



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Διεργασίες Ανάδευσης-Ανάμιξης

υπό

ΟΥΡΑΝΙΑ ΚΕΛΕΣΙΔΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2016

© 2016 Κελεσίδου Ουρανία

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Βασίλειο Μποντόζογλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κ. Νικόλαο Ανδρίτσο και κ. Νικόλαο Πελεκάση για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Επίσης, ευχαριστώ τον Δημήτρη Βαπορίδη για την υποστήριξη και τη βοήθειά του, καθόλη τη διάρκεια των προσπαθειών μου για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Γεωργία Μποζατζίδου και Νεόφυτο Κελεσίδη για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένεια μου και ιδιαιτέρως στη μητέρα μου και στον πατέρα μου.

Κελεσίδου Ράνια

Οι διεργασίες ανάδευσης και ανάμιξης χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία εξασφαλίζοντας ικανοποιητικές συνθήκες διασποράς και μεγάλη απόδοση στην μεταφορά μάζας. Η επιτυχία πολλών βιομηχανικών διεργασιών εξαρτάται από την σωστή επιλογή του κατάλληλου δοχείου ανάμιξης όσο και από την αποτελεσματική λειτουργία του.

Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάστηκαν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά, οι τύποι ροής καθώς και οι διάφοροι τύποι στροφείων που χρησιμοποιούνται σε ένα δοχείο ανάδευσης. Μελετήθηκαν ακόμη κάποιες από τις πιο σημαντικές παραμέτρους λειτουργίας τους, όπως η κατανάλωση ενέργειας, ο ρυθμός κυκλοφορίας και η μετάδοση θερμότητας σε διαφορετικές διατάξεις.

Στη συνέχεια έγινε μελέτη των διεργασιών ανάμιξης, και πιο συγκεκριμένα των διαφόρων συστημάτων που χρησιμοποιούνται συχνότερα και τα βασικότερα στοιχεία των συστημάτων αυτών. Ιδιαίτερη βάση δόθηκε στα διαστικά συστήματα αερίου-υγρού, τα οποία είναι και από τα πιο πολύπλοκα αλλά και από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα στη βιομηχανία, και πιο συγκεκριμένα στη διασπορά αερίου σε υγρό. Παρουσιάστηκαν στοιχεία σχετικά με την κατακράτηση αερίου, τη διεπιφάνεια και την «πλημμύριση» του αναδευτήρα, καθώς και σχετικά με τη στήλη φυσαλίδων, μιας διάταξης με ευρεία χρήση.

Τέλος μελετήθηκε η αλληλεπίδραση μερικών από τα πιο σημαντικά μεγέθη ενός δοχείου ανάμιξης μέσω αντίστοιχων διαγραμμάτων. Η εν λόγω συσχέτιση είναι μεγάλης θεωρητικής και πρακτικής σημασίας, αφού στη βιβλιογραφία δεν παρουσιάζονται ακόμη αρκετά δεδομένα πάνω σ' αυτή.

Περίληψη

Κατάλογος Σχημάτων & Εικόνων

Κατάλογος Πινάκων & Διαγραμμάτων

1. Εισαγωγή	10
1.1. Εισαγωγή-Σκοπός	10
1.2. Ιστορική Αναδρομή	11
1.3. Εφαρμογές	12
2. Ανάδευση	13
2.1. Πρότυπο δοχείο / Αντιδραστήρας Ανάδευσης	13
2.2. Λειτουργικά Χαρακτηριστικά	16
2.3. Τύποι Ροής	17
2.4. Τύποι Στροφείων	20
2.4.1. Επιλογή Στροφείου	20
2.4.2. Στροφεία Αξονικής Ροής	21
2.4.3. Στροφεία Ακτινικής Ροής	22
2.4.4. Στροφεία Hydrofoil	23
2.5. Κατανάλωση Ενέργειας	24
2.6. Ρυθμός Κυκλοφορίας	28
2.7. Χρόνος Ομογενοποίησης	29
2.8. Μετάδοση Θερμότητας σε Αναδευόμενο Δοχείο	31
2.8.1. Μετάδοση Θερμότητας με Σπείρα	32
2.8.2. Μετάδοση Θερμότητας μέσα από το Τοίχωμα	33

3. Ανάμιξη	34
3.1. Είδη Συστημάτων	34
3.2. Μονοφασικά Συστήματα Υγρής Φάσης	36
3.3. Διφασικά Συστήματα Στερεού – Υγρού	36
3.3.1. Διασπορά Στερεών Σωματιδίων σε Υγρό	37
3.4. Διφασικά Συστήματα Υγρού – Υγρού	40
3.4.1. Διασπορά Υγρού σε Υγρό με Ανάδευση	40
3.4.2. Διασπορά Υγρού σε Υγρό με Στατικό Αναμίκτη	43
3.4.3. Διασπορά Υγρού σε Υγρό με Εγχυτήρα	44
3.5. Διφασικά Συστήματα Αερίου – Υγρού	46
3.5.1. Διασπορά Αερίου σε Υγρό	46
3.5.1.1. Κατανάλωση Ενέργειας	48
3.5.1.2. Κατακράτηση Αερίου	50
3.5.1.3. Μέγεθος Φυσαλίδων	52
3.5.1.4. Εμβαδόν Διεπιφάνειας	53
3.5.1.5. «Πλημμύριση» Αναδευτήρα	55
3.5.2. Στήλη Φυσαλίδων	58
3.5.2.1. Γεωμετρία	58
3.5.2.2. Κατανομέας	61
3.5.2.3. Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	62
3.6. Τριφασικά Συστήματα	64
4. Σύνοψη Θεωρητικού Μέρους	65
5. Διαγράμματα	66
6. Συμπεράσματα	73
7. Βιβλιογραφία	74
8. Παράρτημα	77

Κατάλογος Σχημάτων & Εικόνων

Σχήμα 1	(α) Πρότυπος σχεδιασμός αναδευόμενου αντιδραστήρα. (β) Ημι-ελλειπτικός πυθμένας. (γ) Πρότυπο πυθμένα ASME	10
Σχήμα 2	Αναδευτήρας με είσοδο από το κάτω μέρος	11
Σχήμα 3	Αναδευτήρες με είσοδο από το πλάι, από το πάνω μέρος υπό γωνία και από το πλάι σε κυλινδρικό δοχείο	12
Σχήμα 4	Τύπος ροής για αναδευτήρα (α) αξονικής και (β) ακτινικής ροής	15
Σχήμα 5	Είδη αναδευτήρων (α) στρόβιλος Rushton, (β) στρόβιλος Scaba 6SRGT ή Chemineer BT-6, (γ) ναυτική προπέλα, (δ) αναδευτήρας με 4 επίπεδα κεκλιμένα πτερύγια PBT4-45, (ε) Lightmin A315	15
Σχήμα 6	Θέρμανση αναδευόμενου δοχείου (α) με κέλυφος, ή (β) με σερπαντίνα. (γ,δ) Παραδείγματα βιομηχανικών αναδευόμενων δοχείων (γ) με μία ή (δ) με πολλαπλές σερπαντίνες	28
Σχήμα 7	Αιώρηση σε διασπορά στερεών σωματιδίων σε υγρό	34
Σχήμα 8	Αιώρηση σε διασπορά στερεών σωματιδίων που επιπλέουν σε υγρό	35
Σχήμα 9	Διαστρωμάτωση και καθίζηση στερεών σωματιδίων	35
Σχήμα 10	Διασπορά αερίου σε υγρό	44
Σχήμα 11	Κοιλότητες αερίου που εγκλωβίζονται στα πτερύγια του στροβίλου κατά την περιστροφή του	45
Σχήμα 12	Στάδια διασποράς αερίου και πλημμύρισης αναδευτήρα	52
Σχήμα 13	Επίδραση της παροχής του αερίου στην αποτελεσματική διασπορά του	53
Σχήμα 14	Τυπική στήλη φυσαλίδων : G_i , L_i : οι παροχές αερίου και υγρού αντίστοιχα, με $i=0$ είσοδο και $i=1$ έξοδο	56
Σχήμα 15	Σύνθετες μορφές στήλης φυσαλίδων (Shah et al., 1982) : G_i , L_i οι παροχές αερίου και υγρού αντίστοιχα, με $i=0$ είσοδο και $i=1$ έξοδο	57

Εικόνα 1	Ανάδευση σε εγκατάσταση επεξεργασίας ορυκτών	8
Εικόνα 2	Στροφεία αξονικής ροής	18
Εικόνα 3	Στροφεία ακτινικής ροής	19
Εικόνα 4	Στροφεία Hydrofoil	20
Εικόνα 5	Στατικοί αναμίκτης	40
Εικόνα 6	Έγχυση ενός υγρού μέσα σ'ένα άλλο μέσα από ακροφύσιο	41
Εικόνα 7	(α) Αναδευόμενο δοχείο με εγχυτήρα (β) Λεπτομέρεια κατασκευής βιομηχανικού εγχυτήρα	42
Εικόνα 8	Πορώδη διαφράγματα (μεταλλικά, κεραμικά, από πολυμερές) για τη διασπορά αερίου σε υγρό	44
Εικόνα 9	Διασπορά αερίου σε υγρό με ανάδευση	47
Εικόνα 10	Τυπικοί τύποι κατανομών για τη διασπορά της αέριας φάσης στην στήλη φυσαλίδων	58

Κατάλογος Πινάκων & Διαγραμμάτων

Πίνακας 1	Χαρακτηριστικά στοιχεία αναδευτήρων	23
Πίνακας 2	Δεδομένα Διαγράμματος 3	74
Πίνακας 3	Δεδομένα Διαγράμματος 4	75
Πίνακας 4	Δεδομένα Διαγράμματος 5	76
Πίνακας 5	Δεδομένα Διαγράμματος 6	77
Πίνακας 6	Δεδομένα Διαγράμματος 7	78
Πίνακας 7	Δεδομένα Διαγράμματος 8	79
Πίνακας 8	Δεδομένα Διαγράμματος 9	80

Διάγραμμα 1	Χαρακτηριστική εξάρτηση του αριθμού ισχύος (P_0) από τον αριθμό Reynolds (Re), για μερικούς διαδεδομένους αναδευτήρες ($D/T=1/3$ και $C/H=1/3$)	21
Διάγραμμα 2	Επίδραση αερίου στην κατανάλωση ενέργειας (για στρόβιλο Rushton και πρότυπη διαμόρφωση δοχείου)	46
Διάγραμμα 3	Διάγραμμα V-P για διαφορετικά είδη αναδευτήρων	63
Διάγραμμα 4	Διάγραμμα V-N για διαφορετικά είδη αναδευτήρων	64
Διάγραμμα 5	Διάγραμμα V-P για Rushton 6-blade με διαφορετικά D/T	65
Διάγραμμα 6	Διάγραμμα V-N για Rushton 6-blade με διαφορετικά D/T	66
Διάγραμμα 7	Διάγραμμα ρ-P για διαφορετικά είδη αναδευτήρων	67
Διάγραμμα 8	Διάγραμμα ρ-N για διαφορετικά είδη αναδευτήρων	68
Διάγραμμα 9	Διάγραμμα μ-P για διαφορετικά είδη αναδευτήρων	69

1.1 Εισαγωγή – Σκοπός

Οι διεργασίες ανάδευσης και ανάμιξης απαντώνται ευρέως σε ολόκληρη την παραγωγική βιομηχανία σε διεργασίες που αφορούν φυσικές και χημικές μεταβολές, όπως είναι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στις βιομηχανίες τροφίμων, φαρμάκων, χαρτιού, πλαστικών και ελαστικών, και είναι μια από τις βασικές υποδιεργασίες στη χημική βιομηχανία, όσο και στη μεταλλουργία, την επεξεργασία νερού και αποβλήτων κ.α.

Για τον ορθολογικό σχεδιασμό ενός αναδευόμενου αντιδραστήρα είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητή η επίδραση διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων στο καθεστώς λειτουργίας. Η φύση της ροής στα αναδευόμενα δοχεία είναι πολύπλοκη και εξαρτάται από τη γεωμετρία και τις διάφορες λειτουργικές παραμέτρους. Επιπλέον, μεγέθη όπως η συνολική κατακράτηση αέρα, η συνολική κατανομή μεγέθους φυσαλίδων και ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας δίνουν μονάχα μία συνολική εικόνα. Η τοπική πληροφορία της υδροδυναμικής των διασπαστικών ροών απαιτείται για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του αντιδραστήρα και ενδεχομένως και την εντατικοποίηση της διεργασίας (Thatte et al., 2004).

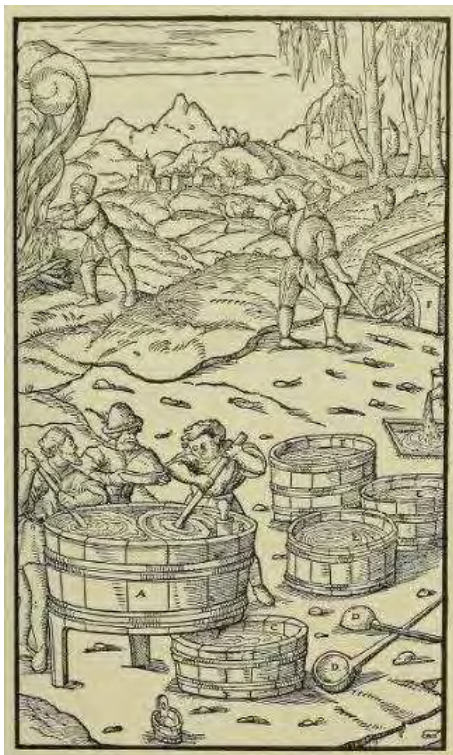
Πριν από οτιδήποτε άλλο, ας διευκρινισθούν οι δύο όροι : ανάμιξη είναι η διεργασία, με την οποία διασπείρεται ένα υλικό μέσα σ' ένα άλλο, της ίδιας ή και διαφορετικής φάσης, έτσι ώστε να επιτευχθεί τελικά μια ομογενής διασπορά, ενώ ανάδευση είναι η μηχανική διεργασία, με την οποία παρέχεται κινητική ενέργεια στο ρευστό μέσω ενός αναδευτήρα για να επιταχυνθεί η διεργασία της ανάμιξης. Είναι προφανές ότι μπορεί να υπάρξει ανάμιξη χωρίς ανάδευση, για παράδειγμα με την απλή διάχυση – κι ας διαρκεί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα – ή με εισροή ενός ρευστού μέσα σ' ένα άλλο ή με ροή μέσα από ειδικά διαμορφωμένες σωληνώσεις ή όταν αναμιγνύονται στερεά σωματίδια κλπ. Συνεπώς, η ανάδευση είναι ένα υποσύνολο της ευρύτερης διεργασίας της ανάμιξης.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος για την παροχή κινητικής ενέργειας, από τα βάθη της αρχαιότητας, είναι η μηχανική ανάδευση, με τη χρήση κάποιου κατάλληλου αναδευτήρα, που η κίνησή του (αρχικά προκαλούμενη από την ανθρώπινη μυϊκή δύναμη κι αργότερα από την αντίστοιχη ζωική) μεταδίδει ενέργεια στο ρευστό και ταυτόχρονα το υποχρεώνει να ρεύσει μέσα στο δοχείο του.

Η πιο παλιά μορφή αναδευτήρα ήταν ένα απλό κουπί (paddle), που το κινούσαν παλινδρομικά μέσα στο ρευστό. Στη συνέχεια, το απλό κουπί βελτιώθηκε, με προσαρμογή ενός εγκάρσιου επίπεδου τμήματος και περιστροφική πια κίνηση (η απλούστατη αυτή μορφή αναδευτήρα συναντάται ακόμα και σήμερα, σε ορισμένες βιομηχανίες).

Η ανθρώπινη εφευρετικότητα επέτρεψε την ανάπτυξη νέων αναδευτήρων, βασισμένων άλλοτε σε απλές μετατροπές και άλλοτε σε ριζικά διαφορετική σχεδίαση των πτερυγίων. Έτσι, σήμερα, υπάρχει μια πληθώρα αναδευτήρων, που έχουν ο καθένας τους ιδιαίτερα λειτουργικά χαρακτηριστικά, αλλά και απόδοση από την άποψη της ανάμιξης. Μερικοί από αυτούς είναι «γενικής χρήσης», ενώ μερικοί άλλοι είναι κατάλληλοι για ορισμένους μόνο τύπους ρευστών.



Εικόνα 1 : Ανάδευση σε εγκατάσταση επεξεργασίας ορυκτών (Agricola G., 1556, De Re Metallica)

1.3 Εφαρμογές

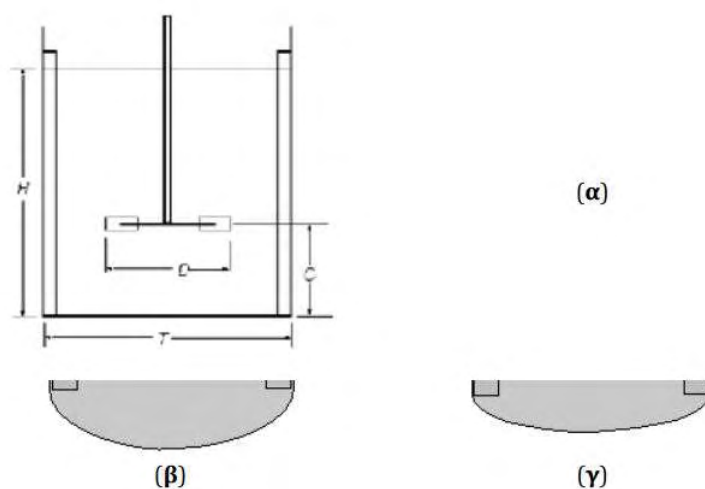
Η διεργασία της ανάμιξης, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, έχει ως τελικό στόχο μια ομοιογενή διασπορά. Το διασπειρόμενο υλικό μπορεί να είναι της ίδιας ή διαφορετικής φάσης με το υλικό, μέσα στο οποίο γίνεται η διασπορά. Έτσι έχουμε ανάμιξη αερίων, υγρών, στερεών και όλων των δυνατών συνδυασμών των τριών αυτών φάσεων. Οι εφαρμογές της ανάμιξης είναι ποικίλες, μερικές από αυτές είναι :

- η διασπορά αλάτων και άλλων πρόσθετων συστατικών σε τρόφιμα, για την παρασκευή «ενισχυμένων» τελικών προϊόντων
- η ανάμιξη χαλικιών και τσιμέντου (χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα στερεά σωματίδια, αντιστοίχως), με ασβέστη (διασπορά στερεών σωματιδίων σε νερό), προς παρασκευή οικοδομικού κονιάματος
- η διασπορά υδρογόνου μέσα σε λάδι, στο οποίο έχει γίνει ήδη διασπορά λεπτόκοκκων στερεών σωματιδίων καταλύτη (π.χ., νικέλιο Raney), ώστε να ακολουθήσει απορρόφηση του υδρογόνου και στη συνέχεια αντίδραση, με στόχο την παρασκευή υδρογονωμένων παραγώγων
- η διασπορά στερεών σωματιδίων και αέρα σε νερό, ώστε ορισμένα από τα σωματίδια (τα υδρόφοβα) να προσκολληθούν στις ανερχόμενες φυσαλίδες και να «επιπλεύσουν» (δηλαδή να διαχωριστούν από τα υπόλοιπα, ανεπιθύμητα στερεά, τα λεγόμενα «στείρα»)
- η ανάμιξη δύο μη-αναμίξιμων υγρών (λάδι, νερό) μαζί με κάποια εξαιρετικά λεπτόκοκκα στερεά (π.χ. σκόνη σπόρων μουστάρδας) με αποτέλεσμα την παρασκευή γαλακτωμάτων (π.χ. μαγιονέζα)

2.1 Πρότυπο Δοχείο / Αντιδραστήρας Ανάδευσης

Πριν προχωρήσουμε στη μελέτη και τον χαρακτηρισμό των διαφόρων εξειδικευμένων αναδευτήρων, πρέπει αρχικά να περιγράψουμε τον χώρο, όπου γίνεται η ανάδευση. Ένα αναδευόμενο σύστημα αποτελείται από: το δοχείο, τους ανακλαστήρες, τον αναδευτήρα και τον άξονά του, και τυχόν συμπληρωματικά εξαρτήματα (θερμαντική σπείρα, διασπορέα αερίου κ.α.)

Μετά από πολλές δεκαετίες έρευνας και πειραματισμών, οι μελετητές κατέληξαν σε έναν πρότυπο σχεδιασμό του αναδευόμενου δοχείου (ή αντιδραστήρα), που φαίνεται στο Σχήμα 1 (Ζουμπούλης, 2009):

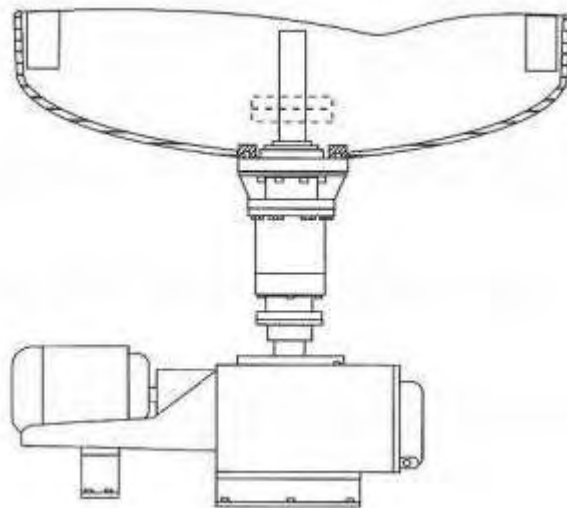


Σχήμα 1 : (α) Πρότυπος σχεδιασμός αναδευόμενου αντιδραστήρα. (β) Ημι-ελλειπτικός πυθμένας. (γ) Πρότυπο πυθμένα ASME.

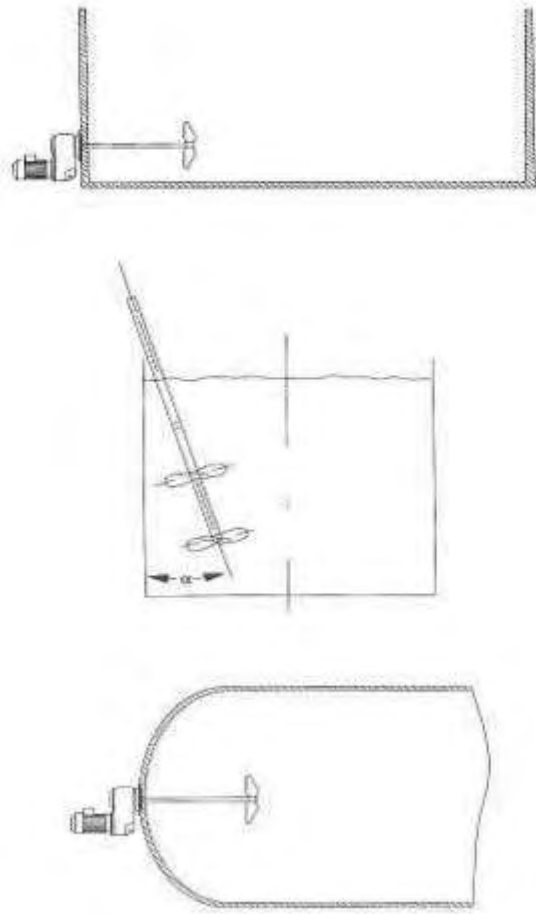
- ύψος του υγρού μέσα στο δοχείο (H) : ίσο με τη διάμετρο του δοχείου (T). Αν είναι ανάγκη να γίνει επεξεργασία μεγάλων όγκων υγρών, τότε επιλέγεται το ύψος έτσι ώστε να είναι πολλαπλάσιο της διαμέτρου T ($H = nT$).
- διάμετρος του αναδευτήρα (D): συνήθως το $1/3$ της διαμέτρου του δοχείου ($D = T/3$). Σε ορισμένες περιπτώσεις αναφέρονται και αναδευτήρες μεγαλύτερης διαμέτρου ($D = T/2$).
- μορφή πυθμένα: επίπεδος ή καμπύλος (Σχήματα β-γ).

