



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

Φρύξη απλίτη με καυστικό νάτριο και σύνθεση γεωπολυμερών
υλικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρυσούλα Διαμαντοπούλου

Επιβλέπων:

Πάνιας Δημήτριος
Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

Φρύξη απλίτη με καυστικό νάτριο και σύνθεση γεωπολυμερών
υλικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρυσούλα Διαμαντοπούλου

Επιβλέπων: Πάνιας Δημήτριος
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 02/03/2023

Δημήτριος Πάνιας, Καθηγητής,.....(Υπογραφή)

Ανθιμος Ξενίδης, Καθηγητής,.....(Υπογραφή)

Σπυρίδων Παπαευθυμίου, Καθηγητής,.....(Υπογραφή)

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Πυρομεταλλουργίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου κατά την περίοδο 2022-2023.

Στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Πάνια, για την εύρεση και ανάθεση του θέματος, καθώς και για τη συνεχή επιστημονική καθοδήγηση και αρωγή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τις μεταδιδακτορικές ερευνήτριες κα. Γεωργία Φλέσουρα και κα. Μάργη Τσαούση για την καθοριστική συμβολή τους στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Οφείλω σε εκείνες τις βαθύτατες ευχαριστίες μου για τον χρόνο που αφιέρωσαν, τόσο για τη διεξαγωγή και επίβλεψη των πειραμάτων, όσο και για τη συμβολή τους στην συγγραφή της διπλωματικής εργασίας. Η στήριξη, το ενδιαφέρον και οι χρήσιμες συμβουλές τους υπήρξαν καθοριστικές καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον ερευνητή κ. Δημήτριο Σπάρη για την συνεισφορά του στην εκτέλεση των πειραματικών διεργασιών και το χρόνο που αφιέρωσε σε αυτές. Η βοήθειά του, σε συνδυασμό με την εμπειρία του στο χειρισμό των μηχανημάτων υπήρξαν ορόσημο για την εργασία, αλλά και μεγάλο γνωστικό εφόδιο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Κατερίνα Βαξεβανίδου, που πραγματοποίησε τη χημική ανάλυση (XRF) των υλικών, και τον κ. Δημήτρη Κοτσάνη, για την ορυκτολογική ανάλυση των υλικών (XRD). Οφείλω να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένεια και τους φίλους μου για το συνεχές ενδιαφέρον και τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της φρύξης του απλίτη με καυστικό νάτριο (soda roasting), με σκοπό τη μετατροπή της κύριας φάσης του απλίτη (quartz) σε πυριτικό νάτριο (Na_2SiO_3).

Αφορμή για τη συγκεκριμένη μελέτη υπήρξε η σημαντική ποσότητα ορυκτού απλίτη ως εξορυκτικό προϊόν βιομηχανίας στη Νορβηγία. Παράλληλα, η μέθοδος της φρύξης με νάτριο (soda roasting) αποτελεί σύγχρονη μέθοδο επεξεργασίας ορυκτών, καθώς έχει μικρές ενεργειακές απαιτήσεις σε συνδυασμό με μειωμένες εκπομπές ρυπογόνων ουσιών [1,2].

Επομένως, η επεξεργασία του απλίτη με την παραπάνω μέθοδο αποτελεί έναν προτεινόμενο τρόπο για τη μετατροπή του σε προϊόν υψηλής προστιθέμενης αξίας με δυνατότητα πολλών εφαρμογών. Συγκεκριμένα, το παραγόμενο υλικό θα μπορούσε να αποτελέσει πρώτη ύλη (ή filler/secondary raw material) για την παραγωγή γεωπολυμερών/δομικών υλικών ή ακόμα και για την παραγωγή διαλύματος πυριτικού νατρίου με πλήθος εφαρμογών, τόσο στον κατασκευαστικό κλάδο (ως δότη πυριτίου στα γεωπολυμερή υλικά) όσο και ως εναλλακτικό υλικό της εμπορικής υδρυάλου.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η προσθήκη πυκνού διαλύματος καυστικού νατρίου και λεπτομερούς απλίτη σε χωνευτήρια αλουμίνας και η πύρωση του σχηματιζόμενου πολτού σε κλίβανο υψηλών θερμοκρασιών. Μετά την πύρωση, το παραγόμενο υλικό λειοτριβείται και αξιολογείται ως προς τη χημική και ορυκτολογική του σύσταση.

Μέσω θερμοδυναμικών υπολογισμών με τη χρήση του θερμοχημικού λογισμικού FactSage, προσδιορίστηκε το θερμοκρασιακό εύρος κατά το οποίο ο χαλαζίας αντιδρά με το πυκνό διάλυμα καυστικού νατρίου, με σκοπό την παραγωγή πυριτικού νατρίου. Συνεπώς, η πύρωση πραγματοποιήθηκε σε εύρος θερμοκρασιών 200 – 900 °C.

Η αξιολόγηση του παραγόμενου υλικού σε κάθε θερμοκρασία, πραγματοποιείται με ορυκτολογική και χημική ανάλυση (περίθλαση ακτίνων X (XRD) και φθορισμό ακτίνων X (XRF) αντιστοίχως).

Abstract

The objective of the current thesis is the study of the soda roasting of aplite, aiming at the conversion of its main phase into sodium silicate.

This study was motivated by the significant amount of mineral aplite as a mining waste of an industry in Norway. At the same time, soda roasting constitutes a modern method of mineral processing, due to its low energy requirements combined with its reduced emissions of pollutants [1,2].

Therefore, the processing of aplite via the abovementioned method constitutes a recommended manner for its conversion into a high added value product, with the capability of a multitude of applications.

The use of sodium hydroxide in combination with high temperature treatment aims to modify the mineralogical and chemical composition of aplite to produce a reactive material. As a result, the generated material could be used as a raw material (or filler/secondary raw material) for the production of geopolymers/structural materials or even for the production of sodium silicate solution with many applications both in the construction industry (as a silica donor in geopolymer materials) and as an alternative material to commercial water glass.

The process followed is the addition of dense sodium hydroxide solution and fine aplite to alumina crucibles and their calcination in a high-temperature furnace. After calcination, the resulting material is milled and evaluated for its chemical and mineralogical composition.

Through thermodynamic calculation with the use of the thermochemical FactSage software, the temperature range in which quartz decomposes to produce sodium silicate was defined. Thus, calcination was performed within a range of temperatures between 200 °C and 900 °C.

The evaluation of the produced material (in each temperature) is performed by mineralogical and chemical analysis (X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF) correspondingly).

Περιεχόμενα

Πρόλογος – Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη	5
Abstract.....	6
Λίστα Εικόνων	8
Λίστα Πινάκων	9
Λίστα Διαγραμμάτων	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
2. Απλίτης	12
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	12
2.2 Σύσταση και πετρογραφικά χαρακτηριστικά.....	12
2.3 Εμφάνιση.....	12
2.4 Πετρογένεση.....	13
2.5 Χρήσεις του απλίτη	14
3. Soda roasting process.....	16
3.1 Φρύξη με καυστικό νάτριο σε ορυκτό απλίτη	17
4. Πειραματικό Μέρος	18
4.1 Χαρακτηρισμός Απλίτη.....	18
4.2 FactSage.....	21
4.3 Φρύξη με καυστικό νάτριο	23
4.3.1 Πειραματική διαδικασία φρύξης με καυστικό νάτριο.....	23
4.3.2 Αξιολόγηση παραγόμενων υλικών	27
4.3.2.1 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης (XRF)	27
4.3.2.2 Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης (XRD).....	30
4.3.2.3 Αποτελέσματα ποσοτικής ορυκτολογικής ανάλυσης	37
5. Συμπεράσματα	41

6.	Πρόταση για μελλοντική έρευνα	42
7.	Βιβλιογραφία	44
	A Παράρτημα	47
	Διαγράμματα περίθλασης ακτίνων-X.....	47
	B Παράρτημα	52
	Εικόνες αποτελεσμάτων χημικής ανάλυσης με φθορισμό ακτίνων X	52

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1:	Γρανιτικό πέτρωμα με έντονη εμφάνιση απλιτικών φλεβών,[11].....	13
Εικόνα 2:	Soda roasting process για την εξαγωγή νικελίου και μολυβδαινίου, [25]..	17
Εικόνα 3:	Τοποθεσία προέλευσης απλίτη, Namsskogan Commune, NordTrøndelag County, βόρεια-κεντρική Νορβηγία, περίπου 6-8 χλμ. νότια του κέντρου της πόλης Namsskogan.....	19
Εικόνα 4:	Δείγμα μετά την αποδέσμευσή του από το καλούπι αλουμίνας.....	26
Εικόνα 5:	Σφαιρόμυλος λειοτριβήσεων δειγμάτων μετά την εξαγωγή τους από το φούρνο.....	26
Εικόνα 6:	Πλακίδιο 900οC έτοιμο για ανάλυση XRF.....	28
Εικόνα 7:	Εικόνα αναλυτικού XRF, δείγματα τοποθετημένα στις θέσεις 5&6.....	28
Εικόνα 8:	α) το περιθλασίμετρο MiniFlex 600, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, β) ο εργαστηριακός μύλος και γ) υποδοχέας δείγματος εντός του μηχανισμού αυτόματης δειγματοληψίας 6 θέσεων.....	31
Εικόνα 9:	Εικόνα αποτελεσμάτων XRF τον ορυκτό απλίτη.....	53
Εικόνα 10:	Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 200οC.....	53
Εικόνα 11:	Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 300οC.....	54
Εικόνα 12:	Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 400οC.....	54

Εικόνα 13: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 500οC.....	55
Εικόνα 14: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 600οC.....	55
Εικόνα 15: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 700οC.....	56
Εικόνα 16: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 800οC.....	57
Εικόνα 17: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 900οC.....	57

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Ορυκτολογικές φάσεις απλίτη.....	20
Πίνακας 2: Αποτελέσματα XRF ανάλυσης ορυκτού απλίτη.....	21
Πίνακας 3: Σύσταση τήγματος για τους 800 & 900οC.....	22
Πίνακας 4: Πειραματικές συνθήκες διαδικασίας φρύξης απλίτη με καυστικό νάτριο..	27
Πίνακας 5: Αποτελέσματα ανάλυσης με XRF- % Σύσταση οξειδίων ανά θερμοκρασία.....	29
Πίνακας 6: Συνθήκες μέτρησης δοκιμών περίθλασης ακτίνων-X.....	31
Πίνακας 7: Ορυκτολογική σύσταση των υπό εξέταση υλικών.....	32
Πίνακας 8: Ποσοτική ανάλυση (Wt%) του προϊόντος κατεργασίας στους 900οC.....	39
Πίνακας 9: Σύγκριση του παραγόμενου πυριτικού νατρίου με την εμπορική υδρύαλο.....	40

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: XRD ανάλυση ορυκτού απλίτη.....	19
Διάγραμμα 2: Προβλεπόμενες ορυκτολογικές φάσεις ανά θερμοκρασία.....	22
Διάγραμμα 3: XRD ορυκτού απλίτη – 300οC.....	33
Διάγραμμα 4: XRD 400-600οC.....	34
Διάγραμμα 5: XRD 700-900οC.....	34
Διάγραμμα 6: Διάκριση άμορφου υλικού στο υλικό των 200οC.....	35
Διάγραμμα 7: Διάγραμμα Rietveld του υπό εξέταση μίγματος.....	39
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα XRD ορυκτού απλίτη.....	48
Διάγραμμα 9: Διάγραμμα XRD δείγματος 200οC.....	48
Διάγραμμα 10: Διάγραμμα XRD δείγματος 300οC.....	49
Διάγραμμα 11: Διάγραμμα XRD δείγματος 400οC.....	49
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα XRD δείγματος 500οC.....	50
Διάγραμμα 13: Διάγραμμα XRD δείγματος 600οC.....	50
Διάγραμμα 14: Διάγραμμα XRD δείγματος 700οC.....	51
Διάγραμμα 15: Διάγραμμα XRD δείγματος 800οC.....	51
Διάγραμμα 16: Διάγραμμα XRD δείγματος 900οC.....	52

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας επικρατεί περιβαλλοντική, ενεργειακή και οικονομική κρίση σε παγκόσμια κλίμακα, καθιστώντας απαραίτητη την εύρεση καινοτόμων και αποτελεσματικών λύσεων για την επίλυση αυτών των θεμάτων. Συγχρόνως, η έλλειψη πρώτων υλών στην Ευρώπη αποτελεί μείζον θέμα, ενώ οι μέθοδοι παραγωγής πρέπει να γίνονται πλέον στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας [3], γεγονός που συνεπάγεται ότι οφείλουν να έχουν μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν είναι απόλυτα εφικτό κι έτσι έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση δευτερευόντων πρώτων υλών ή για πρώτες ύλες, που είναι ανεκμετάλλευτες και βρίσκονται σε αφθονία, δίνοντας λύση στο πρόβλημα της εξάντλησης των πόρων. Ένα τέτοιο υλικό είναι ο απλίτης, η αξιοποίηση του οποίου έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του σε πυρίτιο (υπό τη μορφή οξειδίου του πυριτίου). Επομένως, η εύρεση μεθόδων για την αξιοποίησή του αποτελεί σημαντική συνεισφορά στην πράσινη βιομηχανία, καθώς γίνεται εκμετάλλευση του απλίτη και ταυτόχρονα δημιουργείται μια εναλλακτική πηγή πυριτίου μέσω αυτού.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η αξιοποίηση του απλίτη με τη μέθοδο της φρύξης με καυστικό νάτριο, όπως προαναφέρθηκε. Γενικά, η διαδικασία της φρύξης έχει εξεταστεί ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία επεξεργασίας ορυκτών, καθώς σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους θερμικής επεξεργασίας, διαθέτει πλεονεκτήματα, όπως σημαντικά ταχύτερους χρόνους αντίδρασης και δυνητικά χαμηλότερη ενέργεια[4]. Συγκεκριμένα, η μέθοδος της φρύξης με καυστικό νάτριο έχει πολλά πλεονεκτήματα για βιομηχανικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ενεργειακής απόδοσης, της μείωσης των αποβλήτων και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας[5,6].

Έτσι, η αξιοποίηση του απλίτη μέσω φρύξης με καυστικό νάτριο αποτελεί μια καινοτόμο διαδικασία με πράσινο αποτύπωμα σε βιομηχανική κλίμακα.

2. Απλίτης

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η χρήση του όρου ‘Απλίτης’ ανάγεται στις αρχές του 19ου αιώνα, όπου ο Von Leonhard (1823) τον χρησιμοποίησε για τον χαρακτηρισμό μεσοκοκκώδων γρανιτικών πετρωμάτων, που στερούνται μοσχοβιτών, ενώ αποτελούνται κυρίως από χαλαζία και αστρίους. Ο όρος προέρχεται από την ελληνική λέξη ‘απλούς’, που παραπέμπει στην στοιχειώδη αυτή ορυκτολογική σύσταση. Έκτοτε, οι πετρογράφοι υιοθέτησαν τη χρήση του όρου, όπως προτάθηκε από τον Von Leonhard, αν και ο H. Rosenbuch διεύρυνε τον όρο αυτό για να συμπεριλάβει και περισσότερο λευκοκρατικά φλεβικά πετρώματα [7].

Σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική πλέον, ο όρος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα προσδιοριστικό επίθετο, που δηλώνει την ορυκτολογική σύσταση ενός απλιτικού πετρώματος. Κατά αυτόν τον τρόπο, μπορεί να διακριθούν διάφοροι τύποι απλιτικών πετρωμάτων, όπως γρανιτικοί, γρανοδιοριτικοί, τοναλιτικοί, συνηνιτικοί, μονζονιτικοί και διοριτικοί απλίτες. Όταν ο όρος χρησιμοποιείται χωρίς προσδιοριστικό επίθετο, θεωρείται γενικά ότι αναφέρεται σε γρανιτικούς απλίτες [7,8].

2.2 Σύσταση και πετρογραφικά χαρακτηριστικά

Πρόκειται για λεπτοκοκκώδη πετρώματα (< 2mm), χρώματος λευκού έως ανοικτού γκρι, με χαρακτηριστικό ίσο - έως ποικιλοκοκκώδη ιστό. Η ορυκτολογική τους σύσταση αποτελείται κυρίως από χαλαζία και αλκαλικούς αστρίους (συνήθως, ορθόκλαστο, μικροκλινή, περθίτη, ή νατρούχα πλαγιόκλαστα), ενώ σε μικρό ποσοστό, μπορεί να απαντούν μαρμαρυγίες, όπως ο μοσχοβίτης και ο βιοτίτης, καθώς και κεροστίλβη. Ο χαλαζίας και οι καλιούχοι άστριοι συνήθως αναπτύσσονται σε στενή σύμφυση [7,8,9].

2.3 Εμφάνιση

Οι γρανιτικοί απλίτες είναι ο πλέον συνήθης πετρολογικός τύπος και παρουσιάζουν παγκόσμια γεωγραφική εξάπλωση. Απαντούν, κυρίως, υπό μορφή φλεβών μικρού

πάχους (< 1m), στην οροφή και στην περιφέρεια των μητρικών πλουτωνιτών, καθώς και στα περιβάλλοντα πετρώματα αυτών. Χαρακτηριστική απεικόνιση πετρώματος με έντονη εμφάνιση απλιτικών φλεβών παρουσιάζεται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1: Γρανιτικό πέτρωμα με έντονη εμφάνιση απλιτικών φλεβών,[11]

Όταν η συμμετοχή του χαλαζία αυξάνεται σημαντικά, οι απλίτες μεταπίπτουν σε γρανιτοειδή πετρώματα πλούσια σε χαλαζία, χαλαζιολίθους ή αμιγείς χαλαζιακές φλέβες [7,8].

Συνήθως, οι απλίτες απαντούν στον ίδιο χώρο μαζί με πηγματίτες, πετρώματα παρόμοιας σύστασης, που χαρακτηρίζονται όμως από αδροκρυσταλλικό ιστό [10].

2.4 Πετρογένεση

Σύμφωνα με τα πετρογραφικά τους χαρακτηριστικά, οι απλίτες θεωρείται ότι δημιουργούνται κατά το τελευταίο στάδιο της κρυστάλλωσης ενός ανερχόμενου γρανιτικού μάγματος, που έχει αποψυχθεί κατά το μεγαλύτερο μέρος του, είτε στο αρχικό στάδιο κρυστάλλωσης ενός τήγματος, που δημιουργείται κάτω από συνθήκες προοδευτικής ανάτηξης παλαιότερων πετρωμάτων. Το διαλελυμένο νερό, που μπορεί να υπάρχει σε ένα υπό κρυστάλλωση γρανιτικό μάγμα, συνεχώς ελαττώνεται, με αποτέλεσμα το περιεχόμενο σε νερό, που υπάρχει πραγματικά στο μάγμα να αυξάνεται

μέχρι ενός ορίου, όπου πλέον συνυπάρχει με το τήγμα μια, υπερκρίσιμη, ένυδρη ρευστή φάση. Οι απλίτες θεωρείται ότι αποτελούν το προϊόν της κρυστάλλωσης ενός γρανιτικού μάγματος, όπου απομακρύνθηκε το αποχωρισμένο νερό, εν αντιθέσει με τους πηγματίτες, όπου κρυσταλλώνονται υπό την παρουσία του αποχωρισμένου νερού [7,8].

