ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

ΤΡΙΒΟΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Καλλιόπη Κόκκαλη

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
ΚΟΜΝΙΤΣΑΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
ΑΛΕΒΙΖΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΣΤΡΑΤΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, ΔΡ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Κ. Κομνίτσα. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού σε τεχνητά σύνθετα πυριτικά – ανθρακικά δείγματα.

Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου θέματος είναι ότι παρόλο που αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο διαχωρισμού, η εφαρμογή της είναι περιορισμένη λόγω της πολυπλοκότητας των εμπλεκόμενων αλληλεπιδράσεων καθώς και της δυσκολίας στη ρύθμιση των κατάλληλων παραμέτρων διεργασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Κ. Κομνίτσα για την εμπιστοσύνη και την ανάθεση της παρούσας εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελής επιτροπής Αναπληρωτή Καθηγητή Γεώργιο Αλεβίζο για την αποδοχή του να αξιολογήσει την παρούσα εργασία, και Δρ. Αντώνη Στρατάκη για την πολύτιμη βοήθειά του στις ορυκτολογικές αναλύσεις. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Όλγα Παντελάκη κυρίως για την καθοδήγησή της καθ’ όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε πάντοτε καθώς και την κατανόησή της και την άριστη συνεργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε και με στηρίζει πάντα καθώς και τους φίλους μου για τα υπέροχα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο τριβοηλεκτροστατικός διαχωρισμός αποτελεί μια οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον τεχνική διαχωρισμού, η οποία χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στην επεξεργασία ορυκτών και την ανακύκλωση πλαστικών. Βασίζεται στο τριβοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο δημιουργείται ηλεκτρικό φορτίο στις επιφάνειες δύο σωμάτων με τη βοήθεια της τριβής. Ωστόσο, αν και αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο διαχωρισμού, η εφαρμογή της είναι περιορισμένη λόγω της πολυπλοκότητας των εμπλεκόμενων αλληλεπιδράσεων καθώς και της δυσκολίας στη ρύθμιση των κατάλληλων παραμέτρων διεργασίας. Διάφοροι παράγοντες, όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες (υγρασία, θερμοκρασία, κ.λπ.), οι μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των δειγμάτων, καθώς επίσης, και ο σχεδιασμός του εξοπλισμού πρέπει να εξετάζονται ταυτόχρονα.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η εφαρμογή του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού σε τεχνητά σύνθετα πυριτικά – ανθρακικά δείγματα. Ειδικότερα εξετάστηκε η επιτυχία του διαχωρισμού μεταβάλλοντας παραμέτρους ως προς το υλικό του τριβοφορτιστή, την κοκκομετρία του υλικού τροφοδοσίας, την τάση του ηλεκτροστατικού πεδίου, την παροχή αέρα και τη σχετική θέση εισόδου και εξόδου των τεμαχιδίων στο πεδίο.

Οι καθαρές φάσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ορυκτά χαλαζία (SiO_2), μαγνησίτη ($MgCO_3$) και ασβεστίτη ($CaCO_3$). Από τα τρία αυτά υλικά δημιουργήθηκε το σύνθετο δείγμα που χρησιμοποιήθηκε με ίσες κατά βάρος αναλογίες (33%, 33%, 33%). Χρησιμοποιήθηκαν δύο κοκκομετρίες από το σύμμεικτο δείγμα, α) το σύνολο του υλικού που ήταν -150μm και ονομάστηκε λεπτόκκοκο, και β) το δείγμα που προέκυψε αφού απομακρύνθηκε το κλάσμα (-53 μm) και προέκυψε το (+53-150 μm) που ονομάστηκε χονδρόκοκκο.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές δοκιμών από πολλαπλούς διαχωρισμούς η κάθε σειρά. Σε κάθε διαχωρισμό στα προϊόντα που συλλέχθηκαν προσδιορίστηκε η % κατανομή βάρους τους και η περιεκτικότητά τους σε χαλαζία Q, μαγνησίτη M και ασβεστίτη C με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων X, XRD. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι κατανομές των τριών φάσεων σε κάθε προϊόν.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν διαπιστώθηκε ότι ο χαλαζίας κατανέμεται πάντα στο αρνητικό προϊόν ενώ ο μαγνησίτης κατανέμεται στο θετικό προϊόν. Όσον αφορά το ανθρακικό ορυκτό του ασβεστίτη αυτός κατανέμεται τις περισσότερες φορές μαζί με το επίσης ανθρακικό ορυκτό του μαγνησίτη. Υπήρξαν όμως δοκιμές που επιτεύχθηκε ικανοποιητικός διαχωρισμός ακόμη και μεταξύ των δύο αυτών ανθρακικών ορυκτών. Συγκεκριμένα στη δοκιμή με το

χονδρόκκοκο κλάσμα +53-150μm με χρήση χάλκινου τριβοφορτιστή και τάση 10 KV ανακτήθηκε ένα θετικό προϊόν PP στο οποίο συγκεντρώθηκε το 73% του μαγνησίτη, ένα αρνητικό προϊόν NN στο οποίο συγκεντρώθηκε το 92% του χαλαζία και ένα ενδιάμεσο προϊόν από τη σύνθεση των NP και PN στο οποίο κατανέμεται το 75 % του ασβεστίτη.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ 1
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ..... 1
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ 5
Εισαγωγή 6
Ηλεκτροστατικός διαχωρισμός 6
Η ιστορία του ηλεκτροστατικού διαχωρισμού 8
Τριβοηλεκτρισμός και τριβοηλεκτρικό φαινόμενο..... 10
Θεωρία τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού 12
Τριβοηλεκτρικός διαχωρισμός..... 13
Η θεωρία του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού..... 16
Η μέθοδος του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού..... 17
Εξοπλισμός 21
Θεμελιώδεις αρχές 23
Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία διαχωρισμού 24
Πειραματική διαδικασία..... 27
Περιγραφή του αρχικού σύνθετου δείγματος..... 27
Δοκιμές Τριβοηλεκτροστατικού Διαχωρισμού 30
Πρώτη σειρά δοκιμών 33
Δοκιμές διαχωρισμού με πλαστικό τριβοφορτιστή 34
Δοκιμές διαχωρισμού με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή..... 41
Δοκιμές διαχωρισμού με χάλκινο τριβοφορτιστή 49
Δεύτερη σειρά δοκιμών..... 58
Θέση 3-3 59
Θέση 2-2 63
Θέση 1-1 67
Τρίτη σειρά δοκιμών..... 71
D3-S1 71
D1-S3 72
Αξιολόγηση διαχωρισμών..... 73
Συμπεράσματα..... 78
Προτάσεις 79
Βιβλιογραφία 80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Φόρτιση σωματιδίου – σωματιδίου……13

Εικόνα 2: Φόρτιση σωματιδίου – τοιχώματος……15

Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροστατικού φορτιστή τύπου κυκλώνα για τον καθαρισμό άνθρακα……18

Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροστατικού διαχωρισμού με σωλήνα τριβοφόρτισης……19

Εικόνα 5: Τριβοηλεκτροστατικός διαχωριστής……20

Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση του τριβοηλεκτρικού διαχωρισμού……21

Εικόνα 7: Διαχωριστής ελεύθερης πτώσης……22

Εικόνα 8: Τριβοηλεκτροστατικός διαχωριστής ζώνης (Bittner J. D., 2013)……23

Εικόνα 9: Δυνάμεις που δρουν σε ένα σωματίδιο που πέφτει σε ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο……24

Εικόνα 10:Ορυκτολογική ανάλυση αρχικού χαλαζία……28

Εικόνα 11:Ορυκτολογική ανάλυση αρχικού μαγνησίτη……28

Εικόνα 12:Ορυκτολογική ανάλυση αρχικού ασβεστίτη……29

Εικόνα 13:Ορυκτολογική ανάλυση αρχικού σύνθετου δείγματος……29

Εικόνα 14: Εργαστηριακός τριβοηλεκτροστατικός διαχωριστής……30

Εικόνα 15:Σχηματική αναπαράσταση τριβοηλεκτροστατικού διαχωριστή……31

Εικόνα 16:Λεπτομέρεια κελιού ηλεκτροστατικού πεδίου……31

Εικόνα 17:Σχηματική αναπαράσταση διαδικασία διαχωρισμού……33

Εικόνα 18:Ορυκτολογική ανάλυση των προϊόντων PP, PN, NP και NN……57

Εικόνα 19:Σχετικές θέσεις εισόδου στο ηλεκτρικό πεδίο της τροφοδοσίας και λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων……74

Εισαγωγή

Ο τριβοηλεκτροστατικός διαχωρισμός αποτελεί μια οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον τεχνική διαχωρισμού, η οποία χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στην επεξεργασία ορυκτών και την ανακύκλωση πλαστικών. Βασίζεται στο τριβοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο δημιουργείται ηλεκτρικό φορτίο ανάμεσα σε δύο σώματα με τη βοήθεια της τριβής. Ωστόσο, αν και αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο διαχωρισμού, η εφαρμογή της είναι περιορισμένη λόγω της πολυπλοκότητας των εμπλεκόμενων αλληλεπιδράσεων καθώς και της δυσκολίας στη ρύθμιση των κατάλληλων παραμέτρων διεργασίας. Διάφοροι παράγοντες, όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες (υγρασία, θερμοκρασία, κ.λπ.), οι μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των δειγμάτων, καθώς επίσης, και ο σχεδιασμός του εξοπλισμού πρέπει να εξετάζονται ταυτόχρονα. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η εφαρμογή του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού σε σύνθετα δείγματα.

Ηλεκτροστατικός διαχωρισμός

Ο **ηλεκτρικός διαχωρισμός** βασίζεται στο γεγονός ότι ορυκτά και υλικά μπορούν να φορτιστούν διαφορετικά και κατά συνέπεια μπορούν να διαχωριστούν όταν εφαρμοστεί ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τις διηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ των ουσιών. Δεδομένου ότι η ηλεκτροστατική δύναμη είναι ανάλογη του επιφανειακού φορτίου της επιφάνειας των τεμαχιδίων και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, λεπτά και ελαφρά τεμαχίδια μπορούν να επηρεαστούν σε μεγάλο βαθμό από την ηλεκτροστατική δύναμη και έτσι μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικός διαχωρισμός τους.

Ο ηλεκτροστατικός διαχωρισμός είναι η επιλεκτική ταξινόμηση στερεών χρησιμοποιώντας τις δυνάμεις που ενεργούν σε φορτισμένα ή πολωμένα σώματα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Είναι δυνατόν να διαχωριστούν υλικά προσαρμόζοντας ηλεκτρικές και άλλες δυνάμεις, όπως φυγόκεντρες και βαρυτικές. Σήμερα χρησιμοποιείται ένας αριθμός μηχανισμών για τη μεταβίβαση φορτίου στα τεμαχίδια. Η επαγωγική αγωγιμότητα, η επαφή ή η τριβή και ο βομβαρδισμός ιόντων είναι τρεις κύριοι μηχανισμοί που εφαρμόζονται για τον

ηλεκτρικό διαχωρισμό ορυκτών, καθώς και η φόρτιση μέσω της άλεσης των κόκκων (Gaudin, 1971). Η ποσότητα φορτίου που αναπτύσσεται στην επιφάνεια των τεμαχιδίων καθορίζεται από φυσικούς και χημικούς παράγοντες.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα ενεργειακά επίπεδα, π.χ. ο δείκτης έργου (work function) θεωρούνται γενικά ότι έχουν μεγάλη σημασία.

Οι βιομηχανικές εφαρμογές της του ηλεκτροστατικού διαχωρισμού διακρίνονται κυρίως ως εξής:

1. Εμπλουτισμός ορυκτών και άνθρακα (βιομηχανίες μεταλλευμάτων και επεξεργασίας άνθρακα)
2. Καθαρισμός τροφίμων (βιομηχανία τροφίμων)
3. Επεξεργασία αποβλήτων (διαχείριση αποβλήτων)
4. Ηλεκτροστατική διαστασιολόγηση (electrostatic sizing) (διαλογή στερεών σύμφωνα με το μέγεθος και το σχήμα τους)
5. Ηλεκτροστατική κατακρήμνιση (electrostatic precipitation) (απομάκρυνση σωματιδιακών ρύπων υπό τη μορφή στερεών ή υγρών από ένα αέριο)

Οι τεχνικές ηλεκτροστατικού διαχωρισμού βασίζονται στις διεργασίες ηλεκτροφόρτισης και διηλεκτροφόρτισης φορτισμένων και μη φορτισμένων τεμαχιδίων αντίστοιχα.

Ο ηλεκτροστατικός διαχωρισμός είναι μια μέθοδος διαχωρισμού που βασίζεται στη διαφορική έλξη ή απώθηση φορτισμένων τεμαχιδίων υπό την επίδραση ενός πολύ υψηλού ηλεκτρικού πεδίου (Ralston, 1961). Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο ηλεκτροστατικός διαχωρισμός ονομάζεται επίσης "διαχωρισμός υψηλής τάσης" (Inculet, 1984). Πριν από το στάδιο διαχωρισμού, τα τεμαχίδια πρέπει να φορτίζονται ηλεκτροστατικά. Οι ηλεκτροστατικές μέθοδοι για το διαχωρισμό ορυκτών από τις οργανικές φάσεις στον άνθρακα βασίζονται στις διαφορές στην ικανότητα αυτών των δύο φάσεων, να αναπτύσσουν και να διατηρούν φορτία σε διάφορους τύπους διαχωριστών. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη φόρτιση τεμαχιδίων. Αυτές περιλαμβάνουν i) επαγωγή, ii) βομβαρδισμό ιόντων, και iii) τριβοηλεκτρική φόρτιση (Knoll & Taylor, 1984; Kelly & Spottiswood, 1989). Ανεξάρτητα από τη μέθοδο φόρτισης, η μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα φορτίου και η επιφάνεια του τεμαχιδίου περιορίζουν την ποσότητα του φορτίου που μπορεί να συσσωρευτεί σε ένα τεμαχίδιο. Ο ηλεκτροστατικός διαχωρισμός μικτών τεμαχιδίων

επιτυγχάνεται όταν οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις που δρουν στα τεμαχίδια είναι αρκετά υψηλές ώστε να ξεπεράσουν τις δυνάμεις βαρύτητας και αδράνειας.

Ο ηλεκτροστατικός διαχωρισμός ορυκτών χρησιμοποιεί ηλεκτροφόρτιση όταν η δύναμη που ασκείται σε ένα τεμαχίδιο οφείλεται στην αλληλεπίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου και του φορτισμένου τεμαχιδίου. Το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να είναι είτε από μια πηγή υψηλής τάσης είτε ηλεκτρικό πεδίο από το ίδιο το φορτισμένο τεμαχίδιο.

Η ιστορία του ηλεκτροστατικού διαχωρισμού

Ο ηλεκτροστατικός διαχωρισμός της τέφρας από τον άνθρακα πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1914 από τον Withington και στη συνέχεια, εκδόθηκαν δύο διπλώματα ευρεσιτεχνίας το επόμενο έτος. Δοκιμές μεγάλης κλίμακας και εφαρμογές ηλεκτροστατικού διαχωρισμού έγιναν το 1940 στη Γερμανία. Αυτές οι μέθοδοι θα μπορούσαν να μειώσουν την περιεκτικότητα σε τέφρα του άνθρακα από περίπου 15 σε περίπου 1,5%. Οι περισσότερες από αυτές τις πρώτες δοκιμές διεξήχθησαν σε άνθρακα ενδιάμεσου μεγέθους σε εύρος από 2 έως 0.150 mm. Κατά τη διάρκεια εκείνης της περιόδου, ο πολύ λεπτός άνθρακας δεν εξετάστηκε ποτέ.

Το 1976, ένα αμερικανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας περιγράφει έναν τριβοηλεκτρικό διαχωριστή με μέγεθος τροφοδοσίας περίπου 800 μικρά (microns) και ρυθμό τροφοδοσίας περίπου 5 τόνοι άνθρακα ανά ώρα. Αυτός ο διαχωριστής ανακτούσε περίπου το 88% του άνθρακα σε επίπεδο καθαρότητας 94,7%, από τροφοδοσία καθαρότητας 57%. Η Advanced Energy Dynamics (AED) ανέπτυξε διαχωριστές για λεπτό και πολύ λεπτό άνθρακα. Σχεδίασαν ένα διαχωριστή πιλοτικής κλίμακας, ο οποίος είχε ένα σύστημα με συνεχόμενη μεταφορική ταινία για το διαχωρισμό του καθαρού άνθρακα. Αλλά αυτός ο διαχωριστής ήταν οριακά επιτυχής στην καλύτερη περίπτωση.

Το 1984, οι Alfano et al., σχεδίασαν ένα διαχωριστή αερίου ρεύματος και έναν υπερπληρωτή (turbocharger). Η διαδικασία χρησιμοποιούσε ένα διαχωριστή τριβοηλεκτρικού κυκλώνα (αρχικά κατασκευασμένος το 1965), όπου τα φορτισμένα τεμαχίδια τροφοδοτήθηκαν μέσω της κορυφής μέσα στον κατώτερο θάλαμο, διαχωρίστηκαν σύμφωνα με τα ηλεκτρικά τους φορτία και συλλέχθηκαν σε μία σειρά χοανών μέσω διαχωριστών. Ο σχεδιασμός αποδείχθηκε ικανοποιητικός σε κατηγορίες λεπτού και πολύ λεπτού μεγέθους μεταλλευμάτων διαφορετικής φύσης και προέλευσης. Οι συγγραφείς συζήτησαν επίσης τις βιομηχανικές εφαρμογές και πρότειναν κάποιες μεθόδους για τα κοιτάσματα άνθρακα και τα μεταλλεύματα

φωσφορικών. Εξάχθηκαν συμπεράσματα σχετικά με τις ελπιδοφόρες προοπτικές ανάπτυξης και εφαρμογής των μεθόδων ηλεκτρικού διαχωρισμού και ειδικότερα εκείνων που βασίζονται στην τριβοηλεκτρική φόρτιση.

Σχετικά την ίδια περίοδο, οι Masuda et al. (1983), σχεδίασαν ένα σύστημα με έναν τριβοφορτιστή τύπου κυκλώνα και ένα διαχωριστή. Αυτό ήταν αποτελεσματικό για το διαχωρισμό της ανόργανης ύλης από τον άνθρακα. Το Energy Technology Center - PETC του Πίτσμπουργκ εργάζεται από το 1985 πάνω στον τριβοηλεκτρικό και ηλεκτροστατικό διαχωρισμό του άνθρακα. Ενσωμάτωσαν έναν αναδευτήρα από χαλκό, μέσω του οποίου τροφοδοτήθηκαν τεμαχίδια χρησιμοποιώντας ένα ρεύμα εκτόξευσης με μεγάλη ταχύτητα. Προκειμένου να φορτιστούν τεμαχίδια, χρησιμοποιήθηκε ένας χάλκινος σωλήνας και αυτός συνδέθηκε με έναν αναδευτήρα σε σειρά. Τα φορτισμένα τεμαχίδια στη συνέχεια τροφοδοτήθηκαν μεταξύ δύο πλακών στις οποίες εφαρμόστηκε τάση. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε από τους Gidaspow et al. (1987) ο διαχωριστής τεμαχιδίων ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed particle separator), στον οποίο τόσο το φορτίο όσο και η πυκνότητα των τεμαχιδίων ελήφθησαν υπόψη στη διαδικασία διαχωρισμού. Οι Gupta et al. (1993) μελέτησαν τον ηλεκτροστατικό διαχωρισμό μιγμάτων σκόνης με βάση το δείκτη έργου των συστατικών του. Μελέτησαν τον ξηρό διαχωρισμό ενός μείγματος υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, ανθράκων Illinois υψηλής περιεκτικότητας σε τέφρα με σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και το διαχωρισμό των συνθετικών μειγμάτων που αποτελούνται από ξυλάνθρακα και διοξείδιο του πυριτίου για να αποδείξουν τη δυνατότητα να εφαρμοστεί ένας τέτοιος διαχωρισμός. Η γενική διαδικασία αποκαρβοποιήσεως της ιπτάμενης τέφρας δια του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού έχει ως εξής. Κάτω από την τριβοηλεκτροστατική δράση, τα σωματίδια με υψηλή επιφανειακή εργασία (δηλαδή, σωματίδια άνθρακα σε τέφρα από κονιοποιημένο άνθρακα) υφίστανται τριβή και σύγκρουση, καθίστανται αρνητικά φορτισμένα, ενώ άλλα σωματίδια (π.χ. σωματίδια τέφρας) καθίστανται θετικά φορτισμένα. Κατά την είσοδο στον τριβοηλεκτροστατικό διαχωριστή του ηλεκτρικού πεδίου υψηλής τάσης, αμφότερα τα φορτισμένα σωματίδια υποβάλλονται στο ηλεκτρικό πεδίο και κινούνται κατά μήκος δύο διαδρομών εντελώς διαφορετικών ή αμοιβαίως απόκλισης και διαχωρίζονται με επιτυχία. (Youjun Tao et. al, 2017). Επίσης έχει μελετηθεί έρευνα σχετικά με το πεδίο ροής και τα κινηματικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας σε περιστροφικό τριβοηλεκτροστατικό διαχωριστή όπου παρουσιάζεται η ταχύτητα ροής του αέρα εισόδου, η περιστροφή της γωνιακής ταχύτητας ροής του αέρα και η ταχύτητα συν-ροής επηρεάζοντας

άμεσα την κατανομή της ροής αέρα και τα χαρακτηριστικά κίνησης των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας από την ανάλυση του διαχωρισμού. Η μέση ταχύτητα ροής αέρα στον περιστρεφόμενο τριβοηλεκτροστατικό θάλαμο παρουσιάζει μια τάση πρώτης αύξησης, στη συνέχεια μειώνεται και αυξάνεται και πάλι με την αύξηση της ταχύτητας ροής αέρα εισόδου και αυξάνεται με την περιστρεφόμενη γωνιακή ταχύτητα ροής αέρα στην επιλεγμένη περιοχή. Στην καθαρή επιβάρυνση από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος, οι Ling Zhang et.al πρότειναν ότι το καθαρό φορτίο των σωματιδίων τέφρας θα αυξανόταν με τους αριθμούς σύγκρουσης. Η θεμελιώδης αρχή πίσω από τον ηλεκτροστατικό διαχωρισμό ήταν η παρατήρηση ότι ανθρακούχα και μη ανθρακούχα υλικά θα μπορούσαν να προσδώσουν θετικά και αρνητικά επιφανειακά φορτία αντίστοιχα με ένα χάλκινο in-line αναμίκτη. Διαπιστώθηκε ότι η πολικότητα του επιφανειακού φορτίου εξαρτάται από τις τιμές του δείκτη έργου των τεμαχιδίων και του τριβοφορτιστή. Οι δοκιμές διαχωρισμού σε εργαστηριακό ηλεκτροστατικό διαχωριστή έδειξαν ότι η αποτελεσματικότητα του ηλεκτροστατικού διαχωρισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις υδροδυναμικές συνθήκες όπως η ταχύτητα του αερίου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η συγκέντρωση των τεμαχιδίων στο φέρον αέριο (carrier gas).

Τριβοηλεκτρισμός και τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ένα φαινόμενο με το οποίο ορισμένα υλικά αποκτούν ηλεκτρικό φορτίο αφού έλθουν σε επαφή το ένα με το άλλο (Dodbiba, 2002). Μόλις τα υλικά τριβοφορτιστούν, μπορούν να διαχωριστούν με βάση το μέγεθος και την πολικότητα του φορτίου, χρησιμοποιώντας μεθόδους, όπως η έκθεση σε ηλεκτρικό πεδίο υψηλής τάσης που δημιουργείται από δύο ηλεκτρόδια αντίθετης πολικότητας. Ο διαχωρισμός των τριβοφορτισμένων υλικών μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου είναι μία μέθοδος στην ευρύτερη κατηγορία του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού. Ο καθαρός τριβοηλεκτρικός διαχωρισμός, ωστόσο, βασίζεται στη χρήση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου τόσο για τη φόρτιση όσο και για το διαχωρισμό των υλικών. Ο τριβοηλεκτρικός διαχωρισμός δεν απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια υψηλής τάσης και συνεπώς έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού, συμπεριλαμβανομένου του μειωμένου λειτουργικού κόστους και του μειωμένου κινδύνου για το χειριστή. Παρόλο που οι ηλεκτροστατικοί διαχωριστές χρησιμοποιούνται πιο συχνά για τον εμπλουτισμό των ορυκτών, πρόσφατα

αποδείχθηκαν χρήσιμοι για το διαχωρισμό των μιγμάτων πλαστικών (Dodbiba, 2002: Lee, 2002, Park et. al, 2008) και επίσης χαρτιού από πλαστικό (Smallwood, 2001). Αυτές οι διαδικασίες ηλεκτροστατικού διαχωρισμού μπορούν τυπικά να διακριθούν σε δύο στάδια:

1) Φόρτιση του προς διαχωρισμό υλικού, και
2) Έκθεση του φορτισμένου υλικού σε ηλεκτρικό δυναμικό για το διαχωρισμό του υλικού με βάση την πολικότητα.

Οι διαδικασίες φόρτισης του υλικού περιλαμβάνουν την τριβοηλεκτρική φόρτιση (tribocharging), τη φόρτιση corona (βομβαρδισμό ιόντων) και την επαγωγική φόρτιση . Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί διάφοροι τύποι τριβοφορτιστών, όπως ο περιστροφικός τριβοφορτιστής (περιστροφικός κύλινδρος), ο τριβοκυκλώνας (tribocyclone), ο στατικός τριβοφορτιστής, τύπου προπέλας (propeller-type) και ο τριβοφορτιστής ρευστοποιημένης κλίνης (Zelma, 2013). Μόλις φορτιστούν, οι διεργασίες ηλεκτροστατικού διαχωρισμού τυπικά προσδίδουν στα υλικά ένα ηλεκτρικό δυναμικό, όπως ένα ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται μέσω δύο ηλεκτροδίων υψηλής τάσης αντίθετης πολικότητας. Μία συνήθως χρησιμοποιούμενη διαδικασία διαχωρισμού επιτρέπει στο φορτισμένο υλικό να πέσει μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων υψηλής τάσης, προκαλώντας τα τεμαχίδια να εκτρέπονται προς το ηλεκτρόδιο αντίθετης πολικότητας.

Σε αντίθεση με τους ηλεκτροστατικούς διαχωριστές, οι τριβοηλεκτρικοί διαχωριστές βασίζονται αποκλειστικά στο τριβοηλεκτρικό φαινόμενο τόσο για τη φόρτιση των υλικών όσο και για την παροχή ηλεκτρικού δυναμικού για το διαχωρισμό των φορτισμένων υλικών. Η τριβοφόρτιση του υλικού πραγματοποιείται μέσω ηλέκτρισης με επαφή (contact electrification) (Diaz, 2004). Η ηλέκτριση με επαφή αναφέρεται στο φαινόμενο με το οποίο δύο διαφορετικά υλικά αποκτούν φορτία αντίθετης πολικότητας μετά την επαφή (Diaz, 2004). Στην περίπτωση της τριβοφόρτισης, καθώς τα υλικά έρχονται σε επαφή και συγκρούονται το ένα με το άλλο, κάθε υλικό υφίσταται μεταφορά φορτίου σύμφωνα με το δείκτη έργου τους μέχρι το σημείο στο οποίο εξισώνονται τα επίπεδα Fermi" (Park, 2008). Η μεταφορά ηλεκτρονίων (electron charge transfer) συμβαίνει από το υλικό με το μικρότερο προς το υλικό με το μεγαλύτερο δείκτη έργου (Dodbiba, 2002).

Αρκετοί ερευνητές έχουν δημιουργήσει λίστες ή πίνακες, κοινώς αναφερόμενοι ως τριβοηλεκτρικές σειρές ή πίνακες. Η τριβοηλεκτρική σειρά ταξινομεί υλικά με βάσει το

μέγεθος και την πολικότητα του φορτίου (δηλαδή από τα πιο θετικά στα πιο αρνητικά) που αποκτάται μέσω της τριβοφόρτισης. Όταν δύο υλικά της τριβοηλεκτρικής σειράς έρχονται σε επαφή ή τρίβονται μεταξύ τους, το υλικό πιο κοντά στη θετική πλευρά του πίνακα θα λάβει θετικό φορτίο, ενώ το υλικό πιο κοντά στην αρνητική πλευρά του πίνακα θα πάρει αρνητικό φορτίο (Dodbiba, 2002). Το ίδιο αποτέλεσμα συμβαίνει ακόμα και όταν και τα δύο υλικά βρίσκονται στη θετική ή στην αρνητική πλευρά της σειράς.

Θεωρία τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού

Σε οποιονδήποτε διαχωριστή, η αιώρηση των τεμαχιδίων σε ένα μέσο και η υποβολή τους σε μια δύναμη διαχωρισμού που ενεργεί σε κάποια ιδιότητα των τεμαχιδίων προκαλεί το διαχωρισμό. Σε κάθε περίπτωση ηλεκτροστατικών διαχωρισμών, η κύρια δύναμη διαχωρισμού δίνεται από τη σχέση:

$$F = Q \cdot E$$

όπου F είναι το διανυσματικό άθροισμα όλων των δυνάμεων, Q είναι το συνολικό φορτίο και E είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο στο χώρο. Στην πραγματικότητα, πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη δευτερεύουσες δυνάμεις όπως η βαρύτητα, η δύναμη του ρεύματος αέρα (air stream) κλπ. Ωστόσο, οι δύο παράμετροι E και Q είναι κεντρικές για την κατανόηση των ηλεκτροστατικών διαχωρισμών (Spitzer, 1984).

Ωστόσο, αν ένα τεμαχίδιο έχει ένα φορτίο καθώς εισέρχεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο θα εξαρτηθεί σημαντικά από την αγωγιμότητά του και έτσι η γνώση της σχετικής αγωγιμότητας των τεμαχιδίων είναι επίσης σημαντική. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ένας τριβοφορτιστής, το φορτίο που αναπτύσσεται στα τεμαχίδια είναι η δύναμη της τριβής μεταξύ ενός φορτισμένου τεμαχιδίου και της επιφάνειας ενός ηλεκτροδίου, το οποίο μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$F \alpha \frac{dE}{dH}$$

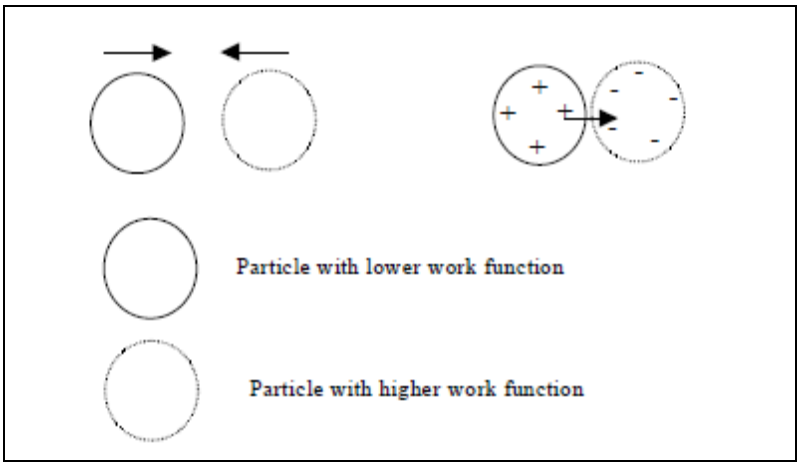
όπου E είναι η ένταση του πεδίου και dE /dH αντιπροσωπεύει την κλίση του πεδίου. Το H στην εξίσωση δίνει την απόσταση διαχωρισμού μεταξύ των επιφανειών των ηλεκτροδίων.