- απόστασή του από τον πυθμένα του δοχείου (C): ισούται με το $1/3$ της διαμέτρου ($C = T/3$).
- αριθμός και πλάτος των ανακλαστήρων: επειδή η περιστροφική κίνηση του αναδευτήρα συμπαρασύρει και το ρευστό σε περιστροφική κίνηση, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να σχηματιστεί ένας έντονος στροβιλισμός στο κέντρο του δοχείου, με έναν κώνο χωρίς υγρό να εκτείνεται σταδιακά, καθώς αυξάνεται ο ρυθμός περιστροφής του, σχεδόν μέχρι τον αναδευτήρα. Μια τέτοια κατάσταση δεν προάγει την ανάμιξη, γιατί το υγρό έχει την τάση απλώς να περιστρέφεται γύρω από το δοχείο ως μια ενιαία μάζα (solid body rotation). Για την αντιμετώπιση παρόμοιων προβλημάτων, τοποθετούνται στις άκρες του δοχείου τέσσερις επίπεδοι ανακλαστήρες, που έχουν πλάτος $1/10$ της διαμέτρου του. Οι ανακλαστήρες άλλοτε εκτείνονται μέχρι τον πυθμένα του δοχείου και άλλοτε μέχρι ενός μικρού ύψους από αυτόν (ειδικά όταν ο πυθμένας είναι καμπύλος). Εξάλλου, οι ανακλαστήρες άλλοτε τοποθετούνται έτσι ώστε να εφάπτονται στα τοιχώματα του δοχείου και άλλοτε στηρίζονται σε ελάσματα, έτσι ώστε να αφήνουν ένα μικρό διάκενο ανάμεσα στον ανακλαστήρα και το εσωτερικό τοίχωμα του δοχείου.

Σε ψηλά δοχεία ο αναδευτήρας μπορεί να εγκατασταθεί στο κάτω μέρος του δοχείου, για να μειωθεί το μήκος του άξονα, και να παρέχεται και μηχανική ευστάθεια στο άλλο σύστημα. Άλλοι τρόποι εισόδου του συστήματος του αναδευτήρα στην δεξαμενή-δοχείο, είναι από το πλάι (διάμετρος δοχείου πάνω από 30 ft) ή από το πάνω μέρος υπό γωνία.



Σχήμα 2 : Αναδευτήρας με είσοδο από το κάτω μέρος



Σχήμα 3 : Αναδευτήρες με είσοδο από το πλάι, από το πάνω μέρος υπό γωνία και από το πλάι σε κυλινδρικό δοχείο.

Μέσα στα αναδευόμενα δοχεία τοποθετούνται συχνά και άλλα εξαρτήματα, όπως δειγματολήπτες, θήκες θερμομέτρων, εμβαπτισμένες θερμαντικές ή/και ψυκτικές σπείρες, διασπορείς αερίων κ.ά., των οποίων οι διαστάσεις και η τοποθέτηση δεν υπάγονται σε κάποιες «οδηγίες», αλλά εξαρτώνται από τις ανάγκες και τους περιορισμούς της διεργασίας.

2.2 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

Θεωρούμε ως αντιδραστήρα κάθε συσκευή όπου συμβαίνει μια χημική ή βιοχημική αντίδραση. Με βάση τον ορισμό αυτό, ο χημικός αντιδραστήρας αποτελεί την πιο σημαντική συσκευή των βιομηχανικών χημικών διεργασιών, και συναντάται σε πολλές παραγωγικές εγκαταστάσεις. Η μορφή των χημικών αντιδραστήρων ποικίλει: μπορεί να είναι φούρνοι, λέβητες, καζάνια, στήλες ή ακόμη και απλοί σωλήνες.

Η κατάταξη των αντιδραστήρων ανάμιξης σε κατηγορίες καθώς και η ανάλυση και σχεδιασμός τους γίνονται με διάφορα κριτήρια. Ένα βασικό κριτήριο κατηγοριοποίησης είναι ο τύπος λειτουργίας. Έτσι διακρίνονται οι εξής τύποι (Ζουμπούλης, 2009):

- **Ασυνεχείς ή διαλείποντος έργου**, στους οποίους όλες οι φάσεις αναμιγνύονται στην αρχή και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας δεν υπάρχει καμία εξωγενής παρέμβαση στο μίγμα όσον αφορά τις ροές. Οι αντιδραστήρες αυτοί θεωρούνται κλειστά συστήματα.
- **Συνεχούς λειτουργίας**, στους οποίους υπάρχει συνεχής ροή όλων των φάσεων που συμμετέχουν, και
- **Ημισυνεχούς λειτουργίας** (ή ημιδιαλείποντος έργου), όπου κάποιες φάσεις ρέουν σε συνεχή λειτουργία ενώ άλλες φάσεις είναι μη μεταβαλλόμενες.

Ανάλογα με τον τύπο ροής μπορούμε επίσης να διακρίνουμε τους αντιδραστήρες:

- **Εμβολικής ροής** (συνήθως αυλωτοί) όπου οι φάσεις ρέουν μέσα από αρκετό μήκος σωλήνωσης προκειμένου να είναι ικανοποιητικός ο χρόνος επαφής, και
- **Πλήρους ανάμιξης**, όπου οι φάσεις εισάγονται σε δοχείο στο οποίο παρέχεται έντονη ανάδευση με σκοπό την κυκλοφορία εντός του δοχείου και την επίτευξη μίας σχετικής ομοιογένειας σε όλο τον όγκο του (Ζαμπούλης, 2009).

Η επιλογή του κατάλληλου αναδευτήρα για μια ορισμένη διεργασία γίνεται με βάση ορισμένα κριτήρια:

- αφενός οικονομικά : οι πιο απλές μορφές αναδευτήρα, όπως για παράδειγμα ο στρόβιλος με τα πλάγια πτερύγια και ο στρόβιλος Rushton, είναι «ελεύθερες» και μπορούν να κατασκευαστούν σχετικά εύκολα, ενώ οι πιο εξειδικευμένοι αναδευτήρες καλύπτονται από διεθνή διπλώματα ευρεσιτεχνίας και το κόστος προμήθειάς τους είναι συνήθως αρκετά σημαντικό.

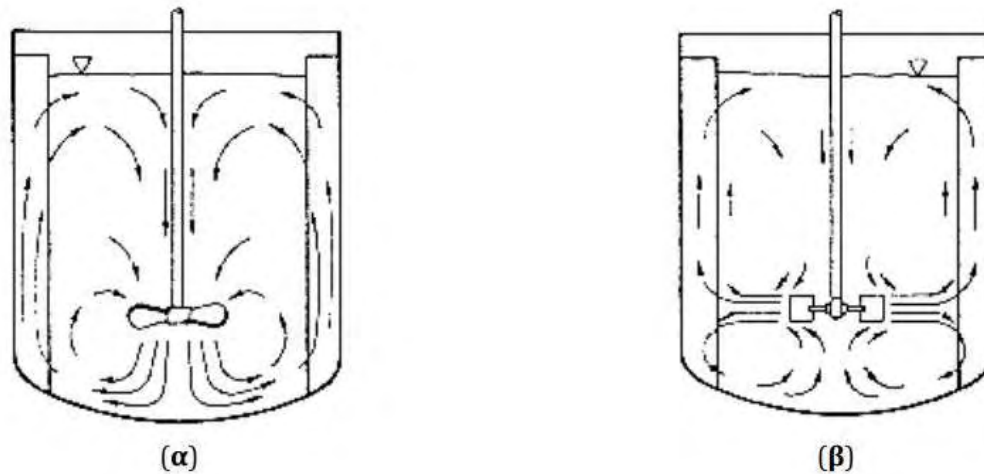
- αφετέρου λειτουργικά : αυτά αφορούν το κόστος λειτουργίας από την άποψη της κατανάλωσης ενέργειας, και τον χρόνο, που χρειάζεται ο κάθε αναδευτήρας για να ομογενοποιήσει το περιεχόμενο του αντιδραστήρα.

2.3 Τύποι Ροής

Ένας βασικός τρόπος διαχωρισμού των αναδευτήρων είναι ανάλογα με τον τύπο ροής που προκαλούν μέσα στο αναδευόμενο δοχείο. Διακρίνουμε τους αναδευτήρες σε *αξονικής* και *ακτινικής* ροής (Μαντος, 2001).

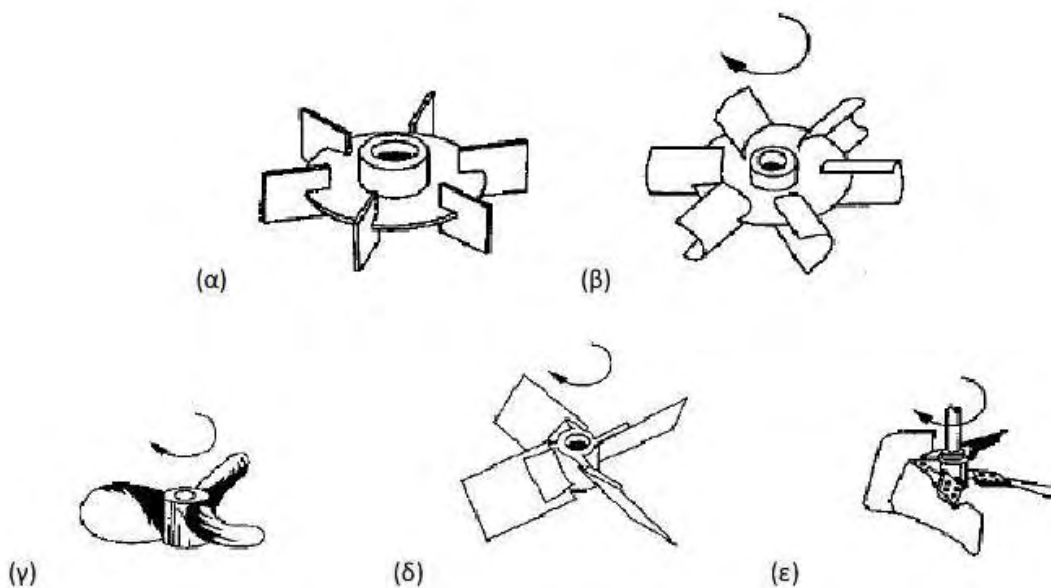
Για την παρουσίασή τους, θα σημειωθεί ότι όλοι οι αναδευτήρες λειτουργούν ουσιαστικά ως αντλίες: αναρροφούν το ρευστό από κάποια πλευρά και το εκτινάσσουν από κάποια άλλη. Επιπλέον, θα θεωρηθεί ότι ο αναδευτήρας περιστρέφεται «δεξιόστροφα» (όπως οι δείκτες ενός ρολογιού), κοιτάζοντας τον αναδευτήρα από το πάνω μέρος του).

Οι αναδευτήρες αξονικής ροής αναρροφούν το ρευστό από το πάνω μέρος τους (και μερικές φορές και από το πλάι) και το εκτινάσσουν από το κάτω μέρος τους (Σχήμα α), κατά τη διεύθυνση του άξονα του αναδευτήρα. Το εκτινασσόμενο ρευστό, λόγω της εγγύτητας του αναδευτήρα με τον πυθμένα του δοχείου, στρέφεται προς τα πλάγια και τα τοιχώματα του δοχείου, αλλάζει φορά και κατευθύνεται προς το πάνω μέρος του δοχείου. Φτάνοντας στο ύψος της πάνω πλευράς του αναδευτήρα, συναντά την περιοχή αναρρόφησης της «αντλίας», με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του ρευστού να κατευθυνθεί προς το πάνω μέρος του αναδευτήρα, κι ένα μικρό μόνο μέρος του ρευστού να κατευθυνθεί προς το πάνω μέρος του αντιδραστήρα. Έτσι, αφενός σχηματίζεται ένας βρόχος κυκλοφορίας ρευστού γύρω από τον αναδευτήρα, αφετέρου στο πάνω μέρος του δοχείου η κυκλοφορία του ρευστού είναι σχετικά περιορισμένη. Γενικά, οι αξονικοί αναδευτήρες είναι κατάλληλοι για έντονες συνθήκες ανάδευσης στο κάτω μέρος του αναδευόμενου αντιδραστήρα. Αναδευτήρες αξονικής ροής είναι π.χ. οι στρόβιλοι με πλάγια πτερύγια (pitched-blade turbine), και οι περισσότεροι αναδευτήρες ειδικού σχεδιασμού.



Σχήμα 4 : Τύπος ροής για αναδευτήρα (α) αξονικής και (β) ακτινικής ροής.

Οι αναδευτήρες ακτινικής ροής (Σχήμα β) αναρροφούν το ρευστό τόσο από το πάνω όσο και από το κάτω μέρος τους και το εκτινάσσουν περιφερειακά και ακτινικά. Το ρευστό γρήγορα συναντά τα τοιχώματα του δοχείου και διασπάται σε δύο βρόχους κυκλοφορίας: ο ένας κατευθύνεται προς το κάτω μέρος του δοχείου και καταλήγει στην «αναρρόφηση» από το κάτω μέρος του αναδευτήρα, ενώ ο δεύτερος κυκλοφορεί το ρευστό στο πάνω μέρος του δοχείου. Οι ακτινικοί αναδευτήρες έχουν ως πλεονέκτημα το ότι επιτυγχάνουν καλύτερη κυκλοφορία του ρευστού μέσα στο αναδευόμενο δοχείο, αλλά και μειονεκτήματα που θα αναφερθούν παρακάτω. Τα παλιά, συμμετρικά κουπιά ήταν ακτινικοί αναδευτήρες, ενώ σήμερα ο πιο διαδεδομένος τύπος ακτινικού αναδευτήρα είναι ο στρόβιλος Rushton (Paul, 2004).



Σχήμα 5 : Είδη αναδευτήρων (α) στρόβιλος Rushton, (β) στρόβιλος Scaba 6SRGT ή Chemineer BT-6, (γ) ναυτική προπέλα, (δ) αναδευτήρας με 4 επίπεδα κεκλιμένα πτερύγια PBT4-45, (ε) Lightmin A315

Ο χαρακτηρισμός ενός αναδευτήρα ως αξονικού ή ακτινικού γίνεται με μέτρηση των πεδίων ροής, δηλαδή των ταχυτήτων του υγρού σε διάφορα μέρη μέσα στο αναδευόμενο δοχείο. Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτουν διαγράμματα, όπου φαίνονται οι βρόχοι κυκλοφορίας του υγρού.

Από τις μετρήσεις των ταχυτήτων σε διάφορα σημεία του αναδευόμενου δοχείου, προκύπτει ότι στις περιοχές κοντά στον αναδευτήρα οι ταχύτητες είναι σχετικά υψηλές και προσεγγίζουν την περιφερειακή ταχύτητα περιστροφής του αναδευτήρα V_{tip} ($= \pi ND$). Αντιθέτως, στις πιο απομακρυσμένες περιοχές, όπως για παράδειγμα στην κορυφή του δοχείου, οι ταχύτητες του υγρού είναι πολύ μικρότερες. Έτσι, δημιουργούνται περιοχές με έντονη κυκλοφορία - και άρα και έντονη ανάμιξη ή/και εναλλαγή ρευστού - και περιοχές με σχετικά περιορισμένη κυκλοφορία, όπου το ρευστό φαίνεται να είναι κάπως «στάσιμο». Η αποτελεσματικότητα ενός αναδευτήρα κρίνεται από το κατά πόσο μπορεί να περιορίσει στο ελάχιστο αυτές τις περιοχές οιονεί-στασιμότητας.

Ένα άλλο ενδιαφέρον στοιχείο, που προκύπτει από τα πεδία ταχυτήτων, είναι η μελέτη της χωρικής μεταβολής των ταχυτήτων. Η ταχύτητα είναι ένα διανυσματικό μέγεθος, και συνεπώς μπορεί να αναλυθεί στις συνιστώσες της. Σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας (V) είναι η ακτινική (V_r), η αξονική (V_z) και η εφαπτομενική (V_θ), και το μέτρο της ταχύτητας προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των τριών συνιστωσών:

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_z^2 + V_\theta^2}$$

Από τα πεδία ταχυτήτων μπορούν να υπολογιστεί η τοπική διαφορική κλίση της ταχύτητας (ρυθμός διάτμησης), όπως για παράδειγμα οι dV_r/dz και dV_z/dr . Μεγάλες τιμές του ρυθμού διάτμησης - που παρατηρούνται κυρίως με ακτινικούς αναδευτήρες - συνεπάγονται έντονες συνθήκες τοπικής ανάμιξης, οι οποίες αποτελούν μεν ενισχυτικό παράγοντα για τις χημικές αντιδράσεις, αλλά είναι επιζήμιες, από άποψη σταθερότητας και βιωσιμότητας, σε μικροοργανισμούς, κροκίδες, ή συσσωματώματα σωματιδίων με σωματίδια ή με φυσαλίδες, οπότε είναι προτιμότερη σε τέτοιες περιπτώσεις η χρήση αξονικού αναδευτήρα.

2.4 Τύποι Στροφείων

Οι τυπικοί τύποι στροφείων που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις ανάδευσης, έχουν διαιρεθεί σε διαφορετικές κλάσεις με βάση την μορφή της ροής, τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται, και τα ειδικά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας τους.

Για παράδειγμα τα στροφεία ακτινικής ροής είναι κατάλληλα για διασπορά αερίων. Το στροφείο με περύγια υπό κλίση (pitched blade turbine) παρόλο που έχει καταχωρηθεί σαν στροφείο αξονικής ροής κάποιες φορές αναφέρεται και σαν στροφείο μεικτής ροής, διότι η ροή δημιουργείται και αξονικά και ακτινικά του στροφείου. Πάνω από την τιμή του λόγου $D/T=0.55$ το στροφείο με περύγια υπό κλίση γίνεται ακτινικής ροής. Παρακάτω δίνονται λεπτομέρειες για διάφορα είδη στροφείων.

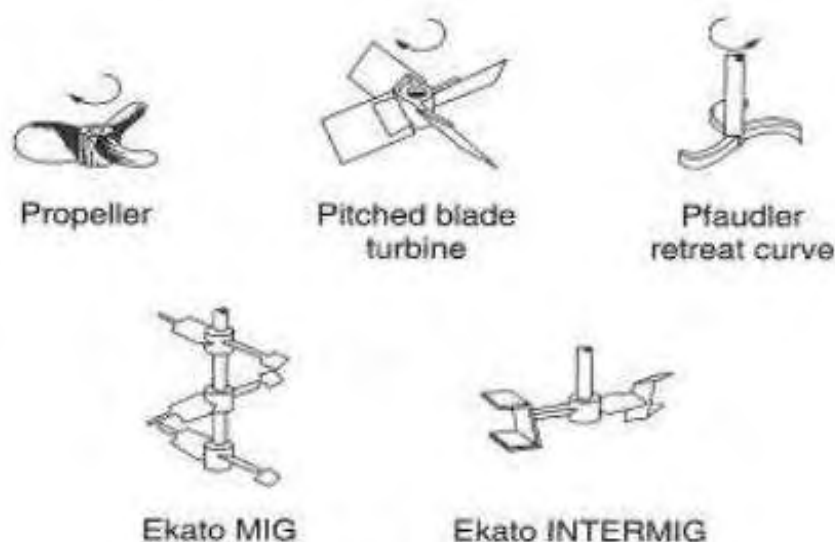
2.4.1 Επιλογή Στροφείου

Υπάρχουν κυριολεκτικά εκατοντάδες τύποι στροφείων στο εμπόριο για χρήση. Ο καθορισμός του πιο αποδοτικού στροφείου πρέπει να βασίζεται στην κατανόηση των απαιτήσεων και την γνώση των φυσικών ιδιοτήτων της εκάστοτε διεργασίας. Τα στροφεία μπορούν να ομαδοποιηθούν σαν στροβίλους (turbines) για υγρά με χαμηλή ή μέση συνεκτικότητα και σαν στροφεία με υγρά με υψηλή συνεκτικότητα.

Υπάρχουν τέσσερις τύποι στροφείων του πρώτου είδους (turbines) τα οποία χαρακτηρίζονται από την μορφή της ροής και από το επίπεδο που μια στρώση παρεμβάλλεται σε μια γειτονικής της (axial flow, radial flow, hydrofoil, high shear impellers). Τα στροφεία τύπου turbine μπορούν να έχουν αριθμό περυγίων από 2 έως 12. Τα 2 περύγια παρουσιάζουν συνήθως μηχανική αστάθεια, ενώ είναι δύσκολο να συνδέσουμε πάνω από έξι. Τα στροφεία αξονικής ροής έχουν γενικά τρία ή τέσσερα περύγια, ενώ τα στροφεία ακτινικής ροής, σχεδιάζονται με έξι περύγια. Στην συνέχεια αναφέρονται οι σημαντικότερες κατηγορίες στροφείων και ορισμένοι τύποι τους ενδεικτικά.

2.4.2 Στροφεία Αξονικής Ροής

Τα στροφεία αξονικής ροής έχουν μεγάλη εφαρμογή σε πολλές διεργασίες και ένας αριθμός, ενδεικτικός, μερικών τύπων στροφείων αξονικής ροής δίνεται στην παρακάτω εικόνα (Μπαμπαλώνα, 2009):



Εικόνα 2 : Στροφεία αξονικής ροής

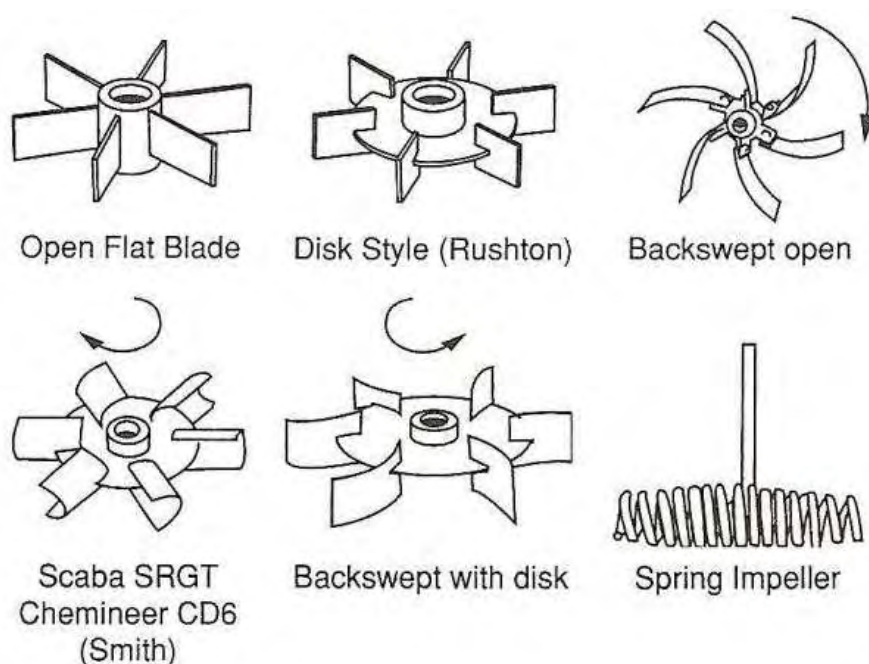
Το παλαιότερο στροφείο αξονικής ροής είναι η ναυτική προπέλα, η οποία συχνά χρησιμοποιείται για ανάδευση σε μεγάλες δεξαμενές με σημείο εισόδου από το πλάι και με σημείο εισόδου από την κορυφή για μικρές δεξαμενές.

Ένα στροφείο με πτερύγια υπό κλίση αποτελείται από μία βάση, ένα κεντρικό σημείο (hub) με έναν αριθμό πτερυγίων, άκαμπτα στερεωμένα πάνω του. Τα πτερύγια μπορούν να έχουν κλίση μεταξύ 10° και 90° , με την πιο κοινή κλίση να είναι αυτή των 45° . Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ροή από ένα τέτοιο στροφείο για υγρά με χαμηλή έως μέση συνεκτικότητα είναι στροφείο μεικτής ροής, με στοιχεία αξονικής και ακτινικής ροής.

Το στροφείο retreat curve της εταιρείας Pfaulder χρησιμοποιείται για υγρά υψηλής διάβρωσης. Η εταιρεία Ekato δημιούργησε τα στροφεία Mig και Intermig, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για υγρά υψηλής συνεκτικότητας αλλά είναι αποδοτικά και για υγρά με χαμηλές και μέσες τιμές συνεκτικότητας.

