετρο 2 mm. Το μήκος του αγωγού είναι 0,155 m. Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις ομάδες μετρήσεων με φαινομενικές ταχύτητες υγρού 0,14 , 0,5 , 1,1 και 2,22 m/s. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ταχύτητες αερίου από 0,506 έως 22,6 m/s.

Πολύ λίγα είναι γνωστά για αγωγούς μικρής διαμέτρου. Και στους συγκεκριμένους αγωγούς η ροή είναι πολύπλοκη. Λόγω του ότι δεν υπήρχε χάρτης ροής για τη συγκεκριμένη διάμετρο, οι συνθήκες ροής εκλέχτηκαν υποθετικά. Ειδικότερα, υποτέθηκε ότι στις συγκεκριμένες ταχύτητες υγρού και αερίου εμφανίστηκαν όλες οι δυνατές μορφές ροής. Όμως δεν μπορούμε να γνωρίσουμε τα όρια μετάπτωσης από τη μια περιοχή στην άλλη και να συσχετίσουμε τις περιοχές αυτές με τον ογκομετρικό συντελεστή k^*a .

Ο τελευταίος υπολογίστηκε μετά από ανάλυση των συλλεγομένων δειγμάτων. Παρατηρήθηκε μια αύξηση του συντελεστή όσο η παροχή του υγρού αυξάνονταν. Η μικρότερη τιμή που παρατηρήθηκε είναι 1,17 1/s για ταχύτητα υγρού 0,14 m/s και ταχύτητα αερίου 0,506 m/s. ο υψηλότερος συντελεστής παρατηρήθηκε για ταχύτητα υγρού 1,1 m/s , ταχύτητα αερίου 22,6 m/s και είχε τιμή 46 1/s. Αν υπήρχε χάρτης ροής για τον αγωγό διαμέτρου 2 mm θα κινούμασταν σε περιοχές ροής όπου εμφανίζονταν μεγάλοι συντελεστές απορρόφησης και ίσως πετυχαίναμε υψηλότερο. Σε σύγκριση με τους αντίστοιχους συντελεστές της βιβλιογραφίας παρατηρήθηκε αισθητή βελτίωση του ογκομετρικού συντελεστή k^*a , ιδιαίτερα στις μεγάλες ταχύτητες του αερίου.

Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι αρχικά είχε σχεδιαστεί να χρησιμοποιηθούν 2 ροόμετρα. Το ένα από αυτά χρησιμοποιήθηκε, το οποίο έδινε παροχές αερίου 5,3 lt/min, διότι πλησιάζαμε σε σημείο κορεσμού. Ωστόσο, επειδή οι ταχύτητες αερίου κυμάνθηκαν από 0,506 έως 22,6 m/s, κρίνεται απαραίτητη η χρήση ροόμετρου το οποίο δίνει μικρότερες παροχές αερίου. Σε ένα τέτοιο ροόμετρο θα περιοριστεί και το σφάλμα ανάγνωσης.

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε επίσης και η πτώση πίεσης εντός του αγωγού. Η πτώση πίεσης συνεπάγεται και την κατανάλωση ενέργειας και είναι βασική λειτουργική δαπάνη για την πειραματική διάταξη. Η μικρότερη ΔP παρατηρήθηκε για ταχύτητα υγρού 0,14 m/s, ταχύτητα αερίου 0,506 m/s και είχε τιμή 0,0205 bar. Η μεγαλύτερη τιμή της ΔP παρατηρήθηκε σε ταχύτητα

υγρού 2,22 m/s, ταχύτητα αερίου 22,6 m/s και είχε τιμή ίση με 0,9225 bar. Γενικά ,όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα διαγράμματα, η πτώση πίεσης αυξάνει όσο αυξάνει η παροχή νερού.

Έγινε επίσης προσπάθεια να συσχετιστεί η πτώση πίεσης με τον ογκομετρικό συντελεστή. Σε σύγκριση με αγωγό επαφής 4 mm, η κατανάλωση ενέργειας ήταν στα ίδια επίπεδα. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί με αγωγό μικρής διαμέτρου να επιτεύχθηκε μεγάλος συντελεστής απορρόφησης και η λειτουργική δαπάνη της συσκευής δεν αυξήθηκε. Ήταν αναμενόμενο αυτό λόγω της ασθενέστερης τύρβης στον αγωγό μικρής διαμέτρου.

6. Προτάσεις

Για την πλήρη κατανόηση της απορρόφησης σε αγωγούς μικρής διαμέτρου προτείνονται οι ακόλουθες ενέργειες.

Προέχει η ανάγκη δημιουργίας χάρτη ροής για τον αγωγό διαμέτρου 2mm Αυτό θα συμβάλλει στο να διερευνήσουμε τις περιοχές ροής και να δούμε σε ποιες από αυτές εμφανίζεται μέγιστος και ελάχιστος ογκομετρικός συντελεστής. Επίσης με το χάρτη θα γίνει ευκολότερη ερμηνεία της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου συντελεστή.

Θα ήταν χρήσιμη και η μελέτη διαφορετικών διφασικών μειγμάτων έτσι ώστε να έχουμε χημική απορρόφηση και να μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η επιφάνεια εναλλαγής a .

Επίσης προτείνεται η χρήση διαφορετικών μηκών ώστε να εξεταστεί εάν η ροή σε τόσο μικρές διαμέτρους είναι πλήρως ανεπτυγμένη.

Ακόμη προτείνεται να εξεταστεί κατά πόσο η μεταβολή της γωνίας εισόδου θα επηρεάσει τον ογκομετρικό συντελεστή. Είναι γνωστό ότι σε μεγαλύτερες των 2 mm διαμέτρους ο μεγάλος συντελεστής k^*a οφείλεται στα έντονα φαινόμενα εισόδου.

