

Βιολογική Επεξεργασία Λυμάτων

Βιολογικός Καθαρισμός

- Στην Ελλάδα είναι επιτακτική ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος, ειδικά των ευαίσθητων υδάτινων ενδιαιτημάτων.
- Κατά μέσο όρο παράγονται 180-300/L αστικών λυμάτων ανά άτομο ανά ημέρα.
- Τα λύματα περιέχουν ένα πολύπλοκο μίγμα στερεών και διαλυμένων συστατικών.
- Στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, όλα τα συστατικά που μολύνουν το περιβάλλον θα πρέπει να μειωθούν σε αποδεκτές συγκεντρώσεις ή να μετατραπούν σε αβλαβείς ενώσεις.

Νομοθεσία

1. Οδηγία της ΕΕ 91/271

- Εφαρμογή σε 3 στάδια:

Α. Μέχρι το τέλος του 1998, σε όλους τους οικισμούς >10.000 κατοίκων που ρυπαίνουν «ευαίσθητες» περιοχές πρέπει να λειτουργούν Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων και Βιολογικού Καθαρισμού.

Β. Μέχρι το τέλος του 2000, σε όλους τους οικισμούς >15.000 κατοίκων πρέπει να λειτουργούν Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων και Βιολογικού Καθαρισμού.

Γ. Μέχρι το τέλος του 2005, σε όλους τους οικισμούς >2.000 κατοίκων πρέπει να λειτουργούν Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων και Βιολογικού Καθαρισμού.

Πως έχει η κατάσταση?

- Μέχρι το τέλος του 1998, είχαν συμμορφωθεί μόνο 4 από τους 16 οικισμούς >10.000 κατοίκων σε «ευαίσθητες» περιοχές.

1^η παραπομπή της χώρας μας για το Θριάσιο Πεδίο (κόλπος της Ελευσίνας).

- Παραβίαση της 2^{ης} προθεσμίας, με 23 οικισμούς >15.000 κατοίκων μετά το τέλος του 2000 χωρίς Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων και Βιολογικού Καθαρισμού.
- Παραβίαση και της 3^{ης} προθεσμίας για οικισμούς >2.000 κατοίκων μετά το τέλος του 2005 χωρίς Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων και Βιολογικού Καθαρισμού.

Κόστος

- Μεταξύ 2 εκατ. Ευρώ και 17 εκατ. Ευρώ.
- 75-100% επιδότηση από ΕΕ (3^ο Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης, ΕΣΠΑ).

Παρατάυτα:

- 239 εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων και Βιολογικού Καθαρισμού στην Ελλάδα, από τις οποίες οι 69 βρίσκονται ακόμα σε κατάσταση μη συμμόρφωσης.
- 80% των οικισμών >15.000 κατοίκων εξυπηρετούνται από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων και Βιολογικού Καθαρισμού.
- Μόνο το 20% των οικισμών >2.000 κατοίκων εξυπηρετούνται από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων και Βιολογικού Καθαρισμού.

Κύρια αίτια:

- Κόστος λειτουργίας.
- Τοπικιστικές αντιπαραθέσεις για χωροθέτηση.

Οφέλη

1. Ποιότητα επιφανειακών (θαλασσών, ποταμών, λιμνών) και υπογείων υδάτων.

- Παράδειγμα αποτελεί ο καθαρισμός της θάλασσας του κόλπου του Σαρωνικού με τη λειτουργία της Ψυτάλλειας.

2. Ανακύκλωση νερού από Βιολογικό Καθαρισμό προς άρδευση.

3. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού αποτελεί κοινή πρακτική εδώ και δεκαετίες σε πολλά κράτη, όπως Γερμανία, Γαλλία, ΗΠΑ, Αυστραλία, Ηνωμένο Βασίλειο, κλπ.

Διαδικασίες επεξεργασίας λυμάτων

- Γενικά, υπάρχουν τρεις κύριες διαδικασίες επεξεργασίας λυμάτων:

1. Η **πρωτογενής**, κατά την οποία απομακρύνονται τα πιο εύκολα διαχωριζόμενα ρυπογόνα συστατικά (στερεά που καθιζάνουν εύκολα και στρώματα ελαίων και ελαφρών συστατικών).

Πρωτοβάθμια διαδικασία

- Δεξαμενή καθίζησης διαμέτρου 22m.
- Τα λύματα εισέρχονται στο κέντρο της δεξαμενής και εξέρχονται ακτινικά μέσω υπερχειλίσεων.
- Η κάθε δεξαμενή είναι εφοδιασμένη με περιστρεφόμενη γέφυρα και φέρει ξέστρο στον πυθμένα για να παρασύρει τη λάσπη στο κεντρικό φρεάτιο.
- Η απόδοση της πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι η απομάκρυνση του BOD κατά 33% και αιωρούμενων στερεών κατά 60%.



Σχ. 103. Πρωτοβάθμια διαδικασία βιολογικού καθαρισμού.

2. Η **δευτερογενής**, κατά την οποία απομακρύνονται αιωρούμενα σωματίδια και διαλυτά συστατικά.

- Σε πολλές περιπτώσεις, τα συστατικά είναι οργανικές ουσίες που οξειδώνονται βιολογικά μέσω:

A. Αερόβιων ή/και

B. Αναερόβιων διαδικασιών χώνευσης.

- Κατά την **αερόβια** διαδικασία η οργανική ύλη αποικοδομείται βιολογικά σε αερόβιο περιβάλλον, είτε με επιφανειακό αερισμό, ή με οξυγόνο μέσω διαβίβασης ισχυρού ρεύματος αέρα.
- Σε ένα άλλο τύπο αερόβιας διαδικασίας, χρησιμοποιείται στρώμα από χαλίκι και άμμο (φίλτρο διαπότισης), από το οποίο περνάει το ρεύμα των λυμάτων.
- Στο στρώμα του φίλτρου υπάρχουν μικροοργανισμοί, οι οποίοι αναπτύσσονται από τις οργανικές ουσίες των λυμάτων, τις οποίες οξειδώνουν προς CO_2 και H_2O .

- Κατά την αναερόβια χώνευση, πραγματοποιείται αποικοδόμηση σε αναερόβιο περιβάλλον είτε των ακατέργαστων αποβλήτων, ή της λάσπης που λαμβάνεται από την προηγούμενη αερόβια διαδικασία.

- Οι διαδικασίες της δευτερογενούς διαχείρισης αποτελούν τον **βιολογικό καθαρισμό**, ο οποίος είναι και το αντικείμενο της βιοτεχνολογίας.

3. Η **τριτογενής** διαχείριση προσανατολίζεται στην απομάκρυνση όλων (ή μερικών) ρυπογόνων συστατικών που έχουν παραμείνει μέσω αντίστροφης όσμωσης, προσρόφηση σε διάφορους προσροφητές, κλπ.

- Στην πράξη, δυστυχώς, δεν εφαρμόζονται και τα τρία στάδια καθαρισμού (η τριτογενής διαχείριση συνήθως δεν εφαρμόζεται λόγω υψηλού κόστους).

- Πάντως, κάποια μορφή πρωτογενούς ή δευτερογενούς διαχείρισης εφαρμόζεται στην πλειοψηφία των δημοτικών εγκαταστάσεων της χώρας μας.

Χαρακτηριστικά των λυμάτων

- Υπάρχουν δύο κατηγορίες λυμάτων:

1. Τα βιομηχανικά λύματα, και

2. Τα αστικά λύματα.

- Συνήθως με τον όρο λύματα (sewage) αναφερόμαστε στα αστικά λύματα, τα οποία αποτελούνται από σκουπίδια, απόνερα πλυντηρίων, περιπτώματα, κλπ.

- Αποτελούνται από νερό (99%), αιωρούμενα στερεά (300ppm), και πτητικές ουσίες (500ppm).

- Το μεγαλύτερο μέρος των αιωρούμενων στερεών συστατικών είναι κυτταρίνη και ο κύριος όγκος των οργανικών ουσιών αποτελείται από λιπαρά οξέα, υδατάνθρακες, και πρωτεΐνες.

- Η δυσάρεστη οσμή των λυμάτων οφείλεται στην αποικοδόμηση των πρωτεϊνών υπό αναερόβιες συνθήκες.

- Τα λύματα περιέχουν ποικιλία μικροοργανισμών (αερόβια, αυστηρά και προαιρετικά αναερόβια βακτήρια, ζύμες, μύκητες, παθογόνους ιούς, κλπ).
- Επομένως, οι μικροβιακοί πληθυσμοί των αστικών λυμάτων αποτελούν ένα συνεχές εμβόλιο μικτών καλλιεργειών.
- Τυπικοί δείκτες των λυμάτων, που δείχνουν τον βαθμό ρύπανσης είναι:

A. Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand) **BOD** που ορίζεται ως το ποσό του οξυγόνου που καταναλώνεται από συγκεκριμένο δείγμα λύματος που επωάζεται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (συνήθως 5 ημέρες) στους 20°C.

B. Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand) **COD** που ορίζεται ως η ποσότητα οξυγόνου που καταναλώνεται σε βιολογικές και μη βιολογικές οξειδώσεις.

- Άλλες παράμετροι που χρησιμοποιούνται συχνά είναι η περιεκτικότητα σε φώσφορο, άζωτο, και αιωρούμενα στερεά συστατικά.
- Η σύσταση των βιομηχανικών λυμάτων εξαρτάται κυρίως από το είδος της πηγής και διαφέρει από αυτή των αστικών λυμάτων.
- Πολλά βιομηχανικά λύματα περιέχουν ισχυρές τοξικές ουσίες, όπως φορμαλδεΰδη, αμμωνία ή κυαναμίδιο.
- Με τέτοια λύματα πρέπει να αντιμετωπίσουμε δύο σχετικά προβλήματα:
 1. Οι τοξικές ουσίες είναι εξαιρετικά βλαβερές για τους ζωντανούς οργανισμούς των νερών που υποδέχονται τα παραπάνω λύματα, και
 2. Οι τοξικές ουσίες φονεύουν τους μικροοργανισμούς που χρησιμοποιούνται στην αερόβια και αναερόβια επεξεργασία των αποβλήτων.
- Αποτελεσματικές και οικονομικά εφικτές μέθοδοι για τον περιορισμό τέτοιων τοξικών ενώσεων δεν έχουν ακόμα εφαρμοστεί.

Ενεργοποίηση λάσπης

- Η υγρή, συμπυκνωμένη, στερεά μάζα απορριμμάτων που προκύπτει από την πρωτογενή διαχείριση των λυμάτων ονομάζεται **λάσπη** (sludge).
- Η **κυτταρική λάσπη** δημιουργείται κατά την δευτερογενή, βιολογική διαχείριση.
- Μεταξύ αυτών των δύο μαζών υπάρχει μια λειτουργική σχέση:
- Η πρώτη λάσπη χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα από μικροοργανισμούς, οι οποίοι αναπτύσσονται (**ενεργοποίηση λάσπης**) και προκύπτει η **ενεργοποιημένη** ή **ενεργή** λάσπη (βιομάζα από κύτταρα μικροοργανισμών).
- Με άλλα λόγια, έχουμε μια μετατροπή της αρχικής λάσπης από στερεά απορρίμματα οργανικών ουσιών σε βιομάζα από κύτταρα.

Αερόβια επεξεργασία αποβλήτων

- Η ανάπτυξη διαδικασιών διαχείρισης αποβλήτων τον τελευταίο αιώνα έχει στηριχθεί στην εμπειρία.
- Σήμερα, οι αερόβιες και αναερόβιες διαδικασίες διαχείρισης αποβλήτων μελετώνται με συνεχώς αυξανόμενο επιστημονικό ενδιαφέρον.
- Αν και οι μελέτες των αερόβιων διαδικασιών είχαν πρωταρχικά προσανατολιστεί στην κατανόηση του μεταβολισμού του άνθρακα, σήμερα οι έρευνες κατευθύνονται προς την κατανόηση του μεταβολισμού και άλλων στοιχείων, όπως, θείου, αζώτου, και φωσφόρου, καθώς τα στοιχεία αυτά θεωρούνται άκρως σημαντικά στα απόβλητα.

Διαδικασίες ενεργούς λάσπης

- Στα αστικά κέντρα, τεράστιες ποσότητες αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων επεξεργάζονται βιολογικά μέσα από την αερόβια διαδικασία της ενεργοποιημένης λάσπης.
- Μειονεκτήματα της «παραδοσιακής» αερόβιας επεξεργασίας είναι:
 1. Περιορισμοί κατά τη μεταφορά οξυγόνου,
 2. Πολύ μεγάλοι χώροι εγκαταστάσεων,
 3. Περιορισμένος έλεγχος της διαδικασίας,
 4. Δυσκολίες στον έλεγχο του πληθυσμού των μικροοργανισμών, και
 5. Περιβαλλοντική ρύπανση, λόγω των οσμών που αναδύονται από τις ανοικτές δεξαμενές και σχηματισμού ομίχλης.
- Σήμερα, χρησιμοποιούνται βιοαντιδραστήρες, όπου γίνεται διαβίβαση αέρα, μειώνοντας σημαντικά την έκταση των εγκαταστάσεων.

- Ο βιοαντιδραστήρας συνδέεται με δεξαμενή, όπου γίνεται καθίζηση της λάσπης.
- Μέρος της λάσπης που καθιζάνει ανακυκλώνεται στον βιοαντιδραστήρα, παρέχοντας έτσι ένα συνεχές εμβόλιο μικροοργανισμών.
- Οι μικροοργανισμοί της λάσπης (π.χ. *Zoogloea ramigera*) συνθέτουν και εκκρίνουν πολυσακχαρίτες (πηκτές), στις οποίες προσκολλώνται αιωρούμενα συστατικά, κολλοειδείς ουσίες, μικροοργανισμοί (ενεργή λάσπη), κλπ, σχηματίζοντας συσσωματώματα (**σταθεροποιημένη λάσπη**).
- Τα βιοαποικοδομήσιμα συστατικά που προσροφούνται στην ενεργή λάσπη υφίστανται στη συνέχεια βιολογική οξείδωση.
- Μια «καλή» λάσπη, εκτός από την καλή προσροφητική και μεταβολική ικανότητα, πρέπει να καθιζάνει γρήγορα (ο όγκος της λάσπης που καθιζάνει σε 30min πρέπει να είναι τουλάχιστον 40 φορές μεγαλύτερος από τον όγκο των αιωρούμενων συστατικών).
- Το φαινόμενο **bulking** (δυσκολίες κατά την καταβύθιση) συνδέεται με την ανάπτυξη νηματοειδών βακτηρίων και βλεφαριδοφόρων πρωτοζώων.



Σχ. 104. Διαδικασία ενεργής λάσπης. Διαστάσεις 60m μήκος, 8.4m πλάτος και 4.50m ωφέλιμο βάθος. Τα λύματα οξυγονώνονται μέσω διαχυτήρων μεμβράνης λεπτής φυσαλίδας που βρίσκονται στον πυθμένα των δεξαμενών. Συνολικός όγκος της δεξαμενής περίπου 9000m³.

- Κανονικά, τα νηματοειδή βακτήρια δεν μπορούν να συναγωνιστούν τα ετερότροφα βακτήρια που βρίσκονται στις υγειονομικά «καλές» λάσπες.
- Απότομες μεταβολές στις συνθήκες του περιβάλλοντος ή ακατάλληλοι χειρισμοί, πιθανόν να θανατώσουν τους επιθυμητούς μικροβιακούς πληθυσμούς της ενεργής λάσπης.

Αερόβια χώνευση

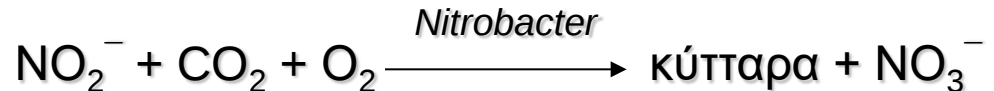
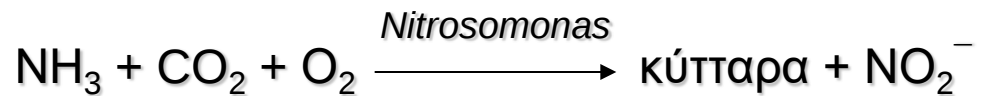
- Το υψηλού βιολογικού περιεχομένου προϊόν της λάσπης που προέρχεται από διαδικασία ενεργούς λάσπης, συχνά υπόκειται σε ένα πρόσθετο στάδιο αερισμού (μη τροφοδοτούμενο σύστημα ενεργούς λάσπης).
- Η βιομάζα χρησιμοποιεί τα δικά της αποθέματα άνθρακα, μέσω της ενδογενούς αναπνοής, μειώνοντας το περιεχόμενο των στερεών μέχρι 50% σε χρονικό διάστημα 15-25 ημερών.
- Κατά συνέπεια, μειώνεται η συνολική μάζα της λάσπης που πρέπει να μεταφερθεί και τελικά να θαφτεί.
- Σήμερα, χρησιμοποιούνται βιοαντιδραστήρες με παροχή αέρα ή οξυγόνου αυξάνοντας την απόδοση της όλης διεργασίας.
- Οι εγκαταστάσεις αυτές έχουν κατά 30% μικρότερο μέγεθος, παρουσιάζουν κατά 20% χαμηλότερο επενδυτικό κόστος και κατά 20% χαμηλότερο ενεργειακό κόστος.

- Η χρήση οξυγόνου αντί αέρα επιτρέπει τη χρήση μικρότερων δεξαμενών αερισμού, μικρότερες δεξαμενές καταβύθισης, ενώ παράγεται και μικρότερο ποσό λάσπης.

Νιτροποίηση

- Μεταξύ των υποστρωμάτων που οξειδώνονται βιολογικά είναι και οι αζωτούχες οργανικές ενώσεις σε νιτρώδη και νιτρικά.
- Υπεύθυνα βακτήρια για την οξείδωση των αζωτούχων ενώσεων είναι είδη των *Nitrosomonas* και *Nitrobacter*.

Σχ. 105. Οξείδωση αζωτούχων
ενέσεων κατά την αερόβια
χώνευση.



- Τα **διαποτιζόμενα βιολογικά φίλτρα** αποτελούν μια δημοφιλή εναλλακτική παραλλαγή ενεργούς λάσπης.
- Οι μικροοργανισμοί βρίσκονται πάνω σε στερεό στήριγμα-φορέα με τη μορφή **λεπτού υμενίου** (slime).
- Το στήριγμα-φορέας πληρεί με τη μορφή κόκκων ένα δοχείο.
- Η επαφή μεταξύ των κόκκων είναι χαλαρή, ώστε να υπάρχει κενός χώρος μεταξύ τους και να επιτρέπεται η είσοδος και η κυκλοφορία του αέρα.
- Τα απόβλητα τροφοδοτούνται από πάνω προς τα κάτω στα στρώματα του φίλτρου, είτε σε συνεχή βάση ή περιοδικά.
- Η ταχύτητα ροής δεν θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να πλημμυρίζει το φίλτρο.
- Η κυκλοφορία του αέρα μέσα στο φίλτρο γίνεται με φυσική μεταφορά, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας που δημιουργείται με την βιολογική οξείδωση των λυμάτων.



Σχ. 106. Εγκατάσταση Βιολογικού καθαρισμού στη Μύκονο.

Αναερόβια επεξεργασία αποβλήτων

- Ως **αναερόβια χώνευση** ορίζεται η παραγωγή CH_4 και CO_2 από οργανικές ουσίες με τη βοήθεια μικτών μικροβιακών πληθυσμών απουσία οξυγόνου.
- Το μεθάνιο που παράγεται απομακρύνεται εύκολα, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο (**βιοαέριο**).
- Γι' αυτό τον λόγο, πολλές φορές επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της παραγωγής μεθανίου.
- Η αναερόβια χώνευση εφαρμόζεται σε πλήθος αποβλήτων (βιομηχανικών, γεωργικών, και αστικών).
- Η κυριότερη, όμως, εφαρμογή της αφορά την επεξεργασία της περίσσειας (συμπυκνωμένης) λάσπης που παράγεται από τις διαδικασίες αερόβιας επεξεργασίας αποβλήτων.

- Η αναερόβια χώνευση παρουσιάζει πλεονεκτήματα συγκριτικά με την αερόβια επεξεργασία:

1. Δεν απαιτείται κατανάλωση ενέργειας για αερισμό,

2. Μειωμένο κόστος λειτουργίας,

3. Το παραγόμενο μεθάνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας [το οργανικό φορτίο μετατρέπεται σχεδόν ποσοτικά (>90%) σε μεθάνιο],

4. Μειωμένη τελική βιομάζα και συνεπώς χαμηλότερο κόστος για τη διάθεση της λάσπης, και

5. Μειωμένα περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω οσμής.

- Όμως, η αναερόβια χώνευση είναι ακατάλληλη για αραιά λύματα, τα οποία θα πρέπει να υφίστανται αρχικά επεξεργασία αερόβιας χώνευσης.



Σχ. 107. Προπάχυνση: Δεξαμενές διαμέτρου 8.5m. Η ιλύς κινούμενη ακτινικά προς την περιφέρεια της δεξαμενής καθιζάνει υποβοηθούμενη από μια περιστρεφόμενη γέφυρα που φέρει καθέτους ράβδους υπό μορφή χτένας. Από τον πυθμένα των δεξαμενών η λάσπη τροφοδοτείται προς τους χωνευτές.



Σχ. 108. Μηχανική πάχυνση: Φυγοκέντρωση.



Σχ. 109. Η συμπυκνωμένη ιλύς μεταφέρεται στους δύο χωνευτές συνολικού όγκου 3100m^3 αφού θερμανθεί στους 35°C . Με την αναερόβια χώνευση επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση της λάσπης με την αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων. Παράλληλα το παραγόμενο βιοαέριο (70% μεθάνιο), αφού υποστεί αποθείωση, χρησιμοποιείται για την θέρμανση των χωνευτών και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για τις ανάγκες του έργου.



Σχ. 110. Βιολογικός καθαρισμός Σαντορίνης.



Σχ. 111. Βιολογικός καθαρισμός στην Πάρο.

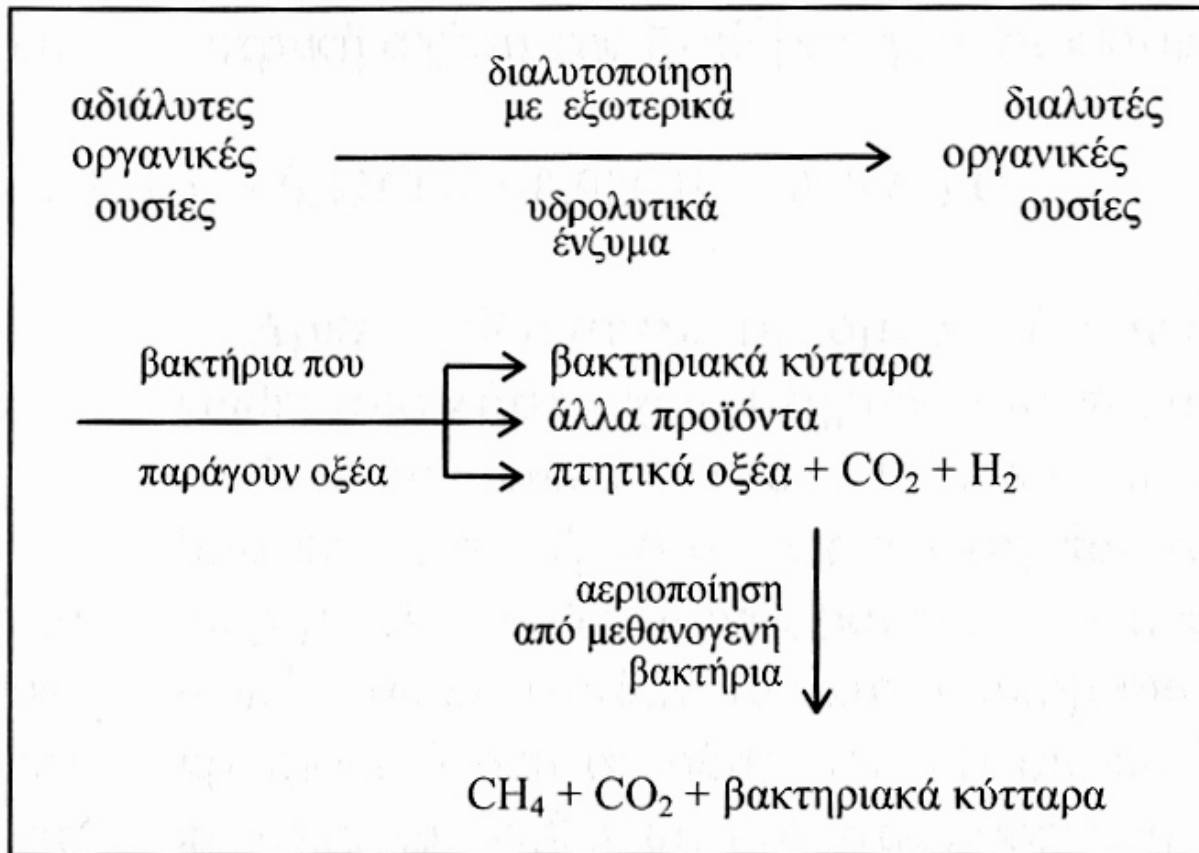


Σχ. 112. Βιολογικός καθαρισμός Ψυτάλλειας.

Αλληλοεπιδράσεις μικροοργανισμών κατά την αναερόβια διαδικασία

- Η αναερόβια χώνευση οργανικών αποβλήτων περιλαμβάνει ένα μίγμα βακτηρίων με μια πολύπλοκη αλληλοεξάρτηση που καταλήγει στην παραγωγή μεθανίου από τα μεθανογενή αρχαία.
- Τα μεθανογενή αρχαία χρησιμοποιούν μόνο ένα πολύ περιορισμένο αριθμό υποστρωμάτων για σχηματισμό μεθανίου, κυρίως οξικό οξύ, μεθανόλη, φορμικό οξύ, H_2 , και CO_2 .
- Περίπου το 75% του μεθανίου προέρχεται από το οξικό οξύ, ενώ το περισσότερο από το υπόλοιπο 25% από H_2 και CO_2 .
- Οι πρώτες ύλες, όμως, της αναερόβιας διεργασίας είναι σύνθετες πολυμερείς ενώσεις, όπως κυτταρίνη, άμυλο, λίπη, και πρωτεΐνες, από τις οποίες καμία δεν μπορεί να αφομοιωθεί από τα μεθανογενή αρχαία.

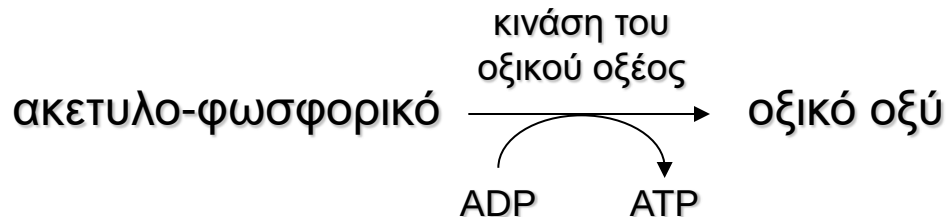
- Συνεπώς, τα μεθανογενή αρχαία εξαρτώνται από άλλους αναερόβιους ζυμωτικούς οργανισμούς για την αποικοδόμηση των πολυμερών ουσιών.
- Η χρήση του H_2 από τα μεθανογενή αρχαία οδηγεί τα υπόλοιπα βακτήρια στην παραγωγή H_2 , παρά άλλων ανηγμένων προϊόντων ζύμωσης.
- Ελλείπει αναπνευστικής αλυσίδας, η φωσφορυλίωση του ADP προς ATP πραγματοποιείται διαμέσου της γλυκόλυσης.



Σχ. 113. Σχηματική παράσταση μηχανισμού αναερόβιας χώνευσης.

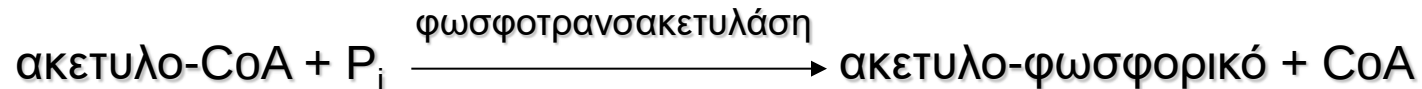
- Το πυροσταφυλικό (ή ενώσεις που προέρχονται από ακετυλο-CoA) χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως λήπτης υδρογόνου για την αναγέννηση του NAD^+ .
- Από την οξείδωση του NADH_2 προκύπτουν ανηγμένες ενώσεις, όπως γαλακτικό οξύ, αιθανόλη, ακετόνη, βουτυρικό οξύ, *n*-βουτανόλη, 2-προπανόλη, 2,3-βουτανοδιόλη, H_2 , κλπ (παραπροϊόντα).

- Ορισμένοι μικροοργανισμοί έχουν το ένζυμο κινάση του οξικού οξέος:



Σχ. 114. Φωσφορυλίωση του ADP προς ATP από την κινάση του οξικού οξέος.

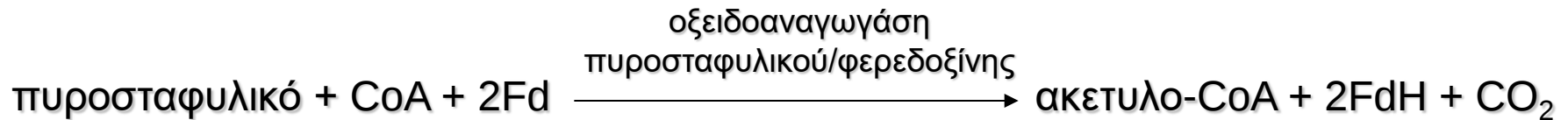
- Το ακετυλο-φωσφορικό προέρχεται από το ακετυλο-CoA με δράση της φωσφοτρανσακετυλάσης:



Σχ. 115. Σχηματισμός ακετυλο-φωσφορικού από ακετυλο-CoA.

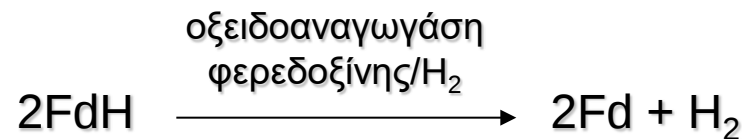
- Στα αναερόβια βακτήρια, το ακετυλο-CoA μπορεί να προκύψει από την οξείδωση του πυροσταφυλικού μέσα από δύο δρόμους:

1) Στα *Clostridia* η αντίδραση καταλύεται από μια οξειδοαναγωγή:



Σχ. 116. Οξείδωση του πυροσταφυλικού από την οξειδοαναγωγή πυροσταφυλικού/φερεδοξίνης.

- Το H_2 ελευθερώνεται εύκολα στη συνέχεια από την ανηγμένη φερεδοξίνη.



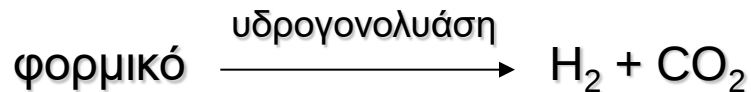
Σχ. 117. Ελευθέρωση H_2 από την φερεδοξίνη με τη δράση οξειδοαναγωγής φερεδοξίνης/ H_2 .

