

ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΟΛΥΜΟΡΦΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΦΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΠΕΛΙΤΗ ΣΕ ΜΠΕΛΙΤΙΚΟ ΘΕΙΟΑΛΟΥΜΙΝΙΚΟ ΚΛΙΝΚΕΡ

Δ. Κουμπούρη^{1,2*}, Ν. Πιστοφίδης², Γ. Μπασκούτας², Μ. Σ. Κατσιώτης², Β. Κυλίκουλου¹

¹Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Αθήνα, Ελλάδα

²Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, Αθήνα, Ελλάδα

(*d.koumpouri@inn.demokritos.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας και της διάρκειας έψησης στον σχηματισμό και πολυμορφισμό του μπελίτη κατά την παραγωγή μπελιτικού θειο-αλουμινικού (BCSA) κλίνκερ. Για το λόγο αυτό παρήχθη BCSA κλίνκερ με περιεκτικότητα 40% κ.β. σε μπελίτη και 40% κ.β. σε γελεμίτη, σε τέσσερις θερμοκρασίες έψησης 1270°C, 1300°C, 1320°C και 1340°C και τρεις χρόνους παραμονής 20min, 30min και 60min για την εκάστοτε θερμοκρασία. Η αξιολόγηση του σχηματισμού και του πολυμορφικού μετασχηματισμού του μπελίτη στα παραγόμενα κλίνκερ πραγματοποιήθηκε με τη χρήση XRD/QXRD και SEM/EDS. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, η αύξηση των συνθηκών έψησης οδηγεί στην αύξηση του συνολικού μπελίτη στο κλίνκερ. Όσον αφορά τον πολυμορφισμό του μπελίτη, η πιο δραστική α_{H'}- δομή, η οποία συνήθως σχηματίζεται σε υψηλή θερμοκρασία, φαίνεται να έχει την υψηλότερη τιμή της στις χαμηλότερες συνθήκες παραγωγής.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μπελιτικά θειο-αλουμινικά (Belite-Calcium Sulfo-Aluminate-BCSA) τσιμέντα αποτελούν μία από τις επικρατέστερες εναλλακτικές λύσεις που προτείνονται για το κοινό τσιμέντο Portland (OPC), λόγω του χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος τους. Η παραγωγή χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα των BCSA κλίνκερ, αποδίδεται σε δύο κύριους παράγοντες: i) την τροποποίηση της χημείας του μίγματος των πρώτων υλών, γεγονός που οδηγεί στη μειωμένη απαίτηση ασβεστολίθου και κατά συνέπεια σε χαμηλότερες εκπομπές CO₂ κατά τη διάρκεια απανθράκωσής του στον κλίβανο και ii) τη μειωμένη θερμοκρασία κλινκεροποίησης (~1250°C, σε αντίθεση με ~1450°C για το OPC), που συνεπάγεται μειωμένη κατανάλωση καυσίμων^[1-4]. Επιπροσθέτως, τα BCSA τσιμέντα αναπτύσσουν ιδιότητες συγκρίσιμες ή και βελτιωμένες σε σχέση με το OPC, καθώς επίσης έχουν και τη δυνατότητα να αναπτύσουν ειδικά διαμορφωμένες/προσαρμοσμένες ιδιότητες (υψηλές πρώιμες αντοχές, ταχεία πήξη).

Οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις των BCSA είναι ο γελεμίτης-C₄A₃Ŝ και ο μπελίτης-C₂S, στις οποίες οφείλεται και η ανάπτυξη των πρώιμων και ύστερων αντοχών αντίστοιχα^[3], καθώς και η φάση του φερρίτη-C₄AF (συντομογραφία C:CaO, S:SiO₂, A:Al₂O₃, Ŝ:SO₃, F:Fe₂O₃, T:TiO₂). Ο μπελίτης ανάλογα με τη θερμοκρασία σχηματισμού του, από τους 1425°C έως τους 490°C, κρυσταλλώνεται με την ακόλουθη σειρά σε πέντε κύριες πολυμορφικές δομές α → α_{H'} → α_{L'} → β → γ^[5]. Η α- δομή του μπελίτη παρουσιάζει τις υψηλότερες υδραυλικές ιδιότητες και ακολουθούν οι α_{H'}-, α_{L'}- και β-δομές. Η μελέτη του σχηματισμού και σταθεροποίησης των πιο ενεργών πολυμορφικών δομών του μπελίτη στο θερμοκρασιακό εύρος παραγωγής των BCSA κλίνκερ έχει μεγάλη σημασία, καθώς ο πολυμορφισμός του μπελίτη δύναται να επηρεάσει τη διαδικασία ενυδάτωσης, συμβάλλοντας ακόμη και στην ενίσχυση της ανάπτυξης των πρώιμων αντοχών. Η σταθεροποίηση ενεργών δομών του μπελίτη μπορεί να επιτευχθεί με φυσικό τρόπο μέσω της ταχείας ψύξης^[6] του κλίνκερ. Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί χημικά, με την ενσωμάτωση “οξειδίων σταθεροποίησης” στο κλίνκερ (B₂O₃, Na₂O, K₂O, P₂O₃, κλπ.), οδηγώντας στην σταθεροποίηση πιο ενεργών δομών του C₂S ακόμα και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες κλινκεροποίησης^[3,7-8].

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην μελέτη του σχηματισμού και του πολυμορφικού μετασχηματισμού του μπελίτη στο BCSA κλίνκερ, σε διαφορετικές συνθήκες κλινκεροποίησης.

Μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας και της διάρκειας έψησης του κλίνκερ όσο αφορά την ορυκτολογική ανάπτυξη του κλίνκερ, καθώς και τον πολυμορφισμό του μπελίτη, μέσω της περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ (XRD/QXRD). Η ενσωμάτωση “σταθεροποιητών” όπως το τιτάνιο και το θείο στη δομή του μπελίτη καθώς και η ανάπτυξη της μικροδομής του, μελετήθηκε με τη χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM/EDS).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για την παραγωγή του BCSA κλίνκερ χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτες ύλες ασβεστόλιθος, σχιστόλιθος, βωξίτης, χαμηλής μεταλλουργικής αξίας διασπορικός βωξίτης (Low-Grade, LG) και γύψος. Ο LG βωξίτης είναι ένα παραπροϊόν της διαδικασίας εξόρυξης του βωξίτη και χρησιμοποιήθηκε αποσκοπώντας στην μερική υποκατάσταση του βωξίτη στο μίγμα των πρώτων υλών. Η χρήση του LG βωξίτη πραγματοποιήθηκε ως εναλλακτική πηγή αλουμινίου στοχεύοντας αφενώς στη μείωση του υψηλού κόστους των πρώτων υλών με υψηλή περιεκτικότητα σε αργίλιο και αφετέρου συμβάλλοντας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της διαχείρισης του συγκεκριμένου χαμηλής ζήτησης προϊόντος.

Ο σχεδιασμός του μίγματος των πρώτων υλών βασίστηκε στις τροποποιημένες εξισώσεις του Bogue (εξισώσεις 1-5) που αφορούν το θερμοδυναμικό σύστημα $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SO}_3$ ^[3], στοχεύοντας στην παραγωγή κλίνκερ με περιεκτικότητα 40% κ.β. σε μπελίτη και 40% κ.β. σε γελεμίτη.

$$\%C_4AF = 3.04(\%Fe_2O_3) \quad (1)$$

$$\%C_4A_3\hat{S} = 1.99(\%Al_2O_3) - 1.27(\%Fe_2O_3) \quad (2)$$

$$\%C_2S = 2.88 (\%SiO_2) \quad (3)$$

$$\%C\hat{S} = 1.70(\%SO_3) - 0.44(\%Al_2O_3) + 0.28(Fe_2O_3) \quad (4)$$

$$\%C = 1.00(\%CaO) - 1.88(\%SiO_2) - 1.05(\%Fe_2O_3) - 0.55(\%Al_2O_3) - 0.70(\%SO_3) \quad (5)$$