Τέλος, προτείνεται ο σχεδιασμός μιας συσκευής η οποία αποτελείται από πολλούς αγωγούς διαμέτρου 2 mm οι οποίοι θα καταλήγουν σε δοχείο συλλογής παρόμοιο με αυτό της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Οι πολλοί αγωγοί συνίστανται προκειμένου να ικανοποιήσουμε απαιτήσεις σε μεγάλες ποσότητες μείγματος αερίου και υγρού.

7. Βιβλιογραφία

1. Barnea D., Luinski Y. and Taitel Y. 1983
" Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes " ,Canadian J. Chem. Eng. , **61**, 617 – 620.
2. Bontozoglou V. & Karabelas A. J. , 1993
" Simultaneous absorption of H₂O and CO₂ in NaOH solutions: Experimental and numerical study of the performance of a short – time contactor " , Ind. Eng. Chem. Res., **32**, 165 – 172.
3. Charpetier J. C., 1982
" What's new in absorption with chemical reaction " , Institution of Chem. Eng., **60**, 131 – 156.
4. Lee Sheng-Yi and Tsui Pang Y. 1999
" Succeed at Gas/Liquid Contacting " , Chemical Engineering Progress, **July 1999**, 23 – 49.
5. Tortopidis P. and Bontozoglou V. 1997
" Mass transfer in gas-liquid flow in small diameter tubes" ,Chemical Engineering Science, **Vol.52, No. 14**, 2231 – 2237.
6. Μαρκόπουλος Ι. Ν. 1992
" Μεταφορά μάζας " , University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
7. Τορτοπίδης Π.Γ. 1996
" Απορρόφηση CO₂ στο νερό σε συμπαγή διάταξη επαφής " , Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
8. Σαραβάκος Γ. Δ. 1976
" Τεχνική Φυσικών Διαχωρισμών " Β' έκδοση, Αθήνα

8. Παράρτημα

A. Βαθμονόμηση αντλίας νερού

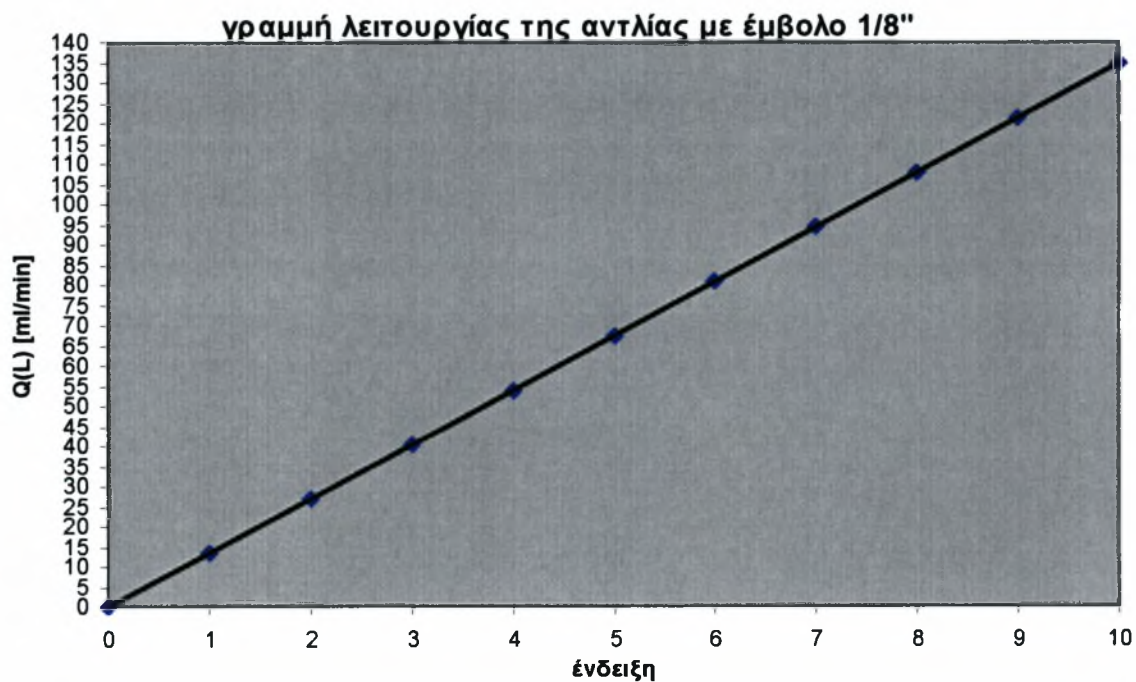
Στη συσκευή υπήρχε προσαρμοσμένη δοσομετρική αντλία της εταιρείας FMI (Fluid Metering Inc) και το μοτέρ είναι υψηλής ταχύτητας. Υπήρχαν 2 διαθέσιμα έμβολα για τη συγκεκριμένη αντλία και χρησιμοποιήθηκαν και τα 2. Το πρώτο είναι διαμέτρου 1/8" και παρέχει νερό μέχρι 135 ml /min. Το δεύτερο έμβολο έχει διάμετρο 3/8" και παρέχει νερό μέχρι 1050 ml/min. Η αντλία μας παρέχει τη δυνατότητα να ρυθμίζουμε την παροχή υγρού στην επιθυμητή τιμή με ειδικό ρυθμιστή δέκα θέσεων.

Η αντλία βαθμονομήθηκε με την εξής διαδικασία, όμοια για κάθε έμβολο. Για κάθε ένδειξη του ρυθμιστή λαμβάνονται δείγματα (2) για ορισμένο χρονικό διάστημα. Έπειτα, ζυγίζουμε τα συγκεκριμένα δείγματα, υπολογίζουμε το μέσο όρο αυτών και στη συνέχεια την παροχή σε ml/min.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε έμβολο και κάθε θέση ρύθμισης.

