



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Αριθμ. Πρωτοκ. 44/
Ημερομηνία 23-10-13

Πτυχιακή διατριβή

**«Προσομοίωση κινητικών μοντέλων στην μελέτη της προσρόφησης
χρωστικών ουσιών από ενεργό άνθρακα»**



Επιβλέπων: Δημήτρου Ανθή

Μηλιώκας Ν. Γεώργιος

Βόλος 2013



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 12219/1
Ημερ. Εισ.: 12/12/2013
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ-ΦΠΑΠ
2013
ΜΗΛ

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή διατριβή πραγματεύεται τη διεξαγωγή μιας έρευνας-μελέτης της προσρόφησης χρωστικών ουσιών από ενεργό άνθρακα και την προσομοίωση κινητικών μοντέλων στην εν λόγω προσρόφηση. Αρχικά, λοιπόν, κρίθηκε απαραίτητο να μελετηθούν και να αναλυθούν ορισμένες βασικές έννοιες: η προσρόφηση, ο ενεργός άνθρακας και οι κινητικές εξισώσεις. Συγκεκριμένα, όσον αφορά στην προσρόφηση μελετήθηκε η διαδικασία της πραγματοποίησής της, η διαφορά της με την απορρόφηση, οι ποικίλοι τύποι προσροφητών που υπάρχουν, οι ποικίλοι τρόποι προσρόφησης που συναντώνται και οι εφαρμογές της στο σύγχρονο πολιτισμό. Κατά διαδοχή, περί ενεργού άνθρακα αναλύθηκε η παραγωγή του, οι διάφορες ταξινομημένες μορφές του που απαντώνται σήμερα, οι βασικές ιδιότητές του και φυσικά οι βασικές εφαρμογές του σε ποικίλους τομείς της σύγχρονης πραγματικότητας. Παράλληλα, μελετήθηκαν οι κινητικές εξισώσεις και ορισμένα συγκεκριμένα μοντέλα αντίδρασης προσρόφησης: η εξίσωση αξιολόγησης «Pseudo-first-order», η εξίσωση αξιολόγησης «Pseudo-second-order», η εξίσωση αξιολόγησης «Intraparticle diffusion» και η εξίσωση αξιολόγησης «Elovich equation». Στη συνέχεια αναλύθηκε ο σκοπός εκπόνησης της διατριβής αυτής σε κάθε δυνατή πτυχή του και το πειραματικό μέρος της διατριβής, όπως και τα δύο αντίστοιχα επιμέρους τμήματά του: το εργαστηριακό και το προγραμματιστικό (λογισμικό κινητικών μοντέλων). Τέλος, παρατέθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την όλη διαδικασία τόσο της θεωρητικής όσο και της πρακτικής (εργαστηριακής) διατριβής, τα οποία αποτελούν και τα ουσιαστικά δεδομένα του πειραματικού μέρους της διατριβής, ακολουθούμενα από τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε ποικιλοτρόπως για την εμπειριστατωμένη συμπλήρωση του θεωρητικού μέρους της εργασίας αυτής.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, καταρχήν, στην επιβλέπουσα της πτυχιακής διατριβής μου κ. Ανθή Δημήρκου, καθηγήτρια της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών και διευθύντρια του εργαστηρίου Εδαφολογίας, για τη δυνατότητα που μου παρείχε να εκπονήσω τη διατριβή μου στον επιστημονικό αυτό κλάδο όπως και για την ιδιαίτερη βοήθεια και στήριξη καθ' όλη τη διάρκειά της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ζαχαρία Ιωάννου για την πολύτιμη βοήθειά του στην εκπόνηση του εργαστηριακού-πειραματικού μέρους της διατριβής και τη συγγραφή της. Εξίσου θερμά ευχαριστήρια θα ήθελα να εκφράσω και στον κ. Βασίλειο Αντωνιάδη, λέκτορα της Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας που, επίσης, παρείχε την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια του πειραματικού μέρους στο εργαστήριο Εδαφολογίας. Παράλληλα, δε θα μπορούσα να παραλείψω από τις ευχαριστίες μου, τους γονείς μου και τον αδερφό μου, λόγω της αμέριστης και αδιάλειπτης ηθικής, οικονομικής και πνευματικής συμπαράστασης τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου διατριβής, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους μου που με στήριξαν σε όλη μου αυτή την προσπάθεια.

Περιεχόμενα

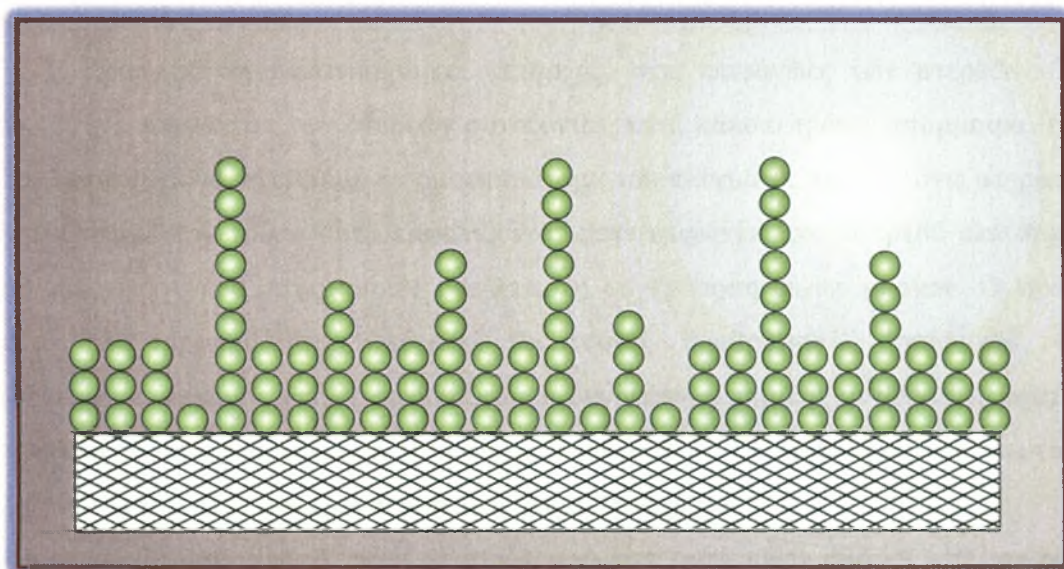
1. Προσρόφιση.....	6
1.1. Γενικά	6
1.2. Περιγραφή διαδικασίας	9
1.3. Περιγραφή προσρόφισης.....	10
1.4. Διαφορά μεταξύ προσρόφισης και απορρόφισης.....	12
1.5. Ισόθερμες.....	14
1.6. Προσροφητές.....	17
1.6.1. Χαρακτηριστικά και γενικές απαιτήσεις	17
1.6.2. Silica gel	17
1.6.3. Ζεόλιθοι	19
1.7. Προσρόφιση πρωτεϊνών από βιοϋλικά.....	21
1.8. Ψύκτες προσρόφισης.....	21
1.9. Προσρόφιση διάχυσης.....	22
1.10. Προσρόφιση πολυμερών	23
1.10.1. Διαφοροποίηση πολυμερών και μη επιφανειών	23
1.11. Προσρόφιση σε ιούς.....	23
1.12. Εφαρμογές στο σύγχρονο-δημοφιλή πολιτισμό	24
2. Ενεργός Άνθρακας	25
2.1. Γενικά	25
2.2. Παραγωγή.....	26
2.2.1. Φυσική επανενεργοποίηση	26
2.2.2. Χημική ενεργοποίηση.....	26
2.3. Ταξινόμηση	27
2.3.1. Ενεργός Άνθρακας σε σκόνη.....	28
2.3.2. Κοκκώδης Ενεργός Άνθρακας	29
2.3.3. Εξηλασμένος Ενεργός Άνθρακας.....	30
2.3.4. Ενεργός Άνθρακας σε σφαιρίδια	30
2.3.5. Εμποτισμένος Άνθρακας	32
2.3.6. Άνθρακας επικαλυμμένος με πολυμερή.....	31
2.3.7. Διάφορες επιπλέον μορφές.....	31
2.4. Ιδιότητες	33
2.4.1. Ο αριθμός-βαθμός ιωδίου.....	35
2.4.2. Μελάσα.....	35
2.4.3. Τανίνες.....	36
2.4.4. Μπλε του μεθυλενίου	36
2.4.5. Αποχλωρίωση	36
2.4.6. Φαινομενική πυκνότητα	37
2.4.7. Αριθμός σκληρότητας/τριβής.....	37
2.4.8. Περιεκτικότητα σε τέφρα	37
2.4.9. Δραστηριότητα τετραχλωριούχου άνθρακα	38
2.4.10. Κατανομή μεγέθους σωματιδίων.....	38
2.5. Χημικές ιδιότητες και τροποποίηση.....	38
2.6. Παραδείγματα προσρόφισης (ενεργού άνθρακα).....	39
2.6.1. Ετερογενής κατάλυση.....	39
2.6.2. Προσρόφιση ψύξης.....	39
2.7. Εφαρμογές	40
2.7.1. Περιβαλλοντικές εφαρμογές.....	41

2.7.2.	Φαρμακευτικές εφαρμογές	41
2.7.3.	Αποθήκευση καυσίμων	43
2.7.4.	Καθαρισμός αερίων	44
2.7.5.	Χημικός καθαρισμός-εξαγνισμός	44
2.7.6.	Καθαρισμός αποσταγμένων αλκοολούχων ποτών	44
2.7.7.	Καθαρισμός υδραργύρου.....	44
2.7.8.	Διάθεση στις Η.Π.Α. μετά απορρόφησης υδραργύρου	45
2.7.9.	Επανενεργοποίηση και αναγέννηση	45
2.7.10.	Θερμική επανενεργοποίηση	46
2.7.11.	Ποικίλες τεχνικές αναγέννησης.....	47
3.	Κινητικές εξισώσεις.....	48
3.1.	Εισαγωγή	48
3.2.	Μοντέλα αντίδρασης προσρόφησης.....	50
3.2.1.	Εξίσωση αξιολόγησης «Pseudo-first-order»	50
3.2.2.	Εξίσωση αξιολόγησης «Pseudo-second-order».....	51
3.2.3.	Εξίσωση αξιολόγησης «Elovich equation»	53
3.2.4.	Εξίσωση αξιολόγησης «Intraparticle diffusion».....	54
4.	Σκοπός.....	57
4.1.	Εργαστηριακό πείραμα	57
4.2.	Λογισμικό μοντέλων.....	58
4.2.1.	Διάγραμμα ροής.....	59
5.	Πειραματικό μέρος	60
5.1.	Εργαστηριακό μέρος.....	60
5.1.1.	Υλικά και μέθοδοι.....	60
5.1.2.	Διαδικασία πειράματος	63
5.1.2.1.	Πρώτο Στάδιο	63
5.1.2.2.	Δεύτερο Στάδιο	63
5.1.2.3.	Τρίτο Στάδιο	64
5.1.2.4.	Τέταρτο Στάδιο	64
5.2.	Προγραμματιστικό μέρος (λογισμικό μοντέλων).....	65
5.2.1.	Λειτουργικότητα λογισμικού.....	65
5.2.1.1.	Γενικά	65
5.2.1.2.	Φόρμα – τρόπος λειτουργίας	66
5.2.1.3.	Έλεγχοι ορθότητας-εγκυρότητας.....	66
5.2.2.	Διεπαφή χρήστη – Τύποι διεπαφής.....	67
5.2.2.1.	Εισαγωγή τιμών δεδομένων.....	67
5.2.2.2.	Επεξεργασία δεδομένων – συναρτήσεις.....	69
5.2.2.3.	Πληροφοριακές εκτυπώσεις	70
6.	Αποτελέσματα	72
6.1.	Εργαστηριακά αποτελέσματα	72
6.2.	Αποτελέσματα λογισμικού μοντέλων.....	75
6.2.1.	Αποτελέσματα “Pseudo-first order”	75
6.2.2.	Αποτελέσματα “Pseudo-second order”.....	75
6.2.3.	Αποτελέσματα “Intraparticle diffusion”	75
6.2.4.	Αποτελέσματα “Elovich equation”	75
7.	Συμπεράσματα	77
8.	Βιβλιογραφία.....	78
8.1.	Ξενόγλωσση.....	78
8.2.	Ελληνική.....	82
8.3.	Διαδίκτυο	83

1. Προσρόφηση

1.1. Γενικά

Καταρχήν, κρίνεται απαραίτητη η απόδοση ενός ορισμού για τον όρο «προσρόφηση». Προσρόφηση, λοιπόν, ονομάζεται η προσκόλληση ατόμων, ιόντων, ή μορίων ενός αερίου, υγρού, ή διαλυμένου στερεού σε μια επιφάνεια, φαινόμενο κατά το οποίο μόρια ενός υγρού ή ενός αερίου συγκρατούνται σ' ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα ορισμένων στερεών ουσιών που αποκαλούνται προσροφητές ή προσροφητικά μέσα. Παραδείγματα προσροφητικών μέσων αποτελούν: ο ζωϊκός άνθρακας, το ενεργό αργίλιο, η αλουμίνα, ο ενεργός βωξίτης και άλλα. Κατά τη



Εικόνα 1: Το μοντέλο των *Brunauer, Emmett* και *Teller* περί πολυεπίπεδης προσρόφησης, το οποίο παρουσιάζει την τυχαία κατανομή των μορίων στην επιφάνεια του υλικού

διαδικασία προσρόφησης, δημιουργείται μια μεμβράνη του προσροφούμενου υλικού στην επιφάνεια του προσροφητή. Η διαδικασία αυτή διαφέρει από την αντίστοιχη της απορρόφησης, κατά την οποία ένα υγρό (το απορροφούμενο υλικό) διαποτίζεται ή διαλύεται από ένα υγρό ή στερεό (τον απορροφητή). Αξίζει να σημειωθεί πως η προσρόφηση είναι μία διαδικασία που βασίζεται στην επιφάνεια των υλικών που συμμετέχουν στη διαδικασία, ενώ η απορρόφηση συμπεριλαμβάνει το συνολικό όγκο των υλικών. Ο όρος απορρόφηση περικλείει ουσιαστικά και τις δύο διαδικασίες, ενώ η εκρόφηση είναι το αντίθετο της προσρόφησης. Είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο.

Ομοίως με την επιφανειακή τάση, η προσρόφηση είναι μία διαδοχή επιφανειακής ενέργειας. Σε ένα ελεύθερο υλικό, όλες οι προϋποθέσεις δέσμευσης (είτε είναι ιονική, ομοιοπολική, ή μεταλλική) των συνισταμένων ατόμων του υλικού είναι γεμάτα με άλλα άτομα στο υλικό. Ωστόσο, άτομα στην επιφάνεια του προσροφητικού υλικού δεν είναι καθολικά περιβαλλόμενες από άλλα άτομα προσρόφησης και για το λόγο αυτό δύνανται να προσελκύσουν προσροφούμενα υλικά. Η ακριβής φύση των δεσμών που αναπτύσσονται εξαρτάται από τις λεπτομέρειες των ειδών που συμπεριλαμβάνονται, αλλά η διαδικασία προσρόφησης είναι γενικά ταξινομημένη ως *φυσιορόφηση* – δηλαδή φυσική προσρόφηση – (που είναι και χαρακτηριστικό των αδύναμων δεσμών van der Waals) ή *χημειορόφηση* – δηλαδή χημική προσρόφηση – (χαρακτηριστικό των ομοιοπολικών δεσμών). Επίσης, μπορεί να συμβεί και λόγω ηλεκτροστατικής έλξης.

Η προσρόφηση παρατηρήθηκε, καταρχάς, στις επιφάνειες των στερεών. Τα άτομα στις επιφάνειες των στερεών συνδέονται, κατά κάποιο τρόπο, ασύμμετρα (όχι συμμετρικά, μονόπλευρα) με τα ομοειδή άτομα του πλέγματος του εν λόγω στερεού. Μάλιστα, με τον τρόπο αυτό εμφανίζονται στην επιφάνεια του στερεού ελεύθερες μονάδες συγγένειας, στις οποίες οφείλεται η συγκράτηση ξένων μορίων. Ο τύπος αυτός της προσρόφησης αποτελεί τη φυσική προσρόφηση. Αντίστοιχα, σε περιπτώσεις κατά τις οποίες εμφανίζεται η δυνατότητα χημικής αντίδρασης μεταξύ των μορίων της προσροφούμενης ουσίας και των μορίων της επιφάνειας του στερεού, η προσρόφηση στην εν λόγω περίπτωση ονομάζεται χημική.

Ωστόσο, όσον αφορά στην προσρόφηση, είτε αυτή είναι φυσική είτε χημική, εφόσον σχετίζεται άμεσα με την επιφάνεια του προσροφητικού μέσου, θα είναι αυξάνεται κατ' αναλογία με την προσροφητική επιφάνεια. Πραγματικά, τα πορώδη ή κοκκώδη υλικά παρουσιάζουν κατά πολύ υψηλότερη προσροφητική ικανότητα, ακριβώς επειδή παρουσιάζουν υψηλή επιφανειακή ανάπτυξη.

Η προσρόφηση απαντάται σε ποικίλα φυσικά, φυσιολογικά, βιολογικά και χημικά συστήματα και χρησιμοποιείται σε υψηλά επίπεδα σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως είναι το ενεργό κάρβουνο, συλλαμβάνοντας και χρησιμοποιώντας τη θερμότητα των αποβλήτων ώστε να παρέχουν κρύο νερό για κλιματισμό και άλλες απαιτήσεις διαδικασιών (ψύκτες προσρόφησης), συνθετικές ρητίνες, αύξηση της αποθηκευτικής χωρητικότητας των ανθράκων που προέρχονται από καρβίδια και τον καθαρισμό του νερού. Η προσρόφηση, η ανταλλαγή ιόντων και η χρωματογραφία είναι διαδικασίες απορρόφησης, στις οποίες συγκεκριμένα προσροφούμενα υλικά μεταφέρονται

επιλεκτικά από την υγρή φάση στην επιφάνεια αδιάλυτων, άκαμπτων σωματιδίων που αιωρούνται σε ένα δοχείο ή είναι συσκευασμένα σε μία στήλη. Λιγότερο γνωστές είναι οι εφαρμογές της φαρμακευτικής βιομηχανίας, όντας ένα μέσο παράτασης της νευρολογικής έκθεσης σε συγκεκριμένα φάρμακα ή μέρη αυτών.

Αξίζει, φυσικά, να αναφερθεί πως οι εφαρμογές του φαινομένου (της προσρόφησης) χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας. Το ενδεχόμενο να επιτευχθεί υψηλό κενό, έως και της τάξεως των 10⁻⁷ mmHg, στην περίπτωση κατά την οποία μέθοδοι με αντλίες και άλλα παρόμοια μέσα δεν προσφέρονται, είναι εξαιρετικά πιθανό. Μάλιστα, δεν είναι λίγες οι ουσίες που, λόγω της προσροφητικής τους ικανότητας σε υδρατμούς, χρησιμοποιούνται ως ξηραντικά μέσα. Συγκεκριμένα, αξιοσημείωτη ανάλογη εφαρμογή αποτέλεσε ο ενεργός άνθρακας στον Α΄ Παγκόσμιο πόλεμο, που χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον στις αντιασφυξιόγόνους προσωπίδες κατά των πολεμικών αερίων. Προσροφητικά σώματα χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις κλιματισμού (air condition) – όπου ο αέρας καθαρίζεται από τους υδρατμούς με διήθηση ανάμεσα από πυκνές προσροφητικές ουσίες – και σε ορισμένες βιομηχανικές επεξεργασίες για αποχρωματισμό ή επανάκτηση πτητικών διαλυτών. Τέλος, μία εξίσου σημαντική εφαρμογή αποτελεί ο διαχωρισμός ενός μείγματος αερίων από ουσίες που παρουσιάζουν εκλεκτικότητα, ή αλλιώς μια διαφορετική προσροφητική ικανότητα για κάθε αέριο. Ο τρόπος αυτός αποτελεί και τη μέθοδο που εφαρμόζεται για το διαχωρισμό ευγενών αερίων.

Ο όρος «προσρόφηση» επινοήθηκε το 1881 από το Γερμανό φυσικό *Heinrich Kayser* (1853-1940).

Η προσρόφηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία ένα στερεό χρησιμοποιείται προκειμένου να διαχωρισθεί και να αφαιρεθεί μια διαλυμένη ουσία από ένα υδατικό διάλυμα. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ο ενεργός άνθρακας αποτελεί το στερεό που λειτουργεί ως «προσροφητής». Ο ενεργός άνθρακας παράγεται συγκεκριμένα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μία εξαιρετικά μικρού μεγέθους εσωτερική επιφάνεια (της τάξης των 500-1500 m²/g). Μάλιστα, η συγκεκριμένου μεγέθους ειδική επιφάνεια καθιστά τον ενεργό άνθρακα ιδανικό στοιχείο για την πραγματοποίηση της προσρόφησης. Ο ενεργός άνθρακας συναντάται σε δύο μορφές: Τον *Ενεργό Άνθρακα σε Σκόνη* (PAC) και τον *Κοκκώδη Ενεργό Άνθρακα* (GAC). Η δεύτερη μορφή του (GAC) χρησιμοποιείται περισσότερο στις υδατικές εφαρμογές, καθώς δύναται να προσροφήσει τις ακόλουθες διαλυτές ουσίες:

- Οργανικές – μη πολικές ουσίες όπως:

- ♦ Μεταλλικά – ανόργανα έλαια
- ♦ BTEX¹
- ♦ Πολύ-αρωματικοί υδρογονάνθρακες
- ♦ (χλωριούχα) φαινόλες
- Αλογονωμένες ουσίες: I, Br, Cl, H, F
- Οσμές
- Γεύσεις
- Μαγιές
- Ποικίλα προϊόντα ζύμωσης
- Μη πολικές ουσίες που δεν είναι υδατοδιαλυτές

1.2. Περιγραφή διαδικασίας

Το νερό διοχετεύεται σε μια στήλη που περιέχει ενεργό άνθρακα. Το νερό αυτό φεύγει από τη στήλη διαμέσου ενός συστήματος διοχέτευσης. Η δραστηριότητα μιας στήλης ενεργού άνθρακος βασίζεται στη θερμοκρασία και τη φύση των ουσιών που διοχετεύονται εντός της. Το νερό διασχίζει τη στήλη με σταθερούς ρυθμούς, γεγονός που προκαλεί τη συσσώρευση διαφόρων ουσιών στο φίλτρο. Ως επακόλουθο, παρουσιάζεται η ανάγκη αντικατάστασης του φίλτρου ανά διαστήματα. Κατά κύριο λόγο, ένα χρησιμοποιημένο φίλτρο μπορεί να αναζωογονηθεί με ποικίλους τρόπους. Χάριν παραδείγματος, ο κοκκώδης άνθρακας μπορεί να αναζωογονηθεί εύκολα μέσω οξείδωσης οργανικής ύλης. Η δραστηριότητα του ενεργού άνθρακα μειώνεται (κατά 5-10%). Ένα μικρό μέρος του ενεργού άνθρακα διαλύεται κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής διαδικασίας και πρέπει να αντικαθίσταται. Αντίστοιχα, στην περίπτωση κατά την οποία στο φίλτρο χρησιμοποιούνται διάφορες στήλες και

¹ BTEX: είναι ένα αρκτικόλεξο που απαρτίζεται από τους όρους *benzene*, *toluene*, *ethylbenzene*, και *xylenes*. Αυτά τα μείγματα είναι μέρη των ασταθών οργανικών ενώσεων (VOCs) που απαντώνται στα παράγωγα του πετρελαίου όπως είναι η βενζίνη. Μάλιστα, τα περισσότερα από αυτά προκαλούν βλάβες στο νευρικό σύστημα.

Τα συμπλέγματα-μείγματα BTEX είναι ευρέως γνωστά, λόγω της μόλυνσης που προκαλούν στο χώμα και τα εδαφικά νερά. Τέτοιου τύπου μόλυνση συνήθως απαντάται σε περιοχές που παράγουν πετρέλαιο ή φυσικό αέριο, σταθμούς πετρελαίου και υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης (USTs) ή εναέριες δεξαμενές αποθήκευσης (ASTs), που περιέχουν βενζίνη ή άλλα προϊόντα που σχετίζονται άμεσα με το πετρέλαιο.

Η ποσότητα του καθολικού «BTEX», ουσιαστικά δηλαδή το άθροισμα των συγκεντρώσεων των συμπλεγμάτων από τα οποία απαρτίζεται, είναι σε ορισμένες περιπτώσεις αρωγός στην εκτίμηση του σχετικού ρίσκου, ή της σοβαρότητας των εκάστοτε περιπτώσεων μολυσμένων τοποθεσιών και της ανάγκης για θεραπεία των τοποθεσιών αυτών. Η Ναφθαλίνη μπορεί, επίσης, να συμπεριληφθεί σε ανάλυση ολικού BTEX, αποφέροντας αποτελέσματα που αναφέρονται στο BTEXN. Κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ορισμένες φορές προστίθεται και το στυρένιο, μετονομάζοντάς το σε BTEXS.

μάλιστα κατά διαδοχή, μπορεί να διασφαλισθεί το γεγονός ότι το σύστημα καθαρισμού δε θα φτάσει ποτέ σε πλήρη εξάντληση.

1.3. Περιγραφή της προσρόφησης

Τα μόρια της αερίου ή της υγρής φάσης θα επισυναφθούν μέσω ενός φυσικού τρόπου σε μια επιφάνεια, (εν προκειμένω χρησιμοποιείται ο ενεργός άνθρακας ως προσροφητικό μέσο χάριν σαφούς εξήγησης) της επιφάνειας του ενεργού άνθρακα. Η διαδικασία της προσρόφησης πραγματοποιείται σε τρία διαδοχικά στάδια.

