

Μικροδομή πυροσυσσωματωμένων τέφρων καύσης λιγνίτη

A. Μουτσάτσου¹, Β. Καραγιάννης², Ε. Κατσικά¹

¹Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15773 Ζωγράφου, Αθήνα.

²Τμήμα Τεχνολογιών Αντιρρύπανσης, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, 50100 Κοίλα, Κοζάνη.

Λέξεις κλειδιά: Ιπτάμενη τέφρα, τέφρα πυθμένα, καύση λιγνίτη, πυροσυσσωμάτωση, κεραμικά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η ερευνητική αυτή εργασία εστιάζεται στη διερεύνηση των δυνατοτήτων πυροσυσσωμάτωσης ιπτάμενης τέφρας και υγρής τέφρας (τέφρας πυθμένα), υψηλής % περιεκτικότητας σε Ca, παραπροϊόντων καύσης λιγνίτη ατμοηλεκτρικού σταθμού της Δυτικής Μακεδονίας, προκειμένου να παρασκευασθούν κεραμικά. Για το σκοπό αυτό, έγινε προετοιμασία ευρείας σειράς μειγμάτων ιπτάμενης/υγρής τέφρας, εφαρμόστηκαν απλές και οικονομικές τεχνικές επεξεργασίας κόνεων για την παρασκευή δοκιμίων και βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροί της. Διερευνήθηκε επίσης η χρήση H₂O και CaO ως βελτιωτικών προσθέτων. Μετά την πυροσυσσωμάτωση των αρχικών μορφωμάτων στους 1100°C, η μικροδομή που προέκυψε εξετάστηκε με περίθλαση ακτίνων X (XRD) καθώς και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) σε συνδυασμό με φασματοσκοπία διαχεόμενης ενέργειας (EDX). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων, τα υλικά που ελήφθησαν διαθέτουν αποδεκτή μικροδομή κεραμικού. Το πορώδες ποικίλει ανάλογα με τη σχετική σύνθεση ιπτάμενης/υγρής τέφρας, καθώς και με την % περιεκτικότητα σε H₂O και επιπρόσθετο CaO, και επομένως είναι δυνατόν να ρυθμιστεί καταλλήλως.

Microstructure of sintered lignite combustion ashes

A. Moutsatsou¹, V. Karayannis², E. Katsika¹

¹Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineering, N.T.U.A., 9 Iroon Polytechniou str., 15773 Zografou Campus, Athens, Greece.

²Department of Pollution Control Technologies, Technological Educational Institute of West Macedonia, 50100 Kila, Kozani, Greece.

Key words: Fly ash, bottom ash, lignite combustion, sintering, ceramics

ABSTRACT: The current study focuses on the investigation of sintering of rich-in-Ca fly ash and bottom ash, originated from a lignite combustion power plant in West Macedonia - Greece, for ceramics fabrication, an alternative application in order to recycle the high ash output in the country. For that purpose, various fly/bottom ash mixtures were prepared and simple powder processing techniques were applied. The incorporation of H₂O and CaO as fabrication additives was tested. After sintering at 1100°C, the microstructure obtained was investigated by XRD and SEM-EDX analyses. The materials developed showed acceptable microstructure. Porosity varies with the relative FA/BA composition and with the % content of fabrication additives, and therefore it can be tailored accordingly.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση των τεραστίων ποσοτήτων τέφρας που παράγονται ετησίως παραμένει ένα σημαντικό πρόβλημα σε πολλά μέρη του κόσμου, δεδομένου μάλιστα ότι η μεγάλη ειδική επιφάνεια των σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας (IT) οδηγεί σε εμπλουτισμό τους με δυνητικά επικίνδυνες στοιχειακές προσμείξεις οι οποίες συμπυκνώνονται κυρίως στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια ψύξης των καυσαερίων [Polic κ.α. 2005]. Ωστόσο, μόνον ένα μικρό ποσοστό ποσοτήτων IT οδηγείται σήμερα για ανακύκλωση στην τσιμεντοβιομηχανία, ενώ οι μεγαλύτερες ποσότητες καταλήγουν σε κάποια μορφή εναπόθεσης. Καθίσταται επομένως αναγκαία η ανάπτυξη εναλλακτικών εφαρμογών στην κατεύθυνση ανακύκλωσης των παραγομένων μεγάλων ποσοτήτων τέφρας ως χρήσιμου βιομηχανικού παραπροϊόντος και μη απόρριψης της ως αποβλήτου.

Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να αναπτύξουν ενδιαφέρουσες εφαρμογές σχετικά. Συγκεκριμένα, IT έχει υποστεί επεξεργασία για να δράσει ως συνθετικός ζεόλιθος για την αποκατάσταση εδαφών που έχουν ρυπανθεί με βάρεια μέταλλα [Moutsatsou κ.α. 2006]. IT σε μορφή συμπυκνωμάτων (pellets) έχει ήδη εξεταστεί με επιτυχία ως προσροφητικό μέσο χαμηλού κόστους για την απομάκρυνση ιόντων Cu και Cd από υδατικά διαλύματα [Papandreou κ.α. 2007]. Ακόμη, τα σωματίδια IT και υγρής τέφρας (YT) διαθέτουν ενδιαφέροντα τριβολογικά χαρακτηριστικά, και ως εκ τούτου έχει διερευνηθεί και η επίδρασή τους στην τριβολογική συμπεριφορά συνθέτων υλικών [Malhotra κ.α. 2002].

Η συμπύκνωση IT (pelletization) προς σχηματισμό ελαφροβαρών συσσωματωμάτων για ποικίλες χρήσεις, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής σκυροδέματος και γεωτεχνικών εφαρμογών, θα μπορούσε να αποτελέσει μια ακόμη διέξοδο στο πρόβλημα διαχείρισης της τέφρας [Arslan κ.α. 2006, Vlahovic κ.α. 2007, Baykal κ.α. 2000]. Γενικότερα, η χρησιμοποίηση της IT στον κατασκευαστικό τομέα αναμένεται να αυξηθεί. Μάλιστα, αρκετές ερευνητικές εργασίες εστιάζουν το ενδιαφέρον τους στην προσθήκη IT σε μείγματα πηλοχωμάτων, σε διάφορους συνδυασμούς και αναλογίες, για την παρασκευή παραδοσιακών οικοδομικών τούβλων και πλακιδίων, με ανεκτές αποκλίσεις από τις προδιαγραφές ή ακόμη και με βελτίωση των χαρακτηριστικών των τελικών προϊόντων, σε συνάρτηση με την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη βασική πρώτη ύλη καθώς και το είδος της προστιθέμενης τέφρας [Spiliotis κ.α. 2007, Zimmer κ.α. 2007, Mishulovich κ.α. 2003, DCCA 2002, Fatih κ.α. 2001, Queralt κ.α. 1997, Berto 2007]. Άλλωστε, όλο και περισσότερα κεραμικά υλικά παρουσιάζονται στις μέρες μας στην αγορά από ποικίλες πρώτες ύλες και με χαρακτηριστικά και απόδοση που ξεπερνούν αρκετά τις συμβατικές χρήσεις. Η IT μπορεί να θεωρηθεί ελκυστική πρώτη ύλη για την κεραμική βιομηχανία, δεδομένου ότι η πυριτία και η αλουμίνα συμπεριλαμβάνονται μεταξύ των κυριότερων συστατικών της. Επίσης τα σφαιρικά σωματίδια και οι κρύσταλλοι μουλλίτη που περιέχει είναι ιδεώδη για τη δημιουργία κάποιας «διαπερατότητας» του κεραμικού ώστε να προωθείται η πληρέστερη όπτηση μέσα στον όγκο του. Ακόμη, IT μπορεί να επιλεγεί για να προσδώσει στο προϊόν ειδικά χρώματα ή άλλες ιδιότητες που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν με τα κοινά πηλοχώματα [Hughes 1995]. Επιπροσθέτως, η IT είναι συνήθως λεπτομερής και ευκόλως διαθέσιμη, και κατά συνέπεια η χρήση της μειώνει τις απαιτήσεις των πρώτων σταδίων παραγωγής τούβλων από χώματα και επομένως και το κόστος παραγωγής. Ωστόσο, η ενσωμάτωση IT στο μείγμα των πρώτων υλών για την παραγωγή τούβλων σπάνια έχει υπερβεί ένα 30% του μείγματος [Lingling κ.α. 2005], κυρίως εξαιτίας ασυμβατότητας της τέφρας με τα χώματα κατά τα στάδια παραγωγής, ιδιαίτερα δε αναφορικά με μια μειωμένη πλαστικότητα μειγμάτων με υψηλά ποσοστά τέφρας, που οδηγεί σε δυσκολίες εξώθησης της πλαστικής μάζας για μορφοποίηση. Τα τελευταία χρόνια, διεξάγεται έρευνα για την ανάπτυξη κεραμικών χρησιμοποιώντας 100% ως πρώτη ύλη διάφορες τέφρες καύσης κάποιας μορφής άνθρακα, με ή χωρίς την ενσωμάτωση προσθέτων, τέτοιων όπως νερό, ενώσεις βόρακα, τάλκης, τσιμέντο, πυροφυλλίτης, άσβεστος, ίνες, και ακόμη και άλλες ανόργανες, οργανικές ή σύνθετες ύλες, και με διερεύνηση βελτιστοποίησης των παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας [Adell κ.α.

