



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

MM900

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΣΗΣ

2^η ΕΝΟΤΗΤΑ, Μέρος 2 Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές

Νίκος Ανδρίτσος
Καθ. Τμ. Μηχ. Μηχ. Π.Θ.





Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές ή «φίλτρα» (electrostatic precipitators, ESP)

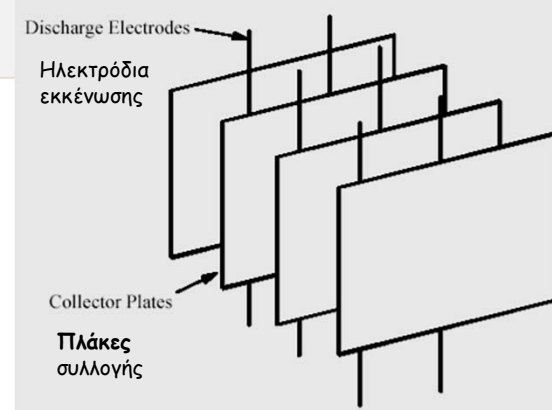
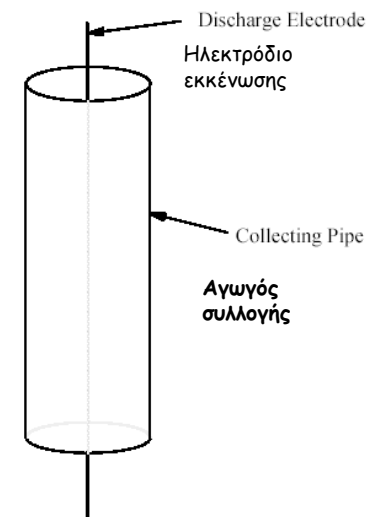
Η διεργασία περιλαμβάνει:

- Τον **ιονισμό** του ρυπασμένου αέριου ρεύματος με τη ροή του ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και τις πλάκες
- Τη **φόρτιση** (συνήθως αρνητική), **μετακίνηση** και **συλλογή** των σωματιδίων στις αντίθετα φορτισμένες πλάκες από το σύρμα
- Την απομάκρυνση των σωματιδίων από τις πλάκες («τινάζονται» ελαφρά - rapping ή ξεπλένονται και συγκεντρώνονται στη βάση)
- Οι δυνάμεις συλλογής δρουν μόνο πάνω στα σωματίδια και όχι σε ολόκληρο το αέριο ρεύμα.
- Αν και η διεργασία είναι δύο σταδίων (κάτι που συμβαίνει στους σπιτικούς ιονιστές αέρα), στη βιομηχανία τα δύο στάδια γίνονται συγχρόνως.



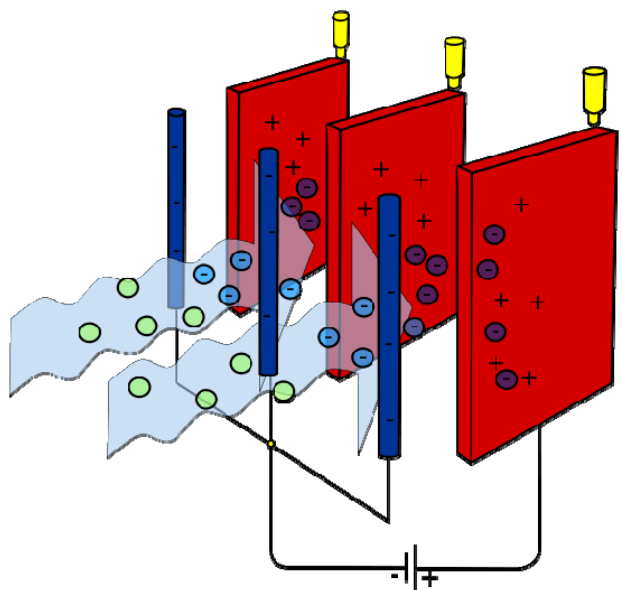
Τύποι ESP :

- Ξηρά ESP (κοινότερος)
- Υγρά ESP (κάποια πλεονεκτήματα, <math><80\text{ }^\circ\text{C}</math>)
- Συμπύκνωσης

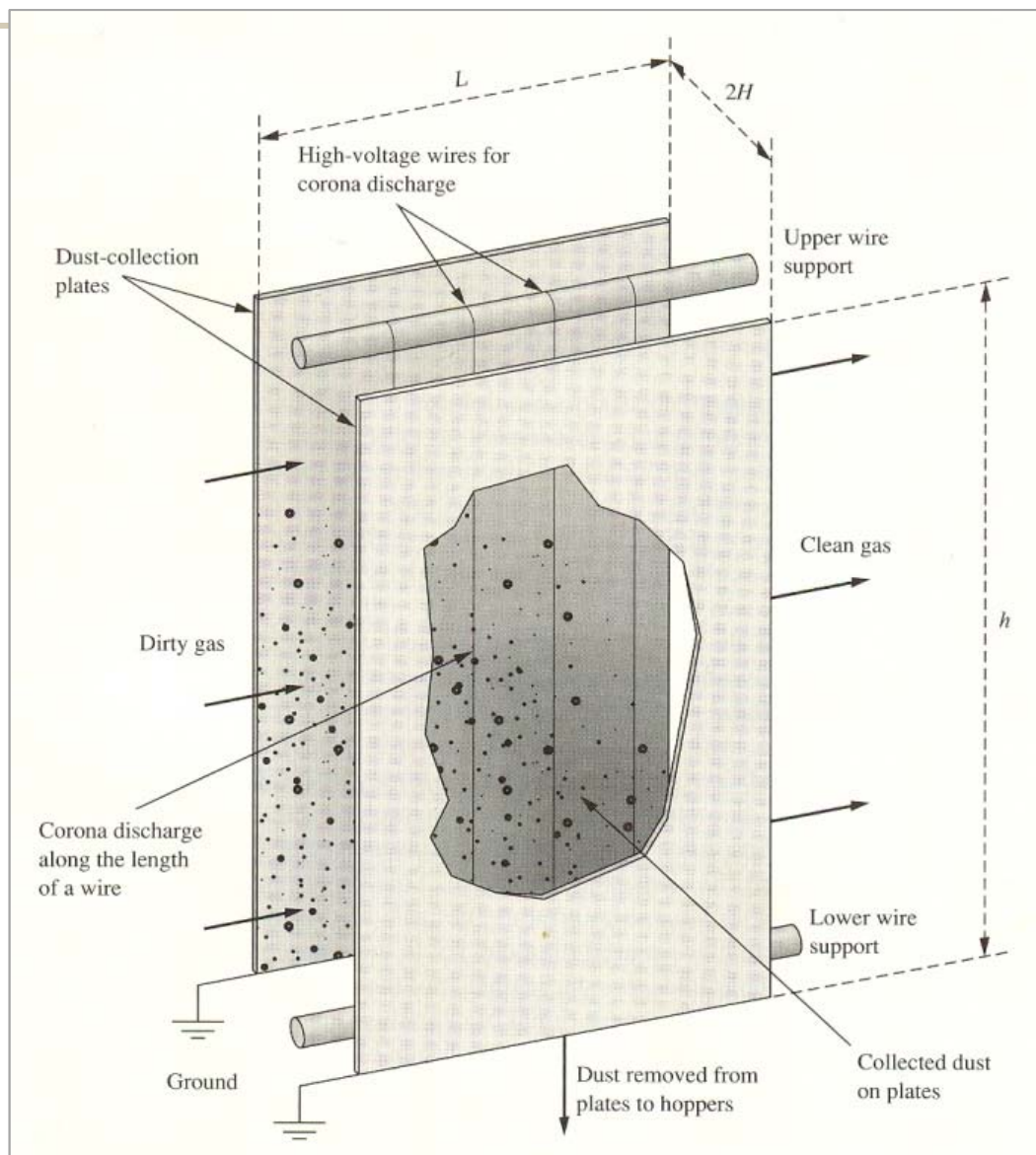




Ηλεκτροστατικοί κατακρημιστές



Διαγραμματικό σχεδιάγραμμα ενός απλοποιημένου ESP με δύο πλάκες, 4 σύρματα και ένα κανάλι ροής. Τα βιομηχανικά ESP αποτελούνται από πολλά κανάλια.

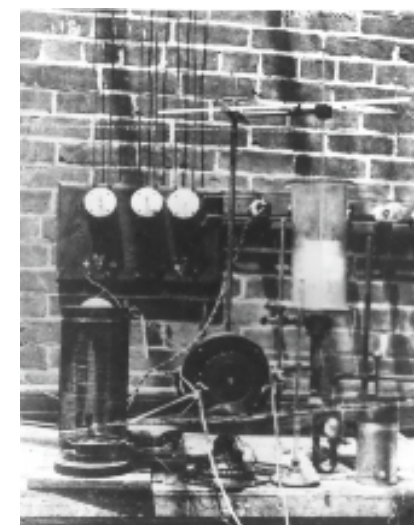




Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές

ΙΣΤΟΡΙΚΟ

- Πρώτες παρατηρήσεις ήδη από τις αρχές του 19ου αιώνα
- Αναπτύχθηκε αρχικά (το 1907) από τον F.G. Cottrell (Univ. of California, Berkeley) για τη συλλογή όξινων σταγονιδίων σε εργοστάσιο παραγωγής H_2SO_4 . Το πρώτο ESP: 100-200 acfm
- Σχεδόν με την έναρξη των μονάδων κονιοποιημένου άνθρακα στη δεκαετία του 1920, χρησιμοποιήθηκαν για τη δέσμευση της ιπτάμενης τέφρας (με απόδοση σχεδόν 90%). Βελτίωση από 99,5% στο 99,9% μειώνει τις εκπομπές (ως αριθμό σωματιδίων) κατά 80%



απόδοση	1935	95%
	1950	97-98%
	1975	99,5%
	Σήμερα	99,9%



- Στις Η.Π.Α. το 80% των μονάδων ESP σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με άνθρακα. Άλλες βιομηχανίες: χαρτοπολυτού (7%), τσιμέντου (3%), χαλυβουργεία (3%) κτλ.



Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (Ξηροί)

Πλεονεκτήματα

- Πολύ υψηλές αποδόσεις (>99%), ακόμη και για μικρά σωματίδια (0,01 μm - 100 μm)
- Επεξεργάζονται μεγάλους όγκους αέριων ρευμάτων (25 - 1500 m^3/s)
- Ξηρή συλλογή υλικών ή υγρή συλλογή για «καπνούς» και λεπτά σταγονίδια
- Ευρεία περιοχή θερμοκρασιών (μέχρι 650°C) και πίεσης λειτουργίας (10 atm)
- Λειτουργούν με υψηλές φορτίσεις, 500 g/m^3
- Χαμηλό ενεργειακό κόστος, 7-35 W/m^3
- Χαμηλή πτώση πίεσης





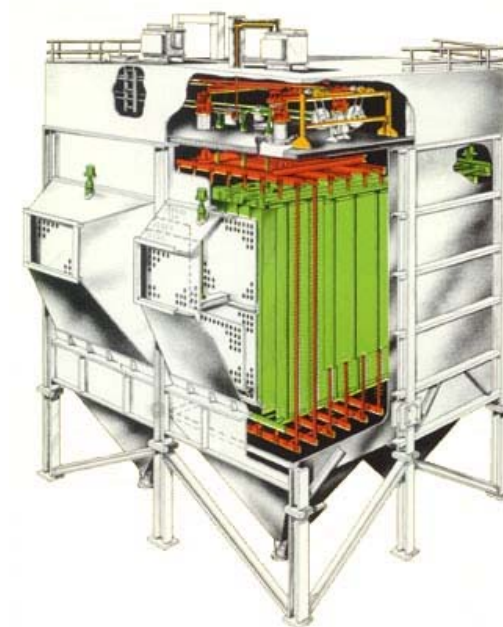
Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές

Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος επένδυσης
- Δεν μπορεί να γίνει ταυτόχρονος έλεγχος όξινων αερίων
- Όχι ιδιαίτερα ευέλικτοι σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας μετά την εγκατάστασή τους
- Καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο
- Δε λειτουργούν ικανοποιητικά με σωματίδια με πολύ υψηλή ηλεκτρική ειδική αντίσταση

Χρησιμοποιούνται όταν:

- Παράγονται μεγάλοι όγκοι σωματιδιακών εκπομπών
- Δεν προκύπτει κίνδυνος έκρηξης με τα σωματίδια
- Απαιτείται υψηλή απόδοση
- Απαιτείται συνεχής διεργασία





Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές

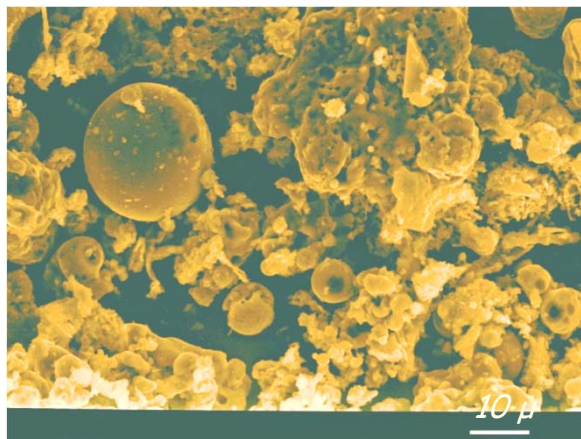
Βιομηχανίες και κύριοι ρύποι για τους οποίους χρησιμοποιούνται ESP

Διεργασία

Παραγωγή ηλεκτρ. ενεργ.
Βιομηχανικοί λέβητες
Φούρνοι χαλυβουργείων
Κλίβανοι τσιμέντου
Βιομ. χαρτοπολτού
Μηχανουργεία

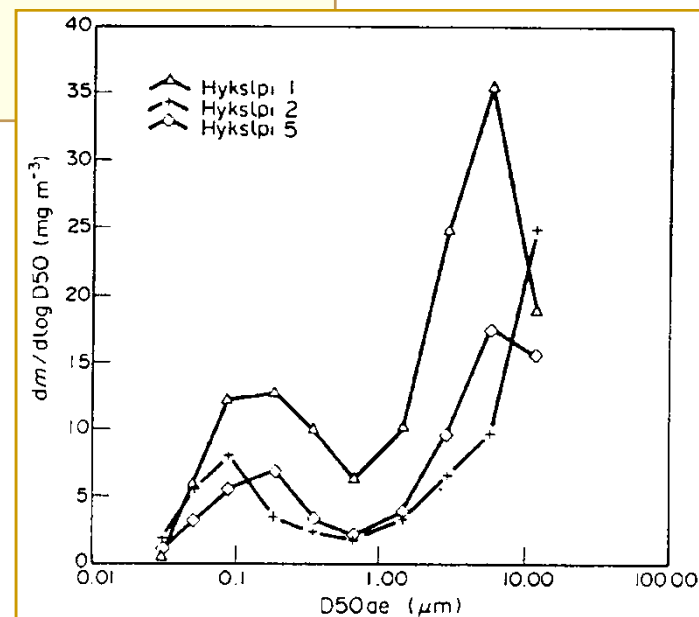
Κύριο Υλικό Συλλογής

Ιπτάμενη τέφρα (SiO_2 , Al_2O , Fe_2O_3)
Ιπτάμενη τέφρα
Οξειδία σιδήρου (Fe_2O_3)
 CaO , SiO_2
Θειικό νάτριο
Σταγονίδια ελαίου



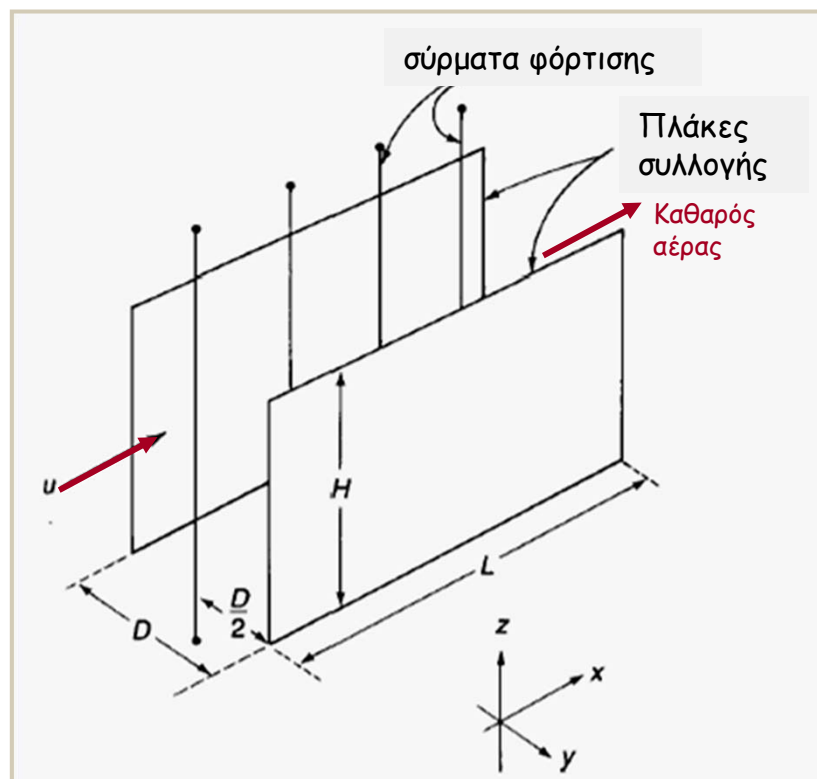
Φωτογραφία SEM
ιπτάμενης τέφρας
Πτολεμαΐδας

Κατανομή μεγέθους
ιπτάμενης τέφρας





Θεωρία



u = ταχύτητα αέριου ρεύματος-drift velocity (m/s)

H = ύψος πλάκας (m)

D = πλάτος καναλιού (m)

C = συγκέντρωση σωματ. ή φόρτιση (g/m^3)

Η πρώτη θεωρία αναπτύχθηκε από τον Deutsch το 1922 και τον Anderson το 1924.

