



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΑΠΟ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΒΛΗΤΟ ΓΥΑΛΙ

Μαρία Αφράτη

ΑΜ: 2015020091

Τριμελής Επιτροπή:

Κομνίτσας Κωνσταντίνος, Καθηγητής

Γαλετάκης Μιχαήλ, Καθηγητής

Κρητικάκη Άννα, Ε.Δ.Ι.Π

Χανιά Μάρτιος, 2024

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Τεχνολογίας Κεραμικών και Υάλου της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η διαδικασία της επεξεργασίας και δημιουργίας των υαλοκεραμικών διήρκησε πέντε μήνες στο χρονικό διάστημα μεταξύ Μαΐου και Αυγούστου 2021. Το θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία υαλοκεραμικών δοκιμών από ιπτάμενη τέφρα και γυαλί αποβλήτων και η μελέτη των συνθηκών παρασκευής και ο προσδιορισμός βασικών φυσικών ιδιοτήτων.

Το εργαστήριο “Τεχνολογίας Κεραμικών και Υάλου» της Σχολής Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης ασχολείται εδώ και αρκετά χρόνια με την διαχείριση και επεξεργασία ιπτάμενης τέφρας, όπως και με την μελέτη και διαχείριση και άλλων αποβλήτων, π.χ. απόβλητα μεταλλευτικών και μεταλλουργικών δραστηριοτήτων, ιζήματα λιμένων, υλικά κατεδαφίσεων, νοσοκομειακά απόβλητα κ.λπ. Συνεπώς η εργασία αυτή συμβάλλει στην μελέτη των διαφόρων παραμέτρων που βελτιστοποιούν τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές διαχείρισης.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κύριο Κωνσταντίνο Κομνίτσα για την ανάθεση του θέματος της εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ’ όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας, όπως επίσης και για την βοήθεια που μου έδωσε όποτε την χρειάστηκα. Επιπρόσθετα τον ευχαριστώ για την διόρθωση της εργασίας μου και την παρουσίαση της.

Επιπλέον ευχαριστώ την Δρ. Άννα Κρητικάκη για την συμμετοχή της, την αμέριστη προσοχή που έδειξε στη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Επίσης την ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια της σε οποιαδήποτε απορία πρόκυπτε κατά την συγγραφή και εκτέλεση της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τον κύριο Στέλιο Μαυριγιαννάκη (ΕΤΕΠ) για την πραγματοποίηση δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στο εργαστήριο «Μηχανικής Πετρωμάτων».

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για την συνεχή συμπαράσταση που μου έδειξαν και την υποστήριξη τους την περίοδο της διπλωματικής εργασίας, αλλά και των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Στην παρούσα μελέτη, διερευνήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας και των απορριμμάτων γυαλιού για την παραγωγή υαλοκεραμικών $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Διάφορα μείγματα ιπτάμενης τέφρας-γυαλιού συμπίεστηκαν μονοαξονικά και πυρώθηκαν στους $900(^{\circ}\text{C})$, $1050(^{\circ}\text{C})$ και $1100(^{\circ}\text{C})$ για την παραγωγή υαλοκεραμικών. Το απόβλητο γυαλί προστέθηκε ως πρόσθετο πυροσυσσωμάτωσης προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία τήξης και πυροσυσσωμάτωσης του γυαλιού. Πραγματοποιήθηκε επίσης μια λεπτομερής διερεύνηση της επίδρασης της προσθήκης γυαλιού και της θερμοκρασίας ψησίματος στο πορώδες, την πυκνότητα, την απορρόφηση νερού και τις μηχανικές ιδιότητες (θλιπτική αντοχή). Τα παραγόμενα κεραμικά εμφάνισαν αντοχή σε θλίψη έως και 20 MPa, οι τιμές πορώδους κυμαίνονταν από 5.6%-41.0% και η απορρόφηση νερού είναι κάτω από 20%. (0.05%-1.15%). Σε όλες τις περιπτώσεις που η ποσότητα απορριμμάτων γυαλιού αυξήθηκε το πορώδες και οι τιμές απορρόφησης νερού μειώθηκαν ενώ παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε θλίψη. Σε όλες τις περιπτώσεις η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης επηρέασε τις τελικές ιδιότητες των παραγόμενων κεραμικών. Τα υαλοκεραμικά έχουν αποδεκτές τιμές φυσικών ιδιοτήτων, δηλαδή πορώδες, πυκνότητα κ.λπ. και σχετικά υψηλή αντοχή σε κάμψη, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για την οικοδομική βιομηχανία.

SUMMARY

In the present study, the valorization potential of fly ash and waste glass was investigated for the production of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass-ceramics. Various fly ash-glass mixtures were uniaxially pressed and calcined at $900(^{\circ}\text{C})$, $1050(^{\circ}\text{C})$ and

1100(°C) for the production of glass-ceramics. Waste glass added as a sintering additive in order to reduce the glass melting and sintering temperature. A detailed investigation of the effect of glass addition and firing temperature on porosity, density, water absorption, and mechanical properties (compressive strength) was also carried out.

The produced ceramics exhibited compressive strength up to 20 MPa, porosity values ranged from 5.6%-41.0% and water absorption are below 20%. (0.05%-1.15%). In all cases when the amount of waste glass increased porosity and water absorption values decreased while an increase compressive strength is seen. In all cases sintering temperature affected the final properties of the produced ceramics. The glass-ceramics have acceptable values of physical properties i.e. porosity, density etc. and a moderately high bending strength, which makes them suitable for the building industry.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	8
2.1 ΥΑΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	8
2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
2.1.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΑΛΟΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	11
2.1.3 ΣΥΓΓΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΥΑΛΟΚΕΡΑΜΙΚΩΝ	12
2.2 ΚΕΡΑΜΙΚΑ	14
2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΟΝΤΙΚΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ	15
2.2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΜΟΙΟΠΟΛΙΚΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ	16
2.2.4 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ	17
2.3 ΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ	19
2.3.2	22
ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	28
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ / ΣΧΕΔΙΑΣΗ	28
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	28
3.2 ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ	28
3.2.1 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	29
3.2.2 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	30
3.2.3 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	31
3.2.4 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	31
3.3. ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	32
3.3.1 ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ	32
3.3.2 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΥΑΛΟΚΕΡΑΜΙΚΩΝ	33

3.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ	38
3.4.1 Θραύση-Λειοτρίβιση	38
3.4.2. ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ (XRF).....	40
3.4.3 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ (XRD)	42
3.5. ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ – ΠΟΡΩΔΕΣ - ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ	43
3.6. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	48
ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	48
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	48
4.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	48
4.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	53
4.3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ.....	55
4.4 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	60
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ/ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	60
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	60
5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	61
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	63
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	67
1. ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	67
ΓΕΝΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μελέτη και παραγωγή κεραμικών δοκιμίων με πρώτες ύλες την ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης και απόβλητο γυαλί το οποίο προήλθε από θραύση μπουκαλιών. Στόχος είναι η δημιουργία υαλοκεραμικών με απλή πυροσυσσώματωση των κόνεων. Στα αρχικά μίγματα προσδιορίστηκε η θερμοκρασία πυροσυσσώματωσης, ενώ στα παραγόμενα υαλοκεραμικά προσδιορίστηκαν οι ορυκτολογικές φάσεις, το πορώδες, η πυκνότητα και η υδατοαπορροφητικότητα καθώς και η αντοχή σε θλίψη.

1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η ταχεία ανάπτυξη της εκβιομηχάνισης έχει δημιουργήσει μεγάλες ποσότητες στερεών αποβλήτων, οδηγώντας σε σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα και σπατάλη πόρων. Ως ένα από τα τυπικά και πολύπλοκα βιομηχανικά στερεά απόβλητα, η ιπτάμενη τέφρα παράγεται σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας. Η περισσότερη ιπτάμενη τέφρα συσσωρεύεται ή θάβεται χωρίς επεξεργασία, γεγονός που όχι μόνο προκαλεί σοβαρή σπατάλη πόρων, αλλά επίσης προβλήματα ρύπανσης στο περιβάλλον, όπως το νερό και η ατμόσφαιρα. Η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί ιδιαίτερα δημοφιλές αντικείμενο μελέτης τα τελευταία χρόνια. Όπως τα σύνθετα οξείδια του σιδήρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον τομέα της κατάλυσης, το πυρίτιο και η αλουμίνα στην ιπτάμενη τέφρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες για την παρασκευή υαλοκεραμικών. Ως εκ τούτου η εργασία έχει ως κεντρικό στόχο της τη μελέτη παρασκευής υαλοκεραμικών, τα οποία δύναται να χρησιμοποιηθούν στους τομείς της αρχιτεκτονικής, της διακόσμησης, της χημικής μηχανικής και της μηχανολογίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 ΥΑΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υαλοκεραμικά ανακαλύφθηκαν από τον S.D. Stookey το 1956 έκτοτε όμως δημοσιεύθηκαν χιλιάδες επιστημονικά άρθρα τα οποία αναφέρονται στις ιδιότητες και στις εφαρμογές τους. Το 1958 ο Stookey έδωσε τον εξής ορισμό για τα υαλοκεραμικά : Η παραγωγή των υαλοκεραμικών εν πρώτης γίνεται από την τήξη υλικών που είναι κατάλληλα, καθώς περιέχουν παράγοντες πυρήνωσης, όπου επιβάλλονται σε συνθήκες κατάλληλης θερμοκρασίας οι οποίες προκαλούν ελεγχόμενη κρυσταλλοποίηση του γυαλιού. Ύστερα από έρευνες που έγιναν τις τελευταίες έξι δεκαετίες υπάρχει πλέον πιο ολοκληρωμένος ορισμός που λέει πως τα υαλοκεραμικά είναι ανόργανα, μη μεταλλικά υλικά τα οποία παράγονται από ελεγχόμενη κρυσταλλοποίηση γυαλιών ύστερα από διαφορικές μεθόδους επεξεργασίας, επιπλέον περιέχουν τουλάχιστον μια κρυσταλλική φάση και μια υαλώδη. Τα υαλοκεραμικά μπορούν να μην έχουν καθόλου πορώδες είτε να εμφανίζουν διάφορα ποσοστά πορώδους σύμφωνα με τις κατάλληλες και τις επιθυμητές ιδιότητες (Πετρουλάκη, 2020). Ωστόσο πρέπει να επισημανθεί πως μόνο ορισμένες συνθέσεις γυαλιού είναι κατάλληλες για την παραγωγή υαλοκεραμικών, ενώ ορισμένοι τύποι γυαλιών είναι αρκετά αναλλοίωτοι και για αυτό είναι δύσκολο να κρυσταλλωθούν, όπως είναι το γνωστό γυαλί παραθύρου, ενώ άλλοι τύποι γυαλιών κρυσταλλώνονται πάρα πολύ εύκολα και δημιουργούνται ανεπιθύμητες μικροδομές. Επιπλέον ακόμη μια κρίσιμη μέθοδος είναι αυτή της θερμικής επεξεργασίας για την επίτευξη ενός αποδεκτού και αναπαραξιμού υλικού (Rawlings et al., 2006). Μία ευρέως γνωστή μέθοδος παραγωγής υαλοκεραμικών είναι αυτή που κάνει χρήση

επικίνδυνων αποβλήτων γιατί έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα τη μείωση του όγκου της τέφρας, τη σταθεροποίηση των βαρέων μετάλλων και την παραγωγή υλικών με πολύ καλές ιδιότητες. Τα υαλοκεραμικά αντέχουν στο θερμικό σοκ και στην φθορά καθώς είναι δύσκολο να διαβρωθούν, επίσης έχουν αρκετά μεγάλη σταθερότητα στις υψηλές θερμοκρασίες, ρυθμιζόμενο συντελεστή θερμικής διαστολής, χαμηλή διηλεκτρική σταθερά και τέλος εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Τα υαλοκεραμικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή οικοδομικών υλικών όπως τούβλα, πλακάκια, σκυρόδεμα, μάρμαρο, μωσαϊκό, γρανίτη, διακοσμητικά υλικά κατασκευών κ.α. (Zhao et al., 2020). Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των υαλοκεραμικών συνοψίζονται ως εξής : Μπορούν να παραχθούν με διεργασίες μαζικής παραγωγής με οποιαδήποτε τεχνική παραγωγής γυαλιού. Ο κατασκευαστής μπορεί να επιτύχει την νανοδομή και την μικροδομή του υλικού ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής, που αυτό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Τα υαλοκεραμικά έχουν τη δυνατότητα να συνδυάσουν σε τέλειο βαθμό μια ποικιλία από επιθυμητές ιδιότητες. Παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Έχουν μηδενικό ή εξαιρετικά χαμηλό πορώδες. Το μηδενικό πορώδες και η ύπαρξη της υαλώδους φάσης δίνει στα υλικά υψηλή διαφάνεια. Ωστόσο όμως τα υαλοκεραμικά μπορούν να μετατραπούν σε αδιαφανή και αυτό οφείλεται στη μικροδομή και το είδος των αναπτυσσόμενων κρυστάλλων. Τα υαλοκεραμικά είναι εφικτό να έχουν διάφορα χρώματα και να μορφοποιηθούν με υψηλή ακρίβεια. Για παράδειγμα, τα υαλοκεραμικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μαγειρικά σκεύη και αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι συνδυάζεται ο πολύ χαμηλός θερμικός συντελεστής και η διαφάνεια στο μήκος κύματος του ορατού φωτός. Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί ο συνδυασμός πολύ υψηλής αντοχής και σκληρότητας, η βιοσυμβατότητα, η χημική ανθεκτικότητα και η σχετικά χαμηλή σκληρότητα έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές στην οδοντιατρική και στην ιατρική.

Ως απόβλητο χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε ουσία ή αντικείμενο το οποίο ο κάτοχός του απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει. Ανάλογα με την φυσική κατάσταση των αποβλήτων αυτά διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, στερεά, υγρά κι αέρια. Στην κατηγορία των στερεών αποβλήτων ανήκουν τα αστικά απορρίμματα, τα βιομηχανικά απορρίμματα (π.χ. τα κενά συσκευασίας, τα άδεια βαρέλια, χαρτοκιβώτια, πλαστικά περιτυλίγματα,

πλαστικά μπουκάλια, οι γυάλινες συσκευασίες κ.α.). Όπως επίσης στα στερεά απόβλητα εντάσσονται τα απόβλητα οικοδομικών κατεδαφίσεων, τα πετρελαιοειδή, τα απόβλητα κτηνοτροφικών και γεωργικών εκμεταλλεύσεων, τα απόβλητα των ορυχείων και των μεταλλείων, τα απόβλητα εκσκαφών (από ξηρά και θάλασσα), η ιλύς από την επεξεργασία αστικών λυμάτων και τη βιομηχανία, τα νοσοκομειακά απορρίμματα, τα ελαστικά και τα σκραπ, το γυαλί κ.α. Μείζον περιβαλλοντικό και κοινωνικό ζήτημα για πάρα πολλές χώρες αποτελεί η συνεχής αύξηση των παραγόμενων τοξικών και επικίνδυνων ανόργανων αποβλήτων, όπως είναι οι ιπτάμενες τέφρες, μεταλλουργικές ιλύες και σκωρίες. Η αύξηση της παραγωγής των επικίνδυνων τοξικών αποβλήτων προκλήθηκε από την συνεχόμενη αύξηση του πληθυσμού τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς και από την βιομηχανική ανάπτυξη. (Φαλέγκας, 2014). Με πιο αναλυτική ματιά, τα τοξικά απόβλητα που εμπεριέχουν υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, όπως Cu, Zn, Pb, Cr, Ni και Cd πρέπει να εναποθέτονται σε ειδικούς χώρους ταφής καθώς η έκπλυση των βαρέων μετάλλων μπορεί να επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στους ανθρώπους και το περιβάλλον. Σύμφωνα με τα πρόσφατα περιβαλλοντικά πρότυπα, πρέπει να αναπτυχθούν μέθοδοι ανακύκλωσης και επεξεργασίας με στόχο να μετατραπούν τα επικίνδυνα βιομηχανικά απόβλητα σε μη επικίνδυνα υλικά και να βρεθούν πιθανές χρήσεις τους. Εξαιτίας όμως της έλλειψης επαρκών χώρων διάθεσης και αξιοποίησης επικίνδυνων αποβλήτων (ΕΑ) στην Ελλάδα το 40% των ΕΑ παραμένει προσωρινά αποθηκευμένο στους χώρους παραγωγής. Αποτέλεσμα αυτού είναι η επιβάρυνση των επιχειρήσεων, λόγω των μέτρων προστασίας που καλούνται να πάρουν και καλύπτει ωφέλιμο βιομηχανικό χώρο (www.intergeo.gr). Το 13% των ΕΑ εξάγεται στο εξωτερικό προς τελική επεξεργασία με μεγάλο κόστος και διαρροή κεφαλαίων. Ένα αδιευκρίνιστο ποσοστό ΕΑ δεν δηλώνεται και αποτίθεται ανεξέλεγκτα με σημαντικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (ρύπανση εδάφους, υπόγειων και επιφανειακών νερών). Μια σημαντικά υποσχόμενη τεχνική αξιοποίησης και ορθολογιστικής διαχείρισης του μεγάλου όγκου των αποβλήτων είναι η υαλοποίηση και η παραγωγή υαλοκεραμικών (Cao et al., 2016). Με τη χρήση αποβλήτων ως εναλλακτικών πρώτων υλών, είναι δυνατή η παραγωγή νέων φιλικών προς το περιβάλλον υαλοκεραμικών με υψηλή προστιθέμενη αξία. Απαιτείται ωστόσο να γίνεται αυστηρός έλεγχος της χημικής σύστασης των αποβλήτων, καθώς τα μίγματα πρέπει να περιέχουν τα

τυπικά συστατικά που ευνοούν το σχηματισμό σταθερών γυαλιών, όπως οξειδίων Si και Al. Παράλληλα αναζητούνται και πρόσθετα που διευκολύνουν τις συνθήκες τήξης όπως Na_2O , K_2O καθώς επίσης και σταθεροποιητικοί παράγοντες όπως το CaO και το MgO , τα οποία είναι τα συστατικά που δημιουργούν γυαλιά με επαρκή ή ειδικά χαρακτηριστικά (Suttibak et al., 2008).