2.5 Χρήσεις του απλίτη

Ο απλίτης χρησιμοποιείται συχνά λόγω της ανοιχτόχρωμης εμφάνισής του, ως διακοσμητική πέτρα σε κατασκευές, ιδιαίτερα σε δάπεδα, πάγκους και διάφορα διακοσμητικά στοιχεία[12]. Επίσης, ο απλίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον κατασκευαστικό κλάδο [13, 14, 15], ως πρώτη ύλη ή πρόσθετο υλικό για την παραγωγή τσιμέντου, σκυροδέματος και γεωπολυμερών υλικών [16,17,18].

Συγκεκριμένα, ο απλίτης χρησιμοποιείται στην τσιμεντοβιομηχανία ως πρόσθετο για τη βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος, ενισχύοντας τις μηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου υλικού, μειώνοντας παράλληλα το κόστος παραγωγής του [17,19]. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το χρώμα του απλίτη, το οποίο βελτιώνει τη λευκότητα και τη συνολική εμφάνιση του τσιμέντου [14]. Λόγω της αφθονίας του απλίτη στη φύση σε συνδυασμό με τα οφέλη που προσφέρει στη βιομηχανία του τσιμέντου, η μελέτη του έχει αποτελέσει αντικείμενο παγκόσμιας έρευνας[19].

Ο Thomas Tveit πραγματοποίησε στο πανεπιστήμιο του Σταβάνγκερ μελέτη σχετικά με την επίδραση του απλίτη στις ιδιότητες του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι η μακροπρόθεσμη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται με την προθήκη μικρών ποσοτήτων απλίτη, ενώ συγχρόνως ελαττώνεται και η απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου Portland [20].

Όπως έχει προαναφερθεί, ο απλίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη ή ως πρόσθετο υλικό για την παραγωγή γεωπολυμερών. Η υψηλή περιεκτικότητα του πυριτίου στον απλίτη τον καθιστά κατάλληλο για την παραγωγή γεωπολυμερών υλικών (μετά από απαραίτητη επεξεργασία με σκοπό τη χρήση του απλίτη ως δότη πυριτίου στο σύστημα). Μια διαφορετική προσέγγιση του απλίτη για τη δημιουργία γεωπολυμερών υλικών είναι η χρήση του ως αδρανές υλικό (filler), υποκαθιστώντας κάποιο άλλο υλικό, όπως η σκωρία ή ο μετακαολίνης. Το γεωπολυμερές υλικό που

προκύπτει και στις δύο περιπτώσεις, ανάλογα με τις μηχανικές του ιδιότητες, καθίσταται κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στον κατασκευαστικό κλάδο. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η καταλληλότητα του απλίτη ως πρώτη ύλη για την παραγωγή γεωπολυμερών εξαρτάται από τα ειδικά χαρακτηριστικά και την ποιότητα του πετρώματος, όπου σημαντικό ρόλο έχει η δυνατότητα αποδέσμευσης και ενεργοποίησης του πυριτίου, που εντοπίζεται σε αυτόν[21].

Σύμφωνα με μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας, Οι S.M. Samindi M.K. Samarakoon κ.ά., από το Πανεπιστήμιο του Σταβάνγκερ της Νορβηγίας, μελέτησαν και αξιολόγησαν τις ιδιότητες γεωπολυμερών υλικών με βάση τον απλίτη και την προσθήκη σκωρίας και πυριτικής παιπάλης. Κατά τη διεξαγωγή της έρευνας, αλεσμένος απλίτης (3,20 μm) με προσθήκη Blast Furnace Slag (BFS), πλούσιο σε ασβέστιο και αλουμίνιο, αναμίχθηκε με υδροξείδιο του καλίου και διάλυμα πυριτικού καλίου, για τη δημιουργία γεωπολυμερών. Η μελέτη κατέληξε στα βέλτιστα επίπεδα αναλογίας οξειδίου του πυριτίου-αλουμίνιας ($\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3=8,4$), με συγκέντρωση υδροξειδίου του καλίου (KOH) ίση με 6M και θερμοκρασία σκλήρυνσης στους 25°C ή 80°C, για την παραγωγή των γεωπολυμερών υλικών[22].

Τέλος, λόγω της περιεκτικότητάς του σε πυρίτιο, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, ο απλίτης, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την παραγωγή διαλύματος πυριτικού νατρίου (εμπορική υδρύαλος), με μεγάλο εύρος βιομηχανικών εφαρμογών, όπως το τσιμέντο και το σκυρόδεμα, ως αποσυγκολλητικό στα κεραμικά και ως αναστολέας της σκουριάς στην επεξεργασία μετάλλων. Ειδικότερα, ο απλίτης έχει διερευνηθεί ως πιθανή πηγή πυριτικού νατρίου, μιας ευπροσάρμοστης χημικής ένωσης, που χρησιμοποιείται σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών, όπως προαναφέρθηκαν.

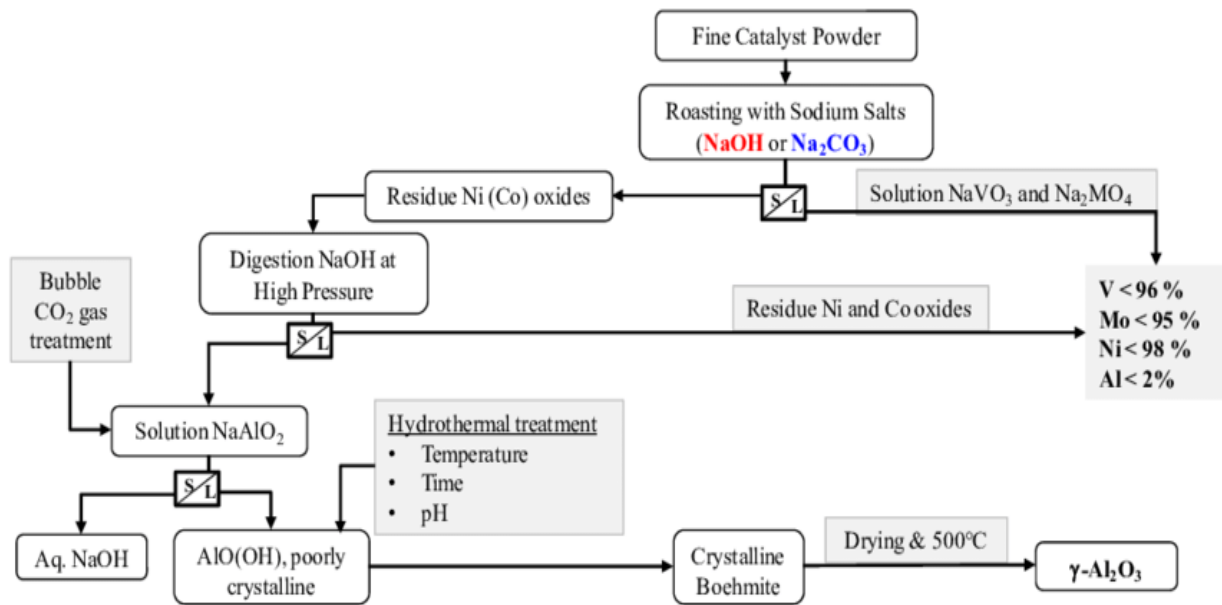
Σε μελέτη που διεξήχθη από τους Chukanov κ.ά., δείγματα απλίτη από την οροσειρά Khibiny της Ρωσίας, διέθεταν υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του πυριτίου και νατρίου. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η περίθλαση ακτίνων X, η ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM) και η φασματοσκοπία ακτίνων X, για να αναλυθούν τα δείγματα, διαπιστώνοντας, έτσι, την υψηλή συγκέντρωσή τους σε διοξειδίου του πυριτίου και νατρίου, υποδηλώνοντας τη δυνατότητά τους για την παραγωγή πυριτικού νατρίου. Από τους ερευνητές προτείνονται ως μέθοδοι εξαγωγής του πυριτικού νατρίου από τον απλίτη είτε η σύντηξη του με ανθρακικό νάτριο, ακολουθούμενη από έκπλυση με νερό για τη λήψη διαλύματος πυριτικού νατρίου, είτε η αλκαλική ενεργοποίηση του με

διάλυμα καυστικού νατρίου και η φρύξη του σε υψηλές θερμοκρασίες για την παραγωγή πυριτικού νατρίου[24].

Επιπλέον, σε έρευνα των Bhaduri κ.ά., διερευνήθηκε η χρήση του απλίτη στη σύνθεση πυριτικού νατρίου για την παραγωγή γεωπολυμερούς σκυροδέματος. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε την αλκαλική ενεργοποίηση του απλίτη για την παραγωγή πυριτικού νατρίου, το οποίο έπειτα χρησιμοποιήθηκε στην παραγωγή γεωπολυμερούς σκυροδέματος. Στη συνέχεια, το παραγόμενο γεωπολυμερές σκυρόδεμα υπέστη δοκιμές αντοχής σε θλίψη και ανθεκτικότητα, αποσκοπώντας στην αξιολόγησή του στη βελτίωση της αντοχής και της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πυριτικό νάτριο με βάση τον απλίτη ήταν αποτελεσματικό στη βελτίωση των ιδιοτήτων του γεωπολυμερούς σκυροδέματος[25]. Συνολικά, οι μελέτες αυτές καταδεικνύουν τις δυνατότητες του απλίτη ως πηγή πυριτικού νατρίου για διάφορες βιομηχανικές και κατασκευαστικές εφαρμογές.

3. Soda roasting process

Η μέθοδος της φρύξης με καυστικό νάτριο (soda roasting) περιεγράφηκε για πρώτη φορά το 1829, και από τότε έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην εξορυκτική βιομηχανία[26]. Η φρύξη με καυστικό νάτριο αποτελεί μια μεταλλουργική διαδικασία, κατά την οποία ένα διάλυμα, καυστικού νατρίου (NaOH - απιονισμένο νερό), χρησιμοποιείται για την εξαγωγή ορυκτών από μέταλλευμα. Είναι μια θερμική διεργασία που περιλαμβάνει τη θέρμανση του μεταλλεύματος παρουσία καυστικού νατρίου, προκαλώντας έτσι τη διάλυση των ορυκτών στο μέταλλευμα. Τα κύρια στάδια της μεθόδου είναι η θραύση και άλεση του πετρώματος, η ανάμιξη του με ανθρακικό νάτριο και η φρύξη του παραγόμενου μείγματος σε κλίβανο, συνήθως σε θερμοκρασίες μεταξύ των 800 και 1000°C. Στη συνέχεια, ακολουθεί η έκπλυση με νερό και η καταβύθιση ή εκχύλιση με διαλύτη, για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών και τη συγκέντρωση των επιθυμητών μεταλλικών ιόντων. Στην παρακάτω Εικόνα 2 παρουσιάζονται τα κύρια στάδια της διαδικασίας για την ανάκτηση νικελίου και βαναδίου.



Εικόνα 2: Soda roasting process για την εξαγωγή νικελίου και μολυβδαινίου, [25]

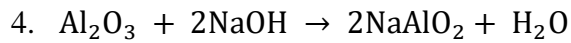
Η παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιείται, επίσης, για την εξαγωγή χαλκού και νικελίου από τα μεταλλεύματά τους [26].

Σημαντική εφαρμογή της φρύξης με καυστικό νάτριο αποτελεί η εξαγωγή χαλκού, από θειούχα μεταλλεύματα, όπως ο χαλκοπυρίτης (CuFeS_2). Η παραπάνω μέθοδος εξαγωγής χαλκού έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας αποβλήτων χαλκού. Ένα παράδειγμα εγκατάστασης, που χρησιμοποιεί φρύξη με καυστικό νάτριο, για την εξόρυξη χαλκού είναι το χυτήριο Boliden Rönnskär στη Σουηδία [28, 29].

3.1 Φρύξη με καυστικό νάτριο σε ορυκτό απλίτη

Η διαδικασία περιλαμβάνει την ανάμειξη λειοτριβημένου απλίτη με διάλυμα καυστικού νατρίου (NaOH) και τη θέρμανση του σε υψηλή θερμοκρασία ($200 - 900^\circ\text{C}$). Κατά τη διάρκεια της διεργασίας, οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, περιγράφονται ως εξής:

1. $\text{SiO}_2 + 2 \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
2. $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 6 \text{NaOH} \rightarrow \text{NaAlO}_2 + 3 \text{Na}_2\text{SiO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$
3. $\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 4 \text{NaOH} \rightarrow \text{KAlSiO}_4 + 2 \text{Na}_2\text{SiO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$



Σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, το καυστικό νάτριο οδηγεί στην αποδέσμευση του πυριτίου από το χαλαζία και στη μετατροπή του σε πυριτικό νάτριο. Επομένως, η προσθήκη καυστικού νατρίου (NaOH) είναι σημαντική, καθώς καθορίζει τη δομή και τη σύσταση του τελικού υλικού [22]. Συνεπώς, η απαιτούμενη ποσότητα του καυστικού νατρίου μπορεί να υπολογιστεί από τη στοιχειομετρία των παραπάνω αντιδράσεων.

4. Πειραματικό Μέρος

4.1 Χαρακτηρισμός Απλίτη

Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία είναι ο απλίτης, προϊόν εξορυκτικών διεργασιών από βιομηχανία στη Νορβηγία (Εικόνα 3).



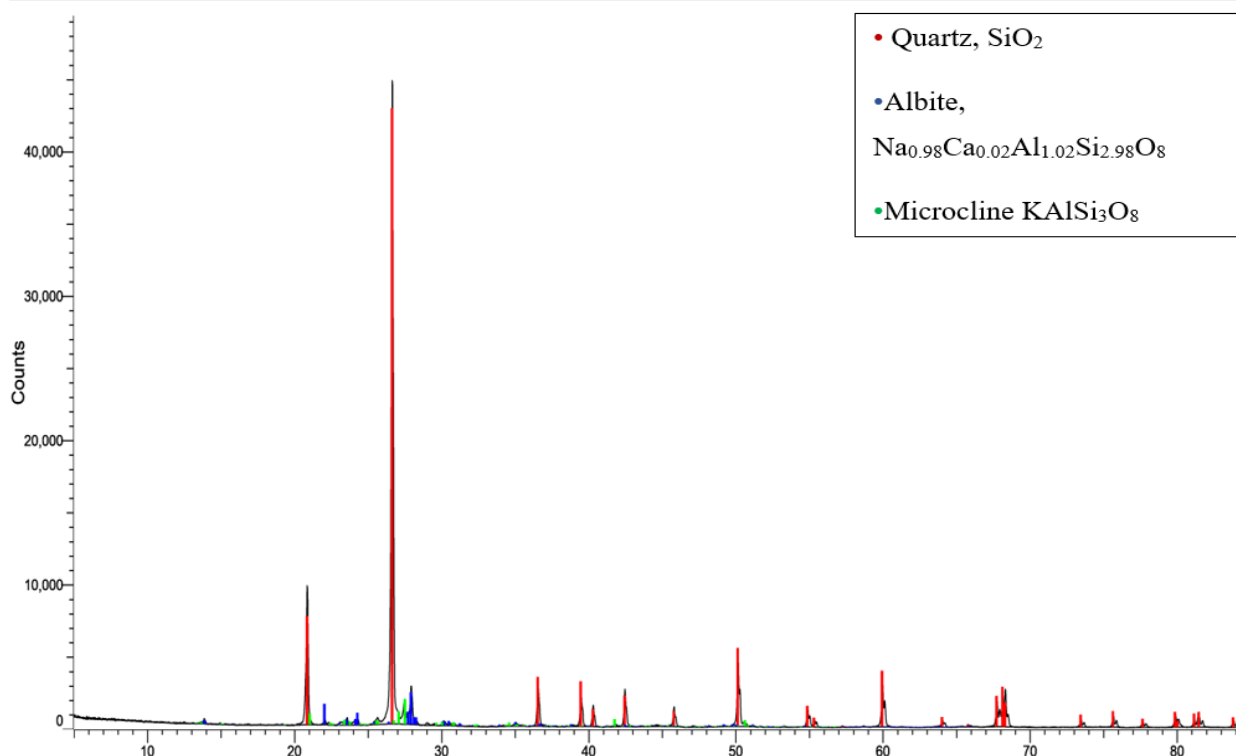
Εικόνα 3: Τοποθεσία προέλευσης απλίτη, Namsskogan Commune, NordTrøndelag County, βόρεια-κεντρική Νορβηγία, περίπου 6-8 χλμ. νότια του κέντρου της πόλης Namsskogan

Αρχικά ο απλίτης λειοτριβήθηκε (>50 μm) σε πορσελάνινο σφαιρόμυλο που βρίσκεται στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Πριν το φυσικοχημικό χαρακτηρισμό (χημική και ορυκτολογική ανάλυση) του απλίτη, το υλικό τοποθετήθηκε για 24 ώρες στο πυραντήριο του εργαστηρίου της Πυρομεταλλουργίας, στους 105°C.

Η ορυκτολογική ανάλυση έγινε με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων Χ. Το μηχάνημα XRD που χρησιμοποιήθηκε, ήταν της εταιρίας Rigaku, για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EVA της εταιρίας Bruker και οι βάσεις αναφορών PDF-2022 της ICDD. Στο διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η ορυκτολογική ανάλυση (XRD) για τον απλίτη.