2008, Erol κ.α. 2008, Kim κ.α. 2008, Zabielska-Adamska 2008, Chandra κ.α. 2008, Uwe κ.α. 2007, Chandra κ.α. 2005, Sear 2005, Liu κ.α. 2005, Kayali 2005, Ilıc κ.α. 2003, Benavidez κ.α. 2003, Yoo κ.α. 2003].

Η παρούσα ερευνητική εργασία εστιάζεται στην ανάπτυξη κεραμικών με χρήση ως πρώτης ύλης αποκλειστικά και μόνον IT και YT υψηλής % περιεκτικότητας σε Ca, παραπροϊόντων καύσης λιγνίτη ατμοηλεκτρικού σταθμού της Δυτικής Μακεδονίας. Τέτοιες IT υψηλού Ca, περιέχουσες κατ' ελάχιστο 50% από $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, κατηγοριοποιούνται κατά ASTM ως IT κατηγορίας-C. Σημειωτέον ότι παρουσιάζουν ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες χάρη στο υψηλό ποσοστό CaO το οποίο μπορεί να συνεισφέρει ως φυσικό συνδετικό και κατά την παρασκευή κεραμικών. Επισημαίνεται ότι, αν και ποσότητες IT της τάξης των 11,5 εκ. τόνων παράγονται ετησίως κατά την καύση λιγνίτη για ηλεκτροπαραγωγή στη χώρα, εκ των οποίων το 80% στις μονάδες της Δυτικής Μακεδονίας, μόνον ένα μικρό ποσοστό αξιοποιείται σε κάποιες χρήσεις [Tsimas κ.α. 2005, Papadakis 2000, Ftikos κ.α. 1985]. Πέραν της περιβαλλοντικής διάστασης, θα πρέπει να επισημανθούν και τα οικονομικά πλεονεκτήματα από το χαμηλό κόστος των εν λόγω βιομηχανικών παραπροϊόντων, ακόμη δε και κάποια πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας κατά την όπτηση των μειγμάτων χάρη στην αξιοσημείωτη % περιεκτικότητα σε άκανστο άνθρακα. Στο πλαίσιο αυτό, εφαρμόστηκαν απλές τεχνικές επεξεργασίας κόνεων για την παρασκευή δοκιμίων από ποικίλα μείγματα IT/YT, κατεβλήθη προσπάθεια βελτιστοποίησης των παραμέτρων της διαδικασίας και εξετάστηκε η μικροδομή των δοκιμίων. Παράλληλα, διερευνήθηκε ο ρόλος της χρησιμοποίησης H_2O καθώς και επιπροσθέτου CaO στο τελικό αποτέλεσμα.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1 Πρώτες ύλες

Η χημική ανάλυση των δειγμάτων IT και YT του λιγνιτικού ατμοηλεκτρικού σταθμού που χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτες ύλες δίνεται στον ακόλουθο Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση των δειγμάτων ιπτάμενης τέφρας (IT) και υγρής τέφρας (YT)

Σύσταση (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Απώλεια Πύρωσης (%)
IT	30,16	14,93	5,10	34,99	2,69	6,28	1,01	0,40	3,95
YT	27,12	9,40	5,65	26,56*	2,68	3,13	0,89	2,97	19,45

* Ελεύθερο CaO: 5,87%

Αναφορικά με τη μορφολογία των σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας, σημειώνεται ότι μερικά σωματίδια τέφρας λαμβάνουν μορφή κενόσφαιρας, που αποκτείται κατά τη στιγμιαία ψύξη των καυσαερίων κατά την επαφή τους με τον αέρα, και οφείλεται σε δυνάμεις επιφανειακής τάσης που ενεργούν στο τήγμα κατά την ψύξη για ελαχιστοποίηση της ελεύθερης επιφανειακής ενέργειας [Mollah κ.α. 1999]. Πάντως, ανευρίσκονται επίσης σωματίδια με πιο ακανόνιστο σχήμα. Γενικά, σύμφωνα με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, οι Ελληνικές τέφρες κρίνονται κατάλληλες ως πρώτες ύλες για την παρασκευή κεραμικών.

