



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

# Χημικές διεργασίες στην επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων

Ασκήσεις



**Επικ. Καθηγητής Αλέξανδρος Στεφανάκης**

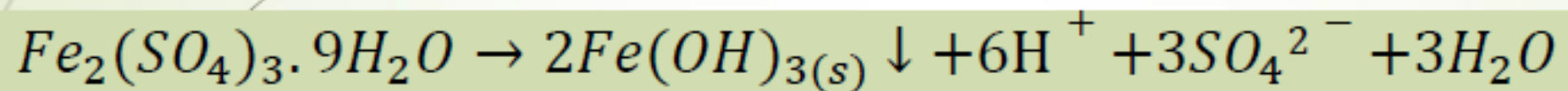
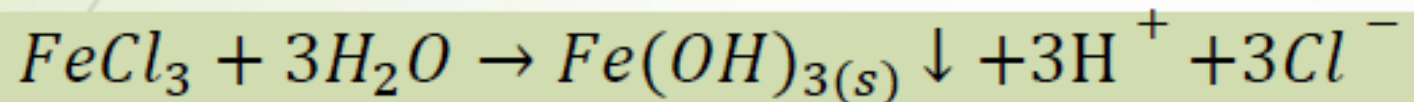
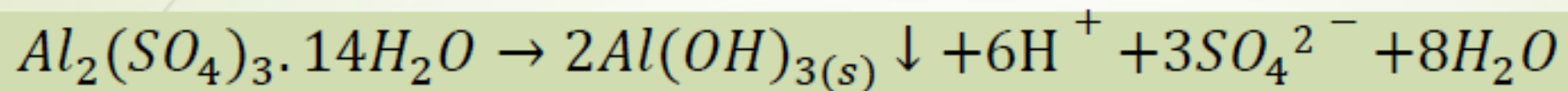
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Κτήριο Κ3, Γραφείο Α23, Τηλ: 28210 06121, [astefanakis@enveng.tuc.gr](mailto:astefanakis@enveng.tuc.gr)

Να προσδιορίσετε τον όγκο και τη μάζα της λάσπης που παράγεται από την κροκιδωτική δράση του Alum για την απομάκρυνση θολότητας ανεπεξέργαστου νερού. Υποθέστε ότι ισχύουν τα παρακάτω:

- Παροχή  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Μέση θολότητα  $25 \text{ NTU}$
- Μέση δοσολογία alum  $30 \text{ mg/L}$
- Θεωρήσεις για τη λάσπη: Συγκέντρωση στερεών στη λάσπη  $=5\%$ , ειδικό βάρος  $1,05$  και θερμοκρασία  $15^\circ \text{C}$  ( $\rho_w = 999,1 \text{ kg/m}^3$ )

Να θεωρηθεί ότι η αναλογία TSS/ Θολότητα (ως NTU μονάδες) $=1,4$ ,  
Μάζα λάσπης από alum/kg alum που προστίθεται  $= 0,26$



## Συνολική Μάζα Λάσπης

Λάσπη από κροκιδωτικό  
+ Λάσπη από αιωρούμενα στερεά  
+ Λάσπη από άλλα χημικά ή υλικά

# ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΛΑΣΠΗΣ ΑΠΟ ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ

Πυκνότητα (υγρής) Λάσπης,  $\rho_{sl}$

$$\rho_{sl} = \rho_w S_{sl}$$

$\rho_w$  = πυκνότητα νερού,  $\text{kg/m}^3$

$S_{sl}$  = ειδικό βάρος λάσπης (χωρίς μονάδες)

Όγκος (υγρής) Λάσπης,  $V$

$$V = \frac{W_s}{\rho_w S_{sl} P_s}$$

$V$  = όγκος υγρής λάσπης,  $\text{m}^3$

$W_s$  = μάζα ολικών στερεών,  $\text{kg}$

$\rho_w$  = πυκνότητα νερού,  $\text{kg/m}^3$

$S_{sl}$  = ειδικό βάρος λάσπης (χωρίς μονάδες)