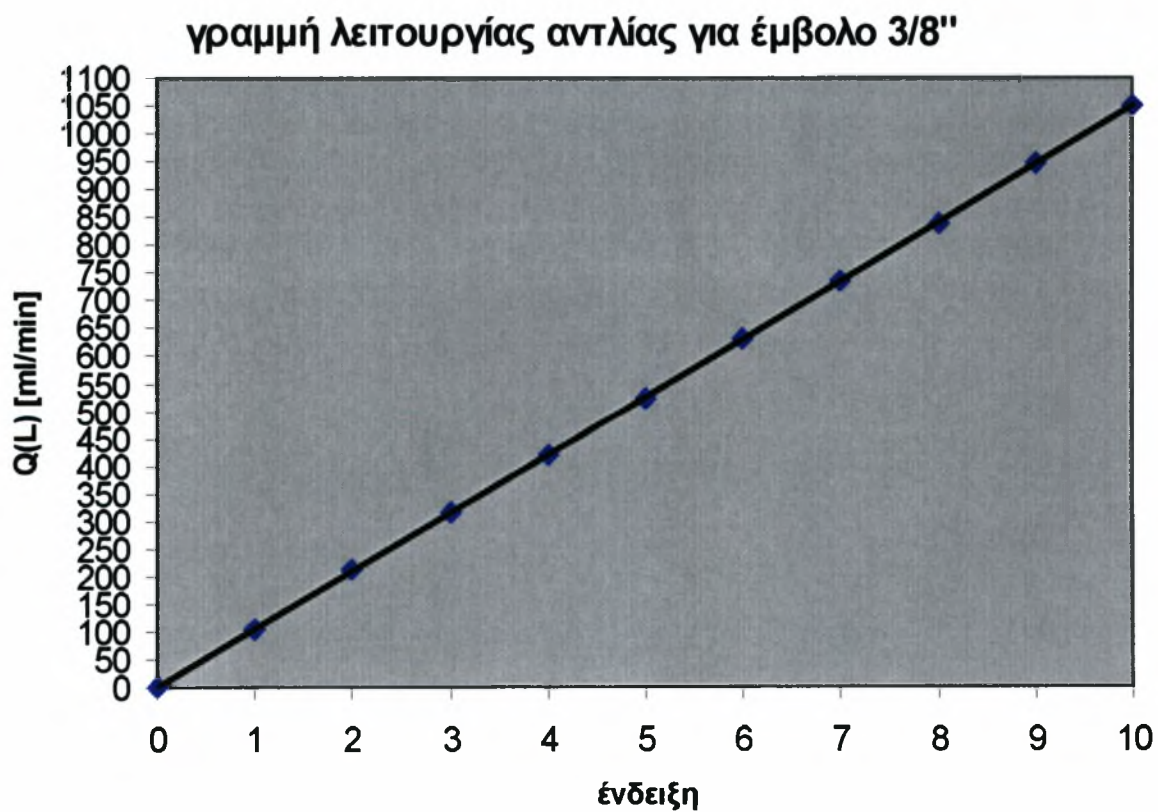
Έμβολο 1/8"

ένδειξη	παροχή ml/min
0	0
1	13,5
2	27
3	40,5
4	54
5	67,5
6	81
7	94,5
8	108
9	121,5
10	135



Έμβολο 3/8"

ένδειξη	παροχή ml/min
0	0
1	105
2	210
3	315
4	420
5	525
6	630
7	735
8	840
9	945
10	1050