2.1.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΑΛΟΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Η υαλοποίηση όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι η μέθοδος από την οποία παράγεται ένα υαλώδες υλικό, όπου παρέχει υψηλή χημική σταθερότητα ενώ συγχρόνως αδρανοποιεί τις τοξικές ουσίες. Εάν τα βιομηχανικά απόβλητα εμπεριέχουν συστατικά που μπορούν να σχηματίσουν γυαλί (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) τότε έχουν την ικανότητα να μετασχηματίζονται σε υαλώδη υλικά. Αυτά τα απόβλητα που βασίζονται πλέον στο γυαλί, εν συνεχεία μπορούν να μετατραπούν σε υαλοκεραμικά. Οι πρώτες απόπειρες παραγωγής υαλοκεραμικών από τα απόβλητα ξεκίνησαν την δεκαετία του '70. Έκτοτε, έχουν μελετηθεί διάφοροι τύποι αποβλήτων και παράχθηκαν υαλοκεραμικά υλικά με ανώτερες ιδιότητες, με την βοήθεια της τέφρας από ατμοηλεκτρικούς σταθμούς και καυστήρες αποβλήτων, έπειτα και από τη χρήση βιομηχανικών, αστικών αλλά και ραδιενεργών αποβλήτων (Savnilotidou, et al., 2019). Μια σημαντική ομάδα περιλαμβάνει απόβλητα πυριτικού τύπου, όπως τέφρες σκωρίες και ανακυκλωμένη σκόνη υάλου, τα οποία μπορούν να παράξουν νέα προϊόντα με βελτιστοποιημένες ιδιότητες, επιτρέποντάς τους να ανταγωνίζονται με τα τρέχοντα υλικά σε διάφορες εφαρμογές. Η συνεπεξεργασία με δευτερεύοντα υλικά απαιτεί συνήθως λιγότερη ενέργεια και παράγει λιγότερη ρύπανση από την παραγωγή ισοδύναμων ποσοτήτων φυσικών πρώτων υλών. Απόβλητα καύσης, συμπεριλαμβανομένης της ιπτάμενης τέφρας και της σκωρίας, παράγονται από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς σε μεγάλες ποσότητες, επιφέροντας αδιαμφισβήτητα περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής στην Κίνα καταναλώνουν ετησίως συνολικά περίπου 305

εκατομμύρια τόνους άνθρακα, με αποτέλεσμα η καύση των αποβλήτων να φτάνει περίπου τους 86 εκατομμύρια τόνους. Τα περισσότερα από αυτά είναι η τέφρα και η σκωρία τα οποία εναποτίθενται ως απορρίμματα, εκτός μόνο από μία μικρή ποσότητα που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για σκυρόδεμα ή κατασκευή τούβλων. Έτσι η ακινητοποίηση αυτών των αποβλήτων επιφέρουν μεγάλα περιβαλλοντικά οφέλη (F. Peng, et al., 2005).

Σε γενικές γραμμές, η παραγωγή κεραμικών γυαλιού πραγματοποιείται με μια διαδικασία δύο σταδίων που περιλαμβάνει την τήξη σε υψηλές θερμοκρασίες (1100-1600° C) για την παραγωγή γυαλιού και στη συνέχεια το θρυμματισμό, τη μορφοποίηση, και τη θέρμανση του παραγόμενου γυαλιού σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της πυροσυσσώματωσης, ώστε να πραγματοποιηθεί μερική κρυστάλλωση και δημιουργία του τελικού υαλοκεραμικού.

Αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι η παραγωγή υαλοκεραμικών που χαρακτηρίζονται από ημιδιαφανή ως διαφανή με σημαντικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες που τα καθιστά ιδιαίτερα ανταγωνιστικά και ικανά να χρησιμοποιηθούν σε πολλούς τομείς (A.R. Bocaccini, et al., 1997).

2.1.3 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΥΑΛΟΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

Ως εκ τούτου, οι ερευνητές έχουν κάνει πολλές μελέτες όσο αναφορά την προετοιμασία υαλοκεραμικών με βασική πρώτη ύλη τη χρήση ιπτάμενης τέφρας, το οποίο καθιστά τα κεραμικά γυαλιού ευρέως διαδεδομένα. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι παρασκευής κεραμικών γυαλιού απαιτούν ακατέργαστα υλικά, τα οποία αρχικά τήκονται σε υψηλή θερμοκρασία για να ληφθεί μια ομοιόμορφη υαλώδης μάζα. Η θερμοκρασία τήξης είναι συνήθως πάνω από 1400° C, συνεπώς είναι μια διεργασία υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το ενεργειακό κόστος παραγωγής των υαλοκεραμικών αναζητούνται νέοι και φιλικότεροι προς το περιβάλλον μέθοδοι παραγωγής. Σύγχρονες μελέτες αναφέρουν την παραγωγή υαλοκεραμικών από ιπτάμενη τέφρα απαλείφοντας το στάδιο της τήξης των πρώτων υλών σε υψηλή θερμοκρασίας. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου έγκειται στο ποσοστό υαλώδης φάσης που εμπεριέχεται στις ιπτάμενες τέφρες. Τα παραγόμενα προϊόντα αν και κατατάσσονται ως

υαλοκεραμικά δεν επιδεικνύουν σημαντικές ιδιότητες γι' αυτό συχνά προστίθενται και άλλες πρώτες ύλες όπως π.χ. γυαλί σε μορφή κόνεως για την ενίσχυση των ιδιοτήτων των υαλοκεραμικών (Y. Lakhadar, et al., 2021). Ο Turgut, το 2010 χρησιμοποιώντας σκόνη ασβεστόλιθου και ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας C παρασκεύασε τούβλα τοιχοποιίας. Σε ένα πλήθος αναλογιών ανέμειξε τις πρώτες ύλες του, κατόπιν πρόσθεσε υγρασία στα μείγματα του και συμπιέζοντάς τα στα 20 MPa τα μορφοποίησε σε τούβλα. Εν συνεχεία, κάποια από τα τούβλα που μορφοποίησε τα άφησε να σκληρύνουν σε θερμοκρασία δωματίου για 48 ώρες ενώ τα υπόλοιπα τα τοποθέτησε σε μία δεξαμενή νερού σε θερμοκρασία της τάξεως 22 °C για 7, 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα και αργότερα τα ξήρανε στους 105 °C για 24 ώρες. Ο Turgut Paki, 2010, αφού έκανε προσδιορισμό των φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους κατέληξε στο συμπέρασμα πως είναι δυνατόν να παραχθούν καλής ποιότητας τούβλα τοιχοποιίας (η μέγιστη θλιπτική αντοχή ήταν 18.27 MPa) από ιπτάμενη τέφρα και ασβεστολιθική σκόνη (Ponsot, E. et al., 2015).

Το 2012 ο Turgut Paki διερεύνησε την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας χρησιμοποιώντας πάλι ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας C, ασβεστολιθική σκόνη, διοξείδιο του πυριτίου και νερό. Προχώρησε στην κατασκευή τους αναμιγνύοντας τις πρώτες ύλες με νερό και συμπιέζοντας στη συνέχεια το μίγμα κι αφήνοντας τα δοκίμια να ωριμάσουν για 7, 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων ύστερα από μέτρηση που τους έκανε έδειξαν πως η θλιπτική αντοχή και η αντοχή σε κάμψη των τούβλων αυξήθηκαν σημαντικά όταν αυξήθηκε το ποσοστό του διοξειδίου του πυριτίου στο αρχικό μείγμα. Με 20% διοξείδιο του πυριτίου η θλιπτική αντοχή των τούβλων έπειτα από 28 και 90 μέρες ωρίμανσης ήταν 23 και 26.5 MPa. Επιπλέον κατάλαβε πως το κόστος παραγωγής τους με τη μέθοδο αυτή μειωνόταν κατά 6.4 φορές σε σχέση με το κόστος παραγωγής των παραδοσιακών τούβλων από άργιλο (Turgut Paki., 2010). Κατά την διαδικασία προετοιμασίας υαλοκεραμικών με την προσθήκη γυαλιού, παρατηρήθηκε αύξηση της περιεκτικότητας σε υαλώδες υλικό με αποτέλεσμα την αύξηση της ιξώδους ροής και της περιεχόμενης υγρασία του σχηματισμού φυσαλίδων. Σε κάθε περίπτωση, η περιεκτικότητα σε γυαλί παίζει σημαντικό ρόλο στην προετοιμασία των υαλοκεραμικών με άμεση σύντηξη. Ωστόσο, υπάρχει λιγότερο συστηματική έρευνα σχετικά με το υαλώδες περιεχόμενο

της κινητικής σύντηξης, τη μορφολογία και τις ιδιότητες των κεραμικών γυαλιού. (Y. Lakhadar, et al., 2021)

2.2 ΚΕΡΑΜΙΚΑ

2 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κεραμικό υλικό είναι κάθε ανόργανο μη μεταλλικό υλικό το οποίο έχει υποστεί θερμική επεξεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες.. Τα κεραμικά περιλαμβάνουν επίσης το γυαλί, το οποίο έχει μη κρυσταλλική ή άμορφη τυχαία δομή, το σμάλτο (ένας τύπος υαλώδους επίστρωσης), ύαλο-κεραμικά, δηλαδή ένα γυαλί που περιέχει υαλώδη και κρυσταλλική φάση. Τέλος, περιλαμβάνουν ανόργανα υλικά τύπου τσιμέντου όπως τσιμέντο, σοβά και ασβεστίτη. Ωστόσο, καθώς η κεραμική τεχνολογία έχει εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου, ο ορισμός έχει επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει ένα πολύ ευρύτερο φάσμα άλλων συνθέσεων που χρησιμοποιούνται σε μία ποικιλία εφαρμογών. (www.ceramics.org). Το κεραμικό υλικό, ανόργανο και μη μεταλλικό, έχει υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000 °C) είτε κατά το στάδιο της επεξεργασίας του είτε κατά το στάδιο της εφαρμογής του. Τα κεραμικά υλικά περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερα στοιχεία (π.χ. Al_2O_3 , MgAl_2O_4), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρούς δεσμούς, δηλ. ιοντικούς, ομοιοπολικούς ή συνδυασμό αυτών (μικτούς δεσμούς) και ακολουθούν είτε περιοδική διάταξη (κρυσταλλικά κεραμικά) είτε τυχαία διάταξη (άμορφα γυαλιά). Ο χαρακτήρας που επικρατεί προσδιορίζεται από τη διαφορά ηλεκτραρνητικότητας μεταξύ των συνδεμένων ατόμων. Με αυτό το κριτήριο υπάρχουν οι εξής δυνατότητες: Μεγάλη διαφορά ηλεκτραρνητικότητας: Ιοντικός χαρακτήρας. (D.A.Vinnik, et al., 2020) Μηδενική διαφορά ηλεκτραρνητικότητας: Ομοιοπολικός χαρακτήρας. Ενδιάμεσες τιμές διαφοράς ηλεκτραρνητικότητας: Μικτός χαρακτήρας. Οι τελικές ιδιότητες των κεραμικών επηρεάζονται από την χημική και ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών, όπως και την

κοκκομετρία τους, τις συνθήκες θέρμανσης και την μέθοδο μορφοποίησης. Κάποιες από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες τους είναι:

- Ψαθυρή συμπεριφορά
- Αντοχή σε τριβή
- Υψηλή σκληρότητα
- Αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες
- Μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Μικρή θερμική αγωγιμότητα (www.ntua.gr)

2.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΟΝΤΙΚΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

Πρόκειται για ενώσεις μετάλλου-αμετάλλου με ιοντική μορφή που συνδέονται μεταξύ τους με δυνάμεις ηλεκτροστατικής φύσεως. Δύο είδη δεσμών βρίσκονται στα κεραμικά ιονικά και ομοιοπολικά. Ο ιονικός δεσμός συμβαίνει μεταξύ ενός μετάλλου κι ενός μη μετάλλου, με άλλα λόγια, δύο στοιχείων με πολύ διαφορετική ηλεκτραρνητικότητα. Η ηλεκτραρνητικότητα είναι η ικανότητα του πυρήνα σε ένα άτομο να προσελκύσει και να συγκρατήσει όλα τα ηλεκτρόνια μέσα στο ίδιο άτομο και εξαρτάται από τον αριθμό των ηλεκτρονίων και την απόσταση των ηλεκτρονίων στις εξωτερικές στιβάδες από τον πυρήνα. (www.ceramics.org). Τα κατιόντα, δηλαδή τα θετικά φορτισμένα ιόντα, είναι μικρότερα σε μέγεθος από τα ανιόντα (αρνητικά φορτισμένα ιόντα), κάθε κατιόν πρέπει να εφάπτεται σε όλα τα ανιόντα που το περιβάλλουν, σε αντίθεση με τα ανιόντα που δεν πρέπει να ενώνονται μεταξύ τους. Περισσότερο σταθερή δομή επιδεικνύουν τα κεραμικά που έχουν πυκνότερη διάταξη ιόντων, διότι οι ηλεκτροστατικές ελκτικές δυνάμεις δημιουργούν σταθερές κρυσταλλικές δομές. Οι συνηθέστερες κρυσταλλικές δομές των ιοντικών κεραμικών είναι :

- Η κυβική εδροκεντρωμένη (FCC), π.χ. η μαγνησία (MgO) και η κυβική ζirkονία (ZrO₂).

- Η μέγιστης πυκνότητας εξαγωνική (HCP), π.χ. η αλουμίνα (Al_2O_3). (Keramika mech.ntua.gr)

2.2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΜΟΙΟΠΟΛΙΚΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

Αποτελούν ενώσεις δύο αμέταλλων ή καθαρά στοιχεία, π.χ. η πυριτία (SiO_2), το διαμάντι (C), το πυρίτιο (Si). Τα άτομα συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας κοινά ζεύγη ηλεκτρονίων της εξωτερικής τους στιβάδας. Η πιο διαδεδομένη δομή ηλεκτρονίων είναι η κυβική, είτε η κρυσταλλική (με δημιουργία αλυσίδων, επίπεδων ή τρισδιάστατων πλεγμάτων), π.χ. το ανθρακοπυρίτιο (SiC), είτε η άμορφη δομή, π.χ. όλα τα εμπορικά γυαλιά, τα οποία έχουν βασική μονάδα τετράεδρα SiO_4 που ενώνονται μεταξύ τους με διάφορους τρόπους δίνοντας κεραμικά διαφορετικών μικροδομών. (www.ntua.gr) Χρησιμοποιούνται ευρέως ως δομικά υλικά υψηλής θερμοκρασίας. Τα περισσότερα από αυτά τα κεραμικά, με κάποιες εξαιρέσεις όπως τα κεραμικά SiC με στερεά κατάσταση, συμπυκνώνονται με τη σύντηξη υγρής φάσης χρησιμοποιώντας μεταλλικά οξείδια ως πρόσθετα σύντηξης λόγω του εξαιρετικά χαμηλού ρυθμού διάχυσης των ομοιοπολικά συνδεδεμένων ατόμων. Τα οξείδια σχηματίζουν ένα τήγμα σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και παραμένουν στα όρια του κόκκου με τη μορφή μιας ενδοκοκκώδους υαλώδους φάσης (IGP) μετά τη σύντηξη. Επομένως, ένα IGP με χαρακτηριστικό πάχος της τάξης των 0,5-2 nm είναι χαρακτηριστικό τέτοιων κεραμικών. Το θερμικά αδύναμο IGP, ωστόσο, αντιπροσωπεύει την αχίλλειον πτέρνα για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. Σχεδόν όλα τα πυκνά κεραμικά SiC και Si_3N_4 που αναφέρονται μέχρι στιγμής περιέχουν IGP και, κατά συνέπεια, υποβάλλονται σε αποικοδόμηση σε υψηλές θερμοκρασίες. Ένας σημαντικός περιοριστικός παράγων στο πεδίο είναι η ορθολογική προσέγγιση για τον έλεγχο του σχηματισμού IGP για την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους. Το πάχος του IGP των κεραμικών-πυροσυσσωματωμένων κεραμικών προσδιορίζεται από τις ελκυστικές δυνάμεις van der Waals και τις απωθητικές δυνάμεις που προέρχονται από το IGP που βρίσκεται μεταξύ των δύο κόκκων. Η προέλευση της ελκτικής δύναμης είναι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κυμαινόμενων δίπολων στις διάφορες φάσεις

(δηλαδή, του κόκκου και του IGP). Η προέλευση της απωθητικής δύναμης είναι η δομή του IGP που αντιστέκεται στην αναταραχή. Η ισορροπία μεταξύ ελκτικών και απωστικών δυνάμεων οδηγεί σε «πάχος IGP ισορροπίας» της τάξης αρκετών nm. Οι προηγούμενες παρατηρήσεις μας και ορισμένες άλλες μελέτες δείχνουν ότι το πάχος IGP στα ομοιοπολικά συνδεδεμένα κεραμικά (π.χ. SiC και Si₃N₄) ποικίλλει ανάλογα με τη σύνθεση των πρόσθετων πυροσυσσωμάτωσης που χρησιμοποιούνται. Αυτό υποδηλώνει ότι το IGP μπορεί να ελεγχθεί εάν τα πρόσθετα σύντηξης έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα. Σε αυτήν τη μελέτη, αναφέρουμε το σχεδιασμό πρόσθετων πυροσυσσωμάτωσης για κεραμικά SiC που εξαλείφουν το IGP καθώς και πυκνοποιούν τα κεραμικά. Περαιτέρω επαλήθευση του σχεδιασμού επιχειρείται παρατηρώντας τα όρια των κόκκων στο κεραμικό SiC που έχει συντηχθεί με τα σχεδιασμένα πρόσθετα και μετρώντας την αντοχή από τη θερμοκρασία δωματίου έως τους 1500 (°C) (Brook et al., 1991).

