

Επιλογή του βέλτιστου κλάσματος σωματιδίων της λιγνιτικής ιπτάμενης τέφρας στις εφαρμογές της βιομηχανίας τσιμέντου

Σ. Ίτσκος¹, Γ.Σ. Ίτσκος^{2,3}, Ν. Κούκουζας³

¹ ΔΕΗ, Τομέας Χημικής Τεχνολογίας και Περιβάλλοντος, ΑΗΣ Αμυνταίου-Φιλώτα, 53200, Αμύνταιο

² Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15773, Ζωγράφου, Αθήνα

³ Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης / Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων (ΕΚΕΤΑ/ΙΤΕΣΚ), 4ο χλμ Πτολεμαΐδας-Μποδοσακείου Νοσοκομείου, 50200, Πτολεμαΐδα

Λέξεις κλειδιά: ασβεστόχος ιπτάμενη τέφρα, λιγνίτης, κατανομή μεγέθους σωματιδίων, πρόσθετα τσιμέντου, βιώσιμη αξιοποίηση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η χημική και ορυκτολογική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας (ΙΤ) ποικίλλει σε σχέση με τις επικρατούσες συνθήκες κατά τις διαδικασίες, τόσο της παραγωγής ενέργειας όσο και της εξόρυξης του λιγνίτη. Η διαφοροποίηση της ποιοτικής και ποσοτικής σύστασης της ασβεστόχου, λιγνιτικής ιπτάμενης τέφρας, ως συνάρτηση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων της, εξακριβώνεται στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διεξαχθείσας έρευνας, ένα, αρκετά μεγάλο, κλάσμα λεπτών σωματιδίων παρουσιάζει ιδιότητες οι οποίες εμποδίζουν την επωφελή αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στις εφαρμογές της τσιμεντοβιομηχανίας. Επίσης, τα σωματίδια μεγάλου μεγέθους, το σύνολο των οποίων αντιστοιχεί σε περιορισμένο ποσοστό επί της ποσότητας της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας, παρουσιάζουν τις ίδιες, μη-επιθυμητές, ιδιότητες. Το κλάσμα, όμως, των σωματιδίων μεσαίου μεγέθους (75-150μm), εμφανίζει, εντόνως, συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία το καθιστούν βέλτιστη επιλογή, προκειμένου για χρήση του ως ποζολανικό πρόσθετο κατά την παραγωγή του τσιμέντου, καθώς, εκτός των άλλων, εμποδίζουν και τους παράγοντες που προκαλούν την έντονη διακύμανση της ποιότητας της ιπτάμενης τέφρας.

Selection of the optimum part of lignite fly ash in cement industry applications

Itskos S.¹, Itskos G.S.^{2,3}, Koukouzas N.³

¹Public Power Corporation of Greece, Department of Chemical Technology and the Environment, SES of Amynteon-Filotas, GR-53200, Amynteon, Greece

²Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9 Iroon Polytechniou str. GR-157 73 Athens

³Centre for Research and Technology Hellas / Institute for Solid Fuels Technology and Applications (CERTH/ISFTA), 4th klm of Ptolemais-Bodosakion Hospital Road, GR-50200, Ptolemais, Greece

ABSTRACT: The chemical and mineralogical composition of lignite fly ash varies as a function of the prevalent conditions in both the processes of power production and lignite mining. The differentiation of the qualitative and quantitative composition of the Greek calcareous lignite fly ash, as a function of its particle size distribution, is verified in this paper. According to the results

of the conducted research, a fine-grained fraction of considerable amount presents properties that obstruct the sustainable exploitation of lignite fly ash in cement industry applications. On the other hand, the same grain fraction (because of its hydraulic properties) can be utilized in other sort of applications, based on different criteria. The coarse-grained fraction (which reflects a low proportion to the total fly ash output) presents the same undesired characteristics as well. However, the intermediate grain fraction (75-150 μ m) indicates the highly desirable properties regarding the utilization of fly ash as pozzolanic additive in the production process of cement. In addition, the mechanism of the formation of the intermediate grain fraction strongly prevents the factors that cause the variation of its quality. It is therefore the optimum part of the whole amount of lignite fly ash, to be utilized as additive in cement manufacturing

Key words: calcareous fly ash, lignite, particle size distribution, cement additives, sustainable utilization