Παραδοχές

- Το αέριο ρεύμα (με τα σωματ.) κινείται στη διεύθυνση x με ταχύτητα u (χωρίς ανάμιξη κατά μήκος)
- Τα σωματίδια είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στις y και z διευθύνσεις (σε κάθε x).
- Τα πεδία φόρτισης και συλλογής είναι σταθερά και ομοιόμορφα (Τα σωματίδια αποκτούν γρήγορα την οριακή ταχύτητα)
- Μηδενική επανείσοδος των σωματιδίων στη ροή.

Ισοζύγιο μάζας σε «φέτα» Δx (για το μισό κανάλι):
[ΕΙΣΟΔΟΣ] - [ΕΞΟΔΟΣ] = [ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ]

$$uH \frac{D}{2} C_x - uH \frac{D}{2} C_{x+\Delta x} = \text{mass removed}$$



Θεωρία (συν.)

Ωστόσο, η μάζα που απομακρύνεται είναι ίση με τη ροή των σωματιδίων στη διεύθυνση y επί την επιφάνεια που είναι κάθετη στη ροή ($H \cdot \Delta x$)

$$uH \frac{D}{2} (C_x - C_{x+\Delta x}) = w C_{x+\Delta x/2} (H \cdot \Delta x)$$

όπου w είναι η ταχύτητα πλαγιολίσθησης (drift velocity - οριακή ταχύτητα στη διευθ. y).

Διαιρώντας με το Δx και για $\Delta x \rightarrow 0$:

$$\frac{-uHD}{2} \frac{dC}{dx} = wCH \xrightarrow{\text{Από 0 μέχρι } L} \ln \left(\frac{C_L}{C_0} \right) = -\frac{2wHL}{uHD} = -\frac{wA_p}{Q}$$

όπου A_p η επιφάνεια μιας πλάκας (και οι δύο πλευρές, m^2) και Q η ογκομετρική παροχή του αέριου ρεύματος (m^3/s).

Για ολόκληρο το ESP μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη συνολική επιφάνεια A :

$$\frac{C_L}{C_0} = \exp \left[-\frac{wA}{Q} \right]$$



Θεωρία (συν.)

$$\frac{C_L}{C_o} = \exp \left[-\frac{w A}{Q} \right]$$

όπου

$$A = 2 \cdot H \cdot L \text{ (m}^2\text{)}$$

$$Q = u \cdot H \cdot D \text{ ογκομετρική παροχή (m}^3\text{/s)}$$

A/Q : Ειδική επιφάνεια συλλογής (specific collection area, SCA)

w = ταχύτητα πλαγιολίσθησης (drift velocity) (m/s)

- Εξίσωση Deutsch-Anderson για την κλασματική απόδοση συλλογής

$$\eta = 1 - \frac{C_L}{C_o} = 1 - \exp \left[-\frac{w A}{Q} \right]$$

Προσοχή: A , Q , w στο ίδιο σύστημα μονάδων

Πως μπορούμε να αυξήσουμε την απόδοση;



Θεωρία (συν.)

- Η (οριακή) ταχύτητα πλαγιολίσθησης, w , δίνεται από (να θυμηθούμε: $u_{\uparrow} = \tau g$):

$$w = \tau F_E$$

όπου F_E = ηλεκτροστατική δύναμη ανά μονάδα μάζας στο σωματίδιο (σε N/kg). Μπορεί να είναι και 3000 φορές μεγαλύτερη από την $F_{gravity}$ για σωματίδιο 1 μm .

τ = χαρακτηριστικός χρόνος (s), διορθωμένος ως προς τον συντελεστή Cunningham, C_c (=1 για σωματίδια της τάξης του 1-5 μm) [slip corrected relaxation time]

$$\tau = \frac{C_c \rho_p d_p^2}{18 \mu}$$

ρ_p = πυκνότητα σωματιδίων
 d_p = διάμετρος σωματιδίων
 C_c = Cunningham correction factor
 μ = ιξώδες αέρα

- Σύμφωνα με τον White (1977) η F_E είναι μέχρι και 3000 φορές μεγαλύτερη από την g για σωματίδιο 1 μm .
- Η συνολική ηλεκτροστατική δύναμη σε ένα σωματίδιο είναι το γινόμενο του ηλεκτρικού φορτίου, q , επί την ένταση του πεδίου συλλογής, E_{CO} .

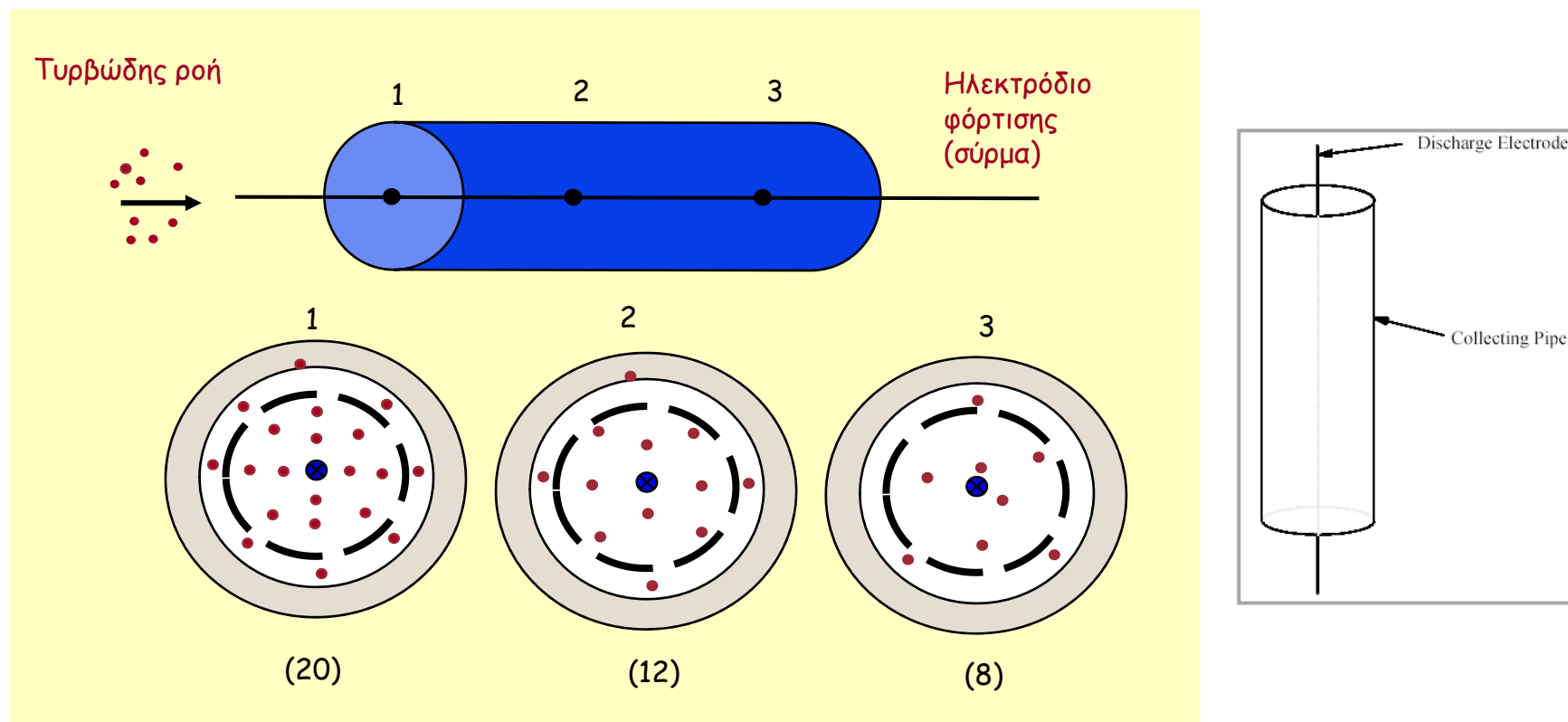
$$m_p F_E = q E_{CO}$$

m_p = μάζα σωματιδίου (kg)
 q = ηλεκτρικό φορτίο (C, coulombs) - charge on the particle
 E_{CO} = ένταση του πεδίου συλλογής-collecting field strength (V/m)



Φόρτιση σωματιδίων

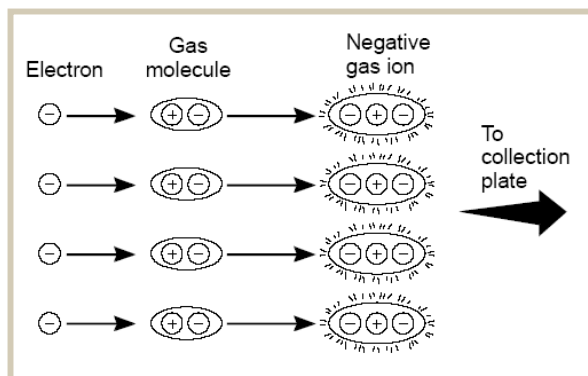
Τα σωματίδια φορτίζονται ηλεκτρικά με 2 μηχανισμούς.



Κορόνα (στεμματόμορφο) είναι ο ιονισμός των μορίων του αερίου από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας στην περιοχή ενός ηλεκτρικού πεδίου (με υψηλή αρνητική τάση μέχρι και 100.000 V) .



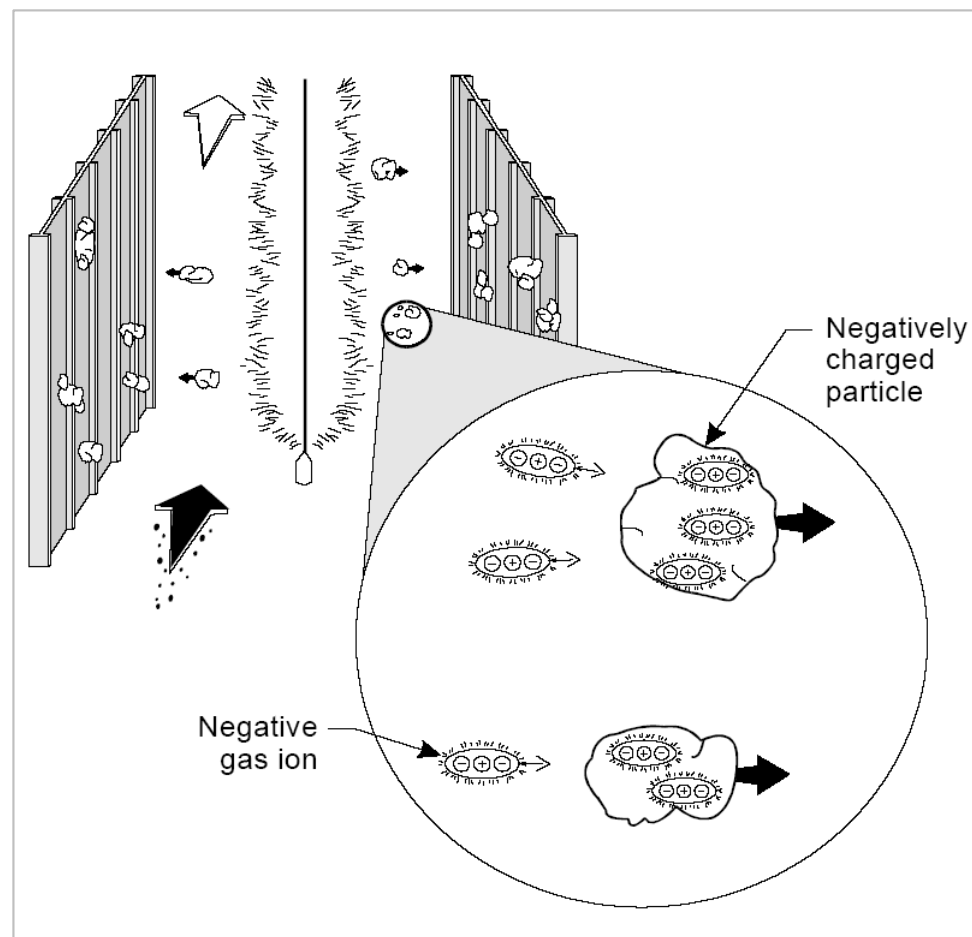
Φόρτιση σωματιδίων (συν.)



■ Για $d_p > 0,5 \mu\text{m}$ κυρίαρχος μηχανισμός: φόρτιση πεδίου (field charging)

Η υψηλή (αρνητική) τάση ιονίζει τα μόρια του αέρα:

- ⇒ Τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα επιταχύνονται στο ισχυρό πεδίο, συγκρούονται με τα σωματίδια καθώς κινούνται προς τις γειωμένες πλάκες και συλλαμβάνονται από αυτά
- ⇒ (αρνητική) φόρτιση των σωματιδίων
- ⇒ Τα σωματίδια οδηγούνται προς τις πλάκες





Μηχανισμός φόρτισης σωματιδίων

Βέβαια, αν τα σωματίδια φορτιστούν ισχυρά, τότε κάμπτουν τις τροχιές των ηλεκτρονίων. Έτσι το φορτίο τους αυξάνει με το χρόνο φθάνοντας σε μία **οριακή τιμή (κορεσμού)**:

$$q = \pi d_p^2 \varepsilon_0 K E_{Ch}$$

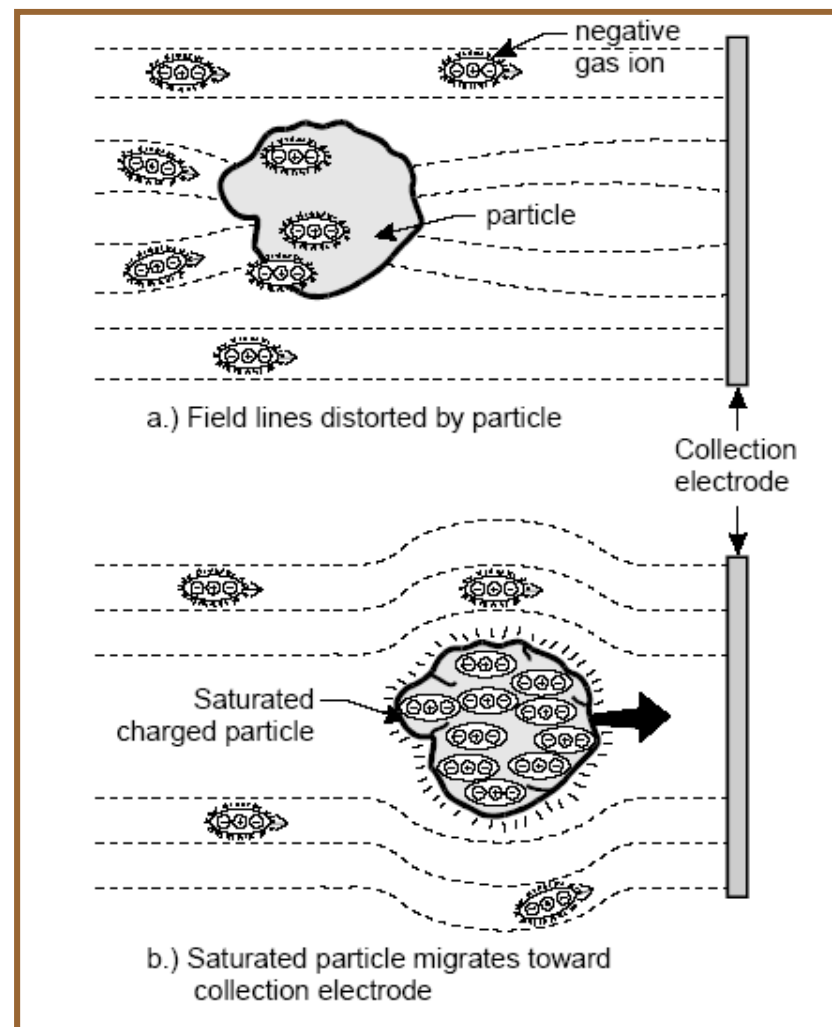
d_p = διάμετρος σωματιδίου, m

ε_0 = διηλεκτρική σταθερά του κενού (permittivity of free space) [= $8,85 \times 10^{-12}$ C/V·m]

K = σταθερά [= $3\varepsilon/(\varepsilon+2)$], Τυπικές τιμές: 1,5-2,4

ε = διηλεκτρική σταθερά αναφορικά με το κενό (κενό = 1, αέρας = 1,0006, για σωματίδια 2-8)

E_{Ch} = ένταση τοπικού πεδίου (V/m)





