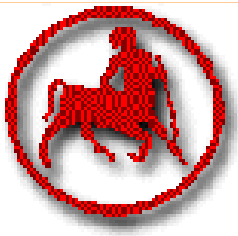


Διάλεξη 8

*Δευτεροβάθμια ή Βιολογική
Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων
Αναερόβια Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων*

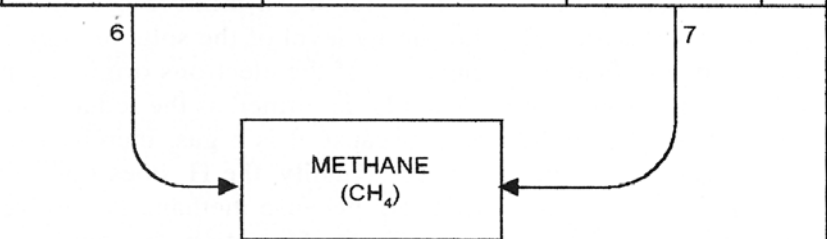
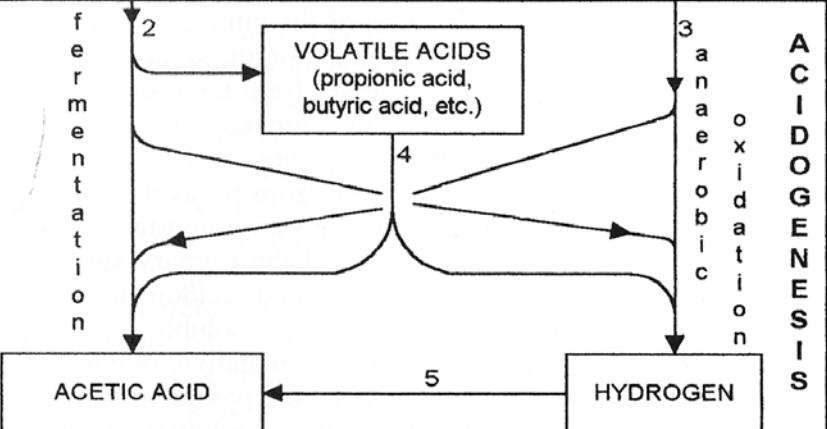
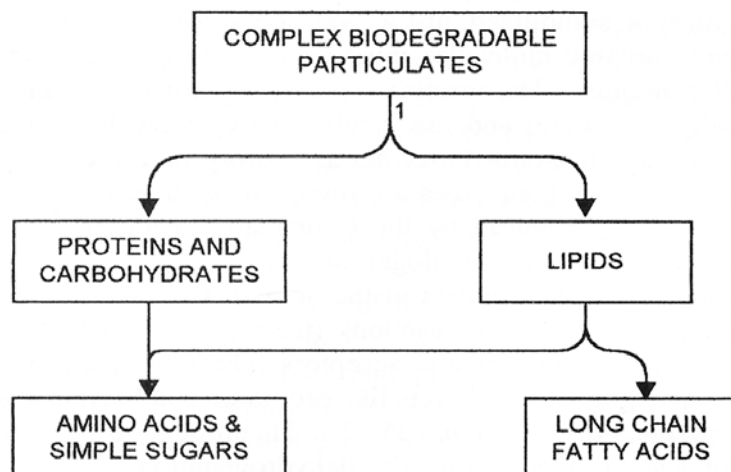


Αναερόβια Χώνευση

Η διάσπαση της οργανικής ύλης υπό αναερόβιες συνθήκες οδηγεί σε παραγωγή **CH₄**, ως τελικό προϊόν, **και πτητικών λιπαρών οξέων**, ως ενδιάμεσα προϊόντα, τα οποία μπορούν να συλλεγούν και να χρησιμοποιηθούν για παροχή ενέργειας



PARTICULATE HYDROLYSIS



METHANOGENESIS

Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την αναερόβια επεξεργασία οργανικής ύλης στα συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων

- Υδρόλυση
- Οξεογένεση
- Μεθανιογένεση



Υδρολυτικό στάδιο αναερόβιας χώνευσης

- Υδρόλυση υδατανθράκων, πρωτεϊνών και λιπιδίων πραγματοποιείται κυρίως από πλήρως αναερόβια βακτήρια των γενών *Clostridium*, *Bifidobacteria*, *Bacteroides*.
- Η διάσπαση των πρωτεϊνών και υδατανθράκων προς αμινοξέα και σάκχαρα αντίστοιχα είναι ταχύτερη αλλά η διάσπαση των λιπιδίων πραγματοποιείται με βραδύτερους ρυθμούς και για τον λόγο αυτό ο χρόνος κατακράτησης των στερεών των συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων σε αναερόβιους αντιδραστήρες θα πρέπει να είναι σχετικά μακρύτερος



Οξεογόνο Στάδιο Αναερόβια Χώνευσης

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιούνται οι εξής διεργασίες:

- **Μετατροπή των αμινοξέων και σακχάρων** προς ενδιάμεσα προϊόντα όπως πτητικά οξέα (προπιονικό και βουτυρικό οξύ) τα οποία μετατρέπονται με αναερόβιες διεργασίες σε οξικό οξύ και H_2 (μικρές ποσότητες)
- **Αναερόβια οξειδωση** λιπαρών και πτητικών οξέων προς οξικό οξύ και H_2 (μεγάλες ποσότητες)

Στο στάδιο οξεογένεσης συμμετέχουν κυρίως αναερόβια βακτήρια του γένους *Syntrophomonas* και *Syntrophobacter* των οποίων τα ενζυμικά συστήματα βρίσκονται υπό την ρύθμιση της συγκέντρωσης H^+ και ενεργοποιούνται σε χαμηλές συγκεντρώσεις H^+

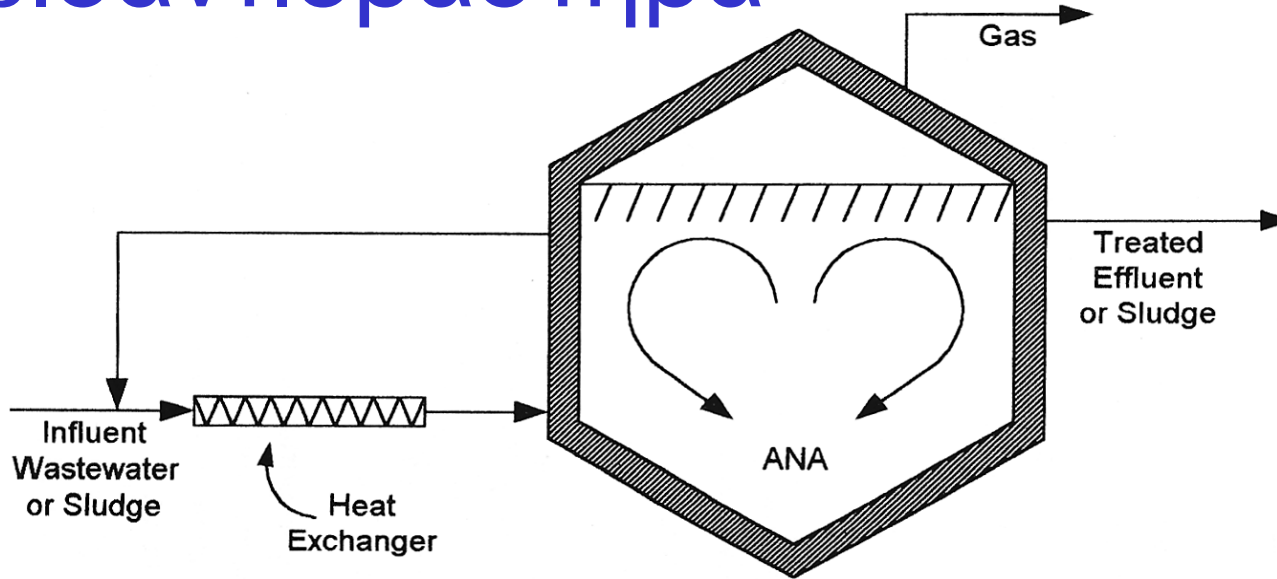
Μεθανιογόνο στάδιο αναερόβιας χώνευσης

Τα προϊόντα του οξεογόνου σταδίου, Η και οξικό οξύ, χρησιμοποιούνται από **μεθανιογόνα βακτήρια** για μετατροπή τους σε μεθάνιο

