

ΤΕΧΝΟΛΟΓΕΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

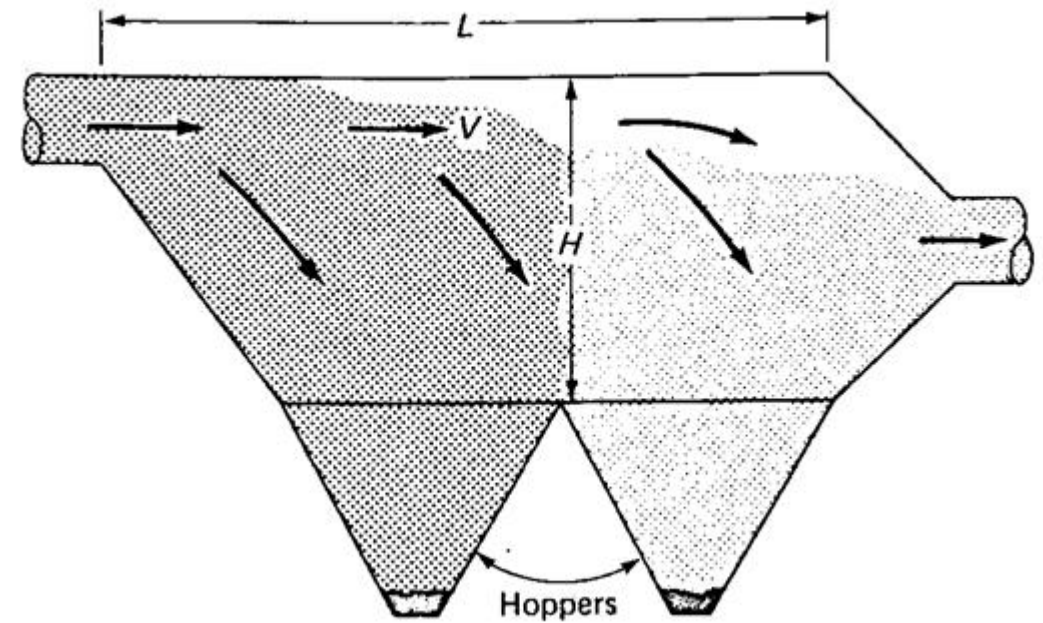
Γεράσιμος Λυμπεράτος
Καθηγητής ΕΜΠ



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

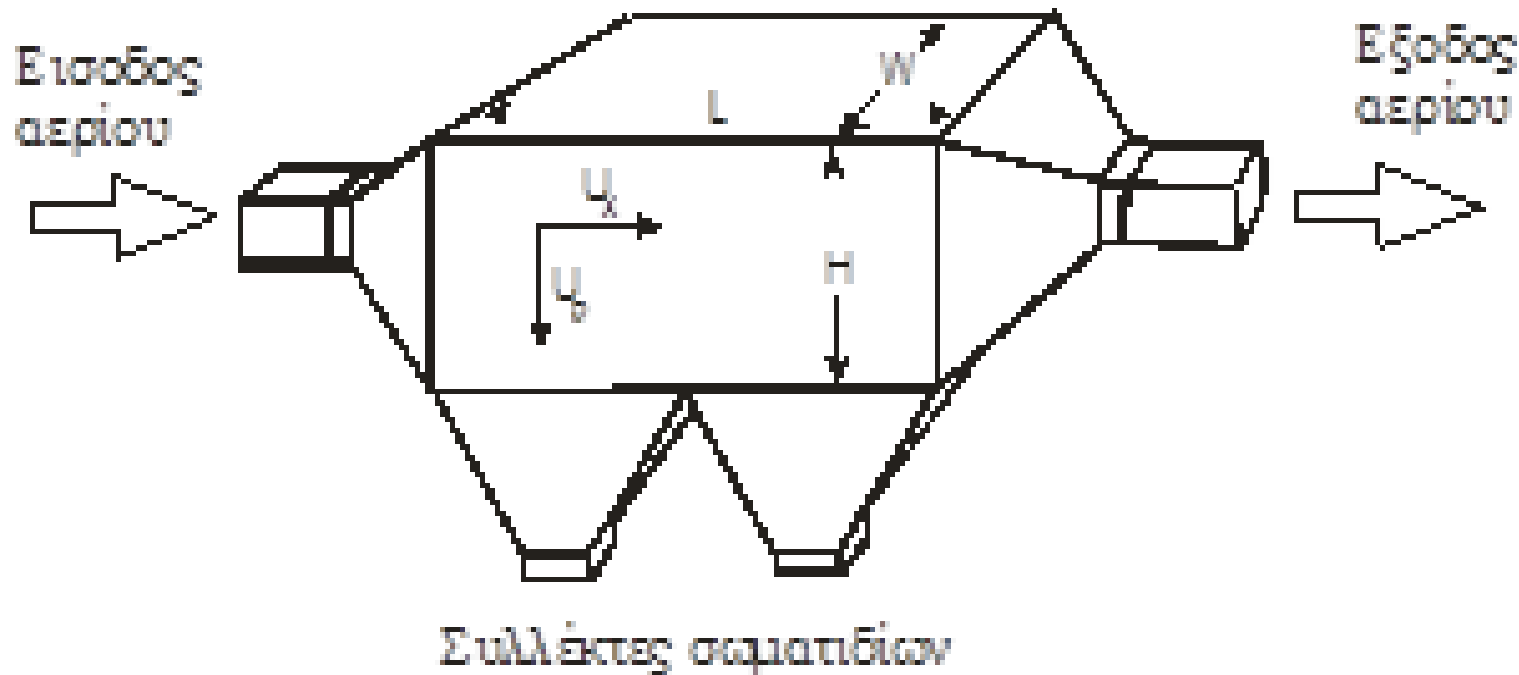
- Θάλαμοι καθίζησης
- Αεριοκυκλώνες
- Σακκόφιλτρα
- Ηλεκτρόφιλτρα

Θάλαμοι καθίζησης



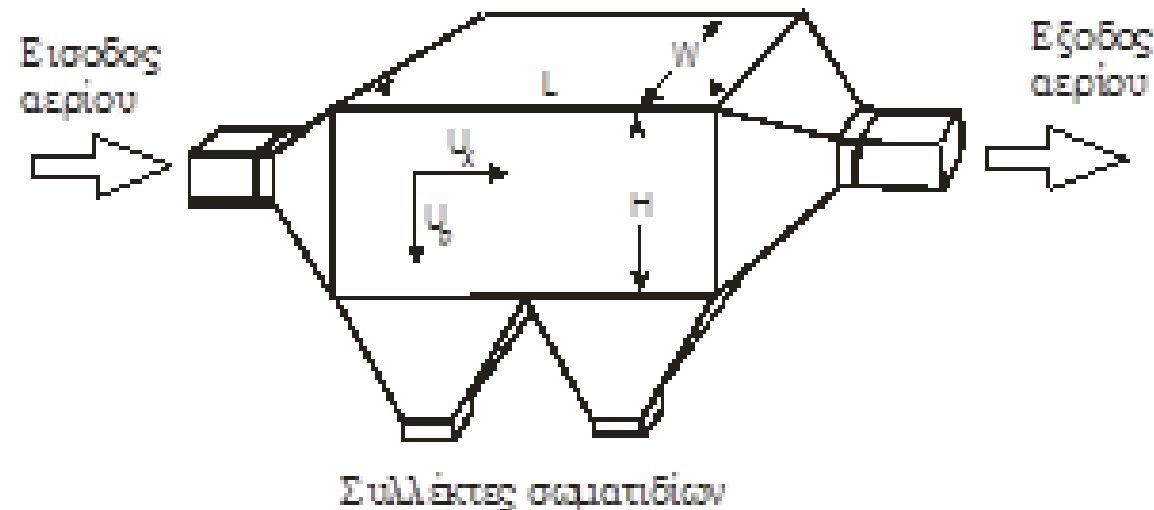
Στατικός διαχωριστής ή θάλαμος καθίζησης με βαρύτητα

- Αποτελεί μία απλή διάταξη διαχωρισμού σωματιδίων λόγω βαρύτητας.
- Με αύξηση της διατομής ροής του αερίου, η ταχύτητα του μειώνεται και έτσι επιτυγχάνεται κατακρήμνιση των βαρύτερων αιωρούμενων σωματιδίων.



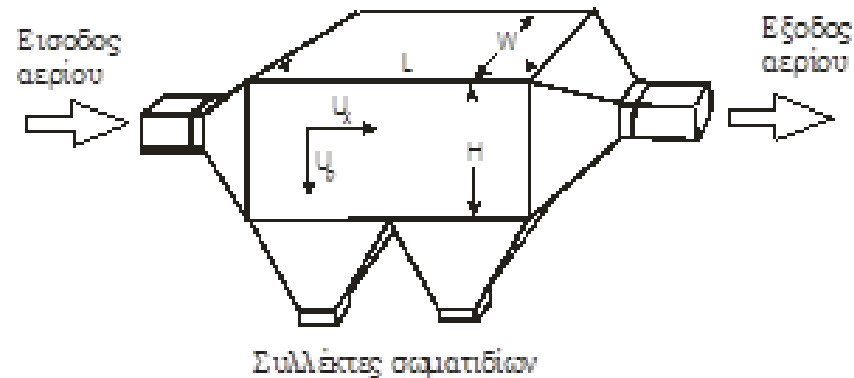
Στατικοί διαχωριστές ή θάλαμοι καθίζησης με βαρύτητα

- Χρησιμοποιούνται για απομάκρυνση σωματιδίων μεγέθους $>50\mu\text{m}$ και για μέγιστη ταχύτητα ροής του αερίου 3 m/s σε ένα εύρος συγκεντρώσεων από 1 έως 100 g/m^3 .
- Χρησιμοποιούνται συνήθως ως προ-επεξεργασία για την προστασία πιο ευαίσθητων συστημάτων επεξεργασίας που ακολουθούν σε σειρά.
- Εφαρμόζονται σε διεργασίες θραύσης και άλεσης.



Στατικοί διαχωριστές ή θάλαμοι καθίζησης με βαρύτητα

- Η απόδοση τους στην απομάκρυνση σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη των $50\ \mu\text{m}$ ανέρχεται σε 90 % σε ποσοστό σωματιδίων αλλά κάτω από 50% σε ποσοστό βάρους
- Η κατανάλωση ισχύος τυπικά ανέρχεται σε $5,3\ \text{kW}/1000\ \text{m}^3/\text{min}$.



Η τελική (οριακή) ταχύτητα καθίζησης του σωματιδίου (v_t) δίνεται από τη σχέση:

$$v_t = \frac{g \cdot \rho_p \cdot d_p^2}{18\mu_g}$$

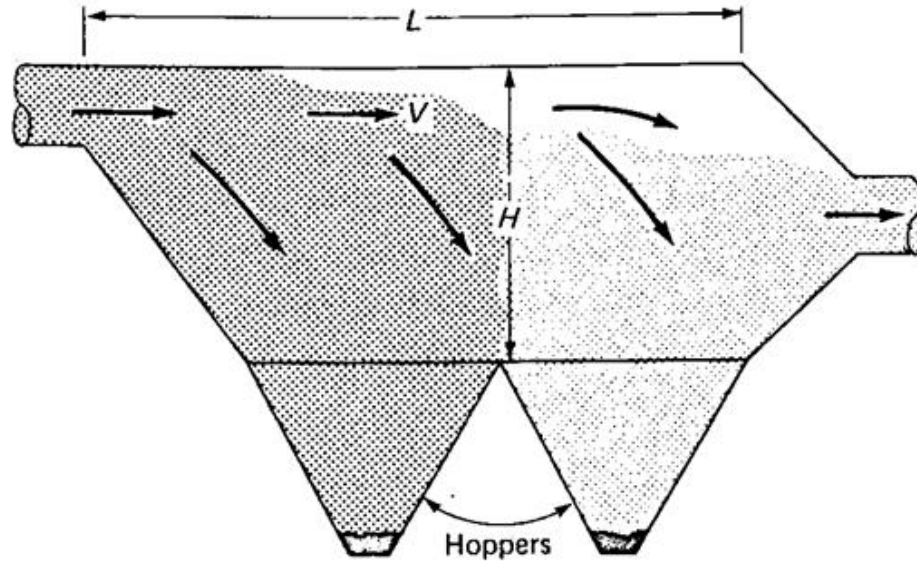
όπου: ρ_p η πυκνότητα των σωματιδίων,
 μ_g το ιξώδες του αερίου και
 d_p συγκεκριμένη διάμετρος σφαιρικού σωματιδίου στην περιοχή ροής Stokes.

Η θεωρητική απόδοση του θαλάμου καθίζησης για σφαιρικά σωματίδια διαμέτρου d_p ισούται με:

$$n = \frac{L \cdot v_t}{H \cdot v_x}$$

όπου: L το μήκος του θαλάμου,
 H το ύψος του θαλάμου και
 v_x η ταχύτητα του αερίου μέσα στο θάλαμο κατά τον άξονα x .

