



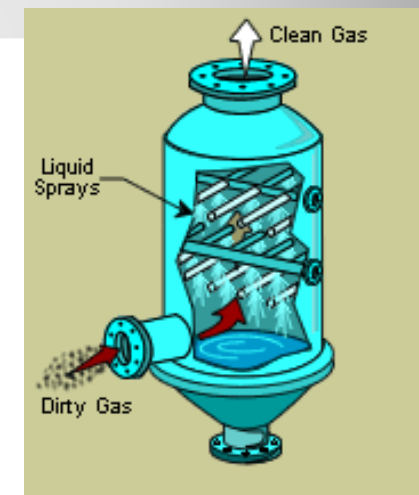
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

MM900

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΣΗΣ

2^η ΕΝΟΤΗΤΑ, Μέρος 4 Πλυντρίδες

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





Εισαγωγή

- Οι **πλυντρίδες** ανήκουν σε μία ευρεία ομάδα συσκευών ελέγχου της αέριας ρύπανσης, που χρησιμοποιούνται βασικά για **την απομάκρυνση σωματιδίων και/ή αέριων ρύπων** (με διαλυτοποίηση ή απορρόφηση) από **βιομηχανικά απαέρια**.
- Παραδοσιακά οι πλυντρίδες αναφέρονται στα συστήματα ελέγχου της αέριας ρύπανσης που χρησιμοποιούν μία υγρή φάση (κυρίως νερό) για να «ξεπλύνουν» ανεπιθύμητους ρύπους από ένα αέριο ρεύμα.
- Γενικά, όταν τα λεπτά σωματίδια έλθουν σε επαφή με ένα υγρό, τότε αμέσως προσκολλώνται σε αυτό. Επίσης σωματίδια ή σταγονίδια μεγέθους 50 μm συλλέγονται εύκολα σε διαχωριστή. Έτσι αν γίνει δυνατή η προσκόλληση των λεπτών σωματιδίων στα σταγονίδια, η συλλογή τους γίνεται ευκολότερη.
- Η ιδέα προφανώς έρχεται από τη φύση: **η βροχή ξεπλένει τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα. Μετά τη βροχή η ατμόσφαιρα είναι πεντακάθαρη.**



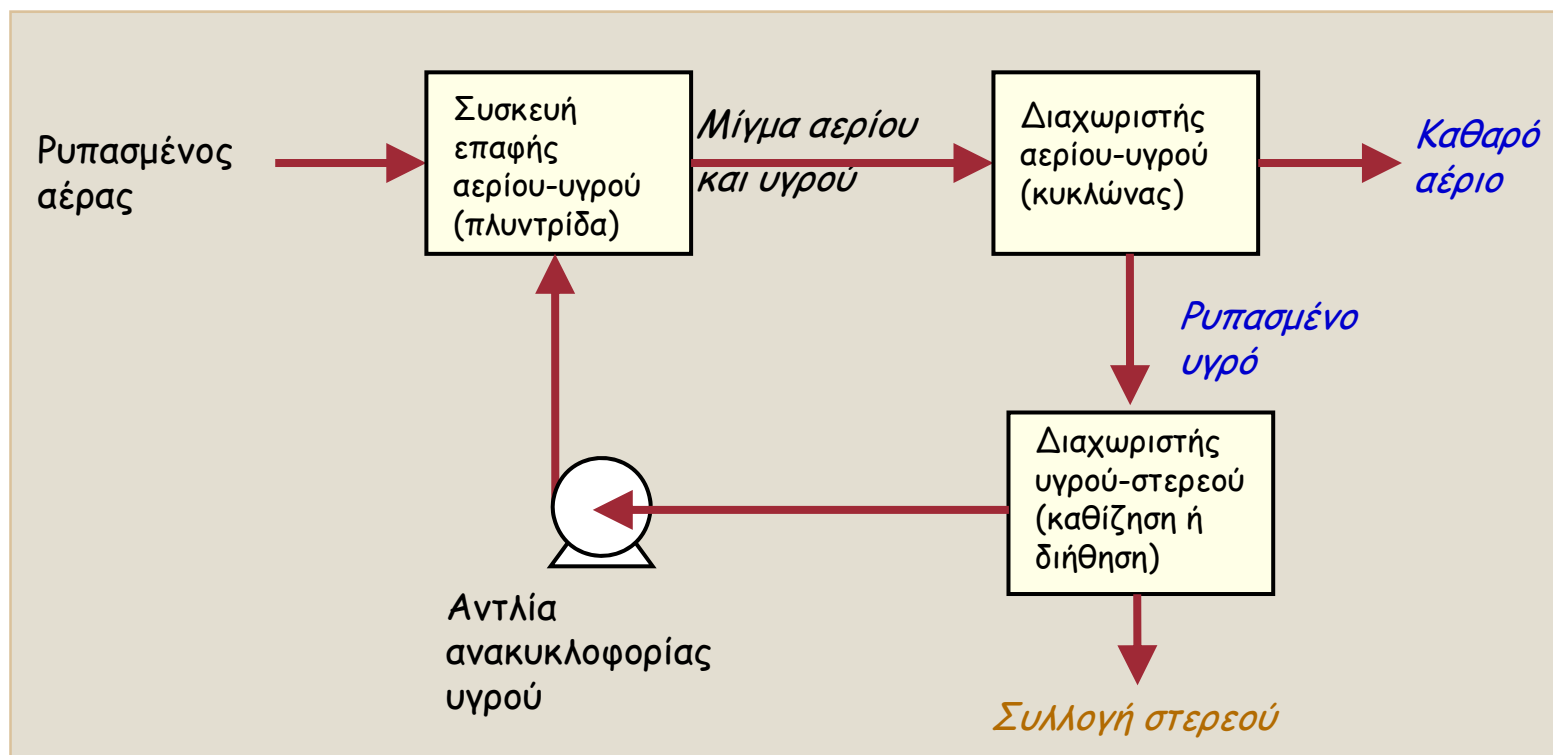


Εισαγωγή (II)

- Πρόσφατα, ο όρος πλυντρίδα χρησιμοποιείται επίσης για να περιγράψει το σύστημα της εισαγωγής ενός στερεού αντιδραστηρίου ή ενός αιωρήματος σε ένα ρυπασμένο ρεύμα με σκοπό την απομάκρυνση των όξινων αερίων.
- Οι πλυντρίδες είναι οι κύριες συσκευές για τον έλεγχο αέριων εκπομπών και ειδικά των όξινων αερίων.
- Θα πρέπει να βρεθεί η κατάλληλη μέθοδος για το διαχωρισμό της στερεής φάσης (σωματίδια) από την υγρή φάση, και η οποία μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Ειδάλλως, το πρόβλημα της ρύπανσης μεταφέρεται από την αέρια φάση στην υγρή φάση.
- Μπορούν να λειτουργήσουν με μικρή ή υψηλή απόδοση.
- Προσαρμοστικότητα ανάλογα με την περίπτωση.
- Σχετικά υψηλό κόστος λειτουργίας.



Υγρή πλυντρίδα



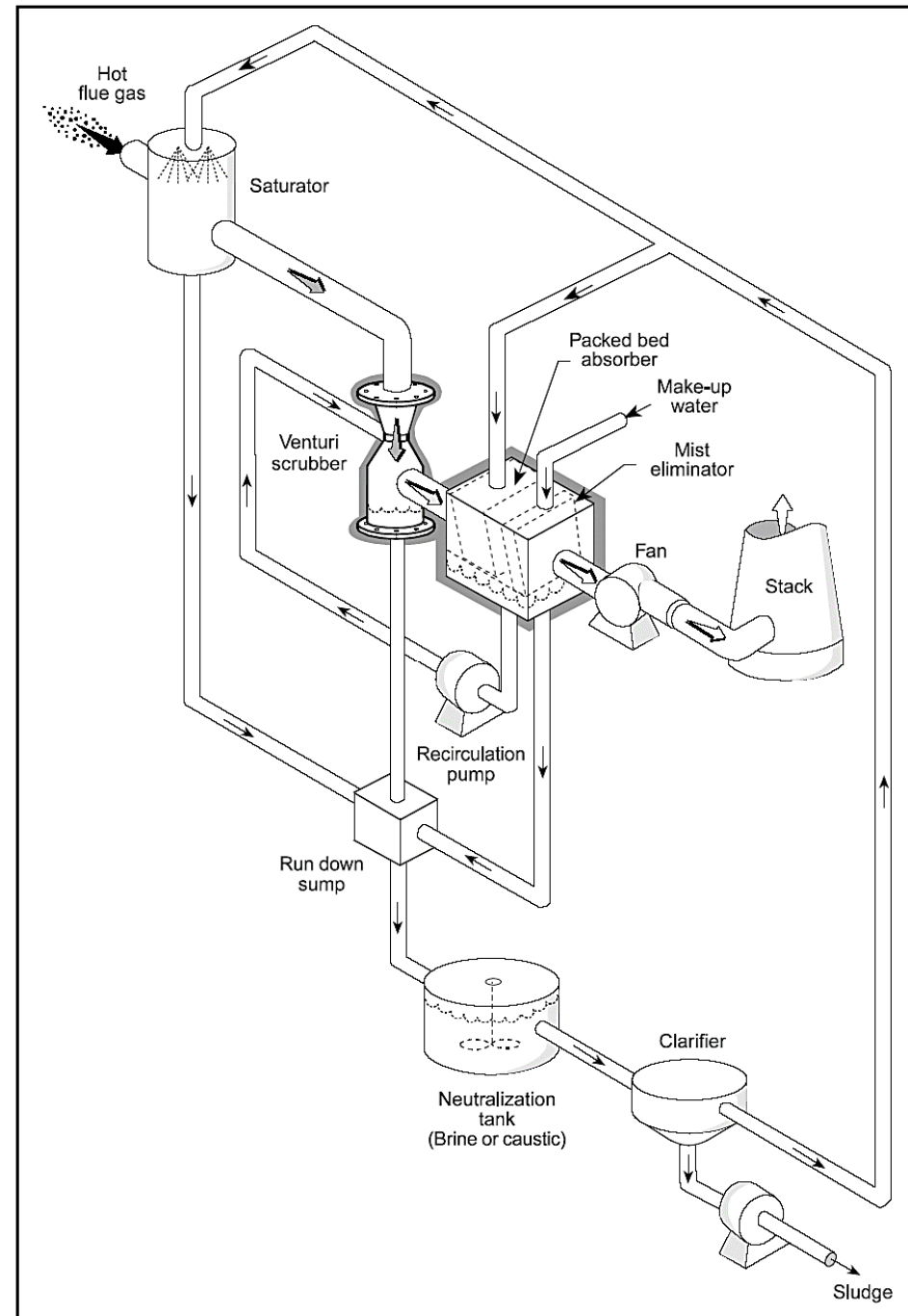
Τα κυριότερα τμήματα ενός συστήματος πλυντρίδας.

* Οι καταλληλότερες συνθήκες για την απομάκρυνση των σωματιδίων αντιστοιχούν στις χειρότερες συνθήκες για τον έλεγχο αερίων.

Υγρή πλυντρίδα

Τα κυριότερα τμήματα ενός συστήματος πλυντρίδας.

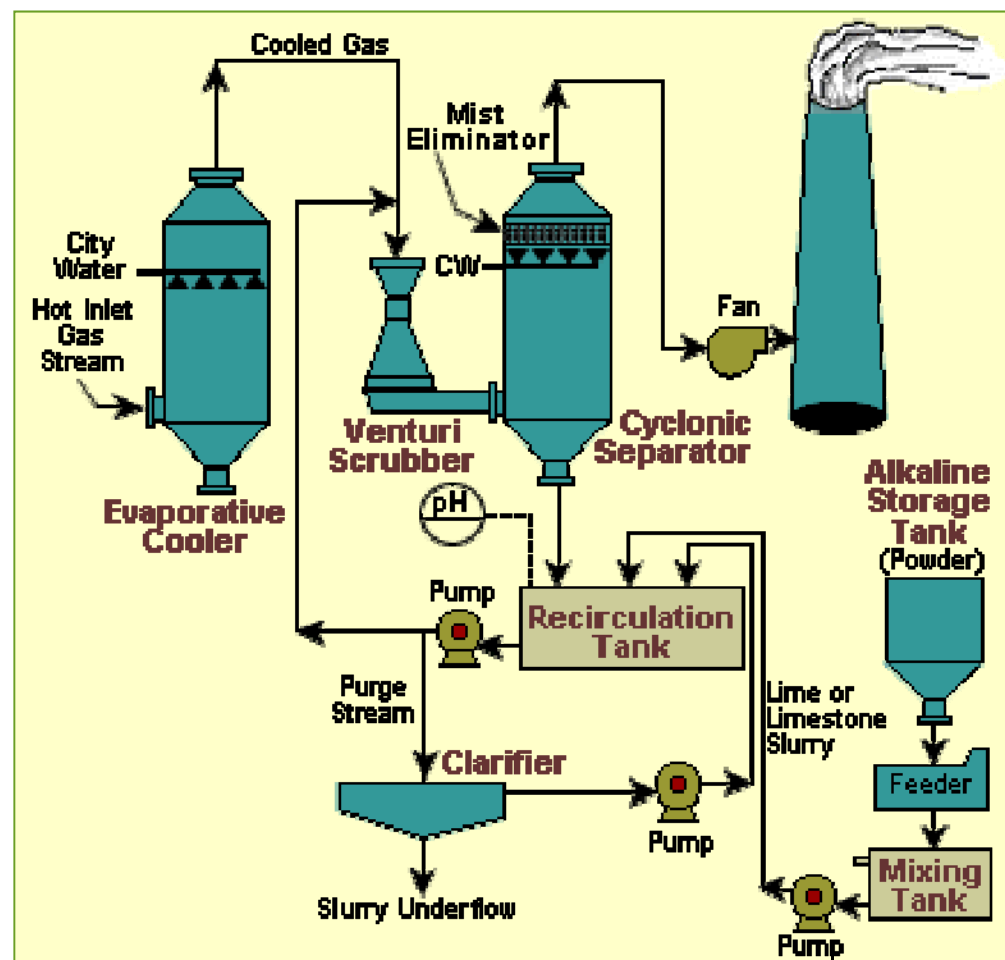
- Αγωγοί και σύστημα ανεμιστήρα
- (Προαιρετικό) σύστημα κορεσμού
- Δοχείο πλυντρίδας
- Αποτροπέας σταγονιδίων
- Αντλητικό σύστημα
- Επεξεργασία υγρών
- Καπνοδόχος





Παράδειγμα συστήματος πλυντρίδας

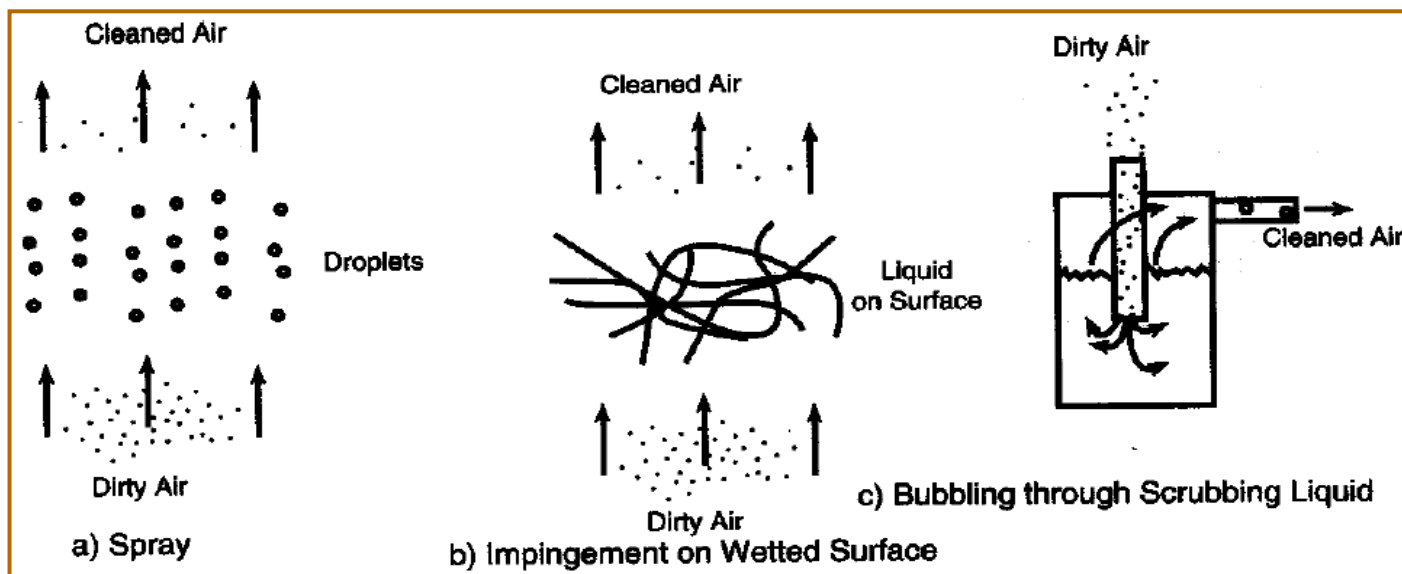
Δέσμευση
σωματιδίων και
όξινων αερίων





Εισαγωγή (III)

- Σε μία υγρή πλυντρίδα το ρυπασμένο αέριο ρεύμα φέρεται σε επαφή με το μέσο έκπλυσης με **ψεκασμό υγρού**, με τη **διέλευση του μέσω από μία υγρή φάση**, με **πρόσκρουση σε υγρή επιφάνεια** κ.α.

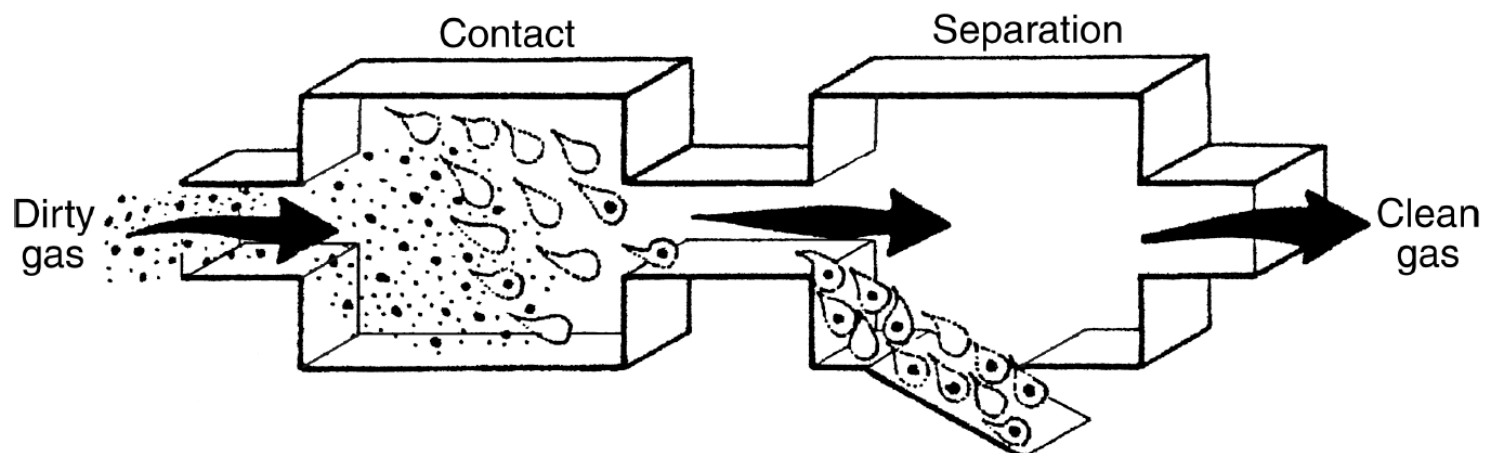


- Υπάρχει **πληθώρα σχεδιασμών πλυντρίδων** και συστημάτων πλυντρίδων. Στόχος του σχεδιασμού είναι η όσο το δυνατόν **καλύτερη επαφή μεταξύ του υγρού και του ρυπασμένου αέριου ρεύματος**.