2.2 Παρασκευή δοκιμίων τέφρας

Τα δείγματα τέφρας που ελήφθησαν αλέστηκαν και ετοιμάστηκε ευρείας συστάσεως σειρά μειγμάτων IT/YT, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Μείγματα ΙΤ/ΥΤ και συνδετικών υλικών

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΣΥΣΤΑΣΗ
1-1	100% Ιπτάμενη τέφρα
1-2	100% Ιπτάμενη τέφρα που έχει υποστεί ξήρανση στους 105 °C
1-3	Ιπτάμενη τέφρα και νερό
1-4	Ιπτάμενη τέφρα με 3% CaO και 1% νερό
2-1	100% Υγρή τέφρα
2-2	100% Υγρή τέφρα που έχει υποστεί ξήρανση στους 105 °C
2-3	Ιπτάμενη τέφρα και 5% νερό
2-4	Υγρή τέφρα με 3% CaO και 1% νερό
3-1	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 1/1
3-2	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 1/1 που έχει υποστεί ξήρανση στους 105 °C
3-3	Ιπτάμενη τέφρα με 10% νερό
3-4	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 1/1 με 3% CaO και 1% νερό
4-1	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 1/2
4-2	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 1/2 που έχει υποστεί ξήρανση στους 105 °C
4-3	Ιπτάμενη τέφρα με 30% νερό
4-4	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 1/2 με 3% CaO και 1% νερό
5-1	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 1/3
5-2	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 1/3 που έχει υποστεί ξήρανση στους 105 °C
5-4	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 1/3 με 3% CaO και 1% νερό
6-1	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 2/1
6-2	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 2/1 που έχει υποστεί ξήρανση στους 105 °C
6-3	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 2/1 και νερό
6-4	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 2/1 με 3% CaO και 1% νερό
7-1	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 3/1
7-2	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 3/1 που έχει υποστεί ξήρανση στους 105 °C
7-3	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 3/1 και νερό
7-4	Ιπτάμενη και υγρή τέφρα σε αναλογία 3/1 με 3% CaO και 1% νερό
8-4	Ιπτάμενη τέφρα με 3% CaO και 10% νερό
9-4	Ιπτάμενη τέφρα με 5% CaO και 1,5% νερό
10-4	Ιπτάμενη τέφρα με 10% CaO και 3% νερό

Για την παρασκευή δοκιμών εφαρμόστηκαν απλές και οικονομικές τεχνικές επεξεργασίας κόνεων. Συγκεκριμένα, τα μείγματα συμπίεστηκαν εν ψυχρώ σε ανοξειδωτή μήτρα για σχηματισμό αρχικών κυλινδρικών δοκιμών διαμέτρου 1,3 cm μορφής δισκίου. Η πυκνότητα και η αντοχή των μορφωμάτων που ελήφθησαν αξιολογήθηκε και έγινε βελτιστοποίηση του εφαρμοζόμενου φορτίου συμπίεσης, δεδομένου ότι η μικροδομή του τελικού προϊόντος μετά την πυροσυσσωμάτωση επηρεάζεται έντονα από την ποιότητα του αρχικού συμπίεστου μορφώματος, και επομένως και από το εφαρμοζόμενο φορτίο [Panelli κ.α. 2001]. Σε σειρά μειγμάτων, διερευνήθηκε επίσης η χρήση H₂O και CaO ως προσθέτων για διερεύνηση κυρίως των δυνατοτήτων βελτίωσης του αποτελέσματος της συμπίεσης. Όλα τα αρχικά μορφώματα υποβλήθηκαν σε όπτηση στους 1100°C για 2h σε εργαστηριακό φούρνο για πυροσυσσωμάτωση, και τελικά σε βαθμιαία ψύξη έως τη θερμοκρασία δωματίου. Οι συνθήκες πυροσυσσωμάτωσης βελτιστοποιήθηκαν βάσει προκαταρκτικών πειραματικών δοκιμών.

Η μικροδομή που προέκυψε εξετάστηκε με περίθλαση ακτίνων X (XRD) (Siemens Diffractometer D-5000) καθώς και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) σε συνδυασμό με φασματοσκοπία διαχεόμενης ενέργειας (EDX) (Jeol JSM-6400). Εκτίμηση της αρχικής φαινόμενης πυκνότητας έγινε από τη μάζα και τον όγκο των μορφωμάτων, ενώ η φαινόμενη πυκνότητα μετά την πυροσυσσωμάτωση μετρήθηκε με τη μέθοδο του Αρχιμήδη. Η συρρίκνωση υπολογίστηκε από τη διαφορά που επήλθε στον όγκο των δοκιμών κατά την όπτηση.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα συμπιεστά μορφώματα που ελήφθησαν από αλεσμένη τέφρα διέθεταν επαρκή γενικά συμπύκνωση και αρχική αντοχή για τη διασφάλιση του ασφαλούς χειρισμού και της υποβολής τους στη συνέχεια σε όπτηση. Αντίθετα, σε προκαταρκτικές δοκιμές συμπίεσης μη αλεσμένων μειγμάτων ΙΤ/ΥΤ χωρίς χρήση προσθέτων βελτιωτικών της συμπίεσης, είχε διαπιστωθεί ένας μειωμένος βαθμός συμπύκνωσης, που πρέπει να συνδεθεί με τη μικρότερη ειδική επιφάνεια των τεφρών πριν την άλεση. Γενικότερα, η ενσωμάτωση H_2O και επιπροσθέτου CaO στα μείγματα τέφρας αποδείχτηκε θετική για μια αποτελεσματικότερη συμπίεση των σωματιδίων. Μετά την πυροσυσσωμάτωση, ελήφθησαν δοκίμια με αποδεκτή στις περισσότερες των περιπτώσεων σχετική πυκνότητα (Εικόνα 1).



