

Χαρακτηρισμός και Διαχείριση Κόνεων Σακοφίλτρων Χαλυβουργίας

Εμμανουήλ Κωβαίος
Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός,
Μεταπτυχιακός Φοιτητής ΔΙΑ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ
mkoveos@yahoo.gr, std104288@ac.eap.gr

Δρ. Πέτρος Τσακιρίδης
Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.
Μέλος ΣΕΠ ΔΙΑ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ
ptsakiri@central.ntua.gr

Περίληψη – Η σκόνη που προκύπτει κατά την διαδικασία παραγωγής του χάλυβα σε ηλεκτρικούς κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου (EAFD) αποτελεί ένα απόβλητο που χαρακτηρίζεται ως επικίνδυνο. Κατά συνέπεια η αξιοποίησή του ή η διάθεσή του με περιβαλλοντικά ασφαλή τρόπο αποτελεί υποχρέωση των παραγωγών αυτού. Ο χημικός και δομικός χαρακτηρισμός του αποβλήτου αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την εκτίμηση της δυνατότητας ανακύκλωσης και αξιοποίησής του. Ο χαρακτηρισμός αυτός υλοποιείται με την χρήση διάφορων μεθόδων και τεχνικών. Στην παρούσα εργασία λαμβάνει χώρα ο πειραματικός χαρακτηρισμός σκόνης σακοφίλτρων προερχόμενης από την παραγωγή χάλυβα σε ελληνική χαλυβουργία με χρήση κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου. Επίσης παρουσιάζονται μέθοδοι διαχείρισης του αποβλήτου.

Λέξεις-Κλειδιά: Σκόνη κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου, χάλυβας, χαρακτηρισμός, βαρέα μέταλλα, επικίνδυνα απόβλητα.

Ι. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή των επικινδύνων αποβλήτων είναι ένα παγκόσμιο πρόβλημα άρρηκτα συνδεδεμένο με την ανάπτυξη της βιομηχανικής παραγωγής αλλά και με τον σύγχρονο τρόπο ζωής. Οι παραγόμενες ποσότητες τους αυξάνονται διαρκώς. Ως εκ τούτου προκειμένου να αποφευχθούν ή να περιοριστούν οι αρνητικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και την δημόσια υγεία καθίσταται απολύτως αναγκαία η ορθή και σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς διαχείριση ή αξιοποίησή τους.

Η βιομηχανία παραγωγής χάλυβα με μέθοδο καμίνου ηλεκτρικού τόξου παράγει μεταξύ των άλλων παραγόμενων αποβλήτων και την σκόνη καμίνων (EAFD), η οποία συγκεντρώνεται στα συστήματα αποκονίωσης. Το απόβλητο αυτό χαρακτηρίζεται ως επικίνδυνο και κατά συνέπεια είναι αναγκαία η σύννομη και επιστημονικά αποδεκτή διαχείρισή του. Η διαχείριση του αποβλήτου αυτού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην Ελλάδα διότι όλες οι εγχώρια παραγόμενες ποσότητες χάλυβα παράγονται με την χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου. Με βάση τα πιο πρόσφατα στοιχεία για την παραγωγή χάλυβα και με δεδομένο ότι για κάθε τόνο παραγόμενου χάλυβα προκύπτουν 15-20 kg σκόνης EAF, εκτιμάται ότι παράγεται στην χώρα σε ετήσια βάση ποσότητα περί τους 14000 -18000 τόνους κόνεων EAF, η οποία βεβαίως είναι μειωμένη τα τελευταία χρόνια λόγω της πτώσης στην παραγωγή χάλυβα ένεκα της οικονομικής κρίσης.

Για την μελέτη των ιδιοτήτων του αποβλήτου χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι χαρακτηρισμού μερικές εκ των οποίων αναλύονται στην παρούσα εργασία. Με βάση τα προκύπτοντα χαρακτηριστικά μπορούν να επιλεγούν και οι οικονομικά συμφέρουσες και τεχνολογικά εφικτές μέθοδοι διαχείρισης.