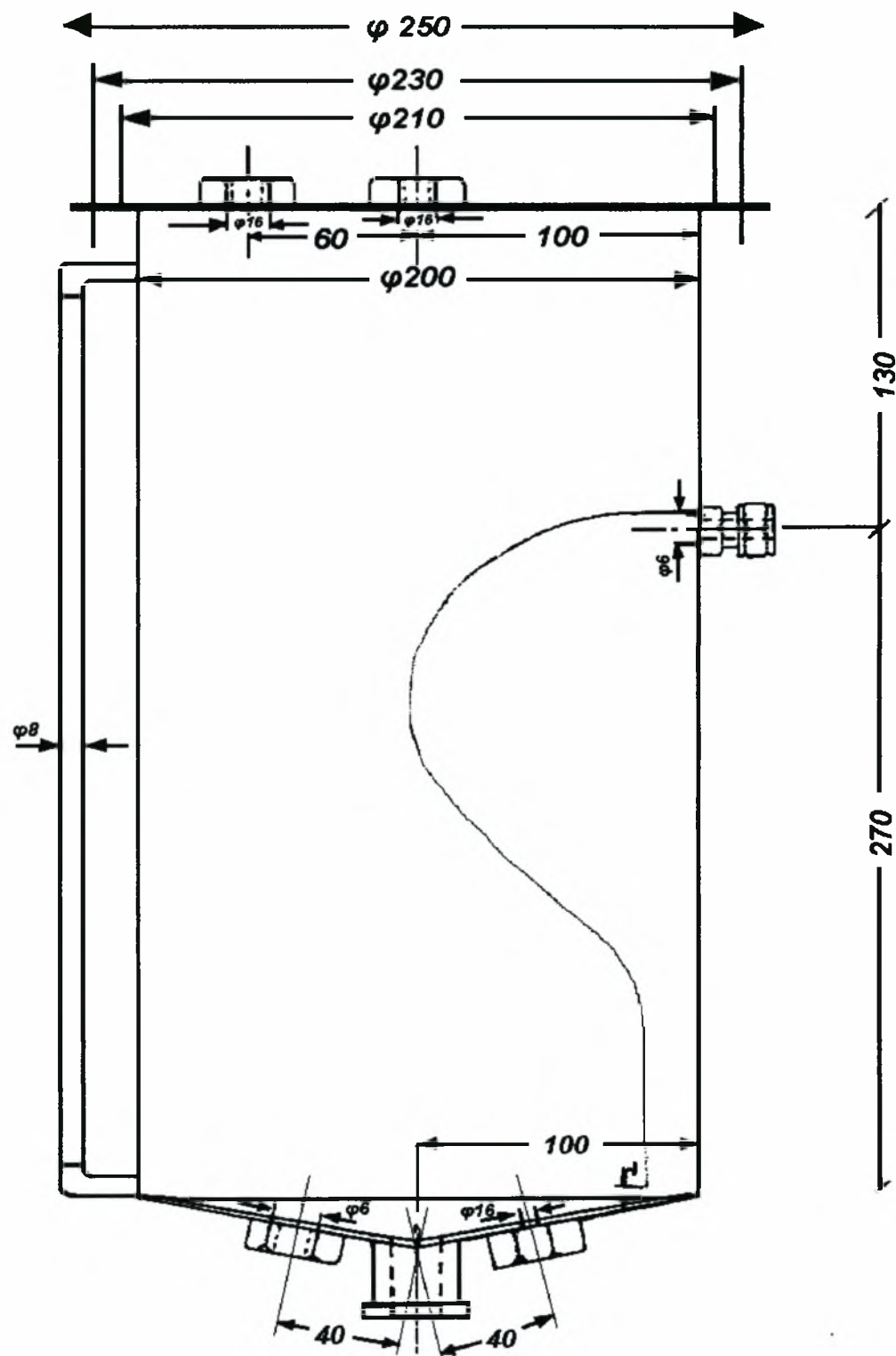


B. Μηχανολογικό Σχέδιο δοχείου

Το δοχείο στο οποίο καταλήγει το διφασικό μείγμα αερίου – υγρού από την έξοδο του αγωγού επαφής είναι κυλινδρικό με κωνική βάση και συνδέεται με καπάκι μέσω έξι κοχλιών σύσφιξης.

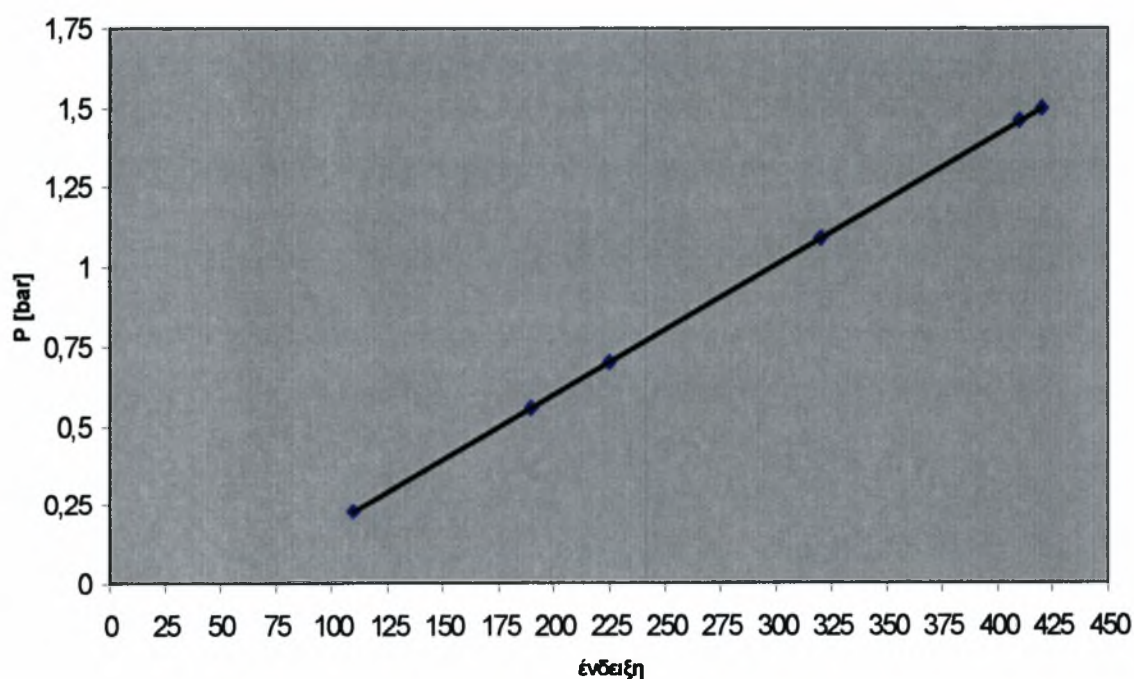
Επειδή οι σχηματιζόμενες από το διαλυμένο CO₂ στο νερό όξινες ανθρακικές ρίζες μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα οξειδωσης, το δοχείο κατασκευάστηκε από ανοξείδωτο χάλυβα “316”. Ο τελευταίος είναι αρχικά σε μορφή φύλλου πάχους 2mm και διαστάσεων 628x400 mm. Για να πάρουμε την κυλινδρική μορφή περνάμε το φύλλο από στράντζα και στη συνέχεια συγκολλείται με ραφή “I” τύπου. Εντός του κυλινδρικού τμήματος υπάρχει έλασμα πάχους 1 mm και σχήματος ζ προκειμένου το διφασικό μείγμα να οδηγηθεί ομαλά στον πυθμένα του δοχείου. Ο πυθμένας είναι κατασκευασμένος από το ίδιο υλικό και η κωνική του μορφή εξασφαλίζεται αφού περάσει και αυτό από στράντζα. Με ηλεκτροκόλληση με ανοξείδωτο ηλεκτρόδιο συνδέεται με το κυλινδρικό τμήμα. Η φλάντζα είναι κατασκευασμένη από φύλλο πάχους 3 mm. Το καπάκι είναι και αυτό κατασκευασμένο από φύλλο πάχους 3 mm και διαμέτρου 250 mm και έχει αυλάκι βάθους 0,5 mm σε διάμετρο 220 mm προκειμένου να εξασφαλιστεί καλύτερη εφαρμογή του στεγανοποιητικού δακτυλίου. Στη συνέχεια κατασκευάζονται οι οπές και συγκολλούνται οι έξοδοι.