Η ισχύς του ίδιου του πεδίου είναι συνάρτηση του δυναμικού που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Έτσι, όσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό που εφαρμόζεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει μια ελάχιστη

απόσταση διαχωρισμού των ηλεκτροδίων που πρέπει να διατηρηθεί ώστε το πεδίο να μην είναι τόξο.

Τριβοηλεκτρικός διαχωρισμός

Η διαδικασία του τριβοηλεκτρικού διαχωρισμού χρησιμοποιεί τη διαφορά στην επιφανειακή ηλεκτρονιακή δομή των τεμαχιδίων που συμμετέχουν στο μηχανισμό φόρτισης. Όταν δύο ανόμοια τεμαχίδια τρίβονται μεταξύ τους, λαμβάνει χώρα μεταφορά ηλεκτρονίων (φορτίων) από την επιφάνεια του ενός τεμαχιδίου στο άλλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ένα από δύο τεμαχίδια να είναι θετικά φορτισμένο και το άλλο να φορτίζεται αρνητικά. Τα φορτισμένα τεμαχίδια, όταν βρίσκονται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, κινούνται προς το αντίθετα πολωμένο ηλεκτρόδιο. Αυτός ο τύπος μηχανισμού φόρτισης ονομάζεται φόρτιση τεμαχιδίου-τεμαχιδίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Φόρτιση τεμαχιδίου - τεμαχιδίου

Όταν δύο μέταλλα διαφορετικής συνάρτησης έργου, ϕ_{M1} και ϕ_{M2} (eV), έρχονται σε επαφή και μετά διαχωρίζονται, τα επίπεδα Fermi των δύο μετάλλων συμπίπτουν και έχουν διαφορά δυναμικού V στη διεπιφάνεια. Ο Harper (1967) ανέφερε ότι ανταλλάσουν ηλεκτρόνια μέσω του φαινομένου σήραγγας (tunneling) έτσι ώστε να διατηρείται η θερμοδυναμική ισορροπία (Dwari, 2006). Η διαφορά δυναμικού επαφής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V_c = \frac{\phi_{M1} - \phi_{M2}}{e}$$

όπου, e $\left(=1,6\cdot 10^{-19}C\right)$ είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Η μεταφορά φορτίου Q κατά την επαφή είναι:

$$Q = CV_c = C\frac{\left(\phi_{\mathrm{M1}} - \phi_{\mathrm{M2}}\right)}{e}$$

όπου C είναι η ηλεκτρική χωρητικότητα μεταξύ δύο συνορευόντων σωμάτων. Η χωρητικότητα C ορίζεται ως $C = \frac{\varepsilon_0 \mathrm{A}}{z}$, όπου A είναι η περιοχή επαφής, z ο διαχωρισμός ηλεκτρικού φορτίου στην επαφή, ε_0 η διηλεκτρική σταθερά που αφορά την ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού $\left(=8.85\cdot 10^{-12}Fm^{-1}\right)$. Έτσι, η μεταφορά φορτίου Q δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Q = \frac{\varepsilon_0 \mathrm{A}}{z} V_c$$

Η πυκνότητα της επιφάνειας φόρτισης που μπορεί να δημιουργηθεί κατά την επαφή είναι:

$$\sigma = \frac{Q}{\mathrm{A}} = \frac{\varepsilon_0}{z}\frac{\left(\phi_{\mathrm{M1}} - \phi_{\mathrm{M2}}\right)}{e}$$

Όταν δύο σώματα διαχωρίζονται μετά την επαφή, η χωρητικότητα C μειώνεται και, συνεπώς, η μεταφορά φορτίου Q μειώνεται μέχρι η ανταλλαγή φορτίου μέσω tunneling να σταματήσει. Ο Harper (1967) διευκρίνισε ότι σε απόσταση διαχωρισμού περίπου 1nm, το tunneling είναι απότομο και για μια σφαιρική επιφάνεια, η χωρητικότητα C δίνεται από τον τύπο:

$$C = 4\pi\varepsilon_0 r\left\{0,577 + 0,5\left(\frac{2r}{z}\right)\right\}$$

όπου r είναι η ακτίνα της σφαίρας και z η απόσταση στην οποία σταματά το tunneling.

Από τις εξισώσεις αυτές, η μεταφορά φορτίου κατά την επαφή μπορεί να γραφεί:

$$Q = 4\pi\varepsilon_0 r\left\{0,577 + 0,5\left(\frac{2r}{z}\right)\right\}\frac{\left(\phi_{\mathrm{M1}} - \phi_{\mathrm{M2}}\right)}{e}$$

Συνεπώς, η πυκνότητα του φορτίου είναι:

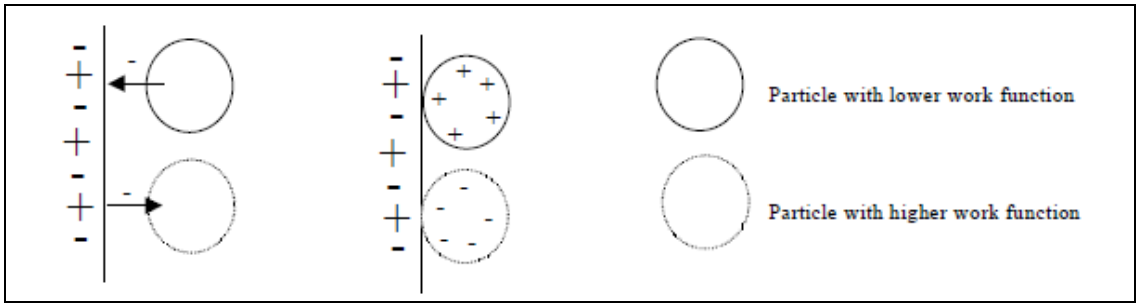
$$\frac{Q}{\mathrm{A}} = \frac{\varepsilon_0}{r}\left\{0,577 + 0,5\left(\frac{2r}{z}\right)\right\}\frac{\left(\phi_{\mathrm{M1}} - \phi_{\mathrm{M2}}\right)}{e}$$

Μια άλλη πληροφορία μεταξύ θεωρίας και εμπειρίας αποκτάται χρησιμοποιώντας απόσταση διαχωρισμού tunneling $z = 1nm$. Ο Lowel (1975) εξέτασε πραγματικά υλικά με

ανώμαλες επιφάνειες και έδειξε ότι η χωρητικότητα μπορεί να εκτιμηθεί καλύτερα λαμβάνοντας υπόψη ότι η πλειονότητα των δύο επιφανειών διαχωρίζεται από πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. (Dwari , 2006).

Υπάρχει άλλη μία παραλλαγή στη διαδικασία τριβοηλεκτροφόρτισης και είναι ο μηχανισμός φόρτισης τεμαχιδίου - τοιχώματος. Σε αυτή τη διαδικασία, υπάρχει μεταφορά ηλεκτρονίων από έναν τύπο τεμαχιδίων στο τοίχωμα, καθιστώντας αυτά τα τεμαχίδια θετικά φορτισμένα. Επιπλέον, υπάρχει μεταφορά ηλεκτρονίων από το τοίχωμα στον άλλο τύπο τεμαχιδίων που τα καθιστά αρνητικά φορτισμένα. Αυτό οδηγεί και πάλι σε διαφορική φόρτιση των τεμαχιδίων που πρόκειται να διαχωριστούν, και συνεπώς στο διαχωρισμό τους. Η παράμετρος της επιφάνειας των τεμαχιδίων είναι ο δείκτης έργου. Ο δείκτης έργου μπορεί να οριστεί ως το έργο που απαιτείται για την αφαίρεση των ηλεκτρονίων από οποιαδήποτε επιφάνεια. Το τεμαχίδιο που είναι θετικά φορτισμένο μετά το μηχανισμό φόρτισης σωματιδίου -σωματιδίου έχει χαμηλότερο δείκτη έργου από το τεμαχίδιο που φορτίζεται αρνητικά. Στην περίπτωση φόρτισης τεμαχιδίου - τοιχώματος που παριστάνεται στην Εικόνα 2, το υλικό του τοιχώματος έχει ένα δείκτη έργου που βρίσκεται μεταξύ των τιμών των δεικτών έργου των δύο τύπων τεμαχιδίων που εμπλέκονται. Από όλες τις μεθόδους που αναφέρθηκαν ανωτέρω, η τριβοηλεκτροφόρτιση είναι η πλέον κατάλληλη για την επεξεργασία ορυκτών με διηλεκτρικές ιδιότητες (Knoll & Taylor, 1984; Mazumder et al., 1994).

Οι Horn et al. (1993) δήλωσαν ότι η αλλαγή των επιφανειακών ιδιοτήτων των τεμαχιδίων βελτιώνει τη διαδικασία ηλέκτρισης μέσω επαφής. καθώς και η αύξηση του λόγου φόρτισης προς μάζα συγκεκριμένης πολικότητας.



Εικόνα 2: Φόρτιση τεμαχιδίου – τοιχώματος

Η θεωρία του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού

Ο όρος τριβοηλεκτροστατικός διαχωρισμός αναφέρεται στη φόρτιση τεμαχιδίων μέσω επαφής ή τριβής με άλλα τεμαχίδια ή με ένα τρίτο υλικό, συνήθως τα τοιχώματα ενός δοχείου ή σωλήνα, που επιτυγχάνεται μέσω της μεταφοράς ή της ελεύθερης πτώσης τους σε ένα ηλεκτρικό πεδίο που εκτρέπει τα τεμαχίδια ανάλογα με το μέγεθος και το πρόσημο του φορτίου τους. Όταν δύο ανόμοια τεμαχίδια έρχονται σε επαφή ή τρίβονται μεταξύ τους, λαμβάνει χώρα μεταφορά ηλεκτρονίων (φορτίο) από την επιφάνεια του ενός τεμαχιδίου στου άλλου μέχρις ότου εξισορροπηθεί η ενέργεια των ηλεκτρονίων σε κάθε υλικό στη διεπαφή.

Η ενέργεια των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του υλικού, χαρακτηρίζεται από το επίπεδο Fermi και ένα μέτρο της σχετικής συγγένειας για τα ηλεκτρόνια του υλικού, είναι ο δείκτης έργου, ο οποίος είναι η ενέργεια που απαιτείται για να μετακινηθεί ένα ηλεκτρόνιο από την επιφάνεια στο άπειρο. Το υλικό με την υψηλότερη συγγένεια για ηλεκτρόνια αποκτά ηλεκτρόνια (δηλαδή χαμηλότερο επίπεδο Fermi ή υψηλότερο δείκτη έργου) και φορτίζεται αρνητικά, ενώ το υλικό με τη χαμηλότερη συγγένεια χάνει ηλεκτρόνια (δηλαδή υψηλότερο επίπεδο Fermi ή χαμηλότερο δείκτη έργου) και φορτίζεται θετικά. Έτσι, το τεμαχίδιο που είναι θετικά φορτισμένο μετά το μηχανισμό φόρτισης τεμαχιδίου – τεμαχιδίου έχει χαμηλότερο δείκτη έργου από το τεμαχίδιο που φορτίζεται αρνητικά. Στην περίπτωση φόρτισης τοιχώματος – τεμαχιδίου ο δείκτης έργου του υλικού του τοιχώματος πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των τιμών του δείκτη έργου των δύο τύπων των τεμαχιδίων που εμπλέκονται για τη δημιουργία διαφορετικής πολικότητας (Soong, 1998).

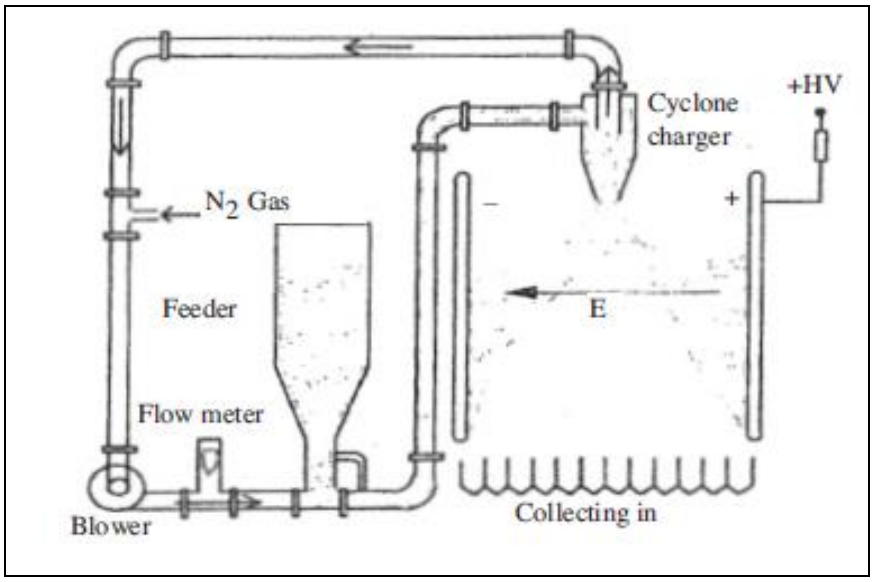
Έχουν προταθεί πολλές θεωρίες για την πρόβλεψη της ποσότητας φορτίου που μεταφέρεται μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Όταν δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή και στη συνέχεια διαχωρίζονται, ηλεκτρόνια μεταφέρονται από το ένα στο άλλο οδηγώντας σε συσσώρευση ίσου και αντίθετου φορτίου στις επιφάνειες του υλικού. Μια ανταλλαγή καθαρού φορτίου συμβαίνει συνήθως για επαφή μετάλλου – μονωτή ή μονωτή – μονωτή. Ωστόσο, κατά την επαφή μετάλλου – μετάλλου, σχεδόν πλήρης ανάστροφη ροή του φορτίου λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διαχωρισμού με αποτέλεσμα πολύ μικρή συσσώρευση φορτίου είτε λόγω σήραγγας ηλεκτρονίων (tunneling) είτε διάκενων αέρα. Μερικοί ερευνητές πιστεύουν ότι η μεταφορά φορτίου κατά την ηλέκτριση μέσω επαφής οφείλεται στη μεταφορά ιόντων (Henry, 1957; Kornfield, 1976), αλλά οι περισσότεροι ερευνητές θεωρούν ότι οι φορείς φορτίου είναι ηλεκτρόνια (Castle, 1997). Προτείνονται διαφορετικά μοντέλα για την κατανόηση των φαινομένων ηλεκτροφόρτισης μέσω επαφής,

αλλά δεν είναι ακόμα σαφές εάν τα ηλεκτρόνια, τα ιόντα ή η μεταφορά υλικού είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά του φορτίου στην επιφάνεια.

Η μέθοδος του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού

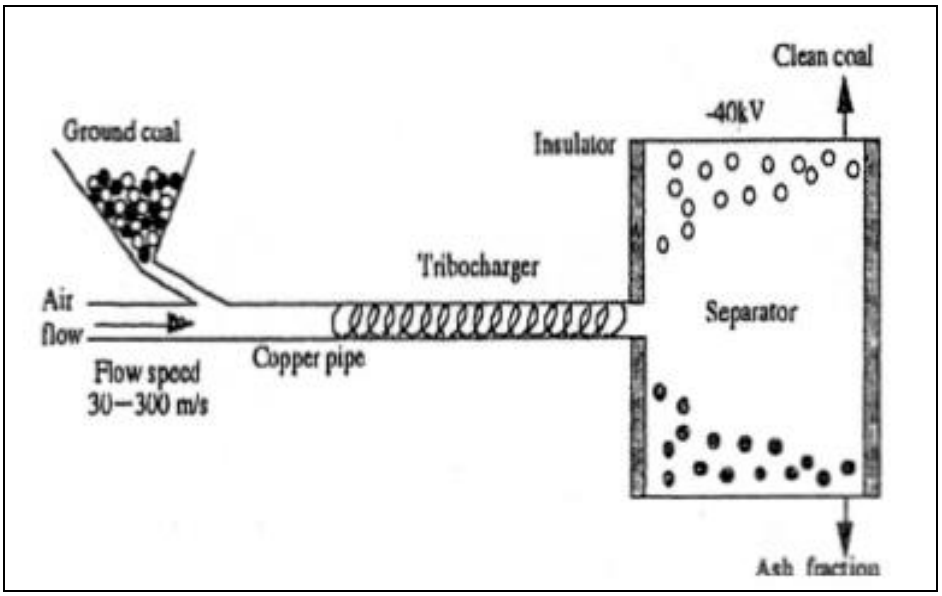
Ο τριβοηλεκτρικός διαχωρισμός του άνθρακα και των τριβοφορτιστικών χαρακτηριστικών του έχουν ερευνηθεί από πολλούς ερευνητές και όλοι έχουν αναφέρει επιτυχή διαχωρισμό ανόργανης ύλης (τεμαχίδια που σχηματίζουν υψηλή τέφρα) από άνθρακα (Mukherjee, 1987; Nifuku, 1989; Ban, 1993a; Ban, 1993b; Higashiyama, 1998; Trigwell, 2003; (Dwari, 2008; Dwari, 2009). Αυτή η ηλεκτροστατική μέθοδος λαμβάνει χώρα σε διαχωριστή που χρησιμοποιεί κυκλώνα (cyclone), ρευστοποιημένη κλίνη (fluidized bed), οκταγωνικό περιστροφικό θάλαμο (octagonal rotary chamber), περιστρεφόμενο κώνο ή σωλήνα φόρτισης. Η τριβοφόρτιση λαμβάνει χώρα μέσω της πρόσκρουσης τεμαχιδίων με άλλα τεμαχίδια είτε με επαφή είτε με τριβή ή με ένα τρίτο υλικό, συνήθως τα τοιχώματα ενός δοχείου ή σωλήνα. Αυτό ακολουθείται από την καθοδική ελευθέρωση των τεμαχιδίων μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου που εκτρέπει τα τεμαχίδια σύμφωνα με το μέγεθος και το πρόσημο των φορτίων τους (Gidaspow, 1987; Masuda, 1984; Finseth, 1993; Higashiyama, 1998).

Η δοκιμή που διεξήχθη από τον Masuda S. T. (1984) χρησιμοποιώντας έναν φορτιστή κυκλώνα (Εικόνα 3) έδειξε ότι τα θετικά φορτισμένα τεμαχίδια άνθρακα εκτρέπονται προς ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο και τα αρνητικά φορτισμένα τεμαχίδια (συνήθως πλούσια σε ανόργανα τεμαχιδία) εκτρέπονται προς ένα θετικό ηλεκτρόδιο. Το αποτέλεσμα που προέκυψε έδειξε ότι η περιεκτικότητα σε τέφρα του άνθρακα μειώθηκε από 15,2% σε 7,1% με καθαρή ανάκτηση άνθρακα 90%. Αυτό το πόρισμα υποστηρίζεται από τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν από τους Lockhart (1984) και Alfano G. C. (1988), όπου διαπίστωσαν ότι τα τεμαχίδια του άνθρακα τα οποία δεν περιέχουν οργανική ύλη φορτίζονται γενικά θετικά και ότι τα τεμαχίδια του άνθρακα τα οποία είναι ανόργανα και πλούσια σε υψηλή τέφρα φορτίζονται αρνητικά.



Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροστατικού φορτιστή τύπου κυκλώνα για τον καθαρισμό άνθρακα Masuda S. T. (1984)

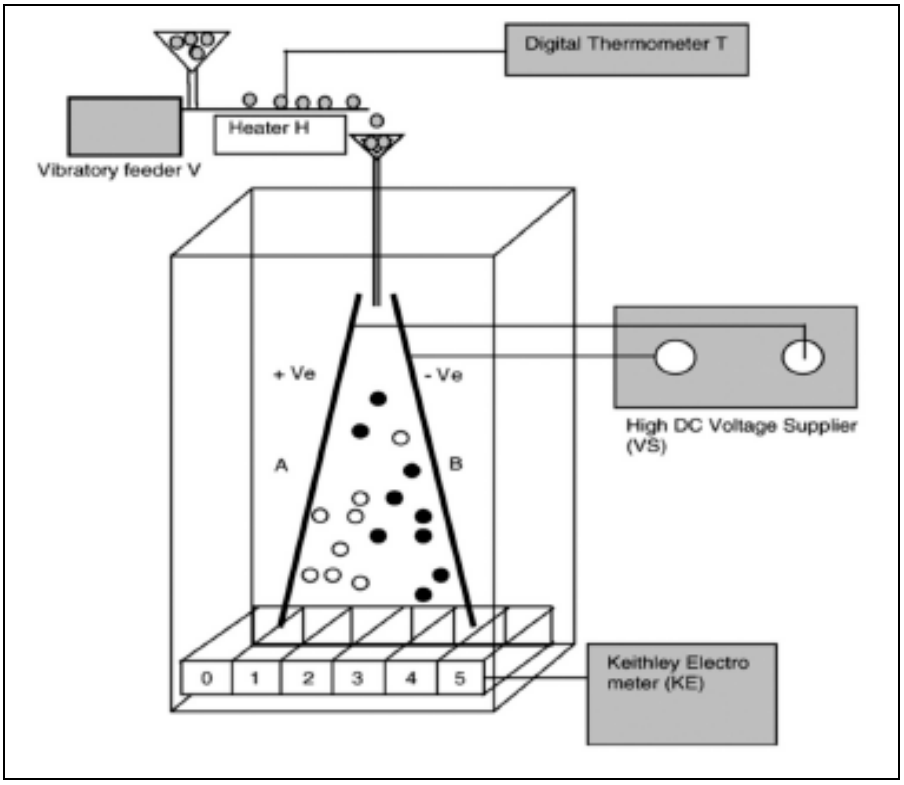
Με βάση αυτά τα αποτελέσματα και τις παρατηρήσεις, διεξήχθη περαιτέρω έρευνα για τον προσδιορισμό της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας στην αποτελεσματικότητα των δυνατοτήτων ηλεκτροστατικού διαχωρισμού του άνθρακα. Ένας χάλκινος σωλήνας τριβοφόρτισης που λειτουργεί κάτω από διαφορετικές συνθήκες όπως μεταβαλλόμενη ταχύτητα, διαφορετικές συγκεντρώσεις (ή φορτία) άνθρακα που τροφοδοτούνται στον αέρα και διαφορετικές τάσεις του διαχωριστή διερευνήθηκαν από τον Finseth (1993). Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι η μέθοδος τριβοηλεκτροστατικού εμπλουτισμού με σωλήνα τριβοφόρτισης όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4, απομάκρυνε αποτελεσματικά τα τεμαχίδια τέφρας παράγοντας έτσι καθαρό άνθρακα με τέφρα 2,1% σε σχέση με την τέφρα 24,4% στον άνθρακα τροφοδοσίας και 0,6% θείο και πέτυχε ποσοστό ανάκτησης άνθρακα 38,8%.



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροστατικού διαχωρισμού με σωλήνα τριβοφόρτισης (Finseth,1993).

Ο καθαρισμός του άνθρακα πριν τη διαδικασία της καύσης (precombustion cleaning), με τριβοηλεκτρικό διαχωρισμό ορυκτών εξετάστηκε επίσης από τους (Trigwell, 2003). Αυτά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο τριβοηλεκτρικός διαχωρισμός των ορυκτών από τον άνθρακα είναι μια βιώσιμη μέθοδος εμπλουτισμού με σημαντική δυνητική εμπορική εφαρμογή. Η λεπτότερη άλεση των δειγμάτων άνθρακα έδωσε ακόμη καθαρότερο άνθρακα. Ομοίως, ο (Lewowski, 1993) μελέτησε την ηλεκτροστατική αποθείωση των ανθράκων της Πολωνίας και τα αποτελέσματά του επιβεβαίωσαν αυτά των (Trigwell, 2003b), δηλαδή ότι η τριβοηλεκτροστατική μέθοδος ξηρού εμπλουτισμού μπορεί σαφώς να διαχωρίσει τα ανόργανα ορυκτά από τα πλούσια σε ορυκτά σωματίδια άνθρακα (Εικόνα 5).

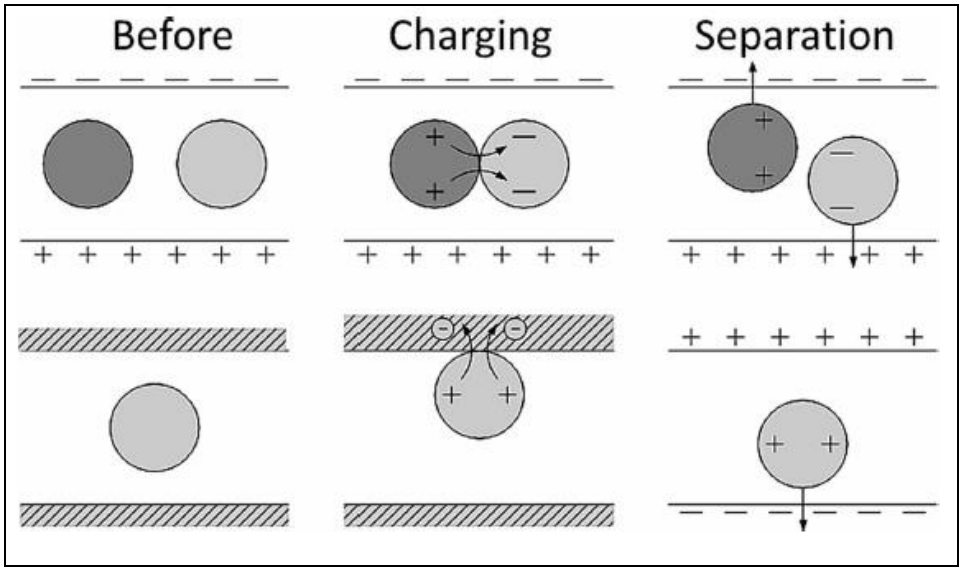
Ο τριβοηλεκτροστατικός διαχωρισμός είναι μία μέθοδος πολλά υποσχόμενη που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό μη αγώγιμων ορυκτών. Ωστόσο, η γνώση σχετικά με τους μηχανισμούς του τριβοηλεκτρισμού εξακολουθεί να είναι πολύ περιορισμένη. Έτσι, η πρόβλεψη των αποτελεσμάτων του διαχωρισμού και η εύρεση κατάλληλων παραμέτρων διαχωρισμού είναι απαιτητικό έργο.



Εικόνα 5: Τριβοηλεκτροστατικός διαχωριστής (Dwari, 2006)

Ο τριβοηλεκτροστατικός διαχωρισμός είναι μια φθηνή, φιλική προς το περιβάλλον τεχνική διαχωρισμού, η οποία έχει μεγάλη σημασία για την επεξεργασία και την ανακύκλωση πλαστικών. Έχει εφαρμοστεί επιτυχώς για διαχωρισμό ασβεστίτη – χαλαζία (Bittner ., 2013), αστρίων – χαλαζία (Peretti, 2012), καθαρισμό τέφρας (Bada, 2010), ακόμη και για το διαχωρισμό άλλων υλικών όπως τα πλαστικά (Inculet , 1998;Dodbiba, 2002).

Ένα απλοποιημένο σχήμα των φαινομένων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση του τριβοηλεκτρικού διαχωρισμού (Kelly & Spottiswood, 1989) μέσω αλληλεπίδρασης τεμαχιδίου – τεμαχιδίου (επάνω) και μέσω αλληλεπίδρασης τεμαχιδίου – τοιχώματος (κάτω).

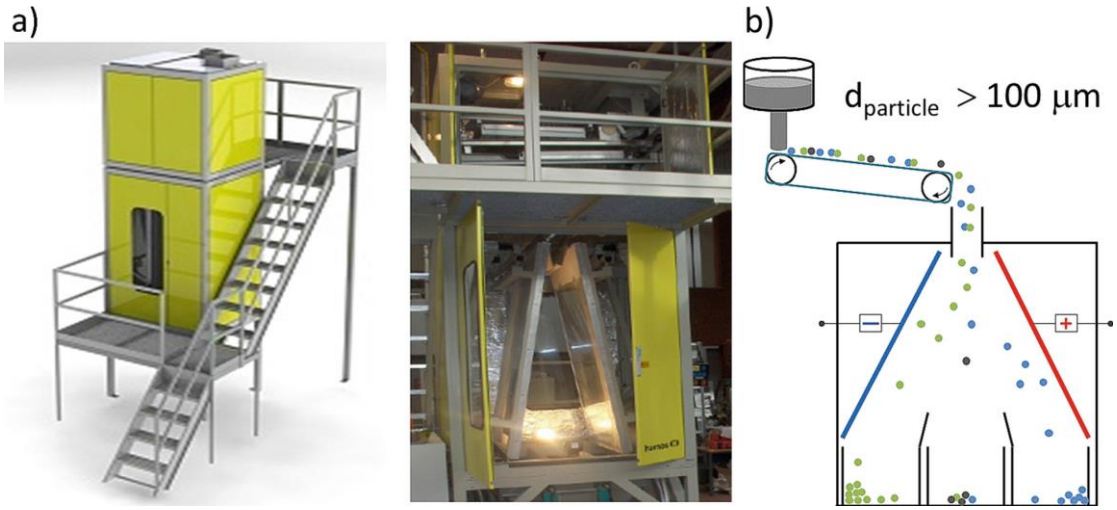
Η φόρτιση πραγματοποιείται με (τριβή) επαφή μέσω αλληλεπίδρασης τεμαχιδίου - τεμαχιδίου και/ή τεμαχιδίων – τοιχωμάτων. Κατά τη διάρκεια της επαφής, πραγματοποιείται μεταφορά φορτίου και μετά το διαχωρισμό προκύπτουν δύο αντιθέτως φορτισμένα αντικείμενα Τα τεχνικά πλεονεκτήματα του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού περιλαμβάνουν την εύκολη λειτουργία, τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και νερού, τη μικρή χρήση χημικών ουσιών. Ωστόσο, η διαδικασία της συμπεριφοράς φόρτισης των τεμαχιδίων των ορυκτών είναι ελάχιστα κατανοητή, γεγονός που καθιστά δύσκολη την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων διεργασίας. Αυτό απαιτεί την εμπειρική διερεύνηση του συστήματος σε μια πιλοτική μονάδα που είναι όχι μόνο χρονοβόρα αλλά και δαπανηρή. Επιπλέον, ο τριβοηλεκτροστατικός διαχωρισμός έχει γενικά χαμηλό ρυθμό παραγωγής και πάσχει από την υψηλή ευαισθησία προς τις ιδιότητες της επιφάνειας του υλικού τροφοδοσίας.

