

Αναερόβια χώνευση ιλύος

Ο όρος αναερόβια χώνευση αναφέρεται στην βιολογική επεξεργασία παχυμένης πρωτοβάθμιας ή/και δευτεροβάθμιας ιλύος, απουσία οξυγόνου, με σκοπό την μετατροπή σημαντικού μέρους των οργανικών συστατικών της σε μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).

Ο πρωταρχικός λόγος για την επεξεργασία ιλύος με αναερόβια χώνευση, είναι η σταθεροποίηση της ιλύος, δηλαδή η μείωση της ικανότητας ανάπτυξης βιολογικών δράσεων που οδηγεί σε παραγωγή οσμών.

Παράλληλα επιτυγχάνεται μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών.

Ανάλογα με την θερμοκρασία που λαμβάνει χώρα η διεργασία διαχωρίζεται σε:

- Μεσοφιλική (30-38 °C)
- Θερμοφιλική (50-57 °C)

Ανάλογα με τον τύπο του χωνευτή κατηγοριοποιείται σε:

- Χαμηλής φόρτισης
- Υψηλής φόρτισης ενός σταδίου
- Υψηλής φόρτισης δύο σταδίων

Πειραματική παραγωγή βιοαερίου



Πτητικά οργανικά
+
αναερόβιες
συνθήκες
↓
βιοαέριο

ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ
(Πολυσακχαρίτες, λιπίδια, πρωτεΐνες, νουκλεϊκά οξέα)

ΥΔΡΟΛΥΣΗ

ΜΟΝΟΜΕΡΕΙΣ ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ
(Σάκχαρα, λιπαρά οξέα, αμινοξέα)

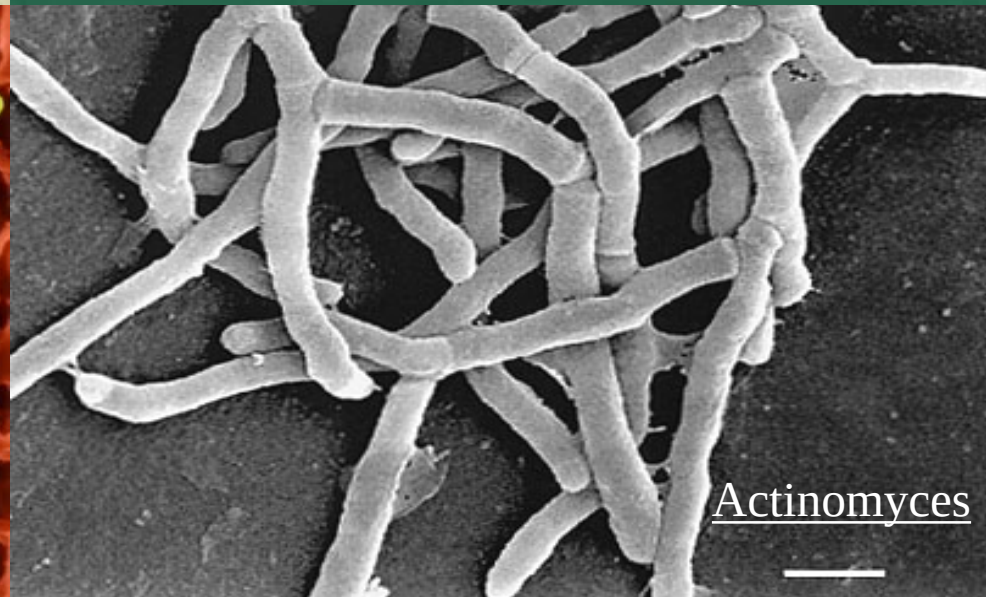
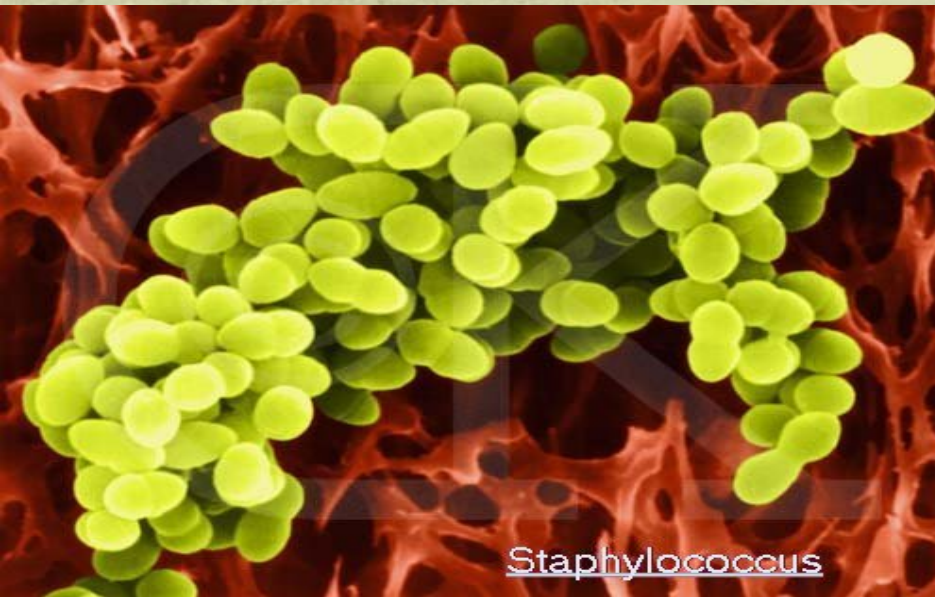
ΖΥΜΩΣΗ

Οξικό οξύ, μεθανόλη,
μεθυλαμίνες...

ΖΥΜΩΣΗ

$\text{H}_4 + \text{CO}_2$

Οξεοπαραγωγά βακτήρια



ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ
(Πολυσακχαρίτες, λιπίδια, πρωτεΐνες, νουκλεϊκά οξέα)

ΥΔΡΟΛΥΣΗ

ΜΟΝΟΜΕΡΕΙΣ ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ
(Σάκχαρα, λιπαρά οξέα, αμινοξέα)

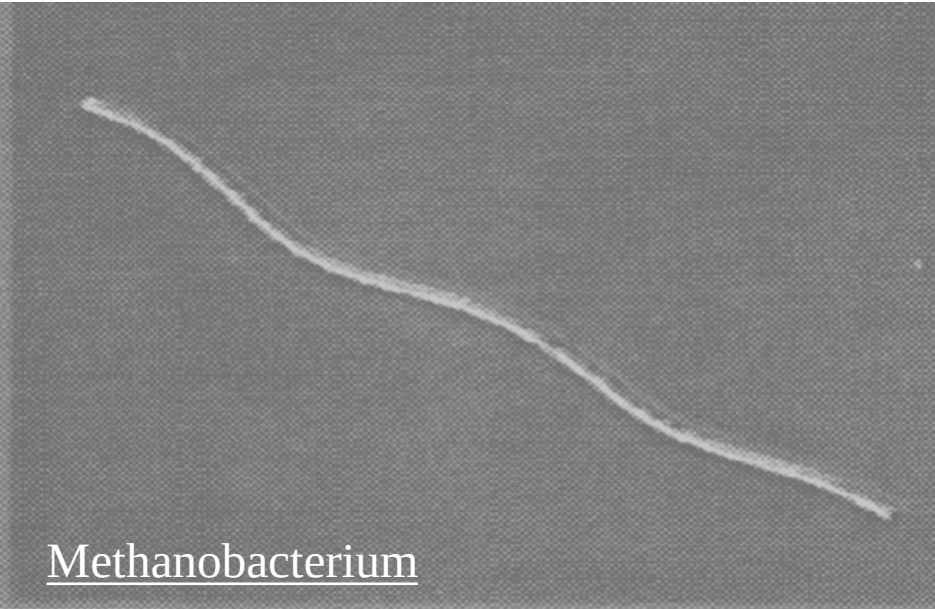
ΖΥΜΩΣΗ

Οξικό οξύ, μεθανόλη,
μεθυλαμίνες...