Στην επόμενη σελίδα παρατίθεται το μηχανολογικό σχέδιο του δοχείου.



Γ. Βαθμονόμηση ψηφιακού μανομέτρου

Το συγκεκριμένο όργανο χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να μετρηθεί η πτώση πίεσης. Τοποθετήθηκε αισθητήρας στην είσοδο του αγωγού και ειδικότερα στο σημείο όπου εισέρχεται το CO₂. Η βαθμονόμησή του έγινε με τον ακόλουθο τρόπο. Στο δοχείο είναι προσαρμοσμένο δίπλα στην έξοδο του CO₂ μανόμετρο το οποίο δείχνει την πίεση που επικρατεί εντός του δοχείου. Με κλειστές τις εξόδους του δοχείου και με διαφορετικές παροχές αερίου λαμβάνονταν διαφορετικές ενδείξεις στο ψηφιακό όργανο οι οποίες αντιστοιχούσαν στις ενδείξεις του μανομέτρου που βρίσκεται στο επάνω μέρος του δοχείου. Τοποθετήθηκαν οι ενδείξεις αυτές σε ένα διάγραμμα διασποράς και υπολογίστηκε η εξίσωση της γραμμής λειτουργίας του.



Η εξίσωση της γραμμής που παριστάνεται στο παραπάνω διάγραμμα είναι :

$$P = 0,0041 * (\text{ένδειξη}) - 0,2213$$

Δ. Βαθμονόμηση ροομέτρου

Για την ακριβή ρύθμιση της παροχής του CO₂ χρησιμοποιείται ροόμετρο της εταιρείας Gilmond Accucal flowmeters και ο τύπος του είναι tube size 225. Μπορεί να μας δώσει παροχές έως και 5,3 lt/min. Έχει κλίμακα ενδείξεων από 0-100. Οι ενδείξεις όμως αυτές αντιστοιχούν σε αέρα πυκνότητας 0,0012 gr/ml και όχι σε CO₂, λόγω του ότι οι συγκεκριμένες ενώσεις έχουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες. Έτσι είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του οργάνου η οποία γίνεται με τον εξής τρόπο, ο οποίος υποδεικνύεται από την κατασκευάστρια εταιρεία. Η σχέση που συνδέει τις παροχές αέρα και CO₂ είναι η παρακάτω:

$$q_{CO_2}^2 = q_{air}^2 * \rho_{air} / \rho_{CO_2}$$

με q_{CO_2} : παροχή CO₂

q_{air} : παροχή αέρα

ρ_{air} / ρ_{CO_2} : λόγος πυκνοτήτων του αέρα προς το CO₂

Ο λόγος αυτός είναι ίσος με 1,53 (Perry). Άρα η παραπάνω σχέση γράφεται ως εξής:

$$q_{CO_2} = q_{air} * 0,808452$$

Όλες οι μετρήσεις έγιναν με φαινομενικές ταχύτητες και όχι με παροχές, οπότε υπολογίζουμε για το CO₂ το συγκεκριμένο μέγεθος με βάση την διατομή του αγωγού που είναι ίση με $A = \pi * d^2 / 4$. Ο αγωγός επαφής είναι διαμέτρου $d = 2$ mm. Άρα η διατομή του ίση με $\pi * 10^{-6} \text{ m}^2$. Τελικά η φαινομενική ταχύτητα του CO₂ δίνεται από τη σχέση:

$$U(G) = q_{CO_2} / A \quad [\text{m} / \text{s}]$$

Μπορούμε και για το νερό να γράψουμε ότι η φαινομενική του ταχύτητα δίνεται από τη σχέση:

$$U(L) = q_{H_2O} / A \quad [\text{m} / \text{s}]$$

Στην επόμενη σελίδα παρατίθενται οι φαινομενικές ταχύτητες του CO₂ για κάθε ένδειξη του ροομέτρου.

