ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Ατμοπαραγωγών & Θερμικών εγκαταστάσεων

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη Κατασκευής Κρύου Μοντέλου Αναβράζουσας Ρευστοποιημένης Κλίνης για Αεριοποίηση Σκουπιδιών

Επιμέλεια: **Μώκος Αθανάσιος**

Επιβλέπων: Εμμανουήλ Κακαράς, Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Πρόλογος

Με την παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μοντελοποίηση μιας Αναβράζουσας Ρευστοποιημένης Κλίνης και Μελέτη της Κατασκευής του Αντίστοιχου Μοντέλου» ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Εμμανουήλ Κακαρά, καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών και υπεύθυνο του εργαστηρίου Ατμοπαραγωγών και Θερμικών Εγκαταστάσεων για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό Σωτήριο Καρέλλα για την άμεση επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας αλλά και για τις συμβουλές και επισημάνσεις του, οι οποίες είχαν ουσιαστική συμβολή στην ολοκλήρωσή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υλική και ηθική στήριξη την οποία μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αυτή η εργασία αφιερώνεται στον παππού μου, ο οποίος έφυγε πρόσφατα από αυτή τη ζωή.

Πίνακας περιεχομένων

1) Σκοπός της Εργασίας ... 3
2) Εισαγωγή ... 3
3) Βιομάζα ... 6
4) Αστικά Απορρίμματα ... 13
4.1) Stabilat ... 19
5) Αεριοποίηση ... 21
6) Αντιδραστήρες Αεριοποίησης ... 28
6.1) Αντιδραστήρες πυκνής μορφής ή αντιδραστήρες σταθερής κλίνης ... 28
6.2) Αντιδραστήρες αραιής μορφής ... 33
6.3) Αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed) ... 34
6.4) Ανεπιθύμητες Προσμείξεις ... 41
6.4.1) Πίσσες ... 43
7) Ρευστοποίηση ... 46
7.1) Είδη ρευστοποιημένων κλινών ... 47
7.3) Παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στη ρευστοποίηση ... 51
7.4) Συσσωμάτωση στερεών σωματιδίων σε υψηλές θερμοκρασίες ... 54
8) Μέγεθος Σωματιδίων ... 56
9) Δεδομένα Πραγματικής Εγκατάστασης ... 61
10) Σχέσεις Αναλογίας Ρευστοποιημένων Κλινών κατά Glicksman ... 67
10.1) Εφαρμογή των νόμων του Glicksman ... 71
10.2) Εφαρμογή των νόμων δυναμικής ομοιότητας στην εγκατάσταση στόχο ... 82
11) Ροή Φυσαλίδων ... 85
11.1) Σχηματισμός Φυσαλίδων ... 85
11.2) Μοντέλο Davidson-Harrison ... 86
11.3) Μέγεθος Φυσαλίδων ... 91
11.4) Ταχύτητα Φυσαλίδων ... 92
11.5) Slugging ... 95
12) Αναβράζουσα Ρευστοποιημένη Κλίνη ... 97
12.1) Μοντέλο K-L ... 101
12.2) Μεταφορά Σωματιδίων ... 104
12.3) Ανάμιξη στερεών ... 109
13) Κατασκευή του Αντιδραστήρα ... 113

13.1) Σύστημα Εισαγωγής Αερίου 113
13.1.1) Διάτρητοι Διασκορπιστές 116
13.1.2) Διασκορπιστές με Tuyere και Κάλυμμα 117
13.1.3) Είσοδος Αερίου 119
13.1.4) Πτώση πίεσης στους διασκορπιστές 121
13.2) Σύστημα Εισαγωγής Καυσίμου 133
13.3) Αντιδραστήρας 136
13.4) Σύστημα Διαχωρισμού Αερίων 142
13.5) Σύστημα Απαγωγής Στερεών υπολειμμάτων 151
13.6) Έλεγχος Εγκατάστασης 153
14) Αποτελέσματα 159
14.1) Προϋπολογισμός της εγκατάστασης 171
15) Σύμβολα 177
16) Βιβλιογραφία 179
17) Παράρτημα 184
17.1) Εικόνες 184
17.2) Υπολογιστικά Φύλλα 186
17.3) Σχέδια 210

1) Σκοπός της Εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός κρύου μοντέλου αντιδραστήρα αεριοποίησης ρευστοποιημένης κλίνης με τελικό σκοπό την κατασκευή του. Το μοντέλο βασίζεται σε μια πραγματική εγκατάσταση στο Osnabrück η οποία κατασκευάζεται στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος Polystabilat. Το μοντέλο προορίζεται για την υδροδυναμική μελέτη της εγκατάστασης και καμία θερμική διεργασία δεν θα λαμβάνει χώρα στην εγκατάσταση.

Κύριο σημείο ενδιαφέροντος στην εγκατάσταση είναι η απαγωγή των υπολειμμάτων αεριοποίησης τα οποία παράγονται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Θα δοκιμαστεί ειδικό σύστημα διασκορπιστή το οποίο θα εξασφαλίζει την απομάκρυνση της τέφρας από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα, επιτρέποντας ταυτόχρονα την απρόσκοπτη συνέχιση της αεριοποίησης.

Ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα της εγκατάστασης, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της εγκατάστασης στο Osnabrück της Γερμανίας θα χρησιμεύσουν στην κατασκευή μιας μεγαλύτερης εγκατάστασης, βιομηχανικής κλίμακας.

2) Εισαγωγή

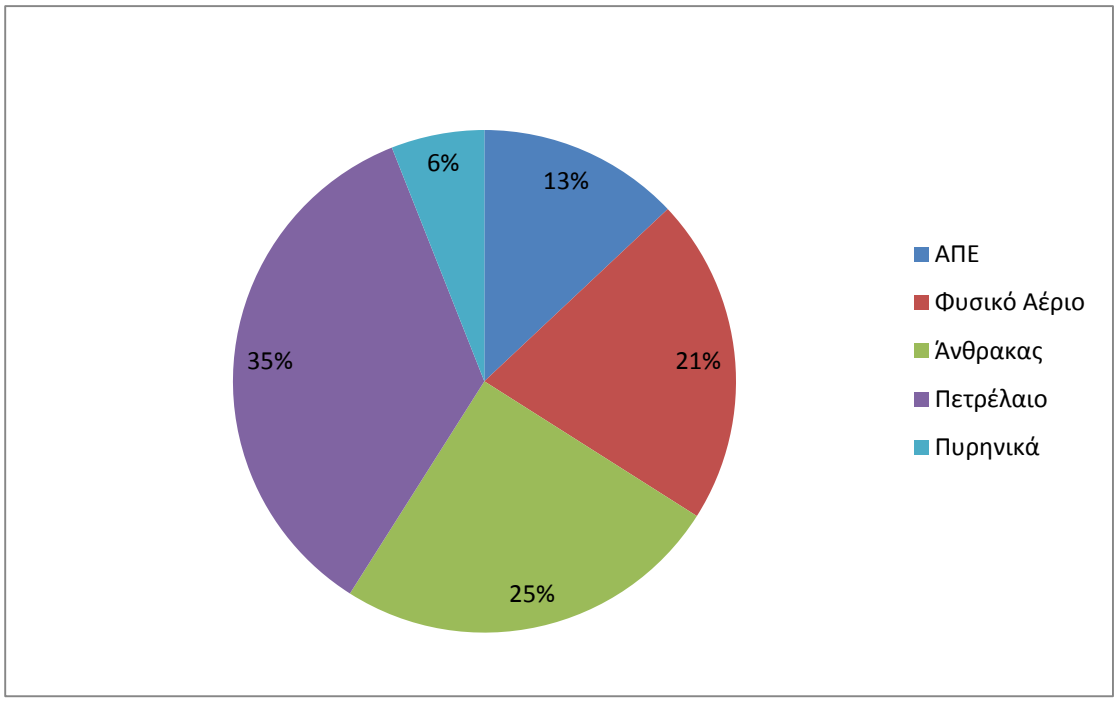
Σήμερα, στην αρχή του 21^{ου} αιώνα, οι ανεπτυγμένες χώρες βρίσκονται σε μια κατάσταση την οποία μπορούμε να ορίσουμε ως «μετα-βιομηχανική». Η βιομηχανική παραγωγή δεν είναι πλέον ο πιο σημαντικός παράγοντας της οικονομικής ζωής. Αντίθετα, ο κλάδος των υπηρεσιών, βοηθούμενος από τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και της πληροφορικής αποτελεί πλέον τον κύριο τομέα.

Αυτή η μεταβολή σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση του πληθυσμού τον τελευταίο αιώνα, έχουν οδηγήσει σε αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας κατά 4000% από το 1900 [1] και κατά 400% από το 1950. Η αύξηση αυτή συνοδεύτηκε και από αύξηση του βιοτικού επιπέδου (κατά κύριο λόγο στις ανεπτυγμένες χώρες) και της επιστημονικής γνώσης.

Αυτή η εξέλιξη της επιστημονικής γνώσης οδήγησε και στη συνειδητοποίηση μιας σειράς περιβαλλοντικών προβλημάτων, τα οποία προκλήθηκαν από την αλόγιστη καύση στερεών καυσίμων. Η καύση οδήγησε στην απελευθέρωση χιλιάδων τόνων μεθανίου και κυρίως διοξειδίου του άνθρακα, τα οποία είναι άμεσα υπεύθυνα για το σοβαρότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα σήμερα, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο απειλεί να αυξήσει τη μέση θερμοκρασία του πλανήτη.

Το διοξείδιο του άνθρακα και τα άλλα αέρια του θερμοκηπίου καθώς αυξάνουν την περιεκτικότητά τους στην ατμόσφαιρα προκαλούν την υπερθέρμανση της ατμόσφαιρας του πλανήτη. Το διοξείδιο του άνθρακα έχει αυξηθεί στην ατμόσφαιρα κατά 31% από τους προϊστορικούς χρόνους και το μεθάνιο κατά 151% [2]. Οι ρυθμοί αύξησης έχουν επιταχυνθεί μετά τη βιομηχανική επανάσταση και ειδικά με τη ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας οδηγώντας σε αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της Γης κατά 0,6^{o}C τον τελευταίο αιώνα.

Για την αντιμετώπιση του φαινόμενου αυτού προτείνεται η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η αντικατάσταση των συμβατικών. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είτε δεν απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, είτε απελευθερώνουν όσο θα απελευθερωνόταν και κατά τις φυσικές διεργασίες, οι οποίες συμβαίνουν ανεξάρτητα από την επίδραση του ανθρώπου (η βιομάζα). Έτσι το ισοζύγιο του άνθρακα παραμένει σταθερό. Ταυτόχρονα, οι πηγές αυτές είναι πρακτικά ανεξάντλητες, ενώ προβλέπεται τα ορυκτά καύσιμα να εξαντληθούν μέσα στους επόμενους δύο αιώνες, αν η σημερινή εκμετάλλευσή τους συνεχιστεί.



Εικόνα 1- Ποσοστά συνεισφοράς των Ενεργειακών Πηγών στην Παγκόσμια Κατανάλωση [3]

Όπως όμως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα [3] τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας) παρέχουν το 81% της ενέργειας που χρησιμοποιούμε σήμερα, με κυριότερο το πετρέλαιο που παρέχει το 35%. Οι ΑΠΕ φαίνεται ότι παρέχουν το 13% αλλά στην πραγματικότητα το μεγαλύτερο ποσοστό προέρχεται από την καύση ξύλου στις αναπτυσσόμενες χώρες. Οι νέες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολική, ηλιακή και υδροηλεκτρική ενέργεια και οι

σύγχρονες μορφές βιοενέργειας) συνεισφέρουν μόνο στο 1/3 αυτού του ποσοστού. Ταυτόχρονα, η χρήση τους εντοπίζεται κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα πως είναι αναγκαία η άμεση αύξηση της συμμετοχής των σύγχρονων μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή. Από τις πηγές αυτές, η μόνη η οποία είναι κατάλληλη για συνεχή παραγωγή ενέργειας χωρίς διακοπή είναι η βιομάζα, καθώς οι εγκαταστάσεις που στηρίζονται στην ηλιακή ή την αιολική ενέργεια δεν μπορούν να έχουν συνεχή παραγωγή, λόγω της αστάθειας της ηλιοφάνειας και της ταχύτητας ροής του ανέμου αντίστοιχα.

Τα υδροηλεκτρικά φράγματα απαιτούν την ύπαρξη σχετικά μεγάλου υδάτινου και υδροηλεκτρικά φράγματα έχουν ήδη κατασκευαστεί στις κυριότερες πηγές υδάτινου δυναμικού στις ανεπτυγμένες χώρες. Υπάρχει βέβαια ακόμα χώρος για ανάπτυξη στις ηπείρους της Νότιας Αμερικής, της Ασίας και της Αφρικής [2].

Επίσης, η σημερινή τεχνολογία παραγωγής ενέργειας βασίζεται κυρίως στην καύση ορυκτών καυσίμων δηλαδή ενώσεων του άνθρακα. Επομένως μια μετάβαση στην καύση βιομάζας είναι πιο εύκολη αφού η τεχνολογία για την θερμική επεξεργασία οργανικών υλικών έχει ήδη μελετηθεί. Υπάρχει εξάλλου και η δυνατότητα χρήσης ήδη κατασκευασμένων εγκαταστάσεων για την παραγωγή βιομάζας.

3) Βιομάζα

Η *βιομάζα* (biomass) είναι κάθε οργανικό υλικό το οποίο βρίσκεται ή βρισκόταν μέχρι πρόσφατα σε ζωντανούς οργανισμούς. Οι ζωντανοί οργανισμοί (πανίδα, χλωρίδα), τα φυτικά και ζωικά υπολείμματα ακόμα και τα σκουπίδια είναι μορφές βιομάζας. Όλη η ποσότητα της βιομάζας βρίσκεται στο λεπτό στρώμα του φλοιού της Γης, τη βιόσφαιρα. Αντιπροσωπεύει ένα πολύ μικρό ποσοστό του φλοιού της Γης, αλλά για τα ανθρώπινα δεδομένα αποτελεί μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας η οποία ανανεώνεται συνεχώς.

Η ενέργεια αυτή βρίσκεται αποθηκευμένη στις οργανικές ενώσεις του άνθρακα, ο οποίος βρίσκεται σε όλους τους ζωντανούς οργανισμούς. Όταν οι οργανισμοί αυτοί πεθαίνουν ο άνθρακας οδηγείται μέσω της σήψης στο υπέδαφος ή στην ατμόσφαιρα με τη μορφή αερίων όπως διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο. Υπάρχουν δηλαδή δύο μεγάλες αποθήκες άνθρακα στο φλοιό της γης: η ατμόσφαιρα και το υπέδαφος.

Η ενέργεια της βιομάζας προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία η οποία αποθηκεύεται μέσω της φωτοσύνθεσης στα φυτά. Στη συνέχεια η εγκλωβισμένη αυτή ενέργεια ανακυκλώνεται με τη βοήθεια μιας σειράς χημικών και φυσικών διεργασιών στα φυτά, το έδαφος, τον περιβάλλον χώρο και τελικά στην υπόλοιπη έμβια ύλη μέσω της τροφικής αλυσίδας. Τελικά, η ενέργεια ακτινοβολείται από τη Γη ως θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας.

Η αποθηκευμένη αυτή ενέργεια μπορεί λόγω του άνθρακα να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμη ύλη, όσο βέβαια λειτουργεί ακόμα ως αποθήκη χημικής ενέργειας. Έτσι, προκύπτουν τα *βιοκαύσιμα*. Ο όρος αυτός αναφέρεται σε ένα πολύ ευρύ πεδίο ενεργειακών πόρων, από τα καυσόξυλα, ως τα αστικά απορρίμματα.

Στην πραγματικότητα και τα συμβατικά καύσιμα (πετρέλαιο, γαιάνθρακες) τα οποία χρησιμοποιούμε σήμερα ευρύτατα προήλθαν από τη βιομάζα που βρισκόταν στο υπέδαφος, η οποία ύστερα από έντονες γεωλογικές αναταράξεις οδηγήθηκε σε αναερόβιες συνθήκες εξαιρετικά υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Η έκθεση στις ακραίες αυτές συνθήκες συνεχίστηκε για εκατομμύρια χρόνια, ώσπου σχηματίστηκαν οι συμπυκνωμένες μορφές υψηλού ενεργειακού περιεχομένου (πετρέλαιο, γαιάνθρακες) τις οποίες χρησιμοποιούμε σήμερα.

Βιοκαύσιμο (biofuel) είναι ουσιαστικά κάθε στερεό, υγρό ή αέριο καύσιμο από οργανικά υλικά, που προέρχεται είτε άμεσα από φυτά και ζώα είτε έμμεσα από βιομηχανικά, εμπορικά, οικιακά και αγροτικά απόβλητα. Βιοκαύσιμα μπορεί να προκύψουν από διάφορες και πολύ διαφορετικές μεταξύ τους πηγές και να αξιοποιηθούν μέσω πληθώρας εφαρμογών και τεχνολογιών.

Μέσο Ενεργειακό Περιεχόμενο Βιοκαυσίμων και Συμβατικών Καυσίμων [2]		
Καύσιμο	Ενεργειακό Περιεχόμενο	
	GJ/t	GJ/m^3
Ξύλο (Ξηρό αέρος-20% υγρασία)	15	10
Χαρτί (στοιβαγμένες εφημερίδες)	17	9
Κοπριά (ξηρή)	16	4
Άχυρο (δέματα)	14	1,4
Ζαχαροκάλαμο (στελέχη ξηρά αέρος)	14	10
Αστικά απορρίμματα (όπως συλλέγονται)	9	1,5
Εμπορικά απόβλητα	16	*
Γρασίδι (φρεσκοκομμένο)	4	3
Πετρέλαιο	42	34
Κάρβουνο	28	50
Φυσικό αέριο (πίεση παροχής)	55	0,04

Παρατηρούμε από τον προηγούμενο πίνακα πως τα βιοκαύσιμα έχουν μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο από τα συμβατικά καύσιμα. Το βιοκαύσιμο με τη μεγαλύτερη θερμική αξία (ξύλο, χαρτί, κοπριά) έχει λίγη παραπάνω από τη μισή θερμική αξία του κάρβουνου, το οποίο όμως έχει τη χειρότερη θερμική αξία από τα συμβατικά καύσιμα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη χημική σύσταση της βιομάζας από την οποία προέρχονται αυτά τα καύσιμα.

Η χημική σύσταση της βιομάζας προφανώς δεν είναι σταθερή. Εξαρτάται έντονα από την πηγή προέλευσής της. Αποτελείται από οργανικές ενώσεις, οι οποίες περιέχουν κυρίως άνθρακα, υδρογόνο, άζωτο και οξυγόνο αλλά και μικρές ποσότητες άλλων χημικών στοιχείων όπως αλκάλια ή και βαρέα μέταλλα. Τα συμβατικά καύσιμα έχουν επίσης ως κύρια συστατικά τα ίδια στοιχεία (εκτός του αζώτου).

Το γεγονός αυτό δεν είναι απλή σύμπτωση. Ο συνδυασμός καυσίμου και οξυγόνου (για αερόβιες διαδικασίες) είναι μια αποθήκη ενέργειας, η οποία μπορεί να απελευθερωθεί μέσω της καύσης ή της αεριοποίησης. Η φυσική διεργασία της αποσύνθεσης είναι επίσης μια παρόμοια διαδικασία οξείδωσης, η οποία οδηγεί σε περίπου τα ίδια προϊόντα με την καύση.

Τα κύρια στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας σε κάθε καύσιμο είναι ο άνθρακας, το υδρογόνο και το οξυγόνο. Η οξείδωσή τους παράγει ενέργεια στη μορφή θερμότητας την οποία μπορεί μετά να αξιοποιήσει ο άνθρωπος. Η ποσότητα η οποία παράγεται εξαρτάται από τις περιεκτικότητες σε άνθρακα και οξυγόνο, αλλά κυρίως από την υγρασία η οποία περιέχεται.

Καύσιμο	Αναλογία Στοιχείων			Περιεκτικότητα % κατά βάρος			CO_2/GJ_{th} (kg)
	C	H	O	C	H	O	
Γαιάνθρακας	1	1	<0,1	85%	6%	9%	120
Πετρέλαιο	1	2	0	85%	15%	0%	75
Μεθάνιο	1	4	0	75%	25%	0%	50
Ξύλο	1	1,5	0,7	49%	6%	45%	77

Όπως παρατηρούμε στον παραπάνω πίνακα [4] το ξύλο, μια από τις πλέον ενεργειακά αποδοτικές πηγές βιομάζας έχει, σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα περίπου 25 με 30% μικρότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα, μικρή περιεκτικότητα σε υδρογόνο και πολύ ψηλή (30-35%) περιεκτικότητα σε οξυγόνο, το οποίο αντικαθιστά τον άνθρακα των συμβατικών καυσίμων.

Το υψηλό ποσοστό οξυγόνου υποδηλώνει μεγάλη παρουσία μορίων νερού δηλαδή υγρασίας, η οποία μειώνει τη θερμική αξία του καυσίμου. Η ενέργεια προέρχεται από την οξείδωση του άνθρακα και του υδρογόνου κατά την καύση, επομένως μικρότερο ποσοστό άνθρακα σημαίνει και μικρότερη θερμική ικανότητα. Το νερό κατά την καύση καταναλώνει ενέργεια για να γίνει υδρατμός, αλλά δε συμβάλλει στην παραγωγή της, άρα η ωφέλιμη ενέργεια μειώνεται.

Συγκρίνουμε τώρα τις μέσες φυσικές και χημικές ιδιότητες της βιομάζας με τις αντίστοιχες ιδιότητες των γαιανθράκων [4]:

Ιδιότητες	Βιομάζα	Γαιάνθρακες
Πυκνότητα (kg/m^3)	500	1300
Μέσο μέγεθος σωματιδίων	3mm	100μm
Περιεκτικότητα σε άνθρακα (% κ.β. ξηρού καυσίμου)	42-54	65-85
Περιεκτικότητα σε οξυγόνο (% κ.β. ξηρού καυσίμου)	35-45	2-15
Περιεκτικότητα σε θείο (% κ.β. ξηρού καυσίμου)	0,5	0,5-7,5
Περιεκτικότητα σε SiO_2 (% κ.β. ξηρής τέφρας)	23-49	40-60
Περιεκτικότητα σε K_2O (% κ.β. ξηρής τέφρας)	4-48	2-6
Περιεκτικότητα σε Al_2O_3 (% κ.β. ξηρής τέφρας)	2,4-9,5	15-25
Περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 (% κ.β. ξηρής τέφρας)	1,5-8,5	8-18
Θερμοκρασία ανάφλεξης (^oC)	145-153	217-322
Ευθραυστότητα	Μικρή	Μεγάλη
Θερμογόνος Ικανότητα (ξηρό καύσιμο) (MJ/kg)	14-21	23-28

Παρατηρούμε ότι οι φυσικές και χημικές ιδιότητες της βιομάζας διαφέρουν αρκετά από τους γαιάνθρακες αν και οι δύο ουσίες είναι καύσιμα τα οποία

αποτελούνται κατά κύριο λόγο από τα ίδια τρία στοιχεία. Η διαφορά αυτή στις ιδιότητες οφείλεται στη διαφορετική περιεκτικότητα του καθενός στα τρία αυτά στοιχεία, η οποία αναφέρθηκε και προηγουμένως αλλά και στις διαφορετικές προσμίξεις τις οποίες έχει η κάθε ουσία.

Η βιομάζα έχει πολύ μικρότερη πυκνότητα από τους γαιάνθρακες, αλλά τα σωματίδιά της είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερα. Ταυτόχρονα, έχει μικρή ευθραυστότητα στην οποία οφείλεται εν μέρει και το μέγεθος των σωματιδίων. Συνολικά δηλαδή το μέσο σωματίδιο της βιομάζας έχει μικρότερη θερμική αξία ανά μονάδα όγκου και μικρότερη επιφάνεια επαφής (λόγω του μεγάλου μεγέθους) κατά τη χημική αντίδραση παραγωγής ενέργειας από τα μικρότερου μεγέθους σωματίδια του γαιάνθρακα. Είναι δηλαδή λιγότερο κατάλληλο από φυσικής άποψης για διεργασίες όπως η καύση.

Χημικά, η περιεκτικότητα σε αλκάλια (ή και χλώριο) είναι αρκετά υψηλή με αποτέλεσμα την εμφάνιση προβλημάτων διάβρωσης στις σωληνώσεις και τα άλλα τμήματα των εγκαταστάσεων ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας. Επίσης η βιομάζα, όπως αναφέρθηκε έχει υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και η θερμική της αξία μειώνεται ενώ το νερό καταναλώνει ενέργεια για τη μετατροπή του σε υδρατμό.

Η τέφρα η οποία παράγεται από τη θερμική κατεργασία της βιομάζας έχει μικρότερη θερμοκρασία τήξης από την τέφρα των γαιανθράκων, γεγονός το οποίο δημιουργεί πρόβλημα σε διεργασίες κατά τις οποίες απαιτείται υψηλή θερμοκρασία, καθώς οι επικαθίσεις της τέφρας είναι έντονα διαβρωτικές. Η βιομάζα τουλάχιστον έχει χαμηλότερο ποσοστό θείου από τους γαιάνθρακες.

Το ενεργειακό αυτό περιεχόμενο της βιομάζας προέρχεται από τον ήλιο. Για την αποθήκευση αυτής της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιείται μια διαφορετική διαδικασία, η φωτοσύνθεση. Στη φωτοσύνθεση, τα φυτά απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα και νερό από την ατμόσφαιρα και αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια, τα μετατρέπουν σε κατάλληλα θρεπτικά στοιχεία.

Το βασικό στοιχείο της διεργασίας είναι η μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα και του νερού σε υδατάνθρακες και οξυγόνο αντίστοιχα υπό την επίδραση του φωτός. Οι διασπάσεις του διοξειδίου και του νερού είναι διαδοχικές και πρώτα γίνεται η διάσπαση του νερού, η οποία απαιτεί και την παρουσία φωτός. Κατά την απορρόφηση του νερού από τη χλωροφύλλη, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της ακόλουθης αντίδρασης:

$$2H_2O + ενέργεια \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$$

Το οξυγόνο που δημιουργείται είναι σε αέρια μορφή και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, ενώ το υδρογόνο παραμένει σε διάσταση. Η ενέργεια μεταφέρεται από τα κατιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια, τα οποία μέσω μιας αλυσίδας αντιδράσεων μετατρέπονται σε $NADP^+$ (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate) η οποία μετά την πρόσληψη των κατιόντων μετατρέπεται σε $NADPH_2$. Στο σημείο αυτό η ενέργεια καταναλώνεται από το φυτό για το σχηματισμό

τριφωσφορικής αδενοσίνης (adenosine triphosphate ή ATP), το οποίο αποτελεί το κύριο μόριο μεταφοράς ενέργειας στους ζωντανούς οργανισμούς.

Τα δύο αυτά μόρια χρησιμοποιούνται από το φυτικό κύτταρο για τη μεταφορά του υδρογόνου και της ενέργειας που είναι απαραίτητες για την παραγωγή υδατανθράκων με τη χρήση διοξειδίου του άνθρακα:

$$4H^+ + 2CO_2 \rightarrow 2[CH_2O]$$

Η διεργασία αυτή δεν απαιτεί άμεση πρόσδοση ενέργειας. Τα NADP και ATP ανακυκλώνονται για τη συνέχιση της διεργασίας.

Όταν ο οργανισμός πεθαίνει μέρος της ενέργειας την οποία περιείχε βρίσκεται αποθηκευμένη στις οργανικές του ενώσεις. Αν ο φυσικός κύκλος εξακολουθήσει τότε η ενέργεια αυτή θα περάσει κατά το μεγαλύτερο μέρος σε κάποιο άλλο οργανισμό ή θα διαχυθεί στις αποθήκες άνθρακα του πλανήτη (την ατμόσφαιρα και το υπέδαφος).

Η ενέργεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί (και χρησιμοποιείται) από τον άνθρωπο για διάφορους σκοπούς. Για την ακρίβεια, η βιομάζα, με τη μορφή ξύλου είναι πιθανόν η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος. Το ξύλο παρέμεινε εξάλλου η κύρια μορφή ενέργειας για χιλιάδες χρόνια μέχρι την αντικατάστασή του από το κάρβουνο. Η κύρια χρήση του ήταν σε εστίες για τη θέρμανση του σπιτιού.

Ακόμα και σήμερα όμως το ξύλο αποτελεί μια σημαντική μορφή ενέργειας για πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, ενώ η βιομάζα αποτελεί το 14% της παγκόσμιας ενέργειας [5]. Εκτός από το ξύλο, έχουν αρχίσει τα τελευταία χρόνια να χρησιμοποιούνται και άλλες μορφές βιομάζας ως καύσιμο. Παραδείγματος χάρη, σε κτηνοτροφικές μονάδες ή σε αγροτικές εκτάσεις, τα ζωικά και φυτικά υπολείμματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της εγκατάστασης.

Στη σύγχρονη εποχή, θεωρείται πως υπάρχουν οι παρακάτω πηγές βιοκαυσίμων:

- **Υπολείμματα ξυλείας:** Διαδικασίες όπως η υλοτόμηση ή το κλάδεμα των δέντρων, αλλά και η επεξεργασία του ξύλου οδηγούν σε μεγάλες ποσότητες υπολειμμάτων. Τα υπολείμματα αυτά μπορούν να ξηρανθούν (για ευκολότερη μεταφορά) και να καούν σε καυστήρες ξύλου.
- **Γεωργικά υπολείμματα:** Σημαντικές ποσότητες υπολειμμάτων σχηματίζονται κάθε χρόνο από τις μονοετείς καλλιέργειες (ρυζιού, σιταριού, καλαμποκιού αλλά και ξηρών καρπών). Αν και τμήμα τους χρησιμοποιείται για την κάλυψη άλλων αναγκών (ζωοτροφές, χαρτοπολτός) απομένει σημαντικό τμήμα το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά.
- **Ζωικά υπολείμματα:** Τα ζωικά απόβλητα, εάν υποβληθούν σε αναερόβια χώνευση (η οποία σύντομα θα πρέπει να γίνει

υποχρεωτική λόγω της εντατικοποίησης της κτηνοτροφίας) μπορούν να παράγουν βιοαέριο. Το βιοαέριο αυτό μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί αντί φυσικού αερίου σε θερμικές εγκαταστάσεις. Διαφορετικά παράγουν μεγάλες ποσότητες μεθανίου στην ατμόσφαιρα, ενός αερίου 10 φορές πιο καταστρεπτικό από το διοξείδιο για το όζον της ατμόσφαιρας.

- **Ενεργειακές καλλιέργειες:** Είναι φυτά που καλλιεργούνται με αποκλειστικό σκοπό την εκμετάλλευση του ενεργειακού περιεχομένου τους. Δεν προκαλούν επιπλέον εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και μπορούν να υποκαταστήσουν τα συμβατικά καύσιμα. Φυτά με σημαντικό ποσό ενέργειας περιλαμβάνουν το σόργο, την ελαιοκράμβη, την αγριαγκινάρα και δύο είδη ευκαλύπτων.
- **Αστικά βιο-απορρίμματα:** Τα οργανικά απορρίμματα τα οποία παράγονται από τα νοικοκυριά. Τα απορρίμματα αυτά περιλαμβάνουν προϊόντα κατασκευασμένα από φυτικά και ζωικά υλικά, τα οποία περιλαμβάνουν υπολείμματα φαγητού, χαρτί και βιοδιασπώμενα πλαστικά. Το μεγαλύτερο ποσοστό των απορριμμάτων σήμερα οδηγείται σε χωματερές. Η ανακύκλωση των ανόργανων υλικών των απορριμμάτων κερδίζει συνεχώς έδαφος αλλά από τα υλικά που απομένουν και τα οποία πετιούνται, μεγάλο ποσοστό είναι οργανικές ύλες οι οποίες μπορούν με κατάλληλη επεξεργασία να χρησιμοποιηθούν ως βιοκαύσιμα.

Προτού χρησιμοποιηθεί η βιομάζα συνήθως ξηραίνεται. Η ξήρανση της βιομάζας έχει σημαντικά οφέλη λόγω του υψηλού ποσοστού υγρασίας το οποίο έχει. Ο όγκος της μειώνεται σημαντικά και απαιτούνται μικρότερες εγκαταστάσεις για την αποθήκευσή της. Ταυτόχρονα, με τη μείωση του όγκου γίνεται πιο εύκολα και με λιγότερα μέσα και η μεταφορά της στο σημείο επεξεργασίας, κάνοντας την όλη διεργασία αρκετά φθηνότερη.

Η ξήρανση έχει ως αποτέλεσμα και την αύξηση της θερμικής αξίας του καυσίμου ανά μονάδα βάρους λόγω της μείωσης του ποσοστού υγρασίας και της πυκνότητας. Ταυτόχρονα, λιγότερη υγρασία σημαίνει μικρότερη παρουσία υδρατμών κατά τη διεργασία, βελτιώνοντας την ποιότητά της. Παράλληλα περιορίζονται οι απώλειες από την αποσύνθεση λόγω της επαφής με τον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης.

Η ξήρανση μπορεί να γίνει με την επίδραση ατμοσφαιρικών συνθηκών ή με τη χρήση τεχνικού εξοπλισμού. Η ξήρανση με αυτό τον εξοπλισμό είναι αρκετά ακριβή και απαιτεί την επιπλέον κατανάλωση ενέργειας. Είναι όμως πολύ γρηγορότερη (απαιτείται σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα για μείωση της υγρασίας με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, ενώ η βιομάζα αποσυντίθεται συνεχώς) και η αποτελεσματικότητά της δεν εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες οι οποίες

επικρατούν στην περιοχή. Για το λόγο αυτό σήμερα χρησιμοποιούμε συνήθως ειδικό εξοπλισμό.

Η βιομάζα θεωρείται ως μια ανανεώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας. Αν και πιθανή καύση της απελευθερώνει στο περιβάλλον διοξείδιο του άνθρακα και άλλα αέρια του θερμοκηπίου αντίθετα με τις άλλες «πράσινες» πηγές ενέργειας, τα αέρια αυτά θα απελευθερώνονταν στην ατμόσφαιρα ούτως ή άλλως κατά την αποσύνθεσή της. Έτσι το συνολικό ισοζύγιο άνθρακα παραμένει σταθερό.

Φυσικά, η υπερκατανάλωση βιομάζας θα έχει δυσάρεστα αποτελέσματα στο περιβάλλον. Η υλοτομία για τις ανάγκες θέρμανσης του πληθυσμού στο παρελθόν (το ξύλο είναι μια μορφή βιομάζας) εξαφάνισε πολλά δάση και οδήγησε στην καταστροφή πολλών βιοτόπων. Η Γη έχει ένα συγκεκριμένο όριο εκπομπών άνθρακα το οποίο μπορεί να απορροφήσει κάθε χρόνο και είναι πιθανό αυτό το όριο να ξεπεραστεί ακόμα και χωρίς τη χρήση συμβατικών καυσίμων.

Η βιομάζα όμως δεν είναι απαραίτητο να προέλθει αποκλειστικά από την πανίδα. Τα αστικά απόβλητα, τα οποία είναι ένα άλλο περιβαλλοντικό πρόβλημα, ειδικά σε αστικά κέντρα είναι μια πιθανή πηγή βιομάζας η κατανάλωση της οποίας δεν θα προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στο φυσικό περιβάλλον.

4) Αστικά Απορρίμματα

Ως *αστικά απορρίμματα* (municipal waste) χαρακτηρίζονται τα απορρίμματα τα οποία παράγονται από νοικοκυριά ή από μικρές επιχειρήσεις και δεν περιλαμβάνουν τα δυνητικώς επικίνδυνα ιατρικά ή βιομηχανικά απορρίμματα. Είναι συνήθως σε στερεή ή ημιστερεή μορφή (municipal solid waste) και μπορεί να περιλαμβάνουν:

- **Βιοδιασπώμενα υλικά:** Είναι συνήθως υπολείμματα φαγητού και άλλα οργανικά υλικά. Μπορούν να διασπαστούν βιολογικά από βακτήρια μέσα σε λίγα χρόνια. Περιέχουν υψηλές ποσότητες άνθρακα και είναι κατάλληλα για την παραγωγή ενέργειας.
- **Ανακυκλώσιμα υλικά:** Περιλαμβάνουν υλικά όπως χαρτί, αλουμίνιο και γυαλί, τα οποία αν συλλεχθούν και επεξεργασθούν μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν. Η συλλογή και επεξεργασία γίνεται σε ειδικές εγκαταστάσεις. Κατά τη θερμική επεξεργασία των αποβλήτων δεν μπορούν να παράγουν ενέργεια.
- **Συνθετικά απορρίμματα**: Περιλαμβάνουν τεχνητές ουσίες, κυρίως παράγωγα του πετρελαίου, όπως πλαστικά ή ελαστικά. Πολύ δύσκολα μπορούν να διασπαστούν βιολογικά (μερικά χρειάζονται αιώνες) και συχνά χρειάζονται αιώνες για την αφομοίωσή τους στο φυσικό περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια όμως έχει γίνει μια στροφή στην κατασκευή συνθετικών υλικών τα οποία είναι βιοδιασπώμενα.
- **Ουδέτερα υλικά**: Υλικά όπως πέτρες και χώμα τα οποία είναι χημικά αδρανή και δεν μπορούν να αποσυντεθούν ή να ανακυκλωθούν. Συνήθως δεν έχουν υποστεί κάποια χημική επεξεργασία.
- **Τοξικά οικιακά απορρίμματα**: Περιλαμβάνουν επικίνδυνα χημικά τα οποία χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας ζωή όπως εντομοκτόνα, χλωρίνες και άλλα υλικά καθαρισμού. Τα υλικά αυτά είναι επικίνδυνα και αν καούν απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα επικίνδυνες τοξίνες. Έτσι πρέπει να είμαστε πολύ προσεκτικοί κατά το χειρισμό τους και σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να τα υποβάλλουμε σε θερμικές ή χημικές διεργασίες. Η συνήθης τακτική με αυτά τα απορρίμματα είναι η ταφή τους.

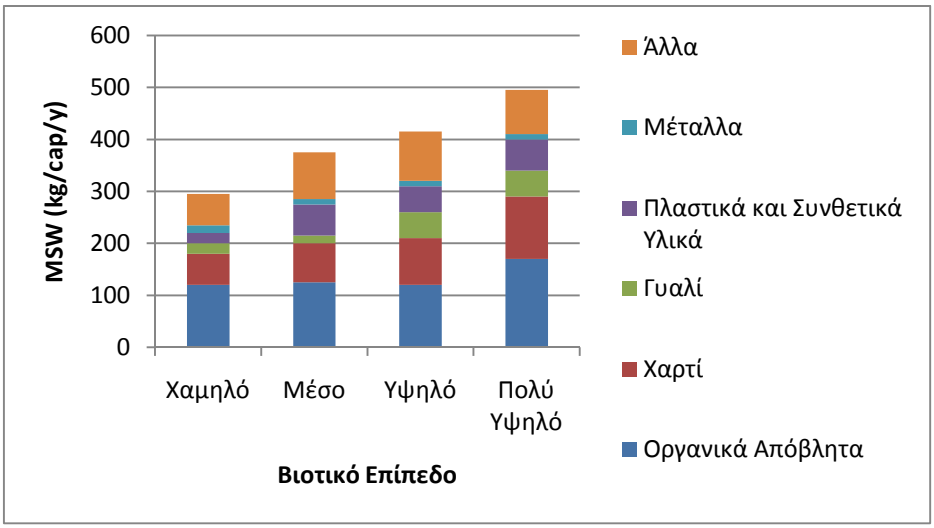
Από τα υλικά αυτά για την παραγωγή ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα βιοδιασπώμενα υλικά και τα πλαστικά, τα οποία περιέχουν άνθρακα. Από τη σύνθεση των απορριμμάτων την οποία παρατηρούμε στον παρακάτω πίνακα, βλέπουμε πως το χαρτί και τα παρεμφερή του υλικά αποτελούν ένα μεγάλο τμήμα των αποβλήτων, μαζί με τα πλαστικά υλικά. Συμπεραίνουμε

λοιπόν πως όντως, τα αστικά απορρίμματα περιέχουν ένα σημαντικό ποσοστό το οποίο θα μπορούσαμε να εκμεταλλευθούμε.

Τυπική σύνθεση αστικών απορριμάτων [2]		
Υλικά	% κατ' όγκο	% κατά βάρος
Χαρτί και χαρτοπολτός	37,5	37
Γυαλί	6,7	2,3
Μεταλλικά αντικείμενα	6,3	8,8
Αλουμίνιο	1,4	3,1
Πλαστικά	8,3	18,3
Λάστιχο και δέρμα	2,4	5,8
Υφάσματα	2,8	5,4
Ξύλο	6,3	5,9
Υπολείμματα τροφών	6,7	2,7
Υπολείμματα κήπων και αυλών	17,9	9,2
Άλλα	3,7	1,5

Τα αστικά απόβλητα είναι ένα μεγάλο σύγχρονο πρόβλημα, καθώς ο ημερήσιος ρυθμός παραγωγής τους είναι εξαιρετικά υψηλός και συνεχίζει να αυξάνεται. Πολλές χώρες (όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής [6]) αντιμετωπίζουν σοβαρό πρόβλημα με τη διάθεση και αποθήκευση των απορριμμάτων, καθώς οι διαθέσιμοι χώροι μειώνονται.

Η ποσότητα των στερεών αποβλήτων η οποία παράγεται εξαρτάται έντονα από το βιοτικό επίπεδο της κάθε χώρας με τις πλούσιες ανεπτυγμένες βιομηχανικές χώρες να έχουν μεγαλύτερη παραγωγή απορριμμάτων από χώρες με μεγαλύτερο πληθυσμό. Η παραγωγή βέβαια εξαρτάται και από την ανάπτυξη των προγραμμάτων ανακύκλωσης και τη συμπεριφορά των πολιτών στο θέμα των αποβλήτων.



Εικόνα 2-Παραγωγή Αστικών Αποβλήτων σε διαφορετικά βιοτικά επίπεδα [7]

Στην Ελλάδα η οποία δυστυχώς χρησιμοποιεί ακόμη χωματερές για την αποθήκευση αυτών των απορριμμάτων αυτό είναι ένα μεγάλο πρόβλημα, ιδιαίτερα στην περιοχή του Λεκανοπεδίου, καθώς οι διαθέσιμοι χώροι (χωματερή Λιοσίων)είναι εντελώς ακατάλληλοι και θα έπρεπε η απόθεση των απορριμμάτων εκεί να έχει σταματήσει χρόνια πριν.

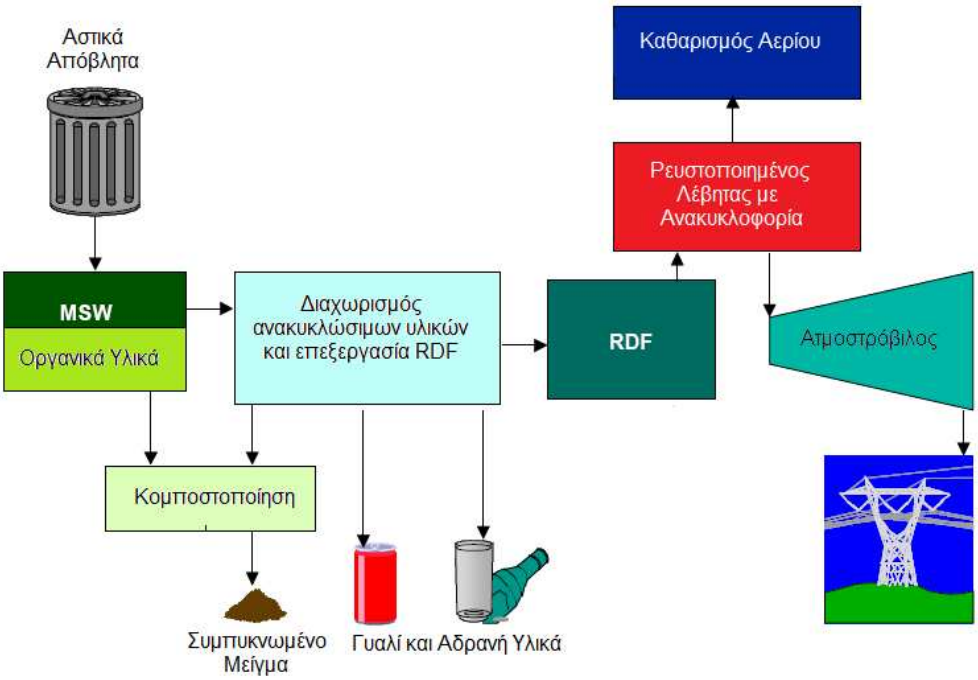
Λόγω ακριβώς αυτού του προβλήματος έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένες τεχνολογίες για την επεξεργασία των αστικών αποβλήτων με σκοπό τη μείωση του όγκου τους. Οι τεχνολογίες αυτές μόλις τα προηγούμενα χρόνια έχουν αρχίσει να εφαρμόζονται και στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα, οι διεργασίες που εφαρμόζονται είναι:

a. **Αποτέφρωση**: Η αποτέφρωση είναι η καύση των αποβλήτων σε περίσσεια οξυγόνου. Χρησιμοποιείται κυρίως για νοσοκομειακά απορρίμματα και απόβλητα υψηλού κινδύνου. Η αποτέφρωση μπορεί να μειώσει τον όγκο των αποβλήτων κατά 90% και το βάρος τους κατά 75% [8]. Η επεξεργασία γίνεται σε ειδικούς αποτεφρωτήρες. Μετά την επεξεργασία τα απόβλητα έχουν μετατραπεί κυρίως σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και τέφρα. Πολλές φορές τα καυσαέρια εισάγονται σε πλυντηρίδες ή συστήματα φίλτρων για να αφαιρεθούν τα επικίνδυνα σωματίδια.

   Οι αποτεφρωτήρες μπορούν να κατασκευαστούν και σε ρευστοποιημένες κλίνες. Μια τέτοια εγκατάσταση λειτουργεί στο Dundee της Σκωτίας και παράγει ηλεκτρική ισχύ 8,3MW. Η εγκατάσταση κατασκευάστηκε το 2001 και χρησιμοποιεί άμμο ως το κύριο υλικό της κλίνης.

   Είναι δυνατή η ταυτόχρονη καύση αποβλήτων και συμβατικού καυσίμου (κυρίως γαιανθράκων) σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες προηγουμένως έκαιγαν αποκλειστικά συμβατικά καύσιμα. Το κύριο πρόβλημα με αυτή τη διαμόρφωση είναι το αυξημένο κόστος συντήρησης του λέβητα, λόγω της διάβρωσης την οποία προκαλούν τα απόβλητα.

b. **Αεριοποίηση – Πυρόλυση:** Είναι θερμικές κατεργασίες με οξυγόνο λιγότερο του στοιχειομετρικού. Από τη θερμική κατεργασία των καυσίμων παράγονται αέρια τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, ειδικά τα προϊόντα της αεριοποίησης. Οι τεχνολογίες αυτές είναι σχετικά καινούριες με μια από τις πρώτες εγκαταστάσεις να έχει κατασκευαστεί το 1986 στο Bergau της Γερμανίας [9]. Τυπικό δείγμα εγκατάστασης αεριοποίησης αποβλήτων είναι η Lomellina I στην Pavia της Ιταλίας με καθαρή ηλεκτρική ισχύ 16MW, η λειτουργία της οποίας ξεκίνησε το 2000 [10]. Το σχεδιάγραμμα της εγκατάστασης είναι:



Εικόνα 3-Σχεδιάγραμμα της Εγκατάστασης Lomellina I [10]

Στην εγκατάσταση αυτή βλέπουμε πως τα αστικά απορρίμματα τα οποία χρησιμοποιούνται στην εγκατάσταση χωρίζονται πρώτα σε ανόργανα και οργανικά υλικά. Τα οργανικά υλικά υποβάλλονται σε μια διαδικασία κομποστοποίησης για την αύξηση της ομοιογένειάς τους και για την μείωση του όγκου τους. Από τα ανόργανα υλικά διαχωρίζονται τα ανακυκλώσιμα υλικά (γυαλί, μέταλλα) και οδηγούνται σε εργοστάσιο ανακύκλωσης.

Στη συνέχεια τα υπόλοιπα υλικά μετατρέπονται σε RDF (refuse – derived fuel) και οδηγούνται στη ρευστοποιημένη κλίνη. Το αέριο το οποίο παράγεται καθαρίζεται σε ειδική εγκατάσταση από τα στερεά σωματίδια και οδηγείται στον αεριοστρόβιλο από τον οποίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

c. **Αναερόβια Χώνευση:** Είναι η διαδικασία στην οποία μικροοργανισμοί διαλύουν τα βιοδιασπώμενα υλικά απουσία οξυγόνου. Συνήθως χρησιμοποιείται σε υγρά λύματα. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτεί θέρμανση των αποβλήτων. Είναι όμως κατάλληλη μόνο για τα οργανικά τμήματα των αποβλήτων (εκτός των πλαστικών), μειώνοντας τη χρησιμότητά της.

d. **Ανακύκλωση**: Υλικά όπως το χαρτί, το γυαλί και διάφορα μέταλλα μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Η επεξεργασία αυτή περιλαμβάνει συνήθως λιώσιμο των υλικών και μετατροπή τους εκ νέου σε πρώτη ύλη σε ειδικά εργοστάσια ανακύκλωσης. Τα υλικά αυτά πρέπει να απομονωθούν από τα υπόλοιπα, εργασία η οποία γίνεται συνήθως χειροκίνητα. Το ποσοστό των υλικών το οποίο

ανακυκλώνεται εξαρτάται από τη χώρα και τις εγκαταστάσεις που αυτή έχει, αλλά και από την κατάλληλη εκπαίδευση των πολιτών. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η Γερμανία είναι η χώρα με τα υψηλότερα ποσοστά ανακύκλωσης, ενώ η Ελλάδα βρίσκεται στους ουραγούς.

e. **Απόθεση σε χωματερές**: Υλικά τα οποία δεν μπορούν να ανακυκλωθούν ή να αποτεφρωθούν ή δεν υπάρχουν οι κατάλληλες εγκαταστάσεις για την επεξεργασία τους αποτίθενται σε επιλεγμένους χώρους που έχουν καθοριστεί από το κράτος. Στους ίδιους χώρους αποτίθενται και τα υπολείμματα της αποτέφρωσης. Στη συνέχεια τα σκουπίδια αυτά μπορούν να θαφτούν. Θεωρητικά κάθε χωματερή έχει συγκεκριμένο όγκο αποβλήτων τον οποίο μπορεί να δεχτεί και μετά το πέρας της λειτουργίας της ο χώρος πρέπει να αναμορφωθεί.

Για τη θερμική κατεργασία αποβλήτων χρησιμοποιείται σήμερα κυρίως η αποτέφρωση με καύση των αποβλήτων. Όμως, τα απόβλητα περιέχουν στοιχεία όπως θείο ή άζωτο τα οποία σε περίπτωση καύσης των αποβλήτων θα παρήγαν βλαβερά αέρια στην ατμόσφαιρα. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η δαπανηρή επένδυση σε συστήματα καθαρισμού των καυσαερίων, τα οποία μειώνουν την βιωσιμότητα της επένδυσης.

Ταυτόχρονα, τα απόβλητα έχουν υψηλό ποσοστό τέφρας και αδρανών στοιχείων και η καύση τους δεν χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό απόδοσης. Η τέφρα επίσης είναι διαβρωτική, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων της εγκατάστασης. Η εγγενής ετερογένεια του μίγματος των αποβλήτων αποτελεί επίσης ένα επιπλέον πρόβλημα κατά την καύση των σκουπιδιών.

Ταυτόχρονα, η καύση των αποβλήτων είναι μια ακριβή διαδικασία και καθώς πρέπει τα σκουπίδια να ελέγχονται ώστε να μην εκλυθούν στην ατμόσφαιρα τοξικά αέρια, δεν μπορεί να αντιμετωπίσει το διαρκώς αυξανόμενο ρυθμό παραγωγής σκουπιδιών, καθώς περιορίζεται από τις παροχές και τις χαμηλές ταχύτητες τις οποίες απαιτούν πολλές συσκευές καθαρισμού. Από την άλλη πλευρά βέβαια, είναι μια δοκιμασμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευρύτατα σήμερα και είναι εφαρμόσιμη σε κάθε περίπτωση.

Η αεριοποίηση αστικών αποβλήτων αντίθετα είναι μια σχετικά καινούρια τεχνολογία, η οποία ακόμα δεν έχει μελετηθεί και εφαρμοστεί ευρέως, ενώ δεν έχουν κατασκευαστεί αρκετές μεγάλες βιομηχανικές και εμπορικές εγκαταστάσεις. Το μικρό κόστος όμως κατασκευής και η επακόλουθη βιωσιμότητά της για μικρού και μεσαίου μεγέθους εγκαταστάσεις (5-10MW) ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές [4] την καθιστούν ελκυστική για το μέλλον. Αναμένεται εξάλλου πως με την ωρίμανση της τεχνολογίας οι αντιδραστήρες αεριοποίησης θα έχουν ως και 50% μεγαλύτερη απόδοση από τους αντίστοιχους αντιδραστήρες [12].

Η αεριοποίηση εξάλλου έχει μικρότερο πρόβλημα με την ετερογένεια των αποβλήτων. Ο βαθμός απόδοσης της καύσης εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό της τέφρας και της υγρασίας στο καύσιμο. Καθώς στα απόβλητα μόνο το ποσοστό της

τέφρας μπορεί να φτάσει ορισμένες φορές και το 40%, αντιλαμβανόμαστε ότι η καύση τους δεν είναι και η πλέον αποδοτική διαδικασία. Η αεριοποίηση προβάλλει έτσι ως μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική τεχνολογία.

Πράγματι, το κύριο πρόβλημα με τα αστικά απόβλητα είναι η μεγάλη ετερογένειά τους. Καθώς αποτελούνται από πολλά διαφορετικά υλικά, από οργανικά υπολείμματα φαγητού ως βαρέα μέταλλα, τα οποία έχουν προφανώς και πολύ διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Ταυτόχρονα κάθε τμήμα των αποβλήτων περιέχει τα στοιχεία αυτά σε διαφορετικές ποσότητες και βέβαια έχει διαφορετικό ποσοστό τέφρας, υγρασίας και μετάλλων.

Επίσης, η σύνθεση των σκουπιδιών διαφέρει ανάλογα με την περιοχή στην οποία συλλέγονται, λόγω των διαφορετικών αναγκών και συνηθειών των κατοίκων της περιοχής. Διαφέρει μάλιστα και ανάλογα με την εποχή στην οποία συλλέγονται τα σκουπίδια. Η παρουσία ή μη εργοστασίων ανακύκλωσης ή άλλων επίσης μεταβάλλει τη σύνθεση των σκουπιδιών.

Για τη μείωση αυτού του προβλήματος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μηχανικές ή βιολογικές διαδικασίες ώστε να απομακρυνθεί όσο το δυνατόν η υγρασία και τα αδρανή στοιχεία. Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν συνήθως διάφορα στάδια ξήρανσης και τεμαχισμού των αποβλήτων ώστε να καταλήξουν σε μια μαλακή μορφή χαμηλής πυκνότητας, τα σωματίδια της οποίας παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια.

Μια φυσική διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται για τη μείωση του όγκου και του βάρους των οργανικών αποβλήτων και αποτελεί σημαντικό τμήμα πολλών τέτοιων διαδικασιών είναι η κομποστοποίηση. Η κομποστοποίηση είναι μια αερόβια (εξαρτώμενη από το οξυγόνο) διαδικασία αποσύνθεσης, στην οποία οργανικά υλικά (όπως φύλλα φυτών, υπολείμματα φαγητού) αποσυντίθενται σε ελεγχόμενες συνθήκες. Δεν είναι μια νέα διαδικασία αλλά χρησιμοποιείται εδώ και πολύ καιρό από τους κηπουρούς για την κατασκευή λιπασμάτων.

Η διεργασία αυτή θα μείωνε σημαντικά τον όγκο των αποβλήτων καθώς έχει υπολογιστεί πως το 20% των σκουπιδιών τα οποία φτάνουν στις χωματερές (τουλάχιστον στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής [13]) είναι απορρίμματα αυλών και κήπων όπως φύλλα φυτών. Τα απόβλητα αυτά έχουν καθαρά οργανική προέλευση και ο όγκος τους μπορεί να μειωθεί σχετικά εύκολα με την κομποστοποίηση.

Καθώς η κομποστοποίηση είναι μια φυσική διεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με ελάχιστη ή καθόλου παρέμβαση από τον άνθρωπο. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κομποστοποίηση είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, το ποσοστό του οξυγόνου, το μέγεθος των σωματιδίων των αποβλήτων και ο λόγος άνθρακα προς άζωτο.

- **Θερμοκρασία:** Κατά τη διαδικασία όμως της αποσύνθεσης τα βακτήρια παράγουν θερμότητα, η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία των αποβλήτων. Σε ένα καλά προετοιμασμένο μείγμα η θερμοκρασία αυξάνεται ακόμα

περισσότερο καταστρέφοντας τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Η θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί ακόμα και στους 60°C. Αν η θερμοκρασία δεν αυξηθεί προκύπτουν αναερόβιες διαδικασίες.

- **Υγρασία:** Είναι απαραίτητο να υπάρχει στο μείγμα αρκετή υγρασία (συνήθως σε ποσοστό 50-55%) καθώς ένα ξηρό μείγμα δεν θα αποσυντεθεί αποτελεσματικά. Μπορεί να απαιτείται περιοδικά προσθήκη υγρασίας στο μείγμα ώστε να είναι σε κατάλληλες συνθήκες.
- **Οξυγόνο:** Τα μικρόβια χρειάζονται οξυγόνο για να αποσυνθέσουν αποτελεσματικά τα οργανικά υλικά. Αποσύνθεση μπορεί βέβαια να πραγματοποιηθεί και σε αναερόβιες συνθήκες, είναι όμως μια αργή διαδικασία και παράγονται επίσης δυσάρεστες οσμές. Ανάμιξη του μίγματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα βελτιώνει την κατανομή του οξυγόνου και επιταχύνει τη διαδικασία.
- **Μέγεθος σωματιδίων:** Σε όσο πιο μικρά σωματίδια έχει χωριστεί το μείγμα των αποβλήτων τόσο πιο γρήγορη είναι η αποσύνθεσή του. Πράγματι, τα μικρότερα σωματίδια έχουν πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής για τα βακτήρια αλλά και για το οξυγόνο που αυτά χρειάζονται. Μειώνεται επιπλέον ο όγκος του μείγματος.
- **Λόγος Άνθρακα προς Άζωτο:** Επειδή τα βακτήρια χρειάζονται άζωτο για να ζήσουν, έλλειψη αζώτου καθυστερεί σημαντικά τη διαδικασία. Υλικά τα οποία έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα αλλά χαμηλή σε άζωτο αποσυντίθενται πολύ αργά και χρειάζεται μερικές φορές η προσθήκη αζώτου για την επιτάχυνση της διαδικασίας.

Μια τέτοια διαδικασία οδηγεί και στην παραγωγή του Stabilat®, το οποίο είναι το καύσιμο που χρησιμοποιείται στην πραγματική εγκατάσταση.

4.1) Stabilat

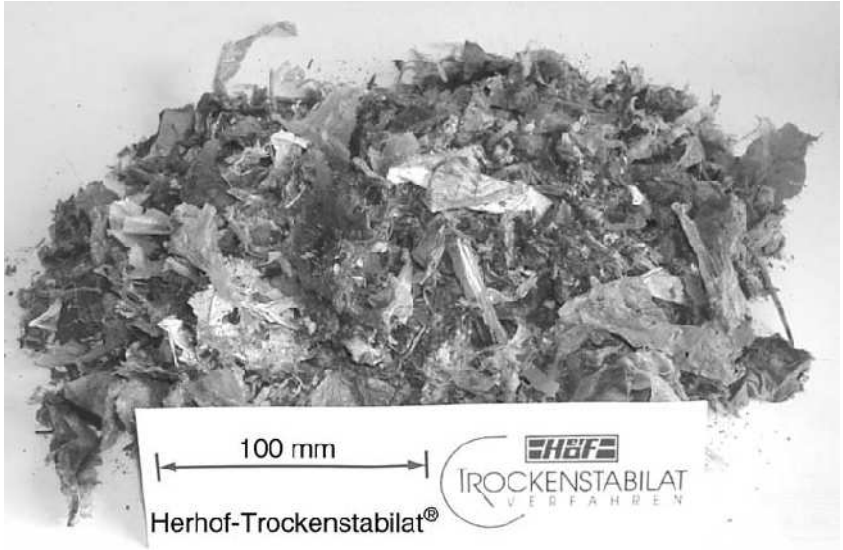
Το *Stabilat®* είναι ένα μηχανικά και βιολογικά επεξεργασμένο καύσιμο από απόβλητα, το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρεία Herhof-Umwelttechnik GmbH. Είναι καύσιμο χαμηλής πυκνότητας, το οποίο είναι κατάλληλο για χρήση σε αεριοποιητές.

Για την παρασκευή του καυσίμου [14], τα απόβλητα αρχικά τεμαχίζονται και απομακρύνονται τα σιδηρούχα υλικά με τη βοήθεια ενός μαγνήτη. Το υπόλοιπο τεμαχισμένο υλικό τοποθετείται ύστερα σε δοχείο κομποστοποίησης για επτά ημέρες. Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, μια εξαναγκασμένη ροή αέρα στο δοχείο εξασφαλίζει ότι οι συνθήκες θα είναι βέλτιστες για τη βιολογική αποσύνθεση της οργανικής ύλης.

Ο θερμός και υγρός αέρας ο οποίος εξέρχεται οδηγείται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας επιτρέποντας τη συλλογή του συμπυκνώματος. Αυτό στη συνέχεια

καθαρίζεται και επαναχρησιμοποιείται. Ο αέρας ο οποίος περνά από τα δοχεία επανακυκλοφορεί, κάτι που μειώνει δραστικά τον όγκο των καυσαερίων της εγκατάστασης. Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται θερμότητα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ξήρανση.

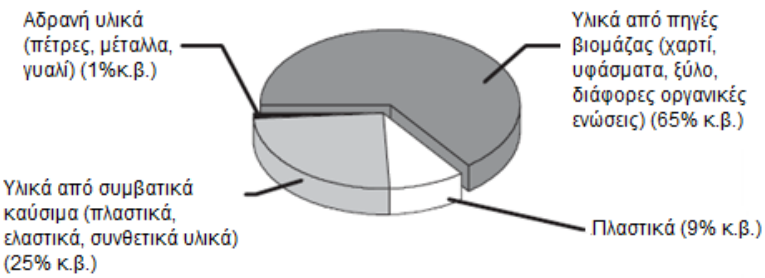
Αφού η κομποστοποίηση ολοκληρωθεί, το υλικό περνά από διάφορα στάδια ξήρανσης, ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία η οποία ήταν απαραίτητη στην κομποστοποίηση και να μειωθεί ο όγκος του. Το γεγονός ότι είναι ξηρό εξάλλου επιτρέπει την εύκολη αποθήκευσή του και το κάνει κατάλληλο και φθηνό καύσιμο για βιομηχανικές εφαρμογές.



Εικόνα 4-Επεξεργασμένο Καύσιμο Βιομάζας Stabilat [14]

Στη συνέχεια αφαιρούνται από το καύσιμο τα διάφορα αδρανή υλικά, όπως κεραμικά ή πέτρες, τα μη σιδηρούχα και τα βαρέα μέταλλα, το γυαλί και πιθανόν τα πλαστικά. Το τελικό προϊόν έχει πυκνότητα περίπου 150 με 250kg/m^3, αλλά μπορεί να συμπιεστεί σε σβώλους αποκτώντας πυκνότητα περίπου 700kg/m^3.

Το Stabilat είναι τελικά ένα μείγμα το οποίο αποτελείται κατά το μεγαλύτερο μέρος του από οργανικά υπολείμματα και παράγωγα του πετρελαίου. Τα αδρανή υλικά έχουν απομακρυνθεί και αμελητέο ποσοστό αυτών παραμένει στο καύσιμο. Αυτό το απαλλάσσει από επικίνδυνες επικαθίσεις μετάλλων ιδίως αλκαλίων.



Εικόνα 5-Κύρια Συστατικά του Stabilat όπως προέκυψαν από στατιστική ανάλυση [14]

5) Αεριοποίηση

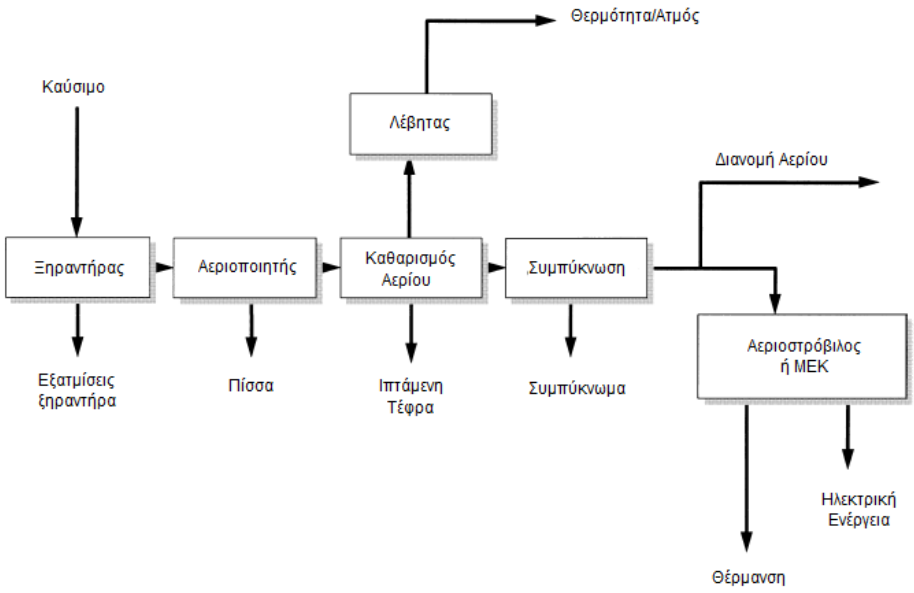
Για την εκμετάλλευση των καυσίμων μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξής θερμικές διεργασίες [15]:

a. **Αεριοποίηση** (gasification): Θερμοχημική μετατροπή ενός υλικού το οποίο περιέχει άνθρακα χρησιμοποιώντας ένα αέριο ή υγρό υλικό όπως νερό, αέρα, οξυγόνο και μίγματα αυτών παράγοντας ένα αέριο προϊόν. Ο λόγος στοιχειομετρίας είναι μικρότερος της μονάδας και συνήθως γύρω στο 0,2 με 0,5. Είναι η διεργασία με βάση την οποία θα λειτουργεί η πραγματική εγκατάσταση.
b. **Πυρόλυση** (pyrolysis): Θερμοχημική αναερόβια μετατροπή ενός υλικού το οποίο περιέχει άνθρακα χωρίς τη χρήση κάποιου αντιδρώντος αερίου παράγοντα. Ο λόγος στοιχειομετρίας είναι προφανώς ίσος με το μηδέν.
c. **Καύση** (combustion): Ολική οξειδωτική μετατροπή ενός καυσίμου με σκοπό την παραγωγή θερμότητας. Ο στοιχειομετρικός λόγος είναι μεγαλύτερος της μονάδας, δηλαδή το οξειδωτικό μέσο είναι περισσότερο από το καύσιμο. Είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη θερμική διεργασία για την μετατροπή οποιουδήποτε καυσίμου σε ενέργεια.

Στην παρούσα εργασία, θα ασχοληθούμε με τη θερμική διεργασία της αεριοποίησης, η οποία χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση της οποίας πρέπει να σχεδιαστεί το μοντέλο. Η γνώση της αεριοποίησης είναι απαραίτητη για την κατανόηση της λειτουργίας, της κατασκευής και των υδροδυναμικών φαινομένων της εγκατάστασης.

Στην πραγματικότητα, η αεριοποίηση είναι μια παλιά τεχνολογία [5], η οποία χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για την παραγωγή φωταερίου στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, αλλά εγκαταλείφθηκε όταν άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως η πιο αποτελεσματική εκείνη την περίοδο καύση. Η έρευνα όμως για μια αποτελεσματική αξιοποίηση των πηγών ενέργειας και των πρώτων υλών, μαζί με την ανάγκη για τη μείωση των εκπομπών του αερίου του θερμοκηπίου οδήγησαν ξανά στη χρήση της αεριοποίησης.

Η αεριοποίηση θεωρείται πως θα γίνει στο μέλλον η πιο σημαντική διεργασία για την κατεργασία αποβλήτων, τα οποία δεν έχουν σταθερή σύνθεση και είναι ανομοιογενή. Είναι μια βιώσιμη εναλλακτική στην καύση των αποβλήτων στους αποτεφρωτήρες. Εξάλλου, το αέριο προϊόν που παράγεται έχει πολλές διαφορετικές χρήσεις επιτρέποντας την ενσωμάτωση της διεργασίας σε αρκετές βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή και τη χρήση του για παραγωγή ενέργειας.



Εικόνα 6-Σχηματικό διάγραμμα πιθανών διεργασιών αεριοποίησης για βιομάζα [12]

Σαν θερμοχημική αεριοποίηση ορίζεται η μετατροπή ενός στερεού καυσίμου σε αέριο φορέα ενέργειας (αέριο καύσιμο). Η διεργασία αυτή βρίσκεται ανάμεσα στην πυρόλυση (θέρμανση απουσία οξυγόνου) που παράγει ανθρακούχο υπόλειμμα (char) και πίσσα (tar) και στην καύση, η οποία ιδανικά καταλήγει σε ολοκληρωτική οξείδωση του καυσίμου σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Στην αεριοποίηση προστίθεται μικρή ποσότητα οξυγόνου (περίπου 20-50% του στοιχειομετρικά απαιτούμενου αέρα για την πλήρη καύση).

Η αεριοποίηση ως διαδικασία εφαρμόζεται μόνο σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 700°C με 1000°C για τη βιομάζα και σε θερμοκρασίες ως και 1600°C για την αεριοποίηση των γαιανθράκων. Μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιαδήποτε πίεση, με αντίστοιχη αλλαγή βέβαια των υπόλοιπων συνθηκών. Η αεριοποίηση θεωρείται πλήρης (100% μετατροπή άνθρακα) όταν όλα τα στοιχεία (εκτός των ανόργανων) είναι στην ίδια φάση, την αέρια.

Απαιτεί όμως υψηλή θερμοκρασία για την εκκίνησή της (σχεδόν 500°C) και έτσι χρειάζεται πριν την εκκίνηση της εγκατάστασης να προσδίδεται στον αντιδραστήρα θερμότητα. Η θερμότητα αυτή προσδίδεται συνήθως με ηλεκτρικές αντιστάσεις στα τοιχώματα του αντιδραστήρα, οι οποίες αυξάνουν τη θερμοκρασία στην επιθυμητή τιμή. Θερμότητα μπορεί να προστίθεται επίσης και στο οξειδωτικό μέσο το οποίο εισέρχεται στην εγκατάσταση προθερμασμένο.

Η αεριοποίηση επιτελείται στα ακόλουθα στάδια:

- **Ξήρανση**, για την εξάτμιση της υγρασίας και την αύξηση της θερμοκρασίας των συστατικών του καυσίμου.
- **Πυρόλυση**, για την παραγωγή αερίου, πισσωδών ατμών και ελαιωδών ουσιών και στερεού ανθρακούχου υπολείμματος. Το

μεγαλύτερο τμήμα του αερίου παράγεται σε αυτό το στάδιο με πολύ μικρή παρουσία του αέρα.

- **Μερική οξείδωση**, των στερεών ανθρακούχων υπολειμμάτων, πυρολυτικών πισσών και αερίων. Εδώ χρησιμοποιείται το οξειδωτικό μέσο το οποίο κάνει τη διεργασία αυτή να διαφέρει από την καθαρή πυρόλυση.

Όταν ένα στερεό καύσιμο θερμαίνεται στους 300-500°C χωρίς την παρουσία κάποιου οξειδωτικού μέσου πυρολύεται σε ανθρακούχο στερεό υπόλειμμα, υδρογονάνθρακες (μικρού μοριακού βάρους όπως το μεθάνιο και μεγάλου βάρους ενώσεις όπως αρωματικοί υδατάνθρακες), αέρια και πίσσες προς συμπύκνωση. Ο ρυθμός παραγωγής τους εξαρτάται από το ρυθμό θέρμανσης και την τελική θερμοκρασία. Το οξειδωτικό μέσο δεν χρησιμοποιείται στο στάδιο αυτό. Το στάδιο της πυρόλυσης είναι ταχύτερο από το στάδιο της μερικής οξείδωσης, έτσι η τελική ταχύτητα της αντίδρασης εξαρτάται κυρίως από το τελευταίο στάδιο.

Τα προϊόντα του σταδίου της πυρόλυσης αντιδρούν σε αυτό το στάδιο με το οξειδωτικό μέσο, το οποίο είναι συνήθως αέριο, και παράγουν αέρια προϊόντα (υδρογόνο, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα) και υδρογονάνθρακες (όπως μεθάνιο). Πολλοί από τους υδρογονάνθρακες μεγάλου μοριακού βάρους διασπώνται σε αυτό το στάδιο. Η μερική οξείδωση των στερών ανθρακούχων υπολειμμάτων προέρχεται από το συνδυασμό πολλών χημικών αντιδράσεων (αερίου-αερίου και αερίου-στερεού).

Με αυτές τις αντιδράσεις, η στερεή ανθρακούχα ένωση οξειδώνεται προς διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα, ενώ υδρογόνο παράγεται από την αντίδραση εναλλαγής νερού-αερίου (water-gas shift reaction), όπου μονοξείδιο αντιδρά με νερό παράγοντας υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Οι αντιδράσεις αερίου-στερεού είναι και οι πιο αργές, καθορίζοντας την ταχύτητα της διεργασίας.

Για παράδειγμα, στην αεριοποίηση ρευστοποιημένης κλίνης το μείγμα καυσίμου/στερεού στην κλίνη τροφοδοτείται με προθερμασμένο ρευστό (όπως ατμοσφαιρικό αέρα ή ατμό κατάλληλης πίεσης) το οποίο περιέχει οξυγόνο. Το οξυγόνο οξειδώνει το καύσιμο και γίνονται εξώθερμες αντιδράσεις οι οποίες διατηρούν τη θερμοκρασία σε υψηλά επίπεδα ώστε να συνεχιστεί η διεργασία.

Η αεριοποίηση είναι μια έντονα εξώθερμη διεργασία. Το καύσιμο το οποίο διασπάται εκπέμπει θερμότητα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διατήρηση της διαδικασίας. Η θερμότητα η οποία παράγεται είναι τόσο μεγάλη ώστε σπάνια χρειάζεται η πρόσδοση εξωτερικού ποσού θερμότητας κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Μερικές φορές μάλιστα είναι απαραίτητη η μείωση της παροχής του καυσίμου για τη διατήρηση της θερμοκρασίας.

Η συνολική διαδικασία δεν διαφέρει τόσο από την καύση. Η κύρια μεταβολή είναι η διαφορά στην ποσότητα του οξειδωτικού μέσου το οποίο χρησιμοποιείται. Στην αεριοποίηση υπάρχει έλλειμμα οξειδωτικού μέσου, με συνέπεια τα προϊόντα να είναι σε λιγότερο οξειδωμένες μορφές από την καύση. Παραδείγματος χάρη, το

υδρογόνο το οποίο συμμετείχε στην καύση δεν εμφανίζεται στα προϊόντα αποκλειστικά με την μορφή υδρατμών, αλλά και ως το διατομικό του μόριο, χωρίς να ενώνεται με οξυγόνο.

Η κύρια αλλαγή όμως συντελείται στα οργανικά προϊόντα της αντίδρασης. Ενώ στην καύση το μεγαλύτερο ποσοστό του άνθρακα εμφανίζεται με τη μορφή διοξειδίου (και το ποσοστό αυξάνεται όσο πλησιάζουμε προς την τέλεια καύση), στην αεριοποίηση δεν είναι η κυρίαρχη μορφή. Μεγάλο ποσοστό του άνθρακα στα προϊόντα βρίσκεται στη μορφή μονοξειδίου ή μεθανίου. Στα προϊόντα υπάρχουν επίσης και μεγαλύτερες οργανικές ενώσεις. Λόγω όμως της παρουσίας αυτών των αερίων και ειδικά του μονοξειδίου, τα προϊόντα της αεριοποίησης είναι εξαιρετικά τοξικά.

Στην αεριοποίηση καυσίμου άνθρακα λαμβάνουν χώρα οι εξής εξισώσεις:

1. $C + 1/2\ O_2 \leftrightarrow CO$ $\Delta H° = -109$ kJ
2. $C + O_2 \leftrightarrow CO_2$ $\Delta H° = -390$ kJ
3. $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ $\Delta H° = +172$ kJ
4. $C + H_2O\ (g) \leftrightarrow CO + H_2$ $\Delta H° = +130$ kJ
5. $C + 2H_2O\ (g) \leftrightarrow CO_2 + 2H_2$ $\Delta H° = +88$ kJ
6. $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$ $\Delta H° = -71$ kJ
7. $CO + H_2O\ (g) \leftrightarrow CO_2 + H_2$ $\Delta H° = -42$ kJ
8. $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$ $\Delta H° = +205$ kJ

Από αυτές τις εξισώσεις, οι σημαντικότερες εξισώσεις, οι οποίες χαρακτηρίζουν την αεριοποίηση είναι οι εξισώσεις {1} (μερική οξείδωση άνθρακα), {3} (εξίσωση Boudouard), {4} (εξίσωση νερού-αερίου) και {7} (εξίσωση CO-shift). Από τις υπόλοιπες εξισώσεις οι {5} (δευτερεύουσα εξίσωση νερού-αερίου), {6} (εξίσωση σχηματισμού μεθανίου) και η {8} (εξίσωση αναμόρφωσης ατμού) λαμβάνουν χώρα στην εγκατάσταση αλλά σε μικρότερη κλίμακα [23].

Η εξίσωση {2} είναι η πλήρης οξείδωση του καυσίμου της εγκατάστασης, δηλαδή η καύση του. Η πραγματοποίηση της εξίσωσης αυτής προσφέρει στην αεριοποίηση τη δυνατότητα αυτόνομης συνέχισης της διεργασίας, χωρίς την παροχή εξωτερικής θερμότητας, καθώς είναι έντονα εξωθερμική και προσφέρει στην ενδοθερμική διαδικασία της αεριοποίησης την απαραίτητη θερμότητα.

Η διατήρηση όμως τέτοιας υψηλής θερμοκρασίας οδηγεί σε υψηλές απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον μέσω των τοιχωμάτων της εγκατάστασης, τα οποία είναι σε εξίσου υψηλή θερμοκρασία. Είναι απαραίτητο λοιπόν να τοποθετηθεί ισχυρή μόνωση στην εγκατάσταση. Επιπλέον, τα υλικά των τοιχωμάτων πρέπει να είναι κατασκευασμένα από υλικό με μεγάλη αντοχή σε θερμικές καταπονήσεις και να έχουν αρκετό πάχος για να τις αντέξουν.

Το αέριο σχηματίζεται κατά κύριο λόγο σε θερμοκρασίες άνω των 750°C. Σε οργανικά καύσιμα το αέριο το οποίο παράγεται, περιέχει κυρίως μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, νερό, υδρογόνο και μεθάνιο. Το αέριο έχει και μικρές ποσότητες υψηλών υδρογονανθράκων. Στον αντιδραστήρα παραμένει συνήθως στερεό ανθρακούχο υπόλειμμα (char) το οποίο αποτελείται από υψηλού μοριακού βάρους υδρογονάνθρακες, οι οποίοι δεν διασπάστηκαν στο τρίτο στάδιο.

Το άζωτο των οργανικών ενώσεων μετατρέπεται κυρίως σε αμμωνία (το άζωτο του αέρα δεν αντιδρά) ενώ το θείο σε υδρόθειο. Τα αλογόνα παρουσιάζονται και στα αέρια (ενωμένα με υδρογόνο, δηλαδή στη μορφή οξέων) και στα στερεά απόβλητα (ως άλατα). Η τελική σύνθεση του παραγόμενου αερίου είναι πάντα συνάρτηση της πρώτης ύλης, των συνθηκών αεριοποίησης και της θερμοκρασίας στην οποία γίνεται η διεργασία.

Η θερμική του αξία εξαρτάται από το μέσο με το οποίο γίνεται η αεριοποίηση. Για αεριοποίηση με ατμοσφαιρικό αέρα η κατώτερη θερμική του αξία είναι συνήθως 6MJ/Nm^3. Αντίθετα, για αεριοποίηση με ατμό ή καθαρό οξυγόνο (oxyfuel) η κατώτερη θερμική του αξία γίνεται 14MJ/Nm^3 αλλά η διαδικασία είναι πιο πολύπλοκη [11].

Η θερμική του όμως αξία δεν είναι αρκετά υψηλή ώστε να δικαιολογεί την κατανάλωση ενέργειας για την συμπίεσή του ή την κατασκευή ειδικών σωληνώσεων (τα οποία ελαχιστοποιούν τις διαρροές) για τη μεταφορά του, όπως του φυσικού αερίου. Η κατανάλωση δηλαδή του αερίου είναι πιο συμφέρουσα όταν γίνεται στο σημείο στο οποίο παράγεται.

Η θερμική αξία του παραγόμενου αερίου εξαρτάται επίσης από την ποιότητα του εισερχόμενου καυσίμου. Όμως, εξαρτάται επίσης και από τις συνθήκες της αεριοποίησης, κάνοντας την παραγωγή αερίου αρκετά υψηλής ποιότητας από καύσιμο χαμηλής θερμικής αξίας δυνατή. Ένα τέτοιο καύσιμο είναι ταυτόχρονα φθηνότερο από το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο και μπορεί να παραχθεί τοπικά. Αν μάλιστα το καύσιμο προέρχεται από βιομάζα, τότε το ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα θα παραμείνει αναλλοίωτο (εκτός της ενέργειας η οποία απαιτείται για την εκκίνησή του).

Η κατανάλωση της ενέργειας την οποία απαιτεί η αεριοποίηση για τη μετατροπή του στερεού καυσίμου σε αέριο, είτε προέρχεται από το αρχικό ενεργειακό δυναμικό του καυσίμου είτε από κάποια εξωτερική πηγή, μπορεί να δικαιολογηθεί από την ευκολία χρήσης του αερίου καυσίμου και το μικρότερο κόστος χρήσης και αποθήκευσής του σε σχέση με το στερεό καύσιμο.

Το αέριο καύσιμο μπορεί να διατηρηθεί υπό πίεση απαιτώντας μικρότερους χώρους, ενώ είναι πολύ πιο κατάλληλο για χρήση σε συνδυασμένους κύκλους και αεριοστροβίλους, χωρίς οι συνθήκες χρήσης του να είναι τόσο περιορισμένες όσο των στερεών καυσίμων. Ο καθαρισμός του καυσίμου από περιβαλλοντικούς ρυπαντές και τοξικά συστατικά είναι πολύ πιο εύκολος από τον καθαρισμό των καυσαερίων του ύστερα από την καύση του.

Το παραγόμενο αέριο μπορεί να αξιοποιηθεί κατά διάφορους τρόπους:

- *Καύση για παραγωγή ατμού.* Το αέριο το οποίο παράγεται από αεριοποίηση καυσίμου έχει το πλεονέκτημα πως καθαρίζεται πριν την καύση, δίνοντας τη δυνατότητα λειτουργίας του ατμολέβητα σε υψηλότερες πιέσεις και του υπερθερμαντήρα σε υψηλότερες θερμοκρασίες, επιτυγχάνοντας αύξηση ως και 30% στο βαθμό απόδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας.
- *Τροφοδοσία μηχανής εσωτερικής καύσης.* Ο βαθμός απόδοσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (αν η μηχανή κινεί ηλεκτρογεννήτρια) μπορεί να ξεπεράσει το 40%. Απαιτείται όμως επιπλέον καθαρισμός των αερίων λόγω της μεγάλης ποσότητας ακαύστων, τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα στη λειτουργία της μηχανής.
- *Κίνηση αεριοστρόβιλου.* Απαιτείται επίσης καθαρισμός των αερίων από τα μεγαλύτερα σωματίδια και την υγρασία, που μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στα πτερύγια του στροβίλου. Μπορεί να οδηγήσει επίσης σε απόδοση της τάξης του 40% στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα αν χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμένο κύκλο.

  Οι παρακάτω εγκαταστάσεις είναι παραδείγματα συνδυασμένου κύκλου με τη χρήση αερίου αεριοποίησης [3]:

Περιοχή	Σύστημα	Θερμική Ισχύς (MWth)	Κατάσταση (2001)
Zeltweg, Αυστρία	Με Ανακυκλοφορία, Άμεση Εισαγωγή στον Λέβητα	10	Σε λειτουργία από το 1998
Lahti, Φινλανδία	Με Ανακυκλοφορία, Άμεση Εισαγωγή στον Λέβητα	60	Σε λειτουργία από το 1999
Amer, Ολλανδία	Με Ανακυκλοφορία, Καθαρισμό του Αερίου, Απομάκρυνση της Αμμωνίας και Εισαγωγή στον Λέβητα	80	Αρχή Λειτουργίας το 2000
Vermont, Η.Π.Α.	Παραγωγή Αερίου Μέσης Θερμικής Αξίας, Εισαγωγή σε Λέβητα Ξύλου	60	Δοκιμαστικές Εκκινήσεις το 2000

- *Διοχέτευση στο δίκτυο αερίου πόλης.* Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η σταθερή ποιότητα του αερίου. Παρόμοια ήταν η πρώτη εφαρμογή της αεριοποίησης, στην οποία το αέριο χρησιμοποιούνταν για το άναμμα των λαμπτήρων φωταερίου στο δημοτικό δίκτυο.
- *Χρήση σε κυψέλες καυσίμου.* Το αέριο αυτό περιέχει ένα σημαντικό ποσοστό υδρογόνου το οποίο θα μπορεί, όταν η τεχνολογία αυτή θα

είναι ώριμη να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου (fuel cells).

Φυσικά, δεν είναι απαραίτητη η κατανάλωση του αερίου στο μέρος που παράγεται. Το παραγόμενο αέριο, όπως και το φυσικό αέριο, μπορεί να μεταφερθεί με σωληνώσεις σε άλλες βιομηχανίες για εσωτερική χρήση ή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεταφορά συμφέρει περισσότερο αν το αέριο έχει μέση θερμογόνο δύναμη, ενώ τα αέρια χαμηλής και υψηλής θερμογόνου δύναμης έχουν μικρό βαθμό απόδοσης και υψηλό κόστος μεταφοράς, αντίστοιχα, για να είναι η μεταφορά τους οικονομικά συμφέρουσα. Συνήθως βέβαια δε συμφέρει για καύσιμο παραγόμενο από βιομάζα.

Ο κύριος αντίπαλος της βιομάζας στην εισαγωγή της στη βιομηχανία είναι η καύση, η οποία μαζί με τα συμβατικά καύσιμα εξασφαλίζει εγκαταστάσεις υψηλής απόδοσης οι οποίες επιπλέον έχουν μελετηθεί εκτενέστερα. Η καύση μπορεί επιπλέον να χρησιμοποιηθεί, συνήθως με μικρότερο επενδυτικό κίνδυνο αλλά και μικρότερη απόδοση, για τη θερμική επεξεργασία της βιομάζας.

Η καύση σε σχέση με την αεριοποίηση έχει πολύ μεγαλύτερη διείσδυση στην αγορά και είναι μια πολύ πιο παλιά και αποδεδειγμένη τεχνολογία. Είναι δύσκολο για τη βιομηχανία, η οποία παραδοσιακά ακολουθεί μια πιο συντηρητική πολιτική σε βιομηχανικές εφαρμογές να χρησιμοποιήσει την αεριοποίηση πριν να αποδειχτεί η οικονομική βιωσιμότητά της. Επιπλέον, η διάβρωση η οποία παρατηρείται στους αντιδραστήρες αεριοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα στο μέλλον, ενώ υπάρχει πάντα το θέμα της διάθεσης της τέφρας και της πίσσας.

