

ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΣΕΛΗΝΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΞΥ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ**Κ. Καλαϊτζίδου¹, Α. Νικολετόπουλος¹, Ν. Τσιφτσάκης¹, Μ. Μήτρακας^{1*}**¹ Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Τ.Θ. 472, 54124, Θεσσαλονίκη,
(*manasis@eng.auth.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρουσία του σεληνίου στα φυσικά/υπόγεια νερά και η απομάκρυνσή του από αυτά αποτελούν τα τελευταία χρόνια ένα από τα πλέον σημαντικά προβλήματα που απασχολούν την επιστημονική κοινότητα. Με δεδομένη την τοξική δράση του σεληνίου και την επιβεβαιωμένη παγκόσμια παρουσία του, η ανάπτυξη τεχνολογιών απομάκρυνσής του από το νερό που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση μετατρέπεται από επιστημονική πρόκληση σε κοινωνική ανάγκη. Η θεώρηση αυτή ενισχύεται και από τα ιδιαίτερα αυστηρά όρια για τη συγκέντρωση του σεληνίου στο πόσιμο νερό, που στην περίπτωση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας είναι τα 10 µg/L (ppb). Τα υδροξυ-οξείδια του σιδήρου (FeOOHs) που μελετήθηκαν για την προσροφητική τους ικανότητα στην παρούσα εργασία, ενώ δε παρουσίασαν απόδοση στην απομάκρυνση Se(VI), όσον αφορά την προσρόφηση του Se(IV) παρουσίασαν τεχνολογικά εφαρμόσιμα αποτελέσματα. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των FeOOHs που μεταβάλλονται ανάλογα με το pH σύνθεσης είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την προσρόφηση. Το σημαντικότερο συμπέρασμα αυτής της εργασίας είναι ότι η προσροφητική ικανότητα είναι ανάλογη του θετικού επιφανειακού φορτίου καθώς επίσης επηρεάζεται σημαντικά από τα θεϊκά που ενσωματώνονται στη δομή των FeOOHs, τα οποία εμποδίζουν την προσρόφηση του Se(IV), ενώ τα θεϊκά που βρίσκονται στη στιβάδα Stern συμβάλλουν θετικά στην προσρόφηση του Se(IV) διαμέσου της ιοντοεναλλαγής. Η εφαρμογή σε μικροστήλες για το υδροξυ-οξείδιο που συντέθηκε σε pH 2,5 (FeOOH/2,5) παρουσίασε τη βέλτιστη προσροφητική ικανότητα $Q_{10} = 4,3 \text{ } \mu\text{g Se(IV)}/\text{mg}_{\text{FeOOH}/2,5}$ από τα FeOOHs που εξετάστηκαν. Τέλος η επιτυχής δυνατότητα αναγέννησης των FeOOHs περιορίζει το κόστος όλης της διεργασίας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σελήνιο είναι ένα σημαντικό ιχνοστοιχείο απαραίτητο στην καθημερινή διατροφή του ανθρώπου. Η κύρια πηγή εισόδου στον ανθρώπινο οργανισμό είναι η διατροφή, ωστόσο η κατανάλωση του σε μεγάλες ποσότητες προκαλεί σοβαρές τοξικές επιπλοκές. Στο νερό τα επίπεδα του σεληνίου κυμαίνονται από 0,06 έως και 400 µg/L, τη στιγμή που σε ορισμένες περιοχές έχουν παρατηρηθεί και συγκεντρώσεις της τάξης των 6.000 µg/L. Παρότι τα επιδημιολογικά στοιχεία είναι ελλιπή η παρουσία του στο πόσιμο νερό ακόμη και σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει δερματολογικές παθήσεις^[1]. Η υψηλή τοξικότητα του είναι και ο λόγος για το αυστηρό όριο ποσικότητας των 10 µg/L που έχει θεσπιστεί στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα^[2]. Συνεπώς, μια τεχνολογικά εφαρμόσιμη μέθοδος για την απομάκρυνση των δύο κύριων μορφών του σεληνίου SeO_3^{2-} και SeO_4^{2-} στο νερό, είναι αναγκαία^[3].