$P_s$  = ποσοστιαία σύσταση σε στερεά

TSS/ Θολότητα = 1,4 άρα για 25 NTU, TSS = 35 mg/L

Με παροχή  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , η μάζα των στερεών θα είναι  $(0,5 \text{ m}^3/\text{s}) \times (35 \text{ mg/L}) = 1.512.000 \text{ g/d} = 1512 \text{ kg/d}$

$$V = \frac{1512 \text{ kg/d}}{(999,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(1,05)(0,05)} = 28,8 \text{ m}^3$$

Μάζα λάσπης από  $\text{alum/kg alum}$  που προστίθεται = 0,26

Προστίθεται  $\text{alum}$   $(30 \text{ g/m}^3) \times (0,5 \text{ m}^3/\text{s}) = 1296 \text{ kg/d}$  άρα η λάσπη  $0,26 \times 1296 = 337 \text{ kg}$

# ΑΣΚΗΣΗ 1

Υπολογίστε τη βαθμίδα ταχύτητας  $G$  και το χρόνο παραμονής  $\tau$  σε έναν flashmixer που χρησιμοποιείται για την ανάμειξη θεικού αργιλίου και αποβλήτου παροχής  $75.700 \text{ m}^3/\text{d}$ .

Η δεξαμενή ανάμειξης έχει ενεργό όγκο  $18,4 \text{ m}^3$  και περιέχει μια τουρμπίνα ανάμειξης που μεταβιβάζει στο σύστημα του αποβλήτου ισχύ  $6,2 \text{ hp}$ .

Ελέγξτε αν η τιμή του  $G$  και του χρόνου παραμονής ( $\tau$ ) βρίσκονται μέσα στα όρια σχεδιασμού.

Η θερμοκρασία του αποβλήτου είναι  $50^\circ\text{F}$

$$G = \left( \frac{P}{V \cdot \mu} \right)^{1/2}, \quad \text{s}^{-1} \quad G = \left[ \frac{(6,2\text{hp}) \cdot (745,7 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3}{\text{hp}})}{(18,4\text{m}^3) \cdot (1,31 \cdot 10^{-3} \text{kg} / \text{s} / \text{m})} \right]^{1/2} = 438\text{mps} / \text{m} \quad (\text{ή } \text{s}^{-1}).$$

Στην παραπάνω σχέση το  $745,7$  είναι ο συντελεστής μετατροπής μονάδων ισχύος και τα  $1,31 \times 10^{-3} \text{ kg/s/m}$  είναι το δυναμικό ιξώδες του νερού στους  $50^\circ\text{F}$

Σύγκριση της τιμής αυτής με τις προτεινόμενες  $300\text{-}1000 \text{ s}^{-1}$  οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι μια αποδεκτή τιμή.

Ο χρόνος παραμονής δίδεται από τη σχέση  $\tau = V/Q$

Έτσι υπολογίζεται:  $\tau = (18,4 \text{ m}^3) / (75700 \text{ m}^3/\text{day}) / (86400 \text{ s/day}) = 21 \text{ s} < 30 \text{ s}$ , επίσης αποδεκτή τιμή.

Πριν την περαιτέρω επεξεργασία ενός αποβλήτου παροχής  $500 \text{ m}^3/\text{d}$ , απαιτείται να επιτευχθεί η συσσωμάτωση των κολλοειδών που περιέχει. Για το απόβλητο αυτό, θερμοκρασίας  $15^\circ\text{C}$ , πυκνότητας  $\rho = 999 \text{ kg/m}^3$  και ιξώδους  $\mu = 1,14 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$ , γνωρίζουμε από προηγούμενες δοκιμές τύπου Jar Test ότι:

- Το καλύτερο κροκιδωτικό είναι το  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (alum),
- Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται σε συνθήκες  $40 \text{ mg Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$  αποβλήτου και για τιμή  $G\tau$  ίση με  $8 \times 10^4$ .

Να σχεδιασθεί μια δεξαμενή η οποία να είναι εφοδιασμένη με έναν αναδευτήρα τύπου στροβίλου, και να υπολογισθούν: η ποσότητα κροκιδωτικού ανά μήνα, η απαιτούμενη ισχύς ανάδευσης και η συχνότητα περιστροφής του αναδευτήρα.