Η απόδοση, για σωματίδια διαμέτρου d_p είναι:



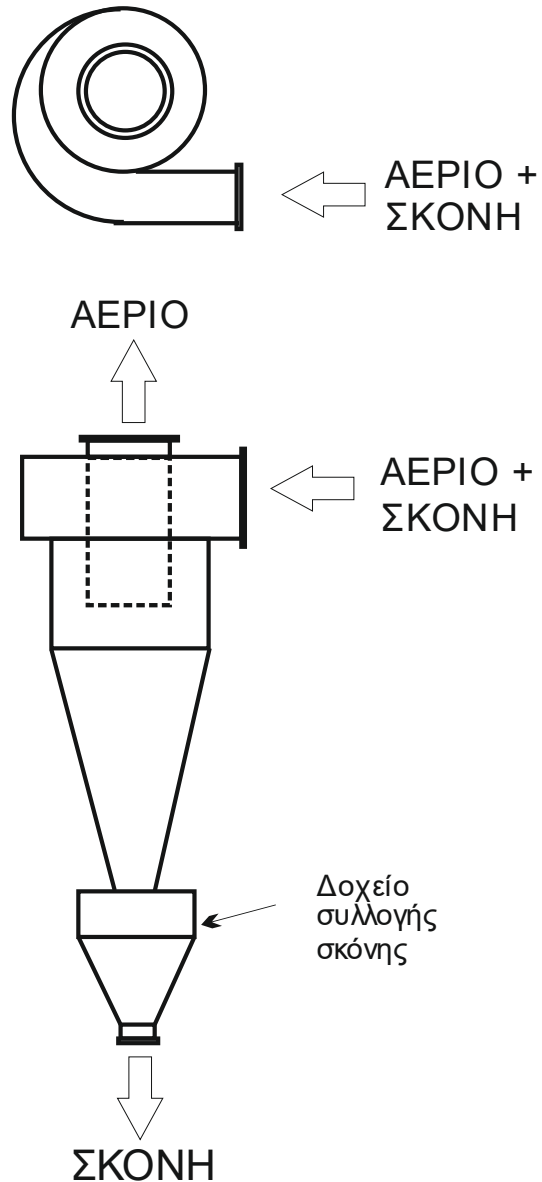
$$n = \frac{L \cdot v_t}{H \cdot v_x} = \frac{L \cdot g \cdot \rho_p}{H \cdot v_x \cdot 18\mu_g} \cdot d_p^2$$

Μέθοδος	Μέγεθος Σωματιδίων (μm)	Απόδοση (%)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Θάλαμοι καθίζησης	> 50	< 50	- ο απλός σχεδιασμός, κατασκευή και λειτουργία τους - η μικρή πτώση πίεσης του διερχομένου αερίου - η δυνατότητα επανάκτησης της κατακρατούμενης σκόνης - Χαμηλό κόστος	- Μέτρια αποτελεσματικότητα ιδιαίτερα για μικρά σωματίδια - η απαίτηση για μεγάλο χώρο

(Αεριο)κυκλώνες



Αεριοκυκλώνες

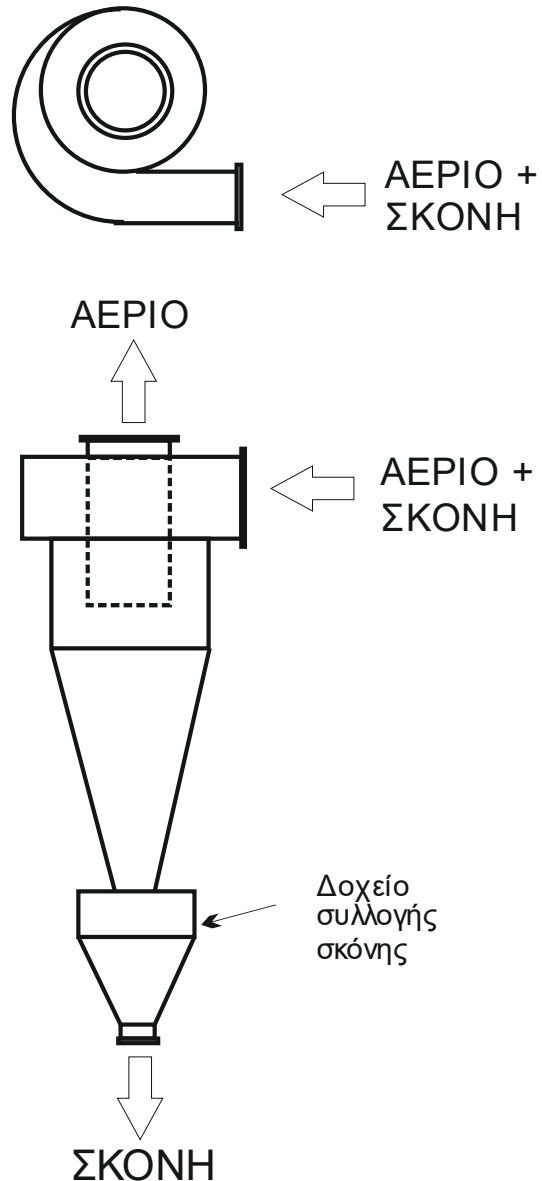


Είναι απλές φυγοκεντρικές διατάξεις διαχωρισμού των αιωρούμενων σωματιδίων από μία αέρια παροχή. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό δοχείο όπου το αέριο **εισέρχεται εφαπτομενικά με ταχύτητα 10-25 m/s.**

Βασική παράμετρος σχεδιασμού: **η διάμετρος των σωματιδίων d_{50}** η οποία ορίζεται ως η θεωρητική διάμετρος που διαιρεί το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων του αερίου αριθμητικά σε δύο ίσα κατά βάρος μέρη.

Οι κυκλώνες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση σωματιδίων μεγέθους 5-25 μm και για ένα εύρος συγκεντρώσεων από 2,5 έως 100 g/m^3 . Η απόδοσή τους, για σωματίδια με λόγο διαμέτρου $d_p/d_{50} > 3$, ανέρχεται σε ποσοστό πάνω από 90%.

Αεριοκυκλώνες - απόδοση

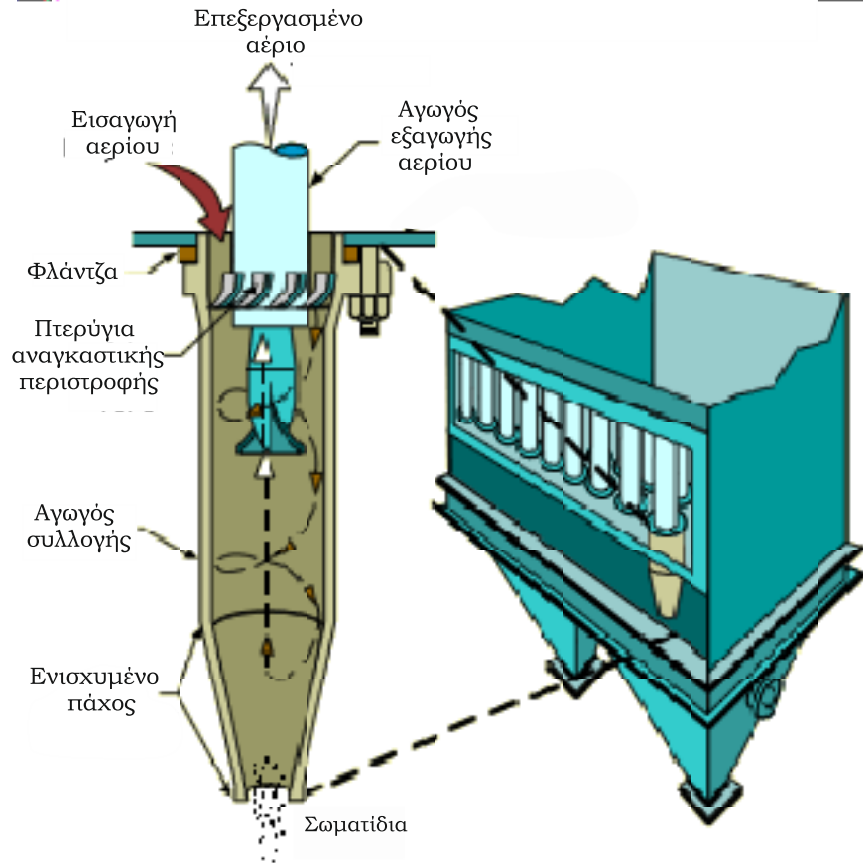


Η απόδοση των κυκλώνων αυξάνει:

- με την αύξηση της διαμέτρου των σωματιδίων και της πυκνότητάς τους
- με την αύξηση της ταχύτητας εισόδου τους
- με την μείωση της πυκνότητας του αερίου ρεύματος
- με την μείωση της διαμέτρου του κυκλώνα και
- με την διαβροχή των τοιχωμάτων του κυκλώνα (υγροί κυκλώνες).

Όμως όλοι οι παράγοντες που αυξάνουν την απόδοση του κυκλώνα αυξάνουν ταυτόχρονα και την πτώση πίεσης του διερχομένου αερίου.

Αεριοκυκλώνες



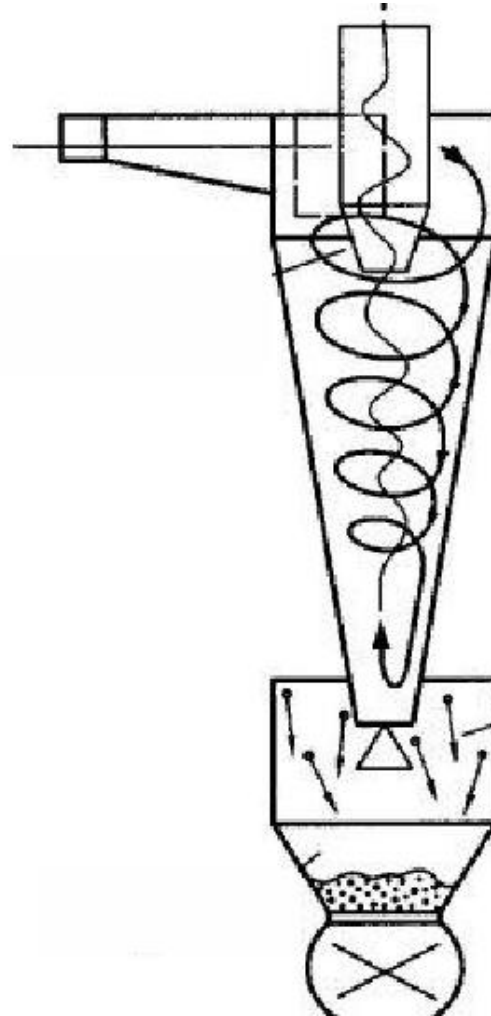
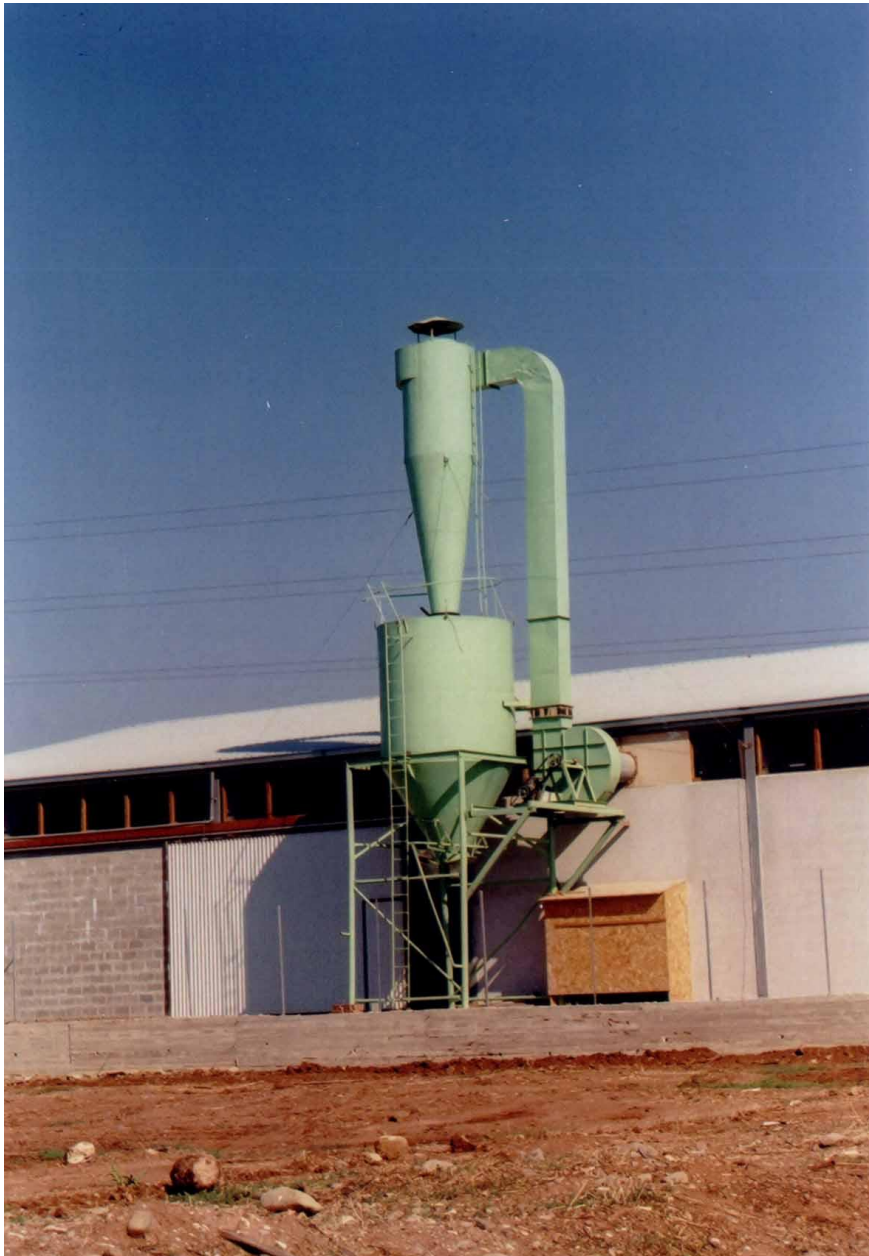
Συλλέκτης Πολλαπλών
Αεριοκυκλώνων
Μικρής διαμέτρου

Οι κυκλώνες χρησιμοποιούνται για τον πρωτογενή καθαρισμό αερίων πριν τον τελικό καθαρισμό τους σε συστήματα υψηλής απόδοσης (π.χ. ηλεκτρόφιλτρα).