Η παραγωγή του BCSA κλίνκερ πραγματοποιήθηκε σε φούρνο αντιστάσεων Carbolite 1600°C, σε τέσσερις θερμοκρασίες έψησης 1270°C, 1300°C, 1320°C και 1340°C και τρεις χρόνους παραμονής 20min, 30min και 60min για την κάθε θερμοκρασία, προκειμένου να μελετηθεί ο σχηματισμός και ο πολυμορφικός μετασχηματισμός της φάσης του μπελίτη. Μετά την έψηση πραγματοποιήθηκε γρήγορη ψύξη του κλίνκερ μέσω θραύσης και ταυτόχρονης παροχής αέρα, προκειμένου να σταθεροποιηθούν οι σχηματισθείσες φάσεις.

Ο έλεγχος του σχηματισμού και της ανάπτυξης των φάσεων του κλίνκερ όσο αφορά την ορυκτολογία και την μικροδομή τους, πραγματοποιήθηκε μέσω περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ (XRD/QXRD) και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM/EDS), αντίστοιχα. Οι μετρήσεις περιθλασιμετρίας πραγματοποιήθηκαν σε εύρος μοιρών 2–70° (2θ), με ακτινοβολία CuKα τάσης 40 kV και έντασης 35 mA, με 0.03°/3 sec step. Η ημιποσοτική ορυκτολογική ανάλυση των φασμάτων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Rietveld, μέσω της χρήση του λογισμικού TOPAS 5[®] (Bruker-AXS). Η ανάλυση της μικροδομής διεξήχθη με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιώντας FEI, Quanta Inspect Instrument εξοπλισμένο με αναλυτή EDAX ultra-thin window και πακέτο λογισμικού ανάλυσης Genesys.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Σχεδιασμός μίγματος πρώτων υλών

Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται η σύσταση του μίγματος των πρώτων υλών, η περιεκτικότητα σε του σε επίπεδο οξειδίων και οι εκτιμώμενες ορυκτολογικές φάσεις όπως αυτές προβλέπονται από τις τροποποιημένες εξισώσεις του Bogue (1-5). Η περιεκτικότητα του μίγματος των πρώτων υλών σε ασβεστόλιθο, σχιστόλιθο, βωξίτη, LG βωξίτη και γύψο είναι 49, 13, 20, 10 και 8 % κ.β., αντίστοιχα. Η μέγιστη δυνατή χρήση του LG βωξίτη στο μίγμα των πρώτων υλών, σύμφωνα με

τους στόχους που καθορίστηκαν για το κλίνκερ και τη χημική σύσταση του LG βωξίτη δεν μπορούσε να υπερβεί το 10 % κ.β..

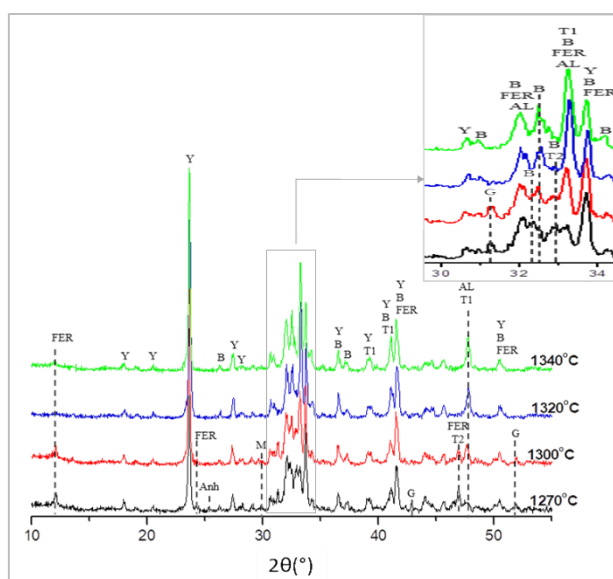
Πίνακας 1. Σύσταση του μίγματος πρώτων υλών, περιεκτικότητα οξειδίων στο μίγμα των πρώτων υλών και η εκτιμώμενη ορυκτολογική σύσταση του κλίνκερ βάσει των τροποποιημένων εξισώσεων του Bogue % κ.β..

