



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ (PELLETIZING)

ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΤΕΜΑΧΙΔΙΩΝ

Τρίμη Πολυάνθη-Μαρία

Επιβλέπων: Τσακαλάκης Κωνσταντίνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ (PELLETIZING) ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΤΕΜΑΧΙΔΙΩΝ

Τρίμη Πολυάνθη-Μαρία

Επιβλέπων: Τσακαλάκης Κωνσταντίνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις /02/2015

Γ. Ν. ΑΝΑΣΤΑΣΑΚΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π., .....

Κ. Γ. ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π., .....

Η. ΧΑΛΙΚΙΑ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π., .....

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2015

Copyright © Τρίμη Πολυάνθη-Μαρία, 2015

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κο Κωνσταντίνο Τσακαλάκη για την εύρεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας και την εμπιστοσύνη την οποία μου έδειξε αναθέτοντάς την μου καθώς επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια και κατεύθυνση κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων όπως και σε ότι αφορά τη συγγραφή και διόρθωση της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κο Ηλία Σαμμάς Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργό, μέλος ΕΤΕΠ του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων του Ε.Μ.Π. για τη πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων της διπλωματικής εργασίας και που χωρίς αυτήν θα ήταν αδύνατη η περαίωσή της.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω συμφοιτητές, φίλους και την οικογένεια μου που με άμεσο ή έμμεσο τρόπο βοήθησαν στην διεκπεραίωση της παρούσης εργασίας προσφέροντας μου συμβουλές, γνώμες, συμπαράσταση και που μου στάθηκαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αφιερώνεται,  
στη σκυλίτσα μου Μάσκα

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαρκής εξόρυξη των διαφόρων κοιτασμάτων έχει οδηγήσει στην εξάντληση των φυσικών πόρων και σε μεγάλα προβλήματα διαχείρισης των μεγάλων όγκων των αποβλήτων, που προκύπτουν από την επεξεργασία τους. Έτσι, έχει παρουσιαστεί πιο επιτακτική από ποτέ η ανάγκη για τη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση των εξορυσσόμενων μεταλλευμάτων ακόμα και των πλέον λεπτόκοκκων, που έως τώρα απορρίπτονταν λόγω μεγέθους ως στείρα. Μια λύση σ' αυτό το πρόβλημα φαίνεται να δίνει η ολοένα μεγαλύτερη ανάπτυξη της βιομηχανίας παραγωγής σφαιροποιημένων προϊόντων (pellet).

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής pellet από ένα υλικό, το οποίο είναι απόβλητο βιομηχανικής κατεργασίας. Το συγκεκριμένο υλικό βρίσκεται σε μορφή σκόνης ενώ στα δείγματα προστίθενται διάφορες ποσότητες ασβεστόλιθου προκειμένου να διαπιστωθεί τυχόν θετική επίδραση του στην αντοχή και στις φυσικοχημικές ιδιότητες των παραγόμενων pellet. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις και συγκεκριμένα α) ένας δίσκος σφαιροποίησης παρόμοιος με αυτούς που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία και β) μία αυτοσχέδια μηχανή σφαιροποίησης. Επίσης πραγματοποιήθηκαν ορισμένες δοκιμές προκειμένου να διαπιστωθεί η ανθεκτικότητα του συγκεκριμένου υλικού στην τριβή και στην πτώση από ύψος. Οι παραπάνω δοκιμές έγιναν με σκοπό να βρεθεί αν τα pellet, που προκύπτουν, έχουν την απαιτούμενη αντοχή ώστε να μπορούν να καθίστανται εύκολα διαχειρίσιμα χωρίς να δημιουργούν προβλήματα, δηλαδή ερευνήθηκε η δυνατότητά τους να αποθηκεύονται και να μεταφέρονται χωρίς να καταστρέφονται. Τέλος, έγιναν δοκιμές και μετρήθηκε ο χρόνος αποσύνθεσης των pellet καθώς και η τιμή του pH που παρουσίασαν τα διαλύματα.

## **ABSTRACT**

The continuous deposit excavation has led to the exhaust of natural resources and has caused severe problems in handling the huge amounts of wastes produced. Thus the need for the maximum use of the excavated ores is more urgent than ever, even of the most fine grained ores that until now were dismissed as sterile. A solution to this problem may be introduced by the developing industry of granulated materials (pellet).

This thesis negotiates the possibility of producing pellet from materials labeled as industrial wastes. These materials were finely ground, whereas in the samples used for the experiments an amount of limestone was added in order to find out if any positive effects would appear on the durability and the physico-chemical abilities of the produced pellets. For this purpose two different machines were used.

Specifically:

- a) A granulation disc as those that are used in industrial scale and,
- b) a handmade granulation machine.

Moreover certain tests were carried out in order to measure the pellets resistance to friction and drop. These tests were conducted to find if the produced pellets had the demanding resistance so that they could be handled easily without causing problems. In other words, it was examined the degree of their ability to be stored and be transported without being damaged.

Furthermore, tests about the susceptibility of pellets to decompose were carried out, and the time of decomposition, as well as the pH of the produced solutions, were measured.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	2
1.2. ΑΙΤΙΕΣ.....	2
1.3. ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ.....	3
2. ΠΡΟΣΘΕΤΑ.....	5
2.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΛΥΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ.....	5
2.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ (ΥΛΙΚΟ ΑΡΑΙΩΣΗΣ).....	6
2.3. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ.....	6
3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ PELLEΤ.....	9
3.1. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΜΕ ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ.....	9
3.1.1. ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ.....	9
3.1.2. ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΟΚΚΟΥ.....	10
3.1.3. ΣΧΕΣΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΟΚΚΟΥ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΥΓΡΟΥ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ.....	11
3.1.4. ΑΛΛΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	11
3.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΜΕ ΤΟ ΥΓΡΟ ΜΕΣΟ.....	12
3.2.1. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΥΓΡΟΥ.....	12
3.2.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΔΙΑΛΥΤΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΤΙΘΕΤΑΙ.....	12
3.2.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΛΥΤΗ.....	13
3.3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	15
3.3.1. ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ.....	15
3.3.2. ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΙΣΚΟΥ.....	16
3.3.3. ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ.....	16
3.3.4. ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ.....	17
3.3.5. ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	18
4. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	20
4.1. ΔΙΣΚΟΙ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	20
4.1.1. ΧΡΗΣΕΙΣ.....	23
4.1.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	23
4.1.3. ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΔΙΣΚΩΝ.....	27
4.1.4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ- ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΣΚΟΥ.....	29
4.2. ΤΥΜΠΑΝΑ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	29

4.3. ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΤΕΣ ΤΥΠΟΥ ΜΙΞΕΡ.....	33
4.3.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	34
5. ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ PELLEΤ.....	36
5.1. ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ PELLEΤ.....	36
5.2. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΦΑΙΡΩΝ.....	37
5.3. ΞΗΡΑΝΣΗ ΚΑΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	37
5.4. ΨΥΞΗ ΤΩΝ PELLEΤ.....	38
6. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	39
6.1. ΥΨΙΚΑΜΙΝΟΣ.....	39
6.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΑΡΑΣ.....	40
6.3. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΣΧΑΡΑΣ-ΚΛΙΒΑΝΟΥ.....	41
6.4. Ο ΨΥΚΤΗΣ.....	42
7. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ.....	44
8. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ PELLEΤ.....	48
8.1. ΠΡΟΤΥΠΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ.....	49
8.2. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ.....	50
8.3. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	51
8.4. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ.....	52
8.5. ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗΝ ΠΤΩΣΗ.....	52
8.6. ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΩΣΕΩΝ.....	52
8.7. ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ.....	53
8.8. ΑΝΑΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΤΡΙΒΗ.....	53
8.9. ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΒΗΣ.....	54
8.10. ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΟΡΩΔΟΥΣ.....	55
8.11. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΣΕ ΥΓΡΑΣΙΑ.....	55
8.12. ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	55
9. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	56
9.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	56
9.2. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	56
9.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ PELLEΤ.....	62
10. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	66
10.1. ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΥΤΟΣΧΕΔΙΑ ΜΗΧΑΝΗ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	66
10.2. ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΣΚΟ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	70
11. ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	73



11.1. ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΒΗΣ.....	73
11.1.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	74
11.1.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	74
11.2. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΠΤΩΣΗ(ΚΡΟΥΣΗ).....	75
11.2.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	75
11.3. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ.....	76
11.3.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	76
11.3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ.....	77
11.4. ΜΕΤΡΗΣΗ pH.....	78
11.4.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	79
11.4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ.....	80
12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	81
13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83
13.1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Χαλίκια ασβεστόλιθου.....	7
Εικόνα 2: Pellet με προσθήκη 20% κ.β. ασβεστόλιθου.....	8
Εικόνα 3: Δίσκος σφαιροποίησης (αριστερά διακρίνεται το σύστημα ψεκασμού).....	21
Εικόνα 4: Δίσκος σφαιροποίησης σε λειτουργία.....	23
Εικόνα 5: Διάγραμμα ροής σφαιροποιητή δίσκου.....	24
Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση της κίνησης (τροχιές) που εκτελούν τα pellet στο δίσκο.....	25
Εικόνα 7: Σύστημα περιστροφής δίσκου.....	26
Εικόνα 8: Δίσκος σφαιροποίησης με επιπλέον κολάρο.....	28
Εικόνα 9: Τύμπανο σφαιροποίησης.....	31
Εικόνα 10: Τύμπανο σφαιροποίησης (στα δεξιά είναι εμφανής και ο μηχανισμός περιστροφής).....	32
Εικόνα 11: Μίξερ σφαιροποίησης.....	34
Εικόνα 12: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας σφαιροποίησης και ξήρανσης των pellets... ..	42
Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής εγκαταστάσεων σφαιροποίησης.....	47
Εικόνα 14: Μύλος θραύσης.....	59
Εικόνα 15: Μεταλλικά στοιχεία μύλου θραύσης.....	59
Εικόνα 16: Δειγματολήπτης (αριστερά), Σιαγωνωτός σπαστήρας (δεξιά).....	60
Εικόνα 17: Πούδρα ασβεστόλιθου (αριστερά), Αναμεμειγμένο υλικό με ασβεστόλιθο (δεξιά).....	61
Εικόνα 18: Αυτοσχέδια μηχανή σφαιροποίησης.....	62
Εικόνα 19: Δίσκος σφαιροποίησης (παραγωγής pellet).....	63
Εικόνα 20: Υλικό που παράχθηκε με την πρώτη μέθοδο.....	64
Εικόνα 21: Κοκκομετρική ανάλυση υλικού.....	64
Εικόνα 22: Pellet αμέσως μόλις βγήκαν από την αυτοσχέδια μηχανή σφαιροποίησης. Είναι εμφανής η υγρασία στην επιφάνεια των pellet.....	65
Εικόνα 23: Κοκκομετρικές αναλύσεις για αναλογίες ασβεστόλιθου 0%, 10%, 20% και 30% (αριστερά προς τα δεξιά).....	66
Εικόνα 24: Υλικό που κατά την ξήρανση παραμορφώθηκε.....	68
Εικόνα 25: Μύλος πορσελάνης- δοχείο τοποθέτησης του δείγματος(πάνω) και μηχανισμός περιστροφής του(κάτω αριστερά).....	73
Εικόνα 26: Κοκκομετρικές των pellet από 0% έως 30% περιεκτικότητας σε ασβεστόλιθο αφούτου πέρασαν από το μύλο.....	74
Εικόνα 27: Δονούμενος τροφοδότης.....	75
Εικόνα 28: Εσωτερικό των pellet.....	76

Εικόνα 29: Δοκιμές αποσύνθεσης.....	76
Εικόνα 30: Διαλύματα με αναλογία ασβεστόλιθου 30%(αριστερά) και 0% (δεξιά).....	78
Εικόνα 31: Ικανότητα εξουδετέρωσης χημικών ενώσεων του ασβεστίου.....	79
Εικόνα 32: Συσκευή μέτρησης pH.....	79



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνική της σφαιροποίησης υπάρχει από τα αρχαία ακόμα χρόνια σε πιο πρώιμα στάδια φυσικά, ενώ χρησιμοποιούταν στην αργυροχρυσοχοΐα. Τα ολοένα και φτωχότερα κοιτασμάτα και η ανάγκη αύξησης της αποδοτικότητας τους μέσω της δημιουργίας κυκλωμάτων ανακύκλωσης των παραπροϊόντων τους, έστρεψε τον κλάδο της μεταλλουργίας προς την έρευνα για την δημιουργία νέων μορφών τροφοδοσίας με αποτέλεσμα την ανάπτυξη των τεχνικών της συσσωμάτωσης, της σφαιροποίησης και της μπρικετοποίησης. Όλες βασίζονται στην ίδια αρχή της δημιουργίας συσσωματωμάτων ικανών να επανατροφοδοτήσουν καμίους ή να αποκτήσουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ώστε να είναι δυνατή η εύκολη μεταφορά τους και η περαιτέρω χρήση τους. Η τεχνική δημιουργίας pellet αναπτύχθηκε ιδιαίτερα την δεκαετία του '50 από την ανάγκη αξιοποίησης των μέχρι τότε άχρηστων υλικών, όπως σκόνης και παραγώνων της μεταλλουργίας, που δεν ήταν δυνατό να αξιοποιηθούν λόγω του πολύ μικρού μεγέθους τους.

Τα pellet είναι σφαιρικοί κόκκοι, που σχηματίζονται με συσσωμάτωση των ψιλών τεμαχίων σκόνης των σιδηρομεταλλευμάτων με διαβροχή με ένα ρευστό μέσο και με χρήση κάποιου προσθετικού υλικού, ενώ στη συνέχεια υπόκεινται σε ξήρανση και σκλήρυνση στους 1300°C (Pati&Vinay, 2008).

Συχνά αναφέρεται και ο όρος green pellet που αναφέρεται στα νωπά σφαιρίδια ή αλλιώς στα ωμά pellet και πρόκειται για σφαιρίδια που μόλις έχουν βγει από το σφαιροποιητή και δεν έχουν υποστεί κάποια επιπλέον επεξεργασία.

Τα pellet χρησιμοποιούνται από πολλές διαφορετικές βιομηχανίες, όπως την φαρμακοβιομηχανία, την αγροτική βιομηχανία και τη μεταλλουργία. Εκτός όμως από την βιομηχανική τους χρήση, τα pellet έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλή και σε οικιακούς καυστήρες μειώνοντας το κόστος θέρμανσης και τους ρύπους, ενώ ακόμα διερευνάται η δυνατότητα τους να αποτελέσουν την καύσιμη ύλη για οχήματα. Όπως είναι φυσικό υπάρχουν τεράστιες αποκλίσεις μεταξύ τους όσον αφορά τις απαιτήσεις τους σε σχήμα και μέγεθος κόκκου, με αποτέλεσμα τα pellet να νοούνται διαφορετικά σε κάθε μία από τις ανωτέρω χρήσεις. Η ανάγκη δημιουργίας των pellet προέκυψε από την ευκολία, που παρουσιάζει η μεταφορά και η χρήση τους, σε σύγκριση με την σκόνη και από την δυνατότητα τους να αποκτούν και κάποιες επιπλέον επιθυμητές ιδιότητες με κατάλληλα πρόσθετα. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί χρησιμοποιούμενοι όροι, κυριότεροι των οποίων είναι granulation και pelletization. Ενώ όμως είναι συνώνυμοι, εμφανίζονται κάποιες διαφορές μεταξύ τους. Granulation καλείται η διεργασία αύξησης του μεγέθους, που παράγει συσσωματώματα με κατανομή μεγέθους μεταξύ 0.1mm-2.0mm και μεγάλου πορώδους (20-50%),

ενώ ο όρος pelletization συχνά χρησιμοποιείται για να περιγράψει μία διεργασία αύξησης του μεγέθους, που εννοεί την κατασκευή συσσωματωμάτων με μέσο μέγεθος 0.5-2.0mm και το προϊόν της οποίας ονομάζεται pellet. Τα pellet έχουν ιδιότητες ελεύθερης ροής και χαμηλό πορώδες (περίπου 10%). Το μέγεθος των pellet, όπως επίσης και το σχήμα τους, εξαρτάται από τη χρήση, για την οποία προορίζονται. Υπάρχουν διάφορες τυποποιήσεις αλλά αναφέρονται κυρίως στη καταλληλότητα των pellet που προορίζονται για καύσιμη ύλη. Χώρες όπως η Αυστρία, η Γερμανία και η Σουηδία, χρησιμοποιούν τα δικά τους πρότυπα ενώ γίνεται μια προσπάθεια θεσμοθέτησης και δημιουργίας ενιαίων Ευρωπαϊκών προτύπων αντίστοιχων με το διεθνές πρότυπο ISO ([http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieep/projects/files/projects/document/s/pellets/pellet\\_standards.pdf](http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieep/projects/files/projects/document/s/pellets/pellet_standards.pdf), ) .

## **1.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

Η χρήση των pellet παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Πιστοποίηση (ομοιόμορφη κατανομή μεγέθους, γενικά μεταξύ 6-16mm)
2. Καθαρότητα μεταλλεύματος
3. Βελτιωμένα χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος
4. Ευκολότερη διαχείριση των υλικών
5. Μείωση της ποσότητας των αποβλήτων
6. Απόδοση κόστους
7. Εύκολη μεταφορά, χαμηλή υποβάθμιση μεγέθους ακόμα και σε συνθήκες τριβής
8. Υψηλή και ομοιόμορφη μηχανική αντοχή
9. Προστασία του περιβάλλοντος
10. Αξιοποίηση ψιλών τεμαχίων
11. Μεγάλο και ομοιόμορφο πορώδες της τάξεως του 25-30%

(<http://feeco.com/agglomeration/>, )

## **1.2. ΑΙΤΙΕΣ**

Ένας λόγος για τον οποίο επιλέγεται να γίνει η σφαιροποίηση είναι ότι τα λεπτά τεμάχια παρουσιάζουν δυσκολία στην αποφόρτιση και κολλούν στα τοιχώματα. Το παραπάνω φαινόμενο μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με δόνηση ή με μηχανική ανάδευση, αλλά παρόλα αυτά είναι δύσκολο να ξεπεραστεί τελείως. Η μοναδική ικανοποιητική λύση είναι να αυξηθεί το μέγεθος του κόκκου μέσω της συσσωμάτωσης. Περαιτέρω, τα πολύ λεπτά τεμάχια δημιουργούν περιβαλλοντολογικά προβλήματα και προβλήματα υγείας λόγω της ικανότητάς τους να σχηματίσουν σύννεφα κατά τη

διάρκεια της φόρτωσης, ενώ σε συνθήκες όπου επικρατεί άνεμος η σκόνη διαχέεται σε μεγάλες αποστάσεις (<http://www.slideshare.net/wisdomvalley/agglomeration>, ).

### 1.3. ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ

Η συσσωμάτωση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, αφενός χωρίς την εφαρμογή πίεσης (ανάπτυξη κόκκων με κύλιση) και αφετέρου με την εφαρμογή πίεσης:

- Χωρίς την εφαρμογή πίεσης

Η συσσωμάτωση με κύλιση γίνεται χωρίς την εφαρμογή πίεσης και συνήθως επιτυγχάνεται παρουσία κάποιου προσθετικού. Με δεδομένο το γεγονός ότι κάποιο ποσό υγρασίας πρέπει να υπάρχει στην τροφοδοσία του υλικού ή και να προστίθεται κατά την διάρκεια της σφαιροποίησης, το τελικό συσσωμάτωμα είναι σχετικά μαλακό και συνήθως απαιτείται ένα επόμενο βήμα στη διεργασία προκειμένου αυτό να ξηραθεί, να υποστεί επεξεργασία ή να ψηθεί για να αποκτήσει την τελική του αντοχή. Τα προϊόντα της συσσωμάτωσης χωρίς την εφαρμογή πίεσης είναι σφαιρικά ή σφαιροειδή pellet.

Ο εξοπλισμός που συνήθως χρησιμοποιείται είναι:

- σφαιροποιητές Δίσκου
  - Μίξερ
  - σφαιροποιητές Τυμπάνου
- Με την εφαρμογή πίεσης

Πρόκειται για διαδικασία, κατά την οποία η αύξηση του μεγέθους των τεμαχίων της σκόνης γίνεται σε ξηρό περιβάλλον. Η συμπύκνωση του προϊόντος γίνεται με την εφαρμογή πίεσης με μηχανικό τρόπο, δηλ. με τη χρήση ενός διπλού συμπιεστή. Σε αυτή την μέθοδο απαιτείται καθόλου ή ελάχιστη υγρασία.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι:

- Συμπιεστές κύλισης
- Συσκευές δημιουργίας μπρικεττών

(<http://feeco.com/agglomeration/>, )

Η τεχνική της σφαιροποίησης είναι η πιο διαδεδομένη στη μεταλλουργία. Κατά την διάρκεια της συσσωμάτωσης γίνεται χρήση κάποιου υγρού μέσου (συνήθως πρόκειται για νερό), το οποίο προστίθεται στην σκόνη πριν ή κατά το στάδιο της ανάμιξης. Καθώς η σκόνη έρχεται σε επαφή με την υγρή φάση σχηματίζονται πυρήνες, οι οποίοι αναπτυσσόμενοι δημιουργούν τα πρώτα συσσωματώματα. Ο βαθμός της συσσωμάτωσης εξαρτάται από παράγοντες, όπως το μέγεθος κόκκου, η διαλυτότητα της σκόνης, ο βαθμός υγρασίας και το ιξώδες της υγρής φάσης. Προκειμένου να δημιουργηθούν σφαιρίδια το υλικό εισέρχεται στη μηχανή σφαιροποίησης, η οποία εκτελεί μία κυκλική κίνηση, που μεταδίδεται στο υλικό. Ακολουθούν συγκρούσεις των κόκκων τόσο μεταξύ τους όσο και με τα τοιχώματα του θαλάμου σφαιροποίησης και έτσι τα τεμάχια σταδιακά αποκτούν το κατάλληλο σχήμα και μέγεθος (Ratul&Baquee, 2013).



## 2. ΠΡΟΣΘΕΤΑ

### 2.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΛΥΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ

Ένας διαλύτης ή ένα πρόσθετο μπορεί να είναι ένα υγρό ή στερεό, που είτε σχηματίζει γέφυρα ή φιλμ είτε προκαλεί χημική αντίδραση για να ισχυροποιήσει τους δεσμούς μεταξύ των κόκκων. Η επεξεργασία με ατμό ή η προθέρμανση είναι βασικές διεργασίες προκειμένου να προστεθεί στο σύστημα η απαιτούμενη θερμότητα και υγρασία και να ενεργοποιηθούν τα πρόσθετα. Η επιλογή του προσθετικού υλικού εξαρτάται βασικά από το κόστος του, τις ιδιότητες του και το κατά πόσο φιλικό είναι προς το περιβάλλον. Σήμερα υπάρχουν διαθέσιμοι περισσότεροι από 50 οργανικοί και ανόργανοι διαλύτες (Kaliyan & Morey, 2008). Σε πολλές περιπτώσεις ο σχηματισμός pellet από το υλικό με απλή προσθήκη νερού δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τις επιθυμητές ιδιότητες. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά, τα οποία είναι ικανά να βελτιώσουν τις ήδη υπάρχουσες ιδιότητες ή να μειώσουν την επιρροή αυτών ή και να προσδώσουν νέες. Συνήθως ο ρόλος του πρόσθετου είναι να βελτιώνει την ικανότητα σφαιροποίησης του υλικού, την αντοχή σε πτώση και σε θλίψη των green pellet, και να ρυθμίζει την ορυκτολογική και χημική σύσταση καθώς και την ποιότητα των ψημένων pellet (P.V.T.Rao, 1994). Τα πρόσθετα αποκτούν κατάλληλη κοκκομετρία, ανακατεύονται με το υλικό και μετά τροφοδοτούνται στην διάταξη σφαιροποίησης μαζί με το υλικό. Πολλά υλικά έχουν δοκιμαστεί ως πρόσθετα αλλά μόνον ο μπεντονίτης, ο ασβεστόλιθος και ο δολομίτης χαίρουν ευρείας εφαρμογής, ενώ από αυτά μόνον ο μπεντονίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως συνδετικό μέσο.

Παραδείγματα χρησιμοποίησης προσθετικών υλικών με σκοπό να αλλάξει η χημική σύσταση των παραγόμενων pellet, ειδικά αυτών που σχηματίζουν σκουριά, είναι:

- Ασβέστης και ενώσεις του ασβεστίου και του μαγνησίου
- Ανακυκλώσιμα υλικά
- Μεταλλεύματα με μεγάλη ικανότητα σχηματισμού ενώσεων

(Meyer, 1980)

Για την επιλογή των προσθέτων όμως, εκτός από τις επιθυμητές ιδιότητες τους, πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες όπως:

1. Η τοποθεσία του εργοστασίου σε σχέση με τον τόπο προμήθειας τους, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά το κόστος μεταφοράς
2. Η κατανάλωση (gal/day) και η κατ' όγκο χρήση
3. Περιβαλλοντολογικοί περιορισμοί (οσμές, διαβρωτικότητα κ.α.)

Ακόμα, η προσθήκη ουσιών ανάλογα με την ποιότητα τους δύναται να επηρεάσει τις ιδιότητες των pellet, όπως:

1. Την αντοχή και το μέγεθος
2. Το ποσοστό εφαρμογής του πρόσθετου στο ξηρό pellet
3. Τα χαρακτηριστικά ξήρανσης (κόστος καυσίμων)

Περαιτέρω η προσθήκη ουσιών ενδέχεται να δημιουργήσει την ανάγκη τοποθέτησης προστατευτικής επένδυσης στο μηχανικό εξοπλισμό προς αποφυγή της φθοράς από τριβή και αντιμετώπιση του αυξημένου κόστους συντήρησης (Veverka & Hinkle, 2001).

## **2.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ (ΥΛΙΚΟ ΑΡΑΙΩΣΗΣ)**

Για να συγκριθούν τα πρόσθετα και να επιλεγεί αυτό που θα χρησιμοποιηθεί για την σφαιροποίηση πρέπει να γίνουν δοκιμές με διαφορετικά ποσοστά πρόσθετου και διαφορετικούς ρυθμούς προσθήκης του κάθε φορά. Έπειτα τα pellet πρέπει να ελεγχθούν προκειμένου να παρατηρηθούν οι τυχόν επιδράσεις των προσθετικών και να γίνουν παρεμβάσεις στη διαδικασία παραγωγής για να βελτιστοποιηθούν τα χαρακτηριστικά τους. Η εφαρμογή αυτής της τακτικής μπορεί να είναι δύσκολη και χρονοβόρα αλλά παρέχει αρκετές χρήσιμες πληροφορίες (<http://www.biofuelmachines.com/Additives-in-biomass-pellet-making.html>, ).

## **2.3. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ**

Σε αυτή την εργασία σαν πρόσθετο επιλέχθηκε ο ασβεστόλιθος. Είναι ιζηματογενές πέτρωμα και αποτελείται περισσότερο από ασβεστίτη και λιγότερο από αραγωνίτη. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ο ασβεστόλιθος ως προσθετικό υλικό, πρέπει πρώτα να θραυστεί, ταξινομηθεί, πλυθεί και, εάν αυτό είναι απαραίτητο, να λειοτριβηθεί. Εξαιρετικά ρυπασμένοι ασβεστόλιθοι ή ασβεστόλιθοι με μεγάλο ποσοστό λεπτομερούς δεν είναι κατάλληλοι για την παραγωγή pellet. Ο ασβεστόλιθος σαν προσθετικό χρησιμοποιείται κυρίως για να αυξήσει την βασικότητα των pellet. Ακόμα ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται σαν πρόσθετο και σε βιοκαύσιμα, που χρησιμοποιούνται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις μειώνοντας έτσι την εμφάνιση σκωρίας στις καμίνους και δημιουργώντας  $\text{CaSO}_4$ , που έχει υψηλότερο σημείο τήξης και παραμένει ως στάχτη. Επίσης, αποτρέπει σε μεγάλο βαθμό το σχηματισμό  $\text{HCl}$ , κάτι που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα (Meyer, 1980).



*Εικόνα 1: Χαλίκια ασβεστόλιθου*

Ακόμα ένα πλεονέκτημά του είναι ότι λόγω των ιδιοτήτων του δύναται να αντικαταστήσει τα προσθετικά, που έως τώρα χρησιμοποιούνται στα γεωργικά λιπάσματα και συνεισφέρουν ελάχιστα στην βελτίωση της ποιότητας τους, η δε χρήση αυτή καθιστά εκμεταλλεύσιμα και τα πλέον λεπτομερή απορρίμματα του (Albert & Langford, 1994).

Ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται πολύ συχνά και ως λίπασμα σε μορφή pellet, αφού είναι ακίνδυνο για το περιβάλλον, αντιδρά με το νερό (διαλύεται στο χώμα) αποδίδοντας ιόντα Ca και λειτουργεί ως προσθετικό για έλεγχο του pH και βελτίωση των καλλιεργειών. Για την βέλτιστη χρήση του όμως, το μέγεθος τεμαχίου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Η χρήση της σκόνης ασβεστόλιθου, παρά το γεγονός ότι τα λεπτά τεμάχια του δεν παύουν να διατηρούν όλες τις χημικές ιδιότητες αυτού, παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες κυρίως κατά την μεταφορά του υλικού και την διανομή του χωρίς να είναι φιλικό προς τον χρήστη (Veverka & Hinkle, 2001). Έτσι, για την εφαρμογή στη γεωργία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει, αφού δεν είναι δυνατό να διασκορπιστεί ομοιόμορφα και να απορροφηθεί γρήγορα εάν βρίσκεται σε μορφή σκύρων, ενώ αν βρίσκεται σε μορφή σκόνης και μεν χρησιμοποιείται πλην όμως κινδυνεύει να παρασυρθεί από τον αέρα δημιουργώντας προβλήματα σε γειτονικές περιοχές. Επομένως, για να μπορέσει να γίνει χρηστικός πρέπει πρώτα να θραυστεί, να λειοτριβηθεί και κατόπιν να συσσωματωθεί (pelletizing). Κατόπιν, με τη βοήθεια της υγρασίας της ατμόσφαιρας, της βροχής κλπ. θα μπορέσει να διαλυθεί αργά στο έδαφος και να συμβάλει θετικά στην καλλιέργεια (Albert & Langford, 1994).