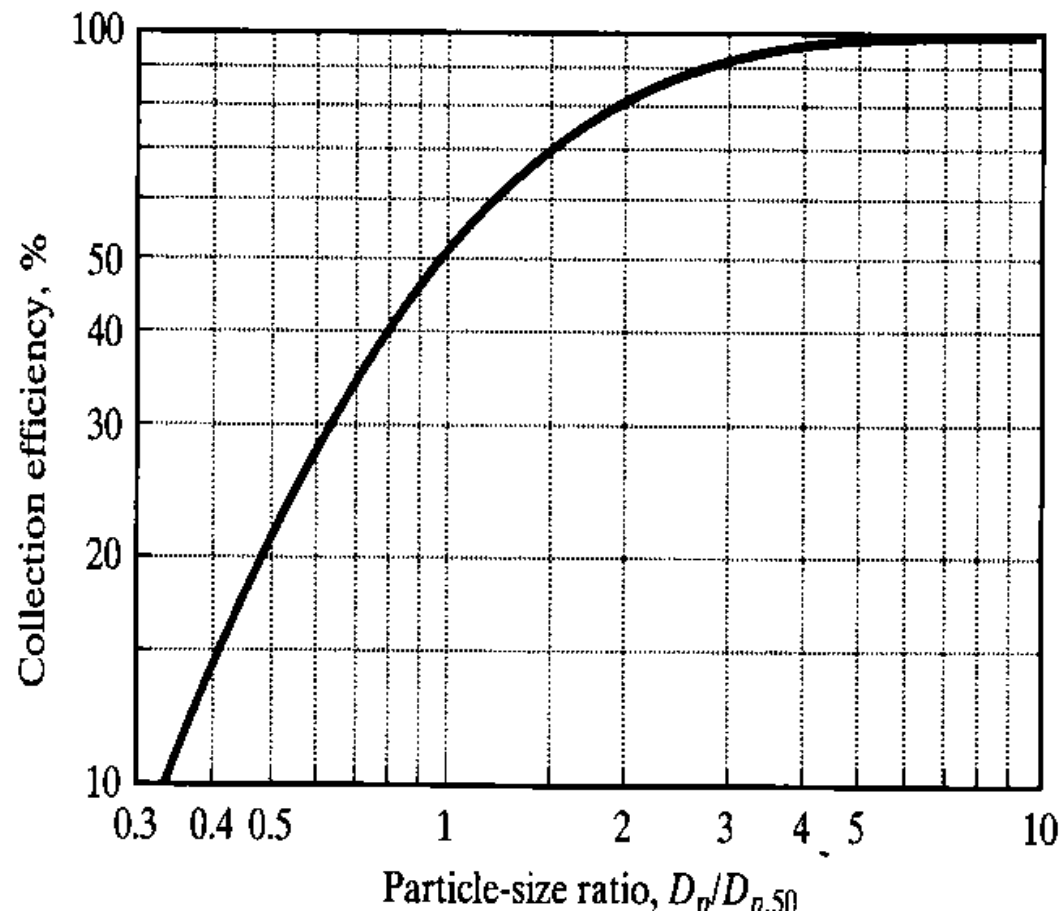
Για μεγάλες παροχές χρησιμοποιούνται συστοιχίες κυκλώνων σε παράλληλη σύνδεση όμως η απόδοσή τους μειώνεται πολύ όταν η συγκέντρωση των σωματιδίων στα αερία είναι μικρότερη από $2,5 \text{ g/m}^3$.

Η κατανάλωση ισχύος ανέρχεται τυπικά σε $52,7 \text{ kW/1000 m}^3/\text{min}$.

Μέθοδος	Μέγεθος Σωματιδίων (μm)	Απόδοση (%)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Κυκλώνες	5 - 25	50 – 90	• απλός σχεδιασμός • απλή κατασκευή και λειτουργία • η μικρή έως μέτρια πτώση πίεσης του διερχόμενου αερίου • Χαμηλό κόστος κεφαλαίου • Λειτουργία και σε υψηλές θερμοκρασίες • Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης	• Χαμηλές αποδόσεις • Υψηλό κόστος λειτουργίας λόγω της υψηλής πτώσης πίεσης • η μικρή απόδοσή τους όσον αφορά τον διαχωρισμό της λεπτής σκόνης • η εξάρτηση της απόδοσης από μεταβολές της συγκέντρωσης της σκόνης και της παροχής των απαερίων.



Σχεδιασμός Αεριοκυκλώνων



Απόδοση κατά Theodore - DePaola:

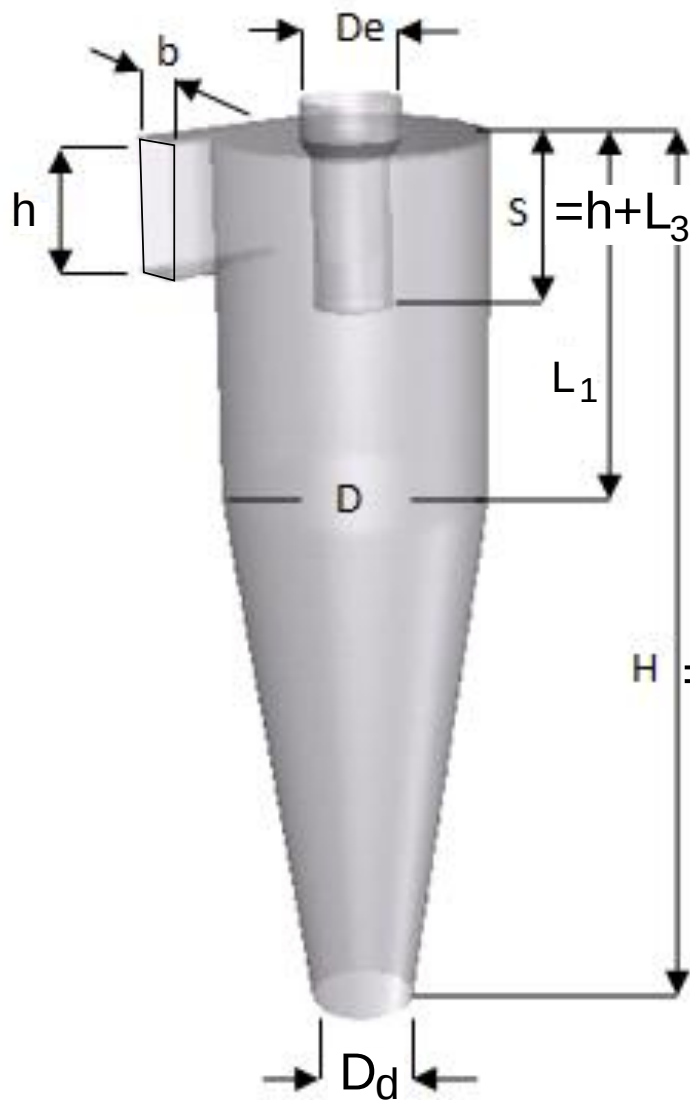
$$n_j = \frac{1}{1 + (d_{50} / \bar{d}_{pj})^2}$$

ολική απόδοση του κυκλώνα:

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

όπου n_o η ολική απόδοση του κυκλώνα και

m_j το ποσοστό, κατά βάρος, των σωματιδίων συγκεκριμένης ομάδας.



Σχεδιαστικές παράμετροι του κυκλώνα:

Διάμετρος κυκλώνα	D
Μήκος κυλίνδρου	$L_1 = 2D$
Μήκος κώνου	$L_2 = 2D$
Διάμετρος εξόδου	$D_e = D/2 = h$
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 αερίων	$L_3 + h = 5D/8$
Αριθμός περιδινήσεων	$N_e = (L_1 + L_2/2)/h$

Βασική παράμετρος σχεδιασμού (Εξίσωση Lapple)

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

d_{50} η διάμετρος των σωματιδίων που κατακρατούνται με απόδοση 50% (m),

μ το ιξώδες των αερίων αποβλήτων (kg/m-s),

b η διάμετρος της εισόδου του κυκλώνα (m),

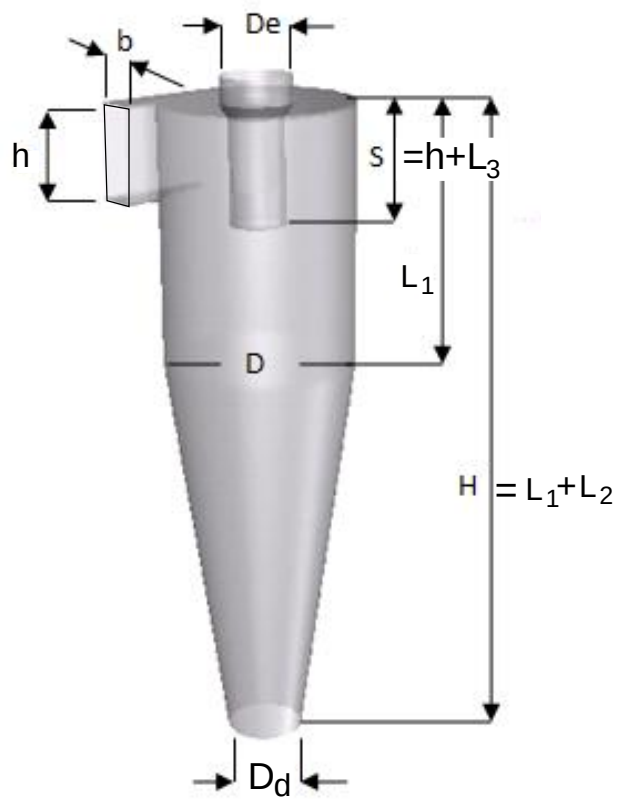
N_e ο αριθμός των περιδινήσεων στον εξωτερικό έλικα του κυκλώνα,

u_i η ταχύτητα εισόδου των αερίων αποβλήτων (m/s) και

ρ_p η πυκνότητα των στερεών σωματιδίων (kg/m³).

Αδιάστατες σχεδιαστικές παράμετροι για κυκλώνες εφραπτομενικής εισόδου

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τυπικής απόδοσης	Χαμηλής απόδοσης	Υψηλής απόδοσης
D	Διάμετρος κυκλώνα	1,0	1,0	1,0
h	Ύψος εισόδου	0,5	0,75	0,5
b	Διάμετρος εισόδου	0,25	0,375	0,2
L_3+h	Μήκος εξόδου	0,625	0,875	0,5
D_e	Διάμετρος εξόδου	0,5	0,75	0,5
L_1	Μήκος κυλίνδρου	2,0	1,5	1,5
L_2	Μήκος κώνου	2,0	2,5	2,5



$$b = \frac{D}{4} \text{ και } h = \frac{D}{2} \Rightarrow A = b \cdot h \Rightarrow A = \frac{D^2}{8}$$

$$u_i = \frac{Q_v}{A} = \frac{8 \cdot Q_v}{D^2}$$

$$D = 3,052 \cdot d_{50}^{2/3} \cdot Q_v^{1/3} \cdot \rho_p^{1/3} \cdot \mu^{-1/3}$$

όπου : Q_v = ογκομετρική παροχή του καυσαερίου, m^3/s

A = κάθετη επιφάνεια αγωγού εισαγωγής του καυσαερίου m^2

Πτώση πίεσης

Shepherd και Lapple:

$$H_v = K \cdot \frac{h \cdot b}{D^2}$$

H_v η πτώση πίεσης (αδιάστατο), εκφρασμένη σε αριθμούς
πιεζομετρικού ύψους ταχύτητας εισαγωγής

K σταθερά η οποία εξαρτάται από την διάταξη
του κυκλώνα και τις συνθήκες λειτουργίας του.

($K=12-18$, τυπικά 16)

Πτώση πίεσης

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

Δp η πτώση πίεσης (N/m²) και
 ρ_g η πυκνότητα του αερίου (kg/m³).

Η πτώση πίεσης στους κυκλώνες
συνήθως ποικίλλει από 250 – 4.000 Pa
(N/m²).

Η **κατανάλωση ισχύος** είναι τότε:

$$\frac{dw_f}{dt} = Q \cdot \Delta p$$

όπου $\frac{dw_f}{dt}$ η ισχύς σε Watt

Q η ογκομετρική παροχή
του αερίου (m^3/s).