ΙΙ. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Λόγω της περιεκτικότητας σε βαρέα μη σιδηρούχα μέταλλα η σκόνη EAF κατατάσσεται στα επικίνδυνα απόβλητα, σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κατάλογο αποβλήτων EKA, κατηγορία 100207* «στερεά απόβλητα από την επεξεργασία αερίων που περιέχουν επικίνδυνες ουσίες». Επίσης και η Υπηρεσία Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (EPA) χαρακτηρίζει το απόβλητο με κωδικό επικινδυνότητας (T- toxic) δηλαδή «τοξικό απόβλητο» με την περιγραφή «σκόνη εκπομπών ελέγχου από την πρωτογενή παραγωγή χάλυβα ηλεκτρικού κλιβάνου» και με τον κωδικό KO61 (industry and EPA hazardous waste number).

A. Χαρακτηρισμός EAFD.

Ο χαρακτηρισμός της σκόνης γίνεται με την χρήση διάφορων τεχνικών. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης έγινε πειραματικός χαρακτηρισμός σκόνης ηλεκτρικής καμίνου από ελληνική χαλυβουργία. Το πειραματικό μέρος διεξήχθη στα εργαστήρια του Τμήματος Μεταλλουργίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Έλαβε χώρα χρήση των κατωτέρω τεχνικών:

1) Δοκιμή EN 12457-2.

2) Δοκιμή εκχύλισης TCLP.

3) Ανάλυση με μέθοδο φασματομετρίας φθορισμού ακτίνων X (XRF): Η χημική ανάλυση με τη μέθοδο αυτή πραγματοποιήθηκε σε αναλυτικό όργανο SPECTRO Xepos. Για την εφαρμογή της, παρασκευάστηκαν ξηρές ταμπλέτες με την εξής διαδικασία: Αρχικά ζυγίστηκε ποσότητα του δείγματος ίση με 4 g που αναμείχθηκε με 1 g συνδετικού υλικού (flux) και τοποθετήθηκε σε ειδική χαλύβδινη μήτρα, όπου με άσκηση πίεσης 10 bar μετατράπηκε σε ταμπλέτα σταθερής γεωμετρίας, με διάμετρο 12 mm. Στη συνέχεια, έγινε η τοποθέτηση της ταμπλέτας στον αναλυτή του οργάνου φθορισμού ακτίνων X και έγινε ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας των διαφόρων

στοιχείων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο (software) ExLabPro.

4) *Ανάλυση με μέθοδο Φασματοσκοπίας ατομικής εκπομπής επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-AES):* Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε φασματοφωτόμετρο επαγωγικής σύζευξης πλάσματος (ICP-MS, Thermo X, Series II), μετά από διαλυτοποίηση του δείγματος με σύντηξη. Προζυγισμένη ποσότητα δείγματος (περίπου 0.1 g) προστέθηκε σε 1.5 g $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ και 0.1 g KNO_3 (συντηκτικά υλικά) σε χωνευτήριο πλατίνας. Το προς ανάλυση στερεό αναμειχθηκε πολύ καλά με τα συντηκτικά υλικά μέσα σε χωνευτήριο το οποίο τοποθετήθηκε σε εργαστηριακό φούρνο υψηλών θερμοκρασιών, σε θερμοκρασία 1000°C , όπου παρέμεινε για 60 min. Στη συνέχεια, το θερμό χωνευτήριο τοποθετήθηκε σε ποτήρι ζέσεως που περιείχε 10% κατ' όγκο πυκνό διάλυμα HNO_3 , όπου παρέμεινε για 48 ώρες, μέχρι την πλήρη διάλυση του τήγματος. Στο διάλυμα που προέκυψε, προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις των διαφόρων μετάλλων με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης με φλόγα (AAS).

5) *Κοκκομετρική ανάλυση με αναλυτή laser:* Ο προσδιορισμός του μεγέθους των κόκκων πραγματοποιήθηκε με χρήση της μεθόδου σκέδασης ακτίνων laser μικρής γωνίας (Low Angle Laser Light Scattering) σε αναλυτή MASTERSIZER 500 της εταιρείας MALVERN. Η μέθοδος αυτή, είναι οπτική μέθοδος μέτρησης της κατανομής και του μεγέθους των σωματιδίων, η οποία στηρίζεται στην τεχνική σκέδασης του φωτός σε σωματίδια.

6) *Ανάλυση με μέθοδο τεχνικής της περίθλασης με ακτίνες X (XRD):* Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τον ορυκτολογικό χαρακτηρισμό των δειγμάτων αποτελείται από το περιθλασίμετρο Bruker D8-Focus, το οποίο διαθέτει άνοδο Cu με μήκος κύματος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας $\lambda = 1.5406\text{ \AA}$, στα $V = 40\text{ KV}$ και $I = 30\text{ Ma}$.