Εισαγωγή (IV)

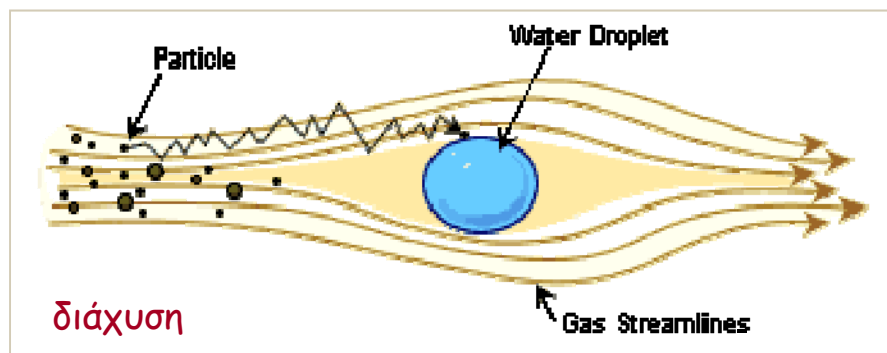
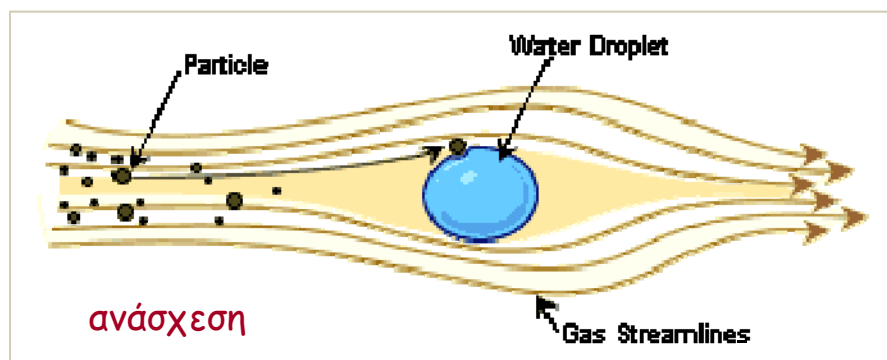
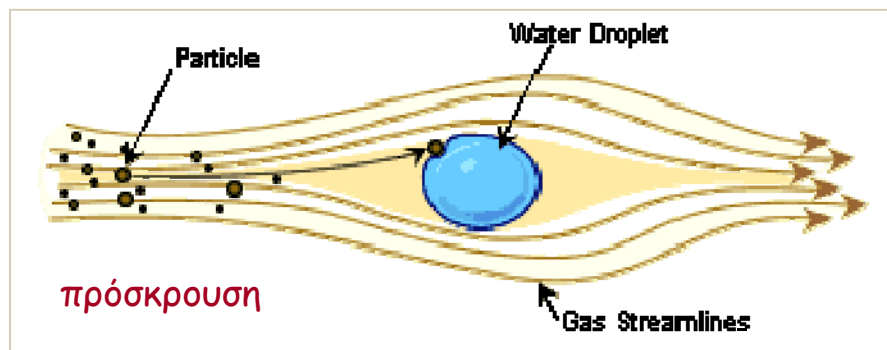
- Μπορούν να παρασταθούν ότι αποτελούνται από δύο ζώνες: τη ζώνη επαφής και τη ζώνη διαχωρισμού.



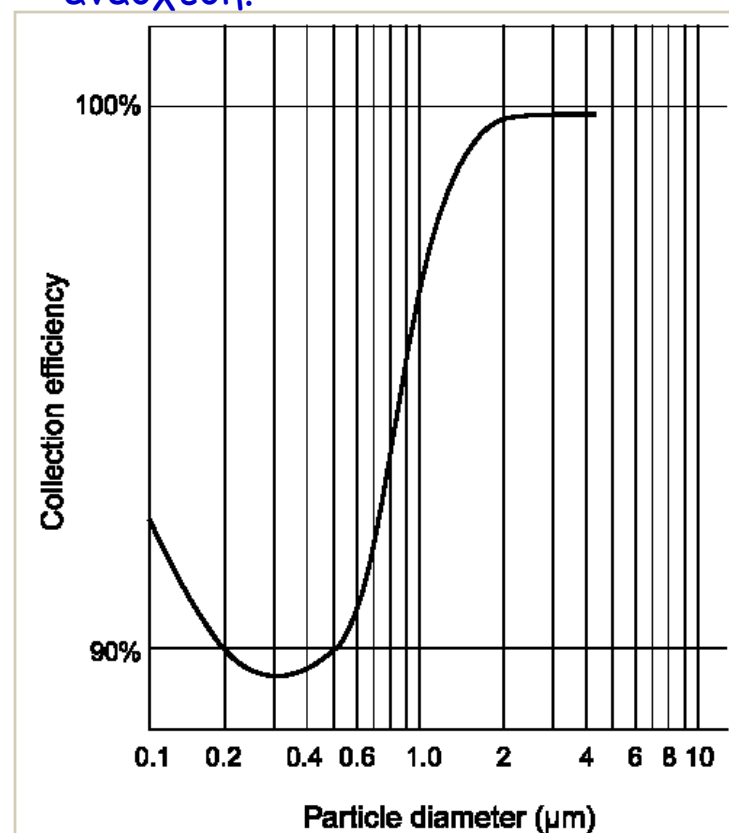
- Ανάγκη συστήματος αποτροπής του συμπαρασυρμού σταγονιδίων από το καθαρό ρεύμα (demister).



Μηχανισμοί σύλληψης των σωματιδίων - Απόδοση



- Οι κύριοι μηχανισμοί σύλληψης των σωματιδίων στα σταγονίδια είναι με πρόσκρουση, διάχυση και με ανάσχεση.



Υποθετική καμπύλη απόδοσης.



Πλυντρίδες: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα

- Μικρές απαιτήσεις σε χώρο.

Οι πλυντρίδες μειώνουν συγχρόνως τη θερμοκρασία (ψύξη) και τον όγκο των αερίων. Για το λόγο αυτό οι αγωγοί και οι ανεμιστήρες κατάντη της συσκευής είναι μικρότερα και με μικρότερο κόστος.

- Δεν δημιουργούνται δευτερογενείς πηγές σκόνης.

Όταν συλληφθούν τα σωματίδια στο υγρό δεν μπορούν να «αποδράσουν».

- Επεξεργάζονται αέρια σε υψηλή θερμοκρασία και υγρασία.

Δεν υπάρχουν περιορισμοί στη θερμοκρασία και προβλήματα συμπύκνωσης όπως στα σακόφιλτρα και στα ESP.

- Ελαχιστοποίηση των κινδύνων φωτιάς και εκρήξεων

Πολλές ξηρές σκόνες γίνονται εύφλεκτες.

- Δυνατότητα ελέγχου συγχρόνως σωματιδιακών και αέριων ρύπων, αλλά και νεφελώματα σταγονιδίων.

- Ο βαθμός απόδοσης μπορεί να μεταβάλλεται.



Πλυντρίδες: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Μειονεκτήματα

■ Προβλήματα διάβρωσης

Τα διαλυμένα αέρια στο νερό μπορούν να το καταστήσουν άκρως διαβρωτικό. Απαιτείται σωστή επιλογή υλικών.

■ Απαίτηση για υψηλή ισχύ.

Υψηλή απόδοση επιτυγχάνεται μόνο σε συνθήκες υψηλής πτώσης πίεσης που οδηγούν σε υψηλότερο λειτουργικό κόστος.

■ Προβλήματα διάθεσης του νερού

Μπορεί να χρειάζονται δεξαμενές καθίζησης και διαυγαστήρες λάσπης.

■ Δύσκολη ανάκτηση του σωματιδιακού προϊόντος

Η αφύγρανση και η ξήρανση της λάσπης από την πλυντρίδα κάνει την επανάχρηση της σκόνης δαπανηρή και προβληματική.

■ Η διάθεση της λάσπης πιθανόν να είναι δαπανηρή

■ Μικροκλιματικά προβλήματα

Τα κορεσμένα σε νερό απαέρια από την καπνοδόχο μπορεί να δημιουργούν ένα υγρό, ορατό «πλούμιο» (plume) προκαλώντας τοπικά μετεωρολογικά προβλήματα.



Τύποι πλυντρίδων

Ανάλογα με το μηχανισμό επαφής, όπως:

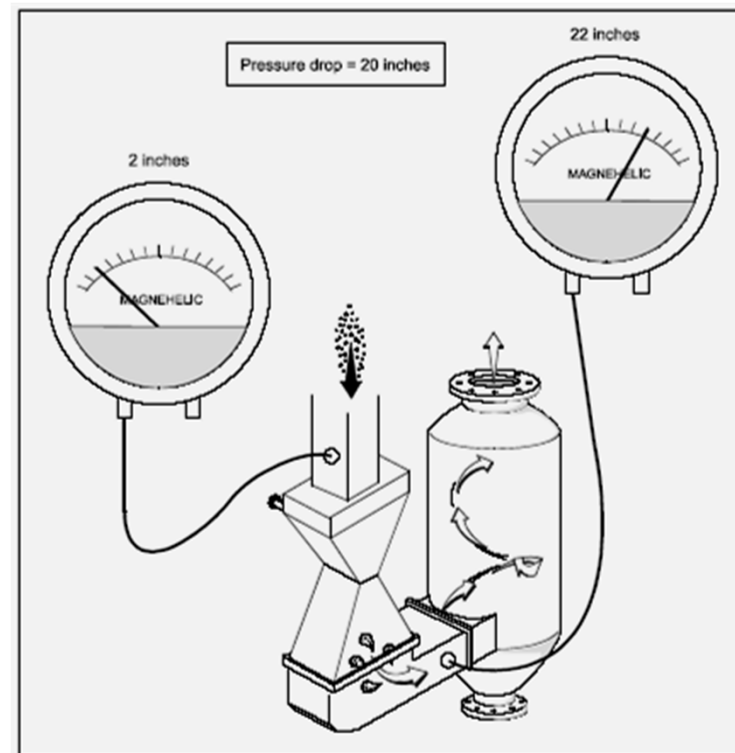
- Ακροφύσια ψεκασμού
- Επιφάνειες πρόσκρουσης
 - Πλάκες
 - Ανακλαστήρες (Baffles)
 - «Καπάκια» (Bubble caps)
 - Πληρωτικό υλικό (Packing)
- Στενώσεις Venturi
- Στόμια καταιονισμού (Spray inducing orifices)
- Μηχανικοί στροφείς (Mechanically driven rotors)
-



Τύποι πλυντρίδων σε σχέση με την πτώση πίεσης

Οι πλυντρίδες μπορούν να ταξινομηθούν σε σχέση με την πτώση πίεσης:

- Χαμηλής ενέργειας ($\Delta P=2-5 \text{ cm H}_2\text{O}$): π.χ. θάλαμοι ψεκασμού
- Χαμηλής-μέσης ενέργειας ($\Delta P=5-15 \text{ cm H}_2\text{O}$): π.χ. τύπου κυκλώνα
- Μέσης - υψηλής ενέργειας ($\Delta P=15-50 \text{ cm H}_2\text{O}$): π.χ. με πληρωτικά υλικά
- Υψηλής ενέργειας ($\Delta P>50 \text{ cm H}_2\text{O}$): π.χ. Venturi



Μέτρηση πτώσης πίεσης σε μία πλυντρίδα venturi

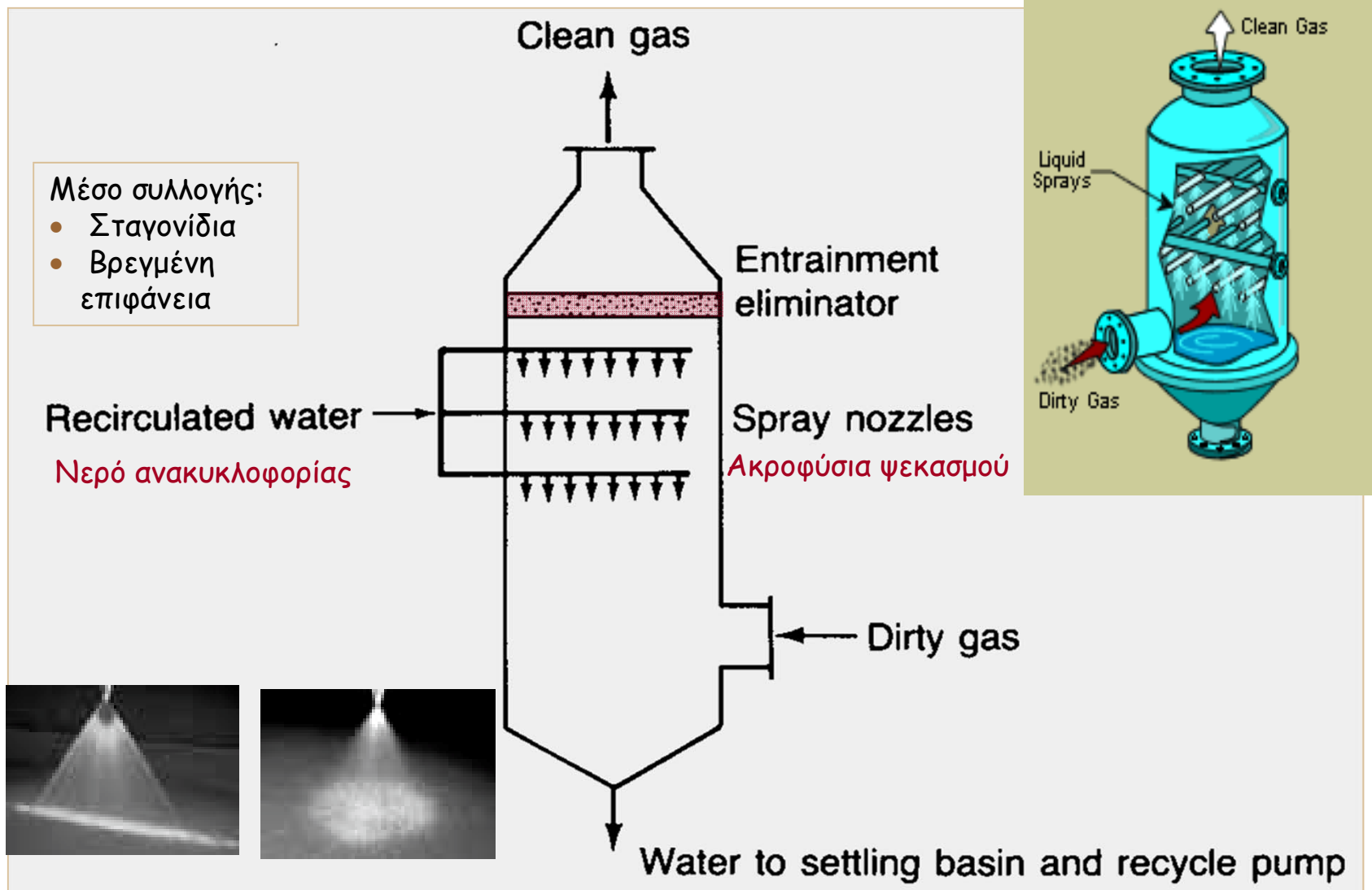


1. Πλυντρίδες με θάλαμο ψεκασμού (spray chambers)

- ✿ Τα σταγονίδια παράγονται μέσω ακροφυσίων ψεκασμού (spray nozzles). Το μέγεθος των σταγονιδίων ρυθμίζεται ώστε να βελτιστοποιείται η επαφή των σωματιδίων με την υγρή φάση. Πίεση ακροφυσίων: 2,5-3,5 bar
- ✿ Διάταξη: αντίθετη ροή (counter-flow) και διασταυρούμενη ροή (cross-flow). Ορισμένες φορές χρησιμοποιούνται και διαφράγματα.
- ✿ Απαίτηση σε νερό: 1,3-2,7 kg νερό ανά m³ αερίου.
- ✿ Πτώση πίεσης: 0,25-1,0 kPa (1-4 in H₂O)
- ✿ Βαθμοί απόδοσης: >90% για σωματίδια μεγαλύτερα από 8 μm (χαμηλή απόδοση).
- ✿ Έχουν χρησιμοποιηθεί σε ποικιλία βιομηχανικών διεργασιών: έλεγχος σκόνης χαρτιού και αιωρούμενα στερεά κατά την παραγωγή υαλοφάσματος.
- ✿ Χαμηλή κατανάλωση ισχύος: 1,5-6 hp ανά 100 m³/min αέρα.