2.4.3 Στροφεία Ακτινικής Ροής

Όπως και τα στροφεία αξονικής ροής τα στροφεία ακτινικής ροής, μερικοί τύποι των οποίων φαίνονται στην παρακάτω εικόνα, χρησιμοποιούνται για υγρά χαμηλής και μέσης συνεκτικότητας. Συγκρίνοντας αυτόν τον τύπο στροφείου με τα στροφεία αξονικής ροής, αυτά παρέχουν υψηλότερα επίπεδα τύρβης και ανάμιξη στρωμάτων κίνησης του υγρού ωθώντας μικρότερη μάζα υγρού. Τα στροφεία ακτινικής ροής ωθούν το υγρό κάθετα ως προς τον άξονά τους, στα τοιχώματα του δοχείου (Μπαμπαλώνα, 2009).

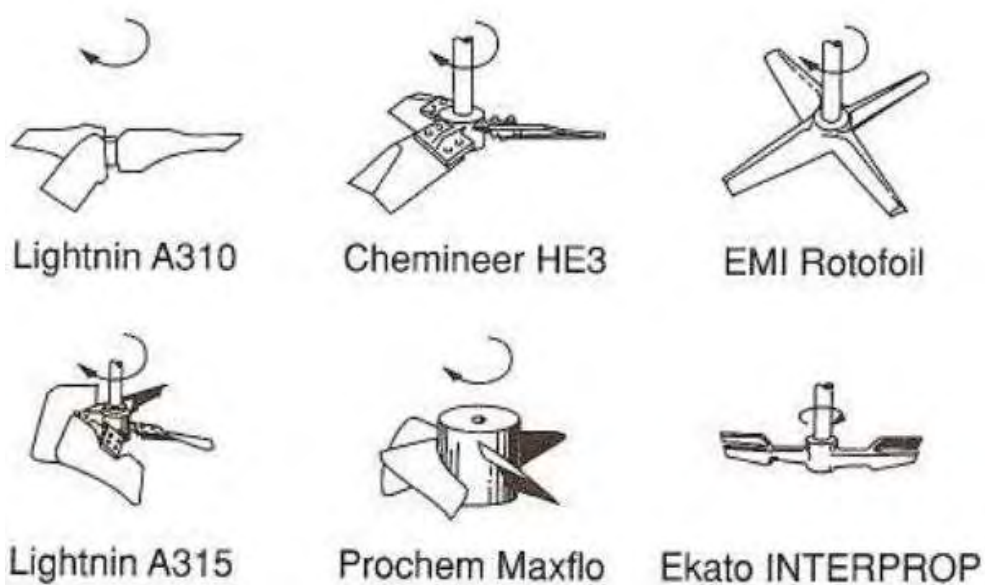


Εικόνα 3 : Στροφεία ακτινικής ροής (Paul, Atiemo-Obeng and Kresta, 2004)

Παρέχεται η δυνατότητα να υπάρχει και ένας δίσκος πάνω στον οποίο στερεώνονται τα περύγια, όπως το στροφείο Rushton ή να είναι ανοιχτό, όπως το FBT. Στροφεία χωρίς δίσκο δεν ωθούν συνήθως το υγρό σε ακτινική κατεύθυνση γιατί υπάρχει διαφορά πίεσης σε κάθε πλευρά του στροφείου. Με την χρήση δίσκου υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης στο στροφείο μεγαλύτερου αριθμού περυγίων απ' ότι σε στροφείο με hub.

2.4.4 Στροφεία Hydrofoil

Κατασκευάστηκαν για περιπτώσεις όπου η αξονική ροή είναι σημαντική. Η γωνία του περυγίου στην άκρη αυτού είναι μικρότερη (ως προς τον άξονα του στροφείου). Αυτό προκαλεί μια πιο ομοιόμορφη ταχύτητα ώθησης υγρού στην περιοχή που αυτό ωθείται. Αναφορικά με τους τύπους που παρουσιάστηκαν παραπάνω, τα στροφεία Lightnin A310, Chemineer HE3 και EMI Rotofoil είναι αποδοτικά για ανάδευση υγρών. Ο τύπος Prochem Maxflo χρησιμοποιείται για διασπορά αερίων, όπως και ο τύπος Ekato Interprop (Μπαμπαλώνα, 2009).

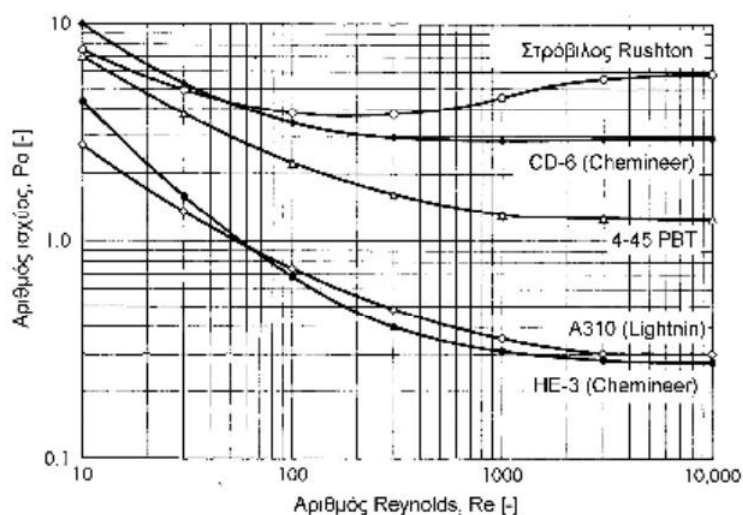


Εικόνα 4 : Στροφεία Hydrofoil

2.5 Κατανάλωση Ενέργειας

Είναι προφανές ότι η περιστροφή του αναδευτήρα απαιτεί ορισμένη ενέργεια. Αυτή παρέχεται από έναν κινητήρα, κατάλληλα προσαρμοσμένο στην κορυφή ή στο πλάι (και σπανιότερα στο κάτω μέρος) του αναδευόμενου δοχείου. Σε ορισμένες περιπτώσεις (κυρίως σε δοχεία μικρού κυβισμού), ο κινητήρας εφοδιάζεται με μειωτή στροφών, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής των στροφών, ανάλογα με τις απαιτήσεις της παραγωγικής διαδικασίας.

Ανάλογη με την παρεχόμενη ισχύ είναι και η ροή μέσα στον αντιδραστήρα: για πολύ μικρές ταχύτητες περιστροφής, η κατανάλωση ισχύος είναι περιορισμένη και η ροή στο αναδευόμενο δοχείο στρωτή ή γραμμική. Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός περιστροφής του αναδευτήρα, αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας (Μπαμπαλώνα, 2009).



Διάγραμμα 1 : Χαρακτηριστική εξάρτηση του αριθμού ισχύος (Po) από τον αριθμό Reynolds (Re), για μερικούς διαδεδομένους αναδευτήρες ($D/T=1/3$ και $C/H=1/3$).

Το κριτήριο χαρακτηρισμού μιας ροής είναι ο αδιάστατος αριθμός Reynolds, που για τα αναδευόμενα δοχεία υπολογίζεται από την έκφραση (McCabe, 2003):

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu}$$

όπου

N : η συχνότητα περιστροφής του αναδευτήρα

ρ : η πυκνότητα του ρευστού

μ : το κινηματικό ιξώδες του ρευστού

Για τιμές του αριθμού $Re < 10$, η ροή στον αναδευόμενο αντιδραστήρα θεωρείται στρωτή, ενώ για $Re > 10^4$ η ροή θεωρείται τυρβώδης.

Η μελέτη και συσχέτιση των μετρήσεων κατανάλωσης ενέργειας για τους διάφορους αναδευτήρες σε διάφορες συνθήκες έδειξε ότι η κατανάλωση ενέργειας P [W] για την περιστροφή του αναδευτήρα και την ανάδευση του υγρού εξαρτάται από μια πληθώρα παραμέτρων, από τις φυσικοχημικές ιδιότητες (πυκνότητα, ιξώδες) του υγρού μέχρι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συνολικού συστήματος και τις συνθήκες λειτουργίας:

$$P = f(T, D, C, H, N, \rho, \mu, \dots)$$

Αντί για την ίδια την ισχύ, προτιμούμε να αναφερόμαστε στην αδιάστατη έκφραση της, τον αριθμό ισχύος (Po : power number) (Harnby, 1985):

$$Po = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

όπου

P : η ισχύς που καταναλώνεται

N : η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου

D : η διάμετρος του στροβίλου

ρ : η πυκνότητα του υγρού

Με τη βοήθεια της διαστασιακής ανάλυσης, προκύπτει ότι ο αριθμός ισχύος μπορεί να συσχετισθεί με τους αριθμούς Reynolds και Froude ($= N^2 D/g$):

$$Po = f(Re, Fr)$$

Σε τυρβώδεις συνθήκες ροής, βρέθηκε ότι ο αριθμός Froude δεν επηρεάζει την ισχύ και ότι ο αριθμός ισχύος Po παραμένει σταθερός και χαρακτηριστικός για τον κάθε τύπο αναδευτήρα (στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζονται καμπύλες αριθμού ισχύος για μερικούς από τους πιο διαδεδομένους αναδευτήρες).

Σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, ο αριθμός ισχύος είναι αντιστρόφως ανάλογος του αριθμού Reynolds. Συνεπώς:

- για $Re < 10$, $Po = K_L / Re$
- για $Re > 10^4$, $Po = K_T$

όπου οι τιμές των K_L και K_T λαμβάνονται από τον παρακάτω Πίνακα για τους πιο διαδεδομένους αναδευτήρες – ή από εξειδικευμένα βιβλία της βιβλιογραφίας.

Είδος αναδευτήρα	K_L	K_T	Fl
Ναυτική προπέλα (3 πτερύγια, τετραγωνικό βήμα)	41	0.32	0.50
HE-3 (Chemineer)	43	0.28	0.47
4-45 PBT	44.5	1.27	0.87
6-45 PBT	60	1.63	
Στρόβιλος Rushton	65	5.0	1.30
Άγκυρα	300	0.35	---

Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά στοιχεία αναδευτήρων.

Η παραπάνω ανάλυση για την κατανάλωση ενέργειας και τον αριθμό ισχύος βασίστηκε σε μια σταθερή τιμή για το ιξώδες του υγρού, που ισχύει για Νευτώνεια υγρά, όπου η διατμητική τάση (τ) είναι ανάλογη του ρυθμού διάτμησης (Mavros, 2001):

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

όπου

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dy}$$

Παραδείγματα Νευτώνειων υγρών είναι: το νερό, το γάλα, το σακχαρόνερο, τα ορυκτέλαια, η γλυκερίνη.

Για έναν μεγάλο αριθμό ρευστών, όμως, τα οριζόμενα ως μη-Νευτώνεια, το φαινόμενο ιξώδες μεταβάλλεται καθώς αλλάζει ο ρυθμός διάτμησης : για παράδειγμα, οι «μπογιές» με τις οποίες κάνουμε τα επιχρίσματα στους τοίχους γίνονται πιο λεπτόρρευστες καθώς τις αναδεύουμε. Για έναν μεγάλο αριθμό ρευστών έχει βρεθεί ότι η διατμητική τάση μπορεί να συσχετισθεί με τον ρυθμό διάτμησης με την παρακάτω εκθετική εξίσωση :

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n$$

όπου τα K και n είναι ο «δείκτης συνοχής» και ο «δείκτης συμπεριφοράς» του ρευστού, αντιστοίχως. Σε μια τέτοια περίπτωση, η εξίσωση για τη διατμητική τάση μπορεί να γραφεί :

$$\tau = \mu_{\alpha} \dot{\gamma}$$

όπου

$$\mu_{\alpha} = K(\dot{\gamma})^{n-1}$$

Είναι προφανές ότι ο ρυθμός διάτμησης μεταβάλλεται μέσα στο αναδευόμενο δοχείο και συνεπώς το φαινόμενο ιξώδες (μ_{α}) θα αλλάζει από σημείο σε σημείο. Έχει βρεθεί όμως ότι για τους περισσότερους αναδευτήρες η μέση τιμή του ρυθμού διάτμησης για όλο το δοχείο σχετίζεται απλά με την ταχύτητα περιστροφής του αναδευτήρα (N) (Metzner and Otto, 1957):

$$\overline{(\dot{\gamma})} = 11N$$

οπότε μπορεί να υπολογιστεί ένας αριθμός Reynolds για το μη-Νευτώνιο ρευστό (Re_{NN}), που ν' αντιστοιχεί σε μια μέση κατάσταση στο αναδευόμενο δοχείο :

$$Re_{NN} = \frac{\rho N^{2-n} D^2}{(11)^{n-1} K}$$

από τον οποίο και πάλι με το ίδιο διάγραμμα μπορεί να προσδιορισθεί ο αριθμός ισχύος για έναν δεδομένο αναδευτήρα και από αυτόν η απαιτούμενη ισχύς του κινητήρα.

Η ανάδευση μη-Νευτώνειων ρευστών με αναδευτήρες μικρής διαμέτρου συχνά οδηγεί σε προβλήματα, γιατί σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής αναδύεται μόνο η περιοχή γύρω από τον αναδευτήρα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι προτιμότερη η χρήση αναδευτήρων μεγάλου μεγέθους τύπου «άγκυρας» ή οι ελικοειδείς αναδευτήρες, που σαρώνουν όλον τον χώρο του αντιδραστήρα.

2.6 Ρυθμός Κυκλοφορίας

Η λειτουργία του αναδευτήρα ως αντλία προκαλεί την κυκλοφορία του ρευστού μέσα στο αναδευόμενο δοχείο. Ένας αποτελεσματικός αναδευτήρας έχει την ικανότητα να θέσει σε κυκλοφορία το σύνολο του περιεχόμενου στο δοχείο ρευστού.

Τα τμήματα του ρευστού, καθώς κυκλοφορούν μέσα στο δοχείο, διέρχονται σε σχετικά τακτικά διαστήματα μέσα από τον χώρο της «αντλίας», δηλαδή έναν ιδεατό χώρο που περικλείει τον αναδευτήρα. Ο μέσος χρόνος ανάμεσα σε δυο διαδοχικές διελεύσεις του ίδιου τμήματος ρευστού μέσα από τον χώρο του αναδευτήρα ορίζεται ως «χρόνος κυκλοφορίας», t_{circ} .

Ένα ισοζύγιο μάζας γύρω από τον χώρο του αναδευτήρα επιτρέπει τον υπολογισμό του όγκου του ρευστού, που διέρχεται μέσα από αυτή την περιοχή στη μονάδα του χρόνου (Q_a). Συνήθως, όμως, αναφερόμαστε σε έναν αδιάστατο αριθμό, που σχετίζεται με αυτή την ογκομετρική παροχή, τον **αριθμό ροής** (Fl) (McCabe, 2003):

$$Fl = \frac{Q_a}{ND^3}$$

Στη τέταρτη στήλη του Πίνακα 1 παρουσιάζεται ο αριθμός ροής για μερικούς από τους πιο διαδεδομένους αναδευτήρες. Ο στρόβιλος του Rushton εμφανίζει από τις μεγαλύτερες αποτελεσματικότητες στην κυκλοφορία του ρευστού, η οποία όμως αντιστοιχεί σε μια εξαιρετικά μεγάλη κατανάλωση ενέργειας.

Το ρεύμα ρευστού, που εκτινάσσεται από τον περιστρεφόμενο αναδευτήρα, συμπαρασύρει και ρευστό γύρω από αυτόν, με αποτέλεσμα η συνολική κυκλοφορία ρευστού να είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται από τον αριθμό ροής. Στη συνολική αυτή ροή, που κυκλοφορεί στο αναδευόμενο δοχείο (Q_c), αναφερόμαστε μέσω του αντίστοιχου αδιάστατου **αριθμού κυκλοφορίας** (Fl_c):

$$Fl_c = \frac{Q_c}{ND^3}$$

2.7 Χρόνος Ομογενοποίησης

Εκτός από την απαίτηση σε ενέργεια και την ποσότητα του ρευστού που μπορεί να θέσει σε κυκλοφορία, ένα ακόμα στοιχείο που χαρακτηρίζει την αποτελεσματικότητα ενός αναδευτήρα είναι ο χρόνος, που χρειάζεται για να ομογενοποιήσει το περιεχόμενο στο δοχείο υγρό. Αυτό συνήθως κρίνεται από τον χρόνο, που χρειάζεται για να φτάσει η συγκέντρωση (C_t) μιας ουσίας, μια μικρή ποσότητα της οποίας προστίθεται στο υγρό τη χρονική στιγμή $t = 0$, σε σταθερή τιμή (C_∞). Ο χρόνος αυτός ορίζεται ως ο **χρόνος ανάμιξης** (t_{mix}) (McCabe, 2003).

Επειδή όμως δεν είναι πάντα πρακτικά εφικτό να προσδιορισθεί ο t_{mix} , είναι προτιμότερο να υπολογιστεί ή να εκτιμηθεί ο χρόνος, που χρειάζεται για να φτάσει το δοχείο σε ένα ορισμένο ποσοστό ομοιογένειας $\delta(t)$:

$$\delta(t) = \frac{|C_t - C_\infty|}{|C_\infty - C_0|}$$

Συνήθως, ορίζεται ως εφικτό το 95% ή το 99% της ομοιογένειας και υπολογίζεται ή προσδιορίζεται πειραματικά αυτός ο χρόνος (το ποσοστό αυτό διευκρινίζεται σε τέτοιες περιπτώσεις).

Ο χρόνος ανάμιξης εξαρτάται κυρίως από τις σχετικές διαστάσεις αναδευτήρα (D) και δοχείου (T), τον αριθμό ισχύος και την ταχύτητα περιστροφής (N) και έχει βρεθεί η παρακάτω απλή συσχέτιση για τυρβώδεις συνθήκες (Nienow, 1997):

$$Nt_{mix} = 5.3(P_0)^{-1/3} \left(\frac{T}{D} \right)^2$$

Για τον στρόβιλο Rushton έχει βρεθεί ότι, για τυρβώδεις συνθήκες ροής, ο χρόνος ανάμιξης μπορεί να εκτιμηθεί από μια ακόμα πιο απλή συσχέτιση:

$$Nt_{mix} \cong 4 \left(\frac{T}{D} \right)^2$$

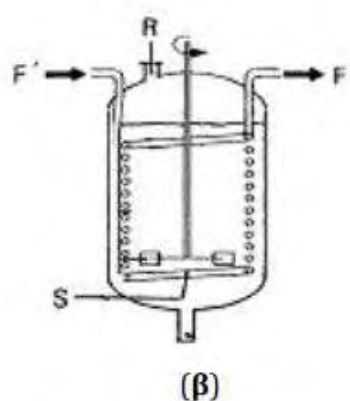
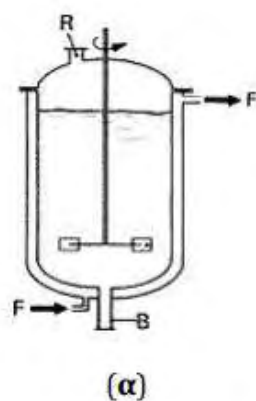
Είναι προφανές ότι ο χρόνος ανάμιξης συνδέεται με την κυκλοφορία μέσα στο αναδευόμενο δοχείο. Έχει βρεθεί η εξής συσχέτιση, που συνδέει τον χρόνο ανάμιξης, με τον αριθμό ροής (Metzner and Otto, 1957):

$$Nt_{mix} = 3.9 \left(\frac{T}{D} \right)^3 \left(\frac{1}{Fl} \right)$$

2.8 Μετάδοση θερμότητας σε αναδευόμενο δοχείο

Σε πολλές από τις διεργασίες της χημικής βιομηχανίας είναι απαραίτητη είτε η προσαγωγή είτε η απομάκρυνση θερμότητας από το υγρό, που περιέχεται στον αναδευόμενο αντιδραστήρα. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν από τους εξής δυο τρόπους (Μανβros, 2001):

- είτε μέσω της παράπλευρης επιφάνειας του αντιδραστήρα: το εξωτερικό τοίχωμα του δοχείου περιβάλλεται από ένα δεύτερο κέλυφος, και ανάμεσα στα δύο τοιχώματα σχηματίζεται ένας στεγανός χώρος, μέσα από τον οποίο ρέει (τροφοδοτείται) ένα κατάλληλο ρευστό – θερμαντικό (π.χ., ατμός ή άλλο, θερμότερο ρευστό) ή ψυκτικό (κρύο νερό, άλμη, ή άλλο ψυκτικό υγρό) – Σχήμα 13-α
- είτε μέσα από σπείρες, δηλαδή ένα μακρύ σωλήνα τυλιγμένο έτσι ώστε να σχηματίζει μια σερπαντίνα, που βυθίζεται μέσα στο υγρό, σχεδόν μέχρι τον πυθμένα του δοχείου (Σχήμα 13-β). Το θερμαντικό ή ψυκτικό ρευστό τροφοδοτείται από τη μια άκρη και εξέρχεται από την άλλη άκρη του σωλήνα.



(γ)



(δ)

Σχήμα 6 : Θέρμανση αναδευόμενου δοχείου (α) με κέλυφος, ή (β) με σερπαντίνα. (γ,δ) Παραδείγματα βιομηχανικών αναδευόμενων δοχείων (γ) με μία ή (δ) με πολλαπλές σερπαντίνες

Το συνηθισμένο ζητούμενο, στον σχεδιασμό του συστήματος μετάδοσης θερμότητας στο αναδευόμενο δοχείο, είναι η επιφάνεια εναλλαγής και η παροχή του ρευστού. Σ' αυτούς τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται:

- ο αδιάστατος αριθμός Reynolds
- ο αδιάστατος αριθμός Nusselt, που σχηματίζεται από τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (h) μεταξύ ρευστού και επιφανείας του τοιχώματος (δοχείου ή σπείρας), του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (k) του υγρού του αναδευόμενου δοχείου και μιας χαρακτηριστικής διάστασης, που σ' αυτή την περίπτωση είναι η διάμετρος του αναδευτήρα (D):

$$Nu = \frac{hD}{k}$$

- και ο αδιάστατος αριθμός Prandtl, που σχηματίζεται από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (k) του υγρού, το ιξώδες (μ) και την ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση του υγρού (C_p):

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

Από την πληθώρα των πειραματικών δεδομένων, που έχουν προκύψει για διάφορα μεγέθη και συνδυασμούς συσκευών και διεργασιών, έχουν προκύψει εμπειρικές εξισώσεις, που συσχετίζουν τις διάφορες παραμέτρους.

2.8.1 Μετάδοση Θερμότητας με Σπείρα

Όταν η μετάδοση θερμότητας (θέρμανση ή ψύξη) γίνεται μέσα από σπείρα, για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση (Mavros, 2001):

$$Nu = 0.17 \left(\frac{\rho N D^2}{\mu} \right)^{0.67} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.37} \left(\frac{D}{T} \right)^{0.1} \left(\frac{d_{σπειρ}}{T} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu}{\mu_{τοιχ}} \right)^{0.24}$$

όπου

$\mu_{τοιχ}$: το ιξώδες του ρευστού στη θερμοκρασία του τοιχώματος της σπείρας
 $d_{σπειρ}$: η εξωτερική διάμετρος της σπείρας

2.8.2 Μετάδοση Θερμότητας μέσα από το Τοίχωμα

Όταν η μετάδοση της θερμότητας γίνεται μέσα από το τοίχωμα του δοχείου και το εξωτερικό κέλυφος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω συσχέτιση (Μανρος, 2001):

$$Nu = 0.76 \left(\frac{\rho N D^2}{\mu} \right)^{0.66} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_{\text{τοιχ}}} \right)^{0.24}$$

Με τον όρο ανάμιξη (mixing) εννοούμε την διαδικασία ελαχιστοποίησης της ανομοιογένειας, με σκοπό να πετύχουμε ένα επιθυμητό αποτέλεσμα. Η ανομοιογένεια μπορεί να είναι σε συγκέντρωση, ή θερμοκρασία δύο ή περισσότερων υλικών, μαζί τοποθετημένα σε μια δεξαμενή-δοχείο. Εάν η διαδικασία της ανάμιξης αποτύχει να παράγει το επιθυμητό τελικό προϊόν, όσον αφορά την ποιότητα και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά, το κόστος παραγωγής αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό και μπορεί ακόμα να καθυστερήσει η προώθηση του προϊόντος. Αυτό συνεπάγεται ζημία για την βιομηχανία, και φαίνεται η σπουδαιότητα της διαδικασίας της ανάμιξης.