(Coupled TwoTheta/Theta)



Διάγραμμα 1: XRD ανάλυση ορυκτού απλίτη

Από την ποιοτική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, οι ορυκτολογικές φάσεις του απλίτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Ορυκτολογικές φάσεις απλίτη

Ορυκτολογική Ανάλυση		
Φάσεις	Χημικός τύπος	Ονομασία
Κύριες	SiO ₂	Χαλαζίας
Δευτερεύουσες	NaAlSi ₃ O ₈	Αλβίτης
	KAlSi ₃ O ₈	Μικροκλινής

Επιπλέον, έγινε χημική ανάλυση με φθορισμό ακτίνων X (XRF), χρησιμοποιώντας το μηχάνημα SPECTRO XEPOS-LabPro, της σχολής Μηχανικών Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών. Σκοπός της χημικής ανάλυσης ήταν η εύρεση της επί τοις εκατό συγκέντρωσης των οξειδίων του απλίτη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα XRF ανάλυσης ορυκτού απλίτη

Raw aplite	
Οξείδια	% Σύσταση
Na₂O	2,21
MgO	0,22
Al₂O₃	6,29
SiO₂	>91,9
Cl	0,04
K₂O	2,38
CaO	1,18
TiO₂	0,07
Fe₂O₃	0,37
ZrO₂	<0,068
BaO	0,03
MnO	0,01
P₂O₅	0,00
SrO	0,01
Σύνολο	104,79

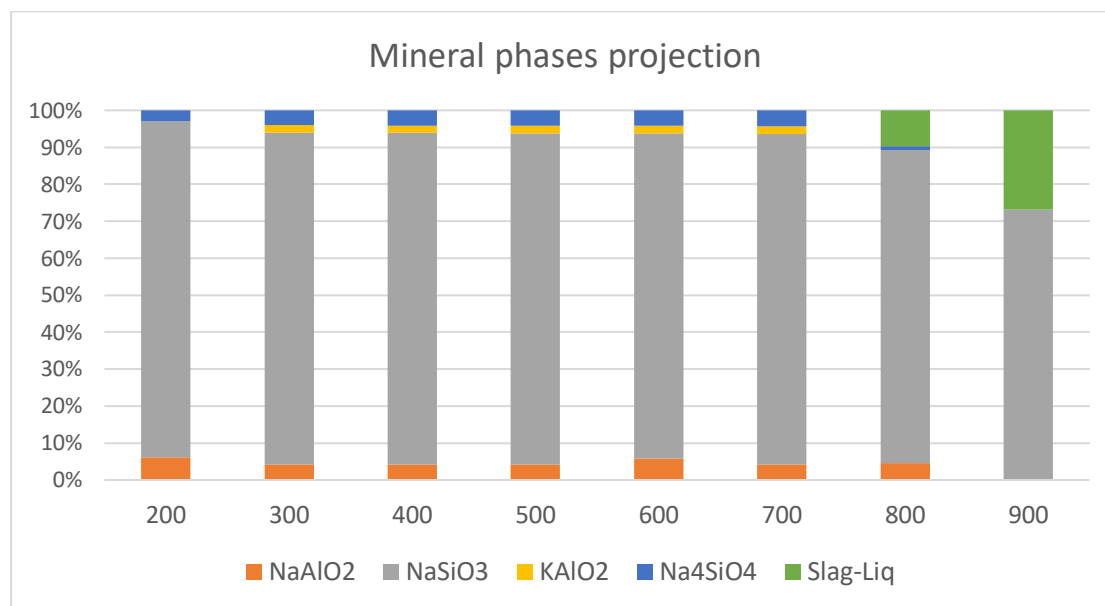
Με βάση τον παραπάνω πίνακα, τα κύρια οξείδια, που περιέχονται στον απλίτη, είναι το οξείδιο του πυριτίου (SiO₂) και το οξείδιο του αλουμινίου (Al₂O₃). Δευτερεύοντα οξείδια αποτελούν το οξείδιο του νατρίου (Na₂O), το οξείδιο του καλίου (K₂O) και το οξείδιο του ασβεστίου (CaO). Το ποσοστό της επί τοις εκατό συγκέντρωσης του πυριτίου (>87,7%) επιβεβαιώνει ότι ο απλίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δότης πυριτίου με την κατάλληλη επεξεργασία του.

4.2 FactSage

Με τη χρήση του εργαλείου Equilib του FactSage προβλέφθηκε το θερμοκρασιακό εύρος κατά το οποίο ο χαλαζίας διασπάται με τη βοήθεια του καυστικού νατρίου, προκειμένου να παραχθεί πυριτικό νάτριο.

Παράλληλα, έγινε και πρόβλεψη της σύστασης των υλικών που προκύπτουν στα αντίστοιχα θερμοκρασιακά εύρη (200-900 °C) όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.

Το εν λόγω εργαλείο βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας Gibbs και υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των χημικών ενώσεων ή στοιχείων, όταν αυτά αντιδρούν για να φτάσουν σε μία κατάσταση χημικής ισορροπίας[30].



Διάγραμμα 2: Προβλεπόμενες ορυκτολογικές φάσεις ανά θερμοκρασία

Σε όλες τις θερμοκρασίες λαμβάνουμε ένα μεγάλο ποσοστό πυριτικού νατρίου ($\approx 80-85\%$, NaSiO_3), ακολουθούμενο από μικρότερα ποσοστά αργλικού νατρίου ($\text{NaAlO}_2, 5\%$), αργλικού καλίου (KAlO_2) και ορθοπυριτικού νατρίου (Na_4SiO_4). Στη θερμοκρασία των 800°C δημιουργείται για πρώτη φορά τήγμα (10%), συνεχίζοντας παράλληλα να λαμβάνουμε τις φάσεις του πυριτικού νατρίου και του αργλικού νατρίου. Στους 900°C , λαμβάνουμε ένα $20-30\%$ τήγμα και $70-75\%$ πυριτικό νάτριο.

Πίνακας 3: Σύσταση τήγματος για τους 800 & 900°C

Slag-Liq composition		
	800°C	900°C
Na ₂ O (wt%)	41,85	39,46
K ₂ O (wt%)	9,14	3,23
SiO ₂ (wt%)	35,37	37,83
NaAlO ₂ (wt%)	12,93	18,95

Με βάση τον πίνακα 3, παρατηρούμαι ότι στους 800°C το τήγμα περιέχει οξείδιο του νατρίου, οξείδιο του καλίου, οξείδιο του πυριτίου και αργλικό νάτριο. Αυτή η σύνθεση υποδηλώνει ότι ο απλίτης αντέδρασε με το καυστικό νάτριο και παρήγαγε ένα τήγμα πλούσιο σε οξείδια αλκαλικών μετάλλων και πυρίτιο. Η παρουσία αργλικού νατρίου υποδηλώνει ότι μέρος της περιεκτικότητας του απλίτη σε αργίλιο διαλύθηκε, επίσης, στο τήγμα.

Στους 900°C φαίνεται ότι η περιεκτικότητα του οξειδίου του νατρίου και του οξειδίου του καλίου στο τήγμα μειώνεται, ενώ η περιεκτικότητα του πυριτίου και του αργλικού νατρίου αυξάνεται. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε διοξείδιο του πυριτίου οφείλεται πιθανότατα στη διάλυση περισσότερου υλικού απλίτη με την αύξηση της θερμοκρασίας.

4.3 Φρύξη με καυστικό νάτριο

Μετά τον πλήρη χαρακτηρισμό του απλίτη ακολουθεί η μέθοδος της φρύξης του με καυστικό νάτριο.

4.3.1 Πειραματική διαδικασία φρύξης με καυστικό νάτριο

Η φρύξη με καυστικό νάτριο, συνίσταται από πύρωση μίγματος καυστικού νατρίου (NaOH) και λειοτριβημένων δειγμάτων απλίτη (σε μορφή πούδρας). Τα βήματα της μεθόδου απεικονίζονται στο Γενικευμένο Διάγραμμα Ροής (Σχήμα 1), που ακολουθεί.



Σχήμα 1: Γενικευμένο διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας

Όπως περιγράφεται και στο διάγραμμα ροής, αρχικά γίνεται ανάμιξη του λειοτριβημένου απλίτη με το διάλυμα καυστικού νατρίου. Συγκεκριμένα, ζυγίζεται η απαιτούμενη ποσότητα του απλίτη και του καυστικού νατρίου σε μορφή pellets (ChemLab, 99+% purity). Τα pellets λειοτριβούνται στο γουδί, ώστε να επιτευχθεί η διάσπασή τους σε λεπτή πούδρα, και έπειτα διαλύονται στο απιονισμένο νερό, υπό συνεχή ανάδευση. Στο διάλυμα αυτό, προστίθεται σταδιακά η ποσότητα του απλίτη. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάμιξη τους, με αναμικτήριο χειρός, για τρία λεπτά στη μέγιστη ταχύτητα. Ακολουθεί η χύτευση του παραγόμενου μείγματος σε ανοιχτό

καλούπι από αλουμίνα. Έπειτα, το μείγμα τοποθετείται στον ηλεκτρικό κλίβανο του εργαστηρίου πυρομεταλλουργίας, όπου θερμαίνεται στην προκαθορισμένη θερμοκρασία, παραμένοντας σε αυτήν για 2 ώρες. Η συνολική διεργασία στον κλίβανο διαρκεί δύομιση ώρες, μισή ώρα μέχρι να φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία και δύο ώρες παραμονής του σε αυτή. Η παραπάνω πειραματική διαδικασία ακολουθήθηκε για το θερμοκρασιακό εύρος των 200-900° C.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία θέρμανσης, τα παραγόμενα υλικά παραμένουν στο φούρνο έως την επόμενη μέρα, με σκοπό να ψυχθούν αργά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Την επόμενη μέρα, τα δείγματα εξάγονται από το φούρνο και αφαιρούνται από το καλούπι. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός πως η ομαλή ψύξη συμβάλλει στην αποφυγή του σχηματισμού ανεπιθύμητων παραπροϊόντων.

Το παραγόμενο υλικό που προκύπτει μετά την εξαγωγή από το φούρνο και την αποδέσμευσή του από το καλούπι, χωρίζεται σε δύο φάσεις (ανοιχτό μπλε χρώμα και συμπαγές λευκό), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4. Η πρώτη φάση (ανοιχτό μπλε), αφαιρείται εύκολα από το καλούπι και λειοτριβείται με γουδί. Αντίθετα, η δεύτερη φάση (συμπαγής λευκή) δεν αποδεσμεύεται εξολοκλήρου από τα τοιχώματα του καλουπιού και η λειοτρίβησή της με γουδί δεν επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς παρουσιάζει μικροκρυσταλλικές φάσεις. Επομένως, το δείγμα που προκύπτει από το χωνευτήριο αρχικά λειοτριβείται χειροκίνητα με γουδί και στη συνέχεια οδηγείται στον σφαιρόμυλο του εργαστηρίου Μεταλλουργίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών (Εικόνα 5), για την απόκτηση της επιθυμητής κοκκομετρίας ($\geq 80 \mu\text{m}$).



Εικόνα 4: Δείγμα μετά την αποδέσμευσή του από το καλούπι αλουμίνας



Εικόνα 5: Σφαιρόμυλος λειοτριβήσεων δειγμάτων μετά την εξαγωγή τους από το φούρνο

Η διαδικασία της φρύξης με καυστικό νάτριο ακολουθήθηκε για 8 δείγματα. Οι συνθήκες ήταν ίδιες για όλα τα δείγματα, με μοναδική παράμετρο μελέτης την θερμοκρασία φρύξης. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι πειραματικές συνθήκες των δειγμάτων.

Πίνακας 4: Πειραματικές συνθήκες διαδικασίας φρύξης απλίτη με καυστικό νάτριο

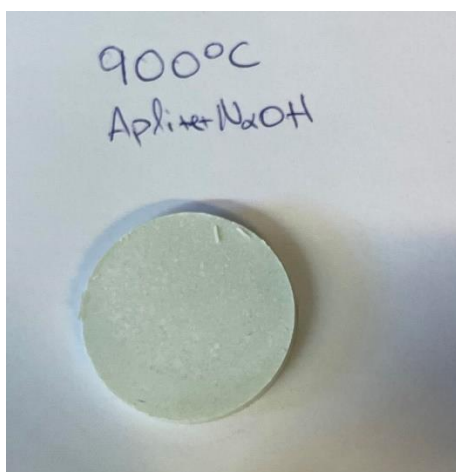
Θερμοκρασία	200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 & 900 °C
Χρόνος παραμονής στον κλίβανο	2 hrs
Απλίτης	36 % wt
NaOH	43 % wt
H₂O	21 % wt
Λόγος NaOH/Απλίτη	1,2

4.3.2 Αξιολόγηση παραγόμενων υλικών

Στο τελικό στάδιο, πραγματοποιείται ο φυσικοχημικός χαρακτηρισμός του παραγόμενου υλικού, το οποίο αρχικά αποθηκεύεται σε ξηρό περιβάλλον και στη συνέχεια αξιολογείται μέσω χημικής και ορυκτολογικής ανάλυσης (XRF, XRD).

4.3.2.1 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης (XRF)

Για την προετοιμασία των δειγμάτων για ανάλυση XRF (SPECTRO XEPOS-LabPro), ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία λειοτρίβησης που πραγματοποιήθηκε για την ανάλυση με XRD. Μετά την επίτευξη της επιθυμητής κονιοποίησης, τα δείγματα αναμιγνύονται με κόλλα (CEREOX - BM-0002-1 Binding Additives for XRF-Analysis, της εταιρείας Fluxana) σε αναλογία 4:1, ομογενοποιούνται και προωθούνται για την δημιουργία πλακιδίου, το οποίο θα αναλυθεί από το XRF. Το πλακίδιο αυτό παρασκευάζεται τοποθετώντας την ομογενοποιημένη σκόνη του δείγματος εντός μεταλλικού κυλίνδρου, ο οποίος πιέζεται με τη χρήση δύο μεταλλικών πλακών.



Εικόνα 6: Πλακίδιο 900°C έτοιμο για ανάλυση XRF



Εικόνα 7: Εικόνα αναλυτικού XRF, δείγματα τοποθετημένα στις θέσεις 5&6

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η επί τοις εκατό σύσταση των οξειδίων για κάθε δείγμα, έτσι όπως προέκυψε από την ανάλυση με XRF.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα ανάλυσης με XRF- % Σύσταση οξειδίων ανά θερμοκρασία

	Raw	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
Οξείδια	% Σύσταση								
Na₂O	2,21	>33,24	>42,54	>36,36	>34,95	>40,77	>33,8	>36,41	>40,63
MgO	0,22	0,08	0,11	0,08	0,12	0,05	0,04	0,05	0,10
Al₂O₃	6,29	1,67	1,66	1,42	1,41	1,28	0,98	1,07	1,14
SiO₂	>91,9	29,46	25,22	26,00	31,08	31,21	21,70	28,87	36,70
Cl	0,04	0,16	0,03	0,02	0,19	0,02	0,02	0,02	0,01
K₂O	2,38	1,02	1,17	0,87	0,83	0,93	0,71	0,77	0,46
CaO	1,18	0,42	0,42	0,40	0,43	0,48	0,40	0,40	0,45
TiO₂	0,07	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
Fe₂O₃	0,37	0,16	0,17	0,17	0,16	0,18	0,16	0,16	0,31
ZrO₂	<0,068	<0,068	<0,068	<0,068	<0,068	<0,068	<0,068	<0,068	<0,068
BaO	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MnO	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P₂O₅	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
SrO	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σύνολο	104,79	66,32	71,43	65,45	69,23	75,03	57,91	67,85	79,87

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις του νατρίου που λαμβάνουμε δεν είναι αντιπροσωπευτικές, λόγω της περίσσειας καυστικού νατρίου που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή της μεθόδου. Σύμφωνα με υπολογισμούς για το ισοζύγιο μάζας, το αναμενόμενο οξείδιο του νατρίου (Na₂O) ανέρχεται κοντά στο 50 %, σε αντίθεση με τις αυξημένες τιμές που λαμβάνουμε. Αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, έχει γίνει υποεκτίμηση του πυριτίου. Είχε γίνει υποεκτίμηση των οξειδίων και κατ' επέκταση του αθροίσματος συνόλου. Πηγή τέτοιων σφαλμάτων, που μπορούν να επηρεάσουν την ορθότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων, είναι η προετοιμασία του δείγματος, η βαθμονόμηση, η μετατόπιση του οργάνου και η ευαισθησία ακρίβειας στη μέτρηση ορισμένων στοιχείων. Επομένως, λόγω της έντονης απόκλισης από τα προβλεπόμενα αποτελέσματα, τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι ενδεικτικά και δεν μπορούμε να εξάγουμε κάποιο έγκυρο συμπέρασμα.

4.3.2.2 Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης (XRD)

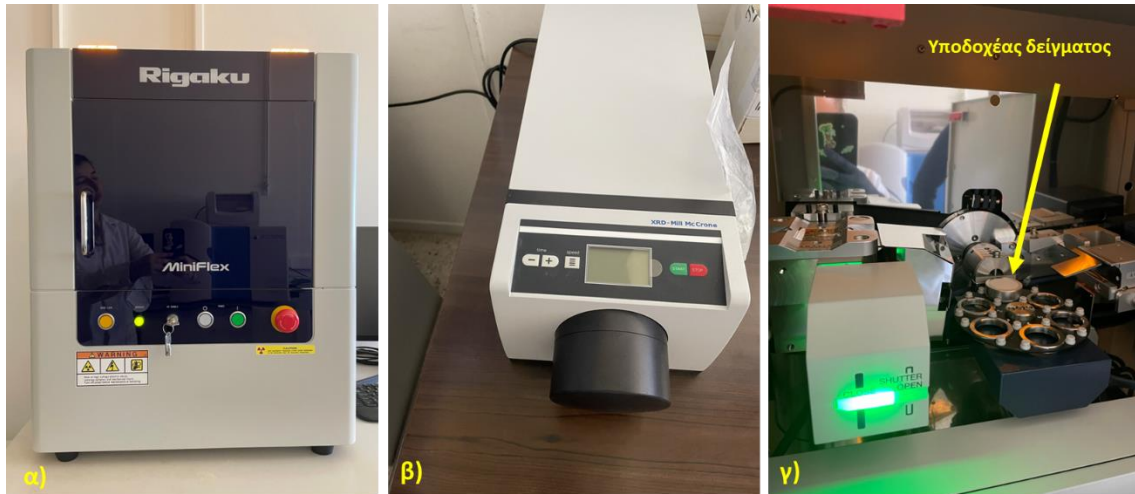
Οι δοκιμές περίθλασης ακτίνων-Χ πραγματοποιήθηκαν στο επιτραπέζιο (benchtop) περιθλασίμετρο MiniFlex 600 της εταιρίας Rigaku (Εικόνα 6α). Η πηγή ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια υδρόψυκτη πηγή χαλκού ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$), με μέγιστη τάση λειτουργίας τα 40 kV και μέγιστο ρεύμα τα 15 mA.

Με σκοπό την λήψη υψηλής ποιότητας αποτελεσμάτων, η προετοιμασία των δειγμάτων ήταν σύμφωνη με την διεθνή πρακτική (Pecharsky and Zavalij 2009) [31].

Συνοπτικά, η ακολουθία ενεργειών που υιοθετήθηκε είχε ως εξής:

1. Ξήρανση των υλικών για μία ημέρα σε θερμοκρασία 105° C ,
2. Λειοτρίβηση για 15 min στον εργαστηριακό μύλο της εταιρίας McCrone (Εικόνα 8β) με σκοπό την ομογενοποίηση των δειγμάτων και την εκλέπτυνση των κόκκων κάτω από το όριο των 45 μm και
3. Εγκιβωτισμός των δειγμάτων εντός κατάλληλων υποδοχέων (back-load sample holders) (Εικόνα 8γ), η χρήση των οποίων διασφαλίζει κατά το δυνατό την μη διατάραξη της ακτινοβοληθείσας επιφάνειας από μηχανικές κινήσεις κατά την προετοιμασία του δείγματος.

Για την ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων, όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν υπό τις ίδιες συνθήκες μέτρησης, που συνοψίζονται στον Πίνακα 6.



Εικόνα 8: α) το περιθλασίμετρο MiniFlex 600, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, β) ο εργαστηριακός μύλος και γ) υποδοχέας δείγματος εντός του μηχανισμού αυτόματης δειγματοληψίας 6 θέσεων.