7) *Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM):* Η μελέτη των μορφολογικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης της εταιρείας JEOL (JSM – 6380LV), στο οποίο είναι συνδεδεμένος στοιχειακός αναλυτής της εταιρείας Oxford Instruments (INCA X-Sight). Οι παράμετροι λειτουργίας κατά την διάρκεια της παρατήρησης ήταν:

- Working Distance (WD): 15mm
- Acceleration Voltage (AV): 20kV.
- Spot Size (50-60)

Τα αποτελέσματα των ανωτέρω τεχνικών παρουσιάζονται στην συνέχεια.

B. Διαχείριση EAFD.

Η διαχείριση των κόνεων EAFD πραγματοποιείται εναλλακτικά με επεξεργασία τους, με σταθεροποίηση /στερεοποίηση ή με αποθήκευση τους σε κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους.

Σε γενικές γραμμές η σκόνη EAFD επεξεργάζεται με τους ακόλουθους τρόπους: (Kukurugya et al, 2015)

1) *Πυρομεταλλουργική κατεργασία:* Περιλαμβάνει την αναγωγή των οξειδίων και την εξαγωγή των μετάλλων για ανάκτηση ψευδαργύρου, μολύβδου και σιδήρου.

2) *Υδρομεταλλουργική κατεργασία:* Συνίσταται σε εκχύλιση της σκόνης με οξέα ή βάσεις.

3) *Χρήση συνδυασμένων μεθόδων επεξεργασίας (υβριδικές μέθοδοι).*

Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους (π.χ κόστος μεταφοράς, περιβαλλοντικοί κανονισμοί). Οι πυρομεταλλουργικές μέθοδοι και κυρίως η μέθοδος Waelz, προτιμούνται περισσότερο απαιτούνται όμως εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας οι οποίες χρειάζονται μεγάλες ποσότητες κόνεων προς επεξεργασία. Αντίθετα, η διαχείριση της σκόνης με υδρομεταλλουργικές μεθόδους είναι περιορισμένη, παρά το γεγονός ότι με τις μεθόδους επιτυγχάνονται καλύτερες ανακτήσεις και ποιότητες των προς ανάκτηση μετάλλων και επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας.

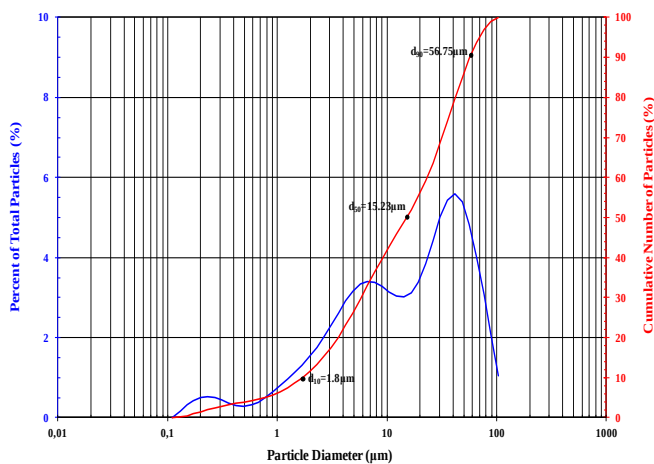
Οι διαδικασίες σταθεροποίησης/στερεοποίησης που αναλύονται στην διεθνή βιβλιογραφία και αξιολογούν θετικά την δυνατότητα χρήσης της μεθόδου αυτής για τις σκόνες κλιβάνων EAF είναι επιγραμματικά μέθοδοι σταθεροποίησης με οξείδιο του μαγνησίου (Fernandez et al, 2003), με δημιουργία ναλοκεραμικών (Τσιλίκας, 2008), εφαρμογή σε κεραμικές δομές (Stathopoulos et al, 2013), εφαρμογές σε πολυμερή (Barreneche et al, 2013)

III. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ακολούθως παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την χρήση διαφόρων μεθόδων χαρακτηρισμού.

A. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Η κοκκομετρική κατανομή της εξεταζόμενης EAFD, όπως καταγράφηκε κατά την διενέργεια του πειραματικού χαρακτηρισμού παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Παρουσιάζει μια ετερογενή κατανομή του μεγέθους και περιέχει δύο κύρια κλάσματα μεγέθους το λεπτόκοκκο τμήμα (0.1-1 μm) και ένα χονδροειδές μέρος (1-100 μm). Διαπιστώνεται ότι το 10% των σωματιδίων είναι μεγέθους μικρότερου των 1.8 μm , το 50% των σωματιδίων είναι κάτω από 15.2 μm , ενώ η πλειοψηφία (90%) των σωματιδίων είναι κάτω από 56.75 μm .

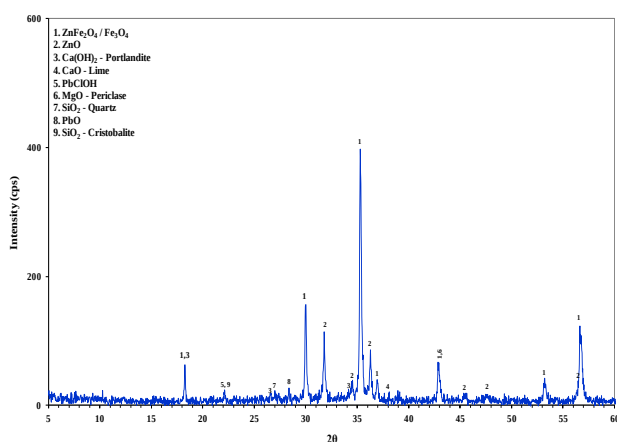


Σχήμα 1 : Κοκκομετρική Κατανομή EAFD.

B. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Κατά την Ορυκτολογική Ανάλυση της EAFD μέσω Περιθλάσης Ακτίνων Χ (XRD) τα σήματα από τις επικρατούσες φάσεις παρουσιάζουν αλληλοεπικάλυψη σε κάποιο βαθμό, όμως εντοπίστηκαν τρεις κύριες φάσεις: οξείδιο ψευδαργύρου (ZnO), φρανκλινίτης (ZnFe_2O_4) και μαγνητίτης (Fe_3O_4). (σχήμα 2). Ο ψευδάργυρος στο εξεταζόμενο δείγμα της σκόνης καμίνου ηλεκτρικού τόξου συναντάται στις μορφές οξειδίου του ψευδαργύρου (Zincite) και φερρίτη ψευδαργύρου (Φρανκλινίτη), ενώ ο σίδηρος συναντάται κυρίως με τη μορφή του φρανκλινίτη και μαγνητίτη. Επιπλέον εντοπίστηκαν ως δευτερεύοντα συστατικά τα $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaO , PbClOH , MgO , SiO_2 σε μορφή χαλαζία ή cristobalite, PbO .

Για τη βελτίωση της αναγνώρισης των φάσεων στα δείγματα EAFD είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν άλλες τεχνικές, όπως, για παράδειγμα η φασματοσκοπία και η σάρωση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



Σχήμα 2: Ορυκτολογική Ανάλυση EAFD μέσω Περιθλάσης Ακτίνων Χ (XRD).

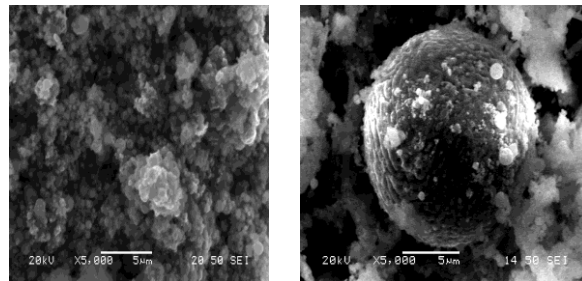
C. ΑΝΑΛΥΣΗ SEM.

Κατά την ανάλυση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο τα σωματίδια EAFD εμφανίζονται ως σφαιρικά λεπτόκοκκα σωματίδια ή ως επιμήκεις κόκκοι. (σχήμα 3). Επικρατεί μορφολογία συσσωματώσεων με τα λεπτά σωματίδια να σχηματίζουν σύμπλοκα και να καλύπτουν τα μεγαλύτερα σωματίδια. Αυτοί οι σχηματισμοί είναι σε συμφωνία με τον κύριο μηχανισμό δημιουργίας κόνεων EAFD όπως έχει περιγραφεί στην διεθνή βιβλιογραφία.