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύσταση της ιπτάμενης τέφρας (IT) διακυμαίνεται σε συνάρτηση με τις συνθήκες τόσο κατά την παραγωγική διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής όσο και κατά τη λιγνιτική εξόρυξη. Η χημική και ορυκτολογική σύσταση του ανόργανου κλάσματος που περιλαμβάνεται στο οργανικό μέρος του λιγνίτη (επιγενετική τέφρα) είναι σημαντικά διαφορετική από αυτή του ανόργανου κλάσματος το οποίο συνοδεύει το καύσιμο κατά την εξόρυξή του (εμπεριεχομένη τέφρα) (Mason 1982, Rao 1985). Η κύρια μάζα των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας αποτελείται από μη-πητικά συστατικά. Για την ακρίβεια, τα πητικά μπορεί είτε να εμπλουτίζονται σε αυτά, είτε να σχηματίζουν λεπτότερα σωματίδια τα οποία δεν παγιδούνται από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Τα χαλκόφιλα (Goldschmidt) ιχνοστοιχεία εμπλουτίζονται στα λεπτόκοκκα σωματίδια. Αντιθέτως τα λιθόφιλα (Goldschmidt) παρευρίσκονται εντόνως στα χονδρόκοκκα σωματίδια (Bogdanovic 1995, Ίτσκος 2007). Η διαφοροποίηση της χημικής και ορυκτολογικής σύστασης σε συνάρτηση με την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων των ιπτάμενων τεφρών εξηγεί τα διάφορα φαινόμενα που παρατηρούνται καθημερινά κατά την παραγωγική διαδικασία του ηλεκτρικού ρεύματος καθώς επίσης μπορεί να προσφέρει αποτελεσματικές λύσεις όσον αφορά την επέκταση της αξιοποίησης των ιπτάμενων τεφρών στην Ελλάδα. Στην Ελλάδα κάθε χρόνο παράγονται περίπου 13 τόννοι ιπτάμενων τεφρών, ενώ αξιοποιείται περίπου το 15% του συνόλου της ποσότητας αυτής. Η διακύμανση της ποιότητάς της, καθώς επίσης και το κόστος μεταφοράς της είναι οι κύριοι παράγοντες περιορισμού της αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγική διαδικασία της βιομηχανίας τσιμέντου (Τσίμας 2005, Ίτσκος 2006, Κούκουζας 2006).

2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Τα δείγματα των ιπτάμενων τεφρών συλλέχτηκαν από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα του ΑΗΣ Αμύνταιου-Φιλότα. Η χημική και ορυκτολογική σύσταση των διαφόρων κλασμάτων της ιπτάμενης τέφρας προσδιορίστηκε με την εφαρμογή των μεθόδων του φθορισμού και περίθλασης ακτινών-X αντίστοιχα (XRF και XRD). Ο προσδιορισμός της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων έγινε με τις μεθόδους STIM και RBS. Η μέτρηση της απώλειας πύρωσης έγινε με τη μέθοδο της θερμοβαρυτικής ανάλυσης και της ειδικής επιφάνειας με τη μέθοδο BET. Οι θερμοκρασίες φυσικοχημικών μεταβολών προσδιορίστηκαν με μετρήσεις οξειδωτικής ατμόσφαιρας και το ειδικό βάρος των κλασμάτων με την εφαρμογή της μεθοδολογίας του πρωτοκόλλου SG-ASTM C642.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Χημική σύσταση και απώλεια πύρωσης των διαφόρων κλασμάτων IT

Η Εικόνα 1 περιγράφει τη διαφοροποίηση της παρουσίας των χημικών ενώσεων στα διάφορα κλάσματα της IT. Είναι εμφανές ότι η μη-συμμετοχή του κλάσματος των σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 50μm στην παραγωγική διαδικασία της βιομηχανίας τσιμέντου μειώνει αποτελεσματικά τη συγκέντρωση των μη-επιθυμητών ενώσεων : SO₃ και CaO. Συνεπώς, η απόρριψη του κλάσματος αυτού: α) βελτιώνει τις προδιαγραφές για την αξιοποίηση της IT β) έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων των τελικών προϊόντων τσιμέντου και γ) κάνει οικονομικότερη την παραγωγική διαδικασία με την αποφυγή της μεταφοράς λιγότερο χρήσιμου υλικού. Ο Πίνακας 1 περιλαμβάνει τις τιμές της ποσοστιαίας Απώλειας Πύρωσης (ΑΠ) κατά τη θέρμανση των διαφόρων κλασμάτων IT στις αντίστοιχες θερμοκρασίες.