Πίνακας 6: Συνθήκες μέτρησης δοκιμών περίθλασης ακτίνων-Χ

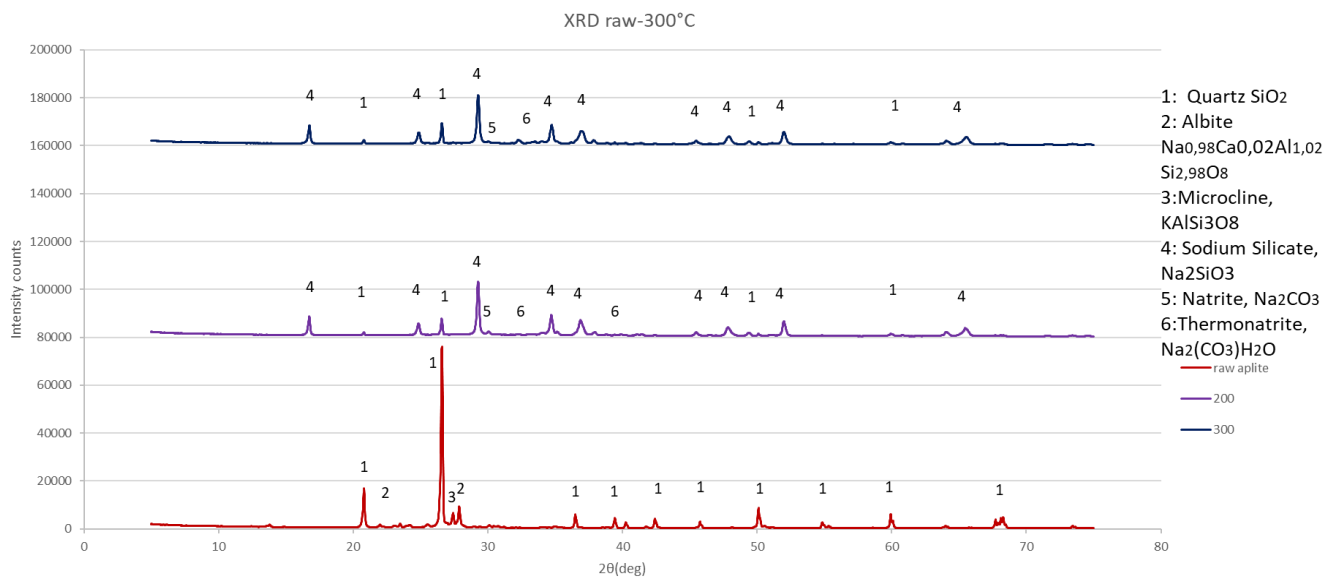
Εύρος 2θ°	Βήμα δειγματοληψίας-Δ2θ°	Ρυθμός μέτρησης-2θ° / min
5-75	0,02	5

Για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης κάθε υλικού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EVA V5.1 της εταιρίας Bruker και οι εμπορικές βάσεις δεδομένων της ICDD (PDF-4+ 2022 και PDF-4 Minerals 2022).

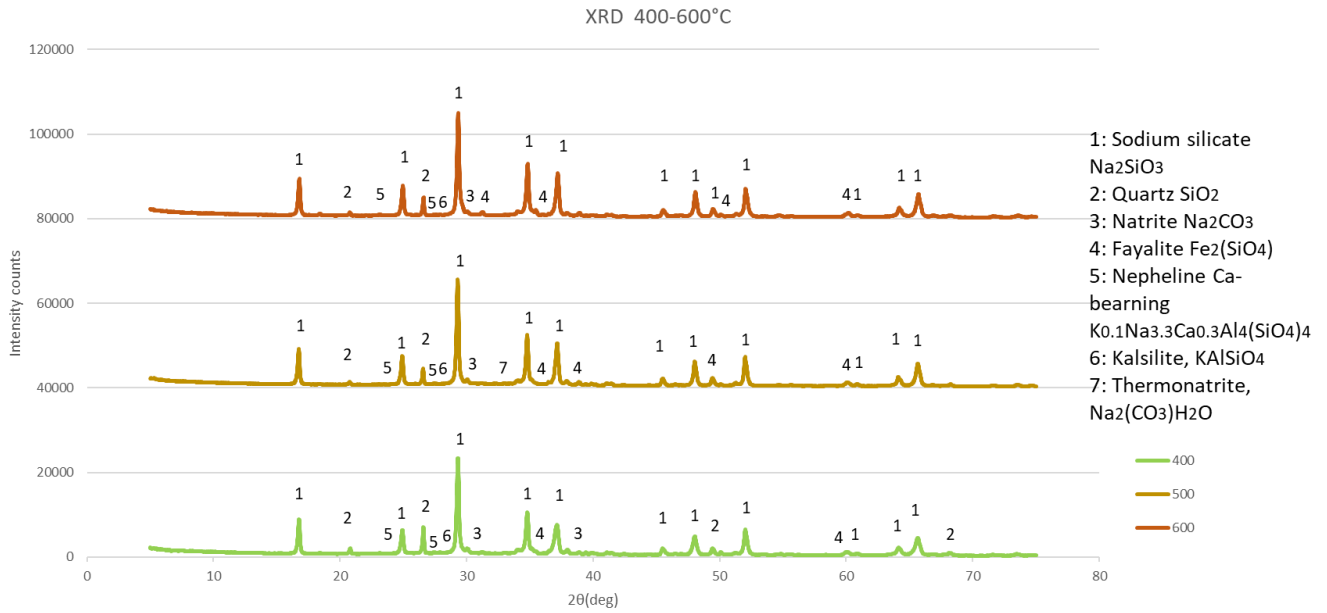
Στον Πίνακα 7 και στα Διαγράμματα 3,4&5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της ποιοτικής ανάλυσης.

Πίνακας 7: Ορυκτολογική σύσταση των υπό εξέταση υλικών

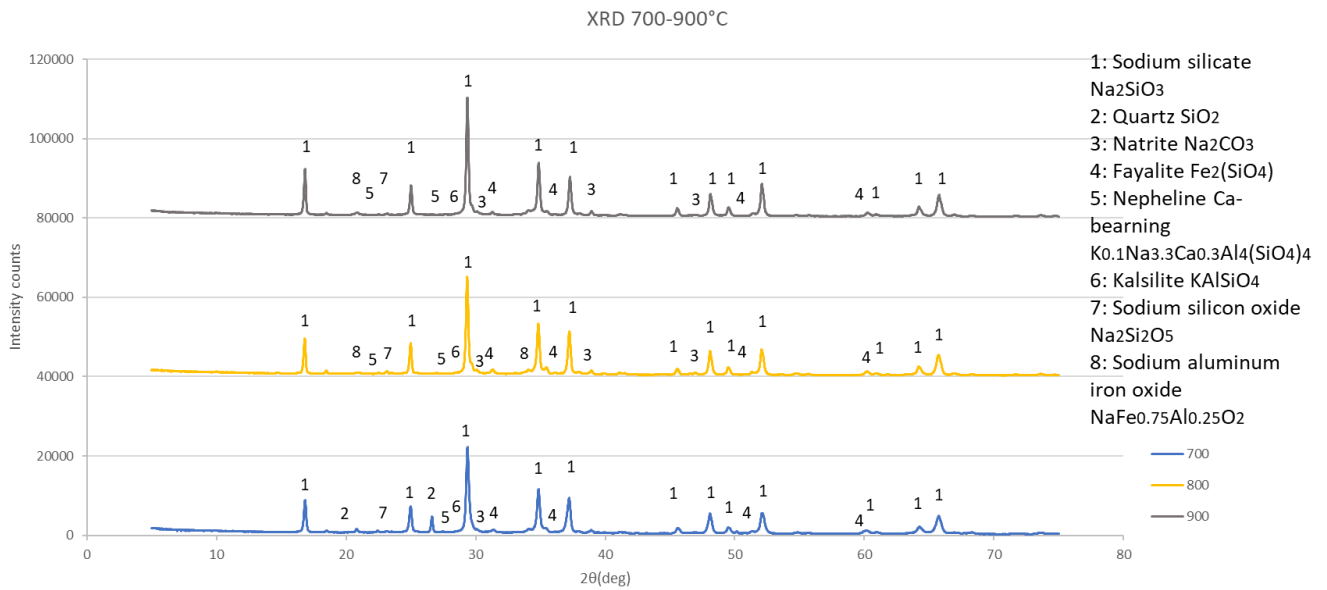
Φάση	Υλικά								
	Απλίτης	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
Αλβίτης	✓	x	x	X	X	X	x	x	x
Μικροκλινής	✓	x	x	X	X	X	x	x	x
Χαλαζίας	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x
Πυριτικό νάτριο (Na ₂ SiO ₃)	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Νατρίτης	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Θερμονατρίτης	X	✓	✓	X	✓	X	x	x	x
Φαυάλιτης	X	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Νεφελίνης	X	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Καλσιλίτης	X	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Διπυριτικό νάτριο (Na ₂ Si ₂ O ₅)	X	x	x	X	X	x	✓	✓	✓
Οξείδιο νατρίου- αλουμινίου- σιδήρου	X	x	x	X	X	x	x	✓	✓
Άμορφη φάση	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Σημείωση	✓: Ταυτοποίηση φάσης και x: Μη ταυτοποίηση φάσης								



Διάγραμμα 3: XRD ορυκτού απλίτη – 300°C

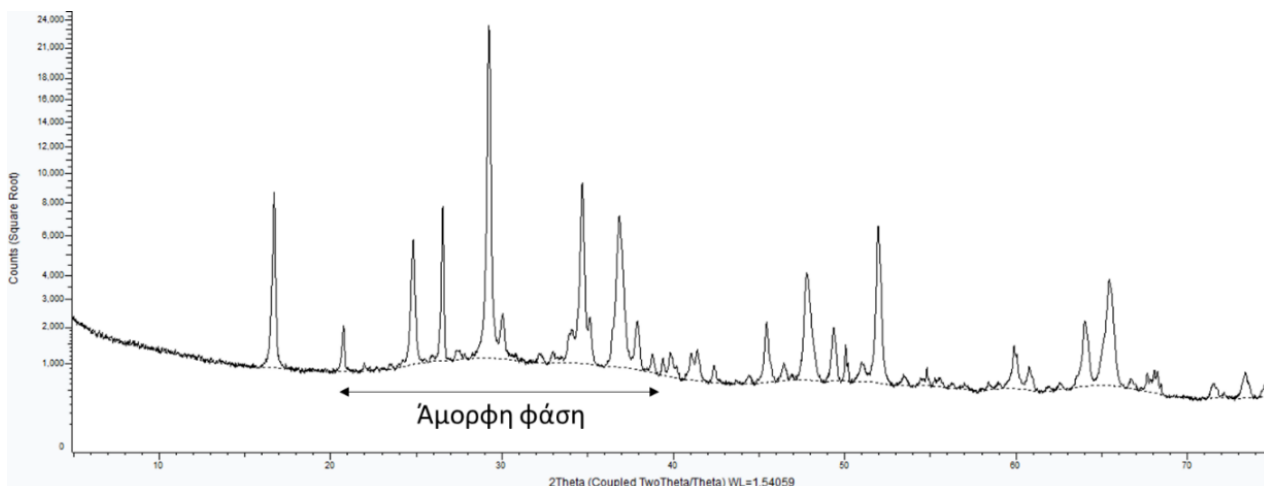


Διάγραμμα 4: XRD 400-600°C



Διάγραμμα 5: XRD 700-900°C

Σημειώνεται επίσης ότι, σε όλα τα παραγόμενα υλικά της πυρομεταλλουργικής διεργασίας (200°C – 900°C) διακρίνεται η ύπαρξη άμορφου υλικού, με την κύρια έκφραση του να λαμβάνει χώρα μεταξύ 20° και 40° (Διάγραμμα 6).



Διάγραμμα 6: Διάκριση άμορφου υλικού στο υλικό των 200°C

Η ορυκτολογική παραγένεση του αρχικού υλικού είναι χαρακτηριστική αυτής ενός γρανιτικού απλίτη, καθώς συνίστανται κυρίως από χαλαζία και δευτερευόντως από αλβίτη και μικροκλινή.

Συμπεράσματα Μεθόδου:

Η ποιοτική ανάλυση με XRD των παραγόμενων υλικών φανερώνει ότι η κρυσταλλική δομή, καθώς και η σύσταση των φάσεων, επηρεάζονται σημαντικά από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Σε κανένα από τα παραγόμενα υλικά δεν ανιχνευθήκαν οι ορυκτές φάσεις των αστρίων του αρχικού υλικού, ενώ ο χαλαζίας απαντάται έως και το υλικό των 700°C. Αναφορικά με το ποσοστό συμμετοχής του, παρατηρείται μία μείωση αυτού στα υλικά των 500°C, 600 °C και 700 °C συγκριτικά με αυτό, που εκτιμάται, στα υλικά των 200°C, 300°C, 400 °C και 600 °C.

Το πυριτικό νάτριο είναι η κυρίαρχη ορυκτολογική φάση σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος από τους 200 °C έως τους 900 °C. Η επικράτηση της φάσης του πυριτικού νατρίου είναι αναμενόμενη, καθώς αποτελεί το κυρίαρχο προϊόν των χημικών αντιδράσεων της φρύξης του απλίτη με καυστικό νάτριο, οι οποίες παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.1 («Φρύξη με καυστικό νάτριο σε ορυκτό απλίτη», σελίδα 17). Η σταδιακή αύξηση του ποσοστού συμμετοχής του, επίσης, είναι προβλεπόμενη καθώς η αντίδραση του καυστικού νατρίου με τον απλίτη ενισχύεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, οδηγώντας σε μεγαλύτερο ποσοστό αποδέσμευσης του πυριτίου προς το σχηματισμό πυριτικού νατρίου. Στο υλικό δε των 900°C παρατηρείται εντονότερη

η αύξηση αυτή του ποσοστού συμμετοχής του έναντι αυτού που εκτιμάται για την περίπτωση των υπολοίπων υλικών.

Από την θερμοκρασία των 400 °C έως αυτήν των 900 °C, απαντούν επιπλέον διάφορες φάσεις οξειδίων, σε μικρό όμως ποσοστό. Συγκεκριμένα, οι ορυκτές φάσεις του νεφελίνη, του φαυαλίτη και του καλσιλίτη ανιχνεύθηκαν σε όλο αυτό το θερμοκρασιακό εύρος, ενώ η ορυκτή φάση του διπυριτικού νατρίου διακρίνεται στα υλικά των 700 °C-900 °C. Επίσης, ένα μεικτό οξείδιο νατρίου-αλουμινίου-σίδηρου, ταυτοποιήθηκε στα υλικά των 800 °C-900 °C.

Η εμφάνιση του καλσιλίτη οφείλεται στην αντίδραση του καυστικού νατρίου με την ορυκτή φάση του μικροκλίτη. Η ύπαρξη του νεφελίνη μπορεί να αποδοθεί στην διάσπαση των αστρίων (αλβίτη, μικροκλίτη), η οποία προσέφερε ιόντα καλίου, ασβεστίου και αργιλίου, τα οποία εν συνεχεία αντέδρασαν με τα υπάρχοντα ιόντα νατρίου και πυριτίου σχηματίζοντας τη νέα αυτή φάση. Ο φαυαλίτης είναι το αποτέλεσμα της αντίδρασης των δισθενών κατιόντων σιδήρου (Fe^{+2}), τα οποία προϋπάρχουν ήδη από τον ορυκτό απλίτη (στη μορφή Fe_2O_3), με τα πλέον αποδεσμευμένα τετράεδρα πυριτίου, η αντίδραση προς το σχηματισμό φαυαλίτη ενισχύεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 400°C. Επιπλέον, η εμφάνιση του διπυριτικού νατρίου είναι απόρροια της αντίδρασης του πυριτίου με το καυστικό νάτριο, όπου σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 700°C, παράγεται ως δευτερεύον προϊόν. Η παρουσία του μεικτού οξειδίου του νατρίου-αλουμινίου-σίδηρου, που ταυτοποιήθηκε στα υλικά των 800 °C-900 °C, πιθανώς να προέρχεται από την ένωση υπολοίπων ποσοτήτων των ιόντων του νατρίου, του αργιλίου και του σιδήρου σχηματίζοντας το αντίστοιχο οξείδιο. Επίσης, η ύπαρξη του οξειδίου αυτού δημιουργεί ενδείξεις για την πιθανή παραγωγή τήματος στο θερμοκρασιακό εύρος των 800 °C-900 °C.

Όλα τα υλικά της κατεργασίας του απλίτη συνίστανται από ανθρακικά ορυκτά, κυρίως υπό την μορφή του νατρίτη και σε κάποιες περιπτώσεις υπό την μορφή του θερμονατρίτη. Η παρουσία αυτών των φάσεων θεωρείται ως το αποτέλεσμα της αντίδρασης υπολειπόμενου καυστικού νατρίου με το διοξείδιο του άνθρακα, κατά την έκθεση αυτών των υλικών σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων XRD λήφθηκαν υπόψιν και παράγοντες πιθανών σφαλμάτων, όπως αυτοί του οργάνου, της τοποθέτησης του δείγματος και της επεξεργασίας των δεδομένων.

4.3.2.3 Αποτελέσματα ποσοτικής ορυκτολογικής ανάλυσης

Για το παραγόμενο υλικό των 900°C πραγματοποιήθηκε ποσοτική ανάλυση με τη μέθοδο του εσωτερικού προτύπου.

Η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος ποσοτικής ανάλυσης άμορφων υλικών είναι αυτή του εσωτερικού προτύπου (internal standard method) [32]. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, συγκεκριμένη ποσότητα ενός πρότυπου υλικού, το οποίο πρέπει να είναι καλά κρυσταλλωμένο και ελεύθερο τυχόν προσμίξεων, προστίθεται στο υπό εξέταση δείγμα. Ακολούθως, οι σχετικές αναλογίες των φάσεων του μίγματος προσδιορίζονται κατά την εκτέλεση Rietveld (Rietveld refinement) σύμφωνα με την Εξίσωση 1 [33]:

$$W_a = 100 \cdot \frac{S_a(ZMV)_a}{\sum_{j=1}^n S_j(ZMV)_j} \quad (1)$$

Όπου:

W_a , είναι η μετρούμενη περιεκτικότητα κατά βάρος (%) της φάσης α

S_a , ο παράγοντας κλίμακας Rietveld για την φάση α

S_j , ο παράγοντας κλίμακας Rietveld για τη φάση j

ZM , η μάζα της στοιχειώδους κυψελίδας

V , ο όγκος της στοιχειώδους κυψελίδας

και n , ο αριθμός των φάσεων

Η ύπαρξη γνώστης ποσότητας ενός πρότυπου υλικού δίνει την δυνατότητα διόρθωσης των παραπάνω αποτελεσμάτων σύμφωνα με την Εξίσωση 2.

$$Corr(W_a) = W_a \cdot \frac{STD_{known}}{STD_{measured}} \quad (2)$$

Όπου:

$Corr(W_\alpha)$, είναι η διορθωμένη περιεκτικότητα κατά βάρος (%) της φάσης α

STD_{known} , η περιεκτικότητα του πρότυπου υλικού εντός του μίγματος

και $STD_{measured}$, η περιεκτικότητα όπως προκύπτει από την Εξίσωση 1

Από τον υπολογισμό των διορθωμένων περιεκτικοτήτων, η ποσότητα του άμορφου υλικού, $W_{amorphous}$, μπορεί να υπολογιστεί από την Εξίσωση 3:

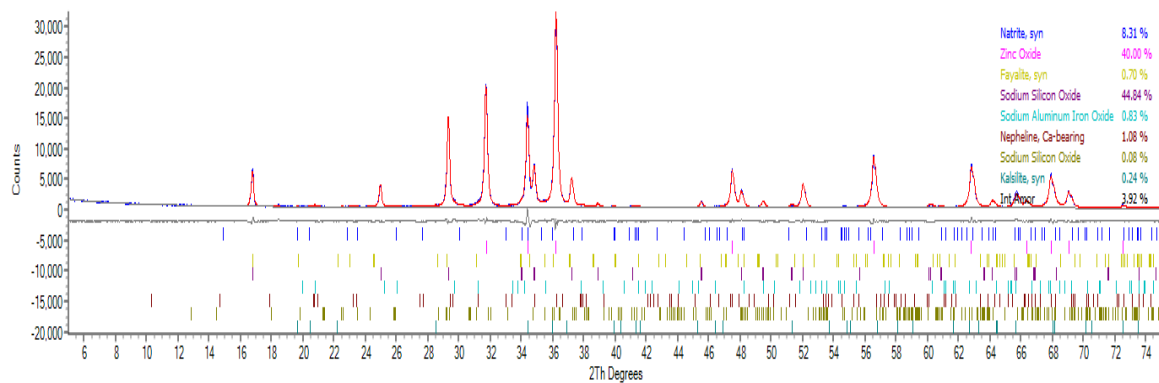
$$W_{amorphous} = 100 - \sum_{j=1}^n Corr(W_j) \quad (3)$$

Για τον υπολογισμό της ποσότητας του άμορφου υλικού στο προϊόν της κατεργασίας του απλίτη στους 900°C, παρασκευάστηκε ένα μίγμα από το υλικό αυτό και συγκεκριμένης ποσότητας (40% κατά βάρος) από ένα πρότυπο υλικό (Ζινκίτης-ZnO).