Εικόνα 2: Pellet με προσθήκη 20% κ.β. ασβεστόλιθου

Η ταχύτητα αντίδρασης (ο ρυθμός με τον οποίο ο ασβεστόλιθος επιδρά στο pH του εδάφους) είναι βασικά συνάρτηση της επιφάνειας των κόκκων του ασβεστόλιθου και της επαφής τους με το έδαφος. Όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το υλικό τόσο μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια έχει και άρα μεγαλύτερη ταχύτητα αντίδρασης. Από τη στιγμή που τα pellet ασβεστόλιθου παράγονται από λεπτομερή σκόνη είναι εύκολο να αντιληφθούμε ότι θα αντιδρά ταχύτερα σε σχέση με την απλή διασπορά σκύρων ασβεστόλιθου, τα οποία είναι πολύ πιο χονδρόκοκκα και συμπαγή και δεν αντιδρούν με την ίδια ευκολία. Παρόλα αυτά φαίνεται ότι ο σφαιροποιημένος ασβεστόλιθος δεν αυξάνει ταχύτερα το pH του εδάφους σε σχέση με ένα καλής ποιότητας ασβεστολιθικό λίπασμα. Συγκρίνοντας τα δύο αυτά υλικά απαιτείται μικρότερη ποσότητα ασβεστολιθικών pellet για την αύξηση του pH του εδάφους στο επιθυμητό επίπεδο. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζει αυτά τα πλεονεκτήματα, η διεργασία σφαιροποίησης του ασβεστόλιθου επηρεάζει σημαντικά την τιμή του προϊόντος, ούτως ώστε ο σφαιροποιημένος ασβεστόλιθος να είναι μεν μια πηγή υψηλής ποιότητας ασβεστόλιθου, πλην όμως η χρήση του στη γεωργία να έχει περιοριστεί κυρίως λόγω της τιμής του (Murdock, 1997).

### **3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ PELLEΤ**

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το τελικό προϊόν της σφαιροποίησης (όσον αφορά το σχήμα του, την σφαιρικότητά του και την αντοχή του) και κάποια χαρακτηριστικά της όλης διεργασίας. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να διαχωρισθούν σε τρεις ομάδες ανάλογα με την εξάρτησή τους από το υλικό τροφοδοσίας, το διαλύτη ή τα κατασκευαστικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος. Παράγοντες που σχετίζονται με το υλικό τροφοδοσίας είναι για παράδειγμα η μορφή στην οποία αυτό βρίσκεται, το σημείο όπου γίνεται η τροφοδότηση του δίσκου και το μέγεθος κόκκου του υλικού της τροφοδοσίας. Αντίστοιχα παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με την προσθήκη του υγρού διαλύτη είναι ο τρόπος, με τον οποίο γίνεται ο ψεκάσμος του υλικού μέσα στη μηχανή σφαιροποίησης, καθώς επίσης το ιξώδες, που αυτό έχει, και η αναλογία του υγρού μέσου με το στερεό υλικό. Τέλος παράγοντες που σχετίζονται με τον εξοπλισμό είναι το σύστημα ψεκάσμου, η διάμετρος, η ταχύτητα περιστροφής και η κλίση του δίσκου σφαιροποίησης καθώς επίσης και ο χρόνος που το υλικό παραμένει στο σφαιροποιητή.

#### **3.1. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΜΕ ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ**

##### **3.1.1. ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ**

Η τροφοδοσία στο δίσκο, τύμπανο και κώνο είναι συνήθως σε μορφή σκόνης, ειδικά στη σφαιροποίηση σιδηρομεταλλευμάτων. Η ξηρή τροφοδοσία για την παραγωγή των pellet εμφανίζει κάποια πλεονεκτήματα σε ορισμένες περιπτώσεις, ενώ συχνά υπαγορεύεται από την ίδια τη διεργασία. Η προετοιμασία του υλικού τροφοδοσίας είναι πολύ σημαντική για μια πετυχημένη σφαιροποίηση. Η σωστή ανάμιξη των υλικών της τροφοδοσίας, όταν αυτά είναι διαφορετικά και ειδικά όταν έχουν διαφορετική κοκκομετρική σύσταση, είναι πολύ σημαντική.

Η κατανομή μεγέθους των τεμαχίων του υλικού τροφοδοσίας είναι πολύ σημαντική, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, ειδικά στην περίπτωση του τύμπανου και του κώνου και σε μικρότερο βαθμό του δίσκου. Σε όλες τις μονάδες σφαιροποίησης υπάρχει ένα συγκεκριμένο ανώτατο μέγεθος κόκκου, μέχρι το οποίο αυτή είναι αποτελεσματικότερη. Οι βαθείς δίσκοι, που είναι μονάδες με λόγο βάθους προς διάμετρο 0.5 ή μεγαλύτερο, εμφανίζονται να έχουν μεγαλύτερη ανεκτικότητα σε υψηλότερα ποσοστά χονδρού υλικού.

Οι μονάδες σφαιροποίησης είναι ευαίσθητες στις διακυμάνσεις της τροφοδοσίας, δηλαδή στις μεταβολές της πυκνότητας, της κατανομής του μεγέθους τεμαχίων, της θερμοκρασίας και του

ρυθμού, με τον οποίο διακυμαίνεται η τροφοδοσία. Η διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού σφαιροποίησης και ποιότητας προϊόντος είναι σχεδόν αδύνατη, εάν προηγουμένως δεν σταθεροποιηθεί η τροφοδοσία. Η μη σταθερή τροφοδοσία του υλικού είναι πηγή πολλών προβλημάτων στα συστήματα σφαιροποίησης. Ο ασταθής ρυθμός σφαιροποίησης εμποδίζει την επίτευξη και διατήρηση σταθερής ποιότητας pellet και ρυθμού παραγωγής.

Η διατήρηση απόλυτα σταθερής ποιότητας προϊόντος είναι σχεδόν αδύνατη και είναι αναμενόμενο να υπόκειται σε περιοδικές διακυμάνσεις. Για να επιτευχθεί η παραγωγή ενός δεδομένου μεγέθους pellet πρέπει όλες οι μεταβλητές, που εμπλέκονται στη διεργασία, να προσαρμοστούν κατάλληλα σύμφωνα με το είδος του υλικού.

Οι προσαρμογές που γίνονται αφορούν:

1. το ρυθμό τροφοδοσίας του υλικού
2. το ρυθμό τροφοδοσίας του νερού
3. το μέγεθος της σταγόνας που ψεκάζεται
4. τη θέση (περιοχή) ψεκασμού
5. την κλίση του μηχανήματος
6. την ταχύτητα

Ο ρυθμός τροφοδοσίας για ακριβή έλεγχο του μεγέθους του προϊόντος και της ποιότητας του εξαρτάται είτε από τη φύση του υλικού, είτε από την μετέπειτα διεργασία ξήρανσης είτε γενικά από τις απαιτήσεις της διεργασίας.

Διαφορετικές μονάδες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας. Σε κάποιες μονάδες οι διαφορές είναι πιο εμφανείς, ενώ σε άλλες λιγότερο και εξαρτώνται από τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει το υλικό. Επίσης, είναι εμφανές ότι τα συνδετικά υλικά προσθέτουν επιπλέον χαρακτηριστικά και πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η αλλαγή της χημικής τους σύστασης έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη ποιότητα των pellet. Αυτό όμως αυξάνει σημαντικά και το κόστος παραγωγής. Η σωστή ρύθμιση του μεγέθους τεμαχίου τροφοδοσίας είναι πρακτικά ο πιο σίγουρος τρόπος για να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα στους μέγιστους ρυθμούς παραγωγής(<http://www.slideshare.net/wisdomvalley/agglomeration>, ).

### **3.1.2. ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΟΚΚΟΥ**

Οι επιθυμητές ιδιότητες των pellet εξαρτώνται αρκετά από τον τύπο του μεταλλεύματος και τις ποιοτικές απαιτήσεις της παραγωγής. Γενικά, για την παραγωγή pellet με υψηλή αντοχή είναι επιθυμητό κανένα τεμάχιο της τροφοδοσίας να μην είναι μεγαλύτερο από 0.2mm, ενώ το ποσοστό τεμαχίων μικρότερων του 0.04mm πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 60-90%. Λεπτότερο υλικό παράγει

pellet με υψηλή αντοχή αλλά με χαμηλό πορώδες. Οι μικροί κόκκοι προσλαμβάνουν περισσότερη υγρασία από τα μεγάλα τεμάχια και έτσι υπόκεινται σε μεγαλύτερου βαθμού επεξεργασία. Επίσης τα μεγάλα τεμάχια έχουν ρωγματώσεις, που προκαλούν σπασίματα στα pellet. Το προτεινόμενο μέγεθος των τεμαχίων τροφοδοσίας είναι 0.6mm έως 0.8mm για την παραγωγή καλύτερης ποιότητας pellet. Έχει προταθεί τα τεμάχια τροφοδοσίας για την δημιουργία pellet να κυμαίνονται από 0.5-0.7mm για να επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη αντοχή(Kaliyan & Morey, 2008). Παρότι γενικά προτιμώνται λεπτά τεμάχια σαν τροφοδοσία, η άλεση στο μύλο καλό είναι να αποφεύγεται γιατί αυξάνει το κόστος της παραγωγής, περαιτέρω δε το πολύ λεπτομερές υλικό μπορεί να προκαλέσει πιθανό ρωγματώσεις στα pellets κατά το στάδιο ξήρανσης(Kaliyan & Morey, 2008) (P.V.T.Rao, 1994) Ένα μείγμα διαφορετικών μεγεθών τεμαχίων μπορεί να δώσει τη βέλτιστη ποιότητα pellet γιατί η μίξη αυτή θα μειώσει τα κενά μεταξύ των κόκκων, αφού τα λεπτομερή τεμάχια τείνουν να επικάθονται στα κενά που δημιουργούν τα μεγαλύτερα τεμάχια(Kaliyan & Morey, 2008) .

### **3.1.3. ΣΧΕΣΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΟΚΚΟΥ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΥΓΡΟΥ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ**

Υπάρχουν έρευνες που καταδεικνύουν ότι το αρχικό μέγεθος κόκκου παίζει ρόλο στην ποσότητα του υλικού συσσωμάτωσης που προστίθεται. Υπάρχει μια γενική τάση να χρησιμοποιείται περισσότερο υγρό όταν το αρχικό μέγεθος κόκκου είναι μικρό, ενώ απαιτείται λιγότερο υγρό για να επιτευχθεί ίδιο μέγεθος pellet, όταν χρησιμοποιείται και ένα μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων για την σφαιροποίηση. Αυτό συμβαίνει επειδή όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του κόκκου τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια. Τα συσσωματώματα σχηματίζονται και αυξάνουν σε μέγεθος εξαιτίας της παρουσίας υγρών γεφυρών μεταξύ των αρχικών κόκκων. Παρόλα αυτά η απαίτηση σε υγρό επηρεάζεται επίσης και από άλλους παράγοντες όπως το πορώδες. Το αρχικό μέγεθος κόκκου, ακόμα, επηρεάζει τη κρίσιμη τιμή του ιξώδους του μίγματος, που χρειάζεται για την ανάπτυξη των κόκκων. Για να προληφθεί πιθανή θραύση των pellet, όταν η τροφοδοσία είναι σχετικά χονδρομερής, χρησιμοποιούνται υγρά υψηλότερου ιξώδους(Salman et al., 2007) .

### **3.1.4. ΑΛΛΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

Τέτοιες μπορεί να είναι η θερμοκρασία, το φορτίο κλπ. Μείωση στο φορτίο οδηγεί σε μικρότερο μέγεθος pellet ενώ εμφανίζει και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Μικρό φορτίο οδηγεί σε αυξημένο ποσοστό σβόλων και χαμηλού επιπέδου επικαλυψιμότητα(Salman,Ghadiri & Hounslow, 2007) .

Η θερμοκρασία συνήθως αυξάνεται για να ενεργοποιήσει τους διαλύτες. Αυξημένη θερμοκρασία

προάγει την πλαστική παραμόρφωση, η οποία είναι σημαντική για την δημιουργία σταθερών δεσμών. Η θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί είτε με άμεσο είτε με έμμεσο τρόπο. Απευθείας θέρμανση περιλαμβάνει την τριβή, τη θέρμανση του φορτίου και την επεξεργασία με ατμό. Έμμεση θέρμανση περιλαμβάνει τα συστήματα, όπως θερμοσυσσωρευτές ηλεκτρικής αντίστασης και εναλλάκτες κυκλοφορίας θερμού λαδιού(Kaliban & Morey, 2008).

## **3.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΜΕ ΤΟ ΥΓΡΟ ΜΕΣΟ**

### **3.2.1. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΥΓΡΟΥ**

Η προσθήκη του υγρού στο σφαιροποιητή γίνεται από τα ακροφύσια ψεκασμού. Εάν το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας είναι λιγότερο από ένα συγκεκριμένο όριο, η διανομή του τείνει να είναι ανομοιογενής με το περισσότερο να βρίσκεται συγκεντρωμένο στα σφαιρίδια αφήνοντας έτσι το υλικό που βρίσκεται σε μορφή σκόνης σχετικά στεγνό. Εάν το ποσό του προστιθέμενου νερού κατά τη διεργασία ξεπερνά ένα όριο αυξάνεται ο ρυθμός ανάπτυξης των pellet αλλά ταυτόχρονα αυτά γίνονται και πιο αδύναμα λόγω της αυξημένης πλαστικότητας τους. Επομένως η υγρασία πρέπει να διατηρείται σε ένα βέλτιστο επίπεδο και έτσι με αυτή τη συνθήκη το φαινόμενο της προσκόλλησης των pellet στα τοιχώματα όπως και της προσκόλλησης μεταξύ τους εξαρτάται λιγότερο από τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες των pellet(Pandey et al., 2012).

### **3.2.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΔΙΑΛΥΤΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΤΙΘΕΤΑΙ**

Η ποσότητα του διαλύτη είναι μια κρίσιμη παράμετρος που ελέγχει την σφαιροποίηση(Reynolds et al., 2005). Η περιεχόμενη υγρασία είναι ο σπουδαιότερος παράγοντας, που επηρεάζει την ανάπτυξη των pellet, ενώ η γωνία κλίσης φαίνεται να επιδρά λιγότερο. Επιπλέον για να έχουν τα pellet επαρκή αντοχή πρέπει να είναι διαθέσιμη η σωστή ποσότητα υγρού. Η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται εάν όλα τα τριχοειδή αγγεία είναι γεμάτα με υγρό. Αυτή η κατάσταση κορεσμού αυξάνει τις διακοκκικές δυνάμεις. Αντίθετα με λιγότερο ή περισσότερο περιεχόμενο υγρού από αυτό αναπτύσσονται ανεπαρκείς δυνάμεις προσκόλλησης. Λιγότερο περιεχόμενο σε νερό από το βέλτιστο προκαλεί παγίδευση φουσαλλίδων αέρα μέσα στα παραγόμενα σφαιρίδια, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον περιορισμό της τριχοειδούς δράσης. Αντίθετα περισσότερη υγρασία οδηγεί στην δημιουργία ενός υγρού φιλμ στην επιφάνεια ολόκληρης της σφαίρας καταστρέφοντας έτσι τις τριχοειδείς δυνάμεις και την συνεκτικότητα των σφαιριδίων. Αυτό στην πραγματικότητα μειώνει την αντοχή και έτσι αυξάνει την απορρόφηση νερού(Harikrishnan & Ramamurthy, 2005). Γενικός κανόνας είναι ότι ο ρυθμός της σφαιροποίησης και το μέσο μέγεθος του παραγόμενου κόκκου



αυξάνεται, όσο αυξάνεται ο περιεχόμενος διαλύτης. Επιπλέον, έχει καταδειχθεί ότι το πορώδες μειώνεται με μία αύξηση της περιεκτικότητας σε διαλύτη, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι πόροι γεμίζουν με το υγρό, η μείωση δε του πορώδους οδηγεί σε αύξηση της αντοχής των κόκκων και επομένως μεγαλύτερη αντίσταση στη θραύση(Reynolds et al., 2005). Το υγρό δρα σαν διαλύτης και βοηθά να αναπτυχθούν δυνάμεις Van der Waals αυξάνοντας την επιφάνεια επαφής μεταξύ των τεμαχίων. Έρευνες έδειξαν ότι η αντοχή αυξάνεται με μια αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας μέχρι ένα βέλτιστο επίπεδο(Kaliyan & Morey, 2008). Αύξηση του βαθμού σφαιροποίησης παρατηρείται όταν η αναλογία υγρού-στερεού αυξάνει. Παρόλα αυτά αν η τιμή αυξηθεί πολύ, τότε παρατηρείται το φαινόμενο της υπερδιαβροχής. Ο κορεσμός σε υγρό, που ορίζεται ως η τιμή του υγρού όγκου προς το μέσο όγκο, αυξάνεται όσο το υγρό προστίθεται(Salman,Ghadiri & Hounslow, 2007). Το βέλτιστο περιεχόμενο υγρασίας εξαρτάται από το είδος του μεταλλεύματος, την λεπτότητά του και τα προσθετικά που χρησιμοποιούνται(P.V.T.Rao, 1994).

Λιγότερο υγρό από το ελάχιστο απαιτούμενο δημιουργεί εύθραυστο υλικό, ενώ υγρό πάνω από το σημείο κορεσμού δημιουργεί μια πάστα που βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και είναι αδύνατον να διατηρήσει το σχήμα της. Σε χαμηλές τιμές περιεχόμενου υγρού τα περισσότερα υλικά τείνουν να είναι ξηρά και να συμπυκνώνονται δύσκολα(Tay et al., 2000). Όσο το περιεχόμενο υγρό αυξάνεται τόσο το υλικό γίνεται πιο επεξεργάσιμο, διευκολύνοντας την συμπύκνωση κατά τη διάρκεια της σφαιροποίησης και καταλήγοντας, έτσι, σε υλικά με υψηλότερη πυκνότητα. Υψηλότερες τιμές κορεσμού σχετίζονται άμεσα με μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου. Όταν η ποσότητα του περιεχόμενου υγρού είναι πολύ μικρή, δεν παρατηρείται αύξηση στο μέγεθος των pellet και χρειάζεται να υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο. Εξαιτίας της πύκνωσης το πορώδες μειώνεται με αποτέλεσμα να υπάρχει αύξηση της υγρασίας. Αν η υγρασία παραμείνει κάτω από κάποια οριακή τιμή τότε δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στο προς σφαιροποίηση υλικό(Salman,Ghadiri & Hounslow, 2007). Η ποσότητα του περιεχόμενου υγρού, στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη πυκνότητα, είναι γνωστή σαν το βέλτιστο περιεχόμενο υγρό. Σε ποσότητες υγρού μεγαλύτερες της βέλτιστης η πυκνότητα μειώνεται(Tay,Hong & Show, 2000). Αν η προσθήκη υγρού συνεχίζει επιπλέον του σημείου κορεσμού, τα pellet αποσυντίθενται ουσιαστικά και σταδιακά μετατρέπονται σε λάσπη(Meyer, 1980).

Η απορρόφηση υγρού από την σκόνη επηρεάζεται κυρίως από την ταχύτητα του σφαιροποιητή, ενώ σαν δεύτερη σημαντική παράμετρος είναι η περιεχόμενη υγρασία.

### **3.2.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΛΥΤΗ**

Υγροί διαλύτες παρουσιάζουν μια ποικιλία από ιδιότητες που μπορεί να επηρεάζουν την

συμπεριφορά του συστήματος. Οι πιο σημαντικές από αυτές παρατίθενται στη συνέχεια:

1. Ιξώδες διαλύτη: Επηρεάζει τις δυνάμεις που οφείλονται στο ιξώδες και κυριαρχούν στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κόκκων. Ο αρχικός ρυθμός ανάπτυξης pellet είναι χαμηλότερος για υψηλά μοριακά βάρη αλλά με την πάροδο του χρόνου αυξάνεται, ενώ μικρά μοριακά βάρη δίνουν περισσότερο σφαιρικά σωματίδια (Salman, Ghadiri & Hounslow, 2007). Η δυναμική αντοχή των νωπών pellet εξαρτάται βασικά από τις ιξώδεις δυνάμεις και επιπλέον επηρεάζεται από τις τριχοειδείς δυνάμεις και την επιφανειακή τάση του διαλύτη. Υπάρχει μία ελάχιστη τιμή ιξώδους, που απαιτείται για το σχηματισμό των κόκκων για ένα δεδομένο μέγεθος αρχικού τεμαχίου. Η τιμή αυτή αυξάνεται, όσο αυξάνεται το μέγεθος του αρχικού τεμαχίου. Η αύξηση στο ιξώδες του διαλύτη μειώνει την διαλυτότητα των κόκκων εξαιτίας του μειούμενου ρυθμού ενοποίησης και θέτει όρια στην συμπύκνωση μέσω της αντίστασης της μετακίνησης του διαλύτη στην επιφάνεια του κόκκου (Reynolds et al., 2005). Ο χρόνος που χρειάζεται κάθε σύστημα είναι περισσότερος για μεγάλες τιμές ιξώδους. Γενικά, όσο αυξάνεται η τιμή του ιξώδους του συνδετικού μέσου, τόσο αυξάνεται και το μέσο μέγεθος κόκκου ενώ ταυτόχρονα μικραίνει και ο ρυθμός μείωσης του ενδοκοκκικού πορώδους κατά την πορεία της σφαιροποίησης. Παρόλα αυτά η πραγματική τιμή του ιξώδους δεν μπορεί να μετρηθεί πειραματικά καθώς το συνδετικό υλικό διαλύει μερικά από τα στερεά και η θερμοκρασία αυξάνεται κατά τη διάρκεια του πειράματος με αποτέλεσμα το ιξώδες να αλλάζει (Salman, Ghadiri & Hounslow, 2007). Η έρευνα έχει καταδείξει ότι χαμηλότερο ιξώδες οδηγεί σε πιο σφαιρικούς κόκκους και πιο αναβαθμισμένη κατανομή τεμαχίων. Το ιξώδες του διαλύτη επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το μηχανισμό και τον βαθμό θραύσης των pellet, ενώ επίσης επηρεάζει σημαντικά και την ομοιογένεια των κόκκων. Υψηλό ιξώδες καταλήγει σε πιο δυνατούς κόκκους, μικρότερης έκτασης θραύση και όχι καλή ομοιογένεια (Reynolds et al., 2005).
2. Διεπιφανειακή τάση: Επιδρά στην αντοχή των τριχοειδών δυνάμεων. Έχει βρεθεί μια ελάχιστη επιφανειακή τάση που είναι απαραίτητη για να δημιουργηθούν pellet με συγκεκριμένο μέγεθος (Salman, Ghadiri & Hounslow, 2007). Η επιφανειακή τάση του διαλύτη παίζει ρόλο στον προσδιορισμό της αντοχής των κόκκων δημιουργώντας τριχοειδείς δυνάμεις μεταξύ των αρχικών τεμαχίων (Reynolds et al., 2005). Με μείωση της επιφανειακής τάσης μειώνεται η αντοχή των pellet κυρίως λόγω της μείωσης των τριχοειδών δυνάμεων που συγκρατούν τα τεμάχια μαζί, ενώ αυξάνεται και το ενδοκοκκικό πορώδες (Reynolds et al., 2005) (Salman, Ghadiri & Hounslow, 2007).

3. Γωνία επαφής: επιδρά στην συμπεριφορά κατά την διαβροχή της σκόνης με το συνδετικό μέσο(Salman,Ghadiri & Hounslow, 2007). Η γωνία επαφής μεταξύ του υγρού διαλύτη και των στερεών τεμαχίων του υλικού επηρεάζει την ικανότητα διαβροχής της επιφάνειας των τεμαχίων. Επίσης η ικανότητα του υγρού διαλύτη να διαβρέχει τα τεμάχια γίνεται κρίσιμη παράμετρος επηρεάζοντας την διεργασία σφαιροποίησης, όταν αυτή η γωνία προσεγγίζει ή ξεπερνά τις 90°. Για γωνίες μεγαλύτερες της κρίσιμης τα παραγόμενα pellet τείνουν να εμφανίζουν ευρύτερη κατανομή μεγεθών και χαμηλότερη αντοχή. Ο σχηματισμός των υγρών γεφυρών και η ικανότητά τους να συγκρατούν τα τεμάχια μαζί εξαρτάται από τη συμπεριφορά διαβροχής του υγρού στα τεμάχια. Ωστόσο και η αρχική γεωμετρία των τεμαχίων επιδρά προσθέτοντας κάποια αβεβαιότητα στις μετρήσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γεωμετρία περιπλέκει τις μετρήσεις της γωνίας επαφής και της περιμέτρου της γέφυρας επαφής η οποία χρησιμοποιούνται για την κανονικοποίηση των μετρήσεων δύναμης(Reynolds et al., 2005).

### **3.3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ**

#### **3.3.1. ΘΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ**

Ο ψεκασμός είναι η μέθοδος με την οποία προστίθεται το υγρό κατά την διάρκεια της σφαιροποίησης και αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει την ανάπτυξη των pellet βοηθώντας την στρωματοποίηση και την σταθεροποίηση του υγρού φιλμ γύρω από τον πυρήνα διατηρώντας την τριχοειδή του δράση. Η αποτελεσματικότητα της σφαιροποίησης εξαρτάται από την διαβροχή. Η διαβροχή είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει εάν το πορώδες μπορεί να δημιουργήσει ισχυρές τριχοειδείς δυνάμεις, που επιδρούν στην προσκόλληση μεταξύ των τεμαχίων της σκόνης. Η σταθερότητα των τριχοειδών δυνάμεων μπορεί να επαυξηθεί με την κατάλληλη τοποθέτηση των ακροφυσίων των ψεκαστήρων(Pandey,Lobo & Kumar, 2012).

Η θέση, από την οποία το μέταλλευμα τροφοδοτείται και προστίθεται το νερό, είναι εξαιρετικής σημασίας για τα pellet. Δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι κανόνες ευρείας εφαρμογής, γενικά όμως γίνεται παραδεκτό ότι για την παραγωγή μικρότερων pellet το υλικό πρέπει να τροφοδοτείται σε κάποιο σημείο στην κορυφή της επιφάνειας του δίσκου, ενώ για την παραγωγή μεγάλων pellet η τροφοδοσία πρέπει να γίνεται σε άλλο σημείο της επιφάνειας του δίσκου.

Η πίεση του νερού γενικά ποικίλει μεταξύ 0.5 και 1.5 atm. Εάν η πίεση είναι πολύ χαμηλή σχηματίζονται χονδρόκοκκα pellet, ενώ η μεγάλη πίεση παράγει πιο λεπτόκοκκα pellet. Ψεκασμός

με μικρό μέγεθος σταγόνας είναι κατάλληλος για την παραγωγή μικρών pellet, ενώ σταγόνα μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιείται για την παραγωγή μεγάλων pellet(P.V.T.Rao, 1994). Το σύστημα ψεκασμού πρέπει πάντα να προσαρμόζεται στις ανάγκες του προϊόντος, ενώ είναι αυτό που υγραίνει τη ζώνη πυρηνοποίησης στο δίσκο για να επιτύχει τα βέλτιστα αποτελέσματα συσσωμάτωσης(economic Mineral Policy Options (c-tempo), 2011).

### 3.3.2. ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΙΣΚΟΥ

Η διάμετρος του δίσκου μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την χρήση του δίσκου (βιομηχανική ή εργαστηριακή). Οι δίσκοι για εργαστηριακούς σκοπούς είναι μικρότεροι και έχουν διάμετρο περίπου 0.8-1m, ενώ οι βιομηχανικές μονάδες έχουν συνήθως διάμετρο 7m προσαρμοζόμενη ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εγκατάστασης(P.V.T.Rao, 1994). Η διάμετρος δεν έχει κάποια επιπλέον επίδραση στην ποιότητα του υλικού, εκτός από το γεγονός ότι το πορώδες του υλικού μειώνεται ελαφρώς με μία αύξηση της διαμέτρου. Εν τούτοις η διάμετρος και κατ' επέκταση η επιφάνεια του δίσκου είναι καθοριστικής σημασίας όσον αφορά την ποσότητα των pellet που μπορούν να παραχθούν. Για την βέλτιστη παραγωγή θα πρέπει όλοι οι εμπλεκόμενοι παράγοντες να μετρώνται και να προσαρμόζονται ανάλογα με το υλικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δίσκου που χρησιμοποιείται. Η ερευνητική εμπειρία έχει καταδείξει την ύπαρξη απευθείας συσχέτισης μεταξύ της διαμέτρου του δίσκου, της επιφάνειας και του ρυθμού αποφόρτισης της συσκευής(Meyer, 1980).

Το ουσιώδες κομμάτι ενός σφαιροποιητή είναι η επιφάνεια πάνω στην οποία γίνεται η σφαιροποίηση. Το σχέδιο οδόντωσης της επιφάνειας του δίσκου μπορεί να έχει διάφορα σχήματα που ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένους σκοπούς. Το πιο κοινό σχέδιο είναι το σταυρωτό με αυλάκια να τέμνονται σε γωνία 90° (Ratul&Baquee, 2013).