Εξοπλισμός

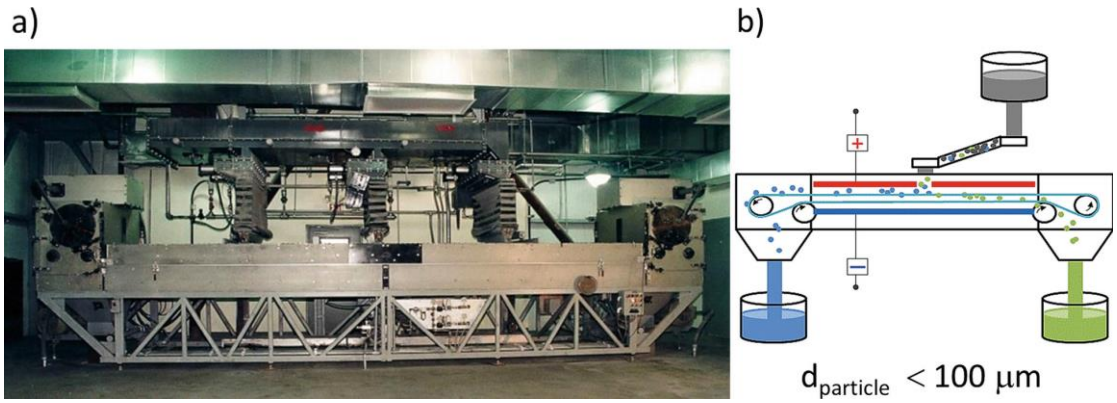
Μια συσκευή τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού συνήθως διαιρείται στις ζώνες τροφοδοσίας, φόρτισης και διαλογής. Οι Εικόνες 7 και 8 παρουσιάζουν παραδείγματα των δύο κύριων τύπων τριβοηλεκτροστατικών διαχωριστών: το διαχωριστή ελεύθερης πτώσης (free-fall separator) και το διαχωριστή ιμάντα (belt separator) και τις αντίστοιχες αρχές λειτουργίας τους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει μεγάλη ποικιλομορφία στην υλοποίηση των διαχωριστών ελεύθερης πτώσης, είτε σε διαφορετικές μονάδες φόρτισης (Bada, 2010; Dodbiba, 2002; Masuda et al, 1983) είτε σε μεταβολή στο σχήμα των ηλεκτροδίων του πεδίου (Chandrasekhar, 1998). Ως μονάδα τριβοφόρτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ιμάντας μεταφοράς (Ndama, 2011), κυκλώνας (Dodbiba, 2002; Masuda et al, 1983), τύμπανο (Bada, 2010) και άλλα. Επίσης, οι μονάδες διαχωρισμού μπορούν να ποικίλουν. Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρόδια μπορούν να έχουν τη μορφή πλάκας ή περιστροφικά σχήματα.

Η κύρια διαφορά μεταξύ του διαχωριστή ελεύθερης πτώσης και του διαχωριστή ιμάντα έγκειται στη διαφορετική ροή των φορτισμένων τεμαχιδίων στη ζώνη διαχωρισμού. Στη μονάδα ελεύθερης πτώσης τα φορτισμένα τεμαχίδια πέφτουν ελεύθερα λόγω βαρυτικής δύναμης, και ταυτόχρονα υπόκεινται σε ελκτικές/απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις από το ηλεκτρικό πεδίο των ηλεκτροδίων. Αντίθετα, στους τριβοηλεκτροστατικούς διαχωριστές ιμάντα η ελεύθερη πτώση των τεμαχιδίων περιορίζεται από τη μικρή απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, οπότε όταν τα τεμαχίδια φθάσουν στο ηλεκτρόδιο έλξης, σύρονται από έναν ιμάντα στα δοχεία συλλογής.



Εικόνα 7: Διαχωριστής ελεύθερης πτώσης (Hamos), (Oberrauner, 2012)



Εικόνα 8: Τριβοηλεκτροστατικός διαχωριστής ιμάντα (Bittner J. D., 2013)

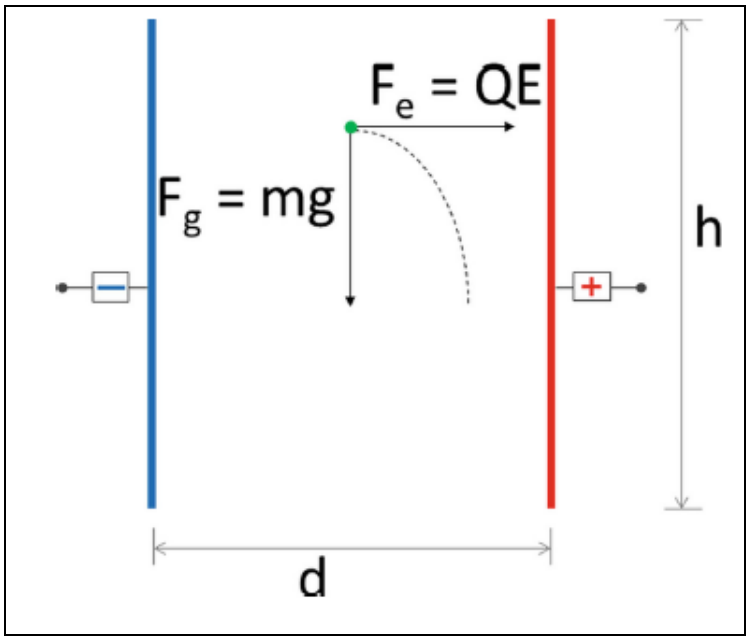
Γενικά, οι διαχωριστές ελεύθερης πτώσης έχουν σχεδιαστεί για τον εμπλουτισμό τεμαχιδίων ορυκτών μεγέθους κόκκων που κυμαίνονται από 0,1-2 mm. Τα πολύ βαριά τεμαχίδια δεν αποκλίνουν επαρκώς από το ηλεκτρικό πεδίο των ηλεκτροδίων, ενώ τα πολύ ελαφρά τεμαχίδια τείνουν να κολλούν στα ηλεκτρόδια και/ή να διαταράσσουν τη στρωτή ροή των τεμαχιδίων που πέφτουν. Και στις δύο περιπτώσεις, ο διαχωρισμός καθίσταται ανεπαρκής (Flachberger, 2012). Διαφορετικά, λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων, χρησιμοποιούνται διαχωριστές ιμάντα για το διαχωρισμό μικρότερων τεμαχιδίων ορυκτών με μεγέθη κόκκων εύρους 1-300 μm. Επιπλέον, η ηλέκτριση μέσω επαφής μεταξύ τεμαχιδίων συμβαίνει επίσης στη ζώνη διαχωρισμού σε ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο βελτιώνει σημαντικά την αποδοτικότητα της διαδικασίας. Οι μόνοι περιορισμοί του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού ιμάντα είναι α) η αναγκαιότητα περιοδικής συντήρησης που προκαλείται από τη φθορά της ζώνης και β) η παρεμπόδιση της κίνησης της ζώνης λόγω της υπερβολικά μεγάλης ποσότητας σκόνης στην ζώνη, που προκαλείται από λανθασμένη επιλογή των συνθηκών διαχωρισμού. Ο τριβοηλεκτροστατικός διαχωρισμός είναι συνήθως μια ξηρή διαδικασία. Η επιλογή κατάλληλου εξοπλισμού που πληροί επαρκώς τις απαιτήσεις είναι απαραίτητη για την επίτευξη της αναμενόμενης αποδοτικότητας της διαδικασίας διαχωρισμού.

Θεμελιώδεις αρχές

Σε γενικές γραμμές, ο τριβοηλεκτροστατικός διαχωρισμός χρησιμοποιεί την τριβοφόρτιση ώστε να προκύψουν διαφορετικά υλικά φορτισμένα με αντίθετες πολικότητες. Εδώ, κατά τη διάρκεια του διαχωρισμού, δύο κύριες δυνάμεις δρουν στα φορτισμένα

τεμαχίδια, δηλαδή η βαρυτική δύναμη F_g και η ηλεκτροστατική δύναμη F_e. Ο διαχωρισμός συμβαίνει όταν οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι αρκετά ισχυρές, ώστε να μετατοπίζουν επαρκώς την τροχιά ενός φορτισμένου τεμαχιδίου στα ηλεκτρόδια με αντίθετο φορτίο.

Το απλούστερο μοντέλο εφαρμόζει ένα σφαιρικό κόκκο με ομοιόμορφο φορτίο Q και μάζα m σε ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο έντασης E που δημιουργείται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων κάθετης πλάκας που απέχουν απόσταση d και μια διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ τους (Dodbiba, 2002) (Εικόνα 9). Το τεμαχίδιο εκτρέπεται προς το ηλεκτρόδιο με αντίθετο πρόσημο κατά την ελεύθερη πτώση του.



Εικόνα 9: Δυνάμεις που δρουν σε ένα τεμαχίδιο που πέφτει σε ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο. (Dodbiba, 2002)

Σε μια διαδικασία βιομηχανικού διαχωρισμού, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντίσταση του αέρα ειδικά για τα επίπεδα και/ή πολύ ελαφρά αντικείμενα. Επιπλέον, ένα ομοιόμορφο φορτίο στην επιφάνεια του τεμαχιδίου λαμβάνει χώρα μόνο για αγώγιμα τεμαχίδια, ενώ τα μη αγώγιμα τεμαχίδια χαρακτηρίζονται από τοπικά φορτισμένες επιφάνειες που αντιστοιχούν στις περιοχές επαφής.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία διαχωρισμού

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία διαχωρισμού μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις ομάδες:

- τα χαρακτηριστικά του υλικού,

- σχεδιασμός εξοπλισμού,
- περιβαλλοντικές συνθήκες.

Έχει καταβληθεί προσπάθεια να καταρτιστεί ένας λεπτομερής κατάλογος των παραγόντων που ανήκουν σε κάθε ομάδα, με τη διεξαγωγή πειραματικών ερευνών (Bada, 2010; Wu, 2013; Flachberger, 2012; Kok, 2009). Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν μεμονωμένα φαινόμενα όπως τον τύπο επαφής, την τάση επαφής, το χρόνο επαφής, την απλή και πολλαπλές επαφές, τη μεταφορά και κατανομή φορτίου, τη φθορά φορτίου και τις δυνάμεις στο σύστημα. Αυτά τα μεμονωμένα φαινόμενα σχετίζονται άμεσα με το τελικό δυναμικό της επιφάνειας (επιφανειακό φορτίο) των τεμαχιδίων και συνεπώς με την αποδοτικότητα της διαδικασίας.

Η συγκεκριμένη διαδικασία διαχωρισμού είναι ευαίσθητη στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Επομένως, ο έλεγχος της ατμόσφαιρας κατά τη διαδικασία διαχωρισμού διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο. Επιπλέον, η απόδοση διαχωρισμού εξαρτάται από τις ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν πριν από την ίδια τη διαδικασία, όπως: ξήρανση, αποθήκευση, μεταφορά, θραύση, άλεση υλικών και άλλες. Για παράδειγμα, η άλεση μπορεί να προκαλέσει προ-φόρτιση της επιφάνειας (ισχυρές πολλαπλές επαφές μεταξύ τεμαχιδίου - τεμαχιδίου και τεμαχιδίου - τοιχωμάτων) και να αλλάξει τις ηλεκτρικές ιδιότητες των τεμαχιδίων εισάγοντας ξένα ιόντα στην επιφάνεια των τεμαχιδίων (από χημικές ουσίες και νερό που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της υγρής άλεσης). Συμπερασματικά, τα πειράματα σε μια πιλοτική μονάδα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη ολόκληρη τη γραμμή παραγωγής. Ακόμη, η σωστή επιλογή του διαχωριστή, ειδικά της μονάδας φόρτισης, είναι κρίσιμη. Τέλος, έχει παρατηρηθεί ότι ακόμη και μικρές αλλαγές στα υλικά ή στη κατανομή μεγέθους και μορφής τεμαχιδίων μπορούν να επηρεάσουν έντονα την απόδοση του διαχωρισμού (Manouchehri, 2000).

Η γνώση της συμπεριφοράς του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού ενός συγκεκριμένου υλικού προέρχεται από εμπειρικές μελέτες βασισμένες κυρίως σε πειράματα δοκιμής και σφάλματος. Σύμφωνα με τους Xing Yang, Haifeng Wang, Zhen Peng, Juan Hao, Yaqun He 2018 ο τριβοηλεκτρικός διαχωρισμός, ως εντελώς ξηρή τεχνολογία, είναι μια προοπτική μέθοδος για την επεξεργασία λεπτών ορυκτών. Σκοπός της εργασίας τους ήταν να διερευνήσουν την απόδοση τριβοηλεκτρικού διαχωρισμού των λαμινιτικών και χαλαζιακών ορυκτών σε μια εργαστηριακή μονάδα και να προετοιμαστεί

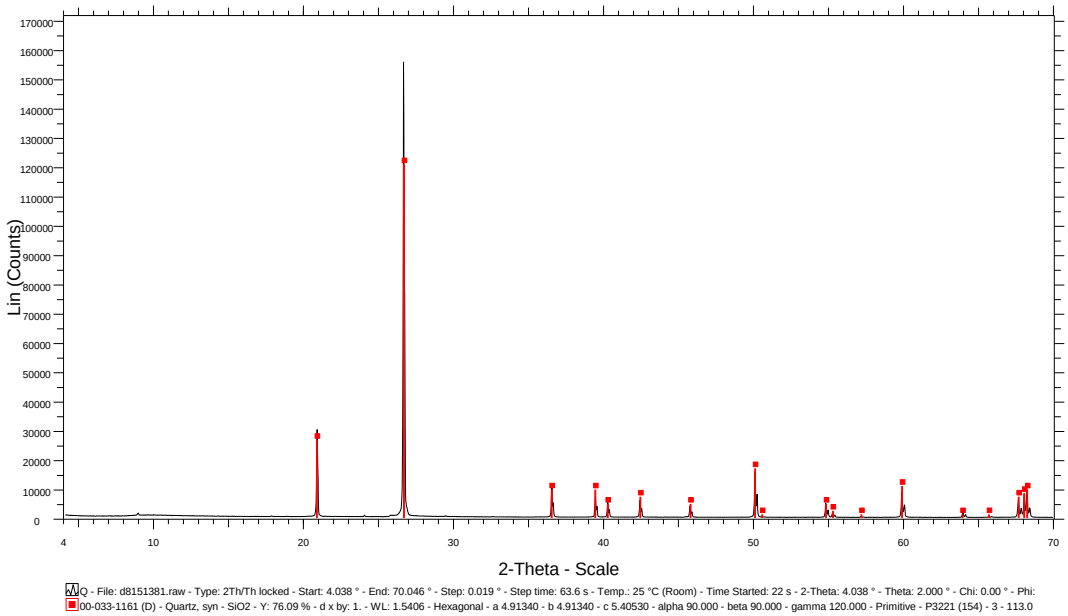
για το διαχωρισμό του μεταλλεύματος ιλμενίτη . Χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα μέτρησης τριών φορτίων για τη δοκιμή των τριβοηλεκτρικών ιδιοτήτων των τεμαχίων λαμινίτη και χαλαζία με τριβοσυλλέκτες αντίστοιχα από PVC, PPR, PMMA, Teflon, χαλκό, ανοξείδωτο χάλυβα και γυαλί χαλαζία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα φορτισμένα σωματίδια λαμινίτηθετικά, ενώ ο χαλαζίας φορτίζεται αρνητικά όταν τροφοδοτείται με tribocharger PVC. Το μίγμα από 12% ιλμενίτη και 88% χαλαζία παρασκευάστηκε για τον τριβοηλεκτρικό διαχωρισμό. Η ανάκτηση του λαμινίτη αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού ροής του αέρα, μειώνεται με την αυξανόμενη ταχύτητα τροφοδοσίας και αυξάνεται πρώτα και στη συνέχεια μειώνεται με την αυξανόμενη τάση . Μία μέγιστη ανάκτηση ιλμενίτη 51,71% με περιεκτικότητα σε λαμινίτη 32,72% ελήφθη σε ρυθμό ροής αέρα 40 m^3 / h, ταχύτητα τροφοδοσίας 6 g / s και τάση 20 kV. Σύμφωνα με τις βέλτιστες παραμέτρους του διαχωρισμού του ιλμενίτη και του μείγματος χαλαζία, το πλεονάζον μετάλλευμα ιλμενίτη με περιεκτικότητα σε Ti 7,55% επωφελήθηκε χρησιμοποιώντας τη μονάδα και η περιεκτικότητα σε Ti αυξήθηκε σε 12,32% σε συμπυκνωμένο προϊόν.

Πειραματική διαδικασία

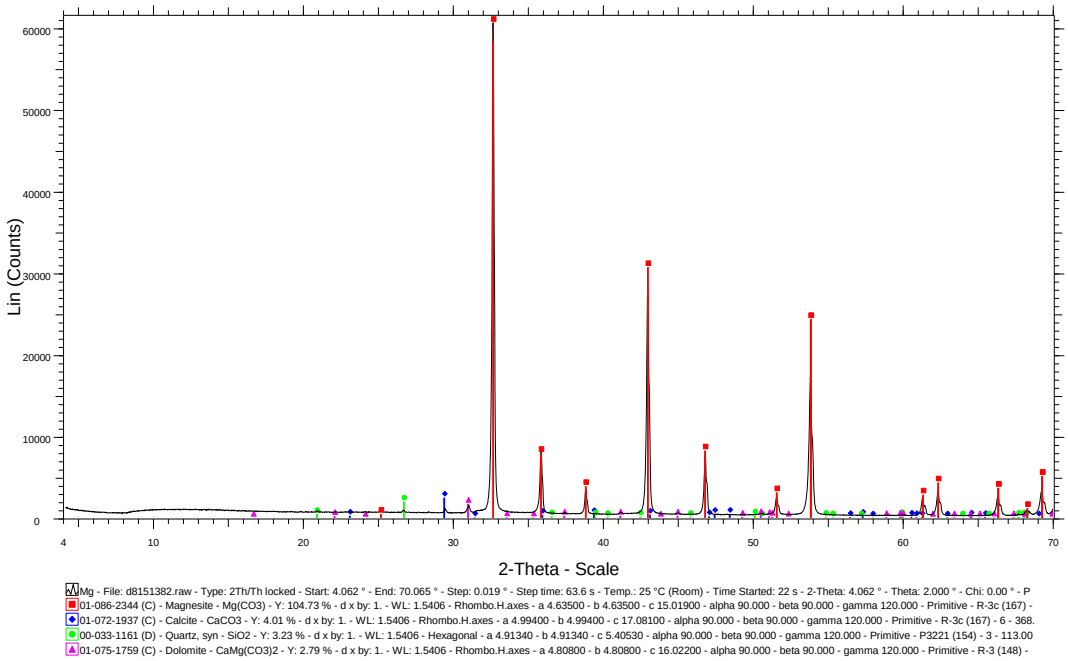
Περιγραφή του αρχικού σύνθετου δείγματος

Για την έναρξη των πειραμάτων τα ορυκτά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαλαζίας (SiO_2), μαγνησίτης ($MgCO_3$) και ασβεστίτης ($CaCO_3$). Στις ακόλουθες Εικόνες 10, 11, 12 δίνονται αντίστοιχα οι ορυκτολογικές αναλύσεις των αρχικών υλικών όπου φαίνεται ότι πρόκειται για καθαρά υλικά με ίχνη προσμίξεων. Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ, XRD. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων-Χ που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως. Έτσι τα προς ανάλυση δείγματα υπό μορφή κόνεως τοποθετήθηκαν σε πλαστικούς δειγματοφορείς και εξετάστηκαν με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ. Το περιθλασίμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου D8-Advance της Bruker AXS του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η ακτινοσκόπηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση λυχνίας χαλκού (Cu), καταμετρητή LynxEye και φίλτρο νικελίου, τάση λυχνίας U=35 KV και ένταση ρεύματος I=35 mA . Η ακτινοσκόπηση των δειγμάτων έγινε σε γωνίες μεταξύ 4-70° 2θ, βήμα 0,02° και χρόνο 0,4 sec/βήμα.

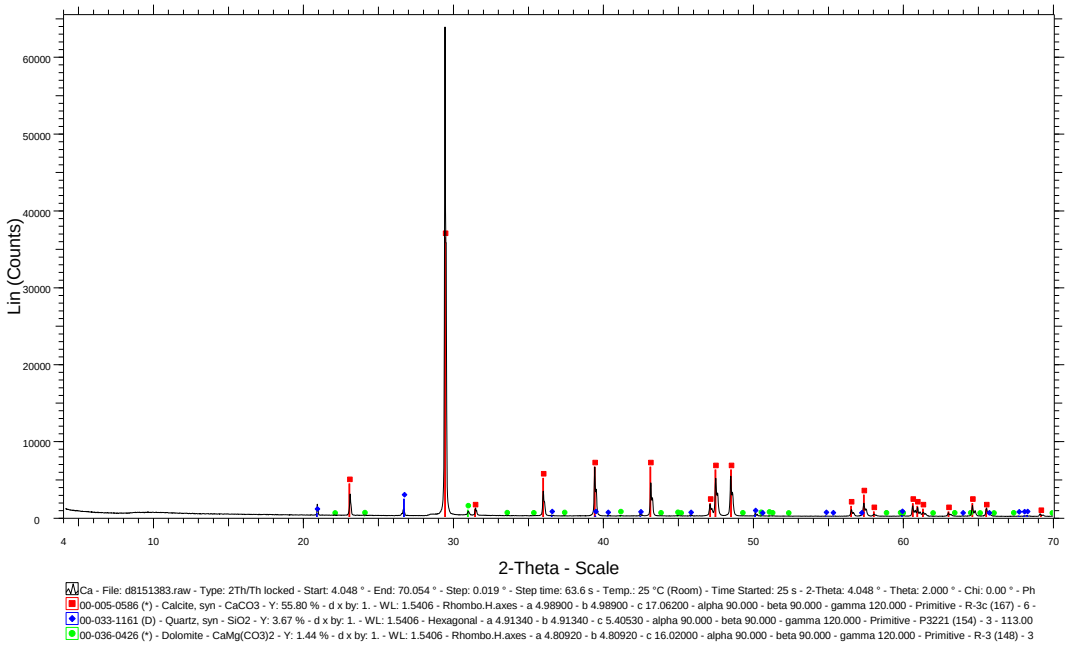
Από τα τρία αυτά υλικά δημιουργήθηκε το σύνθετο δείγμα που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές με ίσες αναλογίες (33%,33%,33%), η ορυκτολογική ανάλυση του οποίου δίνεται στην Εικόνα 13. Χρησιμοποιήθηκαν δύο κοκκομετρίες από το σύμμεικτο δείγμα, α) το σύνολο του υλικού που ήταν -150μm και ονομάστηκε λεπτόκοκκο, και β) το δείγμα που προέκυψε αφού απομακρύνθηκε το κλάσμα (-53 μm) και προέκυψε το (+53-150 μm) που ονομάστηκε χονδρόκοκκο.



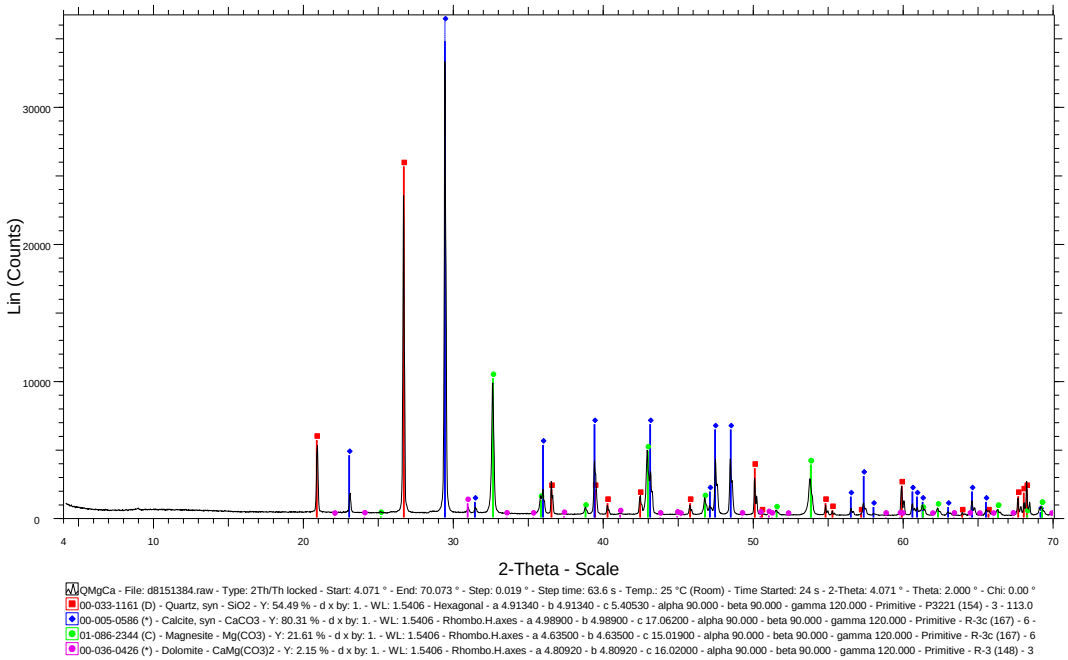
Εικόνα 10:Ορυκτολογική ανάλυση αρχικού χαλαζία



Εικόνα 11:Ορυκτολογική ανάλυση αρχικού μαγνησίτη



Εικόνα 12:Ορυκτολογική ανάλυση αρχικού ασβεστίτη

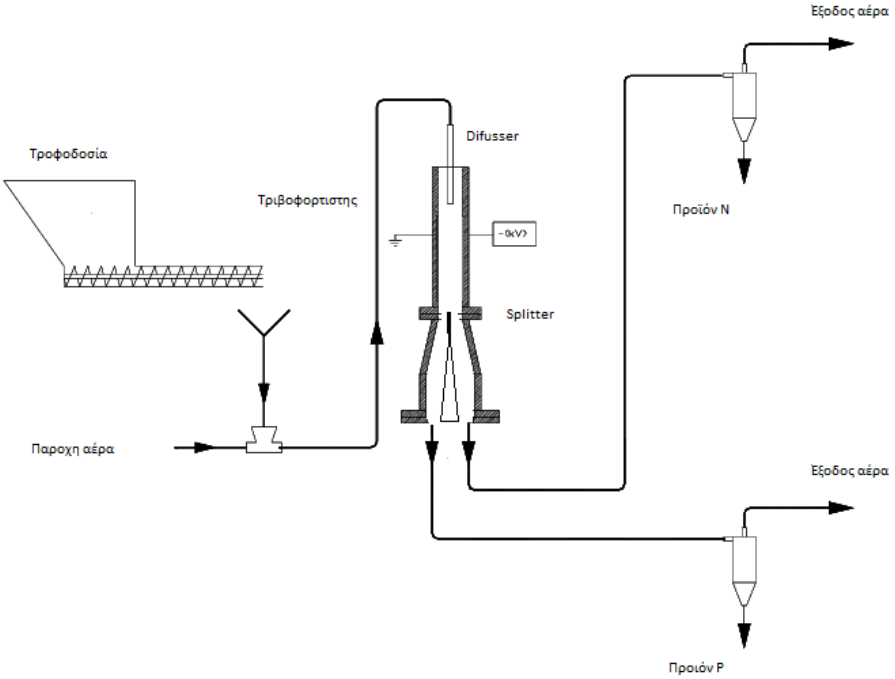


Εικόνα 13:Ορυκτολογική ανάλυση αρχικού σύνθετου δείγματος

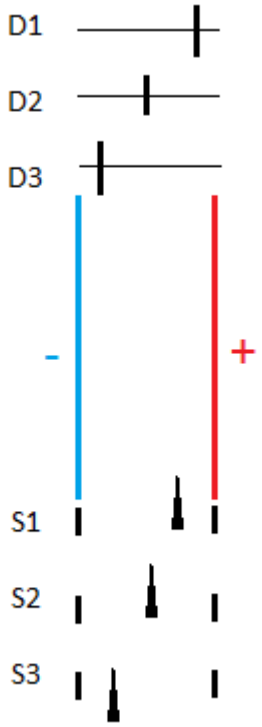
Δοκιμές Τριβοηλεκτροστατικού Διαχωρισμού

Οι δοκιμές τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού πραγματοποιήθηκαν στο διαχωριστή της Tribo Flow Separations που παρουσιάζεται στην Εικόνα 14 και είναι εγκατεστημένος στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων της Σχολής Μηχ.Ο.Π. Στην Εικόνα 15 δίνεται η σχηματική αναπαράσταση του συγκεκριμένου διαχωριστή, ενώ στην ακόλουθη Εικόνα 16 παρουσιάζεται σε λεπτομέρεια το κελί του ηλεκτροστατικού πεδίου.

Εικόνα 14: Εργαστηριακός τριβοηλεκτροστατικός διαχωριστής



Εικόνα 15:Σχηματική αναπαράσταση τριβοηλεκτροστατικού διαχωριστή.

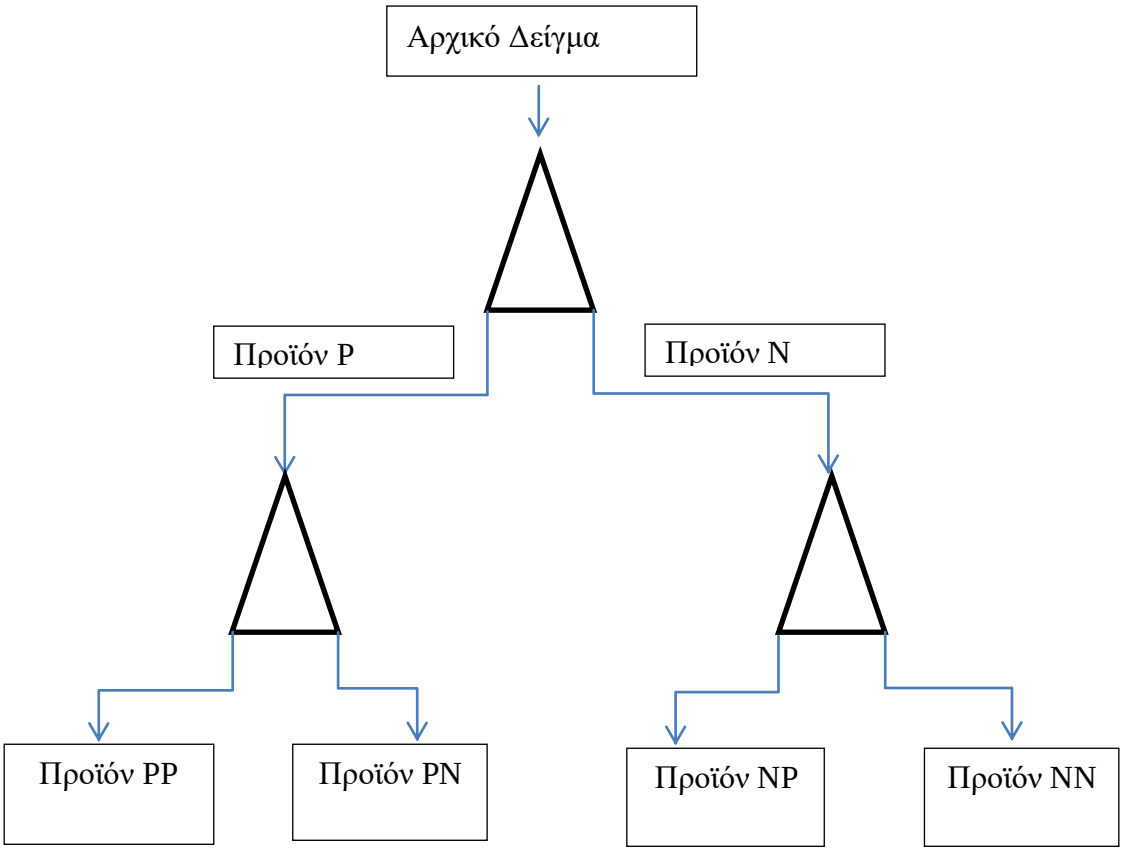


Εικόνα 16:Λεπτομέρεια κελιού ηλεκτροστατικού πεδίου.