Πρώτες ύλες	Περιεκτικότητα οξειδίων		Εκτιμώμενες ορυκτολογικές φάσεις		
	(% κ.β.)				
Ασβεστόλιθος	49.0	SiO ₂	13.6	C ₂ S	39.1
Σχιστόλιθος	13.0	Al ₂ O ₃	23.0	C ₄ A ₃ S̄	38.7
Βωξίτης	20.0	Fe ₂ O ₃	5.6	C ₄ AF	17.0
LG Βωξίτης	10.0	CaO	47.6	C ₂ S	0.2
Γύψος	8.0	MgO	0.8	C	0.0
Σύνολο	100.0	SO ₃	5.2	Σύνολο	95.0
		TiO ₂	3.9		
		Σύνολο	99.7		

Βάσει του σχεδιασμού του μίγματος των πρώτων υλών οι εκτιμώμενες ορυκτολογικές φάσεις του κλίνκερ είναι C₂S, C₄A₃S̄ και C₄AF σε περιεκτικότητα 39.1, 38.7 και 17.0 % κ.β., αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, το μίγμα των πρώτων υλών σχεδιάστηκε στοχεύοντας στην μικρότερη δυνατή παρουσία ελευθέρου ασβέστου και του ανυδρίτη στο παραγόμενο κλίνκερ. Το συνολικό ποσό των προβλεπόμενων φάσεων ήταν 95.0% κ.β., γεγονός το οποίο οφείλεται στην παρουσία του TiO₂ (3.9 % κ.β.) στο μίγμα των πρώτων υλών. Η παρουσία TiO₂ στα BCSA τιμμένα συνδέεται άμεσα με την υψηλή περιεκτικότητα βωξίτη στο μίγμα των πρώτων υλών, ο οποίος είναι η βασική και απαραίτητη πηγή Al₂O₃. Η ποσότητα TiO₂ στο βωξίτη κυμαίνεται μεταξύ 1-8% κ.β. ανάλογα με την προέλευσή του [9].

Ορυκτολογική ανάλυση κλίνκερ

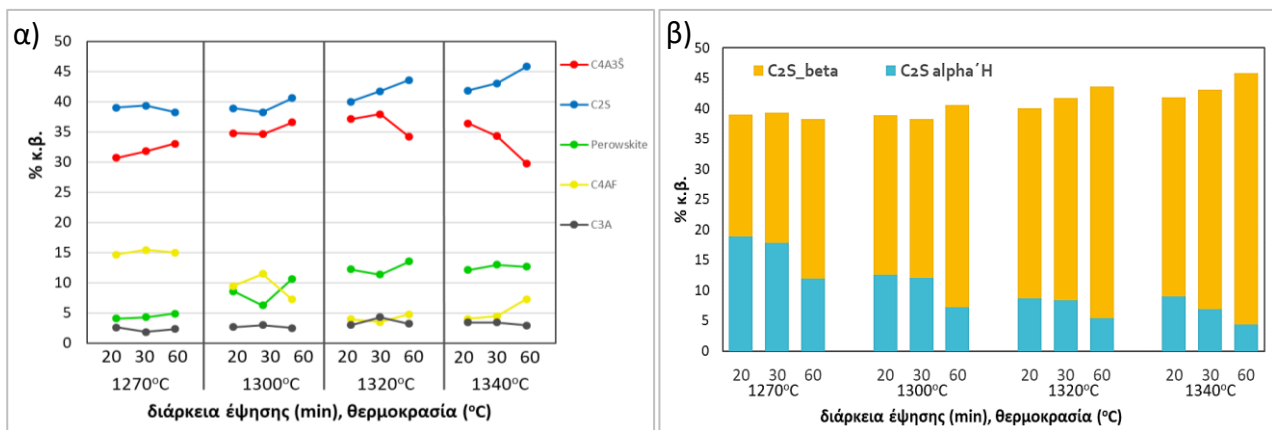
Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα XRD των κλίνκερ που παρήχθησαν στους 1270°C, 1300°C, 1320°C και 1340°C για διάρκεια έψησης 30 min.