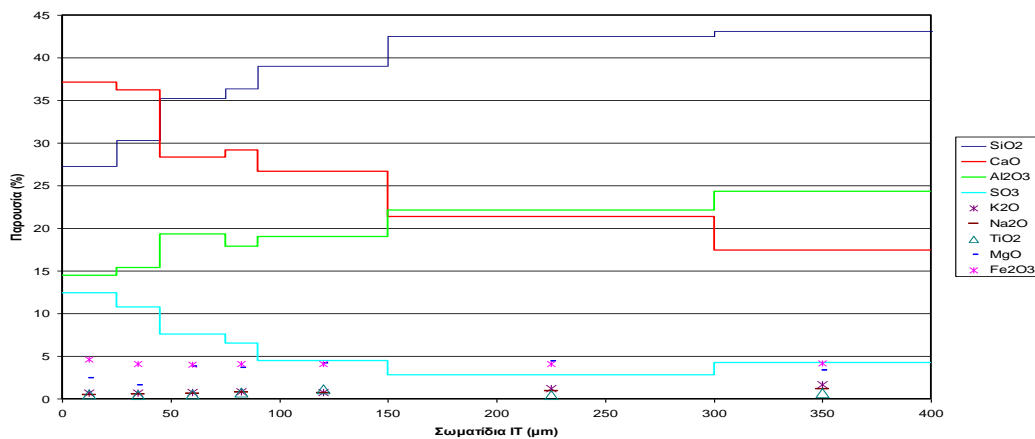
Πίνακας 1. ΑΠ (%) των διαφόρων κλασμάτων IT

Κλάσμα IT	800°C	950°C	1050°C	1150°C	1250°C	δ 950/1250°C
< 25	1.5	1.1	1.5	9.3	9.7	8.6
25-45	1.4	0.9	1.0	2.7	7.6	6.7
45-75	1.3	0.8	-	2.2	4.4	3.6
75-90	1.2	0.8	0.8	1.3	3.6	1.8
90-150	1.5	1.4	1.6	2.6	3.0	1.6
150-300	4.62	3.7	3.8	4.6	4.6	0.9
> 300	12.9	10.9	11.2	12.0	12.4	1.5

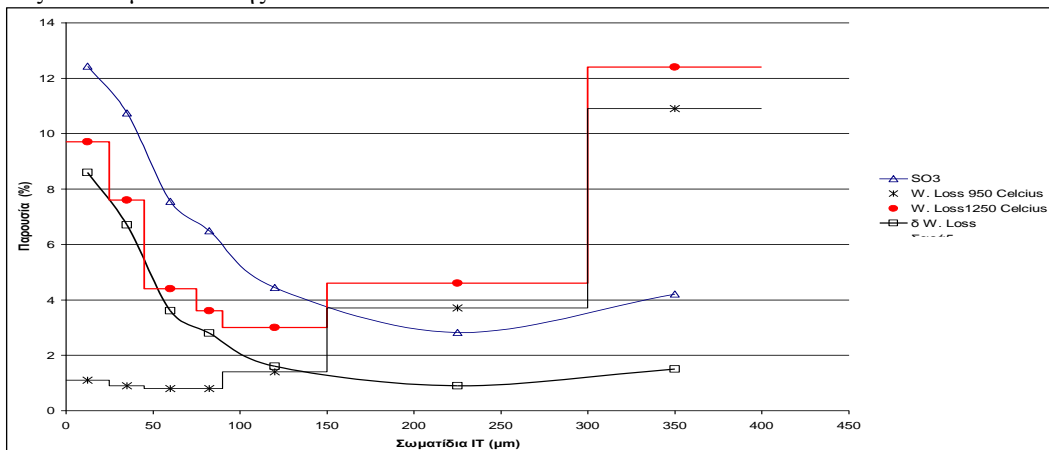
Οι τιμές της απώλειας πύρωσης μειώνονται σταθερά για το κλάσμα των σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 25μm έως το κλάσμα (75-90)μm. Τα κοκκομετρικά κλάσματα των σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 90μm είναι τελείως αποτεφρωμένα. Σε αυτά τα κλάσματα η μετρούμενη απώλεια πύρωσης αποδίδεται στη θερμική διάσπαση των συστατικών τους, κυρίως του ανθρακικού ασβεστίου. Η παρουσία του άκαυστου λιγνίτη αυξάνεται σταδιακά για κλάσματα διαμέτρου μεγαλύτερης των 90μm και κορυφώνεται στα σωματίδια μεγάλου μεγέθους.