ένδειξη	U(G) [m/sec]	ένδειξη	U(G) [m/sec]	ένδειξη	U(G) [m/sec]
1	0,09697991	35	8,11026688	69	18,8810446
2	0,16263445	36	8,41064713	70	19,1814248
3	0,24931561	37	8,66811592	71	19,4818051
4	0,35916896	38	8,96849618	72	19,8250968
5	0,50635529	39	9,26887643	73	20,1254771
6	0,69945688	40	9,56925669	74	20,4258573
7	0,9140142	41	9,86963694	75	20,769149
8	1,14144497	42	10,1700172	76	21,0695293
9	1,37316688	43	10,5133089	77	21,3699096
10	1,60917994	44	10,8136892	78	21,7132013
11	1,84948414	45	11,1569809	79	22,0135815
12	2,0854972	46	11,4573611	80	22,3139618
13	2,3258014	47	11,8006529	81	22,614342
14	2,57039675	48	12,1439446	82	22,9576338
15	2,8149921	49	12,4443248	83	23,258014
16	3,0638786	50	12,7876166	84	23,5583943
17	3,30847395	51	13,0879968	85	23,8587745
18	3,55736045	52	13,4312885	86	24,1591548
19	3,8019558	53	13,7316688	87	24,459535
20	4,05084229	54	14,0749605	88	24,7599153
21	4,33405796	55	14,3753408	89	25,0602955
22	4,59152675	56	14,7186325	90	25,3606758
23	4,84899554	57	15,0190127	91	25,6610561
24	5,10646433	58	15,3623045	92	25,9614363
25	5,40684459	59	15,6626847	93	26,2618166
26	5,66431338	60	16,0059764	94	26,5621968
27	5,92178217	61	16,3063567	95	26,8625771
28	6,17925096	62	16,6496484	96	27,1629573
29	6,47963121	63	16,9500287	97	27,4633376
30	6,7371	64	17,2933204	98	27,7637178
31	6,99456879	65	17,5937006	99	28,0211866
32	7,29494904	66	17,8940809	100	28,3215669
33	7,55241783	67	18,2373726		
34	7,80988662	68	18,5377529		

Ε. Πίνακες αποτελεσμάτων

Στο σημείο αυτό παρατίθενται τα αριθμητικά αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν σε μορφή πινάκων. Παρακάτω επεξηγούνται όλοι οι συμβολισμοί των μεγεθών που υπάρχουν στους συγκεκριμένους πίνακες.

U(G)	: φαινομενική ταχύτητα CO ₂	[m/s]
ΔP	: πτώση πίεσης	[bar]
HCL 0.01N	: δείχνει πόσα gr HCL 0.01N απαιτήθηκαν για την εξουδετέρωση του δείγματος 5 ml.	[gr]
C2	: συγκέντρωση CO ₂ στο νερό στον πυθμένα του δοχείου	[gr/m ³]
C1	: συγκέντρωση CO ₂ στην έξοδο του αγωγού	[gr/m ³]
T	: θερμοκρασία του μείγματος εντός του δοχείου	[°C]
Ce θερμοκρασία	: συγκέντρωση κορεσμού του CO ₂ στο νερό τη συγκεκριμένη θερμοκρασία	[gr/m ³]
K*A	: ειδικός συντελεστής μεταφοράς μάζας του πίδακα	[1/s]
k*a	: ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς μάζας	[1/s]
C1/Ce	: λόγος της συγκέντρωσης στην έξοδο προς τη συγκέντρωση κορεσμού του CO ₂ στο νερό	
ε	: συντελεστής κατανάλωσης ενέργειας	[10 ⁻⁵ Pa/s]

Απορρόφηση CO₂ στο νερό σε συμπιεγμένη διάταξη επαφής : Παράρτημα

Μήκος αγωγού: 0,155m δείγμα 5ml

U(L): 0,14 m/s

πιστόνι: 1/8

in

ένδειξη: 2

παροχή Q(L): 27ml/min ή 0,00162

m³/h

ροόμετρο: Gilmond

225

ένδειξη ροομέτρου	U(G)[m/s]	ένδειξη Dig.	τιμή[bar]	ΔP[bar]	gr HCL 0.01N	C2 gr CO2/m3	T[C]	Ce	K'A	C1	K'a	C1/Ce	ε
0	0	80	0,1067	0,0205	5,745	505,56	24	1491,72	0,000661055	0	0	0	0,096374193
5	0,506	80	0,1067	0,0205	13,91	1224,08	24	1491,72	0,000661055	1086,87	1,17793	0,7286	0,444698064
5	0,506	80	0,1067	0,0205	14,11	1241,68	24	1491,72	0,000661055	1113,5	1,23937	0,74645	0,444698064
5	0,506	80	0,1067	0,0205	14,45	1271,6	24	1491,72	0,000661055	1158,75	1,35448	0,77679	0,444698064
5	0,506	80	0,1067	0,0205	14,4	1267,2	24	1491,72	0,000661055	1152,1	1,3366	0,77233	0,444698064
5	0,506	80	0,1067	0,0205	14,57	1282,16	24	1491,72	0,000661055	1174,73	1,39888	0,7875	0,444698064
20	4,05	85	0,1272	0,041	14,8	1302,4	23	1537,805	0,000637347	1187,11	1,3351	0,77195	1,108322581
20	4,05	85	0,1272	0,041	14,84	1305,92	23	1537,805	0,000637347	1192,35	1,3487	0,77536	1,108322581
20	4,05	85	0,1272	0,041	15,3	1346,4	23	1537,805	0,000637347	1252,66	1,52198	0,81457	1,108322581
20	4,05	85	0,1272	0,041	15,01	1320,88	23	1537,805	0,000637347	1214,64	1,40894	0,78985	1,108322581
20	4,05	85	0,1272	0,041	15,1	1328,8	23	1537,805	0,000637347	1226,44	1,44253	0,79752	1,108322581
20	4,05	85	0,1272	0,041	15,3	1346,4	23	1537,805	0,000637347	1252,66	1,52198	0,81457	1,108322581
30	6,73	95	0,1682	0,082	17,8	1566,4	22	1585,88	0,000614363	1557,28	3,62691	0,98197	3,634451613
30	6,73	95	0,1682	0,082	18,19	1600,72	22	1585,88	0,000614363	1607,66	κορεσμός	1,01374	3,634451613
30	6,73	95	0,1682	0,082	18,4	1619,2	22	1585,88	0,000614363	1634,79	κορεσμός	1,03084	3,634451613
30	6,73	95	0,1682	0,082	18,56	1633,28	22	1585,88	0,000614363	1655,46	κορεσμός	1,04388	3,634451613
30	6,73	95	0,1682	0,082	18,6	1636,8	22	1585,88	0,000614363	1660,63	κορεσμός	1,04713	3,634451613
30	6,73	95	0,1682	0,082	18,71	1646,48	22	1585,88	0,000614363	1674,84	κορεσμός	1,05609	3,634451613