Σχήμα 2. Διαγράμματα XRD των παραγόμενων κλίνκερ σε θερμοκρασία 1270°C, 1300°C, 1320°C και 1340°C και διάρκεια έψησης 30 min (Y: C₄A₃S̄, B: C₂S, FER: C₄AF, T1: CaTiO₃, T2: Ca₃Fe₂TiO₈, G: C₂AS, AL: C₃A, Anh: C₂S̄, M: C₁₂A₇).

Οι φάσεις που ταυτοποιήθηκαν σε όλα τα παραγόμενα κλίνκερ, ήταν ο μπελίτης- C_2S , ο γελεμίτης- $C_4A_3\bar{S}$ και η φερριτική φάση- C_4AF όπως προβλέφθηκαν από τις τροποποιημένες εξισώσεις Bogue. Εκτός από τις αναμενόμενες από το σχεδιασμό φάσεις, αναγνωρίστηκε η φάση του περοβσκίτη ($T1: CaTiO_3$ και $T2: Ca_3Fe_2TiO_8$) η παρουσία της οποίας αποδίδεται στη παρουσία TiO_2 στο μίγμα των πρώτων υλών (Πίνακας 1). Επιπλέον, αναγνωρίστηκαν κορυφές C_3A σε όλα τα παραγόμενα κλίνκερ, ενώ η φάση του γκελενίτη- C_2AS ανιχνεύθηκε έως τους $1300^\circ C$ και για διάρκεια έψησης 30min.

Τα αποτελέσματα της ημιποσοστικής ανάλυσης, για όλες τις ορυκτολογικές φάσεις των παραγόμενων κλίνκερ, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 3α απεικονίζεται η μεταβολή της περιεκτικότητας των ορυκτολογικών φάσεων σε σχέση με τη θερμοκρασία και τη διάρκεια έψησης. Διαπιστώθηκε ότι τα κλίνκερ που παρήχθησαν από τη χαμηλότερη θερμοκρασία και διάρκεια έψησης ($1270^\circ C_{20min}$) έως και τις συνθήκες $1320^\circ C_{20min}$, παρουσιάζουν περιεκτικότητα σε μπελίτη στα ίδια επίπεδα με την εκτιμώμενη τιμή ~40% κ.β. Η περαιτέρω αύξηση των συνθηκών έψησης οδηγεί στην αύξηση του περιεχόμενου μπελίτη. Η περιεκτικότητα του $C_4A_3\bar{S}$ ευνοείται από την αύξηση των συνθηκών έψησης έως τους $1320^\circ C_{30min}$, όπου και έχει την ισχυρότερη παρουσία σε ποσοστό 36.8% κ.β.. Ωστόσο, η περαιτέρω αύξηση των συνθηκών έψησης οδηγεί στη μείωση του περιεχόμενου γελεμίτη, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στη μερική διάσπασή του σε C_3A και SO_2 (g). Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας έψησης είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση του περιεχόμενου περοβσκίτη και παράλληλα τη μείωση του φερρίτη.