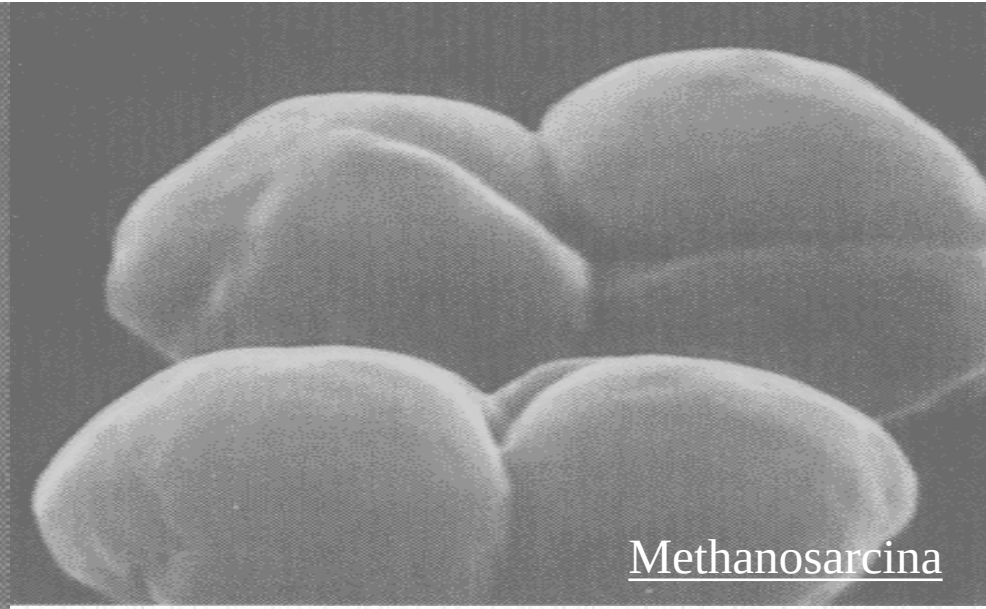
ΖΥΜΩΣΗ

$\text{H}_4 + \text{CO}_2$

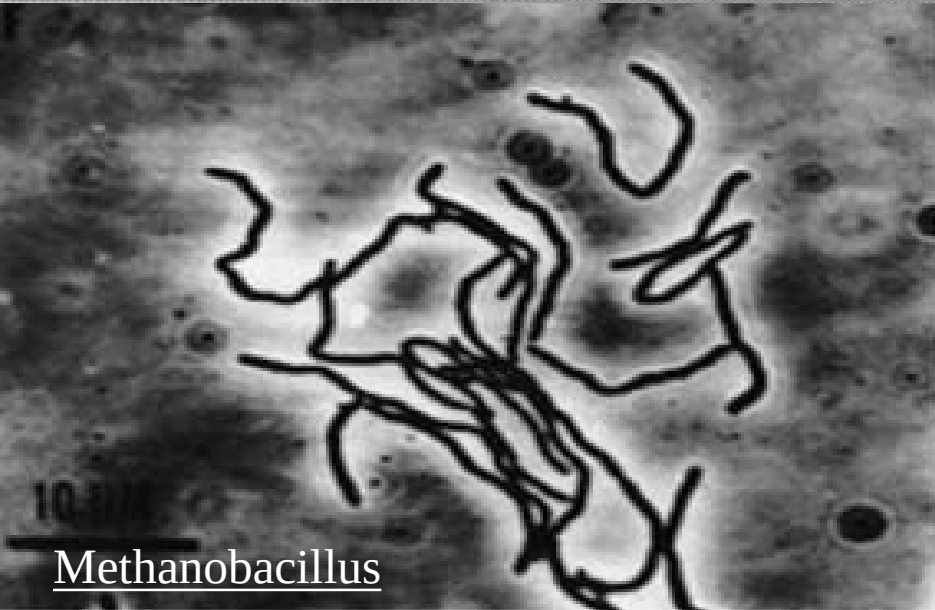
Μεθανοπαραγωγά βακτήρια



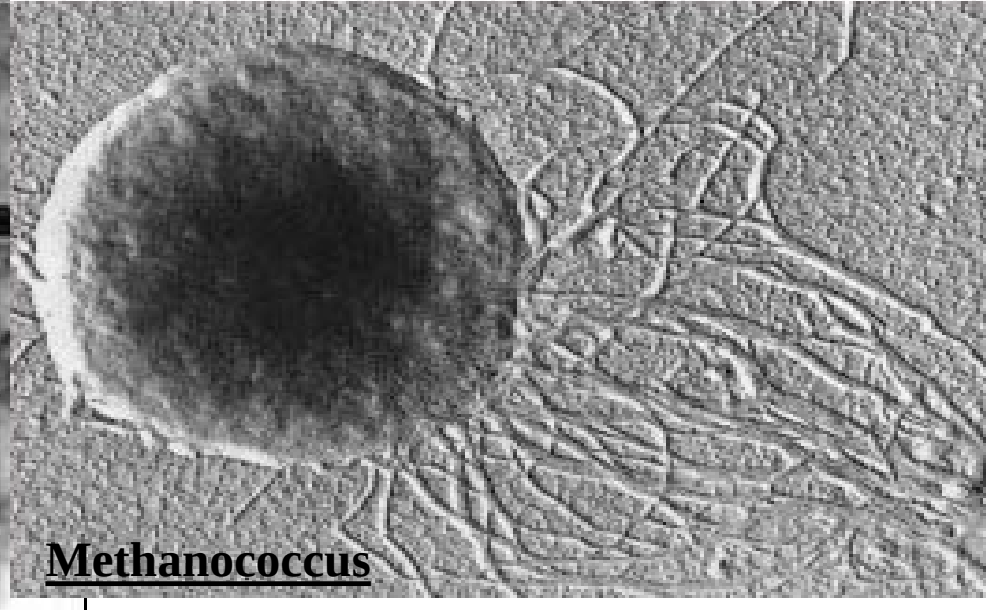
Methanobacterium



Methanosarcina



Methanobacillus



Methanococcus

Διεργασίες αναερόβιας χώνευσης ιλύος

Χαμηλής φόρτισης:

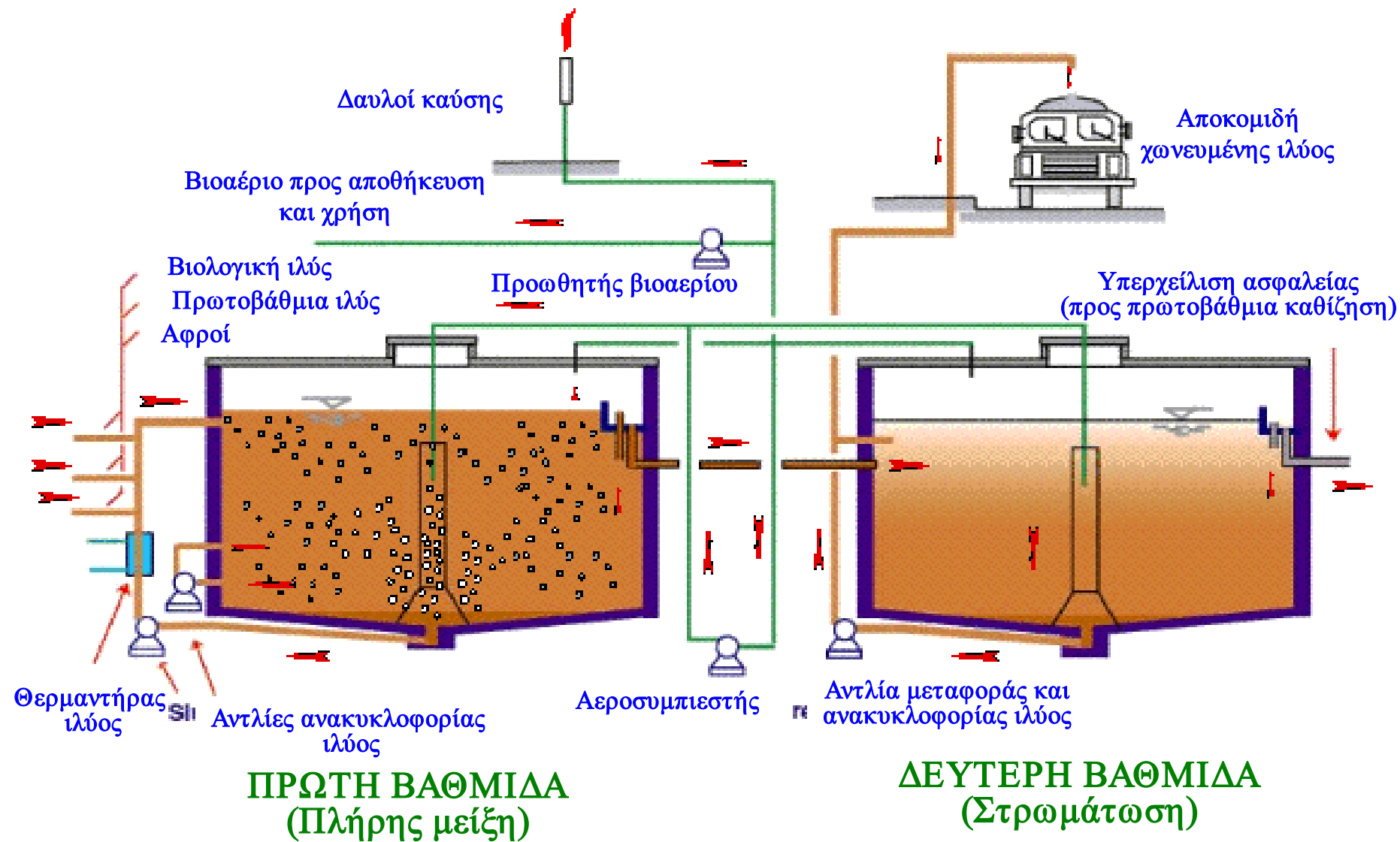
Αποτελείται από μία μη θερμαινόμενη στατική δεξαμενή, ενώ ανάμειξη επιτυγχάνεται μόνο από την ανοδική κίνηση των παραγόμενων φυσαλίδων, με συνέπεια την μείωση του ωφέλιμου όγκου του αντιδραστήρα κατά περίπου 50%, λόγω στρωμάτωσης του περιεχομένου του. Τυπικοί χρόνοι παραμονής: 30 - 60 ημέρες.