Η αεριοποίηση όμως είναι πολύ πιο φιλική προς το περιβάλλον καθώς το παραγόμενο μπορεί να καθαριστεί πριν οδηγηθεί στην παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον επιτρέπει την επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων αστικών αποβλήτων η διάθεση των οποίων γίνεται ολοένα και μεγαλύτερο πρόβλημα. Σε χρήση με συνδυασμένους κύκλους πιστεύεται πως ο βαθμός απόδοσης μπορεί να είναι μεγαλύτερος με τη χρήση της αεριοποίησης [15].

6) Αντιδραστήρες Αεριοποίησης

Οι πιο συνηθισμένοι αντιδραστήρες αεριοποίησης είναι ενός σταδίου, δηλαδή χρησιμοποιούν αποκλειστικά ένα αντιδραστήρα για να μετατρέψουν το καύσιμο σε αέριο. Είναι οι πλέον απλοί στον υπολογισμό και την κατασκευή τους και απαιτούν τα μικρότερα κόστη. Η ποιότητα όμως του αερίου την οποία δίνουν δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή, καθώς περιέχει αρκετές προσμίξεις και άκαυστα.

Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκαν οι αντιδραστήρες αεριοποίησης πολλαπλών σταδίων, οι οποίοι πραγματοποιούν πρώτα την πυρόλυση και στη συνέχεια σε ένα δεύτερο στάδιο πραγματοποιούν την αεριοποίηση των προϊόντων της πυρόλυσης. Οι αντιδραστήρες αυτοί μπορεί να είναι παράλληλοι ή σε σειρά [14].

Η πραγματική εγκατάσταση η οποία θα αναλυθεί με τη βοήθεια του κρύου μοντέλου είναι ένας αντιδραστήρας ενός σταδίου, καθώς θεωρείται πως το σύστημα καθαρισμού του αερίου και το σύστημα απαγωγής της πίσσας τα οποία θα τοποθετηθούν στην εγκατάσταση επαρκούν για να πετύχουν την επιθυμητή καθαρότητα του αερίου και η κατασκευή μιας περίπλοκης μονάδας περισσότερων σταδίων δεν είναι απαραίτητη. Επιπλέον το αέριο θα χρησιμοποιηθεί ακριβώς μετά τον καθαρισμό του σε θάλαμο καύσης, όπου η παρουσία προσμίξεων δεν αποτελεί τόσο μεγάλο πρόβλημα. Τα περισσότερα σωματίδια εξάλλου είναι υδρογονάνθρακες μερικοί από τους οποίους θα διασπαστούν.

Οι πιο συνήθεις τύποι αντιδραστήρων ενός σταδίου. που χρησιμοποιούνται στην αεριοποίηση σε συνδυασμό με αεριοστρόβιλους, μηχανές εσωτερικής καύσεως ή σε διεργασίες συνδυασμένου κύκλου είναι:

6.1) Αντιδραστήρες πυκνής μορφής ή αντιδραστήρες σταθερής κλίνης

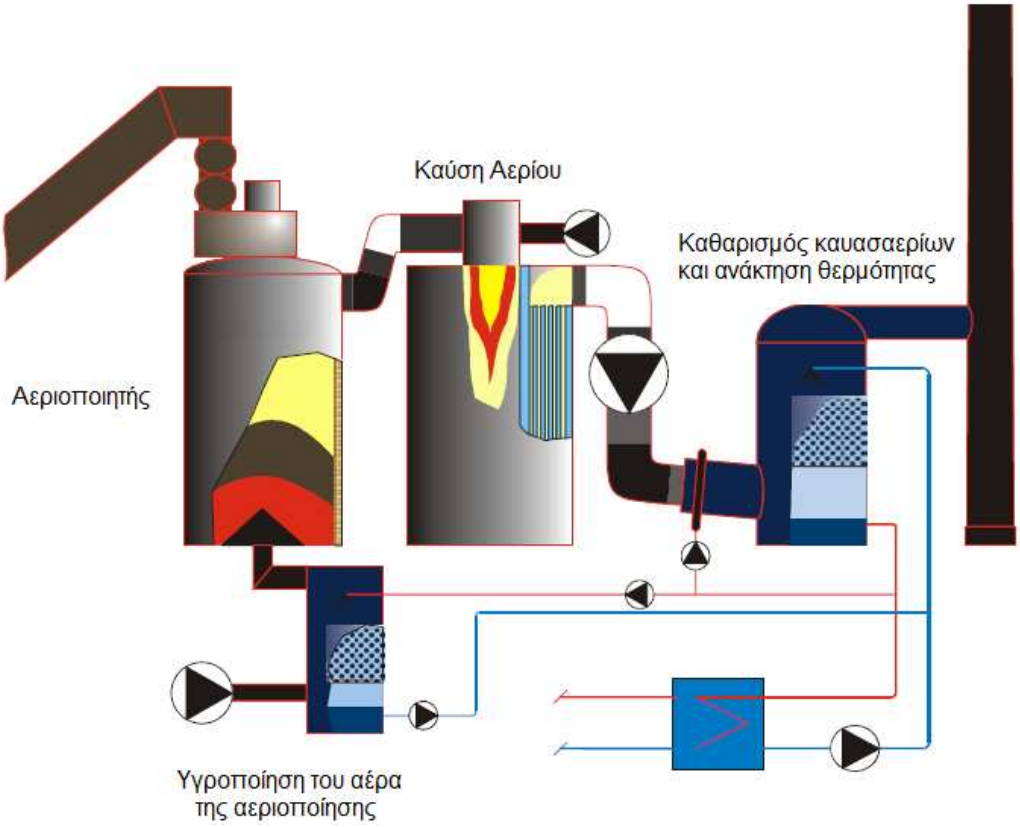
Οι αντιδραστήρες πυκνής μορφής έχουν σαν πιο αντιπροσωπευτικό είδος τον *αντιδραστήρα σταθερής κλίνης* (fixed bed reactor). Είναι οι πρώτοι εμπορικά διαθέσιμοι αεριοποιητές και χαρακτηρίζονται από απλότητα στο σχεδιασμό και τη λειτουργία τους. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι η καύσιμη ύλη καλύπτει όλο σχεδόν το χώρο του αεριοποιητή σε αντίθεση με τους αεριοποιητές αραιάς μορφής όπου το καύσιμο (συνήθως βιομάζα) καλύπτει ένα μικρό μέρος μόνο του αεριοποιητή.

Οι αντιδραστήρες αυτοί είναι κατάλληλοι για εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας. Το μειονέκτημα αυτών των αντιδραστήρων είναι ότι απαιτούν σχετικά

μεγάλες διαστάσεις καθώς και συμπυκνωμένα σταθερών διαστάσεων και σταθερής υγρασίας καύσιμα. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα μικρής κλίμακας συνήθως περίπου 500kW$_{th}$ και πιο σπάνια σε μέσα μεγέθη ως 5MW$_{th}$ [4].

Στον κόσμο υπάρχουν αρκετές μικρές εγκαταστάσεις οι οποίες λειτουργούν επιτυχώς. Οι περισσότερες από αυτές βρίσκονται στη Φινλανδία και τη Δανία όπου το αέριο χρησιμοποιείται στη συνέχεια για καύση. Εγκαταστάσεις υπάρχουν και σε άλλες χώρες με περισσότερες από 1000 ώρες λειτουργίας [3]. Οι εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας είναι λιγότερες αλλά ένα δείγμα τους φαίνεται στον παρακάτω πίνακα [3]:

Περιοχή	Σύστημα	Ηλεκτρική Ισχύς (MWe)	Κατάσταση (2001)
Hogild, Δανία	Παράλληλης Ροής με Μηχανή Εσωτερικής Καύσης της Mercedes	0,5	1200 Ώρες Λειτουργίας το 2000
Espenhaim, Γερμανία	Υγρός Καθαρισμός Αερίου	1	Σε Λειτουργία
Αυστρία	Αεριοποιητής Ξύλου	0,05	Αρκετές σε λειτουργία (σε αγροκτήματα)
Londonderry, Ηνωμένο Βασίλειο	B9	0,2	Σε Λειτουργία
Londonderry, Ηνωμένο Βασίλειο	Αεριοποιητής Ενεργειακών Καλλιεργειών	1	Συνεχής Λειτουργία



Εικόνα 7-Αντιδραστήρας Σταθερής Κλίνης στο Condens Oy, Φινλανδία [9]

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε έναν αντιδραστήρα σταθερής κλίνης, ο οποίος έχει κατασκευαστεί στο Condens Oy, στην Φινλανδία. Ο αντιδραστήρας αυτός προσπαθεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα των δύο τύπων αντιδραστήρων σταθερής κλίνης. Κατασκευάστηκε το 2002 και έχει θερμική ισχύ 8MW. Χρησιμοποιείται για παροχή θέρμανσης και για ερευνητικούς σκοπούς.

Στον αντιδραστήρα αυτόν το καύσιμο (μπορεί να είναι διάφορα καύσιμα βιομάζας, όπως υπολείμματα ξυλείας και επεξεργασμένα βιολογικά απορρίμματα) εισέρχεται στον αεριοποιητή από την κορυφή του, ενώ το οξειδωτικό μέσο (ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος υποβάλλεται σε υγροποίηση και προθέρμανση) εισέρχεται από το κατώτερο μέρος του.

Στη συνέχεια το αέριο χωρίς άλλη επεξεργασία καίγεται σε ένα καυστήρα. Το καυσαέριο καθαρίζεται από τα υπολείμματα της θερμικής επεξεργασίας με έκπλυση. Το θερμό νερό το οποίο προκύπτει χρησιμοποιείται για προθέρμανση του υγροποιημένου αέρα, ο οποίος χρησιμοποιείται στην αεριοποίηση. Το καυσαέριο στη συνέχεια αποβάλλεται στο περιβάλλον μέσω μιας καμινάδας.

Οι αντιδραστήρες αυτοί μπορούν να χωριστούν ανάλογα με τη σχετική κίνηση που ακολουθούν σε αυτούς το καύσιμο και το αέριο. Έτσι, έχουμε:

- **Αντιδραστήρες παράλληλης ροής (co-current gasifiers):** Το στερεό και το αέριο κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση. Η έξοδος δηλαδή του παραγόμενου αερίου βρίσκεται χαμηλότερα από την είσοδο του ρεύματος του αερίου. Παράδειγμα τέτοιου ενεργού αντιδραστήρα είναι στο Hogild στη Δανία με ισχύ 0,5MW_e.
- **Αντιδραστήρες αντίθετης ροής (counter-current gasifiers):** Λέγονται και αντιδραστήρες διασταυρούμενης ροής (cross-current). Το στερεό και το αέριο κινούνται σε διαφορετικές κατευθύνσεις, δηλαδή το αέριο κινείται ανοδικά ενώ το στερεό κινείται καθοδικά. Το σημείο εξόδου βρίσκεται σε ύψος ανάμεσα στις δύο οπές εισόδου, του καυσίμου και του αερίου.

Φυσικά μπορεί να δημιουργηθούν παραλλαγές των δύο αυτών περιπτώσεων, όπως για παράδειγμα, η κίνηση του αερίου υπό γωνία ή η είσοδος του καυσίμου υπό γωνία (crossdraft gasifier). Ο αεριοποιητής επίσης δεν είναι απαραίτητο να έχει μόνο ένα στάδιο. Μπορεί η αεριοποίηση να γίνεται σε περισσότερες από μία φάσεις και η ροή του αερίου και του καυσίμου να είναι διαφορετική στην καθεμία.

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι είναι:

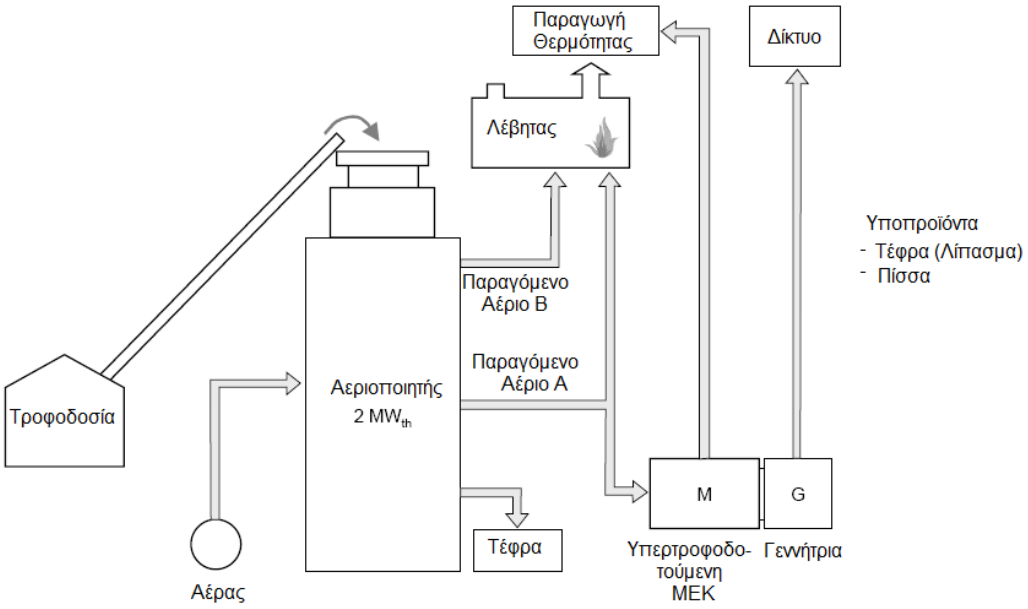
- **Αντιδραστήρας καθοδικής ροής (downdraft):** Το αέριο και το καύσιμο εισέρχονται από το άνω μέρος του αντιδραστήρα. Πρόκειται δηλαδή για αντιδραστήρα παράλληλης ροής. Τα στερεά υπολείμματα εξέρχονται από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα, αφού χωριστούν από το παραγόμενο αέριο μέσω της βαρύτητας. Το σημείο εξόδου βρίσκεται κοντά στο κάτω μέρος της κλίνης. Ο αντιδραστήρας αυτός

δίνει το μικρότερο ποσοστό τέφρας (περίπου $1g/Nm^3_{dry\ gas}$) αλλά το μειονέκτημά του είναι η περιορισμένη παροχή καυσίμου για την οποία μπορεί να κατασκευαστεί (ως και 1,5MW_{th}) [16].

Ένας τέτοιος αντιδραστήρας κατασκευάστηκε στην περιοχή του Tervola στη Φινλανδία το 2001. Έχει δυνατότητα για 1,1MW θερμικής ισχύος και 450kW ηλεκτρικής ισχύος καλύπτοντας στο μεγαλύτερο ποσοστό τους τις θερμικές ανάγκες των κατοίκων της περιοχής και μικρό τμήμα των αντίστοιχων ηλεκτρικών αναγκών. Τροφοδοτείται με τα υπολείμματα των εγκαταστάσεων επεξεργασίας ξυλείας της περιοχής [9].

Στην εγκατάσταση αυτή, το καύσιμο (υπολείμματα ξυλείας και RDF) οδηγείται στον αεριοποιητή, ο οποίος λειτουργεί με αέρα ως οξειδωτικό μέσο. Από την κλίνη εξέρχονται δύο ρεύματα αερίων (και ένα ρεύμα τέφρας). Τμήμα του πρώτου ρεύματος (A) οδηγείται σε μια υπερτροφοδοτούμενη μηχανή εσωτερικής καύσης η οποία κινεί μια γεννήτρια που δίνει ρεύμα στο δίκτυο.

Τα καυσαέρια της μηχανής εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θερμότητας. Το υπόλοιπο τμήμα του πρώτου ρεύματος και το δεύτερο ρεύμα του αερίου οδηγούνται σε έναν λέβητα, όπου καίγονται παράγοντας θερμότητα. Υπολείμματα της εγκατάστασης χρησιμοποιούνται επίσης περαιτέρω, ως πίσσα και ως λίπασμα (η τέφρα που παράγεται).

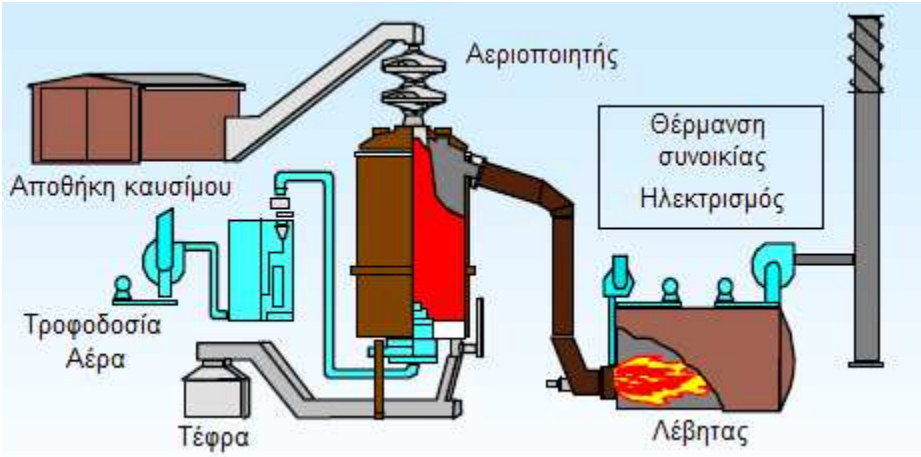


Εικόνα 8-Εγκατάσταση αεριοποιητή καθοδικής ροής στο Tervola, Φινλανδία [9]

- **Αντιδραστήρας ανοδικής ροής (updraft):** Το καύσιμο εισέρχεται από το άνω μέρος του αντιδραστήρα και ακολουθεί καθοδική ροή, αλλά το αέριο εισέρχεται από το κάτω τμήμα και ακολουθεί ανοδική ροή. Πρόκειται δηλαδή για αντιδραστήρα αντίθετης ροής. Το παραγόμενο αέριο εξέρχεται από το άνω μέρος του αντιδραστήρα και τα στερεά υπολείμματα λόγω της βαρύτητας από το κάτω μέρος. Το σημείο εξόδου βρίσκεται συνήθως κοντά στο άνω μέρος της κλίνης, ώστε να εξασφαλίζεται μεγαλύτερος χρόνος επαφής του οξειδωτικού και του καυσίμου.

  Παράδειγμα τέτοιου αντιδραστήρα είναι η εγκατάσταση BIONEER του Τεχνικού Ερευνητικού Κέντρου της Φινλανδίας (Technical Research Centre of Finland). Έχουν αναπτυχθεί 10 τέτοιες εγκαταστάσεις από τη δεκαετία του 80 με θερμική ισχύ περίπου 5MW η καθεμία. Ορισμένες εγκαταστάσεις όπως η εικονιζόμενη, η οποία είναι ενεργή από το 1987 έχουν περίπου 150000 ώρες λειτουργίας [9, 16].

  Στις εγκαταστάσεις αυτές το αέριο το οποίο παράγεται από την κλίνη καίγεται σε έναν λέβητα και χρησιμοποιείται για τη θέρμανση των γειτονικών κατοικιών και για την παροχή ηλεκτρισμού. Η κλίνη διαθέτει επίσης και σύστημα απαγωγής της τέφρας από τον αεριοποιητή.



Εικόνα 9-Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης αεριοποιημένης κλίνης στο Jalasjarvi, Φινλανδία [16]

Εικόνα 10-Εγκατάσταση αεριοποιημένης κλίνης ανοδικής ροής στο Jalasjarvi της Φινλανδίας [16]

6.2) Αντιδραστήρες αραιής μορφής

Στους αντιδραστήρες αυτούς κατατάσσονται οι αντιδραστήρες με κινούμενη και ρευστοποιημένη κλίνη:

- **Κινούμενης κλίνης** (moving bed)

Οι αντιδραστήρες αυτοί χρησιμοποιούνται συνήθως σε διεργασίες χαμηλής θερμοκρασίας. Ως συνέπεια, είναι πιο συνηθισμένοι στην πυρόλυση παρά στην αεριοποίηση. Τα στερεά μεταφέρονται σε αυτούς μηχανικά, συνήθως σε οριζόντιο επίπεδο. Συνήθως χρησιμοποιούνται σχετικά μεγάλα και ομοιόμορφα σωματίδια, χωρίς να είναι λεπτόκοκκα. Μπορούν λοιπόν να λειτουργήσουν ως αεριοποιητέεες βιομάζας.

Οι αντιδραστήρες αυτοί μπορούν να έχουν πολλαπλές εστίες καύσης και η κλίνη τους μπορεί να είναι οριζόντια, αντίθετα με τους άλλους αντιδραστήρες. Η εστία καύσης μερικές φορές είναι κεκλιμένη για να διευκολυνθεί η απομάκρυνση των στερεών υπολειμμάτων. Η μεταφορά θερμότητας δεν είναι ιδιαίτερα καλή, αλλά λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του αδρανούς υλικού μεταφέρονται τελικά μεγάλα ποσά θερμότητας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας και επιτρέπουν, αν εξασφαλιστεί καλή επαφή μεταξύ των αντιδρώντων, μετατροπή του καυσίμου σε ποσοστό κοντά στο 100%.

6.3) Αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed)

Οι αντιδραστήρες αυτοί χρησιμοποιούν μια ρευστοποιημένη κλίνη για να φέρουν σε επαφή το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο. Το δεύτερο είναι κάποιο ρευστό το οποίο εισέρχεται στην κλίνη με αρκετά μεγάλη ταχύτητα ώστε να παρασύρει τα σωματίδια του ρευστού και να τα αναγκάσει να αρχίσουν να κινούνται εσωτερικά της κλίνης. Συνολικά η κλίνη αποκτά τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες ενός ρευστού. Αν η ταχύτητα είναι χαμηλή τότε συμπεριφέρεται ως υγρό,, ενώ αν η ταχύτητα γίνει ψηλότερη τότε συμπεριφέρεται ως αέριο.

Οι αντιδραστήρες αυτοί έχουν εξαιρετική ανάμιξη μεταξύ του οξειδωτικού μέσου και του καυσίμου. Επιπλέον, οι ταχύτητες αντίδρασης είναι πολύ υψηλές (ψηλότερες από των αντιδραστήρων κινούμενης ή σταθερής κλίνης), η μεταφορά μάζας και θερμότητας πολύ υψηλή και η καλή ανάμιξη εξασφαλίζει καλή μετατροπή του καυσίμου. Μπορούν να χειριστούν εύκολα καύσιμα με υψηλό ποσοστό υγρασίας και χαμηλή θερμική αξία. Το κύριο μειονέκτημά είναι η δυσκολία του σχεδιασμού και της κατασκευής τους.

Συνήθως στην κλίνη χρησιμοποιείται ως υλικό πυριτική άμμος γιατί μπορεί να διατηρεί υψηλή θερμοκρασία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Σε πειραματικές συνήθως κλίνες έχουν δοκιμαστεί πολλά άλλα υλικά όπως γυαλί, αλουμίνα ή και οξείδια μετάλλων. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν διάφοροι καταλύτες, όπως δολομίτης ή ολιβίνης, οι οποίοι βελτιώνουν σημαντικά τη χημική απόδοση του συστήματος.

Το οξειδωτικό μέσο εισέρχεται στην κλίνη μέσω ενός διασκορπιστή (distributor) ο οποίος είναι συνήθως μεταλλικός και διαθέτει μικρές οπές από τις οποίες περνά το οξειδωτικό μέσο στην κλίνη χωρίς να διαφεύγουν τα στερεά. Είναι υπεύθυνος για την καλή διεπαφή μεταξύ καυσίμου και οξειδωτικού και κατά συνέπεια από τα πλέον σημαντικά τμήματα της εγκατάστασης. Είναι επίσης ένα από τα πλέον ευάλωτα τμήματα στη διάβρωση της εγκατάστασης, καθώς σε αυτόν κατακάθονται τα άκαυστα.

Η κλίνη λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία, όπως και τα υπόλοιπα συστήματα αεριοποίησης. Η θερμοκρασία της όμως παραμένει, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, περίπου σταθερή σε ολόκληρη την κλίνη. Είναι επίσης εύκολος ο έλεγχος και η ρύθμιση αυτής της θερμοκρασίας κάνοντας την κατάλληλη για χημικές αντιδράσεις με μικρό παράθυρο θερμοκρασιών. Είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη στο άνω τμήμα της κλίνης στο τμήμα απεμπλοκής της ροής (freeboard) λόγω της μικρότερης παρουσίας στερεών σωματιδίων.

Οι περισσότερες χημικές αντιδράσεις και η μετατροπή του καυσίμου γίνονται στο κάτω μέρος της κλίνης, όπου βρίσκεται η μεγαλύτερη ποσότητα στερεών σωματιδίων. Ένα μικρό ποσοστό λαμβάνει χώρα στο τμήμα απεμπλοκής της ροής λόγω των σωματιδίων τα οποία παρασύρονται από το ρεύμα του ρευστού,

αλλά ο κύριος λόγος ύπαρξης αυτού του τμήματος είναι για το διαχωρισμό του παραγόμενου αερίου από προσμίξεις και από το εισερχόμενο ρευστό.

Η μετατροπή του καυσίμου σε αέριο είναι πολύ υψηλή, κοντά στο 100% [π]. Έχει βρεθεί πως η μετατροπή στην περίπτωση της βιομάζας είναι βέλτιστη αν το καύσιμο εισέρχεται από το κάτω μέρος της εγκατάστασης στην πυκνή φάση, γιατί τότε τα στερεά ανθρακούχα υπολείμματα δεν μεταφέρονται από την έξοδο της κλίνης μαζί με το παραγόμενο αέριο.

Η ποιότητα της ρευστοποίησης δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα και την ομοιομορφία του καυσίμου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στη βιομάζα, καθώς ορισμένα βιοκαύσιμα μπορούν να έχουν μεγάλες διαφορές στη χημική τους σύσταση, όπως παραδείγματος χάρη στην περιεκτικότητα σε υγρασία.

Επίσης ο σχεδιασμός των ρευστοποιημένων κλινών είναι αρκετά ευέλικτος ώστε να μπορούν να κατασκευαστούν αντιδραστήρες για κάθε μέγεθος σωματιδίου του υλικού της κλίνης ή του καυσίμου. Μπορούν να λειτουργήσουν ακόμα και σημαντική διαφορά πίεσης και μεγέθους μεταξύ των υλικών (τα οποία δεν είναι απαραίτητα δύο – περισσότερα του ενός υλικά της κλίνης μπορεί να χρησιμοποιούνται.

Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη ανάλογα με την παροχή του καυσίμου και του ρευστού. Σε εξαιρετικά μεγάλες παροχές είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότερα του ενός σημεία εισόδου του καυσίμου ή του οξειδωτικού μέσου. Μια συνηθισμένη διαμόρφωση, η οποία χρησιμοποιείται και στην πραγματική εγκατάσταση είναι μια κύρια εισαγωγή οξειδωτικού μέσου στον πυθμένα της εγκατάστασης και μια δευτερεύουσα μικρότερης παροχής εισαγωγή σε μεγαλύτερο ύψος. Συνήθως όμως υπάρχει μόνο ένα σημείο εξόδου του παραγόμενου αερίου.

Ένα συνηθισμένο πρόβλημα της εγκατάστασης αυτής είναι η παραγωγή τέφρας και ανθρακούχου υπολείμματος. Αυτά παράγονται σε κάθε θερμική διεργασία άνθρακα, αλλά στους αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης λόγω της ροής αερίου και της πολύ υψηλότερης θερμοκρασίας σε όλη την περιοχή της κλίνης τα προβλήματα είναι πολύ σημαντικότερα και μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια της ρευστοποίησης και διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα.

Το κύριο πρόβλημα είναι το χαμηλό σημείο τήξης των στοιχείων αυτών. Ειδικά σε κλίνη η οποία χρησιμοποιεί καύσιμο το οποίο προέρχεται από βιομάζα, η οποία έχει συνήθως υψηλό ποσοστό αλκαλίων, η δημιουργία ευτηκτικών φάσεων είναι πολύ πιο εύκολη. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι φάσεις αυτές συνδυάζονται και με τα πυριτικά υλικά της κλίνης.

Οι ευτηκτικές αυτές φάσεις μπορούν εύκολα να ενωθούν μεταξύ τους σχηματίζοντας μεγαλύτερα σωματίδια, τα οποία απαιτούν υψηλότερη ταχύτητα για να ρευστοποιηθούν. Αν τα σωματίδια αυτά γίνουν αρκετά μεγάλα, τότε θα κατακαθίσουν στο χαμηλότερο μέρος της κλίνης και θα εμποδίσουν τη ροή του ρευστού, σταματώντας τη ρευστοποίηση. Ακόμα και αν δεν την σταματήσουν

τελείως, θα εμποδίσουν την ομοιόμορφη ρευστοποίηση της κλίνης οδηγώντας σε μείωση της απόδοσης της εγκατάστασης.

Τα ίδια σωματίδια μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα διάβρωσης στην κλίνη. Οι ρευστοποιημένες κλίνες αεριοποίησης έχουν ήδη πρόβλημα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, αλλά οι ευτηκτικές μορφές είναι ιδιαίτερα διαβρωτικές, ιδιαίτερα αν η θερμοκρασία ξεπεράσει το σημείο τήξης τους. Τα βιοκαύσιμα έχουν εξάλλου αρκετές μεταλλικές προσμίξεις οι οποίες αυξάνουν τη διαβρωτικότητα τέτοιων ουσιών. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο στο κάτω τμήμα της εγκατάστασης, εκεί όπου κατακάθονται αυτά τα συσσωματώματα.

Οριακές τιμές συγκεντρώσεων προσμίξεων για αέριο καύσιμο για χρήση σε ΜΕΚ [4]	
Σωματίδια (mg/Nm^3)	<50
Μέγεθος Σωματιδίων (μm)	<10
Πίσσες (mg/Nm^3)	<100
Αλκαλικά Μέταλλα (mg/Nm^3)	-

Το παραγόμενο αέριο δυστυχώς δεν είναι συνήθως ικανοποιητικής ποιότητας μόλις εξέρχεται από την κλίνη. Περιέχει σχεδόν πάντα μεγάλο ποσοστό στερεών σωματιδίων, τα οποία έχουν παρασυρθεί από τη ροή του ρευστού εκτός της κλίνης. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι από το υλικό της κλίνης, από την τέφρα η οποία έχει παραχθεί (ιπτάμενη τέφρα – fly ash) ή άκαυστο καύσιμο. Τα σωματίδια αυτά πρέπει οπωσδήποτε να απομακρυνθούν από το αέριο, γιατί αλλιώς η χρήση του θα γίνει αδύνατη. Για το λόγο αυτό μετά από την έξοδο από τον αντιδραστήρα ακολουθεί σύστημα καθαρισμού του αερίου.

Όπως βλέπουμε στον προηγούμενο και τον επόμενο πίνακα οι προδιαγραφές για τη χρήση αερίων καυσίμων στις μηχανές εσωτερικής καύσης και ειδικά στους αεριοστροβίλους είναι ιδιαίτερα υψηλές. Σπάνια μπορεί το καύσιμο το οποίο βγαίνει από τον αντιδραστήρα αεριοποίησης να ικανοποιήσει αυτές τις απαιτήσεις χωρίς να γίνει περαιτέρω επεξεργασία.

Τυπικές προδιαγραφές αερίων βιομάζας για χρήση σε αεριοστροβίλους [17]		
Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα (MJ/m3)		4-6
Ελάχιστο Ποσοστό Υδρογόνου (% κ.ο.)		10-20
Μέγιστη Συγκέντρωση Αλκαλίων (ppm)		20-1000
Μέγιστη Θερμοκρασία (oC)		450-600
Πίσσα		Σε μορφή ατμών
NH3		Χωρίς Περιορισμό
HCl (ppm)		<0,5
S (H2S+SO2) (ppm)		<1
Σύνολο Μετάλλων (ppm)		<1
Αλκαλικά Μέταλλα και Θείο		<0,1
Μέγιστη Συγκέντρωση Σωματιδίων (ppm)		
Διάμετρος Σωματιδίων	>20μm	<0,1
	10-20μm	<1
	4-10μm	<10

Η αεριοποίηση δεν είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πιέσεις χαμηλότερες της ατμοσφαιρικής (όχι πολύ χαμηλές) ή σε αυξημένες πιέσεις μέχρι και 20bar [4]. Η πίεση αλλάζει με τη βοήθεια συμπιεστή ο οποίος μεταβάλλει την πίεση του εισερχόμενου ρευστού στην κλίνη.

Τα παραγόμενα αέρια από αντιδραστήρα σε υψηλή πίεση μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για την παραγωγή ενέργειας χωρίς να απαιτείται συμπίεσή τους με κατανάλωση επιπλέον ενέργειας. Δεν χρειάζεται επίσης να ψυχθούν για να συμπιεστούν. Η σύνθεση και η ποιότητά τους εξάλλου παραμένουν η ίδια, ανεξάρτητα της πίεσης στην οποία έχουν αεριοποιηθεί καθώς επηρεάζονται κυρίως από τη θερμοκρασία. Μπορούμε επιπλέον για την ίδια εγκατάσταση να έχουμε αυξημένη παροχή εισόδου και κατά συνέπεια αυξημένη παραγωγή αερίου καυσίμου.

Η αυξημένη πίεση οδηγεί φυσικά σε πιο πολύπλοκη λειτουργία της εγκατάστασης. Η τροφοδοσία του καυσίμου δεν είναι τόσο εύκολη όσο στις ατμοσφαιρικές κλίνες κυρίως λόγω των προβλημάτων στεγανοποίησης τα οποία προκύπτουν. Επιπλέον το κόστος κατασκευής του αντιδραστήρα και των σωληνώσεων αυξάνεται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της διάβρωσης. Ταυτόχρονα αυξάνεται το κόστος εισαγωγής του οξειδωτικού μέσου στην κλίνη, καθώς ο συμπιεστής θα απαιτεί μεγαλύτερη ενέργεια.

Λόγω της πολυπλοκότητας αυτής επιλέχθηκε η εγκατάσταση να λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση. Σε παρόμοια πίεση επιλέξαμε να λειτουργεί και το κρύο

μοντέλο για να μείνει το κόστος και η πολυπλοκότητα κατασκευής σε χαμηλά επίπεδα και για να αποφευχθούν τα προαναφερόμενα προβλήματα στεγανότητας.

Οι αντιδραστήρες αυτοί μπορούν να χωριστούν ανάλογα με τη μορφή του αντιδραστήρα. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι οι οποίοι διαφέρουν στη χρήση των απαγόμενων σωματιδίων από το αέριο:

- *Αντιδραστήρας χωρίς επανακυκλοφορία*

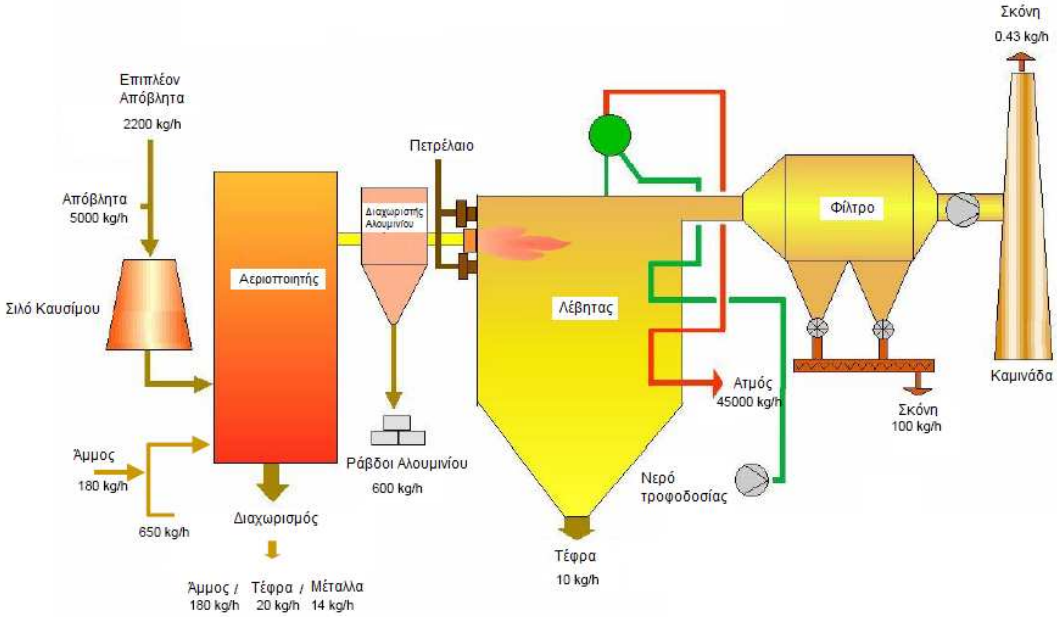
Ο αντιδραστήρας αυτός αποτελείται από ένα δοχείο στο οποίο λαμβάνει χώρα όλη η αντίδραση. Όταν το καύσιμο εισέλθει στον αντιδραστήρα λαμβάνει αρχικά χώρα ξήρανσή του, η οποία πραγματοποιείται ταχύτατα. Στη συνέχεια ακολουθεί η φάση της πυρόλυσης στην οποία παράγονται αέρια, στερεά υπολείμματα (char) και πίσσες (tar).

Όταν αυτά τα προϊόντα αρχίζουν να ρέουν τότε λαμβάνει χώρα η μερική οξείδωση. Η οξείδωση μπορεί να χωριστεί σε ετερογενείς αντιδράσεις (όπου παράγονται μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες και καθαρός άνθρακας) και σε ομοιογενείς αντιδράσεις (όπου εκτός των προηγούμενων παράγονται υδρογόνο και υδρογονάνθρακες μεγαλύτερης τάξης. Το παραγόμενο αέριο συνήθως περιέχει μικρές ποσότητες σκόνης οι οποίες μπορούν να καθαριστούν με ειδικές συσκευές, όπως κυκλώνες.

Οι ποσότητες αυτές στη συνέχεια απορρίπτονται για αυτό και ονομάζεται αντιδραστήρας χωρίς ανακυκλοφορία. Οι αντιδραστήρες αυτοί λειτουργούν συνήθως σε χαμηλότερες ταχύτητες ροής για να μειωθεί το ποσοστό των αερίων το οποίο παρασύρεται από το αέριο εκτός της κλίνης. Επιπλέον υλικό της κλίνης μπορεί να εισέρχεται μαζί με το καύσιμο για την αναπλήρωση των απωλειών.

Μέσα στον αντιδραστήρα υπάρχουν δύο φάσεις, η κύρια ρευστοποιημένη κλίνη, η οποία βρίσκεται στο κάτω τμήμα του δοχείου, στην οποία εισάγεται τόσο το καύσιμο όσο και ο αέρας και το τμήμα απεμπλοκής (freeboard). Στο τελευταίο τμήμα η ροή στερεών είναι πολύ αραιή καθώς τα περισσότερα επιστρέφουν λόγω της βαρύτητας στην κυρίως κλίνη.

Μια τέτοια εγκατάσταση είναι στο Varkaus στην κεντρική Φινλανδία, όπου το 2001 κατασκευάστηκε ένας αντιδραστήρας αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης [9]. Ο αντιδραστήρας χρησιμοποιεί ως καύσιμα αλουμίνιο και πλαστικά τα οποία περιέχουν απόβλητα και μπορεί να παράγει θερμική ισχύ 40MW. Το αλουμίνιο απομακρύνεται από το αέριο και χρησιμοποιείται εκ νέου στην παραγωγή ανακυκλωμένων προϊόντων, ενώ το αέριο καίγεται σε ένα ατμολέβητα.



Εικόνα 11-Σχεδιάγραμμα της εγκατάστασης αεριοποιητή αναβράζουσας κλίνης στο Varkaus [9]

- *Αντιδραστήρας με επανακυκλοφορία*

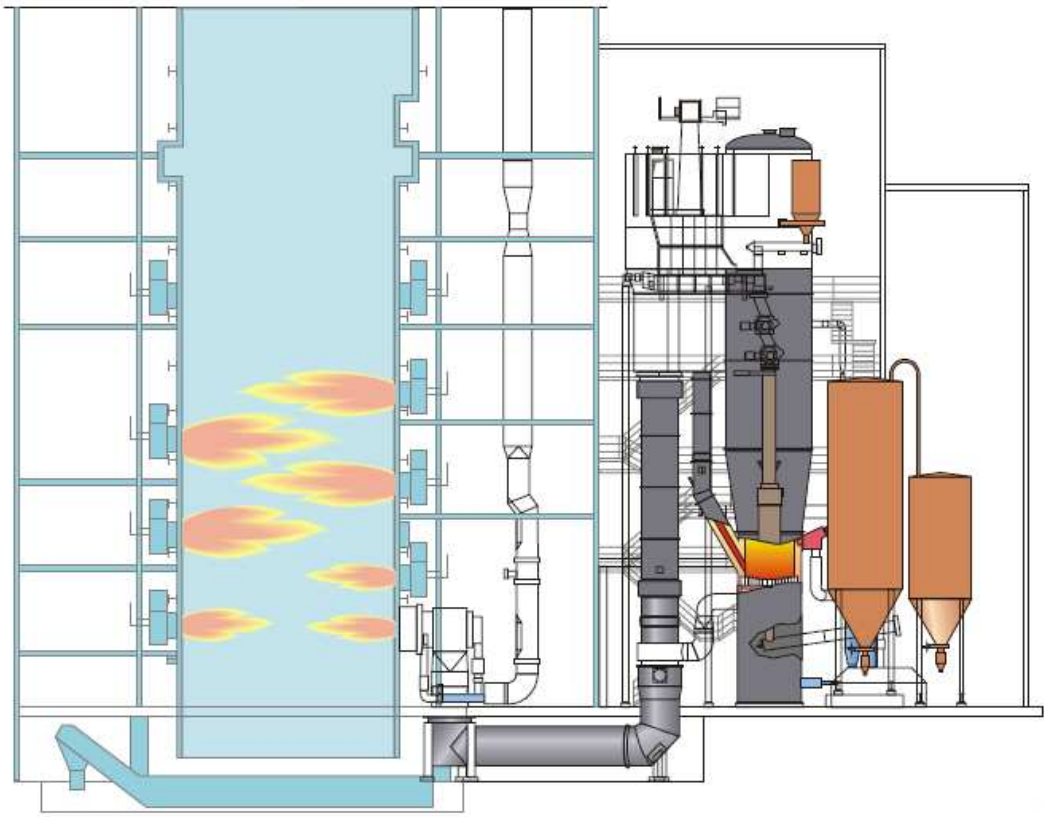
Οι ταχύτητες συνήθως σε αυτούς τους αντιδραστήρες είναι υψηλότερες με αποτέλεσμα να συμπαρασύρεται και να εξέρχεται από την κλίνη μαζί με το παραγόμενο αέριο μεγάλο τμήμα των στερεών σωματιδίων. Τα στερεά αυτά στη συνέχεια διαχωρίζονται από το παραγόμενο αέριο όπως και στους αντιδραστήρες χωρίς ανακυκλοφορία.

Η διαφορά με τον προηγούμενο αντιδραστήρα είναι ότι τα στερεά τα οποία διαχωρίζονται από το παραγόμενο αέριο δεν απορρίπτονται αλλά επιστρέφουν στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα. Αυτά τα στερεά περιέχουν κατά κύριο λόγο άνθρακα, ο οποίος καίγεται κατά τη ρευστοποίηση και παράγει την αναγκαία θερμότητα για τη διατήρηση του συστήματος. Η απόδοση έτσι της μετατροπής του καυσίμου σε αέριο αυξάνεται.

Κύριο σημείο προσοχής σε αυτόν τον αντιδραστήρα είναι η πίεση στην βαλβίδα επιστροφής της σκόνης, ώστε να γίνεται η επιστροφή κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο και να μην επηρεάζεται η διαδικασία της αεριοποίησης. Το σύστημα αυτό συχνά λειτουργεί σε πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής ώστε ο έλεγχος και η μεταβολή της πίεσης να γίνουν ευκολότερες.

Προφανώς δεν χρειάζεται παρά σε μεγάλα χρονικά διαστήματα ανανέωση του υλικού της κλίνης καθώς οι απώλειες είναι πολύ μικρές. Επιπλέον, οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου εξασφαλίζουν συνήθως καλύτερες αποδόσεις μετατροπής του άνθρακα σε αέριο. Μειονέκτημά τους βέβαια είναι η ανάγκη ρύθμισης και ελέγχου της ροής στη βαλβίδα καθώς και το μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης και εισαγωγής του αερίου με μεγαλύτερη ταχύτητα.

Μια εξαιρετικά μεγάλη εγκατάσταση αντιδραστήρα βιομάζας με ανακυκλοφορία έχει κατασκευαστεί στο Lahti της Φινλανδίας. Η εγκατάσταση είναι σε λειτουργία από το 1998 και λειτουργεί σε συνδυασμό με λέβητα γαιανθράκων. Η εγκατάσταση τροφοδοτείται με διάφορα στερεά βιοκαύσιμα, μερικά από τα οποία προέρχονται από απόβλητα, και έχει δυνατότητα παραγωγής 40 με 70MW ανάλογα με την υγρασία του εισερχόμενου καυσίμου (η οποία μπορεί να είναι ως και 60%) και τη θερμική του αξία [9].



Εικόνα 12-Εγκατάσταση αεριοποίησης ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία στο Lahti της Φινλανδίας [9]

- *Δίδυμοι αντιδραστήρες*

Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αερίου υψηλής θερμογόνου δύναμης, με χρήση ατμού και αέρα ως οξειδωτικού μέσου. Είναι μια παραλλαγή των αντιδραστήρων με ανακυκλοφορία αλλά τα στερεά αντί να επιστρέφουν στην αρχική κλίνη εισάγονται σε μία δεύτερη. Ο πρώτος αντιδραστήρας ονομάζεται αεριοποιητής (gasifier) και ο δεύτερος καυστήρας (combustor).

Το καύσιμο εισέρχεται στον αεριοποιητή, ο οποίος χρησιμοποιεί ατμό ως οξειδωτικό μέσο και λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες. Ο ατμός επιτρέπει την παραγωγή αερίου με υψηλή θερμογόνο ικανότητα. Τα στερεά σωματίδια και το αέριο που εξέρχονται οδηγούνται σε έναν κυκλώνα και διαχωρίζονται. Τα θερμά

στερεά τα οποία απάγονται από τον κυκλώνα οδηγούνται στον καυστήρα. Τμήμα του παραγόμενου αερίου μπορεί να επιστρέφει στον αεριοποιητή για να συντηρήσει τη διεργασία. Το παραγόμενο αυτό αέριο δεν περιέχει ατμοσφαιρικό άζωτο.

Ο καυστήρας χρησιμοποιεί αέρα ως οξειδωτικό μέσο, ενώ τα θερμά στερεά τα οποία έρχονται από τον κυκλώνα βοηθούν στη συντήρηση της υψηλής θερμοκρασίας. Συνήθως όμως έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον αεριοποιητή. Τα στερεά του αεριοποιητή έχουν υψηλό ποσοστό σε άνθρακα, ο οποίος αεριοποιείται, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Τμήμα των στερεών του απάγεται και οδηγείται στον αεριοποιητή, αφού πρώτα διαχωριστεί από την τέφρα ώστε ο αεριοποιητής να θερμαίνεται μέσω της θερμής άμμου (αδρανές υλικό).

Το κρύο μοντέλο, όπως και η εγκατάσταση στο Osnabrück, θα είναι αντιδραστήρες χωρίς ανακυκλοφορία. Αυτό γίνεται λόγω του συστήματος απαγωγής των στερεών ανθρακούχων υπολειμμάτων τα οποία θα έχουν. Τα συστήματα θα απάγουν εκτός από την τέφρα αναπόφευκτα και σημαντικό τμήμα του υλικού της κλίνης, το οποίο όμως δεν μπορεί να αποδοθεί αμέσως πίσω στην εγκατάσταση. Για το λόγο αυτό θα προσδίδεται επιπλέον υλικό μαζί με το καύσιμο, κάτι το οποίο εξαλείφει τον κυριότερο λόγο κατασκευής ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία.

6.4) Ανεπιθύμητες Προσμείξεις

Όπως αναφέρθηκε, το παραγόμενο αέριο από τη διαδικασία της αεριοποίησης δεν είναι, μόλις εξέρχεται από την εγκατάσταση, ιδιαίτερα καλής ποιότητας. Περιέχει διάφορες προσμίξεις, οι οποίες εμποδίζουν τη χρήση του σε μηχανές εσωτερικής καύσης και αεριοστρόβιλους, καθώς μπορεί να διαβρώσουν και να καταστρέψουν τις επιφάνειες με τις οποίες με τις οποίες έρχονται σε επαφή. Κάποιες από αυτές τις προσμίξεις, ιδιαίτερα αέριες ενώσεις είναι τοξικές και απειλή για το περιβάλλον.

Ταυτόχρονα, στην κλίνη παραμένουν υπολείμματα από την αεριοποίηση, τα οποία είναι πιθανόν τοξικά και τα οποία μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση της εγκατάστασης, ιδιαίτερα αν τηχθούν λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Ορισμένες από τις προσμίξεις του βιοκαυσίμου επίσης δεν είναι πτητικές και παραμένουν μαζί με τα υπολείμματα στον πυθμένα της κλίνης.

Οι κυριότερες προσμίξεις τις οποίες έχουν τα βιοκαύσιμα τα οποία χρησιμοποιούνται στην αεριοποίηση είναι:

- **Αέρια**

1. *Ενώσεις Αζώτου:* Τα βιοκαύσιμα δεν περιέχουν σχετικά μεγάλο ποσοστό αζώτου, αλλά υπάρχει πάντα η πιθανότητα παραγωγής μικρής ποσότητας αέριων ρυπαντών με αυτό. Κατά την αεριοποίηση αυτά τα μόρια του αζώτου μετατρέπονται σε ενώσεις όπως υδροκυάνιο (HCN) και αμμωνία (NH_3). Οι ενώσεις αυτές κατά την καύση του αερίου για την παραγωγή ενέργειας, οξειδώνονται και σχηματίζουν οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οποία είναι πολύ επικίνδυνοι αέριοι ρυπαντές.
2. *Ενώσεις Αλογόνων:* Αναφερόμαστε κυρίως στο χλώριο, το οποίο βρίσκεται στα προϊόντα της αεριοποίησης με τη μορφή υδροχλωρίου (HCl). Τα άλλα αλογόνα (βρώμιο, ιώδιο, φθόριο) βρίσκονται σε μικρότερες ποσότητες στα προϊόντα. Οι ενώσεις των αλογόνων έχουν όξινο χαρακτήρα και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες και διαβρωτικές αν το αέριο ψυχθεί λόγω του όξινου χαρακτήρα τους, ενώ είναι αέριοι ρυπαντές.
3. *Ενώσεις Θείου:* Τα βιοκαύσιμα έχουν συνήθως μικρότερη ποσότητα θείου από τα συμβατικά καύσιμα χαμηλής ποιότητας. Δεν είναι όμως τελείως ελεύθερα από αυτό. Το θείο εμφανίζεται μετά την αεριοποίηση κυρίως με τη μορφή υδρόθειου (H_2S) το οποίο κατά την καύση δημιουργεί οξείδια του θείου (κυρίως διοξείδιο, SO_2) τα οποία είναι τοξικοί αέριοι ρυπαντές.

- **Στερεά**

1. *Σωματίδια*: Τα στερεά σωματίδια τα οποία βρίσκονται στο αέριο αποτελούνται κυρίως από ιπτάμενη τέφρα (fly ash) και υλικό της κλίνης. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση των σωληνώσεων και των άλλων επιφανειών με τις οποίες έρχονται σε επαφή, ενώ σε μεγαλύτερες ποσότητες δημιουργούν επικαθίσεις, οι οποίες εμποδίζουν τη ροή. Οι επικαθίσεις είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες κατά την ψύξη του αερίου καθώς τα στερεά αυτά τείνουν να σχηματίζουν συσσσωματώματα. Μπορούν επίσης να καταστρέψουν τα πτερύγια των αεριοστρόβιλων στους οποίους χρησιμοποιείται το αέριο.

   Από τα σωματίδια αυτά πιο επικίνδυνη είναι η τέφρα, καθώς ορισμένες από τις μεγαλύτερες οργανικές ενώσεις από τις οποίες αποτελείται είναι πιθανόν τοξικές ενώ τα μικρότερα σωματίδια είναι επικίνδυνα για το αναπνευστικό μας σύστημα και προκαλούν ερεθισμό στα μάτια. Για το λόγο αυτό εξάλλου τα στερεά σωματίδια θεωρούνται ως ρυπαντής και υπάρχει όριο στην εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα.
2. *Αλκαλικά Μέταλλα:* Τα κυριότερα αλκαλικά μέταλλα τα οποία εμφανίζονται στα βιοκαύσιμα είναι το νάτριο και το κάλιο, μέταλλα τα οποία υπάρχουν σε αρκετά μεγάλο ποσοστό και στους ζωντανούς οργανισμούς. Τα μέταλλα αυτά είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά, ιδιαίτερα αν συμμετέχουν σε πτητικές ενώσεις και σε υψηλή θερμοκρασία.

3. *Βαρέα Μέταλλα*: Βιοκαύσιμα τα οποία προέρχονται από απορρίματα (κυρίως αστικά) έχουν ένα μικρό ποσοστό βαρέων μετάλλων. Τα μέταλλα αυτά δεν είναι πτητικά και παραμένουν μετά την καύση στον πυθμένα της κλίνης. Είναι όμως έντονα διαβρωτικά, ειδικά στις υψηλές θερμοκρασίες της κλίνης και τοξικά για τον άνθρωπο. Συνήθως βέβαια απομακρύνονται κατά την επεξεργασία του καυσίμου.
4. *Πίσσα*: Η πίσσα (συμπυκνώσιμοι υδρογονάνθρακες) είναι ένα πολύπλοκο μείγμα οξυγονούχων ενώσεων, οι οποίες παράγονται κυρίως κατά το πρώτο στάδιο της αεριοποίησης, την πυρόλυση. Η πίσσα προκαλεί κυρίως προβλήματα διάβρωσης στον αντιδραστήρα, ιδιαίτερα αν ψυχθεί. Ταυτόχρονα, είναι και η μόνη από τις προσμείξεις που μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα στη ρευστοποίηση, εμποδίζοντας τη ροή του αέρα. Τα περισσότερα βιοκαύσιμα περιέχουν επίσης μεγάλο ποσοστό τέφρας η οποία ευνοεί το σχηματισμό πίσσας.

6.4.1) Πίσσες

Το πρόβλημα της πίσσας είναι το μεγαλύτερο για την ανεμπόδιστη λειτουργία των ρευστοποιημένων κλινών και έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τον περιορισμό του. Η αεριοποίηση του Stabilat αναμένεται να δώσει μια αρκετά μεγάλη ποσότητα τέφρας (το Stabilat περιέχει περίπου 20% κ.β τέφρα) και ο σκοπός λειτουργίας του κρύου μοντέλου ήταν η μελέτη και ο έλεγχος των απαραίτητων μέτρων για την απομάκρυνσή της χωρίς να διακοπεί η λειτουργία του αντιδραστήρα.

Γενικά πίσσα θεωρούνται οι οργανικές ενώσεις με μοριακό βάρος μεγαλύτερο του βενζολίου ($MB_{βενζ}$=78) [4]. Η χημική τους σύσταση είναι πολύπλοκη και εξαρτάται από τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης της εγκατάστασης, αλλά και από το είδος του καυσίμου και του οξειδωτικού μέσου. Εξαρτάται επίσης από το χρόνο παραμονής των υπολειμμάτων και του καυσίμου στην εγκατάσταση.

Οι Natarajan et al. [18] αναφέρουν πως η ποσότητα της πίσσας η οποία εξερχόταν από τον αντιδραστήρα το οποίο κατασκεύασαν με καύσιμο κελύφη ρυζιού, μειώθηκε δραστικά από 6000mg/Nm^3 σε 800mg/Nm^3 όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε από τους 750°C στους 940°C. Αποτελούνταν από υδρογονάνθρακες υψηλού μοριακού βάρους οι οποίοι κατά πάσα πιθανότητα θα καίγονταν αν το αέριο θα χρησιμοποιούνταν για παραγωγή θερμότητας. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι λοιπόν ανασταλτικός παράγοντας στον σχηματισμό τους.

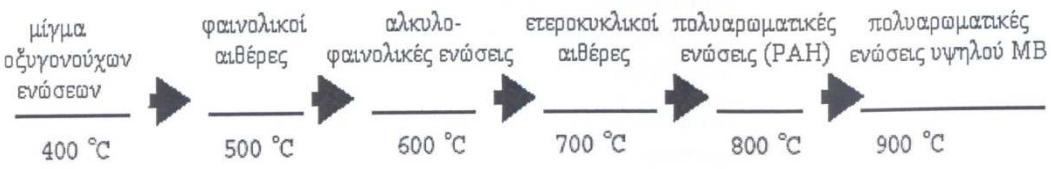
Συνήθως έχουν μεγαλύτερο μέγεθος από τα υπόλοιπα σωματίδια στην κλίνη και η ρευστοποίησή τους είναι πιο δύσκολη. Αν η ταχύτητα είναι αρκετά χαμηλή τότε αρχίζουν να κατακάθονται στον διασκορπιστή εμποδίζοντας τη ρευστοποίηση.

Ακόμα και αν ρευστοποιούνται, η παρουσία τους αλλάζει το μέγεθος και τη μέση πυκνότητα των στερεών μεταβάλλοντας τις ιδιότητες της κλίνης.

Ταυτόχρονα έχουν χαμηλό σημείο τήξης και με τις υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες επικρατούν στην κλίνη είναι δυνατό να υγροποιηθούν. Με την υγροποίηση δημιουργούν μια κολλώδη ουσία, έντονα διαβρωτική, η οποία είναι συνήθως υπεύθυνη για την απόφραξη του διασκορπιστή. Στην κατάσταση αυτή τα σωματίδια της τέφρας μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους ή με το υλικό της κλίνης και να δημιουργήσουν ακόμα μεγαλύτερα σωματίδια, εντείνοντας το πρόβλημα.

Οι πίσσες οι οποίες διαφεύγουν από τον αντιδραστήρα μαζί με το παραγόμενο αέριο μπορούν να φράξουν ή να διαβρώσουν τις σωληνώσεις ή τις συσκευές οι οποίες ακολουθούν καθώς συμπυκνώνονται στις πιο ψυχρές επιφάνειες που βρίσκονται εκεί. Ιδιαίτερα σε αεριοστρόβιλους, η ψύξη του αερίου η οποία προηγείται πριν από την χρήση του οδηγεί σε δημιουργία συσσωματωμάτων, τα οποία καταστρέφουν τα πτερύγια του στροβίλου.

Οι πίσσες παράγονται κυρίως κατά το πρώτο στάδιο της διεργασίας της αεριοποίησης, της πυρόλυσης της βιομάζας. Η βιομάζα διασπάται, αφυδατώνεται λόγω της έντονης θέρμανσης και αρχίζει να περνά στην αέρια φάση. Οι ενώσεις της βιομάζας στη συνέχεια αρχίζουν να σχηματίζουν το καύσιμο αέριο και τις πρώτες οργανικές ενώσεις οι οποίες μετά από μια σειρά αντιδράσεων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα θα αποτελέσουν τις πίσσες.



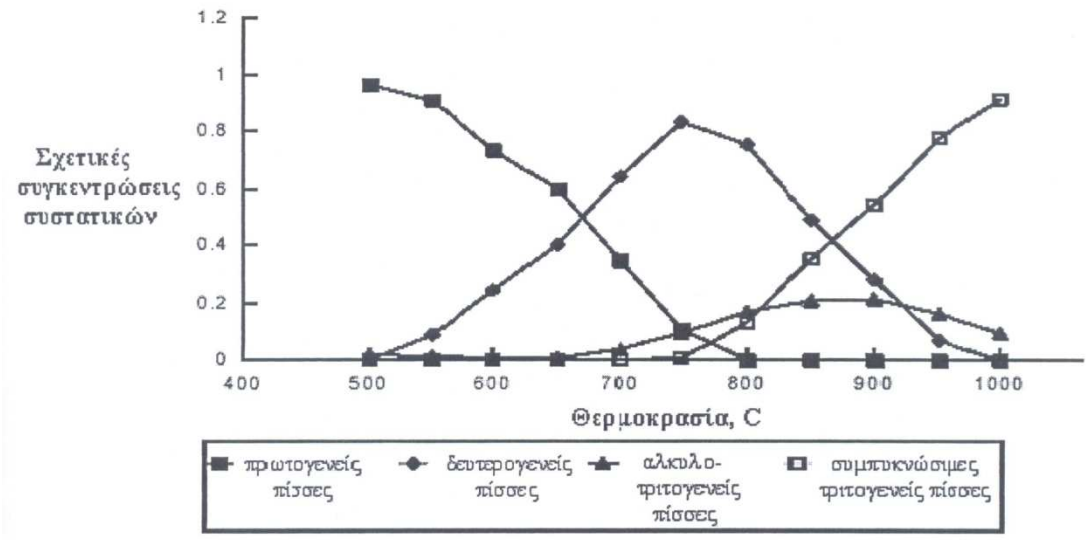
Εικόνα 13-Αλυσίδα Δημιουργίας Πισσών [4]

Οι Evans και Milne πρότειναν την κατανομή των πισσών σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες [19], οι οποίες είναι κατανεμημένες ανάλογα με τη χρονική σειρά εμφάνισής τους στην κλίνη και το σημείο στο οποίο εμφανίζουν μέγιστη συγκέντρωση:

1. *Πρωτογενείς*: Αποτελούνται από απλά οργανικά μόρια τα οποία προέρχονται από τη θερμική διάσπαση των οργανικών ενώσεων της βιομάζας (γλυκοζαμίνη, υδροξυ-ακεταλδεΰδη, φουρφουράλες, μεθοξυ-φαινόλες). Έχουν την υψηλότερη συγκέντρωση στην αρχή της αντίδρασης αλλά έχουν εξαφανιστεί εντελώς ως το μέσο της, δημιουργώντας μεγαλύτερες ενώσεις.
2. *Δευτερογενείς*: Ονομάζονται και φαινολικές και είναι κυρίως αλκοόλες στις οποίες η ομάδα υδροξυλίου είναι απευθείας συνδεδεμένη με

αρωματικό δακτύλιο (βενζόλιο) ή υδρογονάνθρακες με διπλούς δεσμούς. Εμφανίζουν τη μέγιστη συγκέντρωση στο μέσο της αντίδρασης, αλλά τόσο στην αρχή όσο και το τέλος της ανρίδρασης έχουν πρακτικά μηδενική συγκέντρωση.

3. *Τριτογενείς*: Οι τριτογενείς πίσσες οι οποίες αρχίζουν να εμφανίζονται μετά τον μηδενισμό της συγκέντρωσης των πρωτογενών πισσών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:
   a. *Αλκυλο-τριτογενή προϊόντα:* περιλαμβάνουν τα κυριότερα παράγωγα των αρωματικών όπως μεθυλοναφθαλένιο, τολουένιο και ινδένιο. Εμφανίζονται περίπου στη μέση της αντίδρασης, αλλά η συγκέντρωσή τους δεν είναι ποτέ μεγαλύτερη από 20-25% και στο τέλος είναι χαμηλότερη από 10%.
   b. *Συμπυκνωμένα τριτογενή προϊόντα:* Πρόκειται για τις ενώσεις οι οποίες αποτελούν κατά κύριο λόγο τις πίσσες της αεριοποίησης και αποτελούνται από πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες χωρίς υποκαταστάτες (βενζόλιο, ναφθαλένιο, ανθρακένιο, φαινανθρένιο, πυρένιο). Εμφανίζονται στο δεύτερο μισό της αντίδρασης και έχουν συγκέντρωση περίπου 90% προς το τέλος της αντίδρασης.



Εικόνα 14-Κατανομή της συγκέντρωσης των κατηγοριών πισσών συναρτήσει της θερμοκρασίας [19]

7) Ρευστοποίηση

Ρευστοποίηση (fluidization) είναι η διαδικασία μέσω της οποίας στερεά σωματίδια αποκτούν μια κατάσταση παρόμοια με ρευστού λόγω αιώρησης σε ένα υγρό ή αέριο. Το είδος της ρευστοποίησης η οποία προκύπτει εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του αέρα, αλλά και από το είδος του αδρανούς υλικού και του καυσίμου. Τα δοχεία στα οποία γίνεται ρευστοποίηση λέγονται *ρευστοποιημένες κλίνες* (fluidized beds).

Η ρευστοποιημένη κλίνη δεν χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την αεριοποίηση ή για καύσιμα βιομάζας. Υπάρχουν αρκετές εγκαταστάσεις οι οποίες χρησιμοποιούν την ρευστοποιημένη κλίνη για να πραγματοποιήσουν καύση συμβατικών καυσίμων (γαιάνθρακες). Η εγκατάσταση την οποία μελετούμε και το κρύο μοντέλο όμως είναι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης αεριοποίησης.

Η ρευστοποίηση χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα ροής του εισερχόμενου ρευστού. Οι ιδιότητες του ρευστοποιημένου ρευστού αλλάζουν ανάλογα με το μέγεθος αυτό. Αν η ταχύτητα του στερεού δεν είναι αρκετά υψηλή τότε η κλίνη δεν θα είναι ρευστοποιημένη, αλλά θα βρίσκεται σε ένα εισαγωγικό στάδιο.

Αν ένα ρευστό κινείται ανοδικά σε μια κλίνη αποτελούμενη από λεπτόκοκκα αδρανή υλικά με χαμηλή ταχύτητα ροής, το ρευστό απλώς διαπερνά από τους κενούς χώρους ανάμεσα στα ακίνητα σωματίδια. Αυτή είναι μια *σταθερή κλίνη* (fixed bed). Με αύξηση της ταχύτητας τα σωματίδια διαχωρίζονται και μερικά ταλαντώνονται και εκτελούν περιορισμένες κινήσεις. Αυτό οδηγεί σε μια αύξηση του μήκους της κλίνης η οποία ονομάζεται *διεσταλμένη κλίνη* (expanded bed).

Η σταθερή κλίνη χρησιμοποιείται μόνο για πολύ αργούς καταλύτες ή καταλύτες στους οποίους η διεργασία δεν μπορεί να διακοπεί. Δεν είναι κατάλληλη για συνεχείς διεργασίες, καθώς το παραγόμενο αέριο δεν έχει σταθερή σύσταση. Αν η θερμοκρασία αντίδρασης είναι υψηλή προκύπτουν μεγάλες αυξομειώσεις θερμοκρασίας, οι οποίες περιορίζουν το μέγεθος της κλίνης.

Τα σωματίδια τα οποία χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν αρκετά μεγάλο μέγεθος (επομένως δεν υπάρχουν προβλήματα με την πτώση πίεσης) και να έχουν ομοιομορφία. Με κακό έλεγχο της θερμοκρασίας είναι πιθανό να τηχθούν και να φράξουν τον αντιδραστήρα. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι μικρός και η επιφάνεια συναλλαγής πρέπει να είναι μεγαλύτερη όσο το μέγεθος της εγκατάστασης αυξάνει. Είναι δυνατή πάντως με προσεκτικό έλεγχο της ροής και της θερμοκρασίας ολική μετατροπή του καυσίμου.

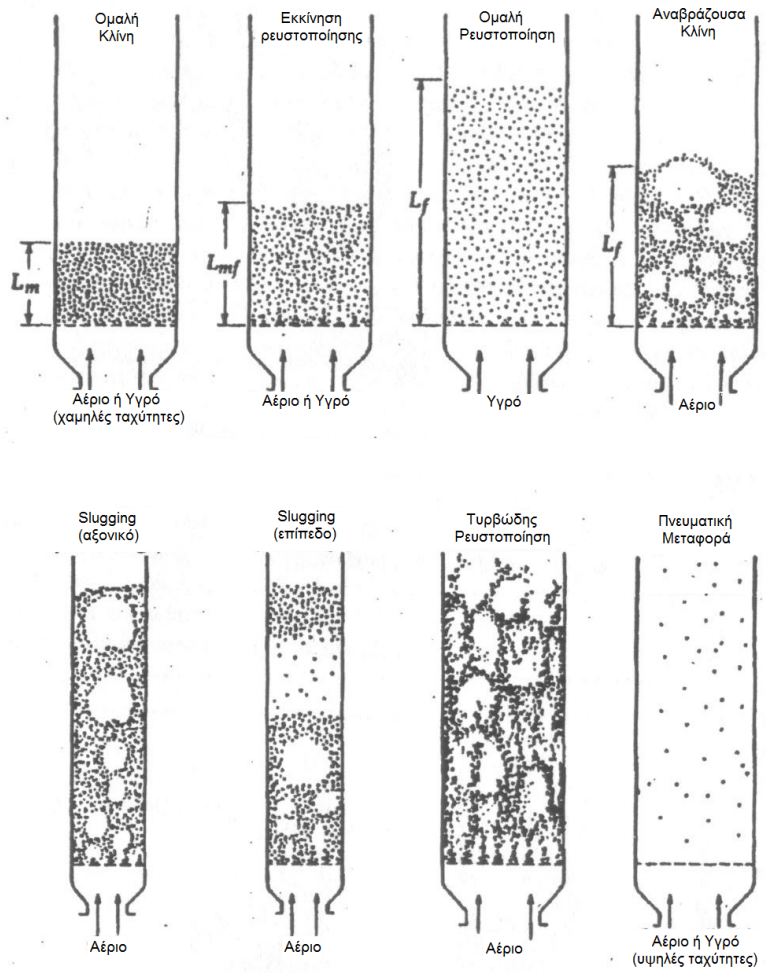
Καθώς η ταχύτητα ροής αυξάνεται, φτάνει σε ένα σημείο όπου όλα τα σωματίδια αιωρούνται από το κινούμενο προς τα πάνω ρευστό. Σε αυτό το σημείο η δύναμη της τριβής ανάμεσα στο ρευστό και το στερεό ισούται με το βάρος του σωματιδίου, η κάθετη συνιστώσα της δύναμης ανάμεσα στα γειτονικά σωματίδια

μηδενίζεται και η πτώση πίεσης σε κάθε τμήμα της κλίνης ισούται περίπου με το βάρος του ρευστού και των σωματιδίων σε αυτό το τμήμα.

Η κλίνη θεωρείται ότι έχει μόλις ρευστοποιηθεί και αναφέρεται ως *κλίνη σε ελάχιστη ρευστοποίηση* (bed at minimum fluidization). Οποιαδήποτε ταχύτητα ροής μεγαλύτερη από την ταχύτητα αυτή (ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης, minimum fluidization velocity) οδηγεί σε μια ρευστοποιημένη κλίνη.

7.1) Είδη ρευστοποιημένων κλινών

Σε υγρά-στερεά συστήματα, μια αύξηση στην ταχύτητα ροής πάνω από την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης καταλήγει συνήθως σε μια ομαλή, σταδιακή επέκταση της κλίνης. Οι αστάθειες της ροής αμβλύνονται και παραμένουν μικρές, ενώ η ετερογένεια ή κενά μεγάλης κλίμακας στο υγρό δεν εμφανίζεται σε φυσιολογικές καταστάσεις. Μια τέτοια κλίνη ονομάζεται *ομογενώς ή ομαλώς ρευστοποιημένη* (homogeneously or smoothly fluidized bed). Σε αέρια-στερεά συστήματα τέτοιες κλίνες μπορούν να παρατηρηθούν μόνο σε ειδικές περιπτώσεις: σε λεπτόκοκκα ελαφρά σωματίδια με πυκνό αέριο σε υψηλή πίεση.



Εικόνα 15-Είδη Ρευστοποιημένων Κλινών [20]

Τα συστήματα αερίου συμπεριφέρονται γενικά αρκετά διαφορετικά. Αν στην κατάσταση ελάχιστης ρευστοποίησης η ταχύτητα ροής αυξηθεί, εμφανίζονται μεγάλες αστάθειες με φυσαλίδες από όπου διοχετεύεται ο κύριος όγκος του αερίου. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες, ο αναβρασμός γίνεται πιο βίαιος και η κίνηση των ρευστών πιο έντονη. Επιπλέον ο όγκος της κλίνης δεν αυξάνεται ιδιαίτερα σε σχέση με τον όγκο στην ελάχιστη ρευστοποίηση. Μια τέτοια κλίνη ονομάζεται *ρευστοποιημένη αναβράζουσα κλίνη* (bubbling fluidized bed). Σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις συστήματα υγρού-στερεού συμπεριφέρονται ως τέτοιες κλίνες, αλλά αυτό συμβαίνει μόνο με πολύ πυκνά στερεά ρευστοποιημένα από υγρά χαμηλής πυκνότητας, όσο το δυνατόν εγγύτερα στην κατάσταση του αερίου.

Η ταχύτητα στην οποία εμφανίζονται για πρώτη φορά οι φυσαλίδες αναφέρεται ως ελάχιστη ταχύτητα αναβρασμού (minimum bubbling velocity, u_{mb}). Σε συστήματα υγρού-στερεού η ταχύτητα αυτή δεν έχει κανένα νόημα καθώς η ρευστοποίηση είναι συνήθως ομαλή σε όλο το εύρος των ταχυτήτων. Από την άλλη πλευρά σε συστήματα αερίου-στερεού, όπου το στερεό αποτελείται από μεγάλα σωματίδια, η ταχύτητα αυτή συμπίπτει σχεδόν με την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης.

Οι κλίνες αυτές έχουν συνήθως δύο ζώνες: την *πυκνή φάση* (dense bed) στο κάτω μέρος της κλίνης, κοντά στην είσοδο του ρευστού. Αυτή η φάση έχει συνήθως μια ξεκάθαρη επιφάνεια η οποία τη διαχωρίζει από μια *αραιή φάση* (lean or dispersed phase) η οποία βρίσκεται στο άνω μέρος της κλίνης. Στην αραιή φάση βρίσκονται πολύ λιγότερα στερεά σωματίδια από την πυκνή και η πυκνότητά τους μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την πυκνή φάση.

Και οι ρευστοποιημένες κλίνες υγρού-στερεού και οι κλίνες αερίου-στερεού θεωρούνται ότι είναι ρευστοποιημένες κλίνες πυκνής φάσης όσο υπάρχει ένα σαφώς ορισμένο άνω όριο ή επιφάνεια στην πυκνή φάση, πάνω από το οποίο η κλίνη γίνεται εξαιρετικά αραιή. Αυτό γενικά ισχύει για τις πιο πάνω περιπτώσεις (λιγότερο για την αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη), αλλά δεν ισχύει αν η ταχύτητα αυξηθεί.

Η περιοχή η οποία βρίσκεται ανάμεσα στην επιφάνεια της πυκνής φάσης και την έξοδο του αερίου προϊόντος ονομάζεται *περιοχή απεμπλοκής* (freeboard). Η περιοχή αυτή καταλαμβάνει συνήθως το μεγαλύτερο μέρος του δοχείου στο οποίο γίνεται η ρευστοποίηση. Το αέριο (καθώς αυτή η περιοχή παρουσιάζεται μόνο σε συστήματα αερίου-στερεού) παρασύρει τα σωματίδια στην περιοχή αυτή και αν η δύναμη την οποία τους ασκεί (η οποία συνεχώς μειώνεται) υπερνικήσει τη βαρύτητα, τότε τα σωματίδια εξέρχονται της κλίνης.

Τα σωματίδια παρασύρονται πιο εύκολα καθώς η ταχύτητα του αερίου αυξάνει. Καθώς όμως η ταχύτητα αυτή αυξάνεται σε ένα αέριο-στερεό σύστημα, αυξάνεται και το μέγεθος των φυσαλίδων. Σε μια ψηλή κλίνη με μικρή διάμετρο μπορεί να μεγαλώσουν τόσο ώστε να καλύπτουν ολόκληρη τη διάμετρο του αντιδραστήρα. Στην περίπτωση λεπτόκοκκων σωματιδίων αυτά ρέουν ομαλά προς

τα κάτω γύρω από το κενό αέρος το οποίο υψώνεται. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται *slugging* με *αξονικά* slugs (axial slugs).

Τα χονδρόκοκκα υλικά αντίθετα, δεν ρέουν από τα πλάγια αλλά παρασύρονται προς τα πάνω από το slug, σαν αυτό να ήταν ένα πιστόνι. Τα βαρύτερα σωματίδια όμως αρχίζουν να πέφτουν από το slug καθώς η δύναμη που τους ασκεί το αέριο δεν είναι αρκετή για να τα συγκρατήσει. Όλο και περισσότερα σωματίδια το διαπερνούν και στο τέλος το διαλύουν. Τότε δημιουργείται πιο κάτω στον αντιδραστήρα ένα νέο slug και η κατάσταση επαναλαμβάνεται. Αυτό ονομάζεται ένα *επίπεδο* slug (flat slug).

Αν η ταχύτητα του αερίου αυξηθεί περαιτέρω η ροή γίνεται τελείως ακανόνιστη και έχουμε μια *τυρβώδη ρευστοποιημένη κλίνη* (turbulent fluidized bed). Στη φάση αυτή δεν δημιουργούνται ξεκάθαρες φυσαλίδες αερίου, αντίθετα το αέριο σχηματίζει ακανόνιστα κενά ανάμεσα στα σωματίδια τα οποία μεταβάλλονται διαρκώς. Σε μια τυρβώδη κλίνη η ταχύτητα του αερίου είναι αρκετά μεγάλη για να παρασύρει τα αδρανή υλικά εκτός του αντιδραστήρα.

Το όριο ανάμεσα στην πυκνή και την αραιή φάση δεν είναι σαφώς καθορισμένο σε μια τυρβώδη κλίνη, αλλά ακόμα διακρίνονται οι δύο αυτές φάσεις. Το αέριο σπρώχνει το στερεό με τέτοια ταχύτητα ώστε σωματίδια εκσφενδονίζονται σε πολύ μεγαλύτερο ύψος από την αναβράζουσα κλίνη. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε τυχαία χρονικά διαστήματα και είναι οι αναταραχές οι οποίες δημιουργούνται που κάνουν την επιφάνεια της πυκνής φάσης δύσκολο να διαχωριστεί.

Η αναβράζουσα κλίνη και η τυρβώδης κλίνη μπορούν να χρησιμοποιηθούν περίπου στις ίδιες διαδικασίες. Χρησιμοποιούνται συνήθως με κοκκώδεις καταλύτες ή καταλύτες σε σκόνη. Η θερμοκρασία είναι περίπου σταθερή στο μεγαλύτερο τμήμα του αντιδραστήρα και αυτό επιτρέπει τη χρήση τους σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

Οι κλίνες αυτές μπορούν να λειτουργήσουν ακόμα και αν η διεργασία σταματάει εύκολα, για παράδειγμα με πτώση της θερμοκρασίας. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν υλικά τα οποία έχουν διάφορα μεγέθη κόκκων αλλά είναι πιο αποτελεσματικές με λεπτόκοκκα υλικά. Η θερμοκρασία μπορεί να ρυθμιστεί με έλεγχο της εισαγωγής και της αφαίρεσης στερεών.

Οι θερμοκρασίες όμως τις οποίες απαιτούν οι περισσότερες διεργασίες αεριοποίησης για να πραγματοποιηθούν με ικανοποιητική απόδοση είναι πολύ υψηλές, συνήθως μεγαλύτερες των 700°C. Αυτό οδηγεί συνήθως σε δύσκολη και χρονοβόρα εκκίνηση των μονάδων, η οποία μπορεί να διαρκεί δύο και τρεις ώρες, καθώς η υψηλή αυτή θερμοκρασία δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στα υλικά της κλίνης.

Λόγω όμως της χρήσης λεπτόκοκκων στερεών και της υψηλής θερμοκρασίας, είναι πιθανή η διάβρωση του δοχείου και των σωληνώσεων. Η διάμετρος των σωματιδίων μπορεί επίσης να αλλάξει λόγω της μεταξύ τους τριβής

και της συμπαράσυρσής τους από το αέριο. Επίσης, σε βαθιές κλίνες, η πτώση πίεσης είναι σημαντική οδηγώντας σε σημαντική κατανάλωση ενέργειας.

Η μεταφορά θερμότητας είναι ικανοποιητική και η ανακυκλοφορία μπορεί να εξαφανίσει τα προβλήματα θέρμανσης σε μεγάλες εγκαταστάσεις. Είναι δυνατή η κατασκευή εγκαταστάσεων συνεχούς λειτουργίας με αυτές τις κλίνες και το προϊόν το οποίο παράγεται έχει ομοιόμορφη ποιότητα. Ο βαθμός απόδοσης της μετατροπής όμως είναι χαμηλότερος από άλλες κλίνες και είναι απαραίτητο για υψηλό βαθμό απόδοσης η αεριοποίηση να γίνει σε περισσότερα στάδια.

Το κρύο μοντέλο και η εγκατάσταση στο Osnabrück ανήκουν στην κατηγορία της αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης. Ο τύπος αυτός της κλίνης επιλέχθηκε λόγω της καλής διεπαφής την οποία προσφέρει μεταξύ καυσίμου και στερεού. Επιπλέον , επειδή η εγκατάσταση θα λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση η εφαρμογή μεγαλύτερων ταχυτήτων στην κλίνη θα ήταν δυσκολότερη.

Ταυτόχρονα, η εγκατάσταση σχεδιάστηκε για την εύρεση και έλεγχο της αποτελεσματικότητας διάφορων μεθόδων αφαίρεσης της τέφρας, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε χαμηλές ταχύτητες, καθώς προϋποθέτουν την αφαίρεση των επικαθίσεων της πίσσας από την κλίνη μέσω του διασκορπιστή. Πρέπει λοιπόν να αποφευχθεί η απομάκρυνση της τέφρας από την κλίνη διαμέσου του αερίου.

Το αέριο εξάλλου αμέσως μετά την έξοδό του θα υποβληθεί σε ψύξη (στην πραγματική εγκατάσταση). Είναι σημαντικό λοιπόν να μην παρασύρονται άκαυστα υπολείμματα τα οποία θα συμπυκνωθούν στο σημείο αυτό και θα διαβρώσουν τον εναλλάκτη, αρχικά μειώνοντας την απόδοσή του και στη συνέχεια καταστρέφοντάς τον.

Αν η ταχύτητα της ροής αυξηθεί περαιτέρω τότε έχουμε την *κλίνη ταχείας ρευστοποίησης* (fast fluidized bed). Εδώ, το μεγαλύτερο μέρος των στερεών σωματιδίων παρασύρεται από το αέριο και για τον καθαρισμό του προϊόντος από τα στερεά απαιτούνται κυκλώνες και άλλες συσκευές συγκράτησης σωματιδίων υψηλής απόδοσης.

Με περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας έχουμε *πνευματική μεταφορά* (pneumatic transport). Η κλίνη γίνεται τότε τόσο αραιή ώστε το στερεό χάνει σχεδόν την υγρή του φάση και καθώς τα σωματίδια κινούνται με υπερβολικά μεγάλη ταχύτητα σχεδόν δεν διακρίνονται στην κλίνη. Οι περισσότερες από τις ιδιότητες του υγρού τις οποίες είχε ως τώρα η κλίνη χάνονται και αρχίζε το υλικό να συμπεριφέρεται ως αέριο.

Οι κλίνες αυτές είναι κατάλληλες για ταχείες αντιδράσεις, στις οποίες χρησιμοποιούνται λεπτόκοκκοι καταλύτες και σωματίδια. Λόγω της παράσυρσης των στερεών είναι απαραίτητη η χρήση ανακυκλοφορίας. Είναι σημαντικός για την ικανοποιητική απόδοση της εγκατάστασης ο έλεγχος του μεγέθους των σωματιδίων και της τριβής μεταξύ τους.

Λόγω όμως των μεγάλων ταχυτήτων που εφαρμόζονται η διάβρωση των σωληνώσεων και του αντιδραστήρα είναι σημαντική. Η πτώση πίεσης βέβαια είναι μικρή για τα λεπτόκοκκα σωματίδια αλλά αυξάνεται όσο το μέγεθος των σωματιδίων αυξάνεται. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι μεγαλύτερος από την κινούμενη κλίνη αλλά μικρότερος από την κλίνη με τις φυσαλίδες.

7.3) Παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στη ρευστοποίηση

Οι ρευστοποιημένες κλίνες δεν είναι απαραίτητο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, να λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση. Η λειτουργία σε υψηλή πίεση προσφέρει εξάλλου ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως μεγαλύτερη παροχή οξειδωτικού μέσου και κατά συνέπεια παραγόμενου αερίου και διευκόλυνση αύξησης της θερμοκρασίας. Είναι ευκολότερη επίσης η εφαρμογή υψηλότερων ταχυτήτων στην κλίνη.

Εκτός από την πίεση στην οποία λειτουργεί η εγκατάσταση μας ενδιαφέρει και η πτώση πίεσης μέσα σε αυτή. Μέσω της πτώσης πίεσης μπορούμε να βρούμε σημαντικά μεγέθη της κλίνης, όπως τις διάφορες ταχύτητες στο εσωτερικό της και να προβλέψουμε τη συμπεριφορά του αερίου, του καυσίμου, του οξειδωτικού μέσου και του υλικού της κλίνης.

Σε μεσαίου μεγέθους σωματίδια (κατηγορίας Geldart B) η πτώση πίεσης στην σταθερή κλίνη αυξάνεται ανάλογα με την ταχύτητα του ρευστού [20]. Η ανοδική πορεία σταματάει όταν η πτώση αυτή είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από τη στατική πίεση της κλίνης. Με μια περαιτέρω αύξηση στην ταχύτητα του ρευστού η κλίνη ρευστοποιείται.

Με τη ρευστοποίηση της κλίνης, η πτώση πίεσης μειώνεται σε σχέση με τη στατική πίεση της κλίνης. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες ρευστού, η κλίνη διαστέλλεται και εμφανίζονται φυσαλίδες, οδηγώντας σε ανομοιογένεια της κλίνης. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο ότι το υλικό το οποίο έχει ρευστοποιηθεί αποκτά, τουλάχιστον στο πυκνό τμήμα της κλίνης, συμπεριφορά υγρού και τα υγρά είναι περίπου ασυμπίεστα.

Εξάλλου, αν εισάγουμε αέριο στον πυθμένα μιας δεξαμενής το οποίο περιέχει υγρό χαμηλού ιξώδους, όπως τα περισσότερα ρευστοποιημένα στερεά, βρίσκουμε πως η πίεση η οποία απαιτείται για την εισαγωγή αυτή είναι περίπου ίση με τη στατική πίεση του ρευστού και είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας και της παροχής του ρευστού.

Αν το ρευστό το οποίο χρησιμοποιούμε στην κλίνη έχει μια ευρεία κατανομή μεγέθους σωματιδίων τότε, τα μικρότερα σωματίδια έχουν την τάση να κινούνται ανάμεσα στα μεγαλύτερα σωματίδια και να έχουν ρευστοποιηθεί ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια παραμένουν ακόμα ακίνητα. Η πτώση πίεσης τότε, είναι ανάμεσα στην πτώση πριν από την είσοδο του ρευστού και την μέγιστη πτώση που εμφανίζεται ακριβώς πριν από τη ρευστοποίηση.

Αυξάνοντας την ταχύτητα ροής του ρευστού, το στερεό τελικά θα ρευστοποιηθεί πλήρως. Σε στερεά με σωματίδια ιδιαίτερα μεγάλου μεγέθους (>1mm) η καμπύλη αύξησης της πίεσης παρουσιάζει μια υστέρηση σε σχέση με την καμπύλη στερεών ενός μεγέθους. Η υστέρηση αυτή οφείλεται σε κατακάθισμα και διαχωρισμό των σωματιδίων. Η υστέρηση όμως αυτή εκμηδενίζεται αν το στερεό περιέχει ταυτόχρονα και ένα μεγάλο αριθμό λεπτόκοκκων σωματιδίων.

