

ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΣΚΑΝΔΙΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΡΥΘΡΑ ΙΛΥ, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΒΩΞΙΤΗ

Λ.Α. Τσακανίκα*, Θ. Λυμπεροπούλου, Κ. Χατζηλυμπέρης, Κ.Μ. Ώξενκιουν, Π. Γεωργίου, Χ. Στεργιόπουλος, Ο. Σεριφή, Φ. Τσόπελας, Μ. Ώξενκιουν*

Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

(*oxenki@central.ntua.gr, btsakanika@gmail.com)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παραπροϊόν επεξεργασίας βωξίτη για την παραγωγή αλουμίνας, γνωστό και ως ερυθρά ιλύς (E.I.), είναι ένα ιδιαίτερα αλκαλικό και εξαιρετικά λεπτόκοκκο υλικό. Η διάθεσή του δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα ενώ η πλούσια χημική του σύσταση το εντάσσει στις εναλλακτικές πηγές ανάκτησης πολλών στοιχείων, όπως οι σπάνιες γαίες [λανθανίδες, ύτριο, σκάνδιο] στοιχεία υψηλής αξίας με μεγάλη ζήτηση σε εφαρμογές προηγμένης τεχνολογίας. Η παρούσα εργασία εστιάζεται στη βελτιστοποίηση της εκλεκτικής ανάκτησης του σκανδίου, κρίσιμου στοιχείου σύμφωνα με τη Ε.Ε. Χρησιμοποιώντας υδρομεταλλουργική επεξεργασία της E.I. με θειικό οξύ, διερευνάται η εκλεκτικότητα της ανάκτησης του σκανδίου ως προς το σίδηρο, κύριο στοιχείο της E.I. Από τις εξετασθείσες μεταβλητές ο λόγος στερεού/υγρό, το τελικό pH και η επαναχρησιμοποίηση του κυοφορούντος διαλύματος μετά την έκπλυση σε νέο δείγμα ερυθράς ιλύος, αποδείχθηκαν ότι έχουν τη σημαντικότερη επίδραση στην αύξηση της συγκέντρωσης του σκανδίου στο κυοφορούν διάλυμα. Με βάση τις βέλτιστες συνθήκες, που προέκυψαν αναπτύχθηκε το διάγραμμα ροής της αναπτυχθείσας διεργασίας ανάκτησης σκανδίου σε συνεχές έργο με στόχο τη μεταφορά της από εργαστηριακή σε πιλοτική κλίμακα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αποτέλεσμα κάθε βιομηχανικής δραστηριότητας είναι η παραγωγή παραπροϊόντων και πολλές φορές μάλιστα σε σημαντικές ποσότητες. Η αξιοποίησή τους αποτελεί ζήτημα πρωταρχικής σημασίας στο πλαίσιο της Αειφόρου Βιομηχανικής Ανάπτυξης, που στοχεύει τόσο στην εξοικονόμηση πρώτων υλών όσο και στην προστασία του περιβάλλοντος. Η ερυθρά ιλύς είναι βιομηχανικό παραπροϊόν, που προκύπτει από τη διαδικασία παραγωγής της αλουμίνας από το βωξίτη με τη μέθοδο Bayer. Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή του ανέρχεται σε 120 εκατ. τόνους ενώ η συσσώρευσή του αγγίζει τα 2.7 δισεκατ. τόνους^[1] Το απόβλητο είναι ιδιαίτερα αλκαλικό και εξαιρετικά λεπτόκοκκο και σε συνδυασμό με την τεράστια παραγωγή του έχει σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα κατά τη μακροχρόνια παραμονή του στους χώρους αποθήκευσης. Η σωστή διαχείριση και αξιοποίησή του σε διάφορες εφαρμογές αποτελούν αντικείμενο πολλών ερευνών^[2-4]. Εξαιτίας της πλούσιας χημικής του σύστασης έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική πηγή ανάκτησης πολλών στοιχείων και ιδιαίτερα «κρίσιμων πρώτων υλών»^[5], όπως οι σπάνιες γαίες [λανθανίδες (La-Lu), ύτριο (Y), σκάνδιο (Sc)], υλικών μεγάλης προστιθέμενης αξίας σε προηγμένες τεχνολογικές εφαρμογές (laser, μαγνήτες, προηγμένα υλικά κ.λ.π.). Ιδιαίτερος το Sc είναι ένα πολύτιμο και σπάνιο μέταλλο με ταχεία διεύθυνση σε νέες τεχνολογίες, όπως προηγμένα κράματα μετάλλων με εφαρμογές στην αεροναυπηγική και πρόσφατα ως ηλεκτρολύτης σε κελιά καυσίμων^[6]. Πιο συγκεκριμένα η ελληνική ερυθρά ιλύς, με παραγωγή 750,000 τόνους ετησίως, περιέχει σημαντικές ποσότητες σπανίων γαιών (περίπου 1kg/tn) καθώς και άλλων στοιχείων όπως Nb, Zr, Ga. Ειδικότερα, αποτελεί μία από τις πλουσιότερες πηγές Sc (~0.2kg/tn ως οξείδιο) εντάσσοντας το ελληνικό απόβλητο στις διεθνώς οικονομικά αξιοποιήσιμες πηγές ανάκτησης του μετάλλου αυτού^[7-9]. Διάφορες τεχνικές έχουν μελετηθεί για την ανάκτηση των σπανίων γαιών και του σκανδίου από την ερυθρά ιλύ, όπως η υδρομεταλλουργική κατεργασία με οξέα και αλκαλικά διαλύματα^[10-13], η κατεργασία με ιοντικά υγρά^[14], η κατεργασία παρουσία μικροοργανισμών (bioleaching)^[15], η