Υψηλής φόρτισης ενός σταδίου:

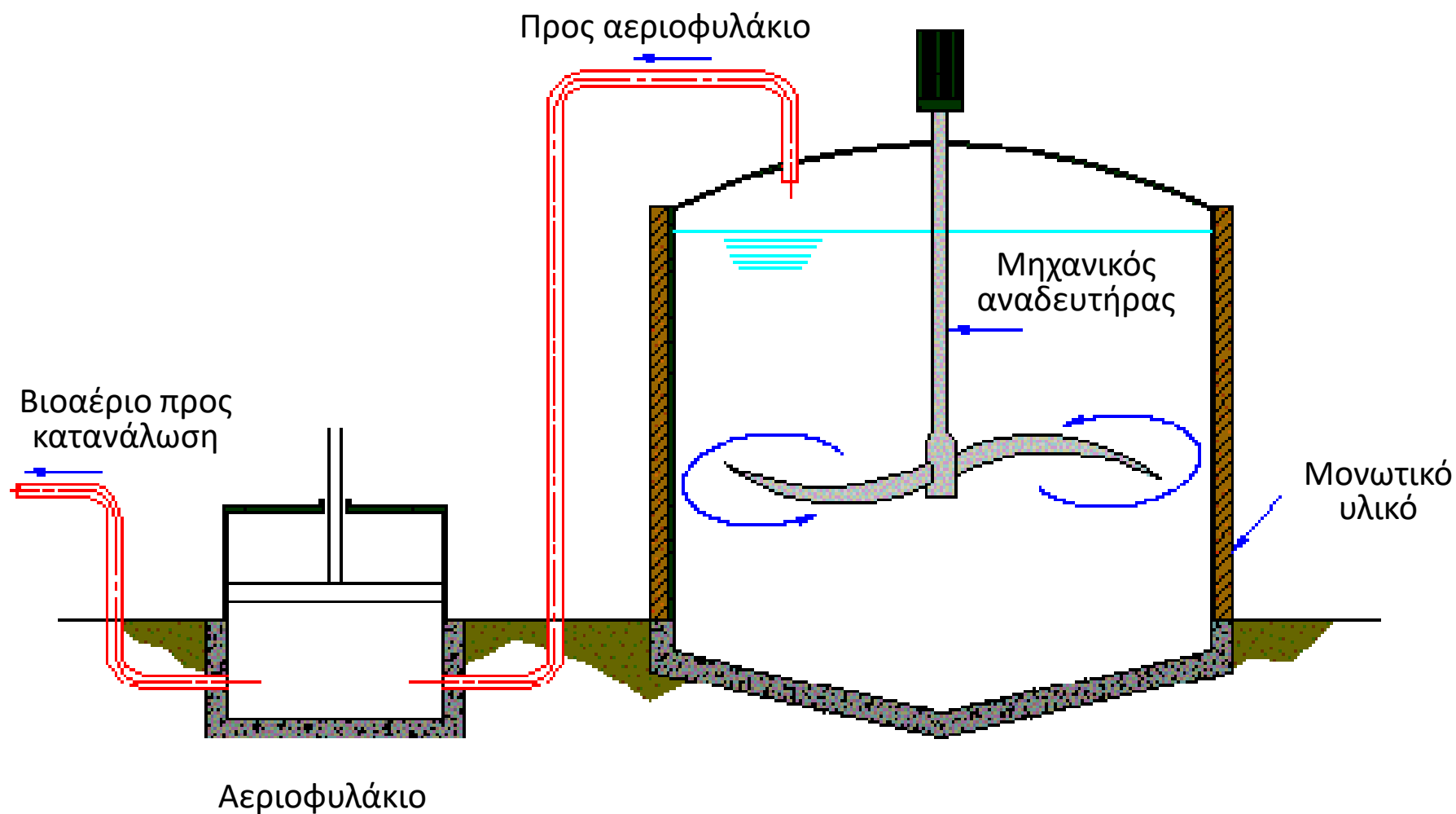
Χαρακτηρίζονται από συνθήκες πλήρους μείξης στο εσωτερικό τους, και θέρμανσης της εισερχόμενης ιλύος. Τυπικοί χρόνοι παραμονής: 15 - 22 ημέρες.

Υψηλής φόρτισης δύο σταδίων:

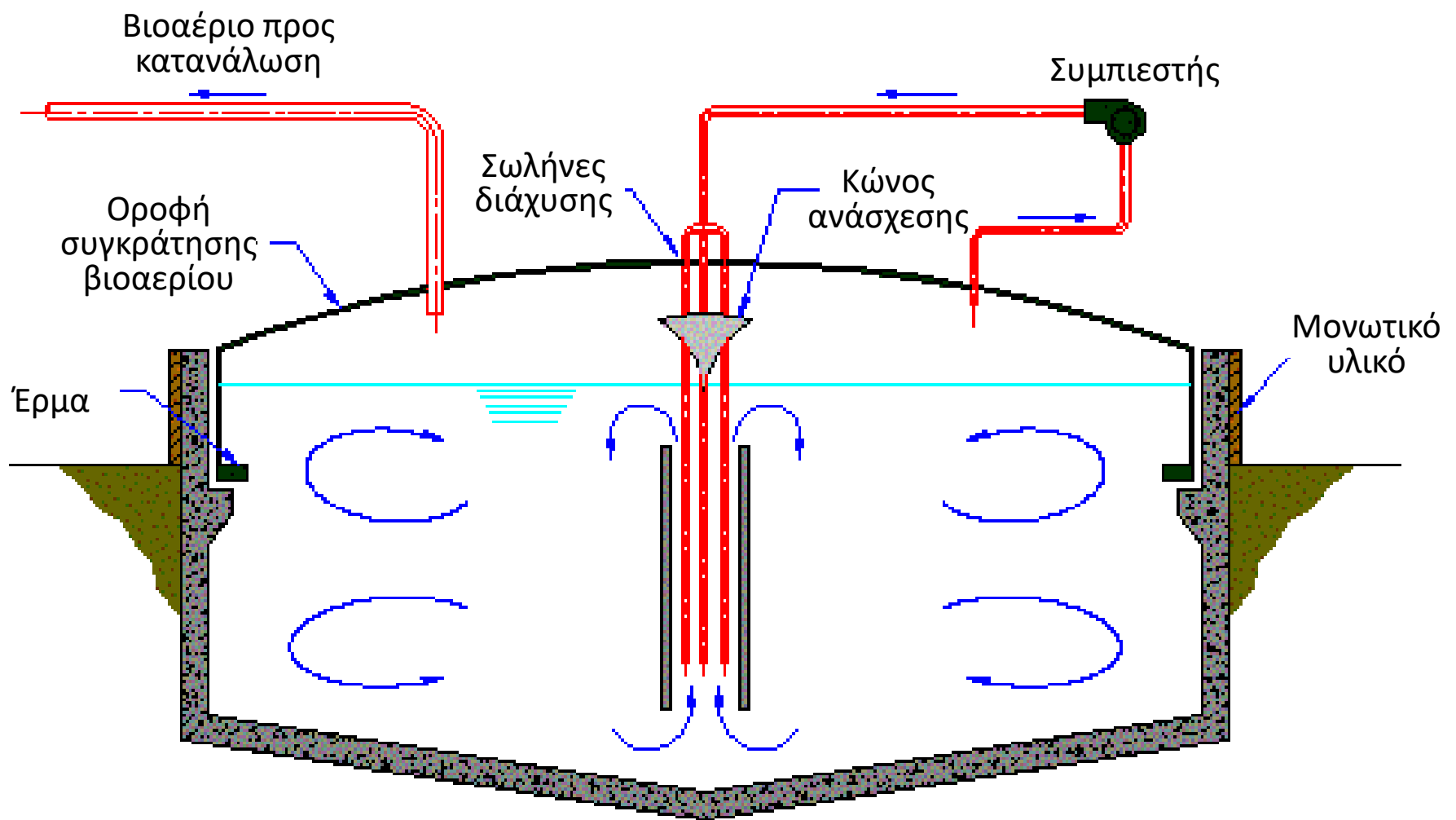
Συνίστανται στην προσθήκη στατικής δεξαμενής (ίδιου όγκου) συνδεδεμένη εν σειρά στην έξοδο της δεξαμενής υψηλής φόρτισης, με σκοπό την ολοκλήρωση της διεργασίας χώνευσης και τον μερικό διαχωρισμό των στερεών. Στην δεύτερη δεξαμενή παράγεται λιγότερο του 10% του βιοαερίου.



ΔΙΒΑΘΜΙΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ ΙΛΥΟΣ



Χωνευτής μηχανικής ανάδευσης σταθερής οροφής



Χωνευτής ανάδευσης με πεπιεσμένο βιοαέριο και πλωτή οροφή

Αναερόβιοι χωνευτές ωειδούς τύπου στο Dubai, Η.Α.Ε.