Μηχανισμός φόρτισης σωματιδίων

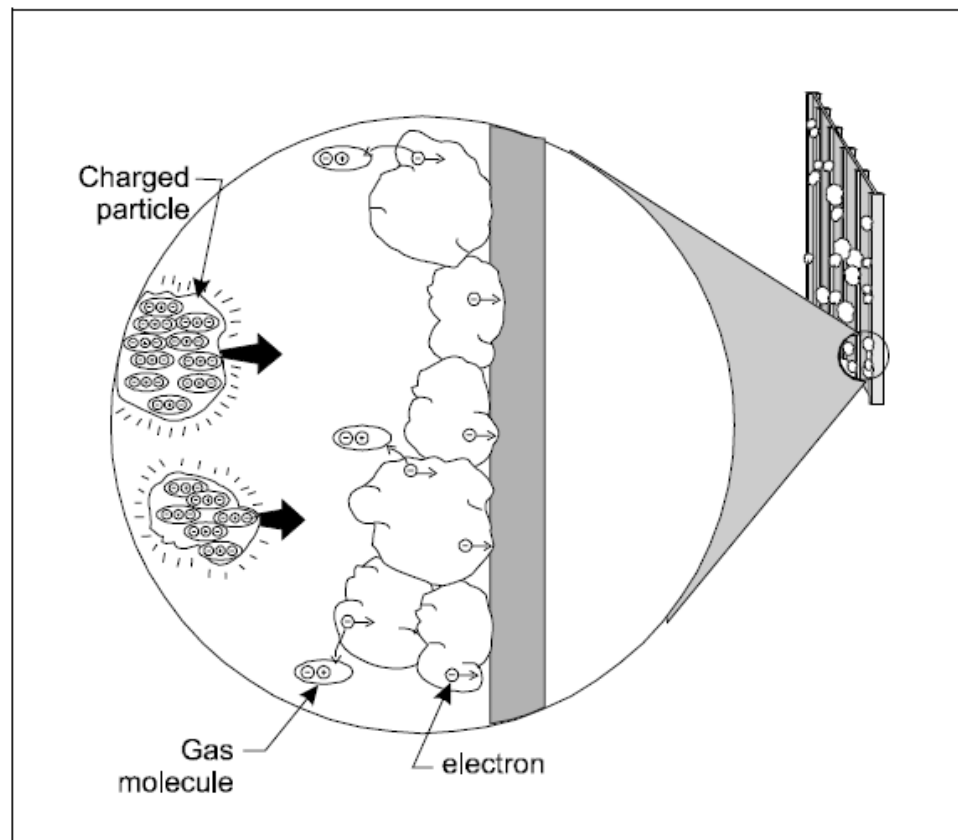


Figure 1-9. Particle collection at collection electrode



Ταχύτητα πλαγιολίθησης

- Συνδυάζοντας προκύπτει η θεωρητική ταχύτητα πλαγιολίθησης ενός σωματιδίου:

$$w = \frac{C d_p}{3 \mu} \varepsilon_o K E_{CO} E_{Ch} \quad E_{CO} \approx E_{Ch} = E$$

- $w \sim d_p$
- $w \sim E^2 \left(\approx \frac{\text{wire voltage}}{\text{wire - plate distance}} \right)$
- Μεγάλο πρόβλημα: **σπινθηρισμός** (Τα περισσότερα ESP λειτουργούν με 50-100 σπινθ./min)
- Η παραπάνω εξίσωση ακριβής μόνο για **λεία, σφαιρικά σωματίδια** που υπόκεινται σε σταθερές ροές και σταθερά ηλεκτροστατικά πεδία
- Δυστυχώς στην πράξη δεν ισχύει (η w συχνά μικρότερη μέχρι 2 φορές), γιατί η παραπάνω προσέγγιση αγνοεί:
 - επανείσοδο σωματιδίων κατά το τίναγμα
 - διαφυγή αερίου από τη χοάνη συλλογής
 - τα σωματίδια δεν είναι ομοιόμορφα (η w των μεγάλων σωματιδίων μεγαλύτερη)
- Οι κατασκευαστές ESP έχουν δικές τους τιμές για μία **ενεργό ταχύτητα πλαγιολίθησης w_e** (από πιλοτικές μονάδες ή από την εμπειρία)



Ταχύτητα πλαγιολίθησης - απόδοση

- Στην πράξη: είτε η w (ενεργός ταχύτητα πλαγιολίθησης) βρίσκεται από πιλοτικές μετρήσεις (White, 1982) ή η απόδοση μειώνεται κατά ένα σταθερό συντελεστή (Matts-Ohnfeldt Equation)

$$\eta = 1 - \exp \left[-w_k \left(\frac{A}{Q} \right)^k \right]$$

Χοντρικός κανόνας

- κάτω από απόδοση 95%, χρήση εξ. Deutsch-Anderson
- πάνω από 99%, χρήση εξ. Matts-Ohnfeldt
- 95-99%, τη μέση τιμή

όπου w_k = μέση ταχύτητα πλαγιολίθησης και k = μία σταθερά, συνήθως 0,4 - 0,6.

Τυπικές τιμές w (cm/s)

Ιπτάμενη τέφρα	2-20
Νέφος θειικού οξέος	6-8
Σκόνες τσιμέντου (ξηρές)	6-7
Σκόνες από υψικάμινο	6-14

Τυπικές τιμές ταχύτητα αέρα: **0,3-3 m/s**
Χρόνος παραμονής ESP: **1-10 s**



Ταχύτητα πλαγιολίθησης - απόδοση

Table 3-2. Collection-efficiency estimations using the Deutsch-Anderson and Matts-Ohnfeldt equations

Relative size of ESP (A/Q)	Deutsch k = 1.0	Matts-Ohnfeldt		
		k = 0.4	k = 0.5	k = 0.6
1	90	90	90	90
2	99	95.1	96.2	97.2
3	99.9	97.2	98.1	98.8
4	99.99	98.1	99	99.5
5	99.999	98.7	99.6	99.76

Source: Gallaer 1983.



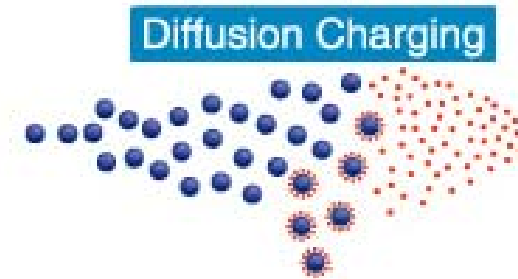
Μηχανισμοί φόρτισης σωματιδίων: φόρτιση λόγω διάχυσης

- Για $d_p < 0,15 \mu\text{m}$ κυρίαρχος μηχανισμός: φόρτιση λόγω διάχυσης (diffusion charging)

Σε αυτή την περιοχή μεγεθών η σχέση

$$q = \pi d_p^2 \varepsilon_o K E_{Ch}$$

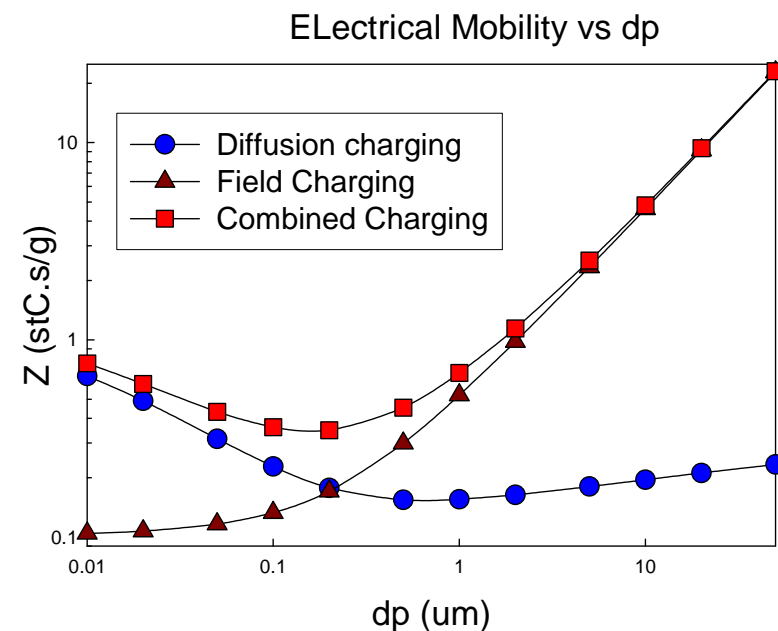
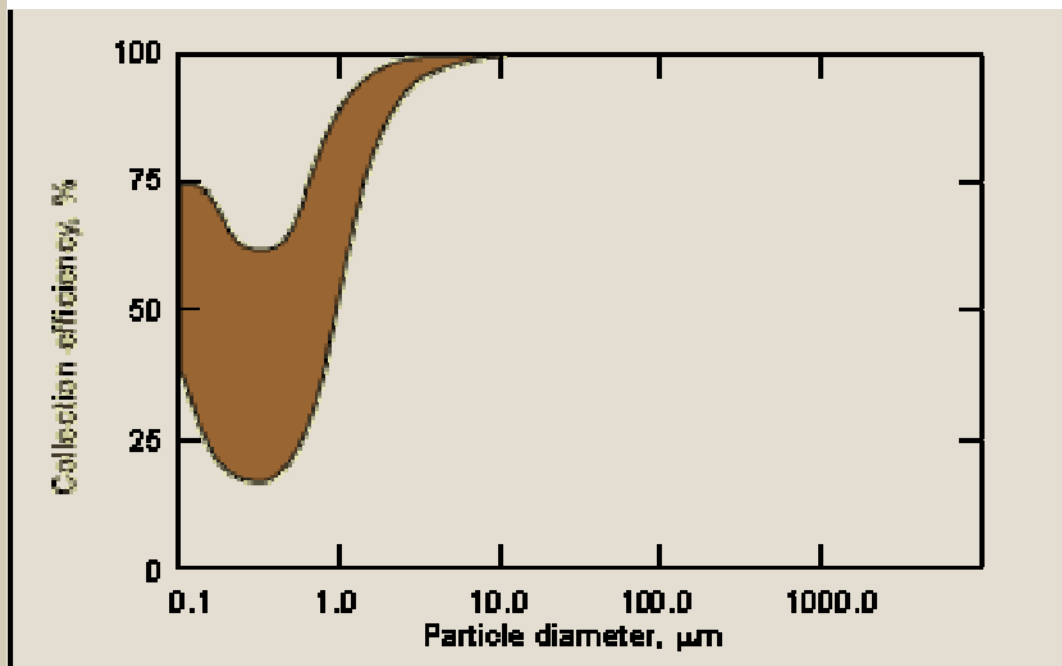
δεν ισχύει.



Φόρτιση λόγω διάχυσης : η τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων σε συνδυασμό με την κίνηση λόγω συγκρούσεων ηλεκτρονίου-μορίου, το οποίο κάνει το ηλεκτρόνιο να συμπεριφέρεται ως μόριο αερίου με κατανομή ταχυτήτων Boltzmann. Η φόρτιση αυτή είναι ανεξάρτητη από το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, αλλά εξαρτάται από το πεδίο λόγω των φορτίων των σωματιδίων.



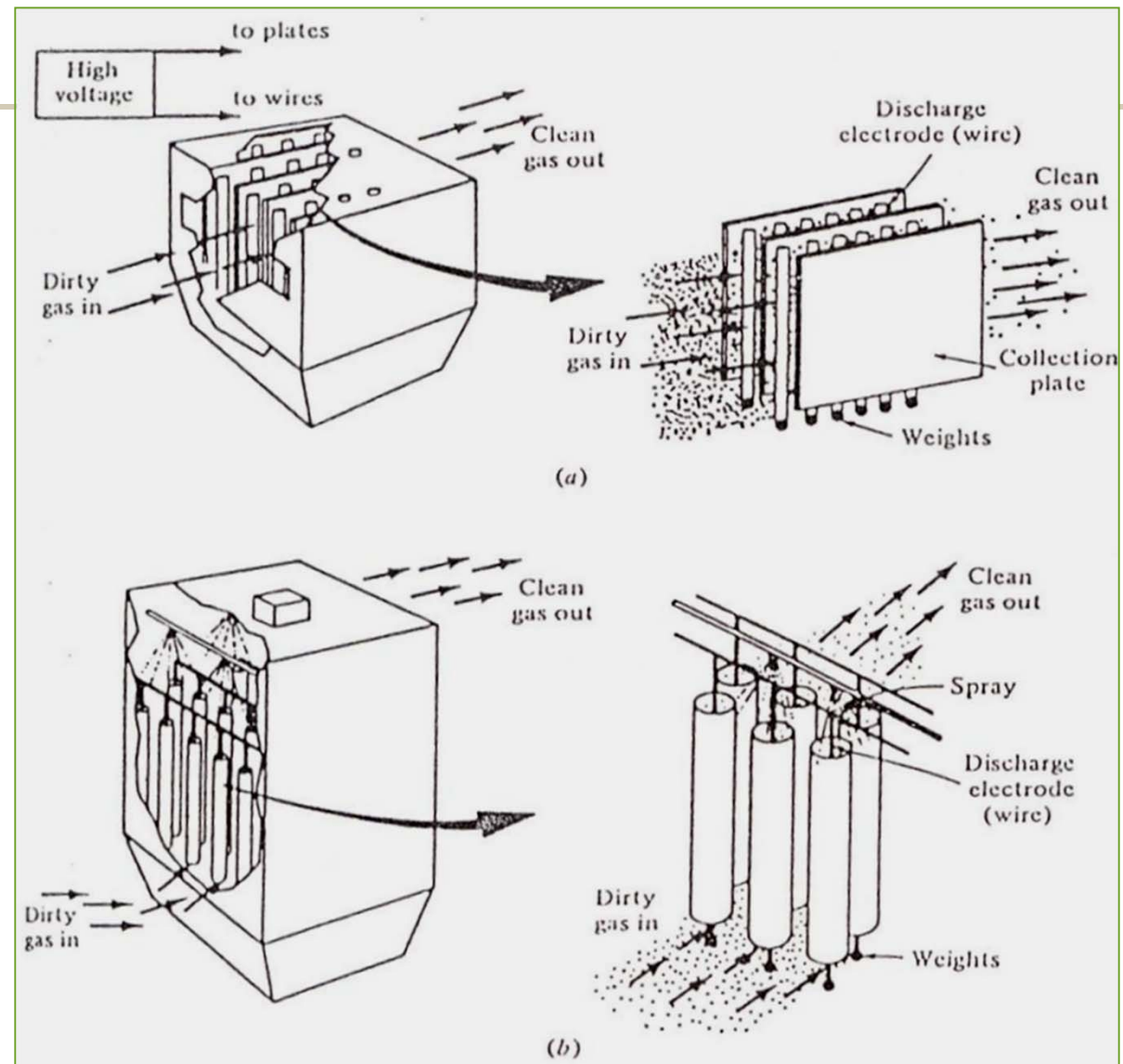
Απόδοση συλλογής ESP



Τυπικές αποδόσεις ενός καλά σχεδιασμένου ESP ως συνάρτηση του μεγέθους των σωματιδίων.

Η απόδοση είναι συνήθως ελάχιστη στην περιοχή 0,1 - 0,5 μm. Το σχήμα της καμπύλης απόδοσης προέρχεται από το συνδυασμό των δύο μηχανισμών φόρτισης, κανένας από τους οποίους δεν είναι αποτελεσματικός στην περιοχή αυτή.

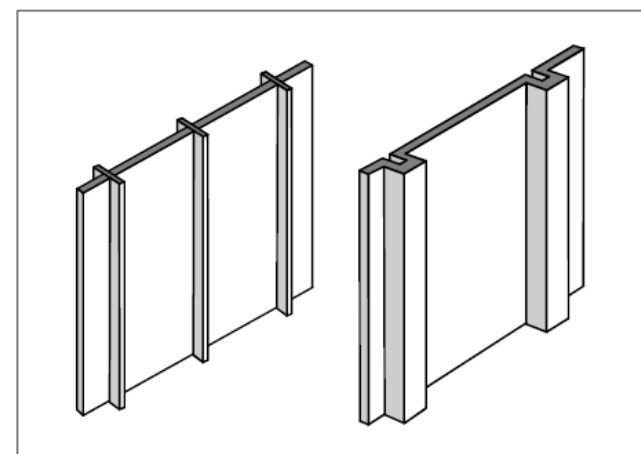
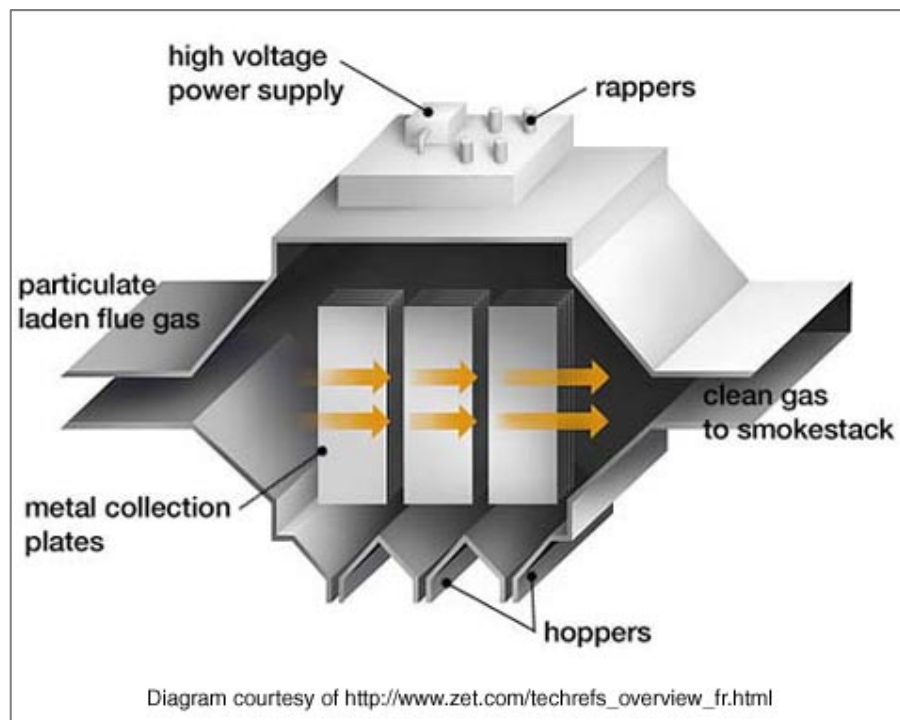
Ηλεκτροστατικοί κατακρημιστής



Κατακρημιστής υψηλής τάσης: (α) τύπου πλακών και (β) τύπου σωλήνα (χρησιμοποιείται για σταγονίδια ή σωματίδια με μεγάλη υγρασία).



Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές



Τυπικές πλάκες



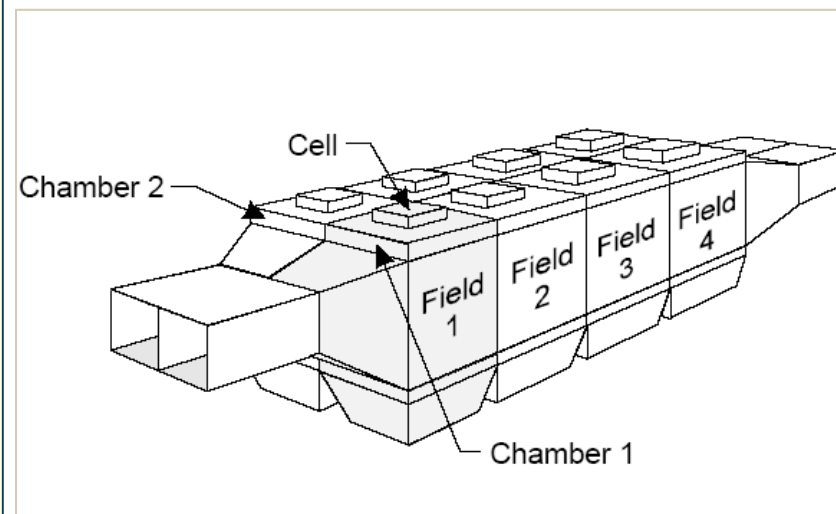
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ - Διαστασιολόγηση πλακών

- **Πλάκες ESP**: συνήθως $H > L$
- Εν σειρά σε ξεχωριστά τμήματα (sections, fields, stages), αλλά και εν παράλληλω (chambers)
- Η επιφάνεια για την εξ. Deutsch-Anderson είναι η «ενεργή» επιφάνεια και όχι η συνολική.
- Για ένα ESP με n πλάκες εν παράλληλω ($n-1$, ενεργές) σε κάθε τμήμα και N_s τμήματα στη διεύθυνση της ροής, η συνολική επιφάνεια είναι:

$$A = A_p(n-1)N_s = A_p(N - N_s) \quad (5.13)$$

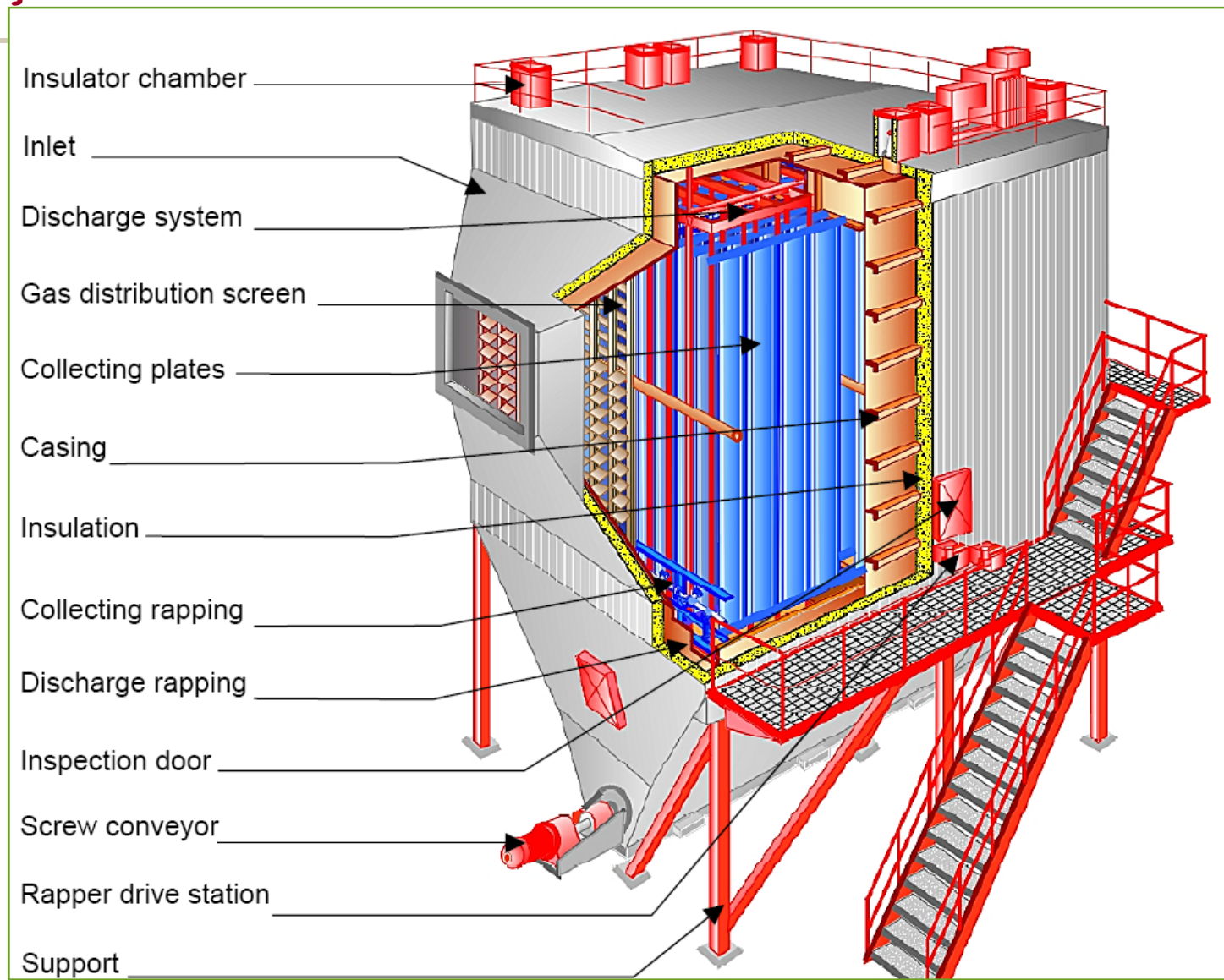
όπου A_p = επιφάνεια πλάκας με διπλή πλευρά
($= 2HL_p$)

N = συνολικός αριθμός πλακών στο ESP

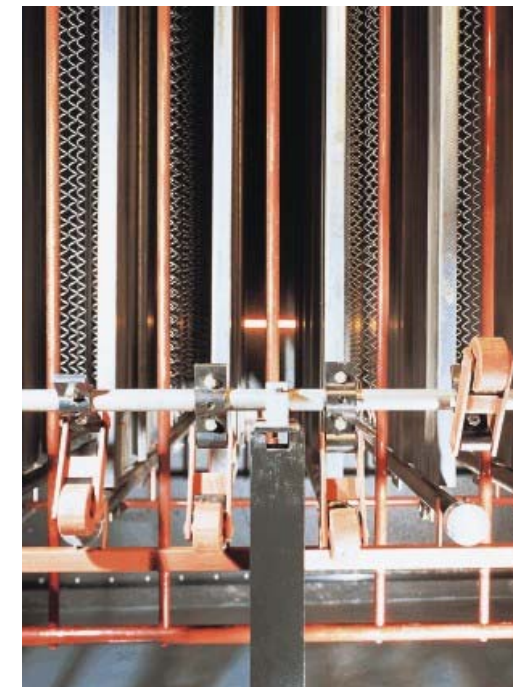
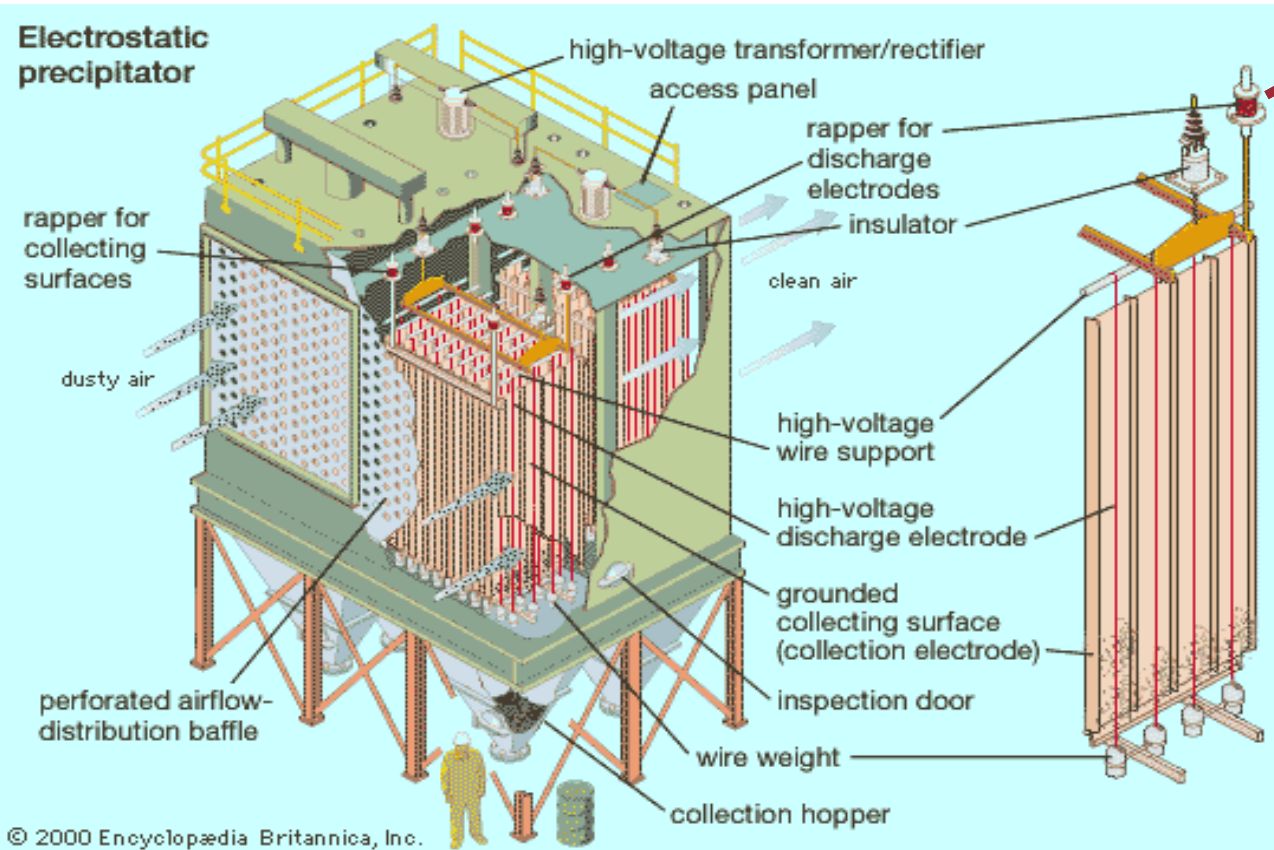


Προσοχή: κάθε τμήμα έχει ακέραιο αριθμό πλακών

Ηλεκτροστατικοί κατακρημιστές



Πολυβάθμιο ESP





Κατανομή αέρα

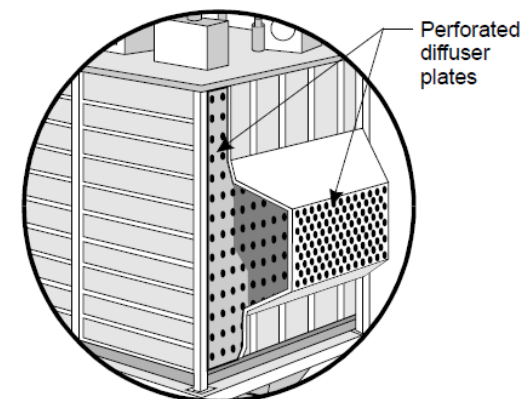
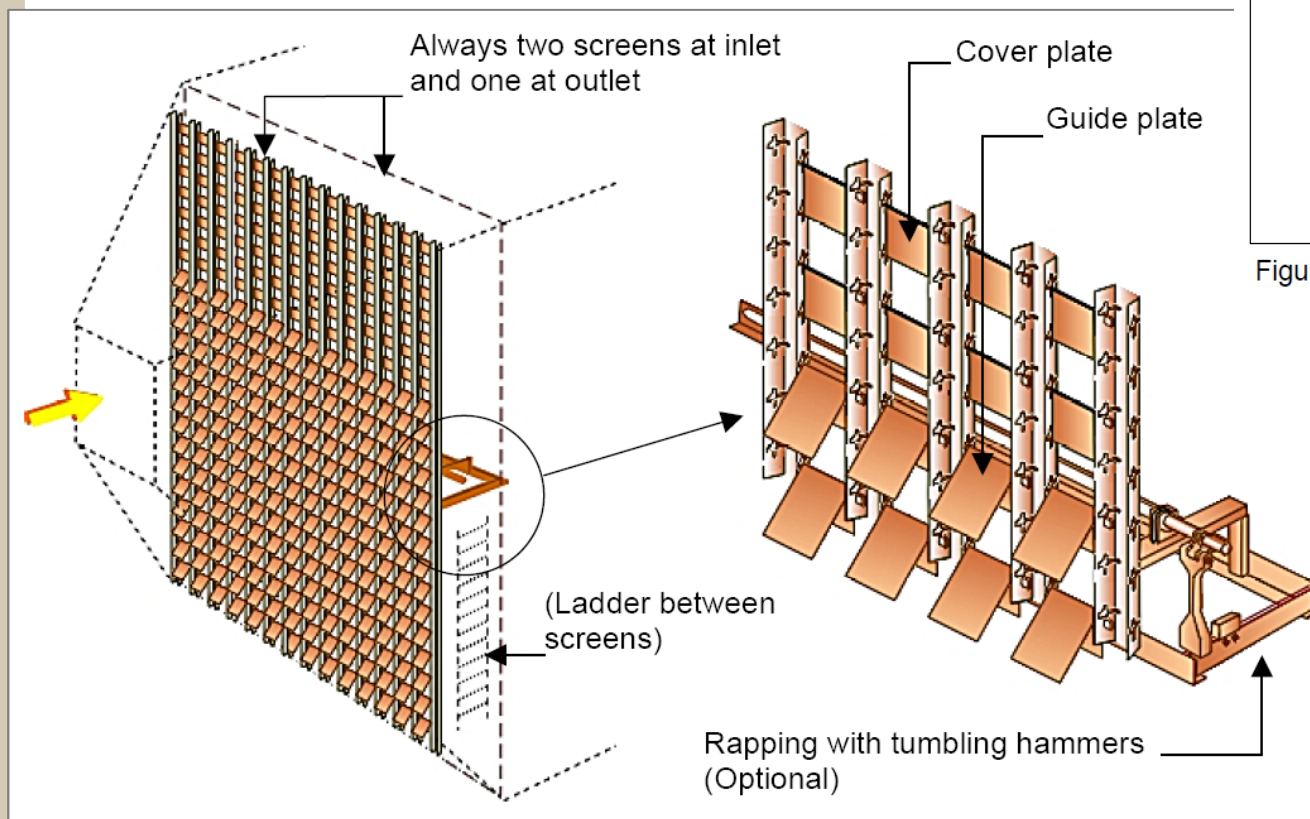


Figure 3-7. Gas inlet with perforated diffuser plates

Σύστημα εκφόρτισης

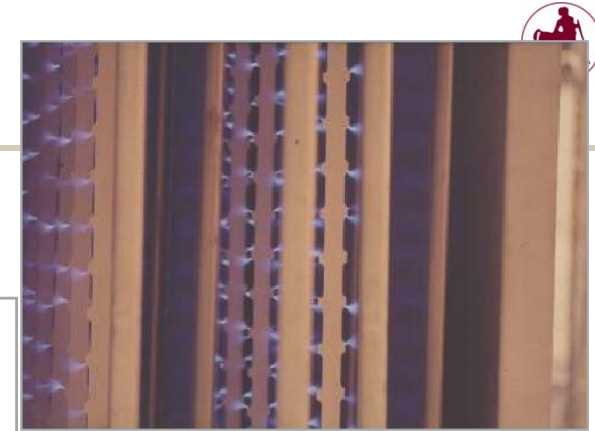
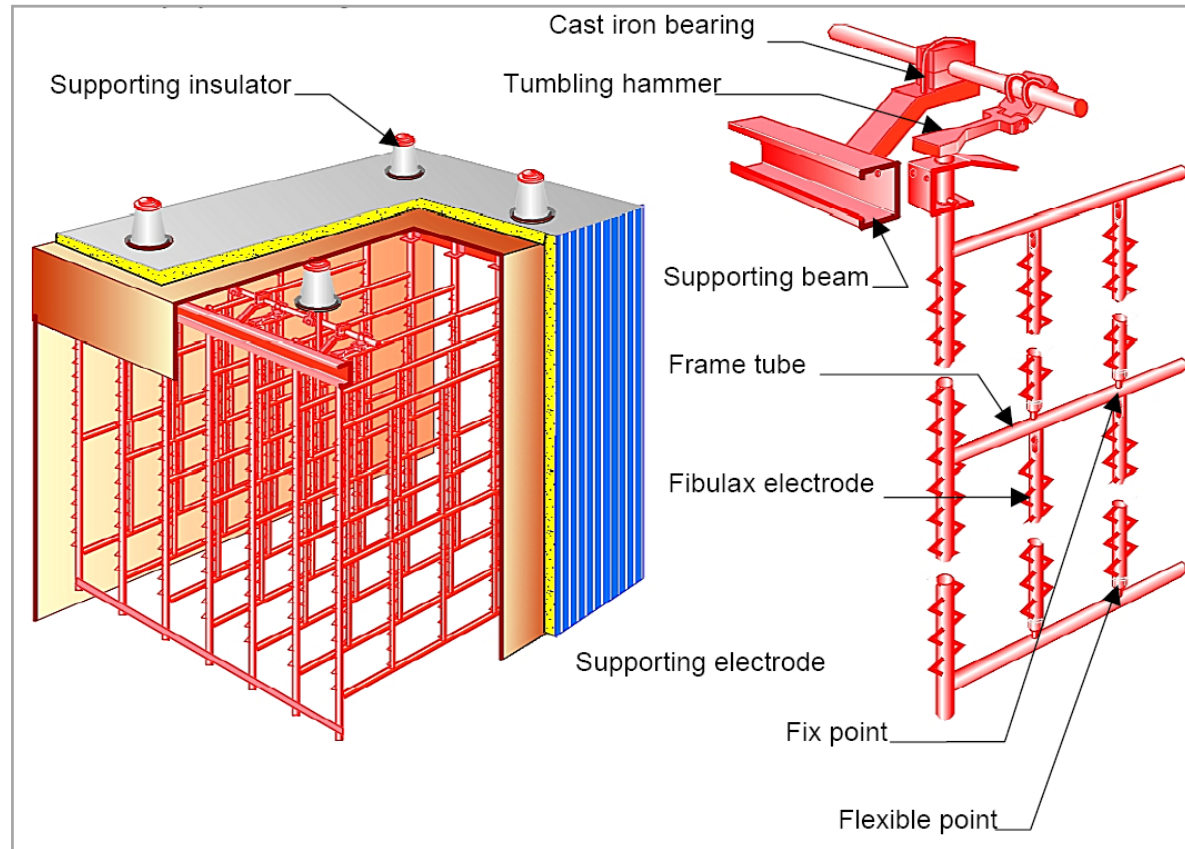