- ♦ Μακρομεταφορά: Η κίνηση της οργανικής ύλης διαμέσου του συστήματος μακροπόρων του ενεργού άνθρακα (οι μακροπόροι είναι μεγαλύτεροι των 50 νανόμετρων)
- ♦ Μικρομεταφορά: Η κίνηση της οργανικής ύλης διαμέσου του συστήματος μεσοπόρων και μικροπόρων ενεργού άνθρακα (οι μικροπόροι είναι μικρότεροι των 2 νανόμετρων και οι μεσοπόροι αντιστοιχούν σε μέγεθος της τάξης των 2-50 νανόμετρων)
- ♦ Απορρόφηση: Η φυσική προσκόλληση της οργανικής ύλης στη επιφάνεια του ενεργού άνθρακα (στους μεσοπόρους και στους μικροπόρους του ενεργού άνθρακα).

Το επίπεδο δραστηριότητας της προσρόφησης βασίζεται κατά κύριο λόγο στη συγκέντρωση της ουσίας στο νερό, της θερμοκρασίας και της πολικότητας της ουσίας. Μια πολική ουσία (ή αλλιώς μια ουσία που διαλύεται καλώς στο νερό) δε δύναται ή δύναται δύσκολα να αφαιρεθεί μέσω του ενεργού άνθρακα, σε αντίθεση με μία μη-πολική ουσία που δύναται να αφαιρεθεί ολοκληρωτικά μέσω του ενεργού άνθρακα. Κάθε είδος άνθρακα έχει και μία συγκεκριμένη ισόθερμη (καμπύλη) προσρόφησης όπως φαίνεται παρακάτω και στο σχήμα 1, και στην επιχείρηση μεταχείρισης του νερού, η ισόθερμη αυτή καθορίζεται από τη συνάρτηση του Φρόιντλιχ (*Freundlich*).

Η συνάρτηση του Freundlich έχει ως εξής:

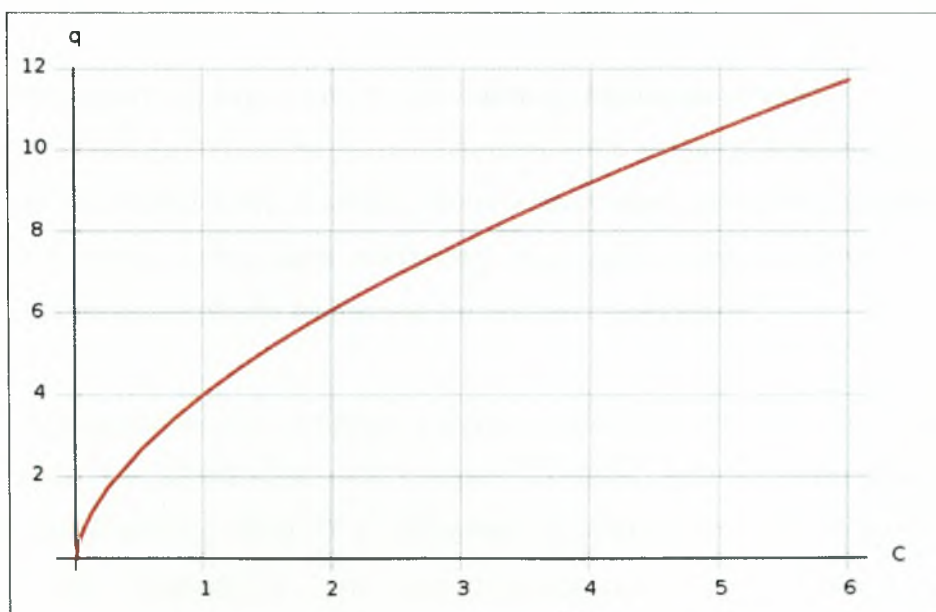
$$\frac{x}{m} = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$$

όπου:

x/m : η προσροφημένη ουσία ανά γραμμάριο ενεργού άνθρακα

C_e : η διαφορά της συγκέντρωσης (μεταξύ προ και μετά της προσρόφησης)

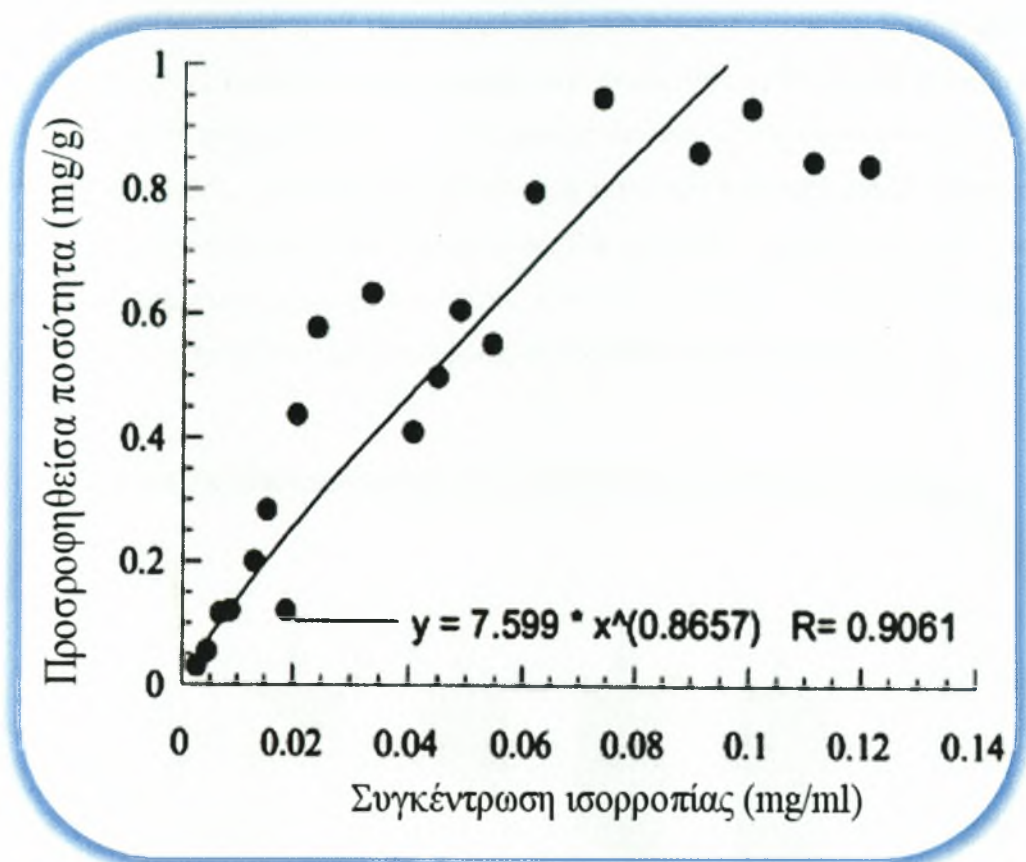
K_f, n : συγκεκριμένες σταθερές



Σχήμα 1. Παράδειγμα της ισόθερμης καμπύλης του Freundlich, στην οποία φαίνεται η προσροφημένη ποσότητα q , συναρτήσει της συγκέντρωσης ισορροπίας στο διάλυμα c .

Το διάγραμμα αντιστοιχεί στις τιμές των σταθερών:

$K=4$ και $1/n=0,6$



Σχήμα 2. Ισόθερμη καμπύλη συγκεκριμένης προσρόφησης ενεργού άνθρακα.

1.4. Ουσιαστική διαφορά μεταξύ προσρόφησης και απορρόφησης

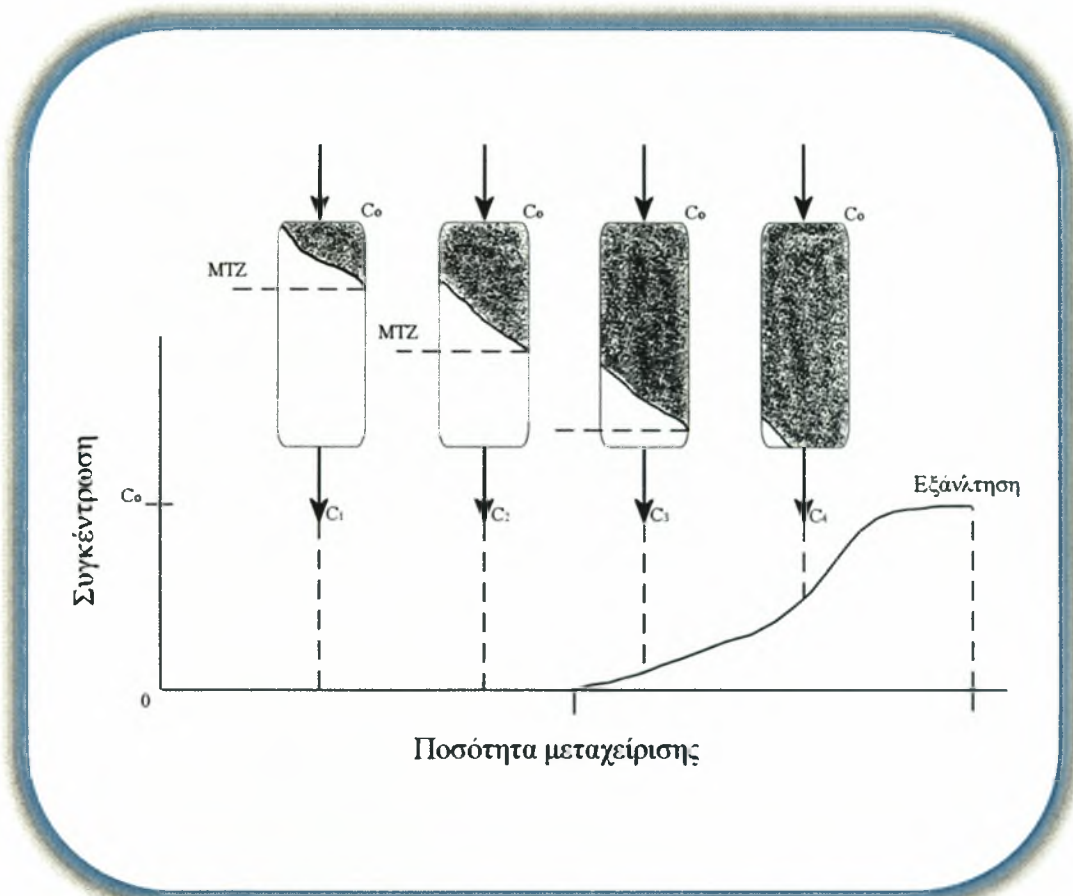
Όταν μια ουσία προσκολλάται σε μια επιφάνεια αυτό ονομάζεται προσρόφηση, και κατά την περίπτωση αυτή, η ουσία προσκολλάται στην εσωτερική επιφάνεια του ενεργού άνθρακα. Όταν, κατά περίπτωση, ένα αέριο συμπεριλαμβάνεται σε ένα διάλυμα, η προαναφερθείσα διαδικασία ονομάζεται αναρρόφηση.

Η δεύτερη καμπύλη του ενεργού άνθρακα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2, παρουσιάζει την εξασθένηση ενός φίλτρου. Συνήθως, τοποθετούνται συστήματα-μονάδες απολύμανσης τύπου UV κατά διαδοχή με τη στήλη του ενεργού άνθρακα.

Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι με τη χρήση του ενεργού άνθρακα για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου από τα απόβλητα, τα οργανικά συστατικά μικρού μοριακού βάρους δεν δεσμεύονται από το σύστημα του ενεργού άνθρακα.

Ο ενεργός άνθρακας απομακρύνει αποτελεσματικά τα διαλυμένα οργανικά συστατικά ακόμη και όταν αυτά βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Η απομάκρυνση αυτή

γίνεται μέσω του μηχανισμού της προσρόφησης. Οι οργανικές ουσίες προσροφώνται στη μεγάλη ειδική επιφάνεια του άνθρακα, ενώ παράλληλα η βιολογική αποδόμηση ανοίγει και πάλι τους πόρους και γενικότερα τις διόδους μεταξύ των κόκκων. Λόγω αυτής της συμβολής της βιολογικής δράσεως, η παρουσία τοξικών ουσιών οδηγεί στη μείωση της απόδοσης του όλου συστήματος. Για τη μείωση, λοιπόν, του συνολικού φορτίου, ή της συγκέντρωσης καλύτερα, των ουσιών από τις οποίες θέλουμε να απαλλαγούμε, χρησιμοποιούμε κατά βάση τον κοκκώδη ενεργό άνθρακα.



Σχήμα 3. Η εξάντληση κατά τη χρήση της στήλης ενεργού άνθρακα. Στο σημείο C_3 η στήλη αρχίζει να χάνει την ισχύ της και φθάνοντας στο σημείο C_4 η στήλη πλέον παρουσιάζει ελάχιστη αποτελεσματικότητα, ενώ ξεπερνώντας το σημείο C_4 δεν υπάρχει καμία απολύτως δράση. Μεταξύ των σημείων C_3 και C_4 βρίσκεται το διάστημα κατά το οποίο θα πρέπει να αλλαχθεί η στήλη.

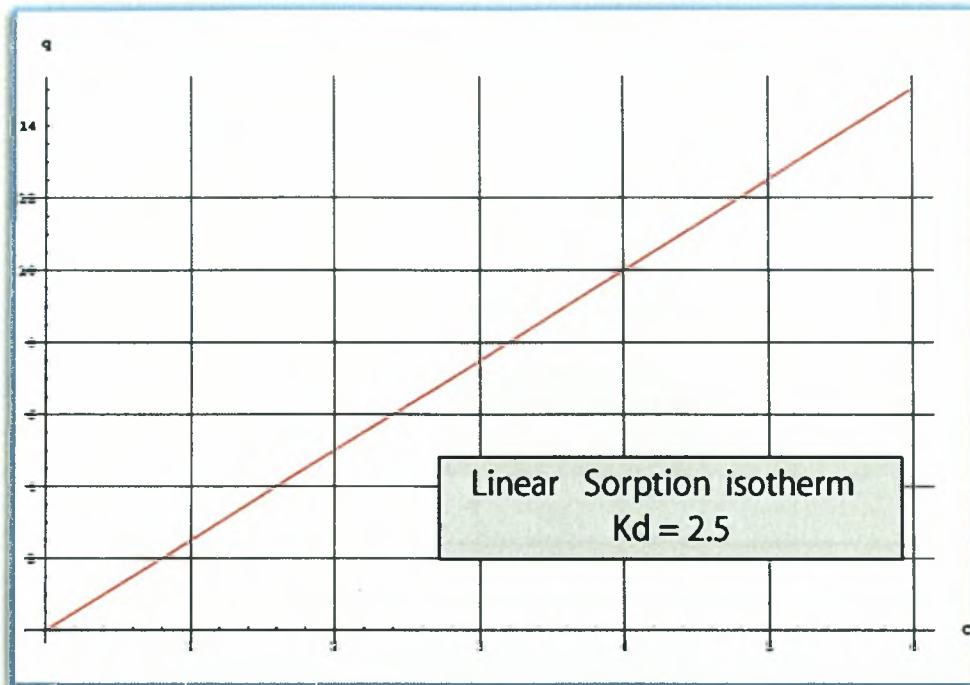
1.5. Ισόθερμες

Η προσρόφηση συνήθως περιγράφεται με ισόθερμες (ισοθερμικές καμπύλες), στις οποίες φαίνεται η ποσότητα του προσροφούμενου υλικού στον προσροφητή ως μία συνάρτηση της πίεσής του (αν επρόκειτο για αέριο) ή συγκέντρωσης (αν επρόκειτο για υγρό) σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας. Η ποσότητα που προσροφάται είναι σχεδόν πάντα κανονικοποιημένη από τη μάζα του προσροφητή ώστε να μπορεί να επιτρέψει τη σύγκριση διαφορετικών υλικών.

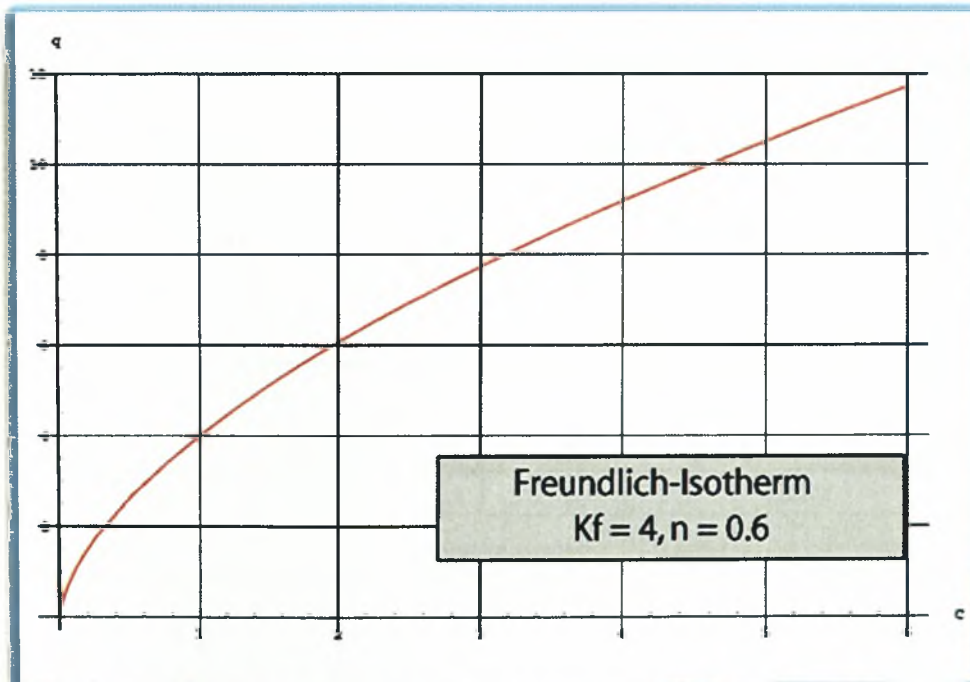
Τα διάφορα είδη ισόθερμων που συναντώνται είναι:

- Η γραμμική
- Η **Freundlich**
- Η **Langmuir**
- Η θεωρία **BET**
- Η **Kisliuk**
- Η ενθαλπία προσρόφησης

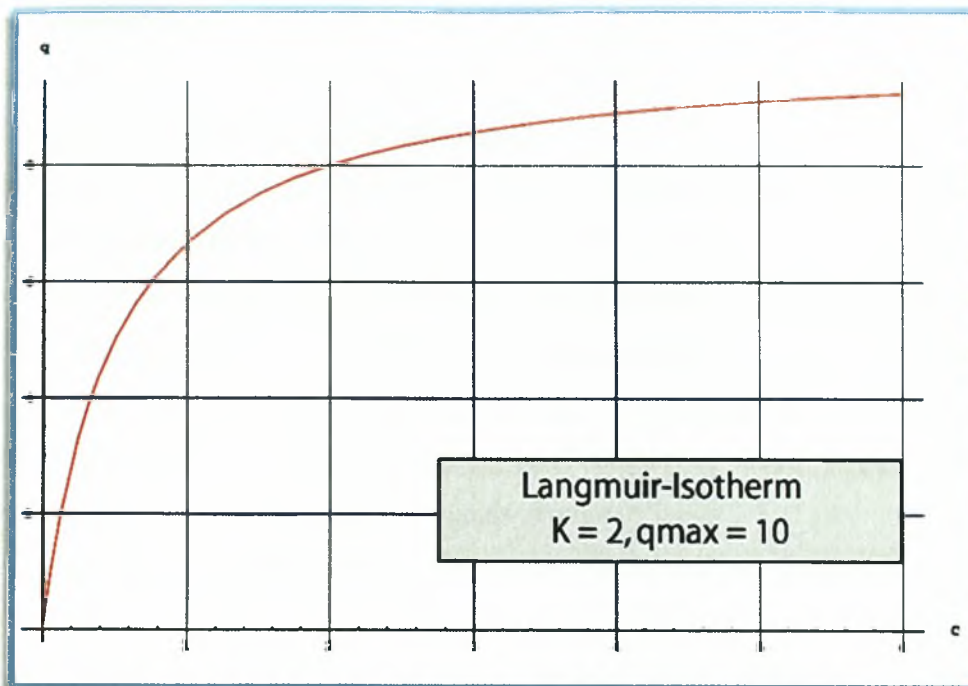
Ακολουθούν ισοθερμικές καμπύλες και γραφικές παραστάσεις για τα διάφορα είδη ισοθερμών που συναντώνται:



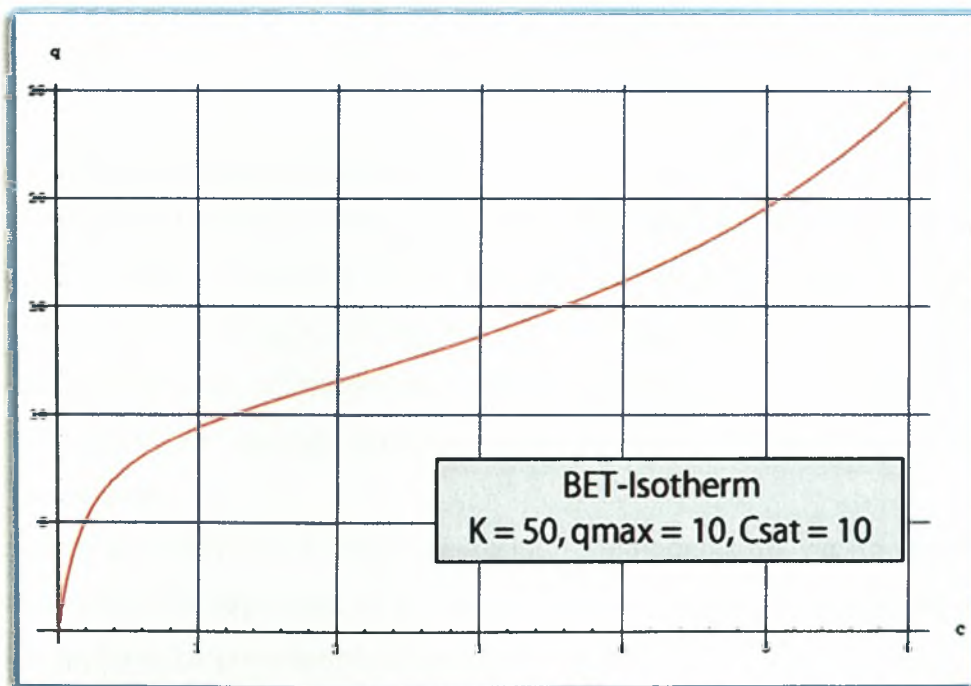
Σχήμα 5. Η γραμμική ισοθερμική καμπύλη προσρόφησης.



Σχήμα 6. Η ισοθερμική καμπύλη προσρόφησης του *Freundlich*.



Σχήμα 7. Η ισοθερμική καμπύλη προσρόφησης του *Langmuir*.



Σχήμα 8. Η ισοθερμική καμπύλη προσρόφησης *BET* (θεωρία *BET*).

1.6. Προσροφητές

1.6.1. Χαρακτηριστικά και γενικές απαιτήσεις

Οι προσροφητές συνήθως χρησιμοποιούνται σε μορφή σφαιρικών δισκίων, ράβδων, καλουπιών ή μονόλιθων με υδροδυναμική διάμετρο μεταξύ 0,5 και 10 χιλιοστών. Πρέπει να έχουν υψηλή αντίσταση τριβής, υψηλή θερμική σταθερότητα και μικρή διάμετρο πόρων, η οποία συντελεί σε περισσότερο εκτεθειμένο εμβαδό επιφάνειας και για το λόγο αυτό και υψηλή χωρητικότητα επιφάνειας για προσρόφηση. Οι προσροφητές πρέπει, επίσης, να έχουν μια ευδιάκριτη δομή πόρων που θα ενεργοποιεί την ταχεία μεταφορά των αερίων ατμών.

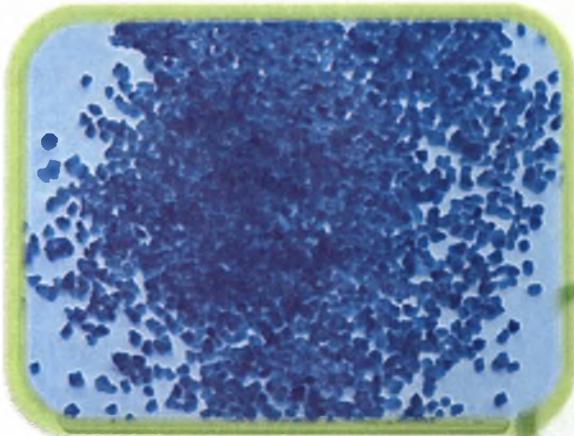
Οι πιο «βιομηχανικοί» προσροφητές ανήκουν σε κάποια από τις τάξεις που ακολουθούν:

- Μείγματα με περιεχόμενο οξυγόνο –τυπικά είναι υδρόφιλα και πολικά, συμπεριλαμβάνοντας υλικά όπως είναι τα κρυσταλλάκια χαλαζία (υλικό που χρησιμοποιείται για την απορρόφηση της υγρασίας) και οι ζεόλιθοι
- Μείγματα βασισμένα σε άνθρακα – τυπικά είναι υδρόφοβα και μη πολικά, συμπεριλαμβάνοντας υλικά όπως είναι ο ενεργός άνθρακας και ο γραφίτης
- Μείγματα βασισμένα σε πολυμερή – είναι πολικά ή μη πολικά λειτουργικά σχήματα-ομάδες σε έναν ιστό πολυμερών πόρων.

1.6.2. Silica gel (κρυσταλλάκια χαλαζία)

Τα κρυσταλλάκια χαλαζία είναι ένας χημικά αδρανής, μη τοξικός, πολικός και διαστατικά σταθερός άμορφος τύπος του SiO_2 . Είναι προετοιμασμένο από την αντίδραση μεταξύ πυριτικού νατρίου και οξικού οξέος, που ακολουθείται από μία σειρά διεργασιών μετεπεξεργασίας όπως είναι η γήρανση, οι διαδικασίες καθαρισμού και άλλα. Αυτές οι μέθοδοι μετεπεξεργασίας συντελούν σε ποικίλες κατανομές μεγέθους πόρων.

Το ορυκτό διοξείδιο του πυριτίου (χαλαζίας) χρησιμοποιείται για το στέγνωμα-ξήρανση του αέρα διεργασίας (π.χ. οξυγόνο, φυσικό αέριο) και την προσρόφηση βαρέων (πολικών) υδρογονανθράκων από φυσικό αέριο.