Το δείγμα αρχικά τοποθετείται στο δονούμενο τροφοδότη και οδηγείται πνευματικά μέσω του τριβοφορτιστή (πλαστικός, ανοξείδωτος, χάλκινος) στο ηλεκτροστατικό πεδίο (ΗΠ). Η κίνηση των τεμαχιδίων μέσω του τριβοφορτιστή έχει ως αποτέλεσμα τη φόρτιση των τεμαχιδίων με θετικό και αρνητικό φορτίο. Στη συνέχεια τα φορτισμένα πια τεμαχίδια εισέρχονται στο ΗΠ σε συγκεκριμένο σημείο εισόδου (difusser **D**) όπου εκεί πια θα κινηθούν σε διαφορετικές κατευθύνσεις τα αρνητικά από τα θετικά φορτισμένα τεμαχίδια. Εξερχόμενα από το πεδίο τα διαχωρισμένα τεμαχίδια ανάλογα και τη θέση της λεπίδας διαχωρισμού προϊόντων (splitter **S**) κατευθύνονται στους δύο κυκλώνες οπού τα στερεά διαχωρίζονται από τον αέρα και προκύπτει τελικά ένα θετικό προϊόν (P) όπου αναφέρεται στα θετικά ηλεκτρισμένα τεμαχίδια τα οποία κατευθύνθηκαν προς τον αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο του πεδίου και ένα αρνητικό προϊόν (N) το οποίο περιέχει τα αρνητικά φορτισμένα τεμαχίδια που εντός του πεδίου κινήθηκαν αντίστροφα.

Όπως γίνεται κατανοητό και από τις εικόνες 14, 15 ο συγκεκριμένος διαχωριστής που χρησιμοποιήθηκε είχε τη δυνατότητα να δίνει σε κάθε πέρασμα αρχικού υλικού δύο μόνο προϊόντα το θετικό (P) και το αρνητικό (N). Για την πληρέστερη διερεύνηση της διαδικασίας του διαχωρισμού επιλέχθηκε να υπόκεινται εκ νέου σε διαχωρισμό με τις ίδιες συνθήκες και τα δύο αυτά προϊόντα, όπως παριστάνεται στην ακόλουθη Εικόνα 17. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα από το αρχικά θετικό προϊόν P να προκύπτουν το θετικό PP και αρνητικό PN, ενώ από το αρχικά αρνητικό προϊόν N να προκύπτουν το θετικό NP και αρνητικό NN, δηλαδή τέσσερα συνολικά προϊόντα.

Καθένα από τα τέσσερα αυτά προϊόντα που συλλέχθηκαν αφού ζυγίσθηκαν για τον προσδιορισμό της % κατανομής βάρους τους, προσδιορίστηκε η περιεκτικότητά τους σε χαλαζία Q, μαγνησίτη M και ασβεστίτη C με σκοπό τον υπολογισμό των κατανομών των φάσεων αυτών. Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης των τεσσάρων προϊόντων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων X, XRD.



Εικόνα 17:Σχηματική αναπαράσταση διαδικασία διαχωρισμού.

Πρώτη σειρά δοκιμών

Στην πρώτη σειρά δοκιμών εξετάστηκε η επίδραση που μπορεί να έχουν στον επιτυγχανόμενο διαχωρισμό οι μεταβολές

α) στο υλικό του τριβοφορτιστή,

β) στην κοκκομετρία του προς διαχωρισμό υλικού, και

γ) στην τάση του ηλεκτροστατικού πεδίου.

Σταθεροί παράμετροι σε όλους τους διαχωρισμούς ήταν

α) η παροχή του αέρα (ίση με 20 L/s),

β) η θέση εισόδου των τεμαχιδίων στο ΗΠ (difusser θέση) και

γ) η θέση της λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων (splitter θέση 3).

Δοκιμές διαχωρισμού με πλαστικό τριβοφορτιστή

Η διαδικασία διαχωρισμού χρησιμοποιώντας τον πλαστικό τριβοφορτιστή πραγματοποιήθηκε αρχικά για το χονδρόκοκκο κλάσμα -150+53 μm και για τις τρεις διαφορετικές τάσεις πεδίου V=5 KV, V=10 KV, V=15 KV

Τα αποτελέσματα των διαχωρισμών παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πίνακες 1, 2, 3 αντίστοιχα για τάσεις πεδίου 5, 10, 15 KV

Πίνακας 1: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 5 KV

V= 5KV			Σύσταση %			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	37.4	1	42	57	1.16	40.27	74.47
	PN	23.1	8	72	20	5.72	42.54	16.10
	ΣΥΝΟΛΟ P	*60.5*	*3.67*	*53.44*	*42.89*	*6.9*	*82.8*	*90.6*
N	NP	7.1	22	49	29	4.83	8.89	7.17
	NN	32.4	88	10	2	88.29	8.29	2.26
	ΣΥΝΟΛΟ N	*39.5*	*76.15*	*17*	*6.85*	*93.1*	*17.2*	*9.4*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**32.28**	**39.05**	**28.66**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

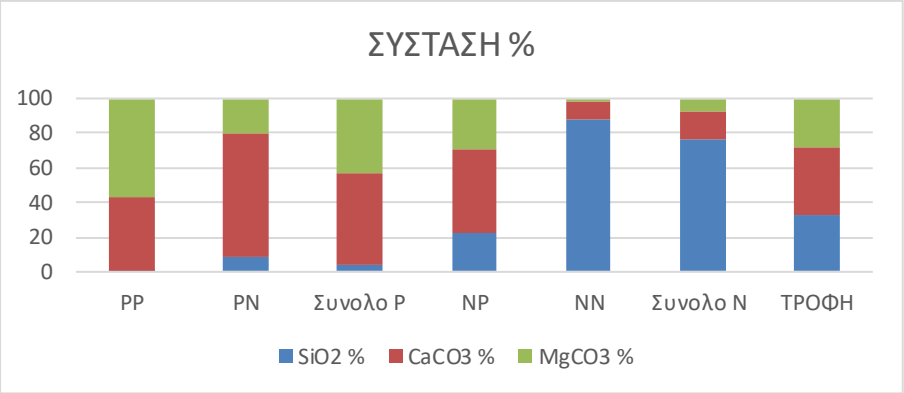
Πίνακας 2: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 10 KV

V= 10KV			Σύσταση %			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	37.3	2	31	67	2.23	31.34	84.65
	PN	23.3	9	80	11	6.26	50.54	8.69
	ΣΥΝΟΛΟ P	*60.7*	*4.69*	*49.85*	*45.46*	*8.5*	*81.9*	*93.3*
N	NP	6.2	30	49	21	5.57	8.26	4.42
	NN	33.1	87	11	2	85.94	9.86	2.24
	ΣΥΝΟΛΟ N	*39.3*	*77.98*	*17.01*	*5.01*	*91.5*	*18.1*	*6.7*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**33.52**	**36.93**	**29.55**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

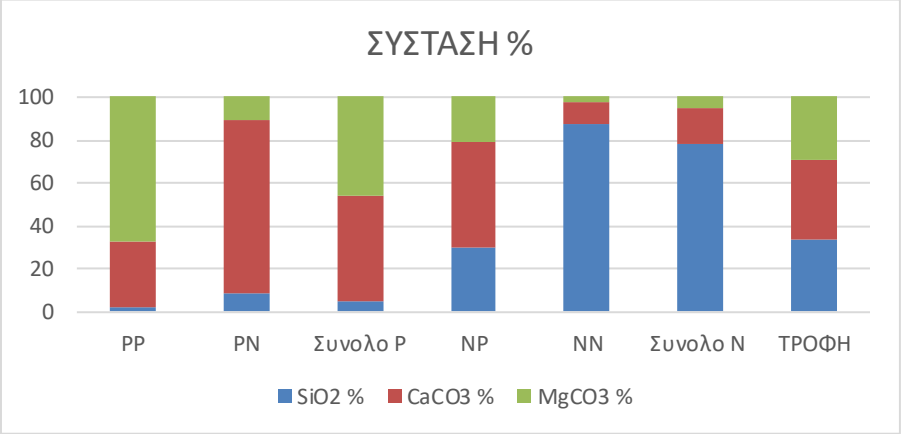
Πίνακας 3: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

V= 15KV			Σύσταση %			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	45.9	16	36	48	21.71	42.42	80.99
	PN	22.8	20	71	9	13.45	41.47	7.53
	ΣΥΝΟΛΟ P	*68.7*	*17.33*	*47.6*	*35.08*	*35.2*	*83.9*	*88.5*
N	NP	12.0	49	33	18	17.34	10.14	7.92
	NN	19.4	83	12	5	47.5	5.96	3.56
	ΣΥΝΟΛΟ N	*31.3*	*70.01*	*20.03*	*9,97*	*64.8*	*16.1*	*11.5*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**33.83**	**38.96**	**27.21**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

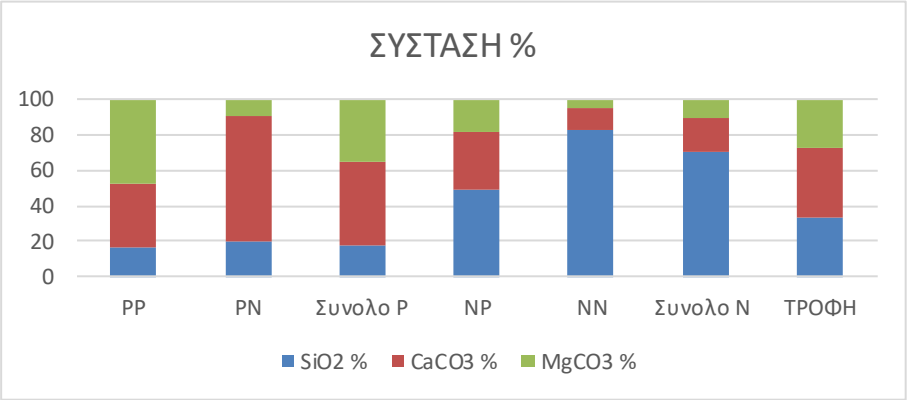
Στα ακόλουθα Διαγράμματα 1, 2, 3, παριστάνεται γραφικά η % σύσταση της αρχικής τροφοδοσίας, των ενδιάμεσων προϊόντων P και N και των τελικών προϊόντων PP, PN, NP και NN για τον διαχωρισμό του χονδρόκοκκου κλάσματος με πλαστικό τριβοφορτιστή και για τις τρείς διαφορετικές τάσεις που εφαρμόστηκαν. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι ο χαλαζίας συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν, ενώ τα ανθρακικά ορυκτά μαγνησίτης και ασβεστίτης συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν. Συγκριτικά με τις διαφορετικές τάσεις παρατηρείται ότι ο καλύτερος διαχωρισμός επιτυγχάνεται στις μικρότερες τάσεις 5 KV και 10 KV.



Διάγραμμα 1: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 5KV

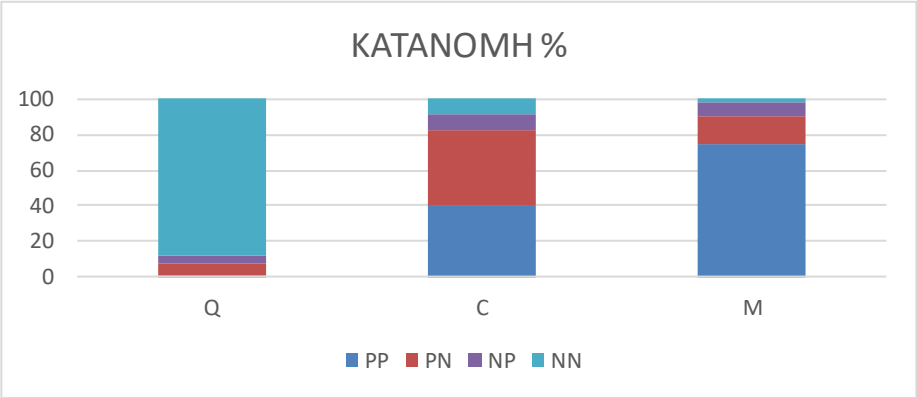


Διάγραμμα 2: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 10KV

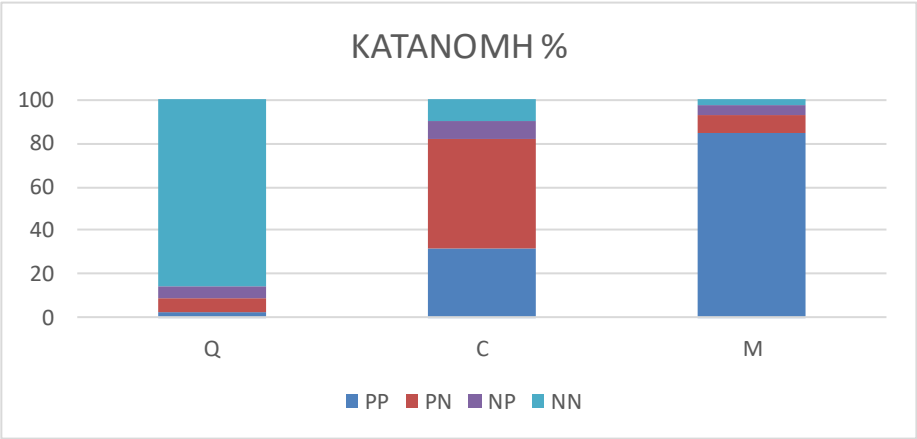


Διάγραμμα 3: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 15KV

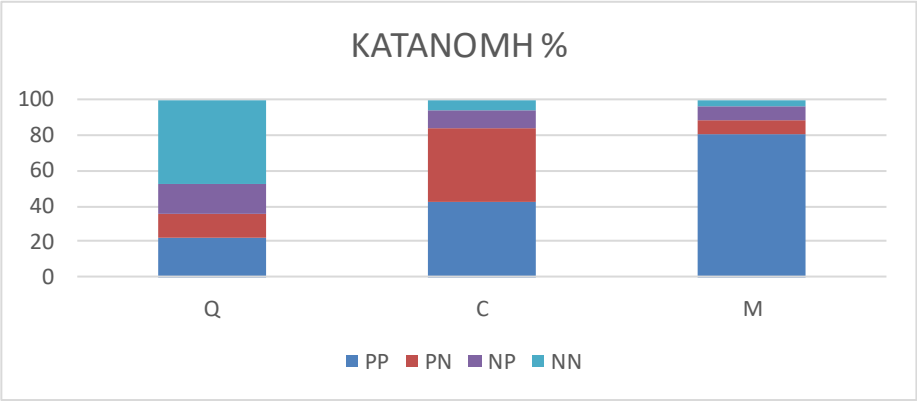
Επιπλέον στα Διαγράμματα 4 , 5, 6 παρουσιάζεται η κατανομή των τριών φάσεων Q, C, M στα τέσσερα διαφορετικά προϊόντα για κάθε διαφορετική τάση διαχωρισμού (PP,PN,NP,NN).



Διάγραμμα 4:Κατανομή των Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 5 KV



Διάγραμμα 5:Κατανομή των Q-C-M -150+53 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 10 KV



Διάγραμμα 6: Κατανομή των Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

Στα παραπάνω διαγράμματα 4, 5, 6 ο χαλαζίας κατανέμεται στο αρνητικό προϊόν (NN) σε τιμές που κυμαίνονται από 47-88%, ενώ ο μαγνησίτης κατανέμεται στο θετικό προϊόν (PP) σε τιμές που δεν ξεπερνούν το 84%. Όσον αφορά τον ασβεστίτη κατανέμεται από τον πρώτο διαχωρισμό στο θετικό προϊόν (P) κατά 80% ενώ στους δύο επόμενους και για τις τρεις διαφορετικές τάσεις ο ασβεστίτης ισοκατανέμεται σχεδόν στα δύο προϊόντα PP και PN.

Στη συνέχεια με τον ίδιο τριβοφορτιστή (πλαστικό) και στις ίδιες πάντα συνθήκες πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διαχωρισμού για το λεπτόκοκκο κοκκομετρικό κλάσμα -150μm. Τα αποτελέσματα των διαχωρισμών φαίνονται στους Πίνακες 4, 5, 6, και στα Διαγράμματα 7 , 8, 9.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 5 KV

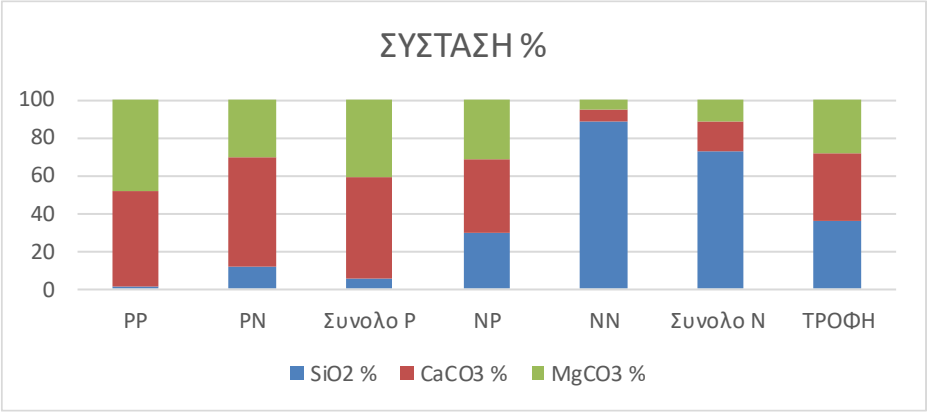
V= 5KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	34.3	2	50	48	1.92	47.24	58.68
	PN	21.4	12	58	30	7.2	34.2	22.89
	ΣΥΝΟΛΟ P	*55.7*	*5.84*	*53.07*	*41.08*	*9.1*	*81.4*	*81.6*
N	NP	11.4	30	39	31	9.55	12.2	12.55
	NN	33.0	88	7	5	81.33	6.36	5.88
	ΣΥΝΟΛΟ N	*44.3*	*73.14*	*15.2*	*11.66*	*90.9*	*18.6*	*18.4*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**35.67**	**36.29**	**28.04**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

Πίνακας 5: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 10 KV

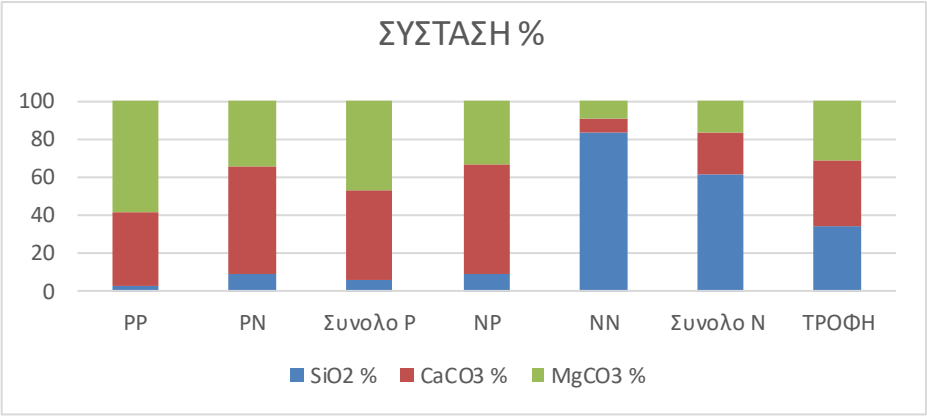
V= 10KV			Σύσταση			Κατανομή%		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	26.2	3	38	59	2.31	28.68	49.07
	PN	23.0	9	57	34	6.11	37.85	24.88
	ΣΥΝΟΛΟ P	*49.2*	*5.81*	*46.89*	*47.3*	*8.4*	*66.5*	*74.0*
N	NP	15.1	9	58	33	4.0	25.21	15.81
	NN	35.8	83	8	9	87.58	8.26	10.24
	ΣΥΝΟΛΟ N	*50.8*	*61.07*	*22.81*	*16.11*	*91.6*	*33.5*	*26.0*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**33.9**	**34.65**	**31.44**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

Πίνακας 6: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

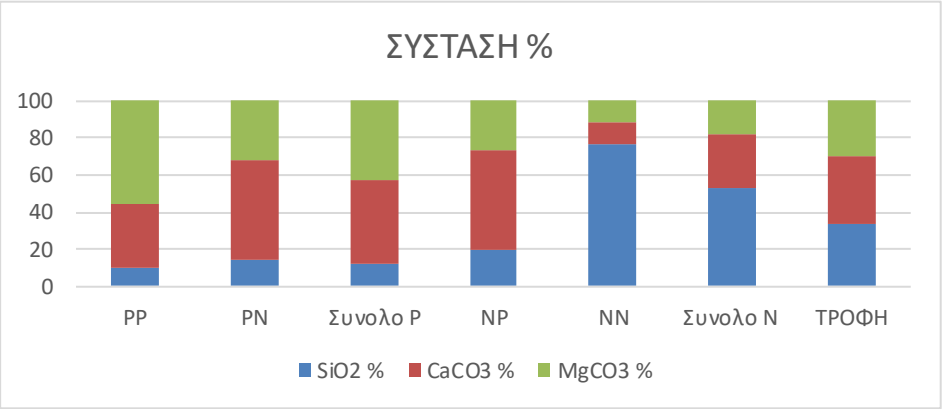
V= 15KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	21.5	10	35	55	6.43	20.29	39.84
	PN	26.7	14	54	32	11.19	38.89	28.81
	ΣΥΝΟΛΟ P	*48.1*	*12.22*	*45.53*	*42.26*	*17.6*	*59.2*	*68.6*
N	NP	21.9	20	54	26	13.12	31.91	19.2
	NN	30.0	77	11	12	69.26	8.91	12.15
	ΣΥΝΟΛΟ N	*51.9*	*52.96*	*29.13*	*17.9*	*82.4*	*40.8*	*31.4*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**33.35**	**37.02**	**29.62**	**100.0**	**100.0**	**100.0**



Διάγραμμα 7: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 5KV



Διάγραμμα 8: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 10KV

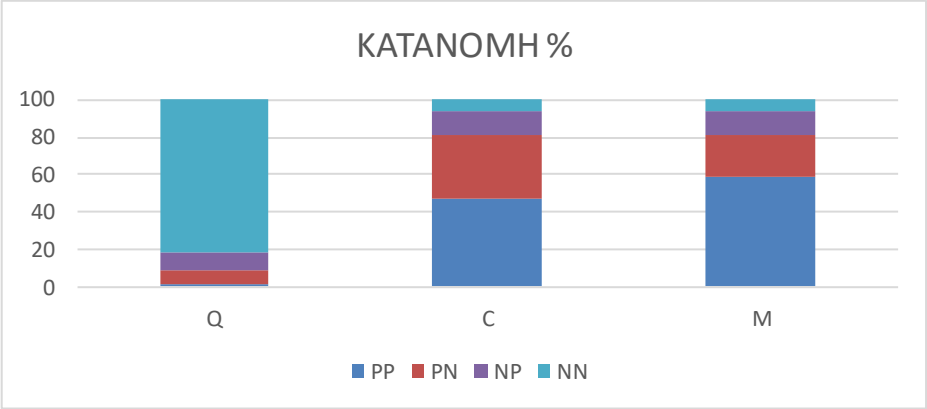


Διάγραμμα 9: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 15KV

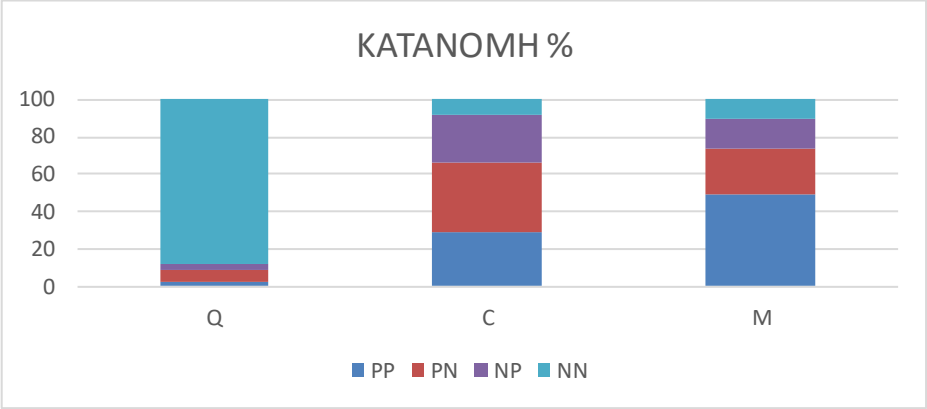
Παρατηρείται ότι και για το διαχωρισμό του λεπτόκοκκου κλάσματος με πλαστικό τριβοφορτιστή και για τις τρεις διαφορετικές τάσεις που εφαρμόστηκαν ο χαλαζίας συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν, ενώ τα ανθρακικά ορυκτά μαγνησίτης και ασβεστίτης

συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν. Συγκριτικά με τις διαφορετικές τάσεις παρατηρείται ότι ο καλύτερος διαχωρισμός επιτυγχάνεται και πάλι στις μικρότερες τάσεις 5 KV και 10 KV.

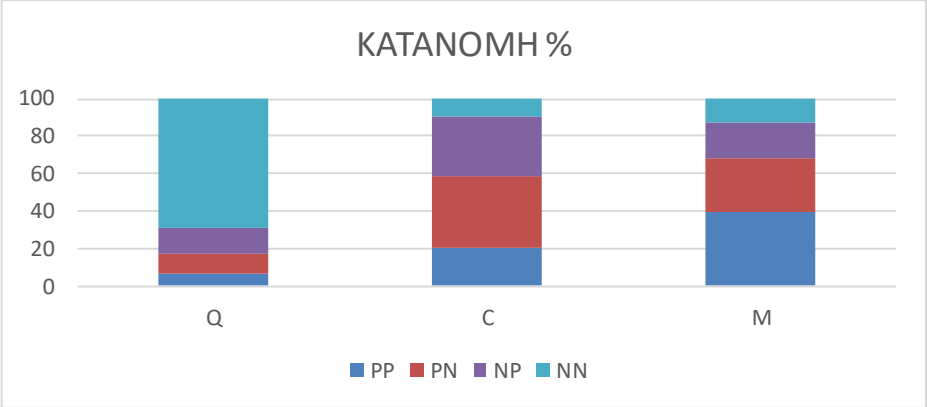
Επιπλέον στα Διαγράμματα 10, 11, 12 παρουσιάζεται η κατανομή των τριών φάσεων Q,C,M στα τέσσερα διαφορετικά προϊόντα για κάθε διαφορετική τάση διαχωρισμού (PP,PN,NP,NN).



Διάγραμμα 10: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 5 KV



Διάγραμμα 11: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 10 KV



Διάγραμμα 12: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150 μm με πλαστικό τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

Παρατηρείται ότι και για το διαχωρισμό του λεπτόκοκκου κλάσματος με πλαστικό τριβοφορτιστή και για τις τρείς διαφορετικές τάσεις που εφαρμόστηκαν ο χαλαζίας συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν, ενώ τα ανθρακικά ορυκτά μαγνησίτης και ασβεστίτης συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν. Συγκριτικά με τις διαφορετικές τάσεις παρατηρείται ότι ο καλύτερος διαχωρισμός επιτυγχάνεται και πάλι στις μικρότερες τάσεις 5 KV και 10 KV.

Δοκιμές διαχωρισμού με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή

Η διαδικασία διαχωρισμού χρησιμοποιώντας τον ανοξείδωτο τριβοφορτιστή πραγματοποιήθηκε αρχικά για το χονδρόκοκκο κλάσμα -150+53 μm και για τις τρεις διαφορετικές τάσεις πεδίου V=5 KV, V=10 KV, V=15 KV

Τα αποτελέσματα των διαχωρισμών παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πίνακες 7, 8, 9 αντίστοιχα για τάσεις πεδίου 5,10,15 KV .