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.

ΑΣΚΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΕΡΙΟΚΥΚΛΩΝΑ

Πίνακας 1: Κατά βάρος κατανομή σωματιδίων

d_p μm	w/w %
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	1,23

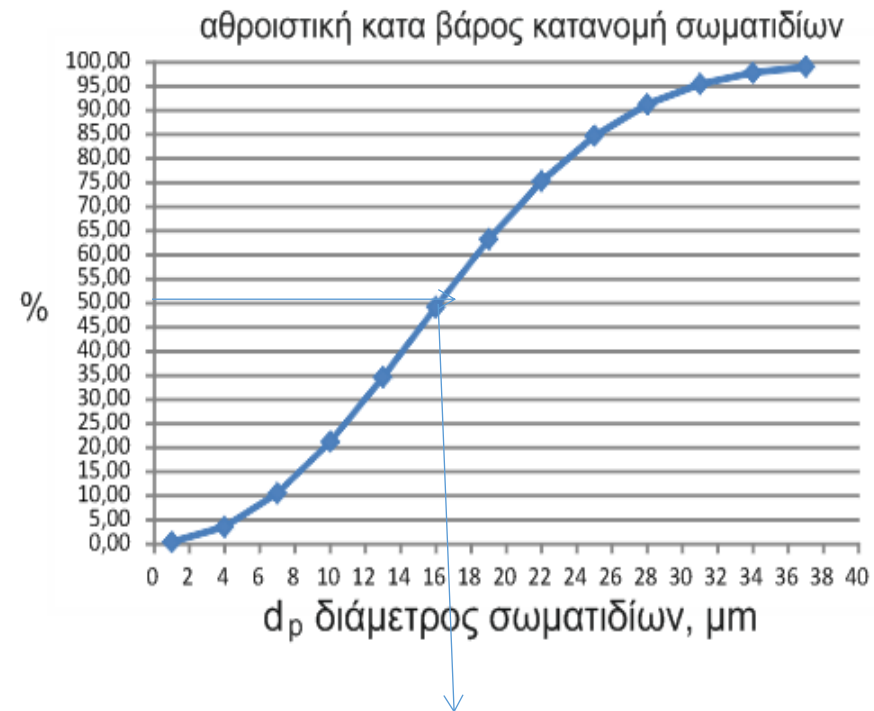
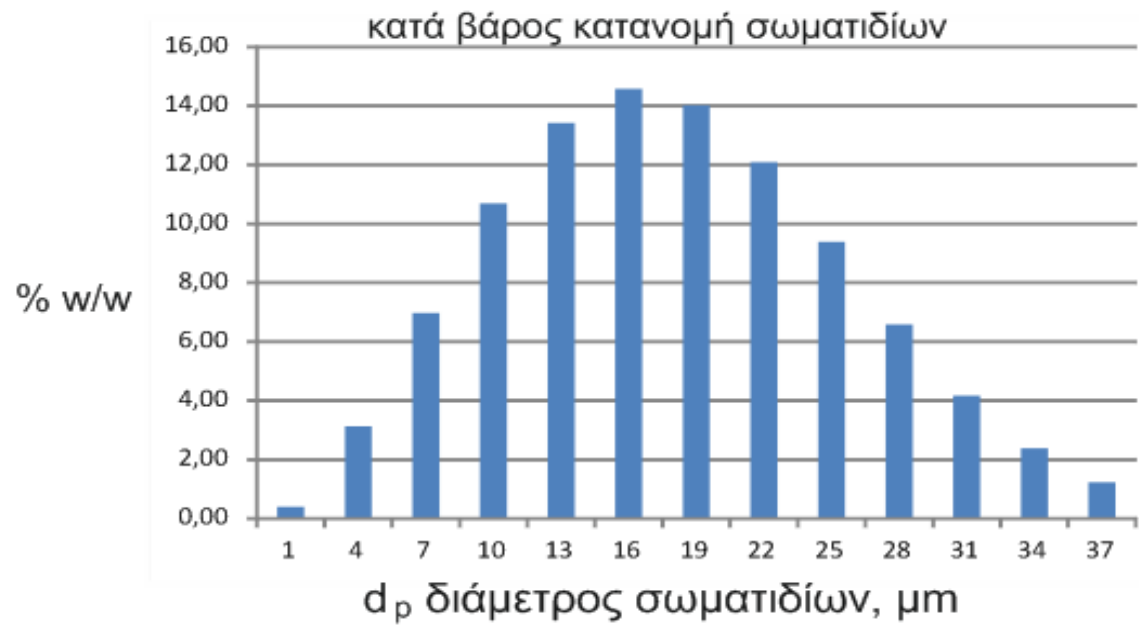
Μία ροή αερίων παροχής $Q_g = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ και θερμοκρασίας $T_g = 80^\circ\text{C}$ περιέχει αιωρούμενα σωματίδια πυκνότητας $\rho_p = 2,6 \text{ g/cm}^3$ και σε συγκέντρωση $C_p = 0,08 \text{ kg/m}^3$. Για την απομάκρυνση των σωματιδίων πρόκειται να εγκατασταθούν δύο αεριοκυκλώνες τυπικών 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.

Βήμα 1°:

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

Διάμετρος σωματιδίων d_p μm	Κατά βάρος κατανομή σωματιδίων % w/w	Αθροιστική κατά βάρος κατανομή 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	97,83
37	1,23	99,06



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

Βήμα 2° : Υπολογίζουμε τις διαστάσεις του τυπικού αεριοκυκλώνα οι οποίες εξαρτώνται μόνο από το d_{50} και τα φυσικά χαρακτηριστικά της ροής των απαερίων:

$$D_1 = 3,2 \cdot d_{50}^{2/3} \cdot Q_g^{1/3} \cdot \rho_p^{1/3} \cdot \mu^{-1/3}$$

Όπου:

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

$$Q_g = 40, \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{παροχή απαερίων}$$

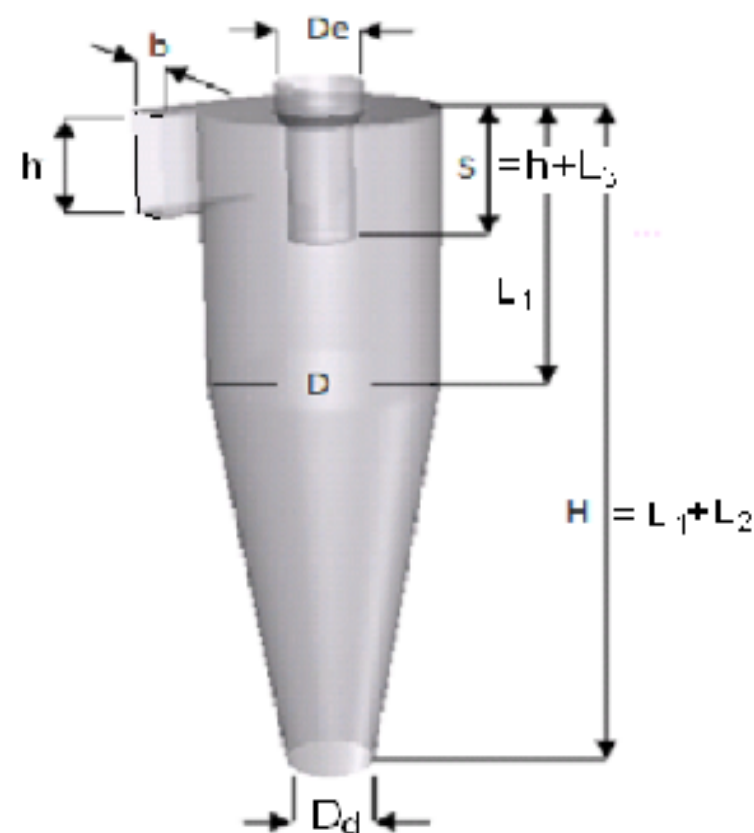
$$\rho_p = 2,6 \cdot 10^3 \text{ , kg/m}^3 \quad \text{πυκνότητα σωματιδίων}$$

$$\mu = 1,73519 \cdot 10^{-5} \cdot ((T_g + 273)/273)^{0,768} = 2,1138 \text{ kg/m-s} \quad \text{ιξώδες απαερίων}$$

Επομένως η διάμετρος του 1^{ου} αεριοκυκλώνα είναι: **$D_1 = 4,82 \text{ m}$**

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

$D=$	4.8	m
$b=$	1,2	m
$h_1=$	2,4	m
$A_1=$	2,9	m ²
$L_1=$	9,65	m
$L_2=$	9,66	m
$D_e=$	2,4	m
$D_d=$	1,2	m
$s=$	3,0	m
$H=$	19,3	m



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

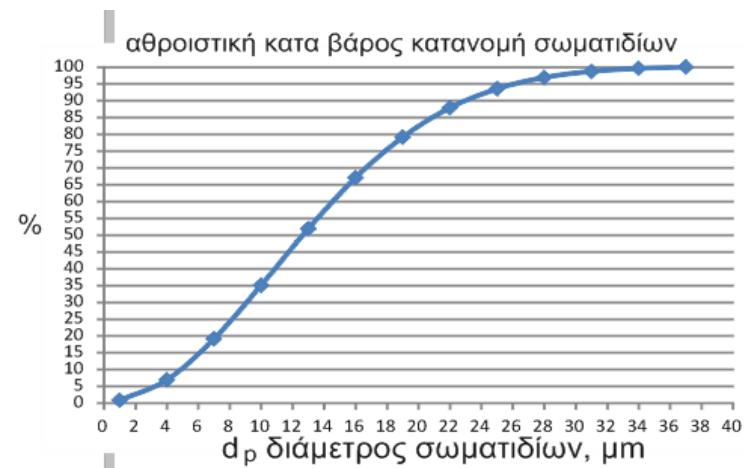
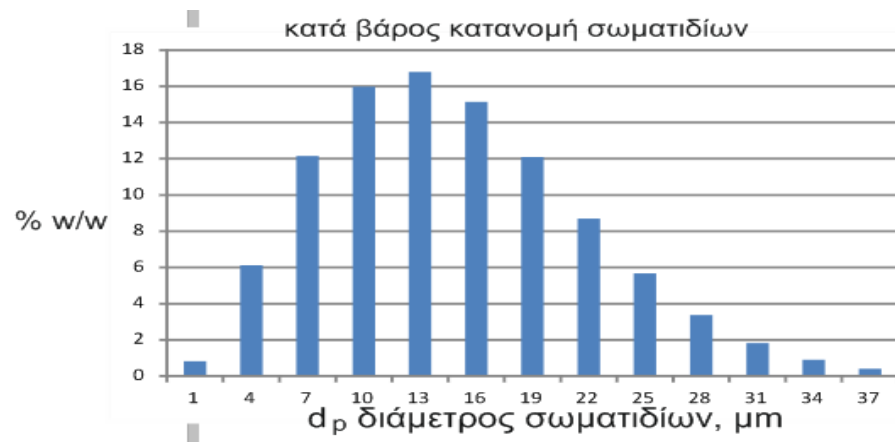
$$n_p = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_p}\right)^2}$$

d _p	w/w	απόδοση	% w/w σωματιδίων	νέα κατανομή σωματιδίων
μm	%	n	Που παρέμειναν	% w/w
	(α)	(β)	γ = (1-β)·α	δ = γ·100/Σγ
1	0,40	0,0039	0,3958	0,8227
4	3,13	0,0588	2,9447	6,1209
7	6,97	0,1607	5,8514	12,1631
10	10,69	0,2809	7,6908	15,9864
13	13,42	0,3976	8,0840	16,8040
16	14,57	0,5000	7,2871	15,1474
19	14,02	0,5851	5,8190	12,0957
22	12,09	0,6541	4,1833	8,6955
25	9,39	0,7094	2,7288	5,6722
28	6,58	0,7538	1,6206	3,3686
31	4,17	0,7896	0,8769	1,8228
34	2,38	0,8187	0,4321	0,8982
37	1,23	0,8425	0,1936	0,4024
			Σύνολο Σγ = 48,108	

Από την στήλη γ του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η απόδοση του 1^{ου} κυκλώνα είναι: **n₁=100-48,108 =51,89%**

Βήμα 5° : Έχοντας την νέα κατανομή των σωματιδίων από την στήλη δ του παραπάνω πίνακα προχωρούμε με παρόμοιο τρόπο των βημάτων 1, 2, 3 και 4 και σχεδιάζουμε τον 2^ο σε σειρά κυκλώνα:
Κατασκευάζουμε την αθροιστική κατά βάρος κατανομή των σωματιδίων και υπολογίζουμε το d_{50} :

Διάμετρος σωματιδίων	Κατά βάρος κατανομή σωματιδίων	Αθροιστική κατά βάρος κατανομή
d_p μm	% w/w	Σ (% w/w)
1	0,822	0,822
4	6,120	6,9436
7	12,163	19,106
10	15,986	35,09
$d_{50}=13$	16,804	51,897
16	15,147	67,044
19	12,095	79,140
22	8,695	87,83
25	5,672	93,507
28	3,36	96,876
31	1,822	98,699
34	0,898	99,597
37	0,402	100



