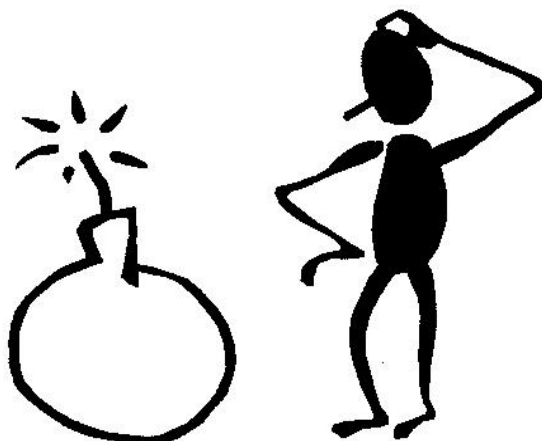




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Σημειώσεις Παραδόσεων



**Α. Βλυσίδης, καθηγητής ΕΜΠ
Ε. Γρηγοροπούλου, Καθηγήτρια ΕΜΠ
Γ. Λυμπεράτος, Καθηγητής ΕΜΠ**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
<u>1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΥΤΟΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΦΥΣΗ.....</u>	6
1.1.1 Φυσικές Διερργασίες.....	6
1.1.2 Χημικές Διερργασίες.....	8
1.1.3 Βιολογικές Διερργασίες	8
<u>1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΥΤΟΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....</u>	9
1.2.1 Επεξεργασία των αερίων ρύπων	9
1.2.2 Επεξεργασία των ρύπων σε υγρή φάση.....	10
1.2.3 Επεξεργασία των στερεών και ημιστερεών αποβλήτων.....	11
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	13
<u>2.1 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....</u>	13
2.1.1 Εξισορρόπηση παροχής-συγκέντρωσης.....	13
2.1.2 Εσχαρισμός	19
2.1.2.1 Σχεδιασμός σχάρας.....	20
2.1.3 Δεξαμενές εξάμμωσης.....	22
2.1.3.1 Εξαμμωτές με σταθερή ταχύτητα ροής.....	24
2.1.4 Λιποσυλλογή και ελαιοδιαχωρισμός	31
<u>2.2 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ</u>	33
2.2.1 Κροκίδωση – Συσσωμάτωση	33
2.2.2 Απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών	39
2.2.2.1 Διαχωρισμός αιωρούμενων με καθίζηση.....	40
2.2.2.1.1 Σχεδιασμός Πρωτοβάθμιας Καθίζησης	40
2.2.2.1.2 Σχεδιασμός Δευτεροβάθμιας Καθίζησης	46
2.2.2.1.3 Σχεδιασμός Πάχυνσης δια βαρύτητας.....	54
2.2.2.1.4 Διαχωρισμός αιωρούμενων στερεών με επίπλευση με αέρα..	57
2.2.2.1.5 Σχεδιασμός μονάδας πάχυνσης με επίπλευση διαλυμένου αέρα	60
<u>2.3 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....</u>	62
2.3.1 Βιολογικές Διερργασίες- Ενεργός ιλύς	62
2.3.1.1 Ορισμοί.....	66
2.3.1.2 Γενική Περιγραφή Διερργασίας Ενεργού Ιλύος	69
2.3.1.3 Βασικός Σχεδιασμός Διερργασίας Ενεργού Ιλύος	70
2.3.1.4 Ανάγκες σε θρεπτικά.....	77
2.3.1.5 Αερισμός.....	77
2.3.2 Ετερογενείς Βιολογικές Διερργασίες – Βιολογικά φίλτρα	78
2.3.2.1 Εισαγωγή	78
2.3.2.2 Κατανάλωση Οργανικού Υποστρώματος	79
2.3.2.3 Αερισμός.....	80
2.3.2.4 Σχεδιασμός βιολογικού φίλτρου.....	82
2.3.3 Αφαίρεση θρεπτικών	83
2.3.3.1 Εισαγωγή	83
2.3.3.2 Αφαίρεση αζώτου.....	83
2.3.3.2.1 Νιτροποίηση.....	83

2.3.3.2.2	Απονιτροποίηση	85
2.3.3.3	Αφαίρεση φωσφόρου.....	90
2.3.3.3.1	Διατάξεις Βιολογικής Απομάκρυνσης Φωσφόρου	90
2.3.4	Ταυτόχρονη Απομάκρυνση Οργανικών, Αζώτου και Φωσφόρου..	91
2.4	ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	91
2.4.1	Απολύμανση	92
2.4.2	Αντίστροφη όσμωση.....	93
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΗΜΙΣΤΕΡΕΩΝ (ΛΑΣΠΩΝ) ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	98
3.1	ΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΛΑΣΠΩΝ	98
3.1.1	Σχεδιασμός Αερόβιας χώνευσης λασπών	98
3.1.1.1	Μοντελοποίηση της χώνευσης	99
3.1.1.2	Αντιδραστήρας πλήρους αναδέυσεως με επιστροφή λάσπης 100	
3.1.1.3	Πειραματική συσκευή υπολογισμού σταθερών χώνευσης 100	
3.2	ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΑΣΠΩΝ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	105
3.3	ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΛΑΣΠΩΝ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	118
3.3.1	Αναερόβια χώνευση λασπών	118
3.3.1.1	Μικροβιολογία και βιοχημεία της αναερόβιας χώνευσης 119	
3.3.1.1.1	Υδρόλυση και διαλυτοποίηση	119
3.3.1.1.2	Οξεογένεση	119
3.3.1.1.3	Οξικογένεση.....	120
3.3.1.1.4	Παραγωγή μεθανίου	120
3.3.1.2	Σχεδιασμός του κωνευτήρα	121
3.3.1.3	Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία και απόδοση του αναερόβιου κωνευτήρα	127
3.3.1.4	Συνθήκες καλής λειτουργίας της αναερόβιας χώνευσης	132
3.3.2	Αναερόβια επεξεργασία απορριμμάτων	132
3.4	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ.....	134
3.4.1	Κόσκινα διαχωρισμού κατά μέγεθος	134
3.4.1.1	Σχεδιασμός δονούμενου κόσκινου.....	135
3.4.1.2	Σχεδιασμός περιστρεφόμενου κόσκινου	135
3.4.2	Υγειονομική ταφή απορριμμάτων	136
3.4.2.1	Εισαγωγή	136
3.4.2.2	Τεχνική περιγραφή ΧΥΤΑ	137
3.4.2.3	Γήρανση Χώρου Υγειονομικής Ταφής.....	139
3.4.2.4	Σχηματισμός, Σύσταση, Κίνηση και Ρύθμιση Διηθημάτων 144	
3.4.3	Καθίζηση ΧΥΤΑ και εξοικονόμηση χώρου	147
3.4.4	Θερμική επεξεργασία απορριμμάτων	148
3.4.4.1	Γενικά	148
3.4.4.2	Καύση Απορριμμάτων με Ανάκτηση Ενέργειας (ΚΑΑΕ)...	149
3.4.4.3	Καύσιμο από Απορρίμματα (RefuseDerivedFuel) (RDF) ...	153
3.4.4.4	Πυρόλυση	154

3.4.4.5	Αεριοποίηση	155
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΕΡΙΑ ΡΥΠΑΝΣΗ	157
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ.....	157
4.2	ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	158
4.2.1	Διασπορά αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα	158
4.2.1.1	<i>Μοντέλο Διασποράς Αερολυμάτων από Καμινάδα</i>	<i>160</i>
4.2.1.1.1	Ανάλυση της υπερύψωσης	161
4.2.1.1.2	Υπολογισμός μεγίστων συγκεντρώσεων εδάφους.....	162
4.2.2	Έλεγχος ρύπανσης στην πηγή	167
4.2.2.1	. Έλεγχος αιωρούμενων σωματιδίων	167
4.2.2.1.1	Κυκλώνες	168
4.2.2.1.2	Σακκόφιλτρα	175
4.2.2.1.3	Ηλεκτροστατικά φίλτρα	183
4.2.2.2	Έλεγχος Αέριων Ρύπων.....	189
4.2.2.2.1	Πύργοι απορρόφησης (Πλυντρίδες)	189

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Περιβαλλοντική Μηχανική ορίζεται ως ο κλάδος της μηχανικής που ασχολείται με τη μελέτη, το σχεδιασμό και τη χρήση διατάξεων και εξοπλισμού για την προστασία και αποκατάσταση του περιβάλλοντος. Ο εξοπλισμός που σχεδιάζεται και χρησιμοποιείται για αυτό τον σκοπό είναι συστήματα αγωγών, δοχείων, αντιδραστήρων (χημικών, βιολογικών) και διαχωριστήρων, συμπεριλαμβανομένου και του απαραίτητου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού τους.

Ο σχεδιασμός βασίζεται στην κατάστροψη και επίλυση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας, οδηγώντας σε υπολογισμό:

- του όγκου των αντιδραστήρων / διαχωριστήρων / δεξαμενών
- της απαιτούμενης ενέργειας για τη λειτουργία στη θερμοκρασία που έχει επιλεγεί.
- του απαραίτητου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, όπως αντλιών, αναδευτήρων, αεριστήρων, σωληνώσεων κλπ
- των χημικών ουσιών που απαιτείται να προστεθούν όπως εξουδετερωτικών, κροκιδωτικών, απολυμαντικών, θρεπτικών αλάτων κλπ.

Ο στόχος του επιτυχούς σχεδιασμού της εγκατάστασης επεξεργασίας είναι η εξουδετέρωση ή/και ο διαχωρισμός των επιβλαβών ρύπων.

Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται:

- για τα αιωρούμενα – σωματίδια στα αέρια ρεύματα και τα αιωρούμενα στερεά στα υγρά ρεύματα, με απλό ή υποβοηθούμενο διαχωρισμό τους σε ένα δευτερεύον ρεύμα, συνήθως πυκνότερο αλλά μικρότερου όγκου, επομένως ευκολότερα διαχειρίσιμου
- για τους οργανικούς ή ανόργανους αέριους ρύπους με την απορρόφησή τους από κάποιο υγρό, την προσρόφησή τους σε κάποιο στερεό ή την οξείδωση/καύση τους
- για τα αέρια ή στερεά που είναι διαλυμένα στην υγρή φάση με τη ρόφησή τους σε μια στερεή φάση (κάποιο πορώδες στερεό), με την εκρόφησή τους στον αέρα ή με τη χημική ή βιολογική μετατροπή τους σε αέρια (CO_2 , CH_4 κλπ), νερό και στερεά τα οποία επίσης διαχωρίζονται.

Τα στερεά που διαχωρίζονται ή παράγονται από αυτές τις διεργασίες, υφίστανται και αυτά επεξεργασία με στόχο:

- την περαιτέρω μείωση του όγκου τους
- την αδρανοποίησή τους
- την ενσωμάτωσή τους σε κάποια παραγωγική διεργασία (πρόσθετα τσιμεντοβιομηχανίας, λιπάσματα, βελτιωτικά εδάφους κλπ)
- τη διάθεσή τους σε ελεγχόμενο χώρο απόθεσης στερεών απορριμμάτων.

Αντίστοιχου τύπου επεξεργασία υφίστανται και τα στερεά βιομηχανικά απόβλητα και αστικά απορρίμματα.

Η επεξεργασία των ρύπων δεν έχει στόχο το μηδενισμό του ρυπαντικού φορτίου, αλλά τη μείωσή του μέχρι τα όρια που επιβάλλονται από τη νομοθεσία και εξαρτώνται, στις περισσότερες περιπτώσεις, από τον αποδέκτη στον οποίο θα γίνει η τελική διάθεση του επεξεργασμένου ρεύματος.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί «η κακία των ισοζυγίων μάζας»: πολλές φορές αυτό που γίνεται δεν είναι η εξάλειψη της ρύπανσης, αλλά η μεταφορά της σε άλλη φάση: ό,τι απομακρύνεται από το νερό – π.χ. οργανικός ρύπος – ή θα γίνει διοξείδιο του άνθρακα ή άλλο αέριο – μεθάνιο κλπ – ή στερεό, και θα περάσει στον αέρα ή θα μεταφερθεί στο έδαφος.

Εκτός από την Περιβαλλοντική Μηχανική υπάρχει και η Πράσινη Μηχανική: αυτή που στοχεύει στην πρόληψη της ρύπανσης με επέμβαση στην παραγωγική μονάδα, είτε με τον εντοπισμό και την εξάλειψη π.χ. διαρροών, είτε με κατάλληλη διαχείριση του νερού ψύξης, είτε με αλλαγή της παραγωγικής διαδικασίας, ακόμη και με υποκατάσταση του προϊόντος από την παραγωγή και χρήση του οποίου προκαλείται ρύπανση από άλλα φιλικότερα προς το περιβάλλον προϊόντα.

1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΥΤΟΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΦΥΣΗ

Στη φύση οι διεργασίες αυτοκαθαρισμού γίνονται με ρυθμούς που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του κάθε φυσικού συστήματος. Αυτά είναι:

- τα μετεωρολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά του αποδέκτη όπως:
 - η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου
 - η ταχύτητα των υδάτινων ρευμάτων
 - οι τύρβες
 - η βροχόπτωση
 - η ηλιοφάνεια
- η διαμόρφωση τοπίου και η δόμηση του χώρου για αέριους ρύπους,
- τα φυσικά χαρακτηριστικά της όχθης και του πυθμένα στην περίπτωση υδάτινων αποδεκτών,
- τα χαρακτηριστικά του εδάφους (διαπερατότητα, μικροοργανισμοί κλπ),
- η θερμοκρασία,
- η ύπαρξη στον αποδέκτη και άλλων ουσιών που συμμετέχουν / καταλύουν / εμποδίζουν τις δράσεις.

Αυτά τα χαρακτηριστικά (μεταβλητές) στα φυσικά συστήματα έχουν τιμές καθορισμένες από το οικοσύστημα, στις οποίες δεν μπορούμε να επεμβούμε. (Επεμβαίνουμε μόνο με την έννοια ότι αυτές μεταβάλλονται λόγω ανθρωπογενούς ρύπανσης). Στα τεχνητά συστήματα, όπως είναι οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας, οι ίδιες αυτές μεταβλητές έχουν τιμές καθοριζόμενες από το σχεδιαστή.

Ένας δόκιμος τρόπος ταξινόμησης των διεργασιών είναι ο χωρισμός τους σε φυσικές, χημικές και βιολογικές.

1.1.1 Φυσικές Διεργασίες

Αραιώση

Αραιώση υφίστανται όλοι οι ρύποι που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα ή στα νερά. Για να είναι αποτελεσματική θα πρέπει να διατίθενται μικρές ποσότητες ρύπων σε αποδέκτες μεγάλου όγκου και χαμηλής περιεκτικότητας σε ρύπους. Όσο αυξάνεται η συσσώρευση και η ένταση της ρυπαίνουσας δραστηριότητας, τόσο αυτή η διεργασία χάνει την αποτελεσματικότητά της. Από τα ισοζύγια μάζας υπολογίζεται η τελική περιεκτικότητα του αποδέκτη στο ρύπο που μας ενδιαφέρει. Ο ρυθμός με τον οποίο διασπείρεται/αραιώνεται ο ρύπος άρα και η χρονική (ή τοπική) εξέλιξη (profile) των συγκεντρώσεων κλπ εκτιμάται από την επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς του με όποιο μηχανισμό ισχύει στην κάθε περίπτωση. Μέχρι και τα μέσα του εικοστού αιώνα η αραιώση θεωρούνταν η πιο οικονομική μέθοδος επίλυσης του προβλήματος (*Dilution is the solution to pollution*).

Ιζηματοποίηση – κατακρήμνιση – επαναιώρηση

Είναι η απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων από την κύρια μάζα του ρευστού λόγω βαρύτητας (καθίζηση – sedimentation). Τα πιο μεγάλα σωματίδια

θα καθιζάνουν σχετικά γρήγορα, ακόμη όμως και τα κολλοειδή θα απομακρυνθούν από στάσιμα (ήρεμα) ρευστά. Ο όρος ιζηματοποίηση χρησιμοποιείται στα νερά (όπου έχουμε στερεά αιωρούμενα) ενώ ο όρος κατακρήμνιση στον αέρα (όπου έχουμε στερεά – σκόνες ή υγρά – σταγονίδια). Σε περίπτωση δημιουργίας τύρβης (ανατάραξη του βυθού ή ξαφνικό ρεύμα αέρα) επέρχεται επαναιώρηση των σωματιδίων.

Η καθίζηση οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της διαφορετικής πυκνότητας του σωματιδίου από το περιβάλλον ρευστό, η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται πάνω του (βάρος – άνωση – τριβή) δεν είναι μηδενική με αποτέλεσμα να υπάρχει κατακόρυφη (σε στάσιμο ρευστό) πτώση με σταθερή ή μεταβλητή ταχύτητα, μέχρι να αποκτήσει την οριακή του ταχύτητα καθίζησης. Αν το ρευστό δεν είναι στάσιμο (ποτάμι, ρεύμα), τότε πάλι θα υπάρχει καθίζηση, συνήθως σε σημεία μειωμένης ταχύτητας (κοντά στις όχθες, στην εκβολή). Αν τέλος το ρευστό είναι αέριο, θα παρασυρθεί από τον άνεμο και θα καθιζάνει αναλόγως.

Ανάλογα με τη φύση των αιωρουμένων σωματιδίων η καθίζηση στα νερά συντελείται με τα ακόλουθα πρότυπα:

1. Καθίζηση διακεκριμένων σωματιδίων (καθίζηση τύπου I). Τα σωματίδια καθιζάνουν ανεξάρτητα το καθένα από τα υπόλοιπα και η ταχύτητα καθίζησής τους είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη διαδρομή (βάθος) που διατρέχουν μέχρι να εναποτεθούν στον πυθμένα. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν συσσωματώνονται. Τέτοιου τύπου καθίζηση ακολουθούν τα ανόργανα σωματίδια.
2. Καθίζηση κροκίδων (καθίζηση τύπου II). Τα σωματίδια, καθώς καθιζάνουν, συσσωματώνονται, με επακόλουθο την αύξηση της ταχύτητας καθίζησης κατά τη διαδρομή μέχρι τον πυθμένα. Τα σωματίδια πάντως εξακολουθούν να μην παρεμποδίζουν το ένα το άλλο. Τέτοιου τύπου καθίζηση ακολουθούν τα οργανικά σωματίδια σε αιωρήματα χαμηλής ή μέσης συγκέντρωσης.
3. Εμποδιζόμενη καθίζηση ή καθίζηση τύπου ζώνης (καθίζηση τύπου III). Όταν τα αιωρούμενα στερεά βρίσκονται σε μεγάλη συγκέντρωση, παρουσιάζεται το φαινόμενο της ζώνης: μέσα στο χώρο καθίζησης και κατά μήκος της διαδρομής καθίζησης δημιουργείται μια ευδιάκριτη διεπιφάνεια σχετικώς καθαρού ρευστού με μια περιοχή στερεών υψηλής συγκέντρωσης. Η διεπιφάνεια αυτή προχωρά συνεχώς προς τον πυθμένα.
4. Πύκνωση (καθίζηση τύπου IV). Όταν έχουμε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις στερεών (μέσα στο στρώμα που έχει καθιζάνει), τα υπερκείμενα στρώματα πιέζουν τα υποκείμενα, ώστε βαθμιαία το στρώμα συμπτκνώνεται.

Η καθίζηση στον αέρα μπορεί να υποβοηθείται και από τη βροχή: μέσα στο σύννεφο τα αιωρούμενα αποτελούν πυρήνες συμπύκνωσης της ατμοσφαιρικής υγρασίας, ενώ κάτω από το σύννεφο τα αιωρούμενα παρασύρονται από τις σταγόνες της βροχής.

Κροκίδωση

Είναι η συνένωση των αιωρουμένων σωματιδίων, η οποία λαμβάνει χώρα όταν για οποιοδήποτε λόγο αυτά χάνουν το φορτίο τους, οπότε παύουν οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις άπωσης και το αιώρημα αποσταθεροποιείται. Κατά τη συνένωση, αυξάνεται η διάμετρος των προς καθίζηση σωματιδίων, οπότε αυξάνει και η ταχύτητα καθίζησής τους.

Διήθηση

Είναι η κατακράτηση των στερεών σωματιδίων κατά τη διαδρομή τους μέσα από ένα στερεό υλικό σταθερής ή μεταβλητής κοκκομετρίας. Στη φύση το υλικό αυτό είναι το έδαφος. Με αυτή τη φυσική διεργασία τα περισσότερα υπόγεια νερά καθίστανται πόσιμα, εφόσον η διαδρομή είναι επαρκής και η σύσταση του εδάφους κατάλληλη.

Επίπλευση

Είναι η απομάκρυνση αδιάλυτων ενώσεων που βρίσκονται στο νερό και έχουν μικρότερο ειδικό βάρος από αυτό. Ο μηχανισμός είναι ο ίδιος με αυτόν της καθίζησης, μόνο που η συνισταμένη δύναμη ωθεί τα σωματίδια προς τα πάνω.

Ρόφηση – εκρόφηση αερίων

Η μεταφορά αερίων από και προς το νερό είναι μια φυσική διεργασία καθαρισμού τόσο του αέρα όσο και του νερού. Οι παράγοντες που χαρακτηρίζουν το σύστημα είναι η διαλυτότητα του / των αερίων στο νερό και ο ρυθμός μεταφοράς από τη μια φάση στην άλλη.

Μεταφορά θερμότητας

Τα υγρά και τα αέρια απόβλητα, αν δεν έχουν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, θα είναι συνήθως θερμότερα από αυτό. Στα αέρια ρεύματα η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά μπορεί να προκαλέσει τοπική υπερθέρμανση του αέρα, η οποία δημιουργεί ρεύμα αέρα, λόγω διαφοράς πυκνότητας, με επακόλουθη ανανέωση του αέρα και διασπορά του ρύπου (όχι βεβαίως στο βαθμό που αυτό επιτυγχάνεται λόγω του ανέμου). Στα νερά το πρόβλημα είναι πιο έντονο, γιατί λόγω του ότι η θερμοκρασία του νερού είναι περίπου σταθερή κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου και κατά τη διάρκεια του έτους (συγκρινόμενη με τη μεταβλητή θερμοκρασία του αέρα), οι υδρόβιοι οργανισμοί είναι συνηθισμένοι σε σταθερή θερμοκρασία και άρα ευαίσθητοι σε αλλαγές.

1.1.2 Χημικές Διεργασίες

Εξουδετέρωση

Πρόκειται για αντιδράσεις οξέων και βάσεων στην υδατική φάση με το σχηματισμό αλάτων διαλυτών (που παραμένουν στην υδατική φάση) ή αδιάλυτων (που απομακρύνονται με καθίζηση). Είναι δράσεις συνήθως ταχύτατες και ποσοτικές. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εξουδετέρωση όξινων απορροών όταν διηθούνται μέσα από αλκαλικά (ασβεστολιθικά) εδάφη.

Οξείδωση – Αναγωγή

Στην ατμόσφαιρα, αέριες ανόργανες και οργανικές ενώσεις (διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου, VOCs) μετασχηματίζονται παρουσία του ηλιακού φωτός (φωτοχημικές αντιδράσεις). Οι περισσότερες αντιδράσεις οξειδοαναγωγής στα νερά είναι βιοχημικής φύσης, απαιτούν δηλαδή τη μεσολάβηση μικροοργανισμών.

Ιοντοεναλλαγή

Ιοντοεναλλαγή εμφανίζεται κατά τη διόδου του νερού μέσα από εδάφη και στον πυθμένα λιμνών και ποταμών. Είναι η εναλλαγή ιόντων μεταξύ διαφορετικών φάσεων, μέχρι να επιτευχθεί ανακατανομή τους και ισορροπία.

1.1.3 Βιολογικές Διεργασίες

Γίνονται στα νερά και στο έδαφος από μικροοργανισμούς, που χρησιμοποιούν τα βιοαποικοδομήσιμα υλικά (οργανικά και ανόργανα) ως πηγή τροφής και ενέργειας: μεταβολίζουν τα διαλυμένα και κolloειδή υλικά και τα μετατρέπουν αφενός σε νέους μικροοργανισμούς και μεταβολικά προϊόντα.

1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΥΤΟΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

1.2.1 Επεξεργασία των αερίων ρύπων

Φυσικές

- ***Διήθηση***

Εφαρμόζεται σε αέρια ρεύματα που περιέχουν σωματίδια. Το αέριο ρεύμα εξαναγκάζεται να περάσει μέσα από διηθητικό μέσο, το πορώδες του οποίου καθορίζει και τις διαστάσεις των σωματιδίων που κατακρατούνται.

- ***Καθίζηση***

Εφαρμόζεται σε αέρια ρεύματα που περιέχουν σωματίδια. Βασίζεται στη σχετική κίνηση του σωματιδίου μέσα στο ρευστό, λόγω της διαφορετικής πυκνότητας των σωματιδίων από το περιβάλλον αέριο.

- ***Φυγοκέντρωση***

Βασίζεται στον ίδιο μηχανισμό με την καθίζηση. Η διαφορά είναι ότι δεν δουλεύει με την επιτάχυνση της βαρύτητας (g) αλλά με πολλαπλάσιά της, ανάλογα με τη συχνότητα περιστροφής και το ενεργό μέγεθος της διάταξης. Και αυτή εφαρμόζεται σε αέρια ρεύματα που περιέχουν σωματίδια, τα οποία λόγω περιστροφής του αερίου ρεύματος που τα περιέχει, εναποτίθενται στο τοίχωμα του φυγοκεντρικού (κυκλώνα).

- ***Προσρόφηση σε στερεά***

Εφαρμόζεται σε αέρια ρεύματα που περιέχουν ενώσεις στην αέρια φάση (ατμούς κλπ), οι οποίες ροφούνται επιλεκτικά σε κατάλληλο στερεό υλικό και απομακρύνονται έτσι από το κύριο αέριο ρεύμα. Η διεργασία τελείται συνήθως σε στήλες (πύργους), όπου το προσροφητικό είναι το πληρωτικό υλικό. Εάν το αέριο ρεύμα περιέχει και σωματίδια, γίνεται ταυτοχρόνως και διήθηση. Η κοκκομετρία του υλικού καθορίζει την πτώση πίεσης κατά τη διεργασία, ενώ η φύση του υλικού και οι συνθήκες λειτουργίας καθορίζουν το ποσοστό (και την κατανομή) των ρύπων που κατακρατούνται.

- ***Ρόφηση από υγρά***

Εφαρμόζεται σε αέρια ρεύματα που περιέχουν ενώσεις που διαλύονται εύκολα στο νερό ή σε οργανικούς διαλύτες, ενδεχομένως παρουσία ενώσεων που αντιδρούν με τους ρύπους στην υγρή φάση. Η ρόφηση μπορεί να είναι είτε φυσική είτε χημική (απομάκρυνση όξινων αερίων από διαλύματα βάσεων). Η διεργασία τελείται συνήθως σε πύργους όπου η συνεχής φάση μπορεί να είναι είτε η υγρή είτε η αέρια.

Χημικές

- ***Οξειδωση***

Η διεργασία είναι συχνά καταλυτική (για να έχουμε ήπιες συνθήκες λειτουργίας). Η μη καταλυτική οξειδωση γίνεται με τη μορφή της καύσης των ρύπων σε συμβατικούς ή τροποποιημένους καυστήρες. Στην περιοχή των χημικών οξειδώσεων συμπεριλαμβάνονται και οι ονομαζόμενες προχωρημένες μέθοδοι οξειδωσης (όπως π.χ. η φωτοκαταλυτική επεξεργασία αερίων ρύπων – με χρήση υπεριώδους αλλά και ηλιακής ακτινοβολίας, ο οζονισμός κ.α.).

- ***Αναγωγή***

Εφαρμόζεται σε αέρια ρεύματα που περιέχουν ενώσεις που μπορούν να αναχθούν (NO_x κλπ). Η διεργασία είναι επίσης καταλυτική, κατά τα ανωτέρω.

Σε περιπτώσεις ρευμάτων που περιέχουν και οξειδώσιμες και αναγωγίμες ενώσεις, χρησιμοποιούνται τριοδικοί καταλύτες (εφαρμογή στα καυσαέρια αυτοκινήτων).

Βιολογικές

Εφαρμόζονται αερόβιες διεργασίες σε αέρια ρεύματα που περιέχουν εύκολα βιοδιασπάσιμες ενώσεις. Η διεργασία τελείται σε βιολογικούς πύργους και εφαρμόζεται ιδιαίτερα για την επεξεργασία οσμών (πτητικών οργανικών ενώσεων, VOCs).

1.2.2 Επεξεργασία των ρύπων σε υγρή φάση

Φυσικές

▪ ***Καθίζηση***

Εφαρμόζεται σε υγρά ρεύματα αποβλήτων (αστικών ή βιομηχανικών) που περιέχουν αιωρούμενα ανόργανα ή οργανικά σωματίδια. Ενδεχομένως προηγείται κροκίδωση, όπου με κατάλληλα χημικά – κροκιδωτικά επιτυγχάνεται η συσσωμάτωση των αιωρουμένων σωματιδίων, συνεπώς και η αύξηση της ταχύτητας καθίζησής τους. Η διεργασία τελείται σε ορθογώνιες ή κυκλικές δεξαμενές, όπου η απομάκρυνση των παραγομένων (καθιζανόντων) στερεών (που αποκαλούνται και με το συλλογικό όρο λάσπη) γίνεται είτε περιοδικά (σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας), είτε συνεχώς (σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας).

▪ ***Διήθηση***

Εφαρμόζεται ως βασική διεργασία στο νερό που προορίζεται για πόσιμο και ως συμπληρωματική διεργασία σε υγρά απόβλητα, για τα οποία οι προδιαγραφές απόρριψης είναι ιδιαίτερα αυστηρές ως προς τα αιωρούμενα στερεά. Το υγρό ρεύμα εξαναγκάζεται να περάσει μέσα από διηθητικό μέσο, το πορώδες του οποίου καθορίζει και τις διαστάσεις των σωματιδίων που κατακρατούνται. Στο πορώδες υλικό κατακρατούνται ενδεχομένως και αρκετές διαλυτές ενώσεις λόγω προσρόφησης.

▪ ***Ρόφηση αερίων***

Εφαρμόζεται στη βιολογική επεξεργασία αστικών ή βιομηχανικών βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων όπου οξυγόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα μεταφέρεται στην υδατική φάση για να χρησιμοποιηθεί από τους μικροοργανισμούς για την αποικοδόμηση των ρύπων και την αναπνοή/αναπαραγωγή τους.

▪ ***Εκρόφηση αερίων***

Εφαρμόζεται σε υγρά απόβλητα που περιέχουν ενώσεις (συνήθως δύσσομες) οι οποίες εκροφούνται (stripping) εύκολα σε αέρα (ή ατμό), ο οποίος στη συνέχεια υφίσταται κατάλληλη επεξεργασία προς ανάκτηση. Επίσης εκρόφηση αερίων συμβαίνει κατά τη βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, όπου απομακρύνονται μερικά από τα τελικά προϊόντα της διεργασίας (CO_2 , CH_4 , NH_4 κλπ).

▪ ***Επίπλευση***

Εφαρμόζεται σε υγρά απόβλητα που περιέχουν ουσίες ελαφρότερες από το νερό (συνήθως ελαιώδεις) σε διασπορά. Το υγρό ρεύμα οδηγείται σε μια δεξαμενή όπου είτε αφήνεται να ηρεμήσει και διαχωρίζεται μηχανικά το ελαιώδες στρώμα που δημιουργείται στην επιφάνεια, είτε παροχετεύεται ταυτόχρονα αέρας σε λεπτή διασπορά, στη διεπιφάνεια των φυσαλίδων του οποίου συγκεντρώνονται οι ελαιώδεις ουσίες και παρασύρονται στην ελεύθερη επιφάνεια, από όπου και συλλέγονται.

Χημικές

▪ **Εξουδετέρωση**

Εφαρμόζεται σε βιομηχανικά απόβλητα, όξινα ή βασικά, ενδεχομένως ως το μόνο στάδιο επεξεργασίας. Η διεργασία τελείται σε δεξαμενές ανάδευσης, με απομάκρυνση της λάσπης που ενδεχομένως θα παραχθεί (αλάτων).

▪ **Οξείδωση**

Εφαρμόζεται και αυτή σε βιομηχανικά απόβλητα, τα οποία περιέχουν μη βιοδιασπάσιμους οργανικούς ρύπους. Μπορεί να είναι ομογενής (καταλυτική ή μη) στην υγρή φάση ή ετερογενής, όπου το στερεό είναι ο καταλύτης. Εφαρμόζεται και διεργασία υγρής οξείδωσης, κατά την οποία η δράση τελείται σε υψηλή θερμοκρασία (αύξηση ρυθμού) και υψηλή πίεση (αύξηση διαλυτότητας οξυγόνου).

Στην περιοχή των χημικών οξειδώσεων συμπεριλαμβάνονται και οι προχωρημένες μέθοδοι οξείδωσης, η οποίες βασίζονται στην δημιουργία ριζών υδροξυλίου (φωτοκατάλυση, οξονισμός, αντίδραση Fenton, αντίδραση με υπεροξείδιο του υδρογόνου κ.α).

▪ **Αναγωγή**

Εφαρμόζεται σε βιομηχανικά απόβλητα, που περιέχουν αναγωγίμους ρύπους (κυρίως μεταλλικά ιόντα).

▪ **Απολύμανση**

Εφαρμόζεται σε απόβλητα (συνήθως αστικά) που περιέχουν μικροοργανισμούς, οι οποίοι δεν θα πρέπει να διατεθούν στον αποδέκτη. Ως απολυμαντικά χρησιμοποιούνται χημικά όπως το υπεροξείδιο του υδρογόνου, το όζον, το χλώριο και, πρόσφατα, η υπεριώδης ακτινοβολία.

▪ **Ιοντοεναλλαγή**

Εφαρμόζεται σε βιομηχανικά απόβλητα που περιέχουν ιόντα εύκολα εναλλάξιμα, όπως είναι τα βαριά μέταλλα, σε κάποιο στερεό εναλλάκτη (συνθετική ρητίνη ή τροποποιημένο φυσικό ζεόλιθο). Εφαρμόζεται επίσης σε αστικά απόβλητα για απομάκρυνση αμμωνίας. Η διεργασία τελείται σε στήλη (πύργο) όπου ο ιοντοεναλλάκτης είναι το πληρωτικό υλικό.

Βιολογικές

Εφαρμόζονται στα αστικά απόβλητα (λύματα) που περιέχουν μεγάλο ποσοστό βιοδιασπάσιμων ενώσεων, καθώς επίσης και σε πολλά βιομηχανικά βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα (γεωργικές βιομηχανίες, τρόφιμα κλπ). Ανάλογα με τη φύση του αποβλήτου, το φορτίο και τις απαιτήσεις ποιότητας στην εκροή εφαρμόζονται αερόβιες (παρουσία οξυγόνου), ανοξικές (παρουσία εναλλακτικού δέκτη ηλεκτρονίων) ή αναερόβιες διεργασίες (ζύμωση απουσία ανόργανου δέκτη ηλεκτρονίων). Οι αερόβιες διεργασίες εφαρμόζονται σε απόβλητα χαμηλού ή μέσου οργανικού φορτίου ενώ οι αναερόβιες εφαρμόζονται σε απόβλητα υψηλού οργανικού φορτίου.

1.2.3 Επεξεργασία των στερεών και ημιστερεών αποβλήτων

Μηχανικές – φυσικές

▪ **Μείωση όγκου**

Δεδομένου ότι τα στερεά απορρίμματα είναι συνήθως ογκώδη με πολύ κενό χώρο (συσκευασίες κλπ), με συμπίεση μπορεί να επιτευχθεί οικονομία χώρου κατά τη μεταφορά τους στο χώρο περαιτέρω επεξεργασίας ή διάθεσης. Τα στερεά και ημιστερεά απόβλητα συχνά περιέχουν υψηλά ποσοστά υγρασίας: ενδεικτικά αναφέρεται ότι η βιολογική λάσπη περιέχει 92-98% υγρασία.

Απομάκρυνση ακόμη και μέρους της υγρασίας οδηγεί σε απόβλητο μικρότερου όγκου, συνεπώς και ευκολότερα διαχειρίσιμο. Ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας που σκοπεύεται να απομακρυνθεί, εφαρμόζονται διεργασίες όπως η συμπύκνωση-πάχυνση (μέχρι 5-15% σε στερεά), η αφυδάτωση (μέχρι 15-50% σε στερεά) και η ξήρανση (υγρασία κάτω του 10%).

- **Μηχανική μείωση του μεγέθους**

Μηχανική μείωση του μεγέθους (π.χ. με τεμαχισμό) διευκολύνει την περαιτέρω επεξεργασία τους.

- **Διαλογή υλικών**

Δεδομένου ότι τα στερεά απορρίμματα περιέχουν (στερεά) συστατικά που αφενός μπορούν να αξιοποιηθούν (ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση κλπ), αφετέρου η παρουσία τους παρεμποδίζει την περαιτέρω επεξεργασία, η διαχείριση στερεών αποβλήτων συχνά περιλαμβάνει διαχωρισμό/διαλογή υλικών. Η βασικότερη κατηγορία υλικών που διαλέγονται είναι τα μέταλλα, το χαρτί, τα πλαστικά και το γυαλί. Η διαλογή μπορεί να γίνεται είτε στην πηγή, είτε μετά τη συλλογή σε μονάδα μηχανικής ανακύκλωσης όπου χρησιμοποιούνται διάφορες διεργασίες όπως μαγνητικοί διαχωριστήρες, αεροκυκλώνες κλπ.

Χημικές (Θερμικές)

- **Καύση**

Σκοπό έχει να μετατρέψει τα στερεά σε αδρανή τελικά προϊόντα (στάχτες και αέρια), μειώνοντας σημαντικά την ποσότητα προς τελική διάθεση και ανακτώντας ενέργεια (θερμική ή/και ηλεκτρική).

- **Πυρόλυση, αεριοποίηση**

Είναι διεργασίες ολικής ή μερικής απουσίας οξυγόνου που παράγουν ενδιάμεσα προϊόντα (καύσιμα).

Βιολογικές

Στόχο έχουν τη σταθεροποίηση του στερεού αποβλήτου, ώστε να μπορεί να διατεθεί ασφαλώς στο περιβάλλον, αλλά και τη μετατροπή του σε χρήσιμα προϊόντα (βιοαέριο για ενεργειακή αξιοποίηση ή/και εδαφοβελτιωτικό).

- **Χώνευση, αερόβια ή αναερόβια**

Η αερόβια χώνευση εφαρμόζεται στη διαχείριση ημιστερεών (λασπών). Είναι διεργασία αντίστοιχη της αερόβιας επεξεργασίας αστικών λυμάτων και παράγει επαρκώς σταθεροποιημένη και ασφαλή προς διάθεση λάσπη. Η αναερόβια εφαρμόζεται ευρύτερα, τόσο για τη σταθεροποίηση λάσπης όσο και του ζυμώσιμου κλάσματος των στερεών αποβλήτων. Παράγει αέριο μεθάνιο, επομένως ανακτάται μέρος της περιεχομένης ενέργειας.

- **Κομποστοποίηση**

Είναι αερόβια διεργασία σταθεροποίησης οργανικών στερεών, όπου το τελικό προϊόν έχει σύσταση ανάλογη του εδάφους και χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

2.1 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

2.1.1 Εξισορρόπηση παροχής-συγκέντρωσης

Στις δεξαμενές εξισορρόπησης (με μεταβλητή παροχή εισόδου) μπορεί να επιτευχθεί, ανάλογα με το σχεδιασμό, εξομάλυνση (μείωση ή εξάλειψη της χρονικής διακύμανσης) της υδραυλικής παροχής εξόδου, με ή χωρίς ταυτόχρονη σχετική εξομάλυνση της συγκέντρωσης των ρύπων.

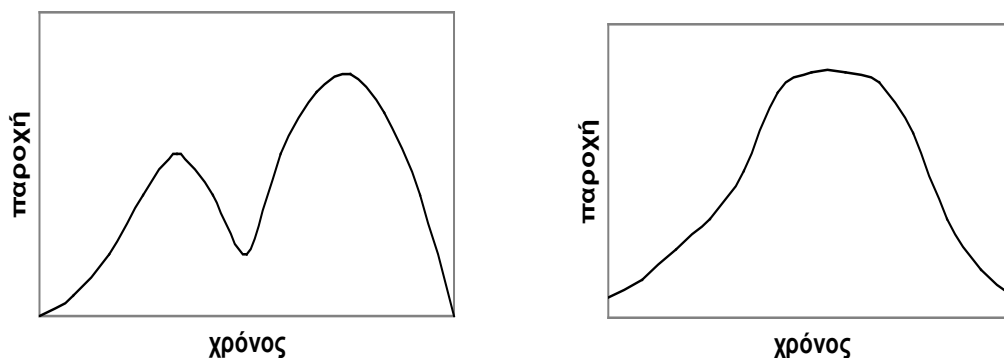
Η συχνά χρησιμοποιούμενη ανάδευση στη δεξαμενή εξισορρόπησης εξυπηρετεί την ομογενοποίηση του περιεχομένου της, στην αποτελεσματική διασπορά των τυχόν προστιθεμένων χημικών και στην αποφυγή καθίζησης των αιωρούμενων στερεών. Επίσης, η ανάδευση εξασφαλίζει και τον απαραίτητο αερισμό ώστε να μην έχουμε αναερόβια βιολογική δραστηριότητα καταστάσεις με επακόλουθη παραγωγή δύσσομων αερίων.

Κατά το σχεδιασμό πρέπει να αποφασισθούν τα εξής:

- αν θα είναι πάνω στη γραμμή επεξεργασίας ή σε παράκαμψη (on- ή off-line)
- το σημείο που θα τοποθετηθεί η δεξαμενή μέσα στο σύστημα επεξεργασίας
- ο όγκος της.

Συνήθη σημεία τοποθέτησης είναι είτε στην αρχή είτε μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία, οπότε λειτουργεί ουσιαστικά σαν "ασπίδα" του δευτεροβάθμιου – βιολογικού καθαρισμού. Για τον υπολογισμό του όγκου της δεξαμενής εξισορρόπησης θεωρούμε ότι έχουμε ένα δοχείο πλήρους ανάμειξης, όπου δεν τελούνται χημικές δράσεις.

Έστω ότι έχουμε δεδομένα στιγμιαίων (ή ωριαίων ή ανά όσο χρονικό διάστημα Δt_i έχουμε μετρήσεις) παροχών εισόδου στη δεξαμενή εξισορρόπησης σύμφωνα με το ακόλουθο Σχήμα 2.1.1.



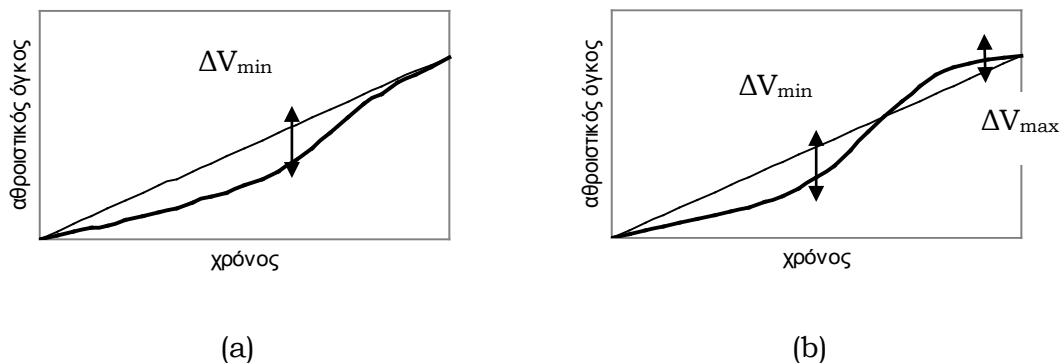
Σχήμα 2.1.1 Πιθανά σενάρια μεταβλητής παροχής στην είσοδο της δεξαμενής εξισορρόπησης

Από τα παραπάνω δεδομένα κατασκευάζουμε το διάγραμμα αθροιστικού όγκου λυμάτων που έχει εισρεύσει στη δεξαμενή (V_i), βάσει της σχέσης:

$$V_i = \sum_{i=1}^i (Q_i \cdot \Delta t_i) \quad (2.1.1)$$

όπου Q_i η μετρημένη (μέση) ογκομετρική παροχή εισόδου κατά το χρονικό διάστημα Δt_i . Αν έχουμε συνεχή μέτρηση παροχής, το άθροισμα αντικαθίσταται από το αντίστοιχο ολοκλήρωμα.

Το διάγραμμα αυτό θα έχει μια από τις μορφές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.2.

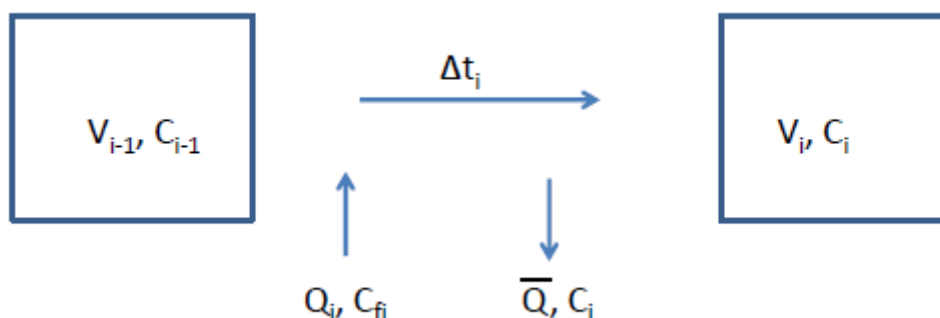


Σχήμα 2.1.2. Πιθανές μορφές διαγράμματος αθροιστικού όγκου που έχει εισρεύσει

Η έντονη γραμμή παριστά τον αθροιστικό όγκο και η κλίση της λεπτής ευθείας γραμμής παριστά τη σταθερή παροχή εξόδου από τη δεξαμενή (το πηλίκο του όγκου που έχει εισρεύσει προς το συνολικό χρόνο εισροής), που δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^i (Q_i \cdot \Delta t_i)}{\sum_{i=1}^i \Delta t_i} \quad \text{ή} \quad \frac{\int_0^{\sum \Delta t_i} Q(t) dt}{\int_0^{\sum \Delta t_i} dt} \quad (2.1.2)$$

Το Σχήμα 2.1.3 δείχνει την μεταβολή κατά το χρονικό διάστημα Δt_i .



Σχήμα 2.1.3. Μεταβολή κατά ένα χρονικό διάστημα Δt_i

Θα έχουμε παροχή εισόδου Q_i με συγκέντρωση ρύπου C_{fi} ενώ θα εκρέει η μέση παροχή $\bar{Q}$ με συγκέντρωση C_i . Ο όγκος V_i του υγρού που βρίσκεται κάθε χρονική στιγμή μέσα στη δεξαμενή θα δίνεται από την αναδρομική σχέση:

$$V_i = V_{i-1} + (Q_i - \bar{Q}) \cdot \Delta t_i \quad (2.1.3)$$

Από το ισοζύγιο για τον ρύπο σε αυτό το χρονικό διάστημα:

$$C_{fi} \cdot Q_i \cdot \Delta t_i - C_i \cdot \bar{Q} \cdot \Delta t_i = C_i \cdot V_i - C_{i-1} \cdot V_{i-1} \quad (2.1.4)$$

προκύπτει η συγκέντρωση εξόδου C_i από τον αναδρομικό τύπο:

$$C_i = \frac{C_{fi} \cdot Q_i \cdot \Delta t_i + C_{i-1} \cdot V_{i-1}}{\bar{Q} \cdot \Delta t_i + V_i} \quad (2.1.5)$$

όπου, $V_0=0$. (Αυτό σημαίνει ότι οι υπολογισμοί ξεκινάνε τη χρονική περίοδο όπου η δεξαμενή είναι άδεια).

Η σχέση 2.1.5 μετασχηματίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.1.3 στην ακόλουθη:

$$C_i = \frac{C_{fi} \cdot Q_i \cdot \Delta t_i + C_{i-1} \cdot V_{i-1}}{Q_i \cdot \Delta t_i + V_{i-1}} \quad (2.1.6)$$

Η διαφορά ($V_i - V_{i-1}$) μπορεί να είναι είτε θετική, οπότε η δεξαμενή γεμίζει, είτε αρνητική, οπότε η δεξαμενή αδειάζει.

Από το Σχήμα 2.1.2 μπορεί να υπολογισθεί και η μέγιστη τιμή της διαφοράς αυτής ($\Delta V_{\max} \geq 0$) που αντιστοιχεί στη μέγιστη αύξηση ενεργού όγκου της δεξαμενής, καθώς και η ελάχιστη τιμή της διαφοράς αυτής ($\Delta V_{\min} \leq 0$) που αντιστοιχεί στη μέγιστη ελάττωσή του δηλαδή τότε που η δεξαμενή είναι τελείως άδεια. Οι ακραίες αυτές διαφορές συμβολίζονται με τα διπλά βέλη. (Στο Σχήμα 2.1.2α, θα είναι $\Delta V_{\max} = 0$).

Είναι προφανές ότι ο ελάχιστος απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής εξισορρόπησης θα δίνεται από το άθροισμα των δύο ακραίων τιμών διαφοράς, δηλαδή

$$V_{\text{δεξαμενης}} = |\Delta V_{\min}| + |\Delta V_{\max}| \quad (2.1.7)$$

Στην ειδική περίπτωση που έχουμε σταθερή παροχή εισόδου Q , ορίζοντας τον χρόνο παραμονής

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (2.1.8)$$

Προκύπτει η μέση συγκέντρωση:

$$C_i = \frac{C_{fi} + C_{i-1} \cdot \theta}{1 + \theta} \quad (2.1.9)$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι η εξομάλυνση είναι πρακτικά πλήρης για πολύ μεγάλο θ ($C_i = C_{i-1}$) και μηδενική για $\theta=0$ ($C_i = C_{0i}$).

Μια αδιάστατη παράμετρος που χαρακτηρίζει την εξισορρόπηση είναι ο συντελεστής αιχμής (peakfactor, PF) που δίνεται από τη σχέση

$$PF = \frac{\text{μέγιστη τιμή του χαρακτηριστικού μεγέθους}}{\text{ελάχιστη τιμή του χαρακτηριστικού μεγέθους}} \quad (2.1.10)$$

μέσα στον πλήρη κύκλο. Στην περιπτώσή μας, το χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η συγκέντρωση και μπορούμε να συγκρίνουμε το συντελεστή αιχμής στην είσοδο με αυτόν στην έξοδο.

Άσκηση 2.1

Διατίθενται τα ακόλουθα δεδομένα ενός πλήρους 24-ώρου για ένα απόβλητο. Να υπολογισθεί ο απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής εξισορρόπησης παροχής, η μέση παροχή εξόδου καθώς και η συγκέντρωση στην έξοδό της.

Χρόνος, ώρες	Μέση παροχή, Q_i (L/s)	Μέση συγκέντρωση εισόδου, BOD_5C_{fi} (mg/L)
0-1	275	150
1-2	221	115
2-3	164	75
3-4	130	50
4-5	105	45
5-6	99,1	60
6-7	119	90
7-8	204	130
8-9	353	175
9-10	410	200
10-11	426	215
11-12	430	220
12-1	426	220
1-2	405	210
2-3	385	200
3-4	351	190
4-5	325	180
5-6	325	170
6-7	328	175
7-8	365	210
8-9	399	280
9-10	399	305
10-11	379	245
11-12	345	180

Λύση

Για να υπολογίσουμε τον όγκο της δεξαμενής εξισορρόπησης θα πρέπει να σχεδιάσουμε το διάγραμμα συνολικού όγκου παροχτευμένων αποβλήτων συναρτήσει του χρόνου.

Για το σκοπό αυτό διαμορφώνουμε πίνακα και διάγραμμα με τη χρονική εξέλιξη της παροχής εισόδου και του όγκου αποβλήτων που έχει εισρεύσει.

Αναλυτικά:

Η τρίτη στήλη του πίνακα υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη δεύτερη με 3600 s/h και διαιρώντας με 1000 L/m³, ώστε να έχουμε παροχή σε m³/h. Αφού τα χρονικά διαστήματα είναι της μιας ώρας, ο ίδιος αριθμός θα δίνει και τον όγκο αποβλήτου που έχει εισρεύσει στο διάστημα Δt_i (μιας ώρας).

Η τέταρτη στήλη δίνει τον αθροιστικό όγκο αποβλήτου στη δεξαμενή (οι κουκίδες στο διάγραμμα).

Η πέμπτη στήλη τέλος δίνει τον όγκο που υπάρχει το κάθε χρονικό διάστημα στη δεξαμενή και υπολογίζεται ξεκινώντας από τότε που αυτός μηδενίζεται. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι αυτό γίνεται στο τέλος της 8ης ώρας.

Ο υπολογισμός (της πέμπτης στήλης, ξεκινώντας από το τέλος της 8ης ώρας, όπου είναι 0) γίνεται με τη σχέση (2.1.3).

Η μέση παροχή εξόδου θα είναι (εφαρμόζοντας τη σχέση 2.1.2):

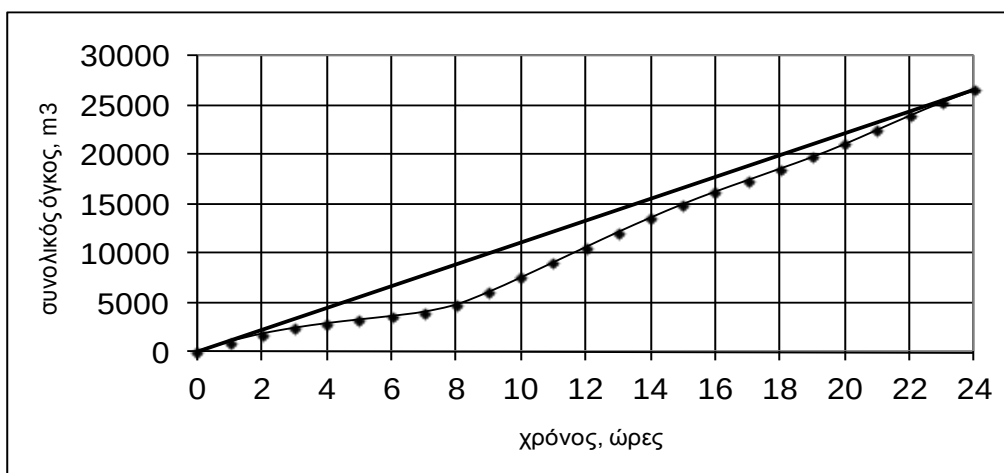
$$\bar{Q} = \frac{26524800}{24} = 1105200 \quad \text{L/h} = 307 \quad \text{L/s}$$

Διαπιστώνουμε από το διάγραμμα ότι η μεγαλύτερη διαφορά εμφανίζεται στις 8 ώρες από την αρχή. Θα είναι δε

$$V = (9200000 - 5000000) = 4200000 \text{ L} = 4200 \quad \text{m}^3$$

Θα έχουμε λοιπόν

χρόνος	Q, L/s	Q, m³/h	Vtot, m³	Vtank, m³
			0	
0-1	275	990	990	3985
1-2	221	796	1786	3673
2-3	164	590	2376	3158
3-4	130	468	2844	2522
4-5	105	378	3222	1794
5-6	99,1	357	3579	1044
6-7	119	428	4007	368
7-8	204	734	4741	0
8-9	354	1274	6012	169
9-10	410	1476	7488	540
10-11	425	1530	9022	965
11-12	430	1548	10570	1407
12-13	425	1530	12104	1831
13-14	405	1458	13562	2182
14-15	385	1386	14948	2465
15-16	351	1264	16212	2621
16-17	325	1170	17382	2689
17-18	325	1170	18552	2754
18-19	328	1181	19733	2830
19-20	365	1314	21047	3039
20-21	399	1436	22483	3371
21-22	399	1436	23919	3702
22-23	379	1364	25283	3962
23-24	345	1242	26525	4101



Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης εξόδου θα γίνει με βάση τη σχέση (2.1.6). Αρχή των υπολογισμών θα είναι η χρονική στιγμή που η δεξαμενή θα είναι εντελώς άδεια, δηλαδή, σύμφωνα με το διάγραμμα την αρχή της 9ης ώρας.

Στο τέλος της 9ης ώρας θα είναι

$$C_9 = \frac{353 \text{ L/s} \cdot 3600 \text{ s} \cdot 175 \text{ mg/l}}{353 \text{ L/s} \cdot 3600 \text{ s}} = 175 \text{ mg/L}$$

στο τέλος της 10ης ώρας θα είναι

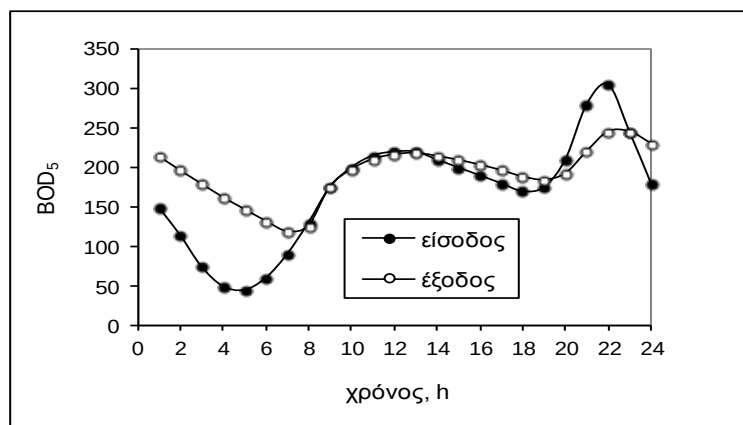
$$C_{10} = \frac{410 \text{ L/s} \cdot 3600 \text{ s} \cdot 200 \text{ mg/l} + 169000 \text{ L} \cdot 175 \text{ mg/L}}{169000 \text{ L} + 410 \text{ L/s} \cdot 3600 \text{ s}} = 197 \text{ mg/L}$$

Συνοπτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

t,h	C_{fi}, mg/L	C_e, mg/L
1	150	214
2	115	196
3	75	179
4	50	162
5	45	147
6	60	132
7	90	119
8	130	126
9	175	175
10	200	197
11	215	210
12	220	216
13	220	218
14	210	214
15	200	209
16	190	203
17	180	196
18	170	188

19	175	184
20	210	192
21	280	220
22	305	245
23	245	245
24	180	230

Για να έχουμε εικόνα της εξομάλυνσης που επιφέρει στη συγκέντρωση η εξισορρόπηση της παροχής εξόδου, σχηματίζουμε το ακόλουθο διάγραμμα



Ο συντελεστής αιχμής στην είσοδο της δεξαμενής είναι

$$PF_{\text{είσοδου}} = \frac{305}{45} = 6,8$$

ενώ στην έξοδο της είναι

$$PF_{\text{εξόδου}} = \frac{245}{119} = 2,1$$

2.1.2 Εσχαρισμός

Ο διαχωρισμός των στερεών από τα υγρά απόβλητα με βάση το μέγεθος γίνεται με τη χρήση εσχαρών ή κοσκίνων.

Τα ογκώδη στερεά που μπορεί να περιέχονται στα απόβλητα (ιδίως τα αστικά) όπως κουρέλια, κομμάτια ξύλων, σακούλες κλπ, μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στις αντλίες και τον υπόλοιπο εξοπλισμό των μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων, οπότε πρέπει να απομακρύνονται. Η απομάκρυνση γίνεται με διατάξεις εσχαρισμού που είναι είτε στοικεία με παράλληλες ράβδους (bars) ή σύρματα, είτε κόσκινα, είτε διάτρητοι δίσκοι. Τα ανοίγματα μπορεί να έχουν οποιοδήποτε σχήμα, συνήθως όμως είναι είτε παραλληλόγραμμα είτε κυκλικά. Οι χονδρές σχάρες (screen) έχουν διάκενα από 1 έως 5 cm. Τα λεπτά κόσκινα (sieve) με διάκενα μικρότερα του 1,5 cm έως μερικά μικρά μπορούν να αντικαταστήσουν και την καθίζηση.

Οι βασικοί παράγοντες για την επιλογή διάταξης εσχαρισμού είναι η παροχή του αποβλήτου, τα στερεά που θέλουμε να κατακρατήσουμε (συνεπώς το άνοιγμα των διακένων της) και ο τρόπος λειτουργίας (συνεχής ή περιοδικός καθαρισμός, αυτόματος ή χειροκίνητος).

2.1.2.1 Σχεδιασμός σκάρας

Έστω δ το πάχος των διακένων της σκάρας (2,5-5cm) και d το πλάτος της ράβδου (0,5-2cm). Η ταχύτητα προσαγωγής και ροής (v) στο κανάλι ανάντη της σκάρας είναι ενδεικτικά μεταξύ 0,4 και 0,6m/s για αποφυγή εναπόθεσης στερεών. Το βάθος ροής στη σκάρα h έχει τυπικά μέγιστο 0,4m για πληθυσμιακό ισοδύναμο μεταξύ 5.000 και 20.000 κατοίκους. Για μεγαλύτερο πληθυσμό κατασκευάζονται περισσότερα κανάλια. Αν δεν είναι γνωστή η μέγιστη παροχή $Q_{\max}$, τότε υπολογίζεται ο συντελεστής αιχμής:

$$c_p = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_{ave}}} \quad (2.1.11)$$

όπου Q_{ave} η μέση παροχή σε L/s. Τότε:

$$Q_{\max} = c_p \cdot Q_{ave} \quad (2.1.12)$$

Έστω, επίσης το κλάσμα διέλευσης f :

$$f = \frac{\delta}{d + \delta} \quad (2.1.13)$$

τότε η απαιτούμενη επιφάνεια ροής είναι:

$$A = \frac{Q_{\max}}{v \cdot f \cdot c} \quad (2.1.14)$$

όπου το c συντελεστής με τιμή 0,1-0,3 για απλές σκάρες και 0,4-0,5 για αυτόματες μηχανικές σκάρες.

Το απαιτούμενο πλάτος είναι τότε:

$$W = \frac{A}{h} \quad (2.1.15)$$

Αν η σκάρα έχει κλίση γωνίας φ , τότε το απαιτούμενο ύψος H της σκάρας (μήκος ράβδων) είναι:

$$H = \frac{h}{\eta \mu \varphi} \quad (2.1.16)$$

Η ταχύτητα ροής στα διάκενα:

$$v_{\text{διακ}} = \frac{v}{f} \quad (2.1.17)$$

δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1,2m/s.

Η υδραυλική απώλεια (πτώση πίεσης Δp) δια μέσου της σκάρας σε m δίδεται από την σχέση:

$$\Delta p = H_{H2O} = 2,34 \cdot \left(\frac{d}{\delta} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{v^2}{2g} \eta \mu \varphi \quad (2.1.18)$$

Η πτώση πίεσης Δp μπορεί να υπολογιστεί και από τύπους όπως οι παρακάτω σχέσεις:

- Για σκάρες

$$\Delta p = \frac{1}{0,7} \cdot \left(\frac{v_{\text{διακ}}^2 - v^2}{2 \cdot g} \right) \quad (2.1.19)$$

όπου $v_{\text{διακ}}$ η ταχύτητα του ρευστού μέσα από τα ανοίγματα, m/s

v η ταχύτητα του ρευστού ανάντη της διάταξης, m/s

g η επιτάχυνση της βαρύτητας, m/s^2

0,7 εμπειρικός συντελεστής (τύρβες και απώλειες)

- Για λεπτές σήτες

$$\Delta p = \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_{\max}}{A_{\text{διακ}}} \right)^2 \quad (2.1.20)$$

όπου $Q_{\max}$ η μέγιστη παροχή του ρευστού, m^3/s

$A_{\text{διακ}}$ η ελεύθερη επιφάνεια (ανοίγματα) του βυθισμένου τμήματος, $m^2 (=f \cdot A)$

c εμπειρικός συντελεστής (τυπική τιμή 0,6).

Ο εμπειρικός αυτός συντελεστής δίδεται συνήθως από τον κατασκευαστή. Οι σχέσεις αυτές αναφέρονται σε καθαρή διάταξη, ενώ όσο συσσωρεύονται στερεά τόσο αυξάνεται η πτώση πίεσης.

Άσκηση 2.2

Σχεδιάστε απλή σχάρα για πληθυσμιακό ισοδύναμο 10.000 κατοίκων (υποθέσατε 200L/(κάτοικο d))

Λύση

Η μέση παροχή θα είναι:

$$Q_{\text{ave}} = \frac{200L}{\text{κάτοικο} \cdot d} \cdot 10000 = 2 \cdot 10^6 \frac{L}{d} = 23,15 \frac{L}{s}$$

οπότε ο συντελεστής αιχμής είναι:

$$c_p = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{23,15}} \approx 2$$

τότε:

$$Q_{\max} = 2 \cdot 23,15 \frac{L}{s} = 46,3 \frac{L}{s}$$

Υποθέτοντας $\delta = 3\text{cm}$ και $d = 2\text{cm}$, τότε:

$$f = \frac{3}{2+3} = 0,6$$

Υποθέτοντας $c=0,2$ και επιθυμητή ταχύτητα ροής $v = 0,5 \text{ m/s}$, η ταχύτητα ροής στα διάκενα θα είναι:

$$v_{\text{διακ}} = \frac{0,5}{0,6} = 0,83 \text{ m/s}$$

εντός προδιαγραφών.

Η απαιτούμενη επιφάνεια είναι:

$$A = \frac{0,0463 \text{ m}^3 / s}{0,83 \text{ m/s} \cdot 0,6 \cdot 0,2} = 0,46 \text{ m}^2$$

Το απαιτούμενο πλάτος θα είναι (για βάθος ροής $h = 0,4$):

$$W = \frac{0,46 \text{ m}^2}{0,4 \text{ m}} = 1,162 \text{ m}$$

Αν η γωνία φ είναι 30° τότε το μήκος των ράβδων θα είναι:

$$H = \frac{0,4}{0,5} = 0,8 \text{ m}$$

Η υδραυλική απώλεια (σε cmH_2O) θα είναι:

$$\Delta p = 2,34 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{4/3} \cdot \frac{0,5^2}{2 \cdot 9,81} \cdot 0,5 = 0,0087 \text{ m} = 0,87 \text{ cm}$$

2.1.3 Δεξαμενές εξάμμωσης

Με τον όρο εξάμμωση περιγράφεται η διεργασία καθίζησης/απομάκρυνσης ανόργανων σωματιδίων στα φυσικά νερά ή στα υγρά απόβλητα. Αυτά τα ανόργανα σωματίδια είναι κόκκοι άμμου, σωματίδια αργίλου κλπ, με διάμετρο από 200 μm έως μερικά mm , με ταχύτητες καθίζησης σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές των οργανικών στερεών (ειδικό βάρος από 2,7 kg/L για καθαρή άμμο μέχρι 1,3 kg/L όταν είναι μίγμα με οργανικά) και συνήθως ονομάζονται «άμμος». Η απομάκρυνση της άμμου επιβάλλεται γιατί δημιουργεί αποθέσεις στον πυθμένα των αγωγών μεταξύ των μονάδων επεξεργασίας και επιφέρει φθορά του μηχανολογικού εξοπλισμού.

Η απομάκρυνση της άμμου ακολουθεί καθίζηση τύπου I (διακεκριμένων σωματιδίων). Το μέγεθος που ενδιαφέρει για το σχεδιασμό των μονάδων εξάμμωσης είναι η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων.

Ο υπολογισμός της ταχύτητας καθίζησης (v_p) μπορεί να γίνει αναλυτικά αν θεωρήσουμε ότι έχουμε σφαιρικά σωματίδια. Σε στάσιμο υγρό, οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε ένα σωματίδιο είναι το βάρος του, η άνωση και η τριβή (οπισθέλκουσα) λόγω της καθόδου του μέσα στο νερό. Η κίνησή του λοιπόν θα οφείλεται στη συνισταμένη δύναμη σύμφωνα με τη θεμελιώδη σχέση:

$$\sum F = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.1.21)$$

και θα διέπεται από τη σχέση:

$$\frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot \rho_p \cdot \frac{dv_p}{dt} = \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_w) - C_D \cdot A_p \cdot \rho_w \cdot \frac{v_p^2}{2} \quad (2.1.22)$$

όπου d_p η διάμετρος του σωματιδίου

ρ_p η πυκνότητά του

v_p η ταχύτητα καθόδου (καθίζησης)

ρ_w η πυκνότητα του νερού

A_p η επιφάνεια του σωματιδίου, προβαλλόμενη κάθετα στην κατεύθυνση της ροής.

Το σωματίδιο κατά την καθίζηση έχει σταθερή διάμετρο, όμως η συνισταμένη δύναμη μεταβάλλεται (ελαττώνεται) κατά την κάθοδό του, διότι μεταβάλλεται (αυξάνεται) η τριβή, ως ανάλογη της (αυξανόμενης) ταχύτητάς του. Όταν η συνισταμένη δύναμη μηδενίζεται, το σωματίδιο καθιζάνει με σταθερή ταχύτητα, την οριακή του. Αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (2.1.22) για μηδενική επιτάχυνση και είναι η

$$v_p = \sqrt{\frac{g}{C_D} \cdot \frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \cdot \frac{4 \cdot d_p}{3}} \quad (2.1.23)$$

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_D εξαρτάται από τον αριθμό Re του σωματιδίου

$$Re = \frac{v_p \cdot d_p}{\nu} \quad (2.1.24)$$

όπου ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (δυναμικό ιξώδες / πυκνότητα), m^2s^{-1} .

Για στρωτή ροή (στην περιοχή Stokes), με $Re < 0.1$, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (2.1.25a)$$

και η σχέση (2.1.23) γίνεται:

$$v_p = \frac{g}{18} \cdot \left(\frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \cdot \frac{1}{\nu} \right) \cdot d_p^2 \quad (2.1.26)$$

Για τυρβώδη ροή (Newton), με $10^3 < Re < 3,5 \cdot 10^5$, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_D = 0,44 \quad (2.1.25b)$$

Και στην ενδιάμεση περιοχή (Allen) από τη σχέση:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34 \quad (2.1.25c)$$

Η πυκνότητα των αστικών αποβλήτων είναι αυτή του νερού (ρ_w) και εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$\rho_w = 1006,63 \cdot \exp[-0,00014 \cdot (1,8 \cdot T + 32)] \quad (2.1.27)$$

όπου T σε $^{\circ}C$ και ρ_w σε kg/m^3 ή άλλη ισοδύναμη από τη βιβλιογραφία.

Αντιστοίχως για το κινηματικό ιξώδες του νερού:

$$\nu = (0,17487 - 0,004427 \cdot T + 0,0000405 \cdot T^2) \cdot 10^{-5} \quad (2.1.28)$$

όπου ρ_w σε kg/m^3 , ν σε m^2/s και T σε $^{\circ}C$.

Στην περίπτωση που στο νερό ή στο απόβλητο περιέχονται ανόργανα σωματίδια διαφορετικών πυκνοτήτων ή και ίδιας πυκνότητας αλλά διαφορετικών διαστάσεων, από τα δεδομένα κατανομής μπορεί να υπολογισθεί αναλυτικά η ταχύτητα καθίζησης του κάθε κλάσματος σωματιδίων.

Άσκηση 2.3

Δύο σωματίδια με πυκνότητα $\rho_p = 2600 \text{ Kg/m}^3$ και διάμετρο 0,1 και 3mm αντίστοιχα καθιζάνουν σε νερό με κινηματικό ιξώδες $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} m^2/s$. Προσδιορίστε τις ταχύτητες καθίζησης των δύο σωματιδίων.

Λύση

Δεν γνωρίζουμε εξ αρχής τι οριακή ταχύτητα θα αποκτήσουν τα σωματίδια, ώστε να χρησιμοποιήσουμε την κατάλληλη σχέση μεταξύ των (2.1.25a) – (2.1.25c). Για το λόγο αυτό θα επιλύσουμε το πρόβλημα με δοκιμή και σφάλμα:

Θα επιλέξουμε μια ταχύτητα. Αυτή θα ορίσει και τον αριθμό Re του σωματιδίου, οπότε θα χρησιμοποιήσουμε την αντίστοιχη σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή C_D . Κατόπιν, από τη σχέση (2.1.23) θα υπολογίσουμε την ταχύτητα. Αν

αυτή συμφωνεί με την αρχική επιλογή μας, θα είναι και η οριακή ταχύτητα καθόδου. Αν όχι, οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται.

Για τα σωματίδια διαμέτρου 0,1 mm:

Υποθέτουμε ταχύτητα 1m/s (την πιο μεγάλη δυνατή ταχύτητα).

$$Re = \frac{1 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{1,3 \cdot 10^{-6}} = 76,9 \quad (\text{ενδιαμεση ροή})$$

$$\Rightarrow C_D = \frac{24}{76,9} + \frac{3}{\sqrt{76,9}} + 0,34 = 0,99$$

$$\Rightarrow v_p = \left(\frac{4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{0,99 \cdot 3} \cdot 9,81 \cdot 1,6 \right)^{1/2} = 0,046 \text{ m/s}$$

Υπάρχει απόκλιση (20 φορές!) μεταξύ της ταχύτητας που υποθέσαμε αρχικά και αυτής που υπολογίσαμε.

Επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς για την ταχύτητα που βρήκαμε.

$$Re = \frac{0,046 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{1,3 \cdot 10^{-6}} = 3,54$$

$$\Rightarrow C_D = \frac{24}{3,54} + \frac{3}{\sqrt{3,54}} + 0,34 = 8,71$$

$$\Rightarrow v_p = \left(\frac{4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{8,71 \cdot 3} \cdot 9,81 \cdot 1,6 \right)^{1/2} = 0,015 \text{ m/s}$$

Πάλι υπάρχει απόκλιση (περίπου 3 φορές).

Συνεχίζουμε μέχρι η διαφορά των δυο ταχυτήτων να είναι 2% της τιμής τους.

Έτσι για το $d=0,1\text{mm}$ βρίσκουμε $v_p=6,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, και για το $d=3\text{mm}$ βρίσκουμε $v_p=0,37 \text{ m/s}$.

Εναλλακτικά:

Αν γνωρίζαμε το είδος της ροής, θα μπορούσαμε να επιλέξουμε την κατάλληλη έκφραση για το συντελεστή C_D και να επιλύσουμε ως προς την ταχύτητα.

Επιλύουμε λοιπόν με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος:

1. έστω ότι έχουμε στρωτή ροή. Τότε θα ισχύει η σχέση (2.1.25a) και, μετά από υπολογισμούς, η ταχύτητα βρίσκεται $v_p=6,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Για την ταχύτητα αυτή, ο Re σωματιδίου υπολογίζεται 0,5, που βρίσκεται εκτός περιοχής στρωτής ροής.

2. έστω ότι έχουμε ενδιάμεση ροή, κ.ο.κ.

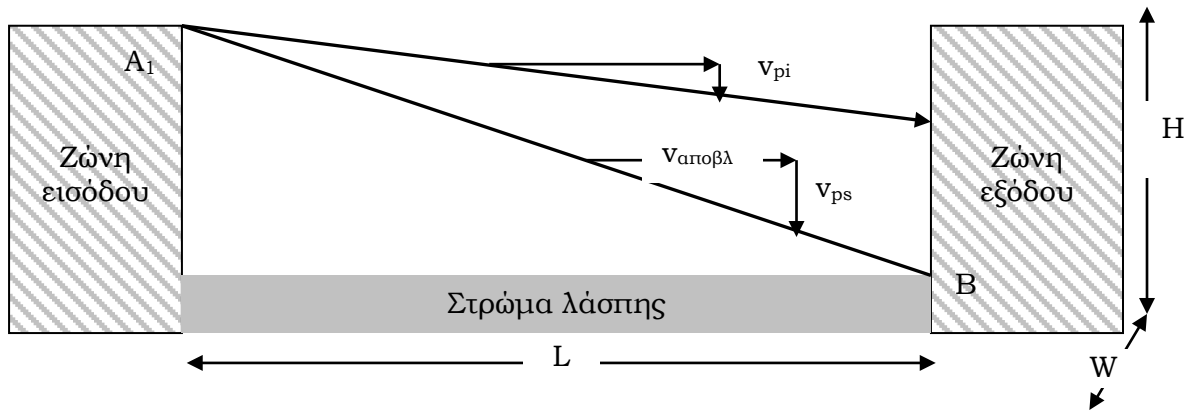
2.1.3.1 Εξαμωτές με σταθερή ταχύτητα ροής

Είναι επιμήκη και ρηχά κανάλια, στα οποία η ταχύτητα ροής είναι σταθερή, ανεξάρτητα από τις μεταβολές της υδραυλικής παροχής. Αυτό είναι θεωρητικά εφικτό αν η διατομή του αγωγού ροής είναι παραβολική, στην πράξη όμως επιτυγχάνεται με την κατασκευή αγωγών από τσιμέντο με δυο ή τρεις κλίσεις (κατά την εφαπτόμενη της παραβολής).

Όσα σωματίδια έχουν ταχύτητα καθίζησης μεγαλύτερη ή ίση του μεγέθους Q/A , όπου Q η υδραυλική παροχή του αποβλήτου και A η επιφάνεια του αγωγού εξάμωσης (ζώνη καθίζησης), θα καθιζάνουν και θα απομακρυνθούν.

Αυτό αποδεικνύεται ως εξής:

Ας θεωρήσουμε εξαμωτή μήκους L (m), ύψους H (m) και πλάτους W (m), ο οποίος δέχεται απόβλητο υδραυλικής παροχής Q (m^3/h) και ταχύτητας ροής $v_{\text{αποβλ}}$ (m/h) και παριστάνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.1.4.



Σχήμα 2.1.4. Ορθογώνια δεξαμενή καθίζησης τύπου I.

Τα σωματίδια θα κινούνται κατά τη συνισταμένη της ταχύτητας ροής του αποβλήτου $v_{\alpha\pi\omicron\beta\lambda}$ (σταθερής) και της ταχύτητας καθίζησής τους v_{pi} (επίσης σταθερής και εξαρτώμενης από τα χαρακτηριστικά τους κατά το πρότυπο διακριτής (discrete) καθίζησης τύπου I). Συνεπώς, θα κινούνται ευθύγραμμα και με κλίση χαρακτηριστική για κάθε μέγεθος σωματιδίου.

Θεωρούμε ότι στην είσοδο του καναλιού τα σωματίδια έχουν τυχαία κατανομή και συνεπώς ίδιες πιθανότητες να βρίσκονται σε οποιοδήποτε ύψος επί της κάθετης στη ροή διατομής.

Ας παρακολουθήσουμε ένα σωματίδιο με ταχύτητα v_{ps} που μπαίνει στο κανάλι στο ανώτατο σημείο (έστω A_1) και ας θεωρήσουμε ότι αυτό το σωματίδιο θα καθιζάνει. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει η τροχιά του να είναι ή επί της διαγωνίου A_1B ή κάτω από αυτήν.

Γίνεται εδώ η παραδοχή ότι όσα σωματίδια συναντούν τον πυθμένα, παραμένουν εκεί (δηλαδή δεν έχουμε επαναιώρηση).

Από τη γεωμετρία (ομοιότητα τριγώνων) θα έχουμε:

$$\frac{v_{\alpha\pi\omicron\beta\lambda}}{v_{ps}} = \frac{L}{H} \quad (2.1.29)$$

καθόσον δεχόμαστε ότι το στρώμα της λάσπης έχει πάχος αμελητέο συγκρινόμενο με το βάθος του καναλιού.

Λόγω της ισχύος της σχέσης

$$v_{\alpha\pi\omicron\beta\lambda} = \frac{Q}{W \cdot H} \quad (2.1.30)$$

θα έχουμε τελικά

$$v_{ps} = \frac{H}{L} \cdot v_{\alpha\pi\omicron\beta\lambda} = \frac{H}{L} \cdot \frac{Q}{W \cdot H} = \frac{Q}{L \cdot W} = \frac{Q}{A} \quad (2.1.31)$$

όπου A η οριζόντια (άνω – ελεύθερη) επιφάνεια του εξαμωτή.

Από τα σωματίδια λοιπόν με ταχύτητα v_{ps} που μπαίνουν στον εξαμωτή στο ύψος H θα καθιζάνουν όλα. Τα σωματίδια με v_{ps} που μπαίνουν σε μικρότερο ύψος θα καθιζάνουν και αυτά, πριν την έξοδο από τον εξαμωτή. Συνεπώς όλα τα σωματίδια με ταχύτητα καθίζησης v_{ps} (και μεγαλύτερη από αυτήν) θα καθιζάνουν.

Απομένει να βρεθεί το ποσοστό των σωματιδίων με ταχύτητα καθίζησης μικρότερη από την v_{ps} που θα καθιζάνουν και αυτά.

Με το ίδιο σκεπτικό, αν αυτά έχουν ταχύτητα v_i , για να καθιζάνουν θα πρέπει να ισχύει

$$\frac{v_i}{v_{ps}} = \frac{h_i}{H} \quad (2.1.32)$$

όπου h_i το μέγιστο ύψος στο οποίο μπαίνουν στον εξαμμωτή. (πχ ένα σωματίδιο με ταχύτητα καθίζησης ίση με το $1/3$ της v_{ps} θα καθιζάνει αρκεί να εμφανιστεί στον εξαμμωτή σε ύψος μέχρι $1/3$ του H).

Θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στη διατομή εισόδου, το ποσοστό σωματιδίων δεδομένης διαμέτρου (άρα και δεδομένης ταχύτητας καθίζησης) θα είναι το ίδιο σ' όλη τη διατομή εισόδου (σ' όλο το ύψος H).

Συνολικά λοιπόν θα καθιζάνουν όλα τα σωματίδια που έχουν ταχύτητα καθίζησης ίση ή μεγαλύτερη από v_{ps} ($=v_{\text{αποβλ}} \cdot H/L$) και από τα υπόλοιπα ανάλογα με το ποσοστό ταχύτητας καθίζησης και το ποσοστό τους στο απόβλητο.

Αν, για παράδειγμα, τα υπόλοιπα σωματίδια είχαν όλα ταχύτητα καθίζησης $v_{ps}/2$, θα καθίζαναν τα μισά από αυτά. Αν τώρα τα σωματίδια με ταχύτητα καθίζησης $v_{ps}/2$ ήταν σε ποσοστό $\alpha\%$ επί των συνολικών σωματιδίων, θα καθίζαναν τα μισά από το ποσοστό αυτό, δηλαδή $(v_{pi}/v_{ps}) \cdot \alpha\%$ συνολικά – για αυτή την κατηγορία σωματιδίων.

Για την τιμή v_{ps} θα απομακρύνονται, σύμφωνα με τα ανωτέρω:

- όλα τα σωματίδια με ταχύτητα καθίζησης $v_i \geq v_{ps}$, δηλαδή συνολικά x_{ps} (όπου x_{ps} το ποσοστό τους επί των συνολικών, το οποίο υπολογίζεται από την κοκκομετρική κατανομή τους)
- από τα σωματίδια με ταχύτητες καθίζησης $v_i < v_{ps}$, για κάθε «κλάση» σωματιδίων ταχύτητας v_i ποσοστό ίσο με v_i/v_{ps} , και σε απόλυτο μέγεθος ποσότητα σωματιδίων ίση με $v_i/v_{ps} \cdot dx_i$
- συνεπώς συνολικά $x_{ps} + \sum_0^{x_{ps}} \frac{v_i}{v_{ps}} \cdot dx_i$ ή $x_{ps} + \int_0^{x_{ps}} \frac{v_i}{v_{ps}} \cdot dx_i$

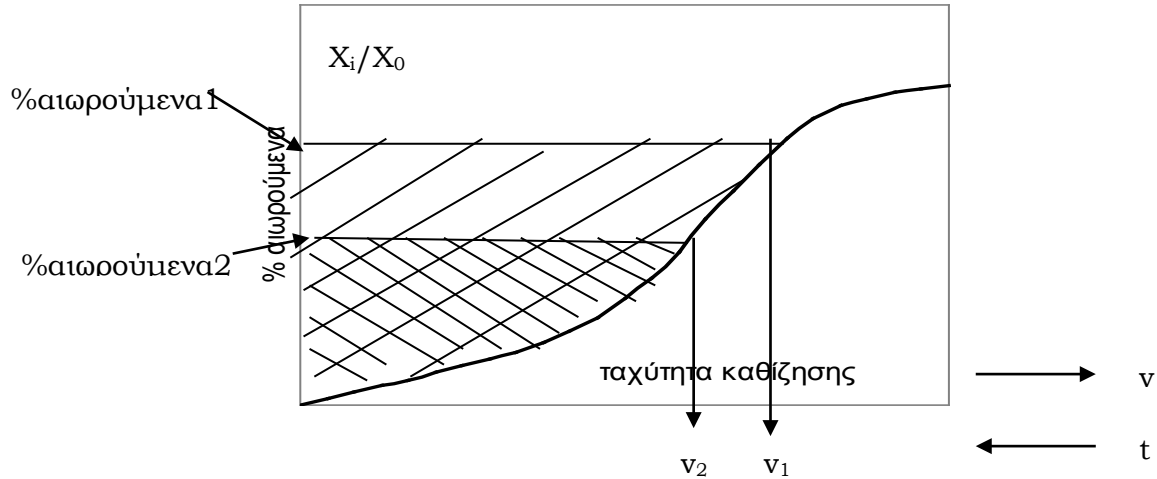
Το μέγεθος v_{ps} καλείται και επιφανειακή φόρτιση ($m^3/m^2/h$).

Το συνολικό ποσοστό απομάκρυνσης σωματιδίων θα είναι προφανώς συνάρτηση του χρόνου παραμονής (τ) μέσα στον εξαμμωτή, συνεπώς και της επιφανειακής φόρτισης. Όσο πιο υψηλός ο τ , τόσο πιο πολλά σωματίδια προλαβαίνουν να καθιζάνουν, καθώς ελαττώνεται η «οριακή» ταχύτητα (η επιφανειακή φόρτιση). Υπενθυμίζεται ότι, για δεδομένη διατομή, το τ είναι ευθέως ανάλογο του L , ενώ η v_{ps} αντιστρόφως ανάλογη.

Ο υπολογισμός αυτού του συνολικού ποσοστού απομάκρυνσης γίνεται:

- Αναλυτικά, με κοκκομετρική ανάλυση και υπολογισμό των ταχυτήτων καθίζησης του κάθε κλάσματος σωματιδίων με χρήση της κατάλληλης σχέσης (τύπου 2.1.23) και υπολογισμό κατά τα παραπάνω.
- Πειραματικά, κατά τα ακόλουθα:
Τοποθετείται το συγκεκριμένο απόβλητο σε κυλινδρικό δοχείο (στήλη καθίζησης), ύψους L , με ένα πλάγιο άνοιγμα κοντά στον πυθμένα (λίγο πάνω από την εκτιμώμενη στάθμη του στρώματος των στερεών που θα καθιζάνουν). Το περιεχόμενο αναδεύεται επισταμένα, ώστε να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη σύσταση X_0 και αφήνεται να ηρεμήσει (χρονική στιγμή $t = 0$). Κατά χρονικά διαστήματα (t_i) παίρνουμε δείγμα από το πλάγιο άνοιγμα (στόμιο δειγματοληψίας) και προσδιορίζεται η συγκέντρωση X_i (περιεκτικότητα) σε αιωρούμενα στερεά. Αυτά είναι τα στερεά που δεν έχουν καθιζάνει ακόμη (τα παραμένοντα ή αιωρούμενα). Αυτή η συγκέντρωση μπορεί να αναχθεί επί της

αρχικής (X_i/X_0) και έτσι έχουμε ζεύγη τιμών χρόνου (t_i) – ποσοστού αιωρουμένων (X_i/X_0) ή χρόνου – ποσοστού απομάκρυνσης ($1-X_i/X_0$). Από τις τιμές του χρόνου και το (γνωστό) ύψος της στήλης καθίζησης υπολογίζουμε ταχύτητα ($=$ διάστημα/χρόνος $= L/t_i$) και έχουμε έτσι ζεύγη τιμών ταχύτητας καθίζησης – συνολικού ποσοστού απομάκρυνσης (ή ποσοστού παραμενόντων αιωρουμένων). Αυτά τα ζεύγη παριστάνονται σε διάγραμμα, που θα έχει τη μορφή που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.5.



Σχήμα 2.1.5. Καμπύλη συνολικής απομάκρυνσης αιωρουμένων στερεών συναρτήσει της επιφανειακής φόρτισης (οριακής ταχύτητας καθίζησης)

Έστω ότι επιλέγεται επιφανειακή φόρτιση v_1 . Όσα σωματίδια έχουν ταχύτητα καθίζησης ίση ή μεγαλύτερη από αυτήν, θα καθιζάνουν. Αυτά είναι τα $(1 - \%αιωρούμενα1)$ στο διάγραμμα. Από όσα σωματίδια έχουν ταχύτητα καθίζησης μικρότερη από τη v_1 , θα καθιζάνουν ανάλογα με τις ταχύτητες καθίζησής τους.

Αν x_i είναι το ποσοστό της κάθε ομάδας σωματιδίων ταχύτητας v_i (x_i μέχρι $\%αιωρούμενα1$), θα καθιζάνουν συνολικά άλλα

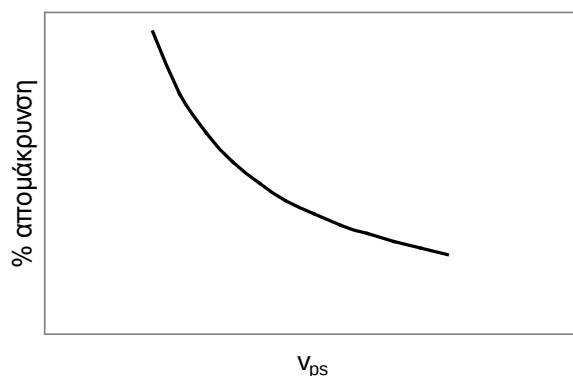
$$\int_0^{x_i} \frac{v_i}{v_1} \cdot dx = \frac{1}{v_1} \cdot \int_0^{x_i} v_i \cdot dx \quad (2.1.33)$$

Το ολοκλήρωμα της σχέσης (2.1.31) παριστάνει το γραμμοσκιασμένο εμβαδό στο Σχήμα 2.1.5. Με γραφική ολοκλήρωση υπολογίζεται το συνολικό ποσοστό των υπόλοιπων σωματιδίων (με ταχύτητες καθίζησης μικρότερες από v_1) που θα καθιζάνουν, καθώς και το συνολικό ποσοστό απομάκρυνσης από τη σχέση

$$\% \text{ συνολική απομάκρυνση} = (1 - \%αιωρούμενα1) + \frac{1}{v_1} \cdot \int_0^{x_i} v_i \cdot dx \quad (2.1.34)$$

Έχουμε λοιπόν ένα ζεύγος τιμών επιφανειακής φόρτισης – συνολικής απομάκρυνσης αιωρουμένων στερεών.

Στη συνέχεια, για επιφανειακή φόρτιση έστω v_2 υπολογίζουμε με τον ίδιο τρόπο άλλο ποσοστό συνολικής απομάκρυνσης. Καταστρώνεται έτσι το διάγραμμα επιφανειακής φόρτισης – συνολικής απομάκρυνσης αιωρουμένων στερεών, χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου αποβλήτου. Το διάγραμμα αυτό έχει γενικώς την ακόλουθη μορφή (Σχήμα 2.1.6):



Σχήμα 2.1.6. Διάγραμμα συνολικής απομάκρυνσης στερεών συναρτήσει της επιφανειακής φόρτισης

Αυτό το διάγραμμα χαρακτηρίζει την καθίζηση ανόργανων σωματιδίων του συγκεκριμένου αποβλήτου και χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό της εγκατάστασης εξάμμωσης.

Τέτοιου τύπου διαγράμματα (ή διάσπαρτες τιμές) διατίθενται στη βιβλιογραφία για αστικά λύματα, τα οποία έχουν κατά το μάλλον ή ήττον παρόμοια σύνθεση.

Για το σχεδιασμό του εξαμμωτή:

- Υπολογίζονται τα συνολικά ποσοστά απομάκρυνσης για διάφορες επιφανειακές φορτίσεις, είτε αναλυτικά είτε από πειραματικά δεδομένα (σχέση (2.1.34), Σχήμα 2.1.6).
- Στη συνέχεια, για το επιθυμητό ποσοστό απομάκρυνσης βρίσκεται η απαιτούμενη επιφανειακή φόρτιση (από το Σχήμα 2.1.6).
- Από αυτήν υπολογίζεται η επιφάνεια του εξαμμωτή, βάσει της δεδομένης υδραυλικής παροχής.
- Επιλέγεται η ταχύτητα ροής του αποβλήτου στον εξαμμωτή. Αυτή πρέπει να μην είναι ούτε τόσο μεγάλη, ώστε να επαναιωρούνται όσα στερεά έχουν καθίζανει, ούτε όμως και τόσο μικρή, ώστε να καθιζάνουν και σημαντικές ποσότητες οργανικών (οπότε προκαλούνται δυσοοσμίες). Στην πράξη λαμβάνεται συνήθως μια τιμή κοντά στα 0,3 m/s.
- Επιλέγεται το πλάτος του καναλιού του εξαμμωτή και υπολογίζεται το μήκος και το βάθος του. Η επιλογή του πλάτους στηρίζεται αφενός σε ένα κανάλι εξάμμωσης «λογικών διαστάσεων», αφετέρου στις διαστάσεις των μηχανικών ξέστρων που θα σαρώνουν τον πυθμένα περιοδικά για να απομακρύνουν την άμμο. Στην πράξη λαμβάνεται συνήθως μια σχέση μήκους καναλιού ως προς το βάθος ίση με 25/1.

Εξαιτίας της ροής και των περιδινήσεων, πολλά σωματίδια που προβλεπόταν να καθιζάνουν, σύμφωνα με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν προηγούμενα, δεν καθιζάνουν και παρασύρονται από το απόβλητο στην υπερχείλιση. Μία σχέση που προβλέπει ικανοποιητικά την οριακή ταχύτητα του αποβλήτου εντός των δεξαμενών ώστε να μην παρασέρνουν αιωρούμενα στερεά συγκεκριμένης σχετικής πυκνότητας και διαμέτρου δίδεται από την παρακάτω σχέση του Shields:

$$V_{\text{οριακή}} = \sqrt{\frac{8K}{f} \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_w} - 1 \right) \cdot d_p} \quad (2.1.35)$$

όπου: $V_{\text{οριακή}}$ οριακή ταχύτητα του αποβλήτου για το συγκεκριμένο σωματίδιο πυκνότητας ρ_p (kg/m³) και διαμέτρου d_p (m), m/s

- K σταθερά που εξαρτάται από τον Re του υγρού και κυμαίνεται από 0,03 έως 0,06
- f συντελεστής τριβής (συνηθισμένη τιμή 0,03).

Τυπικές τιμές σχεδιασμού εξαμμωτών σταθερής ταχύτητας δίνονται παρακάτω (Πίνακας 2.1.1).

Πίνακας 2.1.1. Δεδομένα σχεδιασμού εξαμμωτών σταθερής ταχύτητας

Μέγεθος	Όρια	Τυπική τιμή
Χρόνος παραμονής, s	45-90	60
Οριζόντια ταχύτητα ροής, ft/s	0,8-1,3	1,0
Επιφανειακή φόρτιση για απομάκρυνση*:		
στερεών 65-mesh, ft/min	3,2-4,2	3,8
στερεών 100-mesh, ft/min	2,0-3,0	2,5

*μικρότερη αν το ειδικό βάρος των στερεών είναι πολύ κάτω από 2,65.