Η συνύπαρξη και η επικρατούσα μορφή Se(IV) ή Se(VI) στον υδροφορέα εξαρτάται από τις αναγωγικές ή οξειδωτικές συνθήκες, αντίστοιχα. Η ρύπανση των φυσικών νερών με σελήνιο οφείλεται σε ανθρωπογενείς γεωργικές και εξορυκτικές δραστηριότητες, αλλά και φυσικούς παράγοντες εξαιτίας της έκπλυση ασβεστούχων ιζηματογενών πετρωμάτων^[4].

Η έρευνα για τις μεθόδους απομάκρυνσης των οξυ-ανιόντων σεληνίου από το νερό είναι ευρεία και έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές που βασίζονται στην κροκίδωση^[5], την χημική αναγωγή^[6], την προσρόφηση, την χρήση μεμβρανών^[7], την ιοντοεναλλαγή^[8] και τη βιολογική επεξεργασία^[9]. Ωστόσο, μεγάλο μέρος των σχετικών ερευνητικών εργασιών αφορούν την επεξεργασία υγρών αποβλήτων (συγκέντρωση σεληνίου >1 mg/L) και σε συνθήκες μη συμβατές (ισχυρά όξινο ή αλκαλικό pH) με το πόσιμο νερό. Με κριτήριο τη δυνατότητα επίτευξης υπολειμματικής

συγκέντρωσης 10 µg/L σε τιμές pH 6,5-8, η χρήση αναγωγικών αντιδραστηρίων, προσροφητικών μέσων ή ρητινών ιοντοεναλλαγής και η αντίστροφη ώσμωση επιδεικνύουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Όμως, η έλλειψη εκλεκτικότητας που ισοδυναμεί με ενδεχόμενη αλλοίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού σε συνδυασμό με το σχετικά υψηλό οικονομικό κόστος εφαρμογής αποτελούν αποτρεπτικούς παράγοντες για την απομάκρυνση σεληνίου με ιοντοεναλλαγή ή χρήση μεμβρανών. Επιπλέον, η απόδοση περιορίζεται ραγδαία σε pH>7 ενώ κανένα προσροφητικό δε παρουσιάζει τάση συγκράτησης του Se(VI).

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να παράγει αποτελέσματα εφαρμόσιμα στην απομάκρυνση σεληνίου στις συνθήκες που απαντώνται τα φυσικά νερά με τη δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας. Η προσρόφηση σε κλίνη με στερεό κοκκώδες υλικό γενικά προτιμάται λόγω της απλότητας, της ευελιξίας, του χαμηλού κόστους και της εκλεκτικότητας που μπορεί να προσφέρει. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν δοκιμαστεί διάφορα ανόργανα υλικά όπως τα οξειδία του σιδήρου (Fe₃O₄), η ενεργός αλουμίνα (Al₂O₃), το TiO₂, το Mn₃O₄, μικτά υδροξείδια, ο μεταλλικός (Fe) και ο θειούχος σίδηρος (FeS, FeS₂) καθώς επίσης σύνθετες οργανικές/ανόργανες φάσεις με βάση τη χιτοζάνη, το γραφένιο και βιοροφητικά^[10-15]. Λόγω της χημικής συγγένειας που παρουσιάζει το σελήνιο με τα υδροξυ-οξειδία του σιδήρου θεωρούνται καλοί υποψήφιοι για την προσρόφηση του σεληνίου.

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων προσρόφησης παρασκευάστηκαν FeOOHs σύμφωνα με τη διαδικασία της Τρεσίτση κ.α. 2012^[16] και ακολούθησε ο δομικός χαρακτηρισμός (BET, χημική σύσταση, XRD, pzc) των υλικών που παρασκευάστηκαν για τις ανάγκες των πειραμάτων προσρόφησης. Ακόμη μελετήθηκαν και τα εμπορικά διαθέσιμα FeOOHs, GEH (Granular Ferric Hydroxide) με κύρια φάση τον ακαγκανείτη που παράγεται από την εταιρεία Siemens και Bayoxide με κύρια φάση τον γκαϊτίτη που παράγεται από την εταιρεία Bayer.