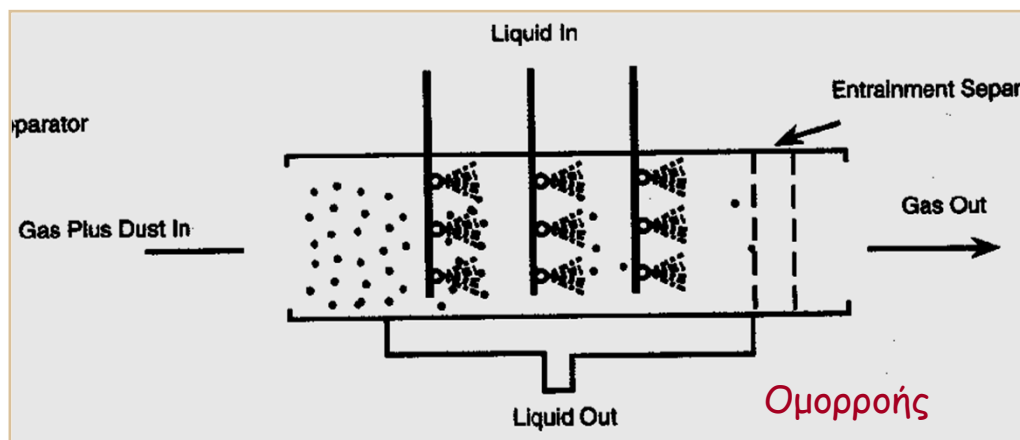
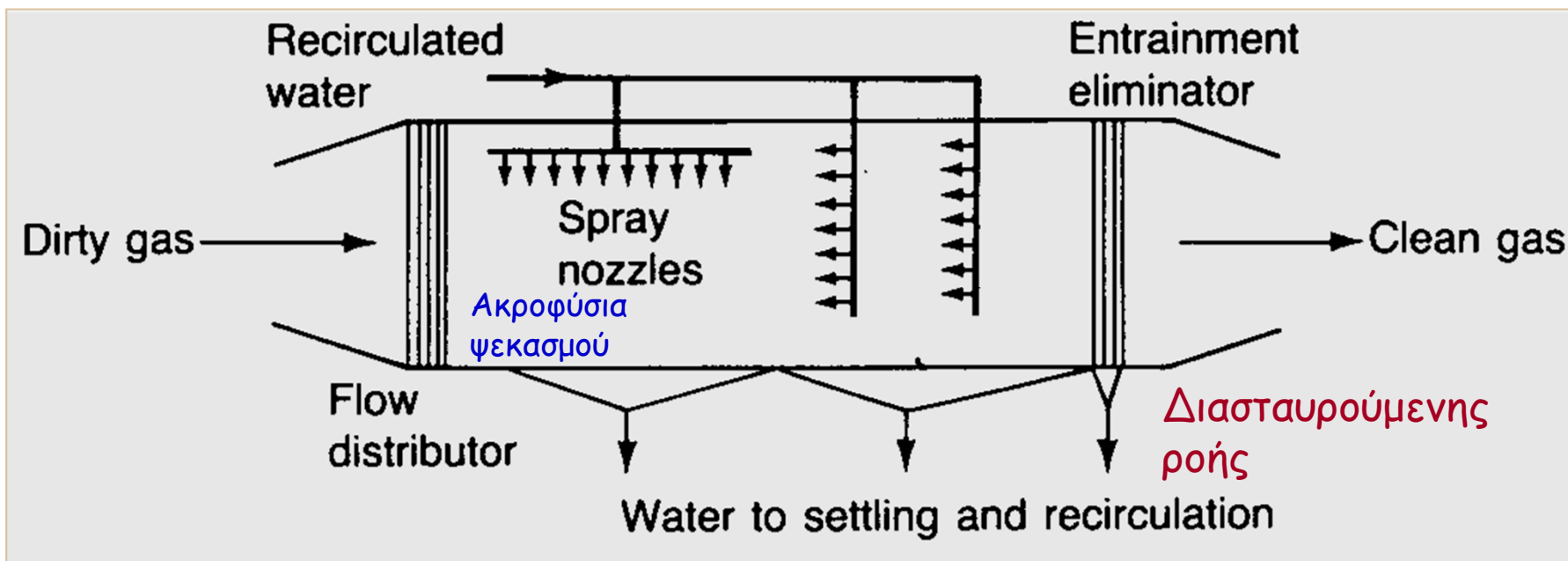


Πλυντρίδα κατακόρυφου θαλάμου (Vertical spray chamber - countercurrent flow)



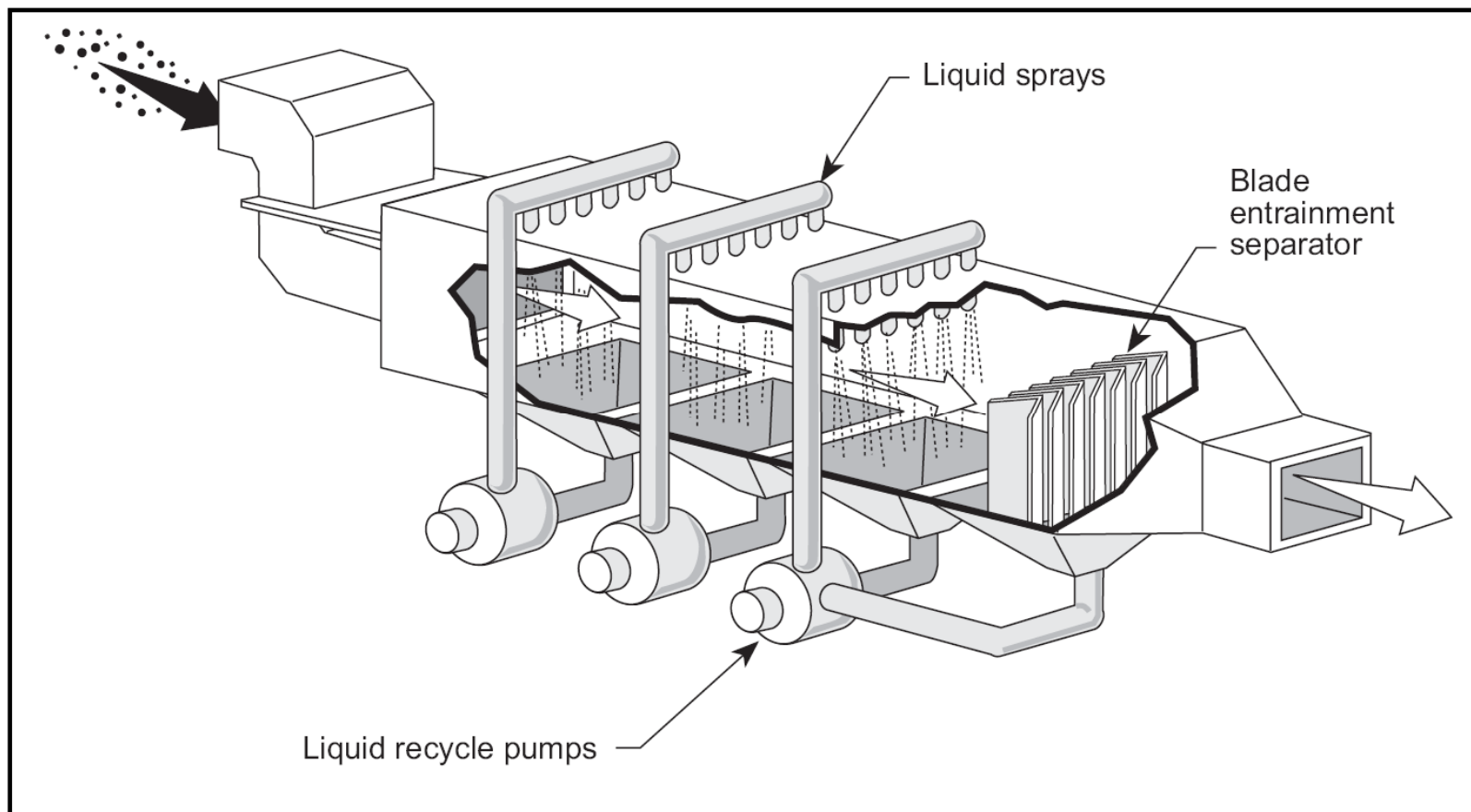


Πλυντρίδα οριζόντιου θαλάμου (horizontal spray chamber - cross ή cocurrent-flow)



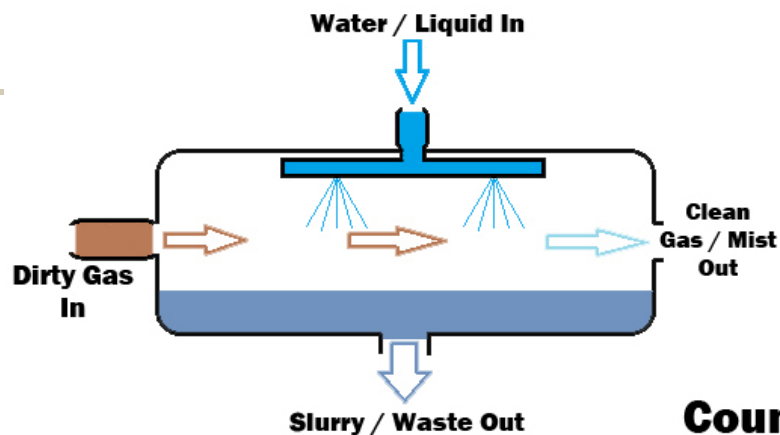


Πλυντρίδα οριζόντιου θαλάμου (horizontal spray chamber - cross ή cocurrent-flow)

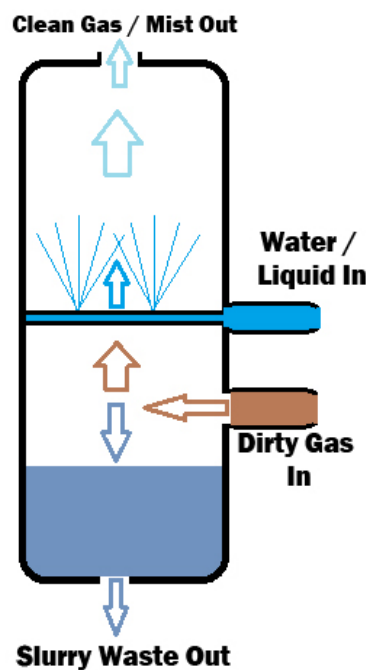




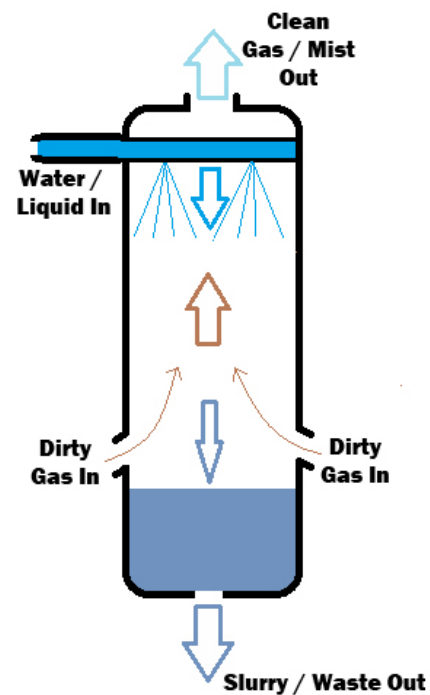
Cross Current Flow



Co-current Flow



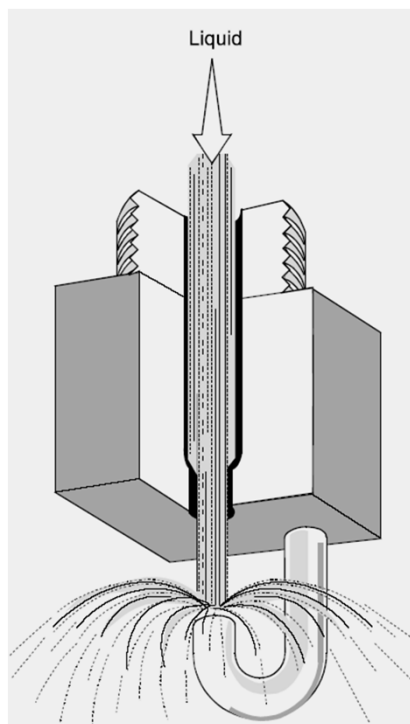
Counter Current Flow



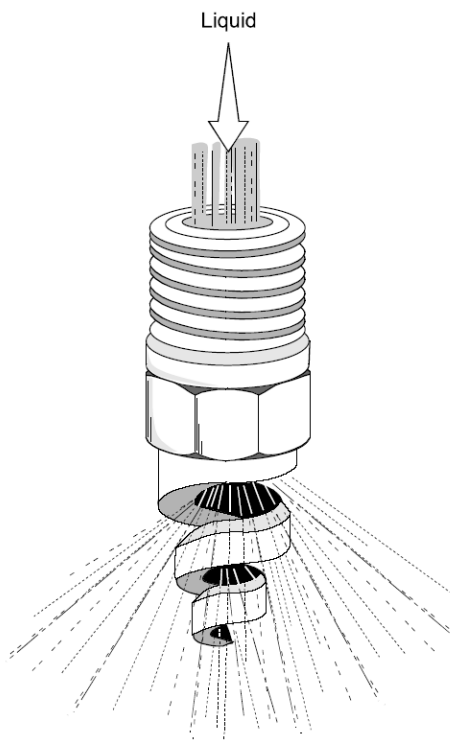
http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/scrubbers



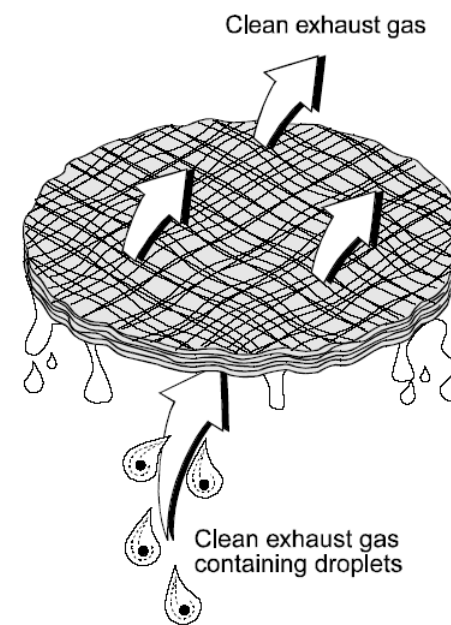
Πλυντρίδες με θάλαμο ψεκασμού (spray chambers)



Ακροφύσιο πρόσκρουσης



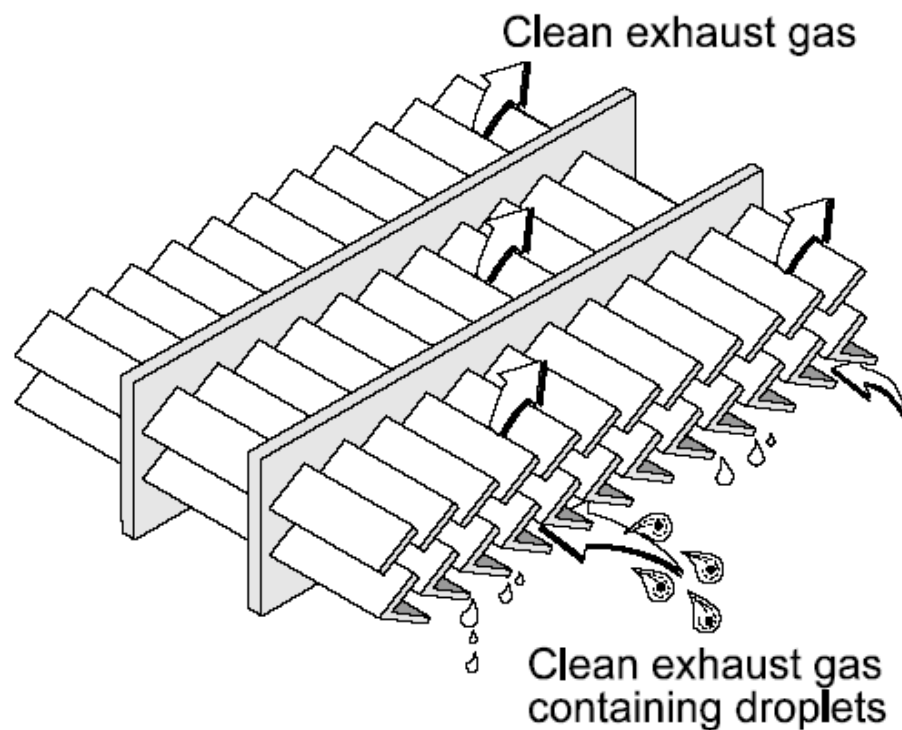
Ελικοειδές ακροφύσιο



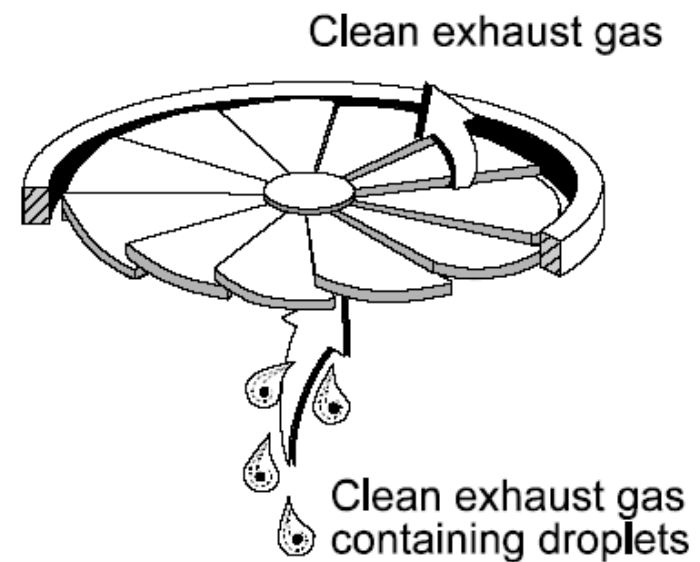
Αποτροπέας σταγονιδίων



Πλυντρίδες με θάλαμο ψεκασμού (spray chambers)



(a) Chevron blade



(b) Impingement blade

Διαχωριστές σταγονιδίων

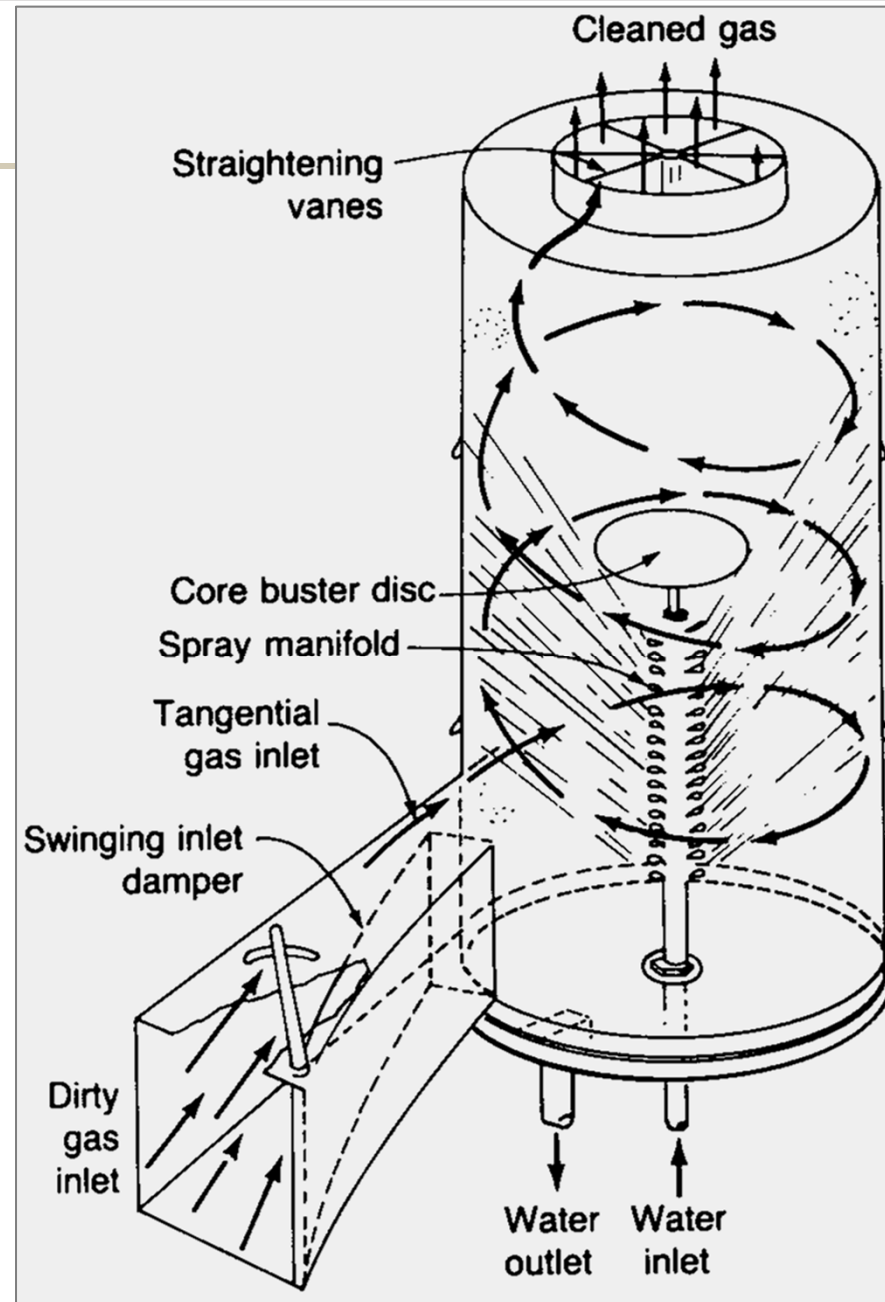


2. Θάλαμοι ψεκασμού με κυκλώνα (Cyclone Spray Chamber)

- ✿ Τροποποίηση του θαλάμου ψεκασμού για βελτίωση της απόδοσης.
- ✿ Η ροή του ρυπασμένου αέριου ρεύματος γίνεται **εφαπτομενικά** (φυγοκεντρική δύναμη) για καλύτερο διαχωρισμό των σταγονιδίων
- ✿ Χρήση σταγονιδίων μικρότερου μεγέθους
- ✿ Ταχύτητες εισόδου: 50-80 m/s (150-250 ft/s)
- ✿ Απαίτηση σε νερό: 0,3-1,3 kg νερό ανά m³ αερίου (2-10 gal/1000 ft³)
- ✿ Πτώση πίεσης: 1,5-10 inH₂O (0,4-2,5 kPa)
- ✿ Βαθμοί απόδοσης: ~95% για σωματίδια μεγαλύτερα από 5 μm.

Θάλαμοι ψεκασμού με κυκλώνα

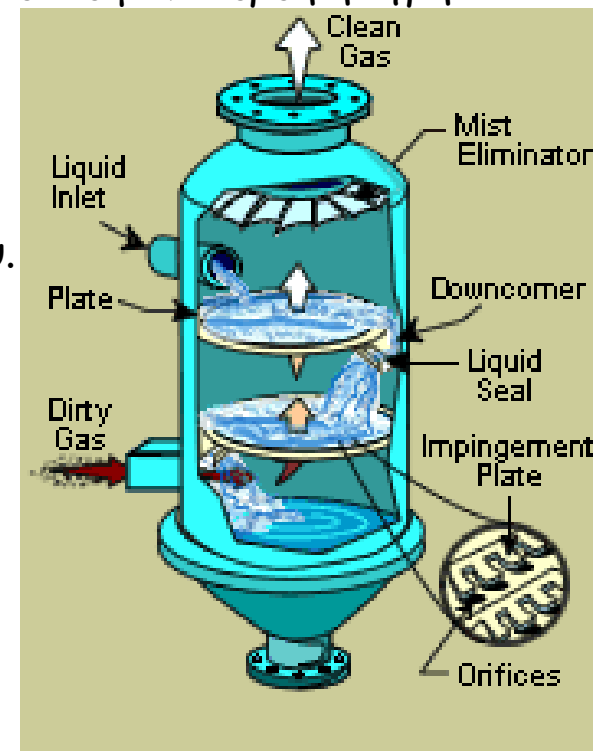
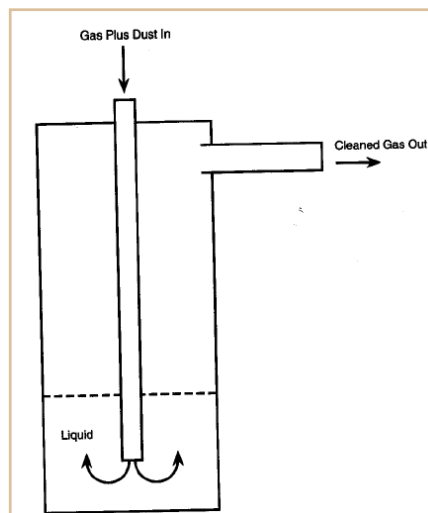
(Cyclone Spray Chamber)





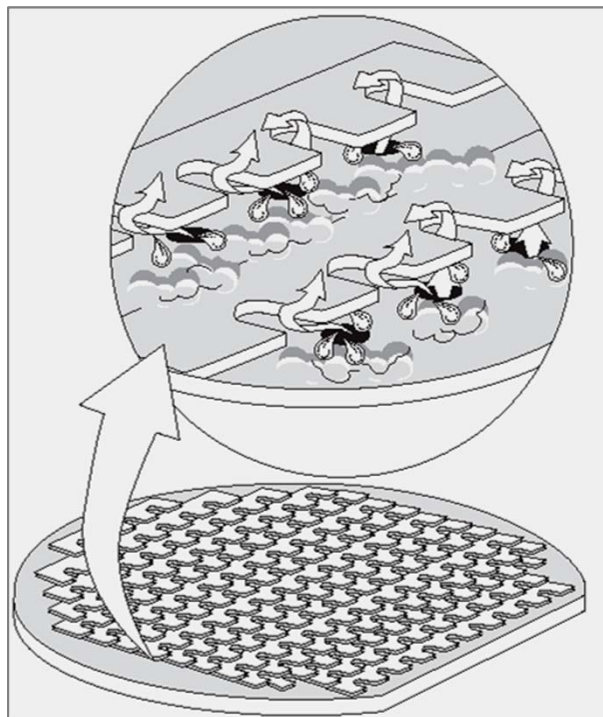
3. Πλυντρίδες πρόσκρουσης σε υγρό (Impingement Scrubber)

- ✿ Τα σωματίδια ή το μίγμα σωματιδίων-σταγονιδίων προσκρούει σε μία στερεή ή υγρή επιφάνεια.
- ✿ Διάφοροι σχεδιασμοί.
- ✿ Απαίτηση σε νερό (χαμηλή): 0,4-0,7 kg νερό ανά m^3 αερίου.
- ✿ Πτώση πίεσης: 0,50-1,5 kPa ανά στάδιο
- ✿ Βαθμοί απόδοσης: ~97% για σωματίδια μεγαλύτερα από 5 μm .



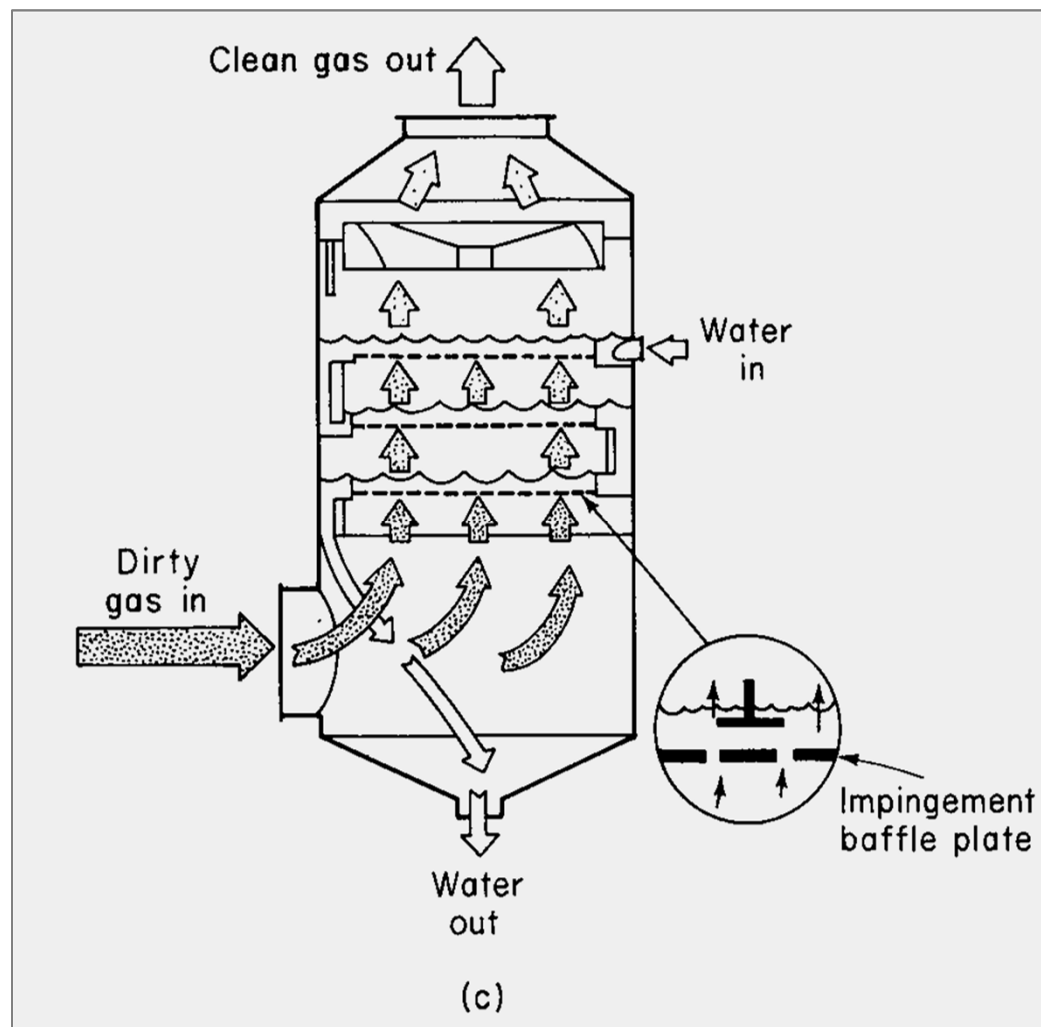


Πλυντρίδες πρόσκρουσης σε υγρό με διάτρητες πλάκες (Impingement Scrubber)



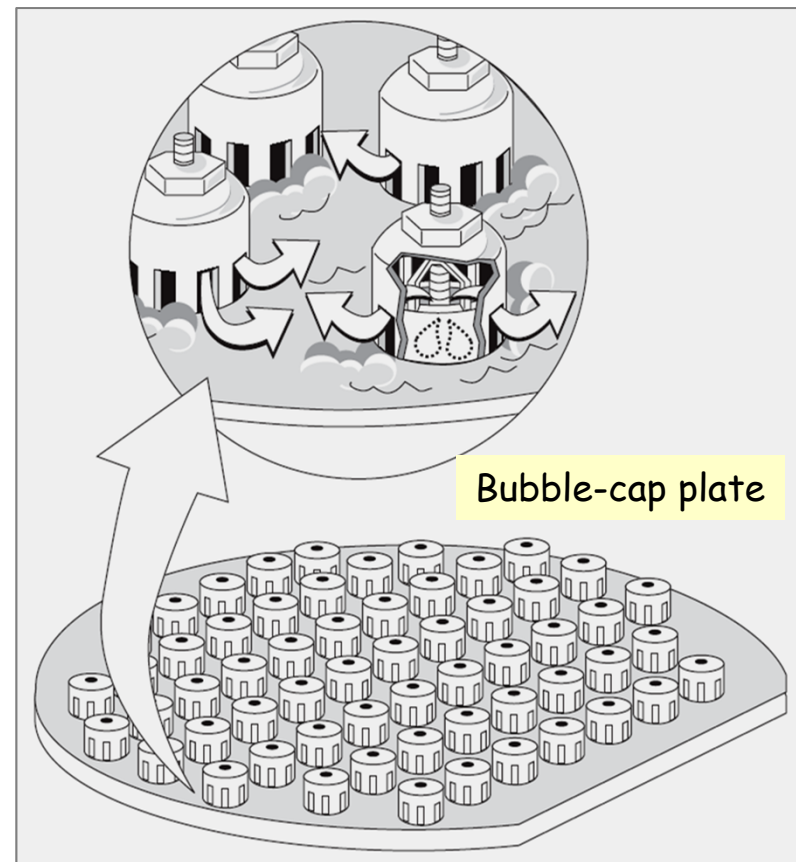
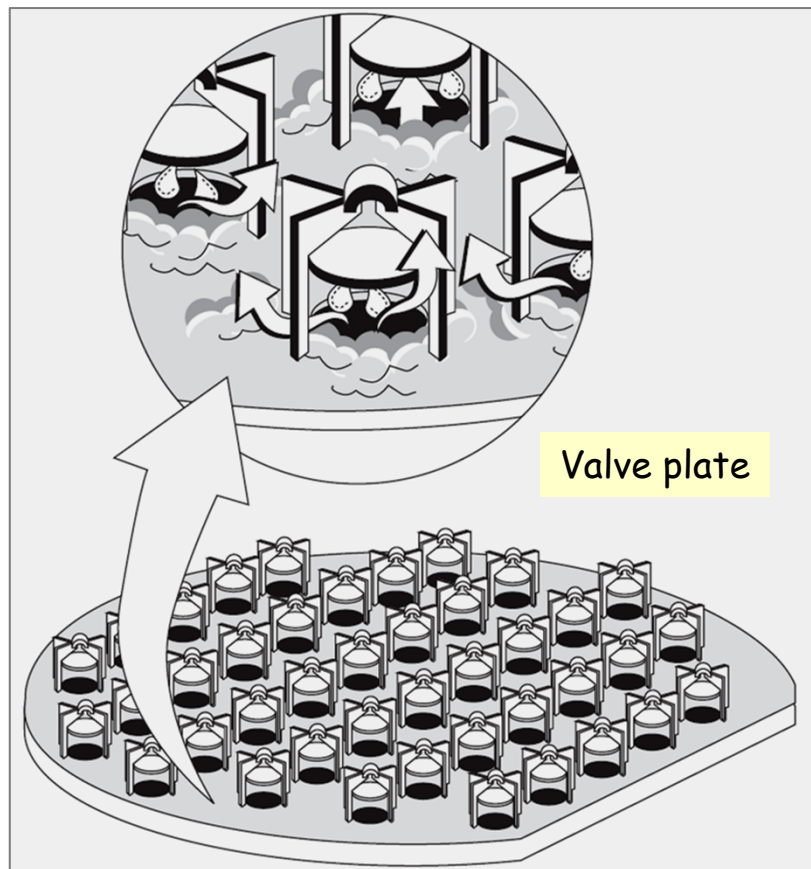
Πηγή: EPA

Flagan & Seinfeld, *Fundamental of Air Pollution Engineering*, 1988





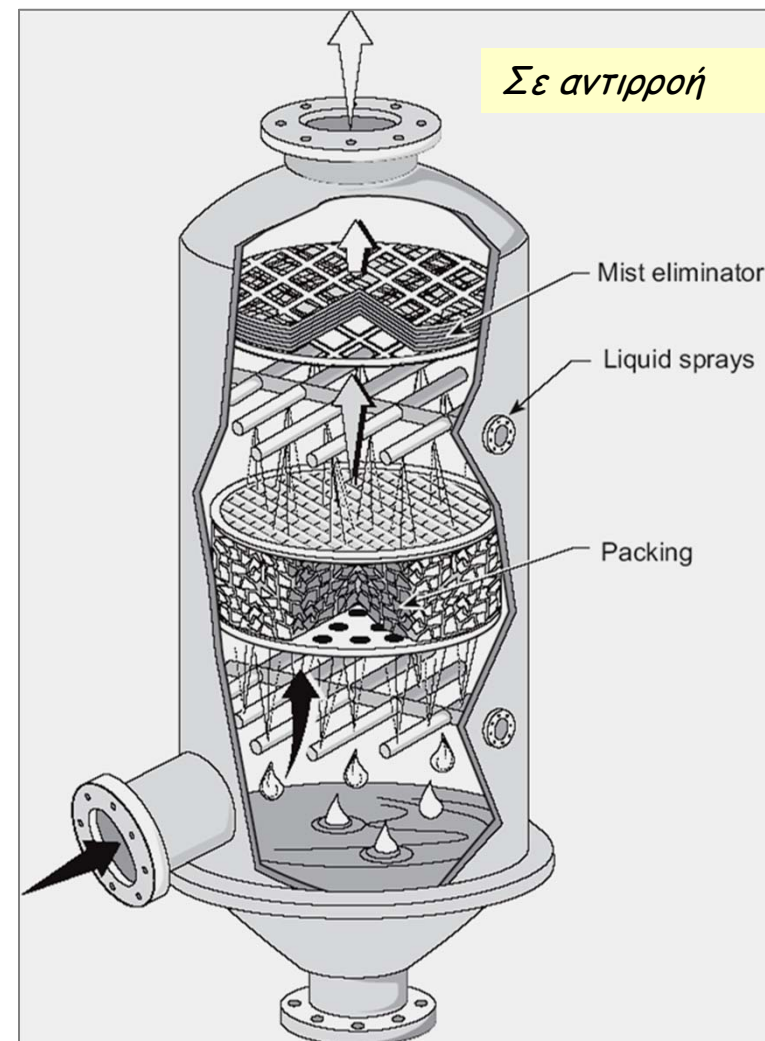
Πλυντρίδες πρόσκρουσης σε υγρό με διάτρητες πλάκες (Impingement Scrubber)





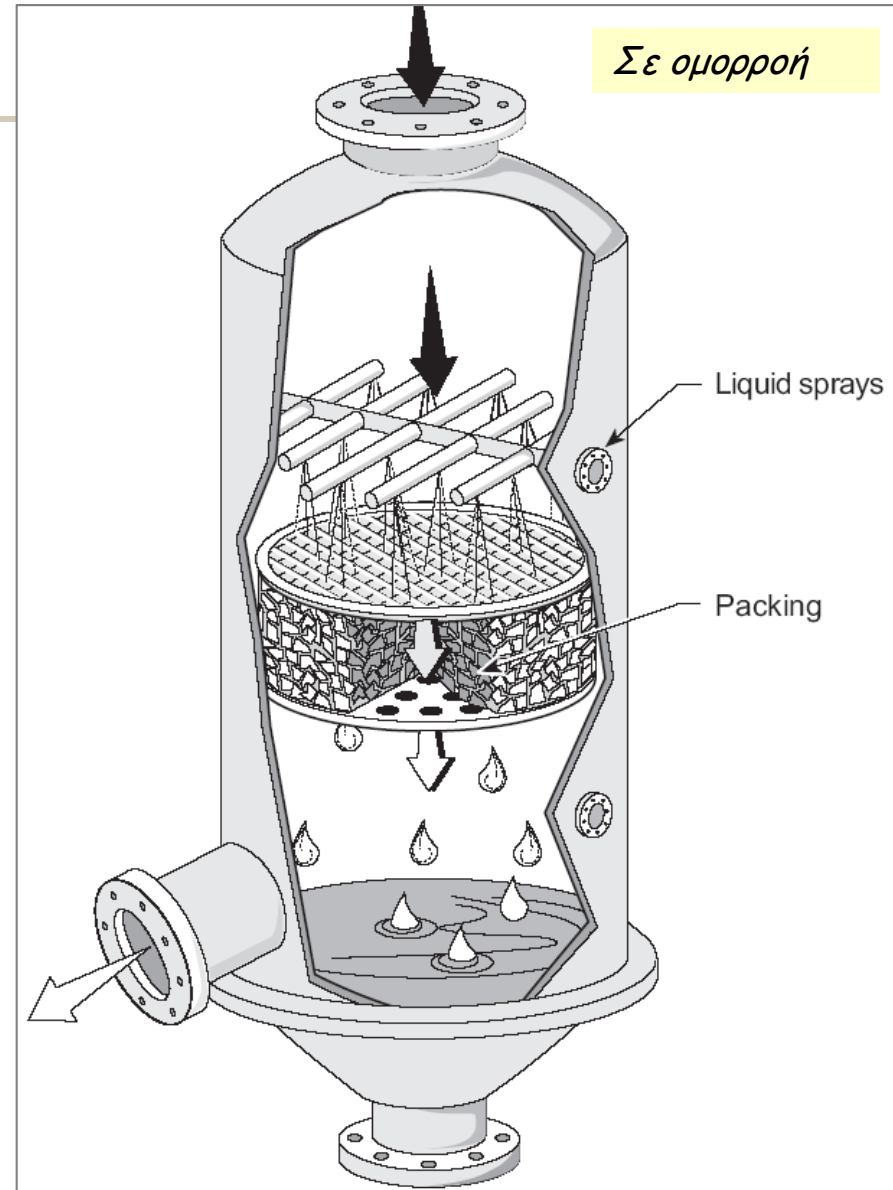
Πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά (packed bed scrubber)

- ❖ Χρησιμοποιείται κυρίως για την απομάκρυνση αέριων ρύπων.
- ❖ Μπορούν να κατασκευαστούν από ειδικά μέταλλα, fiberglass reinforced plastic (FRP) ή θερμοπλαστικά (π.χ. PVC, PP)
- ❖ Απαιτήση σε νερό (χαμηλή): 0,1-0,5 kg νερό ανά m^3 αερίου.
- ❖ Πτώση πίεσης: 0,25-2,0 kPa
- ❖ Βαθμοί απόδοσης: ~97% για σωματίδια μεγαλύτερα από 1 μm .
- ❖ Πληρωτικό υλικό από PP, PP-G, Teflon, η ανοξ. χάλυβα σε διάφορα σχήματα.



