



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Τεχνολογία Περιβάλλοντος: Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων

Ενότητα 10: Επεξεργασία Ιλύος

Κορνάρος Μιχαήλ
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Χημικών Μηχανικών

Επεξεργασία Ιλύος

- Η ιλύς η οποία παράγεται στις διάφορες επιμέρους διεργασίες σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων περιέχει 0,25 έως 12% στερεά, ανάμεσα στα οποία μεγάλη ποσότητα μικροοργανισμών.
- Προκειμένου να διατεθεί η ιλύς, απαιτείται η **σταθεροποίησή** της (μείωση οργανικού φορτίου και καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών που περιέχει) και η **αφυδάτωσή** της.
- Οι πηγές της ιλύος περιλαμβάνουν τα εσχαρίσματα, την αμμοσυλλογή, τις δεξαμενές πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας καθίζησης και την δεξαμενή αερισμού (εφ' όσον απομακρύνεται ιλύς από εκεί).



Τυπική σύσταση της ιλύος

- ΟΣ 2-8%,
 - ΠΣ 60-80% των ΟΣ,
 - λίπη 6-30% των ΟΣ,
 - πρωτεΐνες 20-30% των ΟΣ,
 - άζωτο 1,5-6% των ΟΣ,
 - φωσφόρος 0,8-3% των ΟΣ,
 - κυτταρίνη 5-8% των ΟΣ,
 - οργανικά οξέα 200-2000 mg/L
 - pH 5-8.
-
- Τα στερεά έχουν ειδικό βάρος 1,2-1,4, ενώ αν περιέχεται σημαντική ποσότητα ασβέστη (από απομάκρυνση φωσφόρου) μπορεί το ειδικό βάρος να είναι και μεγαλύτερο.



Τυπικές συμβολές από τις επί μέρους διεργασίες (σε $\text{kg}/10^3\text{m}^3$)

- πρωτοβάθμια καθίζηση 150 (4-12% ΟΣ)
- ενεργός ιλύς 85 (0,5-1,5% ΟΣ)
- χαλικοδιυλιστήριο 70 (1-4% ΟΣ)



Διεργασίες Επεξεργασίας Ιλύος

- (α) **Προεπεξεργασία** (προετοιμασία για κύριες διεργασίες) η οποία περιλαμβάνει:
 - Άλεση, ανάμειξη (για ιλύ από διαφορετικές πηγές), αποθήκευση (για σταθεροποίηση παροχής), εξάμμωση
- (β) **Πύκνωση** (απομάκρυνση νερού που διευκολύνει μια και μειώνει την παροχή για τις περαιτέρω διεργασίες) η οποία επιτυγχάνεται με:
 - Καθίζηση, επίπλευση, φυγοκέντρωση
- (γ) **Σταθεροποίηση** (καταστροφή οργανισμών, μείωση στερεών και οργανικού φορτίου) η οποία επιτυγχάνεται με:
 - Οξείδωση χλωρίου, ασβέστη, θερμική επεξεργασία, αναερόβια χώνευση, αερόβια χώνευση



Διεργασίες Επεξεργασίας Ιλύος

- (δ) **Βελτίωση** (προετοιμασία για αποτελεσματικότερη αφυδάτωση) που περιλαμβάνει πήξη, χημική κροκίδωση, θερμική επεξεργασία, έκπλυση
- (ε) **Απολύμανση** (καταστροφή παθογόνων οργανισμών)
- (στ) **Αφυδάτωση** με μία από τις ακόλουθες μεθόδους: διύλιση σε κενό, διύλιση υπό πίεση, κλίνη ξήρανσης, φυγοκέντριση
- (ζ) **Βιοσταθεροποίηση** (Κομποστοποίηση)
- (η) **Διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας** (καύση, αεριοποίηση, πυρόλυση)
- Ανάλογα με την προτεινόμενη διάθεση, διασπορά στο έδαφος, χωματερές, ή διάθεση στη θάλασσα, προσδιορίζεται ο κατάλληλος συνδυασμός των παραπάνω διεργασιών, έτσι, ώστε να εξασφαλίζει την κατάλληλη επεξεργασία της ιλύος για διάθεση.



Πύκνωση - Πάχυνση

- Η πύκνωση (ή πάχυνση) στοχεύει στην απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του νερού, ελαττώνοντας σημαντικά την παροχή στις περαιτέρω επεξεργασίες.
- συνήθως γίνεται με καθίζηση/ πύκνωση σε κυκλικές δεξαμενές διαμέτρου έως 20 m και βάθους 3-3,7 m.
- Τυπικές επιφανειακές φορτίσεις είναι 24-32 m³/m²·d.
- Το βασικό μέγεθος σχεδιασμού είναι η απαιτούμενη **επιφάνεια** της διατομής.
- Η πύκνωση με **επίπλευση** απαιτεί μικρότερη επιφάνεια και έχει πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά και μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας.
- πύκνωση μπορεί να επιτευχθεί και με διάφορες **φυγοκεντρικές** μηχανές. Αυτή η λύση απαιτεί τον μικρότερο χώρο σε σχέση με τις άλλες εναλλακτικές διεργασίες.



Σταθεροποίηση

- Η σταθεροποίηση της ιλύος στοχεύει στην καταστροφή των παθογόνων οργανισμών, εξουδετέρωση προσβλητικών οσμών καθώς και στην αποφυγή σηπτικότητας της ιλύος.
- Οι διεργασίες είναι είτε φυσικοχημικές, είτε βιολογικές:
- **Φυσικοχημικές Διεργασίες.**
- Η ιλύς μπορεί να οξειδωθεί με την προσθήκη χλωρίου που καταστρέφει τους μικροοργανισμούς.
- Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ασβέστης για να ανεβάσει το pH πάνω από 12.
- Τέλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί θερμική επεξεργασία (260°C σε πιέσεις 400 psi).
- **Βιολογικές Διεργασίες.**
- Υπάρχουν δύο βασικά είδη βιολογικής διεργασίας, *αναερόβια και αερόβια χώνευση.*



Αερόβια Χώνευση

- Η αερόβια χώνευση βασίζεται στην ενδογενή αναπνοή, δηλαδή την κυτταρική αποδόμηση ή αυτοξείδωση που παρατηρείται όταν ο λόγος F/M (τροφής/μικροοργανισμών) είναι μικρός.
- Η διεργασία απαιτεί παροχή οξυγόνου (αέρα) ενώ παράγεται CO₂.
- Η συμβατική διεργασία είναι παραπλήσια αυτής της ενεργού ιλύος με τη βασική διαφορά ότι η παρεχόμενη ιλύς είναι πτωχή σε διαλυτό οργανικό φορτίο.



Αερόβια χώνευση

- Η τιμή της σταθεράς βιοαποδόμησης k_d εξαρτάται από την *θερμοκρασία* αλλά και από την *ηλικία της ιλύος*.
- Η **συνολική** ηλικία της ιλύος πρέπει να εκτιμηθεί για τον υπολογισμό αυτό. Αυτή θα ισούται με το άθροισμα της ηλικίας από την διεργασία της ενεργού ιλύος, αλλά και από την ηλικία της ιλύος στο σύστημα σταθεροποίησης.
- Η απαίτηση σε οξυγόνο είναι περίπου $1 \text{ mg O}_2/\text{g}$ (ΠΑΣ)h για να παραχθεί ιλύς ασφαλής για διάθεση (μη σηπτική).
- Για τις περισσότερες περιπτώσεις στόχος είναι η μείωση των ΠΑΣ σε **10% του αρχικού**.



Σχεδιασμός Αερόβιας Χώνευσης

$$X = \frac{X_0}{1 + 0,48 (\theta_{c_0} + \theta)^{0.415} (1,05)^{T-20} \theta}$$

- Η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ευρεθεί ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής θ για να επιτευχθεί συγκεκριμένη μείωση ΠΑΣ (ενεργού) ιλύος ηλικίας θ_{c_0} σε θερμοκρασία T .
- Ο απαιτούμενος όγκος του αερόβιου χωνευτήρα δίνεται τότε από το γινόμενο της ογκομετρικής παροχής Q και του χρόνου παραμονής θ .
- Αν βεβαίως υπάρχει ανακυκλοφορία τα ισοζύγια πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα



Αναερόβια Χώνευση

- Η αναερόβια χώνευση είναι μια ιδιαίτερα σημαντική διεργασία διότι εκτός από την χρήση της για επεξεργασία ιλύος που προέρχεται από βιολογικό καθαρισμό, τα τελευταία έτη χρησιμοποιείται για:
 - παραγωγή ενέργειας
 - επεξεργασία αποβλήτων με ισχυρό οργανικό φορτίο
 - επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των αστικών απορριμμάτων
- Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διεργασία αυτή παράγει **μεθάνιο** και εξαιτίας του ότι έχει μικρές απαιτήσεις σε υποστρώματα και παράγει μικρές ποσότητες μικροβιακής μάζας.
- Η διεργασία αυτή απαντάται στο πεπτικό σύστημα των μηρυκαστικών ζώων αλλά και γενικότερα στην φύση, όπου επικρατούν αναερόβιες συνθήκες (π.χ. στο έδαφος).



Βασικές διεργασίες κατά την αναερόβια χώνευση

ΑΔΙΑΛΥΤΑ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΜΑΚΡΟΜΟΡΙΑ

ΥΔΡΟΛΥΣΗ

ΔΙΑΛΥΤΑ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΜΙΚΡΟΜΟΡΙΑ

ΟΞΕΟΓΕΝΕΣΗ

ΑΠΛΑ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΟΞΕΑ , ΑΙΘΑΝΟΛΗ

ΟΞΙΚΟΓΕΝΕΣΗ

CH_3COOH , H_2 , CO_2

ΜΕΘΑΝΟΓΕΝΕΣΗ

ΒΙΟΑΕΡΙΟ



Αναερόβια Χώνευση

- Οι σχηματιστές οξέων είναι προαιρετικά αερόβιοι μικροοργανισμοί ενώ τα μεθανοβακτήρια είναι αυστηρά αναερόβιοι μικροοργανισμοί.
- Η αναερόβια χώνευση είναι είτε **μεσοφιλική** (βέλτιστη θερμοκρασία $\sim 37^{\circ}\text{C}$) είτε **θερμοφιλική** (βέλτιστη θερμοκρασία $\sim 55^{\circ}\text{C}$).
- Η θερμοφιλική είναι ελαφρά ταχύτερη, αλλά απαιτεί ακριβή ρύθμιση θερμοκρασίας και είναι ασύμφορη ενεργειακά.
- Παρά τις λειτουργικές δυσκολίες που παρουσιάζει η διεργασία, έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως **χαμηλό κόστος λειτουργίας και παραγωγή μεθανίου** το οποίο συνήθως επαρκεί για να καλύψει όλες τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης επεξεργασίας αποβλήτων και σε ορισμένες περιπτώσεις περισσεύει ως πρόσθετη ενεργειακή πηγή.



Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση

- pH
- Θερμοκρασία
- Χημική σύσταση τροφοδοσίας
- Θρεπτικά συστατικά (N,P)
- Τοξικές ουσίες- παρεμποδιστές
- Τύπος αντιδραστήρα

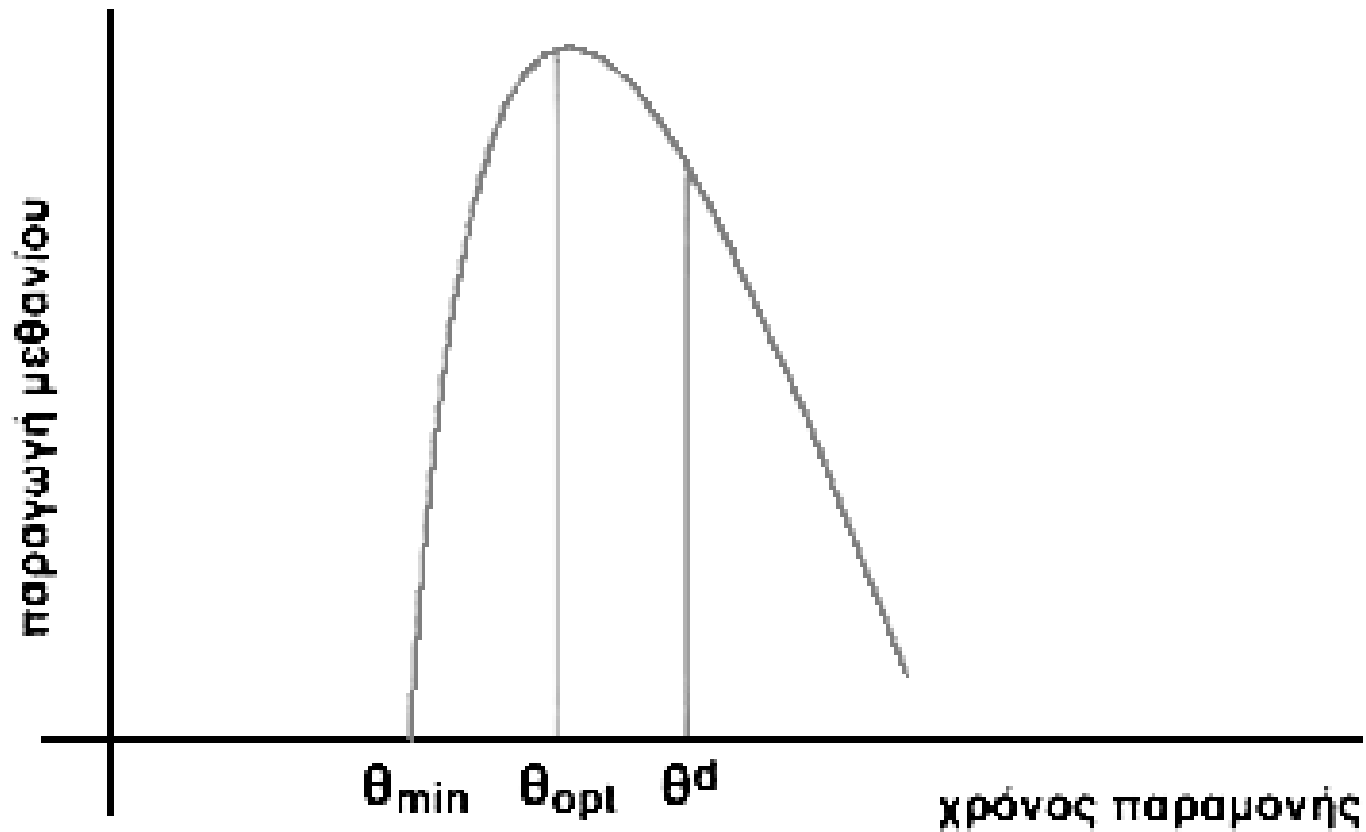


Σχεδιασμός με βάση τον Χρόνο Παραμονής Στερεών

Θερμοκρασία (°C)	Ελάχιστος θ (d)	Συνιστώμενος θ (d)
18	11	28
24	8	20
29,5	6	14
35	4	10
40	4	10



Εξάρτηση παραγωγής μεθανίου από τον χρόνο παραμονής



Αναερόβια χώνευση

Η παραγωγή **μεθανίου** συνήθως υπολογίζεται από την σχέση:

$$Q_{\text{CH}_4} = 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot \left\{ E Q S_0 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}} - 1,42 P_x \right\} \quad \text{όπου:}$$

Q_{CH_4} : παραγωγή μεθανίου σε m^3/d

0,35: θεωρητική απόδοση μετατροπής, δηλαδή το ποσό CH_4 που μπορεί να παραχθεί από 1 kg BAO_5

E: αποδοτικότητα χρήσης ιλύος ($\sim 0,8$)

Q: παροχή (m^3/d)

S_0 : τελικό BAO στην εισροή (g/m^3)

1,42: παράγοντας μετατροπής κυτταρικής μάζας σε BAO

P_x : μάζα κυττάρων παραγόμενη ανά μέρα (kg/d)



Αναερόβια χώνευση

Η P_x μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση:

$$P_x = \frac{YQ(ES_0)}{1 + k_d\theta} \cdot 10^{-3} \text{ g / kg}$$

όπου Y : αποδοτικότητα βιομάζας (g-κυττ./g-ΒΑΟ) ($\sim 0,05$)

k_d : ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής (d^{-1}) ($\sim 0,03 d^{-1}$)

Το μεθάνιο αποτελεί περίπου τα $2/3$ του παραγόμενου αερίου.



Βιοαέριο

- Το παραγόμενο αέριο κατά την αναερόβια χώνευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση.
- Περιέχει 65-70% CH_4 , 25-30% CO_2 , ενώ το υπόλοιπο είναι H_2 , N_2 και H_2S .
- Έχει απόδοση θερμότητας 18.700-26.000 kJ/m^3 ενώ η αντίστοιχη καθαρού μεθανίου είναι 35.800 kJ/m^3 .
- Το παραγόμενο μεθάνιο επαρκεί για:
 - (α) την ανύψωση της θερμοκρασίας της εισερχόμενης ιλύος,
 - (β) την αναπλήρωση απωλειών θερμότητας και
 - (γ) τις υπόλοιπες ενεργειακές ανάγκες της μονάδας επεξεργασίας

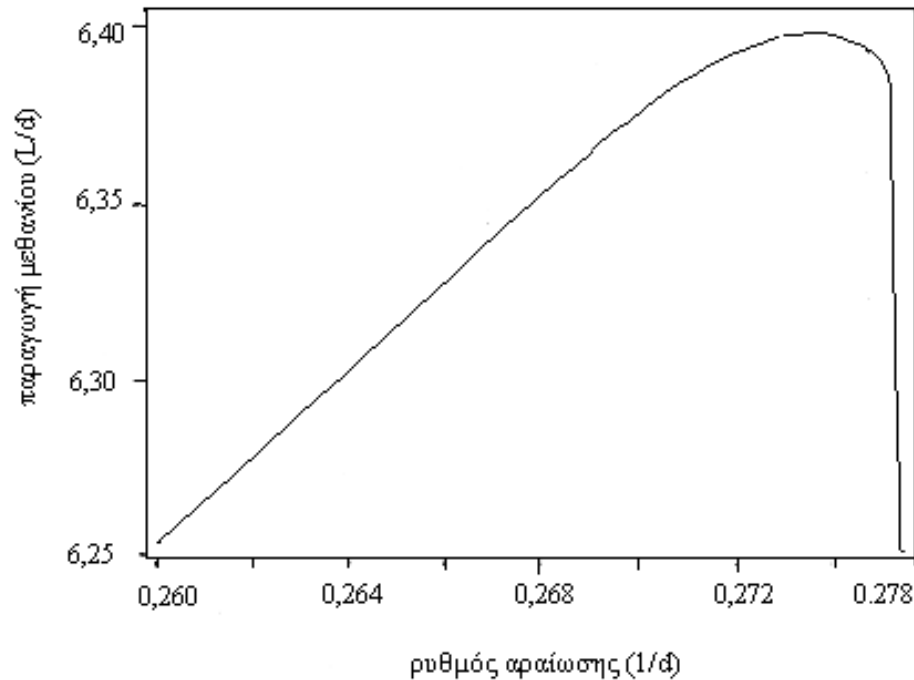


Αναερόβια χώνευση

- Το υπερκείμενο υγρό περιέχει 3.000-10.000 mg/L ΑΣ, 2.000-3.000 mg/L ΒΑΟ₅ και 400-1.000 mg-N/L αμμωνίας και πρέπει να επαναφερθεί στην ΔΠΚ για επεξεργασία.
- Η χωνευμένη ιλύς τυπικά περιέχει 2,5-7% στερεά και απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία, κυρίως αφυδάτωση πριν διατεθεί.



Παραγωγή μεθανίου σε συνάρτηση του ρυθμού αραίωσης



Βιοσταθεροποίηση (Κομποστοποίηση)

- Η βιοσταθεροποίηση (ή λιπασματοποίηση, ή χουμποποίηση ή composting) είναι εξ' ορισμού η βιολογική αποδόμηση και σταθεροποίηση οργανικών και μικροβίων κάτω από συνθήκες που επιτρέπουν την ανάπτυξη θερμοκρασιών στην 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 μορφή σταθεροποίησης της ιλύος, η οποία όμως απαιτεί ειδικές συνθήκες υγρασίας και αερισμού, ούτως ώστε να εξασφαλιστούν θερμοφιλικές θερμοκρασίες.



Βιοσταθεροποίηση (Κομποστοποίηση)

- Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την βιοσταθεροποίηση. *(η διακεκομμένη γραμμή αφορά την περίπτωση αερισμού με ανάδευση, ενώ η συνεχής την περίπτωση αερισμού με φυσητήρες)*



Βιοσταθεροποίηση (Κομποστοποίηση)

- 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)
- (γ) τον λόγο C/N (δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50/1).



Τύποι αερόβιας βιοσταθεροποίησης

- (α) το σύστημα σειραδίων (windrows),
- (β) το σύστημα του αεριζόμενου στατικού σωρού (static aeration piles) και
- (γ) κλειστοί βιοαντιδραστήρες



Το σύστημα σειραδίων

- Συνίσταται στην τοποθέτηση 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 βιοσταθεροποίησης ή/ και κάποιοι προσθετικοί παράγοντες για αύξηση των αερόκενων 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 βιοσταθεροποίηση.



Το σύστημα σειραδίων

- 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 βιοσταθεροποίηση μείγματος.
- Οι σωροί μπορεί να αερίζονται πρόσθετα από φυσητήρες, προκειμένου να εξασφαλιστεί επαρκής παροχή οξυγόνου, ρύθμιση της θερμοκρασίας και να απομακρυνθεί η πρόσθετη υγρασία.
- Τα παραγόμενα υγρά παροχετεύονται με κατάλληλες σωληνώσεις.
- Η βιοσταθεροποίηση (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 σειραδίων

- 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.
- Ο αερισμός κατά την βιοσταθεροποίηση εξυπηρετεί δύο κυρίως σκοπούς:
 - την παροχή επαρκούς οξυγόνου για τη βιολογική οξείδωση,
 - τη ξήρανση του προς βιοσταθεροποίηση μείγματος.
- Η ενέργεια η οποία απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας κατά την βιοσταθεροποίηση και για την εξάτμιση της υγρασίας, παράγεται από την απελευθερούμενη ενέργεια κατά την βιοαποδόμηση.



Σύστημα αεριζόμενου στατικού σωρού

- Το σύστημα του αεριζόμενου στατικού σωρού διαφέρει από το σύστημα σειραδίων:
 - δεν υπάρχει ανάδευση
 - ο αερισμός επιτυγχάνεται με συνεχή παροχή αέρα
 - δε χρησιμοποιείται ανακυκλοφορία προϊόντος (κομπόστας).



Διάθεση ιλύος

- Απόρριψη στη θάλασσα
- Απόρριψη σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ)
- Εφαρμογή σε αγροτική γη
- Καύση



Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.0.0**.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών. Αναπληρωτής Καθηγητής, Μιχαήλ Κορνάρος. «Τεχνολογία Περιβάλλοντος: Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων, Επεξεργασία Ιλύος». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/CMNG2143>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.