Η έντονη παρουσία του CaO στα λεπτόκοκκα κλάσματα, καθώς και η μεγάλη ειδική επιφάνειά τους, οδηγούν στην υψηλή τους ικανότητα αποθείωσης και συνεπώς σε υψηλές συγκεντρώσεις SO₃. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον περιορισμένο χρόνο έκθεσής τους σε υψηλές θερμοκρασίες, οδηγεί στη μεγαλύτερη απώλεια βάρους των προαναφερθέντων σωματιδίων IT σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου οι ενδόθερμες διαδικασίες είναι πιο πιθανό να λάβουν χώρα υπό την απελευθέρωση των SO_x. Η Εικόνα 2 περιγράφει τη διαφοροποίηση της απώλειας βάρους στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα IT κατά το θερμικό έλεγχο τους στις θερμοκρασίες [950-1250] °C, σε συνάρτηση με το μέσο μέγεθος των σωματιδίων IT και την αρχική ποσοστιαία παρουσία SO₃. Στο εύρος των θερμοκρασιών από 900°C -1200°C η εξέλιξη της ακόλουθης αλληλουχίας αντιδράσεων είναι πολύ πιθανή: σχηματισμός 5CaO·3Al₂O₃, 2CaO·3Al₂O₃ – διάσπαση του προϊόντος – ολοκλήρωση του σχηματισμού του XCaO·SiO₂, CaO·2SiO₂ με τη συμμετοχή του CaSO₄ – διαμόρφωση των 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃, 3CaO·Al₂O₃ με τη συμμετοχή του CaSO₄ και αργιλοπυριτικών συστατικών. Η εξέλιξη των αντιδράσεων αυτών απαιτεί τη μετατροπή της κρυσταλλικής φάσης σε άμορφη. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες λαμβάνει χώρα η διάσπαση του CaSO₄. Η απόρριψη του κλάσματος με διάμετρο σωματιδίων IT μικρότερη των 100μm οδηγεί α)

στη μείωση της ποσοστιαίας ΑΠ των πρόσθετων (ΙΤ) (υψηλά ποσοστά ΑΠ στα πρόσθετα πρέπει ασφαλώς να αποφεύγονται στη παραγωγική διαδικασία της τσιμεντοβιομηχανίας καθώς αυξάνει δραματικά τις ανάγκες σε νερό β) στην ενίσχυση του ενεργειακού περιεχομένου των πρόσθετων καθώς επωφελούνται από την παρουσία του άκαυστου λιγνίτη που υπάρχει στα μεγαλύτερα κλάσματα και γ) στην ενίσχυση των ποζολανικών τους ιδιοτήτων. Η απώλεια βάρους στις υψηλές θερμοκρασίες (>1150°C) είναι μεγαλύτερη για τα λεπτόκοκκα κλάσματα και μειώνεται αναλόγως με την αύξηση της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων. Στις χαμηλότερες θερμοκρασίες τα σωματίδια ΙΤ επιδεικνύουν παρόμοια συμπεριφορά. Κατά τη θέρμανση στο εύρος των θερμοκρασιών [950-1250]°C (ισχυρά ενδόθερμη διαδικασία) η επιπλέον απώλεια βάρους ποικίλει ανάλογα με την παρουσία του SO₃ και μειώνεται με την αύξηση της μέσης διαμέτρου των αποτεφρωμένων σωματιδίων.



Εικόνα 1. Διαφοροποίηση της χημικής σύστασης της υπάμενης τέφρας σε συνάρτηση με τη κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων της



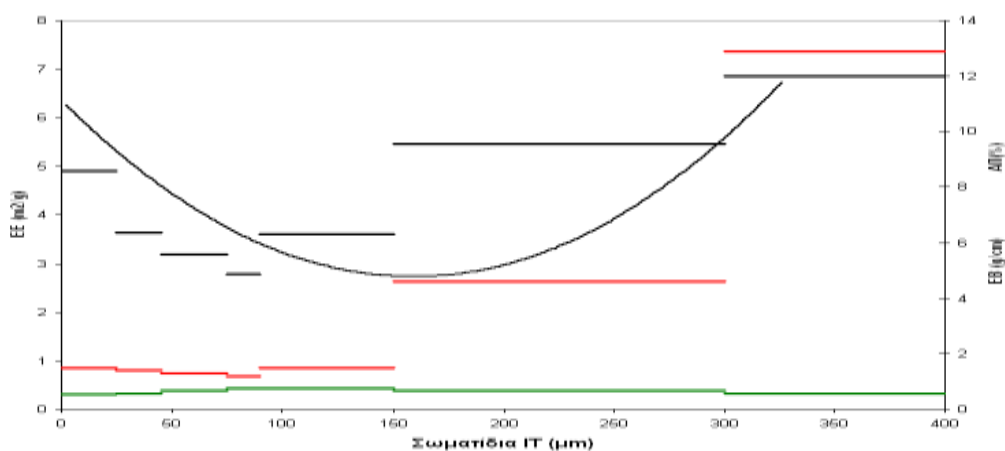
Εικόνα 2. Απώλεια βάρους (στους 950°C και 1250°C) και SO₃ (%) στα διάφορα κλάσματα ΙΤ