Εικόνα 2: Κρυσταλλάκια γαλαΐα



Εικόνα 3: Κομμάτια χαλαζία



Εικόνες 4-5: Silica gel

1.6.3. Ζεόλιθοι

Οι ζεόλιθοι είναι φυσικά ή συνθετικά κρυσταλλικά αργιλοπυριτικά άλατα, τα οποία έχουν ένα επαναλαμβανόμενο δίκτυο πόρων και απελευθερώνουν νερό σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι ζεόλιθοι είναι πολικοί στη φύση.

Έχουν κατασκευαστεί από υδροθερμική σύνθεση αργιλοπυριτικού νατρίου ή άλλης πηγής διοξειδίου του πυριτίου σε ένα



Εικόνα 6: Πέτρωμα ζεόλιθου

αυτόκλειστο που ακολουθείται από μία

ανταλλαγή ιόντων με συγκεκριμένα κατιόντα (Na^+ , Li^+ , Ca_2^+ , K^+ , NH_4^+). Η διάμετρος του διαύλου των κλωβών ζεόλιθων συνήθως κυμαίνεται μεταξύ των 2 και 9 Å (200 έως 900 pm). Η διαδικασία ανταλλαγής ιόντων ακολουθείται από στέγνωμα των κρυστάλλων, που μπορούν να γίνουν σφαιρίδια-δισκία με ένα συνδετικό ώστε να σχηματίσουν μακροπορώδη δισκία.

Οι ζεόλιθοι εφαρμόζονται στην ξήρανση του επεξεργασμένου αέρα, την αφαίρεση του CO_2 από το φυσικό αέριο, την αφαίρεση του CO από το ανασχηματιζόμενο αέριο, το διαχωρισμό του αέρα, την καταλυτική πυρόλυση και την καταλυτική σύνθεση και μετασχηματισμό.

Οι μη πολικοί (πυριτικοί) ζεόλιθοι συντίθενται από πηγές διοξειδίου του πυριτίου χωρίς αλουμίνιο ή από αποαλουμινοποίηση των ζεόλιθων που περιέχουν αλουμίνιο.

Η διαδικασία αποαλουμινοποίησης πραγματοποιείται με την κατεργασία ζεόλιθου με ατμό σε υψηλές θερμοκρασίες, που τυπικά υπερβαίνουν τους 500°C (930°F). Αυτή η υψηλών θερμοκρασιών θερμική επεξεργασία καταργεί τους δεσμούς αλουμινίου-οξυγόνου και το άτομο του αλουμινίου αποβάλλεται από το πλαίσιο του ζεόλιθου.



Εικόνα 7: Ζεόλιθος σε σφαίρες



Εικόνα 8: Ζεόλιθος σε χαλίκια



Εικόνες 9-10: Πέτρωμα ζεόλιθου



1.7. Προσρόφηση πρωτεϊνών από βιοϋλικά

Η προσρόφηση πρωτεϊνών είναι μία διαδικασία που κατέχει έναν θεμελιώδη ρόλο στο πεδίο των βιοϋλικών. Πράγματι, οι επιφάνειες των βιοϋλικών ερχόμενες σε επαφή με βιολογικά μέσα, όπως είναι το αίμα ή ο ορός, περιβάλλονται άμεσα από πρωτεΐνες. Ωστόσο, τα ζωντανά κύτταρα δεν αντιδρούν άμεσα με την επιφάνεια του βιοϋλικού, αλλά με το στρώμα της προσροφημένης πρωτεΐνης. Το στρώμα αυτό πρωτεΐνης μεσολαβεί στην αντίδραση μεταξύ των βιο-υλικών και των κυττάρων, μεταφράζοντας τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των του βιο-υλικού σε μία «βιολογική γλώσσα». Στην πραγματικότητα, τα αισθητήρια όργανα των κυττάρων συνδέονται σχηματίζοντας βιοενεργές θέσεις πρωτεϊνικών στρωμάτων και οι περιπτώσεις αυτές σύνδεσης των αισθητήριων οργάνων πρωτεΐνης μετατρέπονται σε άλλη μορφή, δια της κυτταρικής μεμβράνης, με τρόπο τέτοιο που στιγματίζει συγκεκριμένες ενδοκυτταρικές διαδικασίες που κατόπιν προσδιορίζουν την προσκόλληση των κυττάρων, το σχήμα τους, την ανάπτυξή τους και τη διαφοροποίησή τους. Η πρωτεϊνική προσρόφηση επηρεάζεται από πολλές επιφανειακές ιδιότητες όπως είναι η επιφανειακή διαβρεξιμότητα, η χημική σύνθεση της επιφανείας και η επιφανειακή μορφολογία σε κλίμακα νανόμετρων.

1.8. Ψύκτες προσρόφησης

Συνδυάζοντας έναν προσροφητή με μία ψυκτική ουσία, οι ψύκτες προσρόφησης χρησιμοποιούν θερμότητα ώστε τελικά να παρέχουν ψύξη. Η θερμότητα αυτή, σε μορφή θερμού νερού, μπορεί να προέρχεται από οποιασδήποτε μορφής βιομηχανική πηγή, συμπεριλαμβάνοντας θερμότητα που παράγεται από απόβλητα μέσω βιομηχανικών διαδικασιών, πρώτου τύπου (άμεση) θερμότητα από ηλιακές θερμαντικές εγκαταστάσεις ή από τη θερμότητα καυσαερίων ή την θερμότητα ενός εμβολοφόρου κινητήρα ή τουρμπίνας.

Αν και υπάρχουν ομοιότητες μεταξύ ψυκτικής απορρόφησης και προσρόφησης, η προσρόφηση βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ αερίων και στερεών. Ο θάλαμος προσρόφησης του ψύκτη είναι γεμάτος με ένα στερεό υλικό (όπως είναι ο ζεόλιθος, τα κρυσταλλάκια χαλαζία – διοξείδιο του πυριτίου, η αλουμίνα, ο ενεργός άνθρακας

και συγκεκριμένοι τύποι μεταλλικών αλάτων), που κατά την ουδέτερη κατάστασή του έχει προσροφήσει το ψυκτικό υλικό. Όταν θερμανθεί το στερεό εκροφά (απελευθερώνει) ψυκτικούς ατμούς, που διαδοχικά ψύχονται και υγροποιούνται. Αυτό το ψυκτικό υγρό, κατόπιν παρέχει το φαινόμενο ψύξης στον εξατμιστή, απορροφώντας εξωτερική θερμότητα και επιστρέφοντας στην αέρια φάση (ατμός). Στο τελικό στάδιο το ψυκτικό υγρό επαναπροσροφάται σε στερεό. Ως ένας ψύκτης προσρόφησης δεν απαιτεί κινούμενα μέρη και είναι σχετικά ήσυχος.

1.9. Προσρόφηση διάχυσης

Κατά την περίπτωση των καταλυτικών ή προσροφητικών συστημάτων, όπου ένα μεταλλικό είδος διασκορπίζεται σε ένα υποστηρικτικό (ή μεταφορικό) υλικό (συχνά ημιαδρανή οξεία, όπως είναι η αλουμίνα ή ο χαλαζίας), είναι πιθανό για ένα προσροφητικό είδος να προσροφήσει έμμεσα στην επιφάνεια στήριξης υπό συνθήκες κατά τις οποίες τέτοιου είδους προσρόφηση κρίνεται θερμοδυναμικά μη ευνοϊκή. Η παρουσία μετάλλου χρησιμεύει ως μία δίοδος χαμηλή ενεργειακά για αέρια είδη, ώστε να προσροφήσουν πρώτα στο μέταλλο και κατόπιν να το διαχύσουν στη βοηθητική επιφάνεια. Αυτό είναι πιθανό επειδή τα προσροφούμενα είδη επιτυγχάνει μία χαμηλή ενεργειακή κατάσταση, όταν έχει προσροφηθεί στο μέταλλο, ενώ παράλληλα χαμηλώνει το φράγμα μεταξύ των ειδών της αερίου φάσης και των ειδών υποστήριξης προσρόφησης.

Η διάχυση υδρογόνου αποτελεί το πιο κοινό παράδειγμα προσροφητικής διάχυσης. Στην περίπτωση, μάλιστα, του υδρογόνου η προσρόφηση συνοδεύεται τις περισσότερες φορές από διαχωρισμό του μοριακού υδρογόνου (H_2) σε ατομικό υδρογόνο (H), ακολουθούμενο από διάχυση των παρόντων ατόμων υδρογόνου.

Το φαινόμενο της διάχυσης έχει χρησιμοποιηθεί για την ερμηνεία ποικίλων παρατηρήσεων στην ετερογενή κατάλυση και την προσρόφηση.

1.10. Προσρόφηση πολυμερών

Αρχικά κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός της έννοιας του πολυμερούς. Πολυμερές ονομάζεται ένα μεγάλο σε μέγεθος μόριο που αποτελείται από διαδοχές επαναλαμβανόμενων υπομονάδων που συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς. Η προσρόφηση μορίων πάνω σε επιφάνειες πολυμερών αποτελεί το επίκεντρο της διαδικασίας για έναν αριθμό εφαρμογών, συμπεριλαμβάνοντας την ανάπτυξη μη κολλωδών περιβλημάτων, την κατασκευή ορισμένων βιοϊατρικών συσκευών και γενικότερα ποικίλες εφαρμογές του βιοϊατρικού και του κατασκευαστικού τομέα. Τα πολυμερή μπορούν επίσης να προσροφηθούν σε επιφάνειες δια της πολυηλεκτρολυτικής προσρόφησης (της οποίας η έννοια αναλύεται αργότερα).

1.10.1. Διαφοροποίηση πολυμερών και μη πολυμερών επιφανειών

Η διαφορά των πολυμερών από τις αντίστοιχες μη πολυμερείς επιφάνειες έγκειται στο γεγονός ότι οι υπομονάδες οι οποίες ουσιαστικά απαρτίζουν την επιφάνεια είναι ενωμένες με ομοιοπολικούς δεσμούς. οι μη πολυμερείς επιφάνειες μπορεί να ενώνονται με ιοντικούς δεσμούς, μεταλλικούς δεσμούς ή διαμοριακούς δεσμούς (IMFs). Σε ένα σύστημα δύο συστατικών, οι μη πολυμερείς επιφάνειες είναι αναγκαίες όταν μια ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για τη διάσπαση ιδιο-αλληλεπιδράσεων και σχηματίζονται μη ιδιο-αλληλεπιδράσεις.

1.11. Προσρόφηση σε ιούς

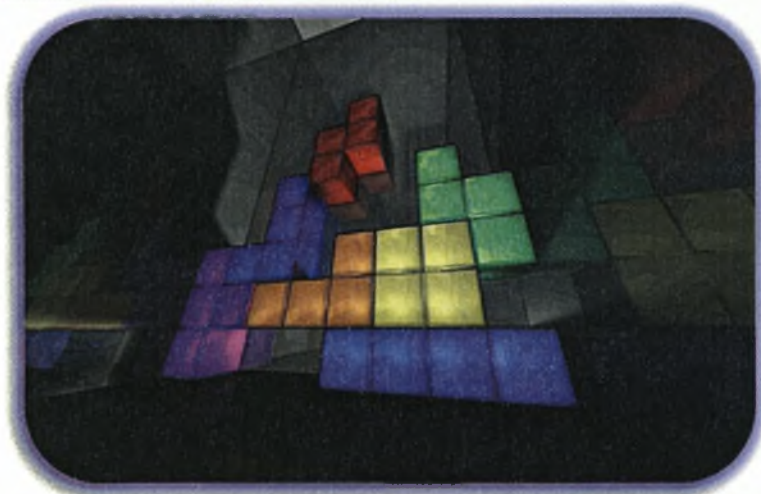
Η προσρόφηση είναι το πρώτο στάδιο στον κύκλο ζωής του ιού. Τα επόμενα στάδια συμπεριλαμβάνουν την εισχώρηση-διείσδυση, την απέκδυση, τη σύνθεση (μεταγραφή αν χρειάζεται και μετάφραση), και απελευθέρωση. Ο κύκλος αντιγραφής του ιού, από αυτή την οπτική γωνία, παρουσιάζει ομοιομορφία σε όλους τους τύπους των ιών. Παράγοντες όπως είναι η μεταγραφή μπορεί να χρειαστούν αλλά και να μη χρειαστούν κατά την περίπτωση που ο ιός δύναται να ενσωματώσει τις πληροφορίες του γονιδιώματος στον πυρήνα του κυττάρου, ή αν ο ιός μπορεί να αντιγράψει πιστά τον εαυτό του απευθείας μεταξύ του κυτοπλάσματος του κυττάρου.

1.12. Εφαρμογές στο σύγχρονο-δημοφιλή πολιτισμό

Μια κλασική περίπτωση εφαρμοσμένης προσρόφησης που οι περισσότεροι άνθρωποι σε παιδική κυρίως ηλικία έχουν βιώσει αποτελεί το ηλεκτρονικό παιχνίδι με την ονομασία «Tetris», που δεν είναι κάτι περισσότερο από ένα παιχνίδι γρίφο στο οποίο ομάδες τεσσάρων τετραγώνων προσροφώνται πάνω σε μια επιφάνεια κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού. Ομάδες επιστημόνων έχουν χρησιμοποιήσει τα τετράγωνα του Tetris ως «αντιπροσωπευτικό για μόρια με ένα πολύπλοκο σχήμα» και την «προσρόφηση του πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια» για να μελετήσουν τη θερμοδυναμική των νανοσωματιδίων.



Εικόνες 11-12: Το «Tetris»



2. Ενεργός Άνθρακας

2.1. Γενικά

Ο ενεργός άνθρακας είναι ένα ιδιαίτερα πορώδες, άμορφο στερεό που αποτελείται από μικροκρυσταλλίτες με πλέγμα γραφίτη, το οποίο συνήθως παρασκευάζεται σε μορφή μικρών σφαιριδίων ή σκόνης. Είναι μη-πολικό ως στοιχείο και επίσης φθινό. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματά του είναι ότι αντιδρά με το οξυγόνο σε μέτριες θερμοκρασίες (πάνω από 300° C). Ο ενεργός άνθρακας έχει την ικανότητα να προσροφά στην επιφάνειά του μικρομοριακές οργανικές ουσίες (που προέρχονται από την αποσύνθεση οργανικών ουσιών), πάσης φύσεως οσμές (που προέρχονται από αέρια ή και την αποσύνθεση οργανικών ουσιών), αέρια, χλώριο και ποικίλες ακόμη ουσίες. Ο ενεργός άνθρακας είναι μια μορφή άνθρακα που έχει υποστεί επεξεργασία ώστε να διαθέτει μικρούς και περιορισμένου όγκου πόρους, οι οποίοι αυξάνουν το εμβαδό επιφανείας που είναι διαθέσιμο για προσρόφηση ή χημικές αντιδράσεις. Σημειώνεται, ότι πολλές φορές ο άνθρακας αυτός καλείται και ενεργοποιημένος.

Λόγω του χαρακτηριστικά μεγάλου πλήθους των μικρών πόρων, μόλις ένα γραμμάριο ενεργού άνθρακα παρουσιάζει εμβαδό επιφανείας άνω των πεντακοσίων τετραγωνικών μέτρων, όπως έχει



Εικόνα 13: Μικροκρυσταλλίτες άνθρακα

προσδιοριστεί μέσω των ισόθερων αντιδράσεων προσρόφησης αερίου διοξειδίου του άνθρακα σε συνθήκες δωματίου ή σε θερμοκρασία 0°C. Ένα επαρκές επίπεδο ενεργοποίησης για χρήσιμη εφαρμογή μπορεί να επιτευχθεί μόνο από υψηλό εμβαδό

επιφανείας. Ωστόσο, η περαιτέρω χημική επεξεργασία συχνά ενισχύει τις ιδιότητες προσρόφησης.

2.2. Παραγωγή

Ο ενεργός άνθρακας είναι ένα παράγωγο άνθρακα που παράγεται από ανθρακούχα υλικά όπως κελύφη, φλοιό καρύδας, τύρφη, ξύλο, κοκοφοίνικα, λιγνίτη, κάρβουνο και πίσσα πετρελαίου. Μπορεί να παραχθεί βάσει μίας εκ των ακόλουθων διεργασιών:

1. Φυσική επανενεργοποίηση

Η πρώτη ύλη εξελίσσεται σε ενεργούς άνθρακες με τη χρήση θερμών αερίων. Αυτό σε γενικές γραμμές επιτυγχάνεται μέσω μίας ή του συνδυασμού των παρακάτω διαδικασιών.

- *Ανθρακοποίηση*: Το υλικό με περιεκτικότητα σε άνθρακα πυρολύεται σε θερμοκρασίες της τάξης των 600-900 °C, με απουσία οξυγόνου (συνήθως σε αδρανή ατμόσφαιρα παρουσία αερίων όπως το αργό ή το άζωτο)
- *Ενεργοποίηση/Οξειδωση*: Το ακατέργαστο υλικό ή το ανθρακούχο υλικό εκτίθεται σε οξειδωτικές ατμόσφαιρες (διοξείδιο του άνθρακα, οξυγόνο, ή ατμός) με θερμοκρασίες άνω των 250 °C, συνήθως της θερμοκρασιακής τάξης των 600-1200 °C.

2. Χημική ενεργοποίηση

Πριν την ανθρακοποίηση, η πρώτη ύλη είναι εμποτισμένη με ορισμένα χημικά. Το χημικό είναι τυπικά ένα οξύ, μια ισχυρή βάση ή ένα άλας (φωσφορικό οξύ, υδροξείδιο του καλίου, καυστικό νάτριο, χλωριούχο ασβέστιο και 25% χλωριούχος ψευδάργυρος). Κατόπιν, το ακατέργαστο υλικό απανθρακώνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (450-900°C). Θεωρείται ότι η ανθρακοποίηση προτιμάται σε σύγκριση με τη φυσική ενεργοποίηση λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών και της συντομότερης χρονικής διάρκειας που απαιτείται για την ενεργοποίηση του υλικού.

Στα σημαντικά υλικά παραγωγής συμπεριλαμβάνονται το κέλυφος καρύδας και φοίνικα, το λάδι, οι φλοιοί και το πριονίδι, τα οποία πρέπει να καούν σε στάχτη προκειμένου να παραχθεί ενεργός άνθρακας. Αποτελείται από 2 τύπους: τη λεπτή σκόνη και τα χάπια ή νιφάδες. Η σκόνη ενδείκνυται στη διάλυση σε νερό, οπότε χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες που σχετίζονται με τη χρήση διαλυμάτων ή γενικότερα υγρών. Παράδειγμα ανάλογης χρήσης παρατηρείται στη λεύκανση αλλά

και απορρόφηση της οσμής στη βιομηχανία ζάχαρης, στην παραγωγή μαγειρικού λαδιού στη βιομηχανία τροφίμων και στον «εξαγνισμό» – φιλτράρισμα του νερού. Επιπλέον, ο ενεργός άνθρακας σε μορφή χαπιού ή νιφάδας χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες και προϊόντα καθαρισμού – φιλτραρίσματος αερίων όπως είναι ο ιονιστής, η απορρόφηση δηλητηριωδών αερίων, τα φίλτρα των τσιγάρων και άλλα.

Η ανάπτυξη της αγοράς του ενεργού άνθρακα εξαρτάται κατά κόρον στην ανάπτυξη των βιομηχανιών που τον χρησιμοποιούν, με εμφανή την ειδοποιό διαφορά μεταξύ των βιομηχανιών ιονιστών και προϊόντων καθαρισμού του αέρα, των βιομηχανιών πόσιμου ύδατος αλλά και «βρύσης»/δικτύου, των μεταλλοβιομηχανιών και των βιομηχανιών τροφίμων. Παράλληλα, ο ενεργός άνθρακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ένα νοικοκυριό, με τον κύριο τρόπο χρήσης του να απαντάται σε προϊόντα που απορροφούν οσμές – όπως είναι η κατά περίπτωση έντονη οσμή του ψυγείου, οι οσμές σε ντουλάπες και αποθήκες και άλλα παρεμφερή. Συνεπώς, είναι εύκολα αντιληπτό πως η αγορά του ενεργού άνθρακα είναι ευρεία και μάλιστα με τη δυνατότητα για σταθερή ζήτηση ως προϊόν. Εκτός των άλλων, μπορεί και να εξαχθεί προς χρήση σε βιομηχανίες που χρειάζονται υψηλή ποιότητα ενεργού άνθρακα, όπως είναι συγκεκριμένα είδη ιονιστών και καθαριστών αέρα. Παρόλα αυτά, τα τωρινά δεδομένα που αφορούν την εισαγωγή είναι χαρακτηριστικά υψηλότερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα της εξαγωγής.

2.3. Ταξινόμηση

Ο ενεργός άνθρακας και τα παράγωγα αυτού προϊόντα είναι πολύπλοκα, καθότι δύσκολα δύνανται να ταξινομηθούν βάσει χαρακτηριστικών τους όπως είναι η συμπεριφορά τους, τα χαρακτηριστικά επιφανείας τους και οι μέθοδοι προετοιμασίας. Ωστόσο, ευρεία ταξινόμηση έχει πραγματοποιηθεί χάριν γενικής φύσεως σκοπιμοτήτων βασισμένη στα φυσικά χαρακτηριστικά των προϊόντων αυτών του ενεργού άνθρακα, συμβάλλοντας στον ακόλουθο διαχωρισμό-κατηγοριοποίηση:

2.3.1. Ενεργός Άνθρακας σε σκόνη (PAC: Powdered activated carbon)

Κατά κύριο λόγο οι διάφορες μορφές ενεργού άνθρακα παρασκευάζονται σε μορφή σωματιδίων ως σκόνη ή λεπτοί κόκκοι των οποίων το μέγεθος δεν ξεπερνά το 1 χιλιοστό και η μέση διάμετρος βρίσκεται μεταξύ των 0.15 και 0.25 χιλιοστών. Έτσι, παρουσιάζουν μεγάλο λόγο της επιφάνειας προς τον όγκο με μία μικρή απόσταση διαχύσεως. Η εν λόγω μορφή ενεργού άνθρακα (σε σκόνη) αποτελείται (ως σύνθεση) από θρυμματισμένα ή αλεσμένα κομμάτια άνθρακα, το 95-100% των οποίων διέρχεται από ένα καθορισμένο κόσκινο-πλέγμα. Ο κοκκώδης ενεργός άνθρακας ορίζεται ως ο ενεργός άνθρακας που διατηρείται σε ένα κόσκινο με 50 πλέγματα (0.297 χιλιοστών) και με τη μορφή σκόνης ως λεπτότερο υλικό. Ο ενεργός άνθρακας σε σκόνη συνήθως χρησιμοποιείται σε ένα συγκεκριμένου τύπου δοχείο, λόγω της μεγάλης απώλειας που θα απαντώνταν. Ο ενεργός άνθρακας σε σκόνη, κατά κύριο λόγο προστίθεται άμεσα σε διάφορες μονάδες επεξεργασίας, όπως οι είσοδοι ακατέργαστου νερού, οι λεκάνες ταχείας μίξης, οι διευκρινιστές, και τα φίλτρα βαρύτητας.



Εικόνες 14-15:
Ενεργός άνθρακας σε σκόνη



2.3.2. Κοκκώδης Ενεργός Άνθρακας (GAC: Granular activated carbon)

Ο Κοκκώδης ενεργός άνθρακας παρουσιάζει σχετικά μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων, σε σύγκριση με τον αντίστοιχο ενεργό άνθρακα σε μορφή σκόνης που αναλύθηκε προηγουμένως, και συνεπώς η εξωτερική του επιφάνεια είναι σαφώς μικρότερη. Έτσι, προκύπτει και το γεγονός πως η διάχυση του προϊόντος προσρόφησης αποτελεί πάραυτα ένα σημαντικό παράγοντα. Οι άνθρακες αυτοί λοιπόν προτιμούνται σε όλες τις διαδικασίες προσρόφησης αερίων και ατμών καθώς ο ρυθμός προσρόφησης τους είναι γρηγορότερος. Ο ενεργός άνθρακας στη μορφή κόκκων χρησιμοποιείται στην επεξεργασία νερού, την αφαίρεση οσμών και το διαχωρισμό των συστατικών ενός συστήματος ροής και επίσης σε λεκάνες ταχείας μίξης. Ο κοκκώδης ενεργός άνθρακας μπορεί να συναντηθεί είτε σε κοκκώδη είτε εξωθημένη μορφή. Ορισμένα παραδείγματα καθορισμένων μεγεθών στα οποία απαντάται είναι τα: 8×20, 20×40 ή 8×30 σε εφαρμογές υπό την υγρή φάση και 4×6, 4×8 ή 4×10 σε εφαρμογές υπό την αέρια φάση (ατμοί). Μια μορφή άνθρακα σε διαστάσεις 20×40 ο άνθρακας κατασκευάζεται από μόρια-σωματίδια που είναι σε θέση να διαπεράσουν ένα κόσκινο με πλέγμα N° 20 (τυποποιημένο στις Ηνωμένες Πολιτείες), που πρακτικά είναι αντίστοιχο των 0.84mm (γενικότερα προκαθορισμένο ως διαπερατότητας 85%), αλλά να διατηρηθούν σε ένα ανάλογο κόσκινο με πλέγμα N° 40 (τυποποιημένο στις Ηνωμένες Πολιτείες), που πρακτικά είναι αντίστοιχο των 0.42mm (γενικότερα προκαθορισμένο ως διαπερατότητας 95%). Η AWWA (1992) B604 χρησιμοποιεί ένα κόσκινο 50 πλεγμάτων (0.297mm) ως το μικρότερο μέγεθος για φιλτράρισμα του άνθρακα σε μορφή κόκκων. Οι πλέον γνωστοί άνθρακες που χρησιμοποιούνται υπό συνθήκες υδάτινης φάσης είναι αυτοί με διαστάσεις 8×30 και 12×40 για το λόγο ότι παρουσιάζουν μία διακριτά καλή ισορροπία μεγέθους, περιοχής επιφάνειας και των χαρακτηριστικών απωλειών της κεφαλής.



Εικόνα 16:
Ενεργός άνθρακας σε κόκκους

2.3.3. Εξηλασμένος Ενεργός Άνθρακας (EAC: Extruded activated carbon)

Ο εξηλασμένος ενεργός άνθρακας συνδυάζει ενεργό άνθρακα σε μορφή σκόνης με ένα συγκολλητικό, που είναι συγχωνευμένα και εξωθημένα σε ένα κυλινδρικού σχήματος ενεργού άνθρακα σώμα -«πλακάκι» με διαμέτρους που κυμαίνονται από 0,8 έως και 130 mm. Αυτά χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για εφαρμογές υπό της αερίου φάσης λόγω της χαμηλής πτώσης πίεσης, της υψηλής μηχανικής αντοχής-δύναμης και της χαμηλής περιεκτικότητας σε σκόνη.



Εικόνα 17: Εξηλασμένος ενεργός άνθρακας

2.3.4. Ενεργός Άνθρακας σε σφαιρίδια (BAC: Bead activated carbon)

Ο ενεργός άνθρακας υπό τη μορφή σφαιριδίων παρασκευάζεται από πίσσα πετρελαίου και απαντάται σε διαμέτρους της τάξης μεταξύ των 0,35 και 0,80mm. Όμοια με τον ΕΕΑ, διακρίνεται επίσης για τη χαμηλής πτώσης πίεση, την υψηλή μηχανική αντοχή και τη χαμηλή περιεκτικότητα σε σκόνη, αλλά με χαρακτηριστικά μικρότερο μέγεθος κόκκου. Το σφαιρικό του σχήμα τον καθιστά προτιμότερο σε εφαρμογές ρευστοποιημένης κλίνης όπως είναι το φιλτράρισμα του νερού.



Εικόνες 18-19: Ενεργός άνθρακας σε σφαιρίδια

2.3.5. Εμποτισμένος Άνθρακας (Impregnated carbon)

Οι πορώδεις άνθρακες που εμπεριέχουν διάφορους τύπους ανόργανων κορεσμένων συνθετικών όπως το Ιώδιο ή ο Άργυρος, κατιόντα όπως τα *Al*, *Mn*, *Zn*, *Fe*, *Li*, *Ca*, έχουν επίσης υποστεί προετοιμασία για συγκεκριμένες εφαρμογές στον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα ειδικά σε μουσεία και εκθέσεις. Μάλιστα, λόγω των αντιμικροβιακών και αντισηπτικών του ιδιοτήτων, ο ενεργός άνθρακας με φορτίο αργύρου, χρησιμοποιείται ως προσροφητής κατά τον εξαγνισμό του οικιακού νερού. Πόσιμο νερό μπορεί να εξαχθεί από το φυσικό νερό, αναμιγνύοντας το νερό αυτό με ένα μίγμα ενεργού άνθρακα και $Al(OH)_3$, που είναι ένας παράγοντας κροκύνωσης. Οι εμποτισμένοι άνθρακες χρησιμοποιούνται επίσης στην προσρόφηση του Υδρόθειου (H_2S) και των θειολών. Οι λόγοι προσρόφησης για το H_2S οι οποίοι αγγίζουν το 50% κατά βάρος έχουν αναφερθεί και καταγραφεί.

2.3.6. Άνθρακας επικαλυμμένος με πολυμερή (Polymer coated carbon)

Είναι μία διαδικασία κατά την οποία ένας πορώδης άνθρακας μπορεί να επικαλυφθεί με ένα βιοσυμβατό πολυμερές ώστε να προσδώσει ένα απαλό και διαπερατό περίβλημα χωρίς να εμποδίζει τους πόρους. Ο άνθρακας που προκύπτει από τη διαδικασία αυτή είναι χρήσιμος για αιμοδιάχυση. Η αιμοδιάχυση είναι μία τεχνική επεξεργασίας κατά την οποία μεγάλες ποσότητες του αίματος του ασθενούς περνούν πάνω από μία ουσία προσρόφησης έτσι ώστε να αφαιρούνται οι τοξικές ουσίες από το αίμα.

2.3.7. Διάφορες επιπλέον μορφές

Ο ενεργός άνθρακας είναι, επίσης, διαθέσιμος σε ειδικές μορφές όπως σε ενδύματα και υφάσματα-ίνες. Ένα παράδειγμα χρήσης τέτοιων τύπων ενεργού άνθρακα σε ενδύματα αποτελούν οι στολές προστασίας που χρησιμοποιεί το προσωπικό των στρατιωτικών δυνάμεων.



Εικόνες 20-21: Επένδυση με ανθρακονήματα στο εσωτερικό και εξωτερικό μέρος αυτοκινήτων



Εικόνα 22: Επένδυση ενεργού άνθρακα σε στολή κατάδυσης



Εικόνα 23: Επένδυση με ανθρακονήματα σε ειδική μάσκα

2.4. Ιδιότητες

Ένα γραμμάριο ενεργού άνθρακα μπορεί να παρουσιάζει εμβαδό επιφανείας μεγαλύτερο των 500 m², με τα 1500 m² να είναι εύκολα και άμεσα εφικτά. Τα ανθρακικά αεροπηκτώματα, καθότι είναι και ακριβότερα, διαθέτουν ακόμη μεγαλύτερο εμβαδό επιφανείας και χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές. Με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, τα υψηλά εμβαδά επιφανείας των ενεργών ανθράκων αποκαλύπτονται. Ξεχωριστά σωματίδια είναι έντονα περιτυλιγμένα και εμφανίζουν ποικίλα είδη πορώδους. Πιθανολογείται, μάλιστα, να υπάρχουν αρκετές περιοχές στις οποίες λεπτές επιφάνειες από υλικά που μοιάζουν με γραφίτη είναι βρίσκονται τακτοποιημένες στο χώρο κατά παράλληλη μεταξύ τους θέση, διαχωρισμένα μόνο από μερικά νανόμετρα (κατά προσέγγιση). Οι μικροπόροι αυτοί παρουσιάζουν εξαιρετικές συνθήκες ώστε να δύναται να πραγματοποιηθεί προσρόφηση, καθώς το υλικό προσρόφησης μπορεί να αντιδράσει με διάφορες επιφάνειες ταυτοχρόνως. Έλεγχοι συμπεριφοράς κατά την προσρόφηση πραγματοποιούνται κατά βάση με τη χρήση αερίου αζώτου στους 77° K υπό υψηλό κενό, αλλά υπό καθημερινές συνθήκες ο ενεργός άνθρακας είναι απόλυτα ικανός να παράξει το ισοδύναμο, μέσω προσρόφησης από το περιβάλλον του, υγρό νερό από ατμό στους 100° C και με πίεση της τάξης του 1/10.000 μιας ατμόσφαιρας.

Ο James Dewar, ο επιστήμονας από τον οποίο πήρε το όνομά της η φιάλη Dewar (θερμός), δαπάνησε πολύ χρόνο μελετώντας τον ενεργό άνθρακα και δημοσίευσε ένα άρθρο που πραγματεύονταν τη χωρητικότητα της προσρόφησης του σχετικά με τα αέρια. Στο εν λόγω άρθρο, ανακάλυψε ότι ψύχοντας τον άνθρακα σε θερμοκρασίες αζώτου του επέτρεψε να απορροφήσει σημαντικές ποσότητες από ποικίλα αέρια του αέρα που, μεταξύ άλλων, θα μπορούσαν μετά να επανασυλλεχθούν απλά επιτρέποντας στον άνθρακα να θερμανθεί και πάλι και ότι ο άνθρακας που βασίζεται σε καρύδα ήταν ανώτερος για το αποτέλεσμα. Χρησιμοποιεί το οξυγόνο ως παράδειγμα, όπου ο ενεργός άνθρακας θα προσροφούσε τυπικά την ατμοσφαιρική συγκέντρωση (21%) υπό φυσιολογικές συνθήκες, αλλά θα απελευθέρωνε πάνω από 80% οξυγόνο εάν ο άνθρακας είχε πρώτα ψυχθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες. Φυσιολογικά, ο ενεργός άνθρακας ενώνει υλικά με δυνάμεις *van der Waals* ή δυνάμεις διασποράς *London*.

Ο ενεργός άνθρακας δε μπορεί να ενωθεί ορθά με προκαθορισμένα χημικά, συμπεριλαμβανομένων των αλκοολών, των γλυκολών, ισχυρών οξέων και βάσεων, μετάλλων και των περισσοτέρων ανόργανων όπως είναι το λίθιο, το σόδιο, ο σίδηρος, ο μόλυβδος, το αρσενικό, το φθόριο και το βορικό οξύ.

Ο ενεργός άνθρακας προσροφά το ιώδιο πολύ καλά και συγκεκριμένα, ο αριθμός ιωδίου mg/g (ASTM D28 Standard Method test) χρησιμοποιείται ως δείκτης του ολικού εμβαδού επιφάνειας.

Ο μονοξειδίο του άνθρακα δεν προσροφάται καλά από τον ενεργό άνθρακα. Αυτό θα έπρεπε να αποτελεί ένα ξεχωριστό θέμα συζήτησης για όσους χρησιμοποιούν το υλικό αυτό σε φίλτρα για αναπνευστικές συσκευές, απαγωγούς, ή άλλα συστήματα ελέγχου αερίων, καθώς το αέριο είναι μη ανιχνεύσιμο για τις ανθρώπινες αισθήσεις, τοξικό για το μεταβολισμό και νευροτοξικό.

Ουσιαστικοί κατάλογοι από τα κοινά βιομηχανικά και γεωργικά αέρια που απορροφούνται από τον ενεργό άνθρακα μπορούν να απαντηθούν στο διαδίκτυο.

Ο ενεργός άνθρακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα για την εφαρμογή διαφόρων χημικών ώστε να βελτιωθεί η προσροφητική χωρητικότητα για ορισμένα ανόργανα (και προβληματικά οργανικά) σύμπλοκα όπως είναι τα σουλφίδια υδρογόνου (H_2S), η αμμωνία (NH_3), η φορμαλδεΰδη ($HCOH$), τα ραδιοϊσότοπα ιωδίου -131 (^{131}I) και ο υδράργυρος (Hg). Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται *χημειορόφηση* (συγκράτηση με χημικό δεσμό).

2.4.1. Ο αριθμός-βαθμός ιωδίου

Πολλοί άνθρακες απορροφούν προνομιακά μικρά μόρια. Ο αριθμός ιωδίου είναι η πιο θεμελιώδης παράμετρος που χρησιμοποιείται ώστε να χαρακτηριστεί η απόδοση του ενεργού άνθρακα. Είναι ένα μέτρο του επιπέδου δραστηριότητας (μεγαλύτερος αριθμός ιωδίου υποδεικνύει υψηλότερο βαθμό ενεργοποίησης), που συχνά αναφέρεται σε mg/g (με τυπικό εύρος μεταξύ 500 και 1200 mg/g). Είναι ένα μέτρο του μικροπορώδους περιεχομένου του ενεργού άνθρακα (0 με 20 Å, ή έως και 2 nm) με προσρόφηση του ιωδίου από το διάλυμα. Είναι ισοδύναμο με εμβαδό επιφανείας άνθρακα μεταξύ 900 m²/g και 1000 m²/g. Είναι το πρότυπο μέτρο για εφαρμογές στην υγρή φάση.

Ο αριθμός-βαθμός ιωδίου ορίζεται ως τα χιλιοστόγραμμα ιωδίου που προσροφώνται από ένα γραμμάριο άνθρακα όταν η συγκέντρωση του ιωδίου στο απομένον διήθημα είναι 0,02 φυσιολογικά. Βασικά, ο αριθμός ιωδίου είναι ένα μέτρο του ιωδίου που προσροφήθηκε στους πόρους και συνεπώς, αποτελεί ένα δείκτη του όγκου των πόρων που είναι διαθέσιμοι στον ενεργό άνθρακα του ενδιαφέροντος. Τυπικά, οι άνθρακες επεξεργασίας νερού, έχουν αριθμούς ιωδίου που κυμαίνονται μεταξύ 600 και 1100. Συχνά, αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί ο βαθμός της αναλώσεως του άνθρακα κατά τη χρήση. Παρόλα αυτά, αυτή η πρακτική θα έπρεπε να εξεταστεί με προσοχή καθώς οι χημικές αντιδράσεις-αλληλεπιδράσεις με το προσροφητικό υλικό ενδέχεται να επηρεάσει τη μέτρηση του ιωδίου καταλήγοντας σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Εκτός των άλλων, η χρήση του αριθμού ιωδίου ως μέτρο του βαθμού ανάλωσης ενός στρώματος άνθρακα μπορεί να συσταθεί μόνο εάν έχει φανεί να μην παρουσιάζει χημικές αλληλεπιδράσεις με προσροφητικά υλικά και εάν η πειραματική συσχέτιση μεταξύ του αριθμού ιωδίου και του βαθμού ανάλωσης έχει προσδιοριστεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

2.4.2. Μελάσα

Ορισμένοι άνθρακες είναι πιο ικανοί να προσροφήσουν μεγάλα μόρια. Ο αριθμός μελάσας ή η αποδοτικότητα της μελάσας είναι ένα μέτρο του περιεχομένου των μεσοπόρων του ενεργού άνθρακα (υψηλότερο από 20 Å, ή μεγαλύτερο από 2 nm) από προσρόφηση της μελάσας από ένα διάλυμα. Ένας υψηλός αριθμός μελάσας υποδεικνύει την υψηλή προσρόφηση μεγάλων μορίων (με εύρος μεταξύ 95-600). Η καραμέλα dp (αποχρωματιστική αποδοτικότητα) είναι παρόμοια με τον αριθμό

μελάσας. Η αποδοτικότητα της μελάσας αναφέρεται ως επί τοις εκατό (με εύρος μεταξύ 40% και 185%) και παραλληλίζεται με τον αριθμό μελάσας ($600=185\%$, $425=85\%$). Ο Ευρωπαϊκός αριθμός μελάσας (με εύρος μεταξύ των 525 και 110) είναι αντιστρόφως συνδεδεμένος με τον αριθμό μελάσας της Βορείου Αμερικής.

Ο αριθμός μελάσας είναι ένα μέτρο του βαθμού αποχρωματισμού ενός κανονικού διαλύματος μελάσας που έχει αραιωθεί και τυποποιηθεί έναντι τυποποιημένου ενεργού άνθρακα. Λόγω του μεγέθους των φορέων χρώματος, ο αριθμός μελάσας αντιπροσωπεύει το δυναμικό όγκο πόρων που είναι διαθέσιμος για μεγαλύτερα είδη προσρόφησης. Όπως όλος ο όγκος των πόρων μπορεί να μην είναι διαθέσιμος προς προσρόφηση σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή των λυμάτων, και όπως κάποια από τα υλικά προσρόφησης μπορεί να εισέλθουν σε μικρότερους πόρους, δεν είναι ένα καλό μέτρο της αξίας ενός συγκεκριμένου ενεργού άνθρακα για μία συγκεκριμένη εφαρμογή. Συχνά, αυτή η παράμετρος αποφαίνεται χρήσιμη στην αξιολόγηση μιας σειράς από ενεργούς άνθρακες βάσει των ποσοστών προσρόφησης τους. Δεδομένων δύο ενεργών ανθράκων με παρόμοιο όγκο πόρων προς προσρόφηση, ο ένας ο οποίος έχει μεγαλύτερο αριθμό μελάσας συνήθως θα έχει και μεγαλύτερους θεραπευτικούς πόρους, συντελώντας στην αποτελεσματικότερη και πληρέστερη μεταφορά προσροφητικού υλικού εντός του χώρου προσρόφησης.

2.4.3. Τανίνες

Οι τανίνες είναι ένα μείγμα μεγάλου και μεσαίου μεγέθους μορίων. Οι άνθρακες που χαρακτηρίζονται από την παρουσία συνδυασμού μακροπόρων και μεσοπόρων προσροφούν τανίνες. Η ικανότητα ενός άνθρακα να προσροφά τανίνες αναφέρεται σε μέρη ανά εκατομμύριο (p.p.m. - parts per million) με εύρος μεταξύ 200 και 362 ppm.

2.4.4. Μπλε του μεθυλενίου

Ορισμένοι άνθρακες έχουν ένα μεσοπόρο (από 20 Å έως 50 Å, ή από 2 έως και 5 nm), που είναι δομή που προσροφά μεσαίου μεγέθους μόρια, όπως είναι η χρωστική με την ονομασία «μπλε του μεθυλενίου». Η χρωστική αυτή αναφέρεται σε g/100g με εύρος από 11 έως και 28 g/100g.

2.4.5. Απογλωρίωση

Ορισμένοι άνθρακες είναι αποτιμημένοι βάσει της διάρκειας ημιζωής απογλωρίωσης, η οποία ουσιαστικά μετρά την αποδοτικότητα αφαίρεσης του

χλωρίου του ενεργού άνθρακα. Το μήκος της ημιζωής αποχλωρίωσης είναι το βάθος του άνθρακα που απαιτείται για να μειωθεί το επίπεδο χλωρίου ενός επιπλέοντος στρώματος μεταξύ 5ppm και 3,5ppm. Το ελάχιστο μήκος μισής τιμής αναδεικνύει την ανώτατη απόδοση.

2.4.6. Φαινομενική πυκνότητα

Η σταθερή ή σκελετική πυκνότητα των ενεργών ανθράκων ουσιαστικά θα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2,0 και 2,1g/cm³ (125–130 lbs./cubic foot). Ωστόσο, ένα μεγάλο μέρος ενός δείγματος ενεργού άνθρακα θα αποτελείται από κενό αέρα μεταξύ μορίων, και η πραγματική ή η φαινομενική πυκνότητα θα είναι συνεπώς χαμηλότερη, τυπικά μεταξύ των 0,4 και 0,5 g/cm³ (25–31 lbs./cubic foot).

Η υψηλότερη πυκνότητα ουσιαστικά παρέχει μεγαλύτερη δραστηριότητα του όγκου και υπό φυσιολογικές συνθήκες υποδεικνύει τον ποιοτικότερο ενεργό άνθρακα.

2.4.7. Αριθμός σκληρότητας/τριβής

Είναι ένα μέτρο της αντίστασης του ενεργού άνθρακα στη φθορά. Είναι ένας σημαντικός δείκτης του ενεργού άνθρακα ώστε να διατηρεί της φυσική του ακεραιότητα και να αντέχει σε δυνάμεις τριβής που επιβάλλονται λόγω οπίσθιας κίνησης ολίσθησης, και άλλων δυνάμεων. Υπάρχουν, φυσικά, μεγάλες διαφορές στη σκληρότητα των ενεργών ανθράκων, που σχετίζεται με την πρώτη ύλη και το επίπεδο δραστηριότητας.

2.4.8. Περιεκτικότητα σε τέφρα

Η τέφρα (στάχτη) μειώνει την ολική δραστηριότητα του ενεργού άνθρακα και μειώνει, επίσης, την αποδοτικότητα της επανενεργοποίησης. Τα μεταλλικά οξειδία (Fe₂O₃) δύνανται να περάσουν από ενεργό άνθρακα, οδηγούμενα στον αποχρωματισμό. Το περιεχόμενο τέφρας διαλυτό σε οξύ/νερό είναι πιο σημαντικό σε σχέση με το συνολικό περιεχόμενο σε τέφρα. Το διαλυτό περιεχόμενο τέφρας μπορεί να καταστεί εξαιρετικά σημαντικό για ιδιοκτήτες ενυδρείων, καθώς σιδηρούχα οξειδία μπορούν να προωθήσουν ανάπτυξη άλγεων. Ένας άνθρακας με χαμηλό περιεχόμενο διαλυτής τέφρας θα πρέπει να χρησιμοποιείται για θαλασσινά, τρεχούμενων υδάτων (γλυκού νερού) ψάρια και δεξαμενές (ενυδρεία) ώστε να αποφεύγεται η δηλητηρίαση με βαρέα μέταλλα και η υπερβολική ανάπτυξη άλγεων.

2.4.9. Δραστηριότητα τετραγλωριούχου άνθρακα

Η μέτρηση του πορώδους ενός ενεργού άνθρακα με την προσρόφηση κορεσμένων ατμών τετραγλωριούχου άνθρακα.

2.4.10. Κατανομή μεγέθους σωματιδίων

Όσο πιο καλής ποιότητας είναι το μέγεθος των μορίων-σωματιδίων ενός ενεργού άνθρακα, τόσο καλύτερη είναι η είσοδος-πρόσβαση στο εμβαδό επιφάνειας και τόσο γρηγορότερος είναι ο ρυθμός κινητικής της προσρόφησης. Σε συστήματα υπό της αερίου φάσης, αυτό είναι αναγκαίο να συνυπολογίζεται έναντι της πτώσης πίεσης, η οποία θα επηρεάσει το κόστος της ενέργειας. Η προσεκτική μελέτη της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων μπορεί να παρέχει σημαντικά λειτουργικά οφέλη.

2.5. Χημικές ιδιότητες και τροποποίηση

Οι ιδιότητες του ενεργού άνθρακα προσδιορίζονται από το πορώδες του, το ειδικό εμβαδό επιφάνειας και τα χαρακτηριστικά της υφής του. Ωστόσο, η προσρόφηση οξέος-βάσης, οξειδωσης-αναγωγής και η ειδική προσρόφηση εξαρτάται ισχυρά από τη σύνθεση των λειτουργικών ομάδων της επιφάνειας. Η επιφάνεια του συμβατικού ενεργού άνθρακα είναι αντιδραστική, ικανή να οξειδωθεί από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο και πλάσμα οξυγόνου, τον ατμό, και επίσης το διοξείδιο του άνθρακα και το όζον. Η οξειδωση στην υγρή φάση, μεταφέρεται από ένα ευρύ φάσμα αντιδραστηρίων (HNO_3 , H_2O_2 , KMnO_4). Μέσω του σχηματισμού ενός μεγάλου αριθμού βασικών και όξινων ομάδων στην επιφάνεια του οξειδωμένου άνθρακα, η απορρόφηση και άλλες ιδιότητες μπορούν να παρουσιάσουν σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες ενός οξειδωμένου άνθρακα. Ο άνθρακας τροποποιημένος από άζωτο αποκτήθηκε είτε από αζωτούχα φυσικά προϊόντα ή πολυμερή, είτε μέσω επεξεργασίας του άνθρακα με αντιδραστήρια που περιείχαν άζωτο. Ως άνθρακας μπορεί να αντιδράσει με το χλώριο, το βρώμιο και το φθόριο. Πρόσφατα, οι χημικές ιδιότητες του άνθρακα δικαιολογούνται συνήθως δια της παρουσίας του διπλού ενεργού δεσμού $\text{C}=\text{C}$ στην επιφάνειά του.

2.6. Παραδείγματα προσρόφησης (ενεργού άνθρακα)

2.6.1. Ετερογενής κατάλυση

Η πιο συχνά απαντώμενη μορφή χημειορόφησης στις βιομηχανίες, συμβαίνει όταν ένας στερεός καταλύτης αντιδρά με μια αερίου μορφής πρώτη ύλη, το (χημικό) αντιδραστήριο. Η προσρόφηση των αντιδραστηρίων στην επιφάνεια του καταλύτη δημιουργεί ένα χημικό δεσμό, που διαφοροποιεί την πυκνότητα των ηλεκτρονίων περί του αντιδρώντος μορίου και του επιτρέπει να υπομείνει αντιδράσεις που υπό φυσιολογικές συνθήκες δε θα ήταν διαθέσιμες σε αυτό.

2.6.2. Προσρόφηση ψύξης

Οι κύκλοι της προσρόφησης ψύξης και της άντλησης θερμότητας, βασίζονται στην προσρόφηση μιας αέριας ψυκτικής ουσίας σε ένα προσροφητικό υλικό σε χαμηλή πίεση και διαδοχική εκρόφηση με θέρμανση. Το υλικό προσρόφησης λειτουργεί ως «χημικός συμπιεστής» που οδηγείται από τη θερμότητα και είναι, από αυτή την οπτική γωνία» η κατά τρόπον «αντλία» του συστήματος. Συμπεριλαμβάνεται από έναν ηλιακό συλλέκτη, έναν πυκνωτή ή θερμικό εναλλάκτη και έναν εξαμιστή που είναι τοποθετημένος σε ένα ψυκτικό κουτί. Το εσωτερικό του συλλέκτη είναι επενδεδυμένο με ένα προσροφητικό στρώμα, συμπιεσμένο με ενεργό άνθρακα που έχει προσροφηθεί με μεθανόλη. Το ψυκτικό κουτί είναι απομονωμένο και γεμισμένο με νερό. Ο ενεργός άνθρακας μπορεί να προσροφήσει μία μεγάλη ποσότητα αερίων μεθανόλης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και να το αποβάλει σε υψηλότερη θερμοκρασία (περίπου 100 βαθμούς Κελσίου). Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η ηλιοφάνεια ακτινοβολεί το συλλέκτη, και έτσι αυτός θερμαίνεται και η μεθανόλη αποβάλλεται από τον ενεργό άνθρακα. Κατά την αποβολή, η υγρή μεθανόλη προσροφάται από το κάρβουνο, θερμαίνεται και εξατμίζεται. Η υγρή μεθανόλη συμπυκνώνεται και αποθηκεύεται στον εξαμιστή.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η θερμοκρασία του συλλέκτη μειώνεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, και το κάρβουνο προσροφά τη μεθανόλη από τον εξαμιστή. Η υγρή μεθανόλη, στον εξαμιστή υγροποιείται και προσροφά τη θερμότητα από το νερό που περιέχεται στους δίσκους. Εφόσον η προσρόφηση είναι μία διαδικασία απελευθέρωσης θερμότητας, ο συλλέκτης πρέπει να ψύχεται επαρκώς

κατά τη διάρκεια της νύχτας. Μάλιστα, το σύστημα προσρόφησης ψύξης λειτουργεί κατά έναν αδιάκοπο κύκλο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το αποτέλεσμα της ψύξης.