Η προετοιμασία αυτού του δείγματος και οι συνθήκες μέτρησης στο περιθλασίμετρο ακτίνων-X, ήταν ανάλογες με αυτές που υιοθετήθηκαν στις περιπτώσεις των υπολοίπων υλικών που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.

Η εκλέπτυνση κατά Rietveld για εν το λόγω μίγμα πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό TOPAS V6 της εταιρίας Bruker, όπου παρέχεται η δυνατότητα υπολογισμού της περιεκτικότητας άμορφου υλικού μέσω της μεθόδου του εσωτερικού προτύπου.

Το γραφικό αποτέλεσμα της ανάλυσης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 7, ενώ η περιεκτικότητα των φάσεων για το υλικό των 900°C, όπως προέκυψαν από τις απαιτούμενες διορθώσεις, συνοψίζονται στον Πίνακα 8.



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα Rietveld του υπό εξέταση μίγματος

Πίνακας 8: Ποσοτική ανάλυση (Wt%) του προϊόντος κατεργασίας στους 900°C

Φάση	(Wt%)
Άμορφη φάση	6.50
Νατρίτης	13.80
Φαυαλίτης	1.17
Πυριτικό νάτριο (Na₂SiO₃)	74.70
Οξείδιο νατρίου-αλουμινίου-σιδήρου	1.39
Νεφελίνης	1.80
Διπυριτικό νάτριο (Na₂SiO₅)	0.14
Καλσιλίτης	0.40

Από τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από την ποσοτική ανάλυση με τη μέθοδο του εσωτερικού προτύπου επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την περίθλαση ακτίνων-Χ. Συγκεκριμένα, εντοπίζεται το πυριτικό νάτριο ως η επικρατέστερη παραγόμενη ένωση με ποσοστό 74.7% κατά βάρος καθώς και η ύπαρξη των υπόλοιπων παραγόμενων φάσεων σε μικρό ποσοστό. Με την εξαγωγή πυριτικού

νατρίου σε τέτοιο ποσοστό στο δείγμα των 900°C μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το παραγόμενο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή πυριτικού νατρίου.

Στο σημείο αυτό αξίζει να συγκριθούν τα αποτελέσματα για το πυριτικό νάτριο που παράχθηκε από τη φρύξη με καυστικό νάτριο στους 900°C (όπως παρουσιάζονται στις σελ. 27,30,37) , με τα αντίστοιχα βιβλιογραφικά δεδομένα για την εμπορική υδράλο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα για τα δύο υλικά.

Πίνακας 9: Σύγκριση του παραγόμενου πυριτικού νατρίου με την εμπορική υδράλο

	Na ₂ O, wt %	SiO ₂ , wt%	Si, g/L
WG type	39.46	37.83	
Commercial WG	8.35	26.65	167.5

Παρατηρώντας τον πίνακα, εντοπίζουμε ότι το πυριτικό νάτριο που έχει προκύψει από τη μέθοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο της εμπορικής υδράλου.

Το πυριτικό νάτριο, με σύνθεση 39,46% wt σε οξείδιο του νατρίου και 37,83% wt σε διοξείδιο του πυριτίου, είναι μια πρόσφατα αναπτυχθείσα εναλλακτική λύση στην εμπορική υδράλο, παραγόμενο μέσα από τη διαδικασία της φρύξης μιας πρώτης ύλης, με σημαντική περιεκτικότητα σε πυρίτιο, και καυστικού ή ανθρακικού νατρίου.

Οι ιδιότητες αυτών των δύο προϊόντων πυριτικού νατρίου μπορούν να συγκριθούν με βάση τη χημική τους σύνθεση και τις φυσικές τους ιδιότητες. Τα δύο προϊόντα αποτελούνται ομοίως από οξείδιο του νατρίου και διοξείδιο του πυριτίου, γεγονός που τους προσδίδει παρόμοιες χημικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένου του pH και της διαλυτότητας. Ωστόσο το πυριτικό νάτριο, με 39,46% wt σε οξείδιο του νατρίου και 37,83% wt διοξείδιο του πυριτίου, έχει διαφορετική σύνθεση από την εμπορική υδράλο, η οποία συνήθως έχει περιεκτικότητα σε οξείδιο του νατρίου μεταξύ 9-14% και περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου που κυμαίνεται μεταξύ 25-33%. Αυτή η διαφορά στη σύνθεση μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές ιδιότητες και επιδόσεις σε διάφορες εφαρμογές.

Για παράδειγμα, η υψηλότερη περιεκτικότητα σε οξείδιο του νατρίου στο εναλλακτικό πυριτικό νάτριο μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο pH και μεγαλύτερη διαλυτότητα συγκριτικά με την υδράλο. Επιπλέον, η διαφορετική σύνθεση των δύο προϊόντων μπορεί να επηρεάσει τις φυσικές τους ιδιότητες, όπως το ιξώδες και η πυκνότητα. Το

ιξώδες του εναλλακτικού πυριτικού νατρίου αναμένεται υψηλότερο από εκείνο της εμπορικής υδρυάλου, λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητάς του σε οξείδιο του νατρίου.

Συνοπτικά, η διαφορετική σύνθεση των δύο προϊόντων πυριτικού νατρίου μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές ιδιότητες και επιδόσεις σε πληθώρα εφαρμογών και η επιλογή μεταξύ τους εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

Συνολικά, το εναλλακτικό πυριτικό νάτριο δείχνει πολλά υποσχόμενο ως μια πιο οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον επιλογή για την παραγωγή πυριτικού νατρίου, αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την πλήρη σύγκριση και αξιολόγηση των επιδόσεών του σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

5. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η πλήρης ανάλυση και ο χαρακτηρισμός ορυκτού απλίτη, προϊόν εξορυκτικών διεργασιών από βιομηχανία στη Νορβηγία.

Επιπλέον, μελετήθηκε η φρύξη του με τη χρήση διαλύματος καυστικού νατρίου. Η πειραματική διεργασία βασίστηκε στην αλκαλική φρύξη του απλίτη στο θερμοκρασιακό εύρος των 200-900°C . Βασικός σκοπός της διεργασίας αποτέλεσε η μετατροπή των φάσεων του πυριτίου σε πυριτικό νάτριο.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα της φρύξης του απλίτη με καυστικό νάτριο, συνδυαστικά με τις προβλέψεις των θερμοδυναμικών υπολογισμών από το λογισμικό FactSage, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Τα παραγόμενα υλικά από τη φρύξη με διάλυμα καυστικού νατρίου για τις θερμοκρασίες των 200-700°C, παρ' όλη την αντίδρασή τους με το καυστικό νάτριο και το σχηματισμό του πυριτικού νατρίου, δεν αποτελούν το επιθυμητό παραγόμενο προϊόν, καθώς το πυρίτιο δεν έχει αντιδράσει εξ' ολοκλήρου, ώστε να αποδεσμευτεί πλήρως από την ορυκτή φάση του χαλαζία. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα XRD των αντίστοιχων θερμοκρασιών.

2. Στους 800°C, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα XRD, αποδεσμεύεται εξ' ολοκλήρου το πυρίτιο από την κρυσταλλική φάση του χαλαζία. Ωστόσο, από το διάγραμμα και τις θερμοδυναμικές προβλέψεις για τους 900°C, συμπεραίνουμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας οι αντιδράσεις προς το σχηματικό των παραγόμενων ορυκτών φάσεων ενισχύονται. Η ενίσχυση αυτή, όμως, δεν είναι σε σημαντικό βαθμό, ώστε να χαρακτηριστεί καταλληλότερη από αυτή των 800°C.
3. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών και του FactSage, η φρύξη στους 800°C και 900 °C αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο εξαγωγής πυριτικού νατρίου και τήγματος πλούσιου σε αλκαλικά μέταλλα.
4. Η παραγωγή πυριτικού νατρίου μέσω της φρύξης του απλίτη με καυστικό νάτριο αποτελεί μια εναλλακτική πρόταση της εμπορικής υδρυάλου με πλήθος εφαρμογών

Συνολικά, η μέθοδος της φρύξης του απλίτη με καυστικό νάτριο αποτελεί μια οικονομική μέθοδο μετατροπής ενός ανεκμετάλλευτου υλικού σε υλικό υψηλής προστιθέμενης αξίας με δύο κυρίως τρόπους αξιοποίησης. Ο πρώτος τρόπος είναι η παραγωγή πυριτικού νατρίου το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί έναντι της εμπορικής υδρυάλου καθώς παρουσιάζει παρεμφερή χαρακτηριστικά. Ο δεύτερος τρόπος είναι η πιθανή χρήση του κατεργασμένου πλέον απλίτη, ως πρώτη ύλη για την παραγωγή γεωπολυμερών υλικών με μεγάλο εύρος εφαρμογών στον κατασκευαστικό κλάδο.

6. Πρόταση για μελλοντική έρευνα

1. Επανάληψη πειραμάτων για το θερμοκρασιακό εύρος 800 - 900°C

Όπως έχει προαναφερθεί και βάσει των συμπερασμάτων, η φρύξη του απλίτη με καυστικό νάτριο αποτελεί μια αποδοτική μέθοδο για την παραγωγή πυριτικού νατρίου. Ωστόσο, για να επιβεβαιωθεί το παραπάνω συμπέρασμα, προτείνεται η επανάληψη των πειραμάτων της φρύξης για το θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 800-900°C, ώστε να επιβεβαιωθεί η επαναληψιμότητα της μεθόδου. Αυτό θα επιτρέψει την διερεύνηση της συνέπειας λήψης ίδιου ποιοτικά και ποσοτικά πυριτικού νατρίου, το οποίο συνεπάγεται

με το χαρακτηρισμό της μεθόδου ως αξιόπιστης. Τέλος, θα προσδιοριστεί με περισσότερη ακρίβεια η βέλτιστη θερμοκρασία για τη διαδικασία της φρύξης.

2. Χαρακτηρισμός υλικού

Ο χαρακτηρισμός των παραγομένων υλικών από τη φρύξη του απλίτη με καυστικό νάτριο για το θερμοκρασιακό εύρος 800-900°C, παρείχε πολύτιμες πληροφορίες για τη χημική σύνθεση και τις ιδιότητές τους. Ωστόσο, για να βελτιώσουμε περαιτέρω την κατανόηση αυτών των υλικών, θα πρέπει να εξεταστούν ειδικές μέθοδοι χαρακτηρισμού. Μια από τις προτεινόμενες μεθόδους είναι η ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM), η οποία παρέχει εικόνες υψηλής ανάλυσης της μικροδομής του υλικού, αποκαλύπτοντας λεπτομέρειες σχετικά με την κρυσταλλική δομή και τη μορφολογία του. Επιπλέον, πρέπει να γίνουν εκτενέστεροι χημικοί χαρακτηρισμοί, μέσω της φασματοσκοπίας φωτοηλεκτρονίων ακτίνων X (XPS) και της υπέρυθρης φασματοσκοπίας μετασχηματισμού Fourier (FTIR), ώστε να ληφθούν πληροφορίες για τους χημικούς δεσμούς που υπάρχουν στα υλικά. Η χημική ανάλυση με φθορισμού ακτίνων X (XRF) πρέπει να επαναληφθεί για την τη λήψη ακριβέστερων αποτελεσμάτων και τη σύγκριση τους με τα αρχικά.

3. Εφαρμογές του υλικού

Τέλος, το παραγόμενο υλικό δίνει το έναυσμα για νέες μελέτες με σκοπό τη διερεύνηση των πιθανών εφαρμογών του στην βιομηχανία ως καταλύτη, ως δομικό υλικό, ως εναλλακτική μορφή πυριτίου κ.ά. . Οι μελέτες αυτές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν δοκιμές για τη μηχανική αντοχή και την ανθεκτικότητα του υλικού, καθώς και για την αντιδραστικότητά του υπό διαφορετικές συνθήκες. Κλείνοντας, το υλικό θα μπορούσε για μελετηθεί για την παραγωγή γεωπολυμερών υλικών.

7. Βιβλιογραφία

[1]Jia, C., Chen, B., Zhang, Y., & Yang, D., (2019), «Process optimization of soda roasting-leaching of nickel sulfide concentrate», Minerals Engineering, p.139, doi: 105863.

[2]Peng, Q., Zhang, Y., & Tang, Y., (2020), «Kinetic study of soda roasting and water leaching of a low-grade nickel-cobalt sulfide ore» Hydrometallurgy, p. 193, doi: 105266.

[3]European Commission, (2021), «The European Green Deal», https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[4] Chiara Cardenia, et al., (2021), Article: «A Combined Soda Sintering and Microwave Reductive Roasting Process of Bauxite Residue for Iron Recovery», p. 1-3

[5]Shang, X., Zhang, Y., & Li, Y. (2020), «Preparation of sodium silicate and its application in industry», Journal of Chemistry, 2020, p.1-8, doi: 10.1155/2020/2938137

[6]Saikia, N., Sharma, S., Gogoi, P., & Baruah, D. C. (2018), «Sodium silicate based binder systems for mould and core making», Journal of Materials Science Research, vol: 7(2), p:-17. doi: 10.5539/jmsr.v7n2p1

- [7] Bishop, A.C. (1989), «Aplite. In: Petrology» Encyclopedia of Earth Science, Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-30845-8_14
- [8] Κοκκινάκης, Α. (2016), «Μαγματικά πετρώματα»
- [9] Haldar, S., & Tišljarić, J. (2014), «Igneous Rocks: Introduction to Mineralogy and Petrology», Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408133-8.00004-3>
- [10] Dill, H. G. (2015), «Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology», Ore Geology Reviews, vol. 69, pp417-561. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.022>
- [11] <https://www.britannica.com/science/aplite>
- [12] Costa, A., et al., «Geological Characterization of Aplite for Construction Aggregates: A Case Study from Portugal», Journal of Earth Science and Engineering, vol. 5, no. 6, 2015, p. 328-37, doi: 10.17265/2159-581X/2015.06.001.
- [13] Menezes, B. M., Freitas, J. C. C., Souza, J. A. M., & Medeiros, V. R., (2018), «Beneficiation of Aplite Rock by Flotation Selectivity of Quartz and Feldspar Minerals», vol.8(12), p. 547, <https://doi.org/10.3390/min8120547>
- [14] Meier, M., et al., (2018), «Mineralogy and geopolymerization of a high-alumina aplite» Applied Clay Science, vol. 167, p. 12-22.
- [15] Lee, C. T., et al., (2014), «A preliminary study of aplite as a potential aggregate for concrete» Construction and Building Materials, vol. 60, p. 121-126.
- [16] Sina Ebnesajjad, (2011), «Characteristics of Adhesive Materials», in Handbook of Adhesives and Surface Preparation, vol.8(1), p.21, <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/sodium-silicate>
- [17] Gholipour, S., et al., (2017), «The effect of aplite on the mechanical properties of cement mortar», Construction and Building Materials, vol. 155, p. 390-397.
- [18] Palchik, V., (2015), «Aplite as a source of raw materials for the production of glass and ceramics», Glass and Ceramics, vol. 72, no. 5-6, p. 214-217.
- [19] Gao, X., et al., (2020), «Influence of mineral admixtures on the properties of cement-based materials: A review», Construction and Building Materials, vol. 239, doi: 117800

- [20] Mahmoud Khalifeh, Arild Saasen, Torbjørn Vrålstad, Helge Bøvik Larsen & Helge Hodne ,(2015), «Experimental study on the synthesis and characterization of aplite rock-based geopolymers», *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, doi: 10.1080/21650373.2015.1044049
- [21] Santosa, S. J., Hardjito, D., & Antoni, (2014), «Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with alkaline activator variations» *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol.46(4), p. 403-416
- [22] S. Samarakoon, «Performance Evaluation of Aplite Rock-Based Geo-Polymer Binder», *ResearchGate*, vol.3 (3-4), p. 6-7
- [23] Chukanov, N. V., Britvin, S. N., Krivovichev, S. V., Pekov, I. V., Yapaskurt, V. O., and Voudouris, P. (2019). Sodium-bearing minerals in the Khibiny alkaline massif, Kola Peninsula, Russia. *Mineralogical Magazine*, vol. 83(5), p. 749-774. <https://doi.org/10.1180/mgm.2019.76>
- [24] Bhaduri, A. K., Mukherjee, A., and Joshi, R. C. (2014). Development of geopolymer concrete using alkali activated sodium silicate synthesized from apatite and aplite minerals. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26(4), p. 639-648. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000844](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000844)
- [25] M. Marafi & M. S. Rana, (2016), «Refinery waste: the spent hydroprocessing catalyst and its recycling options», figure 5, vol. 202, doi: 10.2495/WM160201
- [26] Berzelius, J.J. (1829), «On the extraction of copper and nickel from their ores by means of soda» *Journal of the Royal Swedish Academy of Sciences*, vol. 1, p.1-12
- [27] Marafi, M. & Stanislaus, A., (2011), «Alumina from reprocessing of spent hydroprocessing catalyst. *Catal. Today*», vol. 178, p. 117-123
- [28] Shanthi, M., & Kamaraj, M., (2014), «Extraction of copper from sulphide ore», *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 4(3), p.1-8.
- [29] Boliden, (2021), “Copper smelter – Rönnskär” Retrieved from <https://www.boliden.com/en/our-business/smelters/ronnskar-smelter/copper-smelter-ronnskar/>
- [30] “FactSage.com -Equilib module.” https://www.crct.polymtl.ca/factsage/fs_equilib.php (accessed Sep. 29, 2022)

[31] Hill, R. J. and Howard, C. J., (1987), «Quantitative phase analysis from neutron powder diffraction data using the Rietveld method», *Journal of Applied Crystallography*, vol.20, p. 467-474.

