

Περιβαλλοντική Μηχανική

Φροντιστηριακές Ασκήσεις

Αθήνα, 04-04-2025

ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Άσκηση 1 – Αναερόβια Χώνευση

Ποσότητα βιοαποδομήσιμου αποβλήτου, 13000 t/y, οδηγείται σε μονάδα αναερόβιας χώνευσης προς επεξεργασία με σκοπό την ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας από το παραγόμενο βιοαέριο. Λαμβάνοντας υπόψη τη στοιχειακή ανάλυση του αποβλήτου να προσδιορισθούν τα παρακάτω:

- (α) ο εμπειρικός τύπος του αποβλήτου
- (β) η σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου (κατ' όγκο και κατά βάρος σε μεθάνιο και σε διοξείδιο του άνθρακα) όπως επίσης η ετήσια μέγιστη παραγόμενη ποσότητα του βιοαερίου που οδηγείται προς καύση σε t/y.
- (γ) Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την εκμετάλλευση του βιοαερίου, θεωρώντας ότι το ενεργειακό περιεχόμενο του μεθανίου είναι 50 MJ/kg και η απόδοση μετατροπής 30%.

Στοιχειακή ανάλυση βιοαποδομήσιμων αποβλήτων σε % κ.β. ξηρή βάση

	%C ξ.β.	%H ξ.β.	%O ξ.β.	%N ξ.β.
Απόβλητο	48	6,4	37,6	2,6

Λύση

(α) ο εμπειρικός τύπος του αποβλήτου

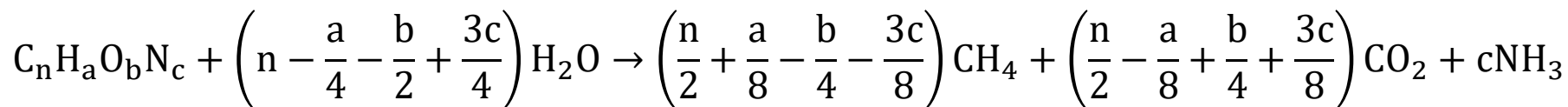
Στοιχείο	% κ.β. ξ.β.	g/mol	mol	mol / mol N	
C	48	12	4,000	21,5	n
H	6,4	1	6,400	34,5	a
O	37,6	16	2,350	12,7	b
N	2,6	14	0,186	1,0	c



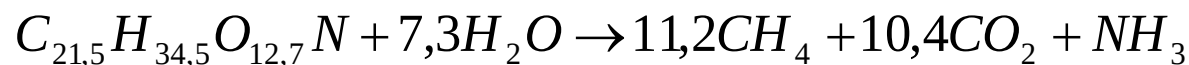
MB: 509,38 g/mol

(β) η σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου (κατ' όγκο και κατά βάρος) σε μεθάνιο και σε διοξείδιο του άνθρακα & ετήσια παραγωγή βιοαερίου

Η μέγιστη ποσότητα CH₄ που μπορεί να παραχθεί από την αναερόβια χώνευση ενός σύνθετου οργανικού υποστρώματος (που συμβολίζεται ως C_nH_aO_bN_c) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση Buswell (3.3.9):



n	21,5
a	34,5
b	12,7
c	1,0



mol	1		11,2	10,4
% κ.ο.			51,8	48,2
g/mol	509		179	457
t/y	13000		4.558	11.650
% κ.β.			28,1	71,9

αναλογία mol είναι
και αναλογία όγκου
σε Κ.Σ.

Ετήσια παραγόμενη ποσότητα του βιοαερίου: 4.558 + 11.650 = 16.209 t/y

(γ) Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (E_{biogas_e}) από το βιοαέριο

Παραγόμενη ποσότητα $\text{CH}_4 = 4.558 \text{ t/y}$

Ενεργειακό περιεχόμενο $\text{CH}_4 = 50 \text{ kJ/kg}$ ή 50 GJ/Mg

Απόδοση μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια: 30%

$$E_{\text{biogas}_e} = 4558 \text{ Mg/y} \times 50 \text{ GJ/Mg} \times 0.3 = \mathbf{68.377 \text{ GJ/y}}$$

Άσκηση 2 - Κομποστοποίηση

Θέλουμε να κάνουμε κομποστοποίηση με αναστρεφόμενα σειράδια των παραγόμενων βιοαποβλήτων σε μία πόλη 400.000 κατοίκων.

Πρέπει να υπολογιστούν τα εξής

- (α) Ο συνολικός όγκος των βιοαποβλήτων
- (β) Ο όγκος και αριθμός των απαιτούμενων σειραδιών
- (γ) Η απαιτούμενη έκταση γης

Θεωρούμε ότι:

- Κάθε κάτοικος παράγει 1 kg απορριμμάτων ανά ημέρα εκ των οποίων το 40% είναι βιοαπόβλητα.
- Η κομποστοποίηση κρατάει 60 μέρες.
- Τα σειράδια έχουν ύψος 1,8m και πλάτος 2,7m διατομή
- Η πυκνότητα του μίγματος είναι ίση με $0,5 \text{ tn/m}^3$
- Το μήκος κάθε σειραδιού είναι 150 μέτρα.
- Ελάχιστο πλάτος μεταξύ σειραδιών για ελιγμό του εξοπλισμού ανάδευσης 1,5 m