Με την αύξηση της πίεσης σε κλίνες έχει διαπιστωθεί [21-22] πως σε κλίνες με πορώδη άνθρακα σε σκόνη, στερεά υπολείμματα τέφρας, κάρβουνο και σφαίρες γυαλιού ίδιας διαμέτρου ισχύουν τα εξής:

- Η ελάχιστη κενότητα ρευστοποίησης αυξάνεται ελαφρά (1-4%) καθώς η πίεση αυξάνεται. Η αλλαγή αυτή βέβαια δεν είναι πολύ σημαντική και δεν επηρεάζει πολύ την συμπεριφορά της κλίνης.
- Η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης μειώνεται ελαφρά καθώς η πίεση αυξάνεται. Η μείωση αυτή είναι ασήμαντη, αν τα στερεά σωματίδια έχουν μέγεθος μικρότερο από 100μm. Γίνεται όμως αρκετά σημαντική, καθώς το μέγεθος αυξάνεται, φτάνοντας σε σωματίδια διαμέτρου περίπου 400μm ως και 40%. Σε μεγαλύτερες πιέσεις δηλαδή είναι πιο εύκολη η επίτευξη της ρευστοποίησης.
- Ο λόγος της ελάχιστης ταχύτητας δημιουργίας φυσαλίδων προς την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης. Δηλαδή, οι φυσαλίδες αρχίζουν να δημιουργούνται γρηγορότερα καθώς η πίεση αυξάνεται.

Αρκετά έχει επίσης μελετηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας [21], σε συνδυασμό μάλιστα μερικές φορές με εφαρμογή υψηλής πίεσης. Η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η βέλτιστη αεριοποίηση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες αλλά κυρίως από το καύσιμο το οποίο χρησιμοποιούμε και το οξειδωτικό μέσο. Η θερμοκρασία πρέπει να παραμένει όσο το δυνατόν κοντά στο βέλτιστο σημείο, καθώς μεγάλη απόκλιση θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη παραγωγή άκαυστων υλικών, τα οποία με τη σειρά τους θα μειώσουν τη θερμοκρασία και θα εμποδίσουν τη ρευστοποίηση οδηγώντας σε μειωμένη απόδοση της εγκατάστασης και σπατάλη ενέργειας.

Η ελάχιστη κενότητα ρευστοποίησης αυξάνεται ελαφρά (ως και 8%) για λεπτόκοκκα στερεά, αλλά σε χονδρόκοκκα υλικά η μεταβολή είναι ασήμαντη. Η θερμοκρασία δηλαδή δεν έχει μεγάλη επίδραση στην κατανομή των στερεών και του αερίου στην εγκαατάσταση. Η κύρια μεταβολή λόγω της θερμοκρασίας είναι εξάλλου η βελτίωση της χημικής αντίδρασης η οποία λαμβάνει χώρα στον αντιδραστήρα.

Έχουμε ήδη αναφέρει πως η αεριοποίηση πραγματοποιείται με έλλειψη οξυγόνου και συνηθέστερα με το 20 ως 50% της στοιχειομετρικής ποσότητας. Προφανώς, η μεταβολή του λόγου του οξυγόνου το οποίο χρησιμοποιούμε προς το στοιχειομετρικά απαιτούμενο μεταβάλλει τις ιδιότητες του αερίου. Η χρήση

περισσότερου οξυγόνου (χωρίς να αυξηθεί υπερβολικά, γιατί τότε το πρώτο στάδιο της αεριοποίησης γίνεται λιγότερο αποτελεσματικό) οδηγεί σε υψηλότερη θερμοκρασία και υψηλότερη θερμική αξία του καυσίμου, αλλά απαιτείται ένα περίπλοκο σύστημα και κατανάλωση ενέργειας για τη διοχέτευσή του.

Ένα άλλο στοιχείο το οποίο επηρεάζει την κλίνη είναι η ποσότητα του οξυγόνου στο οξειδωτικό μέσο το οποίο χρησιμοποιούμε. Ο απλός ατμοσφαιρικός αέρας, τον οποίο χρησιμοποιούμε στο κρύο μοντέλο έχει 21% κ.ο. οξυγόνο. Αν στην εγκατάσταση προσθέταμε εκτός από αέρα και ατμό, τότε το ποσοστό του οξυγόνου στο οξειδωτικό μέσο το οποίο εισέρχεται στην κλίνη θα αύξανε μεταβάλλοντας τις ιδιότητες του παραγόμενου αερίου. Αν χρησιμοποιούμε βέβαια περισσότερα από ένα οξειδωτικά μέσα πρέπει να μελετήσουμε και το λόγο παροχής τους.

Οι Campoy et al. μελέτησαν [11] την επίδραση την οποία έχει η μεταβολή των λόγων αυτών, του στοιχειομετρικού λόγου (stoichiometric ratio) και την ποσότητα του οξυγόνου στο οξειδωτικό μέσο (oxygen purity) σε μια ρευστοποιημένη αναβράζουσα κλίνη με καύσιμο πελλέτες ξύλου. Χρησιμοποίησαν ως οξειδωτικό μέσο συνδυασμό αέρα και ατμού και μελέτησαν επίσης και την επίδραση του λόγου της παροχής ατμού προς την παροχή βιομάζας (steam to biomass ratio).

Βρήκαν πως η αύξηση του ποσοστού του οξυγόνου στην κλίνη ως 40%, μειώνει την επίδραση του αζώτου, αυξάνοντας την θερμοκρασία της κλίνης. Ταυτόχρονα, αυξάνεται η ελάχιστη θερμική αξία του καυσίμου και η απόδοση της εγκατάστασης όσο ο στοιχειομετρικός λόγος αυξάνεται. Από χημικής άποψης, το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα μειώνεται, ενώ τα ποσοστά του υδρογόνου, του μονοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου αυξάνονται (στο μεθάνιο ελαφρά), δηλαδή η οξείδωση των τελικών προϊόντων είναι μικρότερη.

Αύξηση της ποσότητας του οξυγόνου σημαίνει εκτός από λιγότερο άζωτο και υψηλότερη συγκέντρωση μονοξειδίου. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται και από την αύξηση του ποσοστού της μετατροπής του άνθρακα. Το οξυγόνο καταναλώθηκε σε αντιδράσεις με τον άνθρακα της βιομάζας, αφήνοντας τα μόρια του μονοξειδίου χωρίς να οξειδωθούν.

Η αύξηση του στοιχειομετρικού λόγου σημαίνει πως περισσότερα μόρια αζώτου εμφανίζονται μέσα στην κλίνη. Το άζωτο εμποδίζει την πλήρη οξείδωση του καυσίμου οδηγώντας σε περισσότερο μονοξείδιο του άνθρακα στην έξοδο της κλίνης. Η αύξησή του οδήγησε και σε αύξηση της θερμοκρασίας. Μικρός στοιχειομετρικός λόγος οδήγησε στην εμφάνιση μεγαλύτερου ποσοστού καύσιμων αερίων στην έξοδο.

Όσον αφορά το λόγο της παροχής ατμού προς την παροχή βιομάζας, παρατηρήθηκε με αύξησή του ότι η θερμοκρασία εντός της εγκατάστασης μειώνεται αισθητά κατά σχεδόν 30°C. Η απόδοση της εγκατάστασης φτάνει ένα μέγιστο περίπου στο 30% αλλά η τιμή αυτή εξαρτάται προφανώς και από το καύσιμο το οποίο χρησιμοποιήθηκε

Η υψηλότερη θερμοκρασία εξάλλου ευνοεί τις υψηλότερες συγκεντρώσεις μονοξειδίου κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τους Garcia-Ibanez et al. [23] οι οποίοι βρήκαν αύξηση του ποσοστού του μονοξειδίου και του υδρογόνου στο αέριο εξόδου με ταυτόχρονη μείωση του ποσοστού του διοξειδίου και του μεθανίου. Τα ποσοστά λοιπόν αυτών των αερίων στη σύσταση του τελικού προϊόντος είναι άμεσα εξαρτώμενα μεταξύ τους. Επιβεβαίωσαν επίσης πως υψηλότερος στοιχειομετρικός λόγος σημαίνει και μεγαλύτερη παροχή αερίου στην έξοδο.

Οι Campoy et al. [11] μελέτησαν το στοιχειομετρικό λόγο από 20% ως 40%. Αντίθετα, οι Garcia-Ibanez et al. [23] μελετώντας το στοιχειομετρικό λόγο από 40 ως 70% για υπολείμματα επεξεργασίας ελιάς και βρήκαν πως η ελάχιστη θερμική αξία του καυσίμου μειώνεται για την αύξηση του λόγου αυτού πάνω από 40%. Τα καύσιμο βέβαια είναι διαφορετικό (αν και τα δύο είναι φυτικής προέλευσης) αλλά η συμπεριφορά αυτή δείχνει πως η συνεχής αύξηση του στοιχειομετρικού λόγου κάποια στιγμή θα επιφέρει πτώση της απόδοσης. Ενδέχεται η υπερβολική παρουσία αέρα να αποτελεί εμπόδιο στην ομαλή λειτουργία του πρώτου σταδίου της αεριοποίησης, την πυρόλυση.

7.4) Συσσωμάτωση στερεών σωματιδίων σε υψηλές θερμοκρασίες

Ένα σημαντικό πρόβλημα σε υψηλές θερμοκρασίες είναι η συσσωμάτωση των σωματιδίων, επειδή όταν συμβαίνει αυτό η συμπεριφορά της ρευστοποιημένης κλίνης αλλάζει δραματικά. Συγκεκριμένα, καθώς τα σωματίδια συσσωματώνονται το μέσο μέγεθός τους αυξάνεται και η κατηγοριοποίησή τους κατά Geldart μπορεί να αλλάξει με συνέπεια την αλλαγή των ιδιοτήτων της κλίνης ή ακόμα και το είδος της.

Σε μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων οι φυσαλίδες σχηματίζονται σε μικρότερη ταχύτητα και γίνονται αρκετά μεγαλύτερες. Αν η κλίνη ήταν ομογενώς ρευστοποιημένη, θα αρχίσουν να εμφανίζονται φυσαλίδες. Αν αντίθετα υπήρχαν ήδη φυσαλίδες, τότε μπορεί να αρχίσουν να εμφανίζονται φαινόμενα slugging. Σε αρκετά υψηλές ταχύτητες βέβαια αυτό δεν θα επιφέρει σχεδόν καμιά μεταβολή στις ιδιότητες της κλίνης καθώς τα σωματίδια θα συνεχίσουν να παρασύρονται εκτός της.

Η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η συσσωμάτωση διαφέρει ανάλογα με το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται. Ένα ενδιαφέρον εύρημα όμως, είναι πως η συσσωμάτωση δεν γίνεται στην ίδια θερμοκρασία στην οποία γίνεται φυσιολογικά η τήξη του υλικού. Οι Gluckman et al. [24] μελετώντας κλίνη με σφαίρες χαλκού βρήκαν ότι στους 900°C περίπου, η κλίνη εμφάνισε φαινόμενα slugging και η ρευστοποίησή της σταμάτησε. Η κλίνη ρευστοποιήθηκε και πάλι μόνο όταν η ταχύτητα τριπλασιάστηκε.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί ίσως να εξηγηθεί από το γεγονός ότι πολλά υλικά ακόμα και αυτά σε ευρεία βιομηχανική χρήση όπως ο άνθρακας και πολλά

μεταλλεύματα περιέχουν αρκετές ακαθαρσίες. Αυτές μπορούν να δημιουργήσουν στην επιφάνεια υλικά με χαμηλό σημείο τήξης, καταλήγοντας στην εμφάνιση του φαινομένου της συσσωμάτωσης σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Το φαινόμενο αυτό θα είναι ακόμα εντονότερο σε υλικά όπως τα αστικά απόβλητα τα οποία αποτελούνται από δεκάδες διαφορετικά υλικά, διαφορετικής προέλευσης και σύστασης.

Επιπλέον, η παραμονή σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα οδηγεί στο σχηματισμό ευτηκτικών ενώσεων (αρωματικούς άνθρακες) οι οποίοι ενώνονται με άλλα σωματίδια και σχηματίζουν κολλώδη συσσωματώματα. Τα συσσωματώματα αυτά στη συνέχεια επικάθονται στο διασκορπιστή ή σε σωληνώσεις μετά την έξοδο της κλίνης αν παρασυρθούν από το αέριο και αυτό υποβληθεί σε ψύξη.

Το φαινόμενο της συσσωμάτωσης μπορεί να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα στον εξοπλισμό. Τα τηκόμενα υλικά μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση στα τοιχώματα του διασκορπιστή ή και στους σωλήνες κατά την απομάκρυνση τους. Η εν λόγω απομάκρυνση μάλιστα καθίσταται δυσκολότερη καθώς τέτοια σωματίδια είναι κατά κανόνα μεγαλύτερα και βαρύτερα από οποιοδήποτε άλλα μέσα στην κλίνη. Το σημαντικότερο πρόβλημα ωστόσο είναι το φράξιμο του διασκορπιστή.

Ο διασκορπιστής, για να εξασφαλίσει υψηλή ταχύτητα εισαγωγής του ρευστού και για να εμποδίσει τα στερεά να εισέλθουν στις οπές δεν μπορεί να έχει πολύ μεγάλα ανοίγματα. Αν λοιπόν τα σωματίδια καθώς συσσωματώνονται φθάσουν σε ένα μεγαλύτερο μέγεθος από ότι ο διασκορπιστής έχει σχεδιαστεί, μπορούν με πιθανή συσσώρευσή τους να φράξουν τις οπές από τις οποίες περνά το ρευστό.

Αν το σύστημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε τα σωματίδια τα οποία αρχίζουν να κατακάθονται στο διασκορπιστή να παρασύρονται από τον αέρα και να ανέρχονται εκ νέου, ιδιαίτερα με παράλληλες προς το επίπεδο του διασκορπιστή οπές, τότε είναι πιθανό τόσο βαριά σωματίδια να μην παρασυρθούν αλλά αντίθετα να κατακαθίσουν εμποδίζοντας ουσιαστικά τη ροή του αέρα και δημιουργώντας νεκρές ζώνες στο διασκορπιστή.

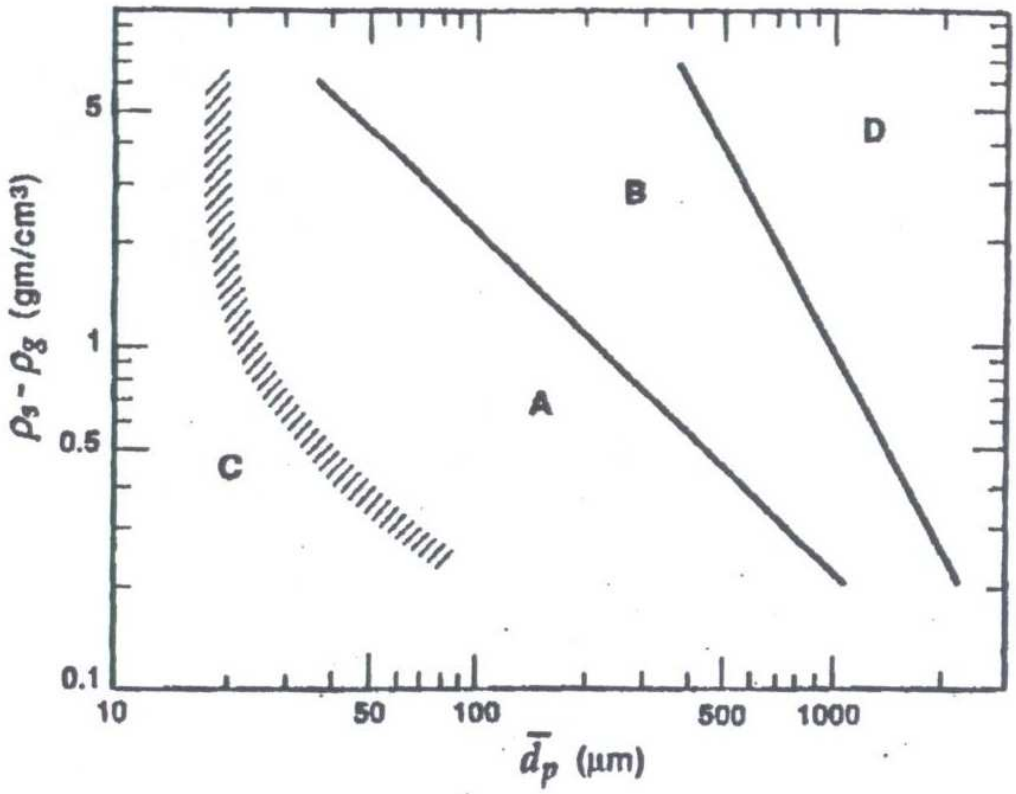
Κάτι τέτοιο οδηγεί σε ανομοιομορφία της ρευστοποίησης, μειώνοντας το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Αν φραχθούν πολλές τρύπες, η ρευστοποίηση της κλίνης θα γίνει αδύνατη και ο διασκορπιστής θα πρέπει να αποσπασθεί από τον αντιδραστήρα και να καθαριστεί οδηγώντας σε διακοπή της λειτουργίας της εγκατάστασης, με σοβαρό οικονομικό κόστος.

Η μόνη περίπτωση στην οποία η συσσωμάτωση μπορεί να αποδειχτεί χρήσιμη είναι η ρευστοποίηση πολύ λεπτόκοκκων σωματιδίων. Όταν μια ψυχρότερη κλίνη εκτεθεί σε θερμό ρεύμα αέρα, είναι στα μικρότερα σωματίδια όπου η θερμοκρασία αυξάνεται πιο γρήγορα και επομένως η τήξη τους γίνεται γρηγορότερα. Επειδή τα πολύ λεπτόκοκκα σωματίδια είναι δύσκολο να ρευστοποιηθούν η συσσωμάτωση τους διευκολύνει τη διαδικασία σημαντικά.

8) Μέγεθος Σωματιδίων

Το είδος της ρευστοποίησης το οποίο πραγματοποιείται δεν εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα του ρευστού. Εξαρτάται και από το στερεό με το οποίο εκείνο αλληλεπιδρά. Πιο συγκεκριμένα εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του ρευστού, την πυκνότητα και τη σφαιρικότητά τους. Εξαρτάται επίσης από το αν τα σωματίδια, τα οποία χρησιμοποιούνται είναι ενός μεγέθους ή έχουν κατανομή σωματιδίων.

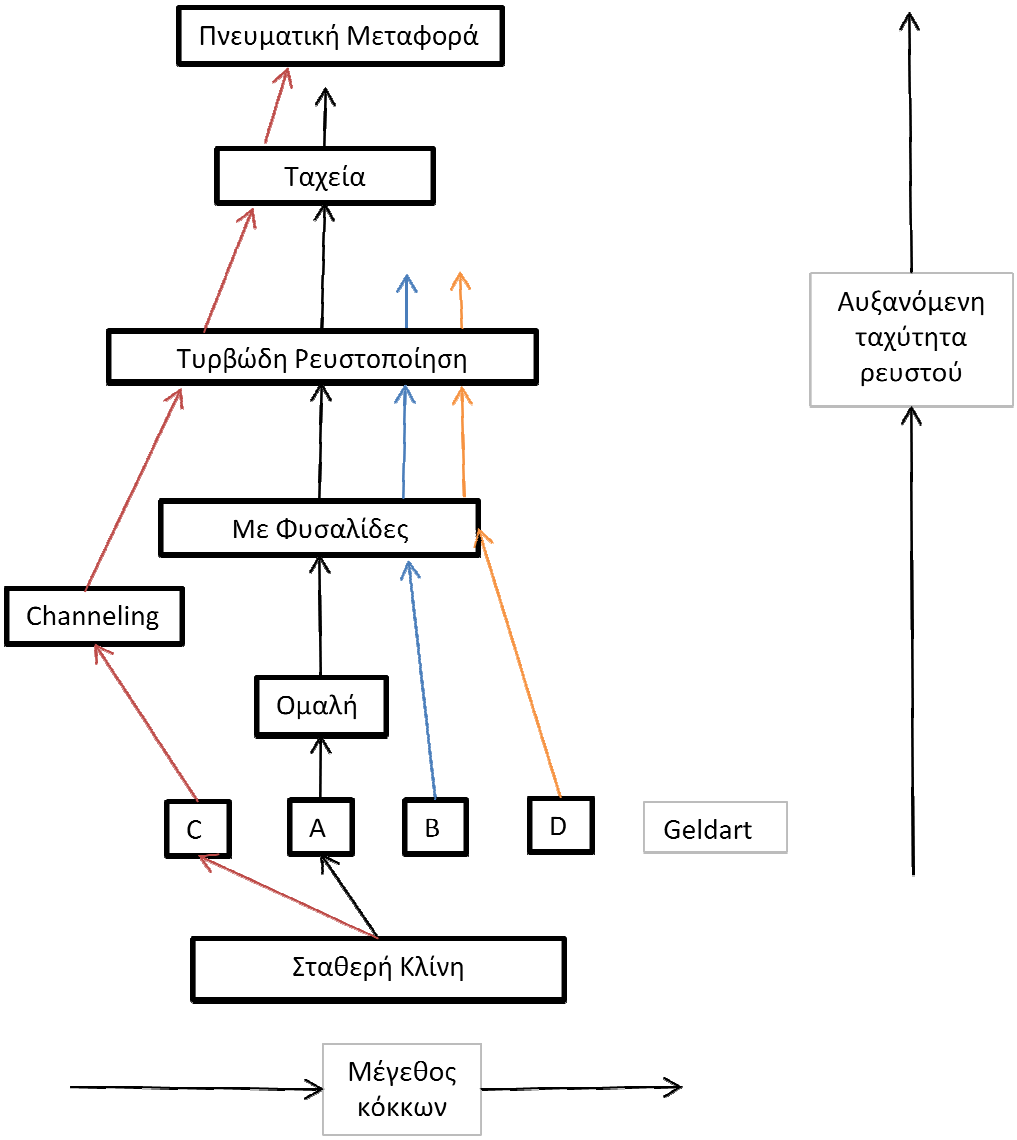
Ο Geldart (1973) [25] κατέταξε, παρατηρώντας τη συμπεριφορά διαφορετικών στερεών κατά την ρευστοποίηση, τα στερεά σε τέσσερα πολύ διαφορετικά και εύκολα αναγνωρίσιμα είδη συμπεριφοράς σωματιδίων. Από το μικρότερο στο μεγαλύτερο σωματίδιο αυτά είναι:



Εικόνα 16-Κατηγορίες Στερεών κατά Geldart [25]

- **Κατηγορία C:**
  Συνεκτικές ή πολύ λεπτόκοκκες σκόνες. Η κανονική ρευστοποίηση είναι εξαιρετικά δύσκολη επειδή οι δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις που προκύπτουν από τη δράση του αερίου.

Το άμυλο, η πούδρα και το αλεύρι είναι τυπικά παραδείγματα τέτοιων ρευστών.
Σε κλίνες μικρής διαμέτρου τα στερεά αυτά τείνουν να ανέρχονται ως σώμα, ενώ σε κλίνες μεγαλύτερης διαμέτρου δημιουργούνται δίαυλοι από την είσοδο του ρευστού ως την επιφάνεια της κλίνης από όπου περνά το ρευστό χωρίς να γίνεται ρευστοποίηση.



Εικόνα 17-Τρόποι ρευστοποίησης ανά κατηγορία σωματιδίου [20]

Ένας τρόπος ρευστοποίησής τους είναι η τοποθέτησή τους σε κλίνη με σωματίδια του ίδιου υλικού αλλά μεγαλύτερου μεγέθους, συνήθως Geldart B. Ακόμα και αν το υλικό είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκο, δεν συμπαρασύρεται αμέσως από το ρευστό αλλά μπορεί να μείνει στην κλίνη για μικρό χρονικό διάστημα. Επειδή τα σωματίδια αυτά είναι πολύ μικρά, συνήθως αυτό το χρονικό διάστημα είναι αρκετά μεγάλο για τη χημική μετατροπή τους.

- **Κατηγορία Α:**

  Στερεά τα οποία έχουν ένα σχετικά μικρό μέγεθος σωματιδίου και πυκνότητα μικρότερη από 1,4g/cm^3. Αυτά τα στερεά ρευστοποιούνται εύκολα και έχουν ομαλή ρευστοποίηση σε χαμηλές ταχύτητες ρευστού και ελεγχόμενη έκλυση φυσαλίδων μικρού μεγέθους σε μεγαλύτερες ταχύτητες ρευστού. Ο καταλύτης FCC είναι αντιπροσωπευτικός των πιο πάνω σωματιδίων.

  Όταν τα σωματίδια αυτά ρευστοποιούνται η κλίνη διαστέλλεται σημαντικά πριν από την εμφάνιση των πρώτων φυσαλίδων. Σε αρκετά μεγάλες ταχύτητες η κλίνη αρχίζει να παράγει φυσαλίδες με μεγαλύτερο ρυθμό και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

  Οι φυσαλίδες του αερίου ανέρχονται ταχύτερα από το υπόλοιπο αέριο το οποίο διηθείται από το γαλάκτωμα. Αυτές οι φυσαλίδες χωρίζονται και συγχωνεύονται συχνά καθώς ανέρχονται στην κλίνη. Υπάρχει πάντα ένα μέγιστο μέγεθος φυσαλίδων, τα οποίο είναι μικρότερο από 10cm ακόμα και σε κλίνες μεγάλης διαμέτρου.

  Αυτές όμως οι διαδικασίες δεν βελτιώνουν απαραίτητα την ρευστοποίηση. Η ανακυκλοφορία των στερεών στην κλίνη προκύπτει ακόμα και αν μόνο λίγες φυσαλίδες είναι παρούσες. Αυτή η κυκλοφορία είναι συνηθισμένη κυρίως σε κλίνες μεγάλης διαμέτρου. Αν το μέγεθος των φυσαλίδων γίνει όσο και η διάμετρος του δοχείου τότε οι φυσαλίδες μετατρέπονται σε αξονικά slugs.

  Τα σωματίδια κατηγορίας Α χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά σε ρευστοποιημένες κλίνες καθώς προσφέρουν καλές ιδιότητες και ανάμιξη ρευστού και σωματιδίων. Χρησιμοποιούνται σε μικρές κλίνες, οι οποίες έχουν κατασκευαστεί για ερευνητικούς σκοπούς.

- **Κατηγορία Β:**

  Τα σωματίδια αυτά έχουν μορφή άμμου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα περισσότερα σωματίδια με διάμετρο από 40μm ως 500μm και πυκνότητα από 1,4g/cm^3 ως 4g/cm^3. Αυτά τα στερεά ρευστοποιούνται εύκολα με έντονη δημιουργία και κίνηση φυσαλίδων, οι οποίες μπορεί να φτάσουν αρκετά μεγάλο μέγεθος.

  Οι φυσαλίδες σε κλίνες με σωματίδια κατηγορίας Β σχηματίζονται αμέσως μόλις η ταχύτητα του ρευστού ξεπεράσει την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης. Σχηματίζουν δηλαδή φυσαλίδες νωρίτερα από τα σωματίδια κατηγορίας Α.

  Σε υψηλότερες ταχύτητες, μικρές φυσαλίδες σχηματίζονται στο διασκορπιστή, οι οποίες μεγαλώνουν και συγχωνεύονται καθώς ανέρχονται στην κλίνη. Το μέγεθός τους μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει της

απόστασης από το διασκορπιστή και τη διαφορά της ταχύτητας του ρευστού προς την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης και είναι σχεδόν ανεξάρτητο του μεγέθους των σωματιδίων. Η έντονη κίνηση των φυσαλίδων διευκολύνει την κυκλοφορία των σωματιδίων στη κλίνη.

Είναι η κατηγορία η οποία χρησιμοποιείται πιο συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές καθώς η μέση τιμή και η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων μπορεί να επιλεγεί από της συνθήκες ρευστοποίησης. Προσφέρουν ικανοποιητική ρευστοποίηση του καυσίμου και χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως υλικό κλίνης. Κατά συνέπεια υπάρχει μεγάλη βιβλιογραφία για τη ρευστοποίηση αυτών των σωματιδίων.

Είναι επίσης η κατηγορία σωματιδίων η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο κρύο μοντέλο για να προσομοιώσει καλύτερα τη ρευστοποιημένη κλίνη της πραγματικής εγκατάστασης.

- **Κατηγορία D:**

  Μεγάλα σωματίδια μεγάλης πυκνότητας. Κλίνες με μεγάλο ύψος και μικρή διάμετρο είναι δύσκολο να ρευστοποιηθούν όταν αποτελούνται από ρευστά αυτής της κατηγορίας. Δεν έχουν ομαλή συμπεριφορά και παράγουν φυσαλίδες μεγάλου μεγέθους, οι οποίες μπορεί να σπάσουν ή να παρουσιάσουν εκροές ρευστού αν η κατανομή του ρευστού δεν είναι ομαλή. Ξηρά σιτηρά και φασόλια, ψημένοι κόκκοι καφέ, αεριοποιημένοι άνθρακες και κάποια μεταλλεύματα τα οποία έχουν ψηθεί σε φούρνο είναι τέτοια στερεά και συνήθως ρευστοποιούνται με τη μέθοδο της εκροής ή σε ρηχές κλίνες.

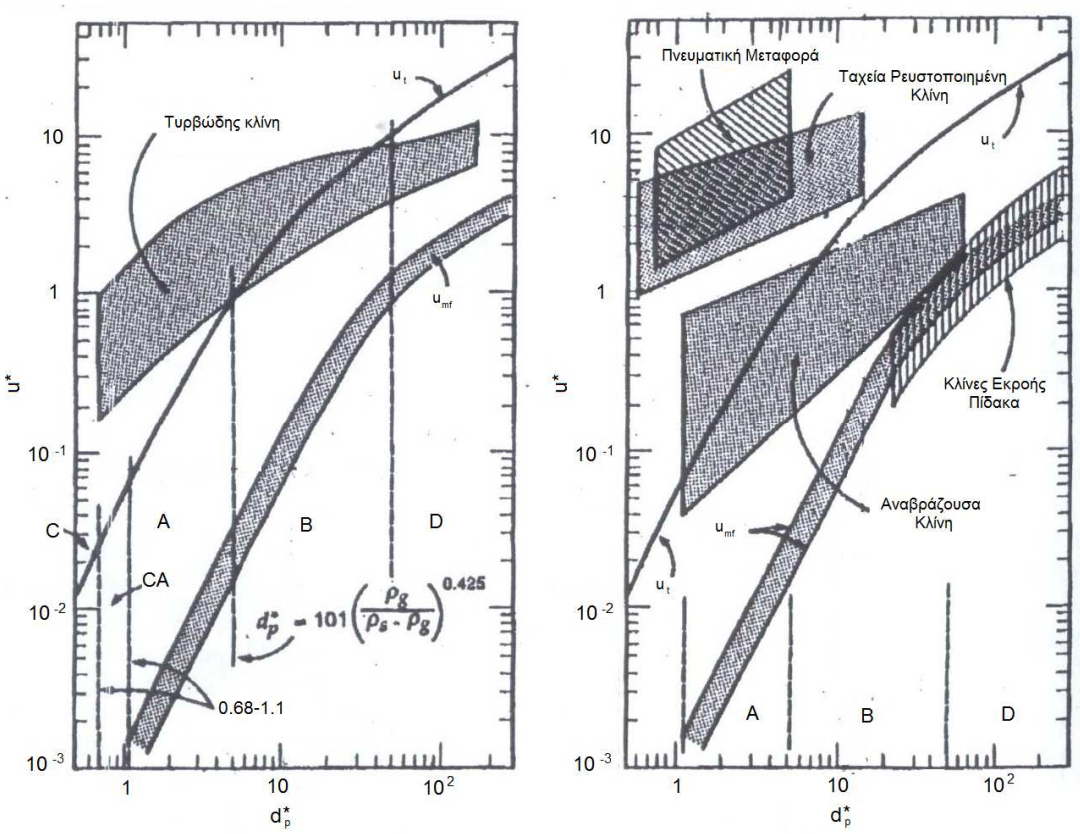
  Σε τέτοιες κλίνες, οι φυσαλίδες οι οποίες παράγονται στο διασκορπιστή είναι μεγαλύτερες από τις άλλες περιπτώσεις και συγχωνεύονται γρήγορα, παράγοντας φυσαλίδες πολύ μεγάλου μεγέθους. Λόγω του μεγέθους όμως κινούνται πιο αργά από το αέριο που ανέρχεται. Επίπεδα slug παρατηρούνται όταν το μέγεθος της φυσαλίδας πλησιάζει τη διάμετρο της κλίνης. Η πυκνή φάση έχει χαμηλή κενότητα.

  Κλίνες με σωματίδια μεγάλου μεγέθους δεν είναι συνήθως επιθυμητές για βιομηχανικές εφαρμογές. Όμως, σε μερικές βιομηχανίες, όπως για παράδειγμα στην επεξεργασία αγροτικών προϊόντων, στη χημική συσσωμάτωση και στην αντίδραση συνθετικών σφαιριδίων, η χρήση τους είναι αναπόφευκτη.

  Μια πολύ μεγάλη παροχή αερίου είναι απαραίτητη για τη ρευστοποίηση αυτών των κλινών. Συχνά η παροχή αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την αντίστοιχη χημική ή φυσική διεργασία για την οποία χρησιμοποιείται η εγκατάσταση. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει κλίνες εκροής, καθώς αυτές απαιτούν λιγότερο αέριο.

Φυσαλίδες μπορεί να δημιουργηθούν αν η κλίνη είναι ρηχή, έχει αρκετά μεγάλη διάμετρο και η ταχύτητα δεν είναι πολύ μεγαλύτερη από την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης. Για την αποφυγή του slugging οι αντιδραστήρες σχεδιάζονται μερικές φορές με μεγαλύτερη διάμετρο στο άνω μέρος.

Στα σωματίδια αυτά ανήκουν συνήθως τα καύσιμα, τα οποία δεν μπορούν να θρυμματιστούν σε πολύ μικρά σωματίδια. Ιδιαίτερα τα καύσιμα βιομάζας ανήκουν σχεδόν αποκλειστικά σε αυτή την κατηγορία έχοντας διαμέτρους συνήθως πάνω από 1mm.



Εικόνα 18- Διάγραμμα κατηγοριών ρευστοποίησης για κάθε κατηγορία ρευστών και για το πλήρες πεδίο των ταχυτήτων [20]

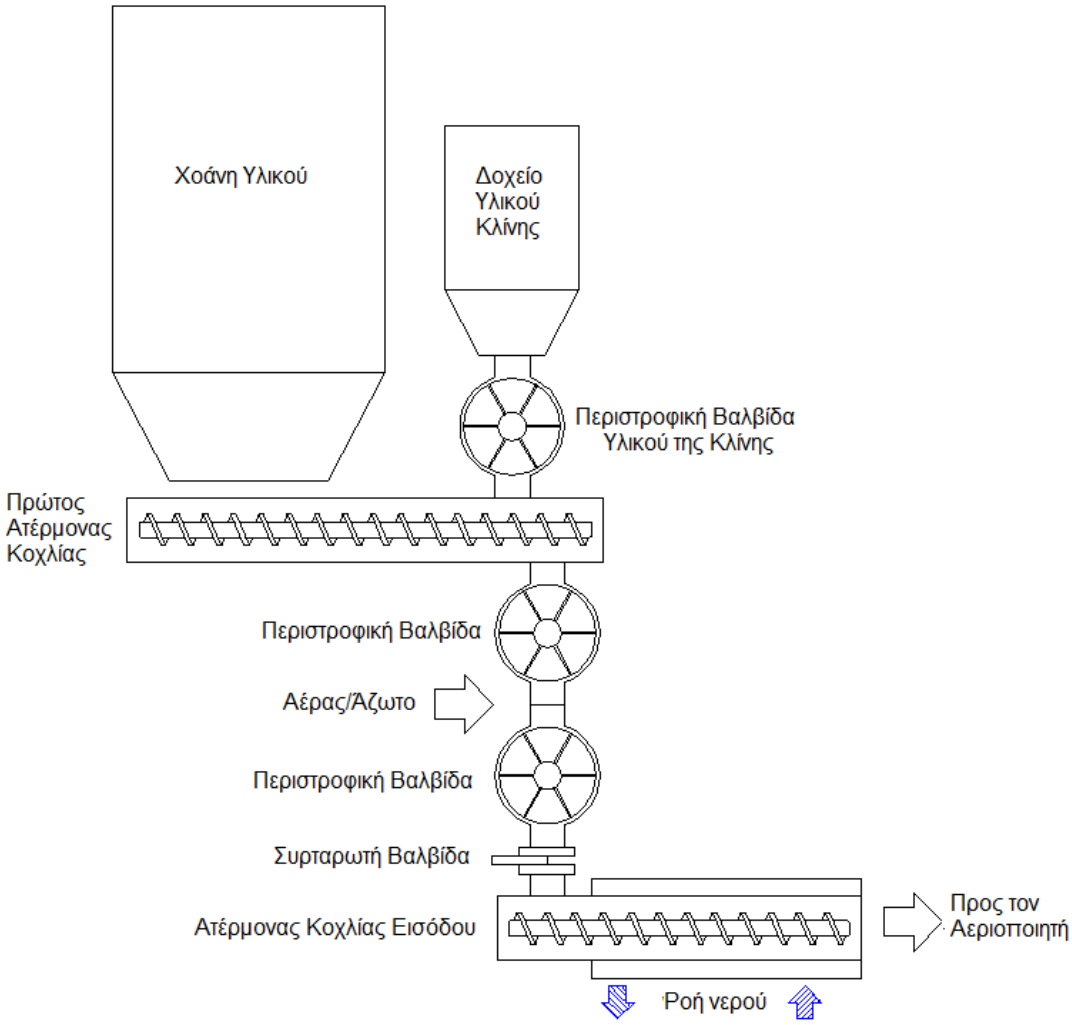
9) Δεδομένα Πραγματικής Εγκατάστασης

Η εγκατάσταση αυτή χρησιμοποιεί ένα αντιδραστήρα ρευστοποιημένης αναβράζουσας κλίνης χωρίς ανακυκλοφορία [26]. Χρησιμοποιεί ως καύσιμο Stabilat το οποίο, όπως έχει αναφερθεί προέρχεται από την επεξεργασία αστικών αποβλήτων. Έχει τη δυνατότητα να δεχτεί ως και 750kg/h αυτού του καυσίμου, ενώ η ελάχιστη παροχή με την οποία μπορεί να λειτουργήσει είναι 250kg/h. Προβλέπεται ότι θα μπορεί να αποδίδει 2,9MW θερμικά στη μέγιστη παροχή καυσίμου.

Το καύσιμο θα εισέρχεται στην κλίνη μέσω ενός συστήματος ατέρμονων κοχλιών μαζί με το υλικό της κλίνης. Τα δύο αυτά στερεά θα εισέρχονται σε έναν ατέρμονα κοχλία, ο οποίος θα διασφαλίζει την ομαλή ανάμιξή τους και τη σταθερή παροχή. Στη συνέχεια, θα εγκατασταθεί περιστροφική βαλβίδα, η οποία εξασφαλίζει πως δεν θα υπάρχουν διαρροές αέρα και πως η κίνηση του καυσίμου θα εξακολουθήσει ομαλά.

Μετά τη βαλβίδα, στα στερεά εισέρχεται ρεύμα αζώτου, το οποίο θα διευκολύνει τη ροή τους προς την εγκατάσταση. Μια δεύτερη περιστροφική βαλβίδα εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρχουν διαρροές αζώτου και μια συρταρωτή πνευματική βαλβίδα απομονώνει το τμήμα αυτό από το υπόλοιπο της εγκατάστασης. Τα στερεά εισέρχονται στη συνέχεια σε έναν ατέρμονα κοχλία, τα τοιχώματα του οποίου ψύχονται από νερό και εισέρχονται στον αντιδραστήρα.

Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα παροχής ως και 750kg/h Stabilat. Πριν εισέλθουν στο σύστημα αυτό τα στερεά (το καύσιμο και το υλικό της κλίνης) φυλάσσονται σε δοχεία τα οποία θα περιέχουν αρκετή ποσότητα ώστε να διασφαλιστεί η λειτουργία της εγκατάστασης για την επόμενη ώρα. Το σύστημα τροφοδοσίας είναι παρόμοιο με αυτό το οποίο σχεδίασαν οι Hamel et al. [14] για το ίδιο καύσιμο.



Εικόνα 19-Σχεδιάγραμμα συστήματος εισόδου στην πραγματική εγκατάσταση [26]

Η ροή του αέρα θα εξασφαλίζεται μέσω ενός συμπιεστή ο οποίος θα λειτουργεί χωρίς να αναμιγνύει τον αέρα με το λάδι λειτουργίας του ή με σταγονίδια νερού τα οποία θα μπορούσα να επηρεάσουν το σύστημα μετρήσεων της εγκατάστασης. Καθώς η εσωτερική θερμοκρασία στην κλίνη είναι περίπου 800°C ο αέρας θα προθερμαίνεται σε εναλλάκτη θερμότητας με την καύση φυσικού αερίου. Πριν ο αέρας εισέλθει στην κλίνη θα μετράται η παροχή του για τον καλύτερο έλεγχο της εγκατάστασης.

Η εγκατάσταση θα διαθέτει 1500kg στερεού κατηγορίας Geldart B στην κλίνη. Το στερεό αυτό θα είναι πυριτική άμμος και ολιβίνης, ο οποίος θα χρησιμοποιείται ως καταλύτης. Τα δύο αυτά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ανεξάρτητα το ένα από το άλλο αν το πείραμα το απαιτεί. Η σύσταση των δύο αυτών υλικών κατά βάρος είναι:

Χημικό Στοιχείο	Πυριτική Άμμος	Ολιβίνης
SiO_2	99	47-49
FeO	-	7-8
MgO	-	41-42
Cr_2O_3, NiO, CaO, Al_2O_3	1	<1

Τα υλικά αυτά έχουν και διαφορετικές πυκνότητες, οι οποίες είναι:

	Πυριτική Άμμος	Ολιβίνης
Πυκνότητα σωματιδίων (kg/m^3)	2600	3200
Πυκνότητα (kg/m^3)	1650	1900

Το καύσιμο καίγεται με αέρα ατμοσφαιρικής πίεσης σε θερμοκρασία 771°C. Επειδή πρόκειται για αεριοποίηση, το καύσιμο καίγεται με αέρα λιγότερο του στοιχειομετρικού και συγκεκριμένα με αέρα σε ποσοστό 26% του στοιχειομετρικού. Η σύσταση του καυσίμου προφανώς διαφέρει λόγω της προέλευσής του από απόβλητα, αλλά μια τυπική σύσταση του είναι:

Stabilat Composition		**(%)**
Carbon	C	38,92
Hydrogen	H	5,08
Nitrogen	N	1,22
Sulfur	S	0,39
Chlorine	Cl	0,02
Fluorine	F	0,55
Oxygen	O	29,21
Moisture	H_2O	4,14
Ash	α	20,47

Ο αντιδραστήρας έχει κυκλική διάμετρο και θα αποτελείται από τρία διαφορετικά μέρη. Στο πρώτο τμήμα, στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα, γίνεται η ρευστοποίηση. Είναι το πλέον σημαντικό τμήμα από ρευστοδυναμικής άποψης και από την άποψη της μετατροπής του Stabilat σε καύσιμο αέριο. Στην αρχή του συστήματος θα βρίσκεται ο διασκορπιστής ενώ θα προβλέπεται και σύστημα απαγωγής των στερεών υπολειμμάτων άνθρακα που θα παραχθούν. Το τμήμα αυτό θα έχει διάμετρο 1,29m και ίδιο ύψος. Πριν από το διασκορπιστή θα υπάρχει τμήμα για την υποδοχή του αέρα (windbox).

Στα τοιχώματα του αντιδραστήρα θα υπάρχουν ηλεκτρικές αντιστάσεις οι οποίες θα προθερμαίνουν το υλικό της κλίνης και το καύσιμο στην προκαθορισμένη θερμοκρασία, ώσπου να εισέλθει ο ατμοσφαιρικός αέρας και να ξεκινήσει η ρευστοποίηση. Ο όλος αντιδραστήρας θα είναι καλυμμένος με μονωτικό υλικό για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας στην ατμόσφαιρα.

Ο διασκορπιστής θα αποτελείται από μια σχάρα σε όλη την επιφάνεια της οποίας θα υπάρχουν οπές για την διέλευση του αέρα. Στο κέντρο θα έχει μια κεντρική οπή εκροής από την οποία θα διαφεύγει η πίσσα. Για τη διάταξη των οπών του διανομέα υπάρχουν δύο εκδοχές. Στην πρώτη, οι οπές θα είναι διατεταγμένες έτσι ώστε να κινούν τον αέρα προς το κέντρο της εσχάρας. Στη δεύτερη περίπτωση, οι οπές θα είναι διατεταγμένες ώστε να οδηγούν τον αέρα προς τον πυθμένα της εσχάρας όπου θα συμβαίνει η εκροή.

Η πίσσα όταν θα διαφεύγει διαμέσου του διασκορπιστή θα οδηγείται σε έναν ατέρμονα κοχλία ο οποίος θα την οδηγεί μέσω περιστρεφόμενης βαλβίδας σε δοχείο αποθήκευσης. Ο κοχλίας έχει τη δυνατότητα να απομακρύνει ως και 150kg/h τέφρας και λόγω των υψηλών θερμοκρασιών της θα ψύχεται με νερό. Φυσικά, μαζί με την τέφρα θα διαφεύγει και τμήμα του υλικού της κλίνης.

Το δεύτερο τμήμα του αντιδραστήρα θα είναι κωνικό και θα αυξάνει σταδιακά τη διάμετρο, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες πίεσης που θα προκαλούνταν αν η αλλαγή διαμέτρου ανάμεσα στο δεύτερο και το τρίτο τμήμα ήταν άμεση. Ταυτόχρονα, η ταχύτητα του ρευστού μειώνεται και επομένως η δύναμη την οποία ασκεί στα σωματίδια μειώνεται.

Το τρίτο τμήμα, η περιοχή απεμπλοκής, θα έχει μεγαλύτερο ύψος, άρα και όγκο από τα άλλα δύο. Το ύψος του χρησιμεύει για την μείωση της ταχύτητας του παραγόμενου αερίου, ώστε τα σωματίδια του καυσίμου τα οποία έχουν παρασυρθεί να επιστρέψουν στον αντιδραστήρα και να ολοκληρωθεί η μετατροπή τους. Από μια οπή κοντά στο άνω μέρος του απάγεται το παραγόμενο αέριο και οδηγείται στο σύστημα καθαρισμού.

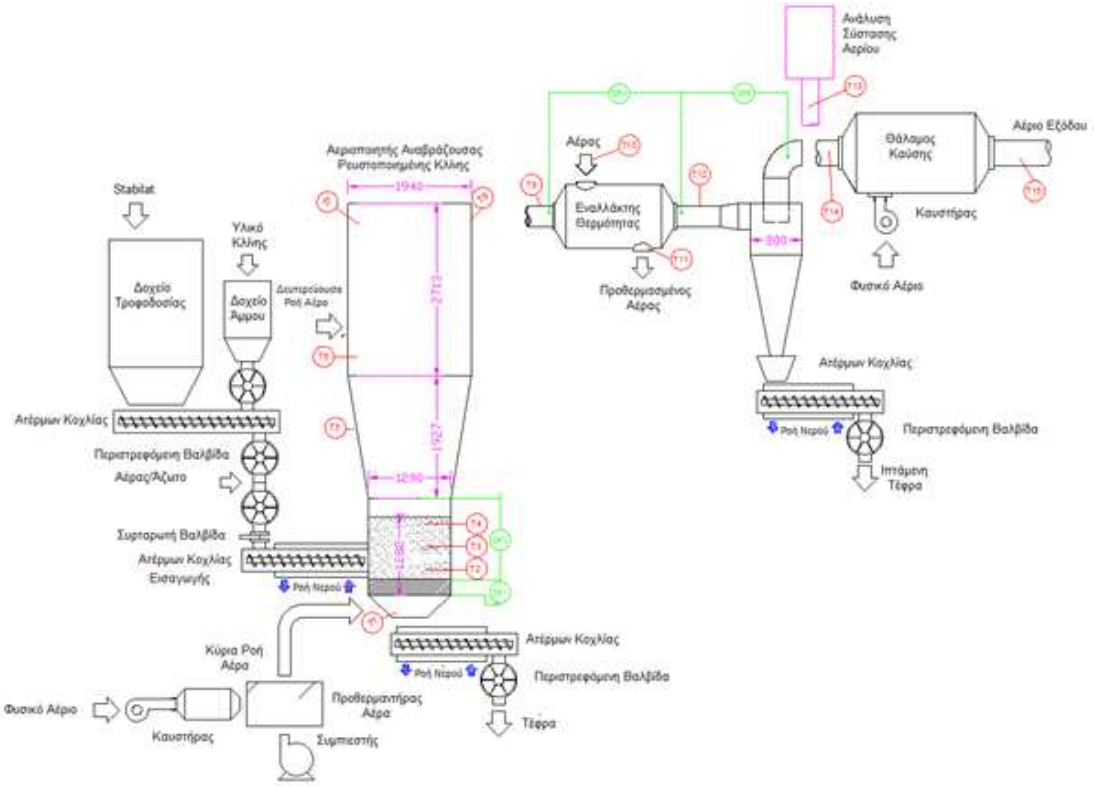
Πριν το αέριο οδηγηθεί στο σύστημα καθαρισμού θα οδηγείται σε ένα εναλλάκτη θερμότητας, όπου θα ψύχεται στους 550-600°C από τους 750-800°C στους οποίους βρισκόταν. Η ψύξη θα επιτυγχάνεται με παράλληλη ροή του αέρα και του αερίου για να αποφευχθεί η δημιουργία συμπυκνωμάτων της τέφρας του αερίου. Η ψύξη θα γίνεται σταδιακά και θα υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής

επιπλέον αέρα για καλύτερο έλεγχο της εγκατάστασης. Ο αέρας θα χρησιμοποιείται στη συνέχεια προθερμασμένος κατά την καύση του αερίου.

Στη συνέχεια το αέριο οδηγείται σε ένα κυκλώνα υψηλής απόδοσης στον οποίο καθαρίζεται από την τέφρα και τα άλλα στερεά σωματίδια. Η ιπτάμενη τέφρα η οποία απάγεται στον κυκλώνα οδηγείται στη συνέχεια σε δοχείο αποθήκευσης μέσω ατέρμονα κοχλία μέγιστης παροχής 50kg/h και περιστροφικής βαλβίδας, όπως η απαγόμενη πίσσα από το διασκορπιστή. Το αέριο οδηγείται στη συνέχεια σε καυστήρα, όπου και καίγεται.

Τα μεγέθη τα οποία μας ενδιαφέρουν σε αυτή την εγκατάσταση είναι η θερμοκρασία και η πίεση. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται θερμοστοιχεία τύπου Κ για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στον αντιδρασταστήρα και της θερμοκρασίας του παραγόμενου αερίου (T1-T9, T12-T15) και θερμοστοιχεία τύπου Pt100 για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα πριν και μετά τον εναλλάκτη θερμότητας (T10 και T11).

Συνοπτικά η εγκατάσταση μαζί με τα σημεία μέτρησης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 20-Συνολικό διάγραμμα της πραγματικής εγκατάστασης με τις θέσεις μέτρησης θερμοκρασίας και πίεσης [26]

Εκτός από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, είναι γνωστά και αρκετά ρευστοδυναμικά στοιχεία του για την περίπτωση στην οποία στην κλίνη υπάρχει μόνο πυριτική άμμος. Συγκεκριμένα, η κλίνη έχει υπολογιστεί με βάση το

μοντέλο Kunii-Levenspiel και είναι γνωστοί οι παράμετροι που χρησιμοποιεί το μοντέλο αυτό. Γνωρίζουμε επίσης τους παράγοντες της ρευστοποίησης, όπως την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης και το μέγεθος των σωματιδίων του στερεού αλλά και των φυσαλίδων οι οποίες εμφανίζονται.

Ο διασκορπιστής της εγκατάστασης έχει μελετηθεί και έχουν βρεθεί οι πτώσεις πίεσης και οι ταχύτητες σε αυτόν. Έχουν αποφασιστεί το μέγεθος αλλά και η πυκνότητα των ακροφυσίων σε αυτόν. Για την παροχή του αέρα χρησιμοποιείται ένας συμπιεστής, ο οποίος με γνωστή πτώση πίεσης δίνει την επιθυμητή παροχή στην κατάλληλη πίεση.

Για το παραγόμενο αέριο γνωρίζουμε την παροχή του και τη θερμική του αξία, ενώ γνωρίζουμε και την παροχή συμπυκνωμάτων. Ο βαθμός απόδοσης είναι 62,35%. Συνοπτικά τα δεδομένα είναι:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Παροχή καυσίμου (Stabilat)	G_F	kg/h	**750,00**
Υλικό της κλίνης (σωματίδια κατηγορίας Geldart B)	W_B	kg	**1.500**
Μέση διάμετρος σωματιδίων	d_p	μm	**497,66**
Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης	u_{mf}	m/s	**0,0761**
Αριθμός Reynolds στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης	$Re_{p,mf}$	-	**0,2896**
Ταχύτητα πτώσης σωματιδίων	$u_{t,f}$	m/s	**5,3243**
Μέγιστη θερμική αξία	HHV	MJ/Nm^3	**6,0394**
Παραγωγή καυσίμου ανά kg εισερχόμενου καυσίμου	Y_g	kg gas/kg feed	**1,8612**
Θερμική απόδοση	n	%	**0,6235**
Θερμοκρασία ρευστοποιημένης κλίνης	T_B	^oC	**771,23**

10) Σχέσεις Αναλογίας Ρευστοποιημένων Κλινών κατά Glicksman

Για την επιτυχή κατασκευή βιομηχανικών εγκαταστάσεων ρευστοποιημένων κλινών είναι απαραίτητη η γνώση της δυναμικής ρευστών της εγκατάστασης. Το φαινόμενο όμως είναι αρκετά πολύπλοκο και η μελέτη του με βάση μόνο θεωρητικές σχέσεις είναι αδύνατη. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων πειραματικών δεδομένων.

Όμως, οι περισσότερες βιομηχανικές εγκαταστάσεις λειτουργούν σε συνθήκες διάφορες των ατμοσφαιρικών, δηλαδή σε υψηλότερη θερμοκρασία και πίεση. Οι συνθήκες αυτές δεν είναι εύκολο να αναπαραχθούν στο εργαστήριο, ιδιαίτερα σε κλίνες ανάλογου μεγέθους με τις βιομηχανικές. Δεν υπάρχουν έτσι αρκετά πειραματικά στοιχεία για την επιτυχή σχεδίαση μιας τέτοιας κλίνης.

Η μελέτη όμως βιομηχανικών κλινών θα μπορούσε να γίνει εύκολα σε κλίνες μικρότερου μεγέθους στο εργαστήριο, οι οποίες να λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία, αν αναπτυχθούν οι κατάλληλες σχέσεις οι οποίες να επιτρέπουν την ασφαλή σμίκρυνση της εγκατάστασης. Έχουν δημιουργηθεί αρκετές τέτοιες σχέσεις, όμως για αυτή τη μελέτη επιλέχθηκε η χρήση των απλοποιημένων σχέσεων του Glicksman [27, 28, 29].

Οι σχέσεις αυτές αποτελούνται από ένα σετ αδιάστατων παραμέτρων, οι οποίες πρέπει να ικανοποιηθούν ώστε οι δύο εγκαταστάσεις να έχουν δυναμική και γεωμετρική ομοιότητα. Προκύπτουν ως εξής:

Εξισώσεις Διατήρησης: Θεωρώντας το ρευστό ασυμπίεστο η εξίσωση διατήρησης μάζας του ρευστού γίνεται $div(\varepsilon \cdot u) = 0$ όπου ε είναι η κενότητα της κλίνης, δηλαδή το ποσοστό του όγκου το οποίο καταλαμβάνει το ρευστό και u η ταχύτητα του ρευστού στην κάθετη κατεύθυνση. Προφανώς, τα δύο αυτά μεγέθη δεν είναι σταθερά κατά μήκος της κλίνης.

Η αντίστοιχη εξίσωση διατήρησης της μάζας για τα σωματίδια είναι $div\big((1-\varepsilon)\cdot v\big) = 0$ όπου (1-ε) είναι το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνουν τα σωματίδια και v είναι η ταχύτητα ανόδου των σωματιδίων.

Θεωρώντας προς το παρόν τις δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων αμελητέες, μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση ορμής του ρευστού ως εξής:

$$\rho_f \cdot \varepsilon \left[\frac{\vartheta u}{\vartheta t} + u \cdot gradu\right] + \vec{\imath} \cdot g \cdot \varepsilon \cdot \rho_f + gradp + \beta(u - v)$$

Στην εξίσωση αυτή $\vec{\imath}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κατά μήκος της κάθετης κατεύθυνσης. Ο όρος $\beta(u - v)$ παριστάνει την δύναμη ανάμεσα στο ρευστό και τα σωματίδια, όπου ο συντελεστής β δεν είναι σταθερά αλλά πρέπει να βρεθεί από κατάλληλη έκφραση.

Η αντίστοιχη σχέση για τα σωματίδια προκύπτει αντικαθιστώντας κατάλληλα τους όρους της κενότητας ώστε να παριστάνουν το χώρο τον οποίο καταλαμβάνουν τα σωματίδια:

$$\rho_s \cdot (1-\varepsilon)\left[\frac{\vartheta v}{\vartheta t} + v \cdot gradv\right] + \vec{\imath} \cdot g \cdot (1-\varepsilon) \cdot \rho_s + gradp + \beta(u-v)$$

Οριακές Συνθήκες: Οι ταχύτητες του ρευστού και των σωματιδίων, αλλά και η πίεση πρέπει να οριστούν σε όλα τα όρια της εγκατάστασης. Στη βάση της εγκατάστασης είναι η ταχύτητα του ρευστού ένα κλάσμα της ταχύτητας ροής (για πορώδη διασκορπιστή με ομοιόμορφη ροή), είναι δηλαδή $u = \frac{\vec{\imath} \cdot u_0}{1-\Delta}$ όπου Δ το κενό του διάτρητου διασκορπιστή.

Η ταχύτητα των σωματιδίων από την άλλη είναι 0, καθώς δεν έχουν παρασυρθεί ακόμα από το ρεύμα του αέρα, ή βρίσκονται στο κατώτατο σημείο της τροχιάς τους κατά την ανακυκλοφορία, αφού δεν μπορούν να πάνε χαμηλότερα από τον διασκορπιστή. Προφανώς στα τοιχώματα της εγκατάστασης και οι δύο αυτές ταχύτητες είναι μηδενικές (συνθήκη μη ολίσθησης).

Στο άνω άκρο της εγκατάστασης, όπου ο χώρος των οποίων καταλαμβάνουν τα στερεά είναι μηδενικός, δηλαδή ε=1, το ρευστό θα έχει αποκτήσει ολόκληρη την ταχύτητα ροής του. Αντίθετα, καθώς δεν υπάρχουν στερεά σε αυτή την περιοχή, η ταχύτητα v θα είναι μηδενική.

Εκτός από τις οριακές συνθήκες για την ταχύτητα, πρέπει να ορίσουμε οριακή συνθήκη και για την πίεση. Συγκεκριμένα μπορούμε να ορίσουμε στο επίπεδο του διασκορπιστή αρχική τιμή $p_{fr} + \beta \cdot u_{mf} \cdot L_{mf}$ όπου u_{mf} η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης και L_{mf} το ελάχιστο ύψος ρευστοποίησης.

Στα τοιχώματα η κάθετη παράγωγος της πίεσης είναι ίση με το 0, δηλαδή $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$. Από τη σχέση αυτή και τις οριακές συνθήκες της ταχύτητας προκύπτει πως $gradp = -\beta(u-v)$. Στο άνω μέρος της κλίνης η πίεση παίρνει μια σταθερή τιμή, p_{fr}.

Αδιαστατοποίηση: Για να είναι οι εξισώσεις ικανές να αναπαραστήσουν κάθε φαινόμενο πρέπει να αδιαστατοποιηθούν. Οι ταχύτητες μπορούν να αδιαστατοποιηθούν με την ταχύτητα ροής του ρευστού: $u' = \frac{u}{u_0}, \acute{v} = \frac{v}{u_0}$. Ο χρόνος μπορεί να αδιαστατοποιηθεί χρησιμοποιώντας την ταχύτητα ροής του ρευστού και ένα χαρακτηριστικό μήκος. Ο Glicksman χρησιμοποίησε αρχικά ως χαρακτηριστικό μήκος το μέγεθος των σωματιδίων: $\acute{t} = t \cdot \frac{u_0}{d_p}$. Στη συνέχεια όμως χρησιμοποίησε το μέγεθος της κλίνης ως χαρακτηριστικό μέγεθος: $\acute{t} = t \cdot \frac{u_0}{L}$.

Ο Λαπλασιανός τελεστής μπορεί επίσης να αδιαστατοποιηθεί με βάση το χαρακτηριστικό μήκος: $\acute{\nabla} = L \cdot \nabla$. Επειδή όμως η εξίσωση διατήρησης της ορμής περιλαμβάνει και όρους πίεσης κάθε όρος της (και για την εξίσωση του ρευστού και

για τα σωματίδια) θα πολλαπλασιαστεί με τον όρο $\frac{L}{\rho_s \cdot {u_0}^2}$ όπου L είναι το χαρακτηριστικό μήκος, δηλαδή το μέγεθος της κλίνης ή το μέσο μέγεθος των σωματιδίων.

Οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ορμής των σωματιδίων και του ρευστού μπορούν έτσι να γραφούν σε αδιάστατη μορφή:

Εξισώσεις μάζας: 1. Ρευστού: $div(\varepsilon \cdot \acute{u}) = 0$

2. Σωματιδίων: $div\big((1-\varepsilon) \cdot \acute{v}\big) = 0$

Εξισώσεις ορμής: 1. Ρευστού:

$$\frac{\rho_f}{\rho_s} \cdot \varepsilon \left[\frac{\vartheta \acute{u}}{\vartheta \acute{t}} + (\acute{u} \cdot \acute{\nabla}) \cdot \acute{u}\right] + \vec{\imath} \cdot \frac{g \cdot L}{{u_0}^2} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\rho_f}{\rho_s} + \acute{\nabla}\left(\frac{p_0}{\rho_s \cdot u_0}\right) + \frac{\beta \cdot L}{\rho_s \cdot u_0}(\acute{u} - \acute{v})$$

2. Σωματιδίων:

$$(1-\varepsilon)\left[\frac{\vartheta \acute{v}}{\vartheta \acute{t}} + (\acute{v} \cdot \acute{\nabla}) \cdot \acute{v}\right] + \vec{\imath} \cdot \frac{g \cdot L}{{u_0}^2} \cdot (1-\varepsilon) - \frac{\beta \cdot L}{\rho_s \cdot u_0}(\acute{u} - \acute{v})$$

Οι οριακές αυτές συνθήκες πρέπει να αδιαστατοποιηθούν με την superficial ταχύτητα του ρευστού, όπως και προηγουμένως. Έτσι οι οριακές συνθήκες γίνονται για το κάτω μέρος της κλίνης: $\acute{u} = \frac{\vec{\imath}}{1-\Delta}$ και $\acute{v} = 0$. Στα τοιχώματα, τώρα είναι οι δύο αδιάστατες ταχύτητες μηδενικές και στο άνω μέρος της κλίνης είναι: $\acute{u} = \vec{\imath}$ και $\acute{v} = 0$.

Η πίεση μπορεί να αδιαστατοποιηθεί με τον όρο $\frac{p_0}{\rho_s \cdot u_0}$.

Οι αδιάστατοι όροι που πρέπει να ελεγχθούν σε κάθε περίπτωση προκύπτουν από τις αδιάστατες εξισώσεις της ορμής και της ενέργειας και την αδιαστατοποίηση της πίεσης. Οι όροι αυτοί δηλαδή είναι χρησιμοποιώντας ως χαρακτηριστικό μήκος το μέσο μέγεθος των σωματιδίων:

$$\frac{\beta \cdot d_p}{\rho_s \cdot u_0}, \frac{g \cdot d_p}{{u_0}^2}, \frac{L}{d_p}, \frac{D}{d_p}, \frac{\rho_f}{\rho_s}, \frac{p_0}{\rho_s \cdot u_0}$$

Οι όροι $\frac{L}{d_p}, \frac{D}{d_p}$ μπορούν προφανώς να συμπτυχθούν σε έναν όρο ο οποίος δίνει το λόγο γεωμετρικής ομοιότητας των δύο εγκαταστάσεων $\boldsymbol{\frac{L}{D}}$. Επίσης, η πίεση p_0 την οποία χρησιμοποίησε ο Glicksman για την αδιαστατοποίηση έχει στην πραγματικότητα μονάδες kg/m^{2}s. Πρόκειται δηλαδή για παροχή μάζας άνα τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας και το αντικαθιστά στη συνέχεια από τη ροή του στερεού στον πυθμένα της κλίνης οπότε ο όρος γίνεται: $\frac{G_s}{\rho_s \cdot u_0}$.

Αν χρησιμοποιηθεί το ύψος της κλίνης ως χαρακτηριστικό μήκος της εγκατάστασης, ο όρος L/d_p που χρησιμοποιήθηκε πριν εκφυλίζεται στη μονάδα. Το πλήρες σετ των παραμέτρων, γίνεται έτσι:

$$\frac{\beta \cdot L}{\rho_s \cdot u_0}, \frac{g \cdot L}{{u_0}^2}, \frac{L}{D}, \frac{\rho_f}{\rho_s}, \frac{G_s}{\rho_s \cdot u_0}$$

Τα σετ των αδιάστατων παραμέτρων, τόσο με τη χρήση του μεγέθους των σωματιδίων, όσο και με τη χρήση του ύψους της κλίνης είναι παρόμοια. Στην

παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιήσουμε το ύψος της κλίνης ως χαρακτηριστικό μήκος, καθώς μπορεί να υπολογιστεί ευκολότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια από το μέσο μέγεθος των σωματιδίων, λόγω της χρήσης του όρου της γεωμετρικής ομοιότητας.

Όταν τα σωματίδια είναι πυκνά μεταξύ τους, ακόμα και μόνο στο κάτω μέρος της κλίνης (όπως στις κλίνες με φυσαλίδες και στις τυρβώδεις κλίνες) για τον υπολογισμό του συντελεστή β μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση Ergun:

$$\beta|u-v| = \frac{\Delta p}{L} = 150\frac{\varepsilon\cdot(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\frac{\mu|u-v|}{\left(\varphi\cdot d_p\right)^2} + 1.75\frac{(1-\varepsilon)\cdot\varepsilon^2}{\varepsilon^3}\frac{\rho_f|u-v|^2}{\varphi\cdot d_p} \quad (1)$$

Η εξίσωση μπορεί να αναδιαταχθεί σε πιο χρήσιμη μορφή:

$$\frac{\beta\cdot L}{\rho_s\cdot u_0} = 150\frac{\varepsilon\cdot(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\frac{\mu\cdot L}{\rho_s\cdot u_0\left(\varphi\cdot d_p\right)} + 1.75\frac{(1-\varepsilon)\cdot\varepsilon^2}{\varepsilon^3}\frac{L\cdot\rho_f|u-v|}{\rho_s\cdot u_0\left(\varphi\cdot d_p\right)} \quad (2)$$

Η εξίσωση όμως αυτή μπορεί να απλοποιηθεί, οδηγώντας σε απλούστερους τρόπους εύρεσης του β και αντικατάστασή του από το σετ των παραμέτρων [28].

Σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds των σωματιδίων η παράσταση $\frac{\rho_f\cdot u_0\cdot d_p}{\mu}$ η οποία παριστάνει ακριβώς αυτόν τον αριθμό Reynolds τείνει προφανώς να γίνει περίπου ίση με το μηδέν. Επομένως μπορούμε από την εξίσωση (2) να παραλείψουμε το δεύτερο όρο.

Σε αυτούς τους αριθμούς όμως ισχύει στις συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης πως $\frac{\Delta p}{L} = \left(\rho_s-\rho_f\right)g(1-\varepsilon_{mf})$ και από την εξίσωση (1) αν λύσουμε ως προς την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης (είναι η τιμή την οποία λαμβάνει η ταχύτητα του ρευστού u στις συνθήκες αυτές, ενώ η ταχύτητα των σωματιδίων v είναι μηδενική) προκύπτει:

$$u_{mf} = \frac{\rho_s\cdot g(1-\varepsilon_{mf})}{150\frac{\varepsilon_{mf}\cdot(1-\varepsilon_{mf})^2}{{\varepsilon_{mf}}^3}\frac{\mu}{\left(\varphi\cdot d_p\right)^2}} \quad (3)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3) στην εξίσωση (2), γραμμένη για τις συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης, προκύπτει:

$$\frac{\beta\cdot L}{\rho_s\cdot u_0}\cdot\left(\frac{{u_0}^2}{gL}\right) = \frac{u_0}{u_{mf}}\cdot\frac{{\varepsilon_{mf}}^3(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2\cdot(1-\varepsilon_{mf})^2}$$

Όπως φαίνεται από την προηγούμενη εξίσωση, ο συντελεστής β εξαρτάται από τον αριθμό Froude, από το ε_{mf} και από το λόγο της superficial ταχύτητας προς την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης. Η ελάχιστη κενότητα ρευστοποίησης εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος του στερεού που χρησιμοποιείται. Μπορούμε προσεγγιστικά, να θεωρήσουμε πως η σφαιρικότητα και η κατανομή μεγέθους του στερεού είναι οι κύριοι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν και την κενότητα.

Μπορούμε να ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία και για υψηλούς αριθμούς Reynolds. Στην περίπτωση αυτή είναι ο πρώτος όρος της εξίσωσης (2) ο

οποίος μηδενίζεται. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες εξισώσεις καταλήγουμε στο αποτέλεσμα:

$$\frac{\beta \cdot L}{\rho_s \cdot u_0} \cdot \left(\frac{{u_0}^2}{gL}\right) = \frac{{u_0}^2}{{u_{mf}}^2} \cdot \frac{{\varepsilon_{mf}}^3 (1-\varepsilon)|\acute{u} - \acute{v}|}{\varepsilon}$$

Παρατηρούμε πως και σε αυτή την περίπτωση ο αδιάστατος όρος του συντελεστή β εξαρτάται από τον αριθμό Froude, την ελάχιστη κενότητα ρευστοποίησης και από το λόγο της ταχύτητας ροής προς την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης. Οι υπόλοιπες τρεις μεταβλητές (οι αδιάστατες ταχύτητες $\acute{u}, \acute{v}$ και η κενότητα ε) είναι εξαρτημένες από τις προηγούμενες τρεις.

Έτσι, σε χαμηλούς και υψηλούς αριθμούς Reynolds το απλοποιημένο σετ αδιάστατων παραμέτρων είναι:

$$\frac{u_0}{u_{mf}}, \frac{g \cdot L}{{u_0}^2}, \frac{L}{D}, \frac{\rho_f}{\rho_s}, \frac{G_s}{\rho_s \cdot u_0}, \varphi, \textit{κατανομή μεγέθους σωματιδίων}$$

Εφόσον οι παράμετροι αυτοί ισχύουν και για χαμηλούς και για υψηλούς αριθμούς Reynolds, μπορούμε να υποθέσουμε προσεγγιστικά πως ισχύουν για όλο το φάσμα των αριθμών, τουλάχιστον όσο η εξίσωση Ergun είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό του συντελεστή β.

Εκτός από τις εξισώσεις του Glicksman και άλλοι [30] έχουν αναπτύξει σχέσεις κατάλληλες για την κατασκευή κλινών σε κλίμακα. Οι Di Felice et al. ανέπτυξαν μια μελέτη σύμφωνα με την οποία κατάλληλοι αδιάστατοι αριθμοί για τους οποίους η ισότητα θα σήμαινε και γεωμετρική ομοιότητα των δύο μοντέλων είναι:

$$\frac{\rho_f}{\rho_s}, \frac{D}{d_p}, \frac{u_0}{u_t}, Ar = \frac{g \cdot d_p^3 \cdot \rho_f^2}{\mu^2}$$

Στην κατασκευή ρευστοποιημένων κλινών με ανακυκλοφορίας χρειάζεται συνήθως η προσθήκη ενός ακόμα όρου στις αδιάστατες παραμέτρους του Glicksman. Οι Chang και Louge [31] έχουν αναπτύξει μια διαφορετική σχέση για την ομοιότητα της πίεσης. Εξασφαλίζει την ομοιότητα του όρου $\frac{P}{\rho_s g D}$ ο οποίος είναι απαραίτητος για τη μελέτη του δοχείου επιστροφής του υλικού της κλίνης.

10.1) Εφαρμογή των νόμων του Glicksman

1. *Γεωμετρική Ομοιότητα*: Η πραγματική εγκατάσταση (Ε1) έχει διάμετρο 1,29m. Για τη δική μας εγκατάσταση (ΚΜ) επιλέγουμε διάμετρο 0,5m (αρχικά υπήρχε η σκέψη επιλογής διαμέτρου 0,3m αλλά ο γεωμετρικός λόγος ομοιότητας ήταν αρκετά μεγάλος και αναμενόταν σημαντικό σφάλμα στη δυναμική ομοιότητα των εγκαταστάσεων) οπότε έχουμε γεωμετρικό λόγο **2,58**. Το συνολικό ύψος της Ε1 είναι 5,92m άρα το απαιτούμενο ύψος

του ΚΜ είναι περίπου 2,3m. Από το λόγο αυτό προκύπτουν συνολικά οι εξής διαστάσεις για το κρύο μοντέλο:

Μέγεθος	Μονάδα	Πραγματική Εγκατάσταση	Κρύο Μοντέλο
Διάμετρος Πυκνής Φάσης	m	1,29	0,5
Διάμετρος Περιοχής Απεμπλοκής	m	1,94	0,752
Ύψος Πυκνής Φάσης	m	1,29	0,5
Επιφάνεια πυκνής Φάσης	m^2	1,307	0,507
Ύψος Κωνικής Περιοχής	m	1,93	0,748
Ύψος Περιοχής Απεμπλοκής	m	2,71	1,05
Συνολικό Ύψος	m	5,92	2,295

2. *Ομοιότητα πυκνοτήτων*: Το κρύο μοντέλο θεωρούμε αρχικά πως λειτουργεί στην ατμοσφαιρική πίεση όπως και η πραγματική εγκατάσταση. Η θερμοκρασία όμως θα είναι διαφορετική: το κρύο μοντέλο λειτουργεί σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία ενώ η εγκατάσταση στην πολύ υψηλότερη της ατμοσφαιρικής θερμοκρασία των 800°C. Η πυκνότητα του αέρα στη θερμοκρασία αυτή μπορεί να προκύψει από το νόμο των τελείων αερίων ίση με 0,334kg/m^3.
   Από πίνακες [32] προκύπτει πως η πυκνότητα του αέρα στην ατμοσφαιρική πίεση είναι 1,181kg/m^3. Ο επιθυμητός λόγος πυκνοτήτων των δύο εγκαταστάσεων μπορεί επομένως να προκύψει από το λόγο της πυκνότητας του αέρα σε αυτές τις δύο περιπτώσεις. Ο λόγος αυτός προκύπτει ίσος με **3,536.**
   Τα υλικά τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην κλίνη είναι η πυριτική άμμος, η οποία έχει πυκνότητα σωματιδίων 2600kg/m^3 και ο ολιβίνης, ο οποίος έχει πυκνότητα 3200kg/m^3. Στην εγκατάσταση επίσης θα υπάρχει ποσότητα καυσίμου (Stabilat) το οποίο έχει πυκνότητα 700kg/m^3 και υπολειμμάτων της διεργασίας (πίσσας, τέφρας) η οποία έχει πυκνότητα από 600kg/m^3 ως 2200kg/m^3 ανάλογα με τις ενώσεις οι οποίες παράγονται και το ποσοστό στο οποίο βρίσκονται στην εγκατάσταση. Χρησιμοποιώντας το λόγο των οποίο βρήκαμε προηγουμένως μπορούμε να υπολογίσουμε τις πυκνότητες των υλικών που απαιτούμε (υποθέτουμε για τα υπολείμματα μέση πυκνότητα 1400kg/m^3).

Κρύο Μοντέλο			
Μέγεθος	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**
Αντίστοιχο Υλικό Άμμου	ρ_{s1}	kg/m^3	9193,413
Αντίστοιχο Υλικό Ολιβίνη	ρ_{s2}	kg/m^3	11314,97
Αντίστοιχο Υλικό Stabilat	ρ_{s3}	kg/m^3	2475,15
Αντίστοιχο Υλικό Πίσσας	ρ_{s4}	kg/m^3	4950,3

Ελέγχοντας τους κατάλληλους πίνακες [32] διαπιστώνουμε πως η πυκνότητα του αντίστοιχου υλικού της άμμου αυτή είναι πολύ κοντά στην πυκνότητα του καθαρού χαλκού η οποία είναι περίπου 8900kg/m^3. Ο χαλκός είναι ένα υλικό το οποίο χρησιμοποιείται συχνά σε μοντέλα ρευστοποιημένων κλινών. Επειδή η πραγματική εγκατάσταση βασίζεται στην πυριτική άμμο θεωρούμε κατάλληλο να βασίσουμε ανάλογα το κρύο μοντέλο στον χαλκό.

Επειδή όμως η πυκνότητα είναι λίγο διαφορετική από αυτή την οποία υπαγορεύει ο λόγος πυκνοτήτων του αέρα, θα πρέπει η πυκνότητα του αέρα να μεταβληθεί. Για να μεταβληθεί η πυκνότητα θα μεταβάλλουμε την πίεση του αέρα. Ο νέος λόγος που προκύπτει από τις πυκνότητες του χαλκού και της άμμου είναι **3,42.** Οπότε η πυκνότητα του αέρα στο ΚΜ προκύπτει λίγο μικρότερη από την ατμοσφαιρική στο 1,142kg/m^3 και η πίεση από το νόμο των τελείων αερίων υπολογίζεται ίση με 0,98bar.

Κρύο Μοντέλο			
Μέγεθος	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**
Θερμοκρασία	T	K	300
Πίεση	P	Pa	98455,4
Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	1,143
Πυκνότητα Χαλκού (Αντίστοιχο Υλικό Άμμου)	ρ_{s1}	kg/m^3	8900
Αντίστοιχο Υλικό Ολιβίνη	ρ_{s2}	kg/m^3	10953,85
Αντίστοιχο Υλικό Stabilat	ρ_{s3}	kg/m^3	2396,154
Αντίστοιχο Υλικό Υπολειμμάτων	ρ_{s4}	kg/m^3	4792,308

Τα αντίστοιχα υλικά για την αντικατάσταση των υπόλοιπων στερεών μπορούν να βρεθούν από τις πυκνότητες και είναι:

$$Αμμος \rightarrow Χαλκός(πυκνότητα \frac{8900kg}{m^3})$$

$$Ολιβίνης \rightarrow Μόλυβδος\ (πυκνότητα \frac{11300kg}{m^3})$$

$$Stabilat \rightarrow Γυαλί\ (πυκνότητα \frac{2400kg}{m^3})$$

$$Υπολείμματα \rightarrow Μαγνητίτης\ (πυκνότητα \frac{4800kg}{m^3})$$

Η επιλογή αυτή των υλικών εξασφαλίζει καλή ομοιότητα, όμως το πρόβλημα είναι η αντικατάσταση του ολιβίνη με μόλυβδο. Ο μόλυβδος, ως το βαρύτερο μη ραδιενεργό χημικό στοιχείο που υπάρχει στη φύση, είναι αρκετά επικίνδυνος, ιδίως η εισπνοή του, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε δηλητηρίαση (μολυβδίαση) η οποία προκαλεί προβλήματα κυρίως στο αναπνευστικό σύστημα.

Σε υλικά με μικρότερη πυκνότητα η πίεση είναι ακόμα μικρότερη. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιήσουμε αντί για χαλκό, σίδηρο για την αντικατάσταση της άμμου, ο οποίος έχει πυκνότητα 7200kg/m^3 τότε η πίεση την οποία θα πρέπει να έχει το αέριο είναι 0,785bar.Παρατηρούμε πως στην περίπτωση αυτή μπορούμε να μοντελοποιήσουμε τον ολιβίνη με χαλκό.

Στην περίπτωση στην οποία μοντελοποιήσουμε τον ολιβίνη αντί για την άμμο με χαλκό, τότε οι επιθυμητές πυκνότητες των υλικών γίνονται:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Θερμοκρασία	T	K	300
Πίεση	P	Pa	79995,45
Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	0,928938
Αντίστοιχο Υλικό Άμμου	ρ_{s1}	kg/m^3	7231,25
Πυκνότητα Χαλκού (Αντίστοιχο Υλικό Ολιβίνη)	ρ_{s2}	kg/m^3	8900
Αντίστοιχο Υλικό Stabilat	ρ_{s3}	kg/m^3	1946,875
Αντίστοιχο Υλικό Υπολειμμάτων	ρ_{s4}	kg/m^3	3893,75

Τα αντίστοιχα υλικά για την αντικατάσταση των υπόλοιπων στερεών μπορούν να βρεθούν από τις πυκνότητες και είναι:

$$Αμμος \rightarrow Σίδηρος(πυκνότητα \frac{7200kg}{m^3})$$

$$Ολιβίνης \rightarrow Χαλκός\ (πυκνότητα \frac{8900kg}{m^3})$$

$$Stabilat \rightarrow Ασβεστόλιθος\ χαμηλής\ πυκνότητας\ (πυκνότητα \frac{1960kg}{m^3})$$

$$Υπολείμματα \rightarrow Λιμονίτης\ (πυκνότητα \frac{3800kg}{m^3})$$

Τα υλικά αυτά δεν είναι τοξικά και η μόνη ανησυχία είναι η εύρεση ποσοτήτων λιμονίτη, ο οποίος δεν βρίσκεται στην Ελλάδα.

Τέλος, στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιήσουμε καθόλου χαλκό, αλλά μοντελοποιήσουμε τον ολιβίνη με σίδηρο, προκύπτουν οι εξής πυκνότητες:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Θερμοκρασία	T	K	300
Πίεση	P	Pa	64715,42
Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	0,7515
Αντίστοιχο Υλικό Άμμου	ρ_{s1}	kg/m^3	5850
Πυκνότητα Σιδήρου (Αντίστοιχο Υλικό Ολιβίνη)	ρ_{s2}	kg/m^3	7200
Αντίστοιχο Υλικό Stabilat	ρ_{s3}	kg/m^3	1575
Αντίστοιχο Υλικό Πίσσας	ρ_{s4}	kg/m^3	3150

Τα αντίστοιχα υλικά για την αντικατάσταση των υπόλοιπων στερεών μπορούν να βρεθούν από τις πυκνότητες και είναι:

$$Αμμος \rightarrow Βανάδιο(πυκνότητα \frac{5500kg}{m^3})$$
$$Ολιβίνης \rightarrow Σίδηρος\ (πυκνότητα \frac{7200kg}{m^3})$$
$$Stabilat \rightarrow Ανθρακίτης\ (πυκνότητα \frac{1600kg}{m^3})$$
$$Υπολείμματα \rightarrow Μαγνησίτης(πυκνότητα \frac{3200kg}{m^3})$$

Το κύριο πρόβλημα σε αυτή την κατανομή των υλικών είναι η εύρεση αντίστοιχου υλικού για την άμμο. Το πλέον κατάλληλο υλικό με βάση την πυκνότητα είναι το γάλλιο (πυκνότητα 5900kg/m^3) όμως εκτός του ότι είναι σπάνιο και ακριβό, είναι και υγρό σε θερμοκρασία δωματίου, κάνοντάς το ακατάλληλο για οποιαδήποτε διεργασία ρευστοποίησης. Το βανάδιο το οποίο μπορούμε να επιλέξουμε είναι επίσης πολύ ακριβό υλικό.

Ως τώρα θεωρήσαμε πως καθένα από τα υλικά πρέπει να μοντελοποιηθεί με ένα αντίστοιχο υλικό. Θα μπορούσαμε όμως, μειώνοντας βέβαια λίγο την ακρίβεια να χρησιμοποιήσουμε λιγότερα υλικά για τη μοντελοποίηση. Τα υλικά τα οποία θα μπορούσαμε να μοντελοποιήσουμε στο κρύο μοντέλο ως ένα θα ήταν η άμμος και ο ολιβίνης.

Για τη σωστή μοντελοποίηση τους όμως θα πρέπει να βρούμε το ποσοστό κατά βάρος το οποίο θα είχαν στην πραγματική εγκατάσταση. Υποθέτουμε πως το ποσοστό θα είναι 60% άμμος και 40% ολιβίνης, θα υπάρχει δηλαδή μεγαλύτερη ποσότητα άμμου. Στην περίπτωση αυτή ο αρμονικός μέσος των πυκνοτήτων τους είναι:

$$\frac{1}{\rho_\mu} = \frac{x_{άμμος}}{\rho_{άμμος}} + \frac{x_{ολιβ}}{\rho_{ολιβ}} \rightarrow \rho_\mu = 2810{,}81 kg/m^3$$

Η τιμή αυτή της πυκνότητας θα χρησιμοποιηθεί ως ένα υλικό. Ο λόγος της πυκνότητας σε αυτή την περίπτωση θα προκύψει από το λόγο της

πυκνότητας του χαλκού με την πυκνότητα του μείγματος ολιβίνη/άμμου και είναι ίσος με 3,17kg/m^3. Η πυκνότητα των σωματιδίων η οποία απαιτείται είναι τότε:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Θερμοκρασία	T	K	300
Πίεση	P	Pa	81428,03
Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	1,05756
Πυκνότητα Χαλκού (Αντίστοιχο Υλικό Ολιβίνη/Άμμου)	ρ_{s1}	kg/m^3	8900
Αντίστοιχο Υλικό Stabilat	ρ_{s2}	kg/m^3	2216,442
Αντίστοιχο Υλικό Πίσσας	ρ_{s3}	kg/m^3	4432,885

Η κατανομή των υλικών αυτών στην πραγματική κλίνη δεν είναι δεδομένη. Σκοπός είναι να γίνουν πειράματα για να διαπιστωθούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας και η βέλτιστη κατανομή υλικών στην κλίνη. Για το λόγο αυτό δεν θα θεωρήσουμε μια σταθερή κατανομή αλλά θα πάρουμε διαφορετικές περιπτώσεις.

3. *Ομοιότητα αριθμού Froude:* Ο αριθμός Froude $\left(\frac{{u_0}^2}{gH}\right)$ είναι επίσης μια από τις παραμέτρους για την επιτυχή κατασκευή ενός μοντέλου. Μέσω αυτού του όρου μπορούμε να αναπτύξουμε μια σχέση για τη ταχύτητα ροής του αέρα μεταξύ του ΚΜ και της Ε1. Συγκεκριμένα:

$$\left(\frac{{u_0}^2}{gH}\right)_{KM} = \left(\frac{{u_0}^2}{gH}\right)_{E1} \rightarrow \frac{u_{0E1}}{u_{0KM}} = \sqrt{\frac{H_{E1}}{H_{KM}}}$$

Ο λόγος δηλαδή των ταχυτήτων ισούται με την τετραγωνική ρίζα του γεωμετρικού λόγου των δύο εγκαταστάσεων (αφού οι εγκαταστάσεις έχουν τον ίδιο λόγο σε όλες τις διαστάσεις τους, δεν παίζει ρόλο ποια διάσταση θα χρησιμοποιηθεί). Για την περίπτωση αυτή, αφού ο γεωμετρικός λόγος είναι 2,58, ο λόγος των ταχυτήτων είναι **1,606**. Δηλαδή, όταν χρησιμοποιείται μια ταχύτητα στο ΚΜ, η ταχύτητα της Ε1 την οποία αυτή προσομοιάζει είναι 1,606 φορές μεγαλύτερη.

4. *Ομοιότητα λόγου ταχυτήτων:* Αναφέρεται στον όρο $\frac{u_0}{u_{mf}}$. Από τον όρο αυτόν μπορεί να προκύψουν τα εξής:

$$\left(\frac{u_0}{u_{mf}}\right)_{KM} = \left(\frac{u_0}{u_{mf}}\right)_{E1} \rightarrow \frac{u_{mfE1}}{u_{mfKM}} = \frac{u_{0E1}}{u_{0KM}}$$

Ο λόγος δηλαδή των ελαχίστων ταχυτήτων ρευστοποίησης είναι ίσος με το λόγο των ταχυτήτων ροής. Ο τελευταίος λόγος όμως υπολογίστηκε ήδη

από την ομοιότητα του αριθμού Froude στην προηγούμενη παράγραφο και είναι ίσος με **1,606**.

Στην πραγματική εγκατάσταση Ε1 γνωρίζουμε για μια κατανομή καυσίμου και άμμου ήδη την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης , η οποία είναι ίση με 0,076m/s. Μπορούμε έτσι να υπολογίσουμε εύκολα την αντίστοιχη ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης του ΚΜ, η οποία βρίσκεται ίση με 0,0473m/s.

Από την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης πρέπει να βρούμε το μέγεθος των σωματιδίων που θα χρησιμοποιηθεί στην κλίνη. Υπάρχουν αρκετές εξισώσεις με τις οποίες μπορούμε να βρούμε το μέγεθος αυτό. Θα δοκιμάσουμε για αυτή την κατανομή κάποιες εξισώσεις ώστε να ελέγξουμε τα μεγέθη των σωματιδίων τα οποία μας δίνουν και να επιλέξουμε αυτήν που θα χρησιμοποιήσουμε για τις διάφορες κατανομές.

Η δοκιμή θα γίνει για την εύρεση του μεγέθους των σωματιδίων του χαλκού, το οποίο είναι το αντίστοιχο της άμμου. Επιλέγουμε την άμμο γιατί είναι το βασικό συστατικό του υλικού της πραγματικής εγκατάστασης και η διάμετρος των σωματιδίων της είναι γνωστή και ίση με 498μm. Το αποτέλεσμα της ομοιότητας μεταξύ αυτών των δύο υλικών (δηλαδή ο λόγος των διαμέτρων τους) θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια και στα άλλα υλικά.

Αρχικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το σετ των πλήρων παραμέτρων του Glicksman. Συγκεκριμένα, έχουμε ήδη αναφέρει πως ο όρος της γεωμετρικής ομοιότητας, αν χρησιμοποιήσουμε το πλήρες σετ παραμέτρων και αν χρησιμοποιήσουμε το μέγεθος των σωματιδίων ως χαρακτηριστικό μήκος γίνεται $\frac{L}{d_p}$. Γνωρίζοντας πως το μέγεθος των σωματιδίων στην Ε1 είναι 0,498mm και έχοντας υπολογίσει πως ο γεωμετρικός λόγος είναι 2,58 μπορούμε να βρούμε εύκολα πως το απαραίτητο μέγεθος σωματιδίων είναι: $\frac{d_{pE1}}{d_{pKM}} = \frac{H_{E1}}{H_{KM}} \rightarrow d_{pKM} = \frac{d_{pE1}}{2.58} = 0.193mm$

Ωστόσο, στις υπόλοιπες περιπτώσεις έχουμε χρησιμοποιήσει ως χαρακτηριστικό μήκος το ύψος της κλίνης Η. Ταυτόχρονα, η σχέση αυτή προέρχεται από το πλήρες σετ των παραμέτρων του Glicksman, ενώ εμείς χρησιμοποιούμε για ευκολία το απλοποιημένο σετ. Για αυτό το λόγο θα προσπαθήσουμε να βρούμε και άλλους τρόπους για τον υπολογισμό του μέσου μεγέθους των σωματιδίων.

Οι Wen και Yu [33] προτείνουν για λεπτόκοκκα σωματίδια την ακόλουθη προσεγγιστική σχέση:

$$Re_{p,mf} = \sqrt{33.7^2 + 0.0408 \cdot Ar} - 33.7$$

για $Re_{p,mf} = \frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_g}{\mu}$ και $Ar = \frac{{d_p}^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}$

Η σχέση αυτή είναι μη γραμμική ως προς το μέγεθος σωματιδίων, αλλά με εφαρμογή αριθμητικής ανάλυσης ή απλά με δοκιμές μπορούμε να βρούμε πως το επιθυμητό μέγεθος των σωματιδίων είναι τα **130μm,** μέγεθος το οποίο δίνει ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης 0,0475m/s.

Παρατηρούμε πως υπάρχει μια αρκετά μεγάλη απόκλιση από την τιμή που έδωσε ο προηγούμενος υπολογισμός. Η απόκλιση αυτή είναι $\frac{193-130}{193} = 32{,}64\%$. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στην προσεγγιστικότητα των σχέσεων αναλογίας του Glicksman αλλά και στο ότι η σχέση των Wen και Yu είναι προσεγγιστική. Συγκεκριμένα οι Wen και Yu θεωρούν πως οι όροι $\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi}$ και $\frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi^2}$ οι οποίοι εμφανίζονται στην πλήρη εξίσωση διατηρούνται περίπου σταθεροί για ένα μεγάλο εύρος αριθμών Reynolds (από 0,001 ως 4000) και μπορούν να πάρουν τις τιμές 33,7 και 0,0408 τις οποίες χρησιμοποιήσαμε. Η προσέγγιση αυτή δίνει προβλέψεις της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης σε ένα εύρος ±34%.

Στη βιβλιογραφία, εκτός από τη σχέση των Wen και Yu έχουν αναπτυχθεί και άλλες παρόμοιες σχέσεις για τον υπολογισμό της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης συναρτήσει του μεγέθους των σωματιδίων. Οι εξισώσεις αυτές έχουν την ίδια μορφή με την προηγούμενη, αλλά κάθε συγγραφέας προτείνει διαφορετικές τιμές συντελεστών.

Ο Richardson [34] πρότεινε λίγο μετά τους Wen και Yu τις τιμές 25,7 και 0,0365 αντίστοιχα. Το επιθυμητό μέγεθος σωματιδίων σε αυτή την περίπτωση είναι **120μm**, δίνοντας ταχύτητα 0,0474m/s. Η απόκλιση από τη σχέση των Wen και Yu είναι $\frac{130-120}{130} = 7{,}7\%$. Η απόκλιση είναι εξαιρετικά μικρή.

Οι Babu et al. [35] προτείνουν χρησιμοποιώντας όλες τις εργασίες που δημοσιεύθηκαν ως το 1977 τις τιμές 25,3 και 0,0651 αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση το μέγεθος των σωματιδίων το οποίο δίνει ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης όσος το δυνατόν εγγύτερα στα 0,0473m/s είναι **89μm.** Η απόκλιση από την τιμή των Wen και Yu είναι $\frac{130-89}{130} = 31{,}5\%$.

Ο Grace [36] πρότεινε σε μια νεώτερη εργασία τους συντελεστές 27,2 και 0,0408 αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα είναι σε αυτή την περίπτωση **117μm.** Η απόκλιση είναι πολύ μικρότερη από τη σχέση των Babu et al. Σχετικά με τη μέθοδο των Wen και Yu. Είναι $\frac{130-117}{130} = 10\%$. Η απόκλιση αυτή είναι αρκετά μικρή για δυο τόσο προσεγγιστικές σχέσεις.

Η απόκλιση αυτή οφείλεται τόσο στην προσεγγιστική φύση αυτών των εξισώσεων, όσο και στις μετρήσεις τις οποίες χρησιμοποίησαν για την εφαρμογή αυτής της σχέσης.

Ο τελευταίος τρόπος είναι να χρησιμοποιήσουμε τη μη γραμμική ακριβής εξίσωση για τον υπολογισμό της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης από την οποία προήλθε και η σχέση των Wen και Yu:

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi} {Re_{p,mf}}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi^2} Re_{p,mf} = Ar$$

Η εξίσωση αυτή για πολύ λεπτά σωματίδια μπορεί να απλοποιηθεί στην ακόλουθη μορφή:

$$u_{mf} = \frac{d_p^2(\rho_s - \rho_g)g}{150\mu} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi^2}{1-\varepsilon_{mf}}$$

Από την εξίσωση αυτή μπορούμε να βρούμε πως το επιθυμητό μέγεθος των σωματιδίων ώστε να είναι η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης 0,0473m/s είναι **128μm.** Για να ισχύει αυτή η σχέση πρέπει όπως είπαμε τα σωματίδια να είναι λεπτόκοκκα. Αυτό αντικατοπτρίζεται στο κριτήριο $Re_{p,mf} < 20$. Για αυτό το μέγεθος των σωματιδίων το αποτέλεσμα είναι 0,432 επομένως η εξίσωση αυτή ισχύει.

Η εξίσωση αυτή έχει απόκλιση από την αντίστοιχη των Wen και Yu $\frac{149,5-130}{149,5} = 13\%$. Η ακρίβεια αυτής της εξίσωσης μειώνεται από το γεγονός πως η σφαιρικότητα των σωματιδίων και η ελάχιστη κενότητα ρευστοποίησης δεν υπολογίστηκαν πειραματικά. Η σφαιρικότητα υπολογίστηκε περίπου 0,7 θεωρώντας σωματίδια κατηγορίας Geldart B τα οποία έχουν αμμοειδή μορφή, ενώ η κενότητα υπολογίστηκε από την σφαιρικότητα με βάση τη σχέση $\varepsilon_{mf} = \left(\frac{0.071}{\varphi}\right)^{1/3}$.

Συνοπτικά τα αποτελέσματα από τις μεθόδους είναι:

Μέθοδος	Συντελεστές		Μέγεθος Σωματιδίων (μm)
Πλήρεις Σχέσεις Αναλογίας	-	-	193
Wen και Yu	33,7	0,0408	130
Richardson	25,7	0,0365	120
Babu et al.	25,3	0,0651	89
Grace	27,2	0,0408	117
Απλοποιημένη εξίσωση	-	-	128

Παρατηρούμε πως οι περισσότερες εξισώσεις δίνουν το μέγεθος σωματιδίων ως μια τιμή γύρω στα 130 με 120μm. Η απλοποιημένη μάλιστα εξίσωση δίνει τιμή 128μm. Επειδή αυτή η εξίσωση θεωρείται ως η πιο ακριβής, θα δεχτούμε πως το μέσο μέγεθος των σωματιδίων στην κλίνη θα πρέπει να είναι 128μm.

5. *Ομοιότητα παροχής στερεού*: Η παροχή στερεού G_s (kg/m^{2}s) πρέπει να αδιαστατοποιηθεί χρησιμοποιώντας την αδιάστατη παροχή M όπου $M = \frac{G_s}{\rho_s \cdot u_0}$. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από το κλάσμα αυτό ο λόγος των παροχών μεταξύ των δύο κλινών είναι συνάρτηση του λόγου των ταχυτήτων και του λόγου των πυκνοτήτων, οι οποίοι όμως υπολογίστηκαν προηγουμένως. Έτσι ο λόγος των παροχών γίνεται:

$$\frac{G_{sKM}}{G_{sE1}} = \frac{\rho_{sKM}}{\rho_{sE1}} \frac{u_{0KM}}{u_{0E1}}$$

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση την οποία μελετάμε (υλικό κλίνης αποκλειστικά άμμος) ο λόγος αυτός γίνεται ίσος με 0,182 δηλαδή η παροχή στο κρύο μοντέλο πρέπει να είναι το 18,2% της παροχής στη ρευστοποιημένη κλίνη.

Η μέγιστη παροχή εισόδου στην εγκατάσταση θα είναι 750kg/h. Επομένως η αντίστοιχη μέγιστη παροχή ρευστών θα πρέπει να είναι το 18,2% της παροχής αυτής, δηλαδή 136,5kg/h. Προσεγγιστικά, μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε την απαραίτητη μέγιστη παροχή για το σύστημα απαγωγής των υπολειμμάτων. Στην πραγματική εγκατάσταση η μέγιστη αυτή παροχή είναι 50kg/h. Στο κρύο μοντέλο αντίστοιχα θα είναι 9,1kg/h.

6. *Ομοιότητα στερεού:* Στην παράγραφο εννοούμε τη σφαιρικότητα και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, τα οποία πρέπει να είναι τα ίδια και στο KM και στην εγκατάσταση E1.

Η μέτρηση του μεγέθους των σωματιδίων δεν είναι εύκολη όταν το σχήμα τους δεν είναι κυκλικό. Φυσικά, όπως αντιλαμβανόμαστε το σχήμα ενός τυχαίου στερεού σε σκόνη δεν είναι σχεδόν ποτέ γεωμετρικό. Πρέπει λοιπόν να βρεθεί ένας τρόπος για τη μέτρηση της ισοδύναμης σφαιρικής διαμέτρου.

Οι Zens and Otmer [37] προτείνουν τη χρήση ενός συντελεστή που ονομάζεται σφαιρικότητα. Ο όρος αυτός ορίζεται ως εξής:

$$\varphi = \left(\frac{surface\ of\ sphere}{surface\ of\ particle}\right)_{same\ volume}$$

Από τον ορισμό της εξίσωσης καταλαβαίνουμε πως η τιμή του συντελεστή αν το σωματίδιο είναι σφαιρικό είναι 1, ενώ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η τιμή του είναι μικρότερη της μονάδας (η σφαίρα είναι το στερεό το οποίο έχει τη μικρότερη επιφάνεια για τον ίδιο όγκο).

Ενδεικτικές τιμές για τη σφαιρικότητα διάφορων στερεών δίνονται στον παρακάτω πίνακα [20]:

Τύπος Σωματιδίου	Σφαιρικότητα
Σφαίρα	1
Κύβος	0,81
Κύλινδρος (h=d)	0,87
Κύλινδρος (h=5d)	0,7
Κύλινδρος (h=10d)	0,58
Δίσκος (h=d/3)	0,76
Δίσκος (h=d/6)	0,6
Δίσκος (h=d/10)	0,47
Ενεργός άνθρακας	0,7-0,9
Τζελ σιλικόνης	0,7-0,9
Σπασμένα στερεά	0,63
Κάρβουνο (ανθρακίτης)	0,63
Κάρβουνο (bituminous)	0,63
Κάρβουνο (φυσική σκόνη)	0,65
Κάρβουνο (κονιοποιημένο)	0,73
Φελλός	0,69
Γυαλί (διαλυμένο)	0,65
Μαγνητίτης	0,58
Καταλύτης Fischer-Tropsch	0,58
Φύλλα μίκας	0,28
Άμμος (σφαιρική)	0,86
Άμμος (αιχμηρή)	0,66
Άμμος (παλιά παραλία)	0,86
Άμμος (νέο ποτάμι)	0,53
Σκόνη tungsten	0,89
Σιτάρι	0,85

Η τιμή για τα σπασμένα στερεά όπως βλέπουμε είναι 0,63. Ο χαλκός όμως που θα χρησιμοποιηθεί θα έχει πιο αμμοειδή μορφή, καθώς θα είναι επεξεργασμένος. Υποθέτουμε λοιπόν πως ο χαλκός αυτός θα έχει σφαιρικότητα περίπου **0,7**.

Τα σωματίδια του χαλκού, όσο επεξεργασμένα και να είναι δεν μπορούν να έχουν ακριβώς το ίδιο μέγεθος. Το ίδιο ισχύει και για το υλικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση Ε1. Οι σχέσεις αναλογίας του Glicksman προϋποθέτουν πως τα δύο αυτά στερεά θα έχουν την ίδια κατανομή μεγέθους.

Βέβαια, δεν γνωρίζουμε την κατανομή μεγέθους του υλικού της εγκατάστασης Ε1, ενώ ακόμα και αν το γνωρίζαμε, η παραγγελία ενός όμοιου στερεού θα ήταν υπερβολικά ακριβή. Για το λόγο αυτό θα φροντίσουμε ώστε το υλικό που θα παραγγελθεί για το ΚΜ να έχει όσο το

δυνατόν το αντίστοιχο μέγεθος της μέσης διαμέτρου του υλικού της Ε1 η οποία μας έχει δοθεί.

10.2) Εφαρμογή των νόμων δυναμικής ομοιότητας στην εγκατάσταση στόχο

Η εγκατάσταση στόχος προορίζεται για τη βιομηχανική εφαρμογή της αεριοποίησης Stabilat. Η εγκατάσταση αυτή θα βασίζεται στα αποτελέσματα του κρύου μοντέλου και της εγκατάστασης στο Osnabrück. Ο σχεδιασμός της εγκατάστασης δεν έχει γίνει ακόμα, αλλά θα χρησιμοποιήσουμε τους νόμους ομοιότητας του Glicksman και τα ήδη γνωστά δεδομένα της πραγματικής εγκατάστασης και του κρύου μοντέλου για να υπολογίσουμε σε πρώτη φάση τις διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης.

α. Λόγος πυκνοτήτων

Η εγκατάσταση θα χρησιμοποιεί τα ίδια στερεά με την εγκατάσταση στο Osnabrück. Δηλαδή το κύριο υλικό της κλίνης θα είναι η πυριτική άμμος, ενώ ως καταλύτης θα χρησιμοποιηθεί ολιβίνης. Το καύσιμο το οποίο θα χρησιμοποιεί η εγκατάσταση θα είναι προφανώς το Stabilat. Ο λόγος δηλαδή των πυκνοτήτων των υλικών μεταξύ των δύο εγκαταστάσεων θα ισούται με τη μονάδα.

Ταυτόχρονα η εγκατάσταση στόχος, όπως και οι άλλες δύο παρεμφερείς εγκαταστάσεις τις οποίες μελετούμε θα χρησιμοποιεί ως οξειδωτικό μέσο ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος θα βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση. Η θερμοκρασία αναμένεται να βρίσκεται στην περιοχή των 800°C, καθώς είναι μια θερμοκρασία στην οποία το Stabilat μπορεί να μετατραπεί σε αέριο αρκετά αποτελεσματικά. Οι Hamel et al. [14] χρησιμοποιούν βέβαια στην εγκατάστασή τους μεγαλύτερη θερμοκρασία της τάξης των 920°C για τη μετατροπή του Stabilat αλλά δεν χρησιμοποιούν αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη.

Συνολικά, η εγκατάσταση στόχος και η εγκατάσταση στο Osnabrück χρησιμοποιούν την ίδια διαμόρφωση στερεών και οξειδωτικού μέσου. Επιπλέον, η αεριοποίηση γίνεται στις ίδιες συνθήκες και στις δύο κλίνες. Επομένως, ο λόγος πυκνοτήτων μεταξύ των δύο εγκαταστάσεων ο οποίος απαιτείται από τους νόμους του Glicksman είναι ίσος με τη μονάδα.

b. Ομοιότητα παροχής στερεού

Για την εγκατάσταση αυτή είναι γνωστό πως η επιθυμητή μέγιστη παροχή καυσίμου είναι 2000kg/h. Γνωρίζουμε πως η μέγιστη παροχή της εγκατάστασης στο Osnabrück είναι 750kg/h. Επομένως, ο λόγος των δύο παροχών είναι:

$$\frac{G_{sE1}}{G_{sE2}} = \frac{750}{2000} = 0{,}375$$

Η παροχή δηλαδή στην πραγματική εγκατάσταση είναι το 37,5% της εγκατάστασης στόχου.

Όπως βρήκαμε πριν όμως, ο λόγος των παροχών ισούται με το γινόμενο των λόγων των πυκνοτήτων και των ταχυτήτων ροής. Από τον έλεγχο του λόγου των πυκνοτήτων, τον οποίο κάναμε ακριβώς πριν, βρέθηκε ότι είναι ίσος με τη μονάδα. Επομένως, ο λόγος των παροχών των δύο εγκαταστάσεων ισούται με το λόγο των ταχυτήτων ροής τους.

c. *Λόγος Ταχυτήτων – Γεωμετρική Ομοιότητα*

Ο λόγος ταχυτήτων ροής, όπως βρέθηκε είναι ίσος με τον λόγο παροχών:

$$\frac{u_{0E1}}{u_{0E2}} = \frac{G_{sE1}}{G_{sE2}} = 0{,}375$$

Από το λόγο των ταχυτήτων του νόμου του Glicksman μπορούμε να βρούμε και το λόγο των ελάχιστων ταχυτήτων ρευστοποίησης, ο οποίος είναι ίσος με τον λόγο των ταχυτήτων ροής, δηλαδή:

$$\frac{u_{0E1}}{u_{0E2}} = \frac{u_{mfE1}}{u_{mfE2}} = 0{,}375$$

Από την ισότητα του αριθμού Froude βρήκαμε προηγουμένως πως ο λόγος των ταχυτήτων ροής ισούται με την τετραγωνική ρίζα του γεωμετρικού λόγου ομοιότητας. Επομένως ο γεωμετρικός λόγος ομοιότητας ισούται με το τετράγωνο του λόγου των ταχυτήτων:

$$\frac{H_{E1}}{H_{E2}} = \left(\frac{u_{0E1}}{u_{0E2}}\right)^2 = 0{,}375^2 = 0.141$$

Επομένως οι γεωμετρικές διαστάσεις της εγκατάστασης γίνονται:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Διάμετρος Πυκνής Φάσης	D	m	9,15
Διάμετρος Περιοχής Απεμπλοκής	D_f	m	13,76
Ύψος Πυκνής Φάσης	H	m	9,15
Επιφάνεια πυκνής Φάσης	A_b	m^2	9,27
Ύψος Κωνικής Περιοχής	H_{fr}	m	13,69
Ύψος Περιοχής Απεμπλοκής	H_f	m	19,22
Συνολικό Ύψος	H_t	m	42

Προφανώς, αυτός ο υπολογισμός είναι απλώς μια πρώτη προσέγγιση. Οι συνθήκες αεριοποίησης στην εγκατάσταση μπορεί να αλλάξουν κατά το σχεδιασμό της ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση. Ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα από τη λειτουργία του κρύου μοντέλου μπορεί να δείξουν αδυναμίες και πιθανές βελτιώσεις του συστήματος, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό της εγκατάστασης.

11) Ροή Φυσαλίδων

Μια ρευστοποιημένη κλίνη με φυσαλίδες έχει περιοχές με πολύ χαμηλή πυκνότητα στερεών σωματιδίων που ονομάζονται μερικές φορές κενά αερίου. Συνήθως όμως οι περιοχές αυτές ονομάζονται φυσαλίδες. Οι φυσαλίδες οδηγούν την κλίνη να συμπεριφέρεται ως ένα ρευστό με χαμηλό ιξώδες. Κινούνται ανοδικά μέσα στην κλίνη με διάφορες ταχύτητες και σπάνε ύστερα από κάποιο διάστημα διαχέοντας το αέριο.

Κάθε κλίνη, ανεξάρτητα από το ρευστό και το στερεό που χρησιμοποιείται, έχει παρόμοιο σχήμα φυσαλίδων. Είναι σχεδόν σφαιρικές όταν είναι μικρές αλλά γίνονται πιο επίπεδες όσο μεγαλώνουν. Οι μικρές φυσαλίδες έχουν πάντοτε μεγαλύτερη ταχύτητα ανόδου στην κλίνη από φυσαλίδες μεγαλύτερου μεγέθους.

Οι φυσαλίδες δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Έρχονται σε επαφή, επηρεάζοντας η μια την άλλη και μπορεί να ενωθούν σχηματίζοντας νέες μεγαλύτερες φυσαλίδες, οι οποίες έχουν διαφορετική ταχύτητα ανόδου και μεγαλύτερο μέγεθος. Οι φυσαλίδες επηρεάζονται επίσης από την επαφή τους με τα τοιχώματα του αντιδραστήρα.

11.1) Σχηματισμός Φυσαλίδων

Σε χαμηλές παροχές αερίου αν ο αριθμός οπών ανά μονάδα επιφάνειας είναι N_{or} (cm^{-2}) και όλο το αέριο επιπλέον αυτού που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η ρευστοποίηση σχηματίζει φυσαλίδες του ίδιου μεγέθους, η παροχή όγκου από κάθε οπή, V_{or}, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$u_0 - u_{mf} = V_{or} \cdot N_{or}$$

Η εξίσωση αυτή έχει προφανώς αρκετές παραδοχές. Το επιπλέον αέριο το οποίο παρέχεται στην εγκατάσταση δεν είναι δυνατόν να καταλήγει εξ' ολοκλήρου στις φυσαλίδες. Επιπλέον, οι φυσαλίδες που δημιουργούνται σε κάθε οπή αποκλείεται να έχουν ακριβώς το ίδιο μέγεθος. Εφόσον όμως μιλούμε για τη στιγμή της δημιουργίας τους και πριν αρχίσουν να ενώνονται μεταξύ τους, το μέγεθός τους είναι σχετικά μικρό, επομένως οποιαδήποτε διαφορές έχει μπορούν να αγνοηθούν.

Εξάλλου, επειδή η παροχή αερίου είναι χαμηλή, το μεγαλύτερο ποσοστό χρησιμοποιείται σίγουρα για τη συντήρηση της ρευστοποίησης, και επειδή έχουμε αναβράζουσα κλίνη, ένα μεγάλο ποσοστό του αερίου καταλήγει αναμφίβολα στις φυσαλίδες. Κατά συνέπεια μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό το οποίο απομένει καταλήγει στην πυκνή φάση. Μπορούμε να θεωρήσουμε για τις περισσότερες περιπτώσεις αυτό το ποσοστό αμελητέο.

Για μια αρκετά χαμηλή παροχή, ώστε οι αρχικές φυσαλίδες από κάθε οπή να είναι αρκετά μικρές ώστε να μην αγγίζουν μεταξύ τους (η παραδοχή αυτή ισχύει σε χαμηλές παροχές αν οι οπές έχουν αρκετή απόσταση μεταξύ τους, αν και αυτό οδηγεί σχεδόν πάντα στη δημιουργία νεκρών ζωνών όπου κατακάθονται τα σωματίδια), το μέγεθος της φυσαλίδας μπορεί να δοθεί από την εξίσωση: $d_{b0} = 1.3\frac{V_{or}^{0.4}}{g^{0.2}}$. Συνδυάζοντας αυτή την εξίσωση με την προηγούμενη προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για την εύρεση της αρχικής διαμέτρου της φυσαλίδας σε χαμηλή παροχή αερίου:

$$d_{b0} = \frac{1.3}{g^{0.2}}\left[\frac{u_0 - u_{mf}}{N_{or}}\right]^{0.4}, \quad d_{b0} < l_{or}$$

Ο περιορισμός στην πάνω εξίσωση, όπου l_{or} είναι η απόσταση ανάμεσα σε γειτονικές οπές, ικανοποιεί την συνθήκη ότι οι γειτονικές φυσαλίδες δεν αγγίζουν μεταξύ τους. Ο αριθμός των οπών ανά μονάδα επιφάνειας, N_{or} μπορεί να βρεθεί από το l_{or}. Συγκεκριμένα, αν οι οπές είναι διατεταγμένες σε τετράγωνο, τότε $N_{or} = \frac{1}{l_{or}^2}$ ενώ αν είναι διατεταγμένες σε ισόπλευρο τρίγωνο η εξίσωση για τον υπολογισμό είναι $N_{or} = \frac{2}{\sqrt{3}\cdot l_{or}^2}$. Στην περίπτωση κατασκευής διασκορπιστή ο οποίος δεν βασίζεται σε κάποια γεωμετρική σχεδίαση, ο υπολογισμός του N_{or} πρέπει να γίνει με το χέρι.

Η παραπάνω εξίσωση προφανώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η παροχή του αέρα είναι τόσο μεγάλη ώστε οι φυσαλίδες ακουμπούν μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε πως το μέγεθος της φυσαλίδας είναι το ελάχιστο δυνατό το οποίο αντιστοιχεί στη δεδομένη ροή του αέρα και να θεωρήσουμε πως οι γειτονικές φυσαλίδες απλώς ακουμπούν χωρούν να ενώνονται. Η ανάλυση δείχνει πως σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση η οποία ικανοποιεί αρκετά καλά τα πειραματικά στοιχεία είναι:

$$d_{b0} = \frac{2.78}{g}\left(u_0 - u_{mf}\right)^2$$

11.2) Μοντέλο Davidson-Harrison

Οι Davidson και Harrison [38] ανέπτυξαν ένα απλό μοντέλο το οποίο περιγράφει τη ροή του ρευστού αλλά και των στερεών σωματιδίων στις φυσαλίδες. Το μοντέλο προβλέπει επίσης την κατανομή πίεσης σε αυτές. Το μοντέλο αναπτύχθηκε και για δισδιάστατες και για τρισδιάστατες κλίνες και βασίζεται στα παρακάτω αξιώματα:

1. Μια φυσαλίδα αερίου είναι ελεύθερη από κάθε στερεό και κυκλική στο σχήμα, είναι δηλαδή σφαιρική σε τρισδιάστατη κλίνη και κυλινδρική σε δισδιάστατη κλίνη
2. Καθώς η φυσαλίδα ανέρχεται, τα στερεά σωματίδια παραμερίζουν, όπως θα έκανε ένα ασυμπίεστο και ατριβές ρευστό με πυκνότητα $\rho_s\left(1 - \varepsilon_{mf}\right)$

3. Το αέριο ρέει στην πυκνή φάση ως ένα ασυμπίεστο ιξώδες ρευστό, έτσι η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο αέριο και το στερεό πρέπει να ικανοποιεί το νόμο του Darcy. Σε κάποια διάσταση x: $u_{gas} - u_{solid} = -K\frac{\vartheta p}{\vartheta x}$

Οι ακόλουθες οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται επίσης στην ανάπτυξη:

i. Μακριά από τη φυσαλίδα η παράγωγος της πίεσης εξακολουθεί να υπάρχει και δίνεται από τη σχέση $\left(\frac{dp}{dx}\right)_a = \left(1 - \varepsilon_{mf}\right)\left(\rho_s - \rho_f\right)g$

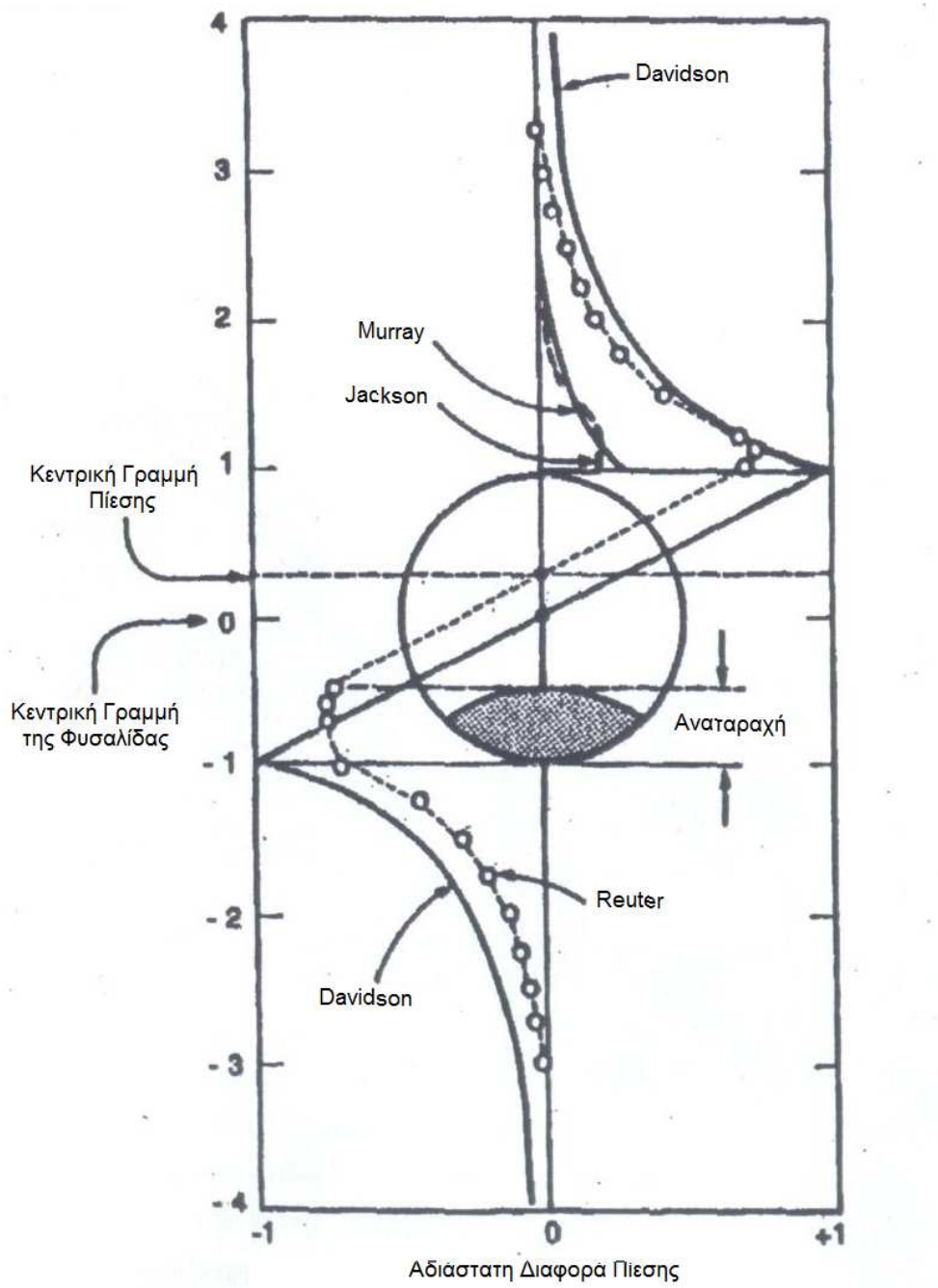
ii. Η πίεση στη φυσαλίδα είναι σταθερή

Αυτά τα αξιώματα και οι οριακές συνθήκες είναι αρκετά για να προκύψουν οι ροές τόσο για τα στερεά όσο και για το αέριο καθώς και η κατανομή πίεσης στην περιοχή γύρω από την ανερχόμενη φυσαλίδα. Το δεύτερο αξίωμα μας επιτρέπει τον υπολογισμό των ταχυτήτων από τα θεωρήματα διατήρησης:

a) Για σχετικό παρατηρητή κινούμενο μαζί με τη φυσαλίδα: $u_r = \frac{\vartheta \Phi}{\vartheta r}$ $u_\theta = \frac{1}{r}\frac{\vartheta \Phi}{\vartheta \theta}$ όπου Φ είναι το δυναμικό της ταχύτητας $\Phi = -u_{br}\left(r + \frac{R_b^3}{2r^2}\right)cos\theta$

b) Για ακίνητο παρατηρητή οι αντίστοιχες ταχύτητες είναι: $u_r = -\frac{1}{r^2 sin\theta}\frac{\vartheta \psi}{\vartheta r}$ $u_\theta = \frac{1}{r \cdot sin\theta}\frac{\vartheta \psi}{\vartheta \theta}$ όπου ψ είναι η συνάρτηση ροής $\psi = -\frac{u_0 \cdot R_b^3}{2r}sin^2\theta$

Το αξίωμα 3 δείχνει πως η κατανομή πίεσης γύρω από μια φυσαλίδα ικανοποιεί την εξίσωση Laplace. Το τρίτο αξίωμα μαζί με τις οριακές συνθήκες και τα άλλα δύο αξιώματα δίνει την ολική κατανομή της πίεσης. Η πίεση σε κάθε σημείο δίνεται από τη σχέση $p = -\left(\frac{dp}{dx}\right)_a\left(r - \frac{R_b^3}{r^2}\right)cos\theta$ με την πίεση στη σφαίρα να είναι όπως είπαμε σταθερή.



Εικόνα 21-Κατανομή Πίεσης στην περιοχή της φυσαλίδας [47]

Από την κατανομή αυτή βλέπουμε πως η πίεση στο χαμηλότερο μέρος της φυσαλίδας είναι χαμηλότερη από το περιβάλλον ρευστό, ενώ στο άνω μέρος της φυσαλίδας είναι μεγαλύτερη. Έτσι, το αέριο μπαίνει στη φυσαλίδα από το κάτω μέρος και εξέρχεται από το άνω. Η σχηματιζόμενη ροή εξαρτάται αποκλειστικά από τη σχετική ταχύτητα της φυσαλίδας με την ταχύτητα του αερίου στην πυκνή φάση $u_f = \frac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}}$ Υπάρχουν δύο περιπτώσεις ροής:

1. Αν η ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας είναι μικρότερη από την ταχύτητα του αερίου στην πυκνή φάση, τότε το αέριο χρησιμοποιεί τις φυσαλίδες για να

μικρύνει το χρόνο παραμονής του στην πυκνή φάση. Εισέρχεται στον πυθμένα της φυσαλίδας και φεύγει από την κορυφή. Ωστόσο, ένα δακτυλιοειδές τμήμα του ρευστού κυκλοφορεί εσωτερικά στην φυσαλίδα κινούμενο ανοδικά μαζί με αυτή. Η ποσότητα αυτή του αερίου αυξάνει καθώς η ταχύτητα της φυσαλίδας μειώνεται και γίνεται ίση με την ταχύτητα του ανερχόμενου αερίου.

2. Αν η ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του αερίου στην πυκνή φάση, το αέριο εξακολουθεί να εισέρχεται στη φυσαλίδα μέσω του πυθμένα και να διαφεύγει από την κορυφή. Ωστόσο η φυσαλίδα ανέρχεται ταχύτερα από το αέριο στην πυκνή φάση, κατά συνέπεια, το αέριο το οποίο εγκαταλείπει τη φυσαλίδα στην κορυφή της σαρώνεται και επιστρέφει στη βάση της φυσαλίδας.

Η περιοχή γύρω από τη φυσαλίδα στην οποία κυκλοφορεί αυτό το αέριο ονομάζεται νέφος της φυσαλίδας. Το υπόλοιπο αέριο δεν αναμιγνύεται με αυτό το αέριο αλλά παραμερίζει καθώς η ταχύτερη φυσαλίδα με το περιβάλλον νέφος περνά. Η μετάβαση από τη μια φάση στην άλλη είναι ομαλή. Το νέφος είναι άπειρο σε πάχος όταν η ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας είναι ίση με την ταχύτητα του αερίου στην πυκνή φάση αλλά μικραίνει όσο η ταχύτητα της φυσαλίδας αυξάνεται. Δίνεται από τη σχέση (για τρισδιάστατη κλίνη, επομένως για σφαιρικές φυσαλίδες):

$$\frac{R_c^3}{R_b^3} = \frac{u_{br} + 2u_f}{u_{br} - u_f}$$

Από αυτή τη σχέση ο λόγος του όγκου του νέφους προς τον όγκο της φυσαλίδας είναι: $f_c = \frac{V_c}{V_b} = \frac{3u_f}{u_{br} - u_f}$

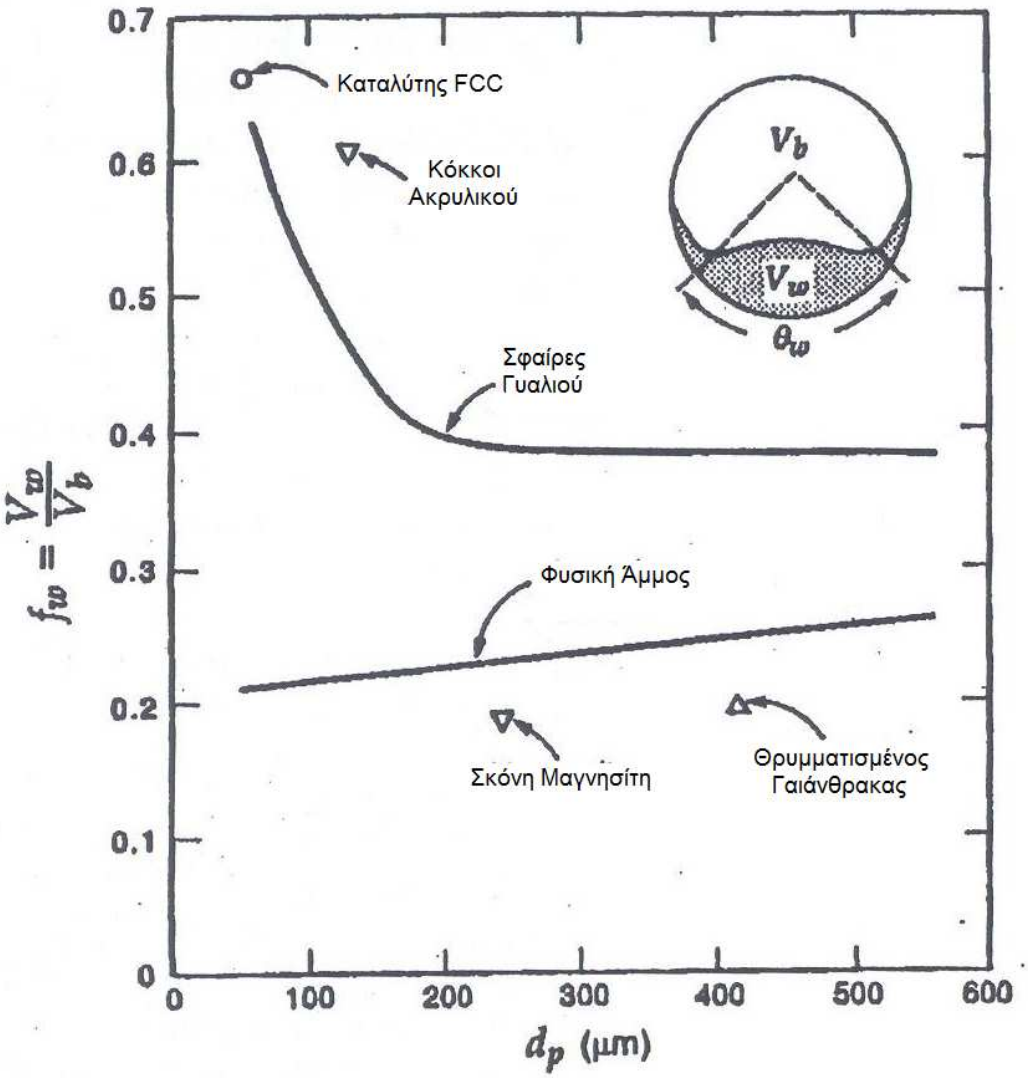
Η θεωρία αυτή υποστηρίζει επίσης πως η ανοδική ροή του αερίου καθώς εισέρχεται και εξέρχεται από την φυσαλίδα είναι $v = 3u_{mf} \cdot \pi \cdot R_b^2$. Αυτό σημαίνει πως στη μέγιστη διατομή η ανοδική ροή του αερίου διαμέσου μιας σφαιρικής φυσαλίδας είναι $3u_{mf}$. Η φυσαλίδα προωθεί τότε τρεις φορές περισσότερο αέριο από την πυκνή φάση στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Το μοντέλο των Davidson και Harrison [38] θεωρεί πως σε τρισδιάστατες κλίνες οι φυσαλίδες είναι απολύτως κυκλικές. Αυτό δεν ανταποκρίνεται ακριβώς στην πραγματικότητα. Οι φυσαλίδες είναι ελαφρώς επίπεδες ή κοίλες. Η περιοχή ακριβώς κάτω από τη φυσαλίδα είναι η περιοχή αναταραχής και σχηματίζεται κατά πάσα πιθανότητα επειδή η πίεση στο χαμηλότερο τμήμα της φυσαλίδας είναι μικρότερη από την πίεση στην πυκνή φάση.

Έτσι, το αέριο παρασύρεται προς τη φυσαλίδα, προκαλώντας αστάθεια, μερική κατάρρευση της φυσαλίδας και τυρβώδη ανάμιξη. Σε φυσαλίδες ταχύτερες από την πυκνή φάση (οι οποίες περιβάλλονται από νέφος), αυτός είναι ο λόγος για την παρατηρούμενη διαρροή του αερίου το οποίο κυκλοφορεί μέσα στη φυσαλίδα στην αναταραχή. Η τύρβη οδηγεί επίσης σε στερεά να παρασύρονται από την ανερχόμενη φυσαλίδα και να σχηματίζουν την περιοχή αναταραχής.

Οι Rowe και Partridge [39] παρατήρησαν την γωνία αναταραχής θ_w και τον όγκο αναταραχής V_w τον οποίο όρισαν ως τον όγκο τον οποίο καταλαμβάνουν τα ρευστά της αναταραχής που προκαλείται από τη φυσαλίδα. Όρισαν το κλάσμα της αναταραχής ως $f_w = \frac{V_w}{V_b+V_w}$. Οι Kozanoglu και Levy [40] ανέπτυξαν την ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό του κλάσματος αναταραχής όπου η διάμετρος των σωματιδίων είναι σε μm και η διάμετρος της φυσαλίδας σε cm:

$$f_w = \left[\left(0.78 + 0.0076d_p\right) + \frac{3.899d_b}{d_p^{1.103}}\right]/100$$



Εικόνα 22-Κλάσμα αναταραχής σε διάφορα υλικά [39]

Έχει βρεθεί όμως [39] πως οι φυσαλίδες περιέχουν επίσης στερεά σωματίδια στο εσωτερικό τους. Τα σωματίδια αυτά έχουν αγνοηθεί από το μοντέλο των Davidson και Harrison [38] και τα περισσότερα άλλα μοντέλα. Μια συνηθισμένη φυσαλίδα περιέχει συνήθως 0,2-1,0% σωματίδια κατά όγκο.

Πειράματα έχουν δείξει πως το μέγεθος των φυσαλίδων αυξάνει τόσο με την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού όσο και με την αύξηση της απόστασης από το διασκορπιστή. Η ακριβής τιμή αυτού του μεγέθους διαφέρει από σύστημα σε σύστημα, ακριβώς όπως και τα μεγέθη από τα οποία εξαρτάται.

Η συχνότητα σχηματισμού φυσαλίδων επίσης σχετίζεται με την ταχύτητα του ρευστού και συγκεκριμένα με τη διαφορά της ταχύτητας του ρευστού προς την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης. Δε φαίνεται όμως να σχετίζεται με το ύψος του αντιδραστήρα. Αυτό οφείλεται στην τάση των φυσαλίδων να ενώνονται μεταξύ τους, κάτι το οποίο γίνεται σε όλους τους αντιδραστήρες ανεξαρτήτως του ύψους τους. Η συχνότητα την οποία πρέπει να εντοπίσουμε είναι η αρχική συχνότητα σχηματισμού των φυσαλίδων στο διασκορπιστή.

Η συγχώνευση των φυσαλίδων μπορεί να προκύψει σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Για παράδειγμα, σε κλίνες με διάτρητους διανομείς, οι φυσαλίδες ενώνονται κυρίως κατά την κάθετη κατεύθυνση, μετά τη δημιουργία αλυσίδων φυσαλίδων από τις οπές του διασκορπιστή. Σε μεγαλύτερο ύψος, καθώς οι φυσαλίδες γίνονται μεγαλύτερες, η αλληλεπίδραση μεταξύ φυσαλίδων στο ίδιο ύψος γίνεται πιο σημαντική. Στις μεγαλύτερες κλίνες, η ακριβής συμπεριφορά των φυσαλίδων εξαρτάται και από την κυκλοφορία των στερεών εντός της κλίνης.

Σε μεγαλύτερο ύψος όμως εκτός από την ένωση των φυσαλίδων μπορεί να προκύψει και διάσπασή τους. Η κορυφή της φυσαλίδας αρχίζει να χωρίζεται στα δύο και στο τέλος ολόκληρη η φυσαλίδα χωρίζεται κάθετα. Αν η μια από τις φυσαλίδες οι οποίες προκύπτουν είναι αρκετά μικρή τότε απορροφάται αμέσως στην άλλη φυσαλίδα.

Όταν οι γειτονικές φυσαλίδες έχουν σχεδόν το ίδιο μέγεθος, η μία αρχίζει να μεγαλώνει σε βάρος της άλλης και στο τέλος την απορροφά. Φυσικά, αν η μεγαλύτερη φυσαλίδα έχει πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα ανόδου από την άλλη τότε απομακρύνεται πριν προλάβει να την απορροφήσει και δύο φυσαλίδες απομένουν στην κλίνη.

Οι φυσαλίδες αναπτύσσουν συχνά ένα μέγιστο μέγεθος σε κάθε κλίνη πέρα από το οποίο διαχωρίζονται. Καθώς ο διαχωρισμός είναι πιο συνηθισμένος σε κλίνες με λεπτόκοκκα σωματίδια (παραδείγματος χάρη Geldart A), το μέγιστο μέγεθος της φυσαλίδας είναι αρκετά μεγάλο σε κλίνες με χοντρόκοκκα σωματίδια, αλλά μικρό σε κλίνες με λεπτόκοκκα σωματίδια.

11.3) Μέγεθος Φυσαλίδων

Οι φυσαλίδες είναι αρκετά μικρές σε κλίνες με λεπτόκοκκα σωματίδια, αλλά μεγαλώνουν όσο το μέγεθος των σωματιδίων μεγαλώνει. Σε κλίνες με σωματίδια κατηγορίας D οι φυσαλίδες δείχνουν να μεγαλώνουν χωρίς όριο. Ταυτόχρονα, το μέγεθος των φυσαλίδων διαφέρει σημαντικά και μέσα στην ίδια κλίνη.

Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την εύρεση σχέσεων οι οποίες θα δίνουν το μέγεθος της φυσαλίδας στην κλίνη σε κάθε στιγμή. Οι Mori και Wen [41] προτείνουν για σωματίδια κατηγορίας B και D την ακόλουθη σχέση, η οποία δίνει το μέγεθος της φυσαλίδας σε κάθε ύψος της κλίνης z:

$$\frac{d_{bm} - d_b}{d_{bm} - d_{b0}} = e^{-0.3z/D}$$

Στη σχέση αυτή, d_{bm} είναι το μέγιστο μέγεθος φυσαλίδας το οποίο δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$d_{bm} = 0.65\left[\frac{\pi}{4}D^2\left(u_0 - u_{mf}\right)\right]^{0.4}$$

Η εξίσωση αυτή ισχύει για τα παρακάτω όρια:

$$D \leq 1.3m,\ \ 60 \leq d_p \leq 450\mu m,\ \ 0.5 \leq u_{mf} \leq \frac{20cm}{s},\ \ u_0 - u_{mf} \leq 48cm/s$$

Ο Werther [42] ανέπτυξε μια διαφορετική σχέση η οποία δίνει επίσης το μέγεθος της φυσαλίδας συναρτήσει του ύψους της κλίνης:

$$d_b = 0.853\left[1 + 0.272\left(u_0 - u_{mf}\right)\right]^{1/3}(1 + 0.0684z)^{1.21}$$

Τα όρια για τα οποία ισχύει η εξίσωση του Werther [42] είναι:

$$D > 20cm,\ \ 100 \leq d_p \leq 350\mu m,\ \ 1 \leq u_{mf} \leq \frac{8cm}{s},\ \ 5 \leq u_0 - u_{mf} \leq 30cm/s$$

11.4) Ταχύτητα Φυσαλίδων

Η ταχύτητα ανόδου δεν εξαρτάται από το ρευστό το οποίο χρησιμοποιείται στην κλίνη αλλά μόνο από το μέγεθος της φυσαλίδας. Οι Clift και Grace [43] προτείνουν την παρακάτω σχέση για την ταχύτητα ανόδου μιας φυσαλίδας σε κλίνη στις συνθήκες της ελάχιστης ρευστοποίησης:

$$u_{br} = 0.711\sqrt{g \cdot d_b}$$

Το μέγεθος d_b είναι η ισοδύναμη διάμετρος σφαιρικής φυσαλίδας με όγκο ίδιο με την πραγματική. Οι Kunii και Levenspiel [20] προτείνουν η σχέση αυτή να χρησιμοποιηθεί μόνο αν ισχύει η παρακάτω ανίσωση: $\frac{d_b}{D} < 0.125$ καθώς σε μεγαλύτερες φυσαλίδες τα τοιχώματα παίζουν ένα σημαντικό ρόλο.

Για μεγαλύτερες φυσαλίδες προτείνουν μια σχέση παρόμοια με αυτή του Wallis [44] προτείνοντας επίσης τα εξής όρια:

$$u_{br} = \left[0.711\sqrt{g \cdot d_b}\right]1.2e^{-1.49\frac{d_b}{D}} \qquad 0{,}125 < \frac{d_b}{D} < 0{,}6$$

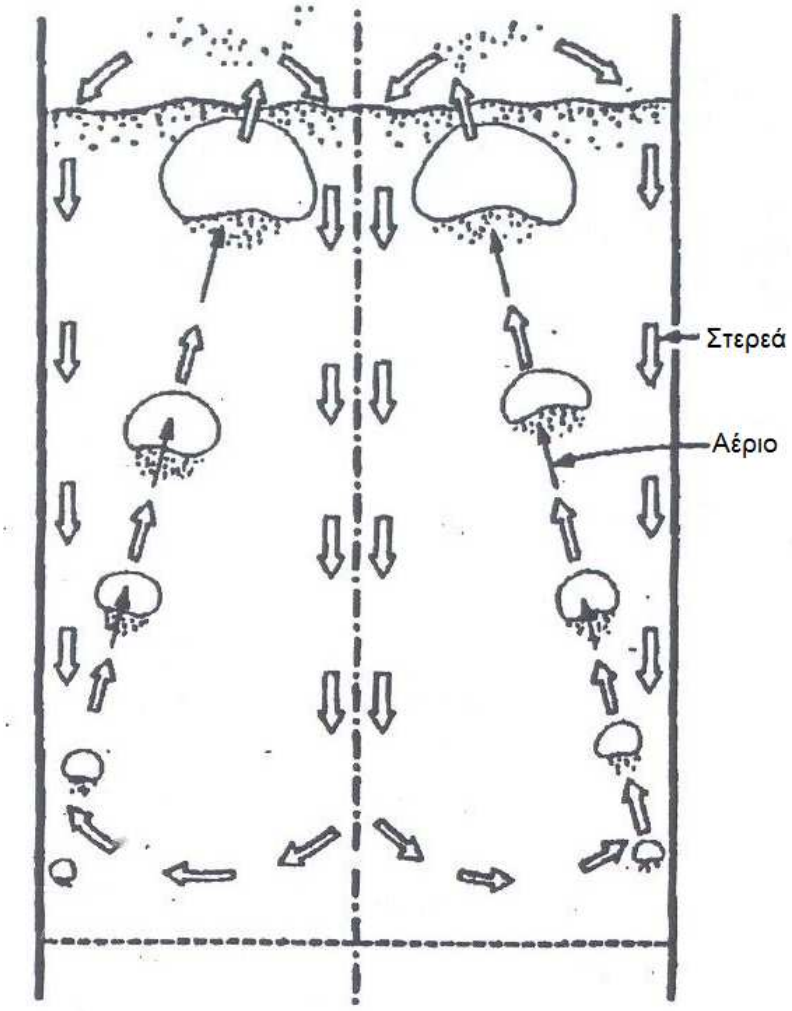
Η ταχύτητα αυτή δεν είναι η ταχύτητα με την οποία ανεβαίνουν οι φυσαλίδες κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης. Αντίθετα, είναι η ταχύτητα κατά την οποία θα ανέβαιναν αν η κλίνη διατηρούνταν μονίμως στις συνθήκες στις οποίες αρχίζει η ρευστοποίηση. Στην πραγματική ρευστοποιημένη κλίνη χρειάζεται να γίνει η εξής διόρθωση:

$$u_b = u_0 - u_{mf} + u_{br}$$

Η ταχύτητα ανόδου δηλαδή της φυσαλίδας χρειάζεται να αυξηθεί κατά τη διαφορά της τρέχουσας ταχύτητας του ρευστού προς την ταχύτητα την οποία είχε στην αρχή της ρευστοποίησης.

Αν όμως η ταχύτητα του αερίου είναι πολύ μεγαλύτερη τότε η ταχύτητα με την οποία ανέρχονται οι φυσαλίδες είναι συνήθως μεγαλύτερη από αυτή την οποία βρίσκουμε από αυτή την εξίσωση. Η αιτία για την απόκλιση αυτή είναι κατά κύριο λόγο τα στερεά σωματίδια τα οποία παρασύρονται από τη φυσαλίδα καθώς αυτή ανέρχεται. Η απόκλιση αυτή είναι μεγαλύτερη σε κλίνες με λεπτόκοκκα σωματίδια (παραδείγματος χάρη κατηγορίας A)

Σε λεπτόκοκκα σωματίδια, ανεξαρτήτου μεγέθους, κάθε φυσαλίδα συνοδεύεται από ένα νέφος αρκετά μεγάλου μεγέθους, το οποίο οφείλεται και για την παρατηρούμενη ανακυκλοφορία των ρευστών εντός της κλίνης. Πολλές κλίνες εξάλλου αναπτύσσουν και δεύτερο ρεύμα ανακυκλοφορίας κοντά στην επιφάνεια τους. Σε αυτή την κατάσταση τα τμήματα της κλίνης με ανοδική ροή είναι πιο πλούσια σε φυσαλίδες και έχουν χαμηλότερη πυκνότητα. Η διαφορά αυτή πυκνότητας συντηρεί το ρεύμα των σωματιδίων.



Εικόνα 23-Ανακυκλοφορία μέσα στην κλίνη [45]

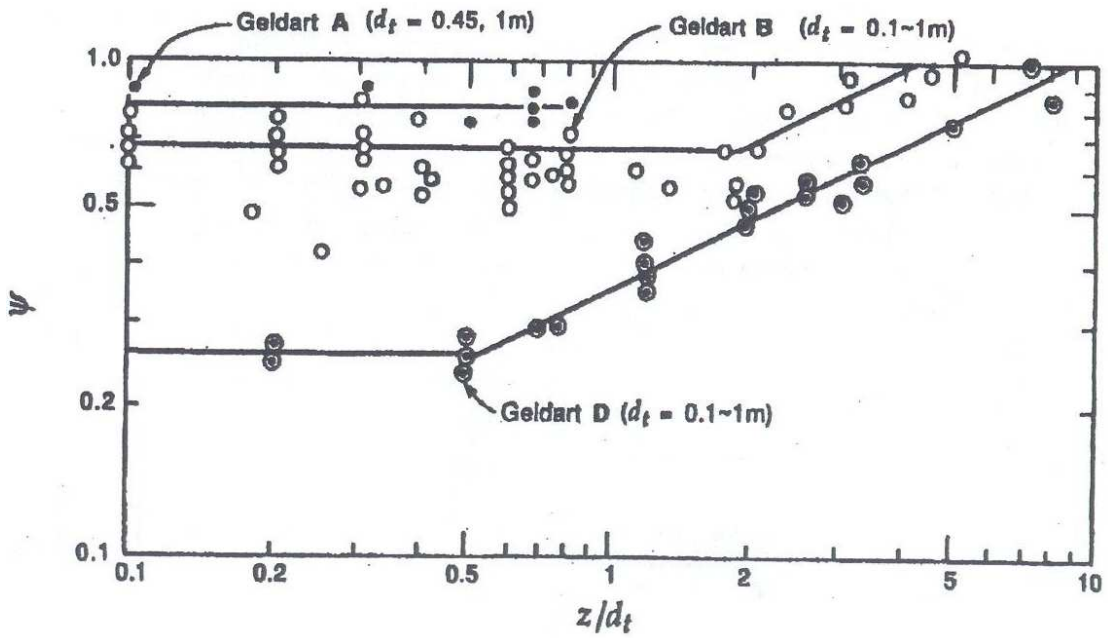
Αυξάνοντας το μέγεθος της κλίνης, η ρευστοποίηση γίνεται πιο ομαλή και η ανακυκλοφορία των ρευστών διευκολύνεται. Η ανακυκλοφορία αυτή είναι πάντα πιο έντονη με μεγαλύτερη ταχύτητα αερίου. Αντίθετα, σε μικρότερες κλίνες αυτή η ροή είναι λιγότερο αισθητή ή μπορεί να μην εμφανίζεται λόγω της τριβής με τα τοιχώματα του δοχείου.

Η πρόβλεψη της εξίσωσης είναι καλύτερη σε κλίνες με στερεά κατηγορίας D γιατί τα μεγαλύτερα σωματίδια σχηματίζουν μικρότερο νέφος γύρω από τις φυσαλίδες και η ανακυκλοφορία στερεών είναι λιγότερο έντονη.

Οι Hilligardt και Werther [46] πρότειναν μια εξίσωση η οποία καλύπτει όλες τις κατηγορίες στερεών κατά Geldart και η οποία λαμβάνει υπόψη το μέγεθος του δοχείου. Η εξίσωση αυτή είναι:

$$u_b = \psi \cdot (u_0 - u_{mf}) + \alpha \cdot u_{br}$$

Στην εξίσωση αυτή το ψ είναι ο λόγος των παρατηρούμενων φυσαλίδων προς τις φυσαλίδες οι οποίες αναμένονται από το απλό μοντέλο δύο φάσεων, ορίζεται δηλαδή με την εξίσωση $\psi = \frac{u_b}{(u_0 - u_{mf})A_b}$. Μπορεί να βρεθεί από το παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 24-Εύρεση του ψ [46]

Ο συντελεστής α είναι ένας παράγοντας ο οποίος υπολογίζει τη διαφορά της συμπεριφοράς των φυσαλίδων στην αναβράζουσα κλίνη από εκείνες που ανέρχονται θεωρητικά, χωρίς άλλη παρέμβαση. Ο Werther [42] προτείνει τις εξής τιμές:

Κατηγορία Geldart	α	D (m)
A	$3,2*D^{1/3}$	0,05-1
B	$2*D^{1/2}$	0,1-1
D	0,87	0,1-1

Οι Kunii και Levenspiel [20] προτείνουν με βάση τα πειραματικά δεδομένα του Werther [42] τις εξής εξισώσεις:

- Για στερεά κατηγορίας Geldart A με διάμετρο του δοχείου μικρότερη του 1m:

$$u_b = 1.55\left[\left(u_0 - u_{mf}\right) + 14.1(d_b + 0.005)\right]D^{0.32} + u_{br}$$

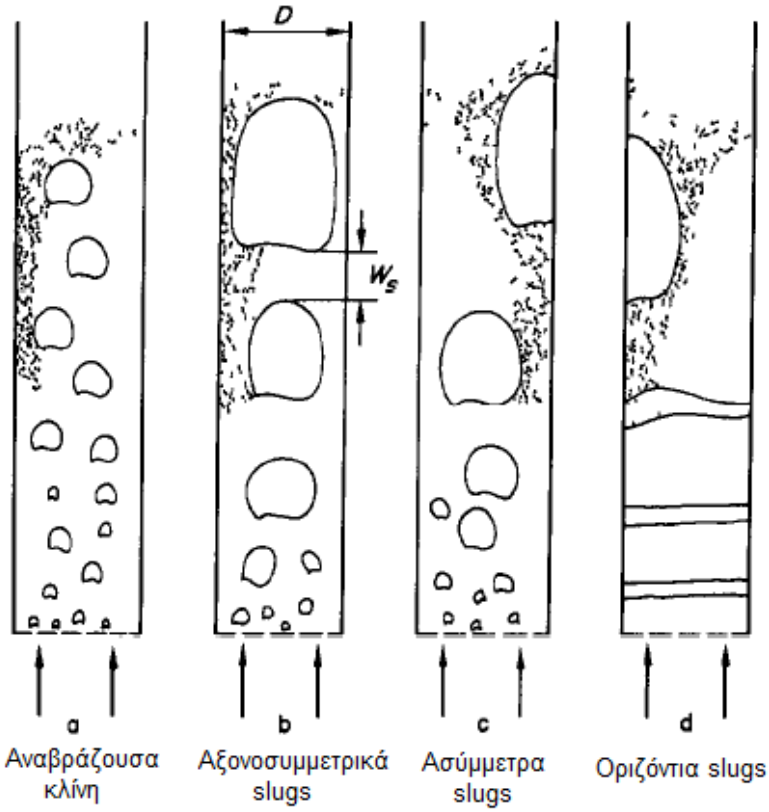
- Για στερεά κατηγορίας Geldart B με διάμετρο του δοχείου μικρότερη του 1m:

$$u_b = 1.6\left[\left(u_0 - u_{mf}\right) + 1.13\sqrt{d_b}\right]D^{1.35} + u_{br}$$

Παρατηρούμε πως η επίδραση της διαφοράς των ταχυτήτων είναι περίπου η ίδια, ανεξάρτητα της κατηγορίας των στερεών. Από την άλλη πλευρά βέβαια, οι δύο διάμετροι (η διάμετρος του δοχείου και η διάμετρος της φυσαλίδας) έχουν διαφορετική επίδραση σε κάθε στερεό. Αυτό οφείλεται στις διαφορές στην πυκνή φάση οι οποίες προκαλούνται από το διαφορετικό μέγεθος των σωματιδίων.

11.5) Slugging

Για $\frac{d_b}{D} > 0,6$ οι φυσαλίδες γίνονται πλέον πολύ μεγάλες και στην εγκατάσταση εμφανίζεται το φαινόμενο του slugging. Στο φαινόμενο αυτό οι φυσαλίδες γίνονται πολύ μεγάλες παρασύροντας μεγάλο όγκο σωματιδίων και οι συνθήκες ρευστοποίησης αλλάζουν. Το slugging είναι εντονότερο σε κλίνες μικρότερης διαμέτρου, καθώς το μέγεθος των φυσαλίδων χρειάζεται επίσης να είναι μικρότερο.



Εικόνα 25-Μορφές slugging [49]

Για συνεχή εισαγωγή αερίου σε μια αέρια-στερεή κλίνη οι Stewart και Davidson [47] πρότειναν ότι η διαφορά της ταχύτητας του ρευστού με την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης προκαλεί την ανοδική κίνηση του slug. Η σχέση την οποία προτείνουν για την ταχύτητα ενός slug είναι:

$$u_{b,s} = c(u_0 - u_{mf}) + 0.35\sqrt{(g \cdot D)}$$

Όπου c είναι μια σταθερά την οποία οι Ormiston et al. [48] προτείνουν ύστερα από πειράματα να είναι ίση με τη μονάδα. Οι Stewart και Davidson [47] πρότειναν επίσης ότι υπάρχει μια ελάχιστη ταχύτητα ανόδου φυσαλίδων κάτω από την οποία δεν θα συμβεί slugging και θεώρησαν αυτή την ταχύτητα ως:

$$u_{b,ms} = u_{mf} + 0.07\sqrt{g \cdot D}$$

Οι Baeyens και Geldart [49] βρήκαν, ύστερα από πειράματα πως το μέγεθος των σωματιδίων ούτε η κατανομή μεγέθους των είχε κάποια επίδραση στο φαινόμενο του slugging. Βρήκαν έτσι το ύψος της κλίνης στο οποίο ολοκληρώνεται το slugging είναι:

$$H_s = 60D^{0.175} \quad (\sigma\varepsilon\ cm)$$

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως το φαινόμενο του slugging εμφανίζεται αν η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη ταχύτητα ανόδου φυσαλίδων $u_{b,ms}$ και αν η κλίνη έχει ύψος μεγαλύτερο από το H_s. Στο κρύο μοντέλο το ύψος της πυκνής φάσης για να ξεκινήσει το slugging είναι ίσο με **1,18m.** Το ύψος της πυκνής φάσης όμως είναι 0,75m περίπου επομένως το κρύο μοντέλο δεν θα πρέπει να παρουσιάζει slugging σε καμία περίπτωση (εκτός αν η ταχύτητα γίνει πολύ υψηλή).

12) Αναβράζουσα Ρευστοποιημένη Κλίνη

Στις αρχικές φάσεις ενασχόλησης με την αναβράζουσα κλίνη, θεωρούνταν πως όλο το επιπλέον αέριο το οποίο δεν χρησιμοποιούνταν για την ρευστοποίηση, δηλαδή το αέριο το οποίο αντιστοιχεί στη διαφορά των ταχυτήτων $u_0 - u_{mf}$, χρησιμοποιούνταν για τη δημιουργία των φυσαλίδων και η πυκνή φάση παρέμενε στις συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης, εκτός από τις στιγμές όπου τα στερεά παραμέριζαν λόγω της ανερχόμενης φυσαλίδας. Η θεωρία αυτή ονομάζεται το *απλό μοντέλο δύο φάσεων* (simple two-phase model).

Η πραγματικότητα όμως είναι όπως συνήθως αρκετά πιο πολύπλοκη. Το απλό μοντέλο δύο φάσεων κάνει μια σειρά παραδοχές οι οποίες, ειδικά σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, δεν ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στην πραγματικότητα. Οι παραδοχές αυτές είναι:

- Η ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων δεν είναι ίση με τη διαφορά των ταχυτήτων $u_0 - u_{mf}$
- Η κενότητα της πυκνής φάσης δεν παραμένει η ίδια όπως στην αρχή της ρευστοποίησης. Αντίθετα αλλάζει καθώς η ταχύτητα του αερίου μεταβάλλεται.
- Η ροή στην πυκνή φάση δεν παραμένει στάσιμη μετά την ρευστοποίηση. Αντίθετα, αναπτύσσονται διάφορα πρότυπα ροής τα οποία οφείλονται στην άνιση κατανομή και ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων

Σε κλίνες οι οποίες χρησιμοποιούν σωματίδια κατηγορίας Geldart B διαπιστώθηκε από τους Werther και Molerus [45] πως αν και είχαν εξασφαλιστεί οι βέλτιστες δυνατές συνθήκες για την ομοιομορφία της ροής, εντοπίστηκε μια ισχυρή ανοδική τάση των στερεών της πυκνής φάσης κοντά στα τοιχώματα του αντιδραστήρα η οποία ξεκινούσε σχεδόν από τον πυθμένα της κλίνης. Η τάση αυτή μετατοπιζόταν προς το κέντρο του αντιδραστήρα όσο η απόσταση από τον πυθμένα αύξανε.

Οι Kunii και Levenspiel [20] χρησιμοποιώντας τις εργασίες των Whitebread [50], Yamazaki et al. και Lin et al. κατέληξαν στα παρακάτω συμπεράσματα για κλίνες με σωματίδια κατηγορίας Geldart B:

- Σε χαμηλή ταχύτητα ρευστοποίησης σε κλίνες με λόγο ύψους προς διάμετρο περίπου ίσο αλλά λιγότερο από τη μονάδα, τα στερεά σωματίδια στην πυκνή φάση σχηματίζουν μια δακτυλιοειδή δίνη με ανοδική τάση κοντά στο τοίχωμα και καθοδική τάση στο κέντρο της κλίνης. Προφανώς, σε κάθε κλίνη δημιουργούνται δύο τέτοιοι δακτύλιοι. Σε υψηλές όμως ταχύτητες η ροή αυτή μπορεί να αντιστραφεί λόγω των μεγάλων ανοδικά κινούμενων φυσαλίδων στην κλίνη.

- Καθώς ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο της κλίνης πλησιάζει τη μονάδα, τα στερεά στην πυκνή φάση αρχίζουν να κινούνται καθοδικά κοντά στα τοιχώματα, ιδιαίτερα κοντά στην επιφάνεια της κλίνης.
- Σε βαθύτερες κλίνες (λόγος ύψους/διαμέτρου μεγαλύτερος του 1) μια δεύτερη δίνη σχηματίζεται πάνω από την αρχική με ανοδική κίνηση στο κέντρο της κλίνης. Σε μεγαλύτερες παροχές αερίου, η κυκλοφορία των στερεών στην άνω δίνη γίνεται πιο έντονη και υπερισχύει στην όλη κίνηση της πυκνής φάσης.
- Σε πολύ ρηχές κλίνες (λόγος ύψους/διαμέτρου μικρότερος του 0.5) οι οποίες λειτουργούν με όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη ροή, μπορεί να αναπτυχθούν δίνες όπως στις κλίνες με λόγο μεγαλύτερο της μονάδας. Αν όμως ο διασκορπιστής έχει πολύ μεγάλη πτώση πίεσης, τότε είναι αυτός που θα καθορίζει τη ροή της πυκνής φάσης.
- Η ροή στην πυκνή φάση αντικατοπτρίζει την τάση ανόδου των φυσαλίδων στην κλίνη. Το τμήμα το οποίο παρουσιάζει ανοδικές τάσεις είναι συνήθως πλούσιο σε φυσαλίδες, αντίθετα, το τμήμα με καθοδική ροή θα έχει λίγες, αν έχει, ανοδικά κινούμενες φυσαλίδες.

Λόγω αυτής της ροής των φυσαλίδων, η ταχύτητα και η κενότητα της πυκνής φάσης δεν είναι, όπως προβλέπεται από το απλό μοντέλο δύο φάσεων ίσες με την ταχύτητα και την ελάχιστη κενότητα ρευστοποίησης. Οι Hilligardt και Werther [45] βρήκαν, για σωματίδια κατηγορίας B, πως η ταχύτητα της πυκνής φάσης δεν άλλαζε σημαντικά σε σχέση με το ύψος της κλίνης, αλλά ήταν σημαντικά μεγαλύτερη της ταχύτητας στην αρχή της ρευστοποίησης και άλλαζε με βάση την ταχύτητα του αερίου. Πρότειναν την εξής σχέση για τρισδιάστατες κλίνες:

$$\frac{u_e - u_{mf}}{u_0 - u_{mf}} = \frac{1}{3}$$

Η πίεση στις περισσότερες βιομηχανικές κλίνες είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής ώστε να είναι δυνατή μεγαλύτερη παροχή σε μικρότερη κλίνη. Όπως αναφέρθηκε, η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης μειώνεται με την πίεση για τα λεπτόκοκκα σωματίδια (κατηγορίες A και B), ενώ και η συμπεριφορά της κλίνης μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά.

Οι Hoffman και Yates [51] συνοψίζουν τα αποτελέσματα για λεπτόκοκκα σωματίδια ως εξής:

- Η συμπεριφορά της κλίνης μεταβάλλεται με την αύξηση της πίεσης. Η ρευστοποίηση γίνεται πιο ομαλή και υπάρχει μικρότερη πιθανότητα για slugging. Τα σωματίδια παρασύρονται πιο εύκολα και σε υψηλές πιέσεις, αλλάζουν ακόμα και οι κατηγορίες στερεών με τα μικρότερα στερεά της κατηγορίας B να μεταπίπτουν σε κατηγορία A.
- Η κενότητα στην πυκνή φάση ε_e αυξάνεται σχεδόν κατά το ένα τρίτο στα πιο λεπτόκοκκα σωματίδια. Όμως όσο το μέγεθος των

σωματιδίων αυξάνει, τόσο λιγότερο η κενότητα μεταβάλλεται, ώσπου σε σωματίδια κατηγορίας B δεν μεταβάλλεται καθόλου.

- Παρόμοια είναι η κατάσταση στο μέγεθος και το σχήμα των φυσαλίδων. Μεταβάλλονται στα λεπτόκοκκα σωματίδια αλλά παραμένουν αμετάβλητα στα μεγαλύτερα σωματίδια. Συγκεκριμένα, στα στερεά με μικρότερη διάμετρο γίνονται πιο μικρές και επίπεδες, αλλά και πιο ασταθείς.
- Αλλαγή παρατηρείται και στον τρόπο και τη συχνότητα διαχωρισμού των φυσαλίδων. Σε στερεά κατηγορίας A οι φυσαλίδες υπό υψηλή πίεση αρχίζουν να διαχωρίζονται από τον πυθμένα και η συχνότητα αυξάνεται. Αντίθετα σε στερεά κατηγορίας B οι φυσαλίδες διαχωρίζονται από την κορυφή και η συχνότητα διαχωρισμού παραμένει η ίδια.

Η ρευστοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διάφορες θερμοκρασίες ανάλογα με τη χρήση της ρευστοποιημένης κλίνης (η πραγματική εγκατάσταση θα λειτουργεί σε θερμοκρασία σχεδόν 800°C ενώ το κρύο μοντέλο θα λειτουργεί σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία). Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οι φυσαλίδες γίνονται μικρότερες οδηγώντας σε πολύ ομαλότερη ρευστοποίηση.

Τα σωματίδια στις ρευστοποιημένες κλίνες, παρασύρονται από το εισερχόμενο αέριο. Καθώς όμως παρασύρονται, η βαρύτητα και η τριβή υπερνικούν στο τέλος την δύναμη την οποία τους ασκεί το ρευστό και τα σωματίδια πέφτουν. Καθώς όμως πέφτουν διαμέσου ενός ρευστού υπάρχει μια μέγιστη ταχύτητα πτώσης την οποία δεν μπορούν να ξεπεράσουν (terminal velocity). Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και το είδος του σωματιδίου, δηλαδή τη διάμετρό του d_p και την πυκνότητά του ρ_s. Εκτός από το μέγεθος εξαρτάται επίσης από το είδος του ρευστού.

Η γνώση του μεγέθους αυτού είναι σημαντική γιατί αν η ταχύτητα του ρευστού ξεπεράσει την ταχύτητα αυτή τότε η δύναμη την οποία ασκεί το αέριο στο σωματίδιο θα υπερνικήσει τις υπόλοιπες δυνάμεις που του ασκούνται και το σωματίδιο θα μεταφερθεί εκτός του αντιδραστήρα, μαζί με το παραγόμενο αέριο.

Αν όμως πολλά από τα σωματίδια μεταφέρονται εκτός της κλίνης, τότε θα πρέπει να εγκατασταθεί σε αυτήν σύστημα ανακυκλοφορίας, το οποίο θα οδηγεί τα σωματίδια πίσω στην κλίνη, αλλάζοντας έτσι όμως όλο το σύστημα. Επομένως, για να αποφευχθεί η μεταφορά των σωματιδίων εκτός της κλίνης, αλλά για να επιτευχθεί η ρευστοποίηση η ταχύτητα του ρευστού πρέπει να διατηρηθεί ανάμεσα στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης και την τελική ταχύτητα πτώσης.

Η ακριβής σχέση για την πτώση σωματιδίων διαμέσου ενός ρευστού είναι:

$$u_t = \sqrt{\frac{4 \cdot d_p(\rho_s - \rho_g)g}{3 \cdot \rho_g \cdot C_D}}$$

Στη σχέση αυτή το C_D είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας, ο οποίος μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά. Οι Haider και Levenspiel [52] προτείνουν την εξής σχέση για τον υπολογισμό του C_D:

$$C_D = \frac{24}{Re_t}\left[1 + (8.1716e^{-4.0655\varphi})Re_t^{\,0.0964+0.5565\varphi}\right] + \frac{73.69(e^{-5.0748\varphi})Re_t}{Re_t + 5.378e^{6.2122\varphi}}$$

Προφανώς η σχέση αυτή είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και δύσχρηστη καθώς ο αριθμός Reynolds περιλαμβάνει και αυτός την ταχύτητα πτώσης την οποία αναζητούμε. Η εύρεση λοιπόν της ταχύτητας πτώσης από αυτήν την εξίσωση απαιτεί τη χρήση μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης.

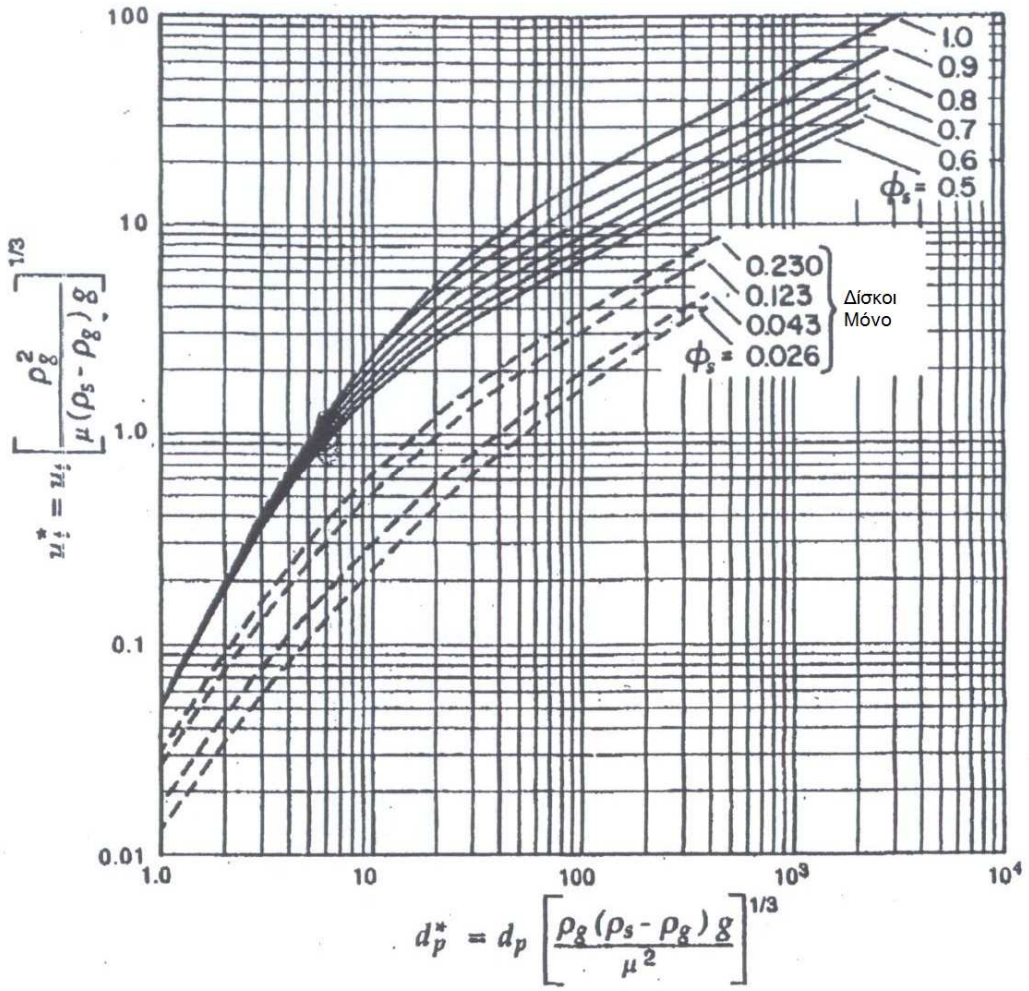
Για να γίνει η εύρεση της ταχύτητας πτώσης λιγότερο χρονοβόρα, οι Haider και Levenspiel [52] ανέπτυξαν την παρακάτω προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό της τελικής ταχύτητας πτώσης:

$$u_t^* = \left[\frac{18}{\left(d_p^*\right)^2} + \frac{2.335 - 1.744 \cdot \varphi}{\sqrt{d_p^*}}\right]^{-1}$$

Τα μεγέθη u_t^* και d_p^* είναι η αδιάστατη τελική ταχύτητα πτώσης και την αδιάστατη διάμετρο των σωματιδίων αντίστοιχα. Οι Haider και Levenspiel [52] προτείνουν τις παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό τους:

$$u_t^* = u_t\left[\frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s-\rho_g)g}\right]^{1/3} \qquad d_p^* = d_p\left[\frac{\rho_g(\rho_s-\rho_g)g}{\mu^2}\right]^{1/3}$$

Για την περίπτωση την οποία ελέγξαμε το μέγεθος σωματιδίων είναι ίσο με 128μm (ακριβής σχέση της εγκατάστασης), η πυκνότητα του αερίου 1,142kg/m^3, η πυκνότητα του στερεού 8900kg/m^3, επομένως η αδιάστατη διάμετρος των σωματιδίων προκύπτει ίση με **8,43.** Η αδιάστατη ταχύτητα προκύπτει επίσης ίση με **1,57**, επομένως η τελική ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων προκύπτει ίση με **1,69m/s**.



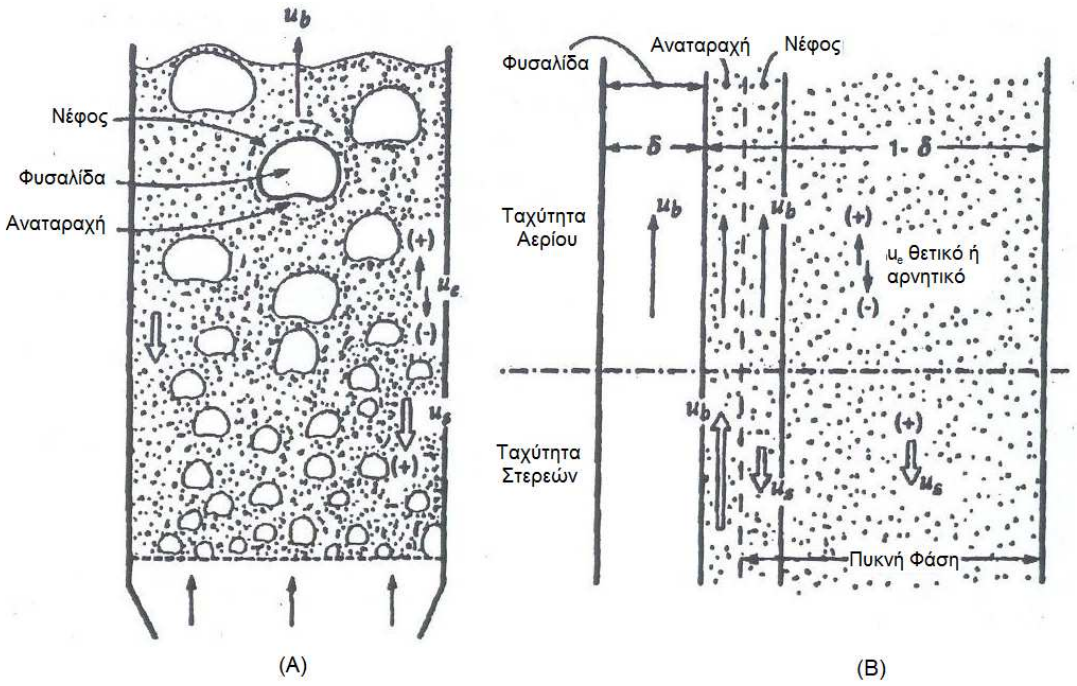
Εικόνα 26-Τελική Ταχύτητα Πτώσης Σωματιδίων [52]

Το προηγούμενο λογαριθμικό διάγραμμα προήλθε από την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης για διάφορες σφαιρικότητες σωματιδίων. Μπορούμε να δούμε, αν και χωρίς πολύ μεγάλη ακρίβεια, πως η αδιάστατη διάμετρος την οποία βρήκαμε αντιστοιχεί πράγματι στην αδιάστατη ταχύτητα η οποία υπολογίστηκε από τη σχέση, λαμβάνοντας υπόψη πως η σφαιρικότητα των στερεών σωματιδίων είναι 0,7.

12.1) Μοντέλο K-L

Οι Kunii και Levenspiel [20] ανέπτυξαν ένα μοντέλο το οποίο προσομοιάζει τη ροή σε μια αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη. Το μοντέλο θεωρεί πως οι φυσαλίδες παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά, ανάλογα με την ταχύτητα με την οποία ανέρχονται μέσα στην κλίνη. Οι φυσαλίδες με χαμηλή ταχύτητα δεν έχουν γύρω τους νέφος, ενώ οι πιο γρήγορα κινούμενες φυσαλίδες παρασύρουν μαζί τους τα γύρω από αυτές στερεά σωματίδια. Για την περιγραφή των

φυσαλίδων, οι Kunii και Levenspiel έκαναν αποδεκτό το μοντέλο των Davidson και Harrison [47] το οποίο περιγράφηκε πιο πριν.



Εικόνα 27-Μοντέλο K-L [20]

Όταν οι κινούμενες φυσαλίδες καταστραφούν στο άνω μέρος της ρευστοποιημένης κλίνης, τα στερεά τα οποία έχουν παρασυρθεί σταματούν την κίνησή τους και χωρίς την ανοδική δύναμη από τη φυσαλίδα η βαρύτητα επικρατεί παρασύροντας αυτά τα σωματίδια προς τα κάτω. Σε λεπτόκοκκα σωματίδια (κατηγορίας A ή AB), αυτή η κάθοδος μπορεί να είναι τόσο γρήγορη ώστε η ανοδική κίνηση του αερίου να αντιστραφεί προσωρινά. Το μοντέλο αυτό εξετάζει και αυτή την συμπεριφορά.