Από την αθροιστική κατανομή προκύπτει ότι $d_{50} = 13 \mu$

Υπολογίζουμε τις διαστάσεις του τυπικού αεριοκυκλώνα:

$$D_2 = 3,2 \cdot d_{50}^{2/3} \cdot Q_g^{1/3} \cdot \rho_p^{1/3} \cdot \mu^{-1/3}$$

Οπου:

$$d_{50} = 13 \cdot 10^{-6}, \text{ m}$$

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

παροχή απαερίων

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

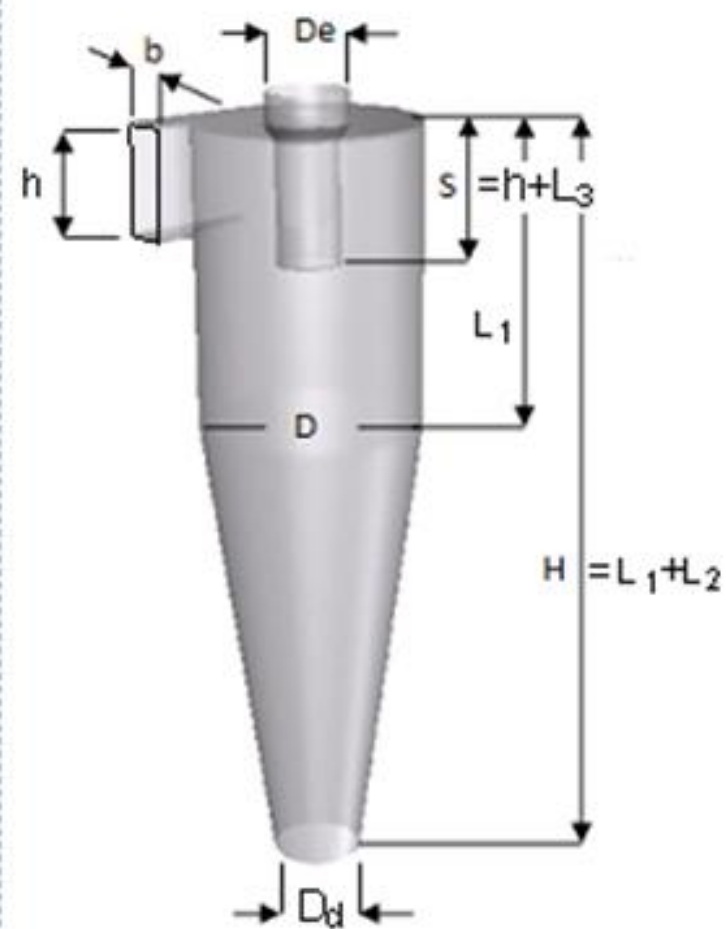
πυκνότητα σωματιδίων

$$\mu = 1.73519 \cdot 10^{-5} \cdot ((T_g + 273)/273)^{0.768} = 2.1138 \text{ kg/m-s}$$

ιξώδες απαερίων

Επομένως η διάμετρος του 2^{ου} αεριοκυκλώνα είναι: $D_2 = 4.16 \text{ m}$

$D=$	4.16	m
$b=$	1,04	m
$h_1=$	2,08	m
$A_1=$	2,16	m ²
$L_1=$	8,32	m
$L_2=$	8,32	m
$D_e=$	2,08	m
$D_d=$	1,04	m
$s=$	0,52	m
$H=$	16,64	m



Υπολογίζουμε την απόδοση του κυκλώνα για κάθε διάμετρο σωματιδίου

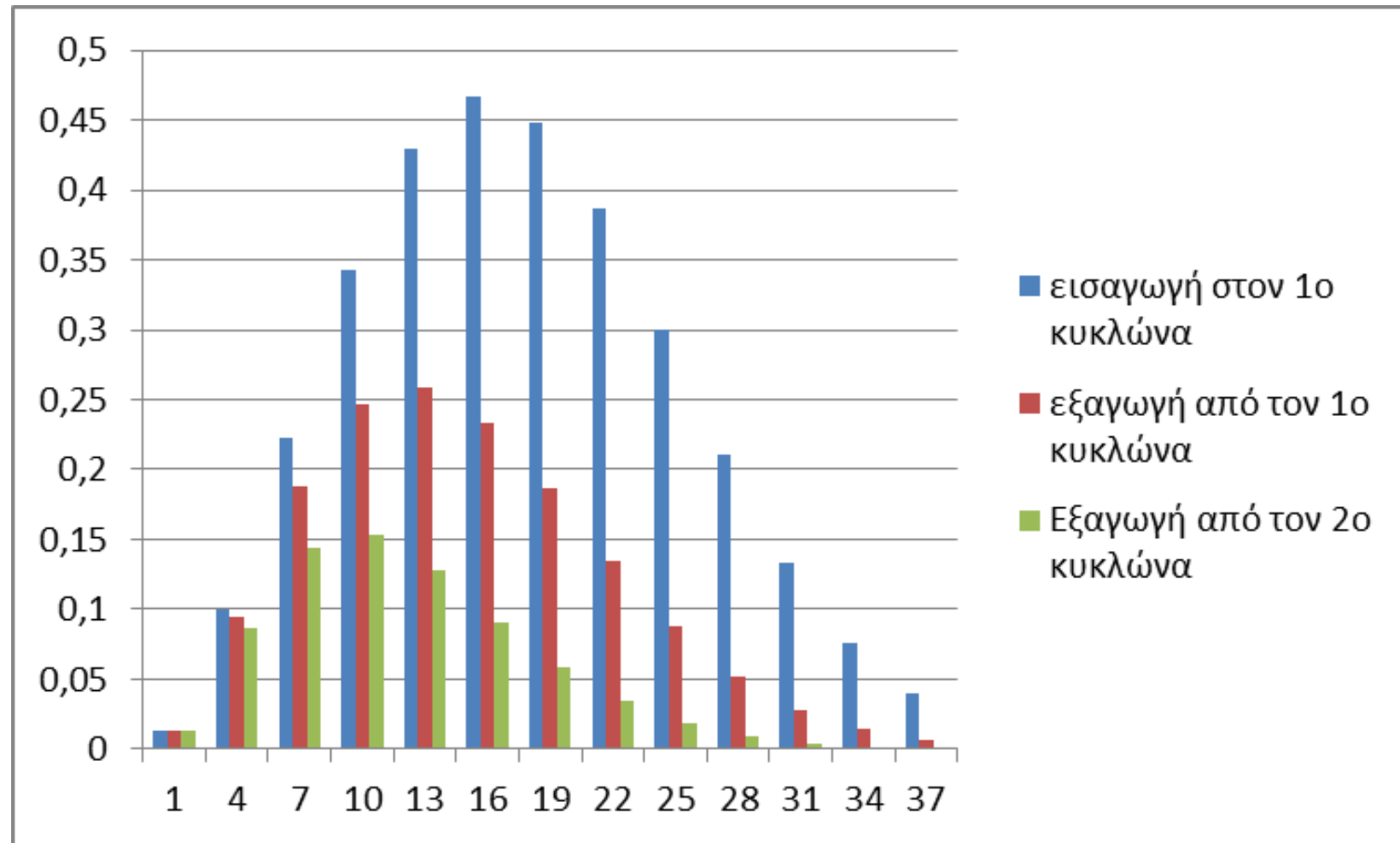
d_p	w/w	απόδοση	% w/w σωματιδίων	νέα κατανομή σωματιδίων
μm	%	n	Που παρέμειναν	% w/w
	(α)	(β)	$\gamma = (1-\beta) \cdot \alpha$	$\delta = \gamma \cdot 100 / \Sigma \gamma$
1	0,822	0,0060	0,8176	0,393
4	6,120	0,0889	5,5763	2,6826
7	12,16	0,2302	9,3629	4,5043
10	15,98	0,3790	9,9272	4,775
13	16,80	0,5077	8,271	3,9793
16	15,14	0,6097	5,9111	2,8437
19	12,09	0,6878	3,7759	1,8165
22	8,69	0,7470	2,1991	1,0579
25	5,67	0,7923	1,178	0,5667
28	3,36	0,8271	0,5822	0,2801
31	1,82	0,8543	0,26550	0,1277
34	0,89	0,8758	0,1114	0,0536
37	0,40	0,8931	0,0430	0,020
			Σύνολο $\Sigma \gamma = 48,01$	

Από την στήλη γ του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η απόδοση του 2ου κυκλώνα είναι:
 $n_2 = 100 - 48,021 = 51,98\%$

Επομένως η συνολική απόδοση και των δύο κυκλώνων είναι:

$$n_{\text{ολική}} = 51,89 + (100 - 51,89) \cdot 0,5198 = 76,89$$

Οι διαδοχικές κατανομές σωματιδίων από κυκλώνα σε κυκλώνα φαίνεται παραστατικά στο παρακάτω διάγραμμα:



Σακκόφιλτρα

(fabric filters ή baghouse filters)



Σακκόφιλτρα

(fabric filters ή baghouse filters)

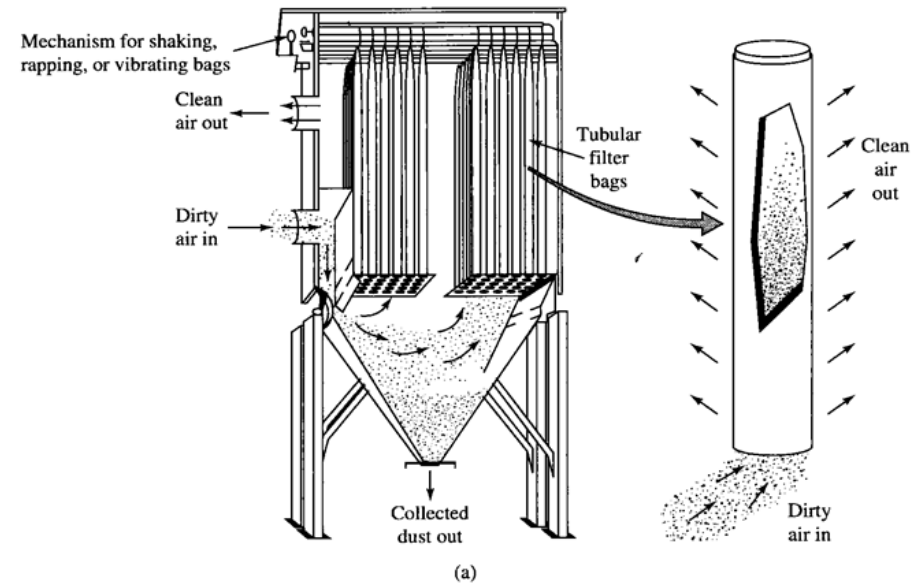
- Είναι ειδικά φίλτρα για τη συλλογή ξηρών σωματιδίων
- Κατά τη διέλευση του αερίου ρεύματος, τα σωματίδια δεσμεύονται πάνω στην επιφάνεια του σακκόφιλτρου, δημιουργώντας ένα **στρώμα σωματιδίων**, το οποίο στη συνέχεια λειτουργεί ως φίλτρο για την περαιτέρω συλλογή σωματιδίων μικρότερης διαμέτρου.
- Τα σακκόφιλτρα είναι κατασκευασμένα συνήθως από **ύφασμα**, αλλά μπορούν να κατασκευαστούν και από άλλα υλικά

Θερμοκρασιακή και χημική αντοχή συνήθων υφασμάτων

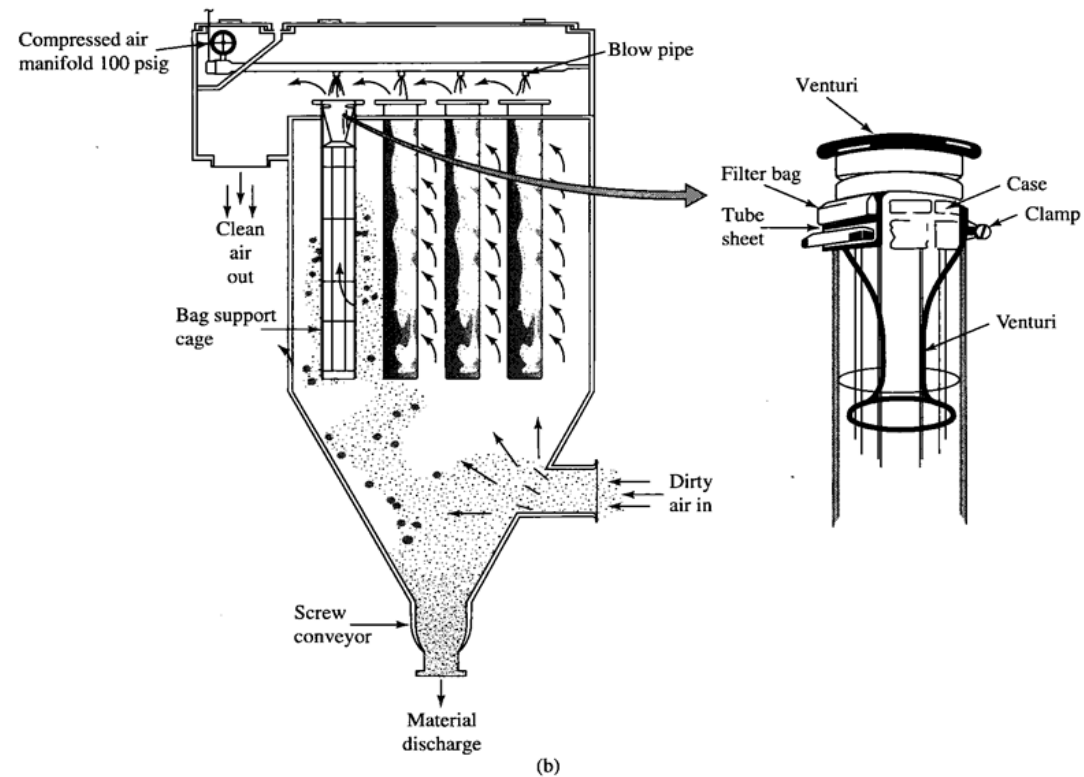
Υφασμα	Μέγιστη θερμοκρασία (°F)	Χημική αντοχή	
		Οξέα	Βάσεις
Dynel	160	καλή	καλή
Βαμβάκι	180	ανεπαρκής	καλή
Μαλλί	200	καλή	ανεπαρκής
Nylon	200	ανεπαρκής	καλή
Πολυπροπυλένιο	200	άριστη	άριστη
Orlon	260	καλή	επαρκής
Dacron	275	καλή	επαρκής
Nomex	400	επαρκής	καλή
Teflon	400	άριστη	άριστη
Γυαλί	550	καλή	καλή