Αναερόβιοι χωνευτές ωοειδούς τύπου στο Hangzhou, Κίνα



Από αέρος άποψη της Ψυττάλειας

Θέσεις αναερόβιων χωνευτών

8 υπόγειοι χωνευτές με συνολικό
ωφέλιμο όγκο 80.000m³, και
παραγωγή βιοαερίου 70.000-
100.000m³/d



Υπόγειοι αναερόβιοι χωνευτές
κυλινδρικού τύπου στην Ψυττάλεια



Εσωτερική άποψη χωνευτή σε ώρα λειτουργίας



Θόλος του υπόγειου χωνευτή στην Ψυττάλεια κατά την διάρκεια της κατασκευής



Σωληνώσεις για την ανάδευση της
ιλύος με εμφύσηση βιοαερίου

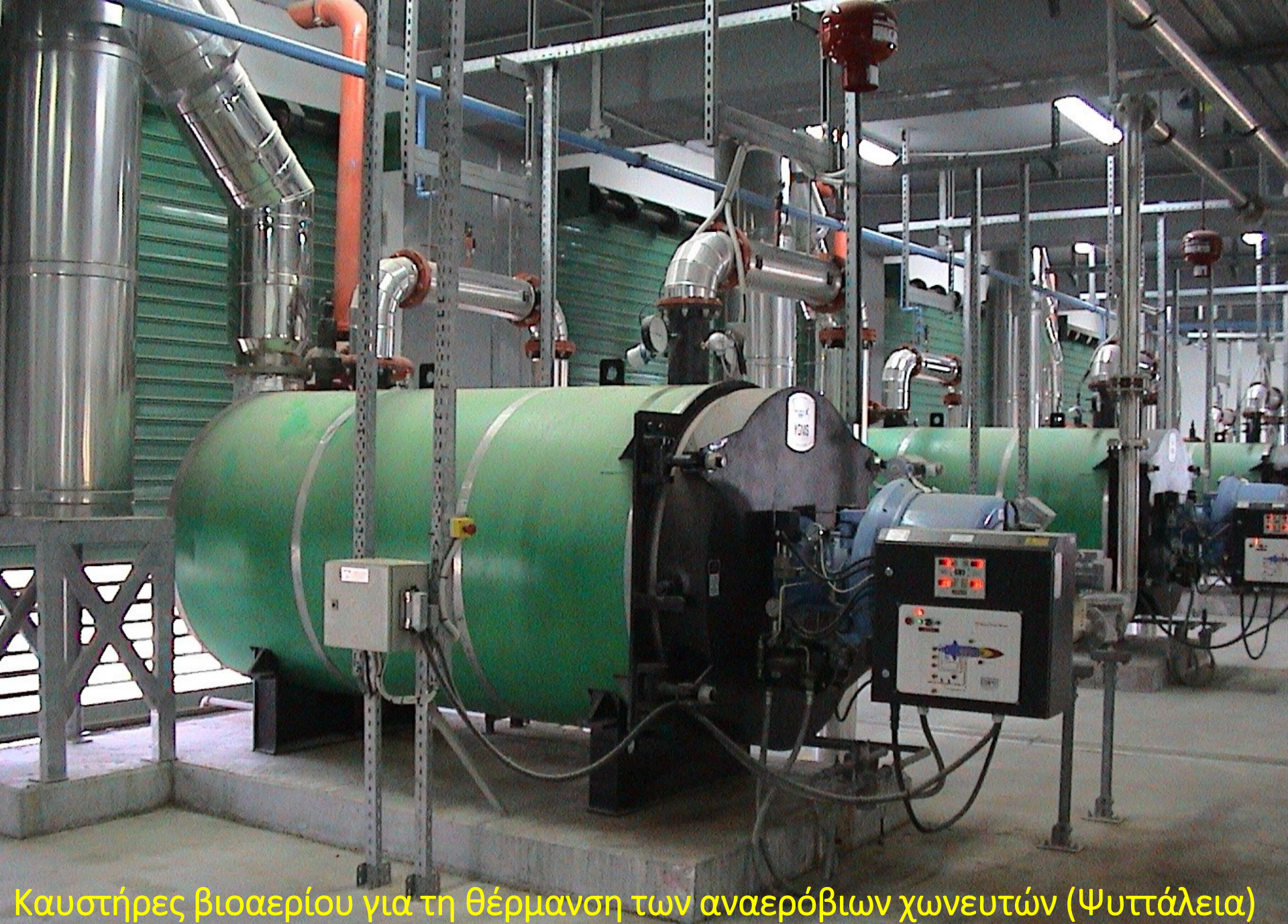
Αναερόβια χώνευση ιλύος

ΧΩΝΕΥΤΕΣ

Πυρσός Αεροφυλάκια



Σίνδος, Θεσσαλονίκη



Καυστήρες βιοαερίου για τη θέρμανση των αναερόβιων χωνευτών (Ψυττάλεια)

Εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης αστικών λυμάτων

- α. Κυλινδρικού τύπου, στην εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων της Muscat, Ομάν
- β. Ωοειδούς τύπου, στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων της Βοστόνης, Η.Π.Α.



Εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης αστικών λυμάτων

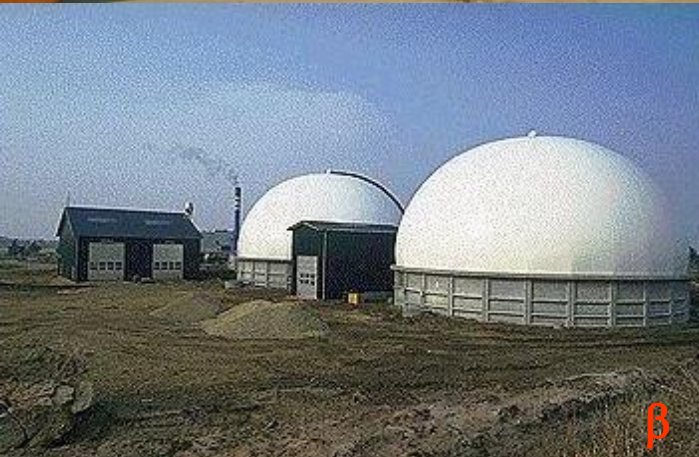
α. Κυλινδρικού τύπου, Δανία

β. Σφαιρικού τύπου, Εσθονία

γ. Κυλινδρικού τύπου, Autitaki, Cook Islands

δ. Κυλινδρικού τύπου, Karlsruhe, Γερμανία

ε. Ωοειδούς τύπου, Faulturm, Γερμανία

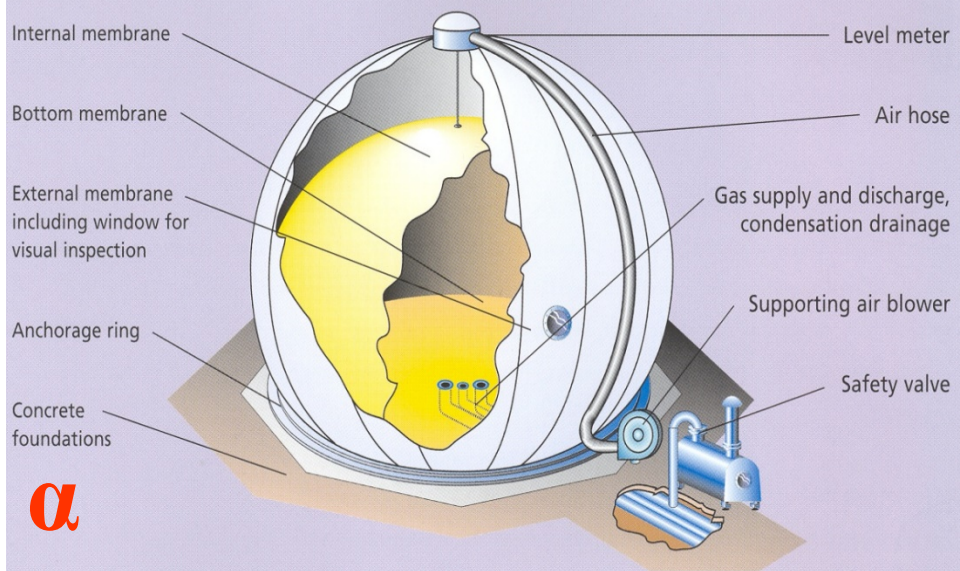


Σύγκριση κυλινδρικών και ωοειδών χωνευτών

	Σχετικά πλεονεκτήματα	Σχετικά μειονεκτήματα
Κυλινδρικού τύπου	Αυξημένη δυνατότητα αποθήκευσης βιοαερίου	Αναποτελεσματική μείξη και δημιουργία νεκρών ζωνών
	Δυνατότητα προσαρμογής πλωτής οροφής	Συσώρευση άμμου και ιλύος
	Δεν απαιτούνται ειδικές τεχνικές κατασκευής	Τίθεται συχνά εκτός λειτουργίας για καθαρισμό και εξάμμωση
Ωοειδούς τύπου	Ελάχιστη συσώρευση άμμου	Μικρός χώρος αποθήκευσης βιοαερίου
	Μειωμένη παραγωγή αφρών	Δύσκολη πρόσβαση στην οροφή
	Υψηλή δυνατότητα αποτελεσματικής ανάμειξης	Απαιτείται ισχυρή θεμελίωση και ειδική αντισεισμική θωράκιση
	Καλή ομογενοποίηση βιομάζας	Υψηλό κόστος κατασκευής
	Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης	Κατασκευή από περιορισμένο αριθμό εξειδικευμένων εταιριών
	Μειωμένο εμβαδόν έδρασης	Δυσκολία συλλογής του βιοαερίου σε αντιδραστήρες αναδευόμενους με εμφύσηση βιοαερίου

Αεριοφυλάκια πλωτής οροφής και σταθμός
ηλεκτροπαραγωγής στην Ψυττάλεια





Αποθήκευση βιοαέριου σε αεριοφυλάκιο διπλής μεμβράνης

- α. Σχηματικό διάγραμμα αεριοφυλακίου SATTLER®
- β,γ. Εφαρμογές των αεριοφυλακίων SATTLER® σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων της Αυστρίας



**ΠΛΥΝΤΗΡΙΔΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΔΕΣΜΕΥΣΗ ΘΕΙΟΥΧΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ**



Πυρσοί καύσης περίσσειας βιοαέριου

α. Σε εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων στον Καναδά

β. Σε εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων στην Ιταλία

γ. Στο Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων Ψυττάλειας





Μηχανή ηλεκτροπαραγωγής

Βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας αναερόβιας χώνευσης

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ	
pH	6,8-7,2	
Θερμοκρασία	Μεσόφιλη	30-38 °C
	Θερμόφιλη	50-57 °C
Πτητικά οξέα [CH ₃ COOH]	200-800 mg/l	
Χρόνος παραμονής	10-20 d	
Αλκαλικότητα [CaCO ₃]	1-5 g/l	
Τοξικές ουσίες	Αποφυγή υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων, αμμωνίας, θειούχων ενώσεων	
Οξυγόνο	Συνθήκες απουσίας οξυγόνου	
Θρεπτικά στοιχεία	Άζωτο (N)	10-13 mg/(100g βιομάζας)
	Φωσφόρος (P)	2,0-2,6 mg/(100g βιομάζας)
	Θείο (S)	1-2 mg/(100g βιομάζας)
Ιχνοστοιχεία	Σίδηρος (Fe)	0,02 mg/(g παραγόμενων οξικών)
	Κοβάλτιο (Co)	0,004mg/(g παραγόμενων οξικών)
	Νικέλιο (Ni)	0,003mg/(g παραγόμενων οξικών)
	Ψευδάργυρος (Zn)	0,02mg/(g παραγόμενων οξικών)

Σύσταση βιοαέριου

Συστατικό	Συγκέντρωση %
Μεθάνιο (CH_4)	65-70
Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)	25-30
Υδροθείο & οργανικές θειοενώσεις	< 1
Άζωτο (N_2)	Ίχνη
Υδρογόνο (H_2)	Ίχνη
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	Ίχνη
Οξυγόνο	-

Θερμογόνος δύναμη αερίων καυσίμων

Κάυσιμο	Κατώτερη θερμογόνος δύναμη kJ/m ³ (20°C, 1atm)	Κατώτερη θερμογόνος δύναμη Btu/ft ³ (20°C, 1atm)
Βιοαέριο	22.400	600
Μεθάνιο	35.800	960
Φυσικό αέριο	37.300	1.000

Σχεδιασμός Αναερόβιου Χωνευτή (ΑΧ)

Αρχικά επιλέγεται ο τύπος του Αναερόβιου Χωνευτή. Ο πιο συνήθης τύπος, ειδικά για μικρές εγκαταστάσεις, είναι ο κυλινδρικός, ενός σταδίου, πλήρους μείξης, και αυτός επιλέγεται για σχεδιασμό.

Εύρος διαμέτρων: 6-40 m.

Για διαμέτρους 15-18 m → ύψος 5-6 m.

Για διαμέτρους > 18 m → ύψος 9-12 m.

Ελεύθερο ύψος: 0,5-0,6 m (μηχανική ανάδευση), >1 m (για πνευματική ανάδευση).

Θερμοκρασία λειτουργίας: 36 °C.

Απαιτείται κατασκευή ανθρωποθυρίδας (καπάκι).

Υλικό κατασκευής: Οπλισμένο σκυρόδεμα ή (σπανιότερα) χάλυβας.

Σε ΑΧ πλήρους μείξης ο χρόνος παραμονής στερών ισούται με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής: $\tau = \text{SRT} = \text{HRT}$.

Το ποσοστό των Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών που καταστρέφονται (VSS_d) σχετίζεται με τον χρόνο παραμονής στερών (SRT) με την πιο κάτω εμπειρική σχέση:

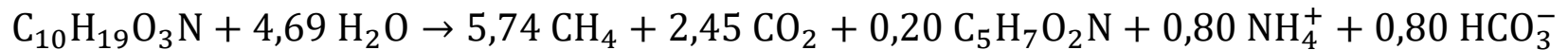
$$\%VSS_d = 13,7 \cdot \ln \text{SRT} + 18,9$$

Για μείωση των VSS_d κατά 60%, απαιτούνται 20 ημέρες: $13,7 \cdot \ln(20d) + 18,9 = 60\%$

Σχεδιασμός Αναερόβιου Χωνευτή

Παραγωγή βιοαερίου/μεθανίου

Η αντίδραση μετατροπής της βιομάζας ($C_{10}H_{19}O_3N$) προς βιοαέριο και άλλα προϊόντα, δίνεται από την χημική εξίσωση:



Η ενέργεια του βιοαερίου ($E_{\text{βιοαερίου}}$), υπολογίζεται με βάση τη θερμογόνο δύναμη (HHV) του CH_4 . (HHV = High Heating Value).

$$E_{\text{βιοαερίου}} = E_{CH_4} = M_{CH_4} \cdot HHV_{CH_4} = V_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} \cdot HHV_{CH_4}$$

Όπου,

$E_{\text{βιοαερίου}}$ = Θερμογόνος δύναμη του βιοαερίου, σε kJ

M_{CH_4} = Μάζα του μεθανίου σε kg

V_{CH_4} = Όγκος μεθανίου που περιέχεται στο βιοαέριο, σε m^3

HHV_{CH_4} = Ανώτερη θερμογόνο δύναμη του μεθανίου = $50.100 \text{ kJ kg}^{-1}$ (από πίνακες θερμοδυναμικής)

ρ_{CH_4} = η πυκνότητα του μεθανίου στους 20°C , με τιμή $0,657 \text{ kg m}^{-3}$

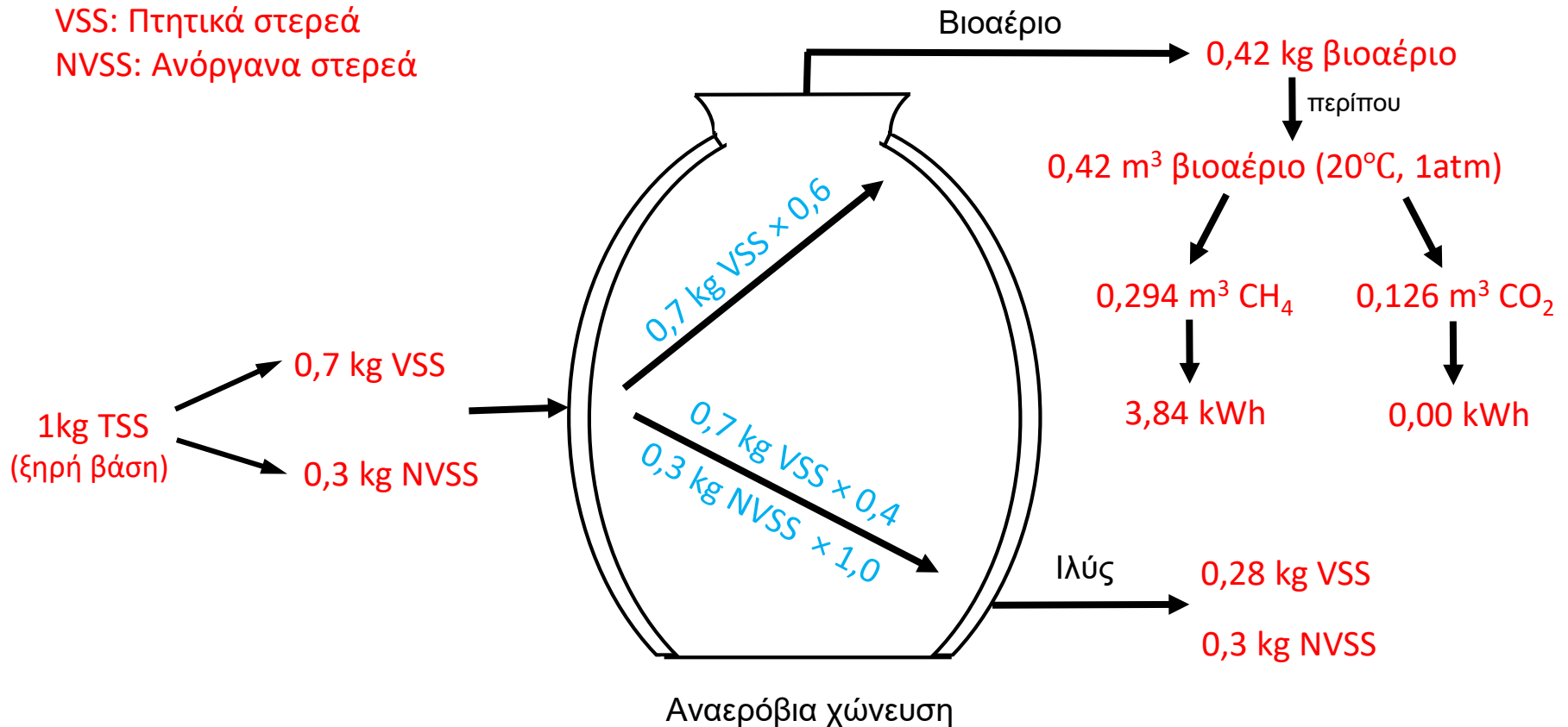
Ο λόγος: $\text{mol}_{CH_4} / \text{mol}_{CO_2} = V_{CH_4} / V_{CO_2} = 0,467$ (Ισχύει ο Νόμος των Τελείων Αερίων)

Σχεδιασμός Αναερόβιου Χωνευτή

Χονδρικό ισοζύγιο μάζας στον αναερόβιο χωνευτή

VSS: Πτητικά στερεά

NVSS: Ανόργανα στερεά



Σχεδιασμός Αναερόβιου Χωνευτή

Θερμότητα που απαιτείται για θέρμανση της ιλύος

Η θερμότητα που απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας της ιλύος δίνεται από τη σχέση:

$$q_s = Q \cdot C_s \cdot (T_2 - T_1)$$

Όπου,

q_s = Απαιτούμενη θερμότητα ανά ημέρα, σε kJ d^{-1}

Q = Μάζα της λάσπης (στερεά + υγρό), σε kg d^{-1}

C_s = Ειδική θερμότητα ιλύος, ($= 4,2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)

T_1 = θερμοκρασία στο χωνευτή, σε $^\circ\text{C}$ ($36 \text{ }^\circ\text{C}$, για μεσοφιλική ΑΧ)

T_2 = θερμοκρασία ιλύος στην εισροή, σε $^\circ\text{C}$ (συνήθως η μέση θερμοκρασία των δύο ψυχρότερων εβδομάδων του έτους)

Συνήθως η ενέργεια δίνεται σε kW

($1\text{W} = 3,6 \text{ kJ h}^{-1}$)

Σχεδιασμός Αναερόβιου Χωνευτή

Απώλειες θερμότητας

Οι απώλειες θερμότητας από κάθε επιφάνεια του χωνευτή υπολογίζονται από τη σχέση:

$$q = U \cdot A \cdot (T_2 - T_1)$$

Όπου,

q = Απώλειες θερμότητας, σε W

U = Σταθερά μεταφοράς θερμότητας, σε $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$

A = Επιφάνεια μέσω της οποίας γίνεται η απώλεια, σε m^2 (πυθμένας, τοιχώματα, καπάκι)

T_1 = Θερμοκρασία στο χωνευτή, σε $^\circ C$

T_2 = Θερμοκρασία λάσπης στην εισροή, σε $^\circ C$ (συνήθως η μέση θερμοκρασία των δύο ψυχρότερων εβδομάδων του έτους)

Οι ολικές απώλειες υπολογίζονται ως άθροισμα των απωλειών κάθε επιφάνειας.

Χαρακτηριστικές τιμές της σταθεράς μεταφοράς θερμότητας U

	W m ⁻² °C ⁻¹
Τοίχωμα από σκυρόδεμα (πάνω από το έδαφος)	
Πάχος 300 mm με μόνωση στρώματος αέρα και εξωτερικό επίχρισμα	1,8-2,4
Πάχος 300 mm με μόνωση	0,6-0,8
Πάχος 300 mm σε επαφή με τον αέρα	4,88
Πάχος 300 mm με μόνωση στρώματος αέρα πάχους 25 mm και 100 mm τούβλα	1,53
Τοίχωμα από σκυρόδεμα (κάτω από το έδαφος)	
Γενικά σε υγρό έδαφος	1,1-1,4
Πάχος 300 mm, υγρό έδαφος	0,62
Πυθμένας 300 mm, υγρό έδαφος	0,68-0,85
Γενικά σε ξηρό έδαφος	0,57-0,68
Πάχος 300 mm, ξηρό έδαφος	0,34
Καπάκια (σταθερά) σκυρόδεμα	
Πάχος 100 mm χωρίς μόνωση	4-5
Πάχος 100 mm με μόνωση πάχους 25 mm	1,2-1,6
Πάχος 150 mm	2,84
Πάχος 300 mm	3,29
Καπάκια (σταθερά, χάλυβας)	
Πάχος 6 mm	5,2
Καπάκια (κινητά)	
Χωρίς μόνωση με 35 mm ξύλινο επικάλυμμα	4-5
Με μόνωση πάχους 25 mm	0,9-1,0

Σχεδιασμός Αναερόβιου Χωνευτή

Αεριοφυλάκιο αποθήκευσης βιοαερίου

Για την προσωρινή αποθήκευση του παραγόμενου βιοαερίου κατά τη διάρκεια της Αναερόβιας Χώνευσης, χρησιμοποιούνται αεριοφυλάκια. Οι συνηθέστεροι τύποι είναι:

- Πλωτής οροφής
- Σταθερής οροφής
- Ελαστικών μεμβρανών

Τα αεριοφυλάκια σχεδιάζονται για μέσο χρόνο παραμονής του βιοαερίου $\tau = 1-4$ ημέρες. Η πίεση σχεδιασμού εξαρτάται από τον τύπο του αεριοφυλακίου.

Τύπος	Πίεση (kPa)
Πλωτής οροφής	≤ 2
Σταθερής οροφής	6-12
Τύπος μεμβρανών	0,2

Ο όγκος του αεριοφυλακίου υπολογίζεται ως:

$$P_{\text{απολ.}} \cdot V_{\text{βιοαερ.}} = P_{\text{σχετ.}} \cdot V_{\text{αεροφυλ.}}$$

Όπου:

$P_{\text{απολ.}}$ = Η απόλυτη πίεση, ίση με 101,325 kPa

$P_{\text{σχετ.}}$ = Η σχετική πίεση, ίση με 101,325 kPa + (Πίεση στο εσωτερικό του αεριοφυλακίου)

$V_{\text{βιοαερ.}}$ = Όγκος του παραγόμενου βιοαερίου, ($V = \tau \cdot Q$)

Όλοι οι αναερόβιοι χωνευτές είναι εξοπλισμένοι με πυρσό καύσης της περίσσειας βιοαερίου

Παράδειγμα Σχεδιασμού Αναερόβιας Χώνευσης (1/10)

Να σχεδιάσετε το σύστημα μεσοφιλικής αναερόβιας χώνευσης πλήρους μίξης για τη σταθεροποίηση μίγματος ιλύος από τις Δεξαμενές Πρωτοβάθμιας, Δευτεροβάθμιας και Χημικής Καθίζησης. Η παροχή της πυκνωμένης ιλύος από τη Δεξαμενή Πάχυνσης είναι $Q_{\text{εισόδου}} = 35 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, και η συγκέντρωση στερεών 4%. Απαιτείται καταστροφή πτητικών στερεών τουλάχιστον κατά 60%. Η δεξαμενή θα είναι κατασκευασμένη από σκυρόδεμα, τα 2/3 της οποίας θα βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Θεωρούμαι:

Θερμοκρασία ιλύος στην είσοδο: 15 °C.

Ελάχιστη θερμοκρασία αέρα: 3°C.

Ελάχιστη θερμοκρασία εδάφους: 8°C.

Πάχος τοιχίου: 300mm.

Διάμετρος χαλύβδινης ανθρωποθυρίδας: 1m.

Αρχικά, υπολογίζεται ο χρόνος παραμονής SRT, βάσει του ποσοστού απομάκρυνσης.

$$\%VSS_d = 13,7 \cdot \ln SRT + 18,9 \Rightarrow 60\% = 13,7 \cdot \ln SRT + 18,9 \Rightarrow SRT = 20 \text{ d}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο όγκος της ιλύος στον αναερόβιο χωνευτή (ίσος με την παροχή της ιλύος επί 20 ημέρες:

$$V_{AX} = V_{\text{ιλύος}} = SRT \cdot Q_{\text{εισόδου}} \Rightarrow V_{\text{ιλύος}} = 20 \text{ d} \cdot 35 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} = 700 \text{ m}^3$$

Παράδειγμα Σχεδιασμού Αναερόβιας Χώνευσης (2/10)

Θεωρούμε βάθος δεξαμενής $H = 6 \text{ m}$. Η επιφάνεια του Αναερόβιου Χωνευτή είναι:

$$A_{AX} = \frac{V_{\text{ιλύος}}}{H} = \frac{700 \text{ m}^3}{6 \text{ m}} = 116,7 \text{ m}^2$$

Η διάμετρος υπολογίζεται ως:

$$D_{AX} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{AX}}{\pi}} \Rightarrow D_{AX} = \sqrt{\frac{4 \cdot 116,7 \text{ m}^2}{\pi}} = 12,2 \text{ m}$$

Το ύψος προσαυξάνεται κατά $0,5 \text{ m}$, για προσωρινή αποθήκευση του βιοαερίου. Συνεπώς, το συνολικό ύψος του AX υπολογίζεται ως:

$$H_{AX} = 6 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 6,5 \text{ m}$$

Ο συνολικός όγκος του αναερόβιου χωνευτή είναι:

$$V_{AX} = 116,7 \text{ m}^2 \cdot 6,5 \text{ m} = 758,6 \text{ m}^3$$

Παράδειγμα Σχεδιασμού Αναερόβιας Χώνευσης (3/10)

Ισοζύγιο Στερεών και Βιοαερίου

Το 1 kg εισερχόμενων Ολικών Στερεών (TSS), αποτελείται από 0,3 kg Μη Πτητικά Στερεά (NVSS) και 0,7 kg Πτητικά Στερεά (VSS). Το 60% των απομακρυνόμενων VSS είναι 0,42 kg, το οποίο έχει μετατραπεί σε βιοαέριο. Το υπόλοιπο 40% των VSS μαζί με τα 0,3 kg NVSS δίνουν συνολικά 0,58 kg TSS, τα οποία εξέρχονται ως ιλύς και οδηγούνται για περαιτέρω επεξεργασία.

Η παροχή στερεών στην είσοδο υπολογίζεται ως: $M_{\text{εισόδου}} = 35 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \cdot 40 \text{ kg m}^{-3} = 1400 \text{ kg d}^{-1}$

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίζεται η συνολική παροχή TSS (VSS + NVSS), και η συγκέντρωση στερεών στην έξοδο του Αναερόβιου Χωνευτή:

$$VSS_{\text{εξόδου}} = \frac{M_{\text{εισόδου}} \cdot (0,7 \text{ kg VSS} \cdot 40\%)}{1 \text{ kg TSS}} \Rightarrow VSS_{\text{εξόδου}} = \frac{1400 \text{ kg d}^{-1} \cdot (0,28 \text{ kg VSS})}{1 \text{ kg TSS}} \\ = 392 \text{ kg d}^{-1}$$

$$NVSS_{\text{εξόδου}} = \frac{M_{\text{εισόδου}} \cdot 0,3 \text{ kg NVSS}}{1 \text{ kg TSS}} \Rightarrow NVSS_{\text{εξόδου}} = \frac{1400 \text{ kg d}^{-1} \cdot 0,3 \text{ kg NVSS}}{1 \text{ kg TSS}} \\ = 420 \text{ kg d}^{-1}$$

$$TSS_{\text{εξόδου}} = VSS_{\text{εξόδου}} + NVSS_{\text{εξόδου}} \Rightarrow TSS_{\text{εξόδου}} = 392 \text{ kg d}^{-1} + 420 \text{ kg d}^{-1} = 812 \text{ kg d}^{-1}$$

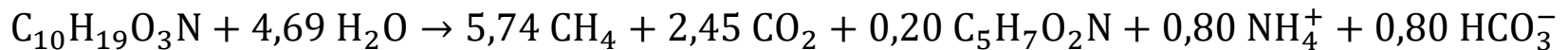
$$C_{\text{εξόδου}} = \frac{TSS_{\text{εξόδου}}}{Q_{\text{εισόδου}}} \Rightarrow C_{\text{εξόδου}} = \frac{812 \text{ kg d}^{-1}}{35 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}} = 23 \text{ kg m}^{-3} = 0,023 \text{ g ml}^{-1} = 2,3\%$$

Παράδειγμα Σχεδιασμού Αναερόβιας Χώνευσης (4/10)

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ποσότητα των VSS ανά ημέρα που καταστρέφονται και μετατρέπονται σε βιοαέριο.

$$VSS_{destroyed} = \frac{M_{\piυκν.} \cdot (0,7 \text{ kg VSS} \cdot 60\%)}{1 \text{ kg TSS}} \Rightarrow VSS_{destroyed} = \frac{1400 \text{ kg d}^{-1} \cdot (0,42 \text{ kg VSS})}{1 \text{ kg TSS}} \\ = 588 \text{ kg d}^{-1}$$

Με βάση την χημική εξίσωση που δείχνει την αναγωγή των VSS:



Προκύπτει ότι για κάθε 201 kg VSS παράγονται $5,74 \times 16 \text{ kg CH}_4$. Άρα, για τα 588 kg d^{-1} VSS αναμένεται να παραχθούν $269 \text{ kg d}^{-1} CH_4$.

Για πυκνότητα CH_4 $0,657 \text{ kg m}^{-3}$, ($20^\circ C$, 1 atm), ο όγκος του παραγόμενου CH_4 θα είναι: $409 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, ενώ ο όγκος του βιοαερίου $409/0,7 = 584 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

Παρατηρούμε ότι τα m^3 του παραγόμενου βιοαερίου (584 m^3) σχεδόν ισούνται αριθμητικά με τη μάζα (σε kg) των VSS που αντιδρούν (588 kg)

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ενέργεια του βιοαερίου ($E_{\text{βιοαερίου}}$), με βάση τη θερμογόνο δύναμη (HHV = $50,1 \text{ MJ kg}^{-1} CH_4$) του CH_4 . Η θερμογόνα δύναμη υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{\text{βιοαερίου}} = E_{CH_4} = 269 \text{ kg d}^{-1} \cdot 50,1 \text{ MJ kg}^{-1} = 13427 \text{ MJ d}^{-1} = 13,4 \text{ GJ d}^{-1} = 155 \text{ kW}$$

Παράδειγμα Σχεδιασμού Αναερόβιας Χώνευσης (5/10)

Η απαιτούμενη ισχύς για την ανάδευση της ιλύος δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{V_{\text{ιλύος}} \cdot 0,005 \text{ kW}}{1 \text{ m}^3 \text{ ιλύος}} \Rightarrow P = \frac{700 \text{ m}^3 \cdot 0,005 \text{ kW}}{1 \text{ m}^3 \text{ ιλύος}} = 3,5 \text{ kW}$$

Ο λόγος Ακτίνας:Βάθους είναι:

$$\frac{R_{AX}}{H_{AX}} = \frac{6,1 \text{ m}}{6,5 \text{ m}} = 0,94 > 0,7 \quad \underline{\text{Αποτελεσματική ανάμιξη}}$$

Η θερμότητα που απαιτείται για την ανύψωση θερμοκρασίας της εισερχόμενης ιλύος, από τους 15 °C στους 36 °C υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} q_s &= Q \cdot C_s \cdot (T_2 - T_1) = \frac{1400 \text{ kg d}^{-1}}{4\% \text{ στερεά}} \cdot 4,2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot (36 - 15) \text{ } ^\circ\text{C} = 3087000 \text{ kJ d}^{-1} \\ &= 35,7 \text{ kW} \end{aligned}$$

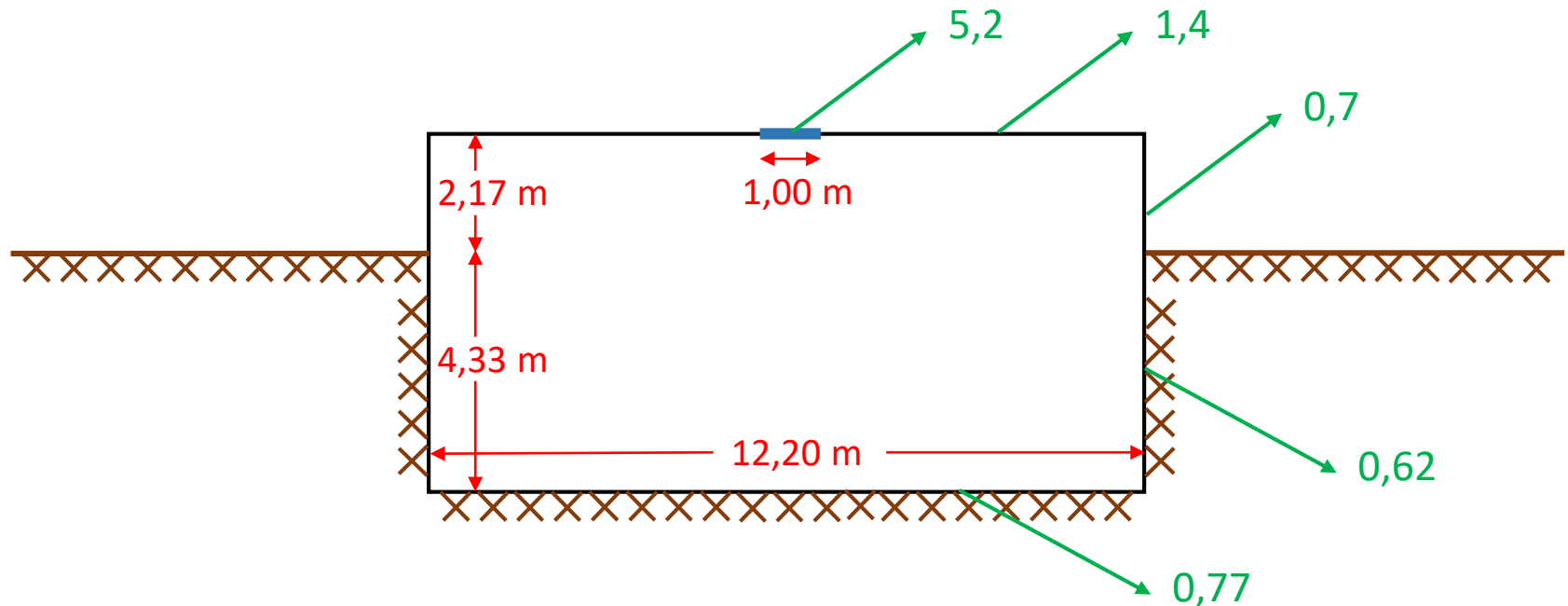
Παράδειγμα Σχεδιασμού Αναερόβιας Χώνευσης (6/10)

Απώλειες θερμότητας (1/3)

Οι απώλειες θερμότητας υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση. Υπολογίζονται ξεχωριστά για τον πυθμένα, τα εσωτερικά και εξωτερικά τοιχώματα, καθώς και για το καπάκι.

$$q = U \cdot A \cdot (T_2 - T_1)$$

Στο σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας σε $\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ή $\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (με πράσινη γραμματοσειρά), που επιλέχθηκαν, βάσει των χαρακτηριστικών του ΑΧ.