Χρήσιμες μέθοδοι για την εξέλιξη της διαδικασίας της ανάμιξης έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια σε ακαδημαϊκό και βιομηχανικό επίπεδο. Περιλαμβάνουν βελτιώσεις παραδοσιακών τεχνικών καθώς και άλλες μεθόδους προσομοίωσης και μοντελοποίησης πολύπλοκων διαδικασιών παρέχοντας έτσι σημαντικά εργαλεία δουλειάς.

3.1 Είδη Συστημάτων

Οι αντιδραστήρες ανάμιξης χρησιμοποιούνται ευρέως για διάφορους σκοπούς και τις περισσότερες φορές συνδυάζοντας πολλές φάσεις:

- Για την ανάμιξη αναμίξιμων υγρών ή για τη διασπορά δύο μη αναμίξιμων υγρών μεταξύ τους.
- Για τη διασπορά στερεών σωματιδίων σε ένα υγρό, που συχνά ακολουθείται από άλλη διεργασία όπως εκχύλιση, επίπλευση, αντίδραση.
- Για τη διασπορά ενός αερίου σε ένα υγρό και πάλι ακολουθούμενο από άλλη διεργασία όπως απορρόφηση και/ή χημική αντίδραση.
- Για τη διασπορά στερεών (όπως καταλύτες) και αερίων σε ένα υγρό μέσο για την πρόκληση χημικής αντίδρασης.

Για κάθε μία εφαρμογή μία διαφορετική διάταξη είναι κατάλληλη. Ο σχεδιασμός αντιδραστήρων ανάμιξης έχει υπάρξει ως αντικείμενο αναρίθμητων μελετών στη

διάρκεια πολλών δεκαετιών στο παρελθόν και πλέον οι βασικές αρχές σχεδιασμού περιγράφονται σε πρότυπα διαφόρων χωρών (ΗΠΑ : American Society of Mechanical Engineers Code, Section VIII, Γερμανία: Deutches Institut fur Normung DIN 28136).

Ωστόσο, η ανάμιξη υφίσταται και σε άλλες διεργασίες, όπως:

- Καλλιέργειες μικροοργανισμών (π.χ. ζυμώσεις).
- Κρυστάλλωση.
- Άλλες, όχι τόσο κλασικές χημικές διεργασίες όπως διαχείριση υγρών αποβλήτων και επεξεργασία μεταλλευμάτων.

Σε αυτές τις διεργασίες, το τελικό προϊόν εξαρτάται όχι μόνο από τις φυσικοχημικές παραμέτρους τις συγκεκριμένης διεργασίας (π.χ. κινητική αντιδράσεων), αλλά επίσης και από το μοτίβο επαφής μεταξύ των διαφόρων ειδών, το επίπεδο διασποράς της ενέργειας, τη διάταξη του δοχείου κ.α.

Η καταλληλότητα ενός συγκεκριμένου αναμικτήρα για μία δεδομένη διεργασία ανάμιξης εξαρτάται από την ικανότητα του να θέτει τη ρευστή φάση του δοχείου σε έντονη ανακυκλοφορία, αποφεύγοντας καταστάσεις όπου υπάρχουν περιοχές του ρευστού με φτωχή ή καθόλου ανάμιξη, αλλά ταυτόχρονα να αποφεύγει να τραυματίσει τα διάφορα είδη που είναι διεσπαρμένα τα οποία μερικές φορές είναι ευαίσθητα στις διατμήσεις (π.χ. κυτταρικές καλλιέργειες ή κρύσταλλοι). Έτσι λοιπόν, κρίνεται αναγκαίο να διευκρινιστούν για κάθε τύπο αναδευτήρα:

- Ο τύπος ροής μέσα στο δοχείο, ως συνάρτηση: α) της εσωτερικής διάταξης του δοχείου (ανακλαστήρες, πυθμένας, σπειρώματα), β) των ιδιοτήτων του ρευστού (αριθμός φάσεων, πυκνότητες, ιξώδη) και γ) τη σχετική τοποθέτηση του αναδευτήρα (απόσταση από πυθμένα, κατεύθυνση άντλησης).
- Η καταλληλότητα του αναδευτήρα για τη συγκεκριμένη διεργασία (υψηλές ή χαμηλές διατμητικές τάσεις) (Mavros, 2001).

3.2 Μονοφασικά Συστήματα Υγρής Φάσης

Σε αρκετές διεργασίες είναι απαραίτητο να αναμιχθούν μεταξύ τους αναμίξιμα υγρά, όπως η ανάμιξη παραγώγων της πετρελαϊκής βιομηχανίας. Αυτό θεωρείται μερικές φορές ως μία πολύ απλή διεργασία ανάμιξης αφού δεν περιλαμβάνει ούτε χημική αντίδραση ούτε διεπιφανειακή μεταφορά μάζας. Είναι μονάχα απαραίτητο να μειωθούν οι ανομοιομορφίες, όπως για παράδειγμα οι μεταβολές των συγκεντρώσεων στο τελικό διάλυμα να είναι σε επιτρεπτά επίπεδα. Ωστόσο, τέτοιες διεργασίες ανάμιξης μπορεί να γίνουν δύσκολες όταν τα υγρά έχουν πολύ διαφορετικές πυκνότητες ή ιξώδη. Επιπλέον, πρόβλημα μπορεί να δημιουργηθεί αν η συγκέντρωση ενός συστατικού στο τελικό μίγμα είναι μικρή.

Όταν εμπλέκονται και χημικές αντιδράσεις μεταξύ των υγρών φάσεων κρίνεται απαραίτητο τα συστατικά να έρθουν σε επαφή σε μοριακό επίπεδο, αναμιγνύοντας τα πριν αντιδράσουν. Με την ανάμιξη πριν οποιαδήποτε άλλη επαφή τους αποφεύγεται η παραγωγή πιθανών παραπροϊόντων ή η έντονη παραγωγή θερμότητας σε περιπτώσεις εξώθερμων αντιδράσεων (Harnby, 1985).

3.3 Διφασικά Συστήματα Στερεού-Υγρού

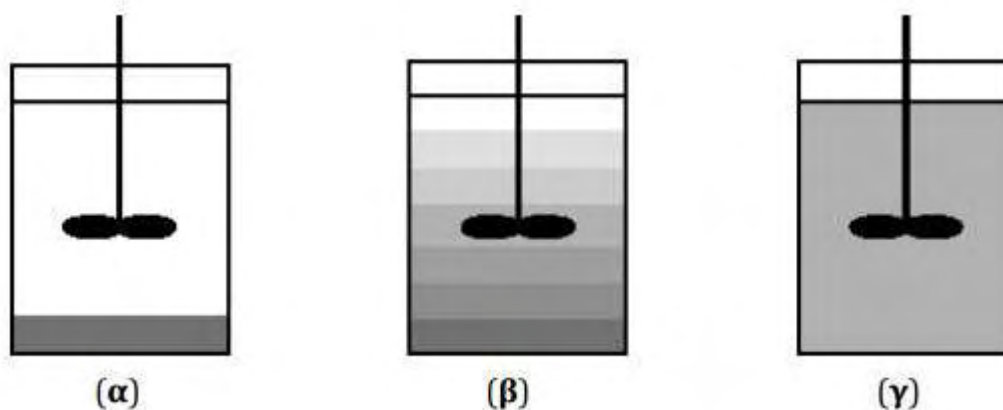
Σε διεργασίες όπως η κρυστάλλωση και η χημική αντίδραση στην υγρή φάση με στερεό καταλύτη είναι απαραίτητη η αιώρηση των στερεών σωματιδίων σε υγρά χαμηλού ιξώδους. Αυτό επιτυγχάνεται σε αναδευόμενα δοχεία, όπου ο αναδευτήρας χρησιμοποιείται για να αποτρέψει την κατακάθιση των στερεών και για να παρέχει συνθήκες κατάλληλες για καλή μεταφορά μάζας μεταξύ στερεών-υγρού και / ή χημική αντίδραση. Εάν διακοπεί η ανάδευση τα στερεά καθιζάνουν ή επιπλέουν, ανάλογα με τις σχετικές πυκνότητες των δύο φάσεων.

Στον αντίποδα βρίσκεται η περίπτωση όπου πρέπει να διασπαρθούν πολύ λεπτά στερεά σωματίδια σε ένα πολύ ιξώδες υγρό. Για παράδειγμα, μία τέτοια διεργασία είναι η ενσωμάτωση άνθρακα στα ελαστικά. Και σε αυτήν την περίπτωση, όπως και στα γαλακτώματα, το παραγόμενο προϊόν είναι σταθερό, πολύ ιξώδες με πολύπλοκη ρεολογική συμπεριφορά. Τέτοιες διεργασίες συχνά έχουν σχέση με επιφανειακά φαινόμενα και φυσική επαφή, σε αντίθεση με τη μεταφορά μάζας και τις χημικές αντιδράσεις (Harnby, 1985).

3.3.1 Διασπορά Στερεών Σωματιδίων σε Υγρό

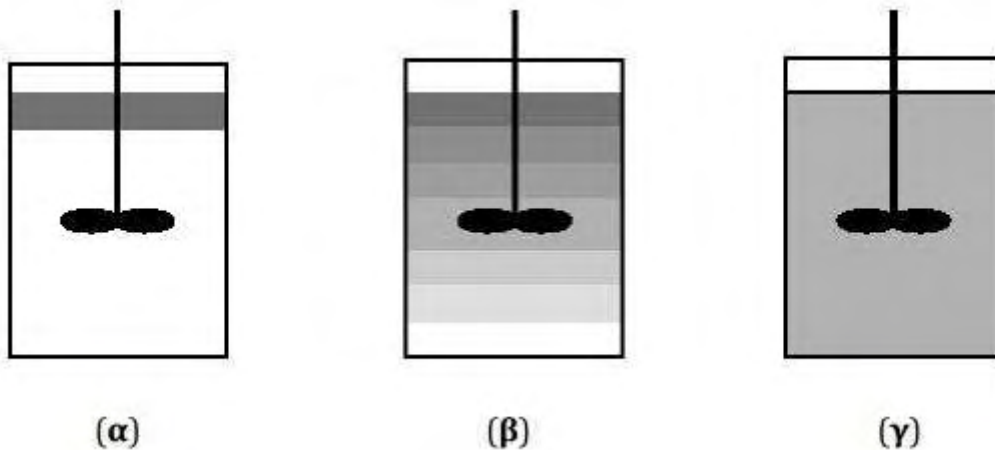
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε πολλές διεργασίες χρειάζεται να διασπείρουμε στερεά σωματίδια μέσα σε ένα υγρό (ή μια διασπορά αερίου σε υγρό), όπως για παράδειγμα στις εκχυλίσεις, στην κρυστάλλωση, στη διάλυση στερεών, στην επίπλευση, αλλά και σε χημικές αντιδράσεις όπου τα στερεά σωματίδια παίζουν τον ρόλο του καταλύτη, κ.ά.

Όταν εισαγάγουμε μια μάζα στερεών σωματιδίων μέσα σ' ένα αναδευόμενο δοχείο, αυτά συνήθως καθιζάνουν στον πυθμένα (Σχήμα 6-α), και το πρόβλημα της ανάδευσης και ανάμιξης του περιεχομένου του δοχείου είναι η διασπορά τους και ο σχηματισμός ενός διαφασικού αιωρήματος (Paul, 2004).



Σχήμα 7 : Αιώρηση σε διασπορά στερεών σωματιδίων σε υγρό.

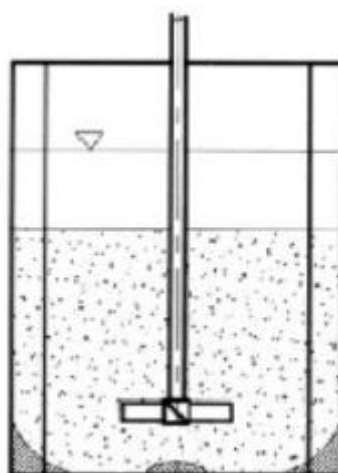
Η περιστροφή του αναδευτήρα σε χαμηλές στροφές συμπαρασύρει μερικά μόνο από τα σωματίδια, και δημιουργείται μια διαστρωμάτωση μέσα στο αναδευόμενο δοχείο, με ζώνες όπου η συγκέντρωση των στερεών σωματιδίων σταδιακά μειώνεται (Σχήμα 6-β). Αν αυξηθεί η ταχύτητα περιστροφής, ένας μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων θα συμπαρασυρθεί, και σε κάποια κρίσιμη ταχύτητα, όλα τα σωματίδια θα βρεθούν σε αιώρηση μέσα στο υγρό (Σχήμα 6-γ).



Σχήμα 8 : Αιώρηση σε διασπορά στερεών σωματιδίων που επιπλέουν σε υγρό.

Στην περίπτωση σωματιδίων, που η πυκνότητά τους είναι μικρότερη του υγρού, όπως για παράδειγμα πολλών πολυμερών, το πρόβλημα είναι το ίδιο, αλλά ακριβώς αντίστροφο: τα σωματίδια αρχικά επιπλέουν όλα (Σχήμα 7-α) και σταδιακά όλο και περισσότερα συμπαρασύρονται μέσα στο υγρό (Σχήμα 7-β), ώσπου τελικά όλα να είναι διεσπαρμένα μέσα σ' αυτό (Σχήμα 7-γ).

Όταν ο πυθμένας του δοχείου είναι επίπεδος, τα σωματίδια έχουν την τάση να συγκεντρώνονται στις περιοχές, όπου οι ταχύτητες είναι μικρές, δηλαδή ακριβώς κάτω από τον αναδευτήρα και στις άκρες του, στο σημείο όπου ο πυθμένας συναντά τα πλάγια τοιχώματα του δοχείου (Σχήμα 8). Γι' αυτό τον λόγο, για συστήματα διασποράς στερεών σε υγρά, προτιμούνται δοχεία με καμπύλο πυθμένα.



Σχήμα 9 : Διαστρωμάτωση και καθίζηση στερεών σωματιδίων.

Η συμπαράσυρση των στερεών σωματιδίων οφείλεται στο υγρό, που κινείται κοντά στον πυθμένα με μεγάλη ταχύτητα, με αποτέλεσμα η οπισθέλκουσα δύναμη λόγω τριβής να γίνεται μεγαλύτερη από τη βαρύτητα. Καθώς όμως το σωματίδιο «ταξιδεύει» στο δοχείο, συναντά περιοχές με χαμηλές ταχύτητες, όπου η ισορροπία δυνάμεων αντιστρέφεται και το σωματίδιο έχει πια την τάση να καθιζάνει. Συνεπώς, η αιώρηση των σωματιδίων είναι μια δυναμική κατάσταση, με άλλα σωματίδια να αιωρούνται και άλλα, ταυτόχρονα, να καθιζάνουν. Αλλά, ακόμα κι όταν κανένα σωματίδιο δεν βρίσκεται πια στον πυθμένα του δοχείου, συνήθως υπάρχουν περιοχές, ειδικά κοντά στην επιφάνεια του υγρού, με πολύ λίγα ή και καθόλου στερεά σωματίδια (Σχήμα 8).

Κατά τον σχεδιασμό των αναδευόμενων δοχείων για συστήματα διασποράς στερεών σε υγρά, ζητείται να προσδιορισθεί η απαιτούμενη ισχύς για να επιτευχθεί η επιθυμητή διασπορά. Έχει βρεθεί ότι η ενέργεια, που απαιτείται για να επιτευχθεί μια ομοιογενής διασπορά, είναι υπερβολικά μεγάλη και ανέφικτη. Γι' αυτό, θεωρείται αρκετό να εξασφαλισθεί τόση ανάδευση, ώστε τα στερεά σωματίδια να παραμένουν οριακά σε αιώρηση και, αν καθιζάνουν, τότε να παραμένουν στον πυθμένα για ελάχιστο χρονικό διάστημα. Καθορίζοντας το χρονικό αυτό διάστημα στα 1-2 s, βρέθηκε ότι η παρακάτω συσχέτιση επιτρέπει τον υπολογισμό της «ελάχιστης» ταχύτητας περιστροφής (N_{JS}), που εξασφαλίζει αυτές τις συνθήκες (Zwietering, 1957):

$$N_{JS} = \frac{S \left(\frac{\mu_L}{\rho_L} \right)^{0.1} (d_p)^{0.2} \left(\frac{g \Delta \rho}{\rho_L} \right)^{0.45} (B)^{0.13}}{D^{0.85}}$$

όπου

d_p : η μέση διάμετρος των στερεών σωματιδίων

μ_L : το ιξώδες του υγρού

ρ_L : η πυκνότητα του υγρού

$\Delta \rho$: η διαφορά πυκνοτήτων στερεού-υγρού

B : το ποσοστό των στερεών στη διασπορά, υπολογιζόμενο από την παρακάτω εξίσωση:

$$B = 100 \times \frac{\text{βάρος στερεού}}{\text{βάρος υγρού}}$$

Η παράμετρος S εξαρτάται από τον τύπο και τις διαστάσεις του αναδευτήρα, σε σχέση με τις διαστάσεις του δοχείου και κυμαίνεται μεταξύ 4 και 12.5 (Harnby, Edwards and

Nienow, 1992). Για την πρότυπη διαμόρφωση ($D/T = 1/3$) είναι: για τον στρόβιλο Rushton, $S \approx 8$, ενώ για τη ναυτική προπέλα $S = 6.5$.

3.4 Διαφασικά Συστήματα Υγρού-Υγρού

3.4.1 Διασπορά Υγρού σε Υγρό με Ανάδευση

Η ανάμιξη δύο αναμίξιμων υγρών – π.χ. αλκοόλης με νερό – ανάγεται σε πρόβλημα απλής ομογενοποίησης και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία. Περισσότερο θεωρητικό και πρακτικό ενδιαφέρον έχει η διασπορά ενός μη αναμίξιμου υγρού σε ένα άλλο υγρό, οπότε προκύπτει μια διασπορά της μιας φάσης σε λεπτό διαμερισμό μέσα στην άλλη, ή γαλάκτωμα, με σχηματισμό μιας «διεπιφάνειας» ανάμεσα στις δυο φάσεις. Το αιώρημα, που προκύπτει, είναι συνήθως ασταθές και έχει την τάση να διαχωριστεί, με σχηματισμό δυο διακριτών στοιβάδων.

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός αιωρήματος Υ-Υ είναι:

- το μέσο μέγεθος των σταγονιδίων (\bar{d})
- η ολική διεπιφάνεια (\bar{a})
- η κατακράτηση (φ_L)

που εξαρτώνται από τις συνθήκες ανάδευσης.

Ως **κατακράτηση** της διεσπαρμένης φάσης (φ_L) ορίζεται ο όγκος του υγρού που διασπείρεται ($V_{\text{διασπ}}$) ως προς τον συνολικό όγκο του αιωρήματος:

$$\varphi_L = \frac{V_{\text{διασπ}}}{V_{\text{διασπ}} + V_{\text{συν}}}$$

όπου

$V_{\text{συν}}$: ο όγκος της συνεχούς φάσης, δηλαδή του υγρού μέσα στο οποίο διασπείρεται το άλλο υγρό.

Αν θεωρήσουμε ότι από τη διασπορά προκύπτουν n σταγονίδια, κι ότι όλα τα σταγονίδια έχουν την ίδια διάμετρο (\bar{d}), τότε βρίσκεται ότι η κατακράτηση δίνεται από την εξίσωση

$$\varphi_L = \frac{\pi(\bar{d})^3}{6} n$$

ενώ το συνολικό εμβαδόν της διεπιφάνειας από την εξίσωση

$$\bar{a} = \pi(\bar{d})^2 n$$

Από τις δυο αυτές εξισώσεις, με διαίρεση, προκύπτει μια απλή σχέση μεταξύ των τριών παραμέτρων (Barigou and Greaves, 1996, Laakkonen et al., 2005, Ζουμπούλης, 2009):

$$\bar{a} = \frac{6\varphi_L}{\bar{d}} \quad \text{και} \quad \bar{d} = \frac{6\varphi_L}{\bar{a}}$$

οπότε όταν είναι οι δύο γνωστές μπορεί αμέσως να προκύψει η τρίτη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω εξισώσεις προϋποθέτουν ότι τα «σωματίδια» της διεσπαρμένης φάσης είναι σφαιρικά. Σε αντίθετη περίπτωση, ως διάμετρος στις εξισώσεις αυτές λαμβάνεται η «ισοδύναμη» διάμετρος, που προκύπτει αν θεωρηθεί ένα σφαιρικό «σωματίδιο» με όγκο ίσο προς τον του πραγματικού «σωματιδίου».

Σε περίπτωση που μετρηθεί το μέγεθος των σταγονιδίων και βρεθεί ότι ποικίλει, τότε η μέση διάμετρος μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους (Markopoulos, Kadoglou, Paraevangelou and Zavitsanou, 2000). Ο πιο διαδεδομένος είναι η μέση διάμετρος \bar{d}_{32} , γνωστή και ως μέση διάμετρος κατά Sauter, που προκύπτει από k κλάσεις σταγονιδίων ίσης διαμέτρου:

$$\bar{d} = \bar{d}_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^{i=k} n_i d_i^2}$$

όπου

d_i : η κλάση διαμέτρου

n_i : ο αριθμός των σταγονιδίων, που έχουν αυτή τη διάμετρο

Η ένταση της ανάδευσης, δηλαδή ο αριθμός των στροφών του αναδευτήρα, επηρεάζει το μέγεθος των σταγονιδίων, σε συνάρτηση και με άλλες παραμέτρους του διφασικού συστήματος. Η παρακάτω εξίσωση επιτρέπει τον προσδιορισμό του μέσου μεγέθους των σταγονιδίων:

$$\frac{\bar{d}}{D} = 0.058(1 + 5.4\varphi_L) We^{-0.6} \left(\frac{\mu_{\text{δισπ}}}{\mu_{\text{συν}}} \right)^{0,1}$$

όπου

$\mu_{\text{δισπ}}$ και $\mu_{\text{συν}}$: το ιξώδες της διεσπαρμένης και της συνεχούς φάσης αντίστοιχα

We : ο αδιάστατος αριθμός Weber:

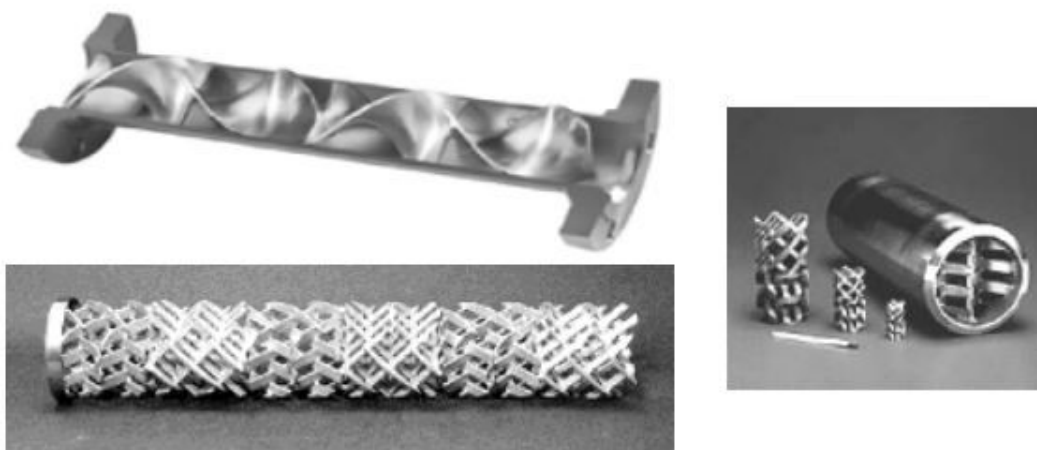
$$We = \frac{\rho_{\text{συν}} N^2 D^3}{\sigma}$$

όπου

σ : η διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δύο υγρών.