Πραγματοποιήθηκαν ασυνεχή πειράματα με την ίδια αρχική συγκέντρωση σεληνίου (100 µg/L Se(IV) ή Se(VI)) για να εξεταστεί η επίδραση του pH στην περιοχή τιμών 4-11, η επίδραση της θερμοκρασίας στους 283, 293 και 303 K. Για τη μελέτη της κινητικής της αντίδρασης προσρόφησης Se στα FeOOHs τοποθετήθηκε ποσότητα 200 mg προσροφητικού σε 1 L διαλύματος 1000 µg/L με NSF νερό σε pH 7 στους 20°C. Ακόμη, έγιναν πειράματα ισόθερμων προσρόφησης όπου τοποθετήθηκε ποσότητα 50-300 mg/L λεπτόκοκκου υλικού (< 63 µm) σε 200 mL διαλύματα σεληνίου (100 – 1000 µg/L) σε κωνικές φιάλες των 300 mL. Οι φιάλες αφέθηκαν σε ανάδευση για 24 h στους 20°C. Οι αρχικές και υπολειμματικές συγκεντρώσεις προσδιορίστηκαν με φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης με γραφίτη (Perkin-Elmer AAnalyst 800). Το όριο ανίχνευσης της μεθόδου, το οποίο υπολογίστηκε από 7 επαναλήψεις 2-10 µg Se/L, υπολογίστηκε ότι είναι 1 µg/L. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν αξιολογήθηκαν σύμφωνα με τα μοντέλα Langmuir και Freundlich και η απόδοση του προσροφητικού αξιολογήθηκε σύμφωνα με την ικανότητα προσρόφησης σε υπολειμματική συγκέντρωση ίση με το όριο ποσοιότητας 10 µg/L, η οποία συμβολίζεται στη συνέχεια ως Q₁₀.

Τα πειράματα συνεχούς τύπου σε μικροστήλες Rapid Small Scale Column Tests (RSSCTs) που προσομοιάζουν την πλήρη κλίμακα λειτούργησαν με χρόνο παραμονής της τάξης των 3-4 min. Μετά τον κορεσμό του προσροφητικού υλικού εξετάστηκε η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του προσροφητικού υλικού με την αναγέννηση του με χρήση διαλύματος NaOH.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

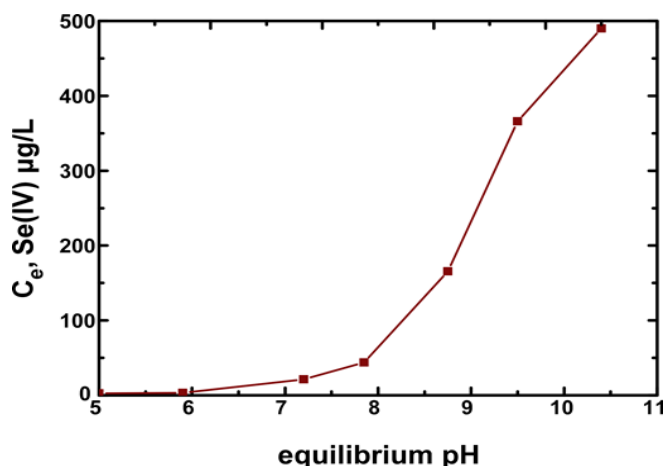
Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υδροξυ οξειδίων του σιδήρου που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο όπως παρατηρήθηκε και από την Τρεσίτση κ.α., 2012 επηρεάζονται σημαντικά από το pH σύνθεσης. Τα κυριότερα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 όπου παρατηρείται ότι η πυκνότητα του θετικού επιφανειακού φορτίου (PSCD) των FeOOHs που συντέθηκαν αυξάνεται όσο μειώνεται το pH σύνθεσης, δηλαδή το FeOOH σε pH σύνθεσης 2,5

παρουσιάζει το μεγαλύτερο PSCD 2,8 mmol [OH⁻]/g, ενώ το χαμηλότερο 0,45 mmol [OH⁻]/g παρατηρήθηκε για το pH σύνθεσης 9. Η τάση αντιστάθμισης του θετικού επιφανειακού φορτίου οδηγεί στην ενσωμάτωση θεικών στην κρυσταλλική δομή και στη στιβάδα Stern, η οποία σταδιακά αυξάνεται μειώνοντας το pH σύνθεσης. Τα προσροφημένα SO₄²⁻ ανιόντα της στιβάδας Stern είναι ιοντο-εναλλάξιμα συμβάλλοντας έτσι στην επιφανειακή πυκνότητα φορτίου, γεγονός που βελτιώνει την προσροφητική ικανότητα^[16].