- Συλλέγουν το μεγαλύτερο ποσοστό σωματιδίων με μέγεθος έως $0,5\mu\text{m}$ και αρκετά μεγάλο ποσοστό σωματιδίων με μέγεθος έως $0,1\mu\text{m}$.
- Η ταχύτητα φιλτραρίσματος κυμαίνεται από **0,46 έως 4,6m/min.**
- Καθώς τα σωματίδια κατακρατούνται η πτώση πίεσης αυξάνει, με αποτέλεσμα να αυξάνει και το λειτουργικό κόστος
- Ο καθαρισμός γίνεται με:
 - μηχανικό περιοδικό τίναγμα (δόνηση) των φίλτρων (Shaker) ή
 - αναστροφή του αέριου ρεύματος (Reverse Air) με παλμικά ακροφύσια .

(a) Σακκόφιλτρο
δόνησης
(Shaker)



(b) Σακκόφιλτρο
παλμικών
ακροφυσίων
(Pulse-jet)



Σχεδιασμός σακκόφιλτρων

Η ταχύτητα φιλτραρίσματος (μέση ταχύτητα εισόδου του αερίου στο φίλτρο) είναι ίση με το λόγο του ρυθμού ροής του αερίου προς την καθαρή επιφάνεια του φίλτρου:

$$v_f = \frac{Q}{A}$$

όπου v_f η ταχύτητα φιλτραρίσματος (m/min),

Q ο ρυθμός ροής του αερίου (m³/min) και

A η καθαρή επιφάνεια υφάσματος (m²).

Μέγιστες ταχύτητες φιλτραρίσματος για σακκόφιλτρα δόνησης (Shaker)

Είδος σωματιδίων	Μέγιστη ταχύτητα Φιλτραρίσματος (m/min)
Ενεργός άνθρακας, Μαύρος άνθρακας, Απορρυπαντικά, Ατμοί μετάλλων	0,46
Οξειδίο του αλουμινίου, Άνθρακας, Λιπάσματα, Γραφίτης, Σιδηρομεταλλεύματα, Ασβέστης, Χρωστικές ουσίες, Ιπτάμενη τέφρα, Βαφές	0,61
Αλουμίνιο, Άργιλος, Κωκ, Κάρβουνο, Κακάο, Οξειδίο του μολύβδου, Mica, Σάπωνες, Ζάχαρη, Τάλκης	0,69
Βωξίτης, Κεραμικά, Μεταλλεύματα Χρωμίου, Άλευρα, Πυρόλιθος, Γυαλί, Γύψος, Πλαστικά, Τσιμέντο	0,76
Αμύαντος, Ασβεστόλιθος, Χαλαζίας, Οξειδίο του πυριτίου	0,84
Σπόροι δημητριακών, Μάρμαρο, Γη διατόμων, Αλάτι	0,91 – 0,99
Δέρμα, Χαρτί, Φύλλα καπνού, Ξύλο	1,07

Μέγιστες ταχύτητες φιλτραρίσματος για σακκόφιλτρα με παλμικά ακροφύσια (Pulse-Jet)

Είδος σωματιδίων	Μέγιστη ταχύτητα Φιλτραρίσματος m/min)
Άνθρακας, Γραφίτης, Ατμοί μεταλλουργίας, Σάπωνες, Απορρυπαντικά, Οξείδιο του ψευδαργύρου	1,5 – 1,8
Τσιμέντο (κοινό), Άργιλος (κοινή), Πλαστικά, Χρωστικές ουσίες, Άμυλο, Ζάχαρη, Ψευδάργυρος (μεταλλικός)	2,1 – 2,4
Οξείδιο του αλουμινίου, Σκόνες τσιμέντου, Άργιλος (επεξεργασμένη), Ασβέστης, Ασβεστόλιθος, Γύψος, Mica, Χαλαζίας, Σόγια, Τάλκης	2,7 – 3,4
Κακάο, Σοκολάτα, Αλεύρι, Σπόροι, Σκόνη δέρματος, Πριονίδι, Φύλλα καπνού	3,7 – 4,3

Σημείωση: Εάν το φορτίο είναι πολύ μεγάλο ή τα σωματίδια πολύ μικρά, οι παραπάνω τιμές θα πρέπει να μειωθούν κατά 0,3m/min.

Υπολογισμός πτώσης πίεσης

Η πτώση πίεσης σε ένα φίλτρο αυξάνει με

- το χρόνο,
- την ταχύτητα v του αερίου
- τη συγκέντρωση των σωματιδίων c_0

Η ολική πτώση πίεσης μέσω του φίλτρου και του στρώματος των σωματιδίων που δημιουργείται για χρόνο λειτουργίας t ισούται τελικά με:

$$\Delta p_{ολ} = \Delta p_{φιλ} + \Delta p_{στρ} = K_1 \cdot v + K_2 \cdot c_0 \cdot v^2 \cdot t$$

όπου K_1 και K_2 σταθερές.

- Τιμές της K_1 μπορούν να δοθούν από τους κατασκευαστές ή από πειραματικά δεδομένα.
- Ο Calvert (1984) προτείνει την τιμή $K_1 = 350 \text{N} \cdot \text{min} \cdot \text{m}^{-3}$ σε περίπτωση έλλειψης δεδομένων.
- Η K_2 ονομάζεται *ειδική αντίσταση του στρώματος των σωματιδίων στο φίλτρο* (dust cake) και συνήθως εκφράζεται σε s^{-1} .
- Οι τιμές της K_2 ποικίλουν.
- Ακριβείς τιμές για κάθε περίπτωση μπορούν να ληφθούν μόνο από πειραματικά δεδομένα.

Τυπικές τιμές της ειδικής αντίστασης του στρώματος των σωματιδίων (K_2) για διαφορετικά είδη σωματιδίων

Εφαρμογή	$K_2 \text{ (s}^{-1}\text{)}$
Alumina	$1,89 \times 10^3$
Asphalt	$1,70 \times 10^4$
Calcium sulfate	$4,02 \times 10^3$
Carbon black	$4,93 \times 10^5$
Cement	$1,2 - 7,01 \times 10^5$
Copper	$1,5 - 6,5 \times 10^5$
Dolomite	$6,72 \times 10^6$
Electric furnace	$0,45 - 7,14 \times 10^6$
Flour	$4,3 \times 10^4$
Fly ash	$0,72 \times 10^5$
Foundry dust	$6 \times 10^3 - 1,2 \times 10^6$
Gypsum	$0,63 - 1,9 \times 10^5$
Iron oxide	$3 \times 10^4 - 7,14 \times 10^6$
Lead oxide	$5,7 \times 10^5$
Lime kiln	9×10^4
Milk powder	$4,5 \times 10^4$
Oats	$1,5 \times 10^4$
Pigments	$2,28 - 2,88 \times 10^4$
Soap	$1,62 - 3,12 \times 10^4$
Tobacco	$3,6 \times 10^5$
Zinc	$0,7 - 5,01 \times 10^5$
Zinc oxide	$1,84 - 4,0 \times 10^5$

Αριθμός διαμερισμάτων συναρτήσει της καθαρής επιφάνειας υφάσματος

Καθαρή επιφάνεια υφάσματος (m ²)	Αριθμός διαμερισμάτων
0,1 – 400	2
400 – 1.100	3
1.100 – 2.300	4 - 5
2.300 – 3.700	6 - 7
3.700 – 5.600	8 - 10
5.600 – 7.400	11 - 13
7.400 – 10.200	14 - 16
10.200 – 13.900	17 - 20
> 13.900	> 20

Σημείωση: Η καθαρή επιφάνεια υφάσματος ισούται με τον λόγο της ογκομετρικής παροχής προς την ταχύτητα φιλτραρίσματος και αντιστοιχεί σε εκείνα τα τμήματα της επιφάνειας των φίλτρων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, με εξαίρεση αυτά που δεν λειτουργούν λόγω συντήρησης.

Εάν υπάρχουν N διαθέσιμα διαμερίσματα σακκόφιλτρων σε όλη την εγκατάσταση

ο **συνολικός χρόνος φιλτραρίσματος** t_f για ένα διαμέρισμα πριν αυτό σταματήσει για τον επόμενο καθαρισμό του (αφού ήδη έχουν υποστεί καθαρισμό διαδοχικά όλα τα υπόλοιπα διαμερίσματα) θα είναι ίσος με:

$$t_f = t_c \cdot (N - 1)$$

- Ο χρόνος καθαρισμού κάθε διαμερίσματος t_c μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως 5min
- Ο συνολικός χρόνος λειτουργίας ενός διαμερίσματος μεταξύ δύο διαδοχικών καθαρισμών του t_f κυμαίνεται από 30min έως 2h.

Άσκηση

Υπολογίστε την απαιτούμενη επιφάνεια υφάσματος συστήματος σακκόφιλτρων τινάγματος (Shaker), το οποίο επεξεργάζεται $1.100\text{m}^3/\text{min}$ αέρα που περιέχει σκόνη βιομηχανικής αλεύρου.

Καθορίστε επίσης τον αριθμό των διαμερισμάτων καθώς και τον αριθμό των σάκκων που χρειάζονται, εάν γνωρίζετε ότι κάθε σάκος έχει μήκος $2,4\text{m}$ και διάμετρο $0,15\text{m}$.

Λύση

Η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα φιλτραρίσματος για τα σακκόφιλτρα τινάγματος στην περίπτωση αλεύρου είναι:

$$v = 0,76 \text{ m/min}$$

Επομένως, η καθαρή επιφάνεια του υφάσματος του φίλτρου ισούται με:

$$A = Q/v = (1100 \text{ m}^3/\text{min}) / (0,76 \text{ m/min}) = 1447 \text{ m}^2$$

Για 1447 m^2 καθαρή επιφάνεια υφάσματος, επιλέγεται η χρήση 5 διαμερισμάτων, με 290 m^2 στο καθένα. Η επιφάνεια κάθε σάκου ισούται με:

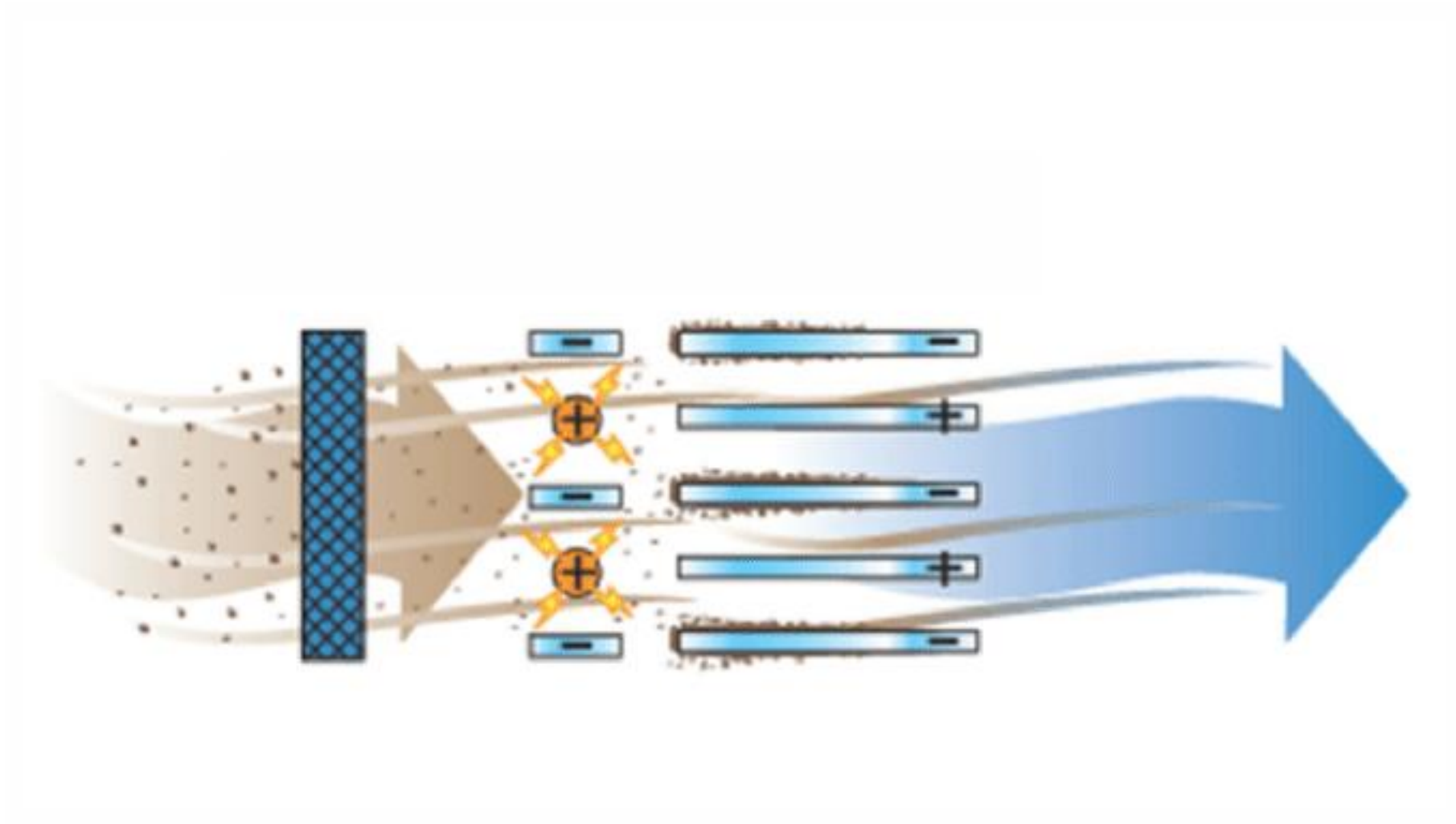
$$\pi \cdot d \cdot l = \pi \cdot 0,15 \text{ m} \cdot 2,4 \text{ m} = 1,13 \text{ m}^2$$