Λύση

Οι 400.000 κάτοικοι παράγουν 400 τόνους απορρίμματα την ημέρα.
Από αυτά για κομποστοποίηση πηγαίνει το 40%, δηλ. $(400 \times 0,40) = 160 \text{ tn/d}$
βιοαποβλήτων

Υπολογισμός συνολικού όγκου προδιαλεγμένων βιοαποβλήτων (V_{tot})

$$V_{\text{tot}} = m_{\text{tot}} / \rho$$

m_{tot} : Σε 60 μέρες θα έχουμε: $(60 \times 160) = 9.600 \text{ tn}$ για κομποστοποίηση

$$V_{\text{tot}} = m_{\text{tot}} / \rho = (9.600 \text{ tn} / 0,5 \text{ tn m}^{-3}) = 19.200 \text{ m}^3$$

Υπολογισμός όγκου σειραδιού (V_{σ}) και αριθμού σειραδιών (N)

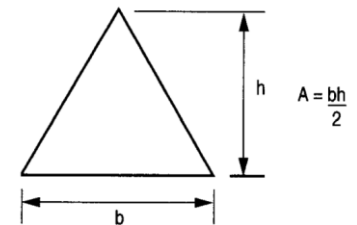
$$V_{\sigma} = A \times m$$

Τα σειράδια έχουν ύψος $h=1,8 \text{ m}$ και πλάτος $b=2,7 \text{ m}$

Διατομή ισοσκελούς τριγώνου: $A = (b \times h) / 2$

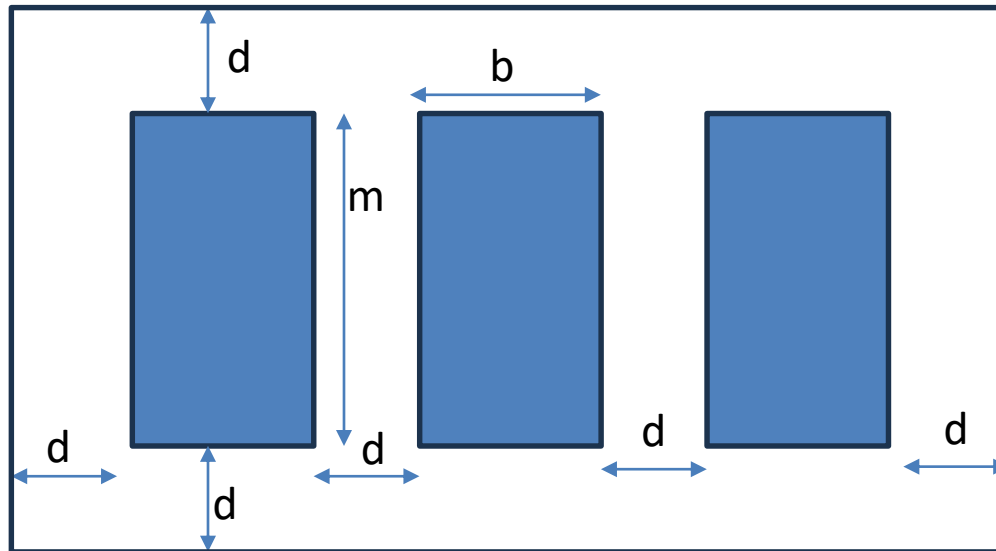
$$V_{\sigma} = (b \times h) / 2 \times m = (1,8 \times 2,7) / 2 \times 150 = 364,5 \text{ m}^3$$

$$N = V_{\text{tot}} / V_{\sigma} = 19.200 / 364,5 = 52,67 \approx 53 \text{ σειράδια}$$



Λύση

Υπολογισμός απαιτούμενης επιφάνειας γης (Etot)



$$\text{Μήκος οικοπέδου} = N_{\text{σειρ}} * b + (N_{\text{σειρ}} + 1) * d = 53 * 2.7 + 54 * 1.5 = 224.1 \text{ m}$$

$$\text{Πλάτος οικοπέδου} = m + 2 * d = 150 + 2 * 1.5 = 153 \text{ m}$$

$$\text{Επιφάνεια οικοπέδου} = 224.1 * 153 = 34287.3 \text{ m}^2$$

ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Οι σχέσεις αυτές ισχύουν για
αμελητέα είσοδο βιομάζας και
τέλεια διαύγαση.

Ενεργός Ιλύς

Αν γνωρίζω την
έξοδο S και τις
κινητικές
σταθερές
μπορώ να
υπολογίσω SRT

$$(2.3.47) \quad SRT = \frac{\theta + r\theta_c}{1 + r}$$

$$(2.3.40) \quad S = \frac{\left(\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d \right) K_s}{\mu_{\max} - k_d - \frac{1+r}{\theta + r\theta_c}} = \frac{\left(\frac{1}{SRT} + k_d \right) K_s}{\mu_{\max} - k_d - \frac{1}{SRT}} \quad (A)$$

$$(2.3.41) \quad X = \frac{Y(S_0 - S)}{\frac{1+r\theta}{\theta + r\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta} = \frac{Y(S_0 - S)}{\frac{1}{SRT} + k_d} \frac{1}{\theta} \quad (B)$$

$$(2.3.42) \quad X_u = \frac{(1+r)\theta_c}{\theta + r\theta_c} \frac{Y(S_0 - S)}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta} = \frac{\theta_c}{SRT} X \quad (Γ)$$