Πίνακας 1. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των FeOOHs που μελετήθηκαν για την απομάκρυνση του Se(IV)/Se(VI) με προσρόφηση.

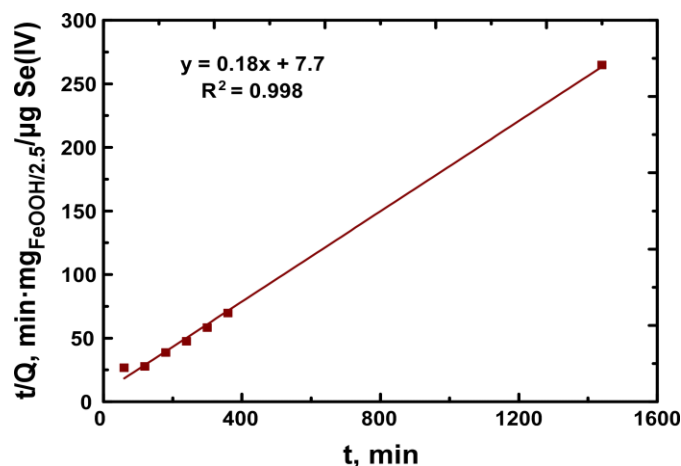
Συντομογραφία	Παράμετροι Σύνθεσης			Fe wt.%	Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	IEP	ZPC	PSCD mmol [OH ⁻]/g	Φυσικά Προσοφνημένα SO ₄ ²⁻ wt.%	Χημικά Προσοφνημένα SO ₄ ²⁻ wt.%	Ολικά SO ₄ ²⁻ wt.%	Κύρια κρυσταλλική δομή
	Υλικά	pH	Redox (mV)									
FeOOH/2	FeSO ₄ /H ₂ O ₂	2	650	38,6	100	5,7	2,6	2,8	3,4	8,3	17,9	Σβερτμανίτης
FeOOH/2,5	FeSO ₄ /H ₂ O ₂	2,5	600	44,8	48	6,9	2,7	3,25	1,9	9,1	17	Σβερτμανίτης
FeOOH/3	FeSO ₄ /H ₂ O ₂	3	440	44,9	53	7,2	3,2	2,45	1,9	8,7	15,1	Σβερτμανίτης
FeOOH/4	FeSO ₄ /H ₂ O ₂	4	380	50,4	120	7,1	3,2	2,23	4,0	7,2	14	Σβερτμανίτης
FeOOH/5,7	FeSO ₄ /H ₂ O ₂	5,7	380	50,1	168	7,3	4,2	1,42	4,4	3,7	8,1	Λεπιδοκροκίτης
FeOOH/8	FeSO ₄ /H ₂ O ₂	8	250	50,2	226	6,6	7,9	1,04	0,8	1,1	1,9	Λεπιδοκροκίτης
FeOOH/9	FeSO ₄ /H ₂ O ₂	9	170	51,4	140	5,8	7,9	0,45	1,8	<0,2	1,8	Αιματίτης
FeOOH/FeCl ₃	FeCl ₃	3	400	50,5	158	7,1	2,6	1,5	<0,2	<0,2	<0,5	Φερριδρίτης
Bayoxide				52	135	7,4	7,8	0,8	<0,2	<0,2	<0,5	Γκαιτίτης
GEH				54,2	237	7,15	5,2	1	<0,2	<0,2	<0,5	Ακαγκανείτης

Οι περισσότερες δημοσιευμένες μελέτες πραγματοποιούνται σε όξινες συνθήκες και αυτό γιατί η απομάκρυνση του σεληνίου ευνοείται σε όξινο περιβάλλον. Στο Σχήμα 1 παρατηρείται η επίδραση του pH στην απομάκρυνση Se(IV) με χρήση FeOOH που παρασκευάστηκε σε pH 2,5, όπου επιβεβαιώνεται η καλύτερη απομάκρυνση σε χαμηλότερα pH, ενώ σε pH>8 η απόδοση μειώνεται εκθετικά και σε pH>10 παρατηρείται ότι η προσρόφηση του Se(IV) είναι μηδενική.