Το αέριο ήλιο μπορεί επίσης να αντληθεί ανακυκλώνοντας θερμικά «απορροφητικές αντλίες» ενεργού άνθρακα μεταξύ 4 Kelvin και υψηλότερων θερμοκρασιών. Ένα παράδειγμα αποτελεί η παροχή ψυκτικής δύναμης στη σειρά ψυκτών αραίωσης «Oxford AST Instruments». Το υγρό ήλιο ^3He αντλείται από την επιφάνεια της διαλυτής φάσης ενός μίγματος ρευστού Ηλίου ^4He και του ισοτόπου αυτού ^3He . Το ^3He προσροφάται στις επιφάνειες του άνθρακα με χαμηλή θερμοκρασία (τυπικά κάτω των 4K), η αναγέννηση της αντλίας μεταξύ 20 και 40K επαναφέρει το ^3He στη συμπυκνωμένη φάση του ρευστού μίγματος. Η ψύξη συμβαίνει κατά την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο υγρών φάσεων καθώς το ^3He υγροποιείται στα όρια της φάσης. Αν παραπάνω από μία αντλία είναι παρούσα στο σύστημα μία συνεχής ροή αερίου και για το λόγο αυτό σταθερή ψυκτική δύναμη μπορεί να αποκτηθεί, επιτυγχάνοντας την αναγέννηση της μίας αντλίας απορρόφησης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της άλλης. Συστήματα όπως το προαναφερθέν, επιτρέπουν σε ανάλογες θερμοκρασίες που αγγίζουν τα 10mK (0,01 Kelvin) να μπορούν να επιτευχθούν με πολύ περιορισμένα κινούμενα μέρη.

2.7. Εφαρμογές

Ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται στον καθαρισμό αερίων, την αφαίρεση καφεΐνης, τον εξαγνισμό του χρυσού, την εξόρυξη μεταλλευμάτων, τον καθαρισμό-φιλτράρισμα του νερού, τη δημιουργία φαρμάκων, την επεξεργασία λυμάτων, τα φίλτρα αέρα στις μάσκες αερίων και τις αναπνευστικές συσκευές, τα φίλτρα σε συμπιεσμένο αέρα και ποικίλες ακόμη εφαρμογές.

Μία εξαιρετικής σημασίας βιομηχανική εφαρμογή που συμπεριλαμβάνει τη χρήση ενεργού άνθρακα είναι το πεδίο φινιρίσματος μετάλλων. Χρησιμοποιείται ιδιαίτερα εκτενώς για τον καθαρισμό ηλεκτρολυτικών διαλυμάτων. Για παράδειγμα, υπάρχει μία γενική τεχνική καθαρισμού που χρησιμοποιείται για αφαίρεση οργανικών ακαθαρσιών από φωτεινά διαλύματα επίστρωσης νικελίου. Μια ποικιλία οργανικών χημικών προστίθενται στα διαλύματα επίστρωσης για βελτίωση των καταθετικών ιδιοτήτων και για τον εμπλουτισμό των ιδιοτήτων τους όπως είναι η φωτεινότητα, η απαλότητα, η ελατότητα, η ελαστικότητα και άλλα. Λόγω της διόδου

του συνεχούς ρεύματος και των ηλεκτρολυτικών αντιδράσεων της ανοδικής οξειδωσης και της καθολικής μείωσης, τα οργανικά πρόσθετα δημιουργούν ανεπιθύμητα διηθήματα στα διαλύματα. Η υπερβολική συσσώρευση-ανάπτυξή τους μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα επίστρωσης (επιμετάλλωσης) και τις φυσικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου μετάλλου. Η μεταχείριση με ενεργό άνθρακα απομακρύνει τέτοιου είδους ακαθαρσίες και επαναφέρει την επιστρωτική αποδοτικότητα στα επιθυμητά επίπεδα.

2.7.1. Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Η προσρόφηση άνθρακα έχει ποικίλες εφαρμογές στην αφαίρεση μολυσμάτων από αέρια ή υδάτινα ρεύματα τόσο σε εδαφικές όσο και σε βιομηχανικές διαδικασίες όπως είναι ο καθαρισμός κηλίδων, η αποκατάσταση-εξυγείανση των υπόγειων υδάτων, ο καθαρισμός-φιλτράρισμα του πόσιμου νερού και ο καθαρισμός του αέρα.

Το 2007, το πανεπιστήμιο West-Flanders στο Βέλγιο άρχισε μια έρευνα που αφορούσε τη μεταχείριση του νερού μετά από περιόδους γιορτών-φεστιβάλ. Μία πλήρους μεγέθους εγκατάσταση ενεργού άνθρακα κατασκευάστηκε και εγκαταστάθηκε στο μουσικό φεστιβάλ «Dranouter» το 2008, με προοπτικές αξιοποίησης της τεχνολογίας για μεταχείριση του νερού στο φεστιβάλ για τα επόμενα 20 χρόνια.

Ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται επίσης στη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου στον αέρα.

2.7.2. Φαρμακευτικές εφαρμογές

Ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται για τη θεραπεία δηλητηριάσεων και υπερβολικών δόσεων από κατάποση.

Θεωρείται ότι παρουσιάζει δεσμευτικό χαρακτήρα για το δηλητήριο και αποτρέπει την απορρόφησή του από το γαστρεντερικό σωλήνα. Σε περιπτώσεις υποψίας δηλητηρίασης, το φαρμακευτικό προσωπικό παρέχει ενεργό άνθρακα επί τόπου ή στο τμήμα επειγόντων περιστατικών ενός νοσοκομείου. Η δόση συνήθως κυμαίνεται περί του 1 γραμμαρίου ανά κιλό μάζας σώματος (για εφήβους και ενήλικες, δίνονται 50-100 γραμμάρια), συνήθως χορηγείται μόνο μία φορά, αλλά εξαρτάται από το φάρμακο που έχει καταναλωθεί, το γεγονός ότι μπορεί να χορηγηθεί πέραν της μίας φορές. Σε σπάνιες περιπτώσεις, ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται και στην Εντατική, ώστε να φιλτράρει και να καθαρίσει οποιαδήποτε

επιβλαβή ουσία από το αίμα του ασθενούς. Ο ενεργός άνθρακας αποτελεί, πλέον, την προτιμότερη κατ' επιλογή συνταγή θεραπείας για πολλών ειδών δηλητηριάσεις, και άλλες μέθοδοι απολύμανσης όπως είναι η χρήση του φυτού *cephalis ıpecacuanha* για πρόκληση εμετού και η πλύση στομάχου χρησιμοποιούνται πλέον σπάνια.

Δεδομένου του ότι ο ενεργός άνθρακας είναι χρήσιμος σε έντονες δηλητηριάσεις, έχει αποδειχθεί ότι δεν είναι αποτελεσματικός σε μακροχρόνια συσσώρευση τοξινών, όπως συμβαίνει και με τη χρήση τοξικών ζιζανιοκτόνων.

Οι μηχανισμοί δράσης έχουν ως ακολούθως:

- Δέσμευση της τοξίνης ώστε να προστατευθεί το στομάχι και εντερική απορρόφηση. Η δέσμευση είναι αναστρέψιμη, γι αυτό και ένα καθαρτικό όπως η σορβιτόλη ενδέχεται να προστεθεί στη διαδικασία πάραυτα.
- Διακοπή της εντεροηπατικής και εντερικής κυκλοφορίας ορισμένων φαρμάκων και τοξινών αλλά και των προϊόντων μεταβολισμού αυτών.

Η μη ορθή εφαρμογή (όπως εντός των πνευμόνων) συντελεί στην πνευμονική αναρρόφηση που ορισμένες φορές μπορεί να αποβεί μοιραία κατά την περίπτωση που δεν υπάρξει άμεση ιατρική και φαρμακευτική θεραπεία. Η χρήση του ενεργού άνθρακα αντενδείκνυται όταν η ουσία που έχει καταποθεί είναι ένα οξύ, μία βάση (αλκαλική ουσία) ή ένα προϊόν πετρελαίου.

Για προ-νοσοκομειακή χρήση (EMT), συναντάται σε πλαστικούς σωλήνες ή μπουκάλια, συνήθως 12,5 ή 25 γραμμαρίων, προ-αναμειγμένο με νερό. Τα καταχωρημένα εμπορικά ονόματα με τα οποία μπορεί να συναντηθεί αυτό το προϊόν είναι τα InstaChar, SuperChar, Actidose, Charcodote, και Liqui-Char, όμως κοινώς αποκαλείται ενεργό κάρβουνο ή ενεργός άνθρακας.

Η απορρόφηση ενεργού άνθρακα πριν την κατανάλωση αλκοολούχων ποτών, έχει φανεί πως μειώνει την απορρόφηση της αιθανόλης από το αίμα. Μάλιστα, 5 με 15 χιλιοστόγραμμα κάρβουνου/άνθρακα ανά κιλό βάρους σώματος που καταναλώθηκαν την ίδια στιγμή με 170 χιλιοστόγραμμα καθαρής αιθανόλης (που ουσιαστικά αντιστοιχεί σε περίπου 10 σερβιρίσματα ενός αλκοολούχου ποτού), μετά την πάροδο μίας ώρας, φάνηκε να μειώνεται η ενδεχόμενη ποσότητα αλκοόλ στο αίμα. Επιπρόσθετα, αντίστοιχες μελέτες έχουν αποδείξει ότι αυτό δεν αποτελεί ένα ουσιαστικό ζήτημα καθεαυτό και ότι οι συγκεντρώσεις αιθανόλης στο αίμα είχαν αυξηθεί καθότι υπήρξε χρήση ενεργού άνθρακα.

Δισκία άνθρακα πωλούνταν στην Αγγλία στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, κατά κύριο λόγο ως αντίδοτο στον τυμπανισμό (φούσκωμα) και στις παθήσεις του στομάχου.

Οι ταμπλέτες ή οι κάψουλες ενεργού άνθρακα χρησιμοποιούνται σε πληθώρα χωρών ως ένα αποτελεσματικό φάρμακο για τη θεραπεία της διάρροιας, της δυσπεψίας και του φουσκώματος. Υπάρχουν αποδείξεις ότι η αποτελεσματικότητά του στην πρόληψη της διάρροιας σε καρκινοπαθείς στους οποίους έχει χορηγηθεί «igipotecan» (ένα φάρμακο κατά του καρκίνου). Μπορεί να επέμβει στην απορρόφηση ορισμένων φαρμακευτικών αγωγών και να οδηγήσει σε μη αναξιόπιστες διαγνώσεις δια των ιατρικών ελέγχων. Ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται, επίσης, στην προετοιμασία του εντέρου μειώνοντας τα εντερικά περιεχόμενα αέρια πριν από κοιλιακή ακτινογραφία, ώστε να απεικονιστούν ενδεχόμενες πέτρες στη χολή, το πάγκρεας και τα νεφρά. Ένας τύπος δισκίων άνθρακα έχει, επίσης, διατεθεί στην αγορά ως προϊόν φροντίδας κατοικίδιων ζώων.

2.7.3. Αποθήκευση καυσίμων

Έρευνες πραγματοποιούνται ελέγχοντας την ικανότητα ποικίλων τύπων άνθρακα να αποθηκεύουν φυσικό αέριο και αέριο υδρογόνο. Το πορώδες υλικό συμπεριφέρεται ως ένα σφουγγάρι για τους διάφορους τύπους αερίων. Το αέριο προσελκύεται στο υλικό από άνθρακα μέσω δυνάμεων Van der Waals. Ορισμένοι άνθρακες έχουν υπάρξει ικανοί να επιτυγχάνουν συνδέσεις ενεργειών της τάξης των 5-10KJ ανά μόριο. Το αέριο μπορεί στη συνέχεια να εκροφηθεί όταν υποβάλλεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και είτε καίγεται για να γίνει η δουλειά ή κατά την περίπτωση του αερίου υδρογόνου εξάγεται για χρήση σε μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Η αποθήκευση αερίου σε ενεργούς άνθρακες είναι μία ελκυστική μέθοδος αποθήκευσης αερίου για το λόγο ότι το αέριο μπορεί να αποθηκευτεί σε συνθήκες χαμηλής πίεσης, χαμηλής μάζας, χαμηλού όγκου περιβάλλοντος που θα ήταν πολύ πιο εφικτό σε σχέση με ογκώδεις δεξαμενές συμπίεσης σε οχήματα. Το τμήμα ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών έχει διευκρινίσει συγκεκριμένους στόχους προς επίτευξη στο χώρο της έρευνας και της ανάπτυξης υλικών προϊόντων άνθρακα με νανο-πορώδες. Όλοι οι στόχοι φαίνονται ότι προς στιγμήν θα ικανοποιηθούν, αλλά αρκετά ινστιτούτα, συμπεριλαμβάνοντας το πρόγραμμα *ALL-CRAFT*, συνεχίζουν να καθοδηγούν εργασίες στο πολλά υποσχόμενο αυτό πεδίο.

2.7.4. Καθαρισμός αερίων

Τα φίλτρα με ενεργό άνθρακα συνήθως χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις καθαρισμού συμπιεσμένου αέρα και αερίων, για την αφαίρεση ατμών, οσμών και άλλων υδρογονανθράκων από τον αέρα. Τα πιο συνηθισμένα σχέδια χρησιμοποιούν μια αρχή καθαρισμού-φιλτραρίσματος σε ένα ή δύο στάδια, στα οποία ο ενεργός άνθρακας είναι ενσωματωμένος στα υλικά του φίλτρου. Ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται επίσης στα συστήματα πρωτοβάθμιας υποστήριξης της ζωής στις διαστημικές στολές. Τα φίλτρα ενεργού άνθρακα χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση ραδιενεργών αερίων από έναν υδροστοβιλικό συμπυκνωτή αντιδραστήρα πυρηνικού ζέοντος νερού. Ο αέρας που εισέρχεται από το συμπυκνωτή περιέχει ίχνη από ραδιενεργά αέρια. Τα μεγάλα στρώματα άνθρακα προσροφούν αυτά τα αέρια και τα διατηρούν για όσο αυτά ταχύτατα αποσυντίθενται και μετατρέπονται σε μη ραδιενεργά στερεά είδη. Τα στερεά παγιδεύονται στα μόρια του άνθρακα, όταν ο φιλτραρισμένος αέρας τα διαπερνά.

2.7.5. Χημικός καθαρισμός-εξαγνισμός

Ο ενεργός άνθρακας συχνά χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό διαλυμάτων που εμπεριέχουν ανεπιθύμητες χρωματισμένες ακαθαρσίες όπως κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας επανακρυστάλλωσης στην οργανική χημεία.

2.7.6. Καθαρισμός αποσταγμένων αλκοολούχων ποτών

Τα φίλτρα ενεργού άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο φιλτράρισμα της βότκας, του ουίσκι και οργανικών ακαθαρσιών που μπορεί να επηρεάσουν το χρώμα, τη γεύση και την οσμή. Περνώντας μία οργανικά νοθευμένη βότκα από ένα φίλτρο ενεργού άνθρακα με κατάλληλη όμως ταχύτητα ροής, θα συντελέσει στη δημιουργία μιας βότκας με πανομοιότυπο περιεχόμενο σε αλκοόλ και σημαντικά αυξημένη οργανική καθαρότητα, κρίνοντας από την οσμή και τη γεύση.

2.7.7. Καθαρισμός υδραργύρου

Ο ενεργός άνθρακας, ο οποίος συχνά εμποτίζεται με ιώδιο ή θειάφι, χρησιμοποιείται ευρέως στην παγίδευση υδραργυρικών εκκρίσεων από ενεργειακούς σταθμούς που τροφοδοτούνται με κάρβουνο, κλίβανους αποτέφρωσης, και από

φυσικό αέριο στην πηγή. Αυτός ο άνθρακας είναι ένα ειδικό προϊόν που κοστίζει πάνω από \$4 δολάρια ανά κιλό. Ωστόσο, συχνά δεν ανακυκλώνεται.

2.7.8. Η διάθεση στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής μετά την απορρόφηση

υδραργύρου

Ο ενεργός άνθρακας που είναι φορτωμένος με υδράργυρο παρουσιάζει ένα δίλημμα όσον αφορά στη διάθεσή του. Εάν ο ενεργός άνθρακας περιέχει λιγότερο από 260 ppm υδραργύρου, οι ομοσπονδιακοί κανονισμοί επιτρέπουν τη σταθεροποίησή του (για παράδειγμα, την παγίδευσή του σε τσιμέντο) προς υγειονομική ταφή. Παρόλα αυτά, απορρίμματα που περιέχουν περισσότερο από 260 ppm θεωρούνται ότι ανήκουν στην υποκατηγορία με υψηλή συγκέντρωση υδραργύρου και απαγορεύεται να καταλήξουν σε υγειονομική ταφή. Αυτό το υλικό, λοιπόν, συσσωρεύεται πλέον στις αποθήκες και σε βαθιά εγκαταλειμμένα ορυχεία, με έναν εκτιμητέο ρυθμό της τάξης των 1000 τόνων ανά χρόνο.

Το πρόβλημα της διάθεσης του ενεργού άνθρακα που είναι «φορτωμένος» με υδράργυρο δεν υπάρχει μόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες. Στην Ολλανδία, ο υδράργυρος ανακτάται σε μεγάλο βαθμό και ο ενεργός άνθρακας διατίθεται δια καθολικής καύσης.

2.7.9. Επανενεργοποίηση και αναγέννηση

Η επανενεργοποίηση ή η αναγέννηση ενεργού άνθρακα συμπεριλαμβάνει την ανάκτηση της προσροφητικής χωρητικότητας του κορεσμένου ενεργού άνθρακα, εκροφώντας προσροφημένων μολυσμένων υλικών στην επιφάνεια του ενεργού άνθρακα.

2.7.10. Θερμική επανενεργοποίηση

Η πιο συχνή τεχνική επανενεργοποίησης που συμπεριλαμβάνεται στις βιομηχανικές διαδικασίες είναι η θερμική επανενεργοποίηση. Η διαδικασία της τεχνικής αυτής κατά γενικό κανόνα ακολουθεί τρία βασικά βήματα:

- Ξήρανση του προσροφητή σε περίπου 105°C
- Εκρόφηση σε υψηλές θερμοκρασίες και αποσύνθεση (500-900°C) υπό αδρανή ατμόσφαιρα
- Υπολειμματική οργανική αεριοποίηση, από ένα οξειδωτικό αέριο (ατμό ή διοξείδιο του άνθρακα) σε υπερυψωμένες θερμοκρασίες (800°C)

Το στάδιο μεταχείρισης με θερμότητα ουσιαστικά αξιοποιεί την εξώθερμη φύση της προσρόφησης και οδηγεί στην εκρόφηση, τη μερική διάσπαση υδρογονανθράκων και τον πολυμερισμό των προσροφημένων οργανικών. Το τελικό στάδιο αποσκοπεί στην αφαίρεση καμένων οργανικών υπολειμμάτων που έχουν σχηματιστεί στη δομή των πόρων κατά το προηγούμενο στάδιο και να εκθέσει ξανά τη δομή του πορώδους άνθρακα αναγεννώντας και αναδομώντας τα χαρακτηριστικά της αρχικής του επιφάνειας. Μετά τη μεταχείριση η στήλη προσρόφησης μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Για κάθε κύκλο θερμο-προσροφητικής αναγέννησης, περίπου 5-15% του στρώματος του άνθρακα καίγεται εντελώς, προκύπτοντας κατ' αυτόν τον τρόπο μία απώλεια της προσροφητικής χωρητικότητας. Η θερμική αναγέννηση είναι μία διαδικασία υψηλών ενεργειακών αναγκών, λόγω των υψηλών επιπέδων προαπαιτούμενης θερμοκρασίας, καθιστώντας την μία δαπανηρή διαδικασία τόσο ενεργειακά όσο και εμπορικά. Τα φυτά που βασίζονται στη θερμική αναγέννηση του ενεργού άνθρακα, πρέπει να έχουν φτάσει ένα συγκεκριμένο μέγεθος πριν κριθεί οικονομικά βιώσιμο να υπάρχουν εγκαταστάσεις αναγέννησης στο σημείο της καλλιέργειας. Ως άμεσο αποτέλεσμα, αποτελεί κοινότυπο φαινόμενο για τις μικρότερου μεγέθους μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων, η αποστολή των πηρύνων ενεργού άνθρακα σε μια εξειδικευμένη μονάδα για αναγέννηση, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό τον ήδη εξαιρετικής σημασίας καταλαμβανόμενο χώρο του άνθρακα.

Ο ενεργός άνθρακας που χρησιμοποιείται σε καταναλωτικές συσκευές, όπως είναι οι φριτέζες και τα φίλτρα αέρα και νερού, μπορεί ομοίως να επανενεργοποιηθεί χρησιμοποιώντας ευρέως διαθέσιμες θερμαντικές συσκευές όπως είναι ο φούρνος, η

τοστιέρα, ή απλά ένας πυρσός προπανίου. Ο άνθρακας αφαιρείται από κάθε είδους περιέκτη χαρτιού ή πλαστικού που θα μπορούσε να λιώσει ή να αναφλεχθεί, και θερμαίνεται ώστε να εξατμιστούν και (/ή) να καούν ολοκληρωτικά τα μολυσματικά υλικά.

2.7.11. Ποικίλες τεχνικές αναγέννησης

Τρέχουσες ανησυχίες που αφορούν στην χαρακτηριστικά απαιτητική σε ενέργεια και υψηλού κόστους φύση της θερμικής αναγέννησης του ενεργού άνθρακα, έχουν ενθαρρύνει την εκκίνηση ερευνών για την εύρεση εναλλακτικών μεθόδων αναγέννησης υποβοηθώντας με τον τρόπο αυτό τη μείωση των επιπτώσεων των διαδικασιών αυτών στο περιβάλλον. Ωστόσο, ποικίλες εκ των τεχνικών μεθόδων που αναφέρονται, τελικά έχουν παραμείνει πεδία καθαρά ακαδημαϊκής έρευνας, όμως ορισμένες εναλλακτικές για συστήματα θερμικής αναγέννησης έχουν εφαρμοσθεί στη βιομηχανία. Επί της παρούσης, οι υπάρχουσες εναλλακτικές μέθοδοι αναγέννησης απαρτίζονται από τις ακόλουθες:

- Χημική και διαλυματική αναγέννηση
- Μικροβιακή αναγέννηση
- Ηλεκτροχημική αναγέννηση
- Υπερηχητική αναγέννηση
- Οξειδωση υγρού αέρα

Ενεργοποιημένος άνθρακας χρησιμοποιείται για την προσρόφηση των οργανικών ουσιών και μη-πολικά προσροφήσεων και είναι επίσης συνήθως χρησιμοποιούνται για απαέρια (και λυμάτων) θεραπεία. Είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο προσροφητικό δεδομένου ότι τα περισσότερα των χημικών (π.χ. επιφανειακές ομάδες) και φυσικές ιδιότητες (π.χ. κατανομή μεγέθους πόρου και το εμβαδόν επιφανείας) μπορεί να ρυθμίζεται ανάλογα με το τι χρειάζεται. Χρησιμότητά της προέρχεται επίσης από μεγάλη μικροπόρων (και μερικές φορές μεσοπόρων) του όγκου του και το προκύπτον μεγάλο εμβαδόν επιφανείας.

3. Κινητικές εξισώσεις

3.1. Εισαγωγή

Η προσρόφηση αποτελεί μία εκ των πιο διαδεδομένων μεθόδων αφαίρεσης ρύπων από μολυσμένα μέσα-υλικά. Στους κοινούς προσροφητές που χρησιμοποιούνται για τέτοιου είδους διαδικασίες συμπεριλαμβάνεται ο ενεργός άνθρακας, τα μοριακά πλέγματα, οι τα πολυμερή προσροφητικά μέσα και ορισμένα ακόμη χαμηλού κόστους υλικά. Στα πλαίσια της προσρόφησης, συμπεριλαμβάνονται συνήθως θερμοδυναμικά και κινητικά κριτήρια ώστε να δύνανται να παρέχονται πληροφορίες και περισσότερες λεπτομέρειες περί της αποτελεσματικότητας αλλά και των μηχανισμών δράσης της. Εκτός της ικανότητας προσρόφησης, μία εξίσου σημαντική παράμετρος συνιστά την κινητική αποδοτικότητα ενός δεδομένου προσροφητικού υλικού, στα πλαίσια της πιλοτικής εφαρμογής. Συγκεκριμένα, δια της κινητικής ανάλυσεως δίνεται η δυνατότητα επαλήθευσης του ρυθμού πρόσληψης της διαλυμένης ουσίας, που προσδιορίζει το χρόνο παραμονής που απαιτείται για την ολοκλήρωση της προσροφητικής αντίδρασης. Εκτός αυτών, μέσω πληροφοριών που πηγάζουν από τις κινητικές εξισώσεις, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα περί της κλιμάκωσης του μηχανισμού προσρόφησης. Γενικότερα, οι κινητικές εξισώσεις που αφορούν την προσρόφηση αποτελούν τη βάση για τον προσδιορισμό της αποδοτικότητας συστημάτων σταθερού στρώματος-κλίνης ή οποιουδήποτε άλλου τύπου με συνεχή διερχόμενη ροή.

Τις τελευταίες δεκαετίες, ποικίλα μαθηματικά μοντέλα έχουν προταθεί για την περιγραφή και την ερμηνεία δεδομένων προσρόφησης, τα οποία μπορούν γενικότερα να ταξινομηθούν ως μοντέλα προσροφητικών αντιδράσεων και προσροφητικής διάχυσης. Φυσικά, τα μοντέλα και των δύο τάξεων που προαναφέρθηκαν εφαρμόζονται για την ερμηνεία της κινητικής διαδικασίας της προσρόφησης. Ωστόσο, παρουσιάζουν μία σχετική διαφοροποίηση στη φύση τους. Τα μοντέλα προσροφητικής διάχυσης δομούνται πάντα με βάση τρία διαδοχικά βήματα (κατά Λαζαρίδη και Ασουχίδου, 2003):

- i. τη διάχυση κατά μήκος της ρευστής μεμβράνης που περιβάλλει τα προσροφητικά σωματίδια,

- ii. τη διάχυση του ρευστού που συγκρατείται στους πόρους και/ή κατά μήκος των πορωδών τοιχωμάτων, που αντίστοιχα έχει ονομαστεί εσωτερική διάχυση ή ενδομοριακή διάχυση (intra-particle diffusion), και
- iii. η προσρόφηση και εκρόφηση μεταξύ του προσροφητικού υλικού και ενεργών περιοχών, όπως η μαζική δράση.

Παρόλα αυτά, όμως, τα μοντέλα αντίδρασης προσρόφησης που προέρχονται από την κινηματική των χημικών αντιδράσεων, βασίζονται στην ολική διαδικασία της προσρόφησης, αγνοώντας τα προαναφερθέντα βήματα.

Επί του παρόντος, τα μοντέλα αντίδρασης προσρόφησης έχουν αναπτυχθεί σε ευρεία κλίμακα ή έχουν εφαρμοστεί για την περιγραφή της κινητικής διαδικασίας της προσρόφησης. Εν αντιθέσει, υπάρχουν ακόμη ορισμένα προβλήματα. Ανάλογης τάξης πρόβλημα που εμφανίστηκε αποτελεί η ψευδο-δεύτερης τάξης εξίσωση αξιολόγησης που βασίζεται στη χημική προσρόφηση και εφαρμόστηκε υπό ακατάλληλες συνθήκες για την περιγραφή προσρόφησης οργανικών μολυσμάτων σε διάφορα μη πολικά πολυμερή υλικά προσρόφησης. Αυτό κατ' ουσία αποτελεί μία διαδικασία φυσικής προσρόφησης. (Meng, 2005).

Οι κινητικές προσρόφησης εξαρτώνται άμεσα από τις αντιδράσεις μεταξύ προσροφητικού και προσροφήσιμου υλικού.

3.2. Μοντέλα αντίδρασης προσρόφησης

3.2.1. Εξίσωση αξιολόγησης «Pseudo-first-order»

Ο Lagergren (1989) παρουσίασε μία αντίδραση αξιολόγησης πρώτης τάξης με σκοπό την περιγραφή της κινητικής διαδικασίας της προσρόφησης μεταξύ υγρής και στερεής φάσης του οξαλικού οξέος και του μηλονικού οξέος (προπανοδικό οξύ) σε άνθρακα, που θεωρείται το πρωιμότερο μοντέλο που αναφέρεται στη χωρητικότητα προσρόφησης. Η εξίσωση αυτή μπορεί να παρουσιαστεί ως εξής:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_{p1}(q_e - q_t) \quad (1)$$

Όπου:

- q_e και q_t (mg/g) είναι οι χωρητικότητες (συγκεντρώσεις) προσρόφησης σε κατάσταση ισορροπίας και τη χρονική στιγμή t (min) αντίστοιχα
- k_{p1} (min^{-1}) είναι η σταθερά της εξίσωσης για το κινητικό μοντέλο

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (1) με τις ακόλουθες συνθήκες περιοριστικών ορίων:

- $q_t = 0$ με $t = 0$ και
- $q_t = q_e$ με $t = t$, προκύπτει (Ho, 2004) η συνάρτηση:

$$\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right) = k_{p1}t \quad (2)$$

Η (2) με μία αναδιοργάνωση μπορεί να γραφεί διαφορετικά και με την εξής μορφή:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_{p1}}{2.303}t \quad (3)$$

Η πρώτη τάξης, λοιπόν, εξίσωση αξιολόγησης του Lagergren ονομάστηκε «pseudo-first-order», ώστε να υπάρχει μία διάκριση μεταξύ των κινητικών εξισώσεων που βασίζονται στη χωρητικότητα προσρόφησης από συγκέντρωση διαλυμάτων (Ho και McKay, 1998a). Πρόσφατα, μάλιστα, έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την περιγραφή της προσρόφησης μολυσματικών ουσιών από υδατικά απόβλητα σε ποικίλα πεδία, όπως είναι η προσρόφηση του μπλε του μεθυλενίου από υδατικό διάλυμα μέσω πλατεών φλοιών φασολιών και η αφαίρεση του πράσινου του μαλαχίτη από υδατικά διαλύματα χρησιμοποιώντας έλαια από τις ίνες του κορμού του φοίνικα (Hammed και El-Khaiary, 2008a).

3.2.2. Εξίσωση αξιολόγησης «Pseudo-second-order»

Το 1995 ο Ho περιέγραψε μία κινητική διαδικασία προσρόφησης δισθενών μεταλλικών ιόντων σε τύρφη (Ho και McKay, 1998b), στην οποία οι χημικοί δεσμοί μεταξύ των δισθενών μεταλλικών ιόντων και πολικών λειτουργικών ομάδων στην τύρφη, όπως είναι οι αλδεΐδες, οι κετόνες, τα οξέα και οι φαινόλες είναι υπεύθυνοι για τη χωρητικότητα ανταλλαγής κατιόντων που παρουσιάζει η τύρφη. Επιπρόσθετα, η αντίδραση που εμφανίζεται μεταξύ τύρφης και μεταλλικών ιόντων πιθανολογείται να παρουσιάζεται όπως φαίνεται στις εξισώσεις (4) και (5) που μπορεί να είναι επικρατούσες στην προσρόφηση των ιόντων του χαλκού Cu^{2+} στην τύρφη (Coleman et al., 1956):



όπου τα P^- και HP είναι ενεργές τοποθεσίες στην επιφάνεια της τύρφης.

Τα κύρια συμπεράσματα από τις δύο ανωτέρω εξισώσεις ήταν ότι η προσρόφηση μπορεί να είναι δεύτερης τάξης και το βήμα περιορισμού της αξιολόγησης μπορεί να αποτελεί χημική προσρόφηση συμπεριλαμβάνοντας ισχυρές δυνάμεις διά του διαμοιρασμού ή της ανταλλαγής ηλεκτρονίων μεταξύ της τύρφης και δισθενών μεταλλικών ιόντων. Επιπλέον, η προσρόφηση βασίζεται στην εξίσωση *Langmuir*.

Ο λόγος της προσρόφησης που περιγράφεται στις ανωτέρω αναγραφόμενες εξισώσεις (4) και (5) είναι ανεξάρτητος όσον αφορά την ποσότητα των δισθενών μεταλλικών ιόντων στην επιφάνεια της τύρφης σε χρόνο t και το γεγονός ότι θα έχει προσροφηθεί πλήρως στην κατάσταση ισορροπίας. Ωστόσο, η έκφραση του λόγου αυτού μπορεί να αποδοθεί με την εξής μορφή:

$$\frac{d(\text{P})_t}{dt} = k_{p2} [(\text{P})_0 - (\text{P})_t]^2 \quad (6)$$

ή

$$\frac{d(\text{HP})_t}{dt} = k_{p2} [(\text{HP})_0 - (\text{HP})_t]^2 \quad (7)$$

Όπου τα $(\text{P})_0$ και $(\text{HP})_0$ δηλώνουν την ποσότητα των σημείων ισορροπίας που είναι διαθέσιμα στην τύρφη, τα $(\text{P})_t$ και $(\text{HP})_t$ δηλώνουν την ποσότητα των ενεργών

σημείων που είναι κατειλημμένα πάνω στην τύρφη σε χρόνο t , και k_{p2} ($g/(mg \cdot \text{min})$) είναι η σταθερά του λόγου της προσρόφησης της Pseudo-second-order (Ho and McKay, 1998b).

Η κύρια ισχύς ($q_e - q_t$) είναι ανάλογη του διαθέσιμου κλάσματος ενεργών περιοχών. Αργότερα, αποδίδεται ως ακολούθως:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_{p2}(q_e - q_t)^2 \quad (8)$$

Η εξίσωση (8), όμως μπορεί να τροποποιηθεί και ως ακολούθως:

$$\frac{dq_t}{(q_e - q_t)^2} = k_{p2} dt \quad (9)$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (9) υπό της συνθήκες-όρια $q_t=0$, $t=0$ και $q_t = q_t$ σε $t=t$, η εξίσωση αποδίδεται ως εξής:

$$\frac{1}{(q_e - q_t)^2} = \frac{1}{q_e} + k_{p2}t \quad (10)$$

Στη συνέχεια, η (10) μπορεί να τροποποιηθεί ως ακολούθως:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{V_0} + \frac{1}{q_e} t \quad (11)$$

Και τέλος:

$$V_0 = k_{p2} q_e^2 \quad (12)$$

Όπου V_0 ($mg/(g \cdot \text{min})$) ουσιαστικά είναι ο αρχικός λόγος προσρόφησης, και οι σταθερές μπορούν κάλλιστα να προσδιοριστούν σε πειραματικό επίπεδο βάσει γραφικής παραστάσεως των t/q_t και t .

Ομοίως με την πρώτης τάξεως κινητική εξίσωση, έτσι και η δεύτερης τάξεως κινητική εξίσωση του Ho ονομάστηκε εξίσωση αξιολόγησης *Pseudo-second-order*, ώστε να επιτευχθεί μία σαφής διάκριση μεταξύ των κινητικών εξισώσεων που βασίζονται στη χωρητικότητα προσρόφησης από συγκέντρωση διαλυμάτων (Ho, 2006). Η εξίσωση αυτή έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στην προσρόφηση μεταλλικών ιόντων, βαφών, εντομοκτόνων, ελαίων και οργανικών ουσιών από υδατικά διαλύματα (Yan and Viraraghavan, 2003; Al-Asheh et al., 2004; Petroni et al., 2004; Pan et al., 2007; Anirudhan and Radhakrishnan, 2008; Cheng et al., 2008; Hameed, 2008; Hameed et al., 2008).

3.2.3. Εξίσωση αξιολόγησης «Elovich's equation»

Μια κινητική εξίσωση περί χημειορόφησης αποδείχθηκε από τον Zeldowitsch το 1934 και χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της αξιολόγησης της προσρόφησης του μονοξειδίου του άνθρακα που μειώνεται εκθετικά παρουσία χαρακτηριστικής αύξησης στην ποσότητα του αερίου που προσροφάται (Ho, 2006). Η εν λόγω εξίσωση είναι η αποκαλούμενη *Elovich equation*, της οποίας ο τύπος είναι ο ακόλουθος (Low, 1960):

$$\frac{dq}{dt} = \alpha e^{-\alpha q} \quad (13)$$

Όπου το q αντιπροσωπεύει την ποσότητα αερίου που έχει προσροφηθεί σε χρόνο t , α είναι η σταθερά εκρόφησης, και α ο αρχικός λόγος προσρόφησης (Ho and McKay, 1998a). Η εξίσωση (13) μπορεί επίσης να επανασυνταχθεί και σε μία γραμμική μορφή του τύπου:

$$q = \left(\frac{2.3}{\alpha}\right) \log(t + t_0) - \left(\frac{2.3}{\alpha}\right) \log t_0 \quad (14)$$

με

$$t_0 = \frac{1}{\alpha\alpha} \quad (15)$$

Η γραφική παράσταση του q με το $\log(t+t_0)$ θα έπρεπε να αποδίδει μία ευθεία γραμμή με μία αρμόδια και αντιπροσωπευτική τιμή του t_0 . Η εξίσωση Elovich εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό των κινητικών της χημειορόφησης των αερίων σε ετερογενή στερεά (Rudzinski and Panczyk, 2000).

Με την υπόθεση $\alpha\alpha t \gg 1$ (Chien and Clayton, 1980), η εξίσωση (14) ολοκληρώθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες-όρια: $q=0$ σε $t=0$ και $q=q$ σε $t=t$, ώστε τελικά να προκύψει η ακόλουθη σχέση (Ho, 2006):

$$q = \alpha \ln(\alpha\alpha) + \alpha \ln t \quad (16)$$

Η εξίσωση Elovich έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την περιγραφή της προσρόφησης αερίου σε στερεά συστήματα (Rudzinski and Panczyk, 2000; Heimberg et al., 2001). Πρόσφατα, μάλιστα έχει εφαρμοστεί για την περιγραφή της διαδικασίας προσρόφησης μολυντών από υδατικά διαλύματα, όπως είναι η αφαίρεση καδμίου από εκρέοντα ύδατα χρησιμοποιώντας χρώμιο (VI) και Χαλκό (II) ως μέσα προσρόφησης.

3.2.4. Εξίσωση αξιολόγησης «Intraparticle diffusion model»

Εισαγωγή

Ο Coenen (1986) συνέλεξε τα δεδομένα της διάχυσης περιορισμού στα πλαίσια της υδρογόνωσης εδωδιμων ελαίων και δήλωσε ότι για έναν καταλύτη με στενούς πόρους (μέσης διαμέτρου πόρων $d_c \approx 4\text{nm}$) παρουσιάζεται 50% μείωση στη δραστηριότητά του σε σύγκριση με έναν μέσο ($d_c \approx 6\text{nm}$) ή έναν πιο ευρέων πόρων ($d_c \approx 8\text{nm}$) καταλύτη.

Ένα τυπικό μοντέλο εσωμοριακής διάχυσης είναι το κοινώς επονομαζόμενο μοντέλο ομοιογενούς διάχυσης στερεών (HSDM), το οποίο μπορεί να περιγράψει τη μεταφορά μάζας σε μια άμορφη και ομοιογενή σφαίρα (Cooney, 1999). Το μοντέλο αυτό μπορεί να παρουσιαστεί ως ακολούθως:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (24)$$

Όπου D_s είναι ο συντελεστής της εσωμοριακής διάχυσης, r είναι η αξονική θέση και q είναι η ποσότητα προσρόφησης της διαλυμένης ύλης στο στερεό ποικίλλοντας με την αξονική θέση σε χρόνο t .

Ο Crank το 1956 έδωσε ένα σαφή ορισμό για τη σχέση (24) περί της περίπτωσης «απεριόριστου λουτρού» κατά την οποία η σφαίρα είναι αρχικά ελεύθερη από διαλυμένη ύλη και η συγκέντρωση της διαλυμένης ύλης στην επιφάνεια παραμένει σταθερή. Η αντίδραση της εξωτερικής μεμβράνης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σχετικά με τη σταθερή επιφανειακή συγκέντρωση (Cooney, 1999). Αργότερα, η επίλυση του Crank αναλύθηκε ως εξής:

$$\frac{q}{q_s} = 1 + \frac{2R}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{n\pi r}{R} \exp \left(\frac{-D_s n^2 \pi^2 t}{R^2} \right) \quad (25)$$

Όπου R είναι η ολική ακτίνα του μορίου.

Η μέση τιμή του q σε ένα σφαιρικό μόριο σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, προσδιορίζομενη ως \bar{q} , παρουσιάζεται ως ακολούθως:

$$\bar{q} = \frac{3}{R^3} \int_0^R q(r) r^2 dr \quad (26)$$

Όπου $q(r)$ είναι η τοπική τιμή της συγκέντρωσης στη στερεή φάση. Εισάγοντας το διάλυμα για $q(r)$ στην εξίσωση (26), μπορούμε να φτάσουμε στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\bar{q}}{q_{\infty}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_s n^2 \pi^2 t}{R^2}\right) \quad (27)$$

Όπου το q_{∞} αντιπροσωπεύει τη μέση συγκέντρωση στο στερεό για άπειρο χρόνο.

Για ένα μικρό χρονικό διάστημα, όταν ισχύει η συνθήκη $\bar{q}/q_{\infty} < 0.3$, η εξίσωση (27) μπορεί να απλοποιηθεί στην εξής μορφή:

$$\frac{\bar{q}}{q_{\infty}} = 6 \left(\frac{D_s}{\pi R^2}\right)^{1/2} t^{1/2} \quad (28)$$

Μια τιμή της D_s , από δεδομένα που προέκυψαν από σύντομες μελέτες μπορεί να προσδιοριστεί

$$\frac{\bar{q}}{q_{\infty}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_s \pi^2 t}{R^2}\right) \quad (29)$$

Κατόπιν, με γραμμική μορφοποίηση της εξίσωσης (29) προκύπτει η ακόλουθη:

$$\ln\left(1 - \frac{\bar{q}}{q_{\infty}}\right) = \frac{-D_s \pi^2}{R^2} t + \ln \frac{6}{\pi^2} \quad (30)$$

Ομοίως, η τιμή του D_s από μακροχρόνιας μελέτης δεδομένα μπορεί να καθοριστεί και να προσδιοριστεί βάσει της γραφικής παράστασης των $\ln\left(1 - \frac{\bar{q}}{q_{\infty}}\right)$ και t . Ωστόσο, το συμπέρασμα της σταθερής επιφανειακής συγκέντρωσης σχετικά με την εσωμοριακή διάχυση είναι πιθανόν να παραβιαστεί σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Παρόλα αυτά, η εξίσωση (30) αποτελεί γενικότερα κάτι το καίριο για ένα βραχύ χρονικό διάστημα. (Cooney, 1999).

Κατά την περίοδο των τελευταίων χρόνων, το μοντέλο της εσωμοριακής διάχυσης έχει εφαρμοστεί σε ποικίλα είδη συστημάτων προσρόφησης, όπως είναι η προσρόφηση σαλικυλικού οξέος και 5-σουλφοσαλικυλικού οξέος από υδατικά

διαλύματα ενώνοντας διά υπερσυνδέσμων τους πολυμερείς προσροφητές NDA-99 και NDA-101. Στα συστήματα προσρόφησης όπου εμπλέκεται η πενταχλωροφαινόλη (PCP) σε ενεργό άνθρακα, ο συντελεστής διάχυσης D_s που αποτιμάται από ομάδες κινητικών πειραμάτων προσρόφησης, έχει εφαρμοστεί σε σταθερές περιπτώσεις όπως είναι η πρόβλεψη των υπερβατικών καμπυλών προσρόφησης και ο σχεδιασμός των σταθερών υποστρωμάτων για την αφαίρεση του PCP.

Συμπεράσματα

Τόσο τα μοντέλα προσρόφησης αντίδρασης όσο και προσρόφησης διάχυσης χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως για την επαλήθευση δεδομένων που σχετίζονται με κινητικές εξισώσεις. Με βάση την εν λόγω ανάλυση, μάλιστα, είναι οφθαλμοφανές το γεγονός ότι τα κατάλληλα μοντέλα αντίδρασης θα πρέπει να επιλέγονται βάσει του μηχανισμού τους περί της διαδικασίας προσρόφησης και της καταλληλότητας διαφόρων άλλων μοντέλων. Γενικότερα, δε δύνανται να αναπαραστήσουν την πραγματική πορεία της προσρόφησης, και επιπλέον να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες χάριν επίγνωσης του μηχανισμού προσρόφησης και του σχεδιασμού συστημάτων σταθερών στρωμάτων. Αντίθετα, τα μοντέλα προσρόφησης διάχυσης που βασίζονται σε τρία βασικά βήματα, μπορούν να αναπαραστήσουν την πραγματική πορεία της προσρόφησης σε πιο λογικά πλαίσια, και ο συντελεστής εσωμοριακής διάχυσης D_s , ο οποίος προσδιορίζεται από τα μοντέλα αυτά είναι χρήσιμος για το σχεδιασμό συστημάτων σταθερών στρωμάτων.

4. Σκοπός

Οι λόγοι που συνέβαλαν στη διεξαγωγή του επικείμενου πειράματος – τόσο εργαστηριακού όσο και ανάπτυξη λογισμικού προσομοίωσης κινητικών μοντέλων αντίστοιχα – αφορούσαν στη μελέτη της προσρόφησης χρωστικών ουσιών από ενεργό άνθρακα.

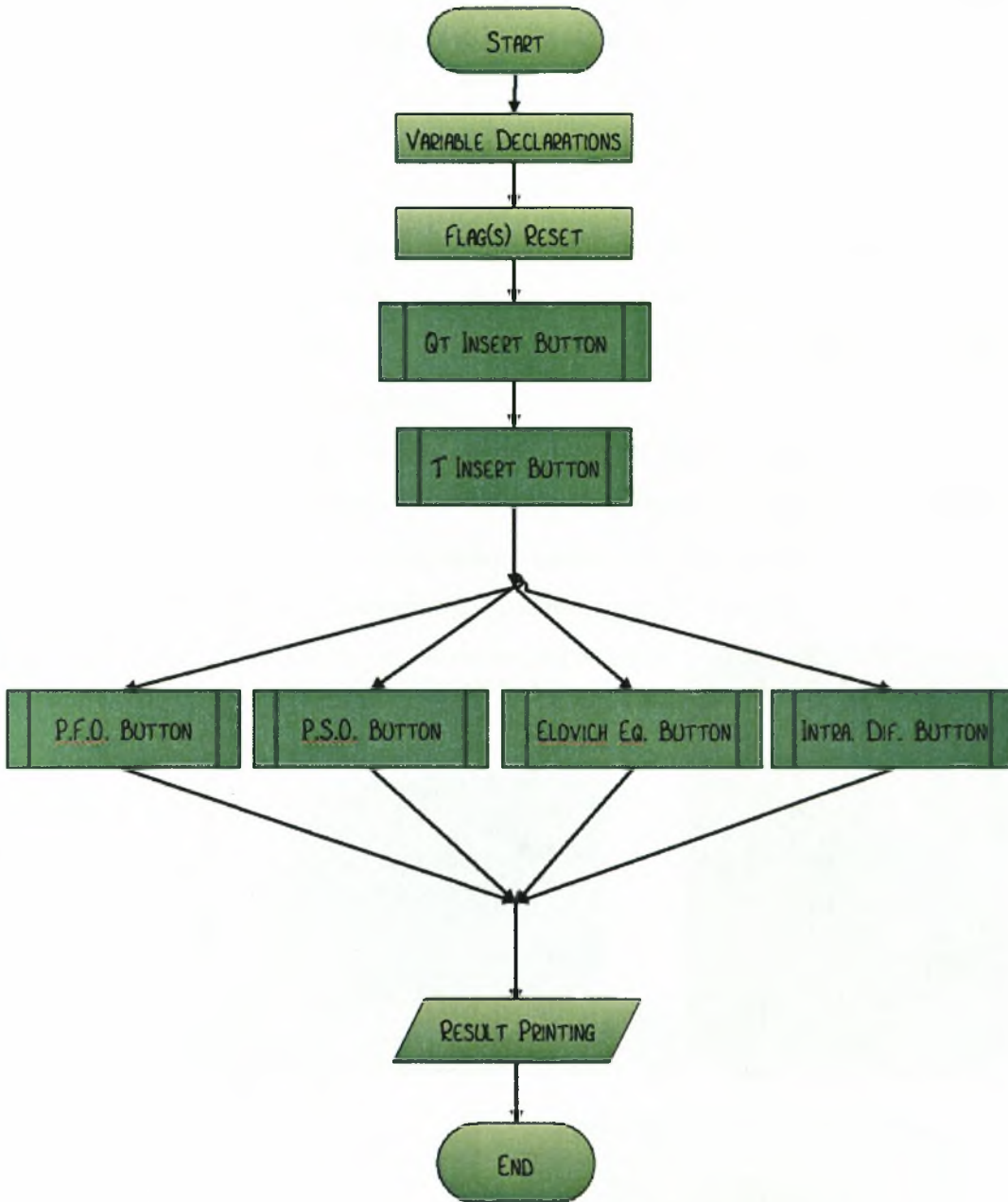
4.1. Εργαστηριακό πείραμα

Όσον αφορά στο εργαστηριακό μέρος-πείραμα της διατριβής, απώτερο σκοπό αποτέλεσε το γεγονός της ανάγκης για μελέτη της προσρόφησης συγκεκριμένων χρωστικών ουσιών από ενεργό άνθρακα. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε αντίστοιχο πείραμα στο εργαστήριο παρασκευάζοντας υγρό διάλυμα κυανού του μεθυλενίου χρησιμοποιώντας τη χρωστική «μπλε του μεθυλενίου» και απιονισμένο νερό, το οποίο αργότερα μετρήθηκε στο φασματοφωτόμετρο στα 664nm ώστε να καταγραφεί η απορρόφησή του για το μπλε χρώμα. Στη συνέχεια προστέθηκε ενεργός άνθρακας στο σωλήνα που βρισκόταν μέρος του διαλύματος, το οποίο μετρούνταν και κατόπιν ανακίνησης για χρονικό διάστημα 5 λεπτών κάθε φορά, μετρήθηκε η απορρόφησή του για το μπλε χρώμα έως ότου συμπληρώθηκε το χρονικό διάστημα της 1 ώρας – που κατέληξε στον αποχρωματισμό. Συνεπώς, το πείραμα έλαβε τέλος, διότι η παρατήρηση του αποχρωματισμού δήλωσε την ολική (ή σχεδόν ολική) προσρόφηση της χρωστικής από τον ενεργό άνθρακα, με καταγεγραμμένα αποτελέσματα απορρόφησης που προέκυψαν από τις μετρήσεις στο φασματοφωτόμετρο.

4.2. Λογισμικό μοντέλων

Όσον αφορά στο δεύτερο μέρος του εργαστηριακού πειράματος που είναι το λογισμικό προσομοίωσης κινητικών μοντέλων, αιώτερο σκοπό αποτέλεσε η ανάγκη για μελέτη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το πειραματικό μέρος, μέσω κινητικών εξισώσεων. Έτσι, αναπτύχθηκε το εν λόγω λογισμικό, το οποίο δέχεται τα δεδομένα αντίστοιχου πειράματος και κατόπιν υπολογισμών και επιλογών του χρήστη, επιστρέφει ορισμένα αντίστοιχα μεγέθη μέσω των οποίων μπορεί να εκτιμηθεί αν το πείραμα απέδωσε λογικά αποτελέσματα και να παρουσιαστεί κινητικό μοντέλο.

4.2.1. Διάγραμμα ροής



5. Πειραματικό μέρος

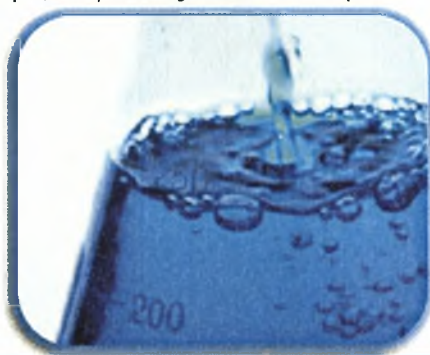
5.1. Εργαστηριακό μέρος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του χειμερινού εξαμήνου του ακαδημαϊκού έτους 2012-2013 και συγκεκριμένα κατά τους μήνες Νοέμβριο-Δεκέμβριο στο εργαστήριο εδαφολογίας της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

5.1.1. Υλικά και μέθοδοι

Το πείραμα αφορά τη δημιουργία διαλύματος κυανού του μεθυλενίου και τη μελέτη της προσρόφησης ενεργού άνθρακα, που είναι τοποθετημένος εντός του διαλύματος, κατόπιν ανακίνησης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα έως το στάδιο του αποχρωματισμού του διαλύματος.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η χρωστική «μπλε του μεθυλενίου», απιονισμένο νερό, ενεργός άνθρακας σε μορφή μικρών κρυστάλλων, σωλήνες τύπου “falcon”, ογκομετρική φιάλη χωρητικότητας 1lit, μαγνήτης ανάδευσης, συσκευή μαγνητικής ανάδευσης, προχοΐδα των 10ml, φασματοφωτόμετρο, κυψελίδες και συσκευή ανακίνησης.