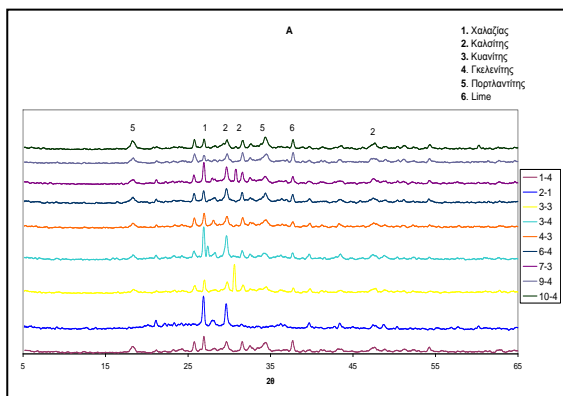
(α)



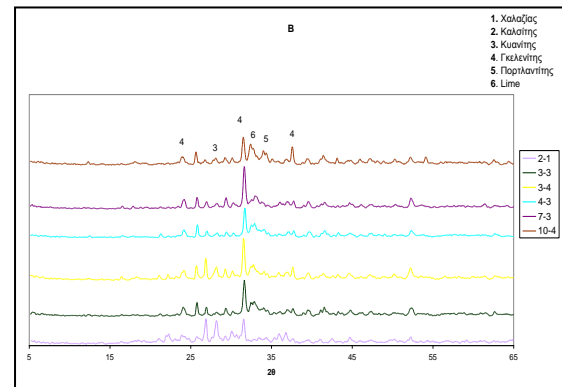
(β)

Εικόνα 1. Μακροφωτογραφίες πυροσυσσωματωμένων δοκιμίων τέφρας (διάμετρος=1,3 cm): (α) ΙΤ και (β) ΙΤ+3%κ.β.СаО+1%κ.β.Н₂О

Ο χαρακτηρισμός των φάσεων δοκιμίων αναφοράς (πριν την πυροσυσσωμάτωση) και αντιπροσωπευτικών πυροσυσσωματωμένων, καθώς και φωτογραφίες της μικροδομής τους παρουσιάζονται στις Εικόνες 2 και 3 αντίστοιχα. Στην Εικόνα 2, πυροσυσσωματωμένα δοκίμια ΙΤ/ΥΤ επιδεικνύουν μεγαλύτερη κρυσταλλικότητα, αλλά και δημιουργία σημαντικής ποσότητας γκελενίτη, η παρουσία του οποίου είναι γενικά ανεπιθύμητη καθόσον έχει μεγάλο συντελεστή θερμικής διαστολής και μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές. Σημειωτέον ότι γκελενίτης προκύπτει από αντιδράσεις ανθρακικών-πυριτικών-σπινελίων [Spiliotis κ.α. 2007].

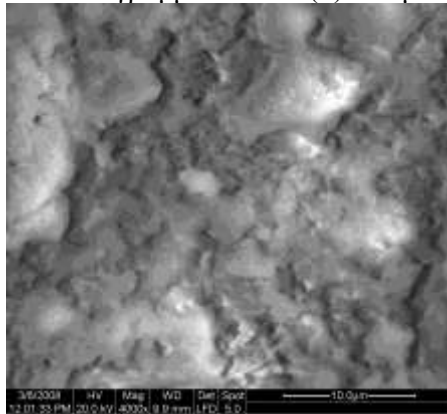


(α)

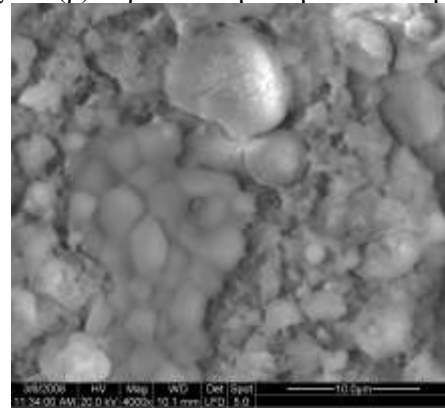


(β)