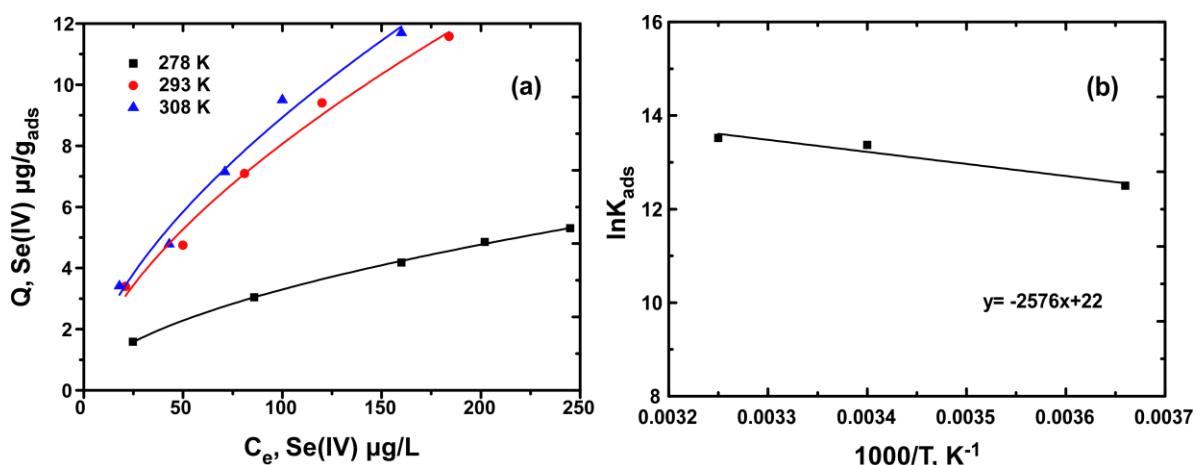


Σχήμα 1. Επίδραση pH στην προσρόφηση του Se(IV) από το FeOOH/2,5 (Αρχική Se(IV) συγκέντρωση 500 µg/L, δόση προσροφητικού 100 mg/L, NSF νερό, T 20 °C).

Μια πολύ σημαντική παράμετρος είναι ο ρυθμός προσρόφησης που εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής. Η αξιολόγηση της προσρόφησης σε σχέση με τον χρόνο επαφής για το προσροφητικό FeOOH/2,5 δείχνει ότι απαιτούνται τουλάχιστον 4 ώρες για να επιτευχθεί το 90% της απομάκρυνσης (Σχήμα 2) και τα κινητικά δεδομένα προσομοιάζονται με αντίδραση ψευδο-δεύτερης τάξης. Από τα αποτελέσματα των ισόθερμων προσρόφησης που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας (Σχήμα 3) προέκυψε ότι η προσρόφηση είναι ενδόθερμη και από τη θετική ΔH° τιμή 21,4 kJ/mol προκύπτει ότι λαμβάνει χώρα ασθενής χημειορόφηση.



Σχήμα 2. Δεδομένα κινητικής για την προσρόφηση Se(IV) από FeOOH/2,5 σε νερό NSF και pH 7 ($C_o = 1000 \mu\text{g Se(IV)/L}$, FeOOH/2,5 δόση προσροφητικού 200 mg/L, $C_e = 12 \mu\text{g Se(IV)/L}$, $T 20^\circ\text{C}$).