2.2.4 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

Τα κεραμικά υλικά με βάση ταξινομούνται στις ακόλουθες δύο κατηγορίες: Παραδοσιακά κεραμικά και προηγμένα κεραμικά. Στα παραδοσιακά κεραμικά κατατάσσονται τα προϊόντα όπως είναι η πορσελάνη, τα κεραμικά πλακίδια, τα γυαλιά, τα τούβλα και τα πυρίμαχα. Στην δεύτερη κατηγορία συγκαταλέγονται τα κεραμικά που χρησιμοποιούνται στη βιοϊατρική (εμφυτεύματα), στη μηχανολογία, στον τομέα της οπτικής (οπτικές ίνες), της ηλεκτρονικής (ημιαγωγοί, αισθητήρες), στο περιβάλλον (φίλτρα, μεμβράνες κ.λπ.). Ο όρος «παραδοσιακό» θέλει να δηλώσει κάτι σχετικά συμβατικό, το οποίο βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, παρόλα αυτά κατεργάζεται εύκολα και με χαμηλό κόστος καθώς επίσης είναι ευρείας χρήσης στην καθημερινή ζωή για πολλά χρόνια. Υπάρχουν δύο κλάδοι της βιομηχανίας παραδοσιακών κεραμικών:

- Ο πρώτος κλάδος χρησιμοποιεί αργιλικά ορυκτά χωρίς άλλες προσθήκες για την παραγωγή δομικών υλικών (τούβλα, πλακίδια, σωλήνες, κλπ.) σε μεγάλη έκταση παραγωγής.

- Ο δεύτερος κλάδος αφορά σε κεραμικά αργιλοπυριτικής βάσης, τα οποία παράγονται από πρώτες ύλες που περιέχουν 20% αργιλικά ορυκτά (China clay, ball clay, calcined flint, fenspar).

Το μίγμα που προκύπτει περιέχει 50-60% άργιλο, υπόκειται σε έψηση σε υψηλή θερμοκρασία (της τάξης των 850-1200 °C), προκύπτοντας ένα υλικό με μικροπορώδες φάση και με μικτή δομή, όπου διακρίνεται κρυσταλλική και υαλώδης φάση. Για να γίνει έλεγχος του πορώδους προστίθεται συνήθως ευτηκτικό υλικό (άστριοι-feldspar) μέχρι ενός ποσοστού περίπου 50%. Το τελικό προϊόν είναι διάφορα είδη πορσελάνης. Τα προηγμένα κεραμικά υλικά είναι υλικά αυξημένων απαιτήσεων, με ειδικές προδιαγραφές που δημιουργήθηκαν με την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών. Είναι κυρίως τα οξειδία, τα καρβίδια, τα νιτρίδια και τα βορίδια που συνδυάζουν μοναδικές ιδιότητες, όπως εξαιρετική μηχανική αντοχή, μεγάλη σκληρότητα, μοναδικές μαγνητικές, οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, πολύ καλές θερμομηχανικές ιδιότητες που διατηρούνται σε υψηλή θερμοκρασία, θερμομονωτικές ιδιότητες, αντοχή σε θερμικούς αιφνιδιασμούς, κ.λπ. Παρότι δεν υπάρχει ένας συνολικός ορισμός για τα προηγμένα κεραμικά, μπορούμε να τα ταξινομήσουμε σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

- Προηγμένα δομικά κεραμικά.
- Ηλεκτρονικά κεραμικά
- Κεραμικές επικαλύψεις
- Σύνθετα κεραμικά υλικά.

Με την χρήση προηγμένων δομικών κεραμικών κατασκευάζονται: εξαρτήματα μηχανών, βαλβίδες, κοπτικά εργαλεία, αντιτριβικά εξαρτήματα, βιοϊατρικά εξαρτήματα, εναλλάκτες θερμότητας, κλπ. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές συνήθως υφίστανται έντονη μηχανική καταπόνηση υπό ταυτόχρονη θερμική φόρτιση. Αυτός ο συνδυασμός, ειδικά υπό συνθήκες κυκλικής λειτουργίας, οδηγεί σε εντονότερες μηχανικές και θερμικές τάσεις, ενώ παράλληλα οι ιδιότητες του υλικού διαφοροποιούνται ανάλογα με την μεταβολή της θερμοκρασίας και την πάροδο του χρόνου. Είναι αναγκαίο, λοιπόν, να χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, δυσθραυστότητα, αντοχή σε θερμικούς αιφνιδιασμούς και

διατήρηση όλων αυτών των μηχανικών ιδιοτήτων σε υψηλές θερμοκρασίες. (Ceramics, mech.ntua.gr).

2.3 ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

Ως ιπτάμενη τέφρα σύμφωνα με το ASTM-C618 ορίζεται το στερεό λεπτομερές υπόλειμμα που προκύπτει κατά την καύση κονιοποιημένου άνθρακα στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ιπτάμενη τέφρα συλλέγεται κυρίως από τα ηλεκτροστατικά ή μηχανικά φίλτρα μαζί με τα παραγόμενα καπναέρια των λεβήτων καύσης του άνθρακα. Στην Ελλάδα, η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί προϊόν καύσης του οποίου απομακρύνεται από το σημείο καύσης με τα παραγόμενα αέρια. Στην συνέχεια συλλέγεται στη μονάδα ελέγχου απαερίων. Πρόκειται για ένα ετερογενές υλικό η σύσταση του οποίου καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του στερεού καυσίμου και τη διαδικασία της καύσης (Φαλέγκας, 2014).

Η ποιότητα της ιπτάμενης τέφρας εξαρτάται από την ποιότητα του λιγνίτη αλλά και από την ποιότητα της καύσης στον λέβητα. Η διακύμανση της ποιότητας του λιγνίτη επιβάλλει τον επιμελημένο έλεγχο, τη διαλογή και την επιλογή της κατάλληλης για κάθε χρήση τέφρας. Η ιπτάμενη τέφρα αξιοποιείται λόγω των περιβαλλοντικών προβλημάτων που δημιουργούνται από την απόθεση μεγάλων ποσοτήτων που παράγονται ετησίως κατά την καύση των στερεών καυσίμων, αλλά και των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν, που τις καθιστούν ένα υλικό κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές (Χατζηγιαννίδου, 2016). Ως ιπτάμενη τέφρα ορίζεται το λεπτό διαχωρισμένο υπόλειμμα που παράγεται μετά την καύση κονιοποιημένου λιγνίτη σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς (ΑΗΣ) παραγωγής ενέργειας. Η ιπτάμενη τέφρα προέρχεται από καύση στείρων στρωμάτων που εξορύσσονται μαζί με το λιγνίτη και από το ανόργανο μέρος του λιγνίτη. Η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να συλλεχθεί από τα καπναέρια που παράγονται συμπαρασύροντας την και αποτίθεται σε πιο μακρινές περιοχές αναλόγως την διεύθυνση και την ταχύτητα του αέρα ή με την χρήση κάποιων φίλτρων (Κατσαρού, 2006).

Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί αποτελεί για πολλές χώρες η βασική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και αντιστοιχεί στο 40% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ιπτάμενης τέφρας σε παγκόσμιο επίπεδο

υπολογίζεται σε περισσότερο από 500 εκατομμύρια τόνους και αυξάνεται ανάλογα με το πόσο αυξάνεται και η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η εξαιρετικά επαρκής ποσότητα βιομηχανικών αποβλήτων είναι σε θέση να προκαλέσει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικολογικά προβλήματα αν δεν αντιμετωπιστεί σωστά (Yao, et al., 2015). Σύμφωνα με παγκόσμια έρευνα που έχει γίνει για τις πιθανές χρήσεις της ιπτάμενης τέφρας εξαιτίας της οικολογικής και οικονομικής της σημασίας. Η παραγωγή υαλοκεραμικών είναι μια από αυτές επειδή έχουν ιδανικές φυσικοχημικές ιδιότητες καθώς έχουν και την ικανότητα να παγιδεύουν τα τοξικά συστατικά που περιέχονται στο απόβλητο (Zhang et al., 2014).

Στην χώρα μας η ιπτάμενη τέφρα προέρχεται από την καύση λιγνίτη στους ΑΗΣ της Δ.Ε.Η. στην Πτολεμαΐδα και στη Μεγαλόπολη. Η διαδικασία με την οποία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από λιγνίτη είναι η εξής. Πρώτον εξορύσσεται ο λιγνίτης και μετακινείται στους ΑΗΣ της Δ.Ε.Η. Μετέπειτα, γίνεται ομογενοποίηση και αποθήκευση στα σιλό του σταθμού για την τροφοδοσία των λεβήτων, ενώ η ξήρανσή του γίνεται με τη χρήση των καυσαερίων. Τέλος, ακολουθεί η καύση του λιγνίτη σε ειδικό κλίβανο ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Ο κλίβανος αναπτύσσει θερμοκρασία περίπου ίση με 1000-1100 °C. Η θερμοκρασία αυτή διατηρείται κάτω από το σημείο μαλάκυνσης της τέφρας (1200-1350 °C), με τον τρόπο αυτό αποφεύγουμε την ενδεχόμενη τήξη της (Κρητικάκη, 2002).

Η ιπτάμενη τέφρα διακρίνεται κυρίως με βάση την χημική σύσταση της η οποία εξαρτάται από το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε και την ορυκτολογική σύσταση των γαιωδών προσμίξεων που συνοδεύουν το καύσιμο στην εξόρυξη. Ύστερα από την καύση του περιεχόμενου άνθρακα και την διάσπαση των ανθρακικών ορυκτών του στερεού καυσίμου της ιπτάμενης τέφρας παρατηρείται πως οι συγκεντρώσεις των οξειδίων που τις αποτελούν αυξάνονται αισθητά στο υλικό σε σύγκριση με τις αρχικές συγκεντρώσεις στον εξορυσσόμενο λιγνίτη εξαιτίας της συμπίκνωσης (Καμπεροπούλου Κ., 2018).

Οι δύο μεγάλες κατηγορίες που κατατάσσονται οι ιπτάμενες τέφρες προκύπτουν από το ποσοστό ασβεστίου είναι οι παρακάτω:

Τέφρες κατηγορίας C ή υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο ή βασικές τέφρες, οι οποίες προκύπτουν από καύση λιγνίτη ή υποασφαλτούχου γαιάνθρακα.

Τέφρες κατηγορίας F ή χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο ή όξινες τέφρες, οι οποίες προκύπτουν από καύση ανθρακίτη ή ασφαλτούχου γαιάνθρακα.

Στην κατηγορία C το ποσοστό ασβεστίου της ιπτάμενης τέφρας κυμαίνεται από 30 έως 40% και διαθέτει υδραυλικές ιδιότητες (όταν αντιδρά με το νερό, σκληρύνεται χωρίς προσθήκη άλλου υλικού), ενώ στην ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας F το ποσοστό ασβεστίου βρίσκεται μεταξύ 1 και 12% και κατέχει ποζολανικές ιδιότητες (Ευθυμίου., 2019).

Στο τριαδικό σύστημα $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ η περιοχή όπου συναντάμε τις όξινες τέφρες είναι αρκετά κοντά, σχεδόν επικαλύπτεται με την περιοχή εμφάνισης των φυσικών ποζολανών. Αντιθέτως η περιοχή των βασικών τεφρών πλησιάζει την περιοχή υδραυλικών κονιών (τσιμέντων). (M. Zhu, et al., 2016).

Η επεξεργασία και η επαναχρησιμοποίηση των ιπτάμενων τεφρών αποτελεί σημαντικό αντικείμενο έρευνας της επιστημονικής κοινότητας, με αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια να μελετώνται νέες τεχνικές που συνδυάζουν χαμηλό κόστος και ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Η παραγωγή υαλοκεραμικών από ιπτάμενη τέφρα αποτελεί μια νέα αποτελεσματική μέθοδο επαναχρησιμοποίησης και αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας, καθώς τα παραγόμενα προϊόντα χρησιμοποιούνται επιτυχώς σε διάφορους τομείς. Στην ιατρική και την οδοντιατρική (εμφυτεύματα, βιοκεραμικά), στον ευρύτερο κατασκευαστικό τομέα για την παραγωγή οικοδομικών υλικών (τούβλα, πλακάκια, παραγωγή τσιμέντου, οδοποιία, αρχιτεκτονική διακόσμηση), για τη παραγωγή κεραμικών φίλτρων και μεμβρανών κ.ά. (Gollakota et al., 2019).

2.3.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Η παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας γίνεται κατά την καύση στερεών καυσίμων όπου εκεί κατακρατείται στη μονάδα ελέγχου των απαερίων καύσης, στα λεγόμενα φίλτρα. Το στερεό καύσιμο αφού κονιοποιηθεί οδηγείται στη διαδικασία της καύσης. Το κονιοποιημένο καύσιμο κατά την θέρμανση του απελευθερώνει τα πτητικά συστατικά τα οποία αναφλέγονται και στη

συνέχεια η φλόγα μεταδίδεται στα στερεά συστατικά. Κατά την καύση των 29 οργανικών συστατικών, τα ανόργανα συστατικά τήκονται και συνενώνονται μεταξύ τους οδηγώντας στον σχηματισμό σωματιδίων διαφόρων διαμέτρων (Ahmaruzzaman et al., 2010). Τα παραγόμενα σωματίδια, τα οποία είναι κυρίως σφαιρικά, στη συνέχεια υπόκεινται σε άλλες διαδικασίες όπως είναι η διόγκωση, εξαιτίας της απελευθέρωσης αερίων από το εσωτερικό ή από επιφανειακές αντιδράσεις με συστατικά των καυσαερίων ή έκρηξη των διογκωμένων σωματιδίων και σχηματισμό σωματιδίων μικρότερων διαστάσεων. Τα ανόργανα συστατικά συμμετέχουν σε διάφορες αντιδράσεις, όπως είναι η θερμική διάσπαση, η οξείδωση κ.ά. Καθώς τα σωματίδια της ανόργανης ύλης μεταφέρονται σε χώρους χαμηλότερων θερμοκρασιών, όπου σταδιακά ψύχονται και στερεοποιούνται. Κατά την διέλευση των σωματιδίων προς την καμινάδα τα συστατικά που είχαν εξαεριωθεί στο φλογοθάλαμο συμπυκνώνονται στην επιφάνεια των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας. Παράλληλα λαμβάνουν μέρος σε διάφορες αντιδράσεις με τα συστατικά των καυσαερίων (π.χ. SO_2). Επομένως η σύσταση των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας διαφοροποιείται από τα σωματίδια μικρότερων διαστάσεων κατά την πορεία τους προς την εγκατάσταση αποκονίωσης, (τα οποία έχουν μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια) να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα συμμετοχής σε διάφορες αντιδράσεις. Η ιπτάμενη τέφρα παράγεται στους σταθμούς της ΔΕΗ κατά την καύση του λιγνίτη. Καθώς το καύσιμο προωθείται στην ζώνη υψηλής θερμοκρασίας του λέβητα τα πτητικά συστατικά και ο άνθρακας καίγονται, τα ορυκτά συστατικά τήκονται και αιωρούνται στο καυσαέριο. Εγκαταλείποντας την ζώνη καύσεως και λόγω της απότομης μεταβολής της θερμοκρασίας οι κόκκοι της τέφρας σταθεροποιούνται. Ένα τμήμα τους συσσωρεύεται σε μεγάλους κόκκους και συγκεντρώνεται στον πυθμένα, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό τους μεταφέρεται με τα καυσαέρια και συγκρατείται στα ηλεκτροστατικά φίλτρα από όπου και συλλέγεται (Φαλέγκας, 2014).

2.3.2.ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Ο προσδιορισμός των φυσικοχημικών συστατικών της ιπτάμενης τέφρας είναι ιδιαίτερα δύσκολος λόγω της πολύπλοκης σύνθεσης της, καθώς και της διακύμανσης του μεγέθους, της μορφολογίας της υφής των σωματιδίων της. Σχεδόν όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα είναι δυνατό να ανιχνευθούν

στη χημική σύσταση των ιπτάμενων τεφρών ενώ έχουν εντοπισθεί σχεδόν 188 διαφορετικές ορυκτολογικές φάσεις .

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 197-1 οι ιπτάμενες τέφρες κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες βάσει του ποσοστού CaO που περιέχουν.

- ✓ Πυριτικές (V) περιέχουν λιγότερο από 10 % CaO
- ✓ Ασβεστολιθικές (W) περιέχουν 10 % - 35% CaO

Το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM C618 αναφέρει τρεις βασικές κατηγορίες ιπτάμενων τεφρών:

- ✓ Τύπου C που παράγονται από την καύση λιγνίτη και υπό-βιταμινούχου κάρβουνου και περιέχουν 50% - 70% SiO_2 , Al_2O_3 και 10 % - 35% CaO (Ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας). Διαθέτει ποζολανικές ιδιότητες και ιδιότητες τσιμέντου
- ✓ Τύπου F που παράγονται από την καύση ανθρακίτη ή βιταμινούχου κάρβουνου και περιέχουν τουλάχιστον 70% SiO_2 , Al_2O_3 και Fe_2O και λιγότερο από 10 % CaO (Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης) και διαθέτει ποζολανικές ιδιότητες
- ✓ Τύπου N αναφέρονται σε ακατέργαστες ποζολάνες και περιέχουν τουλάχιστον 70% SiO_2 , Al_2O_3 και Fe_2O (Φαλέγκας, 2014)

2.3.3. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Κατά την διαδικασία της καύσης οι διάφορες μεταλλικές φάσεις που περιέχονται στο στοιχείο του άνθρακα τήκονται, αντιδρούν ή μετασχηματίζονται, ενώ παράλληλα γίνεται μία ανακατανομή των κύριων συστατικών και των ιχνοστοιχείων τους. Οι κυριότερες ορυκτολογικές φάσεις που απαντώνται στην ιπτάμενη τέφρα εμπεριέχουν τα εξής ορυκτά: χαλαζία, άργιλο-πυριτικά ορυκτά όπως ο μουλίτης ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_3$) και οξείδια του σιδήρου.