- Μεθανιογόνα βακτήρια που διασπούν το οξικό οξύ προς μεθάνιο και CO_2 και αποτελούν τα 2/3 του πληθυσμού των μεθανιογόνων βακτηρίων (*Methanosarcina*, *Methanosaetaceae*)
- Μεθανιογόνα βακτήρια που οξειδώνουν H_2 παρουσία CO_2 προς μεθάνιο και αποτελούν συνήθως το 1/3 του πληθυσμού (*Methanobrevibacter*, *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanogenium*)



Κατασκευαστικά στοιχεία αναερόβιου βιοαντιδραστήρα



- Κλειστή δεξαμενή
- Σύστημα ανάμιξης
- Σύστημα θέρμανσης
- Σύστημα διαχωρισμού αερίων – υγρών - στερεών



Κατασκευαστικά στοιχεία αναερόβιου αντιδραστήρα

- **Κλειστά συστήματα** ώστε να αποφεύγεται η διάχυση O_2 από την ατμόσφαιρα και να διασφαλίζονται αναεροβικές συνθήκες
- **Μονωμένοι εξωτερικά** ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία στο εσωτερικό του αντιδραστήρα και περιέχουν **σύστημα θέρμανσης** το οποίο διατηρεί την θερμοκρασία σταθερή και σε βέλτιστα επίπεδα για την βιομάζα. Το CH_4 που παράγεται συλλέγεται και χρησιμοποιείται ως καύσιμο για την θέρμανση του αντιδραστήρα

Κατασκευαστικά στοιχεία αναερόβιου αντιδραστήρα

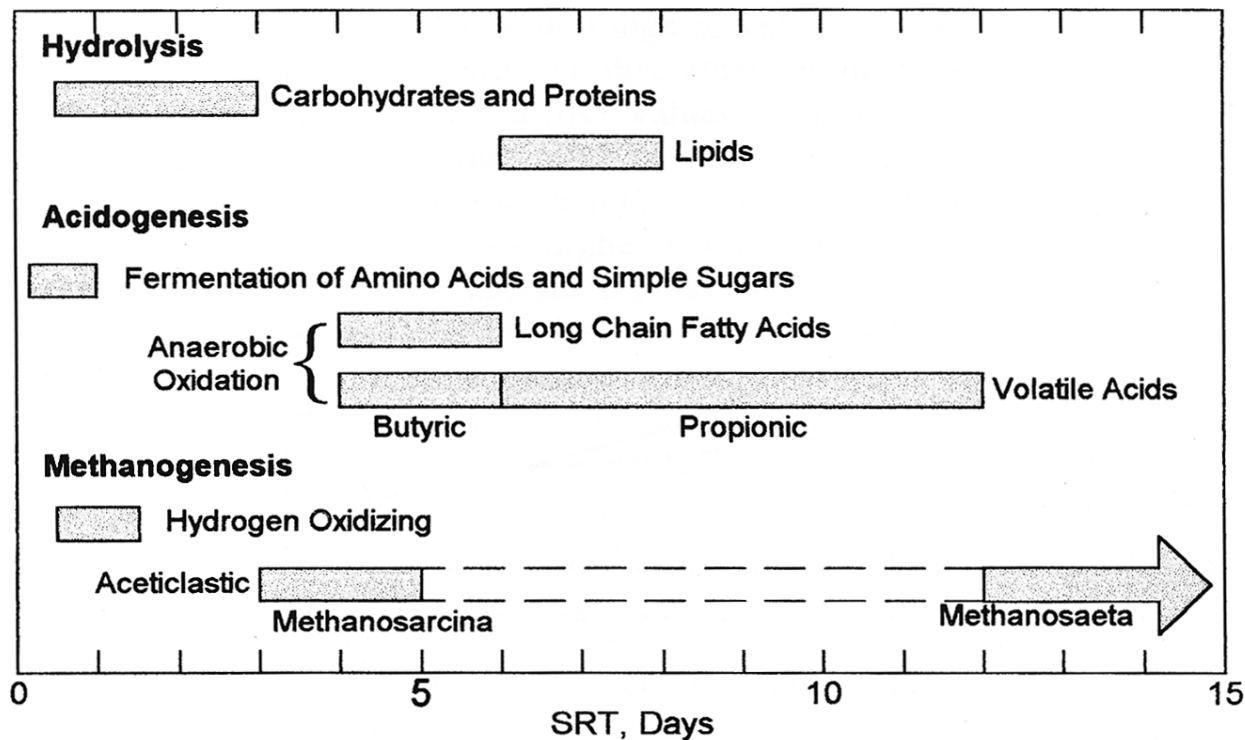
Αναερόβιοι αντιδραστήρες κατέχουν:

- **Συστήματα ανάμιξης:** ώστε να επιτευχθεί ομογενοποίηση των αποβλήτων
- **Αποτελεσματικό σύστημα διαχωρισμού αέριων – υγρών – στερεών:** Ο διαχωρισμός στερεών – υγρών είναι καθοριστικός για την αποτελεσματικότητα του συστήματος ενώ ο διαχωρισμός στερεών – αερίων είναι απαραίτητος για να ακολουθήσει ο διαχωρισμός στερεών - υγρών



Λειτουργία Αναερόβιου Αντιδραστήρα

Γενικότερα, οι αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες χαρακτηρίζονται από μεγάλους χρόνους κατακράτησης στερεών (SRTs) που είναι απαραίτητοι διότι η ανάπτυξη των μεθανιογόνων βακτηρίων είναι αργή



Παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία Συστημάτων Αναερόβιας Χώνευσης

- Χρόνος κατακράτησης στερεών
- Συνολικό υδραυλικό φορτίο
- **Θερμοκρασία**
- **pH**
- **Ουσίες με τοξική και ανασταλτική δράση**
- **Θρεπτικά στοιχεία**
- Ανάμιξη
- Είδος και προέλευση αποβλήτων