Παρατηρούνται σφαιρικά σωματίδια με ρυτιδιασμένη επιφάνεια και σχηματισμοί με επιμήκεις μη καθορισμένες μορφές. Επίσης φαίνονται σωματίδια Zn και Fe, ενώ βρέθηκαν και μικρότερες ποσότητες Ca, Pb, Mg και Cl. Ο ψευδάργυρος συνδέεται κυρίως με τα λεπτότερα σωματίδια σκόνης, πιθανώς ως zincite.

Ο φρανκλινίτης μαζί με τον μαγνητίτη έχει σφαιρική μορφή. Όπως φαίνεται τα λεπτά σωματίδια περιλαμβάνουν ψευδάργυρο και οξυγόνο (Zincite) και έχουν και αυτά σφαιρικό σχήμα. Ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος είναι παρόντες σε υψηλότερη ποσότητα στα μεγαλύτερα σωματίδια. Μάλλον είναι η περιοχή όπου είναι παρούσα η φάση του φρανκλινίτη (ZnFe_2O_4). Το ασβέστιο εμφανίζεται σε μεγάλη ποσότητα όταν δεν υπάρχει παρουσία σιδήρου. Παρατηρείται και υψηλή

πυκνότητα από εξαγωνικές πλάκες $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Επίσης το ασβέστιο εντοπίζεται και σε μορφή CaO . Η παρουσία των εξαγωνικών κρυστάλλων θα πρέπει να αποδοθεί στην διαδικασία παραγωγής του χάλυβα. Ο μόλυβδος εντοπίζεται σε μορφή PbO και PbClOH , ενώ εμφανίζονται και ακανόνιστης μορφής συσσωματώματα SiO_2 .



Σχήμα 3: Μικρογραφίες Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου (SEM)

D. ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ με μέθοδο XRF & ICP

Από την χημική ανάλυση του δείγματος με μέθοδο XRF είναι εμφανής η επικράτηση του Fe_2O_3 σε ποσοστό 46.45% ενώ τα οξείδια του ψευδαργύρου (ZnO) επίσης παρουσιάζεται σε υψηλό ποσοστό 29.91%. Είναι εμφανής η παρουσία διαφόρων άλλων στοιχείων σε μορφή οξειδίων με επικρατέστερα το CaO (3.81%), MnO (2.67%) και PbO (2.61%). Το μόνο στοιχείο που εντοπίζεται σε καθαρή μορφή είναι το Cl σε ποσοστό 2.86%.

Από την λεπτομερέστερη χημική ανάλυση του δείγματος με την μέθοδο ICP προκύπτει η επικράτηση του στοιχείου Cd (14.7%), ενώ ακολουθεί το Ba (8.5%) και το Sb (2.05%).

E. ΔΟΚΙΜΗ ΕΚΧΥΛΙΣΗΣ TCLP.

Οι εργαστηριακές μετρήσεις που προέκυψαν ύστερα από την εφαρμογή της μεθόδου TCLP καταγράφονται στον πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΚΧΥΛΙΣΙΜΟΤΗΤΑΣ
ΜΕΘΟΔΟΥ TCLP.

Metals	EAFD (mg/L)	EPA TCLP Regulatory Limits (mg/L)	EPA Land Disposal Limits (mg/L)
Cd	8.7	1.0	0.11
Pb	72.5	5.0	0.75
Ba	2.2	100	NRL
Cr	0.22	5.0	0.6
Al	0.15	NRL	NRL
Mn	14.7	NRL	NRL
Zn	1218	NRL	4.3
Ni	0.87	NRL	11
Co	0.95	NRL	NRL
Cu	3.2	NRL	NRL

NRL: No regulatory limits are available

Από τις ανωτέρω αναλύσεις διαπιστώνεται ότι υπάρχει υπέρβαση των θεσμοθετημένων από την ΕΡΑ ορίων τοξικότητας (TCRL) για τα στοιχεία Cd (8,7 mg/L > 1,0 mg/L) και Pb (72,5 mg/L > 5,0 mg/L). Κατά συνέπεια το εξεταζόμενο υλικό ΕΑΦΔ θεωρείται τοξικό. Σημειώνεται ότι παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση Zn αν και δεν υπάρχει θεσμοθετημένο όριο του συγκεκριμένου στοιχείου για την δοκιμή αυτή.

Επίσης υπάρχει υπέρβαση των θεσμοθετημένων από την ΕΡΑ ορίων για διάθεση επί ή εντός του εδάφους για τα στοιχεία Cd (8,7 mg/L > 0,11 mg/L), Pb (72,5 mg/L > 0,75 mg/L) και Zn (1218 mg/L > 4,3 mg/L), οπότε δεν είναι επιτρεπτή η διάθεση στο έδαφος.