Ωστόσο οι ασβεστούχες άργιλο-πυριτικές φάσεις και οξείδια του ασβεστίου/μαγνησίου περιέχονται σε τέφρες που προέρχονται από την καύση άνθρακα υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο. Ο σίδηρος που περιέχεται στον άνθρακα ως σιδηροπυρίτης κατά το μεγαλύτερο μέρος του περνάει στην ιπτάμενη τέφρα με τη μορφή των οξειδίων του σιδήρου (Erol, et. al., 2008). Το ποσοστό της μάζας των συστατικών που περιέχονται στην ιπτάμενη τέφρα σε κρυσταλλική μορφή κυμαίνεται συνήθως από 20% έως 60%, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό περιλαμβάνει άμορφη, κυρίως υαλώδη φάση. Ωστόσο, η άμορφη υαλώδης φάση στην ιπτάμενη τέφρα μπορεί να φτάσει σε ποσοστό έως 90%. Επίσης, στην ιπτάμενη τέφρα περιλαμβάνεται ένα ποσοστό άκαυστου άνθρακα (περίπου 3-4%), ο οποίος συναντάται ως πορώδη σωματίδια με σκελετική δομή. Η προέλευση των ορυκτολογικών συστατικών της ιπτάμενης τέφρας μπορεί να είναι:

- Πρωτογενή ορυκτά και φάσεις που περιέχονται στον άνθρακα και δεν έχουν υποστεί καμία μεταβολή κατά την διαδικασία καύσης (πυριτικά, οξείδια, ηφαιστειογενές γυαλί και σωματίδια άνθρακα).
- Δευτερογενείς φάσεις που δημιουργούνται κατά την καύση (μαγνητίτης, αιματίτης, μετα-καολινίτης, μουλίτης, ανυδρίτης, άσβεστος, πυριτικά Ca-Mg, γυαλί, οπτάνθρακας)
- Τριτογενή ορυκτά και φάσεις που δημιουργούνται κατά τη μεταφορά και αποθήκευση των στερεών αποβλήτων (θειικά, ανθρακικά και οξύ-υδροξείδια).

Οι πυριτικές φάσεις είναι κυρίως πρωτογενή ορυκτά και δευτερογενή προϊόντα και πιο σπάνια τριτογενείς φάσεις διαφόρων κλαστικών, συγγενετικών και επιγενετικών ορυκτών στον άνθρακα. Η πυριτική ιπτάμενη τέφρα είναι μία λεπτή σκόνη από σφαιρικά κυρίως σωματίδια που έχουν ποζολανικές ιδιότητες. Βασικά αποτελείται από δραστικό οξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3). Το υπόλοιπο περιέχει οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3) και άλλες ενώσεις. Ο χαλαζίας είναι το πιο διαδεδομένο ορυκτό που περιέχεται στην ιπτάμενη τέφρα. Απαντάται σε γωνιώδεις έως στρογγυλεμένους τεμαχισμένους κόκκους. Γενικά το μέγεθος των κόκκων είναι μεταξύ 5 και 70 μm . Οι πυριτικές φάσεις περιλαμβάνουν κυρίως χαλαζία, χριστοβαλίτη, καολινίτη, ιλλίτη, μοσχοβίτη, πλαγιόκλαστα, αστρίους και

μουλίτη. Οι ορυκτολογικές φάσεις οξειδίων περιλαμβάνουν συνήθως μαγνητίτη, αιματίτη και άσβεστο, ενώ οι συνηθέστερες ορυκτολογικές φάσεις που περιέχουν θειικά περιλαμβάνουν γύψο και ανυδρίτη. Μελέτη των φάσεων που περιέχονται σε δείγματα ιπτάμενης τέφρας έδειξε ότι η ορυκτολογική φάση κυμαινόταν από 17 έως 31%, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό της ιπτάμενης τέφρας ήταν άμορφη υαλώδης φάση. Στην παρούσα μελέτη, το υψηλότερο ποσοστό της ορυκτολογικής φάσης που εντοπίστηκε ήταν χαλαζίας και μουλίτης. Το ποσοστό του χαλαζία στην ορυκτολογική φάση κυμαινόταν από 26 έως 37% και του μουλίτη από 32 έως 46%. Η προέλευση του χαλαζία μπορεί να είναι είτε πρωτογενής, είτε δευτερογενής. Ο δευτερογενής χαλαζίας έχει υποστεί ποικίλους και πολύμορφους μετασχηματισμούς και έχει σχηματιστεί από το διοξείδιο του πυριτίου που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της μεταβολής των αργιλικών ορυκτών, του μαρμαρυγία και των αστρίων, σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 900 °C. Σχετικά με τις ελληνικές τέφρες, έχουν χαρακτηριστεί ως άσβεστο-άργίλο-πυριτικής σύστασης με ποζολανικές ή και υδραυλικές ιδιότητες. Ειδικότερα οι τέφρες περιοχής Πτολεμαΐδας, ανήκουν κατά τα αμερικανικά πρότυπα στην κλάση C δηλαδή στην κατηγορία τεφρών υψηλού ποσοστού CaO, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 15-35%, σε αντίθεση με τις τέφρες της περιοχής Μεγαλουπόλεως που ανήκουν στη κατηγορία F όπου το CaO είναι μικρότερο του 10%. Ουσιαστικά αυτοί είναι οι κύριοι παράγοντες που διακρίνουν τις Ελληνικές ιπτάμενες τέφρες σε ποζολανικές και υδραυλικές. Έτσι, οι τέφρες περιοχής Μεγαλόπολης, στις οποίες το SiO₂ συναντάται σε μεγαλύτερο ποσοστό, εμφανίζουν, κατά κανόνα, μεγαλύτερη ποζολανική δράση, εντονότερη τάση δηλαδή να αντιδράσουν με το Ca(OH)₂ που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου. Αντίστοιχα, η εξάρτηση της δράσης τους από το διαθέσιμο Ca(OH)₂ είναι σημαντικά μεγαλύτερη για τις τέφρες Πτολεμαΐδας που διαθέτουν και υδραυλικές ιδιότητες. (Φαλέγκας Σ., 2014)

2.3.4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Η χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων στον τομέα των κατασκευών αποτελεί πλέον μια ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνική, τόσο στον ελληνικό όσο και στον ευρύτερο ευρωπαϊκό χώρο. Στη χώρα μας, το πιο σύνηθες παραπροϊόν που παράγεται είναι η ιπτάμενη τέφρα. Η ετήσια παραγωγή ανέρχεται στα 11.5-12 εκατομμύρια τόνους (Λιόλιος, 2019). Οι κυριότερες χώρες που παράγουν

ιπτάμενη τέφρα είναι αυτές που έχουν αρκετά μεγάλα φυσικά αποθέματα σε άνθρακα. Τέτοιες χώρες είναι οι Η.Π.Α, η Αγγλία και η Γερμανία. Πιο συγκεκριμένα στην Ελλάδα εξαιτίας των σημαντικών λιγνιτικών κοιτασμάτων που είναι συγκεντρωμένα σε τρεις περιοχές-λεκάνες κατά μήκος του άξονα Φλώρινα-Αμύνταιο-Πτολεμαΐδα-Κοζάνη-Σέρβια, δημιουργήθηκε στην περιοχή της Κοζάνης-Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου ένα από τα μεγαλύτερα Λιγνιτικά Κέντρα όχι μόνο της Ευρώπης αλλά του κόσμου. Το Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας βρίσκεται 160 km δυτικά της Θεσσαλονίκης και εκεί λειτουργούν σήμερα τέσσερα επιφανειακής εξόρυξης λιγνιτωρυχεία. Το Ορυχείο Νοτίου Πεδίου είναι το 22 μεγαλύτερο και έχει ετήσια παραγωγή 24 εκατ. Τόνους λιγνίτη και ακολουθούν το Ορυχείο Καρδιάς, το Ορυχείο Κυρίου Πεδίου και το Ορυχείο Αμυνταίου (συμπεριλαμβανομένου και του ορυχείου στη Φλώρινα) (Βούτα, 2018).. Είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι η βασικότερη διάκριση λόγω της χημικής σύστασης είναι αυτή που προκύπτει από την τιμή του λόγου CaO/SiO_2 που κατατάσσει τις τέφρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες: α) Τέφρες βασικές ή υψηλής ασβέστου (HA) ή Calcareous fly ashes β) Τέφρες όξινης ή χαμηλής ασβέστου (LA) ή Siliceous fly ash Τέφρες που χαρακτηρίζονται βασικές, έχουν συντελεστή $\text{CaO/SiO}_2 \geq 1$ ενώ τέφρες με $\text{CaO/SiO}_2 < 0.3$ χαρακτηρίζονται ως όξινης. Στην χώρα μας, στους ενεργειακούς σταθμούς της Δυτικής Μακεδονίας παράγονται κατά κανόνα βασικές τέφρες ($\text{CaO/SiO}_2 = 0.86-1.40$), ενώ στους σταθμούς της Μεγαλόπολης όξινης ($\text{CaO/SiO}_2 = 0.25-0.38$). Οι κυριότερες από τις εφαρμογές της τέφρας στην Ελλάδα είναι:

- Στην σταθεροποίηση και στεγανοποίηση εδαφών
- Σαν υλικό πλήρωσης κενών σε διάφορα έργα
- Σαν υδραυλικό συνδετικό υλικό σε μίγμα με CaO
- Στην κατασκευή ελαφροβαρών τσιμεντολίθων και αδρανών
- Στο αεριομπετόν και ασφατομπετόν
- Στην κεραμική και πλινθοποιία
- Στην γεωργία και εξουδετέρωση όξινων εδαφών
- Στην εξυγίανση βιομηχανικών αποβλήτων εδαφών, καθώς επίσης και στην κατασκευή χώρων υγειονομικής ταφής.
- Στην ανάκτηση ιχνοστοιχείων
- Στη χημεία για προσροφητικές και καταλυτικές δράσεις

- Στη βιομηχανία πλαστικών (υλικό πλήρωσης PVC, πολυστυρολίου και αφρωδών υλικών)
- Στη βιομηχανία χρωμάτων
- Στην κατασκευή κυλινδρούμενου σκυροδέματος
- Στην απορρύπανση
- Στον εμπλουτισμό εδαφών σε ιχνοστοιχεία
- Στην μεταλλουργία για την ανάκτηση των μετάλλων
- Τέλος στην παραγωγή σύνθετων ζεόλιθων (Μαράκης,2012)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προετοιμασία και τον χαρακτηρισμό των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς επίσης και η παρασκευή και ο χαρακτηρισμός των υαλοκεραμικών δοκιμίων που δημιουργήθηκαν. Πρώτα θα γίνει η περιγραφή των πρώτων υλών, όπως είναι τα χαρακτηριστικά που τις διέπουν, η προέλευση τους, και ο τρόπος παρασκευής τους. Στη συνέχεια περιγράφεται η προετοιμασία των πρώτων υλών, περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια παρασκευής των υαλοκεραμικών και γίνεται ο προσδιορισμός και η ανάλυση των ορυκτολογικών τους ιδιοτήτων και των φυσικοχημικών τους ιδιοτήτων.

3.2 ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ

3.2.1. ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα της Μεγαλόπολης. Η ιπτάμενη τέφρα είναι το λεπτό υπόλειμμα της καύσης του λιγνίτη που παράγεται από τους ηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που απάγεται από τα καυσάτρια και συγκρατείται με ειδικές διατάξεις πριν από την διαφυγή στην ατμόσφαιρα. Είναι όξινη τέφρα, γιατί χαρακτηρίζεται από οξείδια ασβεστίου και διοξείδιο του πυριτίου με λόγο $\text{CaO/SiO}_2 = 0.25-0.38$. Η ιπτάμενη τέφρα της Μεγαλόπολης ανήκει στην κατηγορία των Ι.Τ. με υψηλό ποσοστό SiO_2 σε σχέση με την ιπτάμενη τέφρα των ηλεκτρικών σταθμών Πτολεμαΐδας.

3.2.1 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

Στον Πίνακα παρουσιάζεται η χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης όπως προέκυψε από τη μέθοδο XRF.

Πίνακας 3.1 : Χημική σύστασης % κ.β. ιπτάμενης τέφρας

Συστατικά	Ποσοστό %
SiO ₂	43.13
CaO	18.74
Na ₂ O	1.40
Al ₂ O ₃	13.07
MgO	2.40
K ₂ O	2.33
Fe ₂ O ₃	12.40
MnO	0.10
TiO ₂	1.11
P ₂ O ₅	0.21
Cr ₂ O ₃	0.06
SO ₃	4.56
SrO	0.12
BaO	0.05
L.O.I	4.67
Σύνολο	100

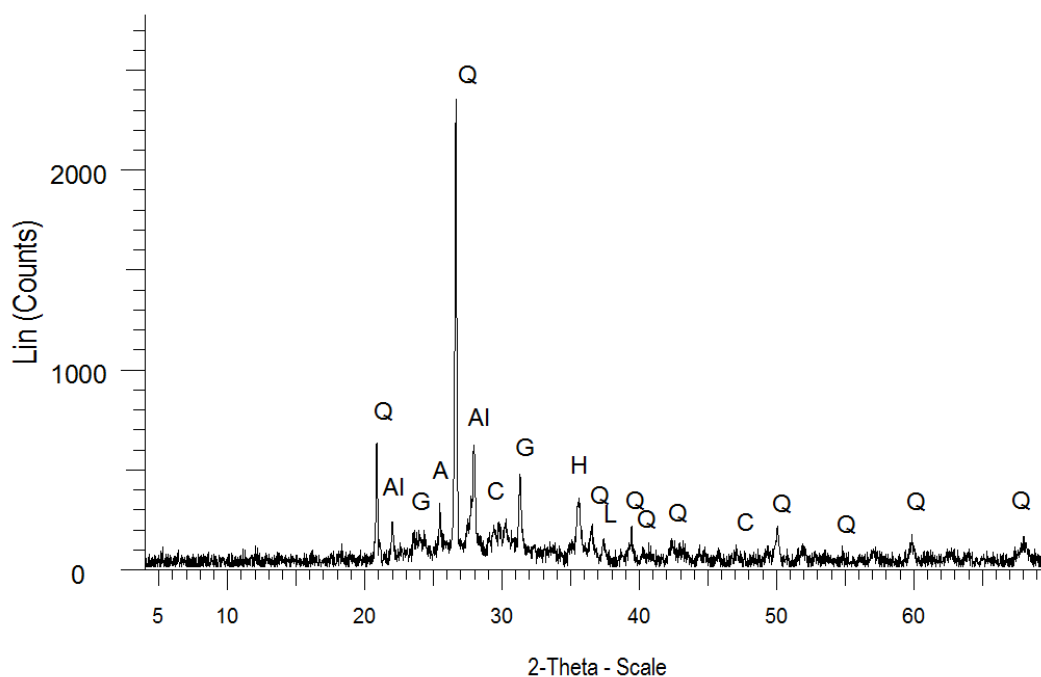
Οι ιπτάμενες τέφρες κατατάσσονται με βάση τη χημική τους σύσταση σε βασικές και τις όξινες.

Η κατηγοριοποίηση αυτή βασίζεται στο λόγο CaO/SiO₂. Όταν η τιμή του λόγου αυτού είναι ίση ή μεγαλύτερη του 1 τότε η ιπτάμενη τέφρα χαρακτηρίζεται για βασική ή υψηλής ασβέστου. Όταν ο λόγος CaO/SiO₂ <0.3, οι τέφρες κατατάσσονται σε όξινες ή χαμηλής ασβέστου . (www.dei.gr)

Στην παρούσα μελέτη η ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης ανήκει στις όξινες τέφρες λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας της σε SiO₂ και Al₂O₃ συν του ότι ο λόγος CaO/SiO₂ ισούται με 0.25-0.38.

3.2.2 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η ορυκτολογική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης



Σχήμα 1: Ακτινοδιάγραμμα ορυκτολογικής φάσης της Ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης (FA) Q: χαλαζίας (SiO_2), C: ασβεστίτης (CaCO_3), Al: αλβίτης $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, G: γκελενίτης $\text{Ca}_2(\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7)$, A: ανυδρίτης $\text{Ca}(\text{SO}_4)$, L: άσβεστος CaO , H: αιματίτης (Fe_2O_3)

Οι κυριότερες ορυκτολογικές φάσεις που συναντώνται είναι ασβεστίτης, χαλαζίας, και ακολουθούν αλβίτης, γκελενίτης, ανυδρίτης, άσβεστος αιματίτης και ένα μικρό ποσοστό άμορφης φάσης.