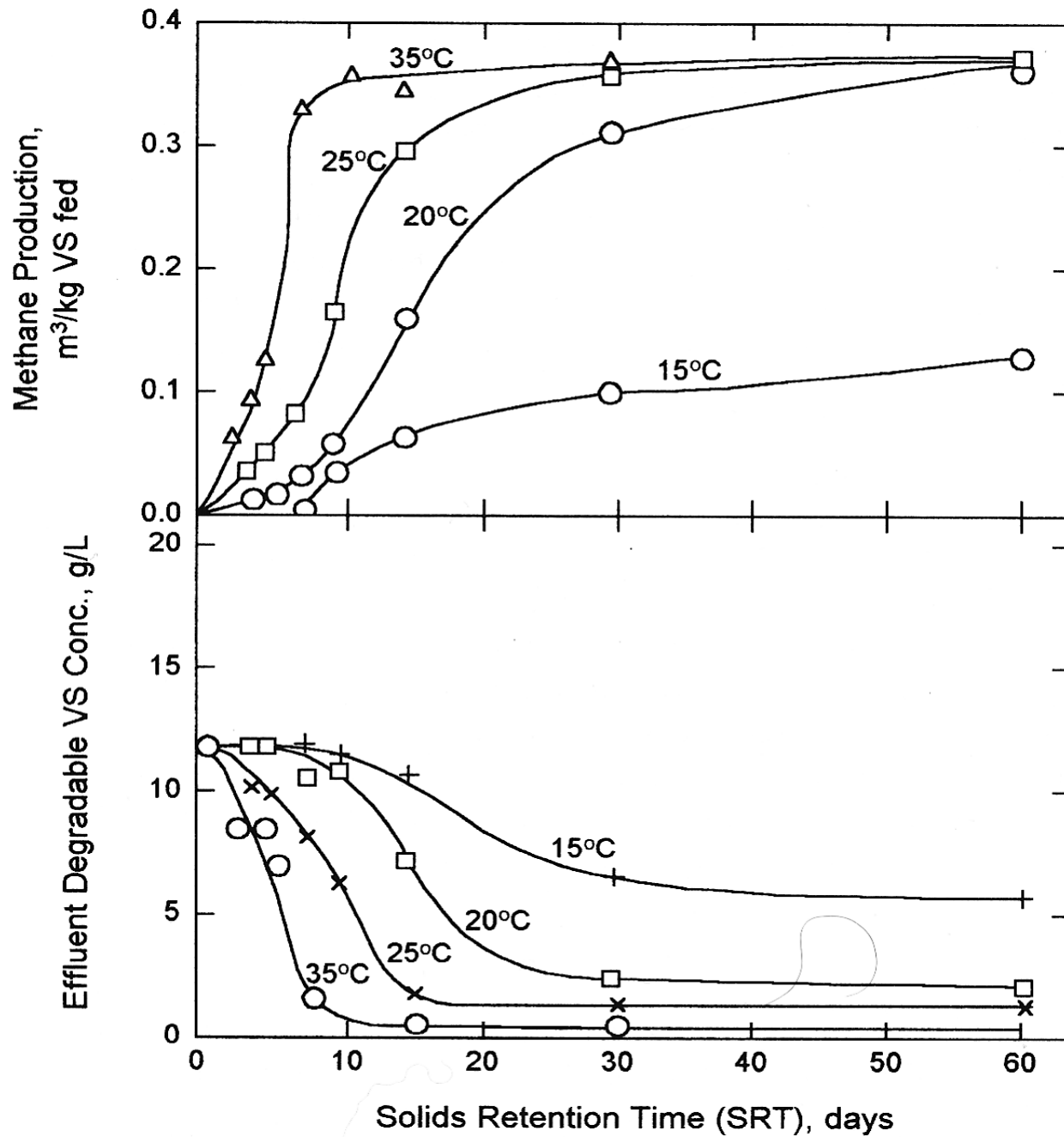


Θερμοκρασία στην Αναερόβια Χώνευση

Βασική αρχή για τα συστήματα αναεροβικής χώνευσης είναι

- **Αποφυγή μεταβολών της θερμοκρασίας** που θα πρέπει να διατηρείται στους $\pm 2^{\circ}\text{C}$ κατά την διάρκεια της διεργασίας
- **Διατήρηση της θερμοκρασίας σε βέλτιστα επίπεδα για την ανάπτυξη των μεθανιογόνων βακτηρίων** δηλαδή 30-40°C και 50-60 °C. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρέχουν την επιπλέον καταστροφή των παθογόνων αλλά απαιτούν παροχή ενέργειας για την διατήρηση των υψηλών θερμοκρασιών και υπάρχει αυξημένος κίνδυνος για αποσταθεροποίηση του συστήματος





pH στην Αναερόβια Χώνευση

- Σημαντικότετος παράγοντας για την ισορροπία του συστήματος με βέλτιστο εύρος 6.8-7.4 - άριστο για την ανάπτυξη των μεθανιογόνων βακτηρίων
- Μείωση του pH, λόγω υψηλής συγκέντρωση H^+ , οδηγεί σε αυξημένες συγκεντρώσεις πτητικών λιπαρών οξέων με αποτέλεσμα τα μεθανιογόνα βακτήρια να μην μπορούν να μεταβολίσουν τις υψηλές συγκεντρώσεις οξικού οξέος και H^+ προς CH_4 με συνέπεια την συσσώρευση πτητικών οξέων και την μείωση του pH που εάν φτάσει σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα προκαλεί την οριστική αναστολή της διεργασίας
- Η κατάσταση μπορεί να διορθωθεί με προσθήκη χημικών όπως άσβεστος, αμμωνία, υδροξειδίου καλίου ή νατρίου

Ουσίες με τοξική και ανασταλτική δράση

Ουσίες με τοξική δράση όπως μεταλλικά κατιόντα (Na, K, Ca, Mg), NH_3 , σουλφίδια, μέταλλα και οργανικοί ρύποι μπορεί να έχουν ανασταλτική δράση στην ισορροπία του συστήματος αναερόβιας χώνευσης



Αερόβια

VS

***Αναερόβια Συστήματα στην
Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων***



- **Αερόβια συστήματα** προτιμούνται για την επεξεργασία αραιών υγρών αποβλήτων ($\text{COD} < 1000 \text{ mg/L}$) ενώ **αναερόβια συστήματα** προτιμούνται για την επεξεργασία πυκνών υγρών αποβλήτων ($\text{COD} > 1000 \text{ mg/L}$)
- Τα **αναερόβια συστήματα** παρουσιάζουν χαμηλότερη παραγωγή στερεών, χαμηλότερες απαιτήσεις για θρεπτικά και ενέργεια ενώ οδηγούν στην παραγωγή ενός χρήσιμου ενεργειακά αερίου



- Τα αερόβια συστήματα είναι πιο ανθεκτικά σε τοξικές ουσίες και παρέχουν υψηλότερης ποιότητας επεξεργασμένα απόβλητα
- Ανθεκτικές στην μικροβιακή διάσπαση ουσίες μπορούν να διασπαστούν ευκολότερα σε αναερόβιες συνθήκες (χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες)

- Οι αερόβιες διεργασίες είναι πιο αποτελεσματικές για την καταστροφή παθογόνων λόγω των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται
- Τα αναερόβια συστήματα απαιτούν γενικά μεγαλύτερους χρόνους κατακράτησης στερεών (SRTs) ώστε να αναπτυχθούν πλήρως οι μεθανιογόνοι μικροοργανισμοί

Κατηγορίες αναερόβιων διεργασιών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

- **Αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion)**
- Χαμηλού ρυθμού αναερόβια χώνευση (Low Rate Anaerobic Digestion)
- Υψηλού ρυθμού αναερόβια χώνευση (High Rate Anaerobic Digestion)
- Αναερόβια χώνευση στερεών (Solids Fermentation Processes)



Αναερόβια χώνευση

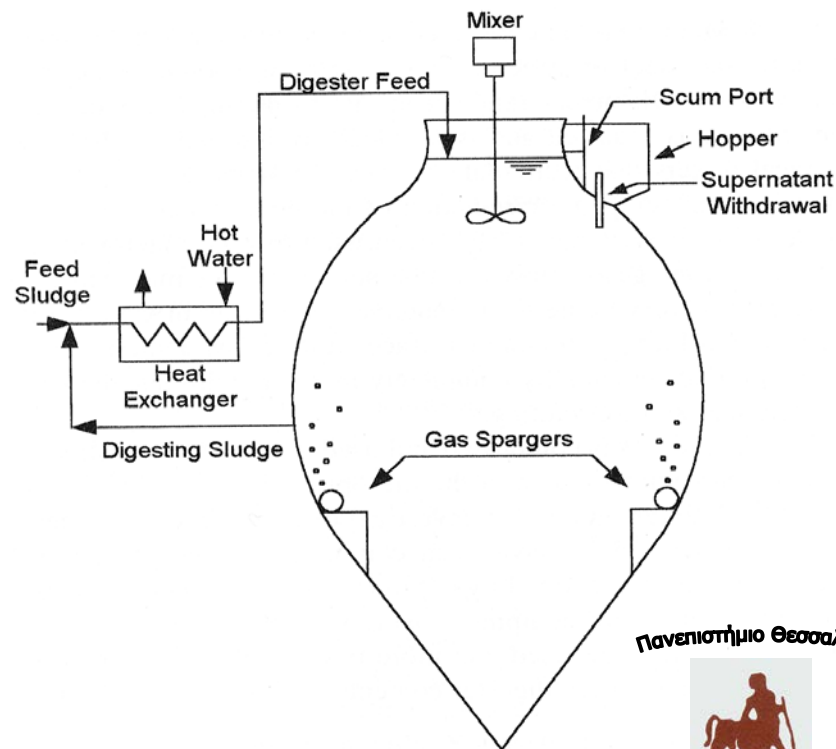
- Στην συνήθη μορφή οι αναερόβιοι χωνευτήρες αποτελούν ένα σύστημα πλήρους ανάμιξης υγρών –στερεών όπου τα απόβλητα διατηρούνται για 15-20 ημέρες (SRTs)
- Είναι συνήθως κυλινδρικές κατασκευές με διάμετρο 10-40 m και κωνικό πυθμένα που περιέχουν κατάλληλο σύστημα ανάμιξης των αποβλήτων.
- Το CH_4 που παράγεται συλλέγεται και χρησιμοποιείται για την θέρμανση του συστήματος ($35\text{-}55^\circ\text{C}$) που πρέπει να διατηρείται σταθερή



Αναεροβική χώνευση

Από τις πιο χρησιμοποιούμενες κατασκευές αντιδραστήρων είναι οι αναερόβιοι αντιδραστήρες σχήματος αυγού που δε αντιμετωπίζουν προβλήματα συσσώρευσης χαλικιών στον πυθμένα και σκουπιδιών στην επιφάνεια

Η αναερόβια χώνευση με χρόνο κατακράτησης στερεών 15-20 ημέρες οδηγεί σε μείωση της βιοδιασπώμενης οργανικής ύλης των αποβλήτων που φθάνει το 80-90%

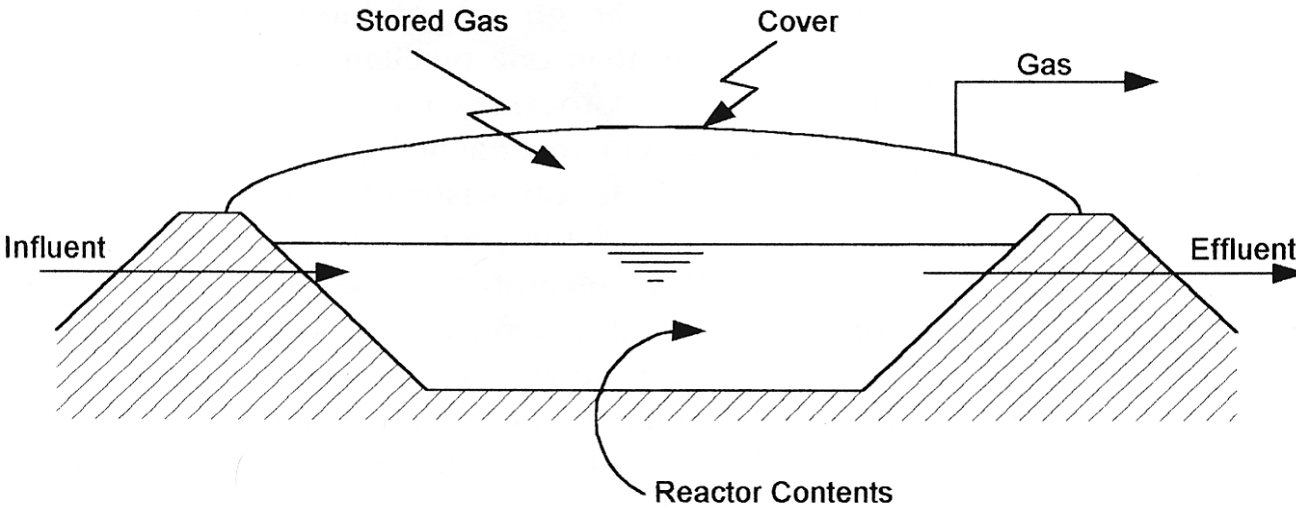


Κατηγορίες αναερόβιων διεργασιών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

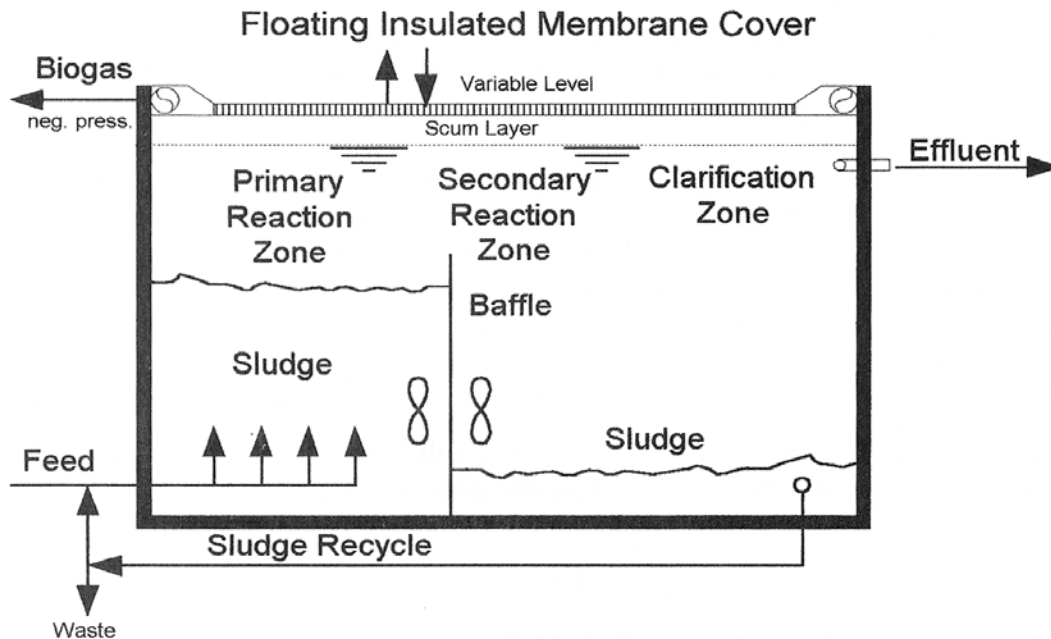
- Αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion)
- **Χαμηλού ρυθμού αναερόβια χώνευση (Low Rate Anaerobic Digestion)**
- Υψηλού ρυθμού αναερόβια χώνευση (High Rate Anaerobic Digestion)
- Αναερόβια χώνευση στερεών (Solids Fermentation Processes)