Άσκηση 2.4

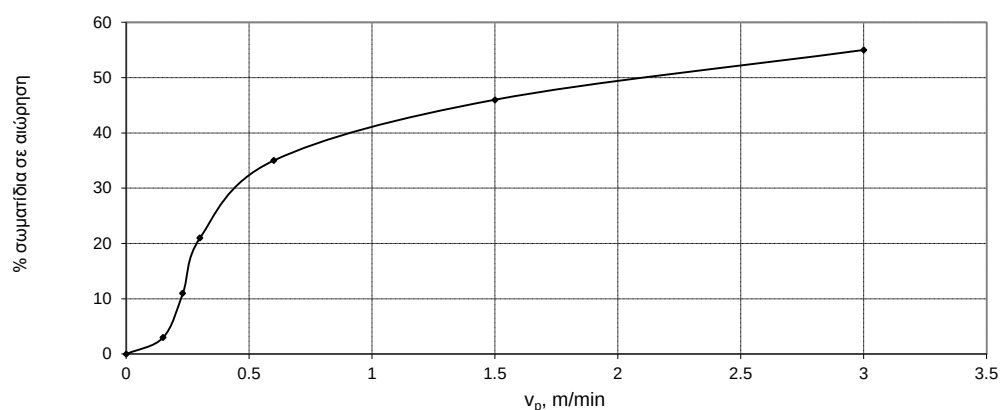
Έχουμε ένα απόβλητο που περιέχει άμμο με την ακόλουθη κατανομή

%, w/w	3	8	10	14	11	9	45
v_p , m/min	0,15	0,23	0,30	0,60	1,5	3,0	3+

Να υπολογισθεί το ποσοστό της άμμου που θα απομακρυνθεί για επιφανειακή φόρτιση $4000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$.

Λύση

Θα καταστρώσουμε διάγραμμα ταχύτητας καθίζησης και ποσοστού σωματιδίων που έχουν αυτήν την ταχύτητα ή μικρότερη. Για παράδειγμα, με ταχύτητα ίση ή μικρότερη από 0,15 m/min το ποσοστό είναι 3%, με ταχύτητα ίση ή μικρότερη από 0,23 m/min το ποσοστό είναι $3+8 = 11\%$ κ.ο.κ.



Επιφανειακή φόρτιση $4000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ αντιστοιχεί σε ταχύτητα καθίζησης 2,8 m/min. Από το διάγραμμα βλέπουμε ότι το 54% συνολικά των σωματιδίων έχει ταχύτητα καθίζησης μέχρι αυτή την τιμή. Θα απομακρυνθούν λοιπόν $100-54=46\%$ και, από τα υπόλοιπα 54%, αναλογικά με τα ποσοστά των ταχυτήτων τους.

Αυτό θα υπολογισθεί από το μέγεθος: $\frac{1}{2,8} \int_0^{0.54} v_p \cdot dx$

Το ολοκλήρωμα είναι η περιοχή ανάμεσα στον άξονα των ψ και την καμπύλη στα παραπάνω διάγραμμα. Με τη μέθοδο των τραπεζίων η συνολική απομάκρυνση υπολογίζεται ως 59%, ενώ μέσω Excel (με εύρεση του καλύτερου πολυωνύμου – 3ης τάξης τελικά –) υπολογίζεται ως 62%.

Άσκηση 2.5

Να σχεδιασθεί εξαμμοτής σταθερής ταχύτητας (ώστε να απομακρυνθεί όλη η άμμος) με τα εξής δεδομένα

Παροχές : $Q_{\max} = 60000 \text{ m}^3/\text{d}$

$Q_{\text{ave}} = 30000 \text{ m}^3/\text{d}$

$Q_{\min} = 12000 \text{ m}^3/\text{d}$ Χαρακτηριστικά άμμου :

$d = 0,20 \text{ mm}$

$v_{ps} = 0,022 \text{ m/s}$ (υπολογισμένη θεωρητικά από Stokes).

Ταχύτητα ροής στον εξαμμοτή $v_{\text{αποβλ}} = 0,30 \text{ m/s}$ (συνηθισμένη τιμή σχεδιασμού).

Ο εξαμμοτής θα αποτελείται από τρία κανάλια που θα δέχονται το 1/3 της παροχής το κάθε ένα. Να ελεγχθεί η περίπτωση να μη λειτουργεί το ένα κανάλι.

Λύση

Επιλέγεται πλάτος καναλιού $W = 1,30 \text{ m}$. (Συνήθης τιμή σχεδιασμού – εξαρτάται και από τη δυνατότητα συνδυασμού με κινούμενα ξέστρα για την απομάκρυνση των στερεών).

Η μέγιστη ροή σε κάθε κανάλι θα είναι:

$$Q_{i,\max} = \frac{Q_{\max}}{3} = 0,231 \text{ m}^3/\text{s}$$

Το βάθος ροής (για μέγιστη παροχή) σύμφωνα με τη σχέση 2.1.30 θα είναι:

$$h = \frac{Q_{i,\max}}{W \cdot v_{\text{αποβλ}}} = \frac{0,231 \text{ m}^3/\text{s}}{1,30 \text{ m} \cdot 0,30 \text{ m/s}} = 0,6 \text{ m}$$

και το μήκος του εξαμμοτή σύμφωνα με τη σχέση 2.1.31:

$$L = \frac{v_{\text{αποβλ}} \cdot h}{v_{ps}} = 8,2 \text{ m}$$

Για λόγους ασφαλείας επιλέγεται διπλάσιο βάθος. Συνεπώς

$$H = 2 \cdot h = 1,2 \text{ m}$$

Λαμβάνουμε και για το μήκος του εξαμμοτή συντελεστή ασφαλείας 1,5, οπότε θα είναι:

$$L = 1,5 \cdot 8,2 = 12,3 \text{ m}$$

Ο χρόνος παραμονής τέλος θα είναι:

$$\tau = \frac{L}{v_{\text{αποβλ}}} = 41 \text{ s.}$$

Έλεγχος για την περίπτωση που δεν λειτουργεί το ένα κανάλι.

Σε κάθε ένα από τα εναπομένοντα σε λειτουργία θα είναι:

$$Q_{i,\max} = \frac{60000}{2} = 30000 \text{ m}^3 / \text{d} = 0,347 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Τότε το βάθος ροής στο κάθε κανάλι θα είναι:

$$h_{\max} = \frac{0,347}{0,30 \cdot 1,30} = 0,9 \text{ m}$$

Αφού το μέγιστο βάθος ροής είναι μικρότερο από το βάθος σχεδιασμού (1,20 m) ο σχεδιασμός είναι δεκτός.

2.1.4 Λιποσυλλογή και ελαιοδιαχωρισμός

Όταν τα υγρά απόβλητα περιέχουν σημαντικές ποσότητες λιπών συχνά απαιτείται μετά την αμμοσυλλογή να προβλεφθεί και μονάδα λιποσυλλογής. Οι λιποσυλλέκτες είναι απλές δεξαμενές με χρόνο παραμονής τουλάχιστον 3-5min. Τα λίπη ως ελαφρότερα συλλέγονται στην επιφάνεια, η δε εκροή του (απαλλαγμένου από το λίπος) νερού γίνεται από σημείο σε αρκετό βάθος.

Οι διαχωριστές με βαρύτητα αποτελούν μια μεγάλη και σημαντική κατηγορία ελαιοδιαχωριστών. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη σημαντική διαφορά πυκνότητας μεταξύ νερού και ελαιωδών ουσιών. Με τη βοήθεια της άνωσης οι σταγόνες λαδιού ανεβαίνουν στην ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής από όπου απομακρύνονται με κατάλληλες διατάξεις επιφανειακής συλλογής. Υπάρχουν δύο κατηγορίες διαχωριστών βαρύτητας:

- Διαχωριστές APIS (American Petroleum Institute Separator)
- Διαχωριστές παραλλήλων πιακών.

Θεωρητικά, η λειτουργία τους βασίζεται στο ότι οι σταγόνες λαδιού ανέρχονται γραμμικά με οριακή ταχύτητα που καθορίζεται από το νόμο του Stokes, όταν η ροή είναι στρωτή. Ο διαχωριστής αυτός αποτελείται από μία ορθογώνια ή κυκλική δεξαμενή, μέσα στην οποία εισέρχεται το απόβλητο και παραμένει εκεί για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, ώστε να “ηρεμήσει”. Τα σταγονίδια λαδιού ανέρχονται προς την επιφάνεια, λόγω της άνωσης, όπου και σχηματίζεται ένα στρώμα λαδιού, το οποίο απομακρύνεται με κατάλληλο συλλέκτη, ενώ τα βαριά σωματίδια κατακάθονται σαν ιλύς, τα οποία επίσης απομακρύνονται με κατάλληλη διάταξη. Το υπόλοιπο νερό περνάει μέσω φραγμάτων, που υπάρχουν στο διαχωριστή, προς την έξοδο. Τα φράγματα αυτά υπάρχουν για να εμποδίσουν τη διάχυση λαδιού και ιλύος στο απόβλητο κατά την έξοδό του από τη μονάδα ελαιοδιαχωρισμού.

Σημαντικές παράμετροι ενός ελαιοδιαχωριστή τύπου APIS είναι ο χρόνος παραμονής και η επιφάνειά του. Οι APIS διαχωρίζουν σταγονίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 200 μm περίπου.

Ο σχεδιασμός των APIS βασίζεται στον υπολογισμό της οριακής ταχύτητας ανόδου των σταγονιδίων του λαδιού σύμφωνα με τη σχέση 2.1.23, όπου ο συντελεστής οπισθέλκουσας καθορίζεται για τις συνθήκες στρωτής ροής που επικρατούν, οπότε

$$v_{oil} = \frac{g \cdot d_{oil}^2}{18 \cdot \nu} \cdot \frac{\rho_{oil} - \rho_w}{\rho_w} \quad (2.1.36)$$

- Όπου v_{oil} η ταχύτητα ανόδου
 ρ_{oil} η πυκνότητα των σταγονιδίων του λαδιού
 d_{oil} η οριακή διάμετρος σταγονιδίων ελαίου
 ρ_w η πυκνότητα του νερού
 ν το κινηματικό ιξώδες του νερού (Σχέση 2.1.28).

Οι δεξαμενές APIS είναι δεξαμενές οριζόντιας ροής και ορθογωνικής διατομής όπως οι εξαμμωτές με σταθερή ταχύτητα ροής. Ο σχεδιασμός είναι αντίστοιχος, με τη μόνη διαφορά ότι τα «σωματίδια» αντί να καθιζάνουν συγκεντρώνονται στην επιφάνεια.

Οι δεξαμενές αυτές σχεδιάζονται με βάση τις παρακάτω προδιαγραφές:

- $\tau \geq 3 \text{ min}$
- $d_{oil} \geq 0,15 \text{ mm}$
- $0,9 \leq v_{oil} \leq 3,6 \text{ m/h}$
- $15 \leq v_{αποβλ} \leq 55 \text{ m/h}$
- $2 \leq W \leq 6 \text{ m}$
- $1 \leq H \leq 2,5 \text{ m}$
- $0,3 \leq H / W \leq 0,5$

Άσκηση 2.6

Ελέγξτε αν ικανοποιούνται όλοι οι όροι σχεδιασμού μιας δεξαμενής διαχωρισμού ελαίων με διαστάσεις: πλάτος 3,048 m, βάθος 1,22m και μήκος ίσο με 15,24 m με μέγιστη τροφοδοσία αποβλήτου 2385 m³/ημέρα. Επίσης έχουμε ειδικό βάρος λαδιού 0,92, θερμοκρασία 60°F και μέγεθος σταγονιδίων 0,015 cm.

Λύση

Από το νόμο του Stokes υπολογίζουμε την οριακή ταχύτητα των σταγονιδίων.

$$v_{oil} = \frac{g}{18 \nu} \cdot \left(\frac{\rho_{oil} - \rho_w}{\rho_w} \right) \cdot d_{oil}^2 \Rightarrow v_{oil} = \frac{981 \cdot (0,92 - 1) \cdot (0,015)^2}{(18) \cdot (1,13 \cdot 0,01)} = -0,0868 \text{ cm/s}$$

$$= -0,0868 \cdot \frac{3600}{100} = -3,1 \text{ m/h}$$

Επιφανειακή φόρτιση λειτουργίας:

$$\frac{2385 \text{ m}^3/\text{day}}{(3,048 \text{ m}) \cdot (15,24 \text{ m})} = 51 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} = 51 \text{ m/d} = 2,1 \text{ m/h}$$

Επομένως ο συντελεστής ασφαλείας είναι $3,1/2,1 = 1,47$.

Η ταχύτητα του αποβλήτου μέσα στο διαχωριστήρα είναι:

$$v_{αποβλ} = \frac{2385 \text{ m}^3/\text{day}}{(3,048 \text{ m}) \cdot (1,22 \text{ m})} = 641 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} = 26,7 \text{ m/h}$$

Επομένως η ταχύτητα του αποβλήτου είναι ικανοποιητική.

Βάθος / Πλάτος = $1,22/3,048 = 0,4 \Rightarrow$ ικανοποιητικό.

Χρόνος παραμονής:

$$\tau = \frac{W \cdot H \cdot L}{Q} = \frac{3,048 \cdot 1,22 \cdot 15,24}{2385} = 34 \text{ min} \Rightarrow \text{ικανοποιητικό}$$

2.2 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

2.2.1 Κροκίδωση – Συσσωμάτωση

Τα **κολλοειδή** είναι υλικά (στερεά, υγρά και αέρια) που έχουν διαχυθεί σ' ένα μέσο στην μορφή λεπτών σωματιδίων (~200 nm). Τα κολλοειδή σωματίδια που βρίσκονται μέσα στο φυσικό νερό και στα υγρά απόβλητα είναι συνήθως αρνητικά φορτισμένα και το ομώνυμο αυτό φορτίο τους τα βοηθά να παραμένουν σε διασπορά.

Ο όρος κροκίδωση (coagulation) αναφέρεται στη χημική αποσταθεροποίηση των κολλοειδών διασπορών εξαιτίας της προσθήκης κατάλληλων ηλεκτρολυτών (κροκιδωτικό μέσο). Οι τελευταίοι μειώνουν το φορτίο των κολλοειδών σωματιδίων με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ηλεκτροστατικές απωστικές δυνάμεις και να υπερισχύουν οι ελκτικές δυνάμεις London-Van der Waals, γεγονός που οδηγεί τα κολλοειδή να πλησιάσουν μεταξύ τους και να σχηματίσουν μεγαλύτερα συσσωματώματα.

Ο όρος συσσωμάτωση (flocculation) αναφέρεται στη διασύνδεση των κολλοειδών σωματιδίων που υπάρχουν σε διασπορά μέσα στο υγρό και το σχηματισμό “συσσωματωμάτων”, τα οποία καθιζάνουν ευκολότερα.

Οι συγκρούσεις μεταξύ σωματιδίων (που οδηγούν στη συσσωμάτωσή τους) οφείλονται είτε στη θερμική κίνηση Brown των σωματιδίων (περικινητική συσσωμάτωση), είτε στη μηχανική ανάμειξη της διασποράς, οπότε δημιουργούνται τοπικές βαθμίδες ταχύτητας μεταξύ των σωματιδίων (ορθοκινητική συσσωμάτωση). Η βαθμίδα ταχύτητας μεταξύ δύο σωματιδίων (G , velocity gradient) ορίζεται ως

$$G = -\frac{dv}{dz} \quad (2.2.1)$$

όπου v η ταχύτητα,
 z η θέση των σωματιδίων.

Η συσσωμάτωση με τον ορθοκινητικό μηχανισμό γίνεται πιο σημαντική για μεγαλύτερα σωματίδια και μεγαλύτερες βαθμίδες ταχύτητας. Πρακτικά, η συσσωμάτωση που επέρχεται κατά τον καθαρισμό των αποβλήτων γίνεται μόνο με τον ορθοκινητικό τρόπο. Συνεπώς, η βασική παράμετρος σχεδιασμού διατάξεων κροκίδωσης – συσσωμάτωσης είναι η βαθμίδα ταχύτητας.

Οι διατάξεις κροκίδωσης – συσσωμάτωσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται τόσο κατά την επεξεργασία του φυσικού νερού ώστε να καταστεί πόσιμο, όσο και κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, σχεδιάζονται για να αποσταθεροποιήσουν τα κολλοειδή σε αιώρηση, ώστε, μετά τη συσσωμάτωσή τους, να καθιζάνουν ευκολότερα.

Η διεργασία της κροκίδωσης – συσσωμάτωσης στα αστικά λύματα εφαρμόζεται:

- πριν από την πρωτοβάθμια καθίζηση
- μετά τη δευτεροβάθμια (βιολογική) επεξεργασία, ως τελικό στάδιο επεξεργασίας,

ενώ στα βιομηχανικά απόβλητα εφαρμόζεται συνήθως πριν την πρωτοβάθμια καθίζηση.

Η αποσταθεροποίηση των κολλοειδών γίνεται με την προσθήκη στο απόβλητο αδιάστατων ουσιών ή ιόντων φορτισμένων αντίθετα από τα σωματίδια του κολλοειδούς. Ο μηχανισμός της αποφόρτισης που επέρχεται είναι συνδυασμός των εξής επιμέρους σταδίων:

- συμπίεσης της διπλοστοιβάδας,

- ρόφησης και εξουδετέρωσης φορτίου,
- παγίδευσης σε ίζημα,
- διασωματιδιακής ζεύξης.

Τα χημικά που προστίθενται είναι:

- ανόργανα
- άλατα (θειικό αργίλιο –alum-, χλωριούχος σίδηρος)
- οξείδια και υδροξείδια (CaO , Ca(OH)_2)
- οργανικά (πολυηλεκτρολύτες).

Η επιλογή του τύπου του κροκιδωτικού, της άριστης ποσότητας (δόσης), καθώς και του άριστου pH κατά την κροκίδωση δεν μπορούν να προβλεφθούν θεωρητικά, λόγω της πολυπλοκότητας της σύστασης των αποβλήτων. Προσδιορίζονται πειραματικά είτε σε εργαστηριακή (Jar tests) είτε σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Ο όρος «άριστη ποσότητα» (ή «κρίσιμη» ή «απαιτούμενη») συνήθως υπονοεί την ποσότητα του κροκιδωτικού η οποία οδηγεί σε νερό ή απόβλητο δεδομένων προδιαγραφών (σε όρους απομενόντων κολλοειδών ή θολερότητας). Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το είδος του κροκιδωτικού (συνήθως αποτελεσματικότερα είναι χημικά με ιόντα μεγαλύτερου σθένους) και στην τελική απόφαση επιλογής βαρύνουσα σημασία έχει και το κόστος του χημικού, το οποίο έχει μεγάλη διακύμανση μεταξύ των συνήθων ανόργανων αλάτων και των οργανικών πολυηλεκτρολυτών.

Η διεργασία κροκίδωσης – συσσωμάτωσης τελείται σε δύο στάδια:

- ταχεία ανάμιξη – κροκίδωση, όπου το κροκιδωτικό και το απόβλητο φέρονται σε επαφή υπό έντονη ανάμειξη και
- συσσωμάτωση – καθίζηση, όπου υπό βραδεία ανάδευση γίνεται η αύξηση μεγέθους των συσσωματωμάτων και κατόπιν η καθίζησή τους. (Σε εργαστηριακή κλίμακα η καθίζηση γίνεται συνήθως σε συνθήκες ηρεμίας).

Παράμετροι σχεδιασμού για το πρώτο στάδιο είναι ο χρόνος παραμονής τ και η βαθμίδα ταχύτητας G . Παράμετρος σχεδιασμού για το δεύτερο στάδιο είναι το αδιάστατο γινόμενο $G\tau$.

Η βαθμίδα ταχύτητας, έτσι όπως ορίστηκε, είναι ένα μέγεθος που μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο μέσα στο δοχείο ανάμειξης και δεν μπορεί να υπολογισθεί. Στη θέση της χρησιμοποιείται η μέση βαθμίδα ταχύτητας (ένας μέσος όρος μέσα στο δοχείο) η οποία αντιστοιχεί με την ισχύ που προσφέρεται από τη διάταξη ανάμειξης στο κινούμενο ρευστό ανά μονάδα όγκου του. Όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο γρηγορότερη κροκίδωση και συσσωμάτωση επιτυγχάνεται. Όμως δεν πρέπει να ξεπερνά κάποιο όριο πάνω από το οποίο οι θρόμβοι σπάζουν μηχανικά, λόγω υπερβολικών διατμητικών τάσεων. Τα όρια αυτά φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 2.2.1).

Η μέση βαθμίδα ταχύτητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G = \left(\frac{P}{V \cdot \mu} \right)^{1/2}, \quad \text{s}^{-1} \quad (2.2.2)$$

όπου P η ισχύς ανάδευσης, W

V ο όγκος του αντιδραστήρα-κροκιδωτή, m^3

μ το ιξώδες του αιωρήματος, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ($\text{kg}/\text{m}/\text{s}$)

Πίνακας 2.2.1. Όρια βαθμίδας ταχύτητας και χρόνου παραμονής για τις διεργασίες της κροκίδωσης, συσσωμάτωσης και καθίζησης

Παράμετροι	Ταχεία ανάμιξη Κροκίδωση	Συσσωμάτωση	Καθίζηση
Χρόνος παραμονής (τ)*	<30 s	30 – 60 min	90 – 180 min
Βαθμίδα ταχύτητας (G)*	300 – 1000 s ⁻¹	25 – 65 s ⁻¹	<10 s ⁻¹
Γινόμενο G· τ		10000 – 100000	
Περιφερειακή ταχύτητα πτερυγίων ανάδευσης	5 m/s	0,6 – 1,2 m/s	

* αν χρησιμοποιηθεί χρόνος ταχείας ανάμιξης της τάξης του sec, προτείνονται τιμές για το G από 3000 έως 5000.

Η μηχανική ανάδευση είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος ανάδευσης και επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλου αναδευτήρα, που η κίνησή του μεταδίδει ενέργεια στο ρευστό και ταυτόχρονα το υποχρεώνει να ρεύσει μέσα στο δοχείο του.

Ο χώρος όπου γίνεται η ανάδευση είναι μια κρίσιμη παράμετρος. Μετά από πολλές δεκαετίες έρευνας και πειραματισμών, οι μελετητές κατέληξαν σε έναν πρότυπο σχεδιασμό του αναδευόμενου δοχείου (ή αντιδραστήρα), όπου:

- Το ύψος του υγρού μέσα στο δοχείο (H) είναι ίσο με τη διάμετρο του δοχείου (D). Αν είναι ανάγκη να γίνει επεξεργασία μεγάλων όγκων υγρών, τότε επιλέγεται το ύψος έτσι ώστε να είναι πολλαπλάσιο της διαμέτρου D ($H = nD$).
- Η διάμετρος του αναδευτήρα (d) ισούται συνήθως με το 1/3 της διαμέτρου του δοχείου ($d = D/3$). Σε ορισμένες περιπτώσεις αναφέρονται και αναδευτήρες μεγαλύτερης διαμέτρου ($d = D/2$).
- Ο πυθμένας μπορεί να είναι είτε επίπεδος ή καμπύλος.
- Η απόστασή του αναδευτήρα από τον πυθμένα του δοχείου (C) ισούται με το 1/3 της διαμέτρου του δοχείου ($C = D/3$).
- Ο αριθμός και το πλάτος των ανακλαστήρων: Για την καλύτερη ανάμιξη τοποθετούνται στις άκρες του δοχείου τέσσερις επίπεδοι ανακλαστήρες, που έχουν πλάτος 1/10 της διαμέτρου του. Οι ανακλαστήρες άλλοτε εκτείνονται μέχρι τον πυθμένα του δοχείου και άλλοτε μέχρις ενός μικρού ύψους από αυτόν (ειδικά όταν ο πυθμένας είναι καμπύλος).

Διακρίνουμε τους αναδευτήρες σε αξονικής και ακτινικής ροής. Είναι προφανές ότι η περιστροφή του αναδευτήρα απαιτεί ορισμένη ενέργεια. Αυτή παρέχεται από έναν κινητήρα, κατάλληλα προσαρμοσμένο στην κορυφή ή στο πλάι του αναδευόμενου δοχείου. Ανάλογη με την παρεχόμενη ισχύ είναι και η ροή μέσα στον αντιδραστήρα: για πολύ μικρές ταχύτητες περιστροφής, η κατανάλωση ισχύος είναι περιορισμένη και η ροή στο αναδευόμενο δοχείο στρωτή (laminar). Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός περιστροφής του αναδευτήρα, αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας.

Υπενθυμίζεται ότι το κριτήριο χαρακτηρισμού μιας ροής είναι ο αδιάστατος αριθμός Reynolds, που για τα αναδευόμενα δοχεία υπολογίζεται από την έκφραση:

$$Re = \frac{d^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \quad (2.2.3)$$

όπου N ο αριθμός των στροφών του αναδευτήρα [$\text{Hz}=\text{s}^{-1}$], d η διάμετρος του αναδευτήρα (m) και ρ [kg m^{-3}] και μ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$] η πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού αντιστοίχως. Για τιμές του αριθμού $Re < 10$, η ροή στο αναδευόμενο δοχείο θεωρείται στρωτή, ενώ για $Re > 10^4$ η ροή θεωρείται τυρβώδης (turbulent).

Η μελέτη και συσχέτιση των μετρήσεων κατανάλωσης ενέργειας, για τους διάφορους αναδευτήρες σε διάφορες συνθήκες, έδειξε ότι η κατανάλωση ενέργειας (P [W]) για την περιστροφή του αναδευτήρα και την ανάδευση του υγρού εξαρτάται από μια πληθώρα παραμέτρων: από τις φυσικοχημικές ιδιότητες (πυκνότητα, ιξώδες) του υγρού μέχρι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συνολικού συστήματος και τις συνθήκες λειτουργίας.

Αντί για την ίδια την ισχύ, προτιμούμε ν' αναφερόμαστε στην αδιάστατη έκφρασή της, τον αριθμό ισχύος (N_p : power number):

$$N_p = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5} \quad (2.2.4)$$

Σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, ο αριθμός ισχύος είναι αντιστρόφως ανάλογος του αριθμού Reynolds.

Συνεπώς:

$$\text{για } Re < 10, \quad N_p = \frac{K_L}{Re} \Rightarrow P = K_L \cdot \mu \cdot N^2 \cdot d^3 \quad (2.2.5)$$

$$\text{για } Re > 10^4, \quad N_p = K_T \Rightarrow P = K_T \cdot \rho \cdot N^3 \cdot d^5 \quad (2.2.6)$$

όπου οι τιμές των K_L και K_T λαμβάνονται από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.2.2) για τους πιο διαδεδομένους αναδευτήρες – ή από εξειδικευμένη βιβλιογραφία.

Πίνακας 2.2.2. Χαρακτηριστικά στοιχεία αναδευτήρων

Είδος αναδευτήρα	K_L	K_T
Ναυτική προπέλα (3 πτερύγια, βήμα 1.0)	41	0,32
HE-3 (Chemineer)	43	0,28
Στρόβιλος (4 κεκλιμένα-45 πτερύγια)	44,5	1,27
Στρόβιλος (6 κεκλιμένα-45 πτερύγια)	-	1,63
Επίπεδος πτερυγιοφόρος τροχός (2 πτερύγια)	36.5	1.7
Άγκυρα	300	0,35

Εκτός από τα μηχανικά στήματα ανάδευσης υπάρχουν και τα **συστήματα υδραυλικής ανάδευσης** (διατάξεις με εξαναγκασμένη ροή: κανάλια με διαμορφωμένα τοιχώματα, αγωγοί όπου το ρευστό στροβιλίζεται). Στις περιπτώσεις αυτές, η απαιτούμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot (\Delta p) \quad (2.2.7)$$

όπου Q η υδραυλική παροχή του αποβλήτου, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

g η επιτάχυνση της βαρύτητας, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

Δp η πτώση πίεσης, $\text{m}_{\text{H}_2\text{O}}$

Αν αυτή η πτώση πίεσης προκαλείται από τα διαμορφωμένα τοιχώματα (αλλαγή κατεύθυνσης ρευστού), υπολογίζεται από τη σχέση

$$\Delta p = n \cdot C_D \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.2.8)$$

- όπου n ο αριθμός των αλλαγών κατεύθυνσης
- C_D ο συντελεστής οπισθέλκουσας, ανάλογα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 2.1.3, όπου όμως ο Re αναφέρεται στον αγωγό και $Re < 2000$ για στρωτή ροή κλπ.
- v η γραμμική ταχύτητα του αποβλήτου, $m \cdot s^{-1}$. Αν αυτή η πτώση πίεσης προκαλείται από στροβιλισμό, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{4f}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.2.9)$$

- όπου L μήκος αγωγού, m
- d διάμετρος αγωγού, m
- f συντελεστής τριβής (Fannig).

Στις (2.2.8) και (2.2.9) μπορούμε να διαπιστώσουμε την αντιστοιχία n και L .

Για το σχεδιασμό της δεξαμενής κροκίδωσης:

- Γίνεται η επιλογή κροκιδωτικού
 - ο επιλογή τύπου, με βάση τη σύσταση και τις ιδιότητες του αποβλήτου
 - ο επιλογή ποσότητας
 - ο επιλογή pH κροκίδωσης από δεδομένα πειραμάτων τύπου JarTests.
- Από δεδομένα πειραμάτων τύπου JarTests αλλά και από βιβλιογραφικά δεδομένα επιλέγονται τα μεγέθη G και τ για τα δύο στάδια κροκίδωσης.
- Υπολογίζεται η απαιτούμενη παροχή διαλύματος/αιωρήματος κροκιδωτικού και διαστασιολογούνται η αντλία προσαγωγής του (συνήθως δοσιμετρική) και οι δεξαμενές αποθήκευσής του.
- Από τα δεδομένα των JarTests υπολογίζεται η παραγόμενη ποσότητα στερεών και διαστασιολογείται η αντλία απαγωγής τους.
- Καθορίζεται ο τρόπος διάθεσης της λάσπης.
- Υπολογίζεται ο όγκος των αντίστοιχων δεξαμενών από δεδομένα υδραυλικής παροχής αποβλήτου.
- Υπολογίζεται η απαιτούμενη ανάδευση και διαστασιολογούνται οι αναδευτήρες.

Άσκηση 2.7

Υπολογίστε τη βαθμίδα ταχύτητας (velocity gradient, mixing intensity) G και το χρόνο παραμονής τ σε έναν flashmixer που χρησιμοποιείται για την ανάμειξη θεικού αργιλίου και αποβλήτου παροχής $75700 \text{ m}^3/\text{d}$. Η δεξαμενή ανάμειξης έχει ενεργό όγκο $18,4 \text{ m}^3$ και περιέχει μια τουρμπίνα ανάμειξης που μεταβιβάζει στο σύστημα του αποβλήτου ισχύ $6,2 \text{ hp}$. Ελέγξτε αν η τιμή του G και του χρόνου παραμονής (τ) βρίσκονται μέσα στα όρια σχεδιασμού. Η θερμοκρασία του αποβλήτου είναι 50°F .

Λύση

Η εφαρμογή της σχέσης (2.2.2) δίνει

$$G = \left[\frac{(6,2\text{hp}) \cdot (745,7 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3}{\text{hp}})}{(18,4\text{m}^3) \cdot (1,31 \cdot 10^{-3} \text{kg} / \text{s} / \text{m})} \right]^{1/2} = 438 \text{mps} / \text{m} \quad (\text{ή } \text{s}^{-1}).$$

Στην παραπάνω σχέση το 745,7 είναι ο συντελεστής μετατροπής μονάδων ισχύος και τα $1,31 \cdot 10^{-3} \text{kg/s/m}$ είναι το δυναμικό ιξώδες του νερού στους 50°F .

Σύγκριση της τιμής αυτής με τις προτεινόμενες (Πίνακας 2.2.1) $300\text{-}1000 \text{ s}^{-1}$ οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι μια αποδεκτή τιμή.

Ο χρόνος παραμονής δίδεται από τη σχέση

$$\tau = V/Q$$

Έτσι υπολογίζεται: $\tau = (18,4 \text{ m}^3) / (75700 \text{ m}^3/\text{day}) / (86400 \text{ s}/\text{day}) = 21 \text{ s} < 30 \text{ s}$, επίσης αποδεκτή τιμή.

Άσκηση 2.8

Πριν την περαιτέρω επεξεργασία ενός αποβλήτου παροχής $500 \text{ m}^3/\text{d}$, απαιτείται να επιτευχθεί η συσσωμάτωση των κολλοειδών που περιέχει. Για το απόβλητο αυτό, θερμοκρασίας 15°C , πυκνότητας $\rho = 999 \text{ kg/m}^3$ και ιξώδους $\mu = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, γνωρίζουμε από προηγούμενες δοκιμές τύπου JarTest ότι:

- Το καλύτερο κροκιδωτικό είναι το $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (alum),
- Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται σε συνθήκες $40 \text{ mgAl}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$ αποβλήτου και για τιμή $G\tau$ ίση με $8 \cdot 10^4$.

Να σχεδιασθεί μια δεξαμενή η οποία να είναι εφοδιασμένη με έναν αναδευτήρα τύπου στροβίλου, και να υπολογισθούν: η ποσότητα κροκιδωτικού ανά μήνα, η απαιτούμενη ισχύς ανάδευσης και η συχνότητα περιστροφής του αναδευτήρα.

Λύση

$$\text{Έστω } G = 40 \text{ s}^{-1}.$$

Τότε θα είναι

$$\tau = \frac{G \cdot \tau}{G} = \frac{8 \cdot 10^4}{40} \cdot \frac{1}{60} = 33,3 \text{ min}$$

Ο χρόνος παραμονής που υπολογίστηκε είναι εντός των ορίων $30\text{-}60\text{min}$ και άρα μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή η επιλογή του $G=40\text{s}^{-1}$.

Ο απαιτούμενος όγκος δεξαμενής θα είναι

$$V = Q \cdot \tau = 500 (\text{m}^3 / \text{d}) \cdot 33,3 (\text{min}) \cdot \frac{1}{60 \cdot 24} = 11,6 \text{ m}^3$$

Έστω ότι η δεξαμενή είναι κυλινδρική. Στα δοχεία ανάδευσης συνήθως ισχύει ότι $H=D$. Οπότε η διάμετρος του δοχείου θα είναι:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi}} = 2,5 \text{ m}.$$

Επιλέγεται, λοιπόν, αναδευτήρας με διάμετρο $d = D/3 = 0,82 \text{ m}$ Η απαιτούμενη ισχύς από τη Σχέση 2.2.2 θα είναι:

$$P = G^2 \cdot V \cdot \mu = 40^2 \text{ s}^{-2} \cdot 11,6 \text{ m}^3 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 21,1 \text{ W}.$$

Έστω ότι η ροή είναι τυρβώδης, τότε θα ισχύει η σχέση 2.2.6 και για αναδευτήρα τύπου στροβίλου (Πίνακας 2.2.2) $K_T=1,27$:

$$P = K_T \cdot \rho \cdot N^3 \cdot d^5 \Rightarrow N = 0,36 \text{ s}^{-1}, \text{ 21rpm}$$

Έλεγχος της ροής αν είναι όντως τυρβώδης

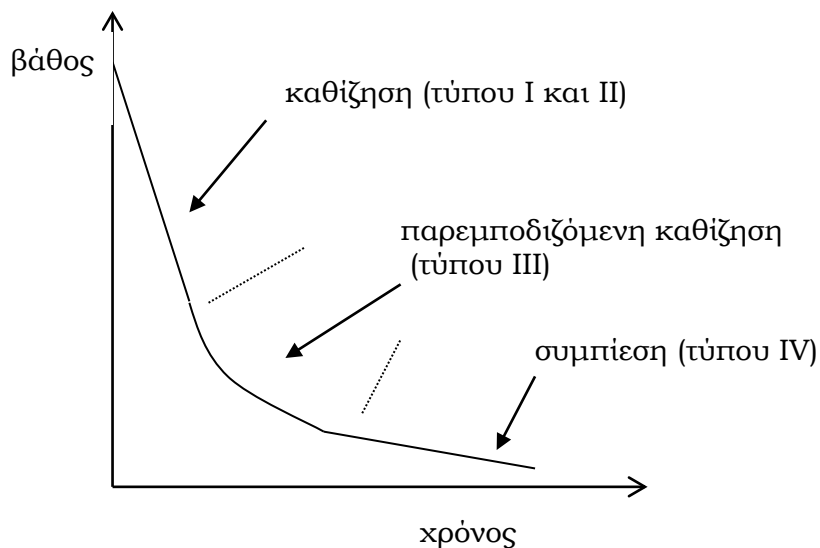
$$Re = \frac{d^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = 21 \cdot 10^5 > 10^4 \Rightarrow \text{τυρβώδης ροή}$$

Η απαιτούμενη ποσότητα κροκιδωτικού θα είναι:

$$500 (\text{m}^3 / \text{d}) \cdot 40 (\text{g} / \text{m}^3) \cdot 30 (\text{d} / \text{mo}) = 600 \text{ kg} / \text{month}.$$

2.2.2 Απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών

Τα αιωρούμενα στερεά που έχουν διέλθει από την προεπεξεργασία χωρίς να έχουν απομακρυνθεί, προέρχονται είτε πρωτογενώς από το ακατέργαστο απόβλητο είτε έχουν δημιουργηθεί δευτερογενώς από την κροκίδωση των κολλοειδών σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά έχουν ειδικό βάρος λίγο μεγαλύτερο από αυτό του νερού ($\rho_p \approx 1,16 \text{ g/cm}^3$) γι' αυτό και αποκτούν μικρές οριακές ταχύτητες καθίζησης, έτσι ώστε οι πλαστικές συγκρούσεις μεταξύ τους να αποτελούν το κυρίαρχο φαινόμενο. Έτσι κατά την κάθοδό τους συσσωματώνονται συνεχώς μεταβάλλοντας τη διάμετρό τους και αυξάνοντας την ταχύτητα καθίζησής τους (καθίζηση τύπου II). Όταν μάλιστα η συγκέντρωσή τους αυξηθεί αρκετά τότε η καθίζηση γίνεται παρεμποδισμένη καθίζηση (τύπου III). Για τις καθιζήσεις τύπου II και III δεν ισχύουν οι σχέσεις που περιγράφηκαν στην απομάκρυνση της άμμου (διακριτή καθίζηση). Μακροσκοπικό χαρακτηριστικό της παρεμποδισμένης καθίζησης ενός μίγματος στερεών-υγρού είναι η εμφάνιση μιας διεπιφάνειας, όταν το μίγμα τεθεί σε ηρεμία, η οποία κινείται με ολοένα και ελαττούμενη ταχύτητα προς τα κάτω, οπότε και μπορεί να χαραχθεί ένα διάγραμμα της ακόλουθης μορφής (Σχήμα 2.2.1).



Σχήμα 2.2.1. Πορεία του ύψους της διεπιφάνειας με το χρόνο

Η κλίση της καμπύλης σε οποιοδήποτε σημείο στο Σχήμα 2.2.1 είναι η ταχύτητα καθίζησης (διαύγασης του υπερκειμένου υγρού). Μπορεί να διαπιστωθεί ότι έχουμε σταθερή ταχύτητα καθίζησης στην καθίζηση τύπου I και II, κατόπιν μια μεταβατική κατάσταση μεταβαλλόμενης ταχύτητας καθίζησης (παρεμποδισμένη καθίζηση-τύπου III), και τελικά σταθερή ταχύτητα συμπίεσης (Συμπίεση-τύπου IV).

Όταν η αρχική συγκέντρωση των αιωρούμενων είναι χαμηλή τότε ακολουθείται η καθίζηση τύπου II. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα αστικά λύματα (παράγραφος 2.2.2.1.1). Αντιθέτως όταν η αρχική συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών είναι υψηλή τότε γρήγορα το διφασικό σύστημα περνά στην καθίζηση τύπου III και IV. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν υγρά απόβλητα μετά από διαδικασία κροκίδωσης-συσσωμάτωσης (καθώς και η περίσσεια ενεργού ιλύος που θα αντιμετωπισθεί στην παράγραφο 2.2.2.1.2).

Η απομάκρυνση των στερεών αυτών επιτυγχάνεται στην πράξη με τρεις τρόπους: σε δεξαμενές καθίζησης, σε φυγοκεντρικά συστήματα και τέλος σε συστήματα με επίπλευση με αέρα.

2.2.2.1 Διαχωρισμός αιωρούμενων με καθίζηση

2.2.2.1.1 Σχεδιασμός Πρωτοβάθμιας Καθίζησης

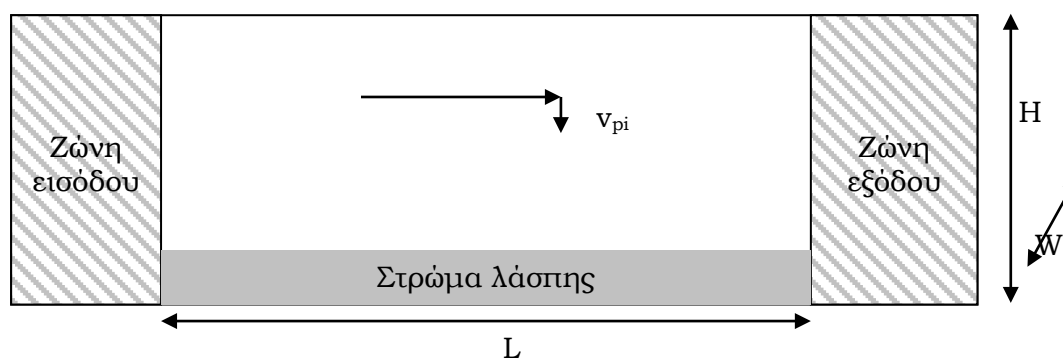
Οι εγκαταστάσεις πρωτοβάθμιας καθίζησης σχεδιάζονται για να απομακρύνουν τα αιωρούμενα στερεά ($\rho_p \approx 1,16$), διαστάσεων 10^{-1} - 10^{-2} mm, είτε για να μειωθεί το ρυπαντικό φορτίο στα επιθυμητά όρια για απόρριψη στον αποδέκτη, είτε ως προεργασία για το επόμενο στάδιο (δευτεροβάθμιο).

Η απομάκρυνση των αιωρούμενων ακολουθεί καθίζηση τύπου II (συσσωματωμένων σωματιδίων). Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων μεταβάλλεται (αυξάνεται) κατά την πορεία τους προς τον πυθμένα της δεξαμενής λόγω της αύξησης του μεγέθους τους. Το αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι να μην είναι δυνατός ο αναλυτικός υπολογισμός ταχυτήτων καθίζησης, αλλά να απαιτείται πειραματική μέτρησή τους. Στην περίπτωση που δεν διατίθενται πειραματικά δεδομένα για το συγκεκριμένο απόβλητο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τιμές που έχουν προκύψει από τη διεθνή εμπειρία για απόβλητα ίδιου τύπου.

Οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι:

- ορθογωνικές με συνεχή οριζόντια ροή, αντίστοιχες των εξαμμητών
- κυλινδρικές, με είσοδο του αποβλήτου στο κέντρο και ροή προς την περιφέρεια. Η ταχύτητα ροής μειώνεται τότε συνεχώς και τα στερεά καθιζάνουν στον πυθμένα, ο οποίος είναι κωνικός για διευκόλυνση της «συγκέντρωσης» της λάσπης, η οποία απομακρύνεται είτε συνεχώς είτε περιοδικά, με αντλίες ή με ξέστρα, από τον πυθμένα.

Μια ορθογωνική δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης παριστάνεται διαγραμματικά στο ακόλουθο Σχήμα 2.2.2.



Σχήμα 2.2.2. Δεξαμενή καθίζησης τύπου II

Η τροχιά των σωματιδίων εδώ δεν είναι ευθύγραμμη, αφού όσο μετακινούνται αυξάνει το μέγεθός τους και συνεπώς και η κατακόρυφη ταχύτητα καθόδου τους.

Τοποθετείται το απόβλητο σε κυλινδρικό δοχείο (στήλη καθίζησης) με πολλά πλάγια ανοίγματα καθ' όλο το ύψος του H . (Θεωρώντας την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού ως επίπεδο αναφοράς, τα ανοίγματα θα είναι σε βάθος h_i). Το περιεχόμενο αναδεύεται επισταμένα ώστε να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη σύσταση X_0 και αφήνεται να ηρεμήσει (χρονική στιγμή $t = 0$). Κατά χρονικά διαστήματα (t_j) παίρνουμε δείγματα από τα ανοίγματα (στόμια δειγματοληψίας) και προσδιορίζεται η συγκέντρωση $X_{i,j}$ (περιεκτικότητα) σε αιωρούμενα στερεά. Αυτά είναι τα στερεά που δεν καθιζάνει ακόμη. Αυτή η συγκέντρωση μπορεί να αναθεί επί της αρχικής και έτσι έχουμε δεδομένα ποσοστού απομάκρυνσης [$x_{ij} = 1 - X_{ij}/X_0$] σαν συνάρτηση του βάθους και του χρόνου (χρόνου παραμονής). Αυτά τα δεδομένα μπορούν να παρασταθούν σε «διάγραμμα ίσης απομάκρυνσης», που θα έχει τη μορφή του ακόλουθου σχήματος (Σχήμα 2.2.3).

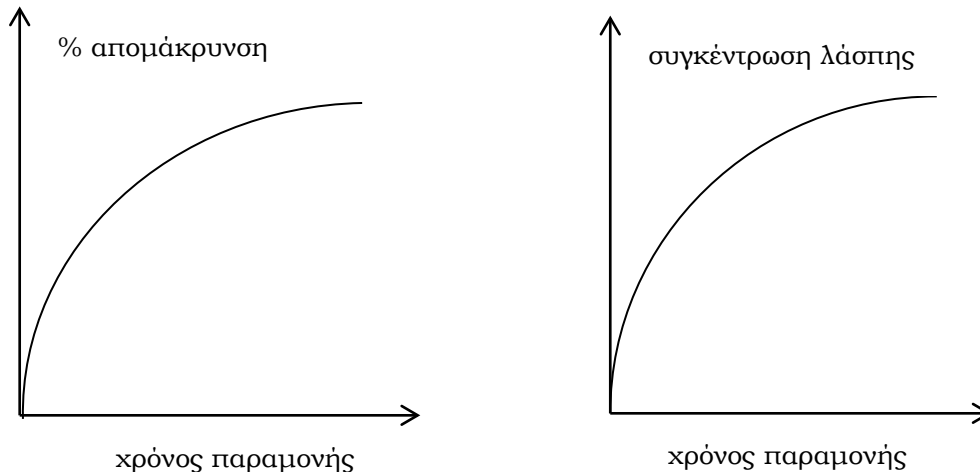
- ποσοστό x_3 έχει απομακρυνθεί τελείως (αφού η καμπύλη τροχιών τους φθάνει στον πυθμένα της στήλης)
- από τα υπόλοιπα σωματίδια, θα απομακρύνονται ανάλογα με την ταχύτητά τους. Για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών, δουλεύουμε με μέσες ταχύτητες (πάνω στην κατακόρυφη στο σημείο t_j): Θεωρούμε ότι για ποσοστό σωματιδίων $x_4 - x_3$ έχουμε ταχύτητα που αντιστοιχεί στο (μέσο) ύψος h_{i1} , για

ποσοστό $x_5 - x_4$ ταχύτητα στο ύψος h_{j2} κ.ο.κ. Υπολογίζουμε λοιπόν το συνολικό ποσοστό απομάκρυνσης από τη σχέση

$$x_{\tau_j} = x_3 + \frac{h_{j1}}{H} \cdot (x_4 - x_3) + \frac{h_{j2}}{H} \cdot (x_5 - x_4) + \dots \quad (2.2.10)$$

Η άθροιση στην (2.2.10) επεκτείνεται σ' όλα τα δεδομένα από το Σχήμα 2.2.1.

Μ' αυτόν τον τρόπο έχουμε το πρώτο ζεύγος επιφανειακής φόρτισης (v_j) – συνολικού ποσοστού απομάκρυνσης (x_{τ_j}) ή χρόνου παραμονής (τ_j) – συνολικού ποσοστού απομάκρυνσης (x_{τ_j}). Στη συνέχεια υπολογίζουμε κι άλλα ζευγάρια τιμών και καταstrώνουμε διάγραμμα ανάλογο του παρακάτω Σχήματος (Σχήμα 2.2.4).



Σχήμα 2.2.4. Παραστατική απεικόνιση της μεταβολής (α) της % συγκέντρωσης και (β) της συγκέντρωσης λάσπης με το χρόνο παραμονής

Σημαντική παράμετρος σχεδιασμού είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής. Μεγάλες τιμές οδηγούν σε καθίζηση κολλοειδών στερεών, με επακόλουθο τη δημιουργία συμπαγούς μάζας στον πυθμένα, που απομακρύνεται δύσκολα. Μικρές τιμές οδηγούν σε ανεπιθύμητα μικρή απομάκρυνση στερεών.

Τα οργανικά στερεά συμπυκνώνονται συνήθως στο 5-10%, ενώ τα ανόργανα στο 20-30%.

Για το σχεδιασμό της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης:

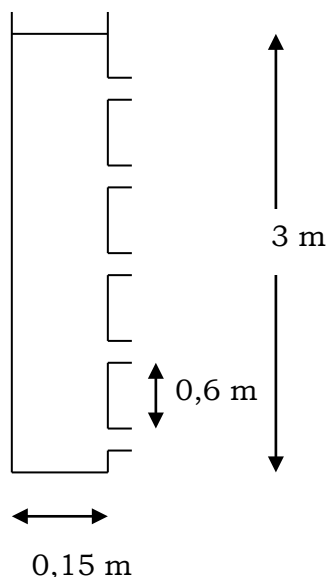
- Γίνεται η επιλογή του ποσοστού απομάκρυνσης για τα αιωρούμενα στερεά. Συνήθως, για αστικά λύματα, επιλέγονται τιμές μεταξύ 50 και 70%. Η επακόλουθη μείωση του BOD_5 είναι της τάξης του 25-40%.
- Για το συγκεκριμένο απόβλητο υπολογίζονται τα συνολικά ποσοστά απομάκρυνσης για διάφορες επιφανειακές φορτίσεις, από πειραματικά δεδομένα και μόνο (σύμφωνα με το Σχήμα 2.2.3). Τα πειράματα αυτά, λόγω του φαινομένου της συσσωμάτωσης, θα πρέπει να έχουν εκτελεστεί σε δοχείο καθίζησης ύψους όσο και της πραγματικής δεξαμενής. Συνηθισμένο ύψος τέτοιων δεξαμενών είναι τα 3 m.
- Από το ίδιο πείραμα, βάσει των διαστάσεων του δοχείου, καταstrώνονται διαγράμματα απομάκρυνσης στερεών και συγκέντρωσης της προκύπτουσας λάσπης συναρτήσει του χρόνου παραμονής. Η συγκέντρωση λάσπης μετράται πειραματικά με δειγματοληψία στον πυθμένα της στήλης καθίζησης.
- Στη συνέχεια, για το επιθυμητό ποσοστό απομάκρυνσης βρίσκεται η απαιτούμενη επιφανειακή φόρτιση. Αν δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα,

επιλέγεται μια επιφανειακή φόρτιση από τη βιβλιογραφία. Συνηθισμένη τιμή σχεδιασμού είναι γύρω στα $40 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$.

- Από αυτήν υπολογίζεται η επιφάνεια της δεξαμενής, βάσει της δεδομένης υδραυλικής παροχής.
- Υπολογίζεται ο χρόνος παραμονής του αποβλήτου στη δεξαμενή είτε από τα πειραματικά δεδομένα, είτε από τη βιβλιογραφία. Στην πράξη λαμβάνεται συνήθως μια τιμή κοντά στις 2 ώρες.
- Αποφασίζεται ο τύπος της δεξαμενής (κυλινδρική ή ορθογώνια) και υπολογίζονται οι διαστάσεις της.
- Υπολογίζονται τα στερεά που απομακρύνονται, από τη συγκέντρωση εισόδου, το ποσοστό απομάκρυνσης και την πυκνότητά τους.

Άσκηση 2.9

Πειραματικά δεδομένα πρωτοβάθμιας καθίζησης αποβλήτου έχουν συλλεχθεί με τη βοήθεια της εικονιζόμενης διάταξης. Το ύψος του κυλίνδρου καθίζησης είναι 3 m. Το απόβλητο περιέχει αρχικά 300 mgSS/L .



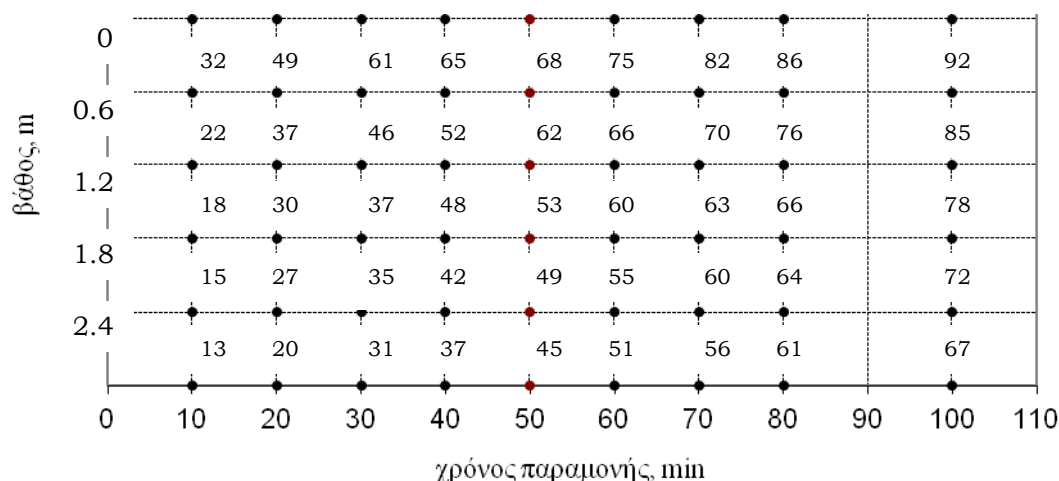
Τα πειραματικά αποτελέσματα στα διάφορα σημεία δειγματοληψίας κατά τις διάφορες χρονικές στιγμές παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί, όπου παρουσιάζονται οι % απομακρύνσεις ως $(1 - X/X_0) \cdot 100$.

Χρόνος, min	0,6 m	1,2 m	1,8 m	2,4 m	3,0 m
10	32	22	18	15	13
20	49	37	30	27	20
30	61	46	37	35	31
40	65	52	48	42	37
50	68	62	53	49	45
60	75	66	60	55	51
70	82	70	63	60	56
80	86	76	66	64	61
100	92	85	78	72	67

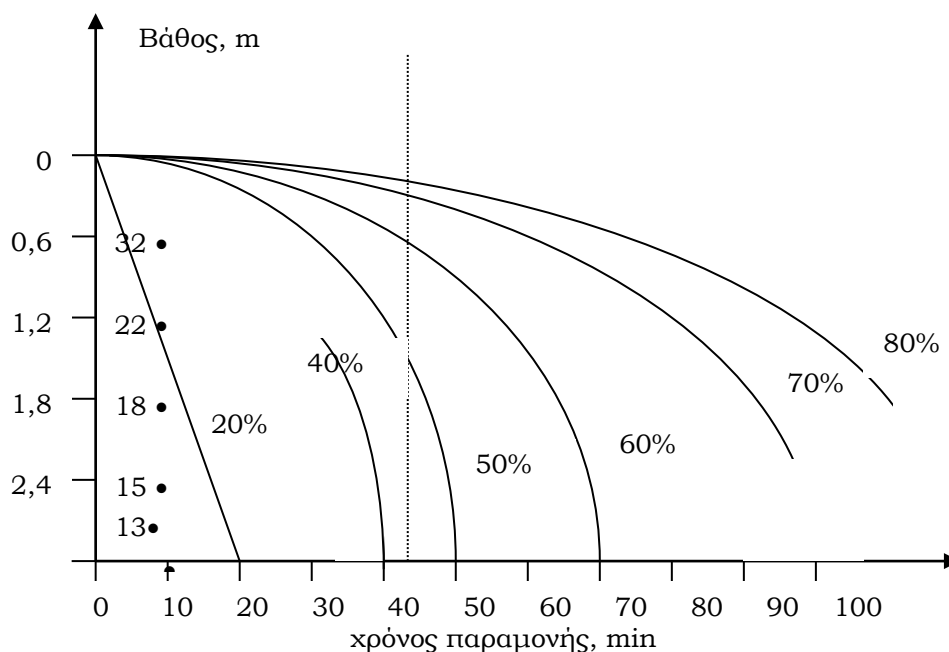
Να κατασκευασθούν τα διαγράμματα απομάκρυνσης στερεών συναρτήσει της επιφανειακής φόρτισης και του χρόνου παραμονής.

Λύση

Με τη βοήθεια αυτού του πίνακα κατασκευάζεται το ακόλουθο διάγραμμα όπου χαράζονται οι «καμπύλες ίσης απομάκρυνσης», ενώνοντας τα σημεία που αντιστοιχούν σε ίση απομάκρυνση για τα διάφορα σημεία δειγματοληψίας, έστω και κατά προσέγγιση.



Οι καμπύλες ίσης απομάκρυνσης (που ξεκινούν όλες από το σημείο [βάθος 0, απομάκρυνση 0]), παρουσιάζονται προσεγγιστικά στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Έστω ότι επιλέγεται βάθος δεξαμενής 3 m και χρόνος παραμονής 44 min. Τότε η επιφανειακή φόρτιση θα είναι

$$v_s = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{V}{H}} = \frac{H}{\frac{V}{Q}} = \frac{H}{\tau} = \frac{3 \text{ m}}{44 \text{ min}} = 98 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{d}$$

Η συνολική απομάκρυνση αιωρουμένων στερεών υπολογίζεται ως εξής:

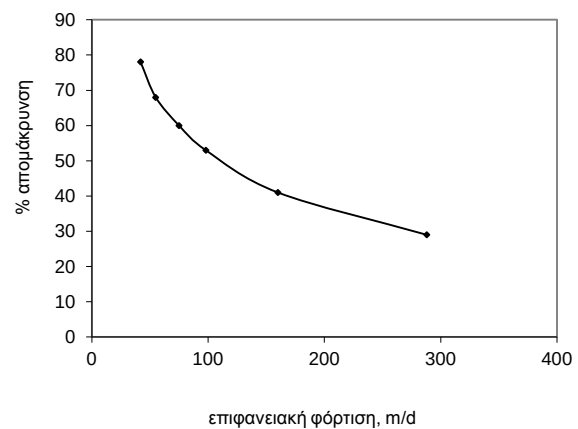
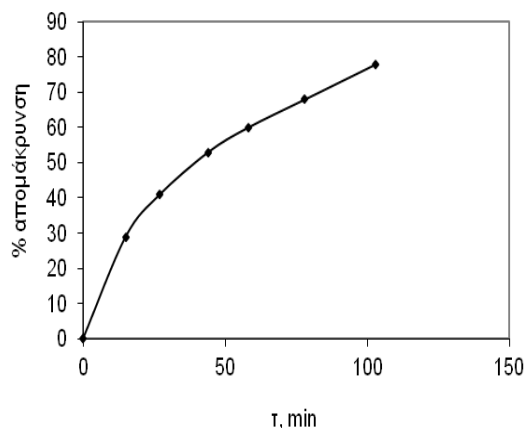
Έχει απομακρυνθεί τελείως το 40% και όσον αφορά τα υπόλοιπα, θα απομακρύνονται ανάλογα με το λόγο $\frac{v}{v_s} = \frac{h}{H}$ όπου h είναι το βάθος καθίζησης και H το βάθος της δεξαμενής. Επιλέγεται το μέσο βάθος για τα διάφορα διαστήματα απομακρύνσεων και το σύνολο υπολογίζεται αθροιστικά:

Διάστημα	Βάθος καθίζησης h, m	Απομάκρυνση, %	
0-40%	3	$(3/3) \times 40 = 40$	
40-50	$(3+1,5)/2 = 2,3$	$(2,3/3) \times 10 = 7,7$	
50-60	$(1,5+0,6)/2 = 1,1$	$(1,1/3) \times 10 = 3,7$	
60-70	$(0,6+0,2)/2 = 0,4$	$(0,4/3) \times 10 = 1,3$	
70-80	$(0,2+0,1)/2 = 0,15$	$(0,15/3) \times 10 = 0,5$	Σύνολο = 53%

Η συνολική απομάκρυνση λοιπών στερεών για χρόνο παραμονής 44 min σε δεξαμενή βάθους 3 m είναι 53%. Για άλλους χρόνους παραμονής (συνεπώς και αντίστοιχες επιφανειακές φορτίσεις εφόσον πρόκειται για την ίδια δεξαμενή) επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία υπολογισμών. Συνοπτικά:

τ , min	v_s , $m^3/m^2/d$	% απομάκρυνση
15	288	29
27	160	41
44	98	53
58	75	60
78	55	68
103	42	78

Με τη βοήθεια του παραπάνω πίνακα κατασκευάζονται τα ακόλουθα διαγράμματα



Άσκηση 2.10

Για το απόβλητο της προηγούμενης άσκησης (Άσκηση 2.9) να σχεδιασθεί δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης για απομάκρυνση αιωρουμένων στερεών κατά 60%, όταν η παροχή είναι $4500 m^3/d$ και η αρχική συγκέντρωση αιωρουμένων είναι $300 mg/L$ (0.3%). Να υπολογισθεί επίσης η παροχή της παραγόμενης λάσπης, πυκνότητας γύρω στο $1 kg/L$ και περιεκτικότητας 4-5% σε στερεά.

Λύση

Από τα διαγράμματα εκτιμούμε ότι απαιτείται χρόνος παραμονής 60 min και επιφανειακή φόρτιση $70 m^3/m^2/d$.

Επιλέγουμε συντελεστή ασφαλείας 1,75, οπότε θα έχουμε:

$$\tau = 60 \cdot 1,75 = 105 \text{ min}$$

$$v_s = \frac{70}{1,75} = 40 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{d}$$

Η επιφάνεια της δεξαμενής θα είναι:

$$A = \frac{Q}{v_s} = \frac{4500 \text{ m}^3 / \text{d}}{40 \text{ m} / \text{d}} = 112,5 \text{ m}^2$$

Αν η δεξαμενή είναι κυλινδρική, θα έχει ακτίνα ίση με:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 6 \text{ m}$$

Ο όγκος της θα είναι:

$$V = Q \cdot \tau = 4500 \text{ m}^3 / \text{d} \cdot \frac{105 \text{ min}}{24 \cdot 60 \text{ min} / \text{d}} = 328 \text{ m}^3$$

(Αν η δεξαμενή είναι κυβική, θα έχει διαστάσεις :

$$d = \sqrt[3]{V} = 10,6 \text{ m}).$$

Επαλήθευση

Το βάθος της δεξαμενής θα είναι:

$$H = \frac{V}{A} = \frac{328}{112} = 3 \text{ m}$$

Η λάσπη που απομακρύνεται θα είναι:

$$0,6 \cdot 300 \text{ mg} / \text{L} \cdot 4500 \text{ m}^3 / \text{d} \cdot 10^{-6} \text{ kg} / \text{mg} \cdot 10^3 \text{ L} / \text{m}^3 = 810 \text{ kg} / \text{d}$$

Για συγκέντρωση λάσπης γύρω στο 4-5% και πυκνότητα γύρω στο 1kg/L θα παράγεται ποσότητα λάσπης ίση με:

$$\frac{810 \text{ kg}_{ss} / \text{d}}{0,045 \text{ kg}_{ss} / \text{kg} \cdot 1 \text{ kg} / \text{L} \cdot 10^3 \text{ L} / \text{m}^3} = 18 \text{ m}^3 / \text{d}$$

Η παροχή αυτή της (υγρής) λάσπης είναι αμελητέα (0,4%) συγκρινόμενη με την παροχή του αποβλήτου. Συνεπώς ο σχεδιασμός της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης με την παραδοχή σταθερής παροχής αποβλήτου ελέγχεται ως ορθός.

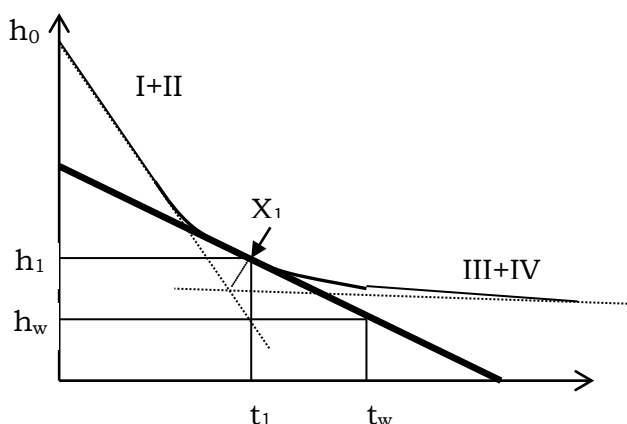
2.2.2.1.2 Σχεδιασμός Δευτεροβάθμιας Καθίζησης

Δεδομένου ότι μία δεξαμενή μπορεί να επιτελεί δυο λειτουργίες (τη διαύγαση του υπερκείμενου υγρού και τη συμπύκνωση της λάσπης σε μία επιθυμητή συγκέντρωση), και οι δυο αυτές λειτουργίες θα πρέπει να συμπεριληφθούν στο σχεδιασμό της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, η οποία αποτελεί σημαντικό μέρος της διεργασίας ενεργού ιλύος. Εδώ επιθυμούμε τόσο το υγρό που υπερχειλίζει να μην περιέχει αιωρούμενα στερεά (διαύγαση), όσο και η συγκέντρωση των οργανικών στερεών (ενεργός ιλύς) να είναι σε προσχεδιασμένη τιμή καθότι αποτελεί βασική σχεδιαστική και λειτουργική παράμετρο για τον έλεγχο ενός βιολογικού καθαρισμού που λειτουργεί με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος.

1^η μέθοδος σχεδιασμού (γραφική μέθοδος)

Δύο ταχύτητες είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό των δεξαμενών αυτών: η αρχική ταχύτητα καθίζησης της λάσπης (επιφανειακή φόρτιση για διαύγαση) και η

ταχύτητα καθίζησης της ζώνης κάτω από τη διαχωριστική επιφάνεια διαυγούς υγρού – λάσπης (επιφανειακή φόρτιση για πύκνωση λάσπης). Αυτές οι δύο ταχύτητες μπορούν να βρεθούν από το Σχήμα 2.2.5, κατά τα ακόλουθα:



Σχήμα 2.2.5. Γραφικός υπολογισμός δεδομένων για δευτεροβάθμια καθίζηση.

Έχουμε βάθος δεξαμενής h_0 και αρχική συγκέντρωση λάσπης X_0 . Επιθυμούμε η συγκέντρωση στην έξοδο (πάχυνση) να είναι X_u . Όταν συμβεί αυτό (σε χρόνο t_w) το ύψος της λάσπης μέσα στη δεξαμενή (η ορατή διεπιφάνεια) θα είναι h_w .

Η αρχική ταχύτητα καθίζησης (επιφανειακή φόρτιση για διαύγαση, $v_{\text{διαύγ.}}$) υπολογίζεται από την κλίση στο σημείο $H=h_0$ (στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού):

$$v_{\text{διαύγ.}} = \left. \frac{dH}{dt} \right|_{t=0} \quad (2.2.11)$$

Η επιφάνεια για διαύγαση θα δίνεται από τη σχέση

$$A_{\text{διαύγ.}} = \frac{Q}{v_{\text{διαύγ.}}} \cdot \frac{H}{H - h_w} \quad (2.2.12)$$

όπου H το βάθος της δεξαμενής καθίζησης

h_w το βάθος που αντιστοιχεί στην επιθυμητή συγκέντρωση εξόδου λάσπης X_u (απαιτούμενη διαδρομή των στερεών $H - h_w$.)

Το βάθος h_w υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h_w = \frac{X_0}{X_u} \cdot H \quad (2.2.13)$$

η οποία είναι ένα ισοζύγιο μάζας στη λάσπη (του τύπου $C_1 V_1 = C_2 V_2$).

Απομένει να υπολογισθεί η επιφάνεια για πάχυνση. Αυτή θα δίνεται από τη σχέση:

$$A_{\text{πάχ.}} = \frac{Q}{v_{\text{πάχ.}}} \quad (2.2.14)$$

Η ταχύτητα πάχυνσης πρέπει να υπολογισθεί. Είναι προφανές ότι θα αντιστοιχεί στην επιθυμητή συγκέντρωση X_u που είναι η συγκέντρωση της λάσπης στον πυθμένα της δεξαμενής.

Αν θεωρήσουμε ότι η ταχύτητα είναι στην ουσία το πηλίκο της απόστασης που θα διανυθεί (τώρα όλη η διαδρομή H , αφού τα στερεά πρέπει να φύγουν από τον πυθμένα της δεξαμενής) προς το χρόνο που απαιτείται (t_w) – και που είναι ακόμη άγνωστος – μπορεί να ορισθεί ως

$$v_{\pi\acute{\alpha}\chi.} = \frac{H}{t_w} \quad (2.2.15)$$

όπου t_w ο χρόνος για να αποκτήσει η λάσπη συγκέντρωση X_u και βρίσκεται ως εξής:

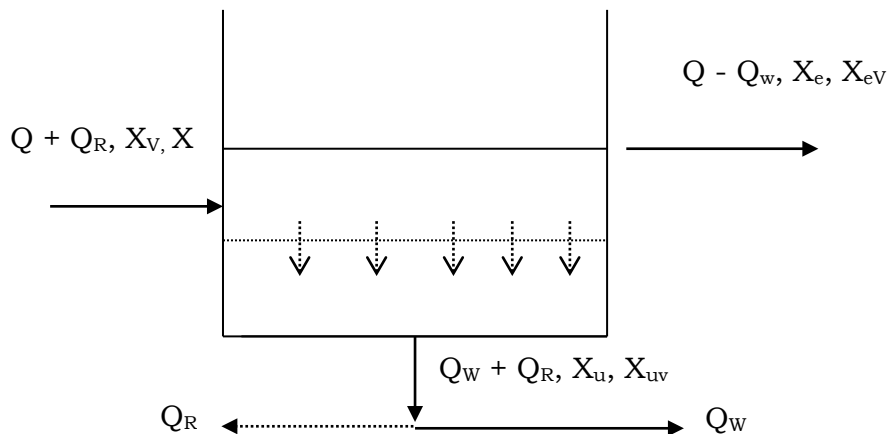
Εκτιμάται καταρχήν η κρίσιμη συγκέντρωση X_1 (που ελέγχει τη λειτουργία της δεξαμενής). Το σημείο X_1 προσδιορίζεται αν επεκτείνουμε τις δύο ακραίες ευθείες καθίζησης – αρχική και τελική – (διακεκομμένες γραμμές) και προεκτείνουμε τη διχοτόμο της γωνίας που σχηματίζεται στο σημείο τομής τους μέχρι την καμπύλη. Η ταχύτητα καθίζησης στο σημείο αυτό θα δίνεται από την εφαπτομένη της καμπύλης στο αντίστοιχο σημείο h_1 (παχιά γραμμή στο Σχήμα 2.2.5).

Από το γνωστό ύψος h_w φέρουμε παράλληλη στον άξονα των χρόνων, η οποία θα τμήσει την εφαπτομένη αυτή και θα ορίσει το χρόνο t_w .

Οι σχέσεις (2.2.13) και (2.2.15) ορίζουν ουσιαστικά την επιφάνεια της ίδιας δεξαμενής. Επιλέγεται λοιπόν η μεγαλύτερη υπολογιζόμενη τιμή, ώστε να ικανοποιείται και η απαίτηση ποιότητας υγρής εκροής και η απαίτηση συγκέντρωσης λάσπης.

2^η μέθοδος σχεδιασμού (υπολογιστική μέθοδος)

Η απαιτούμενη επιφάνεια μπορεί να υπολογισθεί με ανάλυση της μαζικής ροής των αιωρούμενων στερεών. Ας θεωρήσουμε τη δεξαμενή καθίζησης με βάση το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 2.2.6).



Σχήμα 2.2.6. Δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης

Η συνολική ροή στερεών $\dot{M}_A$ ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$), (επιφανειακή μαζική φόρτιση), υπολογίζεται με βάση την παραδοχή ότι είναι το άθροισμα της ροής λόγω βαρύτητας – άρα συνάρτηση της ταχύτητας καθίζησης v_{ps} – και της ροής λόγω απομάστευσης (απομάκρυνσης λάσπης) λόγω της άντλησης από τον πυθμένα.

Θα έχουμε λοιπόν

$$\dot{M}_A = \dot{M}_{A, \text{βαρύτητας}} + \dot{M}_{A, \text{άντλησης}} = v_{ps} \cdot X_i + v \cdot X_i \quad (2.2.16)$$

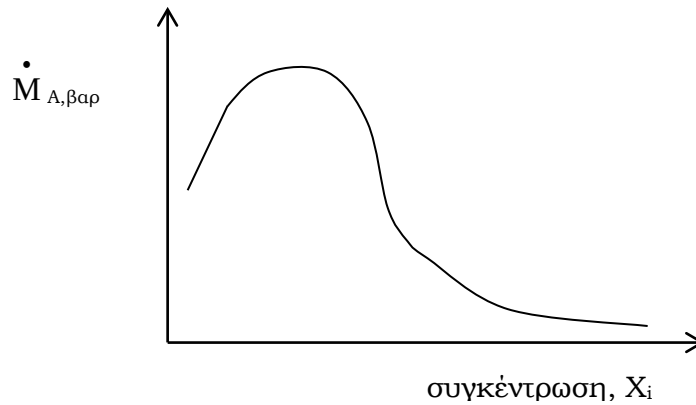
όπου X_i η συγκέντρωση στη διατομή ελέγχου ($X < X_i < X_u$)

v η σταθερή ταχύτητα του αποβλήτου λόγω άντλησης, η οποία ορίζεται από την αντλία απομάκρυνσης λάσπης και είναι:

$$v = \frac{Q_r + Q_w}{A_{\text{πάχυνσης}}} \quad (2.2.17)$$

Στη βιβλιογραφία προτείνονται τιμές για την ταχύτητα άντλησης λάσπης από εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος στην περιοχή $7,1 \times 10^{-3} - 1,4 \times 10^{-2} \text{cm/s}$.

Η ροή λόγω βαρύτητας αναμένεται να εξαρτάται από τη συγκέντρωση των στερεών κατά το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 2.2.7).

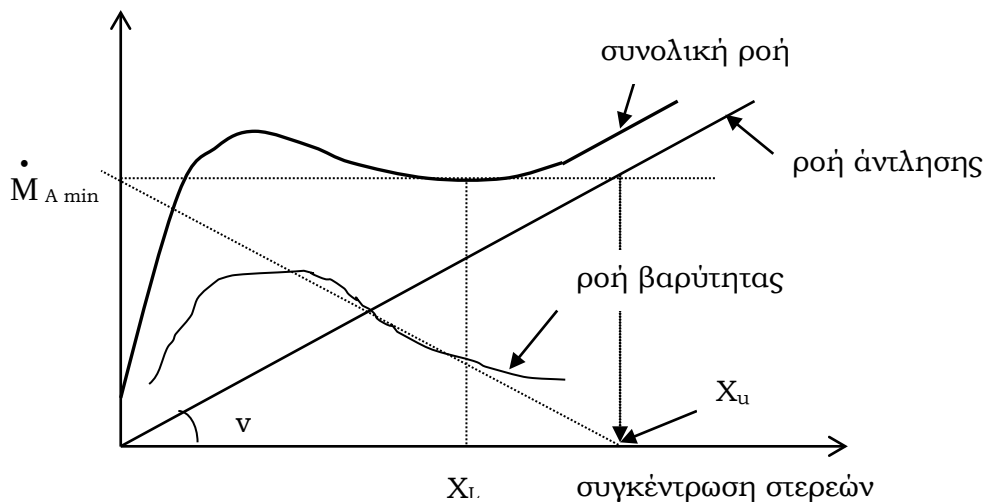


Σχήμα 2.2.7. Εξάρτηση της ροής βαρύτητας από τη συγκέντρωση

Η μορφή αυτή είναι αναμενόμενη, διότι:

- σε μικρές συγκεντρώσεις το γινόμενο (ταχύτητα)×(συγκέντρωση) είναι μικρό,
- στις πολύ μεγάλες είναι επίσης μικρό, αφού η ταχύτητα καθίζησης έχει ελαττωθεί πολύ, λόγω παρεμπόδισης.

Δεδομένα για την κατασκευή διαγράμματος αυτής της μορφής αντλούνται από τις αρχικές κλίσεις διαγραμμάτων (όπως το Σχήμα 2.2.5) για διάφορα X_0 .



Σχήμα 2.2.8. Συνολική ροή στερεών ως συνάρτηση της συγκέντρωσης στερεών

Η ροή λόγω άντλησης έχει γραμμική εξάρτηση από τη συγκέντρωση και η κλίση της μπορεί να μεταβληθεί μέσω της ταχύτητας άντλησης (ρύθμιση της παροχής της αντλίας).

Η συνολική ροή στερεών $\dot{M}_A$ θα έχει λοιπόν τη μορφή του παραπάνω σχήματος (Σχήμα 2.2.8).

Παρατηρείται (λόγω της μορφής της καμπύλης) ένα τοπικό ελάχιστο στη συνολική ροή, έστω $\dot{M}_{A, \min}$. Αυτή είναι και η οριακή τιμή ροής που μπορεί να χειριστεί η δεξαμενή καθίζησης (και θα είναι η παροχή εξόδου. Αν προκύψει ροή μεγαλύτερη από αυτήν, θα συσσωρεύεται). Η ροή αυτή αντιστοιχεί σε συγκέντρωση λάσπης X_u (που βγαίνει από τη δεξαμενή καθίζησης) διότι στον πυθμένα της δεξαμενής, όπου γίνεται η άντληση, η ροή λόγω βαρύτητας είναι μηδενική και έχουμε ροή μόνο λόγω άντλησης.

Μέσω ομοιότητας τριγώνων αποδεικνύεται ότι η εφαπτομένη της καμπύλης της ροής λόγω βαρύτητας που διέρχεται από το σημείο $(X_u, 0)$ τέμνει τον άξονα των τεταγμένων στο σημείο $\dot{M}_{A, \min}$.

Αν τροφοδοτηθούν στη δεξαμενή καθίζησης περισσότερα στερεά, θα αρχίσουν να συσσωρεύονται και, σε κάποια στιγμή, η δεξαμενή θα υπερχειλίσει. Η επιφάνεια της δεξαμενής μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$A = \frac{(Q + Q_r) \cdot X}{\dot{M}_{A, \min}} \quad (2.2.18)$$

Αν απαιτείται συγκέντρωση λάσπης μεγαλύτερη από τη X_u , τότε η νέα τιμή της X_u θα οδηγήσει (μέσω χάραξης της εφαπτομένης) σε νέα – μικρότερη – τιμή της $\dot{M}_{A, \min}$ και από τη (2.2.18) σε νέα – μεγαλύτερη τιμή της επιφάνειας A . Αυτή με τη σειρά της θα οδηγήσει – μέσω της (2.2.17) σε νέα – μικρότερη ταχύτητα άντλησης της λάσπης. Αν, αντί αυτού, μεταβληθεί η ανακύκλωση Q_r , θα έχουμε διατάραξη της λειτουργίας του συνολικού συστήματος, αλλαγή της συγκέντρωσης X της δεξαμενής βιολογικής επεξεργασίας κοκ.

Οι δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης κατασκευάζονται συνήθως κυκλικές, με είσοδο του αποβλήτου στο κέντρο και ροή προς την περιφέρεια, αντίστοιχες των κυκλικών δεξαμενών πρωτοβάθμιας καθίζησης. Οι δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης ονομάζονται και δεξαμενές πάχυνσης (ή παχυντήρες) δεδομένου ότι, αν επικεντρωθούμε στη λάσπη, αυτό που κάνουν είναι να τη συμπυκνώσουν (παχύνουν).

Άσκηση 2.11

Μία παροχή αποβλήτου Q που περιέχει βιολογική λάσπη με συγκέντρωση X , εισέρχεται σε δεξαμενή καθίζησης με σκοπό τη συμπύκνωση της βιολογικής λάσπης σε μία επιθυμητή συγκέντρωση X_u η οποία όμως θα απομακρύνεται, από τον πυθμένα της δεξαμενής, με μία επιθυμητή παροχή Q_w .

Δεδομένα:

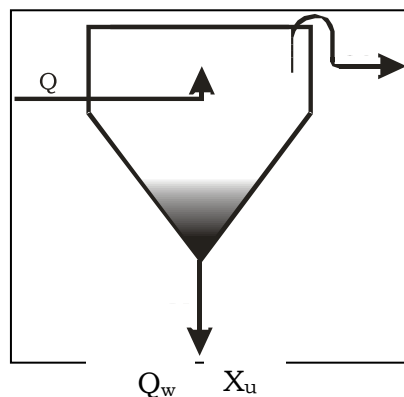
Πίνακας Α

Παροχή αποβλήτου	Q	58	m^3/h
Συγκέντρωση στερεών	X	10	g/L
Παροχή συμπυκνωμένης λάσπης	Q_w	12	m^3/h
Επιθυμητή συγκέντρωση συμπύκνωσης	X_u	35	g/L

Τα τεστ καθιζησιμότητας της βιολογικής λάσπης έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας Β

Συγκέντρωση λάσπης X_i	Ταχύτητα καθίζησης v_i
g/L	m/h
5	1,9753
10	1,069
15	0,5785
20	0,3131
25	0,1694
30	0,0917
35	0,0496
40	0,0269
45	0,0145



Υπολογίστε την επιφάνεια της δεξαμενής και τη συγκέντρωση των αιωρουμένων στην έξοδο (X_e).

Στη συνέχεια, με δεδομένη την επιφάνεια και με δεδομένες τις παροχές του Πίνακα Α, υπολογίστε τη συγκέντρωση X_u ώστε η δεξαμενή να λειτουργεί και σαν διαυγαστήρας.

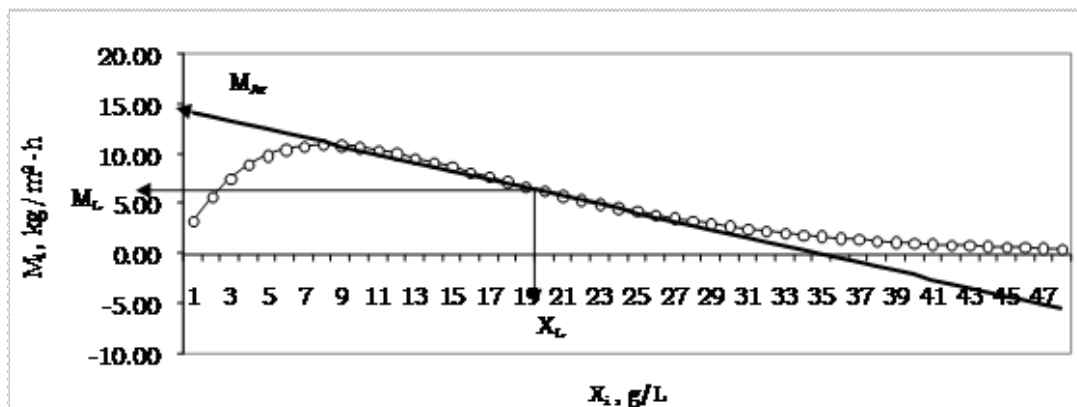
Λύση

Στα δεδομένα του Πίνακα Β προσαρμόζουμε μία καμπύλη της μορφής $v_i = a \cdot \exp(-b \cdot X_i)$. Υπολογίζεται: $a = 3,65 \text{ m/h}$ και $b = 0,1228 \text{ L/g}$. Από τη σχέση αυτή κατασκευάζεται ο Πίνακας Γ και το Διάγραμμα 1 όπου η ροή στερεών λόγω βαρύτητας θα είναι ίση με: $\dot{M}_{Ai} = X_i \cdot v_i$.

Πίνακας Γ

X_i	v_i	$\dot{M}_{Ai}$	X_i	v_i	$\dot{M}_{Ai}$
g/L	m/h	$kg/m^2 \cdot h$	g/L	m/h	$kg/m^2 \cdot h$
1	3,228	3,23	25	0,169	4,24
2	2,855	5,71	26	0,150	3,90
3	2,525	7,58	27	0,133	3,58
4	2,233	8,93	28	0,117	3,28
5	1,975	9,88	29	0,104	3,01
6	1,747	10,48	30	0,092	2,75
7	1,545	10,82	31	0,081	2,51
8	1,367	10,93	32	0,072	2,30
9	1,209	10,88	33	0,063	2,09
10	1,069	10,69	34	0,056	1,91

11	0,945	10,40	35	0,050	1,74
12	0,836	10,03	36	0,044	1,58
13	0,740	9,61	37	0,039	1,44
14	0,654	9,16	38	0,034	1,30
15	0,579	8,68	39	0,030	1,18
16	0,512	8,19	40	0,027	1,07
17	0,453	7,69	41	0,024	0,97
18	0,400	7,20	42	0,021	0,88
19	0,354	6,73	43	0,019	0,80
20	0,313	6,26	44	0,016	0,72
21	0,277	5,82	45	0,015	0,65
22	0,245	5,39	46	0,013	0,59
23	0,217	4,98	47	0,011	0,53
24	0,192	4,60	48	0,010	0,48



Διάγραμμα 1

Δύο τρόποι υπάρχουν για την εύρεση της επιφάνειας της δεξαμενής ώστε η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στη ροή Q_w από τον πυθμένα της δεξαμενής να είναι $X_u = 35 \text{ g/L}$.

Γραφική μέθοδος: Φέρουμε εφαπτόμενη της καμπύλης $\dot{M}_{Ai} = f(X_i)$ ξεκινώντας από τον άξονα των X_i στο σημείο $X_u = 35 \text{ g/L}$ και καταλήγοντας στον άξονα των $\dot{M}_{Ai}$ στο σημείο $\dot{M}_{A,min} = \dot{M}_{Ar}$ ($14,5 \text{ kg/m}^2\text{-h}$, βλέπε Διάγραμμα 1). Η επιφάνεια της δεξαμενής καθιζήσης υπολογίζεται από τη σχέση (2.2.18):

$$A = Q \cdot X / \dot{M}_{Ar} = 58 \cdot 10 / 14,5 = 40 \text{ m}^2$$

Υπολογιστική μέθοδος: Το σημείο επαφής της εφαπτομένης με την καμπύλη έχει συντεταγμένες X_L και $\dot{M}_{AL}$. Στην εφαπτόμενη ανήκουν λοιπόν τα σημεία $(X_u, 0)$,

$(X_L, \dot{M}_{AL})$ (το οποίο ανήκει επίσης και στην καμπύλη $\dot{M}_{Ai}$) και $(0, \dot{M}_{Ar})$. Η κλίση της εφαπτόμενης μπορεί να υπολογιστεί από την παράγωγο της $\dot{M}_{Ai}$ στο σημείο επαφής X_L .

$$\text{κλίση} = \left. \frac{d\dot{M}_{Ai}}{dX} \right|_{X=X_L} = a \cdot \exp(-b \cdot X_L) \cdot (1 - bX_L)$$

Έτσι υπολογίζεται:

$$X_L = \frac{X_u}{2} + \frac{\sqrt{X_u^2 - \frac{4 \cdot X_u}{b}}}{2}$$

και

$$\dot{M}_{Ar} = X_L^2 \cdot a \cdot b \cdot \exp(-b \cdot X_L)$$

Το σημείο $\dot{M}_{Ar} (\dot{M}_A, \min)$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{M}_{Ar} = X_L^2 \cdot a \cdot b \cdot \exp(-b \cdot X_L)$$

Έτσι υπολογίζονται:

$$X_L = 22,11 \text{ g/L}, \dot{M}_{AL} = 5,34 \text{ kg/m}^2\text{-h και } \dot{M}_{Ar} = 14,51 \text{ kg/m}^2\text{-h}$$

Και επομένως πάλι η επιφάνεια της δεξαμενής υπολογίζεται

$$A = 39,98 \text{ m}^2.$$

Η συγκέντρωση εξόδου στο ρεύμα του υγρού θα υπολογιστεί από ισοζύγιο μάζας, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q \cdot X = Q_w \cdot X_u + (Q - Q_w) \cdot X_e$$

από όπου υπολογίζεται

$$X_e = 3,5 \text{ g/L}.$$

Για να λειτουργήσει η δεξαμενή σαν διαυγαστήρας πρέπει $X_e = 0 \text{ g/L}$ δηλαδή όλα τα στερεά να μεταφερθούν στον πυθμένα της δεξαμενής. Δύο τρόποι υπάρχουν για να επιτευχθεί αυτό:

1ος τρόπος: Η δεξαμενή να παραμείνει με την επιφάνεια A που έχει υπολογιστεί αλλά να ελαττωθεί η συγκέντρωση εισαγωγής των στερεών X (σε X') στη ροή Q (εφ' όσον οι ροές Q και Q_w πρέπει να παραμείνουν ίδιες). Στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι σχέσεις:

$$Q \cdot X' = Q_w \cdot X_u$$

και

$$A = \frac{Q \cdot X'}{\dot{M}_{Ar}} = \frac{Q_w \cdot X_u}{\dot{M}_{Ar}},$$

επομένως

$$\frac{X_u'}{\dot{M}_{Ar}} = \frac{A}{Q_w} = \frac{40 \text{ m}^2}{12 \text{ m}^3/\text{h}} = 3,33 \text{ h/m}$$

Με δοκιμή και σφάλμα στο Διάγραμμα 1 βρίσκουμε τα κατάλληλα X_u' και $\dot{M}_{Ar}'$ ώστε το πηλίκό τους να δίνει 3,33. Σ' αυτή την περίπτωση βοηθάει πολύ ο υπολογιστικός τρόπος υπολογισμού του $\dot{M}_{Ar}'$.

Έτσι βρίσκεται $\dot{M}_{Ar}' = 11,68 \text{ kg/m}^2\text{-h}$ και επομένως $X_u' = 38,92 \text{ g/L}$ και εξ' αυτού $X' = 8,02 \text{ g/L}$. *Λογικό να έχει αυξηθεί η συγκέντρωση X_u' ; ΝΑΙ*

2ος τρόπος: Η επιφάνεια της δεξαμενής να μεγαλώσει έτσι ώστε όλα τα στερεά να οδεύσουν στον πυθμένα. Στη περίπτωση αυτή οι ροές Q και Q_w παραμένουν σταθερές καθώς και η συγκέντρωση X εισαγωγής των αιωρούμενων στερεών. Πρέπει να μεταβληθούν καταλλήλως η συγκέντρωση X_u'' και η επιφάνεια της δεξαμενής A' .

Η συγκέντρωση X_u'' υπολογίζεται από το ισοζύγιο μάζας για $X_e=0$. Έτσι

$$X_u'' = X \cdot \frac{Q}{Q_w} = 48,33 \text{ g/L}$$

Υπολογιστικά ή γραφικά εκτιμάται η τιμή του $\dot{M}_{Ar}'' = 6,10 \text{ kg/m}^2\text{-h}$ και από αυτό υπολογίζεται η απαραίτητη ελάχιστη επιφάνεια της δεξαμενής ώστε αυτή να λειτουργεί και ως διαυγαστήρας:

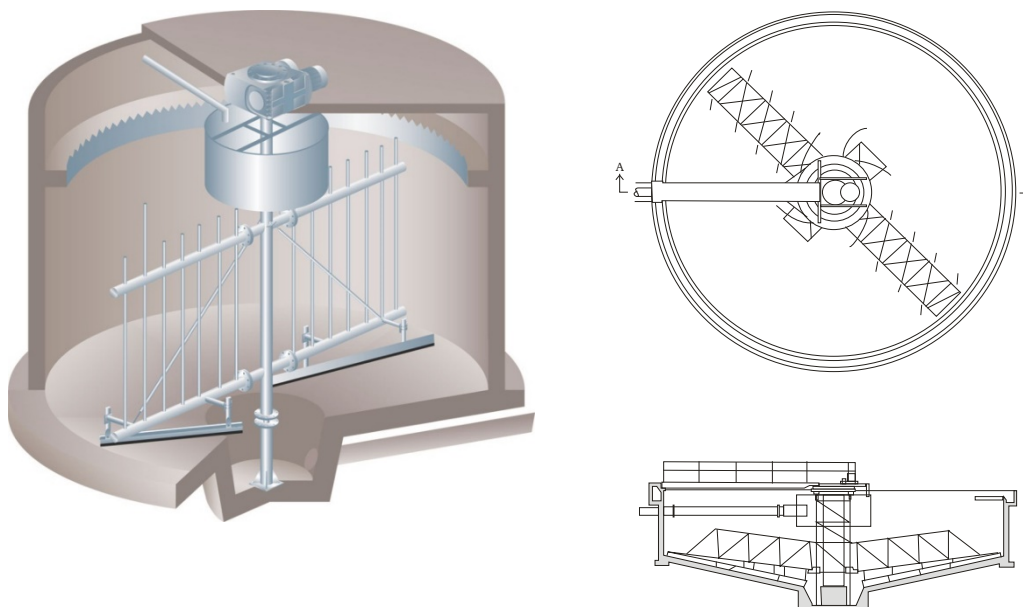
$$A = \frac{Q \cdot X}{\dot{M}_{Ar}''} = 95,05 \text{ m}^2$$

2.2.2.1.3 Σχεδιασμός Πάχυνσης δια βαρύτητας

Η τεχνική της πάχυνσης των λασπών δια βαρύτητας, που εφαρμόζεται από το 1950, ενδείκνυται για πάχυνση είτε πρωτογενών λασπών είτε χημικών λασπών, είτε μίγματος πρωτογενών και δευτερογενών λασπών, αλλά περιορισμένα μόνο για δευτερογενείς λάσπες.

Ένα συνηθισμένο σύστημα πάχυνσης δια βαρύτητας αποτελείται από μία κυκλική δεξαμενή με παράπλευρο βάθος 3 έως 3,7 m. Μεγαλύτερου βάθους δεξαμενές δημιουργούν εύκολα συνθήκες αναερόβιας χώνευσης και επομένως φαινόμενα επίπλευσης λάσπης από το παραγόμενο βιοαέριο. Η κλίση του δαπέδου αυτών των δεξαμενών κυμαίνεται από 2:12 έως 3:12, ανάλογα από τη διάμετρο της δεξαμενής και το βάθος της κλίνης λάσπης που πρέπει να επιτευχθεί, ώστε η συγκέντρωσή της στο σημείο εξαγωγής της να είναι η επιθυμητή.

Η τυπική φόρτιση μιας δεξαμενής πάχυνσης κυμαίνεται από 90 έως 120 $\text{kg/m}^2\text{-d}$ για πρωτογενείς λάσπες και από 19 έως 30 $\text{kg/m}^2\text{-d}$ για δευτερογενείς. Η χρήση πολυηλεκτρολυτών μπορεί να αυξήσει τη φόρτιση. Η δοσολογία εξαρτάται από το είδος του πολυηλεκτρολύτη, για αυτό και η άριστη πρέπει να προσδιορίζεται μετά από εργαστηριακή έρευνα.