3.2.2. ΑΠΟΒΛΗΤΟ ΓΥΑΛΙ

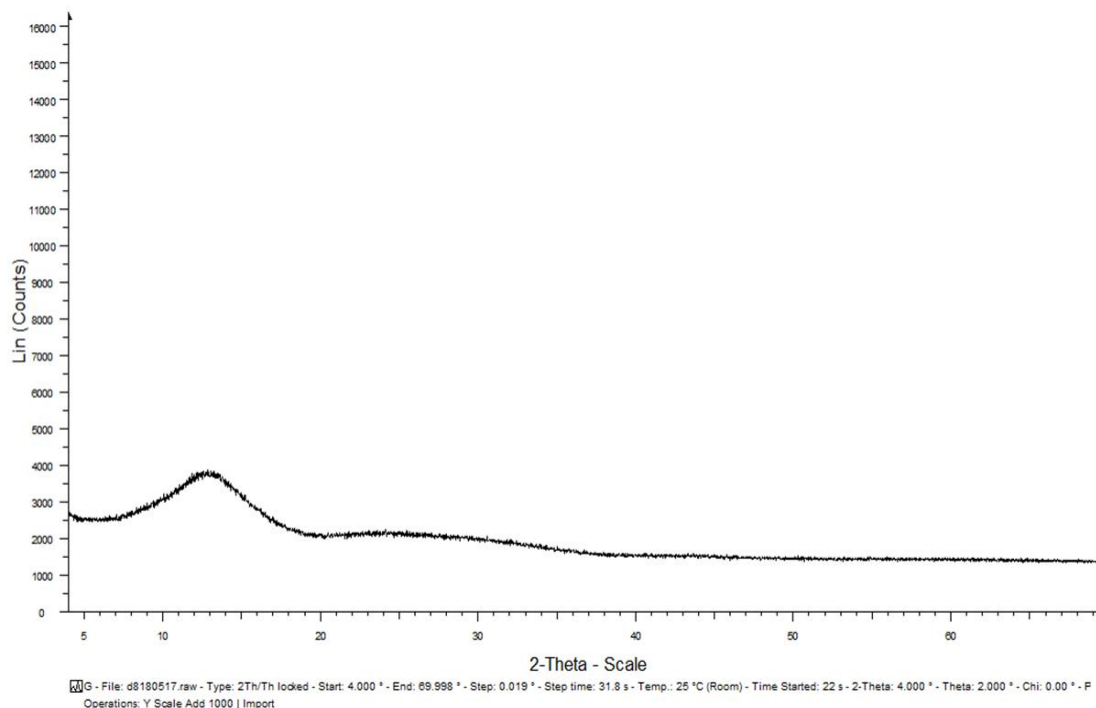
Το γυαλί που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία προέρχεται κυρίως από γυαλιά οικιακής χρήσης (απόβλητα γυάλινα όπως ποτήρια, μπουκάλια κ.λπ.) Τα απόβλητα υάλου έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο και κάλιο, υψηλή διαπερατότητα, καλή κοκκομετρία, αντοχή κατά την θέρμανση και τέλος ηχομόνωση (Καμπεροπούλου, 2018). Το γυαλί είναι ένα άμορφο υλικό και έχει σύσταση κατά βάση διοξείδιο του πυριτίου, όπως προαναφέρθηκε, οξείδια ασβεστίου αλλά και νατρίου. Ύστερα από έρευνες αλλά και μελέτες έχει διαπιστωθεί πως η ανάμειξη απόβλητου γυαλιού με ιπτάμενη τέφρα προσδίδει στο τελικό προϊόν τις ιδιότητες ενός υαλοκεραμικού όπως θα ήταν εάν παρασκευαζόταν με την κλασσική μέθοδο χρησιμοποιώντας καθαρά οξείδια ασβεστίου πυριτίου και καλίου. Ωστόσο αυτή η τεχνική είναι περισσότερο συμφέρουσα διότι έχει χαμηλότερο κόστος και μας δίνει εν τέλει το ίδιο αποτέλεσμα.

3.2.3 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

Το γυαλί αποβλήτου αποτελείται κατά 99.8% από SiO_2 όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης με τη μέθοδο XRF

3.2.4 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

Στο σχήμα παρουσιάζεται η ορυκτολογική σύσταση του απόβλητου γυαλιού



Σχήμα 2: Ακτινοδιάγραμμα ορυκτολογικής φάσης του γυαλιού

Όπως αναμένεται καμία κρυσταλλική φάση δεν εμφανίζεται στο ακτινοδιάγραμμα άλλα μόνο άμορφη φάση.

3.3. ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.3.1 ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμών ήταν οι εξής:

- 1) Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης.
- 2) Απόβλητο γυαλί από οικιακά απορρίμματα .

Όλες οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά λειοτριβήθηκαν και στη συνέχεια αναμίχθηκαν σύμφωνα με τις αναλογίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2 Οι κωδικοί A1 A2 και A3 του παρακάτω πίνακα αναφέρονται στις θερμοκρασίες έψησης των 900° , 1050° και 1100° αντίστοιχα. Ακολούθησε η

μορφοποίηση τους και η έψηση τους σε κλίβανο υψηλών θερμοκρασιών για τη τελική παραγωγή των κεραμικών.

Πίνακας 3.2 : Κωδικοί πειραμάτων και συνθήκες

Κωδικός	Ιπτάμενη Τέφρα (%)	Απόβλητο Γυαλί (%)	Θερμοκρασία
A190100	100	0	900
A19090	90	10	900
A19080	80	20	900
A19075	75	25	900
A19060	60	40	900
A19050	50	50	900
A210100	100	0	1000
A21090	90	10	1000
A21080	80	20	1000
A21075	75	25	1000
A21060	60	40	1000
A21050	50	50	1000
A350100	100	0	1050
A35090	90	10	1050
A35080	80	20	1050
A35075	75	25	1050
A35060	60	40	1050
A35050	50	50	1050
A411100	100	0	1100
A41190	90	10	1100
A41180	80	20	1100
A41175	75	25	1100
A41160	60	40	1100
A41150	50	50	1100

3.3.2 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΝΕΩΝ

Για την μορφοποίηση των κόνεων εφαρμόστηκε η μέθοδος μονοαξονικής συμπίεσης. Στην διαδικασία αυτή το λειοτριβημένο γυαλί τοποθετείται σε ανοξείδωτο μεταλλικό καλούπι μεγάλης σκληρότητας και επιθυμητού σχήματος (κυλινδρικό) και στη συνέχεια μέσω ενός εμβόλου εφαρμόζεται πίεση προς μια διεύθυνση (αυτή του κατακόρυφου άξονα του καλουπιού). Η

πίεση αυτή αναγκάζει τους ασύνδετους κόκκους των υλικών να συνδεθούν μεταξύ τους παίρνοντας το εσωτερικό σχήμα του καλούπιού ενώ παράλληλα παραμορφώνονται πλαστικά.

Αρχικά το εκάστοτε μείγμα προτού τοποθετηθεί στο κυλινδρικό καλούπι αναμίχθηκε με μικρή ποσότητα απιονισμένου νερού (<5%) το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως συνδέτης με σκοπό την βελτίωση της ομογενοποίησης και της πλαστικότητας. Στη συνέχεια τα ομογενοποιημένα και ελαφρώς νωπά μείγματα τοποθετούνταν κάθε φορά στο καλούπι μορφοποίησης (Εικόνα 2.6) και εισαγόταν σε αυτό το έμβολο συμπίεσης. Έπειτα το καλούπι και το έμβολο έμπαιναν στην υδραυλική πρέσα συμπίεσης (Εικόνα 2.8), όπου μέσω των ειδικών μοχλών γινόταν η συμπίεση των μειγμάτων. Η δύναμη συμπίεσης που εφαρμόστηκε για την μορφοποίηση των μειγμάτων ήταν 60 MPa. Μετά τη συμπίεση το καλούπι με το έμβολο αφαιρούνταν από την πρέσα ώστε να γίνει η εξώθηση του μορφοποιημένου δοκιμίου χρησιμοποιώντας τα εξαρτήματα εξώθησης (Σχήμα 3.).



Σχήμα 3: Καλούπι μορφοποίησης με μείγμα ιπτάμενης τέφρας και γυαλιού



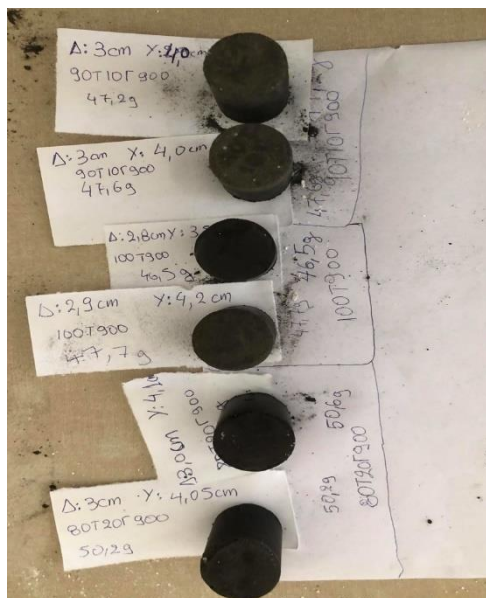
Σχήμα 4: Καλούπι μορφοποίησης δίχως μείγμα



Σχήμα 5: Υδραυλική πρέσα



Σχήμα 6: Εξάρτημα εξώθησης



Σχήμα 7 : Δοκίμια πριν την έψηση



Σχήμα 8 : Δοκίμια μετά την έψηση

3.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

3.4.1 Θραύση-Λειοτρίβιση

Για την παραγωγή λεπτόκοκκων κλασμάτων ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης και των απόβλητων γυαλιών πραγματοποιήθηκε λειοτρίβιση αντιπροσωπευτικών δειγμάτων των υλικών στον μύλο. Όσον αφορά στο γυαλί πριν τη λειοτρίβιση στο μύλο πραγματοποιήθηκε θραύση του στον σιαγωνινό σπαστήρα. Το υποφαινόμενο μηχάνημα, σπαστήρας, διαθέτει πέντε ανοίγματα τα οποία καθορίζουν το μέγεθος των τελικών τεμαχίων των υλικών. (Καμπεροπούλου, 2018).

- **Σιαγωνωτός σπαστήρας**

Ο σιαγωνωτός σπαστήρας είναι μία πολύ απλή μηχανή θραύσης, ίσως και η απλούστερη. Η χρήση της είναι κυρίως για την πρωτογενή και δευτερογενή θραύση. Το μηχάνημα αποτελείται από μια ακίνητη επιφάνεια, σχεδόν κατακόρυφη, απέναντι στην οποία υπάρχει μια δεύτερη κινητή επιφάνεια υπό γωνία, μεταξύ τους ενεργούν ως είδος σιαγόνων. Η κίνηση της δεύτερης επιφάνειας συνθλίβει, σπάει τα σώματα που ευρίσκονται ανάμεσα των δύο επιφανειών. Το άνοιγμα που υπάρχει στο πάνω μέρος των δύο σιαγόνων καθορίζει το μέγεθος των τεμαχίων της τροφοδοσίας, ενώ το άνοιγμα στο κάτω μέρος τους καθορίζει το μέγεθος του προϊόντος το οποίο όμως δεν μπορεί να διατηρείται σταθερό. (Καμπεροπούλου Κ., 2018)



Σχήμα 9: Σιαγονωτός Σπαστήρας

- **Μύλος με δακτυλίους**

Ο δακτυλιόμυλος από την BICO χρησιμοποιεί δαχτυλίδια και ένα δίσκο μέσα σε ένα κράμα χρωμίου-χάλυβα λείανσης διαμέτρου 8". Οι περιοχές εφαρμογής περιλαμβάνουν: ορυκτά, μετάλλευμα, τσιμέντο, πετρώματα, χώμα και παρόμοια υλικά. Κατά τη λειτουργία, το μονωμένο περίβλημα σφραγίζεται για μειωμένο θόρυβο. Περιέχει ένα μπόλ χωρητικότητας 250 mL με εξαρτήματα λείανσης και μαγνητικό διακόπτη εκκίνησης.



Σχήμα 10: Μύλος με δακτυλίους

3.4.2. ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ (XRF)

Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την τεχνική της φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων Χ ή X-ray fluorescence (XRF). Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το αυτοματοποιημένο φασματόμετρο φθορισμού ακτίνων Χ, S2 της εταιρίας Bruker AXS (Σχήμα 11). Η τεχνική αυτή βασίζεται στην διέγερση των ηλεκτρονίων των ατόμων με χρήση υψηλής ενέργειας ακτίνων Χ και στην μέτρηση της φθορίζουσας (δευτερεύουσας) ακτινοβολίας που εκπέμπουν. Σκοπός της ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός των κυριότερων συστατικών που περιέχονται στα αρχικά υλικά και στα παραγόμενα γυαλιά και υαλοκεραμικά. Παρακάτω φαίνονται τα δείγματα προς χημική ανάλυση (Σχήμα 12).



Σχήμα 11: Φασματοόμετρο ακτίνων Χ



Σχήμα 12: Δείγματα προς χημική ανάλυση

3.4.3 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ (XRD)

Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης των πρώτων υλών, καθώς και των παραγόμενων γυαλιών και των υαλοκεραμικών, πραγματοποιήθηκε με το περιθλασίμετρο ακτίνων Χ (XRD) τύπου D8-Advance της Bunker AXS (Εικόνα 2.16) του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η ακτινοσκόπηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση λυχνίας χαλκού (Cu) και φάσμα σάρωσης στις γωνίες 4° έως 70° 2θ , με βήμα $0,02^\circ$ και χρόνο μέτρησης $0,02$ sec/βήμα. Η ποιοτική ορυκτολογική ανάλυση όλων των μετρήσεων έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικά DIFFRAC plus EVA και για βάση δεδομένων το Powder Diffraction File.

Κατά την προετοιμασία των δειγμάτων για μέτρηση με το περιθλασίμετρο, αρχικά λειοτριβείται μικρή ποσότητα του εκάστοτε υλικού στον πλανητικό μύλο Bico Pulverizer. Στη συνέχεια το λειοτριβημένο υλικό τοποθετείται ομοιόμορφα στους ειδικούς πλαστικούς δειγματοφορείς του περιθλασιμέτρου (Σχήμα 13) και διαστρώνεται πολύ καλά ώστε να προκύψει μια λεία επιφάνεια μέτρησης χωρίς ανωμαλίες.



Σχήμα 13: Περιθλασίμετρο ακτίνων Χ



Σχήμα 14: Δειγματοφορείς περιθλασίμετρου

3.5. ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ – ΠΟΡΩΔΕΣ - ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Με βάση την Αρχή του Αρχιμήδη (πρότυπο DIN EN 993-1) προσδιορίστηκαν οι φυσικές ιδιότητες των υαλοκεραμικών και συγκεκριμένα η πυκνότητα, το φαινόμενο πορώδες και η υδατοαπορροφητικότητα. Σε πρώτη φάση μετρήθηκε με ειδική διάταξη σε υδροστατικό ζυγό ακριβείας (Σχήμα 15) η ξηρή μάζα του κάθε δοκιμίου και έπειτα όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε γυάλινο ξηραντήρα (Σχήμα 16) όπου εφαρμόστηκε κενό για δύο ώρες έτσι ώστε να αφαιρεθεί όλος ο αέρας από τους πόρους. Έπειτα προστέθηκε απιονισμένο νερό μέχρι τα $\frac{3}{4}$ του ύψους του ξηραντήρα ως υγρό πλήρωσης έτσι ώστε να καλυφθούν όλα τα δοκίμια με νερό. Ο χρόνος παραμονής των δοκιμίων μέσα στο νερό ήταν μία μέρα ώστε να εξασφαλιστεί η εισχώρηση του νερού στους πόρους των δοκιμίων. Τέλος, προσδιορίστηκε η μάζα των εμβαπτισμένων δοκιμίων στον ζυγό ακριβείας μέσα σε νερό και έπειτα αφού σκουπίστηκαν εξωτερικά ζυγίστηκαν ξανά με την ειδική διάταξη του ζυγού ακριβείας.

Πυκνότητα (ρ):

$$\rho = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

Φαινόμενο Πορώδες (ϕ):

$$\phi = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 (\%)$$

Υδατοαπορροφητικότητα (E):

$$E = \frac{m_3 - m_1}{m_3} \times 100 (\%)$$

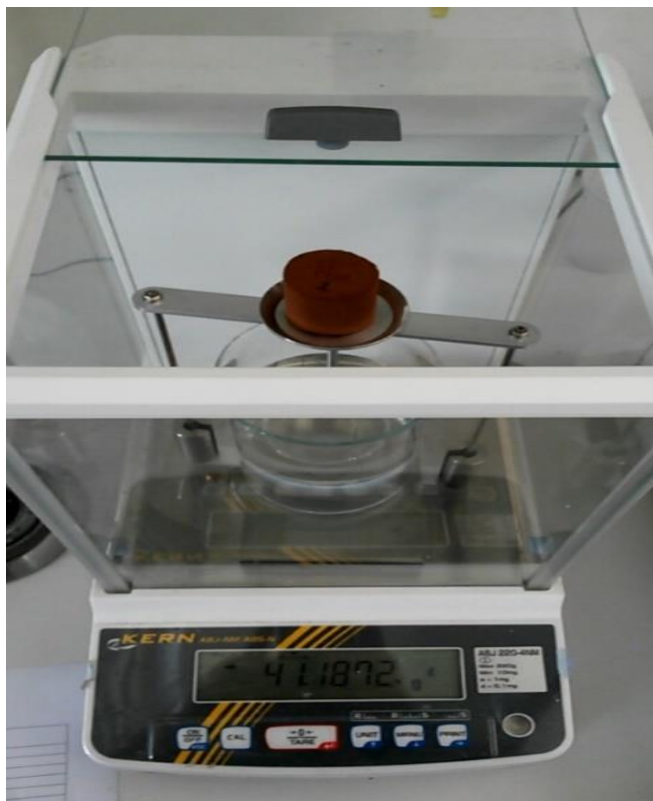
Όπου:

ρ_w = πυκνότητα νερού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, 0,998 g/cm³ στους 20°C.

m_1 = μάζα ξηρού δοκιμίου (g)

m_2 = μάζα εμβαπτισμένου δοκιμίου μέσα σε νερό (g)

m_3 = μάζα εμβαπτισμένου δοκιμίου (g)



Σχήμα 15: Υδροστατικός Ζυγός ακριβείας



Σχήμα 16: Ξηραντήρας κενού

3.6. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

Οι δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη όλων των δοκιμίων έγιναν στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων με την άκαμπτη μηχανή φόρτισης MTS 800 (Σχήμα 17). Αρχικά τα δοκίμια τοποθετούνταν στην κατώτερη πλάκα φόρτισης της μηχανής και στη συνέχεια τοποθετούνταν η πάνω πλάκα φόρτισης. Η φόρτιση έγινε με έλεγχο μετατόπισης από κάτω προς τα πάνω έτσι ώστε το δοκίμιο να έρθει σε επαφή με το πάνω μέρος της μηχανής. Μετά από κατάλληλες ρυθμίσεις στον συνδεδεμένο υπολογιστή με τη μηχανή, τέθηκε σε λειτουργία και ξεκίνησε η αξονική φόρτιση. Η αύξηση του φορτίου ήταν σταδιακή και συνεχόμενη μέχρι την στιγμή που εφαρμοζόταν το μέγιστο φορτίο και αστοχούσε το εκάστοτε δοκίμιο. Τέλος γινόταν η αποφόρτιση της μηχανής και η απομάκρυνση του δοκιμίου.

- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι η ικανότητα ενός υλικού ή μιας δομής να αντέχει σε θλιπτικά φορτία που τείνουν να μειώσουν το μέγεθός του.

$$C_o = \frac{P_{max}}{A} [Pa]$$

Όπου:

P_{max} = μέγιστο θλιπτικό φορτίο μέχρι αστοχίας του δοκιμίου (N)

A = εμβαδόν επιφάνειας φόρτισης δοκιμίου (m²)



Σχήμα 17: Μηχανή φόρτισης MTS 800

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

4.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Παρακάτω παρουσιάζονται πίνακες και διαγράμματα όπου δίνονται τα αποτελέσματα των φυσικών ιδιοτήτων σε σχέση με την θερμοκρασία έψησης και το ποσοστό απόβλητου γυαλιού. Οι αναγραφόμενες τιμές αποτελούν το μέσο όρο τουλάχιστον πέντε μετρήσεων ανά δείγμα.

Πίνακας 4.1 : Τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας A1

Δοκίμια	Πυκνότητα $P \left(\frac{g}{cm^3} \right)$	Φαινόμενο πορώδες Φ (%)	Υδατοαπορροφητικότητα αE (%)
100T900	1,37	41,14	30,23
90T10G900	1,33	43,64	32,72
80T20G900	1,52	40,86	29,21
75T25G900	1,57	38,45	25,94
60T40G900	1,59	37,80	24,31
50T50G900	1,66	37,28	23,50

Πίνακας 4.2: Τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας Α2

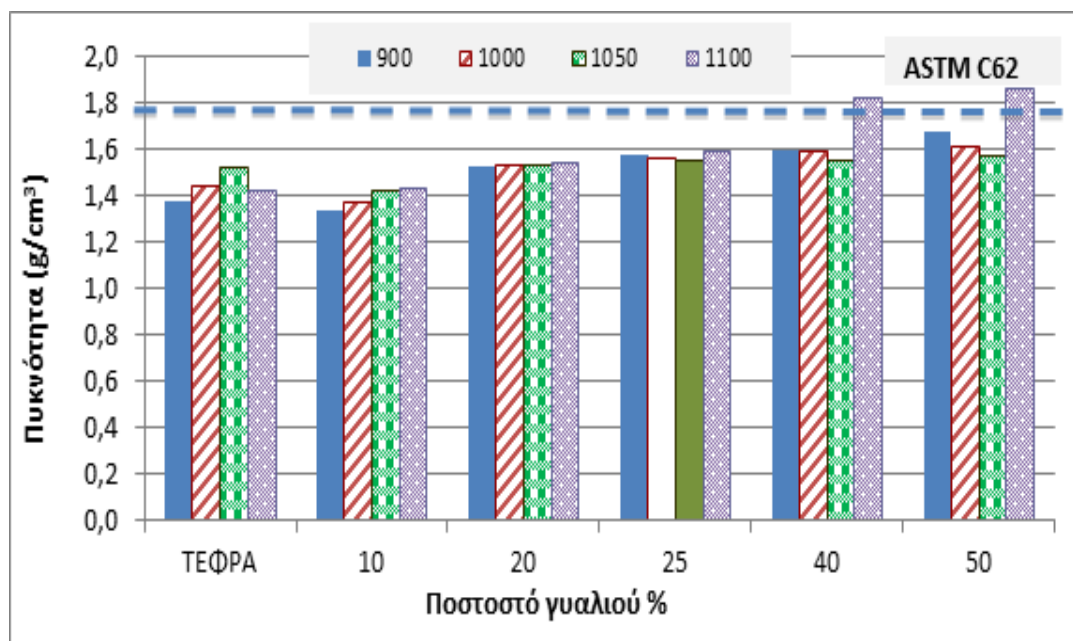
Δοκίμια	Πυκνότητα Ρ ($\frac{g}{cm^3}$)	Φαινόμενο πορώδες Φ (%)	Υδατοαπορροφητικό- τητα Ε (%)
100Τ1000	1,44	37,41	21,47
90Τ10Γ1000	1,37	39,91	23,97
80Τ20Γ1000	1,52	37,69	23,83
75Τ25Γ1000	1,56	35,98	19,52
60Τ40Γ1000	1,58	35	17,27
50Τ50Γ1000	1,61	29,97	3,08

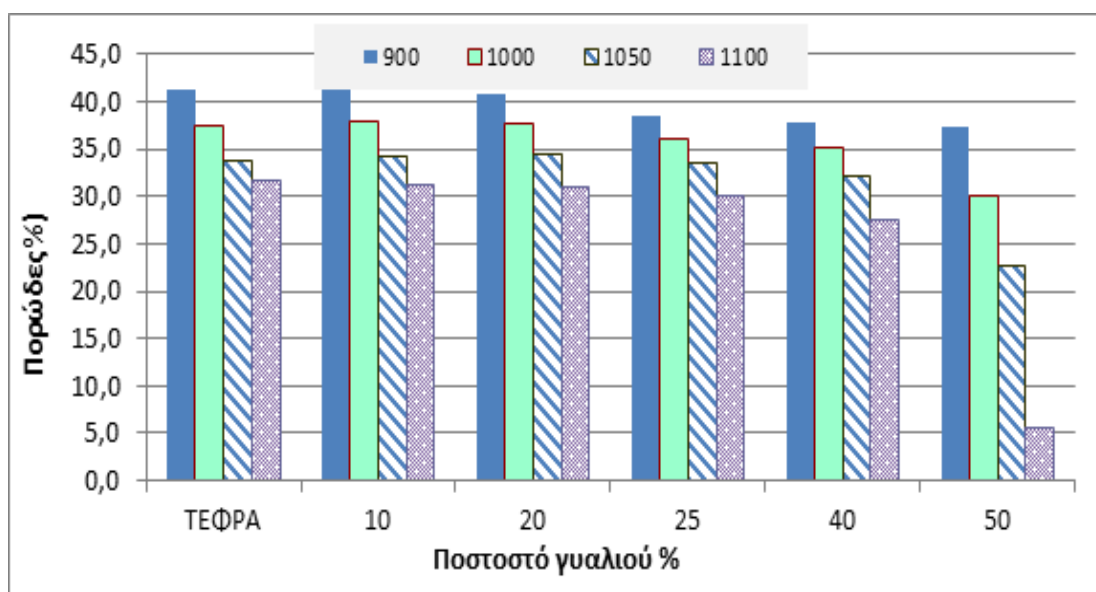
Πίνακας 4.3: Τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας Α3

Δοκίμια	Πυκνότητα Ρ ($\frac{g}{cm^3}$)	Φαινόμενο πορώδες Φ (%)	Υδατοαπορροφητικό- τητα Ε (%)
100Τ1050	1,51	33,68	22,99
90Τ10Γ1050	1,41	36,17	25,49
80Τ20Γ1050	1,52	34,51	22,73
75Τ25Γ1050	1,55	33,52	21,93
60Τ40Γ1050	1,54	32,2	20,72
50Τ50Γ1050	1,57	22,66	14,39

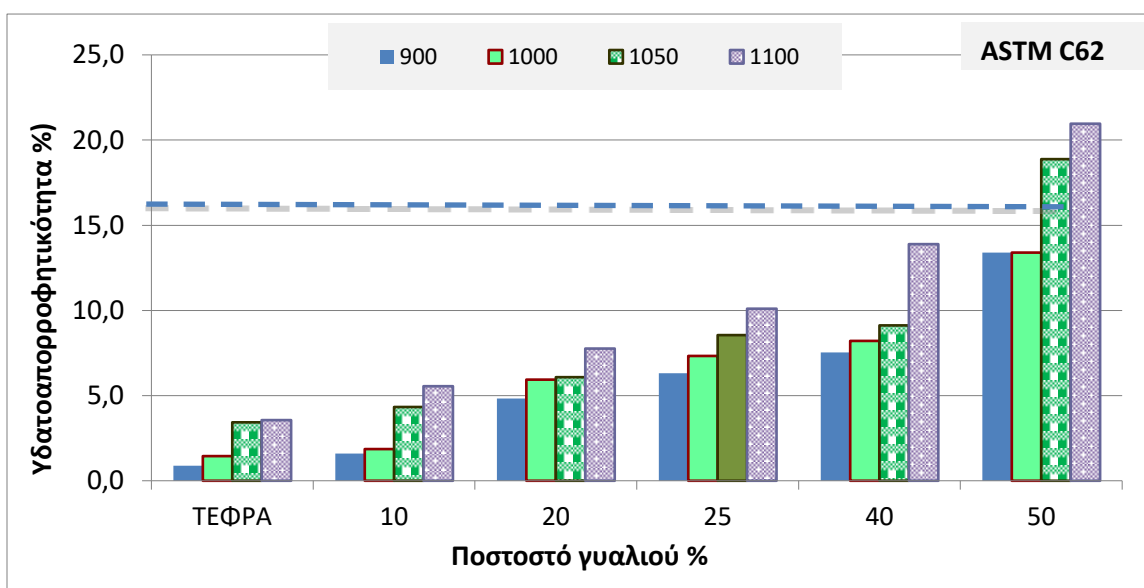
Πίνακας 4.4: Τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας Α4

Δοκίμια	Πυκνότητα Ρ ($\frac{g}{cm^3}$)	Φαινόμενο πορώδες Φ (%)	Υδατοαπορροφητικότητα Ε (%)
100Τ1100	1,42	31,70	25,64
90Τ10Γ1100	1,42	34,20	26,58
80Τ20Γ1100	1,53	33,98	19,52
75Τ25Γ1100	1,58	30,06	17,27
60Τ40Γ1100	1,81	27,5	19,9
50Τ50Γ1100	1,85	5,61	3,08

**Διάγραμμα 4.1:** Τιμές πυκνότητας σε σχέση με το ποσοστό γυαλιού και την θερμοκρασία έψησης



Διάγραμμα 4.2: Τιμές φαινόμενου πορώδους σε σχέση με το ποσοστό γυαλιού και την θερμοκρασία έψησης



Διάγραμμα 4.3: Διάγραμμα υδατοαπορροφητικότητας σε σχέση με το ποσοστό γυαλιού και την θερμοκρασία έψησης

Η διακεκομμένη γραμμή του πίνακα 4.3 δείχνει τα όρια του προτύπου ASTM C62 για τις προδιαγραφές κατασκευής τούβλων-κεραμιδίων.

Στα παραπάνω διαγράμματα επεξηγούνται οι ιδιότητες των δειγμάτων που πυροσυσσωματώθηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες, συμπεριλαμβανομένης της πυκνότητας, της υδατοαπορροφητικότητας και του πορώδους. Όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.1 η μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας με τιμή $1.85 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ επιτυγχάνεται όταν το ποσοστό γυαλιού είναι 50%. Επιπλέον φαίνεται και στον πίνακα 4.4, αλλά και στο διάγραμμα 4.1 ότι στη θερμοκρασία των 1100 (°C) έχουμε εξίσου την μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας Η μικρότερη τιμή πυκνότητας εντοπίζεται στους 900° C με τιμή $1.33 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ και ποσοστό γυαλιού 10%. Προσθέτοντας γυαλί, ευνοούνται οι μηχανισμοί της πυροσυσσωμάτωσης μέσω υγρής φάσης. Αυτό σημαίνει ότι το γυαλί προωθεί τη διαδικασία πύκνωσης πυροσυσσωμάτωσης, επομένως ενισχύεται το ποσοστό της υαλώδους φάσης που περιέχεται στην ιπτάμενη τέφρα και αυξάνεται η συνοχή και η πυκνότητα του τελικού δοκιμίου.

Το ποσοστό πορώδους από την άλλη, σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες, παρατηρούμε ότι μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του ποσοστού σε γυαλί. Και συγκεκριμένα από 43.64 προσθέτοντας 10% γυαλί και 5.61 αυξάνοντας το ποσοστό του γυαλιού σε ποσοστό 50 %. Ενώ σε σχέση με τη θερμοκρασία 900 (°C) με τιμή 43.64 με ποσοστό τέφρας 90% και ποσοστό σε γυαλί 10%. Εκτός από την αξιολόγηση του αποτελέσματος πυροσυσσωμάτωσης του όγκου πυκνότητας, η απορρόφηση του νερού είναι επίσης ένας σημαντικός δείκτης. Η υδατοαπορροφητικότητα νερού καθώς και το πορώδες των δοκιμίων μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η απορρόφηση νερού και το πορώδες των δειγμάτων με 50 και 60 ποσοστό σε γυαλί είναι σχεδόν 3% όταν ψήνεται στους 1100 (°C). Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός απορρόφησης νερού σχετίζεται άμεσα με το ανοιχτό πορώδες. Συγκριτικά με την αύξηση του ποσοστού σε γυαλί παρατηρείται σταδιακή αύξηση και της υδατοαπορροφητικότητας. Την μικρότερη τιμή της υδατοαπορροφητικότητας 3.08 την συναντάμε στους 1100 (°C) και ταυτίζεται με αυτήν του 1000 (°C) με ποσοστό σε γυαλί 40% και 50 % αντίστοιχα.

4.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των παραγόμενων υαλοκεραμικών παρουσιάζεται στους πίνακες που ακολουθούν καθώς και στο διάγραμμα 4.4.

Πίνακας 4.5: Τιμές αντοχής σε θλίψη κεραμικών ομάδας A1

Δοκίμια	Αντοχή σε Θλίψη (MPa)
100T900	0,89
90T10Γ900	1,59
80T20Γ900	4,82
75T25Γ900	6,32
60T40Γ900	7,53
50T50Γ900	13,4

Πίνακας 4.6: Τιμές αντοχής σε θλίψη κεραμικών ομάδας A2

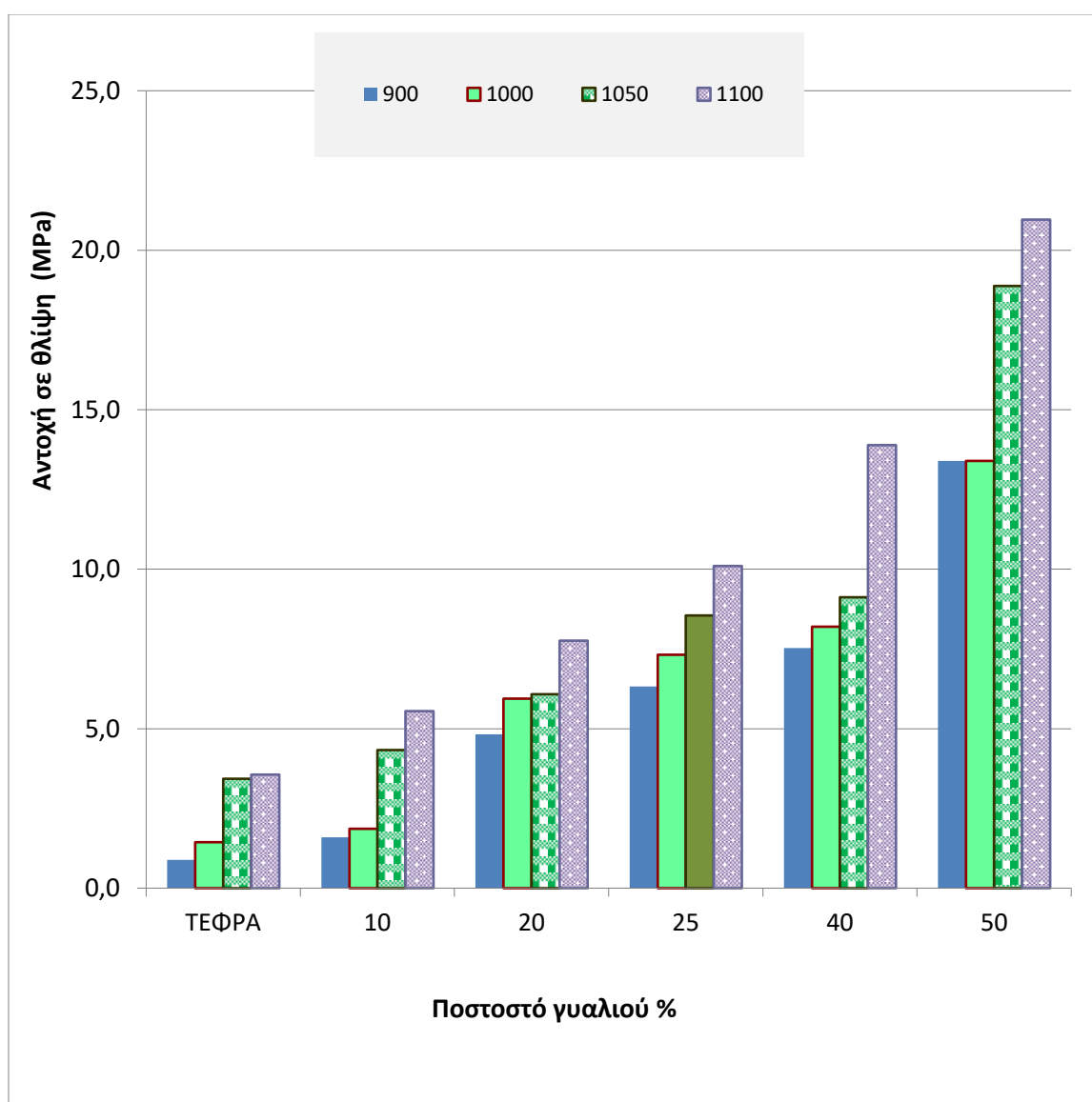
Δοκίμια	Αντοχή σε Θλίψη (MPa)
100T1000	1,44
90T10Γ1000	1,86
80T20Γ1000	5,94
75T25Γ1000	7,32
60T40Γ1000	8,2
50T50Γ1000	14,2