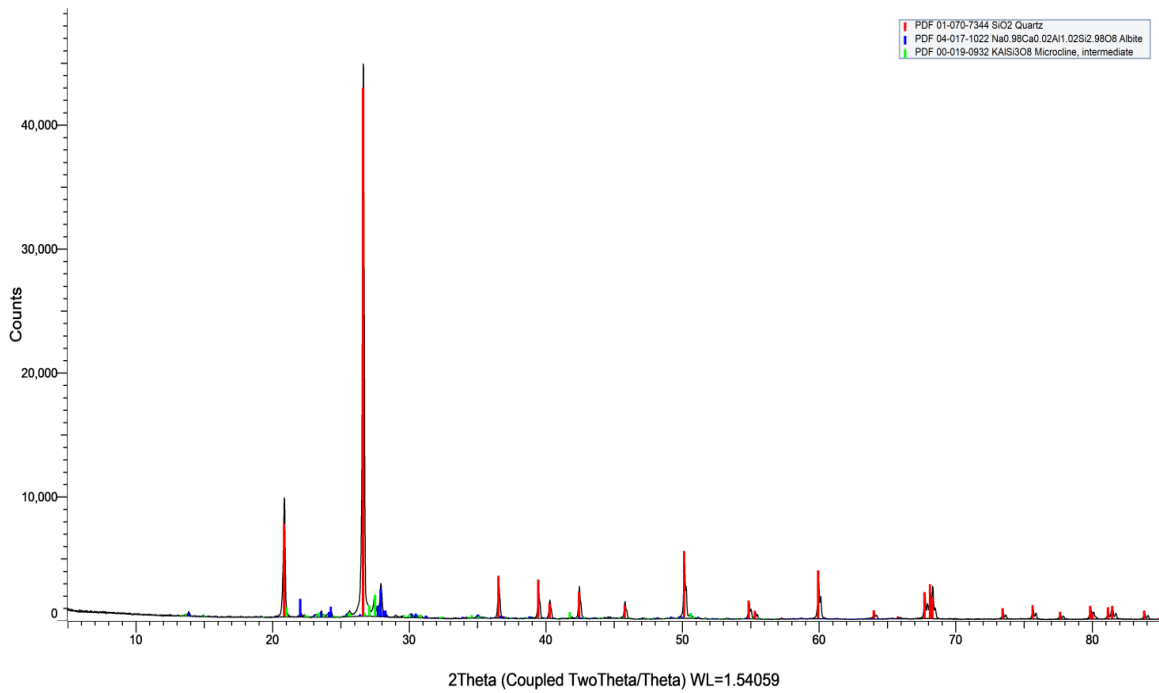
[32] Pecharsky, V.K. and Zavalij, P.Y. (2009), «Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials», Second Edition, Springer, New York: USA.

[33] Scarlett, N. V. Y., Madsen, I. C., Cranswick, L. M. D., Lwin, T., Groleau, E., Stephenson, G., Aylmore, M. and Agron-Olshina, N., (2002), «Outcomes of the International Union of Crystallography Commission on powder diffraction round robin on quantitative phase analysis: samples 2, 3, 4, synthetic bauxite, natural granodiorite, and pharmaceuticals», *Journal of Applied Crystallography*, vol.35, p. 383-400.

A Παράρτημα

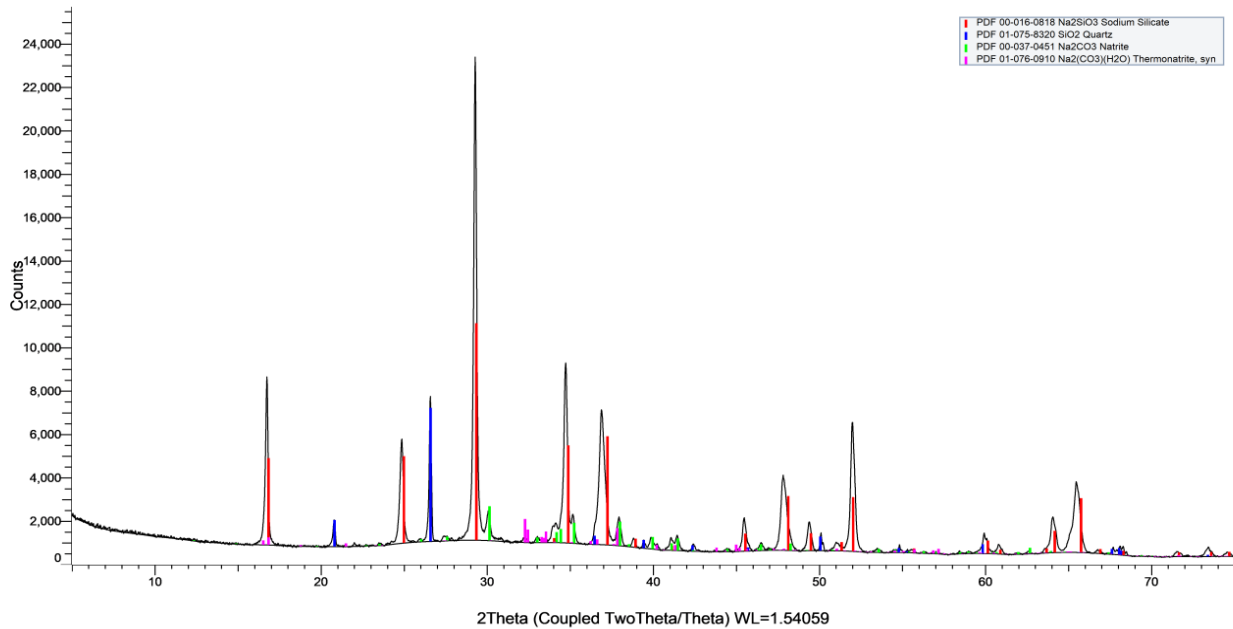
Διαγράμματα περίθλασης ακτίνων-X

(Coupled TwoTheta/Theta)



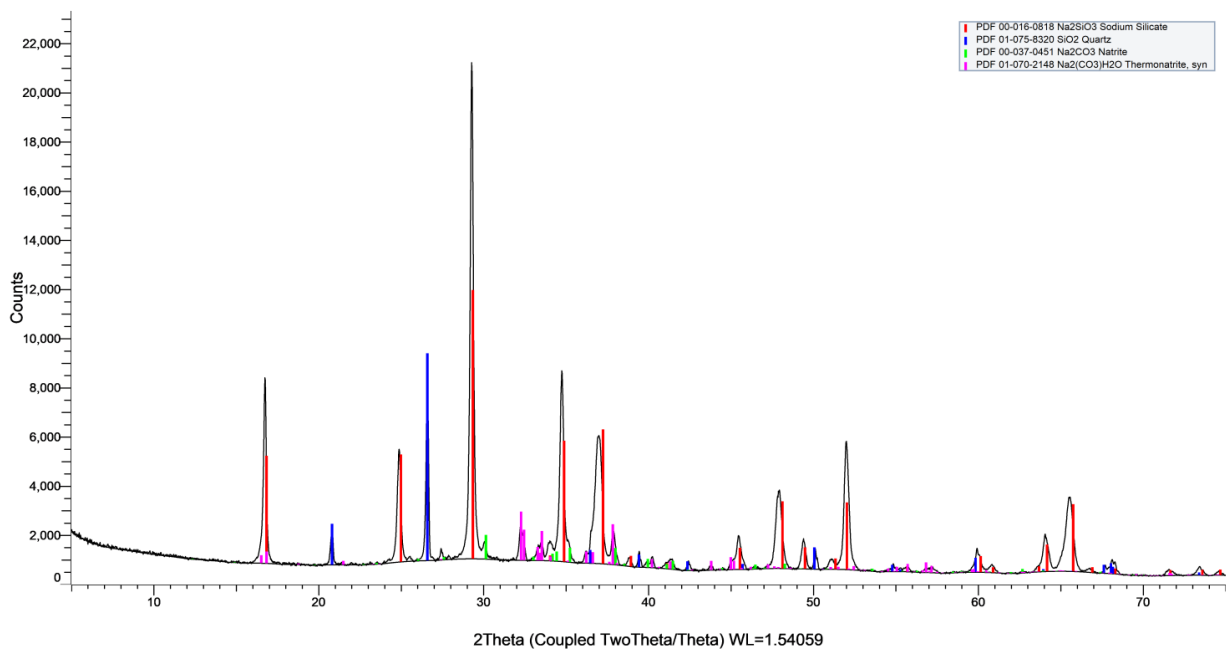
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα XRD ορυκτού απλίτη

(Coupled TwoTheta/Theta)



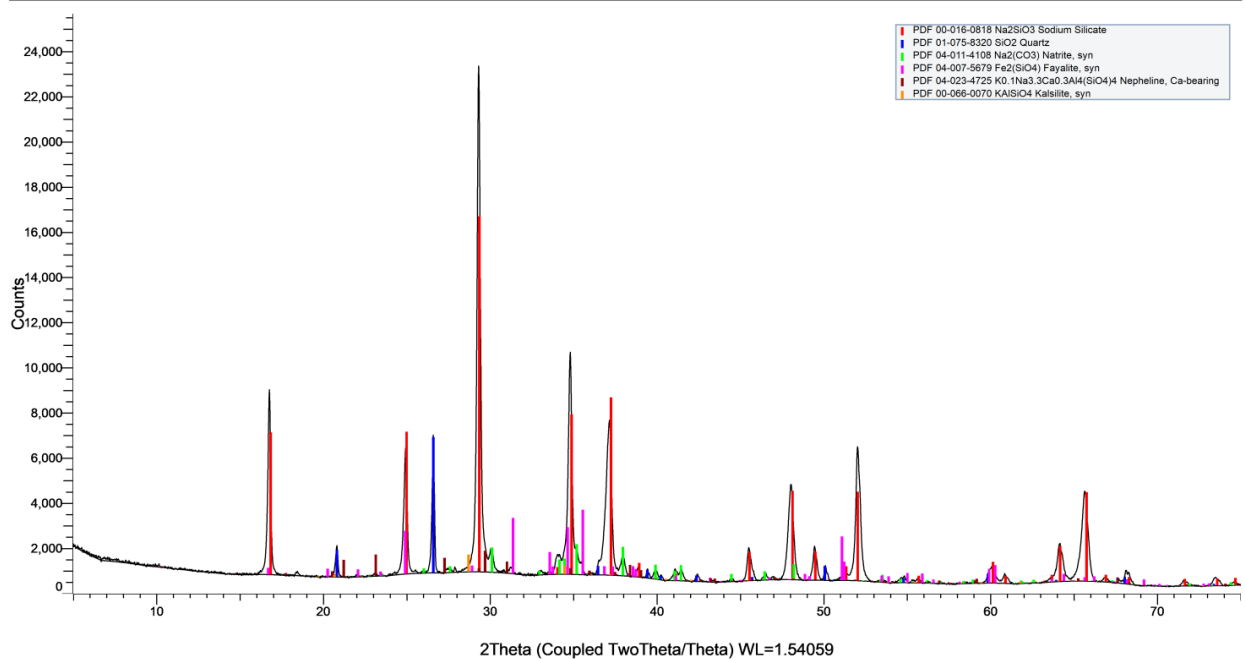
Διάγραμμα 9: Διάγραμμα XRD δείγματος 200°C

(Coupled TwoTheta/Theta)



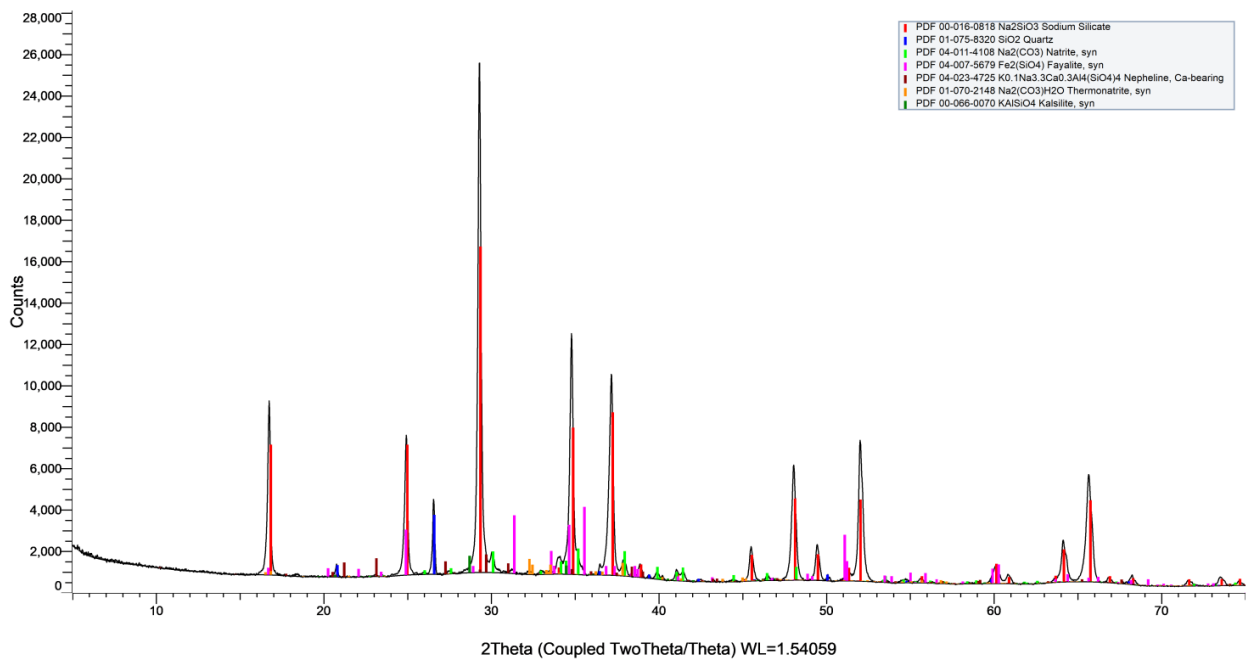
Διάγραμμα 10: Διάγραμμα XRD δείγματος 300°C

(Coupled TwoTheta/Theta)



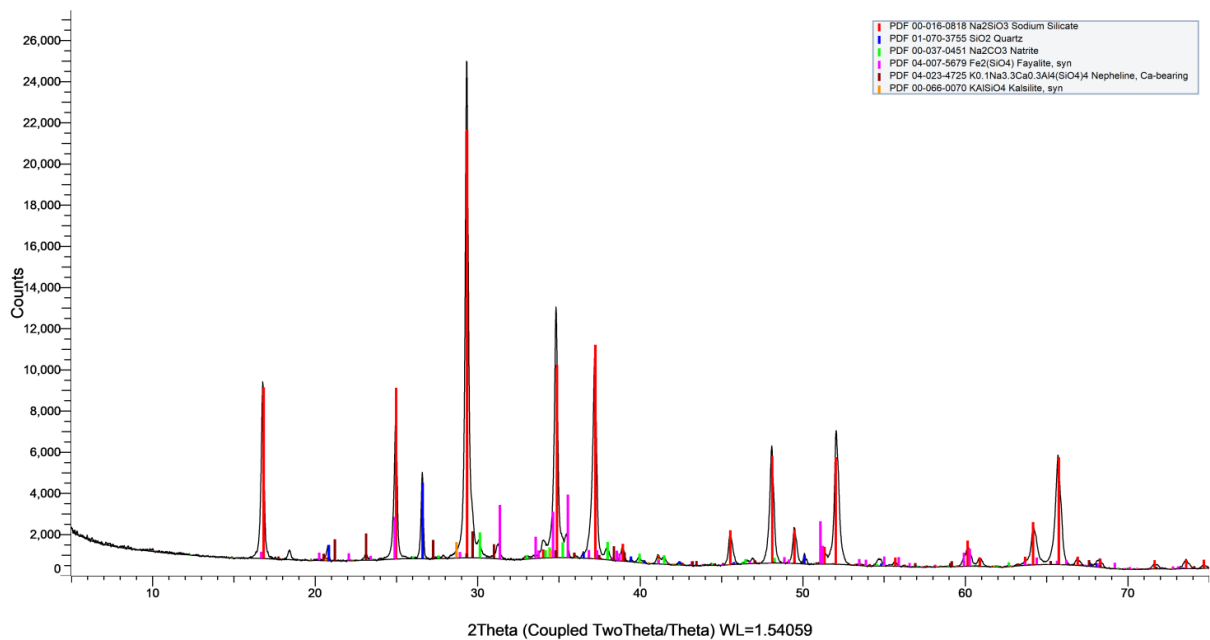
Διάγραμμα 11: Διάγραμμα XRD δείγματος 400°C

(Coupled TwoTheta/Theta)



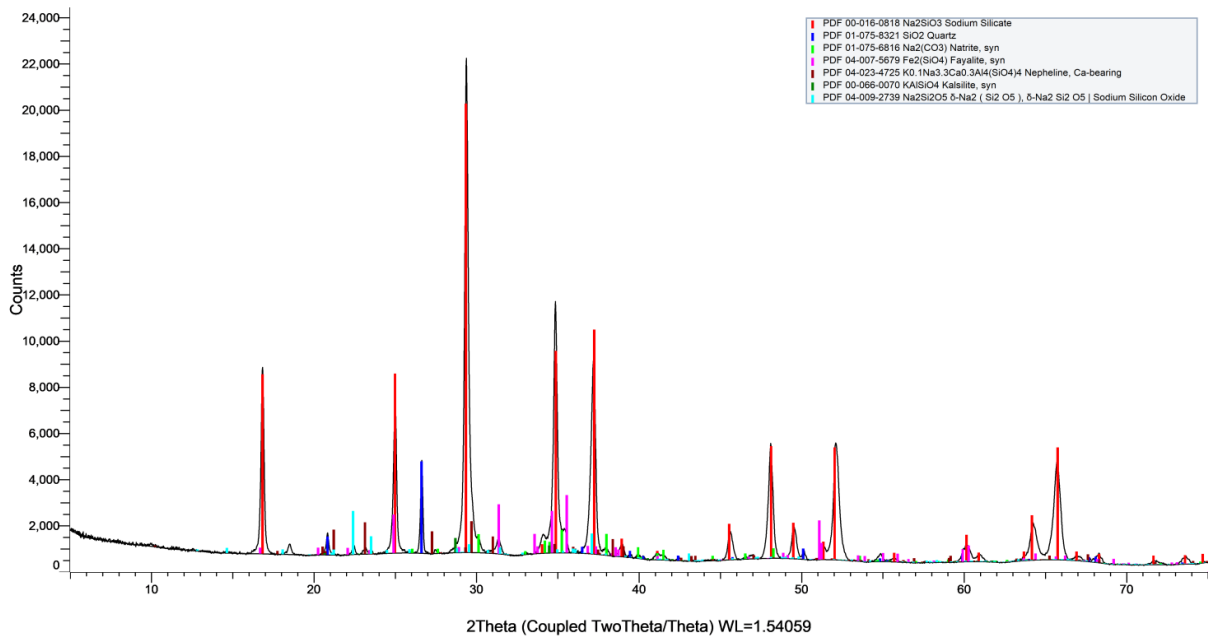
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα XRD δείγματος 500°C

(Coupled TwoTheta/Theta)