Άσκηση 3 – Ενεργός Ιλύς

Ένα τυπικό σύστημα ενεργού ιλύος λειτουργεί με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Παροχή εισόδου:

$$Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$$

BOD₅ εισόδου:

$$S_o = 500 \text{ mg/L}$$

Όγκος δεξαμενής αερισμού:

$$V = 1000 \text{ m}^3$$

MLVSS στη δεξαμενή αερισμού:

$$X = 4 \text{ g/L}$$

Παροχή εξόδου βιολογικής λάσπης:

$$Q_w = 50 \text{ m}^3/\text{d}$$

MLVSS στη παροχή Q_w :

$$X_u = 8 \text{ g/L}$$

Σταθερά ενδογενούς αναπνοής:

$$k_d = 0,03 \text{ d}^{-1}$$

Συντελεστής αποδοτικότητας:

$$Y = 0,5 \text{ g X/gBOD}_5$$

Σταθερά κορεσμού:

$$K_s = 100 \text{ mg/L}$$

Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης BOD₅: $\mu_{\max} = 3,5 \text{ d}^{-1}(\text{mg BOD}_5)(\text{mg X})^{-1}$

Άσκηση 3 (συνέχεια)

Υπολογίστε:

α) την παροχή αναρροής Q_r (m^3/h)

β) τη συγκέντρωση BOD_5 εξόδου S_e (mg/L)

γ) αν ξαφνικά η συγκέντρωση BOD_5 εισόδου των αποβλήτων αυξηθεί σε $S_0 = 600 \text{ mg/L}$ τότε προτείνετε μία τουλάχιστον λύση ώστε με την υπάρχουσα εγκατάσταση να συνεχίσει ο βιολογικός να λειτουργεί ικανοποιητικά.

Υποθέστε αμελητέα είσοδο βιομάζας και τέλεια διαύγαση στη δεξαμενή καθίζησης.

Δεδομένα

$$Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$S_o = 500 \text{ mg/L}$$

$$V = 1000 \text{ m}^3$$

$$X = 4 \text{ g/L}$$

$$Q_w = 50 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$X_u = 8 \text{ g/L}$$

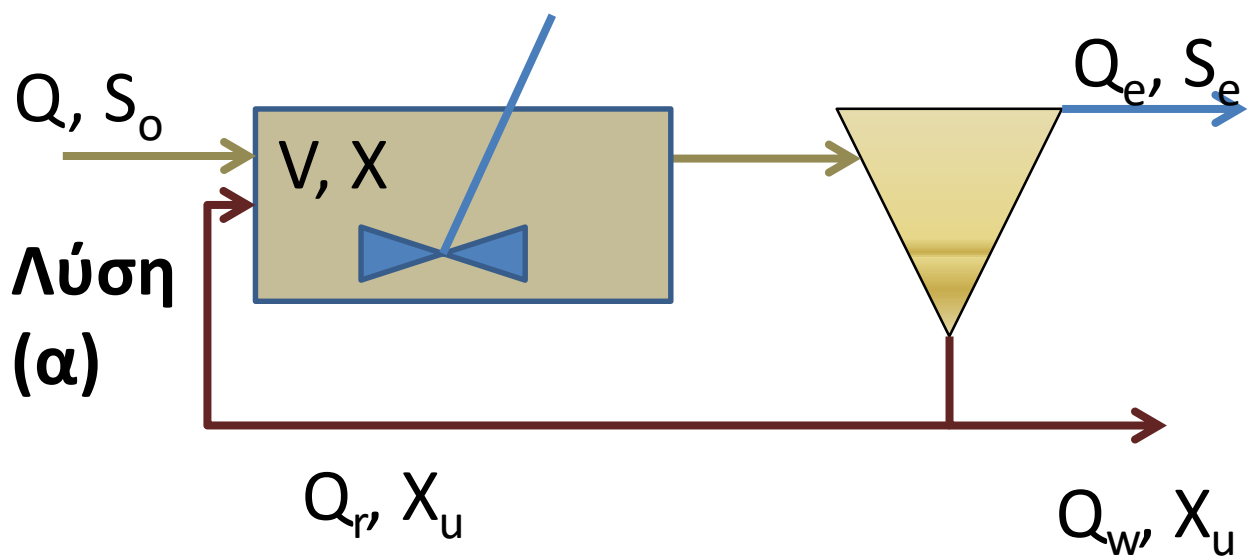
$$k_d = 0,03 \text{ d}^{-1}$$

$$Y = 0,5 \text{ g X/gBOD}_5$$

$$K_s = 100 \text{ mg/L}$$

$$\mu_{\max} = 3,5 \text{ d}^{-1} (\text{mg BOD}_5)(\text{mg X})^{-1}$$

Λύση
(α)



Οι σχέσεις αυτές ισχύουν για
αμελητέα είσοδο βιομάζας και
τέλεια διαύγαση.

Ενεργός Ιλύς

Αν γνωρίζω την
έξοδο S και τις
κινητικές
σταθερές
μπορώ να
υπολογίσω SRT

$$(2.3.47) \quad SRT = \frac{\theta + r\theta_c}{1 + r}$$

$$(2.3.40) \quad S = \frac{\left(\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d \right) K_s}{\mu_{\max} - k_d - \frac{1+r}{\theta + r\theta_c}} = \frac{\left(\frac{1}{SRT} + k_d \right) K_s}{\mu_{\max} - k_d - \frac{1}{SRT}} \quad (A)$$

$$(2.3.41) \quad \checkmark X = \frac{Y(S_0 - S)}{\frac{1+r\theta}{\theta + r\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta} = \frac{Y(S_0 - S)}{\frac{1}{SRT} + k_d} \frac{1}{\theta} \quad (B)$$

$$(2.3.42) \quad \checkmark X_u = \frac{(1+r)\theta_c}{\theta + r\theta_c} \frac{Y(S_0 - S)}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta} = \frac{\theta_c}{SRT} X \quad (Γ)$$

Δεδομένα

$$Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$S_o = 500 \text{ mg/L}$$

$$V = 1000 \text{ m}^3$$

$$X = 4 \text{ g/L}$$

$$Q_w = 50 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$X_u = 8 \text{ g/L}$$

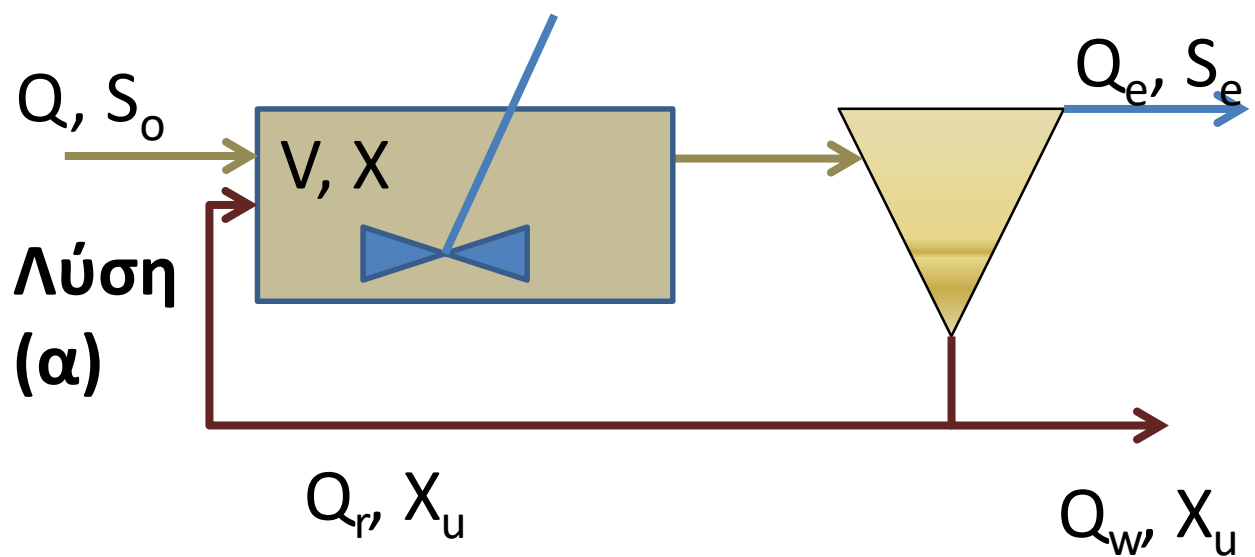
$$k_d = 0,03 \text{ d}^{-1}$$

$$Y = 0,5 \text{ g X/gBOD}_5$$

$$K_s = 100 \text{ mg/L}$$

$$\mu_{\max} = 3,5 \text{ d}^{-1} (\text{mg BOD}_5)(\text{mg X})^{-1}$$

Λύση
(α)



$$(2.3.42) \quad X_u = \frac{(1+r)\theta_c}{\theta + r\theta_c} \frac{Y(S_o - S)}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta}$$

$$(2.3.41) \quad X = \frac{Y(S_o - S)}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta}$$

$$\Rightarrow X_u = \frac{(1+r)\theta_c}{\theta + r\theta_c} X \Rightarrow r = \frac{X\theta_c - X_u\theta}{\theta_c(X_u - X)}$$

$$r = \frac{X\theta_c - X_u\theta}{\theta_c(X_u - X)}$$

$$\theta = \frac{V}{Q} = \frac{1000 \text{ m}^3}{100 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \frac{1000 \text{ m}^3}{2400 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 0,42 \text{ d}$$

$$(2.3.34) \quad \theta_c = \frac{V}{Q_w} = \frac{1000 \text{ m}^3}{50 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 20 \text{ d}$$

$$r = 0,96$$

$$Q_r = Q \cdot r =$$

$$100 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,96 \quad Q_r = 96 \text{ m}^3/\text{h}$$

(β)

$$(2.3.40) \quad S_e = \frac{\left(\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d \right) K_s}{\mu_{\max} - k_d - \frac{1+r}{\theta + r\theta_c}} =$$

$$S_e = \frac{\left(\frac{1 + 0,96}{0,42d + 0,96 \cdot 20d} + 0,03d^{-1} \right) \cdot 100 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{3,5d^{-1} - 0,03d^{-1} - \frac{1 + 0,96}{0,42d + 0,96 \cdot 20d}}$$

$$S_e = 3,86 \text{mg/L}$$

(v) $S_o = 600 \text{ mg/L}$

$$(2.3.40) \quad S_e = \frac{\left(\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d \right) K_s}{\mu_{\max} - k_d - \frac{1+r}{\theta + r\theta_c}} = \frac{\left(\frac{1}{\text{SRT}} + k_d \right) K_s}{\mu_{\max} - k_d - \frac{1}{\text{SRT}}}$$

$$(2.3.47) \quad \text{SRT} = \frac{\theta + r\theta_c}{1+r} = \frac{0,42\text{d} + 0,96 \cdot 20\text{d}}{1 + 0,96} = 10\text{d}$$

$$(2.3.41) \quad X = \frac{Y(S_o - S)}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d} \frac{1}{\theta} = \frac{Y(S_o - S)}{\frac{1}{\text{SRT}} + k_d} \frac{1}{\theta} = 5503\text{mg/L}$$

r	0.22	0.78	3.00	4.80	5.74	6.30
θ_c (d)	53.00	22.15	13.19	12.00	11.67	11.50
SRT (d)	10	10	10	10	10	10

ΑΕΡΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Αεροκυκλώνες

Διαδικασία σχεδιασμού

- Αρχικά επιλέγεται η επιθυμητή d_{50}
- Υπολογίζεται η διάμετρος του κυκλώνα από τη σχέση:
$$D = 3,2 \cdot d_{50}^{2/3} \cdot Q_g^{1/3} \cdot \rho_p^{1/3} \cdot \mu^{-1/3}$$
όπου Q_g = η παροχή αερίων σε m^3/s
 ρ_p = η πυκνότητα σωματιδίων σε kg/m^3
 μ = το ιξώδες αερίων σε $kg/m-s$
- Υπολογίζεται η συνολική απόδοση
- Ελέγχεται η πτώση πίεσης
- Εάν αυτή είναι υψηλή, θα πρέπει να μοιραστεί η ροή του αερίου σε δύο παράλληλους κυκλώνες.

Πτώση πίεσης

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot v_i^2 \cdot H_v$$

Δp η πτώση πίεσης (N/m^2) και
 ρ_g η πυκνότητα του αερίου (kg/m^3).

Η πτώση πίεσης στους κυκλώνες συνήθως ποικίλλει από 250 – 4.000 Pa (N/m^2).

πόδοση κατά Theodore - DePaola:

$$n_j = \frac{1}{1 + (d_{50} / \bar{d}_{pj})^2}$$

ολική απόδοση του κυκλώνα:

$$n_o = \sum n_j \cdot m_j$$

ΤΥΠΙΚΟΣ ΚΥΚΛΩΝΑΣ	
Διάμετρος εισόδου (πλάτος)	$b = D/4$
Ύψος εισόδου	$h = D/2$
Επιφάνεια εισόδου	$b \cdot h$
Μήκος κυλίνδρου	$L_1 = 2D$
Μήκος κώνου	$L_2 = 2D$
Διάμετρος εξόδου	$De = D/2$
Διάμετρος εξόδου σωματιδίων	$Dd = D/4 = b = L_3$
Μήκος αγωγού εξόδου των αερίων	$s = D \cdot 5/8$
Ύψος κυκλώνα	$H = L_1 + L_2$
Αριθμός περιδινήσεων	$Ne = (L_1 + L_2/2)/h$

$$d_{50} = \left(\frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot u_i \cdot \rho_p} \right)^{1/2}$$

Άσκηση 6 - Αεροκυκλώνες

Μία ροή απαερίων παροχής $Q_g = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ και θερμοκρασίας $T_g = 80^\circ\text{C}$ περιέχει αιωρούμενα σωματίδια πυκνότητας $\rho_p = 2,6 \text{ g/cm}^3$ και σε συγκέντρωση $C_p = 0,08 \text{ kg/m}^3$. Για την απομάκρυνση των σωματιδίων πρόκειται να εγκατασταθούν δύο αεροκυκλώνες τυπικών διαστάσεων σε σειρά. Η κατά βάρος ποσοστιαία κατανομή των σωματιδίων δίδεται στον πίνακα 1. Υπολογίστε:

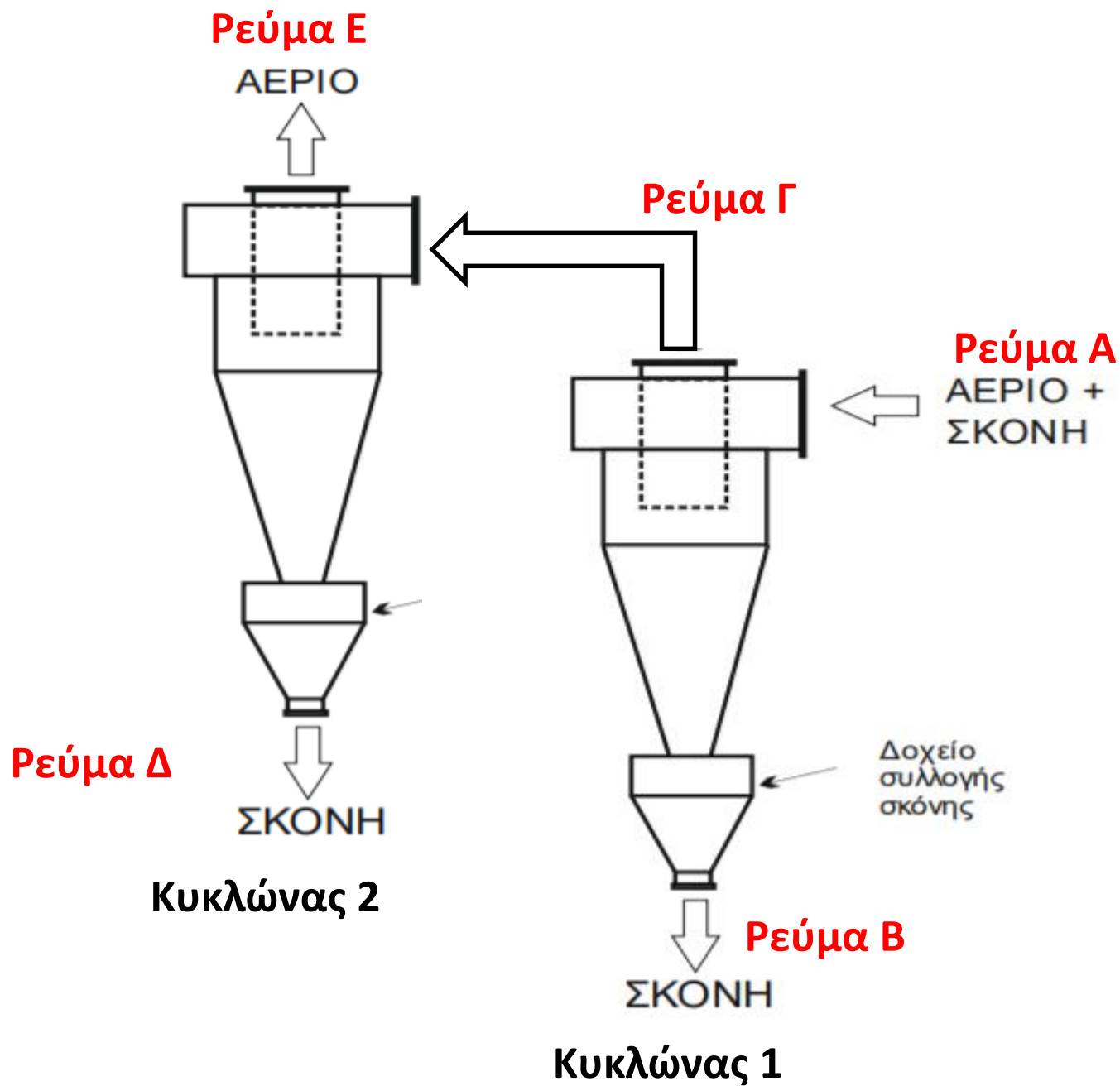
- Τις διαστάσεις των δύο κυκλώνων
- Την απόδοση του κάθε κυκλώνα χωριστά καθώς και την συνολική απόδοση των δύο σε σειρά κυκλώνων
- Την νέα κατανομή κατά βάρος των σωματιδίων στην έξοδο του κάθε κυκλώνα
- Το ισοζύγιο των σωματιδίων στο σύστημα των δύο κυκλώνων
- Ελέγξτε αν ο σχεδιασμός των δύο κυκλώνων ικανοποιεί τις γενικές προδιαγραφές λειτουργίας των αεριοκυκλώνων.

Δίνονται για τα απαέρια στη θερμοκρασία λειτουργίας: πυκνότητα $1,2754 \text{ kg/m}^3$ και ιξώδες $2,1138 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m/s}$.

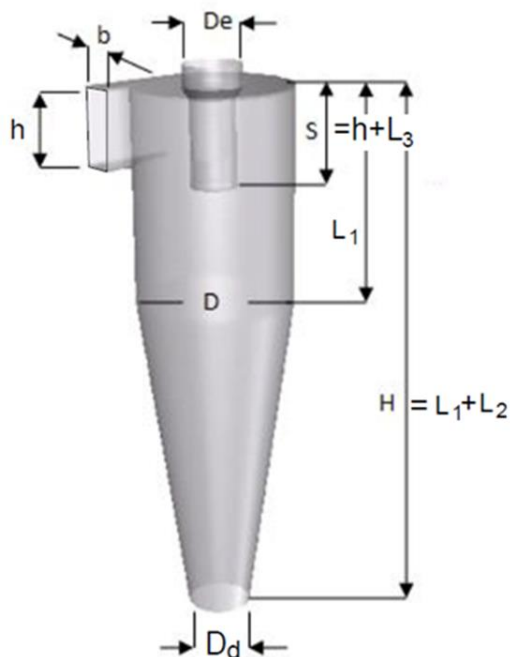
Πίνακας 1:

Κατά βάρος κατανομή σωματιδίων

d_p	w/w
μm	%
1	0,40
4	3,13
7	6,97
10	10,69
13	13,42
16	14,57
19	14,02
22	12,09
25	9,39
28	6,58
31	4,17
34	2,38
37	2,19



Τυπικός Αεροκυκλώνας



Σχεδιαστικές παράμετροι κυκλώνα τυπικής απόδοσης:

Διάμετρος κυκλώνα D

Μήκος κυλίνδρου $L_1 = 2D$

Μήκος κώνου $L_2 = 2D$

Διάμετρος εξόδου $De = D/2 = h$

Ύψος εισόδου $h = D/2$

Διάμετρος εισόδου (πλάτος) $b = D/4 = L_3 = D_d$

Διάμετρος εξόδου σωματιδίων $D_d = D/4 = b = L_3$

Μήκος αγωγού εξόδου των απαιριών $L_3 + h = 5D/8$

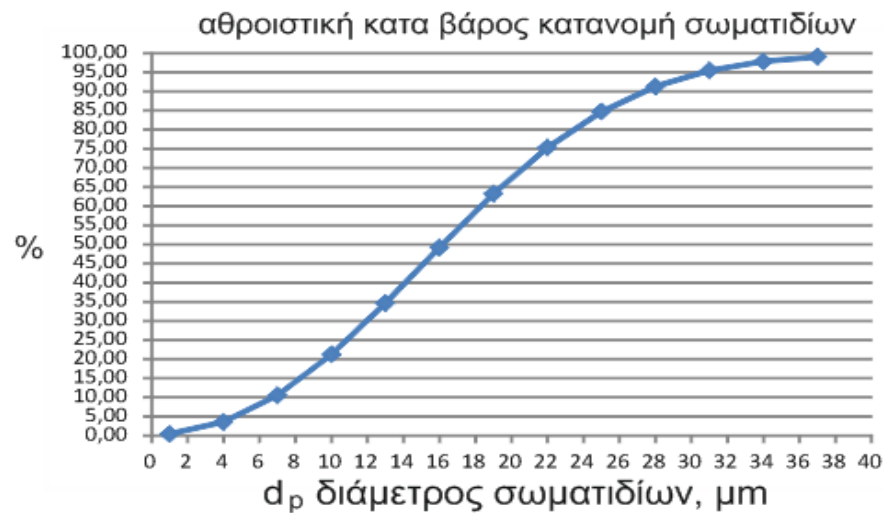
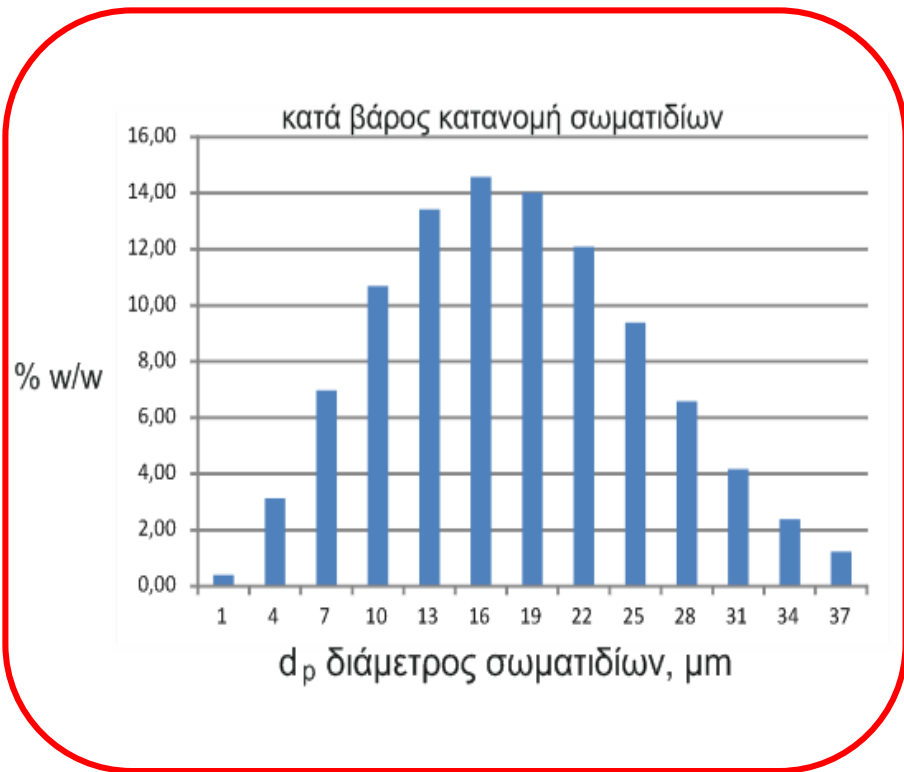
Αριθμός περιδινήσεων $Ne = (L_1 + L_2/2)/h$

Βήμα 1ον: Κατασκευάζουμε την αθροιστική κατά βάρος κατανομή των σωματιδίων και υπολογίζουμε το d_{50} :

Διάμετρος σωματιδίων	Κατά βάρος κατανομή σωματιδίων	Αθροιστική κατά βάρος κατανομή
d_{pj} μm	% w/w	Σ (% w/w)
1	0,40	0,40
4	3,13	3,53
7	6,97	10,50
10	10,69	21,19
13	13,42	34,61
$d_{50}=16$	14,57	49,19
19	14,02	63,21
22	12,09	75,30
25	9,39	84,70
28	6,58	91,28
31	4,17	95,45
34	2,38	97,81
37	2,19	100,00

% w/w + προηγούμενο Σ (% w/w)