Άρα, ο απαιτούμενος αριθμός σάκων είναι:

$$N = (1447 \text{ m}^2) / (1,13 \text{ m}^2) = 1280 \text{ σάκοι}$$

Τοποθετούμε 256 σάκους σε κάθε διαμέρισμα.

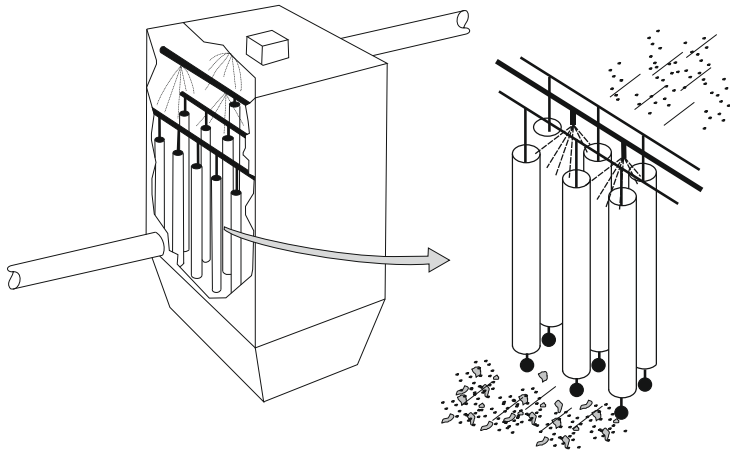
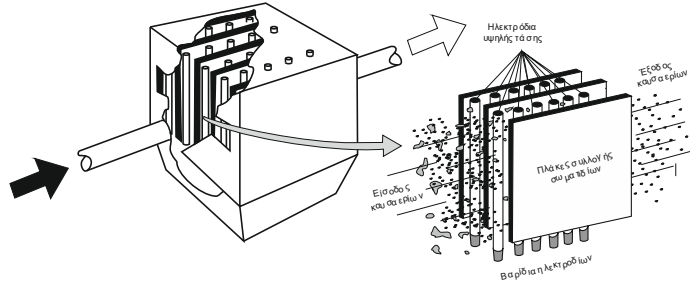
Ηλεκτροστατικά φίλτρα



Ηλεκτροστατικά φίλτρα

- Τα ηλεκτρόφιλτρα ή ηλεκτροστατικά φίλτρα ή ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (electrostatic precipitators) κατακρατούν τα αιωρούμενα σωματίδια ανεξάρτητα από το μέγεθός τους.
- Είναι ιδιαιτέρως κατάλληλα για την κατακράτηση υγρών σωματιδίων.
- Θεωρούνται ως η πιο αποτελεσματική μέθοδος κατακράτησης σωματιδίων, αλλά έχουν μεγάλο κόστος κατασκευής και λειτουργίας.

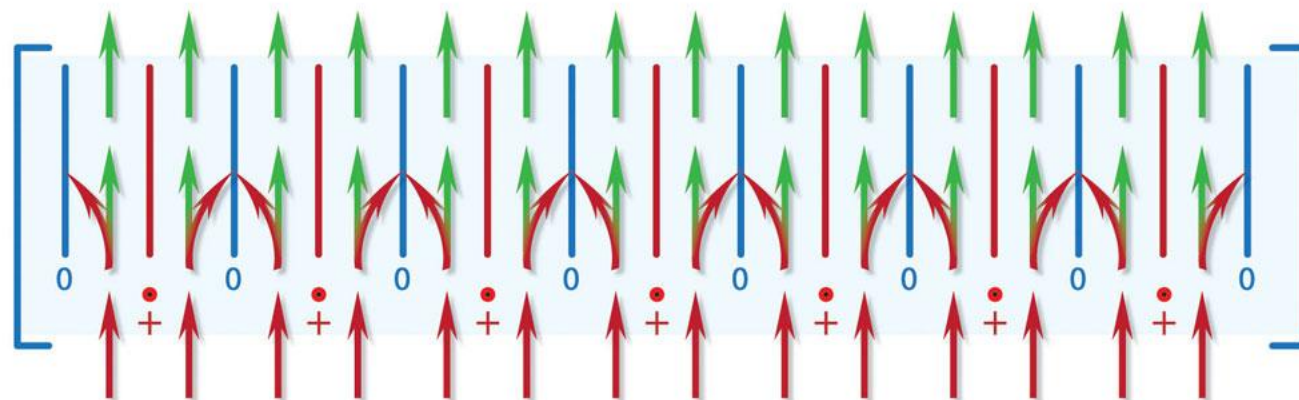
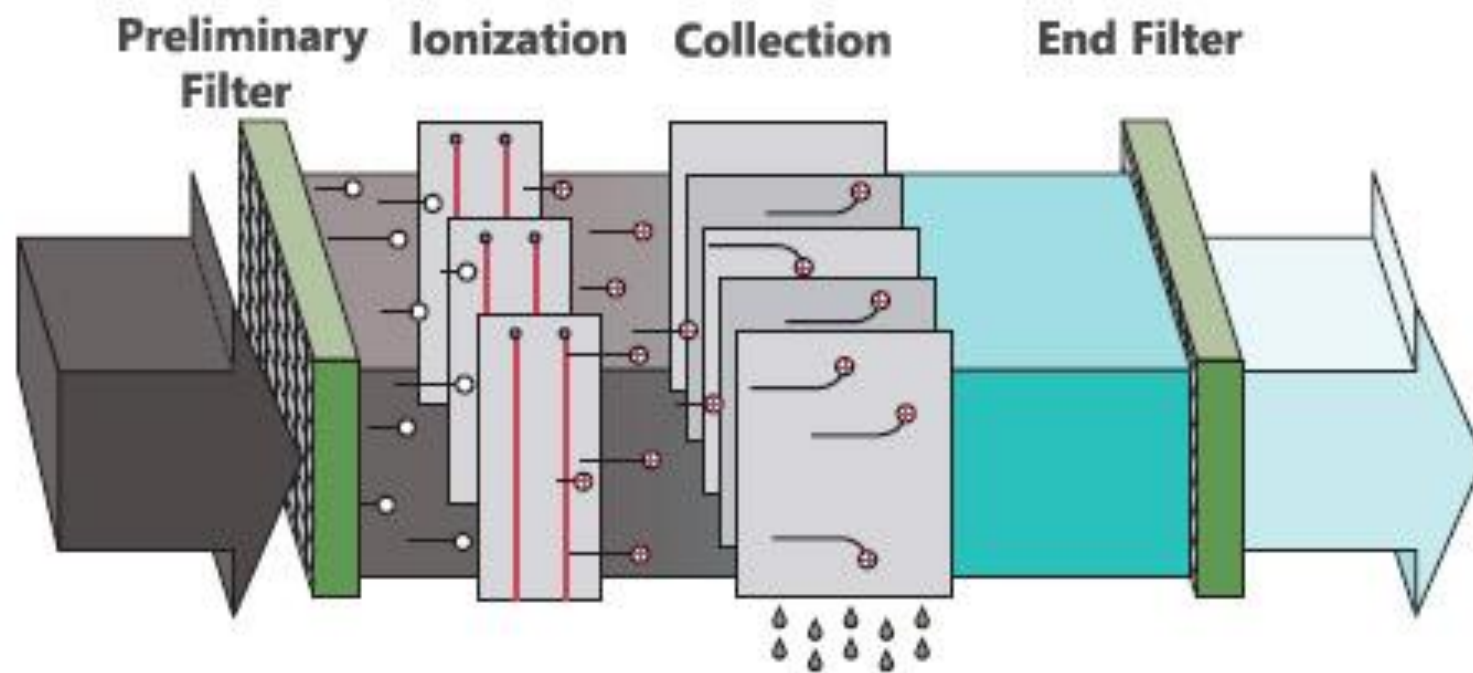
Ηλεκτροστατικά φίλτρα ή Ηλεκτρόφιλτρα



- Χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση σωματιδίων διαμέτρου μέχρι $0,1 \mu\text{m}$ με απόδοση 95-99%.
- Τα υλικά που συγκρατούνται, συλλέγονται σε υποδοχείς και απομακρύνονται περιοδικά.
- Οι απομακρυνόμενοι ρύποι μπορεί να είναι σκόνη, ελαιώδες νέφος ατμοσφαιρικού αέρα, ιπτάμενη τέφρα, πίσσα και όξινη ομίχλη.
- Εφαρμόζονται συχνά ως 2^ο στάδιο απομάκρυνσης σωματιδίων μετά από κυκλώνες, σε διεργασίες διακίνησης υλικών κατά την οποία παράγεται λεπτόκκοκη σκόνη καθώς και σε απαέρια κλιβάνων και ξηραντήρων υψηλής θερμοκρασίας.

Αρχή λειτουργίας

- Τα ηλεκτρόφιτρα αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια
- Το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι συνήθως ένα λεπτό σύρμα και ονομάζεται **ηλεκτρόδιο εκκένωσης**.
- Το θετικό ηλεκτρόδιο ονομάζεται **ηλεκτρόδιο συλλογής** και έχει μεγάλη επιφάνεια και συνήθως σχήμα πλάκας ή κυλίνδρου (σωλήνα).
- Ανάμεσα στα ηλεκτρόδια αναπτύσσεται **ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο** (20.000 – 90.000V).
- τα αέρια μόρια φορτίζονται αρνητικά (μέσω σπινθήρα κορώνας) και κατευθύνονται προς το ηλεκτρόδιο συλλογής, συμπαρασύροντας και αιωρούμενα σωματίδια πάνω στα οποία προσκολλώνται φορτίζοντάς τα αρνητικά.
- Τα φορτισμένα σωματίδια προσκολλώνται στο ηλεκτρόδιο συλλογής.
- Στη συνέχεια τα σωματίδια αποφορτίζονται και συλλέγονται



Ηλεκτροστατικά φίλτρα ή Ηλεκτρόφιλτρα

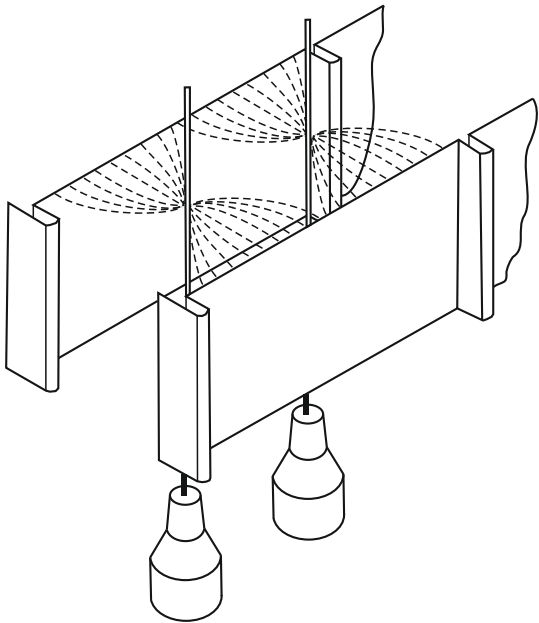
Η απόδοσή τους επηρεάζεται από:

- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πλακών συλλογής
- την μεταξύ τους απόσταση
- την ταχύτητα διέλευσης των αερίων
- την ταχύτητα παράσυρσης των σωματιδίων που έχουν επικαθήσει στις πλάκες
- την εφαρμοζόμενη τάση
- την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου
- το ρεύμα Corona
- την παροχή του αερίου
- την πίεση και την θερμοκρασία του αερίου
- τη συγκέντρωση ($<0.1 \text{ g/m}^3$ για χαμηλή τάση και $1-2 \text{ g/m}^3$ για υψηλή τάση)
- το ειδικό βάρος και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων
- την ηλεκτραγωγιμότητα των σωματιδίων (10^7 έως 10^{11} Ohms/cm).