Έστω  $G = 40 \text{ s}^{-1}$ . Τότε θα είναι 
$$\tau = \frac{G \cdot \tau}{G} = \frac{8 \cdot 10^4}{40} \cdot \frac{1}{60} = 33,3 \text{ min}$$

Ο χρόνος παραμονής που υπολογίστηκε είναι εντός των ορίων 30-60 min και άρα μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή η επιλογή του  $G=40 \text{ s}^{-1}$ .

Ο απαιτούμενος όγκος δεξαμενής θα είναι 
$$V = Q \cdot \tau = 500 (\text{m}^3 / \text{d}) \cdot 33,3 (\text{min}) \cdot \frac{1}{60 \cdot 24} = 11,6 \text{ m}^3$$

## ΑΣΚΗΣΗ 2

Έστω ότι η δεξαμενή είναι κυλινδρική. Στα δοχεία ανάδευσης συνήθως ισχύει ότι  $H=D$ .

Οπότε η διάμετρος του δοχείου θα είναι:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi}} = 2,5 \text{ m.}$$

Επιλέγεται, λοιπόν, αναδευτήρας με διάμετρο  $d = D/3 = 0,82 \text{ m}$ .

Η απαιτούμενη ισχύς θα είναι:

$$P = G^2 \cdot V \cdot \mu = 40^2 \text{ s}^{-2} \cdot 11,6 \text{ m}^3 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ (N} \cdot \text{s / m}^2 \text{)} = 21,1 \text{ W}$$

Έστω ότι η ροή είναι τυρβώδης, τότε για αναδευτήρα τύπου στροβίλου  $K_T=1,27$ :

$$P = K_T \cdot \rho \cdot N^3 \cdot d^5 \Rightarrow N = 0,36 \text{ s}^{-1}, \quad 21 \text{ rpm}$$

$$\text{για } Re < 10, \quad N_p = \frac{K_L}{Re} \Rightarrow P = K_L \cdot \mu \cdot N^2 \cdot d^3$$

$$\text{για } Re > 10^4, \quad N_p = K_T \Rightarrow P = K_T \cdot \rho \cdot N^3 \cdot d^5$$

Έλεγχος της ροής αν είναι όντως τυρβώδης  $Re = \frac{d^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = 21 \cdot 10^5 > 10^4 \Rightarrow \text{τυρβώδης ροή}$

Η απαιτούμενη ποσότητα κροκιδωτικού θα είναι:  $500 \text{ (m}^3/\text{d)} \cdot 40 \text{ (g/m}^3 \text{)} \cdot 30 \text{ (d/mo)} = 600 \text{ kg/month}$

## ΑΣΚΗΣΗ 3

Μια δεξαμενή ταχείας ανάμιξης έχει μήκος 1,2 m, πλάτος 1,2 m και βάθος υγρού 1,1 m. Η ισχύς που καταναλώνεται για την ανάμιξη του περιεχομένου της δεξαμενής είναι ίση με 1 hp. Να υπολογισθεί η κλίση της ταχύτητας  $G$ . Η θερμοκρασία του τροφοδοτούμενου νερού είναι ίση με 15°C.

Στους 15°C το δυναμικό ιξώδες του νερού  $\mu$  είναι ίσο με 1,14 cp ή  $1,14 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$

Ο όγκος του νερού στη δεξαμενή είναι  $1,1 \times 1,2 \times 1,2 = 1,584 \text{ m}^3$

Η προσδιδόμενη ισχύς είναι  $P = 1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$

Οπότε η κλίση της ταχύτητας είναι:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{746 \text{ W}}{(1,14 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s})(1,584 \text{ m}^3)}} = 643 \text{ s}^{-1}$$