F. ΔΟΚΙΜΗ ΕΚΧΥΛΙΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΣ EN 12457-2.

Οι εργαστηριακές μετρήσεις που προέκυψαν ύστερα από την εφαρμογή της μεθόδου EN 12457-2 καταγράφονται στον πίνακα 2. Όπως προκύπτει από την δοκιμή εκχυλισιμότητας, με την μέθοδο αυτή υπάρχει υπέρβαση των επιτρεπόμενων σύμφωνα με την οδηγία 2003/33/ΕΚ ορίων για τα στοιχεία Pb, Zn και Cl⁻ για διάθεση σε χώρους απόθεσης αδρανών υλικών. Κατά συνέπεια το εξεταζόμενο υλικό δεν μπορεί να διατεθεί σε τέτοιους χώρους.

Πέραν τούτου υπάρχει υπέρβαση και των επιτρεπόμενων ορίων για την διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής επικινδύνων αποβλήτων για τα στοιχεία Pb και Zn, καθιστώντας μη δυνατή την απόθεση του εξεταζόμενου αποβλήτου σε ΧΥΤΕΑ χωρίς την προηγούμενη εφαρμογή κατάλληλης μεθόδου διαχείρισής του, ώστε να επιτευχθούν τιμές για όλα τα εξεταζόμενα στοιχεία μικρότερες των ορίων που προβλέπονται από την οδηγία 2003/33/ΕΚ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΚΧΥΛΙΣΙΜΟΤΗΤΑΣ
ΜΕΘΟΔΟΥ EN 12457-2

Metals	ΕΑΦΔ (mg/L)	2003/33/CE Inert (mg/kg)*	2003/33/CE Hazardous (mg/kg)*
Cd	0.02	0.04	5
Pb	65.7	0.5	0.5
Ba	-	20	300
Cr	0.01	0.5	70
Al	0.05	NRL	NRL
Zn	245	4	200
Ni	0.04	0.4	40
Co	0.02	NRL	NRL
Cu	0.02	2	100
Mn	0.01	NRL	NRL
Cl ⁻	1250	800	25000

NRL: No regulatory limits are available

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως προέκυψε από τις ανωτέρω εργαστηριακές διαδικασίες χαρακτηρισμού του εξεταζόμενου αποβλήτου ΕΑΦΔ κάποια από τα χαρακτηριστικά χημικά στοιχεία αυτού υπερβαίνουν τις καθορισθείσες από την νομοθεσία οριακές τιμές. Κατά συνέπεια το απόβλητο χαρακτηρίζεται ως επικίνδυνο και υπάρχει ανάγκη να αξιοποιηθεί ή να διατεθεί σε κατάλληλο χώρο ύστερα από εφαρμογή κάποιας δόκιμης μεθόδου διαχείρισης, η οποία επιλέγεται με βάση τα βέλτιστα τεχνοοικονομικά κριτήρια.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Barreneche C., Fernández A., Niubó M., Chimenos J., Espiell F., Segarra M., Solé C., Cabeza L. (2013). «Development and characterization of new shape-stabilized phase change material (PCM)—Polymer including electrical arc furnace dust (ΕΑΦΔ), for acoustic and thermal comfort in buildings», Energy and Buildings 61 210–214.
- European Waste Catalogue and Hazardous Waste List (2002)., Environmental Protection Agency, Ireland.
- Fernandez An., Chimenos J., Raventos N., Miralles L., Espiell F. (2003). «Stabilization of electrical arc Furnace Dust with Low Grade MgO prior to landfill.» Journal of Environmental Engineering, 129(3), 275-279.
- Kukurugya F., Vindt T., Havlik T. (2015). Behavior of zinc, iron and calcium from electric arc furnace (ΕΑΦ) dust in hydrometallurgical processing in sulfuric acid solutions: Thermodynamic and kinetic aspects» Hydrometallurgy 154, p.20-32.
- Stathopoulos V.N., Papandreou A., Kanellopoulou D., Stournaras C.J. (2013) «Structural ceramics containing electric arc furnace dust» Journal of Hazardous Materials 262, 91–99.
- Τσιλικά Ειρήνη. (2008). «Δομικές Ιδιότητες προϊόντων σταθεροποίησης στερεών αποβλήτων» (Διδακτορική διατριβή). ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη