

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΤΗΣ ΧΡΩΣΤΙΚΗΣ ΜΕΤΗΛΕΝΕ ΒΛΕ ΣΕ ΑΓΡΟΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΑΠΟ ΦΛΟΥΔΕΣ ΜΠΑΝΑΝΑΣ ΣΕ ΣΤΗΛΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΛΙΝΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΟΗΣ****Α. Σταυρινού<sup>1,2</sup>, Χ.Α. Αγγελόπουλος<sup>1\*</sup>, Χ. Τσακίρογλου<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας-Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής, Πάτρα, Ελλάδα<sup>2</sup>Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Πάτρα, Ελλάδα(\*[caggelop@iceht.forth.gr](mailto:caggelop@iceht.forth.gr))**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε η προσρόφηση της χρωστικής Methylene Blue (MB) σε σταθερή κλίνη προσροφητικού υλικού που παρασκευάστηκε από φλούδες μπανάνας. Χρησιμοποιήθηκε στήλη από ανοξείδωτο χάλυβα και περισταλτική αντλία για τη διοχέτευση υδατικού διαλύματος MB υπό σταθερή ογκομετρική παροχή 1 mL/min. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα συνεχούς ροής για δύο αρχικές συγκεντρώσεις MB, 100 mg/L και 200 mg/L για σταθερό ύψος προσροφητικού υλικού, και σταθερή ταχύτητα ροής. Για τον εκτίμηση των παραμέτρων που αφορούν τη προσροφητική ικανότητα του υλικού και τη κινητική της προσρόφησης οι πειραματικές καμπύλες διείσδυσης (breakthrough curves) της συγκέντρωσης της MB μετρούμενης στην έξοδο της στήλης προσαρμόστηκαν αριθμητικά μέσω μοντέλου σύζευξης της συναγωγής-διασποράς κατά μήκος της κλίνης με κινητική προσρόφησης 1<sup>ης</sup> τάξης. Τα αποτελέσματα είναι πλήρως συμβατά με προγενέστερες μελέτες προσρόφησης σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου και δείχνουν ότι οι φλούδες μπανάνας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά ως προσροφητικά υλικά για την επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων βαφών υπό συνθήκες συνεχούς ροής.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η απελευθέρωση στο περιβάλλον βιομηχανικών αποβλήτων που περιέχουν βαφές έχει καταστεί μείζον ζήτημα, λόγω των δυσμενών επιπτώσεών τους στο οικοσύστημα και την ανθρώπινη υγεία<sup>1</sup>. Η παρουσία των αζωχρωμάτων στα λύματα μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ασθένειες λόγω της τοξικότητάς τους, καθώς επίσης και της καρκινογένεσης και μεταλλαξιογένεσης που μπορούν να προκαλέσουν<sup>2,3</sup>. Η κατιονική βαφή, Methylene Blue (MB), χρησιμοποιείται ως χρωστική στην κλωστοϋφαντουργία και χαρτοποιία, ως δείκτης οξειδοαναγωγής στην αναλυτική χημεία και ως φάρμακο στην ιατρική. Η έκθεση στη βαφή MB μπορεί να είναι πολύ επικίνδυνη, καθώς έχουν αναφερθεί πολλά προβλήματα υγείας, όπως η αναιμία, η υπέρταση, η νέκρωση των ιστών και οι γαστρεντερικές διαταραχές<sup>4</sup>. Όσον αφορά τις μεθόδους που υιοθετούνται για την επεξεργασία των λυμάτων, όπως οι διεργασίες προηγμένης οξείδωσης, βιολογικές μέθοδοι κ.λ.π, η διαδικασία προσρόφησης θεωρείται ανώτερη λόγω της απλότητας και της αποτελεσματικότητάς της προς μια ευρεία κατηγορία βαφών<sup>5</sup>. Το υλικό που χρησιμοποιείται εκτεταμένα για τις διεργασίες προσρόφησης είναι ο εμπορικός ενεργός άνθρακας<sup>6,7</sup>, αλλά λόγω του υψηλού κόστους του, την τελευταία δεκαετία τείνει να αντικατασταθεί από στερεά αγροτικά απόβλητα, που αποτελούν, για την επεξεργασία ρυπασμένων υδάτων, φυσικά οργανικά προσροφητικά υλικά χαμηλού κόστους. Ειδικά η χρήση ακατέργαστων στερεών αποβλήτων μπορεί να μειώσει πολύ περισσότερο το κόστος της διαδικασίας προσρόφησης, επειδή δεν υπάρχει ανάγκη για φυσική ή χημική ενεργοποίηση του υλικού. Υπάρχει μια ποικιλία ακατέργαστων αγροτικών αποβλήτων που έχουν χρησιμοποιηθεί ως προσροφητικά υλικά χαμηλού κόστους για την απομάκρυνση βαφών, όπως φλούδες πορτοκαλιού<sup>8</sup>, φλούδες γκρέιπφρουτ<sup>9</sup>, φλοιοί φυσιτικού<sup>10</sup> και φύλλα πεύκου<sup>11</sup>.

Οι μπανάνες καταναλώνονται παγκοσμίως ως τρόφιμα ή χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ποικιλίας προϊόντων σε καλλυντικά ή κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Η ετήσια παραγωγή μπανάνας στον κόσμο είναι 114 εκατομμύρια τόνοι, επομένως τα απόβλητά τους θα μπορούσαν

να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη χαμηλού κόστους προσροφητικών υλικών για την απομάκρυνση χρωστικών ουσιών. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες σχετικά με την ικανότητα προσρόφησης φλούδας μπανάνας σε συστήματα διαλείποντος έργου (batch) για απομάκρυνση βαφών, όπως Acid Black 1<sup>12</sup>, Malachite Green<sup>13</sup>, Congo Red<sup>14</sup>. Περιορισμένη έρευνα έχει πραγματοποιηθεί όσον αφορά με την προσρόφηση της βαφής MB σε φλούδες μπανάνας για συστήματα συνεχούς ροής<sup>15</sup>. Έχουν δημοσιευθεί μερικές μελέτες σχετικά με την απομάκρυνση MB από απόβλητα για διάφορα προσροφητικά<sup>16-21</sup>.

Σε προγενέστερη εργασία, φλούδες μπανάνας πλύθηκαν, ξηράνθηκαν, θρυμματίστηκαν, κοσκινίστηκαν, και δοκιμάστηκαν ως προσροφητικά υλικά για τον καθαρισμό απιονισμένου νερού ρυπασμένου με MB. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα προσρόφησης σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου υπό μεταβλητές συνθήκες και βρέθηκε ότι σε pH~6, οι φλούδες μπανάνας παρουσίασαν μέγιστη προσροφητική ικανότητα ~210 mg/g, ως προς το MB. Ο φυσικοχημικός και μορφολογικός χαρακτηρισμός των υλικών σε συνδυασμό με τον ποσοτικό προσδιορισμό κινητικών παραμέτρων της διεργασίας της προσρόφησης έδειξε ότι η χημειορόφηση αποτελεί τον επικρατέστερο μηχανισμό προσκόλλησης του MB στην επιφάνεια. Επομένως, το συγκεκριμένο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς οποιαδήποτε τροποποίηση σαν ένα πολύ χαμηλού κόστους προσροφητικό υλικό για την αποτελεσματική απομάκρυνση τόσο των ανιονικών όσο και των κατιονικών βαφών από τα λύματα<sup>22</sup>.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της προσρόφησης MB σε φλούδες μπανάνας σε συνθήκες συνεχούς ροής, χρησιμοποιώντας στήλες σταθερής κλίσης. Για την ποσοτικοποίηση των παραμέτρων που περιγράφουν τη διεργασία της προσρόφησης οι πειραματικά μετρούμενες καμπύλες διέλευσης (breakthrough curves) της συγκέντρωσης MB στην έξοδο της στήλης προσαρμόστηκαν με φυσικά μοντέλα μεταφοράς μάζας, που λαμβάνουν υπόψη τις διεργασίες συναγωγής, διασποράς και προσρόφησης.

## **ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ**

### **ΔΙΑΛΥΜΑ MB**

Κατιονική βαφή MB (μοριακός τύπος: C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>N<sub>3</sub>ClS) αναλυτικής καθαρότητας αγοράστηκε από τη Merck. Αποθεματικά διαλύματα MB των 1000 mg/L παρασκευάστηκαν με απεσταγμένο νερό και όλα τα διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα παρασκευάστηκαν με αραιώση τους στην απαιτούμενη συγκέντρωση. Τέλος, όλα τα διαλύματα απαερώθηκαν πριν τη χρήση τους, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα σχηματισμού φυσσαλίδων αέρα στο εσωτερικό της στήλης.

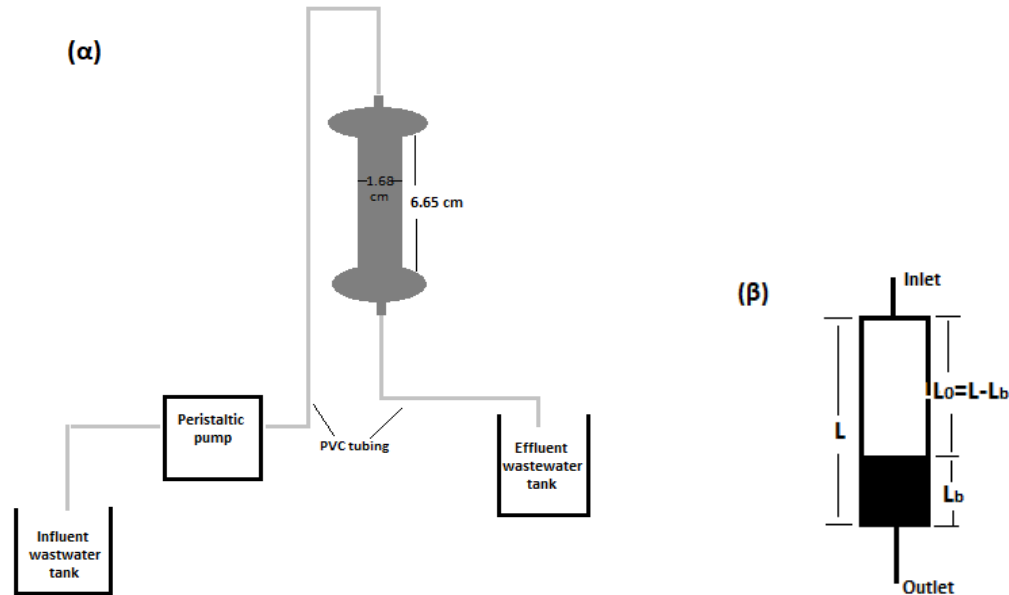
### **ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ**

Οι φλούδες από μπανάνες αρχικά πλύθηκαν με νερό βρύσης και απεσταγμένο νερό αρκετές φορές και έπειτα ξηράνθηκαν σε φούρνο στους 110 °C για 24 ώρες για να απομακρυνθεί η υγρασία. Τα υλικά που προέκυψαν θρυμματίστηκαν και κοσκινίστηκαν σε μηχανικό κόσκινο για να απομονωθούν σωματίδια μεγέθους 125-500 μm.

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΤΗΛΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΛΙΝΗΣ**

Πειράματα συνεχούς ροής πραγματοποιήθηκαν σε στήλη κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα ύψους 6.65 cm και διαμέτρου 1.68 cm ενώ 2 σίτες στερεώθηκαν στα καπάκια εισόδου και εξόδου για να εμποδιστεί η διέλευση των σωματιδίων του προσροφητικού. Όσον αφορά την πειραματική διάταξη, η είσοδος της στήλης συνδέθηκε σε σειρά με περισταλτική αντλία (Dynamax/Rainin RP-1) για την τροφοδοσία του υδατικού διαλύματος. Για όλες τις συνδέσεις χρησιμοποιήθηκε σωλήνας πολυβινυλοχλωριδίου εσωτερικής διαμέτρου 1.52 mm (Σχήμα 1α). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν μέσα σε θερμοστατούμενο φούρνο (Friocell) σε σταθερή θερμοκρασία 25 °C. Ποσότητα προσροφητικού υλικού 2,43 g τοποθετήθηκε μέσα στη στήλη και επιβλήθηκε ροή με κατεύθυνση προς τα κάτω για να εξασφαλιστούν συνθήκες σταθερής κλίσης.

Αρχικά έγινε επιτόπια (in situ) έκπλυση της κλίνης με διοχέτευση 1 L απαερωμένου απεσταγμένου νερού και στη συνέχεια διοχετεύθηκε το διάλυμα του MB, όλα με σταθερή παροχή 1 mL/min. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα για δύο τιμές της αρχικής συγκέντρωσης MB (0.1, 0.2 kg/m<sup>3</sup>). Με τη βοήθεια ενός κλασματικού συλλέκτη (Eidex) δείγματα υδατικού διαλύματος συλλέγονταν σε τακτά χρονικά διαστήματα από την έξοδο της στήλης για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του MB με φασματοφωτόμετρο UV-Vis (Hitachi, U-3000).



**Σχήμα 1.** (α) Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης, (β) Σχηματικό διάγραμμα στήλης

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Κατά τη μονοδιάστατη ροή μιας υδατικής φάσης μέσα από ένα ομογενές πορώδες μέσο, όπως είναι η κλίση του προσροφητικού υλικού, η μεταφορά ενός διαλυμένου ρύπου περιλαμβάνει συναγωγή, διασπορά, προσρόφηση καθώς επίσης και οποιεσδήποτε άλλες βιοχημικές ή αβιοτικές διεργασίες<sup>23</sup> και περιγράφεται μαθηματικά από το παρακάτω ισοζύγιο μάζας:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u_0 \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho_b}{\phi} \frac{\partial S}{\partial t} - r_B - r_A \quad (1)$$

όπου  $t$  είναι ο χρόνος (s),  $C$  είναι η συγκέντρωση ρύπου στην υδατική φάση (kg/m<sup>3</sup>),  $x$  είναι η αξονική απόσταση από την είσοδο της στήλης (m),  $D_L$  είναι ο συντελεστής διαμήκους υδροδυναμικής διασποράς (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>),  $u_0$  είναι η μέση ταχύτητα πόρου (m s<sup>-1</sup>),  $S$  είναι η συγκέντρωση ρύπου στο προσροφητικό υλικό (kg/kg),  $\rho_b$  είναι η φαινομενική πυκνότητα του προσροφητικού υλικού της κλίνης,  $\phi$  είναι το πορώδες της κλίνης ενώ  $r_B$  και  $r_A$  είναι αντιστοίχως ο ρυθμός βιοχημικής αποικοδόμησης και αβιοτικών αντιδράσεων του ρύπου (kg m<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>). Αμελώντας οποιεσδήποτε βιοτικές και αβιοτικές αντιδράσεις, θεωρούμε ότι η προσρόφηση περιγράφεται από κινητική 'αντίδρασης' 1<sup>ης</sup> τάξης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = k_d [K_{eq} C - S] \quad (2)$$

όπου  $K_{eq} = k_a/k_d$  είναι η σταθερά ισορροπίας (m<sup>3</sup>/kg) και ορίζεται ως ο λόγος της κινητικής σταθεράς προσρόφησης,  $k_a$  [m<sup>3</sup>/(kg s)] προς τη κινητική σταθερά εκρόφησης,  $k_d$  (s<sup>-1</sup>)<sup>23</sup>. Ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς περιγράφεται από τη σχέση<sup>24</sup>:

$$D_L = \frac{D_m}{F\phi} + a_L u_0 \quad (3)$$

Όπου  $D_m$  είναι ο συντελεστής μοριακής διάχυσης ( $m^2 s^{-1}$ ),  $F$  είναι ο παράγοντας σχηματισμού και  $a_L$  είναι το μήκος διαμήκους διασποράς (m). Χρησιμοποιώντας τις αδιάστατες μεταβλητές  $\tau = tu_0/L$ ,  $\xi = x/L$ ,  $C^* = C/C_0$  (όπου  $L$  το συνολικό ύψος της στήλης (m)) οι Εξ.(1), (2) τελικά μετασχηματίζονται στις παρακάτω σχέσεις:

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\phi}\right) \frac{\partial C^*}{\partial \tau} = \left(\frac{1}{F\phi Pe} + \frac{a_L}{L}\right) \frac{\partial^2 C^*}{\partial \xi^2} - \frac{\partial C^*}{\partial \xi} - \left(\frac{\rho_b L k_d}{\phi u_0 C_0}\right) [K_{eq} C_0 C^* - S] \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} = \left(\frac{k_d L}{u_0}\right) [K_{eq} C_0 C^* - S] \quad (5)$$

όπου υπεισέρχονται πέντε αδιάστατες παράμετροι: ο αριθμός Peclet,  $Pe = u_0 L / D_m$ , η αδιάστατη κινητική σταθερά εκρόφησης,  $k_d^* = k_d L / u_0$ , η αδιάστατη σταθερά ρόφησης σε ισορροπία,  $K_{eq}^* = K_{eq} C_0$ , ο παράγοντας καθυστέρησης (retardation factor),  $R = K_{eq} \rho_b / \phi$ , και η αδιάστατη πυκνότητα,  $\lambda = \rho_b / (\phi C_0)$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι Εξ. (4),(5) περιγράφουν τη μεταφορά μάζας κατά μήκος της κλίνης του πορώδους υλικού,  $\xi_0 \leq \xi \leq 1.0$ , όπου η απόσταση  $\xi_0$  οριοθετεί την πάνω επιφάνεια του προσροφητικού υλικού,  $\xi_0 = 1 - (L_b/L)$  και  $L_b$  είναι το ύψος της κλίνης (Σχήμα 1β). Από την άλλη πλευρά, το πρώτο τμήμα της στήλης,  $0 \leq \xi \leq \xi_0$ , καταλαμβάνεται μόνο από την υδατική φάση όπου δεν υπάρχει προσρόφηση και η μεταφορά μάζας για το διαλυμένο ρύπο (MB) περιγράφεται από την κλασική εξίσωση διάχυσης-συναγωγής, που σε αδιάστατη μορφή γράφεται:

$$\frac{\partial C^*}{\partial \tau} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C^*}{\partial \xi^2} - \phi \frac{\partial C^*}{\partial \xi} \quad (6)$$

Για την εκτίμηση των παραμέτρων της προσρόφησης ( $K_{eq}, k_d$ ), χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ATHENA Visual Studio 14, όπου οι ΜΔΕ λύνονται με πεπερασμένες διαφορές και η δυναμική προσαρμογή της αριθμητικής λύσης στην πειραματική καμπύλη διέλευσης (breakthrough curve) της συγκέντρωσης MB πραγματοποιείται με στοχαστική Bayesian εκτιμήτρια παραμέτρων<sup>25</sup>.

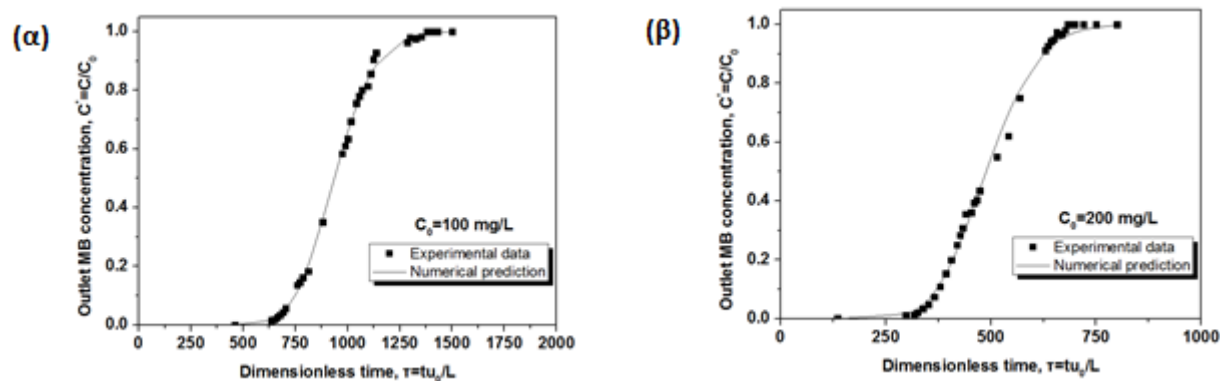
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) δίνονται οι τιμές των γνωστών παραμέτρων που υπεισέρχονται στις εξ.(4)-(6) και χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των παραμέτρων ρόφησης ( $K_{eq}, k_d$ ).

**Πίνακας 1.** Σταθερές παράμετροι

$C_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$u_0$ (m s <sup>-1</sup> )	$L$ (m)	$L_b$ (m)	$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\phi$	$F$	$D_m$ (m <sup>2</sup> /s)
0.1	2.5x10 <sup>-4</sup>	0.0665	0.0186	590	0.35	4.0	4.6x10 <sup>-10</sup>
0.2							

Οι πειραματικές καμπύλες διέλευσης της αδιάστατης συγκέντρωσης MB (breakthrough curves) συγκρίνονται με τις αριθμητικές προβλέψεις του μοντέλου στο Σχήμα 2 για τις δύο αρχικές συγκεντρώσεις MB. Η καμπύλη διέλευσης είναι η γραφική παράσταση του λόγου της τελικής συγκέντρωσης στην έξοδο της στήλης ( $\xi=1.0$ ) προς την αρχική συγκέντρωση ( $C/C_0$ ) συναρτήσεως του αδιάστατου χρόνου.



**Σχήμα 2.** (α) Πειραματικά μετρούμενη έναντι αριθμητικά προβλεπόμενης καμπύλης διέλευσης της συγκέντρωσης MB για αρχική συγκέντρωση  $C_0=0.1 \text{ kg/m}^3$ , (β) Πειραματικά μετρούμενη έναντι αριθμητικά προβλεπόμενης καμπύλης διέλευσης της συγκέντρωσης MB για αρχική συγκέντρωση  $C_0=0.2 \text{ kg/m}^3$ .

Διαπιστώνεται ότι για τις εκτιμώμενες παραμέτρους ρόφησης (Πίνακας 2) οι αριθμητικά προβλεπόμενες καμπύλες διέλευσης σχεδόν ταυτίζονται με τα πειραματικά δεδομένα (Σχήμα 2). Καθώς διπλασιάζεται η αρχική συγκέντρωση MB ο χρόνος που απαιτείται για τον πλήρη κορεσμό της κλίνης με MB υποδιπλασιάζεται.

**Πίνακας 2:** Εκτιμώμενες παράμετροι προσρόφησης και εκρόφησης

$\lambda$ $\times 10^{-3}$	$K_{eq}$ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )	$k_d \times 10^4$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$K_{eq}^*$	$k_d^*$
16.809	$2.0074 \pm 8.64$ $\times 10^{-3}$	$9.328 \pm 2.4$	$0.20074 \pm$ $0.864 \times 10^{-4}$	$2.481248$ $\pm 0.6384$
8.428	$1.047 \pm 8.78$ $\times 10^{-3}$	$6.365 \pm 1.34$	$0.2094 \pm$ $0.87810^{-4}$	$1.69309$ $\pm 0.35644$

Παρατηρούμε ότι καθώς η αδιάστατη πυκνότητα  $\lambda$  ( $\lambda = \rho_b / \phi C_0$ ), η οποία εκφράζει τη διαθέσιμη μάζα προσροφητικού υλικού ανά μονάδα μάζας προσροφημένου ρύπου, μειώνεται στο μισό, η σταθερά ισορροπίας,  $K_{eq}$ , μειώνεται επίσης περίπου στο μισό, που μεταφράζεται σε "σταθερή" τιμή της αδιάστατης σταθεράς ρόφησης σε ισορροπία,  $K_{eq}^*$  ( $K_{eq} = K_{eq} C_0$ ). Αυτή η παράμετρος  $K_{eq}^*$  (Πίνακας 2) εκφράζει την μέγιστη προσροφητική ικανότητα του υλικού (kg-προσροφημένου συστατικού/kg-προσροφητικού). Αξίζει να σημειωθεί ότι η εκτιμώμενη τιμή της παραμέτρου είναι σχεδόν ίση με την αντίστοιχη που προέκυψε από πειράματα προσρόφησης σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου<sup>22</sup>. Από την άλλη πλευρά, η αδιάστατη σταθερά ταχύτητας εκρόφησης  $k_d^*$  ( $k_d^* = k_d / u_0$ ) μειώνεται αλλά σε όρους τάξης μεγέθους παραμένει περίπου σταθερή.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη της προσρόφησης της βαφής Methylene Blue σε προσροφητικό υλικό παρασκευασμένο από φλούδες μπανάνας σε συνθήκες συνεχούς ροής, έδειξε ότι το εν λόγω υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την αφαίρεση του ρύπου από υδατικά απόβλητα. Από την αριθμητική ανάλυση πειραμάτων προσρόφησης σε στήλη σταθερής κλίνης διαπιστώθηκε ότι η προσροφητική ικανότητα του εν λόγω υλικού, όπως ποσοτικοποιείται με την αδιάστατη σταθερά ρόφησης σε ισορροπία  $K_{eq}^*$ , παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως της αρχικής συγκέντρωσης του MB και είναι συγκρίσιμη με την τιμή της προσροφητικής ικανότητας του ίδιου υλικού όπως μετρήθηκε με πειράματα διαλείποντος έργου ( $\sim 0.21 \text{ kg/kg}$ )<sup>22</sup>, γεγονός που επαληθεύει την ορθότητα των αποτελεσμάτων και δείχνει την αποτελεσματική απόδοση του υλικού και υπό συνθήκες συνεχούς ροής.

**ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης “Ενίσχυση Επιχειρήσεων για ερευνητικά έργα στους τομείς: «Μικροηλεκτρονική» και «Προηγμένα Υλικά» (Κωδικός ΟΠΣ 2154)”. Συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και Εθνικούς Πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Δυτική Ελλάδα 2014-2020» (Τίτλος έργου: Υλικά για ενεργειακές αυτόνομες μονάδες καθαρισμού νερού για την ασφαλή επαναχρησιμοποίησή τους – ΥΛΕΝΔΩΡ, Κωδικός Έργου/MIS 5029472).



**Ευρωπαϊκή Ένωση**  
Ευρωπαϊκά Διαρθρωτικά  
και Επενδυτικά Ταμεία

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] V. Katheresan, J. Kansedo, S.Y. Lau. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6 (2018) 4676-4697.
- [2] D. Rawat, V. Mishra, R.S. Sharma. *Chemosphere* 155 (2016) 591-605.
- [3] B.J. Brüscheiler, C. Merlot. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 88 (2017) 214-226.
- [4] M. Wainwright, K.B. Crossley. *Journal of Chemotherapy* 14 (2002) 431-443.
- [5] A. Bhatnagar, M. Sillanpää. *Chemical Engineering Journal* 157 (2010) 277-296.
- [6] C. Djilani, R. Zaghdoudi, F. Djazi, B. Bouchekima, A. Lallam, A. Modarressi, M. Rogalski, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 53 (2015) 112-121.
- [7] R. Mailler, J. Gasperi, Y. Coquet, C. Derome, A. Buleté, E. Vulliet, A. Bressy, G. Varrault, G. Chebbo, V. Rocher. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4 (2016) 1102-1109.
- [8] L. Cui, C. Liu, G. Wu. *Environmental Technology* 29 (2008) 1021-1030.
- [9] A. Saeed, M. Sharif, M. Iqbal. *Journal of Hazardous Materials* 179 (2010) 564-572.
- [10] M.Ş. Tanyildizi. *Chemical Engineering Journal* 168 (2011) 1234-1240.
- [11] F. Deniz, S. Karaman. *Chemical Engineering Journal* 170(1) (2011) 67-74.
- [12] C. Palma, E. Contreras, J. Urra, M.J. Martinez. *Waste and Biomass Valorization* 2 (2011) 77-86.
- [13] M. Dahiru, Zakariyya, U. Zango, M.A. Haruna. *American Journal of Materials Science* 8(2) (2018) 32-38.
- [14] N.K. Mondal, S. Kar. *Applied Water Science* 8(157) (2018).
- [15] S.H. Abbas, F. Kamar. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 9(9) (2018) 2094-2109.
- [16] C. Djelloul, O. Hamdaoui. *Desalination and Water Treatment* 56(11) (2014) 2966-2975.
- [17] R. Han, Y.W. Yu, W. Zou, J. Shi, H. Liu. *Journal of Hazardous Materials* 141(3) (2007) 713-718.
- [18] J. Song, W. Zou, Y. Bian, F. Su, R. Han. *Desalination* 265(1-3) (2011) 119-125.
- [19] S. Afroze, T.K. Sen, H. M. Ang. *Research on Chemical Intermediates* 42(3) (2015) 2343-2364.
- [20] S. Dardouri, J. Sghaier. *Korean Journal of Chemical Engineering* 34(4) (2017) 1037-1043.
- [21] T. Zhou, W. Lu, L. Liu, H. Zhou, Y. Jiao, S. Zhang, R. Han. *Journal of Molecular Liquids* 211 (2015) 909-914.
- [22] A. Stavrinou, C.D. Tsakiroglou, C.A. Aggelopoulos. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6 (2018) 6958-6970.
- [23] Magga, Z., D.N. Tzovolou, M.A. Theodoropoulou, Th. Dalkarani, K. Pikiotis, C.D. Tsakiroglou. *Journal of Environmental Sciences and Health B* (4) (2008), 732-741.
- [24] C.A. Aggelopoulos, C.D. Tsakiroglou, *Water, Air and Soil Pollution* 185 (2007) 223-237.
- [25] Stewart, W.E., M. Caracotsios, “Computer-aided modeling of reactive systems”, Wiley, NY (2008).