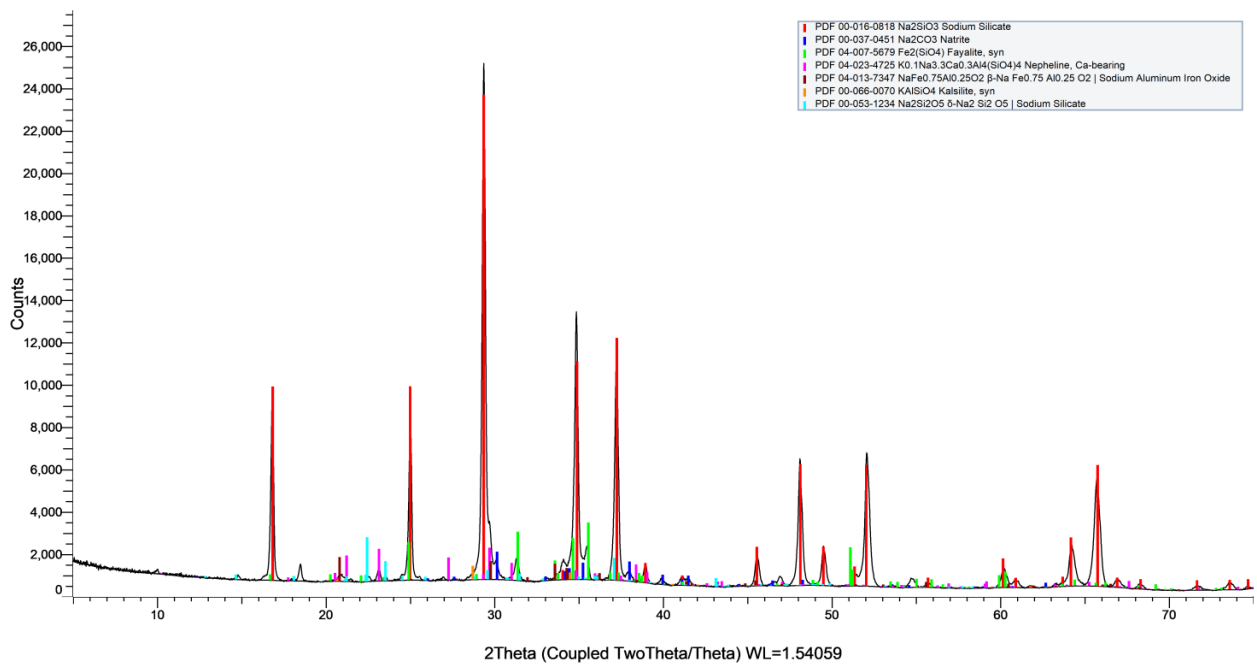
Διάγραμμα 13: Διάγραμμα XRD δείγματος 600°C

(Coupled TwoTheta/Theta)



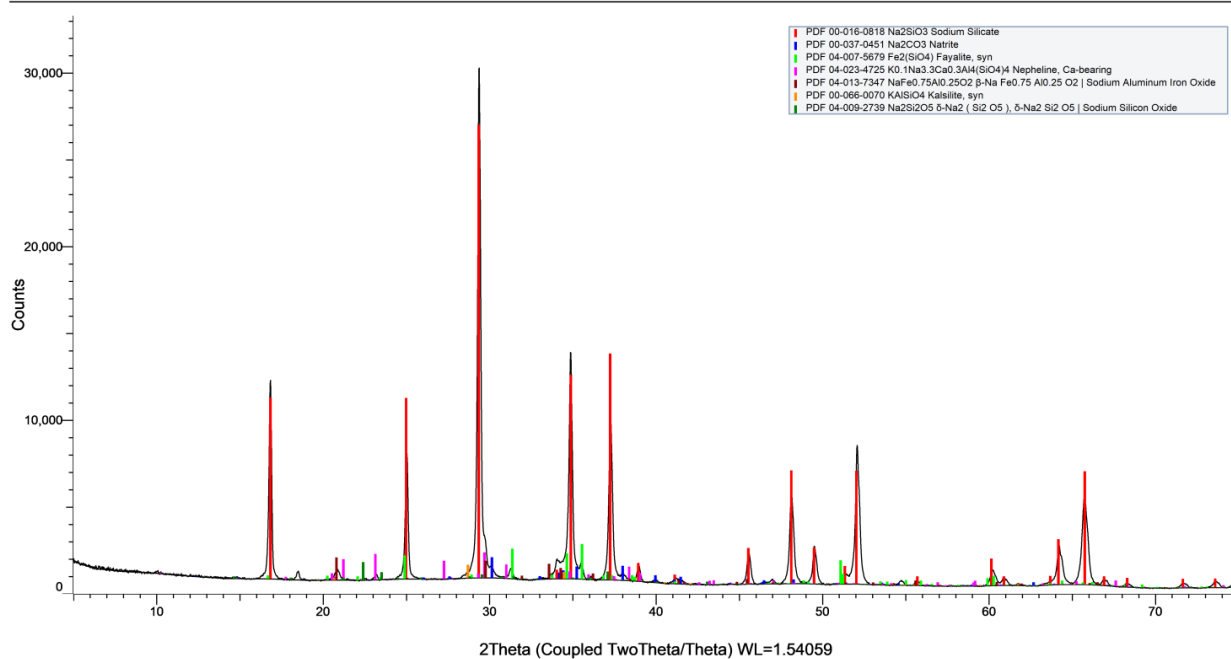
Διάγραμμα 14: Διάγραμμα XRD δείγματος 700°C

(Coupled TwoTheta/Theta)



Διάγραμμα 15: Διάγραμμα XRD δείγματος 800°C

(Coupled TwoTheta/Theta)



Διάγραμμα 16: Διάγραμμα XRD δείγματος 900°C

Β Παράρτημα

Εικόνες αποτελεσμάτων χημικής ανάλυσης με φθορισμό ακτίνων

X

Preset Sample Data
Sample Name: aplite
 Description: Tq-9217
 Method: 29
 Job Number: Pressed tablet, 32 mm
 Sample State: Pressed tablet
 Sample Type: A A A X X X
 Sample Status: Dilution Material: HWC
 Sample Mass (g): 4.0087
 Dilution Mass (g): 1.0071
 Dilution Factor: 0.7992
 Sample rotation: No
 Date of Receipt: 15/06/2022
 Date of Evaluation: 15/06/2022

Results
 The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
11	Na2O		3915	2.21 %	0.13 %
12	MgO		2382	0.218 %	0.031 %
13	Al2O3		247341	6.292 %	0.023 %
14	SiO2		5230241	> 91.09 %	0.11 %
15	P2O5		3573	< 0.0019 %	(0.0) %
16	SO3		5999	< 0.0050 %	(0.0) %
17	Cl	Chlorine	21882	0.03563 %	0.00039 %
19	K2O		43541	2.379 %	0.019 %
20	CaO		26915	1.184 %	0.011 %
22	TiO2		4024	0.0728 %	0.0016 %
23	V2O5		87	0.00157 %	0.00084 %
24	Cr2O3		266	0.0092 %	0.0012 %
25	MnO		536	0.0124 %	0.0010 %
26	Fe2O3		21338	0.3714 %	0.0035 %
27	CoO		70	< 0.00077 %	(0.00031) %
28	NiO		362	0.00219 %	0.00023 %
29	CuO		208	0.00090 %	0.00017 %
30	ZnO		525	0.00155 %	0.00012 %
31	Ga	Gallium	351	0.00071 %	0.00009 %
32	Ge	Germanium	37	0.00006 %	0.00005 %
33	As2O3		0	< 0.00011 %	(0.0) %
34	Se	Selenium	0	< 0.00003 %	(0.0) %
35	Br	Bromine	69	0.00005 %	0.00002 %
37	Rb2O		12037	0.00738 %	0.00009 %
38	SrO		19097	0.01141 %	0.00011 %
39	Y	Yttrium	2504	0.00143 %	0.00008 %
40	ZrO2		223	< 0.068 %	(0.0) %
41	Nb2O5		47	0.00076 %	0.00043 %
42	Mo	Molybdenum	101	0.0059 %	0.0019 %
47	Ag	Silver	406	0.00365 %	0.00033 %
48	Cd	Cadmium	313	0.00289 %	0.00031 %
49	In	Indium	305	> 0.00168 %	0.00024 %
50	SnO2		203	< 0.00037 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	249	0.00195 %	0.00033 %
52	Te	Tellurium	341	0.00334 %	0.00053 %
53	I	Iodine	93	0.00075 %	0.00031 %
55	Cs	Cesium	185	0.00102 %	0.00054 %
56	BaO	Barium	1420	0.0309 %	0.0026 %
57	La	Lanthanum	444	0.0079 %	0.0022 %
58	Ce	Cerium	237	< 0.0040 %	(0.0019) %

Sample Name: **aplite**
 Description: Date of Receipt: 15/06/2022
 Date of Evaluation: 15/06/2022

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
72	Hf	Hafnium	17	< 0.00026 %	(0.00012) %
73	Ta2O5		190	0.00292 %	0.00063 %
74	WO3		11	< 0.00031 %	(0.0) %
80	Hg	Mercury	8	< 0.00006 %	(0.00002) %
81	Tl	Thallium	74	0.00011 %	0.00005 %
82	PbO		876	0.00185 %	0.00012 %
83	Bi	Bismuth	0	< 0.00008 %	(0.0) %
90	Th	Thorium	463	0.00068 %	0.00007 %
92	U	Uranium	456	0.00054 %	0.00012 %

Sum of concentration 103.97 %

Εικόνα 9: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF των ορυκτό απλίτη

Preset Sample Data
Sample Name: 200c
 Description: Tq-9217
 Method: 29
 Job Number: Pressed tablet, 32 mm
 Sample State: Pressed tablet
 Sample Type: A A A X X X
 Sample Status: Dilution Material: HWC
 Sample Mass (g): 4.0110
 Dilution Mass (g): 1.0035
 Dilution Factor: 0.7999
 Sample rotation: No
 Date of Receipt: 15/06/2022
 Date of Evaluation: 15/06/2022

Results
 The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
11	Na2O		47968	> 33.24 %	0.25 %
12	MgO		637	0.077 %	0.025 %
13	Al2O3		48565	1.669 %	0.014 %
14	SiO2		1269782	29.46 %	0.05 %
15	P2O5		1899	0.01026 %	0.00083 %
16	SO3		4176	< 0.00019 %	(0.0) %
17	Cl	Chlorine	126458	0.1610 %	0.0007 %
19	K2O		24865	1.019 %	0.012 %
20	CaO		13116	0.4190 %	0.0061 %
22	TiO2		1853	0.01917 %	0.00066 %
23	V2O5		19	< 0.00081 %	(0.0) %
24	Cr2O3		190	0.00483 %	0.00090 %
25	MnO		293	0.00491 %	0.00063 %
26	Fe2O3		12180	0.1615 %	0.0020 %
27	CoO		74	0.00037 %	0.00027 %
28	NiO		332	0.00143 %	0.00016 %
29	CuO		131	0.00036 %	0.00011 %
30	ZnO		337	0.00070 %	0.00008 %
31	Ga	Gallium	122	0.00016 %	0.00005 %
32	Ge	Germanium	0	< 0.00004 %	(0.0) %
33	As2O3		0	< 0.00006 %	(0.0) %
34	Se	Selenium	6	< 0.00003 %	(0.0) %
35	Br	Bromine	63	0.00003 %	0.00002 %
37	Rb2O		7505	0.00381 %	0.00006 %
38	SrO		11922	0.00592 %	0.00008 %
39	Y	Yttrium	2774	0.00114 %	0.00006 %
40	ZrO2		145	< 0.068 %	(0.0) %
41	Nb2O5		74	0.00099 %	0.00036 %
42	Mo	Molybdenum	162	0.0075 %	0.0015 %
47	Ag	Silver	549	0.00425 %	0.00031 %
48	Cd	Cadmium	305	0.00341 %	0.00041 %
49	In	Indium	253	> 0.00123 %	0.00019 %
50	SnO2		124	< 0.00035 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	188	0.00123 %	0.00029 %
52	Te	Tellurium	322	0.00285 %	0.00047 %
53	I	Iodine	336	0.00401 %	0.00055 %
55	Cs	Cesium	416	0.0044 %	0.0011 %
56	BaO	Barium	704	0.0134 %	0.0022 %
57	La	Lanthanum	444	0.0077 %	0.0022 %
58	Ce	Cerium	159	< 0.0039 %	(0.0) %

Sample Name: **200c**
 Description: Date of Receipt: 15/06/2022
 Date of Evaluation: 15/06/2022

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
72	Hf	Hafnium	0	< 0.00018 %	(0.0) %
73	Ta2O5		247	0.00272 %	0.00041 %
74	WO3		25	0.00015 %	0.00015 %
80	Hg	Mercury	42	0.00008 %	0.00005 %
81	Tl	Thallium	38	< 0.00006 %	(0.00001) %
82	PbO		541	0.00081 %	0.00008 %
83	Bi	Bismuth	0	< 0.00006 %	(0.0) %
90	Th	Thorium	371	0.00039 %	0.00005 %
92	U	Uranium	573	0.00053 %	0.00009 %

Sum of concentration 66.32 %

Εικόνα 10: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 200°C

Preset Sample Data

Sample Name: **300c** Dilution Material: HWC
 Description: Sample Mass (g): 4,0300
 Method: Tq-9217 Dilution Factor: 1,0017
 Job Number: 29 Sample rotation: No
 Sample State: Pressed tablet, 32 mm Date of Receipt: 15/06/2022
 Sample Type: Pressed tablet Date of Evaluation: 15/06/2022
 Sample Status: A A A X X X

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
11	Na2O		67322	> 42,54 %	0,26 %
12	MgO		750	0,111 %	0,028 %
13	Al2O3		46012	1,653 %	0,014 %
14	SiO2		1099735	25,22 %	0,04 %
15	P2O5		1863	0,01105 %	0,00080 %
16	SO3		3672	< 0,00050 %	(0,0) %
17	Cl	Chlorine	22748	0,02839 %	0,00030 %
19	K2O		28903	1,165 %	0,012 %
20	CaO		13306	0,4200 %	0,0059 %
22	TiO2		1959	0,01918 %	0,00062 %
23	V2O5		74	0,00081 %	0,00039 %
24	Cr2O3		139	0,00340 %	0,00084 %
25	MnO		367	0,00607 %	0,00064 %
26	Fe2O3		12789	0,1654 %	0,0020 %
27	CoO		99	0,00053 %	0,00030 %
28	NiO		457	0,00194 %	0,00017 %
29	CuO		206	0,00061 %	0,00012 %
30	ZnO		290	0,00059 %	0,00007 %
31	Ga	Gallium	159	0,00021 %	0,00006 %
32	Ge	Germanium	0	< 0,00004 %	(0,0) %
33	As2O3		0	< 0,00006 %	(0,0) %
34	Se	Selenium	0	< 0,00003 %	(0,0) %
35	Br	Bromine	86	0,00004 %	0,00002 %
37	Rb2O		7023	0,02342 %	0,00006 %
38	SiO		12200	0,00580 %	0,00007 %
39	Y	Yttrium	2875	0,00116 %	0,00005 %
40	ZrO2		103	< 0,068 %	(0,0) %
41	Nb2O5		135	0,00202 %	0,00040 %
42	Mo	Molybdenum	98	0,00045 %	0,00016 %
47	Ag	Silver	455	0,00347 %	0,00030 %
48	Cd	Cadmium	406	0,00432 %	0,00038 %
49	In	Indium	370	> 0,00178 %	0,00019 %
50	SnO2		185	< 0,00035 %	(0,0) %
51	Sb	Antimony	247	0,00174 %	0,00033 %
52	Te	Tellurium	120	0,00041 %	0,00019 %
53	I	Iodine	300	0,00348 %	0,00094 %
55	Cs	Cesium	207	0,00129 %	0,00061 %
56	BaO	Barium	933	0,0184 %	0,0023 %
57	La	Lanthanum	367	0,0054 %	0,0019 %
58	Ce	Cerium	331	0,0054 %	0,0023 %

Date: 15/06/2022

Page 1

Sample Name: 300c

Date of Receipt: 15/06/2022

Date of Evaluation: 15/06/2022

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
72	Hf	Hafnium	0	< 0,00020 %	(0,0) %
73	Ta2O5		242	0,00261 %	0,00046 %
74	WO3		0	< 0,00024 %	(0,0) %
80	Hg	Mercury	11	< 0,00006 %	(0,00002) %
81	Tl	Thallium	28	< 0,00006 %	(0,0) %
82	PbO	Bismuth	574	0,00085 %	0,00008 %
83	Bi	Bismuth	0	< 0,00006 %	(0,0) %
90	Th	Thorium	321	0,00033 %	0,00005 %
92	U	Uranium	651	0,00062 %	0,00009 %

Sum of concentration 71,42 %

Date: 15/06/2022

Page 2

Εικόνα 11: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 300°C

Preset Sample Data

Sample Name: **400c** Dilution Material: HWC
 Description: Sample Mass (g): 4,0129
 Method: Tq-9217 Dilution Factor: 1,0155
 Job Number: 29 Dilution Factor: 0,7980
 Sample State: Pressed tablet, 32 mm Sample rotation: No
 Sample Type: Pressed tablet Date of Receipt: 15/06/2022
 Sample Status: A A A X X X Date of Evaluation: 15/06/2022

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
11	Na2O		52576	> 36,36 %	0,25 %
12	MgO		561	0,082 %	0,027 %
13	Al2O3		40659	1,418 %	0,013 %
14	SiO2		1106056	26,00 %	0,05 %
15	P2O5		1862	0,01091 %	0,00078 %
16	SO3		3778	< 0,00050 %	(0,0) %
17	Cl	Chlorine	19781	0,02477 %	0,00028 %
19	K2O		21582	0,8690 %	0,0100 %
20	CaO		12818	0,4006 %	0,0056 %
22	TiO2		2794	0,03349 %	0,00090 %
23	V2O5		72	0,00077 %	0,00040 %
24	Cr2O3		113	0,00263 %	0,00075 %
25	MnO		302	0,00494 %	0,00061 %
26	Fe2O3		12824	0,1664 %	0,0020 %
27	CoO		87	0,00044 %	0,00028 %
28	NiO		434	0,00182 %	0,00016 %
29	CuO		193	0,00057 %	0,00011 %
30	ZnO		308	0,00062 %	0,00007 %
31	Ga	Gallium	186	0,00025 %	0,00006 %
32	Ge	Germanium	0	< 0,00003 %	(0,0) %
33	As2O3		0	< 0,00006 %	(0,0) %
34	Se	Selenium	0	< 0,00002 %	(0,0) %
35	Br	Bromine	55	0,00003 %	0,00002 %
37	Rb2O		7173	0,03358 %	0,00006 %
38	SiO		12062	0,00589 %	0,00007 %
39	Y	Yttrium	2670	0,00107 %	0,00005 %
40	ZrO2		152	< 0,068 %	(0,0) %
41	Nb2O5		112	0,00166 %	0,00041 %
42	Mo	Molybdenum	30	0,0014 %	0,00014 %
47	Ag	Silver	519	0,00396 %	0,00033 %
48	Cd	Cadmium	373	0,00418 %	0,00040 %
49	In	Indium	253	> 0,00122 %	0,00020 %
50	SnO2		112	< 0,00035 %	(0,0) %
51	Sb	Antimony	244	0,00172 %	0,00031 %
52	Te	Tellurium	263	0,00212 %	0,00041 %
53	I	Iodine	398	0,00481 %	0,00097 %
55	Cs	Cesium	304	0,00274 %	0,00090 %
56	BaO	Barium	783	0,0151 %	0,0022 %
57	La	Lanthanum	485	0,0088 %	0,0023 %
58	Ce	Cerium	140	< 0,0039 %	(0,0) %