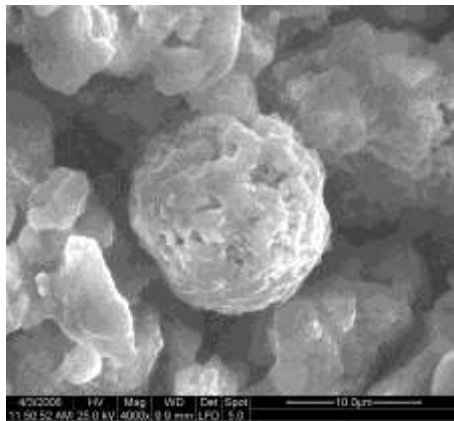
Εικόνα 2. Διαγράμματα XRD (α) δοκιμίων αναφοράς και (β) πυροσυσσωματωμένων δοκιμίων



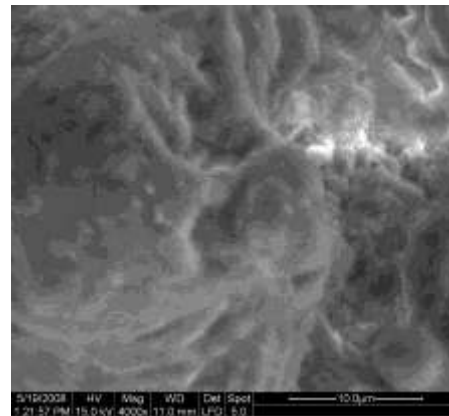
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 3. Μικρογραφίες SEM πυροσυσσωματωμένων δοκιμίων: (α) IT/YT:1/1 + 3% H_2O + 1% CaO , (β) YT 100%, (γ) IT + 10% CaO + 3% H_2O και (δ) IT/YT:3/1 + 3% H_2O + 1% CaO

Στην Εικόνα 3, φαίνεται ο σχηματισμός χαρακτηριστικών «λαιμών» πυροσυσσωμάτωσης, η αντίδραση των κενοσφαιρών (άμορφο SiO_2) με $Ca(OH)_2$ (δοκίμια γ,δ), και ακόμη η ανάπτυξη κάποιας υαλώδους φάσης. Πράγματι, σε ετερογενή συστήματα όπως αυτά των τεφρών που εξετάστηκαν και περιέχουν μείγμα κρυσταλλικών και αμόρφων συστατικών, υπάρχουν σωματίδια με υψηλές και σωματίδια με χαμηλότερες θερμοκρασίες τήξης, που επομένως συμπεριφέρονται διαφορετικά κατά τη διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης. Κατά συνέπεια, στις θερμοκρασιακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν, θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν φαινόμενα τόσο κυρίως διάχυσης όσο και περιορισμένης έστω ιξώδους ροής λεπτής υγρής στοιβάδας, που λαμβάνουν χώρα μεταξύ σωματιδίων των τεφρών και τείνουν να τα διασυνδέσουν [Nowok κ.α. 1990]. Σημειώτεον ότι έμφαση στο ρόλο φαινομένων μεταφοράς εντός της διασωματιδιακής λεπτής υγρής φάσης επί της συμπεριφοράς της τέφρας κατά την πυροσυσσωμάτωση έχει ήδη δοθεί από άλλους ερευνητές [Mollah κ.α. 1999, Nowok κ.α. 1998].

Οι μικροφωτογραφίες SEM αποκαλύπτουν επίσης ένα διασυνδεδεμένο πορώδες στα πυροσυσσωματωμένα δοκίμια, το οποίο δεν έχει κάποιο ιδιαίτερο προσανατολισμό ή σχήμα και μεταβάλλεται με τη σχετική σύνθεση IT/YT, όπως επαληθεύτηκε και από τις μετρήσεις πυκνότητας που επέτρεψαν περαιτέρω εμβάθυνση στις διεργασίες συμπύκνωσης του υλικού. Το

πορώδες μπορεί, σε κάποιο βαθμό, να αποδοθεί στην απομάκρυνση του υπολειμματικού άνθρακα που κανονικά λαμβάνει χώρα στη θερμοκρασιακή περιοχή των 700-750°C σε κεραμικά από τέφρα [Mishulovich κ.α. 2003]. Παρόμοιος ή και καλύτερος ακόμη βαθμός συμπίκνωσης για δεδομένη σύνθεση ΙΤ/ΥΤ παρατηρήθηκε όταν 3%κ.β. CaO με την αντίστοιχη στοιχειομετρική ποσότητα H₂O (1%κ.β.) προστέθηκαν στα μείγματα τέφρας. Γενικά, τα πυροσυσσωματωμένα δοκίμια εμφανίζουν μια αποδεκτή μικροδομή κεραμικού. Επειδή δε το πορώδες μεταβάλλεται με τη σχετική σύνθεση ΙΤ/ΥΤ, όπως προαναφέρθηκε, είναι δυνατόν να προδιαγραφεί σε επιθυμητά επίπεδα, γεγονός το οποίο θα μπορούσε να έχει ενδιαφέρον για ειδικές εφαρμογές, καθότι οι πορώδεις μικροδομές παρέχουν πλεονεκτήματα αναφορικά με τη θερμομονωτική συμπεριφορά τους ως εναλλακτική λύση για την ελάττωση της ενεργειακής κατανάλωσης κτηρίων [Ren κ.α. 2007, Yildirim κ.α. 1996], καθώς και την αντοχή σε θερμική προσβολή χάρη σε μια βελτιωμένη ανοχή διαστολής και κάποια μείωση του μέτρου ελαστικότητας [Karayannis κ.α. 2007].