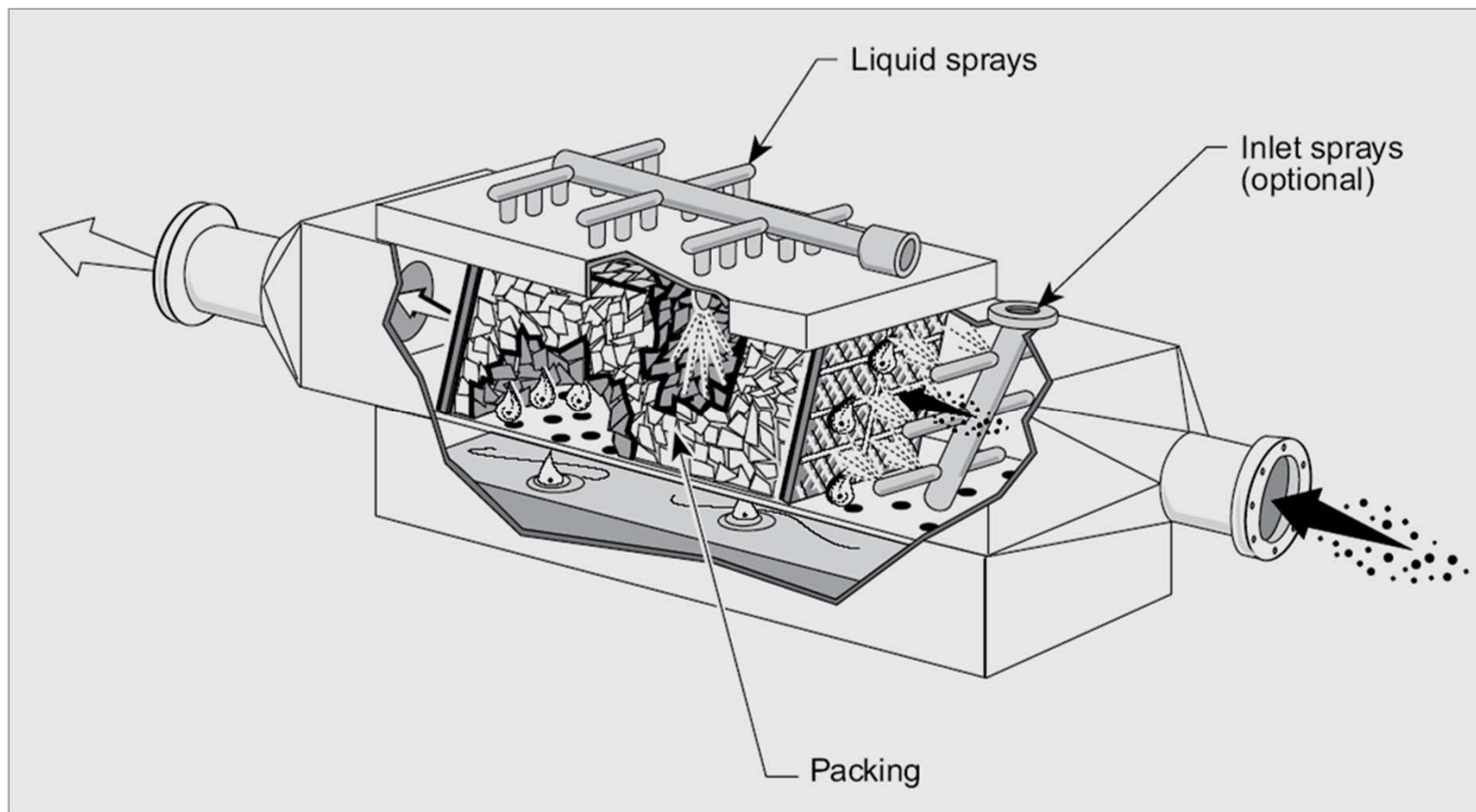
Πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά

*Μπορεί να λειτουργήσει σε μεγαλύτερες παροχές υγρού και αερίου επειδή δεν απαντάται το πρόβλημα του πλημμυρισμού, όπως στα συστήματα σε αντιρροή.





Πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά (packed bed scrubber)



Οριζόντια πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά (διασταυρούμενη ροή + ομορορή)



Πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά (packed bed scrubber)



Κατακόρυφη πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά σε αντirroή
(www.induscoenviro.com/scrubbers.htm)



Πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά (packed bed scrubber)



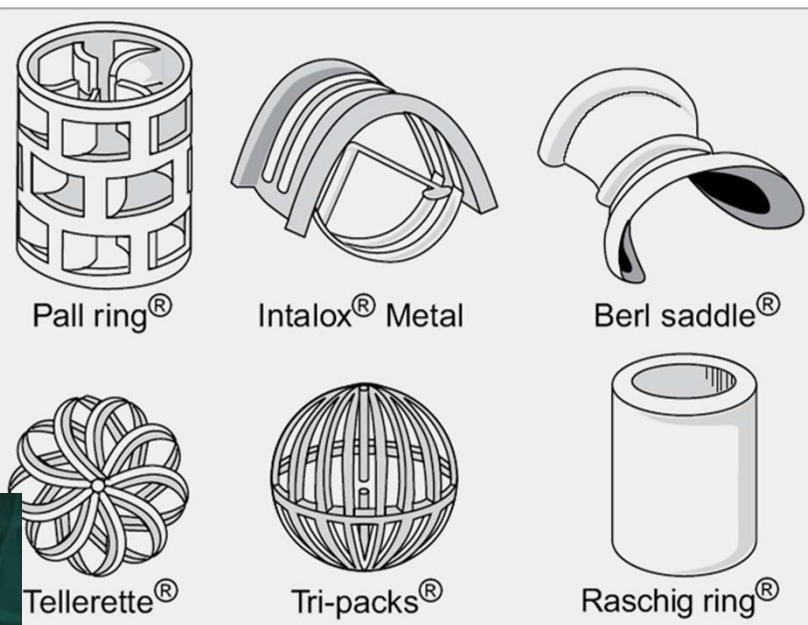
Πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά σε διασταυρούμενη ροή
(Crossflow packed bed scrubbers)



Πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά (packed bed scrubber)

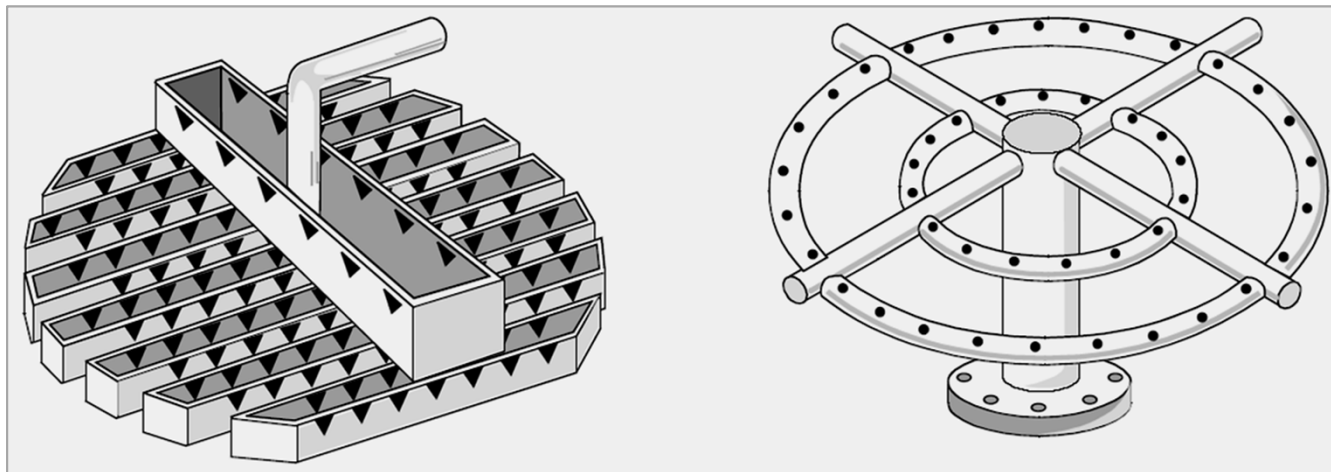


Πληρωτικά υλικά





Πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά (packed bed scrubber)

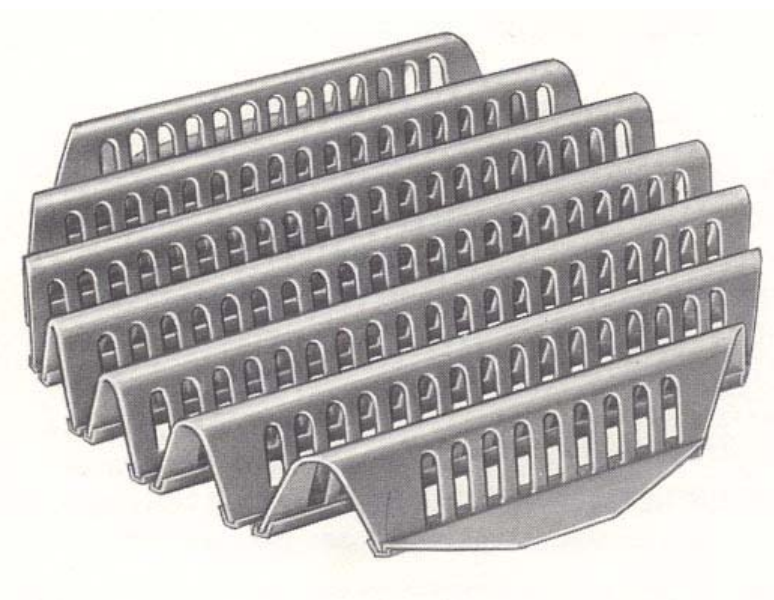
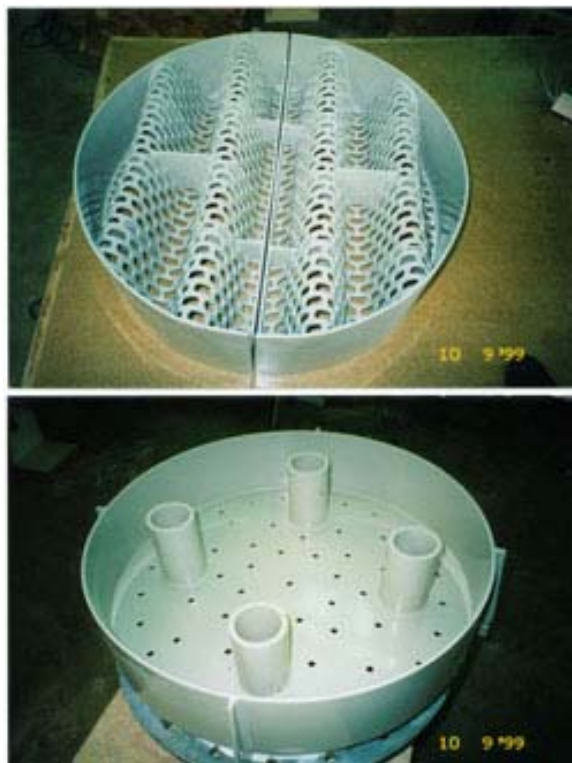


Συστήματα κατανομής του νερού.





Πλυντρίδα με πληρωτικά υλικά (packed bed scrubber)

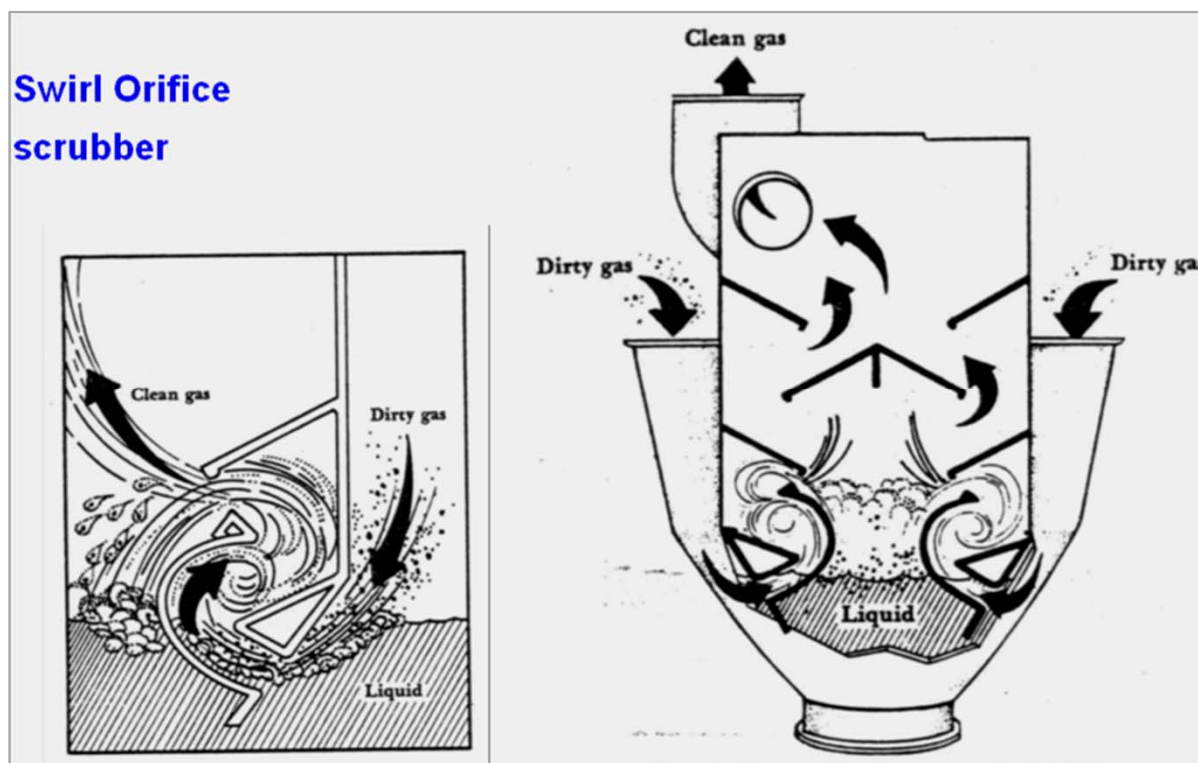


Στηρίγματα του πληρωτικού υλικού.



4. Πλυντρίδες με στόμιο (swirl orifice)

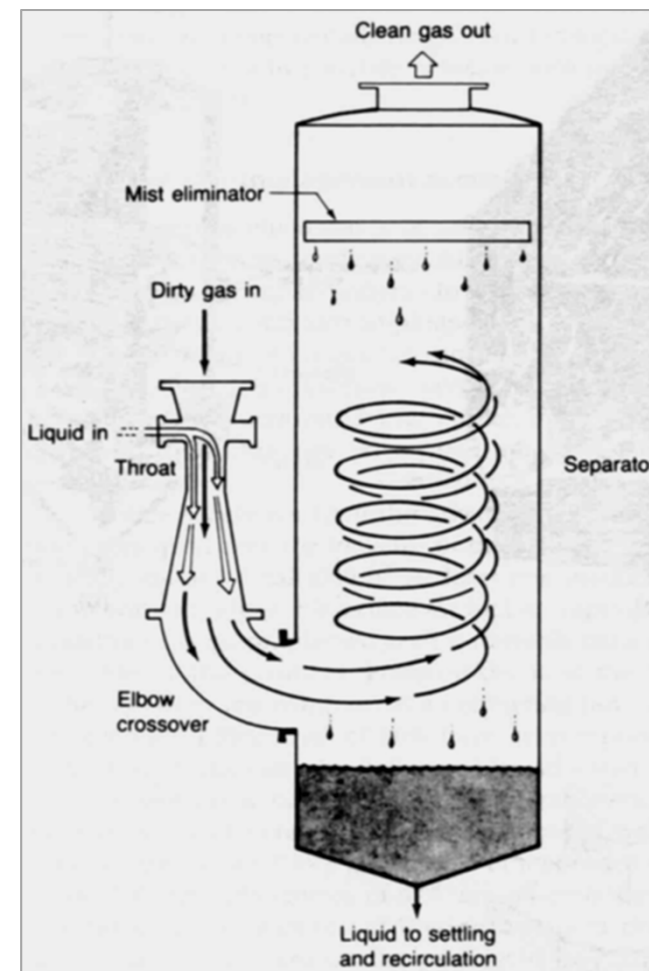
- ✿ Τα σωματίδια ή το μίγμα σωματιδίων-σταγονιδίων προσκρούει στην υγρή επιφάνεια και εν συνεχεία σε ανακλαστήρες.
- ✿ Απαίτηση σε νερό (χαμηλή): ~ 0,2 kg νερό ανά m³ αερίου.
- ✿ Πτώση πίεσης: 0,20-0,40 kPa
- ✿ Βαθμοί απόδοσης: ~90% για σωματίδια μεγαλύτερα από 2 μm.





