



**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

# Χημική και Περιβαλλοντική Τεχνολογία

## Διάλεξη 9η: Διαχείριση και Επεξεργασία Αερίων Εκπομπών

**Νικόλαος Γ. Σαββάκης**

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΕΛΜΕΠΑ

Ακαδημαϊκό Έτος 2022-2023

# Ατμοσφαιρική Ρύπανση

- **Ατμοσφαιρική ρύπανση** είναι η παρουσία στην εξωτερική ατμόσφαιρα... οποιονδήποτε ενός ή περισσότερων ουσιών ή ρύπων σε ποσότητες, οι οποίες **είναι ή μπορεί να είναι επιβλαβείς ή επιζήμιες** για την **ανθρώπινη υγεία ή ευεξία**, για την **ύπαρξη ζώων και των φυτών**, ή **των περιουσιών**, ή αδικαιολόγητα παρεμβαίνουν στις απολαύσεις της ζωής και της περιουσίας, συμπεριλαμβανομένης και της υπαίθριας αναψυχής (*Διοικητικός κώδικας της Φλόριντα, 1982*)
- **Ατμοσφαιρική ρύπανση** ονομάζεται η παρουσία ρύπων στην ατμόσφαιρα **σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια** τέτοια ώστε να είναι δυνατόν **να προκληθούν αρνητικές συνέπειες** στην ανθρώπινη υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα.

# Πηγές ρύπανσης

- Οι πηγές ρύπανσης μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες:
  - A.** τις **ανθρωπογενείς**, δηλαδή εκείνες που οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα και
  - B.** τις **φυσικές**, δηλαδή εκείνες που οφείλονται στη φυσική δραστηριότητα.

- Οι κυριότερες **ανθρωπογενείς πηγές** είναι:
  - **Βιομηχανικές πηγές** (που περιλαμβάνουν κυρίως διεργασίες καύσης)
  - **Παραγωγή και μεταφορά ενέργειας**
  - **Μεταφορές**
  - **Κεντρική θέρμανση**



# Πηγές ρύπανσης

- Οι σημαντικότερες φυσικές πηγές είναι:
  - Τα ηφαίστεια (που συνεισφέρουν κυρίως με εκπομπές αιωρούμενων σωματίδια, διοξειδίου του θείου, υδρόθειου και μεθανίου).
  - Οι πυρκαγιές δασών\* (απελευθερώνοντας αιωρούμενα σωματίδια, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα).
  - Οι ωκεανοί και γενικότερα οι θαλάσσιες εκτάσεις (όπου έχουμε εκροές χλωριούχου νατρίου και θειικών αλάτων).
  - Η βιολογική αποσύνθεση των φυτών και των ζώων (η οποία έχει ως κατάλοιπα κυρίως υδρογονάνθρακες, αμμωνία και υδρόθειο).



# Κατηγοριοποίηση Αέριων Ρύπων

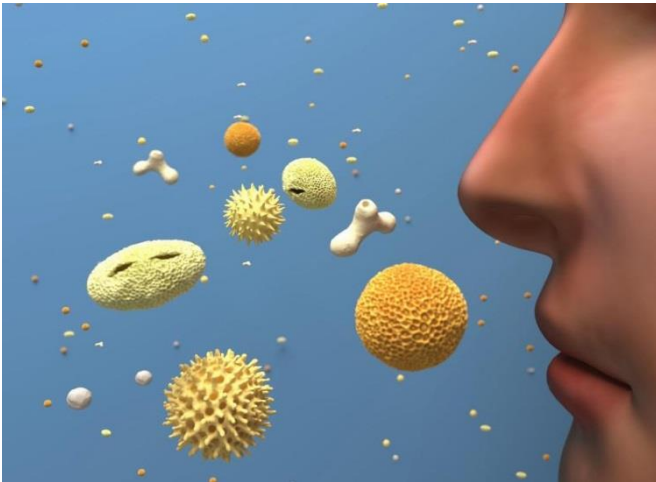
Οι αέριοι ρύποι που υπάρχουν στο περιβάλλον μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