3.4.2 Διασπορά Υγρού σε Υγρό με Στατικό Αναμίκτη

Η διαπίστωση ότι η επαφή τμημάτων ρευστού σε τυρβώδεις συνθήκες ροής εξασφαλίζει την ανάμιξή τους οδήγησε στην ανάπτυξη ενός συστήματος ανάμιξης, που δεν έχει κινούμενα μέρη. Στους **στατικούς αναμίκτης**, οι τυρβώδεις συνθήκες ροής εξασφαλίζονται με την παρεμβολή εμποδίων στη ροή του υγρού, που παίζουν τον ίδιο ρόλο όπως ακριβώς και οι ανακλαστήρες στα αναδευόμενα δοχεία. Μέσα σ' έναν σωλήνα προσαρμόζεται σειρά ελασμάτων, τα οποία έχουν εναλλασσόμενες κλίσεις (Εικόνα 3), και το ρευστό που ρέει μέσα στον σωλήνα υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη αλλαγή κατεύθυνσης.



Εικόνα 5 : Στατικοί αναμίκτης

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί στατικός αναμίκτης για τη διασπορά ενός μη αναμίξιμου υγρού σ' ένα άλλο υγρό, το μέγεθος των σταγονιδίων της διασποράς υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\bar{d}}{D_{\text{σωλ}}} = C (We)^{-0.6} (f)^{-0.4}$$

όπου

$D_{\text{σωλ}}$: η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα

C : ένας συντελεστής (για σταγόνες υγρού χαμηλού ιξώδους διεσπαρμένου σε νερό με μικρούς στατικούς αναμίκτης τύπου Kenics, $C \approx 0.35$)

f : ο συντελεστής τριβής, που υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$f = \frac{D_{\text{σωλ}} \Delta p}{2 \rho_{\text{συν}} (\bar{v})^2 L}$$

όπου

\bar{v} : η μέση ταχύτητα του υγρού μέσα στον σωλήνα

L : το συνολικό μήκος του αναμίκτη

Δp : η πτώση πίεσης στον σωλήνα

Ο αριθμός Weber υπολογίζεται από μια ελαφρώς διαφορετική εξίσωση:

$$We = \frac{\rho_{\text{συν}} (\bar{v})^2 D_{\text{σωλ}}}{\sigma}$$

3.4.3 Διασπορά Υγρού σε Υγρό με Εγχυτήρα

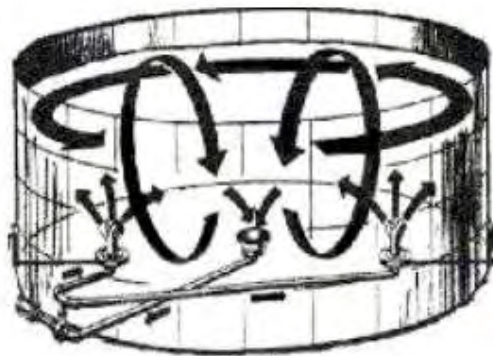
Μερικές φορές, αντί του αναδευτήρα, χρησιμοποιούνται **εγχυτήρες** (jet mixer) για την ανάμιξη του υγρού σ' έναν αντιδραστήρα. Στον εγχυτήρα, το υγρό βγαίνει από το ακροφύσιο με μεγάλη ταχύτητα και σχηματίζει έναν συγκλίνοντα εσωτερικό κώνο («πυρήνα») κι έναν αποκλίνοντα εξωτερικό κώνο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Στο όριο ανάμεσα στον εξωτερικό κώνο και το περιβάλλον υγρό παρατηρούνται μεγάλες διατμητικές τάσεις.



Εικόνα 6 : Έγχυση ενός υγρού μέσα σ'ένα άλλο μέσα από ακροφύσιο

Στον χώρο ανάμεσα στους δυο κώνους αναρροφάται υγρό από τον περιβάλλοντα χώρο. Οι συνθήκες ροής για το υγρό, που περιέχεται ανάμεσα στους κώνους, είναι έντονα τυρβώδεις, και σ' αυτές οφείλεται η επιτυγχανόμενη ανάμιξη. Επειδή, όμως, η ποσότητα του υγρού αναρροφάται και «συμπαράσύρεται» από τις υψηλές ταχύτητες του «πυρήνα», χρειάζεται αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα για να γίνει η ανάμιξη όλου του περιεχομένου του αντιδραστήρα.

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται ένας βιομηχανικός εγχυτήρας, με πολλαπλά ακροφύσια, όπως επίσης και ένα διάγραμμα, όπου φαίνεται πώς γίνεται η εγκατάσταση των εγχυτήρων σε μια δεξαμενή και πώς διαμορφώνεται η ροή του υγρού μέσα σ' αυτήν.



(α)



(β)

Εικόνα 7 : (α) Αναδεδυμένο δοχείο με εγχυτήρα (β) Λεπτομέρεια κατασκευής βιομηχανικού εγχυτήρα

3.5 Διφασικά Συστήματα Αερίου-Υγρού

Αρκετές βασικές βιομηχανικές διεργασίες, όπως η οξείδωση, υδρογόνωση και βιολογικές καλλιέργειες εμπλέκουν την επαφή αερίων με υγρά. Ο σκοπός αυτών των διεργασιών είναι η διασπορά φυσαλίδων αέρα στη συνεχή φάση του υγρού, όπου έπειτα λαμβάνει χώρα η μεταφορά μάζας στη διεπιφάνεια Α-Υ. Σε μερικές περιπτώσεις η μεταφορά μάζας ακολουθείται από κάποια χημική αντίδραση (Harnby et al., 1985, Wallis, 1969).

Οι διεργασίες διασποράς αερίου σε υγρά μοιάζουν ως προς τις διεργασίες κρυστάλλωσης και εκχύλισης, που αναφέρθηκαν νωρίτερα, ως προς το γεγονός ότι η ανάδευση συνεισφέρει στη μεταφορά μάζας μέσω της δημιουργίας διεπιφάνειας. Τα μίγματα Α-Υ είναι ασταθή και σε περίπτωση διακοπής της ανάδευσης οι φάσεις διαχωρίζονται αρκετά γρήγορα.

3.5.1 Διασπορά Αερίου σε Υγρό

Η διασπορά αερίου μέσα σ' ένα υγρό είναι όπως αναφέρθηκε μια από τις πιο διαδεδομένες διεργασίες στη χημική τεχνολογία, με ποικίλους στόχους:

- την απλή διασπορά της μιας φάσης στην άλλη, κατά την παρασκευή προϊόντων με αφρώδη υφή – τρόφιμα, πολυμερή, κ.ά.
- τη διασπορά αερίου σε υγρό, προκειμένου να ακολουθήσει κάποια χημική αντίδραση – υδρογόνωση, χλωρίωση, οξείδωση, νίτρωση, κ.ά.
- τη διασπορά αερίου μέσα σε διασπορά στερεών σωματιδίων σε νερό, προκειμένου να διαχωριστούν τα υδρόφοβα από τα υδρόφιλα σωματίδια (επίπλευση) – εμπλουτισμός ορυκτών.

Η διασπορά του αερίου γίνεται με πολλούς τρόπους. Στους αναδευόμενους χημικούς αντιδραστήρες, η εισαγωγή του αέρα γίνεται κάτω από τον αναδευτήρα.

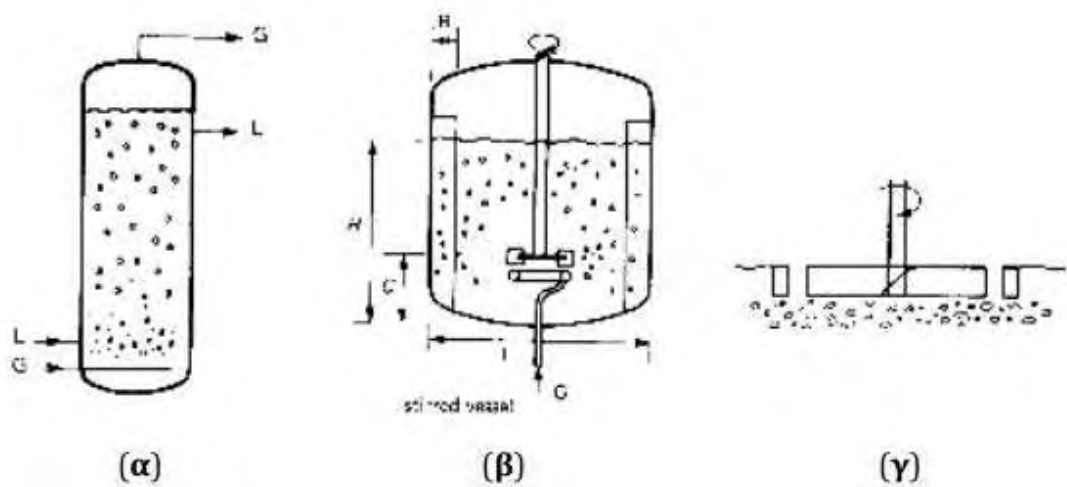


Εικόνα 8 : Πορώδη διαφράγματα (μεταλλικά, κεραμικά, από πολυμερές) για τη διασπορά αερίου σε υγρό.

Αρχικά, το μέγεθος των φυσαλίδων εξαρτάται από το άνοιγμα του στομίου, μέσα από το οποίο διέρχεται το αέριο, εισερχόμενο στο υγρό του αναδευόμενου δοχείου και μπορεί να είναι:

- το στόμιο ενός απλού σωλήνα
- οι οπές, που έχουν ανοιχτεί σε έναν σωλήνα μορφοποιημένο σε δακτύλιο, που τοποθετείται ακριβώς κάτω από τον αναδευτήρα
- ένα πορώδες διάφραγμα

Είναι προφανές ότι ο κάθε τύπος διασπορά αερίου έχει διαφορετική διάμετρο ανοίγματος, κι αυτό επηρεάζει την αρχική διάμετρο της φυσαλίδας.

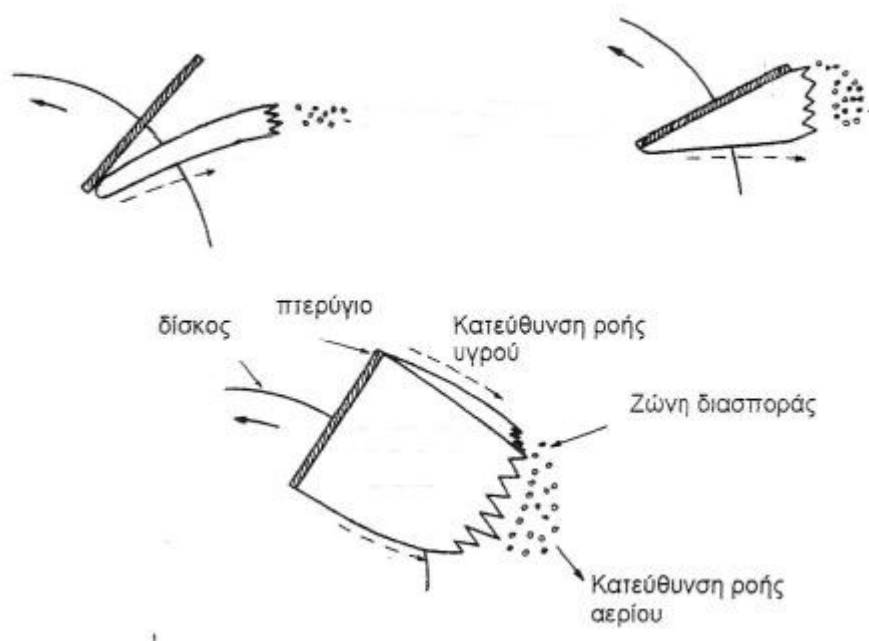


Σχήμα 10 : Διασπορά αερίου σε υγρό

3.5.1.1 Κατανάλωση Ενέργειας

Η γνώση της κατανάλωσης ενέργειας στα αναδεδόμενα συστήματα αερίου-υγρού είναι πολύ σημαντική, διότι σχετίζεται με τη διεπιφάνεια αερίου-υγρού και κατά συνέπεια με τη μεταφορά μάζας που πραγματοποιείται. Συνεπώς, είναι μια από τις βασικότερες σχεδιαστικές παραμέτρους για τέτοιου είδους συστήματα.

Η απαίτηση σε ισχύ για την ανάδευση μίγματος αερίου-υγρού είναι γενικά μικρότερη απ'ότι για την ανάδευση μόνο του υγρού. Αυτό συμβαίνει διότι όταν υπάρχει αέριο στο σύστημα, εξαιτίας της περιστροφής του στροβίλου, δημιουργούνται σταθερές κοιλότητες αερίου (cavities) πίσω από τα πτερύγια του, με αποτέλεσμα να μειώνεται δραστικά η οπισθέλκουσα δύναμη. Η ποσότητα αυτή του αερίου που εγκλωβίζεται στις εν λόγω κοιλότητες αποτελείται τόσο από φρέσκο αέριο που εισέρχεται στο σύστημα, όσο και από ανακυκλωμένο αέριο του συστήματος εξαιτίας της ανάδευσης. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται σχηματικά οι κοιλότητες που δημιουργούνται πίσω από τα πτερύγια του στροβίλου Rushton.



Σχήμα 11 : Κοιλότητες αερίου που εγκλωβίζονται στα πτερύγια του στροβίλου κατά την περιστροφή του (Harnby, Edwards and Nienow,2001)

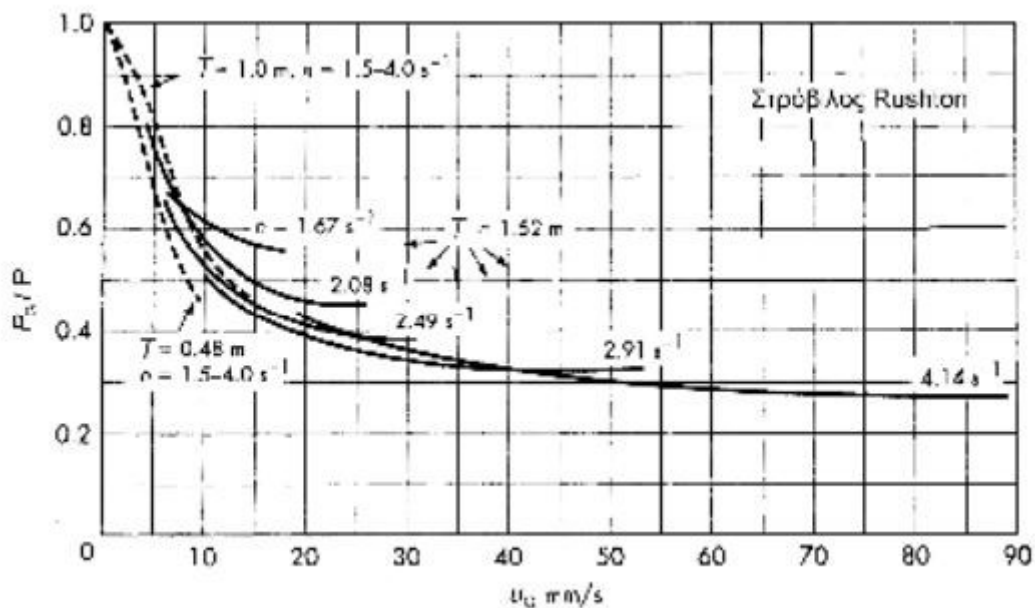
Η κατανάλωση ισχύος σε ένα σύστημα δεν επηρεάζεται μόνο από την παρουσία ή όχι αερίου στο σύστημα. Κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος ανάδευσης επηρεάζουν επίσης την ισχύ που καταναλώνεται.

Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζονται ορισμένες γραφικές συσχετίσεις για στρόβιλο Rushton (για $D/T = 1/3$) και για διάφορες ταχύτητες περιστροφής, ως προς τη γραμμική ταχύτητα του εισερχόμενου αερίου. Ως **γραμμική ταχύτητα** (u_G) ορίζεται η ταχύτητα του αερίου σε κενό δοχείο, που υπολογίζεται αν η αέρια ογκομετρική παροχή Q_G διαιρεθεί με το εμβαδόν της διατομής του δοχείου (Harnby, 1985):

$$u_G = \frac{Q_G}{A_{\text{δοχ}}}$$

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2, με την αύξηση της γραμμικής ταχύτητας του αερίου, η απαιτούμενη ενέργεια για την ανάδευση της διασποράς μειώνεται μέχρι και στο 30% της ενέργειας για το ίδιο σύστημα και τις ίδιες συνθήκες (Ζαμπούλης, 2009) (τύπος, θέση και στροφές αναδευτήρα), αλλά χωρίς αέριο.

Οι καμπύλες αυτές δεν είναι για γενική χρήση, αλλά είναι χαρακτηριστικές και ενδεικτικές της μείωσης σε απαίτηση για ενέργεια.

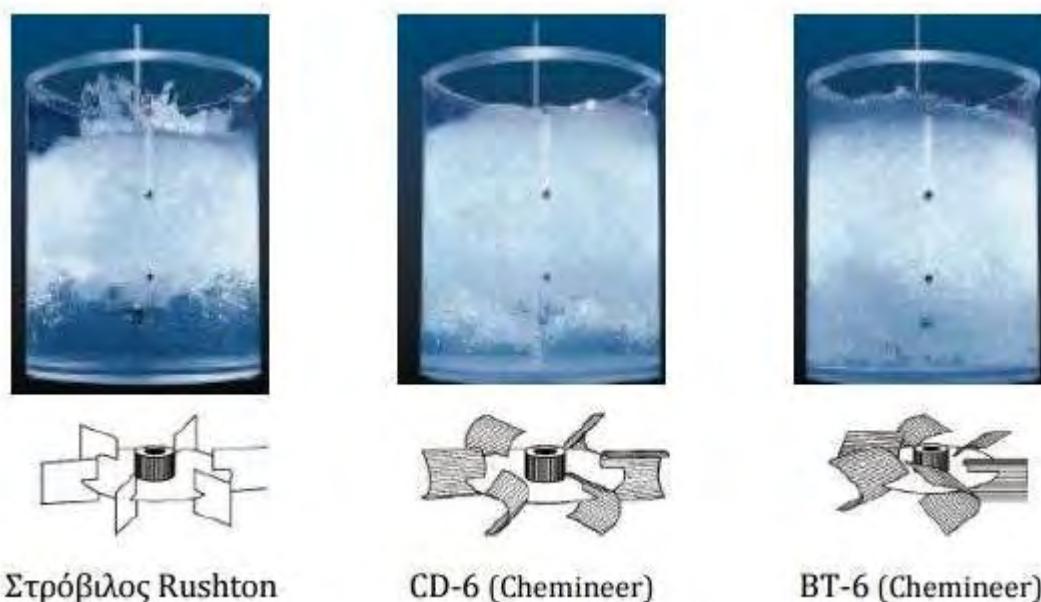


Διάγραμμα 2 : Επίδραση αερίου στην κατανάλωση ενέργειας (για στρόβιλο Rushton και πρότυπη διαμόρφωση δοχείου)

3.5.1.2 Κατακράτηση Αερίου

Μετά την έξοδό τους από το στόμιο (ή τα στόμια, στην περίπτωση πολλαπλών οπών) του διασπορέα, οι φυσαλίδες συμπαρασύρονται από τη ροή του υγρού μέσα στην κύρια μάζα του υγρού, σχηματίζοντας τη διασπορά του αερίου στο υγρό.

Η αποτελεσματικότητα ενός αναδευτήρα στο να διασπείρει ένα αέριο μέσα στο υγρό του αναδευόμενου δοχείου εξαρτάται από τον τύπο του αναδευτήρα και από τον τύπο ροής, που προκαλεί μέσα στο δοχείο. Οι ακτινικοί αναδευτήρες είναι πιο κατάλληλοι από τους αξονικούς για την διασπορά ενός αερίου σ' ένα υγρό, και από τους ακτινικούς πιο αποτελεσματικοί είναι εκείνοι, με τα καμπύλα πτερύγια, σχεδιασμένοι ειδικά γι' αυτή τη διεργασία (οι “CD-6” και “BT-6” της Chemineer) – Εικόνα 7.



Εικόνα 9 : Διασπορά αερίου σε υγρό με ανάδευση

Σε κάθε στιγμή, μέσα στο υγρό, φυσαλίδες αερίου δημιουργούνται στον διασπορέα, ενώ άλλες φυσαλίδες διαφεύγουν από την κορυφή – από την ελεύθερη επιφάνεια – της διασποράς, και μέσα στη διασπορά βρίσκεται διεσπαρμένος ένας ορισμένος όγκος αερίου. Το ποσοστό αυτού του όγκου ως προς τον συνολικό όγκο της διασποράς ονομάζεται **αέρια κατακράτηση** (φ_G). Το ποσοστό αυτό μπορεί να διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, μέσα στο αναδευόμενο δοχείο.

Η διασπορά αυτή υπόκειται σε διατμητικές τάσεις, ειδικά στις περιοχές κοντά στον αναδευτήρα. Οι διατμητικές τάσεις έχουν ως αποτέλεσμα τη διάσπαση των φυσαλίδων σε μικρότερες. Ταυτόχρονα, όμως, άλλες φυσαλίδες συγκρούονται μεταξύ τους. Η

σύγκρουση αυτή συνήθως έχει ως αποτέλεσμα τη συσσωμάτωσή τους και τον σχηματισμό μεγαλύτερων φυσαλίδων – όχι όμως πάντα: η παρουσία τασενεργών ουσιών μέσα στο υγρό ή άλλων ουσιών, που να έχουν τασενεργές ιδιότητες, «σταθεροποιεί» κατά κάποιον τρόπο τη διεπιφάνεια αερίου-υγρού και παρεμποδίζει τη συνένωση των φυσαλίδων, με αποτέλεσμα οι φυσαλίδες σε παρόμοια υγρά να έχουν γενικά μικρότερο μέγεθος.

Η αέρια κατακράτηση (φ_G) έχει συσχετισθεί με διάφορες παραμέτρους, κυρίως λειτουργικές. Για στρόβιλο Rushton και συστήματα, όπου παρατηρούνται συσσωματώσεις φυσαλίδων (Smith, Middleton and van't Riet, 1977):

$$\varphi_G = 0.02 \left(\frac{P_G}{V_L} \right)^{0.475} (u_G)^{0.4}$$

Η παραπάνω συσχέτιση ισχύει για $0.005 \leq u_G \leq 0.05 \text{ m s}^{-1}$, και $1 \leq P_G/V_L \leq 5 \text{ kW m}^{-3}$.

Για συστήματα, όπου δεν παρατηρούνται συσσωματώσεις, π.χ. εξαιτίας της παρουσίας ηλεκτρολυτών, τασενεργών ουσιών κ.ά., η αέρια κατακράτηση μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω συσχέτιση:

$$\varphi_G = 0.04 \left(\frac{P_G}{V_L} \right)^{0.475} (u_G)^{0.4}$$

για $0.004 \leq u_G \leq 0.02 \text{ m s}^{-1}$, και $100 \leq P_G/V_L \leq 750 \text{ W m}^{-3}$.

3.5.1.3 Μέγεθος Φυσαλίδων

Σε μια διασπορά A-Y απαιτούνται πολλές μικρές φυσαλίδες για να δώσουν μεγάλη διεπιφάνεια και έτσι αποτελεσματική μεταφορά μάζας. Οι μικρές φυσαλίδες διεισδύουν πιο αβίαστα (λόγω της μικρότερης άνωσης) στους βρόχους κυκλοφορίας του ρευστού και έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμιξη απ'ότι με τις μεγαλύτερες φυσαλίδες κάτω από παρόμοιες υδροδυναμικές συνθήκες.

Ο αριθμός των παραμέτρων, που επηρεάζουν το μέγεθος των φυσαλίδων του αερίου είναι πολύ μεγάλος, και στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές εμπειρικές συσχετίσεις, όπως η παρακάτω, που συνδέει το μέγεθος των φυσαλίδων με την κατακράτηση του αερίου (φ_G), που προέκυψε από ανάλυση πειραματικών μετρήσεων με συσσωματούμενα συστήματα (Calderbank, 1958):

$$d_b = \bar{d}_{32} = 4.15 \left[\frac{\sigma^{0.6}}{\rho_L^{0.2} \left(\frac{P_G}{V_{\text{διασπ}}} \right)^{0.4}} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.25} (\varphi_G)^{0.5} + 0.0009 \right]$$

Ωστόσο, είναι γνωστό ότι μικρές συγκεντρώσεις ηλεκτρολυτών, τασενεργών, ελαίων και αλκοολών στα συστήματα A-Y έχουν τεράστιο αντίκτυπο στο μέγεθος των φυσαλίδων και στην κατακράτηση και μεταβάλλουν τις εμπειρικές σταθερές για την εύρεση του αριθμού Re. Αυτή η επίδραση είναι αρκετά διαφορετική από τις επιδράσεις της ταχύτητας ανάδευσης και της γραμμικής ταχύτητας του αερίου και σχετίζεται με το φαινόμενο της παρεμπόδισης της συνένωσης (Harnby et al., 1985, Tatterson, 1991).