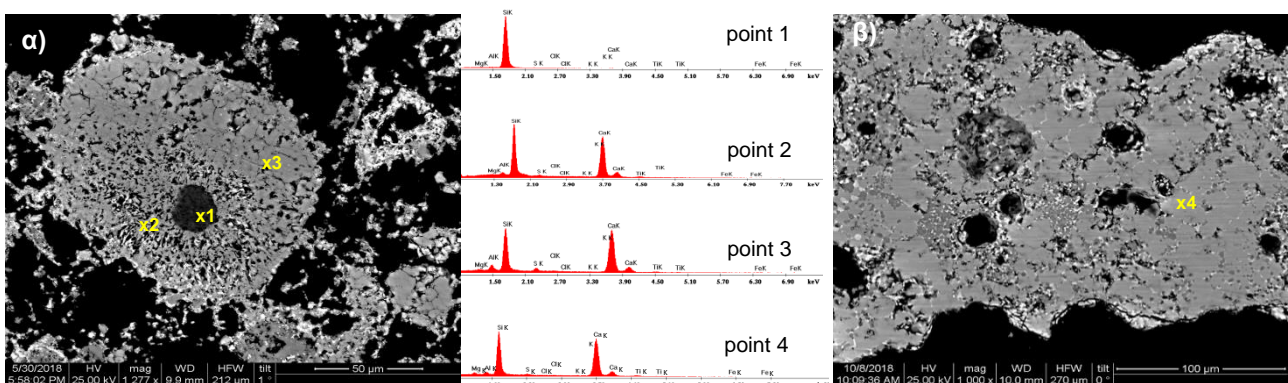


Σχήμα 3. Ημιποσοστική ανάλυση (% κ.β.): α) ορυκτολογικής σύστασης παραγόμενων κλίνκερ και β) πολυμορφικών δομών του C_2S .

Στο Σχήμα 3β, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ημιποσοστικής ανάλυσης που αφορούν τις πολυμορφικές δομές του μπελίτη στα παραγόμενα κλίνκερ. Οι πολυμορφικές δομές του μπελίτη που ταυτοποιήθηκαν σε όλα τα παραγόμενα κλίνκερ ήταν η α_H' - και η β - δομή. Διαπιστώθηκε ότι το κλίνκερ που παρήχθη στις χαμηλότερες συνθήκες έψησης ($1270^\circ C_{20min}$) παρουσιάζει την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε α_H' - μπελίτη (19.4% κ.β.). Η σταθεροποίηση της α_H' -δομής στις χαμηλές συνθήκες παραγωγής μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία του TiO_2 (3.9% κ.β., Πίνακας 1) στο μίγμα των πρώτων υλών, που πιθανότατα οδηγεί στην υποκατάσταση ιόντων SiO^{4+} από TiO^{4+} στο κρυσταλλικό πλέγμα του μπελίτη^[10,11]. Η αύξηση τόσο της θερμοκρασίας όσο και της διάρκειας έψησης έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της περιεκτικότητας της α_H' -δομής και παράλληλα την αύξηση του β -μπελίτη.

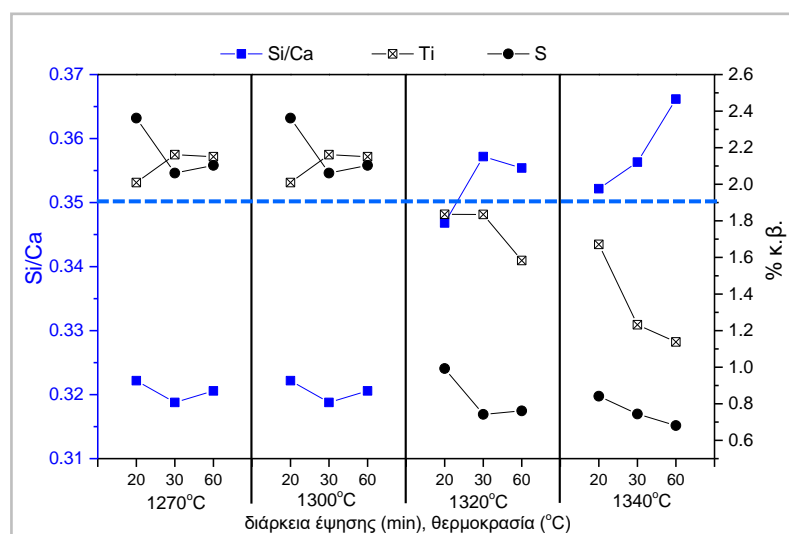
Ανάλυση μικροδομής (SEM/EDS) του μπελίτη στα παραγόμενα BCSA κλίνκερ