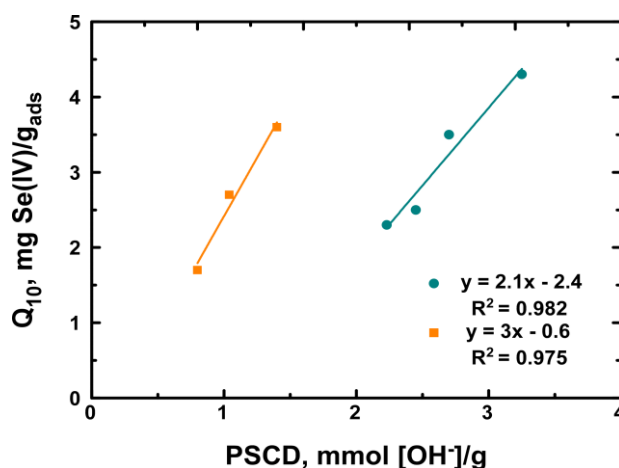
Σχήμα 3. (a) Ισόθερμες προσρόφησης Se(IV) από FeOOH/2,5 σε pH 7, (b) διάγραμμα Van't Hoff από τα δεδομένα προσρόφησης.

Για την περαιτέρω αξιολόγηση των προσροφητικών υλικών στην απομάκρυνση του Se(IV) και το Se(VI) πραγματοποιήθηκαν ασυνεχή πειράματα ισόθερμων προσρόφησης αλλά και συνεχή πειράματα μικροστηλών προσρόφησης RSSCTs. Η αξιολόγηση έγινε με βάση το όριο ποσιμότητας 10 $\mu\text{g/L}$ και τα αποτελέσματα Q_{10} που υπολογίστηκαν από την προσομοίωση των αποτελεσμάτων με το μοντέλο Freundlich αλλά και από την εφαρμογή των RSSCTs παρατίθενται στον Πίνακα 2. Τα πειράματα είχαν ως αποτέλεσμα σχεδόν μηδενική απομάκρυνση για το εξασθενές σελήνιο Se(VI) για όλα τα προσροφητικά υλικά που μελετήθηκαν. Αντιθέτως, οι προσροφητικές ικανότητες που παρατηρήθηκαν για την απομάκρυνση του Se(IV) είναι τεχνολογικά εφαρμόσιμες. Τη βέλτιστη προσροφητική ικανότητα παρουσίασε το FeOOH/2,5 - $Q_{10} = 3,05 \mu\text{g Se(IV)/mg}_{\text{FeOOH/2,5}}$ σύμφωνα με τις ισόθερμες προσρόφησης και $Q_{10} = 4,3 \mu\text{g Se(IV)/mg}_{\text{FeOOH/2,5}}$ σύμφωνα με την εφαρμογή της μικροστήλης. Γενικά, οι συνθήκες της στήλης ευνοούν την προσρόφηση του Se(IV). Όπως

προαναφέρθηκε η παρουσία των SO_4^{2-} στη στιβάδα Stern αλλά και το θετικό επιφανειακό φορτίο είναι δύο παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την προσρόφηση του Se(IV) και για τους παραπάνω λόγους το $\text{FeOOH}/2,5$ παρουσίασε την καλύτερη προσροφητική ικανότητα. Η συσχέτιση του PSCD με την προσροφητική ικανότητα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Για τα FeOOHs με χαμηλό φαινόμενο βάρος ($0,5 \pm 0.1 \text{ g/mL}$), η διαφορετική συσχέτιση με το PSCD, που υποδείχθηκε από την κλίση των γραμμών συσχέτισης (Σχήμα 4) πιθανώς σχετίζεται με τη κρυσταλλική δομή του προσροφητικού. Τα ενσωματωμένα στη δομή θειικά των $\text{FeOOH}/2$, $\text{FeOOH}/2,5$, $\text{FeOOH}/3$ και $\text{FeOOH}/4$ (Πίνακας 1) εμποδίζουν με κάποιο τρόπο το SeO_3^{2-} να έχει πρόσβαση στις θέσεις προσρόφησης με αποτέλεσμα να προκύπτει χαμηλότερη αναλογία μεταξύ Q_{10} και PSCD σε σύγκριση με τα αντίστοιχα $\text{FeOOH}/5,7$, $\text{FeOOH}/5$ και Bayoxide τα οποία δεν έχουν ενσωματωμένα θειικά στη δομή τους.