Πίνακας 2. ΕΕ και ΕΒ των κλασμάτων ΙΤ

Κλάσμα IT	Ειδική Επιφάνεια (g/cm)	Ειδικό Βάρος (m ² /g)
< 25	1.5	1.1
25-45	1.4	0.9
45-75	1.3	0.8
75-90	1.2	0.8
90-150	1.5	1.4
150-300	4.62	3.7
> 300	12.9	10.9

3.2 Ειδική Επιφάνεια (SSA) και Ειδικό Βάρος (SG) των κλασμάτων IT

Ο Πίνακας 2 δείχνει τις τιμές της ειδικής επιφάνειας και του ειδικού βάρους των διαφόρων κλασμάτων IT. Όπως αναμένονταν, στα αποτεφρωμένα κλάσματα (<90μm) η ειδική επιφάνεια μειώνεται με την αύξηση της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων. Στα κλάσματα IT με σωματίδια μεγαλύτερα από 90μm, η ειδική επιφάνεια αυξάνεται αναλόγως με την αύξηση της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων IT και της απώλειας πύρωσής τους. Η αύξηση των τιμών της ειδικής επιφάνειας αποδίδεται στο πορώδες των σωματιδίων του άκαυστου λιγνίτη το οποίο σχηματίζεται κατά την απελευθέρωση των πτητικών στον καυστήρα, κατά την παραγωγική διαδικασία του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι τιμές του ειδικού βάρους στα τελείως αποτεφρωμένα σωματίδια δεν έρχονται σε αντίθεση με τις αντίστοιχες μετρήσεις της ειδικής επιφάνειας, καθώς η μικρότερη τιμή ειδικού βάρους αντιστοιχεί στο πιο λεπτόκοκκο κλάσμα, ενώ οι η υψηλότερη στο κλάσμα (75-90)μm. Οι καλύτερες ποζολανικές ιδιότητες, η σημαντική παρουσία άμορφης φάσης και η οικονομικότερη μεταφορά του υλικού «προτείνουν» την επιλεκτική αξιοποίηση του κλάσματος (50-100)μm (το μεγάλο ειδικό βάρος μειώνει το κόστος μεταφοράς της υπτάμενης τέφρας). Η Εικόνα 3 περιγράφει τη διαφοροποίηση ειδικού βάρους, ειδικής επιφάνειας και απώλειας πύρωσης σε συνάρτηση με το μέσο μέγεθος των σωματιδίων IT.



Εικόνα 3. Ειδική επιφάνεια (μαύρη καμπύλη), Απώλεια Βάρους (κόκκινη καμπύλη) και Ειδικό Βάρος (πράσινη καμπύλη) στα διάφορα κλάσματα IT

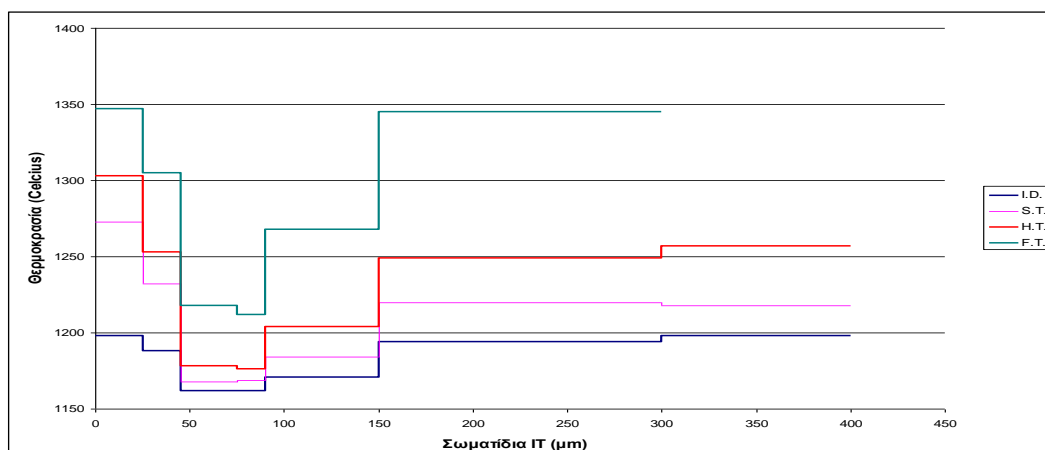
3.3 Θερμοκρασίες φυσικοχημικών μεταβολών στα διάφορα κλάσματα IT