- **Πρωτογενείς ρύποι**: Θεωρούνται οι ρύποι που εκπέμπονται απευθείας **από την πηγή ρύπανσης**, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο  $< 10\mu\text{m}$  (PM-10) (π.χ. σκόνη, καπνός και διάφορα μέταλλα), το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), το μονοξείδιο του αζώτου (NO), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και οι αέριοι οργανικοί πτητικοί υδρογονάνθρακες (VOCs).
- **Δευτερογενείς ρύποι**: Θεωρούνται οι ρύποι που σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα με **χημική αλληλεπίδραση των πρωτογενών ρύπων** και υπό την καθοριστική πολλές φορές για το σχηματισμό τους **παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας**. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ), το όζον ( $\text{O}_3$ ) και το νιτρικό υπεροξυακετύλιο (PAN)

# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter)

- Σωματίδια στερεής ή υγρής φάσης, πολύ μικρής διαμέτρου (της τάξεως των  $\mu\text{m}$ ), τα οποία αιωρούνται στην ατμόσφαιρα.
- Χαρακτηρίζονται ως:
  - Σκόνη (dust): Μέγεθος από **1  $\mu\text{m}$  μέχρι εκατοντάδες  $\mu\text{m}$**
  - Καπνός (smoke): **< 1  $\mu\text{m}$**
  - Αεροζόλ (aerosols): **οργανικά ή ανόργανα** σταγονίδια **< 2  $\mu\text{m}$**
- Η χημική σύσταση των αιωρ. σωματιδίων είναι συνάρτηση της προέλευσης και του μεγέθους των



# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter)-Διεργασίες έκλυσης αιωρ. σωματιδίων

- **Ανθρωπογενείς πηγές:** βιομηχανικές - εξορυκτικές δραστηριότητες (ειδικά η παραγωγή τσιμέντου και γύψου), τα χυτήρια μεταλλευμάτων, οι κατασκευές και οι αγροτικές δραστηριότητες, μεταφορές, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα.
- **Φυσικές πηγές** αποτελούν η διάβρωση των εδαφών και των πετρωμάτων, η ηφαιστειακή δραστηριότητα, το σπρέι της θάλασσας και η καύση της βιομάζας.
- **Παρατήρηση:** **Σημαντικό ρόλο** έχουν τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των **10 μm (PM-10)** και ιδίως τα σωματίδια με πολύ μικρή διάμετρο (**PM-2,5**), διότι το μέγεθός τους επιτρέπει την είσοδό τους στο αναπνευστικό σύστημα, προκαλώντας σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα

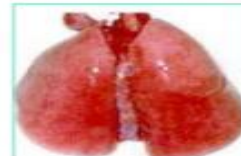
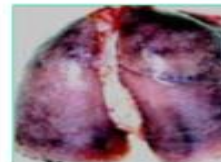
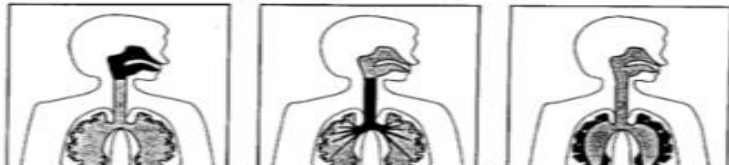
# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter)- Επιπτώσεις

- Σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι **επιβλαβή** για τους πνεύμονες του ανθρώπου, προκαλούν **βρογχίτιδες**, **ερεθισμό** των ματιών, **δερματικές παθήσεις** και αύξηση του αριθμού των θανάτων ιδιαίτερα όταν οι αιωρούμενες ουσίες είναι τοξικές.
- **Μείωση της ορατότητας**, καθώς τα αιωρούμενα σωματίδια σε μεγάλες συγκεντρώσεις σκεδάζουν και απορροφούν το φως.
- **Ρύπανση κτηρίων – μνημείων**
- **Φθορά από οξείδωση και διάβρωση**
- **Επιβράδυνση στην ανάπτυξη φυτών και ζώων**