Το μοντέλο K-L θεωρεί την ταχύτητα των φυσαλίδων διαφορετική ανάλογα με το μέγεθος της κλίνης. Σε μικρές κλίνες αποδεκτή θεωρείται η εξίσωση την οποία προτείνουν οι Davidson και Harrison [38] όπου η ταχύτητα μιας μοναχικής ανοδικά κινούμενης φυσαλίδας δίνεται από την εξίσωση των Clift και Grace [43]:

$$u_b = u_0 - u_{mf} + u_{br} \text{ με } u_{br} = 0.711\sqrt{g \cdot d_b}$$

Σε μεγαλύτερες κλίνες όμως (βιομηχανικής κλίμακας) προτείνεται η χρήση των εξισώσεων των Kunii και Levenspiel [20] για στερεά κατηγορίας A και B και της εξίσωσης του Werther [42] για στερεά κατηγορίας D:

- Geldart A: $u_b = 1.55\left[\left(u_0 - u_{mf}\right) + 14.1(d_b + 0.005)\right]D^{0.32} + u_{br}$
- Geldart B: $u_b = 1.6\left[\left(u_0 - u_{mf}\right) + 1.13\sqrt{d_b}\right]D^{1.35} + u_{br}$
- Geldart D: $u_b = \psi \cdot \left(u_0 - u_{mf}\right) + \alpha \cdot u_{br}$

Το επόμενο βήμα στο μοντέλο είναι η εύρεση του κλάσματος όγκου της κλίνης δ (m^3 φυσαλίδων/m^3 κλίνης) το οποίο βρίσκεται σε φυσαλίδες, ο χώρος δηλαδή τον οποίο καταλαμβάνουν μέσα στην κλίνη. Το κλάσμα αυτό βρίσκεται διαφορετικά ανάλογα με την ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων και τη σχέση της με την ταχύτητα της πυκνής φάσης u_e. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις:

1. Αργές φυσαλίδες χωρίς νέφος ή $u_b < u_e$: $\delta = \frac{u_0 - u_{mf}}{u_b + 2u_{mf}}$
2. Φυσαλίδες μεσαίας ταχύτητας με πυκνό νέφος οι οποίες μπορεί να αγγίζουν μεταξύ τους ή $u_e < u_{mf} < 5u_e$ (το τμήμα αυτό είναι δύσκολο να προσομοιωθεί): $\delta = \begin{cases} \frac{u_0 - u_{mf}}{u_b + u_{mf}} & \alpha\nu\ u_b \cong u_e \\ \frac{u_0 - u_{mf}}{u_b} & \alpha\nu\ u_b \cong 5u_e \end{cases}$
3. Ταχείς φυσαλίδες με λεπτό νέφος ή $u_b > 5u_e$: $\delta = \frac{u_0 - u_{mf}}{u_b - u_{mf}}$

Αν η ταχύτητα του αερίου είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την ταχύτητα στην αρχή της ρευστοποίησης τότε μπορούμε να πούμε προσεγγιστικά πως $\delta = \frac{u_0}{u_b}$. Φυσικά η αρχική εξίσωση είναι αρκετά απλή, οπότε δεν υπάρχει λόγος να γίνει αυτή η απλοποίηση.

Το επόμενο βήμα στο μοντέλο είναι ο υπολογισμός των λόγων του όγκου των διάφορων τμημάτων της αναβράζουσας κλίνης προς τον αντίστοιχο όγκο της φυσαλίδας. Τα τμήματα αυτά είναι:

- Κλάσμα του νέφους, το οποίο υπολογίζεται από την εξίσωση $f_c = \frac{3}{\frac{u_{br} \cdot \varepsilon_{mf}}{u_{mf}} - 1}$
- Κλάσμα της αναταραχής, το οποίο βρίσκεται από την εικόνα 22 ή από τη σχέση των Kozanoglou και Levy [40]: $f_w = \left[\left(0.78 + 0.0076 d_p\right) + \frac{3.899 d_b}{d_p^{1.103}}\right] / 100$
- Κλάσμα της κλίνης στην πυκνή φάση (χωρίς υπολογισμό του νέφους), το οποίο υπολογίζεται από την εξίσωση: $f_e = 1 - \delta - f_w \delta$

Εκτός από τα διάφορα τμήματα της ροής, πρέπει να υπολογίσουμε και την κατανομή των στερεών στην κλίνη. Τα στερεά σωματίδια μπορεί να έχουν παγιδευτεί εντός των φυσαλίδων ή να βρίσκονται στο νέφος γύρω από αυτές. Υπάρχουν όμως και στερεά σωματίδια τα οποία είναι απομακρυσμένα από όλες τις φυσαλίδες και τα οποία βρίσκονται απλώς στη στερεή φάση.

Οι Kunii και Levenspiel [20] υπολόγισαν από πειράματα πως το κλάσμα των στερεών στις φυσαλίδες γ_b είναι περίπου σταθερό και ανάμεσα σε 10^{-2} και 10^{-3}. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούν σε όλες τις περιπτώσεις τη μέση τιμή, δηλαδή γ_b=0,005.

Αν περιλάβουμε τα στερεά τα οποία βρίσκονται στο νέφος γύρω από τις φυσαλίδες και τα στερεά τα οποία βρίσκονται στην περιοχή της αναταραχής σε ένα κλάσμα όγκου, τότε η τιμή του μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\gamma_c = (1 - \varepsilon_{mf})(f_c + f_w)$$

Το κλάσμα των στερεών τα οποία δεν επηρεάζονται από τις φυσαλίδες δεν μπορεί να υπολογιστεί άμεσα. Για τον υπολογισμό του πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τα άλλα δύο κλάσματα των ρευστών τα οποία υπολογίστηκαν προηγουμένως και το κλάσμα των φυσαλίδων στην κλίνη προκύπτει ως εξής:

$$\gamma_e = \frac{(1 - \varepsilon_{mf})(1 - \delta)}{\delta} - \gamma_b - \gamma_c$$

Η ταχύτητα στην πυκνή φάση σύμφωνα με το μοντέλο αυτό δεν είναι απλώς ο λόγος της ταχύτητας στην αρχή της ρευστοποίησης προς την αντίστοιχη κενότητα. Αντίθετα, καθώς το μοντέλο προβλέπει όπως αναφέρθηκε την πτωτική τάση των σωματιδίων πρέπει να αφαιρέσουμε από αυτό το λόγο την ταχύτητα της πτώσης αυτής, οπότε η πυκνή φάση υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$u_e = \frac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}} - u_s$$

Η ταχύτητα αυτή πτώσης (η οποία δεν ισούται απαραίτητα με τη μέγιστη ταχύτητα πτώσης u_t και μάλιστα είναι συνήθως μικρότερη από αυτή) των σωματιδίων μπορεί να βρεθεί σύμφωνα με τους Kunii και Levenspiel [20] από την εξίσωση:

$$u_s = \frac{f_w \cdot u_b \cdot \delta}{1 - \delta - \delta \cdot f_w}$$

Οι εξισώσεις αυτές δεν είναι τόσο αποτελεσματικές σε κλίνες με λεπτόκοκκα σωματίδια καθώς η ροή ανακυκλοφορίας γίνεται πολύ έντονη. Αυτό οδηγεί την ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων να είναι υψηλότερη από αυτή που προκύπτει από την εξίσωση και την αναστροφή της ροής των σωματιδίων να προκύπτει σε χαμηλότερη ταχύτητα ανόδου του ρευστού.

12.2) Μεταφορά Σωματιδίων

Ανεξάρτητα από το ύψος της κλίνης και την ταχύτητα του ρευστού, ένα τμήμα των στερεών σωματιδίων θα παρασυρθεί από το ρευστό και θα βγει από τον αντιδραστήρα μαζί με το παραγόμενο αέριο. Το ποσοστό των σωματιδίων τα οποία θα εγκαταλείψουν την κλίνη με αυτό τον τρόπο εξαρτάται από τη γεωμετρία της κλίνης, τις ιδιότητες και την ταχύτητα ροής του ρευστού, το μέγεθος των σωματιδίων και τη θέση εξόδου του παραγόμενου αερίου από την κλίνη.

Για να γίνει έξοδος των σωματιδίων με αυτό τον τρόπο θα πρέπει η δύναμη την οποία ασκεί το ρευστό στα στερεά σωματίδια να είναι μεγαλύτερη από τη βαρύτητα αλλά και την τριβή η οποία ασκείται μεταξύ τους. Προφανώς, τα βαρύτερα σωματίδια, στα οποία η βαρύτητα είναι μεγαλύτερη, είναι αυτά τα οποία πρώτα σταματούν και επιστρέφουν στην πυκνή φάση, ενώ μόνο αρκετά λεπτόκοκκα σωματίδια θα εγκαταλείψουν τον αντιδραστήρα.

Η όλη αυτή διαδικασία λαμβάνει χώρα στην περιοχή απεμπλοκής πάνω από την πυκνή φάση. Στην περιοχή απεμπλοκής η πυκνότητα των στερεών σωματιδίων μειώνεται καθώς η απόσταση από την πυκνή φάση αυξάνεται, λόγω της πτώσης των βαρύτερων σωματιδίων η οποία αναφέρθηκε προηγουμένως. Επομένως, αύξηση του ύψους της περιοχής απεμπλοκής οδηγεί σε μείωση των σωματιδίων που παρασύρονται εκτός της κλίνης. Η αρχική του ταχύτητα σε αυτή την περίπτωση θα έπρεπε να είναι αρκετά μεγαλύτερη για να εξασφαλιστεί η έξοδός τους.

Τα σωματίδια τα οποία οδηγούνται στην περιοχή απεμπλοκής ανήκουν σε ολόκληρο το εύρος του μεγέθους των σωματιδίων στην κλίνη. Τα βαρύτερα σωματίδια όμως επιστρέφουν στην πυκνή φάση, επομένως καθώς η απόσταση από αυτήν αυξάνει μεταβάλλεται και η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων με το μέσο μέγεθος να γίνεται μικρότερο. Αυτός ο διαχωρισμός με καθίζηση (elutriation) συμβαίνει σε κάθε ύψος πάνω από τη ρευστοποιημένη κλίνη.

Αυτή όμως η μείωση δεν συνεχίζεται για κάθε ύψος της περιοχής απεμπλοκής. Υπάρχει ένα όριο πέρα από το οποίο το ποσοστό των σωματιδίων που παρασύρονται δεν αλλάζει σημαντικά, όσο και αν αυξήσουμε το ύψος. Αυτό το όριο ονομάζεται *ύψος αποδέσμευσης της μεταφοράς* (transport disengaging height ή TDH). Όταν η έξοδος του παραγόμενου αερίου βρίσκεται πάνω από αυτό το όριο, τότε το ποσοστό και η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων τα οποία εξέρχονται διατηρείται περίπου σταθερή. Η κατανομή αυτή μεγέθους δεν είναι προφανώς η ίδια με την κατανομή μεγέθους της κλίνης αλλά περιλαμβάνει κυρίως λεπτότερα σωματίδια.

Όριο υπάρχει επίσης και στην ποσότητα των στερεών σωματιδίων τα οποία μπορεί να μεταφέρει η κάθε ροή αερίου πάνω από το ύψος αποδέσμευσης της μεταφοράς. Το όριο αυτό ονομάζεται *κορεσμένη χωρητικότητα μεταφοράς* (saturation carrying capacity). Το όριο αυτό εξαρτάται και από τις ιδιότητες του ρευστού αλλά και από τις ιδιότητες του στερεού.

Η περιοχή απεμπλοκής εμφανίζεται μόνο σε συστήματα αερίου-ρευστού, τα οποία δεν έχουν ιδιαίτερα υψηλή ταχύτητα ροής του αερίου. Θα πρέπει δηλαδή η ταχύτητα να έχει ξεπεράσει την ελάχιστη ταχύτητα δημιουργίας φυσαλίδων και η κλίνη να είναι τουλάχιστον αναβράζουσα. Ο λόγος είναι ότι οι φυσαλίδες είναι οι κύριοι υπεύθυνοι για την μεταφορά των σωματιδίων στην περιοχή απεμπλοκής.

Αν η ταχύτητα της ρευστοποίησης είναι πολύ υψηλή τότε η περιοχή απεμπλοκής δεν θα υπάρχει καθόλου στην κλίνη. Τα σωματίδια παρασύρονται από το αέριο σε όλο το ύψος της κλίνης ως την έξοδο ανεξαρτήτως μεγέθους. Επομένως όλα τα ύψη έχουν περίπου την ίδια πυκνότητα και δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ πυκνής και αραιής φάσης.

Η πίεση των φυσαλίδων είναι μεγαλύτερη από την πίεση η οποία επικρατεί στην επιφάνεια της πυκνής φάσης. Κατά συνέπεια, όταν η φυσαλίδα φτάνει στην επιφάνεια αυτή διαλύεται και τα σωματίδια τα οποία βρίσκονται στην κορυφή της εκσφενδονίζονται στην περιοχή απεμπλοκής. Η ταχύτητα με την οποία

εκσφενδονίζονται εξαρτάται από την πίεση της φυσαλίδας και την ταχύτητα με την οποία αυτή ανέρχεται. Αυτό είναι πιο συνηθισμένο σε φυσαλίδες μεγάλου μεγέθους και slugs.

Εκτός όμως από τα στερεά σωματίδια στην κορυφή της φυσαλίδας στην περιοχή απεμπλοκής μπορεί να οδηγηθούν και τα σωματίδια τα οποία απαρτίζουν το νέφος της φυσαλίδας. Καθώς η φυσαλίδα και το νέφος κινούνται πιο γρήγορα από τα ελεύθερα σωματίδια της πυκνής φάσης όταν η φυσαλίδα σταματήσει την κίνησή της στην επιφάνεια της πυκνής φάσης και διαλυθεί, κάποια από τα σωματίδια του νέφους, λόγω αδράνειας συνεχίζουν την κίνησή τους και οδηγούνται στην περιοχή απεμπλοκής. Η αντίδραση αυτή είναι πιο συνηθισμένη σε αναβράζουσες κλίνες.

Μια ειδική περίπτωση είναι για δυο φυσαλίδες να ενώνονται τη στιγμή που η μία διαλύεται έχοντας φτάσει στην επιφάνεια της πυκνής φάσης. Η διαφορά πίεσης σε αυτή την περίπτωση ανάμεσα στην επιφάνεια και τις δύο ενωμένες φυσαλίδες είναι αρκετά μεγάλη, καθώς η δεύτερη φυσαλίδα βρίσκεται εντός της πυκνής φάσης όπου η πίεση είναι μεγαλύτερη. Η διαφορά πίεσης αυτή οδηγεί σε μια έντονη αντίδραση όπου τα σωματίδια του νέφους της δεύτερης φυσαλίδας μέσα στην κλίνη οδηγούνται με μεγάλη ταχύτητα στην περιοχή απεμπλοκής.

Εφόσον η μεταφορά των σωματιδίων εξαρτάται τόσο από τη συμπεριφορά των φυσαλίδων όταν φτάνουν στην επιφάνεια της πυκνής φάσης, ένας τρόπος για τη μείωση της μεταφοράς των στερεών σωματιδίων εκτός της πυκνής φάσης είναι η μείωση του μεγέθους των φυσαλίδων οι οποίες φτάνουν στην επιφάνεια αυτή. Μειωμένου μεγέθους φυσαλίδες μπορούν να στείλουν λιγότερα σωματίδια στην περιοχή απεμπλοκής και η διαφορά πίεσης είναι μικρότερη, επομένως τα σωματίδια εκσφενδονίζονται με μικρότερη ταχύτητα.

Η συμπεριφορά της περιοχής απεμπλοκής εξαρτάται σημαντικά από το ύψος αποδέσμευσης μεταφοράς. Αν το ύψος της κλίνης είναι μεγαλύτερο από το ύψος αυτό τότε η έξοδος των σωματιδίων από την κλίνη είναι σχετικά μικρή, καθώς περιορίζεται από το όριο κορεσμού. Επιπλέον, τα σωματίδια διαχωρίζονται από το αέριο ανάλογα με το βάρος τους, ενώ μόνο τα πλέον λεπτόκοκκα σωματίδια θα απομακρυνθούν.

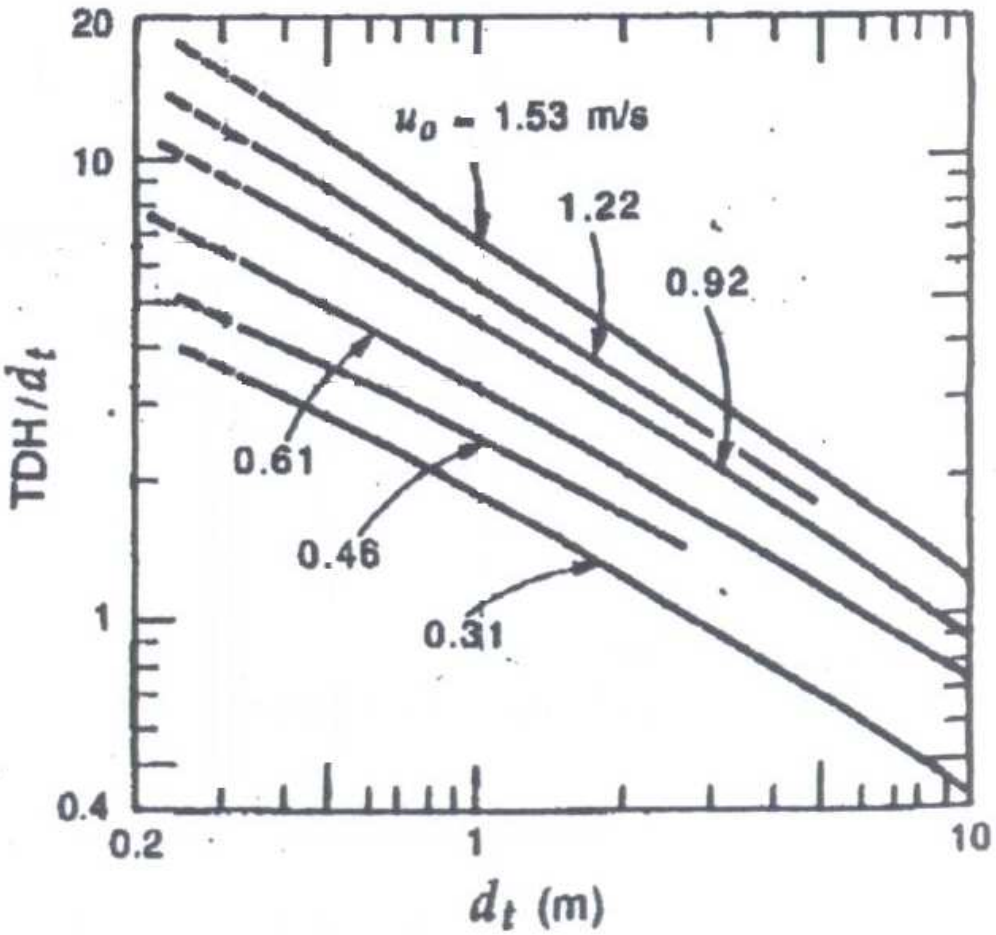
Αντίθετα, σε κλίνες με μικρότερο ύψος, όπου η έξοδος του παραγόμενου αερίου βρίσκεται χαμηλότερα από το ύψος αποδέσμευσης της μεταφοράς τα σωματίδια δεν προλαβαίνουν πολλές φορές να διαχωριστούν πλήρως μεταξύ τους, και παραμένουν σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, όπως είχαν προέλθει από την πυκνή φάση. Ο ρυθμός εξόδου των σωματιδίων είναι πολύ μεγαλύτερος και η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων αυτών πλησιάζει την κατανομή μεγέθους στην πυκνή φάση.

Είναι απαραίτητο λοιπόν να υπολογίσουμε αυτό το ύψος μεταφοράς για κάθε κλίνη και να δούμε ποιες ιδιότητες θα έχουν και ποια συμπεριφορά θα ακολουθούν τα σωματίδια τα οποία διαφεύγουν από την πυκνή φάση. Η επιθυμητή

συμπεριφορά θα καθορίσει το τελικό ύψος της κλίνης καθώς και το ύψος της εξόδου του αερίου. Ταυτόχρονα σε χημικούς αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης, όπως η πραγματική εγκατάσταση καύσης Stabilat, υπάρχει συνήθως κάποιος ελάχιστος χρόνος παραμονής για να ολοκληρωθεί η αντίδραση και η τοποθέτηση της εξόδου του παραγόμενου αερίου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο χρόνο παραμονής.

Το ύψος αποδέσμευσης της μεταφοράς εξαρτάται έντονα από το μέγεθος των σωματιδίων. Το μέγεθος των σωματιδίων καθορίζει την τελική ταχύτητα πτώσης τους και η σχέση της ταχύτητας ροής του αερίου με την τελική ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων καθορίζει τη δυνατότητα των σωματιδίων να απομακρυνθούν από την πυκνή φάση.

Η μέθοδος υπολογισμού του ύψους αποδέσμευσης της μεταφοράς διαφέρει ανάλογα με τη σχέση αυτών των δύο ταχυτήτων. Αν τα περισσότερα σωματίδια είναι λεπτόκοκκα, τότε η ταχύτητα ροής του αερίου είναι μεγαλύτερη από την τελική ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων, ενώ αντίθετα σε μεγαλύτερα σωματίδια μεγάλο τμήμα των στερεών μπορεί να έχει πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα πτώσης και η απομάκρυνσή του μπορεί να μην είναι εφικτή.



Εικόνα 28-Εκτίμηση TDH για σωματίδια κατηγορίας Geldart A[37]

Οι Zenz και Weil [37] δημοσίευσαν το παρακάτω σχήμα για σωματίδια με διάμετρο από 20 ως 150μm. Το σχήμα αυτό αναπτύχθηκε για καταλύτη FCC ο οποίος ανήκει σε κατηγορία Geldart A και η χρήση του προφανώς δεν είναι απολύτως ακριβής. Τα αποτελέσματα όμως είναι έστω και προσεγγιστικά μας οδηγούν στο αδιαμφισβήτητο συμπέρασμα πως η κλίνη του κρύου μοντέλου, η οποία έχει διάμετρο πυκνής φάσης 0,5m και συνολικός ύψος εγκατάστασης περίπου 2,3m, δεν έχει το απαραίτητο ύψος αποδέσμευσης μεταφοράς. Επομένως αναμένουμε σημαντική ποσότητα σωματιδίων να διαφεύγουν από την κλίνη. Για αυτό το λόγο πρέπει να τοποθετήσουμε στην εγκατάσταση σύστημα καθαρισμού του εξερχόμενου αέρα.

Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύεται από την ταχύτητα πτώσης η οποία είναι της περισσότερες φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα ροής. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα πτώσης για κλίνη αποκλειστικά με άμμο είναι 1,69m/s ενώ η ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης είναι 0,0476m/s. Η ταχύτητα για να αρχίσει να αναπτύσσεται slugging στην εγκατάσταση εξάλλου είναι περίπου 0,2m/s.

Οι Kunii και Levenspiel [20] ανέπτυξαν ένα μοντέλο για τον υπολογισμό τέτοιων κλινών. Στο μοντέλο γίνονται δεκτά τα παρακάτω αξιώματα:

- Στην περιοχή απεμπλοκής συνυπάρχουν τρεις διακριτές φάσεις:
    1. Ροή αερίου με πλήρως διεσπαρμένα σωματίδια. Από αυτά τα σωματίδια, τα λεπτόκοκκα οδηγούνται εκτός της κλίνης, ενώ τα μεγαλύτερα επιστρέφουν στην πυκνή φάση.
    2. Συσσωρευμένες μάζες σωματιδίων από τη διάλυση φυσαλίδων, οι οποίες κινούνται ανοδικά.
    3. Συσσωρευμένες μάζες και λεπτά στρώματα σωματιδίων στα τοιχώματα, τα οποία κινούνται καθοδικά.
- Σε κάθε ύψος της περιοχής απεμμπλοκής ο ρυθμός μεταφοράς λεπτόκοκκων σωματιδίων από τη φάση 2 (συσσωρευμένες μάζες) στη φάση 1 (διεσπαρμένα σωματίδια) είναι ανάλογος στο κλάσμα όγκου των συσσωρευμένων μαζών σε αυτό το ύψος (ανερχόμενων και κατερχόμενων).
- Οι συσσωρευμένες μάζες σε κάποιο σημείο θα σταματήσουν να κινούνται ανοδικά και θα αναστρέψουν την κατεύθυνσή τους. Θα αλλάξουν δηλαδή από τη φάση 2 στη φάση 3 και η συχνότητα αλλαγής της κατεύθυνσης είναι ανάλογη του κλάσματος όγκου της φάσης 2 στο ύψος αυτό. Φυσικά υπάρχει και η περίπτωση να αποσπαστούν αρκετά σωματίδια από κάποια μάζα ώστε να πάψει να υπάρχει.

Η μέση πυκνότητα των στερεών σε κάθε ύψος στην κλίνη ισούται με το άθροισμα των πυκνοτήτων της κάθε φάσης σε αυτό το ύψος. Η συνολική ανοδική παροχή μάζας ισούται με το άθροισμα των παροχών των φάσεων 1 και 2 ενώ η παροχή μάζας προς την πυκνή φάση ισούται με την παροχή μάζας στη θέση 3.

12.3) Ανάμιξη στερεών

Στους αντιδραστήρες ρευστοποίησης τοποθετούνται συχνά δύο και τρία διαφορετικά στερεά, μαζί με το καύσιμο, τα οποία πρέπει να ρευστοποιηθούν. Αυτά τα στερεά δεν έχουν τις ίδιες φυσικές και χημικές ιδιότητες και η συμπεριφορά της κλίνης θα είναι διαφορετική από την περίπτωση ένα από αυτά τα στερεά να ρευστοποιούνταν μόνο του.

Είναι δύσκολο να γίνει ρευστοποίηση σε κλίνη η οποία να αποτελείται μόνο από καύσιμο και οξειδωτικό μέσο. Χρειάζεται συνήθως και ένα άλλο υλικό, το οποίο θα είναι αδρανές αλλά θα ευνοεί τη ρευστοποίηση. Μερικά καύσιμα εξάλλου όπως τα υπολείμματα της επεξεργασίας του ρυζιού, όπως αναφέρεται από τους Natarajan et al. [18] είναι αδύνατον να ρευστοποιηθούν λόγω της φύσης τους. Η ανάμιξη με άλλα στερεά βοηθά σημαντικά στην επιτυχία της ρευστοποίησής του.

Στο κρύο μοντέλο θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο ή τρία διαφορετικά στερεά τα οποία θα αναπαριστούν διαφορετικά στοιχεία της πραγματικής εγκατάστασης. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα στερεό το οποίο θα προσομοιάζει σύμφωνα με το λόγο πυκνότητας κατά Glicksman [27] το υλικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην κλίνη (ολιβίνη ή πυριτική άμμο), ένα υλικό το οποίο θα προσομοιάζει το καύσιμο (Stabilat) και ένα υλικό το οποίο θα προσομοιάζει τα υπολείμματα της διεργασίας.

Η αεριοποίηση αυτών των τριών συστατικών γίνεται ταυτόχρονα στην ίδια κλίνη. Λόγω όμως της μεγάλης διαφοράς στην πυκνότητα και το μέγεθός τους, διαφορές τις οποίες έχουν και τα πραγματικά συστατικά, η συμπεριφορά τους κατά την αεριοποίηση δεν είναι ίδια στο καθένα, αλλά πιθανόν και να διαφέρει από τη συμπεριφορά την οποία θα είχαν αν το καθένα αεριοποιούνταν μόνο του.

Τα βαρύτερα ή και μεγαλύτερα σωματίδια σε μια τέτοια μίξη έχουν την τάση να κατακάθονται στον πυθμένα. Σε μια αναβράζουσα κλίνη αυτό εμποδίζεται από τις ανοδικά κινούμενες φυσαλίδες, στο νέφος των οποίων γίνεται μίξη των διάφορων στερεών. Η μίξη αυτή ευνοείται όταν η ταχύτητα αυξάνεται και γίνεται αρκετά μεγαλύτερη από την ταχύτητα στην αρχή της ρευστοποίησης. Εμποδίζεται επίσης από τον διασκορπιστή ο οποίος στέλνει στην εγκατάσταση αέρα με υψηλή ταχύτητα ώστε να εμποδίζει την κατακάθιση στερεών.

Όλα όμως τα σωματίδια δεν έχουν την ίδια ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης. Τα βαρύτερα και τα μεγαλύτερα σωματίδια απαιτούν υψηλότερη ταχύτητα από τα λεπτόκοκκα στερεά για να ρευστοποιηθούν. Αν λοιπόν η ταχύτητα ροής του αερίου μειωθεί αρκετά ώστε τα μεγαλύτερα σωματίδια να μην ρευστοποιούνται, αυτά τα στερεά κατακάθονται σταδιακά στον πυθμένα της κλίνης. Η ανάμιξη αυτή των σωματιδίων είναι τελικά μια διαδικασία ισορροπίας η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες ροής.

Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται σε κλίνες με σχετικά χαμηλές ταχύτητες ροής, όπως η αναβράζουσα και η τυρβώδη και αν η ταχύτητα ροής του στερεού

είναι κοντά στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης κάποιου από τα στερεά (τα μεγαλύτερα στερεά έχουν και μεγαλύτερη ταχύτητα ρευστοποίησης). Η συμπεριφορά αυτή δεν παρατηρείται σε κλίνες με ταχεία ρευστοποίηση ή πνευματική μεταφορά, καθώς οι ταχύτητες ροής είναι τόσο υψηλές ώστε τα σωματίδια παρασύρονται ανεξάρτητα του βάρους τους.

Η ανάμιξη αυτή είναι πιο σημαντική σε καταλυτικούς αντιδραστήρες αεριοποίησης, όπου η ανάμιξη του καταλύτη και του καυσίμου είναι σημαντική για να γίνει όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά η χημική αντίδραση. Η ανάμιξη όμως μπορεί να λειτουργήσει και αντίστροφα αν υπάρχει αρκετά μεγάλος αριθμός αδρανών στερεών στο μείγμα. Με ανάμιξη τα στοιχεία αυτά μπορούν να εμποδίσουν την χημική αντίδραση. Μια τέτοια εγκατάσταση η οποία έχει χημικές αντιδράσεις είναι και ο αντιδραστήρας καύσης Stabilat στο Osnabrück.

Η ανάμιξη των στερεών οφείλεται σε διάχυσή τους από τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσής τους σε περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης. Η ανάμιξη αυτή καθορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση διάχυσης όπου C_s είναι η συγκέντρωση του στερεού και D_{sv} είναι ο μέσος συντελεστής διάχυσης κατά την κάθετη κατεύθυνση:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = D_{sv} \frac{\partial^2 C_s}{\partial z^2}$$

Το μοντέλο Kunii-Levenspiel [20] το οποίο χρησιμοποιήσαμε υποθέτει πως κάποια από τα στερεά σωματίδια έχουν καθοδική πορεία στην πυκνή φάση της κλίνης. Για την ανάμιξη των στερεών ο van Deemter [53] ανέπτυξε ένα παρόμοιο μοντέλο αντιρροής, το οποίο προβλέπει κίνηση και προς τις δύο κατευθύνσεις για τα στερεά με ανταλλαγή σωματιδίων μεταξύ των δύο φάσεων.

Ο Kunii [20] τροποποίησε το μοντέλο του van Deemter χρησιμοποιώντας το μοντέλο φυσαλίδας των Davidson-Harrison [38]. Θεώρησε πως τα σωματίδια τα οποία κινούνται προς το διασκορπιστή και βρίσκονται στην πορεία αντίθετα κινούμενης φυσαλίδας απορροφούνται από το νέφος της και συνεχίζουν την καθοδική τους πορεία μέσα σε αυτό.

Υπέθεσε στη συνέχεια πως καθώς η κυκλοφορία του αερίου στο νέφος είναι αρκετά γρήγορη, όλα τα στερεά σωματίδια τα οποία εισήλθαν στο νέφος οδηγούνται στην περιοχή της αναταραχής πίσω από τη φυσαλίδα, αναμιγνύονται με τα στερεά τα οποία είναι ήδη εκεί και τελικά οδηγούνται πάλι πίσω στην πυκνή φάση.

Με βάση τις παραδοχές αυτές, ανέπτυξε την παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης σ αυτή την περίπτωση:

$$D_{sv} = \frac{f_w^2 \cdot \varepsilon_{mf} \cdot \delta \cdot d_b \cdot u_b^2}{3u_{mf}}$$

Ως τώρα έχουμε αναφερθεί μόνο στην ανάμιξη διαφορετικών σωματιδίων κατά το ύψος της κλίνης. Μας ενδιαφέρει όμως και η οριζόντια κίνηση και ανάμιξη των σωματιδίων. Η ανάμιξη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε κλίνες οι οποίες έχουν μια είσοδο για το καύσιμο στη μία άκρη της κλίνης και η έξοδος του

παραγόμενου αερίου βρίσκεται στην άλλη άκρη, όπως οι δύο εγκαταστάσεις υπό μελέτη εδώ. Η μελέτη είναι ιδιαίτερα σημαντική στα επίπεδα εισόδου και εξόδου από την κλίνη.

Τα πειράματα για την οριζόντια ανάμιξη των στερεών σε μια ρευστοποιημένη κλίνη δείχνουν πως ο συντελεστής διάχυσης, D_{sh}, είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μικρότερος από τον αντίστοιχο συντελεστή διάχυσης για κάθετη ανάμιξη. Η ανάμιξη δηλαδή σε επίπεδο παράλληλο στο διασκορπιστή είναι λιγότερο έντονη από την ανάμιξη σε κάθετο επίπεδο στην κλίνη.

Αντίθετα από την κάθετη ανάμιξη η οποία δεν επηρεάζεται σημαντικά, η οριζόντια εξαρτάται από το μέγεθος της κλίνης. Συγκεκριμένα, αυξάνει όσο η διάμετρος της κλίνης αυξάνει, η αύξηση αυτή όμως δεν είναι γραμμική. Παραδείγματος χάρη, οι Hirama et al. βρήκαν πως σε πολύ μικρές κλίνες διπλασιασμός της διαμέτρου της κλίνης οδηγεί σε αύξηση κατά 60% του συντελεστή διάχυσης.

Ένας άλλος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η οριζόντια ανάμιξη των στερεών είναι η διασπορά των σωματιδίων στην περιοχή απεμπλοκής. Αν το ύψος της κλίνης είναι αρκετά μεγάλο ώστε να βρισκόμαστε κοντά στο ύψος αποδέσμευσης της μεταφοράς τότε τα περισσότερα σωματίδια θα έχουν διασκορπιστεί και η οριζόντια ανάμιξη θα είναι καλύτερη. Αν όμως η κλίνη δεν είναι αρκετά ψηλή, τότε οι συσσωματωμένες μάζες στερεών εμποδίζουν την ανάμιξη.

Οι Kunii και Levenspiel [20] ανέπτυξαν ένα μοντέλο σύμφωνα με το οποίο η οριζόντια ανάμιξη στην πυκνή φάση οφείλεται επίσης στην ύπαρξη των φυσαλίδων. Καθώς η φυσαλίδα ανέρχεται, τα σωματίδια στην πυκνή φάση τα οποία βρίσκονται κοντά της εισέρχονται στο νέφος και οδηγούνται μετά στην περιοχή αναταραχής. Εκεί, τα σωματίδια αναμιγνύονται και εξέρχονται σε τυχαίες στιγμές και θέσεις, διευκολύνοντας την οριζόντια μίξη.

Ο συντελεστής οριζόντιας ανάμιξης σύμφωνα με το μοντέλο αυτό μπορεί να δοθεί από την εξής εξίσωση:

$$D_{sh} = \frac{3}{16} \cdot \frac{\delta}{1-\delta} a^2 \cdot d_b \cdot u_{br} \cdot \left[\left(\frac{u_{br} + 2u_f}{u_{br} - u_f} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να απλοποιηθεί για ταχείς φυσαλίδες με μικρά νέφη, οι οποίες παρουσιάζονται σε κλίνες με λεπτόκοκκα σωματίδια, όπου $u_{br} \gg u_f$:

$$D_{sh} = \frac{3}{16} \cdot \frac{\delta}{1-\delta} \frac{a^2 \cdot d_b \cdot u_{mf}}{\varepsilon_{mf}}$$

Το α είναι ο λόγος της διαμέτρου της περιοχής αναταραχής προς το λόγο της φυσαλίδας. Οι Kunii και Levenspiel [20] βρήκαν ότι ο λόγος αυτός για λεπτόκοκκα σωματίδια (κατηγορία A και AB) είναι περίπου ίσος με τη μονάδα. Οι Bellgardt και Werther [54,55] βρήκαν ότι για μεγαλύτερα σωματίδια (κατηγορίες B και D) ικανοποιητική είναι η τιμή 0,77.

Εκτός από το μέγεθος σημασία έχει και η πυκνότητα των σωματιδίων. Σωματίδια με ίδιο μέγεθος αλλά σημαντικά διαφορετική πυκνότητα μπορούν να συμπεριφέρονται με άλλο τρόπο μέσα στην κλίνη. Τα σωματίδια αυτά έχουν την τάση να διαχωρίζονται μεταξύ τους. Εκείνα με τη μεγαλύτερη πυκνότητα κινούνται συνήθως προς το κάτω τμήμα της κλίνης, ενώ τα άλλα παρασύρονται από το αέριο.

Όταν αυτό συμβεί τότε το κάτω μέρος της κλίνης αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από τα σωματίδια μεγαλύτερης πυκνότητας, ενώ τα υπόλοιπα βρίσκονται στα ανώτερα στρώματα της κλίνης. Σωματίδια μεγάλης πυκνότητας τα οποία βρίσκονται σε μεγαλύτερο ύψος είναι αρκετά λίγα και βρίσκονται σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένα στην κλίνη.

Η διαφορά στη συμπεριφορά τους με τα στερεά σωματίδια διαφορετικού μεγέθους είναι ότι τα σωματίδια διαφορετικής πυκνότητας έχουν μεγαλύτερη τάση να διαχωρίζονται και ο διαχωρισμός αυτός είναι πολύ πιο έντονος. Σωματίδια διαφορετικής διαμέτρου διαχωρίζονται μόνο σε χαμηλές ταχύτητες, κοντά στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης των μεγαλύτερων στερεών. Στην πυκνή φάση όλα τα σωματίδια παρόμοιας πυκνότητας, ανεξάρτητα από το μέγεθός τους είναι αναμιγμένα.

Εξάλλου, επειδή συνήθως σε μια κλίνη υπάρχει ποικιλία μεγεθών αντί για δύο ή τρεις τιμές όπως στην πυκνότητα, ο διαχωρισμός είναι πολύ πιο δύσκολος. Κάθε στερεό εξάλλου βρίσκεται στην κλίνη με μια κατανομή μεγέθους, τα όρια της οποίας δε χρειάζεται να είναι κοντινά μεταξύ τους. Το μέγεθος λοιπόν παίζει λιγότερο σημαντικό ρόλο από την πυκνότητα στο διαχωρισμό των σωματιδίων.

Ο διαχωρισμός αυτός εξαρτάται από την ταχύτητα ροής του αερίου. Όταν αυτή είναι σχετικά χαμηλή τότε είναι αρκετά έντονος. Εμφανίζεται κατά συνέπεια μόνο σε ρευστοποιημένες κλίνες με χαμηλές ταχύτητες ροής, όπως στην αναβράζουσα, ενώ για κλίνες ταχείας ρευστοποίησης όλα τα σωματίδια ανεξαρτήτως πυκνότητας (ή μεγέθους) μπορούν να παρασυρθούν από την κλίνη.

Οι Rowe et al. [56, 57, 58] ήταν οι πρώτοι οι οποίοι θεώρησαν ότι το φαινόμενο του διαχωρισμού οφείλεται στις αργά κινούμενες φυσαλίδες. Καθώς η φυσαλίδα κινείται προς τα πάνω παρασέρνει στο νέφος τα σωματίδια και τα οδηγεί στην περιοχή αναταραχής. Όμως μόνο τα σωματίδια μεγαλύτερης πυκνότητας μπορούν στη συνέχεια να υπερνικήσουν την ανοδική δύναμη και να επιστρέψουν στα κατώτερα τμήματα της κλίνης. Τα ελαφρύτερα σωματίδια παραμένουν στα ανώτερα στρώματα.

13) Κατασκευή του Αντιδραστήρα

13.1) Σύστημα Εισαγωγής Αερίου

Σε μια ρευστοποιημένη κλίνη είναι απαραίτητο να εισαχθεί κάποιο αέριο, το οποίο θα υπερνικήσει την αντίσταση των στερεών και θα εξασφαλίσει υψηλή κυκλοφορία των σωματιδίων, δημιουργώντας τη ρευστοποιημένη κλίνη. Το αέριο αυτό είναι συνήθως αέρας, ενώ χρησιμοποιούνται και μίγματα ατμού και ατμοσφαιρικού αέρα. Σε μερικές εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται αέρας εμπλουτισμένος με καθαρό οξυγόνο.

Το αέριο αυτό εισέρχεται σε μια αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη πάντα από το κάτω μέρος της εγκατάστασης. Το ακριβές σημείο εισόδου του ποικίλλει ανάλογα και με το σύστημα απομάκρυνσης των στερεών καταλοίπων. Αν η παροχή του πρέπει να είναι πολύ υψηλή, τότε και η ταχύτητά του στο σωλήνα εισαγωγής θα είναι πολύ υψηλή. Για να αποφευχθεί εισαγωγή του στον αεριοποιητή με πολύ ψηλή ταχύτητα και κατά συνέπεια ταχεία ρευστοποίηση ή πνευματική μεταφορά στον αντιδραστήρα αντί για αναβράζουσα κλίνη, χρησιμοποιείται συνήθως ένα κωνικό στοιχείο πριν το διασκορπιστή, το οποίο λειτουργεί ως διαχύτης, μειώνοντας την ταχύτητα του αερίου.

Η περιοχή αυτή προσφέρει καλύτερο έλεγχο της ταχύτητας και επιτρέπει τη λειτουργία αντιδραστήρα με μεγαλύτερες ποσότητες καυσίμου και υλικού, καθώς επιτρέπει αύξηση της διαμέτρου. Η διάταξη αυτή είναι ταυτόχρονα και η βέλτιστη για τον περιορισμό των απωλειών από την αύξηση της διαμέτρου. Σε κάθε περίπτωση όμως η ταχύτητα του αερίου κατά την είσοδο στη ρευστοποιημένη κλίνη πρέπει να είναι υψηλή για να υποστηρίξει το βάρος του υλικού επομένως η αύξηση της διαμέτρου δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλη.

Ακριβώς πριν την εισαγωγή του αερίου στη ρευστοποιημένη κλίνη υπάρχει ένας διασκορπιστής (distributor). Σκοπός του είναι η καλύτερη κατανομή της ροής όπως αυτή διαμορφώνεται από τον διαχύτη και ο ταυτόχρονος έλεγχος της ροής. Πράγματι, ο διασκορπιστής προσφέρει συνολικά ομοιόμορφη ροή στην έξοδό του εξασφαλίζοντας ομοιόμορφες συνθήκες σε κάθε σημείο της ρευστοποιημένης κλίνης. Ταυτόχρονα μειώνει όσο είναι δυνατόν την τύρβη της ροής (μικροδίνες και διαταραχές της ταχύτητας της ροής), όπως διαμορφώθηκε από τον διαχύτη και το σύστημα εισαγωγής.

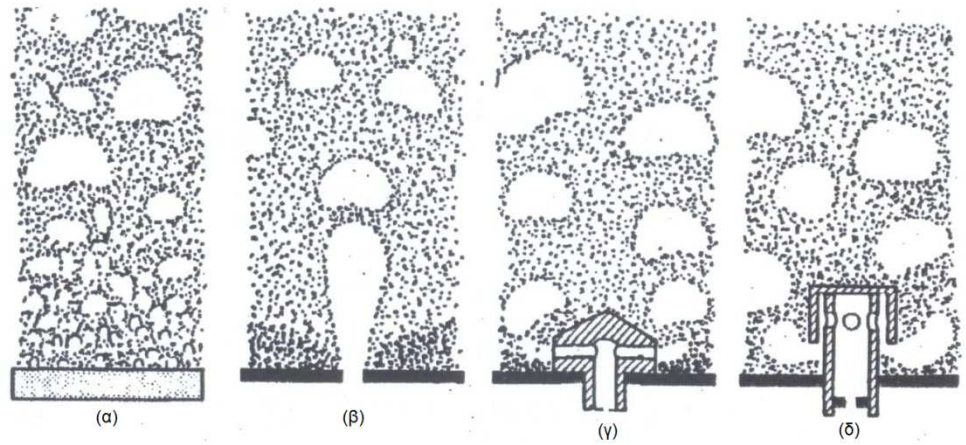
Οι περισσότερες κλίνες χρησιμοποιούν για την εισαγωγή του αέρα διασκορπιστές. Οι διασκορπιστές αυτοί είναι συνήθως κατασκευασμένοι από κεραμικά υλικά ή από μέταλλο, συνήθως με χύτευση. Οι διασκορπιστές έχουν

αρκετοί αντίσταση στη ροή του αερίου ώστε να προκύψει μια ομοιόμορφη διανομή του αέρα στην κλίνη, η οποία διευκολύνει την ρευστοποίηση.

Πολλά άλλα υλικά μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή διασκορπιστών, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υφάσματα για φίλτρα, συμπιεσμένες ίνες ή ακόμα και μια μικρή κλίνη λεπτόκοκκων σωματιδίων. Φυσικά, μερικά από αυτά τα υλικά χρειάζεται να υποστηριχτούν με μέταλλο κατά την κατασκευή. Η χρήση τους όμως δεν είναι συχνή, ιδιαίτερα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών τις οποίες πρέπει να αντιμετωπίσει ο διασκορπιστής.

Το κύριο πλεονέκτημα των διασκορπιστών είναι η ομοιόμορφη διάδοση του αέρα, που εξασφαλίζει την βέλτιστη επαφή μεταξύ στερεού και αερίου και το βέλτιστο αποτέλεσμα στη διεπαφή αυτή έρχεται με τη χρήση των λιγότερο συνηθισμένων υλικών. Ωστόσο οι διασκορπιστές αυτοί έχουν υψηλές απώλειες πίεσης και μικρή αντοχή σε θερμικές ή μηχανικές πιέσεις, ενώ είναι ευαίσθητοι στη διάβρωση. Είναι έτσι ακατάλληλοι για βιομηχανική χρήση.

Ένα σημαντικό μέγεθος στους διασκορπιστές είναι το ποσοστό κενού χώρου, το οποίο δηλώνει την ανοιχτή επιφάνεια του διασκορπιστή από την οποία περνά το αέριο. Από την επιφάνεια αυτή δηλαδή, το στερεό μέσα στην κλίνη θα μπορούσε να πέσει κάτω από το επίπεδο του διασκορπιστή, αν δεν εμποδιζόταν από το αέριο. Το ποσοστό αυτής της επιφάνειας στους περισσότερους διασκορπιστές είναι μικρότερο του 5%, καθώς ο αέρας εισέρχεται από πολύ μικρές οπές στην εγκατάσταση. Υπάρχουν όμως ορισμένοι διασκορπιστές οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την απαγωγή της τέφρας και οι οποίοι μπορεί να έχουν πολύ μεγαλύτερο ποσοστό ανοιχτής επιφάνειας, όπως ο διασκορπιστής ο οποίος σχεδιάζεται για το κρύο μοντέλο.



Εικόνα 29-Δημιουργία Φυσαλίδων πάνω από το διασκορπιστή: α) Πορώδης β) Διάτρητος γ) Με ακροφύσια δ) Με καπάκι [42]

Το πιο σημαντικό μέγεθος όμως σε ένα διασκορπιστή είναι η πτώση πίεσης του. Η πτώση πίεσης του διασκορπιστή και της κλίνης έχει άμεση επίδραση στο κόστος μεταφοράς και εισαγωγής του αερίου στην κλίνη και έμμεση έτσι επίδραση στο κόστος της επένδυσης στην εγκατάσταση. Επιπλέον, το μέγεθος αυτό έχει επίδραση στη σταθερή λειτουργία της ρευστοποιημένης κλίνης. Τα όλο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως μια σύνδεση δύο υδραυλικών αντιστάσεων (διασκορπιστής και κλίνη) σε σειρά, οι ιδιότητες των οποίων χαρακτηρίζουν συνολικά την εγκατάσταση [59].

Η πτώση πίεσης μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση του Bernoulli ίση με $\Delta P_d = \zeta \frac{\rho \cdot u_{or}^2}{2}$. Ο αδιάστατος συντελεστής ζ ο οποίος περιλαμβάνει το λόγο της απώλειας ενέργειας προς την κινητική ενέργεια του ρευστού έχει υπολογιστεί με πολλές σχέσεις. Οι Kunii και Levenspiel [20] θεώρησαν πως ο συντελεστής αυτός είναι ίσος με $\zeta = \frac{1}{C_D^2}$, ενώ οι Bauer και Mewes, μελετώντας τους διασκορπιστές με μεγάλη ελεύθερη επιφάνεια (οι οποίοι και μας ενδιαφέρουν στην περίπτωση αυτή) βρήκαν την ακόλουθη σχέση: $\zeta = \frac{64}{Re_{or} \cdot (d_{or}/s_d)} + 1.6(1 - \vartheta)$

Οι Saxena et al. [60] μελέτησαν σε μια σειρά διαφορετικών διασκορπιστών την επίδραση της ταχύτητας και του ποσοστού ανοικτής επιφάνειας και βρήκαν τα εξής αποτελέσματα:

1. Η πτώση πίεσης στους διασκορπιστές βρέθηκε πως αυξανόταν καθώς η ταχύτητα ροής αυξανόταν, αλλά μειωνόταν όσο το ποσοστό ανοιχτής περιοχής αυξανόταν. Για κάθε είδος διασκορπιστή τον οποίο δοκίμασαν όμως, βρήκαν πως είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων της κλίνης και κατά συνέπεια των ίδιων των διαστάσεων του διασκορπιστή.
2. Ο λόγος της πτώσης πίεσης του διασκορπιστή προς την πτώση πίεσης της κλίνης ήταν ανάλογος της ταχύτητας ροής. Εξαρτιόταν επίσης έντονα από το είδος του διασκορπιστή αλλά και από το ύψος της κλίνης, προφανώς λόγω του όρου του παρονομαστή (της ταχύτητας ροής).
3. Το μέγεθος των φυσαλίδων τις οποίες δημιουργούσαν οι διασκορπιστές είναι ανάλογο της πτώσης πίεσης τους. Στην ίδια ταχύτητα ροής μεγαλύτερη πτώση πίεσης σήμαινε και μεγαλύτερο μέγεθος φυσαλίδων.

13.1.1) Διάτρητοι Διασκορπιστές

Εικόνα 30-Διάτρητοι διασκορπιστές για πειραματικές εγκαταστάσεις

Οι *διάτρητοι ή πορώδεις διασκορπιστές* (perforated distributors) χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία, καθώς είναι εύκολοι και φτηνοί στην κατασκευή τους. Είναι εύκολη η κατασκευή τους σε διάφορα μεγέθη και η ρύθμιση του μεγέθους των οπών ώστε να περνά η επιθυμητή ποσότητα του αερίου στην επιθυμητή ταχύτητα. Μπορούν να κατασκευαστούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους πρόσβασης του αέρα στην κλίνη και μπορεί να περιλαμβάνουν σύστημα για την απομάκρυνση της τέφρας που κατακάθεται.

Ένα πρόβλημα με αυτούς τους διασκορπιστές είναι η έλλειψη ακαμψίας. Είναι πιθανό πως ο διασκορπιστής θα υποχωρήσει σε κάποιο σημείο κάτω από την πίεση του στερεού της κλίνης, καθώς η μηχανική συμπεριφορά τέτοιων δομών είναι γενικά αρκετά απρόβλεπτη. Επιπλέον, λόγω της διαστολής από τις υψηλές θερμοκρασίες είναι πιθανή η διαφυγή αερίου από τα άκρα.

Μερικές φορές για να αποφύγουμε πιθανή αστοχία του υλικού χρησιμοποιούμε υποστηρικτικές μεταλλικές κατασκευές. Όταν η κατασκευή τους δεν είναι πρακτική μπορούμε να κατασκευάσουμε το διασκορπιστή κοίλο για να έχει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή. Οι κοίλοι διασκορπιστές βοηθούν επίσης στην περίπτωση αναβράζουσας κλίνης: οι φυσαλίδες τείνουν να εμφανίζονται στο κέντρο του αντιδραστήρα και ένας τέτοιος σχεδιασμός μπορεί να αντιμετωπίσει αυτό το φαινόμενο κάνοντας τη ροή πιο ομοιόμορφη.

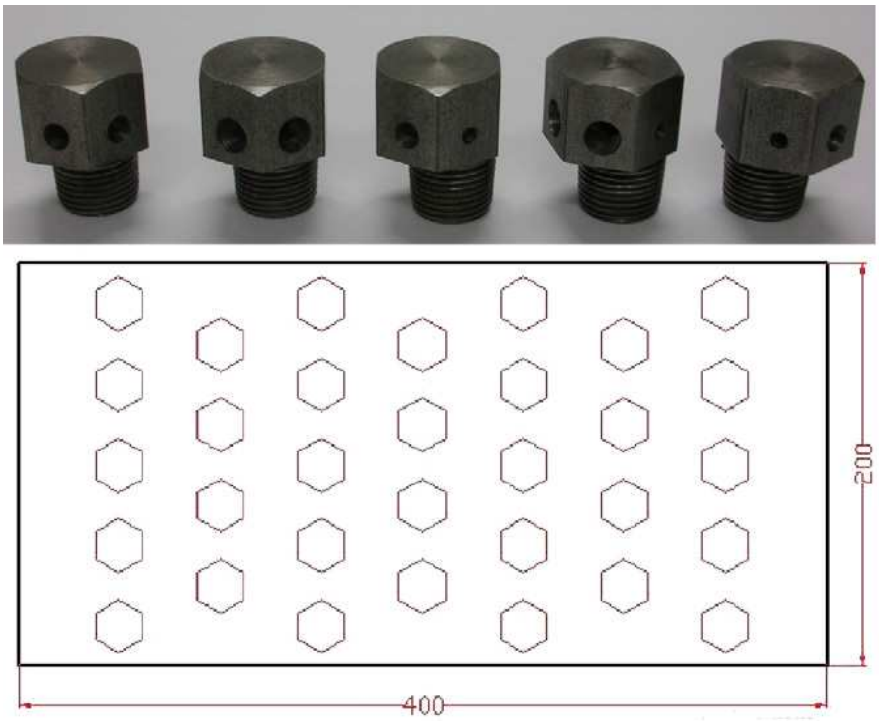
Οι περισσότεροι κοίλοι διασκορπιστές έχουν το κοίλο μέρος προς την κλίνη. Αν κατασκευαστούν αντίστροφα, χρειάζεται για να προκύψει καλή επαφή μεταξύ στερεού και αερίου να υπάρχουν περισσότερες οπές στα άκρα και λιγότερες στο κέντρο. Γενικά όμως η κατασκευή ενός κοίλου διασκορπιστή είναι αρκετά δύσκολη και δε συνηθίζεται.

Οι διάτρητοι διασκορπιστές μπορεί μερικές φορές να περιέχουν φίλτρα για να εμποδίσουν τη διαφυγή σωματιδίων από την κλίνη. Τα φίλτρα αυτά μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο του διασκορπιστή: στην είσοδο ή την έξοδο του αερίου η ακόμα και ανάμεσα σε δύο όμοιους διασκορπιστές. Η τελευταία

διάταξη εξασφαλίζει το καλύτερο αποτέλεσμα αλλά η κατασκευή της είναι πιο πολύπλοκη και το κόστος της μεγαλύτερο.

Τα σωματίδια μπορεί επίσης να μπλοκάρουν τις οπές ή να προκαλέσουν διάβρωση του διασκορπιστή. Για αυτό το λόγο αυτός πρέπει να ελέγχεται συχνά. Σε μερικές περιπτώσεις σωματίδια μπορεί να εισέρχονται μαζί με τον αέρα. Σε αυτή την περίπτωση προφανώς δεν χρησιμοποιούμε φίλτρα γιατί τα σωματίδια θα μπλοκάρουν σιγά - σιγά το διαχύτη. Η υψηλή ταχύτητα με την οποία εισέρχεται ο αέρας και τα σωματίδια μπορεί εξάλλου να καταστρέψει τα φίλτρα.

13.1.2) Διασκορπιστές με Tuyere και Κάλυμμα



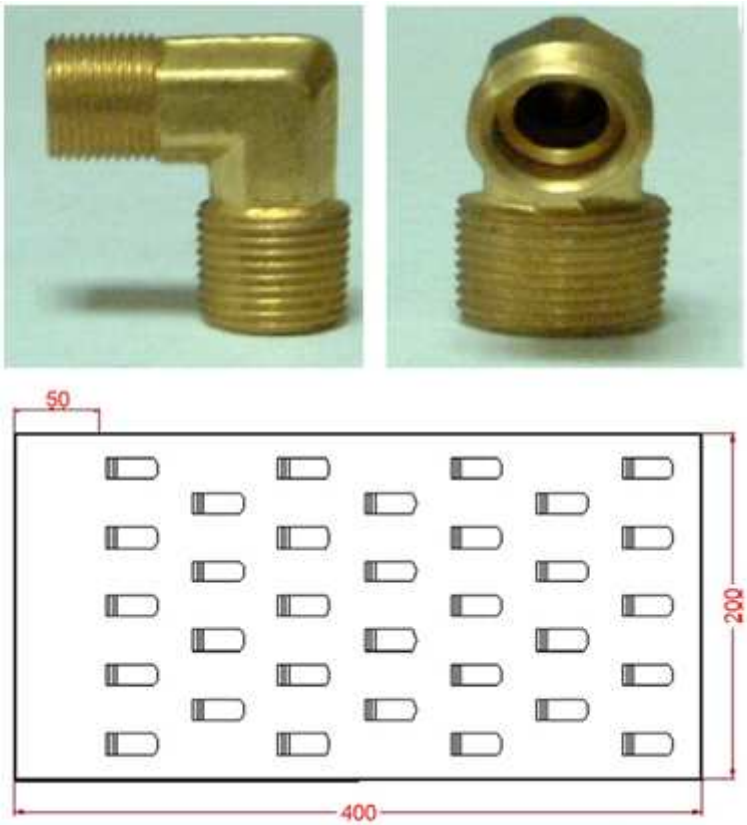
Εικόνα 31-Διασκορπιστής Tuyere και διαμόρφωσή του [61]

Οι διάτρητοι διασκορπιστές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αντίξοες συνθήκες λειτουργίας όπως εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία ή έντονα διαβρωτικό περιβάλλον. Επίσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αν η πτώση πίεσης την οποία πρέπει να προκαλούν είναι πολύ υψηλή, καθώς οδηγούμαστε σε πολύ μεγάλες ταχύτητες εισόδου του αέρα.

Σε αυτές τις περιπτώσεις προτιμάμε να χρησιμοποιούμαι σχεδιασμούς με tuyeres. Κάθε tuyere μπορεί να έχει στο εσωτερικό του ένα διάτρητο διασκορπιστή, από όπου περνά το αέριο. Αυτός ο σχεδιασμός δίνει καλή κατανομή του αερίου στην κλίνη, αλλά τα σωματίδια μπορεί να κατακαθίσουν ανάμεσα σε γειτονικές tuyeres, όπου δημιουργούνται συνήθως νεκρές ζώνες. Επίσης χρειάζεται να

πάρουμε ειδικές προφυλάξεις για να διασφαλίσουμε πως το εισερχόμενο αέριο είναι ελεύθερο σωματιδίων.

Για το λόγο αυτό τα περισσότερα tuyeres σχεδιάζονται με καλύμματα. Τα καλύμματα είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να επιτρέπουν στον αέρα και όχι σε στερεά σωματίδια να περνούν. Έχουν ακροφύσια ή οπές τα οποία παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στη ροή του αερίου και εξασφαλίζουν την έξοδό του με μεγάλη ταχύτητα.



Εικόνα 32-Διασκορπιστής οριζόντιων ακροφυσίων και διαμόρφωσή του [61]

Οι οπές αυτές είναι συνήθως στραμμένες προς το διασκορπιστή για να εμποδίζουν τα σωματίδια να κατακαθίσουν σε αυτόν και να τον διαβρώσουν. Η μεγάλη ταχύτητα όμως με την οποία εξέρχεται ο αέρας από τα ακροφύσια προκαλεί έντονη τριβή των σωματιδίων μεταξύ τους και μείωση του μεγέθους τους. Η παροχή του αερίου βέβαια μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα καθώς η ταχύτητα εισαγωγής καθορίζεται από το ακροφύσιο ή την οπή υψηλής αντίστασης. Λόγω της περίπλοκης κατασκευής τους όμως είναι πιο ακριβοί από τους διάτρητους.

Οι διανομείς αυτοί μπορούν να εξοπλιστούν και με καλύμματα, τα οποία προστατεύουν τις οπές από πιθανό φράξιμό τους από σωματίδια. Το κάλυμμα μπορεί να εξασφαλίσει επίσης την ύπαρξη περισσότερων της μίας οπής περιμετρικά του διασκορπιστή, η οποία δεν χρειάζεται να είναι παράλληλη στο επίπεδο του κυρίως σώματος του διασκορπιστή. Ταυτόχρονα, σε ένα διασκορπιστή μπορούν να

τοποθετηθούν πολλά διαφορετικά καλύμματα καθένα με διαφορετική διαμόρφωση οπών χωρίς να χρειαστεί να αποσυναρμολογηθεί τελείως το σύστημα.

13.1.3) Είσοδος Αερίου

Μεγάλη σημασία δίνεται σήμερα στην περιοχή εισόδου του ρευστού στην κλίνη. Η επαφή μεταξύ στερεού και αερίου είναι βέλτιστη και εκεί γίνεται μεγάλο τμήμα της χημικής αντίδρασης. Η περιοχή αυτή επίσης επηρεάζει σημαντικά την μεταφορά θερμότητας και τη μεταφορά μάζας. Είναι σημαντική λοιπόν η βέλτιστη σχεδίαση ενός διανομέα ώστε να ανταποκρίνεται στις συνθήκες της συγκεκριμένης κλίνης.

Πάνω από ένα πορώδη διασκορπιστή με πολλές μικροσκοπικές οπές εισόδου, για μια ομοιόμορφη ροή αέρα, του οποίου η ταχύτητα ξεπερνά την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης, ο σκεδασμός του αερίου και του στερεού ο οποίος προκαλείται ακριβώς πάνω από το διασκορπιστή εκτείνεται σε μεγαλύτερο ύψος. Είναι ασταθής και μερικά χιλιοστά πάνω από το διασκορπιστή ο σκεδασμός διασπάται σε πολλές μικροσκοπικές φυσαλίδες οι οποίες ενώνονται γρήγορα και μεγαλώνουν σε μέγεθος. Η συμπεριφορά αυτή προκαλεί και την πυκνή φάση η οποία παρατηρείται στις αναβράζουσες κλίνες.

Αν ο διασκορπιστής έχει μεγαλύτερες οπές με μια μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους τότε οι φυσαλίδες δημιουργούν στήλες πάνω από κάθε οπή. Αυτό όμως έχει το αποτέλεσμα τα σωματίδια να κατακάθονται στις περιοχές μεταξύ των οπών δημιουργώντας μια νεκρή ζώνη. Η νεκρή ζώνη αυτή μειώνεται αυξάνοντας την ταχύτητα του ρευστού και το μέγεθος των σωματιδίων. Μπορούμε επίσης να μειώσουμε την απόσταση μεταξύ των οπών και να αυξήσουμε το μέγεθός τους. Είναι δυνατή αν όλοι οι παραπάνω όροι ικανοποιηθούν η εκμηδένιση των νεκρών ζωνών.

Πάνω από μια οπή και αν η ταχύτητα μέσα στην κλίνη είναι ίση με την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης, το αέριο το οποίο εισέρχεται από αυτή έχει παροχή όγκου V_{or} $(\frac{m^3}{s})$. Θεωρώντας πως η δημιουργούμενη φυσαλίδα αποκολλάται όταν η ταχύτητα ανόδου της ξεπερνά το γραμμικό ρυθμό αύξησης, οι Davidson και Schuler [62] υπολόγισαν τον όγκο της φυσαλίδας που δημιουργείται στο επίπεδο του διασκορπιστή ως $V_b = 1.138\frac{V_{or}^{6/5}}{g^{3/5}}$

Πειράματα έδειξαν πως σε 10cm από το επίπεδο του διασκορπιστή, περίπου το 1/3 εμφανίζεται ως φυσαλίδες ενώ τα 2/3 του εισερχόμενου αερίου εισέρχονται στην πυκνή φάση για να αυξήσουν την κενότητα πάνω από την απαιτούμενη για ρευστοποίηση. Καθώς αυτές οι φυσαλίδες ενώνονται και μεγαλώνουν, ένα ποσοστό του αερίου κατευθύνεται στη φυσαλίδα έτσι ώστε σε 25cm από το επίπεδο του διασκορπιστή περισσότερα από τα 2/3 του αερίου έχουν εισέλθει στην φυσαλίδα.

Η παραπάνω συμπεριφορά παρατηρείται σε μικρές σχετικά ταχύτητες εισόδου του ρευστού. Όταν η παροχή του όμως είναι αρκετά μεγάλη, τότε οι αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών φυσαλίδων εκμηδενίζονται και τελικά οι φυσαλίδες ενώνονται και σχηματίζουν ένα πίδακα εκροής, από την κορυφή του οποίου αποκόβονται και απομακρύνονται διαρκώς φυσαλίδες. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει συχνότερα σε σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου (κατηγορίας D).

Σε ακροφύσια, οι φυσαλίδες σχηματίζονται και αποκολλούνται από αυτά σε τακτά χρονικά διαστήματα. Αν η ταχύτητα εισόδου γίνει πολύ υψηλή τότε μπορούν να δημιουργηθούν και σε αυτή την περίπτωση στήλες. Αν το ακροφύσιο είναι παράλληλο στο επίπεδο του διασκορπιστή, η στήλη εκμηδενίζει εντελώς τις νεκρές ζώνες και εξασφαλίζει καλύτερη ανάμιξη του αέρα.

Η περιοχή ακριβώς μετά την είσοδο του αερίου, στην οποία αναμιγνύονται τα στερεά σωματίδια και το αέριο είναι πολύ σημαντική για την ικανοποιητική απόδοση της εγκατάστασης. Οι Chyang et al. [61] διενέργησαν σειρά πειραμάτων για την περιοχή αυτή. Τα κύρια αποτελέσματά τους είναι:

- Η περιοχή διασποράς του αερίου εξαρτάται από την ταχύτητά του και μάλιστα αυξάνεται όσο η ταχύτητα του αερίου αυξάνεται. Η περιοχή αυτή είναι σχετικά μικρή αν η ταχύτητα του αερίου είναι μικρότερη από $4u_{mf}$ ενώ οι βέλτιστες συνθήκες παρουσιάζονται για $u_0 = 5 \cdot u_{mf}$
- Οι διασκορπιστές οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα είχαν λίγο ελεύθερο χώρο. Τα αποτελέσματα όμως δεν έδειξαν κάποια γενική τάση της περιοχής διασποράς και μπορούμε να υποθέσουμε πως δεν εξαρτάται από τον ελεύθερο χώρο του διασκορπιστή. Είναι πιθανό βέβαια μια μεγάλη απόκλιση στην ανοιχτή επιφάνεια να μεταβάλλει ελαφρώς τα αποτελέσματα.
- Η περιοχή αυτή εξαρτάται έντονα από το είδος του διασκορπιστή. Σε κλίνες με χρήση διανομέων με tuyeres πολλαπλών οπών, η ρευστοποίηση βελτιώθηκε σε σχέση με τους διανομείς με tuyeres μιας οπής. Το εύρος της περιοχής αυτής μειώθηκε αρκετά όταν χρησιμοποιήθηκε διάτρητος διασκορπιστής.

Γενικά, οι Chyang et al. [61] κατέληξαν πως η κύρια επιρροή σε αυτήν την περιοχή προέρχεται από τον σχεδιασμό του διασκορπιστή. Η διασπορά του αερίου δεν επηρεάζεται από το ύψος της κλίνης, αλλά βελτιώνεται αν ο διασκορπιστής έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να εκμηδενίζει τις νεκρές ζώνες σε αυτόν.

13.1.4) Πτώση πίεσης στους διασκορπιστές

Για την επιτυχία της ρευστοποίησης ο διασκορπιστής πρέπει να προκαλεί κατάλληλη πτώση πίεσης στο αέριο ώστε να εξασφαλιστεί η όσο το δυνατόν ομοιόμορφη ροή στην κλίνη. Η πτώση πίεσης στο διασκορπιστή αρχικά υπολογιζόταν με εμπειρικό κανόνα ως $\Delta p_d = (0.2 - 0.4)\Delta p_b$. Η πτώση πίεσης στο διασκορπιστή δηλαδή θεωρούνταν περίπου το ένα τρίτο της πτώσης στην κλίνη.

Ο κανόνας αυτός οδηγούσε συνήθως σε σχεδιασμό διασκορπιστών με υπερβολική πτώση πίεσης. Αν και η αυξημένη πτώση πίεσης εξασφαλίζει καλύτερη κατανομή της ροής του αερίου στην κλίνη, απαιτείται μεγαλύτερη πίεση από τον συμπιεστή για να λειτουργήσει η εγκατάσταση, κάτι που οδηγεί σε αυξημένο κόστος λειτουργίας. Έτσι, ο εμπειρικός κανόνας αυτός χρησιμοποιείται πλέον ως ένα άνω όριο στην απαραίτητη πτώση πίεσης για τους αντιδραστήρες.

Επιπλέον σε μερικούς διασκορπιστές, ειδικά αν έχουν ακροφύσια, για να επιτευχθούν τέτοιες πτώσεις πίεσης, η ταχύτητα εισόδου πρέπει να είναι πολύ ψηλή. Αυτό οδηγεί σε διάβρωση της εγκατάστασης λόγω της υψηλής ταχύτητας την οποία αποκτούν τα σωματίδια αφού παρασυρθούν από το αέριο. Μπορεί επίσης να οδηγήσει σε συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων και αλλαγή της κατανομής του μεγέθους τους.

Είναι σημαντικό λοιπόν να γνωρίζουμε την ελάχιστη πτώση πίεσης η οποία εξασφαλίζει ομοιόμορφη ρευστοποίηση για την συγκεκριμένη κλίνη. Από τη θεωρία μηχανικής των ρευστών για ροή διαμέσου οπών γνωρίζουμε πως η πτώση πίεσης είναι ανάλογη με την παροχή όγκου από την οπή για πορώδεις δίσκους και με το τετράγωνο της ταχύτητας για διάτρητους δίσκους και tuyeres.

Υπάρχουν αρκετές θεωρήσεις για την κατάλληλη πτώση πίεσης. Ο Hiby θεώρησε πως αν η μείωση της ταχύτητας του αερίου προκαλούσε ταυτόχρονα και μείωση της συνολικής πτώσης πίεσης στην κλίνη τότε ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$\frac{\Delta p_d}{\Delta p_b} = 0.15 \quad \gamma\iota\alpha \quad \frac{u_0}{u_{mf}} = 1 - 2 \;\; \kappa\alpha\iota \; \frac{\Delta p_d}{\Delta p_b} = 0.015 \quad \gamma\iota\alpha \quad \frac{u_0}{u_{mf}} > 2$$

Αντίθετα ο Siegel θεώρησε το παρακάτω κριτήριο για να είναι η λειτουργία σταθερή, ανεξάρτητα όμως του λόγου των ταχυτήτων που χρησιμοποίησε ο Hiby:

$$\frac{\Delta p_d}{\Delta p_b} \geq 0.14$$

Συνολικά, τα πειράματα δείχνουν πως η σχέση την οποία χρησιμοποίησε ο Hiby ή η σχέση την οποία πρότεινε ο Siegel είναι αρκετά ακριβείς αν η ταχύτητα του ρευστού δεν είναι πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα στην ελάχιστη ρευστοποίηση. Όσο όμως η διαφορά των δύο ταχυτήτων αυξάνει, τόσο ο απαραίτητος λόγος της πτώσης πίεσης στο διασκορπιστή προς την πτώση πίεσης στην κλίνη αυξάνεται.

Ο λόγος αυτός είναι επίσης περίπου ανεξάρτητος του ύψους της κλίνης. Προφανώς, σε μεγαλύτερες κλίνες όπου η πτώση πίεσης είναι επίσης μεγαλύτερη

χρειάζεται μεγαλύτερη πτώση πίεσης στο διασκορπιστή για να διατηρηθεί η λειτουργία σε όλο το ύψος της εγκατάστασης. Με τον ίδιο τρόπο είναι ανεξάρτητος της τιμής της πτώσης πίεσης στην κλίνη, η αντίστοιχη τιμή στο διασκορπιστή είναι πάντα αντίστοιχη.

Είναι σημαντικό η σχεδίαση του διασκορπιστή να γίνεται σύμφωνα με το πεδίο ταχυτήτων στο οποίο θα επιχειρεί. Η πτώση πίεσης στο διασκορπιστή διαφέρει ανάλογα με την ταχύτητα του ρευστού, ενώ η πτώση πίεσης στην κλίνη παραμένει σχετικά ανεξάρτητη. Η χρήση δηλαδή ενός διανομέα σε μια κλίνη με διαφορετική πίεση από αυτή για την οποία σχεδιάστηκε θα οδηγούσε σε ραγδαία αλλαγή του λόγου πίεσης. Για να διατηρηθεί ο λόγος της πίεσης περίπου ίδιος θα χρειαζόταν υπερβολικά μεγάλες διακυμάνσεις στην πίεση του εισερχόμενου αέρα, δυσχεραίνοντας τη λειτουργία του συμπιεστή.

Επειδή η απαιτούμενη παροχή αερίου στην εγκατάσταση είναι πολύ μεγάλη είναι απαραίτητη η συμπίεσή του πριν την είσοδο στον αεριοποιητή. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν συμπιεστή για να επιτύχουν αυτή την παροχή και για τον καλύτερο έλεγχο της παροχής. Ο συμπιεστής αυτός πρέπει οπωσδήποτε να μην φέρνει το λάδι λειτουργίας του ή άλλα υγρά σε επαφή με το αέριο το οποίο συμπιέζει.

Επειδή οι θερμοκρασίες που απαιτούνται στην αεριοποίηση είναι πολύ υψηλές, προθέρμανση του αερίου είναι αναγκαία. Η προθέρμανση μπορεί να γίνει με ηλεκτρικές αντιστάσεις ή με χρήση του αερίου το οποίο παράγεται από τη ρευστοποίηση. Η δεύτερη μέθοδος εξασφαλίζει επίσης ψύξη του αερίου, αν αυτή απαιτείται για τον καθαρισμό ή για τη μετέπειτα επεξεργασία του. Μερικές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν ένα μικρό καυστήρα συμβατικών καυσίμων, συνήθως φυσικού αερίου για να επιτύχουν την προθέρμανση.

Εάν ο αεριοποιητής είναι πολύ μεγάλος και η παροχή του αερίου από τον πυθμένα της εγκατάστασης δεν επαρκεί για την κυκλοφορία των στερεών στον αεριοποιητή, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μία ή δύο δευτερεύουσες παροχές αερίου. Ο παροχές αυτές τοποθετούνται είτε στο ίδιο ύψος με την παροχή καυσίμου είτε στο σύνορο μεταξύ της αραιής και της πυκνής φάσης της εγκατάστασης. Η ρύθμισή τους μέσω βαλβίδων είναι εύκολη.

Ως αέριο εισαγωγής χρησιμοποιείται συνήθως ο αέρας. Είναι πολύ εύκολη η εισαγωγή του από το περιβάλλον και η συμπίεση του σε ένα αεροσυμπιεστή. Η χρήση όμως αέρα δίνει ένα αέριο παραγωγής με μεγάλη περιεκτικότητα σε άζωτο, μειώνοντας τη θερμική του αξία [2], η οποία είναι από 4 ως 10MJ/m^3. Για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για αέρας ατμός, καθαρό οξυγόνο, υδρογόνο ή μίγμα τους.

Η χρήση ατμού αντί για αέρα αυξάνει τη θερμική αξία του παραγόμενου αερίου στα 10 ως 15MJ/m^3 , αλλά η διεργασία είναι πιο πολύπλοκη, καθώς δεν υπάρχει οξυγόνο για να ξεκινήσει η οξείδωση [2]. Έτσι χρησιμοποιούμε ένα μείγμα ατμού - οξυγόνου ή ατμού - αέρα, το οποίο έχει τη δυνατότητα να οξειδώσει την

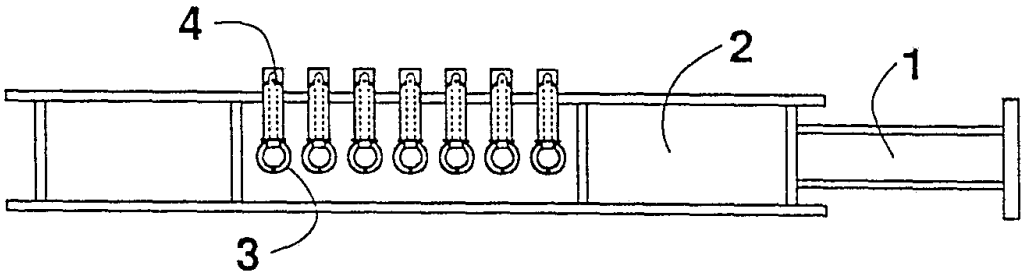
εγκατάσταση χωρίς να παράγει αέριο με υπερβολικά μεγάλη περιεκτικότητα σε άζωτο. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και αέρας εμπλουτισμένος σε οξυγόνο [2]. Το κόστος όμως του καθαρού οξυγόνου ειδικά με τις υψηλές παροχές που απαιτούνται σε μια ρευστοποιημένη κλίνη είναι πολύ υψηλό. Το υδρογόνο τα οποίο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί αυξάνει ακόμα περισσότερο τη θερμική αξία στα 20 ως 25MJ/m^3, αλλά η αποθήκευσή του και η εισαγωγή του στην εγκατάσταση χωρίς σημαντικές διαρροές είναι πολύ δύσκολη.

Στο **κρύο μοντέλο** η περιοχή εισόδου του αέρα στην κλίνη είναι πολύ σημαντική υδροδυναμικά. Είναι λοιπόν απαραίτητο να τηρηθούν οι σχέσεις με τις οποίες έγινε η κατασκευή του μοντέλου. Φυσικά, στο κρύο μοντέλο δεν χρειάζεται να πάρουμε μέτρα για τις θερμοκρασίες οι οποίες αναπτύσσονται στην πραγματική εγκατάσταση. Έτσι, δεν χρειάζεται προθέρμανση του αέρα ή κατασκευή του διασκορπιστή από ανοξείδωτο ατσάλι. Η κατασκευή όμως του διασκορπιστή δεν μπορεί να γίνει από πλεξιγκλάς όπως της υπόλοιπης εγκατάστασης, λόγω της σημαντικής πτώσης πίεσης. Καθώς δεν γίνονται θερμικές διεργασίες προτείνεται η χρήση αέρα, για μείωση του κόστους της εγκατάστασης και γιατί είναι το ίδιο οξειδωτικό μέσο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί και στην πραγματική εγκατάσταση.

Για το διασκορπιστή έχουμε λάβει υπόψη δύο σχεδιασμούς. Και οι δύο σχεδιασμοί έχουν πολύ μεγάλο ποσοστό ανοιχτής επιφάνειας για να επιτρέπουν την αφαίρεση των υπολειμμάτων της διεργασίας. Ο σχεδιασμός τους βασίζεται στην εσωτερική ανακυκλοφορία των ρευστών στην κλίνη, ώστε να εξασφαλίζουν πως το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων τα οποία αφαιρούνται είναι τα υπολείμματα και όχι το υλικό της κλίνης ή το καύσιμο το οποίο δεν έχει ακόμα μετατραπεί.

Το πρώτο σύστημα το οποίο προτάθηκε βασίζεται στην ευρεσιτεχνία με αριθμό 90013773, η οποία αναπτύχθηκε από τους R. Tabery και K. Dangman [63]. Σχεδίασαν ένα διασκορπιστή ο οποίος εξασφαλίζει την άμεση απαγωγή της τέφρας μόλις σχηματιστεί, πριν ακόμα δημιουργήσει συσσωματώματα στην κλίνη. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στη διαμόρφωση του διασκορπιστή, ο οποίος έχει ποσοστό ελεύθερης επιφάνειας περίπου 50%.

Η ανοιχτή αυτή επιφάνεια είναι ισοκατανεμημένη στην επιφάνεια του διασκορπιστή. Η πιθανότητα απαγωγής ενός σωματιδίου είναι σταθερή ανεξάρτητα από τη θέση του στην εγκατάσταση. Έτσι, ο ρυθμός απαγωγής των υπολειμμάτων είναι σταθερός και ίδιος σε κάθε περιοχή, ενώ δεν υπάρχει η περίπτωση συσσώρευσης υπολειμμάτων σε καμία περιοχή και η επακόλουθη διακοπή της αεριοποίησης.



Εικόνα 33- Όψη του διανομέα όπως σχεδιάστηκε αρχικά

Ο αέρας, αφού εισέλθει στην εγκατάσταση (1), οδηγείται σε ένα περιφερικό χώρο (2). Ο χώρος αυτός συνδέεται με μια σειρά παράλληλων συνδετικών σωλήνων (3), οι οποίοι είναι συμμετρικά τοποθετημένοι ως προς το χώρο. Η τοποθέτηση αυτή εξασφαλίζει πως η πίεση την οποία κάθε σωλήνας έχει στην είσοδο του είναι σταθερή και ίση με την πίεση των υπόλοιπων. Αφού έχουν την ίδια πίεση, σε κάθε σωλήνα εισέρχεται η ίδια ακριβώς παροχή αέρα.

Οι σωλήνες συγκολλούνται στο ένα πλευρό στο τοίχωμα του περιφερικού χώρου. Στο άλλο πλευρό όμως δεν μπορούμε να κάνουμε ακριβώς το ίδιο λόγω της θερμικής διαστολής. Αφήνουμε λοιπόν στο σωλήνα ελευθερία κίνησης στην αξονική κατεύθυνση, προσαρμόζοντάς τον σε ένα χιτώνιο σφικτής συναρμογής. Για το λόγο αυτό, κατασκευάζουμε στο σωλήνα μια εντομή στην οποία προσαρμόζουμε ένα αντίστοιχο δακτύλιο αντίστοιχης διαμέτρου. Η διαμόρφωση αυτή επιτρέπει τη διαστολή του σωλήνα χωρίς να ασκούνται επιπλέον τάσεις σε αυτόν. Φυσικά στο κρύο μοντέλο το οποίο δεν έχει αύξηση της θερμοκρασίας και επομένως θερμικές διαστολές αρκεί να γίνει συγκόλληση του διανομέα και στο άλλο άκρο του.

Στο άνω μέρος του σωλήνα υπάρχει μια σειρά κατακόρυφων αγωγών (4) από τους οποίους διαχέεται ο αέρας στην κλίνη. Για την τοποθέτηση των αγωγών υπάρχει σε συγκεκριμένα διαστήματα στον σωλήνα συνδετικό σπείρωμα στο οποίο βιδώνονται οι αγωγοί. Ο αριθμός των αγωγών σε κάθε σωλήνα εξαρτάται από το μέγεθος του διασκορπιστή.

Ο κάθε αγωγός στην ευρεσιτεχνία έχει σχεδιαστεί σε εξαγωνικό σχήμα και στο άνω μέρος έχει κυλινδρικές οπές (ένα σε κάθε πλευρά, δηλαδή έξι συνολικά) από τα οποία εξέρχεται ο αέρας. Οι οπές έχουν κατασκευαστεί με κλίση προς τα κάτω για να μειώσουν την πιθανή αντιρροή των στερεών και για να εκμηδενίσουν τις νεκρές ζώνες ανάμεσα στους αγωγούς.

Η απόσταση μεταξύ των αγωγών προτείνεται να είναι ίση με το μέγεθος των ίδιων των αγωγών. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε πως το άνοιγμα θα είναι αρκετά μεγάλο για να περνούν τα μεγάλα σωματίδια τα οποία θέλουμε να απομακρύνουμε, αλλά και πως ο αέρας θα έχει ίση παροχή και ταχύτητα σε κάθε σημείο του διασκορπιστή. Η δύναμη του αέρα σε αυτή την απόσταση θα είναι επίσης αρκετή για την υποστήριξη των σωματιδίων της κλίνης από τον αέρα.

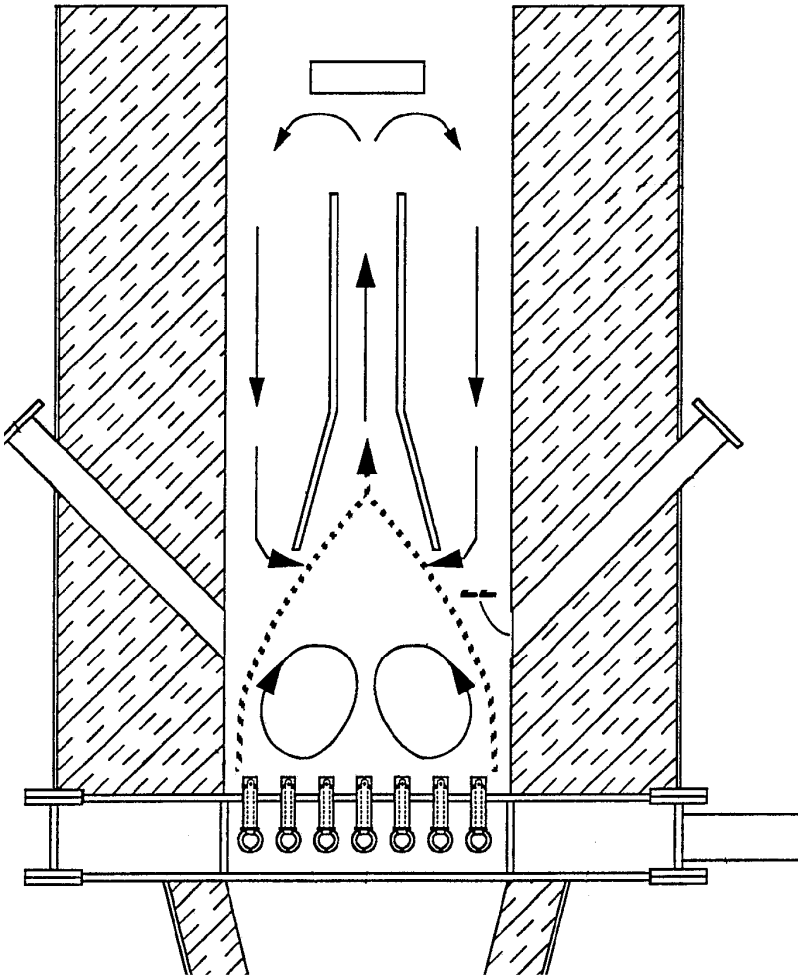
Ο σχεδιασμός της εισαγωγής των αγωγών με τη βοήθεια σπειρώματος έχει το πλεονέκτημα πως δεν είναι απαραίτητο να αποσυναρμολογηθεί όλο το σύστημα αν ένας αγωγός παρουσιάσει πρόβλημα. Το κύριο πλεονέκτημα όμως είναι το γεγονός ότι πάνω στην ίδια βάση θα μπορούσαν να δοκιμαστούν πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις διασκορπιστών αν διαπιστωθεί πως η ρευστοποίηση δεν ανταποκρίνεται στις προσδοκίες.

Παραδείγματος χάρη, αν διαπιστωθεί κατά τη λειτουργία πως η μια οπή ανά πλευρά στον αγωγό δεν είναι αρκετή για την υποστήριξη της κλίνης είναι εύκολη η αφαίρεση των αγωγών και η προσθήκη μιας δεύτερης οπής σε κάποια απόσταση κάτω από την πρώτη. Αν το εξαγωνικό σχήμα δεν είναι κατάλληλο για την εγκατάσταση, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κυλινδρικό σχήμα με οπές ανά 60°. Περισσότερες από 6 οπές στο ίδιο ύψος δεν συνιστώνται καθώς η κατασκευή θα γίνει αρκετά αδύναμη μηχανικά.