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις τιμές των θερμοκρασιών: Αρχικής παραμόρφωσης (ID), Ημισφαιρικής Παραμόρφωσης (HT), Σφαιρικής Παραμόρφωσης (ST) και Τήξης (FT) στα διάφορα κλάσματα IT. Η Εικόνα 4 περιγράφει τη διαφοροποίηση των τιμών των θερμοκρασιών σε συνάρτηση με το μέγεθος των σωματιδίων, η οποία, σε μεγάλο βαθμό, οφείλεται στους διαφορετικούς χρόνους παραμονής των κλασμάτων στην εστία της καύσης. Οι καμπύλες που περιγράφουν τη διαφοροποίηση των τιμών των κρίσιμων θερμοκρασιών ταυτίζονται στους 1140

°C και στη διάμετρο των 90μm. Η προαναφερθείσα τιμή της θερμοκρασίας είναι η θερμοκρασία αρχικής παραμόρφωσης της ιπτάμενης τέφρας.

Πίνακας 3. Θερμοκρασίες φυσικοχημικών μεταβολών των διαφόρων κλασμάτων ΙΤ

Κοκκομετρικό Κλάσμα	(I.D.) (°C)	(S.T.) (°C)	(H.T.) (°C)	(F.T.) (°C)
< 25	1198	1273	1303	1347
25-45	1188	1232	1253	1305
45-75	1162	1168	1178	1218
75-90	1162	1169	1176	1212
90-150	1171	1184	1204	1268
150-300	1194	1220	1249	1345
> 300	1198	1218	1257	-



Εικόνα 4. Θερμοκρασίες φυσικοχημικών μεταβολών σε συνάρτηση με το μέγεθος των σωματιδίων της ΙΤ

3.4 Συνολική αποτίμηση των ιδιοτήτων των διαφόρων κλασμάτων της ΙΤ

Κλάσμα σωματιδίων (0-75)μm: Η χαμηλή πυκνότητα αυτού του κλάσματος ΙΤ περιορίζει το χρόνο παραμονής των σωματιδίων του στην εστία της καύσης και οδηγεί στην περιορισμένη έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες και στη συνεπακόλουθη παρεμπόδιση των ενδόθερμων αντιδράσεων. Παρόλα αυτά, η ταυτόχρονη μεταφορά σωματιδίων ΙΤ και καυσαερίων, σε συνδυασμό με τις μεγάλες τιμές ειδικής επιφάνειας αυτού του κλάσματος, ευνοεί την εξέλιξη των αντιδράσεων μεταξύ των συστατικών του. Η πολύ σημαντική ποσοστιαία παρουσία CaO στα λεπτόκοκκα κλάσματα είναι αναμενόμενη λόγω των εύθρυπτων ορυκτών του ασβεστολίθου του τροφοδοτούμενου καυσίμου. Παράλληλα η θερμική διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου εξηγεί την έντονη παρουσία του ελευθέρου οξειδίου του ασβεστίου. Η μετρούμενη απώλεια πύρωσης στο κλάσμα αυτό αποδίδεται σε μέρος του ασβεστολίθου που δεν έχει διασπαστεί λόγω έλλειψης χρόνου. Η σημαντική ποσοστιαία παρουσία του SO₃ εξηγείται από α) την αρχική παρουσία γύψου

στο ανόργανο μέρος του λιγνίτη β) το σχηματισμό CaSO_4 εξαιτίας της αποθεωτικής δράσης των CaCO_3 και CaO κατά τη από κοινού μεταφορά σωματιδίων IT και καυσαερίων. Η μικρή περίοδος θερμικής έκθεση αυτού του κλάσματος γίνεται επίσης προφανής από την έντονη κρυσταλλική φάση και τις υψηλές τιμές των θερμοκρασιών φυσικοχημικών μεταβολών. Όπως αναμένονταν, το ενεργό πυρίτιο εμφανίζει λιγότερο έντονη παρουσία σε σχέση με τα σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους.