Figure 11. Single Nine-Inch Gas Passage (ESP)

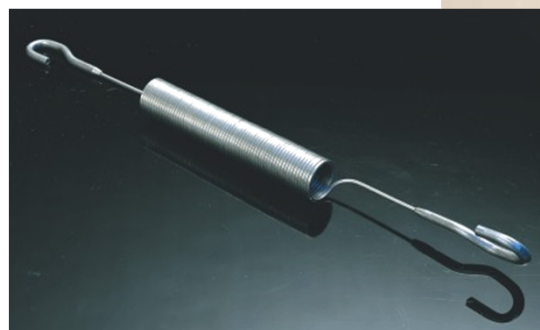
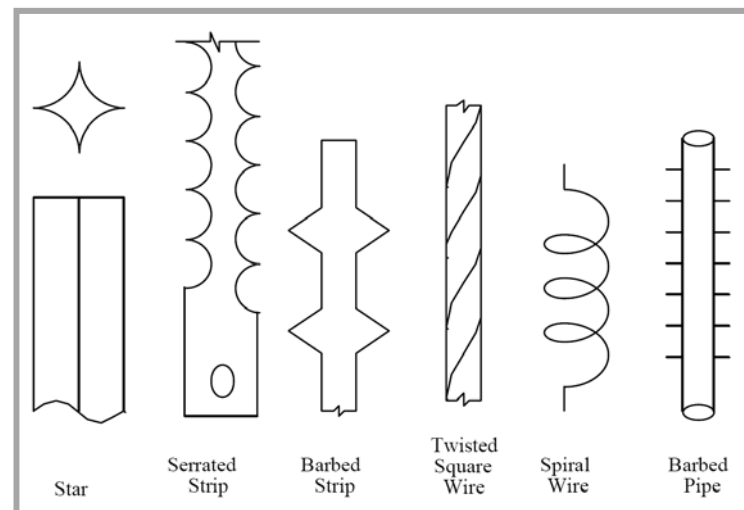
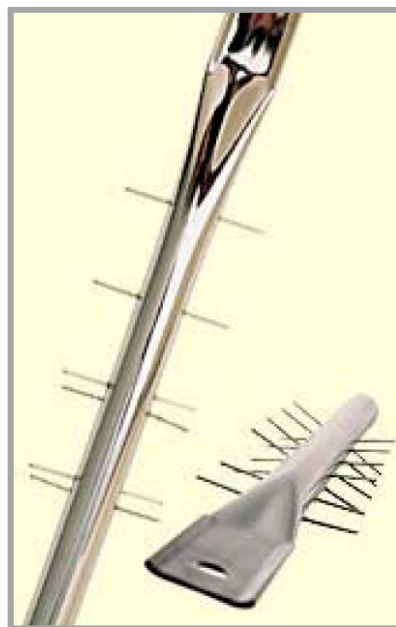
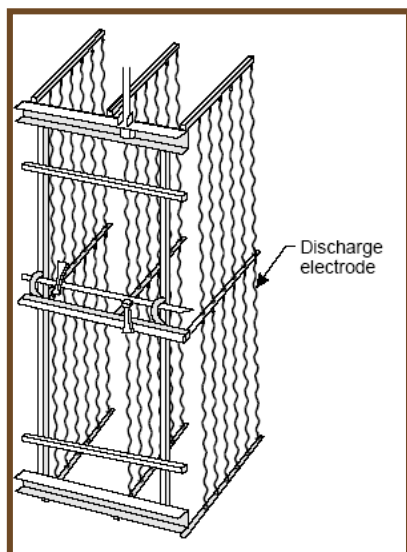


http://www.epin.ncsu.edu/apti/ol_2000/module6/matter/control/contfram1.htm



Παραδείγματα ηλεκτροδίων εκφόρτισης (discharge electrode)

- Παλαιότερα σύρματα 2,5 mm τεντωμένα με βαρίδια
- Σήμερα ποικιλία σχεδίων στηριγμένα σε άκαμπτα συστήματα



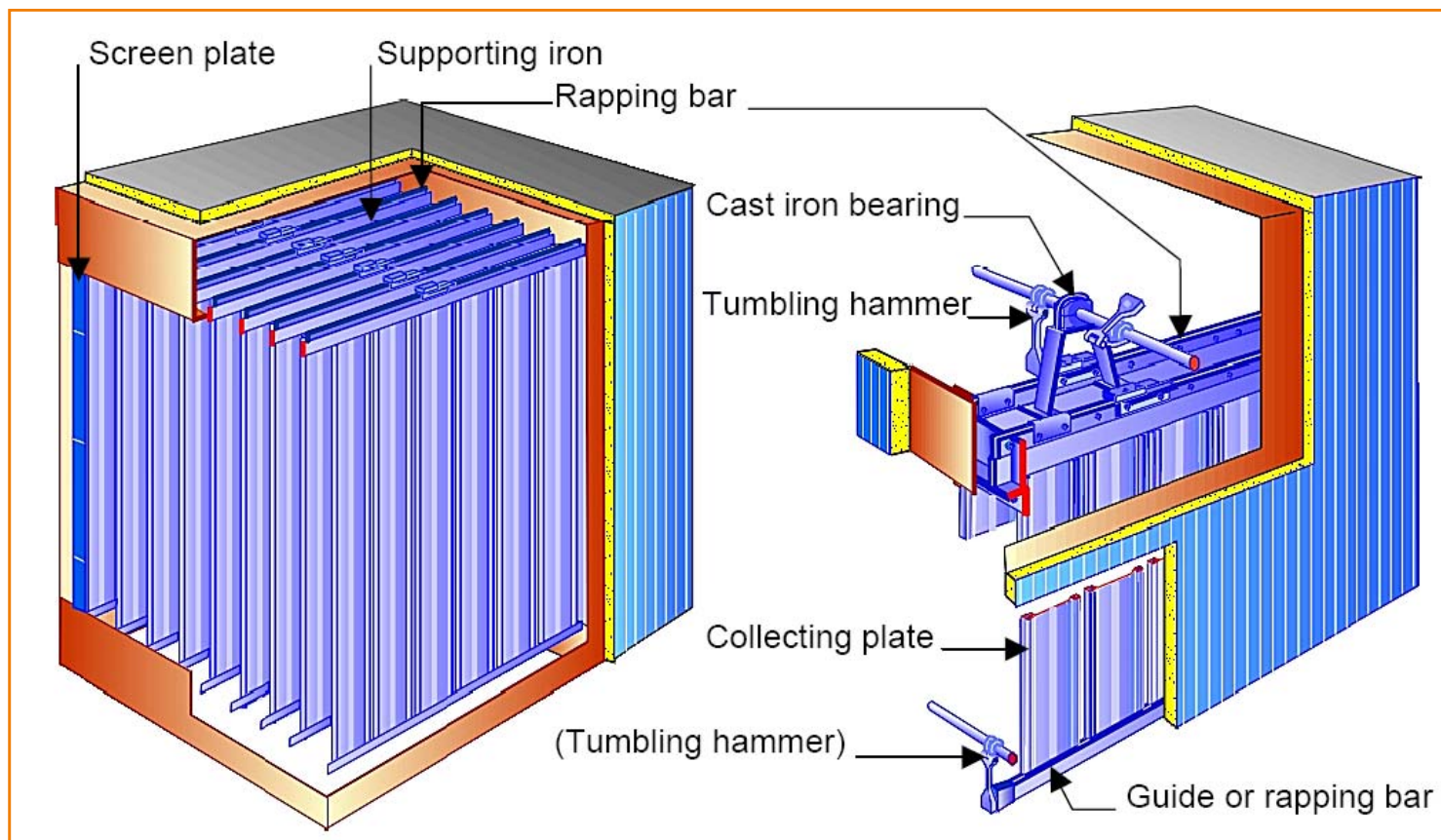


Απομάκρυνση της σκόνης που συλλέχθηκε

- Τα σωματίδια που συλλέχθηκαν στις πλάκες θα πρέπει να απομακρυνθούν με κατάλληλο τρόπο στην κατάλληλη στιγμή
- Η κάλυψη με σκόνη των ηλεκτροδίων μπορεί να:
 - μειώσει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου
 - αυξήσει την πιθανότητα σπινθηρισμών
 - προκαλέσει αντίστροφη κορόνα
- **Αποτέλεσμα:** μειωμένη απόδοση συλλογής
- Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να καθαριστούν οι πλάκες συλλογής
 - Σύρμα-πλάκες: «τίναγμα» (rapping) με ρυθμό 1-10 min
 - Σύρμα-σωλήνας: πλύσιμο



Σύστημα συλλογής (Collecting system)

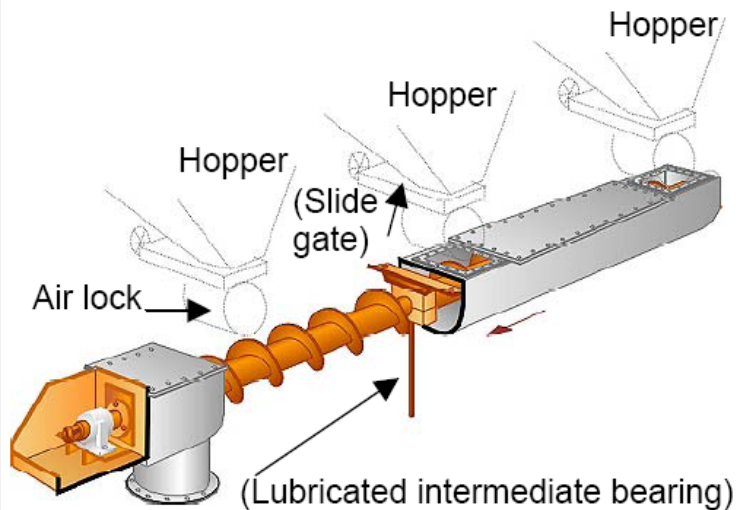




Απομάκρυνση σκόνης

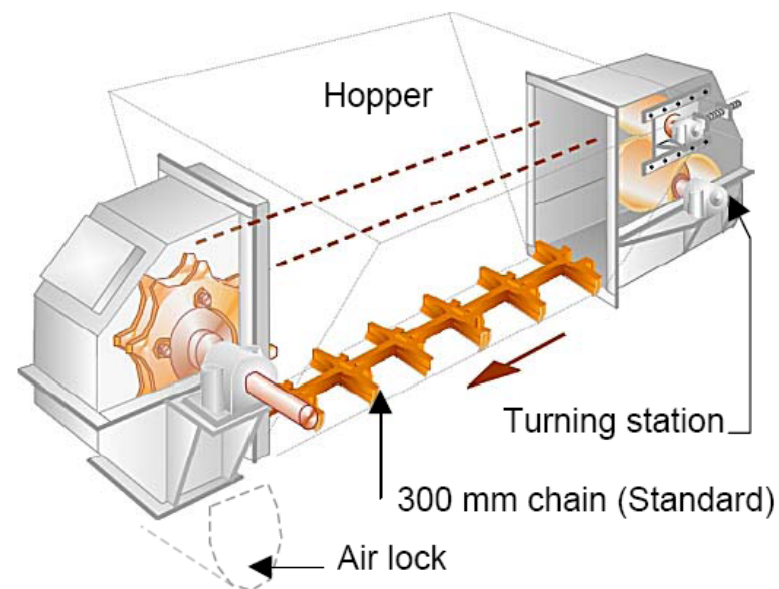
Screw conveyor

When screw conveyors are applied, dust from the individual hoppers are often fed into the screw conveyor via rotary air lock.



Drag chain

When the drag chain are applied, dust is typically fed directly into the drag chain



www.flsmidth.com

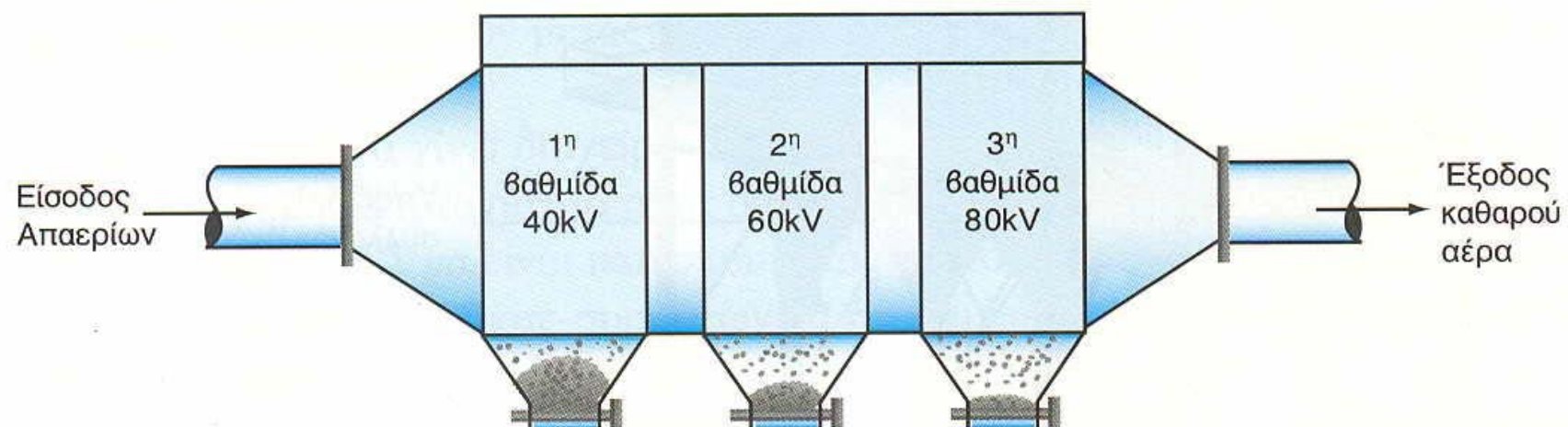


Επανείσοδος σωματιδίων

- Επανείσοδος συμβαίνει όταν για διάφορους λόγους τα σωματίδια από τις πλάκες συλλογής μεταφέρονται στο αέριο ρεύμα
- Πηγές επανεισόδου:
 - Υψηλό τυρβώδες πεδίο
 - Το τίναγμα - παρατηρούνται «φυσήματα» που βγαίνουν από τον κατακρημνιστή
 - Αντίθετη κορόνα