3.5.1.4 Εμβαδόν Διεπιφάνειας

Το εμβαδόν της διεπιφάνειας αερίου-υγρού είναι προφανώς συνάρτηση του κατά πόσον το υγρό έχει τασενεργά συστατικά ή όχι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η μέση επιφάνεια έχει συσχετισθεί με διάφορες παραμέτρους, και υπάρχει πληθώρα σχετικών εξισώσεων στη βιβλιογραφία, με μεγάλες όμως αποκλίσεις μεταξύ τους, με πιο συχνά χρησιμοποιούμενη αυτή (Calderbank, 1958):

$$a = 1.44 \left[\frac{\left(\frac{P_G}{V} \right)^{0.4} \rho_L^{0.2}}{\gamma^{0.6}} \right] \left(\frac{u_G}{u_t} \right)^{0.5}$$

όπου

u_t : η τελική ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας [m/s]

Στην περίπτωση που είναι γνωστά ή υπολογισμένα τα μεγέθη της κατακράτησης αερίου και μέσου μεγέθους φυσαλίδων κατά Sauter, τότε ο υπολογισμός της διεπιφάνειας A-Y μπορεί να γίνει από τον εξής τύπο (Barigou and Greaves, 1996, Laakkonen, 2005):

$$\bar{a} = \frac{6\varphi_L}{\bar{d}} \quad \text{και} \quad \bar{d} = \frac{6\varphi_L}{\bar{a}}$$

όπου

φ_L : η κατακράτηση του αερίου στο υγρό

\bar{d} : η μέση διάμετρος Sauter ή αλλιώς d_{32}

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τον προσδιορισμό της διεπιφάνειας, τόσο φυσικές, όσο και χημικές, που αφορούν στη μέτρηση μεγεθών που σχετίζονται άμεσα με τη διεπιφάνεια, όπως η κατακράτηση του αερίου ή οι συντελεστές μεταφοράς μάζας. Επίσης στη βιβλιογραφία υπάρχουν πειραματικές συσχετίσεις που βοηθούν στον προσδιορισμό της διεπιφάνειας μεταξύ αερίου και υγρού, είτε πρόκειται για την ολική διεπιφάνεια, είτε για την τοπική διεπιφάνεια αερίου-υγρού, μια που η διεπιφάνεια αερίου-υγρού διαφέρει τοπικά ανάλογα με τη θέση στο δοχείο διασποράς. Έτσι, μια συσχέτιση για την τοπική τιμή της διεπιφάνειας είναι (Takahashi and Nienow, 1991):

$$a = C_d \pi \sum f_i r_i^2$$

όπου

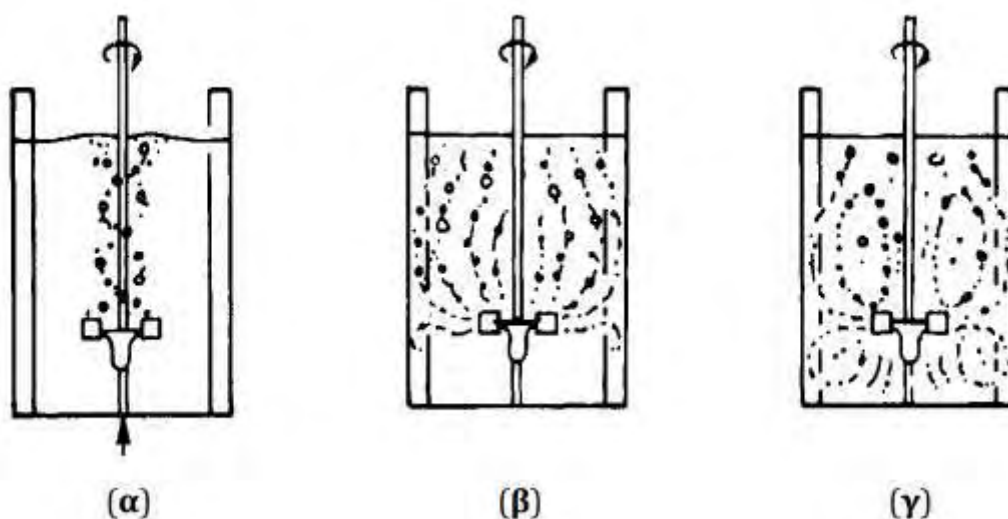
C_d : η συγκέντρωση των φυσαλίδων ανά μονάδα όγκου

f_i : ο αριθμός των φυσαλίδων με διάμετρο r_i , ανά συνολικό αριθμό φυσαλίδων

3.5.1.5 «Πλημμύριση» Αναδευτήρα

Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία της λειτουργίας ενός αναδευόμενου δοχείου, μέσα στο οποίο διασπείρεται αέρας, είναι το πόσο αέριο μπορεί να διασπείρει αποτελεσματικά ο αναδευτήρας. Η διεργασία της διασποράς περνάει από ορισμένα στάδια, για μια δεδομένη και σταθερή παροχή αερίου:

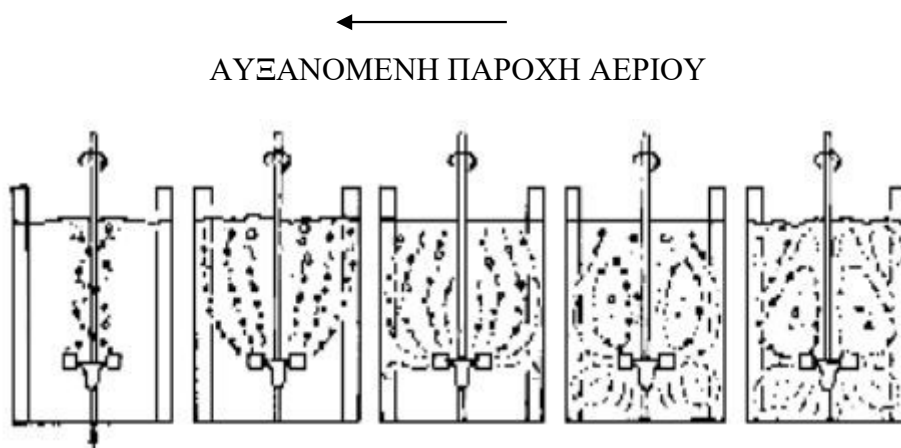
- όταν οι στροφές του αναδευτήρα είναι χαμηλές, το αέριο δεν κυκλοφορεί στον κύριο όγκο του δοχείου, αλλά παραμένει κοντά στον άξονα του αναδευτήρα (Σχήμα 10-α), γύρω από τον οποίο σχηματίζει ένα νέφος ανερχόμενων φυσαλίδων.
- όταν αυξηθούν αρκετά οι στροφές του αναδευτήρα και φτάσουν σε ένα κρίσιμο σημείο, το αέριο αρχίζει να διασπείρεται αποτελεσματικά σε όλο το πάνω μέρος του δοχείου (Σχήμα 10-β)
- με ακόμα περαιτέρω αύξηση των στροφών του αναδευτήρα, το αέριο διασπείρεται πια σε όλο το αναδευόμενο δοχείο (Σχήμα 10-γ)



Σχήμα 12 : Στάδια διασποράς αερίου και πλημμύρισης αναδευτήρα (Smith, 1977)

Η πρώτη περίπτωση, όπου το αέριο δεν διασπείρεται και παραμένει κοντά στον άξονα του αναδευτήρα, ονομάζεται «πλημμύριση» (flooding) (Rushton and Bimbinet, 1968) του αναδευτήρα, και αντιστοιχεί σε αστοχία του συστήματος, αφού δεν επιτυγχάνεται διασπορά του αερίου σε όλο το σώμα του υγρού μέσα στο αναδευόμενο δοχείο. Το δεύτερο στάδιο λέγεται **διασπορά** (loaded), και είναι μια κατάσταση η οποία αν και είναι μη ιδιαίτερα ομογενής, είναι ωστόσο αποδεκτή. Η τρίτη κατάσταση ονομάζεται **πλήρης διασπορά** (completely dispersed) και είναι η πλέον επιθυμητή κατάσταση αερισμού.

Τα ίδια στάδια – αλλά με αντίστροφη πορεία – παρατηρούνται αν διατηρηθούν σταθερές οι στροφές του αναδευτήρα και αυξηθεί σταδιακά η παροχή του αερίου (Q_G). Αρχικά, για μικρή παροχή, η διασπορά είναι αποτελεσματική και οι φυσαλίδες του αερίου παρατηρούνται παντού μέσα στο δοχείο. Αν αυξηθεί σταδιακά η παροχή, κάποια στιγμή το αέριο δεν διασπείρεται πια και ο αναδευτήρας «πλημμυρίζει». Οι «ανταγωνιστικές» αυτές επιδράσεις της παροχής του αερίου και των στροφών του αναδευτήρα στη διασπορά του αερίου φαίνονται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13 : Επίδραση της παροχής του αερίου στην αποτελεσματική διασπορά του (Μανρός, 2001).

Ο προσδιορισμός των τριών αυτών καταστάσεων διασποράς είναι πολύ σημαντικός στα αναδευόμενα συστήματα αερίου-υγρού, διότι αποτελεί κριτήριο για την ποιότητα της ανάμιξης και τους συντελεστές μεταφοράς μάζας. Αν, για παράδειγμα, ένα σύστημα ανάδευσης είναι πλημμυρισμένο, τότε χαρακτηρίζεται από μεγάλες φυσαλίδες δηλαδή μικρή διεπιφάνεια αερίου-υγρού και ως εκ τούτου μικρούς συντελεστές μεταφοράς μάζας.

Η κρίσιμη παροχή αερίου, στο σημείο της πλημμύρισης, για στρόβιλο Rushton, εκφρασμένη ως γραμμική ταχύτητα, έχει συσχετισθεί με την κατανάλωση ενέργειας (Wang et al., 2006, Ζουμπούλης, 2009):

$$u_{G,crit} = 1.14 \times 10^{-4} \left(\frac{P_G}{V_L} \right) \left(\frac{T}{1.5} \right)^{0.17}$$

Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού των συνθηκών πλημμύρισης είναι με τον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητα περιστροφής που αντιστοιχεί στην πλημμύριση (Nienow, Wisdom and Middleton, 1978):

$$n_o = c_1 + c_2 \left(\frac{D}{d} \right)$$

όπου

D : η διάμετρος ή ακμή του δοχείου ανάδευσης

d : η διάμετρος του στροβίλου

c_1, c_2 : σταθερές που εξαρτώνται, είτε από τις φυσικές ιδιότητες των προς ανάδευση φάσεων, είτε από τη γεωμετρία του δοχείου

Παρόλα αυτά, το μειονέκτημα της συσχέτισης αυτής είναι ότι δεν περιλαμβάνει την εξάρτηση της ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου από την παροχή του αερίου στο σύστημα, οπότε δεν είναι δυνατό να προκύψουν συμπεράσματα για τις συνθήκες διασποράς. Άλλωστε, η διασπορά χαρακτηρίζεται από την ικανότητα του στροβίλου να χειριστεί και να διασπείρει συγκεκριμένη ποσότητα αερίου σε μια δεδομένη ταχύτητα περιστροφής.

Όπως αναφέρθηκε, η κατάσταση διασποράς σε ένα αναδευόμενο σύστημα αερίου-υγρού είναι εξαιρετικά σημαντική παράμετρος σε τέτοιου είδους διεργασίες, αφού καθορίζει την ποιότητα της ανάμειξης του διφασικού συστήματος και φυσικά τους συντελεστές μεταφοράς μάζας.

3.5.2 Στήλη Φυσαλίδων

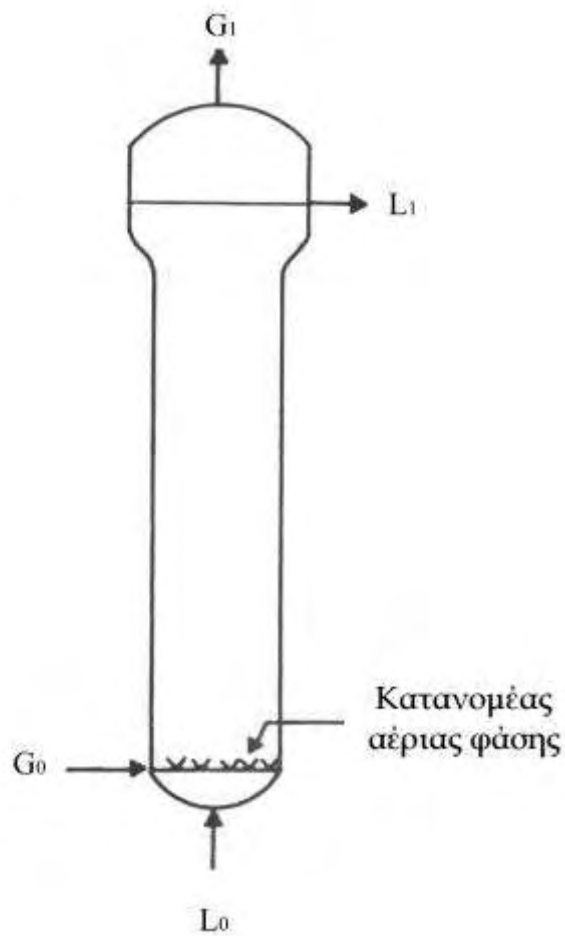
Μια από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συσκευές στην επαφή Y-A είναι η στήλη φυσαλίδων. Σε αυτή η ασυνεχής αέρια φάση (*dispersed phase*) με τη μορφή φυσαλίδων κινείται κατακόρυφα ως προς τη συνεχή φάση (*continuous phase*) που μπορεί να είναι είτε ένα υγρό είτε ένα αιώρημα. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα μιας στήλης φυσαλίδων είναι η απλή κατασκευή της (δοχείο και κατανομέας), το χαμηλό λειτουργικό της κόστος, η υψηλή ενεργειακή απόδοση και οι μεγάλοι συντελεστές μεταφοράς μάζας που επιτυγχάνονται.

Η αέρια φάση τροφοδοτείται μέσω ενός κατανομέα που μπορεί να είναι ακροφύσιο, διάτρητος δίσκος ή πορώδης δίσκος. Η επιλογή του κατανομέα της αέριας φάσης αποτελεί πρωταρχικής σημασίας βήμα στο σχεδιασμό μιας στήλης φυσαλίδων, καθώς καθορίζει το πλήθος και το μέγεθος των παραγόμενων φυσαλίδων, επηρεάζοντας τη διαθέσιμη διεπιφάνεια για τη μεταφορά μάζας μεταξύ των δύο φάσεων.

Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη χημική βιομηχανία και έχουν ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογών (Shah et al., 1982). Επίσης, χρησιμοποιούνται στη μεταλλουργία, σε υδρομεταλλουργικές διεργασίες, αλλά και ως βιοχημικοί αντιδραστήρες σε διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων και ζύμωσης (Joshi, 2001).

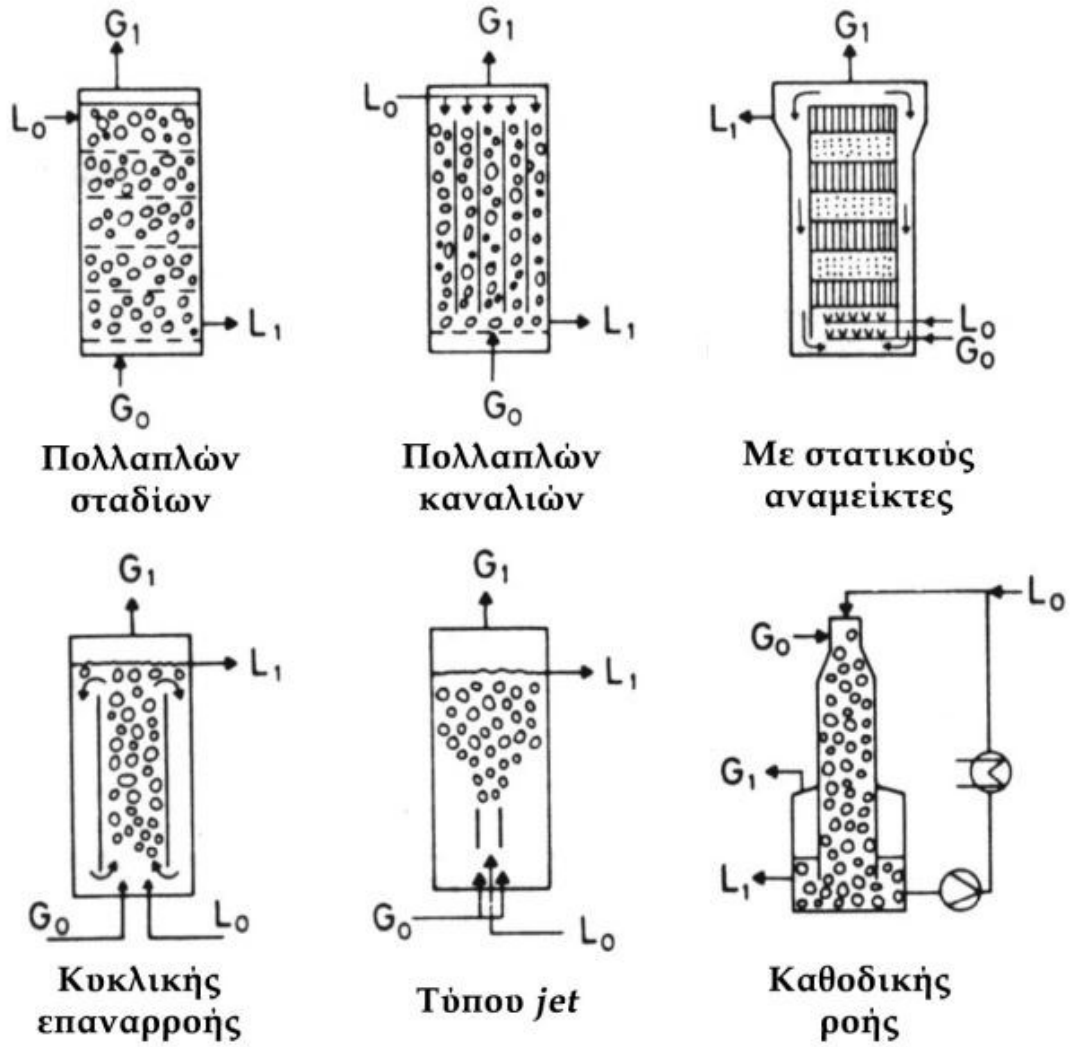
3.5.2.1 Γεωμετρία

Στην απλούστερη μορφή της, η στήλη φυσαλίδων είναι ένα κατακόρυφο κυλινδρικό δοχείο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11, όπου ο λόγος ύψους προς διάμετρο είναι μεταξύ 2 και 5 (Deckwer, 1992). Το αέριο εισάγεται από τον πυθμένα μέσω ενός κατανομέα που μπορεί να διαφέρει ως προς τη σχεδιάσή του. Η υγρή φάση μπορεί να τροφοδοτείται ασυνεχώς ή συνεχώς σε ομορορή ή αντιρροή ως προς την αέρια φάση. Η στήλη φυσαλίδων χαρακτηρίζεται από την απουσία οποιουδήποτε μηχανικού μέσου ανάδευσης, αφού το αέριο κατανέμεται αρκετά ομοιόμορφα μέσα στην υγρή φάση.



Σχήμα 14 : Τυπική στήλη φυσαλίδων (Deckwer, 1992): G_i , L_i : οι παροχές αερίου και υγρού αντίστοιχα, με $i=0$ είσοδο και $i=1$ έξοδο.

Ανάλογα με τη διεργασία, η μορφή της στήλης φυσαλίδων μπορεί να είναι ακόμα πιο πολύπλοκη σε σχέση με αυτή του Σχήματος 11. Το Σχήμα 12 δείχνει διάφορες σύνθετες κατασκευές στήλης φυσαλίδων.



Σχήμα 15 : Σύνθετες μορφές στήλης φυσαλίδων (Shah et al., 1982) : G_i , L_i οι παροχές αερίου και υγρού αντίστοιχα, με $i=0$ είσοδο και $i=1$ έξοδο.

3.5.2.2 Κατανομέας

Ο κατανομέας της αέριας φάσης παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία μιας στήλης φυσαλίδων, μιας και καθορίζει άμεσα την κατανομή μεγέθους των φυσαλίδων, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει το κλάσμα κενού και τη διαθέσιμη διεπιφάνεια για τη μεταφορά μάζας. Η σχέση που συνδέει τη διεπιφάνεια με το μέγεθος των φυσαλίδων και το κλάσμα κενού είναι:

$$\bar{a} = \frac{6\phi_L}{\bar{d}}$$

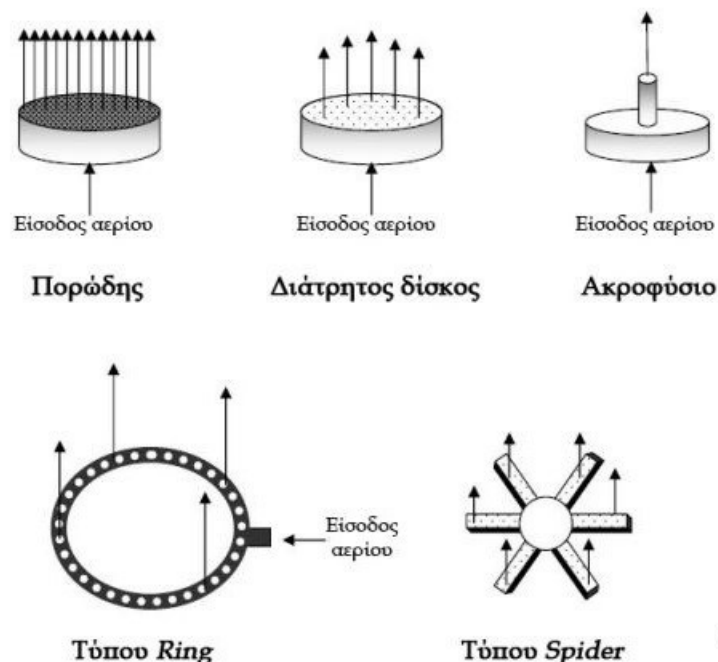
όπου

\bar{a} : η διεπιφάνεια

ϕ_L : η αέρια κατακράτηση

\bar{d} : η διάμετρος Sauter

Όταν η διεπιφάνεια είναι το πιο σημαντικό κριτήριο για το σχεδιασμό, ένας αποτελεσματικός κατανομέας πρέπει να επιλεγεί. Η Εικόνα 8 δείχνει τους πιο γνωστούς κατανομέες που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη διασπορά του αερίου στη στήλη φυσαλίδων.



Εικόνα 10 : Τυπικοί τύποι κατανομέων για τη διασπορά της αέριας φάσης στην στήλη φυσαλίδων (Behkish, 2004)

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός κατανομέα είναι ο αριθμός, το μέγεθος και ο προσανατολισμός των σπών. Είναι γενικά αποδεκτό ότι το είδος και η γεωμετρία του κατανομέα της αέριας φάσης, εκτός από το μέγεθος των παραγόμενων φυσαλίδων, επηρεάζει σημαντικά και την υδροδυναμική συμπεριφορά μιας στήλης φυσαλίδων.

Οι σημαντικότερες **σχεδιαστικές παράμετροι** μιας στήλης φυσαλίδων είναι (Shah et al., 1982, Deckwer, 1992):

- η περιοχή ροής (ομογενής ή ετερογενής)
- το κλάσμα κενού
- το μέγεθος και η κατανομή μεγέθους των φυσαλίδων
- οι συντελεστές μεταφοράς μάζας και θερμότητας
- η διεπιφάνεια μεταξύ υγρού-αερίου
- ο συντελεστής διασποράς

Οι παραπάνω παράμετροι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των δύο φάσεων, τον τύπο του κατανομέα για τη διασπορά της αέριας φάσης, τις συνθήκες λειτουργίας (ταχύτητα υγρής και αέριας φάσης) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της στήλης (Camarasa, 1999).