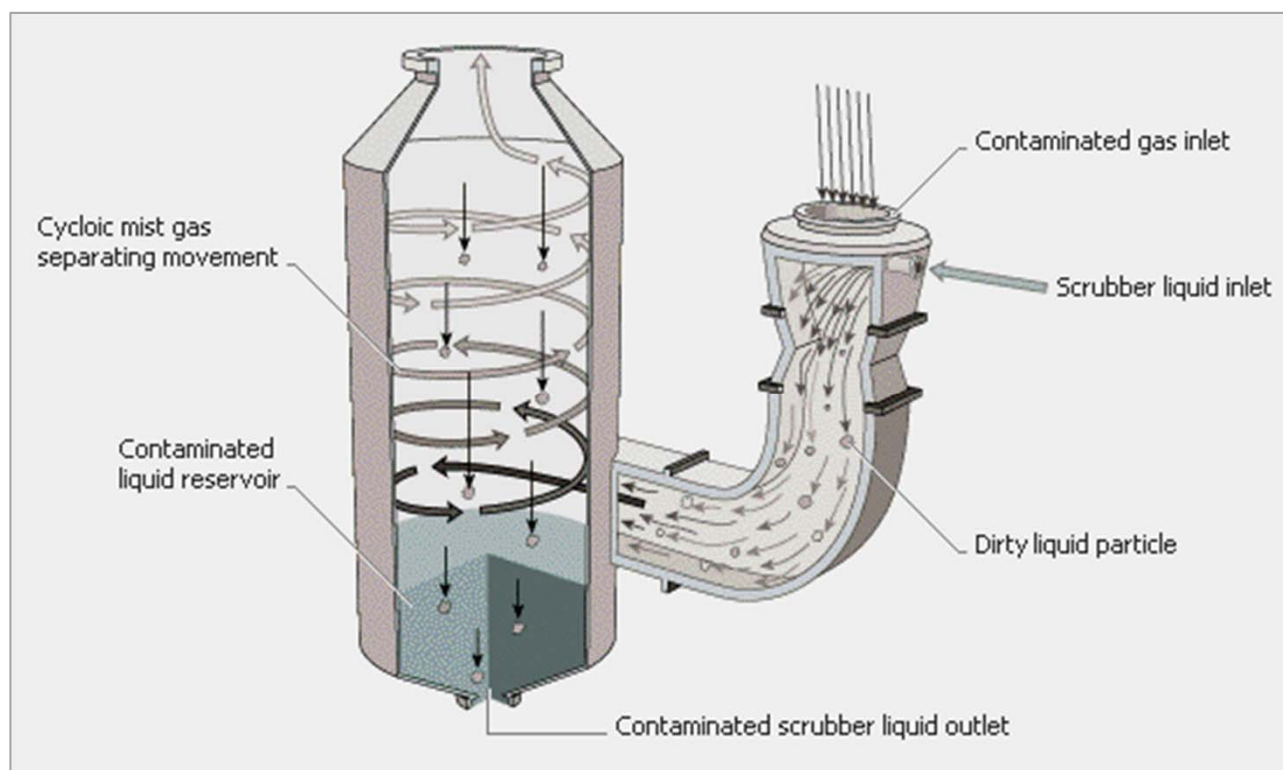
5. Πλυντρίδες Venturi (Venturi Scrubber)

- ❖ Μία πλυντρίδα venturi αποτελείται από τρία τμήματα: ένα τμήμα συστολής, το τμήμα του λαιμού και το τμήμα διαστολής. Ίσως η κοινότερη πλυντρίδα.
- ❖ Το υγρό εισάγεται είτε στο λαιμό ή στην είσοδο της συστολής.
- ❖ Ταχύτητα του αερίου στο λαιμό: 60 - 150 m/s
- ❖ Απαίτηση σε νερό: 0,7-1,0 kg νερό ανά m³ αερίου.
- ❖ Πτώση πίεσης: 1,5-18 kPa
- ❖ Βαθμοί απόδοσης: ~98% για σωματίδια μεγαλύτερα από 0,5 μm. Υψηλή απόδοση.
- ❖ Απαιτούν αποτροπέα συμπαρασυρμού (demister): κυκλωνικό, τύπου σήτας, πτερυγίων



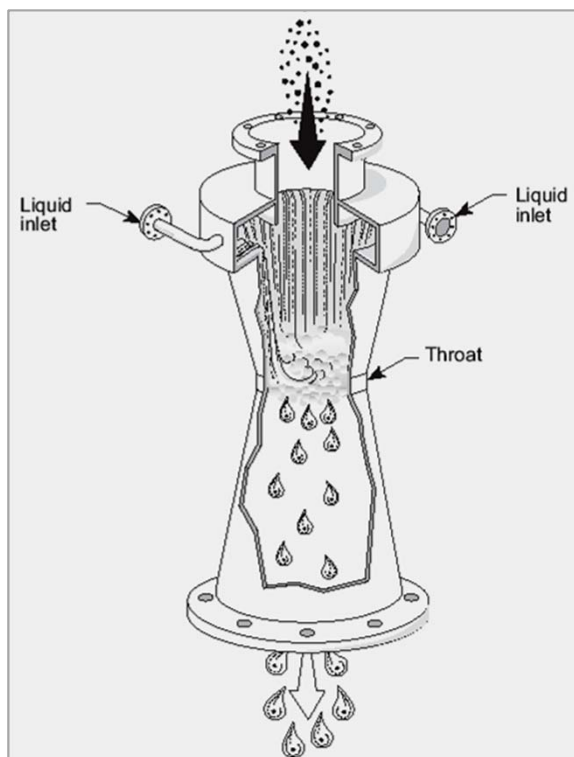


Πλυντρίδες Venturi (Venturi Scrubber)

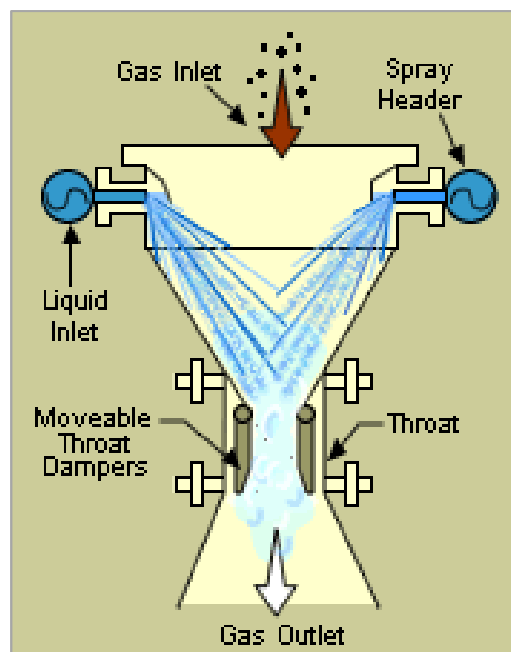




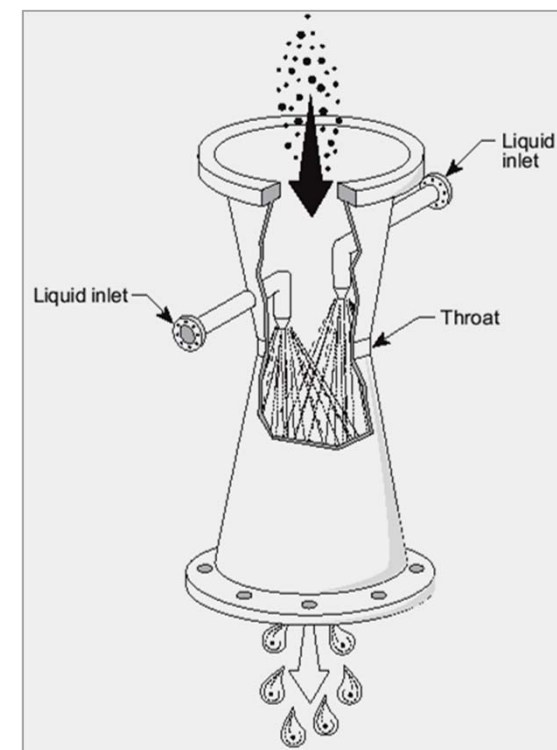
Πλυντρίδες Venturi (Venturi Scrubber): Είσοδος νερού



Venturi με ψεκασμό στην είσοδο της συστολής. Πηγή: EPA



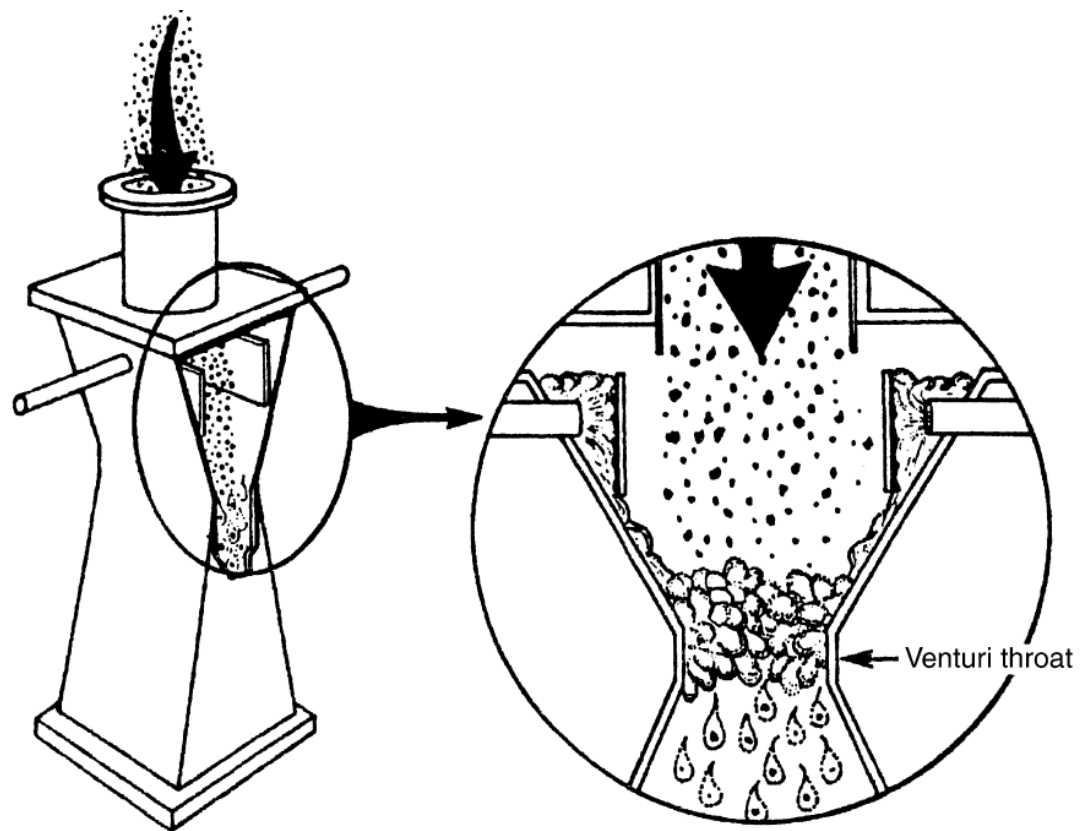
Venturi με ρυθμιζόμενο λαιμό. Πηγή: www.epin.ncsu.edu



Venturi με ψεκασμό στο λαιμό. Πηγή: EPA



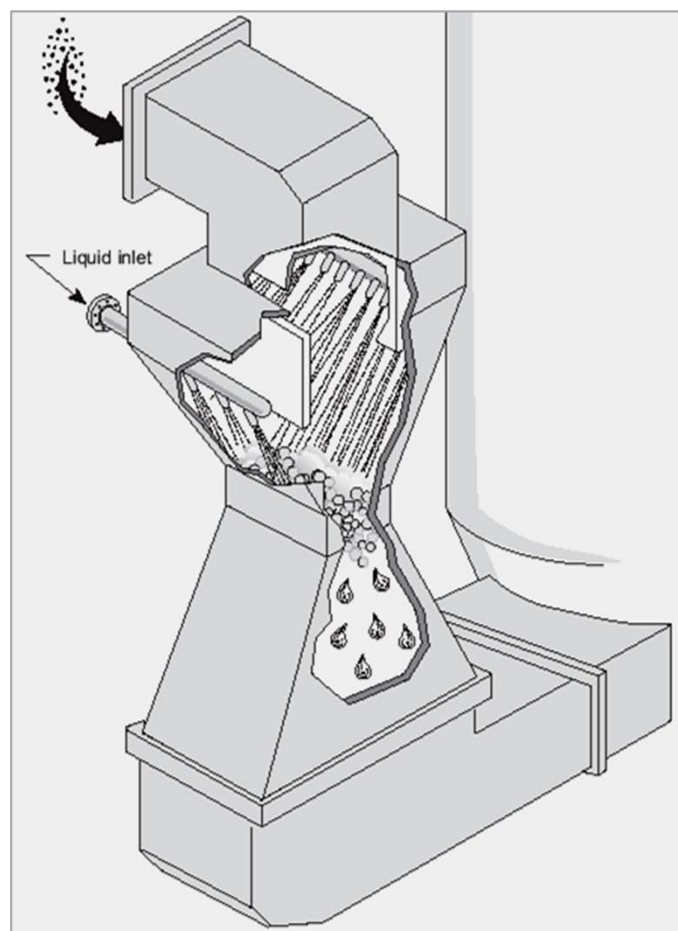
Πλυντρίδες Venturi (Venturi Scrubber)



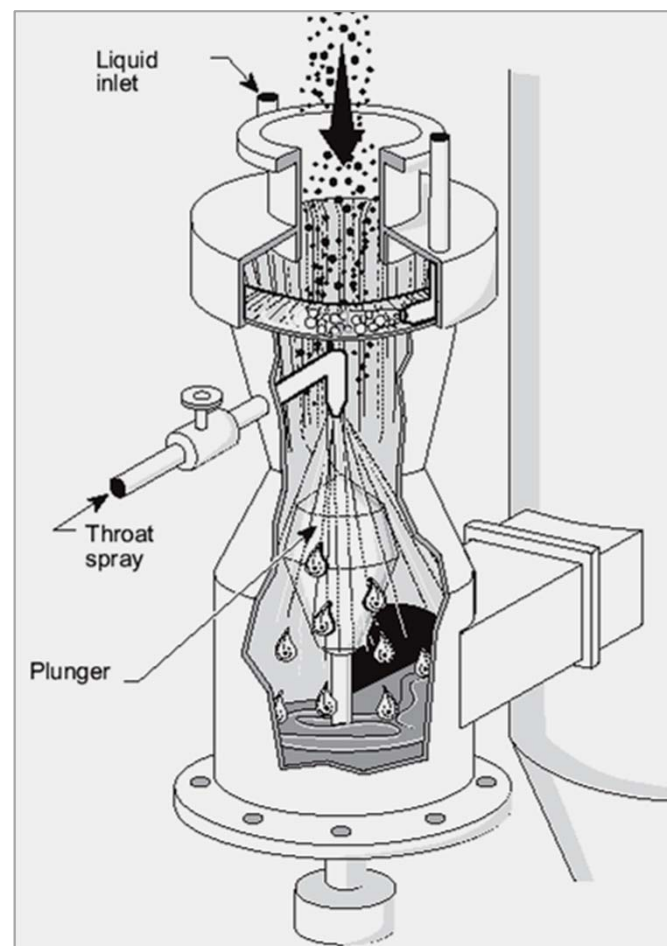
(Handbook of Air Pollution Control Engineering & Technology, Mycock, McKenna & Theodore, *CRC Inc.*, 1995.)



Πλυντρίδες Venturi (Venturi Scrubber)



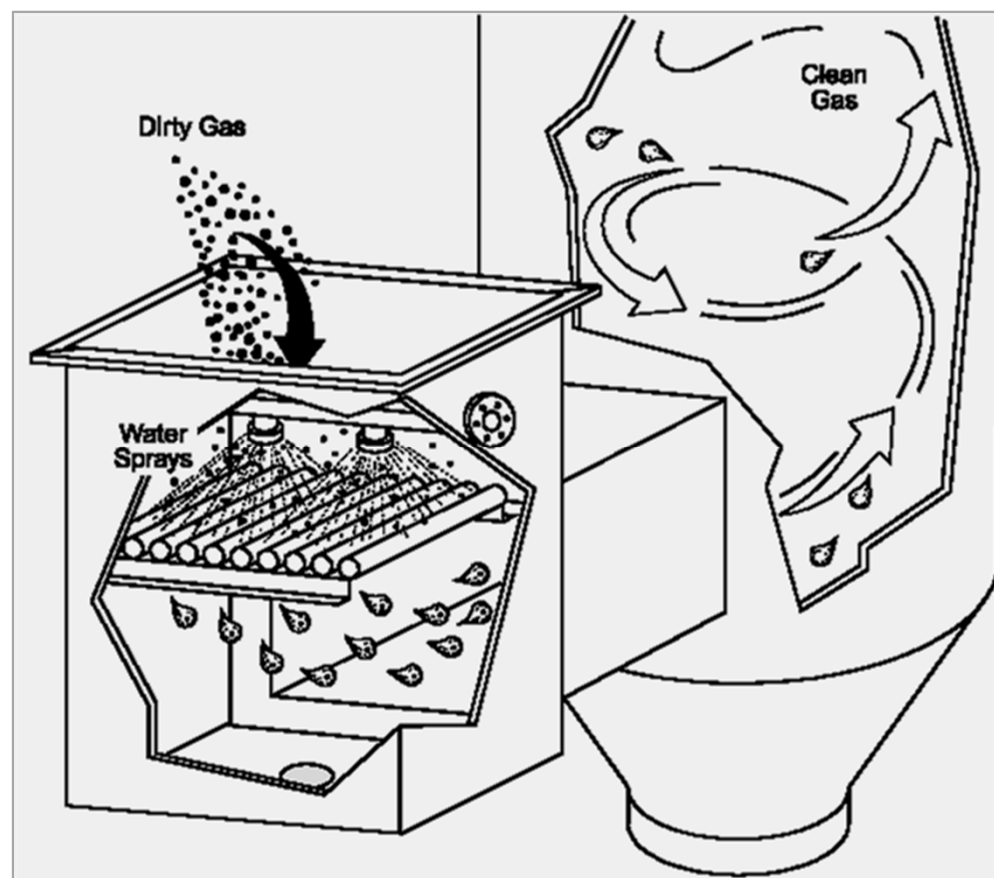
Venturi με λαιμό ορθογώνιας διατομής.
Πηγή: EPA



Venturi με ρυθμιζόμενο λαιμό.
Πηγή: EPA



Πλυντρίδες Venturi (Venturi Scrubber)



Venturi με ράβδους. Η εκνέφωση δημιουργείται κυρίως στις ράβδους, οι οποίοι θα πρέπει να είναι από ανθεκτικό υλικό. Πηγή: ΕΡΑ

Πλυντρίδες Venturi (Venturi Scrubber)

- Λόγω της έλλειψης κινητών μερών, το κόστος της λειτουργίας και συντήρησης της συσκευής είναι μικρό.
- Τα ακροφύσια θα πρέπει να είναι αντικαταστάσιμα εύκολα.
- Κατασκευάζεται από υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση.
- Εφαρμογή σε σειρά βιομηχανιών (λιπασμάτων, χαρτοπολτού, αποτεφρωτήρες, μεταλλοβιομηχανίες κτλ.)