Χαμηλού ρυθμού αναερόβια χώνευση



Κατασκευή εντός
της γης με
κατάλληλα
τοιχώματα



Τσιμεντένια
κατασκευή με
διαχωρισμένες ζώνες



Χαμηλού ρυθμού αναερόβια χώνευση

- Απλά συστήματα που επιτυγχάνουν ικανοποιητική καθίζηση των στερεών χρησιμοποιώντας μεγάλους χρόνους κατακράτησης
- Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως για επεξεργασία υγρών αποβλήτων που βρίσκονται σε υψηλή θερμοκρασία ή χρησιμοποιούν μεγάλους χρόνους κατακράτησης στερεών για να επιτρέψουν στο σύστημα να λειτουργήσει σε κατάλληλες θερμοκρασίες



Κατηγορίες αναερόβιων διεργασιών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

- Αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion)
- Χαμηλού ρυθμού αναερόβια χώνευση (Low Rate Anaerobic Digestion)
- **Υψηλού ρυθμού αναερόβια χώνευση (High Rate Anaerobic Digestion)**
- Αναερόβια χώνευση στερεών (Solids Fermentation Processes)



Υψηλού ρυθμού αναερόβια χώνευση

- Βασική αρχή αυτών των συστημάτων είναι η σημαντική κατακράτηση της ενεργής βιομάζας
- Οι βιοαντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι **βιοαντιδραστήρες με βιολογικές κροκύδες** (suspended growth bioreactors), **βιοντιδραστήρες βιοστρωμάτων** (Attached growth bioreactors) ή **υβριδικά συστήματα** μεταξύ των δύο αυτών ειδών

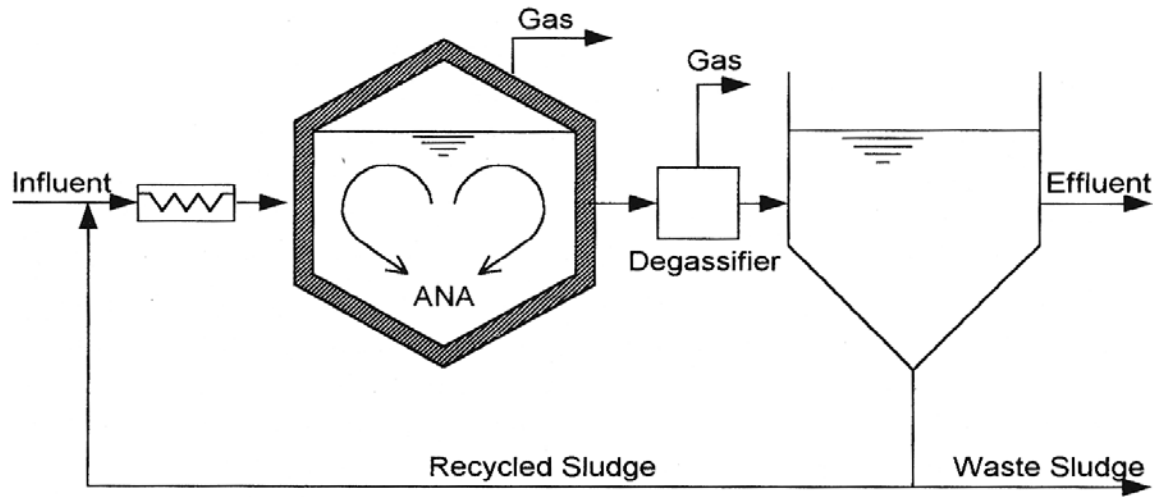


Συστήματα Αναερόβιας Χώνευσης Υψηλού Ρυθμού

- Αναερόβιας Επαφής (Anaerobic contact, AC)
- Αναερόβιοι Αντιδραστήρες Ανοδικής ροής (UASB)
- Αναερόβια Διήθηση (AF)
- Υβριδικά συστήματα UASB/AF
- Καθοδικής Ροής Σταθεροποιημένου Βιοστρώματος (DSFF)
- Ρευστοποιημένες/Αναπτυσσόμενες Κλίνες (FB/EB)



Συστήματα Αναερόβιας Επαφής



- Αναερόβια Συστήματα Ενεργοποιημένης Λάσπης όπου τα υγρά απόβλητα βρίσκονται σε πλήρη ανάμιξη με κατάλληλο σύστημα ανάμιξης, το αέριο που παράγεται συλλέγεται πριν τα υγρά απόβλητα διοχετευτούν στην δεξαμενή διαχωρισμού
- Τμήμα της συλλεγόμενης λάσπης (**Recycled Sludge**) επαναφέρεται στο σύστημα

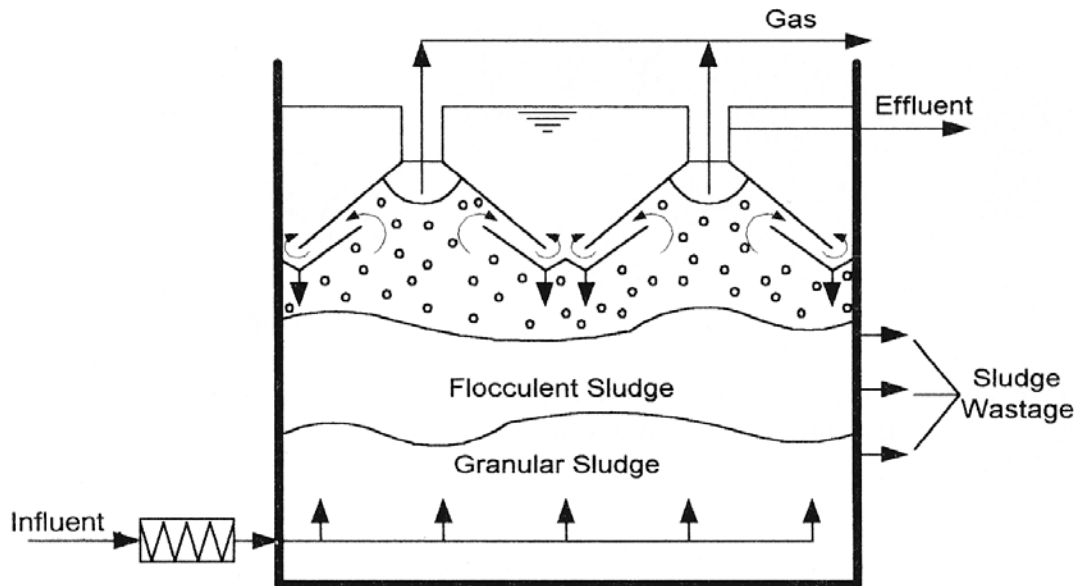
Συστήματα Αναερόβιας Χώνευσης Υψηλού Ρυθμού

- Αναερόβιας Επαφής (Anaerobic contact, AC)
- **Αναερόβιοι Αντιδραστήρες Ανοδικής ροής (UASB)**
- Αναερόβια Διήθηση (AF)
- Υβριδικά συστήματα UASB/AF
- Καθοδικής Ροής Σταθεροποιημένου Βιοστρώματος (DSFF)
- Ρευστοποιημένες/Αναπτυσσόμενες Κλίνες (FB/EB)



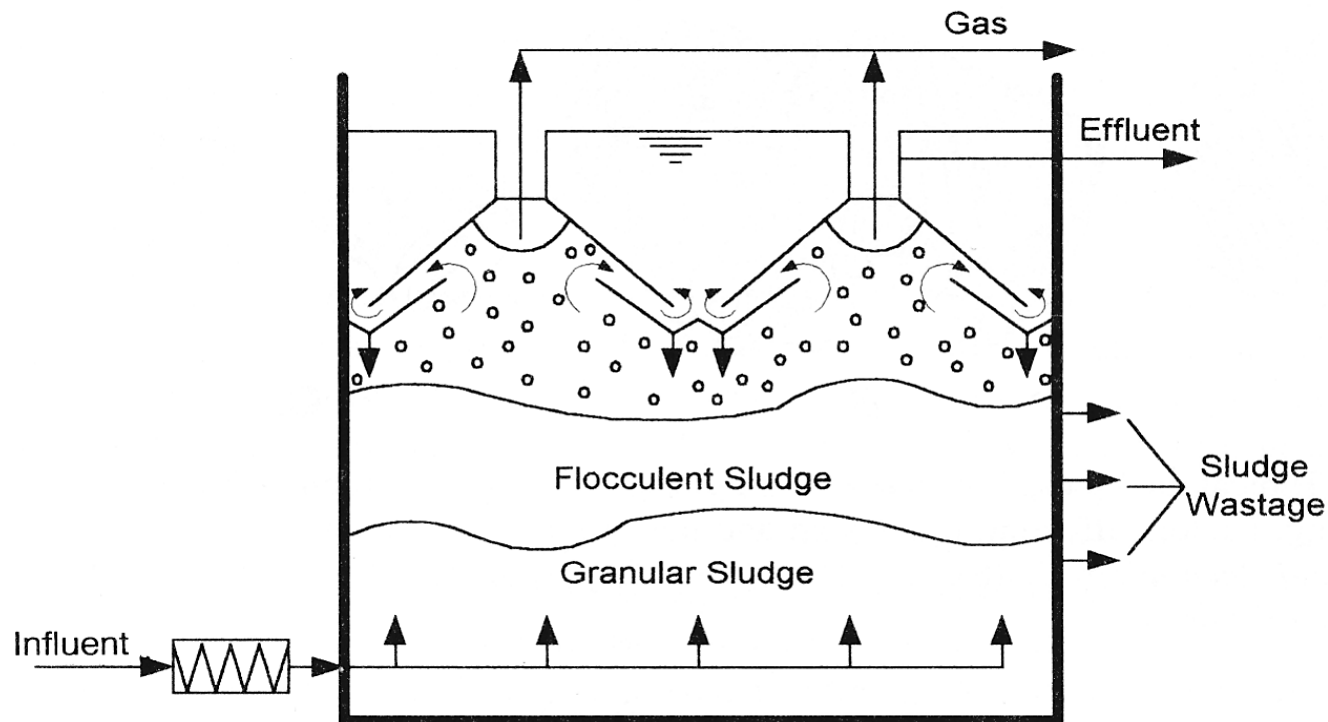
Αναερόβιοι Αντιδραστήρες Ανοδικής Ροής

- Σύστημα βιοκροκύδων όπου το εσωτερικό του διαχωρίζεται σε τρεις οριζόντιες ζώνες
- Τα υγρά διοχετεύονται ομοιόμορφα από τον πυθμένα του αντιδραστήρα και τα μεγάλα μεγέθους στερεά και η βιομάζα σχηματίζουν μεγάλους κόκκους οι οποίοι καθιζάνουν στον πυθμένα σχηματίζοντας μια παχιά ζώνη (**Granular sludge**) με συγκεντρώσεις διαλυτών στερεών 20 – 30 g/L



Αναερόβιοι Αντιδραστήρες Ανοδικής Ροής

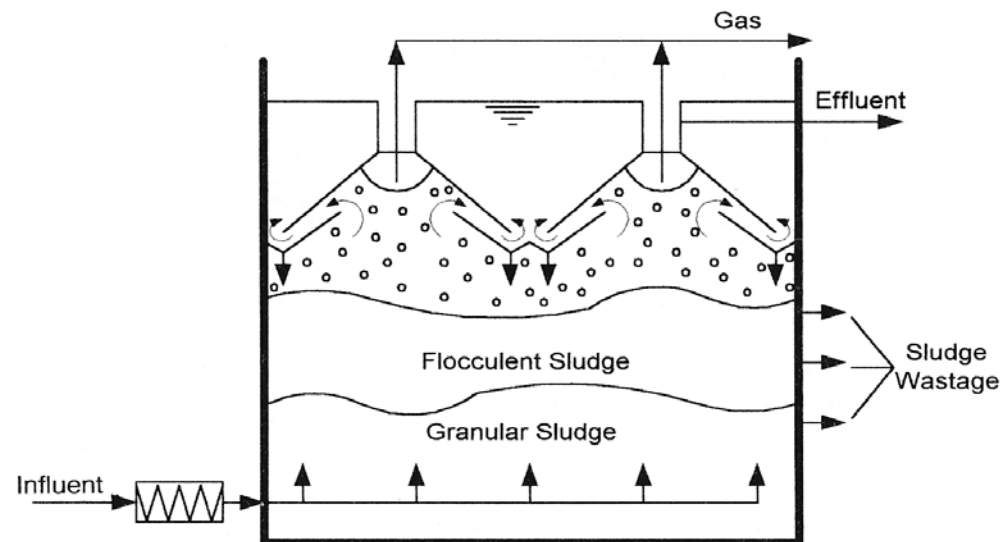
Τα εισερχόμενα απόβλητα διέρχονται από την ζώνη των κόκκων (**Granular sludge**) και η οργανική ουσία έρχεται σε επαφή με την βιομάζα στην ζώνη των κόκκων και διασπάζεται



Αναερόβιοι Αντιδραστήρες Ανοδικής Ροής

Σωματίδια τα οποία δεν κατακρατούνται στην ζώνη των κόκκων δημιουργούν μια αραιότερη ζώνη από κροκύδες (**flocculent sludge**) ακριβώς πάνω από την ζώνη των κόκκων.

Τα υγρά που διέρχονται από τις δύο ζώνες καταλήγουν στην κορυφή του συστήματος όπου με διάφορες μεθόδους γίνεται ο διαχωρισμός υγρών – στερεών – αερίων.



Συστήματα Αναερόβιας Χώνευσης Υψηλού Ρυθμού

- Αναερόβιας Επαφής (Anaerobic contact, AC)
- Αναερόβιοι Αντιδραστήρες Ανοδικής ροής (UASB)
- **Αναερόβια Διήθηση (AF)**
- Υβριδικά συστήματα UASB/AF
- Καθοδικής Ροής Σταθεροποιημένου Βιοστρώματος (DSFF)
- Ρευστοποιημένες/Αναπτυσσόμενες Κλίνες (FB/EB)



Αναερόβια Διήθηση (Anaerobic filter)

- Ο αντιδραστήρας περιέχει κατάλληλα πορώδη υλικά επί των οποίων αναπτύσσεται η βιομάζα
- Τα υγρά απόβλητα εισέρχονται ομοιόμορφα από τον πυθμένα του συστήματος διαχέονται διαμέσου του πορώδους υλικού όπου και πραγματοποιείται η βιολογική διάσπαση του οργανικού φορτίου



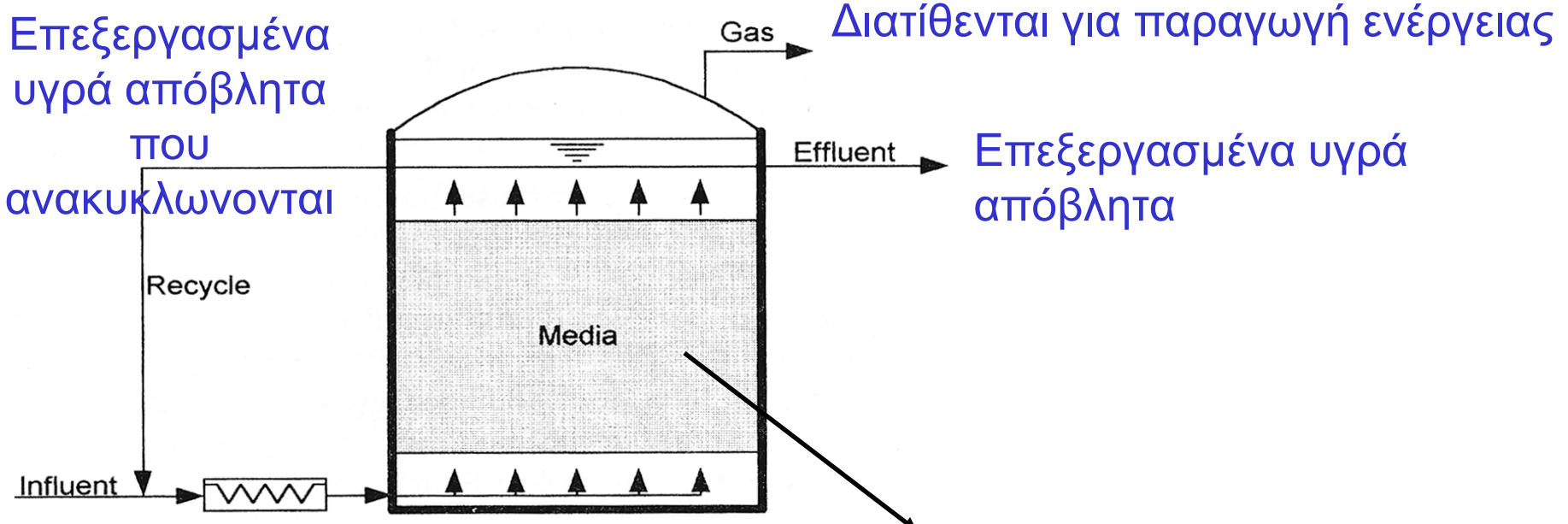
Αναερόβια Διήθηση (Anaerobic filter)

- Τα υγρά απόβλητα που διαπερνούν το διηθητικό μέσο καταλήγουν στην κορυφή του συστήματος όπου απομακρύνονται.
- Τα αέρια συλλέγονται από κατάλληλο σύστημα και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας

Αναερόβια Διήθηση

Επεξεργασμένα
υγρά απόβλητα

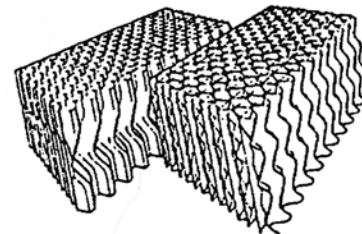
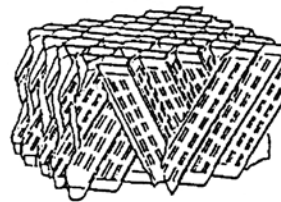
ΠΟΥ
ανακυκλώνονται



Διατίθενται για παραγωγή ενέργειας

Επεξεργασμένα υγρά
απόβλητα

Τύποι πορώδους υλικού

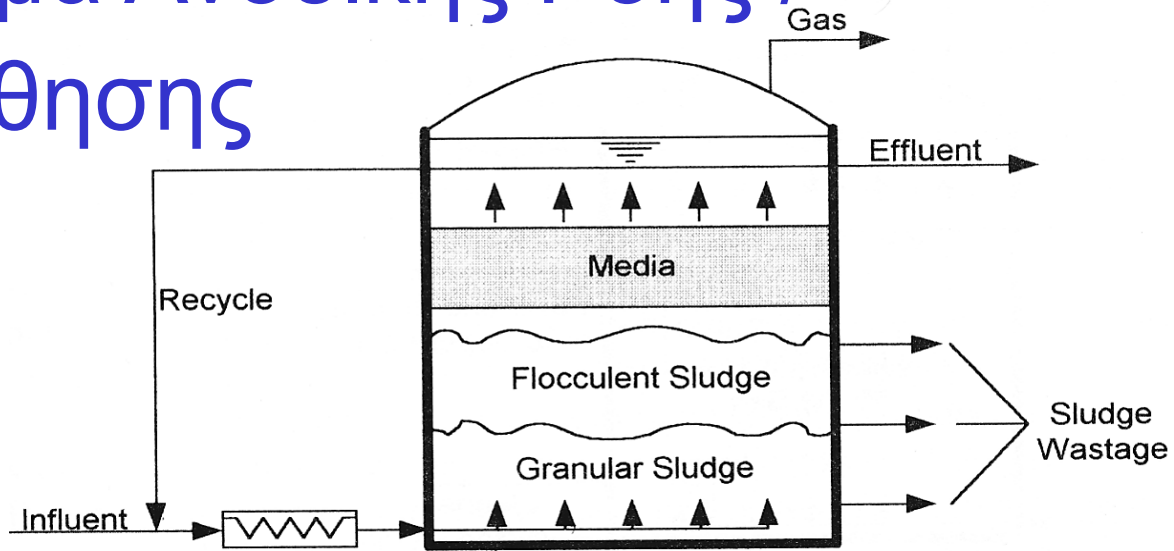


Συστήματα Αναερόβιας Χώνευσης Υψηλού Ρυθμού

- Αναερόβιας Επαφής (Anaerobic contact, AC)
- Αναερόβιοι Αντιδραστήρες Ανοδικής ροής (UASB)
- Αναερόβια Διήθηση (AF)
- **Υβριδικά συστήματα UASB/AF**
- Καθοδικής Ροής Σταθεροποιημένου Βιοστρώματος (DSFF)
- Ρευστοποιημένες/Αναπτυσσόμενες Κλίνες (FB/EB)



Υβριδικό σύστημα Ανοδικής Ροής / Αναερόβιας Διήθησης



Στο σύστημα συνδυάζονται οι χαρακτηριστικές ζώνες κόκκων (Granular Sludge) και κροκύδων (Flocculent Sludge) του συστήματος Ανοδικής Ροής ενώ τα υγρά απόβλητα στην συνέχεια εισέρχονται σε μια ζώνη από πορώδες υλικό όπως στο σύστημα Αναερόβιας Διήθησης

Συστήματα Αναερόβιας Χώνευσης Υψηλού Ρυθμού

- Αναερόβιας Επαφής (Anaerobic contact, AC)
- Αναερόβιοι Αντιδραστήρες Ανοδικής ροής (UASB)
- Αναερόβια Διήθηση (AF)
- Υβριδικά συστήματα UASB/AF
- **Καθοδικής Ροής Σταθεροποιημένου**

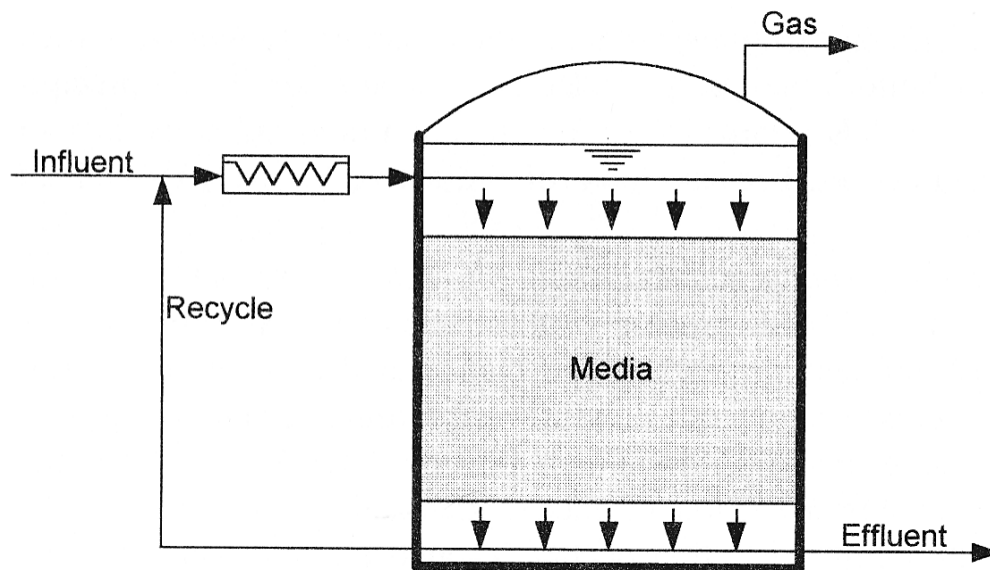
Βιοστρώματος (DSFF)

- Ρευστοποιημένες/Αναπτυσσόμενες Κλίνες (FB/EB)



Καθοδικής ροής σταθεροποιημένου βιοστρώματος

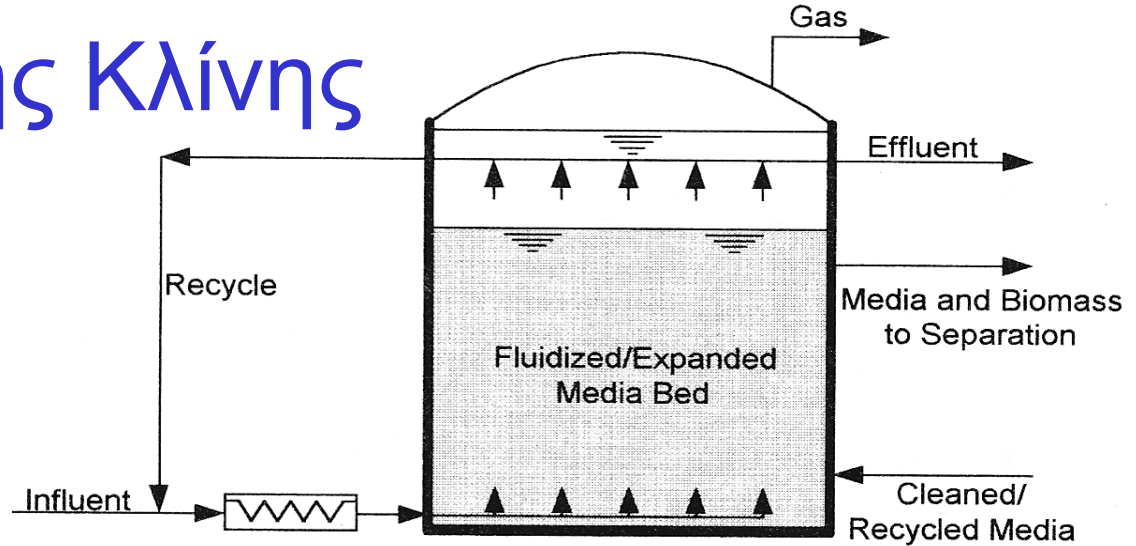
- Παρόμοιο με το σύστημα Αναερόβιας Διήθησης με τη διαφορά ότι η ροή των αποβλήτων είναι καθοδική
- Τα διηθητικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη της βιομάζας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα είναι ίδια με τα υλικά του AF



Τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα συλλέγονται και είτε ανακυκλώνονται είτε μεταφέρονται για νέα επεξεργασία



Βιοαντιδραστήρες Ρευστοποιημένης – Αναπτυσσόμενης Κλίνης



Βιοαντιδραστήρες βιοστρωμάτων όπου η βιομάζα αναπτύσσεται επί λεπτοκόκκου υλικού όπως άμμος ή άλλο κοκκώδες υλικό και το οποίο διαβρέχεται καθώς τα υγρά απόβλητα διοχετεύονται από τον πυθμένα του συστήματος. Καθώς το κοκκώδες υλικό διαβρέχεται διαστέλλεται και αυξάνεται ο όγκος του σε βαθμό ανάλογο με την ανοδική ταχύτητα ροής των αποβλήτων.

Βιοαντιδραστήρες Ρευστοποιημένης – Αναπτυσσόμενης Κλίνης (FB/EB)

- Βασικό χαρακτηριστικό των FB/EB συστημάτων είναι η χρήση λεπτόκοκκων διηθητικών υλικών που παρέχουν υψηλή ειδική επιφάνεια για ανάπτυξη βιομάζας που κυμαίνεται από 3 – 10,000 m²/m³
- Το σύστημα λόγω της μεγάλης ειδικής επιφάνειας του κοκκώδους υλικού αναπτύσσει μεγάλες συγκεντρώσεις βιομάζας και συνεπώς παρουσιάζει μικρούς χρόνους υδραυλικής παραμονής (0.2-2 ημέρες)
- Η περίσσεια βιομάζας του συστήματος συσσωρεύεται στα ανώτερα τμήματα του πληρωτικού υλικού και συνήθως απομακρύνονται και καθαρίζονται σε ειδικές εγκαταστάσεις και το καθαρό πληρωτικό υλικό επαναπροστίθεται στο αντιδραστήρα

Χρήσεις Αναερόβιων Συστημάτων

- Οι αναερόβιοι χωνευτήρες χρησιμοποιούνται κυρίως για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων υψηλού οργανικού φορτίου και με υψηλές συγκεντρώσεις διαλυτών στερεών. Αποτελούν συνήθως τμήματα μεγαλύτερων συστημάτων επεξεργασίας διότι έχουν υψηλό κόστος κατασκευής αλλά χαμηλό κόστος συντήρησης
- Τα συστήματα χαμηλού ρυθμού αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιούνται σε περιοχές με διαθέσιμη γη για την κατασκευής τους και είναι ιδανικά για την επεξεργασία αποβλήτων με υψηλές συγκεντρώσεις διαλυτών στερεών και οργανικού φορτίου (COD 20-30,000 mg/L)

Χρήσεις Αναερόβιων Συστημάτων

- Συστήματα υψηλού ρυθμού αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιούνται κυρίως για την επεξεργασία αποβλήτων με μέτριο ως υψηλό φορτίο ρύπων (COD <20,000 mg/L)
- Η παρουσία ή όχι υψηλών συγκεντρώσεων διαλυτών στερεών καθορίζει και το είδος του συστήματος υψηλού ρυθμού που θα χρησιμοποιηθεί:

Αναεροβικής Επαφής και Καθοδικής Ροής

Σταθεροποιημένου Βιοστρώματος και προτιμώνται για απόβλητα με υψηλές συγκεντρώσεις διαλυτών στερεών.