ΗΚ τριών βαθμίδων





Ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σωματιδίων

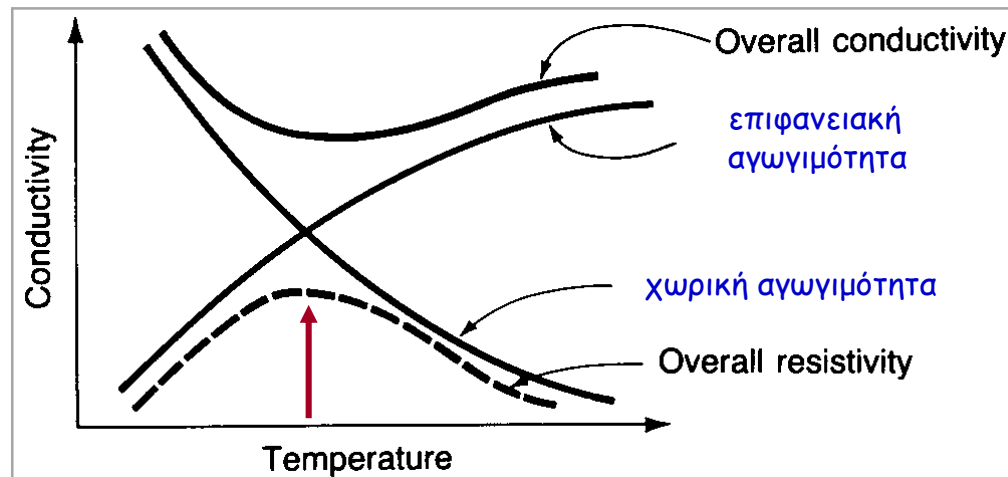
- Τα μονωμένα σωματίδια είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού
(1) αντιστέκονται στη φόρτιση, (2) δε συλλέγονται εύκολα
- Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σωματιδίων, ΕΗΑ, (σε $\Omega \cdot \text{cm}$) είναι μέτρο της αντίστασης της σκόνης στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεταβάλλεται σημαντικά και συνδέεται με:
(1) την **στοιχειακή σύσταση** της σκόνης και των αερίων καύσης, (2) το **ποσοστό υγρασίας** στον αέρα, και (3) τη **θερμοκρασία** του αερίου
- Εάν η ΕΗΑ είναι υψηλή (δηλ. η σκόνη είναι καλός μονωτής), π.χ. πάνω από $10^{10} \Omega\text{-cm}$, η συλλογή των σωματιδίων ιδιαίτερα δύσκολη, γιατί το φορτίο δεν εκκενώνεται στις πλάκες (δημιουργείται «αντίθετη κορόνα»), και τα σωματίδια δεν «τινάζονται»
- Εάν η ΕΗΑ είναι πολύ χαμηλή (δηλ. η σκόνη καλός αγωγός), το φορτίο εκκενώνεται πολύ γρήγορα και τα σωματίδια επαναιωρούνται
- Επίδραση της ειδικής αντίστασης των σωματιδίων στην απόδοση του ESP
(Επιθυμητό: $10^9 - 10^{10} \text{ ohm-cm}$)
- **Ρυθμιστές (Conditioners)**
 - προστίθενται στο αέριο ρεύμα για να αυξήσουν την αγωγιμότητα των σωματιδίων.
 - παραδείγματα: H_2O , NH_3 , NaCl , H_2SO_4

Resistivity	Range of measurement
Low	between 10^4 and $10^7 \text{ ohm} \cdot \text{cm}$
Normal	between 10^7 and $10^{10} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$
High	above $10^{10} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$ (usually between 10^{10} and $10^{14} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$)



Συντελεστής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης/Αγωγιμότητα

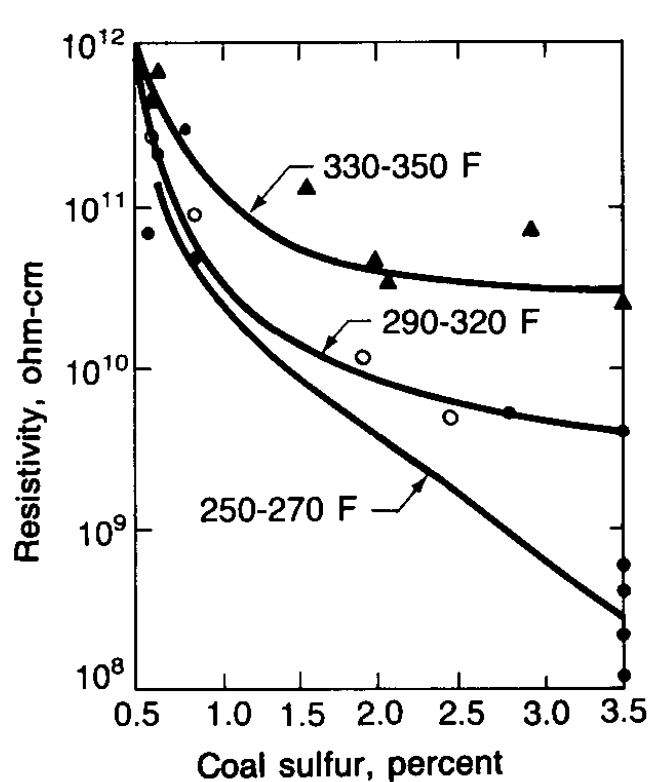
- Η αγωγιμότητα του στρώματος προέρχεται από
 - 1) τη χωρική αγωγιμότητα του ίδιου του υλικού (μειώνεται με τη θερμοκρασία)
 - 2) την επιφανειακή αγωγιμότητα (λόγω των προσροφημένων αερίων και σταγονιδίων, αύξηση με T)Υπάρχει ένα μέγιστο στην αντίσταση της ιπτάμενης τέφρας, που βρίσκεται συνήθως σε θερμοκρασία 250-350 F (120-180°C)



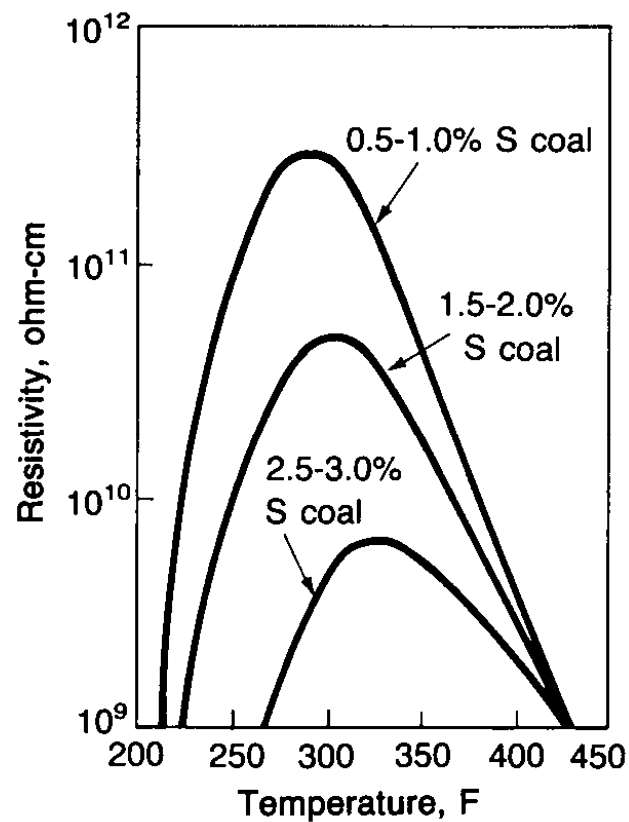
Σχέση θερμοκρασίας αγωγιμότητας



Συντελεστής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης/Αγωγιμότητα



(a)

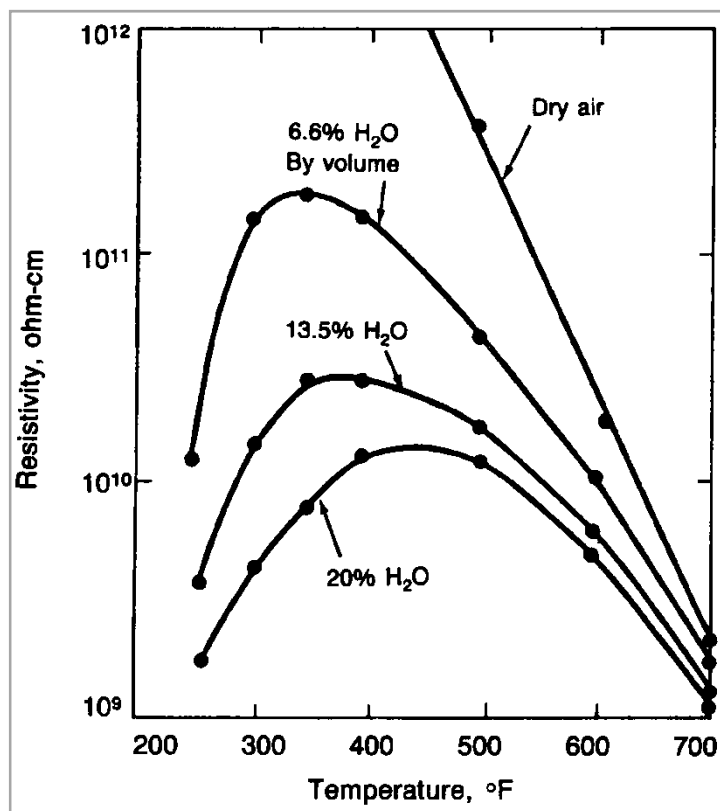


(b)

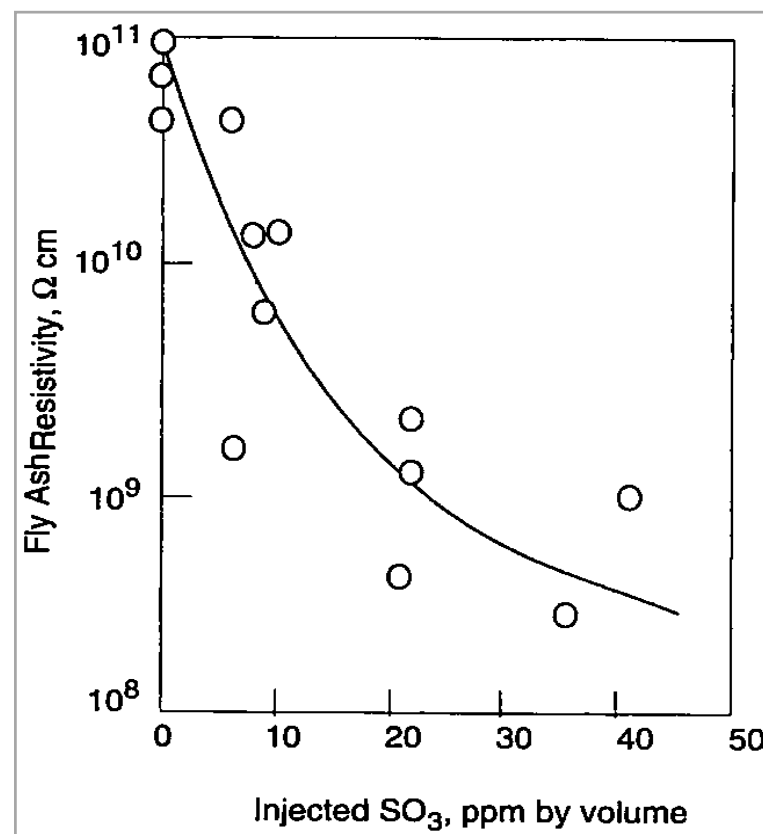
Επίδραση του περιεχόμενου θείου (μείωση της ΕΗΑ λόγω της προσρόφησης π.χ. του SO_3 στην ιπτάμενη τέφρα) και της θερμοκρασίας στην ΕΗΑ



«Επεξεργασία» του ρέοντος αέριου ρεύματος



Επίδραση της υγρασίας (με εκνέφωση) της σκόνης από το φούρνο τσιμέντου στην ΕΗΑ.



Επίδραση της συγκέντρωσης του εισαγόμενου στην ιπτάμενη τέφρα SO₃ στην ΕΗΑ.



Συντελεστής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης/Αγωγιμότητα

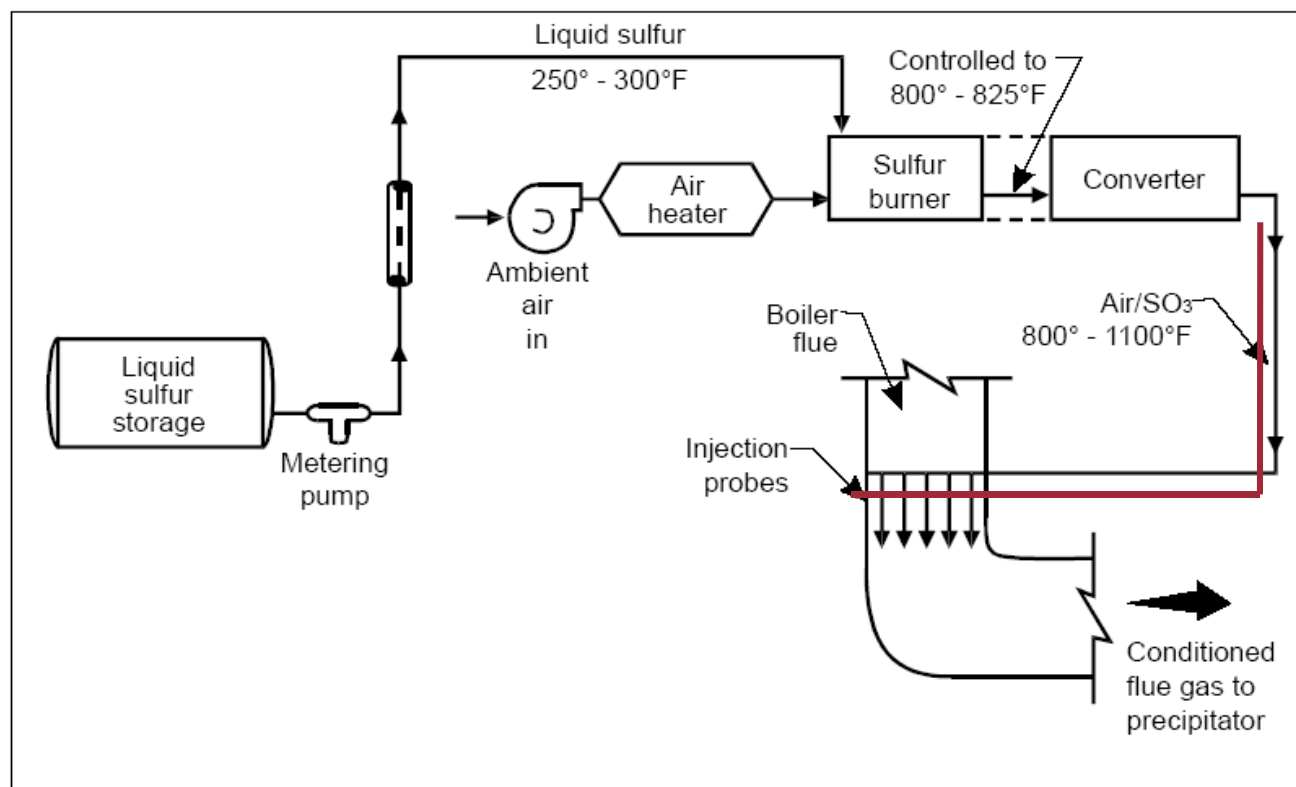
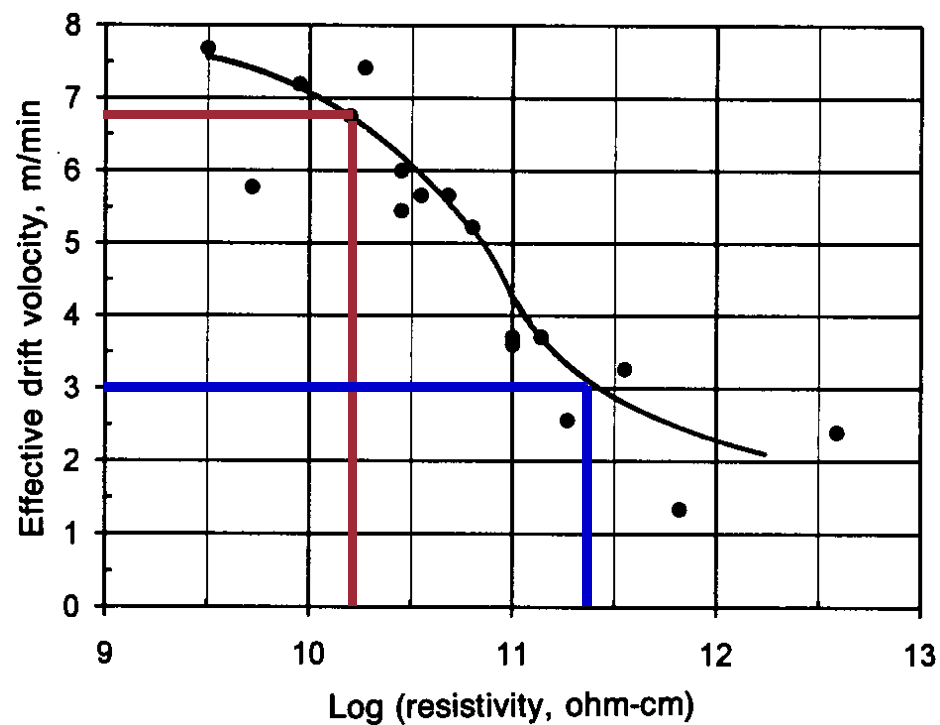


Figure 3-4. Flow diagram of sulfur-burning flue gas conditioning system
Courtesy of Wahlco, Inc.



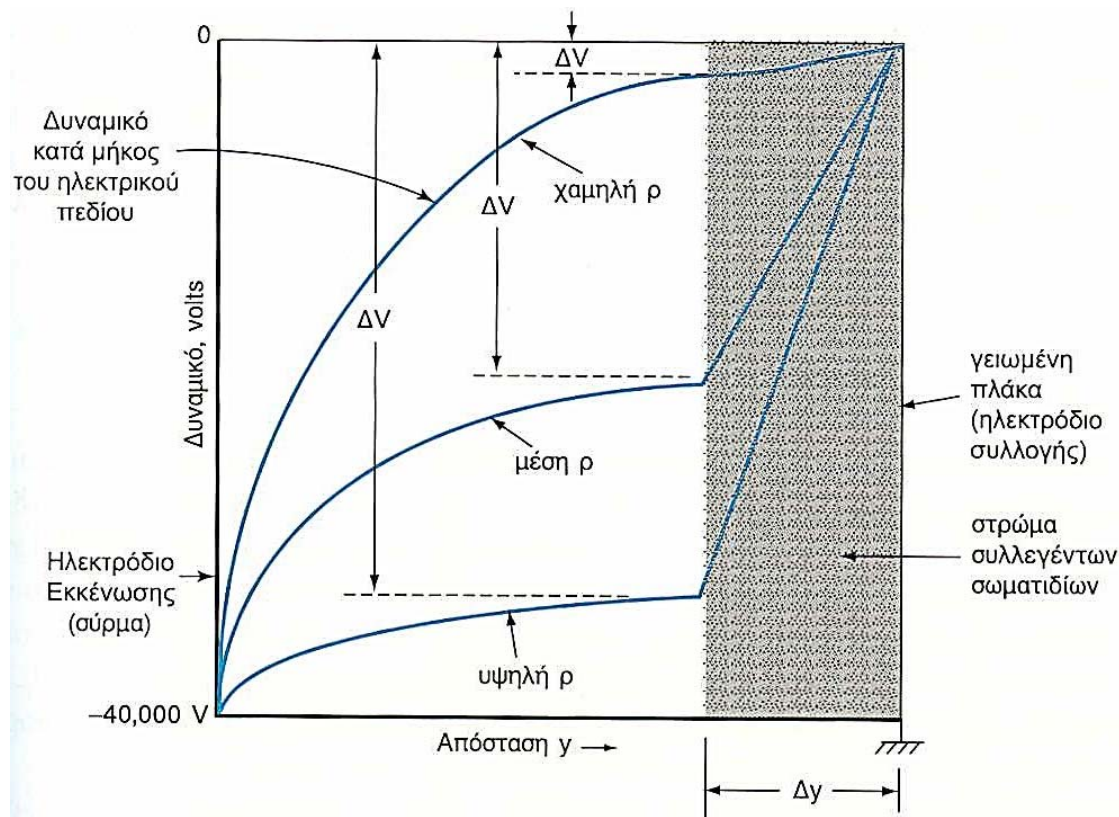
Συντελεστής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης/Αγωγιμότητα



Η ενεργός ταχύτητα πλαγιολίσθησης ως συνάρτηση της ΕΗΑ.



Συντελεστής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης/Αγωγιμότητα



ήμα 5.3: Κατανομή του δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων ενός ΗΣΣ για χαμηλή, μέση και υψηλή ειδική αντίσταση.

Κατανομή του δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων ενός ΗΚ για χαμηλή, μέση και υψηλή ειδική αντίσταση (Ραφομανίκης & Καστρινάκης, 2009)

Εσωτερική διαμόρφωση (I)



Πρακτικές
παράμετροι
σχεδιασμού
ενός ESP.

Πίνακας 5.1 Επιλεγμένες παράμετροι σχεδιασμού για ESP ιπτάμενης τέφρας και τυπικές τιμές

Παράμετροι	Εύρος Τιμών
Ταχύτητα Πλαγιολίσθησης w_e	1.0 – 10 m/min
Πλάτος Καναλιού (Αγωγού) D	15 – 40 cm
Ειδική Επιφάνεια Συλλογής SCA (Επιφάνεια Πλάκας / Παροχή Αερίου)	0.25 – 2.1 m ² /(m ³ /min)
Ταχύτητα Αερίου u	1.2 – 2.5 m/s (70 – 150 m/min)
Αναλογία Διαστάσεων R (Μήκος Αγωγού / Ύψος Πλάκας)	0.5 – 1.5
Λόγος Ισχύος Κορόνας P/Q (Ισχύς Κορόνας / Παροχή Αερίου)	1.75 – 17.5 W/(m ³ /min) (όχι μικρότ. από 1.0 για $\eta > 99\%$)
Λόγος Ρεύματος Κορόνας I/A (Ρεύμα Κορόνας / Επιφάνεια Πλάκας)	50 – 750 $\mu\text{A}/\text{m}^2$
Πυκνότητα Ισχύος έναντι της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	
<u>Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση Τέφρας, ohm-cm</u>	<u>Πυκνότητα Ισχύος, W/m²</u>
$10^4 - 10^7$	43
$10^7 - 10^8$	32
$10^9 - 10^{10}$	27
10^{11}	22
10^{12}	16
10^{13}	10.8
Επιφάνεια Πλάκας ανά Ηλεκτρική Διάταξη A_s	460 – 7400 m ²
Αριθμός Ηλεκτρικών Τμημάτων	
α. Στη Διεύθυνση της Ροής του Αερίου, N_s	2 – 8
β. Συνολικά, N_t	1 – 10 τμήματα / (1000 m ³ /min)



Εσωτερική διαμόρφωση (II)

- Η διαμόρφωση περισσότερη «τέχνη» παρά επιστήμη
- Σημαντική η ομοιόμορφη κατανομή της ροής του αερίου μέσα στους αγωγούς
- Σημαντική η κατάλληλη διάταξη των ηλεκτροδίων
- Σημαντική η πιστότητα των πλακών ώστε να είναι επίπεδες και πάντα παράλληλες (ίδιο d)
- Σημαντικός ο επαρκής αριθμός των τμημάτων
- Παρά τα αναλυτικά υπολογιστικά εργαλεία ακόμη βασιζόμαστε σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία
- Με τον Πίνακα 5.1. μπορούμε να ορίσουμε τη βασική γεωμετρία ενός ΗΚ
- Συνολικό πλάτος ΗΚ: αριθμός αγωγών (N_d) * πλάτος αγωγού (D) + πάχος πλακών.



Εσωτερική διαμόρφωση (III)

- Αριθμός αγωγών (N_d):
$$N_d = \frac{Q}{uDH} \quad (5.15)$$

όπου Q η συνολική παροχή (m^3/min), η ταχύτητα του αερίου στο ΗΚ (m/min) και H το ύψος της πλάκας (m)

- 1^η προσέγγιση: επιλέγουμε u , D και $H \Rightarrow N_d$
- 2^η προσέγγιση: υπολογισμός του u στο τέλος αφού έχουμε ορίσει όλες τις άλλες παραμέτρους
- **Συνολικό μήκος του ESP**

$$L_o = N_s L_p + (N_s - 1) L_s + L_{en} + L_{ex}$$

N_s : αριθμός ηλεκτρικών τμημάτων στη διεύθυνση της ροής (2-8), L_p : μήκος πλάκας (1-4 m, H : 6-12 m), L_s : διάκενο ανάμεσα στα ηλεκτρικά τμήματα (0,5-1,5 m), L_{en} : μήκος τμήματος εισόδου, L_{ex} : μήκος τμήματος εξόδου.

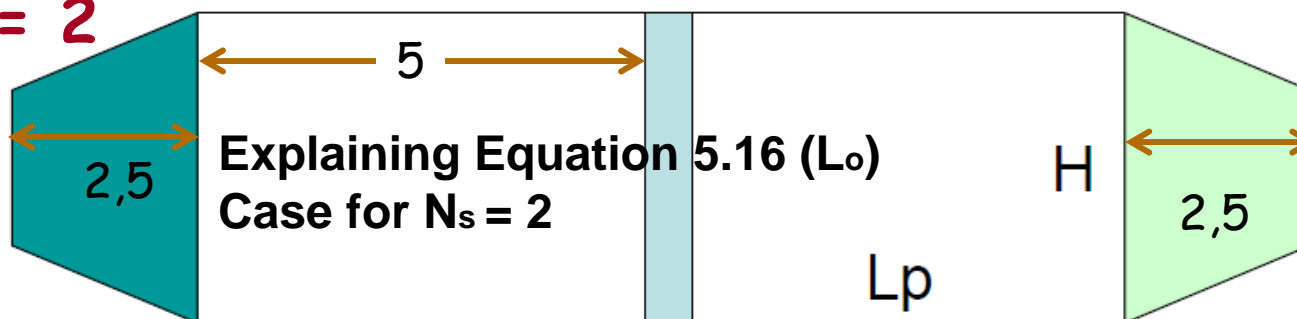


Συνολικό μήκος του ESP

Σχέση 5.16

$$L_o = N_s L_p + (N_s - 1) L_s + L_{en} + L_{ex}$$

Για $N_s = 2$



$$L_{en} + L_p + L_s + L_p + L_{ex}$$

$$L_o = 2L_p + L_s + L_{en} + L_{ex}$$

$$L_o = 2 \times 5 + 2 + 2,5 + 2,5 = 17 \text{ m}$$



Εσωτερική διαμόρφωση (IV)

- Ο αριθμός των τμημάτων (N_s) μπορεί να εκτιμηθεί από
$$N_s = R \frac{H}{L_p} \quad (5.17)$$

όπου R είναι η αναλογία διαστάσεων-*aspect ratio* (συνολικό μήκος πλακών/ H , 0,5-2 συνήθως >1)

- Όταν έχουν καθοριστεί τα N και N_s , μπορεί να υπολογιστεί η πραγματική επιφάνεια συλλογής

$$A_a = 2HL_p N_s N_d \quad (5.18), \quad A_a \geq A_{est}$$



Κατανάλωση ενέργειας

Κατανάλωση ενέργειας στο ΗΦ από:

- 1) Την Η.Ε. για την κορόνα
- 2) Την πτώση πίεσης (μικρότερη)

Ισχύς για την κορόνα σε W

$$P_C = I_C V_{avg}$$

I_C = ένταση ηλεκτ. ρεύματος, A
 V_{avg} = μέση τιμή τάσης

Πραγμ. Ταχύτητα πλαγιολίσησης (σύμφωνα με τον White)

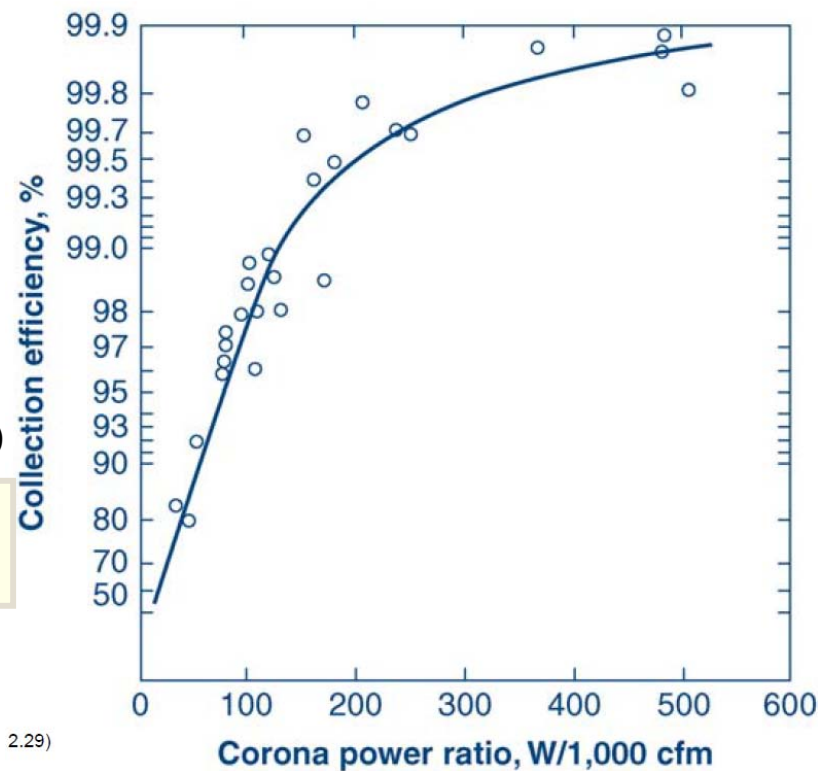
$$w_e = \frac{kP_C}{A}$$

k = σταθερά, 0,5-0,7
 P_C/A = πυκνότητα ισχύος, 0,1-0,2 W/m²

Απόδοση συλλογής

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-kP_C}{Q}\right)$$

Ισχύει για αποδόσεις μέχρι 98,5%



Απόδοση συλλογής ως συνάρτηση της ισχύος της κορόνας



Απόδοση ΗΦ

Table 1: Hazardous Air Pollutant Removal Efficiency of an **Electrostatic Precipitator**

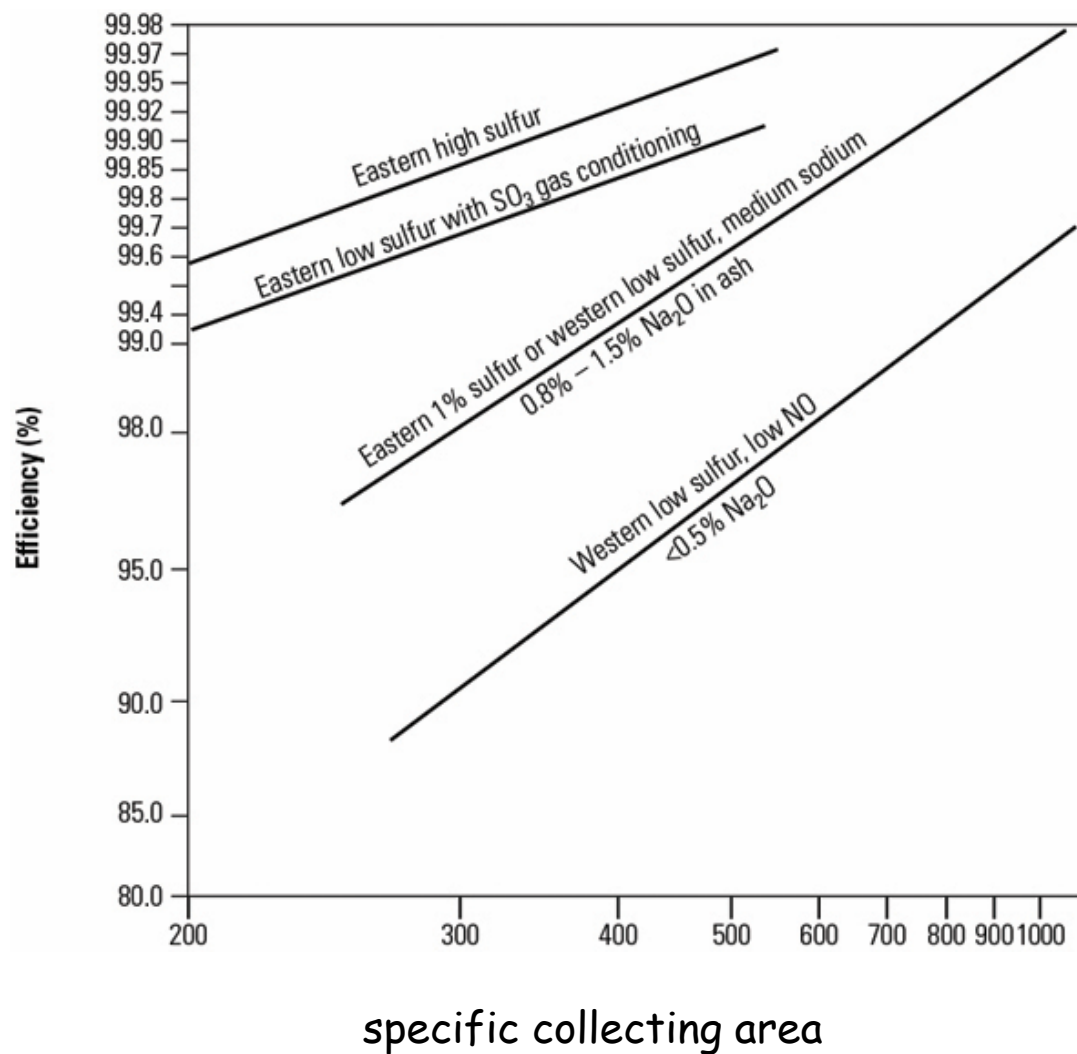
<i>Element</i>	<i>Symbol</i>	<i>Removal Efficiency [percent]</i>	<i>Element</i>	<i>Symbol</i>	<i>Removal Efficiency [percent]</i>
Antimony	Sb	81.00	Copper	Cu	99.60
Arsenic	As	99.10	Manganese	Mn	99.60
Barium	Ba	99.80	Mercury	Hg	<20.00
Beryllium	Be	97.40	Molybdenum	Mo	96.00
Cadmium	Cd	99.20	Nickel	Ni	98.20
Chromium	Cr	99.20	Phosphorus	P	98.00
Cobalt	Co	99.30	Vanadium	V	99.50

ΣΤΙΣ ΗΠΑ το 95% των ΑΗΜ έχουν συστήματα ESP



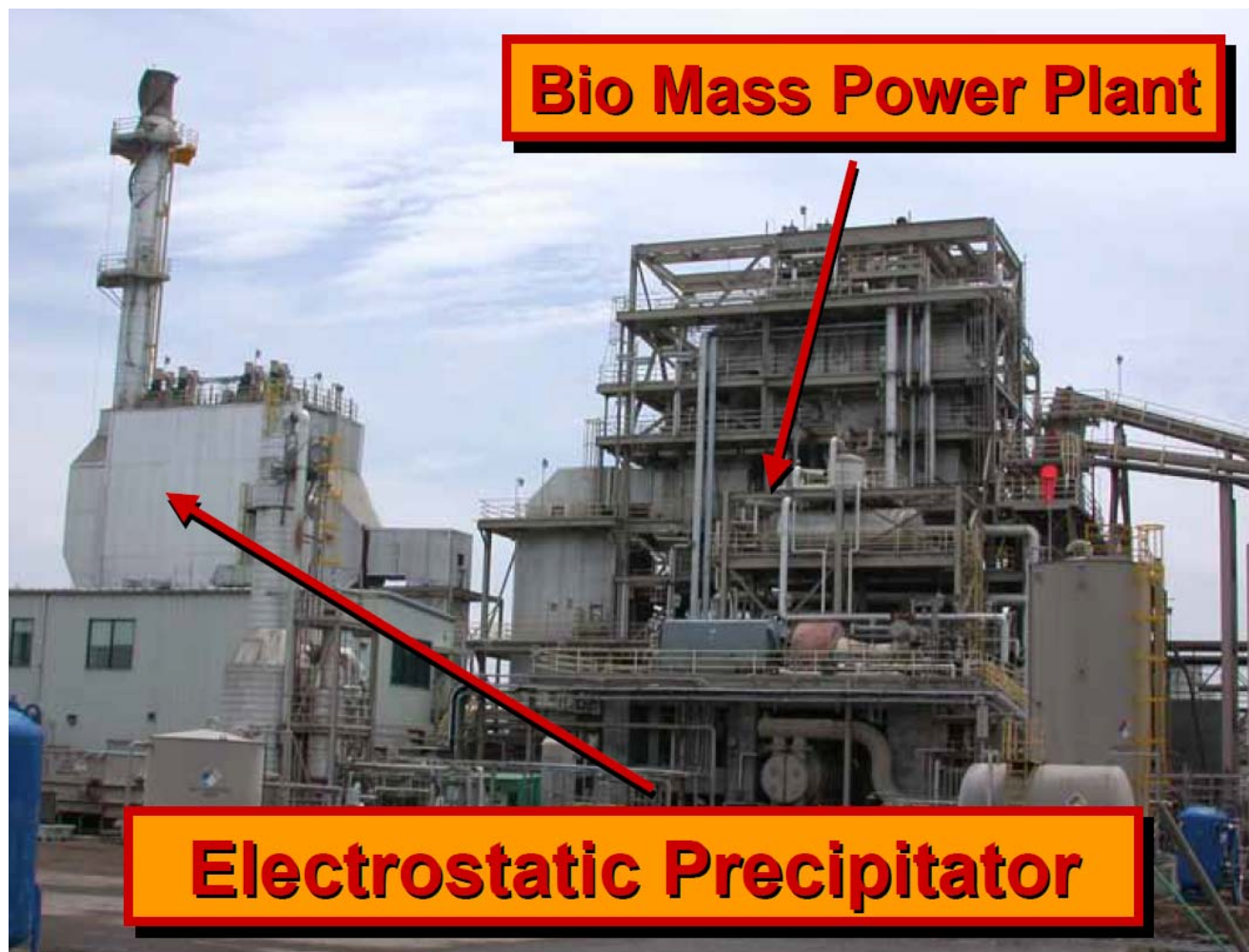
Απόδοση ΗΦ

Coal ash collecting. ESP collection efficiency versus specific collecting area (SCA) for various coals is illustrated. Source: K.S. Kumar and P.L. Feldman, *Beyond NSPS: Electrostatic Precipitator and Fabric Filter Technologies to Meet Future Emission Control Requirements*, 9th Symposium on Transfer & Utilization of Particulate Control Technology, October 1991.