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα χημικά, κρυσταλλογραφικά, και μορφολογικά χαρακτηριστικά τεφρών υψηλού Ca από λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας καθιστούν δυνατή τη χρήση τους ως πρώτων υλών στην ανάπτυξη κεραμικών. Πράγματι, με την εφαρμογή απλών και οικονομικών μεθόδων επεξεργασίας κόνεων παρασκευάστηκαν με επιτυχία από μείγματα ΙΤ και ΥΤ κεραμικά υλικά με αποδεκτή μικροδομή. Γενικά, η συμπίεση και η συμπίκνωση διευκολύνονται σε κάποιο βαθμό από την προσθήκη CaO and H₂O. Κατά την πυροσυσσωμάτωση, προωθείται ο σχηματισμός γκελενίτη και άλλων κρυσταλλικών φάσεων. Το πορώδες ποικίλει ανάλογα με τη σχετική σύνθεση ΙΤ/ΥΤ καθώς και με την % περιεκτικότητα σε H₂O και επιπρόσθετο CaO, και επομένως είναι δυνατόν να ρυθμιστεί καταλλήλως, το οποίο θα μπορούσε να είναι ενδιαφέρον για την ανάπτυξη θερμομονωτικής συμπεριφοράς και άλλες εφαρμογές πορωδών δομών.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Adell, V., Cheeseman, C.R., Doel, A., Beattie, A. & Boccaccini, A.R. 2008. Comparison of rapid and slow sintered pulverised fuel ash, *Fuel*, 87 (2): 187-195
- Arslan, H. & Baykal, G. 2006. Utilization of fly ash as engineering pellet aggregates, *Environ Geol*, 50: 761-770
- Baykal, G. & Döven, A.G. 2000. Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results, *Resources, Conservation and Recycling*, 30 (1): 59-77
- Benavidez, E., Grasselli, C. & Quaranta, N. 2003. Densification of ashes from a thermal power plant, *Ceram Int*, 29: 61-68
- Berto, Arnaldo Moreno, 2007. Ceramic tiles: Above and beyond traditional applications, *J Euro Ceram Soc*, 27 (2-3): 1607-1613
- Chandra, N., Sharma, P., Pashkov, G.L., Voskresenskaya, E.N., Amritphale, S.S. & Baghel, N.S. 2008. Coal fly ash utilization: Low temperature sintering of wall tiles, *Waste Management*, 28 (10): 1993-2002
- Chandra, N., Agnihotri, N., Bhasin, S. & Khan, A.F. 2005. Effect of addition of talc on the sintering characteristics of fly ash based ceramic tiles, *J Euro Ceram Soc*, 25: 81-88
- Erol, M., Küçükbayrak, S. & Ersoy-Meriçboyu, A. 2008. Characterization of sintered coal fly ashes, *Fuel*, 87 (7): 1334-134
- Fatih, T. & Umit, A. 2001. Utilization of fly ash in manufacturing of building bricks, *Proc. Int. Ash Utilization Symp.*, Lexington, Kentucky, USA
- Fired bricks from fly ash, 2002. Illinois State Geological Survey, DCCA
- Ftikos, C. & Tsimas, S. 1985. Investigation of the possible utilization of Greek fly ash, Technical Chamber of Greece, Athens
- Hughes, R.E., DeMaris, P.J., Dreher, G.B., Moore, D.M. & Rostam-Abadi, M. 1995-1996. Brick

manufacture with fly ash from Illinois coals, *ICCI Project: 95-1/3.1A-14*, Final technical report

Ilic, M., Cheeseman, C., Sollars, C. & Knight, J. 2003. Mineralogy and microstructure of sintered lignite coal fly ash, *Fuel*, 82: 331–336

Karayannis, V.G. & Moutsatsou, A.K. 2007. The contribution of waste in the construction of composite materials. *J Eur Ceram Soc* 27 (2-3): 843-849

Kayali, O. 2005. High performance bricks from fly ash, www.flyash.info

Kim, B. & Prezzi, M. 2008. Compaction characteristics and corrosivity of Indiana class-F fly and bottom ash mixtures, *Constr. Build. Mater.*, 22: 694-702