Πίνακας 4.7: Τιμές αντοχής σε θλίψη κεραμικών ομάδας A3

Δοκίμια	Αντοχή σε Θλίψη (MPa)
100T1050	3,43
90T10Γ1050	4,33
80T20Γ1050	6,08
75T25Γ1050	8,55
60T40Γ1050	9,12
50T50Γ1050	18,88

Πίνακας 4.8: Τιμές αντοχής σε θλίψη κεραμικών ομάδας Α4

Δοκίμια	Αντοχή σε Θλίψη (MPa)
100Τ1100	3,56
90Τ10Γ1100	5,55
80Τ20Γ1100	7,76
75Τ25Γ1100	10,1
60Τ40Γ1100	13,89
50Τ50Γ1100	20,96

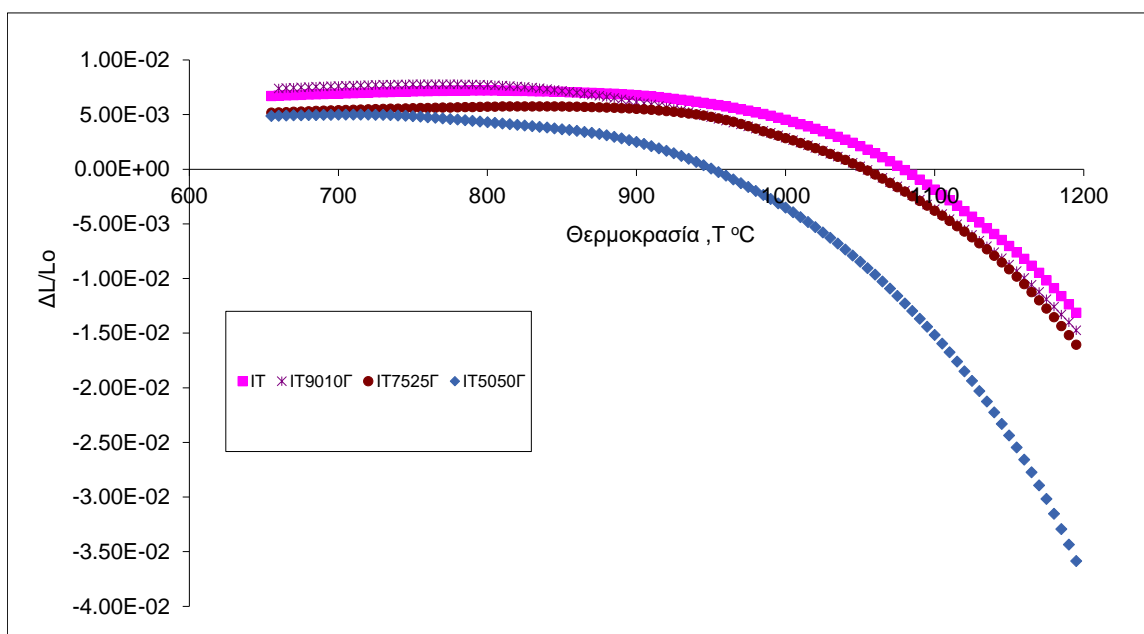
**Διάγραμμα 4.4:** Αντοχή σε θλίψη σε σχέση με το ποσοστό γυαλιού και τη θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης.

Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 4.4 η αντοχή των δοκιμίων σε θλίψη αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση του ποσοστού σε γυαλί και την αύξηση της θερμοκρασίας πυροσυσσωμάτωσης. Αυτό μας υποδεικνύει πως η επίδραση του γυαλιού ενεργοποίησε την ενίσχυση των αντοχών. Επομένως η υαλοποίηση ήταν παραπάνω από ικανοποιητική βάσει των αποτελεσμάτων. Η αντοχή σε θλίψη και η πυκνότητα των δειγμάτων παρουσίασε σχεδόν την ίδια τάση, δηλαδή αυξανόταν με την αύξηση του ποσοστού γυαλιού.

Ωστόσο, η αντοχή σε θλίψη του δείγματος δεν σχετίζεται με την πύκνωση των υαλοκεραμικών, αλλά και με το πορώδες. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης, το ανοιχτό πορώδες σταδιακά αλλάζει σε κλειστό. Δηλαδή η επιφάνεια του σταδιακά γίνεται πυκνότερη και εμφανίζονται εσωτερικοί πόροι. Παρατηρείται ότι η προσθήκη επιπλέον γυαλιού βοηθάει σημαντικά στην αύξηση της αντοχής του δοκιμίου κυρίως όταν προστίθεται 50% γυαλί όπου η αντοχή αυξάνεται περίπου 20 φορές σε σχέση με τα δοκίμια της τέφρας.

4.3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ

Στο διάγραμμα 4.5 που ακολουθεί παρουσιάζεται η πορεία πυροσυσσωμάτωσης των παραγόμενων υαλοκεραμικών.



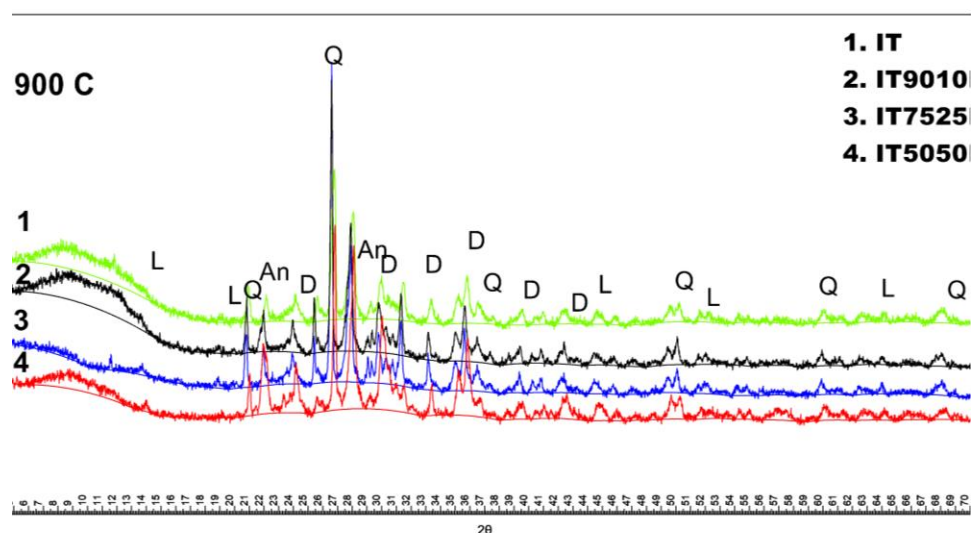
Διάγραμμα 4.5: Διάγραμμα Πυροσυσσωμάτωσης

Λόγω του ποσοστού υαλώδους φάσης που εμπεριέχεται στην ιπτάμενη τέφρα καθώς και του ποσοστού υαλώδους φάσης του γυαλιού που προστέθηκε αναμένεται ότι ο μηχανισμός πυροσυσσωμάτωσης των παραγόμενων υαλοκεραμικών ανήκει στην πυροσυσσωμάτωση υγρής φάσης. Όταν το ποσοστό του γυαλιού αυξάνεται παρατηρείται ότι μειώνεται η θερμοκρασία έναρξης της πυροσυσσωμάτωσης. Η θερμοκρασία έναρξης της πυροσυσσωμάτωσης για τα κεραμικά ΙΤ που περιέχουν μόνο ιπτάμενη τέφρα είναι 970 °C και παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του γυαλιού η θερμοκρασία μειώνεται σε 950 °C , και όταν προστεθεί 50 % γυαλί πέφτει στους 900 °C.

Η αύξηση αυτή ευνοεί το σχηματισμό περισσότερης υγρής φάσης, τη μείωση της ιξώδους ροής και την ευκολότερη μεταφορά μάζας στην υγρή φάση επιταχύνοντας έτσι τη πορεία της πυροσυσσωμάτωσης. Η θερμοκρασία της πυροσυσσωμάτωσης είναι το σημείο καμπής. Παρατηρούμε πως όσο το ποσοστό γυαλιού στο αρχικό μίγμα αυξάνεται , τόσο η έναρξη της θερμοκρασίας της πυροσυσσωμάτωσης μειώνεται.

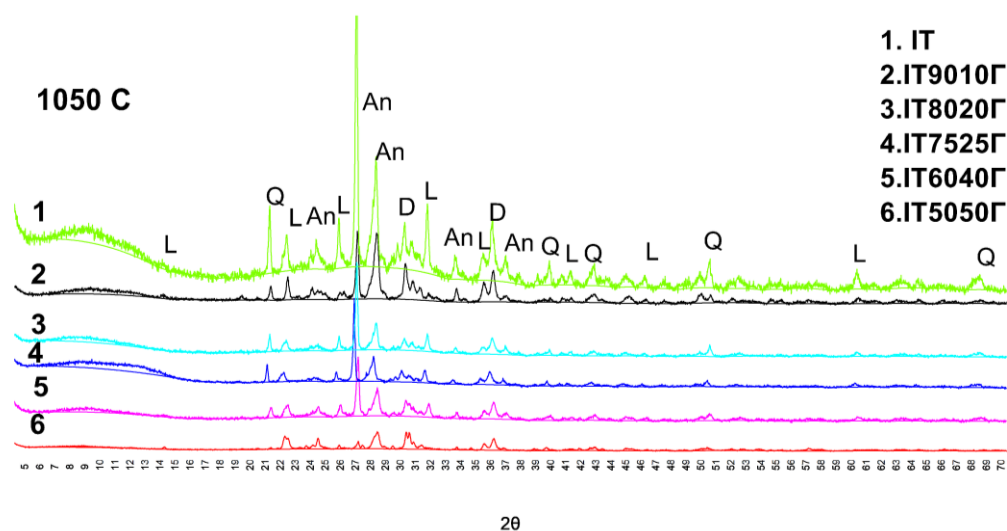
4.4 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Το αποτέλεσμα της ορυκτολογικής ανάλυσης των υαλοκεραμικών συναρτήσει του ποσοστού του γυαλιού για τις θερμοκρασίες των 900, 1050 και 1100 °C παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν .



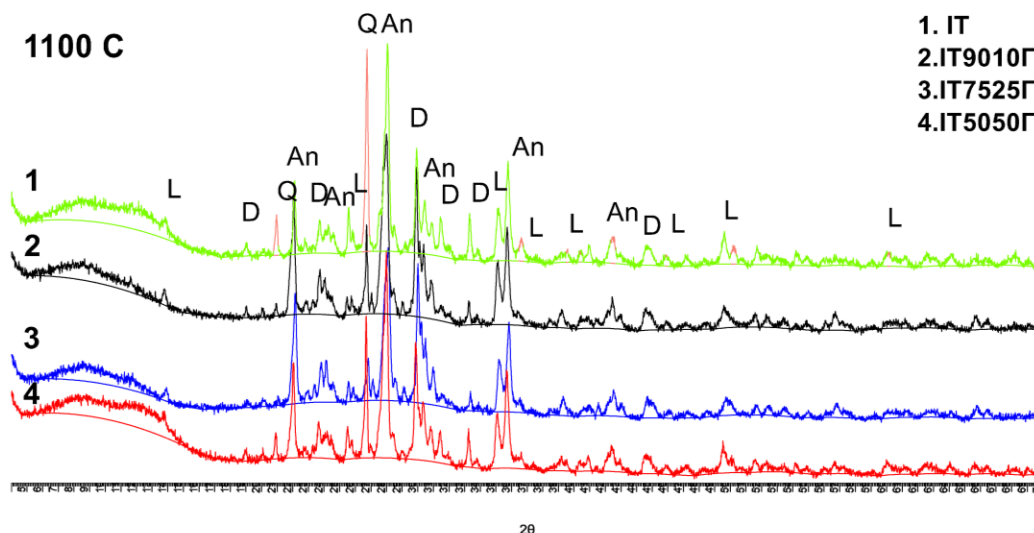
Διάγραμμα 4.6: Διάγραμμα ορυκτολογικής ανάλυσης για τα υαλοκεραμικά IT, IT9010Γ, IT7525Γ και IT5050Γ μετά από έψηση στους 900 C. (Q: χαλαζίας (SiO_2), L: Λαβραδόριο ($(\text{Ca,Na})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$), D: Διοψίδιος ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), An: Ανορθίτης ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)).

Όπως προκύπτει από την ορυκτολογική ανάλυση δεν παρατηρείται αξιόλογη μεταβολή ως προς τη παρουσία των ορυκτολογικών φάσεων. Οι φάσεις που επικρατούν σε μεγαλύτερο ποσοστό είναι τα πλαγιόκλαστα κυρίως το Λαβραδόριο $(\text{Ca,Na})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$ και ο Ανορθίτης $(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ και ακολουθούν σε μικρότερα ποσοστά ο Χαλαζίας (SiO_2) και ο Διοψίδιος ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$). Παρατηρείται επίσης ότι η ένταση της κορυφής του χαλαζία μειώνεται αυξάνοντας την ποσότητα του γυαλιού και αντίστοιχα η ένταση του ανορθίτη και του λαβραδορίου αυξάνονται.



Διάγραμμα 4.7: Διάγραμμα ορυκτολογικής ανάλυσης για τα υαλοκεραμικά IT, IT9010G, IT7525G, και IT5050G μετά από έψηση στους 1050 °C. (Q: χαλαζίας (SiO_2), L: Λαβραδόριο ($(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$), D: Διοψίδιος ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), An: Ανορθίτης ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$))

Εδώ φαίνεται εντονότερα ότι η κορυφή του χαλαζία μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού του γυαλιού και εξαφανίζεται όταν προστίθεται 50% γυαλί. Αυτό οφείλεται πιθανόν στο γεγονός ότι σε αυτή τη θερμοκρασία γίνεται τήξη υαλώδους φάσης. Πάλι κυριαρχούν τα πλαγιόκλαστα στα δείγματα. Επίσης η αύξηση της θερμοκρασίας δεν οδήγησε στη δημιουργία νέων ορυκτολογικών φάσεων.



Διάγραμμα 4.8: Διάγραμμα ορυκτολογικής ανάλυσης για τα υαλοκεραμικά IT, IT9010G, IT7525G, και IT5050G μετά από έψηση στους 1100 °C. (Q: χαλαζίας (SiO_2), L: Λαβραδόριο ($(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$), D: Διοψίδιος ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), An: Ανορθίτης ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Χωρίς απορρίμματα γυαλιού. V

Η κορυφή περίθλασης του χαλαζία μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ η κορυφή περίθλασης του ανορθίτη $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$ αυξάνεται σταδιακά εξαιτίας της τήξης του άμορφου αργιλοπυριτικού ασβεστίου CFA και του χαλαζία. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο περισσότερος ανορθίτης σχηματίζεται λόγω της τήξης του πυριτίου και του άμορφου αργιλοπυριτικού ασβεστίου. Όταν προστέθηκαν απορρίμματα γυαλιού, εκτός από τον ανορθίτη, σχηματίστηκε τριδυμίτης, (SiO_2) και αυγίτης σε χαμηλότερη θερμοκρασία και η ενέργεια ενεργοποίησης πυροσυσσωμάτωσης μειώνεται.

Η ενέργεια ενεργοποίησης της πυροσυσσωμάτωσης μπορεί να αυξηθεί μόνο όταν ο αριθμός των νέων κρυστάλλων αυξάνεται σε κάποιο βαθμό. Η θερμοκρασία του ανορθίτη που σχηματίστηκε από το δείγμα μειώνεται ενώ περιεκτικότητα σε ανορθίτη αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι η προσθήκη απορριμμάτων γυαλιού μειώνει τη θερμοκρασία τήξης του άμορφου αργιλοπυριτικού ασβεστίου στην υπάμενη τέφρα και ταυτόχρονα παρέχει πηγή ασβεστίου για το σχηματισμό ανορθίτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρασκευάστηκαν υαλοκεραμικά, υψηλής αντοχής από ιπτάμενη τέφρα και απόβλητο γυαλί, χωρίς την χρήση εμπορικών πρόσθετων. Η ποσότητα ιπτάμενης τέφρας που χρησιμοποιείται είναι μεταξύ 50% και 100%. Αυτό το πείραμα αναπτύσσει μία νέα μεθοδολογία όσο αναφορά την εφαρμογή ιπτάμενης τέφρας και απορριμμάτων γυαλιού, ιδιαίτερα για υαλοκεραμικά χαμηλής ενέργειας που παρασκευάζονται με άμεση πυροσυσσωμάτωση, χωρίς το ενδιάμεσο στάδιο της υαλοποίησης

Κατά την παρασκευή υαλοκεραμικών, η προσθήκη απορριμμάτων γυαλιού ευνοεί τη διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης, η οποία μπορεί να μειώσει την ενέργεια ενεργοποίησης της πυροσυσσωμάτωσης σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας από 900 (°C) σε 1100 (°C). Η προσθήκη απορριμμάτων γυαλιού μπορεί επίσης να βελτιώσει την απόδοση υαλοκεραμικών με μείωση της απορρόφησης νερού.