Απορρόφηση CO₂ στο νερό σε συμπιεγμένη διάταξη επαφής : Παράρτημα

Μήκος αγωγού: 0,155m δείγμα 5ml
 U(L): 0,5 m/s
 πιστόνι: 1/8 in
 ένδειξη: 7
 παροχή Q(L): 94,5ml/min ή 0,00567m³/h
 ροόμετρο: Gilmond 225

	U(G)[m/s]	ένδειξη Dig.	τιμή[bar]	ΔP[bar]	gr HCL.0.01N	C2 grCO2/m3	T[C]	Ce	K'A	C1	K'a	C1/Ce	ε
0	0	80	0,1067	0,0205	7,5	660	23	1537,805	0,0030983	0	0	0	0,066129032
5	0,506	90	0,1477	0,0615	12,869	1132,472	23	1537,805	0,0030983	827,71208	2,488144	0,5362425	0,399154838
5	0,506	90	0,1477	0,0615	12,945	1139,16	23	1537,805	0,0030983	839,42862	2,5417172	0,5458616	0,399154838
5	0,506	90	0,1477	0,0615	13,001	1144,088	23	1537,805	0,0030983	848,06187	2,5817705	0,5514756	0,399154838
5	0,506	90	0,1477	0,0615	13,018	1145,584	23	1537,805	0,0030983	850,68267	2,5940288	0,5531798	0,399154838
5	0,506	90	0,1477	0,0615	13,157	1157,816	23	1537,805	0,0030983	872,11161	2,6960486	0,5671146	0,399154838
15	2,8	90	0,1477	0,0615	13,7	1206,6	23	1537,805	0,0030983	965,82323	3,1287846	0,6215503	1,309354839
15	2,8	90	0,1477	0,0615	14,07	1238,16	23	1537,805	0,0030983	1012,8643	3,4609398	0,6586429	1,309354839
15	2,8	90	0,1477	0,0615	14,3	1258,4	23	1537,805	0,0030983	1048,3222	3,6861341	0,6817004	1,309354839
15	2,8	90	0,1477	0,0615	14,6	1284,8	23	1537,805	0,0030983	1094,5718	4,005729	0,7117754	1,309354839
15	2,8	90	0,1477	0,0615	15,3	1346,4	23	1537,805	0,0030983	1202,4873	4,9041658	0,7819504	1,309354839
20	4,05	95	0,1682	0,082	15,326	1348,688	23	1537,805	0,0030983	1206,4956	4,9428887	0,7845569	2,407096774
20	4,05	95	0,1682	0,082	15,52	1365,76	23	1537,805	0,0030983	1236,4036	5,2475323	0,8040054	2,407096774
20	4,05	95	0,1682	0,082	15,657	1377,816	23	1537,805	0,0030983	1257,5242	5,4814685	0,8177397	2,407096774
20	4,05	95	0,1682	0,082	15,926	1401,488	23	1537,805	0,0030983	1298,9946	5,9970614	0,844707	2,407096774
31	6,99	100	0,1887	0,1025	15,24	1341,12	23	1537,805	0,0030983	1193,2374	4,8165436	0,7759354	4,953064516
31	6,99	100	0,1887	0,1025	15,78	1388,64	23	1537,805	0,0030983	1276,4865	5,7070359	0,8300705	4,953064516
31	6,99	100	0,1887	0,1025	16,15	1421,2	23	1537,805	0,0030983	1333,5276	6,4999961	0,867163	4,953064516
31	6,99	100	0,1887	0,1025	15,94	1402,72	23	1537,805	0,0030983	1301,1529	6,0262952	0,8461105	4,953064516

Απορρόφηση CO₂ στο νερό σε συμπαγή διάταξη επαφής : Παράρτημα

Μήκος αγωγού 0,155 m δείγμα 5 ml
 U(L): 1,1 m/s
 πιστόνι: 3/8
 in
 ένδειξη: 2
 παροχή Q(L): 210ml/min ή 0,0126m³/h
 ροόμετρο: Gilmond
 225