Lingling, X., Wei, G., Tao, W. & Nanru, Y. 2005. Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio, *Constr Build Mater*, 19: 243–247

Liu, H. Burkett, W.J. & Haynes, K. 2005. Improving freezing and thawing properties of fly ash bricks, *Proc. World of Coal Ash (WOCA) Conf.*, Lexington, Kentucky, USA

Malhotra, V.M., Valimbe, P.S. & Wright, M.A. 2002. Effects of fly ash and bottom ash on the frictional behavior of composites, *Fuel*, 81 (2): 235-244

Mishulovich, A. & Evanko, J.L. 2003. Ceramic tiles from high-carbon fly ash, *Proc. Int. Ash Utilization Symp.*, Lexington, Kentucky, USA

Moutsatsou, A. & Protonotarios, V. 2006. Remediation of polluted soils by utilizing hydrothermally treated calcareous fly ashes, *China Particuology*, 4 (2): 65-69

Nowok, J.W., Hurley, J.P. & Benson, S.A. 1998. The role of physical factors in mass transport during sintering of coal ashes and deposit deformation near the temperature of glass transformation, *Fuel Processing Technology*, 56: 89-101

Nowok, J.W., Benson, S.A., Jones, M.L. & Kalmanovitch, D.P. 1990. Sintering behaviour and strength development in various coal ashes, 69: 1020-1028

Panelli, R. & Filho, F.A. 2001. A study of a new phenomenological compacting equation, *Powder Technology*, 114 (1-3): 255-261

Papadakis, V.G. 2000. Effect of fly ash on Portland cement systems - Part II. High-Calcium fly ash, *Cement and Concrete Research*, 30 (10): 1647-1654

Papandreou, A., Stournaras, C.J. & Pantias, D. 2007. Copper and cadmium adsorption on pellets made from fired coal fly ash, *J Hazard Mater*, 148: 538-547

Polic, P.S., Ilic, M.R. & Popovic, A.R. 2005. Environmental impact assessment of lignite fly ash and its utilization products as recycled hazardous wastes on surface and ground water quality, *Handb. Environ. Chem.*, Vol. 5, Part F, Vol. 2 : 61-110

Queralt, I., Querol, X., Lopez-Soler, A. & Plana, F. 1997. Use of coal fly ash for ceramics: a case study for a large Spanish power station, *Fuel*, 76: 787–791

Ren, X.-J., Zhang, X.-B., Meng, G.Y. & Liu, X.Q. 2007. Preparation and characterization of the porous ceramics from fly ash, *Journal of Coal Science and Engineering*, 13 (1): 95-98

Sear, L. 2005. Blocks made in UK - 100% utilization of bottom ash, *Proc. COBA Conf.*, UK Quality Ash Association

Spiliotis, X., Karayannis, V., Koukouzas, N., Kassidakis, D., Papanikolaou, D., Riga, A. & Papapolymerou, G. 2007. Physico-mechanical properties of clay bricks containing recycled lignite fly ash, *Proc. 10th Int. Conf. of the European Ceramic Society*, Berlin, Germany

Tsimas, S. & Moutsatsou-Tsima, A. 2005. High-Ca fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives, *Cement and Concrete Composites*, 27 (2): 231-237

Τσίμας, Σ & Μουτσάτσου, Α. 2005. Διαχείριση ιπτάμενης τέφρας ΔΕΗ: Ουτοπία ή πραγματικότητα; Πρακτικά 1^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΒΠΠΑΡ για την Αξιοποίηση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, Θεσσαλονίκη

Uwe, E.A., Boccaccini, A.R., Cook, S.G. & Cheeseman, C.R. 2007. Effect of borate addition on the sintered properties of pulverised fuel ash, *Ceram Int*, 33: 993-999

Vlahovic, M., Martinovic, S, Boljanac, T. & Vidojkovic, V. 2007. Valorization of combustion ash for preparation of lightweight aggregate, *Proc. XII Balkan Mineral Processing Cong.*, Greece

Yildirim, M.S., Bicer, Y. & Yildiz, C. 1996. Utilization of fly ash and polypropylene wastes in the production of a new porous composite material, *Journal of Porous Materials*, 3: 189-191

Yoo, J.G. & Jo, Y.M. 2003. Finding the optimum binder for fly ash pelletization, *Fuel Processing Technology*, 81 (3): 173-186

Zabielska-Adamska, K. 2008. Laboratory compaction of fly ash and fly ash with cement additions, *J Hazard Mater*, 151 (2-3): 481-489

Zimmer, A. & Bergmann, C.P. 2007. Fly ash of mineral coal as ceramic tiles raw material, *Waste*

Management, 27 (1): 59-68