### 3.3.3. ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ

Η κλίση του δίσκου αποτελεί τον παράγοντα με την μεγαλύτερη επιρροή στις ιδιότητες των pellet. Πιο συγκεκριμένα, έχει διαπιστωθεί ότι η αύξηση της κλίσης από την οριζόντια θέση προκαλεί αύξηση του μέσου μεγέθους των σχηματιζόμενων pellet(Gluba, 2012). Η κλίση του δίσκου καθορίζεται από την γωνία τριβής του υλικού, από την οποία πρέπει να είναι και ελαφρώς μεγαλύτερη ώστε να μπορεί να υπάρξει κύλιση του υλικού(Meyer, 1980). Η κλίση του δίσκου είναι, επίσης, και ο κυριότερος παράγοντας, που καθορίζει το χρονικό διάστημα παραμονής της υλικού στο δίσκο(Gluba, 2012). Εάν είναι μικρότερη από τη γωνία τριβής του υλικού ή ίση με αυτή, το υλικό παραμένει σε μια θέση ακινησίας στην επιφάνεια του δίσκου, ενώ εάν η γωνία κλίσης είναι

πολύ μεγάλη τότε το φορτίο δεν θα μπορεί να ανέλθει. Το ύψος του φορτίου καθορίζεται από την γωνία κλίσης. Όταν ο δίσκος είναι ρυθμισμένος στην ελάχιστη γωνία κλίσης, τότε το φορτίο του είναι το ελάχιστο. Όσο πιο επίπεδος είναι ο δίσκος και ψηλότερο το πλευρικό τοίχωμα του δίσκου τόσο περισσότερο χρόνο τα pellet παραμένουν στο δίσκο μέχρι να αποφορτιστούν (P.V.T.Rao, 1994). Η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου και η γωνία κλίσης αυτού είναι τα μεγέθη, τα οποία προσαρμόζονται προκειμένου η αποφόρτιση των pellet να γίνεται στο επιθυμητό μέγεθος τεμαχίων. Ο έλεγχος του μεγέθους, κυρίως στους σφαιροποιητές τυμπάνου, επιτυγχάνεται με κλειστό κύκλωμα κοσκίνισης, όπου το υπερμέγεθος σπάει και επιστρέφει στο σφαιροποιητή μαζί με τη νέα τροφοδοσία. Οι εγκαταστάσεις δίσκων πολύ συχνά παράγουν προϊόν στο ακριβές μέγεθος ή και με κάποια ποσότητα υπερμεγέθους - υπομεγέθους μεταξύ αποδεκτών ορίων. Παρόλα αυτά, όταν υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές ποιότητας για το παραγόμενο προϊόν, χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει κοσκίνιση και ανακύκλωση της αποφόρτισης του προϊόντος (<http://feeco.com/agglomeration/>, ). Από σχετικές έρευνες, που έγιναν σχετικά με την βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας, βρέθηκε ότι για την παραγωγή pellet μεγέθους 8-12mm η μέγιστη απόδοση εμφανίζεται, όταν η γωνία κλίσης του δίσκου ήταν 43°, και ότι με αύξηση της γωνίας κλίσης το επιθυμητό εύρος μεγέθους μειώνεται (Pandey, Lobo & Kumar, 2012).

### **3.3.4. ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ**

Η ταχύτητα περιστροφής του σφαιροποιητή έχει την μεγαλύτερη επίδραση στα pellet με το περιεχόμενο σε υγρασία να ακολουθεί (Harikrishnan & Ramamurthy, 2005). Η ταχύτητα περιστροφής πρέπει να είναι τέτοια ώστε το φορτίο να μην παραμένει σε κατάσταση ηρεμίας, περαιτέρω όμως δεν θα πρέπει να ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο διότι από εκεί και πέρα το υλικό -λόγω της φυγόκεντρης δύναμης- εκσφενδονίζεται στα τοιχώματα του δίσκου και κολλάει εκεί με αποτέλεσμα να μην κυλά για να σχηματιστούν τα σφαιρίδια. Αυτός είναι και ο λόγος, για τον οποίο σε μικρότερες ταχύτητες παράγονται μεγαλύτερα pellet συγκριτικά με μεγαλύτερες ταχύτητες. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται όταν η ταχύτητα πλησιάζει μια κρίσιμη τιμή, ενώ η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής καθορίζεται στο 70% αυτής. Η οριακή ταχύτητα είναι εκείνη, κατά την οποία όλη η τροφοδοσία εκσφενδονίζεται και κολλά στα τοιχώματα του δίσκου και δεν κυλά (Meyer, 1980) (Pandey, Lobo & Kumar, 2012). Κρατώντας την ταχύτητα του δίσκου σταθερή κατά τη φάση της συσσωμάτωσης και αυξάνοντάς την κατά την φάση της σφαιροποίησης, η διαδικασία καταλήγει σε πιο σφαιρικά pellet με μεγαλύτερες διαμέτρους και πιο λείες επιφάνειες. Μειώνοντας τη ταχύτητα κατά τη διάρκεια του σταδίου της σφαιροποίησης καταλήγουμε σε λιγότερο σφαιρικά pellet με πιο άγριες επιφάνειες (Pietsch, 2008). Η ταχύτητα του δίσκου πρέπει να

είναι τέτοια ώστε το υλικό να φτάνει στο ψηλότερο σημείο του δίσκου και μετά να κυλάει προς το χαμηλότερο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένας λείος δίσκος να περιστρέφεται πιο αργά σε σχέση με έναν τραχύ. Εάν η ταχύτητα είναι ανεπαρκής, το φορτίο παραμένει σε ακινησία και δεν προκύπτει κύλιση του υλικού, ενώ αντίθετα σε πολύ υψηλές ταχύτητες το υλικό κινείται μόνο ανοδικά χωρίς να κυλάει προς τα κάτω. Αυτό το φαινόμενο προκύπτει στην κρίσιμη ταχύτητα του δίσκου, που αξιοποιεί μέγιστα την επιφάνεια του για την κύλιση του υλικού. Στις εμπορικές εγκαταστάσεις η ταχύτητα του δίσκου είναι γενικά 6-20 rpm για διαμέτρους που ποικίλουν από 3 μέχρι 6 m (P.V.T.Rao, 1994). Γενικά γίνεται δεκτό ότι η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του δίσκου αυξάνει και το μέσο μέγεθος τεμαχιδίων (Gluba, 2012). Επιπροσθέτως, με υψηλότερη ταχύτητα παράγονται πιο συμπαγή pellet και άρα και πιο ανθεκτικά κάτι που με την σειρά του οδηγεί σε μείωση της απορρόφησης υγρού (Harikrishnan & Ramamurthy, 2005). Η ρύθμιση της γωνίας κλίσης και της ταχύτητας περιστροφής υπαγορεύονται από τη γεωμετρία της μηχανής. Ιδανική προσαρμογή της γωνίας και της ταχύτητας επιτυγχάνεται μόνο εμπειρικά κατά τη διαχείριση του συγκεκριμένου υλικού που σφαιροποιείται (<http://www.slideshare.net/wisdomvalley/agglomeration>, ).

### 3.3.5. ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο χρόνος παραμονής του υλικού στο μηχάνημα είναι συνάρτηση της γωνίας κλίσης, της ταχύτητας περιστροφής και του ρυθμού τροφοδοσίας (<http://www.slideshare.net/wisdomvalley/agglomeration>, ). Η δυναμικότητα του δίσκου, το μέγεθος και η αντοχή των green pellet εξαρτώνται από το χρόνο που το υλικό παραμένει στο δίσκο (P.V.T.Rao, 1994). Ο χρόνος παραμονής του υλικού στο δίσκο είναι ανάλογος του μεγέθους των κόκκων που θέλουμε να παραχθούν. Όσο πιο μικρός είναι ο χρόνος τόσο μικρότερο μέγεθος κόκκου παράγεται. Μια ακόμη παράμετρος που επιδρά στον απαιτούμενο χρόνο παραμονής του υλικού στο δίσκο είναι το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας του υλικού. Στην περίπτωση που το υλικό δεν έχει το απαιτούμενο ποσό υγρασίας, προκειμένου να σχηματιστούν σφαιρίδια, τότε ο χρόνος παραμονής επεκτείνεται λόγω της προσθήκης επιπλέον υγρού (Meyer, 1980). Έχει διαπιστωθεί ότι η παράταση του χρόνου παραμονής του προς σφαιροποίηση υλικού στο δίσκο οδηγεί σε pellet με μεγαλύτερη ομοιογένεια, πιο σφαιρικά και περισσότερο πυκνά (Gluba, 2012). Θα ήταν αναμενόμενο μίας παρατεταμένη χρονικά διεργασία να αυξάνει το μέγεθος του κόκκου και να δίνει καλύτερη κατανομή μεγέθους, όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Έχει παρατηρηθεί ότι κατά τη διάρκεια της διεργασίας εμφανίζεται μια σχετικά στάσιμη περίοδος, όσον αφορά την αύξηση του μεγέθους των pellet, η οποία ενδέχεται να ακολουθείται από μια περίοδο αύξησης του μεγέθους τους. Αυτή η περίοδος διαρκεί έως ότου ο κορεσμός σε υγρό καταστεί αρκετός για να

συνενωθούν οι κόκκοι(Salman,Ghadiri & Hounslow, 2007). Από ένα συγκεκριμένο χρονικό όριο και μετά, δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές. Γενικά η αντοχή των κόκκων αυξάνεται με σταδιακή πύκνωση, όσο αυξάνεται ο χρόνος. Η διαδικασία πύκνωσης μειώνει το πορώδες των κόκκων, μεταβάλλει την αρχική διάταξη των τεμαχίων και μεταφέρει τον διαλύτη από το εσωτερικό στην επιφάνεια των κόκκων. Ακόμα η κρίσιμη ταχύτητα κρούσης, που απαιτείται για τη θραύση των pellet, αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την πάροδο του χρόνου.

## 4. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Οι κύριοι τύποι σφαιροποιητών κύλισης, που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία pellet είναι οι εξής:

1. Δίσκοι σφαιροποίησης
2. Τύμπανα σφαιροποίησης
3. Σφαιροποιητές τύπου mixer

Σε αυτού του είδους τους σφαιροποιητές τα τεμάχια κινούνται λόγω της κύλισης που προκύπτει από το ισοζύγιο των δυνάμεων της βαρύτητας και της φυγόκεντρης. Οι δύο πιο διαδεδομένοι τύποι σφαιροποιητών είναι τα τύμπανα και οι δίσκοι, υπάρχουν όμως και άλλες συσκευές που ουσιαστικά αποτελούν τροποποιήσεις τους δίσκοι με ένα επιπλέον δακτύλιο για επιπλέον κύλιση, δίσκοι με πλαϊνά τοιχώματα πολλών επιπέδων και δίσκοι με σχήμα κόλουρου κώνου οι οποίες είναι μερικές τροποποιήσεις οι οποίες γίνονται προκειμένου το προϊόν να έχει ορισμένα χαρακτηριστικά(Litster & Ennis, 2004).

Το τύμπανο σφαιροποίησης χρησιμοποιείται συχνά σε παραγωγές που απαιτούν την διαχείριση μεγάλου όγκου τροφοδοσίας, όπως αυτή των σιδηρομεταλλευμάτων, περαιτέρω δε χρησιμοποιείται αρκετά συχνά και για την παραγωγή λιπασμάτων. Ο κώνος δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα συχνά. Ο δίσκος έχει τη μεγαλύτερη βιομηχανική εφαρμογή από όλα τα παραπάνω. Η διαθέσιμη ποικιλία των μεγεθών των δίσκων και η γεωμετρία τους που έχει μια τάση να βοηθά στην ταξινόμηση του φορτίου κάνοντας πιο εύκολο τον έλεγχο της διεργασίας, τους καθιστά ιδανική λύση για διάφορα υλικά(<http://feeco.com/agglomeration/>, ).

### 4.1. ΔΙΣΚΟΙ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ένας δίσκος σφαιροποίησης είναι:

- η κυκλική επιφάνεια πάνω στην οποία γίνεται η σφαιροποίηση
- ο μηχανισμός περιστροφής του δίσκου
- ο αποξεστήρας, που απομακρύνει το υλικό που κολλάει
- η βάση στήριξης
- τα ακροφύσια ψεκασμού

Τα συστήματα σφαιροποίησης αποτελούνται από την επιφάνεια σφαιροποίησης, το μοτέρ και τους αποξεστήρες, που στηρίζονται σε ένα βαρύ πλαίσιο και βάση. Η επιφάνεια σφαιροποίησης κινείται



κυκλικά με τη βοήθεια του κινητήρα. Η κίνηση μεταδίδεται μέσω ενός ιμάντα μετάδοσης κίνησης και ενός μειωτήρα. Οι σφαιροποιητές δίσκου, των οποίων η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από 10ft, είναι εξοπλισμένοι με οδοντωτούς ιμάντες, που διατηρούν σταθερή την ταχύτητα και κινούνται μέσω μοτέρ, μειωτήρα, πηνίου και γραναζιού, τα οποία βρίσκονται στο πίσω μέρος του δίσκου. Αλλαγές στην ταχύτητα περιστροφής του δίσκου μπορούν να γίνουν με κατάλληλη επιλογή των τροχαλιών και των ιμάντων. Η γωνία του δίσκου μπορεί να προσαρμοστεί σε ένα εύρος περίπου 20 μοιρών για να ταιριάζει σε διάφορες συνθήκες σφαιροποίησης και εφαρμογές. Οι ταχύτητες των σφαιροποιητών δίσκου με διάμετρο από 3ft έως 8ft ποικίλουν με λόγο 3:1. Το σύστημα ψεκασμού αποτελείται από το δίκτυο των σωληνώσεων, ακροφύσια, μανόμετρα, βαλβίδες, ρυθμιστές πίεσης και φίλτρα, ενώ για εξαιρετικά τοξικά υλικά χρησιμοποιείται σωλήνας αποφόρτισης και κάλυμμα για την αποφυγή δημιουργίας σκόνης. Οι σφαιροποιητές τύπου δίσκου είναι μονάδες που δέχονται την τροφοδοσία από την εμπρόσθια όψη. Διάφορα είδη τροφοδοτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με το προς επεξεργασία υλικό και την ακρίβεια μεγέθους της παραγωγής. Η επιλογή μπορεί να γίνει ανάμεσα σε ογκομετρικούς κοχλίες τροφοδότησης, ιμάντες, επιτραπέζιους τροφοδότες και σταθμικούς τροφοδότες(Minarals, ).



*Εικόνα 3: Δίσκος σφαιροποίησης (αριστερά διακρίνεται το σύστημα ψεκασμού)*

Οι δίσκοι σφαιροποίησης απαντώνται σε μια ευρεία γκάμα μεγεθών από δίσκους για εργαστηριακή χρήση με διάμετρο έως 1m μέχρι δίσκους βιομηχανικής παραγωγής διαμέτρου έως και 8m(Meyer, 1980). Οι βιομηχανικοί δίσκοι αποτελούνται από ένα κεκλιμένο επίπεδο με διάμετρο 5-7.5m, που περιστρέφεται με ταχύτητα 6-8rpm. Οι δίσκοι λειτουργούν κυρίως με ταχύτητα ίση με το 50 και του 75% της κρίσιμης ταχύτητας. Η κλίση του δίσκου είναι συνήθως 45° ενώ μπορεί να κυμαίνεται

από 45° έως 55° (Litster & Ennis, 2004). Αποτελούνται από μια κυκλική επιφάνεια, η οποία τοποθετείται συνήθως υπό κλίση προκειμένου να υπάρχει επαρκής τριβή και επαρκής άνοδος του υλικού κατά την κίνηση. Η χωρητικότητα του δίσκου προκύπτει όταν το πλαϊνό χείλος τοποθετείται κάθετα ως προς τη βάση του δίσκου, δηλαδή όταν ο δίσκος είναι τοποθετημένος κάθετα. Προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση για το εκάστοτε υλικό θα πρέπει να γίνονται πρώτα οι απαραίτητες δοκιμές, όσον αφορά την κλίση, την ταχύτητα, τα σημεία πρόσθεσης του υλικού και του συνδετικού μέσου και το χρόνο περιστροφής, αφού για το κάθε υλικό οι ανωτέρω παράμετροι - ρυθμίσεις διαφέρουν (Meyer, 1980). Οι δίσκοι προτιμώνται για την παραγωγή καλύτερης ποιότητας pellet, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευκολία στον έλεγχο κατά τη χρήση τους, περαιτέρω απαιτούν μικρότερο χώρο, ενώ ακόμη προτιμώνται για την δημιουργία pellet μεγέθους 8-16mm.

Η προ-διαβρεγμένη φάση προστίθεται με ελεγχόμενο ρυθμό. Τα λεπτομερή τεμάχια εκτελούν μια ανοδική κίνηση μέχρις ότου η τριβή ξεπεραστεί από την βαρύτητα και τα υλικά αρχίσουν να ρέουν προς την βάση. Αυτή η περιστροφική κίνηση σχηματίζει τα πρώτα μικρά σφαιρίδια-οδηγούς. Η ανάπτυξη των pellet προκύπτει από την κίνηση του δίσκου σε συνδυασμό με την προσθήκη περισσότερου φρέσκου υλικού και με συνένωση ανάμεσα στα μικρά pellet. Καθώς τα pellet μεγαλώνουν σε μέγεθος κινούνται προς την περιφέρεια του δίσκου και στην επιφάνεια του στρώματος αυτού έως ότου ξεπεράσουν το χείλος του πλαϊνού τοιχώματος και αποφορτιστούν. Η ανάπτυξη των pellet ελέγχεται από την μικρή ποσότητα νερού που προστίθεται στο δίσκο και από την προσαρμογή της ταχύτητας του δίσκου (economic Mineral Policy Options (c-tempo), 2011). Αμέσως μετά το σφαιροποιητή δίσκου, δονούμενα ή κινούμενα κόσκινα εγκαθίστανται για την συλλογή του επιθυμητού μεγέθους pellet (γενικά 6-20mm), τα οποία τροφοδοτούν την μονάδα ψησίματος. Το υπερμέγεθος και το υπομέγεθος των pellet ανακυκλώνεται στην διεργασία σφαιροποίησης. Η προσθήκη κινούμενων κόσκινων στο κύκλωμα της διεργασίας επιδρά στο σχηματισμό πιο σφαιρικών pellet και με βελτιωμένη αντοχή.

Ο σφαιροποιητής δίσκου είναι ένα μηχάνημα ευρέως χρησιμοποιούμενο σε αρκετές βιομηχανίες. Σε αντίθεση με το σφαιροποιητή τύμπανου ο δίσκος μπορεί να συνδυάσει ταυτόχρονα σφαιροποίηση και ταξινόμηση σε μία λειτουργία, αφού μόνο τα pellet που είναι αρκετά μεγάλα μπορούν να αποφορτιστούν από το δίσκο ενώ τα ψιλά συγκρατούνται σε κύλιση έως ότου το μέγεθος τους αυξηθεί. Επιπλέον η ποιότητα του προϊόντος μπορεί να ελεγχθεί με απλές μεθόδους, όπως η αλλαγή της κλίσης του δίσκου, η αλλαγή της ταχύτητας, η προσαρμογή των λεπίδων απόξεσης, η θέση του σημείου τροφοδοσίας και ο ψεκασμός του υγρού. Ο δίσκος επεξεργάζεται το υλικό με παρόμοιο τρόπο με το τύμπανο, δηλαδή τεμάχια υπόκεινται στις ίδιες δυνάμεις και στις

δύο περιπτώσεις(P.V.T.Rao, 1994).



Εικόνα 4: Δίσκος σφαιροποίησης σε λειτουργία

#### 4.1.1. ΧΡΗΣΕΙΣ

Οι σφαιροποιητές δίσκου μπορούν να λειτουργήσουν με μία ευρεία γκάμα υλικών από λεπτόκοκκα, ξηρά υλικά έως και υγρά ή λασπώδη υλικά. Μερικές από τις πλέον κοινές εφαρμογές τους είναι:

- Χημικά σε μορφή σκόνης
- Ασβεστόλιθος/Γύψος
- Λιπάσματα
- Λεπτομερή τεμάχια λιθάνθρακα
- Τσιμέντο/Σκόνη ασβεστόλιθου από κλίβανο
- Ιπτάμενη τέφρα
- Φιλτραρισμένη ή φυγοκεντρωμένη πάστα
- Ορυκτά και μεταλλεύματα
- Υλικά από τέλματα
- Σκόνη από κάμινο ηλεκτρικού τόξου

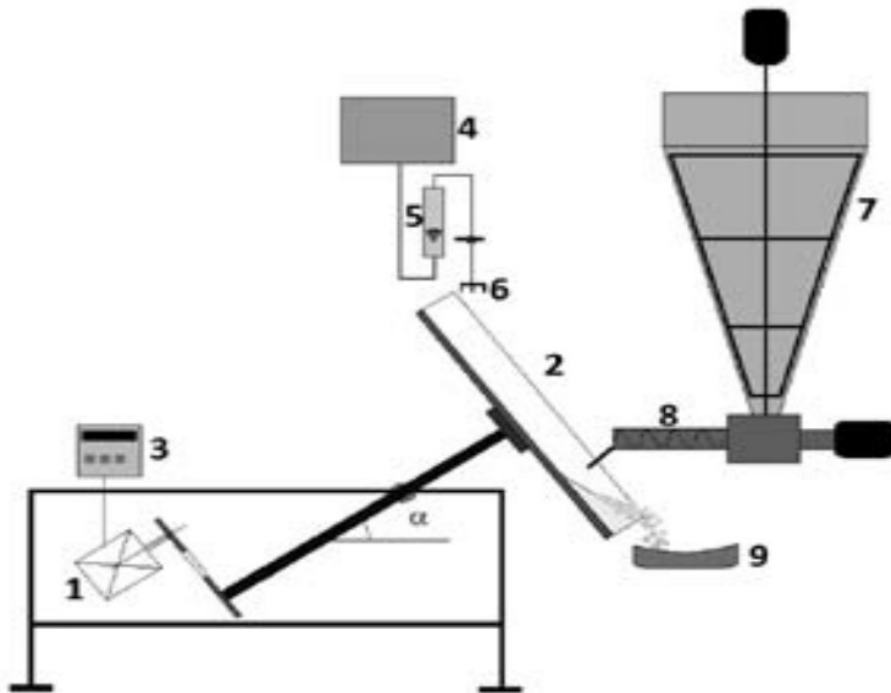
(<http://feeco.com/disc-pelletizers/>, )

Εξαιτίας της απλότητας της διεργασίας και των διαφόρων δυναμικοτήτων οι δίσκοι σφαιροποίησης είναι κατάλληλοι για χρήση και σε εγκαταστάσεις με μικρή παραγωγή(P.V.T.Rao, 1994).

#### 4.1.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται τα τμήματα που απαρτίζουν το κύκλωμα του δίσκου

σφαιροποίησης:

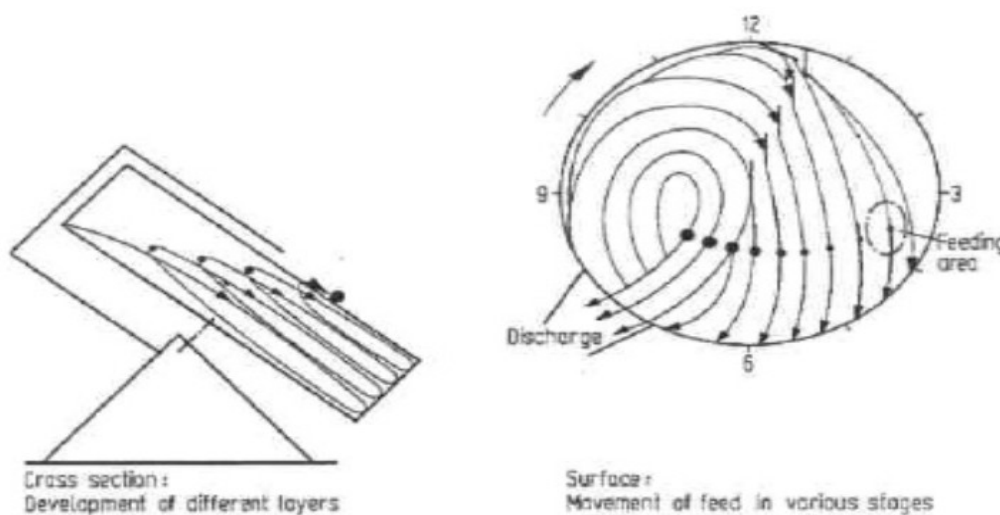


Εικόνα 5: Διάγραμμα ροής σφαιροποιητή δίσκου

1.μειωτήρας στροφών 2.σφαιροποιητής δίσκου 3.μετασχηματιστής 4.δεξαμενή υγρού διαλύτη 5.στροφόμετρο 6.ψεκαστήρας 7.δεξαμενή τροφοδότησης σκόνης 8.κοχλίας τροφοδότησης 9.δεξαμενή συλλογής pellet (GLUBA, 2012)

Ο μειωτήρας στροφών μέσω μιας ταινίας μετάδοσης περιστρέφει τον άξονα, με τον οποίο συνδέεται ο σφαιροποιητής δίσκου. Η περιστροφική ταχύτητα του δίσκου ελέγχεται μέσω ενός μετατροπέα και καθορίζεται από ένα ταχύμετρο. Το υγρό (συνήθως νερό) διανέμεται στάγδην πάνω στο κινούμενο στρώμα τεμαχίων, που εισάγεται στο δίσκο από ένα τροφοδότη μέσω ενός συστήματος καταιονισμού. Το νερό διανέμεται με σταθερή παροχή, η οποία μετράται με ένα στροφόμετρο. Με σκοπό τη διασφάλιση ομοιόμορφων συνθηκών διαβροχής ένας ποικίλος αριθμός ακροφυσίων ψεκασμού σταγόνων χρησιμοποιείται (από δύο έως τέσσερα ακροφύσια) ανάλογα με το ποσό του ψιλού υλικού. Ο τροφοδότης αποτελείται από μία δεξαμενή, στην οποία το υλικό αναμιγνύεται μέσω ενός ενσωματωμένου αναδευτήρα και ενός κοχλίας τροφοδοσίας με συνεχή ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής (Gluba, 2012). Το προς σφαιροποίηση μείγμα τροφοδοτείται στο δίσκο ή το τύμπανο, αφού πρώτα έχει ανακατευτεί με υγρό και διατηρεί υγρασία σε ένα

επίπεδο 5-8%, και περιστρέφεται μέχρι να σφαιροποιηθεί είτε στο δίσκο διαμέτρου 3.7-5.5m είτε στο τύμπανο διαμέτρου 2.5-3m και μήκους 9-10m, το οποίο περιστρέφεται με ταχύτητα 10-15rpm(Indian Bureau of Mines, 2011). Το υλικό προστίθεται στο δίσκο, ενώ λόγω της κλίσης του δίσκου υπερνικάται η γωνία τριβής του και το υλικό αρχίζει να κυλά καθοδικά αντίρροπα της φοράς περιστροφής του δίσκου στο χείλος του, σχηματίζοντας τα πρώτα συσσωματώματα, τα οποία σταδιακά αυξάνονται σε μέγεθος(Gluba, 2012).



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση της κίνησης (τροχιές) που εκτελούν τα pellet στο δίσκο

(Meyer 1980)

Αν ο δίσκος σφαιροποίησης θεωρηθεί σαν ένα αναλογικό ρολόι, τα πιο λεπτά τεμάχια που έχουν παραμείνει ανέρχονται έως την θέση 12, από την οποία και ωθούνται πάλι προς τα κάτω από τους εκτροπείς, ενώ η τροφοδοσία υλικού ή η επιπλέον προσθήκη νερού είναι προτιμότερο να γίνεται στη θέση 3-4, όπου σχηματίζονται οι κόκκοι (η θέση αυτή ενδέχεται να διαφέρει ανάλογα με την κοκκομετρία του υλικού), ενώ η αποφόρτιση του υλικού γίνεται στη θέση σημείο 7-8:30. Κατά την κύλιση του υλικού, ταυτόχρονα με την σφαιροποίηση των κόκκων γίνεται και ταξινόμηση τους σε ζώνες ανάλογα με το μέγεθος τους, οι δε κόκκοι με το μεγαλύτερο μέγεθος βρίσκονται πιο κοντά στο εξωτερικό χείλος(Meyer, 1980). Το τελικό προϊόν (νωπό pellet) ανατρέπεται από το χείλος του δίσκου και συλλέγεται σε μια δεξαμενή(Gluba, 2012). Τα pellet αποφορτιζόμενα από τα τύμπανα και τους δίσκους μεταφέρονται σε ένα δονούμενο κόσκινο διπλού καταστρώματος πριν οδηγηθούν σε πύρωση. Το υπομέγεθος (-8mm) ανακυκλώνεται ενώ το υπερμέγεθος (-18mm+8mm) τροφοδοτείται στο φούρνο πύρωσης(Indian Bureau of Mines, 2011) .

Παράγοντες που επηρεάζουν τον σχηματισμό των νωπών pellet είναι η κλίση, το ύψος του χείλους του δίσκου, η θέση των αποξεστήρων όπως επίσης και η ταχύτητα περιστροφής (Meyer, 1980). Η κλίση μπορεί να ρυθμιστεί αυτόματα μέσω μηχανοκίνητης ατράκτου ακόμα και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Η περιστροφική ταχύτητα είναι ρυθμιζόμενη, ενώ η λειτουργία του δίσκου μπορεί



Εικόνα 7: Σύστημα περιστροφής δίσκου

να αρχίσει ακόμη και όταν αυτός είναι σε πλήρη φόρτιση. Για την ρύθμιση της ποιότητας του προϊόντος και προκειμένου να προσαρμόζεται στις συνθήκες λειτουργίας, το ύψος του πλευρικού τοιχώματος ρυθμίζεται αυτόματα, ενώ ο δίσκος είναι εφοδιασμένος και με αποξεστήρες. Όλοι οι αποξεστήρες εγκαθίστανται στη κορυφή του δίσκου. Το ύψος του κάθε αποξεστήρα είναι προσαρμόσιμο και επιτρέπει την ρύθμιση του πάχους του στρώματος που επεξεργάζεται ο δίσκος. Η γωνία κλίσης του δίσκου μπορεί να ποικίλει και ρυθμίζεται με τη βοήθεια μίας ρυθμιστικής ατράκτου, που βρίσκεται ανάμεσα στη βάση και στις κολώνες στήριξης. Ένας εύκαμπτος ελαστικός αγωγός αποφόρτισης εγκαθίσταται πολλές φορές στο σημείο αποφόρτισης των pellet και

ρυθμίζεται για να ταιριάζει στη γωνία κλίσης του δίσκου. Το σύστημα πλοήγησης και ο μετατροπέας συχνότητας ξεκινούν σε πλήρη φόρτιση για την αποτροπή πρόκλησης ζημιών στον άξονα και φέρουν και το κύριο βάρος σε περίπτωση απότομου σταματήματος του δίσκου από πτώση του ρεύματος ή επείγουσα παύση εργασιών. Ο μετατροπέας συχνότητας επιτρέπει το συνεχή έλεγχο της ταχύτητας κίνησης και την αυτόματη ρύθμιση της κλίσης όσο ο δίσκος περιστρέφεται. Το κεντρικό σύστημα λίπανσης εφοδιάζει αυτόματα με λάδι όλα τα σημεία του δίσκου([http://www.wstyler.ca/pdf/analysis\\_processing/Pelletizing\\_Discs.pdf](http://www.wstyler.ca/pdf/analysis_processing/Pelletizing_Discs.pdf), ).

#### 4.1.3. ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΔΙΣΚΩΝ

Οι τροποποιήσεις στους δίσκους γίνονται ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία ορισμένων εφέ στα σφαιρίδια, παρόλα αυτά όμως χρησιμοποιούνται σπανίως. Οι τροποποιήσεις αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν είτε την προσθήκη ειδικών κολλάρων γύρω από το χείλος του δίσκου είτε την δημιουργία ενός πολύ φαρδύτερου χείλους.

- Με την προσθήκη κολλάρων

Ο ρόλος των κολλάρων που προστίθενται είναι να δημιουργήσουν έναν επιπλέον χώρο περιστροφής για τα σφαιρίδια, τα οποία έχουν αποφορτιστεί από το κύριο χώρο δημιουργίας των pellet (δηλαδή έχουν σχηματισθεί και είναι πλέον έτοιμα να απορριφθούν από το δίσκο). Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται γιατί η επιπλέον περιστροφή των έτοιμων ουσιαστικά σφαιριδίων μπορεί να λειάνει την επιφάνεια τους, να πυκνώνει περισσότερο το εξωτερικό τους στρώμα και γενικά να διαμορφώσει ένα ακόμη πιο ομοιόμορφο σφαιρικό σχήμα.

Σε μερικές περιπτώσεις αυτή η επιπλέον περιστροφή των σφαιριδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια επιπλέον διεργασία, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει την επικάλυψη των pellet με διάφορα συστατικά που προσδίδουν συγκεκριμένες ιδιότητες για την μετέπειτα χρήση τους. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα εξής:

- a) Η επικάλυψη με κωκ για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο ή σαν στερεό αναγωγικό
- b) Επικάλυψη pellet άνθρακα με ασβεστόλιθο προκειμένου να επιτευχθεί η αποθείωση των καυσαερίων
- c) Πρόσθετα σταθεροποίησης για να διατηρηθούν αναλλοίωτα κατά την αποθήκευσή τους, όπως στην περίπτωση των λιπασμάτων

Τα κολλάρια αυτά μπορούν να στερεώνονται είτε στο ίδιο επίπεδο είτε δημιουργώντας μια προεξοχή ώστε να σχηματίζουν ένα χώρο συγκράτησης των σφαιριδίων -μετά την αποφόρτιση τους από το δίσκο- προκειμένου να περιστραφούν εκ νέου. Έχουν προταθεί διάφορα σχέδια πλαϊνών τοιχωμάτων για την ενίσχυση της ταξινόμησης κατά την σφαιροποίηση. Η σφαιροποίηση σε

δίσκους με υποστηρικτικά πολλαπλών κολάρων εμφανίζεται να δημιουργεί συσσωματώματα περισσότερο ανθεκτικά και ομοιόμορφα εξαιτίας της περιστροφής στο πλαϊνό τοίχωμα αντί για την περιστροφή πάνω στο μαλακό στρώμα των pellet και των ψιλών (Pietsch, 2008).



*Εικόνα 8: Δίσκος  
σφαιροποίησης με επιπλέον  
κολάρο*

Η χρήση ενός κεκλιμένου αβαθούς δίσκου με ένα ομόκεντρο ανυψωμένο επίπεδο στην επιφάνεια σφαιροποίησης έχει ως αποτέλεσμα μια πιο ομαλή λειτουργία, αφού απουσιάζουν τα μεγάλα άμορφα συσσωματώματα, τα οποία προκύπτουν από τη θραύση των πιο μεγάλων σφαιριδίων πάνω στους αποξεστήρες κατά την χρήση επίπεδων επιφανειών σφαιροποίησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υγρό συνδετικό μέσο και η τροφοδοσία ψεκάζονται πάνω στον ανυψωμένο πάτο, ο οποίος διατηρείται καθαρός με τη βοήθεια ενός αποξεστήρα. Τα σφαιρίδια επομένως που σχηματίζονται οδηγούνται στο δακτυλιοειδή χώρο μεταξύ του υπερυψωμένου τμήματος και του τοιχώματος, αναπτύσσονται ομοιόμορφα χωρίς υπερβολικές διογκώσεις (Pietsch, 2008).

- Με τη δημιουργία δίσκων με μεγαλύτερο ύψος πλαϊνών τοιχωμάτων

Η χρήση δίσκων με αναλογία ύψους πλαϊνών τοιχωμάτων και διαμέτρου που υπερβαίνει το 0.25, οδηγεί στη δημιουργία σφαιριδίων με αυξημένη αντοχή εξαιτίας της υπερκείμενης πίεσης του φορτίου του σφαιροποιητή και του μεγαλύτερου χρόνου παραμονής. Επιπλέον προστίθεται έκκεντρα τοποθετημένος κινούμενος αποξεστήρας, ο οποίος προκαλεί την μερική αποσύνθεση των ήδη σχηματισμένων σφαιριδίων προωθώντας έτσι την στρωματοποίηση και παράγοντας μία πιο ομοιόμορφη δομή και κατανομή μεγέθους (Pietsch, 2008).



#### 4.1.4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ- ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΣΚΟΥ

Η χρήση των δίσκων σφαιροποίησης έχει ορισμένα πλεονεκτήματα.

1. Εύκολη χρήση και ρύθμιση των παραμέτρων της σφαιροποίησης
2. Καλύτερος έλεγχος της παραγωγής
3. Μικρή απαίτηση σε χώρο
4. Καταλληλότητα και για χρήση σε μικρές μονάδες
5. Δυνατότητα ταυτόχρονης ταξινόμησης των pellet

Παρόλα αυτά ο σφαιροποιητής δίσκου παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα όπως φαίνεται και παρακάτω:

1. Αφού η πύκνωση γίνεται με την βοήθεια της βαρύτητας υπάρχει ένα ανώτατο όριο στο ρυθμό της συμπύκνωσης που μπορεί να επιτευχθεί. Η συμπύκνωση γίνεται ταυτόχρονα με την μεγέθυνση των σφαιρών και έτσι είναι δύσκολο να απομονωθούν και να ελεγχθούν.
2. Δεν ενδείκνυται για την σφαιροποίηση κολλωδών υλικών και υλικών με μεγάλη πλαστικότητα, π.χ. αργίλων, και υγρών που περιέχουν κολλοειδή και πολύ λεπτά συστατικά.
3. Η σωστή λειτουργία είναι δυνατή μόνο σε ένα μικρό εύρος περιεχόμενου υγρού και υπάρχουν στενά περιθώρια ανοχής σε ό,τι το αφορά. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να οδηγήσει σε λειτουργικά προβλήματα, όπως π.χ. όταν η τροφοδοσία είναι σιδηρομετάλλευμα συγκεντρωμένο από φιλτρόπρεσσα και έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία.
4. Παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στις διακυμάνσεις της τροφοδοσίας

(Drew, 1978)

#### 4.2. ΤΥΜΠΑΝΑ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Αυτού του τύπου τα μηχανήματα χρησιμοποιούνται ευρέως στην σφαιροποίηση λιπασμάτων και μεταλλευμάτων(Williams & Allen, 1980). Τα κύρια μέρη του τυμπάνου είναι:

- ένας κύλινδρος ανοιχτός στις δύο άκρες του
- η βάση
- ο μηχανισμός περιστροφής
- οι αποξεστήρες, που τοποθετούνται εσωτερικά

Οι σφαιροποιητές τυμπάνου τοποθετούνται με κλίση  $10^\circ$  από την οριζόντιο υποβοηθώντας έτσι τη μεταφορά του υλικού κατά μήκος του τυμπάνου, ενώ αυτό περιστρέφεται με ταχύτητα περίπου 8-14rpm (Meyer, 1980) (Nold et al., 2003). Το υλικό, αφού τοποθετείται μέσα στο τύμπανο, ακολουθεί λόγω της τριβής του με την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου μια τροχιά ανεβαίνοντας έως κάποιο ύψος και στη συνέχεια κυλώντας με καθοδική φορά (Nold, Lobe & Muller, 2003). Συχνά τοποθετείται ένας υποστηρικτικός δακτύλιος στο σημείο της τροφοδοσίας προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν απώλειες καθώς επίσης και ένας ακόμα δακτύλιος στην έξοδο του υλικού προκειμένου να αυξήσει το βάθος του στρώματος του υλικού και το χρόνο παραμονής του μέσα στο τύμπανο (Williams & Allen, 1980).

Εσωτερικά για τη βελτίωση της συγκολλητικής δύναμης και της αδρότητας η μεταλλική λεία επιφάνεια καλύπτεται με ένα στρώμα υγρών λεπτομερών τεμαχίων, του οποίου το πάχος ελέγχεται από τους αποξεστήρες (Meyer, 1980). Στη σφαιροποίηση των σιδηρομεταλλευμάτων το μεταλλικό τύμπανο είναι σύνηθες να καλύπτεται με ένα στρώμα τσιμέντου ή με φύλλα μετάλλου. Συνήθως στο υλικό της τροφοδοσίας έχει προστεθεί υγρό, πριν εισαχθεί στο τύμπανο, αλλά υπάρχουν καταιονιστές και μέσα στο τύμπανο για επιπλέον προσθήκη υγρού προκειμένου να υποβοηθηθεί ο σχηματισμός των pellet. Παρόλο που το νερό είναι το κυριότερο μέσο διαβροχής, υπάρχουν και άλλα υγρά, όπως διαλύματα και πολφού, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προστιθέμενα με καταιονισμό (Williams & Allen, 1980). Ο ψεκασμός του υγρού γίνεται στην πλευρά όπου γίνεται και η τροφοδοσία. Το βάθος στο οποίο εγκαθίστανται ο μηχανισμός και ο ρυθμός ψεκασμού ρυθμίζεται ανεξάρτητα (P.V.T.Rao, 1994). Η σφαιροποίηση προκύπτει όταν η τροφοδοσία περιέχει τη βέλτιστη ποσότητα υγρής φάσης και υπόκειται στην περιστροφική κίνηση του τυμπάνου (Williams & Allen, 1980).



Εικόνα 9: Τύμπανο σφαιροποίησης

Στα τύμπανα σφαιροποίησης συγκρατείται παραπάνω υγρασία από την ελάχιστη απαιτούμενη προκειμένου να αποφευχθούν διογκώσεις. Αυτό να μεν μειώνει το κίνδυνο να συμβεί κάτι ανεπιθύμητο, όπως το σταμάτημα του τυμπάνου, πλην όμως οδηγεί στη μείωση της ποιότητας του προϊόντος και επηρεάζει αρνητικά την παραγωγικότητα. Το επιπλέον νερό πρέπει να αφαιρεθεί πριν τα pellet μπουν στη διαδικασία πύρωσης για να αποφευχθεί η θραύση τους. Αυτό γίνεται με ξήρανση που είναι αρκετά ακριβή συγκριτικά με την απομάκρυνση του νερού με τη χρήση φίλτρων με πίεση. Γενικά, υπάρχει η τάση τα επίπεδα υγρασίας να διατηρούνται αρκετά υψηλά, αλλά αυτό αντισταθμίζεται με την προσθήκη συνδετικού υλικού, πράγμα που όμως είναι ανεπιθύμητο για τους εξής κυρίως λόγους:

1. Τα συνδετικά μολύνουν το σιδηρομετάλλευμα και άρα τα επίπεδα τους πρέπει να διατηρούνται χαμηλά. Πολύ υψηλά επίπεδα νερού και προσθετικού δίνουν κακή ποιότητα pellet.
2. Τα προσθετικά είναι ακριβά επομένως είναι αντιοικονομικό να προσθέσουμε περισσότερο από το απαραίτητο για να επιτύχουμε ικανοποιητική μηχανική αντοχή των green pellet.
3. Η ολική εισροή στα τύμπανα είναι μειωμένη.

(Rapp, 2004)

Οι αποξεστήρες μπορεί να είναι στατικοί ή περιστρεφόμενοι και σε κάθε περίπτωση τοποθετούνται παράλληλα με τον άξονα του τυμπάνου. Στα πιο σύγχρονα μηχανήματα χρησιμοποιούνται πλέον ελικοειδείς αποξεστήρες που όχι μόνο μειώνουν το ύψος του στρώματος αλλά προκαλούν και

μεγαλύτερη τριβή στην εσωτερική επιφάνεια.

Προκειμένου να διασφαλίζονται βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, οι διαστάσεις και οι λειτουργίες του κύριου τυμπάνου και των αποσπώμενων τμημάτων πρέπει να έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα το μήκος, η διάμετρος του τυμπάνου, η κλίση του τυμπάνου από την οριζόντιο και ο αριθμός περιστροφών είναι παράγοντες που μπορούν να διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με τις απαιτήσεις της παραγωγής (Meyer, 1980). Οι διαστάσεις των εμπορικών τυμπάνων ποικίλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις του προϊόντος. Τα τύμπανα που χρησιμοποιούνται έχουν συνήθως διαμέτρους μεταξύ 1-3.5m, μήκος 5-9.5m και μέση δυναμικότητα περίπου 50-60 tn/h (P.V.T.Rao, 1994).



*Εικόνα 10: Τύμπανο σφαιροποίησης (στα δεξιά είναι εμφανής και ο μηχανισμός περιστροφής)*

Συνήθως τα τύμπανα συνδέονται με ένα σύστημα κόσκινων στην αποφόρτισή τους, το οποίο λειτουργεί ως διαχωριστική μονάδα και από την οποία το υπερμέγεθος, που προκύπτει μετά τη θραύση, επιστρέφει πάλι στο τύμπανο για να ανακυκλωθεί. Όπως γίνεται ευκόλως αντιληπτό η τροφοδοσία του τυμπάνου αποτελείται από δύο τμήματα, την καινούργια σκόνη και τα τεμάχια, τα οποία ήδη έχουν περάσει μια φορά από το τύμπανο και ανακυκλώνονται. Ο συνδυασμός αυτός της τροφοδοσίας του καινούργιου υλικού με το παλαιότερο, καθιστά τα τύμπανα λιγότερο ευαίσθητα στις αλλαγές της ποιότητας της τροφοδοσίας. Αυτή ακριβώς η μικρότερη ευαισθησία στις διακυμάνσεις της τροφοδοσίας και του στρώματος τεμαχιδίων, που επεξεργάζονται, είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των σφαιροποιητών τυμπάνου σε σχέση με του σφαιροποιητές δίσκου, αρκεί βέβαια να καλύπτονται οι απαιτήσεις όσον αφορά την κοκκομετρία του παραγόμενου

προϊόντος(Nold,Lobe & Muller, 2003) (Outotec Pelletizing Technologies, ). Ο χρόνος που το υλικό παραμένει στο τύμπανο εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής(Τσακίρης, 2009). Έχει διαπιστωθεί ότι η βέλτιστη ταχύτητα τυμπάνου βρίσκεται στο μισό της κρίσιμης ταχύτητας. Ως κρίσιμη ταχύτητα ορίζεται η ταχύτητα, κατά την οποία το ξηρό υλικό μετακινείται γύρω από το δίσκο λόγω της φυγόκεντρης δύναμης(Ghasemi et al., 2013).

### **4.3. ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΤΕΣ ΤΥΠΟΥ ΜΙΞΕΡ**

Οι σφαιροποιητές τύπου μίξερ αποτελούν μετεξέλιξη των σφαιροποιητών δίσκου και πρόκειται για συσκευές, των οποίων η λειτουργία μπορεί να είναι και διακοπτόμενη. Γενικά από τους όλους τους τύπους σφαιροποιητών, οι τύπου μίξερ υπερέχουν έναντι των υπολοίπων και έχουν μεγάλη εφαρμογή κυρίως στη φαρμακοβιομηχανία, την αγροτοβιομηχανία και τις βιομηχανίες απορρυπαντικών εξαιτίας της ικανότητάς τους να διαχειρίζονται δύσκολα διαχειρίσιμες μορφές τροφοδοσίας. Οι σφαιροποιητές τύπου μίξερ χωρίζονται στους έχοντες οριζόντιο ή κατακόρυφο άξονα. Αποτελούνται από ένα στροφέιο και παράγουν υψηλής πυκνότητας κόκκους. Η τροφοδοσία είναι συνήθως αναμεμιγμένη και ξηρή πριν αρχίσει η διεργασία, ώστε όποια συσσωματώματα μπορεί να υπάρχουν πριν αρχίσει η διεργασία να σπάσουν και έτσι να διασφαλίζονται συνθήκες ομογένειας. Το υλικό εισάγεται στον κεκλιμένο περιστρεφόμενο μίκτη μέσω της τριβής με τα τοιχώματα. Στο υψηλότερο σημείο αποξένεται προς τον περιστρεφόμενο άξονα με τη βοήθεια ενός αποξεστήρα. Παρότι που η ανάδευση είναι αρκετά γρήγορη τα τεμάχια έρχονται γρήγορα κοντά με την προσθήκη της κατάλληλης ποσότητας υγρού. Μόλις σχηματίζονται οι πυρήνες σφαιροποίησης η ταχύτητα μειώνεται απότομα. Σε αυτή την φάση το υλικό κυλάει κατά μήκος του πυθμένα. Σε περίπτωση που η ταχύτητα δεν μειωθεί θα δημιουργηθεί ένα είδος ισορροπίας μεταξύ της δημιουργίας συσσωματωμάτων και της καταστροφής τους. Το υγρό μέσο μπορεί να προστεθεί στην αρχή ή σταδιακά κατά την διάρκεια της διεργασίας με ψεκάσμο.



*Εικόνα 11: Μίξερ σφαιροποίησης*

Κατά το στάδιο της διαβροχής το στροφέιο διασφαλίζει την ανάμιξη της σκόνης και του υγρού όπως επίσης και την πύκνωση ενώ η έλικα χρησιμοποιείται για τη θραύση των πολύ μεγάλων συσσωματωμάτων διασφαλίζοντας την αναδιανομή του υλικού και επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ομοιογένεια του τελικού προϊόντος. Τα pellet που προκύπτουν από τους σφαιροποιητές τύπου μίξερ έχουν μέγεθος από 0.1mm έως και 8mm. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης σφαιροποιητή τύπου μίξερ είναι ότι δεν χρειάζεται διαρκή και στενή παρακολούθηση της διεργασίας. Επιπλέον μπορεί η ανάμιξη και η σφαιροποίηση να γίνουν ταυτόχρονα στην ίδια συσκευή. Ακόμη, αν χρησιμοποιείται ανακυκλωμένο υλικό, αυτός ο τύπος σφαιροποιητή πλεονεκτεί στο γεγονός ότι μπορεί να μετατρέψει το υγρό υλικό, όπως τη λάσπη, σε pellet προσθέτοντας στερεές ουσίες (Nold, Lobe & Muller, 2003). Παρότι όμως, αυτή η συσκευή χρησιμοποιήθηκε με μεγάλη επιτυχία σε βιομηχανικές μονάδες δεν κρίθηκε κατάλληλη για την σφαιροποίηση των σιδηρομεταλλευμάτων εξαιτίας της μικρής δυναμικότητας της σε σχέση με τις απαιτήσεις για μεγάλη παραγωγής (Meyer, 1980).

#### **4.3.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

Πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης μίξερ:

1. Μείωση των εξόδων ξήρανσης
2. Αποφυγή φαινομένων αποκόλλησης των πρώτων υλών
3. Δυνατότητα έναρξης και παύσης της παραγωγικής διαδικασίας, όποτε χρειασθεί
4. Εύκολη μεταβολή της σύνθεσης και αλλαγή του παραγόμενου υλικού
5. Δυνατότητα εύκολης μεταβολής του μεγέθους των κόκκων

6. Ποικιλία των διαστάσεων των μηχανημάτων από 3lt έως 5lt
  7. Δυνατότητα διαχείρισης υγρών κολλωδών υλικών
  8. Ικανότητα διασκορπισμού παχύρευστων διαλυτών
  9. Μικρότερη ευαισθησία στη μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας
  10. Δυνατότητα παραγωγής μικρών κόκκων (<2mm) υψηλής πυκνότητας
- (Chitu, 2009)

## 5. ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ PELLETT

### 5.1. ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ PELLETT

Ξήρανση είναι η διεργασία, με την οποία απομακρύνεται το μηχανικά ενωμένο υγρό από τα στερεά υλικά. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες διενεργείται εξαρτώνται από την μετέπειτα χρήση του υλικού και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που θέλουμε να του προσδώσουμε (Νέου-Συγκούνα, ). Η ξήρανση αποτελεί μία από τις διεργασίες, που λαμβάνουν χώρα κατά το τελικό στάδιο παραγωγής των pellet. Μετά την ξήρανση συνήθως ακολουθούν και οι διεργασίες της έμφυσης και της ψύξης των pellet με σκοπό την αναβάθμιση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών.

Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης η περιεχόμενη υγρασία των pellet εξατμίζεται. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το νερό μπορεί να περιέχεται σε διάφορες μορφές μέσα στο pellet, όπως:

1. Νερό στα διάκενα μεταξύ των δομικών στοιχείων του pellet, όπως στους πόρους και στα τριχοειδή
2. Στην περίπτωση ενός πορώδους μεταλλεύματος το νερό μπορεί επίσης να βρίσκεται στους πόρους των κόκκων του ίδιου του μεταλλεύματος
3. Το νερό μπορεί να είναι χημικώς δεσμευμένο σαν ένυδρη ουσία, όπως π.χ. στον λειμωνίτη
4. Το νερό μπορεί να συνενωθεί με διαλύτες που είναι αντίθετοι στο σχηματισμό γαλακτωμάτων όπως π.χ. άργιλοι ή μπετονίτης
5. Το νερό μπορεί να συνδεθεί χημικά σαν ένυδρη ουσία σε αντίστοιχους διαλύτες που οδηγούν σε ένυδρη μορφή, όπως π.χ.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$
6. Το νερό μπορεί να είναι παρών σαν κρυσταλλικό συστατικό στα ήδη υπάρχοντα ή στα πρόσθετα άλατα

Η περιεχόμενη υγρασία του pellet μπορεί να συνίσταται σε νερό που περιέχεται ήδη στο μετάλλευμα (φυσική υγρασία) ή σε νερό που προστέθηκε κατά την σφαιροποίηση.

Κατά την διαδικασία της ξήρανσης, ένα ελάχιστο τμήμα από το περιεχόμενο στα pellet υγρό εξατμίζεται στους  $100^\circ\text{C}$ . Τα περιεχόμενα άλατα και οι ένυδροι συνδυασμοί χάνουν το περιεχόμενο υγρό τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η ταχύτητα ξήρανσης πρέπει να προσαρμόζεται στο εκάστοτε υλικό προκειμένου να αποφευχθεί η αποδυνάμωση του pellet εξαιτίας της δημιουργίας ρωγμών ή σχισμών μεταξύ των υλικών. Η ξήρανση γίνεται σε δύο στάδια ξεκινώντας από μεμονωμένα τεμαχίδια και προχωρώντας με την πάροδο του χρόνου στο υπόλοιπο στρώμα (Meyer, 1980).



## 5.2. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΦΑΙΡΩΝ

Η διαδικασία ξήρανσης ξεκινά όταν ο θερμός αέρας ή τα αέρια ανάφλεξης ρέουν ανάμεσα από τα pellet. Σε αυτό το σημείο η θερμοκρασία του αερίου, το σημείο δρόσου, η ποσότητα και η ταχύτητα ξήρανσης παίζουν σπουδαίο ρόλο. Η περιεχόμενη υγρασία αρχίζει να εξατμίζεται ομοιόμορφα από την επιφάνεια του pellet. Μετά από αυτή την πρώτη επιφανειακή εξάτμιση, το νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του pellet κατευθύνεται μέσω των τριχοειδών αγγείων στην επιφάνεια. Όσο συντομότερα εξατμίζεται το νερό, που περιέχεται στα τριχοειδή αγγεία, τόσο συντομότερα η διαδικασία ξήρανσης τελειώνει. Συνεπώς, εάν η θέρμανση και ο σχηματισμός των υδρατμών γίνεται με γρήγορους ρυθμούς τότε μπορεί να οδηγήσει σε σπασίματα και ρωγμές λόγω της απότομης αυξομείωσης της θερμοκρασίας. Επίσης, κατά την ξήρανση παίζουν σημαντικό ρόλο ιδιότητες εξαρτώμενες από το υλικό, όπως το μέγεθος, η κοκκομετρία και η συνεκτικότητα (Meyer, 1980).

## 5.3. ΞΗΡΑΝΣΗ ΚΑΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ

Αυτή η θεώρηση προσομοιάζει περισσότερο τις συνθήκες, κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται η ξήρανση στην βιομηχανία. Η ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού από τα pellet παρέχεται από τα αέρια ξήρανσης.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τα αέρια ξήρανσης μπορεί να εγκλωβιστούν ανάμεσα σε δύο στρώματα και να ακολουθήσουν μία καθοδική πορεία. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ξήρανση με καθοδικό ρεύμα αέρα. Ωστόσο το αέριο αυτό μπορεί να ωθηθεί τελικά προς τα πάνω και να ακολουθήσει μια ανοδική πορεία, οπότε και έχουμε ξήρανση με ανοδικό ρεύμα αέρα. Στην πράξη η ξήρανση δεν γίνεται με ένα τρόπο αλλά υπάρχει συνδυασμός των δύο φαινομένων. Ο ξηρός αέρας ρέοντας διαμέσου του πρώτου στρώματος απορροφά από τα pellet ένα συγκεκριμένο ποσό υγρασίας από την εξάτμιση με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία του αερίου από την αρχική του στην θερμοκρασία εξάτμισης. Αυτό το νερό που πλέον βρίσκεται σε μορφή υδρατμών περνά διαδοχικά στα πιο υγρά και κρύα στρώματα των pellet, όπου ένα μέρος του απορροφάται και συμπυκνώνεται μεταβάλλοντας την θερμοκρασία. Ωστόσο μπορεί να υπάρξει το φαινόμενο της υπερδιαβροχής, όπου η δομή των pellet αποδυναμώνεται και μειώνεται η αντοχή τους. Κατά την ξήρανση με καθοδικό ρεύμα αέρα τα χαμηλότερα στρώματα των pellet μπορούν να αποδυναμωθούν και να πιεστούν με τέτοιο τρόπο ώστε το στρώμα να γίνει αδιαπέραστο από τα αέρια ξήρανσης. Κατά την ξήρανση με ανοδικό ρεύμα σταγόνες νερού μπορεί να συμπυκνωθούν στην επιφάνεια του στρώματος των pellet (Meyer, 1980).

## 5.4. ΨΥΞΗ ΤΩΝ PELLEΤ

Η ψύξη των pellet συνίσταται στην σταδιακή απομάκρυνση της επιπλέον θερμότητας από αυτά με σκοπό τόσο την ελεγχόμενη επαναφορά τους σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όσο και την ανάκτηση της επιπλέον θερμότητας και την ανακύκλωση της στο σύστημα είτε την χρήση της σε άλλη διεργασία. Η ψύξη είναι μια σημαντική διαδικασία για τους εξής λόγους:

1. Τα θερμά pellet περιέχουν μεγάλα ποσά θερμότητας, η οποία θα πρέπει να ανακυκλώνεται στις διάφορες διεργασίες
2. Οι δεσμοί και η κρυσταλλική δομή, που επιτυγχάνονται με την ξήρανση, κινδυνεύουν να διαταραχθούν και να καταστραφούν με απότομη ψύξη

(Meyer, 1980)

## 6. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η αντοχή των νωπών pellet είναι ανεπαρκής και μπορεί να αυξηθεί με την εκθεσή τους σε διάφορες θερμικές διεργασίες, που εξαρτώνται από το αρχικό υλικό τους. Μόνη η ξήρανση μπορεί να κάποιες φορές να είναι αρκετή, πιθανώς σε συνδυασμό και με την χρήση προσθετικών. Η θερμική σκλήρυνση είναι η πιο κοινή μέθοδος που εφαρμόζεται. Ο μηχανισμός σκλήρυνσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα αρχικά χημικά συστατικά του υλικού. Υψηλότερες θερμοκρασίες και χρόνοι σκλήρυνσης παράγουν pellet με μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη(P.V.T.Rao, 1994).

Τα συστήματα θερμικής κατεργασίας είναι τρία:

1. Υψικάμινοι
2. Σύστημα σχάρας
3. Μεταφορική σχάρα σε συνδυασμό με Π/Κ

### 6.1. ΥΨΙΚΑΜΙΝΟΣ

Εξαιτίας της υψηλής θερμικής αποδοτικότητας και των σχετικά απλών λειτουργικών απαιτήσεων χρησιμοποιήθηκε σαν η βασική μονάδα για τη σκλήρυνση των pellet από συμπύκνωμα μαγνησίτη τόσο στις Η.Π.Α. όσο και τη Σουηδία. Όσο ο μαγνησίτης ήταν το κύριο υλικό που χρησιμοποιούνταν αυτός ο τρόπος ψήσιματος ήταν αρκετά διαδεδομένος. Σε αυτό το σύστημα το φορτίο κινείται συνεχώς διαμέσου της υψικαμίνου, ενώ τα θερμά αέρια κινούνται αντίρροπα. Υπάρχει διακύμανση της θερμοκρασίας από την βάση στην κορυφή. Η κορυφή δρα σαν ξηραντής, το δεύτερο μέρος σαν μονάδα πύρωσης και το τρίτο σαν ψύκτης. Τα green pellet τροφοδοτούνται από το άνοιγμα στη κορυφή της υψικαμίνου και κινούνται λόγω της βαρύτητας προς τα κάτω διαμέσου όλων των θερμικών ζωνών έως ότου αποφορτιστούν. Τα pellet βρίσκονται σε διαρκή κίνηση, ενώ ταυτόχρονα εκτίθενται στην τριβή και την αυξανόμενη πίεση. Ο έλεγχος και η δυνατότητα επιρροής των θερμικών βημάτων είναι σχεδόν αδύνατα. Τα αέρια της διεργασίας ρέουν διαμέσου του στρώματος των pellet σε διάφορες θερμοκρασίες απορροφώντας θερμότητα στο στάδιο ψύξης και εκπέμποντας θερμότητα στη ζώνη καύσης και προθέρμανσης.

Συγκρινόμενα με τα άλλα συστήματα σκλήρυνσης οι υψικάμινοι έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Απλή κατασκευή, μικρός αριθμός κινούμενων μερών, πυρίμαχη επένδυση όλης της καμίνου με τούβλα βέλτιστης κεραμικής ποιότητας για κάθε ζώνη

## 2. Εντατική ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των αερίων και των στερεών εξαιτίας της αντίθετης ροής

Ένα μειονέκτημα των υψικαμίνων είναι η μικρή δυνατότητα της επιρροής των διαφόρων σταδίων της διεργασίας και ως αποτέλεσμα η μικρότερη ευελιξία. Προκειμένου να διασφαλισθεί μια διεργασία χωρίς προβλήματα πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες:

- a) τα νωπά pellet πρέπει να είναι βέλτιστης ποιότητας
- b) πρέπει να γίνεται ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου των pellet κατά μήκος της διατομής
- c) πρέπει να γίνεται προσεκτική εισαγωγή των αερίων διεργασίας χωρίς υπερθέρμανση των τοιχωμάτων της υψικαμίνου και της περιφέρειας του φορτίου των pellet
- d) τα αέρια καύσης και ο αέρας ψύξης πρέπει να παρουσιάζουν ομοιομορφία

Έχουν γίνει διάφορες αλλαγές στις υψικαμίνους με πρώτη την αλλαγή του σχήματος από κυκλικό σε τετράγωνο, την αλλαγή του τροφοδότη, το μέγεθος και τη διάταξη του ανοίγματος της εισαγωγής του αερίου καύσης και τη μέθοδο ψύξης. Υπάρχουν δύο τύποι υψικαμίνων ανάλογα με το σημείο, στο οποίο επιτυγχάνεται η ψύξη. Στον πρώτο τύπο η ψύξη συντελείται μέσα στην υψικάμινο, ενώ στον δεύτερο τύπο, που είναι και ο συνηθέστερος, η ψύξη γίνεται εκτός υψικαμίνου σε δύο θαλάμους (Meyer, 1980).

## 6.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΑΡΑΣ

Το σύστημα αυτό άρχισε να χρησιμοποιείται στη βιομηχανία αμέσως μετά από τις υψικαμίνους. Το σύστημα περιλαμβάνει μία σχάρα μεταφοράς των νωπών pellet, τα οποία περνούν σταδιακά από τα στάδια της ξήρανσης, προθέρμανσης, έμψησης και ψύξης. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έναντι της υψικαμίνου είναι ότι υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας κατά τα διάφορα βήματα της διεργασίας. Η μέθοδος, όμως, αυτή μειονεκτεί στο γεγονός ότι οποιαδήποτε αλλαγή στην ταχύτητα της περιστρεφόμενης καμίνου επηρεάζει όλες τις παραμέτρους ψησίματος. Ένα μηχάνημα σχάρας περιλαμβάνει μια μεγάλη μήκους σχάρα με πλευρικά τοιχώματα. Ένα στρώμα πάχους 100mm ψημένων pellet τοποθετείται πάνω στο επίπεδο της σχάρας. Τα νωπά pellet τοποθετούνται πάνω από αυτό το στρώμα σχηματίζοντας ένα στρώμα πάχους 300mm. Το στρώμα των ψημένων pellet προστατεύει τη σχάρα και το πλευρικό τοίχωμα από υψηλές θερμοκρασίες και προλαμβάνει το ενδεχόμενο τα νωπά pellet να ψηθούν ανομοιογενώς. Τα pellet στη σχάρα περνούν τις ζώνες ξήρανσης, προθέρμανσης, έμψησης και ψύξης. Κάθε ζώνη είναι ρυθμισμένη σε μια προκαθορισμένη θερμοκρασία και η ανταλλαγή θερμότητας προκύπτει διαμέσου του θερμού αέρα

και/ή του αερίου καύσης. Αυτό το σύστημα, αποτελούμενο βασικά από μια μονάδα, η οποία κινεί ένα στατικό στρώμα, είναι εύκολο στη χρήση. Παρόλα αυτά το σύστημα πρέπει να ανακυκλώνει ένα τμήμα των ψημένων pellet προκειμένου να σχηματίζει ένα στρώμα στη σχάρα και στα πλευρικά τοιχώματα για την προστασία των μηχανολογικών τμημάτων και προκειμένου να αποφευχθούν διακυμάνσεις στην ποιότητα των pellet. Παρόλα αυτά τα pellet υπόκεινται σε μεταβολές της θερμοκρασίας τους περνώντας διαμέσου των διαφόρων σταδίων και των αυξημένων θερμοκρασιών. Επιπροσθέτως σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται ένα παχύ στρώμα τεμαχιδίων, που είναι επιρρεπές σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του από τα κατώτερα μέρη στα ανώτερα οδηγώντας σε διακυμάνσεις και της ποιότητας των παραγόμενων pellet (<http://www.raymondgrindingmill.com/solutions/cushing-plant/pelletizing-process.html>, ).

### **6.3. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΣΧΑΡΑΣ-ΚΛΙΒΑΝΟΥ**

Αυτή η διεργασία έγινε γνωστή ως μεταφορική σχάρα-Π/Κ και είναι κατάλληλη για όλα τα σφαιροποιημένα μεταλλεύματα. Εδώ υπάρχουν τρεις συγκεκριμένες μονάδες διεργασίας, που συνδέονται η μία με την άλλη. Οι τρεις βασικές μονάδες διεργασίας είναι η μεταφορική σχάρα, ο περιστρεφόμενος κλίβανος και ο ψύκτης (Meyer, 1980). Η ξήρανση και η προθέρμανση γίνονται στην σχάρα, η πύρωση στην Π/Κ και η ψύξη σε ψύκτη τύπου σχάρας.

Η μεταφορική σχάρα χρησιμοποιείται για ξήρανση, προθέρμανση και οξειδωση του μεταλλεύματος. Τα green pellet είναι ακίνητα, ενώ τα θερμά καυσάερα από τη Π/Κ ή από το ψύκτη περνούν διαμέσου των στρωμάτων των green pellet προς διαφορετικές διευθύνσεις και ζώνες ξηραίνοντας και προθερμαίνοντάς τα. Στον περιστρεφόμενο κλίβανο, που είναι εφοδιασμένος με μία επένδυση πυρίμαχων, τα προθερμασμένα pellet υφίστανται σκλήρυνση στην απαιτούμενη θερμοκρασία κυρίως μέσω της ακτινοβολίας. Για να διασφαλισθεί ότι τα pellet θα φτάσουν σε μια θερμοκρασία περίπου 1320-1340°C, η θερμοκρασία του τοιχώματος του φούρνου είναι υψηλότερη γεγονός που εντείνει το κίνδυνο των επικαθήσεων. Κατά τη διάρκεια της μεταφοράς από την ταινία προθέρμανσης στο κλίβανο πρέπει να ληφθεί ειδική φροντίδα με σκοπό τα pellet να είναι σε καλή κατάσταση στο περιστρεφόμενο κλίβανο προκειμένου να αποφύγουμε το σπάσιμο τους και την δημιουργία σκόνης μέσα στην Π/Κ. Η αντίδραση της σκόνης των οξειδίων με τη θερμή επένδυση και ο σχηματισμός επικαθήσεων ή δαχτυλιδιών στα τοιχώματα της Π/Κ πρέπει να αποφεύγεται. Μετά τη πτώση από τη μεταφορική ταινία πάνω σε ένα κεκλιμένο επίπεδο μέσα στο περιστρεφόμενο κλίβανο, τα pellet κινούνται ελικοειδώς προς το άλλο άκρο της Π/Κ, όπου και απομακρύνονται (αδειάζουν). Τα pellet θερμαίνονται ομοιόμορφα με ακτινοβολία από τα

τοιχώματα του κλιβάνου και από τα θερμά αέρια. Η κάμιнос θερμαίνεται με καύσιμο και θερμό αέρα από το ψύκτη. Στη συνέχεια τα ζεστά pellet περνούν στην τρίτη μονάδα του ψύκτη, όπου ψύχονται με τη βοήθεια αέρα. Ο θερμός αέρας ψύξης ρέει κυρίως στο περιστρεφόμενο κλίβανο και μερικώς στην μεταφορική σχάρα. Δεδομένου ότι έχουμε τρεις διαφορετικές μονάδες επεξεργασίας η παροχή θερμότητας μπορεί να μοιραστεί αναλογικά σύμφωνα με το τύπο του προς επεξεργασία μεταλλεύματος. Η διεργασία, που γίνεται σε τρεις διαφορετικές μονάδες, αποτελεί τον καλύτερο συνδυασμό τεχνολογίας και φύσης του υλικού τροφοδοσίας (P.V.T.Rao, 1994). Ο περιστρεφόμενος κλίβανος λειτουργεί μόνο συνδυαστικά και δεν επαρκεί μόνος του εξαιτίας θερμικών, λειτουργικών και ποιοτικών λόγων (Meyer, 1980).

*Εικόνα 12: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας σφαιροποίησης και ξήρανσης των pellets*

## **6.4. Ο ΨΥΚΤΗΣ**

Ο ψύκτης είναι δακτυλιοειδούς μορφής με πλευρικά τοιχώματα και σχάρες για δάπεδο. Τα pellet αφήνουν την περιστρεφόμενη κάμινο στους 1300°C και φορτίζονται στον ψύκτη σαν ένα στρώμα βάθους 75-80cm. Από τη στιγμή που η περιστρεφόμενη κλίβανος δεν είναι πλέον κατάλληλη για

περαιτέρω οξείδωση, η τελική οξείδωση πρέπει να γίνεται στο ψύκτη, πράγμα το οποίο ορισμένες φορές οδηγεί σε μια ελαφρά αύξηση της θερμοκρασίας στη πρώτη ζώνη ψύξης. Το θερμότερο τμήμα του αέρα ψύξης πηγαίνει απευθείας στο κλίβανο. Ο αέρας ψύξης χαμηλότερης θερμοκρασίας μπορεί να εμφυσάται στη ζώνη ξήρανσης της μεταφορικής σχάρας. Η αποτελεσματική απομάκρυνση της θερμότητας από τα ψημένα pellet είναι πολύ σημαντική, προκειμένου να γίνεται καλή ανάκτηση της. Διάφορες αποδοτικές τεχνικές έχουν εφαρμοστεί σε μια ροή αερίου για τη σχάρα μεταφοράς επιτρέποντας τη μέγιστη μείωση της κατανάλωσης αερίου και των απωλειών (technologies pull, ). Ο αέρας ψύξης και οι ανεμιστήρες ελέγχουν τη διαδρομή του ρεύματος αέρα. Οι ανεμιστήρες μπορεί να έχουν εγκατασταθεί ανάμεσα στις ζώνες προθέρμανσης και ψύξης (Meyer, 1980). Η ροή του αέρα διατηρείται σε ικανοποιητικά επίπεδα με τη βοήθεια πέντε ή έξι κυρίων ανεμιστήρων. Όσο ο ανεμιστήρας της ψύξης εισάγει φρέσκο αέρα, ο ανεμιστήρας του ανεμοκιβωτίου καυσαερίων και ο καλυμμένος ανεμιστήρας εξάγουν γύρω στα 2/3 και 1/3 καυσαερίων αντίστοιχα (of Mines, 2011). Οι τρεις ξεχωριστές μονάδες επεξεργασίας προσαρμόζονται ανάλογα με το μετάλλευμα, που πρέπει να επεξεργασθούν, με τέτοιο τρόπο ώστε η απαιτούμενη ενέργεια και ο χρόνος παραμονής να δίνουν τα βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά τη κατανάλωση ενέργειας, τη θερμική απόδοση και την ποιότητα των pellet. Η δυνατότητα αλλαγής των διαστάσεων των διαφόρων συσκευών κατά το στάδιο του σχεδιασμού καταλήγει να δίνει μεγάλα περιθώρια ευελιξίας όπου λαμβάνεται υπόψη και η μετέπειτα χρήση των διαφόρων υλικών (Meyer, 1980).

## 7. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ

Ένα τυπικό διάγραμμα ροής της διαδικασίας σφαιροποίησης είναι το ακόλουθο:

### 1. ΠΑΡΑΛΑΒΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΞΗΡΗΣ ΣΚΟΝΗΣ

Για το σκοπό αυτό υπάρχουν μεταλλικά silo, στα οποία η ξηρή σκόνη οδηγείται με πνευματικό σύστημα μεταφοράς. Τα silo είναι εφοδιασμένα με σακκόφιλτρα και δείκτες στάθμης.

### 2. ΑΝΑΜΙΞΗ ΚΑΙ ΟΜΟΙΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ

Το αναμικτήριο είναι ένα κυλινδρικό δοχείο με περιστρεφόμενο άξονα που διέρχεται από τη βάση του κυλίνδρου. Επάνω στον άξονα του αναμικτηρίου είναι τοποθετημένα κατάλληλα πτερύγια. Ο άξονας περιστρέφεται με 150 στροφές/λεπτό. Επίσης, υπήρχαν αρχικά επάνω στον κύλινδρο 4 δορυφορικοί πολύστροφοι αναδευτήρες για την καλύτερη ανάδευση και ομοιογενοποίηση του μίγματος. Εντούτοις εξαιτίας της υψηλής φθοράς των πτερυγίων και των αξόνων τους σε σύγκριση με τη μικρή τους αποτελεσματικότητα αποφασίσθηκε η κατάργησή τους. Υπάρχει επίσης κατάλληλο ακροφύσιο για τη προσθήκη νερού σε μορφή σταγονιδίων για ταχύτερη και πληρέστερη διαβροχή του μίγματος. Η τροφοδοσία του μίγματος γίνεται από το ένα άκρο του κυλίνδρου και η παραλαβή του στο άλλο. Ο έλεγχος της λειτουργίας των αναμικτηρίων προβλέφθηκε αρχικά να γίνεται με περιοδικές τοπικές επισκέψεις από το χειριστή της εγκατάστασης σφαιροποίησης. Η λειτουργία τους γίνεται με τηλεχειρισμό, όπως π.χ. η μεταβολή της παροχής και της αναλογίας των πρώτων υλών.

Η σκόνη είναι υδρόφοβο υλικό και η διαβροχή της με νερό δεν είναι πάντοτε επιτυχής (εξασφαλισμένη). Αυτό προκαλεί διαρροές σκόνης προς το περιβάλλον ενώ παράλληλα η ποιότητα των σφαιριδίων δεν είναι ικανοποιητική. Η χρονική διάρκεια των διαρροών περιορίσθηκε με την τηλεοπτική παρακολούθηση της λειτουργίας των αναμικτηρίων από το χειριστήριο της εγκατάστασης.

### 3. ΑΝΑΒΑΤΟΡΙΟ

Πρόκειται για κατακόρυφο ελαστικό μεταφορικό ιμάντα, στον οποίο έχουν τοποθετηθεί ελαστικοί κάδοι για την ανύψωση και μεταφορά του μίγματος στα silos μίγματος.

### 4. SILOS ΜΙΓΜΑΤΟΣ

Με τα silos εξασφαλίζεται σταθερή τροφοδοσία του μίγματος στους δίσκους και ανεξαρτητοποίηση της τροφοδοσίας των δίσκων από την λειτουργία του αναμικτηρίου.

### 5. ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΜΙΓΜΑΤΟΣ

Πρόκειται για σύστημα ογκομετρικού κοχλίας και μεταφορικής ταινίας, το οποίο τροφοδοτεί



το δίσκο σφαιροποίησης. Σε κάθε δίσκο υπάρχει ανάλογο τροφοδοτικό σύστημα.

#### 6. ΔΙΣΚΟΙ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ

Πρόκειται για 3 δίσκους. Κάθε δίσκος έχει διάμετρο 6m, κλίση 65° ως προς την οριζόντιο και τριβάθμιο ή μονοβάθμιο πλευρικό τοίχωμα. Περιστρέφεται με ταχύτητα 9 στροφές/λεπτό και έτσι το μίγμα, που τροφοδοτείται στο κέντρο περίπου του δίσκου, σφαιροποιείται με τη μέθοδο της χιονοστοιβάδας (snowball). Η σφαιροποίηση υποβοηθείται με καταιονισμό νερού. Η ορθή λειτουργία κάθε δίσκου απαιτεί συχνό επιτόπιο έλεγχο της ποιότητας των σφαιριδίων (ποσότητα προστιθέμενου νερού, μίγματος στο δίσκο κλπ)

#### 7. ΑΠΟΘΕΤΗΣ ΩΜΩΝ ΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ

Πρόκειται για τυπικό μηχανισμό απόθεσης των ωμών σφαιριδίων. Η ύπαρξή του είναι απαραίτητη, διότι τα παραγόμενα σφαιρίδια (green pellet) έχουν πολύ μικρή αρχική μηχανική αντοχή και πρέπει να αποτίθενται από μικρό ύψος (της τάξεως των 50cm), ενώ το ύψος του σωρού δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2-3m περίπου. Διαφορετικά, τα σφαιρίδια συνθλίβονται κατά την πτώση τους, συγκολλούνται μεταξύ τους και σχηματίζουν μεγάλα συσσωματώματα.

#### 8. ΠΛΑΤΕΙΑ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΩΡΙΜΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ

Για να τροφοδοτηθούν τα σφαιρίδια στις Π/Κ χωρίς να θρυμματίζονται θα πρέπει να έχουν την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, η οποία τους επιτρέπει να διατηρήσουν το σχήμα και τις διαστάσεις τους. Για να έχουν αυτή την αντοχή απαιτείται απόθεση και παραμονή για ωρίμανση επί χρονικό διάστημα 2-3 ημερών.

#### 9. ΤΑΙΝΙΕΣ ΔΙΑΚΙΝΗΣΗΣ ΩΡΙΜΩΝ ΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ

Πρόκειται για σύστημα μεταφορικών ταινιών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη διακίνηση των ωρίμων σφαιριδίων. Με τις ταινίες αυτές τροφοδοτούνται τα silos, από τα οποία τροφοδοτούνται με δοσιμετρικούς ζυγούς τα σφαιρίδια στις περιστροφικές καμίνους. Η τροφοδοσία των ωρίμων σφαιριδίων από την πλατεία απόθεσης και ωρίμανσης στον ταινιόδρομο γίνεται με τη βοήθεια φορτωτή.

#### 10. ΚΟΣΚΙΝΙΣΗ ΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ

Στις μεταφορικές ταινίες παρεμβάλλεται δονούμενο κόσκινο για την απομάκρυνση του κλάσματος -4mm από τα ώριμα σφαιρίδια. Η απομάκρυνση του κλάσματος -4mm αποσκοπεί στον περιορισμό της επιβάρυνσης των Π/Κ αλλά και του κυκλώματος αποκονίωσης και διακίνησης της σκόνης.

#### 11. ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ-ΕΜΨΗΣΗΣ

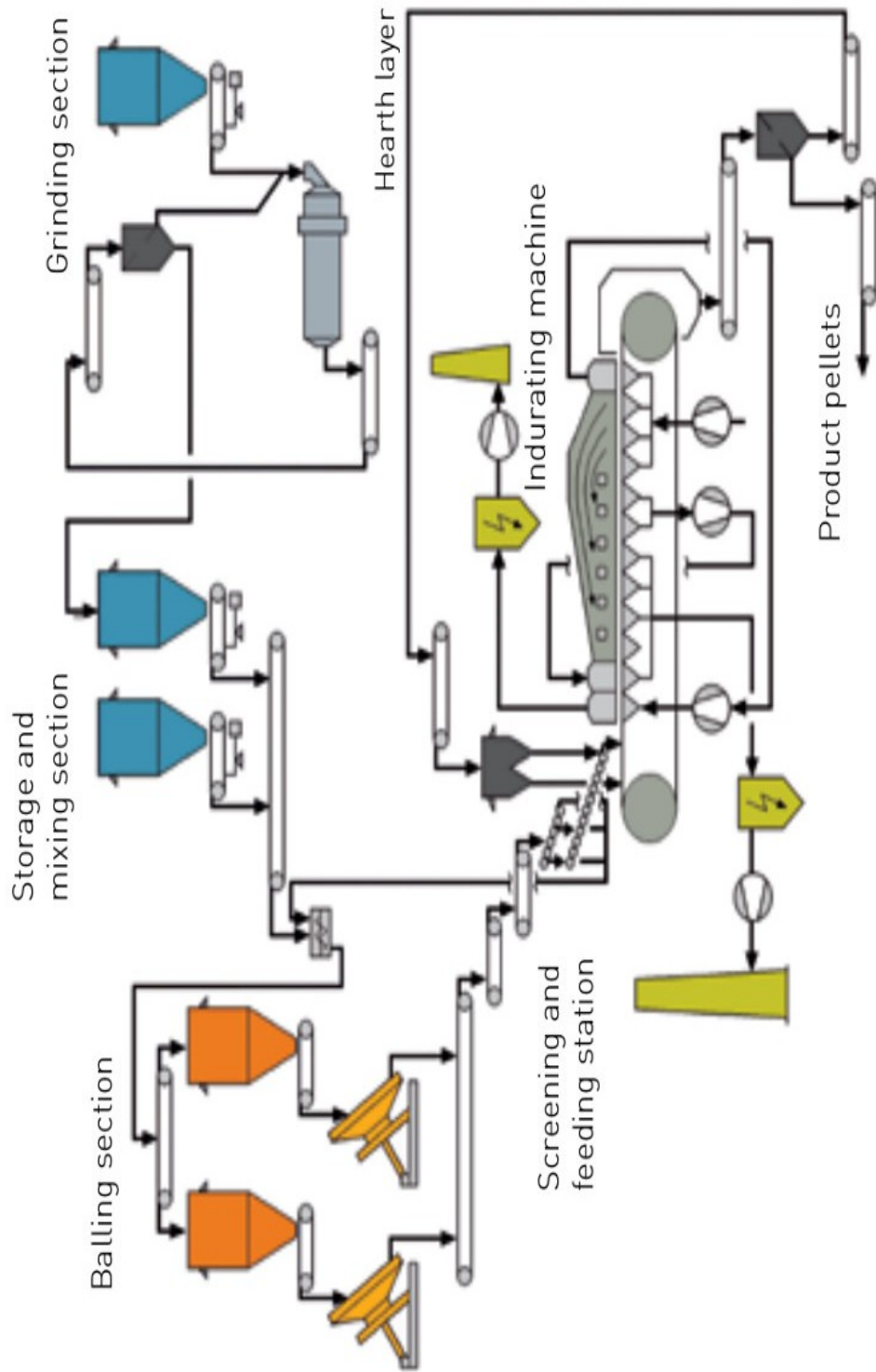
Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι συστημάτων έμψησης, οι υψικάμιννοι, ο συνδυασμός μεταφορικής σχάρας - Π/Κ και το σύστημα σχάρας. Σε

οποιαδήποτε από τις παραπάνω περιπτώσεις τα σχηματισμένα pellet περνούν πρώτα από το στάδιο της ξήρανσης, όπου η επικρατούσα θερμοκρασία είναι χαμηλότερη και σταδιακά αυξάνεται μέχρι τους 1300°C, η οποία είναι η θερμοκρασία ψησίματος των pellet.

## 12. ΨΥΚΤΗΣ

Έπειτα από τις διεργασίες ψησίματος τα pellet εισέρχονται στον ψύκτη, όπου με την εμφύσηση ψυχρού ρεύματος αέρα σταδιακά αποβάλλεται η θερμότητα που έχουν απορροφήσει κατά το ψήσιμο με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία τους.

(Ρεμουντάκη&Τσέζος, 2010)



Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής εγκαταστάσεων σφαιροποίησης

Typical flow diagram of a pelletizing plant.

## 8. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ PELLETS

Η αντοχή των pellet μετριέται για να περιγράψει την αντίσταση τους στη θραύση κατά το σχηματισμό, τη μεταφορά και τις υπόλοιπες διεργασίες, στις οποίες υπόκεινται. Η αντοχή των pellet είναι η δύναμη, την οποία μπορεί να δεχθεί έως ότου αρχίσει να παραμορφώνεται πλαστικά ή να αναπτύσσει μακροσκοπικές ζημιές. Η μέτρηση της αντοχής εξαρτάται αρκετά από τη πειραματική τεχνική, που χρησιμοποιείται κάθε φορά (Reynolds et al., 2005). Η επιλογή της παραμέτρου μέτρησης εξαρτάται από το τύπο των δυνάμεων, που υπάρχουν κατά τη δημιουργία και την μετέπειτα χρήση των προϊόντων. Έγκυρη δοκιμή είναι αυτή που προσομοιάζει όσο γίνεται καλύτερα τις συνθήκες, στις οποίες θα χρησιμοποιηθεί το υλικό, θα μεταφερθεί και θα αποθηκευτεί και εξάγει συμπεράσματα για το ποσοστό διάσπασης και το ποσό των παραγόμενων ψιλών. Η αντοχή των pellet είναι καθοριστικής σημασίας, αφού πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ανθίστανται στα θλιπτικά φορτία κατά την μεταφορά και αποθήκευσή τους ώστε να μην αποσυντίθενται, αλλιώς η σφαιροποίηση είναι ανούσια. Για τον προσδιορισμό της αντοχής των pellet υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, ορισμένες από τις οποίες υπόκεινται σε κανονισμούς ISO ενώ άλλες όχι.

Γενικά οι ορισμοί της αντοχής των κόκκων αναφέρονται στη στατική αντοχή, που παρουσιάζει ο κόκκος. Όμως η μη στατική αντοχή και πιο συγκεκριμένα η παρατηρούμενη παραμόρφωση κατά τη διαχείριση του υλικού (π.χ. φόρτωση, μεταφορά, εκφόρτωση, πτώση κλπ) είναι αρκετά σημαντική για το προσδιορισμό της συμπεριφοράς των κόκκων. Η αντοχή των pellet εξαρτάται από τους δεσμούς που ενώνουν τους κόκκους μεταξύ τους:

1. Γέφυρες στερεών
2. Ελκτικές δυνάμεις μεταξύ στερεών
3. Σύμπλεξη των στοιχείων μεταξύ τους
4. Δυνάμεις τριβής και προσκόλλησης
5. Διεπιφανειακές δυνάμεις
6. Τριχοειδής πίεση

(Kaliyan & Morey, 2008)

Η ποιότητα των pellet μετριέται κατ'αρχάς στο νωπό υλικό, όσον αφορά την αντοχή σε θραύση, τον πριν την θραύση αριθμό πτώσεων από ορισμένο ύψος και την ανατροπή ή το δείκτη τριβής. Αυτά τα τεστ συχνά επαναλαμβάνονται μετά από ορισμένο χρόνο ξήρανσης σε φυσικό περιβάλλον ή σε φούρνο. Υπάρχουν δοκιμές που συναρτώνται με τη μετέπειτα χρήση των pellet, όπως ο προσδιορισμός της αντίστασης σε τριβή και το πορώδες (<http://feeco.com/agglomeration/>, ) .

Το αποτέλεσμα της διεργασίας σφαιροποίησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το χειριστή της και από τις απαιτήσεις της παραγωγής. Μια ένδειξη αυτής της εξάρτησης είναι το γεγονός ότι τα pellet χαρακτηρίζονται ως αποδεκτά όταν βρίσκονται σε συγκεκριμένο εύρος κοκκομετρίας. Η δειγματοληψία μετά την ξήρανση είναι αυτή που μπορεί να προσδιορίσει τα χαρακτηριστικά των pellet και εάν αυτά έχουν τις επιθυμητές τιμές αντοχής και το επιθυμητό σχήμα. Η αποτελεσματικότητα της σφαιροποίησης προσδιορίζεται από την κοσκίνιση, ενώ το υλικό που δεν έχει το επιθυμητό μέγεθος πρέπει να περνά από ένα σύστημα ανακύκλωσης ή να αποθηκεύεται (Veverka & Hinkle, 2001). Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών βοηθούν στην τροποποίηση των παραμέτρων σφαιροποίησης προκειμένου να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα (Kaliyan & Morey, 2008) .

Τρεις παράγοντες είναι καθοριστικής σημασίας για το σχηματισμό των green pellet και τη μηχανική τους αντοχή:

1. Οι δυνάμεις δεσμών ανάμεσα στην επιφάνεια των κόκκων και το νερό.
2. Οι κοκκομετρικές ιδιότητες, όπως η κατανομή των τεμαχίων, η ειδική επιφάνεια, οι ιδιότητες της ειδικής επιφάνειας και η διαβροχότητα.
3. Μηχανική συμπίεση και δυνάμεις πρόσκρουσης, που γίνονται ενεργές κατά τη διάρκεια της κύλισης των στερεών τεμαχίων με το νερό στα τύμπανα ή στους δίσκους.

(Meyer, 1980)

## **8.1. ΠΡΟΤΥΠΑ ΘΡΑΥΣΗΣ**

Η θραύση των συνεχών στερεών μπορεί να περιγραφεί με τρεις τρόπους, δηλ. ως ψαθυρή, ημιψαθυρή και όλκιμη. Οι κλασικοί, όμως, αυτοί ορισμοί ανταποκρίνονται καλύτερα στα συνεχή υλικά, όπου οι τοπικές πιέσεις μεταφέρονται και διανέμονται σε όλο τον όγκο, και δεν είναι ικανές να περιγράψουν επαρκώς τις αστοχίες στα συσσωματώματα (Kaliyan & Morey, 2008) . Οι Mishra and Thornton (2001) ταυτοποίησαν 4 διαφορετικούς τύπους αστοχίας βασιζόμενοι στην έκταση της ζημιάς που έχει προκληθεί.

1. Σπάσιμο

Σε αυτό τον τύπο η αστοχία είναι συνυφασμένη, κυρίως, με την ύπαρξη ορατών ρωγμών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν 2 ή περισσότερα μεγάλα «θυγατρικά» τεμάχια σχηματίζονται επιπρόσθετα του σχηματισμού των ψιλών.

## 2. Θρυμματισμός

Σε αυτό τον τύπο η αστοχία είναι συνυφασμένη, κυρίως, με αυξημένες κρίσιμες ταχύτητες, κατά τις οποίες τα μεγαλύτερα θραύσματα μπορεί να σπάσουν σε μικρότερες συστάδες σωματιδίων.

## 3. Αποσύνθεση

Σε αυτό τον τύπο η αστοχία συνεχεται με ένα μεγάλο σύμπλεγμα, το οποίο είναι κεντραρισμένο στο ανώτερο τμήμα του συσσωματώματος με το υπόλοιπο του συσσωματώματος να μειώνεται σε 1-10 μικρότερα πρωτογενή σωματίδια.

## 4. Όλκιμη αποσύνθεση

Σε αυτό τον τύπο αστοχίας περιγράφεται η περίπτωση, κατά την οποία δεν υπάρχουν μεγάλοι κόκκοι μετά τη σύγκρουση σε υψηλή ταχύτητα.

Βρέθηκε επίσης ότι τα κοκκώδη τεμάχια θραύονται με διαφορετικό τρόπο στην ίδια ταχύτητα σύγκρουσης, εάν έχουν διαφορετικές πυκνότητες. Πυκνότερα συσσωματώματα ευνοούν το μοντέλο του θρυμματισμού, ενώ πιο χαλαρά τείνουν να αστοχούν με αποσύνθεση. Η διεπιφανειακή ενέργεια έχει μεγάλο αντίκτυπο στη συμπεριφορά θραύσης για χαμηλές κρίσιμες ταχύτητες, ενώ επίσης ο τρόπος αστοχίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα κρούσης.

(Reynolds et al., 2005)

## 8.2. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Η αντοχή σε θλίψη καθορίζεται ως η ικανότητα ενός υλικού ή μίας δομής να αντιστέκεται σε αξονικές θλιπτικές δυνάμεις. Όταν το φορτίο φτάνει το όριο της αντοχής τους τα υλικά θραύονται. Η αντοχή στη θλίψη θεωρείται ως ένα από τα κυριότερα κριτήρια της καταλληλότητας των πυρωμένων pellet, που προορίζονται για μεταλλουργικές διεργασίες. Η αντοχή των pellet εξαρτάται από το βαθμό οξειδωσης τους. Η μεγάλου βαθμού οξειδωση δίνει pellet με ομοιογενή δομή, προλαμβάνει το σχηματισμό ακτινικών ρωγμών και προάγει πιο εκτεταμένη και ολοκληρωμένη συσσωμάτωση και έτσι καθίσταται ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες, που αυξάνουν την αντοχή. Τα green pellet όπως και τα ξηρά pellet πρέπει να έχουν μια ελάχιστη αντοχή σε θλίψη ώστε κάθε κόκκος να μπορεί να αντέχει το φορτίο των υπόλοιπων κόκκων επάνω του κατά τη διάρκεια της διεργασίας ξήρανσης(P.V.T.Rao, 1994) . Η μέτρηση της αντοχής μπορεί να γίνει είτε μηχανικά είτε πνευματικά(Kaliyan & Morey, 2008) .

Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι μέτρησης της αντοχής των pellet όπως:

1. Η μέση θλιπτική αντοχή των νωπών και ξηρών pellet καθορίζεται τοποθετώντας ανάμεσα σε δύο μεταλλικές παράλληλες πλάκες τουλάχιστον 10 pellet. Η μέση τιμή που προκύπτει

δίνει την αντοχή των pellet σε θλίψη (N/pellet). Γενικά παρατηρείται ότι pellet με μικρότερες διαμέτρους δίνουν και μικρότερες τιμές αντοχής

2. Η μέση αντοχή σε θλίψη των green pellet καθορίζεται από την θλίψη 20 pellet πάνω σε ένα ζυγό έως ότου σπάσουν, ενώ κατά τη στιγμή της θραύσης σημειώνεται η ένδειξη του ζυγού σε kg. Μια τιμή αντοχής της τάξεως των 1.8-2.3kg θεωρείται ότι είναι ικανοποιητική (of Mines, 2011).
3. 6 pellet των 10mesh τοποθετούνται σε διάταξη, που μετρά τη θλιπτική δύναμη για το προσδιορισμό της μέσης δύναμης σε lbs, που απαιτούνται για τη θραύση τους (Veverka & Hinkle, 2001) .

Τα πιο σφαιρικά τεμάχια αντέχουν περισσότερο από αυτά που είναι ακανόνιστα και έχουν άγρια επιφάνεια, ενώ η φόρτιση τους κατά τη διάρκεια των δοκιμών είναι πιο ομοιογενής (Reynolds et al., 2005). Πολλοί ερευνητές ανέφεραν ότι ήταν δύσκολο να πετύχουν επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων της αντοχής σε θλίψη της ίδιας ποιότητας pellet. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής είναι: kahl tester, stokes tester, schleniger tester, tablet hardness tester, universal testing machine, kramer shear strength tester (Kaliyan & Morey, 2008) .

### **8.3. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ**

Είναι αναμφίβολα ο πιο συχνός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αντοχή. Ο Rumpf περιγράφει την αντοχή σε εφελκυσμό ως την εφελκυστική αντοχή, κατά την οποία παρατηρείται αστοχία συνιστάμενη στο χωρισμό του συσσωματώματος με μια εγκάρσια τομή. Οι περισσότερες μέθοδοι μέτρησης της εφελκυστικής τάσης παράγουν και διατμητικές τάσεις ταυτόχρονα σε διάφορες διευθύνσεις μέσα στο στερεό απαιτώντας προσεκτική μικροσκοπική εξέταση για να γίνει η διάκριση μεταξύ της αστοχίας σε εφελκυσμό από την αστοχία σε διάτμηση. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί πιο απλά να μετρηθεί με τη χρήση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης. Η δοκιμή διαμετρικής συμπίεσης υπήρξε αρκετά δημοφιλής τεχνική για την μελέτη της αντοχής σε θλίψη ενός κόκκου ενώ παρέχει ένα τρόπο έμμεσης μέτρησης της εφελκυστικής αντοχής. Κατά τη διάρκεια της σύνθλιψης δημιουργείται μία στεφάνη τάσης, η οποία αναφέρεται ως εφελκυστική τάση του κόκκου και σημαίνει την τάση που απαιτείται για τον διαχωρισμό αυτού. Αυτός ο τύπος δοκιμής θεωρείται γενικά ως ο πιο αντιπροσωπευτικός της αντοχής του κόκκου σε σχέση με άλλες δοκιμές που απαιτούν ειδική προετοιμασία των δειγμάτων. Η θραύση των pellet δημιουργείται αρχικά εξαιτίας του διαχωρισμού των διακοκκικών δεσμών κατά μήκος ενός επιπέδου όταν η τάση

υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή. Από τη στιγμή που γίνεται η παραδοχή ότι δεν υπάρχει επίπεδο προτίμησης, τότε όλοι οι διακοκκικοί δεσμοί υπόκεινται στην ίδια οριζόντια εφελκυστική δύναμη. Η ενέργεια που απαιτείται για την έναρξη της ρωγμής από ελεύθερη πτώση είναι η διπλάσια από αυτή της στατικής συμπίεσης (Reynolds et al., 2005) .

## **8.4. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ**

Το τεστ διατμητικής αντοχής προήλθε από την εδαφομηχανική και τη διαχείριση στερεών όγκων. Η δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την μέτρησή της. Η συμπίεση από μόνη της δεν παράγει τόση ζημιά όση όταν συνοδεύεται από διάτμηση. Πρέπει να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη δοκιμή είναι στατική, όμως η συμπεριφορά των pellet υπό δυναμικές συνθήκες μπορεί να είναι πολύ διαφορετική (Reynolds et al., 2005).

## **8.5. ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗΝ ΠΤΩΣΗ**

Η αντοχή σε πτώση δίνεται από τον αριθμό των πτώσεων που μπορεί να αντέξει ένα green pellet όταν πέφτει από ύψος 45cm σε μια μεταλλική επιφάνεια. Γενικά τιμές άνω του 7 είναι ικανοποιητικές για εμπορική χρήση (P.V.T.Rao, 1994) . Η αντίσταση στην πτώση ή η αντίσταση θραύσης μπορεί να προσομοιάσει τις δυνάμεις, που συνυπολογίζονται κατά το άδειασμα των προϊόντων από φορτηγά στο έδαφος ή από αγωγούς σε κάδους (Kaliyan & Morey, 2008) . Είναι η πιο σημαντική παράμετρος, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, και επηρεάζει τις υπόλοιπες ιδιότητες. Υψηλή αντοχή σε πτώση υποδεικνύει την αντίσταση στη θραύση κατά την μεταφορά των pellet (P.V.T.Rao, 1994).

## **8.6. ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΩΣΕΩΝ**

Η συγκεκριμένη δοκιμή μας δείχνει πόσες φορές μπορεί ένα pellet να πέσει από συγκεκριμένο ύψος [ανάλογα με τον διενεργούντα την δοκιμή] προτού εμφανισθούν σπασίματα ή αισθητές ρωγμές. Δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές με την δοκιμή αντοχής σε πτώση, σε αυτή την περίπτωση όμως μετريέται ο αριθμός των πτώσεων αντί για την δύναμη που ασκείται.

Σε μία εκδοχή της συγκεκριμένης δοκιμής, ο αριθμός των πτώσεων υπολογίζεται από την ρίψη 20



pellet πάνω σε μία μεταλλική επιφάνεια από ύψος 30 και 45cm μέχρι να αναπτύξουν ρωγμές και να σπάσουν. Ο αριθμός των πτώσεων που μπορεί να αντέξει ένα pellet υπολογίζεται ως ο μέσος όρος της αντοχής των 20 pellet. Ένας ικανοποιητικός αριθμός πτώσεων είναι 15 και 6 από ύψος 30 και 45cm αντίστοιχα (of Mines, 2011) .

## 8.7. ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

Τυπικά η σκληρότητα ενός υλικού μετριέται από την τραχύτητα. Σε αυτό το είδος δοκιμής ένα φορτίο εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια του δείγματος με αποτέλεσμα την δημιουργία αποτυπώματος σε αυτήν. Η κοπτική κεφαλή του μηχανήματος διατίθεται σε διάφορα σχήματα όπως σφαιρικό, τετράγωνο, πυραμίδα κλπ. Η σκληρότητα μπορεί να ορισθεί ως το φορτίο που κατανέμεται στη περιοχή της εσοχής και προβάλλεται στο επίπεδο της επιφάνειας. Γενικά η σκληρότητα είναι μία συνάρτηση της αντοχής σε εφελκυσμό, του μέτρου ελαστικότητας, του λόγου Poisson και της ολικής τάσης. Ένα βασικό πλεονέκτημα σε αυτού του είδους τις δοκιμές είναι ότι μπορούν να εφαρμοσθούν εύκολα στην επιφάνεια των συμπαγών συσσωματωμάτων όταν το δείγμα είναι αρκετά μεγάλο. Παρόλα αυτά, η μέτρηση της σκληρότητας με τη χρήση αυτής της τεχνικής μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, όταν πρόκειται για μικρά τεμάχια (Reynolds et al., 2005) .

## 8.8. ΑΝΑΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΤΡΙΒΗ

Σύμφωνα με το ISO 3271:1995 ορίζεται ένα σχετικό μέτρο για την εκτίμηση της αντίστασης των pellet στην μείωση του μεγέθους εξαιτίας των συγκρούσεων και της τριβής. Πρόκειται για μία μηχανική δοκιμή που διεξάγεται για οξειδωμένα pellet σιδηρομεταλλευμάτων με σκοπό να εκτιμήσει την επίδραση της τριβής στα pellet κατά τη μεταφορά τους, ενώ χρησιμοποιείται και για τον προσδιορισμό της φθοράς των μηχανικών μερών, που εμπλέκονται στη διεργασία παραγωγής των pellet (of Mines, 2011). Χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η ποιότητα της σκληρότητας των pellet (PDI) ή απλούστερα η ποσοστιαία σκληρότητα.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτή η δοκιμή:

1. Η δοκιμή προσομοιάζει τη μηχανική διαχείριση των pellet και προβλέπει το πιθανό ποσοστό λεπτών, που παράγονται εξαιτίας του μηχανικού χειρισμού. Κατά τη διαδικασία της ανατροπής τα pellet λειαινούνται και παράγουν σκόνη εξαιτίας της αλληλεπίδρασης και

τριβής μεταξύ τους και με τα τοιχώματα. Αφού τεθούν σε κύλιση 500gr pellet για 10min στα 50rpm, στη συνέχεια κοσκινίζονται με τη χρήση κόσκινου με άνοιγμα βρογχίδας ίσο με το 0.8 της διαμέτρου του pellet. Η PDI υπολογίζεται ως ο λόγος του βάρους μετά την πτώση προς το βάρος πριν την πτώση επί τοις εκατό. Αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο στις βιομηχανίες τροφίμων στις Η.Π.Α..

2. Διαφορετικά αυτή η δοκιμή μπορεί να γίνει σε ένα Holmer durability tester, που προσομοιάζει την πνευματική διαχείριση των pellet. Αυτός ο προσομοιωτής κυκλοφορεί πνευματικά ένα δείγμα pellet μέσω ενός τετραγωνικού αγωγού ή σωλήνα με ορθές γωνίες. Τα pellet προσκρούουν επανειλημμένα στα τοιχώματα του αγωγού και όταν συγκρούονται στις ορθές γωνίες του μηχανήματος θρυμματίζονται. Τα εναπομείναντα pellet συλλέγονται και κοσκινίζονται με τη χρήση κόσκινου με άνοιγμα βρογχίδας ίσο περίπου με το 80% της διαμέτρου του pellet, ζυγίζονται και υπολογίζεται ο PDI. Αυτή η δοκιμή χρησιμοποιείται περισσότερο στην Ευρώπη παρά στην Βόρεια Αμερική γιατί προσομοιάζει πνευματικούς μεταφορείς, που χρησιμοποιούνται συχνότερα στην Ευρώπη. Ακόμα σε αυτό τον τύπο δοκιμής απαιτείται μικρότερη ποσότητα δείγματος (100g) από ότι απαιτείται στην πρώτη μέθοδο, ενώ δημιουργείται μεγαλύτερη καταπόνηση και επομένως έχουμε και μεγαλύτερες μειώσεις.
3. Ο Ligno tester χρησιμοποιεί αέρα για γρήγορη κυκλοφορία 100gr pellet σε θάλαμο για 30s. Ο θάλαμος είναι μια ανεστραμμένη τετράγωνη πυραμίδα με διάτρητα άκρα. Ο δυνατός αέρας είναι η καταστροφική δύναμη σε αυτή την περίπτωση ενώ ο θάλαμος βρίσκεται σε 60millibar πίεση. Μεγαλύτερες πιέσεις μπορούν να εφαρμοσθούν όταν δοκιμάζονται pellet με μεγαλύτερες διαμέτρους (>4.8mm). Τα λεπτά απομακρύνονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της δοκιμής και έτσι δεν υπάρχει ανάγκη κοσκίνισης των pellet. Αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι ταχύτερη από τις δύο προηγούμενες (Kaliyan & Morey, 2008) .

## 8.9. ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΒΗΣ

Σκοπός αυτού του test είναι να επιτύχει ένα σχετικό μέτρο σύγκρισης των δειγμάτων των pellet για να προσδιορισθούν οι διαφορές στην τριβή που προέκυψαν από την χρήση διαφόρων συνδεδετικών υλικών.

Ένα δείγμα pellet κοσκινίζεται για να είναι μεταξύ 6 και 10 mesh και μετά τοποθετείται σε κόσκινο με άνοιγμα βρογχίδας 20mesh και ταξινομείται για 5 λεπτά. Το υπομέγεθος που διέρχεται από το κόσκινο ζυγίζεται και η τιμή αναφέρεται ως ποσοστό απώλειας επί του αρχικού βάρους (Veverka &

Hinkle, 2001) .

## **8.10. ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΟΡΩΔΟΥΣ**

Η μέτρηση του πορώδους των συσσωματωμάτων περιλαμβάνει δύο βήματα. Στο πρώτο ένας μετρητής πυκνότητας με αέριο ήλιο χρησιμοποιείται για να μετρήσει την πραγματική πυκνότητα των συσσωματωμάτων. Τα δεδομένα που συλλέγονται χρησιμοποιούνται στο δεύτερο βήμα, όπου με κατάλληλο αναλυτή υπολογίζεται η πυκνότητα των pellet. Με τα αποτελέσματα της πραγματικής και της υπολογιζόμενης πυκνότητας μπορεί να υπολογισθεί το πορώδες του συσσωματώματος (Radava et al., 2013). Η πυκνότητα αναφέρεται στο βάρος του υλικού ανά κυβικό πόδι και μετριέται με κλίμακα και βαθμονομημένο κύλινδρο (1000ml/δείγμα) (Veverka & Hinkle, 2001) .

## **8.11. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΣΕ ΥΓΡΑΣΙΑ**

Τα δείγματα υγρών pellet τοποθετούνται σε ένα ζυγό ακριβείας, που μετρά το αρχικό βάρος (με την υγρασία), την εξάτμιση της υγρασίας και το τελικό, πλέον, βάρος επί ξηρού κατά την διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Το ποσοστό υγρασίας ισούται με το λόγο του βάρους του νερού που εξατμίστηκε προς το αρχικό βάρος. Ένα ελάχιστο ποσό περιεχόμενης υγρασίας είναι απαραίτητο για την αντοχή των pellet. Πολύ χαμηλό ποσό υγρασίας κάνει τα pellet εύθραστα, ενώ πολύ υψηλό τα κάνει εξαιρετικά παραμορφώσιμα (P.V.T.Rao, 1994).

## **8.12. ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ**

Μικρής διάρκειας έκθεση σε βροχή ή υψηλή υγρασία κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση επηρεάζουν δυσμενώς την ποιότητα των pellet (Kaliyan & Morey, 2008). Στην συγκεκριμένη δοκιμή ένα μικρό δείγμα ξηρών pellet τοποθετείται σε ένα δοχείο με νερό προκειμένου να βρεθεί η ικανότητα τους να διαλύονται (Veverka & Hinkle, 2001) .

## 9. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

### 9.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

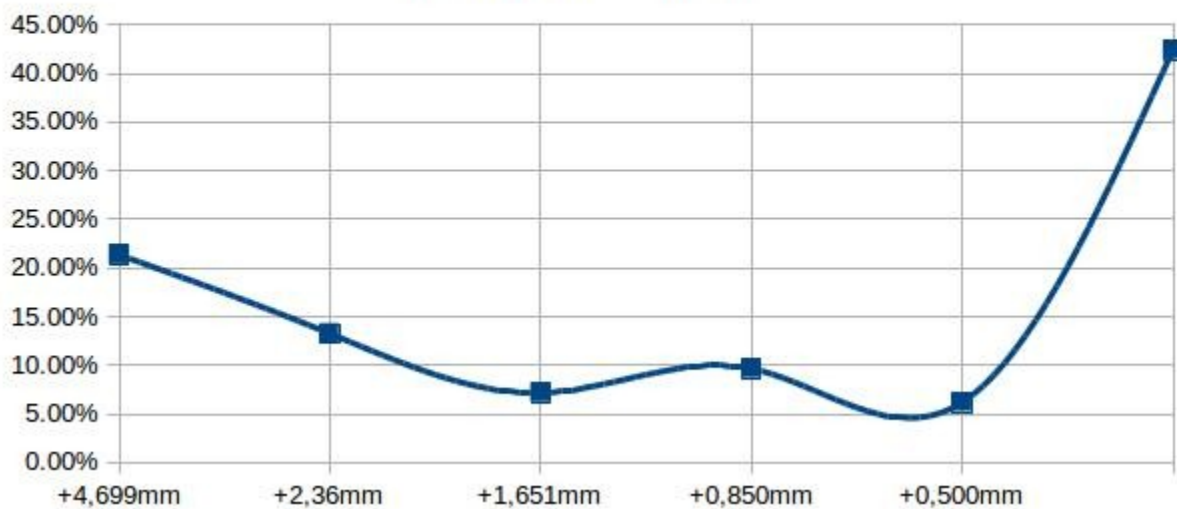
Το υλικό, με το οποίο έγιναν τα πειράματα, είναι απόβλητο βιομηχανικής μονάδας και ερευνάται η καταλληλότητά του για τη δημιουργία pellet. Το υλικό βρίσκεται σε μορφή ψιλής σκόνης και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε η μετατροπή του σε pellet προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί πιο αποδοτικά και με τις λιγότερες δυνατές απώλειες. Προκειμένου να θεωρηθεί κατάλληλο για οποιαδήποτε χρήση πρέπει τα pellet που προκύπτουν να εμφανίζουν επαρκή αντοχή κατά τις διαδικασίες φόρτωσης – εκφόρτωσης και μεταφοράς από την μονάδα παραγωγής στους αποδέκτες, πρέπει επομένως να έχουν την απαιτούμενη αντοχή σε θραύση και τριβή. Ακόμη πρέπει να ελεγχθεί η ικανότητα αποσύνθεσης του όπως επίσης και της τιμής του pH που παράγεται.. Προκειμένου να σφαιροποιηθεί το υλικό χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις σφαιροποίησης, μία κατακόρυφη και μία υπό κλίση. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο παραγόμενο προϊόν σκοπό είχαν το προσδιορισμό της τριβής, της αντοχής με πτώση από ύψος και της δυνατότητας αποσύνθεσης των pellet καθώς επίσης και τη μέτρηση του pH. Ως προσθετικό υλικό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο ασβεστόλιθος, αφού πρόκειται για υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως στην γεωργία, είναι φτηνό και δεν προκύπτουν περιβαλλοντικά προβλήματα από τη χρήση του. Έγιναν δοκιμές χωρίς και με συγκεκριμένες αναλογίες προσθήκης ασβεστόλιθου προκειμένου να διαπιστωθεί πιθανή επίδραση του ασβεστόλιθου στην αντοχή των pellet και στην τιμή του pH.

### 9.2. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Από το αρχικό υλικό λαμβάνονται 1820g. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του σταυρού προκύπτουν δύο δείγματα των 910g. Στη συνέχεια το ένα από τα δύο δείγματα των 910g οδηγείται για κοκκομετρική ανάλυση. Για την κοκκομετρική ανάλυση χρησιμοποιούνται κόσκινα με άνοιγμα βρογχίδας 4,699mm, 2,36mm, 1,651mm, 0,850mm και 0,500mm. Η διάταξη τοποθετείται στον ταξινομητή και ο χρόνος ρυθμίζεται στα 7 λεπτά. Από την ταξινόμηση προέκυψε η εξής κοκκομετρική ανάλυση:

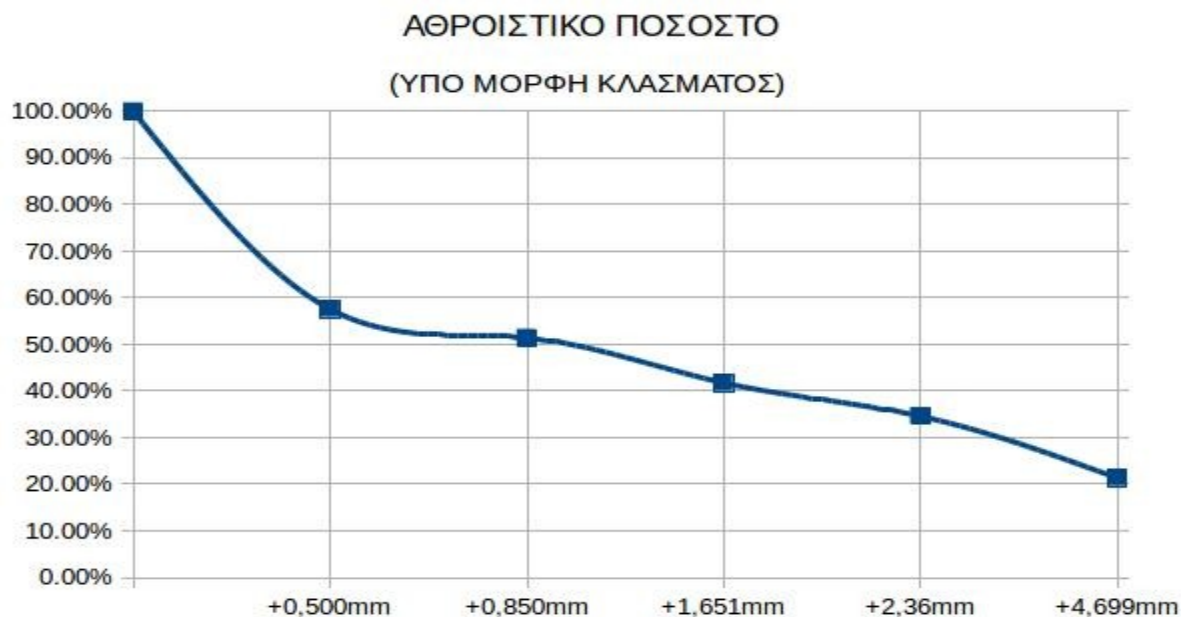
ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	
+4,699mm	21.34%
-4,699+2,36mm	13.25%
-2,36+1,651mm	7.16%
-1,651+0,850mm	9.64%
-0,850+0,500mm	6.17%
-0,500mm	42.41%

**ΠΟΣΟΣΤΟ**  
(ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ)



Ενώ τα αθροιστικά ποσοστά παραμένοντος δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Αθροιστικό ποσοστό παραμένοντος	
+4,699mm	21.34%
-4,699+2,36mm	34.59%
-2,36+1,651mm	41.75%
-1,651+0,850mm	51.39%
-0,850+0,500mm	57.56%
-0,500mm	100.00%



Έπειτα από αυτό δείγμα των 910g με το οποίο έγινε και η κοκκομετρική ανάλυση θραύονται στο μύλο τα κλάσματα κοκκομετρίας +2.36mm προκειμένου να υποβαθμιστούν και να γίνουν κοκκομετρίας -2.36mm+1mm για να λειτουργήσουν ως πυρήνες σφαιροποίησης. Ακολούθως το υλικό συνενώνεται, χωρίζεται με τη μέθοδο του σταυρού και ταξινομείται στο κοκκομετρικό κλάσμα  $\pm 1,651$  οπότε προκύπτει:

+1,651mm	15.57%
-1,651mm	84.42%

Κατά τη διάρκεια της κοκκομετρικής ανάλυσης το άλλο δείγμα των 910g τοποθετείται στο κλίβανο για 24h προκειμένου να γίνει ξήρανση για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας του. Οι μετρήσεις που προέκυψαν δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ξήρανση	
Πρίν(gr)	910
Μετά(gr)	781.1
Υγρασία(gr)	128.9
Υγρασία %	14.16%

Το δείγμα κοσκινίζεται στο κόσκινο  $\pm 1,651$ mm και προκύπτουν τα εξής:

+1,651mm	30.73%
----------	--------

-1,651mm	69.26%
----------	--------

Κατόπιν το κλάσμα +1.651 mm τοποθετείται στο μύλο θραύσης προκειμένου να γίνει πούδρα. Το υλικό ήταν εύθρυπτο και δεν χρειαζόταν να παραμείνει στο μύλο για πάνω από 10 με 20 δευτερόλεπτα. Παρατηρήθηκε ότι κόλλαγε αρκετά πάνω στις επιφάνειες του μύλου, ενώ παρουσίαζε πολύ έντονη οσμή για λίγα λεπτά μετά το πέρας της θραύσης πιθανόν λόγω της θερμότητας που δημιουργήθηκε κατά την θραύση.

Έπειτα τα δύο αρχικά δείγματα των 910g και των 777g (που προέκυψε από την ξήρανση του δείγματος των 910g) συνενώνονται.



Εικόνα 14: Μύλος θραύσης

Αφού κοσκινίστηκε στο  $\pm 1\text{mm}$  προέκυψαν δύο διαφορετικά κοκκομετρικά κλάσματα. Από τα δύο κλάσματα χρησιμοποιήθηκε το κοκκομετρικό κλάσμα  $-1\text{mm}$ , στο οποίο προστέθηκε και υλικό μεγέθους  $-2.36+1\text{mm}$ . Η προσθήκη αυτή του πιο χονδρόκοκκου υλικού έγινε προκειμένου η σφαιροποίηση να δώσει καλύτερα αποτελέσματα, αφού οι πιο χονδρόκοκκοι κόκκοι δρουν ως πυρήνες σφαιροποίησης.



*Εικόνα 15: Μεταλλικά στοιχεία μύλου θραύσης*

Ακολούθως το υλικό τοποθετήθηκε στο δειγματολήπτη και δημιουργήθηκαν 8 διαφορετικά δείγματα των 200g έκαστο, με τα οποία έγιναν οι δοκιμές. Στα παραπάνω δείγματα προστέθηκε με συγκεκριμένη αναλογία ασβεστόλιθος ως προσθετικό υλικό προκειμένου να ερευνηθεί η επίδραση του στο σχηματισμό των pellet, στην αντοχή τους και γενικά στη μετέπειτα συμπεριφορά τους.

Ο ασβεστόλιθος, που χρησιμοποιήθηκε σαν προσθετικό, βρισκόταν σε μορφή σκύρων και έτσι ήταν απαραίτητη μια προεργασία προκειμένου να αποκτήσει την δυνατότητα να αναμειγνύεται με το υλικό, που βρίσκεται σε σκόνη, και να είναι δυνατή η μέγιστη αξιοποίηση των χαρακτηριστικών του. Αυτή η προεργασία έγκειται στην θραύση του στον σιαγωνωτό σπαστήρα και όχι στο μύλο, αφού το υλικό ήταν αρκετά χονδρόκοκκο για να κινηθεί ανάμεσα στα μεταλλικά μέρη του μύλου.





*Εικόνα 16: Δειγματολήπτης (αριστερά), Σιαγωνωτός σπαστήρας (δεξιά)*

Η σχέση μεταξύ της αυξανόμενης λεπτότητας του ασβεστόλιθου και της ικανότητας του να αντιδρά προκύπτει από την μεγαλύτερη επιφάνεια που εκτίθεται κάθε φορά στην αντίδραση. Η επιφάνεια ενός λειοτριβημένου υλικού αυξάνεται με την μείωση του μεγέθους του. Επομένως όσο πιο λεπτόκοκκος είναι ο ασβεστόλιθος που χρησιμοποιείται τόσο μεγαλύτερη επίδραση θα έχει στις ιδιότητες των pellet.

Αφού λήφθηκε η τριμμένη και κοσκινισμένη ποσότητα ασβεστόλιθου, ακολούθησε η διαδικασία της ανάμιξης του με το υλικό σε διάφορες αναλογίες. Το μείγμα υλικού- ασβεστόλιθου τοποθετείτο σε ταψιά, όπου και αναμιγνυόταν πολύ καλά προκειμένου το μείγμα να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιογενές.

Προέκυψαν τέσσερις κατηγορίες δειγμάτων ανάλογα με τον περιεχόμενο ασβεστόλιθο:

1. Χωρίς την προσθήκη ασβεστόλιθου
2. Με προσθήκη 10% κ.β. σε ασβεστόλιθο
3. Με προσθήκη 20% κ.β. σε ασβεστόλιθο
4. Με προσθήκη 30% κ.β. σε ασβεστόλιθο

Στη κάθε κατηγορία αναλογούν από δύο δείγματα των 200g έκαστο.



*Εικόνα 17: Πούδρα ασβεστόλιθου (αριστερά), Αναμειγμένο υλικό με ασβεστόλιθο (δεξιά)*

### **9.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ PELLETT**

Δύο διατάξεις χρησιμοποιήθηκαν για τον σχηματισμό των pellet :

1. Αυτοσχέδια μηχανή σφαιροποίησης κάθετη με την οριζόντιο

Πρόκειται για αυτοσχέδια διάταξη σφαιροποίησης, που αποτελείται από ένα μοτέρ συνδεδεμένο μέσω ενός μάντα μετάδοσης της κίνησης με μια ρόδα αυτοκινήτου. Στο εσωτερικό του ελαστικού προστίθεται το υλικό μαζί με τον υγρό διαλύτη και με την περιστροφή της δημιουργούνται τα pellet.



*Εικόνα 18: Αυτοσχέδια μηχανή σφαιροποίησης*

Ο τρόπος λειτουργίας του είναι πανομοιότυπος με τον τρόπο λειτουργίας του δίσκου, μόνο που σε αυτή την περίπτωση η επιφάνεια σφαιροποίησης είναι κάθετη.

Το μέγιστο φορτίο ενός δίσκου σφαιροποίησης βρίσκεται όταν ο δίσκος βρίσκεται σε κάθετη θέση. Επομένως μια τέτοια διάταξη λειτουργεί ακόμα και εάν είναι φορτισμένη με το μέγιστο φορτίο, που μπορεί να δεχτεί το μηχάνημα.

## 2. Δίσκος σφαιροποίησης σε κλίση με την οριζόντιο

Πρόκειται για τη κλασσική διάταξη σφαιροποιητή, που χρησιμοποιείται και σε βιομηχανική κλίμακα, προσαρμοσμένη όμως στις εργαστηριακές ανάγκες. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στην αυτοσχέδια διάταξη σφαιροποίησης, ενώ μόνο για δύο δείγματα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και στο δίσκο προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα.



Εικόνα 19: Δίσκος σφαιροποίησης (παραγωγής pellet)

Η διαδικασία ξεκινά χρησιμοποιώντας τα δύο δείγματα που έχουν μηδενική περιεκτικότητα προσθετικού υλικού (ασβεστόλιθου) και χρησιμοποιώντας σκέτο νερό ως συνδετική ύλη. Η δοκιμή ξεκινά χρησιμοποιώντας μόνο τα 150g του δείγματος προκειμένου να υπάρχει κάποιο περιθώριο διορθώσεων σε περίπτωση υπερδιαβροχής και δημιουργίας λάσπης. Η ποσότητα αυτή τοποθετείται στην εσωτερική επιφάνεια της ρόδας, όπου πριν ξεκινήσει η λειτουργία της γίνεται ένας πρώτος ψεκασμός προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία σύννεφου σκόνης από την περιστροφή της ρόδας και να αρχίσει άμεσα η διαδικασία σχηματισμού των συσσωματωμάτων. Η μηχανή τίθεται σε λειτουργία και ο ψεκασμός γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, αλλά με μεγαλύτερη συχνότητα το πρώτο διάστημα, κατά το οποίο και σχηματίζονται τα περισσότερα συσσωματώματα και το υλικό είναι ακόμα σχετικά ξερό και σε μορφή σκόνης. Όταν τα συσσωματώματα έχουν πα σχηματισθεί σταματάμε τη λειτουργία της μηχανής και αφαιρούμε τα σχηματισμένα σφαιρίδια από το εσωτερικό της ρόδας.



*Εικόνα 20: Υλικό που παράχθηκε με την πρώτη μέθοδο*

Τα σφαιρίδια τοποθετούνται άμεσα σε διηθητικό χαρτί προκειμένου να απορροφηθεί η πλεονάζουσα υγρασία. Τα pellet πρέπει να παραμείνουν λίγο χρόνο στο διηθητικό χαρτί προκειμένου να αναπτύξουν κάποια ελάχιστη αντοχή ώστε να μπορούν να διαχωριστούν με τη μέθοδο του σταυρού χωρίς να καταστραφούν. Τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής χωρίζονται με την μέθοδο του σταυρού σε δύο τμήματα, από τα οποία το ένα παραμένει για ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα επί 24 ώρες, ενώ το άλλο τμήμα οδηγείται για ξήρανση σε φούρνο επί 24 ώρες στους 100°C, προκειμένου να διαπιστωθεί πιθανή θετική επίδραση της ξήρανσης στην αντοχή τους και την αποσύνθεσή τους. Μετά την ξήρανση γίνονται κοκκομετρικές αναλύσεις για το κάθε δείγμα.

Οι υπόλοιπες δοκιμές ακολουθούν την ίδια ακριβώς διαδικασία.



*Εικόνα 21: Κοκκομετρική ανάλυση υλικού*

Με την έναρξη της λειτουργίας της ρόδας έγινε σχεδόν αμέσως αντιληπτό το γεγονός ότι η

σφαιροποίηση ξεκίνησε από το μεγαλύτερης κοκκομετρίας υλικό, που προστέθηκε για να λειτουργήσει ως οδηγός και έδρασε ως πυρήνας σφαιροποίησης και ήταν αυτό που δημιούργησε τα πρώτα συσσωματώματα. Μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα οι συγκεκριμένοι κόκκοι μεγάλωσαν σε μέγεθος και από αυτούς άλλοι μεν έσπασαν λόγω των συγκρούσεων μεταξύ τους καθώς και με τα τοιχώματα της μηχανής, άλλοι δε έγιναν πιο συμπαγείς. Παρατηρήθηκε ένα χρονικό διάστημα, κατά το οποίο οι κόκκοι πολλαπλασιάστηκαν ραγδαία, αλλά μετά την πάροδο αυτού δεν υπήρχε άλλη σοβαρή μεταβολή. Μετά από αυτό το διάστημα παρατηρήθηκε επιφανειακή λείανση των κόκκων και η δημιουργία πιο σφαιρικών και (ταυτόχρονα) πιο συμπαγών επιφανειών.



*Εικόνα 22: Pellet αμέσως μόλις βγήκαν από την αυτοσχέδια μηχανή σφαιροποίησης. Είναι εμφανής η υγρασία στην επιφάνεια των pellet.*

Αυτό που γενικά διαπιστώθηκε από τη διαδικασία ξήρανσης είναι ότι δεν έπαιξε κάποιο σπουδαίο ρόλο στην αντοχή των pellet. Γενικά τα σφαιρίδια όταν έβγαιναν από τις διατάξεις ήταν αρκετά εύπλαστα ενώ μετά από λίγη ώρα η σκληρότητά τους αυξανόταν προφανώς λόγω της απομάκρυνσης τμήματος της υγρασίας.

## 10. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 10.1. ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΥΤΟΣΧΕΔΙΑ ΜΗΧΑΝΗ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Για το υλικό που σφαιροποιήθηκε στην κατακόρυφη διάταξη σφαιροποίησης (τύπου ελαστικού αυτοκινήτου) πραγματοποιήθηκαν κοκκομετρικές αναλύσεις με τα εξής αποτελέσματα:

	Ποσοστά							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Αναλογία Ασβεστόλιθου	0.00%	10.00%	20.00%	30.00%	0.00%	10.00%	20.00%	30.00%
+9,5mm	47.36%	23.76%	70.17%	57.97%	50.73%	47.97%	45.12%	54.34%
+6,680mm	34.56%	33.42%	17.80%	22.25%	33.44%	33.78%	25.23%	31.81%
+4,7mm	7.59%	16.36%	6.72%	10.37%	13.25%	10.98%	14.73%	8.80%
+2,36mm	8.81%	10.01%	3.85%	6.14%	2.58%	5.24%	8.20%	3.01%
+1mm	1.38%	8.70%	0.94%	2.15%	0.00%	2.03%	3.22%	1.20%
	0.31%	7.75%	0.52%	1.12%	0.00%	0.00%	3.50%	0.84%

Γενικά παρατηρείται ότι τα pellet, που προέκυπταν από τις δοκιμές, ήταν χονδρόκοκκα κοκκομετρίας κυρίως μεγαλύτερης των 9.5mm, περαιτέρω δε περιείχαν και αρκετή ποσότητα υλικού κοκκομετρίας -9.5mm+6.68mm, ενώ οι υπόλοιπες κοκκομετρίες ήταν σχεδόν αμελητέες. Η σύνθεση που προέκυψε υποδηλώνει ότι η σφαιροποίηση ήταν επιτυχής, αφού το μέγεθος κόκκου είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μπορεί να είναι διαχειρίσιμο χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα κατά την χρήση του, όπως η αιώρηση των ψιλών.



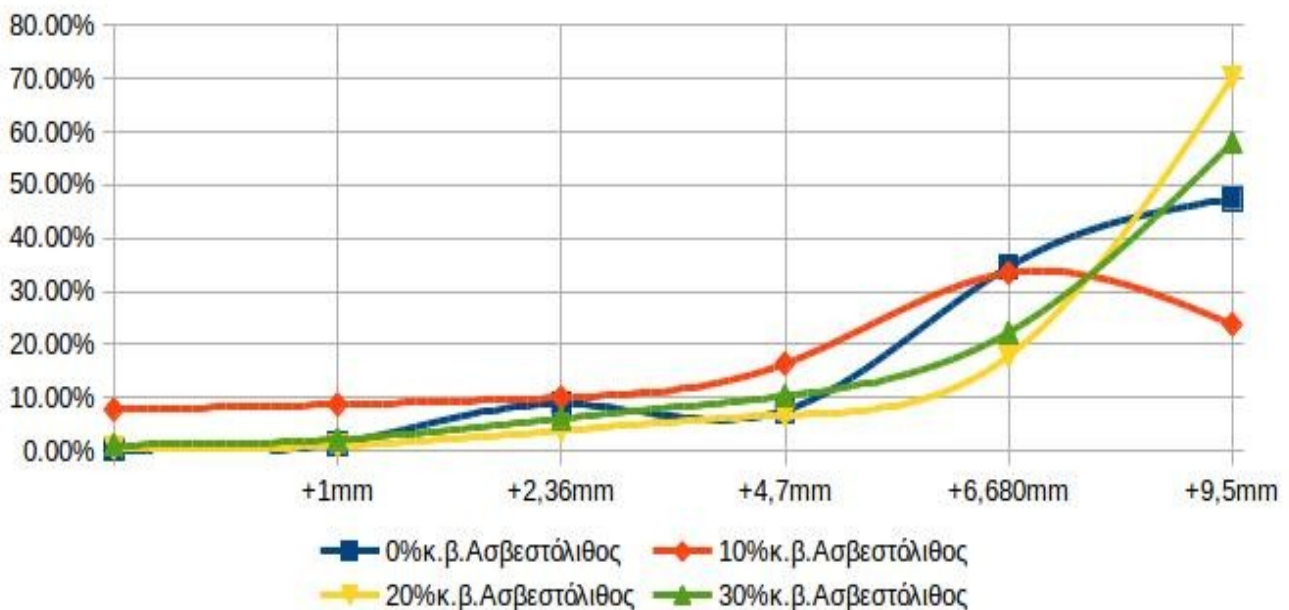
Εικόνα 23: Κοκκομετρικές αναλύσεις για αναλογίες ασβεστόλιθου 0%, 10%, 20% και 30% (αριστερά προς τα δεξιά)

Ακόμα το γεγονός ότι οι ποσότητες ψιλών τεμαχιδίων ήταν σχεδόν αμελητέες φανερώνει την αποδοτική χρήση μεγάλου τμήματος του δείγματος και μειώνει την ανάγκη για ανακύκλωση του υλικού. Οι ποσότητες κοκκομετρίας μικρότερης των 6.68mm ήταν πολύ μικρές, πράγμα που σημαίνει ότι υπήρξαν μικρές απώλειες. Το υλικό με την πολύ μικρή κοκκομετρία, το οποίο είναι ακατάλληλο για χρήση, μπορεί να ανακυκλωθεί. Η διαδικασία ανακύκλωσης του περιλαμβάνει τις διεργασίες θραύσης, ταξινόμησης και ανάμιξής του με το επόμενο δείγμα.

Η θραύση του συγκεκριμένου υλικού δεν έγινε σε μύλο αλλά προτιμήθηκε η χειρωνακτική άλεση σε γουδί, αφού οι ποσότητες ήταν πολύ μικρές και υπήρχε μεγάλη πιθανότητα να κολλήσει όλη η ποσότητα στα τοιχώματα του μύλου. Η ταξινόμηση έγινε ώστε να απομακρυνθούν τα συσσωματώματα, που προέκυψαν.

### ΠΟΣΟΣΤΑ (ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ)

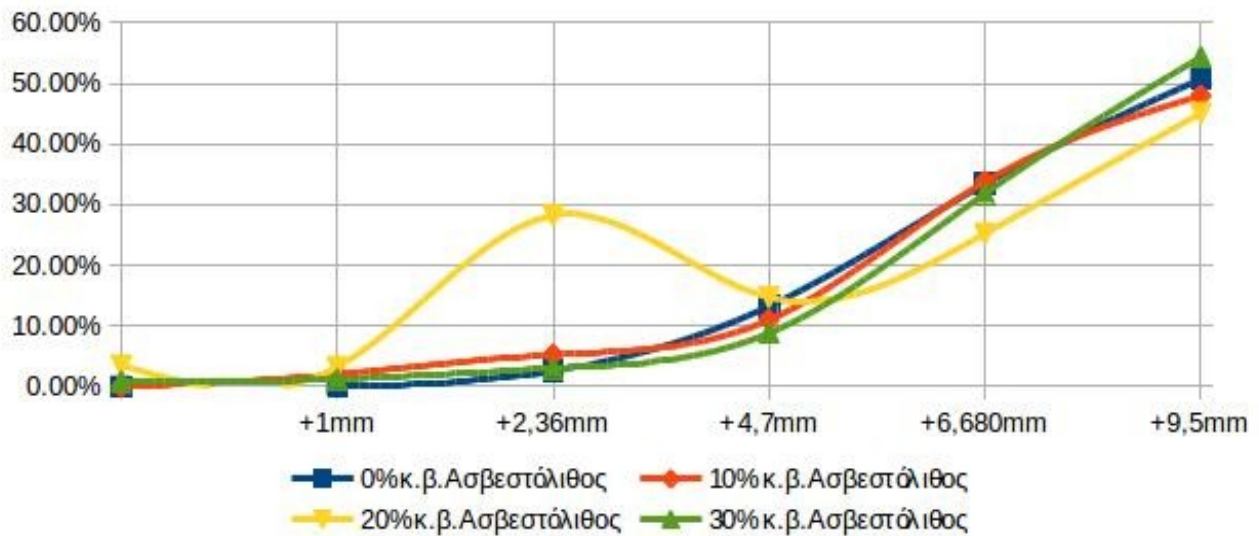
ΔΟΚΙΜΕΣ 1, 2, 3 ΚΑΙ 4





## ΠΟΣΟΣΤΑ (ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ)

ΔΟΚΙΜΕΣ 5, 6, 7 ΚΑΙ 8



Ακόμη σε μία από τις δοκιμές που έγιναν και πιο συγκεκριμένα στη δοκιμή με το υλικό μηδενικής περιεκτικότητας σε ασβεστόλιθο, αφού παρέμεινε μόνο για 30' με 1h στο κλίβανο, όταν εξήλθε παρατηρήθηκε ότι είχε παραμορφωθεί και μετατραπεί σε μια ενιαία άμορφη μάζα. Πιθανόν το φαινόμενο αυτό να προέκυψε από το υψηλό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας του υλικού και την απότομη εξάτμισή της από τους πόρους, με αποτέλεσμα την ολοκληρωτική καταστροφή της δομής του και τη δημιουργία μιας άμορφης πάστας. Ακόμη, όπως γίνεται αντιληπτό και από την παρακάτω φωτογραφία, επήλθε και αποχρωματισμός του υποδοχέα ("ταψάκι" αλουμινίου) στον οποίο ήταν τοποθετημένα τα pellet.

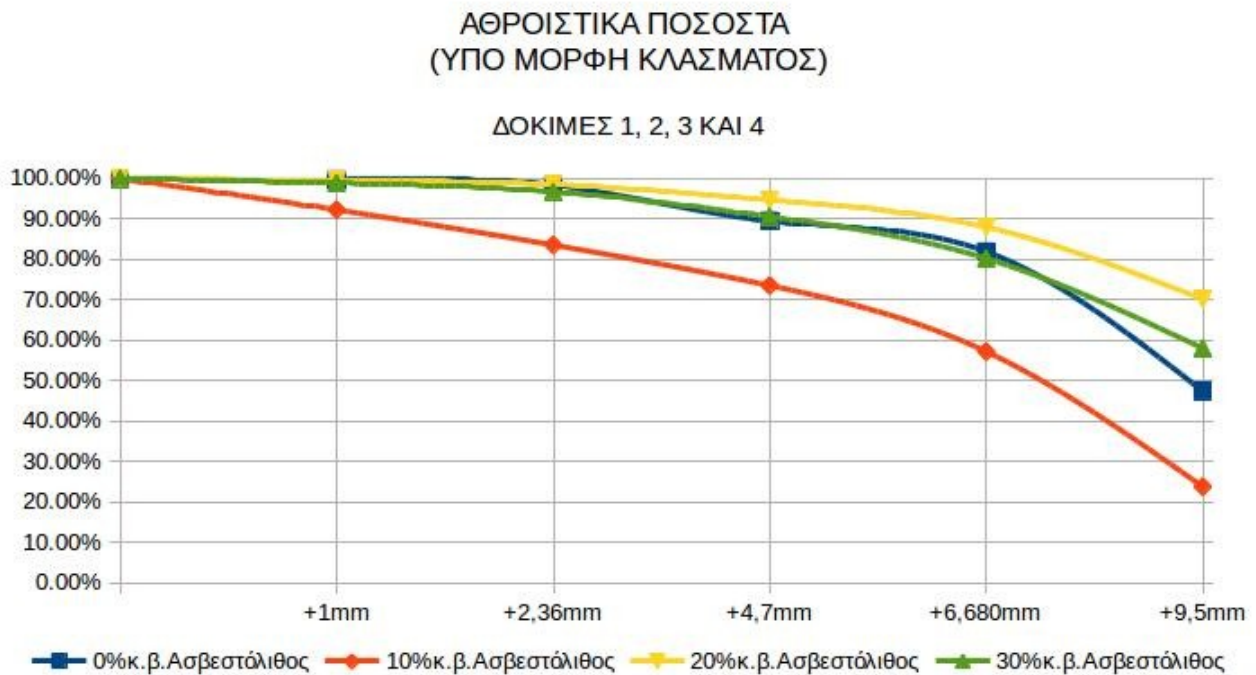


Εικόνα 24: Υλικό που κατά την ξήρανση παραμορφώθηκε

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα η μεταβολή στην περιεκτικότητα του ασβεστόλιθου δεν είχε καμία επίδραση στην κοκκομετρία των pellet.

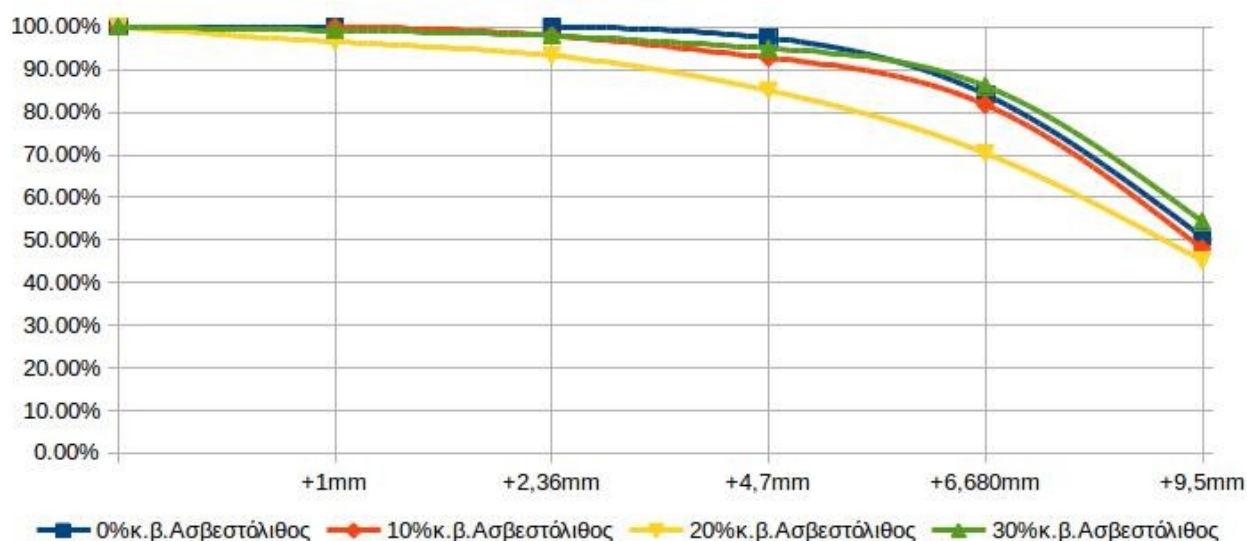
	Αθροιστικά Ποσοστά							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Αναλογία Ασβεστόλιθου	0.00%	10.00%	20.00%	30.00%	0.00%	10.00%	20.00%	30.00%
+9,5mm	47.36%	23.76%	70.17%	57.97%	50.73%	47.97%	45.12%	54.34%
+6,680mm	81.92%	57.18%	87.98%	80.22%	84.17%	81.76%	70.35%	86.14%
+4,7mm	89.50%	73.54%	94.69%	90.59%	97.42%	92.74%	85.08%	94.94%
+2,36mm	98.31%	83.55%	98.54%	96.73%	100.00%	97.97%	93.28%	97.95%
+1mm	99.69%	92.25%	99.48%	98.88%	100.00%	100.00%	96.50%	99.16%
	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Μετά την ξήρανση τους τα pellet τοποθετήθηκαν σε μύλο προκειμένου να διαπιστωθεί η ικανότητα τους να θρυμματίζονται.



## ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ ΠΟΣΟΣΤΑ (ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ)

ΔΟΚΙΜΕΣ 5, 6, 7 ΚΑΙ 8



## 10.2. ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΣΚΟ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

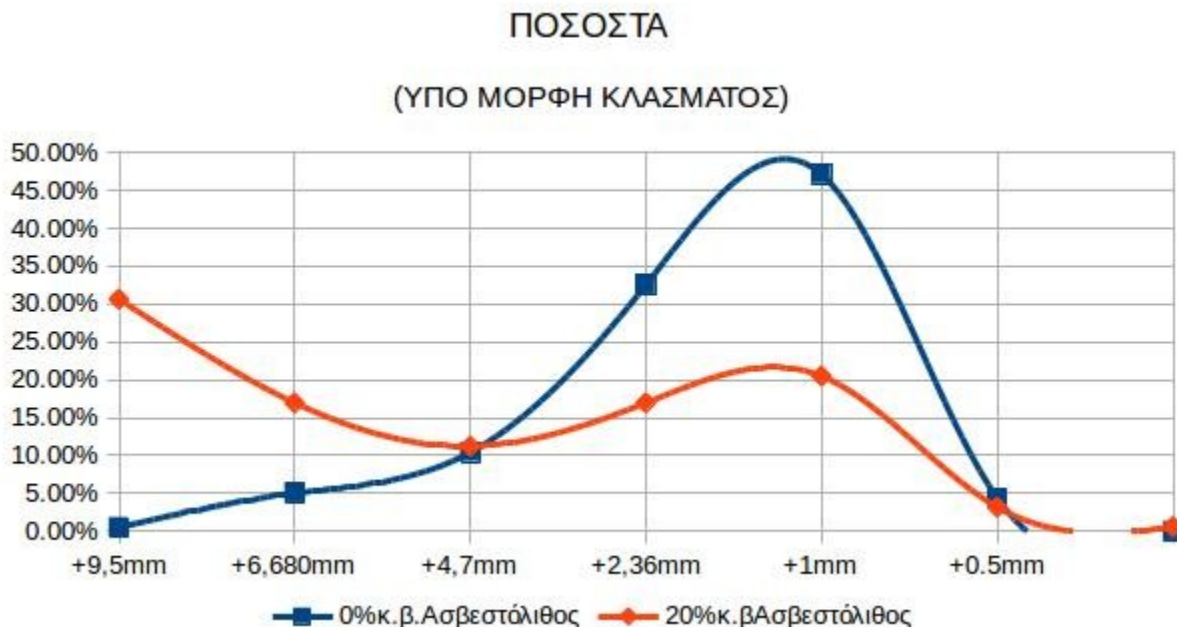
Ο δίσκος τίθεται σε λειτουργία και το υλικό προστίθεται σταδιακά όπως επίσης και το νερό. Η ταχύτητα του δίσκου ρυθμίζεται στις 64 στροφές ανά λεπτό.

Για το δίσκο δεν έγιναν δοκιμές με όλες τις αναλογίες ασβεστόλιθου αλλά μόνο για 0% και 20%. Επίσης μετά την ξήρανση τα pellet δεν τοποθετήθηκαν στο μύλο αλλά σε τροφοδότη και έπεσαν από ύψος 80cm προκειμένου να μελετηθεί η αντοχή τους στην πτώση.

	Ποσοστά	
	1	2
Αναλογία Ασβεστόλιθου	0.00%	20.00%
+9,5mm	0.50%	30.65%
+6,680mm	5.03%	16.95%
+4,7mm	10.40%	11.21%
+2,36mm	32.55%	16.95%
+1mm	47.15%	20.48%
+0.5mm	4.36%	3.16%
	0.00%	0.59%

Τα επόμενα δύο διαγράμματα, σε αντίθεση με τα προηγούμενα που όλα ανεξάρτητα από το

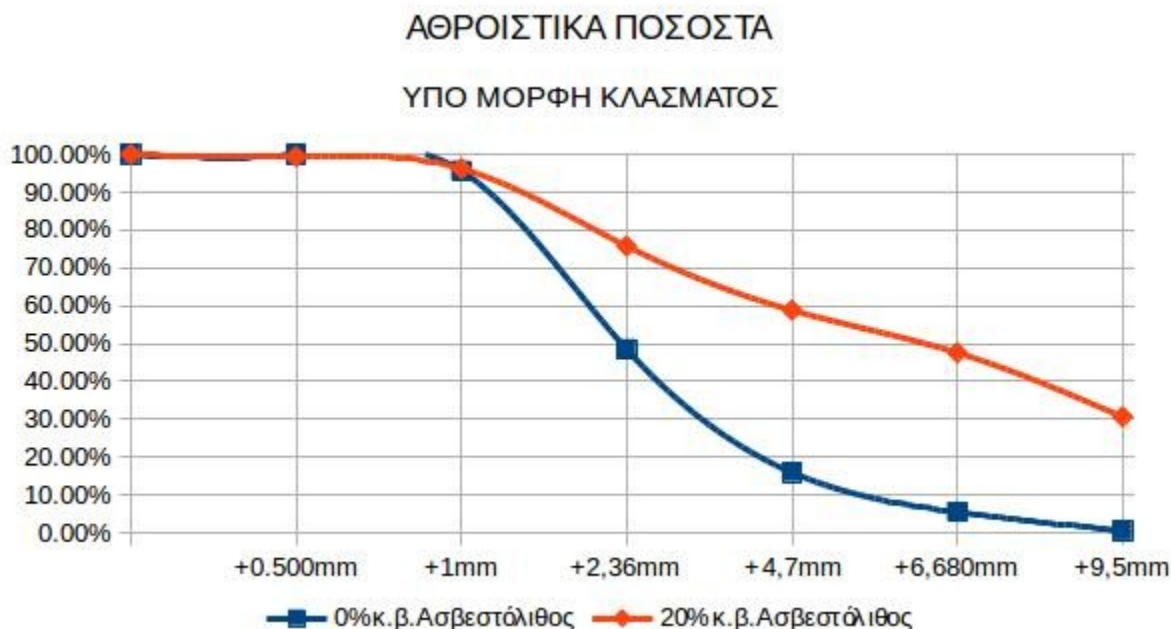
ποσοστό του περιεχόμενου ασβεστόλιθου ακολουθούσαν παρόμοια κατανομή, διαφέρουν αρκετά στην κατανομή των κοκκομετρικών κλασμάτων και αυτό συμβαίνει διότι η σφαιροποίηση του πρώτου δείγματος είναι ουσιαστικά δοκιμαστική προκειμένου να διαπιστωθεί ο τρόπος λειτουργίας του δίσκου.



	Αθροιστικά Ποσοστά	
	1	2
Αναλογία Ασβεστόλιθου	0.00%	20.00%
+9,5mm	0.50%	30.65%
-9,5+6,680mm	5.54%	47.60%
-6,680+4,7mm	15.94%	58.82%
-4,7+2,36mm	48.49%	75.77%
-2,36+1mm	95.64%	96.25%
-1mm	100.00%	99.41%
-0.5mm	100.00%	100.00%

Όπως προκύπτει από τα ποσοστά παραμένουτος υλικού ο δίσκος δίνει διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με τη ρόδα. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος με τη ρόδα δίνει μεγαλύτερο ποσοστό κοκκομετρίας +9,5mm και μεγάλο ποσοστό στο κοκκομετρικό κλάσμα -9,5+6,68mm. Αντίθετα ο δίσκος δίνει για την μια δοκιμή ένα πολύ μικρό ποσοστό +9,5mm και δίνει κυρίως αποτελέσματα στο κλάσμα -2,36+1mm και -4,7+2,36mm για το δείγμα χωρίς ασβεστόλιθο ενώ για το 20% παρουσιάζει κοκκομετρία κυρίως +9,5mm αλλά και πάλι το ποσοστό παραμένουτος υλικού σε αυτή την κοκκομετρία είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο της ρόδας, ενώ εμφανίζει ταυτόχρονα ένα σημαντικό ποσοστό κοκκομετρίας -2,36+1mm. Επομένως ο δίσκος παράγει pellet με μικρότερη

κοκκομετρία, ενώ παρατηρείται και πιο ομοιόμορφη κατανομή του μεγέθους. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στο ότι τα σχηματισθέντα pellet στην πρώτη διάταξη δεν ανέρχονταν στο απαιτούμενο ύψος προκειμένου να θρυμματιστούν όταν πέσουν. Επίσης, τα pellet που προέκυψαν από το δίσκο φαίνεται να είναι πιο εύθρυπτα σε σχέση με αυτά που προέκυψαν από τη ρόδα.