πυρομεταλλουργία ^[16] ή η ηλεκτρομεταλλουργία. Μεταξύ όλων η υδρομεταλλουργική κατεργασία με ανόργανα οξέα παραμένει η πιο απλή και οικονομικά βιώσιμη μέθοδος ανάκτησης κυρίως σε συνθήκες περιβάλλοντος, με ικανοποιητικά υψηλές ανακτήσεις σκανδίου και εκλεκτικότητα ως προς το σίδηρο, απαραίτητη για την απόδοση των ακόλουθων σταδίων καθαρισμού και απομόνωσης του στοιχείου όπως με ιονεναλλακτικές ρητίνες, εκχύλιση με εκλεκτικά εκχυλιστικά μέσα, χρωματογραφικός διαχωρισμός σε υψηλή καθαρότητα (HPLC) ^[8,9,17-19].

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εργασία εστιάζεται στη βελτιστοποίηση της υδρομεταλλουργικής κατεργασίας της ερυθράς ιλύος για την εκλεκτική ανάκτηση Sc με θειικό οξύ, το οποίο επιτυγχάνει υψηλές ανακτήσεις και επιλέγεται επιπλέον ως το οικονομικά και περιβαλλοντικά καταλληλότερο μέσο έκπλυσης σε σύγκριση με άλλα ανόργανα οξέα της ίδιας μοριακότητας ^[20]. Διάφορες μεταβλητές εξετάζονται, όπως ο χρόνος κατεργασίας, η μοριακότητα του οξέος, το τελικό pH του διαλύματος έκπλυσης, ο λόγος στερεού προς υγρό (S/L), η πίεση και θερμοκρασία, ο τρόπος ανάδευσης, η έκπλυση του ίδιου δείγματος ερυθράς ιλύος σε πολλά στάδια με νέο διάλυμα προσβολής, η επαναχρησιμοποίηση του κυοφορούντος διαλύματος έκπλυσης σε νέο δείγμα ερυθράς ιλύος. Στόχος της μελέτης είναι η υψηλή συγκέντρωση Sc στο κυοφορούν διάλυμα σε συνδυασμό με την εκλεκτική ανάκτησή του από τα κύρια στοιχεία και ιδιαίτερα το σίδηρο, που αποτελεί το κύριο στοιχείο της ερυθράς ιλύος. Ο λόγος στερεού προς υγρό (S/L), το τελικό pH και η επαναχρησιμοποίηση (αναρροή) του κυοφορούντος διαλύματος σε νέα ερυθρά ιλύ βρέθηκαν να έχουν τη σημαντικότερη επίδραση. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι ήπια αφού χρησιμοποιεί θειικό οξύ σχετικά χαμηλής συγκέντρωσης σε συνθήκες περιβάλλοντος και έχει σχετικά ταχεία κινητική. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα ροής, το οποίο αποτυπώνει την αναπτυχθείσα διεργασία σε συνεχές έργο. Η έρευνα διεξάγεται στο πλαίσιο του έργου SCALE ^[21] (Πρόγραμμα HORIZON2020) και στοχεύει στη κλιμάκωση της υδρομεταλλουργικής κατεργασίας της ερυθράς ιλύος υπό τις βέλτιστες συνθήκες, σε μονάδα επίδειξης, η οποία θα εγκατασταθεί στους χώρους της εταιρείας «ΜΥΤΙΛΗΝΑΙΟΣ Α.Ε.» ^[22].