3.5.2.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Τα κυριότερα **πλεονεκτήματα** μιας στήλης φυσαλίδων σε σχέση με άλλους πολυφασικούς αντιδραστήρες είναι τα ακόλουθα (Shah et al., 1982):

- Απαιτείται λιγότερη συντήρηση, λόγω της απουσίας κινητών τμημάτων.
- Μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη διεπιφάνεια και μεγαλύτεροι ολικοί συντελεστές μεταφοράς μάζας.
- Επιτυγχάνονται υψηλότεροι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας ανά όγκο αντιδραστήρα.
- Απαιτείται λιγότερη επιφάνεια και μικρότερο κόστος για την εγκατάσταση μιας στήλης φυσαλίδων.
- Στερεά μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς προβλήματα στη λειτουργία της στήλης ή την πρόκληση διάβρωσης.
- Λόγω του μεγάλου χρόνου παραμονής της υγρής φάσης, μπορούν να λάβουν χώρα και αργές αντιδράσεις.

Από την άλλη μεριά, τα σημαντικότερα **μειονεκτήματα** που εμφανίζει μια στήλη φυσαλίδων είναι (Shah et al., 1982):

- Η συνένωση των φυσαλίδων που οδηγεί σε μείωση της διαθέσιμης διεπιφάνειας για τη μεταφορά μάζας.
- Η αναστροφή της ροής (*recirculation* ή *backmixing*) που μπορεί να παρατηρηθεί και στις δύο φάσεις.
- Ο χαμηλός χρόνος παραμονής της αέριας φάσης, που καθορίζεται αποκλειστικά από την ταχύτητα των φυσαλίδων.
- Η σχετικά υψηλή πτώση πίεσης.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα, όμως, είναι ο δύσκολος σχεδιασμός της, εξαιτίας της πολύπλοκης υδροδυναμικής και των πολλών παραμέτρων που πρέπει να προσδιοριστούν. Μέχρι σήμερα, ο σχεδιασμός μιας στήλης φυσαλίδων γίνεται με τη χρήση εμπειρικών ή ημι-εμπειρικών συσχετισμών που προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις και παρατηρήσεις σε στήλες διαφόρων διαστάσεων (Kantarci et al., 2005). Ωστόσο, οι περισσότεροι συσχετισμοί αποτυγχάνουν όταν εφαρμόζονται σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (π.χ. άλλη παροχή αερίου, διαφορετικές υγρές φάσεις) (Ribeiro & Lage, 2005). Παρόλο που η κατασκευή μιας στήλης φυσαλίδων είναι αρκετά εύκολη, ωστόσο, ο επιτυχημένος σχεδιασμός και η σωστή διαστασιολόγησή της απαιτούν κατανόηση όλων των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία της (Kantarci et al., 2005) και τη διατύπωση γενικευμένων συσχετισμών.

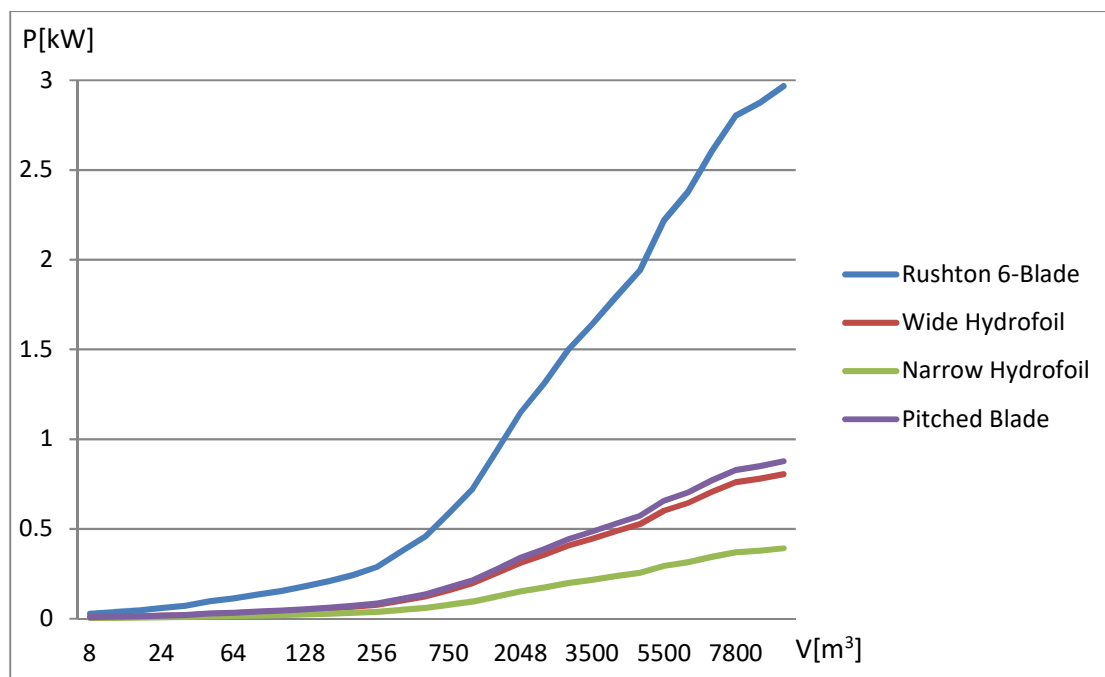
3.6 Τριφασικά Συστήματα

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως υδρογόνωση, επίπλευση και κρυστάλλωση με εξάτμιση, είναι απαραίτητη η επαφή μεταξύ τριών φάσεων. Η επίπλευση είναι μία διεργασία που χρησιμοποιείται ευρέως στη χημική βιομηχανία, η οποία μπορεί να επιτευχθεί είτε σε αναδευόμενα δοχεία είτε σε στήλες επίπλευσης. Σε περιπτώσεις μεγάλης περιεκτικότητας σε στερεά στον πολφό απαιτείται η χρήση ανάδευσης, όπως για παράδειγμα στην απομάκρυνση μελάνης από το χαρτί. Αφού το χαρτί πολτοποιηθεί, η μελάνη απομακρύνεται από τις ινώδεις επιφάνειες μέσα σε κατάλληλο χημικό περιβάλλον. Έπειτα χρησιμοποιείται αέρας για να συμπαρασύρει τα μόρια μελάνης προς την επιφάνεια. Οι συνθήκες λειτουργίας απαιτούν την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εγκλωβισμού ινών χαρτιού στην ανερχόμενη ροή φυσαλίδων. Η απόδοση της συλλογής των μορίων μελάνης εξαρτάται από τη συνδυασμένη πιθανότητα μιας σειράς αλυσιδωτών γεγονότων: σύγκρουση μεταξύ μορίου μελάνης και φυσαλίδα αέρα, προσκόλληση στη φυσαλίδα και διατήρηση του δεσμού μελάνης-αέρα. Η ανάδευση παίζει κρίσιμο ρόλο σε όλα τα παραπάνω γεγονότα (Harnby, 1985, Paul, 2004).

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν, έγινε μία παρουσίαση των διαφόρων τύπων ροής που απαντώνται στα δοχεία ανάμιξης καθώς και των χαρακτηριστικών των δοχείων αυτών. Μελετήθηκαν ακόμη διάφορα είδη συστημάτων που απαντώνται σε δοχεία ανάμιξης και έγινε μια αναφορά των βασικότερων σχέσεων που διέπουν τη λειτουργία τους. Στην αναφορά αυτή, περιλαμβάνονταν οι σχέσεις υπολογισμού βασικών μεγεθών, όπως ο αριθμός Reynolds, ο αριθμός ροής και η απαιτούμενη για τη λειτουργία τους ισχύς.

Στην πράξη βέβαια, η επιλογή του κατάλληλου ανά περίπτωση δοχείου είναι μια αρκετά πιο σύνθετη διαδικασία. Πέρα από τον θεωρητικό υπολογισμό των τιμών των μεγεθών που αναφέρθηκαν, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και πλήθος άλλων παραμέτρων. Παράγοντες όπως το αρχικό κόστος του δοχείου ανάμιξης, αλλά και το κόστος λειτουργίας του, ο απαιτούμενος χώρος για την εγκατάστασή του, ο ρυθμός φθοράς του, αλλά και πολλοί άλλοι, είναι εξαιρετικά σημαντικοί για την επιλογή του κατάλληλου δοχείου ανάμιξης. Για το λόγο αυτό, στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο από τις τιμές των βασικών μεγεθών, είναι η συσχέτισή τους. Η γνώση της συσχέτισης της μεταβολής των βασικών μεγεθών ενός δοχείου ανάμιξης έχει μεγάλη χρησιμότητα όσον αφορά την επιλογή του κατάλληλου δοχείου, αλλά και τον προσδιορισμό των συνθηκών λειτουργίας του.

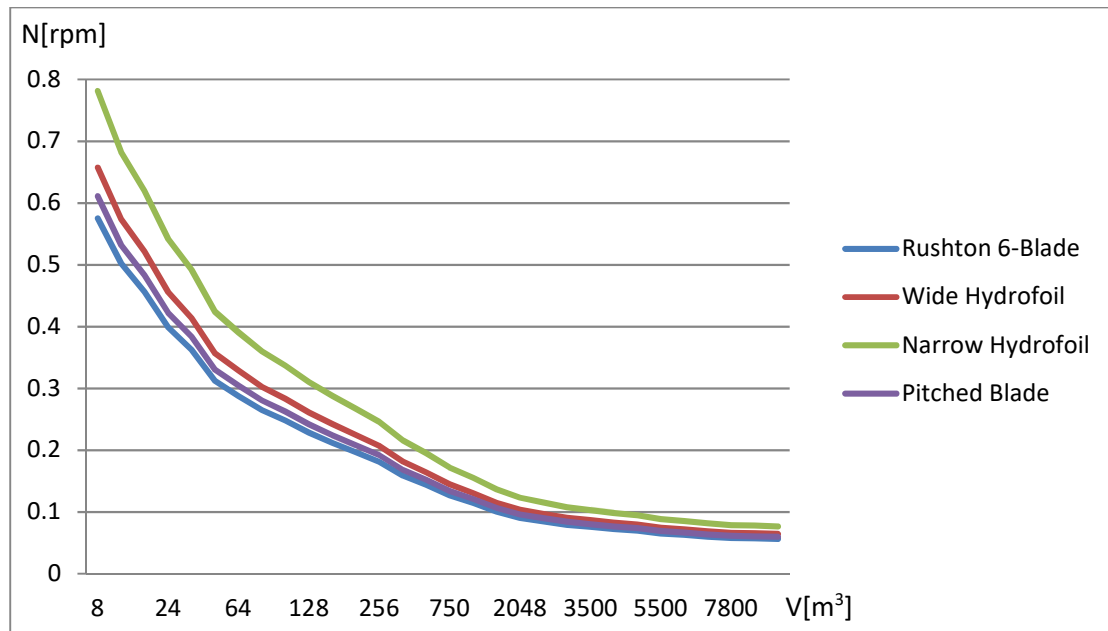
Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα παρουσιαστούν διαγράμματα συσχέτισης πολλών από τα μεγέθη που αναφέρθηκαν μέχρι τώρα. Ο σχεδιασμός των διαγραμμάτων έχει γίνει μέσω της εφαρμογής που διατίθεται δωρεάν στη σελίδα <http://checalc.com/>.



Διάγραμμα 3 : Διάγραμμα V-P για διαφορετικά είδη αναδευτήρων

Το πρώτο διάγραμμα αφορά τη μεταβολή της ισχύος σε σχέση με τον όγκο του δοχείου ανάμιξης για τέσσερα διαφορετικά είδη αναδευτήρων. Οι τέσσερις αυτοί αναδευτήρες (Rushton 6-blade, Wide Hydrofoil, Narrow Hydrofoil και Pitched Blade) είναι απ'τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους σε διεργασίες ανάδευσης-ανάμιξης. Και για τους τέσσερις αναδευτήρες θεωρήθηκε $D/T=0.4$, $\rho=1200\text{Kg/m}^3$ και $\mu=100\text{cP}$.

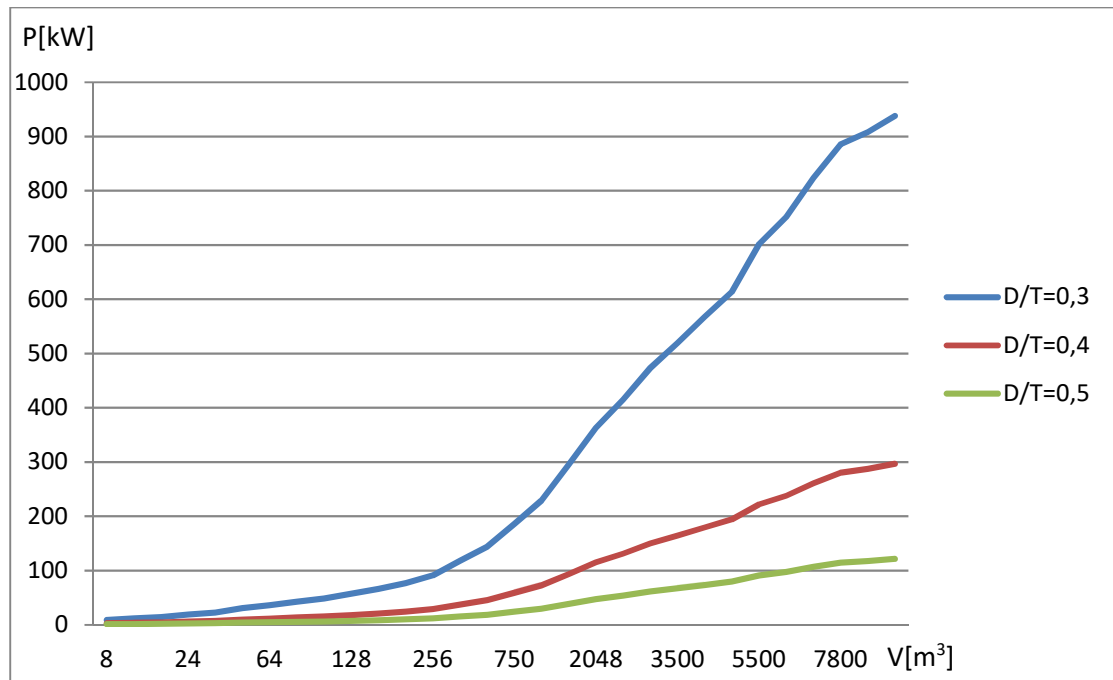
Είναι εμφανές ότι, ενώ και για τα τέσσερα είδη αναδευτήρων η ισχύς αυξάνεται με την αύξηση του όγκου, για τον αναδευτήρα Rushton η αύξηση είναι πολύ πιο ραγδαία, με τιμές ισχύος σχεδόν τετραπλάσιες σε σχέση με των υπολοίπων.



Διάγραμμα 4 : Διάγραμμα V-N για διαφορετικά είδη αναδευτήρων

Το διάγραμμα αυτό περιγράφει τη μεταβολή της ταχύτητας του αναδευτήρα σε σχέση με τον όγκο του δοχείου για τα τέσσερα είδη αναδευτήρων που χρησιμοποιήθηκαν και παραπάνω. Και για τους τέσσερις αναδευτήρες θεωρήθηκε $D/T=0.4$, $\rho=1200\text{Kg/m}^3$ και $\mu=100\text{cP}$.

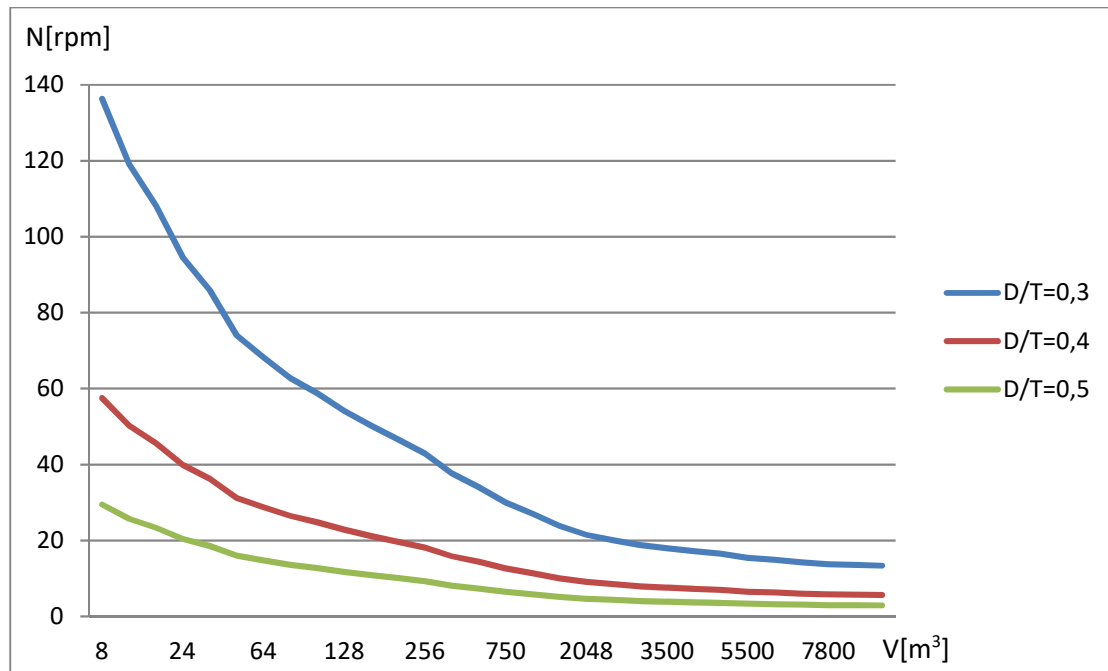
Στην περίπτωση της ταχύτητας, η τιμή της μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με τον όγκο του δοχείου. Παρατηρούμε ότι τα τέσσερα είδη αναδευτήρων δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους και οι τιμές της ταχύτητας τείνουν να πλησιάζουν με την πάροδο του χρόνου.



Διάγραμμα 5 : Διάγραμμα V-P για Rushton 6-blade με διαφορετικά D/T

Μια σημαντική παράμετρος όσον αφορά την επιλογή των συνθηκών λειτουργίας ενός δοχείου ανάμιξης είναι ο λόγος D/T. Οι τιμές του λόγου αυτού κυμαίνονται συνήθως από 0,25 ως 0,55. Το παραπάνω διάγραμμα αφορά τη μεταβολή της ισχύος σε σχέση με τον όγκο για διαφορετικούς λόγους D/T. Μελετήθηκε αναδευτήρας Rushton 6-blade με $\rho=1200\text{Kg/m}^3$ και $\mu=100\text{cP}$.

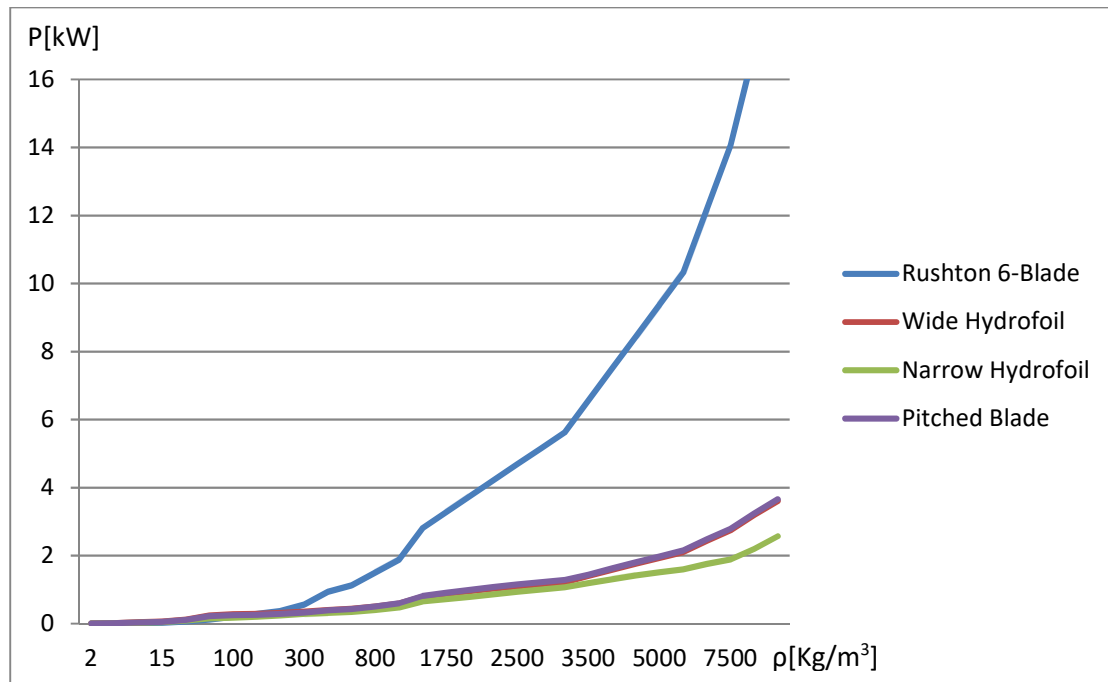
Βλέπουμε ότι για έναν συγκεκριμένο αναδευτήρα, μια μικρή μεταβολή του λόγου αυτού έχει σαν αποτέλεσμα πολύ διαφορετικές τιμές της ισχύος του. Πιο συγκεκριμένα όσο μικρότερη η τιμή του λόγου D/T, τόσο μεγαλύτερες οι τιμές της ισχύος.



Διάγραμμα 6 : Διάγραμμα V-N για Rushton 6-blade με διαφορετικά D/T

Εκτός από την ισχύ του δοχείου ανάμιξης, η επιλογή του λόγου D/T επηρεάζει και τον τρόπο μεταβολής της ταχύτητας του αναδευτήρα. Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει τη μεταβολή της ταχύτητας του αναδευτήρα σε σχέση με τον όγκο του δοχείου για τους τρεις λόγους D/T που μελετήθηκαν και παραπάνω. Και πάλι η μελέτη έγινε για αναδευτήρα Rushton 6-blade με $\rho=1200\text{Kg/m}^3$ και $\mu=100\text{cP}$.

Όπως και στην περίπτωση της ισχύος, έτσι και σε αυτήν της ταχύτητας, μικρή αλλαγή της τιμής του D/T επιφέρει μεγάλες διαφοροποιήσεις στην τελευταία. Η ταχύτητα μεταβάλλεται αντίστροφα με τον όγκο του δοχείου αλλά και πάλι ο μικρότερος λόγος (D/T=0.3) δίνει τις μεγαλύτερες τιμές για την ταχύτητα.

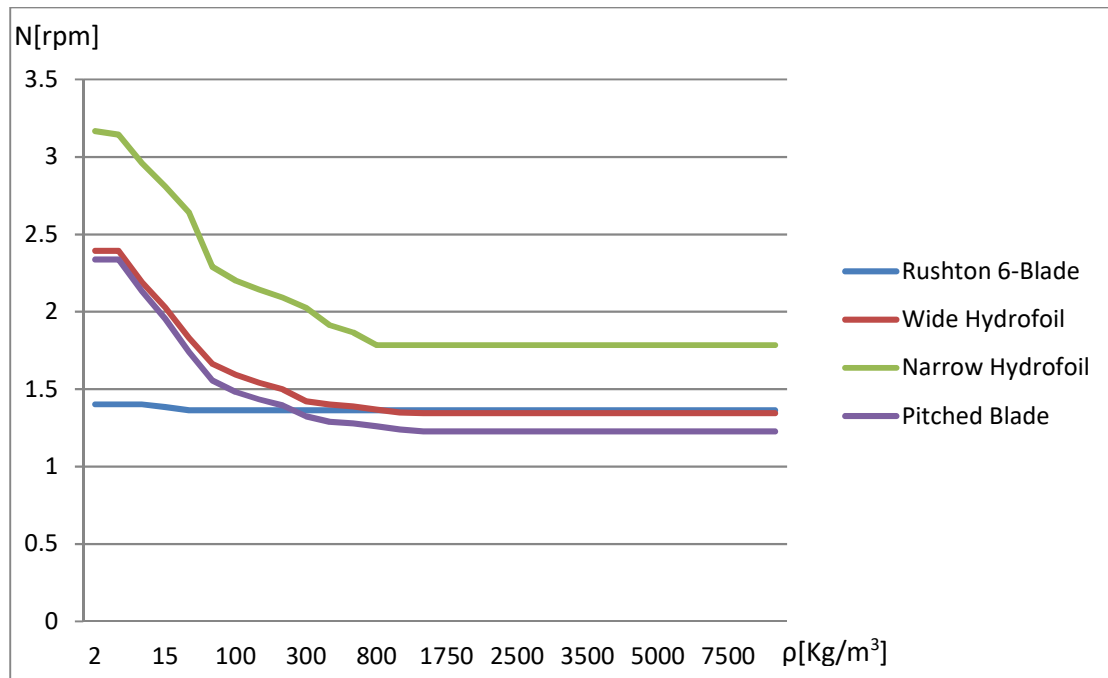


Διάγραμμα 7 : Διάγραμμα ρ -P για διαφορετικά είδη αναδευτήρων

Στα διαγράμματα που προηγήθηκαν μελετήθηκαν χαρακτηριστικά του δοχείου ανάμιξης και η αλληλεπίδραση αυτών για σταθερό ιξώδες και πυκνότητα του υγρού ανάμιξης. Σημαντικό ωστόσο είναι να γνωρίζουμε και πως συμπεριφέρονται διαφορετικά είδη αναδευτήρων για διαφορετικά χαρακτηριστικά του υγρού ανάμιξης.