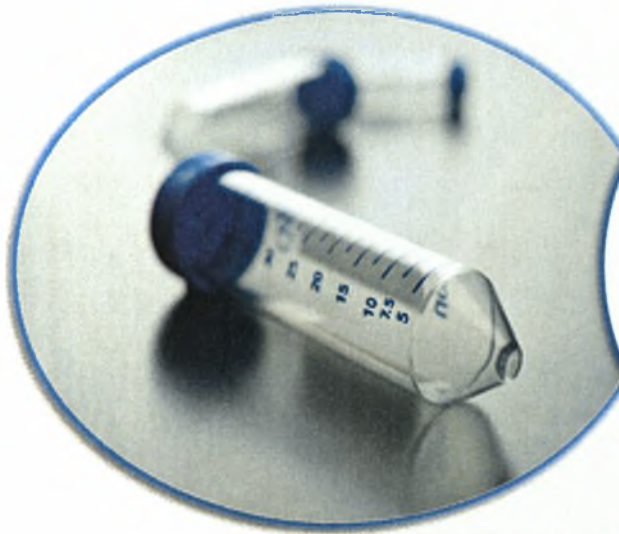
Εικόνες 24-25: Μπλε του μεθυλενίου



Εικόνα 26: Ογκομετρική φιάλη (1Lit)



Εικόνα 27: Ενεργός άνθρακας



Εικόνα 28: Σωλήνας "falcon"



Εικόνα 29: Προχοΐδα (10ml)



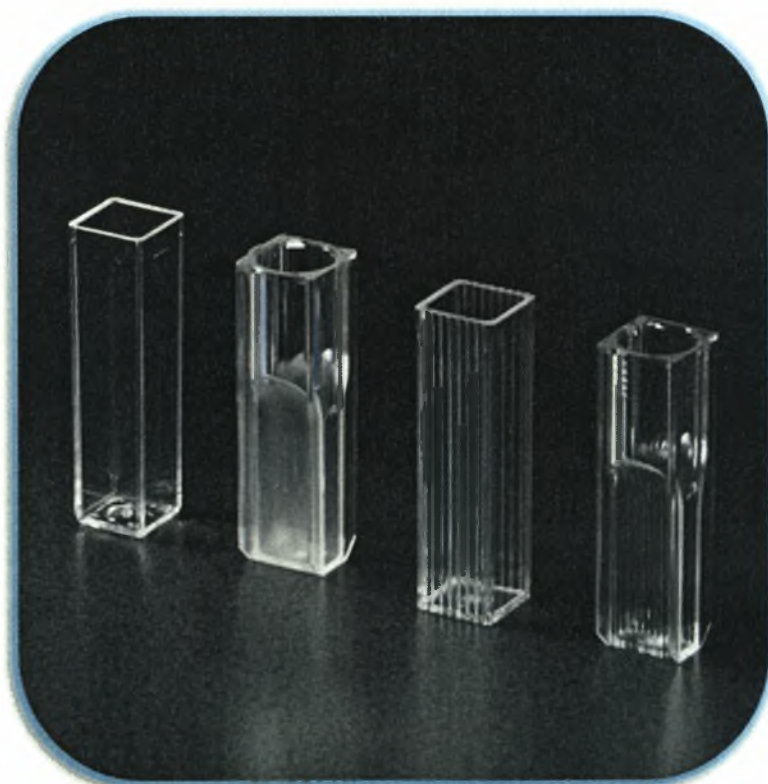
Εικόνα 30: Μαγνήτες ανάδευσης

Εικόνα 31: Συσκευή
μαγνητικής ανάδευσης





Εικόνα 32: Φασματοφωτόμετρο



Εικόνα 33: Κυβελίδες

5.1.2. Διαδικασία πειράματος

Η διεξαγωγή του εργαστηριακού πειράματος αναλύεται σε τέσσερα στάδια χάριν ορθότερης καταγραφής και μελέτης των δεδομένων και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

5.1.2.1. Πρώτο Στάδιο:

Στο πρώτο στάδιο ουσιαστικά ανήκει η παρασκευή του αρχικού διαλύματος, με το οποίο τελικά πραγματοποιήσαμε τις μετρήσεις του πειράματος.

Σε πιατάκι ζυγίσαμε 0.032gr κυανού του μεθυλενίου σε μορφή σκόνης. Τοποθετήσαμε σε ποτήρι ζέσεως 100ml απιονισμένου ύδατος και προσθέσαμε τα 0.032gr κυανού του μεθυλενίου. Τοποθετήσαμε εντός του ποτηριού ζέσεως ένα κυλινδρικού σχήματος μαγνήτη και στη συνέχεια τοποθετήσαμε το ποτήρι στον αναδευτήρα, όπου σταδιακά αυξήσαμε τις στροφές ώστε να αναμιχθεί κατάλληλα το απιονισμένο νερό με το κυανό του μεθυλενίου και τελικά ομογενοποιηθεί το διάλυμα. Σε ογκομετρική φιάλη του 1lit τοποθετήσαμε το διάλυμα που ετοιμάσαμε με την ανάδευση και προσθέσαμε απιονισμένο νερό μέχρι τη γραμμή υπόδειξης του λίτρου. Με τη βοήθεια προχοϊδας των 10ml βάλαμε 20ml διαλύματος σε σωλήνα τύπου “falcon” και προσθέσαμε 0,2gr ενεργού άνθρακα.

5.1.2.2. Δεύτερο στάδιο:

Το δεύτερο στάδιο αποτελείται από την πλήρωση τριών σωλήνων τύπου “falcon” με συγκεκριμένες συγκεντρώσεις διαλύματος.

Βάλαμε, λοιπόν, στον πρώτο σωλήνα τύπου “falcon” **10ml διαλύματος** και **0ml νερού**, με τελική συγκέντρωση διαλύματος **0,032 gr/lit**. Βάλαμε στο δεύτερο σωλήνα τύπου “falcon” **5ml διαλύματος** και **5ml νερού**, με τελική συγκέντρωση διαλύματος **0,016 gr/lit**. Βάλαμε στον τρίτο σωλήνα τύπου “falcon” **0ml διαλύματος** και **10ml νερού**, με τελική συγκέντρωση διαλύματος **0 gr/lit**.

5.1.2.3. Τρίτο στάδιο:

Το τρίτο στάδιο συμπεριλαμβάνει τη διαδικασία μηδενισμού του φασματοφωτόμετρου, το οποίο χρησιμοποιήσαμε για να πραγματοποιήσουμε τις μετρήσεις του πειράματος.

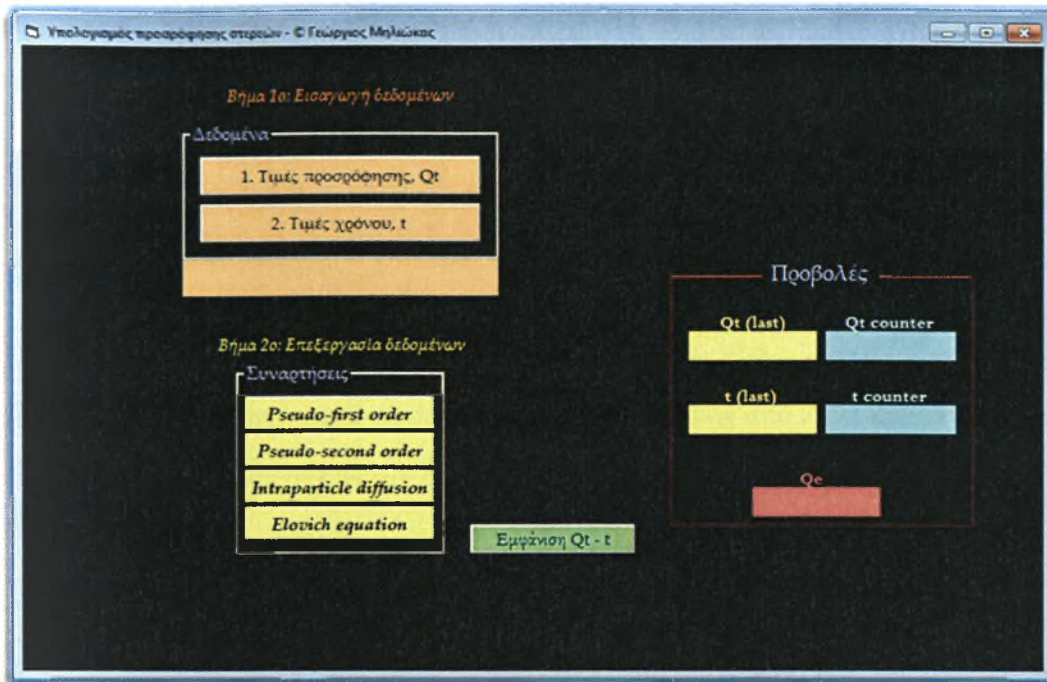
Ρυθμίσαμε το μήκος κύματος του φωτός στο φασματοφωτόμετρο στα **664nm** (που είναι το μήκος κύματος του φωτός για το μπλε χρώμα). Τοποθετήσαμε σε κυψελίδα (δοχείο προς φασματοφωτομέτρηση) από το τελευταίο εκ των τριών διαλυμάτων του δεύτερου σταδίου, το οποίο ήταν σκέτο απιονισμένο νερό – άρα με συγκέντρωση διαλύματος κυανού του μεθυλενίου **0 gr/lit** – που αποτελούσε και το «μάρτυρα» για το μηδενισμό του μηχανήματος φασματοφωτομέτρησης. Τέλος, μετρήσαμε την απορρόφηση και των λοιπών δύο διαλυμάτων με συγκεντρώσεις **0,016 gr/lit** και **0,032 gr/lit** αντίστοιχα του δευτέρου σταδίου.

5.1.2.4. Τέταρτο στάδιο:

Το τέταρτο στάδιο συμπεριλαμβάνει την κατ' επανάληψη μέτρηση του αρχικά παρασκευασμένου διαλύματος στο οποίο είχε εισαχθεί και ο ενεργός άνθρακας κατόπιν ανακίνησης 5 λεπτών κάθε φορά, μέχρι την παρουσίαση αποχρωματισμού του διαλύματος.

Μετρήσαμε, λοιπόν, την απορρόφηση του αρχικού διαλύματος με συγκέντρωση **0,032 gr/lit** κυανού του μεθυλενίου με τη βοήθεια κυψελίδας στο φασματοφωτόμετρο. Επιστρέψαμε την ποσότητα που μετρήσαμε στον σωλήνα τύπου “falcon” και τοποθετήσαμε το δοχείο με το διάλυμα στη συσκευή ανακίνησης και μετά την ανακίνηση διάρκειας 5 λεπτών, μετρήσαμε και πάλι την απορρόφηση του διαλύματος. Επαναλάβαμε τη διαδικασία ανακίνησης και μέτρησης 10 φορές έως ότου παρατηρήθηκε αποχρωματισμός του διαλύματος και συνολικά ο χρόνος ανακίνησης ήταν 1 ώρα.

5.2. Προγραμματιστικό μέρος (λογισμικό μοντέλων)



Εικόνα 34: Η γενική όψη του λογισμικού

5.2.1. Λειτουργικότητα λογισμικού

5.2.1.1. Γενικά

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε δέχεται δεδομένα – που προέκυψαν από εργαστηριακό πείραμα – από το χρήστη και κατόπιν συγκεκριμένης επιλογής επεξεργασίας των δεδομένων αυτών μέσω μίας εκ των τεσσάρων διαθέσιμων κινητικών εξισώσεων εμφανίζονται σε παράθυρο εκτύπωσης τα αποτελέσματα της επεξεργασίας.

5.2.1.2. Φόρμα – τρόπος λειτουργίας

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος, πραγματοποιείται δήλωση των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας του για προσωρινή αποθήκευση των εισαγόμενων δεδομένων προς επεξεργασία. Κατά περίπτωση οι μεταβλητές αυτές είναι απλές μεμονωμένες μεταβλητές ακεραίου τύπου ή διπλής ακριβείας ή ακόμη και μονοδιάστατοι πίνακες, επίσης διπλής ακριβείας. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μηδενισμός (*reset*) των δεικτών που θα χρησιμοποιηθούν στο πρόγραμμα, για την ορθή καταχώρηση, ταξινόμηση και επεξεργασία των δεδομένων. Αμέσως επόμενο βήμα είναι να οριστούν οι τίτλοι που θα εμφανίζονται στο πλαίσιο περιγραφής κατά το πέρασμα του δείκτη πάνω από κάθε κουμπί, ώστε το όλο περιβάλλον της διεπαφής του λογισμικού να είναι πιο φιλικό προς το χρήστη.

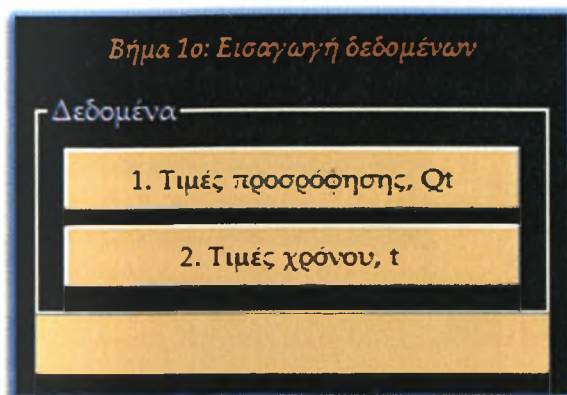
5.2.1.3. Έλεγχοι ορθότητας-εγκυρότητας δεδομένων και σφαλμάτων

Σε ποικίλα στάδια κατά τη λειτουργία του λογισμικού κινητικών μοντέλων, ελέγχονται όλα τα δεδομένα που καταχωρούνται και χρησιμοποιούνται ώστε να διασφαλίζεται η εγκυρότητά τους, η ορθότητα καταχώρησής τους αλλά και η εξάλειψη της πιθανότητας εμφάνισης σφαλμάτων στους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται. Συνεπώς, ελέγχεται οτιδήποτε καταχωρεί ο χρήστης του λογισμικού και κατά την περίπτωση που κάτι δεν συμβαδίζει με τους κανόνες λειτουργίας του λογισμικού, ο χρήστης ειδοποιείται με κατάλληλα μηνύματα για τη διόρθωση των δεδομένων που εισάγει και την ορθολογική καταχώρησή τους.

5.2.2. Διεπαφή χρήστη - Τύποι διεπαφής

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται οι τύποι και οι δομές μέσω των οποίων ουσιαστικά δομείται και ορίζεται η διεπαφή χρήστη.

5.2.2.1. Εισαγωγή τιμών-δεδομένων (2 κουμπιά)

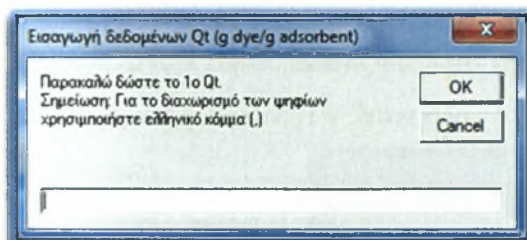


Εικόνα 35: Πεδίο εισαγωγής

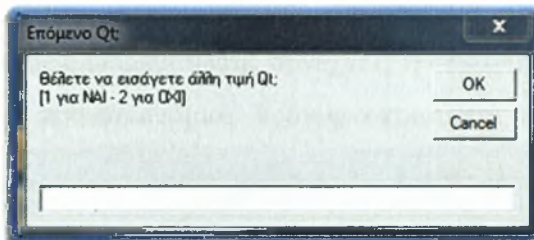
συμπεριλαμβάνεται μια αλληλουχία ενεργειών και υπολογισμών, με πρώτες στη λίστα τις απαραίτητες εσωτερικές δηλώσεις των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται μέσα στη ρουτίνα, και την αρχικοποίηση (κατά περιπτώσεις μηδενισμός) των

Φθάνοντας, λοιπόν, σε αυτό το σημείο στην πρώτη ουσιαστική επαφή του χρήστη με το πρόγραμμα, εμφανίζεται πρώτο εξ άνωθεν αριστερών, το κουμπί με τίτλο «1. Τιμές προσρόφησης, Qt» πατώντας το οποίο, εκτελείται στο παρασκήνιο

μία ρουτίνα. Στην εν λόγω ρουτίνα



Εικόνα 36: Εισαγωγή τιμών Qt

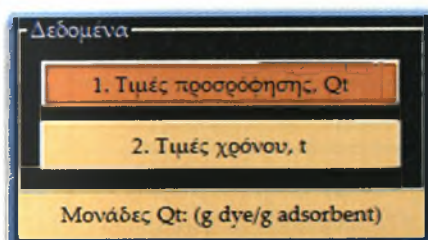


Εικόνα 37: Ερώτηση για συνέχεια

ανάλογων μεταβλητών καθώς κάποιες θα χρησιμοποιηθούν ως μετρητές – *flags*. Στη συνέχεια, εντός επαναληπτικού βρόγχου ο οποίος τερματίζει με ένα διακόπτη, εκτελούνται ένα σύνολο εντολών που συμπεριλαμβάνουν την εισαγωγή μίας μίας των τιμών Qt όπως τις πληκτρολογεί ο χρήστης κατόπιν εμφάνισης ανάλογου μηνύματος στην οθόνη, με αυτόματη καταμέτρηση του πλήθους των τιμών που εισάγονται καθώς και σύγκριση μεταξύ τους ώστε να προκύψει η μέγιστη τιμή. Σημειώνεται πως ανά εισαγωγή τιμής, αμέσως μετά την πρώτη, ο χρήστης καλείται να επιβεβαιώσει ότι θέλει να συνεχίσει να εισάγει τιμές, ειδάλως η διαδικασία εισαγωγής τερματίζεται, με την εμφάνιση του πλήθους τιμών που έχουν εισαχθεί σε παράθυρο μηνύματος. Φυσικά, πραγματοποιούνται αυστηροί έλεγχοι για την ορθή λειτουργία της ρουτίνας

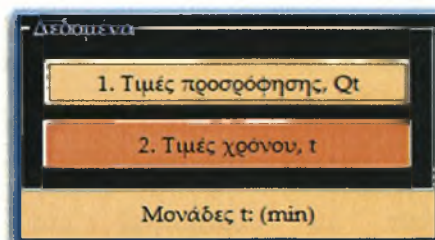
στα δεδομένα που εισάγονται και τις επιλογές του χρήστη. Τελικά, προσαυξάνονται όλες οι εισαχθείσες τιμές κατά μία απειροελάχιστη τιμή – της τάξης του 0,0000001 – ώστε να μην προκύπτουν προβλήματα σε υπολογισμούς που πραγματοποιούνται αργότερα.

Αντίστοιχη διαδικασία εκτελείται και με το πάτημα του αμέσως επόμενου, κατά σειρά εμφάνισης, κουμπιού με τίτλο «2. Τιμές χρόνου, t». Συγκεκριμένα εκτελείται η αντίστοιχη ρουτίνα μέσω της οποίας ο χρήστης καλείται να εισάγει τις τιμές του



Εικόνα 38: Επιλεγμένο κουμπί Qt

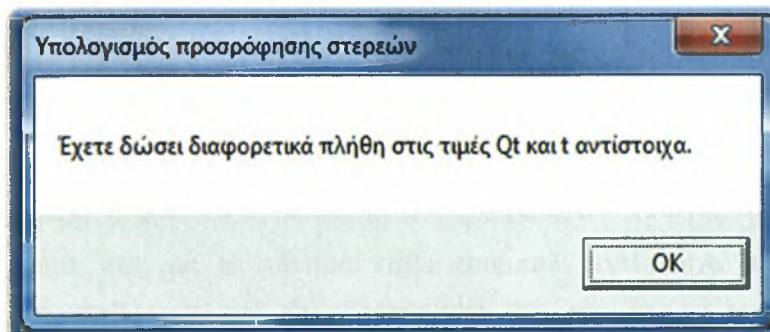
χρόνου t,
με τη
βοήθεια



Εικόνα 39: Επιλεγμένο κουμπί t

μηνυμάτων καθοδήγησης που εμφανίζονται στην οθόνη. Παράλληλα, για λόγους πρακτικότητας και φιλικότητας προς το χρήστη, με το πέρασμα του δείκτη του ποντικιού πάνω από κάθε κουμπί του πλαισίου «Δεδομένα», αυτό αλλάζει χρώμα ώστε να φαίνεται η δυνατότητα επιλογής. Θα ήταν σημαντικό, μάλιστα, να αναφερθεί πως η διαδικασία καταχώρησης των τιμών του χρόνου, συνοδεύονται – όπως και στην εισαγωγή των τιμών Q_t – από τους ανάλογους ελέγχους εγκυρότητας και πιθανού λάθους, όπως επίσης και από ερωτήσεις επιβεβαίωσης συνέχειας ή διακοπής της εισαγωγής τιμών. Εν συνεχεία, λόγω προ-οικονομίας πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι

υπολογισμοί μέσω των οποίων προκύπτουν οι τιμές-δεδομένα που θα χρειαστούν για

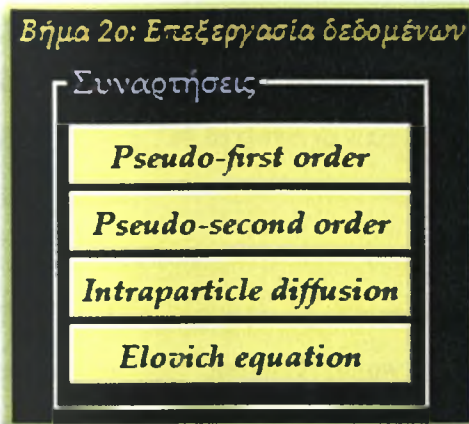


Εικόνα 40: Έλεγχος εγκυρότητας πλήθους

κάθε μία από τις τέσσερις συναρτήσεις, οι οποίες καταχωρούνται σε πίνακες. Σημειώνουμε, βέβαια, πως οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται μόνο εάν είναι θετικός ο έλεγχος εγκυρότητας του πλήθους εισαχθέντων τιμών (αν, δηλαδή, είναι ίσα μεταξύ τους τα πλήθη των τιμών Q_t και t αντίστοιχα), με την περίπτωση του αρνητικού ελέγχου να καταλήγει σε

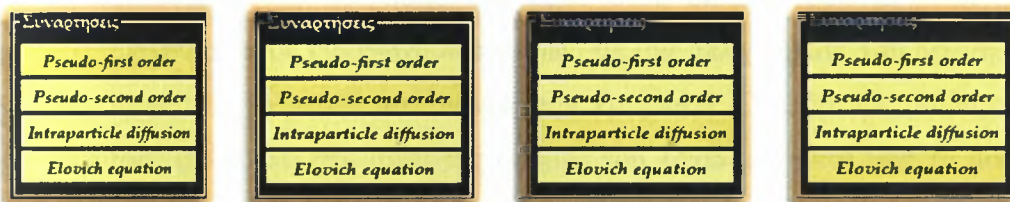
προειδοποιητικό μήνυμα διαφορετικότητας των πληθών στις τιμές Q_t και t αντίστοιχα, ώστε τελικά ο χρήστης να προβεί σε ενέργειες διόρθωσης.

5.2.2.2. Επεξεργασία δεδομένων - Συναρτήσεις (4 κουμπιά)



Το κυριότερο, ενδεχομένως, μέρος και ταυτόχρονα ο σημαντικότερος λόγος για τη δημιουργία του εν λόγω λογισμικού, εντοπίζεται στις τέσσερις συναρτήσεις που ενεργοποιούνται με ένα αντίστοιχο κουμπί η κάθε μία. Τα τέσσερα αυτά κουμπιά βρίσκονται στο κεντρικό πλαίσιο της φόρμας του λογισμικού με τίτλο

Εικόνα 41: Επεξεργασία δεδομένων «Συναρτήσεις», και το κάθε ένα αφορά και σε μία συνάρτηση. Κατά σειρά εμφάνισης, λοιπόν, ξεκινώντας από πάνω προς τα κάτω, συναντώνται τα κουμπιά «Pseudo-first order», «Pseudo-second order»,



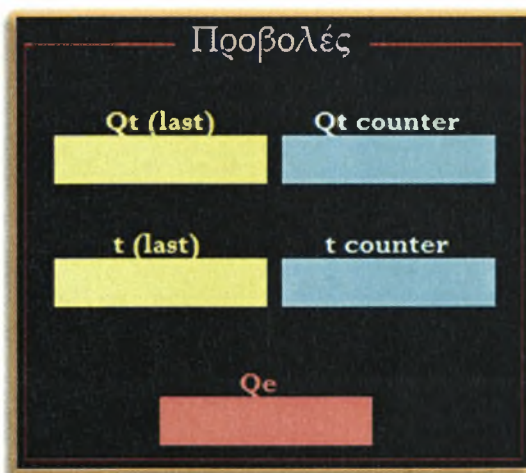
Εικόνα 42: Αλλαγή χρώματος ανάλογα με την επιλογή

«Intraparticle diffusion» και «Elovich equation». Επιπρόσθετα, είναι σημαντικό να αναφερθεί το γεγονός ότι για λόγους πρακτικότητας και φιλικότητας προς το χρήστη, με το πάσισμα του δείκτη του ποντικιού πάνω από κάθε κουμπί του πλαισίου «Συναρτήσεις», αυτό αλλάζει χρώμα ώστε να φαίνεται η δυνατότητα επιλογής. Στο σημείο αυτό, επισημαίνουμε πως με το πάτημα κάθε κουμπιού αντίστοιχα που αντιπροσωπεύει μία από τις τέσσερις συναρτήσεις που συμπεριλαμβάνει το εν λόγω λογισμικό, ξεκινούν οι διαδικασίες υπολογισμών συγκεκριμένων μεγεθών που συμπεριλαμβάνει κάθε συνάρτηση χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που έχουν καταχωρηθεί από το χρήστη στο προηγούμενο βήμα της εισαγωγής δεδομένων – όπως αυτό αναφέρεται στην ενότητα 5.2.2.1. Φυσικά, και σε αυτό το σημείο δεν παραλείπονται οι έλεγχοι εγκυρότητας και πιθανού σφάλματος πριν την εκκίνηση εφαρμογής κάθε συνάρτησης, ώστε τα δεδομένα που θα δεχθούν επεξεργασία να

είναι ορθά και να μη δημιουργούνται προβλήματα στη λειτουργία του λογισμικού και κατ' επέκταση στην ορθή διεξαγωγή αποτελεσμάτων. Σε περίπτωση, μάλιστα, που κάποιος εκ των εν λόγω ελέγχων αποδώσει σφάλμα εγκυρότητας αυτό ανακοινώνεται με αντίστοιχο μήνυμα στο χρήστη και δεν πραγματοποιείται εφαρμογή της συνάρτησης που επιλέχθηκε. Φυσικά, κατά την περίπτωση που οι έλεγχοι εγκυρότητας είναι επιτυχείς και πραγματοποιηθεί η εφαρμογή της επιλεγμένης συνάρτησης, τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν, εμφανίζονται στην οθόνη αναλυτικά.