2) Στα εντεροβακτήρια η αντίδραση καταλύεται από τη λυάση του πυροσταφυλικού/φορμικού:



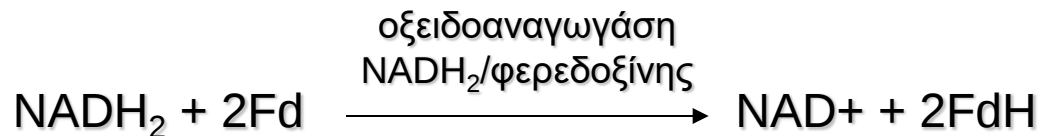
Σχ. 118. Οξείδωση πυροσταφυλικού από τη λυάση πυροσταφυλικού/φορμικού.

- Το φορμικό οξύ μπορεί στη συνέχεια να διασπαστεί από την υδρογονολυάση:



Σχ. 119. Διάσπαση του φορμικού από την υδρογονολυάση.

- Και οι δυο παραπάνω μηχανισμοί ελευθέρωσης H_2 περιλαμβάνουν ενδιάμεσα προϊόντα (FdH και φορμικό).
- Το ακετυλο-CoA που προκύπτει από τις αντιδράσεις των Σχ. 116 και 118 μπορεί να μετατραπεί σε ακετυλοφωσφορικό και μέσω της κινάσης του οξικού να καταλήξει σε οξικό, το οποίο τελικά εκκρίνεται από το κύτταρο στο περιβάλλον.
- Το υδρογόνο που προέρχεται από την αφυδρογόνωση της 3-φωσφορικής γλυκεραλδεΐδης με τη μορφή $NADH_2$ μεταφέρεται σε οργανικούς λήπτες υδρογόνου στα περισσότερα αναερόβια βακτήρια (ζυμωτικά).
- Μερικά βακτήρια έχουν την ικανότητα να ελευθερώνουν μοριακό H_2 από το $NADH_2$ μέσω της οξειδοαναγωγής $NADH_2$ /φερεδοξίνης:



Σχ. 120. Απελευθέρωση H_2 από $NADH_2$ με τη δράση οξειδοαναγωγής $NADH_2$ /φερεδοξίνης.

- Έτσι, το H_2 μπορεί πλέον να ελευθερωθεί από την FdH (Σχ. 117).
- Η αντίδραση του Σχ. 120 πραγματοποιείται σε πολύ χαμηλές μερικές πιέσεις H_2 .
- Συνεπώς, η απελευθέρωση του H_2 από μικροοργανισμούς που χρησιμοποιούν την κινάση του οξικού και μπορούν να ελευθερώνουν H_2 , πραγματοποιείται μόνο σε συνεργασία με άλλους μικροοργανισμούς (π.χ. μεθανογενείς), έτσι ώστε να διατηρείται χαμηλή η μερική πίεση του μοριακού H_2 .
- Έχουμε, δηλαδή, έναν ειδικό τύπου συμβίωσης (**μεταφορά υδρογόνου μεταξύ των ειδών**).

Οι ομάδες των μικροβιακών πληθυσμών στην αναερόβια χώνευση

- Η ακριβής ταυτοποίηση των ειδών που υπάρχουν σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα δεν είναι εύκολη, καθώς οι συνθήκες καλλιέργειας καθορίζουν την επιβίωση και ανάπτυξη των διαφόρων ειδών.
- Προς το παρόν, οι γνώσεις μας για την μικροβιολογία των χωνευτήρων στηρίζονται στην αντίληψη 3 μικροβιακών ομάδων:
 1. Η ομάδα I που αποτελείται από υδρολυτικά και ζυμωτικά βακτήρια,
 2. Η ομάδα II που αποτελείται από οξικογενή βακτήρια τα οποία παράγουν H_2 , και
 3. Η ομάδα III που αποτελείται από τα μεθανογενή αρχαία.
- Κατά το πρώτο στάδιο, στερεά της λάσπης διαλυτοποιούνται από εξωκυτταρικά ένζυμα που συνθέτονται από ευρύ φάσμα βακτηρίων που παράγουν πρωτεολυτικά, λιπολυτικά, και κυτταρινολυτικά ένζυμα.

- Το επόμενο στάδιο της χώνευσης αφορά τη σύνθεση πτητικών ουσιών και λιπών με βραχεία αλυσίδα από βακτήρια που ονομάζονται **οξοποιητές**.
- Το κύριο προϊόν του σταδίου αυτού είναι το οξικό οξύ, αλλά παράγονται και άλλα οξέα, όπως προπιονικό, βουτυρικό, κλπ.
- Το τρίτο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης περιλαμβάνει την παραγωγή μεθανίου (το 75% του μεθανίου παράγεται από το οξικό οξύ).
- Είναι το πλέον αργό στάδιο (καθορίζον την ταχύτητα στάδιο).

Ομάδα I: Υδρολυτικά και ζυμωτικά βακτήρια

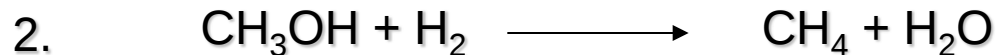
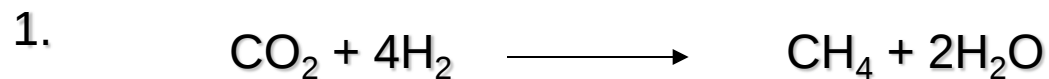
- Περιλαμβάνει υποχρεωτικά αναερόβια (*Clostridia*), αλλά και προαιρετικά αναερόβια βακτήρια (στρεπτόκοκκους και εντεροβακτήρια).
- Η ομάδα αυτή είναι υπεύθυνη για την απομάκρυνση μικρών ποσών οξυγόνου που εισάγεται με την τροφοδοσία του χωνευτήρα.
- Ο πληθυσμός των βακτηρίων αυτών ανέρχεται συνήθως σε 10^8 - 10^9 cfu/mL.
- Υποστρώματα υδρόλυσης είναι οργανικές ουσίες, όπως λίπη, πρωτεΐνες, κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, άμυλο, πηκτίνες, κλπ, και προϊόντα υδρόλυσης οργανικά οξέα (προπιονικό, οξικό, βουτυρικό, γαλακτικό), αλκοόλη, H_2 , CO_2 , κλπ.

Ομάδα II: Οξικογενή βακτήρια που παράγουν H_2

- Τα βακτήρια αυτά είναι προαιρετικά αναερόβια, ετερότροφα με βέλτιστο pH ανάπτυξης 4.0-6.5.
- Ο πληθυσμός των βακτηρίων αυτών ανέρχεται συνήθως σε 10^6 cfu/mL.
- Στους χωνευτήρες διεξάγεται και η β -οξείδωση των ανώτερων λιπαρών οξέων προς οξικό οξύ.

Ομάδα III: Μεθανογενή αρχαία

- Είναι αυστηρά αναερόβια αρχαία.
- Ο πληθυσμός τους ανέρχεται συνήθως σε 10^6 - 10^8 cfu/mL.
- Χρησιμοποιούν μια πολύ περιορισμένη κλίμακα υποστρωμάτων.
- Η σύνθεση του μεθανίου είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με 3 τρόπους:



• Απουσία H_2 μια ποσότητα CH_3OH οξειδώνεται προς CO_2 για την αναγωγή άλλων μορίων CH_3OH προς CH_4 .





- Η παραγωγή μεθανίου από οξικό είναι φτωχότερη ενεργειακά (μόλις ευνοείται) σε σχέση με τους άλλους τρόπους.
- Έτσι, η αύξηση των μεθανογενών αρχαίων σε οξικό οξύ είναι πολύ αργή.
- Ο μέσος χρόνος παραγωγής μεθανίου είναι >20 ημερών.
- Ο χρόνος αυτός μπορεί να μειωθεί αρκετά αν χρησιμοποιηθεί διάταξη ακινητοποιημένων μικροοργανισμών σε βιοαντιδραστήρα στήλης.

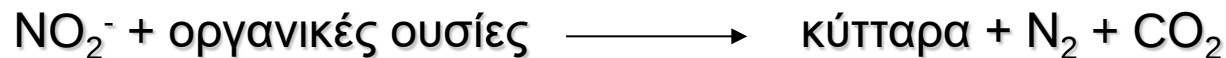
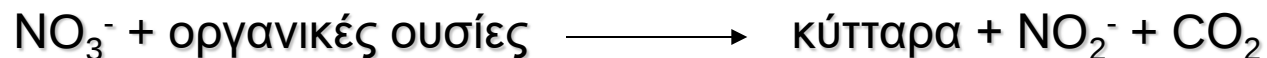
Αναερόβια απονιτροποίηση

- Η αναγωγή του αζώτου επιτυγχάνεται υπό αναερόβιες συνθήκες από ποικιλία βακτηρίων, τα οποία καταναλώνουν οργανικές ουσίες χρησιμοποιώντας νιτρικά και νιτρώδη ιόντα ως δέκτες ηλεκτρονίων.

- Υπάρχουν 2 δρόμοι αφομοίωσης του αζώτου:

A. Ο δρόμος της αφομοιωτικής αναγωγής νιτρικών, όπου μέρος του αζώτου μετατρέπεται σε αμμωνία και ενσωματώνεται στην κυτταρική μάζα, και

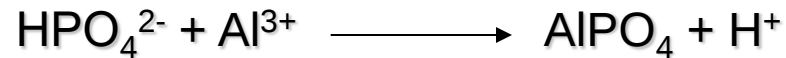
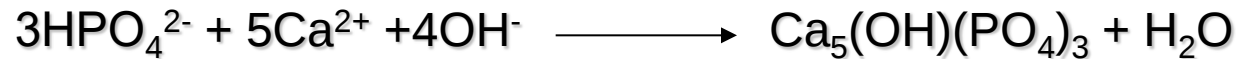
B. Ο δρόμος της μη αφομοιωτικής αναγωγής, όπου το τελικό προϊόν είναι το μοριακό άζωτο.



Σχ. 121. Αναγωγή νιτρικών και νιτρωδών αλάτων σε μοριακό άζωτο.

Απομάκρυνση φωσφορικών

- Ο φώσφορος βρίσκεται σε ακατέργαστα απόβλητα.
- Είναι δυνατόν να καταβυθιστεί στα ρεύματα εξόδου με ασβέστιο ή αργίλιο.



Σχ. 122. Καταβύθιση φωσφορικών με ασβέστιο και αργίλιο.

Καλλιέργειες εκκινητές για διαδικασίες επεξεργασίας αποβλήτων

- Σε αναλογία με την χρήση καλλιεργειών εκκινητών στη βιομηχανία τροφίμων, υπάρχουν κατάλληλες καλλιέργειες εκκινητές που χρησιμοποιούνται για επεξεργασία αποβλήτων σε περιπτώσεις όπου η μεταφορά των αποβλήτων σε εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού είναι αδύνατη.
- Οι καλλιέργειες εκκινητές βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στη θαλάσσια ρύπανση (π.χ. κηλίδες πετρελαίου).