Μια εγκατάσταση καθαρισμού νερού είναι σχεδιασμένη για να επεξεργάζεται  $150.000 \text{ m}^3/\text{d}$ . Η δεξαμενή θρόμβωσης έχει μήκος  $30 \text{ m}$ , πλάτος  $15 \text{ m}$  και το βάθος υγρού είναι ίσο με  $5 \text{ m}$ . Η δεξαμενή θρόμβωσης είναι εξοπλισμένη με περιστρεφόμενα κουπιά τα οποία είναι τοποθετημένα σε τέσσερις οριζόντιους άξονες που περιστρέφονται με  $2 \text{ rpm}$ . Κάθε άξονας φέρει τέσσερα κουπιά. Κάθε κουπί έχει πλάτος  $0,2 \text{ m}$ , μήκος  $14 \text{ m}$  και απέχει  $2,0 \text{ m}$  από τον άξονα περιστροφής του. Υποθέτουμε ότι η μέση ταχύτητα του νερού είναι το  $30\%$  της ταχύτητας των κουπιών, ότι η θερμοκρασία του νερού είναι  $15^\circ\text{C}$  και ότι ο συντελεστής οπισθέλκουσας είναι  $C_D=1,9$ .

Ζητούνται:

1. η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των κουπιών και του νερού
2. η τιμή της κλίσης ταχύτητας ( $G$ )
3. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στη δεξαμενή θρόμβωσης ( $T$ )
4. η τιμή του γινομένου  $GT$

## Ερώτημα 1

Η ταχύτητα περιστροφής των κουπιών (στο μέσο του πλάτους της σανίδας που αντιστοιχεί σε κάθε κουπί) είναι:

$$v_{\pi} = \frac{2\pi r n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 2}{60} = 0,419 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

όπου  $r=2 \text{ m}$  η ακτίνα περιστροφής (η ακτίνα αυτή είναι η απόσταση του κέντρου του άξονα περιστροφής από το μέσο του πλάτους του κουπιού) και  $n=2$  οι περιστροφές κάθε κουπιού ανά min (60 s).

Η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των κουπιών και του νερού είναι:  $0,70 \cdot 0,419 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,293 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

## Ερώτημα 2

Η τιμή του  $G$  υπολογίζεται από τη σχέση  $G = \left( \frac{C_D A_p \rho v_p^3}{2 V \mu} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{1,9 \cdot 44,8 \cdot 999 \cdot 0,293^3}{2 \cdot 2250 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{2}} = 37,7 \text{ s}^{-1}$

$\rho$  = η πυκνότητα του νερού στους  $15^\circ\text{C}$  ( $999 \text{ kg/m}^3$ ) και  $\mu$  = δυναμικό ιξώδες του νερού στους  $15^\circ\text{C}$  ( $1,14 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ )

Αρ είναι η επιφάνεια των κουπιών  $A_p = (4 \text{ άξονες}) \left( 4 \frac{\text{κουπιά}}{\text{άξονα}} \right) \left( 0,2 \cdot 14 \frac{\text{m}^2}{\text{κουπί}} \right) = 44,8 \text{ m}^2$

V είναι ο όγκος της δεξαμενής θρόμβωσης

$$V = 30 \times 15 \times 5 = 2250 \text{ m}^3$$

## Ερώτημα 3

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στη δεξαμενή θρόμβωσης είναι ο λόγος του όγκου της δεξαμενής προς την τροφοδοτούμενη παροχή νερού:

$$T = \frac{V}{Q} = \frac{2250 \text{ m}^3}{100000 \text{ m}^3/\text{d}} = 0,0225 \text{ d} \rightarrow 0,0225 \text{ d} \frac{24 \text{ h}}{\text{d}} \frac{60 \text{ min}}{\text{h}} = 32,4 \text{ min}$$

## Ερώτημα 4

Η τιμή του γινομένου GT είναι:

$$G T = 37,7 \frac{1}{\text{s}} 32,4 \text{ min} 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 73288 = 73,3 \cdot 10^3$$

## ΑΣΚΗΣΗ 5

Μια μαιανδρική δεξαμενή με χωρίσματα και ροή άνω και κάτω από τα χωρίσματα προορίζεται για υδραυλική βραδεία ανάμιξη με βαρύτητα. Οι διαστάσεις της διαδρομής είναι: μήκος 150 m, πλάτος 0,5 m, μέσο βάθος υγρού 1,2 m. Η δεξαμενή δέχεται παροχή νερού ίση με 5500 m<sup>3</sup>/d και διαμορφώνεται πιεζομετρική απώλεια 0,4 m μεταξύ εισόδου και εξόδου. Εάν η θερμοκρασία του τροφοδοτούμενου νερού είναι 15°C να υπολογισθούν:

1. Η κλίση ταχύτητας (G) που επιτυγχάνει η δεξαμενή θρόμβωσης
2. Η τιμή του γινομένου GT

### Ερώτημα 1

Στους 15°C το δυναμικό ιξώδες του νερού μ είναι ίσο με 1,14 cp ή 1,14x10<sup>-3</sup> kg/m·s και η πυκνότητα του νερού είναι 999 kg/m<sup>3</sup>.