Date: 15/06/2022

Page 1

Sample Name: 400c

Date of Receipt: 15/06/2022

Date of Evaluation: 15/06/2022

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
72	Hf	Hafnium	0	< 0,00018 %	(0,0) %
73	Ta2O5		204	0,00217 %	0,00043 %
74	WO3		0	< 0,00022 %	(0,0) %
80	Hg	Mercury	9	< 0,00005 %	(0,00002) %
81	Tl	Thallium	33	< 0,00006 %	(0,0) %
82	PbO	Bismuth	593	0,00087 %	0,00007 %
83	Bi	Bismuth	0	< 0,00006 %	(0,0) %
90	Th	Thorium	382	0,00039 %	0,00005 %
92	U	Uranium	491	0,00042 %	0,00008 %

Sum of concentration 65,44 %

Date: 15/06/2022

Page 2

Εικόνα 12: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 400°C

Preset Sample Data

Sample Name:	500c	Dilution Material:	HWC
Description:	Tq-9217	Sample Mass (g):	4,0183
Method:	29	Dilution Mass (g):	1,0163
Job Number:	29	Dilution Factor:	0,7981
Sample State:	Pressed tablet, 32 mm	Sample rotation:	No
Sample Type:	Pressed tablet	Date of Receipt:	15/06/2022
Sample Status:	A A X X X	Date of Evaluation:	15/06/2022

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
11	Na2O		52816	> 34,95 %	0,25 %
12	MgO		915	0,121 %	0,027 %
13	Al2O3		44931	1,411 %	0,013 %
14	SiO2		1371461	31,08 %	0,05 %
15	P2O5		2167	0,01246 %	0,00090 %
16	SO3		4357	< 0,00022 %	(0,0) %
17	Cl	Chlorine	151512	0,1934 %	0,0008 %
18	K2O		20177	0,630 %	0,011 %
20	CaO		13527	0,4321 %	0,0059 %
22	TiO2		1902	0,02055 %	0,00071 %
23	V2O5		141	0,00213 %	0,00054 %
24	Cr2O3		99	0,00232 %	0,00076 %
25	MnO		347	0,00584 %	0,00064 %
26	Fe2O3		12321	0,1625 %	0,0020 %
27	CoO		95	< 0,00053 %	0,00031 %
28	NiO		369	0,00159 %	0,00017 %
29	CuO		128	0,00036 %	0,00011 %
30	ZnO		274	0,00057 %	0,00007 %
31	Ga	Gallium	148	0,00020 %	0,00006 %
32	Ge	Germanium	0	< 0,00004 %	(0,0) %
33	As2O3		0	< 0,00006 %	(0,0) %
34	Se	Selenium	0	< 0,00002 %	(0,0) %
35	Br	Bromine	39	0,00002 %	0,00002 %
37	Rb2O		7554	0,00378 %	0,00006 %
38	SrO		12277	0,00600 %	0,00008 %
39	Y	Yttrium	2578	0,00106 %	0,00006 %
40	ZrO2		103	< 0,068 %	(0,0) %
41	Nb2O5		53	0,00066 %	0,00030 %
42	Mo	Molybdenum	117	0,00053 %	0,00016 %
47	Ag	Silver	566	0,00433 %	0,00031 %
48	Cd	Cadmium	373	0,00402 %	0,00038 %
49	In	Indium	354	> 0,00170 %	0,00020 %
50	SnO2		187	< 0,00034 %	(0,0) %
51	Sb	Antimony	132	0,00071 %	0,00024 %
52	Te	Tellurium	216	0,00155 %	0,00039 %
53	I	Iodine	375	0,00448 %	0,00058 %
55	Cs	Cesium	308	0,00278 %	0,00090 %
56	BaO	Barium	626	0,0115 %	0,0021 %
57	La	Lanthanum	280	0,0029 %	0,0013 %
58	Ce	Cerium	153	< 0,0038 %	(0,0) %

Sample Name: **500c** Date of Receipt: 15/06/2022
 Description: Date of Evaluation: 15/06/2022

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
72	Hf	Hafnium	0	< 0,00019 %	(0,0) %
73	Ta2O5		228	0,00250 %	0,00047 %
74	WO3		0	< 0,00023 %	(0,0) %
80	Hg	Mercury	43	0,00008 %	0,00006 %
81	Tl	Thallium	55	0,00005 %	0,00003 %
82	PbO		470	0,00071 %	0,00008 %
83	Bi	Bismuth	0	< 0,00006 %	(0,0) %
90	Th	Thorium	387	0,00041 %	0,00005 %
92	U	Uranium	356	0,00026 %	0,00007 %

Sum of concentration 69,28 %

Εικόνα 13: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 500°C

Preset Sample Data

Sample Name:	600c	Dilution Material:	HWC
Description:	Tq-9217	Sample Mass (g):	4,0236
Method:	29	Dilution Mass (g):	1,0033
Job Number:	29	Dilution Factor:	0,8004
Sample State:	Pressed tablet, 32 mm	Sample rotation:	No
Sample Type:	Pressed tablet	Date of Receipt:	15/06/2022
Sample Status:	A A X X X	Date of Evaluation:	15/06/2022

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
11	Na2O		55609	> 40,77 %	0,28 %
12	MgO		374	0,053 %	0,027 %
13	Al2O3		37579	1,281 %	0,012 %
14	SiO2		1232134	31,21 %	0,05 %
15	P2O5		1711	0,00919 %	0,00074 %
16	SO3		3307	< 0,00050 %	(0,0) %
17	Cl	Chlorine	17683	0,02448 %	0,00029 %
19	K2O		20875	0,930 %	0,012 %
20	CaO		13842	0,4791 %	0,0064 %
22	TiO2		1836	0,02025 %	0,00070 %
23	V2O5		70	0,00082 %	0,00039 %
24	Cr2O3		129	0,00345 %	0,00090 %
25	MnO		349	0,00636 %	0,00069 %
26	Fe2O3		12329	0,1769 %	0,0022 %
27	CoO		85	0,00048 %	0,00031 %
28	NiO		366	0,00171 %	0,00017 %
29	CuO		158	< 0,00007 %	(0,0) %
30	ZnO		283	0,00063 %	0,00008 %
31	Ga	Gallium	164	0,00024 %	0,00006 %
32	Ge	Germanium	0	< 0,00004 %	(0,0) %
33	As2O3		0	< 0,00007 %	(0,0) %
34	Se	Selenium	0	< 0,00003 %	(0,0) %
35	Br	Bromine	0	< 0,00002 %	(0,0) %
37	Rb2O		7408	0,00405 %	0,00007 %
38	SrO		12696	0,00679 %	0,00008 %
39	Y	Yttrium	2957	0,00131 %	0,00006 %
40	ZrO2		181	< 0,068 %	(0,0) %
41	Nb2O5		141	0,00228 %	0,00044 %
42	Mo	Molybdenum	93	0,00345 %	0,0015 %
47	Ag	Silver	549	0,00443 %	0,00030 %
48	Cd	Cadmium	358	0,00425 %	0,00041 %
49	In	Indium	303	> 0,00154 %	0,00019 %
50	SnO2		75	< 0,00037 %	(0,0) %
51	Sb	Antimony	66	< 0,00025 %	(0,00013) %
52	Te	Tellurium	313	0,00283 %	0,00047 %
53	I	Iodine	221	0,00251 %	0,00088 %
55	Cs	Cesium	318	0,00305 %	0,00096 %
56	BaO	Barium	730	0,0143 %	0,0023 %
57	La	Lanthanum	206	< 0,0026 %	(0,00090) %
58	Ce	Cerium	103	< 0,0040 %	(0,0) %

Sample Name: **600c** Date of Receipt: 15/06/2022
 Description: Date of Evaluation: 15/06/2022

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
72	Hf	Hafnium	0	< 0,00020 %	(0,0) %
73	Ta2O5		200	0,00236 %	0,00047 %
74	WO3		0	< 0,00025 %	(0,0) %
80	Hg	Mercury	18	< 0,00006 %	(0,00004) %
81	Tl	Thallium	20	< 0,00006 %	(0,0) %
82	PbO		542	0,00088 %	0,00008 %
83	Bi	Bismuth	0	< 0,00006 %	(0,0) %
90	Th	Thorium	333	0,00037 %	0,00005 %
92	U	Uranium	435	0,00039 %	0,00008 %

Sum of concentration 75,03 %

Εικόνα 14: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 600°C

Preset Sample Data		Dilution Material:		HWC
Sample Name:	700c	Sample Mass (g):	4,0156	
Description:		Dilution Mass (g):	1,0195	
Method:	Tq-9217	Dilution Factor:	0,7974	
Job Number:	29	Sample rotation:	No	
Sample State:	Pressed tablet, 32 mm	Date of Receipt:	15/06/2022	
Sample Type:	Pressed tablet	Date of Evaluation:	15/06/2022	
Sample Status:	A A A X X X			

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
11	Na2O		42924	> 33,80 %	0,26 %
12	MgO		285	0,040 %	0,023 %
13	Al2O3		27911	0,977 %	0,011 %
14	SiO2		854397	21,70 %	0,04 %
15	P2O5		1519	0,00947 %	0,00074 %
16	SO3		3081	< 0,0050 %	(0,0) %
17	Cl	Chlorine	16152	0,02043 %	0,00025 %
19	K2O		17657	0,7122 %	0,0097 %
20	CaO		12904	0,4015 %	0,0055 %
22	TiO2		1649	0,01568 %	0,00058 %
23	V2O5		65	0,00064 %	0,00032 %
24	Cr2O3		149	0,00362 %	0,00082 %
25	MnO		328	0,00534 %	0,00061 %
26	Fe2O3		12452	0,1635 %	0,0020 %
27	CoO		47	< 0,0042 %	(0,00016) %
28	NiO		389	0,00162 %	0,00016 %
29	CuO		199	0,00057 %	0,00012 %
30	ZnO		301	0,00050 %	0,00007 %
31	Ga	Gallium	203	0,00027 %	0,00006 %
32	Ge	Germanium	8	< 0,00004 %	(0,00001) %
33	As2O3		0	< 0,00006 %	(0,0) %
34	Se	Selenium	0	< 0,00002 %	(0,0) %
35	Br	Bromine	103	0,00005 %	0,00002 %
37	Rb2O		6456	0,00337 %	0,00006 %
38	SiO		11915	0,00609 %	0,00008 %
39	Y	Yttrium	5106	0,00203 %	0,00006 %
40	ZrO2		280	< 0,068 %	(0,0) %
41	Nb2O5		102	0,00134 %	0,00036 %
42	Mo	Molybdenum	18	< 0,0012 %	(0,00032) %
47	Ag	Silver	512	0,00394 %	0,00029 %
48	Cd	Cadmium	412	0,00507 %	0,00045 %
49	In	Indium	189	> 0,0052 %	0,00020 %
50	SnO2		79	< 0,0040 %	(0,0) %
51	Sb	Antimony	188	0,00123 %	0,00030 %
52	Te	Tellurium	241	0,00188 %	0,00040 %
53	I	Iodine	211	0,00221 %	0,00050 %
55	Cs	Cesium	234	0,00171 %	0,00074 %
56	BaO	Barium	633	0,0119 %	0,0022 %
57	La	Lanthanum	257	< 0,0027 %	(0,0023) %
58	Ce	Cerium	191	< 0,0040 %	(0,0) %

Date: 15/06/2022

Page 1

Sample Name:		Date of Receipt:		15/06/2022	
Description:		Date of Evaluation:		15/06/2022	
Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
72	Hf	Hafnium	24	0,00013 %	0,00013 %
73	Ta2O5		238	0,00251 %	0,00043 %
74	WO3		0	< 0,00022 %	(0,0) %
80	Hg	Mercury	0	< 0,00006 %	(0,0) %
81	Tl	Thallium	0	< 0,00006 %	(0,0) %
82	PbO		561	0,00081 %	0,00008 %
83	Bi	Bismuth	0	< 0,00006 %	(0,0) %
90	Th	Thorium	335	0,00034 %	0,00005 %
92	U	Uranium	506	0,00044 %	0,00008 %

Sum of concentration 57,90 %

Date: 15/06/2022

Page 2

Εικόνα 15: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 700°C

Preset Sample Data

Sample Name:	800c	Dilution Material:	HWC
Description:		Sample Mass (g):	4.0264
Method:	Ta-9217	Dilution Mass (g):	1.0095
Job Number:	29	Dilution Factor:	0.7395
Sample State:	Pressed tablet, 32 mm	Sample rotation:	No
Sample Type:	Pressed tablet	Date of Receipt:	15/06/2022
Sample Status:	A A A X X X	Date of Evaluation:	15/06/2022

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
11	Na2O		52575	> 36.41 %	0.26 %
12	MgO		381	0.053 %	0.026 %
13	Al2O3		34938	1.069 %	0.011 %
14	SiO2		1220715	28.87 %	0.05 %
15	P2O5		1649	0.00804 %	0.00067 %
16	SO3		2835	< 0.00050 %	(0.0) %
17	Cl	Chlorine	15306	0.01975 %	0.00026 %
19	K2O		18512	0.7890 %	0.0100 %
20	CaO		12583	0.4048 %	0.0056 %
22	TiO2		1641	0.01555 %	0.00056 %
23	V2O5		38	< 0.00075 %	(0.00015) %
24	Cr2O3		132	0.00330 %	0.00085 %
25	MnO		317	0.00532 %	0.00063 %
26	Fe2O3		11777	0.1553 %	0.0020 %
27	CoO		0	< 0.00043 %	(0.0) %
28	NiO		393	0.00169 %	0.00017 %
29	CuO		270	0.00085 %	0.00012 %
30	ZnO		298	0.00062 %	0.00007 %
31	Ga	Gallium	198	0.00028 %	0.00006 %
32	Ge	Germanium	0	< 0.00004 %	(0.0) %
33	As2O3		0	< 0.00006 %	(0.0) %
34	Se	Selenium	0	< 0.00003 %	(0.0) %
35	Br	Bromine	17	< 0.00002 %	(0.00001) %
37	Rb2O		5059	0.00256 %	0.00005 %
38	SrO		12846	0.00635 %	0.00008 %
39	Y	Yttrium	5003	0.00204 %	0.00005 %
40	ZrO2		133	< 0.0068 %	(0.0) %
41	Nb2O5		82	0.00096 %	0.00032 %
42	Mo	Molybdenum	170	0.00078 %	0.00014 %
47	Ag	Silver	413	0.00317 %	0.00026 %
48	Cd	Cadmium	450	0.00503 %	0.00042 %
49	In	Indium	329	> 0.00159 %	0.00020 %
50	SnO2		219	< 0.00028 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	223	0.00153 %	0.00029 %
52	Te	Tellurium	284	0.00238 %	0.00042 %
53	I	Iodine	349	0.00416 %	0.00096 %
55	Cs	Cesium	426	0.0046 %	0.0011 %
56	BaO	Barium	756	0.0145 %	0.0022 %
57	La	Lanthanum	300	0.0035 %	0.0014 %
58	Ce	Cerium	316	0.0048 %	0.0021 %

Sample Name: **800c** Date of Receipt: 15/06/2022
 Description: Date of Evaluation: 15/06/2022

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
72	Hf	Hafnium	0	< 0.00019 %	(0.0) %
73	Ta2O5		165	0.00145 %	0.00037 %
74	WO3		0	< 0.00023 %	(0.0) %
80	Hg	Mercury	46	0.00009 %	0.00006 %
81	Tl	Thallium	0	< 0.00006 %	(0.0) %
82	PbO		521	0.00078 %	0.00007 %
83	Bi	Bismuth	0	< 0.00006 %	(0.0) %
90	Th	Thorium	289	0.00030 %	0.00005 %
92	U	Uranium	414	0.00033 %	0.00007 %

Sum of concentration 67.85 %

Εικόνα 16: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 800°C

Preset Sample Data

Sample Name:	900aplnaoh	Dilution Material:	HWC
Description:		Sample Mass (g):	4.0151
Method:	Ta-9217	Dilution Mass (g):	1.0386
Job Number:	9	Dilution Factor:	0.7345
Sample State:	Pressed tablet, 32 mm	Sample rotation:	No
Sample Type:	Pressed tablet	Date of Receipt:	02/02/2023
Sample Status:	A A A X X X	Date of Evaluation:	02/02/2023

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
11	Na2O		72080	> 40.63 %	0.24 %
12	MgO		727	0.098 %	0.030 %
13	Al2O3		44212	1.136 %	0.010 %
14	SiO2		1738484	36.70 %	0.05 %
15	P2O5		2451	0.01288 %	0.00081 %
16	SO3		4838	< 0.00050 %	(0.0) %
17	Cl	Chlorine	7907	0.01015 %	0.00019 %
19	K2O		11000	0.4601 %	0.0092 %
20	CaO		13874	0.4475 %	0.0059 %
22	TiO2		1136	0.00824 %	0.00037 %
23	V2O5		91	0.00117 %	0.00040 %
24	Cr2O3		158	0.00391 %	0.00068 %
25	MnO		461	0.00782 %	0.00072 %
26	Fe2O3		23356	0.3059 %	0.0027 %
27	CoO		167	0.00100 %	0.00047 %
28	NiO		469	0.00208 %	0.00018 %
29	CuO		217	0.00068 %	0.00013 %
30	ZnO		286	0.00062 %	0.00008 %
31	Ga	Gallium	130	0.00018 %	0.00006 %
32	Ge	Germanium	0	< 0.00004 %	(0.0) %
33	As2O3		0	< 0.00006 %	(0.0) %
34	Se	Selenium	0	< 0.00003 %	(0.0) %
35	Br	Bromine	109	0.00006 %	0.00002 %
37	Rb2O		3929	0.00189 %	0.00005 %
38	SrO		10238	0.00480 %	0.00007 %
39	Y	Yttrium	2782	0.00116 %	0.00005 %
40	ZrO2		107	< 0.0068 %	(0.0) %
41	Nb2O5		56	0.00075 %	0.00034 %
42	Mo	Molybdenum	10	< 0.0013 %	(0.00048) %
47	Ag	Silver	512	0.00380 %	0.00031 %
48	Cd	Cadmium	413	0.00403 %	0.00036 %
49	In	Indium	262	> 0.00126 %	0.00019 %
50	SnO2		0	< 0.00043 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	156	0.00093 %	0.00029 %
52	Te	Tellurium	253	0.00198 %	0.00042 %
53	I	Iodine	173	0.00175 %	0.00082 %
55	Cs	Cesium	191	0.00104 %	0.00054 %
56	BaO	Barium	578	0.0103 %	0.0021 %
57	La	Lanthanum	256	< 0.0026 %	(0.0022) %
58	Ce	Cerium	153	< 0.0038 %	(0.0) %

Sample Name: **900aplnaoh** Date of Receipt: 02/02/2023
 Description: Date of Evaluation: 02/02/2023

Z	Symbol	Element	No. of Impulses	Concentration	Abs. Error
72	Hf	Hafnium	23	0.00013 %	0.00013 %
73	Ta2O5		212	0.00239 %	0.00050 %
74	WO3		0	< 0.00023 %	(0.0) %
80	Hg	Mercury	17	< 0.00006 %	(0.00003) %
81	Tl	Thallium	48	< 0.00006 %	(0.00003) %
82	PbO		332	0.00051 %	0.00008 %
83	Bi	Bismuth	0	< 0.00006 %	(0.0) %
90	Th	Thorium	291	0.00031 %	0.00005 %
92	U	Uranium	370	0.00028 %	0.00006 %

Sum of concentration 79.86 %

Εικόνα 17: Εικόνα αποτελεσμάτων XRF το δείγμα των 900°C