Σχήμα 2.2.9. Δεξαμενή πάχυνσης δια βαρύτητας

Για να μπορεί η συμπυκνωμένη λάσπη να «κατρακυλά» εύκολα προς το κέντρο του πυθμένα χωρίς να κολλά στα τοιχώματα, πρέπει η κλίση του πυθμένα να είναι 60°. Αυτό καθίσταται αδύνατο όταν η διάμετρος της δεξαμενής είναι μεγαλύτερη από 4 m, διότι τότε το συνολικό βάθος της δεξαμενής πρέπει να ξεπερνά τα 6m. Γι' αυτό και στην περίπτωση των δεξαμενών μεγάλης διαμέτρου, κατασκευάζεται ένας μικρός κώνος, διαμέτρου από 1 έως 1,5 m και κλίσης 60°, στο κέντρο του πυθμένα και ο υπόλοιπος πυθμένας έχει κλίση από 10 έως 15°. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ένα κατάλληλο ξέστρο, το οποίο θα περιστρέφεται αργά, για να μη δημιουργεί προϋποθέσεις επανανάμιξης της λάσπης που έχει καθιζάνει, και να υποβοηθά τη συλλογή της λάσπης στον κεντρικό κώνο. Το περιστρεφόμενο ξέστρο, συνήθως, φέρει και κάθετες βέργες οι οποίες, καταλλήλως σχεδιασμένες, μπορούν να βελτιώσουν την κροκίδωση της λάσπης. Επίσης το περιστρεφόμενο ξέστρο, παράλληλα, φέρει ειδικό μηχανισμό συλλογής των επιπλεουσάντων (αφρολάσπες) που δημιουργούνται στην υγρή επιφάνειά του παχυντή.

Γενικά οι παχυντές βαρύτητας σχεδιάζονται για ογκομετρική τροφοδοσία από 16 έως 33 m³/m²-d. Όμως η κρίσιμη παράμετρος σχεδιασμού είναι η μαζική φόρτιση του παχυντή βαρύτητας. Τυπικές τιμές μαζικής φόρτισης, για διάφορους τύπους λασπών, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 2.2.3) καθώς επίσης και συγκεντρώσεις πύκνωσης που μπορούν να επιτευχθούν. Από τις τιμές του πίνακα αυτού μπορούν να υπολογιστούν οι σχεδιαστικές παράμετροι για μίγματα λασπών λαμβάνοντας τα δεδομένα αναλογικά της σύστασής τους. Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2.2.4) παρουσιάζονται οι δοσολογίες χημικών προσθέτων για αποτελεσματική συμπύκνωση των λασπών.

Πίνακας 2.2.3. Τυπικές τιμές παραμέτρων σχεδιασμού παχυντών βαρύτητας με μηχανική ανάδευση διαφόρων τύπων λασπών

Τύπος λάσπης	Φόρτιση kg στερεών/m ² -d	Συγκέντρωση TS στην έξοδο του κώνου %
Πρωτογενής	97,6	10
Δευτερογενής	19,5	1,75+100/SVI

Λάσπη βιοφίλτρων	39,0	6
Χημικές λάσπες		
- Alum-phosphate (Al/P = 1,5)	19,5	2,5
- Ferric – phosphate (Fe/P = 1,5)	29,28	4
- CaCO ₃	292,8	30
- Lime-phosphate (απατίτης)	29,28	3
- Mg(OH) ₂	19,5	2

Ο δείκτης SVI (Sludge Volume Index) εκφράζει την ικανότητα ενός αιωρήματος οργανικών στερεών να συμπυκνώνεται με απλή καθίζηση με βαρύτητα επί 30 min (εκτός αν αναφέρεται σαφώς αλλιώς), μετριέται σε κωνικό δοχείο καθίζησης Imhoff και εκφράζεται σε mL/g στερεών.

Πίνακας 2.2.4. Τυπική δοσολογία χημικών προσθέτων για πάχυνση με βαρύτητα

Τύπος λάσπης	Ακατέργαστη λάσπη		Αναερόβια κωνεμένη λάσπη	
	FeCl ₂ mg/L	CaO mg/L	FeCl ₂ mg/L	CaO mg/L
Πρωτογενής	1-2	6-8	1,5-3,5	6-10
Πρωτογενής + βιοφίλτρου	2-3	6-8	1,5-3,5	6-10
Πρωτογενής + δευτερογενής	1,5-2,5	7-9	1,5-4,0	6-12
Δευτερογενής	4-6	-	-	-

Άσκηση 2.12

Μία λάσπη, παροχής 100 m³/d και 1,5 % TS, περιέχει (σε ξηρή βάση) 45% πρωτογενή λάσπη, 23% δευτερογενή λάσπη (SVI 100), CaCO₃ 25% και απατίτη 7%. Χρησιμοποιώντας τα βιβλιογραφικά δεδομένα (Πίνακας 2.2.3), σχεδιάστε εμπειρικά έναν παχυντή βαρύτητας και υπολογίστε την συγκέντρωση στερεών στην απορροή του πυθμένα.

Λύση

Για βάση 100 kg υπολογίζουμε τον παρακάτω πίνακα:

Συστατικό της λάσπης	Ξηρό βάρος kg	Απαραίτητη επιφάνεια m ²	Υγρό Βάρος (στην έξοδο) kg
Πρωτογενής	45	0,461	450
Δευτερογενής	23	1,179	836
CaCO ₃	25	0,085	83,3
απατίτης	7	0,239	233,3
Σύνολο	100	1,964	1602,6

Η ημερήσια μαζική παροχή υπολογίζεται:

$$\dot{M} = (100 \text{ m}^3/\text{d}) \cdot (15 \text{ kg}/\text{m}^3) = 1500 \text{ kg}/\text{d}$$

Η επιφανειακή φόρτιση υπολογίζεται σε $100/1,964 = 50,92 \text{ kg}/\text{m}^2\text{-d}$, επομένως απαιτείται δεξαμενή πάχυνσης επιφάνειας:

$$A = (1500 \text{ kg}/\text{d}) / (50,92 \text{ kg}/\text{m}^2\text{-d}) = 29,46 \text{ m}^2$$

Η συγκέντρωση απορροής υπολογίζεται:

$$TS_{\text{απορροής}} = 100 \text{ kg (ξηρό βάρος)} / 1602,6 \text{ kg (υγρό βάρος)} = 0,062 = 6,2\%$$

Η παροχή στο κάτω μέρος του κώνου υπολογίζεται:

$$Q_{\text{κάτω}} = \frac{1500 \text{ kg}/\text{d}}{0,062 \text{ kg}/\text{m}^3} = 24,2 \text{ m}^3/\text{d}$$

Ενώ η τελική παροχή στο άνω μέρος του κώνου υπολογίζεται:

$$Q_{\text{άνω}} = 100 \text{ m}^3/\text{d} - 24,2 \text{ m}^3/\text{d} = 75,8 \text{ m}^3/\text{d}$$

2.2.2.1.4 Διαχωρισμός αιωρούμενων στερεών με επίπλευση με αέρα

Η επίπλευση είναι μία διεργασία με την οποία στερεά σωματίδια που βρίσκονται σε αιώρηση εντός υγρού προσκολλώνται πάνω σε μικροσκοπικές φυσαλίδες αερίου και έτσι δημιουργούνται ευνοϊκότερες συνθήκες διαχωρισμού των από την υγρή φάση, ανεβαίνοντας στην επιφάνεια του υγρού λόγω ελαττωμένου ειδικού βάρους του διφασικού συστήματος στερεού-αερίου. Τα ανερχόμενα στερεά ενώνονται με άλλα σωματίδια και σχηματίζουν ένα στρώμα μάζας, το οποίο απομακρύνεται μηχανικά.

Οι φυσαλίδες αέρα δημιουργούνται με μία από τις παρακάτω μεθόδους:

1. Εμβολή αέρα καθώς το υγρό βρίσκεται υπό πίεση και ακολούθως εκτόνωση σε ατμοσφαιρική πίεση (Dissolved Air Flotation).
2. Αερισμός σε ατμοσφαιρική πίεση (Induced Air Flotation).
3. Κορεσμός με αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση και ακολούθως εφαρμογή κενού στο υγρό (Vacuum Flotation).

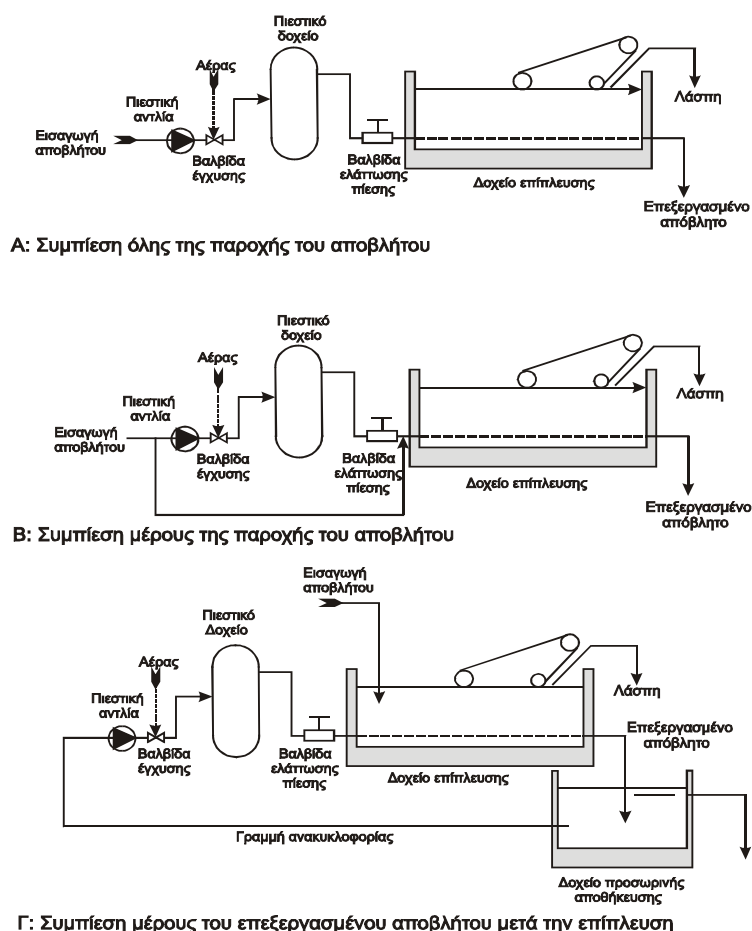
Στη πρώτη μέθοδο (DAF), ο αέρας διαλύεται στα υγρά απόβλητα υπό πίεση έως και 7 atm , και ακολουθεί εκτόνωση σε ατμοσφαιρική πίεση. Όλη η ροή αποβλήτων παραμένει στη δεξαμενή εξισορρόπησης για μερικά λεπτά, προκειμένου να διαλυθεί ο αέρας μέσα σ' αυτή. Η συμπιεσμένη ροή περνά από μία βαλβίδα εκτόνωσης στην δεξαμενή επίπλευσης, όπου ο αέρας που βρίσκεται σε περίσσεια σε ατμοσφαιρική πίεση εξέρχεται με μορφή μικρών φυσαλίδων από τον όγκο του υγρού. Στην περίπτωση αυτή οι σχηματιζόμενες φυσαλίδες είναι περίπου $40 \mu\text{m}$, μικρότερες από το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων.

Υπάρχει περίπτωση να μη συμπιέζεται όλη η ροή λυμάτων αλλά μόνο ένα μέρος της (Σχήμα 2.2.10Α,Β). Επίσης, όταν η επιπλέουσα λάσπη δεν είναι πυκνή και εύκολα διασκορπίζεται, δε συμπιέζεται το κύριο ρεύμα εισόδου, παρά ένα μέρος από τα απόβλητα που εκρέουν από τη μονάδα επίπλευσης, τα οποία ανακυκλώνονται, συμπιέζονται με αέρα και αναμιγνύονται με το κύριο ρεύμα λυμάτων πριν τη δεξαμενή επίπλευσης στο σημείο εκτόνωσης. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων και για πάχυνση της λάσπης (Σχήμα 2.2.10Γ).

Στη δεύτερη μέθοδο (IAF), οι φυσαλίδες σχηματίζονται με την είσοδο της αέριας φάσης απ' ευθείας στην υγρή φάση μέσω συστήματος Venturi. Στην περίπτωση αυτή οι σχηματιζόμενες φυσαλίδες είναι μεγαλύτερες από το μέγεθος των σωματιδίων. Η μέθοδος IAF είναι αποτελεσματικότερη από ότι η μέθοδος DAF για

την απομάκρυνση γαλακτωμάτων ελαίου καθώς και για την απομάκρυνση ινιδίων κυτταρίνης στις διεργασίες επεξεργασίας χαρτιού.

Στην τρίτη μέθοδο, την επίπλευση υπό κενό, τα απόβλητα γίνονται κορεσμένα σε αέρα είτε απ' ευθείας σε δεξαμενή αερισμού, είτε επιτρέποντας στον αέρα να μπει στην αντλία αναρρόφησης των αποβλήτων. Έτσι εφαρμόζεται μερικώς κενό που συντελεί στην έξοδο του αέρα από το υγρό υπό μορφή φυσαλίδων. Οι φυσαλίδες, προσκολλημένες σε σωματίδια, ανεβαίνουν προς την επιφάνεια και δημιουργείται μία μάζα (scum) η οποία απομακρύνεται με ξέστρο. Αυτή η μέθοδος δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά όσο η μέθοδοι DAF και IAF, λόγω προσθέτων δυσκολιών συντήρησης του κενού.



Σχήμα 2.2.10. Συστήματα επίπλευσης με διαλυμένο αέρα (DAF)

Η ανακυκλοφορία σε μία μονάδα DAF μπορεί να φτάσει και στο 100% της παροχής της τροφοδοσίας ενώ η πίεση του αέρα στο πιεστικό δοχείο μπορεί να ανέλθει μέχρι και 6 bar. Η αναλογία αέρα/στερεών κυμαίνεται συνήθως από 0,2 έως 0,4 w/w. Αν χρειαστεί να προστεθεί βοηθητικό κροκίδωσης, όπως πολυηλεκτρολύτες, το καταλληλότερο σημείο είναι το σημείο ανάμιξης της ανακυκλοφορίας με την τροφοδοσία, όπου εκτονώνεται ο αέρας και δημιουργεί φυσαλίδες.

Η αποτελεσματικότητα της επίπλευσης με διαλυμένο αέρα, αν σχεδιαστεί σωστά, μπορεί να φτάσει από 94 έως 99% ως προς την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών. Η επιπλέουσα λάσπη σχηματίζει ένα στρώμα πάχους 150-300 mm και απομακρύνεται με ειδικό περιστρεφόμενο μηχανισμό (επιφανειακό ξέστρο). Εξαιτίας της μερικής αναποτελεσματικότητας της

επίπλευσης, μπορεί, ένα μέρος της λάσπης να καθιζάνει. Επομένως οι μονάδες επίπλευσης με αέρα περιλαμβάνουν και ειδικό ξέστρο δαπέδου ώστε να συλλέγεται και αυτή η λάσπη.

Για να λειτουργεί ικανοποιητικά μία μονάδα επίπλευσης, πρέπει η τροφοδοσία να είναι κατά το δυνατόν σταθερή και η συγκέντρωση της λάσπης να μην υπερβαίνει τα 5.000 mg/L. Αν χρησιμοποιηθούν βοηθητικά κροκίδωσης, τότε τόσο η ογκομετρική φόρτιση όσο και η μαζική φόρτιση μπορούν να αυξηθούν από 50 έως 100%.

Η απορριπτόμενη λάσπη από την επίπλευση περιέχει σημαντικές ποσότητες αέρα, γι' αυτό και έχει φαινομενικά χαμηλή πυκνότητα (700 kg/m³). Αργότερα όμως, που σιγά-σιγά ο αέρας εγκαταλείπει το μίγμα, η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών αποκτά την πραγματική της τιμή. Για πάχυνση με επίπλευση δευτερογενούς λάσπης η συγκέντρωση της λάσπης, μετά την επίπλευση, κυμαίνεται από 3 έως 5%. Η μεγαλύτερη τιμή 5% λαμβάνεται για μία μαζική φόρτιση 1,4 g/m²-s (χωρίς βοηθητικά κροκίδωσης) και για ένα SVI=100 της δευτερογενούς λάσπης. Όσο μικρότερο είναι το SVI αιωρήματος τόσο καλύτερη είναι η ικανότητα καθίζησης δια βαρύτητας του αιωρήματος. Ο δείκτης SVI χρησιμοποιείται για τη γρήγορη εκτίμηση της ενεργότητας μιας μικτής βιολογικής μάζας όπως είναι η ενεργός ιλύς.

Η πυκνότητα της λάσπης μετά από την επίπλευση εξαρτάται από το είδος της λάσπης και από τη μαζική αναλογία αέρα/στερεά όπως φαίνεται στο

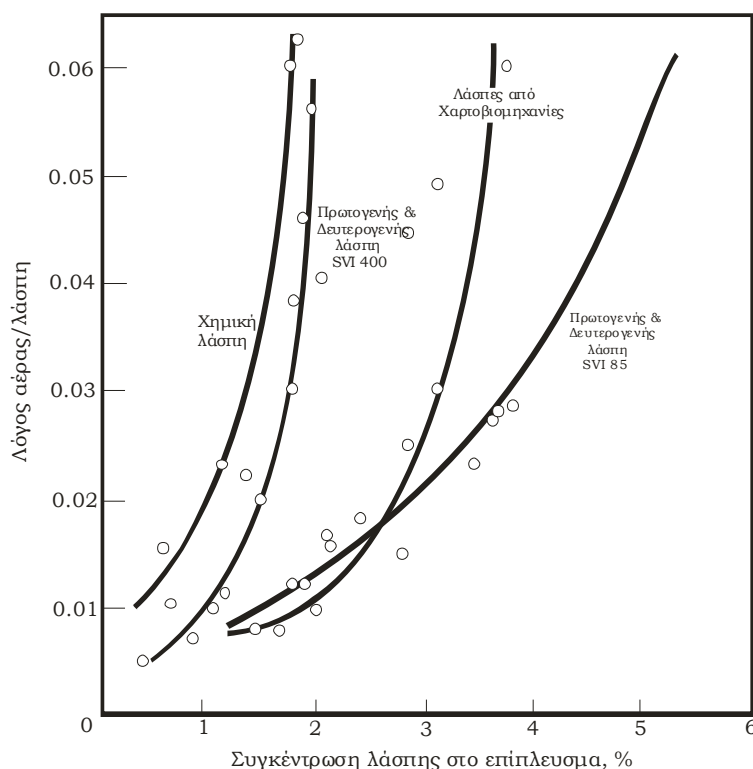
Σχήμα 2.2.11 2.2.11. Επίσης εξαρτάται από το SVI της λάσπης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.12 και τη σχέση:

$$A/S = (0,006-0,00001 \cdot SVI) \cdot \exp[(0,177+0,003365 \cdot SVI) \cdot TSS_e] / 80 \quad (2.2.19)$$

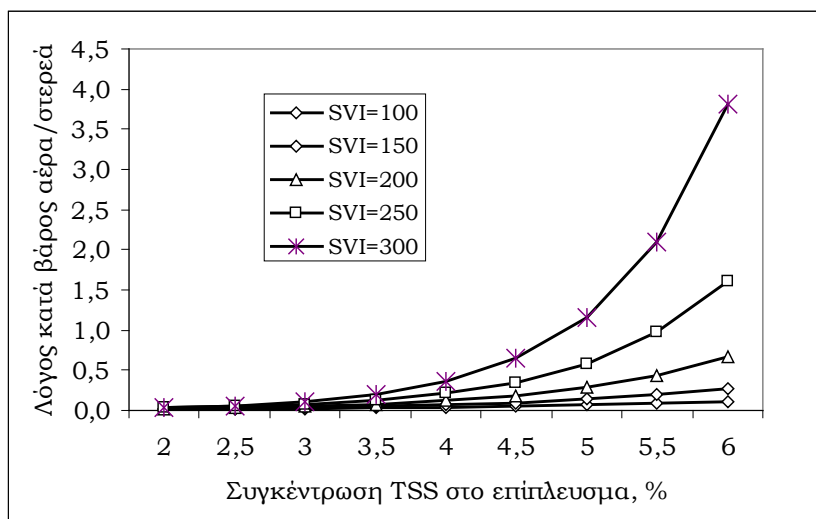
Όπου A/S λόγος βάρους αέρα προς βάρος σωματιδίων

SVI mL/g λάσπης μετά από παραμονή σε καθίζηση Imhoff μιας ώρας

TSS_e % περιεκτικότητα στερεών στην λάσπη που επιπλέει στο DAF



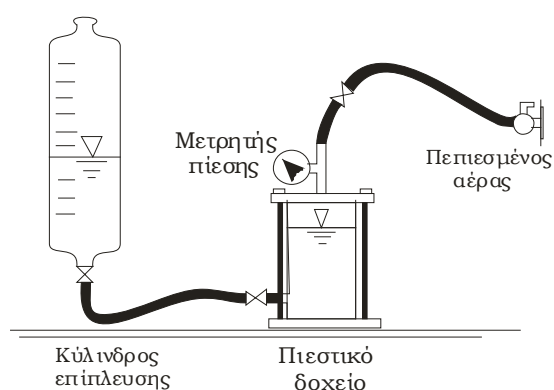
Σχήμα 2.2.11. Σχέση πάχυνσης της λάσπης με το είδος και την κατά βάρος αναλογία αέρα/στερεού



Σχήμα 2.2.12. Λόγος A/S (αέρα/στερεά) κατά βάρος σε σχέση με τον δείκτη SVI της λάσπης και την αποτελεσματικότητα της πύκνωσης

2.2.2.1.5 Σχεδιασμός μονάδας πάχυνσης με επίπλευση διαλυμένου αέρα

Η σημαντικότερη παράμετρος σχεδιασμού για μία μονάδα DAF είναι ο λόγος A/S (αέρα/στερεών) που απαιτείται για την επίπλευση των στερεών ενός υδάτινου αιωρήματος.



Σχήμα 2.2.13. Πειραματική συσκευή υπολογισμού του ελάχιστου ογκομετρικού λόγου αέρα/στερεών ώστε να επιτευχθεί επίπλευση

Η ελάχιστη ογκομετρική αναλογία A/S (αέρα/στερεών) προσδιορίζεται εργαστηριακά με τη συσκευή που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.13. Στον κύλινδρο επίπλευσης τοποθετείται απόβλητο γνωστής περιεκτικότητας σε λάσπη και τροφοδοτείται βαθμιαία με νερό κορεσμένο σε αέρα (στην επιθυμητή πίεση P) που έχει παρασκευαστεί στο πιεστικό δοχείο του σχήματος (Σχήμα 2.2.13). Στο σημείο που παρατηρείται επίπλευση της λάσπης σημειώνεται η ποσότητα του κορεσμένου σε αέρα νερού και υπολογίζεται έτσι η ογκομετρική τροφοδοσία του αέρα.

Για ένα σύστημα επίπλευσης όπου όλη η ποσότητα του αποβλήτου εισάγεται στο σύστημα συμπίεσης με αέρα χωρίς ανακυκλοφορία του εξερχόμενου από το DAF αποβλήτου ισχύει η σχέση:

$$\frac{A}{S} = \frac{1,3 \cdot s_a \cdot (f \cdot p - 1)}{X_p} \quad (2.2.20)$$

Όπου A/S λόγος αέρα προς αιωρούμενα στερεά, mL αέρα/mg στερεών
 s_a διαλυτότητα του αέρα στο νερό, mL/L
 p απόλυτη πίεση λειτουργίας του DAF, atm
 f συντελεστής απόδοσης της ισορροπίας αέρα-νερού στην πίεση

p, συνήθως η τιμή αυτή είναι 0,5

X_p συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών, mg/L

Η διαλυτότητα s_a (mL/L) του αέρα στο νερό εξαρτάται από τη θερμοκρασία $T^{\circ}\text{C}$ και δίδεται από τη σχέση:

$$s_a = 28,642 e^{-0,0206 \cdot T} \quad (2.2.21)$$

Για τα συστήματα DAF, όπου ο διαλυμένος αέρας προέρχεται από την αποσυμπίεση μέρους του αποβλήτου που ανακυκλοφορεί από την έξοδο του DAF (Σχήμα 2.2.10Γ), ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{A}{S} = \frac{1,3 \cdot s_a \cdot (f \cdot p - 1) \cdot Q_r}{X_p \cdot Q_0} \quad (2.2.22)$$

όπου: Q_r παροχή ανακυκλοφορίας επεξεργασμένου αποβλήτου, m^3/d

Q_0 παροχή ακατέργαστου αποβλήτου, m^3/d

Επίσης πρέπει η ογκομετρική φόρτιση του DAF να είναι 11,52 έως 230,4 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ ενώ η μαζική φόρτιση από 43,2 έως 120 $\text{kg}/\text{m}^2\text{-d}$.

Άσκηση 2.13

Υπολογίστε την πίεση λειτουργίας και την επιφάνεια ενός DAF με τα εξής δεδομένα:

Παροχή αποβλήτου: $Q_0 = 240 \text{ m}^3/\text{d}$

Συγκέντρωση σωματιδίων: $X_p = 5 \text{ kg}/\text{m}^3$

Θερμοκρασία: $T = 30^{\circ}\text{C}$

$A/S = 0,008 \text{ mL}/\text{mg}$

Ογκομετρική φόρτιση: $Q_A = 15 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$

Λύση

Υπολογίζουμε τη διαλυτότητα του αέρα στο νερό για $T=30^{\circ}\text{C}$

$$s_a = 28,642 e^{-0,0206 \cdot T} = 15,43 \text{ mL}/\text{L}$$

Από τη σχέση 2.2.20 υπολογίζουμε την απαραίτητη πίεση λειτουργίας:

$$\begin{aligned} \frac{A}{S} &= \frac{1,3 \cdot s_a \cdot (f \cdot p - 1)}{X_p} \Rightarrow \\ p &= \frac{\frac{A}{S} \cdot \frac{X_p}{1,3 \cdot s_a} + 1}{f} = \frac{0,008 \cdot \frac{5000}{1,3 \cdot 15,2} + 1}{0,5} = 6,05 \approx 6 \text{ atm} \end{aligned}$$

Η απαραίτητη επιφάνεια υπολογίζεται:

$$A = Q_0 / Q_A = 240 / 15 = 16 \text{ m}^2$$

Ελέγχουμε ως προς την μαζική φόρτιση: $\dot{M} = (Q_0 X_p) / A = 75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, εντός των ορίων.

2.3 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

2.3.1 Βιολογικές Διεργασίες- Ενεργός ιλύς

Οι βιολογικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, βασίζονται στην ανάπτυξη κατάλληλων μικροοργανισμών σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Οι μικροοργανισμοί αυτοί επιτελούν το σημαντικό έργο της απομάκρυνσης διαφόρων ρύπων από τα υγρά απόβλητα, αξιοποιώντας τους ως υπόστρωμα για την ανάπτυξή τους. Έτσι επιτυγχάνεται ο «καθαρισμός» των αποβλήτων. Οι μικροοργανισμοί παίρνουν θρεπτικά συστατικά από το περιβάλλον τους και αναπτύσσονται παράγοντας περισσότερο κυτταρικό υλικό, καθώς και μεταβολικά προϊόντα. Στη συνολική αυτή "αντίδραση" ανάπτυξης, αν ο αερισμός και η ανάδευση επαρκούν, ο ρυθμός της βιολογικής ανάπτυξης είναι και ο καθοριστικός ρυθμός, χωρίς να υπάρχουν περιορισμοί μεταφοράς μάζας. Ο μηχανισμός της βιολογικής ανάπτυξης είναι εξαιρετικά πολύπλοκος, γι αυτό και τα κινητικά μοντέλα έχουν περιορισμένη ισχύ. Ωστόσο, προκειμένου να μπορέσει να γίνει σχεδιασμός βιοαντιδραστήρων είναι απαραίτητο να ανευρεθούν κάποια κινητικά μοντέλα, συνειδητοποιώντας πάντα τον περιορισμό στην ισχύ τους. Η ιδέα, πάντα, είναι η κατασκευή των απλούστερων, κατά το δυνατόν, μοντέλων που να περιγράφουν αρκετά ικανοποιητικά την πραγματικότητα.

Το πιο απλό μοντέλο, το οποίο όμως επαρκεί για το σχεδιασμό των βιολογικών διεργασιών περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος είναι το μοντέλο Monod. Ο ρυθμός ανάπτυξης δίνεται από τη σχέση:

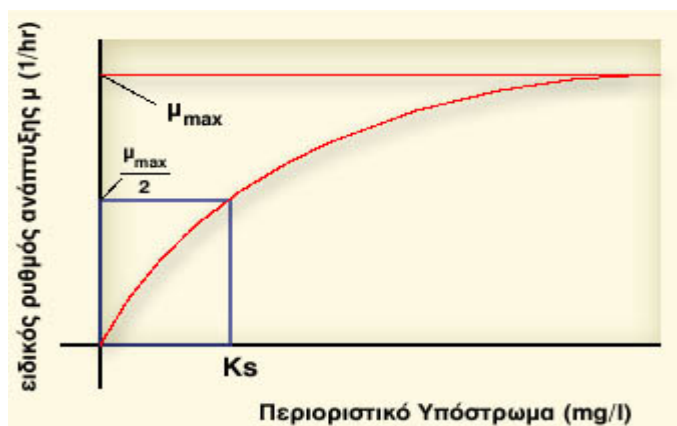
$$r_{\text{ανάπτυξης}} = \mu \cdot X \quad (2.3.1)$$

όπου X η συγκέντρωση μικροοργανισμών σε g/L κυτταρικής μάζας και μ ο ειδικός ρυθμός μικροβιακής ανάπτυξης (microbial specific growth rate) με μονάδες αντίστροφου χρόνου. Σύμφωνα με το μοντέλο Monod το μ δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} \quad (2.3.2)$$

όπου S περιοριστικό υπόστρωμα, συνήθως η πηγή άνθρακα (mg/L)
 K_s σταθερά κορεσμού (mg/L) (ίση με τη συγκέντρωση του υποστρώματος στην οποία ο ρυθμός ανάπτυξης είναι ίσος με το ήμισυ του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης)
 $\mu_{\max}$ μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης (σε μονάδες αντίστροφου χρόνου)

Η εξάρτηση του ειδικού ρυθμού ανάπτυξης από τη συγκέντρωση του περιοριστικού υποστρώματος δίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.3.1.

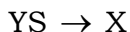


Σχήμα 2.3.1. Κινητική Monod

Συχνά μεγάλες συγκεντρώσεις υποστρώματος παρεμποδίζουν την ανάπτυξη. Ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψη αυτό το φαινόμενο, είναι το μοντέλο παρεμπόδισης υποστρώματος:

$$\mu = \frac{\mu_{\max}}{1 + \frac{K_m}{S} + \frac{S}{K_I}} \quad (2.3.3)$$

Συνήθως, θεωρούμε ότι το περιοριστικό υπόστρωμα βρίσκεται σε σταθερή στοιχειομετρική σχέση με τη βιομάζα:



Άρα ο ειδικός ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος δίνεται από τη σχέση:

$$r_s = -\frac{1}{Y} r_{X, \text{ανάπτυξης}} \quad (2.3.4)$$

όπου, Y είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας σε

$$\frac{\text{mg κυττάρων που παράγονται}}{\text{mg περ. υποστρώματος που καταναλώνεται}}$$

Ο ρυθμός αποδόμησης της βιομάζας εξαιτίας ενδογενούς αναπνοής, συνήθως θεωρείται ανάλογος της συγκέντρωσης της βιομάζας:

$$r_d = -k_d \cdot X \quad (2.3.5)$$

Έτσι, για τις δύο συνηθισμένες μεταβλητές των κινητικών μοντέλων S και X, οι ρυθμοί μεταβολής παίρνουν συνήθως την μορφή:

$$r_x = \mu(S) \cdot X - k_d \cdot X \quad (2.3.6)$$

$$r_s = -\frac{\mu(S) \cdot X}{Y} \quad (2.3.7)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός ανάπτυξης εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία και το pH. Παρουσιάζει βέλτιστα και ως προς τις δύο αυτές μεταβλητές.

Η συγκέντρωση των οργανικών ενώσεων μετράται με κάποια γενικευμένη παράμετρο (COD ή BOD₅ ή TOC). Επειδή η σχέση αυτών των μεγεθών μεταξύ τους είναι διαφορετική μεταξύ εισόδου και εξόδου του βιοαντιδραστήρα, *οι ίδιες κινητικές σταθερές θα έχουν διαφορετική τιμή, ανάλογα με τις μονάδες στις οποίες εκφράζονται.*

Ο ρυθμός της διεργασίας μπορεί να εξαρτάται και από (ή μόνον από) τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, όταν έχουμε περίσσεια του οργανικού υποστρώματος, οπότε το διαλυμένο οξυγόνο είναι το περιοριστικό συστατικό.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα ισοζύγια μάζας των συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων βιοαντιδραστήρων υποθέτοντας κινητική Monod.

(α). Αντιδραστήρας Διαλείποντος Έργου.

Τα ισοζύγια για τη βιομάζα και το υπόστρωμα παίρνουν την μορφή:

$$\frac{dX}{dt} = \mu(S)X - k_d X \quad (2.3.8)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu(S)X}{Y} \quad (2.3.9)$$

Υποθέτοντας κινητική Monod:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X - k_d X \quad (2.3.10)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X \quad (2.3.11)$$

Οι εξισώσεις (2.3.10) και (2.3.11) επιλύονται αριθμητικά με αρχικές συνθήκες:

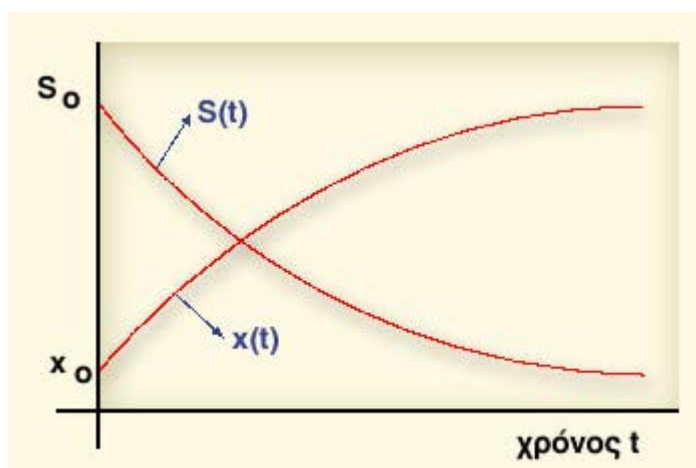
$$X(0) = X_0$$

$$S(0) = S_0$$

Η λύση δίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.3.2.

Αν αγνοηθεί η ενδογενής αναπνοή έχουμε:

$$\frac{d}{dt}(Y \cdot S + X) = 0 \Rightarrow YS + X = S_0 Y + X_0 \Rightarrow X = X_0 + Y(S_0 - S) \quad (2.3.12)$$



Σχήμα 2.3.2. Συγκεντρώσεις βιομάζας (x) και υποστρώματος (S) για αντιδραστήρα διαλείποντος έργου

Αντικαθιστώντας ως προς x στην δεύτερη εξίσωση έχουμε:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} (X_0 + Y \cdot (S_0 - S)) \quad (2.3.13)$$

Η σχέση αυτή μπορεί να ολοκληρωθεί αναλυτικά. Έτσι έχουμε:

$$\ln S = \ln \left[S_0 + Y(S_0 - S) \frac{S_0}{X_0} \right] + \left(\frac{X_0 + YS_0}{Y K_s} \right) \ln \left[\frac{X_0 + Y(S_0 - S)}{X_0} \right] - \mu_{\max} t \frac{[X_0 + YS_0]}{Y K_s} \quad (2.3.14)$$

και

$$\ln X = \mu_{\max} t + \ln X_0 - \left(\frac{YK_s}{X_0 + YS_0} \right) \ln \left[\left(\frac{X}{X_0} \right) \left(\frac{YS_0}{YS_0 + X_0 - X} \right) \right] \quad (2.3.15)$$

Η σχέση (2.3.15) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ευρεθεί ο απαιτούμενος χρόνος για να μειωθεί το υπόστρωμα σε κάποια επιθυμητή τιμή.

(β). Αντιδραστήρας Συνεχούς Λειτουργίας (CSTR).

Τα ισοζύγια μάζας σ' αυτή την περίπτωση είναι:

$$V \frac{dS}{dt} = Q_0 S_0 - Q_0 S - \frac{1}{Y} \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X \cdot V \quad (2.3.16)$$

$$V \frac{dX}{dt} = Q_0 X_0 - Q_0 X + \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X \cdot V - k_d X \cdot V \quad (2.3.17)$$

όπου S_0 και X_0 οι συγκεντρώσεις στην τροφοδοσία.

Διαιρώντας με τον όγκο V τις παραπάνω σχέσεις και ορίζοντας τον ρυθμό

αραίωσης: $D = \frac{Q_0}{V} = \frac{1}{\theta}$ (dilution rate, αντίστροφος του χρόνου παραμονής θ), για

μόνιμη κατάσταση ($\frac{dS}{dt} = \frac{dX}{dt} = 0$) έχουμε:

$$D(S_0 - S) - \frac{1}{Y} \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X = 0 \quad (2.3.18)$$

$$D(X_0 - X) + \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X - k_d X = 0 \quad (2.3.19)$$

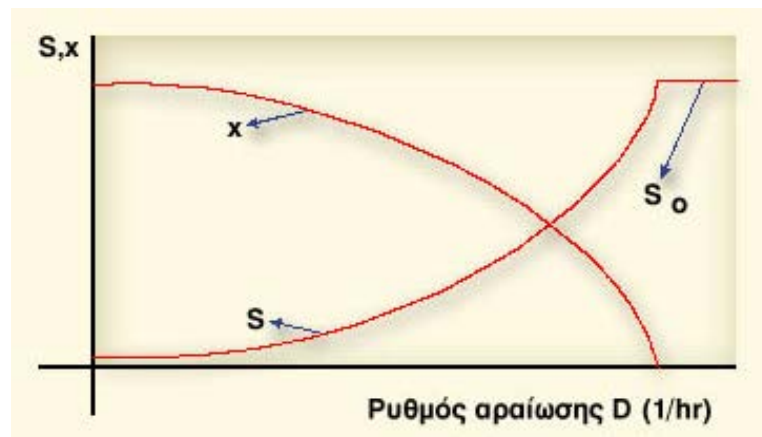
Αν δεν περιέχονται οργανισμοί στην τροφοδοσία ($X_0=0$) έχουμε:

$$D = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} - k_d \Rightarrow S = \frac{(D + k_d) K_s}{\mu_{\max} - (D + k_d)} \quad (2.3.20)$$

Όταν ο ρυθμός αραίωσης είναι πολύ μεγάλος, φτάνει στην οριακή τιμή D_w (ρυθμός αραίωσης έκπλυσης), όπου οι οργανισμοί δεν μπορούν να αναπτυχθούν στον αντιδραστήρα μιας και αφαιρούνται με ρυθμό μεγαλύτερο απ' ό,τι μπορούν

να αναπτυχθούν. Τότε ισχύει $D_w = \frac{\mu_{\max} S_0}{K_s + S_0} - k_d$. Η εξάρτηση των συγκεντρώσεων

της βιομάζας και του υποστρώματος από τον ρυθμό αραίωσης δίνονται σχηματικά στο Σχήμα 2.3.3.



Σχήμα 2.3.3. Συγκεντρώσεις υποστρώματος και βιομάζας για αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας

Άσκηση 2.14

Προσδιορίστε το ρυθμό αραίωσης που μεγιστοποιεί την παραγωγικότητα βιομάζας ανά μονάδα όγκου και χρόνου, υποθέτοντας κινητική Monod.

Λύση

Τα ισοζύγια μάζας για συνεχή αντιδραστήρα τύπου CSTR (Σχέσεις 2.3.16-17), υποθέτοντας κινητική Monod, αμελητέα ενδογενή αναπνοή και $X_0=0$ είναι:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_{\max} \cdot S}{K_s + S} \cdot X - D \cdot X$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y} \cdot \frac{\mu_{\max} \cdot S \cdot X}{K_s + S} + D \cdot (S_0 - S)$$

Η μόνιμη κατάσταση που αντιστοιχεί σε ύπαρξη βιομάζας στον αντιδραστήρα, ευρίσκεται θέτοντας τις παραγώγους ως προς χρόνο (συσσώρευση) ίσες με 0, και επιλύοντας για $X \neq 0$ τις δύο εξισώσεις που προκύπτουν, οπότε λαμβάνεται:

$$S = \frac{D \cdot K_s}{\mu_{\max} - D}$$

$$X = Y \cdot \left(S_0 - \frac{D \cdot K_s}{\mu_{\max} - D} \right)$$

Η παραγωγικότητα της βιομάζας ανά μονάδα όγκου και χρόνου δίνεται από το γινόμενο του ρυθμού αραίωσης επί τη συγκέντρωση της βιομάζας ($\Pi = D \cdot X$), και επομένως είναι:

$$\Pi = D \cdot X = D \cdot Y \cdot \left(S_0 - \frac{D \cdot K_s}{\mu_{\max} - D} \right)$$

Παραγωγίζοντας ως προς D , και θέτοντας την παράγωγο ίση με 0, επιλύουμε τη σχέση που προκύπτει ως προς D , και ευρίσκουμε ότι ο ρυθμός αραίωσης που μεγιστοποιεί την παραγωγικότητα της βιομάζας είναι:

$$D_{\text{opt}} = \mu_{\max} \left(1 - \sqrt{\frac{K_s}{K_s + S_0}} \right)$$

2.3.1.1 Ορισμοί

Στο βιολογικό καθαρισμό συχνά χρησιμοποιούνται διάφορες παράμετροι που ορίζονται συναρτήσει των κινητικών παραμέτρων $\mu_{\max}$, K_s , Y και k_d . Έτσι ορίζονται:

- (α) Ρυθμός χρήσης υποστρώματος:

$$r_{su} = -\frac{1}{Y} \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X = D \cdot (S - S_0) \quad (2.3.21)$$

για αναδευόμενο αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας (CSTR).

- (β) Ειδικός ρυθμός χρήσης υποστρώματος (ανά g βιομάζας):

$$U = \frac{D(S_0 - S)}{X} \quad (2.3.22)$$

- (γ) Παρατηρούμενη απόδοση:

$$Y_{\text{obs}} = \frac{YU - k_d}{U} = \frac{DY}{D + k_d} \quad (2.3.23)$$

- (δ) Λόγος τροφής/μικροοργανισμών:

$$F/M = \frac{DS_0}{X} \quad (2.3.24)$$

(ε) Αποδοτικότητα διεργασίας:

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \quad (2.3.25)$$

Προσδιορισμός Κινητικών Παραμέτρων

Τυπικά ο προσδιορισμός των παραμέτρων των βιολογικών διεργασιών γίνεται με αντιδραστήρες συνεχούς ροής. Μετρώντας για διάφορους ρυθμούς αραίωσης D , τα S και X , έχουμε:

$$D(S_0 - S) = \frac{1}{Y} \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X \Rightarrow \frac{X}{D(S_0 - S)Y} = \frac{K_s}{\mu_{\max}} \frac{1}{S} + \frac{1}{\mu_{\max}} \quad (2.3.26)$$

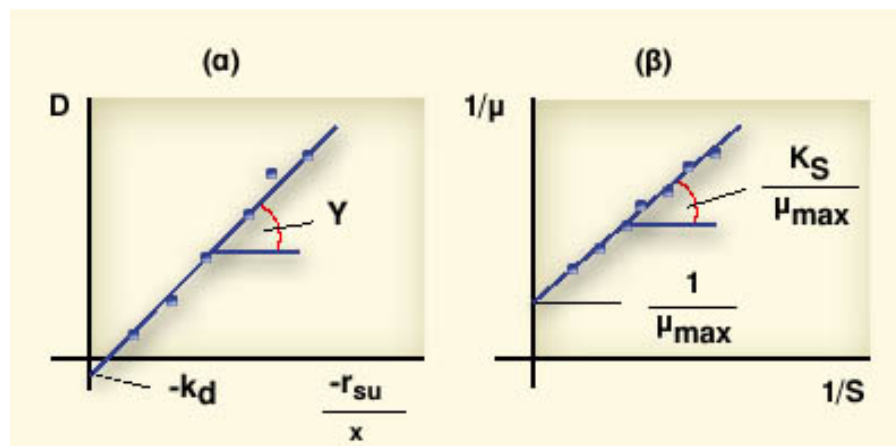
Επίσης έχουμε:

$$D = -\frac{Y r_{su}}{X} - k_d = YU - k_d \quad (2.3.27)$$

Κατασκευάζοντας τα διαγράμματα D ως προς U και $\frac{X}{D(S_0 - S)Y}$ ως προς $\frac{1}{S}$,

παίρνουμε δύο ευθείες που μας επιτρέπουν σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.3.27) και (2.3.26) τον προσδιορισμό των παραμέτρων (Σχήμα 2.3.4). Από το Σχήμα 2.3.4α προσδιορίζονται τα Y και k_d . Το Σχήμα 2.3.4β (διάγραμμα Lineweaver-Burk) δίνει τα K_s και $\mu_{\max}$.

Σημείωση: η συγκέντρωση των μικροοργανισμών X θεωρείται ανάλογη της συγκέντρωσης των πτητικών αιωρούμενων στερεών, το δε υπόστρωμα (πηγή άνθρακα) όταν πρόκειται για απόβλητα είναι το διαλυτό κλάσμα του BOD_5 ή COD.



Σχήμα 2.3.4. Προσδιορισμός κινητικών παραμέτρων ανάπτυξης

Η σχέση των σταθερών αυτών με τη θερμοκρασία δίνεται ως:

$$\mu_{\max} = \mu_{\max_0} \cdot c_1^{(T-T_0)} \quad (2.3.28a)$$

$$K_s = k_{s0} \cdot c_2^{(T_0-T)} \quad (2.3.28b)$$

$$k_d = k_{d0} \cdot c_3^{(T-T_0)} \quad (2.3.28c)$$

όπου: $\mu_{\max 0} = \mu_{\max}$ στη θερμοκρασία αναφοράς T_0 (συνήθως 20 °C)
 $K_{S0} = K_S$ στη θερμοκρασία αναφοράς T_0 (συνήθως 20 °C)
 $k_d = k_{d0}$ στη θερμοκρασία αναφοράς T_0 (συνήθως 20 °C)
 T θερμοκρασία λειτουργίας, °C
 $c_{1,2,3}$ σταθερές

Η εμπειρία υποδεικνύει ότι το Y είναι ανεξάρτητο της θερμοκρασίας, τα k_d και $\mu_{\max}$ διπλασιάζονται για άνοδο κάθε 10°C (τόσο στις αερόβιες όσο και στις αναερόβιες διεργασίες) ενώ το K_S υποδιπλασιάζεται για άνοδο κάθε 10°C για αναερόβιες διεργασίες ενώ για αερόβιες διπλασιάζεται για άνοδο κάθε 10°C.

Άσκηση 2.15

Βρείτε τις τιμές των συντελεστών $\mu_{\max}$, K_S , Y και k_d από τα εξής δεδομένα σε αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας τροφοδοτούμενο με $S_0=300$ mg/L (BOD₅).

	$D(d^{-1})$	$S(mg/L)$ - BOD ₅	$X(mg/L)$ - Π.Α.Σ.
1	0,03125	7	128
2	0,5	13	125
3	0,625	18	133
4	0,909	30	129
5	0,909	41	121

Λύση

Κατασκευάζουμε τον εξής Πίνακα:

	$D(d^{-1})$	$D(S_0-S)/X(d^{-1})$
1	0,3125	0,715
2	0,500	1,156
3	0,625	1,325
4	0,909	1,901
5	0,909	1,946

Από το διάγραμμα τύπου (2.3.4α) βρίσκουμε $Y=0,5$ και $k_d=0,05$. Στη συνέχεια κατασκευάζουμε τον Πίνακα:

	$\frac{X}{D(S_0 - S)Y} (d)$	$\frac{1}{S} \left(\frac{mg}{l} \right)^{-1}$
1	2,796	0,143
2	1,630	0,077
3	1,510	0,056
4	1,052	0,033
5	1,028	0,024

Από το Σχήμα 2.3.4β βρίσκουμε

$$\mu_{\max} = \frac{1}{0.64} = 1,563 \text{d}^{-1} \quad , \quad \frac{K_s}{\mu_{\max}} = 15,384 \Rightarrow K_s = 1.563 \times 15,384 = 24 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

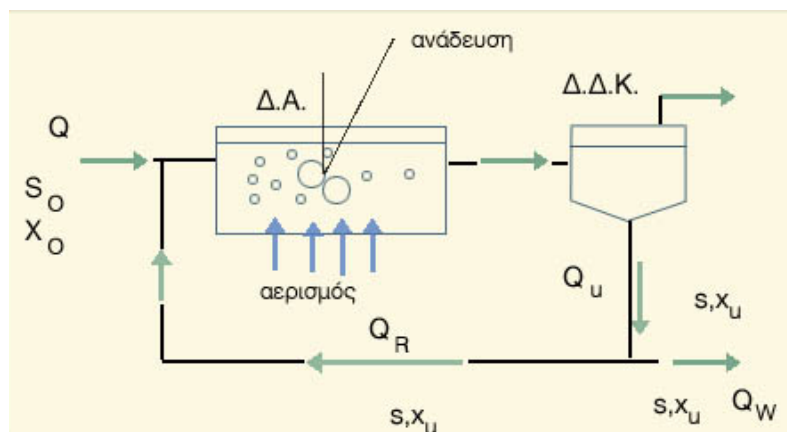
Άρα βλέπουμε πως, μετρώντας τα πιητικά αιωρούμενα στερεά και το BOD₅, για διάφορους ρυθμούς αραιώσης, μπορούμε να προσδιορίσουμε όλες τις κινητικές παραμέτρους. Έχοντας γνώση της κινητικής της μικροβιακής ανάπτυξης μπορούμε πλέον να μελετήσουμε το σχεδιασμό δευτεροβάθμιας επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων.

2.3.1.2 Γενική Περιγραφή Διεργασίας Ενεργού Ιλύος

Η διεργασία της ενεργού ιλύος (ή δραστικής λάσπης, activated sludge) τυπικά περιλαμβάνει μια δεξαμενή αερισμού (ΔΑ) όπου γίνεται και η βιολογική οξείδωση των οργανικών και μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (ΔΔΚ) όπου καθιζάνουν οι μικροοργανισμοί (Σχήμα 2.3.5).

Η διεργασία της ενεργού ιλύος αναπτύχθηκε το 1914 στην Αγγλία, από τους Arden και Lockett. Τα οργανικά λύματα εισέρχονται στην δεξαμενή αερισμού, όπου οξειδώνονται από μικροοργανισμούς. Το οξυγόνο παρέχεται είτε με διαχυτήρες είτε με επιφανειακούς αεριστήρες. Η παροχή αερισμού εξασφαλίζει και την καλή ανάμιξη του υγρού που ονομάζεται ανάμικτο υγρό (mixed liquor). Η βιολογική οξείδωση οδηγεί σε ανάπτυξη μικροοργανισμών (αφομοίωση), που συνοδεύεται από παραγωγή μεταβολικών προϊόντων, CO₂, NO₃⁻ και SO₄²⁻.

Τα κυριότερα είδη μικροοργανισμών σε μία διεργασία ενεργού ιλύος είναι βακτήρια όπως *Pseudomonas*, *Zoogloea*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Bdellovibrio*, *Mycobacterium*, *Nitrosomonas* και *Nitrobacter*, αλλά και μύκητες νηματώδους μορφής όπως οι *Sphaerotilus*, *Beggiatoa*, *Thothrix*, *Lecicothrix* και *Geotrichum*. Οι μικροοργανισμοί παράγουν λιποπολυσακχαρίτες και άλλες ουσίες που προκαλούν τη συσσωμάτωσή τους σε κροκίδες (flocs) που αποτελούν την ενεργό ιλύ. Η παρουσία των μυκήτων καθώς και νηματοειδών βακτηρίων επηρεάζει τα χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης δυσμενώς, μιας και εμποδίζουν τον σχηματισμό κροκίδων με ικανοποιητικά χαρακτηριστικά καθίζησης.



Σχήμα 2.3.5. Διεργασία ενεργού ιλύος με δεξαμενή αερισμού, δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης και ανακυκλοφορία ιλύος.

Η ιλύς αυτή απορροφά τα διαλυμένα και αιωρούμενα οργανικά (και ανόργανα) στερεά τα οποία και οξειδώνει βιολογικά. Τα συσσωματώματα (flocs) μικροοργανισμών συγκρατούνται μεταξύ τους με τη βοήθεια μιας διακυτταρικής πηκτής (gel). Τόσο το διαλυμένο οξυγόνο, όσο και οι οργανικές ενώσεις (υπόστρωμα, substrate) διαχέονται μέσα στην πηκτή αυτή, φθάνουν στους

μεμονωμένους μικροοργανισμούς, διαπερνούν το κυτταρικό τοίχωμα, μεταβολίζονται, και τα προϊόντα του μεταβολισμού (αέρια και νερό) διαχέονται έξω από την πηκτή προς το περιβάλλον. Ταυτόχρονα, οι νέοι μικροοργανισμοί που παράγονται προστίθενται στην κυτταρική μάζα. Τα συσσωματώματα αυτά διατηρούνται σε αιώρηση μέσα στο βιοαντιδραστήρα με τη βοήθεια εξωτερικής (μηχανικής) ανάδευσης, η οποία ταυτοχρόνως εξασφαλίζει και το απαιτούμενο οξυγόνο, μέσω μεταφοράς του στη διεπιφάνεια υγρού/αέρα και διάχυσής του στην κύρια μάζα του υγρού.

Λόγω αυτής της διαμόρφωσης, οι εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος είναι αναδευόμενοι αντιδραστήρες. Επειδή η ανάδευση είναι αρκετά έντονη, αλλιώς τα συσσωματώματα θα καθιζάνουν και το σύστημα θα αστοχήσει, κατά την ανάλυση και το σχεδιασμό τους θεωρούνται δοχεία πλήρους ανάμειξης. Τυχόν αποκλίσεις από την ιδανική συμπεριφορά συνήθως ενσωματώνονται μέσα στην αβεβαιότητα των κινητικών συντελεστών και τα όρια αβεβαιότητας των μετρουμένων μεγεθών (BOD₅ κ.ά.) λόγω της μεθόδου μέτρησής τους.

Έχει παρατηρηθεί ότι για να έχει η ιλύς καλά χαρακτηριστικά καθίζησης, πρέπει να παραμένει στο σύστημα τουλάχιστον τέσσερις ημέρες. Οι βιολογικές κροκίδες που περιέχουν τους παραχθέντες μικροοργανισμούς καθιζάνουν σε ΔΔΚ και εν μέρει ανακυκλώνονται, ενώ το υπόλοιπο της ιλύος απομακρύνεται (περίσσεια ιλύος), για να αποφευχθεί συσσώρευση μικροοργανισμών. Η ανακυκλοφορία επιτρέπει τη διατήρηση μεγάλου χρόνου παραμονής των στερεών (solids retention time, SRT) σε σχέση με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (hydraulic retention time, HRT), μειώνοντας έτσι τον συνολικά απαιτούμενο όγκο για την επιθυμητή απομάκρυνση οργανικών.

2.3.1.3 Βασικός Σχεδιασμός Διεργασίας Ενεργού Ιλύος

Προκειμένου να σχεδιαστεί μια διεργασία ενεργού ιλύος, απαιτείται η χρήση κάποιου μαθηματικού μοντέλου για τη διεργασία. Γι' αυτό τον σκοπό γίνονται οι εξής βασικές παραδοχές:

- Βιολογική οξείδωση και ανάπτυξη γίνονται μόνο στην δεξαμενή αερισμού, αγνοώντας την όποια βιολογική επεξεργασία στην δεξαμενή καθίζησης.
- Η διεργασία μπορεί να περιγραφεί αρκούντως με δύο μόνο μεταβλητές: S (συγκέντρωση διαλυμένων οργανικών, υπόστρωμα μετρούμενο συνήθως σε BOD₅ ή COD ή TOC) και X (συγκέντρωση κροκιδωμένων στερεών, βιομάζα, λαμβανόμενη ίση με την συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών του ανάμεικτου υγρού Mixed Liquor Volatile Suspended Solids, MLVSS). Εδώ πρέπει να διευκρινιστεί ότι, εν γένει, στην πραγματικότητα τα πτητικά αιωρούμενα στερεά περιλαμβάνουν και μη κυτταρική οργανική μάζα, την οποία θεωρούμε αμελητέα μέσα στη δεξαμενή αερισμού. Ακόμη η τροφοδοσία μπορεί να περιέχει και μη πτητικά (αδρανή) στερεά.
- Ο όγκος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του χρόνου παραμονής των βιοστερεών (της βιομάζας) είναι μόνο ο όγκος της δεξαμενής αερισμού. Ουσιαστικά δηλαδή θεωρείται, ότι οι κροκίδες δεν μεταβάλλονται καθόλου από την έξοδο της ΔΑ μέχρι την επαναφορά τους, η δε ποσότητα που περιέχεται εκτός ΔΑ είναι αμελητέα.

Ορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

(α) Μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής (mean hydraulic retention time) σε ολόκληρο το σύστημα ενεργού ιλύος:

$$\theta_s = \frac{V + V_s}{Q} \quad (2.3.29)$$

όπου Q η ογκομετρική παροχή,

V ο όγκος του υγρού στη δεξαμενή αερισμού και

V_s ο όγκος της δεξαμενής καθίζησης.

(β) Μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής στη ΔΑ:

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (2.3.30)$$

(γ) Μέσος χρόνος παραμονής στερεών [solids retention time (SRT), ονομάζεται και ηλικία λάσπης, (sludge age)]

$$SRT = \frac{VX}{Q_w X_u + (Q - Q_w) X_e} \quad (2.3.31)$$

όπου X η συγκέντρωση της βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού, X_u η αντίστοιχη συγκέντρωση στον πυθμένα της δεξαμενής καθίζησης, και X_e η συγκέντρωση της βιομάζας στο διαυγασμένο νερό που εξέρχεται από τη δεξαμενή καθίζησης.

Εάν $X_e \approx 0$ έχουμε:

$$SRT = \frac{VX}{Q_w X_u} \quad (2.3.32)$$

Ενίοτε η αφαίρεση λάσπης γίνεται απ' ευθείας από την ΔΑ, αντί από τη γραμμή της ανακυκλοφορίας. Σ' αυτή την περίπτωση:

$$SRT = \frac{VX}{Q_w X + (Q - Q_w) X_e} \quad (2.3.33)$$

και εάν $X_e \approx 0$ έχουμε:

$$SRT = \frac{V}{Q_w} \quad (2.3.34)$$

Έτσι, όταν η αφαίρεση λάσπης γίνεται απ' ευθείας από την ΔΑ, ο χρόνος θ_c μπορεί να ρυθμιστεί εντελώς ανεξάρτητα από τον θ . Αν και για την περίπτωση της απομάκρυνσης της λάσπης από την ανακυκλοφορία, ο μέσος χρόνος παραμονής των στερεών δίνεται ορθά από τη σχέση (2.3.32), συχνά χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.3.34) για την παράμετρο θ_c μια και αυτή η παράμετρος, αντίθετα με τον τύπο (2.3.32), δεν περιλαμβάνει συγκεντρώσεις που χρειάζονται προσδιορισμό. Σε αυτή την περίπτωση το θ_c δεν αντιστοιχεί στο χρόνο παραμονής των στερεών.

Για να υπολογιστεί η συγκέντρωση των οργανικών S , κάτω από λειτουργικές συνθήκες μόνιμης κατάστασης, καταστρώνονται τα ισοζύγια μάζας των μεταβλητών X και S , για όλο το σύστημα, θεωρώντας κινητική Monod και μόνιμη κατάσταση (βλ. Κεφάλαιο 2.3.1):

$$0 = QS_0 - (Q - Q_w)S - Q_w S - \frac{1}{Y} \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} XV \quad (2.3.35)$$

$$0 = QX_0 - (Q - Q_w)X_e - Q_w X_u + \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} XV - k_d XV \quad (2.3.36)$$

Συνήθως γίνεται η παραδοχή ότι $X_0 \approx 0$, δηλαδή αμελητέα συγκέντρωση βιομάζας στην είσοδο της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Επίσης, θεωρείται τέλεια διαύγαση (διαχωρισμός στερεών στη ΔΔΚ ($X_e = 0$)). Ένα απλό ισοζύγιο μάζας στη ΔΔΚ δίνει:

$$(Q + Q_r)X = (Q_r + Q_w)X_u \quad (2.3.37)$$

Με αυτές τις παραδοχές οι εξισώσεις (2.3.35) και (2.3.36) παίρνουν τη μορφή:

$$0 = QS_0 - QS - \frac{1}{Y} \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X V \quad (2.3.38)$$

$$0 = -Q_w \frac{(Q + Q_r)}{(Q_w + Q_r)} X + \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X V - k_d X V \quad (2.3.39)$$

Η (2.3.39) εν όψει των (2.3.30) και (2.3.34) δίνει με $r = \frac{Q_r}{Q}$, $\theta_c = \frac{V}{Q_w}$ για την περίπτωση της απομάκρυνσης λάσπης από την ανακυκλοφορία:

$$\frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} - k_d = \frac{1+r}{\theta + r\theta_c} \Rightarrow S = \frac{\left(\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d \right) K_s}{\mu_{\max} - k_d - \frac{1+r}{\theta + r\theta_c}} \quad (2.3.40)$$

και τότε η (2.3.38) δίνει:

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta} \quad (2.3.41)$$

Και η (2.3.37):

$$X_u = \frac{(1+r)\theta_c}{\theta + r\theta_c} \frac{Y(S_0 - S)}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta} \quad (2.3.42)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι η απομάκρυνση οργανικών εξαρτάται από τις κινητικές παραμέτρους $\mu_{\max}$, K_s , k_d καθώς και τις λειτουργικές παραμέτρους r , θ και θ_c .

Για τα βιομηχανικά απόβλητα, λόγω της ιδιαιτερότητάς τους, δεν υπάρχουν συνήθως διαθέσιμες τιμές των κινητικών σταθερών στη διεθνή βιβλιογραφία και αυτές πρέπει να προσδιορίζονται από πειράματα, πιλοτικής συνήθως κλίμακας.

Για τα αστικά απόβλητα όμως, λόγω περίπου ομοιόμορφης σύστασής τους και λόγω της μακροχρόνιας διεθνούς εμπειρίας, υπάρχουν διαθέσιμες τιμές, που συνήθως χρησιμοποιούνται ως δεδομένα σχεδιασμού.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.3.1) αναγράφονται ενδεικτικές τιμές για τις κινητικές σταθερές για αστικά απόβλητα.

Πίνακας 2.3.1. Τυπικές τιμές κινητικών παραμέτρων για συστήματα ενεργού ιλύος

Παράμετρος	Τιμές
Y για απόβλητα μετά από πρωτοβάθμια καθίζηση	0,5 – 0,75 kgVS/kg απαγόμενου BOD ₅
Y για απόβλητα χωρίς πρωτοβάθμια καθίζηση	0,8 – 1,1 kgVS/kg απαγόμενου BOD ₅
k (της $dS/dt = -k.S.X$, περίπου $\mu_{\max}/K_s$)	0,016 – 0,043 L/mg.d στους 20°C S ως BOD ₅
K _s	20 – 100 mg/L (BOD ₅)
k _d	0,05 – 0,15d ⁻¹ στους 20°C

--	--

Μία συχνά χρησιμοποιούμενη παράμετρος, που χρησιμεύει στην εκτίμηση της κατάστασης μίας διεργασίας ενεργού ιλύος είναι ο λόγος τροφής/μικροοργανισμών (F/M: food to microorganisms ratio). Ο F/M χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.3.40) και (2.3.41) παίρνει τη μορφή:

$$F/M = \frac{S_0}{\theta X} = \frac{S_0 \left[\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d \right]}{Y(S_0 - S)} \quad (2.3.43)$$

Επίσης, ο ειδικός ρυθμός χρήσης υποστρώματος δίνεται τότε από τη σχέση:

$$U = \frac{1}{Y} \left[\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d \right] \quad (2.3.44)$$

Η παρατηρούμενη απόδοση της διεργασίας δίνεται από τη σχέση:

$$Y_{obs} = Y \cdot \frac{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c}}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d} \quad (2.3.45)$$

και η αποδοτικότητα της διεργασίας από τη σχέση:

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \quad (2.3.46)$$

όπου το S δίνεται από την (2.3.40). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος παραμονής των στερεών δίνεται από τη σχέση

$$SRT = \frac{\theta + r\theta_c}{1+r} \quad (2.3.47)$$

Αν η απομάκρυνση της λάσπης γίνεται από την ΔΑ (κάνοντας τις ίδιες παραδοχές) είναι:

$$0 = Q(S_0 - S) - \frac{1}{Y} \frac{\mu_{max} S}{K_s + S} X V \quad (2.3.48)$$

$$0 = -Q_w X + \frac{\mu_{max} S}{K_s + S} X V - k_d X V \quad (2.3.49)$$

Σ' αυτή την περίπτωση:

$$S = \frac{\left(\frac{1}{\theta_c} + k_d \right) K_s}{\mu_{max} - k_d - \frac{1}{\theta_c}} \quad (2.3.50)$$

και

$$X = \frac{Y(S_0 - S)}{\theta \left(\frac{1}{\theta_c} + k_d \right)} \quad (2.3.51)$$

Οπότε:

$$X_u = \frac{1+r}{r} \frac{Y(S_0 - S)}{\theta \left(\frac{1}{\theta_c} + k_d \right)} \quad (2.3.52)$$

Όπως φαίνεται από την (2.3.50), η απομάκρυνση οργανικού φορτίου ($S_0 - S$) είναι ανεξάρτητη του χρόνου υδραυλικής παραμονής και του ρυθμού ανακυκλοφορίας, και εξαρτάται μόνο από το χρόνο παραμονής των στερεών (την ηλικία της ιλύος). Τότε είναι:

$$F/M = \frac{S_0}{\theta X} = \frac{S_0 \left[\frac{1}{\theta_c} + k_d \right]}{Y(S_0 - S)} \quad (2.3.53)$$

$$U = \frac{1}{Y} \left[\frac{1}{\theta_c} + k_d \right] \quad (2.3.54)$$

$$Y_{obs} = Y \frac{1}{1 + k_d \theta_c} \quad (2.3.55)$$

και

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \quad (2.3.56)$$

Σε αυτή την περίπτωση $SRT = \theta_c$.

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές ενεργού ιλύος με τα εξής χαρακτηριστικά:

(α) Συμβατικό σύστημα: Η τροφοδοσία και η ανακυκλοφορία γίνονται σε διάφορα σημεία της δεξαμενής αερισμού, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ομοιογένεια του ανάμεικτου υγρού. Το σύστημα αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι "αντέχει" σε ξαφνικές αυξήσεις BOD_5 στην εκροή.

(β) Τροποποιημένος αερισμός: Ο αερισμός δεν είναι συνεχής αλλά διακοπτόμενος. Το σύστημα αυτό οδηγεί σε μικρά X και σε μικρότερη απομάκρυνση BOD_5 .

(γ) Ταχύρρυθμος αερισμός: Συνδυάζεται υψηλή οργανική φόρτιση με μεγάλη πυκνότητα λάσπης και αερισμό με τουρμπίνες. Οδηγεί σε πολύ ικανοποιητική απομάκρυνση BOD_5 (για μεγάλη φόρτιση όταν ο διαθέσιμος χώρος είναι μικρός).

(δ) Εκτεταμένος αερισμός: Λειτουργεί ουσιαστικά στην περιοχή ενδογενούς αναπνοής των οργανισμών, επιτυγχάνοντας έτσι και σταθεροποίηση της ιλύος.

Τυπικά, σε ένα πρόβλημα σχεδιασμού διεργασίας ενεργού ιλύος, προσδιορίζεται η παροχή και η περιεκτικότητα σε BOD_5 των αποβλήτων καθώς και η απαιτούμενη απομάκρυνση οργανικών, δηλαδή η συγκέντρωση S . Οι βασικές σχεδιαστικές παράμετροι που πρέπει να υπολογισθούν είναι:

(α) Ο όγκος της δεξαμενής αερισμού, V

(β) Ο ρυθμός ανακυκλοφορίας, Q_r

(γ) Ο ρυθμός απομάκρυνσης ιλύος, Q_w .

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.3.2) αναγράφονται ενδεικτικά τιμές για τις παραμέτρους σχεδιασμού.

Ο προσδιορισμός αυτών των τριών βασικών παραμέτρων V , Q_r και Q_w (ή ισοδύναμα των παραμέτρων r , θ , και θ_c) απαιτεί τρεις εξισώσεις. Ενδεικτικά, επιλέγοντας τα r , θ και θ_c , οι (2.3.40), (2.3.41) και (2.3.42) (ή οι (2.3.50), (2.3.51)

και (2.3.52) αν η απομάκρυνση ιλύος είναι από τη δεξαμενή αερισμού) προκύπτουν τα X , X_u και S , και από αυτά υπολογίζονται το SRT , το F/M και το E και ελέγχεται αν ικανοποιούνται τα βασικά κριτήρια τα οποία είναι τα εξής:

(α) Απαιτήσεις εκροής S : $S < S_{max}$.

(β) $SRT > \theta_{cmin}$, όπου $\theta_{cmin} = 1/D_w$ ο χρόνος στον οποίο απομακρύνονται όλα τα βακτήρια (έκπλυση). Επίσης, όπως ήδη συζητήθηκε, πρέπει $SRT > 3-4d$ για εξασφάλιση καλών χαρακτηριστικών καθίζησης των κροκίδων. Συνήθως επιλέγεται το SRT μεταξύ 4-15d ή το F/M μεταξύ 0,05 και 1.

(γ) Το θ (ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στη δεξαμενή αερισμού) πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο (18-24h), ούτως ώστε να δίνει αρκετά χαμηλό S , κατάλληλο X (πολύ μεγάλο X απαιτεί ισχυρή ανάδευση, λόγω χαμηλής διαλυτότητας του οξυγόνου, γεγονός που βλάπτει τις κροκίδες, αυξάνοντας το κόστος της ΔΔΚ) και καλή απόσβεση σε διακυμάνσεις παροχής. Ωστόσο μεγάλο θ σημαίνει μεγάλο όγκο ΔΑ και υψηλό κόστος. Συνήθως το θ ρυθμίζεται να δίνει $X \sim 2.000-3.000 \text{ mg/L}$.

Αφού προσδιοριστούν αυτές οι παράμετροι (r , θ , θ_c), δηλαδή ισοδύναμα (Q_r, V , Q_w), σχεδιάζεται το σύστημα αερισμού και η δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης.

Πίνακας 2.3.2. Τιμές παραμέτρων σχεδιασμού συστημάτων ενεργού ιλύος

Τύπος διεργασίας	Συμβατική	Τροποποιημένου αερισμού	Ταχύρρυθμη	Εκτεταμένου αερισμού
SRT , d	5-15	0,2-0,5	0,5-10	20-30
F/M , $\text{kgBOD}_5/\text{kgMLVSS}/\text{d}$	0,2-0,5	1,5-5,0	0,4-1,5	0,05-0,15
Φόρτιση, $\text{kgBOD}_5/\text{m}^3_{αντδ}/\text{d}$	0,3-0,6	1,2-2,4	1,6-3,6	0,1-0,4
X , mg/L	1.500-3.000	200-500	4.000-10.000	3.000-6.000
θ , h	4-8	1,5-3,0	0,5-2,0	18-36
r	0,25-0,5	0,05-0,15	1,0-5,0	0,75-1,5
Απαιτήσεις σε O_2 , $\text{kgO}_2/\text{kg}(\Delta BOD_5)$	0,8-1,2		0,4-0,8	1,3-2

Μια ποιοτική παράμετρος για την ιλύ είναι ο Δείκτης Όγκου Ιλύος ή δείκτης Mohlmann (Sludge Volume Index). Θεωρείται ότι για $SVI < 50$ η λάσπη καθιζάνει εξαιρετα, ενώ για $SVI > 150$ δεν καθιζάνει ικανοποιητικά.

Ο δείκτης αυτός εξαρτάται από:

- το βαθμό τυρβωδών συνθηκών στον αντιδραστήρα
- τη σύσταση του υγρού (πιθανή ύπαρξη επιφανειακώς ενεργών ουσιών)
- τη φυσιολογική κατάσταση των μικροοργανισμών
- την οργανική φόρτιση.

Για καλή οξυγόνωση απαιτείται η ύπαρξη μικρών συσσωματωμάτων από μικροοργανισμούς μέσα στον αντιδραστήρα, επομένως υψηλή τιμή SVI . Για ικανοποιητική καθίζηση στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης απαιτείται χαμηλή τιμή. Στην πράξη λοιπόν επιδιώκεται ένας συμβιβασμός.

Άσκηση 2.16

Να σχεδιαστεί μια διεργασία ενεργού ιλύος που να δέχεται 21600m³/d αστικών υγρών αποβλήτων με BOD₅ 250mg/L. Το μέγιστο επιτρεπόμενο BOD₅ εξόδου είναι 20mg/L. Θεωρήστε ότι ισχύουν οι εξής κινητικές παράμετροι μικροβιακής ανάπτυξης: Y=0,8, k_d=0,05d⁻¹, μ_{max}=0,9d⁻¹, K_s=24mg/L.

Λύση

Παραδοχές: Συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος με απομάκρυνση ιλύος από τη γραμμή ανακυκλοφορίας. Έστω r=0,5 (Q_r=0,5·Q). Η εξίσωση (2.3.40) δίνει:

$$S = \frac{\left(\frac{1+0,5}{\theta+0,5 \cdot \theta_c} + 0,05 \right) 24}{0,9 - 0,05 - \frac{1+0,5}{\theta+0,5 \cdot \theta_c}}$$

Για S<20 mg/L είναι θ+0,5 · θ_c>4,17d.

Ας υποτεθούν σύμφωνα με τους περιορισμούς για το συμβατικό σύστημα (Πίνακας 2.3.2) θ_c=16d και, θ=0,3d τότε η (2.3.47) δίνει

$$SRT = \frac{0,3 + 0,5 \cdot 16}{1 + 0,5} = 5,5d$$

Η (2.3.40) δίνει:

$$S = \frac{\left(\frac{1+0,5}{16+0,5 \cdot 0,3} + 0,05 \right) 24}{0,9 - 0,05 - \frac{1+0,5}{16+0,5 \cdot 0,3}} = 8,27mg/L$$

και η (2.3.41)

$$X = \frac{0,8(250 - 8,27)}{1,5} \cdot \frac{1}{\frac{1}{16+0,5 \cdot 0,3} + 0,05} = 2794mg/L$$

Οι τιμές αυτές είναι ικανοποιητικές γιατί 5<SRT<15d, S=8,27<20mg/L και 1500<X<3000mg/L. Μικρότερο θ θα μείωνε τον απαιτούμενο όγκο αλλά θα οδηγούσε σε μεγάλο X.

Ο απαιτούμενος όγκος είναι:

$$V = Q \cdot \theta = 21600m^3/d \cdot 0,3d = 6480m^3$$

Επίσης, είναι:

$$F/M = \frac{250mg/L}{0,3d \cdot 2794mg/L} = 0,3 \frac{mg}{mg \cdot d}$$

μέσα στα επιτρεπτά όρια 0,2 και 0,5.

Ο ρυθμός παροχής ιλύος (περίσσεια ιλύος) Q_w είναι:

$$Q_w = \frac{V}{\theta_c} = \frac{6480 \text{ m}^3}{16 \text{ d}} = 405 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Από την (2.3.42) είναι:

$$X_u = \frac{(1+r)\theta_c}{\theta + r\theta_c} \cdot \frac{Y(S_0 - S)}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d} \cdot \frac{1}{\theta} = 8078 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Επομένως, η παροχή ιλύος θα είναι:

$$\Pi = Q_w \cdot X_u = 405 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 8078 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \approx 3272 \text{ kg/d}$$

Η αποδοτικότητα του καθαρισμού θα είναι:

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 = \frac{250 - 8,27}{250} \times 100 = 96,7\%$$

2.3.1.4 Ανάγκες σε θρεπτικά

Οι μικροοργανισμοί για την ανάπτυξή τους χρειάζονται άζωτο και φώσφορο, βασικά συστατικά του κυττάρου τους. Για τον υπολογισμό των απαιτήσεων στα συστατικά αυτά χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις:

$$N \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right) = \frac{0,0558 \cdot x_\beta \cdot \Pi}{0,77} + 0,0317 \cdot \frac{(0,77 - x_\beta) \cdot \Pi}{0,77} \quad (2.3.57)$$

$$\text{και} \quad P \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right) = \frac{0,0118 \cdot x_\beta \cdot \Pi}{0,77} + 0,00454 \cdot \frac{(0,77 - x_\beta) \cdot \Pi}{0,77} \quad (2.3.58)$$

όπου x_β το βιοαποικοδομήσιμο ποσοστό των MLVSS

Π η «καθαρή» παραγωγή ιλύος (απομακρυνόμενη από το σύστημα), kg/d.

Το βιοαποικοδομήσιμο ποσοστό των MLVSS εκτιμάται ως το 70% περίπου των οργανικών και η παραγωγή λάσπης ως το άθροισμα $Q_w \cdot X_u + (Q - Q_w) \cdot X_e$.

Αν οι ποσότητες N και P που περιέχονται στο απόβλητο (γνωστές από ανάλυση σύστασης) δεν είναι ικανοποιητικές, τότε προστίθεται επιπλέον N ή/και P .

2.3.1.5 Αερισμός

Οι θεωρητικές απαιτήσεις σε οξυγόνο μπορούν να υπολογισθούν από το BOD_5 των υγρών αποβλήτων και την ποσότητα των μικροοργανισμών που απομακρύνονται ως περίσσεια ιλύος. Έτσι, υπολογίζοντας το τελικό BOD από το BOD_5 (το BOD_5 είναι $f \cdot BOD$ όπου $f=0,68$) υπολογίζεται το συνολικό οξυγόνο που θα απαιτούσε η πλήρης οξείδωση των οργανικών. Απ' αυτό πρέπει να αφαιρεθεί η περιεκτικότητα σε τελικό BOD των απομακρυνόμενων από το σύστημα μικροοργανισμών. Αυτή λαμβάνεται ως $1,42 \text{ kg O}_2/\text{kg}$ κυττάρων. Έτσι, αν η παροχή Q δίνεται σε m^3/d , και το S σε $\text{mg/L} = \text{g-BOD}_5/\text{m}^3$ έχουμε ότι η συνολική απαίτηση οξυγόνου σε kgO_2/d (R) είναι:

$$R = \frac{Q(S_0 - S) \cdot (10^3 \text{ g/kg})^{-1}}{f} - 1,42 \Pi \quad (2.3.59)$$

όπου Π η παραγωγή στερεών ιλύος σε kg/d .

Άσκηση 2.17

Για τα δεδομένα της προηγούμενης άσκησης (Άσκηση 2.16), υπολογίστε τη θεωρητική απαίτηση σε οξυγόνο της διεργασίας ενεργού ιλύος.

Λύση

$$\dot{M}_{O_2} = \frac{(21.600 \text{ m}^3/\text{d}) \cdot (250 - 3,97) \text{ g/m}^3}{0,68} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}} - 1,42 \cdot 2.582 \text{ kg/d} = 4.149 \text{ kgO}_2/\text{d}$$

Ο αερισμός γίνεται είτε με διαχυτήρες, είτε με επιφανειακούς αεριστήρες. Σε κάθε περίπτωση, η διάταξη θα χαρακτηρίζεται από κάποια αποδοτικότητα μεταφοράς οξυγόνου τυπικά 10-30%. Συνήθως απαιτείται η διατήρηση στη δεξαμενή αερισμού, μιας συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου τουλάχιστον 1-2mg/L. Οι σύγχρονες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (ΜΕΛ) διαθέτουν αυτοκαθαριζόμενα ηλεκτρόδια που μετράνε online τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) και των αιωρούμενων στερεών του ανάμικτου υγρού (MLSS).

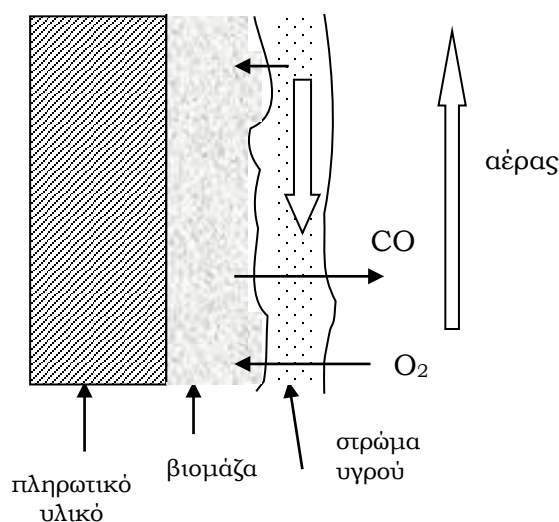
2.3.2 Ετερογενείς Βιολογικές Διεργασίες – Βιολογικά φίλτρα

2.3.2.1 Εισαγωγή

Εναλλακτικά προς την ενεργό ιλύ μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δεξαμενές με πληρωτικό υλικό, οι οποίες ονομάζονται χαλικοδυλιστήρια ή βιολογικά φίλτρα ή βιολογικοί πύργοι. Ο σχεδιασμός τους αποβλέπει στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων σε όρους BOD₅, συχνά όμως τα απόβλητα υφίστανται και νιτρίκοποίηση. Προηγείται τυπικά μια δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (υποχρεωτική καθόσον η τροφοδοσία υψηλής συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών θα προκαλέσει συσσώρευσή τους στα διάκενα του πληρωτικού υλικού και επακόλουθη υπερβολική αύξηση της πτώσης πίεσης με αποτέλεσμα την αστοχία και τελικώς την κατάρρευση του συστήματος), ο (ή οι) βιολογικοί πύργοι με το πληρωτικό υλικό (χαλίκια ή πλαστικό πληρωτικό υλικό) και μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης της ιλύος, η οποία δεν ανακυκλώνεται. Ενδεχομένως ανακυκλώνεται τμήμα του υγρού εξόδου.

Η βιομάζα (μικροοργανισμοί) είναι ακινητοποιημένη πάνω στο πληρωτικό υλικό. Ο αντιδραστήρας στη συνηθισμένη περίπτωση κατωροής είναι τριφασικός. Από τη διάταξη κατωροής (που ήταν και η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε) με το υγρό να «σταλάζει» και να δημιουργεί ρυάκια πάνω στο πληρωτικό υλικό προέρχονται και οι όροι «σταλάζον φίλτρο», «φίλτρο στάγδην ροής» και «tricklingfilter».

Στο Σχήμα 2.3.6 φαίνονται σχηματικά οι διεπιφάνειες σε μια στοιχειώδη διατομή.



Σχήμα 2.3.6. Διατομή λεπτομέρειας βιολογικού φίλτρου

Το οξυγόνο διαχέεται από την αέρια κύρια μάζα στην υδατική και, ως διαλυμένο πια, μεταφέρεται μέσω της κύριας μάζας του αποβλήτου στο προσκολλημένο βιοφίλμ. Ταυτόχρονα με τις διαλυμένες οργανικές ουσίες που έχουν περάσει κι αυτές από την υδατική φάση στο βιοφίλμ εισέρχεται το οξυγόνο μέσα στους μικροοργανισμούς και καταναλώνεται/αντιδρά μέσω των βιοχημικών δράσεων. Τα παραγόμενα αέρια προϊόντα διαχέονται μέσω της υδατικής φάσης στην αέρια και απομακρύνονται. Οι παραγόμενοι νέοι μικροοργανισμοί προσκολλώνται και συγκρατούνται στο βιοφίλμ. Οι απενεργοποιούμενοι και τελικά νεκροί μικροοργανισμοί χάνουν την ικανότητα πρόσφυσης στο πληρωτικό υλικό, αποκολλώνται και παρασύρονται/απομακρύνονται με την υδατική φάση λόγω ροής.

2.3.2.2 Κατανάλωση Οργανικού Υποστρώματος

Θεωρούμε ότι έχουμε εμβολική ροή του υγρού και μόνιμη κατάσταση, οπότε για στοιχειώδη όγκο του αντιδραστήρα (ή ισοδύναμα για στοιχειώδες βάθος, εφόσον η διατομή του είναι σταθερή) το ισοζύγιο μάζας καταλήγει στη σχέση

$$-Q \cdot \frac{dS}{dV} = k \cdot S^n \quad (2.3.60)$$

όπου	Q	η υδραυλική παροχή
	S	η συγκέντρωση σε BOD ₅
	n	η τάξη της (γενικευμένης) αντίδρασης
	k	η κινητική σταθερά
	V	ο όγκος του αντιδραστήρα.

Στην κινητική εδώ δεν εμφανίζεται η συγκέντρωση των μικροοργανισμών, επειδή η συγκέντρωση μικροοργανισμών μέσα στον αντιδραστήρα δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί, και έτσι «ενσωματώνεται» στην κινητική σταθερά.

Η σχέση αυτή προτάθηκε από τον Veltz το 1949. Οι Howland&Schulze πρότειναν το 1958 την τιμή n=1 με κατάλληλη προσαρμογή του κινητικού συντελεστή k.

Τέλος το 1963 ο Eckenfelder πρότεινε τη σχέση (2.3.61) για βιολογικό φίλτρο χωρίς ανακυκλοφορία:

$$\frac{S_e}{S_0} = \exp\left(-\frac{K \cdot Z}{Q_A^n}\right) \quad (2.3.61)$$

όπου	S ₀	η συγκέντρωση BOD ₅ στην είσοδο
	S _e	η συγκέντρωση BOD ₅ στην έξοδο
	K	«σταθερά α' τάξης» που δίνεται από τη σχέση

$K = k' \cdot A_s$ με k' κινητική σταθερά και A_s την ειδική επιφάνεια του πληρωτικού υλικού που είναι διαθέσιμη για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών

Z	το βάθος του φίλτρου
n	σταθερά και
Q _A	η υδραυλική φόρτιση (=Q/A), m ³ /m ² d.

Αυτή είναι και η ευρέως χρησιμοποιούμενη σήμερα σχέση.

Στην περίπτωση όπου τα διαθέσιμα από τη βιβλιογραφία δεδομένα είναι εκφρασμένα σε όρους COD, απαιτείται μια διόρθωση της σχέσης (2.3.61), όπου αντί του όρου S χρησιμοποιείται ο όρος $S - S_{\infty}$, όπου S_{∞} είναι το τμήμα εκείνο του COD που παραμένει μετά από άπειρο χρόνο παραμονής στο βιολογικό φίλτρο, δηλαδή στην ουσία το μη βιοδιασπάσιμο τμήμα του COD. Το πρόβλημα εδώ είναι ότι το μέγεθος S_{∞} συνήθως δεν είναι γνωστό από θεωρητική ανάλυση. Χρειάζονται λοιπόν δεδομένα λειτουργίας από μια πειραματική διάταξη, από τα οποία θα υπολογισθεί η τιμή του. Για το λόγο αυτό ακολουθείται η εξής πορεία:

- Υποτίθεται μια τιμή S_{∞}
- ελέγχεται η ορθότητα της επιλογής (μέσω ελαχιστοποίησης της απόκλισης της ολοκληρωμένης μορφής της (2.3.61)).

Για το σχεδιασμό βιολογικών φίλτρων με ανακύκλωση (r) όπου στο φίλτρο εισέρχεται παροχή $Q+Qr$ με συγκέντρωση $S_0' = \frac{S_0 + r \cdot S}{1+r}$ χρησιμοποιείται η ακόλουθη ημιεμπειρική σχέση:

$$\frac{S_e}{S_0} = \frac{e^{\frac{K \cdot Z}{Q_A^n}}}{(1+r) - r \cdot e^{\frac{K \cdot Z}{Q_A^n}}} \quad (2.3.62)$$

$$\text{όπου } r = \frac{Q_r}{Q}$$

Σε αυτή την περίπτωση, η υδραυλική φόρτιση είναι το άθροισμα της καθαρής εισόδου και της ανακυκλοφορίας.

2.3.2.3 Αερισμός

Ο αερισμός στις εγκαταστάσεις αυτού του τύπου γίνεται με φυσικό τρόπο λόγω διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ αέρα και υγρού αποβλήτου. Στην περίπτωση που το απόβλητο είναι θερμότερο από τον αέρα (χειμώνας) τον ζεσταίνει μέσα στο φίλτρο και ο θερμός αέρας ανέρχεται. Στην αντίθετη περίπτωση ο αέρας, που ψύχεται, κατέρχεται στο φίλτρο. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξασφαλίζεται επαρκής κυκλοφορία αέρα για την ανανέωση του οξυγόνου που καταναλώνεται. Η κατανάλωση οξυγόνου εκτιμάται από τη σχέση (2.3.59) και για την εκτίμηση της ταχύτητας του αέρα μέσα στο φίλτρο χρησιμοποιείται η εμπειρική σχέση

$$v_{air} = 0,123 \cdot (T_{air} - T_w) - 0,234, \quad cm/s \quad (2.3.63)$$

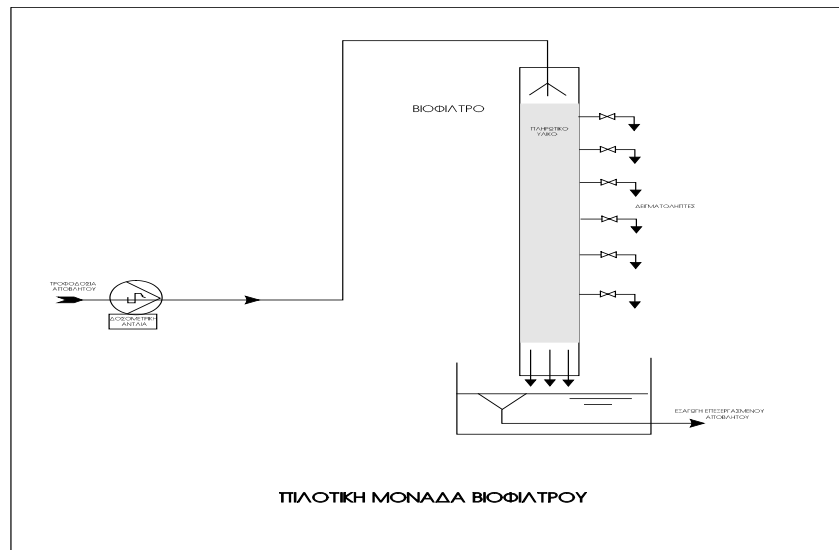
Άσκηση 2.18

Υγρό απόβλητο από ένα χοιροτροφείο έχει αρχική συγκέντρωση $S_0=10500$ mg COD/L. Το απόβλητο αυτό δοκιμάστηκε σε πειραματική εγκατάσταση, που αποτελείται από ένα βιοφίλτρο ύψους 2,5 m και διαμέτρου 7,5 cm. Η τροφοδοσία του αποβλήτου γίνεται μέσω μιας δοσομετρικής αντλίας η οποία έχει δυνατότητα ρύθμισης της παροχής της από 0 μέχρι 15 L/h και ένα σύστημα διασποράς του αποβλήτου στην επιφάνεια του βιοφίλτρου. Παραπλεύρως του βιοφίλτρου υπάρχουν έξι δειγματολήπτες.

Τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων συγκέντρωσης (COD) εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Βάθος Βιόφιλτρου Z, m	Ογκομετρική φόρτιση Q _A , m ³ /m ² /d					
	5	7,5	10	12,5	15	17,5
0,4	9460	9421	9451	9694	9825	9672
0,8	8654	8675	8673	8907	8826	9014
1,2	7757	7997	8050	8194	8128	8287
1,6	7039	7326	7310	7477	7585	7498
2	6388	6559	6697	6977	6924	7074
2,4	5661	5972	6169	6318	6388	6510

Να προσδιοριστεί η εξίσωση σχεδιασμού.



Λύση

- Υποθέτουμε ένα S_{∞} . Ασφαλώς πρέπει να ισχύει ($0 < S_{\infty} < S_e$). Έστω $S_{\infty} = 500$ mg/L.
- Από τη γραμμική σχέση :

$$\ln(S_e - S_{\infty}) = \ln(S_0 - S_{\infty}) - \frac{K \cdot Z}{Q_A^n} \quad (A)$$

με τεχνική γραμμικής παλινδρόμησης λαμβάνονται ζεύγη τιμών (Q_A , K/Q_A^n)

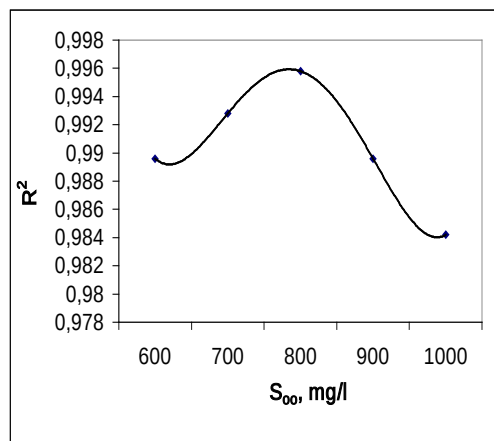
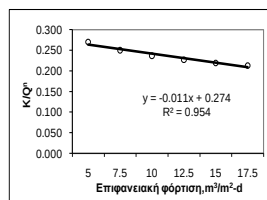
Βάθος Βιόφιλτρου Z, m	$\ln (S - 500)$					
	Ογκομετρική φόρτιση Q _A , m ³ /m ² /d					
	5	7,5	10	12,5	15	17,5
0,4	9,10	9,11	9,11	9,12	9,12	9,12
0,8	8,99	9,01	9,02	9,03	9,03	9,04
1,2	8,88	8,91	8,92	8,94	8,95	8,95
1,6	8,78	8,81	8,83	8,85	8,86	8,87
2	8,67	8,71	8,74	8,76	8,77	8,78
2,4	8,56	8,61	8,64	8,67	8,68	8,70
K/Q _A ⁿ	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21

3. Χρησιμοποιώντας τα ζεύγη τιμών (Q_A , K/Q_A^n) του προηγούμενου βήματος υπολογίζουμε το συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R^2 . Έτσι για $S_\infty = 500 \text{ mg/L}$ έχουμε:

Q_{Ai}	5	7,5	10	12,5	15	17,5
K/Q_{Ai}^n	0,270	0,250	0,237	0,227	0,220	0,213

με $R^2 = 0.9545$

4. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 1 μέχρι και 3 μεταβάλλοντας το S_∞ από 0 έως $S_e = 2000 \text{ mg/L}$ και κρατάμε το S_∞ για το οποίο $R^2 = \max$.



Τα δεδομένα του πίνακα του βήματος 3 σε διάγραμμα.

Εύρεση του $R^2_{\max}$

Προκύπτει $S_\infty = 800 \text{ mg/L}$.

5. Έχουμε πια το μέγεθος S_∞ καθώς και ζεύγη τιμών για τα μεγέθη Q_A και K/Q_A^n (από την (A)). Αυτό που δεν έχουμε είναι οι τιμές K και n .

Από τη γραμμική σχέση:

$$\ln(K) = \ln\left(\frac{K}{Q_A^n}\right) + n \cdot \ln(Q_A)$$

και για $S_\infty = 800 \text{ mg/L}$ υπολογίζουμε με μέθοδο γραμμικής παλινδρόμησης τις τιμές $K = 0,38$ και $n = 0,19$.