Ακόμα, οι δοκιμές που έγιναν στο δίσκο φάνηκε να δίνουν πιο σφαιρικά και λεία τεμάχια συγκριτικά με αυτές που έγιναν στην αυτοσχέδια μηχανή σφαιροποίησης, όπου τα τεμάχια που προέκυπταν ήταν πιο πεπλατυσμένα. Προφανώς αυτό συμβαίνει διότι στο δίσκο τα αναπτυσσόμενα pellet αναγκάζονται να εκτελέσουν διαφορετική κίνηση, αφού ο δίσκος είναι κεκλιμένος με επαρκή επιφάνεια, με αποτέλεσμα να κυλούν και προς διαφορετικές διευθύνσεις σχηματίζοντας πιο σφαιρικό σχήμα σε αντίθεση με την αυτοσχέδια μηχανή σφαιροποίησης, όπου η κίνηση που εκτελούν είναι κυρίως προς μια διεύθυνση. Ακόμη η εσωτερική επιφάνεια της ρόδας στην οποία, έγινε η σφαιροποίηση ήταν τραχιά και χωρίς κάποιο συγκεκριμένο σχέδιο οδόντωσης (όπως έχει ο δίσκος σφαιροποίησης) το οποίο να επιδρά θετικά στην δημιουργία των pellet και να αποδίδει πιο σφαιρικές επιφάνειες. Ο δίσκος σφαιροποίησης παρουσιάζει και το πλεονέκτημα της αυτόματης αποφόρτισης των τεμαχιδίων επιθυμητού μεγέθους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην καταστρέφονται από την επιπλέον περιστροφή. Τέλος, βασικός παράγοντας για την ποιότητα των παραχθέντων pellet είναι και η δυνατότητα ελέγχου της διαδικασίας, η οποία στο δίσκο είναι σαφώς καλύτερη.

Συμπερασματικά η αυτοσχέδια μηχανή σφαιροποίησης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία pellet αλλά θα ήταν αναγκαίες ορισμένες μεταβολές. Το κύριο πρόβλημά της έγκειται στο γεγονός ότι τα τεμάχια δεν μπορούν να κινηθούν και προς άλλες διευθύνσεις, ενώ ένα

ακόμα πρόβλημα είναι η αδυναμία αυτόματης αποφόρτισης των τεμαχίων.

## 11. ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

### 11.1. ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΒΗΣ

Οι δοκιμές τριβής χρησιμοποιούνται προκειμένου να διαπιστωθεί αν το υπό εξέταση υλικό μπορεί να ανταπεξέλθει στη μετέπειτα διαχείρισή του, όπως η μεταφορά, χωρίς να θρυμματίζεται. Σε αντίθετη περίπτωση η διαδικασία σφαιροποίησης δεν έχει νόημα και θα πρέπει να βρεθούν τρόποι αύξησης της αντοχής του.



*Εικόνα 25: Μύλος πορσελάνης- δοχείο τοποθέτησης του δείγματος(πάνω) και μηχανισμός περιστροφής του(κάτω αριστερά)*

Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένας μύλος πορσελάνης, ένα κόσκινο με άνοιγμα βρογχίδας 1mm και ένας ζυγός ακριβείας.

### 11.1.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα pellet, που προέκυψαν από την πρώτη διάταξη, μετά το πέρας της διαδικασίας ξήρανσης τοποθετήθηκαν και σε μύλο πορσελάνης προκειμένου να διαπιστωθεί η αντοχή τους σε τριβή. Περιστράφηκαν για 7min και έπειτα έγινε κοσκίνιση στο +1mm προκειμένου να διαπιστωθεί εάν δημιουργήθηκε σκόνη.



*Εικόνα 26: Κοκκομετρικές των pellet από 0% έως 30% περιεκτικότητας σε ασβεστόλιθο αφότου πέρασαν από το μύλο*

### 11.1.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από την δοκιμή προέκυψε μικρό ποσοστό θραυσμάτων από 0.7-3.8g, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα όπου με αρνητικό ή θετικό πρόσημο είναι τα κλάσματα από τα οποία υπήρξε απώλεια βάρους ή προσθήκη μετά το μύλο αντίστοιχα.

	Μεταβολή ποσοτήτων μετά το μύλο							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Αναλογία Ασβεστόλιθου	0.00%	10.00%	20.00%	30.00%	0.00%	10.00%	20.00%	30.00%
+1mm	-	-14.6	-	-	-3.2	-0.2	-0.2	-6.2
-1mm	-	7	-	-	2.3	0.7	0.8	3.8
Ποσοστό σκόνης	6.092254134				3.7156704362 1.1824324324 0.7366482505 4.578313253			

Παρατηρήθηκε ότι όντως υπάρχει δημιουργία σκόνης αλλά δεν είναι σημαντικής έκτασης, ενώ η παραγωγή σκόνης επί του αρχικού δείγματος κυμαίνεται από 0.73% έως 6.09%. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε υπάρχει μια μεγάλη διαφορά στα δύο διαφορετικά δείγματα pellet με ασβεστόλιθο σε αναλογία 10% η οποία έγκειται προφανώς στο γεγονός ότι ο μύλος δεν είχε αδειάσει πλήρως από κάποια προηγούμενη δοκιμή.

## 11.2. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΠΤΩΣΗ(ΚΡΟΥΣΗ)

Σκοπός της συγκεκριμένης δοκιμής είναι να διαπιστωθεί η δυνατότητα του υλικού κατά τις διαδικασίες διαχείρισης του, όπως η μεταφορά και η απόθεση, να πέφτει από ύψος χωρίς να θρυμματίζεται. Για τη διενέργεια αυτής της δοκιμής χρησιμοποιήθηκε ένας δονούμενος τροφοδότης τοποθετημένος σε ύψος 80cm.

### 11.2.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα pellet που προέκυψαν από το σφαιροποιητή δίσκου τροφοδοτήθηκαν στο δονούμενο τροφοδότη και έπεσαν από ύψος 80cm παρουσιάζοντας μικρό ποσοστό θραυσμάτων.



Εικόνα 27: Δονούμενος τροφοδότης



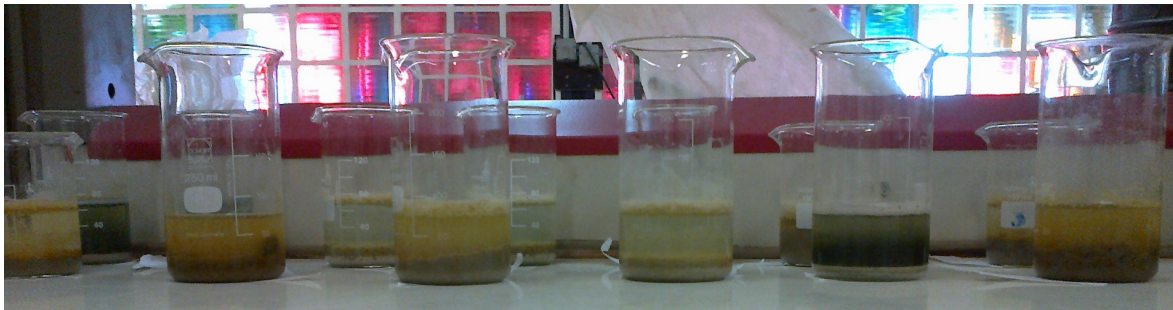


Εικόνα 28: Εσωτερικό των pellet

### 11.3. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ

Η συγκεκριμένη δοκιμή σκοπό έχει να ελέγξει την ικανότητα των παραχθέντων pellet να αποσυντεθούν, αφού το ζητούμενο τα pellet να μπορούν να διαλύονται με ευκολία και το υλικό τους να απορροφάται από το έδαφος.

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δοχεία ζέσεως και χρονόμετρο.



Εικόνα 29: Δοκιμές αποσύνθεσης

### 11.3.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

11.3.2. Λήφθηκε μικρή ποσότητα από όλα τα δείγματα και τοποθετήθηκε στα δοχεία ζέσεως, στα οποία προστέθηκε νερό και μετρήθηκε ο χρόνος που απαιτήθηκε προκειμένου τα pellet να αποσυντεθούν. Πιο συγκεκριμένα το υλικό χωρίσθηκε σε δύο κοκκομετρικά κλάσματα το +9.5mm και το -9.5mm+1mm. Σε ένα δοχείο τοποθετήθηκε υλικό από το κλάσμα +9.5mm και σε ένα άλλο τοποθετήθηκε υλικό κοκκομετρίας -9.5mm+1mm. Στα δύο δοχεία προστέθηκαν 80ml νερού. Πρώτα μετρήθηκε ο χρόνος αποσύνθεσης τους και αμέσως μετά μετρήθηκε η τιμή του pH. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ

Στα δοχεία στα οποία είχε προστεθεί υλικό που περιείχε ασβεστόλιθο παρατηρήθηκε αναβρασμός λόγω της αντίδρασης του ασβεστόλιθου με το υλικό παρουσία νερού. Τα δείγματα που δεν περιείχαν ασβεστόλιθο αποσυντέθηκαν γρηγορότερα αλλά παρόλα αυτά σημαντικές αλλαγές παρατηρήθηκαν μόνο κατά τα πρώτα 1-2min της διαδικασίας. Ακόμη παρατηρήθηκε ότι τα δείγματα που είχαν ξηραθεί στον κλίβανο αποσυντέθηκαν πολύ πιο εύκολα και γρήγορα. Το φαινόμενο αυτό πιθανόν να οφείλεται στην αφαίρεση μεγαλύτερου τμήματος της περιεχόμενης υγρασίας τους και ως εκ τούτου στην μεγαλύτερη επιδεκτικότητα τους στην προσρόφηση νερού σε σχέση με τα pellet που ξηράνθηκαν σε φυσική υγρασία.

Ο ασβεστόλιθος δεν είναι διαλυτός στο νερό ως έχει και επομένως χρειάζεται να υποβαθμισθεί σε μέγεθος και να γίνει αρκετά λεπτομερής προκειμένου να αυξάνει το pH των όξινων εδαφών σε ένα λογικό χρονικό διάστημα. Ακόμη και μικρές αλλαγές στο μέγεθος των τεμαχιδίων έχουν πολύ μεγάλη επίδραση στον χρόνο που απαιτείται για να διαλυθούν. Τεμάχια ασβεστόλιθου μεγαλύτερα των 10 mesh δεν επηρεάζουν το pH του εδάφους. Τεμάχια των οποίων το 50% διέρχεται από κόσκινο 10 mesh αλλά όχι από κόσκινα 50 mesh διαλύονται και αυξάνουν το pH των εδαφών σε λογικό χρονικό διάστημα ενώ τεμάχια μικρότερα από 50 mesh εξουδετερώνουν τα όξινα εδάφη σε πολύ μικρό χρόνο.(Oldham, 2011) Ο ασβεστόλιθος που χρησιμοποιήθηκε στα pellet βρίσκεται σε μορφή πούδρας και κατά συνέπεια είναι πολύ λεπτότερος από τα 50 mesh. Επομένως οι αναμενόμενοι χρόνοι αποσύνθεσης και αύξηση της τιμής του pH είναι πολύ μικροί.

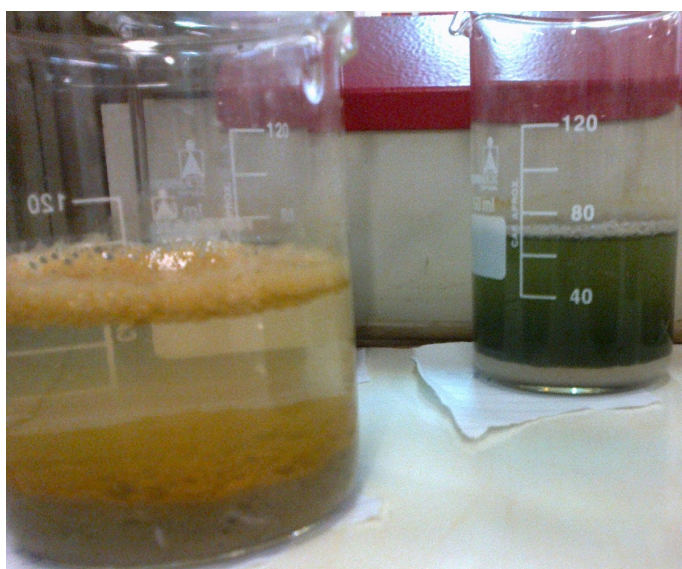
Οι χρόνοι διάλυσης και αποσύνθεσης των κόκκων μετρήθηκαν και παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες:

	Μετρήσεις Χρόνου (min)			
	0.00%	10.00%	20.00%	30.00%
+9.5mm	1.5	1	2	2
-9.5mm+1mm	1	1	2	1

Υλικό μετά το μύλο	Μετρήσεις Χρόνου (min)				
	0.00%	10.00%	20.00%	30%a	30%b
+1mm	2	3	2	2.5	1

Παρατηρείται μια αύξηση των χρόνων διάλυσης για το υλικό που έχει περάσει από μύλο, η οποία πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι οι επιφάνειες έχουν λειανθεί κατά το πέρασμά τους από το μύλο με αποτέλεσμα να έχουν γίνει και λιγότερο ενεργές.

Γενικά παρατηρήθηκε ότι οι χρόνοι αποσύνθεσης είναι μεγαλύτεροι για το πιο χονδρόκοκκο υλικό.



Εικόνα 30: Διαλύματα με αναλογία ασβεστόλιθου 30%(αριστερά) και 0% (δεξιά)

Αμέσως μετά την διάλυση των pellet το υλικό δεν μένει σε αιώρηση μέσα στο νερό αλλά παρατηρείται ταχεία δημιουργία ιζήματος. Ακόμα ο χρωματισμός του διαλύματος και του ιζήματος διαφέρει αισθητά χωρίς και με την προσθήκη ασβεστόλιθου. Στα διαλύματα που δεν έχει προστεθεί ασβεστόλιθος το ίζημα είναι γκρι με πράσινο διάλυμα ενώ σε αυτά που έχει προστεθεί ασβεστόλιθος το ίζημα είναι καφέ ενώ το διάλυμα είναι ελαφρώς καφετί και πολύ πιο διαυγές.

## 11.4. ΜΕΤΡΗΣΗ pH

Η μέτρηση του pH σκοπό έχει να προσδιορίσει την οξύτητα του συγκεκριμένου υλικού προκειμένου να καθορισθεί η καταλληλότητα του για την χρήση του ως έχει σαν λίπασμα, η επίδραση που έχει η προσθήκη ασβεστόλιθου σ' αυτό καθώς επίσης και το εάν θα πρέπει να γίνουν τροποποιήσεις τέτοιες ώστε να ουδετεροποιήσουν την τιμή του, δηλαδή να αυξήσουν την τιμή του εάν το υλικό βρεθεί να είναι αρκετά όξινο ή το αντίθετο. Η τιμή εξουδετέρωσης του ασβεστόλιθου εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό του περιεχόμενου καθαρού  $\text{CaCO}_3$ . Οι εμπορικοί ασβεστόλιθοι μπορεί να έχουν τιμή εξουδετέρωσης μεγαλύτερη ή μικρότερη από το καθαρό  $\text{CaCO}_3$ . Ενδεικτικά ο δολομιτικός ασβεστόλιθος έχει τιμή ίση με 108%, αλλά το σύνηθες είναι οι τιμές τους να είναι μικρότερες του 100%, ενώ επιπλέον προσμίξεις (π.χ. με αργίλους) μειώνουν ακόμα περισσότερο την ικανότητα εξουδετέρωσης. Η δυνατότητα εξουδετέρωσης είναι ανάλογη της τιμής εξουδετέρωσης, της λεπτότητας του υλικού και της ξηρότητας του (Lierop & Kelowna, 1985).

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται μερικές τιμές ικανότητας εξουδετέρωσης ενώσεων του ασβεστίου:

<b>Table 1. The neutralizing value (CCE) of the Pure Forms of Commonly Used Liming Materials</b>	
Lime material	Neutralizing value (%)
CaO (calcium oxide)	179
Ca(OH) <sub>2</sub> (calcium hydroxide)	136
MgCO <sub>3</sub> (magnesium carbonate)	119
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (dolomitic limestone)	109
CaCO <sub>3</sub> (calcium carbonate)	100

From "Soil Fertility and Fertilizers", 3<sup>rd</sup> Edition, Tisdale and Nelson

Εικόνα 31: Ικανότητα εξουδετέρωσης χημικών ενώσεων του ασβεστίου

### 11.4.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η μέτρηση του pH γίνεται στα διαλύματα που προέκυψαν από τις δοκιμές αποσύνθεσης των pellet. Η μέτρηση γίνεται με ηλεκτρονικό πεχάμετρο. Αφού το πεχάμετρο ρυθμισθεί κατάλληλα με την βοήθεια ρυθμιστικών διαλυμάτων, το ηλεκτρόδιο τοποθετείται μέσα στο διάλυμα και η μέτρηση εμφανίζεται στην οθόνη.



Εικόνα 32: Συσκευή μέτρησης pH

### 11.4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ

Οι τιμές που προέκυψαν ήταν αρκετά χαμηλές, ενώ στα δείγματα που είχε προστεθεί και ασβεστόλιθος οι τιμές αυξάνονταν. Πιο συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη ήταν η ποσότητα του ασβεστόλιθου που είχε προστεθεί τόσο μεγαλύτερη ήταν και η αύξηση του pH. Η τιμή του pH, που προέκυψε για το δείγμα που δεν περιείχε καθόλου ασβεστόλιθο, είναι πολύ χαμηλή αλλά παρόλα αυτά δεν είναι και απαγορευτική για την χρήση του υλικού ως λίπασμα, αφού παρουσιάζει μπορεί το ζητούμενο να είναι η επίτευξη ενός πολύ όξινου εδάφους προκειμένου να ευνοηθούν ορισμένου τύπου καλλιέργειες. Η μεγαλύτερη τιμή προέκυψε με προσθήκη 30% κ.β. ασβεστόλιθου, οπότε η τιμή του pH γίνονταν ίση ή ελαφρώς μεγαλύτερη του 5.

Μετρήσεις pH				
	0.00%	10.00%	20.00%	30.00%
+9.5mm	2.63	3.99	5.08	5.2
-9.5mm+1mm	2.64	3.9	4.53	5.38

Μετρήσεις pH					
Υλικό μετά το μύλο	0.00%	10.00%	20.00%	30%a	30%b
+1mm	2.66	4.36	5.056	5.08	5.68

## 12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να ερευνηθεί η δυνατότητα δημιουργίας pellet από το συγκεκριμένο υλικό, όπως επίσης και η ανθεκτικότητά τους κατά τις διάφορες διαδικασίες χειρισμού τους.

Η χρήση pellet έχει πολύπλευρα πλεονεκτήματα, όπως η αποδοτικότερη διαχείριση των στείρων, η προστασία του περιβάλλοντος ή η αύξηση της απόδοσης, όπου αυτά χρησιμοποιούνται.

Τα συμπεράσματα, τα οποία εξήχθησαν από την παρούσα εργασία ήταν ότι το συγκεκριμένο υλικό είναι εύκολα επεξεργάσιμο και μπορεί να σφαιροποιηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό χωρίς προβλήματα και με τις δύο μεθόδους. Από τις δύο διαφορετικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά το σχήμα των pellet έδωσε ο δίσκος σφαιροποίησης

παράγοντας περισσότερο σφαιρικά pellet. Από την άλλη πλευρά στα pellet που προέκυψαν από την αυτοσχέδια διάταξη σφαιροποίησης, η κατανομή της κοκκομετρίας τους περιοριζόταν κυρίως στα κοκκομετρικά κλάσματα +6.68-9.5mm και +9.5mm με διαφορά 10 ή 20 ποσοστιαίων μονάδων από τα υπόλοιπα κλάσματα, ενώ για αυτά που προέκυψαν από το δίσκο σφαιροποίησης τα ποσοστά ήταν σχεδόν ισομοιρασμένα σε όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα. Δεδομένου ότι ζητούμενο ήταν να προκύψουν χονδρόκοκκα pellet, καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από τη χρήση της αυτοσχέδιας μηχανής σφαιροποίησης. Αυτό το γεγονός πιθανόν να είναι απόρροια των περισσότερων δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στην αυτοσχέδια διάταξη και άρα του καλύτερου χειρισμού της. Ακόμη τα pellet που προέκυψαν από το δίσκο ήταν λιγότερο υγρά κάτι που ίσως να οφείλεται στην καλύτερη δυνατότητα ελέγχου της διαδικασίας.

Παρόλο που από τις δοκιμές τριβής, που έγιναν στο μύλο, διαπιστώθηκε ότι το υλικό εμφανίζει σχεδόν αμελητέες ποσότητες θραυσμάτων, η παρουσία του ασβεστόλιθου επηρέασε την αντοχή του σε τριβή ελαχιστοποιώντας την παραγωγή θραυσμάτων για περιεκτικότητες 10% και 20%. Επίσης παρατηρήθηκε ότι μεγάλο ρόλο στην αντοχή φαίνεται να έχει και η εξοικείωση με την λειτουργία του μηχανήματος.

Όσον αφορά τις δοκιμές αντοχής σε πτώση πάλι δεν υπήρξαν σημαντική φθορά των pellet. Ένα πολύ μικρό ποσοστό θρυμματίστηκε ενώ η υπόλοιπη ποσότητα του δείγματος παρέμεινε ως είχε.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά όξινο (με pH περί το 2,5) με αποτέλεσμα να καθίσταται επικίνδυνο για χρήση στο περιβάλλον ως έχει, ενώ επίσης προέκυψε και η ανάγκη για προσεκτικό χειρισμό του για την αποφυγή εγκαυμάτων και ατυχημάτων. Με την προσθήκη του ασβεστόλιθου σαν συνδετικό υλικό η τιμή του pH αυξήθηκε έως και δύο μονάδες πλησιάζοντας το 5,5 και έτσι αυτό κατέστη λιγότερο επιβλαβές για το περιβάλλον.

Ακόμα από την χρονομέτρηση, που έγινε προκειμένου να διαπιστωθεί ο απαιτούμενος χρόνος αποσύνθεσης των παραχθέντων pellet, φάνηκε ότι μέσα στο πρώτο λεπτό τα πιο λεπτόκοκκα pellet διαλύονταν ενώ τα πιο χονδρόκοκκα χρειάζονταν λίγο περισσότερο χρόνο. Ακόμα το υλικό το οποίο είχε ξηραθεί σε κλίβανο παρουσίαζε μεγαλύτερη ταχύτητα αποσύνθεσης και χρειάστηκε λιγότερο χρόνο συγκριτικά με τα υπόλοιπα δείγματα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην απομάκρυνση μεγαλύτερου τμήματος της υγρασίας του με αποτέλεσμα να είναι επιδεκτικότερο στην προσρόφηση νερού.

Επομένως το συγκεκριμένο υλικό είναι κατάλληλο για γεωργική χρήση ως λίπασμα ως έχει αλλά

και με προσθήκη ασβεστόλιθου γεγονός που εξαρτάται αν ζητούμενο είναι η δημιουργία περισσότερο ή λιγότερο όξινων εδαφών. Επιπλέον τα pellet είναι ανθεκτικά στην τριβή και την πτώση κάτι που εξασφαλίζει τη μη δημιουργία σκόνης κατά το χειρισμό τους δημιουργώντας έτσι λιγότερα προβλήματα, ενώ είναι ικανά να αποσυντίθενται αρκετά γρήγορα στην επαφή τους με το νερό. Περαιτέρω η δημιουργία του pellet είναι μία αρκετά εύκολη και απλή διεργασία, η οποία δεν απαιτεί εξεζητημένες και ακριβές πρώτες ύλες, αφού τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι νερό, σκόνη ασβεστόλιθου και το συγκεκριμένο υλικό το οποίο είναι βιομηχανικό απόβλητο.

Η παρούσα εργασία αποτελεί προκαταρκτική μελέτη στην χρήση του συγκεκριμένου υλικού και την δημιουργία pellet. Σε επόμενες εργασίες θα μπορούσαν ενδεχομένως να μετρηθούν και άλλες ιδιότητες των παραγόμενων pellet, όπως το πορώδες τους. Ακόμα θα μπορούσαν να μελετηθούν και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την δημιουργία των pellet, όπως η κλίση της συσκευής, η ταχύτητα περιστροφής καθώς και η θέση στην οποία γίνεται η τροφοδοσία και ο ψεκασμός. Επιπροσθέτως μπορεί να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα όσον αφορά το συγκεκριμένο βιομηχανικό απόβλητο προκειμένου να βρεθούν και άλλες ιδιότητες καθώς και πιθανές χρήσεις του. Ακόμα ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μια τεχνικοοικονομική μελέτη προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την δυνατότητα αξιοποίησης και άλλων βιομηχανικών αποβλήτων κατά παρόμοιο τρόπο.

### **13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

technologies null, O. P. (). *Outotec Pelletizing technologies*, Outotec Pelletizing technologies .

Albert, K. B. and Langford, D. (1994). *Pelletizing Limestone Fines: A Study Of The Benefits Of Pelletized Limestone Fines In The Commercial And Agricultural Market*, .

Chitu, M. T.-M. (2009). *Granulation Humide Des Poudres Cohesives: Rheologie, Mecanismes De Croissance Et Tenue Mecanique Des Granules*, Génie des procédés, Institut National Polytechnique de Toulouse.

Drew, 1978. *Advances in chemical engineering*. Academic press Inc, .



Ghasemi, Y.; Kianmehr, M. H.; Mirzabe, A. H. and Abooli, B. (2013). *The Effect Of Rotational Speed Of The Drum On Physical Properties Of Granulated Compost Fertilizer*, [www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/](http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/) .

Gluba, T. (2012). *Investigation of continuous disc granulation process*, .

Harikrishnan, K. and Ramamurthy, K. (2005). *Influence Of Pelletization Process On The Properties Of Fly Ash Aggregates*, .

[http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieeprojects/files/projects/documents/pelletslas\\_pellet\\_standards.pdf](http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieeprojects/files/projects/documents/pelletslas_pellet_standards.pdf) ().

[http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieeprojects/files/projects/documents/pelletslas\\_pellet\\_standards.pdf](http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieeprojects/files/projects/documents/pelletslas_pellet_standards.pdf), .

<http://feeco.com/agglomeration/> (). <http://feeco.com/agglomeration/>, .

<http://feeco.com/disc-pelletizers/> (). <http://feeco.com/disc-pelletizers/>, .

<http://www.biofuelmachines.com/Additives-in-biomass-pellet-making.html> ().

<http://www.biofuelmachines.com/Additives-in-biomass-pellet-making.html>, .

<http://www.raymondgrindingmill.com/solutions/cushing-plant/pelletizing-process.html> ().

<http://www.raymondgrindingmill.com/solutions/cushing-plant/pelletizing-process.html>, .

<http://www.slideshare.net/wisdomvalley/agglomeration> ().

<http://www.slideshare.net/wisdomvalley/agglomeration>, .

[http://www.wstyler.ca/pdf/analysis\\_processing/Pelletizing\\_Discs.pdf](http://www.wstyler.ca/pdf/analysis_processing/Pelletizing_Discs.pdf) ().

[http://www.wstyler.ca/pdf/analysis\\_processing/Pelletizing\\_Discs.pdf](http://www.wstyler.ca/pdf/analysis_processing/Pelletizing_Discs.pdf), .

Kaliyan, N. and Morey, V. (2008). *Factors affecting strength and durability of densified biomass products*, .

Lierop, D. W. and Kelowna (1985). *Evaluation of Agricultural Limestone*, .

Meyer, K., 1980. *Pelletizing of Iron Ores*, .

Minerals, M. (). *Disc Pelletizer*, .

economic Mineral Policy Options (c-tempo), C. F. T. (2011). *Development Of Iron Ore Pelletisation Industry In India*, .

of Mines, I. B. (2011). *Iron And Steel-vision 2020*, .

- Murdock, L. W., 1997. *Pelletized Lime - How Quickly Does It React.* , .
- Nold; Lobe and Muller (2003). *Granules Production - Easy and cost effective*, Interceram .
- P.V.T.Rao (1994). *Agglomeration And Prereduction Of Ores*, .
- Pandey, P.; Lobo, N. F. and Kumar, P. (2012). *Optimization of Disc Parameters Producing More Suitable Size Range of Green Pellets*, International Journal of Metallurgical Engineering 2012 .
- Pati&Vinay (2008). *Reduction Behaviour Of Iron Ore Pellets*, .
- Pietsch, W., 2008. *Agglomeration Processes: Phenomena, Technologies, Equipment*. John Wiley & Sons, .
- Radeva, Z.; Müller, P. and Tomas, J. (2013). *Influence Of The Pan Pelletizer Rotational Velocity And The Particles Size On The Agglomeration Of Alumina Oxide Granules*, .
- Rapp, K. (2004). *Nonlinear Estimation And Control In The Iron Ore Pelletizing Process: An Application And Analysis Of The Extended Kalman Filter*, Norwegian University of Science and Technology.
- Ratul&Baquee (2013). *Pellets And Pelletization Techniques: A Critical Review*, .
- Reynolds, G.; Fu, J.; Cheong, Y.; Hounslow, M. and Salman, A. (2005). *Breakage In Granulation: A Review*, .
- Tay, J.-H.; Hong, S.-Y. and Show, K.-Y. (2000). *Reuse Of Industrial Sludge As Pelletized Aggregate For Concrete*, Journal of Environmental Engineering .
- Veverka, J. and Hinkle, R. (2001). *A Comparison Of Liquid Binders For Limestone Pelletizing*, .
- Νέου-Συγκούνα, . *Εξαγωγική Μεταλλουργία Πυρομεταλλουργικές και Υδρομεταλλουργικές Διεργασίες.* , .
- Ρεμουντάκη&Τσέζος, 2010. *Περιβάλλον 1- Εισαγωγή Στην Επιστήμη Και Την Τεχνολογία Προστασίας Του Περιβάλλοντος*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Ε.Μ.Π., .
- Τσακίρης, Ν. Κ. (2009). *Παραγωγή Σιδήρου Από Κατάλοιπα Βωξίτη*, .
- Litster, J. & Ennis, B. (Ed.), 2004. *The Science And Engineering Of Granulation Processes*. Kluwer Academic Publishers, .
- Salman, A. D.; Ghadiri, M. & Hounslow, M. (Ed.), 2007. *Handbook of Powder Technology*. Elsevier B.V, .

Williams & Allen (Ed.), 1980. *Particle Size Enlargement*. Elsevier, .