Πλυντρίδες Venturi (Venturi Scrubber)

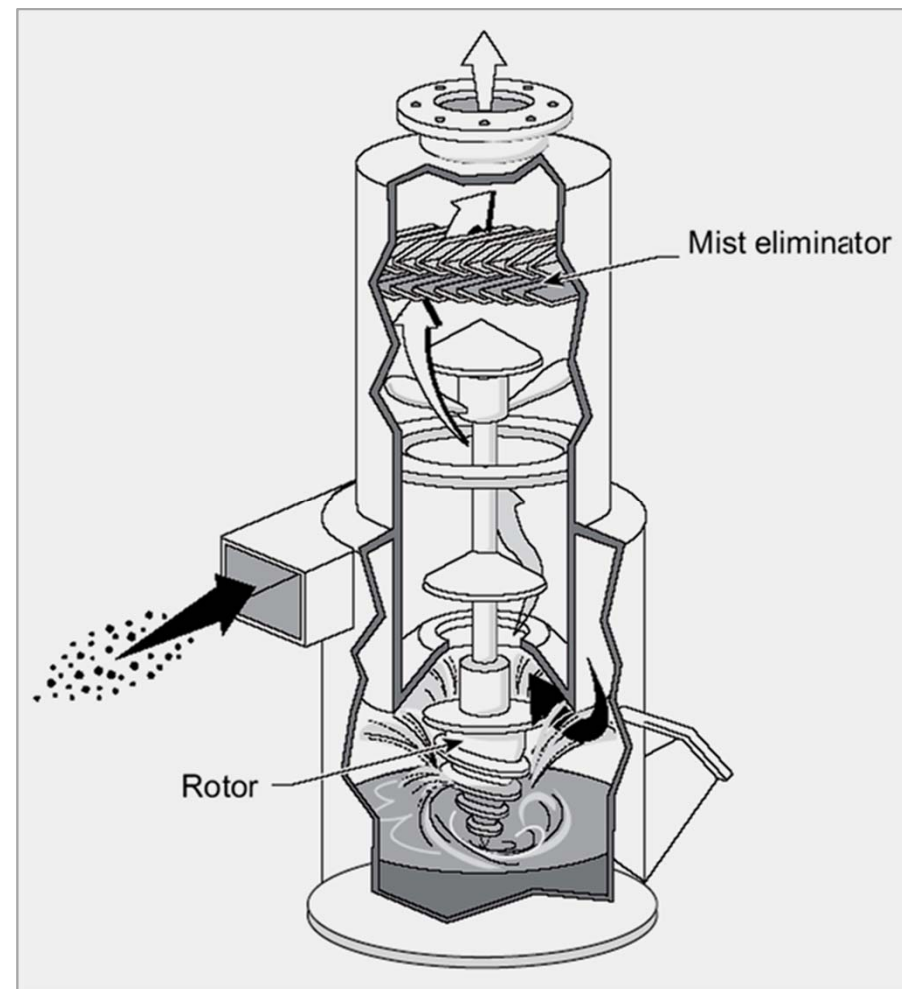
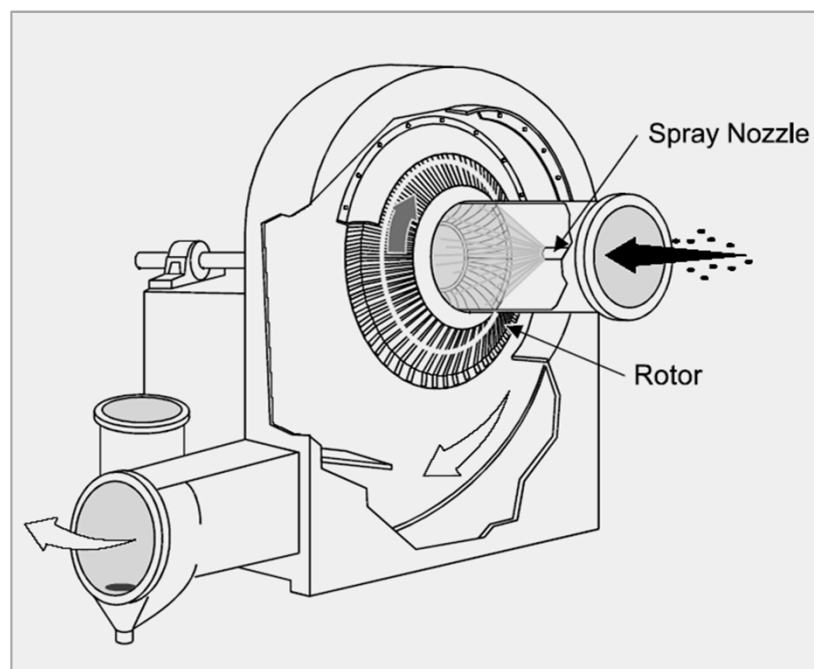


Μικρή πλυντρίδα venturi.



6. Πλυντρίδες μηχανικές (Mechanical wet scrubber)

- Τα σταγονίδια δημιουργούνται από κινούμενα μέρη (π.χ. δίσκους, πτερύγια).
- Καλή απόδοση, υψηλό κόστος.





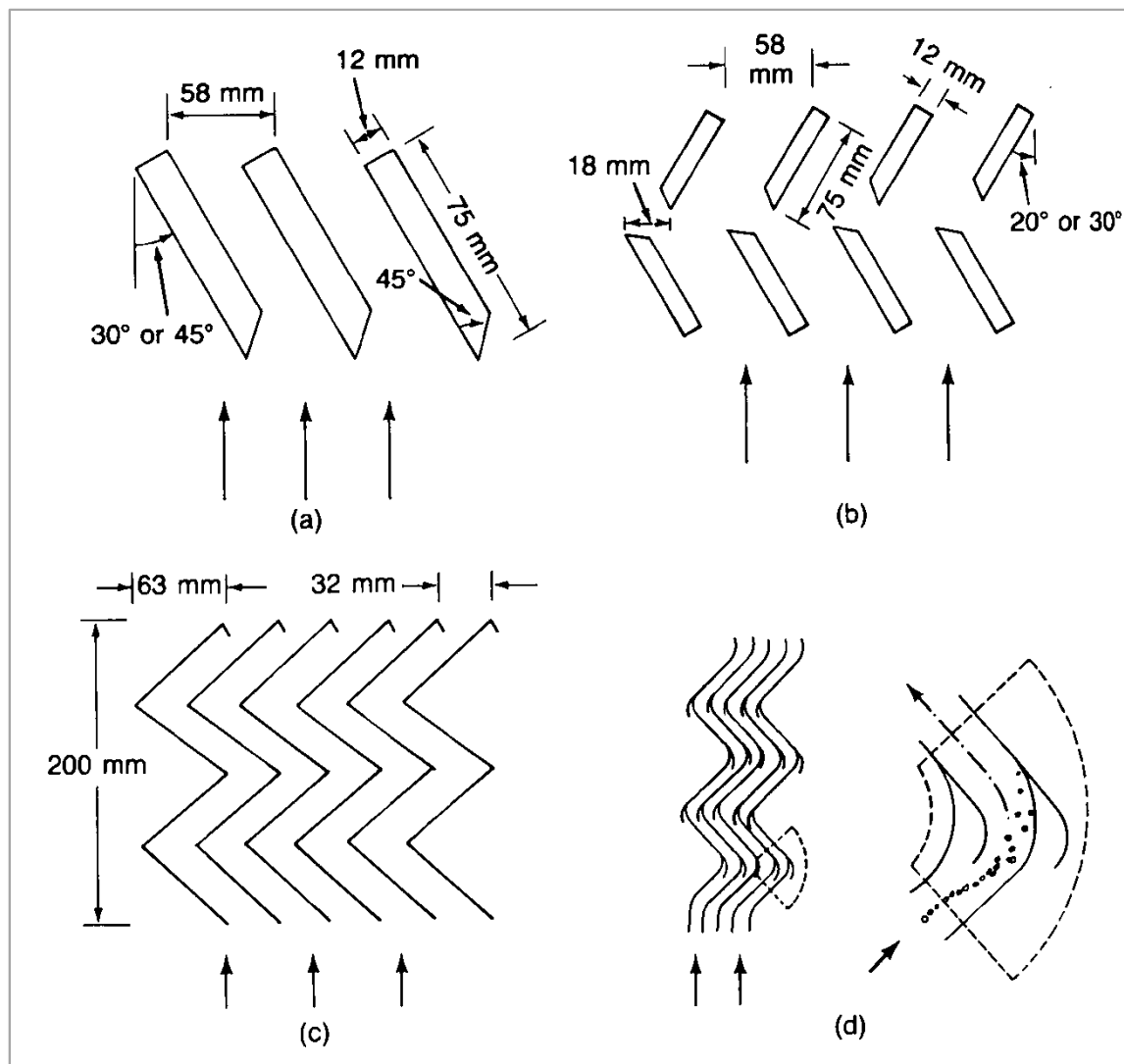
Comparison of different scrubber types

Scrubber Type	Efficiency	Power Inputs (hp/1000 cfm)	Liquid Requirements (gal/1000 ft ³)
Spray-chamber	90% (+8 μ m particles)	0.5 - 2	1 - 20
Cyclone-spray	95% (+5 μ m particles)	1 - 3.5	2 - 10
Impingement	97% (+5 μ m particles)	2 - 3	2 - 5
Orifice	97% (+5 μ m particles)	0.5	2 - 4
Venturi	98% (+0.5 μ m particles)	3 - 12	3 - 15

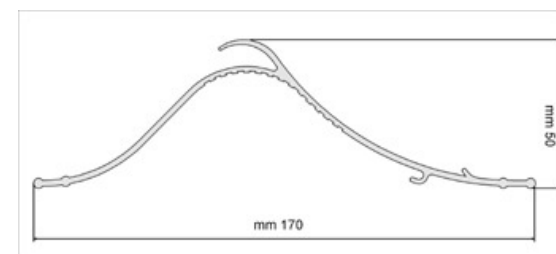
http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/scrubbers



Συστήματα αποτροπής συμπαρασυρμού σταγονιδίων με πρόσκρουση

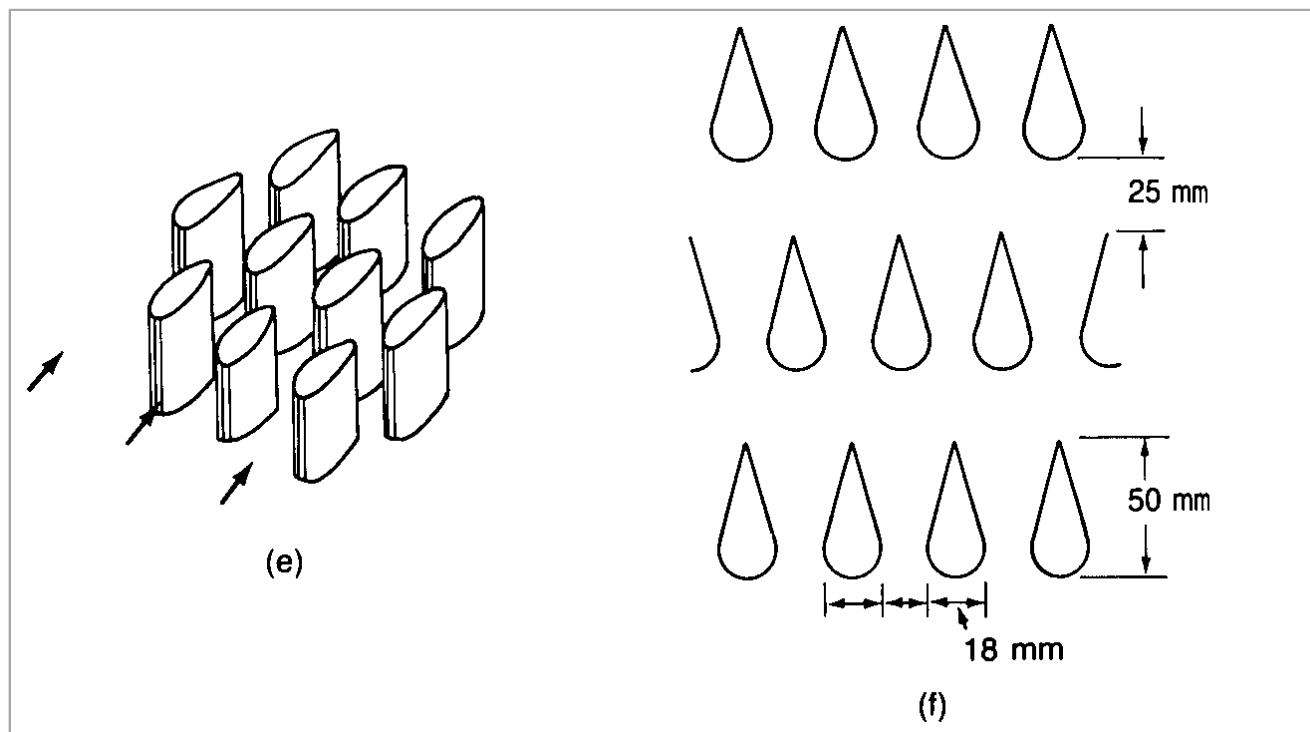


- (a) Μονή σειρά διαφραγμάτων
- (c) Διπλή σειρά διαφραγμάτων
- (b) Διαχωριστής σχήματος W
- (d) Κυματοειδής διαχωριστής





Συστήματα αποτροπής συμπαρασυρμού σταγονιδίων με πρόσκρουση



- (e) Κάθετη ράβδοι με διατομή «δάκρυ» σε οριζόντιο σύστημα
- (f) Οριζόντιοι ράβδοι με διατομή «δάκρυ»



Σχεδιασμός πλυντρίδων

- Η **αδρανειακή πρόσκρουση** είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός.
- Ο σχεδιασμός των πλυντρίδων βασίζεται σε μοντέλα που αναπτύχθηκαν για διάφορες διεργασίες επαφής (και συλλογής) υγρού-αερίου, από τα οποία μπορούν να συναχθούν κατάλληλες σχέσεις της διείσδυσης, P_d , για συγκεκριμένη διάμετρο σωματιδίων, d .

- **Διείσδυση:** το κλάσμα των σωματιδίων που δεν συλλέγεται.

$$P_d = 1 - n_d$$

όπου n_d η κλασματική απόδοση για σωματίδια με διάμετρο d .

- Η **συνολική διείσδυση** υπολογίζεται από:

$$P_{\text{total}} = \sum (P_d \times m_d)$$

όπου m_d το κλάσμα μάζας των σωματιδίων στη συγκεκριμένη διάμετρο.



Απόδοση Θαλάμων ψεκασμού

Απλός σχεδιασμός και λειτουργία.

Σχέση για το P_d από Calvert (1977). Βασικός μηχανισμός: πρόσκρουση

$$P_d = \exp\left(-\frac{3Q_L V_{td} \eta_d z}{4Q_G r_d (V_{td} - V_G)}\right) = \exp\left(-\frac{A_d V_{td} \eta_d}{Q_G}\right)$$

P_d = διείδυση ενός συγκεκριμένου μεγέθους σωματιδίων

V_{td} = οριακή ταχύτητα του σταγονιδίου

V_G = φαινομενική ταχύτητα αερίου (cm/s)

Q_L = ογκομετρική παροχή υγρού (m³/s)

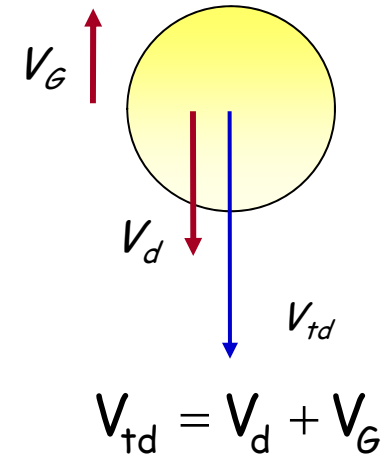
Q_G = ογκομετρική παροχή αερίου (m³/s)

η_d = κλασματικός βαθμός απόδοσης συλλογής ενός και μόνο σταγονιδίου

z = μήκος της ζώνης επαφής της πλυντρίδας (m)

r_d = ακτίνα σταγονιδίου (cm)

A_d = ενεργός διατομή της επιφάνειας όλων των σταγονιδίων στην πλυντρίδα (cm²)





Θεωρία - Θάλαμοι ψεκασμού

Όγκος κάθε σταγόνας:

$$v_d = \frac{\pi d_d^3}{6}$$

Συνολικός αριθμός σταγονιδίων στον θάλαμο ανά sec.

$$N_d = \frac{Q_L}{v_d} = \frac{Q_L}{\frac{\pi d_d^3}{6}} \quad Q_L = \text{ογκομετρική παροχή υγρού}$$

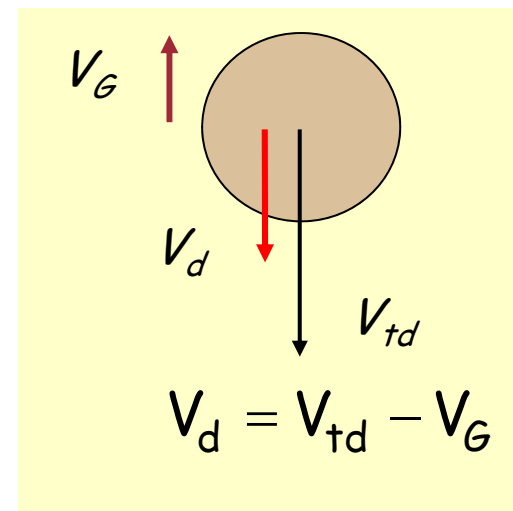
Συγκέντρωση σταγονιδίων στο θάλαμο

$$n_d = \frac{N_d}{A_c V_d} = \frac{6Q_L}{\pi d_d^3 A_c V_d}$$

A_c = διατομή πλυντρίδας

V_d = ταχύτητα του πίπτοντος σταγονιδίου **σε σχέση με το τοίχωμα**

V_{td} = οριακή ταχύτητα του σταγονιδίου



ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

- Η συγκέντρωση των σωματ. στο επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση της ροής
- Η ταχύτητα V_G ομοιόμορφη
- Τα σταγονίδια, με ομοιόμορφη διάμετρο, κατανέμονται ομοιόμορφα
- Δεν γίνεται συλλογή σταγονιδίων στα τοιχώματα
- Όχι συσσωμάτωση σωματιδίων



Θεωρία - Θάλαμοι ψεκασμού

Σε συγκεκριμένο χρόνο dt , το σταγονίδιο πέφτει κατά $dz = V_d dt$

Ο όγκος του αέρα που «σαρώνεται» μέσω της διατομής μιας σταγόνας σε χρόνο dt

$$V_{\text{air, single droplet}} = \left(\frac{\pi d_d^2}{4} \right) V_{td} dt = \left(\frac{\pi d_d^2}{4} \right) \frac{V_{td}}{V_d} dz$$

Ο συνολικός ενεργός όγκος του αέρα ανά s που «σαρώνεται» από όλες τις σταγόνες στο διάστημα dz (με κάποια απόδοση)

$$V_{\text{air, all}} = N_d \left(\frac{\pi d_d^2}{4} \right) \frac{V_{td}}{V_d} dz = \left(\frac{6Q_L}{\pi d_d^3} \right) \left(\frac{\pi d_d^2}{4} \right) \frac{V_{td}}{V_d} dz$$

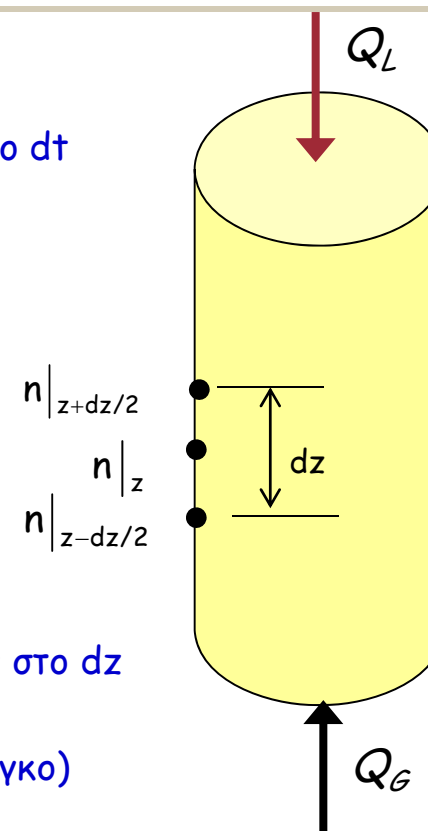
Συνολικός αριθμός σωματιδίων που «σαρώνονται» από όλες τις σταγόνες ανά s στο dz

$$dn_p = \eta_d \left(\frac{6Q_L}{\pi d_d^3} \right) \left(\frac{\pi d_d^2}{4} \right) \frac{V_{td}}{V_d} n|_{p,z} dz$$

η_p = συγκέντρωση σωματιδίων (#/όγκο)
 η_d = απόδοση μονής σταγόνας

Συνολικός αριθμός σωματιδίων που απομακρύνονται ανά s στο dz

$$dn_p = V_G A_c \left[n|_{p,z-dz/2} - n|_{p,z+dz/2} \right]$$





Θεωρία- Θάλαμοι ψεκασμού

Επομένως:

$$\int_{n_{p,in}}^{n_{p,out}} \frac{dn_p}{n_p} = \int_0^z \left(-\frac{3 Q_L}{2 Q_G} \frac{V_{td}}{V_{td} - V_G} \eta_d \frac{dz}{d_d} \right)$$

Και η διεύθυνση σωματιδίων σε κατακόρυφο θάλαμο ψεκασμού σε αντιστροφή γράφεται:

$$P_d = \frac{n_{p,out}}{n_{p,in}} = \exp \left(-\frac{3 Q_L}{2 Q_G} \frac{V_{td}}{V_{td} - V_G} \frac{z}{d_d} \eta_d \right) = \exp \left(-\frac{A_d V_{td} \eta_d}{Q_G} \right) \quad (1)$$

Όπου A_d είναι η διατομή όλων των σταγονιδίων

$$A_d = (A_c z) \times \left(\frac{6 Q_L}{\pi d_d^3 A_c V_d} \right) \times \left(\frac{\pi d_d^2}{4} \right) = \frac{3 Q_L z}{2 d_d (V_{td} - V_G)}$$

Ο Calvert προτείνει το Q_L/Q_G να πολλαπλασιαστεί με 0,2

$$n = 1 - P_d$$

Πότε έχουμε την μεγαλύτερη απόδοση;

Όταν $n_d \uparrow$, $V_{td} \sim V_G$, $z \uparrow$. Τι γίνεται με το d_d ;



Θεωρία- Θάλαμο ψεκασμού

Η διείδυση σε θάλαμο ψεκασμού σε διασταυρούμενη ροή.

$$P_d = \exp\left[-\frac{3}{2}\left(\frac{Q_L}{Q_G}\right)\left(\frac{\eta_d}{d_d}\right)z\right] = \exp\left(-\frac{A_d V_{td} \eta_d}{Q_G}\right)$$

Ποιοι είναι οι μηχανισμοί συλλογής; Τους χρειαζόμαστε για το η_d .