2.3.2.4 Σχεδιασμός βιολογικού φίλτρου

Για το σχεδιασμό του βιολογικού φίλτρου

- Επιλέγεται το πληρωτικό υλικό (συνήθως για βιομηχανικά απόβλητα χρησιμοποιούνται πλαστικά ειδικής διαμόρφωσης –structured packings–, με μεγάλα διάκενα για την υποβοήθηση της κυκλοφορίας του αέρα και σε κατάλληλα σχεδιασμένες δομικές μονάδες –modules– ώστε να εξασφαλίζουν μεγάλους χρόνους παραμονής του υγρού).
- Επιλέγεται ο ρυθμός ανακυκλοφορίας r .
- Επιλέγεται το βάθος Z .
- Από τις διαθέσιμες σχέσεις (εμπειρικές ή ημιθεωρητικές) υπολογίζεται η υδραυλική φόρτιση για την απαιτούμενη ποιότητα εξόδου. Από τη δεδομένη παροχή υπολογίζεται η διατομή του φίλτρου (επιλογή αν θα είναι τετραγωνική ή κυκλική).
- Αν η υδραυλική παροχή είναι έξω από τα εμπειρικά όρια για πλήρη διαβροχή ή πλημμύριση, επιλέγεται άλλο ζεύγος βάθους – ανακυκλοφορίας και επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί.

Στον Πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2.3.3) αναγράφονται ενδεικτικά τιμές για τα μεγέθη που επιλέγονται κατά το σχεδιασμό.

Πίνακας 2.3.3. Τιμές παραμέτρων σχεδιασμού βιολογικών φίλτρων

Τύπος διεργασίας	Συμβατική	Υψηλού φορτίου	Χαμηλού φορτίου
F/M	0,24-0,48	0,4-1,0	0,08-0,4
Z, m	1,25-2,5	1,25-2,5	1,5-3
r	0-1	0,75-2,0	0
Q _A , m ³ /m ² .d	3,7-9,4	9,4-28	1,9-3,7
Δ(BOD ₅), %	50-70	65-80	80-85

2.3.3 Αφαίρεση θρεπτικών

2.3.3.1 Εισαγωγή

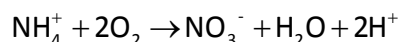
Η εκροή δευτεροβάθμιας επεξεργασίας συνήθως εξακολουθεί να έχει περίπου 30mg/L αιωρούμενα στερεά, 300mg/L ολικά στερεά, 20-30mg/LBOD₅, καθώς και παθογόνους μικροοργανισμούς (που μπορούν να καταστραφούν με απολύμανση), αλλά το κυριότερο πρόβλημα είναι η σημαντική παρουσία αζώτου (~20mg/L) και φωσφόρου (~7mg/L). Η παρουσία αυτών των στοιχείων, που αναφέρονται ως θρεπτικά συστατικά, παρουσιάζει συχνά ιδιαίτερο πρόβλημα μια και ευθύνεται για ανάπτυξη μικροφυκών στο φυσικό αποδέκτη. Η ανάπτυξη μικροφυκών στους φυσικούς αποδέκτες προκαλεί ένα φαινόμενο που ονομάζεται ευτροφισμός. Τα μικροφύκη αναπτύσσονται και στη συνέχεια σαπίζουν αποτελώντας τροφή για άλλους μικροοργανισμούς (βακτήρια) που δεσμεύουν το οξυγόνο, προκαλώντας θάνατο στην υδρόβια ζωή (π.χ. στα ψάρια).

2.3.3.2 Αφαίρεση αζώτου

2.3.3.2.1 Νιτροποίηση

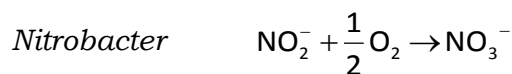
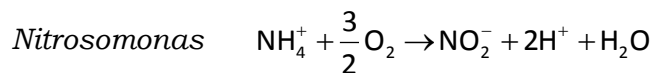
Το άζωτο στα υγρά απόβλητα απαντάται σε τέσσερις μορφές: οργανικό άζωτο, αμμωνία, νιτρώδη και νιτρικά ιόντα. Οι δύο πρώτες μορφές είναι και οι κυριότερες. Το συνολικό άζωτο είναι τυπικά 20-85mg/L στα υγρά αστικά απόβλητα, από το οποίο 40% είναι οργανικό και 60% υπό την μορφή αμμωνίας. Το οργανικό άζωτο μετατρέπεται κι αυτό με αργές βιολογικές διεργασίες σε αμμωνία (αμμωνιοποίηση).

Στο φυσικό περιβάλλον η αμμωνία οξειδώνεται σε δύο στάδια (νιτροποίηση) δίνοντας πρώτα νιτρώδη (νιτρωδοποίηση) και εν συνεχεία νιτρικά ιόντα (νιτριοποίηση). Αξίζει να σημειωθεί ότι για το συνηθισμένο pH στα υγρά απόβλητα (6-7) η αμμωνία βρίσκεται σχεδόν εξ ολοκλήρου υπό μορφή ιόντων αμμωνίου. Η συνολική αντίδραση οξείδωσης της αμμωνίας (υπό τη μορφή ουσιαστικά NH₄⁺) είναι:

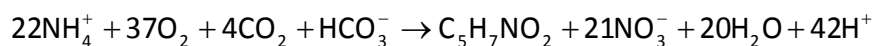


Όπως φαίνεται από την παραπάνω αντίδραση, για την πλήρη οξείδωση της αμμωνίας απαιτούνται 4,57g οξυγόνου ανά g αμμωνιακού αζώτου. Αυτή η απαίτηση οξυγόνου ονομάζεται νιτρογενής απαίτηση οξυγόνου (ΝΑΟ) και είναι ο βασικός λόγος που απαιτείται απομάκρυνση της αμμωνίας πριν την τελική

διάθεση του αποβλήτου. Η βιολογική οξείδωση της αμμωνίας συντελείται σε δύο στάδια από δύο διαφορετικές ομάδες βακτηρίων:



Τα δύο αυτά είδη είναι αυτότροφοι οργανισμοί που χρησιμοποιούν CO_2 ως πηγή άνθρακα. Η συνολική αντίδραση που περιγράφει τη χρήση αμμωνίας και διοξειδίου του άνθρακα για την ανάπτυξή τους είναι:



Οι δύο τύποι βακτηρίων που αναφέρθηκαν απαντώνται φυσικά στην ενεργό ιλύ, όταν η ηλικία της ιλύος είναι αρκετά μεγάλη. Ο λόγος είναι ότι χαρακτηρίζονται από βραδεία κινητική ανάπτυξης, και ως αποτέλεσμα, μικρές ηλικίες ιλύος οδηγούν στην έκπλυσή τους. Μεγάλοι χρόνοι παραμονής στερεών (ηλικίες ιλύος) ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε στην ενεργό ιλύ, είτε στο βραδυχαλικοδιϋλιστήριο, για να επιτευχθεί η φυσική οξείδωση (νιτροποίηση) της αμμωνίας.

Γενικά θεωρείται ότι μόνο οι αυτότροφοι μικροοργανισμοί μπορούν να οξειδώσουν το αμμωνιακό άζωτο.

2.3.3.2.1.1 Κινητική Νιτροποίησης

Ο ρυθμός ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηριδίων μπορεί να περιγραφεί από την εξής έκφραση:

$$r_A = \hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) x_{BA} - b_A x_{BA} \quad (2.3.64)$$

Όπου x_{BA} συγκέντρωση αυτότροφων (νιτροποιητικών) οργανισμών

$\hat{\mu}_A$ μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης αυτότροφων οργανισμών

S_O συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου

b_A ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής αυτότροφων οργανισμών

S_{NH} συγκέντρωση αμμωνίου

K_{NH}, K_{OA} συντελεστές κορεσμού.

Η σχέση (2.3.64) υποθέτει διπλό περιορισμό υποστρώματος (αμμώνιο και διαλυμένο οξυγόνο). Ο ρυθμός απομάκρυνσης ιόντων αμμωνίου είναι:

$$r_{NH} = - \frac{r_A + b_A x_{BA}}{Y_A} \quad (2.3.65)$$

Τυπικές τιμές των παραμέτρων που συνήθως χρησιμοποιούνται (στους 18°C) είναι:

$\hat{\mu}_A = 0,4 \text{ d}^{-1}$, $K_{NH} = 0,2 \text{ mg-N/L}$, $Y_A (\text{mgCOD/mgN}) = 0,2$, $K_{OA} = 0,4 \text{ mg/L}$, $b_A = 0,1 \text{ d}^{-1}$

Ο ρυθμός ανάπτυξης εξαρτάται σημαντικά από την θερμοκρασία και το pH:

$$\hat{\mu}_A - b_A = \frac{m e^{-c/T}}{1 + \frac{d}{10^{-\text{pH}}} + \frac{10^{-\text{pH}}}{f}} \quad (2.3.66)$$

m , d , f και c σταθερές

Από τη σχέση (2.3.66) φαίνεται ότι αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερους ρυθμούς νιτροποίησης, ενώ υπάρχει βέλτιστο pH~7,2. Οι σχέσεις (2.3.64) και (2.3.65) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαστασιολόγηση διεργασίας νιτροποίησης για να επιτευχθεί η απαιτούμενη μετατροπή NH_4^+ .

Άσκηση 2.19

Για την Άσκηση 2.3.3 σχεδιασμού διεργασίας ενεργού ιλύος, να ευρεθεί η δυνατότητα νιτροποίησης. Υποθέσατε ότι η ισχύς των απόνερων σε αμμωνία είναι 50mg/L. Θεωρήσατε τις τυπικές τιμές παραμέτρων για την νιτροποίηση.

Λύση

Η διεργασία αυτή είχε σχεδιασθεί με χρόνο παραμονής $\theta=0,3\text{d}$, και $\theta_c=16\text{d}$. Για τη νιτροποίηση θα ισχύουν πάλι οι σχέσεις (2.3.40) και (2.3.41) για το αμμώνιο S_{NH} και την αυτότροφη βιομάζα X_{BA} , υπό τον όρο ότι ο αερισμός είναι επαρκής (δεν υπάρχει περιορισμός οξυγόνου). Έτσι:

$$S_{\text{NH}} = \frac{\left(\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + b_A \right) K_{\text{NH}}}{\mu_A - b_A - \frac{1+r}{\theta + r\theta_c}}$$

και

$$X_{\text{BA}} = \frac{Y_A (S_{\text{NH}_0} - S_{\text{NH}})}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + b_A} \cdot \frac{1}{\theta}$$

Η πρώτη σχέση δίνει:

$$S_{\text{NH}} = \frac{\left(\frac{1,5}{25,7} + 0,1 \right) 0,2}{0,4 - 0,1 - \frac{1,5}{25,7}} \approx 0,47 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Επομένως επιτυγχάνεται ουσιαστικά πλήρως νιτροποίηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι μικρότερες τιμές θ_c μπορεί να οδηγούσαν σε απομάκρυνση BOD_5 αλλά ταυτόχρονα μπορεί να οδηγούσαν και σε έκπλυση της νιτροποιητικής βιομάζας.

Η νιτροποίηση μπορεί ουσιαστικά να επιτευχθεί σε συμβατικές διεργασίες ενεργού ιλύος, αρκεί να εξασφαλιστεί επαρκής αερισμός και υψηλές ηλικίες ιλύος. Επίσης, μπορεί να απαιτηθεί η προσθήκη ασβέστη για σταθεροποίηση του pH το οποίο μειώνεται κατά την νιτροποίηση. Συχνά ωστόσο η νιτροποίηση λαμβάνει χώρα σε χωριστή διεργασία που έπεται της ενεργού ιλύος. Επίσης, νιτροποίηση μπορεί να επιτευχθεί στα κατώτερα στρώματα των βραδυχαλικοδιϋλιστηρίων.

2.3.3.2.2 Απονιτροποίηση

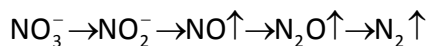
Η μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό άζωτο δεν επαρκεί για την απομάκρυνση του αζώτου από τα λύματα, απλά ελαχιστοποιεί την απαίτηση σε οξυγόνο στον υδάτινο αποδέκτη, αν τα λύματα διατεθούν μετά τη νιτροποίηση. Για την απομάκρυνση των παραγόμενων νιτρικών και (στην περίπτωση ανεπαρκούς νιτροποίησης) νιτρώδων είναι απαραίτητη η διεργασία της απονιτροποίησης.

Απονιτροποίηση είναι η βιολογική αναγωγή των νιτρικών και νιτρωδών προς αέρια οξείδια του αζώτου (NO, N₂O) και τελικά προς αέριο άζωτο, το οποίο λόγω της μικρής διαλυτότητάς του στο νερό, διαφεύγει στην ατμόσφαιρα.

Η συνήθης θεώρηση για την απονιτροποίηση, μέχρι τα τελευταία χρόνια, ήταν ότι αποτελεί μια διεργασία δύο σταδίων:



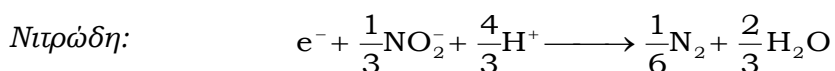
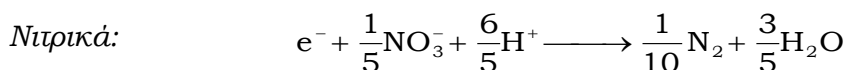
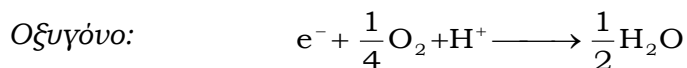
παρόλο που έχει προταθεί και η ακόλουθη σειρά αντιδράσεων:



Παρά τη μακρόχρονη ερευνητική προσπάθεια, είτε λόγω τεχνικών δυσκολιών, είτε λόγω των πραγματικά πολύ μικρών συγκεντρώσεών τους σε συνήθη συστήματα απονιτροποίησης, η παραγωγή του οξειδίου (NO) και του υποοξειδίου (N₂O) του αζώτου ως ελεύθερων ενδιάμεσων προϊόντων κατά την αναγωγή των νιτρικών και των νιτρωδών προς αέριο άζωτο, δεν είχε πιστοποιηθεί μέχρι πρόσφατα.

Η διεργασία της απονιτροποίησης πραγματοποιείται από ετερότροφα, προαιρετικά αερόβια βακτήρια κάτω από ανοξικές συνθήκες. Τα βακτήρια αυτά χρησιμοποιούν διάφορες οργανικές ενώσεις ως πηγή άνθρακα και είναι ικανά να χρησιμοποιούν τόσο μοριακό οξυγόνο όσο και οξυγόνο προερχόμενο από τα νιτρικά ως αποδέκτη ηλεκτρονίων για να οξειδώσουν τις οργανικές ενώσεις.

Η απονιτροποίηση θεωρείται ως μια αυστηρά ανοξική διεργασία, επειδή τα απονιτροποιητικά βακτήρια, ως προαιρετικά αερόβιοι μικροοργανισμοί, προτιμούν τη χρήση του οξυγόνου ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, έναντι της χρήσης νιτρικών και νιτρωδών ως τελικούς αποδέκτες ηλεκτρονίων. Η αντιστοιχία μεταξύ οξυγόνου, νιτρικού και νιτρώδους αζώτου όσον αφορά τη λειτουργία τους ως τελικοί αποδέκτες ηλεκτρονίων, φαίνεται από τις ακόλουθες ημιαντιδράσεις:



Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι, με βάση τη μεταφορά ενός ηλεκτρονίου, η αναγωγή 1/4 mole οξυγόνου ισοδυναμεί με την αναγωγή 1/5 mole νιτρικών και 1/3 mole νιτρωδών ή διαφορετικά 1mgNO₃⁻ – N ισοδυναμεί με 2,86mgO₂ και 1mgNO₂⁻ – N ισοδυναμεί με 1,71mgO₂. Η χρήση οξυγόνου ως τελικού αποδέκτη ηλεκτρονίων είναι ενεργειακά προτιμητέα σε σχέση με τη χρήση νιτρικών, επειδή η ενεργειακή απόδοση του αερόβιου μεταβολισμού του οργανικού άνθρακα είναι υψηλότερη από τον ανοξικό καταβολισμό των νιτρικών. Για παράδειγμα, η οξείδωση της γλυκόζης παρουσία οξυγόνου αποδίδει 686 kcal/mole γλυκόζης ενώ σε ανοξικές συνθήκες παρουσία νιτρικών αποδίδει 570 kcal/mole γλυκόζης.

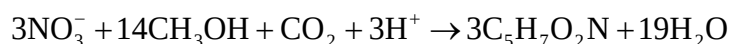
Τα ετερότροφα απονιτροποιητικά βακτήρια απαιτούν την ύπαρξη οργανικού άνθρακα τόσο για την κυτταρική σύνθεση όσο και για την παραγωγή ηλεκτρονίων απαραίτητων για την αναγωγή των νιτρικών και των νιτρωδών. Η μεθανόλη χρησιμοποιείται ευρέως ως πηγή άνθρακα και δότης ηλεκτρονίων στα διάφορα απονιτροποιητικά συστήματα, περισσότερο ίσως από κάθε άλλη οργανική ένωση, λόγω του χαμηλού κόστους της. Αγνοώντας προσωρινά την κυτταρική σύνθεση, η απονιτροποίηση με χρήση μεθανόλης μπορεί να περιγραφεί σαν διεργασία δύο σταδίων με τις ακόλουθες αντιδράσεις:



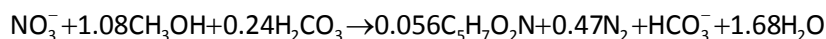
ή συνολικά αθροίζοντας τις αντιδράσεις:



Στην συνολική αντίδραση η μεθανόλη λειτουργεί ως δότης ηλεκτρονίων (οξειδώνεται προς CO_2), ενώ τα νιτρικά ως αποδέκτης ηλεκτρονίων (ανάγονται προς αέριο άζωτο). Όπως και στην περίπτωση της νιτροποίησης οι προηγούμενες εξισώσεις λαμβάνουν χώρα σε υδατικά διαλύματα συμμετέχοντας στο σύστημα του ανθρακικού οξέος. Έτσι τα παραγόμενα OH^- αντιδρούν με το ανθρακικό οξύ (H_2CO_3) δίνοντας αλκαλικότητα. Λαμβάνοντας υπόψη την αντίδραση αυτή καθώς και την κυτταρική σύνθεση (εμπειρικός τύπος κυτταρικής σύστασης: $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$):



η αντίδραση αναγωγής των νιτρικών δίνεται από τη σχέση:



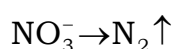
Παρόμοιες εκφράσεις μπορούν να αναπτυχθούν για οποιαδήποτε οργανική πηγή άνθρακα, αν είναι γνωστός ο συντελεστής απόδοσης των απονιτροποιητικών οργανισμών.

Σε αντίθεση με τη διεργασία της νιτροποίησης στην οποία καταναλώνεται αλκαλικότητα, κατά την απονιτροποίηση παρατηρείται παραγωγή αλκαλικότητας. Έτσι κατά την απονιτροποίηση παρουσιάζεται μια τάση ανόδου στην τιμή του pH. Ωστόσο, η απονιτροποίηση αντισταθμίζει μερικώς μόνο την αλκαλικότητα που χάνεται κατά τη νιτροποίηση, εφόσον η παραγωγή ανά mg αζώτου είναι μόλις η μισή της αντίστοιχης απώλειας κατά τη νιτροποίηση. Έτσι θεωρητικά παράγονται 3,57mg αλκαλικότητας (ως CaCO_3) ανά mg νιτρικού ή νιτρώδους αζώτου που ανάγεται σε αέριο άζωτο, αν και πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι στην πράξη επιτυγχάνονται χαμηλότερα επίπεδα παραγωγής αλκαλικότητας από αυτά που προβλέπει η θεωρία. Εντούτοις, μια τιμή κατάλληλη για υπολογισμούς είναι η παραγωγή 3,0mg αλκαλικότητας (ως CaCO_3) ανά mg αναγόμενου αζώτου.

Για την ποσότητα της οργανικής ύλης που απαιτείται για την αναγωγή των νιτρικών, οι αναφερόμενες τιμές κυμαίνονται σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος, από 4 έως 5mg διαλυμένου COD για κάθε $\text{mg NO}_3^- - \text{N}$ που ανάγεται έτσι ώστε να μην περιορίζεται ο βαθμός της απονιτροποίησης. Η θεωρητική απαίτηση μεθανόλης για την αναγωγή των νιτρικών (αγνοώντας την κυτταρική σύνθεση) είναι 1,9mg μεθανόλης/mg νιτρικού αζώτου, ενώ συνυπολογίζοντας την κυτταρική ανάπτυξη αυξάνεται σε 2,47mg μεθανόλης/mg νιτρικού αζώτου. Τα ανεπεξέργαστα λύματα παρέχουν μια αξιόπιστη και ανέξοδη πηγή οργανικού άνθρακα.

2.3.3.2.2.1 Κινητική Απονιτροποίησης

Η περιγραφή της κινητικής της απονιτροποίησης βασίζεται στην παραδοχή, για λόγους απλότητας, ότι είναι μια διεργασία αναγωγής ενός σταδίου:



Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται η κλασική κινητική Monod για να περιγραφεί η επίδραση καθενός από τα δύο βασικά υποστρώματα (νιτρικά και οργανικός άνθρακας) στο ρυθμό απονιτροποίησης και ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Η εξίσωση που περιγράφει τον ειδικό ρυθμό ανάπτυξης των απονιτροποιητικών βακτηρίων είναι:

$$\mu_H = \mu_H' \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \frac{S}{K_S + S} \quad (2.3.67)$$

Η ανάπτυξη των απονιτροποιητικών βακτηριδίων περιγράφεται από τη σχέση:

$$r_H = \mu_H' \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot X_{BH} - b_H X_{BH} \quad (2.3.68)$$

ενώ η απομάκρυνση των νιτρικών δίνεται από:

$$r_{NO} = -\frac{1}{Y'} (r_H + b_H X_{BH}) \quad (2.3.69)$$

η δε απομάκρυνση οργανικών:

$$r_S = -\frac{1}{Y_H} (r_H + b_H X_{BH}) \quad (2.3.70)$$

όπου	μ_H'	ειδικός ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης (τυπική τιμή $\sim 4,2d^{-1}$)
	K_S, K_{NO}	συντελεστές κορεσμού (20mgCOD/L και 0,5mg-N/L, αντίστοιχα)
	b_H	ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής (0,5d ⁻¹)
	S_{NO}	συγκέντρωση NO ₃ ⁻ (mg-N/L)
	S	συγκέντρωση οργανικών (mg-COD/L)
	Y'	συντελεστής αποδοτικότητας ($\sim 5,8$ mg COD κυττ./mg-N)
	Y_H	συντελεστής αποδοτικότητας ($\sim 0,67$ mg COD κυττ./mgCOD)

Άσκηση 2.20

Μια δεξαμενή απονιτροποίησης πρόκειται να σχεδιαστεί με σκοπό την απομάκρυνση νιτρικών σε απόνερα παροχής 3000m³/d που περιέχει 60mg-COD/L οργανικά και 50mg-N/L νιτρικά. Να υπολογισθεί ο απαιτούμενος όγκος καθώς και η απαιτούμενη προσθήκη μεθανόλης σε COD (αν απαιτείται) προκειμένου τα νιτρικά να μειώνονται σε 5mg-N/L.

Λύση

Τα ισοζύγια μάζας σε μόνιμη κατάσταση δίνουν:

$$\text{βιομάζα:} \quad O = \mu_H' \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} X_{BH} - b_H X_{BH} - \frac{X_{BH}}{\theta} \quad (A)$$

$$\text{υπόστρωμα (οργανικά):} \quad O = -\frac{1}{Y_H} \mu_H' \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} X_{BH} + \frac{S_0 - S}{\theta} \quad (B)$$

$$\text{νιτρικά:} \quad O = -\frac{1}{Y'} \mu_H' \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} X_{BH} + \frac{S_{0,NO} - S_{NO}}{\theta} \quad (Γ)$$

Από την (B) και την (Γ) είναι: $Y'(S_{0,NO} - S_{NO}) = Y_H(S_0 - S)$

Απαιτώντας $S_{NO}=5$ είναι (αφού αντικατασταθούν οι τιμές των παραμέτρων):

$$S = S_0 - 389,55 \quad (Δ)$$

Αντικαθιστώντας στην (A) είναι (για $X_{BH} \neq 0$):

$$4,2 \frac{S_0 - 389,55}{S_0 - 369,55} \cdot \frac{5}{5,5} = 0,5 + \frac{1}{\theta} \quad (E)$$

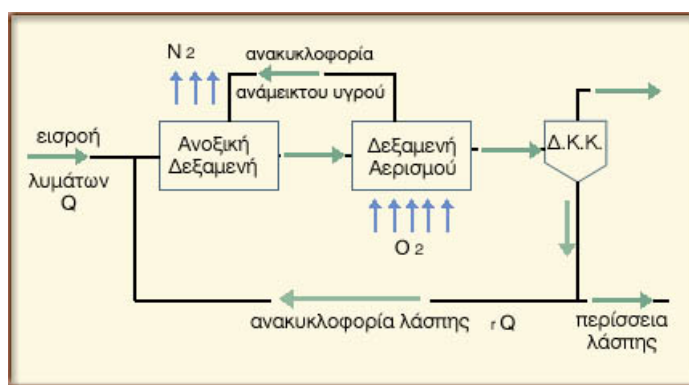
Για κάθε θ προσδιορίζεται το S_0 (η απαιτούμενη φόρτιση σε οργανικά) και αντικαθιστώντας στην (Δ) βρίσκεται το (S), αντικαθιστώντας δε στην (B) βρίσκεται το X_{BH} . Άρα φαίνεται ότι υπάρχει μια μονάδα ελευθερίας.

Αν υποθεθεί $\theta=0,5$ d βγάζουμε ότι η απαιτούμενη φόρτιση είναι $S_0 \sim 428$ mgCOD/L. Το COD στην απορροή τότε θα είναι $S=S_0-389,55=38,45$ mgCOD/L. Μεγαλύτερος χρόνος παραμονής θ απαιτεί μικρότερη συγκέντρωση S_0 , και θα οδηγούσε σε μεγαλύτερη απομάκρυνση οργανικών.

Για $\theta=0,5$ d η απαιτούμενη παροχή οργανικών είναι επομένως $Q \cdot S_0=1284$ kg/d, άρα πρέπει να προστεθούν $1284-60=1224$ kg-COD/d μεθανόλης. Ο όγκος που απαιτείται για $\theta=0,5$ d είναι $V=Q \cdot \theta=1500$ m³.

2.3.3.2.2 Προαπονιτροποίηση

Προκειμένου να αποφευχθεί η ανάγκη προσθήκης εξωτερικής πηγής άνθρακα, είναι δυνατόν να προηγηθεί η απονιτροποίηση της νιτροποίησης/οξειδωσης, εκμεταλλευόμενοι έτσι τα πλούσια σε οργανικό φορτίο απόβλητα που προέρχονται από την πρωτοβάθμια επεξεργασία. Αυτή η διάταξη φυσικά απαιτεί ανακυκλοφορία του ανάμεικτου υγρού (πλούσιου σε νιτρικά) που απορρέει από τη δεξαμενή αερισμού στη δεξαμενή απονιτροποίησης για απομάκρυνση του αζώτου. Αυτή η διεργασία είναι πολύ δημοφιλής γιατί επιτυγχάνει ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικών και αζώτου. Ονομάζεται προαπονιτροποίηση, και δίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.3.7.



Σχήμα 2.3.7. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, στο οποίο φαίνεται η διεργασία της προαπονιτροποίησης

Δύο βασικές παράμετροι καθορίζουν την επιτυχή απομάκρυνση του αζώτου στη διεργασία της προαπονιτροποίησης: η παροχή οξυγόνου και ο λόγος ανακυκλοφορίας ανάμεικτου υγρού.

(α) *Παροχή Οξυγόνου.* Μεγάλη παροχή οξυγόνου οδηγεί σε ικανοποιητική νιτροποίηση. Ωστόσο, εξαιτίας της ανακυκλοφορίας του ανάμεικτου υγρού, υπερβολικός αερισμός οδηγεί σε υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου στην ανοξική δεξαμενή και παρεμπόδιση της απονιτροποίησης. Επομένως υπάρχει κάποια βέλτιστη παροχή οξυγόνου.

(β) *Λόγος ανακυκλοφορίας ανάμεικτου υγρού.* Μικρός λόγος ανακυκλοφορίας οδηγεί σε περιορισμένη απονιτροποίηση. Ωστόσο, υπερβολικά μεγάλος λόγος οδηγεί ουσιαστικά σε παρόμοιες συνθήκες στις δύο δεξαμενές (σαν να ήταν ένας καλώς αναδευόμενος αντιδραστήρας) και επομένως μικρή απομάκρυνση αζώτου. Ο βέλτιστος λόγος ανακυκλοφορίας είναι περίπου 4. Η διάταξη αυτή, εκτός του ότι δεν απαιτεί εξωτερική πηγή άνθρακα, μειώνει τον απαιτούμενο όγκο αέρα για νιτροποίηση και αποφεύγει την ανάγκη ενδιάμεσων δεξαμενών καθίζησης, που θα απαιτούσε μια σειρά από δεξαμενές νιτροποίησης και απονιτροποίησης.

2.3.3.3 Αφαίρεση φωσφόρου

Ο φώσφορος στα υγρά απόβλητα απαντάται σε τρεις βασικές μορφές: ορθοφωσφορικά, πολυφωσφορικά και οργανικός φώσφορος. Περίπου 10% απομακρύνεται με την πρωτοβάθμια καθίζηση. Με εξαίρεση το μικρό ποσοστό που δεσμεύεται από τη μικροβιακή ανάπτυξη στη δευτεροβάθμια επεξεργασία, το μεγαλύτερο ποσοστό είναι διαλυμένο και απαιτεί προχωρημένη επεξεργασία.

Μέχρι πρόσφατα ο συνηθέστερος τρόπος απομάκρυνσης φωσφόρου ήταν η χημική κατακρήμνιση με χρήση αλάτων του ασβεστίου ή του αργιλίου (συνήθως υδροξείδια), ή του σιδήρου (συνήθως θειικός ή χλωριούχος). Η απομάκρυνση του φωσφόρου επιτυγχάνεται και με φυσικές μεθόδους, όπως είναι η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα (10-30%), η υπερδιήθηση (20-50%) και η αντίστροφη όσμωση (90-100%).

Οι βιολογικές μέθοδοι (χρήση μικροοργανισμών κατάλληλου τύπου) βασίζονται στην εναλλάξ έκθεση των μικροοργανισμών σε αναερόβιες και αερόβιες συνθήκες. Επιτυγχάνουν απομάκρυνση φωσφόρου 70-90%. Οι βιολογικές μέθοδοι σήμερα προτιμούνται γιατί επιτυγχάνουν υψηλό ποσοστό αφαίρεσης φωσφόρου με χαμηλό κόστος λειτουργίας, ενώ ταυτόχρονα αποφεύγεται η προσθήκη χημικών που στη συνέχεια θα πρέπει να απομακρυνθούν γιατί επιβαρύνουν αφενός την επεξεργασία του υγρού ρεύματος και αφετέρου την παραγόμενη λάσπη στις δεξαμενές καθίζησης.

Η βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου βασίζεται στην ικανότητα ορισμένων μικροοργανισμών (φωσφοροβακτηρίων) να προσροφούν και να συσσωρεύουν ενδοκυτταρικά περισσότερο φώσφορο απ' όσο απαιτείται συνήθως για την κυτταρική ανάπτυξη και συντήρηση. Εμπλουτισμός των μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων με φωσφοροβακτήρια πραγματοποιείται με έκθεση της ενεργού ιλύος σε εναλλασσόμενες αναερόβιες και αερόβιες συνθήκες.

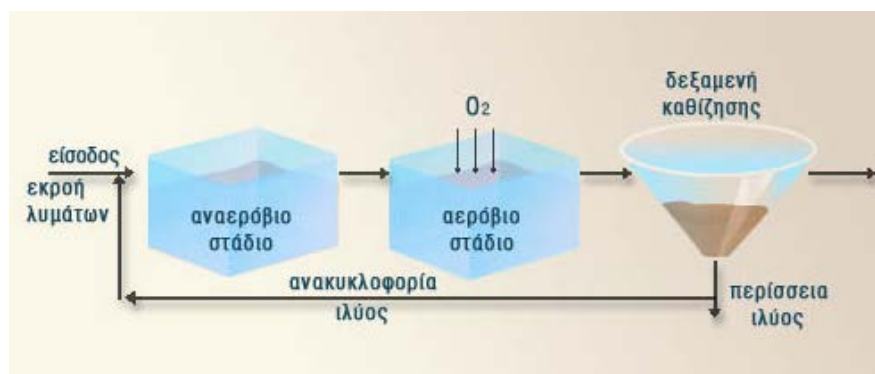
Η αποθήκευση φωσφορικών και άνθρακα από τα φωσφοροβακτήρια κατά την περιοδική έκθεσή τους σε αναερόβιες και αερόβιες συνθήκες, δεν είναι τυχαίο γεγονός αλλά αποτελεί μηχανισμό επιβίωσης για τα βακτήρια αυτά, έναντι των υπολοίπων ετερότροφων, που δεν έχουν την ικανότητα της αποθήκευσης. Σε αναερόβιες συνθήκες η υδρόλυση των αποθηκευμένων (αερόβια) πολυφωσφορικών παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για ενδοκυτταρική συσσώρευση και αποθήκευση άνθρακα σε μορφή βιοπολυμερούς PHB (πολυυδροξυβουτυρικού). Τα αποθέματα αυτά του άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αερόβια, σε συνθήκες περιορισμού ή έλλειψης διαλυτού οργανικού άνθρακα, ως πηγή άνθρακα και ενέργειας. Τα φωσφορικά αποθηκεύονται στη μορφή πολυφωσφορικών. Τα πολυφωσφορικά και τα PHB σχηματίζονται στο εσωτερικό των κυττάρων υπό τη μορφή κοκκιωδών συσσωματωμάτων.

2.3.3.3.1 Διατάξεις Βιολογικής Απομάκρυνσης Φωσφόρου

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες για τη βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου από τα υγρά απόβλητα (αστικά ή βιομηχανικά), που βασίζονται στη διεργασία της ενεργού ιλύος.

Η διεργασία A/O χρησιμοποιείται για συνδυασμένη οξείδωση άνθρακα και απομάκρυνση φωσφόρου από τα απόβλητα και περιλαμβάνει ένα αναερόβιο και αερόβιο στάδιο σε σειρά (Σχήμα 2.3.8). Στο αναερόβιο στάδιο, ένα μέρος του ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου φωσφόρου στα κύτταρα των φωσφοροβακτηρίων απελευθερώνεται ως διαλυτός φώσφορος με ταυτόχρονη μερική μείωση του BOD στο στάδιο αυτό. Στο επόμενο αερόβιο στάδιο, ο φώσφορος προσλαμβάνεται από τα κύτταρα των φωσφοροβακτηρίων και τελικά απομακρύνεται από το υγρό μέσο κατά την απομάκρυνση της πλούσιας σε φωσφορικά ιλύος. Ανακυκλοφορία της

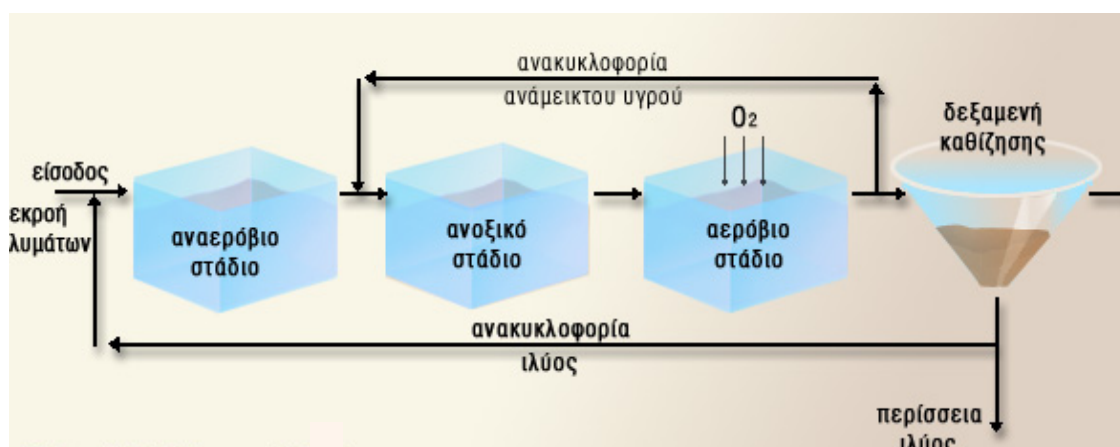
καθιζόμενη ιλύς στην είσοδο του συστήματος και ανάμειξή της με το εισερχόμενο απόβλητο εξασφαλίζει ικανοποιητικό χρόνο παραμονής των φωσφοροβακτηρίων στο σύστημα. Η συγκέντρωση του φωσφόρου στην έξοδο εξαρτάται κύρια από το λόγο BOD/P των προς επεξεργασία αποβλήτων. Η απαίτηση αυτή συνίσταται στη διασφάλιση ικανοποιητικής ποσότητας οργανικής ύλης ως πηγής άνθρακα και ενέργειας. Έχει αναφερθεί ότι, όταν ο λόγος αυτός υπερβαίνει την τιμή 10 προς 1, η συγκέντρωση του διαλυτού φωσφόρου στην εκροή είναι 1mg/L ή και λιγότερο.



Σχήμα 2.3.8. Η διεργασία A/O

2.3.4 Ταυτόχρονη Απομάκρυνση Οργανικών, Αζώτου και Φωσφόρου

Με κατάλληλο συνδυασμό αερόβιων, ανοξικών και αναερόβιων συνθηκών, έχουν αναπτυχθεί σήμερα διεργασίες οι οποίες επιτυγχάνουν την ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικών, αζώτου και φωσφόρου. Για παράδειγμα, η διεργασία A²/O (Σχήμα 2.3.9) είναι μια τροποποίηση της A/O με προσθήκη ενός ανοξικού σταδίου για απονιτροποίηση. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στην ανοξική ζώνη είναι περίπου 1 h. Στην ανοξική δεξαμενή δεν υπάρχει διαλυμένο οξυγόνο αλλά μόνο νιτρικά ή/και νιτρώδη τα οποία εισέρχονται με την ανακυκλοφορία του ανάμεικτου υγρού από την αερόβια δεξαμενή στην ανοξική. Η ανακυκλοφορία της καθιζόμενης ιλύος γίνεται στην είσοδο του αναερόβιου σταδίου. Στην έξοδο μιας μονάδας A²/O η συγκέντρωση φωσφόρου που επιτυγχάνεται είναι μικρότερη από 2mg/L.



Σχήμα 2.3.9. Σύστημα ταυτόχρονης απομάκρυνση οργανικών, αζώτου και φωσφόρου

2.4 ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Με τον όρο «τριτογενής» (ή «τριτοβάθμια») επεξεργασία νοείται:

- η περαιτέρω επεξεργασία/αποδόμηση διαλυμένων οργανικών ενώσεων στο νερό και στα υγρά απόβλητα, όταν η εκροή της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας δεν ικανοποιεί τις νομοθετημένες απαιτήσεις για τον αποδέκτη ή όταν είναι επιθυμητή η επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων,
- η επεξεργασία ενώσεων που «περνάνε» αναλλοίωτες από την πρωτοβάθμια και τη δευτεροβάθμια επεξεργασία (πχ μέταλλα),
- η απενεργοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών.

Συνήθως, εκτός από την απολύμανση, εφαρμόζονται η χημική οξείδωση, η αναγωγή, η προσρόφηση σε στερεά, η ιοντοεναλλαγή, η αντίστροφη όσμωση.

2.4.1 Απολύμανση

Οι δεξαμενές απολύμανσης σχεδιάζονται για την επιλεκτική καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών που υπάρχουν πάντοτε στα αστικά λύματα ($10^6 - 10^9$ ανά 100ml) και σε όσα υγρά απόβλητα έρχονται σε επαφή με αυτά, μέχρι των ορίων που επιβάλλουν οι προδιαγραφές. Οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι βακτήρια, ιοί και κύστες.

Απολύμανση μπορεί να γίνει:

- με χημικά μέσα (χλώριο, βρώμιο, ιώδιο, όζον και πολλά άλλα χημικά). Μεγαλύτερη εφαρμογή έχει το χλώριο και το όζον.
- με φυσικά μέσα (θερμότητα και φως – ηλιακό ή υπεριώδες),
- με ακτινοβολία (κυρίως με ακτίνες γ).

Καταστροφή των παθογόνων μπορεί να συμβεί παρεμπιπτόντως και κατά τις ήδη αναφερθείσες διεργασίες επεξεργασίας, δεν είναι όμως ποτέ ικανοποιητική.

Η δράση των απολυμαντικών μέσων συνίσταται στην καταστροφή των μικροοργανισμών, είτε λόγω οξείδωσης του κυτταρικού τους περιβλήματος, είτε λόγω διάχυσης του απολυμαντικού στο εσωτερικό τους και αντίδρασης με τα ένζυμα και με το πρωτόπλασμα.

Έχει παρατηρηθεί πειραματικά, από το 1908, ότι η καταστροφή των μικροοργανισμών εκφράζεται με κινητική πρώτης τάξης, σύμφωνα με τη σχέση

$$-\frac{dX_{org}}{dt} = k \cdot X_{org} \quad (2.4.1)$$

όπου X_{org} η συγκέντρωση των παθογόνων μικροοργανισμών

k σταθερά που εξαρτάται από το pH, τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση του απολυμαντικού, το είδος των μικροοργανισμών καθώς και την ύπαρξη κολλοειδών και συσσωματωμάτων που προσφέρουν σ' αυτούς καταφύγιο και προστασία.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη σταθερά του ρυθμού καταστροφής έχει βρεθεί πειραματικά ότι υπακούει στο νόμο του Arrhenius.

Η σχέση που συνδέει τη σταθερά με τη συγκέντρωση του απολυμαντικού είναι της μορφής

$$k = a \cdot C^b \quad (2.4.2)$$

όπου a, b εμπειρικές σταθερές

C η συγκέντρωση του απολυμαντικού.

Η κινητική πρώτης τάξης δεν ακολουθείται πάντοτε στην πράξη, οπότε η συνήθης πρακτική είναι να θεωρείται κινητική της μορφής

$$\frac{-dX_{org}}{dt} = k \cdot X_{org}^n \quad (2.4.3)$$

και να εκτιμάται η τιμή του n από πειραματικά δεδομένα.

Οι εγκαταστάσεις απολύμανσης σχεδιάζονται ως αντιδραστήρες εμβολικής ροής σύμφωνα με τα ακόλουθα βήματα:

- Επιλέγεται το μέσο απολύμανσης.
- Επιλέγεται το επιθυμητό ποσοστό καταστροφής των μικροοργανισμών.
- Από πειραματικά αποτελέσματα ή βιβλιογραφικά δεδομένα εκτιμώνται οι κινητικοί συντελεστές.
- Υπολογίζεται ο απαραίτητος χρόνος παραμονής των αποβλήτων από την (2.4.3).
- Διαστασιολογείται η δεξαμενή απολύμανσης.
- Υπολογίζεται η απαιτούμενη παροχή απολυμαντικού και διαστασιολογείται η μονάδα τροφοδοσίας του. Για τον προσδιορισμό της απαίτησης σε απολυμαντικό τυπικές τιμές σχεδιασμού για χλώριο είναι 2-8 mg/L για έξοδο από μονάδα ενεργού ιλύος και 10-25 mg/L για ανεπεξέργαστα λύματα.

2.4.2 Αντίστροφη όσμωση

Όταν στις δύο πλευρές μιας ημιπερατής μεμβράνης βρίσκονται διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης, είτε σε ιόντα είτε σε μη φορτισμένα μόρια, θα εμφανισθεί κίνηση (μορίων του διαλύτη) μέσα από τους πόρους της μεμβράνης προς την κατεύθυνση εξομοίωσης των συγκεντρώσεων, δηλαδή από το αραιότερο διάλυμα προς το πυκνότερο. Η διεργασία αυτή καλείται όσμωση. Οσμωτική πίεση δε, είναι η πίεση που πρέπει να εξασκηθεί πάνω στο πυκνότερο διάλυμα ώστε να μην «περάσουν» σ' αυτό μόρια του διαλύτη. Αν τώρα εφαρμοσθεί πίεση μεγαλύτερη από την οσμωτική από την πλευρά του πυκνού διαλύματος, η πορεία θα αντιστραφεί: διαλύτης θα «περάσει» από το πυκνότερο διάλυμα προς το αραιότερο, με αποτέλεσμα το πυκνό διάλυμα να πυκνώσει ακόμη περισσότερο. Αυτή είναι η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης και χρησιμοποιείται στον καθαρισμό και την απομάκρυνση ιόντων από το νερό (αφαλάτωση), καθώς τα ιόντα/μόρια της διαλυμένης ουσίας συγκρατούνται πάνω στη μεμβράνη.

Η δρώσα δύναμη για τη ροή του διαλύτη μέσα από τη μεμβράνη είναι η διαφορά μεταξύ της πτώσης πίεσης λόγω ροής μέσα από τη μεμβράνη και της διαφοράς οσμωτικής πίεσης. Η ροή λοιπόν του διαλύτη θα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dM_{\delta}}{dt} = \frac{K_{\delta} \cdot \rho_{\delta}}{L_{\mu}} \cdot (\Delta p - \Delta \pi) \quad , \quad kg/(m^2 \cdot d) \quad (2.4.4)$$

- όπου M_{δ} η μάζα διαλύτη (kg)
- A η επιφάνεια της μεμβράνης
- K_{δ} η διαπερατότητα του διαλύτη, έστω L/atm/m/day
- L_{μ} το πάχος της μεμβράνης
- ρ η πυκνότητα του διαλύματος
- Δp πτώση πίεσης στη μεμβράνη, η διαφορά μεταξύ των πιέσεων στις δύο πλευρές της
- $\Delta \pi$ η διαφορά οσμωτικής πίεσης μεταξύ των αντιστοίχων μεγεθών στις δύο πλευρές.

Η οσμωτική πίεση για αραιά διαλύματα είναι συχνά γραμμική συνάρτηση της συγκέντρωσης, σύμφωνα με τη σχέση

$$\pi = \alpha \cdot x \quad (2.4.5)$$

όπου x το μοριακό κλάσμα (ή κλάσμα βάρους)

α σταθερά από πειραματικά δεδομένα.

Όταν το διάλυμα γίνεται πυκνότερο, η οσμωτική πίεση αυξάνεται περισσότερο από όσο προβλέπεται από τη γραμμική σχέση. Για ασυμπίεστα υγρά η οσμωτική πίεση μπορεί να εκτιμηθεί και από δεδομένα τάσεων ατμών.

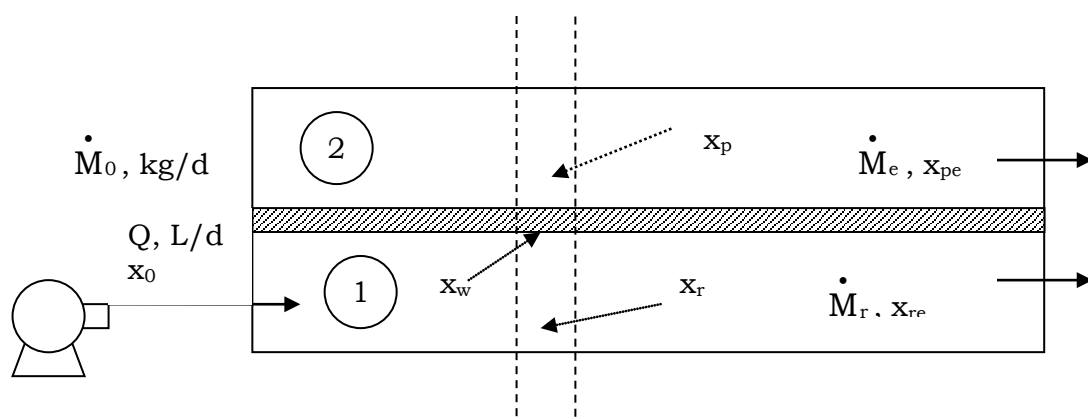
Αν μέσα από τη μεμβράνη μπορεί να περάσει και η διαλυμένη ουσία (αυτό εξαρτάται από τη σχέση μεγέθους μορίων/ιόντων και ανοιγμάτων της μεμβράνης) θα έχουμε και μια ροή διαλυμένης ουσίας

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dM_{\delta, \text{ουστ.}}}{dt} = \frac{K'_{\delta, \text{ουστ.}}}{L_{\mu}} \cdot \Delta x \quad (2.4.6)$$

Με $K'_{\delta, \text{ουστ.}} = 0$, κατακρατούνται πλήρως τα ιόντα/μόρια πάνω στη μεμβράνη.

Η αντίστροφη όσμωση είναι μια διεργασία ενάντια στη θερμοδυναμική, που επιτάσσει μεταβολές προς σταθερότερες καταστάσεις. Με αυτή την έννοια, χρειάζεται ενέργεια για να συμπυκνωθεί το πυκνό διάλυμα (απόβλητο). Καθίσταται επίσης προφανές ότι είναι αντιοικονομική η παραλαβή πολύ πυκνών συμπυκνωμάτων, αφού θα απαιτείται η άσκηση υπερβολικά υψηλής πίεσης.

Έστω ότι έχουμε διάταξη σύμφωνα με το Σχήμα 2.4.1.



Σχήμα 2.4.1. Διάταξη αντίστροφης όσμωσης

Μέσω μιας αντλίας υψηλής πίεσης εισέρχεται στο χώρο ① της διάταξης ογκομετρική παροχή Q (μαζική παροχή $\dot{M}_0$) με σύσταση x_0 διαλυμένης ουσίας. Η μεμβράνη έχει επιφάνεια A και στην έξοδο της διάταξης έχουμε μαζική παροχή εξόδου συμπυκνώματος $\dot{M}_r$ και διηθήματος $\dot{M}_e$. Στο χώρο υψηλής πίεσης θα υπάρχει κίνηση του διαλύτη (συνήθως νερού) προς τη μεμβράνη. Η κίνηση αυτή θα παρασύρει και διαλυμένη ουσία, οπότε θα έχουμε μια σύσταση (x_w) κοντά στην επιφάνεια υψηλότερη από αυτήν στην κύρια μάζα του ρευστού (x_r). Αυτή η διαφορά θα έχει ως αποτέλεσμα αφενός να αυξήσει την οσμωτική πίεση από την πλευρά του συμπυκνώματος, οπότε θα έχουμε χαμηλότερο ρυθμό μεταφοράς μέσα από τη μεμβράνη (σύμφωνα με τη σχέση 2.4.4), αφετέρου θα δημιουργήσει μια κίνηση από το τοίχωμα προς τον κύριο όγκο του ρευστού, ανάλογη του

συντελεστή μεταφοράς μάζας. Για πολύ υψηλές τιμές του συντελεστή αυτού, οι δύο συγκεντρώσεις εξισώνονται.

Σε κάθε σημείο (ή στοιχειώδη όγκο του συστήματος ή – ισοδύναμα – στοιχειώδες τμήμα της μεμβράνης) θα έχουμε

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dM_{\delta}}{dt} = \dot{M} \cdot (1 - x_p) = \frac{K_{\delta} \cdot \rho_{\delta}}{L_{\mu}} \cdot [(p_r - p_p) - (\pi_r(x_w) - \pi_p(x_p))] \quad kg/(m^2 \cdot d) \quad (2.4.7)$$

όπου $\dot{M}$ ολική μαζική ροή, $kg/m^2 \cdot d$

x_p περιεκτικότητα του διαλύματος στη διαλυμένη ουσία στην περιοχή ② -διηθήματος (permeate)

p_r πίεση (η υψηλή) στο χώρο ① - χώρο συμπυκνώματος (retentate)

p_p πίεση (συνήθως ατμοσφαιρική) στο χώρο ②.

Με την απλουστευτική παραδοχή ότι η οσμωτική πίεση υπακούει στη σχέση (2.4.5) θα έχουμε:

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dM_{\delta}}{dt} = \dot{M} \cdot (1 - x_p) = \frac{K_{\delta} \cdot \rho_{\delta}}{L_{\mu}} \cdot [(p_r - p_p) - \alpha \cdot (x_w - x_p)] \quad (2.4.8)$$

Η συγκέντρωση x_w είναι μη μετρήσιμη, πρέπει συνεπώς να συσχετισθεί με μετρήσιμη συγκέντρωση (όπως είναι η x_r). Για το λόγο αυτό ορίζουμε το μέγεθος ΜΠ (μέτρο πόλωσης της συγκέντρωσης, concentration polarization modulus) με τη σχέση

$$MP = \frac{x_w}{x_r} \quad (2.4.9)$$

Το ΜΠ μπορεί να εκτιμηθεί από πειραματικά δεδομένα. Αν έχουμε υψηλό συντελεστή μεταφοράς μεταφοράς μάζας, θα ισούται με τη μονάδα.

Συνδυασμός των (2.4.8) και (2.4.9) οδηγεί στη σχέση

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dM_{\delta}}{dt} = \dot{M} \cdot (1 - x_p) = \frac{K_{\delta} \cdot \rho_{\delta}}{L_{\mu}} \cdot [(p_r - p_p) - \alpha \cdot (MP \cdot x_r - x_p)] \quad (2.4.10)$$

Αντίστοιχα γράφεται η ροή διαλυμένης ουσίας

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dM_{\delta, \text{ουσ.}}}{dt} = \dot{M} \cdot x_p = \frac{K'_{\delta, \text{ουσ.}}}{L_{\mu}} \cdot (x_w - x_p) = \frac{K'_{\delta, \text{ουσ.}}}{L_{\mu}} \cdot (MP \cdot x_r - x_p) \quad (2.4.11)$$

Προσοχή: το $K_{\delta, \text{διαλ.ουσ.}}$ δεν έχει τις ίδιες διαστάσεις με το K_{δ} , γιατί ο μηχανισμός μεταφοράς είναι διαφορετικός: ενώ για το νερό δυναμικό είναι η πίεση, για τη διαλυμένη ουσία είναι η συγκέντρωση.

Στο σημείο αυτό ορίζουμε την εκλεκτικότητα της μεμβράνης a σύμφωνα με τη σχέση

$$a = \frac{K_{\delta}}{K_{\delta, \text{ουσ.}}} \quad (2.4.12)$$

Δεδομένων των διαφορετικών διαστάσεων των δύο διαπερατοτήτων, η εκλεκτικότητα δεν είναι αδιάστατο μέγεθος. Επίσης τιμή της κάτω από τη μονάδα δεν σημαίνει ότι μεταφέρεται εκλεκτικά η διαλυμένη ουσία σε σχέση με το διαλύτη.

Με την παραδοχή ότι το $K_{\delta, \text{ουσ.}}$ είναι διάφορο του μηδενός («περνάει» και διαλυμένη ουσία) και ανεξάρτητο από τη ροή του διαλύτη, καθώς επίσης και ότι το K_{δ} είναι

ανεξάρτητο από τη ροή της διαλυμένης ουσίας, από τις σχέσεις (2.4.10), (2.4.11) και (2.4.12) καταλήγουμε στη σχέση

$$x_r = \frac{x_p \cdot [x_p \cdot (a \cdot \alpha \cdot \rho_\delta - 1) + a \cdot \rho_\delta \cdot (p_r - p_p) + 1]}{M\Pi \cdot [1 + (a \cdot \alpha \cdot \rho_\delta - 1) \cdot x_p]} \quad (2.4.13)$$

Η σχέση αυτή συνδέει την περιεκτικότητα στο συμπύκνωμα με την περιεκτικότητα στο διήθημα και τα χαρακτηριστικά του συστήματος μεμβράνης/διαλύτη/διαλυμένης ουσίας. (Αντίστοιχα μπορούμε να επιλύσουμε ως προς x_p).

Η σχέση (2.4.13) παριστάνει το ρυθμό μεταφοράς τόσο του διαλύτη όσο και της διαλυμένης ουσίας μέσω της μεμβράνης σε όρους % σύστασης. Αν $K_{\delta, \text{ous}}=0$, το x_p θα είναι μηδέν (δεν θα περάσει καθόλου διαλυμένη ουσία και θα έχουμε ως διήθημα καθαρό νερό).

Η σχέση (2.4.13) θα επιλυθεί μαζί με το ισοζύγιο μάζας για το σύστημα, που είναι οι σχέσεις

$$\begin{aligned} \dot{M}_0 &= \dot{M}_r + \dot{M}_e \\ \dot{M}_0 \cdot x_0 &= \dot{M}_r \cdot x_{re} + \dot{M}_e \cdot x_{pe} \end{aligned} \quad (2.4.14)$$

όπου $\dot{M}_0$ η (μαζική) είσοδος στον όγκο dV , με σύσταση x_0 και τα άλλα μεγέθη αντιστοιχούν στην έξοδο (r για το συμπύκνωμα και p για το διήθημα αντίστοιχα). Αν η διάταξη αποτελείται από δύο χώρους πλήρους ανάμειξης, οι σχέσεις (2.4.13) και (2.4.14) γράφονται κατευθείαν μεταξύ εισόδου και εξόδου, αλλιώς απαιτείται ολοκλήρωση κατά μήκος της διάταξης.

Έστω ότι έχουμε ένα διαχωριστήρα μεμβράνης πλήρους ανάμειξης. Επιλύοντας την (2.4.14) θα έχουμε την εξίσωση λειτουργίας

$$x_{p, \text{out}} = - \frac{1 - \frac{\dot{M}_e}{\dot{M}_0}}{\frac{\dot{M}_e}{\dot{M}_0}} \cdot x_{re} + \frac{x_0}{\frac{\dot{M}_{pe}}{\dot{M}_0}} \quad (2.4.15)$$

Η ταυτόχρονη επίλυση των (2.4.15) και (2.4.13) (είτε αναλυτικά είτε γραφικά) δίνει τα χαρακτηριστικά εξόδου από το σύστημα.

Η λειτουργία της αντίστροφης όσμωσης μπορεί και να δίνεται με όρους συντελεστή απόρριψης (rejection coefficient) R , σύμφωνα με τον ορισμό

$$R = \frac{x_r - x_p}{x_r} = 1 - \frac{x_p}{x_r} \quad (2.4.16)$$

Άσκηση 2.21

Μια καινούρια συνθετική μεμβράνη θα χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα πλήρους ανάμειξης με πίεση εισόδου 10 atm και πίεση από τη μεριά του διηθήματος 1 atm. Να υπολογιστούν οι περιεκτικότητες σε χλωριούχο νάτριο στο διήθημα και στο συμπύκνωμα, όταν η είσοδος περιέχει 0,010 w/w χλωριούχο νάτριο σε νερό και σχεδιάζουμε για $F_p/F_{\text{εξ}} = 0,40$.

Δίδεται ότι λόγω του πολύ υψηλού συντελεστή μεταφοράς μάζας του χλωριούχου νατρίου, $M\Pi = 1$.

Επίσης $a_{H_2O/NaCl} = 0,351 \text{ L}/(\text{kg} \cdot \text{atm})$, $\rho = 0,997 \text{ kg/L}$ (καθαρού νερού).

Λύση

Η σχέση (2.4.13) γίνεται

$$x_r = \frac{x_p \cdot [x_p \cdot (a \cdot \alpha \cdot \rho_\delta - 1) + a \cdot \rho_\delta \cdot (p_r - p_p) + 1]}{1 + (a \cdot \alpha \cdot \rho_\delta - 1) \cdot x_p}$$

Από δεδομένα της βιβλιογραφίας (Perry&Green, 6th edition, p.16-23) βρίσκουμε ότι η οσμωτική πίεση υδατικού διαλύματος 0,01 mole/mole χλωριούχου νατρίου στους 25°C είναι 0,05 atm. Θεωρούμε ότι ισχύει η γραμμική σχέση (2.4.5) για να βρούμε το συντελεστή α.

Αφού έχουμε πολύ αραιό διάλυμα, μπορούμε να μετατρέψουμε τη σύσταση mole/mole σε σύσταση w/w σύμφωνα με τη σχέση:

$$x_{w/w} = x_{\text{mole/mole}} \cdot \frac{MB_{H_2O}}{MB_{NaCl}} = \frac{18}{58,5} \cdot x_{\text{mole/mole}} = 0,31 x_{\text{mole/mole}}$$

Θα έχουμε λοιπόν

$$\alpha = \frac{0,05 \text{ atm}}{0,01 x_{\text{mole/mole}}} = 15,4 \text{ atm} / x_{w/w}$$

Αντικαθιστώντας τα γνωστά μεγέθη στην (2.4.13) θα έχουμε

$$x_r = \frac{x_p \cdot [x_p \cdot [(0,351) \cdot (15,4) \cdot (0,997) - 1] + 0,351 \cdot (0,997) \cdot (10 - 1) + 1]}{1 + [(0,351) \cdot (15,4) \cdot (0,997) - 1] \cdot x_p}$$

$$x_r = \frac{x_p \cdot [x_p \cdot (4,41) + 4,15]}{1 + 4,41 \cdot x_p}$$

Η εξίσωση αυτή είναι δευτέρας τάξης ως προς x_p . Δεδομένου όμως ότι $x_0 = 0,01$, μπορούμε να τη θεωρήσουμε γραμμική.

Ένα ζεύγος τιμών είναι το (0,0). Για μια τιμή $x_p = 0,004$ (αρκετά χαμηλά για να είμαστε στη γραμμική περιοχή) θα έχουμε

$$x_r = \frac{0,004 \cdot [(0,004) \cdot (4,41) + 4,15]}{1 + (4,41) \cdot (0,004)} = 0,016$$

Έχουμε λοιπόν την ευθεία (0,0) και (0,004,0,016). Υπολογίζουμε την κλίση της και είναι η

$$x_p = 0,244 x_r \quad (A)$$

Αυτή είναι η εξίσωση του ρυθμού μεταφοράς.

Η σχέση (2.4.16) γίνεται

$$x_p = -\left(\frac{6}{4}\right) \cdot x_r + 0,010/0,4 \quad (B)$$

Επίλυση του συστήματος των (A) και (B) σε συνθήκες πλήρους ανάμειξης ($x_p = x_{p,\text{out}}$ και $x_r = x_{r,\text{out}}$) δίνει τις τιμές

$$x_{\text{συμπυκνωματος}} = 0,0143$$

$$x_{\text{διηθηματος}} = 0,0035$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΗΜΙΣΤΕΡΕΩΝ (ΛΑΣΠΩΝ) ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

3.1 ΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΛΑΣΠΩΝ

Σκοπός της αερόβιας χώνευσης είναι η βιολογική σταθεροποίηση των λασπών έτσι ώστε αυτές να μπορούν να διατεθούν ακίνδυνα στο περιβάλλον. Τα πλεονεκτήματα της αερόβιας χώνευσης έναντι της αναερόβιας είναι: (α) δεν απαιτείται θέρμανση της λάσπης, (β) έχει χαμηλότερο πάγιο κόστος εγκατάστασης, (γ) παράγει πιο σταθεροποιημένη λάσπη, (δ) το υπερκείμενο υγρό έχει χαμηλότερο οργανικό ρυπαντικό φορτίο (BOD), (ε) έχει απλούστερη και σταθερότερη λειτουργικότητα και τέλος (στ) επιτυγχάνει νιτροποίηση του οργανικού αζώτου που επαναδιαλυτοποιείται. Τα μειονεκτήματα της αερόβιας χώνευσης έναντι της αναερόβιας είναι: (α) οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες λειτουργίας της λόγω απαιτήσεων παροχής οξυγόνου, (β) η εποχική μεταβαλλόμενη απόδοσή της λόγω μεταβολή της θερμοκρασίας και (γ) δεν παράγεται κανένα χρήσιμο παραπροϊόν.

Η αερόβια χώνευση βασίζεται σε αερόβιους ή επαμφοτερίζοντες μικροοργανισμούς οι οποίοι παρουσία οξυγόνου και υπό καθεστώς έλλειψης τροφής, εξαντλούν το ενδοκυτταρικό περιεχόμενο τους ή υδρολύουν τα οργανικά περιεχόμενα των νεκρών κυττάρων (λύσης) ή των αιωρούμενων στερεών. Τα τελικά προϊόντα της αερόβιας χώνευσης είναι το διοξείδιο του άνθρακα, μη περαιτέρω αποδομήσιμα στερεά (υδατάνθρακες, κυτταρίνες και ημικυτταρίνες) και προϊόντα νιτροποίησης (νιτρώδη και νιτρικά).

Η αερόβια χώνευση των λασπών είναι μία διεργασία παρόμοια με την αερόβια βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, με τη διαφορά ότι αυτή λειτουργεί σε χαμηλή οργανική φόρτιση και μεγάλη ηλικία λάσπης. Έτσι το τελικό αποτέλεσμα είναι η παραγωγή μικρής ποσότητας λάσπης, εφόσον το σύστημα συντηρείται από την ενδογενή αναπνοή των μικροοργανισμών που το απαρτίζουν. Συνήθως στην αερόβια χώνευση οδηγούνται μίγματα πρωτογενών και δευτερογενών λασπών. Οι απαιτήσεις οξυγόνωσης των πρωτογενών λασπών είναι περίπου εννέα φορές περισσότερες από αυτές των δευτερογενών λασπών, καθότι οι δεύτερες είναι συνήθως αρκετά σταθεροποιημένες. Το ορθολογικότερο σύστημα είναι οι πρωτογενείς λάσπες να σταθεροποιούνται αναερόβια και κατόπιν το μίγμα των χωνευμένων πρωτογενών λασπών με τις δευτερογενείς λάσπες να σταθεροποιούνται με αερόβια χώνευση.

Οι παράγοντες που επιδρούν στη διεργασία της αερόβιας χώνευσης είναι:

1. Η συγκέντρωση των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών στερεών
2. Η θερμοκρασία
3. Η ανάδευση
4. Οι βιολογικές ανάγκες σε οξυγόνο
5. Το είδος των στερεών
6. Οι απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά (άζωτο, φώσφορος)
7. Η φυσιολογική κατάσταση των μικροοργανισμών
8. Ο χρόνος παραμονής στον αερόβιο χωνευτήρα.

3.1.1 Σχεδιασμός Αερόβιας χώνευσης λασπών

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος αερόβιας χώνευσης λασπών συνίσταται στον υπολογισμό του όγκου του χωνευτήρα, καθώς και της απαιτούμενης ισχύος των

μηχανημάτων οξυγόνωσης και ανάμιξης. Για τον σχεδιασμό απαιτούνται να ληφθούν υπόψη: (α) η παροχή και η σύσταση της λάσπης που πρόκειται να σταθεροποιηθεί, (β) η θερμοκρασία χώνευσης, (γ) η ανάγκη παροχής οξυγόνου, (δ) η ανάγκη ανάμιξης της λάσπης, (ε) η αναγκαία συγκέντρωση αφαίρεσης της χωνευμένης λάσπης, (στ) ο τρόπος μεταφοράς και διάθεσης της χωνευμένης λάσπης, (ζ) ο τρόπος λειτουργίας του χωνευτήρα, (η) ο αναγκαίος χρόνος παραμονής της λάσπης στον χωνευτήρα και (θ) η μέθοδος λειτουργίας του χωνευτήρα, δηλαδή εάν η διεργασία θα είναι συνεχούς ή διαλείποντος έργου.

3.1.1.1 Μοντελοποίηση της χώνευσης

Η αερόβια χώνευση των λασπών βασίζεται στην αυτο-οξείδωση της οργανικής κυτταρικής μάζας μέσω του ενδογενούς μεταβολισμού της. Η αυτο-οξείδωση αυτή, έχει αποδειχθεί ότι ακολουθεί κινητική 1^{ης} τάξεως ως προς την αποδόμηση των αιωρούμενων πιητικών στερεών. Κάτω από συνθήκες διαλείποντος έργου ή εμβολικής ροής ισχύει η σχέση:

$$\frac{X_e}{X_0} = e^{-k_d \cdot t} \quad (3.1.1)$$

όπου X_e βιο-αποδομήσιμα αιωρούμενα πιητικών στερεών μετά από οξείδωση σε χρόνο t

X_0 αρχικά αιωρούμενα πιητικά στερεά

k_d ρυθμός αποδόμησης, d^{-1}

t χρόνος αερισμού, d .

Αν λάβουμε υπόψη τα μη βιοαποικοδομήσιμα αιωρούμενα πιητικά στερεά X_n , τότε η σχέση (3.1.1) μετατρέπεται στην σχέση (3.1.2)

$$\frac{X_e - X_n}{X_0 - X_n} = e^{-k_d \cdot t} \quad (3.1.2)$$

Αν θεωρήσουμε έναν αντιδραστήρα πλήρους ανάδευσης τότε η (3.1.2) γίνεται:

$$\frac{X_e - X_n}{X_0 - X_n} = \frac{1}{1 + k_d \cdot t} \quad (3.1.3)$$

και αν η (3.1.3) λυθεί ως προς το χρόνο παραμονής θ , τότε λαμβάνουμε τη:

$$\theta = \frac{X_0 - X_e}{k_d \cdot (X_e - X_n)} \quad (3.1.4)$$

και αν χρησιμοποιηθούν σε σειρά m αριθμός ισοδύναμου όγκου αντιδραστήρων τότε λαμβάνεται η σχέση:

$$\frac{X_e - X_n}{X_0 - X_n} = \left(\frac{1}{1 + k_d \cdot t_m} \right)^m \quad (3.1.5)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (3.1.5), η χρήση πολλαπλών αντιδραστήρων αντί του ενός έχει καλύτερη απόδοση.

Οι ανάγκες σε οξυγόνο υπολογίζονται σε 1,4 kg O_2 για κάθε kgVSS που αποδομείται.

Η θερμοκρασία επιδρά στον ρυθμό αποδόμησης k_d . Για κάθε αύξηση 10°C, ο ρυθμός k_d διπλασιάζεται. Σε μία τυπική αερόβια χώνευση η συγκέντρωση της οξειδωμένης λάσπης που λαμβάνεται μετά την αερόβια χώνευση και κάτω από την δεξαμενή δευτερογενούς καθίζησης είναι από 0,5 έως 1,5%, η απαιτούμενη παροχή αέρα από 15-20 $m^3/min/1000 m^3$ χωνευτήρα, ενώ η απαιτούμενη ισχύς για την ανάδευση του χωνευτήρα ανέρχεται σε 0,02 kW/ m^3 χωνευτήρα. Η

παραγόμενη θερμότητα από την εξώθερμη οξείδωση των οργανικών πιητικών στερεών ανέρχεται σε 21000 kJ/kgVSS που αποδομείται. Επομένως ενδείκνυται η πάχυνση της λάσπης, προ της αερόβιας χώνευσής της. Όμως, συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών πάνω από 2% στον αερόβιο χωνευτήρα δημιουργούν προβλήματα στην αποτελεσματική ανάδευση της λάσπης καθώς και στη μεταφορά του οξυγόνου.

3.1.1.2 Αντιδραστήρας πλήρους αναδέυσεως με επιστροφή λάσπης

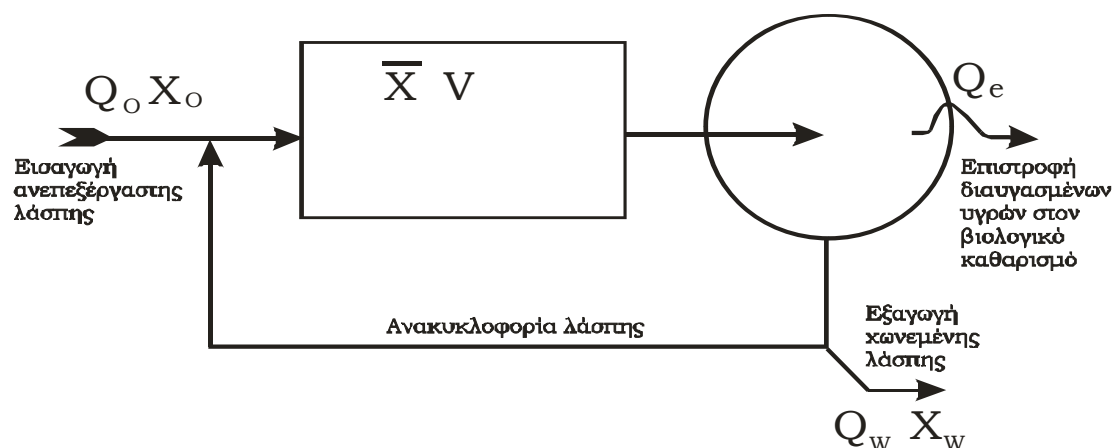
Στους αντιδραστήρες χωρίς επιστροφή λάσπης ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ταυτίζεται με τον χρόνο παραμονής των στερεών. Επομένως στην περίπτωση αυτή, ο όγκος της δεξαμενής είναι ο μεγαλύτερος που αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο απαιτούμενο χρόνο χώνευσης της λάσπης. Εάν θέλουμε να ελαττώσουμε τον όγκο του χωνευτήρα, αλλά να διατηρήσουμε τον χρόνο παραμονής των στερεών (SRT), τότε πρέπει να αυξήσουμε ανάλογα την συγκέντρωση των VSS στον χωνευτήρα γεγονός που μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την εφαρμογή μίας δεξαμενής καθίζησης (διαύγασης) στην έξοδο του χωνευτήρα και να επιστρέφουμε την καθιζάνουσα λάσπη πίσω στον χωνευτήρα όπως φαίνεται στο διάγραμμα το Σχήμα 3.1.1.

Εφαρμόζοντας ισοζύγιο μάζας για τα βιοαποικοδομήσιμα VSS σε όλο το σύστημα προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$k_d \cdot \bar{X} \cdot V = -\frac{d\bar{X}}{dt} \cdot V + Q_o \cdot X_o - Q_w \cdot X_w - Q_e \cdot X_e$$

Στη σχέση αυτή $X_e=0$ και για μόνιμες συνθήκες ισχύει $d\bar{X}/dt = 0$. Επομένως λύνοντας τη σχέση αυτή ως προς k_d λαμβάνουμε την σχέση:

$$\frac{1}{k_d} = \frac{X \cdot V}{Q_o \cdot X_o - Q_w \cdot X_w} = SRT \quad (3.1.6)$$

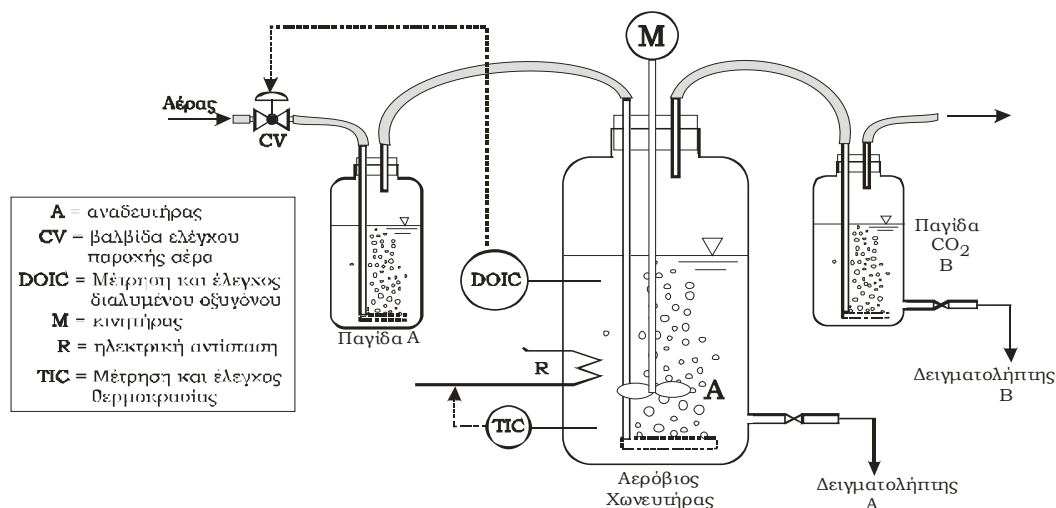


Σχήμα 3.1.1 Διάγραμμα αερόβιας χώνευσης με επιστροφή λάσπης

3.1.1.3 Πειραματική συσκευή υπολογισμού σταθερών χώνευσης

Η πειραματική συσκευή (βλέπε Σχήμα 3.1.2) αποτελείται από έναν βιοαντιδραστήρα (χωνευτήρα) διαλείποντος έργου, πλήρους ανάμιξης με έλεγχο της θερμοκρασίας του. Στον χωνευτήρα αυτόν τοποθετείται δεδομένη ποσότητα λάσπης V (L) με δεδομένη αρχική συγκέντρωση πιητικών αιωρούμενων στερεών X_o (mg/L). Το περιεχόμενο του χωνευτήρα τίθεται σε προκαθορισμένη θερμοκρασία μέσω του μετρητή θερμοκρασίας TIC, ο οποίος ελέγχει την θερμοκρασία μέσω της

ηλεκτρικής αντίστασης R . Επίσης ρυθμίζεται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε προκαθορισμένη τιμή (συνήθως $1,5 \text{ mg/L}$) με την ελεγχόμενη παροχή αέρα. Η παροχή του αέρα ρυθμίζεται από τη βαλβίδα CV η οποία ελέγχεται από το μετρητή διαλυμένου οξυγόνου $DOIC$. Ο αέρας που τροφοδοτείται στον κωνευτήρα διέρχεται από την αλκαλική παγίδα A , όπου απαλλάσσεται από το CO_2 που περιέχει, ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις παραγωγής του CO_2 στον κωνευτήρα. Ο αέρας διαχέεται σε μικρές φυσαλίδες από κατάλληλο διαχυτήρα εντός του κωνευτήρα και κατόπιν οδηγείται στην αλκαλική παγίδα B , όπου δεσμεύεται το CO_2 που έχει παραχθεί κατά την αερόβια χώνευση. Κατά τακτά χρονικά διαστήματα, λαμβάνονται παράλληλα υγρά δείγματα από τους δύο δειγματολήπτες A και B .



Σχήμα 3.1.2 Πειραματική συσκευή εξαγωγής απαραίτητων δεδομένων για τον σχεδιασμό ενός αερόβιου χωνευτήρα.

Στα δείγματα A διεξάγονται αναλύσεις ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) καθώς και πιητικών αιωρούμενων στερεών (VSS), ενώ στα δείγματα B διεξάγονται αναλύσεις ολικών ανθρακικών. Η διαφορική μέτρηση των ανθρακικών σε δύο δείγματα που έχουν ληφθεί στην αρχή και στο τέλος μιας χρονικής περιόδου, αντιστοιχούν ισομοριακά στην απορρόφηση οξυγόνου εντός του κωνευτήρα, την ίδια χρονική περίοδο, εφόσον η παραγωγή ενός mol CO_2 αντιστοιχεί σε απορρόφηση ενός mol O_2 . Στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας, τα αποτελέσματα που πρέπει να έχουν συλλεχθεί ώστε να αξιοποιηθούν στο σχεδιασμό μιας μονάδας αερόβιας χώνευσης περιλαμβάνουν τις τιμές συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών και των αντίστοιχων τιμών απορρόφησης οξυγόνου σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Άσκηση 3.1.1

Στον πίνακα παρουσιάζονται τα εργαστηριακά αποτελέσματα αερόβιας χώνευσης διαλείποντος έργου μιας περίσσειας λάσπης από έναν βιολογικό καθαρισμό. Η παραγωγή της λάσπης αυτής ανέρχεται σε $Q=40 \text{ m}^3/\text{d}$ σε συγκέντρωση 10.000 mg/l . Πρέπει:

χρόνος t days	Συγκέντρωση VSS mg/L
0	7200
1	6366
2	5608
3	5096
4	4637
5	4304
6	4083
7	3792
8	3708
9	3609
10	3500
11	3379
12	3361
13	3301
14	3251
15	3251
16	3190
17	3236
18	3208
19	316
20	3199
21	3154
22	3195
23	3130
24	3193
25	3150

α) να σχεδιαστεί ένας αερόβιος χωνευτήρας συνεχούς λειτουργίας με απόδοση 90% ως προς την χώνευση των αποδομήσιμων VSS.

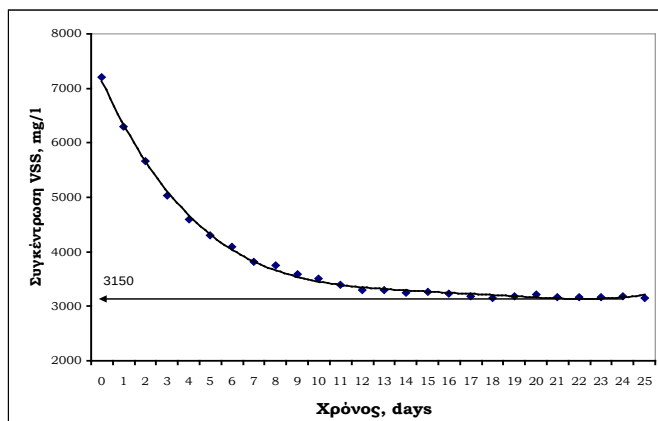
β) να σχεδιαστεί ένα σύστημα τριών χωνευτήρων σε σειρά με την ίδια συνολική απόδοση (90%)

γ) να υπολογιστούν οι ανάγκες των δύο συστημάτων σε οξυγόνο και σε ισχύ δεδομένου ότι η απορροφούμενη ισχύς του επιφανειακού αεριστήρα ανέρχεται σε 0,85 kg O₂/kW/h και οι ανάγκες ανάδευσης του χωνευτήρα ανέρχονται σε 19,8 W/m³ χωνευτήρα.

Λύση

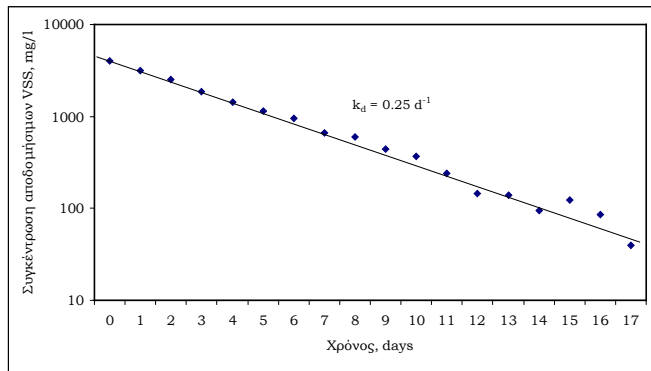
1. Προσδιορίζουμε γραφικά (διάγραμμα παρακάτω) τη συγκέντρωση των μη βιοαποικοδομήσιμων στερεών: $X_n = 3150 \text{ mg/L}$

2. Προσδιορίζουμε το ρυθμό απομείωσης των αποδομήσιμων VSS χρησιμοποιώντας το κάτωθι διάγραμμα ημιλογαριθμικής κλίμακας της συγκέντρωσης των βιοαποικοδομήσιμων στερεών $\ln(X_e - X_n)$ σε σχέση με τον χρόνο απομείωσης. Η κλίση της ευθείας γραμμής αντιστοιχεί στον συντελεστή $k_d = 0,25 \text{ d}^{-1}$.



3. Υπολογίζουμε το ποσοστό βιοαποικοδομήσιμων VSS στην αρχική λάσπη: $(X_0 - X_n)/X_0 = 0,5625$

4. Υπολογίζουμε τη συγκέντρωση VSS ώστε η απόδοση των συστημάτων αερόβιας χώνευσης να ανέρχεται σε 90% απομείωσης των αποδομήσιμων στερεών: $X_e = 10000$ –



$$0,9 \cdot 0,5625 \cdot 10000 = 4937,5 \text{ mg/L}$$

α) Για έναν κωνευτήρα συνεχούς λειτουργίας ο χρόνος παραμονής δίδεται από την σχέση (3.1.4):

$$\theta_1 = \frac{X_0 - X_e}{k_d \cdot (X_e - X_n)} = \frac{10000 - 4937,5}{0,25 \cdot (4937,5 - 4375)} = 36 \text{ d}$$

και επομένως ο όγκος του κωνευτήρα είναι $V_1 = \theta_1 \cdot Q = 36 \cdot 40 = 1440 \text{ m}^3$

β) Για τρεις ίδιους κωνευτήρες συνεχούς λειτουργίας σε σειρά ο χρόνος παραμονής κάθε κωνευτήρα δίδεται από την σχέση (3.1.5):

$$(1 + k_d \cdot \theta_3)^3 = \frac{X_0 - X_n}{(X_e - X_n)} = \frac{10000 - 4375}{(4937,5 - 4375)} = 10 \Rightarrow \theta_3 = 4,62 \text{ d}$$

και επομένως ο όγκος του κάθε κωνευτήρα είναι $V_3 = \theta_3 \cdot Q = 4,62 \cdot 40 = 184,8 \text{ m}^3$

ενώ ο συνολικός χρόνος παραμονής στο σύστημα των τριών κωνευτήρων ανέρχεται σε $3 \cdot 4,62 \text{ d} = 13,86 \text{ d}$ και ο συνολικός όγκος $544,4 \text{ m}^3$.

γ) για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος, υπολογίζουμε τις ανάγκες αερισμού (οξυγόνωσης) και τις ανάγκες ανάμιξης χωριστά για κάθε σύστημα:

Σύστημα ενός κωνευτήρα:

Η ημερήσια απομείωση των VSS υπολογίζεται:

$$\text{VSS}_d = Q \cdot (X_0 - X_e) / 1000 = 40 \cdot (10 - 4,937) = 202,55 \text{ kg/d}$$

Οι ημερήσιες απαιτήσεις σε οξυγόνο ανέρχονται:

$$[\text{O}_2] = \text{VSS}_d \cdot 1,4 \text{ kg O}_2/\text{VSS}_r = 202,5 \cdot 1,4 = 282 \text{ kg O}_2/\text{d} = 11,85 \text{ kg O}_2/\text{h}$$

Η απαιτούμενη ισχύς για τον αερισμό υπολογίζεται:

$$P_{\text{αερισμού}} = [\text{O}_2] / 0,85 = 13,85 \text{ kW}$$

Η απαιτούμενη ισχύς για την ανάμιξη του κωνευτήρα υπολογίζεται:

$$P_{\text{ανάμιξης}} = V_1 \cdot 0,0198 \text{ kW/m}^3 = 1440 \cdot 0,0198 = 28,5 \text{ kW}$$

Συνολική απαιτούμενη ισχύς: $P_{\text{ολική}} = P_{\text{αερισμού}} + P_{\text{ανάμιξης}} = 42,3 \text{ kW}$

Σύστημα τριών κωνευτήρων σε σειρά:

Υπολογίζεται η συγκέντρωση εισαγωγής και εξαγωγής των VSS καθώς και οι ανάγκες σε οξυγόνο και ισχύ αερισμού για κάθε κωνευτήρα χωριστά:

1^{ος} κωνευτήρας:

$$X_{1,e} = \frac{X_{1,0} + \theta_3 \cdot k_d \cdot X_n}{1 + \theta_3 \cdot k_d} = \frac{10000 + 4,32 \cdot 0,25 \cdot 4375}{1 + 4,32 \cdot 0,25} = 7079 \text{ mg/L}$$

$$\text{VSS}_{1,d} = Q \cdot (X_{1,0} - X_{1,e}) / 1000 = 116,84 \text{ kg VSS}_r/\text{d} = 4,87 \text{ kg/h}$$

$$[\text{O}_2]_1 = \text{VSS}_{1,d} \cdot 1,4 \text{ kg O}_2/\text{VSS}_r = 4,868 \cdot 1,4 = 6,82 \text{ kg O}_2/\text{h}$$

$$P_{1,\text{αερισμού}} = [\text{O}_2]_1 / 0,85 = 8,52 \text{ kWh/h} = 8,02 \text{ kW}$$

2^{ος} κωνευτήρας:

$$X_{2,e} = \frac{X_{2,0} + \theta_3 \cdot k_d \cdot X_n}{1 + t_3 \cdot k_d} = \frac{7079 + 4,32 \cdot 0,25 \cdot 4375}{1 + 4,32 \cdot 0,25} = 5675 \text{ mg/L}$$

$$VSS_{2,d} = Q \cdot (X_{2,0} - X_{2,e}) / 1000 = 56,16 \text{ kg VSS}_r/d = 2,34 \text{ kg/h}$$

$$[O_2]_2 = VSS_{2,d} \cdot 1,4 \text{ kg O}_2/VSS_r = 2,34 \cdot 1,4 = 3,276 \text{ kg O}_2/h$$

$$P_{2,αερισμού} = [O_2]_2 / 0,85 = 3,8 \text{ kWh/h} = 3,85 \text{ kW}$$

3^{ος} κωνευτήρας:

$$X_{3,e} = \frac{X_{3,0} + t_3 \cdot k_d \cdot X_n}{1 + t_3 \cdot k_d} = \frac{5675 + 4,32 \cdot 0,25 \cdot 4375}{1 + 4,32 \cdot 0,25} = 4937 \text{ mg/L}$$

$$VSS_{2,d} = Q \cdot (X_{3,0} - X_{3,e}) / 1000 = 29,52 \text{ kg VSS}_r/d = 1,23 \text{ kg/h}$$

$$[O_2]_2 = VSS_{2,d} \cdot 1,4 \text{ kg O}_2/VSS_r = 1,23 \cdot 1,4 = 1,72 \text{ kg O}_2/h$$

$$P_{3,αερισμού} = [O_2]_2 / 0,85 = 2,02 \text{ kWh/h} = 2,02 \text{ kW}$$

Επομένως η συνολική απαίτηση οξυγόνου, και για τις τρεις δεξαμενές, ανέρχεται σε $[O_2]_{1,2,3} = 11,82 \text{ kg/h}$ ενώ η συνολική ισχύς για τον αερισμό ανέρχεται σε $P_{αερισμού, 1,2,3} = 13,85 \text{ kW}$.

Η απαιτούμενη ισχύς για την ανάμιξη και των τριών κωνευτήρων υπολογίζεται:

$$P_{ανάμιξης, 1,2,3} = 518,4 \text{ m}^3 \cdot 0,0198 \text{ kW/m}^3 = 453,2 \cdot 0,0198 = 10,26 \text{ kW}.$$

$$\text{Συνολική απαιτούμενη ισχύς: } P_{ολική, 1,2,3} = P_{αερισμού, 1,2,3} + P_{ανάμιξης, 1,2,3} = 24,66 \text{ kW}.$$

Παρατηρούμε πως η απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου καθώς και η ισχύς αερισμού και στα δύο συστήματα παραμένει ίδια, όμως ο συνολικός όγκος χώνευσης, και επομένως η ισχύς ανάδευσης, ελαττώνεται σημαντικά στην περίπτωση των τριών σε σειρά κωνευτήρων.

3.2 ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΑΣΠΩΝ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

3.2.1. Γενικά

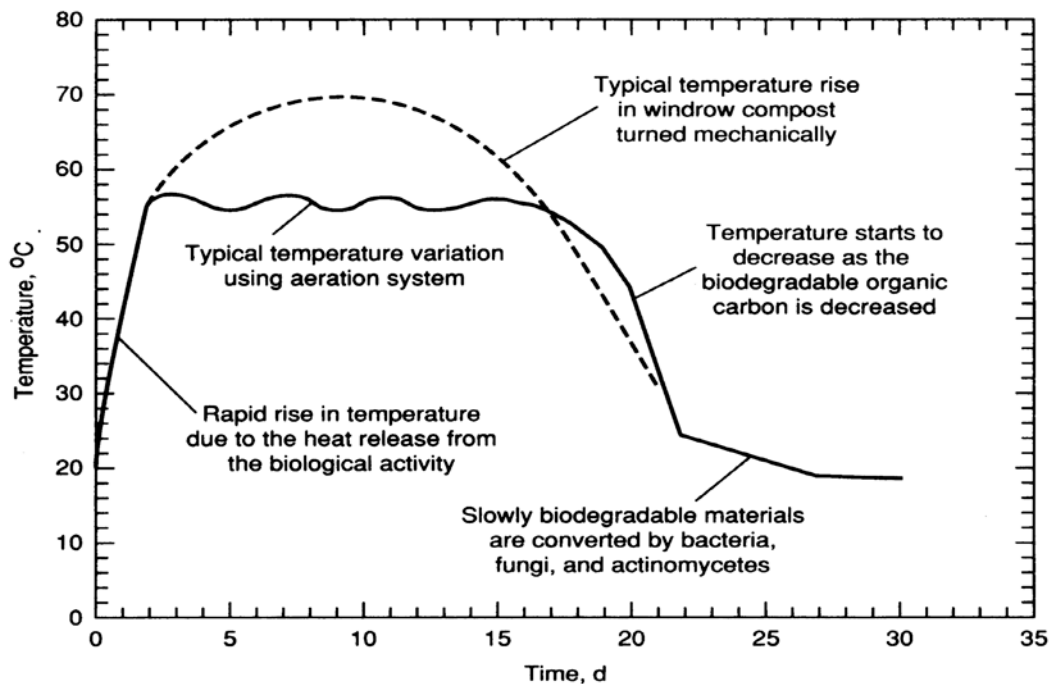
Η **κομποστοποίηση, βιοσταθεροποίηση** (ή **λιπασματοποίηση, ή χουμποποίηση**) είναι εξ' ορισμού η βιολογική αποδόμηση και σταθεροποίηση οργανικών και μικροβίων κάτω από συνθήκες που επιτρέπουν την ανάπτυξη θερμοκρασιών στη θερμοφιλική περιοχή (50-60°C), η οποία διασφαλίζεται από βιολογικά παραγόμενη θερμότητα, με τελικό προϊόν αρκούντως σταθεροποιημένο για αποθήκευση και χρήση ως εδαφοβελτιωτικό χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αποτελεί έτσι μορφή σταθεροποίησης αποβλήτων, η οποία όμως απαιτεί ειδικές συνθήκες υγρασίας και αερισμού ούτως ώστε να εξασφαλιστούν θερμοφιλικές θερμοκρασίες. Η βιοσταθεροποίηση του διαχωρισμένου οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων κερδίζει σταθερά έδαφος από το 1970. Αν και η κομποστοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα σχεδόν τα βιολογικής προέλευσης υλικά, κατά κανόνα εφαρμόζεται στο ζυμώσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων.

Κατά την έναρξη της βιο-οξειδωτικής διαδικασίας, παρατηρείται ταχεία άνοδος της θερμοκρασίας. Η ένταση και η διάρκεια της φάσης αυτής εξαρτάται από τη σύνθεση της οργανικής ύλης και ιδιαίτερα από τα συστατικά εκείνα, τα οποία αποτελούν πρόσφορο θρεπτικό υπόστρωμα, όπως είναι για παράδειγμα τα απλά σάκχαρα. Η αποδόμηση κατά τη φάση αυτή πραγματοποιείται από θερμόφιλα είδη βακτηρίων, η δράση των οποίων δεν επηρεάζεται από τις υψηλές θερμοκρασίες (>60°C) και τις αυξημένες τιμές του pH. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του υλικού αυξάνεται ταχύτατα και μέσα σε λίγες μέρες φθάνει μέχρι και τους 70°C.

Οι ενώσεις του αζώτου κατά την θερμόφιλη φάση αποδομούνται σχεδόν πλήρως και ταχύτατα. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην παραγωγή σημαντικών ποσών αμμωνίας που ανεβάζουν τις τιμές του pH σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Προοδευτικά, καθώς μειώνεται η διαθεσιμότητα των εύκολα αποδομήσιμων πηγών άνθρακα, εμφανίζονται θερμόφιλοι μύκητες-ακτινομύκητες, οι οποίοι αποδομούν ημικυτταρίνες και κυτταρίνες. Αντίθετα, η λιγνίνη δεν αποδομείται σε θερμοκρασίες άνω των 65°C. Η αποδόμησή της συντελείται αργότερα σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες (<50°C), οπότε επικρατούν οι λιγνολυτικοί μύκητες.

Καθώς πέφτει η θερμοκρασία ακολουθεί ένας δεύτερος κύκλος μικροβιακής δραστηριότητας, όπου επικρατούν οι μεσόφιλοι μικροοργανισμοί, κυρίως μύκητες που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα, οι οποίοι χρησιμοποιούν την κυτταρίνη που έχει απομείνει από το στάδιο της θερμόφιλης φάσης καθώς και τη λιγνίνη. Τα συστατικά αυτά χρησιμοποιούνται με βραδύ ρυθμό και οι παραγόμενες ποσότητες θερμότητας δεν μπορούν να αναπληρώσουν τις απώλειες. Κατά συνέπεια η θερμοκρασία της διεργασίας εξακολουθεί να μειώνεται. Με το πέρας της θερμόφιλης φάσης και κατά την εξέλιξη της μεσόφιλης το υλικό έχει χάσει την αρχική του μορφή, δομή και σύσταση. Έχει τα χαρακτηριστικά κομπόστ, όμως επειδή περιέχει ένα σύνολο φυτοτοξικών ουσιών είναι ακόμα ακατάλληλο για χρήση. Χαρακτηρίζεται ως άωρο (ωμό) κομπόστ. Η ωρίμανση του άωρου κομπόστ είναι επίσης μία βιο-οξειδωτική πλην όμως βραδεία διαδικασία, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να διαρκέσει αρκετούς μήνες. Η φάση της ωρίμανσης δεν έχει την ένταση των προηγούμενων δύο φάσεων και πραγματοποιείται από μία μικτή μεσόφιλη μικροβιακή χλωρίδα.

Κατά την αερόβια βιοσταθεροποίηση παράγονται διοξείδιο του άνθρακα, νερό και θερμότητα.



Σχήμα3.2.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την βιοσταθεροποίηση.

Κατά τη βιοσταθεροποίηση, τυπικά 20-30% των πτητικών αιωρούμενων στερεών μετατρέπονται σε κομπόστ, διοξείδιο του άνθρακα, νερό και χουμικό οξύ. Υπεύθυνοι για την διάσπαση των οργανικών είναι δύο τύποι μικροβίων, βακτήρια και μύκητες. Τα βακτήρια ευθύνονται για την διάσπαση των λιπιδίων και των πρωτεϊνών σε θερμοφιλικές συνθήκες, ενώ οι μύκητες ευθύνονται για την αποσύνθεση των πολύπλοκων οργανικών και της κυτταρίνης.

Η καταλληλότητα ενός υποστρώματος για βιοσταθεροποίηση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τρεις παραμέτρους: (α) την υγρασία (δεν πρέπει να υπερβαίνει το 60%), (β) το οργανικό κλάσμα (πρέπει να υπερβαίνει το 50% του στερεού μέρους) και (γ) τον λόγο C/N (δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50/1).

Διακρίνουμε τρεις βασικούς τύπους αερόβιας βιοσταθεροποίησης:

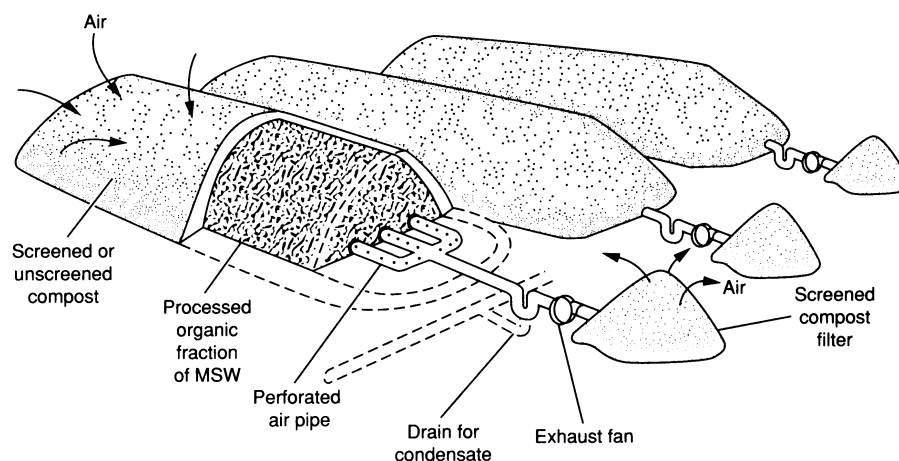
- (α) το **σύστημα σειραδίων** (windrows),
- (β) το **σύστημα του αεριζόμενου στατικού σωρού** (static aeration piles) και
- (γ) τους κλειστούς **βιοαντιδραστήρες**.

Το σύστημα σειραδίων συνίσταται στην τοποθέτηση των (τεμαχισμένων σε μεγέθη 25-75 mm) απορριμμάτων σε παράλληλους σωρούς τριγωνικής, τραπεζοειδούς ή ορθογώνιας διατομής, οι οποίοι αναδεύονται σε τακτά διαστήματα με μηχανικό τρόπο για επίτευξη επαρκούς αερισμού και ομοιογένειας στον σωρό.

Συχνά προστίθεται **ανακυκλοφορούμενο προϊόν** της κομποστοποίησης ή/και κάποιοι προσθετικοί παράγοντες, για αύξηση των αερόκενων (πορώδους) και βελτίωση της σύστασης του υποστρώματος όσον αφορά την υγρασία, τα οργανικά και τα άλλα θρεπτικά καθώς και τους μικροοργανισμούς που είναι υπεύθυνοι για την κομποστοποίηση. Επίσης, μπορεί να προστεθεί και οργανικό ή ανόργανο **διογκωτικό υλικό** (όπως μικρά τεμάχια ξύλου), με σκοπό την παροχή δομικής στήριξης και την αύξηση του πορώδους του προς κομποστοποίηση μείγματος. Οι σωροί μπορεί να αερίζονται πρόσθετα από φυσική ρύθμιση της θερμοκρασίας και να απομακρυνθεί η πρόσθετη υγρασία. Τα παραγόμενα υγρά παροχετεύονται με κατάλληλες σωληνώσεις. Η κομποστοποίηση (μεσοφιλικό, θερμοφιλικό στάδιο και

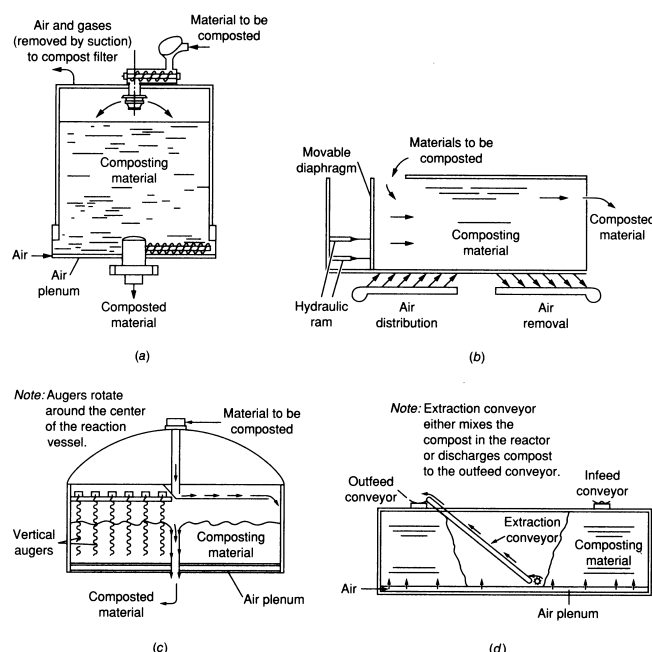
στάδιο ψύξης) διαρκεί περί τις 20 μέρες και ακολουθεί στάδιο **ωρίμανσης** (όπου οξειδώνονται τα διάφορα οργανικά οξέα που παρήχθησαν στο πρώτο στάδιο και βελτιώνεται η τελική σύσταση) 30 περίπου ημερών.

Το σύστημα του αεριζόμενου στατικού σωρού (Σχήμα 3.2.2) διαφέρει από το σύστημα σειραδίων στο ότι δεν υπάρχει ανάδευση, ενώ ο αερισμός επιτυγχάνεται με συνεχή παροχή αέρα δια μέσου του σωρού. Επίσης δεν χρησιμοποιείται ανακυκλοφορία προϊόντος (κομπόστ).



Σχήμα 3.2.2 Σύστημα στατικού αεριζόμενου σωρού.

Τέλος, συχνά χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι κλειστών "βιοαντιδραστήρων" (βλ. Σχήμα 3.2.3), με ή χωρίς ανάδευση, όπως των τύπων κινούμενης αναδευόμενης κλίνης, κινούμενης στερεάς κλίνης, περιστρεφόμενου τυμπάνου και αναδευόμενης στερεάς κλίνης.



Σχήμα 3.2.3. Κλειστοί βιοαντιδραστήρες βιοσταθεροποίησης.

Τα βασικά κριτήρια επιλογής του πλέον κατάλληλου συστήματος βιοσταθεροποίησης συνοψίζονται στον Πίνακας 3.2.1.

Πίνακας 3.2.1: Κριτήρια επιλογής συστήματος κομποστοποίησης.

	Σειράδια	Αεριζόμενος Σωρός	Αντιδραστήρας
Κεφάλαιο Εγκατάστασης	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό
Λειτουργικό Κόστος	Χαμηλό	Υψηλό	Χαμηλό
Απαιτήσεις γης	Υψηλές	Υψηλές	Χαμηλές
Ρύθμιση Αερισμού	Περιορισμένη	Πλήρης	Πλήρης
Ελεγχόμενες Παράμετροι	Συχνότητα ανάδευσης, Πρόσθετα ή προϊόν, αερισμός	Παροχή αέρα, παράγων δομής	Παροχή αέρα, ανάδευση, πρόσθετα ή προϊόν
Ευαισθησία στον καιρό	Ευαίσθητο εκτός εάν στεγάζεται σε υπόστεγο	Μη ευαίσθητο	Μη ευαίσθητο
Έλεγχος οσμών	Εξαρτάται από την τροφοδοσία	Εξαρτάται από την τροφοδοσία	Καλός

Από την ανωτέρω ανάλυση, προκύπτει ότι η οικονομικότερη λύση είναι κατά κανόνα το σύστημα σειραδίων, στεγασμένο σε υπόστεγο (για να αποφευχθεί η ευαισθησία σε καιρικές συνθήκες) και με δυνατότητα πρόσθετου αερισμού με φυσητήρες (για να διασφαλίζεται επαρκής ρύθμιση του αερισμού).

Οι βασικές λειτουργικές παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν είναι η σχετική πρόσμιξη πρόσθετων ή προϊόντος ή διογκωτικού υλικού δομής (π.χ. πριονίδι), η παροχή αέρα (εφόσον παρέχεται πρόσθετος αερισμός), οι χρόνοι παραμονής σε κάθε στάδιο και η συχνότητα ανάδευσης.

Το οργανικό κλάσμα (αφαιρουμένων του γυαλιού, των πλαστικών και των μετάλλων) στην Ελλάδα είναι αρκετά υψηλό. Η επάρκεια υγρασίας στο προς βιοσταθεροποίηση μείγμα είναι απαραίτητη, προκειμένου να διασφαλιστεί επαρκής ρυθμός βιολογικής οξείδωσης. Η υγρασία στα στερεά απορρίμματα μπορεί να αυξηθεί με προσθήκη λάσπης από βιολογικό καθαρισμό (υγρασία 70-75%). Στο διαχωριζόμενο οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων στην Ελλάδα, η υγρασία αντίθετα είναι αρκετά υψηλή (της τάξης του 70%) και απαιτείται προς τούτο μείωσή της στο μείγμα τροφοδοσίας με προσθήκη χαρτιού ή ανακυκλοφορία προϊόντος.

Ο **αερισμός** κατά την κομποστοποίηση εξυπηρετεί δύο κυρίως σκοπούς: την παροχή επαρκούς οξυγόνου για την βιολογική οξείδωση, και την ξήρανση του προς κομποστοποίηση μείγματος.

Η ενέργεια η οποία απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας κατά την κομποστοποίηση και για την εξάτμιση της υγρασίας, παράγεται από την απελευθερούμενη ενέργεια κατά την βιοαποδόμηση.

Παράγοντες που επηρεάζουν την Κομποστοποίηση

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της βιοαποδόμησης που περιγράφεται πιο πάνω είναι τόσο βιολογικοί όσο και χημικοί. Οι σπουδαιότεροι από αυτούς είναι οι εξής:

- η διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων,
- η σχέση άνθρακα/αζώτου (C/N),

- το pH,
- το ποσοστό υγρασίας,
- η θερμοκρασία και ο αερισμός.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η παρουσία τοξικών ουσιών (τοξικά μέταλλα), οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά τόσο τις διαδικασίες κομποστοποίησης, όσο και την ποιότητα του παραγόμενου τελικού προϊόντος.

• **Η Διαθεσιμότητα Θρεπτικών Στοιχείων - Σχέση Ανθρακα/ Αζώτου (C/N)**

Για την αποτελεσματική εφαρμογή της διεργασίας της κομποστοποίησης ο λόγος C/N πρέπει να είναι περίπου 30:1 (έχουν αναφερθεί και ιδανικές αναλογίες κοντά στο 15:1).

• **pH**

Οι τιμές του pH επηρεάζουν σημαντικά τις διεργασίες της κομποστοποίησης, αφού από τις τιμές αυτές εξαρτάται το είδος των μικροοργανισμών που θα αναπτυχθούν. Για παράδειγμα, τα βακτήρια δραστηριοποιούνται σε ουδέτερο ή αλκαλικό περιβάλλον υπό αερόβιες συνθήκες (γένη *Bacillus*, *Achromobacter*, *Cellulomonas* κ.α) και υπό αναερόβιες (γένη *Clostridium* κ.α). Αντίθετα σε pH<5,5 η διάσπαση των κυτταρινών, ημικυτταρινών κλπ γίνεται κυρίως από μύκητες και ακτινομύκητες (γένη *Aspergillus*, *Fusarium*, *Curularia*, *Trichoderma* κ.α). Τα συνήθη υλικά που οδηγούνται στην κομποστοποίηση παρουσιάζουν γενικά χαμηλό pH, ενώ για την βελτιστοποίηση της διεργασίας το pH πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6,0 και 7,5. Η ιλύς των αστικών λυμάτων, η οποία είναι ένα νέο υλικό για αξιοποίηση έχει pH από 6,9 έως 8,1.

• **Υγρασία**

Η παρουσία του νερού παίζει σημαντικό ρόλο στην κομποστοποίηση. Όταν η υγρασία είναι σχετικά υψηλή, ο αερισμός δεν είναι αποτελεσματικός με αποτέλεσμα να επιβραδύνονται ή και να αναστέλλονται οι αερόβιες διαδικασίες, δίνοντας τη θέση τους σε αναερόβιες οι οποίες είναι ανεπιθύμητες. Χαμηλό ποσοστό υγρασίας οδηγεί επίσης σε επιβράδυνση ή αναστολή των βιολογικών διεργασιών, φαινόμενο που είναι εντονότερο στις περιπτώσεις που συνοδεύεται από πτώση της θερμοκρασίας. Για τους λόγους αυτούς, τα προς κομποστοποίηση υλικά θα πρέπει να περιέχουν το κατάλληλο ποσοστό υγρασίας. Το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για τη διεργασία της κομποστοποίησης κυμαίνεται μεταξύ 45-55%. Ένας βασικός περιορισμός που πρέπει να τηρείται είναι ο λόγος Λ του νερού προς τα αποδομήσιμα οργανικά να είναι μικρότερος από 10.

• **Θερμοκρασία**

Θεωρείται ίσως η σημαντικότερη παράμετρος για τη διεργασία της κομποστοποίησης. Η μικροβιακή δραστηριότητα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία πολλές φορές ξεπερνά τους 70°C, οπότε γίνεται ανεπιθύμητη, μιας και μπορεί να αναστείλει τη μικροβιακή δραστηριότητα και λαμβάνονται μέτρα για την ελάττωσή της (ύγρανση των υλικών, βελτίωση του αερισμού, ανάδευση κ.λ.π). Μια θερμοκρασία γύρω στους 55-65°C είναι επιθυμητή για ένα χρονικό διάστημα επειδή οδηγεί σε μερική αποστείρωση του υλικού. Σ' αυτή τη θερμοκρασιακή περιοχή, καταστρέφονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που ενδεχομένως υπάρχουν στα υλικά. Κατά την εξέλιξη της διεργασίας, η βέλτιστη θερμοκρασία κομποστοποίησης βρίσκεται στη μεσόφιλη περιοχή, δηλαδή ανάμεσα στους 35-45°C, ενώ αν πέσει κάτω από 20°C, η αποδόμηση επιβραδύνεται.

• Αερισμός

Λόγω του ότι η επιθυμητή διεργασία βιοαποδόμησης του υλικού είναι αερόβια, καθίσταται αυτονόητο ότι πρέπει να εξασφαλίζεται στους οργανισμούς που λαμβάνουν μέρος στη διεργασία το απαραίτητο οξυγόνο. Έτσι, αν χρησιμοποιούνται ανοικτά συστήματα για τη διεργασία της κομποστοποίησης ο σωρός δεν πρέπει να ξεπερνά σε πλάτος τα 1,5-2 μέτρα και ύψος τα 1,3-1,5 μέτρα, ενώ το μήκος καθορίζεται από την ποσότητα του προς κομποστοποίηση υλικού. Αντίθετα εάν χρησιμοποιούνται κλειστά συστήματα για τη διεργασία της κομποστοποίησης, τότε η υγρασία, η θερμοκρασία και ο αερισμός είναι οι παράμετροι που ελέγχονται κατά περίπτωση.

Ο ελεύθερος αέριος χώρος (free air space FAS) ορίζεται ως το κλάσμα του όγκου του μείγματος που καταλαμβάνεται από αέριο (πορώδες). Είναι σημαντικός δείκτης της επάρκειας αερόβιων συνθηκών για το προς κομποστοποίηση μείγμα και δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_m f_m}{\gamma_m \rho_w} - \frac{\rho_m (1 - f_m)}{\rho_w} \quad (3.2.1)$$

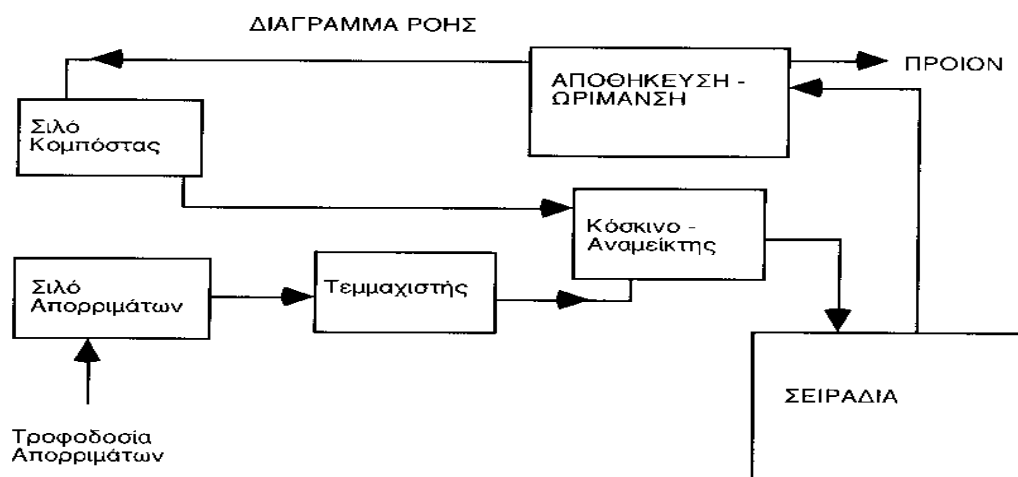
όπου, ρ_m πυκνότητα μείγματος
 ρ_w πυκνότητα νερού (=1g/cm³)
 γ_m ειδικό βάρος μίγματος
 f_m κλάσμα στερεών μίγματος

Η μεταφορά οξυγόνου στα συστήματα σειραδίων γίνεται κυρίως λόγω διαφοράς πυκνότητας του αέρα στους πόρους από την εξωτερική και όχι λόγω διάχυσης του οξυγόνου. Κατά τους McGauhey και Gotaas καθώς και Golueke, για σύστημα σειραδίων με μέση διάμετρο σωματιδίων 2,5-5cm για υγρασία 40-60% μία ανάδευση κάθε 3 μέρες (συνολικά περί τις 4 αναδεύσεις) επαρκεί για να διασφαλιστεί επαρκής φυσικός αερισμός. Για μικρότερα σωματίδια ή/και κλάσμα ελεύθερου αέριου χώρου, ο φυσικός αερισμός που προκύπτει από την ανάδευση και μόνο δεν επαρκεί.

Μία τυπική μονάδα κομποστοποίησης περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια:

- Προεπεξεργασία - με βασικό στόχο την προετοιμασία των στερεών απορριμμάτων για την κυρίως επεξεργασία
- Κομποστοποίηση
- Βελτίωση προϊόντος (ωρίμανση)

Το βασικό διάγραμμα ροής έχει ως ακολούθως:



Σχήμα3.2.4. Διάγραμμα ροής μονάδας κομποστοποίησης

Άσκηση3.1

Σχεδιάστε μονάδα κομποστοποίησης για απορρίμματα μαζικής παροχής 2000 kg/d με μέση υγρασία 55% και ζυμώσιμα (πιητικά στερεά) 78,50% του ξηρού. Η εγκατάσταση θα περιλαμβάνει τεμαχισμό και ανάμειξη με τελικό προϊόν για τη ρύθμιση της υγρασίας τροφοδοσίας στο 50%. Το τελικό προϊόν θα έχει υγρασία 30% και πιητικά στερεά το 50% των συνολικών. Η προεπεξεργασία θα λαμβάνει χώρα σε καλυμμένη έκταση 400 m² και θα περιλαμβάνει υποδοχεία (σιλό) απορριμμάτων, σιλό κομπόστ, τεμαχιστή και πίνακα ηλεκτροδότησης. Το σιλό απορριμμάτων θα είναι υπερυψωμένο από το έδαφος. Τα απορριμματοφόρα αφού ζυγιστούν σε γεφυροπλάστιγγα, αδειάζουν τα απορρίμματα με χρήση ράμπας στο σιλό απορριμμάτων. Με χρήση χοάνης θα τροφοδοτείται ο τεμαχιστής ο οποίος θα διασφαλίζει σωμάτια μεγέθους 2-5 cm. Θα επεξεργάζεται 500 kg/h και θα λειτουργεί επί 4ώρου βάσεως. Τα απορρίμματα με χρήση κοχλία θα οδηγούνται σε αναμεικτή - κόσκινο (περιστρεφόμενο τύμπανο), όπου θα αναμειγνύονται με ανακυκλοφορούμενο προϊόν από το σιλό κομπόστ (για να επιτευχθεί μείωση της υγρασίας) και θα απομακρύνονται σωμάτια μεγάλου όγκου (διαμέτρου άνω των 50 cm). Το μείγμα απορριμμάτων-κομπόστ θα οδηγείται σε σειράδια (τριγωνικής διατομής, ύψους 1 m, βάσεως 2 m και απέχοντα 3 m μεταξύ τους). Η ανάδευση θα επιτυγχάνεται με ειδικό εξάρτημα μήκους 2 μέτρων που προσαρμόζεται στο όχημα σχηματισμού-καθαίρεσης σειραδίων. Τα σειράδια θα είναι εφοδιασμένα και με δίκτυο στράγγισης των παραγόμενων υγρών. Το όχημα σχηματισμού/καθαίρεσης των σειραδίων θα οδηγεί το προϊόν στην περιοχή ωρίμανσης - αποθήκευσης. Ποσότητα κομπόστ θα μεταφέρεται ημερησίως στο σιλό κομπόστ για διασφάλιση της απαιτούμενης ποσότητας ανακυκλοφορίας.

Να προσδιορισθούν:

1. η ποσότητα προϊόντος που απαιτείται να ανακυκλοφορείται
2. ο ελεύθερος αέριος χώρος (για την εξασφάλιση επάρκειας αερόβιων συνθηκών)
3. οι απαιτήσεις σε αερισμό
4. η ενεργειακή αυτοδυναμία της μονάδας, για επιθυμητή θερμοκρασία κομποστοποίησης τους 60°C
5. ο λόγος Λ του νερού προς τα αποδομήσιμα οργανικά και να ελεγχθεί αν είναι μικρότερος από 10
6. ο συνολικός όγκος των σειραδίων.

Δίδονται:

1. η κομποστοποίηση θα διεξάγεται σε σειράδια, με χρόνο παραμονής 18 ημέρες. Η ωρίμανση θα διαρκεί περί τους 3 μήνες.
2. ειδικά βάρη: ζυμώσιμων στερεών γ_v 1, μη ζυμώσιμων γ_{nv} 2,5 g/cm³
3. εμπειρικός τύπος ζυμώσιμου κλάσματος απορριμμάτων C₁₆H₂₇O₈N
4. αποδόμηση οργανικών κατά την κομποστοποίηση 50%
5. πυκνότητα προϊόντος 0,65 g/cm³
6. θερμοχωρητικότητα αέρα και στερεών c_p 0,25 cal/g°C (θερμοχωρητικότητα νερού c_p 1 cal/g°C)
7. ειδική θερμότητα εξάτμισης νερού q_v = 540 cal/g
8. θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C
9. $\Delta H_{\text{βιολ.οξειδ.}}=5500 \text{ cal/g}_{\text{οργαν.}}$
10. Η υγρασία που προσλαμβάνει ο ξηρός αέρας είναι 0,137 g H₂O/g αέρα.

Λύση

1. Βελτίωση υγρασίας του προς κομποστοποίηση μείγματος

Η υγρασία στο ζυμώσιμο μέρος των στερεών απορριμμάτων (55%) κρίνεται επαρκής ούτως ώστε να μην απαιτείται προσθήκη λάσπης από βιολογικό καθαρισμό.

Αντίθετα κρίνεται επιθυμητή η χρήση ανακυκλοφορούμενου τελικού προϊόντος (κομπόσι) υγρασίας 30% προκειμένου να μειωθεί η υγρασία του μείγματος σε 50%.

Εναλλακτικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πρόσθετα όπως πριονίδια ή κάποιο διογκωτικό υλικό (τεμάχια ξύλου).

Μια και η υγρασία είναι αρκετά κοντά στην τελική επιθυμητή κρίνεται οικονομικότερη η **απλή προσθήκη ανακυκλοφορούμενου προϊόντος**.

Ο λόγος του υγρού βάρους στην ανακυκλοφορία προς το υγρό βάρος στην τροφοδοσία R_w είναι:

$$R_{wet} = \frac{f_m - f_0}{f_r - f_m} \quad (A)$$

όπου,

$f_m=0,5$ (επιθυμητό κλάσμα στερεών μείγματος)

$f_0=0,45$ (κλάσμα στερεών τροφοδοσίας)

$f_r=0,7$ (κλάσμα στερεών ανακυκλοφορούμενου προϊόντος)

άρα **$R_{wet}=0,25$** .

Επομένως απαιτείται επαναφορά τελικού προϊόντος κατά 25% της τροφοδοσίας.

Ο λόγος R_{dry} ξηρού βάρους στην ανακυκλοφορία προς το ξηρό βάρος στην τροφοδοσία δίνεται από την σχέση:

$$R_{dry} = \frac{\frac{f_m}{f_0} - 1}{1 - \frac{f_m}{f_r}} \quad (B)$$

όπου,

$f_m=0,5$ (επιθυμητό κλάσμα στερεών μείγματος)

$f_0=0,45$ (κλάσμα στερεών τροφοδοσίας)

$f_r=0,7$ (κλάσμα στερεών ανακυκλοφορούμενου προϊόντος)

Εφαρμόζοντας την σχέση προκύπτει **$R_{dry}=0,39$**

Το πτητικό κλάσμα του μείγματος δίδεται από την σχέση:

$$f_{vm} = \frac{f_{v0} + f_{vr} R_d}{1 + R_d} \quad (Γ)$$

Αποδόμηση κατά 50% των πτητικών συνεπάγεται ότι για κάθε 1 g στερεών στην τροφοδοσία παράγονται 0,6075 g στερεών στο προϊόν, το οποίο περιέχει 0,3925 g πτητικών στερεών.

Άρα το κλάσμα των πιητικών στερεών του προϊόντος f_{vr} είναι 0,65.

Με $f_{v0}=0,785$, $f_{vr}=0,65$ και $R_d=0,39$, προκύπτει ότι το πιητικό κλάσμα του μείγματος είναι $f_{vm}=0,75$.

2. Απαιτήσεις αερισμού

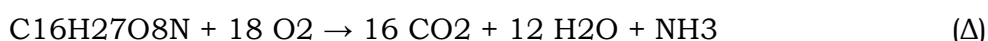
Ο αερισμός κατά την κομποστοποίηση εξυπηρετεί δύο κυρίως σκοπούς:

την παροχή επαρκούς οξυγόνου για την βιολογική οξείδωση

την ξήρανση του προς λιπασματοποίηση μείγματος.

2.1. Εκτίμηση απαιτήσεων αερισμού για βιολογική οξείδωση

Θεωρώντας ως μέσο εμπειρικό τύπο για την σύσταση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων τον $C_{16}H_{27}O_8N$, έχουμε την ακόλουθη στοιχειομετρία:



Προκύπτει λοιπόν ότι απαιτούνται 1,60 g οξυγόνου ανά g αποδομούμενου οργανικού μέρους.

Με βιοαποδόμηση 50% του πιητικού κλάσματος 0,785, προκύπτει ότι απαιτούνται περί τα 0,62 g οξυγόνου (ή 2,7 g αέρα) ανά g στερεού των απορριμμάτων.

Με 2000 kg/d και $f_0=0,45$, η απαίτηση σε αέρα για τη βιολογική οξείδωση υπολογίζεται σε $0,45 \times 2.000 \times 2,7 = 2.430$ κιλά ημερησίως.

2.2. Εκτίμηση απαιτήσεων αερισμού για απομάκρυνση υγρασίας

Για 1 g στερεών τροφοδοσίας έχουμε $1 \times 0,55 / 0,45 = 1,22$ g νερού.

Από την αντίδραση προκύπτει ότι ανά g στερεού απορριμμάτων παράγονται 0,235 g νερού.

Η υγρασία που θα περιέχει το προϊόν θα είναι 30%, άρα τα 0,6075 g των στερεών στο προϊόν θα συνοδεύονται από $0,6075 \times 0,3 / 0,7 = 0,26$ g νερού.

Άρα ανά g στερεού τροφοδοσίας πρέπει να απομακρυνθούν $1,22 - 0,26 + 0,235 = 1,195$ g νερού.

Για 2.000 kg/d και $f_0=0,45$, έχουμε $\Delta H_2O = 900 \times 1,195 = 1076$ kg/d.

Μια και η υγρασία που προσλαμβάνει ο ξηρός αέρας είναι 0,137 g H_2O /g αέρα, η απαίτηση σε αέρα είναι $1,195 / 0,137 = 8,72$ g ξηρού αέρα/g ξηρού βάρους στην τροφοδοσία ή $900 \times 8,72 = 7.848$ κιλά αέρα ημερησίως, σαφώς περισσότερος (υπερτριπλάσιος) από τον απαιτούμενο για βιολογική οξείδωση.

Ο λόγος των δύο απαιτήσεων είναι αρκετά μικρός σε σχέση με τον παρατηρούμενο για κομποστοποίηση λάσπης που προέρχεται από βιολογικό καθαρισμό (10-30).

Αυτό οφείλεται στην αρκετά μεγάλη συγκέντρωση στερεών (45%) στην τροφοδοσία.

3. Ισοζύγιο μάζας

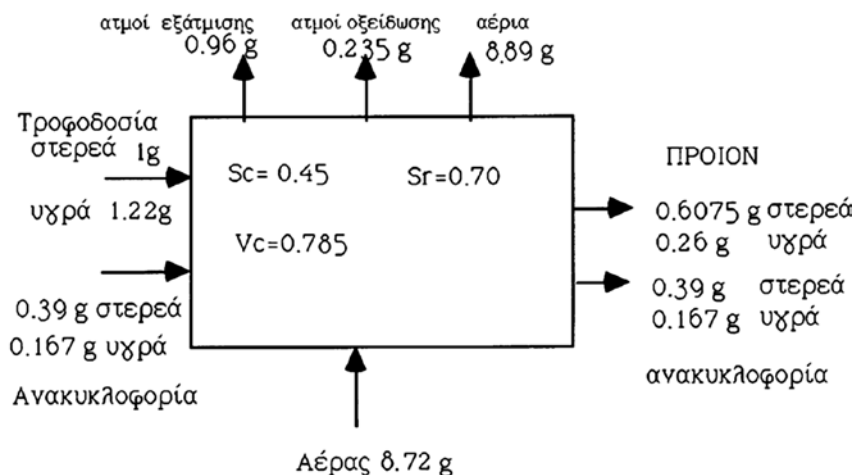
Λόγω της αποδόμησης των στερεών (50% του πιητικού μέρους) περί τα 0,6075 g στερεού υπολείπονται στο προϊόν.

Από την στοιχειομετρική εξίσωση εξάγουμε το συμπέρασμα ότι με πιητικότητα 0,785 και ποσοστό βιοαποδομήσιμων 50%, παράγονται 0,235 g H_2O και 0,78 g λοιπών αερίων (CO_2 και NH_3) ενώ καταναλώνονται 0,62 g οξυγόνου.

Παρέχοντας 8,72 g ξηρού αέρα στην αέρια φάση (σε 60°C) διαφεύγουν 8,72-0,62+0,78=8,89 g αερίων

0,235 g υδρατμών που προέρχονται από βιολογική οξείδωση, και 0,96 g υγρασίας λόγω εξάτμισης (προκειμένου να παραχθεί προϊόν με υγρασία 30%).

Ισοζύγιο μάζας



4. Προσδιορισμός του ελεύθερου αέριου χώρου

Για τον υπολογισμό του ελεύθερου αέριου χώρου αρκεί να υπολογιστεί η ποσότητα του αέρα στο τελικό προϊόν. Στο τελικό προϊόν η πυκνότητα θα είναι $\rho_r = 0,65 \text{ kg/m}^3$

Άρα 1 kg μίγματος καταλαμβάνει $1/0,65 = 1,538 \text{ m}^3$

1 kg προϊόντος περιέχει 0,3 kg νερό

$0,7 \times 0,65 = 0,455 \text{ kg}$ βιοαποδομήσιμα και $0,7 \times 0,35 = 0,245 \text{ kg}$ μη βιοαποδομήσιμα

Άρα θα καταλαμβάνει όγκο:
$$\frac{0,3 \text{ g}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} + \frac{0,455 \text{ g}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} + \frac{0,245 \text{ g}}{2,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 0,853 \text{ cm}^3$$

Άρα ο αέρας θα καταλαμβάνει $1,538 - 0,853 = 0,685 \text{ m}^3$ ή ποσοστό $(0,685/1,538) \times 100 = 44\%$ ελεύθερο αέριο χώρο

Αρχικά

1 kg απορρίμματος έχει: 0,55 kg νερό,

$0,45 \times 0,785 = 0,35 \text{ kg}$ βιοαποδομήσιμα και $0,45 \times 0,215 = 0,10 \text{ kg}$ μη βιοαποδομήσιμα

Αν υποθέσουμε ότι δεν έχει καθόλου ελεύθερο αέριο όγκο θα καταλαμβάνει $0,55/1 + 0,35/1 + 0,10/2,5 = 0,94 \text{ m}^3$.

Στο 1 kg προσθέτουμε 0,25 kg προϊόντος που καταλαμβάνει $1,538 \times 0,25 = 0,39 \text{ m}^3$, από το οποίο ο αέρας είναι $0,44 \times 0,39 = 0,17 \text{ m}^3$.

Άρα συνολικά 1,25 kg μίγματος έχει ολικό όγκο $0,94 + 0,39 = 1,33 \text{ m}^3$ από τα οποία αέρας είναι $0,17 \text{ m}^3$ ή ποσοστό $0,17/1,33 \times 100 = 12,8\%$ το οποίο κρίνεται ικανοποιητικό

Στην πορεία αυξάνεται και τελικά γίνεται 44%.

Εναλλακτικά, θα μπορούσε να ακολουθηθεί η πορεία υπολογισμών που παρουσιάζεται στη συνέχεια. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων ρ_m και γ_m , προσδιορίζουμε κατ' αρχάς το ειδικό βάρος των στερεών της τροφοδοσίας:

$$\frac{1}{\gamma_{s0}} = \frac{f_{v0}}{\gamma_v} + \frac{1-f_{v0}}{\gamma_{nv}} \quad (E)$$

Για $f_{v0}=0,785$, παίρνουμε $\gamma_{s0}=1,15 \text{ g/cm}^3$.

Τότε η πυκνότητα στην τροφοδοσία είναι:

$$\rho_0 = \frac{\rho_w}{\frac{f_0}{\gamma_{s0}} + 1 - f_0} \quad (\Sigma T)$$

εξ ου $\rho_0=1,07$

Η πυκνότητα μείγματος ρ_m τότε είναι:

$$\rho_m = \frac{\gamma_{s0} + \rho_r R_{wet}}{1 + R_{wet}} \quad (Z)$$

Με $\rho_r=0,65 \text{ g/cm}^3$, προκύπτει $\rho_m=1,05 \text{ g/cm}^3$.

Το ειδικό βάρος των στερεών του ανακυκλοφορούμενου μείγματος δίνεται από την σχέση:

$$\frac{1}{\gamma_{sm}} = \frac{f_{vr}}{\gamma_v} + \frac{1-f_{vr}}{\gamma_{nv}} \quad (H)$$

ήτοι $\gamma_{sm}=1,64$

Το ειδικό βάρος των στερεών του μείγματος δίνεται τότε από την σχέση:

$$\gamma_m = \frac{\gamma_0 + \gamma_{sm} R_{dry}}{1 + R_{dry}} \quad (\Theta)$$

ήτοι $\gamma_m=1,18$

Η σχέση (3.2.1) τότε δίνει $\varepsilon=0,03$.

Καθώς το μείγμα λιπασματοποιείται, το ε θα ανέλθει τελικά σε

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_r f_r}{\gamma_{mr} \rho_w} - \frac{\rho_r (1-f_r)}{\rho_w} \quad (I)$$

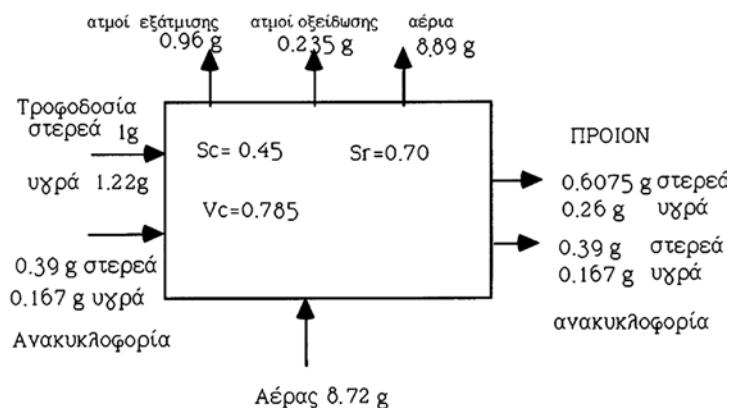
ήτοι 0,44, αφού $\gamma_{mr}=f_r \cdot \gamma_{sm} + 1 - f_r = 1,19$.

5. Επάρκεια ενέργειας

Η ενέργεια η οποία απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας κατά την κομποστοποίηση και για την εξάτμιση της υγρασίας, παράγεται από την **απελευθερούμενη ενέργεια** κατά την βιοαποδόμηση.

Το αιτούμενο είναι εάν και κατά πόσο η απελευθερούμενη ενέργεια επαρκεί για την ανύψωση της θερμοκρασίας στους 60°C και για την επίτευξη υγρασίας 30% στο τελικό προϊόν.

Για να εκτιμηθεί αυτό, πρέπει να θεωρήσουμε την απαίτηση για ενέργεια 1 g στερεού στην τροφοδοσία.



Οι ενεργειακές απαιτήσεις τότε είναι (μέγιστες απαιτήσεις):

ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ: $q_s = m c_p \Delta T = 1,39 \text{ g} \times 0,25 \text{ cal/g}^\circ\text{C} \times (60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 13,9 \text{ cal}$

ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ: $q_w = (1,22 + 0,167) \times 1 \times 40 = 55,48 \text{ cal}$

ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΑΕΡΑ $q_a = 8,89 \times 0,25 \times 40 = 88,9 \text{ cal}$

ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ: $q_v = 540 \text{ cal/g} \times 1,195 = 645,3 \text{ cal}$

ΣΥΝΟΛΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ: 803,6 cal

Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος απαιτείται για την εξάτμιση της υγρασίας.

Η απελευθερούμενη ενέργεια από την βιολογική οξείδωση θα είναι $5.500 \text{ cal/g} \times 0,785 \times 0,5 = 2.158,75 \text{ cal}$, και επομένως είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την απαιτούμενη.

Άρα η παραγόμενη ενέργεια σίγουρα επαρκεί για την ανύψωση της θερμοκρασίας και την απαιτούμενη εξάτμιση της υγρασίας.

Άρα δεν θα υπάρξει πρόβλημα επίτευξης των υψηλών θερμοκρασιών.

Είναι δύσκολο να εκτιμηθούν οι απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον.

Πρόσθετος αερισμός μπορεί να απαιτηθεί για ρύθμιση της θερμοκρασίας σε ανεκτά επίπεδα ($<70^\circ\text{C}$).

Λόγος νερού προς βιοαποδομήσιμα Από τις τιμές στο σχήμα ο λόγος νερού προς βιοαποδομήσιμα οργανικά στο μίγμα προς κομποστοποίηση:

$$\Lambda = \frac{1,22 + 0,167}{0,780 + 0,25 \cdot 0,65} = 1,5 \quad (\text{K})$$

άρα ικανοποιητικός.

6. Χρόνοι Παραμονής- Διάταξη σειραδίων

Ο ενδεικνυόμενος χρόνος παραμονής στο στάδιο της κομποστοποίησης είναι έως 20 ημέρες.

Με 2000 kg/d παροχή και 25% ανακυκλοφορία η συνολική παροχή θα είναι 2500 kg/d.

Με 18 ημέρες χρόνο παραμονής αυτό συνεπάγεται συνολικό όγκο 45.000 kg στο σειράδι.

Με μέσο ειδικό βάρος $(1,33/1,25+0,65)/2=0,86$ kg/l, υπολογίζουμε συνολικό όγκο περί τα 52 m³.

Θα έχουμε έξι σειράδια όγκου περίπου 9 m³ έκαστο.

Επίσης, πρέπει να μεσολαβεί χώρος 3 μέτρων ανάμεσα στα σειράδια.

Αν είναι τριγωνικής διατομής βάσεως 2 m και ύψους 1 m, το μήκος του κάθε σειραδίου θα είναι περί τα 9 m.

Νέο σειράδι θα δημιουργείται κάθε τρίτη μέρα.

Η προεπεξεργασία θα λαμβάνει χώρα σε καλυμμένη έκταση 400 m² και θα περιλαμβάνει υποδοχέα (σιλό) απορριμμάτων, σιλό κομπόστ, τεμαχιστή και πίνακα ηλεκτροδότησης.

Τα απορριμματοφόρα αφού ζυγιστούν σε γεφυροπλάστιγγα θα αδειάζουν τα απορρίμματα με χρήση ράμπας στο σιλό απορριμμάτων.

Με χρήση κοάνης θα τροφοδοτείται ο τεμαχιστής ο οποίος θα διασφαλίζει σωμάτια μεγέθους 2-5 cm.

Θα επεξεργάζεται 500 kg/h και θα λειτουργεί επί 4ώρου βάσεως.

Τα απορρίμματα με χρήση κοχλία θα οδηγούνται σε αναμείκτη - κόσκινο (περιστροφόμενο τύμπανο), όπου θα αναμειγνύονται με ανακυκλοφορούμενο προϊόν από το σιλό κομπόστ (για να επιτευχθεί μείωση της υγρασίας) και απομακρύνονται σωμάτια μεγάλου όγκου (διαμέτρου άνω των 50 cm).

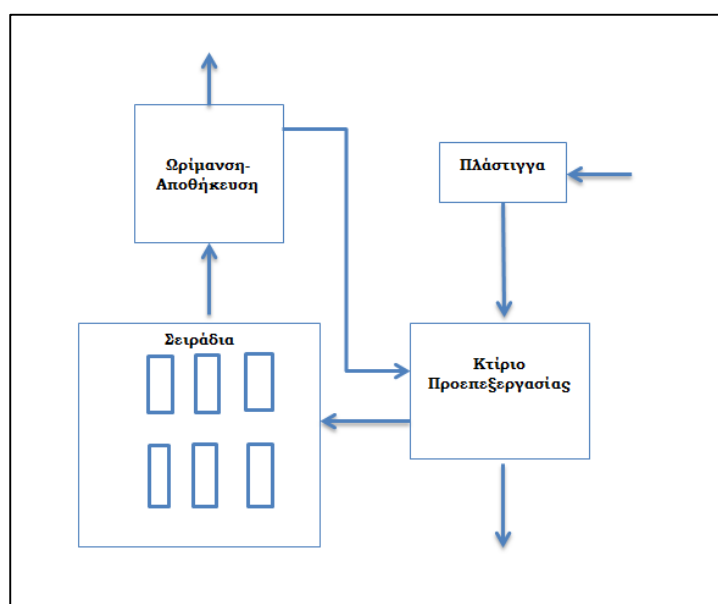
Η ανάδευση θα επιτυγχάνεται με ειδικό εξάρτημα μήκους 2 μέτρων που προσαρμόζεται στο όχημα σχηματισμού-καθαίρεσης σειραδίων.

Τα σειράδια θα είναι εφοδιασμένα και με δίκτυο στράγγισης των παραγόμενων υγρών.

Το όχημα σχηματισμού/ καθαίρεσης των σειραδίων θα οδηγεί το προϊόν στην περιοχή ωρίμανσης - αποθήκευσης.

Ποσότητα κομπόστ θα μεταφέρεται ημερησίως στο σιλό κομπόστ για διασφάλιση της απαιτούμενης ποσότητας ανακυκλοφορίας.

Ενδεικτική χωροθέτηση



3.3 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΛΑΣΠΩΝ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, η οποία λαμβάνει χώρα και στη φύση μπορεί να προσδιοριστεί ως η βιολογική διεργασία κατά την οποία οργανικό υλικό, απουσία οξυγόνου, μετατρέπεται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Σήμερα, η αναερόβια επεξεργασία με ταυτόχρονη παραγωγή μεθανίου είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τη σταθεροποίηση της παραγόμενης ιλύος στις μονάδες βιολογικής επεξεργασίας αστικών λυμάτων και υγρών βιομηχανικών αποβλήτων, καθώς και για την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των αστικών στερεών αποβλήτων, των αστικών λυμάτων και υγρών και στερεών βιομηχανικών αποβλήτων.

Η αναερόβια χώνευση είναι μια ιδιαίτερα σημαντική διεργασία, διότι εκτός από τη χρήση της για επεξεργασία ιλύος που προέρχεται από βιολογικό καθαρισμό, τα τελευταία έτη ερευνάται η χρήση της και για παραγωγή ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διεργασία αυτή παράγει μεθάνιο, έχει μικρές απαιτήσεις σε υποστρώματα και παράγει μικρές ποσότητες μικροβιακής μάζας. Η διεργασία αυτή απαντάται στο πεπτικό σύστημα των μηρυκαστικών ζώων αλλά και γενικότερα στη φύση, όπου επικρατούν αναερόβιες συνθήκες (π.χ. στο έδαφος). Η αναερόβια χώνευση είναι και η βασική βιολογική διεργασία που λαμβάνει χώρα στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.

3.3.1 Αναερόβια χώνευση λασπών

Η αναερόβια χώνευση είναι μια σύνθετη μικροβιολογική διεργασία που ολοκληρώνεται χάρη στη συμμετοχή πολλών κατηγοριών βακτηρίων. Αρχικά είναι σημαντικό να αναφέρουμε τους παράγοντες «κλειδιά» που καθορίζουν την αποδοτικότητα της αναερόβιας χώνευσης:

- ❶ κατάλληλος χρόνος παραμονής
- ❷ ικανοποιητική ανάμιξη (επαφή βακτηρίων - υποστρώματος)
- ❸ κατάλληλο pH
- ❹ έλεγχος της θερμοκρασίας
- ❺ επαρκής συγκέντρωση θρεπτικών ουσιών
- ❻ απουσία (ή εξουδετέρωση) των τοξικών ουσιών
- ❼ κατάλληλα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας.

Ο χρόνος παραμονής σχετίζεται με την κινητική της διεργασίας, ειδικότερα με την κινητική της ανάπτυξης των βακτηρίων και είναι η κύρια παράμετρος διαστασιολόγησης των αναερόβιων χωνευτήρων. Το «κλειδί» για την αποτελεσματική αναερόβια χώνευση είναι η ανάπτυξη και η διατήρηση ενός μεγάλου, σταθερού και ζωντανού πληθυσμού από μεθανογενή (ή μεθανογόνα) βακτήρια. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτούνται:

- ❶ ικανοποιητική επαφή μεταξύ των βακτηρίων και των θρεπτικών πηγών του υποστρώματος (δηλαδή επαρκής ανάμιξη)
- ❷ κατάλληλες ομοιόμορφες συνθήκες (θερμοκρασία, συγκέντρωση κ.ο.κ.)
- ❸ επαρκής χρόνος παραμονής των βακτηρίων.

Τα περισσότερα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την αναερόβια χώνευση οφείλονται σε ανομοιόμορφες και ασταθείς συνθήκες που επικρατούν στην τροφοδοσία ή στο εσωτερικό του αντιδραστήρα.

3.3.1.1 Μικροβιολογία και βιοχημεία της αναερόβιας χώνευσης

Ο κύριος σκοπός της αναερόβιας χώνευσης είναι η σταθεροποίηση του οργανικού υλικού με ταυτόχρονη μείωση των οσμών, της συγκέντρωσης των παθογόνων μικροοργανισμών και της μάζας του οργανικού υλικού που χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της βιολογικής μετατροπής του οργανικού υλικού σε βιοαέριο, δηλαδή σε μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) υπό αναερόβιες συνθήκες (απουσία οξυγόνου). Η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται μέσω της δράσης πολλών κατηγοριών βακτηρίων. Συνήθως η περιγραφή της διεργασίας απλουστεύεται χρησιμοποιώντας ένα σχήμα τεσσάρων σταδίων (βλ. Σχήμα 3.3.1). Τα τέσσερα αυτά στάδια περιλαμβάνουν:

- ❶ διαλυτοποίηση του οργανικού υλικού (υδρόλυση)
- ❷ παραγωγή λιπαρών οργανικών οξέων (οξυγένεση ή οξεογένεση)
- ❸ παραγωγή υδρογόνου και οξικού οξέος (οξικογένεση)
- ❹ παραγωγή μεθανίου (μεθανογένεση).

Θεωρείται ότι συμμετέχουν πέντε κατηγορίες βακτηρίων, καθεμία από τις οποίες παράγει ενέργεια μέσω ορισμένων βιοχημικών αντιδράσεων. Οι δράσεις των βακτηρίων είναι άμεσα αλληλεξαρτώμενες.

3.3.1.1.1 Υδρόλυση και διαλυτοποίηση

Η υδρόλυση (ή αποπολυμερισμός) και η διαλυτοποίηση του σύνθετου και συνήθως αδιάλυτου οργανικού υλικού είναι απαραίτητες για τη μετατροπή του σε μορφή και μέγεθος τέτοια ώστε να μπορούν να διαπεράσουν το κυτταρικό τοίχωμα των βακτηρίων και να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας ή θρεπτικών υλικών. Η υδρόλυση και η διαλυτοποίηση πραγματοποιούνται μέσω της δράσης εξωκυτταρικών υδρολυτικών ενζύμων που παράγονται και εκκρίνονται από ορισμένα βακτήρια. Ο ολικός ρυθμός σταθεροποίησης και παραγωγής μεθανίου μπορεί να επιβραδύνεται από το ρυθμό υδρόλυσης του σύνθετου οργανικού υλικού.

Επιπλέον, πρέπει να επισημανθεί ότι δεν μπορούν όλα τα είδη των οργανικών υλικών να υδρολυθούν σε απλές ενώσεις, αφομοιώσιμες από τα βακτήρια. Αυτά τα συστατικά ονομάζονται μη αποδομήσιμα και αποτελούν σημαντικό τμήμα των λασπών. Το μη αποδομήσιμο τμήμα των λασπών που προέρχονται από αστικά λύματα μπορεί να κυμαίνεται από 35-80% του οργανικού υλικού.

3.3.1.1.2 Οξεογένεση

Κατά την υδρόλυση, το σύνθετο οργανικό υλικό διασπάται σε μακράς αλυσίδας οργανικά οξέα, σάκχαρα, αμινοξέα και τελικά σε μικρότερα οργανικά οξέα όπως οξικό, προπιονικό, βουτυρικό, ισοβουτυρικό και βαλερικό οξύ (πηκτικά λιπαρά οξέα). Αυτή η φάση λέγεται «**φάση οξεογένεσης ή ζύμωσης**» και δεν επιφέρει σταθεροποίηση στο σύστημα (δεν μειώνει σημαντικά το ολικό COD). Απλά, το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού υλικού αλλάζει μορφή κι ένα πολύ μικρό μέρος του καταναλώνεται ως πηγή ενέργειας (δηλαδή σταθεροποιείται). Τα βακτήρια που προκαλούν την παραγωγή των οξέων μπορεί να είναι *προαιρετικά αναερόβια* (ζουν και με την παρουσία οξυγόνου) ή *αυστηρά αναερόβια* (το οξυγόνο είναι τοξικό γι' αυτά). Κατά την παραγωγή των οργανικών οξέων σχηματίζονται ταυτόχρονα οξικό οξύ (και άλλα πηκτικά λιπαρά οξέα όπως προπιονικό και βουτυρικό), υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα.

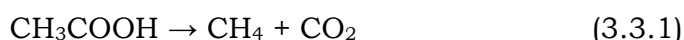
3.3.1.1.3 Οξικογένεση

Το οξικό οξύ εκτός από την απευθείας παραγωγή από τα ζυμωτικά βακτήρια (ομάδα 1), παράγεται επίσης από τα οξικογόνα βακτήρια που μετατρέπουν τα ανώτερα λιπαρά οξέα (βουτυρικό, προπιονικό κλπ) σε οξικό οξύ (ομάδα 2) καθώς και από τα ομοοξικογόνα που καταναλώνουν υδρογόνο (ομάδα 3).

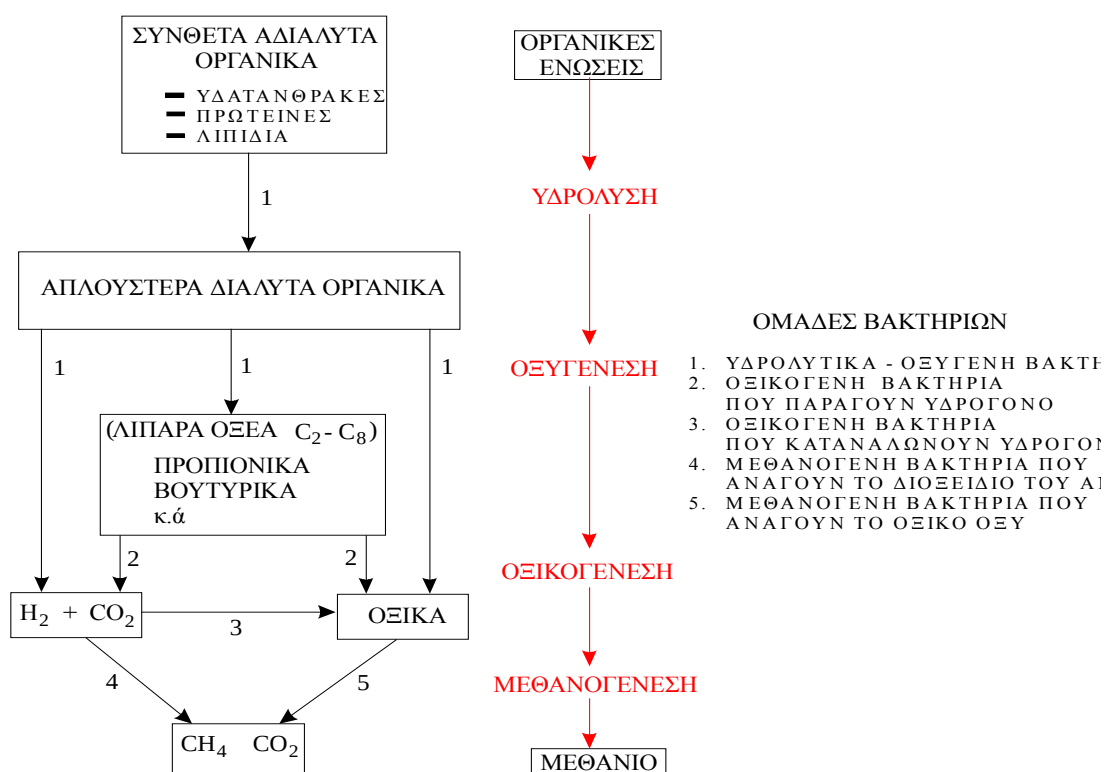
3.3.1.1.4 Παραγωγή μεθανίου

Η σταθεροποίηση των οργανικών λασπών (και άλλων οργανικών) συμβαίνει κατά τη φάση της μεθανογένεσης μέσω της μετατροπής του οξικού οξέος σε μεθάνιο, το οποίο ουσιαστικά είναι αδιάλυτο στο νερό, εύκολα διαχωρίζεται από τη λάσπη και μεταφέρεται στην αέρια φάση και έτσι απομακρύνεται από το σύστημα. Επίσης παράγεται CO_2 το οποίο ή απομακρύνεται ως αέριο ή μετατρέπεται σε διττανθρακική αλκαλικότητα, ανάλογα με το pH. Τα μεθανοπαραγωγά βακτήρια είναι αυστηρά αναερόβια και το οξυγόνο είναι ισχυρά τοξικό γι' αυτά. Το οξικό οξύ και το υδρογόνο είναι τα κύρια υποστρώματα για το σχηματισμό του CH_4 κατά την αναερόβια χώνευση των οργανικών λασπών.

Κατά την αναερόβια χώνευση της λάσπης, ενδεικτικά το 72% του CH_4 που παράγεται, προέρχεται από τη διάσπαση του οξικού οξέος:

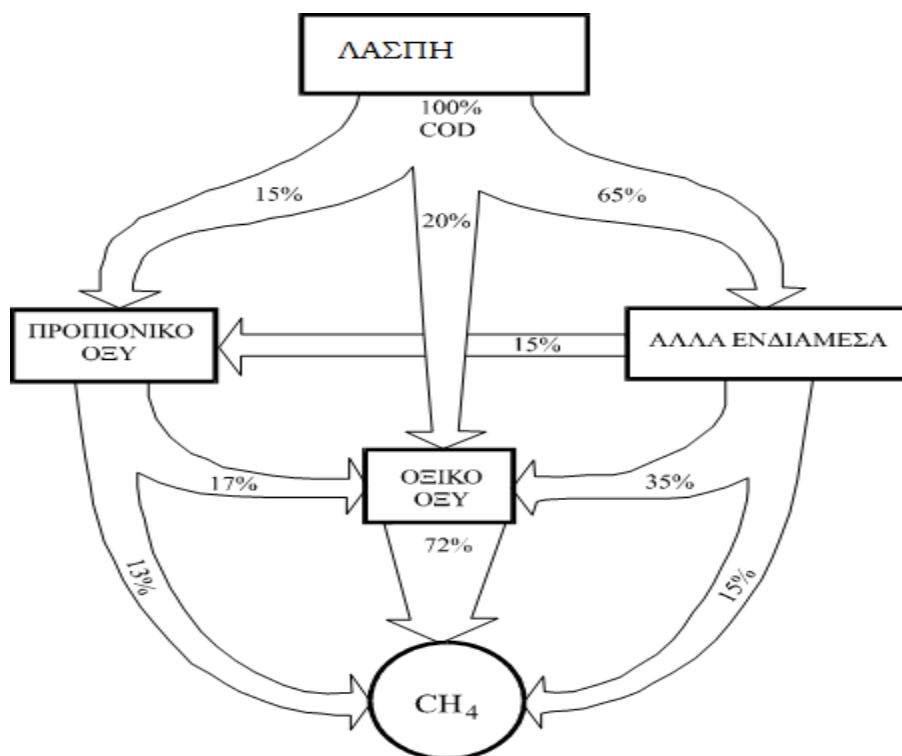


Το υπόλοιπο 28% προκύπτει από την αναγωγή του CO_2 (13% από το προπιονικό οξύ και 15% από άλλα ενδιάμεσα προϊόντα) χρησιμοποιώντας H_2 ως πηγή ενέργειας:



Σχήμα 3.3.1 Απλοποιημένη πορεία παραγωγής μεθανίου τεσσάρων σταδίων κατά την αναερόβια χώνευση

Οι «δρόμοι» παραγωγής CH_4 κατά την αναερόβια χώνευση παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3..



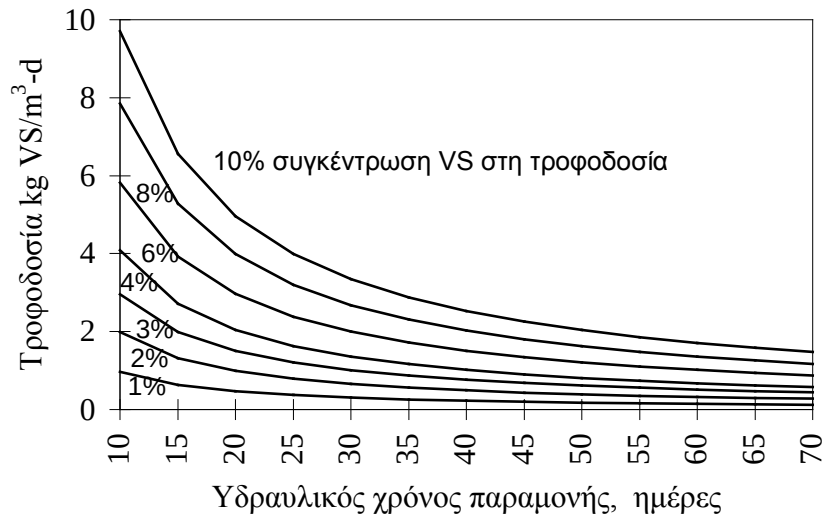
Σχήμα 3.3.2 Δρόμοι παραγωγής μεθανίου από λάσπη.

3.3.1.2 Σχεδιασμός του κωνευτήρα

Ένας σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη των βακτηρίων είναι ο χρόνος παραμονής. Για να επιτευχθεί ικανοποιητική μετατροπή του σύνθετου οργανικού υποστρώματος σε CH_4 και CO_2 , ο πληθυσμός των βακτηρίων στο κωνευτήρα πρέπει να είναι επαρκής σε ποσότητα και συγκέντρωση και επίσης πρέπει ο χρόνος παραμονής να είναι επαρκής για το μεταβολισμό του υποστρώματος. Για τον μηχανικό, αυτό σημαίνει κατάλληλο όγκο αντιδραστήρα και συνεπαγόμενο κόστος.

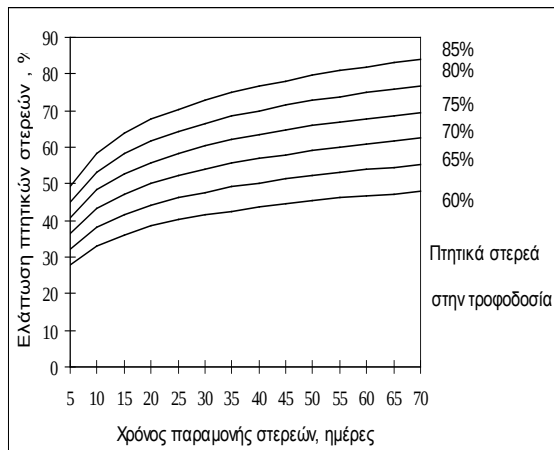
Ως κύρια παράμετρος σχεδιασμού του αναερόβιου κωνευτήρα θα χρησιμοποιηθεί ο χρόνος παραμονής των βιολογικών στερεών (SRT, Solids Retention Time ή θ_c).

Ο σχεδιασμός των κωνευτήρων λασπών από αστικά λύματα στο παρελθόν γινόταν εμπειρικά και ο όγκος τους υπολογιζόταν με βάση τον πληθυσμό της πόλης που εξυπηρετούσε ή το φορτίο των πτητικών στερεών ανά ημέρα (π.χ. $\text{kgVSS}/\text{m}^3\text{-d}$). Η σχέση μεταξύ φορτίου πτητικών στερεών και υδραυλικού χρόνου παραμονής φαίνεται στο Σχήμα 3.3.3. Όπως φαίνεται, η σχέση αυτή εξαρτάται από τη συγκέντρωση των στερεών στην τροφοδοσία. Για συγκεκριμένη συγκέντρωση στερεών στη λάσπη τροφοδοσίας, μικρότερος υδραυλικός χρόνος παραμονής (δηλαδή μεγαλύτερος ρυθμός υδραυλικού φορτίου) οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού οργανικού φορτίου. Στους συμβατικούς αντιδραστήρες ενός σταδίου, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) είναι ίσος με τον SRT ($\text{HRT} = \text{SRT} = \text{όγκος}/\text{ροή} = V/Q$).

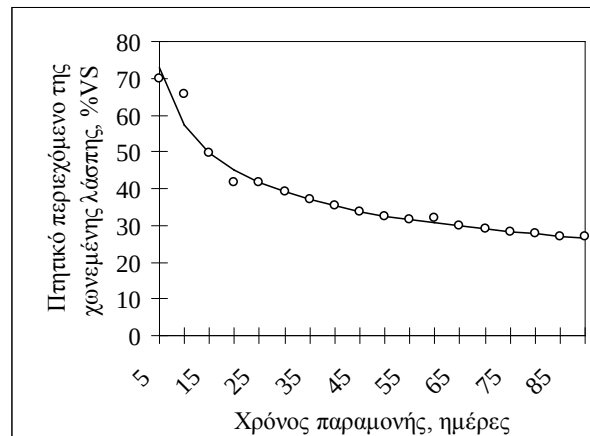


Σχήμα 3.3.3 Σχέση του υδραυλικού χρόνου παραμονής (HRT) με τη φόρτιση του αντιδραστήρα καθώς και τη συγκέντρωση των πτητικών στερεών τροφοδοσίας

Ο χρόνος παραμονής καθορίζει τη σχέση μεταξύ του βακτηριακού πληθυσμού και των λειτουργικών συνθηκών του χωνευτήρα (βλέπε Σχήμα 3.3.1 και Σχήμα 3.3.2).



Σχήμα 3.3.1 Συσχέτιση της ελάττωσης των πτητικών στερεών από τον χρόνο παραμονής τους στον χωνευτήρα και από το ποσοστό τους.



Σχήμα 3.3.2 Σχέση περιεκτικότητας της χωνεμένης λάσπης σε πτητικά οργανικά στερεά με τον χρόνο παραμονής των στερεών στον χωνευτήρα

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ένα κινητικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του την επίδραση του SRT στο σχεδιασμό και την αποδοτικότητα της διεργασίας. Το μοντέλο βασίζεται σε αρχές της βακτηριακής ανάπτυξης και της κατανάλωσης του υποστρώματος.

Υπάρχουν δύο βασικές εξισώσεις που περιγράφουν την αναερόβια βιολογική επεξεργασία αρκετά σωστά για τις περισσότερες περιπτώσεις (τύπου Monod):

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{kSX}{K_s + S} \quad (3.3.3)$$

$$\frac{dX}{dt} = Y\left(-\frac{dS}{dt}\right) - bX \quad (3.3.4)$$

όπου,

$-dS/dt$ ρυθμός κατανάλωσης οργανικού υποστρώματος (καταναλισκόμενη μάζα / όγκος-χρόνος)

k μέγιστος ειδικός ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος (μάζα καταναλισκόμενου υποστρώματος/ημέρα/μάζα βακτηρίων)

S συγκέντρωση υποστρώματος (μάζα/όγκος)

K_s σταθερά ημιταχύτητας του Monod (μάζα/όγκος υποστρώματος)

X συγκέντρωση βακτηριακής μάζας (μάζα/όγκος)

Y συντελεστής απόδοσης βακτηριακής μάζας (μάζα βακτηρίων/μάζα υποστρώματος)

b σταθερά θανάτου μικροοργανισμών (χρόνος⁻¹).

Αντικατάσταση της Εξίσωσης (3.3.3) στην Εξίσωση (3.3.4) και διαίρεση με το X δίνει:

$$\frac{\frac{dX}{dt}}{X} = \mu = \frac{YkS}{K_s + S} - b \quad (3.3.5)$$

όπου μ (d⁻¹) είναι ο καθαρός ειδικός ρυθμός βακτηριακής ανάπτυξης.

Η βακτηριακή παραγωγή συσχετίζεται επομένως με την κατανάλωση του υποστρώματος και την αποσύνθεση του οργανικού υλικού μέσω των κινητικών σταθερών Y , b , k και K_s .

Συνδυάζοντας τις προηγούμενες εξισώσεις με ισοζύγια μάζας σε έναν συγκεκριμένο αντιδραστήρα, προκύπτουν εξισώσεις που συσχετίζουν την αποδοτικότητα της διεργασίας με τον SRT. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι αντιδραστήρων που χρησιμοποιούνται είναι οι αντιδραστήρες πλήρους ανάμιξης (CSTR: ContinuousStirredTankReactor) με ή χωρίς επιστροφή στερεών. Ο χρόνος SRT (συμβολίζεται ως θ_c) που απαιτείται για να επιτευχθεί μια ορισμένη συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην έξοδο, S , και για τα δύο συστήματα δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{YkS}{K_s + S} - b = \mu \quad (3.3.6)$$

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι ο καθαρός ειδικός ρυθμός βακτηριακής ανάπτυξης μ , είναι ίσος με τον αντίστροφο του χρόνου παραμονής των βιολογικών στερεών (SRT ή θ_c). Επομένως, ο ρυθμός βακτηριακής ανάπτυξης και η αποδοτικότητα της διεργασίας μπορεί να ρυθμιστεί ελέγχοντας τον SRT.

Λύνοντας την Εξίσωση (3.3.6) ως προς S παίρνουμε:

$$S = \frac{K_s(1 + b\theta_c)}{\theta_c(Yk - b) - 1} \quad (3.3.7)$$

Η αποδοτικότητα της διεργασίας μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση:

$$E(\%) = \frac{S_o - S}{S_o} \cdot 100\% \quad (3.3.8)$$

όπου S_o είναι η συγκέντρωση του αποδομήσιμου τμήματος του υποστρώματος.

Για την πρωτογενή λήσπη και για θερμοκρασίες μεταξύ 20-35°C, ο Ο' Rourke υπολόγισε τις ακόλουθες τιμές για τις σταθερές:

$$k = 6,67 \text{ g COD/g VSS} \cdot \text{d} (1,035^{T-35})$$

$$K_s = 1,8 \text{ g COD/L} (1,112^{T-35})$$

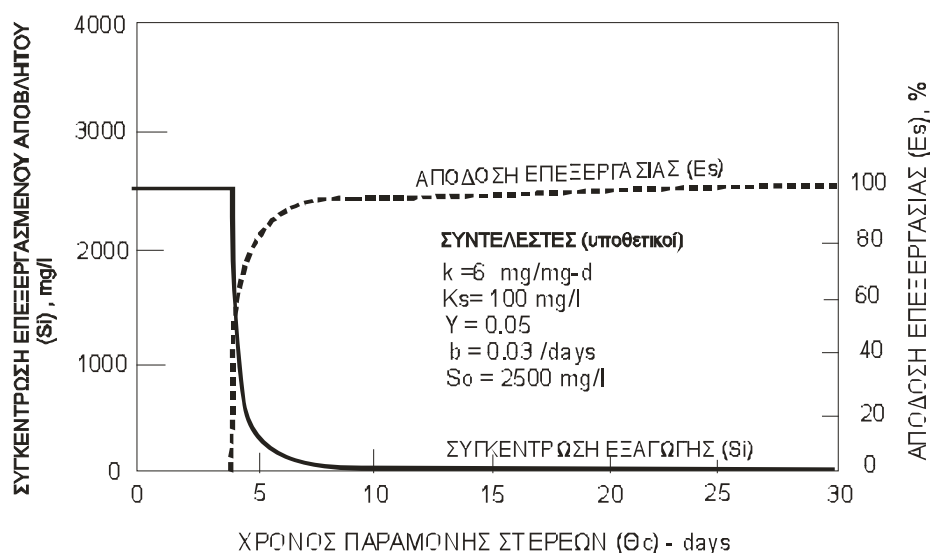
$$b = 0,03 \text{ d}^{-1} (1,035^{T-35}) \text{ και}$$

$$Y = 0,04 \text{ gVSS/gCOD.}$$

Αυτοί οι συντελεστές είναι κατάλληλοι για να περιγράψουν την κινητική της αναερόβιας χώνευσης λήσπης από αστικά λύματα και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλήρως σε όλες τις περιπτώσεις αποβλήτων. Οι κινητικές άλλων μεθανογενών αντιδράσεων, όπως της αντίδρασης (3.3.2), αν και είναι σημαντική καθώς απομακρύνει το υδρογόνο, είναι αρκετά γρήγορες και δεν επηρεάζουν τη συνολική κινητική.

Η επίδραση του χρόνου παραμονής στην αποδοτικότητα της διεργασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.3. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.3, για αρκετά μεγάλους χρόνους παραμονής δεν αυξάνεται περαιτέρω η αποτελεσματικότητα της διεργασίας.

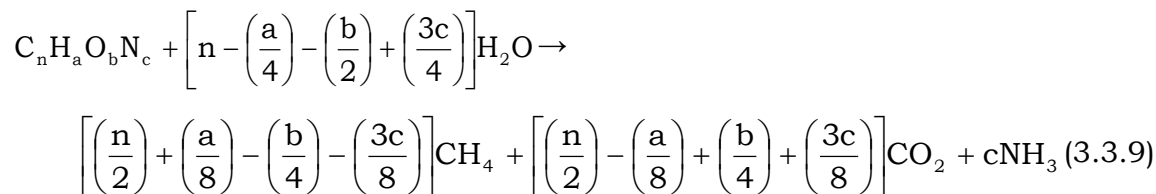
Όπως έχει αναφερθεί, ένας αναερόβιος χωνευτήρας περιέχει πολλές κατηγορίες βακτηρίων καθεμιά από τις οποίες έχει τον δικό της χαρακτηριστικό ρυθμό ανάπτυξης. Ο ολικός ειδικός ρυθμός ανάπτυξης του βακτηριακού συστήματος μ , σχετίζεται άμεσα με τον θ_c . Τα μεθανοπαραγωγά και τα υδρογονοπαραγωγά οξικογενή βακτήρια γενικά έχουν μικρότερους ρυθμούς ανάπτυξης από άλλους συνηθισμένους μικροοργανισμούς και γι' αυτό θεωρούνται οι «κρίσιμοι» μικροοργανισμοί που καθορίζουν τον ολικό ρυθμό ανάπτυξης και την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία του χωνευτήρα πρέπει να εξασφαλίζει επαρκή χρόνο ανάπτυξης των κρίσιμων μικροοργανισμών, ώστε να επιτευχθεί πλήρης μετατροπή του υποστρώματος σε CH_4 .



Σχήμα 3.3.3 Συσχέτιση μεταξύ του χρόνου παραμονής των στερεών, της συγκέντρωσης οργανικών στην έξοδο του χωνευτήρα και της απόδοσης επεξεργασίας σε έναν αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας πλήρους ανάδευσης.

Η μέγιστη ποσότητα CH_4 που μπορεί να παραχθεί από την αναερόβια χώνευση ενός σύνθετου οργανικού υποστρώματος (που συμβολίζεται ως $\text{C}_n\text{H}_a\text{O}_b\text{N}_c$) μπορεί

να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση που αναπτύχθηκε αρχικά από τον Buswell:



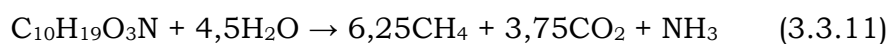
Η ενέργεια που προέρχεται από την αποσύνθεση του οργανικού υλικού και εκλύεται με τη μορφή CH_4 , μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την προηγούμενη αντίδραση και το ισοδύναμο COD του CH_4 , που υπολογίζεται ως εξής:



Από την αντίδραση (3.3.10) υπολογίζεται ότι 1 mole CH_4 (22,4L σε Κ.Σ.) είναι ισοδύναμο με 2 moles O_2 (64 grCOD). Επομένως ισχύει ότι 1 gCOD παράγει 0,35 L CH_4 σε Κ.Σ.

Το ενεργειακό περιεχόμενο του CH_4 που παράγεται από τη σταθεροποίηση 1kgCOD σε Κ.Σ. είναι 13,1 MJ. Χρησιμοποιώντας το νόμο των ιδανικών αερίων για να μετατρέψουμε τα αποτελέσματα σε διαφορετικές θερμοκρασίες, λαμβάνεται η σχέση που φαίνεται στο Σχήμα 3.3.4 μεταξύ της παραγωγής CH_4 και της θερμοκρασίας κώνευσης.

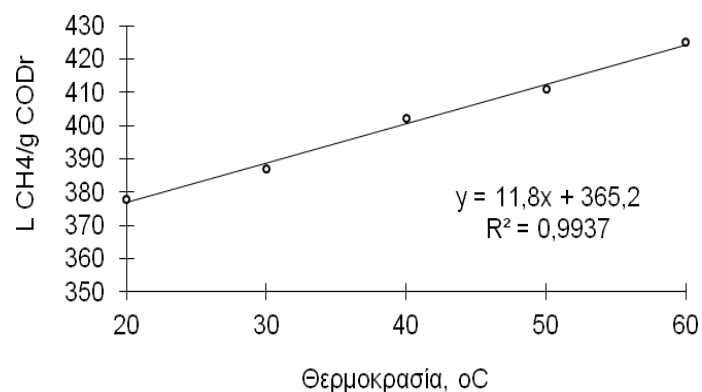
Ο χημικός τύπος που περιγράφει την πρωτογενή λάσπη, σύμφωνα με τον McCarty, είναι $C_{10}H_{19}O_3N$. Χρησιμοποιώντας την αντίδραση (3.3.9), η σταθεροποίηση της πρωτογενούς λάσπης μπορεί να γραφεί ως εξής:



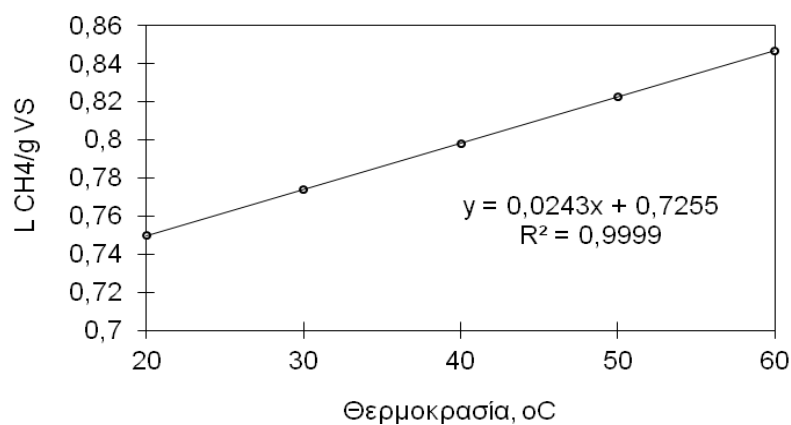
Από την αντίδραση (3.3.11) προκύπτει ότι 1 gVS πρωτογενούς λάσπης μπορεί να παράγει 0,7 L CH_4 σε Κ.Σ. 1gVS πρωτογενούς λάσπης ισοδυναμεί με 1,99g καταναλισκόμενου BOD ή COD (McCarty). Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, προέκυψε η σχέση για τη μέγιστη παραγωγή CH_4 ανά μονάδα καταναλισκόμενων VS ως συνάρτηση της θερμοκρασίας κώνευσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.5. Το ποσοστό του CO_2 στο βιοαέριο ποικίλλει ανάλογα με τη φύση του υποστρώματος, όπως προκύπτει από τη σχέση (3.3.9). Για παράδειγμα, το ποσοστό του CO_2 είναι μεγαλύτερο για ένα απόβλητο που περιέχει πολλούς υδατάνθρακες από ένα απόβλητο που περιέχει πολλές πρωτεΐνες.

Χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες σχέσεις η απόδοση του κωνευτήρα μπορεί να προσδιοριστεί σε σχέση με τη μέγιστη παραγωγή CH_4 ανά μονάδα καταναλισκόμενου οργανικού υλικού (BOD, COD ή VS). Ο θεωρητικός όγκος του παραγόμενου CH_4 μπορεί να υπολογιστεί εύκολα. Το γεγονός ότι το πραγματικά παραγόμενο CH_4 ανά μονάδα καταναλισκόμενου οργανικού υλικού είναι γενικά λιγότερο από το θεωρητικά μέγιστο, οφείλεται στο ότι ένα μέρος του οργανικού υλικού μετατρέπεται σε καινούργια βακτηριακή μάζα (μικροβιακή ανάπτυξη) και στη μη σωστή συλλογή και μέτρηση του αερίου. Τυπικά ωστόσο, το ποσοστό αυτό είναι μικρότερο από 5%, οπότε η σχέση (3.3.9) οδηγεί σε ικανοποιητική εκτίμηση.

Το κλάσμα του οργανικού υλικού που μετατρέπεται σε βακτηριακή μάζα σχετίζεται με τον χρόνο παραμονής. Ο Πίνακας 3.3.1 παρουσιάζει αποτελέσματα παραγωγής CH_4 για πρωτογενή λάσπη. Η σταθερά θανάτου των μικροοργανισμών, b, θεωρήθηκε ίση με $0,03 \text{ d}^{-1}$.



Σχήμα 3.3.4 Σχέση ειδικού ρυθμού παραγωγής μεθανίου (με βάση το βιοαποδομούμενο COD) και της θερμοκρασίας του χωνευτήρα.



Σχήμα 3.3.5 Σχέση ειδικού ρυθμού παραγωγής μεθανίου (με βάση τα βιοαποικοδομούμενα πτητικά στερεά) και της θερμοκρασίας του χωνευτήρα

Πίνακας 3.3.1 Επίδραση του SRT (θ_c) στην παραγωγή CH_4 ανά μονάδα καταναλισκόμενου οργανικού υλικού για πρωτογενή λάσπη.

SRT (d)	L/gBOD σε Κ.Σ.	L/g BOD σε 35°C	L/gVS ^a σε Κ.Σ.	L/gVS ^a σε 35°C
7,5	0,317	0,358	0,631	0,712
10	0,319	0,359	0,634	0,715
12,5	0,320	0,361	0,637	0,718
15	0,321	0,362	0,639	0,721
20	0,323	0,364	0,643	0,725
25	0,325	0,366	0,646	0,729
30	0,326	0,368	0,649	0,732
40	0,328	0,370	0,653	0,737
50	0,330	0,372	0,657	0,741
β	0,350	0,395	0,697	0,786

β: Μέγιστη θεωρητική παραγωγή CH_4 ανά μονάδα καταναλισκόμενου οργανικού υλικού.

Ο ορθολογικός σχεδιασμός των αναερόβιων συστημάτων μπορεί να ενισχυθεί με την πρόβλεψη του χρόνου βακτηριακής παραγωγής, θ_c^{lim} , και του χρόνου βακτηριακής «έκπλυσης» (bacterial washout time), θ_c^{min} :

$$\theta_c^{\text{lim}} = (Yk - b)^{-1} \quad \text{χρόνος βακτηριακής παραγωγής} \quad (3.3.12\alpha)$$

$$\theta_c^{\text{min}} = \left(\frac{YkS_0}{K_c + S_0} - b \right)^{-1} \quad \text{χρόνος βακτηριακής «έκπλυσης»} \quad (3.3.12\beta)$$

Το θ_c^{lim} είναι ο οριακός ελάχιστος χρόνος παραμονής για αποφυγή έκπλυσης των μικροοργανισμών, όταν η συγκέντρωση τροφοδοσίας S_0 τείνει στο άπειρο. Το θ_c^{min} είναι ο ελάχιστος χρόνος παραμονής για αποφυγή έκπλυσης των μικροοργανισμών για δεδομένη συγκέντρωση τροφοδοσίας S_0 . Κατά το σχεδιασμό του αναερόβιου συστήματος, ο σχεδιαζόμενος χρόνος παραμονής των στερεών, θ_c^d μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή ασφάλειας στον SRT που απαιτείται για μια συγκεκριμένη απόδοση της διεργασίας, θ_c^{eff}

$$\theta_c^{\text{eff}} = \left(\frac{YkS^{\text{eff}}}{K_s + S^{\text{eff}}} - b \right)^{-1} \quad (3.3.13)$$

ή σε έναν από τους θ_c^{lim} και θ_c^{min} .

Συνηθισμένοι συντελεστές ασφάλειας για συμβατικούς κωνευτήρες κυμαίνονται μεταξύ 2,5-10. Αφού επιλεγεί η επιθυμητή απόδοση, από τη σχέση (3.3.8) προσδιορίζουμε το S^{eff} . Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του O' Rourke για την πρωτογενή λάσπη και επιθυμητή απόδοση 90% προκύπτει $S^{\text{eff}} = 0,1S_0$. Στη συνέχεια από την (3.3.13) προσδιορίζουμε τον θ_c^{eff} . Αφού βεβαιωθούμε ότι ο χρόνος αυτός υπερβαίνει τους θ_c^{lim} και θ_c^{min} , υπολογίζεται ο χρόνος σχεδιασμού παραμονής στερεών, θ_c^d χρησιμοποιώντας τον συντελεστή ασφάλειας. Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε τη σχέση (3.3.7) για να προσδιορίσουμε τη συγκέντρωση εξόδου του υποστρώματος. Η παραγωγή του CH_4 μπορεί τότε να εκτιμηθεί με βάση το γεγονός ότι για κάθε gCOD που μετατρέπεται, παράγονται 0,35 L CH_4 σε Κ.Σ.

$$Q_{\text{methane}} = 0,35 L g^{-1} (S_0 - S) / \theta_c^d \quad (3.3.14)$$

3.3.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία και απόδοση του αναερόβιου κωνευτήρα

Η θερμοκρασία

Η αναερόβια χώνευση μπορεί να λειτουργήσει σε δύο θερμοκρασιακά εύρη: της μεσόφιλης φάσης (30-38°C) και της θερμόφιλης φάσης (50-60°C). Τα περισσότερα συστήματα που δουλεύουν με αστικά λύματα έχουν σχεδιαστεί για τη μεσόφιλη φάση. Παρόλα αυτά η θερμόφιλη φάση έχει σημαντικά πλεονεκτήματα:

- * αυξάνει τον ρυθμό αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας.
- * βελτιώνει τα χαρακτηριστικά της αφυδάτωσης
- * αυξάνει τον ρυθμό καταστροφής των παθογόνων οργανισμών.

Η αύξηση του ρυθμού αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας μας δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε μικρότερους αντιδραστήρες.

Τα μειονεκτήματα της θερμόφιλης φάσης είναι:

- * υψηλό ενεργειακό κόστος
- * χαμηλής ποιότητας κωνευμένη λάσπη
- * λιγότερο βιοαποδομήσιμο προϊόν.

Η επίδραση της θερμοκρασίας μπορεί να φανεί χρησιμοποιώντας την έννοια του συντελεστή ασφάλειας που αναπτύχθηκε προηγουμένως. Χρησιμοποιώντας ξανά τα δεδομένα του Ο' Rourke για την πρωτογενή λάσπη, επιθυμητή απόδοση 90% και χρόνο παραμονής σχεδιασμού (θ_c^d) 20 μέρες, οι προτεινόμενοι συντελεστές ασφάλειας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας μπορούν να υπολογιστούν όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.2.

Πίνακας 3.3.2. Προτεινόμενοι Συντελεστές Ασφάλειας για επεξεργασία πρωτογενούς λάσπης με χρόνο σχεδιασμού SRT 20 μέρες και απόδοση της διεργασίας 90%. Επίδραση της θερμοκρασίας.

Θερμοκρασία (°C) (1)	θ_c^{lim} (d) (2)	θ_c^{min} (d) (3)	θ_c^{eff} (d) (4)	Προτεινόμενοι Συντελεστές Ασφάλειας για θ_c^d 20 d		
				$\theta_c^d / \theta_c^{\text{lim}}$ (d) (5)	$\theta_c^d / \theta_c^{\text{min}}$ (d) (6)	$\theta_c^d / \theta_c^{\text{eff}}$ (d) (7)
20	7,1	10,9	91,2	2,8	1,8	0,2
25	6,0	7,8	32,8	3,3	2,6	0,6
30	5,0	5,9	16,0	4,0	3,4	1,3
35	4,2	4,7	9,2	4,8	4,3	2,2

Η ανάμιξη

Η επαρκής ανάμιξη του περιεχόμενου του κωνευτήρα είναι απαραίτητη για να εξασφαλίσει αποτελεσματική χρησιμοποίηση όλου του όγκου του αντιδραστήρα, να εμποδίσει τη στρωμάτωση και τις διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας, να διασπείρει τα τελικά προϊόντα του μεταβολισμού και τα τοξικά υλικά που περιέχονται στην τροφοδοσία και να διατηρήσει άμεση επαφή μεταξύ των βακτηρίων, των βακτηριακών ενζύμων και του υποστρώματος. Η επίδραση της ανεπαρκούς ανάμιξης στην κινητική της διεργασίας εκδηλώνεται με μείωση του δραστικού όγκου του συστήματος, επομένως και μείωση του SRT και τελικά μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε αποτυχία. Μελέτες σε αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας έδειξαν ότι η ανεπαρκής ανάμιξη μπορεί να μειώσει το δραστικό όγκο του κωνευτήρα ακόμα και μέχρι 70%.

Το pH

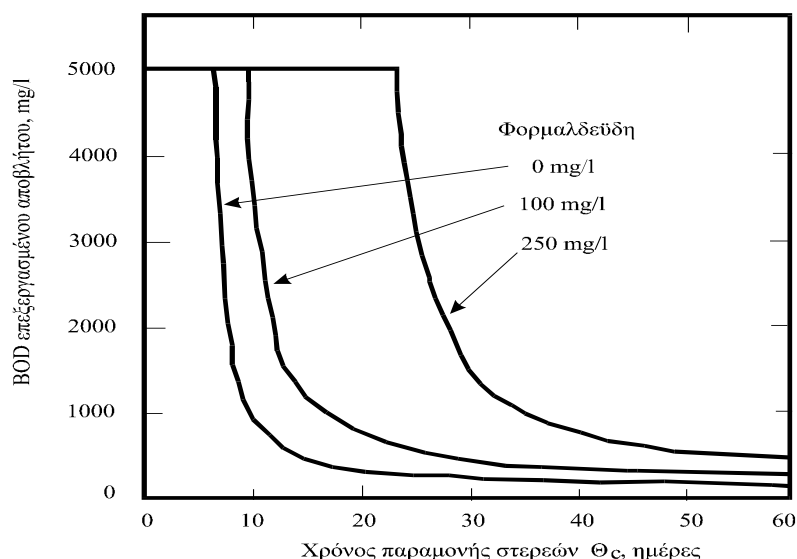
Η ιδανική περιοχή pH για αποτελεσματική κώνευση είναι μεταξύ 6,5-7,6. Παρόλο που η αναερόβια διεργασία αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας σε μεθάνιο είναι πολυσύνθετη και συμπεριλαμβάνει διάφορα είδη βακτηρίων, αυτή που είναι πιο ευαίσθητη στο pH είναι η μεθανογένεση. Κατά τη διάρκεια ενός μη σταθερού συστήματος (λόγω αλλαγής των υδραυλικών χαρακτηριστικών, της θερμοκρασίας ή των τοξικών) πτητικά οξέα είναι δυνατόν να δημιουργηθούν από οξικογενή βακτήρια. Αν το σύστημα δε δουλεύει κάτω από ικανοποιητικές συνθήκες τότε η τιμή του pH θα κατέβει πολύ χαμηλά με αποτέλεσμα να παρεμποδιστεί η διεργασία της παραγωγής του μεθανίου.

Η τοξικότητα

Οι τοξικές ουσίες μπορεί να είναι είτε συνεχώς παρούσες στην τροφοδοσία και επομένως συνεχώς να διοχετεύονται στο σύστημα μαζί με το προς χώνευση υλικό ή να περιέχονται κατά διαστήματα στην τροφοδοσία (προσωρινή τοξικότητα). Η παρουσία τοξικών ουσιών μόνιμα ή παροδικά μεταβάλλει την κινητική της χώνευσης.

Στην περίπτωση της μόνιμης τοξικότητας, η επίδραση της συνεχούς μεταβολής της κινητικής της διεργασίας στην απόδοση του κωνευτήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.9 το οποίο προέκυψε χρησιμοποιώντας διάφορα δεδομένα και τιμή για το Y ίση με 0,04g/g (Ο' Rourke). Η παρουσία 250 mg/L φορμαλδεΰδης οδηγεί σε αύξηση του χρόνου «έκπλυσης» ($\theta_c^{\min}$) από 6 μέρες (χωρίς παρουσία φορμαλδεΰδης) σε περίπου 23 μέρες. Αν έχει χρησιμοποιηθεί χρόνος σχεδιασμού SRT 20 μέρες, η παρουσία 100 mg/L φορμαλδεΰδης θα οδηγήσει σχεδόν σε διπλασιασμό του BOD της εξόδου, ενώ η παρουσία 250 mg/L φορμαλδεΰδης θα οδηγήσει στην αποτυχία του συστήματος λόγω της «έκπλυσης» των βακτηρίων.

Η μόνιμη παρουσία 100 mg/L φορμαλδεΰδης θα προκαλέσει περίπου 14% μείωση στην αποτελεσματικότητα αποικοδόμησης του BOD για SRT 15 μέρες και 54% αντίστοιχη μείωση για SRT 10 μέρες. Έτσι, αν δε θέλουμε να μειωθεί αισθητά η απόδοση, απαιτείται ένας αρκετά μεγάλος SRT. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.9, χρόνος σχεδιασμού SRT 18 μέρες θα δώσει συντελεστή ασφάλειας 3 ($\theta_c^d / \theta_c^{\min} = 18/6$) όταν δεν υπάρχει φορμαλδεΰδη. Σε περίπτωση παρουσίας 250 mg/L φορμαλδεΰδης, απαιτείται χρόνος σχεδιασμού SRT 69 μέρες για τιμή του συντελεστή ασφάλειας ίση με 3. Η αρνητική επίδραση της μόνιμης παρουσίας της τοξικότητας μπορεί επομένως να ελαχιστοποιηθεί με κατάλληλη ρύθμιση του SRT. Η κατάλληλη ρύθμιση του SRT επίσης μεγιστοποιεί τον εγκλιματισμό των μικροοργανισμών στην τοξικότητα, γεγονός που θα εξεταστεί λεπτομερέστερα παρακάτω.



Σχήμα 3.3.6 Επίδραση της τοξικότητας στη λειτουργία του κωνευτήρα.

Η αναερόβια χώνευση επηρεάζεται από την παρουσία των **βαρέων μετάλλων**. Στον Πίνακα 3.3.3 δίνεται η μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση του κάθε μετάλλου στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Πίνακας 3.3.3 Συνολική και διαλυτή συγκέντρωση βαρέων μετάλλων που παρατηρούνται στους αναερόβιους χωνευτήρες.

Μέταλλα	Ολική συγκέντρωση (ppm)	Διαλυτή συγκέντρωση (ppm)
Cr VI	520	3,0
Cu	196	0,7
Ni	70	1,6
Zn	341	0,1

Ο Πίνακας 3.3.4 και

Πίνακας 3.3.5 παρουσιάζουν τις **οργανικές ενώσεις** που θεωρούνται τοξικές κατά τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Πίνακας 3.3.4 Σχετική τοξικότητα οργανικών ενώσεων.

Ένωση	Συγκέντρωση για την οποία ελαττώνεται κατά 50% η βιολογική δραστηριότητα (mM)
1- Χλωροπροπάνιο	0,1
Νιτροβενζόλιο	0,1
Acrolein	0,2
1- Χλωροπροπάνιο	1,9
Φορμαλδεΰδη	2,4
Lauric Acid	2,6
Αιθυλοβενζόλιο	3,2
Acrylonitrille	4
3 χλωρο 1,2 Propandiol	6
Crotonaldehyde	6,5
2 Χλωροπροπιονικό οξύ	8
Vinyl Acetate	8
Ακεταλδεΰδη	10
Ethyl Acetate	11
Ακρυλικό οξύ	12
Catechol	24
Φαινόλη	26
Ανιλίνη	26
Resorcinol	29
Προπανάλη	90

Πίνακας 3.3.5 Συγκεντρώσεις οργανικών ενώσεων που θεωρούνται ότι παρεμποδίζουν την αναερόβια χώνευση.

Οργανικές ενώσεις	Τοξική συγκέντρωση (ppm)
Φορμαλδεύδη	50-200
Χλωροφόρμιο	0,5
Αιθυλικό βενζόλιο	200-1000
Διχλωροαιθυλένιο	5
Κηροζίνη	500
Γραμμικό ABS (απορρυπαντικό)	1% ξηράς ουσίας

Θρεπτικά συστατικά

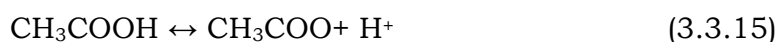
Για να έχουμε ικανοποιητικό αποτέλεσμα στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης πρέπει να έχουμε ικανοποιητική συγκέντρωση θρεπτικών, και κυρίως άζωτο και φώσφορο. Από βιβλιογραφικές πηγές, είναι φανερό ότι το 4-10% των βιοδιασπάσιμων οργανικών υλικών όπως το COD, μετατρέπονται σε βακτηριακή κυτταρική μάζα. Γνωρίζοντας ότι 1 g των βακτηρίων ισοδυναμεί με 1,42 g COD και γνωρίζοντας το COD του υγρού, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την παραγωγή βιομάζας και την απαιτούμενη ποσότητα αζώτου.

Εκτός από το φώσφορο και το άζωτο, τα άλλα θρεπτικά που απαιτούνται είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο, το θείο, το ασβέστιο και ίχνη μικροοργανισμών. Εν γένει θεωρείται ότι για πολλά στοιχεία υπάρχει μία βέλτιστη συγκέντρωση και πάνω από κάποια άλλη μεγαλύτερη συγκέντρωση παρατηρείται παρεμπόδιση.

Τα Πτητικά Οξέα (VA)

Για πολλά χρόνια επικρατούσε η άποψη ότι τα πτητικά οξέα εμποδίζουν τη διεργασία παραγωγής μεθανίου από τα βακτήρια. Όπως έχει ειδη αναφερθεί τα επικρατέστερα πτητικά οξέα που παράγονται είναι το οξικό, το προπιονικό και το βουτυρικό οξύ. Επικρατεί η άποψη ότι αν η συγκέντρωση των πτητικών οξέων είναι μεγαλύτερη από 2000 ppm τότε αυτά θεωρούνται τοξικά. Παρόλα αυτά εκτεταμένες έρευνες έδειξαν ότι, αν η συγκέντρωση των πτητικών οξέων φθάσει στα 6000 ppm, θεωρείται ανεκτική και χωρίς να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην παραγωγή μεθανίου, δεδομένου του ότι το pH είναι στη βέλτιστή του τιμή. Οι έρευνες αυτές έδειξαν ότι το προπιονικό οξύ σε συγκέντρωση 6000 ppm παρεμποδίζει τα οξικογενή βακτήρια.

Ο Andrews και οι συνεργάτες του καθώς και ο Kroeker θεωρούν ως δεδομένο ότι τοξικά για τα μεθανογενή βακτήρια είναι τα μη ιονισμένα πτητικά οξέα, UVA. Παρεμπόδισεις αναφέρονται να συμβαίνουν από τα UVA σε συγκεντρώσεις 30-60 ppm. Χρησιμοποιώντας οξικό οξύ ως παράδειγμα, το οποίο θεωρείται από τα πρωταρχικά πτητικά οξέα, ισχύει αντίδραση:



Η συγκέντρωση των UVA συνδέεται επομένως άμεσα με το pH της διεργασίας. Οι Heyes & Hall θεωρούν ως δεδομένο ότι το υδρογόνο παράγεται κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης από το UVA που προκαλεί παρεμπόδιση. Για να αυξήσουμε τη συγκέντρωση των UVA σε 30 ppm και σε pH 7,0, απαιτείται ολική συγκέντρωση οξέων περίπου 5500 ppm, ενώ για pH 6,5 απαιτούνται 1800 ppm πτητικών οξέων. Για 60 ppm UVA απαιτούνται περίπου 11000 ppm οξέων σε pH 7,5 και 3600 ppm σε pH 6,5 αντίστοιχα.

Πρέπει να αποσαφηνιστεί ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις πτητικών οξέων μπορεί να είναι ανεκτές όσο το pH βρίσκεται μεταξύ 6,5 και 7,6.

3.3.1.4 Συνθήκες καλής λειτουργίας της αναερόβιας χώνευσης

Ασταθή χώνευση έχουμε από αλλαγές στα οργανικά συστατικά και στα χαρακτηριστικά τους και από μεταβολή στη θερμοκρασία λόγω παρουσίας τοξικών ουσιών. Κατά τη διάρκεια της ασταθούς χώνευσης τυπικά η συγκέντρωση των πτητικών αυξάνει ενώ το pH, η διττανθρακική αλκαλικότητα, η παραγωγή μεθανίου και η δομή των οργανικών μειώνονται. Ένας προσεκτικός έλεγχος όλων αυτών έχει ως αποτέλεσμα να παρεμποδιστεί η ασταθής λειτουργία του συστήματος.

Πτητικά οξέα - Αλκαλικότητα - pH: η σχέση μεταξύ αυτών των τριών παραμέτρων είναι πολύ σημαντική και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης. Το ιόν HCO_3^- είναι η κύρια πηγή για ικανοποιητική αλκαλικότητα στην αναερόβια χώνευση και για βέλτιστο pH 6,5-7,6. Παράγεται κατά τη διάσπαση του οργανικού αζώτου κυρίως από πρωτεΐνες σε NH_3 και από την αντίδραση της αμμωνίας με το CO_2 για να σχηματισθεί το ιόν του αμμωνίου. Περίπου 200 ppm αλκαλικότητας (μετρούμενη ως CaCO_3) παράγονται από τη διάσπαση 1 g/L πρωτοβάθμιας λάσπης (VS $\text{C}_{10}\text{H}_{19}\text{O}_3\text{N}$). Για SRT 50 ημερών θα παραχθούν περίπου 213 ppm αλκαλικότητας (μετρούμενη ως CaCO_3). Αυτή η μορφή αλκαλικότητας όπως και η παραγωγή του αμμωνιακού αζώτου εξαρτάται κυρίως από το SRT.

Η διττανθρακική αλκαλικότητα μπορεί να παράγεται και όταν χωνεύονται τα οργανικά άλατα των οξέων ή τα απορρυπαντικά. Τα κατιόντα που συνεργάζονται με τα οργανικά οξέα και τα απορρυπαντικά είναι διαθέσιμα και για να παράγουν και CO_2 , το οποίο με το νερό σχηματίζει διττανθρακικά άλατα. Λογικό είναι να μην υπάρχει αλκαλικότητα αν δεν υπάρχει διαθέσιμο οργανικό άζωτο, απορρυπαντικά ή άλατα οργανικών οξέων, γεγονός όμως το οποίο δημιουργεί πρόβλημα για την επεξεργασία των βιομηχανικών αποβλήτων.

Στις διεργασίες αναερόβιας χώνευσης **η ρύθμιση του pH** γίνεται με άσβεστο, ανθρακικό νάτριο, καυστικό νάτριο ή κάλιο και αμμωνία. Αυτό όμως που προτιμάται είναι το ανθρακικό νάτριο, διότι ο άσβεστος αν και είναι πολύ φθηνός ως αντιδραστήριο, δεν είναι τόσο αποτελεσματικός όσο το ανθρακικό νάτριο.

Πρέπει να δίδεται μεγάλη προσοχή κατά τη χρήση του ασβέστη στη διεργασία της χώνευσης λόγω της χημικής δράσης του Ca. Από τη χημική ισορροπία για να ανέλθει το pH από 6,5 σε 6,7 χρειάζονται περίπου 1000 ppm CaCO_3 . Αν προστεθεί μεγάλη ποσότητα CaCO_3 τότε θα δημιουργηθεί ίζημα, με αποτέλεσμα να μειωθεί ο όγκος του αντιδραστήρα και ως εκ τούτου το SRT. Το διοξείδιο του άνθρακα θα μειωθεί με αποτέλεσμα να ελαττωθεί και η παραγωγή του μεθανίου. Αν η προσθήκη ασβέστου γίνεται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες τότε η δημιουργία του ιζήματος θα μπορεί να ελεγχθεί και να απομακρυνθεί εύκολα. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμμωνία αλλά και εδώ υπάρχει κίνδυνος τοξικότητας.

3.3.2 Αναερόβια επεξεργασία απορριμμάτων

Τα αστικά στερεά απορρίμματα μπορούν να αποδώσουν σημαντικά ποσά ενέργειας. Η εκμετάλλευση του βιοαερίου που παράγεται κατά την υγειονομική ταφή αποτελεί μέθοδο ανάκτησης ενέργειας. Η μέθοδος όμως αυτή χαρακτηρίζεται από πολύ βραδύ ρυθμό που συνήθως διαρκεί 5-10 έτη.

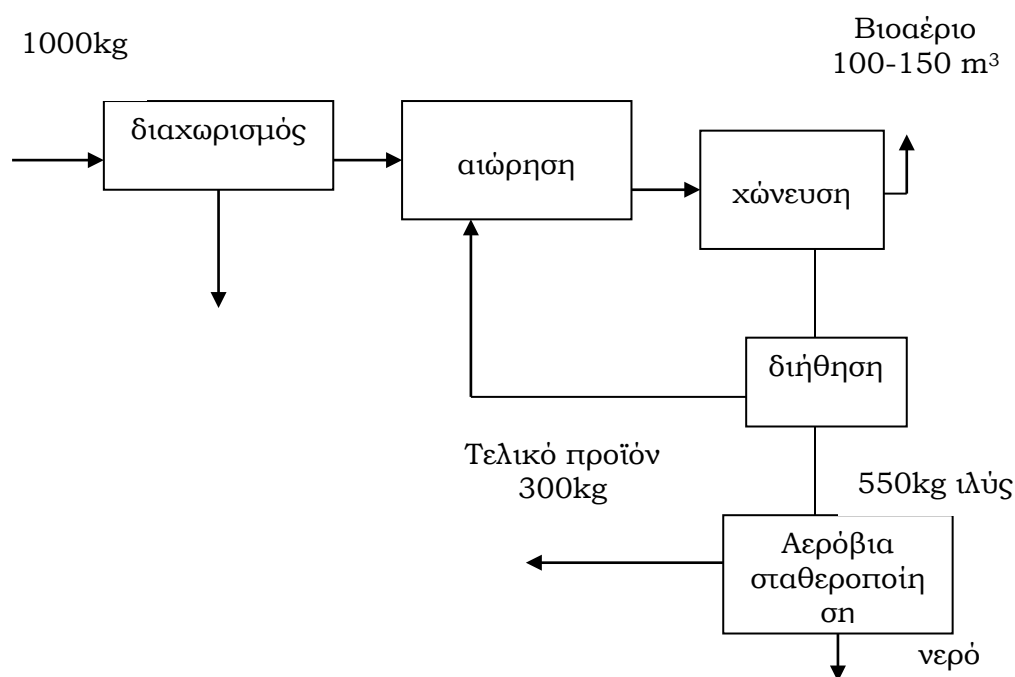
Η επιτάχυνση της απελευθέρωσης του βιοαερίου μπορεί να επιτευχθεί σε ειδικούς αντιδραστήρες υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Επιπλέον, οι αντιδραστήρες αυτοί

αποδίδουν το υπόλειμμα της αποσύνθεσης για περαιτέρω επεξεργασία και χρήση ως εδαφοβελτιωτικό, περίπου όπως το παραγόμενο με αερόβια λιπασματοποίηση.

Μία τυπική μονάδα (Σχήμα 3.3.7) αποτελείται από τα εξής στάδια:

1. Διαχωρισμός του οργανικού κλάσματος από μέταλλα, πλαστικά, γυαλί
2. Αιώρηση των οργανικών σε νερό για τροφοδότηση του βιοαντιδραστήρα (σε 10% στερεά τυπικά, εκτός αν πρόκειται για ξηρή διεργασία)
3. Αναερόβια χώνευση
4. Διήθηση αναερόβιας ιλύος
5. Αερόβια σταθεροποίηση αναερόβιας ιλύος.

Κατά την προεπεξεργασία απομακρύνονται τα μέταλλα, το γυαλί και τα άλλα ανόργανα υλικά, εξασφαλίζεται η κατάλληλη κοκκομετρία και προστίθεται νερό για επίτευξη συγκέντρωσης στερεών 10-30%, ανάλογα με την τεχνολογία, για την τροφοδοσία του αντιδραστήρα. Στη συνέχεια το αιώρημα οδηγείται σε αντιδραστήρα όπου χωνεύεται επί 2-3 εβδομάδες. Το βιοαέριο που παράγεται καίγεται προς παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η μονάδα, συνήθως ιδιοκαταναλώνει ένα ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας. Το υπόλειμμα του αντιδραστήρα, όπου τα πτητικά στερεά έχουν μειωθεί κατά 50-65%, αφυδατώνεται ως ένα ποσοστό 60%. Το υγρό κλάσμα χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της υγρασίας της τροφοδοσίας. Το συμπύκνωμα της πρέσας λιπασματοποιείται αερόβια (ενδεχομένως με προσθήκη άλλων υλικών, όπως ιλύς από βιολογικό) και το μίγμα αφήνεται να ωριμάσει, οπότε σχηματίζεται το τελικό προϊόν (compost).



Σχήμα 3.3.7 Τυπική μονάδα αναερόβιας επεξεργασίας απορριμμάτων

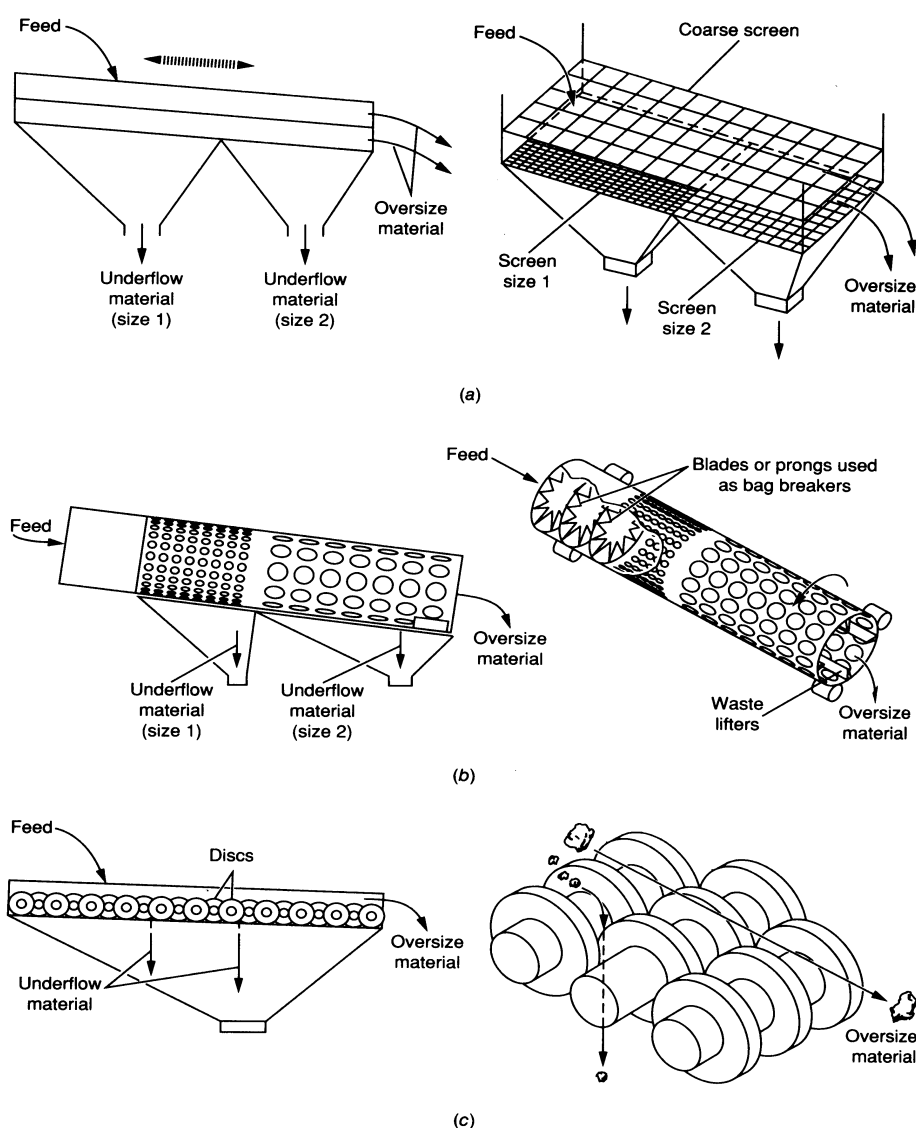
Το υλικό αυτό είναι σταθεροποιημένο και απαλλαγμένο από παθογόνους οργανισμούς. Η περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα εξαρτάται από την τροφοδοσία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό ή ως επικαλυπτικό στην υγειονομική ταφή απορριμμάτων.

3.4 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

3.4.1 Κόσκινα διαχωρισμού κατά μέγεθος

Στόχος κατά την κοσκίνηση των απορριμμάτων είναι ο διαχωρισμός των απορριμμάτων διαφόρων μεγεθών σε δύο ή περισσότερα κλάσματα μεγέθους, με τη χρήση μίας ή περισσότερων διαχωριστικών επιφανειών (κόσκινων). Πρακτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν: (1) απομάκρυνση ογκωδών αντικειμένων, απομάκρυνση μικρών αντικειμένων, (2) διαχωρισμό απορριμμάτων σε ελαφρά καύσιμα και βαρέα μη καύσιμα, (3) ανάκτηση χαρτιού, πλαστικών και άλλων ελαφρών αντικειμένων από γυαλί και μέταλλο, (4) διαχωρισμό γυαλιού και άμμου από καύσιμα υλικά, (5) διαχωρισμό αντικειμένων από την τέφρα της καύσης.

Τυπικά κόσκινα περιγράφονται στο Σχήμα 3.4.1.



Σχήμα 3.4.1 Τυπικά κόσκινα για τον διαχωρισμό ΑΣΑ: (α) δονούμενο κόσκινο, (b) περιστροφικό κόσκινο, και (c) δισκοκόσκινο.

Η απόδοση των κόσκινων εκφράζεται με την ποσοστιαία ανάκτηση, την καθαρότητα και την αποδοτικότητα των κλασμάτων που πρέπει να διαχωριστούν. Με βάση τον κάτωθι διαχωρισμό:



δύο κλασμάτων X και Y, η *ανάκτηση* του X είναι $R_x = (X_1 / X_0) \times 100$, και του Y είναι $R_y = (Y_2 / Y_0) \times 100$, η *καθαρότητα* του X είναι $P_x = [X_1 / (X_1 + Y_1)] \times 100$ και του Y είναι $P_y = [Y_2 / (X_2 + Y_2)] \times 100$, και η *αποδοτικότητα* του διαχωρισμού (που μετρά τόσο την ανάκτηση όσο και την καθαρότητα) ορίζεται ως:

$$E_{(X,Y)} = \left| \frac{X_1}{X_0} - \frac{Y_1}{Y_0} \right| * 100 = \left| \frac{X_2}{X_0} - \frac{Y_2}{Y_0} \right| * 100 \quad (3.4.1)$$

Ο σχεδιασμός των κόσκινων γίνεται με βάση την παροχή των απορριμμάτων και το χρόνο παραμονής στη συσκευή.

3.4.1.1 Σχεδιασμός δονούμενου κόσκινου

$$A = \frac{\dot{M}}{\dot{M}_A} f \quad (3.4.2)$$

όπου, A Εμβαδόν σε m^2 $A = (Q_{nom} / C_u) \cdot F$

$\dot{M}$ φόρτιση κόσκινου σε tn/h

$\dot{M}_A$ δυναμικότητα μονάδας (tn/h) / m^2

f συντελεστής που προσδιορίζεται πειραματικά (π.χ. $f=1,4$ για θρυμματισμένο γυαλί)

Εναλλακτικά:

$$\dot{M}_A = \frac{\rho D^{2/3}}{K} \quad (3.4.3)$$

όπου, Q_{nom} φόρτιση κόσκινου σε ton/h· m^2

ρ πυκνότητα (kg/m^3) στερεών

D διάμετρος οπών (cm)

K πειραματικά προσδιοριζόμενη σταθερά

3.4.1.2 Σχεδιασμός περιστρεφόμενου κόσκινου

$$n_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (3.4.4)$$

όπου n_c κρίσιμη ταχύτητα περιστροφής στρ./s (πρέπει να είναι η ταχύτητα στο 50-80% αυτής της τιμής για να έχουμε ροή προς τα κάτω)

g επιτάχυνση βαρύτητας 9,81 m/s²

R ακτίνα τυμπάνου

Σχέση για εκτίμηση της παροχής:

$$D = \left(\frac{0,32 \dot{M}}{\rho_b f K_v g^{0,5} \varepsilon \varphi \omega} \right)^{0,4} \quad (3.4.5)$$

όπου, D διάμετρος τυμπάνου

$\dot{M}$ παροχή κόσκινου σε kg/s

ρ_b πυκνότητα (kg/m³)

ω κλίση κόσκινου (γωνία με οριζόντιο 2-5°)

f παράγοντας πληρότητας (τυπικά 0,25-0,33)

g επιτάχυνση της βαρύτητας 9,81 m/s²

K_v παράγοντας ταχύτητας

- 1,35 για 3°

- 1,85 για 5°

Τυπικά μεγέθη:

- Διάμετρος 3,5 m
- Μήκος 4 m
- Μέγεθος οπών 50 mm
- Γωνία 3-7 μοίρες
- Ταχύτητα περιστροφής 11-13 στροφές/min

3.4.2 Υγειονομική ταφή απορριμμάτων

3.4.2.1 Εισαγωγή

Υγειονομική ταφή ονομάζεται η διαδικασία ταφής των απορριμμάτων με την οποία ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και στη δημόσια υγεία.

Στο παρελθόν η διάθεση των ΑΣΑ λάμβανε χώρα σε μη στεγανοποιημένους χώρους (σκουπιδότοπους) ή απλά σε χώρους με απλό φυσικό στρώμα αργίλου με περιοδική επικάλυψη και τέλος τοποθέτηση τελικής επικάλυψης.

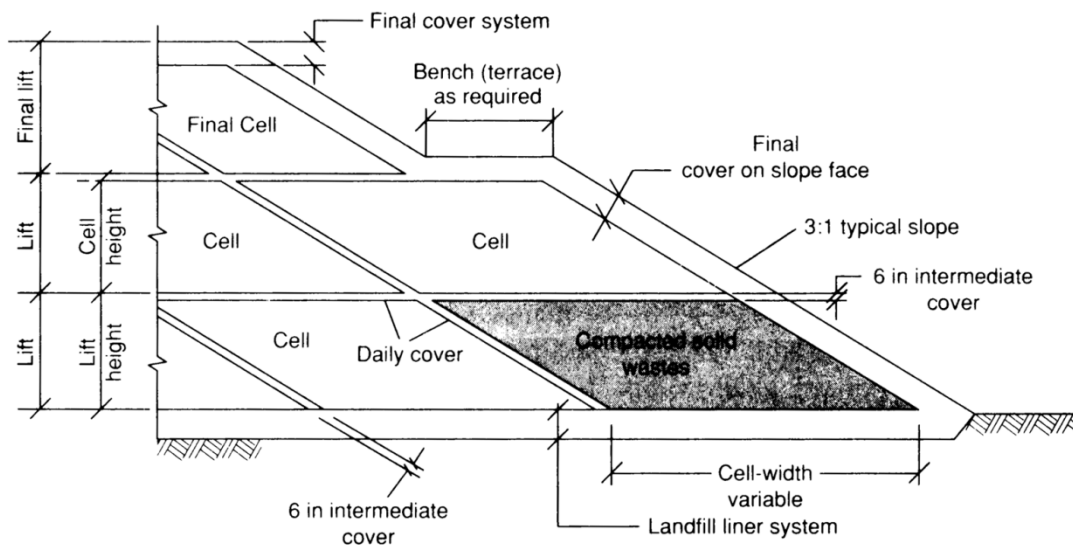
Για μικρούς χώρους διάθεσης, η ποσότητα των διηθημάτων είναι μικρή και συνήθως δεν δημιουργεί σοβαρό πρόβλημα. Με την αύξηση του μεγέθους των ΧΥΤΑ (χώρων υγειονομικής ταφής) αλλά και του φάσματος των υλικών προς ταφή το ρυπαντικό δυναμικό των διηθημάτων αυξήθηκε και έγινε αναγκαία η εισαγωγή διατάξεων περιβαλλοντικής προστασίας από τα διηθήματα.

Τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν είναι τα εξής:

1. Χωροθέτηση
2. Σχεδιασμός και λειτουργία
3. Μακροπρόθεσμες εγγυήσεις και νομικές ευθύνες.

3.4.2.2 Τεχνική περιγραφή ΧΥΤΑ

Η σύγχρονη τεχνολογία υγειονομικής ταφής επιτρέπει την κατασκευή και λειτουργία των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) σταδιακά με τη μέθοδο των κυττάρων. Τυπική εγκάρσια τομή δίνεται στο Σχήμα 3.4.2. **Κύτταρο** (cell) ονομάζεται ο όγκος του υλικού που τοποθετείται σε κάθε προκαθορισμένη **λειτουργική περίοδο** (αντίστοιχη φάση λειτουργίας), συνήθως μία μέρα. Κάθε κύτταρο έχει ίδιο διαμορφωμένο και στεγανοποιημένο πυθμένα με σαφή υδραυλικά όρια από το προηγούμενο και το επόμενο και ίδιο σύστημα συλλογής διηθημάτων. Πληρούνται εξ' ολοκλήρου πριν την αρχή πλήρωσης του επομένου. Το κύτταρο αποτελείται από τα απορρίμματα και το υλικό κάλυψης. Η **ημερήσια κάλυψη** είναι 15-30 cm χώματος ή εδαφοβελτιωτικού που τοποθετείται στο τέλος κάθε μέρας, προκειμένου να αποφευχθεί η διασπορά των απορριμμάτων και να ελεγχθεί η εισροή νερού στα απορρίμματα.



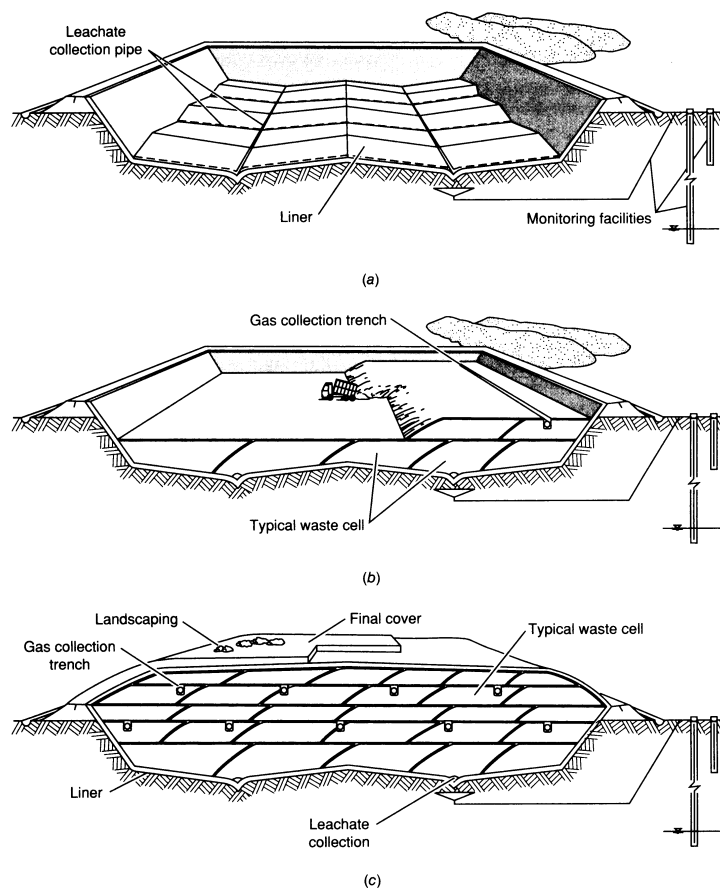
Σχήμα 3.4.2 Εγκάρσια τομή χώρου υγειονομικής ταφής.

Ταμπάνι (lift) ονομάζεται ένα πλήρες στρώμα σε όλη την έκταση του κυττάρου. Όταν το ύψος υπερβαίνει τα 16-25 m, χρησιμοποιούνται **"τοιχία"** (benches) για να διατηρηθεί η κλίση των πρανών, για να τοποθετηθούν κανάλια για τα υγρά διηθήματα και για την τοποθέτηση αγωγών βιοαερίου. Το **"τελικό ταμπάνι"** (final lift) περιλαμβάνει το στρώμα κάλυψης. Το τελικό στρώμα κάλυψης εφαρμόζεται σε όλη την επιφάνεια κάθε κυττάρου αφού συμπληρωθούν όλες οι λειτουργίες. Το **τελικό κάλυμμα** συνήθως αποτελείται από πολλαπλά στρώματα χώματος ή/και υλικών γεωμεμβρανών σχεδιασμένων με σκοπό την αύξηση των επιφανειακών απορροών, την παρεμπόδιση εισροής νερού και την υποστήριξη επιφανειακής βλάστησης φυτών.

Το υγρό που συλλέγεται στο βυθό ονομάζεται **διήθημα ή στράγγισμα** (leachate). Για βαθιές χωματερές μπορεί να συλλέγεται και σε ενδιάμεσα σημεία. Προέρχεται από τη διήθηση βροχών και νερών αρδεύσεων κυρίως. Επίσης περιλαμβάνει και την αρχική υγρασία των απορριμμάτων.

Στους ΧΥΤΑ παράγεται **βιοαέριο** (μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα) με κάποια περιεκτικότητα σε άζωτο, οξυγόνο, αμμωνία και πτητικά οργανικά. Κάτω κάτω υπάρχει στρώμα πηλού ή γεωμεμβρανών για αποφυγή διήθησης.

Ενας ΧΥΤΑ "κλείνει" σε 10 - 50 χρόνια ανάλογα με τον όγκο και τις ροές των απορριμμάτων και στην συνέχεια εξακολουθεί να ελέγχεται.



Σχήμα 3.4.3 Ανάπτυξη και συμπλήρωση ΧΥΤΑ: (α) εκσκαφή και προετοιμασία (β) τοποθέτηση στερεών απορριμμάτων και (γ) τομή συμπληρωμένης χωματερής

Στάδια ανάπτυξης ΧΥΤΑ

Τα στάδια ανάπτυξης και συμπλήρωσης ενός ΧΥΤΑ δίνονται στο Σχήμα 3.4.3. Η προετοιμασία του χώρου υγειονομικής ταφής περιλαμβάνει την εξασφάλιση απορροής υγρών, την περίφραξη και τη δημιουργία οδών πρόσβασης. Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει εκσκαφή και προετοιμασία του δαπέδου (διαδοχικά κατά τμήματα). Τα χώματα χρησιμοποιούνται αργότερα για κάλυψη.

Τοποθετούνται περιμετρικοί **αισθητήρες** μεταξύ του πυθμένα και του υδροφόρου ορίζοντα. Τοποθετείται δάπεδο από πηλό χαμηλής διαπερατότητας. Το σύστημα συλλογής αποστραγγισμάτων τοποθετείται μέσα ή πάνω στον πυθμένα. Μπορεί να τοποθετηθούν και οριζόντια χαντάκια ανάληψης βιοαερίου στον πυθμένα, αν αναμένονται πολλά οργανικά πτητικά, τα οποία λαμβάνονται με φύσημα αέρα και καίγονται.

Κάθε ημερήσιο φορτίο τοποθετείται συμπιεσμένο σε στρώμα 2,5-4 m. Το πάχος είναι 3-10 m. Το κάλυμμα χώματος είναι 15-30 cm στο τέλος κάθε μέρας. Στο τέλος με το κλείσιμο του κυττάρου τοποθετούνται κατακόρυφοι **αγωγοί αερίου**.

Χρειάζεται διαρκής έλεγχος και χειρισμός ενός ΧΥΤΑ μια και με τις αντιδράσεις ο χώρος καθίζει. Η παρακολούθηση και συντήρηση εξακολουθεί για 30-50 χρόνια μετά το κλείσιμο. Μέσα στον χώρο λαμβάνουν χώρα βιολογικές αντιδράσεις (αρχικά αερόβιες, έπειτα αναερόβιες) και χημικές και φυσικές μετατροπές

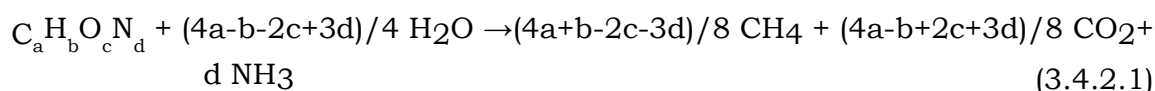
(διαλυτοποίηση κ.ο.κ.) που οδηγούν στην παραγωγή διαφόρων συστατικών τόσο στα υγρά όσο και στα αέρια απόβλητα.

3.4.2.3 Γήρανση Χώρου Υγειονομικής Ταφής

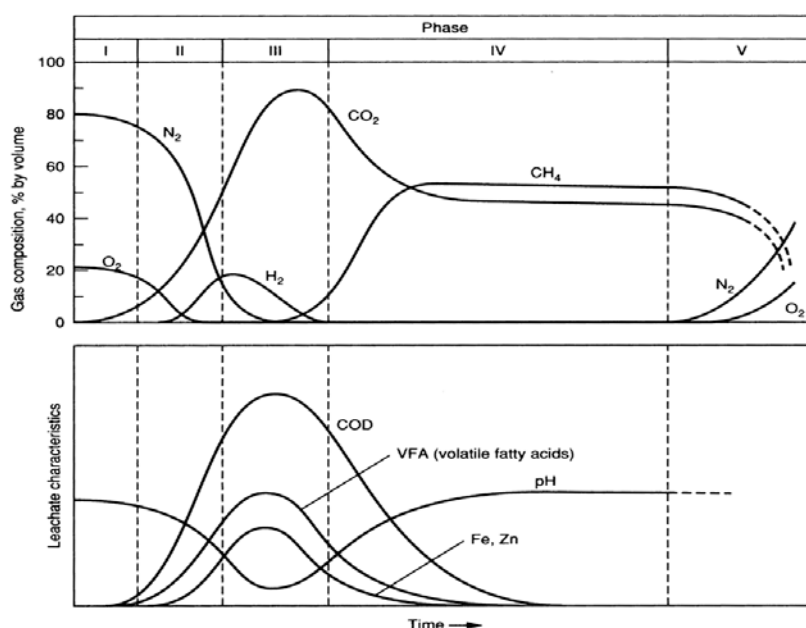
Οι πιητικές οργανικές ενώσεις αυξάνουν με την ηλικία του ΧΥΤΑ. Διακρίνονται πέντε φάσεις λειτουργίας ενός ΧΥΤΑ (Σχήμα 3.4.4):

- I) αρχική προσαρμογή (αερόβια)
- II) μεταβατική φάση (απονιτροποίηση, αποθείωση, μεταβατική αναερόβια)
- III) όξινη φάση (οξεογένεση, διαλυτοποίηση Fe, Zn κλπ.)
- IV) μεθανογένεση (παραγωγή μεθανίου)
- V) ωρίμανση (παραγωγή δύσκολα αποδομήσιμων χουμικού και φουλβικού οξέος).

Η διάρκεια των φάσεων εξαρτάται από την κατανομή οργανικών, τη διαθεσιμότητα θρεπτικών, την υγρασία (αν δεν είναι αρκετή περιορίζεται η αποδόμηση) και το βαθμό αρχικής συμπίεσης. Η αναερόβια αποσύνθεση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ παράγει βιοαέριο. Η παραγωγή του βιοαερίου εκτιμάται από τον τύπο $C_a H_b O_c N_d$ για τα οργανικά:



Τα οργανικά διακρίνονται σε γρήγορα αποδομήσιμα (3 μήνες - 5 χρόνια) και αργά αποδομήσιμα (έως 50 χρόνια). Τα πρώτα έχουν περίπου τον τύπο $C_{68} H_{111} O_{50} N$. Τα αργά αποδομήσιμα έχουν ενδεικτικό τύπο $C_{20} H_{29} O_9 N$. Τα γρήγορα αποδομήσιμα περιλαμβάνουν τα υπολείμματα τροφών, το χαρτί, το χαρτόνι και περίπου το 60% των αποβλήτων κήπου, ενώ τα αργά αποδομήσιμα περιλαμβάνουν υλικά όπως υφάσματα, δέρμα, ξύλο, ελαστικά και περίπου το 40% των αποβλήτων κήπου.



Σχήμα 3.4.4 Γενικευμένες φάσεις παραγωγής αερίων ΧΥΤΑ.

Ο Πίνακας 3.4.1 δίνει την περιεκτικότητα σε πτητικά διαφόρων υλικών.

Πίνακας 3.4.1 Περιεκτικότητα σε πτητικά.

	κλάσμα πτητικών
Τρόφιμα	0,82
Εφημερίδες	0,22
Χαρτί γραφείο	0,82
Χαρτόνι	0,47
Απορρίμματα αυλών	0,72

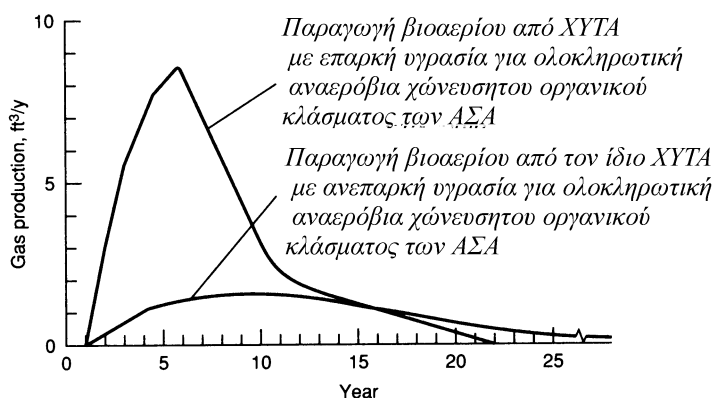
Το βιοαέριο μεταφέρεται με μεταφορά και διάχυση. Ο πρώτος μηχανισμός υπερισχύει όταν έχουμε μεγάλη παραγωγή ενώ ο δεύτερος όταν έχει μειωθεί η παραγωγή αερίου. Το βιοαέριο μπορεί να συλλεγεί είτε παθητικά (κυρίως όταν έχουμε μεγάλη παραγωγή), είτε ενεργητικά (αντλίες). Τυπική σύνθεση του παραγόμενου βιοαερίου δίδεται στον Πίνακα 3.4.2.

Πίνακας 3.4.2 Σύσταση βιοαερίου χωματερών (% σε ξηρά βάση)

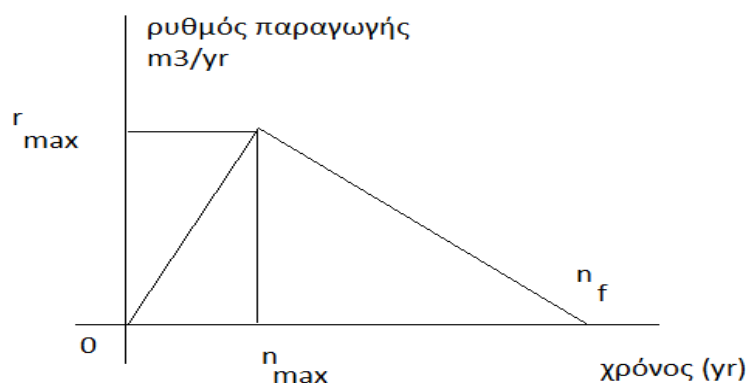
CH ₄	45-60
CO ₂	40-60
N ₂	2-5
O ₂	0,1-1
σουλφίδια, δισουλφίδια, μερκαπτάνες	0-1
NH ₃	0,1-1
H ₂	0-0,2
CO	0-0,2
Ιχνοστοιχεία (περίπου 150 ενώσεις)	0,01-0,6
Θερμοκρασία (οC)	35-45
Ειδική βαρύτητα	1,02-1,06
Υγρασία	κορεσμένο
Θερμογόνα δύναμη (kJ/m ³)	15.000-20.000

Ο σχηματισμός του βιοαερίου στο χώρο της υγειονομικής ταφής και οι ανεξέλεγκτες εκλύσεις του είναι δυνατόν να προξενήσουν πυρκαγιές, εκρήξεις, επικίνδυνες συγκεντρώσεις αερίων, οσμές κλπ. Όταν το μεθάνιο είναι μεταξύ 5-15 % το αέριο είναι εκρηκτικό.

Η παραγωγή βιοαερίου παρουσιάζει μέγιστο σε 5-10 χρόνια ανάλογα με την υγρασία της χωματερής (Σχήμα 3.4.5). Θεωρούμε ότι το βιοαέριο παράγεται από κάθε τύπο αποβλήτου με ετήσιο ρυθμό που περιγράφεται από το τρίγωνο του Σχήματος 3.4.6. Για τα γρήγορα αποδομήσιμα απόβλητα ενδεικτικά $n_{\max}=1$, $n_f=5$, $r_{\max1}=0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$, ενώ για τα αργά $n_{\max}=5$, $n_f=15$ και $r_{\max2}=0,18 \text{ m}^3/\text{kg}$. Η συνολική παραγωγή βιοαερίου ισούται με το εμβαδόν του τριγώνου και είναι επομένως $n_f r_{\max}/2$. Αρα είναι $r_{\max1}=1,25 \text{ m}^3/\text{kg}$ για τα γρήγορα αποδομήσιμα και $r_{\max2}=1,35 \text{ m}^3/\text{kg}$ για τα αργά.



Σχήμα 3.4.5 Παραγωγή βιοαερίου σε ΧΥΤΑ το οποίο δέχεται απορρίμματα επί πέντε έτη.



Σχήμα 3.4.6 Παραγωγή βιοαερίου στον χρόνο από 1 kg απορριμμάτων.

Άσκηση 3.2

Ενας ΧΥΤΑ έχει 5 χρόνια ζωής. Το 35% κ.β. των απορριμμάτων είναι γρήγορα αποδομήσιμα και το 4% κ.β. είναι αργά αποδομήσιμα. Βρείτε την παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου κατά τα 5 χρόνια λειτουργίας του ΧΥΤΑ και την ετήσια παραγωγή για τα επόμενα 15 χρόνια μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ. Υποθέσατε ότι η πόλη που εξυπηρετεί έχει 100.000 κατοίκους με μέση παραγωγή απορριμμάτων 1 kg/(κάτοικο·d).

Λύση

Η ετήσια εναπόθεση είναι $100.000 \text{ κάτοικοι} \cdot 1 \text{ kg}/(\text{κάτοικο} \cdot \text{d}) \cdot 365 \text{ d/yr} = 36.500 \text{ ton/yr} = 3,65 \times 10^7 \text{ kg/y}$. Από αυτά, το 35% ή $1,2775 \times 10^7 \text{ kg/yr} = a_1$ είναι γρήγορα βιοαποδομήσιμα και 4% ή $0,146 \times 10^7 \text{ kg/yr} = a_2$ είναι αργά αποδομήσιμα.

1 kg γρήγορα αποδομήσιμων σύμφωνα με το τρίγωνο του σχήματος 3.4.6 παράγει:

Τον πρώτο χρόνο $1/2 \cdot 1 \cdot r_{\max_1} = 0,5 r_{\max_1}$

Τον δεύτερο $1/2(r_{\max_1} + 3/4 r_{\max_1}) = 0,875 r_{\max_1}$

Τον τρίτο $1/2(3/4 r_{\max_1} + 2/4 r_{\max_1}) = 0,625 r_{\max_1}$

Τον τέταρτο $1/2(2/4 r_{\max_1} + 1/4 r_{\max_1}) = 0,375 r_{\max_1}$

Τον πέμπτο $1/2(1/4 r_{\max_1}) = 0,125 r_{\max_1}$

Μιας και εναπόθεση ποσότητας α_1 θα έχουμε για κάθε ένα από τα πρώτα πέντε χρόνια η παραγωγή βιοαερίου από τα γρήγορα αποδομήσιμα θα είναι:

Χρόνος 1	0,5	$\alpha_1 \cdot r_{\max 1}$
Χρόνος 2	$0,5+0,875=1,375$	$\alpha_1 \cdot r_{\max 1}$
Χρόνος 3	$0,5+0,875+0,625=2$	$\alpha_1 \cdot r_{\max 1}$
Χρόνος 4	$0,5+0,875+0,625+0,375=2,375$	$\alpha_1 \cdot r_{\max 1}$
Χρόνος 5	$0,5+0,875+0,625+0,375+0,125=2,5$	$\alpha_1 \cdot r_{\max 1}$
Χρόνος 6	$0,875+0,625+0,375+0,125=2$	$\alpha_1 \cdot r_{\max 1}$
Χρόνος 7	$0,625+0,375+0,125=1,125$	$\alpha_1 \cdot r_{\max 1}$
Χρόνος 8	$0,375+0,125=0,5$	$\alpha_1 \cdot r_{\max 1}$
Χρόνος 9	0,125	$\alpha_1 \cdot r_{\max 1}$

Αντίστοιχα η παραγωγή βιοαερίου από 1 kg αργά αποδομήσιμου θα είναι:

Τον πρώτο χρόνο $1/2 \cdot 1/5 r_{\max 2} = 0,1 r_{\max 2}$
Τον δεύτερο $1/2(1/5 r_{\max 2} + 2/5 r_{\max 2}) = 0,3 r_{\max 2}$
Τον τρίτο $1/2(2/5 r_{\max 2} + 3/5 r_{\max 2}) = 0,5 r_{\max 2}$
Τον τέταρτο $1/2(3/5 r_{\max 2} + 4/5 r_{\max 2}) = 0,7 r_{\max 2}$
Τον πέμπτο $1/2(4/5 r_{\max 2} + 5/5 r_{\max 2}) = 0,9 r_{\max 2}$
Τον έκτο $1/2(10/10 r_{\max 2} + 9/10 r_{\max 2}) = 0,95 r_{\max 2}$
Τον έβδομο $1/2(9/10 r_{\max 2} + 8/10 r_{\max 2}) = 0,85 r_{\max 2}$
Τον όγδοο $1/2(8/10 r_{\max 2} + 7/10 r_{\max 2}) = 0,75 r_{\max 2}$
Τον ένατο $1/2(7/10 r_{\max 2} + 6/10 r_{\max 2}) = 0,65 r_{\max 2}$
Τον δέκατο $1/2(6/10 r_{\max 2} + 5/10 r_{\max 2}) = 0,55 r_{\max 2}$
Τον ενδέκατο $1/2(5/10 r_{\max 2} + 4/10 r_{\max 2}) = 0,45 r_{\max 2}$
Τον δωδέκατο $1/2(4/10 r_{\max 2} + 3/10 r_{\max 2}) = 0,35 r_{\max 2}$
Τον δεκατο τρίτο $1/2(3/10 r_{\max 2} + 3/10 r_{\max 2}) = 0,25 r_{\max 2}$
Τον δεκατο τέταρτο $1/2(3/10 r_{\max 2} + 1/10 r_{\max 2}) = 0,15 r_{\max 2}$
Τον δεκατο το πέμπτο $1/2(1/10 r_{\max 2}) = 0,05 r_{\max 2}$

Μιας και εναπόθεση ποσότητας α_2 θα έχουμε για κάθε ένα από τα πρώτα πέντε χρόνια η παραγωγή βιοαερίου από τα αργά αποδομήσιμα θα είναι:

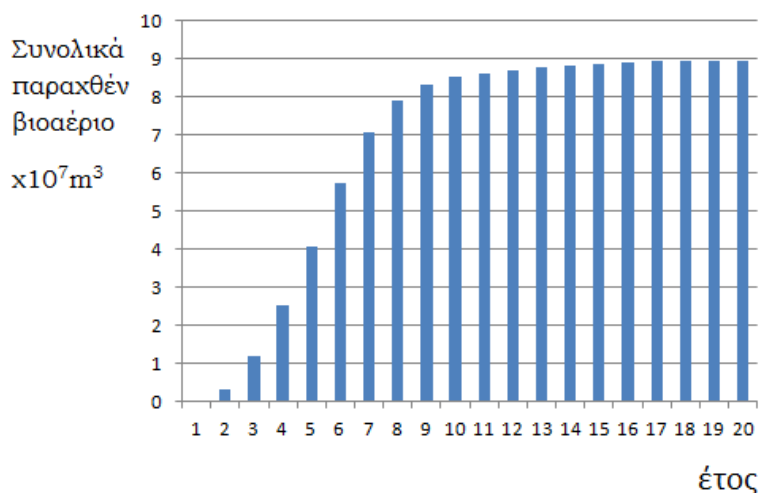
Χρόνος 1:	0,1	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 2:	$0,1+0,3=0,4$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 3:	$0,1+0,3+0,5=0,9$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 4:	$0,1+0,3+0,5+0,7=1,6$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 5:	$0,1+0,3+0,5+0,7+0,9=2,5$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 6:	$0,3+0,5+0,7+0,9+0,95=3,35$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 7:	$0,5+0,7+0,9+0,95+0,85=3,9$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 8:	$0,7+0,9+0,95+0,85+0,75=4,05$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 9:	$0,9+0,95+0,85+0,75+0,65=4,1$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$

Χρόνος 10: $0,95+0,85+0,75+0,65+0,55=3,75$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 11: $0,85+0,75+0,65+0,55+0,45=3,25$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 12: $0,75+0,65+0,55+0,45+0,35=2,75$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 13: $0,65+0,55+0,45+0,35+0,25=2,25$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 14: $0,55+0,45+0,35+0,25+0,15=1,75$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 15: $0,45+0,35+0,25+0,15+0,05=1,25$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 16: $0,35+0,25+0,15+0,05=0,80$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 17: $0,25+0,15+0,05=0,45$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 18: $0,15+0,05=0,20$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$
Χρόνος 19: $0,05$	$\alpha_2 \cdot r_{\max 2}$

Προσθέτοντας την παραγωγή βιοαερίου από γρήγορα και αργά βιοαποικοδομήσιμα στερεά ανά έτος (με $r_{\max 1}=0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$, $r_{\max 2}=0,18 \text{ m}^3/\text{kg}$) προκύπτει ο ρυθμός ετήσιας παραγωγής (δεύτερη στήλη του πίνακα) ενώ η τρίτη στήλη δίνει το συνολικά παραχθέν βιοαέριο:

Έτος	Ρυθμός ετήσιας παραγωγής βιοαερίου ($\times 10^7 \text{ m}^3$)	Συνολικά παραχθέν βιοαέριο ($\times 10^7 \text{ m}^3$)
0	0	0
1	0,322	0,322
2	0,889	1,211
3	1,301	2,512
4	1,559	4,071
5	1,663	5,734
6	1,366	7,099
7	0,821	7,920
8	0,426	8,346
9	0,188	8,534
10	0,099	8,632
11	0,085	8,718
12	0,072	8,790
13	0,059	8,849
14	0,046	8,895
15	0,033	8,928
16	0,021	8,949
17	0,012	8,961
18	0,005	8,966
19	0,001	8,967

Το παραγόμενο με τον χρόνο βιοαέριο δίνεται στο κάτωθι γράφημα:



3.4.2.4 Σχηματισμός, Σύσταση, Κίνηση και Ρύθμιση Διηθημάτων

Τα διηθήματα συλλέγονται στο βυθό της χωματερής και στη συνέχεια διηθούνται στο έδαφος εκτός εάν υπάρχει βυθός από πηλό ή άλλο υλικό που να έχει χαμηλή διαπερατότητα.

Τα διηθήματα μπορούν να ανακυκλοφορηθούν στη χωματερή βελτιώνοντας την βιολογική δραστηριότητα. Εναλλακτικά μπορούν να εξατμίζονται σε κατάλληλες δεξαμενές, να τυγχάνουν βιολογικής επεξεργασίας, ή να εκβάλλονται στο αποχετευτικό δίκτυο. Τυπική σύσταση των διηθημάτων δίδεται στον Πίνακα 3.4.3.

Πίνακας 3.4.3 Τυποποιημένη σύσταση διηθημάτων χώρου υγειονομικής ταφής.

Συστατικό	Νέος ΧΥΤΑ (< 2 έτη)		Ώριμος ΧΥΤΑ
(mg/L)	Φάσμα	Τυπικά	(> 2 έτη)
BOD ₅	2.000 – 30.000	10.000	100 – 200
TOC	1.500 – 20.000	6.000	80 – 160
COD	3.000 – 60.000	18.000	100 – 500
TSS	200 – 2.000	500	100 – 400
Οργ. N	10 – 800	200	80 – 120
NH ₄ ⁺ - N	10 – 800	200	20 – 40
NO ₃ ⁻	5 – 40	25	5 – 10
ολικός P	5 – 100	30	5 – 10
ορθοφωσφορικά	4 – 80	20	4 – 8
αλκαλικότητα	1000 – 10.000	3.000	200 – 1000
pH	4,5 – 7,5	6	6,6 – 7,5
σκληρότητα	300 – 10.000	3.500	200 – 500
Ca	200 - 3.000	1000	100 - 400

Mg	50 - 1.500	250	50 - 200
K	200 - 1.000	300	50 - 400
Na	200 - 2.500	500	100 - 200
Cl ⁻	200 - 3.000	500	100 - 400
SO ₄ ²⁻	50 - 1.000	300	20 - 150
ολ.σίδηρος	50 - 1.200	60	20 - 200

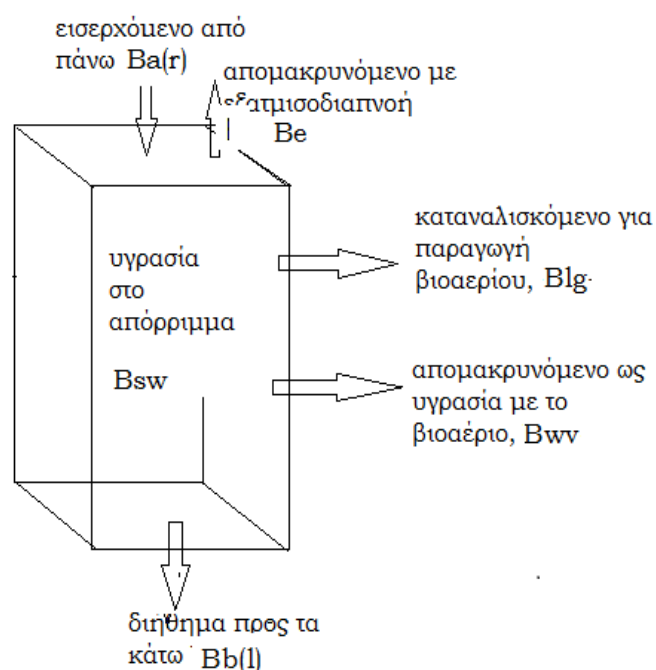
Τα απορρίμματα, καθώς τοποθετούνται νέα ταμπάνια, έχουν ολοένα αυξανόμενο υπερκείμενο βάρος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συμπίεση τους και τη μείωση της υγρασίας που μπορούν να συγκρατήσουν (την ικανότητα πεδίου). Συγκεκριμένα έχουμε:

$$FC = 0,6 - \frac{0,55B}{18.870 + B} \quad (3.4.2)$$

Η ικανότητα πεδίου είναι το κλάσμα νερού στα απορρίμματα με βάση το ξηρό τους βάρος. Εδώ B (kg) είναι το υπερκείμενο βάρος, υπολογιζόμενο στο μέσο ύψος των απορριμμάτων στο συγκεκριμένο ταμπάνι.

Το εάν και κατά πόσο θα σχηματισθεί διήθημα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η αρχική υγρασία των απορριμμάτων σε σχέση με την ικανότητα πεδίου και η βροχόπτωση κατά κύριο λόγο. Εξαρτάται όμως και από άλλες παραμέτρους. Ένα ισοζύγιο σε ετήσια βάση για κάθε ταμπάνι μας προσδιορίζει την ποσότητα του διηθήματος που θα σχηματιστεί.

Το ισοζύγιο για έναν όγκο ελέγχου, τυπικά ένα ταμπάνι δίνεται στο Σχήμα 3.4.7.



Σχήμα 3.4.7 Ισοζύγιο νερού σε ταμπάνι.

Ο όγκος ελέγχου λαμβάνεται ως επιφάνεια 1 m² ενός ταμπανιού. Σε ένα χρόνο υπολογίζουμε την ποσότητα του νερού που θα δημιουργηθεί μέσα στον όγκο ελέγχου. Αν αυτή ξεπερνά την ικανότητα πεδίου, θα δημιουργηθεί διήθημα προς το πιο κάτω ταμπάνι. Αν όχι δεν θα δημιουργηθεί. Τους υπολογισμούς τους

αρχίζουμε από το πάνω πάνω ταμπάνι, όπου το εισερχόμενο νερό από πάνω είναι η ετήσια βροχόπτωση, και συνεχίζουμε προς τα κάτω. Το εξερχόμενο από το τελευταίο ταμπάνι θα είναι το διήθημα που θα παραχθεί για το συγκεκριμένο έτος.

Το ισοζύγιο παίρνει την μορφή:

$$B_{sw}(\text{νέο}) = B_{sw}(\text{περσινό}) + B_a(r) - B_e - B_{lg} - B_{wn} - B_b(l) \quad (3.4.3)$$

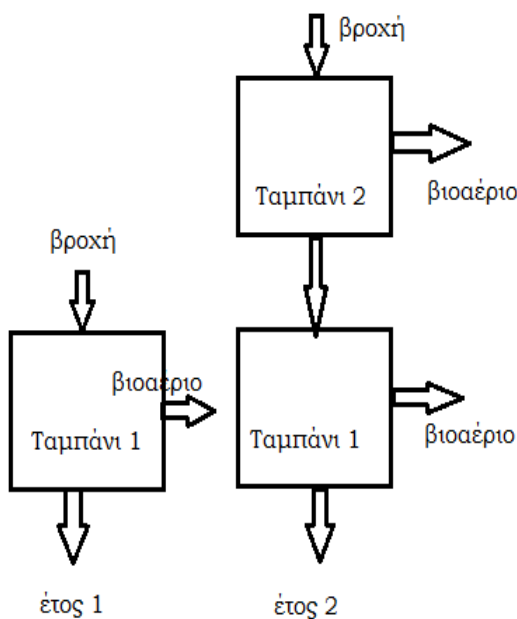
Αν το άθροισμα $B_{sw}(\text{περσινό}) + B_a(r) - B_e - B_{lg} - B_{wn}$ ξεπερνά την ικανότητα πεδίου τότε $B_{sw}(\text{νέο}) = FCx(\text{ξηρό βάρος})$ και η (3.4.3) μπορεί να επιλυθεί για να ευρεθεί το διήθημα $B_b(l)$. Αν όχι, τότε $B_b(l) = 0$ και η (3.4.3) μας δίνει το $B_{sw}(\text{νέο})$.

Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην επόμενη Άσκηση 3.3.

Άσκηση 3.3

Θεωρήσατε τον ΧΥΤΑ της Άσκηση 3.2. Υποθέσατε σταθερή ετήσια βροχόπτωση 400mm και αμελητέα εξατμισοδιαπνοή. Θεωρήσατε κατανάλωση $0,122 \text{ kg/m}^3$ νερού για την παραγωγή βιοαερίου και περιεκτικότητα υγρασίας $0,0122 \text{ kg/m}^3$ στο βιοέριο. Το ειδικό βάρος του βιοαερίου είναι 1 kg/m^3 . Θεωρήσατε ακόμη ότι η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία των απορριμμάτων είναι 20% κατά βάρος, ότι το ειδικό βάρος των συμπιεσμένων απορριμμάτων είναι $592,5 \text{ kg/m}^3$ και ότι το ύψος κάθε ταμπανιού είναι 2,3 m. Προσδιορίστε την ποσότητα του διηθήματος στο τέλος του πρώτου και στο τέλος του δεύτερου χρόνου.

Λύση



Η ετήσια εναπόθεση είναι $3,65 \times 10^7 \text{ kg/yr}$. Με ειδικό βάρος συμπιεσμένων $592,5 \text{ kg/m}^3$ ο όγκος που καταλαμβάνει η ετήσια εναπόθεση είναι $61.603 \text{ m}^3/\text{y}$. Με ύψος ταμπανιού 2,3 m, η επιφάνεια είναι $61.000/2,3 = 26.784 \text{ m}^2$.

Το βάρος ανά m^2 επομένως είναι $3,65 \times 10^7 / 26.784 = 1.363 \text{ kg}$.

Δεδομένης της υγρασίας των απορριμμάτων (20%), αυτό το βάρος αυτό αποτελείται από $1363 \cdot 0,8 = 1.090 \text{ kg}$ στερεά και $1363 \cdot 0,2 = 273 \text{ kg}$ υγρασία (B_{sw}).

Το βάρος της εισερχόμενης βροχής ανά m^2 ετησίως θα είναι $0,4 \text{ m} \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 400 \text{ kg/m}^2$ ($B_a(r)$).

Αρα το συνολικό βάρος με τη βροχή είναι 1.763 kg .

Κατά το πρώτο έτος:

Το παραγόμενο βιοαέριο είναι $3,22 \times 10^6 \text{ m}^3$ (από την προηγούμενη άσκηση) για όλη την εναπόθεση που αντιστοιχεί σε $3,22 \times 10^6 / 26.784 = 120 \text{ m}^3$ για κάθε m^2 . Αυτό έχει βάρος 120 kg . Για να παραχθεί καταναλώνονται $0,122 \text{ kg/m}^3 \times 120 \text{ m}^3 = 14,64 \text{ kg}$ νερού = B_{lg}

Το νερό που φεύγει με το βιοαέριο είναι $0,0122 \text{ kg/m}^3 \cdot 120 \text{ m}^3 = 1,464 \text{ kg}$ νερού = B_{wv}

Το ξηρό βάρος των απορριμμάτων στο τέλος του πρώτου έτους θα είναι επομένως $1090 \text{ kg} - (120 \text{ kg} - 14,64 \text{ kg}) = 984,54 \text{ kg}$

Άρα έχουμε ότι το συνολικό νερό που προστέθηκε είναι $B_{sw} (\text{περσινό}) + B_{a(r)} - B_{e} - B_{lg} - B_{wv} = 273 \text{ kg} + 400 \text{ kg} - 14,64 \text{ kg} - 1,464 \text{ kg} = 657 \text{ kg}$.

Το μέσο βάρος B της εναπόθεσης στο ταμπάνι είναι $0,5 \times 1.763 = 881,5 \text{ kg}$. Εφαρμογή της (3.4.2) δίνει $FC = 0,575$. Άρα το νερό που μπορεί να συγκρατηθεί είναι $0,575 \cdot 984,54 \text{ kg} = 567 \text{ kg}$.

Άρα θα παραχθεί διήθημα $657 - 567 = 90 \text{ kg/m}^2$ το πρώτο έτος.

Το ολικό βάρος του ταμπανιού θα είναι $984,54 + 567 = 1551,1 \text{ kg/m}^2$.

Το δεύτερο έτος:

Για το ταμπάνι 2 θα γίνει ό,τι ακριβώς έγινε για το ταμπάνι 1 το πρώτο έτος. Δηλαδή στο τέλος του δεύτερου έτους θα έχει ανά m^2 συνολικό ξηρό βάρος $984,54 \text{ kg}$ και 567 kg νερού, δηλαδή συνολικό βάρος $1.551,1 \text{ kg}$.

Για το πρώτο ταμπάνι κατά το δεύτερο έτος έχουμε:

Το παραγόμενο βιοαέριο κατά το δεύτερο έτος είναι $8,88 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (από την προηγούμενη άσκηση). Μιας και από αυτό $3,22 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ θα παραχθεί από το δεύτερο ταμπάνι, η παραγωγή από το πρώτο θα είναι $8,88 \cdot 10^6 - 3,22 \cdot 10^6 = 5,66 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ για όλη την εναπόθεση που αντιστοιχεί σε $5,66 \cdot 10^6 / 26.784 = 211 \text{ m}^3$ για κάθε m^2 . Αυτό έχει βάρος 211 kg . Για να παραχθεί καταναλώνονται $0,122 \text{ kg/m}^3 \times 211 \text{ m}^3 = 25,7 \text{ kg}$ νερού = B_{lg}

Το νερό που φεύγει με το βιοαέριο είναι $0,0122 \text{ kg/m}^3 \times 211 \text{ m}^3 = 2,57 \text{ kg}$ νερού = B_{wv}

Το ξηρό βάρος των απορριμμάτων στο τέλος του πρώτου έτους θα είναι επομένως $984,54 \text{ kg} - (211 \text{ kg} - 25,7 \text{ kg}) = 799,24 \text{ kg}$

Άρα έχουμε ότι το συνολικό νερό που προστέθηκε είναι $B_{sw} (\text{περσινό}) + B_{a(r)} - B_{e} - B_{lg} - B_{wv} = 567 \text{ kg} + 90 \text{ kg} - 25,7 \text{ kg} - 2,57 \text{ kg} = 628,7 \text{ kg}$.

Το μέρος βάρος W της εναπόθεσης στο ταμπάνι είναι όλο το ταμπάνι 2 βάρους 1.763 και το μισό του ταμπανιού 1, δηλαδή $0,5 \cdot (984,54 + 567) + 1.763 = 2.539 \text{ kg}$. Εφαρμογή της (6.2) δίνει $FC = 0,535$. Άρα το νερό που μπορεί να συγκρατηθεί είναι $0,535 \cdot 799,24 \text{ kg} = 427,4 \text{ kg}$.

Άρα θα παραχθεί διήθημα $628,73 - 427,4 = 201 \text{ kg/m}^2$ το δεύτερο έτος.

Το ολικό βάρος του ταμπανιού θα είναι $799,24 + 427,4 = 1.226,7 \text{ kg/m}^2$.

3.4.3 Καθίζηση ΧΥΤΑ και εξοικονόμηση χώρου

Καθώς καταναλώνεται η οργανική ύλη μετατρεπόμενη σε βιοαέριο και καθώς τοποθετούνται νέα ταμπάνια πάνω από τα υπάρχοντα, παρατηρείται καθίζηση στο ΧΥΤΑ, κάτι που έχει τα προβλήματα του γιατί δημιουργεί ανομοιομορφίες στην επιφάνεια, αλλά ταυτόχρονα οδηγεί και σε εξοικονόμηση χώρου.

Υποθέτοντας ένα αρχικό ειδικό βάρος $592,5 \text{ kg/m}^3$, το ειδικό βάρος μεταβάλλεται με την υπερκείμενη πίεση p (εκφρασμένη σε kg/m^2) με βάση τη σχέση:

$$SW_p = 592,5 + \frac{P}{22,5 + 0,0017p} \quad (3.4.4)$$

Άσκηση 3.4

Για τα δεδομένα της Άσκηση 3.3 προσδιορίστε την εξοικονόμηση χώρου που θα προκύψει στο τέλος του δεύτερου χρόνου από την ενδεχόμενη καθίζηση.

Λύση

Στο τέλος του δεύτερου χρόνου θα έχουμε:

Βάρος ταμπανιού 1 1.226,7 kg

Βάρος ταμπανιού 2 1.551 kg

Αρα στο μέσο του ταμπανιού 1 θα έχουμε $1.551 + 1.226,7 / 2 = 2.164,4 \text{ kg}$

Αρα αντικαθιστώντας στην (3.4.4) ευρίσκουμε

$$SW_p = 592,5 + \frac{2.165}{22,5 + 0,0017 \times 2.165} = 675 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Αρα αν h είναι το νέο ύψος του ταμπανιού θα έχουμε:

$1.226,7 \text{ kg/m}^2 = 675 \cdot h$ εξου $h = 1,82 \text{ m}$.

Αρα θα μειωθεί το ύψος του ταμπανιού 1 κατά $2,3 - 1,82 = 0,48 \text{ m}$ εξοικονομώντας συνολικά $0,48 \cdot 26.784 = 12.856 \text{ m}^3$.

3.4.4 Θερμική επεξεργασία απορριμμάτων

3.4.4.1 Γενικά

Η **καύση (incineration)** (θερμική οξείδωση παρουσία περίσσειας οξυγόνου) είναι η κυριότερη μέθοδος θερμικής επεξεργασίας των αστικών στερεών απορριμμάτων (ΑΣΑ). Δύο ακόμα διεργασίες, η **πυρόλυση (pyrolysis)** και η **αεριοποίηση (gasification)**, χρησιμοποιούν υψηλές θερμοκρασίες για τη μετατροπή των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των ΑΣΑ με ταυτόχρονη παραγωγή εναλλακτικών καυσίμων τα οποία μπορούν να υποκαταστήσουν το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο σε μεγάλο πλήθος βιομηχανικών καυστήρων.

Ως **πυρόλυση** θεωρείται η θερμική επεξεργασία των αστικών στερεών απορριμμάτων απουσία αέρα. Καθώς οι περισσότερες οργανικές ουσίες είναι θερμικά ασταθείς, κατά τη διάρκεια της θέρμανσής τους απουσία οξυγόνου διασπώνται, με ένα συνδυασμό αντιδράσεων θερμικής διάσπασης και συμπύκνωσης, παράγοντας αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα.

Συναφής διεργασία με την πυρόλυση είναι η **αεριοποίηση**. Ενώ στα πυρολυτικά συστήματα δεν απαιτείται προσθήκη υποβοηθητικών μέσων καύσης στον αντιδραστήρα, στα συστήματα αεριοποίησης πραγματοποιείται προσθήκη αερίων με σκοπό την ενίσχυση του σχηματισμού αερίων προϊόντων και/ ή την απελευθέρωση θερμότητας μέσα στον αντιδραστήρα. Τα αέρια που προστίθενται συνήθως είναι οξυγόνο, ατμός ή υδρογόνο. Οι αντιδράσεις αεριοποίησης συνήθως λαμβάνουν χώρα σε υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που απαιτούνται για την πυρόλυση.

Τόσο η πυρόλυση όσο και η αεριοποίηση έχουν ως αποτέλεσμα την μετατροπή των ΑΣΑ σε αέρια, υγρά και στερεά καύσιμα. Η βασική διαφορά των δύο συστημάτων

είναι ότι τα πυρολυτικά συστήματα χρησιμοποιούν μια εξωτερική πηγή θερμότητας για την πραγματοποίηση των ενδοθερμικών αντιδράσεων σε περιβάλλον απουσίας οξυγόνου, ενώ απεναντίας τα συστήματα αεριοποίησης είναι αυτοσυντηρούμενα καθώς χρησιμοποιούν αέρα ή οξυγόνο για την μερική καύση των ΑΣΑ.

3.4.4.2 Καύση Απορριμμάτων με Ανάκτηση Ενέργειας (ΚΑΑΕ)

Η καύση αποτελεί μία ελκυστική μέθοδο επεξεργασίας, μιας και μπορεί να μειώσει τον όγκο των απορριμμάτων κατά 85-95%, παράγοντας παράλληλα ενέργεια. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα που έχει, είναι οι χαμηλές απαιτήσεις σε χώρο. Ο έλεγχος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλείται παραμένει ωστόσο το βασικό πρόβλημα της μεθόδου, παρά την ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας κατά τα τελευταία χρόνια.

Πολύ σημαντική για την καύση είναι η σύσταση των αστικών στερεών απορριμμάτων και ιδιαίτερα η θερμογόνος δύναμή τους. Η κυριότερη πηγή της θερμογόνου δύναμης είναι η κυτταρίνη που απαντάται κυρίως στο χαρτί. Συνήθως η θερμογόνος δύναμη είναι περίπου 2500 kcal/kg απορριμμάτων, και είναι άμεση συνάρτηση της υγρασίας των απορριμμάτων. Στη χώρα μας, λόγω της αυξημένης υγρασίας των απορριμμάτων η θερμογόνος δύναμή τους είναι περίπου 1750 kcal/kg. Στον Πίνακα 3.4.4 δίνεται το υπόλειμμα που αφήνουν και το ενεργειακό περιεχόμενο των διαφόρων συστατικών των απορριμμάτων.

Πίνακας 3.4.4 Ενδεικτικό μέσο ενεργειακό περιεχόμενο και υπόλειμμα διαφόρων συστατικών.

Συστατικό	Υπόλειμμα (%)	Ενεργ.περιεχόμενο kJ/kg
Υπολείμματα τροφών	5	4.650
Χαρτί	6	17.000
Χαρτόνι	5	16.000
Πλαστικό	10	32.000
Υφάσματα	2,5	18.000
Ελαστικά	10	23.000
Υπολείμματα κήπου	10	23.000
Ξύλο	4,5	6.500
Διάφορα οργανικά	1,5	18.000
Γυαλί	98	150
Κασσίτερος	98	750
Αργίλιο	96	-
Άλλα μέταλλα	98	750
Σκόνη, στάχτη	70	7.000

Η διεργασία της καύσης αρχίζει με το άδειασμα των απορριμμάτων σε αποθηκευτικό χαντάκι, μεγέθους ικανού για να δεχθεί απορρίμματα δύο περίπου ημερών. Εν συνεχεία, ένας γερανός οδηγεί φουρνιές από τα απορρίμματα στην ατραπό φορτώσεως, η οποία οδηγεί τα απορρίμματα στον κλίβανο. Ο χειριστής του γερανού επιλέγει το μείγμα των απορριμμάτων ούτως ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη υγρασία στην τροφοδοσία. Ο γερανός επίσης απομακρύνει μεγάλα και μη καύσιμα αντικείμενα.

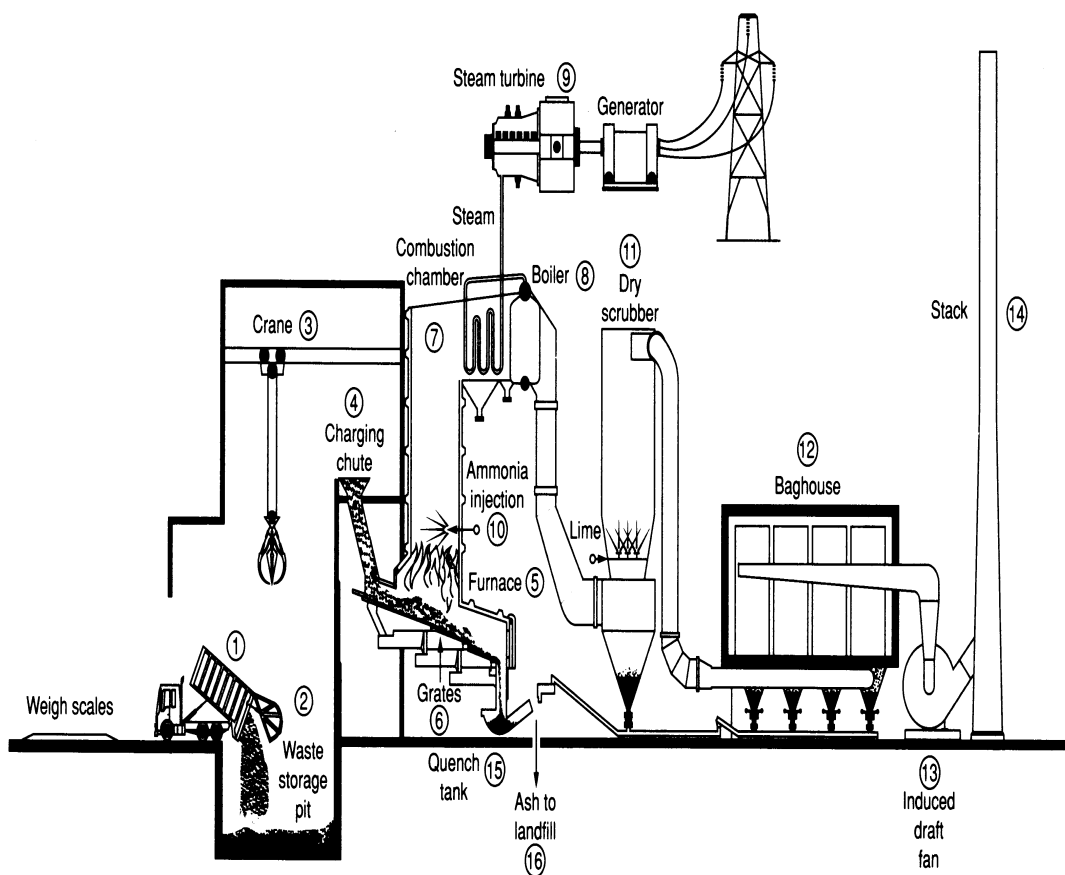
Ο αέρας παρέχεται από κάτω με τη βοήθεια αεριστήρα ή από πάνω προκειμένου να ρυθμιστούν οι ρυθμοί καύσης και η θερμοκρασία του κλιβάνου. Μιας και τα περισσότερα οργανικά απορρίμματα είναι θερμικά ασταθή, αναδύονται διάφορα αέρια τα οποία μαζί με μικρά οργανικά σωματίδια ανέρχονται στον χώρο καύσης και καίγονται σε θερμοκρασία άνω των 900°C.

Η παραγόμενη ενέργεια ανακτάται μέσω εξάτμισης νερού (βραστήρα) που παράγει ατμό, και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω τουρμπίνας (γεννήτριας). Σήμερα οι περισσότεροι σταθμοί καύσης απορριμμάτων διαθέτουν σύστημα ανάκτησης ενέργειας, είτε με χρήση της θερμικής ενέργειας για θέρμανση, είτε με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για τον έλεγχο των αερίων ρύπων περιλαμβάνει χρήση αμμωνίας για έλεγχο των NO_x, ξηρό φίλτρο για έλεγχο του SO₂ και των όξινων αερίων, και σακκόφιλτρο για απομάκρυνση σωματιδίων.

Τα τελικά προϊόντα της καύσης είναι θερμά καυσαέρια και στάχτες. Τα καθαρισμένα αέρια εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Η στάχτη οδηγείται σε χωματερές.

Τα κύρια στοιχεία των στερεών απορριμμάτων είναι C, O, N και S. Μικρότερες ποσότητες πολλών ακόμη στοιχείων ευρίσκονται στην στάχτη. Υπό ιδανικές συνθήκες τα καυσαέρια θα περιέχουν κυρίως CO₂, H₂O, N₂ και μικρές ποσότητες SO₂. Στην πράξη, πολλές διαφορετικές αντιδράσεις είναι πιθανές, ανάλογα με την ακριβή φύση των απορριμμάτων και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα καύσεως.



Σχήμα3.4.8 Τυπική μονάδα καύσης.

Οι κύριες αντιδράσεις κατά την καύση είναι οι εξής:



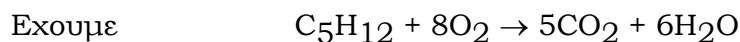
Θεωρούμε ότι ο ξηρός αέρας περιέχει 23,15% οξυγόνο κατά βάρος, οπότε 1 kg C απαιτεί 11,52 kg αέρα. Τα αντίστοιχα ποσά για το H₂ και το S είναι 34,56 και 4,31 αντίστοιχα.

Προκειμένου να αποφύγουμε ημιτελή καύση συνήθως λειτουργούμε με περίσσεια αέρα μέχρι και 100%. Όσο υψηλότερη η περίσσεια αέρα ωστόσο, τόσο περισσότερη είναι η ενέργεια που θα αναλωθεί για θέρμανση των αερίων με αποτέλεσμα να επιτυγχάνουμε χαμηλότερη θερμοκρασία καύσης. Η θερμοκρασία των καυσαερίων (της καύσης) προκύπτει από ένα ισοζύγιο θερμότητας. Υπολογίζεται η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την καύση και αφού αφαιρεθούν απώλειες υπολογίζεται η θερμοκρασία των καυσαερίων με δεδομένη τη σύσταση τους, μιας και η καθαρή παραγόμενη ενέργεια χρειάζεται για να ανυψώσει τη θερμοκρασία των καυσαερίων.

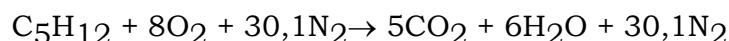
Άσκηση 3.5

Προσδιορίσατε το ποσό (kg και m³) του αέρα που απαιτείται για πλήρη καύση ενός τόνου οργανικών στερεών απορριμμάτων. Θεωρήσατε ότι η σύσταση του οργανικού απορρίμματος που θα καεί είναι C₅H₁₂, και το ειδικό βάρος του αέρα είναι 1,2 kg/m³.

Λύση



Άρα ανέχουμε αέρα με δεδομένη την αναλογία οξυγόνου/αζώτου στον αέρα 21/79, θα ισχύει:



Άρα απαιτήση σε O₂ θα είναι: $8 \cdot \text{MB}_{\text{O}_2} / \text{MB}_{\text{απορρίμματος}} = 8 \cdot 32 / 72 \cdot 1.000 \text{ kg/ton} = 3.556 \text{ kg/ton}$

και ο απαιτούμενος όγκος αέρα είναι $3.556 \text{ kg/ton} / 0,21 = 16.931 \text{ kg/ton} = 16.931 / 1,2 = 14.109 \text{ m}^3/\text{ton}$

Γενικά η στοιχειομετρική απαίτηση οξυγόνου για απόρριμμα με σύσταση CH_aO_bS_c είναι $1 + a/4 + c - b/2$ moles O₂/ "mole" απορρίμματος ή $(1 + a/4 + c - b/2) \cdot 32 / (12 + a + 16b + 32 \cdot 1c)$ kg οξυγόνου/kg απορρίμματος.

Άσκηση 3.6

Προσδιορίστε την ποσότητα και τη σύσταση του υπολείμματος από καυστήρα χρησιμοποιούμενου για ΑΣΑ με την τυπική μέση σύσταση. Εκτιμήσατε την μείωση σε όγκο απορριμμάτων αν υποθέσουμε ότι το ειδικό βάρος του υπολείμματος είναι 600 kg/m³.

Λύση

Συστατικό	Βάρος	(kg)	Αδρανή kg	<u>Υπόλειμμα</u>	
				%	υπολ.%
Τρόφιμα	90	5		4,5	1,9
Χαρτί	340	6		20,4	8,6
Χαρτόνι	60	5		3	1,3
Πλαστικά	70	10		7	2,9
Υφάσματα	20	6,5		1,3	0,5
Ελαστικά	5	9,9		0,5	0,2
Δέρμα	5	9,0		0,5	0,2
Απορ. αυλών	185	4,5		8,3	3,5
Ξύλο	20	1,5		0,3	0,1
Διάφορα οργανικά	-	-	-	-	-
<u>Ανόργανα</u>					
Γυαλί	80	98		78,4	33,0
Κονσέρβες	60	98		58,8	24,7
Al	5	96		4,8	2,0
Άλλα μέταλλα	30	98		29,4	12,4
Σκόνη, στάχτη	30	68		20,4	8,6
ΣΥΝΟΛΟ	1000			237,6	100

Εκτιμούμε τους αρχικούς και τελικούς όγκους προ και μετά την καύση, θεωρώντας ότι στο φρέαρ εκφόρτωσης έχουμε μέσο ειδικό βάρος 225 kg/m^3 .

Αρχικός όγκος: $1000 \text{ kg} / 225 \text{ kg/m}^3 = 4,44 \text{ m}^3$

Υπολ. όγκος: $237,6 \text{ kg} / 600 \text{ kg/m}^3 = 0,396 \text{ m}^3$

Η μείωση σε όγκο είναι επομένως $(4,44 - 0,396) / 4,44 = 91\%$

Σημαντικά διαχειριστικά θέματα κατά την υλοποίηση μιας λύσης βασισμένης στην ΚΑΑΕ έχουν να κάνουν με:

- (1) την επιλογή τοποθεσίας,
- (2) τις αέριες εκπομπές,
- (3) την διάθεση των υπολειμμάτων,
- (4) υγρές εκπομπές και
- (5) οικονομικά.

Είναι δυνατόν η τοποθεσία να είναι κοντά σε οικιακές ή βιομηχανικές περιοχές, ωστόσο προτιμούνται απόμακρες περιοχές. Πολλά από τα αέρια εκπομπής έχουν πιθανές επιπτώσεις στην υγεία. Πολλές φορές το κόστος κατάλληλων συστημάτων ελέγχου των εκπομπών είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το κόστος των λοιπών εγκαταστάσεων για την καύση.

Τα στερεά υπόλοιπα περιλαμβάνουν την καθιζάνουσα τέφρα, την ιπτάμενη τέφρα και τα προϊόντα διήθησης. Η καθιζάνουσα τέφρα οδηγείται στις χωματερές.

Υγρές εκπομπές μπορούν να πηγάσουν από τις εγκαταστάσεις απομάκρυνσης στάχτης, από την απορροή υγρών απορροφητικών στηλών, απόβλητα και αντλίες, καθαρισμούς και νοικοκύρεμα, απόβλητα από συστήματα επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νερών βραστήρα υψηλής ποιότητας και υγρά από πύργο ψύξεως. Τα οικονομικά σε τελευταία ανάλυση καθορίζουν την αποτελεσματικότητα και εφικτότητα της μεθόδου.

3.4.4.3 Καύσιμο από Απορρίμματα (RefuseDerivedFuel) (RDF)

Με τον όρο RDF υποδηλώνεται το στερεό απόβλητο το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε λέβητες για την παραγωγή ατμού ή ηλεκτρικής ενέργειας. Το RDF αναμιγνύεται και καίγεται επίσης μαζί με άνθρακα. Κατά την παραγωγή του στο στάδιο της προεπεξεργασίας το RDF απαλλάσσεται από τυχόν μέταλλα και γυαλιά. Η σύνθεσή του κυμαίνεται από την αλεσμένη μορφή ελαφρά επεξεργασμένων ΑΣΑ ως την αποκλειστική σύσταση από χαρτί και πλαστικό, γεγονός που είναι και συνηθέστερο.

Παράγονται δύο είδη καύσιμης ύλης από απορρίμματα:

- Η αλεσμένη μορφή
- Η ποιοτικά αναβαθμισμένη μορφή (υπό μορφή σφαιριδίων)

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το RDF είναι τα ακόλουθα:

- α) Εύκολη μεταφορά και αποθήκευση της καύσιμης ύλης,
- β) Δυνατότητα καύσης του προϊόντος σε συμβατικούς καυστήρες στερεών καυσίμων, μόνο του ή σε συνδυασμό με άνθρακα,
- γ) Συνδυασμός της παραγωγής του με τη μέθοδο της μηχανικής διαλογής,
- δ) Αρκετά σταθερή ποιότητα καυσίμου,
- ε) Καλή θερμική απόδοση,
- στ) Μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Το μεγαλύτερο εμπόδιο στην ευρεία εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι η αγορά του RDF. Η αγορά του RDF αποτελείται από θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, βιομηχανίες τσιμέντου και χαρτιού και μεταλλουργίες.

Πίνακας 3.4.5 Σύγκριση RDF με άνθρακα με βάση 18000 MJ ωφέλιμης θερμικής ενέργειας

Χαρακτηριστικό	RDF	Άνθρακας
Καύσιμο που καταναλώθηκε (kg)	1266	781
Καύσιμο που καταναλώθηκε (m ³)	2,11	1,03
Τέφρα (kg)	161	50
Πτητικά (kg)	905	240
Άνθρακας που κάηκε (kg)	101	230
Απαιτούμενος στοιχ. αέρας (kg)	6.949	8.600
Διοξείδιο του θείου (kg)	4,1	21
Υδροχλώριο (kg)	10,4	2,2

3.4.4.4 Πυρόλυση

Πυρόλυση είναι η θερμική διάσπαση των οργανικών ενώσεων και ειδικότερα η καταστρεπτική αποστακτική διαδικασία που διενεργείται απουσία οξυγόνου και σε θερμοκρασίες 250 - 1000°C ανάλογα με τα επιθυμητά προϊόντα.

Με τη μέθοδο της πυρόλυσης τα αστικά στερεά απορρίμματα μετατρέπονται σε μια σειρά χρήσιμων προϊόντων στερεής, υγρής ή αέριας φάσης. Η μέθοδος αυτή δεν επιβαρύνει το περιβάλλον όταν εφαρμόζεται σωστά.

Τα προϊόντα της πυρόλυσης των ΑΣΑ καταλαμβάνουν όγκο 50% μικρότερο του αρχικού και μετατρέπονται σε ενέργεια που καταναλώνει η ίδια η διαδικασία της πυρόλυσης ή παρέχεται προς διάθεση.

Η πυρόλυση χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα ως μία βιομηχανική διεργασία για την παραγωγή κάρβουνου από ξύλο, κοκ και αέριο κοκ από γαιάνθρακα, καθώς και υγρά καύσιμα και πίσσα από βαριά κλάσματα πετρελαίου. Παρά όμως την ευρεία εφαρμογή της στην βιομηχανία, η πυρόλυση δεν έχει πλήρως ξεπεράσει τα πολλαπλά προβλήματα που αντιμετωπίζει, κυρίως εξαιτίας της σημαντικής ανομοιογένειας των ΑΣΑ. Έτσι έχει περιοριστεί σε πειραματικές μονάδες και σε ελάχιστες μονάδες πλήρους ανάπτυξης.

Τα τρία σημαντικότερα κλάσματα που προκύπτουν από την πυρολυτική επεξεργασία των αστικών στερεών απορριμμάτων είναι τα ακόλουθα:

1. *αέριο ρεύμα*, το οποίο περιέχει κυρίως υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και διάφορα άλλα αέρια, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ.
2. *υγρό ρεύμα*, αποτελούμενο από πίσσα ή λάδι το οποίο περιέχει οξικό οξύ, ακετόνη, μεθανόλη και περίπλοκους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες. Με επιπλέον επεξεργασία, το υγρό κλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνθετικό καύσιμο λάδι σαν υποκατάστατο του συμβατικού λαδιού Νο 6.
3. *στερεό υπόλειμμα (char)*, αποτελούμενο από σχεδόν καθαρό άνθρακα καθώς και από όλα τα αδρανή υλικά που περιείχαν αρχικά τα ΑΣΑ.

Για την κυτταρίνη ($C_6H_{10}O_5$), η οποία αποτελεί μεγάλο μέρος του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, η ακόλουθη αντίδραση έχει προταθεί ως αντιπροσωπευτική της πυρολυτικής της διάσπασης:



Στην εξίσωση αυτή, η πίσσα ή/και τα ελαιώδη προϊόντα αναπαριστώνται από την έκφραση C_6H_8O . Έχει βρεθεί ότι η κατανομή των διαφόρων κλασμάτων ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η διεργασία της πυρόλυσης.

Στον

Πίνακας 3.4.6 δίνονται αντιπροσωπευτικά δεδομένα όσον αφορά την μάζα των παραγόμενων προϊόντων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης.

Πίνακας 3.4.6 Ισοζύγια μάζας για την πυρόλυση.

Θερμοκρασία °C	Μάζα ΑΣΑ tn	Αέρια tn	Πίσσα και πυρολυτικά έλαια tn	Char tn
481,7	1.000	123,30	610,80	247,10
648,2	1.000	186,40	591,80	218,00
814,7	1.000	236,90	596,70	172,40
925,7	1.000	243,60	587,00	176,70

Η τυπική σύσταση των αερίων που παράγονται κατά τη διεργασία της πυρόλυσης σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας δίνεται στον Πίνακα 3.4.7.

Πίνακας 3.4.7 Σύσταση αερίων πυρόλυσης σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.

	Ποσοστό κατ'όγκο			
Αέριο	481,7 °C	648,2 °C	814,7 °C	925,7 °C
H ₂	5,56	16,58	28,55	32,48
CH ₄	12,43	15,91	13,73	10,45
CO	33,50	30,49	34,12	35,25
CO ₂	44,77	31,78	20,59	18,31
C ₂ H ₄	0,45	2,18	2,24	2,43
C ₂ H ₆	3,03	3,06	0,77	1,07

Το ενεργειακό περιεχόμενο των πυρολυτικών ελαίων έχει υπολογιστεί ότι είναι περίπου 20.934 kJ/kg. Αντίστοιχα, σε συνθήκες πλήρους αεριοποίησης, έχει υπολογιστεί ότι το ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων αερίων είναι περίπου 26.081 kJ/m³.

3.4.4.5 Αεριοποίηση

Ως αεριοποίηση θεωρείται η διεργασία της μερικής καύσης κατά την οποία τα ΑΣΑ καίγονται με ποσότητες αέρα μικρότερες από τις στοιχειομετρικά απαιτούμενες.

Η αεριοποίηση είναι μια αποδοτική μέθοδος η οποία στοχεύει στη μείωση του όγκου των ΑΣΑ με ταυτόχρονη ανάκτηση ενέργειας. Μέσω της μερικής καύσης των ΑΣΑ παράγεται καύσιμο αέριο πλούσιο σε μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και μερικούς κορεσμένους υδρογονάνθρακες, κυρίως μεθάνιο. Το αέριο αυτό μπορεί στη συνέχεια να καεί σε μηχανές εσωτερικής καύσεως, σε αεροστρόβιλους, ή σε λέβητες σε συνθήκες περίσσειας αέρα.

Κατά τη διεργασία της αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα πέντε βασικές αντιδράσεις:





Η θερμότητα που απαιτείται για να συντηρήσει αυτοδύναμα τη διεργασία προέρχεται από τις εξώθερμες αντιδράσεις.

Όταν ένας αντιδραστήρας αεριοποίησης λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση με αέρα ως οξειδωτικό μέσο, το τελικό προϊόν της διεργασίας είναι ένα αέριο με χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο με τυπική κ.ό. σύσταση 10% CO₂, 20% CO, 15% H₂, 2% CH₄ και 53% N₂.

Παράλληλα, παράγονται συμπυκνώσιμα υγρά όμοια με τα πυρολυτικά έλαια καθώς και στερεό ανθρακούχο υπόλειμμα (char) μαζί με τα αδρανή υλικά που περιείχαν αρχικά τα ΑΣΑ. Εξαιτίας της αραίωσης που προκαλεί το αέριο άζωτο από τον εισερχόμενο αέρα στο παραγόμενο κατά τη διεργασία αέριο, το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου αυτού είναι 5589 kJ/m³. Η λειτουργία των συστημάτων αεριοποίησης με φυσική αέρα είναι ικανοποιητικά σταθερή, με ταυτόχρονα εξίσου σταθερή ποιότητα παραγόμενων αερίων για ένα ευρύ φάσμα παροχών αέρα στον αντιδραστήρα. Στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο σαν οξειδωτικό μέσο αντί για αέρας, όπως για παράδειγμα στα συστήματα Pulox, το παραγόμενο αέριο από τη διεργασία έχει ενεργειακό περιεχόμενο περίπου 11.778 kJ/m³.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΕΡΙΑ ΡΥΠΑΝΣΗ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ

Ως αέρια ρύπανση μπορεί να οριστεί η παρουσία ορισμένων συστατικών στον ατμοσφαιρικό αέρα σε συγκέντρωση ή διάρκεια που τον καθιστούν επικίνδυνο ή επιζήμιο για την αναπνοή και τη λειτουργία των φυτών και των ζώων. Τα συστατικά αυτά ονομάζονται ατμοσφαιρικοί ρύποι και γενικά κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: σωματιδιακής και αέριας φύσης. Οι ρύποι σωματιδιακής φύσης αποτελούνται από μικρά σωματίδια, στερεά ή υγρά, που αιωρούνται στην αέρια φάση όπως είναι οι σκόνες, ο καπνός, οι αναθυμιάσεις, η ιπτάμενη τέφρα, η ομίχλη και τα σταγονίδια. Οι ρύποι αέριας φύσης αποτελούνται από αέρια συστατικά και έχουν την ιδιότητα να καλύπτουν κάθε διαθέσιμο χώρο μέχρι να επέλθει ισορροπία λόγω διάχυσης. Εάν ο διαθέσιμος χώρος είναι πολύ μεγάλος τότε η τελική συγκέντρωση των ρύπων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα ενώ δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα όταν ο χώρος είναι περιορισμένος όπως τα καυσαέρια ενός αυτοκινήτου σε ένα κλειστό γκαράζ.

Οι **σκόνες** (dusts) είναι μικρά στερεά σωματίδια, μεγέθους 1,0 έως 1000 μm , που δημιουργούνται από μεγαλύτερα με διεργασίες σύγκρουσης, κοσκινίσματος ή θραύσης.

Οι **αναθυμιάσεις** (fumes) αποτελούνται από στερεά σωματίδια που δημιουργήθηκαν κατά την συμπύκνωση εξατμιζόμενων στερεών· το δε μέγεθός τους ποικίλλει από 0,03 έως 0,3 μm .

Ο **καπνός** (smoke) αποτελείται από στερεά σωματίδια άνθρακα και προέρχεται από την ατελή καύση οργανικών ενώσεων· το δε μέγεθός τους ποικίλλει από 0,5 έως 1,0 μm .

Η **ιπτάμενη τέφρα** (flyash) αποτελείται από μη καύσιμα σωματίδια που δημιουργήθηκαν κατά την καύση στερεών όπως ορυκτού άνθρακα· το δε μέγεθός τους ποικίλει από 1,0 έως 1000 μm .

Η **καταχνιά** (mist) αποτελείται από πολύ μικρή διασπορά σταγονιδίων υγρού (0,07 έως 10 μm) στον αέρα που προέρχεται από συμπύκνωση ατμών του υγρού. Η συμπύκνωση της καταχνιάς δημιουργεί ομίχλη (fog).

Η μηχανική διασπορά υγρού σε αέριο (spray) δημιουργεί σωματίδια υγρού που το μέγεθός τους ποικίλει από 10 έως 1000 μm .

Όλοι οι αέριοι ρύποι διακρίνονται σε οργανικούς και ανόργανους. Οι οργανικοί αέριοι ρύποι αποτελούνται από οργανικές ενώσεις όπως π.χ. ακρυλονιτρίλιο, βενζόλιο, φορμαλδεΐδη, πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), ενώ οι ανόργανοι αέριοι ρύποι αποτελούνται από ανόργανες ενώσεις όπως π.χ. CO, CO₂, NO, NO₂ ή SO₂. Οι οργανικοί ρύποι διακρίνονται σε φυσικούς και συνθετικούς. Οι φυσικοί οργανικοί ρύποι είναι αυτοί που παράγονται από βιολογικές δραστηριότητες. Αέρια διασπορά μικροσκοπικών ή μακροσκοπικών σωματιδίων που αποτελούνται από γύρη, μικροσκοπικά άλγαι, σπόρους, μικροοργανισμούς (ζωντανούς ή προσφάτως θανόντες), ιούς κ.ά. ονομάζονται βιολογικοί αέριοι ρύποι. Οι συνθετικοί οργανικοί ρύποι προέρχονται από μη βιολογικές παραγωγικές δραστηριότητες.

Επίσης οι αέριοι ρύποι διαχωρίζονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Πρωτογενείς ρύποι είναι αυτοί που εκπέμπονται απευθείας από την πηγή ενώ οι δευτερογενείς ρύποι δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα μετά την εκπομπή τους από την πηγή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δημιουργίας δευτερογενών ρύπων αποτελεί ο φωτοχημικός κύκλος δημιουργίας του όζοντος στην ατμόσφαιρα, ενώ η παραγωγή NO και NO₂ στους θαλάμους καύσης υγρών καυσίμων αποτελεί κλασικό παράδειγμα παραγωγής πρωτογενών ανόργανων αέριων ρύπων.

4.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Οι δύο βασικές προσεγγίσεις που υπάρχουν για τον έλεγχο των αερίων ρύπων και των αιωρούμενων σωματιδίων είναι:

- α) η αραίωση των ρύπων (διασπορά) στην ατμόσφαιρα και
- β) η μείωση (έλεγχος) των εκπομπών στην πηγή.

Η **πρώτη μέθοδος** επιτυγχάνεται κυρίως με τη χρήση υψηλών βιομηχανικών καμινάδων, οι οποίες εκπέμπουν συνήθως πάνω από το ύψος της θερμοκρασιακής αναστροφής και οδηγούν σε αύξηση της διασποράς και μείωση των συγκεντρώσεων στο έδαφος.

Η **δεύτερη μέθοδος**, δηλαδή ο έλεγχος της ρύπανσης στην πηγή, είναι η πλέον επιθυμητή και αποτελεσματική μέθοδος. Έλεγχος της ρύπανσης στην πηγή μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, ο κυριότερος από τους οποίους είναι η εγκατάσταση συσκευών και εξοπλισμού επεξεργασίας των αερίων αποβλήτων μιας διεργασίας. Όπως αναφέρθηκε οι συσκευές αυτές πολύ συχνά λειτουργούν με βάση τις αρχές των φυσικών μεθόδων καθαρισμού της ατμόσφαιρας. Πολύ λίγες από αυτές έχουν την ικανότητα να περιορίζουν ταυτοχρόνως τις εκπομπές αερίων ρύπων και τις εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων και γι' αυτό οι συσκευές αυτές συνήθως σχεδιάζονται συγκεκριμένα για τη μία ή την άλλη χρήση.

Από πλευράς όγκου παραγόμενων ρύπων ο έλεγχος αερίων ρύπων είναι πιο σημαντικός. Παρόλα αυτά στην πράξη δίδεται περισσότερη σημασία στον έλεγχο των αιωρούμενων σωματιδίων. Πρόσφατες επιδημιολογικές μελέτες έχουν αποδείξει τα σοβαρά προβλήματα που προκαλούν τα αιωρούμενα σωματίδια στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Η παραπάνω διαπίστωση, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η ρύπανση από σωματίδια είναι περισσότερο ορατή με γυμνό μάτι, έχει προκαλέσει την ευαισθητοποίηση του γενικού πληθυσμού.

4.2.1 Διασπορά αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα

Τα αερολύματα (αέριοι ρύποι), που προέρχονται από τις διάφορες καύσεις και από την παραγωγική διαδικασία βιομηχανιών, διοχετεύονται στον τελικό αποδέκτη, την ατμόσφαιρα, μέσω καμινάδων. Οι καμινάδες σε καμία περίπτωση δεν αποτελούν μέθοδο καθαρισμού, μια και δεν γίνεται σ' αυτές συγκράτηση του ρυπαντικού φορτίου, αλλά αποτελούν κύρια ένα μέσο για την πιο καλή διασπορά των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα, ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων εδάφους σε μια ευρύτερη περιοχή. Η χρήση των καμινάδων είναι απαραίτητη τόσο στην περίπτωση της διοχέτευσης ανεπεξέργαστων αερολυμάτων όσο και επεξεργασμένων, μιας και ο βαθμός καθαρισμού που εξαρτάται από τεχνικοοικονομικά στοιχεία και την απαιτούμενη ποιότητα αέρα στην περιοχή δεν είναι ποτέ 100%.

Τα αερολύματα που διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα ακολουθούν τη διεύθυνση του ανέμου και διαχέονται λόγω του τυρβώδους χαρακτήρα του. Ο τυρβώδης χαρακτήρας του ανέμου οφείλεται σε στροβιλισμούς που προέρχονται τόσο από μηχανικούς όσο κύρια από θερμικούς λόγους. Ο άνεμος επομένως αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην διάχυση των αερολυμάτων και οι παράγοντες που τον επηρεάζουν, θα επηρεάζουν και τη διαδικασία της διάχυσης. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την τυρβώδη ροή, την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου είναι συνοπτικά οι παρακάτω:

- η τριβή με το έδαφος
- η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα και
- η τοπογραφία και η ύπαρξη κτισμάτων.

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διάχυση των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της. Ποιοτικά οι

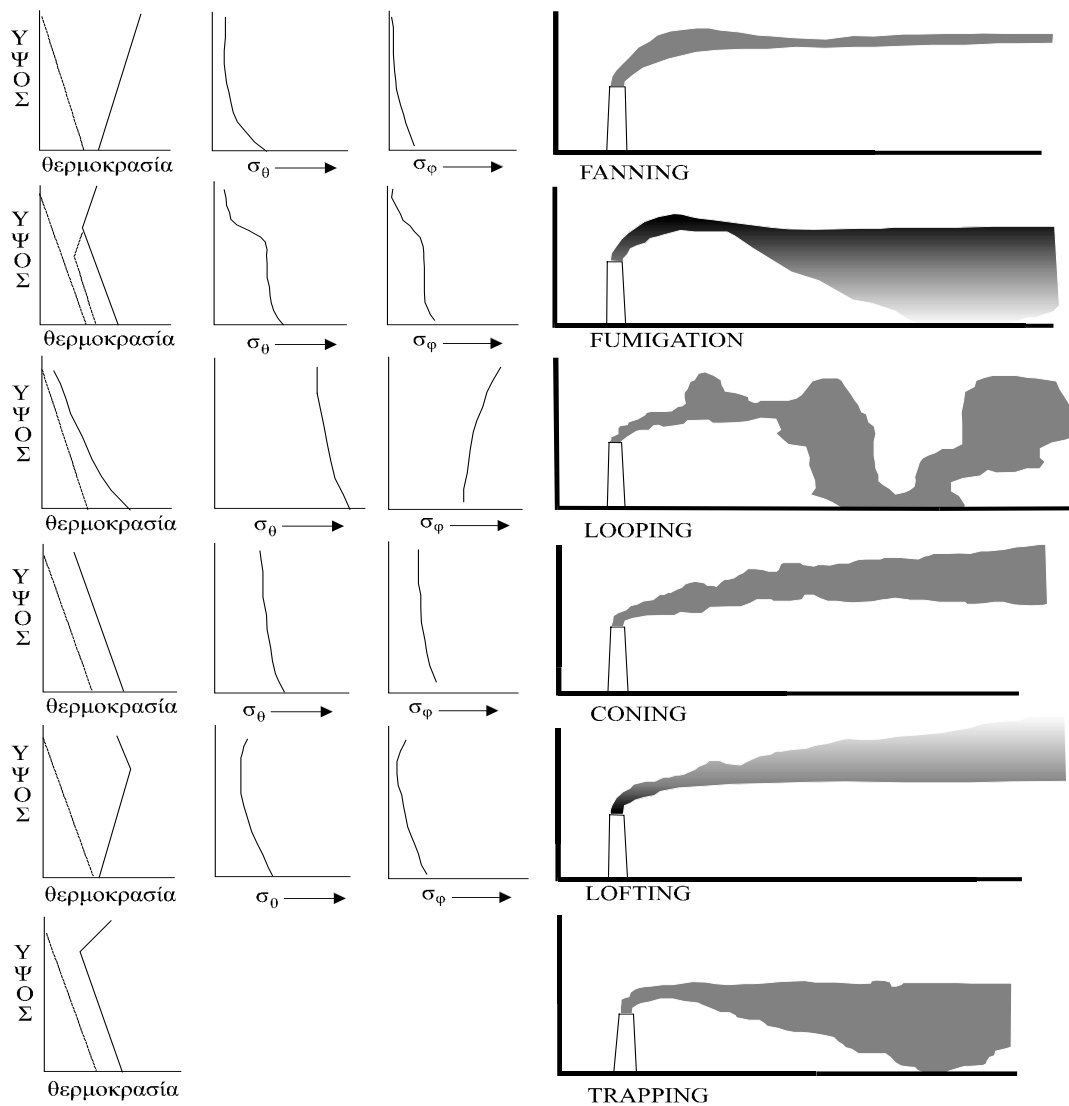
διάφοροι τρόποι διάχυσης περιγράφονται συχνά από το γεωμετρικό σχήμα που έχει η ορατή διασπορά των αερολυμάτων (Σχήμα 4.2.1). Οι τύποι αυτοί εμφανίζονται όταν δεν υπάρχουν επιδράσεις επιφανειακών ανωμαλιών όπως κτίρια κλπ. Η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας και τα τυρβώδη χαρακτηριστικά που συνδέονται μ' αυτή, παίζουν σημαντικό ρόλο στον τύπο της διασποράς. Στο Σχ.4.1. τα δυο αυτά στοιχεία δίνονται μαζί με τα αντίστοιχα γεωμετρικά σχήματα. Τα τυρβώδη χαρακτηριστικά καθορίζονται από την τυπική απόκλιση στην κάθετη και οριζόντια μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου που συνδέεται μ' αυτά.

Όταν δεν υπάρχουν θερμικά φαινόμενα, η μεταβολή της θερμοκρασίας τείνει να γίνει αδιαβατική (αδιάφορη) και η διασπορά έχει το σχήμα κώνου (CONING). Η κάθετη τομή της είναι ελλειπτική με τον οριζόντιο άξονα γενικά πιο μεγάλο από τον κάθετο.

Μεταβολές με μικρότερο ρυθμό από την αδιαβατική (πιο αρνητικές) είναι θερμικά ασταθείς. Είναι ενδεικτικές της αύξησης του τυρβώδους χαρακτήρα και του ρυθμού διάχυσης των αερολυμάτων. Οι δίνες που σχηματίζονται μπορεί να είναι πιο μεγάλες από την κάθετη διατομή με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ο τύπος LOOPING. Θερμοκρασιακές μεταβολές με ρυθμό πιο μεγάλο από την αδιαβατική (πιο θετικές) προκαλούν μια μείωση της έντασης του τυρβώδη χαρακτήρα ιδιαίτερα στην κάθετη διεύθυνση. Το αποτέλεσμα είναι ο τύπος FANNING όπου ο οριζόντιος άξονας είναι πολύ πιο μεγάλος από τον κατακόρυφο.

Οι τρεις υπόλοιποι τύποι αναφέρονται σε μη ομοιόμορφες θερμοκρασιακές μεταβολές που παρουσιάζουν ασυνέχεια λόγω της επαφής αερίων στρωμάτων με διαφορετικά θερμικά χαρακτηριστικά. Οι τύποι FUMIGATING και TRAPPING είναι οι πιο σημαντικοί για τις συγκεντρώσεις εδάφους. Ένα θερμικά σταθερό στρώμα στο πάνω μέρος εμποδίζει την προς τα πάνω διάχυση ενώ επιταχύνεται η διάχυση προς τα κάτω λόγω της ύπαρξης ενός ουδέτερου ή ασταθούς στρώματος στο κάτω μέρος. Ο τύπος FUMIGATING είναι αποτέλεσμα της μετάβασης από ένα επιφανειακά σταθερό στρώμα σ' ένα αναπτυσσόμενο ουδέτερο ή ασταθές κάτω από τον κώνο διάχυσης (PLUME) των αερολυμάτων. Καθώς το ασταθές στρώμα καλύπτει τον κώνο, μπορεί να εμφανιστούν υψηλές συγκεντρώσεις εδάφους για μικρά χρονικά διαστήματα (λίγα λεπτά της ώρας ή περισσότερο). Το φαινόμενο οφείλεται στη θέρμανση της επιφάνειας της γης τις πρωινές ώρες που ακολουθεί τις νυχτερινές σταθερές συνθήκες. Μπορεί επίσης να συμβεί κατά τη μετάβαση του αέρα από ψυχρές σε θερμές επιφάνειες όπως από τη θάλασσα στη στεριά ή από την ύπαιθρο σε αστικές περιοχές.

Ο τύπος TRAPPING οφείλεται στην παρουσία για μεγάλα χρονικά διαστήματα ενός σταθερού στρώματος σε αρκετό ύψος πάνω από τον κώνο διάχυσης. Το ουδέτερο ή ασταθές στρώμα που καλύπτει τον κώνο διάχυσης μπορεί να προκαλέσει για πολλές ώρες μεγάλες συγκεντρώσεις εδάφους. Ο τύπος LOFTING είναι ο πιο επιθυμητός από την άποψη της αέριας ρύπανσης γιατί το κατώτερο σταθερό στρώμα εμποδίζει την διάχυση προς τα κάτω.



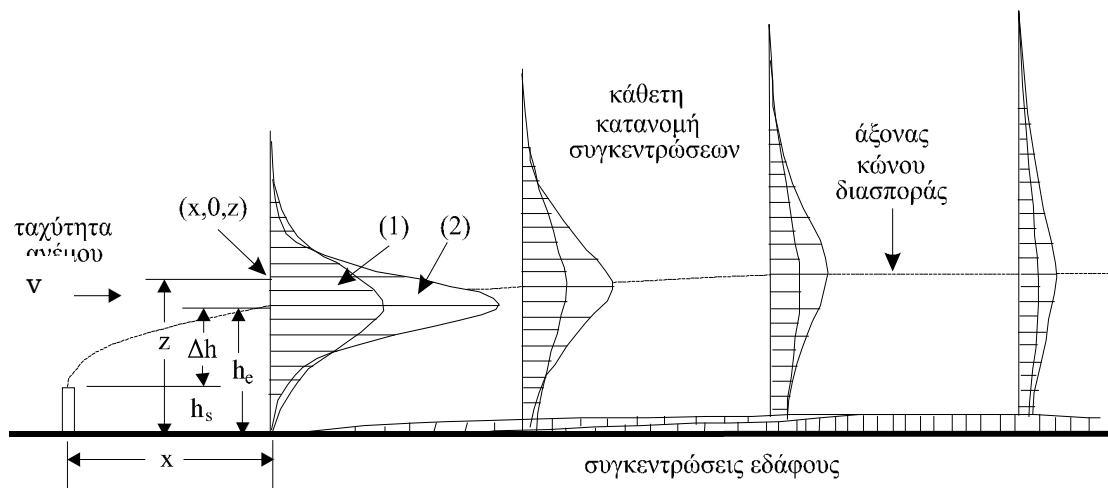
Σχήμα 4.2.1 Διάφοροι τύποι κώνων διασποράς που παρατηρούνται στην ατμόσφαιρα. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την αδιαβατική μεταβολή της θερμοκρασίας. Τα σ_θ και σ_ϕ παριστάνουν τις σταθερές αποκλίσεις στις μεταβολές της οριζόντιας και κατακόρυφης διεύθυνσης του ανέμου, που μπορούν να κυμαίνονται μεταξύ 0 και 25 μοιρών.

4.2.1.1 Μοντέλο Διασποράς Αερολυμάτων από Καμινάδα

Η υπερύψωση του κώνου των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα συνοδεύεται από διάχυση γύρω από τον άξονά του. Ενώ υπάρχει αλληλοεπίδραση μεταξύ τους, η υπερύψωση και η διάχυση εξετάζονται ανεξάρτητα στην μαθηματική ανάλυση.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κώνου διάχυσης φαίνονται στο Σχήμα 4.2.2 και περιλαμβάνουν το φυσικό ύψος της καμινάδας (h_s), το ενεργό ύψος της καμινάδας (h_e) που είναι το άθροισμα του ύψους της καμινάδας και της υπερύψωσης του κώνου διασποράς (Δh):

$$h_e = h_s + \Delta h \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.2.2 Κατανομή συγκεντρώσεων και θέση του άξονα του κώνου διασποράς για μικρή (1) και μεγάλη (2) διαταραχή της ατμόσφαιρας

Οι υπολογισμοί για την εύρεση της κατανομής των συγκεντρώσεων απαιτούν την γνώση του h_e . Η υπερύψωση του άξονα του κώνου διάχυσης εξαρτάται από τα αρχικά χαρακτηριστικά των αερολυμάτων και από τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας. Η διάχυση εξαρτάται κύρια από τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας.

4.2.1.1.1 Ανάλυση της υπερύψωσης

Η υπερύψωση οφείλεται τόσο στην ορμή των αερολυμάτων στην έξοδο της καμινάδας όσο και από την διαφορά πυκνότητας μεταξύ αερολυμάτων και ατμοσφαιρικού αέρα στο σημείο εξόδου. Ο ρυθμός της ανόδου μειώνεται καθώς ο εισερχόμενος αέρας αυξάνει τον συνολικό όγκο των αερολυμάτων. Ο ρυθμός ανόδου λόγω της ορμής είναι αρχικά μεγάλος αλλά μειώνεται γρήγορα με την απόσταση. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω διαφοράς πυκνότητας δεν προκαλούν μεγάλη αρχική υπερύψωση αλλά συνεχίζουν να δρουν για πιο μεγάλο χρονικό διάστημα. Στις περισσότερες περιπτώσεις βιομηχανικών εφαρμογών, η υπερύψωση εξαρτάται κύρια από την διαφορά πυκνότητας, ιδιαίτερα όταν έχουμε μεγάλες υπερυψώσεις. Σε λίγες περιπτώσεις υπερτερεί η ορμή κυρίως όταν τα αερολύματα βρίσκονται σε θερμοκρασία παραπλήσια του περιβάλλοντος αέρα.

Τα χαρακτηριστικά των αερολυμάτων που επηρεάζουν την υπερύψωση είναι:

- η θερμοκρασία και η πυκνότητα. Γενικά όσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά θερμοκρασίας εξόδου και περιβάλλοντος τόσο ευνοείται η υπερύψωση λόγω διαφοράς πυκνότητας.
- η ταχύτητα εξόδου των αερολυμάτων που εξαρτάται από την παροχή των αερολυμάτων και τη διάμετρο της καμινάδας. Γενικά όσο πιο μεγάλη η ταχύτητα εξόδου τόσο μεγαλώνει η υπερύψωση λόγω ορμής.
- η παρουσία σωματιδίων. Σωματίδια διαμέτρου $<20\mu\text{m}$ ακολουθούν τα υπόλοιπα αέρια, ενώ σωματίδια διαμέτρου $>20\mu\text{m}$ λόγω της επίδρασης της βαρύτητας θα έχουν μικρότερη υπερύψωση.
- η παρουσία υγρασίας που μπορεί να οφείλεται σε προηγούμενη επεξεργασία των αερολυμάτων. Τα σταγονίδια του νερού εξατμίζονται καθώς εξέρχονται από την καμινάδα απορροφώντας θερμότητα από τη μάζα των αερίων ψύχοντάς τα με αποτέλεσμα την μείωση της υπερύψωσης.

Τα χαρακτηριστικά του αέρα που επηρεάζουν την υπερύψωση είναι:

- η ταχύτητα του ανέμου. Γενικά η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί μείωση της υπερύψωσης τόσο λόγω της μείωσης της κατακόρυφης ταχύτητας των αερολυμάτων όσο και λόγω της ταχύτερης ανάμιξης και εξισορρόπησης των χαρακτηριστικών των αερολυμάτων μ' αυτά του ατμοσφαιρικού αέρα.
- η ισορροπία της ατμόσφαιρας. Γενικά ατμοσφαιρικές συνθήκες που ευνοούν την προς τα κάτω κίνηση αερίων μαζών μειώνουν την υπερύψωση (π.χ. FUMIGATING, TRAPPING), ενώ συνθήκες που ευνοούν την προς τα πάνω κίνηση ευνοούν την υπερύψωση (LOFTING).

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εξισώσεων που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της υπερύψωσης. Οι εξισώσεις αυτές χαρακτηρίζονται από τον εμπειρικό τους χαρακτήρα και από την ανταπόκρισή τους σε συνθήκες ανάλογες μ' αυτές για τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν. Οι περισσότερες αφορούν τα αερολύματα θερμοηλεκτρικών σταθμών στερεών καυσίμων. Η υπερύψωση λαμβάνεται ως συνάρτηση κυρίως των χαρακτηριστικών των αερολυμάτων και της ταχύτητας του ανέμου, ενώ τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας υπεισέρχονται έμμεσα σ' αυτές συνήθως με την μορφή εμπειρικών συντελεστών. Παρακάτω δίνεται η πλέον εφαρμοζόμενη σχέση (εξίσωση HOLLAND 1953):

$$\Delta h = \frac{1,5 \cdot v_{\text{αερολ.}} \cdot D + 4 \cdot 10^{-5} \cdot \dot{Q}_h}{v} \quad (4.2)$$

όπου Δh υπερύψωση (m)

$v_{\text{αερολ.}}$ ταχύτητα εξόδου αερολυμάτων (m/s)

D διάμετρος εξόδου καμινάδας (m)

$\dot{Q}_h$ ρυθμός εκπομπής θερμότητας (cal/s)

v ταχύτητα ανέμου (m/s).

Οι όροι που περιέχονται στην (4.2) αναφέρονται στη συμμετοχή της ορμής και της διαφοράς πυκνότητας. Η εξαγωγή του πρώτου βασίστηκε σε εργαστηριακά πειράματα και του δεύτερου σε τρεις μονάδες παραγωγής ενέργειας.

4.2.1.1.2 Υπολογισμός μεγίστων συγκεντρώσεων εδάφους.

Το μοντέλο διασποράς που χρησιμοποιείται περισσότερο στους θεωρητικούς υπολογισμούς είναι το στατιστικό μοντέλο της κατανομής GAUSS. Για τους υπολογισμούς μ' αυτό η διάχυση των αερολυμάτων αναλύεται σ' ένα σύστημα τριών συντεταγμένων, στα οποία ο άξονας του κώνου διάχυσης είναι παράλληλος και στο ίδιο επίπεδο με τον άξονα x (Σχήμα 4.2.3). Η μορφή του κώνου διάχυσης είναι τέτοια ώστε να εφαρμόζεται η διασπορά κατά GAUSS μέσα σ' αυτόν.

Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται σ' αυτό το μοντέλο είναι:

$$C_{x,y,z} = \frac{\dot{M}}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z - h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z + h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.3)$$

όπου $C(x,y,z)$ η συγκέντρωση στο σημείο συντεταγμένων (x,y,z) , (g/m³)

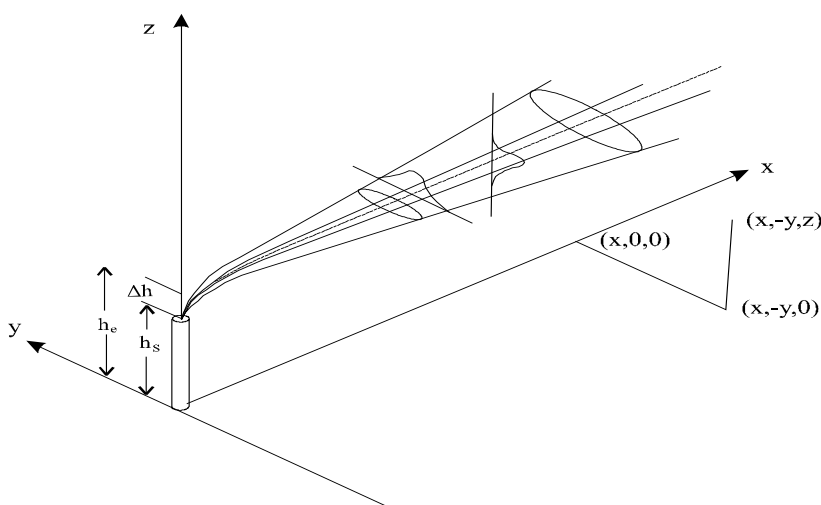
$\dot{M}$ η παροχή εξόδου αερολυμάτων (g/s)

h_e ενεργό ύψος της καμινάδας (m)

x,y,z το μέγεθος των συντεταγμένων (m)

v η μέση ταχύτητα του ανέμου σ' όλη την έκταση του κώνου διασποράς (m/s)

σ_y και σ_z οι τυπικές αποκλίσεις της κατανομής Gauss στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο αντίστοιχα (m)



Σχήμα 4.2.3 Σύστημα αξόνων που δείχνει την Gaussian κατανομή στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο.

Για την ισχύ της εξίσωσης (4.3) γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

1. Συνεχής εκπομπή αερολυμάτων από την πηγή σε ρυθμούς ίσους ή μεγαλύτερους από την διασπορά λόγω του ανέμου ώστε η διάχυση προς την κατεύθυνση της μεταφοράς να είναι αμελητέα.
2. Το υλικό που διαχέεται είναι σταθερό αέριο ή αιώρημα σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 20μm που παραμένει σε αιώρηση για μεγάλο χρονικό διάστημα.
3. Όλη η μάζα των αερολυμάτων παραμένει στον κώνο διάχυσης και δεν έχουμε απώλεια υλικού λόγω προσρόφησης ή χημικής αντίδρασης κατά την επαφή με το έδαφος.
4. Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου παραμένουν σταθερές σ' όλο το μήκος της διασποράς.
5. Η κατανομή των συγκεντρώσεων είναι κανονική και στο οριζόντιο και στο κάθετο επίπεδο.
6. Τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας είναι σταθερά σ' όλο το μήκος της διασποράς και τα σ_y και σ_z είναι συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα.

Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων εδάφους η εξίσωση (4.3) μπορεί να απλοποιηθεί ($y=0$) και να πάρει την μορφή:

$$C_{x,0,0} = \frac{\dot{M}}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

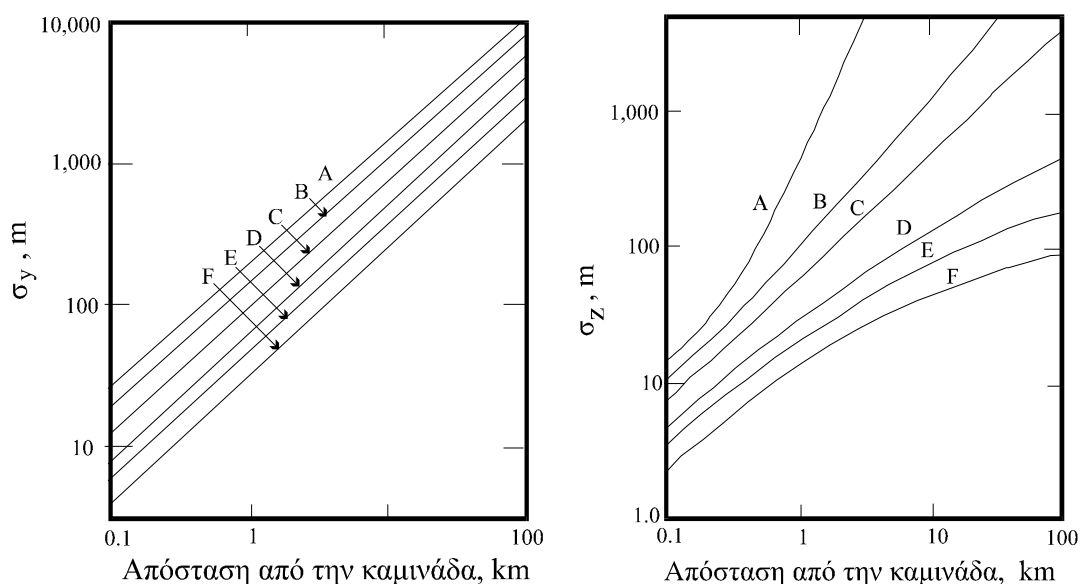
Η Εξίσωση (4.4) δείχνει ότι κάτω από τις ίδιες συνθήκες (ίδια παροχή αερολυμάτων και ίση απόσταση από την καμινάδα) οι συγκεντρώσεις εδάφους είναι αντιστρόφως ανάλογες της ταχύτητας του αέρα και του ενεργού ύψους της καμινάδας. Αυτό σημαίνει ότι αύξηση του ύψους της καμινάδας διατηρώντας τις άλλες συνθήκες σταθερές θα έχει ως αποτέλεσμα σημαντική ελάττωση της συγκέντρωσης εδάφους σ' ένα συγκεκριμένο σημείο.

Οι τιμές που μπορούν να πάρουν οι σταθερές διασποράς σ_y και σ_z μπορούν να βρεθούν από διαγράμματα όπως αυτά του Σχήμα 4.2.4 για διάφορες αποστάσεις από την καμινάδα.

Τα χαρακτηριστικά γράμματα των καμπυλών (Α, Β, C, D, E και F) αναφέρονται σε διαφορετικές καταστάσεις σταθερότητας της ατμόσφαιρας. Στον Πίνακα 4.2.1 φαίνεται μια τέτοια αντιστοιχία μεταξύ των καμπυλών και της κατάστασης της ατμόσφαιρας που βασίζεται στην ένταση της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας.

Πίνακας 4.2.1 Εκτίμηση της ατμοσφαιρικής σταθερότητας.

Επιφανειακός άνεμος στα 10 μέτρα m / s	Ημέρα			Νύχτα	
	Ηλιακή ακτινοβολία			κάλυψη με σύννεφα	
	Ισχυρή	Μέτρια	Λίγη	>4/8	<3/8
<2	A	A - B	B		
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D



Σχήμα 4.2.4 Οι συντελεστές σ_y και σ_z σε συνάρτηση με την απόσταση από την καμινάδα.

Στις καμπύλες των διαγραμμάτων (Σχήμα 4.2.4) έχουν προσαρμοστεί μαθηματικά μοντέλα της μορφής $\sigma_y = a \cdot x^p$ και $\sigma_z = b \cdot x^q$ των οποίων οι συντελεστές a , b , p και q παίρνουν τιμές σύμφωνα με τον

Πίνακα 4.2.2.

Πίνακας 4.2.2 Συντελεστές για τα μαθηματικά μοντέλα $\sigma_y=a.x$ και $\sigma_z=b.x$ ανάλογα με τον τύπο της διασποράς.

Τύπος διασποράς	σ_y		σ_z		Εύρος εφαρμογής για το σ_z , x σε m
	a	p	b	q	
A	0,55202	0,85927	0,07791	1,1148	100-300
			0,01036	1,4787	300-500
			0,000218	2,1057	500-3000
B	0,38267	0,87024	0,1186	0,9711	100-500
			0,05419	1,1028	500-20000
C	0,22759	0,88812	0,11486	0,9074	100-20000
D	0,16209	0,87944	0,09261	0,8529	100-500
			0,25616	0,6727	500-3000
			0,52179	0,6020	3000-20000
E	0,11826	0,88167	0,08182	0,8178	100-500
			0,22387	0,6575	500-3000
			0,74895	0,5052	3000-20000
F	0,07948	0,88144	0,05498	0,8101	100-500
			0,1549	0,6485	500-3000
			0,92323	0,4234	3000-20000

Η ταχύτητα του ανέμου (v) είναι συνάρτηση του ύψους (z). Στις σχέσεις (4.3) και (4.4) συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η ταχύτητα του ανέμου στο ενεργό ύψος (h_e). Αν είναι γνωστή η ταχύτητα του ανέμου v_1 σε κάποιο ύψος z_1 τότε μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα του ανέμου σε οποιοδήποτε ύψος σύμφωνα με την σχέση:

$$v = v_1 \cdot \left(\frac{h_e}{z_1} \right)^{0.5} \quad (4.5)$$

Αποδεικνύεται πως η μεγαλύτερη συγκέντρωση του αέριου ρύπου στο έδαφος εμφανίζεται σε απόσταση από την καμινάδα για την οποία ισχύει η σχέση:

$$\sigma_z = 0,707 h_e \quad (4.6)$$

Στη περίπτωση που τα αερολύματα παγιδεύονται λόγω θερμικής αναστροφής (trapping) τότε ισχύει η εξίσωση (Turner, 1970):

$$C_{x,0,0} = \frac{\dot{M}}{\sqrt{2\pi} \cdot H_i \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.7)$$

όπου, H_i το ύψος της θερμικής αναστροφής.

Η απόσταση x_i από την καμινάδα κατά την οποία το αερόλυμα φθάνει το επίπεδο της θερμικής αναστροφής υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Turner, 1970):

$$2,15 \sigma_z = H_i - h_e \quad (4.8)$$

Όπως φαίνεται, το πρόβλημα της διάχυσης των αερολυμάτων από καμινάδες είναι αρκετά πολύπλοκο. Απαιτεί την πλήρη γνώση παραμέτρων που μεταβάλλονται όχι μόνο τοπικά αλλά και χρονικά ενώ τα θεωρητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό παραδοχών ώστε να παρουσιάζονται σημαντικές

αποκλίσεις στην πράξη. Μόνο μια μακροχρόνια μελέτη μπορεί να δώσει ασφαλή εικόνα της διάχυσης των αερολυμάτων και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μια περιοχή όταν μάλιστα προέρχεται από πολλές πηγές συγχρόνως. Τα προαναφερόμενα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μία κατ' αρχήν εκτίμηση της διασποράς των ρύπων.

Άσκηση 4.1

Μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνει ημερησίως καταναλώνει 12000 tons στερεού καυσίμου που περιέχει 1.5% θείο. Το ενεργό ύψος (h_e) της καμινάδας είναι 200 m. Στη στάχτη συγκρατείται το 25% του θείου ενώ το υπόλοιπο εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα από την καμινάδα με τη μορφή SO_2 . Μετρήθηκε μία ηλιόλουστη ημέρα σε ύψος 10 m η ταχύτητα του ανέμου και βρέθηκε 4 m/s. Να βρεθεί η συγκέντρωση του SO_2 στο έδαφος σε απόσταση 1, 5 και 10 km. Να βρεθεί το ύψος της θερμικής αναστροφής που θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά τη συγκέντρωση του SO_2 στο έδαφος σε απόσταση 10 km από τη καμινάδα. Να υπολογιστεί η μέγιστη συγκέντρωση SO_2 στο έδαφος που μπορεί να μετρηθεί καθώς και η απόστασή της από τη καμινάδα.

Λύση

Από τον Πίνακα 4.2.1 διαπιστώνουμε ότι η ατμοσφαιρική σταθερότητα ανήκει στη κατηγορία B. Από τα διαγράμματα (Σχήμα 4.2.4) υπολογίζουμε:

σ_x	σ_y	σ_z
1 km	150 m	100 m
5 km	700 m	700 m
10 km	1000 m	1200 m

Από την εξίσωση (4.5) υπολογίζουμε την ταχύτητα του ανέμου στο ενεργό ύψος h_e .

$$v = v_1 \cdot \left(\frac{h_e}{z_1} \right)^{0.5} = 4 \left(\frac{200}{10} \right)^{0.5} = 18 \text{ m/s}$$

και η εκπομπή θείου στην ατμόσφαιρα ανέρχεται σε:

$$\dot{M}_s = \frac{0,75 \cdot 12000 \cdot 10^6 \cdot 0,015}{24 \cdot 3600} = 1562,5 \text{ g/s}$$

ενώ η εκπομπή SO_2 είναι:

$$\dot{M}_{SO_2} = 1562,5 \cdot \frac{MB_{SO_2}}{MB_s} = 1562,5 \cdot \frac{64}{32} = 3125 \text{ g/s}$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (4.4) υπολογίζουμε τις συγκεντρώσεις SO_2 στο έδαφος σε απόσταση 1 km, 10 km και 5 km:

$$x = 1 \text{ km: } C_{SO_2} = \frac{3125}{\pi \cdot 150 \cdot 100 \cdot 18} \exp \left(- \frac{200^2}{2 \cdot 100^2} \right) = 0,0005 \text{ g/m}^3 = 500 \mu\text{g/m}^3$$

$$x = 5 \text{ km: } C_{SO_2} = \frac{3125}{\pi \cdot 700 \cdot 700 \cdot 18} \exp \left(- \frac{200^2}{2 \cdot 700^2} \right) = 0,000108 \text{ g/m}^3 = 108 \mu\text{g/m}^3$$

$$x = 10 \text{ km: } C_{SO_2} = \frac{3125}{\pi \cdot 1000 \cdot 1200 \cdot 18} \exp \left(- \frac{200^2}{2 \cdot 1200^2} \right) = 0,000045 \text{ g/m}^3 = 45 \mu\text{g/m}^3$$

Η μεγίστη συγκέντρωση SO₂ στο έδαφος εμφανίζεται όταν ισχύει η εξίσωση (4.8)

$$\sigma_z = 0,707 \cdot h_e = 0,707 \cdot 200 = 141 \text{ m}$$

Από το διάγραμμα (Σχήμα 4.2.4) ή τις εξισώσεις διαπιστώνουμε ότι αυτό συμβαίνει σε απόσταση $x=1,25 \text{ km}$ από την καμινάδα. Σ' αυτή την απόσταση προσδιορίζεται $\sigma_y=190 \text{ m}$ και εφαρμόζοντας την εξίσωση (4.4) υπολογίζουμε την συγκέντρωση του SO₂ σ' αυτό το σημείο:

$$x = 1,25 \text{ km}: C_{\text{SO}_2} = \frac{3125}{\pi \cdot 1168 \cdot 141 \cdot 18} \exp\left(-\frac{200^2}{2 \cdot 141^2}\right) = 0,00076 \text{ g/m}^3 = 760 \mu\text{g/m}^3$$

Η θερμική αναστροφή θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά μία απόσταση 10 km αν ίσχυε η σχέση (4.8). Σ' αυτή την απόσταση έχουμε υπολογίσει ότι $\sigma_z=1200 \text{ m}$ και εφαρμόζοντας την εξίσωση (4.8) υπολογίζουμε το ελάχιστο ύψος της θερμικής αναστροφής:

$$2,15 \sigma_z = H_i - h_e \Rightarrow 2,15 \cdot 1200 = H_i - 200 \Rightarrow H_i = 2780 \text{ m}$$

4.2.2 Έλεγχος ρύπανσης στην πηγή

Οι τεχνικές που εφαρμόζονται για τον έλεγχο της αέριας ρύπανσης στη πηγή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τεχνικές για έλεγχο αιωρούμενων σωματιδίων και τεχνικές για έλεγχο αέριων ρύπων.

4.2.2.1 Έλεγχος αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν έναν από τους χαρακτηριστικούς ρύπους της εποχής μας. Προέρχονται από μία μεγάλη ποικιλία πηγών και έχουν ένα σημαντικό εύρος διαφορετικών μορφολογικών, χημικών, φυσικών και θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών. Η διάμετρός τους ποικίλλει από μερικά νανόμετρα έως και 100μm και σχετίζεται άμεσα με τον τρόπο σχηματισμού και εκπομπής τους. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια για την ομαδοποίηση των αιωρούμενων σωματιδίων σε επιμέρους κλάσματα, όπως το μέγεθος, η σύσταση, ο τρόπος σχηματισμού και οι φυσικές και χημικές τους ιδιότητες. Το συνηθέστερο και ευρύτερα χρησιμοποιούμενο κριτήριο ομαδοποίησης, ωστόσο, είναι το μέγεθός τους.

Ορισμοί: Με βάση ορισμού την ταξινόμηση των ολικών αιωρούμενων σωματιδίων κατά μέγεθος (σε χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα) και σε συσχέτιση με την διεισδυτικότητά τους στον ανθρώπινο οργανισμό (εσπνεύσιμα και αναπνεύσιμα), γίνεται η εισαγωγή δύο νέων ρυπαντικών παραμέτρων, των σωματιδίων **PM10** και των σωματιδίων **PM2,5**. Θεωρείται γενικά ότι τα **PM10** ταυτίζονται με την κατηγορία των εσπνεύσιμων σωματιδίων και έχουν διάμετρο έως 10μm. Ωστόσο ο ορισμός αυτός δεν λαμβάνει υπ' όψη του το γεγονός ότι είναι αδύνατον να κατασκευασθεί δειγματολήπτης ικανός να λειτουργεί υπό μορφή βηματικής συνάρτησης, οπότε να αποκλείει τη συλλογή των σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο παραπλήσια της επιθυμητής, ώστε να μπορούμε να προσδιορίσουμε σωματίδια μέχρι ή από μία διάμετρο και πέρα. Στην πράξη δηλαδή τα PM10 περιλαμβάνουν και ένα περιορισμένο αριθμό σωματιδίων με μέγεθος μεγαλύτερο από 10μm. Τα PM2.5 ταυτίζονται με την κατηγορία των αναπνεύσιμων σωματιδίων και θεωρείται ότι έχουν διάμετρο έως και 2,5 μm.

Οι κυριότερες μέθοδοι ελέγχου των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι θάλαμοι βαρύτητας ή καθίζησης, οι κυκλώνες, τα σακκόφιλτρα, οι υγροί καθαριστήρες ή πύργοι έκπλυσης-ψεκασμού και τα ηλεκτρόφιλτρα ή ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές. Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους είναι

κατάλληλη για συγκεκριμένες εφαρμογές. Οι κυριότεροι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου είναι:

- A. Η διάμετρος και το σχήμα των σωματιδίων
- B. Οι φυσικοχημικές και ηλεκτροστατικές ιδιότητες των σωματιδίων
- Γ. Η συγκέντρωση των σωματιδίων στα αέρια απόβλητα
- Δ. Η παροχή των αέριων αποβλήτων
- Ε. Η παρουσία ή μη άλλων αερίων ρύπων στα αέρια απόβλητα.

Στον Πίνακα 4.2.3 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα εφαρμογής των κυριότερων μεθόδων ελέγχου των αιωρούμενων σωματιδίων σε αέρια απόβλητα καθώς επίσης και τα κριτήρια επιλογής τους με βάση τη μικρότερη διάμετρο των σωματιδίων που πρέπει να απομακρυνθούν καθώς και την απόδοση απομάκρυνσης που πρέπει να επιτευχθεί.

4.2.2.1.1. Κυκλώνες

Η λειτουργία των κυκλώνων ή αεροκυκλώνων (cyclones) βασίζεται στην εφαρμογή φυγόκεντρων δυνάμεων στα σωματίδια, τα οποία με αυτό τον τρόπο διαχωρίζονται από τα αέρια απόβλητα. Οι δυνάμεις αυτές είναι κατά πολύ ισχυρότερες από τις δυνάμεις βαρύτητας και γι' αυτό οι αεροκυκλώνες μπορούν να συγκρατήσουν σωματίδια με μικρότερη διάμετρο από αυτά που συγκρατούν οι θάλαμοι βαρύτητας. Οι αεροκυκλώνες συνήθως αποτελούνται από ένα κατακόρυφο κυλινδρικό δοχείο που το κάτω μέρος του καταλήγει σε μια κωνική χοάνη (Σχήμα 4.2.5α). Τα αέρια απόβλητα εισέρχονται εφαπτομενικά στο πάνω μέρος του δοχείου και οδηγούνται με σπειροειδείς κινήσεις προς τα κάτω, με αποτέλεσμα να ασκείται μία εξωτερική περιδίνηση (vortex). Όταν το ρεύμα των αποβλήτων εισέλθει στο κωνικό τμήμα του κυκλώνα ο αέρας υφίσταται ανάκρουση και αλλαγή πορείας σχηματίζοντας μια ανερχόμενη εσωτερική δίνη. Κάτω από την επίδραση των φυγόκεντρων δυνάμεων που τους ασκούνται, τα σωματίδια προσκρούουν στα τοιχώματα του κυκλώνα, δημιουργούνται ευρύτερες συσσωματώσεις οι οποίες και συνεχίζουν την πορεία τους προς τα κάτω ώσπου τελικά καταλήγουν στο συλλέκτη που βρίσκεται στο κάτω μέρος του κωνικού τμήματος του κυκλώνα. Η απόδοση ενός αεροκυκλώνα εξαρτάται από το μέγεθος των φυγόκεντρων δυνάμεων που ασκούνται στα σωματίδια. Η αποκλειστική χρήση κυκλώνων δεν επαρκεί συνήθως για τον καθαρισμό αέριων ρευμάτων έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ρυθμίσεις σχετικά με τα ανώτερα επιτρεπτά όρια ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Λόγω όμως του χαμηλού τους κόστους και της εύκολης συντήρησής τους, είναι ιδανικοί σαν προ-καθαριστήρες σε διαδικασίες καθαρισμού που χρησιμοποιούν πιο εκλεπτυσμένες και δαπανηρές μεθόδους, όπως σακκόφιλτρα ή ηλεκτροστατικά φίλτρα.

4.2.2.1.1.1 Σχεδιασμός κυκλώνων

Το μέγεθος των φυγόκεντρων δυνάμεων που ασκούνται στα σωματίδια εξαρτάται από τη μάζα των σωματιδίων, την ταχύτητα των αερίων αποβλήτων μέσα στον κυκλώνα και τη διάμετρο του κυκλώνα, όπως φαίνεται και από την εξίσωση:

$$F_c = M_p \frac{v_i^2}{R} \quad (4.9)$$

όπου F_c η φυγόκεντρος δύναμη (N),

M_p η μάζα των σωματιδίων (kg)

v_i^2/R η φυγόκεντρος επιτάχυνση (m/s^2) με

v_i ταχύτητα των σωματιδίων και

R ακτίνα του κυκλώνα (m).

Από την εξίσωση αυτή φαίνεται ότι η φυγόκεντρος δύναμη, και συνεπώς η απόδοση του κυκλώνα, αυξάνει με μείωση της ακτίνας του κυκλώνα. Μείωση της ακτίνας του κωνικού τμήματος του κυκλώνα οδηγεί και σε μείωση της απόστασης που τα σωματίδια πρέπει να διανύσουν μέχρι να καταλήξουν στο συλλέκτη. Κυκλώνες μεγάλης διαμέτρου, ίσης με 1m, (κυκλώνες τυπικής απόδοσης) έχουν ικανοποιητική απόδοση για σωματίδια με διάμετρο 40 - 50 μ m, ενώ για σωματίδια διαμέτρου κοντά στα 20 μ m η απόδοση πέφτει στο 50%. Οι κυκλώνες υψηλής απόδοσης, με διάμετρο <23 cm (συνήθως 15 - 23cm), παρουσιάζουν καλές αποδόσεις για σωματίδια διαμέτρου 15 - 20 μ m και αποδόσεις γύρω στο 80% για σωματίδια μικρότερα των 10 μ m. Η απόδοση πολλαπλών κυκλώνων που λειτουργούν σε παραλληλία φτάνει ως και 90% για σωματίδια με διάμετρο 5 - 10 μ m. Οι πολύ μικροί κυκλώνες συχνά αντιμετωπίζουν προβλήματα φθοράς των τοιχωμάτων λόγω της υψηλής ταχύτητας και των τριβών που αναπτύσσονται, καθώς και απόφραξης όταν το ρυπαντικό φορτίο (σωματίδια) είναι πολύ υψηλό.

Ο υπολογισμός της απόδοσης του κυκλώνα για σωματίδια διαφορετικών διαμέτρων είναι αρκετά σύνθετη διαδικασία. Για το λόγο αυτό ως σωματίδια αναφοράς λαμβάνονται συνήθως τα σωματίδια εκείνης της διαμέτρου που κατακρατούνται με απόδοση 50%. Το μέγεθος των σωματιδίων αυτών δίδεται από την εξίσωση του Lapple:

$$d_{50} = \left(\frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot u_i \cdot \rho_p} \right)^{1/2} \quad (4.10)$$

Όπου d_{50} η διάμετρος των σωματιδίων που κατακρατούνται με απόδοση 50% (m),

μ το ιξώδες των αερίων αποβλήτων (kg/m-s),

b η διάμετρος της εισόδου του κυκλώνα (m),

N_e ο αριθμός των περιδινήσεων στον εξωτερικό έλικα του κυκλώνα,

u_i η ταχύτητα εισόδου των αερίων αποβλήτων (m/s) και

ρ_p η πυκνότητα των στερεών σωματιδίων (kg/m³).

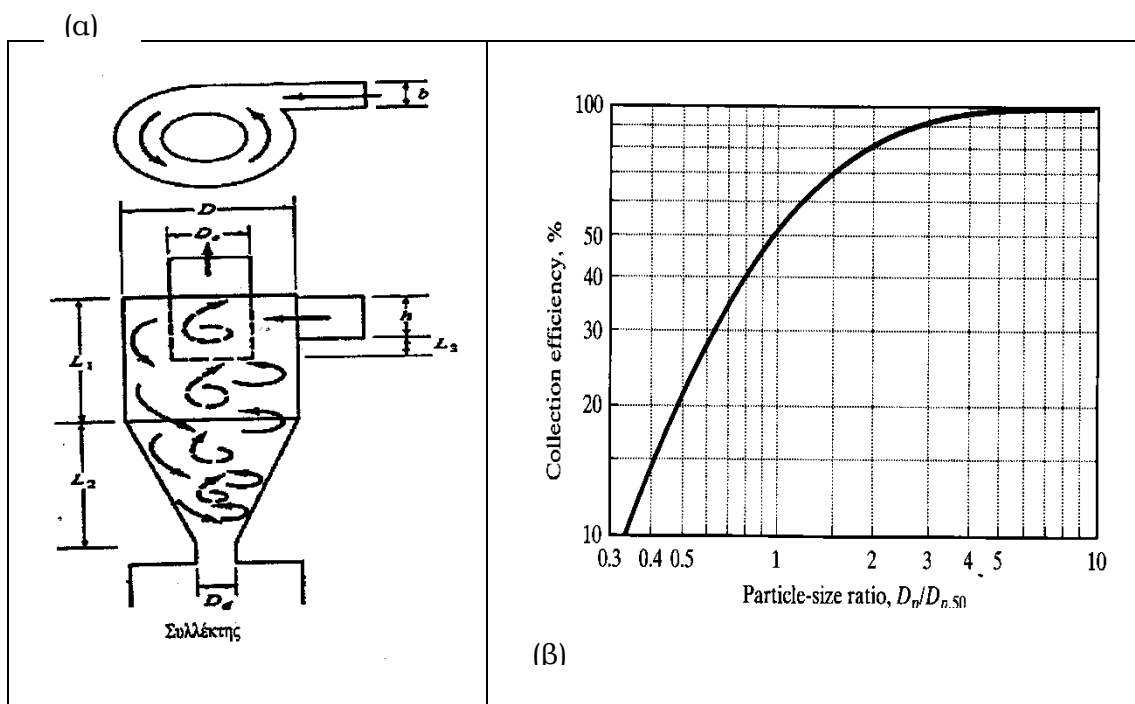
Πίνακας 4.2.3 Κριτήρια επιλογής μεθόδου ελέγχου αιωρούμενων σωματιδίων.

Μέθοδος	Μέγεθος Σωματιδίων	Απόδοση (%)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Θάλαμοι καθίζησης	> 50 μm	< 50	Χαμηλό κόστος	Μέτριας αποτελεσματικότητας, ιδιαίτερα για μικρά σωματίδια
Κυκλώνες	5 - 25 μm	50 – 90	Χαμηλό κόστος κεφαλαίου. Λειτουργία και σε υψηλές θερμοκρασίες. Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης καθώς δεν περιλαμβάνουν κινητά τμήματα.	Χαμηλές αποδόσεις. Υψηλό κόστος λειτουργίας λόγω της υψηλής πτώσης πίεσης.
Σακκόφιλτρα	<1 μm	>99	Εξαιρετικά υψηλή απόδοση, ακόμα και για πολύ μικρά σωματίδια. Κατάλληλα για πολλά διαφορετικά είδη σκόνης. Σχεδιαστική διαρρύθμιση που επιτρέπει την επεξεργασία αερίων ρευμάτων ευρείας κλίμακας ογκομετρικής παροχής. Σχετικά χαμηλές πιέσεις.	Υψηλό κόστος. Μεγάλες απαιτήσεις χώρου. Λειτουργία μόνο σε συνθήκες ξηρασίας. Ευαισθησία των υφασμάτων έναντι υψηλών θερμοκρασιών και παρουσίας διαβρωτικών χημικών ουσιών. Κίνδυνος φωτιάς ή έκρηξης.
Υγροί καθαριστήρες (α) Πύργοι ψεκασμού (β) Υδροκυκλώνες (γ) Venturi	>10 μm >2.5 μm >0.5 μm	<80 <80 <99	Υψηλές αποδόσεις με ταυτόχρονη κατακράτηση μέρους των αερίων ρύπων. Επεξεργασία εύφλεκτης και εκρηκτικής σκόνης σχετικά ακίνδυνα. Δυνατότητα επεξεργασίας ομίχλων. Ταυτόχρονη ψύξη των θερμών αερίων. Εξουδετέρωση διαβρωτικών αερίων και σκόνης.	Πολύ υψηλό κόστος λειτουργίας λόγω της υψηλής πτώσης πίεσης. Απαιτήση για διάθεση της υγρής λάσπης που παράγεται. Κίνδυνος καταστροφών από διάβρωση. Απαιτήση για προστασία απέναντι σε φαινόμενα ψύξης. Πιθανόν τα απαέρια να χρειαστούν θέρμανση προς αποφυγή δημιουργίας ορατού πλουμίου. Πιθανή μόλυνση των συλλεγομένων σωματιδίων με αποτέλεσμα να μην είναι ανακυκλώσιμα. Πρόβλημα μόλυνσης από το παραγόμενο υγρό.
Ηλεκτρόφιλτρα	<1 μm	95-99	Επεξεργασία μεγάλου όγκου αερίων με μικρή πτώση πίεσης. Πολύ υψηλές αποδόσεις ακόμα και για πολύ μικρά σωματίδια. Δυνατότητα ξηρής συλλογής χρησίμων υλών ή υγρής συλλογής αιθάλης και ομίχλης. Λειτουργία σε ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών. Χαμηλό κόστος λειτουργίας, όταν δεν απαιτείται πολύ υψηλή απόδοση.	Υψηλό κόστος κεφαλαίου. Σχετικά άκαμπτα σε αλλαγές των συνθηκών λειτουργίας. Μη δυνατότητα ελέγχου αερίων ρύπων. Μεγάλες απαιτήσεις χώρου. Πιθανότητα αποτυχίας στην περίπτωση σωματιδίων με πολύ υψηλή ηλεκτρική αντίσταση.

(β)

Σχεδιαστικές παράμετροι κυκλώνα τυπικής απόδοσης:

Διάμετρος κυκλώνα	D
Μήκος κυλίνδρου	$L_1 = 2D$
Μήκος κώνου	$L_2 = 2D$
Διάμετρος εξόδου	$D_e = D/2=h$
Ύψος εισόδου	$h = D/2$
Διάμετρος εισόδου (πλάτος)	$b=D/4=L_3=D_d$
Διάμετρος εξόδου σωματιδίων	$D_d = D/4=b=L_3$
Μήκος αγωγού εξόδου των αερίων	$L_3+h = 5D/8$
Αριθμός περιδινήσεων	$N_e = (L_1 + L_2/2)/h$



Σχήμα 4.2.5. (α) Αεροκυκλώνας συμβατικών διαστάσεων με τα χαρακτηριστικά του, (β) Διάγραμμα απόδοσης αεροκυκλώνα με βάση τις σχετικές διαστάσεις των σωματιδίων

Η απόδοση κατακράτησης για σωματίδια μικρότερης ή μεγαλύτερης διαμέτρου μπορεί να υπολογιστεί από τον λόγο της διαμέτρου τους προς την d_{50} (Σχήμα 4.2.5β). Οι Theodore και DePaola (1980) προσάρμοσαν στην παραπάνω καμπύλη μια αλγεβρική σχέση, καθιστώντας τον υπολογισμό της απόδοσης πιο εύκολο και ακριβή:

$$n_j = \frac{1}{1 + (d_{50}/\bar{d}_{pj})^2} \quad (4.11)$$

όπου n_j η απόδοση του κυκλώνα για σωματίδια συγκεκριμένης ομάδας
 $\overline{d_{pj}}$ η χαρακτηριστική διάμετρος των σωματιδίων της ομάδας αυτής.

Η ολική απόδοση του κυκλώνα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$n_o = \sum n_j \cdot m_j \quad (4.12)$$

όπου n_o η ολική απόδοση του κυκλώνα και

m_j το ποσοστό, κατά βάρος, των σωματιδίων συγκεκριμένης ομάδας.

Γενικά, υψηλές αποδόσεις επιτυγχάνονται όταν το ρεύμα αερίου εισέρχεται με μεγάλη ταχύτητα στον κυκλώνα. Ταυτόχρονα, όμως, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η δημιουργούμενη πτώση πίεσης. Καθώς αυξημένη πτώση πίεσης μέσα στον κυκλώνα συνεπάγεται αύξηση και του έργου του ανεμιστήρα, κατά το σχεδιασμό θα πρέπει να αναζητείται η βέλτιστη λύση, ισοσταθμίζοντας τους δύο αυτούς παράγοντες.

Πίνακας 4.2.4 Αδιάστατες σχεδιαστικές παράμετροι για κυκλώνες
εφαπτομενικής εισόδου

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τυπικής απόδοσης	Χαμηλής απόδοσης	Υψηλής απόδοσης
D	Διάμετρος κυκλώνα	1,0	1,0	1,0
h	Ύψος εισόδου	0,5	0,75	0,5
b	Διάμετρος εισόδου	0,25	0,375	0,2
L ₃ +h	Μήκος εξόδου	0,625	0,875	0,5
D _e	Διάμετρος εξόδου	0,5	0,75	0,5
L ₁	Μήκος κυλίνδρου	2,0	1,5	1,5
L ₂	Μήκος κώνου	2,0	2,5	2,5

Υπάρχουν πολλά μοντέλα για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης μέσα στον κυκλώνα. Το απλούστερο και, ταυτόχρονα αποδεκτής ακρίβειας, είναι αυτό που προτείνουν οι Shepherd και Lapple:

$$H_v = K \cdot \frac{h \cdot b}{D_e^2} \quad (4.13)$$

όπου H_v η πτώση πίεσης (αδιάστατο), εκφρασμένη σε αριθμούς πιεζομετρικού ύψους ταχύτητας εισαγωγής και

K σταθερά η οποία εξαρτάται από την διάταξη του κυκλώνα και τις συνθήκες λειτουργίας του.

Θεωρητικά η τιμή του K μπορεί να ποικίλλει. Όμως, στην περίπτωση ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και για τυπικούς κυκλώνες με εφαπτομενική είσοδο του αέρα, οι τιμές του K είναι στο διάστημα 12 – 18. Ο Licht (1984) συστήνει τιμή της σταθεράς K ίση με 16 και κρίνει τα αποτελέσματα της εφαρμογής της παραπάνω απλής εξίσωσης πολύ ικανοποιητικά.

Η υπολογιζόμενη παραπάνω πτώση πίεσης μετατρέπεται σε στατική πτώση πίεσης με τη χρήση της εξίσωσης:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot v_i^2 \cdot H_v \quad (4.14)$$

όπου Δp η πτώση πίεσης (N/m²) και

ρ_g η πυκνότητα του αερίου (kg/m³).

Η πτώση πίεσης στους κυκλώνες συνήθως ποικίλλει από 250 - 4000 Pa (N/m²).

Τέλος, από την πτώση πίεσης μπορεί να υπολογιστεί ο απαιτούμενος ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας:

$$\frac{dw_f}{dt} = Q \cdot \Delta p \quad (4.15)$$

όπου $\frac{dw_f}{dt}$ ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας (W) και

Q η ογκομετρική παροχή του αερίου (m³/s).

Ο σχεδιασμός συστημάτων κυκλώνων αποτελεί ένα συμβιβασμό ανάμεσα σε τρεις παράγοντες: την απόδοση, την απώλεια ενέργειας και το μέγεθος του κυκλώνα. Μία δόκιμη μεθοδολογία σχεδιασμού κυκλώνων είναι η χρήση διαδικασίας δοκιμής-σφάλματος. Αρχικά επιλέγεται τιμή για τη διάμετρο του κυκλώνα. Στη συνέχεια υπολογίζεται η d_{50} και η συνολική απόδοση. Εάν η απόδοση είναι πολύ χαμηλή, επιλέγεται μικρότερη διάμετρος και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία. Εφόσον η απόδοση είναι ικανοποιητική, ελέγχεται η πτώση πίεσης. Εάν αυτή είναι πολύ υψηλή, θα πρέπει είτε να επιλεγεί διαφορετικός τύπος κυκλώνα ή να μοιραστεί η ροή του αερίου σε δύο παράλληλους κυκλώνες.

Άσκηση 4.2

Αέρια απόβλητα με ρυθμό ροής 8m³/s καθαρίζονται από κυκλώνα συμβατικών διαστάσεων (βλέπε Σχήμα 4.2.5a). Η διάμετρος του κυκλώνα είναι 2m, και η θερμοκρασία του αέρα 77°C. Να υπολογιστεί η απόδοση του κυκλώνα για σωματίδια πυκνότητας 1,6g/cm³ και διαμέτρου 9μm.

Λύση

Αρχικά υπολογίζουμε την d_{50} .

Από το Error! Unknown switch argument.α έχουμε: $b = D/4 = 0,5\text{m}$, $h = D/2 = 1,0\text{m}$ και $N_e = 6$.

Η επιφάνεια εισόδου είναι: $A = h \cdot b = 0,5\text{m}^2$

$v_i = Q/A = (8\text{m}^3/\text{s})/0,5\text{m}^2 = 16\text{m/s} = 960\text{m/min}$

(Η ταχύτητα εισόδου συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 15-30 m/s.)

Στους 77°C είναι $\mu = 2,1 \cdot 10^{-5}\text{kg/m-s}$

Από την εξίσωση του Lapple:

$$d_{50} = \left(\frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot v_i \cdot \rho_p} \right)^{1/2} = \left(\frac{9 \cdot 0,5 \cdot 2,1 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 16 \cdot 1600} \right)^{1/2} \text{ m} = 9,9 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 9,9 \mu\text{m}$$

$$n = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_p} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{9,9 \mu\text{m}}{9 \mu\text{m}} \right)^2} = 0,45$$

η απόδοση είναι 45%.

Άσκηση 4.3

Ρεύμα αέρα, με ρυθμό ροής $150 \text{ m}^3/\text{min}$, θερμοκρασίας $T = 350 \text{ K}$ και πίεσης $P = 1 \text{ atm}$, περιέχει σωματίδια πυκνότητας 1600 kg/m^3 και με την κατανομή μεγέθους που δίνεται παρακάτω. Υπολογίστε την ολική απόδοση κυκλώνα τυπικής απόδοσης και διαμέτρου 1 m .

Μέγεθος σωματιδίων (μm)	ποσοστό κατά βάρος (%)
0 – 2	1
2 – 4	9
4 – 6	10
6 – 10	30
10 – 18	30
18 – 30	14
30 – 50	5
50 – 100	1

Δίνεται επίσης το ιξώδες του αέρα $\mu_g = 0,075 \text{ kg/m}\cdot\text{h}$.

Λύση

Για κυκλώνα τυπικής απόδοσης:

$$h = \frac{D}{2} = 0,5 \text{ m}, \quad b = \frac{D}{4} = 0,25 \text{ m}, \quad N_e = 6$$

Η ταχύτητα εισόδου του αέρα ισούται με:

$$v_i = \frac{Q}{h \cdot b} = \frac{150 \text{ m}^3/\text{min}}{0,5 \text{ m} \cdot 0,25 \text{ m}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 20 \text{ m/s}$$

Από την εξίσωση του Lapple υπολογίζεται η d_{50} :

$$d_{50} = \left(\frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot v_i \cdot \rho_p} \right)^{1/2} = \left(\frac{9 \cdot 0,075 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{h}} \cdot \frac{\text{h}}{3600 \text{ s}} \cdot 0,25 \text{ m}}{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1/2} = 6,23 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 6,23 \mu\text{m}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την απόδοση για τα σωματίδια διαφορετικών μεγεθών, από την εξίσωση (4.11). Ως χαρακτηριστικό μέγεθος χρησιμοποιείται ο αριθμητικός μέσος κάθε διαστήματος. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι υπολογισμοί:

j	Πεδίο μεγέθους (μm)	$\overline{d}_{pj}$ (μm)	$d_{50} / \overline{d}_{pj}$	n_j	m_j (%)	$n_j m_j$ (%)
1	0 – 2	1	6,24	0,03	1	0,03
2	2 – 4	3	2,08	0,19	9	1,69
3	4 – 6	5	1,25	0,39	10	3,9
4	6 – 10	8	0,779	0,62	30	18,7
5	10 – 18	14	0,445	0,83	30	25,0
6	18 – 30	24	0,260	0,94	14	13,1
7	30 – 50	40	0,156	0,98	5	4,9
8	50 – 100	75	0,083	0,99	1	<u>1</u>
						68,32

Επομένως, η συνολική απόδοση ισούται με:

$$n_o = \sum_{j=1}^8 n_j \cdot m_j = 68,32\%$$

4.2.2.1.2 Σακκόφιλτρα

Τα σακκόφιλτρα (fabricfilters ή baghousefilters) είναι ειδικά φίλτρα για τη συλλογή ξηρών σωματιδίων. Κατά τη διέλευση του αερίου ρεύματος, τα σωματίδια δεσμεύονται πάνω στην εσωτερική ή εξωτερική επιφάνεια του σακκόφιλτρου, δημιουργώντας ένα στρώμα σωματιδίων, το οποίο στη συνέχεια λειτουργεί ως φίλτρο για την περαιτέρω συλλογή σωματιδίων μικρότερης διαμέτρου. Τα σακκόφιλτρα είναι κατασκευασμένα συνήθως από ύφασμα, αλλά μπορούν να κατασκευαστούν και από άλλα υλικά (Πίνακας 4.2.5). Το υλικό που επιλέγεται για την κατασκευή των φίλτρων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ρεύματος των αερίων αποβλήτων, όπως είναι ο όγκος τους, η οξύτητά τους και η θερμοκρασία τους. Τα σακκόφιλτρα μπορούν να συλλέγουν το μεγαλύτερο ποσοστό σωματιδίων με μέγεθος έως 0,5 μm και αρκετά μεγάλο ποσοστό σωματιδίων με μέγεθος έως 0,1 μm . Επειδή μπορούν να καθαρίσουν μεγάλους όγκους αερίων αποβλήτων από σωματίδια διαφόρων διαμέτρων με σχετικά υψηλή ταχύτητα, τα σακκόφιλτρα χρησιμοποιούνται σε πολλές βιομηχανίες όπως χυτήρια, τσιμεντάδικα, χαλυβουργεία και αλευρόμυλοι. Η ταχύτητα φιλτραρίσματος κυμαίνεται από 0,46 έως 4,6m/min.

Καθώς τα σωματίδια κατακρατούνται πάνω στο φίλτρο, οι δίοδοι σταδιακά κλείνουν και η πτώση πίεσης αυξάνει, με αποτέλεσμα να αυξάνει και το λειτουργικό κόστος. Πριν η πτώση πίεσης γίνει πολύ μεγάλη, τα φίλτρα πρέπει να καθαριστούν από το στρώμα των σωματιδίων. Συνήθως ο καθαρισμός γίνεται με:

1. μηχανικό περιοδικό τίναγμα των φίλτρων (Shaker) ή

2. αναστροφή του αέριου ρεύματος(ReverseAir).

Η εφαρμογή νέων ανθεκτικών υλικών από συνθετικές ίνες επέτρεψε τη δημιουργία ενός 3^{ου} τύπου σακκόφιλτρων με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα για τον καθαρισμό της εξωτερικής τους επιφάνειας, λύνοντας έτσι ένα από τα βασικά τους προβλήματα, αφού τα κατακρατημένα σωματίδια συσσωρεύονται και αποφράσσουν τις διόδους των φίλτρων. Αυτά είναι τα σακκόφιλτρα τύπου παλμικών ακροφυσίων(Pulse-jet).

Πίνακας 4.2.5 Θερμοκρασιακή και χημική αντοχή συνήθων υφασμάτων

Υφασμα	Μέγιστη θερμοκρασία (°F)*	Χημική αντοχή	
		Οξέα	Βάσεις
Dynel	160	καλή	καλή
Βαμβάκι	180ανεπαρκής	καλή	
Μαλλί	200	καλή	ανεπαρκής
Nylon	200	ανεπαρκής	καλή
Πολυπροπυλένιο	200	άριστη	άριστη
Orlon	260	καλή	επαρκής
Dacron	275	καλή	επαρκής
Nomex	400	επαρκής	καλή
Teflon	400	άριστη	άριστη
Γυαλί	550	καλή	καλή

* (1°F = 1,8°C + 32)

4.2.2.1.2.1 Μηχανισμοί λειτουργίας σακκόφιλτρων

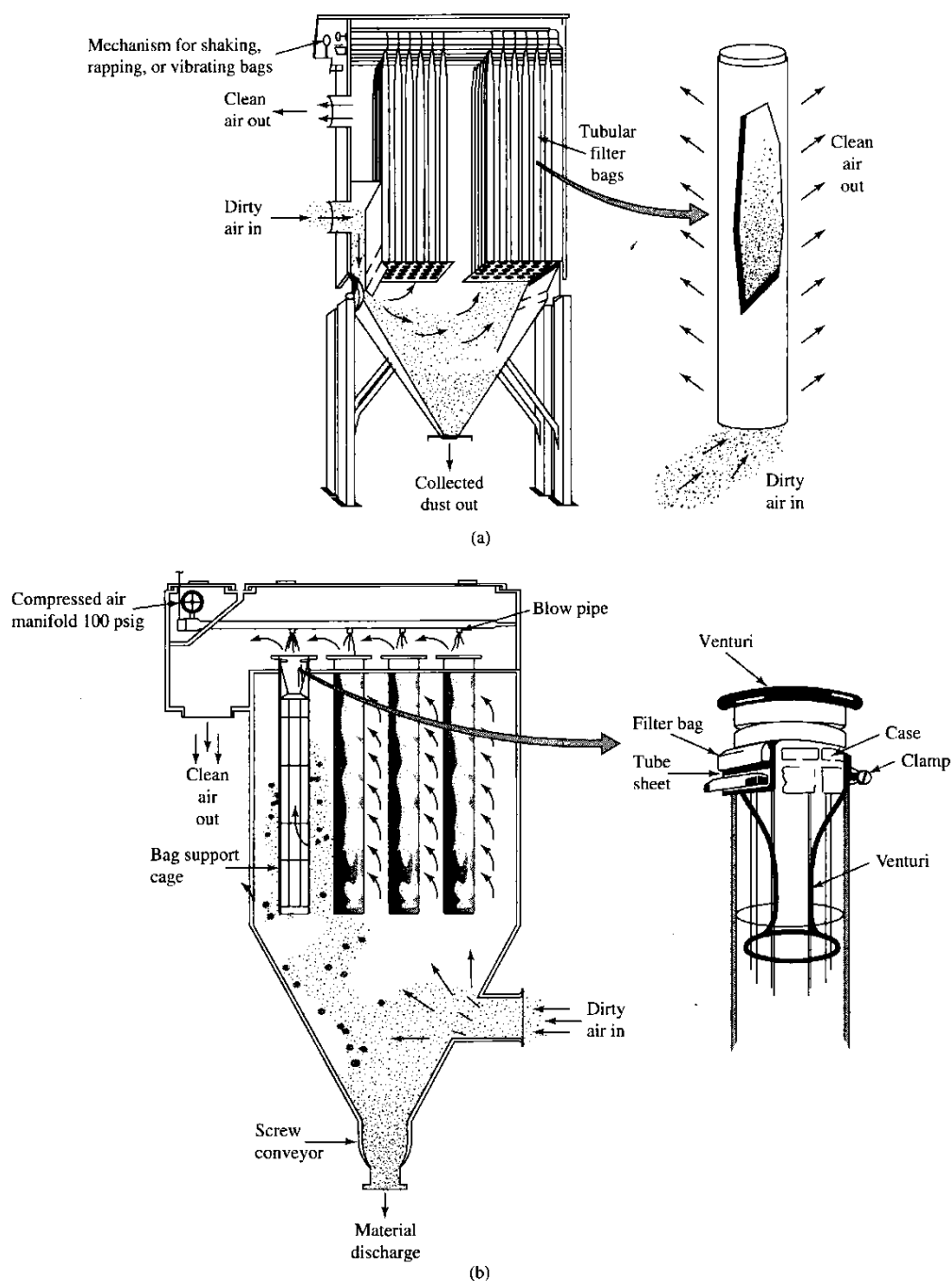
Οι κυριότεροι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται κατά τη λειτουργία των σακκόφιλτρων είναι οι ακόλουθοι:

A. Κατακάθιση λόγω βαρύτητας: Τα σωματίδια δεν ακολουθούν το ρεύμα των αερίων και κατακάθονται λόγω του βάρους τους.

B. Πρόσκρουση λόγω αδράνειας: Τα σωματίδια προσκρούουν πάνω στις ίνες του φίλτρου και συγκρατούνται (για σωματίδια διαμέτρου πάνω από 1μm).

Γ. Ανάσχεση: Όταν η απόσταση ανάμεσα στις ίνες και τις ρευστοδυναμικές γραμμές που ακολουθούν τα σωματίδια είναι μικρότερη από τη διάμετρο των σωματιδίων, αυτά παρεμποδίζονται και κατακρατούνται στις ίνες του φίλτρου.

Δ. Ηλεκτροστατική καθίζηση: Τα σωματίδια έχουν αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο από τις ίνες του φίλτρου και έτσι έλκονται και κατακρατούνται. Σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμόζεται ηλεκτροστατικό πεδίο στα φίλτρα για αποτελεσματικότερη συγκράτηση των σωματιδίων.

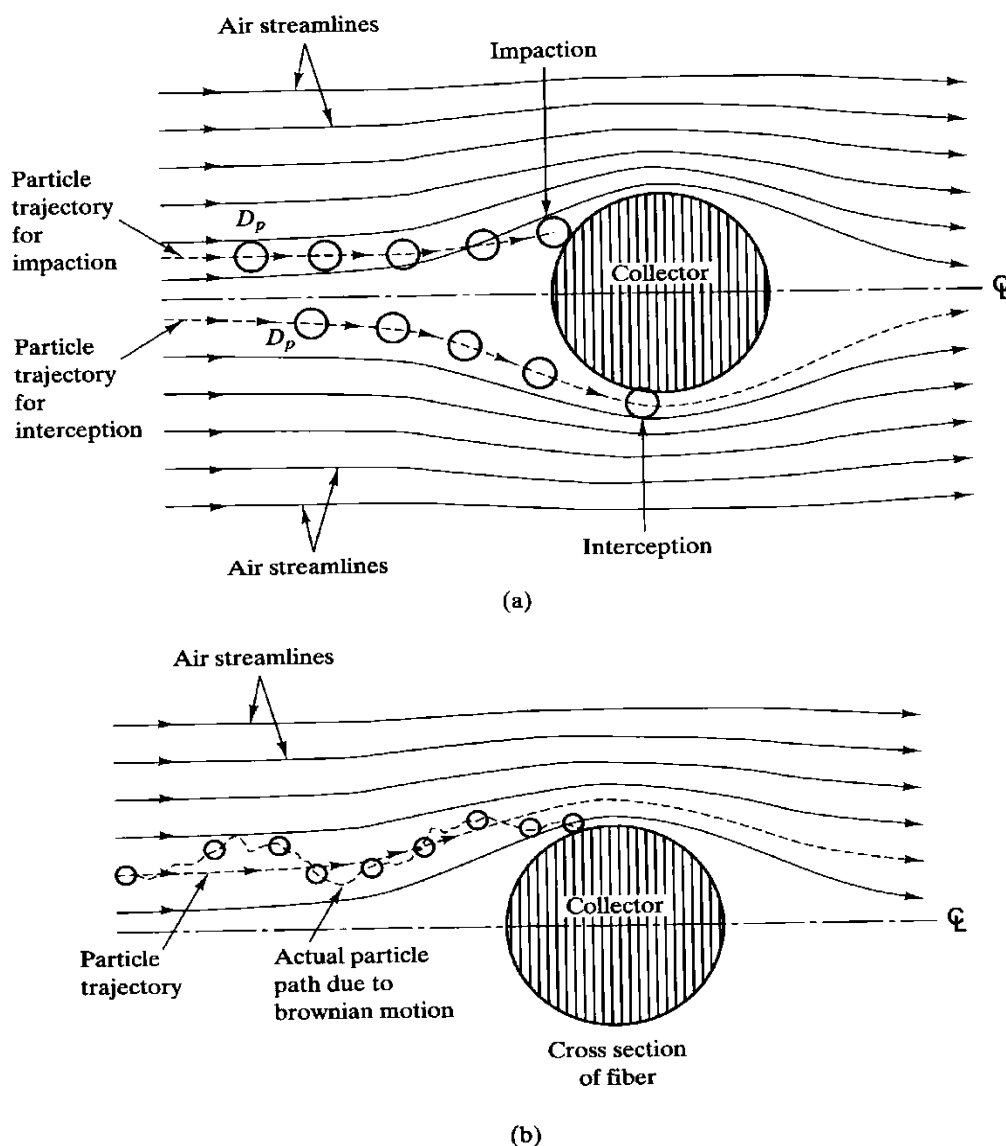


Σχήμα 4.2.6 (a) Σακκόφιλτροτινάγματος (Shaker) και (b) Σακκόφιλτροπαλμικών ακροφυσίων (Pulse-jet)

Ε. Διάχυση: Τα σωματίδια με πολύ μικρή διάμετρο ($<0,5\mu\text{m}$) υπόκεινται σε κινήσεις Brown και έτσι στην ακανόνιστη κίνησή τους είναι πιθανόν να πέσουν πάνω στις ίνες και να συγκρατηθούν.

ΣΤ. Κοσκίνιση: Ο μηχανισμός αυτός αφορά τα σωματίδια που έχουν τέτοια διάμετρο ώστε να μην μπορούν να περάσουν ανάμεσα από τις ίνες του φίλτρου.

Στο Σχήμα 4.2.7 παρουσιάζεται η κίνηση ρευστού που περιέχει σωματίδια γύρω από στάσιμο σώμα (όπως είναι η ίνα υφάσματος ενός φίλτρου). Όταν το κινούμενο ρευστό πλησιάζει το σώμα, οι γραμμές ροής του ρευστού παρεκκλίνουν γύρω από το αντικείμενο αυτό. Τα σωματίδια που περιέχονται μέσα στο ρευστό δεν ακολουθούν ακριβώς τις γραμμές ροής, καθώς έχουν την τάση να συνεχίσουν να κινούνται στις αρχικές τους τροχιές λόγω αδράνειας. Εφόσον τα σωματίδια παρουσιάζουν αρκετή αδράνεια και βρίσκονται αρκετά κοντά στο στάσιμο σώμα, θα προσκρούσουν επάνω του με αποτέλεσμα να συλλεγούν από αυτό.



Σχήμα 4.2.7 Μηχανισμοί κατακράτησης σωματιδίων στα φίλτρα: α) Πρόσκρουση λόγω αδράνειας και Ανάσχεση και β) Διάχυση.

4.2.2.1.2.2 Σχεδιασμός σακκόφίλτρων

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος σακκόφίλτρων διαφέρει από τις άλλες μεθόδους ως προς το ότι η απόδοση του συστήματος δεν αποτελεί σχεδιαστικό πρόβλημα. Ο λόγος είναι ότι ένα σωστά σχεδιασμένο και σωστά συντηρημένο σύστημα

σακκόφιλτρων, το οποίο λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές του, συλλέγει σωματίδια διαμέτρων μικρότερων του 1 μm μέχρι και μερικών εκατοντάδων μm με απόδοση μεγαλύτερη από 99%. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος σακκόφιλτρων, επομένως, περιλαμβάνει τη βέλτιστη επιλογή της ταχύτητας φιλτραρίσματος v_f έτσι ώστε να εξισορροπηθούν το κόστος κεφαλαίου (που σχετίζεται με το μέγεθος των σακκόφιλτρων) με το κόστος λειτουργίας (που σχετίζεται με την πτώση πίεσης σε αυτά).

Η ταχύτητα φιλτραρίσματος (μέση ταχύτητα εισόδου του αερίου στο φίλτρο) είναι ίση με το λόγο του ρυθμού ροής του αερίου προς την καθαρή επιφάνεια του φίλτρου:

$$v_f = \frac{Q}{A} \quad (4.16)$$

όπου v_f η ταχύτητα φιλτραρίσματος (m/min),
 Q ο ρυθμός ροής του αερίου (m³/min) και
 A η καθαρή επιφάνεια υφάσματος (m²).

Στους Πίνακες 4.2.6 και Πίνακας 4.2.7 αναγράφονται οι μέγιστες ταχύτητες φιλτραρίσματος ανάλογα με το είδος των σωματιδίων και με το σύστημα σακκόφιλτρων.

Πίνακας 4.2.6 Μέγιστες ταχύτητες φιλτραρίσματος για σακκόφιλτρα τινάγματος (Shaker) και αναστροφής αέρα (ReverseAir)

Είδος σωματιδίων	Μέγιστη ταχύτητα Φιλτραρίσματος (m/min)
Ενεργός άνθρακας, Μαύρος άνθρακας Απορρυπαντικά, Ατμοί μετάλλων	0,46
Οξείδιο του αλουμινίου, Άνθρακας, Λιπάσματα, Γραφίτης, Σιδηρομεταλλεύματα Ασβέστης, Χρωστικές ουσίες, Ιπτάμενη τέφρα, Βαφές	0,61
Αλουμίνιο, Άργιλος, Κωκ, Κάρβουνο, ΚακάοΟξείδιο του μολύβδου, Mica, Σάπωνες, Ζάχαρη, Τάλκης	0,69
Βωξίτης, Κεραμικά, Μεταλλεύματα Χρωμίου, Άλευρα, Πυρόλιθος, Γυαλί, Γύψος, Πλαστικά, Τσιμέντο	0,76
Αμιάντος, Ασβεστόλιθος, Χαλαζίας, Οξείδιο του πυριτίου	0,84
Σπόροι δημητριακών, Μάρμαρο, Γη διατόμων, Αλάτι	0,91 – 0,99
Δέρμα, Χαρτί, Φύλλα καπνού, Ξύλο	1,07

Πίνακας 4.2.7 Μέγιστες ταχύτητες φιλτραρίσματος για σακκόφιλτρα με παλμικά ακροφύσια (Pulse-Jet).

Είδος σωματιδίων	ταχύτητα Φιλτραρίσματος m/min)
Άνθρακας, Γραφίτης, Ατμοί μεταλλουργίας, Σάπωνες,	1,5 – 1,8
Απορρυπαντικά, Οξείδιο του ψευδαργύρουΤσιμέντο (κοινό), Άργιλος (κοινή),Πλαστικά, Χρωστικές ουσίες, Άμυλο, Ζάχαρη, Ψευδάργυρος (μεταλλικός)	2,1 – 2,4
Οξείδιο του αλουμινίου, Σκόνες τσιμέντου, Άργιλος(επεξεργασμένη), Ασβέστης, Ασβεστόλιθος, Γύψος, Mica, Χαλαζίας, Σόγια, Τάλκης	2,7 – 3,4
Κακάο, Σοκολάτα, Αλεύρι, Σπόροι, Σκόνη δέρματος, Πριονίδι, Φύλλα καπνού	3,7 – 4,3

Σημείωση: Εάν το φορτίο είναι πολύ μεγάλο ή τα σωματίδια πολύ μικρά, οι παραπάνω τιμές θα πρέπει να μειωθούν κατά 0,3m/min.

4.2.2.1.2.3 Υπολογισμός πτώσης πίεσης

Η πτώση πίεσης σε ένα φίλτρο αυξάνει με το χρόνο, την ταχύτητα v του απαερίου και τη συγκέντρωση των σωματιδίων c_0 .

Η ολική πτώση πίεσης μέσω του φίλτρου και του στρώματος των σωματιδίων που δημιουργείται για χρόνο λειτουργίας t ισούται τελικά με:

$$\Delta p_{ολ} = \Delta p_{φιλ} + \Delta p_{στρ} = K_1 \cdot v + K_2 \cdot c_0 \cdot v^2 \cdot t \quad (4.17)$$

όπου K_1 και K_2 σταθερές.

Τιμές της K_1 μπορούν να δοθούν από τους κατασκευαστές των φίλτρων ή από πειραματικά δεδομένα. Ο Calvert (1984) προτείνει την τιμή $K_1 = 350 \text{ N} \cdot \text{min} \cdot \text{m}^{-3}$ σε περίπτωση έλλειψης τέτοιων δεδομένων.

Η K_2 ονομάζεται *ειδική αντίσταση του στρώματος των σωματιδίων στο φίλτρο* (dustcake) και συνήθως εκφράζεται σε s^{-1} . Οι τιμές της K_2 ποικίλλουν και ακριβείς τιμές για κάθε περίπτωση μπορούν να ληφθούν μόνο από πειραματικά δεδομένα. Στον Πίνακα 4.2.8 δίδονται τυπικές τιμές για τη σταθερά K_2 για διαφορετικά είδη σωματιδίων.

Πίνακας 4.2.8 Τυπικές τιμές της ειδικής αντίστασης του στρώματος των σωματιδίων (K_2) για διαφορετικά είδη σωματιδίων.

Εφαρμογή	$K_2 (\text{s}^{-1})$
Alumina	$1,89 \cdot 10^3$
Asphalt	$1,70 \cdot 10^4$
Calcium sulfate	$4,02 \cdot 10^3$
Carbon black	$4,93 \cdot 10^5$

Cement	$1,2 - 7,01 \cdot 10^5$
Copper	$1,5 - 6,5 \cdot 10^5$
Dolomite	$6,72 \cdot 10^6$
Electric furnace	$0,45 - 7,14 \cdot 10^6$
Flour	$4,3 \cdot 10^4$
Fly ash	$0,72 \cdot 10^5$
Foundry dust	$6 \cdot 10^3 - 1,210^6$
Gypsum	$0,63 - 1,9 \cdot 10^5$
Iron oxide	$3 \cdot 10^4 - 7,14 \cdot 10^6$
Lead oxide	$5,7 \cdot 10^5$
Lime kiln	$9 \cdot 10^4$
Milk powder	$4,5 \cdot 10^4$
Oats	$1,5 \cdot 10^4$
Pigments	$2,28 - 2,88 \cdot 10^4$
Soap	$1,62 - 3,12 \cdot 10^4$
Tobacco	$3,6 \cdot 10^5$
Zinc	$0,7 - 5,01 \cdot 10^5$
Zinc oxide	$1,84 - 4,0 \cdot 10^5$

Τα σακκόφιλτρα με παλμικά ακροφύσια, λόγω ακριβώς του τρόπου καθαρισμού τους που διαρκεί κάθε φορά 30-100 milliseconds, είναι συνεχούς λειτουργίας και δε χρειάζονται ανεξάρτητα διαμερίσματα.

Τα σακκόφιλτρα τινάγματος και αναστροφής αέρα κατασκευάζονται αποτελούμενα από αρκετά ανεξάρτητα διαμερίσματα. Για λόγους συντήρησης (καθαρισμού των σάκων από τα συλλεγόμενα σωματίδια) ένα κάθε φορά διαμέρισμα τίθεται εκτός γραμμής λειτουργίας για ένα χρονικό διάστημα t_c (χρόνος καθαρισμού / συντήρησης ενός διαμερίσματος). Στον Πίνακα 4.2.9 αναγράφεται ο αριθμός διαμερισμάτων ενός συστήματος σακκόφιλτρων ως συνάρτηση της καθαρής επιφάνειας υφάσματος των φίλτρων.

Πίνακας 4.2.9 Αριθμός διαμερισμάτων συναρτήσει της καθαρής επιφάνειας υφάσματος

Καθαρή επιφάνεια υφάσματος (m²)	Αριθμός διαμερισμάτων
0.1 – 400	2
400 – 1100	3
1100 – 2300	4 - 5
2300 – 3700	6 - 7
3700 – 5600	8 - 10
5600 – 7400	11 - 13

7400 – 10200	14 - 16
10200 – 13900	17 - 20
> 13900	> 20

Σημείωση: Η καθαρή επιφάνεια υφάσματος ισούται με τον λόγο της ογκομετρικής παροχής προς την ταχύτητα φιλτραρίσματος και αντιστοιχεί σε εκείνα τα τμήματα της επιφάνειας των φίλτρων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, με εξαίρεση αυτά που δε λειτουργούν λόγω συντήρησης.

Εάν υπάρχουν N διαθέσιμα διαμερίσματα σακκόφιλτρων σε όλη την εγκατάσταση (ένα baghouse) ο συνολικός χρόνος φιλτραρίσματος t_f για ένα διαμέρισμα πριν αυτό σταματήσει για τον επόμενο καθαρισμό του (αφού ήδη έχουν υποστεί καθαρισμό διαδοχικά όλα τα υπόλοιπα διαμερίσματα) θα είναι:

$$t_f = t_c \cdot (N - 1) \quad (4.18)$$

Ο χρόνος καθαρισμού κάθε διαμερίσματος t_c μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως 5 min ενώ ο συνολικός χρόνος λειτουργίας ενός διαμερίσματος μεταξύ δύο διαδοχικών καθαρισμών του t_f κυμαίνεται από 30 min έως 2 h.

Ο καθορισμός του χρονικού κύκλου καθαρισμού και λειτουργίας κάθε διαμερίσματος του σακκόφιλτρου αποτελεί σημαντική σχεδιαστική παράμετρο. Με καθορισμένο καταρχήν τον αριθμό διαμερισμάτων ο μηχανικός πρέπει να επιλέξει χρονικό κύκλο ισορροπώντας μεταξύ της μέγιστης αποδεκτής $\Delta p_{ολ}$ και της αναμενόμενης φυσικής φθοράς των σάκων από το συχνό καθαρισμό.

Άσκηση 4.4

Υπολογίστε την απαιτούμενη επιφάνεια υφάσματος συστήματος σακκόφιλτρων τινάγματος (Shaker), το οποίο επεξεργάζεται 1100m³/min αέρα που περιέχει σκόνη βιομηχανικής αλεύρου. Καθορίστε επίσης τον αριθμό των διαμερισμάτων καθώς και τον αριθμό των σάκων που χρειάζονται, εάν γνωρίζετε ότι κάθε σάκος έχει μήκος 2,4m και διάμετρο 0,15m.

