

Βιολογικές Διεργασίες στην Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων

Μάθημα 9

Συστήματα ενεργού ιλύος

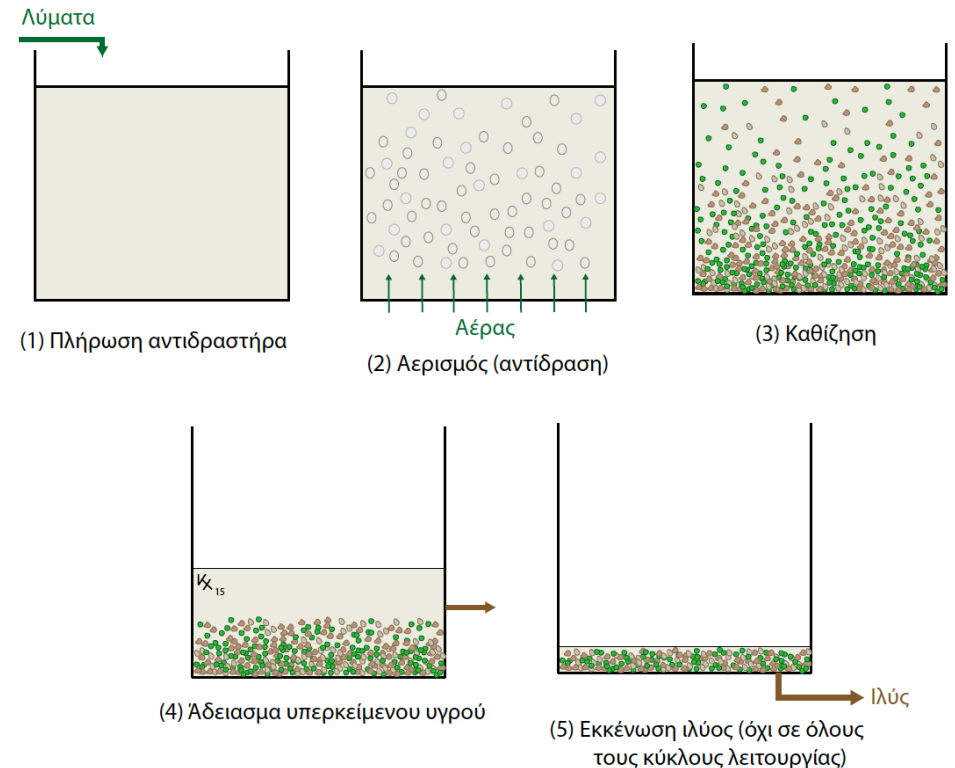
Η μέθοδος της ενεργού ιλύος για δευτεροβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων **επινοήθηκε το 1914** από τους Άγγλους ερευνητές, E. Arden και W. Lockett.

Το πρώτο σύστημα ενεργού ιλύος **λειτούργησε το 1917** στο Μάντσεστερ της Αγγλίας και αποτελείτο από ένα αντιδραστήρα διαλείποντος έργου (batch) που χρησιμοποιείτο σε πέντε επαναλαμβανόμενα βήματα:

- (1) πλήρωση αντιδραστήρα με τα υγρά απόβλητα,
- (2) αερισμός,
- (3) καθίζηση,
- (4) άδειασμα υπερκείμενου υγρού και
- (5) εκκένωση ιλύος αλλά όχι σε όλους τους κύκλους λειτουργίας.

Καθώς συνεχιζόταν οι κύκλοι λειτουργίας, βελτιωνόταν η αφαίρεση του οργανικού υλικού, επειδή αυξανόταν η ποσότητα των αιωρούμενων στερεών του ανάμικτου υγρού και κατά συνέπεια ο αριθμός των μικροοργανισμών. Οι επιστήμονες της εποχής θεωρούσαν ότι τα στερεά του ανάμικτου υγρού ενεργοποιούνταν με την πάροδο του χρόνου. Με βάση το λανθασμένο σκεπτικό αυτό, η διεργασία ονομάστηκε **σύστημα ενεργού ιλύος (activated sludge)**.

Στην **πραγματικότητα** δεν υπάρχει ενεργοποίηση στερεών αλλά απλή ανάπτυξη των μικροοργανισμών, οι οποίοι είναι και υπεύθυνοι για την κατανάλωση του οργανικού φορτίου των υγρών αποβλήτων.



Βήματα λειτουργίας των πρώτων συστημάτων ενεργού ιλύος για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων.

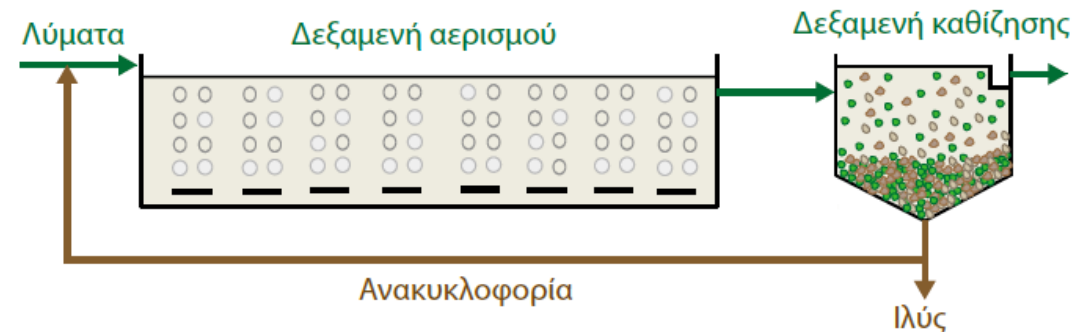
Με την πάροδο του χρόνου τα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων με ενεργό ιλύ **εξελίχθηκαν**, ώστε να επιτυγχάνεται ταχεία απομάκρυνση του οργανικού φορτίου καθώς και αποτελεσματικός διαχωρισμός της βιομάζας από τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα.

Ένα σύγχρονο (συμβατικό) συστήματα ενεργού ιλύος περιλαμβάνει μια δεξαμενή αερισμού και μια δεξαμενή καθίζησης.

Στη **δεξαμενή αερισμού** τροφοδοτούνται τα υγρά απόβλητα και αναμιγνύονται με το ανάμικτο υγρό που περιέχει. Η ανάμιξη εξασφαλίζεται με παροχή αέρα. Οι μικροοργανισμοί (βακτήρια, μύκητες) χρησιμοποιούν το οργανικό υλικό για την ανάπτυξή τους και την παραγωγή μεταβολικών προϊόντων (CO_2 , NO_3^- , SO_4^{2-}).

Στη **δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης** γίνεται κατακράτηση των αιωρούμενων στερεών του ανάμικτου υγρού. Ένα μέρος από τα αιωρούμενα στερεά, που κατακάθονται στον πυθμένα της δεξαμενής, ανακυκλοφορείται στη δεξαμενή αερισμού και το υπόλοιπο αφαιρείται από τη δεξαμενή καθίζησης.

Η **ανακυκλοφορία** σκοπεύει στο να αύξηση το χρόνο παραμονής των αιωρούμενων στερεών στην δεξαμενή αερισμού.

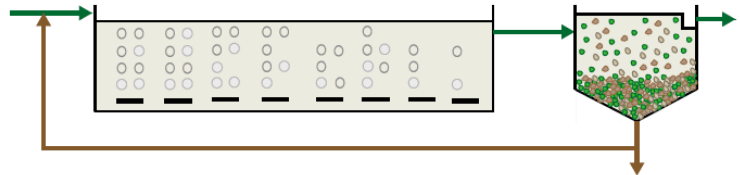


Συμβατικό συστήματα ενεργού ιλύος

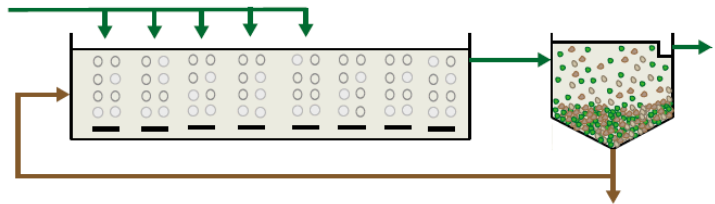
Προκειμένου να αντιμετωπιστούν διάφορα λειτουργικά προβλήματα που έχουν προκύψει με το κλασικό ή συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος, δημιουργήθηκαν διάφορες παραλλαγές.



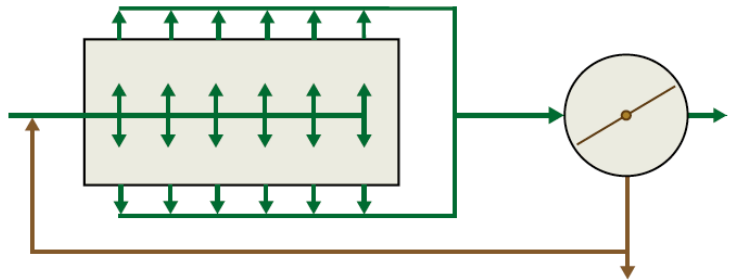
(α) Κλασικό σύστημα
(αερισμός ομοιόμορφος
σε όλο το μήκος της
δεξαμενής)



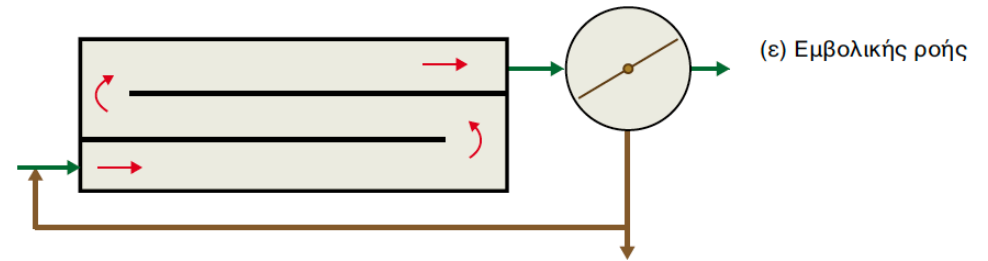
(β) Σταδιακά μειωμένος
αερισμός



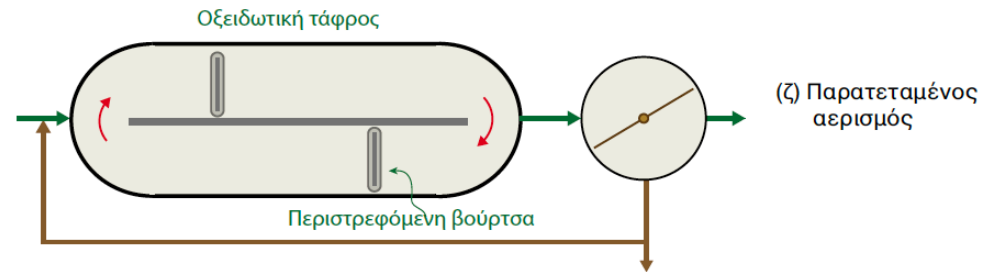
(γ) Βηματική τροφοδότηση



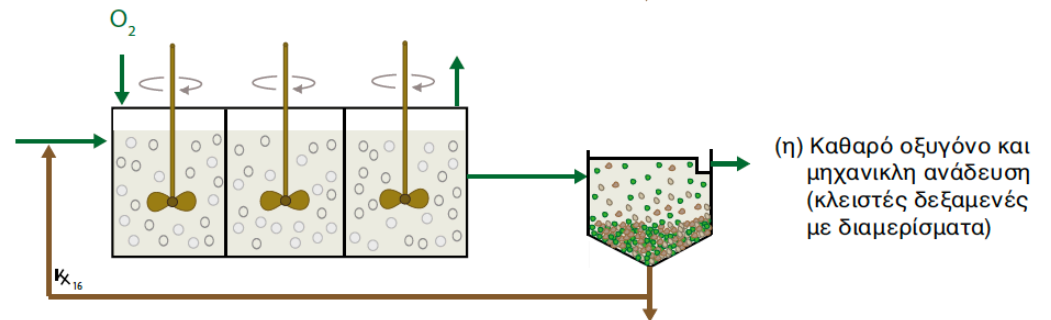
(δ) Πολλαπλά σημεία
τροφοδότησης και
εκροής



(ε) Εμβολικής ροής



(ζ) Παρατεταμένος
αερισμός



(η) Καθαρό οξυγόνο και
μηχανική ανάδευση
(κλειστές δεξαμενές
με διαμερίσματα)

Διάφορες παραλλαγές συστημάτων ενεργού ιλύος
για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων.

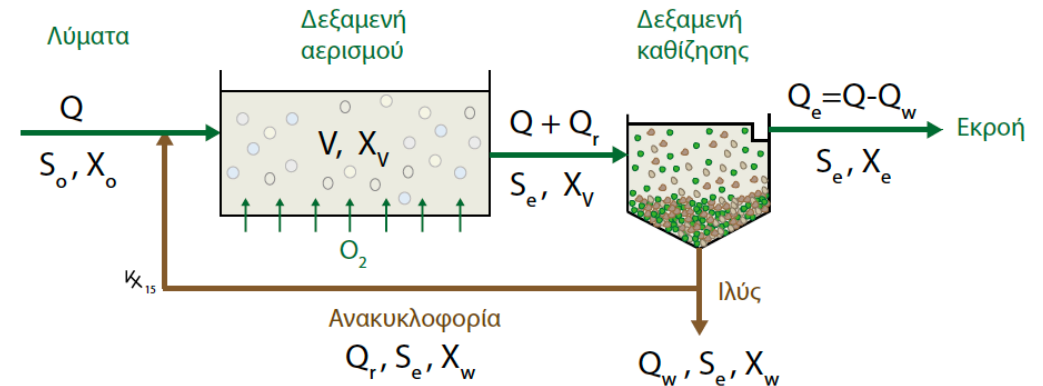
Λειτουργικές παράμετροι

(1) Ο μέσος χρόνος παραμονής στερεών, θ_c [t], (solids retention time, SRT) ή ηλικία της λάσπης (sludge age) δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_c = \frac{VX_v}{Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e}$$

όπου V [L^3] είναι ο όγκος της δεξαμενής αερισμού, X_v [M_x/L^3] είναι η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών (volatile suspended solids, VSS) ή βιομάζα του ανάμικτου υγρού στη δεξαμενή αερισμού, Q [L^3/t] είναι ο ρυθμός τροφοδοτούμενης παροχής, Q_w [L^3/t] είναι ο ρυθμός απομάκρυνσης περίσσειας ιλύος από τη δεξαμενή καθίζησης, X_w [M_x/L^3] είναι η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών στην περίσσεια ιλύος από τη δεξαμενή καθίζησης και X_e [M_x/L^3] είναι η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών στην επεξεργασμένη εκροή.

Στην παραπάνω εξίσωση ο αριθμητής περιγράφει τη μάζα των πτητικών αιωρούμενων στερεών στη δεξαμενή αερισμού, ενώ ο παρονομαστής τη μάζα των πτητικών αιωρούμενων στερεών που χάνεται στην εκροή.



Αρχίζοντας με το ισοζύγιο μάζας των πτητικών αιωρούμενων στερεών σε ένα σύστημα ενεργούς ιλύος προκύπτει:

Εισροή – Εκροή + Παραγωγή = Συσσώρευση

$$QX_o - [Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e] + r_{xg} V = \frac{dX_v}{dt} V$$

Δεδομένου ότι $X_o \approx 0$, σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, το ισοζύγιο μάζας μετά από αντικατάσταση του r_{xg} (καθαρός ρυθμός αύξησης μικροοργανισμών) μετατρέπεται ως εξής:

$$\Rightarrow Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e = (Y r_s - k_d X_v) V$$

$$\Rightarrow \frac{Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e}{V X_v} = Y \frac{r_s}{X_v} - k_d$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\theta_c} = Y \frac{r_s}{X_v} - k_d$$

(2) Ο μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής στη δεξαμενή αερισμού, θ [t], δίνεται από τη σχέση:

$$\theta = \frac{V}{Q}$$

Για τον υπολογισμό του θ δεν συμπεριλαμβάνεται η παροχή της ανακυκλοφορίας της ιλύος. Για **αστικά απόβλητα** $\theta=1-5$ d και για **βιομηχανικά απόβλητα** $\theta=1-10$ d.

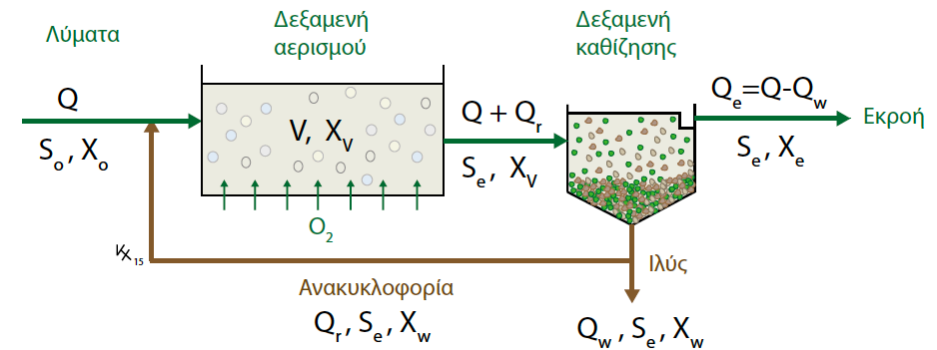
(3) Ο μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής στο σύστημα ενεργού ιλύος, θ_s [t], (hydraulic retention time):

$$\theta_s = \frac{V+V_s}{Q}$$

όπου V_s [L³] είναι ο όγκος της δεξαμενής καθίζησης.

(4) Ο παρατηρούμενος συντελεστής απόδοσης μετατροπής είναι ο **λόγος της μάζας** των αιωρούμενων **στερεών που εξέρχονται** από το σύστημα ως προς τη μάζα του βιοαποδομούμενου υλικού που **εισέρχεται** στο σύστημα.

Με βάση το **ολικό τροφοδοτούμενο οργανικό υλικό**, ο παρατηρούμενος συντελεστής απόδοσης μετατροπής, $Y_{obs,t}$ [M_x/M_s], (total observed yield) δίνεται από τη σχέση:



$$Y_{obs,t} = \frac{Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e}{Q S_o}$$

όπου S_o [M_s/L^3] είναι η ολική συγκέντρωση (αιωρούμενο και διαλυτό υπόστρωμα) του βιοαποδομούμενου οργανικού υλικού στην τροφοδότηση.

Με βάση την **καθαρή αφαίρεση οργανικού υλικού**, ο παρατηρούμενος συντελεστής απόδοσης μετατροπής, Y_{obs} [M_x/M_s], (observed yield) δίνεται από τη σχέση:

$$Y_{obs} = \frac{Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e}{Q(S_o - S_e)}$$

όπου S_e [M_s/L^3] είναι η ολική συγκέντρωση (αιωρούμενο και διαλυτό υπόστρωμα) βιοαποδομούμενου οργανικού υλικού στην επεξεργασμένη εκροή.

(5) Ο λόγος τροφής προς μικροοργανισμούς, F/M [1/t], (food to microorganism) είναι ο λόγος του ολικού ρυθμού τροφοδοσίας του υποστρώματος ως προς την ολική ποσότητα μικροοργανισμών και δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{F}{M} = \frac{QS_o}{VX_v}$$

(6) Ο ειδικός ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος, U [1/t]:

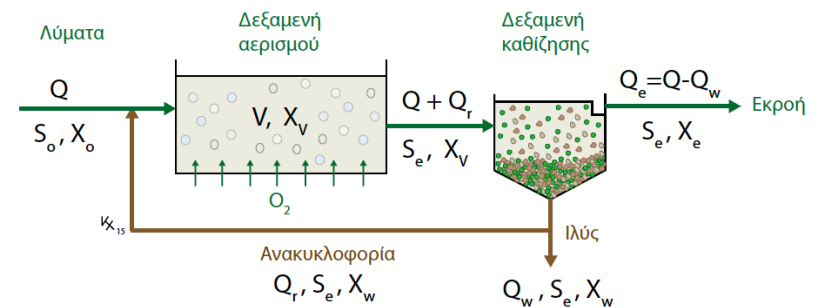
$$U = \frac{Q(S_o - S_e)}{VX_v}$$

(7) Ο απόδοση αφαίρεσης οργανικού υλικού, E [%]:

$$E = \frac{S_o - S_e}{S_o} \times 100$$

Επίσης, συνδυάζοντας τις 3 παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν οι εξής συσχετίσεις:

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{\frac{F}{M}(S_o - S_e)}{S_o} \\ E &= \frac{S_o - S_e}{S_o} \times 100 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} E &= \frac{U}{F/M} \times 100 \\ U &= \left(\frac{F}{M} \right) \frac{E}{100} \end{aligned} \right.$$



(8) Η παραγωγή βιομάζας, P_x [M_x/t], σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης ισούται με τη βιομάζα που εξέρχεται από το σύστημα ανά μονάδα χρόνου ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} P_x &= Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e \\ \theta_c &= \frac{VX_v}{Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e} \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_x = \frac{VX_v}{\theta_c}$$

Αν ο καθαρός ρυθμός αύξησης των μικροοργανισμών δίνεται από την εξίσωση:

$$\Rightarrow r_{xg} = Yr_s - k_d X$$

η ενεργή βιομάζα που εξέρχεται από το σύστημα ανά μονάδα χρόνου είναι:

$$P_x = \frac{VX_v}{\theta_c} = \frac{YQ(S_o - S_e)}{1 + k_d \theta_c} \quad (*)$$

Η εξίσωση (*) εξάγεται αρχίζοντας με ένα ισοζύγιο μάζας ως προς το S, για ένα σύστημα ενεργού ιλύος:

$$QS_o - (Q - Q_w)S_e - Q_w S_e + r_s V = \frac{dS_e}{dt} V = 0$$

$$\Rightarrow r_s = \frac{Q(S_o - S_e)}{V}$$

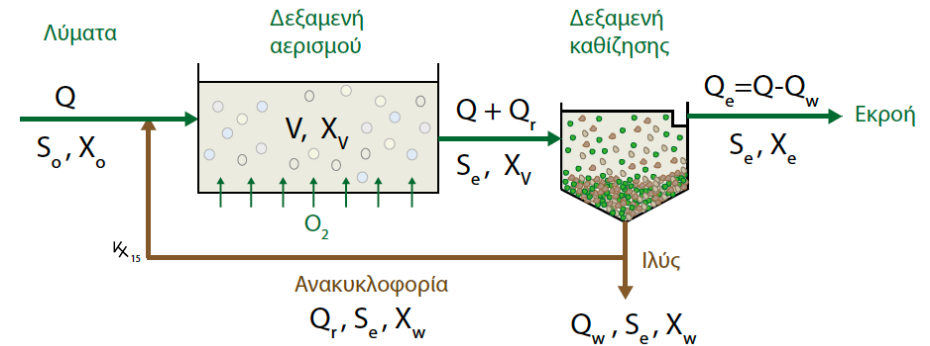
Συνεχίζοντας με ένα ισοζύγιο μάζας ως προς τα αιωρούμενα στερεά, για ένα σύστημα ενεργού ιλύος:

$$0 - (Q - Q_w)X_e - Q_w X_w + r_{xg} V = \frac{dX_e}{dt} V = 0$$

$$\Rightarrow \left. \begin{aligned} Q_w X_w + (Q - Q_w)X_e &= r_{xg} V \\ r_{xg} &= Yr_s - k_d X_v \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow \left. \begin{aligned} \frac{Q_w X_w + (Q - Q_w)X_e}{VX_v} &= \frac{YQ(S_o - S_e)}{VX_v} - k_d \\ \theta_c &= \frac{VX_v}{Q_w X_w + (Q - Q_w)X_e} \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\theta_c} + k_d = \frac{YQ(S_o - S_e)}{VX_v}$$



$$\Rightarrow 1 + k_d \theta_c = \frac{\theta_c}{VX_v} YQ(S_o - S_e)$$

$$\Rightarrow \frac{VX_v}{\theta_c} = \frac{YQ(S_o - S_e)}{1 + k_d \theta_c} = P_x \quad \bullet$$

(9) Ο λόγος ανακύκλωσης, r [-], δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{Q_r}{Q}$$

όπου Q_r [L^3/t] είναι η παροχή της ανακυκλοφορίας της ιλύος.

(10) Η **απαίτηση σε οξυγόνο**, R_o [M/t], θεωρώντας ότι δεν γίνεται νιτροποίηση στο σύστημα ενεργού ιλύος, υπολογίζεται ως εξής:

$$R_o = \frac{Q(S_o - S_e)}{f_o} \left(\frac{\text{kg}}{1000\text{g}} \right) - 1,42 P_x \quad \left[\frac{\text{kg O}_2}{\text{d}} \right]$$

όπου $P_x = Q_w X_w$ [kg/d] είναι ο ρυθμός παραγωγής στερεών βιομάζας (κυτταρική μάζα), $f_o = 0,68$ [-] είναι ο συντελεστής μετατροπής του BOD_5 σε BOD_{Lo} (απόλυτο BOD), **1,42 [kg O₂/kg κυττάρων]** είναι μια σταθερά που μετατρέπει τη μάζα των κυττάρων σε ισοδύναμο O₂, Q έχει μονάδες [m³/d], S_o και S_e έχουν μονάδες [mg/L].

Η απαίτηση σε οξυγόνο ισούται με το **οξυγόνο που χρειάζεται για οξείδωση**, σε CO₂ και H₂O, του οργανικού υλικού (που αφαιρείται), μείον το οξυγόνο που χρειάζεται για οξείδωση της αναπτυσσόμενης βιομάζας.

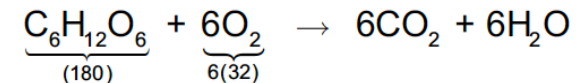
Το **1,42P_x αφαιρείται** στον υπολογισμό του R_o γιατί η πραγματική απαίτηση σε οξυγόνο είναι μικρότερη της $Q(S_o - S_e)$ επειδή ένα ποσοστό του υποστρώματος S_o χρησιμοποιείται για τη **σύνθεση κυττάρων** και οξειδώνεται από τα βακτήρια.

Για τον υπολογισμό του R_o έχουν γίνει οι έξης **παραδοχές**:

(i) Η συγκέντρωση της βιομάζας στην επεξεργασμένη εκροή είναι αμελητέα ($X_e \approx 0$).

(ii) $BOD_5 \approx 0,68 BOD_{Lo}$.

(iii) Επειδή η οργανική ύλη δεν είναι ποτέ γνωστή, θεωρείται ότι η οργανική ύλη μπορεί να εκφραστεί ως γλυκόζη (C₆H₁₂O₆), η οξείδωσή της οποίας είναι:

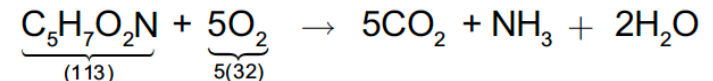


και το COD της γλυκόζης είναι:

$$COD = \frac{6(32) \text{ g O}_2 / \text{mole}}{180 \text{ g C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 / \text{mole}} = 1,07 \frac{\text{g O}_2}{\text{g C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}$$

Δηλαδή, **1 g C₆H₁₂O₆ ≈ 1 g O₂**.

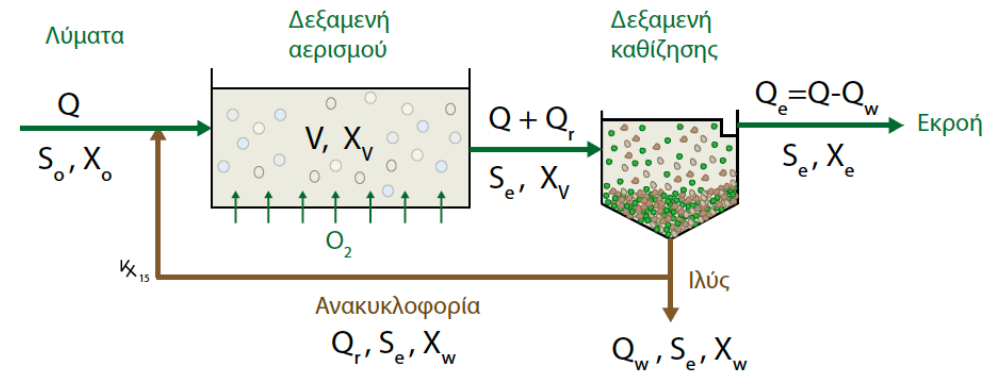
(iv) Τα κύτταρα βιομάζας που συντίθενται μπορούν να εκφραστούν ως C₅H₇O₂N και η αντίδραση οξείδωσης είναι:



και το COD της κυτταρικής μάζας είναι:

$$COD = \frac{5(32) \text{ g O}_2 / \text{mole}}{113 \text{ g C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} / \text{mole}} = 1,42 \frac{\text{g O}_2}{\text{g κυττάρων}}$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται ενδεικτικές τιμές των συντελεστών και κινητικών παραμέτρων για απομάκρυνση οργανικής ύλης από αστικά λύματα με τη βοήθεια ετερότροφων βακτηρίων σε συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος, στους 20 °C.



Παράμετρος	Διακύμανση	Τυπική τιμή
Μικροβιακή κινητική		
μ_m/Y [mg BOD ₅ /mg VSS·d]	2-10	5
K_s [mg BOD ₅ /L]	25-100	60
Y [mg VSS/mg BOD ₅]	0,4-0,8	0,6
k_d [1/d]	0,025-0,075	0,06
Λειτουργία συστήματος		
θ_c [d]	5-15	
F/M [mg BOD ₅ /mg VSS·d]	0,2-0,6	
Οργανική φόρτιση [kg BOD ₅ /m ³ ·d]	0,8-1,9	
Αιωρούμενα στερεά [kg/m ³]	2,5-6,5	
θ_s [d]	3-5	
$r=Q_r/Q$ [-]	0,25-1	
Απόδοση αφαίρεσης BOD ₅ [%]	85-95	

μ_m – μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης μικροοργανισμών
 K_s – σταθερά κορεσμού
 Y – συντελεστής κυτταρικής απόδοσης
 k_d – συντελεστής αποδόμησης μικροοργανισμών
 θ_c – μέσος χρόνος παραμονής στερεών
 θ_s – μέσος χρόνος υδραυλικής παραμονής
 E – απόδοση αφαίρεσης οργανικού υλικού

Παράδειγμα 1

Μια μονάδα ενεργού ιλύος επεξεργάζεται αστικά απόβλητα με $BOD_5 = 440 \text{ mg/L}$. Να βρεθεί η απόδοση που πρέπει να έχει η μονάδα αυτή ώστε το οργανικό υλικό στα επεξεργασμένα απόβλητα να μην υπερβαίνουν την τιμή $BOD_5 = 25 \text{ mg/L}$.

Λύση:

Η απόδοση καθαρισμού δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{(S_o - S_e)}{S_o} 100 \%$$

$$\Rightarrow E \geq \frac{(440 \text{ mg/L} - 25 \text{ mg/L})}{440 \text{ mg/L}} 100 \Rightarrow E \geq 94,3 \%$$

Παράδειγμα 2

Μια μονάδα ενεργού ιλύος επεξεργάζεται 6000 m³/d υγρά απόβλητα με BOD₅ εισόδου 425 mg/L και BOD₅ εξόδου 25 mg/L. Η δεξαμενή αερισμού έχει όγκο V=1200 m³. Να βρεθεί η απόδοση καθαρισμού, E, και ο χρόνος παραμονής των λυμάτων στη δεξαμενή.

Λύση

Η απόδοση καθαρισμού δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{(S_o - S_e)}{S_o} 100 \%$$
$$\Rightarrow E = \frac{(425 \text{ mg/L} - 25 \text{ mg/L})}{425 \text{ mg/L}} 100 = 94,1 \%$$

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής των λυμάτων είναι:

$$\theta = \frac{V}{Q} = \frac{1200 \text{ m}^3}{6000 \text{ m}^3 / \text{d}} = 0,2 \text{ d}$$

Παράδειγμα 3

Για μια εγκατάσταση βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με σύστημα ενεργού ιλύος πλήρους ανάμειξης γνωρίζουμε ότι ο ρυθμός τροφοδοτούμενης παροχής είναι $Q=2000 \text{ m}^3/\text{h}$, η ολική συγκέντρωση του βιοαποδομούμενου οργανικού υλικού (διαλυτό και αιωρούμενο υπόστρωμα) στην τροφοδότηση είναι $S_o=180 \text{ mg/L}$, ο όγκος της δεξαμενής αερισμού είναι $V=5000 \text{ m}^3$, η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών (volatile suspended solids) του ανάμεικτου υγρού στη δεξαμενή αερισμού είναι $X_v=2100 \text{ mg/L}$, η ολική συγκέντρωση του βιοαποδομούμενου οργανικού υλικού στην επεξεργασμένη εκροή είναι $S_e=4 \text{ mg/L}$, η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών στην επεξεργασμένη εκροή είναι $X_e=8 \text{ mg/L}$, ο ρυθμός απομάκρυνσης περιόσσειας ιλύος από τη δεξαμενή καθίζησης είναι $Q_w=500 \text{ m}^3/\text{d}$, η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών στην περίσσεια ιλύος είναι $X_w=4900 \text{ mg/L}$ και ο ρυθμός ανακυκλοφορίας ιλύος είναι $Q_r=550 \text{ m}^3/\text{h}$. Να βρεθούν: (α) ο μέσος χρόνος παραμονής στερεών, θ_c , (β) ο λόγος τροφής/μικροοργανισμών, F/M , (γ) ο ειδικός ρυθμός χρήσης υποστρώματος, U , (δ) ο συντελεστής ανακυκλοφορίας, r , (ε) η απόδοση καθαρισμού, E , (ζ) ο παρατηρούμενος συντελεστής απόδοσης μετατροπής με βάση το ολικό τροφοδοτούμενο οργανικό υλικό, $Y_{\text{obs},t}$.

Λύση

(α) Ο μέσος χρόνος παραμονής στερεών δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_c = \frac{V X_v}{Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e}$$

$$\Rightarrow \theta_c = \frac{(5000 \text{ m}^3)(2100 \text{ mg/L})}{(500 \text{ m}^3/\text{d})(4900 \text{ mg/L}) + [(2000 \text{ m}^3/\text{h})(24 \text{ h/d}) - (500 \text{ m}^3/\text{d})](8 \text{ mg/L})}$$

$$\Rightarrow \theta_c = 3,71 \text{ d} \quad \bullet$$

(β) Ο λόγος F/M δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{F}{M} = \frac{S_o}{\theta X_v} = \frac{Q S_o}{V X_v}$$

$$\Rightarrow \frac{F}{M} = \frac{(2000 \text{ m}^3/\text{h})(180 \text{ mg/L})}{(5000 \text{ m}^3)(2100 \text{ mg/L})} \left(\frac{24 \text{ h}}{\text{d}} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{F}{M} = 0,823 \frac{1}{\text{d}} \quad \bullet$$

(γ) ο ειδικός ρυθμός χρήσης υποστρώματος δίνεται από τη σχέση:

$$U = \frac{S_o - S_e}{\theta X_v} = \frac{Q(S_o - S_e)}{V X_v}$$

$$\Rightarrow U = \frac{(2000 \text{ m}^3/\text{h})(180 \text{ mg/L} - 4 \text{ mg/L})}{(5000 \text{ m}^3)(2100 \text{ mg/L})} \left(\frac{24 \text{ h}}{\text{d}} \right)$$

$$\Rightarrow U = 0,805 \frac{1}{\text{d}} \quad \bullet$$

(δ) Ο συντελεστής ανακυκλοφορίας δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{Q_r}{Q}$$

$$\Rightarrow r = \frac{550 \text{ m}^3/\text{h}}{2000 \text{ m}^3/\text{h}} = 0,275 \quad \bullet$$

(ε) Η απόδοση καθαρισμού δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{(S_o - S_e)}{S_o} 100 \%$$

$$\Rightarrow E = \frac{(180 \text{ mg/L} - 4 \text{ mg/L})}{180 \text{ mg/L}} 100 = 97,8 \% \quad \bullet$$

επίσης α πρέπει να σημειωθεί ότι:

$$E = \frac{U}{\left(\frac{F}{M} \right)} = \frac{0,805}{0,823} = 0,978 \quad \bullet$$

(ζ) Ο παρατηρούμενος συντελεστής απόδοσης μετατροπής με βάση το ολικό τροφοδοτούμενο οργανικό υλικό δίνεται από τη σχέση:

$$Y_{\text{obs},t} = \frac{Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e}{Q S_o}$$

$$\Rightarrow Y_{\text{obs},t} = \frac{(500 \text{ m}^3/\text{d})(4900 \text{ mg/L}) + [(2000 \text{ m}^3/\text{h})(24 \text{ h/d}) - (500 \text{ m}^3/\text{d})](8 \text{ mg/L})}{[(2000 \text{ m}^3/\text{h})(24 \text{ h/d})](180 \text{ mg/L})}$$

$$\Rightarrow Y_{\text{obs},t} = \frac{2.830.000 \text{ (mg απο X)}}{8.640.000 \text{ (mg απο S)}} = 0,32 \quad \bullet$$

Παράδειγμα 4

Για μια εγκατάσταση βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με σύστημα ενεργού ιλύος πλήρους ανάμιξης γνωρίζουμε ότι ο ρυθμός τροφοδοτούμενης παροχής είναι $Q=5000 \text{ m}^3/\text{d}$, η ολική συγκέντρωση του βιοαποδομούμενου οργανικού υλικού στην τροφοδότηση είναι $S_o=400 \text{ mg/L}$, ο όγκος της δεξαμενής αερισμού είναι $V=1000 \text{ m}^3$, η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών του ανάμεικτου υγρού στη δεξαμενή αερισμού είναι $X_v=3000 \text{ mg/L}$, η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών στην επεξεργασμένη εκροή είναι $X_e \approx 0 \text{ mg/L}$, ο ρυθμός απομάκρυνσης περισσειας ιλύος από τη δεξαμενή καθίζησης είναι $Q_w=59 \text{ m}^3/\text{d}$ και η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών στην περίσσεια ιλύος είναι $X_w=8000 \text{ mg/L}$. Να βρεθεί (α) ο μέσος χρόνος παραμονής των στερεών στο σύστημα, θ_c , και (β) η θεωρητική απαίτηση σε οξυγόνο της διεργασίας ενεργού ιλύος εάν η ολική συγκέντρωση του βιοαποδομούμενου οργανικού υλικού στην επεξεργασμένη εκροή είναι $S_e=5 \text{ mg/L}$.

Λύση

$$\theta_c = \frac{V X_v}{Q_w X_w + (Q - Q_w) X_e}$$
$$\Rightarrow \theta_c = \frac{(1000 \text{ m}^3)(3000 \text{ mg/L})}{(59 \text{ m}^3/\text{d})(8000 \text{ mg/L}) + 0}$$
$$\Rightarrow \theta_c = 6,36 \text{ d} \quad \bullet$$

Η απαίτηση σε οξυγόνο δίνεται από τη σχέση:

$$R_o = \frac{Q(S_o - S_e)}{f} \left(\frac{\text{kg}}{1000\text{g}} \right) - 1,42 P_x$$

όπου η παροχή των στερεών ιλύος, P_x , δίνεται από τη σχέση:

$$P_x = Q_w X_w = \left(59 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) \left(8000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \left(\frac{\text{g}}{1000 \text{ mg}} \frac{\text{kg}}{1000\text{g}} \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \right) = 472 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$
$$f_o = 0,68$$

$$\Rightarrow R_o = \frac{(5000 \text{ m}^3/\text{d})(400 \text{ mg/L} - 5 \text{ mg/L})}{0,68} \left(\frac{\text{kg}}{1000\text{g}} \right) - 1,42 \left(472 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \right)$$
$$\Rightarrow R_o = 2234,17 \text{ kg/d} \quad \bullet$$

Παράδειγμα 5

Μια μονάδα ενεργού ιλύος επεξεργάζεται $Q=4000 \text{ m}^3/\text{d}$ υγρά απόβλητα με BOD_5 εισόδου 200 mg/L . Το φορτίο ιλύος είναι $F/M = 0,30 \text{ (kg BOD}_5/\text{kg VSS}\cdot\text{d)}$ όπου VSS είναι τα πτητικά αιωρούμενα στερεά. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής των λυμάτων είναι $\theta=6 \text{ h}$. Να βρεθεί η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών, X_v .

Λύση

Ο όγκος της δεξαμενής αερισμού υπολογίζεται με την βοήθεια της εξίσωσης (10.11) που περιγράφει το χρόνο παραμονής των λυμάτων:

$$\theta = \frac{V}{Q} \Rightarrow V = \theta Q$$
$$\Rightarrow V = \left[(6 \text{ h}) \left(\frac{\text{d}}{24 \text{ h}} \right) \right] \left(4.000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) = 1.000 \text{ m}^3$$

Η ημερήσια παροχή του BOD_5 είναι:

$$\text{BOD}_5 = \left[\left(200 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \left(\frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{\text{kg}}{10^6 \text{ mg}} \right) \right] \left(4.000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) = 800 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Η μάζα των πτητικών αιωρούμενων στερεών στη δεξαμενή είναι:

$$\left(800 \frac{\text{kg BOD}_5}{\text{d}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg VSS} \cdot \text{d}}{0,30 \text{ kg BOD}_5} \right) = 2.666,7 \text{ kg VSS}$$

Η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών είναι:

$$X_v = \left[(2.666,7 \text{ kg VSS}) \left(\frac{1000 \text{ g}}{\text{kg}} \right) \right] \left(\frac{1}{1.000 \text{ m}^3} \right) = 2.666,7 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 2.666,7 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad \bullet$$

Παράδειγμα 6

Για να υπολογιστεί η απόδοση ενός συστήματος ενεργού ιλύος πρέπει να βρεθούν τα απαραίτητα δεδομένα για τις ιδιότητες των μικροοργανισμών. Για την εύρεση των δεδομένων αυτών, διεξάγονται εργαστηριακά πειράματα χρησιμοποιώντας ένα αντιδραστήρα συνεχούς τροφοδότησης και πλήρους ανάμιξης (CMFR) χωρίς ανακύκλωση. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η εισερχόμενη συγκέντρωση (BOD) του βιοαποδομούμενου οργανικού υλικού ή υποστρώματος (S_o) είναι σταθερή. Οι δύο τιμές του υδραυλικού χρόνου παραμονής ($\theta=V/Q$) που δίνονται στον Πίνακα Π10.10 έχουν υπολογιστεί υπό συνθήκες μόνιμης κατάστασης (δηλαδή σταθερή εξερχόμενη συγκέντρωση, S_e , και σταθερή συγκέντρωση των μικροοργανισμών, X). Να υπολογιστούν: ο μέγιστος ρυθμός αύξησης των μικροοργανισμών (μ_m), η σταθερά κορεσμού (K_s), ο συντελεστής αποδόμησης μικροοργανισμών (k_d), και ο συντελεστής κυτταρικής απόδοσης (Y). Θεωρήστε ότι ο ρυθμός χρησιμοποίησης του υποστρώματος (r_s) αντιπροσωπεύεται ικανοποιητικά από το μοντέλο Monod.

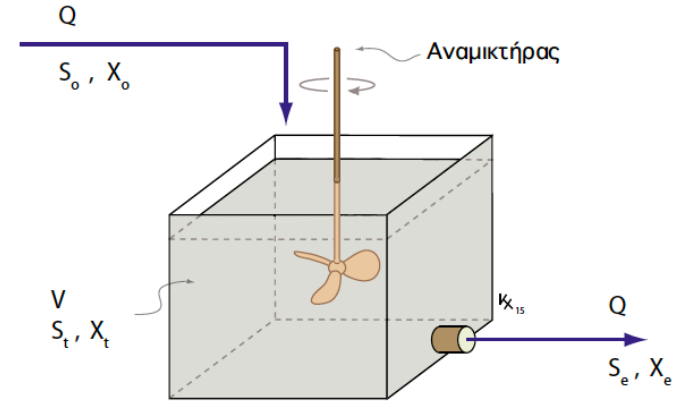
Πίνακας Π10.10: Πειραματικά δεδομένα συστήματος ενεργού ιλύος*

Πείραμα	S_o [g Ms/m ³]	X_o [g Mx/m ³]	θ [d]	S_e [g Ms/m ³]	X_e [g Mx/m ³]
1	250	0	3,0	10	120
2	250	0	1,0	45	110

* M_x = VSS και M_s = BOD₅

Λύση

Για να υπολογιστούν οι τιμές των μ_m/Y και K_s χρειάζεται να αρχίσουμε με ένα ισοζύγιο μάζας στον αντιδραστήρα, ως προς το S (σε μόνιμη κατάσταση $S(t)=S_e$ και $X(t)=X_e$):



Σχήμα Π10.10: Αντιδραστήρας συνεχούς τροφοδότησης και πλήρους ανάμιξης χωρίς ανακύκλωση.

Συσσώρευση = Εισροή – Εκροή + Παραγωγή

$$\left. \begin{aligned} 0 &= QS_o - QS_e - r_s V \\ r_s &= \mu \left(\frac{X_e}{Y} \right) = \frac{\mu_m S_e}{K_s + S_e} \left(\frac{X_e}{Y} \right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q(S_o - S_e) = \frac{\mu_m S_e}{K_s + S_e} \left(\frac{X_e}{Y} \right) V$$

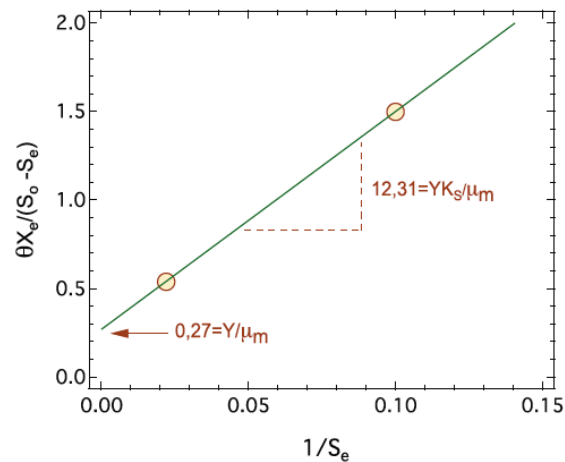
$$\Rightarrow \left. \begin{aligned} \frac{Q(S_o - S_e)}{V} &= \frac{\mu_m S_e}{K_s + S_e} \left(\frac{X_e}{Y} \right) \\ \theta &= \frac{V}{Q} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{S_o - S_e}{\theta X_e} = \left(\frac{\mu_m}{Y} \right) \frac{S_e}{K_s + S_e} \quad (i)$$

$$\Rightarrow \frac{\theta X_e}{S_o - S_e} = \frac{Y K_s}{\mu_m} \left(\frac{1}{S_e} \right) + \frac{Y}{\mu_m} \quad (ii)$$

Επομένως, η σχέση μεταξύ $\theta X_e/(S_o - S_e)$ και $1/S_e$ είναι γραμμική με κλίση YK_s/μ_m . Επίσης, ο λόγος Y/μ_m προσδιορίζεται από το σημείο όπου η ευθεία γραμμή τέμνει τον κάθετο άξονα. Επομένως, τροποποιώντας τα πειραματικά δεδομένα (βλέπε Πίνακα Π10.10α) όπως παριστάνονται γραφικά στο Σχήμα Π10.10α, βρίσκουμε:

Πίνακας Π10.10α: Τροποποίηση δεδομένων για τον υπολογισμό των όρων YK_s/μ_m και Y/μ_m

Πείραμα	$\theta X_e/(S_o - S_e)$ [(d·g M _x)/g M _s]	$1/S_e$ [m ³ /g M _s]
1	1,50	0,10
2	0,54	0,022



Σχήμα Π10.10α: Γραμμική σχέση μεταξύ $\theta X_e/(S_o - S_e)$ και $1/S_e$.

$$\Rightarrow \frac{YK_s}{\mu_m} = \frac{1,50 - 0,54}{0,10 - 0,022} = 12,31 \left[\frac{d \cdot g M_x}{m^3} \right] \quad (iii)$$

Από την εξίσωση (ii) γνωρίζουμε ότι:

$$\frac{Y}{\mu_m} = \frac{\theta X_e}{S_o - S_e} - \frac{YK_s}{\mu_m} \left(\frac{1}{S_e} \right) \Rightarrow \frac{Y}{\mu_m} = 1,50 - (12,31)(0,10) \Rightarrow \frac{Y}{\mu_m} = 0,27$$

$$\Rightarrow \frac{\mu_m}{Y} = 3,70 \left[\frac{g M_s}{d \cdot g M_x} \right] \quad (iv)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (iii) προκύπτει ότι:

$$K_s = 12,31 \frac{\mu_m}{Y} = \left(12,31 \left[\frac{d \cdot g M_x}{m^3} \right] \right) \left(3,70 \left[\frac{g M_s}{d \cdot g M_x} \right] \right) \Rightarrow K_s = 45,55 \left[\frac{g M_s}{m^3} \right] \quad \bullet$$

Για να υπολογιστούν οι τιμές των Y και k_d χρειάζεται να αρχίσουμε με ένα ισοζύγιο μάζας στον αντιδραστήρα, ως προς το X (σε μόνιμη κατάσταση $X(t)=X_e$):

Συσσώρευση = Εισροή – Εκροή + Παραγωγή

$$\left. \begin{aligned} 0 &= QX_o - QX_e + r_{xg}V \\ X_o &= 0 \\ r_{xg} &= Yr_s - k_d X_e \\ r_s &= \mu \left(\frac{X_e}{Y} \right) = \frac{\mu_m S_e}{K_s + S_e} \left(\frac{X_e}{Y} \right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow -QX_e + \left[Y \left(\frac{\mu_m}{Y} \right) \frac{S_e X_e}{K_s + S_e} - k_d X_e \right] V = 0$$

$$\Rightarrow \frac{X_e}{\theta} = Y \left(\frac{\mu_m}{Y} \right) \frac{S_e X_e}{K_s + S_e} - k_d X_e$$

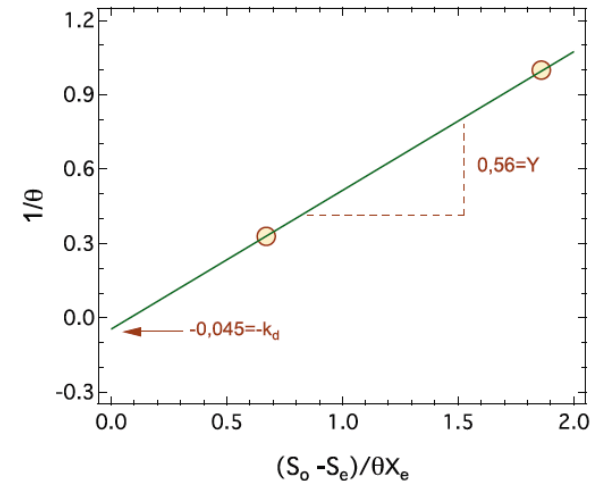
$$\Rightarrow \frac{1}{\theta} = Y \left(\frac{\mu_m}{Y} \right) \frac{S_e}{K_s + S_e} - k_d \quad \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow \frac{1}{\theta} = Y \left(\frac{S_o - S_e}{\theta X_e} \right) - k_d \quad (v) \end{array} \right. \quad \text{Δεν εμφανίζεται στο βιβλίο}$$

Επομένως, η σχέση μεταξύ $1/\theta$ και $(S_o - S_e)/\theta X_e$ είναι γραμμική με κλίση Y . Επίσης, το k_d προσδιορίζεται από το σημείο όπου η ευθεία γραμμή τέμνει τον κάθετο άξονα. Επομένως, τροποποιώντας τα πειραματικά δεδομένα (βλέπε Πίνακα Π10.10β) όπως παριστάνονται γραφικά στο Σχήμα Π10.10β, βρίσκουμε:

$$\Rightarrow Y = \frac{0,33 - 1,00}{0,67 - 1,86} = 0,56 \left[\frac{g \text{ } M_x}{g \text{ } M_s} \right] \quad \bullet$$

Πίνακας Π10.10β: Τροποποίηση δεδομένων για τον υπολογισμό των παραμέτρων Y και k_d .

Πείραμα	$1/\theta$ [1/d]	$(S_o - S_e)/\theta X_e$ [g M_s /d · g M_x]
1	0,33	0,67
2	1,00	1,86



Σχήμα Π10.10β: Γραμμική σχέση μεταξύ $1/\theta$ και $(S_o - S_e)/\theta X_e$.

Από την εξίσωση (v) γνωρίζουμε ότι:

$$k_d = Y \left(\frac{S_o - S_e}{\theta X_e} \right) - \frac{1}{\theta} \Rightarrow k_d = \left(0,56 \left[\frac{g \text{ } M_x}{g \text{ } M_s} \right] \right) \left(0,67 \left[\frac{g \text{ } M_s}{d \cdot g \text{ } M_x} \right] \right) - 0,33 \left[\frac{1}{d} \right]$$

$$\Rightarrow k_d = 0,045 \left[\frac{1}{d} \right] \quad \bullet$$

Επίσης, από την εξίσωση (iv) γνωρίζουμε ότι:

$$\mu_m = 3,70 \left[\frac{g \text{ } M_s}{d \cdot g \text{ } M_x} \right] \times Y = 3,70 \left[\frac{g \text{ } M_s}{d \cdot g \text{ } M_x} \right] \left(0,56 \left[\frac{g \text{ } M_x}{g \text{ } M_s} \right] \right) = 2,07 \left[\frac{1}{d} \right] \quad \bullet$$

Παράδειγμα 7

Σε μονάδα βιολογικού καθαρισμού πραγματοποιείται καθημερινά επεξεργασία 4568 m^3 υγρών αποβλήτων με συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών $X_0=264 \text{ mg/L}$. Το νερό μετά τη διαύγαση έχει συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών $X_e=8 \text{ mg/L}$. Με βάση τα αιωρούμενα στερεά που έχουν αφαιρεθεί, να προσδιορίσετε την ημερήσια ποσότητα (kg/d) της παραγόμενης ιλύος στη μονάδα.

Λύση

Η ποσότητα των αιωρούμενων στερεών που εισέρχεται στη μονάδα είναι:

$$\left(4568 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)\left(264 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)\left(10^3 \frac{\text{L}}{\text{m}^3}\right)\left(\frac{\text{kg}}{10^6 \text{mg}}\right) = 1205,9 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Η ποσότητα των αιωρούμενων στερεών που εξέρχεται από τη μονάδα είναι:

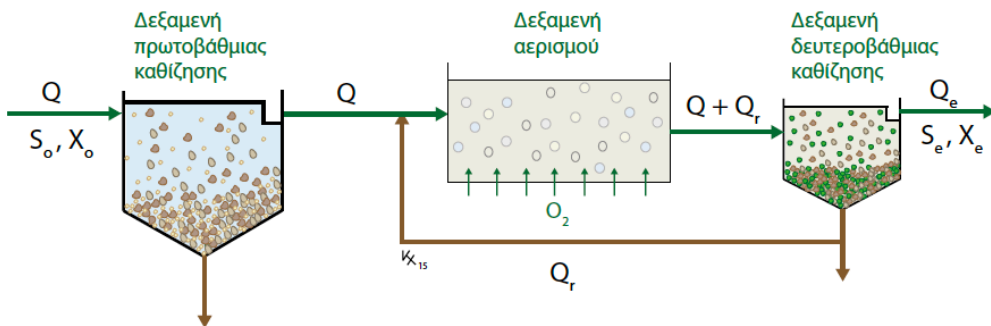
$$\left(4568 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)\left(8 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)\left(10^3 \frac{\text{L}}{\text{m}^3}\right)\left(\frac{\text{kg}}{10^6 \text{mg}}\right) = 36,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Επομένως η ποσότητα των αιωρούμενων στερεών που αφαιρείται με τη λάσπη είναι:

$$1205,9 \frac{\text{kg}}{\text{d}} - 36,5 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 1169,4 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \quad \bullet$$

Παράδειγμα 8

Μια μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων περιλαμβάνει μια δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών και μια εγκατάσταση βιολογικής επεξεργασίας με σύστημα ενεργού ιλύος με ανακυκλοφορία ιλύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα Π10.12. Να υπολογιστεί ο ρυθμός παραγωγής της συνολικής λάσπης από αυτή την μονάδα σε τόνους την ημέρα (tons/day). Η συγκέντρωση των αιωρούμενων πτητικών στερεών στην είσοδο της μονάδας είναι $X_o=280 \text{ mg/L}$ και στην έξοδο $X_e=15 \text{ mg/L}$. Η ολική συγκέντρωση του βιοαποδομούμενου οργανικού υλικού στην είσοδο της μονάδας είναι $S_o=360 \text{ mg/L}$ και στην έξοδο $S_e=20 \text{ mg/L}$. Ο ρυθμός τροφοδοτούμενης παροχής είναι $Q=0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ και ο συντελεστής απόδοσης μετατροπής στη δευτεροβάθμια επεξεργασία είναι $Y=0,65 [M_x/M_s]$. Θεωρήστε ότι τα αιωρούμενα πτητικά στερεά αφαιρούνται μόνο στη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης και ότι το οργανικό φορτίο αφαιρείται μόνο στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης.



Λύση

Η παραγωγή λάσπης στη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης οφείλεται στην καθίζηση των αιωρούμενων πτητικών στερεών και υπολογίζεται ως εξής:

$$(X_o - X_e)Q = \left(280 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 15 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) \left(0,3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \left(\frac{\text{ton}}{10^9 \text{mg}}\right) \left(\frac{10^3 \text{L}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{86.400 \text{s}}{\text{d}}\right) = 6,9 \frac{\text{ton}}{\text{d}}$$

Η παραγωγή λάσπης στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας οφείλεται στην καθίζηση των αιωρούμενων στερεών και υπολογίζεται ως εξής:

$$(S_o - S_e)QY = \left(360 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 20 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) \left(0,3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \left(0,65 \frac{M_x}{M_s}\right) \left(\frac{\text{ton}}{10^9 \text{mg}}\right) \left(\frac{10^3 \text{L}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{86.400 \text{s}}{\text{d}}\right)$$

$$\Rightarrow (S_o - S_e)QY = 5,7 \frac{\text{ton}}{\text{d}}$$

Επομένως η συνολική λάσπη που παράγεται στη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι:

$$6,9 \frac{\text{ton}}{\text{d}} + 5,7 \frac{\text{ton}}{\text{d}} = 12,6 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \quad \bullet$$