Από την αθροιστική κατανομή προκύπτει
ότι $d_{50} = 16 \mu\text{m}$



Βήμα 2ον: Υπολογίζουμε τις διαστάσεις του τυπικού αεροκυκλώνα οι οποίες εξαρτώνται μόνο από το d_{50} και τα φυσικά χαρακτηριστικά της ροής των απαερίων:
Από την εξίσωση 4.10

$$d_{50} = \left(\frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot u_i \cdot \rho_p} \right)^{1/2}$$

Σχεδιαστικές παράμετροι κυκλώνα τυπικής απόδοσης:

- Διάμετρος εισόδου (πλάτος) $b = \frac{D}{4}$
- Αριθμός περιδινήσεων $N_e = \frac{(L_1 + \frac{L_2}{2})}{h} = \frac{2D + \frac{2D}{2}}{\frac{D}{2}} = \frac{3D}{\frac{D}{2}} = 6$
- $u_i = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{h \cdot b} = \frac{Q}{\frac{D}{2} \cdot \frac{D}{4}} = \frac{8Q}{D^2}$

Όπου:

$$d_{50} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$Q_g = 40 \text{ m}^3/\text{s}$$

παροχή απαερίων

$$\rho_p = 2,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

πυκνότητα σωματιδίων

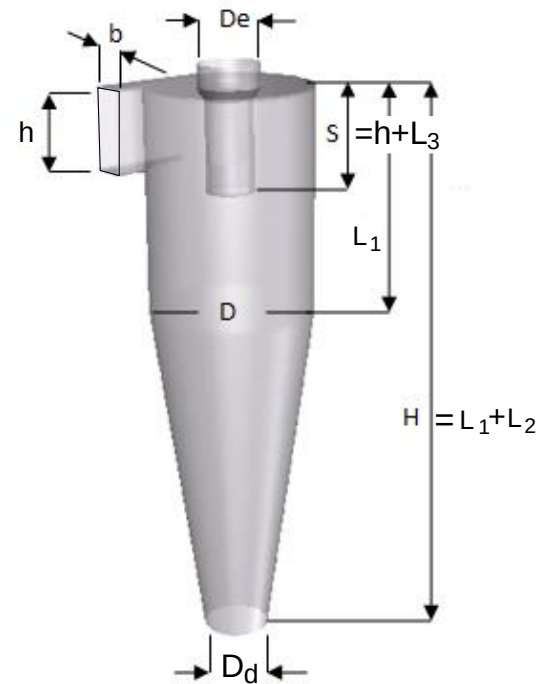
$$\mu = 2,1138 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m-s}$$

ιξώδες απαερίων

Επομένως η διάμετρος του 1^{ου} αεριοκυκλώνα είναι: **$D_1 = 5,53 \text{ m}$**

Βήμα 3ον : Από την διάμετρο του κυκλώνα υπολογίζουμε τις υπόλοιπες διαστάσεις του κυκλώνα:

Διάμετρος 1 ^{ου} κυκλώνα		$D_1 =$	5,53	m
Διάμετρος εισόδου (πλάτος)	$b_1 = D/4$	$b =$	1,38	m
Ύψος εισόδου	$h_1 = D_1/2$	$h_1 =$	2,76	m
Επιφάνεια εισόδου	$b_1 * h_1$	$A_1 =$	3,82	m ²
Μήκος κυλίνδρου	$L_1 = 2D$	$L_1 =$	11,05	m
Μήκος κώνου	$L_2 = 2D$	$L_2 =$	11,05	m
Διάμετρος εξόδου	$De = D/2$	$D_e =$	2,76	m
Διάμετρος εξόδου σωματιδίων	$Dd = D/4 = b = L_3$	$D_d =$	1,38	m
Μήκος αγωγού εξόδου των απαερίων	$s = D_1 * 5/8$	$s =$	3,45	m
Ύψος κυκλώνα	$H = L_1 + L_2$	$H =$	22,10	m
Αριθμός περιδινήσεων	$Ne = (L_1 + L_2/2)/h$	$Ne =$	6	



Βήμα 4ον : Υπολογίζουμε την απόδοση του κυκλώνα για κάθε διάμετρο σωματιδίου με βάση την σχέση:

$$n_p = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_p}\right)^2} \quad \text{Εξίσωση 4.11}$$

$$\gamma = (1-\beta) \cdot \alpha$$

$$\delta = \gamma \cdot 100 / \Sigma \gamma$$

d_p μm	w/w %	απόδοση n (β)	% w/w σωματιδίων Που παρέμειναν στο αέριο ρεύμα $\gamma = (1-\beta) \cdot \alpha$	νέα κατανομή σωματιδίων % w/w $\delta = \gamma \cdot 100 / \Sigma \gamma$
1	0,40	0,0039	0,3984	0,8257
4	2,12	0,0588	2,9459	6,1052
		0,1607	5,8502	12,1248
		0,2809	7,6872	15,9314
		0,3976	8,0836	16,7529
		0,5000	7,2850	15,0978
		0,5851	5,8171	12,0556
		0,6541	4,1825	8,6680
		0,7094	2,7285	5,65478
		0,7538	1,6197	3,35675
		0,7896	0,8772	1,8179
34	2,38	0,8187	0,4315	0,8942
37	2,19	0,8425	0,3450	0,7150
			Σύνολο $\Sigma \gamma = 48,2518$	

Από την στήλη γ του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η απόδοση του 1^{ου} κυκλώνα είναι:
 $n_1 = 100 - 48,2518 = 51,75\%$