Λύση

Από τον Error! Unknown switch argument. βλέπουμε ότι η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα φιλτραρίσματος για τα σακκόφιλτρα τινάγματος στην περίπτωση αλεύρου είναι:

$$v = 0,76\text{m}/\text{min}$$

Επομένως, η καθαρή επιφάνεια του υφάσματος του φίλτρου ισούται με:

$$A = Q/v = (1100\text{m}^3/\text{min})/(0,76\text{m}/\text{min}) = 1447\text{m}^2$$

Βάσει του Πίνακα 4.2.9 και για 1447m² καθαρή επιφάνεια υφάσματος, επιλέγεται η χρήση 5 διαμερισμάτων, με 290m² στο καθένα. Η επιφάνεια κάθε σάκου ισούται με:

$$\pi \cdot d \cdot l = \pi \cdot 0,15\text{m} \cdot 2,4\text{m} = 1,13\text{m}^2$$

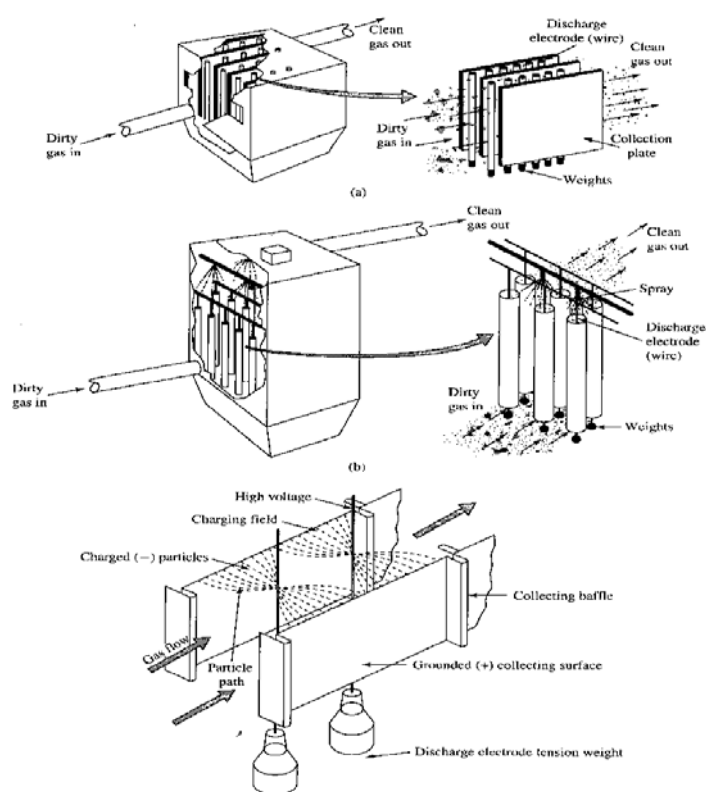
Άρα, ο απαιτούμενος αριθμός σάκων είναι:

$$N = (1447\text{m}^2)/(1,13\text{m}^2) = 1280 \text{ σάκοι}$$

Τοποθετούμε 256 σάκους σε κάθε διαμέρισμα.

4.2.2.1.3 Ηλεκτροστατικά φίλτρα

Τα ηλεκτρόφιλτρα ή ηλεκτροστατικά φίλτρα ή ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (electrostatic precipitators) κατακρατούν τα αιωρούμενα σωματίδια ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Είναι ιδιαίτερος κατάλληλος για την κατακράτηση υγρών σωματιδίων. Θεωρούνται ως η πιο αποτελεσματική μέθοδος κατακράτησης σωματιδίων, αλλά έχουν πολύ μεγάλο κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Τα ηλεκτρόφιλτρα αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια (Error! Unknown switch argument.). Το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι συνήθως ένα λεπτό σύρμα και ονομάζεται ηλεκτρόδιο εκκένωσης. Το θετικό ηλεκτρόδιο έχει μεγάλη επιφάνεια και έχει συνήθως σχήμα πλάκας ή κυλίνδρου (σωλήνα). Το ηλεκτρόδιο αυτό ονομάζεται ηλεκτρόδιο συλλογής. Στην περίπτωση φίλτρων ενός σταδίου ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια αναπτύσσεται ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο (20000 – 90000V). Όταν τα αέρια απόβλητα βρεθούν μέσα στο πεδίο αυτό, τα αέρια μόρια φορτίζονται αρνητικά (μέσω σπινθήρα κορώνας) και κατευθύνονται προς το ηλεκτρόδιο συλλογής, συμπαρασύροντας και αιωρούμενα σωματίδια πάνω στα οποία προσκολλούνται φορτίζοντας τα αρνητικά. Τα φορτισμένα σωματίδια υπό την επίδραση του πεδίου προσκολλούνται στο ηλεκτρόδιο συλλογής. Στη συνέχεια τα σωματίδια αποφορτίζονται και συλλέγονται με κατάλληλη μέθοδο.



Σχήμα 4.2.8 Σχηματική παράσταση ηλεκτροστατικών φίλτρων, με ηλεκτρόδιο συλλογής τύπου πλάκας (a, c) και τύπου κυλίνδρου (b)

Τα ηλεκτρόφιλτρα διακρίνονται σε ενός σταδίου και δύο σταδίων. Στα ηλεκτρόφιλτρα ενός σταδίου – που είναι και τα πιο κοινά στις βιομηχανικές εφαρμογές – οι διαδικασίες ιονισμού και συλλογής των σωματιδίων

συνδυάζονται σε ένα στάδιο. Στα ηλεκτρόφιльтра δύο σταδίων υπάρχει ένα στάδιο ιονισμού το οποίο ακολουθείται από ένα στάδιο συλλογής σωματιδίων, σε διαφορετικά τμήματα της συσκευής και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα συστήματα airconditioning των κτιρίων.

Σημαντική για τη λειτουργία των ηλεκτρόφιλτρων είναι η διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη συλλογή των αιωρούμενων σωματιδίων από το ηλεκτρόδιο συλλογής. Μετά την αποφόρτισή τους, τα σωματίδια συλλέγονται είτε με δόνηση ή περιοδικό κύπημα του ηλεκτροδίου συλλογής από ειδικό σφυρί, είτε με έκπλυση του ηλεκτροδίου με νερό, όταν τα συλλεγόμενα σωματίδια είναι σε υγρή κατάσταση, π.χ. αιωρούμενα σταγονίδια θειικού οξέος. Η δεύτερη τεχνική χρησιμοποιείται περισσότερο όταν τα ηλεκτρόδια συλλογής είναι τύπου κυλίνδρου (σωλήνα), με το σύρμα του ηλεκτροδίου εκκένωσης στο κέντρο τους.

Τα ηλεκτρόφιльтра είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά για την κατακράτηση σωματιδίων διαφόρων μεγεθών, ακόμα και για πολύ μικρά σωματίδια, έχουν πολύ μικρή πτώση πίεσης και μπορούν να χειριστούν μεγάλο όγκο αερίων αποβλήτων (25 ως 1000 m³/s). Μπορούν να λειτουργούν συνεχώς με λίγη συντήρηση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο όξινων και αλκαλικών ουσιών, αλλά όχι και για τον έλεγχο εκρηκτικών ουσιών. Το κόστος εγκατάστασης είναι υψηλό και συνήθως απαιτούν πολύ χώρο για βιομηχανικές χρήσεις. Χρησιμοποιούνται στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, καθώς και στις βιομηχανίες τσιμέντων, υαλουργίας, χαρτιού, χημικών κ.α. Ο Πίνακας 4.8 δείχνει χαρακτηριστικές τιμές της απόδοσης ενός ηλεκτρόφιλτρου για σωματίδια διαφόρων μεγεθών.

4.2.2.1.3.1 Σχεδιασμός ηλεκτροστατικών φίλτρων

Κατά το σχεδιασμό ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου σημαντικές παράμετροι είναι οι ειδικές αντιστάσεις του αέρα και των σωματιδίων, καθώς αυτές προσδιορίζουν την ταχύτητα φόρτισης των σωματιδίων και το μέγεθος του δημιουργούμενου δυναμικού του πεδίου. Οι τιμές των ειδικών αντιστάσεων εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και τη χημική σύσταση του προς καθαρισμό ρεύματος.

Η απόδοση ενός ηλεκτρόφιλτρου δίνεται από την εξίσωση Anderson-Deutsch:

$$n = 1 - e^{-\frac{v_{p,op} \cdot A}{Q}} \quad (4.19)$$

όπου n η απόδοση του ηλεκτρόφιλτρου,

Q ο ρυθμός ροής των αερίων αποβλήτων (m³/s),

A η επιφάνεια των ηλεκτροδίων συλλογής (m²)

$v_{p,op}$ η οριακή ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής (m/s).

Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται ευρύτατα για το σχεδιασμό, την ανάλυση και τη σύγκριση απόδοσης των μονάδων. Ισχύει κανονικά μόνο για σωματίδια με κανονικό σχήμα και μέγεθος, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην πράξη. Εκτός από τις παραμέτρους της εξίσωσης αυτής η απόδοση των ηλεκτρόφιλτρων εξαρτάται και από παράγοντες που επηρεάζουν το δυναμικό του πεδίου, όπως είναι η σύσταση των αερίων αποβλήτων, η πυκνότητα των σωματιδίων και η ηλεκτρική αγωγιμότητα των σωματιδίων.

Στην πραγματικότητα, η ταχύτητα κίνησης (v) των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής δεν είναι σταθερή. Η ταχύτητα αυτή καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, και μια απλή εξίσωση για τον υπολογισμό της είναι η ακόλουθη:

$$v = \frac{q \cdot V}{6 \cdot \pi \cdot R \cdot \mu} \quad (4.20)$$

όπου: q το φορτίο των σωματιδίων (C),
 R η ακτίνα των σωματιδίων (m),
 V το δυναμικό του πεδίου (V/m) και
 μ το ιξώδες των αερίων αποβλήτων (kg/m/s).

Η πραγματική ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής κυμαίνεται μεταξύ 0,04 και 0,2m/s, και κατά καιρούς έχουν δημοσιευτεί από διάφορους κατασκευαστές διαστήματα τιμών για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές (Πίνακας 4.2.10).

Η εσωτερική διαρρύθμιση ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου έχει ιδιαίτερη σημασία για τη σωστή λειτουργία του. Στον Πίνακα 4.2.11 δίνονται πληροφορίες για τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού ηλεκτροστατικού φίλτρου κατακράτησης ιπτάμενης τέφρας.

Πίνακας 4.2.10 Πραγματικές ταχύτητες κίνησης σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια σε ηλεκτροστατικά φίλτρα.

Εφαρμογή	Ταχύτητα κίνησης σωματιδίων (cm/s)
Ιπτάμενη τέφρα από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	4,0 – 20,4
Ιπτάμενη τέφρα κονιοποιημένου άνθρακα	10,1 – 13,4
Εργοστάσια χαρτοπολτού και χαρτοποιίας	6,4 – 9,5
Ατμοί θειικού οξέος	5,8 – 7,62
Τσιμέντο (υγρή επεξεργασία)	10,1 – 11,3
Τσιμέντο (ξηρή επεξεργασία)	6,4 – 7,0
Γύψος	15,8 – 19,5
Χυτήρια	1,8
Κλίβανος ανοικτής εστίας	4,9 – 5,8
Υψικάμινος	6,1 – 14,0
Θερμός φώσφορος	2,7
Κλίβανος σπινθήρα (flashroaster)	7,6
Κλίβανος πολλαπλών εστιών	7,9
Σκόνη καταλύτη	7,6
Cupola	3,0 – 3,7

Το συνολικό πλάτος του καθαριστήρα εξαρτάται από το πλήθος των καναλιών που περιλαμβάνει:

$$N_d = \frac{Q}{vdH} \quad (4.21)$$

όπου N_d το πλήθος των καναλιών, ίσο με $n-1$, όπου n ο αριθμός των παράλληλων πλακών,

Q ο συνολικός ρυθμός ροής του αερίου στο φίλτρο (m^3/min),

v η γραμμική ταχύτητα του αερίου μέσα στο φίλτρο (m/min),

d το πλάτος ενός καναλιού (η απόσταση μεταξύ δύο πλακών) (m),

H το ύψος της πλάκας (m).

Το συνολικό μήκος του καθαριστήρα δίνεται από την εξίσωση:

$$L = N_s L_p + (N_s - 1)L_s + L_0 + L_e \quad (4.22)$$

όπου: L το συνολικό μήκος (m),

N_s ο αριθμός των ηλεκτρικών τμημάτων στην διεύθυνση της ροής,

L_p το μήκος της πλάκας (m),

L_s η απόσταση μεταξύ των ηλεκτρικών τμημάτων (m),

L_0 το μήκος του τμήματος εισόδου (m),

L_e το μήκος του τμήματος εξόδου (m).

Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτρικών τμημάτων είναι συνήθως 0,5 – 2m, ενώ το μήκος του τμήματος εισόδου και εξόδου μπορεί να είναι μερικών μέτρων. Τυπικές διαστάσεις των πλακών ηλεκτροστατικού φίλτρου για την απομάκρυνση ιπτάμενης τέφρας είναι 8 – 15m ύψος και 1 – 4m μήκος (στη διεύθυνση της ροής). Το ύψος του καθαριστήρα κυμαίνεται από 1,5 μέχρι 3 φορές το ύψος των πλακών.

Πίνακας 4.2.11 Τυπικές τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού ηλεκτροστατικού φίλτρου κατακράτησης ιπτάμενης τέφρας.

Παράμετρος	Τυπικές τιμές
Οριακή ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων $v_{p,op}$	1 – 10 m/min
Πλάτος καναλιού d	15 – 40 cm
Ειδική επιφάνεια συλλογής (επιφάνεια πλάκας/ρυθμό ροής αερίου)	0,25–2,1 $m^2/(m^3/min)$
Ταχύτητα αερίου v	1,2 – 2,5 m/s
Διαστάσεις καναλιού (συνολικό μήκος/ύψος καναλιού) R	0,5–1,5 (>1 για $n > 99\%$)
Λόγος ισχύος της κορώνας P_c/Q (ισχύς κορώνας/ρυθμό ροής αερίου)	1,75–17,5 $W/(m^3/min)$
Λόγος έντασης ρεύματος της κορώνας I_c/A (ένταση ρεύματος κορώνας/επιφάνεια	50 – 750 $\mu A/m^2$

πλάκας)	
---------	--

Πυκνότητα ισχύος ως προς την ικανότητα αντίστασης (ohm-cm) της τέφρας:

<u>Ικανότητα αντίστασης τέφρας (ohm-cm)</u>	<u>Πυκνότητα ισχύος (W/m²)</u>
10 ⁴ - 10 ⁷	43
10 ⁷ - 10 ⁸	32
10 ⁹ - 10 ¹⁰	27
10 ¹¹	22
10 ¹²	16
10 ¹³	10,8
Επιφάνεια πλάκας ανά ηλεκτρικό τμήμα A _s	460 – 7400 m ²
Πλήθος ηλεκτρικών τμημάτων N _s	
α. Στην διεύθυνση της ροής του αερίου	2 – 8
β. Συνολικά	1-10τμήματα / (1000m ³ /min)

Το πλήθος των ηλεκτρικών τμημάτων του φίλτρου στη διεύθυνση της ροής πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να παρέχει επαρκή επιφάνεια συλλογής, χωρίς να υπερβαίνει όμως κατά πολύ την επιθυμητή τιμή. Ο αριθμός των τμημάτων μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$N_s = \frac{RH}{L_p} \quad (4.23)$$

όπου N_s ο αριθμός των τμημάτων στην διεύθυνση της ροής (ακέραιος),

R ο λόγος του συνολικού μήκους των πλακών προς το ύψος της κάθε πλάκας.

Η πραγματική επιφάνεια συλλογής υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$A_a = 2HL_p N_s N_d \quad (4.24)$$

όπου A_a η πραγματική επιφάνεια συλλογής (m²).

Η κατανάλωση ενέργειας σε ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο σχετίζεται κυρίως με την ενέργεια της κορώνας και, κατά δεύτερο λόγο, με την πτώση πίεσης. Η ισχύς κορώνας που απαιτείται υπολογίζεται από την εξίσωση:

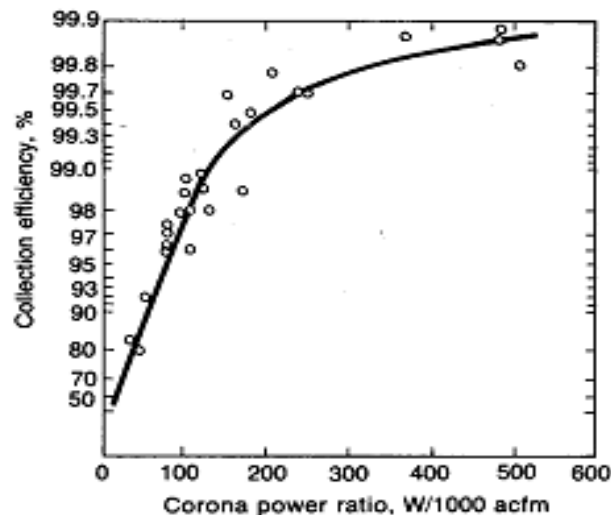
$$n = 1 - e^{(-kP_c/Q)} \quad (4.25)$$

όπου n η απόδοση του φίλτρου,

P_c η ισχύς κορώνας (W),

k μία προσαρμόσιμη σταθερά η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0,5 – 0,7,

Q ο ρυθμός ροής του αερίου (ft³/s). (1m³ = 35,3ft³)



Σχήμα 4.2.9 Απόδοση ηλεκτροστατικού φίλτρου συναρτήσει του λόγου ισχύος κορώνας

Για αποδόσεις μέχρι και 98,5%, έχει αποδειχθεί ότι $k = 0,55$ (για τις μονάδες που δίνονται παραπάνω). Για μεγαλύτερες αποδόσεις, η απαιτούμενη ενέργεια κορώνας βρίσκεται από το Error! Unknown switch argument..

Άσκηση 4.5

Ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο πρόκειται να εγκατασταθεί για την απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων από τα αέρια απόβλητα μονάδας παραγωγής τσιμέντου, η οποία εκπέμπει με ρυθμό 50m³/s. Η ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής υπολογίζεται ίση με 0,12m/s. Να υπολογιστεί η απαιτούμενη επιφάνεια συλλογής του ηλεκτροστατικού φίλτρου (α) για απόδοση 90%, και (β) για απόδοση 99%.

Λύση

Η απόδοση δίνεται από την εξίσωση Anderson-Deutsch:

$$n = 1 - e^{-\frac{v_{p,op} \cdot A}{Q}}$$

(α) Για $n = 90\%$, με αντικατάσταση έχουμε:

$$0,90 = 1 - e^{-\frac{0,12A}{50}}$$

$$-A \frac{0,12}{50} = \ln(1 - 0,90)$$

$$A = -\frac{50}{0,12} \ln(0,10) = -416,7 \ln(0,1) = 959 \text{m}^2$$

(β) Για $n = 99\%$, με αντικατάσταση έχουμε

$$0,99 = 1 - e^{-\frac{0,12A}{50}}$$

$$-A \frac{0,12}{50} = \ln(1 - 0,99)$$

$$A = -\frac{50}{0,12} \ln(0,01) = -416,7 \ln(0,01) = 1919 \text{m}^2 = 2 \cdot 959 \text{m}^2$$

4.2.2.2 Έλεγχος Αέριων Ρύπων

4.2.2.2.1. Πύργοι απορρόφησης (Πλυντρίδες)

Ένας πύργος υγρής προσρόφησης αέριων ρύπων είναι μια συσκευή καθαρισμού αερίων ρευμάτων που βασίζεται στην ικανότητα μεταφοράς (διάλυσης) των αέριων ρύπων σε ένα υγρό ρεύμα που εισάγεται στον πύργο γι' αυτόν τον σκοπό. Η απορρόφηση αυτή μπορεί να είναι είτε φυσική (απλή μεταφορά στην υγρή φάση), είτε χημική (υποβοηθούμενη από αντίδραση του ρύπου με μια χημική ένωση που υπάρχει στην υγρή φάση).

Ο σχεδιασμός των πλυντρίδων βασίζεται στην όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της καμπύλης ισορροπίας υγρού-αερίου του προς απομάκρυνση ρύπου ώστε να μεγιστοποιηθεί η μεταφορά του ρύπου από την αέρια στην υγρή φάση.

Τα πλεονεκτήματα χρησιμοποίησης των πλυντρίδων έναντι άλλων διατάξεων απορρόφησης αέριων ρύπων από αέρια ρεύματα, όπως τα φίλτρα ενεργού άνθρακα, είναι:

- Έχουν χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.
- Τα αιωρούμενα σωματίδια που τυχόν υπάρχουν στο αέριο ρεύμα δεν επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργία τους.
- Τέλος, δεν υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με τη θερμοκρασία και την υγρασία του εισερχόμενου αερίου συστήματος, ενώ δεν απαιτείται ιδιαίτερη συντήρησή τους, μιας και η κατασκευή μιας πλυντρίδας χωρίς κινητά μέρη, είναι πολύ απλή.

4.2.2.2.1.1 Διαλυτότητα των αερίων στα υγρά

Αν παραμείνει μία περιορισμένη μάζα αερίου, με ένα ή πολλά συστατικά, σε επαφή με μία περιορισμένη μάζα υγρού, σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση, για απεριόριστο χρόνο, τότε το διφασικό σύστημα, αργά ή γρήγορα, θα σταθεροποιηθεί και καμία μεταφορά μάζας από φάση σε φάση δεν θα παρατηρείται. Η κατάσταση αυτή της σταθερότητας ονομάζεται κατάσταση ισορροπίας υγρού-αερίου και στην κατάσταση αυτή η συγκέντρωση ενός συστατικού του αερίου στην υγρή φάση ονομάζεται διαλυτότητα του αερίου συστατικού στο συγκεκριμένο υγρό στη συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία. Στην κατάσταση ισορροπίας η διαλυτότητα των αερίων διέπεται από το νόμο του Henry (Henry'slaw):

$$p = K_H \cdot x_{eq} \quad (4.26)$$

όπου x_{eq} το μοριακό κλάσμα ισορροπίας του αερίου συστατικού στην υγρή φάση

K_H σταθερά Henry, (atm)

p η μερική πίεση του αερίου συστατικού στην αέρια φάση (atm)

Η μερική πίεση ενός αερίου που αποτελεί συστατικό ενός μίγματος διαιρούμενη με την ολική πίεση του μίγματος εκφράζει το μοριακό κλάσμα του αερίου στο μίγμα. Είναι προτιμότερο η σταθερά Henry να εκφράζεται αδιάστατα ως λόγος μοριακών κλασμάτων σύμφωνα με τη σχέση:

$$y_{eq} = K_H' \cdot x_{eq} \quad (4.27)$$

όπου K_H' σταθερά Henry, (-)

y_{eq} το μοριακό κλάσμα του αερίου συστατικού στην αέρια φάση.

Η σταθερά Henry εξαρτάται από τη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2.12.

Πίνακας 4.2.12 Η σταθερά του Henry ($\times 10^{-5}$)(atm) διαφόρων αερίων σε σχέση με τη θερμοκρασία

Αέρια	Θερμοκρασία (°C)						
	0	5	10	15	20	25	30
Ακετυλένιο	0,72	0,84	0,96	1,08	1,21	1,33	1,46
Αέρας	0,43	0,49	0,55	0,61	0,66	0,72	0,77
CO ₂	0,73	0,88	1,04	1,22	1,42	1,64	1,86
CO	0,35	0,40	0,44	0,49	0,54	0,58	0,62
H ₂	0,58	0,61	0,64	0,66	0,68	0,70	0,73
Ethane	0,13	0,16	0,19	0,23	0,26	0,30	0,34
H ₂ S	26,8	31,5	36,70	42,30	48,30	54,5	60,9
Methane	0,22	0,26	0,30	0,34	0,38	0,41	0,45
N ₂ O	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26	0,29	0,30
N ₂	0,53	0,60	0,67	0,74	0,28	0,87	0,92
NO ₂	-	1,17	1,41	1,66	1,98	2,25	2,59
O ₂	0,25	0,29	0,33	0,36	0,40	0,44	0,48

Άσκηση 4.6

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα διαλυτότητας του SO₂ σε καθαρό νερό που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα* υπολογίστε τη σταθερά Henry σε ατμοσφαιρική πίεση (760 mmHg) και για θερμοκρασία 40°C.

Μερική πίεση του SO₂ (mmHg) σε υδατικά διαλύματα σε πίεση 760 mmHg

g SO ₂ /100g H ₂ O	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
0,0	-	-	-	-	-	-	-
0,5	21	29	42	60	83	111	144
1,0	42	59	85	120	164	217	281
1,5	64	90	129	181	247	328	426
2,0	86	123	176	245	333	444	581
2,5	108	157	224	311	421	562	739
3,0	130	191	273	378	511	682	-
3,5	153	227	324	447	603	-	-
4,0	176	264	376	518	698	-	-
4,5	199	300	428	588	-	-	-
5,0	223	338	482	661	-	-	-

* Δεδομένα διαλυτότητας λαμβάνονται εφόσον έχει επιτευχθεί ισορροπία

Λύση

Υπολογίζουμε τα μοριακά κλάσματα του SO₂ στην υγρή φάση σύμφωνα με τη σχέση:

$$x = \frac{\text{moles SO}_2 \text{ στο διάλυμα}}{\text{moles SO}_2 \text{ στο διάλυμα} + \text{moles H}_2\text{O}}$$

όπου moles SO₂ στο διάλυμα = c_{SO₂}/64 gSO₂ ανά mole

c_{SO₂} = συγκέντρωση SO₂ στην υγρή φάση = gSO₂/100 g H₂O

moles H₂O = 100 g H₂O/18 g H₂O ανά mole = 5,55 moles

Έτσι π.χ. για διαλυτότητα c_{SO₂} = 1,5 gSO₂/100 g H₂O το μοριακό κλάσμα SO₂ στην υγρή φάση υπολογίζεται:

$$x = \frac{c_{\text{SO}_2}/64}{c_{\text{SO}_2}/64 + 5,55} = \frac{\frac{1,5}{64}}{\frac{1,5}{64} + 5,55} = 0,0042$$

Υπολογίζουμε τα μοριακά κλάσματα του SO₂ στην αέρια φάση σύμφωνα με τη

σχέση:

$$y = \frac{p_{\text{SO}_2}}{p_T}$$

όπου: p_{SO₂} = μερική πίεση του SO₂ στην αέρια φάση (mmHg)

p_T = ολική πίεση = 760 mmHg

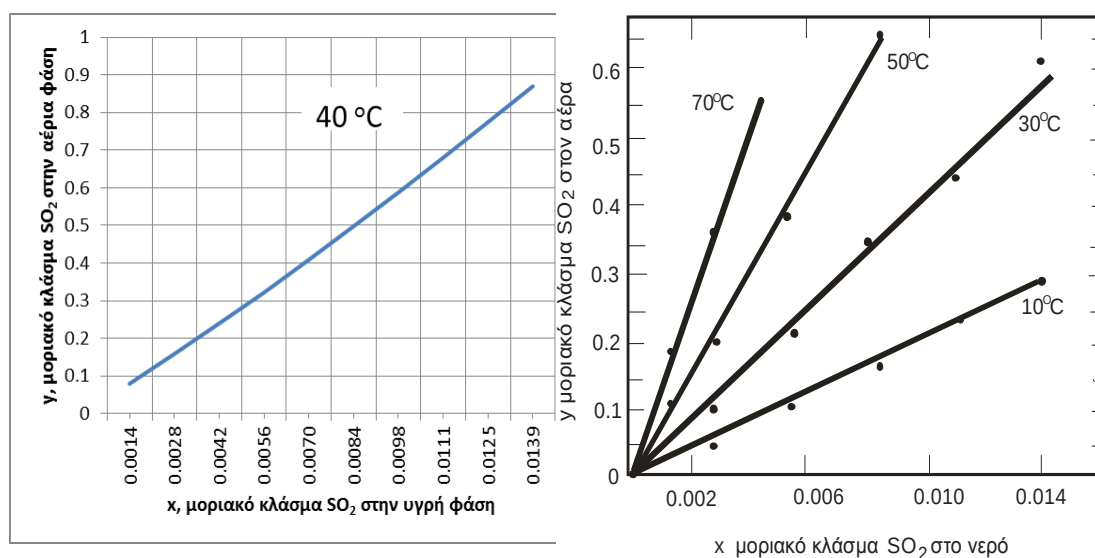
Έτσι π.χ. για διαλυτότητα c_{SO₂} = 1,5 gSO₂/100 g H₂O και 40°C το μοριακό κλάσμα SO₂ στην αέρια φάση υπολογίζεται:

$$y = \frac{181}{760} = 0,238$$

Με τον ίδιο τρόπο συμπληρώνουμε τον παρακάτω πίνακα:

Διαλυτότητα SO ₂ g SO ₂ /100g H ₂ O	Μερική πίεση SO ₂ mmHg	Μοριακό κλάσμα στην υγρή φάση x	Μοριακό κλάσμα στην αέρια φάση y
0,5	60	0,001406	0,078947
1	120	0,002807	0,157895
1,5	181	0,004205	0,238158
2	245	0,005599	0,322368
2,5	311	0,006989	0,409211
3	378	0,008375	0,497368
3,5	447	0,009757	0,588158
4	518	0,011136	0,681579
4,5	588	0,01251	0,773684
5	661	0,013881	0,869737

Σύμφωνα με τη θεωρία του Henry τα σημεία x και y πρέπει να βρίσκονται σε ευθεία γραμμή στο διάγραμμα x-y και η κλίση της γραμμής αυτής προσδιορίζει τη σταθερά Henry H'.



$$\text{κλίση} = H' = \frac{y}{x} = 63,59$$

Καμπύλες ισορροπίας σε διάφορες θερμοκρασίες για ατμοσφαιρική πίεση.

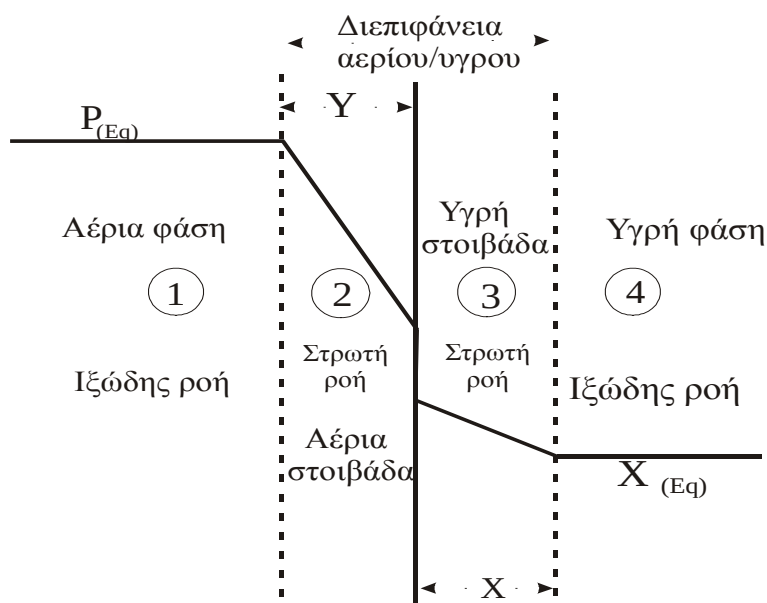
4.2.2.2.1.2 Διαδικασία απορρόφησης αέριων ρύπων σε υγρά

Στη διαλυτότητα των αέριων ρύπων στο νερό βασίζεται ο μηχανισμός απομάκρυνσής τους είτε από την αέρια φάση (έκπλυση) είτε από την υγρή

φάση (απογύμνωση) και οι συσκευές που πραγματοποιούν αυτές τις διεργασίες ονομάζονται πλυντρίδες (scrubbers) ή απογυμνωτές (strippers) αντίστοιχα. Για το σωστό σχεδιασμό τους απαιτείται η ανάπτυξη ενός κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου, το οποίο θα βασίζεται σε μία ικανοποιητική θεωρία μεταφοράς μάζας από την αέρια στην υγρή φάση και αντίστροφα. Η πλέον ικανοποιητική θεωρία που έχει αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι η θεωρία των δύο στοιβάδων (two-film theory, Whitman 1923).

Κατά τη θεωρία αυτή γύρω από τη διεπιφάνεια υγρού-αερίου σχηματίζονται δύο «ακίνητες» στοιβάδες υγρού και αερίου οι οποίες ακολουθούν την κίνηση της διεπιφάνειας και οι οποίες χωρίζουν τη θεωρητική απόσταση που έχει να διανύσει ένα μόριο, για να μεταβεί από τη μία φάση στην άλλη, σε τέσσερις περιοχές. Έτσι η μεταφορά ενός ρύπου από την αέρια στην υγρή φάση και αντίστροφα, σύμφωνα με τη θεωρία των δύο στοιβάδων, μπορεί να παρουσιαστεί ως μία διεργασία τεσσάρων σταδίων. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη διαδικασία προσέγγισης ενός μορίου στη διεπιφάνεια. Κατά το δεύτερο στάδιο, το μόριο πρέπει να περάσει την πρώτη λεπτή «ακίνητη» στοιβάδα και να διεισδύσει στη δεύτερη. Κατά το τρίτο στάδιο, το μόριο πρέπει να περάσει από τη δεύτερη «ακίνητη» στοιβάδα και κατόπιν στο τέταρτο στάδιο να διαχυθεί στην κύρια μάζα του δεύτερου ρευστού.

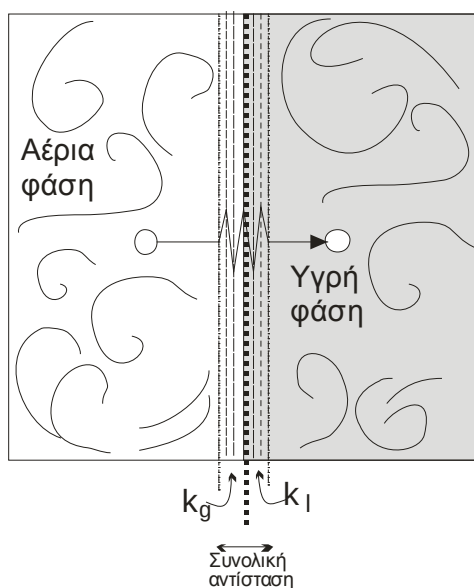
Από τα τέσσερα στάδια το πιο αργό στάδιο καθορίζει και το συνολικό ρυθμό μεταφοράς μάζας. Σε στάσιμες καταστάσεις της κύριας μάζας του αερίου ή του υγρού το αργότερο στάδιο είναι το 1^ο ή το 4^ο αντίστοιχα. Στην περίπτωση που επικρατούν τυρβώδεις καταστάσεις ροής τόσο στην υγρή φάση όσο και στην αέρια τότε αναλαμβάνει τον έλεγχο της συνολικής μεταφοράς μάζας η διεπιφάνεια, δηλαδή ή το 2^ο ή το 3^ο στάδιο.



Σχήμα 4.2.10 Θεωρία δύο στοιβάδων.

Για τα αέρια που διαλύονται ελάχιστα στο υγρό, όπως το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα στο νερό, τότε η διάχυση στην υγρή στοιβάδα γύρω από τη διεπιφάνεια ελέγχει το συνολικό ρυθμό μεταφοράς (3^ο στάδιο), ενώ για τα αέρια που είναι πολύ διαλυτά στο νερό, όπως η αμμωνία, τότε τον έλεγχο της

όλης διεργασίας μεταφοράς τον έχει η στοιβάδα του αερίου γύρω από τη διεπιφάνεια (2^ο στάδιο).



Σχήμα 4.2.11 Αντίσταση κατά την κίνηση ενός μορίου αερίου ρύπου που προσροφάται σ' ένα υγρό

Ο ρυθμός διάχυσης ενός συστατικού Α μέσω της διπλοστοιβάδας δίδεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\dot{N}_A = K_{OG} \cdot (p_{AG} - p_A^*) \quad (4.28)$$

$$\dot{N}_A = K_{OL} \cdot (C_A^* - C_{AL}) \quad (4.29)$$

όπου,

$\dot{N}_A$ = ο ρυθμός μεταφοράς μάζας του συστατικού Α, mol/h/m²

C_A^* = η συγκέντρωση ισορροπίας του συστατικού Α σε συνθήκες λειτουργίας για την p_{AG} ($= p_{AG} / KH'$), mol/L

p_A^* = η μερική πίεση ισορροπίας του συστατικού Α σε συνθήκες λειτουργίας για την C_{AL} ($= KH' \cdot C_{AL}$), atm

K_{OG} = ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας του συστατικού Α στην αέρια στοιβάδα, mol/h·m²·atm

K_{OL} = ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας του συστατικού Α στην υγρή στοιβάδα, L/h·m²

Αν ορίσουμε την ειδική διεπιφάνεια a ως το πηλίκο της διεπιφάνειας ανά μονάδα όγκου του πύργου απορρόφησης, οι συντελεστές μεταφοράς μάζας K_{OG} και K_{OL} αναφέρονται στον όγκο του πύργου απορρόφησης.

Οι δύο αυτές σχέσεις εισάγουν ένα ανώτατο όριο στην ποσότητα του συστατικού Α που μπορεί να απορροφηθεί από την υγρή φάση. Επίσης, ο ρυθμός μεταφοράς μάζας εξαρτάται είτε από τη διαφορά ($p_{AG} - p_A^*$) στην αέρια φάση είτε από τη διαφορά ($c_A^* - c_{AL}$) στην υγρή φάση και η μεγαλύτερη από τις δύο διαφορές καθορίζει και το συνολικό ρυθμό μεταφοράς μάζας.

Οι συνολικοί συντελεστές δίδονται από τις σχέσεις:

$$\frac{1}{K_{OG}} = \frac{1}{k_g} + \frac{K_H''}{k_l} \quad (4.32)$$

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{K_H'' \cdot k_g} + \frac{1}{k_l} \quad (4.33)$$

Οι σχέσεις (4.32) και (4.33) είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό της φάσης που ελέγχει τη συνολική διεργασία της προσρόφησης. Εάν η K_H'' είναι πολύ μικρή (που σημαίνει ότι το αέριο είναι πολύ διαλυτό στο υγρό) τότε $K_{OG} \approx k_g$ δηλαδή η όλη διεργασία ελέγχεται από την αέρια στοιβάδα της διεπιφάνειας και επομένως η αέρια φάση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντίσταση στη μεταφορά της μάζας. Αντιθέτως εάν ένα αέριο έχει περιορισμένη διαλυτότητα, το K_H'' είναι μεγάλο, τότε $K_{OL} \approx k_l$ και η υγρή στοιβάδα της διεπιφάνειας ελέγχει όλη τη διεργασία και επομένως η υγρή φάση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντίσταση στη μεταφορά της μάζας. Τα περισσότερα συστήματα της αέριας ρύπανσης είναι συστήματα που ελέγχονται από την αέρια φάση εφόσον επιλεγούν υγρά που έχουν μεγάλη διαλυτότητα του αερίου ρύπου.

Η προηγούμενη ανάλυση αναφέρεται στη διεπιφάνεια υγρού/αερίου. Αν ορίσουμε την ειδική διεπιφάνεια (a) ως το πηλίκο της διεπιφάνειας ανά μονάδα όγκου του πύργου απορρόφησης, οι συντελεστές μεταφοράς μάζας K_{OGa} , K_{OLa} , k_{ga} και k_{la} αναφέρονται πια στον όγκο του πύργου απορρόφησης. Στην περίπτωση των πύργων με πληρωτικό υλικό, γνωρίζοντας αυτούς τους συντελεστές, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την ειδική επιφάνεια του πύργου (m^2/m^3) που απαιτείται ώστε να πετύχουμε τον επιθυμητό διαχωρισμό. Οι συντελεστές αυτοί προσδιορίζονται είτε εμπειρικά από πιλοτικές μονάδες, είτε μέσω αδιάστατων αριθμών (Reynolds, Schmidt).

Στους παρακάτω Πίνακες (Error! Unknown switch argument.Error! Unknown switch argument.) παρουσιάζονται τιμές των K_{OLa} και K_{OGa} για διάφορα συστήματα υγρού – αερίου.

Πίνακας 4.2.13 Τιμές του K_{OGa} για συστήματα ελεγχόμενα από την αέρια στοιβάδα

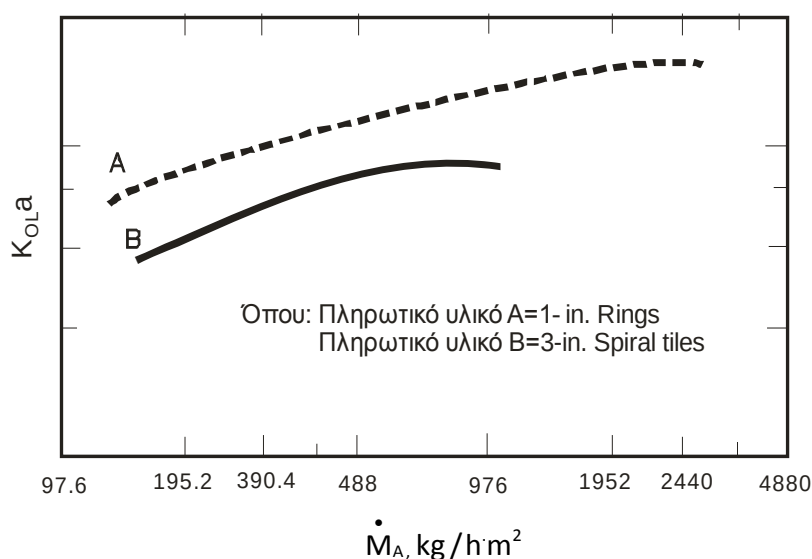
Αέριος ρύπος	Υγρό απορρόφησης	K_{OGa} kg- mol/h/m³/atm
Υδροχλώριο	Νερό	224,25
Υδροφθόριο	Νερό	96,1
Αμμωνία	Αραιό οξύ	208,23
Χλώριο	8% NaOH	172,99
Διοξείδιο του θείου	11% Na ₂ CO ₃	142,56

Πίνακας 4.2.14 Τιμές του K_{OLA} για συστήματα ελεγχόμενα από την υγρή στοιβάδα

Αέριος ρύπος	Υγρό απορρόφησης	K_{OLA} kg-mol/h/m ³ /atm
Διοξείδιο του άνθρακα	4% NaOH	24,03
Υδροθείο	4% NaOH	70,48
Διοξείδιο του θείου	Νερό	35,24
Υδροκυάνιο	Νερό	70,48
Φορμαλδεϋδη	Νερό	70,48
Χλώριο	Νερό	54,46
Βρώμιο	4% NaOH	59,26
Διοξείδιο χλωρίου	Νερό	70,48

Οι τιμές των K_{OLA} και K_{OGA} για το ίδιο σύστημα υγρού-αερίου εξαρτώνται και από το είδος του πληρωτικού υλικού καθώς και από την αέρια επιφανειακή φόρτιση $\dot{M}_A$ (kg/h·m²). Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.12.

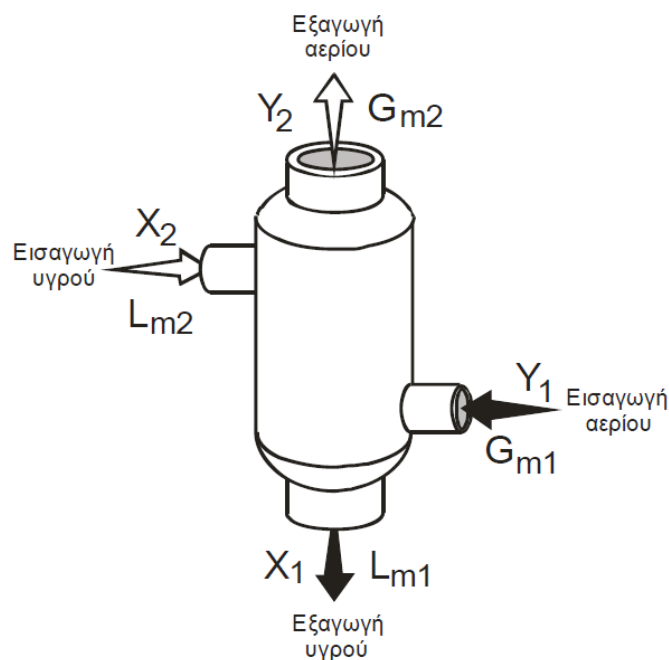
Τέτοια διαγράμματα όπως (Σχήμα 4.2.12) παρέχονται από τους κατασκευαστές των πληρωτικών υλικών των πύργων απορρόφησης.



Σχήμα 4.2.12 Σύγκριση του συνολικού συντελεστή απορρόφησης για δύο διαφορετικά πληρωτικά υλικά στο σύστημα SO₂-νερού (Perry 1973).

4.2.2.2.1.3 Σχεδιασμός πύργων απορρόφησης αέριων ρύπων

Στο Σχήμα 4.2.13 παρουσιάζεται η βασική αρχή λειτουργίας ενός πύργου απορρόφησης κατ' αντιρροή.



Σχήμα 4.2.13 Πύργος απορρόφησης κατ' αντιστροφή (ισοζύγια μάζας σε στήλη απορρόφησης.)

Από τη βάση του πύργου εισάγεται το αέριο που περιέχει τον αέριο ρύπο και από την κορυφή του πύργου ψεκάζεται το υγρό που θα απορροφήσει τον ρύπο. Ο πύργος μπορεί να έχει πληρωτικό υλικό (packed tower) ή να έχει “καμπανάκια” φυσαλίδων (bubble-cup trays) ή οποιονδήποτε άλλο μηχανισμό ο οποίος να εξασφαλίζει μία καλή επαφή αερίου-υγρού.

Γνωρίζοντας την παροχή του αερίου και τη συγκέντρωση του ρύπου σ' αυτό καθώς και τον επιθυμητό καθαρισμό του αερίου, το πρόβλημα του σχεδιασμού μιας στήλης απορρόφησης συνοψίζεται στον υπολογισμό της παροχής του υγρού, του ύψους στήλης καθώς και της διαμέτρου της.

Η πιο συνηθισμένη περίπτωση:

Η παροχή του αερίου G (moles/min) καθώς και η συγκέντρωση του ρύπου στο αέριο (y_1) είναι γνωστά.

Επίσης είναι δεδομένη η επιθυμητή συγκέντρωση του ρύπου στην έξοδο του αερίου (y_2) από την πλυντρίδα.

Η συγκέντρωση x_2 του ρύπου στο εισερχόμενο υγρό (νερό) είναι μηδενική διότι συνήθως χρησιμοποιούμε καθαρό νερό.

Οπότε πρέπει να υπολογίσουμε την ελάχιστη παροχή του νερού.

- Η συγκέντρωση x_1 του ρύπου στο εξερχόμενο υγρό πρέπει να είναι σε ισορροπία με την συγκέντρωση του ρύπου στην αέρια φάση
- Οπότε μπορεί να προκύψει συγκεκριμένα η ελάχιστη παροχή του υγρού από το συνολικό ισοζύγιο:

$$y_1 - y_2 = \frac{L}{G}(x_1 - x_2) \quad (4.34)$$

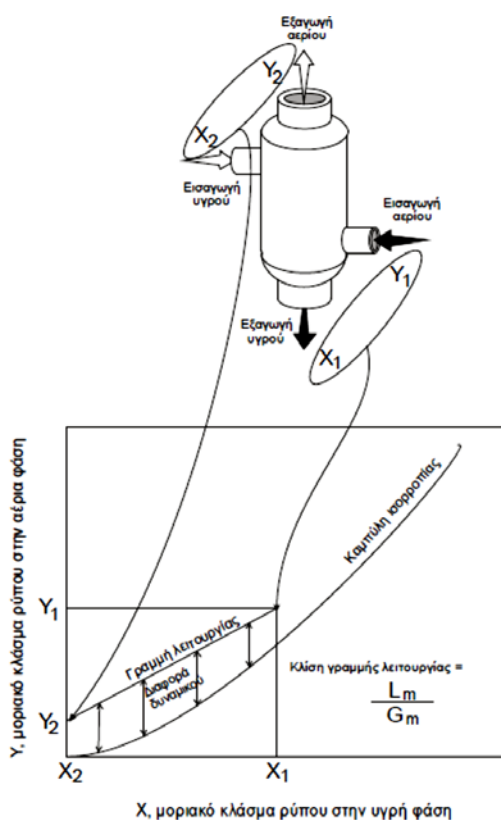
Όπου L η παροχή του υγρού σε moles/min

Για $x_2=0$ έχουμε

$$L_{\min} = \frac{GK'_H}{y_1}(y_1 - y_2) \quad (4.35)$$

Τότε για λόγους ασφάλειας παίρνουμε:

$$L = 1,5L_{\min}$$



Σχήμα 4.2.14 Τυπικό διάγραμμα γραμμής λειτουργίας.

Επειδή θεωρείται ότι η ποσότητα του ρύπου που μεταφέρεται από το αέριο στο υγρό είναι μηδαμινή, οι μοριακές παροχές αερίου G και υγρού L (σε mol/h) παραμένουν σταθερές.

Αν όμως το ποσοστό του ρύπου είναι μεγαλύτερο από 2-3% στην αέρια φάση τότε η υπόθεση αυτή δεν ισχύει.

Ισοζύγιο μάζας σε όγκο dV του πύργου δίνει:

$$d(L \cdot x) = d(G \cdot y) = \alpha \cdot \dot{N}_A \cdot dV \quad (4.36)$$

όπου,

x μοριακό κλάσμα του αέριου ρύπου στην υγρή φάση

y μοριακό κλάσμα του αέριου ρύπου στην αέρια φάση

a διεπιφάνεια ανά μονάδα όγκου πύργου.

Η σχέση (4.34) λόγω των (4.30)-(4.33) μετασχηματίζεται στη σχέση:

$$V = h \cdot A = -\frac{G}{p \cdot K_{OG} \cdot a} \cdot \int_{p_{A1}}^{p_{A2}} \frac{dp_A}{p_A - K_H'' \cdot C_A} = \frac{L}{C_W \cdot K_{OL} \cdot a} \cdot \int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{dC_A}{p_A / K_H'' - C_A} \quad (4.37)$$

όπου V όγκος του πύργου απορρόφησης

h ύψος του πύργου

A επιφάνεια του πύργου

p πίεση του συστήματος

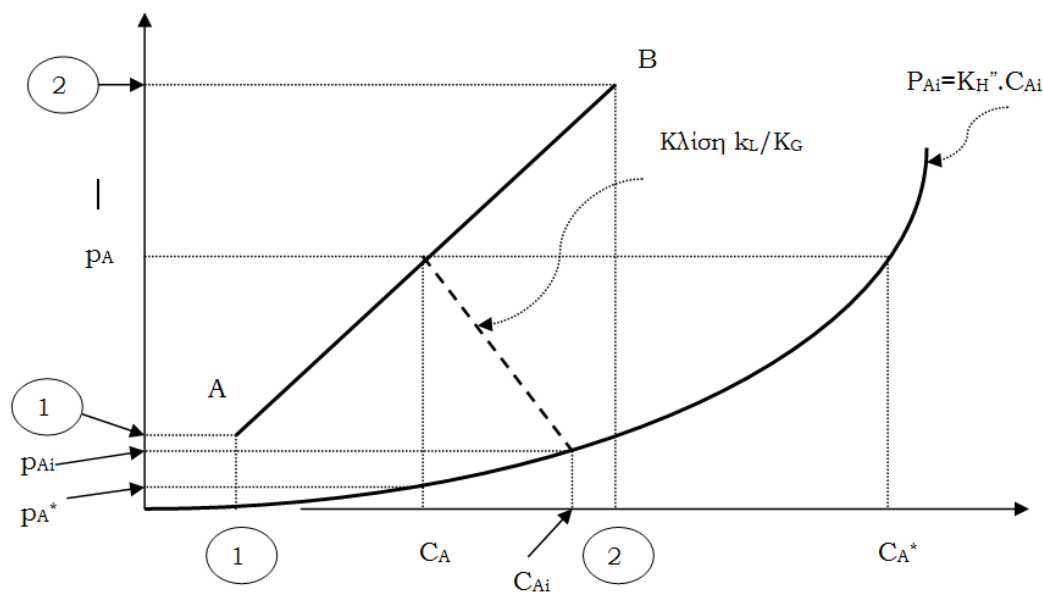
1,2 πυθμένας και κορυφή του πύργου αντίστοιχα

C_W μοριακή συγκέντρωση του νερού (55,5 mol/L).

4.2.2.2.1.4 Υπολογισμός των αναγκών σε παροχή υγρού

Η AB είναι η γραμμή λειτουργίας, με κλίση (L·P)/(G·C_W), και η καμπύλη είναι η γραμμή ισορροπίας (για αραιά συστήματα ευθεία). Για τυχαίο σημείο C_A, p_A βρίσκουμε τα μεγέθη C_A^{*}, C_{Ai}, p_A^{*} και p_{Ai} και υπολογίζουμε τους όρους 1/(p_A - K_H^{''}·C_A) ή 1/(p_A/K_H^{''} - C_A).

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για διάφορες τιμές C_A και p_A υπολογίζουμε γραφικά το ολοκλήρωμα, που δίνει τον όγκο (και το ύψος) του πύργου.



Σχήμα 4.2.15 Γραφικός προσδιορισμός της παροχής του υγρού.

Για γραμμική σχέση ισορροπίας δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$V = h \cdot A = - \frac{G}{p \cdot K_{OG} \cdot a \cdot (1 + K'_H \cdot G/L)} \cdot \ln \frac{y_2 + K'_H \cdot x_1 + K'_H (y_2 - y_1) \cdot G/L}{y_1 + K'_H \cdot x_1} \quad (4.38)$$

Άσκηση 4.7

Υπολογίστε την ελάχιστη απαιτούμενη παροχή καθαρού νερού για την απομάκρυνση 90% του SO₂ από μία ροή αερίου παροχής 40 m³/min που περιέχει 3% SO₂ κατ' όγκο.

Η θερμοκρασία είναι 40°C και η πίεση 760 mm Hg.

Η σταθερά Henry είναι: $K'_H = 62,69 \frac{\text{μοριακή αναλογία SO}_2 \text{ στον αέρα}}{\text{μοριακή αναλογία SO}_2 \text{ στο νερό}}$

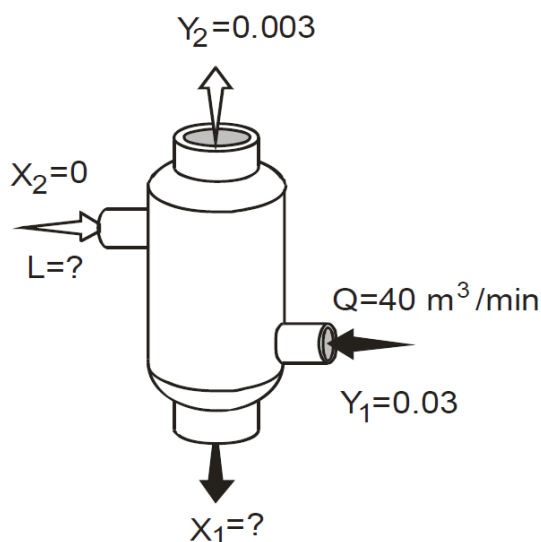
Επίσης αν $K_{OG} a = 100 \text{ kmol}/(\text{h} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{atm})$ βρείτε τον όγκο της πλυντρίδας.

Λύση

Υπολογίζουμε τις μοριακές αναλογίες στην αέρια φάση:

$y_1 = 3\% \text{ SO}_2 \text{ ογκομετρική αναλογία} = 0,03 \text{ μοριακή αναλογία του SO}_2$

$y_2 = (10\%)(y_1) = 0,003 \text{ μοριακή αναλογία του SO}_2$



Η μέγιστη συγκέντρωση του SO₂ στο νερό κατά την έξοδό του από την πλυντρίδα αντιστοιχεί στη συγκέντρωση ισορροπίας.

Η σταθερά Henry είναι: $K'_H = 62,69 \frac{\text{μοριακή αναλογία SO}_2 \text{ στον αέρα}}{\text{μοριακή αναλογία SO}_2 \text{ στο νερό}}$

οπότε $X_1 = \frac{Y_1}{K'_H} = \frac{0,03}{62,69} = 0,000479$

Η ελάχιστη αναλογία υγρού/αερίου υπολογίζεται από τη σχέση 4.36:

$$L_{\min} = \frac{GK'_H}{y_1} (y_1 - y_2)$$

Υπολογίζουμε τη μαζική παροχή G του αερίου προσαρμοσμένη στις συνθήκες λειτουργίας της πλυντρίδας. Υποθέτουμε ότι έχουμε ιδανικό αέριο:

στους 273K είναι 22.4 L/min=0.0224 m³/mole

Η ογκομετρική παροχή του αέρα στους 40°C είναι

$$G = \frac{40 \text{ m}^3 / \text{min}}{0,0224 \text{ m}^3 / \text{mole}} = 1557,2 \text{ mole} / \text{min}$$

Η ελάχιστη απαιτούμενη ροή νερού είναι:

$$L_{\min} = 1557,2 \text{ mole} / \text{min} \cdot (62,69) \cdot \frac{0,03 - 0,003}{0,03} = 87876 \text{ mole} / \text{min}$$

MB_{H2O}=18 και ρ=1kg/L

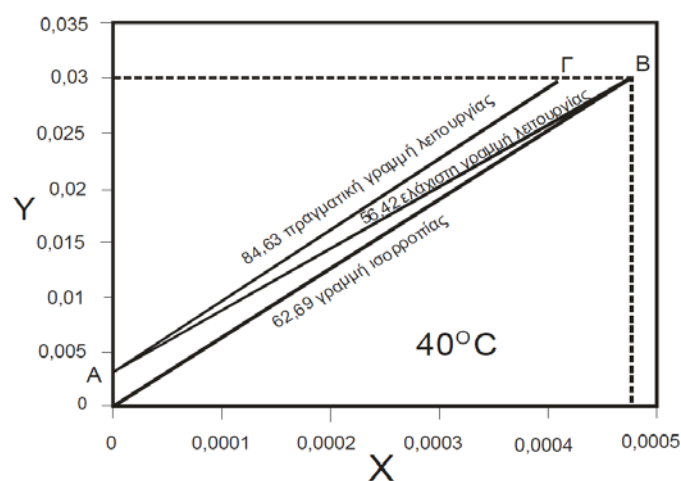
$$L_{\min} = 87876 \text{ mole} / \text{min} \cdot 18 \text{ g} / \text{mole} = 1581,7 \text{ kg} / \text{min}$$

$$L = 1,5L_{\min} = 2372 \text{ L} / \text{min} = 2,3 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O} / \text{min}$$

Η κλίση είναι $\left(\frac{L}{G}\right)_{\min} = \frac{87876}{1557,7} = 56,42$

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{σχεδιασμού}} = 56,42 \cdot 1,5 = 84,63$$

Στο Παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται, γραφικά, η λύση του προβλήματος:



Για να τοποθετήσουμε την πραγματική γραμμή λειτουργίας ΑΓ πολλαπλασιάζουμε την κλίση της ελάχιστης γραμμής λειτουργίας ΑΒ με 1,5.

$$AG = 1,5 AB = 1,5 (56,42) = 84,63.$$

Ο όγκο της πλυντρίδας υπολογίζεται από την σχέση 4.38 όπως δίδεται και παρακάτω:

$$V = h \cdot A = - \frac{G}{p \cdot K_{OG} \cdot a \cdot (1 + K'_H \cdot G/L)} \cdot \ln \frac{y_2 + K'_H \cdot x_1 + K'_H (y_2 - y_1) \cdot G/L}{y_1 + K'_H \cdot x_1}$$

$$V = - \frac{1,5572 \frac{\text{kmole}}{\text{min}}}{1 \text{ atm} \cdot 100 \frac{\text{k mole}}{\text{h m}^3 \text{ atm}} \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot \left(1 + 62,69 \cdot \frac{1}{84,63} \right)} \cdot \ln \frac{0,003 + 62,69 \cdot 0,000479 + 62,69 \cdot (0,003 - 0,03) \cdot 1/84,63}{0,03 + 62,69 \cdot 0,000479} = 0,82 \text{ m}^3$$

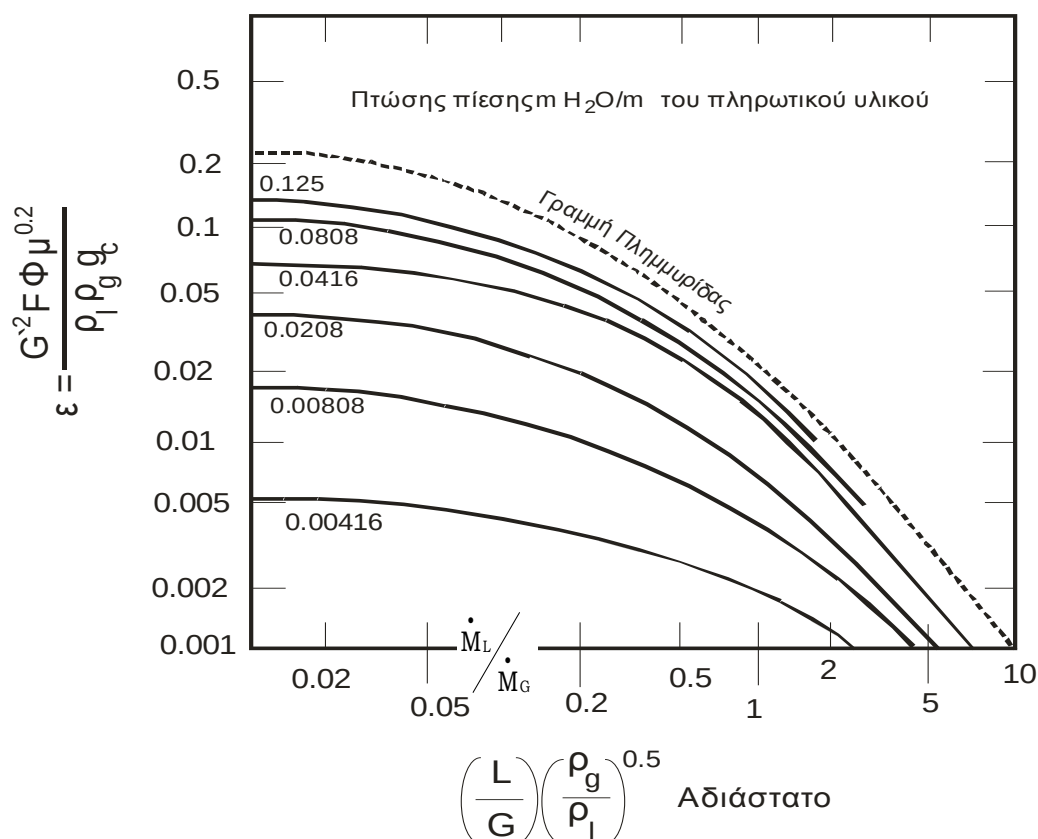
ο όγκος του πύργου απορρόφησης.

4.2.2.2.1.5 Υπολογισμός της διαμέτρου μιας στήλης με πληρωτικό υλικό

Η κύρια παράμετρος που επηρεάζει το μέγεθος της διαμέτρου είναι η ταχύτητα διέλευσης του αερίου που επιτρέπει την εισχώρηση των σταγονιδίων του υγρού στην αέρια ροή. Έχοντας δεδομένη την αναλογία του υγρού/αερίου, σε μια στήλη με πληρωτικό υλικό, όσο ελαττώνεται η διάμετρος της στήλης τόσο η ταχύτητα του αερίου αυξάνεται και από κάποιο σημείο και πέρα η κάθοδος του υγρού, διαμέσου της ελεύθερης επιφάνειας του πληρωτικού υλικού, αρχίζει να παρεμποδίζεται. Το σημείο αυτό αναφέρεται ως σημείο φόρτισης (loading point). Επίσης όσο ελαττώνεται η διάμετρος της στήλης τόσο αυξάνεται και η πτώση πίεσης του διερχόμενου αερίου. Λίγο μετά το σημείο φόρτισης η ελεύθερη επιφάνεια του πληρωτικού υλικού αρχίζει σταδιακά να καλύπτεται με το υγρό και από κάποια διάμετρο και πέρα η κορυφή της στήλης καλύπτεται πλήρως από το υγρό μην επιτρέποντας το επιπλέον προστιθέμενο υγρό να κατρακυλά προς τα κάτω και έτσι εμφανίζεται το φαινόμενο της πλημμυρίδας (flooding). Η ταχύτητα του αερίου όταν εμφανίζεται το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ταχύτητα πλημμυρίδας (flooding velocity). Η ταχύτητα αυτή ορίζει μία οριακή λειτουργία της στήλης και με βάση αυτήν την ταχύτητα διαστασιολογείται η στήλη. Από την άλλη πλευρά, όσο μεγαλώνει η διάμετρος της στήλης τόσο καλύτερα λειτουργεί η στήλη αποφεύγοντας το σημείο πλημμυρίδας αλλά αυξάνεται το κόστος της διεργασίας. Στην πράξη, η διάμετρος μιας στήλης σχεδιάζεται έτσι ώστε η ταχύτητα του αερίου εντός της στήλης να είναι το 50-75% της ταχύτητας πλημμυρίδας. Εννοείται βέβαια ότι η ταχύτητα που επιλέγεται πρέπει να βρίσκεται κάτω και από το σημείο φόρτισης.

Ο υπολογισμός της διαμέτρου μιας στήλης βασίζεται στη χρήση εμπειρικών δεδομένων που είναι διαθέσιμα σε μορφή διαγραμμάτων, όπως αυτό που παρουσιάζεται στο Error! Unknown switch argument. (διάγραμμα Sherwood

(1938)). Στον άξονα των τετμημένων, ο αδιάστατος αριθμός βασίζεται στις φυσικές ιδιότητες και λειτουργικές παραμέτρους των δύο ρευστών ενώ στον άξονα των τεταγμένων εμφανίζονται τόσο οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών όσο και οι ιδιότητες του πληρωτικού υλικού. Με τη χρήση του διαγράμματος Sherwood υπολογίζεται η οριακή τιμή της διαμέτρου της στήλης ώστε να αποφευχθεί η πλημμυρίδα. Οποιαδήποτε μεγαλύτερη διάμετρος ασφαλώς αποτελεί μία λειτουργική διάμετρο.



Σχήμα 4.2.16 Διάγραμμα υπολογισμού πλημμυρίδας και πτώσης πίεσης

Τα μεγέθη του διαγράμματος είναι:

$\dot{M}_{GA}$ παροχή αερίου ανά μονάδα επιφάνειας, g/s·m²

ρ_g πυκνότητα του αερίου, kg/m³

ρ_l πυκνότητα του υγρού, kg/m³

g_c σταθερά βαρύτητας, 9,82 m/s²

F συντελεστής πλήρωσης που εξαρτάται από το είδος του πληρωτικού υλικού

Φ λόγος του ειδικού βάρους του υγρού ως προς το ειδικό βάρος του νερού

μ_l ιξώδες του υγρού.

Στον Error! Unknown switch argument. που ακολουθεί παρουσιάζονται χαρακτηριστικά ευρέως χρησιμοποιούμενων πληρωτικών υλικών.

Πίνακας 4.2.15 Πληρωτικά υλικά.

Πληρωτικό υλικό		Μέγεθος (in.)	βάρος (lb/ft ²)	Ειδική επιφάνει	Κενός χώρος	Συντελεστής F
	Raschig rings (ceramic and steel)	1/2	52	114	65	580
		1	44	58	70	155
		1 1/2	42	36	72	95
	Raschig rings (steel)	1/2 x 1/32 1 x 1/32	77 40	128 63	84 92	300 115
	Berl saddles (ceramic and porcelain)	1/4	55	274	63	900
		1/2	54	155	64	240
		1	48	79	68	110
		2	38	32	75	45
	Intalox saddles (ceramic)	1/4	54	300	75	725
		1/2	45	190	78	200
		1	44	78	77	98
	intalox saddles (plastic)	1 2	6.00 3.75	63 33	91 93	30 20
	Pall rings (plastic)	5/8	7.0	104	87	97
		1	5.5	63	90	52
	Pall rings (metal)	5/8x0.018 1 1/2 x 0.02	38 24	104 39	93 95	73 28
	Telerettes	1	7.5	55	87	40
		2	3.9	38	93	20
		3	5.0	30	92	15

Η πορεία υπολογισμού της διαμέτρου μιας στήλης με πληρωτικό υλικό έχει ως εξής:

1. Υπολογίζουμε την τιμή στον άξονα των X

$$\text{Τιμή στον άξονα X} = \left(\frac{\dot{M}_L}{\dot{M}_G} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5}$$

2. Από το διάγραμμα του Σχήματος 4.17 για μία επιθυμητή πτώση πίεσης υπολογίζουμε την τιμή ε στον άξονα των Y.

3. Υπολογίζουμε την τιμή του $\dot{M}_{GA}$ (πλημμυρίδας) από τη σχέση:

$$\dot{M}_{GA} = \left[\frac{(\epsilon)(\rho_g)(\rho_l)(g_c)}{F \phi \mu_l^{0.2}} \right]^{0.5}$$

4. Προσαρμογή στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας

$$\dot{M}_{GA, \text{ operating}} = (f)(\dot{M}_{GA})$$

όπου $0,5 < f < 0,75$

5. Υπολογίζουμε την επιφάνεια A της στήλης από τη σχέση:

$$A = \frac{\dot{M}_G}{\dot{M}_{GA}}$$

6. Υπολογίζουμε τη διάμετρο της στήλης από τη σχέση:

$$d = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{0.5} = 1,13 A^{0.5}$$

Άσκηση 4.8

Χρησιμοποιείτε τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της προηγούμενης άσκησης και υπολογίστε τη διάμετρο της πλυντρίδας

Η παροχή λειτουργίας του νερού είναι 1,5 φορές η ελάχιστη δυνατή παροχή.

Η ταχύτητα του αερίου εντός της στήλης δεν ξεπερνά το 75% της ταχύτητας πλημμυρίδας και

Το πληρωτικό υλικό αποτελείται από 2 inch κεραμικό Intalox saddles.

Προσδιορίστε την πτώση πίεσης.

Λύση

1. Υπολογίζουμε τον λόγο $\dot{M}_L / \dot{M}_G$:

$$\dot{M}_L = 1581,7 \text{ kg/min}$$

$$\dot{M}_G = \dot{N}_G \cdot (29 \text{ kg/kg-mol}) = 1,557 \cdot 29 = 45,153 \text{ kg/min}$$

2. Υπολογίζουμε την ποσότητα:

$$X = \left(\frac{\dot{M}_L}{\dot{M}_G} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.5} = \left(\frac{1581,7}{45,153} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} = 1.226$$

όπου:

$$\rho_g = \text{πυκνότητα αέρα} = -0,3026 + 107,98 / (67,59 + 0,0865 \cdot (^\circ\text{C})) = 1,2172 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_L = \text{πυκνότητα νερού} = 1006,63 \cdot e^{-0,00014 \cdot (1,8 \cdot (^\circ\text{C}) + 32)} = 992,08 \text{ kg/m}^3$$

3. Από το διάγραμμα Sherwood του Σχήμα 4.2.16 διαβάζουμε την τιμή ε :

$$\varepsilon = 0,0178$$

4. Υπολογίζουμε την επιφανειακή φόρτιση στο σημείο πλημμυρίδας:

$$\dot{M}_{GA} = \left[\frac{\varepsilon \rho_g \rho_l g_c}{F \Phi \mu_l^{0,2}} \right]^{0,5} = \left[\frac{0,0178 \cdot 1,2172 \cdot 992,08 \cdot 9,82}{40 \cdot 1 \cdot (0,006209)^{0,2}} \right]^{0,5} = 3,82 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$$

Όπου: $\Phi = 1$

$F = 40 \text{ m}^2/\text{m}^3$ από τον Πίνακα 4.2.15 για το πληρωτικού υλικού

$\mu_l =$ δυναμικό ιξώδες του νερού

$$= \rho_l \cdot (0,17487 - 0,004427 \cdot (^\circ\text{C}) + 0,0000405 \cdot (^\circ\text{C})^2) \cdot 10^{-6}, \text{ Pas} = 0.0062 \text{ Pas}$$

5. Υπολογίζουμε την επιφανειακή φόρτιση στο σημείο λειτουργίας θεωρώντας ότι αυτή πρέπει να είναι το 75% της επιφανειακής φόρτισης στο σημείο πλημμυρίδας:

$$\dot{M}_{GA, \text{ operation}} = \dot{M}_{GA} \cdot 0,75 = 2,865 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$$

6. Υπολογίζουμε την επιφάνεια της πλυντρίδας από τη σχέση:

$$A = \frac{\dot{M}_G}{\dot{M}_{GA, \text{ operation}}} = \frac{(45,138 \text{ kg/min})(1 \text{ min}/60 \text{ sec})}{2,865 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2} = 0,263 \text{ m}^2$$

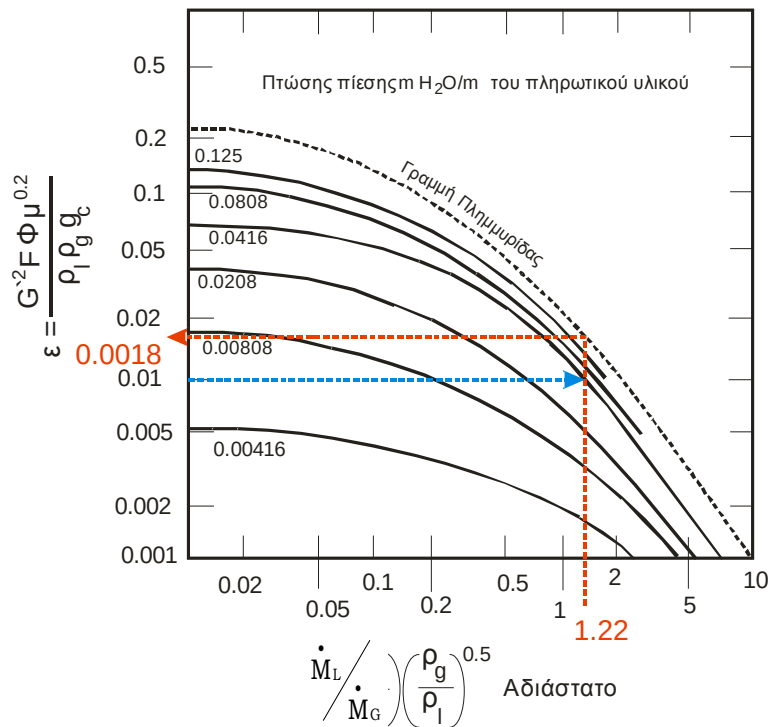
7. Υπολογίζουμε τη διάμετρο της πλυντρίδας:

$$d = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{0,5} = \left(\frac{4 \cdot 0,263}{3,14} \right)^{0,5} \approx 0,579 \text{ m}$$

8. Επαναπροσδιορίζουμε το ε χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\dot{M}_{GA, \text{ operation}}^2 F \Phi \mu_l^{0,2}}{\rho_g \cdot \rho_l \cdot g_c} = \frac{2,865^2 \cdot 40 \cdot 1 \cdot 0,0062^{0,2}}{1,2172 \cdot 992,08 \cdot 9,82} = 0,01$$

και από το διάγραμμα του Σχήμα 4.2.16 διαβάζουμε την πτώση πίεσης, η οποία ανέρχεται σε $\Delta P = 0,0416 \text{ m/m}$ πληρωτικού υλικού.



Γραφική λύση της Άσκησης 4.8

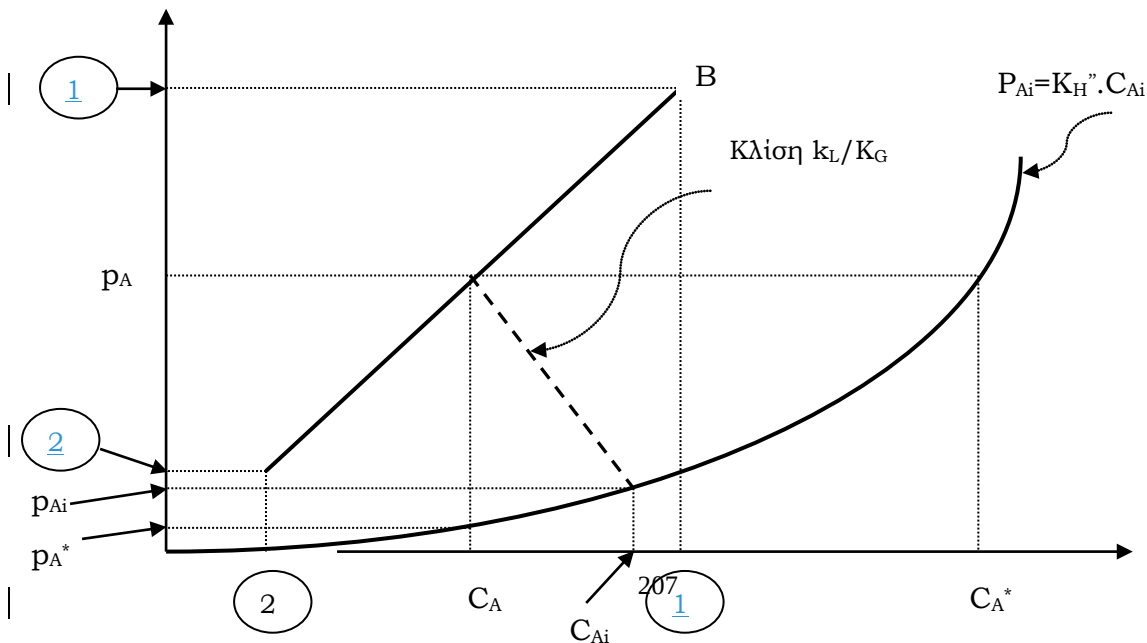
4.2.2.2.1.6 Υπολογισμός του ύψους του πύργου

Η σχέση (4.35) μπορεί να επιλυθεί γραφικά, οπότε υπολογίζεται ο όγκος του πύργου. Με υπολογισμένη τη διάμετρό του, σύμφωνα με τα παραπάνω, υπολογίζεται και το ύψος του.

Η γραφική επίλυση της σχέσης (4.35) παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Η AB είναι η γραμμή λειτουργίας, με κλίση $(\dot{N}_L \cdot P) / (\dot{N}_G \cdot C_w)$, και η καμπύλη είναι η γραμμή ισορροπίας (για αραιά συστήματα ευθεία).

Για τυχαίο σημείο C_A , p_A βρίσκουμε τα μεγέθη C_A^* , C_{Ai} , p_A^* και p_{Ai} και υπολογίζουμε τους όρους $1/(p_A - K_H \cdot C_A)$ ή $1/(p_A/K_H - C_A)$. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για διάφορες τιμές C_A και p_A υπολογίζουμε γραφικά το ολοκλήρωμα, που δίνει τον όγκο (και το ύψος) του πύργου.



Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1.1 Πιθανά σενάρια μεταβλητής παροχής στην είσοδο της δεξαμενής εξισορρόπησης	13
Σχήμα 2.1.2. Πιθανές μορφές διαγράμματος αθροιστικού όγκου που έχει εισρεύσει.....	14
Σχήμα 2.1.3. Μεταβολή κατά ένα χρονικό διάστημα Δt	14
Σχήμα 2.1.4. Ορθογώνια δεξαμενή καθίζησης τύπου Ι.	25
Σχήμα 2.1.5. Καμπύλη συνολικής απομάκρυνσης αιωρουμένων στερεών συναρτήσει της επιφανειακής φόρτισης (οριακής ταχύτητας καθίζησης)	27
Σχήμα 2.1.6. Διάγραμμα συνολικής απομάκρυνσης στερεών.....	28
Σχήμα 2.2.1. Πορεία του ύψους της διεπιφάνειας με το χρόνο	39
Σχήμα 2.2.2. Δεξαμενή καθίζησης τύπου ΙΙ	40
Σχήμα 2.2.3. Τυπικό διάγραμμα πρωτοβάθμιας καθίζησης όπου x_i τα ποσοστά απομάκρυνσης ($1-X_{i,j}/X_0$) και h_i τα ύψη των στομιών δειγματοληψίας.....	41
Σχήμα 2.2.4. Παραστατική απεικόνιση της μεταβολής (α) της % συγκέντρωσης και (β) της συγκέντρωσης λάσπης με το χρόνο παραμονής.....	42
Σχήμα 2.2.5. Γραφικός υπολογισμός δεδομένων για δευτεροβάθμια καθίζηση.	47
Σχήμα 2.2.6. Δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης.....	48
Σχήμα 2.2.7. Εξάρτηση της ροής βαρύτητας από τη συγκέντρωση	49
Σχήμα 2.2.8. Συνολική ροή στερεών ως συνάρτηση της συγκέντρωσης στερεών	49
Σχήμα 2.2.9. Δεξαμενή πάχυνσης δια βαρύτητας	55
Σχήμα 2.2.10. Συστήματα επίπλευσης με διαλυμένο αέρα (DAF)	58
Σχήμα 2.2.11. Σχέση πάχυνσης της λάσπης με το είδος και την κατά βάρος αναλογία αέρα/στερεού	59
Σχήμα 2.2.12. Λόγος A/S (αέρα/στερεά) κατά βάρος σε σχέση με τον δείκτη SVI της λάσπης και την αποτελεσματικότητα της πύκνωσης	60
Σχήμα 2.2.13. Πειραματική συσκευή υπολογισμού του ελάχιστου ογκομετρικού λόγου αέρα/στερεών ώστε να επιτευχθεί επίπλευση	60
Σχήμα 2.3.1. Κινητική Monod	62
Σχήμα 2.3.2. Συγκεντρώσεις βιομάζας (x) και υποστρώματος (S) για αντιδραστήρα διαλείποντος έργου.....	64
Σχήμα 2.3.3. Συγκεντρώσεις υποστρώματος και βιομάζας για αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας.....	65
Σχήμα 2.3.4. Προσδιορισμός κινητικών παραμέτρων ανάπτυξης.....	67
Σχήμα 2.3.5. Διεργασία ενεργού ιλύος με δεξαμενή αερισμού, δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης και ανακυκλοφορία ιλύος.	69
Σχήμα 2.3.6. Διατομή λεπτομέρειας βιολογικού φίλτρου.....	78
Σχήμα 2.3.7. Διάγραμμα ροής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, στο οποίο φαίνεται η διεργασία της προαπονιτροποίησης.....	89
Σχήμα 2.3.8. Η διεργασία A/O.....	91
Σχήμα 2.3.9. Σύστημα ταυτόχρονης απομάκρυνση οργανικών, αζώτου και φωσφόρου	91
Σχήμα 2.4.1. Διάταξη αντίστροφης όσμωσης.....	94
Σχήμα 3.1.1 Διάγραμμα αερόβιας χώνευσης με επιστροφή λάσπης	100
Σχήμα 3.1.2 Πειραματική συσκευή εξαγωγής απαραίτητων δεδομένων για τον σχεδιασμό ενός αερόβιου χωνευτήρα.....	101
Σχήμα 3.2.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την βιοσταθεροποίηση.	106
Σχήμα 3.2.2 Σύστημα στατικού αεριζόμενου σορού.	107

Σχήμα 3.2.3. Κλειστοί βιοαντιδραστήρες βιοσταθεροποίησης.	107
Σχήμα 3.2.4. Διάγραμμα ροής μονάδας κομποστοποίησης	110
Σχήμα 3.3.1 Συσχέτιση της ελάττωσης των πιητικών στερεών από τον χρόνο παραμονής τους στον χωνευτήρα και από το ποσοστό τους.	122
Σχήμα 3.3.2 Σχέση περιεκτικότητας της χωνεμένης λάσπης σε πιητικά οργανικά στερεά με τον χρόνο παραμονής των στερεών στον χωνευτήρα	122
Σχήμα 3.3.3 Συσχέτιση μεταξύ του χρόνου παραμονής των στερεών, της συγκέντρωσης οργανικών στην έξοδο του χωνευτήρα και της απόδοσης επεξεργασίας σε έναν αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας πλήρους ανάδευσης.	124
Σχήμα 3.3.4 Σχέση ειδικού ρυθμού παραγωγής μεθανίου (με βάση το βιοαποδομούμενο COD) και της θερμοκρασίας του χωνευτήρα.	126
Σχήμα 3.3.5 Σχέση ειδικού ρυθμού παραγωγής μεθανίου (με βάση τα βιοαποικοδομούμενα πιητικά στερεά) και της θερμοκρασίας του χωνευτήρα	126
Σχήμα 3.3.6 Επίδραση της τοξικότητας στη λειτουργία του χωνευτήρα.	129
Σχήμα 3.3.7 Τυπική μονάδα αναερόβιας επεξεργασίας απορριμμάτων	133
Σχήμα 3.4.1 Τυπικά κόσκινα για τον διαχωρισμό ΑΣΑ: (α) δονούμενο κόσκινο, (b) περιστροφικό κόσκινο, και (c) δισκοκόσκινο.	134
Σχήμα 3.4.2 Εγκάρσια τομή χώρου υγειονομικής ταφής.	137
Σχήμα 3.4.3 Ανάπτυξη και συμπλήρωση ΧΥΤΑ: (α) εκσκαφή και προετοιμασία (b) τοποθέτηση στερεών απορριμμάτων και (c) τομή συμπληρωμένης χωματερής	138
Σχήμα 3.4.4 Γενικευμένες φάσεις παραγωγής αερίων ΧΥΤΑ.	139
Σχήμα 3.4.5 Παραγωγή βιοαερίου σε ΧΥΤΑ το οποίο δέχεται απορρίμματα επί πέντε έτη.	141
Σχήμα 3.4.6 Παραγωγή βιοαερίου στον χρόνο από 1 kg απορριμμάτων.	141
Σχήμα 3.4.7 Ισοζύγιο νερού σε ταμπάνι.	145
Σχήμα 3.4.8 Τυπική μονάδα καύσης.	150
Σχήμα 4.2.1 Διάφοροι τύποι κώνων διασποράς που παρατηρούνται στην ατμόσφαιρα. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την αδιαβατική μεταβολή της θερμοκρασίας. Τα σ_θ και σ_ϕ παριστάνουν τις σταθερές αποκλίσεις στις μεταβολές της οριζόντιας και κατακόρυφης διεύθυνσης του ανέμου, που μπορούν να κυμαίνονται μεταξύ 0 και 25 μοιρών.	160
Σχήμα 4.2.2 Κατανομή συγκεντρώσεων και θέση του άξονα του κώνου διασποράς για μικρή (1) και μεγάλη (2) διαταραχή της ατμόσφαιρας	161
Σχήμα 4.2.3 Σύστημα αξόνων που δείχνει την Gaussian κατανομή στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο.	163
Σχήμα 4.2.4 Οι συντελεστές σ_y και σ_z σε συνάρτηση με την απόσταση από την καμινάδα.	164
Σχήμα 4.2.5. (α) Αεροκυκλώνας συμβατικών διαστάσεων με τα χαρακτηριστικά του, (β) Διάγραμμα απόδοσης αεροκυκλώνα με βάση τις σχετικές διαστάσεις των σωματιδίων	171
Σχήμα 4.2.6 (α) Σακκόφιλτροτινάγματος (Shaker) και (b) Σακκόφιλτροπαλμικών ακροφυσίων (Pulse-jet)	177
Σχήμα 4.2.7 Μηχανισμοί κατακράτησης σωματιδίων στα φίλτρα: α) Πρόσκρουση λόγω αδράνειας και Ανάσχεση και β) Διάχυση.	178
Σχήμα 4.2.8 Σχηματική παράσταση ηλεκτροστατικών φίλτρων, με ηλεκτρόδιο συλλογής τύπου πλάκας (α, c) και τύπου κυλίνδρου (b)	183
Σχήμα 4.2.9 Απόδοση ηλεκτροστατικού φίλτρου συναρτήσει του λόγου ισχύος κορώνας	188
Σχήμα 4.2.10 Θεωρία δύο στοιβάδων.	193
Σχήμα 4.2.11 Αντίσταση κατά την κίνηση ενός μορίου αερίου ρύπου που προσροφάται σ' ένα υγρό	194

Σχήμα 4.2.12 Σύγκριση του συνολικού συντελεστή απορρόφησης για δύο διαφορετικά πληρωτικά υλικά στο σύστημα SO ₂ –νερού (Perry 1973).	196
Σχήμα 4.2.13 Πύργος απορρόφησης κατ' αντιστροφή (ισοζύγια μάζας σε στήλη απορρόφησης.)	197
Σχήμα 4.2.14 Τυπικό διάγραμμα γραμμής λειτουργίας.	198
Σχήμα 4.2.15 Γραφικός προσδιορισμός της παροχής του υγρού.....	199
Σχήμα 4.2.16 Διάγραμμα υπολογισμού πλημμυρίδας και πτώσης πίεσης...	203

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1.1. Δεδομένα σχεδιασμού εξαμμητών σταθερής ταχύτητας.....	29
Πίνακας 2.2.1. Όρια βαθμίδας ταχύτητας και χρόνου παραμονής για τις διεργασίες της κροκίδωσης, συσσωμάτωσης και καθίζησης	35
Πίνακας 2.2.2. Χαρακτηριστικά στοιχεία αναδευτήρων	36
Πίνακας 2.2.3. Τυπικές τιμές παραμέτρων σχεδιασμού παχυντών βαρύτητας με μηχανική ανάδευση διαφόρων τύπων λασπών	55
Πίνακας 2.2.4. Τυπική δοσολογία χημικών προσθέτων για πάχυνση με βαρύτητα	56
Πίνακας 2.3.1. Τυπικές τιμές κινητικών παραμέτρων για συστήματα ενεργού ιλύος.....	72
Πίνακας 2.3.2. Τιμές παραμέτρων σχεδιασμού συστημάτων ενεργού ιλύος.....	75
Πίνακας 2.3.3. Τιμές παραμέτρων σχεδιασμού βιολογικών φίλτρων.....	83
Πίνακας 3.2.1: Κριτήρια επιλογής συστήματος κομποστοποίησης.	108
Πίνακας 3.3.1 Επίδραση του SRT (θ_c) στην παραγωγή CH_4 ανά μονάδα καταναλισκόμενου οργανικού υλικού για πρωτογενή λάσπη.	126
Πίνακας 3.3.2. Προτεινόμενοι Συντελεστές Ασφάλειας για επεξεργασία πρωτογενούς λάσπης με χρόνο σχεδιασμού SRT 20 μέρες και απόδοση της διεργασίας 90%. Επίδραση της θερμοκρασίας.	128
Πίνακας 3.3.3 Συνολική και διαλυτή συγκέντρωση βαρέων μετάλλων που παρατηρούνται στους αναερόβιους χωνευτήρες.	130
Πίνακας 3.3.4 Σχετική τοξικότητα οργανικών ενώσεων.	130
Πίνακας 3.3.5 Συγκεντρώσεις οργανικών ενώσεων που θεωρούνται ότι παρεμποδίζουν την αναερόβια χώνευση.....	131
Πίνακας 3.4.1 Περιεκτικότητα σε πτητικά.....	140
Πίνακας 3.4.2 Σύσταση βιοαερίου κωματερών (% σε ξηρά βάση)	140
Πίνακας 3.4.3Τυποποιημένη σύσταση διηθημάτων χώρου υγειονομικής ταφής.	144
Πίνακας 3.4.4 Ενδεικτικό μέσο ενεργειακό περιεχόμενο και υπόλειμμα διαφόρων συστατικών.....	149
Πίνακας 3.4.5 Σύγκριση RDF με άνθρακα με βάση 18000 MJ ωφέλιμης θερμικής ενέργειας.....	153
Πίνακας 3.4.6 Ισοζύγια μάζας για την πυρόλυση.	155
Πίνακας 3.4.7 Σύσταση αερίων πυρόλυσης σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας.	155
Πίνακας 4.2.1 Εκτίμηση της ατμοσφαιρικής σταθερότητας.....	164
Πίνακας 4.2.2 Συντελεστές για τα μαθηματικά μοντέλα $\sigma_y=a \cdot x^p$ και $\sigma_z=b \cdot x^q$ ανάλογα με τον τύπο της διασποράς.	165
Πίνακας 4.2.3 Κριτήρια επιλογής μεθόδου ελέγχου αιωρούμενων σωματιδίων.	170
Πίνακας 4.2.4Αδιάστατες σχεδιαστικές παράμετροι για κυκλώνες εφαπτομενικής εισόδου.....	172
Πίνακας 4.2.5 Θερμοκρασιακή και χημική αντοχή συνήθων υφασμάτων.....	176
Πίνακας 4.2.6 Μέγιστες ταχύτητες φιλτραρίσματος για σακκόφιλτρα τινάγματος (Shaker) και αναστροφής αέρα (ReverseAir)	179
Πίνακας 4.2.7 Μέγιστες ταχύτητες φιλτραρίσματος για σακκόφιλτρα με παλμικά ακροφύσια (Pulse-Jet).	180
Πίνακας 4.2.8 Τυπικές τιμές της ειδικής αντίστασης του στρώματος των σωματιδίων (K_2) για διαφορετικά είδη σωματιδίων.	180
Πίνακας 4.2.9 Αριθμός διαμερισμάτων συναρτήσει της καθαρής επιφάνειας υφάσματος	181

Πίνακας 4.2.10 Πραγματικές ταχύτητες κίνησης σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια σε ηλεκτροστατικά φίλτρα.	185
Πίνακας 4.2.11 Τυπικές τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού ηλεκτροστατικού φίλτρου κατακράτησης ιπτάμενης τέφρας.	186
Πίνακας 4.2.12 Η σταθερά του Henry ($\times 10^{-5}$)(atm) διαφόρων αερίων σε σχέση με τη θερμοκρασία	190
Πίνακας 4.2.13 Τιμές του K_{OGa} για συστήματα ελεγχόμενα από την αέρια στοιβάδα	195
Πίνακας 4.2.14 Τιμές του K_{OLa} για συστήματα ελεγχόμενα από την υγρή στοιβάδα	196
Πίνακας 4.2.15 Πληρωτικά υλικά.	204

Ευρετήριο Ασκήσεων

Άσκηση 2.1.....	16
Άσκηση 2.2.....	21
Άσκηση 2.3.....	23
Άσκηση 2.4.....	29
Άσκηση 2.5.....	30
Άσκηση 2.6.....	32
Άσκηση 2.7.....	37
Άσκηση 2.8.....	38
Άσκηση 2.9.....	43
Άσκηση 2.10.....	45
Άσκηση 2.11.....	50
Άσκηση 2.12.....	56
Άσκηση 2.13.....	61
Άσκηση 2.14.....	65
Άσκηση 2.15.....	68
Άσκηση 2.16.....	76
Άσκηση 2.17.....	78
Άσκηση 2.18.....	80
Άσκηση 2.19.....	85
Άσκηση 2.20.....	88
Άσκηση 2.21.....	96
Άσκηση 3.1.....	111
Άσκηση 3.2.....	141
Άσκηση 3.3.....	146
Άσκηση 3.4.....	148
Άσκηση 3.5.....	151
Άσκηση 3.6.....	151
Άσκηση 4.1.....	166
Άσκηση 4.2.....	173
Άσκηση 4.3.....	174
Άσκηση 4.4.....	182
Άσκηση 4.5.....	188
Άσκηση 4.6.....	190
Άσκηση 4.7.....	200
Άσκηση 4.8.....	205