Η παρουσία ασβεστούχων συστατικών σε αυτό το κλάσμα οδηγεί στην ανάπτυξη των υδραυλικών ιδιοτήτων του. Συνεπώς προτείνεται η μη-αξιοποίηση του κλάσματος (<75 μm) «ως παρελήφθη» στις εφαρμογές της βιομηχανίας τσιμέντου. Για την ακρίβεια, η απόρριψη του κλάσματος αυτού εξοικονομεί σημαντική ποσότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα τη μείωση τόσο του οικονομικού κόστους της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου όσο και του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των δραστηριοτήτων της. Αντοθέτως, η χαμηλή πυκνότητα και η μεγάλη ειδική επιφάνειά του το καθιστούν υλικό κατάλληλο για την οδοποιία και την αποκατάσταση εδαφών.

Κλάσμα σωματιδίων (75-150) μm : Το κλάσμα αυτό, εξαιτίας της μεγάλης του πυκνότητας, παραμένει για περισσότερο χρόνο στη εστία καύσης όχι μόνο στις περιοχές των υψηλών θερμοκρασιών αλλά συνολικά στις εγκαταστάσεις του καυστήρα. Τα χημικά συστατικά του κλάσματος υπόκεινται σε ενδοθερμικές μετατροπές ως αποτέλεσμα της έκθεσής τους στις υψηλές θερμοκρασίες. Σαν αποτέλεσμα α) αυτό το κλάσμα παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές απώλειας βάρους και β) τα συστατικά του αντιδρούν και σχηματίζουν ενώσεις που τήκονται εύκολα. Στη συνέχεια το CaSO_4 διασπάται υπό τον ταυτόχρονο σχηματισμό ασβεστοπυριτικών ενώσεων, αντίδραση η οποία οδηγεί στην απελευθέρωση SO_3 . Καθώς δεν υπάρχει ο διαθέσιμος χρόνος για να εξελιχθεί επαρκώς η κρυστάλλωση των συστατικών του κλάσματος, δημιουργείται έντονα υαλώδης φάση, διαδικασία στην οποία αποδίδονται και οι χαμηλές τιμές της ειδικής επιφάνειας των σωματιδίων του κλάσματος. Το κλάσμα σωματιδίων με μέγεθος (75-150) μm παρουσιάζει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο με συγκεντρωμένα αργίλο-πυριτικά και ασβεστο-πυριτικά συστατικά στην υαλώδη φάση, περιορισμένη παρουσία κρυσταλλικής φάσης και την υψηλότερη ποσοστιαία παρουσία SiO_2 και ενεργού πυριτίου. Τα κλάσμα, λοιπόν, αυτό έχει αποκτήσει τις καλύτερες ποζολανικές ιδιότητες. Επιπλέον, η μηδενική παρουσία ελεύθερου οξειδίου του ασβεστίου σε συνδυασμό με τα χαμηλά ποσοστά τριοξειδίου του θείου και απώλειας πύρωσης καθιστούν το συγκεκριμένο κλάσμα σωματιδίων IT κατάλληλο για χρήση στη φάση της άλεσης του κλίνκερ στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου. Παρόλα αυτά, η χαμηλές τιμές ειδικής επιφάνειάς και η απαίτηση θραύσης του επιφανειακού υαλώματος για την εκδήλωση της ποζολανικότητας, «εισηγούνται» την περαιτέρω κονιοποίηση του υλικού. Η μεγαλύτερη πυκνότητα του κλάσματος κάνει οικονομικότερη τη μεταφορά του ενώ ταυτόχρονα η αποφυγή μεταφοράς του μικρόκοκκου κλάσματος περιορίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαιτίας αυτού.

Κλάσμα σωματιδίων (>150) μm : Η αυξημένη τιμή ΑΠ του κλάσματος αυτού οφείλεται στην εργαστηριακή ολοκλήρωση της καύσης των σωματιδίων του λιγνίτη τα οποία δεν είχαν τον απαιτούμενο χρόνο κατά την παραγωγική διαδικασία. Κατά την έκθεση του κλάσματος (>150) μm στις υψηλές θερμοκρασίες τα πτητικά απελευθερώνονται με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πορώδους στη μάζα των σωματιδίων που εκδηλώνεται με την αύξηση της ειδικής επιφάνειας και τη μείωση της πυκνότητάς τους. Η ποσοστιαία παρουσία των συστατικών του ασβεστίου, όπως και του ελεύθερου οξειδίου του ασβεστίου και του τριοξειδίου του θείου είναι μικρότερες. Συστατικά δύσθρυπτων υλικών (SiO_2 , Al_2O_3) έχουν εντονότερη παρουσία. Το κλάσμα (>150) μm είναι υπεύθυνο για την αύξηση της ΑΠ στο συνολικό, ενιαίο υλικό της ιπτάμενης τέφρας με επίπτωση στα κριτήρια αποτελεσματικότητας για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας στη βιομηχανία τσιμέντου. Η κρυσταλλική φάση του κλάσματος (το οποίο δεν απέδωσε ολόκληρο το ενεργειακό του περιεχόμενο κατά την παραγωγική διαδικασία του ηλεκτρικού ρεύματος) σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος των σωματιδίων τους και τη δυσθρυπτότητά τους, κατά την απαιτούμενη