Βιομηχανικές εφαρμογές ΗΦ





Βιομηχανικές εφαρμογές ΗΦ





Βιομηχανικές εφαρμογές ΗΦ



Pittsylvania consists of a single 83-megawatt wood-burning generating unit that began commercial service in 1994. Pittsylvania is equipped with a selective non-catalytic reduction system to reduce emissions of nitrogen oxides and electrostatic precipitators to reduce the amount of particulate matter. (<https://www.dom.com/about/stations/renewable/pittsylvania-power-station.jsp>)



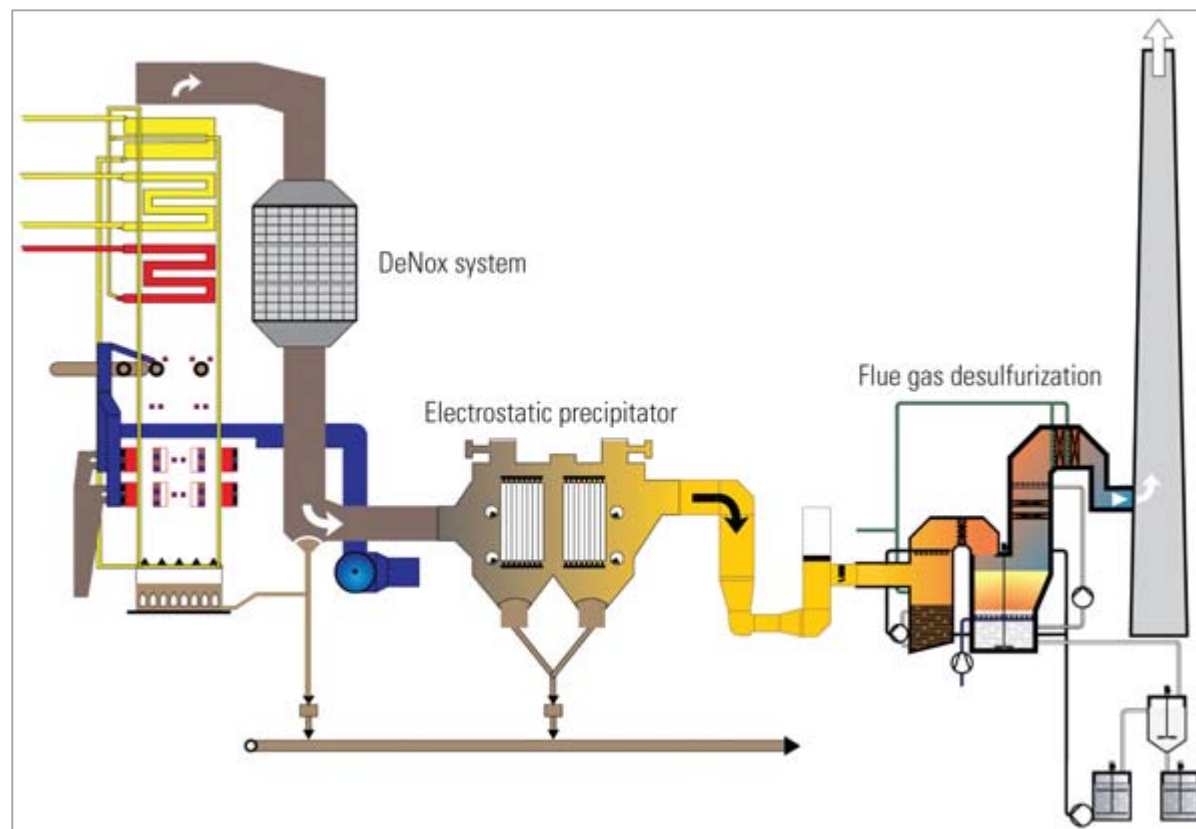
Βιομηχανικές εφαρμογές ΗΦ



Tenova TAKRAF



Βιομηχανικές εφαρμογές ΗΦ





Βιομηχανικές εφαρμογές ΗΦ

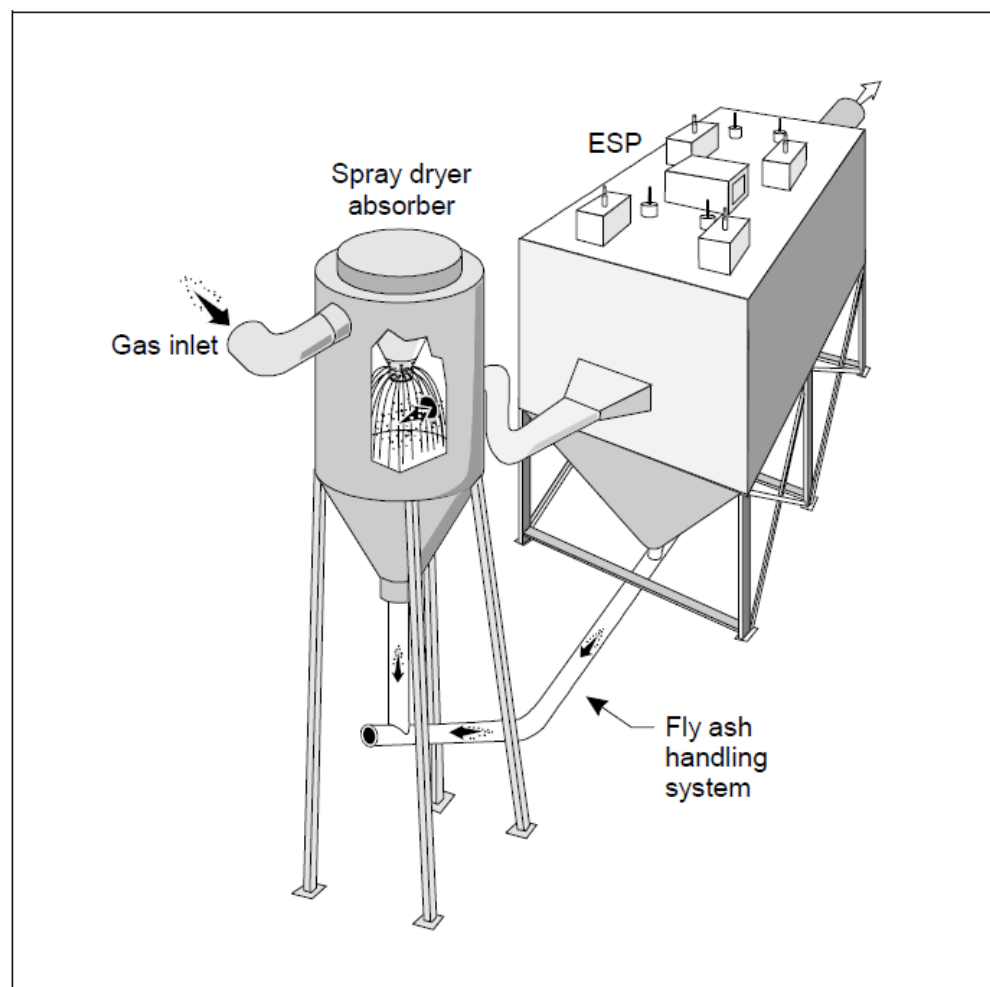


Figure 5-1. Spray dryer with ESP



Βιομηχανικές εφαρμογές ΗΦ

Table 5-2. Summary of typical ESP applications (by industry)

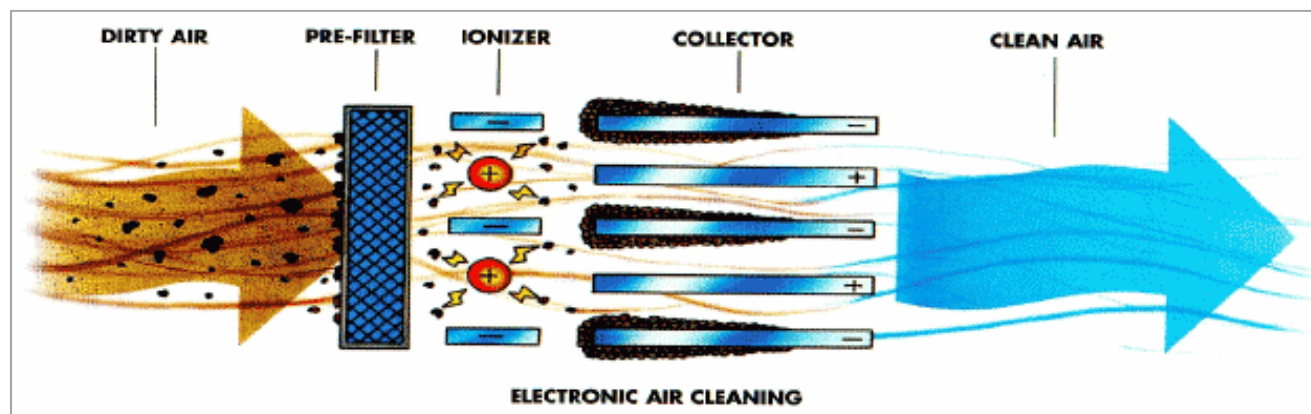
Industry	Process	Material Collected by ESP	ESP Collection Efficiency	ESP Features	Potential Problems
1. Industrial & utility boilers	Burning fossil fuels	Fly ash	> 99%	Hot-side and cold-side ESPs	Fly ash from low sulfur coals has high resistivity
	Dry SO ₂ control systems	Dry, alkaline product	> 99% (particles); 70-80% (SO ₂)	Cold-side ESP (usually rigid electrode or rigid frame)	
2. Cement plants	Cement kilns	Particulate emissions	> 99%	Usually hot-side ESPs with collection plates. Rapped or sprayed with water.	Dust often has high resistivity. Combustible gases are present when kiln is warming up.
	Clinker coolers	Particulate emissions	> 99%	Hot-side or cold-side depending on gas temperature.	Must prevent moisture in flue gas from condensing
3. Steel mills	Blast furnaces	Carbon monoxide and particulate matter	> 99% Particulate matter	Wet ESPs. Both plate and tube with water sprays.	
	Basic oxygen furnaces	Iron oxide dust	> 99%	Wet or dry plate ESPs	Iron oxide dust can have high resistivity

Cont. on next page



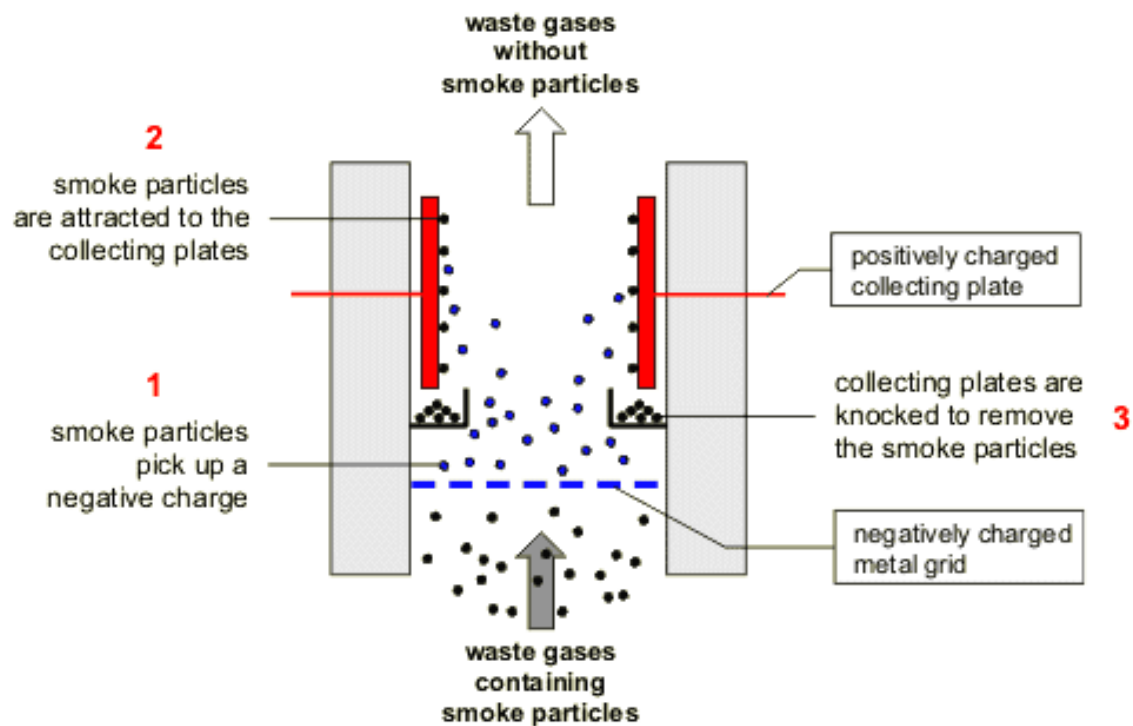
Εσωτερικοί κατακρημνιστήρες

- Εσωτερικοί κατακρημνιστήρες= «ηλεκτρονικοί καθαριστές αέρα»
- Συστήματα 2 σταδίων
- Χρησιμοποιείται σε εστιατόρια, μπαρ κτλ.





Εσωτερικοί κατακρημνιστές



http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/add_edexcel/static_elec/staticrev4.shtml



Παράδειγμα

Ένα ESP πρέπει να επεξεργαστεί 10000 m³ με 99% απόδοση.

α) Για μία πραγματική ταχύτητα πλαγιολίσθησης 0,08 m/s, υπολογίστε την απαιτούμενη επιφάνεια συλλογής.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση Deutsch για την ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνεια των πλακών έχουμε

$$A = -\left(\frac{Q}{w}\right) \ln(1-n) = \frac{10.000 \text{ (m}^3/\text{s)}}{0,08 \text{ (m/s)} \times 60 \text{ (s/min)}} [-\ln(1-0,99)] = 9594 \text{ m}^2$$

β) Υποθέτοντας ότι οι πλάκες ύψος 5 m και μήκος 2 m και είναι διαταγμένες σε τρία τμήματα στη διεύθυνση της ροής, υπολογίστε το λόγο των διαστάσεων.

$$R = \frac{L}{H} = \frac{3 \times 2}{5} = 1,2$$

γ) Εκτιμήστε το συνολικό αριθμό των πλακών στο συγκεκριμένο ESP.

$$N = \frac{A}{A_p} + N_s = \frac{9594 \text{ (m}^2\text{)}}{2 \times 5 \times 2 \text{ (m}^2\text{)}} + 3 = 482,7 \Rightarrow N = 483 \text{ πλάκες (πρέπει να διαιρούνται με το 3)}$$

δ) Υπολογίστε την ισχύ του ανεμιστήρα εάν η μέση πτώση πίεσης είναι 15 mm H₂O και η απόδοση ανεμιστήρα/κινητήρα είναι 70%.

$$\dot{W}_f = \frac{Q \Delta P}{n} = \frac{1}{0,7} \times \left[\frac{10.000 \text{ (m}^3/\text{min)}}{60 \text{ (s/min)}} \right] \times [15 \text{ (mmH}_2\text{O)} \times 9.80665 \text{ (Pa/mmH}_2\text{O)}] =$$

(από τους πίνακες μετατροπής)

$$= 35 \text{ kW} = 35 \text{ (kW)} \times 1,341 \text{ (hp/kW)} = 47 \text{ hp}$$