Πίνακας 2. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των FeOOH μελετήθηκαν στην απομάκρυνση $\text{Se(IV)}/\text{Se(VI)}$ με προσρόφηση.

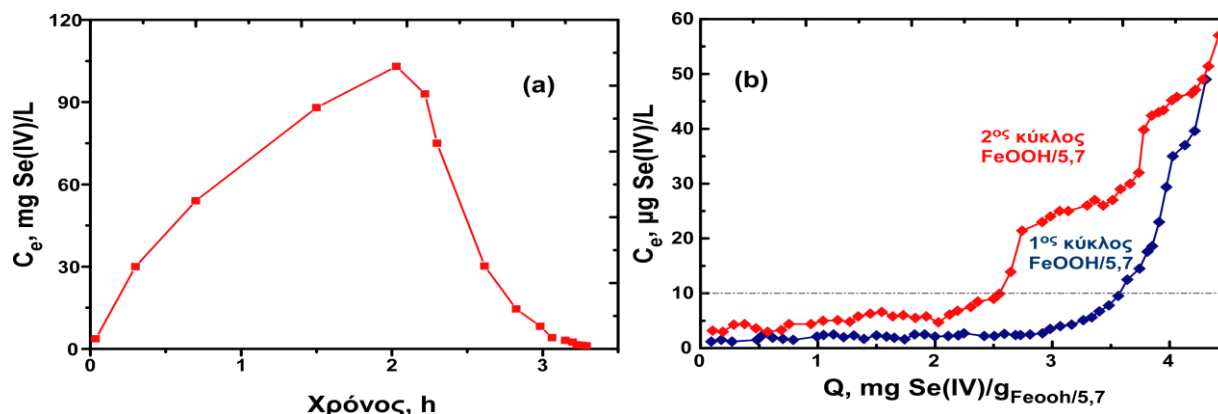
Προσροφητικό	Φαινόμενο βάρος g/mL	Ισόθερμες		Μικροστήλες	
		Q_{10} mg Se(IV)/g $_{\text{FeOOH}}$	Q_{10} μg Se(VI)/g $_{\text{FeOOH}}$	Q_{10} mg Se(IV)/g $_{\text{FeOOH}}$	Q_{10} mg Se(IV)/g $_{\text{FeOOH}}$
$\text{FeOOH}/2$	0,54	2,35	17	3,5	
$\text{FeOOH}/2,5$	0,46	3,05	10	4,3	
$\text{FeOOH}/3$	0,49	2,7	4,4	2,5	
$\text{FeOOH}/4$	0,54	2,1	1,6	2,3	
$\text{FeOOH}/5,7$	0,49	1,6	4	3,6	
$\text{FeOOH}/8$	0,48	1,45	1,4	2,7	
Bayoxide	0,41	1,1	0	1,7	
GEH	1,28	1,35	4	0,7	



Σχήμα 4. Συσχέτιση του θετικού επιφανειακού φορτίου των FeOOHs με την προσροφητική ικανότητα για το Se(IV) (Q_{10}) στα πειράματα μικροστήλης. (Συμπαγείς κύκλοι αναφέρονται στα FeOOHs με ενσωματωμένα θειικά στη δομή τους και συμπαγή τετράγωνα αναφέρονται στα FeOOHs χωρίς θειικά στη δομή).

Με σκοπό την βελτιστοποίηση της διεργασίας προσρόφησης σε σχέση με το κόστος της, μελετήθηκε η αναγέννηση με χρήση διαλύματος 0,02 N NaOH ($\text{pH} = 12 \pm 0,5$) των FeOOHs μετά τον κορεσμό τους σε Se(IV) . Η αναγέννηση του $\text{FeOOH}/5,7$ όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5a πραγματοποιείται σε περίπου 3 ώρες. Στον επόμενο κύκλο φόρτωσης παρατηρήθηκε περίπου 25% μείωση της προσροφητικής ικανότητας του $\text{FeOOH}/5,7$ (Σχήμα 5b), καθώς κατά την αναγέννηση

απομακρύνθηκε περίπου το 75% του προσροφημένου σεληνίου.