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης

Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιήθηκε βωξιτικό απόβλητο (ερυθρά ιλύς), από την παραγωγική δραστηριότητα της εταιρείας «ΜΥΤΙΛΗΝΑΙΟΣ Α.Ε.» (πρώην ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ Α.Ε.) με τη μορφή της σιδηροαλουμίνας, που παραλαμβάνεται μετά την πλύση και διήθηση με φίλτρο-πρεσσα του πολφού. Η σιδηροαλουμίνα έχει τιμή pH 11.3, υγρασία 26% και είναι λεπτόκοκκη με $D_{80} < 25 \mu\text{m}$. Οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις του σιδήρου είναι αιματίτης και γκαιτίτης και του αργιλίου γκιψίτης και διάσπορος ^[23]. Ως προς τη χημική του σύσταση περιέχει Fe_2O_3 (43.5%), Al_2O_3 (19.0%), SiO_2 (7.3%), TiO_2 (5.6%), CaO (9.4%), Na_2O (3.0%), ενώ η περιεκτικότητα του σε σκάνδιο ανέρχεται σε $98 \pm 3 \text{mg/kg}$, η οποία παραμένει σταθερή τα τελευταία 20 χρόνια ^[7-9, 23].

Αναλυτική διαδικασία -Εξοπλισμός

Κατάλληλοι όγκοι θειικού οξέος διαφόρων συγκεντρώσεων (1, 2, 3M H_2SO_4) προστέθηκαν σε ξηρή σιδηροαλουμίνα, ώστε να προκύψουν διαλύματα με λόγους στερεού/υγρό 2-30%. Τα μίγματα αναδεύτηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος. Μετά την έκπλυση ακολούθησε φυγοκέντρηση, διήθηση υπό κενό με $0.45 \mu\text{m}$ φίλτρα και μετρήθηκε το τελικό pH του διαλύματος. Τα πειράματα επίδρασης της θερμοκρασίας διεξήχθησαν σε σφαιρική φιάλη σε heat on block για έλεγχο της θερμοκρασίας και αεροψυχόμενο ψυκτήρα, χρησιμοποιώντας προθερμασμένα διαλύματα οξέος. Η επίδραση της πίεσης μελετήθηκε με κατεργασία της

ερυθράς ιλύος εντός αυτόκλειστου δοχείου Teflon. Όσο αφορά τη διαδικασία έκπλυσης σε πολλαπλά στάδια, το ίζημα της ερυθράς ιλύος που παραμένει μετά την έκπλυση, υποβάλλεται εκ νέου σε κατεργασία με νέο διάλυμα οξέος σε τρία στάδια έκπλυσης. Τα πειράματα επαναχρησιμοποίησης του διαλύματος έκπλυσης πραγματοποιούνταν με νέο Ε.Ι. σε κάθε κύκλο και ρύθμιση του pH με πυκνό H₂SO₄ (pH = 0.3). Η όλη διαδικασία ολοκληρώνονταν σε τρεις κύκλους. Οι αναλύσεις των διαλυμάτων πραγματοποιήθηκαν με το ICP -OES Optima 7000DV της Perkin Elmer (ΗΠΑ). Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις συνθήκες του οργάνου, τις παραμέτρους ανάλυσης και το υλικό αναφοράς αναφέρονται αλλού [7-9].