Στην ευρεσιτεχνία προτείνεται η διάνοιξη οπών στο κάτω μέρος του σωλήνα για να ψυχθούν τα κατερχόμενα στερεά και για να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη συνέχεια της κίνησής τους σε κάθε σημείο του διασκορπιστή. Στο διανομέα, επειδή όλα τα σωματίδια είναι στην ατμοσφαιρική θερμοκρασία και επειδή λόγω της μικρής ποσότητας των στερεών και τη χαμηλής ταχύτητας του αέρα δεν προβλέπεται αντίστροφη κίνηση η κατασκευή των οπών αυτών δεν είναι απαραίτητη.

Στην ευρεσιτεχνία, το σύστημα απαγωγής της τέφρας εκτός του διανομέα περιλαμβάνει και μια εσωτερική διάταξη στην κλίνη, η οποία περιλαμβάνει ένα αγωγό ανόδου και ένα στοιχείο παρεμπόδισης. Το σύστημα αυτό εκμεταλλεύεται την εσωτερική ανακυκλοφορία στην κλίνη για να βελτιώσει την απαγωγή της τέφρας, κάνοντάς την πιο αισθητή ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες ροής.

Οι φυσαλίδες σχηματίζονται κυρίως κοντά στα τοιχώματα και κινούνται προς το κέντρο της κλίνης λόγω της ένωσής τους με άλλες φυσαλίδες. Ο αγωγός ανόδου τοποθετείται σε ύψος στο οποίο το μεγαλύτερο ποσοστό των φυσαλίδων βρίσκεται στο κέντρο και εξασφαλίζει την ανοδική κίνηση των φυσαλίδων στο κέντρο της εγκατάστασης με μεγαλύτερη ταχύτητα.



Εικόνα 34-Εσωτερική ανακυκλοφορία που εκμεταλλεύεται ο διασκορπιστής [63]

Το ύψος του αγωγού πρέπει να είναι τέτοιο ώστε η κορυφή να βρίσκεται εντός της πυκνής φάσης, αλλά όχι σε μεγάλη απόσταση από το ψηλότερο σημείο της. Οι φυσαλίδες όταν εξέλθουν από τον αγωγό με μεγαλύτερη ταχύτητα οδηγούνται στο στοιχείο παρεμπόδισης το οποίο βρίσκεται σχεδόν ακριβώς ή λίγο ψηλότερα από το ύψος της πυκνής φάσης, όπου οι φυσαλίδες καταστρέφονται.

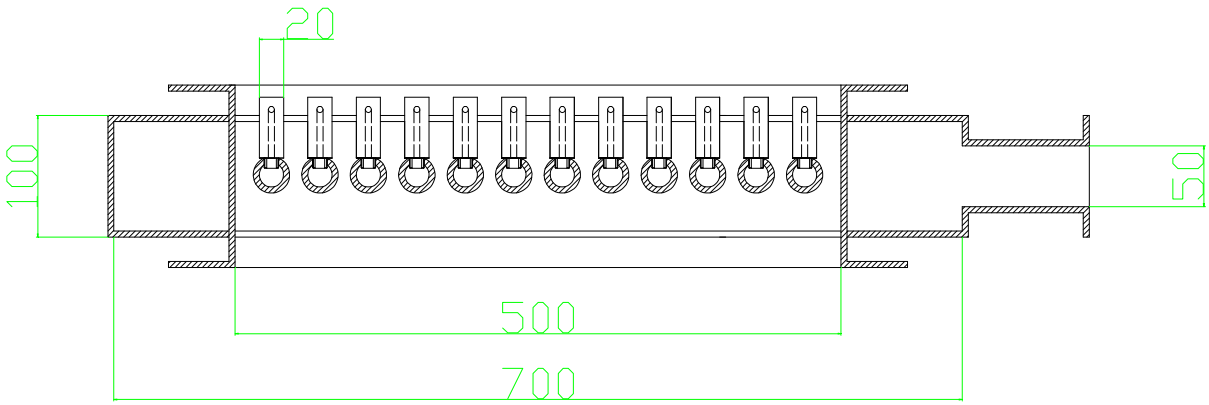
Μετά την καταστροφή των φυσαλίδων, τα στερεά σωματίδια τα οποία έχουν παρασυρθεί από αυτές (περιοχή αναταραχής και τα σωματίδια στο νέφος της φυσαλίδας) προσκρούουν στο στοιχείο παρεμπόδισης και το μεγαλύτερο τμήμα τους διασκορπίζεται σε ολόκληρη την πυκνή φάση. Στην αραιή φάση δηλαδή καταλήγουν πολύ λιγότερα σωματίδια από τη συνηθισμένη αναβράζουσα κλίνη.

Λόγω της παρουσίας του αγωγού ανόδου στο κέντρο της εγκατάστασης τα σωματίδια αυτά καταλήγουν προς τα τοιχώματα της εγκατάστασης. Λόγω της προηγούμενης κίνησης των φυσαλίδων προς το κέντρο της εγκατάστασης στην περιοχή αυτή υπάρχουν πολύ λίγες φυσαλίδες και έτσι τα σωματίδια κινούνται καθοδικά. Τα βαρύτερα σωματίδια αποκτούν έτσι αρκετά χαμηλή ταχύτητα ώστε να απομακρυνθούν από την κλίνη.

Αν και η χρήση αυτών των εσωτερικών στοιχείων παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα στη ροή, η κατασκευή και η στήριξή τους στο εσωτερικό της εγκατάστασης είναι αρκετά δύσκολη, ιδιαίτερα επειδή ο αντιδραστήρας είναι κυλινδρικός. Ταυτόχρονα ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγησή τους παρουσιάζουν αρκετά προβλήματα κυρίως γιατί ο λόγος της διαμέτρου προς το ύψος της πυκνής φάσης στο κρύο μοντέλο είναι μονάδα και συνήθως εσωτερικές διατάξεις δεν χρησιμοποιούνται σε τόσο ρηχές κλίνες. Για τους λόγους αυτούς αποφασίστηκε τελικά οι διατάξεις αυτές να μην τοποθετηθούν στο κρύο μοντέλο και από την ευρεσιτεχνία να τοποθετηθεί μόνο ο ειδικός διασκορπιστής.

Στον διασκορπιστή αυτόν ο αέρας θα έρχεται από συμπιεστή με την κατάλληλη πίεση την οποία απαιτεί η κάθε διεργασία. Στον εισερχόμενο αέρα στην εγκατάσταση δεν θα γίνεται καμία επέμβαση, καθώς η διεργασία γίνεται σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία και δεν θα εισαχθούν άλλα αέρια για έλεγχο της ροής ή της σύστασης.

Για το κρύο μοντέλο προτείνουμε τον παρακάτω γενικό σχεδιασμό του διασκορπιστή:



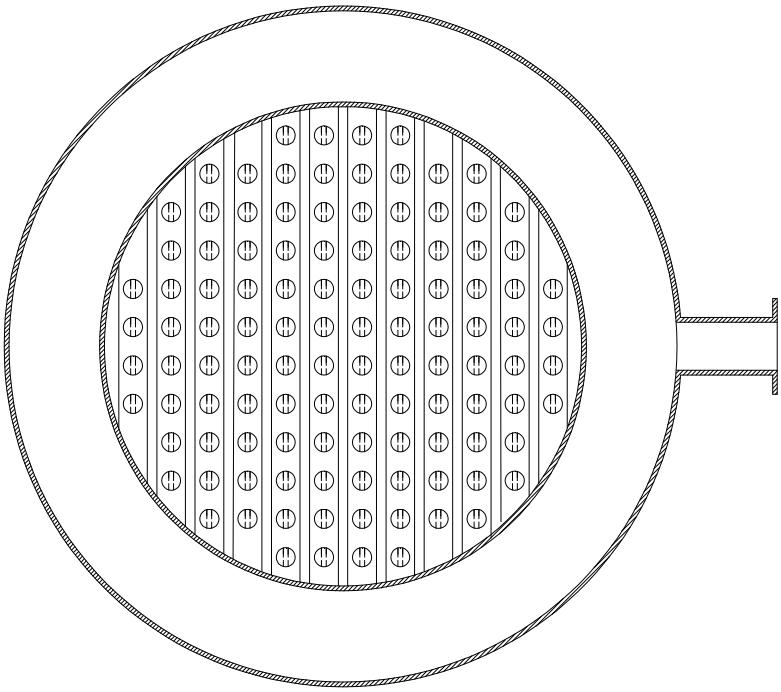
Εικόνα 35- Τομή διανομέα κρύου μοντέλου

Όπως και ο αντιδραστήρας θα είναι κυλινδρικός, αλλά επειδή έχει πολύ λεπτή κατασκευή, η οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί από το πλεξιγκλάς, θα είναι κατασκευασμένος από μέταλλο. Ο περιφερικός χώρος θα έχει 200mm μεγαλύτερη διάμετρο από την κλίνη ώστε να υπάρχει σε κάθε στιγμή διαθέσιμος αέρας για την εγκατάσταση, χωρίς να διακόπτεται η παροχή.

Ο διασκορπιστής στο κρύο μοντέλο θα έχει 12 παράλληλους σωλήνες εξωτερικής διαμέτρου 30mm και εσωτερικής διαμέτρου 20mm. Στους σωλήνες αυτούς θα διανοιχτούν οπές κοχλιών διαμέτρου M12, στις οποίες θα τοποθετηθούν οι αγωγοί. Τα σπειρώματα θα είναι διαμπερή, ώστε να περνά ο αέρας στους αγωγούς, αλλά θα έχουν αρκετό πάχος ώστε να αντέξουν στις μηχανικές καταπονήσεις.

Η βέλτιστη κατανομή των κατακόρυφων αγωγών πάνω στους σωλήνες δεν είναι ένα πρόβλημα το οποίο έχει μοναδική λύση. Λόγω του κυκλικού σχήματος και με δεδομένο μέγεθος των αγωγών υπάρχουν δύο βέλτιστες λύσεις για το πρόβλημα αυτό. Οι λύσεις αυτές δεν έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους, αλλάζει μόνο ο αριθμός και η τοποθέτηση των αγωγών σε τέσσερις συγκεκριμένους σωλήνες.

Η πρώτη περίπτωση είναι:

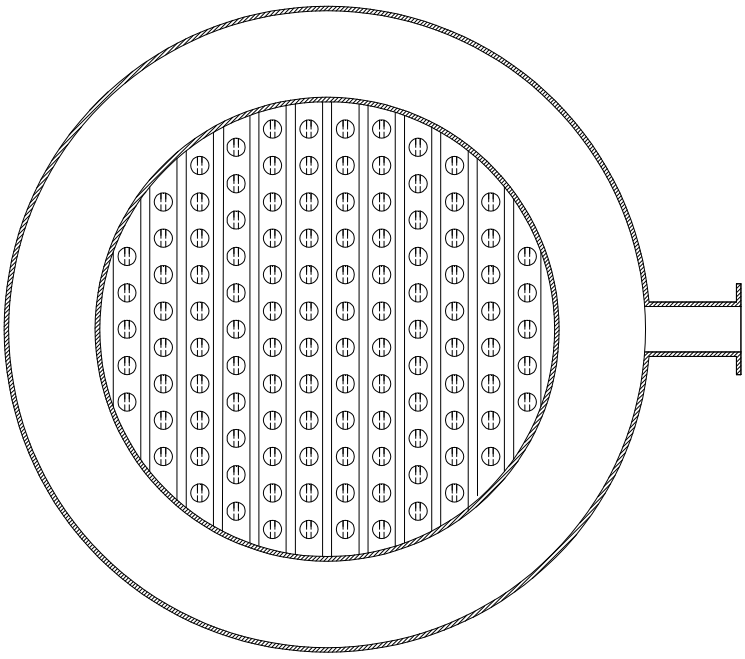


Εικόνα 36- Κάτοψη διανομέα - Περίπτωση 1η

Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα οι αγωγοί είναι ομοιόμορφα τοποθετημένοι σε απόλυτη συμμετρία. Ο κάθε αγωγός είναι απέναντι στον άλλο και σε κανένα εσωτερικό σημείο του πεδίου δεν υπάρχει διαφορά, εξασφαλίζοντας την ομοιόμορφη ροή για τον αντιδραστήρα. Τα κενά εξάλλου μεταξύ των αγωγών είναι ίδια, εξασφαλίζοντας ότι η πιθανότητα απαγωγής των σωματιδίων είναι η ίδια σε κάθε σημείο του συστήματος.

Το μόνο τμήμα με το οποίο υπάρχει πρόβλημα είναι κάποιες περιοχές στο τοίχωμα (οκτώ συνολικά) οι οποίες είναι πολύ μικρές για να τοποθετηθεί ένας επιπλέον αγωγός και έτσι υπάρχει μεγάλη απόσταση ανάμεσα σε αυτές και το τοίχωμα. Στην περιοχή αυτή επίσης η ροή του αέρα δεν είναι τόσο έντονη όσο στις υπόλοιπες, επομένως θα σημειώνεται απώλεια και υλικού της κλίνης εκτός των υπολειμμάτων.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος προτείνεται η ακόλουθη κατανομή των αγωγών:



Εικόνα 37- Κάτοψη διανομέα - Περίπτωση 2η

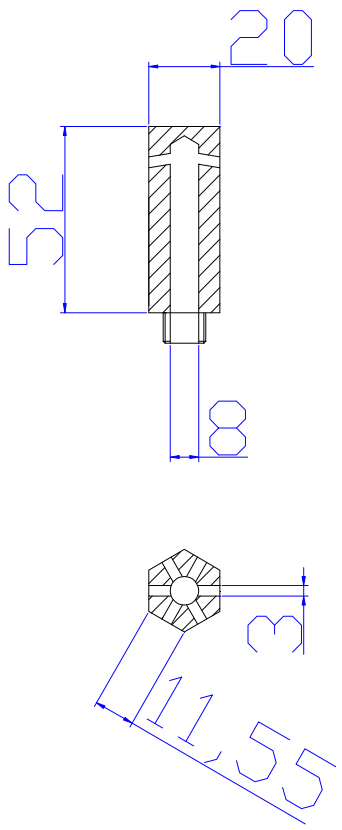
Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα δεν υπάρχουν μεγάλα κενά ανάμεσα στο τοίχωμα και τους αγωγούς. Αυτό επιτεύχθηκε μετακινώντας τους αγωγούς τεσσάρων σωλήνων κατά απόσταση ίση με τη διάμετρο του ενός, οπότε βρίσκονται πλέον στο χώρο τον οποίο καταλάμβαναν πριν τα κενά ανάμεσά τους. Η μετακίνηση αυτή μας επιτρέπει επίσης να τοποθετήσουμε έναν επιπλέον αγωγό σε κάθε έναν από αυτούς τους σωλήνες επιτυγχάνοντας μεγαλύτερες παροχές αέρα με χαμηλότερη πίεση.

Η αλλαγή όμως της θέσης τους χαλά ελαφρώς την ομοιομορφία της θέσης των αγωγών και επομένως την ομοιομορφία της ροής. Η παροχή αέρα και κατά συνέπεια η άνωση στα σωματίδια δεν είναι ίδια σε κάθε θέση, κάτι το οποίο σε μια πραγματική εγκατάσταση θα επηρέαζε το βαθμό μετατροπής του καυσίμου και την ανάμιξή του με το υλικό της κλίνης και το οξειδωτικό μέσο.

Συνολικά όμως, οι απώλειες υλικού από τα κενά τα οποία υπάρχουν κοντά στα τοιχώματα στην πρώτη περίπτωση θα είναι αρκετά μεγάλες (αφού μάλιστα τα στερεά συνήθως κατέρχονται κοντά στα άκρα) ώστε να δημιουργήσουν μεγαλύτερο πρόβλημα στην εγκατάσταση από την ανομοιομορφία η οποία παρατηρείται στη δεύτερη περίπτωση. Προτείνεται λοιπόν η δεύτερη κατασκευή, χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν είναι δυνατόν αν κριθεί απαραίτητο να κατασκευαστεί και η πρώτη.

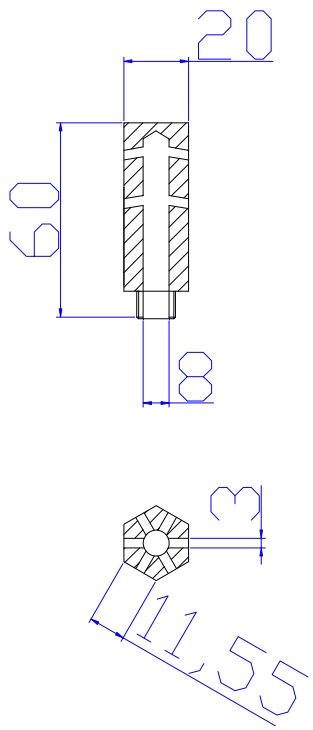
Ιδιαίτερης σημασίας είναι και η διαμόρφωση των αγωγών στην κορυφή, όπου γίνεται η έξοδος του αέρα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αρχική σχεδίαση προβλέπει την κατασκευή ενός εξαγώνου με μια οπή σε κάθε πλευρά. Οι

οπές θα είναι με ελαφριά κλίση προς τα κάτω για να εμποδίζουν την συσσώρευση σωματιδίων στην επιφάνεια των σωλήνων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 38-Διαμόρφωση αγωγών - Εξαγωνικό σχήμα με μία οπή ανά πλευρά

Αν η κατασκευή μιας οπής σε κάθε πλευρά δεν δίνει την απαραίτητη παροχή τότε είναι δυνατή η κατασκευή μιας επιπλέον οπής σε κάθε πλευρά σε χαμηλότερο ύψος του αγωγού. Η παροχή έτσι του αέρα στην ίδια πίεση μπορεί να διπλασιαστεί. Μια τέτοια διαμόρφωση όμως θα δημιουργήσει πρόβλημα σε μικρές παροχές, καθώς η ταχύτητα εξόδου του αέρα θα είναι πολύ χαμηλή. Για αυτό συνίσταται μια τέτοια διαμόρφωση να εφαρμοστεί μόνο αν βρεθεί πως οι ταχύτητες στην προηγούμενη διαμόρφωση είναι πολύ υψηλές. Το σχέδιο μιας τέτοιας διαμόρφωσης φαίνεται παρακάτω:

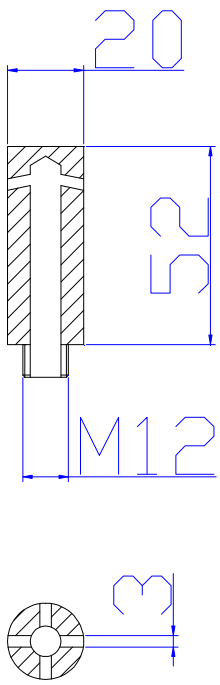


Εικόνα 39-Διαμόρφωση αγωγών - Εξαγωνικό σχήμα με δύο οπές ανά πλευρά

Δεν είναι απαραίτητη φυσικά η σχεδίαση των αγωγών αποκλειστικά με εξαγωνικό σχήμα. Η κατασκευή όμως του αγωγού σε σχήμα πολυγώνου με περισσότερες πλευρές (παραδείγματος χάρη οκταγώνου), αν και θα μείωνε τις νεκρές ζώνες τις κατασκευής, θα μείωνε επίσης και την μηχανική αντοχή της εγκατάστασης στο επίπεδο στο οποίο θα κατασκευάζονταν οι οπές. Ταυτόχρονα το κόστος κατασκευής ενός πιο πολύπλοκου στερεού θα αυξανόταν δυσανάλογα.

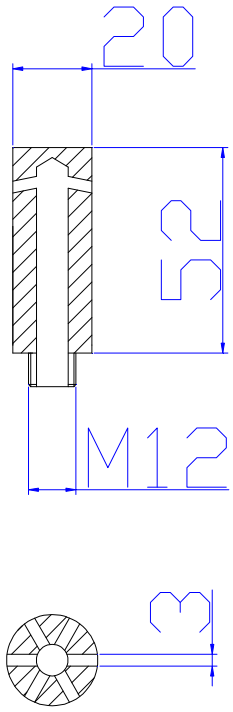
Η κατασκευή ενός απλούστερου στερεού αν και ευκολότερη και φθηνότερη δεν συνίσταται, καθώς οι λίγες πλευρές συμβάλλουν στη δημιουργία νεκρών ζωνών από τις οποίες θα έχουμε μεγάλες απώλειες υλικού. Επομένως, η μόνη εναλλακτική είναι η κατασκευή μιας κυκλικής διατομής, η οποία μπορεί να έχει όσες οπές είναι απαραίτητες και είναι εύκολη στην κατασκευή.

Η πιο απλή διαμόρφωση η οποία θα είναι αρκετά αποτελεσματική είναι η κατασκευή 4 οπών σε απόσταση 90° μεταξύ τους. Η διαμόρφωση αυτή έχει το πρόβλημα της δημιουργίας νεκρών ζωνών ανάμεσα στις οπές για αυτό και είναι καλύτερα να χρησιμοποιηθεί με τη δεύτερη διαμόρφωση των σωλήνων η οποία αναφέρθηκε πιο πάνω καθώς η ανομοιομορφία της βοηθάει στη μείωσή τους. Το σχέδιο της εγκατάστασης είναι:



Εικόνα 40-Διαμόρφωση αγωγών - Κυκλική διατομή με 4 οπές

Τα μειονεκτήματα της προηγούμενης διαμόρφωσης μπορούν να εξαλειφθούν σχετικά εύκολα από την κατασκευή στην κυκλική διατομή 6 οπών με απόσταση 60° μεταξύ τους. Η διαφορά στο κόστος δεν θα είναι υπερβολική και τα καλύτερα αποτελέσματα αναμφίβολα θα υπερκαλύψουν τα επιπλέον έξοδα. Η κατασκευή περισσότερων οπών είναι δυνατή αλλά θα ήταν καλύτερο να γίνει μια ελαφρά μείωση της διατομής των οπών. Το σχέδιο της διαμόρφωσης αυτής είναι:



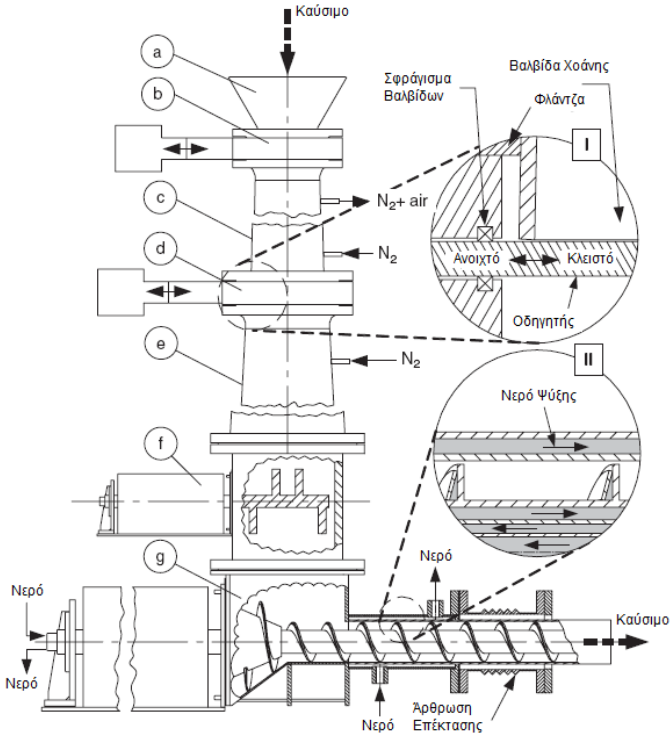
Εικόνα 41- Διαμόρφωση Αγωγών - Κυκλική διατομή με 6 οπές

13.2) Σύστημα Εισαγωγής Καυσίμου

Το καύσιμο σε έναν αεριοποιητή μπορεί να εισαχθεί σε δύο περιοχές: είτε πάνω από την κλίνη είτε απευθείας σε αυτήν. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα τού αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει με μια μεγάλη ποικιλία καυσίμων ανεξάρτητα από το ποσοστό υγρασίας και τέφρας που έχουν, είναι επομένως κατάλληλος για καύσιμα βιομάζας.

Το καύσιμο όμως πρέπει να εισαχθεί στον αεριοποιητή κονιοποιημένο και μάλιστα σε σωματίδια όσο το δυνατόν ομοιόμορφης διαμέτρου. Δεν πρέπει όμως το καύσιμο να γίνει πολύ λεπτόκοκκο, γιατί τότε θα παρασύρεται από το ρεύμα του αέρα. Πρέπει λοιπόν το σύστημα εισαγωγής καυσίμου να σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να μην υπάρχει πιθανότητα το ρεύμα του θερμού αέρα να εισέλθει στο σύστημα και να αναγκάσει το καύσιμο να κινηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Η είσοδος του καυσίμου γίνεται συνήθως με ατέρμονα κοχλία. Το σύστημα του κοχλία παρουσιάζει το πλεονέκτημα εισαγωγής σταθερού ρυθμού καυσίμου. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με καύσιμα βιομάζας, τα οποία έχουν συνήθως μεγάλη υγρασία και είναι ανομοιόμορφα. Ένα σύνηθες σύστημα είναι η εισαγωγή του καυσίμου από μια χοάνη στον κοχλία και από εκεί στον αεριοποιητή. Για λόγους ασφαλείας, και για καλύτερη διανομή του καυσίμου, μερικές φορές υπάρχουν δύο κοχλίες: ο πρώτος παίρνει το καύσιμο από τη χοάνη και το στέλνει σε μια περιστρεφόμενη βαλβίδα. Ο δεύτερος παίρνει στη συνέχεια το καύσιμο από τη βαλβίδα και το εισάγει στον αεριοποιητή.



Εικόνα 42-Διάταξη εισαγωγής καυσίμου για Stabilat [14]

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ένα σύστημα εισαγωγής καυσίμου για Stabilat, το οποίο σχεδιάστηκε από τους Hamel et al. [14]. Στο σύστημα αυτό βλέπουμε πως το καύσιμο εισέρχεται από μια χοάνη εισαγωγής (a) και στη συνέχεια περνά από μια βαλβίδα χοάνης (c) για να ρυθμιστεί η παροχή του. Για τον έλεγχο της βαλβίδας υπάρχουν δύο συρταρωτές πνευματικές βαλβίδες (b και d). Στο καύσιμο προστίθεται αδρανές άζωτο για να διευκολυνθεί η ροή του και οδηγείται στο δοχείο (e) το οποίο λειτουργεί ως αποθήκη.

Για να εξασφαλιστεί ότι η ροή του καυσίμου δεν θα παρεμποδιστεί έχει προστεθεί ένας αναδευτήρας (f). Το καύσιμο στη συνέχεια καταλήγει στον ατέρμονα κοχλία τροφοδοσίας (g) ο οποίος ψύχεται με νερό το οποίο κυκλοφορεί στο εσωτερικό των τοιχωμάτων και το οποίο οδηγεί το καύσιμο εντός του αντιδραστήρα. Η διάμετρος του ατέρμονα αυξάνεται συνεχώς για να εμποδιστεί το καύσιμο να μπλοκάρει τον κοχλία.

Η εγκατάσταση αυτή όπως βλέπουμε εφαρμόζει στον ατέρμονα κοχλία εισαγωγής ψύξη με συνεχή ροή νερού στα τοιχώματα γύρω από αυτόν. Η ψύξη αυτή, αν και αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης προστατεύει τον κοχλία από την υψηλή θερμοκρασία η οποία υπάρχει στην εγκατάσταση και η οποία μεταδίδεται μέσω τη εισαγωγής του καυσίμου. Ταυτόχρονα, η ψύξη προστατεύει το καύσιμο από έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία η οποία μπορεί να εμποδίσει την ομαλή παροχή.

Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σύστημα πνευματικής μεταφοράς, αλλά εισάγει αέρα, ο οποίος επηρεάζει την ήδη λεπτή ισορροπία της ροής και για αυτό δεν χρησιμοποιείται.

Το σύστημα μεταφοράς μπορεί να είναι αυτόματο ή χειροκίνητο. Το αυτόματο σύστημα είναι πιο εύκολο στη διαχείριση και εξασφαλίζει μεγαλύτερη ομοιομορφία εισαγωγής καυσίμου αλλά είναι προφανώς ακριβότερο και σε εργαστηριακές εφαρμογές χρησιμοποιείται ημιαυτόματο σύστημα (χειροκίνητη προσθήκη καυσίμου σε αυτόματο σύστημα εισαγωγής). Στο σημείο στο οποίο το σύστημα εισαγωγής έρχεται σε επαφή με τον αντιδραστήρα, ίσως πρέπει να εφαρμοστεί ψύξη λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στον αντιδραστήρα.

Το σημείο εισόδου του καυσίμου είναι πολύ σημαντικό. Κάθε καύσιμο και κάθε εγκατάσταση έχει διαφορετικό σημείο εισόδου. Το καύσιμο μπορεί να εισαχθεί απευθείας στη ρευστοποιημένη κλίνη. Η είσοδος όμως δεν είναι απαραίτητα στην αρχή της και μπορεί να είναι σε διάφορα ύψη εντός της κλίνης. Η εγκατάσταση της εισόδου του καυσίμου σε αυτό το ύψος μειώνει την πιθανότητα σωματίδια του καυσίμου να παρασυρθούν από το ρεύμα αέρα και να εξέλθουν από τον αεριοποιητή. Εξασφαλίζει την παραμονή όλων των σωματιδίων του καυσίμου στη ρευστοποιημένη κλίνη ώσπου να παρασυρθεί από το ρεύμα αέρα οδηγώντας σε μεγαλύτερο ποσοστό αεριοποίησης. Ταυτόχρονα όμως επηρεάζει τη ρευστοποιημένη κλίνη ενώ λόγω της βαρύτητας μέρος των σωματιδίων μπορεί να αποβληθεί από το σύστημα απομάκρυνσης των υπολειμμάτων στο κάτω μέρος.

Στο **κρύο μοντέλο** θα χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα το οποίο θα μοιάζει με το σύστημα των Hamel et al. [14] και το σύστημα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην πραγματική εγκατάσταση. Το σύστημα βέβαια εδώ θα είναι απλούστερο γιατί δεν θα γίνεται εισαγωγή αζώτου για να εξασφαλιστεί η ομοιότητα της ροής ή εισαγωγή νερού για ψύξη του ατέρμονα κοχλία, αφού δεν λαμβάνει χώρα θερμική διεργασία στην εγκατάσταση.

Σε μια εγκατάσταση αεριοποίησης χρησιμοποιείται συνήθως μια χοάνη για την εισαγωγή του καυσίμου και μερικές φορές (όπως στην πραγματική εγκατάσταση) χρησιμοποιείται άλλη μια χοάνη για την παροχή επιπλέον υλικού κλίνης, στην περίπτωση που αυτό χάνεται μαζί με την τέφρα και το αέριο. Στο κρύο μοντέλο θα χρησιμοποιήσουμε επίσης χοάνη για την είσοδο του υλικού καθώς είναι μια απλή κατασκευή η οποία εξασφαλίζει συνεχή πτώση υλικού και μπορεί να αποθηκεύσει επιπλέον υλικό χωρίς να χρειάζεται να γίνει συνεχής παροχή του.

Στην κλίνη όμως θα χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά μία χοάνη στην οποία θα τοποθετηθεί το συγκεκριμένο μίγμα υλικού για το οποίο θέλουμε να δοκιμάσουμε την δυναμική ομοιότητα ροής. Στο κρύο μοντέλο δεν γίνονται μεταβολές υλικού εντός της κλίνης, για αυτό πρέπει να προετοιμαστεί με ένα συγκεκριμένο μείγμα, το οποίο θα έχει συγκεκριμένη (κατά βάρος) σύσταση. Το συγκεκριμένο μείγμα θα εισαχθεί στην χοάνη ήδη ανακατεμένο και ομογενοποιημένο αναπαριστώντας κάποια συγκεκριμένη σύσταση στην πραγματική εγκατάσταση για την οποία θέλουμε να ελέγξουμε.

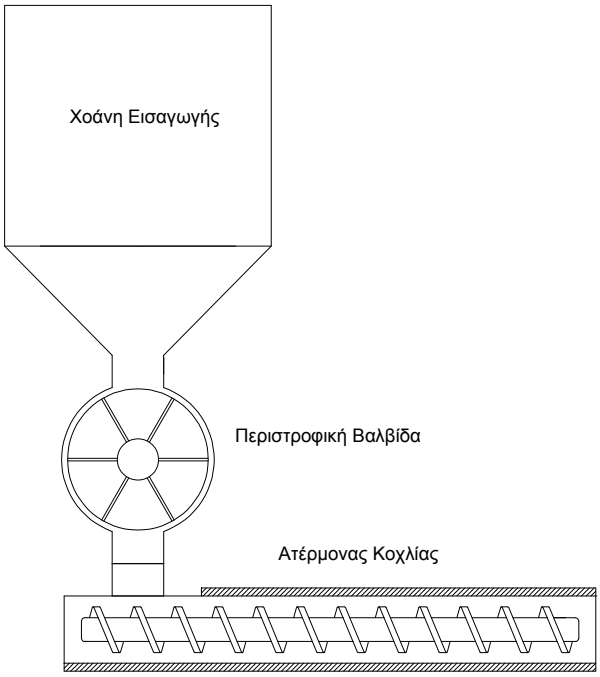
Επειδή το κρύο μοντέλο δεν θα έχει συνεχή λειτουργία θα πρέπει η ροή του μείγματος να σταματά όταν η λειτουργία θα σταματά επίσης. Για το λόγο αυτό θα τοποθετηθεί μια βαλβίδα αμέσως μετά τη χοάνη. Η βαλβίδα αυτή θα είναι περιστροφική όπως χρησιμοποιήθηκε στην πραγματική εγκατάσταση [26], γιατί εξασφαλίζει απόλυτα πως το υλικό δεν θα μπει στην εγκατάσταση, δεν επιτρέπει δηλαδή διαρροές σωματιδίων.

Αμέσως μετά τη βαλβίδα θα υπάρχει ένας τροφοδότης ατέρμονα κοχλία, όπως εκείνοι τους οποίους χρησιμοποίησαν οι δύο προηγούμενες εγκαταστάσεις. Οι τροφοδότες αυτοί επιτρέπουν την ομοιόμορφη παροχή στερεών στην εγκατάσταση, ενώ δεν επιτρέπουν την αντίθετη ροή αέρα από τον αντιδραστήρα. Ταυτόχρονα, δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα με το μικρό μέγεθος των σωματιδίων μερικών υλικών τα οποία χρησιμοποιούμε στην κλίνη και με την αμμοειδή μορφή τους. Το μόνο μειονέκτημα το οποίο έχουν είναι το σχετικά υψηλό τους κόστος.

Το ύψος εισόδου του καυσίμου στο κρύο μοντέλο θα πρέπει να είναι, για να έχουμε δυναμική ομοιότητα, ίσο με το αντίστοιχο ύψος του στην πραγματική εγκατάσταση. Το ύψος αυτό μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας το λόγο γεωμετρικής ομοιότητας. Παρομοίως, η μέγιστη παροχή την οποία θα πρέπει να έχει το σύστημα τροφοδοσίας στην είσοδο θα πρέπει να είναι η ανάλογη της

μέγιστης παροχής της πραγματικής εγκατάστασης (συγκεκριμένα 136,5kg/h) όπως αυτή βρέθηκε από το λόγο των παροχών τους.

Το σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης είναι:



Εικόνα 43- Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης εισαγωγής καυσίμου

13.3) Αντιδραστήρας

Το κύριο μέρος ενός αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης είναι ο αντιδραστήρας. Είναι συνήθως κυλινδρικός ή με το μεσαίο μέρος του κωνικό για τη μείωση της ταχύτητας του αέρα, έχουν όμως κατασκευαστεί και ορθογώνιοι αντιδραστήρες. Οι αεριοποιητές αναβράζουσας κλίνης πάντως είναι κατά κανόνα κυλινδρικοί. Στο κάτω μέρος του τοποθετείται κοκκώδες υλικό για τη δημιουργία της ρευστοποιημένης κλίνης. Το υλικό αυτό είναι συνήθως πυριτική άμμος ή αργιλιοξείδιο (αλουμίνα). Το υλικό αυτό λειτουργεί ως θερμική 'αποθήκη' διατηρώντας υψηλή θερμοκρασία ακόμα και μετά το πέρας της ρευστοποίησης και επιτρέποντας την οικονομικότερη επανεκκίνηση του συστήματος.

Ο αντιδραστήρας μπορεί να θεωρηθεί πως αποτελείται από τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι ο πυθμένας του αντιδραστήρα όπου βρίσκεται το στερεό. Αυτή είναι η ρευστοποιημένη κλίνη ή η πυκνή περιοχή του αεριοποιητή. Εκεί υπάρχει έντονη ροή τόσο στερεού όσο και αέρα και εκεί γίνεται η αεριοποίηση. Στη συνέχεια ακολουθεί μια μεταβατική περιοχή, όπου η ροή στερεών σωματιδίων σταδιακά μειώνεται. Στο άνω μέρος του ξηραντήρα υπάρχει η περιοχή απεμπλοκής

(freeboard) όπου κυριαρχεί η ροή του παραγόμενου αερίου, η οποία εξέρχεται από την κορυφή.

Ο αεριοποιητής κατασκευάζεται από ανοξείδωτο ατσάλι ή άλλο υλικό ανθεκτικό σε χημική διάβρωση και σε υψηλές θερμοκρασίες. Τυπικές θερμοκρασίες αεριοποίησης είναι 700-1000°C. Ο αντιδραστήρας πρέπει υποχρεωτικά να καλυφθεί με στρώμα μόνωσης, γιατί οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πολύ υψηλές και υπάρχουν σημαντικές θερμικές απώλειες. Πρέπει όμως να προβλεφθεί χώρος ανάμεσα στη μόνωση και τα τοιχώματα για τη θερμική διαστολή του αεριοποιητή.

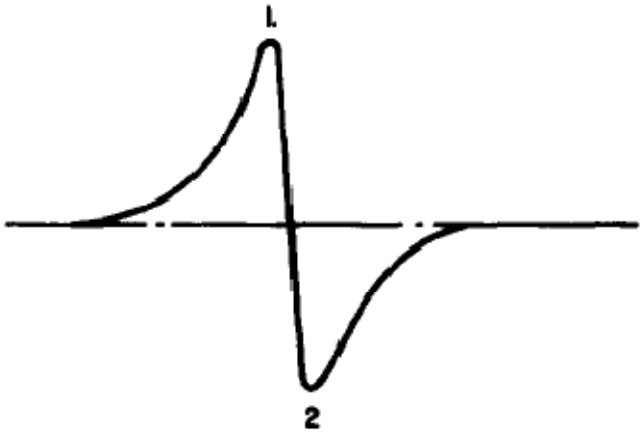
Επειδή η αεριοποίηση γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 800°C, απαιτείται στην εκκίνηση, προθέρμανση του αντιδραστήρα. Η προθέρμανση αυτή μπορεί να γίνει με ηλεκτρικές αντιστάσεις, που θα βρίσκονται ανάμεσα στη μόνωση και τον αντιδραστήρα. Η προθέρμανση του οξειδωτικού μέσου της εγκατάστασης επίσης βοηθάει στην καλύτερη εκκίνηση του αντιδραστήρα.

Ο αντιδραστήρας δεν κατασκευάζεται ως ένα κομμάτι. Αντίθετα είναι καλύτερο να κατασκευαστεί σε τρία ή τέσσερα τεμάχια, τα οποία θα ενωθούν μεταξύ τους με φλάντζες. Λόγω του μεγάλου ύψους του αντιδραστήρα η κατασκευή αυτή μειώνει την πιθανότητα λυγισμού και εξομοιώνει τις διαφορετικές παραμορφώσεις οι οποίες εμφανίζονται λόγω των θερμικών τάσεων, οι οποίες διαφέρουν σε κάθε μέρος του αεριοποιητή.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην πυκνή περιοχή καθώς σε αυτή την περιοχή αναπτύσσονται όχι μόνο οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες αλλά λόγω των υπολειμμάτων το περιβάλλον είναι έντονα διαβρωτικό. Προτείνεται η κατασκευή των τμημάτων του αντιδραστήρα στην περιοχή αυτή και ειδικά του διασκορπιστή από ανοξείδωτο ατσάλι. Η αεριοποίηση σε βιομηχανική κλίμακα γίνεται μερικές φορές σε πίεση μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική και τα τοιχώματα του αντιδραστήρα πρέπει να έχουν αρκετό πάχος ώστε να αντέξουν στην υψηλή πίεση.

Για τον έλεγχο του ύψους της ρευστοποιημένης κλίνης της εγκατάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σωλήνας υπερχείλισης [23]. Χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη σωλήνα υπερχείλισης έχουμε και διαφορετικά ύψη της κλίνης. Αυξάνεται όμως η πιθανότητα κάποια από τα σωματίδια να διαφύγουν χωρίς να ολοκληρωθεί η αεριοποίησή τους.

Η στατική τάση η οποία εμφανίζεται στην ρευστοποιημένη κλίνη είναι σχετικά μικρή αλλά δεν μπορούμε να την αγνοήσουμε εντελώς. Οι Boland και Geldart [64, 65] αναφέρουν πως η τάση η οποία δημιουργείται σε μια φυσαλίδα καθώς αυτή ανεβαίνει δεν είναι αμελητέα. Η τάση όμως αυτή είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τις τάσεις οι οποίες εμφανίζονται στην υπόλοιπη κλίνη.



Εικόνα 44-Τάση η οποία παρατηρείται στη φυσαλίδα: 1 είναι η κορυφή της και 2 ο πυθμένας [64]

Η στατική αυτή τάση είναι μεγαλύτερη για σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους. Έτσι είναι μέγιστη όταν τα σωματίδια είναι κατηγορίας D. Οι δυνάμεις μταξύ σωματιδίων και τοιχωμάτων ωστόσο είναι πιο έντονες όταν τα σωματίδια είναι μικρότερα και ιδιαίτερα όταν είναι μικρότερα από 50μm. Δε φαίνεται η ένταση της τάσης αυτής να εξαρτάται από την σχετική υγρασία η οποία επικρατεί στην εγκατάσταση (αν και εξαφανίζεται ταχύτερα σε υγρασίες πάνω από 70%). Εξαρτάται περισσότερο από τη σχετική κίνηση των σωματιδίων.

Παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα πως το πρόσημο της τάσης ανάμεσα στην κορυφή και τον πυθμένα της φυσαλίδας είναι διαφορετικό. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό μηχανισμό βάσει του οποίου αναπτύσσεται η κάθε τάση. Στην κορυφή της φυσαλίδας φαίνεται ότι οφείλεται περισσότερο στη σχετική κίνηση μεταξύ σωματιδίων και αερίου, ενώ στον πυθμένα οφείλεται στη σχετική μεταξύ των ίδιων των σωματιδίων ή των σωματιδίων και του τοιχώματος [64].

Στο **κρύο μοντέλο** δεν υπάρχει προφανώς η ανάγκη θερμικής μόνωσης. Η διεργασία λαμβάνει χώρα σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία και δεν υπάρχουν θέματα θερμικών τάσεων ή θερμικών διαστολών. Ταυτόχρονα, η διεργασία θα λάβει χώρα σε πίεση κοντά ή χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική, επομένως δεν υπάρχει ιδιαίτερος λόγος για ενίσχυση των τοιχωμάτων με αύξηση του πάχους τους.

Ο αντιδραστήρας θα κατασκευαστεί αποκλειστικά από πλεξιγκλάς (ουσιαστικά μόνο ο διασκορπιστής θα κατασκευαστεί από μέταλλο). Το πλεξιγκλάς μας επιτρέπει καθώς είναι διάφανο να μπορούμε να δούμε τη διεργασία τη στιγμή που συμβαίνει βοηθώντας στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Σε περίπτωση που κάτι συμβεί στην εγκατάσταση είναι πιο εύκολο να εξακριβωθεί η αιτία αν είναι δυνατό να δεις το εσωτερικό της.

Ταυτόχρονα, μπορούν να ληφθούν φωτογραφίες της κλίνης οι οποίες να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο των θεωρητικών αποτελεσμάτων και για εύρεση

συγκεκριμένων μεγεθών. Οι Rowe και Partridge [56] παραδείγματος χάρη βρήκαν τη διάμετρο των φυσαλίδων στην κλίνη τους παίρνοντας φωτογραφίες της κλίνης σε πραγματικό χρόνο και μελετώντας τις αργότερα.

Το πλεξιγκλάς μπορεί να αντέξει περίπου 1,5bar πίεσης, αλλά σε κανένα σημείο της εγκατάστασης η πίεση δεν θα είναι τόσο υψηλή. Το βάρος ωστόσο των υλικών τα οποία θα υπάρχουν εντός της κλίνης κάθε δεδομένη στιγμή δεν είναι αμελητέο για αυτό προτείνουμε το πάχος των τοιχωμάτων να είναι τουλάχιστον 5mm σε κάθε ύψος της εγκατάστασης.

Το ύψος του αντιδραστήρα θα είναι μεγαλύτερο από δύο μέτρα. Αν και το ίδιο βάρος του αντιδραστήρα δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο, το ύψος του (και οι αλλαγές διαμέτρου) μας αναγκάζει να μην κατασκευάσουμε την κλίνη ως ένα ενιαίο τμήμα. Θα χωριστεί σε έξι διαφορετικά τμήματα, τα οποία θα συναρμολογήσουμε ώστε να προκύψει η τελική κατασκευή. Η κατασκευή εξάλλου σε μικρότερα τμήματα μειώνει το κόστος και διευκολύνει την επεξεργασία της πρώτης ύλης, καθώς τα τεμάχια τα οποία απαιτούνται είναι φθηνότερα.

Η κατασκευή της κλίνης σε τμήματα και η ακόλουθη συναρμολόγησή τους μας επιτρέπει επίσης να κάνουμε αλλαγές ή να αντικαταστήσουμε ένα τμήμα χωρίς τα άλλα να χρειάζεται να αλλαχθούν. Μπορούμε έτσι να δοκιμάσουμε διαφορετικές ρυθμίσεις και ύψη με διάφορα τμήματα στην ίδια κλίνη. Η συναρμολόγηση και μεταφορά των τμημάτων είναι εξάλλου ευκολότερη όσο πιο μικρά τεμάχια είναι.

Η κατασκευή αυτή εμποδίζει το λυγισμό κάποιου τμήματος λόγω υπερβολικού βάρους και εξασφαλίζει καλύτερη κατανομή των πιέσεων. Στο κάθε τμήμα δηλαδή ασκείται λιγότερη πίεση. Ταυτόχρονα είναι λιγότερο πιθανή η διάδοση ταλαντώσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της εγκατάστασης. Κάποια από τα τμήματα βέβαια δέχονται περισσότερες δυνάμεις και τάσεις, συγκεκριμένα τα τμήματα τα οποία αποτελούν τα τοιχώματα του διασκορπιστή και της πυκνής φάσης.

Η εγκατάσταση θα κατασκευαστεί όπως αναφέραμε σε έξι μικρότερα τμήματα. Τα τμήματα αυτά θα είναι:

- Το κατώτερο τμήμα του αντιδραστήρα πριν από το διασκορπιστή, το οποίο θα περιλαμβάνει το σύστημα απαγωγής των υπολειμμάτων.
- Ο διασκορπιστής. Η κατασκευή του ως ξεχωριστού τμήματος μας επιτρέπει την εύκολη αντικατάστασή του με κάποιον άλλο διασκορπιστή. Ταυτόχρονα θα είναι ευκολότερο να αφαιρεθεί από την κλίνη και να μεταβληθεί η διάταξή του.
- Τα τοιχώματα της πυκνής φάσης είναι ακόμα ένα τμήμα το οποίο θα κατασκευαστεί ως ενιαίο. Το ύψος της πυκνής φάσης είναι μόλις 0,75m και επειδή στην περιοχή αυτή θα αναπτυχθούν οι μεγαλύτερες πιέσεις δεν μπορούμε να μικρύνουμε πάρα πολύ το μέγεθός του. Επιπλέον αν το τμήμα αυτό κατασκευαζόταν από περισσότερα τμήματα υπήρχε μεγαλύτερος κίνδυνος διαρροών.

- Η κωνική περιοχή, λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας της (το υπόλοιπο τμήμα του αντιδραστήρα είναι κυλινδρικό) θα κατασκευαστεί επίσης ως ένα ενιαίο κομμάτι. Η κατασκευή των συνδετικών τμημάτων είναι πολύ δύσκολο να γίνει σε αυτή τη γεωμετρία και είναι προτιμότερο να κατασκευαστούν στην αρχή και το τέλος της περιοχής.
- Η περιοχή απεμπλοκής λόγω του μεγάλου ύψους της δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί σε ένα τμήμα. Θα κατασκευαστεί λοιπόν σε δύο χωριστά τμήματα, το κατώτερο των οποίων θα τη συνδέει με την κωνική περιοχή και το ανώτερο θα περιέχει την έξοδο του αέρα και τη σύνδεση της κλίνης με το σύστημα καθαρισμού.

Τα τμήματα θα συνδέονται μεταξύ τους με φλάντζες. Οι φλάντζες θα είναι επίσης κατασκευασμένες από πλεξιγκλάς και θα κολληθούν με ειδική κόλλα πάνω στο κυρίως σώμα του αντιδραστήρα. Η φλάντζα κάθε τμήματος θα είναι ενωμένη με κοχλίες, οι οποίοι θα είναι τοποθετημένοι περιφερειακά, με την φλάντζα του γειτονικού τμήματος. Αν κριθεί ανάγκη και υπάρχει πιθανός κίνδυνος διαρροών από τις ενώσεις αυτές τότε στις ενώσεις μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί κόλλα η οποία θα σφραγίσει ερμητικά τη φλάντζα.

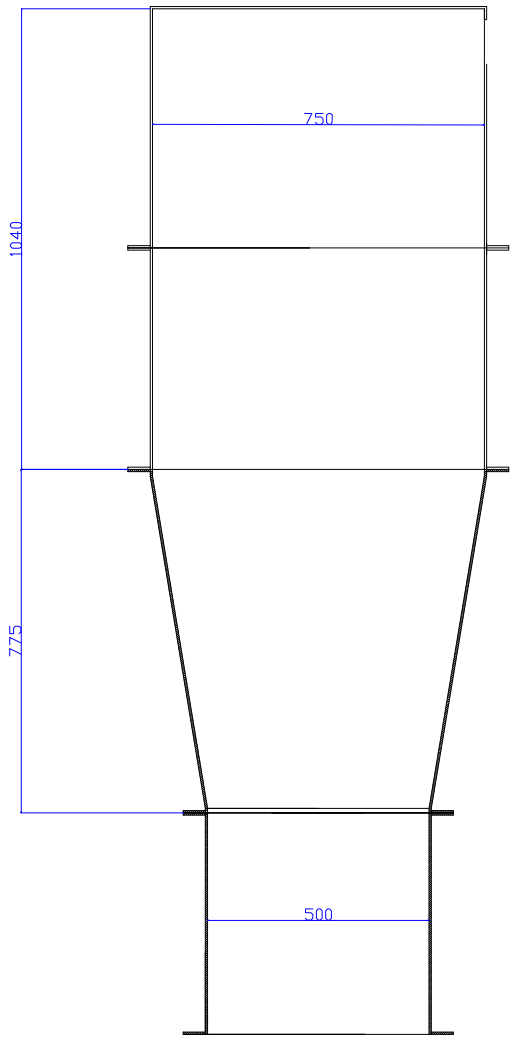
Φυσικά, μια τέτοια μεγάλη εγκατάσταση χρειάζεται και την αντίστοιχη μηχανική στήριξη. Για το σκοπό αυτό θα κατασκευαστεί ένα κουβούκλιο από ράβδους αλουμινίου. Οι ράβδοι αυτοί είναι ελαφριοί, αλλά με μεγάλη μηχανική αντοχή, έτσι θα στηρίξουν το βάρος της εγκατάστασης. Το ύψος του κουβουκλίου δεν χρειάζεται να είναι τόσο μεγάλο όσο της κλίνης, αλλά πρέπει να είναι αρκετά ψηλοί ώστε να μην υπάρχει περίπτωση λυγισμού της.

Τέτοιοι ράβδοι είναι ειδικά διαμορφωμένοι και τυποποιημένοι και συνδέονται μεταξύ τους με συγκεκριμένα συνδετικά στοιχεία για κάθε περίπτωση. Η κατασκευή έτσι ενός τέτοιου κουβουκλίου είναι εύκολη. Το μόνο μειονέκτημα είναι το μεγαλύτερο κόστος των ράβδων αλουμινίου σε σχέση με τις αντίστοιχες του σιδήρου. Για αυτό το λόγο έχει προταθεί οι ράβδοι αυτοί αν υπάρξει έλλειψη χρηματοδότησης να αντικατασταθούν από αντίστοιχες ράβδους σιδήρου.

Η κλίνη θα στηρίζεται σε αυτές τις ράβδους με τη βοήθεια σφιγκτικών δακτυλίων. Οι δακτύλιοι αυτοί θα τοποθετηθούν σε διάφορα ύψη της εγκατάστασης και θα εφαρμόζουν απόλυτα στην εκάστοτε διάμετρο με τη βοήθεια κοχλιών. Θα συνδέονται στη συνέχεια με το κουβούκλιο εξασφαλίζοντας τη στήριξη της εγκατάστασης.

Θα αποφύγουμε την τοποθέτησή τους στο κωνικό τμήμα της εγκατάστασης λόγω προφανώς της γεωμετρίας. Θα τοποθετήσουμε αντιθέτως δύο υποστηρίγματα στο πυκνό τμήμα της εγκατάστασης και τρία στην περιοχή απεμπλοκής η οποία είναι και η μεγαλύτερη. Ένας ακόμα δακτύλιος θα τοποθετηθεί στο τμήμα κάτω από τον διασκορπιστή.

Συνολικό διάγραμμα του αντιδραστήρα:



Εικόνα 45- Σχηματικό διάγραμμα του αντιδραστήρα

Δεν αναμένουμε την εμφάνιση έντονης στατικής τάσης στην εγκατάσταση λόγω της μη μεταλλικής κατασκευής της. Ωστόσο για λόγους ασφαλείας δεν μπορούμε να παραβλέψουμε πιθανή ύπαρξη της. Για την στατική τάση η οποία μπορεί να εμφανίζεται στην εγκατάσταση θα γειώσουμε το μοναδικό μεταλλικό τμήμα εντός της εγκατάστασης, τον διασκορπιστή. Ταυτόχρονα, θα τοποθετήσουμε ένα γειωμένο μεταλλικό πλέγμα γύρω από την εγκατάσταση, όπως προτάθηκε από τον Λ. Κοροβέση [66], το οποίο θα εκμηδενίσει τα σχηματιζόμενα φορτία στην εγκατάσταση.

13.4) Σύστημα Διαχωρισμού Αερίων

Όπως έχει αναφερθεί, πριν χρησιμοποιηθεί το αέριο θα πρέπει να καθαριστεί από τις ανεπιθύμητες προσμίξεις και τα στερεά σωματίδια τα οποία περιέχει. Για τον καθαρισμό αυτόν υπάρχουν δύο δυνατότητες: το αέριο μπορεί να καθαριστεί αμέσως μετά από την έξοδό του από την κλίνη, ενώ βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, ή να καθαριστεί αφού πρώτα ψυχθεί.

Ο θερμός καθαρισμός του καυσίμου αερίου του επιτρέπει να διατηρήσει τη θερμότητά του και κατά συνέπεια οι ενεργειακές απώλειες είναι λιγότερες. Όμως, η ανάπτυξη και η εφαρμογή τεχνολογιών για την περίπτωση αυτή είναι πιο δύσκολη λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της μεγαλύτερης διαβρωτικής ικανότητας την οποία έχει το καύσιμο.

Ο ψυχρός καθαρισμός πετυχαίνει ευκολότερα και καλύτερα τους επιθυμητούς στόχους αφαίρεσης προσμίξεων από το θερμό καθαρισμό. Οι τεχνολογίες του περιλαμβάνουν συνήθως συστήματα έκπλυσης νερού (water scrubbing). Η ψύξη όμως του αερίου απαιτεί την κατανάλωση ενέργειας και την απώλεια μέρους της θερμικής αξίας του καυσίμου.

Ο καθαρισμός του αερίου μπορεί να είναι επίσης ξηρός ή υγρός. Στον ξηρό καθαρισμό χρησιμοποιούνται συσκευές όπως οι κυκλώνες και τα φίλτρα τα οποία διαχωρίζουν τα στερεά από τα αέρια βασισμένα στη βαρύτητα και στο διαφορετικό μέγεθος των σωματιδίων. Τα στερεά εξέρχονται σε κονιοειδή μορφή η οποία μπορεί εύκολα να μεταφερθεί.

Ο υγρός καθαρισμός του αερίου καυσίμου γίνεται συνήθως με νερό. Το νερό μπορεί να παρασύρει τα στερεά σωματίδια χωρίς να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις με το καύσιμο. Το νερό μπορεί να λειτουργήσει και ως ψυκτικό υγρό, αν και κάτι τέτοιο οδηγεί σε απώλειες θερμότητας. Παράλληλα δημιουργούνται υγρά απόβλητα, τα οποία είναι πιο δύσκολα στη διαχείρισή τους από τα στερεά και πιο επικίνδυνα γιατί μπορούν να απορροφηθούν από το έδαφος.

Επειδή τα παραγόμενα αέρια από την αεριοποίηση δεν είναι ιδιαίτερα υψηλής θερμικής αξίας, προτιμάται ο καθαρισμός τους με θερμές διαδικασίες λόγω των μικρότερων απωλειών. Σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας όπου αξιοποιείται αυτό το αέριο η χρήση τους είναι οικονομικότερη. Ο υγρός καθαρισμός συνδυαζόμενος με ψύξη του αερίου εφαρμόζεται περισσότερο σε μεγάλης κλίμακας συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν συνήθως συμβατικά καύσιμα.

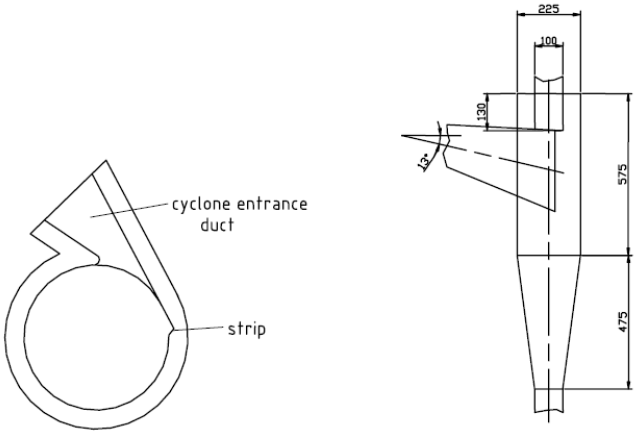
Στην πραγματική εγκατάσταση θα χρησιμοποιηθεί ξηρός και θερμός καθαρισμός του παραγόμενου αερίου αμέσως μετά την έξοδό του από την κλίνη, καθώς είναι μια μικρή μονάδα η οποία θα κατασκευαστεί για πειραματικούς σκοπούς. Επειδή το κρύο μοντέλο λειτουργεί σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία, δεν πρόκειται προφανώς να γίνει ψύξη ή θέρμανση του καυσίμου και θα εφαρμοστεί απλά ξηρός καθαρισμός του αέρα.

Οι ανόργανες προσμίξεις του αερίου (ενώσεις του θείου, των αλογόνων, των αλκαλίων) εναλλακτικά μπορούν να απομακρυνθούν και με τη χρήση κατάλληλων προσροφητικών υλικών στην εγκατάσταση. Τα υλικά αυτά μπορούν να τοποθετηθούν στην ίδια την κλίνη (με μικρή πτώση της απόδοσης [4]) ή να τοποθετηθούν σε χώρο μετά την έξοδο του αερίου.

Οι κύριες τεχνολογίες τις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τον θερμό και ξηρό καθαρισμό των στερεών σωματιδίων είναι:

- **Κυκλώνες**

  Οι κυκλώνες είναι απλές και φθηνές στην κατασκευή συσκευές καθαρισμού αερίων από στερεά σωματίδια, οι οποίες κατορθώνουν να συγκρατούν τα στερεά σωματίδια χάρη στην εφαρμογή φυγόκεντρων δυνάμεων στα σωματίδια, οι οποίες τα διαχωρίζουν από στερεά απόβλητα. Τα αέρια (με τα σωματίδια) εισέρχονται εφαπτομενικά στο άνω μέρος ενός θαλάμου και αναγκάζονται να πραγματοποιήσουν σπειροειδή κίνηση προς τον πυθμένα του κυκλώνα. Εκεί ο αέρας αλλάζει κατεύθυνση σχηματίζοντας μια ανερχόμενη δίνη. Σε όλη αυτή τη διαδικασία τα σωματίδια δέχονται φυγόκεντρες δυνάμεις, προσκρούουν στα τοιχώματα του κυκλώνα και καταλήγουν στο συλλέκτη ο οποίος βρίσκεται κάτω από το κωνικό τμήμα.



Εικόνα 46-Τυπικό σχήμα κυκλώνα [67]

Οι κυκλώνες είναι εξαιρετικά αποτελεσματικοί για μεσαίου και μέσου μεγέθους σωματίδια, αλλά δεν είναι δυνατόν να συλλάβουν τα πολύ μικρά σωματίδια. Για το λόγο αυτό και λόγω του μικρού τους κόστους χρησιμοποιούνται συνήθως στην αρχή της διαδικασίας καθαρισμού μειώνοντας το φορτίο των συσκευών που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια.

- **Φίλτρα**

  Τα φίλτρα (όπως και οι κυκλώνες) μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για θερμό όσο και για ψυχρό καθαρισμό του αερίου. Έχουν πολύ υψηλή απόδοση λειτουργίας (περίπου 99%) ακόμα και σε μικρά μεγέθη σωματιδίων

(μεγαλύτερα των 2μm) ενώ τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους είναι χημικά αδρανή.

Τα φίλτρα σχεδιάζονται με σκοπό να μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν, αφού αφαιρεθούν όλα τα σωματίδια που έχουν κολλήσει επάνω του. Το μειονέκτημά τους είναι η πολύ υψηλή πτώση πίεσης που προκαλούν στο αέριο και το υψηλό κόστος εγκατάστασής τους. Ως ψυχρά φίλτρα αναφέρονται συνήθως τα σακκόφιλτρα, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται τα κεραμικά φίλτρα.

a. *Σακκόφιλτρα:* όπως υποδηλώνει το όνομά τους αποτελούνται από υφαντούς σάκους. Λειτουργούν περίπου μέχρι τους 200°C και η απόδοσή τους είναι συνήθως πάνω από το 99%. Σε βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται σε συστοιχίες οι ποίες βρίσκονται σε μια κοινή διάταξη. Το κύριο μειονέκτημα των σακκόφιλτρων είναι η πολύ μεγάλη πτώση πίεσης την οποία προκαλούν στο αέριο. Απαιτούν επίσης χαμηλές ταχύτητες και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται και σε συστοιχίες.

Εικόνα 47-Σακκόφιλτρο τύπου 3M/FB 900 [16]

Η ροή στα σακκόφιλτρα μπορεί να είναι και προς τις δύο κατευθύνσεις. Στα φίλτρα όπου η ροή του αερίου είναι από το εσωτερικό του φίλτρου προς το εξωτερικό το φίλτρο διογκώνεται και τα σωματίδια παραμένουν στο εσωτερικό του φίλτρου. Στην αντίθετη ροή απαιτείται μηχανική υποστήριξη για την διατήρηση του σχήματος του φίλτρου, ενώ τα σωματίδια παραμένουν στο εξωτερικό. Ο καθαρισμός πραγματοποιείται είτε με μηχανική ανακίνηση των σάκων είτε με εφαρμογή αντίθετης ροής αέρα.

Το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται τα σακκόφιλτρα ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή θερμοκρασιών του αερίου. Για θερμοκρασίες κάτω των 80°C χρησιμοποιούνται βαμβακερά υφάσματα, ενώ για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, υφάσματα από

πολυμερή υλικά [π]. Στην κατασκευή παίζει ρόλο και το είδος του αερίου και το είδος του ρύπου που πρέπει να απομακρυνθεί.

b. *Κεραμικά Φίλτρα:* Τα κεραμικά φίλτρα χρησιμοποιούν ως υλικό φιλτραρίσματος κεραμικά υλικά. Η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει το 99,99% για μεγέθη μέχρι 10μm ενώ αντέχουν σε πιέσεις μέχρι και 2MPa. Το θερμοκρασιακό τους εύρος είναι τεράστιο, αφού μπορούν να αντέξουν θερμοκρασίες μέχρι και 1000°C. Ανάλογα με τη διάταξη των κεραμικών στοιχείων χωρίζονται σε κηροειδή και σταυρωτής ροής.

Εικόνα 48-Κεραμικά φίλτρα της Madison [16]

Τα κηροειδή κεραμικά φίλτρα αποτελούνται από δέσμες κοίλων κεραμικών ράβδων, οι οποίες έχουν μια ελεύθερη οπή στη βάση της ράβδου. Το αέριο ρέει μέσα στο δοχείο όπου βρίσκονται οι ράβδοι και τα σωματίδια αιχμαλωτίζονται στους πόρους αυτών. Από τους πόρους περνούν στο εσωτερικό της ράβδου όπου και απομακρύνονται διαμέσου της οπής.

Τα κεραμικά φίλτρα σταυρωτής ροής εξασφαλίζουν την ίδια απόδοση με τα κηροειδή και μάλιστα σε μικρότερο χώρο. Αποτελούνται από πορώδες κεραμικό υλικό κατανεμημένο σε στρώματα ώστε να δημιουργεί ένα είδος μεμβράνης, κάθετα στην οποία ρέει το αέριο. Ο καθαρισμός του φίλτρου γίνεται είτε με κατάλληλη ροή πεπιεσμένου αέρα ή με εφαρμογή μηχανικών ή πνευματικών ταλαντώσεων στο φίλτρο.

- **Ηλεκτροστατικά Φίλτρα**

Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα ή συστήματα ηλεκτροστατικής κατακρήμνισης σωματιδίων (electrostatic precipitation ή ESP) διαφέρουν από τα απλά φίλτρα στην αρχή συγκράτησης των σωματιδίων. Ενώ τα άλλα φίλτρα χρησιμοποιούν πορώδη υλικά, το σύστημα αυτό βασίζεται στην ανάπτυξη ηλεκτροστατικών δυνάμεων στα σωματίδια.

Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία των ηλεκτροστατικών φίλτρων στηρίζεται στην δημιουργία, από δύο ηλεκτρόδια με μεγάλη διαφορά δυναμικού, ισχυρού ηλεκτροστατικού πεδίου, μέσω του οποίου περνούν με χαμηλή ταχύτητα το προς καθαρισμό αέριο ρεύμα. Τα στερεά σωματίδια φορτίζονται έτσι έντονα, ενώ το ωφέλιμο αέριο παραμένει ανεπηρέαστο.

Στη συνέχεια, το ρεύμα του αερίου περνά από φορτισμένα ηλεκτρόδια σε μορφή πλάκας, στα οποία προσκολλούνται τα αντίθετα φορτισμένα σωματίδια ενώ το αφόρτιστο αέριο συνεχίζει την πορεία του. Με περιοδικά κτυπήματα ή εφαρμογή δονήσεων ή ακόμα και με έκπλυση των πλακών συλλογής τα σωματίδια απομακρύνονται και συλλέγονται.

Η απόδοση των φίλτρων αυτών είναι εξαιρετική, επιτυγχάνοντας μέχρι και 99% απομάκρυνση σωματιδίων με διάμετρο 0,1μm. Η ταχύτητα όμως η οποία απαιτείται για την απόδοση αυτή είναι περίπου 1m/s οδηγώντας σε τεράστιες εγκαταστάσεις ηλεκτροστατικών φίλτρων και αντίστοιχο κόστος. Το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας (η δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου απαιτεί προφανώς κατανάλωση ενέργειας) είναι απαγορευτικό για οποιαδήποτε μικρή ή μεσαία εγκατάσταση στις οποίες χρησιμοποιείται συνήθως η βιομάζα.

Η ελαχιστοποίηση της παραγωγής πίσσας από την ρευστοποιημένη κλίνη είναι επιτακτική ανάγκη για την εύκολη και ανέξοδη χρήση του αερίου σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Η ελαχιστοποίηση αυτή δεν είναι απαραίτητο να γίνει μετά την παραγωγή του αερίου. Είναι δυνατή η κατάλληλη ρύθμιση της ίδιας της κλίνης για την μείωση του ρυθμού παραγωγής της πίσσας.

Ανεξάρτητα από το καύσιμο ή από το είδος του αντιδραστήρα παρατηρείται πάντα παραγωγή πίσσας. Είναι δυνατή όμως η επιλογή με βάση το καύσιμο με το οποίο τροφοδοτείται η κλίνη και των χημικών αντιδράσεων οι οποίες αναμένονται των άλλων παραμέτρων της (οξειδωτικό, υλικό της κλίνης, σημείο εισαγωγής και εξαγωγής του καυσίμου και του οξειδωτικού και σημείο απαγωγής της τέφρας και του αερίου) ώστε να ελαχιστοποιείται η παραγωγή πίσσας.

Μια τεχνική η οποία κερδίζει συνεχώς έδαφος είναι η χρήση καταλύτη εντός της κλίνης, ο οποίος μπορεί να καταστρέψει σε υψηλές θερμοκρασίες τις πίσσες. Οι καταλύτες αυτοί ανήκουν σε μια ποικιλία υλικών ανάλογα με το είδος της κλίνης, το καύσιμο το οποίο χρησιμοποιείται και τη θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί αυτή. Οι καταλύτες χωρίζονται συνήθως σε μεταλλικούς και μη μεταλλικούς.

Οι μη μεταλλικοί καταλύτες, οι πιο σημαντικοί από τους οποίους είναι ο δολομίτης και ο ολιβίνης (ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί και στην πραγματική εγκατάσταση). Οι καταλύτες αυτοί γενικά ανήκουν στους ζεόλιθους, τους δολομίτες και τους ασβεστίτες. Κύριο πλεονέκτημά τους είναι το χαμηλό κόστος, το οποίο συνδυάζεται με καλή απόδοση ιδιαίτερα στην περίπτωση της βιομάζας. Είναι ιδιαίτερα ενεργοί στις υψηλές θερμοκρασίες των κλινών και μπορούν να απομακρύνουν 95-99% των πισσών στις θερμοκρασίες αυτές [4]. Το κύριο

πρόβλημά τους είναι η σταδιακή απενεργοποίησή τους λόγω του σχηματισμού αλάτων και λόγω των διαβρωτικών συνθηκών.

Οι μεταλλικοί καταλύτες είναι μια σχετικά καινούρια τεχνολογία, η οποία δεν έχει δοκιμαστεί ακόμα ευρέως. Εμφανίζουν ικανοποιητικό ρυθμό καταστροφής της πίσσας και σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγεται και η ταυτόχρονη διάσπαση της αμμωνίας. Αναμένεται όμως ότι θα είναι λιγότερο οικονομικά βιώσιμοι για μικρές εγκαταστάσεις.

Εκτός από τη χρήση καταλυτών για την μείωση των πισσών, πολλές από αυτές τις ενώσεις είναι ευαίσθητες σε θερμικές καταπονήσεις. Σε θερμοκρασίες άνω τον 1000°C είναι δυνατή η καταστροφή τους χωρίς τη χρήση καταλύτη. Προφανώς η θερμοκρασία η οποία απαιτείται για να διασπαστεί κάθε ουσία διαφέρει. Υπάρχουν έτσι ουσίες οι οποίες έχουν αντοχή σε θερμοκρασίες ως και 1300°C και άλλες οι οποίες αρχίζουν να καταστρέφονται από τους 900°C.

Φυσικά η κάθε χημική αντίδραση η οποία πραγματοποιείται σε έναν αεριοποιητή έχει διαφορετικές θερμοκρασίες στις οποίες η απόδοση είναι ικανοποιητική. Δεν είναι δυνατόν να μεταβάλλουμε τις θερμοκρασίες της κλίνης μόνο για τη διάσπαση κάποιων ουσιών οι οποίες μπορούν να αφαιρεθούν και με άλλους τρόπους. Συνήθως εξάλλου οι θερμοκρασίες καταστροφής των πισσών είναι υψηλότερες από τις θερμοκρασίες στις οποίες γίνονται οι αντιδράσεις.

Η προσθήκη ατμού στο οξειδωτικό μέσο μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή πισσών λιγότερο ανθεκτικών σε υψηλές θερμοκρασίες και ευνοεί αυτές ακριβώς τις πίσσες οι οποίες μπορούν να διασπασθούν καταλυτικά. Η εισαγωγή ατμού δεν είναι απλή υπόθεση καθώς χρειάζεται κατανάλωση ενέργειας και ξεχωριστό κύκλωμα για την παραγωγή και την εισαγωγή του στην κλίνη.

Η προσθήκη καθαρού οξυγόνου ως οξειδωτικό οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης της πίσσας. Οι πίσσες όμως οι οποίες παράγονται είναι εξαιρετικά ανθεκτικές σε υψηλές θερμοκρασίες, όταν σχηματίζονται. Πιο συγκεκριμένα, τα οξυγόνο εμποδίζει την κατασκευή αρωματικών ενώσεων. Όταν όμως κάποια αρωματική ένωση δημιουργηθεί τότε η καταστροφή της εντός της κλίνης δεν είναι πλέον δυνατή.

Οι εγκαταστάσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό η μία με την άλλη. Μπορούμε έτσι να συνδυάσουμε τον ξηρό με τον υγρό καθαρισμό και συνήθως τοποθετούμε πρώτα τον ξηρό μηχανισμό στην εγκατάσταση. Ο ψυχρός και ο θερμός καθαρισμός συνήθως δε συνδυάζονται. Για λόγους ασφαλείας στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις τοποθετούνται σχεδόν πάντα δύο τέτοιες διατάξεις, ώστε να εξασφαλίζεται η ο βέλτιστος καθαρισμός του αερίου. Επιπλέον σε περίπτωση βλάβης της μίας η άλλη μπορεί να εξακολουθήσει να λειτουργεί χωρίς άμεση διακοπή της λειτουργίας της εγκατάστασης.

Η πιο συνηθισμένη διάταξη η οποία χρησιμοποιείται σε ρευστοποιημένες κλίνες είναι ο κυκλώνας. Έχει υψηλή απόδοση, μεγάλη διάρκεια λειτουργίας και χαμηλό κόστος ενώ δεν χρησιμοποιεί χημικές διατάξεις που πιθανόν να

προκαλέσουν πρόβλημα στο καυσαέριο. Η απουσία κινούμενων τμημάτων μειώνει σημαντικά το αρχικό κόστος και το κόστος συντήρησης. [68] Η απόδοσή του μάλιστα αυξάνεται καθώς η παροχή σωματιδίων αυξάνεται. Είναι η πιο συνηθισμένη διάταξη για αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης. Αντιμετωπίζει ωστόσο προβλήματα λόγω της χημικής διάβρωσης.

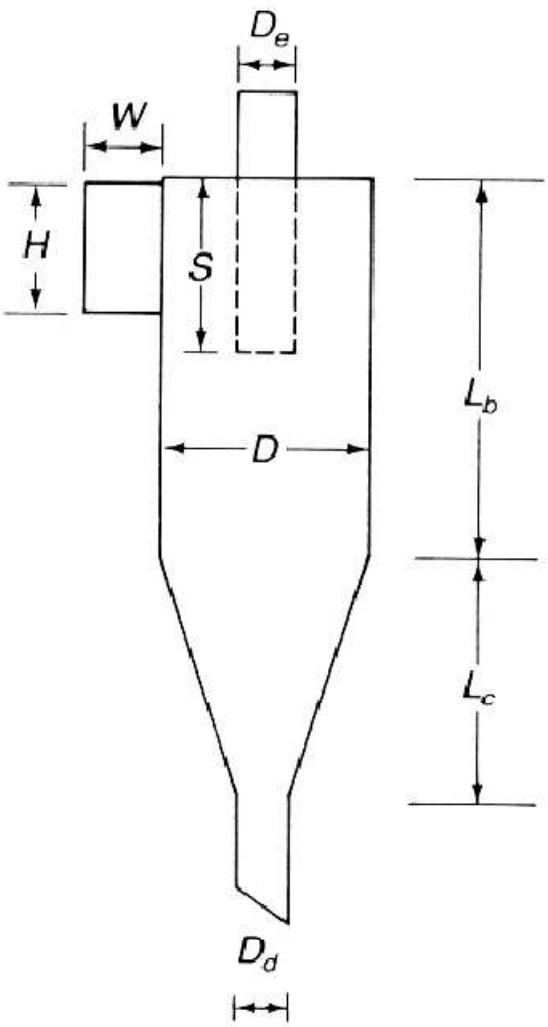
Στην πραγματική εγκατάσταση, όπως είδαμε υπάρχει ένας κυκλώνας για τον καθαρισμό του αερίου ύστερα από ψύξη του. Επειδή ο αέρας στο **κρύο μοντέλο** έχει θερμοκρασία ίδια με την ατμοσφαιρική δεν χρειάζεται να κάνουμε ψύξη του ή κάποια άλλη διεργασία η οποία να σχετίζεται με τη θερμότητα. Θα τοποθετηθεί όμως ένας κυκλώνας στην έξοδο του δοχείου της κλίνης, για τη συγκράτηση των σωματιδίων.

Λόγω του χαμηλού ύψους της αναμένεται σημαντική απαγωγή στερεών από τον αέρα. Με την τοποθέτηση του κυκλώνα επιτυγχάνουμε λιγότερες απώλειες υλικού της κλίνης από την εγκατάσταση. Ταυτόχρονα, επειδή τα σωματίδια αυτά είναι εξαιρετικά μικρά υπάρχει κίνδυνος εισπνοής τους από τα άτομα στο εργαστήριο, οπότε για λόγους ασφαλείας επιβάλλεται η τοποθέτησή του.

Δεν θα χρησιμοποιήσουμε φίλτρα ή έκπλυση των σωματιδίων, όχι μόνο γιατί δεν υπάρχουν στην αντίστοιχη πραγματική εγκατάσταση, αλλά και γιατί η τοποθέτησή τους απαιτεί μεγάλο διαθέσιμο χώρο, ενώ ταυτόχρονα το κόστος τους είναι ιδιαίτερα αυξημένο λόγω της επιπλέον παροχής νερού. Αν ο κυκλώνας συντηρείται ικανοποιητικά, αναμένουμε απόδοση άνω του 99% στην κατακράτηση σωματιδίων (τα οποία έχουν όπως είπαμε μέσο μέγεθος περίπου 130μm) οπότε δεν θα υπάρξουν προβλήματα ασφαλείας.

Για τη σχεδίαση του κυκλώνα ακολουθήθηκαν οι σχέσεις μεταξύ των διαστάσεων του κυκλώνα οι οποίες αναπτύχθηκαν από τους Shepherd και Laddle [69]. Οι σχέσεις αυτές αναφέρονται σε ένα συνηθισμένο κυκλώνα και εφαρμόστηκαν επιλέγοντας ύψος εισόδου 0,1m. Τα μεγέθη στις σχέσεις αυτές είναι αδιάστατοι λόγοι ως προς την διάμετρο του σώματος του κυκλώνα. Η διάμετρος αυτή επιτρέπει την εύκολη απομάκρυνση του αέρα χωρίς η ταχύτητα να είναι υπερβολικά μεγάλη και να επιτρέπει την απαγωγή υπερβολικά πολλών σωματιδίων από το ρεύμα του αερίου.

Ύψος Εισόδου	H/D	0.5
Πλάτος Εισόδου	W/D	0.25
Διάμετρος Εξόδου Αερίου	D_e/D	0.5
Μήκος Ανιχνευτή Στροβίλων	S/D	0.6
Μήκος Σώματος	L_b/D	1.75
Μήκος Κωνικού Τμήματος	L_c/D	2
Διάμετρος Βάσης	D_d/D	0.4



Εικόνα 49-Σχηματικό διάγραμμα γεωμετρικών μεγεθών τυπικού κυκλώνα

Στο συγκεκριμένο κυκλώνα μπορούμε να υπολογίσουμε την διάμετρο των σωματιδίων για την οποία η αποδοτικότητα του κυκλώνα είναι ακριβώς 50% με βάση μια σχέση η οποία αναπτύχθηκε από τον Lapple. Αν η διάμετρος αυτή είναι μικρή σε σχέση με τις διαμέτρους των σωματιδίων τις οποίες χρησιμοποιούμε στην εγκατάσταση, τότε ο κυκλώνας είναι κατάλληλος για τη διεργασία. Η σχέση αυτή είναι:

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu W}{2\pi \cdot N_e \cdot V_g \cdot (\rho_s - \rho_g)}}$$

Στη σχέση αυτή N_e είναι ο αριθμός των στροβιλισμών τους οποίους κάνει το αέριο στον κυκλώνα ώσπου να απομακρυνθούν τα στερεά και να εξέλθει το αέριο από τον κυκλώνα. Ο αριθμός αυτός δίνεται από την επόμενη σχέση συναρτήσει των γεωμετρικών συνθηκών του κυκλώνα:

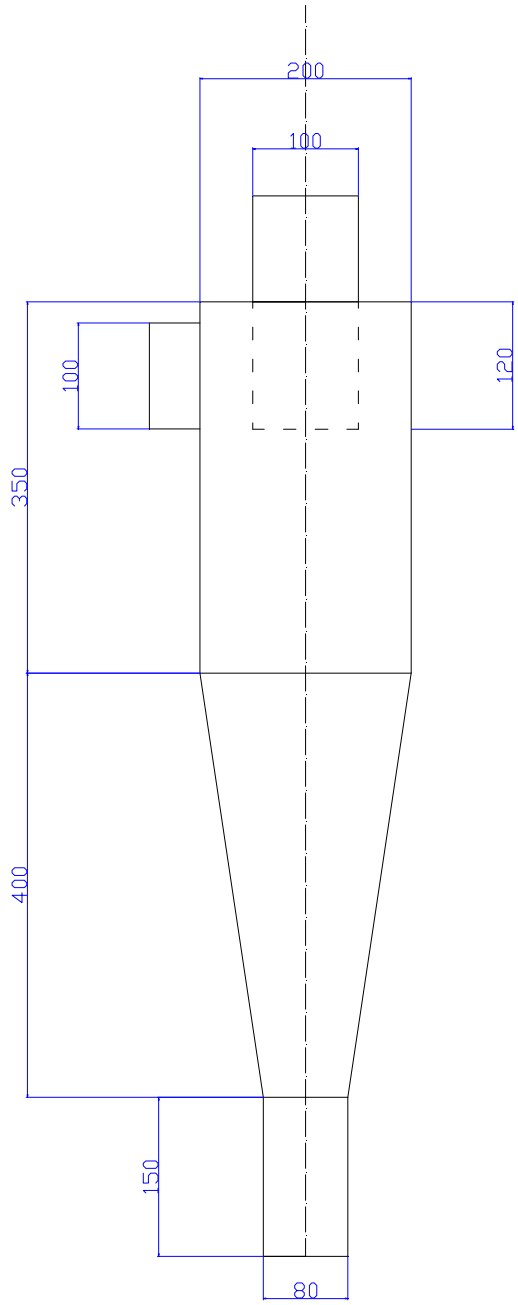
$$N_e = \frac{1}{H}\left(L_b + \frac{L_c}{2}\right)$$

Η πτώση πίεσης σε αυτόν τον κυκλώνα μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον Lapple [69] από τη σχέση:

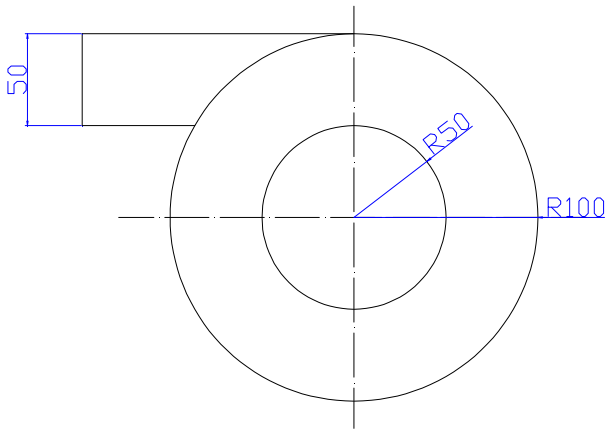
$$\Delta P = K\frac{HW}{D_e^2}\cdot\frac{\rho_g\cdot {V_g}^2}{2}$$

Το K είναι μια εμπειρική σταθερά, η οποία στους κυκλώνες με εφαπτομενική είσοδο έχει τιμή 16.

Το αποτέλεσμα αυτής της σχεδίασης είναι ο ακόλουθος κυκλώνας:



Εικόνα 50-Εμπρόσθια όψη του κυκλώνα



Εικόνα 51-Κάτοψη του κυκλώνα

13.5) Σύστημα Απαγωγής Στερεών υπολειμμάτων

Η αεριοποίηση της βιομάζας έχει μεγαλύτερη απόδοση από την καύση της βιομάζας, αλλά το κύριο πρόβλημα με την βιομηχανική αξιοποίησή της είναι η απομάκρυνση των στερεών υπολειμμάτων (τέφρας). Τα υπολείμματα λόγω του χαμηλού σημείου τήξης μπορεί να συντηχθούν σε συσσωματώματα και να προκαλέσουν διάβρωση. Για το λόγο αυτό, αφού απομακρυνθούν από τον αντιδραστήρα, συνήθως ψύχονται κάτω από τους 500°F πριν γίνει περαιτέρω διεργασία.

Για την αποφυγή σχηματισμού συσσωματωμάτων είναι σημαντική η σωστή σχεδίαση του θαλάμου της ρευστοποιημένης κλίνης.

Για την απομάκρυνση της τέφρας από τον αντιδραστήρα μπορούν να εφαρμοστούν μηχανικά ή πνευματικά συστήματα. Συνήθως η τέφρα αφαιρείται μαζί με υλικό της κλίνης, διαχωρίζονται λόγω του διαφορετικού βάρους και η τέφρα απομακρύνεται ενώ το υλικό στέλνεται ξανά στην κλίνη.

Για την ψύξη της τέφρας χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου οι ποσότητες της τέφρας είναι πολύ μεγάλες, μια δεύτερη ρευστοποιημένη κλίνη. Εκεί η τέφρα ψύχεται με τον κρύο αέρα ο οποίος εισέρχεται μέσω ενός διασκορπιστή, όπως στην κανονική ρευστοποιημένη κλίνη. Είναι δυνατόν ο θερμός αέρας που προκύπτει να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια σε άλλη εφαρμογή ή ακόμα

και στον ίδιο τον αεριοποιητή. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η τέφρα στη συνέχεια αποθηκεύεται σε μεγάλα σιλό όπου γίνεται επεξεργασία για τη μεταφορά της.

Σε μικρότερες εφαρμογές η τέφρα, αφού αφαιρεθεί από τον αντιδραστήρα οδηγείται στο σύστημα ψύξης. Εκεί ψύχεται συνήθως με νερό, το οποίο όμως δεν έρχεται σε επαφή με την τέφρα, για να μην υπάρχει ανάγκη επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Σε καύσιμα πολύ χαμηλών αποβλήτων, χρησιμοποιείται ψύκτης κοχλία (screw cooler). Το υλικό προς ξήρανση κινείται σε ένα ατέρμονα κοχλία, που περιβάλλεται από χιτώνιο στο οποίο κυλά νερό ή λάδι ως ψυκτικό μέσο.