Με περιεκτικότητα σε απόβλητο γυαλί που κυμαίνεται από 0 έως 50% η υδατοαπορροφητικότητα ήταν η μικρότερη 3.08% της ομάδας A4 δηλαδή με ποσοστό γυαλιού 50% και θερμοκρασία έψησης 1100(°C) και η μεγαλύτερη 30.23% της ομάδας A1 δηλαδή με ποσοστό γυαλιού 10% και θερμοκρασία έψησης 900 (°C). Η πυκνότητα ήταν η μικρότερη τιμή $1.33 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ της ομάδας A1 με θερμοκρασία έψησης 900 (°C) και ποσοστό γυαλιού 10% και η μεγαλύτερη $1.85 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ της ομάδας A4 με θερμοκρασία έψησης 1100 (°C) και ποσοστό γυαλιού 50%. Η μικρότερη τιμή πορώδους είναι της ομάδας A4 με ποσοστό σε γυαλί 50% και θερμοκρασία έψησης 1100 (°C) με τιμή 5.61%, ενώ η μεγαλύτερη τιμή είναι 43.64% στην ομάδα A1, δηλαδή με θερμοκρασία 900(°C) και ποσοστό γυαλιού 10% . Η αντοχή σε θλίψη παρουσίασε ικανοποιητικές τιμές όταν το ποσοστό της τέφρας είναι 100% η αντοχή σε θλίψη έχει τιμή 3.56 (MPa) και όταν η τέφρα είναι 50% η αντοχή σε θλίψη

είναι 20.96 (MPa). Στην περίπτωση της πυκνότητας δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή ανάλογα με την αύξηση της περιεκτικότητας τους σε γυαλί, όμως τα βέλτιστα υαλοκεραμικά από όλες τις ομάδες A1, A2, A3, A4 είναι τα υαλοκεραμικά 50T50Γ με τιμή $1.66 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$, 50T50Γ με τιμή $1.60 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$, 50T50Γ με τιμή $1.57 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ και 50T50Γ με τιμή $1.85 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ αντίστοιχα. Αντίθετα οι τιμές της υδατοαπορροφητικότητας και του πορώδους δεν παρουσιάζουν αύξηση ή μείωση ανάλογη με το ποσοστό σε γυαλί, όπως στην πυκνότητα. Τα πιο καλά όμως υαλοκεραμικά που αξίζει να αναφερθούν είναι τα εξής. Για το πορώδες τα δείγματα με αναλογία 90T10Γ σε θερμοκρασίες 1100 (°C) με τιμή 34.20%, 1050 (°C) με τιμή 36.17%, στους 1000 (°C) με τιμή 39.91 και στους 900 (°C) με τιμή 43.64. Ακριβώς το ίδιο συμβαίνει και στην υδατοαπορροφητικότητα, τα υαλοκεραμικά αναλογία 90T10Γ έχουν τις καλύτερες τιμές σε υδατοαπορροφητικότητα στις θερμοκρασίες 1100 (°C), 1000 (°C), 1050 (°C) και 900 (°C) με τιμές 32.72, 23.97, 25.49, 26.58 αντίστοιχα. Στις δοκιμές όμως σε αντοχή σε κάμψη τα κεραμικά που παρουσιάζουν τις βέλτιστες τιμές, για την παρούσα εργασία είναι το 50T50Γ1050 και 50T50Γ1100 με τιμές 18.88 (MPa) και 20.96 (MPa) αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συμφωνούν με αντίστοιχες ερευνητικές εργασίες που παρασκεύασαν υαλοκεραμικά με ιπτάμενη τέφρα και απόβλητο γυαλί, όπως οι τιμές του πορώδους ήταν 33.9 η μέγιστη στη θερμοκρασία των 900 (°C) και 0.3 η μικρότερη στη θερμοκρασία έψησης των 1100 (°C), της αντοχής τόσες της πυκνότητας η μικρότερη τιμή ήταν $2.5 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ με θερμοκρασία έψησης 1000 (°C) και η μεγαλύτερη είχε τιμή $2.7 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ στους 1100 (°C). Τέλος η υδατοαπορροφητικότητα κυμάνθηκε από 17%-0.1% με μεγαλύτερη και μικρότερη τιμή στους 950 (°C) και 1100 (°C) αντίστοιχα

5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑ

Τα παρακάτω μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω σε περίπτωση παραγωγής υαλοκεραμικών από ιπτάμενη τέφρα και απόβλητο γυαλί:

- Η προσθήκη διαφορετικού ποσοστού γυαλιού, μεγαλύτερου από το 50 % για την μελέτη της δυνατότητας παραγωγής υαλοκεραμικών.

- Η επιλογή και άλλων θερμοκρασιών έψησης , μεγαλύτερων των 1100 °C για ικανοποιητικότερη υαλοποίηση.
- Η μελέτη της δομής των παραγόμενων ηλεκτρονικών υαλοκεραμικών σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)
- Η διερεύνηση των συνθηκών παραγωγής υαλοκεραμικών προϊόντων, όπως για παράδειγμα τα κεραμικά φίλτρα καθαρισμού αέριων ρύπων, υαλοκεραμικές εστίες, πλάκες πεζοδρόμησης κ.α.
- Τέλος θα ήταν δυνατόν να γίνει βελτιστοποίηση της διαδικασίας μορφοποίησης των κεραμικών δοκιμίων, ώστε αυτά να παραχθούν σε συγκεκριμένες γεωμετρικές διαστάσεις που θα ορίσουμε εμείς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Βούτα Ναυσικά (2018). “Μελέτη της έκπλυσης βαρέων μετάλλων από μίγματα ιπτάμενης τέφρας τόφφου ΗΕΥ Κλινοπτιλολιθος-Ευλανδίτης”, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
2. Καμπεροπούλου Κλεονίκη (2018). “Διερεύνηση παραμέτρων αλκαλικής ενεργοποίησης”, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων , Πολυτεχνείο Κρήτης.
3. Κατσαρού Ελευθερία (2006).”Σύνθεση και ιδιότητες γεωπολυμερών που παράγονται από ιπτάμενη τέφρα λιγνιτικών σταθμών”, Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης .
4. Κρητικάκη Άννα (2002). “Παραγωγή προσροφητικών υλικών από την ιπτάμενη τέφρα”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
5. Λιόλιος Αντώνιος (2019). “Δόμηση και περιβάλλον: Βιώσιμα δομικά υλικά και η συμπεριφορά τους”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
6. Μαράκης Ιωάννης (2012). “Διερεύνηση δυνατότητας παρασκευής κεραμικών μαζών από ιπτάμενη τέφρα του ΑΗΣ ΛΙΠΤΟΛ για την παραγωγή φίλτρων”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
7. Μαρκόπουλος Α. (2021). “Σημειώσεις του μαθήματος Μη μεταλλικά Τεχνικά Υλικά “, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών,ΕΜΠ
8. Πετρουλάκη Στεφανία (2020). “Παραγωγή υαλοκεραμικών από βιομηχανικά απόβλητα”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
9. Φαλέγκας Σταύρος (2014), “Διερεύνηση παραμέτρων που επιδρούν στη σύνθεση γεωπολυμερών από ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας” ,Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

10. Σκανδαλάκης Αντώνης (2006), “Εξομοίωση λειοτριβήσης χαλαζία και ασβεστολίθου σε δακτυλιόμυλο”, Μεταπτυχιακή εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
11. Χατζηγιαννίδου Ειρήνη (2016), “Παραγωγή και αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας», Μεταπτυχιακή εργασία, Ανοικτό Πανεπιστήμιο Ελλάδας.
12. INTERGEO (5 Ιουνίου 2012). Εκδήλωση: “Το περιβάλλον στην πράξη”, Επικίνδυνα Βιομηχανικά Απόβλητα και Ρύπανση Υπεδάφους Καλές Πρακτικές διαχείρισης και εφαρμοσμένες λύσεις.

Διεθνής

1. Ahmaruzzaman, M. (2010). “A review on the utilization of fly ash”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 36, Issue 3, pp. 327-363, ISSN 0360-1285.
2. American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM C618-94a, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete (1994)," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia, Pennsylvania.
3. Bocaccini, A.R., Bucker, M., Rossert, J., Marszalek, K. (1997). “Glass matrix composites from coal fly ash and waste glass, Waste Management, Vo.17, Issue 1, pp.39-45.
4. Richard J. Brook, (1991). Concise Encyclopedia of Advanced Ceramics Materials, Editions J. Brook, ISBN 9780080983707
5. Cao J., Lu J., Jiang L., Wang Z., (2016)., “Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass”, Ceramics International, Vol.42, Issue 8, pp.327-363.
6. Carolan, M.F., Christopher M. Chen, Christopher F. Miller, Eric Minford, James J. Steppan, William E. Waldron, (2006). “Development of the ceramic membrane ITM syngas/ITM hydrogen process”, ECS Transactions, Vol.1 Issue 7, pp.335-343 .

7. Erol M., Küçükbayrak S., Ersoy-Meriçboyu A., (2008). "Characterization of sintered coal fly ashes", *Fuel*, Vol. 87, pp.1334-13401. (
8. Gollakota A.R.K., Volli V., Shu C.M., (2019). "Progressive utilization prospects of coal fly ash, A Review" *Science of The Total Environment* Vol. 672 pp. 951-989.
9. Guo, K., Qu, G., Li, J., Xia, H., Yan, W., Fu, J., Yuan, P., Zhang, J. (2021). "Polysulfides shuttling remedies by interface-catalytic effect of Mn_3O_4 - MnP_x heterostructure", *Energy Storage Materials*, Vol.36, pp.496-503.
10. Kozlovskiy A.I., Zdorovets M.V., (2020). "The study of the structural characteristics and catalytic activity of $\text{Co}/\text{Co}_2\text{O}_3$ nanowires", *Composites: Part B Engineering*, Vol.191, Issue 15, 107968.
11. Kozlovskiy A.L., Kenzhina I.E, Zdorovets M.V., (2020). "FeCo- $\text{Fe}_2\text{CoO}_4/\text{Co}_3\text{O}_4$ nanocomposites: Phase transformations as a result of thermal annealing and practical application in catalysis", *Ceramics International*, Vol.46, Issue 8, pp. 10262-10269.
12. Lakhadar Y., Tuck C., Binner J., Terry A., Goodridge R., (2021). "Additive manufacturing of advanced ceramic materials", *Progress in Materials Science*, Vol.116, 100736.
13. Peng F., Liang K.M., Hu A.M., (2005). "Nano-crystal glass-ceramics obtained from high alumina coal fly ash", *Fuel*, Vol. 84, Issue 4, pp. 341-346.
14. Ponsot, E. Bernardo, E. Bontempi, L. Depero, R. Detsch, R.K. Chinnam, A. R. Bocaccini, (2015). "Recycling of pre-stabilized municipal waste incinerator fly ash and soda-lime glass into sintered glass-ceramics", *Cleaner Prod.*, Vol.89, pp 224–230.
15. Rawlings R. D., Wu J. P. and Bocaccini A. R. (2006). "Glass-ceramics: their production from wastes—a review", *J. Mater. Sci.*, Vol.41, pp 733–761.
16. Savvilotidou V., Kritikaki A., Stratakis A., Komnitsas K., Gidarakos E., (2019) "Energy efficient production of glass-ceramics using photovoltaic (P/V) glass and lignite fly ash", *Waste Management*, Vol. 90, pp 46-58.
17. Suttibak, S. (2008). "Assessment of factors influencing the performance of solid waste program", *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 53, Issues 1–2, pp.45-56.

18. Trukhanov A.V., Algarou N.A., Y. Slimani Y., Almessiere M.A., Baykal A., Tishkevich D. I., Vinnik D.A., Vakhitov M.G., Klygach D.S., Silibin M.V., T.I. Zubar T.I., Trukhanov S. V., (2020). "Peculiarities of the microwave properties of hard-soft functional composites $\text{SrTb}_{0.01}\text{Fe}_{11.98}\text{O}_{19}\text{-AFe}_2\text{O}_4$ ", RSC Adv, Vol.10, pp. 32638-32651.
19. Turgut P. (2010). "Masonry composite material made of limestone powder and fly ash". Powder Technology, Vol.204, Issue 1, pp. 42-47.
20. Vinnik D.A., Podgornov F.V. , Zabeivorota N.S., Zhivuulin E.A., A.S.Chernukha A.S., Gavriyak M.V., Zherebtsov S.A., Trukhanov A.V., Panina T.I., Podgornaya S.V., Zdorovets M.V., (2020). "Effect of treatment conditions on structure and magnetodielectric properties of barium hexaferrites" Nanomaterials (Basel)., Vol.12, Issue 8, p1306.
21. Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S., Xi Y.Q., (2015). "A comprehensive review on the applications of coal fly ash", Earth-Science Reviews, Vol.141, pp 105-121.
22. Zhao, S. (2020). "Study on glass-ceramics made from MSWI fly ash, pickling sludge and waste glass by one-step process" Journal of Cleaner Production, Vol. 271, 122674.
23. Zhu M., Ji R., Li Z.M., Wang H., Liu L., Zhang Z.T. (2016). "Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass", Construction and Building Materials, Vol. 112 pp.398-405.

Ιστοσελίδες

1. www.ntua.gr
2. www.dei.gr
3. www.ceramics.org

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πίνακας 2. 1 : Υπό μελέτη συνθέσεις

Κωδικός	Ιπτάμενη Τέφρα (%)	Απόβλητο Γυαλί (%)	Θερμοκρασία
A190100	100	0	900
A19090	90	10	900
A19080	80	20	900
A19075	75	25	900
A19060	60	40	900
A19050	50	50	900
A210100	100	0	1000
A21090	90	10	1000
A21080	80	20	1000
A21075	75	25	1000
A21060	60	40	1000
A21050	50	50	1000
A350100	100	0	1050
A35090	90	10	1050
A35080	80	20	1050
A35075	75	25	1050
A35060	60	40	1050
A35050	50	50	1050
A411100	100	0	1100
A41190	90	10	1100
A41180	80	20	1100
A41175	75	25	1100
A41160	60	40	1100
A41150	50	50	1100

Πίνακας 2.2 : Τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας A1

Δοκίμια	Πυκνότητα $P \left(\frac{g}{cm^3} \right)$	Φαινόμενο πορώδες Φ (%)	Υδατοαπορροφητικότητα E (%)
---------	---	------------------------------------	----------------------------------

100T900	1,372335	41,14	30,23351
90T10Γ900	1,330655	43,6443	32,720913
80T20Γ900	1,521833	40,8688	29,215766
75T25Γ900	1,569048	38,45108	25,942244
60T40Γ900	1,59563	37,80269	24,318482
50T50Γ900	1,668299	37,282240	23,506606

Πίνακας 2.3: Τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας Α2

Δοκίμια	Πυκνότητα Ρ ($\frac{g}{cm^3}$)	Φαινόμενο πορώδες Φ (%)	Υδατοαπορροφητικότητα Ε (%)
100T1000	1,44366	37,41	21,47432
90T10Γ1000	1,373456	39,91109	23,97432
80T20Γ1000	1,523538	37,69191	23,8327495
75T25Γ1000	1,560209	35,98611	19,52519445
60T40Γ1000	1,583436	35,00923	17,27778578
50T50Γ1000	1,608154	29,97491	3,08743049

Πίνακας 2.4: Τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας Α3

Δοκίμια	Πυκνότητα Ρ ($\frac{g}{cm^3}$)	Φαινόμενο πορώδες Φ (%)	Υδατοαπορροφητικότητα Ε (%)
100T1050	1,514985	33,68986	22,99387
90T10Γ1050	1,416243	36,17787	25,49387
80T20Γ1050	1,525244	34,51503	22,7368646
75T25Γ1050	1,551370	33,52113	21,93360073
60T40Γ1050	1,548009	32,21577	20,72447847
50T50Γ1050	1,571242	22,66758	14,3976865

--	--	--	--

Δοκίμια	Πυκνότητα $P \left(\frac{g}{cm^3}\right)$	Φαινόμενο πορώδες Φ (%)	Υδατοαπορροφητικότητα E (%)
100T1050	1,4162431	36,177871	25,493868
100T1050	1,4899047	36,177871	25,345526
90T10Γ1050	1,5381822	32,860499	21,320477
90T10Γ1050	1,5149847	34,515031	22,736865
80T20Γ1050	1,5215698	34,013173	22,309293
75T25Γ1050	1,5296872	33,127864	21,613313
75T25Γ1050	1,5513704	32,215774	20,724478
60T40Γ1050	1,5480089	16,607148	10,706614
50T50Γ1050	1,571242	22,667585	14,397687

Πίνακας 2.5: Τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας A4

Δοκίμια	Πυκνότητα $P \left(\frac{g}{cm^3}\right)$	Φαινόμενο πορώδες Φ (%)	Υδατοαπορροφητικότητα E (%)
100T1100	1,423178	31,70	25,648397
90T10Γ1100	1,423847	34,20416	26,586342
80T20Γ1100	1,536526	33,98622	19,525194
75T25Γ1100	1,589376	30,06109	17,277786
60T40Γ1100	1,813723	27,51594	19,991501
50T50Γ1100	1,854934	5,610966	3,0874305

Πίνακας 2.6: Τιμές μηχανικής αντοχής κεραμικών ομάδας A1

Δοκίμια	Μηχανική Αντοχή (MPa)
100T900	0,89
90T10Γ900	1,59
80T20Γ900	4,82
75T25Γ900	6,32
60T40Γ900	7,53
50T50Γ900	13,4

Πίνακας 2.7: Τιμές μηχανικής αντοχής κεραμικών ομάδας A2

Δοκίμια	Μηχανική Αντοχή (MPa)
100T1000	1,44
90T10Γ1000	1,86
80T20Γ1000	5,94
75T25Γ1000	7,32
60T40Γ1000	8,2
50T50Γ1000	14,2

Πίνακας 2.8: Τιμές μηχανικής αντοχής κεραμικών ομάδας A3

Δοκίμια	Μηχανική Αντοχή (MPa)
100T1050	3,43
90T10Γ1050	4,33
80T20Γ1050	6,08
75T25Γ1050	8,55
60T40Γ1050	9,12
50T50Γ1050	18,88

Πίνακας 2.9: Τιμές μηχανικής αντοχής κεραμικών ομάδας A4

Δοκίμια	Μηχανική Αντοχή (MPa)
100T1100	3,56
90T10Γ1100	5,55
80T20Γ1100	7,76

75T25Γ1100	10,1
60T40Γ1100	13,89
50T50Γ1100	20,96