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Επίδραση του χρόνου αντίδρασης

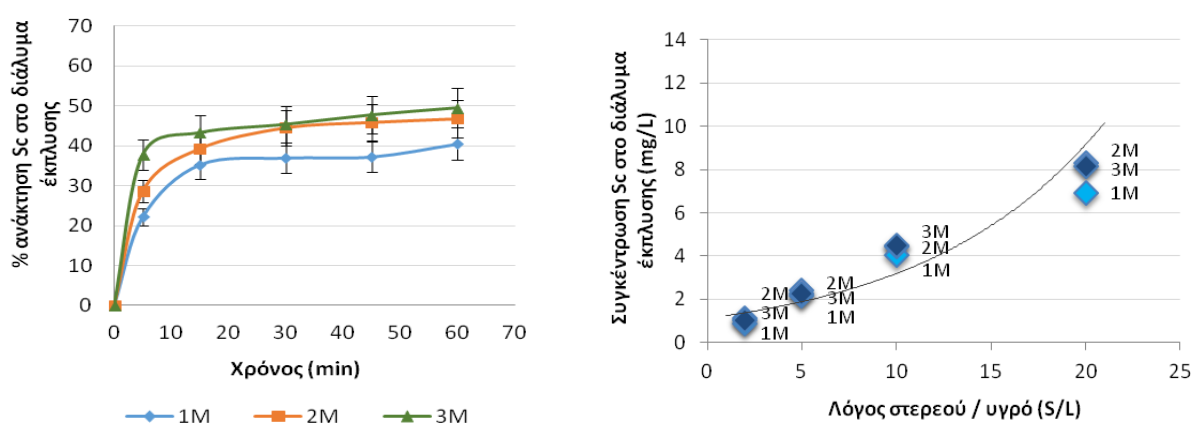
Η διαδικασία έκπλυσης, σε συνθήκες περιβάλλοντος, είναι γρήγορη και πρακτικά ολοκληρώνεται σε διάστημα ~30-60 min. Μεγαλύτεροι χρόνοι κατεργασίας δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική βελτίωση (Σχήμα 1α).

Επίδραση του λόγου στερεού/υγρό (S/L)

Η επίδραση του λόγου S/L, δηλαδή της πυκνότητας του πολφού είναι, όπως λογικά αναμενόταν, κρίσιμη για τη συγκέντρωση του σκανδίου στο διάλυμα έκπλυσης (Σχήμα 1β). Η επιλογή υψηλής πυκνότητας πολφού καίτοι ευνοεί σημαντικά τη συγκέντρωση σκανδίου, εντούτοις δημιουργεί προβλήματα στον χειρισμό των δειγμάτων λόγω παράλληλης αύξησης των πυριτικών και δημιουργίας γέλης.

Επίδραση της συγκέντρωσης του οξέος

Η επίδραση της μοριακότητας του οξέος καθίσταται εμφανής στην περίπτωση της υψηλής πυκνότητας του πολφού (S/L=20%), λόγω του ότι μέρος της ποσότητας του οξέος καταναλώνεται στην εξουδετέρωση της αλκαλικότητας της ερυθράς ιλύος. Συγκεντρώσεις οξέος >3M δεν επηρεάζουν σημαντικά την ανάκτηση του σκανδίου, σε αντίθεση με την ανάκτηση του σιδήρου. Μοριακότητες οξέος >3M επιτρέπουν το χειρισμό πολφού πυκνότητας έως 30% και οδηγούν σε διαλύματα πλούσια σε σκάνδιο αλλά και σε σίδηρο και άλλα κύρια στοιχεία, σε βάρος της εκλεκτικότητας της μεθόδου. Τα πειραματικά αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 1β.

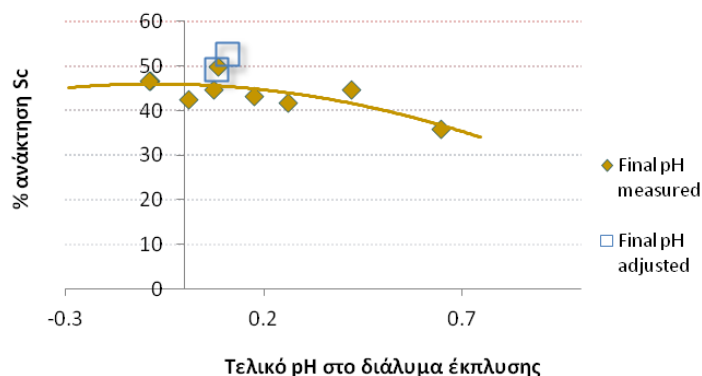


Σχήμα 1. Επίδραση του χρόνου κατεργασίας για διαφορετικές μοριακότητες οξέος και πυκνότητα πολφού (S/L) 5% (α) Επίδραση του λόγου S/L στη συγκέντρωση του Sc σε διαφορετικές μοριακότητες οξέος (β).

Από τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων με ANOVA [23] προκύπτει ότι η κρίσιμη παράμετρος (ποσοστό συμμετοχής≈70%) είναι η πυκνότητα του πολφού δηλ. ο λόγος στερεού/υγρό για τη συγκέντρωση του σκανδίου και ο χρόνος κατεργασίας για την ανάκτηση.

Ρύθμιση του pH

Η τιμή του pH του τελικού διαλύματος αποτελεί σημαντική παράμετρο για την εκχυλισσιμότητα του σκανδίου. Ρύθμιση του pH σε τιμές κοντά στο 0, έχουν ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του ποσοστού ανάκτησης του σκανδίου, ιδιαιτέρως στην περίπτωση των πυκνών πολφών. Η βέλτιστη τιμή pH κυμαίνεται από 0-0.3 (Σχήμα 2).



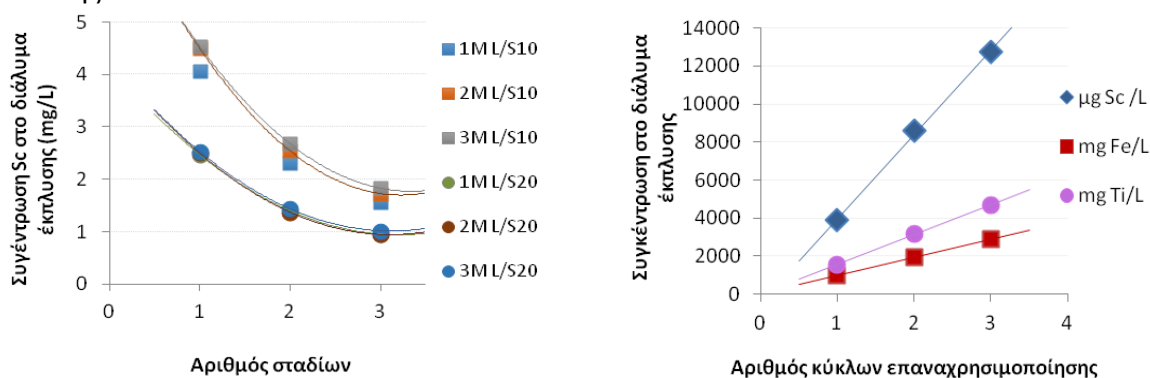
Σχήμα 2. Επίδραση της τιμής του τελικού pH του διαλύματος έκπλυσης.

Επίδραση πίεσης και θερμοκρασίας

Αύξηση της θερμοκρασίας έως 85 °C στην περίπτωση οξέος συγκέντρωσης έως <3M, αυξάνει ελάχιστα την ανάκτηση του σκανδίου (από 48.2 σε 52.2%) ενώ ευνοεί σημαντικά την ανάκτηση του σιδήρου (από 5.0 σε 13.9%). Το αποτέλεσμα γίνεται εμφανέστερο σε συνθήκες αυτόκλειστου με υψηλή θερμοκρασία και πίεση όπου η ανάκτηση του σιδήρου ανέρχεται σε 20%. Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κάτω από ακραίες συνθήκες (6M, 30%, 85 °C, 7h) έδειξαν ότι ο συνδυασμός υψηλών θερμοκρασιών με υψηλές συγκεντρώσεις οξέος οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της συγκέντρωσης του σκανδίου ~17mg/L και σε αποφυγή σχηματισμού γέλης αλλά ταυτόχρονα σε ελαχιστοποίηση της εκλεκτικότητας λόγω σχεδόν πλήρους διαλυτοποίησης του σιδήρου.

Πολλαπλές εκπλύσεις

Η διαδικασία εφαρμόστηκε στο ίδιο δείγμα ερυθράς ιλύος χρησιμοποιώντας νέο διάλυμα θεικού οξέος σε κάθε κύκλο επανάληψης και για τρεις κύκλους επανάληψης με διαφορετικές συγκεντρώσεις οξέος και πυκνότητα πολφού σε συνθήκες περιβάλλοντος για 60 min χρόνο αντίδρασης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3α. Οι πολλαπλές εκπλύσεις αυξάνουν το ποσοστό ανάκτησης αλλά μειώνουν σημαντικά τη συγκέντρωση του σκανδίου στο τελικό διάλυμα. Η ανάκτηση του σιδήρου παραμένει συνολικά χαμηλή, έως 3% μετά τον τρίτο κύκλο έκπλυσης.



Σχήμα 3. Επίδραση πολλαπλών εκπλύσεων της E.I. στη συγέντρωση του Sc στο διάλυμα έκπλυσης, $t=60\text{min}$, συνθήκες περιβάλλοντος (α), Επαναχρησιμοποίηση του διαλύματος έκπλυσης σε νέα E.I. με ρύθμιση του pH, S/L 10-13%, 2M H_2SO_4 , 60min, συνθήκες περιβάλλοντος (β).

Επαναχρησιμοποίηση διαλύματος έκπλυσης

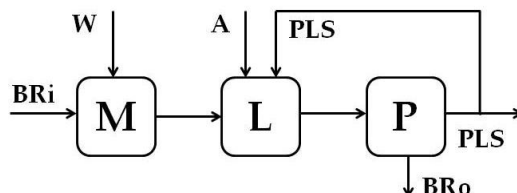
Η επαναχρησιμοποίηση του διαλύματος πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το διάλυμα έκπλυσης, μετά από διήθηση, σε νέα ποσότητα ερυθράς ιλύος. Η όλη διαδικασία επαναλήφθηκε τρεις φορές χρησιμοποιώντας θειικό οξύ 2M σε συνδυασμό με ρύθμιση του pH (0.3) του διαλύματος και πυκνότητα πολφού ~10%. Τα δεδομένα για Sc (μg/L), Ti και Fe (mg/L) παρουσιάζονται στο Σχήμα 3β. Παρατηρείται γραμμική συσχέτιση της συγκέντρωσης των μετάλλων και των κύκλων επαναχρησιμοποίησης του εκχυλίσματος, ωστόσο η συγκέντρωση του σιδήρου παραμένει χαμηλή σε σύγκριση με τον ολικό σίδηρο στην E.I., περίπου 3000 mg/L (ανάκτηση ~10%) ενώ η συγκέντρωση του τιτανίου στο διάλυμα έκπλυσης παρουσιάζεται υψηλότερη (σχεδόν ποσοτική ανάκτηση).

Επίδραση τρόπου ανάδευσης

Μελετήθηκαν τρεις τρόποι ανάδευσης: με μαγνητικό αναδευτήρα (550 & 650 rpm), μηχανική ανάδευση και μηχανική ανάδευση με παροχή αέρα. Από τα πειραματικά αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι ο τρόπος ανάδευσης δεν επιδρά στην ανάκτηση του Sc.

Ανάπτυξη διαγράμματος ροής επιλεκτικής ανάκτησης σκανδίου από ερυθρά ιλύ

Ο σχεδιασμός της διεργασίας έκπλυσης σε συνεχές έργο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.