Ο όγκος του νερού στη δεξαμενή είναι 150 x 0,5 x 1,2 = 60 m<sup>3</sup>

Η ισχύς που αντιστοιχεί σε πιεζομετρική απώλεια Δh είναι:  $P = Q \rho g \Delta h$

Οπότε η κλίση της ταχύτητας είναι:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{Q \rho g \Delta h}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{\frac{5500}{24 \cdot 60 \cdot 60} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,35 \text{m}}{1,14 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \cdot 90 \text{ m}^3}} = 46,1 \text{ s}^{-1}$$

## Ερώτημα 2

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στη δεξαμενή θρόμβωσης είναι ο λόγος του όγκου της δεξαμενής προς την τροφοδοτούμενη παροχή νερού:

$$T = \frac{V}{Q} = \frac{90 \text{ m}^3}{5500 \text{ m}^3/\text{d}} = 0.0164 \text{ d} \rightarrow 0,0164 \text{ d} \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 23,6 \text{ min}$$

Η τιμή του γινομένου GT είναι:

$$G T = 46,1 \frac{1}{\text{s}} 23,6 \text{ min} 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 65277,6 = 65,3 \cdot 10^3$$

**Παράδειγμα.** Η προσρόφηση βενζολίου σε ενεργό άνθρακα έχει αναφερθεί ότι ακολουθεί την ισόθερμη εξίσωση Freundlich, όπου  $c$  είναι σε mg/L και  $q$  σε mg/g:

$$q_{benz} = 50.1 c_{benz}^{0.533}$$

Ένα διάλυμα στους 25°C που περιέχει 0.50 mg/L βενζόλιου πρόκειται να υποβληθεί σε επεξεργασία σε μια διεργασία batch για τη μείωση της συγκέντρωσης σε λιγότερο από 0,01 mg/L. Το προσροφητικό είναι ενεργός άνθρακας με ειδική επιφάνεια 650 m<sup>2</sup>/g. Υπολογίστε την απαιτούμενη δόση ενεργού άνθρακα.

**Λύση.** Η πυκνότητα προσρόφησης του βενζολίου σε ισορροπία με  $c_{eq}$  ίσο με 0.010 mg/L μπορεί να προσδιοριστεί από την ισόθερμη έκφραση:

$$q_{benz} = 50.1 c_{benz}^{0.533} = 4.30 \text{ mg/g}$$

Στη συνέχεια, μπορεί να γραφτεί και να λυθεί ένα ισοζύγιο μάζας για τη δόση του ενεργού άνθρακα:

$$C_{tot, benz} = C_{benz} + q_{benz} C_{AC}$$

$$\text{όπου } C_{AC} = m/V$$

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m}$$

$$0.50 = 0.010 + (4.30 \text{ mg/g}) C_{AC}$$

$$C_{AC} = 0.114 \text{ g/L} = 114 \text{ mg/L}$$

## Παράδειγμα

Εάν η ίδια δόση προσροφητικού χρησιμοποιείται για την επεξεργασία διαλύματος που περιέχει 0,500 mg/L τολουόλιο, ποια θα είναι η συγκέντρωση ισορροπίας και η πυκνότητα προσρόφησης; Η ισόθερμη προσρόφησης για το τολουόλιο είναι:

$$q_{tol} = 76.6 c_{tol}^{0.365}$$

**Λύση.** Το ισοζύγιο μάζας στο τολουόλιο είναι:

$$c_{tot,tol} = c_{tol} + q_{tol} c_{AC}$$

$$0.50 = c_{tol} + (76.6 c_{tol}^{0.365})(0.114 \text{ g/L})$$

$$c_{tol} = 3.93 \times 10^{-4} \text{ mg/L}$$