ένδειξη ροομέτρου	U(G)[m/s]	ένδειξη Dig.	τιμή[bar]	ΔP[bar]	gr HCL 0.01N	C2 grCO2/m3	T[°C]	Ce	K'A	C1	K'a	C1/Ce	ε
0	0	110	0,2297	0,1435	3,513	309,144	22	1585,88	0,0027214	0	0	0	1,018387097
20	4,05	130	0,3117	0,2255	11,42	1004,96	22	1585,88	0,0027214	864,2982403	5,58774	0,54499599	7,492419355
20	4,05	130	0,3117	0,2255	12,07	1062,16	22	1585,88	0,0027214	935,3484307	6,32328	0,589797734	7,492419355
20	4,05	130	0,3117	0,2255	12,14	1068,32	22	1585,88	0,0027214	942,9999897	6,40724	0,594622537	7,492419355
20	4,05	130	0,3117	0,2255	12,63	1111,44	22	1585,88	0,0027214	996,5609026	7,02452	0,62839616	7,492419355
31	6,994	150	0,3937	0,3075	12,02	1057,76	22	1585,88	0,0027214	929,8830315	6,26391	0,586351446	16,05745161
31	6,994	150	0,3937	0,3075	13,68	1203,84	22	1585,88	0,0027214	1111,334287	8,56159	0,700768209	16,05745161
31	6,994	150	0,3937	0,3075	13,78	1212,64	22	1585,88	0,0027214	1122,265086	8,72695	0,707660785	16,05745161
31	6,994	150	0,3937	0,3075	14,45	1271,6	22	1585,88	0,0027214	1195,501436	9,94702	0,753841045	16,05745161
31	6,994	150	0,3937	0,3075	14,9	1311,2	22	1585,88	0,0027214	1244,690029	10,9027	0,784857637	16,05745161
31	6,994	150	0,3937	0,3075	15,23	1340,24	22	1585,88	0,0027214	1280,761664	11,6956	0,807603138	16,05745161
54	14,07	200	0,5987	0,5125	17,07	1502,16	22	1585,88	0,0027214	1481,888358	19,3336	0,934428538	50,15887097
54	14,07	200	0,5987	0,5125	17,1	1504,8	22	1585,88	0,0027214	1485,167597	19,561	0,93649431	50,15887097
54	14,07	200	0,5987	0,5125	17,15	1509,2	22	1585,88	0,0027214	1490,632996	19,9569	0,939940599	50,15887097
54	14,07	200	0,5987	0,5125	17,21	1514,48	22	1585,88	0,0027214	1497,191476	20,4632	0,944076144	50,15887097
54	14,07	200	0,5987	0,5125	18,2	1601,6	22	1585,88	0,0027214	1605,406381	κορεσμός	1,012312647	50,15887097
81	22,6	270	0,8857	0,7995	17,8	1566,4	22	1585,88	0,0027214	1561,683187	29,6803	0,984742343	122,246129
81	22,6	270	0,8857	0,7995	17,95	1579,6	22	1585,88	0,0027214	1578,079385	37,7131	0,995081207	122,246129
81	22,6	270	0,8857	0,7995	18	1584	22	1585,88	0,0027214	1583,544784	46,2715	0,998527495	122,246129
81	22,6	270	0,8857	0,7995	18,07	1590,16	22	1585,88	0,0027214	1591,196343	κορεσμός	1,003352298	122,246129
81	22,6	270	0,8857	0,7995	18,11	1593,68	22	1585,88	0,0027214	1595,568662	κορεσμός	1,006109329	122,246129

Απορρόφηση CO₂ στο νερό σε συμπιεγμένη διάταξη επαφής : Παράρτημα

Μήκος αγωγού: 0,155m δείγμα 5ml
 U(L): 2,22
 m/s
 πιστόνι: 3/8 in
 ένδειξη: 4
 παροχή Q(L): 420ml/min ή 0,0252m³/h
 ροόμετρο: Gilmonrd 225

ένδειξη ροομέτρου	U(G)[m/s]	ένδειξη Dig.	ημ[bar]	ΔP[bar]	gr HCL0.01N	C ₂ grCO ₂ /m ³	T[C]	Ce	K'A	C1	K'a	C1/Ce	ε
0	0	145	0,3732	0,2870	7,786	685,08	24	1491,72	0,015023	0	0	0	4,110580645
5	0,506	170	0,4757	0,3895	9,75	858	24	1491,72	0,015023	319,7811	3,455473	0,214371	6,850174194
5	0,506	170	0,4757	0,3895	10,31	907,28	24	1491,72	0,015023	410,9146	4,614883	0,275464	6,850174194
5	0,506	170	0,4757	0,3895	10,38	913,44	24	1491,72	0,015023	422,3063	4,766638	0,2831	6,850174194
5	0,506	170	0,4757	0,3895	10,56	931,04	24	1491,72	0,015023	454,854	5,2093	0,304919	6,850174194
5	0,506	170	0,4757	0,3895	10,95	963,6	24	1491,72	0,015023	515,0673	6,06614	0,345284	6,850174194
10	1,6	190	0,5577	0,4715	11	968	24	1491,72	0,015023	523,2042	6,185962	0,350739	11,62019355
10	1,6	190	0,5577	0,4715	11,25	990	24	1491,72	0,015023	563,8888	6,800591	0,378012	11,62019355
10	1,6	190	0,5577	0,4715	11,28	992,64	24	1491,72	0,015023	568,771	6,876151	0,381285	11,62019355
10	1,6	190	0,5577	0,4715	11,39	1002,32	24	1491,72	0,015023	586,6722	7,156665	0,393286	11,62019355
10	1,6	190	0,5577	0,4715	11,47	1009,36	24	1491,72	0,015023	599,6913	7,364183	0,402013	11,62019355
20	4,05	225	0,7012	0,615	13,37	1176,56	24	1491,72	0,015023	908,8944	13,45977	0,609293	24,87774194
20	4,05	225	0,7012	0,615	13,55	1192,4	24	1491,72	0,015023	938,1873	14,19832	0,62893	24,87774194
20	4,05	225	0,7012	0,615	13,71	1206,48	24	1491,72	0,015023	964,2254	14,88839	0,646385	24,87774194
20	4,05	225	0,7012	0,615	13,75	1210	24	1491,72	0,015023	970,735	15,06623	0,650749	24,87774194
20	4,05	225	0,7012	0,615	13,8	1214,4	24	1491,72	0,015023	978,8719	15,29168	0,656204	24,87774194
39	9,26	300	1,0087	0,9225	13,77	1211,76	24	1491,72	0,015023	973,9897	15,15598	0,652931	68,32451613
39	9,26	300	1,0087	0,9225	13,8	1214,4	24	1491,72	0,015023	978,8719	15,29168	0,656204	68,32451613
39	9,26	300	1,0087	0,9225	13,86	1219,68	24	1491,72	0,015023	988,6362	15,56699	0,662749	68,32451613
39	9,26	300	1,0087	0,9225	13,87	1220,56	24	1491,72	0,015023	990,2636	15,61339	0,66384	68,32451613