Οριακές ταχύτητες σταγονιδίων νερού

Table 7.2
Terminal Settling Velocity for Water Droplets ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$)

Diameter		V _{TS}		Diameter		V _{TS}		Diameter		V _{TS}	
μm	cm/sec	ft/sec	μm	cm/sec	ft/sec	μm	cm/sec	ft/sec			
0.2	0.00012	0.000004	180	61.3	2.011	600	242	7.94			
0.5	0.00075	0.000025	185	63.7	2.090	650	261	8.56			
1	0.003	0.000098	190	66	2.164	700	280	9.19			
5	0.075	0.00246	195	68.4	2.244	750	298	9.78			
10	0.3	0.00984	200	70.8	2.323	800	316	10.37			
15	0.675	0.2215	210	75.5	2.48	850	334	10.96			
20	1.2	0.03937	220	80.2	2.63	900	352	11.55			
25	1.875	0.06152	230	84.9	2.79	950	369	12.11			
30	2.7	0.08858	240	89.6	2.94	1,000	386	12.66			
35	3.675	0.1206	250	94.3	3.09	1,100	419	13.75			
40	4.8	0.1575	260	98.9	3.24	1,200	452	14.83			
45	6.075	0.1993	270	103	3.38	1,300	484	15.88			



Εναπόθεση σωματιδίων σε σφαιρικό συλλέκτη

$$Re = \frac{d_d V_{td} \rho_G}{\mu_G}$$

Αρ. Reynolds σωματιδίου

$$Sc = \frac{\mu_G}{\rho_G D}$$

Αριθ. Schmidt σωματ.

$$St = \frac{C_c \rho_p d_p^2 V_{p,d}}{18 \mu_G d_d}$$

Αριθμ. Stokes σωματ.

[$V_{p,d}$: ταχ. σωματ. σε σχέση με τη σταγόνα, $V_{p,d} \sim V_{td}$]

$$\kappa = \frac{d_p}{d_d}$$

Λόγος διαμέτρων

$$\omega = \frac{\mu_L}{\mu_G}$$

Λόγος ιξωδών

Απόδοση συλλογής μονής σταγόνας (διάχυση)

$$\eta = \frac{8}{Re Sc} \left[1 + \frac{0.4}{\sqrt{2}} Re^{1/2} Sc^{1/3} + \frac{0.16}{\sqrt{2}} Re^{1/2} Sc^{1/2} \right] + 4\kappa \left[\omega^{-1} + (1 + \sqrt{2} Re^{1/2}) \kappa \right] + \left[\frac{2 St - S_*}{2 St - S_* + \frac{2}{3}} \right]^{3/2}$$

(ανάσχεση)

(πρόσκρουση)

$$S_* = \frac{1.2 + \frac{1}{12} \ln(1 + Re/2)}{1 + \ln(1 + Re/2)}$$

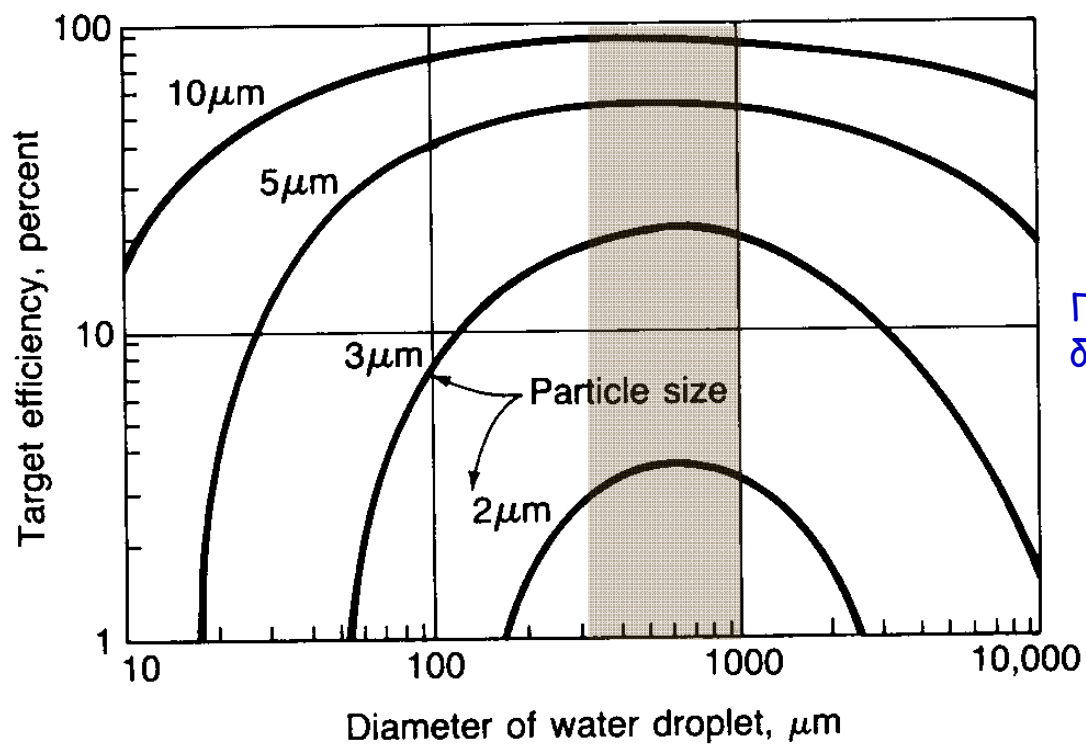


Εναπόθεση σωματιδίων σε σφαιρικό συλλέκτη

Μόνο πρόσκρουση $\eta_d = \left(\frac{K_p}{K_p + 0,7} \right)^2 = \left(\frac{St}{St + 0,35} \right)^2$

Η παράμετρος πρόσκρουσης K_p που χρησιμοποιείται στο βιβλίο: $K_p = 2 St$

Βέλτιστη μέγεθος σταγονιδίων



Γιατί υπάρχει μία βέλτιστη διάμετρος;

Ισχύει για $\rho_p = 2 \text{ g/cm}^3$



Πλυντρίδες Venturi : μοντέλο Calvert

Η διείσδυση των σωματιδίων σε μία πλυντρίδα venturi, με κυρίαρχο μηχανισμό την πρόσκρουση (Calvert et al, 1972)

$$P_d = \exp \left\{ \frac{Q_L V_G \rho_L d_d}{55 Q_G \mu_G} \left[-0,7 - K_{po} f + 1,4 \ln \left(\frac{K_{po} f + 0,7}{0,7} \right) + \frac{0,49}{0,7 + K_{po} f} \right] \frac{1}{K_{po}} \right\}$$

K_{po} = παράμετρος πρόσκρουσης για ταχύτητα στο λαιμό (=2St με την αεροδυναμική διάμετρο)
 $f = 0,5$ για υδρόφιλα υλικά, $0,25$ για υδρόφοβα

Η παραπάνω εξ. λύνεται με τη χρήση της μέσης διαμέτρου του Sauter ($d_{32} = 6V_p / A_p$) που δίνεται από τη σχέση των Nukiyama-Tanasawa

$$d_d = \frac{k_1}{V_G} \left(\frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.5} + 597 \left(\frac{\mu_L}{(\sigma \rho_L)^{0.5}} \right)^{0.45} \left(1000 \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1.5}$$

$k_1 = 58600$ εάν V_G είναι σε cm/s
 $= 1920$ εάν V_G είναι σε ft/s

σ , ρ_L και μ είναι στο cgs
 Q_L και Q_G πρέπει να έχουν τις ίδιες μονάδες

Για νερό και αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος, απλοποιείται:

$$d_d = \frac{16000}{V_G (\text{ft} / \text{s})} + 1,45 \left(1000 \frac{Q_L (\text{gal} / \text{s})}{Q_G (\text{ft}^3 / \text{s})} \right)^{1.5} (\mu\text{m})$$

V_G : ταχύτητα αέρα στο λαιμό



Πτώση πίεσης σε πλυντρίδα Venturi

Η πτώση πίεσης οφείλεται κυρίως στην επιτάχυνση του σωματιδίου και βρίσκεται από τη σχέση των Young et al. (1977)

$$\Delta p = k \rho_L V_G^2 \frac{Q_L}{Q_G}$$

$$k = 2(1 - X^2 + \sqrt{X^4 - X^2})$$

$$X = \frac{3l_t C_{Dd} \rho_G}{16d_d \rho_L} + 1$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}}, \quad Re = \frac{d_d V_G \rho_G}{\mu_G}$$

V_G : ταχύτητα αερίου

l_t : μήκος λαιμού venturi

X : αδιάστατο μήκος λαιμού

Re : αριθμός Reynolds σταγόνas

C_D : συντελεστής οπισθέλκουσας σταγόνas



Προσέγγιση με την ισχύ επαφής

Όταν συγκρίνονται στην ίδια κατανάλωση ενέργειας, όλες οι πλυντρίδες δίνουν χοντρικά τον ίδιο βαθμό απόδοσης, ανεξάρτητα από τον κυρίαρχο μηχανισμό και από πού προέρχεται η πτώση πίεσης (υγρή ή αέρια φάση).

$$\eta = 1 - \exp(-N_t)$$

N_t = αδιάστατος αριθμός μονάδων μεταφοράς, από

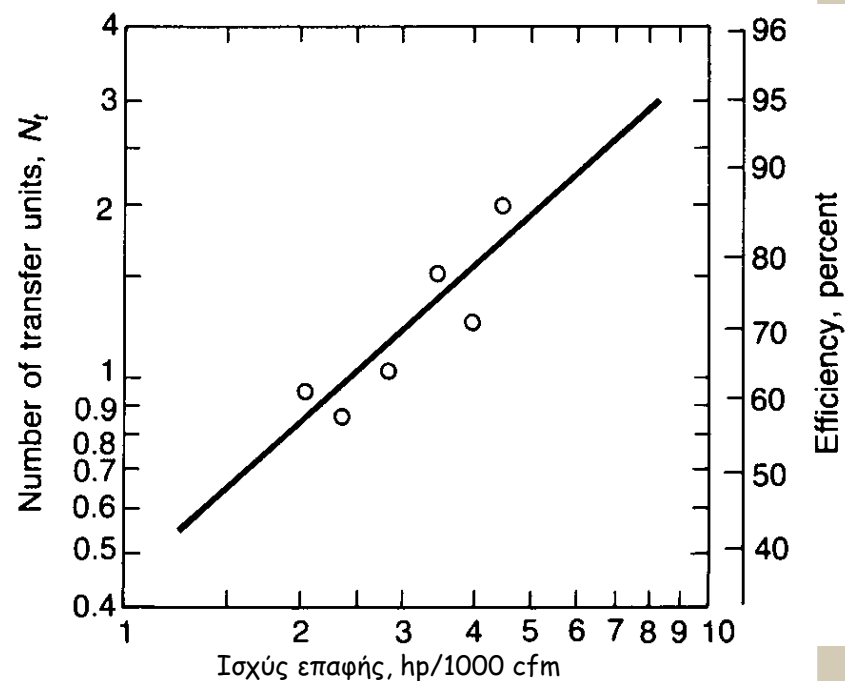
$$N_t = \alpha P_T^\beta$$

P_T = ισχύς επαφής σε hp/1000 cfm

α = συντελεστής

β = αδιάστατος εκθέτης

Πλυντρίδα Venturi που συλλέγει μεταλλουργική «κάπνα»



(1 inch H_2O = 0,1575 hp/1000 cfm)

Προσέγγιση με την ισχύ επαφής

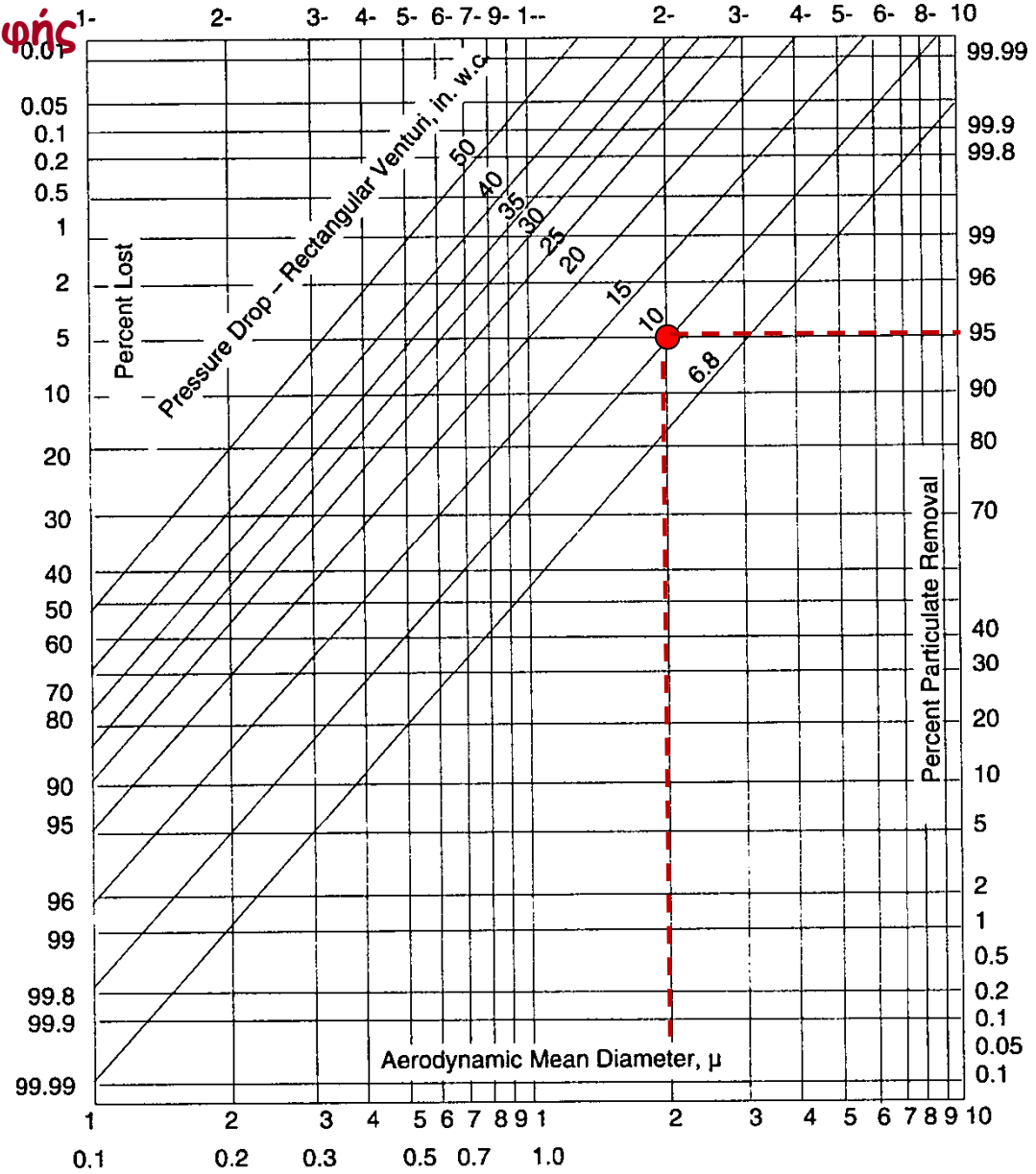


Table 7.4
Values of α and β for Different Industries

Aerosol	Scrubber type	α	β
Raw gas (lime dust and soda fume)	Venturi and cyclonic spray	1.47	1.05
Prewashed gas (soda fume)	Venturi, pipeline, and cyclonic spray	0.915	1.05
Talc dust	Venturi Orifice and pipeline	2.97 2.7	0.362 0.362
Black liquor recovery furnace fume	Venturi and cyclonic spray Venturi, pipeline, and cyclonic spray Venturi evaporators	1.75 0.740 0.522	0.62 0.861 0.861
Cold scrubbing water humid gases			
Hot fume solution for scrubbing (humid gases)			
Hot black liquor for scrubbing (dry gases)			
Phosphoric acid mist	Venturi	1.33	0.647
Foundry cupola dust	Venturi	1.35	0.621
Open hearth steel furnace fume	Venturi	1.26	0.569
Talc dust	Cyclone	1.16	0.655
Copper sulfates	Solivore (A) with mechanical spray generator	0.390	1.14
	(B)with hydraulic nozzles	0.562	1.06
Ferrosilicon furnace fume	Venturi and Cyclonic spray	0.870	0.459
Odorous mist	Venturi	0.363	1.41

Venturi Scrubber Collection Efficiencies as a Function of Particle Size and Pressure Drop for a Rectangular Venturi

Προσέγγιση με την ισχύ επαφής



Παράδειγμα: 10" water, 2 μ m:



Προσέγγιση με την ισχύ επαφής

Δοκιμές σε πλυντρίδα σε μεταλλουργική μονάδα έδωσαν τα αποτελέσματα δίπλα. Να εκτιμηθεί η απαιτούμενη ισχύς επαφής για να επιτευχθεί απόδοση 97%.

Απώλειες πίεσης (in H ₂ O)	η (%)
12.7	56
38.1	89

Μετατροπή μονάδων (σε hp/1000 cfm)

$$P_{T,56\%} = 12,7 (\text{inH}_2\text{O}) \times 0,1575 = 2,0 \text{ hp} / 1000 \text{ cfm}, \quad P_{T,89\%} = 6,0 \text{ hp} / 1000 \text{ cfm}$$

$$\eta = 1 - \exp(-N_t) \Rightarrow N_t = \ln[1 / (1 - \eta)] \Rightarrow \left. \begin{array}{l} N_{t,56\%} = 0,821 \\ N_{t,89\%} = 2,207 \\ N_{t,97\%} = 3,506 \end{array} \right\}$$

$$\text{Από τη σχέση } N_t = \alpha P_T^\beta \text{ βρίσκουμε τα } \alpha \text{ και } \beta: \left. \begin{array}{l} \alpha = 0,44 \\ \beta = 0,90 \end{array} \right\}$$

και $3,506 = 0,44 P_T^{0,9} \Rightarrow P_T = 10 \text{ hp} / 1000 \text{ cfm}$