Πίνακας 7: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 5 KV

V= 5KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	38.1	1	33	66	1.17	38.91	71.41
	PN	13.7	17	50	33	7.19	21.25	12.87
	ΣΥΝΟΛΟ P	*51.8*	*5.24*	*37.5*	*57.26*	*8.4*	*60.2*	*84.3*
N	NP	17.8	17	57	26	9.32	31.39	13.14
	NN	30.4	88	9	3	82.32	8.46	2.59
	ΣΥΝΟΛΟ N	*48.2*	*61.77*	*26.73*	*11.5*	*91.6*	*39.8*	*15.7*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**32.46**	**32.32**	**35.22**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

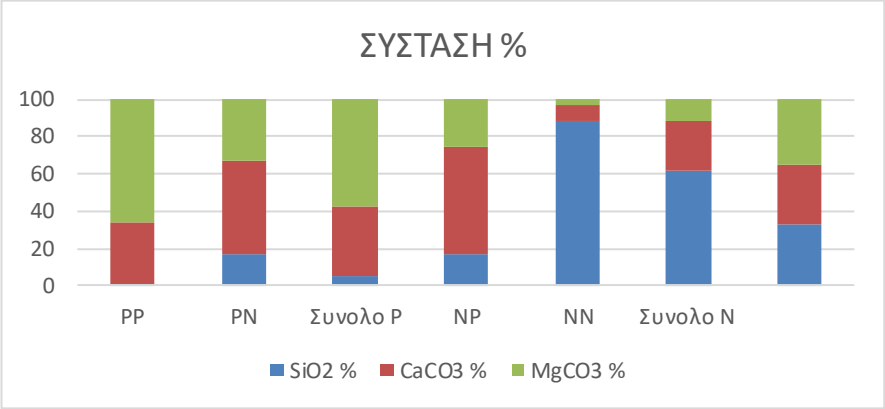
Πίνακας 8: Αποτελέσματα διαχωρισμού -150+53 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV

V= 10KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	30.4	1	13	86	0.88	13.35	72.66
	PN	13.0	12	49	39	4.53	21.52	14.09
	ΣΥΝΟΛΟ P	*43.4*	*4.29*	*23.78*	*71.92*	*5.4*	*34.9*	*86.7*
N	NP	20.2	8	72	20	4.69	49.14	11.23
	NN	36.4	85	13	2	89.89	15.99	2.02
	ΣΥΝΟΛΟ N	*56.6*	*57.52*	*34.06*	*8.42*	*94.6*	*65.1*	*13.3*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**34.42**	**29.6**	**35.98**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

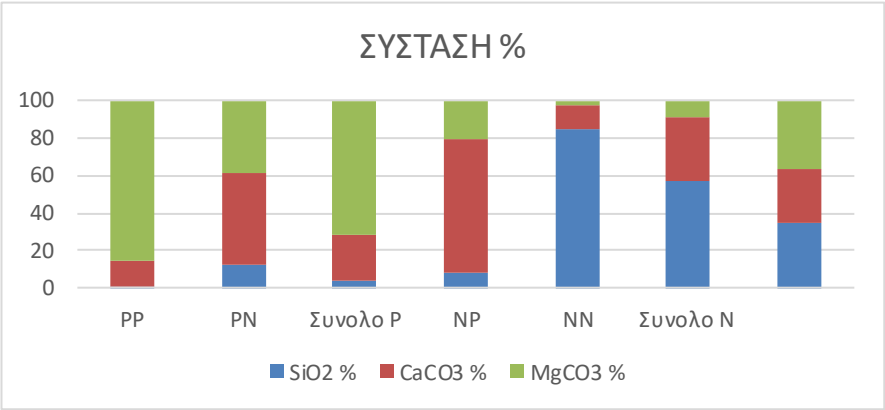
Πίνακας 9: Αποτελέσματα διαχωρισμού-150+53 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

V= 15KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	32.3	13	7	80	11.32	7.79	76.53
	PN	12.7	36	34	30	12.31	14.86	11.27
	ΣΥΝΟΛΟ P	*45.0*	*19.48*	*14.61*	*65.9*	*23.6*	*22.7*	*87.8*
N	NP	21.4	15	72	13	8.65	53.11	8.24
	NN	33.5	75	21	4	67.72	24.24	3.97
	ΣΥΝΟΛΟ N	*55.0*	*51.61*	*40.88*	*7.51*	*76.4*	*77.3*	*12.2*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**37.14**	**29.05**	**33.81**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

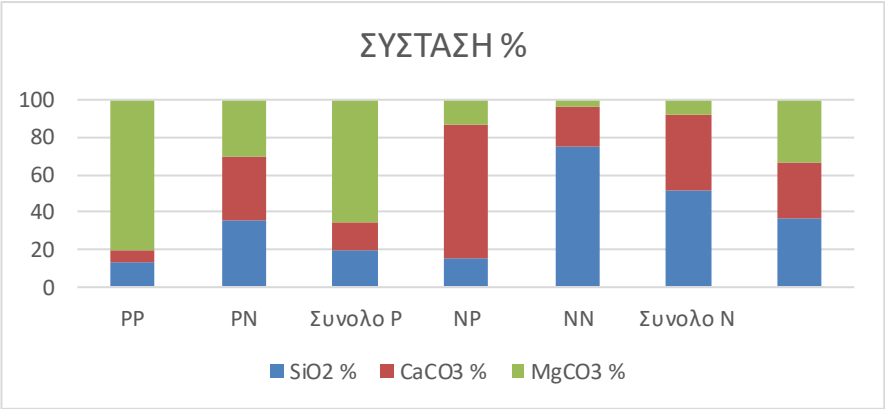
Στα ακόλουθα Διαγράμματα 13, 14, 15 παριστάνεται γραφικά η % σύσταση της αρχικής τροφοδοσίας, των ενδιάμεσων προϊόντων P και N και των τελικών προϊόντων PP, PN, NP και NN για το διαχωρισμό του χονδρόκοκκου κλάσματος με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή και για τις τρείς διαφορετικές τάσεις που εφαρμόστηκαν. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του χαλαζία συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν, ενώ τα ανθρακικά ορυκτά μαγνησίτης και ασβεστίτης συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν. Συγκριτικά με τις διαφορετικές τάσεις παρατηρείται ότι ο καλύτερος διαχωρισμός επιτυγχάνεται στις μικρότερες τάσεις 5 KV και 10 KV καθώς για την τάση των 15 KV εμφανίζεται ένα μικρό ποσοστό του χαλαζία στο θετικό προϊόν.



Διάγραμμα 13: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 5KV

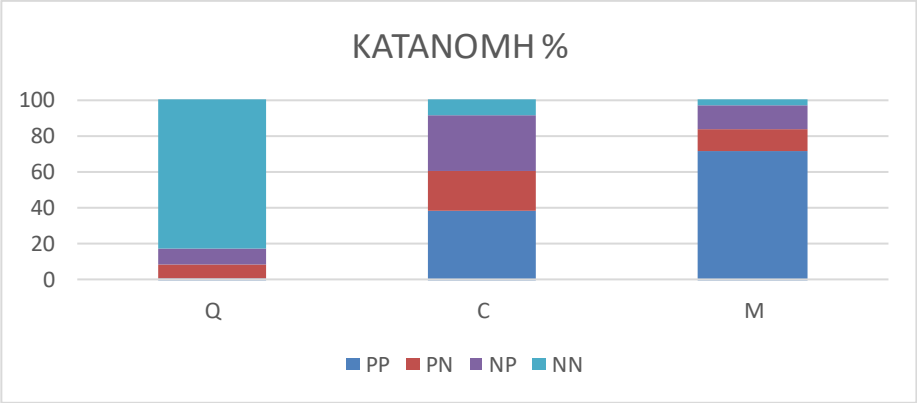


Διάγραμμα 14: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 10KV

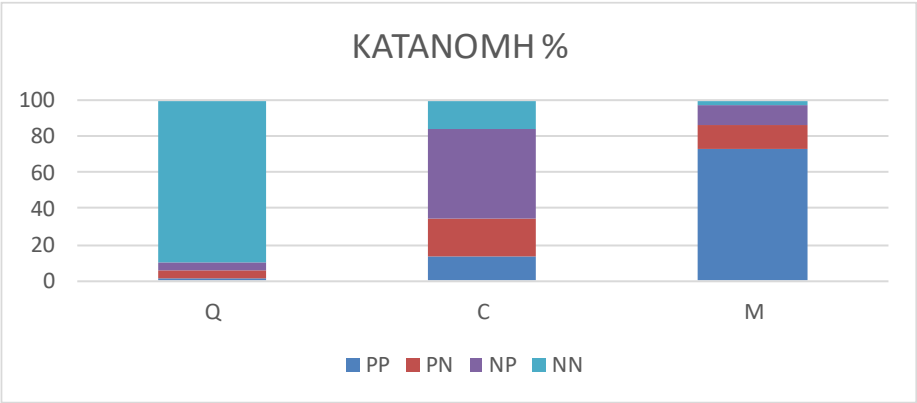


Διάγραμμα 15: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 15KV

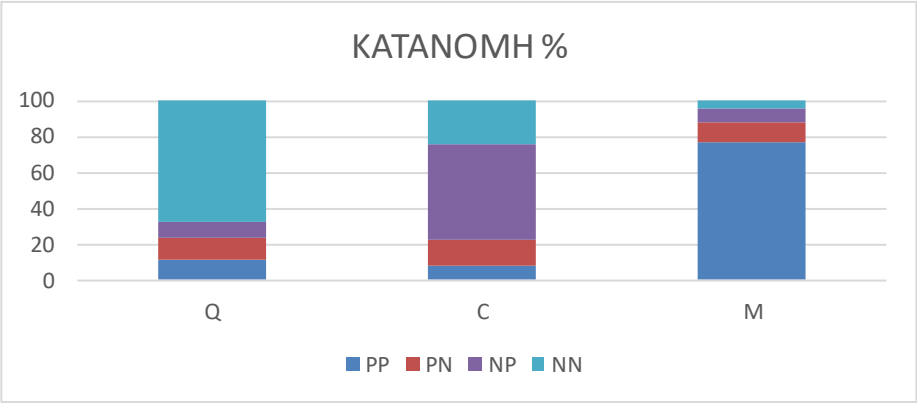
Επιπλέον στα Διαγράμματα 16, 17, 18 παρουσιάζεται η κατανομή των τριών φάσεων Q, C, M στα τέσσερα διαφορετικά προϊόντα για κάθε διαφορετική τάση διαχωρισμού (PP,PN,NP,NN).



Διάγραμμα 16: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 5 KV



Διάγραμμα 17: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV



Διάγραμμα 18: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

Στα παραπάνω διαγράμματα ο χαλαζίας κατανέμεται στο αρνητικό προϊόν (NN) σε τιμές που φτάνουν μέχρι και το 90% για τα 10 KV, ενώ ο μαγνησίτης κατανέμεται στο θετικό προϊόν (PP) σε τιμές κυμαίνονται από 71-76%. Όσον αφορά τον ασβεστίτη η συμμετοχή του στο αρνητικό προϊόν (NN) είναι μικρή αλλά ισοκατανέμεται στα άλλα τρία προϊόντα στο διαχωρισμό των 5 KV. Στο διαχωρισμό των 10 και 15 KV ο ασβεστίτης κατανέμεται σε ποσοστό της τάξης του 70% στα ενδιάμεσα προϊόντα PN και NP.

Στη συνέχεια με τον ίδιο τριβοφορτιστή (ανοξείδωτο) και στις ίδιες πάντα συνθήκες πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διαχωρισμού για το λεπτόκοκκο κοκκομετρικό κλάσμα -150μm. Τα αποτελέσματα των διαχωρισμών φαίνονται στους Πίνακες 10, 11, 12 και στα Διαγράμματα 19, 20, 21.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 5 KV

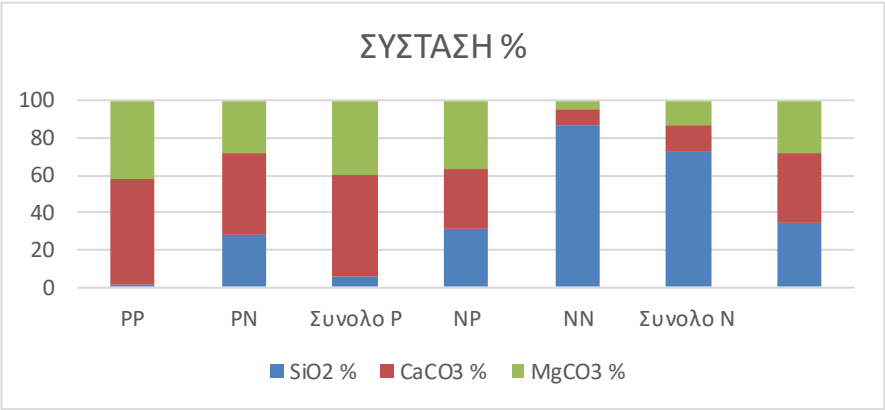
V= 5KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	47.7	2	56	42	2.73	72.5	70.75
	PN	9.0	28	44	28	7.24	10.79	8.93
	ΣΥΝΟΛΟ P	*56.7*	*6.14*	*54.09*	*39.77*	*10.0*	*83.3*	*79.7*
N	NP	11.2	31	32	37	9.94	9.73	14.64
	NN	32.1	87	8	5	80.09	6.98	5.68
	ΣΥΝΟΛΟ N	*43.3*	*72.53*	*14.2*	*13.27*	*90.0*	*16.7*	*20.3*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**34.9**	**36.81**	**28.29**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

Πίνακας 11: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV

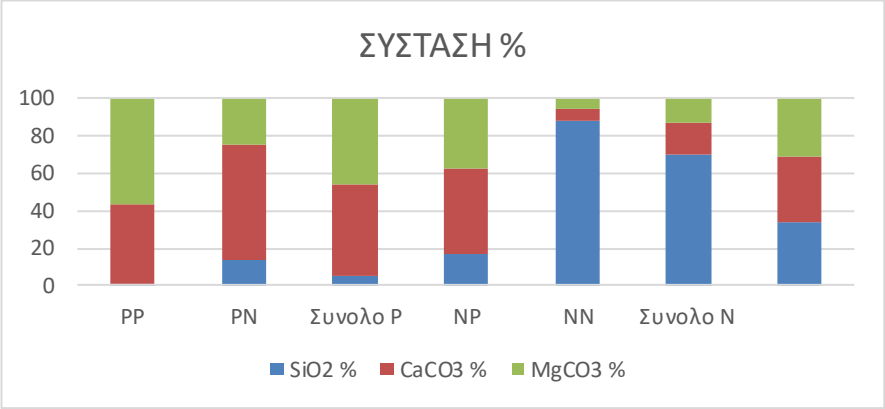
V= 10KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	37.8	1	43	56	1.11	47.12	67.28
	PN	17.3	14	61	25	7.1	30.62	13.76
	ΣΥΝΟΛΟ P	*55.1*	*5.08*	*48.66*	*46.26*	*8.2*	*77.7*	*81.0*
N	NP	11.6	17	46	37	5.78	15.49	13.66
	NN	33.3	88	7	5	86.01	6.77	5.3
	ΣΥΝΟΛΟ N	*44.9*	*69.67*	*17.07*	*13.26*	*91.8*	*22.3*	*19.0*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**34.11**	**34.46**	**31.43**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

Πίνακας 12: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

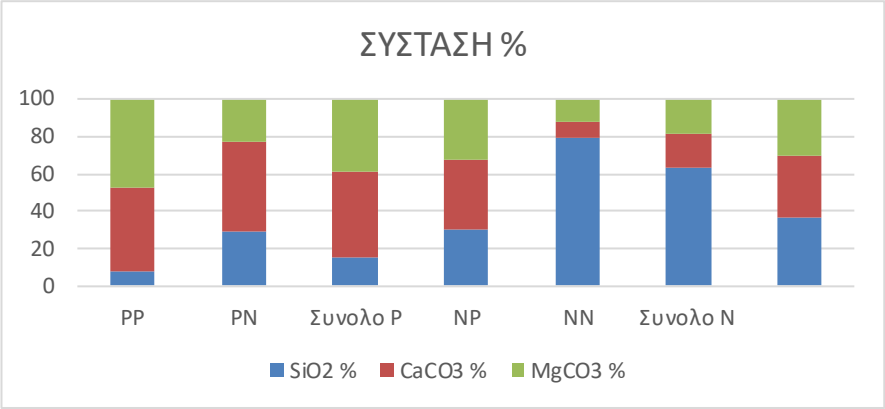
V=15KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	36.2	8	45	47	7.96	48.26	57.0
	PN	19.8	29	48	23	15.77	28.13	15.24
	ΣΥΝΟΛΟ P	*56.0*	*15.42*	*46.06*	*38.52*	*23.7*	*76.4*	*72.2*
N	NP	14.3	30	37	33	11.8	15.69	15.82
	NN	29.7	79	9	12	64.46	7.91	11.93
	ΣΥΝΟΛΟ N	*44.0*	*63.06*	*18.11*	*18.83*	*76.3*	*23.6*	*27.8*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**36.38**	**33.76**	**29.86**	**100.0**	**100.0**	**100.0**



Διάγραμμα 19: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 5KV



Διάγραμμα 20: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 10KV

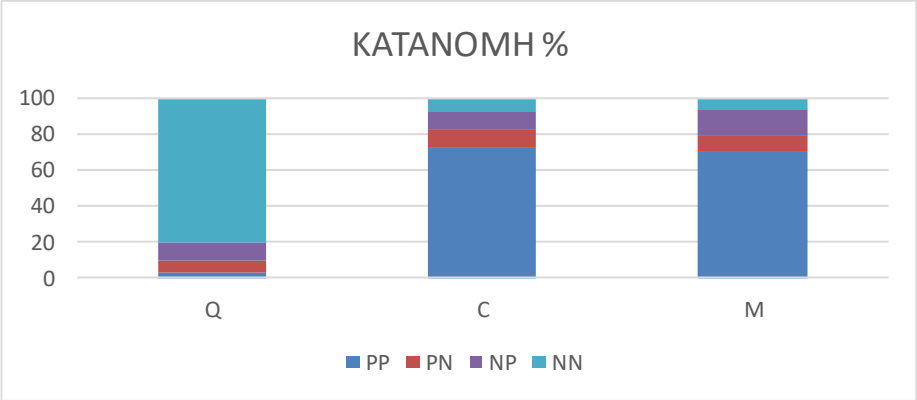


Διάγραμμα 21: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 15KV

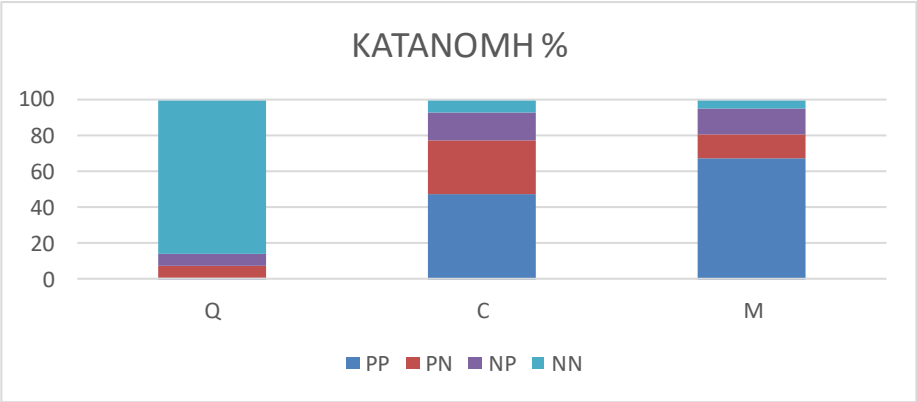
Παρατηρείται ότι και για το διαχωρισμό του λεπτόκοκκου κλάσματος με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή και για τις τρεις διαφορετικές τάσεις που εφαρμόστηκαν ο χαλαζίας συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν, ενώ τα ανθρακικά ορυκτά μαγνησίτης και ασβεστίτης

συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν. Συγκριτικά με τις διαφορετικές τάσεις παρατηρείται ότι ο καλύτερος διαχωρισμός επιτυγχάνεται και πάλι στις μικρότερες τάσεις 5 KV και 10 KV.

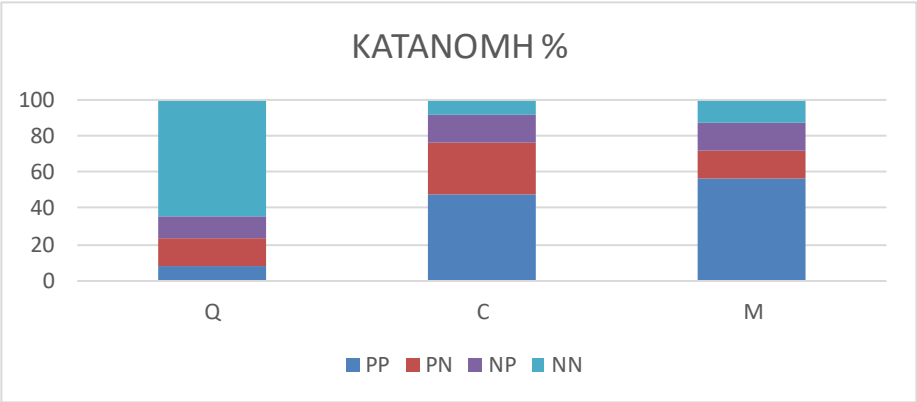
Επιπλέον στα Διαγράμματα 22, 23 ,24 παρουσιάζεται η κατανομή των τριών φάσεων Q, C, M στα τέσσερα διαφορετικά προϊόντα για κάθε διαφορετική τάση διαχωρισμού (PP,PN,NP,NN).



Διάγραμμα 22: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 5 KV



Διάγραμμα 23: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV



Διάγραμμα 24: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150 μm με ανοξείδωτο τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

Στα παραπάνω διαγράμματα ο χαλαζίας κατανέμεται στο αρνητικό προϊόν(NN) σε τιμές που κυμαίνονται έως 86%, ενώ ο μαγνησίτης κατανέμεται στο θετικό προϊόν (PP) σε τιμές που δεν ξεπερνούν το 70%. Όσον αφορά τον ασβεστίτη η συμμετοχή του στο αρνητικό προϊόν (NN) είναι μικρή, ενώ κατανέμεται στα τρία υπόλοιπα προϊόντα και συνυπάρχει πάντα με το μαγνησίτη.

Δοκιμές διαχωρισμού με χάλκινο τριβοφορτιστή

Η διαδικασία διαχωρισμού χρησιμοποιώντας το χάλκινο τριβοφορτιστή πραγματοποιήθηκε αρχικά για το χονδρόκοκκο κλάσμα -150+53 μm και για τις τρεις διαφορετικές τάσεις πεδίου V=5 KV, V=10 KV, V=15 KV .

Τα αποτελέσματα των διαχωρισμών παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πίνακες 13, 14, 15 αντίστοιχα για τάσεις πεδίου 5,10,15 KV .

Πίνακας 13: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 5 KV

V= 5KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	33.7	1	30	69	0.97	31.39	70.31
	PN	14.5	7	59	34	2.92	26.56	14.91
	ΣΥΝΟΛΟ P	*48.2*	*2.81*	*38.72*	*58.47*	*3.9*	*57.9*	*85.2*
N	NP	16.7	13	62	25	6.26	32.24	12.66
	NN	35.1	89	9	2	89.86	9.82	2.12
	ΣΥΝΟΛΟ N	*51.8*	*64.46*	*26.11*	*9.43*	*96.1*	*42.1*	*14.8*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**34.77**	**32.19**	**33.05**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

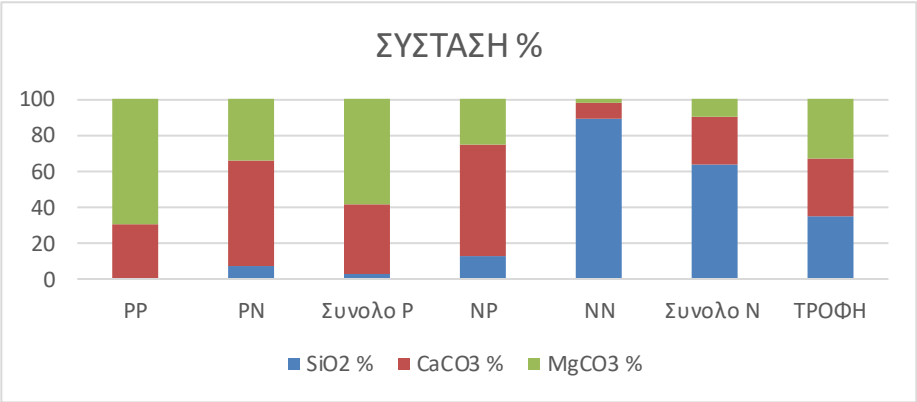
Πίνακας 14: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV

V= 10KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	28.2	1	10	89	0.8	9.15	73.5
	PN	15.0	7	62	31	3.0	30.3	13.67
	ΣΥΝΟΛΟ P	*43.2*	*3.09*	*28.1*	*68.81*	*3.8*	*39.5*	*87.2*
N	NP	19.1	7	74	19	3.8	45.84	10.62
	NN	37.7	86	12	2	92.39	14.7	2.21
	ΣΥΝΟΛΟ N	*56.8*	*59.47*	*32.82*	*7.71*	*96.2*	*60.5*	*12.8*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**35.1**	**30.78**	**34.12**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

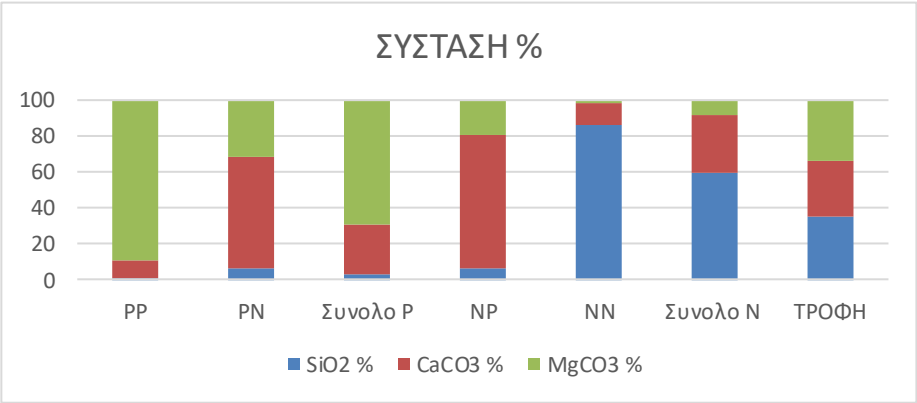
Πίνακας 15: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

V= 15KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	27.4	6	7	87	4.45	6.49	71.36
	PN	14.6	30	38	32	11.88	18.8	14.0
	ΣΥΝΟΛΟ P	*42.1*	*14.35*	*17.78*	*67.87*	*16.3*	*25.3*	*85.4*
N	NP	22.6	7	76	17	4.27	57.97	11.47
	NN	35.4	83	14	3	79.4	16.74	3.17
	ΣΥΝΟΛΟ N	*57.9*	*53.4*	*38.15*	*8.45*	*83.7*	*74.7*	*14.6*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**36.97**	**29.58**	**33.45**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

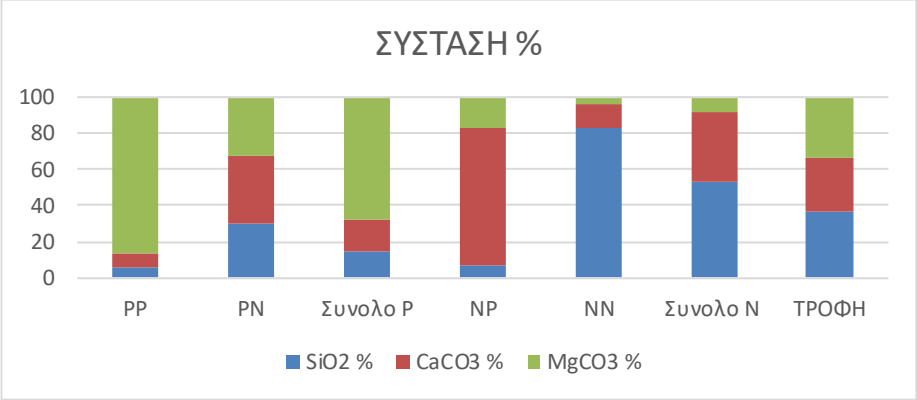
Στα ακόλουθα Διαγράμματα 25, 26, 27 παριστάνεται γραφικά η % σύσταση της αρχικής τροφοδοσίας, των ενδιάμεσων προϊόντων P και N και των τελικών προϊόντων PP, PN, NP και NN για το διαχωρισμό του χονδρόκοκκου κλάσματος με χάλκινο τριβοφορτιστή και για τις τρεις διαφορετικές τάσεις που εφαρμόστηκαν. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι ο χαλαζίας συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν, ενώ τα ανθρακικά ορυκτά μαγνησίτης και ασβεστίτης συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν. Συγκριτικά με τις διαφορετικές τάσεις παρατηρείται ότι ο καλύτερος διαχωρισμός επιτυγχάνεται στις μικρότερες τάσεις 10 KV και 15 KV.



Διάγραμμα 25: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 5KV

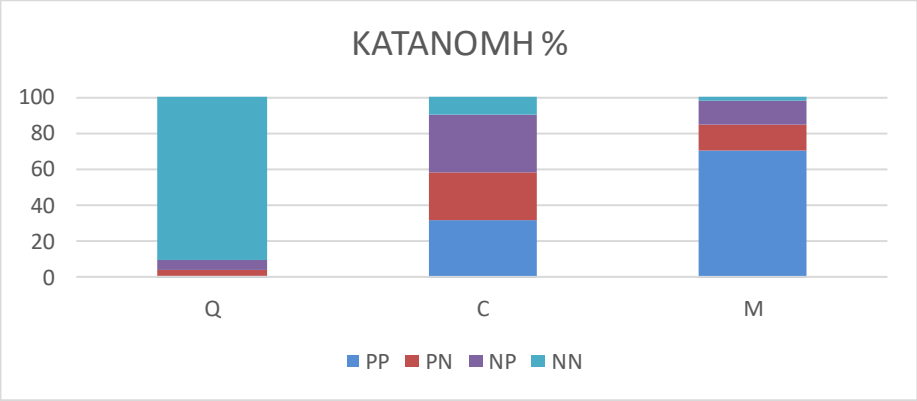


Διάγραμμα 26: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10KV

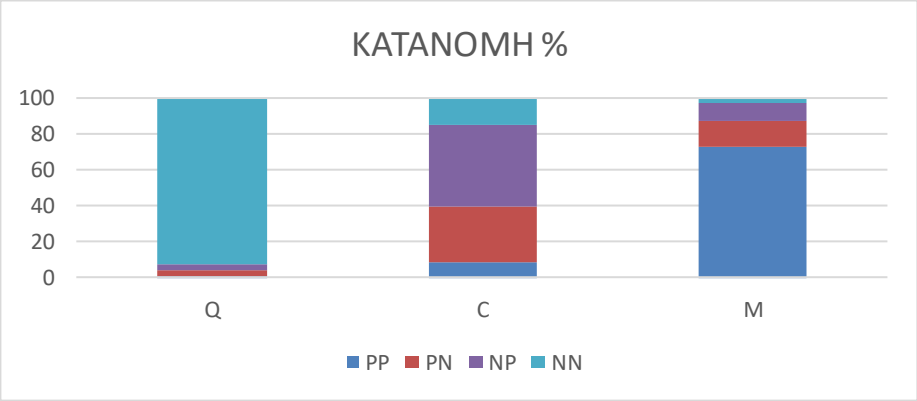


Διάγραμμα 27: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 15KV

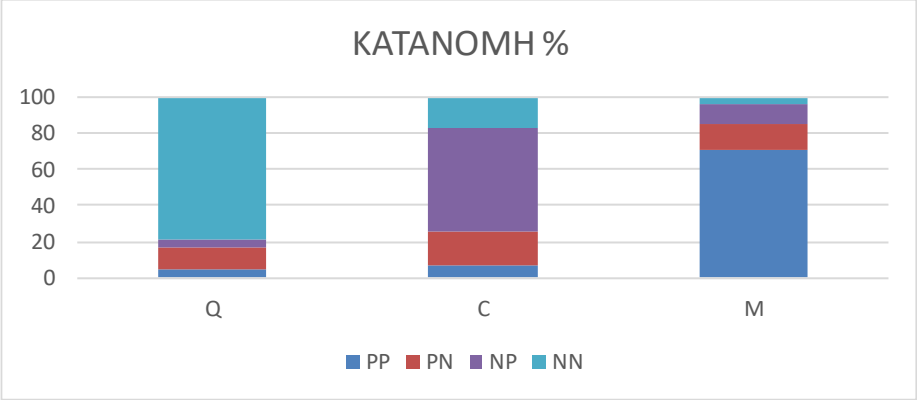
Επιπλέον στα Διαγράμματα 28, 29, 30 παρουσιάζεται η κατανομή των τριών φάσεων Q, C, M στα τέσσερα διαφορετικά προϊόντα για κάθε διαφορετική τάση διαχωρισμού (PP,PN,NP,NN).