5.2.2.3. Πληροφοριακές εκτυπώσεις (1 κουμπί – 11 σημεία προβολής)

Εκτός των βασικών τύπων διεπαφής του λογισμικού των κινητικών μοντέλων προσρόφησης, υπάρχουν και οι βοηθητικοί τύποι διεπαφής. Ο πρώτος βοηθητικός τύπος διεπαφής που εμφανίζεται στη φόρμα του λογισμικού έχει τη μορφή πίνακα προβολής και βρίσκεται εντός πλαισίου ακριβώς κάτωθεν της περιοχής εισαγωγής δεδομένων στο πάνω αριστερό μέρος της φόρμας του λογισμικού. Στο σημείο αυτό, εμφανίζονται οι μονάδες μέτρησης του κάθε ενός εκ των δύο μεγεθών που συμπεριλαμβάνονται στην εισαγωγή δεδομένων, με μία απλή κύλιση του δείκτη του ποντικιού πάνω από το πεδίο του αντίστοιχου κουμπιού. Ο επόμενος βοηθητικός τύπος διεπαφής βρίσκεται στο μέσο της φόρμας του λογισμικού και έχει τη μορφή κουμπιού με ανοιχτό πράσινο χρώμα και τίτλο «**Εμφάνιση $Q_t - t$** ». Με το πάτημα του εν λόγω κουμπιού πραγματοποιείται εκτύπωση των εισαχθέντων δεδομένων ($Q_t - t$) στην οθόνη κατά σειρά εισαγωγής σε ζευγάρια. Στο τέλος της εκτύπωσης όλων των ζευγαριών των τιμών αυτών, εμφανίζεται και η τιμή Q_e . Φυσικά, όπως αναμένεται, και στο σημείο αυτό εφαρμόζονται οι αντίστοιχοι έλεγχοι εγκυρότητας δεδομένων και σε περίπτωση σφάλματος εμφανίζονται αντίστοιχα μηνύματα για αναγκαία διόρθωση των δεδομένων. Επιπλέον, στο δεξιό μέρος της φόρμας του λογισμικού συναντάμε τον πίνακα «**Προβολές**» που αποτελείται από 5 σημεία



Εικόνα 43: Το πλαίσιο προβολών

προβολής, στα οποία συμπεριλαμβάνονται: η προβολή της τελευταίας εισαχθείσας τιμής Qt και του αντίστοιχου μετρητή πλήθους τιμών Qt , η προβολή της τελευταίας εισαχθείσας τιμής t και του αντίστοιχου μετρητή πλήθους τιμών t και τέλος την προβολή της τιμής Qe που υπολογίζεται στο τέλος της καταχώρησης των τιμών Qt και t . Εν συνεχεία, ακριβώς κάτω από το κουμπί «**Εμφάνιση $Qt - t$** » συναντάμε τέσσερις βοηθητικούς τύπους διεπαφής με μορφή σημείων προβολής, στα οποία εμφανίζονται βοηθητικές περιγραφές όσον αφορά στη λειτουργία και τις αντίστοιχες προβολές για το κουμπί «**Εμφάνιση $Qt - t$** » και κάθε ένα από τα πέντε σημεία προβολής του πίνακα «**Προβολές**».

6. Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους της διατριβής.

6.1. Εργαστηριακά αποτελέσματα

Κατά τη διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος, αφού παρασκευάστηκαν τα διαλύματα που ήταν απαραίτητα, μετρήθηκαν στο φασματοφωτόμετρο τρία βασικά εκ των προαναφερθέντων διαλυμάτων όπως αυτά φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 1. Πρότυπα διαλύματα χρωστικής «κυανού του μεθυλενίου»

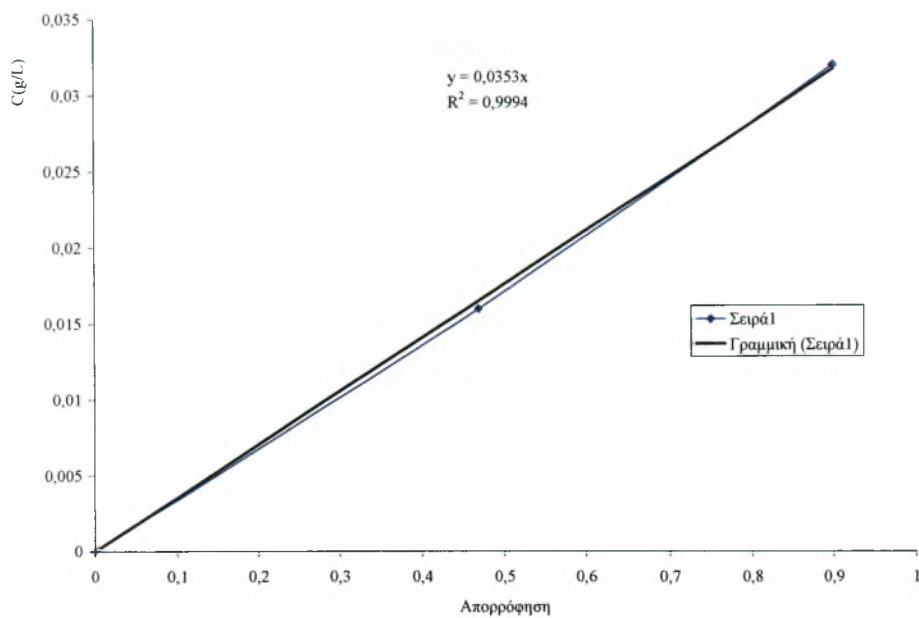
Διάλυμα	ml διαλύματος χρωστικής	ml H ₂ O	C (g/L)	ένδειξη
1	10	0	0,032	0,900
2	5	5	0,016	0,468
3	0	10	0	0

Το τρίτο διάλυμα αποτελούνταν από σκέτο απιονισμένο νερό, και χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας γι αυτό και η ένδειξή του ήταν 0.

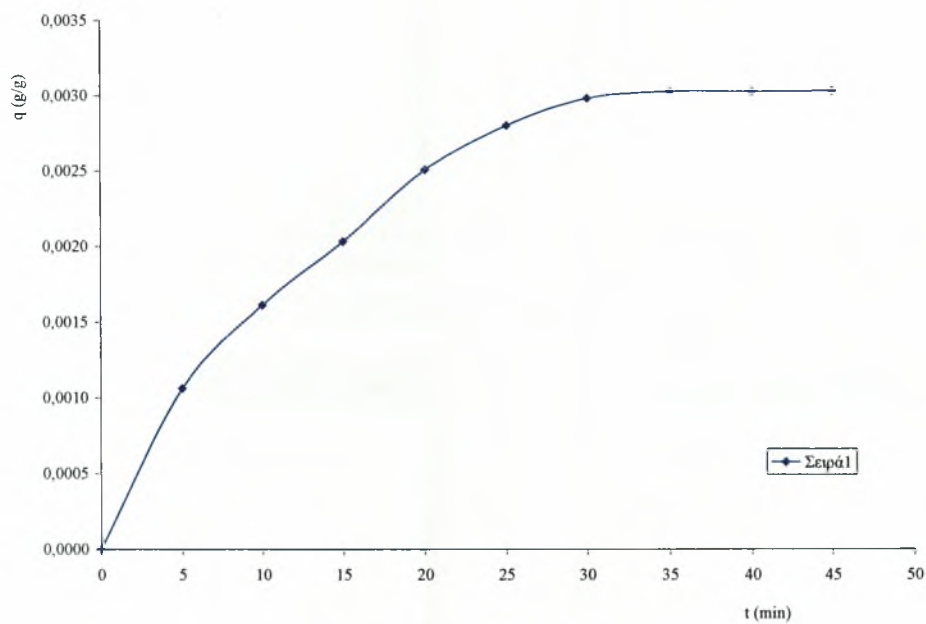
Ακολουθούν τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του διαλύματος που περιείχε και ενεργό άνθρακα στο φασματοφωτόμετρο – ρυθμισμένο στα 664nm, ξεκινώντας από τη χρονική στιγμή 0 (πριν το τοποθετήσουμε στη συσκευή ανακίνησης) έως και μία ώρα (60 min) μετά, με λήψη μέτρησης ανά 5 λεπτά ανακίνησης. Σημειώνεται πως μετά το 60ό λεπτό ανακίνησης σταμάτησαν οι μετρήσεις για το λόγο ότι παρατηρήθηκε αποχρωματισμός στο μετρούμενο διάλυμα, γεγονός που δηλώνει το τελικό σημείο του πειράματος καθώς προσροφήθηκε εντελώς (σε βαθμό που να είναι ορατό με γυμνό μάτι) η χρωστική ουσία «μπλε του μεθυλενίου».

Πίνακας 2. Πειραματικά Αποτελέσματα προσρόφησης
χρωστικής από ενεργό άνθρακα

Χρόνος t (min)	Απορρόφηση	Συγκέντρωση	q_t (g _{χρ} /gC)
0	0,606	0,0320	0,0000
5	0,450	0,0214	0,0011
10	0,331	0,0159	0,0016
15	0,197	0,0117	0,0020
20	0,114	0,0070	0,0025
25	0,063	0,0040	0,0028
30	0,050	0,0022	0,0030
35	0,050	0,0018	0,0030
40	0,049	0,0018	0,0030
45	0,049	0,0017	0,0030
50	0,049	0,0017	0,0030
55	0,049	0,0017	0,0030
60	0,049	0,0017	0,0030



Διάγραμμα 1. Καμπύλη βαθμονόμησης του οργάνου



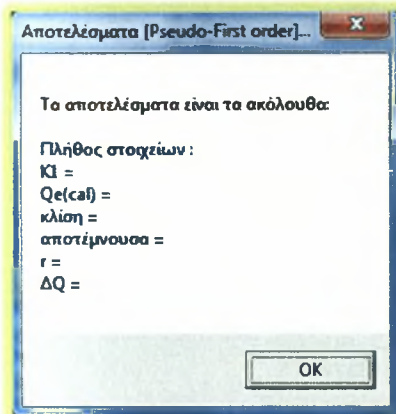
Διάγραμμα 2. Καμπύλη προσρόφησης χρωστικής «κυανό του μεθυλενίου»

6.2. Αποτελέσματα λογισμικού μοντέλων

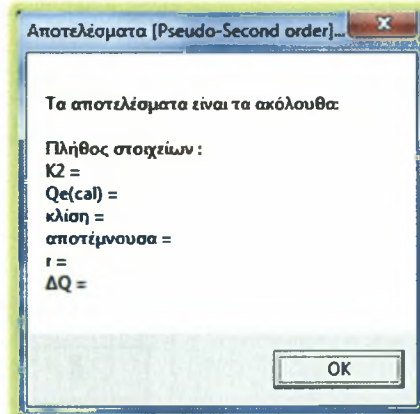
Το λογισμικό κινητικών μοντέλων που αναπτύχθηκε λειτουργεί με βάση κάποια δεδομένα εισόδου (εν προκειμένω τις τιμές Q_b , Q_e και t αντίστοιχα) και εμφανίζει κάποια δεδομένα εξόδου. Στα δεδομένα εισόδου αντιστοιχούν οι τιμές των μεγεθών Q_i και t που καταχωρεί κάθε φορά (σε κάθε χρήση) ο χρήστης, συνυπολογίζοντας και την Q_e που υπολογίζεται μόνη της με το πέρας των καταχωρήσεων και στα δεδομένα εξόδου αντιστοιχούν οι τιμές που προκύπτουν από την εκάστοτε συνάρτηση.

Η δομή των αποτελεσμάτων όπως τα εμφανίζει σε κάθε μία εκ των τεσσάρων περιπτώσεων το λογισμικό φαίνεται στις εικόνες παρακάτω:

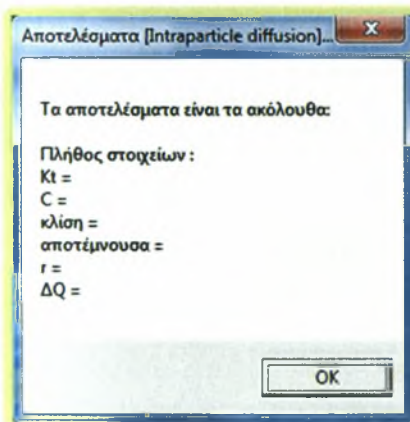
6.2.1. Αποτελέσματα "Pseudo-first order"



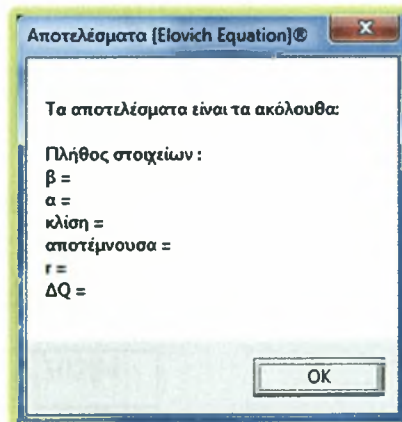
6.2.2. Αποτελέσματα "Pseudo-second order"



6.2.3. Αποτελέσματα "Intraparticle diffusion"



6.2.4. Αποτελέσματα "Elovich equation"



Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατόπιν εφαρμογής των πειραματικών δεδομένων στα μοντέλα του λογισμικού, είναι τα ακόλουθα:

Pseudo-first order

Πλήθος στοιχείων	8
K_1	0,2313
$Q_{e_{cal}}$	0,01228
Κλίση	-0,10044
Αποτέμνουσα	-1,9109
r^2	0,70375

Pseudo-second order

Πλήθος στοιχείων	8
K_2	0,12343
$Q_{e_{cal}}$	0,06001
Κλίση	277,68212
Αποτέμνουσα	2249,73389
r^2	0,8995

Intraparticle diffusion

Πλήθος στοιχείων	8
K_t	0,00054
Κλίση	0,00054
Αποτέμνουσα	-0,00005
r^2	0,99091

Elovich equation

Πλήθος στοιχείων	8
β	7737,13851
α	4,30284
Κλίση	0,00013
Αποτέμνουσα	0,00194
r^2	0,66767

7. Συμπεράσματα

Μετά την εφαρμογή όλων των διαθέσιμων μοντέλων του λογισμικού που αναπτύχθηκε στα πειραματικά δεδομένα, καταλήξαμε πως το αντιπροσωπευτικότερο μοντέλο και ελέγχον στάδιο της διεργασίας προσρόφησης του «κυανού του μεθυλενίου» από τον ενεργό άνθρακα (το εργαστηριακό πείραμα που πραγματοποιήσαμε) ήταν το μοντέλο που αφορούσε την εξίσωση αξιολόγησης *Intraparticle diffusion*, ή αλλιώς ενδομοριακή διάχυση, καθώς παρουσίασε και το μεγαλύτερο δείκτη r^2 . Επιπρόσθετα, το συμπέρασμα κρίνεται αναμενόμενο, καθώς στο εργαστηριακό πείραμα ουσιαστικά παρουσιάζονται μηχανισμοί διάχυσης, οι οποίοι συναντώνται και στην εν λόγω εξίσωση αξιολόγησης.

Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή των πειραματικών δεδομένων στα μοντέλα και τη μελέτη αυτών, μπορεί να γίνει και η εξής κατάταξη, από το πιο αντιπροσωπευτικό μοντέλο στο λιγότερο αντιπροσωπευτικό (βάσει του δείκτη r^2).

- Intraparticle diffusion
- Pseudo-second order
- Pseudo-first order
- Elovich equation

8. Βιβλιογραφία

8.1. Ξενόγλωσση

- ❖ Acedo-Ramos M., Gomez-Serrano V., Valenzuela-Calahorro C., and Lopez-Peinado A.J. Oxydation of activated carbon in liquid phase. Study by FT-IR // Spectroscopy letters. – 1993. – V26(6). – P.1117-1137
- ❖ Arriagada R., Garcia R., Molina-Sabio M., Rodriguez-Reinoso F. Effect of steam activation on the porosity and chemical nature of activated carbons from Eucalyptus globulus and peach stones // Microporous Mat. – 1997. – V.8, № 3–4. – P.123-130
- ❖ Barnes, Brian C.; Siderius, Daniel W.; Gelb, Lev D. (2009). "Structure, Thermodynamics, and Solubility in Tetramino Fluids". Langmuir 25 (12): 6702–16.
- ❖ Biniak S., Szymański G., Siedlewski J., Świątkowski A. The characterization of activated carbons with oxygen and nitrogen surface groups // Carbón. – 1997. – Vol.35, № 12. – P. 1799-1810
- ❖ Boudou J.P., Chehimi M., Broniek E., Siemieniowska T., Bimer J. Adsorption of H₂S or SO₂ on an activated carbon cloth modified by ammonia treatment // Carbon. – 2003. – Vol. 41, № 10. – P. 1999-2007
- ❖ Bradley RH, Sutherland I, Sheng E Carbon surface: Area, porosity, chemistry, and energy // J. of colloid and interface science – 1996. – V. 179, №2. – P. 561-569
- ❖ Brandt, R. K.; Hughes, M. R.; Bourget, L. P.; Truszkowska, K.; Greenler, R. G. (1993). "The interpretation of CO adsorbed on Pt/SiO₂ of two different particle-size distributions". Surface Science 286 (1–2): 15–25
- ❖ Czepirski, L.; Balys, M. R.; Komorowska-Czepirska, E. (2000). "Some generalization of Langmuir adsorption isotherm.". Internet Journal of Chemistry 3 (14)
- ❖ Ferrari, L.; Kaufmann, J.; Winnefeld, F.; Plank, J. (2010). "Interaction of cement model systems with superplasticizers investigated by atomic force microscopy, zeta potential, and adsorption measurements". J Colloid Interface Sci. 347 (1): 15–24.

- ❖ Garcia A.B., Martinez-Alonso A., Leon C. A., Tascon J.M.D. Modification of the surface properties of an activated carbon by oxygen plasma treatment // *Fuel*. – 1998. – V.77, №1 – P.613-624
- ❖ Gomez-Serrano V., Acedo-Ramos M., Lopez-Peinado A.J., Valenzuela-Calahorro C. Stability towards heating and outgassing of activated carbon oxidized in the liquid-phase // *Thermochimica Acta*. – 1991. – V.176. – P.129-140
- ❖ Gomez-Serrano V., Piriz-Almeida F., Duran-Valle C.J., Pastor-Villegas J. Formation of oxygen structures by air activation. A study by FT-IR spectroscopy // *Carbon*. – 1999. – V.37. – P.1517-1528
- ❖ J.Romanos et al. (2012). "Nanospace engineering of KOH activated carbon". *Nanotechnology* 23 (1)
- ❖ Kisliuk, P. (1957). "The sticking probabilities of gases chemisorbed on the surfaces of solids". *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 3 (1–2): 95–101.
- ❖ Machnikowski J., Kaczmarek H., Gerus-Piasecka I., Diez M.A., Alvarez R., Garcia R. Structural modification of coal-tar pitch fractions during mild oxidation – relevance to carbonization behavior // *Carbon*. – 2002. –V.40. –P.1937-1947
- ❖ Molina-Sabio M., Gonzalez M.T., Rodriguez-Reinoso F., Sepulveda-Escribano A. Effect of steam and carbon dioxide activation in the micropore size distribution of activated carbon // *Carbon* – 1996. – V.34, №4. – P.505-509
- ❖ Narayan, R. L.; King, T. S. (1998). "Hydrogen adsorption states on silica-supported Ru-Ag and Ru-Cu bimetallic catalysts investigated via microcalorimetry". *Thermochimica Acta* 312 (1–2): 105–114.
- ❖ Petrov N., Budinova T., Razvigorova M., Ekinci E., Yardim F., Minkova V. Preparation and characterization of carbon adsorbents from furfural // *Carbon* – 2000. – V.38, №15. – P.2069-2075
- ❖ Pilatowsky, I.; Romero, R.J.; Isaza, C.A.; Gamboa, S.A.; Sebastian, P.J. and Rivera, W. (2011). "Chapter 5: Sorption Refrigeration Systems". *Cogeneration Fuel Cell-Sorption*

Air Conditioning Systems. Green Energy and Technology. Springer. pp. 99,100. ISBN 978-1-84996-027-4. Retrieved 10 May 2011.

- ❖ Philippe Serp, José Luis Figueiredo, Carbon Materials for Catalysis, Wiley, – 2009, – 550 p.
- ❖ Polovina M., Babic B., Kaluderovic B., Dekanski A. Surface characterization of oxidized activated carbon cloth // Carbon –1997. – V.35, №8. – P.1047-1052
- ❖ Pradhan B.K., Sandle N.K. Effect of different oxidizing agent treatments on the surface properties of activated carbons // Carbon. – 1999. – V.37, №8. – P.1323-1332
- ❖ Rivera-Utrilla J; Sanchez-Polo M. The role of dispersive and electrostatic interactions in the aqueous phase adsorption of naphthalenesulphonic acids on ozone-treated activated carbons // Carbon – 2002. – V.40, №14. – P.2685-2691
- ❖ Rozanov, V. V.; Krylov, O. V. (1997). "Hydrogen spillover in heterogeneous catalysis". Russian Chemical Reviews 66 (2): 107–119.
- ❖ Saha B., Tai M.H., Sreat M. Study of activated carbon after oxidation and subsequent treatment characterization // Process safety and environmental protection – 2001. – V.79, №B4. – P.211-217
- ❖ Shoba Jhadhav, Value Added Products from Gasification – Activated Carbon, The Combustion, Gasification and Propulsion Laboratory (CGPL) at the Indian Institute of Science (IISc)
- ❖ Trens, P.; Durand, R.; Coq, B.; Coutanceau, C.; Rousseau, S.; Lamy, C. (2009). "Poisoning of Pt/C catalysts by CO and its consequences over the kinetics of hydrogen chemisorption". Applied Catalysis B: Environmental 92(3–4): 280–284.
- ❖ VanderWiel, D. P.; Pruski, M.; King, T. S. (1999). "A Kinetic Study of the Adsorption and Reaction of Hydrogen on Silica-Supported Ruthenium and Silver-Ruthenium Bimetallic Catalysts during the Hydrogenation of Carbon Monoxide". Journal of Catalysis 188 (1): 186–202.
- ❖ Wilson, CJ; Clegg, RE; Leavesley, DI; Percy, MJ (2005). "Mediation of Biomaterial-Cell Interactions by Adsorbed Proteins: A Review". Tissue engineering 11 (1): 1–18

- ❖ Youssef A.M., Abdelbary E.M., Samra S.E., Dowidar A.M. Surface-properties of carbons obtained from polyvinyl-chloride // Ind. J. of Chem. section a-inorganic bio-inorganic physical theoretical & analytical chemistry – 1991. – V.30, №10. – P.839-843
- ❖ Zupanc, C.; Hornung, A.; Hinrichsen, O.; Muhler, M. (2002). "The Interaction of Hydrogen with Ru/MgO Catalysts". Journal of Catalysis 209 (2): 501–514.

8.2. Ελληνική

- ❖ Νέα δομή, 1996, τόμος 4, "ΔΟΜΗ", σ. 311-312
- ❖ Νέα δομή, 1996, τόμος 29, "ΔΟΜΗ", σ. 100-101

8.3. Διαδίκτυο

- ❖ <http://www.lenntech.com/library/adsorption/adsorption.htm>
- ❖ <http://en.wikipedia.org/wiki/Adsorption#Adsorbents>
- ❖ http://en.wikipedia.org/wiki/Polymer_adsorption
- ❖ <http://arstechnica.com/science/2009/05/the-thermodynamics-of-tetris/>
- ❖ <http://www.lenntech.com/Data-sheets/Datasheet-granular-activated-carbon-FA100.pdf>
- ❖ <http://en.wikipedia.org/wiki/Physisorption>
- ❖ <http://en.wikipedia.org/wiki/Chemisorption>
- ❖ http://en.wikipedia.org/wiki/Activated_carbon
- ❖ http://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue
- ❖ http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_filtering
- ❖ <http://www.tigg.com/granular-activated-carbon.html#Anchor-Apparen-32986>
- ❖ <http://science.howstuffworks.com/environmental/energy/question209.htm>
- ❖ <http://www.livepedia.gr/index.php/%CE%A0%CF%81%CE%BF%CF%83%CF%81%CF%8C%CF%86%CE%B7%CF%83%CE%B7>
- ❖ <http://postgrasrv.hydro.ntua.gr/gr/edmaterial/education/katsiri/ActiveCarbon.pdf>
- ❖ <http://www.hydragcom.com/el/waterpidia/dictionary/103-prosrofisi>
- ❖ http://jupiter.chem.uoa.gr/pchem/courses/labs/guide_II-10.pdf
- ❖ <http://www.scribd.com/doc/24514822/28/%CE%A0%CF%81%CE%BF%CF%83%CF%81%CF%8C%CF%86%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CF%83%CE%B5-%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%B3%CF%8C-%CE%AC%CE%BD%CE%B8%CF%81%CE%B1%CE%BA%CE%B1#page=54>
- ❖ <http://www.hydragcom.com/el/categories-products/browse/51--?sef=hc>
- ❖ <http://www.thermoydravlikos.gr/article.php?ID=183>