όπου:

M (Make-up unit): Μονάδα προ-επεξεργασίας στερεών, *L* (Leaching reactor): Αντιδραστήρας εκλεκτικής διαλυτοποίησης και χημικής εξουδετέρωσης, *P* (Purification unit): Μονάδα διαχωρισμού υγρού-στερεών, *BR* (Bauxite Residue): Υπόλειμμα Βωξίτη (*i* (in): αλκαλικό εισερχόμενο, *o* (out): όξινο εξερχόμενο, *A* (Acid): Πυκνό θειικό οξύ, *W* (Water): Νερό βιομηχανικής χρήσης, *PLS* (Pregnant Leach Solution): Κυοφορούν διάλυμα διαλυτοποιημένου σκανδίου.

Σχήμα 4. Σχεδιασμός διεργασίας έκπλυσης της ερυθράς ιλύος σε συνεχές έργο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την διερεύνηση διαφόρων παραμέτρων, που επιδρούν στην εκλεκτική ανάκτηση του σκανδίου από την E.I. προέκυψε ότι η διαδικασία έκπλυσης ολοκληρώνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα (60min). Η πυκνότητα του πολφού αποτελεί την κύρια παράμετρο για την αύξηση της συγκέντρωσης του σκανδίου. Η υψηλή συγκέντρωση οξέος ευνοεί την ανάκτηση του σκανδίου αλλά μειώνει την εκλεκτικότητα. Σε κάθε περίπτωση, οι χαμηλές συγκεντρώσεις οξέος είναι περιβαλλοντικά και οικονομικά προτιμότερες. Η ρύθμιση του τελικού pH του διαλύματος είναι κρίσιμη για την ανάκτηση του σκανδίου. Υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με πίεση και χρήση οξέος υψηλής συγκέντρωσης οδηγούν σε αυξημένη ανάκτηση σκανδίου με χαμηλή ωστόσο εκλεκτικότητα. Η διαδικασία πολλαπλών εκπλύσεων αυξάνει την ποσοστιαία ανάκτηση του σκανδίου αλλά μειώνει τη συγκέντρωση. Η επαναχρησιμοποίηση του διαλύματος έκπλυσης, συνδυαζόμενη με ρύθμιση του pH, έχει ως αποτέλεσμα τον τριπλασιασμό της συγκέντρωσης του σκανδίου. Η επιλογή των βέλτιστων συνθηκών έκπλυσης εξαρτάται από τις απαιτήσεις των διεργασιών καθαρισμού και απομόνωσης του σκανδίου που ακολουθούν σε συνδυασμό με την προστασία του περιβάλλοντος και τη οικονομικότητα της διεργασίας έκπλυσης, δηλαδή ελαφρώς όξινα υπολείμματα και χαμηλό κόστος λειτουργίας και ενέργειας αντίστοιχα^[24]. Η διεργασία, που προτείνεται περιλαμβάνει τη χρήση θειικού οξέος 1-2 M H₂SO₄ σε συνδυασμό με ρύθμιση του pH