Διάγραμμα 28: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 5 KV



Διάγραμμα 29: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV



Διάγραμμα 30: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

Ο χαλαζίας κατανέμεται στο αρνητικό προϊόν (NN) σε τιμές που κυμαίνονται και πάνω από 90%, ενώ ο μαγνησίτης κατανέμεται στο θετικό προϊόν (PP) σε τιμές που δεν ξεπερνούν το 70-73%. Όσον αφορά τον ασβεστίτη η συμμετοχή του στο αρνητικό προϊόν (NN) είναι μικρή, ενώ κατανέμεται στα τρία υπόλοιπα προϊόντα. Πιο συγκεκριμένα στο διαχωρισμό των 5 KV ο ασβεστίτης κατανέμεται σχεδόν στα τρία προϊόντα (εκτός NN), ενώ στα 10 και 15 KV συγκεντρώνεται κυρίως στα προϊόντα PN και NP. Αυτό σημαίνει ότι η μίξη αυτών των δύο προϊόντων δίνει ένα προϊόν στο οποίο κατανέμεται το 75% του αρχικού ασβεστίτη.

Στη συνέχεια με τον ίδιο τριβοφορτιστή (χάλκινο) και στις ίδιες πάντα συνθήκες πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διαχωρισμού για το λεπτόκοκκο κοκκομετρικό κλάσμα -150μm. Τα αποτελέσματα των διαχωρισμών φαίνονται στους Πίνακες 16, 17, 18 και στα Διαγράμματα 31, 32, 33.

Πίνακας 16: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 5 KV

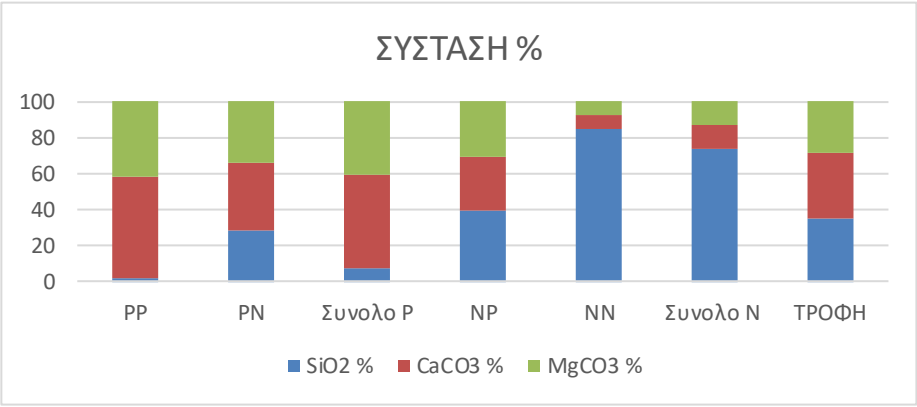
V=5KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	45.9	2	56	42	2.57	72.01	67.17
	PN	11.5	28	38	34	9.01	12.22	13.59
	ΣΥΝΟΛΟ P	*57.3*	*7.20*	*52.40*	*40.40*	*11.6*	*84.2*	*80.8*
N	NP	10.6	40	29	31	11.84	8.58	11.40
	NN	32.1	85	8	7	76.58	7.20	7.84
	ΣΥΝΟΛΟ N	*42.7*	*73.87*	*13.19*	*12.94*	*88.4*	*15.8*	*19.2*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**35.64**	**35.67**	**28.68**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

Πίνακας 17: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV

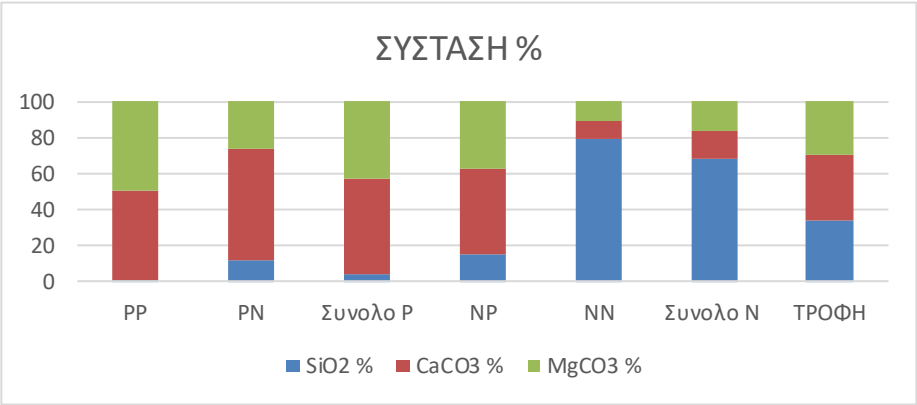
V=10KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	37.8	1	50	49	1.11	52.50	62.05
	PN	15.7	12	62	26	5.51	26.94	13.62
	ΣΥΝΟΛΟ P	*53.5*	*4.22*	*53.51*	*42.27*	*6.6*	*79.4*	*75.7*
N	NP	8.3	15	48	37	3.63	11.01	10.23
	NN	38.3	80	9	11	89.75	9.56	14.09
	ΣΥΝΟΛΟ N	*46.5*	*68.46*	*15.93*	*15.62*	*93.4*	*20.6*	*24.3*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**34.10**	**36.03**	**29.87**	**100.0**	**100.0**	**100.0**

Πίνακας 18: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

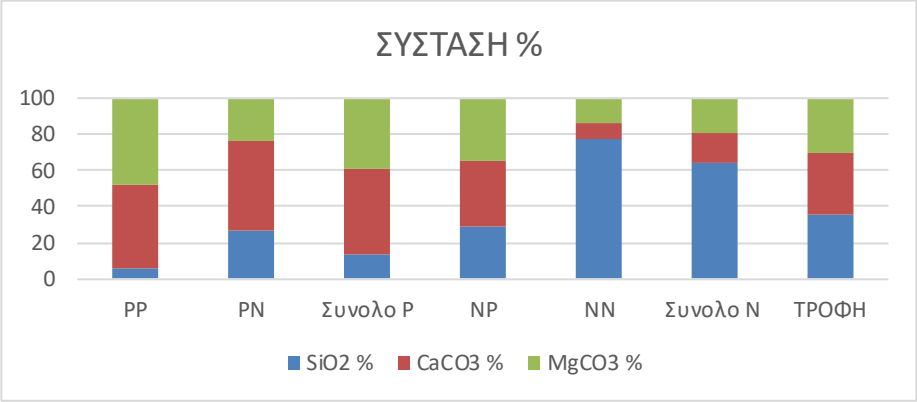
V=15KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	36.2	6	46	48	6.13	48.57	57.50
	PN	21.0	27	50	23	16.03	30.66	16.00
	ΣΥΝΟΛΟ P	*57.3*	*13.72*	*47.47*	*38.81*	*22.2*	*79.2*	*73.5*
N	NP	11.7	29	37	34	9.58	12.63	13.17
	NN	31.0	78	9	13	68.26	8.14	13.33
	ΣΥΝΟΛΟ N	*42.7*	*64.57*	*16.68*	*18.76*	*77.8*	*20.8*	*26.5*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**35.45**	**34.31**	**30.24**	**100.0**	**100.0**	**100.0**



Διάγραμμα 31: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 5KV



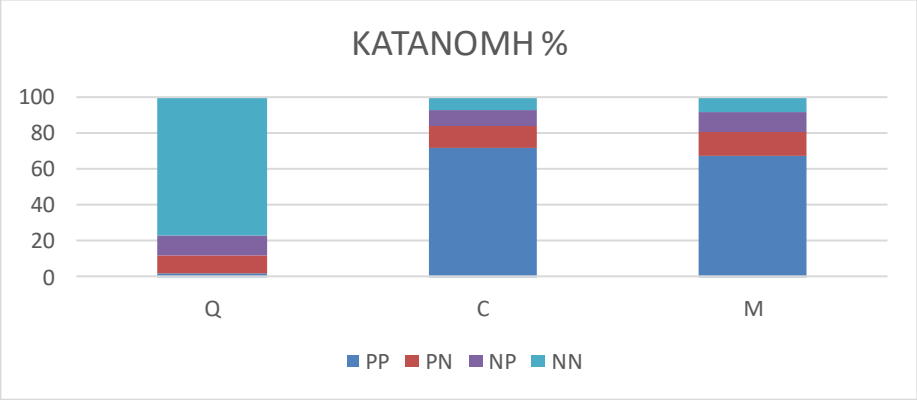
Διάγραμμα 32: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10KV



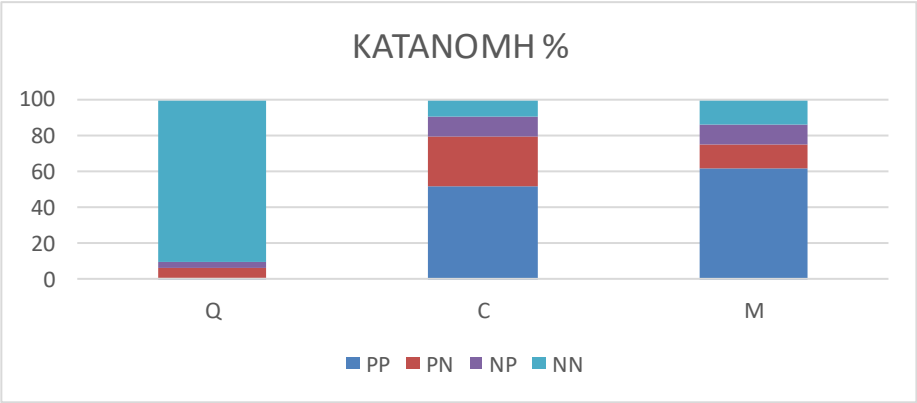
Διάγραμμα 33: Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 15KV

Παρατηρείται ότι και για το διαχωρισμό του λεπτόκοκκου κλάσματος με χάλκινο τριβοφορτιστή και για τις τρεις διαφορετικές τάσεις που εφαρμόστηκαν ο χαλαζίας συγκεντρώνεται και πάλι στο αρνητικό προϊόν, ενώ τα ανθρακικά ορυκτά μαγνησίτης και ασβεστίτης συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν. Συγκριτικά με τις διαφορετικές τάσεις παρατηρείται ότι ο καλύτερος διαχωρισμός επιτυγχάνεται και πάλι στις μικρότερες τάσεις 5 KV και 10 KV.

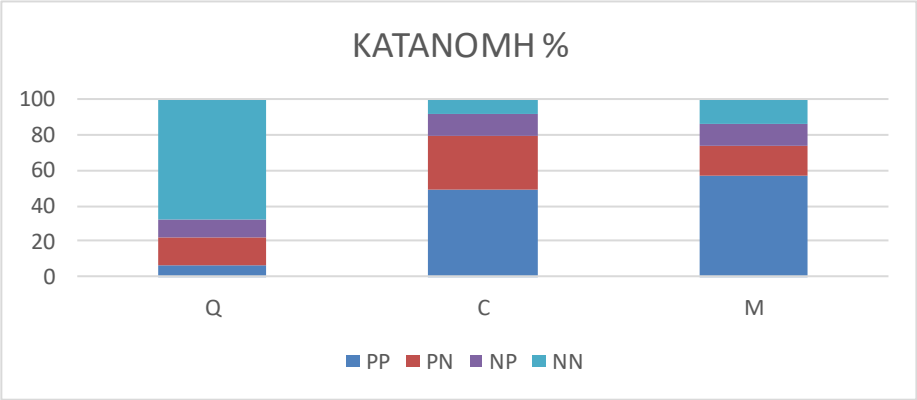
Επιπλέον στα Διαγράμματα 34 ,35, 36 παρουσιάζεται η κατανομή των τριών φάσεων Q, C, M στα τέσσερα διαφορετικά προϊόντα για κάθε διαφορετική τάση διαχωρισμού (PP,PN,NP,NN).



Διάγραμμα 34: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 5 KV



Διάγραμμα 35: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV

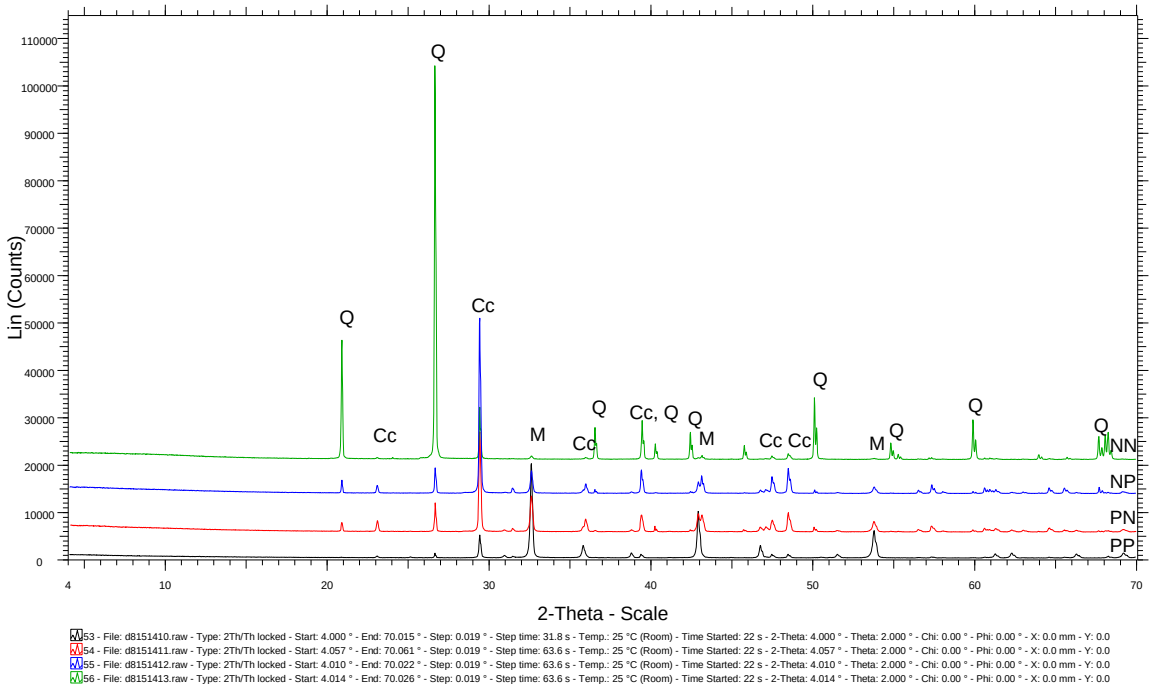


Διάγραμμα 36: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 15 KV

Ο χαλαζίας κατανέμεται στο αρνητικό προϊόν (NN) σε τιμές που κυμαίνονται έως 89%, ενώ ο μαγνησίτης κατανέμεται στο θετικό προϊόν (PP) σε τιμές που δεν ξεπερνούν το 67%. Όσον αφορά τον ασβεστίτη κατανέμεται από τον πρώτο διαχωρισμό στο θετικό προϊόν (P) κατά 80%

ενώ στους δύο επόμενους και για τις τρεις διαφορετικές τάσεις ο ασβεστίτης ισοκατανέμεται σχεδόν στα δύο προϊόντα PP και PN.

Ενδεικτικά στην ακόλουθη Εικόνα 18 παρουσιάζονται οι ορυκτολογικές αναλύσεις και των τεσσάρων προϊόντων που λήφθησαν κατά το διαχωρισμό του χονδρόκοκκου κοκκομετρικού κλάσματος +53-150μm, με χάλκινο τριβοφορτιστή και τάση 10KV. Όπως φαίνεται το προϊόν NN αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από χαλαζία, το προϊόν PP αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από μαγνησίτη ενώ στα προϊόντα PN και NP υπάρχει αυξημένη περιεκτικότητα σε ασβεστίτη.



Εικόνα 18:Ορυκτολογική ανάλυση των προϊόντων PP, PN, NP και NN

Συγκεντρωτικά από όλες τις παραπάνω δοκιμές παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

- Καλύτερος διαχωρισμός παρατηρήθηκε πάντα με τη χρήση του χονδρόκοκκου προϊόντος +53-150μm έναντι του λεπτόκοκκου -150 μm. Είναι αναμενόμενο στα υλικά που περιέχουν λεπτόκοκκα τεμαχίδια ότι αυτά μπορεί να επικάθονται πάνω στις επιφάνειες των χοδρόκοκκων τεμαχιδίων. Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο εξαρτάται από το φορτίο της επιφάνειας των προς διαχωρισμό τεμαχιδίων. Άρα το δείγμα +53-150μm αφού είχε καθαρότερες επιφάνειες λόγω της έλλειψης λεπτόκοκκων τεμαχιδίων, ήταν αναμενόμενο να δώσει καλύτερα αποτελέσματα.

- Συγκριτικά με τους τρεις διαφορετικούς τριβοφορτιστές που δοκιμάστηκαν παρατηρήθηκε ότι και με τους τρείς ο χαλαζίας κατανέμεται στο αρνητικό προϊόν ενώ τα ανθρακικά ορυκτά του ασβεστίτη και μαγνησίτη κατανέμονται στο θετικό προϊόν κάθε διαχωρισμού. Η χρήση όμως τόσο του ανοξείδωτου όσο και του χάλκινου τριβοφορτιστή έδειξε ότι το ανθρακικό ορυκτό του ασβεστίτη μπορεί να διαχωριστεί από το ανθρακικό ορυκτό του μαγνησίτη αφού συγκεντρώνεται στα δύο προϊόντα PN και NP, με λίγο καλύτερα αποτελέσματα με το χάλκινο. Το ιδιαίτερα σημαντικό γεγονός αυτό δεν παρατηρήθηκε με τη χρήση του πλαστικού τριβοφορτιστή.
- Όσο αναφορά την τάση του διαχωρισμού η χρήση των 10 KV είναι μια ιδιαίτερα ασφαλής επιλογή, αφού σε όλες σχεδόν τις δοκιμές έδινε τα καλύτερα αποτελέσματα από τις δοκιμές των 5 KV και 15 KV
- Συγκεκριμένα στη δοκιμή με το χονδρόκκοκο κλάσμα +53-150μm με χρήση χάλκινου τριβοφορτιστή και τάση 10 KV ανακτήθηκε ένα θετικό προϊόν PP στο οποίο συγκεντρώθηκε το 73% του μαγνησίτη, ένα αρνητικό προϊόν NN στο οποίο συγκεντρώθηκε το 92% του χαλαζία και ένα ενδιάμεσο προϊόν από τη σύνθεση των NP και PN στο οποίο κατανέμεται το 75 % του ασβεστίτη.

Δεύτερη σειρά δοκιμών

Με βάση τα αποτελέσματα της προηγούμενης σειράς δοκιμών σχεδιάστηκε μια δεύτερη σειρά δοκιμών όπου εξετάστηκε η επίδραση που μπορεί να έχουν στον επιτυγχανόμενο διαχωρισμό οι μεταβολές

α) στη παροχή του αέρα

β) στη θέση εισόδου των τεμαχιδίων στο ΗΠ (difusser) και

γ) στη θέση της λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων (splitter).

Σταθεροί παράμετροι σε όλους τους διαχωρισμούς ήταν

α) το υλικό του τριβοφορτιστή (χάλκινος)

β) η κοκκομετρία του προς διαχωρισμού υλικού (-150+53 μm) και

γ) η τάση του ηλεκτροστατικού πεδίου (10 KV) .

Θέση 3-3

Η δεύτερη σειρά δοκιμών ξεκίνησε έχοντας τη θέση εισόδου (difusser) των τεμαχιδίων στο ΗΠ στη θέση 3 καθώς και τη θέση της λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων (splitter) στη θέση 3. Τα αποτελέσματα των διαχωρισμών παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες 19, 20, 21 για τρεις διαφορετικές τιμές της παροχής του αέρα 12.5 L/s,15 L/s και 20 L/s.

Πίνακας 19: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 12.5 L/s

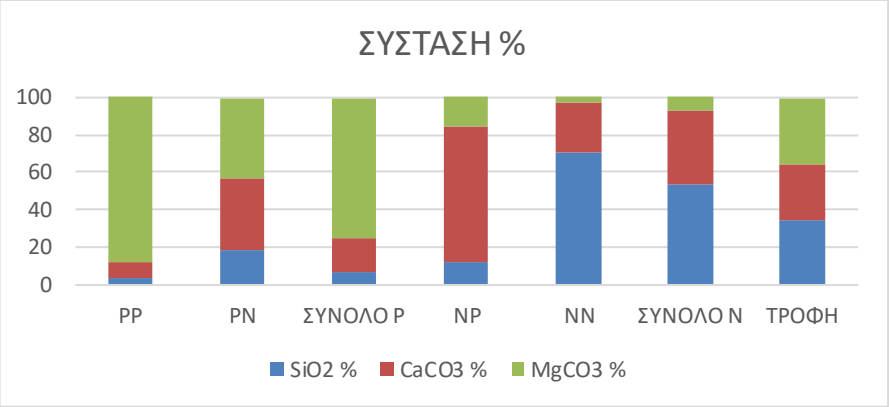
V=10 KV			Σύσταση			ΚΑΤΑΝΟΜΗ %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β %	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	30.36	3	9	88	2.68	9.01	74.97
	PN	11.76	18	39	42	6.24	15.14	13.86
	ΣΥΝΟΛΟ P	*42.13*	*7.2*	*17.4*	*75.2*	*8.93*	*24.15*	*88.83*
N	NP	17.27	12	72	16	6.11	41.02	7.75
	NN	40.61	71	26	3	84.97	34.83	3.42
	ΣΥΝΟΛΟ N	*57.87*	*53.4*	*39.7*	*6.9*	*91.07*	*75.85*	*11.17*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.00**	**33.93**	**30.31**	**35.64**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Πίνακας 20: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 15 L/s

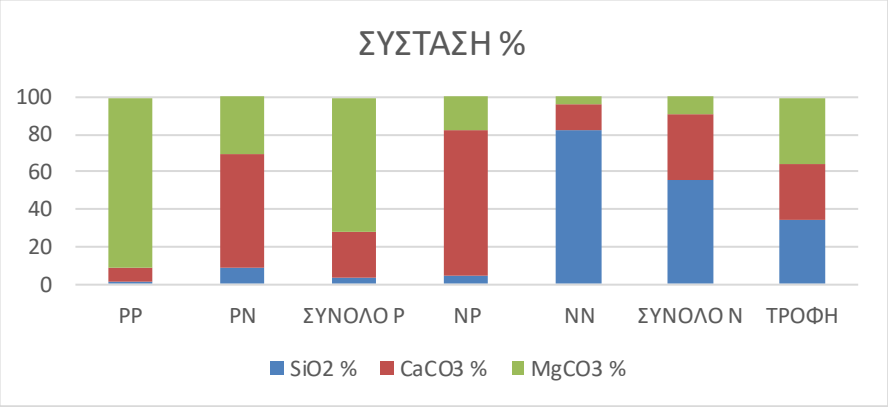
V=10 KV			Σύσταση			ΚΑΤΑΝΟΜΗ %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β %	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	29.04	1	8	90	0.85	7.58	74.06
	PN	13.08	9	61	30	3.46	26.03	11.12
	ΣΥΝΟΛΟ P	*42.12*	*3.48*	*24.46*	*71.37*	*4.32*	*33.62*	*85.17*
N	NP	19.42	5	77	19	2.86	48.81	10.46
	NN	38.46	82	14	4	92.81	17.57	4.36
	ΣΥΝΟΛΟ N	*57.88*	*56.16*	*35.14*	*9.03*	*95.67*	*66.39*	*14.82*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.00**	**33.98**	**30.64**	**35.29**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Πίνακας 21: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 20 L/s

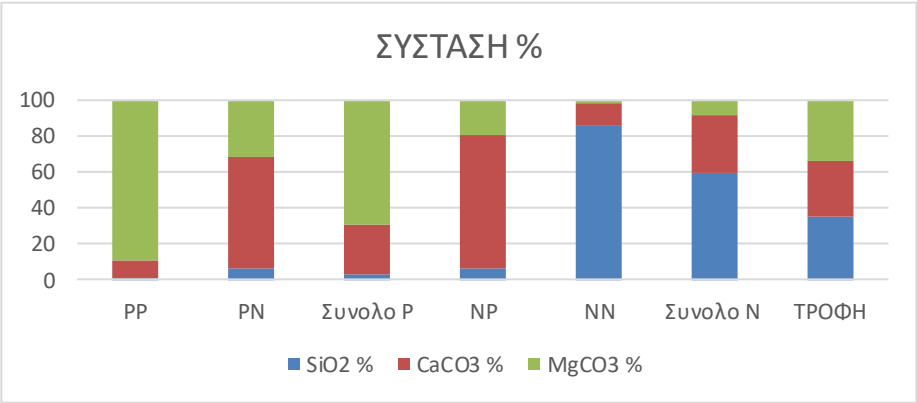
V= 10KV			Σύσταση			Κατανομή %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	B (%)	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	28.2	1	10	89	0.8	9.15	73.5
	PN	15.0	7	62	31	3.0	30.3	13.67
	ΣΥΝΟΛΟ P	*43.2*	*3.09*	*28.1*	*68.81*	*3.8*	*39.5*	*87.2*
N	NP	19.1	7	74	19	3.8	45.84	10.62
	NN	37.7	86	12	2	92.39	14.7	2.21
	ΣΥΝΟΛΟ N	*56.8*	*59.47*	*32.82*	*7.71*	*96.2*	*60.5*	*12.8*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.0**	**35.1**	**30.78**	**34.12**	**100.0**	**100.0**	**100.0**



Διάγραμμα 37:Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 12.5 L/s



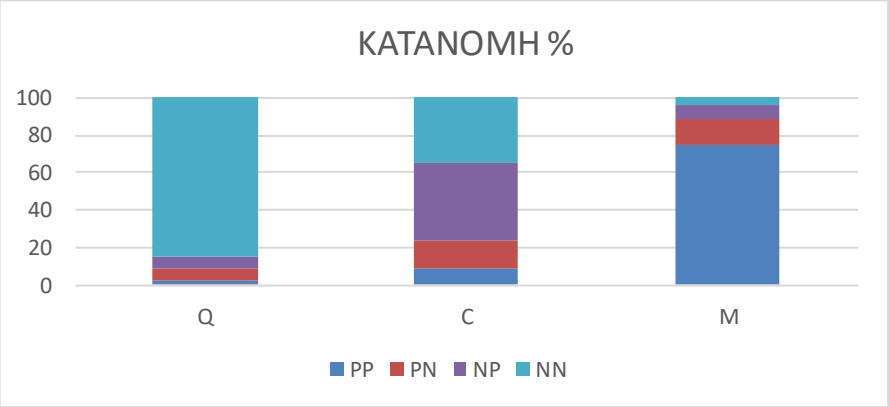
Διάγραμμα 38:Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 15 L/s



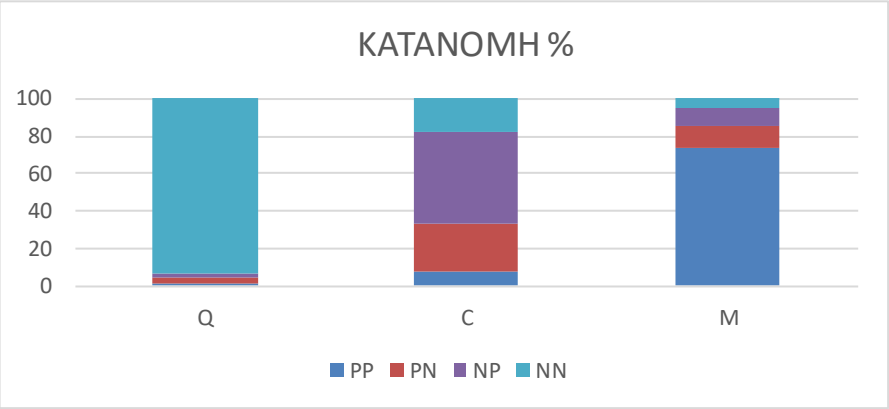
Διάγραμμα 39:Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 20 L/s

Στα παραπάνω Διαγράμματα 37, 38, 39 παριστάνεται γραφικά η % σύσταση της αρχικής τροφοδοσίας, των ενδιάμεσων προϊόντων P και N και των τελικών προϊόντων PP, PN, NP και NN για το διαχωρισμό του χονδρόκοκκου κλάσματος με χάλκινο τριβοφορτιστή και για τις τρείς διαφορετικές τιμές παροχής αέρα που εφαρμόστηκαν. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι ο χαλαζίας συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν, ενώ τα ανθρακικά ορυκτά μαγνησίτης και ασβεστίτης συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν. Συγκριτικά με τις διαφορετικές τιμές παροχής αέρα παρατηρείται ότι ο καλύτερος διαχωρισμός επιτυγχάνεται στη μεγαλύτερη τιμή παροχής αέρα 20 L/s .

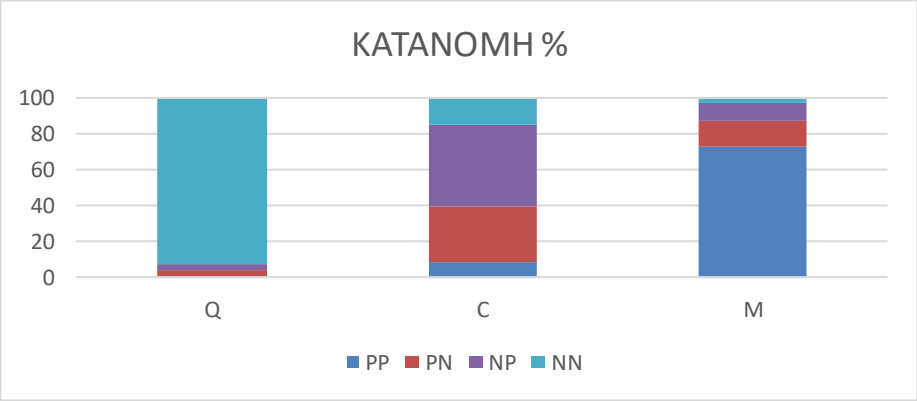
Επιπλέον στα Διαγράμματα 40, 41, 42 παρουσιάζεται η κατανομή των τριών φάσεων Q, C, M στα τέσσερα διαφορετικά προϊόντα για κάθε διαφορετική τιμή παροχής αέρα (PP,PN,NP,NN).



Διάγραμμα 40: Κατανομή των Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 12.5 L/s



Διάγραμμα 41: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 15 L/s



Διάγραμμα 42: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 20 L/s

Ο χαλαζίας κατανέμεται για άλλη μια φορά στο αρνητικό προϊόν (NN) σε τιμές που κυμαίνονται και πάνω από 92%, ενώ ο μαγνησίτης κατανέμεται στο θετικό προϊόν (PP) σε τιμές που δεν ξεπερνούν το 74%. Όσον αφορά τον ασβεστίτη κατανέμεται κυρίως στα αρνητικά προϊόντα (NN,NP) όταν η παροχή του αέρα είναι 12.5 L/s ενώ όταν η παροχή είναι 15 και 20 L/s συγκεντρώνεται κυρίως στα προϊόντα NP και PN.

Θέση 2-2

Η δεύτερη σειρά δοκιμών συνεχίστηκε έχοντας τη θέση εισόδου (difusser) των τεμαχιδίων στο ΗΠ στη θέση 2 (στο κέντρο) καθώς και τη θέση της λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων (splitter) στη θέση 2 (στο κέντρο).Τα αποτελέσματα των διαχωρισμών παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες 22, 23, 24 για τρεις διαφορετικές τιμές της παροχής του αέρα 12.5 L/s,15 L/s και 20 L/s.