Στο παραπάνω διάγραμμα αναπαριστάται ο τρόπος μεταβολής της ισχύος σε σχέση με την πυκνότητα του υγρού μέσα στον αναδευτήρα. Η μελέτη έγινε για τέσσερα διαφορετικά είδη αναδευτήρων, και για όλους θεωρήθηκε όγκος δοχείου $V=1000\text{m}^3$, λόγος $D/T=0.3$ και ιξώδες υγρού $\mu=100\text{cP}$.

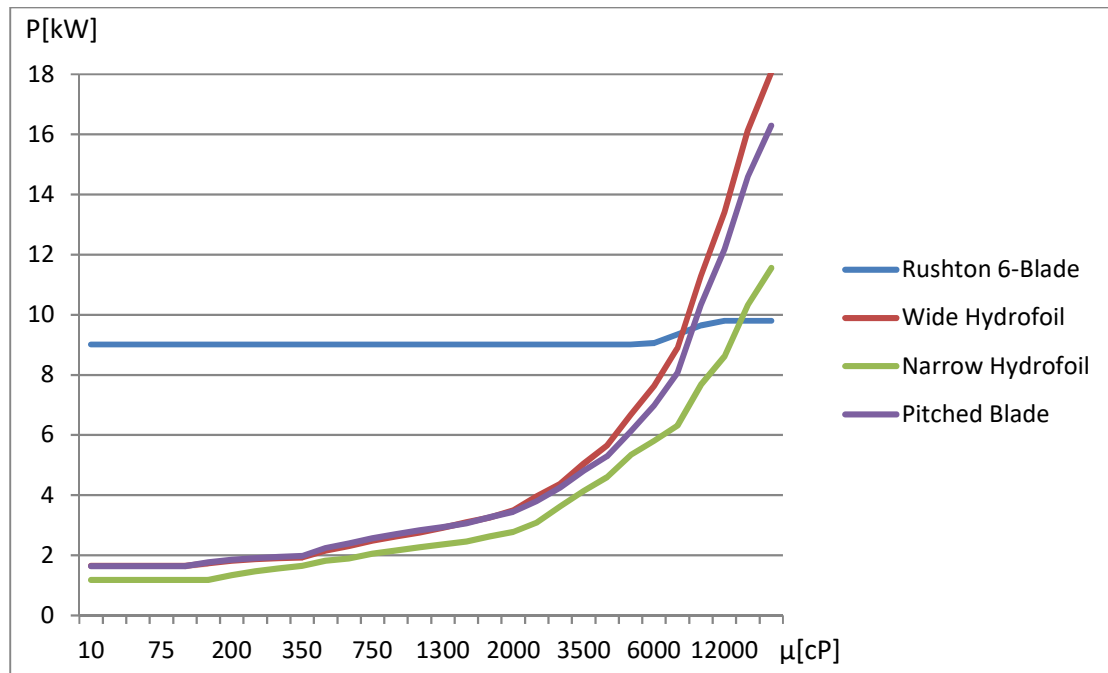
Και στην περίπτωση της πυκνότητας σε σχέση με την ισχύ παρατηρούμε ότι ο αναδευτήρας που διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με τους υπόλοιπους είναι ο Rushton 6-Blade. Για ίδιες τιμές πυκνότητας υγρού, οι τιμές της ισχύος για τον Rushton είναι εξαιρετικά μεγαλύτερες σε σχέση με όλων των υπόλοιπων αναδευτήρων.



Διάγραμμα 8 : Διάγραμμα ρ-N για διαφορετικά είδη αναδευτήρων

Το διάγραμμα αυτό αφορά τη συσχέτιση πυκνότητας – ταχύτητας αναδευτήρα για τα τέσσερα είδη αναδευτήρων. Ο όγκος του δοχείου ανάμιξης και για τα τέσσερα είναι $V=8m^3$, $\mu=100cP$ ενώ θεωρήθηκε $D/T=0.3$.

Στην περίπτωση της ταχύτητας, και πάλι ο Rushton είναι αυτός που διαφοροποιείται αλλά με διαφορετικό τρόπο αυτή τη φορά. Βλέπουμε ότι πολύ μεγάλες αλλαγές της πυκνότητας του υγρού επιφέρουν μικρή έως καθόλου αλλαγή στην ταχύτητα του αναδευτήρα, ακόμα και για μικρές τιμές της πυκνότητας. Όσον αφορά τους άλλους τρεις αναδευτήρες, παρατηρούμε ένα παρόμοιο μοτίβο σύμφωνα με το οποίο για μικρές τιμές της πυκνότητας η ταχύτητα σταδιακά μειώνεται ώσπου φτάσει μια συγκεκριμένη τιμή στην οποία σταθεροποιείται.



Διάγραμμα 9 : Διάγραμμα μ -P για διαφορετικά είδη αναδευτήρων

Όσον αφορά τη συσχέτιση του ιξώδους του υγρού, έγινε μελέτη της μεταβολής της ισχύος σε σχέση με αυτό. Μελετήθηκαν τα προαναφερθέντα τέσσερα είδη αναδευτήρων για τα οποία θεωρήθηκε $V=8\text{m}^3$, $D/T=0.3$ και $\rho=1200\text{Kg/m}^3$.

Ο αναδευτήρας Rushton είναι αυτός που εμφανίζει και πάλι διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τους υπόλοιπους. Πιο συγκεκριμένα, βλέπουμε και πάλι ότι σημαντικές αλλαγές του ιξώδους έχουν σαν αποτέλεσμα ελάχιστες αλλαγές στην τιμή της ισχύος. Από την άλλη, οι υπόλοιποι τρεις αναδευτήρες παρουσιάζουν μια εκθετική αύξηση του ιξώδους σε σχέση με την ισχύ, με μικρές διαφορές μεταξύ τους.

Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο την μελέτη και παρουσίαση της βιβλιογραφίας σχετικά με τις διεργασίες ανάδευσης και ανάμιξης. Πραγματοποιήθηκε μελέτη τόσο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοχείων ανάμιξης, όσο και των σχέσεων που περιγράφουν τη λειτουργία τους. Τέλος, έγινε μια παρουσίαση της συσχέτισης διαφόρων βασικών μεγεθών για τις εν λόγω διεργασίες μέσω διαγραμμάτων.

Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής, ένα βασικό συμπέρασμα είναι η πολυπλοκότητα των μελετηθέντων διεργασιών. Η μεγάλη ανάπτυξη της βιομηχανίας τον περασμένο αιώνα είχε ως αποτέλεσμα να πραγματοποιηθούν πολλές μελέτες πάνω σε αυτές, οι οποίες οδήγησαν σε σημαντική γνώση των καταστάσεων και της λειτουργίας των συστημάτων ανάμιξης. Υπάρχει πλέον μια αρκετά μεγάλη βιβλιογραφία σχετικά τόσο με την επιλογή του κατάλληλου δοχείου για την εκάστοτε περίπτωση και τη σωστή διαστασιολόγησή του, όσο και με τον ορισμό των συνθηκών λειτουργίας του. Ωστόσο, κάτι που καθίσταται ακόμα πιο σημαντικό είναι η γνώση της συσχέτισης των μεγεθών αυτών. Στην πράξη πρέπει να γίνει η επιλογή όχι μόνο μίας αλλά όλων των παραμέτρων που έχουν αναφερθεί - έτσι είναι εξαιρετικά σημαντικό να υπάρχει μεγάλο εύρος πληροφοριών για την αλληλεπίδρασή τους. Όπως έγινε φανερό στο Κεφάλαιο 6, πολύ μικρές μεταβολές σε ένα μέγεθος μπορούν να επιφέρουν τεράστιες αλλαγές σε κάποιο άλλο. Ακόμη, τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι αρκετά πιο σύνθετα και αποτελούνται όχι μόνο από ένα δοχείο, αλλά από περισσότερα ή και από διαφορετικές συσκευές.

Έτσι κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στις διεργασίες ανάδευσης και ανάμιξης είναι η περαιτέρω μελέτη της συσχέτισης των μεγεθών που τις περιγράφουν καθώς και επέκταση σε πιο σύνθετα συστήματα λειτουργίας.

- Barigou M. and Greaves M., 1996, Gas holdup and interfacial area distributions in a mechanically agitated gas-liquid contactor, *Chem. Eng. Res. Des.*, 74, 397-405
- Behkish A., 2004, Hydrodynamic and Mass-Transfer Characteristics in Organic Liquid Mixtures in a Large-Scale Bubble Column Reactor for the Toluene Oxidation Process
- Calderbank P.H., 1958, Physical rate processes in industrial fermentation – Part I: The interfacial area in gas-liquid contacting with mechanical agitation, *Chem. Eng. Res. Des.*, 36, 443-463
- Camarasa E., 1999, *Chem. Eng. & Processing: Process Intensification*, 38, 329
- Deckwer W.D., Louisi Y., Zaidi A. and Ralek M., 1980, Hydrodynamic properties of the Fischer–Tropsch slurry process, *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, 19, 699-708
- Deckwer W.D., 1992, *Bubble Column Reactors*, John Wiley & Sons
- Dickey D.S., 1981, in M. Moo-Young (Ed.), *Advances in Biotechnology*, Pergamon Press, New York
- Harnby N., Edwards M.F. and Nienow A.W., 1985, *Mixing in the process industries*, Butterworths, London
- Joshi J., 2001, *Computational flow modelling and design of bubble column reactors*
- Kantarci N., Fahir B., Kutlu U., 2005, *Bubble Column Reactors*
- Markopoulos J., Kadoglou E., Papaevangelou D., Zavitsanou A., 2000, Regional mean bubble diameters and gas holdup in agitated gas-liquid contactors, *Chem. Eng. Technol.*, 23, 337
- Mavros P., 2001, Flow visualization in stirred vessels: A review of experimental techniques, *Chem. Eng. Res. Des.*, 79, 113-127
- McCabe W., Smith J. and Harriot P., 2003, *Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- Metzner A.B. and Otto R.E., 1957, Agitation of non-Newtonian fluids, *AIChE Journal*
- Nagata S., 1976, *Mixing Principles and Applications*, Wiley, New York

- Nienow A. W., Wisdom D. J., Middleton J. C., 1978, The effect of scale and geometry on flooding, recirculation, and power in gassed stirred vessels, Proc. of the 2nd European Conf. on Mixing, Cranfield, UK
- Paul E.L., Atiemo-Obeng V.A. and Kresta S.M., 2004, Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey
- Ribeiro Jr., Lage, 2005, Gas-liquid direct-contact evaporation: A review, *Chem. Eng. Tech.*, 28, 1081-1107
- Rushton H. and Bimbinet J.J., 1968, Holdup and flooding in air liquid mixing, *Can. J. Chem.Eng.*, 46, 16-21
- Shah Y.T., Joseph S., Smith D.N. and Ruether J.A., 1985, On the behaviour of the gas phase in a bubble column with ethanol-water mixtures, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 24, 1140-1148
- Smith J.C., Middleton J.C. and Van't Riet K., 1977, Scale-up of agitated gas-liquid reactors for mass transfer, Proc. 2nd Eur. Conf. Mixing (BHRA Fluid Engineering), Cranfield, UK
- Sterbacek Z. and Tausk P., 1965, Mixing in the Chemical Industry, Pergamon, New York
- Thatte A.R., Ghadge R.S., Patwardhan A.W., Joshi J.B. and Singh G., 2004, Local gas holdup measurement in sparged and aerated tanks by γ -ray attenuation technique, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 5389-5399
- Van't Riet K., Smith J. M., 1973, The behaviour of gas-liquid mixtures near Rushton turbine blades, *Chem. Eng. Sci.*, 28, 1031
- Zaboulis X., Papara M., Chatziargyriou A. and Karapantsios T.D., 2009, Detection of densely dispersed spherical bubbles in digital images based on a template matching technique; Application to wet foams, 309, 96-106
- Zwietering Th.N., 1957, Suspending of solid particles in liquid by agitators, *Chem. Eng. Sci.*, 8, 244-253
- Μπαμπαλώνα Ε.Δ., 2009, Μελέτη των καταστάσεων πλημμύρισης σε αναδευόμενα συστήματα αερίου-υγρού, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Ζουμπούλης Α., Καραπάντσιος Θ., Μάτης Κ. και Μαύρος Π., 2009, Στοιχεία Φυσικών Διεργασιών, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη

Online Πηγές:

<http://www.dduanchor.org/site/wp-content/uploads/2014/11/Process-Engineering-Agitation-Mixing.pdf>

http://www.pacontrol.com/process-information-book/Mixing%20and%20Agitation%2093851_10.pdf

[http://classes.engineering.wustl.edu/eECE503/Lecture_Notes/Agitation%20\(STR\).pdf](http://classes.engineering.wustl.edu/eECE503/Lecture_Notes/Agitation%20(STR).pdf)

<https://www.scribd.com/doc/186737456/Agitation-and-Mixing-pdf>

http://www.uobabylon.edu.iq/uobColeges/ad_downloads/5_4863_857.pdf

<http://checalc.com/agitation.html>

Πίνακας 2 : Δεδομένα Διαγράμματος 3

V	Rushton 6- Blade	Wide Hydrofoil	Narrow Hydrofoil	Pitched Blade
8	2,85	0,77	0,38	0,85
12	3,73	1,01	0,49	1,1
16	4,52	1,23	0,6	1,34
24	5,93	1,61	0,78	1,75
32	7,18	1,95	0,95	2,12
50	9,67	2,62	1,28	2,86
64	11,4	3,09	1,51	3,37
82	13,45	3,65	1,78	3,98
100	15,35	4,17	2,03	4,54
128	18,09	4,91	2,39	5,35
160	21	5,7	2,78	6,21
200	24,36	6,61	3,22	7,2
256	28,72	7,8	3,8	8,49
380	37,38	10,14	4,94	11,05
512	45,6	12,37	6,03	13,48
750	58,81	15,96	7,77	17,39
1024	72,38	19,64	9,57	21,4
1500	93,35	25,34	12,34	27,6
2048	114,89	31,18	15,19	33,97
2500	131,23	35,62	17,35	38,8
3050	149,83	40,67	19,81	44,3
3500	164,23	44,57	21,71	48,56
4000	179,52	48,72	23,73	53,08
4500	194,19	52,7	25,67	57,42
5500	221,98	60,25	29,34	65,64
6100	237,85	64,55	31,44	70,33
7000	260,7	70,75	34,46	77,08
7800	280,2	76,05	37,04	82,82
8100	287,34	77,98	37,98	84,96
8500	296,72	80,53	39,22	87,74

Πίνακας 3 : Δεδομένα Διαγράμματος 4

V	Rushton 6- Blade	Wide Hydrofoil	Narrow Hydrofoil	Pitched Blade
8	57,52	65,75	78,14	61,11
12	50,25	57,42	68,26	53,2
16	45,65	52,17	62,02	48,34
24	39,88	45,58	54,18	42,23
32	36,23	41,41	49,22	38,37
50	31,23	35,69	42,42	33,06
64	28,76	32,87	39,07	30,45
82	26,48	30,26	35,97	28,04
100	24,78	28,32	33,67	26,24
128	22,83	26,09	31,01	24,17
160	21,19	24,22	28,79	22,44
200	19,67	22,48	26,72	20,83
256	18,12	20,71	24,61	19,18
380	15,88	18,15	21,58	16,82
512	14,38	16,43	19,53	15,23
750	12,66	14,47	17,2	13,41
1024	11,41	13,04	15,5	12,08
1500	10,05	11,48	13,65	10,64
2048	9,06	10,35	12,31	9,59
2500	8,48	9,69	11,51	8,97
3050	7,93	9,07	10,78	8,4
3500	7,58	8,66	10,29	8,02
4000	7,25	8,28	9,84	7,67
4500	6,97	7,96	9,47	7,38
5500	6,52	7,45	8,85	6,9
6100	6,3	7,2	8,55	6,67
7000	6,01	6,87	8,17	6,37
7800	5,8	6,63	7,88	6,14
8100	5,73	6,55	7,78	6,06
8500	5,64	6,44	7,66	5,97

Πίνακας 4 : Δεδομένα Διαγράμματος 5

V	D/T=0,3	D/T=0,4	D/T=0,5
8	9,01	2,85	1,17
12	11,8	3,73	1,53
16	14,3	4,52	1,85
24	18,73	5,93	2,43
32	22,69	7,18	2,94
50	30,56	9,67	3,96
64	36,03	11,4	4,67
82	42,5	13,45	5,51
100	48,51	15,35	6,29
128	57,19	18,09	7,41
160	66,36	21	8,6
200	77	24,36	9,98
256	90,78	28,72	11,77
380	118,13	37,38	15,31
512	144,1	45,6	18,68
750	185,87	58,81	24,09
1024	228,75	72,38	29,65
1500	295,05	93,35	38,24
2048	363,12	114,89	47,06
2500	414,75	131,23	53,75
3050	473,55	149,83	61,37
3500	519,05	164,23	67,27
4000	567,37	179,52	73,53
4500	613,72	194,19	79,54
5500	701,57	221,98	90,92
6100	751,71	237,85	97,42
7000	823,94	260,7	106,78
7800	885,58	280,2	114,77
8100	908,14	287,34	117,69
8500	937,8	296,72	121,54

Πίνακας 5 : Δεδομένα Διαγράμματος 6

V	D/T=0,3	D/T=0,4	D/T=0,5
8	136,34	57,52	29,45
12	119,1	50,25	25,73
16	108,21	45,65	23,37
24	94,53	39,88	20,42
32	85,89	36,23	18,55
50	74,02	31,23	15,99
64	68,17	28,76	14,72
82	62,76	26,48	13,56
100	58,75	24,78	12,69
128	54,11	22,83	11,69
160	50,23	21,19	10,85
200	46,63	19,67	10,07
256	42,94	18,12	9,28
380	37,65	15,88	8,13
512	34,08	14,38	7,36
750	30,01	12,66	6,48
1024	27,05	11,41	5,84
1500	23,82	10,05	5,15
2048	21,47	9,06	4,64
2500	20,09	8,48	4,34
3050	18,8	7,93	4,06
3500	17,96	7,58	3,88
4000	17,18	7,25	3,71
4500	16,52	6,97	3,57
5500	15,45	6,52	3,34
6100	14,92	6,3	3,22
7000	14,25	6,01	3,08
7800	13,75	5,8	2,97
8100	13,58	5,73	2,93
8500	13,36	5,64	2,89

Πίνακας 6 : Δεδομένα Διαγράμματος 7

ρ	Rushton 6- Blade	Wide Hydrofoil	Narrow Hydrofoil	Pitched Blade
2	0,41	0,83	0,61	0,74
5	1,02	2,07	1,52	1,84
10	2,04	4,14	3,03	3,68
15	3,06	6,21	4,55	5,52
30	6,13	12,42	9,1	11,03
60	12,25	24,64	15,71	22,07
100	20,42	27,93	17,93	25,38
150	29,44	28,9	20,24	26,18
200	37,76	31,78	24,17	29,07
300	56,29	35,33	28,72	33,08
500	93,82	40,37	31,41	38,96
600	112,58	43,63	34,71	43,11
800	150,11	50,82	40,33	50,58
1000	187,64	59,21	48,28	60,24
1500	281,45	79,38	65,33	81,74
1750	328,36	88,26	72,56	91,26
2000	375,27	96,31	79,06	99,99
2250	422,18	103,62	86,47	108,01
2500	469,09	110,28	93,78	115,4
2750	516	116,37	100,74	122,23
3000	562,91	122,07	107,38	128,55
3500	656,72	140,71	119,77	143,81
4000	750,54	158,9	131,11	162,29
4500	844,36	176,67	141,51	180,31
5000	938,18	194,02	151,08	197,89
5500	1031,99	210,98	159,9	215,03
6500	1219,63	243,74	175,63	248,11
7500	1407,27	275,07	189,19	279,65
9000	1688,72	319,54	220,42	324,3
10500	1970,17	361,26	257,16	366,02

Πίνακας 7 : Δεδομένα Διαγράμματος 8

ρ	Rushton 6- Blade	Wide Hydrofoil	Narrow Hydrofoil	Pitched Blade
2	140,23	239,42	316,66	233,72
5	140,23	239,42	314,46	233,72
10	140,23	219,07	295,93	213,28
15	138,4	202,7	280,95	195,31
30	136,34	183,09	264,1	174,1
60	136,34	166,29	229,12	155,56
100	136,34	159,32	220,17	148,23
150	136,34	154,17	214,43	143,49
200	136,34	149,77	209,23	139,43
300	136,34	142,26	202,54	132,45
500	136,34	140,02	191,42	128,99
600	136,34	138,96	186,65	127,95
800	136,34	136,91	178,48	125,96
1000	136,34	134,98	178,48	124,09
1500	136,34	134,47	178,48	122,71
1750	136,34	134,47	178,48	122,71
2000	136,34	134,47	178,48	122,71
2250	136,34	134,47	178,48	122,71
2500	136,34	134,47	178,48	122,71
2750	136,34	134,47	178,48	122,71
3000	136,34	134,47	178,48	122,71
3500	136,34	134,47	178,48	122,71
4000	136,34	134,47	178,48	122,71
4500	136,34	134,47	178,48	122,71
5000	136,34	134,47	178,48	122,71
5500	136,34	134,47	178,48	122,71
6500	136,34	134,47	178,48	122,71
7500	136,34	134,47	178,48	122,71
9000	136,34	134,47	178,48	122,71
10500	136,34	134,47	178,48	122,71

Πίνακας 8 : Δεδομένα Διαγράμματος 9

μ	Rushton 6- Blade	Wide Hydrofoil	Narrow Hydrofoil	Pitched Blade
10	9,01	1,65	1,18	1,64
20	9,01	1,65	1,18	1,64
50	9,01	1,65	1,18	1,64
75	9,01	1,65	1,18	1,64
100	9,01	1,65	1,18	1,64
150	9,01	1,74	1,18	1,77
200	9,01	1,82	1,34	1,85
250	9,01	1,87	1,47	1,91
300	9,01	1,91	1,57	1,95
350	9,01	1,93	1,65	1,98
500	9,01	2,15	1,82	2,25
600	9,01	2,31	1,9	2,4
750	9,01	2,49	2,05	2,57
900	9,01	2,63	2,16	2,7
1100	9,01	2,76	2,27	2,83
1300	9,01	2,92	2,36	2,94
1600	9,01	3,1	2,46	3,07
1800	9,01	3,26	2,63	3,27
2000	9,01	3,49	2,78	3,45
2500	9,01	3,96	3,09	3,8
3000	9,01	4,38	3,63	4,26
3500	9,01	5,05	4,14	4,81
4000	9,01	5,65	4,6	5,29
5000	9,01	6,67	5,33	6,12
6000	9,06	7,63	5,8	6,98
7500	9,35	8,89	6,31	8,07
10000	9,65	11,28	7,67	10,33
12000	9,8	13,41	8,61	12,18
15000	9,8	16,13	10,33	14,59
17500	9,8	18,05	11,56	16,29