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (BEI), για κλίνκερ που παρήχθησαν σε χαμηλές (Σχήμα 4α, 1270°C_30min) και υψηλές (Σχήμα 4β, 1340°C_30min) συνθήκες έψησης. Στις χαμηλές συνθήκες παραγωγής (Σχήμα 4α) διαπιστώθηκε η παρουσία σφαιρικών κρυστάλλων μπελίτη (σημείο 3, Σχήμα 4α). Επιπρόσθετα, στα κλίνκερ που παρήχθησαν στους 1270°C ανιχνεύθηκε η παρουσία κόκκων SiO₂ (σημείο 1, Σχήμα 4α) περιμετρικά των οποίων σχηματίζονται κρύσταλλοι μπελίτη (σημείο 3, Σχήμα 4α). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4α και πιστοποιείται από τις αναλύσεις EDS, οι κρύσταλλοι του μπελίτη ξεκινούν να σχηματίζονται καθώς το CaO διαχέεται και αντιδρά με το SiO₂ οδηγώντας σε περιοχές με υψηλότερη περιεκτικότητα σε Si (σημείο 2, Εικόνα 4α) σε σύγκριση με τους πλήρως σχηματισμένους κρυστάλλους μπελίτη. Από τους 1300°C και έπειτα ο μπελίτης παρουσιάζεται σε πλήρως σχηματισμένος σε σφαιρικούς κρυστάλλους, όπως αντιπροσωπευτικά απεικονίζεται στο Σχήμα 4β.



Σχήμα 4. Εικόνες SEM/EDS (BEI) για κλίνκερ παραγόμενο: α) 1270°C_30min και β) 1340°C_30min.

Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των Si, Ca, Ti και S% κ.β. στον μπελίτη, πραγματοποιήθηκε στοιχειακή ανάλυση (EDS) σε τουλάχιστον 5 καλώς σχηματισμένους κρυστάλλους μπελίτη, σε όλα τα παραγόμενα κλίνκερ. Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται η επίδραση της θερμοκρασίας και της διάρκειας έψησης στην ατομική αναλογία Si/Ca και στην παρουσία Ti και S (% κ.β.) στους κρυστάλλους μπελίτη.



Σχήμα 5. Διάγραμμα της διάρκειας έψησης (min) και της θερμοκρασία vs. Si/Ca, Ti και S (% κ.β.) καλά σχηματισμένων κρυστάλλων C₂S.