Σχήμα 5. (α) Αναγέννηση $\text{FeOOH}/5,7$ στη μικροστήλη σε σχέση με το χρόνο, (β) καμπύλες διέλευσης για τους 2 κύκλους φόρτωσης Se (IV) σε $\text{FeOOH}/5,7$ (C_0 100 $\mu\text{g Se (IV)/L}$, NSF νερό, pH 7, T 20°C, EBCT 3,5±0,5 λεπτά).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα FeOOH αξιολογήθηκαν με ισόθερμες προσρόφησης και μικροστήλες RSSCTs και επιτεύχθηκαν βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά την προσρόφηση του τετρασθενούς σεληνίου Se(IV) . Η προσροφητική ικανότητα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το θετικό επιφανειακό φορτίο, η παρουσία θεικών στη στιβάδα Stern και στην κρυσταλλική δομή του προσροφητικού αλλά και από τη φαινόμενη πυκνότητα του υλικού. Το προσροφητικό που παρουσίασε τη βέλτιστη απόδοση ήταν το FeOOH που συντέθηκε σε pH 2,5 με προσροφητική ικανότητα $Q_{10} = 4,3 \mu\text{g Se(IV)}/\text{mg}_{\text{FeOOH}/2,5}$. Η τιμή αυτής της προσροφητικής ικανότητας δίνει τεχνολογικά εφαρμόσιμα αποτελέσματα ενώ η δυνατότητα αναγέννησης των FeOOHs περιορίζει σημαντικά το κόστος λόγω της αποτελεσματικής επαναχρησιμοποίησής τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. Jordan, A. Ritter, A.C. Scheinost, S. Weiss, D. Schild, R. Hübner. *Environ Sci Technol* 48 (2014) 1665-1673.
- [2] The Council of the European Union. *Off. J. Eur. Communities* 33 (1998)32–54.
- [3] E. Barron, V. Migeot, S. Rabouan, M. Potin-Gautier, F. Seby, P. Hartemann, Y. Levi, B. Legube. *J. Water Health*, 07(4) (2009) 630-642.
- [4] L. Moore, A. Mahmoudkhani. *Proceedings Tailings and Mine Waste Vancouver* (2011), BC, November 6 to 9, 2011.
- [5] S. Santos, G. Ungureanu, R. Boaventura, C. Botelho. *Sci. Total Environ* 521-522 (2015) 246-260.
- [6] N. Geoffroy, G.P. Demopoulos. *J. Hazard. Mater.* 185 (2011) 148–154.
- [7] CH2MHILL. Prepared for North American Metals Council (2010).
- [8] C. Mac Namara, J. Torroba, A. Deacon. *Johnson Matthey Technol. Rev.* 59 (2015) 334–352.
- [9] L.C. Staicu, E.D. Van Hullebusch, M.A. Oturan, C.J. Ackerson, P.N.L. Lens. *Chemosphere* 125 (2015) 130–138.
- [10] N. Jordan, H. Foerstendorf, S. Weiß, K. Heim, D. Schild, V. Brendler. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75 (2011) 1519–1530.
- [11] Y.T. Chan, W.H. Kuan, T.Y. Chen, M.K. Wang. *Water Res.* 43 (2009) 4412–4420.
- [12] W. Sun, W. Pan, F. Wang, N. Xu. *Chem. Eng. J.* 273 (2015) 353–362.
- [13] K. Mitchell, R.M. Couture, T.M. Johnson, P.R.D. Mason, P. Van Cappellen, *Chem. Geol.* 342 (2013) 21–28.
- [14] M.S. Seyed Dorraji, A.R. Amani-Ghadim, Y. Hanifehpour, S. Woo Joo, A. Figoli, M. Carraro, F. Tasselli. *Chem. Eng. Res. Des.* 117 (2017) 309–317.
- [15] M. Tuzen, A. Sari. *Chem. Eng. J.* 158 (2010) 200–206.
- [16] S. Tresintsi, K. Simeonidis, G. Vourlias, G. Stavropoulos, M. Mitrakas. *Water Research*, 46(16) (2012) 5255-5267.