Παράδειγμα Σχεδιασμού Αναερόβιας Χώνευσης (7/10)

Απώλειες θερμότητας (2/3)

Ο υπολογισμός των απωλειών έχει ως εξής:

Καπάκι

$$q_{καπ.} = U_{καπ.} \cdot A_{καπ.} \cdot (T_{AX} - T_{αέρας}) = U_{καπ.} \cdot \frac{\pi \cdot D_{καπ.}^2}{4} \cdot (T_{AX} - T_{αέρας})$$
$$\Rightarrow q_{καπ.} = 5,2 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \frac{\pi \cdot (1 \text{ m})^2}{4} \cdot (36 - 3) \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} = 11644,5 \text{ kJ d}^{-1}$$

Άνω μέρος (χωρίς το καπάκι)

$$q_{άνω} = U_{άνω} \cdot A_{άνω} \cdot (T_{AX} - T_{αέρας}) = U_{άνω} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{AX}^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{καπ.}^2}{4} \right) \cdot (T_{AX} - T_{αέρας})$$
$$\Rightarrow q_{καπ.} = 1,4 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \left(\frac{\pi \cdot (12,2 \text{ m})^2}{4} - \frac{\pi \cdot (1 \text{ m})^2}{4} \right) \cdot (36 - 3) \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}}$$
$$= 463487 \text{ kJ d}^{-1}$$

Τοίχωμα (πάνω από το έδαφος)

$$q_{τοιχ.άνω} = U_{τοιχ.άνω} \cdot A_{τοιχ.άνω} \cdot (T_{AX} - T_{αέρας}) = U_{τοιχ.άνω} \cdot \pi \cdot D_{AX} \cdot 2,17 \text{ m} \cdot (T_{AX} - T_{αέρας})$$
$$\Rightarrow q_{τοιχ.άνω} = 0,7 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \pi \cdot 12,2 \text{ m} \cdot 2,17 \text{ m} \cdot (36 - 3) \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}}$$
$$= 165995 \text{ kJ d}^{-1}$$

Παράδειγμα Σχεδιασμού Αναερόβιας Χώνευσης (8/10)

Απώλειες θερμότητας (3/3)

Τοίχωμα (κάτω από το έδαφος)

$$\begin{aligned} q_{\text{τοιχ. κάτω}} &= U_{\text{τοιχ. κάτω}} \cdot A_{\text{τοιχ. κάτω}} \cdot (T_{\text{AX}} - T_{\text{έδαφος}}) = U_{\text{τοιχ. κάτω}} \cdot \pi \cdot D_{\text{AX}} \cdot 4,33 \text{ m} \cdot (T_{\text{AX}} - T_{\text{έδαφος}}) \\ &\Rightarrow q_{\text{τοιχ. κάτω}} = 0,62 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \pi \cdot 12,2 \text{ m} \cdot 4,33 \text{ m} \cdot (36 - 8) \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} \\ &= 248920,7 \text{ kJ d}^{-1} \end{aligned}$$

Πυθμένας

$$\begin{aligned} q_{\text{πυθμ.}} &= U_{\text{πυθμ.}} \cdot A_{\text{πυθμ.}} \cdot (T_{\text{AX}} - T_{\text{έδαφος}}) = U_{\text{πυθμ.}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{AX}}^2}{4} \cdot (T_{\text{AX}} - T_{\text{έδαφος}}) \\ &\Rightarrow q_{\text{πυθμ.}} = 0,77 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \frac{\pi \cdot (12,2 \text{ m})^2}{4} \cdot (36 - 8) \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} = 217759 \text{ kJ d}^{-1} \end{aligned}$$

Συνολικές απώλειες

$$\begin{aligned} q_{\text{απώλ.,ολ.}} &= q_{\text{καπ.}} + q_{\text{άνω}} + q_{\text{τοιχ. άνω}} + q_{\text{τοιχ. κάτω}} + q_{\text{πυθμ.}} \\ &= (11644,5 + 463487 + 165995 + 248920,7 + 217759) \text{ kJ d}^{-1} = 1107806 \text{ kJ d}^{-1} = 12,8 \text{ kW} \end{aligned}$$

Συνολικά απαιτούμενη θερμότητα

$$q_{\text{ολ.}} = q_s + q_{\text{απώλ.,ολ.}} = 3087000 \text{ kJ d}^{-1} + 1107806 \text{ kJ d}^{-1} = 4194806 \text{ kJ d}^{-1} = 48,5 \text{ kW}$$

Παράδειγμα Σχεδιασμού Αναερόβιας Χώνευσης (9/10)

Οπότε, η περίσσεια ενέργειας υπολογίζεται ως:

$$E_{\text{διαθέσιμη}} = E_{\text{βιοαερίου}} - Q_{\text{ολ}} = 155 \text{ kW} - 48,5 \text{ kW} = 106,5 \text{ kW}$$

Διαστασιολόγηση αεριοφυλακίου για την αποθήκευση του βιοαερίου

Για την αποθήκευση του βιοαερίου επιλέγεται αεριοφυλάκιο πλωτής οροφής, με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- $P = 2000 \text{ Pa}$
- $\tau = 2 \text{ d}$

Ο όγκος του βιοαερίου που παράγεται κατά το διάστημα των 2 ημερών είναι:

$$V_{\text{βιοαερ.}} = \tau \cdot Q_{\text{βιοαερ.}} \Rightarrow V_{\text{βιοαερ.}} = 2 \text{ d} \cdot 584 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} = 1168 \text{ m}^3$$

Συνεπώς, ο όγκος του αεριοφυλακίου υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{\text{απολ.}} \cdot V_{\text{βιοαερ.}} = P_{\text{σχετ.}} \cdot V_{\text{αεροφουλ.}} \Rightarrow 101325 \text{ Pa} \cdot 1168 \text{ m}^3 = (101325 + 2000) \text{ Pa} \cdot V_{\text{αεροφουλ.}} \\ \Rightarrow V_{\text{αεροφουλ.}} = 1145 \text{ m}^3$$

Για συντελεστή ασφαλείας = 1,2, ο Όγκος Σχεδιασμού προκύπτει: $V_{\text{αεροφουλ. Σχεδιασμου}} = 1374 \text{ m}^3$

Εάν θέσουμε ύψος αεριοφυλακίου ($H_{\text{αεριοφυλ.}}$) ίσο με το $\frac{1}{2}$ της διαμέτρου ($D_{\text{αεριοφυλ.}}$), τότε προκύπτουν διατάσεις:

$$D_{\text{αεριοφυλ.}} = 15,2 \text{ m}, H_{\text{αεριοφυλ.}} = 7,6 \text{ m}.$$

Παράδειγμα Σχεδιασμού Αναερόβιας Χώνευσης (10/10)

Χαρακτηριστικά ΑΧ	
Παράμετρος	Τιμή
Τύπος	Κυλινδρικός, Πλήρους μείξης
Διάμετρος	12,2 m
Ολικό ύψος	6,5 m
Ωφέλιμος όγκος	700 m ³
Ολικός όγκος	758,6 m ³
Χρόνος παραμονής	20 d
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά εξόδου (TSS _{εξόδου})	812,0 kg d ⁻¹
Συγκέντρωση στερεών στην έξοδο	2,3%
Παραγόμενος όγκος βιοαερίου ανά ημέρα	584 m ³ d ⁻¹
Παραγόμενος όγκος μεθανίου ανά ημέρα	409 m ³ d ⁻¹
Θερμογόνος δύναμη βιοαερίου	2,4 GJ d ⁻¹
Απαιτούμενη ισχύς ανάδευσης ιλύος	3,5 kW
Απαιτούμενη ισχύς για τη θέρμανση ιλύος	35,7 kW
Ισχύς απωλειών θερμότητας ΑΧ	12,8 kW
Όγκος αεριοφυλακίου αποθήκευσης βιοαερίου	1374 m ³