Πίνακας 22: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 12.5 L/s

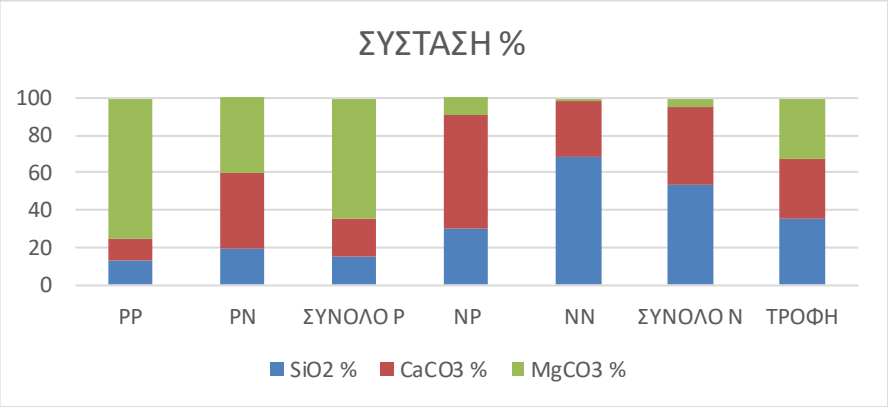
V=10 KV			Σύσταση			ΚΑΤΑΝΟΜΗ %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	B %	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	33.0	13	12	74	12.15	12.39	75.85
	PN	13.56	19	41	41	7.3	17.4	17.27
	ΣΥΝΟΛΟ P	*46.56*	*14.75*	*20.45*	*64.39*	*19.45*	*29.8*	*93.13*
N	NP	21.66	30	61	9	18.41	41.35	6.06
	NN	31.78	69	29	1	62.12	28.85	0.99
	ΣΥΝΟΛΟ N	*53.44*	*53.19*	*41.97*	*4.24*	*80.53*	*70.2*	*7.04*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.00**	**35.29**	**31.95**	**32.24**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Πίνακας 23: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 15 L/s

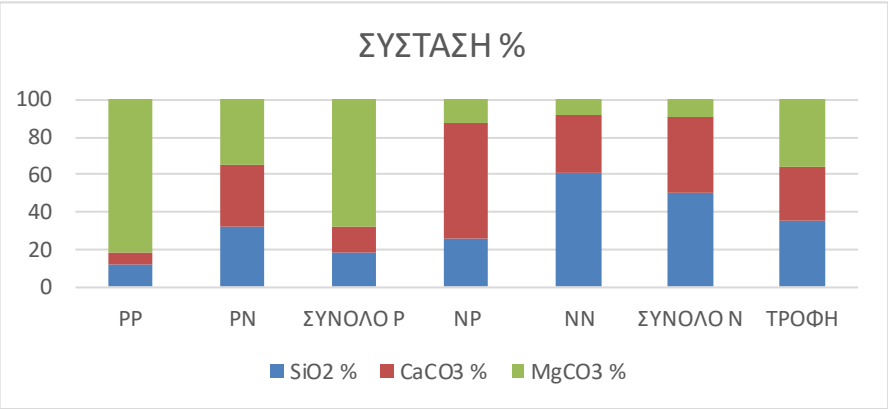
V=10 KV			Σύσταση			ΚΑΤΑΝΟΜΗ %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β %	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	31.85	12	6	82	10.73	6.73	72.6
	PN	13.91	32	33	35	12.49	16.18	13.53
	ΣΥΝΟΛΟ P	*45.77*	*18.08*	*14.21*	*67.71*	*23.22*	*22.91*	*86.13*
N	NP	16.33	26	62	12	11.91	35.68	5.45
	NN	37.9	61	31	8	64.87	41.4	8.43
	ΣΥΝΟΛΟ N	*54.23*	*50.46*	*40.33*	*9.2*	*76.79*	*77.08*	*13.87*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.00**	**35.64**	**28.38**	**35.98**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Πίνακας 24: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 20 L/s

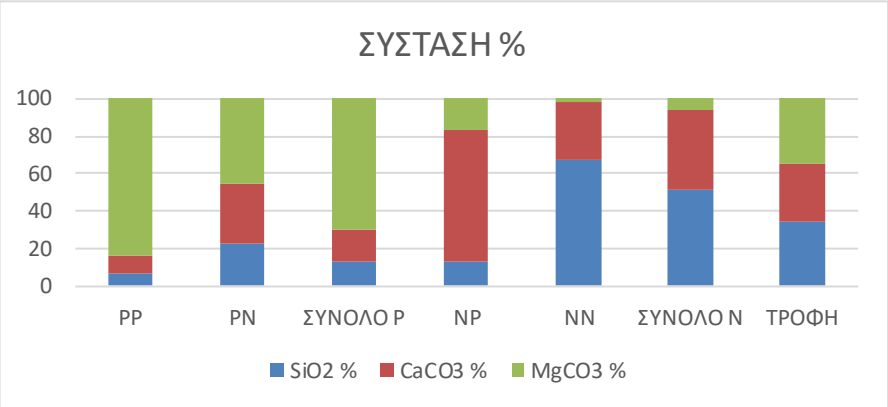
V=10 KV			Σύσταση			ΚΑΤΑΝΟΜΗ %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β %	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	28.36	7	9	85	5.73	8.2	69.84
	PN	15.32	23	32	45	10.18	15.75	19.97
	ΣΥΝΟΛΟ P	*43.69*	*12.61*	*17.07*	*70.97*	*15.91*	*23.95*	*89.82*
N	NP	15.94	13	70	17	5.98	35.85	7.85
	NN	40.37	67	31	2	78.11	40.2	2.34
	ΣΥΝΟΛΟ N	*56.31*	*51.71*	*42.04*	*6.25*	*84.1*	*76.05*	*10.19*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.00**	**34.63**	**31.13**	**34.52**	**100.00**	**100.00**	**100.00**



Διάγραμμα 43:Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 12.5 L/s



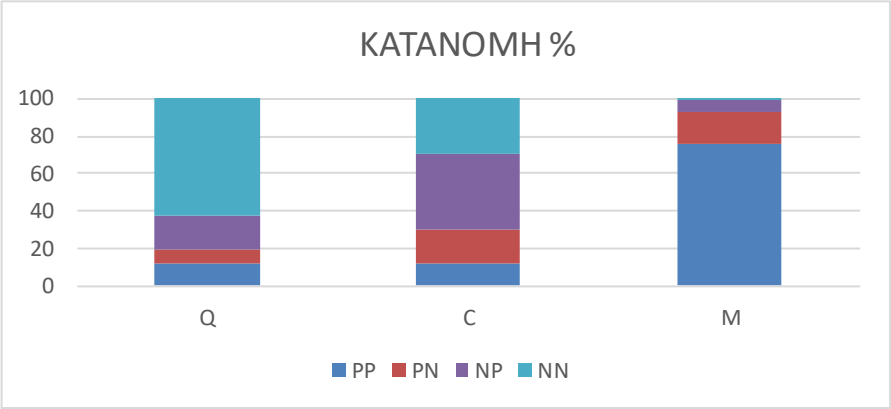
Διάγραμμα 44:Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 15 L/s



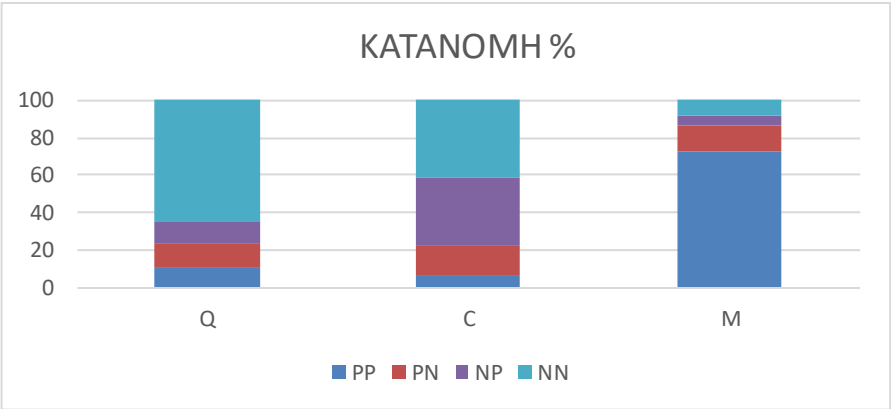
Διάγραμμα 45:Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 20 L/s

Στα παραπάνω Διαγράμματα 43, 44, 45 παριστάνεται γραφικά η % σύσταση της αρχικής τροφοδοσίας, των ενδιάμεσων προϊόντων P και N και των τελικών προϊόντων PP, PN, NP και NN για το διαχωρισμό του χονδρόκοκκου κλάσματος με χάλκινο τριβοφορτιστή και για τις τρείς διαφορετικές τιμές παροχής αέρα που εφαρμόστηκαν. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι ο χαλαζίας και ο ασβεστίτης συγκεντρώνονται στο αρνητικό προϊόν, ενώ ο μαγνησίτης συγκεντρώνεται στο θετικό προϊόν.

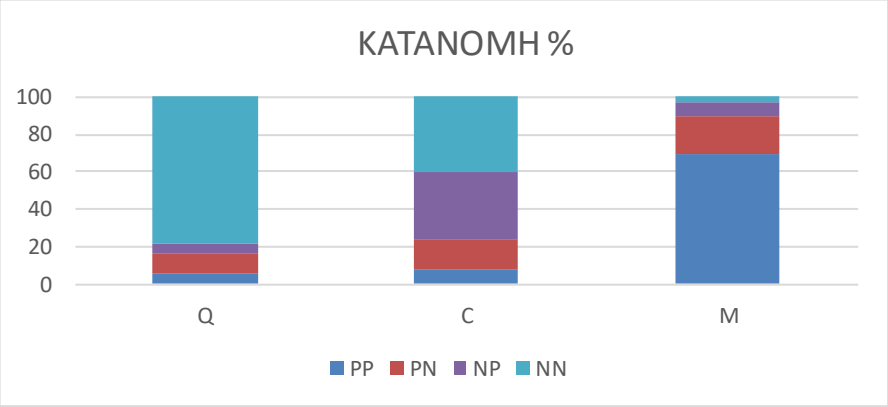
Επιπλέον στα Διαγράμματα 46, 47, 48 παρουσιάζεται η κατανομή των τριών φάσεων Q, C, M στα τέσσερα διαφορετικά προϊόντα για κάθε διαφορετική τιμή παροχής αέρα (PP,PN,NP,NN).



Διάγραμμα 46: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 12.5 L/s



Διάγραμμα 47: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 15 L/s



Διάγραμμα 48: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 20 L/s

Ο χαλαζίας κατανέμεται για άλλη μια φορά στο αρνητικό προϊόν (NN) σε τιμές που κυμαίνονται από 62-78%, ενώ ο μαγνησίτης κατανέμεται στο θετικό προϊόν (PP) σε τιμές που δεν ξεπερνούν το 75%. Όσον αφορά τον ασβεστίτη, σχεδόν απουσιάζει από το θετικό προϊόν (PP) ενώ συγκεντρώνεται στα αρνητικά προϊόντα μαζί με το χαλαζία. Συγκριτικά με τις τρεις διαφορετικές τιμές παροχής αέρα παρατηρείται ότι ο καλύτερος διαχωρισμός επιτυγχάνεται στη μεγαλύτερη τιμή παροχής αέρα 20 L/s για το χαλαζία ενώ σχετικά με το μαγνησίτη αυτός διαχωρίζεται καλύτερα στη μικρότερη παροχή αέρα 12,5 L/s.

Θέση 1-1

Η δεύτερη σειρά δοκιμών συνεχίστηκε έχοντας τη θέση εισόδου (difusser) των τεμαχιδίων στο ΗΠ στη θέση 1 καθώς και τη θέση της λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων (splitter) στη θέση 1. Τα αποτελέσματα των διαχωρισμών παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες 25 και 26 για δύο διαφορετικές τιμές της παροχής του αέρα 15 L/s και 20 L/s.

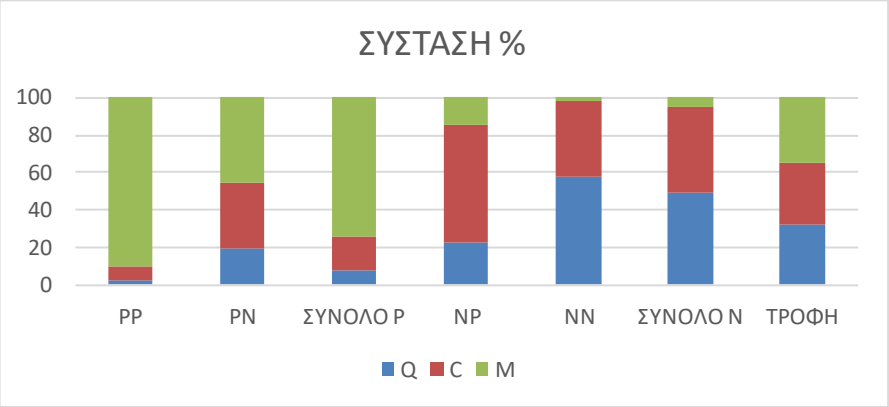
Πίνακας 25: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 15 L/s

V=10 KV			Σύσταση			ΚΑΤΑΝΟΜΗ %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β %	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	27.54	2	8	90	1.72	6.54	72.17
	PN	15.11	19	36	45	8.98	16.15	19.81

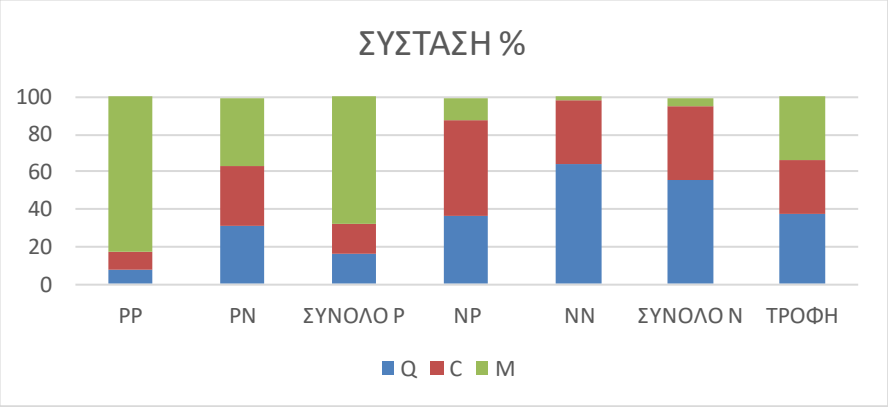
	ΣΥΝΟΛΟ Ρ	*42.65*	*8.02*	*17.92*	*74.05*	*10.7*	*22.7*	*91.97*
N	NP	13.46	23	63	14	9.68	25.17	5.49
	NN	43.89	58	40	2	79.63	52.13	2.56
	ΣΥΝΟΛΟ Ν	*57.35*	*49.79*	*45.4*	*4.82*	*89.31*	*77.3*	*8.04*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.00**	**31.98**	**33.68**	**34.34**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Πίνακας 26: Αποτελέσματα διαχωρισμού κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 20 L/s

V=10 KV			Σύσταση			ΚΑΤΑΝΟΜΗ %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	Β %	Q	C	M	Q	C	M
Ρ	PP	30	8	9	84	6.34	9.33	75.95
	PN	15.32	31	32	36	12.54	16.93	16.62
	ΣΥΝΟΛΟ Ρ	*45.32*	*15.77*	*16.77*	*67.77*	*18.88*	*26.26*	*92.57*
N	NP	15.32	36	52	11	14.57	27.52	5.08
	NN	39.36	64	34	2	66.54	46.23	2.37
	ΣΥΝΟΛΟ Ν	*54.68*	*56.16*	*39.04*	*4.52*	*81.11*	*73.74*	*7.45*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.00**	**37.86**	**28.95**	**33.19**	**100.00**	**100.00**	**100.00**



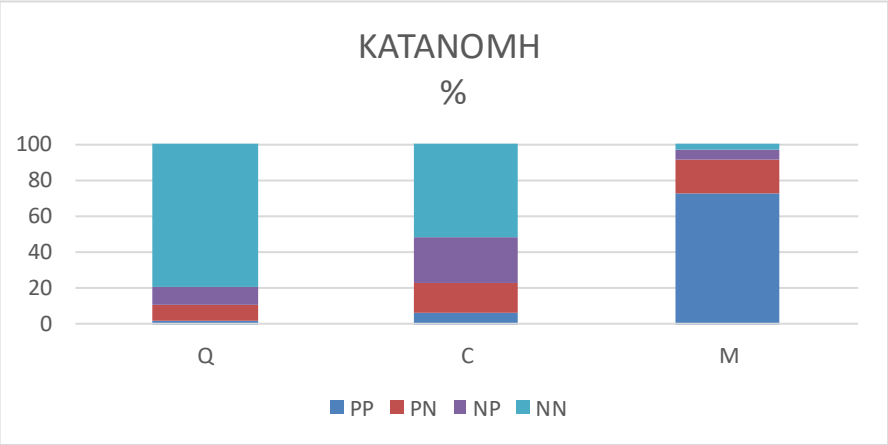
Διάγραμμα 49:Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 15 L/s



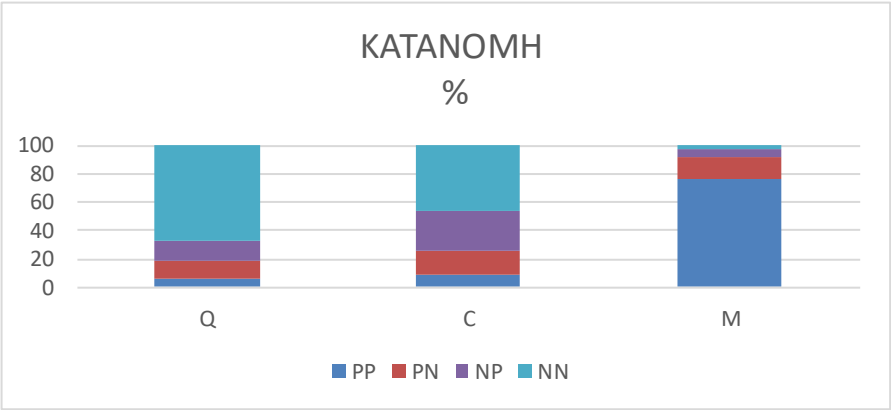
Διάγραμμα 50:Σύσταση προϊόντων κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 20 L/s

Στα παραπάνω Διαγράμματα 49 και 50 παριστάνεται γραφικά η % σύσταση της αρχικής τροφοδοσίας, των ενδιάμεσων προϊόντων P και N και των τελικών προϊόντων PP, PN, NP και NN για το διαχωρισμό του χονδρόκοκκου κλάσματος με χάλκινο τριβοφορτιστή και για τις δύο διαφορετικές τιμές παροχής αέρα που εφαρμόστηκαν. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι ο χαλαζίας συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν μαζί με τον ασβεστίτη, ενώ ο μαγνησίτης συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν.

Επιπλέον στα Διαγράμματα 51, 52 παρουσιάζεται η κατανομή των τριών φάσεων Q, C, M στα τέσσερα διαφορετικά προϊόντα για τις δύο διαφορετικές τιμές παροχής του αέρα (PP,PN,NP,NN).



Διάγραμμα 51: Κατανομή Q-C-M -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 15 L/s



Διάγραμμα 52: Κατανομή Q-C-M κλάσματος -150+53 μm με χάλκινο τριβοφορτιστή για τάση 10 KV και παροχή αέρα 20 L/s

Ο χαλαζίας κατανέμεται για άλλη μια φορά στο αρνητικό προϊόν (NN) σε τιμές που κυμαίνονται από 66-79%, ενώ ο μαγνησίτης κατανέμεται στο θετικό προϊόν (PP) σε τιμές που δεν ξεπερνούν το 75%. Όσον αφορά τον ασβεστίτη η συμμετοχή του στο θετικό προϊόν (PP) είναι μικρή, ενώ κατανέμεται στα τρία υπόλοιπα προϊόντα. Πιο συγκεκριμένα, στο διαχωρισμό και για τις δύο διαφορετικές τιμές παροχών αέρα ο ασβεστίτης κατανέμεται κατά το ήμισυ στο αρνητικό προϊόν (NN) και το υπόλοιπο μισό ποσοστό του ισοκατανέμεται στα δύο προϊόντα (PN,NP). Συγκριτικά με τις δύο διαφορετικές τιμές παροχής αέρα παρατηρείται ότι ο καλύτερος διαχωρισμός επιτυγχάνεται στη μικρότερη τιμή παροχής αέρα 15 L/s για το χαλαζία ενώ σχετικά με το μαγνησίτη αυτός διαχωρίζεται καλύτερα σε παροχή αέρα 20 L/s.

Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών παρατηρήθηκε ότι το αποτέλεσμα του διαχωρισμού μεταβάλλεται ανάλογα τη σχετική θέση που έχει οριστεί για το σημείο εισόδου στο πεδίο των τεμαχιδίων και το σημείο λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων. Συγκεκριμένα όταν τόσο η θέση εισόδου όσο και η θέση λεπίδας είναι κοντά στο αρνητικό ηλεκτρόδιο (Θέση 3-3) τότε τα ανθρακικά ορυκτά συνυπάρχουν στα θετικά προϊόντα με εξαίρεση την παροχή αέρα των 12,5 L/s. Στις άλλες δύο περιπτώσεις (Θέση 2-2 και 1-1) ο ασβεστίτης συνυπάρχει με το χαλαζία στα αρνητικά προϊόντα του διαχωρισμού.

Τρίτη σειρά δοκιμών

Μέχρι τώρα έχουν παρουσιαστεί δοκιμές διαχωρισμού όπου η θέση εισόδου στο πεδίο της τροφοδοσίας και η θέση λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων ήταν σχεδόν σε κατακόρυφη διάταξη (Εικόνα 17). Πραγματοποιήθηκαν δύο επιπλέον δοκιμές με θέση εισόδου στο πεδίο της τροφοδοσίας και θέση λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων ήταν σχεδόν σε διαγώνια διάταξη, κρατώντας σταθερές τις ακόλουθες παραμέτρους:

α) το υλικό του τριβοφορτιστή (χάλκινος)

β) η κοκκομετρία του προς διαχωρισμού υλικού (-150+53 μm)

γ) η τάση του ηλεκτροστατικού πεδίου (10 KV) και

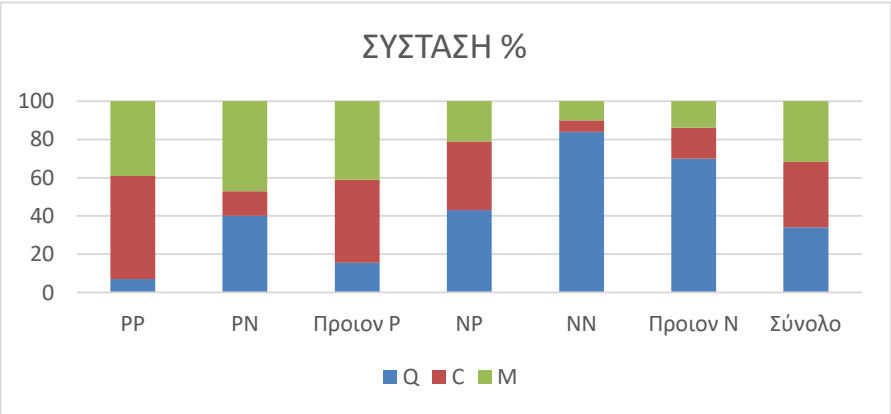
δ) η παροχή του αέρα (15-16 L/s).

D3-S1

Στην πρώτη δοκιμή ορίστηκε η θέση εισόδου (difusser) των τεμαχιδίων στο ΗΠ στη θέση 3, ενώ η θέση της λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων (splitter) στη θέση 1. Τα αποτελέσματα του διαχωρισμού παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 27, ενώ η % σύσταση της αρχικής τροφοδοσίας, των ενδιάμεσων προϊόντων P και N και των τελικών προϊόντων PP, PN, NP και NN παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 53.

Πίνακας 27: Αποτελέσματα διαχωρισμού για θέση εισόδου 3 και θέση λεπίδας διαχωρισμού προϊόντων 1.

V=10 KV			Σύσταση			ΚΑΤΑΝΟΜΗ %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	B %	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	48.95	7	54	39	10.06	77.3	60.11
	PN	16.95	40	13	47	19.91	6.44	25.08
	ΣΥΝΟΛΟ P	*65.9*	*15.49*	*43.46*	*41.06*	*29.97*	*83.74*	*85.19*
N	NP	11.72	43	36	21	14.79	12.33	7.75
	NN	22.38	84	6	10	55.22	3.93	7.05
	ΣΥΝΟΛΟ N	*34.1*	*69.91*	*16.31*	*13.78*	*70.02*	*16.26*	*14.79*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.00**	**34.05**	**34.2**	**31.76**	**100.00**	**100.00**	**100.00**



Διάγραμμα 53:Σύσταση προϊόντων διαχωρισμού για θέση εισόδου 3 και θέση λεπίδας διαχωρισμού προϊόντων 1

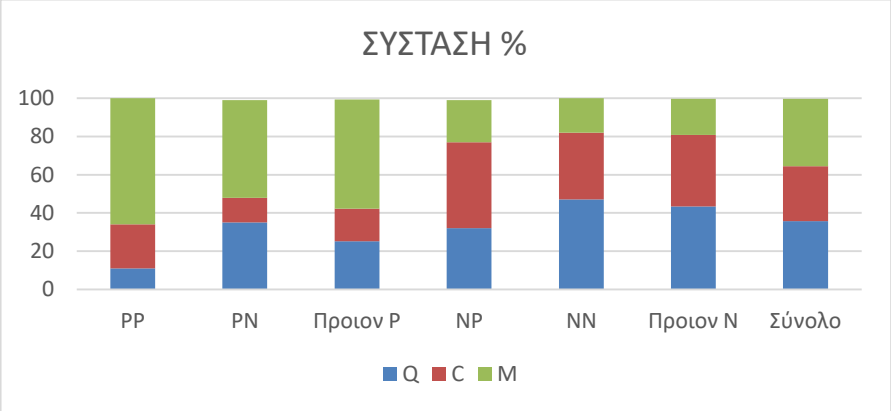
Από το διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι ο χαλαζίας ενώ συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν εμφανίζεται όμως με αυξημένες συγκεντρώσεις και στα θετικά προϊόντα. Αντίστροφα και τα ανθρακικά ορυκτά μαγνησίτης και ασβεστίτης ενώ συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν εμφανίζονται όμως με αυξημένες συγκεντρώσεις και στα αρνητικά προϊόντα.

D1-S3

Στη δεύτερη δοκιμή ορίστηκε η θέση εισόδου των τεμαχιδίων στο ΗΠ στη θέση 1, ενώ η θέση της λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων στη θέση 3. Τα αποτελέσματα του διαχωρισμού παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 28, ενώ η % σύσταση της αρχικής τροφοδοσίας, των ενδιάμεσων προϊόντων P και N και των τελικών προϊόντων PP, PN, NP και NN παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 54.

Πίνακας 28: Αποτελέσματα διαχωρισμού για θέση εισόδου 1 και θέση λεπίδας διαχωρισμού προϊόντων 3.

V=10 KV			Σύσταση			ΚΑΤΑΝΟΜΗ %		
ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΙΟΝ	B %	Q	C	M	Q	C	M
P	PP	17.41	11	23	66	5.37	13.9	32.7
	PN	24.94	35	13	51	24.49	11.25	36.2
	ΣΥΝΟΛΟ P	*42.35*	*25.13*	*17.11*	*57.17*	*29.86*	*25.15*	*68.9*
N	NP	13.88	32	45	22	12.46	21.68	8.69
	NN	43.76	47	35	18	57.7	53.17	22.42
	ΣΥΝΟΛΟ N	*57.65*	*43.39*	*37.41*	*18.96*	*70.16*	*74.85*	*31.11*
Σύνολο	**ΤΡΟΦΗ**	**100.00**	**35.66**	**28.81**	**35.14**	**100.00**	**100.00**	**100.00**



Διάγραμμα 54:Σύσταση προϊόντων διαχωρισμού για θέση εισόδου 1 και θέση λεπίδας διαχωρισμού προϊόντων 3

Από το διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι ο χαλαζίας δεν συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν (NN) ενώ εμφανίζεται με ιδιαίτερα αυξημένες συγκεντρώσεις σε όλα τα προϊόντα. Αντίστροφα τα ανθρακικά ορυκτά μαγνησίτης και ασβεστίτης ενώ συγκεντρώνονται στο θετικό προϊόν (PP) εμφανίζονται όμως με ιδιαίτερα αυξημένες συγκεντρώσεις και στα αρνητικά προϊόντα.

Αξιολόγηση διαχωρισμών

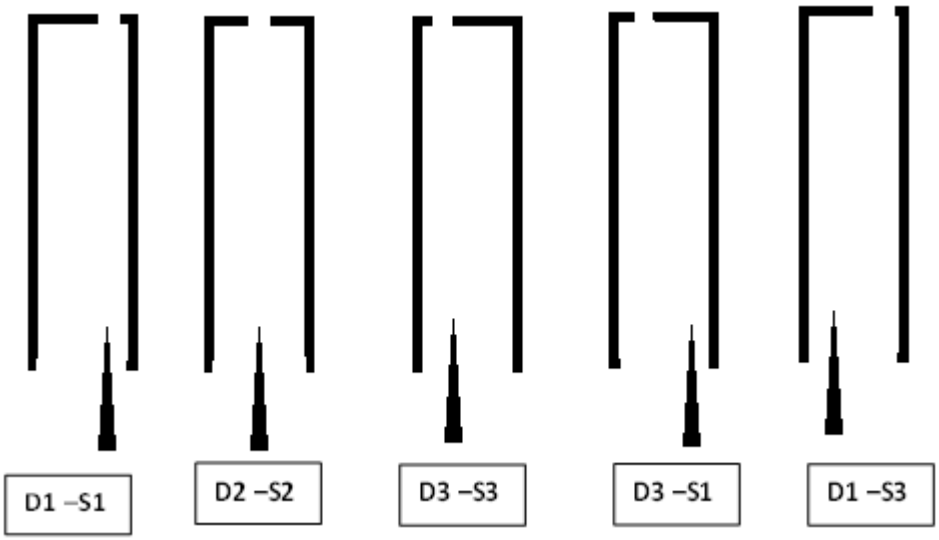
Συγκεντρώνοντας τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν συνολικά στο χονδρόκκοκο κοκκομετρικό κλάσμα +53-150 μm, με χάλκινο τριβοφορτιστή σε τάση πεδίου 10 KV, και παροχή αέρα 15 L/s, και με διαφοροποίηση μόνο στην κατανομή των θέσεων εισόδου στο ηλεκτρικό πεδίο της τροφοδοσίας και λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων, υπολογίστηκε ο βαθμός διαχωρισμού χωριστά για χαλαζία, ασβεστίτη και μαγνησίτη με σκοπό τον προσδιορισμό του βαθμού επιτυχίας του επιτυγχανόμενου διαχωρισμού.