κονιοποίηση του στην παραγωγική διαδικασία της τσιμεντοβιομηχανίας, προϋπολογίζει ενεργοβόρο διαδικασία, μη-συγκρίσιμου μεγέθους με το υπόλειμμα του ενεργειακού περιεχομένου και την τελική συνεισφορά στο παραγόμενο προϊόν.

Η μη-συμμετοχή του κλάσματος αυτού στην παραγωγική διαδικασία της τσιμεντοβιομηχανίας μπορεί να οδηγήσει στην εξοικονόμηση ενέργειας με ευνοϊκά αποτελέσματα, τόσο στην ποιότητα των τελικών υλικών, όσο και στην μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κλάσμα (75-150) μm , το οποίο παρουσιάζει την εντονότερη υαλώδη φάση, αποκτά τις καλύτερες ποζολανικές ιδιότητες. Προκειμένου οι ιδιότητες του κλάσματος να αξιοποιηθούν, προτείνεται η περαιτέρω άλεση των σωματιδίων του (υπό τη συνεπακόλουθη απελευθέρωση πυριτικών συστατικών) έτσι ώστε να θραυτεί το επιφανειακό υάλωμα και να αυξηθεί σημαντικά η ειδική επιφάνειά τους. Το συγκεκριμένο αυτό κλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξεχωριστά για την παρασκευή του τσιμέντου, εξοικονομώντας ενέργεια κατά την παραγωγική διαδικασία και συμβάλλοντας έτσι στη μείωση οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους. Σίγουρα, πάντως, απαιτείται η διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας, προσανατολισμένης κυρίως στις αντοχές των τελικών προϊόντων. Προτείνεται, επίσης, η απόρριψη του κλάσματος (>50) μm όσον αφορά την παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου εξαιτίας της εντονότατης παρουσίας SO_3 και CaO στα σωματίδιά του. Το ίδιο αυτό κλάσμα μπορεί να είναι περισσότερο χρήσιμο σε εφαρμογές οδοποιίας και αποκατάστασης εδαφών. Όσον αφορά το κλάσμα (>150) μm , παρότι η χρήση του προφανώς θα εξοικονομούσε ενέργεια κατά τη διαδικασία της παρασκευής του κλίνκερ, εντούτοις, για μια σειρά από λόγους, προτείνεται η απόρριψή του.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Annual Book of ASTM Standards, C618-03

Bogdanovic, I., Fazinic, S., Itskos, S., Jaksic, M., Karydas, E., Katselis, V., Paradellis, T., Tadic, T., Valkovic, O., Valkovic, V. 1995. Trace element characterization of coal fly ash particles, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 99, 1-4: 402-405

Itskos, S.G. and Itskos, G.S. 2006. Saving energy and mineral resources through the rationalization of the supply of lignite and the utilization of lignite fly ash. *Energy Saving Workshop, Athens Academy of Sciences*, Athens, Greece, Proceedings: 167-175

Itskos, S., Itskos, G.S., Kakaras, E., Koukouzas, N. 2007. Differentiation of chemical composition and behaviour of lignite fly ash as a function of its particle size distribution *3rd International Conference on Environmental Science and Technology*, American Academy of Sciences, 6-9 August 2007, Houston, TX, USA.

Koukouzas, N. K., Zeng, R., Perdikatsis, V., Xu, W., Kakaras, E. K. 2006. Mineralogy and geochemistry of Greek and Chinese coal fly ash, *Fuel*, 85: 2301-2309

Mason, B. and Moore, C.B. 1982. *Principles of Geochemistry*, New York, John Wiley

Rao, P.V. and Buckley, D.H. 1985. *Characterization of solid particle erosion resistance of ductile metals based on their properties*, Cleveland, NASA

Tsimas, S., Moutsatsou-Tsima, A. 2005. High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives, *Cement & Concrete Composites*, 27: 231-237