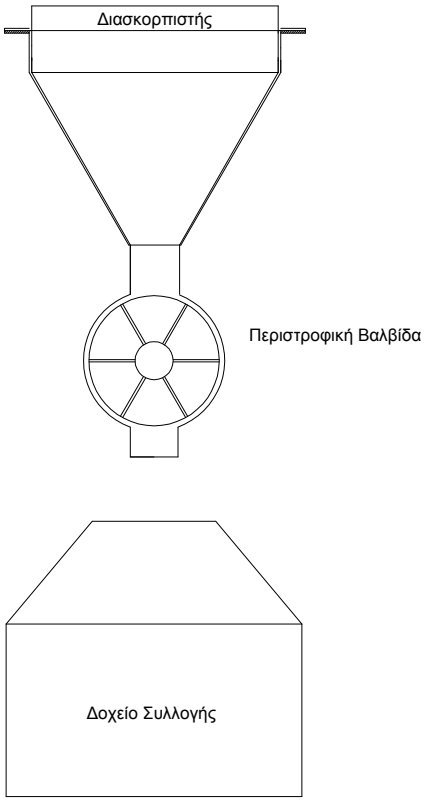
Αν όμως υπάρχουν συσσωματώματα, τότε αυτά εμποδίζουν την ψύξη και στοιχεία των στερεών παραμένουν σε υψηλή θερμοκρασία. Είναι λοιπόν πιθανόν να χρειάζεται διαχωρισμός της τέφρας ανάλογα με το βάρος της, και στη συνέχεια κατάλληλη διαχείριση κάθε τμήματος.

Στο **κρύο μοντέλο** μπορούμε να ακολουθήσουμε το σύστημα το οποίο προτείνεται στην πραγματική εγκατάσταση και να τοποθετήσουμε άλλον ένα τροφοδότη ατέρμονα κοχλία κάτω από τον αντιδραστήρα ώστε να συλλέγει και να απομακρύνει την τέφρα. Αυτό είναι πράγματι η βέλτιστη λύση όμως το κόστος αγοράς ενός δεύτερου τέτοιου συστήματος είναι αρκετά υψηλό.

Η παροχή υπολειμμάτων στο σύστημα αυτό δεν είναι τόσο υψηλή όσο στην πραγματική εγκατάσταση. Υπολογίσαμε προσεγγιστικά πως η παροχή αυτή θα είναι περίπου 9,1kg/h (το 18% περίπου της παροχής των 50kg/h της πραγματικής εγκατάστασης). Η παροχή αυτή δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή και η εγκατάσταση δεν θα λειτουργεί για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα. Η αγορά επομένως ενός τέτοιου συστήματος κρίνεται ασύμφορη.

Αντίθετα, μπορούμε απλώς να συλλέξουμε τα υπολείμματα σε ένα δοχείο κατάλληλης χωρητικότητας, το οποίο απλώς θα πρέπει να αδειάζουμε πριν από κάθε χρήση της εγκατάστασης. Η λύση αυτή αναμφίβολα περιορίζει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο μπορεί να λειτουργήσει η κλίνη, αλλά με κατάλληλη χωρητικότητα δοχείου η κλίνη θα μπορούσε να λειτουργήσει για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να ολοκληρωθεί το πείραμα.

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο μεταφοράς ή αποθήκευσης των υπολειμμάτων μια βαλβίδα πρέπει να τοποθετηθεί πάνω από την κλίνη ώστε τα στερεά εντός της κλίνης να μην καταλήγουν στο σύστημα απαγωγής των υπολειμμάτων χωρίς να είναι η κλίνη σε λειτουργία, αλλά και κατά την εκκίνησή της ώσπου να εφαρμοστεί η κατάλληλη πίεση. Δεδομένου ότι ο διασκορπιστής έχει περίπου το 50% της επιφάνειάς του ανοικτό η παρουσία της βαλβίδας είναι απαραίτητη. Θα χρησιμοποιήσουμε μια περιστροφική βαλβίδα, ακριβώς όπως και στην είσοδο του υλικού, γιατί εξασφαλίζεται πολύ καλός έλεγχος παροχής.



Εικόνα 52- Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης απαγωγής τέφρας

13.6) Έλεγχος Εγκατάστασης

Είναι πολύ σημαντικό να γίνεται άμεσος και ακριβής έλεγχος της εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται την ώρα της δοκιμής μετρήσεις συγκεκριμένων μεγεθών. Στη ρευστοποιημένη κλίνη είναι απολύτως απαραίτητη η μέτρηση της πίεσης και της θερμοκρασίας σε όσο το δυνατόν περισσότερες θέσεις.

Το παράθυρο της θερμοκρασίας για μια επιτυχημένη αεριοποίηση δεν είναι πολύ μεγάλο. Ανάλογα με το υλικό κυμαίνεται περίπου από 700°C ως 1050°C. Είναι σημαντικό να διατηρείται η θερμοκρασία σε αυτά τα όρια, γιατί κάτω από τους 700°C ο βαθμός απόδοσης της αεριοποίησης πέφτει, ενώ το ποσοστό ακαύστων αυξάνεται δραματικά. Πάνω από τους 1050°C γίνονται χημικές αντιδράσεις οι οποίες εμποδίζουν την αεριοποίηση. Η θερμοκρασία εξαρτάται επίσης σημαντικά και από το λόγο αέρα - καυσίμου της εγκατάστασης.

Η θερμοκρασία σε μια ρευστοποιημένη κλίνη πρέπει να μετρηθεί τόσο στην πυκνή περιοχή όσο και την περιοχή απεμπλοκής. Είναι σημαντικό η θερμοκρασία σε μια αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη να διατηρείται σταθερή σε όλο το ύψος της. Επίσης είναι σημαντική η τοποθέτηση ενός θερμοστοιχείου στο σύστημα καθαρισμού του αερίου, για να δούμε την πτώση θερμοκρασίας την οποία προκαλεί.

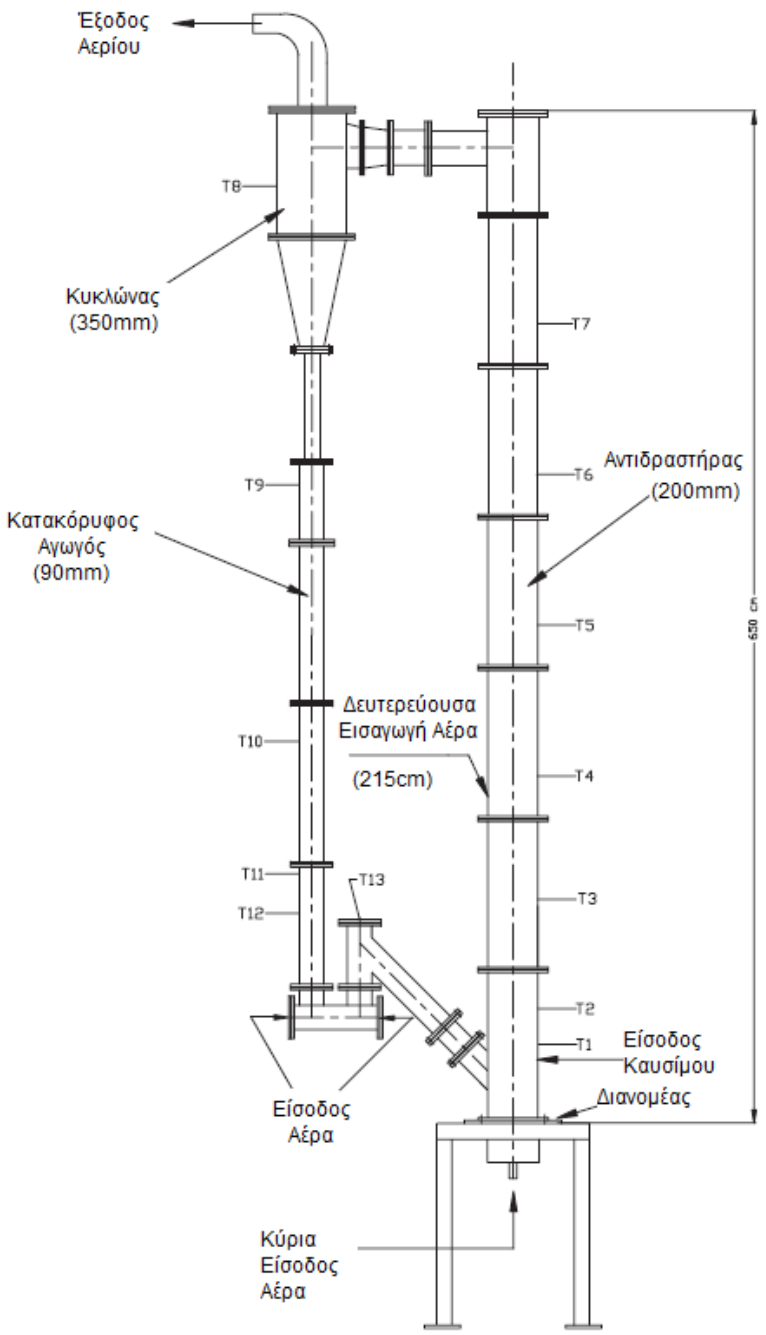
Η τοποθέτηση ενός οργάνου μέτρησης θερμοκρασίας ανά περιοχή συνήθως δεν είναι αρκετή για να συλλάβει όλες τις μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία μεταβάλλεται πιο εύκολα στην πυκνή περιοχή και για αυτό το λόγο προτείνεται η τοποθέτηση περισσότερων στοιχείων σε αυτή την περιοχή. Επειδή εκεί γίνεται και η κυρίως μετατροπή του καυσίμου είναι σημαντική η γνώση της θερμοκρασία σε όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία.

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται συνήθως θερμοστοιχεία. Τα θερμοστοιχεία, ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα, έχουν τη δυνατότητα μέτρησης διαφορετικού πεδίου θερμοκρασιών. Ταυτόχρονα, μπορούν εύκολα να συνδεθούν με σύστημα συλλογής και επεξεργασίας των μετρήσεων καθοδηγούμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για τη μέτρηση των υψηλών θερμοκρασιών της αεριοποίησης κατάλληλα είναι τα θερμοστοιχεία τύπου Κ.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο αντιδραστήρας ο οποίος κατασκευάστηκε από τους Garcia-Ibanez et al. [23] για τη μελέτη της αεριοποίησης των υπολειμμάτων της κατεργασίας του καρπού των ελαιόδεντρων για την παρασκευή ελαιόλαδου. Ο αντιδραστήρας αυτός είναι αναβράζουσας κλίνης με ανακυκλοφορία και έχει θερμική ισχύ 300kW. Στο σχήμα παρουσιάζεται η τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης της θερμοκρασίας (θερμοστοιχείων τύπου Κ) στην εγκατάσταση.

Παρατηρούμε πως οι ερευνητές αποφάσισαν να τοποθετήσουν 4 θερμοστοιχεία (T1 - T4) στην περιοχή της πυκνής φάσης, σε ύψος δηλαδή ως 220cm περίπου. Στα υπόλοιπα 430cm της εγκατάστασης, στην περιοχή απεμπλοκής τοποθετήθηκαν μόνο 3 θερμοστοιχεία (T5 - T7). Η επιλογή αυτή δείχνει τη σημασία της γνώσης της μεταβολής της θερμοκρασίας στην πυκνή φάση της εγκατάστασης για τη σωστή ρύθμισή της.

Ένα ακόμα θερμοστοιχείο (T8) τοποθετήθηκε στη μέση του κυκλώνα, για να μετρηθεί η θερμοκρασία του αερίου στην έξοδό του. Τα υπόλοιπα 5 θερμοστοιχεία (T9 - T13) τοποθετήθηκαν στον αγωγό επιστροφής των στερεών της εγκατάστασης και στη βαλβίδα ανακυκλοφορίας.



Εικόνα 53-Θέσεις Μέτρησης της Θερμοκρασίας σε ένα αντιδραστήρα κλίνης με ανακυκλοφορία [23]

Η πίεση είναι επίσης ένα πολύ σημαντικό μέγεθος προς μέτρηση σε μια ρευστοποιημένη κλίνη καθώς όλα τα βασικά στοιχεία ης εγκατάστασης μπορούν να συνδεθούν με την πίεση και ειδικά η κατανομή της μάζας. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η διαφορά πίεσης από τον πυθμένα ως την κορυφή της εγκατάστασης.

Πρέπει επίσης να μετρηθεί και η ταχύτητα των σωματιδίων. Η αεριοποίηση έχει μια ελάχιστη ταχύτητα στην οποία γίνεται και πρέπει να βεβαιωθούμε ότι αυτή η ταχύτητα επιτυγχάνεται. Ταυτόχρονα αν η ταχύτητα γίνει πολύ υψηλή τότε δεν θα έχουμε μια αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη αλλά μια τυρβώδη

ρευστοποιημένη κλίνη, η οποία έχει διαφορετικές ιδιότητες και μας υποχρεώνει να μεταβάλλουμε το σχεδιασμό της κλίνης. Ταυτόχρονα, η μέτρηση της ταχύτητας θα μας επιτρέψει να γνωρίζουμε την παροχή. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στην περιοχή της κλίνης τα όργανα πρέπει να ψύχονται.

Για τη μέτρηση της περιεκτικότητας μπορούμε να εισάγουμε με τον αέρα μικρή ποσότητα άλλου αερίου στον αεριοποιητή, όπως ήλιο [70]. Στη συνέχεια μετρώντας τη συγκέντρωση αυτού του αερίου μπορούμε να βρούμε τη σύσταση των αερίων σε διάφορες θέσεις. Η παροχή του αερίου αυτού θα έπρεπε να είναι μικρότερη του 1% της παροχής του αέρα, για να μην υπάρξουν μεταβολές στη ρευστοποιημένη κλίνη. Η μέτρηση παροχών και ταυτόχρονα της ταχύτητας των αερίων μπορεί να γίνει με ροόμετρα στην είσοδο και την έξοδο του αεριοποιητή.

Στο **κρύο μοντέλο** δεν είναι απαραίτητο προφανώς να μετρήσουμε τη θερμοκρασία. Πρέπει όμως να γνωρίζουμε την πτώση πίεσης σε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία και ειδικά στην περιοχή της πυκνής φάσης. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να τοποθετηθούν περισσότερα στοιχεία μέτρησης της πίεσης στο κάτω μέρος του αεριοποιητή. Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την πτώση πίεσης και στο ανώτερο μέρος του αεριοποιητή πριν την έξοδο στον σύστημα διαχωρισμού. Εκτός της κλίνης θέλουμε να γνωρίζουμε την πτώση πίεσης την οποία έχει ο κυκλώνας στον οποίο απομακρύνονται τα στερεά σωματίδια.

Βέβαια η πίεση του αέρα που παράγει ο συμπιεστής στην είσοδο και η πτώση πίεσης στο σύστημα διαχωρισμού πρέπει να είναι γνωστά. Στο μεσαίο τμήμα της κλίνης και την περιοχή απεμπλοκής τα σημεία μέτρησης της πίεσης μπορούν να είναι πιο αραιά γιατί η πίεση δεν μεταβάλλεται ραγδαία. Μπορούμε έτσι να χρησιμοποιήσουμε πιο αραιά σημεία μέτρησης της πίεσης.

Για τη μέτρηση της πίεσης θα χρησιμοποιήσουμε *ψηφιακούς διαφορικούς μετρητές πίεσης* (digital differential pressure transducers). Χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την πτώση πίεσης ανάμεσα σε δύο σημεία. Οι μετρητές αυτοί έχουν πολύ καλή ακρίβεια μέτρησης και διακριτική ικανότητα. Επίσης, μπορούν να συνδεθούν με ηλεκτρονικό υπολογιστή και να δίνουν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο.

Θα χρησιμοποιηθούν συνολικά πέντε από αυτούς τους μετρητές και θα χρησιμοποιηθούν στα εξής σημεία:

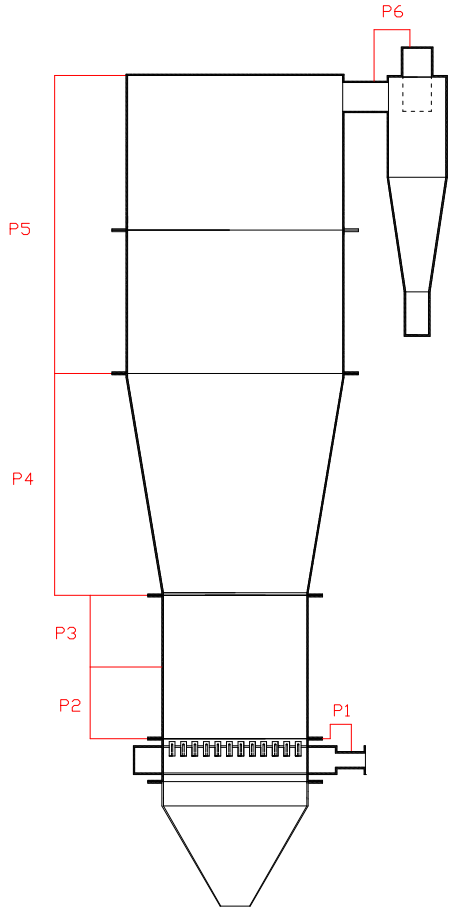
1. Μέτρηση της πτώσης πίεσης στον διασκορπιστή. Στον διασκορπιστή αναμένεται έντονη πτώση πίεσης για αυτό και το εύρος μέτρησης του οργάνου πρέπει να είναι σχετικά μεγάλο. Προτείνεται μετρητής με εύρος 0-400mbar.
2. Μέτρηση της πτώσης πίεσης στην πυκνή φάση. Κι εδώ, όπως στον διασκορπιστή αναμένεται μεγάλη πτώση της πίεσης για αυτό και προτείνεται η χρήση οργάνου με εύρος από 0-400mbar. Αν υπάρχει

ανάγκη στην πυκνή φάση μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μετρητές, καθένας από τους οποίους θα μετρά την πτώση της πίεσης στην μισή περιοχή. Εάν χρησιμοποιηθεί ένας μετρητής θα πρέπει να έχει εύρος 0-400mbar, ενώ για δύο μετρητές αρκεί εύρος 0-200mbar στον καθένα.

3. Στην κωνική περιοχή (frustum). Στην περιοχή αυτή δεν αναμένεται τόσος έντονη πτώση, για αυτό και μπορεί το όργανο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί να έχει εύρος 0-200mbar.
4. Στην περιοχή απεμπλοκής. Επειδή η περιοχή αυτή είναι πολύ αραιή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα όργανο με εύρος 0-200mbar για να υπολογίσουμε την πτώση πίεσης. Η πτώση αυτή πίεσης θα υπολογιστεί ως την έξοδο του αέρα από την εγκατάσταση.
5. Στον κυκλώνα. Ένα τελευταίο όργανο θα χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει την πτώση πίεσης στον κυκλώνα, από την έξοδο του αερίου στην κλίνη ως την έξοδό του στο περιβάλλον.

Για να αξιοποιηθούν αυτά τα στοιχεία θα πρέπει να υπάρχει και ένα κατάλληλο σύστημα ελέγχου, αξιολόγησης και παρουσίασης των μετρήσεων. Θα προέκυπταν καλύτερα αποτελέσματα για την εγκατάσταση αν το σύστημα ήταν σε πραγματικό χρόνο. Για το λόγο αυτό θα πρέπει τα μετρητικά συστήματα να συνδεθούν σε υπολογιστικό δίκτυο το οποίο θα ελέγχεται από εξειδικευμένο πρόγραμμα. Οι μετρητές της πτώσης πίεσης θα στέλνουν έτσι την τιμή σε μορφή τάσης στο σύστημα το οποίο θα το μετατρέπει στην κατάλληλη μορφή.

Για το υπολογιστικό πρόγραμμα μελετήθηκε η λύση του Labview το οποίο κατασκευάζεται από την Texas Instruments Inc. και το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ήδη με επιτυχία στην ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία η οποία κατασκευάστηκε στο IVD στην Στουτγάρδη [71]. Το σύστημα αυτό μπορεί να ελέγξει ταυτόχρονα πολλές μετρητικές συσκευές, ενώ έχει τη δυνατότητα προγραμματισμού και παρουσίασης των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο. Δηλαδή, μπορεί να κατασκευαστεί πρόγραμμα το οποίο θα ελέγχει και θα παρουσιάζει αυτόματα, χωρίς παρέμβαση από άνθρωπο (απαιτείται μόνο έλεγχος) τις τιμές των μετρήσεων. Στον προγραμματισμό μπορεί επίσης να επιλεγεί το χρονικό διάστημα μεταξύ των μετρήσεων.



Εικόνα 54-Σημεία μέτρησης της πτώσης πίεσης

Εκτός από την πίεση θα θέλαμε να γνωρίζουμε και τη σύσταση των στερεών σωματιδίων τα οποία απορρίπτονται από την κλίνη κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της και τη σχέση τους με το αρχικό μείγμα. Γνωρίζοντας το ποσοστό κατά βάρος κάθε συστατικού το οποίο υπήρχε στο αρχικό μείγμα της κλίνης μπορούμε να ζυγίσουμε και να χωρίσουμε μέσω κατάλληλων φίλτρων τα υπολείμματα, ώστε να βρούμε τις μεταβολές.

14) Αποτελέσματα

Α. Περίπτωση 1

Στην περίπτωση αυτή, η οποία είναι η περίπτωση την οποία ελέγξαμε τους νόμους του Glicksman [27] στην προηγούμενη ανάλυση, θεωρούμε πως στην πραγματική εγκατάσταση υπάρχει απλά άμμος. Η άμμος αυτή θα μοντελοποιηθεί στο κρύο μοντέλο με τη χρήση χαλκού. Η μοντελοποίηση αυτή μας δίνει συνολικά τις πυκνότητες του κρύου μοντέλου:

Πυκνότητα	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**
Κλίνης	ρ_s	kg/m^3	8900
Αέρα	ρ_f	kg/m^3	1,143307692
Λόγος πυκνοτήτων	-	-	3,423076923

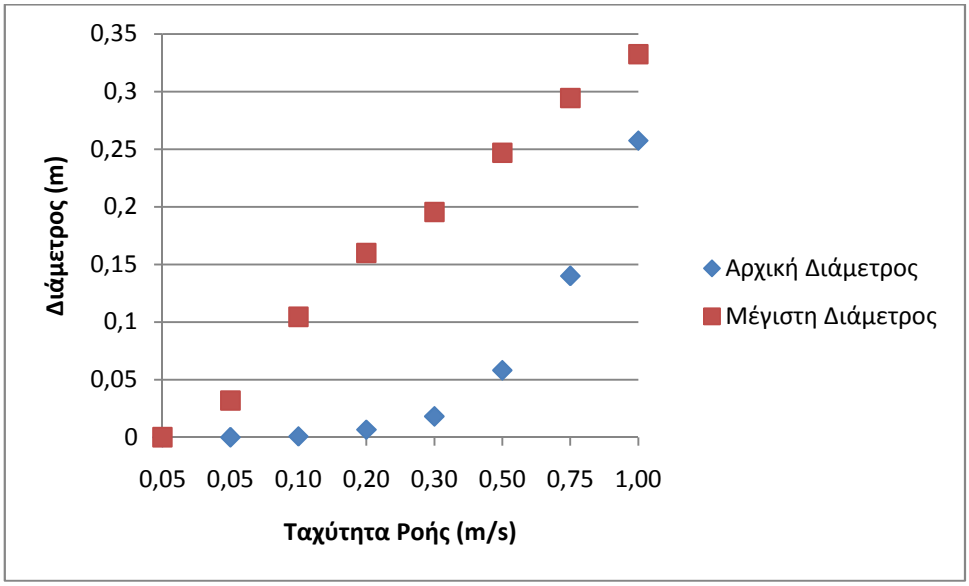
Τα υπόλοιπα γενικά μεγέθη της κλίνης έχουν ήδη βρεθεί στην προηγούμενη ανάλυση η οποία έγινε στο κεφάλαιο 10.1. Κατά την διάρκεια της ανάλυσης παρουσιάσαμε και ορισμένα ακόμα αριθμητικά αποτελέσματα για τη δοκιμή των αντίστοιχων σχέσεων καταλήγοντας τελικά στα παρακάτω μεγέθη:

	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Λόγος Αριθμού Froude	Fr	-	1,606
Λόγος Ταχυτήτων	-	-	1,606
Λόγος Παροχών	M	-	0,182
Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης	u_{mf}	m/s	0,0473
Μέσο Μέγεθος Σωματιδίων	d_p	m	0.000128
Ταχύτητα Πτώσης Σωματιδίων	u_t	m/s	1,69
Ελάχιστη Ταχύτητα Slugging	$u_{b,ms}$	m/s	0,202
Ελάχιστο Ύψος Slugging	H_s	m	1,189792

Γνωρίζοντας αυτά τα μεγέθη μπορούμε, χρησιμοποιώντας το μοντέλο των Davidson και Harrison και τις εξισώσεις οι οποίες αναφέρθηκαν προηγουμένως κατά την ανάλυση της ροής να υπολογίσουμε τα απαραίτητα μεγέθη για τις φυσαλίδες. Τα μεγέθη αυτά είναι συναρτήσεις της ταχύτητας ροής και κατά συνέπεια θα παρουσιαστούν συναρτήσει διάφορων τιμών της ταχύτητας αυτής:

Ταχύτητα Ροής (m/s)	Αρχική Διάμετρος Φυσαλίδας	Μέγιστη Διάμετρος Φυσαλίδας
0,04731	0	0
0,05	2,04E-06	0,0317
0,1	0,000786	0,1044
0,2	0,00660	0,1598
0,3	0,01809	0,1955
0,5	0,05807	0,2468
0,75	0,13992	0,2943
1	0,25720	0,3324

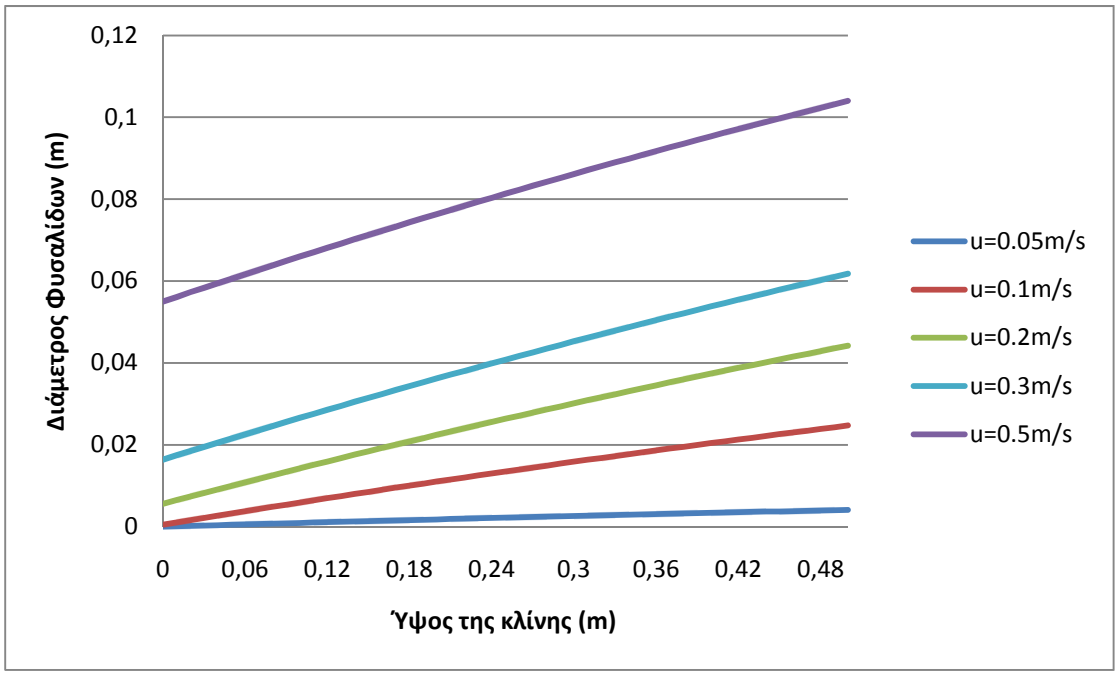
Παρατηρούμε πως και η αρχική και η μέγιστη διάμετρος της φυσαλίδας αυξάνονται καθώς η ταχύτητα ροής αυξάνεται. Μάλιστα, η αρχική διάμετρος αυξάνεται πολύ πιο έντονα από τη μέγιστη διάμετρο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, όπου η μέγιστη διάμετρος ακολουθεί σχεδόν γραμμική αύξηση ενώ η αρχική διάμετρος υπερβολική. Δεν έγινε δοκιμή σε ταχύτητες μεγαλύτερες του 1m/s γιατί ήδη η αρχική διάμετρος είναι περίπου 0,25m ίση δηλαδή με την ακτίνα της εγκατάστασης. Τα τοιχώματα λοιπόν παίζουν ήδη σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά της φυσαλίδας και περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μεγάλο σφάλμα αν συνεχιστεί η χρήση αυτών των τύπων.



Εικόνα 55-Μεταβολή αρχικής και μέγιστης διαμέτρου φυσαλίδας συναρτήσει της ταχύτητας ροής

Παρατηρούμε επίσης πως ύστερα από την αύξηση της ταχύτητας σε 0,2m/s η αρχική διάμετρος της φυσαλίδας αυξάνεται δραματικά. Παρατηρούμε επίσης πως η ταχύτητα εμφάνισης slugging στην εγκατάσταση την οποία υπολογίσαμε θα είναι

περίπου 0,2m/s. Άρα, η αύξηση της αρχικής διαμέτρου σηματοδοτεί την αρχή της επιρροής των τοιχωμάτων στη φυσαλίδα, αλλά και το ότι η αρχική ταχύτητα είναι τόση ώστε οι φυσαλίδες ενώνονται πλέον μεταξύ τους μόλις βγουν από τις οπές του διασκορπιστή.



Εικόνα 56-Διάμετρος φυσαλίδων στο κρύο μοντέλο συναρτήσει της ταχύτητας ροής και του ύψους της εγκατάστασης

Το διάγραμμα έγινε μόνο για τις ταχύτητες μέχρι 0,5m/s γιατί στη συνέχεια οι διάμετροι αυξάνονται ιδιαίτερα σε σχέση με τις μικρότερες ταχύτητες δυσκολεύοντας την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Διαπιστώσαμε εξάλλου πως σε μεγαλύτερες ταχύτητες τα τοιχώματα αρχίζουν να παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της φυσαλίδας.

Η διάμετρος της φυσαλίδας είναι συνάρτηση όχι μόνο της ταχύτητας ροής αλλά και της απόστασης της φυσαλίδας από τον πυθμένα της κλίνης, δηλαδή στην περίπτωση του κρύου μοντέλου της απόστασης από τον διασκορπιστή. Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα η διάμετρος των φυσαλίδων αυξάνεται σε σχέση με το ύψος της εγκατάστασης. Η αύξηση αυτή ισχύει για κάθε ταχύτητα της εγκατάστασης.

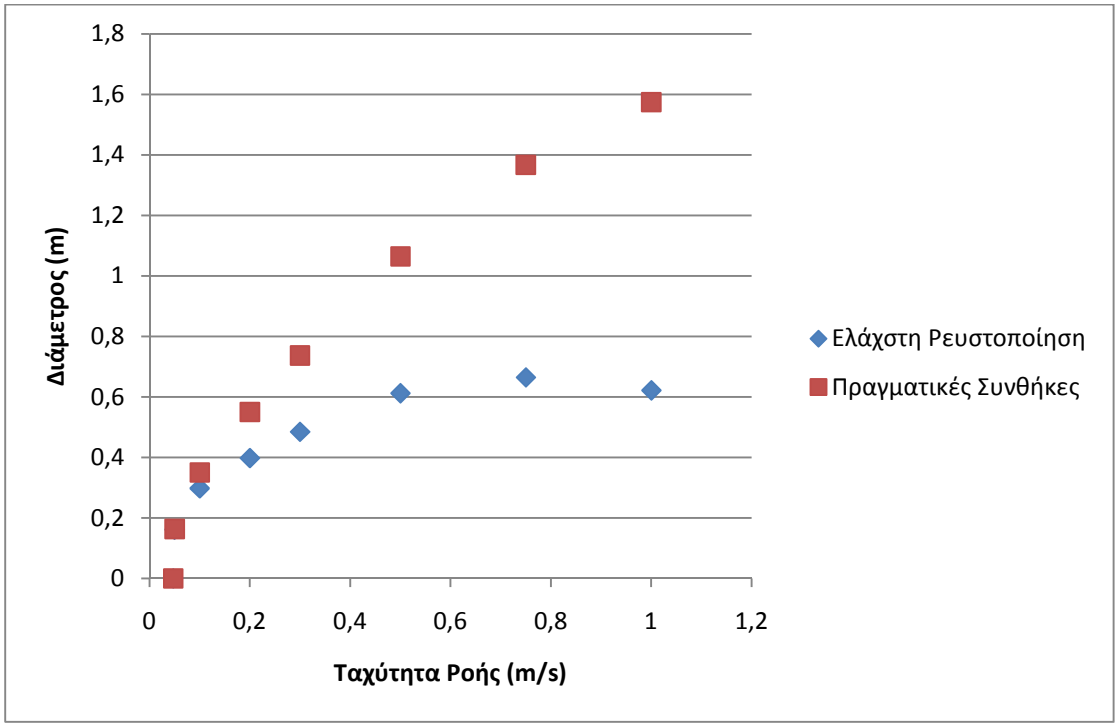
Παρατηρούμε επίσης πως το μέγεθος των φυσαλίδων αυξάνει ανάλογα με την ταχύτητα ροής. Η αύξηση αυτή γίνεται πιο έντονη καθώς η ταχύτητα ροής αυξάνεται, δηλαδή η διαφορά των διαμέτρων μεταξύ μιας ταχύτητας και της προηγούμενης είναι πιο μεγάλη όσο πιο μεγάλες είναι αυτές οι ταχύτητες.

Διαπιστώνουμε πως το μέγεθος της φυσαλίδας εξαρτάται έντονα από την αρχική διάμετρο. Η αρχική διάμετρος αυξάνεται όσο η ταχύτητα ροής αυξάνεται, έτσι οι φυσαλίδες σε μια μεγαλύτερη ταχύτητα ροής έχουν πάντα μεγαλύτερο

μέγεθος. Οι φυσαλίδες επίσης δεν φαίνεται να περιορίζονται από τη μέγιστη διάμετρο, καθώς σε καμία περίπτωση δεν την πλησιάζουν. Το τελευταίο βέβαια μπορεί να αλλάξει σε μεγαλύτερες ταχύτητες όπου η αρχική και η τελική διάμετρος δεν έχουν τόσο μεγάλη διαφορά.

Για την ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης υπάρχουν δύο σχέσεις τις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε, καθεμία από τις οποίες εξαρτάται από την ταχύτητα ροής. Κάθε σχέση χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα όρια, τα οποία όμως εξαρτώνται από την διάμετρο της φυσαλίδας, δηλαδή από το ύψος από το επίπεδο του διασκορπιστή. Η χρήση των σχέσεων εκτός των ορίων τους δίνει αρκετά μεγάλα σφάλματα. Το όριο μεταξύ των δύο σχέσεων είναι ο λόγος $\frac{d_b}{D}$ ο οποίος θα πρέπει να πάρει την τιμή 0,125.

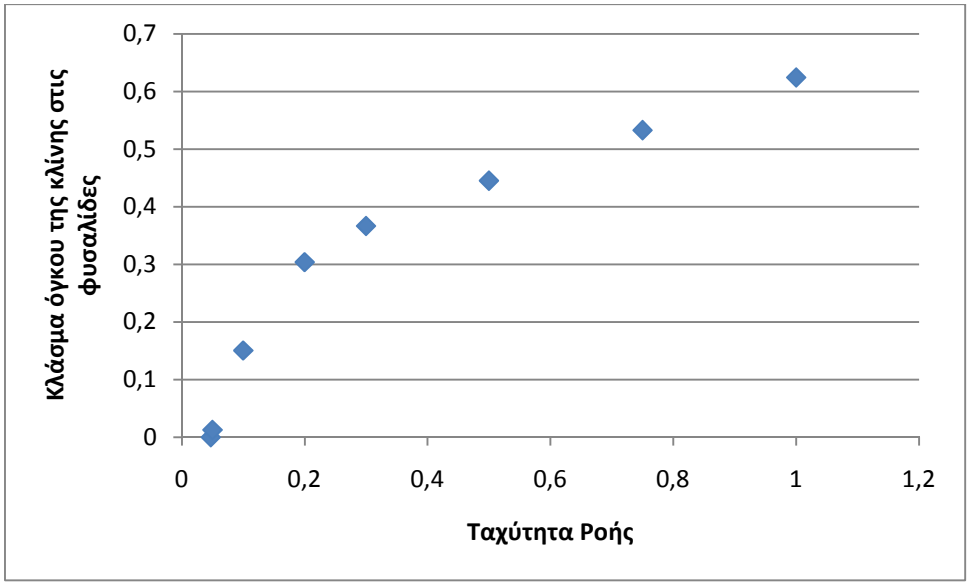
Για την ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας θα χρησιμοποιήσουμε την απλή σχέση του Werther καθώς η εγκατάσταση είναι σχετικά μικρή και οι σχέσεις των Kunii και Levenspiel για κλίνες βιομηχανικής κλίμακας δεν θα δώσουν ακριβέστερα αποτελέσματα από τη σχέση αυτή. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται τόσο από την ταχύτητα ροής όσο και από την ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας στην ελάχιστη ρευστοποίηση. Επομένως εξαρτάται έμμεσα και από το ύψος της εγκατάστασης. Η γενική όμως μορφή του διαγράμματος θα παραμείνει η ίδια ανεξάρτητα από το ύψος. Θα κατασκευάσουμε το διάγραμμα σε ύψος 0,3m δηλαδή περίπου στη μέση της εγκατάστασης.



Εικόνα 57-Ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας στα 0.3m ύψος

Όπως βλέπουμε σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ροής κοντά δηλαδή στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης οι δύο ταχύτητες ανόδου, όπως ήταν αναμενόμενο, σχεδόν ταυτίζονται. Όσο όμως αυξάνει η ταχύτητα τόσο περισσότερο οι τιμές τους απομακρύνονται. Όπως αναμενόταν οι ταχύτητες αυτές αυξάνουν όσο αυξάνει και η ταχύτητα ροής, με την εξαίρεση της τελευταίας τιμής της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης.

Γνωρίζοντας την ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων μπορούμε να υπολογίσουμε το κλάσμα όγκου της κλίνης το οποίο βρίσκεται σε φυσαλίδες. Ο τρόπος υπολογισμού αυτού του κλάσματος διαφέρει ανάλογα με την ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων. Στο κρύο μοντέλο διαπιστώσαμε πως για χαμηλές ταχύτητες οι φυσαλίδες έχουν μεσαία ταχύτητα ανόδου και μάλιστα σε ταχύτητες πολύ κοντά στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης πλησιάζουν στις ταχύτητες αργών φυσαλίδων. Για ταχύτητες άνω των 0,2m/s όμως οι φυσαλίδες γίνονται ταχείς χωρίς μεγάλο νέφος.



Εικόνα 58-Κλάσμα όγκου των φυσαλίδων συναρτήσει της ταχύτητας ροής

Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε πως το ποσοστό των φυσαλίδων οι οποίες βρίσκονται κάθε στιγμή στην κλίνη αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ταχύτητα ροής. Για ταχύτητες πάνω από 0,8m/s οι φυσαλίδες καταλαμβάνουν περισσότερο από το μισό της πυκνής φάσης. Η άνοδος είναι εντονότερη στις χαμηλότερες ταχύτητες, ενώ όταν η ταχύτητα αυξηθεί πέραν των 0,5m/s η άνοδος περιορίζεται, μάλλον λόγω του μεγέθους της κλίνης.

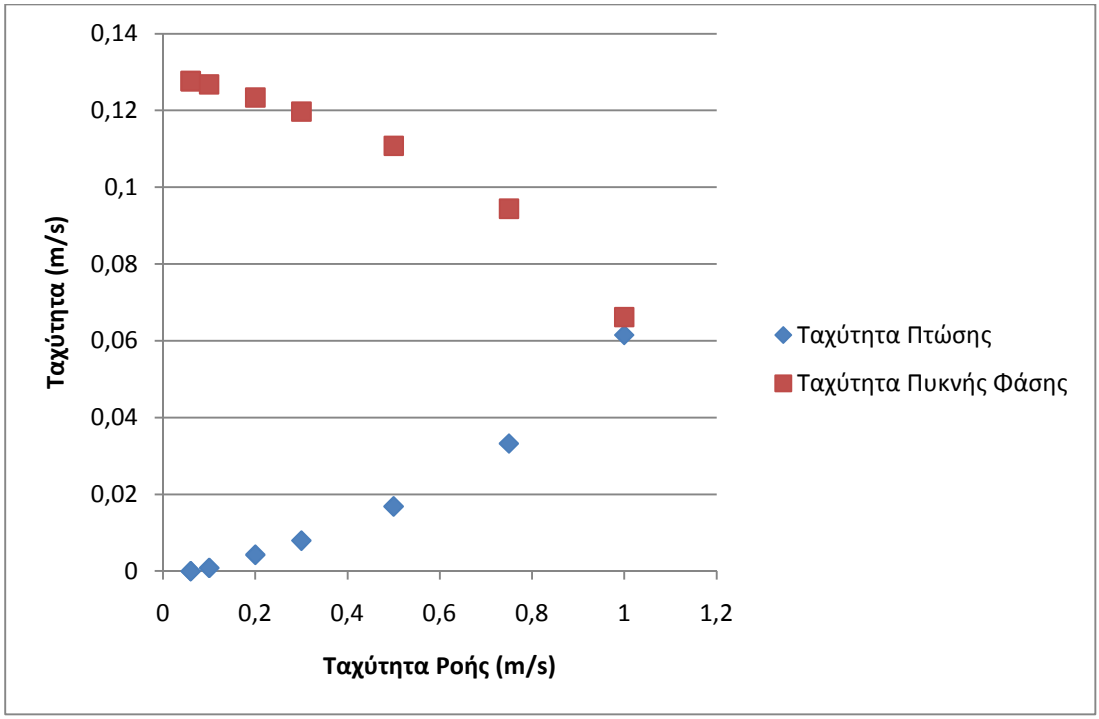
Το μοντέλο Kunii-Levenspiel ασχολείται και με το ποσοστό του όγκου το οποίο βρίσκεται σε κάθε φάση, αλλά και με την κατανομή των στερεών της κάθε φάσης. Παραθέτουμε στη συνέχεια τα αποτελέσματα των εξισώσεων υπολογισμού των διάφορων φάσεων του κρύου μοντέλου με βάση το μοντέλο αυτό.

Ταχύτητα Ροής	Λόγος όγκων νέφους και φυσαλίδας	Λόγος όγκων αναταραχής και φυσαλίδας	Λόγος όγκων πυκνής φάσης και φυσαλίδας	Όγκος στερεών νέφους προς όγκο φυσαλίδας	Όγκος στερεών πυκνής φάσης προς όγκο φυσαλίδας
0,0473	-3	0,0175	1	-1,591	-
0,05	5,106	0,0176	0,9870	2,7344	38,684
0,1	1,551	0,0178	0,8469	0,8376	2,1717
0,2	1,028	0,0181	0,6908	0,5585	0,6601
0,3	0,795	0,0184	0,6269	0,4339	0,4842
0,5	0,596	0,0192	0,5464	0,3285	0,3319
0,75	0,541	0,0206	0,4564	0,2998	0,1635
1	0,585	0,02251	0,3619	0,3244	-0,0079

Όπως βλέπουμε από τον παραπάνω πίνακα, στις χαμηλές ταχύτητες κοντά στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης το ποσοστό των φυσαλίδων στην πυκνή φάση είναι ελάχιστο. Αυξάνεται όμως όσο η ταχύτητα ροής αυξάνεται, μειώνοντας το ποσοστό των υπόλοιπων φάσεων. Παρατηρούμε επίσης πως οι φυσαλίδες σε χαμηλότερες ταχύτητες έχουν μεγαλύτερο νέφος, αλλά μικρότερη αναταραχή.

Οι αρνητικές τιμές οι οποίες προκύπτουν για τους λόγους στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης μπορούν να εξηγηθούν από τις ιδιότητες της κλίνης. Στην ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης δεν υπάρχουν ακόμα φυσαλίδες για αυτό και οι τιμές αυτές είναι τόσο διαφορετικές από τις άλλες. Η μόνη αρνητική τιμή η οποία δεν οφείλεται στην ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης είναι η τιμή του όγκου των στερεών της πυκνής φάσης προς τον όγκο της φυσαλίδας για ταχύτητα ροής 1m/s. Η τιμή αυτή οφείλεται στην επιρροή των τοιχωμάτων στη φυσαλίδα καθώς οι φυσαλίδες ήδη (όπως φαίνεται από τις προηγούμενες τιμές) καταλαμβάνουν πολύ μεγάλο χώρο.

Το μοντέλο Kunii – Levenspiel απαιτεί επίσης να βρούμε την ταχύτητα της πυκνής φάσης και την ταχύτητα καθοδικής κίνησης των στερεών. Τα αποτελέσματα για αυτά τα δύο μεγέθη είναι:



Εικόνα 59-Ταχύτητες των σωματιδίων συναρτήσει της ταχύτητας ροής

Στο προηγούμενο διάγραμμα βλέπουμε τη σχέση της ταχύτητας της πυκνής φάσης και της ταχύτητας πτώσης των σωματιδίων. Παρατηρούμε πως κοντά στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης, η ταχύτητα πτώσης είναι σχεδόν μηδενική ενώ η ταχύτητα της πυκνής φάσης είναι ίση με την θεωρητική. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς τα σωματίδια μόλις βρίσκονται στην αρχή της κίνησής τους. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα ροής η καθοδική κίνηση των σωματιδίων γίνεται εντονότερη μειώνοντας την ταχύτητα της πυκνής φάσης.

B. Περίπτωση 2

Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε πως η κλίνη της πραγματικής εγκατάστασης αποτελείται από δύο υλικά, την άμμο και τον καταλύτη της κλίνης τον ολιβίνη. Είχαμε διαπιστώσει πως αν χρησιμοποιήσουμε χαλκό για την μοντελοποίηση της άμμου, τότε χρειαζόμαστε μόλυβδο για την ρευστοποίηση του ολιβίνη. Υποθέτοντας μια κατανομή βάρους 60% για την άμμο και 40% για τον ολιβίνη και προφανώς την αντίστοιχη κατανομή για το κρύο μοντέλο, οδηγούμαστε στις εξής πυκνότητες για το κρύο μοντέλο:

Πυκνότητα	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Κλίνης	ρ_s	kg/m^3	9726,305609
Αέρα	ρ_f	kg/m^3	1,143307692
Λόγος πυκνοτήτων	-	-	3,423076923

Επειδή όμως ο μόλυβδος είναι αρκετά τοξικός για τον άνθρωπο είχαμε δοκιμάσει επίσης την αντικατάσταση του ολιβίνη από τον χαλκό, οπότε οι πυκνότητες της κλίνης (για την ίδια κατανομή μάζας) γίνονται:

Πυκνότητα	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Κλίνης	ρ_s	kg/m^3	7795,620438
Αέρα	ρ_f	kg/m^3	0,9289375
Λόγος πυκνοτήτων	-	-	2,78125

Οι πυκνότητες των δύο αυτών αντικαταστάσεων των υλικών είναι όπως βλέπουμε αρκετά διαφορετικές. Για το λόγο αυτό θα ελέγξουμε τα αποτελέσματα των δύο αυτών περιπτώσεων και τις διαφορές τις οποίες προκαλεί η μεταβολή στην πυκνότητα, τόσο του υλικού της κλίνης όσο και του αέρα.

Ωστόσο, πριν βρούμε τα αποτελέσματα θα πρέπει να υπολογίσουμε την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης του νέου συστήματος. Η ταχύτητα την οποία γνωρίζουμε αφορά κλίνη με υλικό το οποίο αποτελείται αποκλειστικά από άμμο. Η εισαγωγή όμως άλλου υλικού προκάλεσε μεταβολή στην πυκνότητα, η οποία μετέβαλε την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης.

Για διευκόλυνση των υπολογισμών θα θεωρήσουμε πως το μέσο μέγεθος των σωματιδίων παραμένει σταθερό και ίσο με 498μm. Η παραδοχή αυτή δεν αποτελεί μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα καθώς το υλικό της κλίνης αποτελείται αποκλειστικά από στερεά σωματίδια κατηγορίας B ενώ και τα δύο στερεά στην πραγματικότητα έχουν μια ευρεία κατανομή μεγεθών.

Η ταχύτητα αυτή θα υπολογιστεί με τη βοήθεια της ακριβέστερης εξίσωσης υπολογισμού της, όπως αυτή βρέθηκε από την προηγούμενη ανάλυση, της απλοποιημένης ακριβούς εξίσωσης:

$$u_{mf} = \frac{d_p^2(\rho_s - \rho_g)g}{150\mu} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi^2}{1 - \varepsilon_{mf}}$$

Όπως γνωρίζουμε από τους νόμους δυναμικής ομοιότητας του Glicksman η σφαιρικότητα φ πρέπει να είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις και είχαμε βρει την τιμή της ίση με 0,7. Η ελάχιστη κενότητα ρευστοποίησης εξαρτάται μόνο από το φ και η τιμή της προκύπτει ίση με 0,466. Η κινηματική συνεκτικότητα όμως του αέρα μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Για τους 800°C γίνεται ίση με $3,625*10^{-5}$ kg/m*s.

Η πυκνότητα της εγκατάστασης προκύπτει ίση με τον αρμονικό μέσο της πυκνότητας των δύο συνιστωσών, δηλαδή:

$$\frac{1}{\rho_\mu} = \frac{x_{\acute{\alpha}\mu\mu o\varsigma}}{\rho_{\acute{\alpha}\mu\mu o\varsigma}} + \frac{x_{o\lambda i\beta}}{\rho_{o\lambda i\beta}} \rightarrow \rho_\mu = 2810{,}81 kg/m^3$$

Επομένως η νέα ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης της εγκατάστασης προκύπτει ίση με **0,0956m/s.** Η αντίστοιχη ταχύτητα του κρύου μοντέλου προκύπτει από τη χρήση του λόγου των ταχυτήτων (ο οποίος παραμένει ίδιος λόγω της αποκλειστικής εξάρτησής του από το λόγο γεωμετρικής ομοιότητας των δύο εγκαταστάσεων) ίση με **0,595m/s**. Η ελάχιστη αυτή κενότητα ρευστοποίησης είναι κοινή και για τις δύο περιπτώσεις αντικατάστασης καθώς η πυκνότητα και το μέγεθος σωματιδίων της πραγματικής εγκατάστασης παραμένουν σταθερά.

Μεταβολή έχουμε και στο απαραίτητο μέσο μέγεθος των σωματιδίων για να επιτευχθεί η δυναμική ομοιότητα στην κλίνη. Για τη διαμόρφωση χαλκού-μολύβδου το μέγεθος των σωματιδίων είναι ίσο με **137μm**, ενώ για τη διαμόρφωση σιδήρου-χαλκού είναι ίσο με **153μm**. Η μείωση δηλαδή της πυκνότητας με σταθερή την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης προκαλεί αύξηση της απαραίτητης διαμέτρου των σωματιδίων. Η ίδια η αύξηση όμως της ελάχιστης ταχύτητας οδηγεί ήδη σε αύξηση της επιθυμητής διαμέτρου των σωματιδίων (ήταν 128μm στην προηγούμενη περίπτωση).

Μια σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο διαφορετικών επιλογών στερεών είναι η τελική ταχύτητα πτώσης τους. Ως γνωστόν, η ταχύτητα αυτή σηματοδοτεί την ταχύτητα ροής η οποία θα παρασύρει τα σωματίδια μέσου μεγέθους και όσα είναι μικρότερης διαμέτρου εκτός της κλίνης, κάτι επιζήμιο για μια αναβράζουσα κλίνη. Βλέπουμε πως για την ύπαρξη χαλκού και μολύβδου στην εγκατάσταση η ταχύτητα αυτή είναι ίση με **1,93m/s** ενώ για χαλκό και σίδηρο είναι **1,99m/s**. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος των σωματιδίων το οποίο είναι μεγαλύτερο στη δεύτερη περίπτωση και για αυτό η τελική ταχύτητα πτώσης μειώνεται.

Παρατηρούμε όμως πως σε σχέση με την προηγούμενη ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης η οποία ήταν 0,0473m/s, η αύξηση της ελάχιστης ταχύτητας (η οποία προέρχεται από την αύξηση της πυκνότητας της κλίνης στην εγκατάσταση) έχει αυξήσει την τελική ταχύτητα πτώσης (η οποία ήταν 1,68m/s). Τα σωματίδια δηλαδή ρευστοποιούνται πιο δύσκολα αλλά παρασύρονται και πιο δύσκολα αν έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα ρευστοποίησης.

Η διάμετρος των φυσαλίδων την οποία υπολογίζουμε στις δύο κατανομές στερεών **δεν** μεταβάλλεται καθόλου. Οι φυσαλίδες γενικά δεν εξαρτώνται από την πυκνότητα άμεσα, αλλά έμμεσα μέσω της μεταβολής της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης. Η αλλαγή της διαμόρφωσης της κλίνης δεν οδήγησε σε μεταβολή της ελάχιστης ταχύτητας, αλλά μόνο σε μεταβολή του λόγου των πυκνοτήτων. Επομένως, οι φυσαλίδες δεν επηρεάζονται καθόλου από τα υλικά τα οποία θα

τοποθετήσουμε εντός της κλίνης, όσο η διαμόρφωσή τους δεν μεταβάλλει τις ταχύτητες του συστήματος.

Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τα μεγέθη του μοντέλου K-L. Τα μεγέθη εξαρτώνται από την πυκνότητα των υλικών στο βαθμό που αυτή μεταβάλλει την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης του συστήματος. Η επιλογή δηλαδή των υλικών τα οποία θα τοποθετήσουμε στην κλίνη δεν επηρεάζεται από τις ιδιότητες ροής του συστήματος αλλά περισσότερο από τη διαθεσιμότητα και το κόστος των υλικών.

Η μόνη επιρροή την οποία μπορεί να έχει είναι στο επιθυμητό μέγεθος των σωματιδίων, το οποίο αυξάνεται όσο η πυκνότητα μειώνεται και στη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ροής η οποία μειώνεται όσο η πυκνότητα μειώνεται. Επειδή εμείς θέλουμε αύξηση και των δύο αυτών μεγεθών, πρέπει να βρεθεί η βέλτιστη λύση για την πυκνότητα καθώς τα δύο μεγέθη είναι αντικρουόμενα.

C. Περίπτωση 3

Στο τμήμα αυτό θα ελέγξουμε την επιρροή την οποία θα έχει η μεταβολή του μέσου μεγέθους των σωματιδίων στην εγκατάσταση. Αναμένουμε ιδιαίτερες μεταβολές στη ροή, καθώς η μεταβολή αυτού του μεγέθους οδηγεί σε μεταβολή της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης, από την οποία εξαρτώνται τα μεγέθη τα οποία αφορούν τις φυσαλίδες και το μοντέλο K-L.

Για να προσομοιώσουμε την μεταβολή θα εισάγουμε στην εγκατάσταση ένα ποσοστό 20% κ. β. Stabilat. Το Stabilat ως καύσιμο βιομάζας έχει χαμηλή πυκνότητα και δεν μπορεί να κοπεί σε πολύ μικρά σωματίδια όπως τα υπόλοιπα στερεά. Συνήθως τα σωματίδια του είναι μεγαλύτερα από 1mm. Η εισαγωγή του επομένως στην εγκατάσταση θα οδηγήσει σε αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων.

Θεωρούμε πως το Stabilat το οποίο εισάγεται στην κλίνη έχει μέσο μέγεθος σωματιδίων 1,5mm. Το μέσο μέγεθος της κλίνης μπορεί έτσι να προκύψει από τον αρμονικό μέσο των δύο αυτών διαμέτρων:

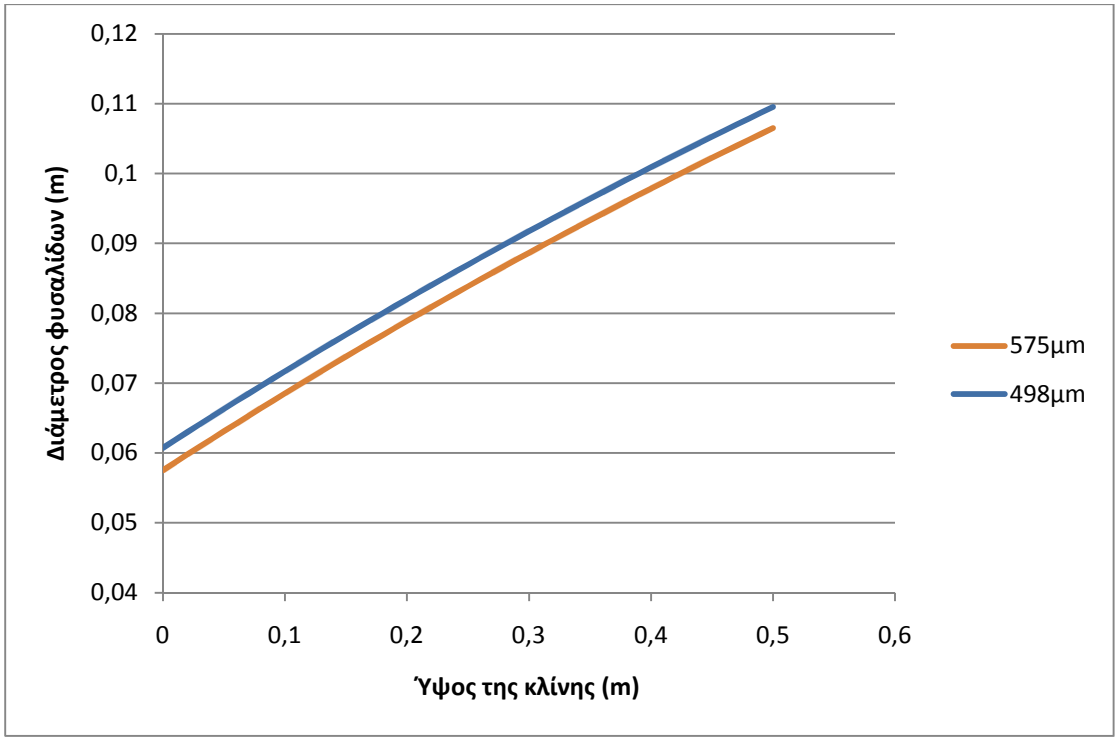
$$\frac{1}{d_{pm}} = \frac{0.8}{d_{pbed}} + \frac{0.2}{d_{pStabilat}} \rightarrow d_{pm} = 575\mu m$$

Με τον ίδιο τρόπο προκύπτει και η νέα πυκνότητα της εγκατάστασης ίση με 1748,95kg/m^3. Η αντίστοιχη πυκνότητα του κρύου μοντέλου (αντικαθιστώντας την άμμο με χαλκό, τον ολιβίνη με μόλυβδο και το Stabilat με γυαλί) προκύπτει ίση με 6021,85kg/m^3.

Για τη σύγκριση της κατάστασης αυτής με μια άλλη η οποία θα έχει διαφορετική ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης και διαφορετικό μέσο μέγεθος σωματιδίων θεωρούμε μια κατάσταση όπου η εισαγωγή αντίστοιχης ποσότητας Stabilat στην εγκατάσταση δεν μετέβαλλε τη μέση διάμετρο των σωματιδίων, η οποία παραμένει ίση με 498μm. Επιλέγουμε την κατάσταση αυτή για να εκμηδενίσουμε την επίδραση της πυκνότητας στα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν.

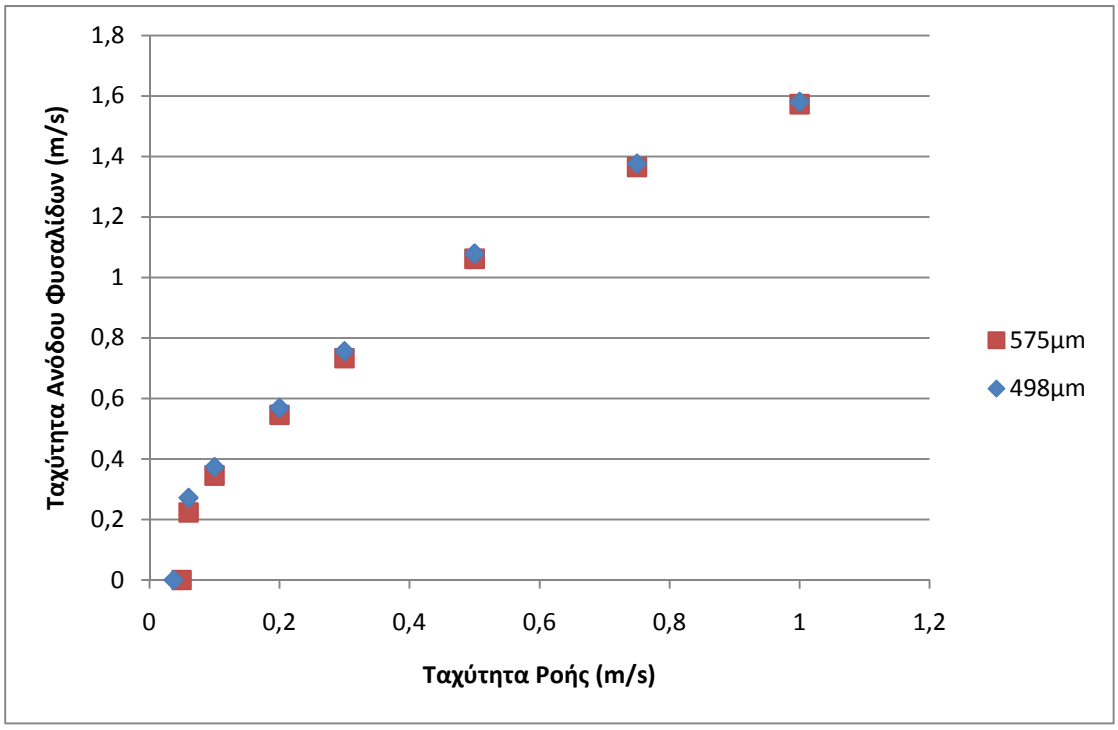
Η πρώτη κατάσταση αποκτά έτσι ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης ίση με 7,92cm/s στην πραγματική εγκατάσταση, η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα **4,93cm/s** στο κρύο μοντέλο. Οι αντίστοιχες ταχύτητες για τη δεύτερη κατάσταση (χωρίς αλλαγή μεγέθους σωματιδίων) είναι 5,95cm/s και **3,7cm/s** αντίστοιχα. Βλέπουμε λοιπόν πως η μεταβολή του μέσου μεγέθους των σωματιδίων περίπου κατά 75μm οδηγεί σε μεταβολή της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης κατά 25% στο κρύο μοντέλο, μεταβολή η οποία είναι αρκετά σημαντική.

Η πρώτη διαφορά η οποία οφείλεται στην αλλαγή του μέσου μεγέθους των σωματιδίων βρίσκεται στην ταχύτητα πτώσης. Τα μικρότερα σωματίδια (τα αντίστοιχα σωματίδια στο κρύο μοντέλο έχουν μέση διάμετρο 137,5μm) έχουν ταχύτητα πτώσης 1,4m/s ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια (αντίστοιχη διάμετρος στο κρύο μοντέλο 158,5μm) ταχύτητα πτώσης ίση με 1,61m/s. Τα μεγαλύτερα σωματίδια δηλαδή παρασύρονται ευκολότερα κάτι το οποίο αναμέναμε.



Εικόνα 60-Μεταβολή της διαμέτρου σωματιδίων ανάλογα με το ύψος της κλίνης για δυο διαφορετικές μέσες διαμέτρους

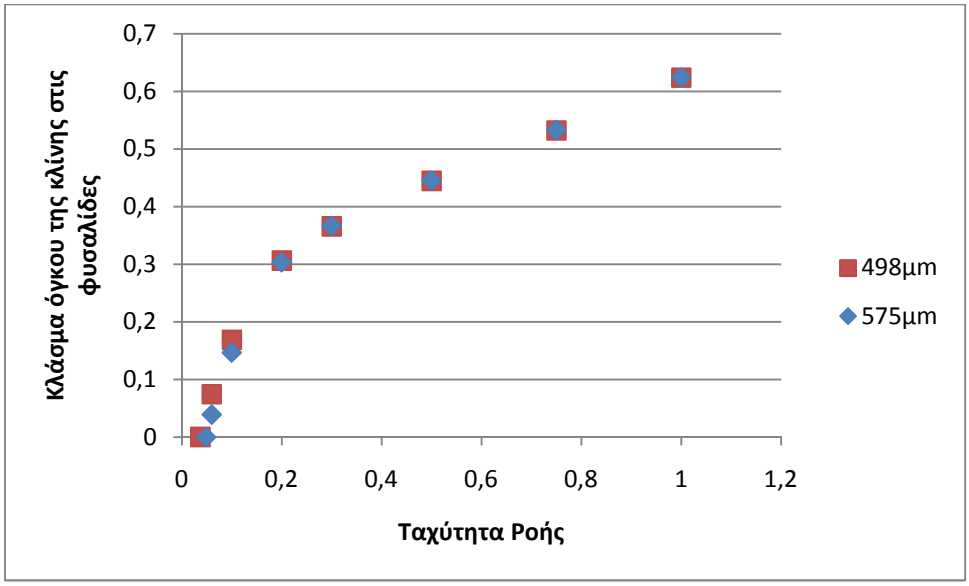
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η ταχύτητα των φυσαλίδων σε σχέση με το μέγεθος των στερεών σωματιδίων για ταχύτητα ροής 0,5m/s. Η διαφορά μεταξύ των διαμέτρων είναι μικρή, αλλά φαίνεται πως τα μικρότερα σωματίδια επιτρέπουν στις φυσαλίδες να γίνουν ελαφρώς μεγαλύτερες λόγω του μικρότερου βάρους τους. Οι φυσαλίδες μπορούν έτσι να παραμερίσουν τα σωματίδια ευκολότερα.



Εικόνα 61-Ταχύτητα ανόδου φυσαλίδων για δύο διαφορετικές διαμέτρους φυσαλίδων

Στο προηγούμενο διάγραμμα βλέπουμε τη διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων ανόδου των φυσαλίδων στα δύο διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων. Παρατηρούμε πως στις χαμηλότερες ταχύτητες ροής οι φυσαλίδες έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα ανόδου όταν τα σωματίδια είναι μικρότερα. Η διαφορά όμως αυτή των ταχυτήτων ανόδου μειώνεται όσο η ταχύτητα ροής αυξάνεται. Αναμένουμε πως σε μεγαλύτερες ταχύτητες ροής η άνοδος των φυσαλίδων θα γίνεται με την ίδια ταχύτητα ανεξάρτητα του μεγέθους των σωματιδίων.

Τα ελαφρύτερα σωματίδια ασκούν μικρότερη δύναμη στην ανερχόμενη φυσαλίδα και μπορούν να παρασυρθούν πιο εύκολα. Έτσι η ίδια ανοδική δύναμη από τον αέρα καταλήγει σε μεγαλύτερη ταχύτητα για τη φυσαλίδα. Αν όμως η ταχύτητα ροής αυξηθεί αρκετά, τότε η επίδραση της βαρύτητας (και του μεγέθους των σωματιδίων) γίνεται μικρότερη και η ταχύτητα γίνεται η ίδια ανεξάρτητα του μεγέθους των σωματιδίων.



Εικόνα 62-Όγκος των φυσαλίδων στην κλίνη για δύο διαφορετικές διαμέτρους σωματιδίων

Και στο κλάσμα όγκου των φυσαλίδων στην πυκνή φάση παρατηρούμε το ίδιο φαινόμενο, όπως και με τις ταχύτητες ανόδου. Το μέγεθος των σωματιδίων παίζει ουσιαστικό ρόλο μόνο στις χαμηλότερες ταχύτητες ροής. Όσο η ταχύτητα ροής αυξάνεται, τόσο τα κλάσματα πλησιάζουν το ένα στο άλλο ώσπου έχουν την ίδια τιμή.

Στις χαμηλότερες ταχύτητες πάντως βλέπουμε ότι στην κλίνη των μεγαλύτερων σωματιδίων οι φυσαλίδες καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο στην πυκνή φάση από την άλλη. Ο σχηματισμός δηλαδή των φυσαλίδων στην κλίνη αυτή είναι πιο δύσκολος και το μέγεθός τους είναι περιορισμένο.

14.1) Προϋπολογισμός της εγκατάστασης

Για την υποστήριξη της εγκατάστασης θα κατασκευαστεί ένα πλαίσιο από προφίλ αλουμινίου, τα οποία είναι μικρού βάρους και μπορούν να κοπούν εύκολα στο επιθυμητό μέγεθος. Ταυτόχρονα έχουν την απαραίτητη μηχανική αντοχή για τη στήριξη μιας εγκατάστασης τέτοιου ύψους.

Μαζί με τα προφίλ αλουμινίου θα πρέπει να παραγγελθούν και τα απαραίτητα συνδετικά στοιχεία για την κατασκευή του πλαισίου. Τα συνδετικά αυτά στοιχεία είναι: T-slot Nuts για τη σύνδεση των προφίλ αλουμινίου μεταξύ τους και angle brackets για τη στήριξή τους. Η σύνδεση του αντιδραστήρα και των υπόλοιπων στοιχείων της εγκατάστασης θα γίνει με δακτυλίους.

Για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση προβλέπεται η παραγγελία προφίλ αλουμινίου μήκους 30m διαστάσεων 40x40 τύπου προφίλ 8. Επίσης προβλέπεται η παραγγελία 40 T-slot Nuts και των αντίστοιχων βιδών για τη στήριξή τους. Με βάση

τη συγκεκριμένη διαμόρφωση της εγκατάστασης θα παραγγελθούν 20 σετ υποστηρικτικών γωνιών μαζί με τις απαραίτητες βίδες για τη στήριξή τους.

Για την κατασκευή και παραγγελία αυτών προβλέπονται τα παρακάτω έξοδα:

	Τύπος	**Μήκος (m)**	**Τιμή**	**Τελικό κόστος** (€)
Προφίλ Αλουμινίου	Profile 8 40x40	30	27,03€/m	810,9
		Ποσότητα		
T-slot Nuts	8 St M8	40	0,77€/τεμ.	30,8
Angle Brackets	Σετ 8 40x40	20	7,03€/τεμ.	140,6
Κοχλίες	Button-Head Screw M8x50	50	0,63€/τεμ.	31,5
Καλύμματα	8 40x40 μαύρο	10	0,82€/τεμ.	8,2

Ο αντιδραστήρας σύμφωνα με τον παρόντα σχεδιασμό θα αποτελείται από τρία μέρη. Θα είναι κατασκευασμένος εξ' ολοκλήρου από διάφανο πλεξιγκλάς, το οποίο είναι υλικό αρκετά μεγάλης μηχανικής αντοχής και φθηνό. Το διάφανο πλεξιγκλάς μας επιτρέπει επίσης να δούμε τη ρευστοποιημένη κλίνη στο εσωτερικό. Το πάχος του πλεξιγκλάς θα διατηρηθεί σταθερό σε όλο το μήκος του αντιδραστήρα και θα είναι ίσο με 5mm ώστε να αντέξει την εσωτερική πίεση από τον αέρα και τα σωματίδια.

Το κάτω μέρος (η πυκνή φάση) θα αποτελείται από ένα κυλινδρικό σωλήνα, ενιαίας διαμέτρου 0,5m. Στο κάτω μέρος της πυκνής φάσης θα τοποθετηθεί το τμήμα του διασκορπιστή. Η πυκνή φάση λόγω του σχετικά μικρού ύψους της και την απουσία κάποιας εσωτερικής διαμόρφωσης θα κατασκευαστεί εξ' ολοκλήρου σε ένα τμήμα.

Το επόμενο τμήμα θα έχει μια κωνική διαμόρφωση, ώστε η διατομή σταδιακά να αυξηθεί. Σκοπός της αύξησης της διατομής είναι η κατακράτηση περισσότερων στερεών σωματιδίων με μείωση της ταχύτητας του αέρα. Μια σταδιακή αύξηση της διατομής, όπως η κωνική διαμόρφωση προσφέρει τις μικρότερες απώλειες ροής και για αυτό επιλέχθηκε για την εγκατάσταση. Το τμήμα αυτό προβλέπεται να έχει σχετικά μικρό ύψος και για αυτό δεν θα χωριστεί σε μικρότερα μέρη.

Το άνω τμήμα της εγκατάστασης (freeboard) θα είναι και αυτό ένας κυλινδρικός σωλήνας από πλεξιγκλάς. Η διάμετρός του θα είναι μεγαλύτερη και ίση με 0,5m. Το τμήμα αυτό δεν έχει την έντονη ροή της ρευστοποιημένης κλίνης, αλλά θα έχει μεγαλύτερο ύψος. Για αυτό το λόγο (μείωση της καταπόνησης και διευκόλυνση της μεταφοράς) θα χωριστεί σε δύο μικρότερα τμήματα.

Τα τμήματα θα ενώνονται μεταξύ τους μέσω φλάντζας. Η φλάντζα θα κατασκευαστεί και αυτή από πλεξιγκλάς και θα συγκολληθεί επάνω στο σωλήνα. Η

διαδικασία αυτή είναι απλή και φθηνή ενώ εξασφαλίζει ικανοποιητικό αποτέλεσμα, τόσο από άποψη μηχανικής αντοχής όσο και από άποψη στεγανότητας. Οι φλάντζες θα συνδέονται μεταξύ τους με κοχλίες.

Για την κατασκευή του αντιδραστήρα προτείνεται η παραγγελία 2m σωλήνα από πλεξιγκλάς διαμέτρου 0,5m και παραγγελία ίσης ποσότητας σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 0,75m. Οι φλάντζες γύρω από τις ενώσεις των σωλήνων θα κατασκευαστούν από φύλλο πλεξιγκλάς στο οποίο θα διανοιχτούν τρύπες για να περάσουν κοχλίες κατάλληλης αντοχής. Για την συγκόλληση του πλεξιγκλάς θα αγοραστεί επίσης ειδική συγκολλητική ουσία.

Στο άνω μέρος του freeboard θα διανοιχτεί οπή από την οποία θα φεύγει ο αέρας. Η οπή θα έχει διάμετρο 0,1m και σε αυτήν θα τοποθετηθεί σωλήνας από πλεξιγκλάς ίδιας διαμέτρου. Ο σωλήνας αυτός θα καταλήγει σε έναν κυκλώνα, ο οποίος θα κατακρατεί τα σωματίδια και θα αποβάλλει τον αέρα. Η κατασκευή του κυκλώνα θα ανατεθεί σε εξωτερικό μηχανουργείο και προβλέπεται να στοιχίσει επιπλέον 1000€.

Συνολικά δηλαδή το πλεξιγκλάς το οποίο θα παραγγείλουμε θα είναι οι εξής ποσότητες για τις οποίες προβλέπονται οι εξής τιμές:

	Εξωτερική Διάμετρος (m)	**Πάχος (mm)**	**Μήκος (m)**	**Τιμή**	**Τελικό Κόστος (€)**
	0,1	5	1	33€/m	66
Σωλήνας Πλεξιγκλάς	0,5	5	2	350€/m	700
	0,75	5	2	500€/m	1000
Υλικό Συγκόλλησης Πλεξιγκλάς					200
	Επιφάνεια (m^2)				
Φύλλο Πλεξιγκλάς	12,383	5		28€/m^2	350

Το μέγεθος το οποίο θα μετρηθεί στην εγκατάσταση είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ διάφορων σημείων της εγκατάστασης. Επειδή μετρούμε τη διαφορά πίεσης, θα χρησιμοποιήσουμε διαφορικούς μετρητές. Κάθε ένα από τα όργανα αυτά θα έχει διαφορετικό εύρος μέτρησης της πίεσης ανάλογα με τη θέση στην οποία θα τοποθετηθεί και την αναμενόμενη πτώση πίεσης.

Το πιο σημαντικό τμήμα της εγκατάστασης είναι η ρευστοποιημένη κλίνη. Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια την πτώση πίεσης σε αυτό το τμήμα. Για το λόγο αυτό στο τμήμα αυτό θα τοποθετήσουμε 2 διαφορικούς μετρητές πίεσης (είναι δυνατή και η τοποθέτηση ενός μόνο μετρητή αν το κόστος της εγκατάστασης είναι πολύ υψηλό). Ένας

επιπλέον μετρητής πίεσης θα τοποθετηθεί για να μετρηθεί η πτώση πίεσης στο διανομέα, πριν την είσοδο του αέρα στην εγκατάσταση.

Στο κωνικό τμήμα και στην περιοχή απεμπλοκής θα τοποθετηθούν δύο όργανα μέτρησης της πίεσης, γιατί η ροή εκεί είναι λιγότερο σημαντική. Πρέπει επίσης να τοποθετηθεί ένας μετρητής πίεσης στον κυκλώνα, έτσι ώστε να έχουμε τη συνολική πτώση πίεσης στην εγκατάσταση. Συνολικά θα μπορούσαμε δηλαδή να τοποθετήσουμε 6 διαφορικούς μετρητές πίεσης. Από τα άλλα μεγέθη, θα μπορούσαμε να μετράμε την παροχή του αέρα στην είσοδο.

Οι διαφορικοί μετρητές τους οποίους θα τοποθετήσουμε έχουν τιμή περίπου 275€ το τεμάχιο. Αν αγοραστούν έξι συσκευές το συνολικό κόστος είναι 1250€. Ακόμα και αν τοποθετηθεί ένας μετρητής στην πυκνή περιοχή θα ήταν χρήσιμο να αγοραστούν έξι στην περίπτωση που υπάρχει ανάγκη αύξησησς της ακρίβειας στην περιοχή αυτή.

Οι μετρητές πίεσης θα δίνουν σήμα σε σύστημα απόκτησης πληροφοριών (data acquisition system – DAQ). Το σύστημα αυτό θα συνδέεται με έναν υπολογιστή μέσω θύρας USB. Δεν κρίθηκε απαραίτητη η αγορά ηλεκτρονικού υπολογιστή για λειτουργία σε αντίξοες συνθήκες, καθώς δεν προβλέπεται έντονη διαφυγή των σωματιδίων στο περιβάλλον. Θα αγοραστεί όμως ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής, κατά προτίμηση φορητός για τον άμεσο έλεγχο των μετρήσεων.

Για τον έλεγχο και την καλύτερη παρουσίαση των πληροφοριών προτείνεται η χρήση του λογισμικού DAQ της National Instruments, του Labview. Θα αγοραστεί η βασική άδεια χρήσης του λογισμικού από την εταιρεία. Ο εξοπλισμός λήψης και μετατροπής των αποτελεσμάτων θα αγοραστεί επίσης από την ίδια εταιρεία ώστε να είναι συμβατός με το πρόγραμμα. Το ηλεκτρονικό σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί είναι σχεδιασμένο ειδικά για μετρήσεις πίεσης.

	Ποσότητα		**Τιμή**	**Τελικό κόστος**
Μετρητές Πίεσης	6		275€/pce	1650
		Άδεια		
NI Labview		Βασική	1.250 €	1250
Φορητός υπολογιστής	1			600
		Μοντέλο		
Σύστημα DAQ	1		1350€/pce	1350
		NI-9235		
Υποδοχή συστήματος DAQ	1	NI-cDaq-9172	1000€/pce	1000

Όσον αφορά τα στερεά τα οποία θα αποτελούν το υλικό της κλίνης αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν εκείνα που αντιστοιχούν στην πρώτη περίπτωση, στην αντικατάσταση δηλαδή της άμμου με χαλκό, καθώς η πίεση στην οποία βρίσκεται η κλίνη είναι σχεδόν όμοια με την ατμοσφαιρική και κατά συνέπεια οι απώλειες αέρα λόγω της διαφοράς πίεσης στην ατμόσφαιρα θα είναι μικρότερες. Ταυτόχρονα, δεν απαιτείται η ακριβή στεγανοποίηση της εγκατάστασης ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες πίεσης.

Κατά συνέπεια τα υλικά τα οποία θα χρησιμοποιηθούν είναι: ο χαλκός, ο μόλυβδος (παρά την τοξικότητά του, το γυαλί και ο μαγνητίτης. Οι τιμές των υλικών αυτών μπορούν να προσδιοριστούν (με αρκετή ακρίβεια αλλά οι τιμές των μετάλλων μεταβάλλονται συνεχώς, επομένως οι ακόλουθες τιμές δεν μένουν σταθερές) ανά κιλό:

Υλικό	**Τιμή/kg υλικού**
Χαλκός	40
Μόλυβδος	70
Γυαλί	6
Μαγνητίτης	10

Αρχικά, κρίνεται καλύτερη η παραγγελία μικρής ποσότητας των αναφερόμενων υλικών για να γίνει η αρχική δοκιμή της εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό προτείνονται οι παρακάτω παραγγελίες υλικών, καθώς και το αντίστοιχο κόστος τους:

Υλικό κλίνης			
	Βάρος	Τιμή/kg υλικού	
Χαλκός	30	40	1200€
Μόλυβδος	15	70	1050€
Γυαλί	25	6	150€
Μαγνητίτης	20	10	200€

Εκτός από το κόστος των υλικών θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και το κόστος απόκτησης των εξαρτημάτων για την κατασκευή των συστημάτων εισαγωγής του μείγματος στην εγκατάσταση και απαγωγής των υπολειμμάτων. Τα κύρια συστατικά για αυτά τα συστήματα είναι οι τρεις περιστροφικές βαλβίδες, το δοχείο προσαγωγής των υπολειμμάτων και ο τροφοδότης ατέρμονα κοχλία. Το κόστος του δοχείου προσαγωγής της τέφρας είναι πολύ μικρότερο από το κόστος του ατέρμονα κοχλία, έτσι τα κόστος του συστήματος είναι πολύ μικρότερο από του συστήματος προσαγωγής. Το κόστος του πρώτου εκτιμάται σε περίπου 200€ ενώ το κόστος του δεύτερου εκτιμάται πως θα πενταπλασιαστεί και θα φτάσει τα 1000€. Οι τιμές αυτές είναι εκτιμήσεις, οι οποίες δείχνουν όμως την τάξη του κόστους της εγκατάστασης.

Ταυτόχρονα και η κατασκευή του διασκορπιστή, η οποία θα γίνει σε εξωτερικό μηχανουργείο αναμένεται να έχει υψηλό κόστος. Ο διασκορπιστής εξάλλου θα είναι κατασκευασμένος εξ' ολοκλήρου από μέταλλο, αντίθετα με την υπόλοιπη εγκατάσταση. Επομένως, μπορούμε να εκτιμήσουμε πως το κόστος του θα είναι ανάλογο με το σύστημα προσαγωγής του μείγματος το οποίο εκτιμήσαμε σε 1000€.

Με την ανάθεση της κατασκευής της εγκατάστασης σε εξωτερικό μηχανουργείο, θα πρέπει να συνυπολογίσουμε το εργατικό κόστος της κατασκευής. Επειδή κάποια τμήματα, ιδιαίτερα ο κυκλώνας και ο διασκορπιστής απαιτούν ιδιαίτερα δύσκολη και τεχνική εργασία, το συνολικό εργατικό κόστος θα είναι περίπου 2000€.

Επειδή στον υπολογισμό του κόστους της κλίνης έγιναν αρκετές εκτιμήσεις, και επειδή μπορεί να προκύψουν νέες ανάγκες κατά την κατασκευή της κλίνης, θα συνυπολογίσουμε ένα επιπλέον κόστος 3000€ το οποίο θα καλύψει τις ενδεχόμενες αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Ταυτόχρονα, επειδή οι τιμές των υλικών μεταβάλλονται θα λειτουργήσει και ως ασφαλιστική βαλβίδα για τις μελλοντικές αυξήσεις.

Συνολικά, το τελικό κόστος της εγκατάστασης είναι:

Τελικό κόστος	
Υλικό πλαισίου	1022€
Πλεξιγκλάς	1656€
Κυκλώνας	1000€
Μετρητικό Σύστημα	6250€
Υλικό Κλίνης	2600€
Διασκορπιστής	1000€
Σύστημα απαγωγής	200€
Σύστημα Προσαγωγής	1000€
Εργατικό κόστος	2000€
Επιπλέον Έξοδα	3000€
Συνολικό Κόστος	**19728€**

15) Σύμβολα

A_b εμβαδόν κλίνης

Ar αδιάστατος αριθμός Αρχιμήδη

C_s συγκέντρωση στερεού

D διάμετρος ρευστοποιημένης κλίνης

d_p διάμετρος σωματιδίων

d_b διάμετρος φυσαλίδων

d_{b0} αρχική διάμετρος φυσαλίδων

d_{bm} μέση διάμετρος φυσαλίδων

D_{sv} συντελεστής διάχυσης κάθετης ανάμιξης

D_{sh} συντελεστής διάχυσης οριζόντιας ανάμιξης

f_c κλάσμα όγκου του νέφους προς τον όγκο της φυσαλίδας

f_w κλάσμα όγκου της αναταραχής προς τον όγκο της φυσαλίδας

f_e κλάσμα όγκου της πυκνής φάσης προς τον όγκο της φυσαλίδας

g σταθερά επιτάχυνσης της βαρύτητας της Γης ίση με 9,81m/s

G_s παροχή μάζας του στερεού

G_f παροχή μάζας του καυσίμου

H ύψος πυκνής φάσης

H_t ύψος από το διασκορπιστή ως την έξοδο

H_f ύψος της περιοχής απεμπλοκής

H_{fr} ύψος της κωνικής περιοχής

H_s

L_{mf} ελάχιστο ύψος ρευστοποίησης

N_{or} αριθμός ακροφυσίων

p πίεση

p_f πίεση στην περιοχή απεμπλοκής

p_d πίεση στο διασκορπιστή

R_b ακτίνα φυσαλίδας

R_c ακτίνα νέφους

Re_p αριθμός Reynolds των στερεών σωματιδίων

$Re_{p,mf}$ Αριθμός Reynolds των στερεών στις συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης

Re_t αριθμός Reynolds σωματιδίων με τελική ταχύτητα πτώσης

t χρόνος

T_B θερμοκρασία της κλίνης

u_0 ταχύτητα ροής του αερίου

u_b ταχύτητα ανόδου φυσαλίδας σε κλίνη

u_{br} ταχύτητα ανόδου μιας φυσαλίδας

$u_{b,s}$ ταχύτητα ενός slug

$u_{b,ms}$ ελάχιστη ταχύτητα ροής ώστε να εμφανιστεί slugging

u_e ταχύτητα πυκνής φάσης

u_{mf} ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης

u_f ανοδική ταχύτητα του ρευστού στην πυκνή φάση

u_s ταχύτητα πτώσης σωματιδίων

u_t τελική ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων

V_b όγκος φυσαλίδων

V_c όγκος νέφους

V_{or} παροχή όγκου από ένα ακροφύσιο

W_B βάρος στερεών σωματιδίων στην κλίνη

Y_g παροχή μάζας παραγόμενου αερίου

z ύψος της κλίνης (μεταβλητή)

β συντελεστής οπισθέλκουσας

δ κλάσμα όγκου των φυσαλίδων στην κλίνη

Δ κενό τμήμα διασκορπιστή

Δp_b πτώση πίεσης στην κλίνη

Δp_d πτώση πίεσης στο διασκορπιστή

ε κενότητα

ε_{mf} κενότητα σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης

η βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης

μ ιξώδες του ρευστού

ν κινηματική συνεκτικότητα

ρ_s πυκνότητα του στερεού στην κλίνη

ρ_f πυκνότητα του αερίου στην κλίνη

φ σφαιρικότητα

Φ δυναμικό ταχύτητας

ψ συνάρτηση ροή

16) Βιβλιογραφία

1. *World Energy Council,* Survey of Energy Resources 2007, 2007
2. *Α. Ζερβός,* Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, *Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2007*
3. *International Energy Agency,* World Energy Outlook 2006, 2006
4. *Κυριάκος Δ. Πανόπουλος,* 'Ολοκληρωμένος Σχεδιασμός Θερμοχημικών Διεργασιών Ενεργειακής Αξιοποίησης Βιομάζας', Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2005
5. *S. Kakerezi, K. Lata, S.T. Coelho, Traditional Biomass Energy, Improving Its Use and Moving to Modern Energy Use, International Conference for Renewable Energies, Bonn 2004*
6. *L. Bass, T.E. Bilderback, M.A. Powell,* Composting: A Guide to Managing Organic Yard Wastes, *North Carolina Cooperative Extension Service*
7. *P. Beigl, G. Wassermann, F. Schneider and S. Salhofer*, 'Forecasting Municipal Solid Waste Generation in Major European Cities', European Commision 2004
8. *C-Tech Innovation Ltd.,* 'Thermal Methods of Wasted Municipal Treatment', www.capenhurst.com, 2003
9. *OPET Report 4,* 'Review of Finnish Biomass Gasification Technologies', Technical Research Centre of Finland, Espoo 2002
10. *Hannu Holopainen,* 'Lomellina II, a new generation RDF power plant in Italy', *Power-Gen Europe 2006, Koelnmesse, Cologne, Germany, May 30 – June 1, 2006*
11. *M. Campoy, A. Gomez-Barea, F.B. Vidal, P. Ollero,* Air–steam gasification of biomass in a fluidised bed: Process optimisation by enriched air, *Fuel Processing Technology, 2009*
12. *M. Morris, L. Waldheim,* Energy Recovery from Solid Waste Fuels Using Advanced Gasification Technology, *Waste Management 18, pp. 557-564, 1998*
13. *University of California Riverside,* 'Technology Evaluation and Economic Analysis of Waste Tire Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction', California Integrated Waste Management Board, Publication #620-06-004
14. *Stefan Hamel, Holger Hasselbach, Steffen Weil, Wolfgang Krumm,* Autothermal two-stage gasification of low-density waste-derived fuels, *Energy 32, pp. 95-107, 2007*
15. *R. Zevenhoven,* Energy and Recovered Materials from Waste, *Postgraduate Course Ene-47.200/2002, Espoo, September 2-4, 2002*
16. *Matti Nieminen, '*Gasification of Biomass and Waste Derived Fuels For Industrial Applications', Technical Research Centre of Finland (VTT)
17. *Ayhan Demirbas, '*Combustion characteristics of different biomass fuels', Progress in Energy and Combustion Science 30, pp. 219-230, 2004

18. *E. Natarajan, A. Nordin, A.N. Rao,* 'Overview of Combustion and Gasification of Rice Husk in Fluidised Bed Reactors', Biomass and Bioenergy Vol. 14, Nos. 5/6, pp. 533-546
19. *T. A. Milne, R. J. Evans, N. Abatzoglou, '*Biomass Gasifier Tars: Their Nature, Formation and Conversion, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, NREL/TP-570-25357, November 1998
20. *D. Kunii, O. Levenspiel, Fluidization Engineering 2nd edition,* Butterworth-Heinemann, 1991
21. *S. C. Saxena, G. J. Vogel, '*Segregation and fluldization characteristics of a dolomite bed with a range of particle sizes and shapes', Chemical Engineering Journal 14, pp. 59-63, 1977
22. *D. C. Chitester, R. M. Kornosky, L. Fan, J. P. Danko,* 'Characteristics of fluidization at high pressure', Chemical Engineering Science 39, pp. 253-261, 1984
23. *P. Garcia-Ibanez, A. Cabanillas, J.M. Sanchez*, Gasification of leached orujillo (olive oil waste) in a pilot plant circulating fluidized bed reactor. Preliminary results, *Biomass and Bioenergy 27, pp. 183-194, 2004*
24. *M. J. Gluckman, J. Yerushalmi, A. M. Squires,* 'Fluidization Technology', volume 2, McGraw-Hill, New York 1976
25. *D. Geldart,* 'Types of Gas Fluidization', Powder Technology 7, pp. 285-292, 1973
26. *Herhof GMBH, Helector S. A., '*POLYgeneration through gasification utilising STABILAT', 2009
27. *L. R. Glicksman,* Scaling Relationships for Fluidized Beds, *Chemical Engineering Science Vol. 39, No. 9, pp. 1373-1379, 1984*
28. *L. R. Glicksman,* Scaling Relationships for Fluidized Beds, *Chemical Engineering Science Vol. 43, No. 6, pp. 1419-1421, 1987*
29. *L. R. Glicksman, M. Hyre, K. Woloshun,* Simplified Scaling Relationships for Fluidized Beds, *Powder Technology vol. 77, pp. 177-199, 1993*
30. *R. Di Felice, S. Rapagna, P. U. Foscolo, L. G. Gibilaro ,* 'Cold Modeling Studies of Fluidized Bed Reactors', Chemical Engineering Science 47, pp. 2233-2238, 1992
31. *H. Chang, M. Louge,* 'Fluid dynamic similarity of circulating fluidized beds', Powder Technology 70, pp. 259-270, 1992
32. *Perry's Chemical Engineers Handbook,* 8th Edition, McGraw-Hill Companies Inc., 2008
33. *C. Y. Wen, Y. H. Yu, '*A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity', AIChE Journal 12, pp. 610-612, 1966
34. *J. F. Richardson, H. Harrison,* 'Fluidization', Academic Press, New York 1971

35. *S. P. Babu, B. Shah, A. Talwalkar,* 'Fluidization Correlations For Coal Gasification Materials - Minimum Fluidization Velocity and Fluidized Bed Expansion Ratio', AIChE Symp. Ser. 74, 1978
36. *J. R. Grace*, 'Handbook of Multiphase Systems', Hemisphere, Washington D.C., 1982
37. *F. A. Zens, D. F. Othmer,* 'Fluidization and Fluid Particle Systems', Van Nostrand Reinhold, New York, 1960
38. *J. F. Davidson, H. Harrison,* 'Fluidized Particles', Cambridge University Press, New York, 1963
39. *P. N. Rowe, B. A. Partridge,* 'An X-Ray Study of Bubbles in Fluidized Beds', Trans IChemE Vol. 75, December 1997
40. *B. Kozanoglu, E. K. Levy,* 'Wake fractions of small bubbles in gas fluidized beds', Powder Technology 68, pp. 285-286, 1991
41. *S. Mori, C. Y. Wen,* 'Estimation of bubble diameter in gaseous fluidized beds', AIChE Journal, Vol. 21, pp. 109-115, 1975
42. *J. Werther,* 'Scale-up modeling for fluidized bed reactors', Chemical Engineering Science, Volume 47, pp. 2457-2462, 8 June 1992
43. *R. Clift, J. R. Grace,* 'Fluidization', Academic Press, New York 1971
44. *G. B. Wallis,* 'One-Dimensional Two-Phase Flow', McGraw-Hill, New York, 1969
45. *J. Werther, O. Molerus,* 'The local structure of gas fluidized beds – II. The spatial distribution of bubbles', International Journal of Multiphase Flow Vol. 1, pp. 123-128, 1973
46. *K. Hilligardt, J. Werther,* 'Local Bubble gas hold-up and expansion of gas/solid fluidized beds', German Chemical Engineering 9, pp. 215-221, 1986
47. *P. S. B. Stewart, J. F. Davidson,* 'Slug flow in fluidized beds', Powder Technology 1, pp. 61-80, 1967
48. *R. M. Ormiston, F. R. G. Mitchell, J. F. Davidson,* 'The Velocities of Slugs in Fluidized beds', Chemical Engineering Research and Design, Vol. 43a, pp. 209-216, 1965
49. *J. Baeyens, D. Geldart,* 'An investigation into slugging fluidized beds', Chemical Engineering Science 29, pp. 255-265, 1974
50. *A. B. Whitehead,* 'Fluidization', Academic Press, New York 1971
51. *A. C. Hoffmann, J. G. Yates,* ' Experimental Observations of fluidized beds at elevated pressures', Chemical Engineering Communications 41, pp. 133-149, 1986
52. *A. Haider, O. Levenspiel,* 'Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles' , Powder Technology 58, pp. 63-70, 1989
53. *J. J. van Deemter,* 'Fluidization', Academic Press, New York 1971
54. *D. Bellgardt, J. Werther,* 'A Novel Method for the Investigation of Particle Mixing in Gas-Solid Systems', Powder Technology, 48, pp. 173-180, 1986

55. *D. Bellgardt, M. Schoessler, J. Werther,* 'Lateral Non-uniformities of Solids and Gas Concentrations in Fluidized Bed', Powder Technology 53, pp. 205-216, 1987
56. *P. N. Rowe, A. W. Nienow, L. Y. L. Cheung, '*A Quantitative Analysis of the Mixing of Two Segregating Powders of Different Density in a Gas-Fluidised Bed', Powder Technology 20, pp. 89-97, 1978
57. *P. N. Rowe, A. W. Nienow*, 'Particle Mixing and Segregation in Gas Fluidised Beds. A Review', *Powder Technology 15, pp.* 141 – 147, 1976
58. *P. N. Rowe, A. W. Nienow, '*Minimum Fluidization Velocity of Multi-component Particle Mixtures', Chemical Engineering Science, Vol. 30, pp. 1365-1349, 1975
59. *A. Sobolewski, J. Bandrowski,* 'Determination of Pressure Drop through Gas Distributors in Multistage Fluidized Bed Vessels', Chemical Engineering and Processing 33, pp. 419-428, 1994
60. *S.C. Saxena, A. Chatterjee, R.C. Patel,* 'Effect of Distributors on Gas-Solid Fluidization', Powder Technology 22, pp.191-198, 1979
61. *Chien-Song Chyang , Kelly Lieu, Shun-Sheng Hong*, 'The effect of distributor design on gas dispersion in a bubbling fluidized bed', Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers 39, pp. 685-692, 2008
62. *J. F. Davidson, O. G. Schuler,* 'Bubble formation at an orifice in a viscous liquid', Chemical Engineering Research and Design 75, pp. S105-S115, 1997
63. *R. Tabery, K. Dangtran,* 'Fluidized Bed Device for Combustion of Low-melting Fuels', International Publication Number WO 90/13773, 15 November 1990
64. *D. Boland, Q. A. W. Al-Salim, D. Geldart, '*Static electrification in fluidized beds', Chemical Engineering Science, Vol 24, pp 1389-1390, 1969
65. *D. Boland, D. Geldart, '*Electrostatic Charging in Gas Fluidised Beds', Powder Technology 5, 1971
66. *L. Korovesis, Diplome Thesis, IVD Universität Stuttgart, s.n. 2008*
67. *Andreas Kreuzeder, Christoph Pfeifer, Hermann Hofbauer,* 'Fluid-Dynamic Investigations in a Cold Model for a Dual Fluidized Bed Biomass Steam Gasification Process: Optimization of the Cyclone', 2007 ECI Conference on The 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering, Vol. RP4, Article 112, 2007
68. *Γιώργος Μπεργελές,* 'Πηγές, Διασπορά και Έλεγχος Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης', Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006
69. *C. D. Cooper, F. C. Alley,* 'Air Pollution Control: A Design Approach', Waveland Press, Prospect Heights, Illinois, 1986
70. *Μ. Φούντη,* Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης, *Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2005*

71. *A. Charitos, C. Hawthorne, A. Bidwe, L. He, G. Scheffknecht, '*Design of a dual fluidized bed system for the post-combustion removal of CO_2 using CaO. Part II: Scaled Cold Model Investigation
72. *K.W. Kwant,* Status of Gasification in countries participating in the IEA Bioenergy gasification activity, *International Energy Agency, March 2001*
73. *New Hampshire Department of Environmental Services,* Municipal Composting of Yard Waste, 2007
74. *K. Maniatis,* Progress in Biomass Gasification: An Overview, *Directorate General for Energy and Transport, European Commission*
75. *B.K. Shibler, D.A. Martin,* 'Design and Construction of a Laboratory-scale Fluidized Bed Reactor', United States Department of the Interior, Bureau of Mines, Report of Investigations 6209, 1963
76. *J.J. Ramirez, J.D. Martinez, S.L. Petro,* 'Basic Design of a Fluidised Bed Gasifier for Rice Husk on a Pilot Scale', Latin American Applied Research 37:299-306
77. *Donglai Xie, C. Jim Lim, John R. Grace, Alaa-Eldin M. Adris, '*Gas and Particle Circulation in an Internally Circulating Fluidized Bed Membrane Reactor Cold Model', *Chemical Engineering Science* (2009), doi:10.1016/j.ces.2009.02.032
78. *S.A. Nair, A.J.M. Pemen, K. Yana, F.M. van Gompel, H.E.M. van Leuken, E.J.M. van Heesch, K.J. Ptasinski, A.A.H. Drinkenburg,* 'Tar removal from biomass-derived fuel gas by pulsed corona discharges', Fuel Processing Technology Vol. 84 (2003), pp. 161–173
79. *Jeffrey R. Rode, D. E. Charhut,* 'High Capacity Ash System for Waste Coal Fluidized Bed Boiler'*, Power Gen International, 6-9 December 2005*
80. *D. Kunii, O. Levenspiel,* 'Fluidization Engineering 1st edition', John Wiley & Sons Inc., New York 1969
81. *C. Freda, G. Canneto, P. Mariotti, E. Fanelli, A. Molino, G. Braccio,'* Cold model testing of an internal circulating fluid bed gasifier',
82. *D. Ross, R. Noda, M. Horio, A. Kosminski, P. Ashman, P. Mullinger,* 'Axial gas profiles in a bubbling fluidised bed biomass gasifier', Fuel 86, pp.1417-1429, 2007
83. *J. P. Constantineau, J. R. Grace, C. J. Lim, G. G. Richards,* 'Generalized bubbling–slugging fluidized bed reactor model
84. *H. Cui, J. R. Grace,* 'Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow aspects', Chemical Engineering Science 62, pp. 45-55, 2007
85. *S. Mori, C. Y. Wen,* 'Estimation of bubble diameter in gaseous fluidized beds', AIChE Journal Vol. 21 No. 1, pp. 109-115, 1975

17) Παράρτημα

17.1) Εικόνες

1) Σελ. 4: Ποσοστό συνεισφοράς των πηγών στην παγκόσμια κατανάλωση [1]
2) Σελ. 14: Παραγωγή Αστικών Αποβλήτων σε διαφορετικά βιοτικά επίπεδα [7]
3) Σελ. 16: Σχεδιάγραμμα της Εγκατάστασης Lomellina I [9]
4) Σελ. 20: Επεξεργασμένο Καύσιμο Βιομάζας Stabilat [14]
5) Σελ. 20: Κύρια Συστατικά του Stabilat όπως προέκυψαν από στατιστική ανάλυση [14]
6) Σελ. 22: Σχηματικό διάγραμμα πιθανών διεργασιών αεριοποίησης για βιομάζα [12]
7) Σελ. 29: Αντιδραστήρας Σταθερής Κλίνης στο Condens Oy, Φινλανδία [9]
8) Σελ. 31: Εγκατάσταση αεριοποιητή καθοδικής ροής στο Tervola, Φινλανδία [9]
9) Σελ. 32: Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης αεριοποιημένης κλίνης στο Jalasjarvi, Φινλανδία [16]
10) Σελ. 33: Εγκατάσταση αεριοποιημένης κλίνης ανοδικής ροής στο Jalasjarvi της Φινλανδίας [16]
11) Σελ. 39: Σχεδιάγραμμα της εγκατάστασης αεριοποιητή αναβράζουσας κλίνης στο Varkaus [9]
12) Σελ. 40: Εγκατάσταση αεριοποίησης ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία στο Lahti της Φινλανδίας [9]
13) Σελ. 44: Αλυσίδα Δημιουργίας Πισσών [4]
14) Σελ. 45: Κατανομή της συγκέντρωσης των κατηγοριών πισσών συναρτήσει της θερμοκρασίας [19]
15) Σελ. 47: Είδη Ρευστοποιημένων Κλινών [20]
16) Σελ. 56: Κατηγορίες Στερεών κατά Geldart [25]
17) Σελ. 57: Τρόποι ρευστοποίησης ανά κατηγορία σωματιδίου [20]
18) Σελ. 60: Διάγραμμα κατηγοριών ρευστοποίησης για κάθε κατηγορία ρευστών και για το πλήρες πεδίο των ταχυτήτων [20]
19) Σελ. 62: Σχεδιάγραμμα συστήματος εισόδου στην πραγματική εγκατάσταση [26]
20) Σελ. 65: Συνολικό διάγραμμα της πραγματικής εγκατάστασης με τις θέσεις μέτρησης θερμοκρασίας και πίεσης [26]
21) Σελ. 88: Κατανομή Πίεσης στην περιοχή της φυσαλίδας [47]
22) Σελ. 90: Κλάσμα αναταραχής σε διάφορα υλικά [39]
23) Σελ. 93: Ανακυκλοφορία μέσα στην κλίνη [45]
24) Σελ. 94: Εύρεση του ψ [46]
25) Σελ. 96: Μορφές slugging [49]
26) Σελ. 101: Τελική Ταχύτητα Πτώσης Σωματιδίων [52]
27) Σελ. 102: Μοντέλο K-L [20]
28) Σελ. 107: Εκτίμηση TDH για σωματίδια κατηγορίας Geldart A [37]
29) Σελ 114: Δημιουργία Φυσαλίδων πάνω από το διασκορπιστή: α) Πορώδης β) Διάτρητος γ) Με ακροφύσια δ) Με καπάκι [42]

30) Σελ. 116: Διάτρητοι διασκορπιστές για πειραματικές εγκαταστάσεις
31) Σελ. 117: Διασκορπιστής Tuyere και διαμόρφωσή του [61]
32) Σελ. 118: Διασκορπιστής οριζόντιων ακροφυσίων και διαμόρφωσή του [61]
33) Σελ. 124: Όψη του διανομέα όπως σχεδιάστηκε αρχικά
34) Σελ. 126: Εσωτερική ανακυκλοφορία που εκμεταλλεύεται ο διασκορπιστής [63]
35) Σελ. 127: Τομή διανομέα κρύου μοντέλου
36) Σελ. 128: Κάτοψη διανομέα - Περίπτωση 1η
37) Σελ. 129: Κάτοψη διανομέα - Περίπτωση 2η
38) Σελ. 130: Διαμόρφωση αγωγών - Εξαγωνικό σχήμα με μία οπή ανά πλευρά
39) Σελ. 131: Διαμόρφωση αγωγών - Εξαγωνικό σχήμα με δύο οπές ανά πλευρά
40) Σελ. 132: Διαμόρφωση αγωγών - Κυκλική διατομή με 4 οπές
41) Σελ. 132: Διαμόρφωση αγωγών - Κυκλική διατομή με 6 οπές
42) Σελ. 133: Διάταξη εισαγωγής καυσίμου για Stabilat [14]
43) Σελ. 136: Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης εισαγωγής καυσίμου
44) Σελ. 138: Τάση η οποία παρατηρείται στη φυσαλίδα: 1 είναι η κορυφή της και 2 ο πυθμένας [64]
45) Σελ. 141: Σχηματικό διάγραμμα του αντιδραστήρα
46) Σελ. 143: Τυπικό σχήμα κυκλώνα [67]
47) Σελ. 144: Σακκόφιλτρο τύπου 3M/FB 900 [16]
48) Σελ. 145: Κεραμικά φίλτρα της Madison [16]
49) Σελ. 149: Σχηματικό διάγραμμα γεωμετρικών μεγεθών τυπικού κυκλώνα
50) Σελ. 150: Εμπρόσθια όψη του κυκλώνα
51) Σελ. 151: Κάτοψη του κυκλώνα
52) Σελ. 153: Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης απαγωγής τέφρας
53) Σελ. 155: Θέσεις Μέτρησης της Θερμοκρασίας σε ένα αντιδραστήρα κλίνης με ανακυκλοφορία [23]
54) Σελ. 158: Σημεία μέτρησης της πτώσης πίεσης
55) Σελ. 160: Μεταβολή αρχικής και μέγιστης διαμέτρου φυσαλίδας συναρτήσει της ταχύτητας ροής
56) Σελ. 161: Διάμετρος φυσαλίδων στο κρύο μοντέλο συναρτήσει της ταχύτητας ροής και του ύψους της εγκατάστασης
57) Σελ. 162: Ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας στα 0.3m ύψος
58) Σελ. 163: Κλάσμα όγκου των φυσαλίδων συναρτήσει της ταχύτητας ροής
59) Σελ. 165: Ταχύτητες των σωματιδίων συναρτήσει της ταχύτητας ροής
60) Σελ. 169: Μεταβολή της διαμέτρου σωματιδίων ανάλογα με το ύψος της κλίνης για δυο διαφορετικές μέσες διαμέτρους
61) Σελ. 170: Ταχύτητα ανόδου φυσαλίδων για δύο διαφορετικές διαμέτρους φυσαλίδων
62) Σελ. 171: Όγκος των φυσαλίδων στην κλίνη για δύο διαφορετικές διαμέτρους σωματιδίων

17.2) Υπολογιστικά Φύλλα

α) Διαστάσεις της κλίνης: Οι διαστάσεις αυτές παραμένουν αναλλοίωτες για οποιαδήποτε διαμόρφωση των υλικών, καθώς προέρχονται από την επιλογή της διαμέτρου ίση με 0,5m.

Κρύο Μοντέλο							**Πραγματική Εγκατάσταση**			
				Γεωμετρική Ομοιότητα						
					Λόγος Ομοιότητας					
					2,58					
Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή				Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Διάμετρος Πυκνής Φάσης	D	m	0,5				Διάμετρος Πυκνής Φάσης	D	m	1,29
Διάμετρος Περιοχής Απεμπλοκής	D_f	m	0,75				Διάμετρος Περιοχής Απεμπλοκής	D_f	m	1,94
Ύψος Πυκνής Φάσης	H	m	0,5				Ύψος Πυκνής Φάσης	H	m	1,29
Επιφάνεια πυκνής Φάσης	A_b	m^2	0,507				Επιφάνεια πυκνής Φάσης	A_b	m^2	1,307
Ύψος Κωνικής Περιοχής	H_{fr}	m	0,748				Ύψος Κωνικής Περιοχής	H_{fr}	m	1,93
Ύψος Περιοχής Απεμπλοκής	H_f	m	1,05				Ύψος Περιοχής Απεμπλοκής	H_f	m	2,71
Συνολικό Ύψος	H_t	m	2,295				Συνολικό Ύψος	H_t	m	5,92

b) *Πυκνότητες της κλίνης*: Αναπτύξαμε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις δυναμικής ομοιότητας μεταξύ των υλικών της κλίνης και των υλικών τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο κρύο μοντέλο:

i. Ορίζουμε πως η πίεση εντός της κλίνης θα είναι ακριβώς ίση με την ατμοσφαιρική

Κρύο Μοντέλο							**Πραγματική Εγκατάσταση**			
				Λόγος Πυκνοτήτων						
					3,535928					
Μέγεθος	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**				**Μέγεθος**	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**
Θερμοκρασία	T	K	300				Θερμοκρασία	T	K	1073
Πίεση	P	Pa	100000				Πίεση	P	Pa	100000
Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	1,181				Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	0,334
Πυκνότητα Υλικού 1	ρ_{s1}	kg/m^3	9193,413				Πυκνότητα Άμμου	ρ_{s1}	kg/m^3	2600
Πυκνότητα Υλικού 2	ρ_{s2}	kg/m^3	11314,97				Πυκνότητα Ολιβίνη	ρ_{s2}	kg/m^3	3200
Πυκνότητα Υλικού 3	ρ_{s3}	kg/m^3	2475,15				Πυκνότητα Stabilat	ρ_{s3}	kg/m^3	700
Πυκνότητα Υλικού 4	ρ_{s4}	kg/m^3	4950,299				Πυκνότητα Πίσσας	ρ_{s4}	kg/m^3	1400

ii. Θεωρούμε στη συνέχεια το χαλκό ως αντίστοιχο υλικό της άμμου:

Κρύο Μοντέλο						**Πραγματική Εγκατάσταση**			
					Λόγος Πυκνοτήτων				
					3,423077				
Μέγεθος	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**	**Υλικό**		**Μέγεθος**	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**
Θερμοκρασία	T	K	300			Θερμοκρασία	T	K	1073
Πίεση	P	Pa	98455,94			Πίεση	P	Pa	100000
Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	1,143308			Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	0,334
Πυκνότητα Υλικού 1	ρ_{s1}	kg/m^3	8900	Χαλκός		Πυκνότητα Άμμου	ρ_{s1}	kg/m^3	2600
Πυκνότητα Υλικού 2	ρ_{s2}	kg/m^3	10953,85	Μόλυβδος		Πυκνότητα Ολιβίνη	ρ_{s2}	kg/m^3	3200
Πυκνότητα Υλικού 3	ρ_{s3}	kg/m^3	2396,154	Γυαλί		Πυκνότητα Stabilat	ρ_{s3}	kg/m^3	700
Πυκνότητα Υλικού 4	ρ_{s4}	kg/m^3	4792,308	Μαγνητίτης		Πυκνότητα Πίσσας	ρ_{s4}	kg/m^3	1400

iii. Θεωρούμε το χαλκό ως αντίστοιχο υλικό του ολιβίνη:

Κρύο Μοντέλο						**Πραγματική Εγκατάσταση**			
					Λόγος Πυκνοτήτων				
					2,78125				
Μέγεθος	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**	**Υλικό**		**Μέγεθος**	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**
Θερμοκρασία	T	K	300			Θερμοκρασία	T	K	1073
Πίεση	P	Pa	79995,45			Πίεση	P	Pa	100000
Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	0,928938			Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	0,334
Πυκνότητα Υλικού 1	ρ_{s1}	kg/m^3	7231,25	Σίδηρος		Πυκνότητα Άμμου	ρ_{s1}	kg/m^3	2600
Πυκνότητα Υλικού 2	ρ_{s2}	kg/m^3	8900	Χαλκός		Πυκνότητα Ολιβίνη	ρ_{s2}	kg/m^3	3200
Πυκνότητα Υλικού 3	ρ_{s3}	kg/m^3	1946,875	Ασβεστόλιθος		Πυκνότητα Stabilat	ρ_{s3}	kg/m^3	700
Πυκνότητα Υλικού 4	ρ_{s4}	kg/m^3	3893,75	Λιμονίτης		Πυκνότητα Πίσσας	ρ_{s4}	kg/m^3	1400

iv. Θεωρούμε το σίδηρο ως αντίστοιχο υλικό του ολιβίνη:

Κρύο Μοντέλο						**Πραγματική Εγκατάσταση**			
					Λόγος Πυκνοτήτων				
					2,25				
Μέγεθος	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**	**Υλικό**		**Μέγεθος**	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**
Θερμοκρασία	T	K	300			Θερμοκρασία	T	K	1073
Πίεση	P	Pa	64715,42			Πίεση	P	Pa	100000
Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	0,7515			Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	0,334
Πυκνότητα Υλικού 1	ρ_{s1}	kg/m^3	5850	Βανάδιο		Πυκνότητα Άμμου	ρ_{s1}	kg/m^3	2600
Πυκνότητα Υλικού 2	ρ_{s2}	kg/m^3	7200	Σίδηρος		Πυκνότητα Ολιβίνη	ρ_{s2}	kg/m^3	3200
Πυκνότητα Υλικού 3	ρ_{s3}	kg/m^3	1575	Ανθρακίτης		Πυκνότητα Stabilat	ρ_{s3}	kg/m^3	700
Πυκνότητα Υλικού 4	ρ_{s4}	kg/m^3	3150	Μαγνησίτης		Πυκνότητα Πίσσας	ρ_{s4}	kg/m^3	1400

v. Θεωρούμε το χαλκό ως υλικό αντικατάστασης τόσο του ολιβίνη όσο και της άμμου

Κρύο Μοντέλο						**Πραγματική Εγκατάσταση**			
					Λόγος Πυκνοτήτων				
					3,166346				
Μέγεθος	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**	**Υλικό**		**Μέγεθος**	**Σύμβολο**	**Μονάδα**	**Τιμή**
Θερμοκρασία	T	K	300			Θερμοκρασία	T	K	1073
Πίεση	P	Pa	81428,03			Πίεση	P	Pa	100000
Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	1,05756			Πυκνότητα Αέρα	ρ_g	kg/m^3	0,334
Πυκνότητα Υλικού 1	ρ_{s1}	kg/m^3	8900	Χαλκός		Πυκνότητα Άμμου/Ολιβίνη	ρ_{s1}	kg/m^3	2810,811
Πυκνότητα Υλικού 2	ρ_{s2}	kg/m^3	2216,442	Αμμόλιθος		Πυκνότητα Stabilat	ρ_{s2}	kg/m^3	700
Πυκνότητα Υλικού 3	ρ_{s3}	kg/m^3	4432,885	Βαρύτης		Πυκνότητα Πίσσας	ρ_{s3}	kg/m^3	1400

Πυκνότητες των υλικών τις οποίες χρησιμοποιούμε στην εγκατάσταση:

Πυκνότητες Υλικών	**(kg/m^3)**
Χαλκός	8900
Μόλυβδος	11300
Γυαλί	2400
Μαγνητίτης	4800
Σίδηρος	7200
Ασβεστόλιθος	1960
Λιμονίτης	3800
Βανάδιο	5500
Ανθρακίτης	1600
Μαγνησίτης	3200
Αμμόλιθος	2200
Βαρύτης	4500

c) Οι δύο αδιάστατοι λόγοι των νόμων του Glicksman οι οποίοι σχετίζονται με τις ταχύτητες είναι (οι λόγοι αυτοί μεταβάλλονται μόνο συναρτήσει του γεωμετρικού λόγου:

Λόγος Αριθμού Froude	Λόγος Ταχυτήτων
1,60623784	1,60623784

Ο λόγος των παροχών μεταβάλλεται ανάλογα με το λόγο των πυκνοτήτων:

Περίπτωση	Λόγος Πυκνοτήτων	Λόγος Παροχών
ii	3,423076923	0,181875202
iii	2,78125	0,223846402
iv	2,25	0,276699025
v	3,166346154	0,19662184

Η ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης σε κάθε περίπτωση γίνεται:

		Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	
Μέγεθος Σωματιδίων Πραγματικής Εγκατάστασης (m)	Πυκνότητα Κλίνης Εγκατάστασης	Εγκατάσταση	Κρύο Μοντέλο
0,000498	2600	0,076	0,047315533
0,000498	2810,810811	0,095618173	0,059529274
0,000498	1748,948949	0,059491459	0,037037765
0,000574792	1748,948949	0,07925337	0,049340993

Το μέγεθος των σωματιδίων σε κάθε περίπτωση είναι:

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης Κρύου Μοντέλου		0,047315533				
Πυκνότητα Σωματιδίων Κρύου Μοντέλου		8900				
Πυκνότητα Αέρα Κρύου Μοντέλου		1,143307692				
Προσεγγιστικές Σχέσεις	C1	C2	Re/u_{mf}	Ar	Διαμέτρος Σωματιδίου	u_{mf}
Wen και Yu	33,7	0,0408	7,95E+00	6,27E+02	0,00013	4,75E-02
Richardson	25,7	0,0365	7,34E+00	4,93E+02	0,00012	4,74E-02
Babu et al.	25,3	0,0651	5,44E+00	2,01E+02	0,000089	4,73E-02
Grace	27,2	0,0408	7,15E+00	4,57E+02	0,000117	4,76E-02
Ακριβής Εξίσωση	-	-	-	-	0,000128	4,75E-02

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης Κρύου Μοντέλου		0,059529274				
Πυκνότητα Σωματιδίων Κρύου Μοντέλου		9726,305609				
Πυκνότητα Αέρα Κρύου Μοντέλου		1,143307692				
Προσεγγιστικές Σχέσεις	C1	C2	Re/u_{mf}	Ar	Διαμέτρος Σωματιδίου	u_{mf}
Wen και Yu	33,7	0,0408	8,53E+00	8,47E+02	0,0001395	5,96E-02
Richardson	25,7	0,0365	7,89E+00	6,70E+02	0,000129	5,97E-02
Babu et al.	25,3	0,0651	5,84E+00	2,72E+02	0,0000955	5,95E-02
Grace	27,2	0,0408	7,64E+00	6,09E+02	0,000125	5,93E-02
Ακριβής Εξίσωση	-	-	-	-	0,000137	5,95E-02

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης Κρύου Μοντέλου		0,059529274				
Πυκνότητα Σωματιδίων Κρύου Μοντέλου		7795,620438				
Πυκνότητα Αέρα Κρύου Μοντέλου		0,9289375				
Προσεγγιστικές Σχέσεις	C1	C2	Re/u_{mf}	Ar	Διαμέτρος Σωματιδίου	u_{mf}
Wen και Yu	33,7	0,0408	7,72E+00	7,64E+02	0,0001555	5,94E-02
Richardson	25,7	0,0365	7,15E+00	6,07E+02	0,000144	5,97E-02
Babu et al.	25,3	0,0651	5,29E+00	2,45E+02	0,0001065	5,93E-02
Grace	27,2	0,0408	6,95E+00	5,57E+02	0,00014	5,97E-02
Ακριβής Εξίσωση	-	-	-	-	0,000153	5,94E-02

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης Κρύου Μοντέλου		0,037037765				
Πυκνότητα Σωματιδίων Κρύου Μοντέλου		6021,855197				
Πυκνότητα Αέρα Κρύου Μοντέλου		1,143307692				
Προσεγγιστικές Σχέσεις	C1	C2	Re/u_{mf}	Ar	Διαμέτρος Σωματιδίου	u_{mf}
Wen και Yu	33,7	0,0408	8,13E+00	4,54E+02	0,000133	3,37E-02
Richardson	25,7	0,0365	7,52E+00	3,59E+02	0,000123	3,38E-02
Babu et al.	25,3	0,0651	5,59E+00	1,48E+02	0,0000915	3,39E-02
Grace	27,2	0,0408	7,31E+00	3,30E+02	0,0001195	3,37E-02
Ακριβής Εξίσωση	-	-	-	-	0,000131	3,37E-02

Η τελική ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων είναι για κάθε μεταβολή της πυκνότητας της κλίνης:

Πυκνότητα Κλίνης Κρύου Μοντέλου	Αδιάστατη Διάμετρος Σωματιδίων	Αδιάστατη Ταχύτητα Πτώσης Σωματιδίων	Ταχύτητα Πτώσης Σωματιδίων (m/s)
8900,0000	8,4276	1,5693	1,6899
9726,3056	9,2911	1,7420	1,9323
7795,6204	8,9939	1,6834	1,9920
6021,8552	7,5719	1,3911	1,3151

Οι ταχύτητες ροής του κρύου μοντέλου τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε στους επόμενους υπολογισμούς και οι αντίστοιχες ταχύτητες της εγκατάστασης είναι:

Ταχύτητα Ροής	
Κρύο Μοντέλο	Εγκατάσταση
0	0
u_{mfKM}	u_{mfE1}
0,06	0,09637427
0,1	0,160623784
0,2	0,321247568
0,3	0,481871352
0,5	0,80311892
0,75	1,20467838
1	1,60623784

d) Οι διάμετροι των φυσαλίδων τις οποίες βρήκαμε για κάθε διαφορετική ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης και για ύψος 0,3m είναι:

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,732E-02		
Ύψος κλίνης (m)	0,300		
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Αρχική Διάμετρος Φυσαλίδας (m)	Μέγιστη Διάμετρος Φυσαλίδας (m)	Διάμετρος Φυσαλίδας (m)
0,060	4,560E-05	5,908E-02	9,770E-03
0,100	7,866E-04	1,044E-01	1,786E-02
0,200	6,606E-03	1,598E-01	3,185E-02
0,300	1,809E-02	1,955E-01	4,732E-02
0,500	5,807E-02	2,469E-01	8,917E-02
0,750	1,399E-01	2,943E-01	1,654E-01
1,000	2,572E-01	3,324E-01	2,696E-01

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	5,953E-02		
Ύψος κλίνης (m)	0,300		
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Αρχική Διάμετρος Φυσαλίδας (m)	Μέγιστη Διάμετρος Φυσαλίδας (m)	Διάμετρος Φυσαλίδας (m)
0,060	6,279E-08	1,582E-02	2,606E-03
0,100	4,641E-04	9,397E-02	1,587E-02
0,200	5,592E-03	1,546E-01	3,013E-02
0,300	1,639E-02	1,917E-01	4,526E-02
0,500	5,498E-02	2,442E-01	8,615E-02
0,750	1,351E-01	2,923E-01	1,610E-01
1,000	2,506E-01	3,307E-01	2,638E-01

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	3,704E-02		
Ύψος κλίνης (m)	0,300		
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Αρχική Διάμετρος Φυσαλίδας (m)	Μέγιστη Διάμετρος Φυσαλίδας (m)	Διάμετρος Φυσαλίδας (m)
0,060	1,494E-04	7,491E-02	1,246E-02
0,100	1,123E-03	1,121E-01	1,941E-02
0,200	7,526E-03	1,640E-01	3,331E-02
0,300	1,960E-02	1,986E-01	4,909E-02
0,500	6,074E-02	2,491E-01	9,176E-02
0,750	1,440E-01	2,960E-01	1,691E-01
1,000	2,628E-01	3,339E-01	2,745E-01

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,934E-02		
Ύψος κλίνης (m)	0,300		
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Αρχική Διάμετρος Φυσαλίδας (m)	Μέγιστη Διάμετρος Φυσαλίδας (m)	Διάμετρος Φυσαλίδας (m)
0,060	3,220E-05	5,511E-02	9,105E-03
0,100	7,273E-04	1,028E-01	1,754E-02
0,200	6,432E-03	1,590E-01	3,156E-02
0,300	1,781E-02	1,949E-01	4,697E-02
0,500	5,755E-02	2,464E-01	8,866E-02
0,750	1,391E-01	2,940E-01	1,646E-01
1,000	2,561E-01	3,322E-01	2,686E-01

Η ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων η οποία βρέθηκε είναι (τονισμένες είναι οι ταχύτητες για τις οποίες ισχύει ο περιορισμός

	Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,732E-02		
	Ύψος κλίνης (m)	0,300		
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας σε Συνθήκες Ελάχιστης Ρευστοποίησης αν $d_b/D<0,125$	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας σε Συνθήκες Ελάχιστης Ρευστοποίησης αν $0,125<d_b/D<0,6$	Περιορισμός d_b/D	Ταχύτητα ανόδου φυσαλίδας
0,060	2,201E-01	2,566E-01	1,954E-02	2,328E-01
0,100	2,976E-01	3,386E-01	3,572E-02	3,503E-01
0,200	3,974E-01	4,337E-01	6,369E-02	5,501E-01
0,300	4,844E-01	5,048E-01	9,464E-02	7,371E-01
0,500	6,650E-01	6,118E-01	1,783E-01	1,064E+00
0,750	9,056E-01	6,639E-01	3,307E-01	1,367E+00
1,000	1,156E+00	6,213E-01	5,392E-01	1,574E+00

	Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	5,953E-02		
	Ύψος κλίνης (m)	0,300		
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας σε Συνθήκες Ελάχιστης Ρευστοποίησης αν $d_b/D<0,125$	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας σε Συνθήκες Ελάχιστης Ρευστοποίησης αν $0,125<d_b/D<0,6$	Περιορισμός d_b/D	Ταχύτητα ανόδου φυσαλίδας
0,060	1,137E-01	1,354E-01	5,212E-03	1,142E-01
0,100	2,805E-01	3,211E-01	3,173E-02	3,210E-01
0,200	3,866E-01	4,241E-01	6,027E-02	5,271E-01
0,300	4,738E-01	4,968E-01	9,052E-02	7,142E-01
0,500	6,536E-01	6,068E-01	1,723E-01	1,047E+00
0,750	8,935E-01	6,636E-01	3,220E-01	1,354E+00
1,000	1,144E+00	6,253E-01	5,277E-01	1,566E+00

	Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	3,704E-02		
	Ύψος κλίνης (m)	0,300		
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας σε Συνθήκες Ελάχιστης Ρευστοποίησης αν $d_b/D<0,125$	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας σε Συνθήκες Ελάχιστης Ρευστοποίησης αν $0,125<d_b/D<0,6$	Περιορισμός d_b/D	Ταχύτητα ανόδου φυσαλίδας
0,060	2,486E-01	2,875E-01	2,493E-02	2,716E-01
0,100	3,103E-01	3,514E-01	3,882E-02	3,732E-01
0,200	4,064E-01	4,416E-01	6,662E-02	5,694E-01
0,300	4,934E-01	5,115E-01	9,818E-02	7,564E-01
0,500	6,746E-01	6,158E-01	1,835E-01	1,079E+00
0,750	9,157E-01	6,639E-01	3,382E-01	1,377E+00
1,000	1,167E+00	6,179E-01	5,490E-01	1,581E+00

	Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,934E-02		
	Ύψος κλίνης (m)	0,300		
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας σε Συνθήκες Ελάχιστης Ρευστοποίησης αν $d_b/D<0,125$	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας σε Συνθήκες Ελάχιστης Ρευστοποίησης αν $0,125<d_b/D<0,6$	Περιορισμός d_b/D	Ταχύτητα ανόδου φυσαλίδας
0,060	2,125E-01	2,482E-01	1,821E-02	2,231E-01
0,100	2,949E-01	3,359E-01	3,508E-02	3,456E-01
0,200	3,956E-01	4,321E-01	6,312E-02	5,463E-01
0,300	4,827E-01	5,035E-01	9,395E-02	7,333E-01
0,500	6,631E-01	6,110E-01	1,773E-01	1,062E+00
0,750	9,036E-01	6,639E-01	3,293E-01	1,365E+00
1,000	1,154E+00	6,220E-01	5,373E-01	1,573E+00

Εκτός από την ταχύτητα ανόδου την οποία προβλέπει το μοντέλο υπολογίστηκε και η ταχύτητα με βάση τις σχέσεις των Kunii-Levenspiel για βιομηχανικές κλίνες και σωματίδια κατηγορίας A και B.

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,732E-02	
Ύψος κλίνης (m)	0,300	
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας (Geldart A)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας (Geldart B)
0,060	4,945E-01	2,982E-01
0,100	7,632E-01	4,254E-01
0,200	1,232E+00	6,198E-01
0,300	1,714E+00	7,973E-01
0,500	2,823E+00	1,108E+00
0,750	4,519E+00	1,393E+00
1,000	6,612E+00	1,588E+00

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	5,953E-02	
Ύψος κλίνης (m)	0,300	
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας (Geldart A)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας (Geldart B)
0,060	2,474E-01	1,502E-01
0,100	6,961E-01	3,953E-01
0,200	1,176E+00	5,979E-01
0,300	1,652E+00	7,756E-01
0,500	2,749E+00	1,091E+00
0,750	4,427E+00	1,382E+00
1,000	6,500E+00	1,580E+00

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	3,704E-02	
Ύψος κλίνης (m)	0,300	
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας (Geldart A)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας (Geldart B)
0,060	5,829E-01	3,422E-01
0,100	8,158E-01	4,486E-01
0,200	1,279E+00	6,382E-01
0,300	1,767E+00	8,156E-01
0,500	2,885E+00	1,121E+00
0,750	4,597E+00	1,403E+00
1,000	6,707E+00	1,594E+00

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,934E-02	
Ύψος κλίνης (m)	0,300	
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας (Geldart A)	Ταχύτητα Ανόδου Φυσαλίδας (Geldart B)
0,060	4,727E-01	2,869E-01
0,100	7,525E-01	4,207E-01
0,200	1,223E+00	6,162E-01
0,300	1,704E+00	7,937E-01
0,500	2,810E+00	1,105E+00
0,750	4,504E+00	1,391E+00
1,000	6,593E+00	1,586E+00

e) Το κλάσμα όγκου των φυσαλίδων εντός της κλίνης προκύπτει για τις διάφορες περιπτώσεις ίσο με:

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,732E-02						
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Αργές φυσαλίδες ($u_b<u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Φυσαλίδες Μεσαίας ταχύτητας ($u_b=u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Φυσαλίδες Μεσαίας ταχύτητας ($u_b=5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Ταχείς φυσαλίδες ($u_b>5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Περιορισμός u_b-u_{mf}/ε_{mf}	Περιορισμός u_b-$5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$	Κλάσμα όγκου της κλίνης σε φυσαλίδες
0,060	3,874E-02	4,528E-02	5,449E-02	6,838E-02	1,313E-01	-2,745E-01	4,528E-02
0,100	1,184E-01	1,325E-01	1,504E-01	1,739E-01	2,488E-01	-1,570E-01	1,504E-01
0,200	2,368E-01	2,556E-01	2,776E-01	3,037E-01	4,486E-01	4,280E-02	3,037E-01
0,300	3,038E-01	3,221E-01	3,428E-01	3,663E-01	6,356E-01	2,298E-01	3,663E-01
0,500	3,906E-01	4,072E-01	4,253E-01	4,451E-01	9,630E-01	5,572E-01	4,451E-01
0,750	4,809E-01	4,970E-01	5,142E-01	5,326E-01	1,265E+00	8,593E-01	5,326E-01
1,000	5,709E-01	5,876E-01	6,053E-01	5,481E-01	1,473E+00	1,067E+00	5,481E-01

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	5,953E-02						
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Αργές φυσαλίδες ($u_b<u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Φυσαλίδες Μεσαίας ταχύτητας ($u_b=u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Φυσαλίδες Μεσαίας ταχύτητας ($u_b=5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Ταχείς φυσαλίδες ($u_b>5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Περιορισμός u_b-u_{mf}/ε_{mf}	Περιορισμός u_b-$5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$	Κλάσμα όγκου της κλίνης σε φυσαλίδες
0,060	2,018E-03	2,710E-03	4,123E-03	8,617E-03	-1,349E-02	-5,241E-01	2,018E-03
0,100	9,197E-02	1,064E-01	1,261E-01	1,548E-01	1,933E-01	-3,173E-01	1,064E-01
0,200	2,174E-01	2,395E-01	2,665E-01	3,005E-01	3,994E-01	-1,112E-01	2,665E-01
0,300	2,886E-01	3,108E-01	3,367E-01	3,673E-01	5,866E-01	7,600E-02	3,673E-01
0,500	3,777E-01	3,980E-01	4,206E-01	4,460E-01	9,196E-01	4,090E-01	4,460E-01
0,750	4,687E-01	4,884E-01	5,099E-01	5,334E-01	1,226E+00	7,159E-01	5,334E-01
1,000	5,582E-01	5,786E-01	6,006E-01	5,570E-01	1,438E+00	9,275E-01	5,570E-01

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	3,704E-02						
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Αργές φυσαλίδες ($u_b<u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Φυσαλίδες Μεσαίας ταχύτητας ($u_b=u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Φυσαλίδες Μεσαίας ταχύτητας ($u_b=5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Ταχείς φυσαλίδες ($u_b>5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Περιορισμός u_b-u_{mf}/ε_{mf}	Περιορισμός u_b-$5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$	Κλάσμα όγκου της κλίνης σε φυσαλίδες
0,060	6,643E-02	7,440E-02	8,455E-02	9,790E-02	1,922E-01	-1,255E-01	7,440E-02
0,100	1,408E-01	1,535E-01	1,687E-01	1,873E-01	2,938E-01	-2,387E-02	1,687E-01
0,200	2,533E-01	2,687E-01	2,862E-01	3,061E-01	4,900E-01	1,723E-01	3,061E-01
0,300	3,167E-01	3,314E-01	3,477E-01	3,656E-01	6,769E-01	3,593E-01	3,656E-01
0,500	4,016E-01	4,149E-01	4,291E-01	4,444E-01	9,994E-01	6,817E-01	4,444E-01
0,750	4,914E-01	5,042E-01	5,178E-01	5,321E-01	1,297E+00	9,798E-01	5,321E-01
1,000	5,819E-01	5,952E-01	6,091E-01	5,405E-01	1,501E+00	1,184E+00	5,405E-01

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,934E-02						
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Αργές φυσαλίδες ($u_b<u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Φυσαλίδες Μεσαίας ταχύτητας ($u_b=u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Φυσαλίδες Μεσαίας ταχύτητας ($u_b=5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Ταχείς φυσαλίδες ($u_b>5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$)	Περιορισμός u_b-u_{mf}/ε_{mf}	Περιορισμός u_b-$5*u_{mf}/\varepsilon_{mf}$	Κλάσμα όγκου της κλίνης σε φυσαλίδες
0,060	3,312E-02	3,912E-02	4,777E-02	6,133E-02	1,173E-01	-3,059E-01	3,912E-02
0,100	1,140E-01	1,283E-01	1,466E-01	1,710E-01	2,398E-01	-1,834E-01	1,466E-01
0,200	2,336E-01	2,529E-01	2,758E-01	3,032E-01	4,405E-01	1,727E-02	3,032E-01
0,300	3,013E-01	3,203E-01	3,418E-01	3,665E-01	6,275E-01	2,043E-01	3,665E-01
0,500	3,884E-01	4,056E-01	4,245E-01	4,452E-01	9,558E-01	5,326E-01	4,452E-01
0,750	4,789E-01	4,956E-01	5,135E-01	5,327E-01	1,259E+00	8,355E-01	5,327E-01
1,000	5,688E-01	5,861E-01	6,045E-01	5,496E-01	1,467E+00	1,044E+00	5,496E-01

Τα κλάσματα όγκων τα οποία απαιτούνται για τον υπολογισμό του μοντέλου K-L είναι:

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,732E-02				
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Λόγος όγκων νέφους - φυσαλίδας	Λόγος όγκων αναταραχής - φυσαλίδας	Λόγος όγκων πυκνής φάσης - φυσαλίδας	Όγκος στερεών νέφους προς όγκο φυσαλίδας	Όγκος στερεών πυκνής φάσης προς όγκο φυσαλίδας
0,060	2,565E+00	1,771E-02	9,539E-01	1,378E+00	9,868E+00
0,100	1,552E+00	1,786E-02	8,469E-01	8,376E-01	2,172E+00
0,200	1,028E+00	1,812E-02	6,908E-01	5,585E-01	6,601E-01
0,300	7,948E-01	1,840E-02	6,269E-01	4,340E-01	4,842E-01
0,500	5,964E-01	1,918E-02	5,464E-01	3,285E-01	3,319E-01
0,750	5,412E-01	2,058E-02	4,564E-01	2,998E-01	1,635E-01
1,000	5,855E-01	2,251E-02	4,396E-01	3,244E-01	1,106E-01

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	5,953E-02				
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Λόγος όγκων νέφους - φυσαλίδας	Λόγος όγκων αναταραχής - φυσαλίδας	Λόγος όγκων πυκνής φάσης - φυσαλίδας	Όγκος στερεών νέφους προς όγκο φυσαλίδας	Όγκος στερεών πυκνής φάσης προς όγκο φυσαλίδας
0,060	-2,743E+01	1,826E-02	9,979E-01	-1,463E+01	2,785E+02
0,100	2,505E+00	1,848E-02	8,917E-01	1,347E+00	3,132E+00
0,200	1,479E+00	1,873E-02	7,285E-01	7,992E-01	6,644E-01
0,300	1,106E+00	1,899E-02	6,257E-01	6,005E-01	3,137E-01
0,500	7,993E-01	1,969E-02	5,453E-01	4,370E-01	2,209E-01
0,750	7,145E-01	2,097E-02	4,555E-01	3,925E-01	6,944E-02
1,000	7,695E-01	2,274E-02	4,303E-01	4,228E-01	-3,365E-03

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	3,704E-02				
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Λόγος όγκων νέφους - φυσαλίδας	Λόγος όγκων αναταραχής - φυσαλίδας	Λόγος όγκων πυκνής φάσης - φυσαλίδας	Όγκος στερεών νέφους προς όγκο φυσαλίδας	Όγκος στερεών πυκνής φάσης προς όγκο φυσαλίδας
0,060	1,408E+00	1,962E-02	9,241E-01	7,619E-01	5,872E+00
0,100	1,032E+00	1,972E-02	8,280E-01	5,613E-01	2,063E+00
0,200	7,286E-01	1,993E-02	6,878E-01	3,994E-01	8,052E-01
0,300	5,755E-01	2,017E-02	6,271E-01	3,179E-01	6,032E-01
0,500	4,442E-01	2,082E-02	5,463E-01	2,481E-01	4,140E-01
0,750	4,076E-01	2,199E-02	4,562E-01	2,293E-01	2,349E-01
1,000	4,425E-01	2,359E-02	4,467E-01	2,487E-01	1,999E-01

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,934E-02				
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Λόγος όγκων νέφους - φυσαλίδας	Λόγος όγκων αναταραχής - φυσαλίδας	Λόγος όγκων πυκνής φάσης - φυσαλίδας	Όγκος στερεών νέφους προς όγκο φυσαλίδας	Όγκος στερεών πυκνής φάσης προς όγκο φυσαλίδας
0,060	2,975E+00	1,792E-02	9,602E-01	1,597E+00	1,151E+01
0,100	1,678E+00	1,807E-02	8,508E-01	9,052E-01	2,197E+00
0,200	1,095E+00	1,832E-02	6,913E-01	5,942E-01	6,273E-01
0,300	8,422E-01	1,860E-02	6,267E-01	4,594E-01	4,581E-01
0,500	6,283E-01	1,935E-02	5,462E-01	3,456E-01	3,144E-01
0,750	5,688E-01	2,072E-02	4,562E-01	3,146E-01	1,485E-01
1,000	6,149E-01	2,260E-02	4,380E-01	3,402E-01	9,220E-02

Η ταχύτητα της πυκνής φάσης και η ταχύτητα πτώσης σωματιδίων η οποία την επηρεάζει είναι:

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,732E-02	
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα πτώσης στερεών	Ταχύτητα Πυκνής φάσης
0,060	1,957E-04	1,013E-01
0,100	1,111E-03	1,003E-01
0,200	4,381E-03	9,708E-02
0,300	7,926E-03	9,353E-02
0,500	1,663E-02	8,483E-02
0,750	3,283E-02	6,863E-02
1,000	4,418E-02	5,728E-02

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	5,953E-02	
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα πτώσης στερεών	Ταχύτητα Πυκνής φάσης
0,060	4,215E-06	1,276E-01
0,100	7,077E-04	1,269E-01
0,200	3,611E-03	1,240E-01
0,300	7,961E-03	1,197E-01
0,500	1,686E-02	1,108E-01
0,750	3,326E-02	9,439E-02
1,000	4,608E-02	8,157E-02

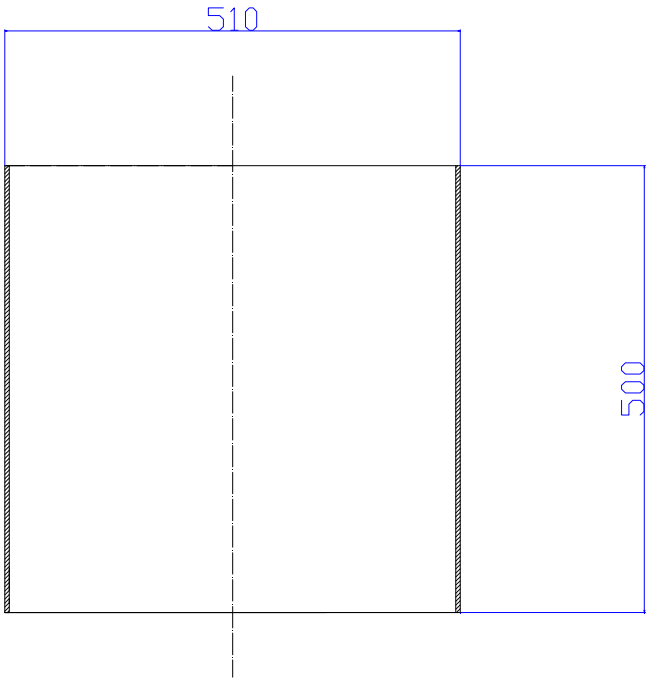
Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	3,704E-02	
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα πτώσης στερεών	Ταχύτητα Πυκνής φάσης
0,060	4,289E-04	7,899E-02
0,100	1,500E-03	7,792E-02
0,200	5,052E-03	7,437E-02
0,300	8,895E-03	7,052E-02
0,500	1,827E-02	6,115E-02
0,750	3,533E-02	4,409E-02
1,000	4,513E-02	3,428E-02

Ελάχιστη Ταχύτητα Ρευστοποίησης (m/s)	4,934E-02	
Ταχύτητα Ροής (m/s)	Ταχύτητα πτώσης στερεών	Ταχύτητα Πυκνής φάσης
0,060	1,629E-04	1,056E-01
0,100	1,076E-03	1,047E-01
0,200	4,390E-03	1,014E-01
0,300	7,977E-03	9,782E-02
0,500	1,675E-02	8,905E-02
0,750	3,302E-02	7,278E-02
1,000	4,459E-02	6,122E-02

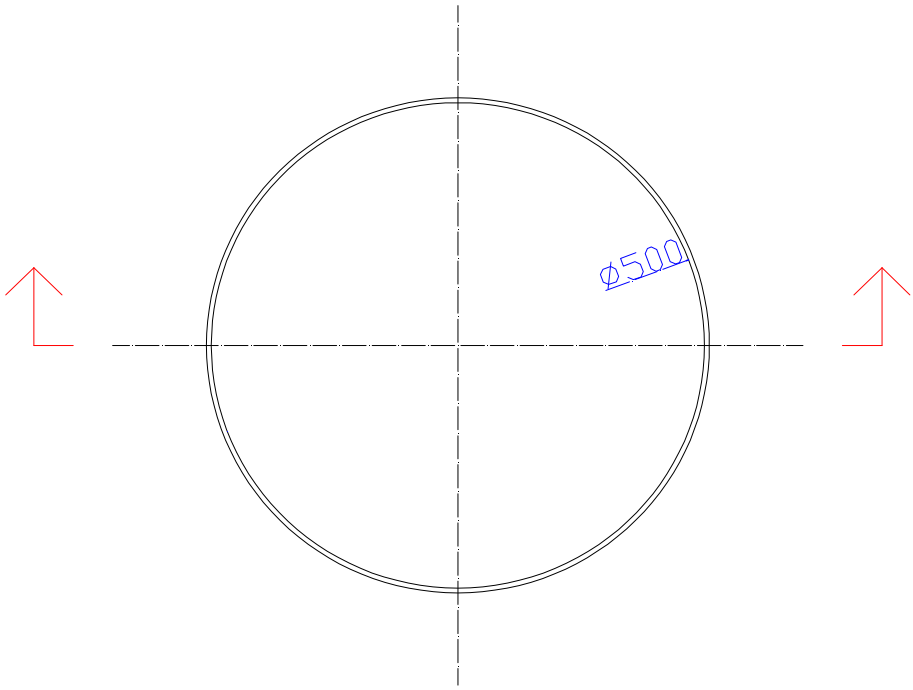
f) Οι σταθερές οι οποίες ισχύουν για τους προηγούμενους υπολογισμούς, χωρίς μεταβολή στην εγκατάσταση είναι:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Θερμοκρασία	T	K	300
Κινηματική Συνεκτικότητα Αέρα Κρύου Μοντέλου	μ_{KM}	kg/m*s	1,87E-05
Σφαιρικότητα Σωματιδίων	ϕ	-	0,7
Κενότητα Ελάχιστης Ρευστοποίησης	ε_{mf}	-	0,466359
Κινηματική Συνεκτικότητα Αέρα Πραγματικής Εγκατάστασης	μ_{E1}	kg/m*s	4,44E-05

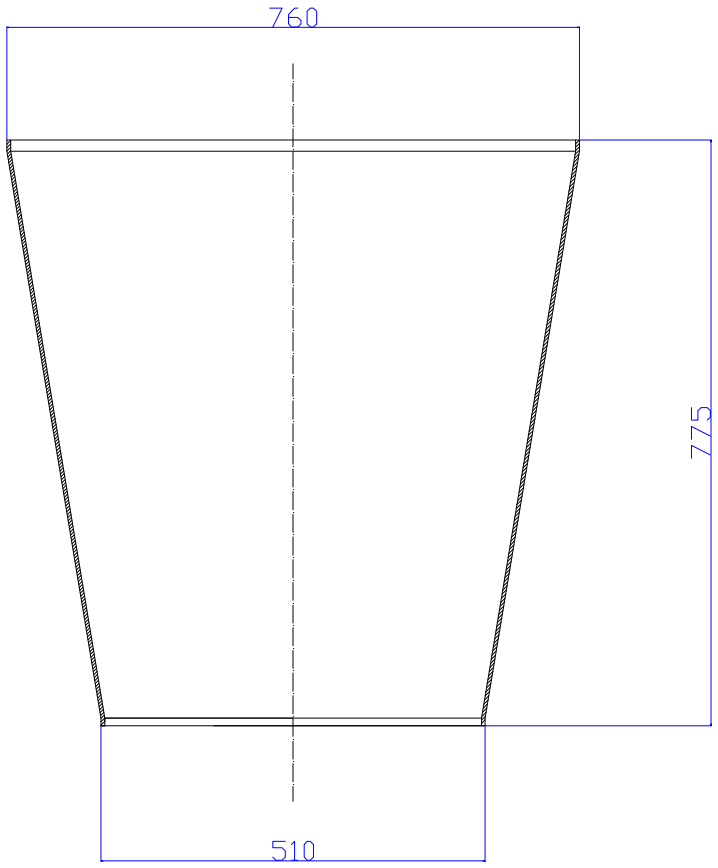
17.3) Σχέδια



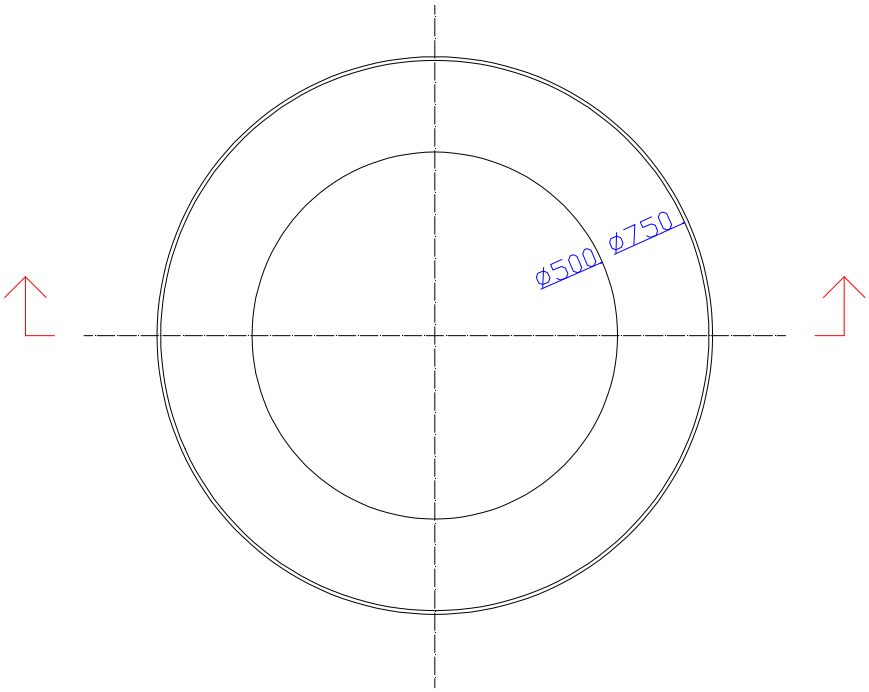
Πυκνή Φάση Αντιδραστήρα - Εμπρόσθια Όψη



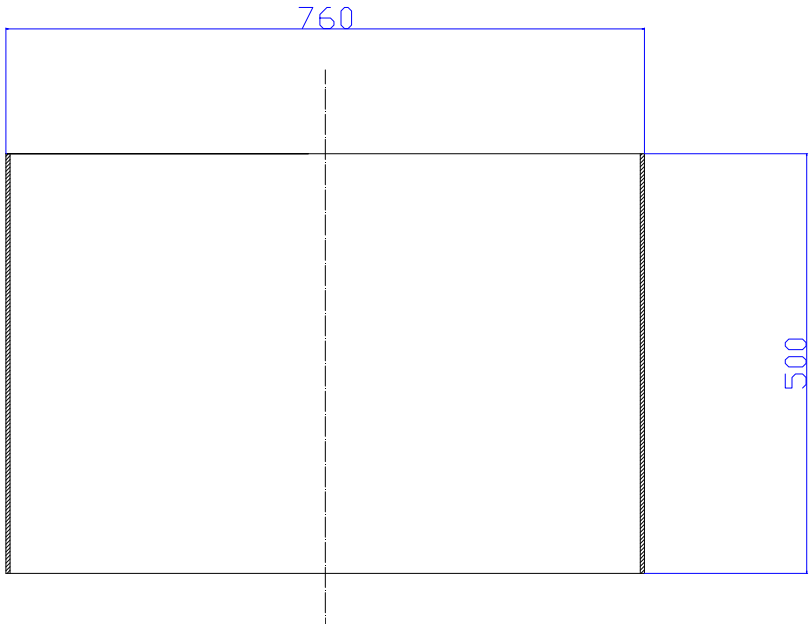
Πυκνή Φάση Αντιδραστήρα - Κάτοψη



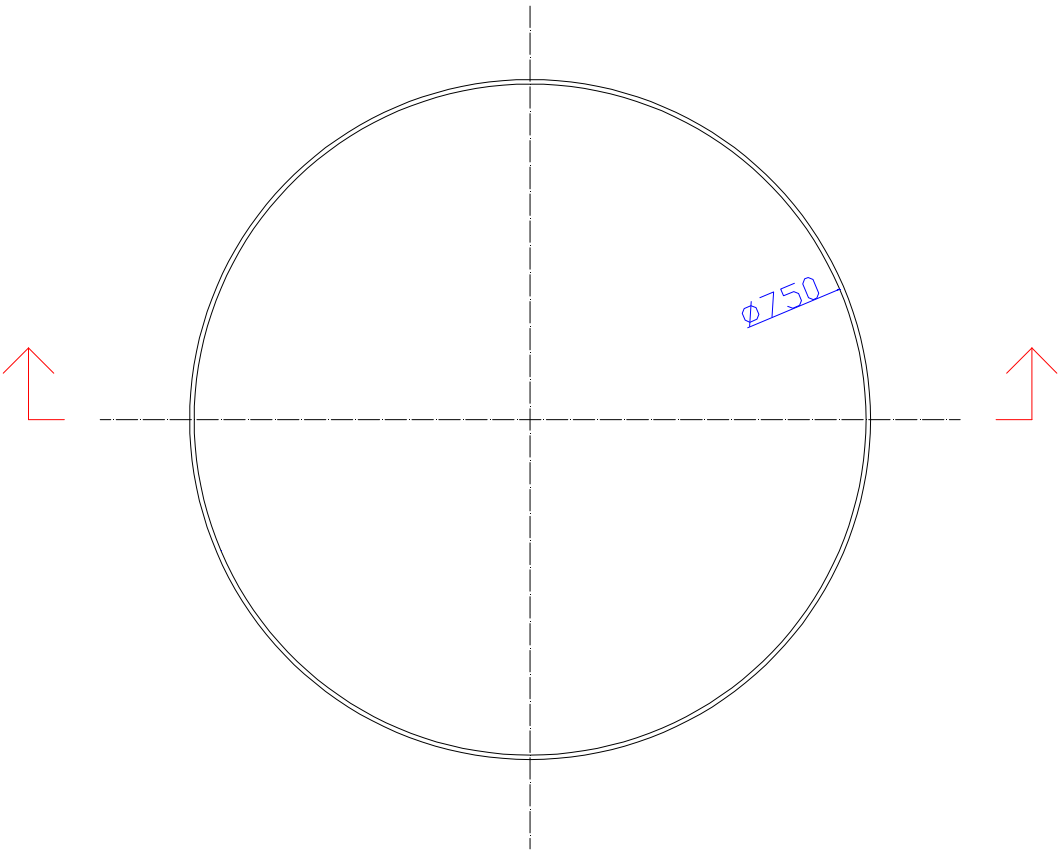
Κωνικό τμήμα αντιδραστήρα - Εμπρόσθια όψη



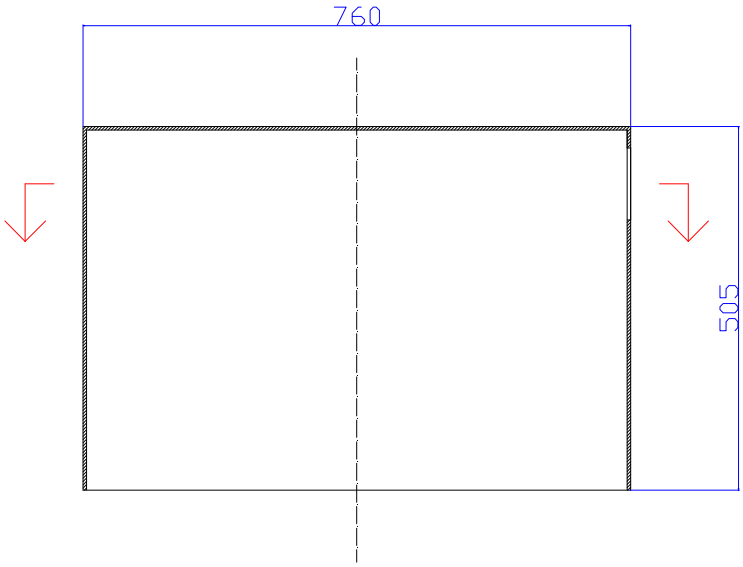
Κωνικό τμήμα αντιδραστήρα – Κάτοψη



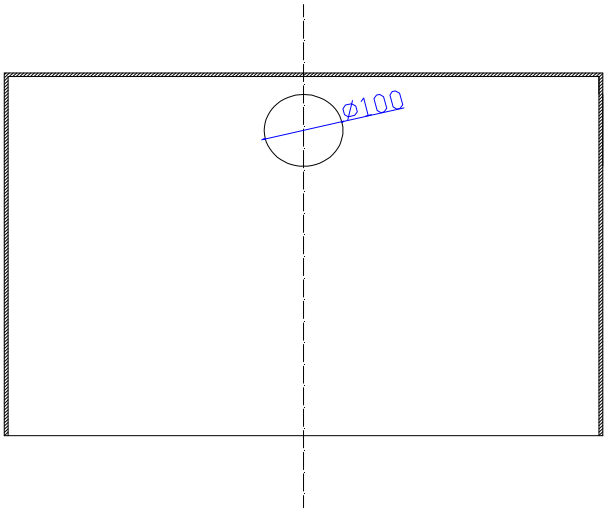
Περιοχή Απεμπλοκής - Κάτω Τμήμα – Εμπρόσθια Όψη



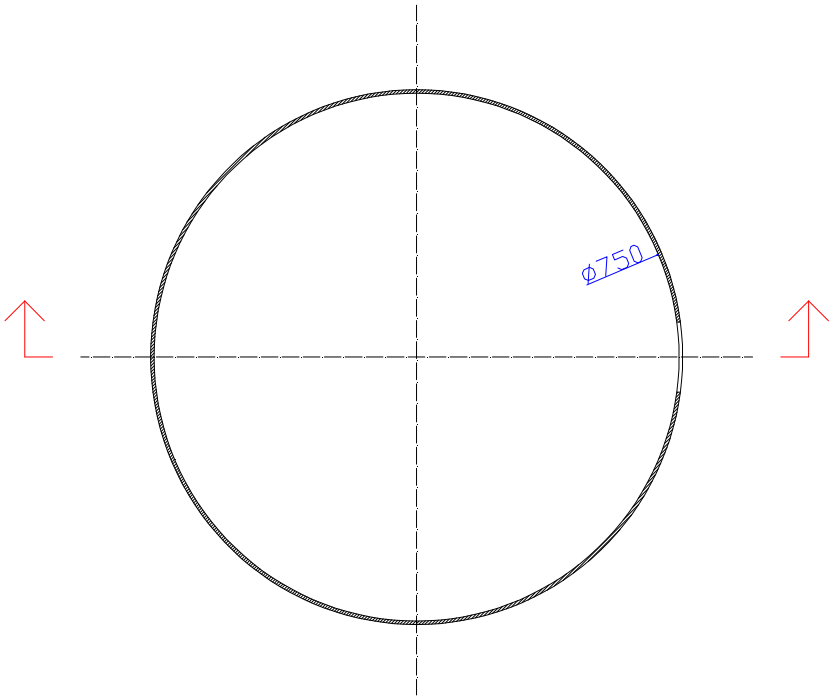
Περιοχή Απεμπλοκής - Κάτω Τμήμα - Κάτοψη



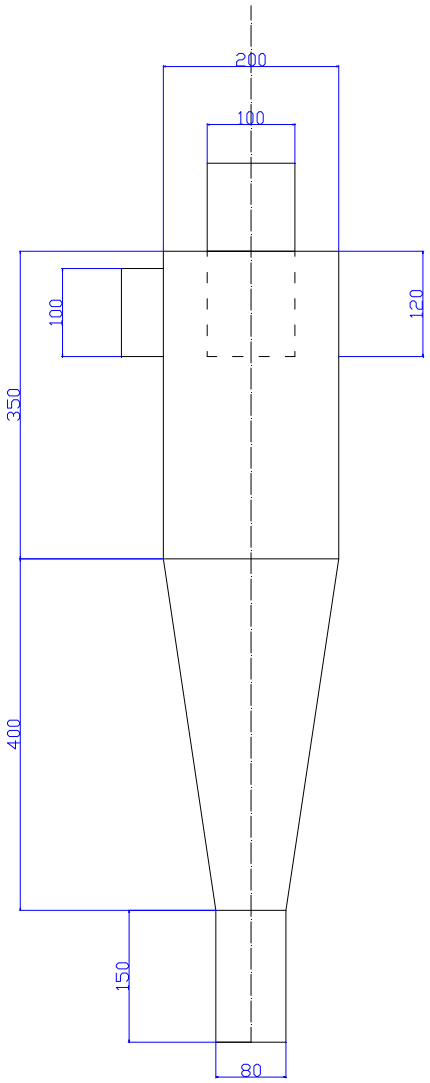
Περιοχή Απεμπλοκής – Άνω Τμήμα Εμπρόσθια Όψη



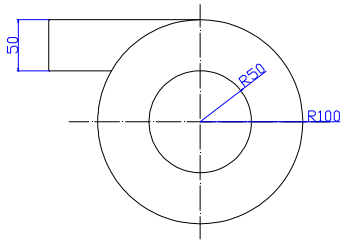
Περιοχή Απεμπλοκής – Άνω Τμήμα Πλάγια Όψη



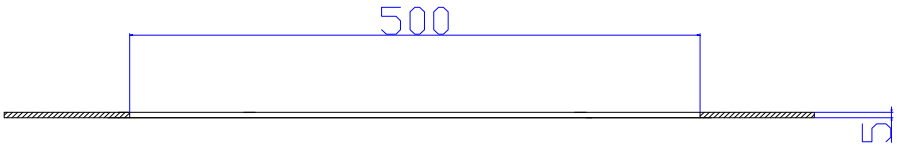
Περιοχή Απεμπλοκής – Άνω Τμήμα – Κάτοψη



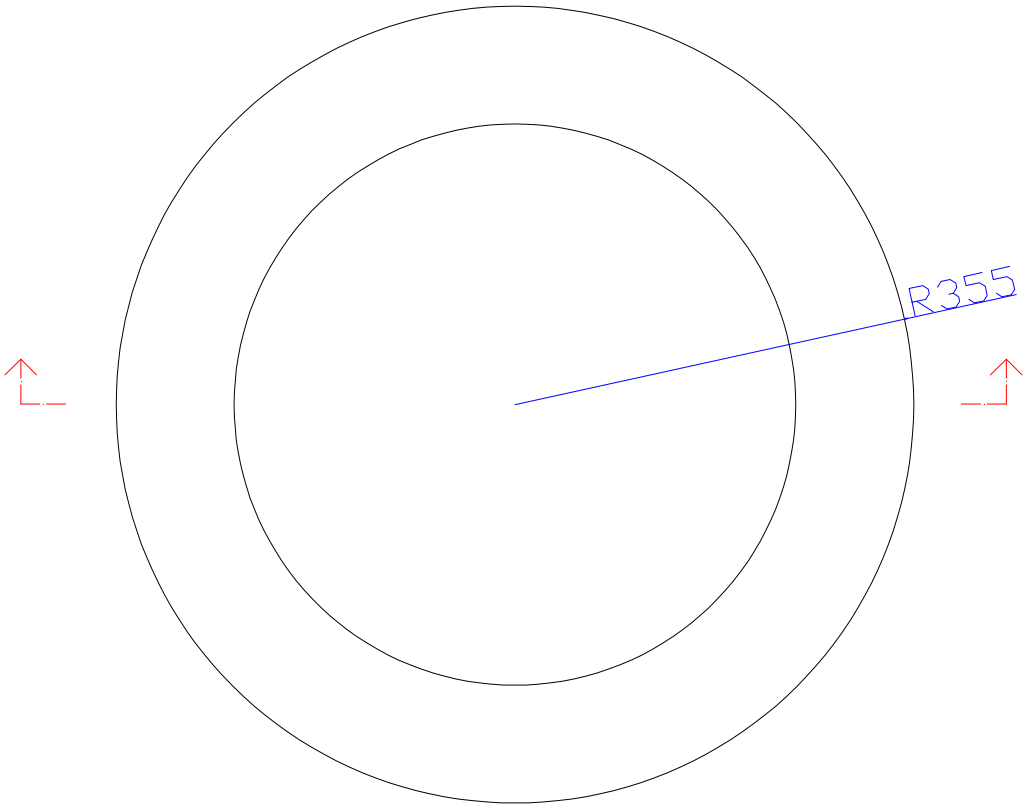
Κυκλώνας - Εμπρόσθια όψη



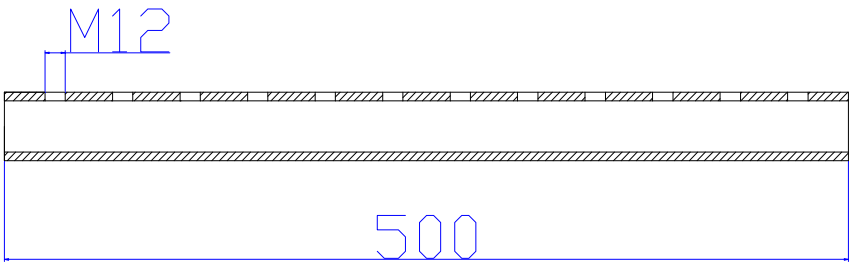
Κυκλώνας – Κάτοψη



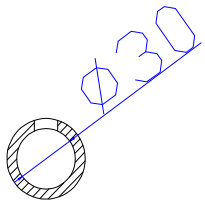
Κάλυμμα διασκορπιστή - Εμπρόσθια όψη



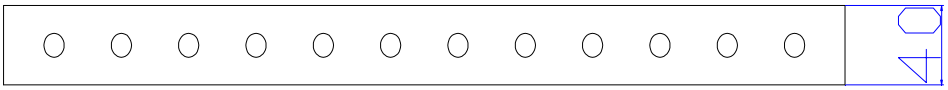
Κάλυμμα διασκορπιστή – Κάτοψη



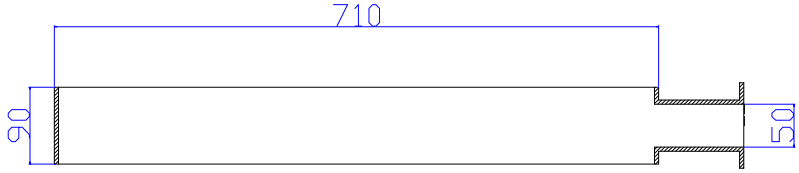
Σωλήνας μεταφοράς αέρα διασκορπιστή
Εμπρόσθια όψη



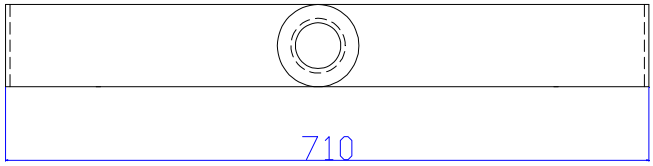
Σωλήνας μεταφοράς αέρα διασκορπιστή – Πλάγια Όψη



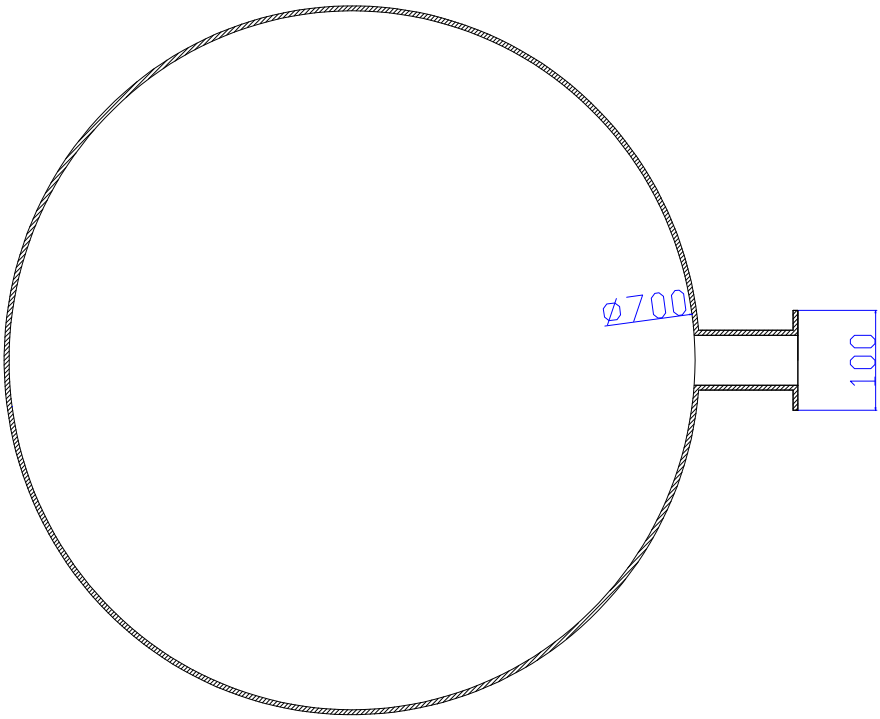
Σωλήνας μεταφοράς αέρα διασκορπιστή
Κάτοψη



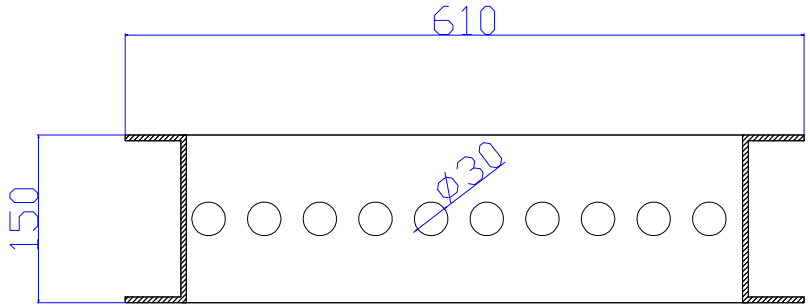
Τοίχωμα περιφερικού χώρου διασκορπιστή
Εμπρόσθια όψη



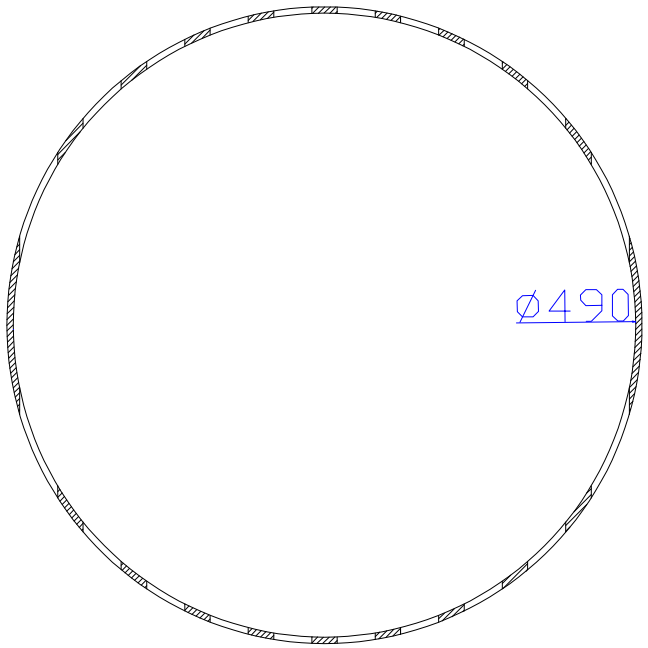
Τοίχωμα περιφερικού χώρου διασκορπιστή
Πλάγια Όψη



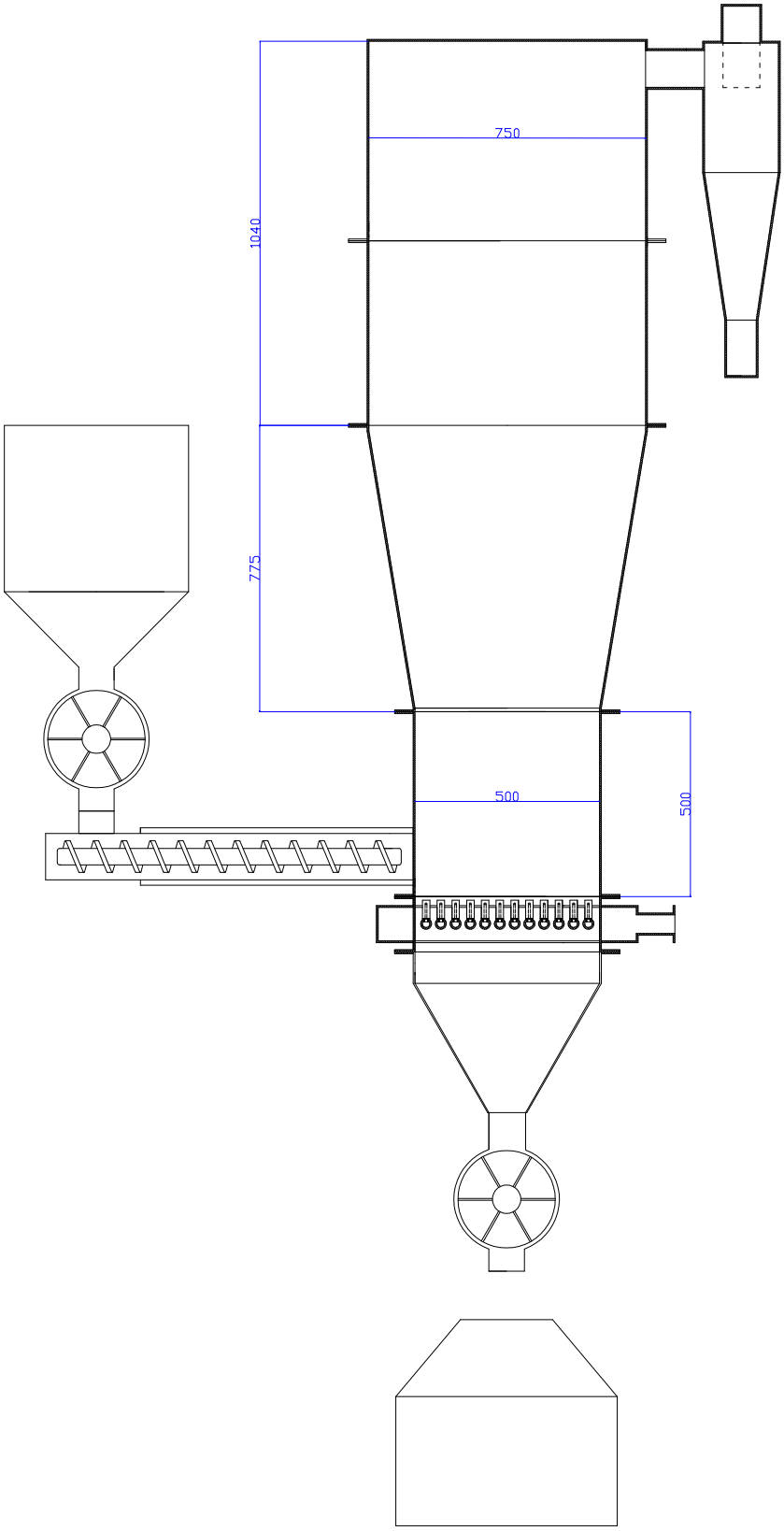
Τοίχωμα περιφερικού χώρου διασκορπιστή
Κάτοψη



Εσωτερικό τοίχωμα περιφερικού χώρου - Εμπρόσθια όψη



Εσωτερικό τοίχωμα περιφερικού χώρου – Κάτοψη



Σχεδιάγραμμα του αντιδραστήρα