Ο βαθμός διαχωρισμού **n** είναι εξ ορισμού το μέτρο αξιολόγησης του βαθμού επιτυχίας του. Υπολογίζεται χωριστά για κάθε διαφορετική φάση (στοιχείο ή ορυκτό) που συμμετέχει στο διαχωρισμό, συναρτήσει των % σύστασης της κάθε φάσης, της τροφής **f**, του συμπυκνώματος **c**, και του απορρίμματος **t**, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση (Σταμπολιάδης, 2008):

$$n = \frac{(f-t)*(c-f)*100}{(c-t)*(100-f)*f}*100$$

Για την πληρέστερη κατανόηση των συνθηκών διαχωρισμού παρουσιάζονται στη ακόλουθη Εικόνα 19 σχηματικά οι σχετικές θέσεις εισόδου στο ηλεκτρικό πεδίο της τροφοδοσίας και

λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων για κάθε ένα συνδυασμό που επιλέχθηκε(D1-S1, D2-S2, D3-S3, D3-S1, D1-S3).



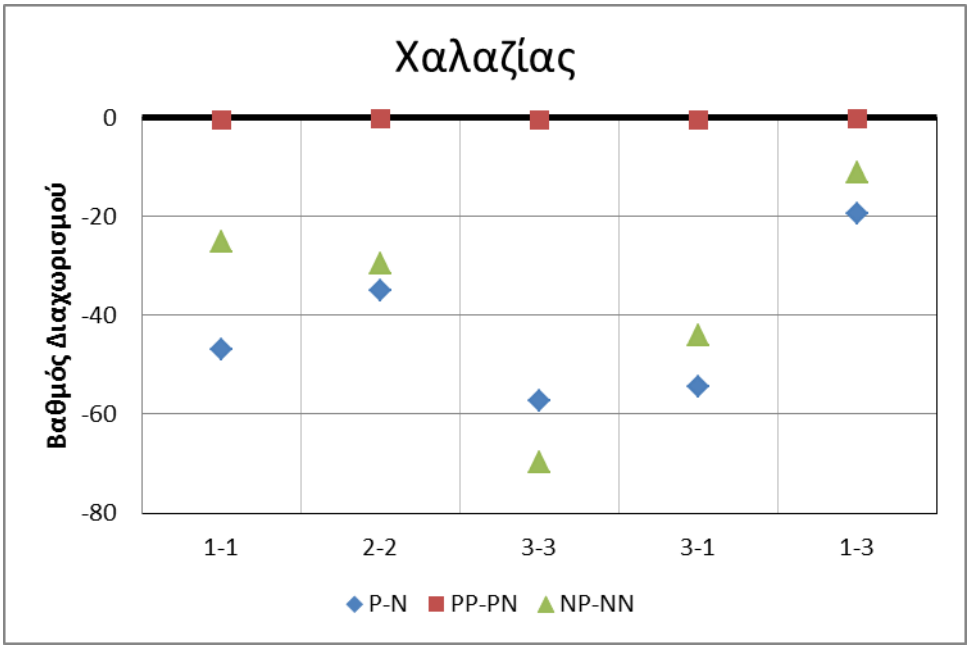
Εικόνα 19: Σχετικές θέσεις εισόδου στο ηλεκτρικό πεδίο της τροφοδοσίας και λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του βαθμού διαχωρισμού που υπολογίστηκαν από τις αντίστοιχες τιμές των συστάσεων των φάσεων για κάθε μία από τις τρεις φάσεις (χαλαζίας, μαγνησίτης και ασβεστίτης) που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 29: Τιμές Βαθμού Διαχωρισμού για κάθε φάση

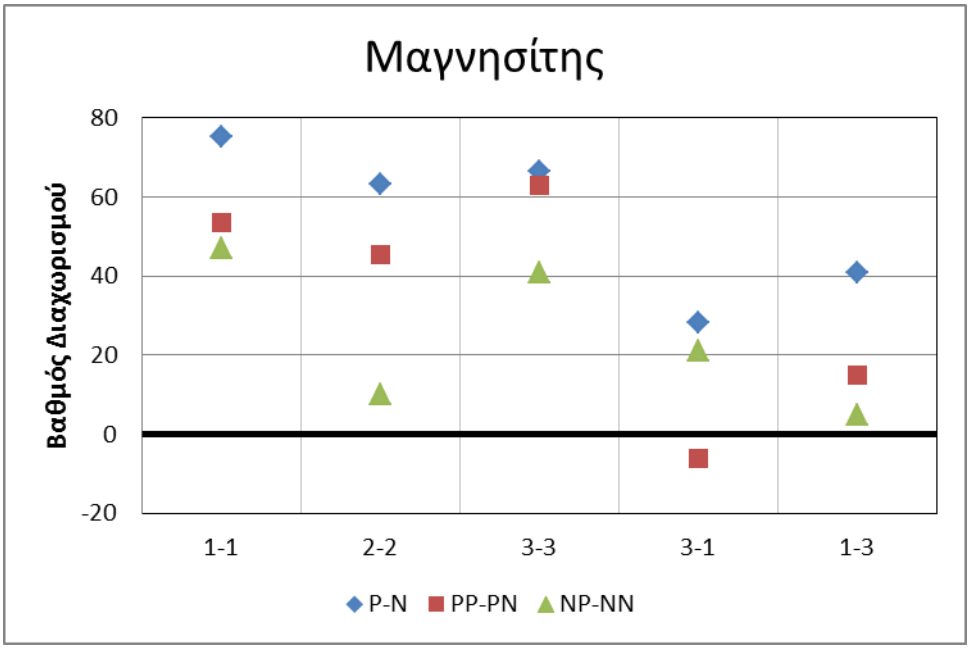
Σχετική θέση	**Χαλαζίας**			**Μαγνησίτης**			**Ασβεστίτης**		
	P-N	**PP-PN**	**NP-NN**	**P-N**	**PP-PN**	**NP-NN**	**P-N**	**PP-PN**	**NP-NN**
D1-S1	-47.0	-0.53	-25.14	75.1	53.58	47.01	-30.1	-43.55	16.66
D2-S2	-35.0	-0.29	-29.46	63.0	45.48	10.07	-31.9	-46.87	27.11
D3-S3	-57.2	-0.51	-69.73	66.5	62.87	40.70	-12.3	-61.42	61.63
D3-S1	-54.5	-0.48	-43.96	28.3	-6.31	20.88	27.1	31.87	49.57
D1-S3	-19.4	-0.31	-11.16	40.9	14.83	4.76	-24.2	17.07	7.81

Στα Διαγράμματα 55, 56, 57 παριστάνονται οι τιμές του βαθμού διαχωρισμού που υπολογίστηκαν σε κάθε μία από τις διαφορετικές σχετικές θέσεις που δοκιμάστηκαν για το χαλαζία, το μαγνησίτη και τον ασβεστίτη αντίστοιχα.



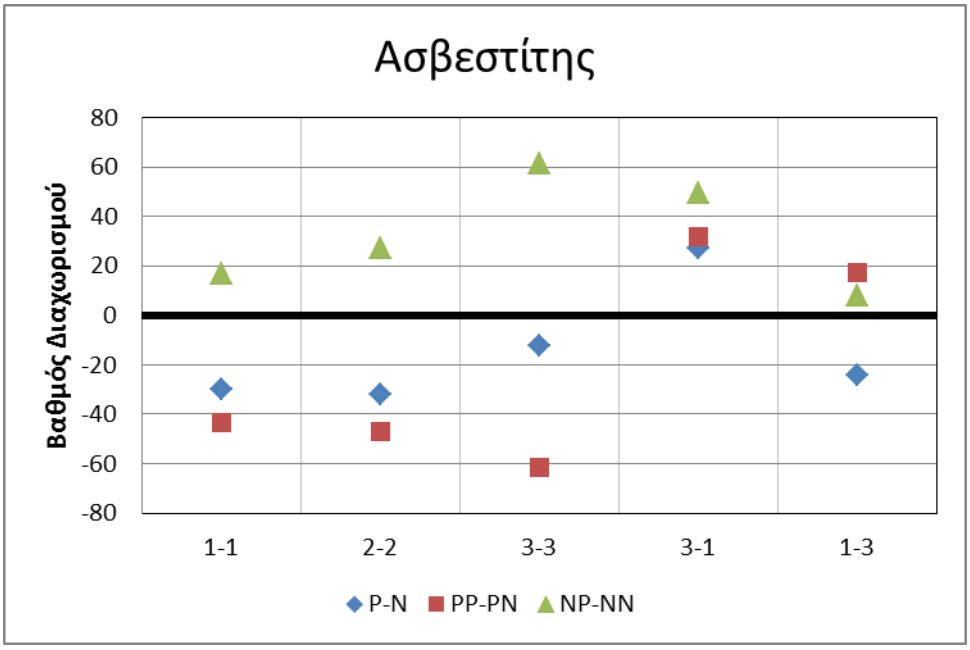
Διάγραμμα 55: Βαθμός διαχωρισμού σε κάθε μία από τις διαφορετικές σχετικές θέσεις για το χαλαζία,

Σύμφωνα με το διάγραμμα ο χαλαζίας συγκεντρώνεται πάντα στο αρνητικό προϊόν σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Οι υψηλότερες τιμές του βαθμού διαχωρισμού για το χαλαζία παρατηρούνται στον πρώτο διαχωρισμό της αρχικής τροφής (P-N) σχεδόν σε όλους τους συνδυασμούς των θέσεων εισόδου και εξόδου που δοκιμάστηκαν. Επιπλέον αντίστοιχα καλός διαχωρισμός παρατηρείται και στο διαχωρισμό (NP-NN) του αρχικά αρνητικού προϊόντος N, δηλαδή ενός υλικού με υψηλή αρχική περιεκτικότητα σε χαλαζία. Από την άλλη μεριά σχεδόν μηδενικές τιμές του βαθμού διαχωρισμού υπολογίστηκαν κατά το διαχωρισμό (PP-PN) του αρχικά θετικού προϊόντος P, δηλαδή του υλικού με χαμηλή αρχική περιεκτικότητα σε χαλαζία, σε όλες τις θέσεις που ελέγχθηκαν. Αυτό σημαίνει ότι για να μπορεί να διαχωριστεί ικανοποιητικά ο χαλαζίας με τη μέθοδο αυτή πρέπει το προς διαχωρισμό υλικό να μην περιέχει μικρή περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε χαλαζία. Τέλος, φαίνεται ότι ιδιαίτερα καλός διαχωρισμός επιτυγχάνεται στο συνδυασμό θέσεων 3-3, δηλαδή σε θέση εισόδου τροφής και θέση λεπίδας διαχωρισμού προϊόντων κοντά στο αρνητικό ηλεκτρόδιο του ηλεκτρικού πεδίου.



Διάγραμμα 56: Βαθμός διαχωρισμού σε κάθε μία από τις διαφορετικές σχετικές θέσεις για το μαγνησίτη

Σύμφωνα με το διάγραμμα ο μαγνησίτης συγκεντρώνεται σχεδόν πάντα στο θετικό προϊόν στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, με εξαίρεση μία μόνο δοκιμή που με μικρή τιμή του βαθμού διαχωρισμού (6,31) φαίνεται ότι συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν. Οι υψηλότερες τιμές του βαθμού διαχωρισμού για το μαγνησίτη παρατηρούνται στο πρώτο διαχωρισμό της αρχικής τροφής (P-N) σε όλους τους συνδυασμούς των θέσεων εισόδου και εξόδου που δοκιμάστηκαν. Επιπλέον αντίστοιχα καλός διαχωρισμός παρατηρείται και στο διαχωρισμό (PP-PN) του αρχικά θετικού προϊόντος P, δηλαδή του υλικού με υψηλή αρχική περιεκτικότητα σε μαγνησίτη, σχεδόν σε όλες τις θέσεις που ελέγχθηκαν. Από την άλλη μεριά χαμηλότερες τιμές βαθμού διαχωρισμού υπολογίστηκαν κατά το διαχωρισμό (NP-NN) του αρχικά αρνητικού προϊόντος N, δηλαδή ενός υλικού με χαμηλότερη αρχική περιεκτικότητα σε μαγνησίτη. Και για το μαγνησίτη φαίνεται ότι ιδιαίτερα καλός διαχωρισμός επιτυγχάνεται στο συνδυασμό θέσεων 3-3, δηλαδή σε θέση εισόδου τροφής και θέση λεπίδας διαχωρισμού προϊόντων κοντά στο αρνητικό ηλεκτρόδιο του ηλεκτρικού πεδίου.



Διάγραμμα 57: Βαθμός διαχωρισμού σε κάθε μία από τις διαφορετικές σχετικές θέσεις για τον ασβεστίτη.

Τέλος όσον αναφορά το διαχωρισμό του ασβεστίτη σύμφωνα με το διάγραμμα αυτός συγκεντρώνεται άλλοτε στο θετικό προϊόν και άλλοτε στο αρνητικό προϊόν στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Χαμηλές τιμές του βαθμού διαχωρισμού εμφανίζονται στον πρώτο διαχωρισμό της αρχικής τροφής (P-N) σχεδόν σε όλους τους συνδυασμούς των θέσεων εισόδου και εξόδου που δοκιμάστηκαν, που σημαίνει ότι ο ασβεστίτης δεν διαχωρίζεται τόσο ικανοποιητικά αρχικά. Αρκετά καλός διαχωρισμός όμως επιτυγχάνεται τόσο στο διαχωρισμό (PP-PN) του αρχικά θετικού προϊόντος P, όπου ο ασβεστίτης συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν, όσο και στο διαχωρισμό (NP-NN) του αρχικά αρνητικού προϊόντος N, όπου στην περίπτωση αυτή ο ασβεστίτης συγκεντρώνεται στο θετικό προϊόν. Τέλος, και για τον ασβεστίτη παρατηρείται ότι ιδιαίτερα καλός διαχωρισμός επιτυγχάνεται στο συνδυασμό θέσεων 3-3, δηλαδή σε θέση εισόδου τροφής και θέση λεπίδας διαχωρισμού προϊόντων κοντά στο αρνητικό ηλεκτρόδιο του ηλεκτρικού πεδίου.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η δυνατότητα εμπλουτισμού σύνθετων πυριτικών και ανθρακικών δειγμάτων με τη μέθοδο του τριβοηλεκτροστατικού διαχωρισμού. Ειδικότερα εξετάστηκε η επιτυχία του διαχωρισμού μεταβάλλοντας παραμέτρους ως προς το υλικό του τριβοφορτιστή, την κοκκομετρία του υλικού τροφοδοσίας, την τάση του ηλεκτροστατικού πεδίου, την παροχή αέρα και τη σχετική θέση εισόδου και εξόδου των τεμαχιδίων στο πεδίο.

Από τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν παρατηρήθηκε ότι ο χαλαζίας κατά την τριβοηλεκτροφόρτιση αποκτά αρνητικό φορτίο και συγκεντρώνεται στο αρνητικό προϊόν σε αντίθεση με το ανθρακικό ορυκτό του μαγνησίτη που αποκτά θετικό φορτίο και συγκεντρώνεται στο θετικό προϊόν. Το ανθρακικό ορυκτό του ασβεστίτη στις περισσότερες δοκιμές εμφανιζόταν μαζί με το μαγνησίτη στα θετικά προϊόντα αλλά και σε κάποιες άλλες συνυπήρχε με το χαλαζία στα αρνητικά προϊόντα.

Ο καλύτερος διαχωρισμός παρατηρήθηκε πάντα με τη χρήση του χονδρόκοκκου προϊόντος +53-150μm έναντι του λεπτόκοκκου -150 μm. Είναι αναμενόμενο στα υλικά που περιέχουν λεπτόκοκκα τεμαχίδια ότι αυτά μπορεί να επικάθονται πάνω στις επιφάνειες των χοδρόκοκκων τεμαχιδίων. Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο εξαρτάται από το φορτίο της επιφάνειας των προς διαχωρισμό τεμαχιδίων. Άρα το δείγμα +53-150μm που είχε καθαρότερες επιφάνειες λόγω της μη προσκόλησης λεπτόκοκκων τεμαχιδίων, ήταν αναμενόμενο να δώσει καλύτερα αποτελέσματα.

Συγκριτικά με τους τρεις διαφορετικούς τριβοφορτιστές που δοκιμάστηκαν σε παροχή αέρα 20 L/s και σχετική θέση εισόδου στο ηλεκτρικό πεδίο της τροφοδοσίας και λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων D3-S3 παρατηρήθηκε ότι και με τους τρείς ο χαλαζίας κατανέμεται στο αρνητικό προϊόν ενώ τα ανθρακικά ορυκτά του ασβεστίτη και μαγνησίτη κατανέμονται στο θετικό προϊόν κάθε διαχωρισμού. Η χρήση όμως τόσο του ανοξείδωτου όσο και του χάλκινου τριβοφορτιστή έδειξε ότι το ανθρακικό ορυκτό του ασβεστίτη μπορεί να διαχωριστεί από το ανθρακικό ορυκτό του μαγνησίτη αφού συγκεντρώνεται στα δύο προϊόντα PN και NP, με λίγο καλύτερα αποτελέσματα με τον χάλκινο τριβοφορτιστή. Το ιδιαίτερα σημαντικό γεγονός αυτό δεν παρατηρήθηκε με τη χρήση του πλαστικού τριβοφορτιστή.

Όσο αναφορά την τάση του διαχωρισμού η χρήση των 10 KV είναι μια ιδιαίτερα ασφαλής επιλογή, αφού σε όλες σχεδόν τις δοκιμές έδινε καλύτερα αποτελέσματα από τις δοκιμές των 5 KV και 15 KV.

Συγκεκριμένα στη δοκιμή με το χονδρόκκοκο κλάσμα +53-150μm με χρήση χάλκινου τριβοφορτιστή και τάση 10 KV ανακτήθηκε ένα θετικό προϊόν PP στο οποίο συγκεντρώθηκε το 73% του μαγνησίτη, ένα αρνητικό προϊόν NN στο οποίο συγκεντρώθηκε το 92% του χαλαζία και ένα ενδιάμεσο προϊόν από τη σύνθεση των NP και PN στο οποίο κατανέμεται το 75 % του ασβεστίτη

Σχετικά με τη μεταβολή στις τιμές της παροχής αέρα όσο και με τη διαφοροποίηση στη σχετική εισόδου στο ηλεκτρικό πεδίο της τροφοδοσίας και λεπίδας διαχωρισμού των προϊόντων, παρατηρήθηκε ότι επηρεάζουν αρκετά τον επιτυγχανόμενο διαχωρισμό αφού ο ασβεστίτης κατά περίπτωση συνυπήρχε άλλοτε με το μαγνησίτη και άλλοτε με το χαλαζία.

Από τη μελέτη του βαθμού διαχωρισμού διαπιστώθηκε ότι ο χαλαζίας οδηγείται συνεχώς στο αρνητικό προϊόν αλλά για να μπορεί να διαχωριστεί ικανοποιητικά πρέπει το προς διαχωρισμό υλικό πρέπει να περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε χαλαζία ενώ ο μαγνησίτης οδηγείται συνεχώς στο θετικό προϊόν. Τέλος, όσο αναφορά το διαχωρισμό του ασβεστίτη αυτός συγκεντρώνεται άλλοτε στο θετικό προϊόν μαζί με το μαγνησίτη και άλλοτε στο αρνητικό προϊόν μαζί με το χαλαζία. Αυτό σημαίνει ότι επιλέγοντας κατάλληλες συνθήκες μπορεί να ανακτηθούν τα τρία αυτά ορυκτά σε τρία διαφορετικά προϊόντα.

Προτάσεις

Όσον αναφορά τις προτάσεις, θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σειρές δοκιμών εξετάζοντας επιπλέον κοκκομετρικά κλάσματα, αλλά και λεπτομερέστερη διερεύνηση του διαχωρισμού σε σχέση με τις θέσεις εισόδου και εξόδου των τεμαχιδίων στο ηλεκτρικό πεδίο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα έχει η διερεύνηση εμπλουτισμού μεταλλευμάτων που περιέχουν τα συγκεκριμένα ορυκτά όπως για παράδειγμα τα μεταλλεύματα λευκολίθου. Επιπλέον, με δεδομένο ότι ο τριβοηλεκτροστατικός διαχωρισμός είναι μια μέθοδος που ερευνάται τα τελευταία χρόνια σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα της διαδικασίας, κάθε παρόμοια μελέτη σε σύνθετα δείγματα άλλων ορυκτών θα μπορούσε να αναδείξει πιθανώς ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

Alfano, G. C. (1988). Progress in Triboelectric Separation of Minerals, E. Forssberg (ed.). *Proceedings of the XVI IMPC*, (σσ. 833-844). Stockholm, Sweden. Amsterdam.

Alfano, G., Carta, M., Ciccu , R., & Del Fa, C. (1984). Electric Separation of Finely Divided Particles in Gaseous Streams or in Vacuum. *IEEE Annual Meeting.*

Bada, S. O. (2010). A study of rotary tribo-electrostatic separation of South African fine coal. *Int. J. Coal Prep. Util., 30*, σσ. 154-172.

Ban, H. S. (1993a). Size and velocity effects on coal particle triboelectrification and separation efficiency. *Procceding of International Pittsburgh Coal Conference.* Pittsburgh.

Ban, H. Y. (1993b). Measurement of charge and charge distribution on coal and mineral matter during electrostatic dry coal cleaning. *Proceedings of International Conference on Coal Science*, (σσ. 615-618). Banf, AB, Canada, 1.

Bittner, J. D. (2013). Triboelectric belt separator for beneficiation of fine minerals. *Proc. of the 13th European Symposium of Comminution and Classification*, (σσ. 72-75). Sierke Verlag,Gottingen.

Bittner, J. D. (2013). Triboelectric belt separator for beneficiation of fine minerals. *Proc. of the 13th European Symposium of Comminution and Classification*, (σσ. 72-75). Sierke Verlag, Gottingen.

Castle, G. P. (1997). Contact charging between insulators. *Journal of Electrostatics*, Vol. 40-41, σσ. 13-20.

Chandrasekhar, P. (1998). *Design and testing of a triboelectrostatic separator for cleaning coal.* Blacksburg, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University.

Crook, T. (1909). The electrostatic separation of minerals. *Mineral. Mag., 15*, σσ. 260-264.

Crook, T. (1911). Further remarks on the electrostatic separation of minerals. *Mineral. Mag., 16*, σσ. 109-111.

Diaz, A. F.-N. (2004). A Semi-Quantitative Tribo-Electric Series for Polymeric Materials: The Influence of Chemical Structure and Properties. *Journal of Electrostatics, 62*, σσ. 277-290.

Dodbiba, G. S. (2002). Electrostatic Separation of the Shredded Plastic Mixtures Using a Tribo-cyclone. *Magnetic and Electrical Separation, 11*, σσ. 63-92.

Dwari, R.. (2006). Tribo-electrostatic behaviour of high ash non coking Indian thermal coal. *International Journal of Mineral Process, 81*, σσ. 93-104.

Dwari, R. . (2007). Dry Beneficiation of coal - A review. *Mineral Processinc and Extractive Metallurgy, 28*, σσ. 177-234.

Dwari, R.. (2008). Characterising Electron Transfer Mechanism in Tribo Electrification of pyrite through Contact Angle Measurements. *The Open Mineral Processing Journal, 1*, σσ. 6-17.

Dwari, R. R. (2009). Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator. *Minerals Engineering, 22*, σσ. 119-127.

Finseth, D. N. (1993). Dry electrostatic separation of fine coal. *Processing and Utilization of High Sulfur Coals, V.B.K. Parekh, and J.G. Groups (eds.)*, σσ. 91-98.

Flachberger, H. M. (2012). Electrostatic separation in mineral processing-inventory, challenges and outlook. *Proc. of the European Mineral Resources Conference*, (σσ. 349-369). Wien.

Gaudin, A. M. (1971). Gaudin, A. M., 1971, ‘‘The principle of electrical processing with particular application to electrostatic separation. (13), σσ. 45-57.

Gidaspow, D. G. (1987). Separation of Pyrites from Illinois Coals Using Electrofluidized Beds and Electrostatic Sieve Conveyors. *Processing and Utilization of High Sulfur Coals II*.

Gupta, R. G. (1993). Electrostatic Separation of Powder Mixtures Based on Work Functions of its Consituents. *Powder Technology, 75*.

Hamos, G. (χ.χ.).

Harper, W. R. (1967). Contact and frictional electrification. *Clarendon press, Oxford*.

Henry, P. (1957). Generation of static on solid insulators. *Journal of the Textile Institute*, σσ. 5-25.

Higashiyama, Y. a. (1998). Recent progress in electrostatic separation technology. *Particulate science and technology, 16*, σσ. 77-90.

Higashiyama, Y. a. (1998). Recent progress in electrostatic separation technology. *Particulate science and technology, 16*, σσ. 77-90.

Horn, R. G. (1993, December). Contact Electrifiacation Induced by Monolayer Modification of a Surface and Ralation to Acid- Base Interactions. *Nature*.

Hower, J. H. (1997). Maceral/microlithotype partitioning through triboelectrostatic dry coal cleaning. *International Journal of Coal Geology, 34*, σσ. 277-286.

Inculet, I. (1984). Electrostatic Minerals Separation. *John Wiley and Sons, Inc.*

Inculet, I. I. (1998). Electrostatic separation of plastics for recycling. *Part. Sci. Technol., 16*, σσ. 91-100.

Kelly, D., & Spottiswood, D. J. (1989). The Theory of Electrostatic Separations: a Review, Part III. The Separation of Particles. *Minerals Engineering, 2*.

Knoll, F., & Taylor, J. B. (1984). Selection and Sizing of Electrostatic Concentrating Equipment. *Concentration and Dewatering Circuits*.

Kok, J. L. (2009). The electrification of granular systems of identical insulators. *Phys. Rev. E., 79*, σ. 051304.

Kornfield, M. I. (1976). Frictional Electrification. *Journal of Physics D: Applied Physics*, σσ. 1183-1192.

Kwetkus, B. A. (1998). Particle triboelectrification and its use in the electrostatic separation process. *Particul. Sci. Technol., 16*, σσ. 55-68.

Lee, J.-K. &.-H. (2002). Triboelectrostatic Separation of PVC Materials from Mixed Plastics for Waste Plastic Recycling. *Korena Journal of Chemical Engineering, 19*, σσ. 267-272.

Lewowski, T. (1993). Electrostatic desulphurisation of Polish steam coals. *Coal Preparation, 13*, σσ. 97-105.

Lockhart, N. (1984). Dry Beneficiation of Coal -Review Paper. *Powder Technology, 40*, σσ. 17-42.

Lowell, J. (1975). Contact electrificatioin of metals. *Journal of Physics D: Applied physics 8*, σσ. 53-63.

Mach, F. A. (2014). Evolutionary algorithm-based multi-criteria optimization of triboelectrostatic separator. *J. Computational Appl. Mathematics, 270*, σσ. 134-142.

Manouchehri, H. R. (2000). *Triboelectric charge characteristics and electrical separation of industrial minerals.* Lulea: Doctoral Thesis, Lulea University of Technology.

Masuda, S. T. (1984). Electrostatic Beneficiation of Coal Using a Cyclone-Tribocharger. *IEEE Transactions of Industry Applications, 1A-19*.

Masuda, S., Toraguchi , M., Takahashi, T., & Haga, K. (1983). Electrostatic Beneficiation of Coal Using a Cyclone-Tribocharger. *IEEE Transactions of Industry Applications*, *IA-19.*

Mazumder, A. T. (1994). Electrostatic Beneficiation of Coal. *10th Annual Coal Preparation, Utilization and Environmental Control Contractors Conference.*

Mazumder, A. T., & Kelly, D.G. and Spottiswood, D.J. (1994). Electrostatic Beneficiation of Coal. *10th Annual Coal Preparation, Utilization and Environmental Control Contractors Conference.*

Mukherjee, A. G. (1987). Surface charge of Illinois coal and pyrites for dry electrostatic cleaning. *American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, 32*, σσ. 395-407.

Ndama, A. T. (2011). A reproducible test to characterize the triboelectric charging of powders during their pneumatic transport. *J. Electrostat, 69*, σσ. 146-156.

Nifuku, M. (1989). Static electrification phenomena in pneumatic transportation of coal. *Journal of Electrostatics, 23*, σσ. 45-54.

Park, C. H. (2008). Triboelectric Series and Charging Properties of Plastics Using Vertical - Reciprocation Charger. *Journal of Electrostatics, 66*, σσ. 578-583.

Park, C.-H. J.-S.-S.-H.-K. (2008). Application of Electrostatic Separation to the Recycling of Plastic Wastes: Separation of PVC, PET and ABS. *Environmental Science & Technology, 42*, σσ. 249-255.

Peretti, P. S. (2012). Electrostatic K-feldspar and feldspar/quartz separation: influence of feldspar composition. *Mineral Processing & Extractive Metall. Rev., 33*, σσ. 220-231.

Ralson, O. C. (1961). Electrostatic separation of mixed granular solids. *Elevier Monographs, Engineering Section*.

Ralston, O. C. (1961). Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids. *Elsevier*.

Saeki, M. (2010). Triboelectric Separation of Binary Plastic Mixture. *International Science Index, 4*, σσ. 795-798.

Schmidt, M. a. (1992). Investigations of Fine Particle Separation Using and Electrostatic Nozzle Scrubber. *Journal of Aerosol Science, 23*.

Singewald, A. F. (χ.χ.). Die elektrostatische Aufbereitung von Kali-Rohsalzen. *Chem. Ing.Tech*, σσ. 39-45.

Smallwood, J. (2001). Electrostatic Recovery of Paper and Plastic Packaging Wastes (ELREC). *ERA Technology Ltd*.

Soong, Y. L. (1998). Triboelectrostatic Separation of Mineral Matter from Slovakian Coals. *Acta Montanistica Slovaca, Rocknic*, σσ. 393-400.

Spitzer, J. (1984). New Electrostatic Model for Highly Charged Surfaces. *Colloids and Surfaces, 12*.

Trigwell, S. T. (2003). Precombustion cleaning of coal by triboelectric separation of minerals. *Particulate Science and Technology, 21*, σσ. 353-364.

Wu, G. L. (2013). Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: a review. Waste Management, 33, σσ. 585-597.

Xing Yang, (2018). Triboelectric properties of ilmenite and quartz minerals and investigation of triboelectric separation of ilmenite ore. International Journal of Mining Science and Technology,28 , Issue 22, σσ.23-230.

Youjun Tao, (2017). Effects of key factors of rotary triboelectrostatic separator on efficiency of fly ash decarbonization.International Journal of Mining Science and Technology, 27, Issue 6, σσ.1037-1042.

Zhang, L.(2018). Research on flow field and kinematic characteristics of fly ash particles in rotary triboelectrostatic separator. Powder Technology, 336, σσ. 168-179 .

Zelma, M. E.-M. (2013). Experimental Comparative Study of Different Tribocharging Devices for Triboelectric Separation of Insulating Particles. IEEE Transactions on Industrial Applications, 49, σσ. 1113-1118.

Σταμπολιάδης, Η. (2008) Εμπλουτισμός των Μεταλλευμάτων, ISBN 978-960-930816-8

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

https://www.alphalabinc.com/triboelectric-series/ (24/5/2018)