- **μεγαλύτερα από 11 μm:** δεν εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα
- **7,00-11,00 μm:** εισχωρούν στη ρινική κοιλότητα
- **4,70-7,00 μm:** εισχωρούν στο φάρυγγα
- **3,30-4,70 μm:** εισχωρούν στην τραχεία και στην αρχή των βρόγχων
- **2,10-3,30 μm:** εισχωρούν στο μέσο των βρόγχων
- **1,10-2,10 μm:** εισχωρούν στα τελευταία τμήματα των βρόγχων
- **0,65-1,10 μm:** εισχωρούν στα βρογχιόλια
- **0,43-0,65 μm:** εισχωρούν στις κυψελίδες των πνευμόνων

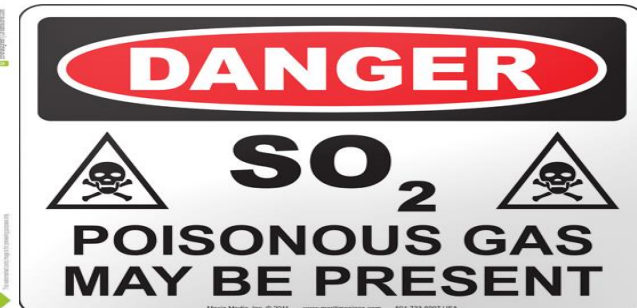
PM < 100 μm:	εισπνεύσιμα
PM < 10 μm:	Θωρακικό κλάσμα (διασχίζουν την τραχεία και τους βρόγχους)
PM < 4 μm:	αναπνεύσιμα, αυτά που φτάνουν και εισέρχονται στις κυψελίδες



# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>):

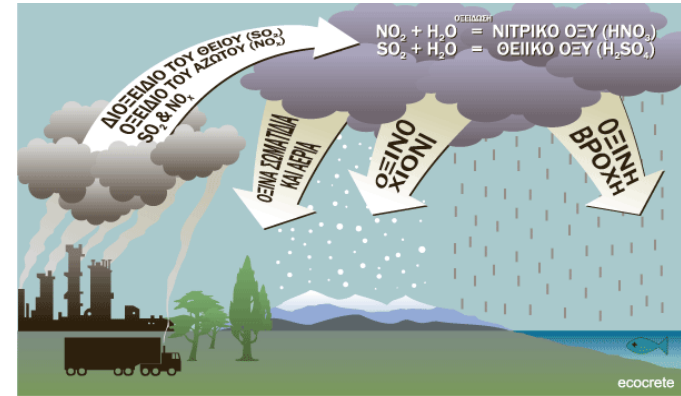
- **Αέριο, άχρωμο, άοσμο** σε χαμηλές συγκεντρώσεις αλλά με έντονη ερεθιστική οσμή σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις.
- Προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων που περιέχουν θείο (λιγνίτες, μαζούτ, πετρέλαιο). Σημαντικές πηγές αποτελούν επίσης τα διυλιστήρια πετρελαίου και τα εργοστάσια επεξεργασίας χαλκού.
- Ευδιάλυτο στο νερό → μετατρέπεται  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  → **όξινες κατακρημνίσεις**



# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) - Επιπτώσεις:

- Σοβαρά **αναπνευστικά** προβλήματα στον άνθρωπο αλλά και **αλλοιώσεις** στη **βλάστηση** και τα **μέταλλα**.
- **Μειώνει** την **ορατότητα** της **ατμόσφαιρας** και **αυξάνει** την **οξύτητα** των επιφανειακών **υδάτων** (λιμνών και ποταμών)
- **Επιδρά αρνητικά** στα **δομικά υλικά** (σημαντικές **φθορές σε μνημεία**) καθώς, το H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> προσβάλλει το ανθρακικό ασβέστιο των μαρμάρων → σε γύψο



Πριν την όξινη βροχή

Μετά την όξινη βροχή



# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Μονοξείδιο του άνθρακα (CO):

- Άχρωμο, άοσμο, άγευστο και δηλητηριώδες
- Παράγεται από την ατελή καύση υλικών που περιέχουν άνθρακα, αλλά και από ορισμένες βιολογικές και βιομηχανικές διεργασίες.
- **Κύρια πηγή** του όμως είναι τα βενζινοκίνητα οχήματα.
- Υψηλές συγκεντρώσεις παρατηρούνται σε:
  - **Κλειστούς χώρους** όπως χώροι στάθμευσης, ελλιπώς αεριζόμενες υπόγειες διαβάσεις
  - **Κατά μήκος των δρόμων** σε περιόδους κυκλοφοριακής αιχμής.



# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) - Επιπτώσεις:

- Ανάλογα με τη συγκέντρωσή του στον ατμοσφαιρικό αέρα το CO μπορεί να προκαλέσει:
  - καρδιακές και πνευμονικές διαταραχές,
  - διαταραχή της συμπεριφοράς,
  - προσβολή του κεντρικού νευρικού συστήματος
  - διαταραχές των κινήσεων και της όρασης,
  - πονοκέφαλο, κόπωση,
  - κώμα, αδυναμία αναπνοής, **ακόμη και θάνατο.**

### Παρατήρηση:

Είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο σε κλειστούς χώρους όπου δύσκολα γίνεται αντιληπτή η παρουσία του.



# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Οξειδία του αζώτου (NOx)

- Από τα επτά γνωστά οξειδία του αζώτου (**NO**, **NO<sub>2</sub>**, NO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, και N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) **μόνο δύο προκαλούν** σημαντικά προβλήματα.
- Το **NO** είναι **αέριο, άχρωμο και άγευστο**, ενώ το **NO<sub>2</sub>** έχει **καστανοκόκκινο χρώμα και ιδιάζουσα οσμή**.
- Παράγονται **από τη χρήση καυσίμων**, κυρίως **σε αυτοκίνητα** αλλά και σε **βιομηχανικούς καυστήρες** και σε **σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας**.
- Η παραγωγή των **NOx** γίνεται:
  - Από την **οξείδωση του ατμοσφαιρικού αζώτου** κατά τη διάρκεια της καύσης
  - Κατά τη **οξείδωση των αζωτούχων ενώσεων** που περιέχονται στα καύσιμα.

# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>)-Επιπτώσεις :

### NO<sub>2</sub>

- υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, αντιδρά με υδρογονάνθρακες → παραγωγή O<sub>3</sub> και τη δημιουργία **φωτοχημικού νέφους**.

Υδρογονάνθρακες + Οξειδία του αζώτου + Ηλιακό φως → Φωτοχημικό νέφος

- Έχει **συμβολή** στην **όξινη βροχή**
- Σε μεγάλες συγκεντρώσεις, είναι **ερεθιστικό** για τον **ανθρώπινο οργανισμό**.



# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Όζον (O<sub>3</sub>):

- **Αέριο άχρωμο**, με **έντονη οσμή** και **οξειδωτική δράση**
- Δεν εκπέμπεται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα αλλά **παράγεται** μετά από μια **σειρά αντιδράσεων**.
- Η εκκίνηση μια σειράς πολύπλοκων χημικών αντιδράσεων (**Υδρογονάνθρακες + Οξείδια του αζώτου + Ηλιακό φως → Φωτοχημικό νέφος**) έχει σαν αποτέλεσμα τη **δημιουργία** κάποιων **δευτερογενών ρύπων**, **κυριότερος** από τους οποίους είναι **το O<sub>3</sub>**.
- **Βασική αιτία** της **φωτοχημικής ρύπανσης** των πόλεων (χρησιμοπ. σαν **δείκτης** της).

Παρατήρηση: Οι εποχικές διακυμάνσεις στα επίπεδα του O<sub>3</sub> **σχετίζονται** με τις αντιδράσεις σχηματισμού του και ιδιαίτερα με την απαιτούμενη **ηλιακή ακτινοβολία**. Οι **μέγιστες συγκεντρώσεις** παρουσιάζονται, λοιπόν, **την θερμή περίοδο του έτους** όπου τόσο **η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας** όσο και **η διάρκεια της ημέρας** είναι **μεγαλύτερες**

# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Όζον (O<sub>3</sub>)- Επιπτώσεις:

- Εξαιρετικά **τοξικό αέριο**
- Η παρουσία του στην στρατόσφαιρα συμβάλλει αποφασιστικά στην προστασία των ανθρώπων, ζώων και φυτών από την υπεριώδη ακτινοβολία.
- Αντίθετα όμως στην **χαμηλότερη ατμόσφαιρα** το όζον αποτελεί ένα **ισχυρό** και **ερεθιστικό ρύπο** ο οποίος **βλάπτει την ανθρώπινη υγεία, τις αγροτικές καλλιέργειες** ακόμη και **τα δομικά υλικά**
- Προκαλεί **ελάττωση των πνευμονικών λειτουργιών**, βήχα, δύσπνοια, άσθμα.
- Έκθεση του ατόμου σε εξαιρετικά **υψηλές συγκεντρώσεις (>9 ppm)** μπορεί να προκαλέσει **ζάλη έμετο κ.ά.**

# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων



Vehicle exhaust emissions

## Μόλυβδος (Pb)

- Χρησιμοποιήθηκε για αρκετά χρόνια ως αντικροτικό στα καύσιμα. Με τη αλλαγή της σύστασης του στόλου των αυτοκινήτων και **με τη χρήση της αμόλυβδης βενζίνης** παρουσιάζεται **σημαντική μείωση** στις συγκεντρώσεις του.
- **Άλλες πηγές:** χρήση **γαιανθράκων**, οι **βαριές βιομηχανίες**, τα **χυτήρια μεταλλευμάτων**, τα **εργοστάσια μπαταριών** και η **καύση των απορριμμάτων**.

## Επιπτώσεις

- **Τοξικός** σε **όλες τις μορφές του** και μπορεί να εισαχθεί στον οργανισμό τόσο από την πεπτική όσο και την αναπνευστική οδό.
- Χαρακτηριστική είναι η **αθροιστική δράση** του και η **εκλεκτική απόθεσή του στα οστά**.
- **Έντονα συμπτώματα** εμφανίζονται **όταν ο μόλυβδος στο αίμα είναι πάνω από 60-100μg**, οπότε δημιουργούνται προβλήματα στο ρυθμό παραγωγής του αίματος.

# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC<sub>s</sub>)

- **Χαρακτηρίζονται** κυρίως οι πτητικές αρωματικές ενώσεις (όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο, ξυλόλια κλπ) που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα.
- **Κύριες Πηγές:** οι βιομηχανίες, τα καυσαέρια των οχημάτων, τα πρατήρια υγρών καυσίμων, χρώματα και οικοδομικά υλικά.
- **Ενδεικτικά** αναφέρεται ότι: **οι ΗΠΑ εκπέμπουν** , περίπου, **17.580.000 τόνους (1990)**, η **Μ. Βρετανία 2.600.000 τόνους** και η **Γερμανία 2.545.000 τόνους**.
- Παίζουν σημαντικό ρόλο σε **φωτοχημικές αντιδράσεις** και συμβάλλουν στην περιβαλλοντική ρύπανση, λόγω της **υψηλής τοξικής και καρκινογόνου δράσης**.

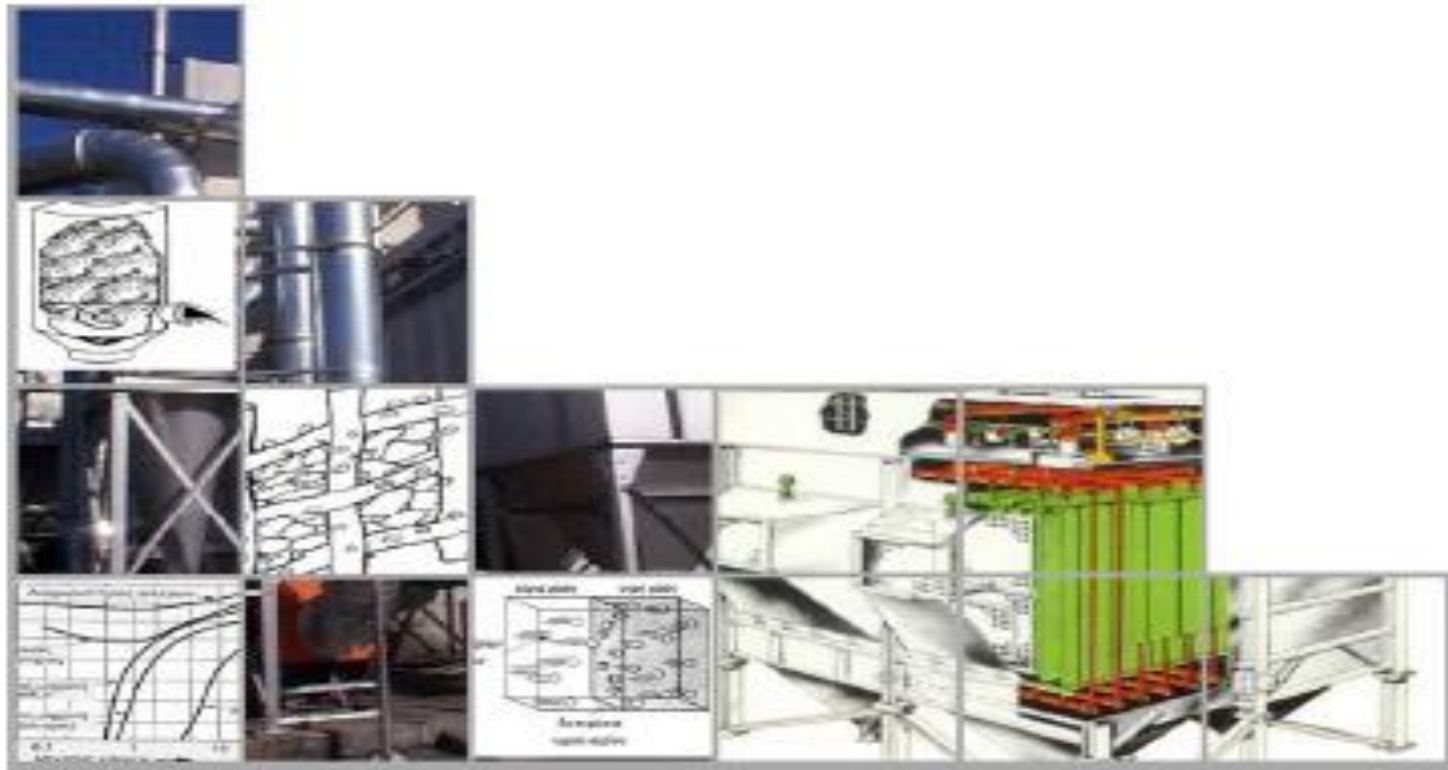


# Ιδιότητες και επιπτώσεις των ρύπων

## Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC<sub>s</sub>)-Επιπτώσεις

- Τα VOCs είναι ποικίλως ερεθιστικά, ναρκωτικά, καρκινογενή κ.λ.π.
- Οι ενοχλήσεις για το περισσότερο από το 75% του πληθυσμού με συμπτώματα όπως πονοκέφαλοι, ερεθισμοί δέρματος και ματιών, χρόνια κόπωση, οφείλονται στην έκθεσή του σε υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών ενώσεων (VOCs).
- Πάνω από 50% του πληθυσμού με τακτική έκθεση στο βενζόλιο παρουσίασε **προβλήματα**, ενώ περισσότερες από 3000 περιπτώσεις λευχαιμίας **αποδίδονται στο βενζόλιο**.
- Οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες έχουν **επιπτώσεις στο νευρικό σύστημα**, προκαλούν **ερεθισμούς των ματιών, της μύτης και των πνευμόνων** καθώς και καταστροφές του δέρματος, του ήπατος και των νεφρών.
- Η δράση τους είναι **συνδυαστική** → το αποτέλεσμα είναι αθροιστικό και σοβαρότερο.

# Τεχνολογίες Επεξεργασίας Αερίων Εκπομπών



# Τεχνολογίες Επεξεργασίας Αερίων Εκπομπών

→ Διακρίνονται δυο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος του αέριου ρύπου που πρόκειται να επεξεργαστεί.