Η αναλογία Si/Ca για τα κλίνκερ που παρήχθησαν έως τους 1300°C_60min είναι ~0.32 (στοιχειομετρικά η αναλογία Si/Ca για τον μπελίτη είναι 0.35). Επιπλέον, τα προαναφερθέντα κλίνκερ παρουσιάζουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε Ti και S σε σύγκριση με τα δείγματα που παράγονται σε υψηλότερες συνθήκες έψησης, το οποίο συνδυαστικά με την χαμηλή περιεκτικότητα σε Si μπορεί να υποδεικνύει την ενσωμάτωση των Ti και S στον κρύσταλλο του μπελίτη. Η αύξηση των συνθηκών έψησης οδηγεί σε αύξηση της αναλογίας Si/Ca και για συνθήκες πάνω από 1320°C_30min υπερβαίνει την στοιχειομετρική αναλογία, πιθανότατα λόγω της μερικής διάχυσης του CaO στη ρευστή φάση. Όσο αφορά την μείωση του περιεχόμενου Ti, για συνθήκες έψησης από 1320°C_20min και έπειτα, θα μπορούσε να αποδοθεί στη διάχυσή του Ti στην ρευστή φάση και στον σχηματισμό περοβσκίτη, όπως υποδηλώνεται και από τα αποτελέσματα της ημιποσοτικής ανάλυσης (Σχήμα 3α). Τέλος, η μείωση του S θα μπορούσε να συσχετιστεί με την αύξηση του γελεμίτη μέχρι τους 1320°C_30min και την εκπομπή SO₂ σε υψηλότερες συνθήκες έψησης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Οι ορυκτολογικές φάσεις που αναγνωρίστηκαν σε όλα τα δείγματα ήταν ο μπελίτης, ο γελεμίτης και η φερριτική φάση, όπως είχε προβλεφθεί από τις τροποποιημένες εξισώσεις του Bogue.
- Πέρα των προβλεπόμενων φάσεων διαπιστώθηκε ο σχηματισμός περοβσκίτη (CaTiO₃ και Ca₃Fe₂TiO₈) λόγω της παρουσίας TiO₂ στο μίγμα των πρώτων υλών. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η περιεκτικότητα του περοβσκίτη αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας έψησης.
- Η βέλτιστη ορυκτολογική σύσταση βάσει των στόχων που τέθηκαν κατά τον σχεδιασμό του μίγματος των πρώτων υλών επιτεύχθηκε στις ακόλουθες συνθήκες έψησης: 1300°C_60min και 1320°C_20min και 30min.
- Ο σχηματισμός και ο πολυμορφισμός του μπελίτη φαίνεται να συνδέεται άμεσα με τις συνθήκες έψησης του κλίνκερ καθώς και με την παρουσία Ti και/ή S στον κρύσταλλο του μπελίτη. Η αύξηση της θερμοκρασίας και της διάρκειας της έψησης οδηγεί στην αύξηση του μπελίτη στο κλίνκερ.
- Όσον αφορά τον πολυμορφισμό του μπελίτη, η πιο δραστική αμ'- δομή, η οποία συνήθως σχηματίζεται σε υψηλή θερμοκρασία, φαίνεται να έχει την υψηλότερη τιμή της στις χαμηλότερες συνθήκες παραγωγής. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί, όπως υποδηλώνουν τα αποτελέσματα από την EDS ανάλυση, στην παρουσία και την ποσότητα των Ti και S στο κρυσταλλικό πλέγμα του μπελίτη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «DEVELOPMENT OF NOVEL CEMENT CLINKERS WITH LOW CARBON FOOTPRINT FOR INDUSTRIAL PRODUCTION», και συγχρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος και την Α.Ε. Τιμέντων TITAN.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. Quillin. Cement and Concrete Research 31(9) (2001) 1341–1349.
- [2] E. Gartner. Cement and Concrete Research 34(9) (2004) 1489-1498.
- [3] C.D. Lawrence. Lea's Chemistry of Cement and Concrete (4th Edition), (2003).
- [4] R.I. Iacobescu, Y. Pontikes, et al. Cement & Concrete Composites 44 (2013) 1–8.
- [5] C.J. Chan, W.M. Kriven, et al. Journal of the American Ceramic Society 75 (1992) 1621-27.
- [6] J. Stark, A. Muller, et al. Silikatechnik 31 (1980) 50-31.
- [7] S.N. Gosh, P.B. Rao, et al. Journal of Materials Science, 14 (1979) 1554-1556.
- [8] D. Koumpouri, G.N. Angelopoulos. Cement and Concrete Composites 68 (2016) 1-8.
- [9] G. Ostojčić, D. Lazić, et al. Contemporary Materials 1 (2014) 84-94.
- [10] D.M. Shang, Z. Wang, et al. Construction and Building Materials, 146 (2017) 344–349.
- [11] X.C. Liu, B.L. Li, et al. Materials Research Innovations 13 (2009) 92-97.