του τελικού διαλύματος σε $pH=0.3$, πυκνότητα πολφού $S/L \cong 10\%$, για 60 min, σε συνθήκες περιβάλλοντος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου SCALE και έλαβε χρηματοδότηση από το Πρόγραμμα Horizon 2020 της Ευρωπαϊκής Κοινότητας (H2020 / 2014-2020), υπό τη σύμβαση επιχορήγησης με αριθ. 730105. Θερμές ευχαριστίες επίσης και στις εταιρείες II-VI Inc. (Saxonburg, PA, USA) και ΜΥΤΙΛΗΝΑΙΟΣ Α.Ε. για την εποικοδομητική συνεργασία στο πλαίσιο του έργου Scale καθώς και σε προηγούμενα από κοινού υλοποιηθέντα έργα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] G. Power, M. Gräfe, C. Klauber. *Hydrometallurgy* 108 (2011) 33-45.
- [2] H. Sutar, S.C. Mishra, S.K. Sahoo, A.P. Chakraverty, H.S. Maharana. *American Chemical Science Journal* 4 (2014) 255-279.
- [3] B. Mishra, S. Gostu. *Frontiers of Chemical Science and Engineering* 11 (2017) 483-496.
- [4] S. Samal, A.K. Ray, A. Bandopadhyay. *International Journal of Mineral Processing* 118 (2013) 43-55.
- [5] European Commission. *Critical Raw Materials. Third List of Critical Raw Materials for the EU of 2017.* https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
- [6] Scalmalloy® - Aluminium in Perfektion, Airbus APWorks. <https://apworks.de/de/scalmalloy/>
- [7] M. Ochsenkühn-Petropoulou, Th. Lyberopulu, G. Parissakis. *Anal. Chim. Acta* 296 (3) (1994) 305-313.
- [8] Th. Lymperopoulou. PhD Thesis, National Technical University of Athens, Athens, Greece, 1996.
- [9] L.-A. Tsakanika. PhD Thesis, National Technical University of Athens, Athens, Greece, 2013.
- [10] Z. Liu, H. Li. *Hydrometallurgy* 155 (2015) 29-43.
- [11] O. Petrakova, A. Panov, S. Gorbachev, G. Klimentenok, A. Perestoronin, S. Vishnyakov, V. Anashkin. In: Hyland M (ed) *Light Metals* (2015) Wiley, New York, 91-96.
- [12] M. Ochsenkühn-Petropulu, Th. Lyberopulu, K.M. Ochsenkühn, G. Parissakis. *Anal.Chim.Acta*, 319 (1996) 249-254.
- [13] M. Ochsenkühn-Petropoulou, K. Hatzilyberis, L. Mendrinou, C. Salmas. *Ind. Eng. Chem. Res.* 41 (2002) 5794-5801.
- [14] P. Davris, E. Balomenos, D. Panyas, I. Paspaliaris. *Hydrometallurgy* 164 (2016) 125-135.
- [15] Y. Qu, B. Lian. *Bioresource Technology* 136 (2013) 16-23.
- [16] R.M. Rivera, B. Xakalash, G. Ounoughene, K. Binnemans, B. Friedrich, T. Van Gerven. *Hydrometallurgy* 184 (2019) 162-174.
- [17] L. Tsakanika, M. Ochsenkühn-Petropoulou, L. Mendrinou. *Anal. Bioanal. Chem* 379 (2004) 796-802.
- [18] M. Ochsenkühn-Petropoulou, L.-A. Tsakanika, Th. Lymperopoulou. *Proceeding of 1st European Rare Earth Resources Conference (ERES 2014)*, Milos Island, Greece, 4-7 September 2014, 28-29.
- [19] L.-A. Tsakanika, M. Ochsenkühn-Petropoulou. *Proceedings of International Bauxite Residue Valorization and Best Practices Conference (BR2015)*, Leuven, Belgium, 5-7 October 2015, 309-315.
- [20] Th. Lymperopoulou, L.A. Tsakanika, K.M. Ochsenkühn, M. Ochsenkühn-Petropoulou. *Proceedings of 2nd conference on European Rare Earth Resources (ERES2017)*, Santorini Island, Greece, 28-31 May 2017, 182-184.
- [21] Project SCALE (Production of Sc Compounds & Sc-Al Alloys from European metallurgical by-products), European Community's Horizon 2020 Program (H2020/2014-2020), Grant Agreement No. 730105. <http://scale-project.eu/>
- [22] Mytilineos S.A. - Aluminium of Greece. <https://www.alhellas.com/en-us/home/homepage>
- [23] M. Ochsenkuehn-Petropoulou, L.-A. Tsakanika, T. Lymperopoulou, K.-M. Ochsenkuehn, K. Hatzilyberis, P. Georgiou, C. Stergiopoulos, O. Serifi, F. Tsopelas. *Metals* 8(11) (2018) 915.
- [24] K. Hatzilyberis, T. Lymperopoulou, L.-A. Tsakanika, K.-M. Ochsenkühn, P. Georgiou, N. Defteraios, F. Tsopelas, M. Ochsenkühn-Petropoulou. *Minerals* 8(3) (2018) 79.