Ηλεκτροστατικά φίλτρα ή Ηλεκτρόφιλτρα

Πλεονεκτήματα :

- η ικανότητά τους να συγκρατούν πολύ μικρών διαστάσεων σωματίδια, την συλλογή ξηράς σκόνης από την οποία μπορούν να ανακτηθούν προϊόντα και παραπροϊόντα
- μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι και 535°C
- μπορούν να επεκταθούν εύκολα
- μπορούν να συνδυαστούν με άλλες μονάδες αντιρρύπανσης
- έχουν χαμηλή πτώση πίεσης του διερχόμενου αερίου (13 mm H₂O περίπου)
- έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος.



Μειονεκτήματα:

- υψηλό κόστος εγκατάστασης
- σχετικά σημαντικό κόστος λειτουργίας λόγω ενεργειακής κατανάλωσης (26.3 kw/1000 m³/min).

Μέθοδος	Μέγεθος Σωματιδίων (μm)	Απόδοση (%)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ηλεκτρόφιλτρα	< 1	95 – 99	- Επεξεργασία μεγάλου όγκου αερίων με μικρή πτώση πίεσης - Πολύ υψηλές αποδόσεις ακόμα και για πολύ μικρά σωματίδια - Δυνατότητα ξηρής συλλογής χρήσιμων υλών ή υγρής συλλογής αιθάλης και ομίχλης - Λειτουργία σε ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών - Χαμηλό κόστος λειτουργίας, όταν δεν απαιτείται πολύ υψηλή απόδοση	- Υψηλό κόστος κεφαλαίου - Σχετικά άκαμπτα σε αλλαγές των συνθηκών λειτουργίας - Μη δυνατότητα ελέγχου αέριων ρύπων - Μεγάλες απαιτήσεις χώρου - Πιθανότητα αποτυχίας στην περίπτωση σωματιδίων με πολύ υψηλή ηλεκτρική αντίσταση

Σχεδιασμός ηλεκτρόφιλτρων

Η απόδοση ενός ηλεκτρόφιλτρου δίνεται από την εξίσωση Anderson-Deutsch:

$$n = 1 - e^{-\frac{v \cdot A}{Q}}$$

- όπου n η απόδοση του ηλεκτρόφιλτρου,
 Q ο ρυθμός ροής των αερίων αποβλήτων (m^3/s),
 A η επιφάνεια των ηλεκτροδίων συλλογής (m^2)
 v η ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής (m/s).

Η ταχύτητα κίνησης (v) των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής:

$$v = \frac{q \cdot V}{6 \cdot \pi \cdot R \cdot \mu}$$

όπου:

q το φορτίο των σωματιδίων (C),

R η ακτίνα των σωματιδίων (m),

V το δυναμικό του πεδίου (V/m) και

μ το ιξώδες των αερίων αποβλήτων (kg/m s).

Η πραγματική ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής κυμαίνεται μεταξύ 0,04 και 0,2m/s

Πραγματικές ταχύτητες κίνησης σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια σε ηλεκτροστατικά φίλτρα

Εφαρμογή	Ταχύτητα κίνησης σωματιδίων (cm/s)
Ιπτάμενη τέφρα από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	4,0 – 20,4
Ιπτάμενη τέφρα κονιοποιημένου άνθρακα	10,1 – 13,4
Εργοστάσια χαρτοπολτού και χαρτοποιίας	6,4 – 9,5
Ατμοί θειικού οξέος	5,8 – 7,62
Τσιμέντο (υγρή επεξεργασία)	10,1 – 11,3
Τσιμέντο (ξηρή επεξεργασία)	6,4 – 7,0
Γύψος	15,8 – 19,5
Χυτήρια	1,8
Κλίβανος ανοιχτής εστίας	4,9 – 5,8
Υψικάμινος	6,1 – 14,0
Θερμός φώσφορος	2,7
Κλίβανος σπινθήρα (flash roaster)	7,6
Κλίβανος πολλαπλών εστιών	7,9
Σκόνη καταλύτη	7,6
Cupola	3,0 – 3,7

Το συνολικό πλάτος του καθαριστήρα εξαρτάται από το **πλήθος των καναλιών** που περιλαμβάνει:

$$N_d = \frac{Q}{vdH}$$

όπου N_d το πλήθος των καναλιών, ίσο με $n-1$,

όπου n ο αριθμός των παράλληλων πλακών

Q ο συνολικός ρυθμός ροής του αερίου στο φίλτρο (m^3/min),

v η γραμμική ταχύτητα του αερίου μέσα στο φίλτρο (m/min),

d το πλάτος ενός καναλιού (η απόσταση μεταξύ δύο πλακών) (m)

H το ύψος της πλάκας (m)

Το **συνολικό μήκος** του καθαριστήρα δίνεται από την εξίσωση:

$$L = N_s L_p + (N_s - 1)L_s + L_0 + L_e$$

όπου: L το συνολικό μήκος (m),

N_s ο αριθμός των ηλεκτρικών τμημάτων στην διεύθυνση της ροής

L_p το μήκος της πλάκας (m),

L_s η απόσταση μεταξύ των ηλεκτρικών τμημάτων (m),

L_0 το μήκος του τμήματος εισόδου (m)

L_e το μήκος του τμήματος εξόδου (m).

Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτρικών τμημάτων είναι συνήθως 0,5 – 2m, ενώ το μήκος του τμήματος εισόδου και εξόδου μπορεί να είναι μερικών μέτρων.

Ο αριθμός των ηλεκτρικών τμημάτων του φίλτρου στη διεύθυνση της ροής πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε να παρέχει επαρκή επιφάνεια συλλογής, χωρίς να υπερβαίνει όμως κατά πολύ την επιθυμητή τιμή

Ο **αριθμός των τμημάτων** στην διεύθυνση της ροής (ακέραιος) μπορεί να υπολογιστεί από:

$$N_s = \frac{RH}{L_p}$$

όπου R ο λόγος του συνολικού μήκους των πλακών προς το ύψος της κάθε πλάκας

Η **πραγματική επιφάνεια συλλογής** (m²) υπολογίζεται από:

$$A_a = 2HL_p N_s N_d$$

Η **κατανάλωση ενέργειας** σε ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο σχετίζεται κυρίως με την ενέργεια της κορώνας και, κατά δεύτερο λόγο, με την πτώση πίεσης.

Η ισχύς κορώνας που απαιτείται υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$n = 1 - e^{(-kP_c/Q)}$$

όπου n η απόδοση του φίλτρου,

P_c η ισχύς κορώνας (W),

k μία προσαρμόσιμη σταθερά η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0,5 – 0,7

Q ο ρυθμός ροής του αερίου (ft³/s).

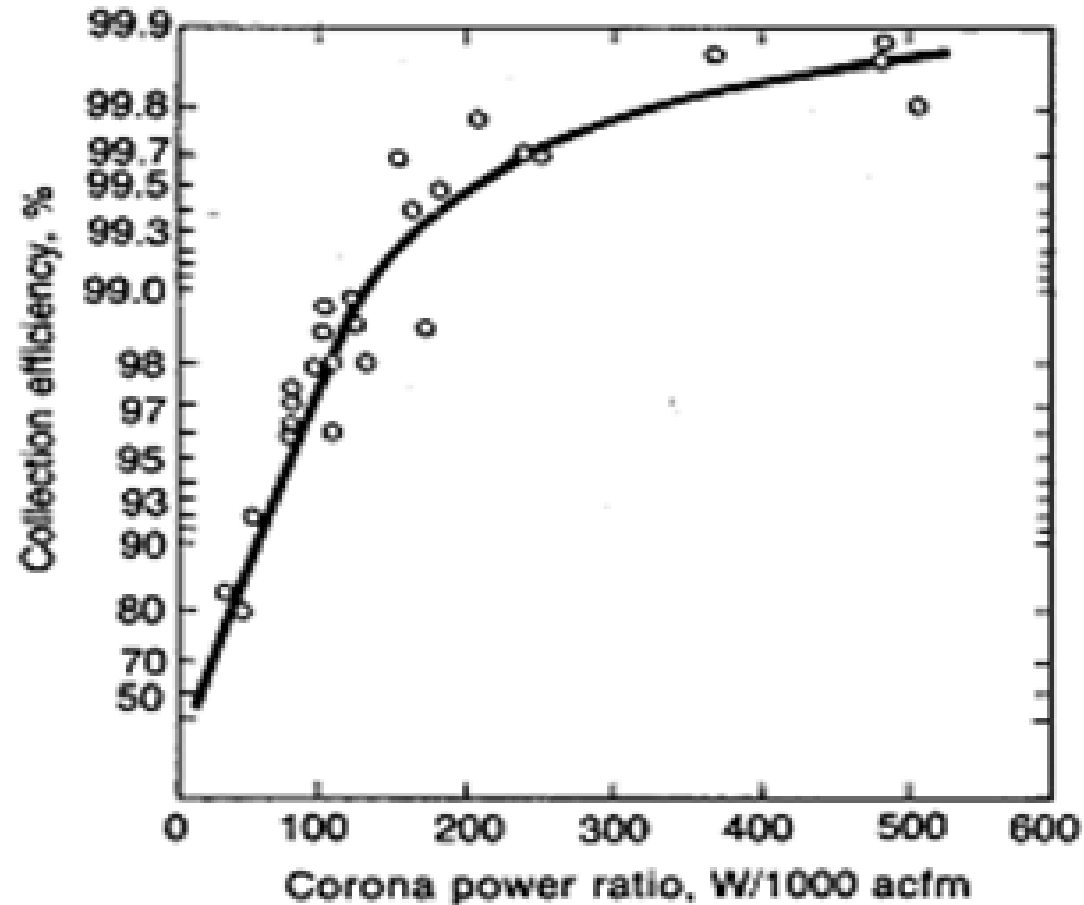
$$(1\text{m}^3 = 35,3\text{ft}^3)$$

Για αποδόσεις μέχρι και 98,5%, έχει αποδειχθεί ότι $k = 0,55$

(για τις μονάδες που δίνονται παραπάνω).

Για μεγαλύτερες αποδόσεις, η απαιτούμενη ενέργεια κορώνας βρίσκεται από το Σχήμα.

Απόδοση ηλεκτροστατικού φίλτρου συναρτήσει του λόγου ισχύος κορώνας



Τυπικές τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού ηλεκτροστατικού φίλτρου κατακράτησης ιπτάμενης τέφρας.

Παράμετρος	Τυπικές τιμές
Οριακή ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων $v_{p,ορ}$	1 – 10 m/min
Πλάτος καναλιού d	15 – 40 cm
Ειδική επιφάνεια συλλογής (επιφάνεια πλάκας/ρυθμό ροής αερίου)	0,25–2,1 $m^2/(m^3/min)$
Ταχύτητα αερίου v	1,2 – 2,5 m/s
Διαστάσεις καναλιού (συνολικό μήκος/ύψος καναλιού) R	0,5–1,5 (>1 για $n > 99\%$)
Λόγος ισχύος της κορώνας P_c/Q (ισχύς κορώνας/ρυθμό ροής αερίου)	1,75–17,5 $W/(m^3/min)$
Λόγος έντασης ρεύματος της κορώνας I_c/A (ένταση ρεύματος κορώνας/επιφάνεια πλάκας)	50 – 750 $\mu A/m^2$

Άσκηση

Ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο πρόκειται να εγκατασταθεί για την απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων από τα αέρια απόβλητα μονάδας παραγωγής τσιμέντου, η οποία εκπέμπει με ρυθμό $50\text{m}^3/\text{s}$.

Η ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής υπολογίζεται ίση με $0,12\text{m/s}$.

Να υπολογιστεί η απαιτούμενη επιφάνεια συλλογής του ηλεκτροστατικού φίλτρου

(α) για απόδοση 90%, και

(β) για απόδοση 99%.

Λύση

Η απόδοση δίνεται από την εξίσωση Anderson-Deutsch:

$$n = 1 - e^{-\frac{v_{p,op} \cdot A}{Q}}$$

(α) Για $n = 90\%$, με αντικατάσταση έχουμε:

$$0,90 = 1 - e^{-\frac{0,12 A}{50}}$$

$$-A \frac{0,12}{50} = \ln(1 - 0,90)$$

$$A = -\frac{50}{0,12} \ln(0,10) = -416,7 \ln(0,1) = 959 \text{m}^2$$

(β) Για $n = 99\%$, με αντικατάσταση έχουμε

$$0,99 = 1 - e^{-\frac{0,12 A}{50}}$$

$$-A \frac{0,12}{50} = \ln(1 - 0,99)$$

$$A = -\frac{50}{0,12} \ln(0,01) = -416,7 \ln(0,01) = 1919 \text{m}^2 = 2 \cdot 959 \text{m}^2$$