## Αέριες Εκπομπές

```
graph TD; A[Αέριες Εκπομπές] --> B[Σωματιδιακοί ρύποι]; A --> C[Αέριες ενώσεις];
```

### Σωματιδιακοί ρύποι

- Βαρυτικοί συλλεκτες
- Κυκλώνες
- Σακόφιλτρα
- Ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP)
- Πλυντρίδες

### Αέριες ενώσεις

- Προσρόφηση
- Απορρόφηση
- Οξείδωση – καύση
- Συμπύκνωση

# Τεχνολογίες Επεξεργασίας Αερίων Εκπομπών

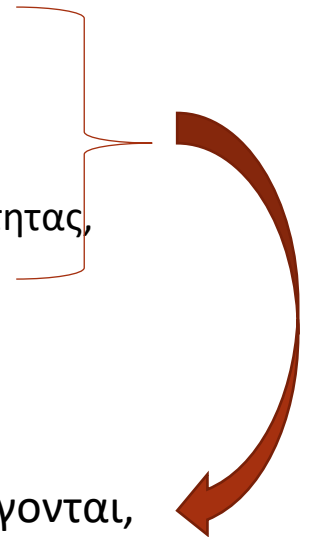
## Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων (αιωρούμενων σωματιδίων)

- Αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter):

- αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους πρωτογενείς αέριους ρύπους,
- παρουσιάζουν μεγάλο εύρος σχήματος, μεγέθους, χημικής σύστασης, πυκνότητας, τοξικότητας , κ.λ.π.

- Οι χρησιμοποιούμενες συσκευές συλλογής σωματιδίων να επιλέγονται, ανάλογα:

- ❖ με το συγκεκριμένο αέριο ρεύμα που πρέπει να επεξεργαστεί
- ❖ με τη συγκέντρωση και το είδος των προς συλλογή σωματιδίων



# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων (αιωρούμενων σωματιδίων)

Κατά συνέπεια,

- Οι **φυσικές ιδιότητες** και τα **χαρακτηριστικά** του συνολικού αέριου ρεύματος αποτελούν επίσης παράγοντες που επηρεάζουν καθοριστικά το είδος της συσκευής που θα επιλεγεί.
- Άλλοι παράμετροι όπως η **θερμοκρασία**, η **υγρασία**, **παροχή** κ.α. παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απόδοση μιας συσκευής συλλογής σωματιδίων.

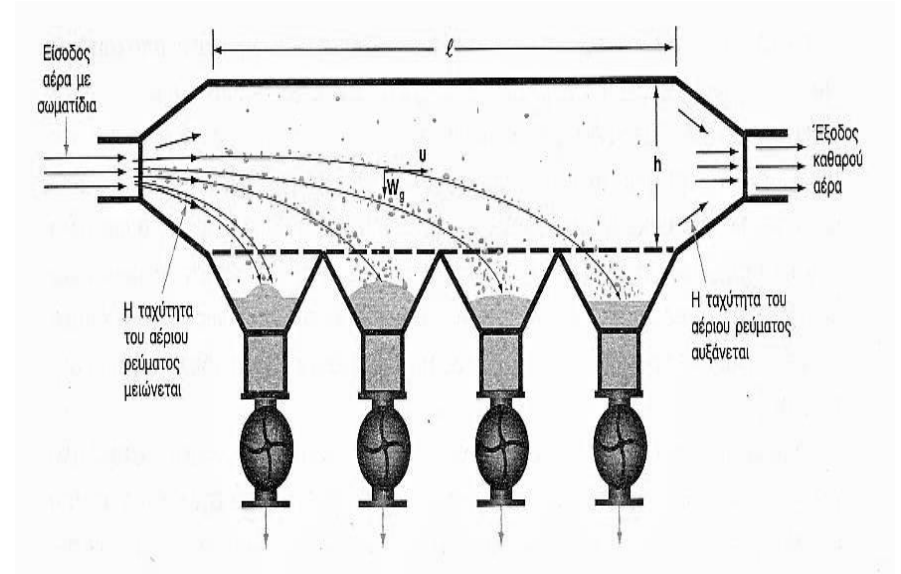
# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

- Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αερίων ρευμάτων και τη συλλογή αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:
  - τους μηχανικούς συλλέκτες (οι οποίοι περιλαμβάνουν τους βαρυτικούς συλλέκτες, τους διαχωριστές πρόσκρουσης και τους κυκλώνες),
  - τις πλυντρίδες (ή αλλιώς υγροί συλλέκτες, wet scrubbers),
  - τα σακόφιλτρα (bag filters)
  - τα ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP, Electrostatic Precipitators).
- Οι παραπάνω διατάξεις μπορεί να χρησιμοποιούνται μόνες τους ή σε συνδυασμό μεταξύ τους, ανάλογα με την εφαρμογή και τον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Βαρυτικοί συλλέκτες

- Χαρακτηρίζονται από απλό σχεδιασμό, κατασκευή και λειτουργία.
- Λειτουργούν κυρίως ως συστήματα προεπεξεργασίας αερίων ρευμάτων για την απομάκρυνση μεγάλης διαμέτρου σωματιδίων.



### Αρχή Λειτουργίας

Αέριο ρεύμα εισέρχεται, με ταχύτητα που μειώνεται κατά μήκος της συσκευής (λόγω αυξημένης διαμέτρου )

Σωματίδια με μεγάλο μέγεθος και βάρος  $\rightarrow$  Επίδραση της βαρυτικής δύναμης

Βαρυτική καθίζηση

**Παρατήρηση:** Όσο πιο μικρή είναι η ταχύτητα τόσο πιο μεγάλος είναι ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στο εσωτερικό της συσκευής με αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού το οποίο καθιζάνει.

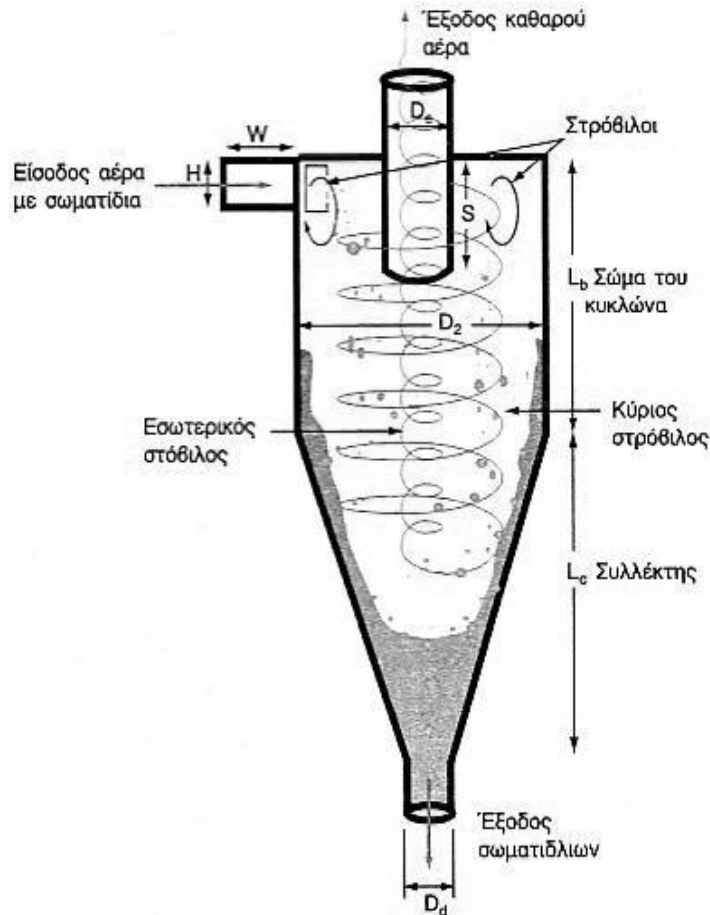
# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Βαρυτικοί συλλέκτες

- Η απόδοση μπορεί να φτάσει έως και **το 90%** όταν η διάμετρος των σωματιδίων είναι > από 50μm.
- Οι συγκεντρώσεις των αερίων ρευμάτων στην είσοδο των συλλεκτών πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ 1-100g/m<sup>3</sup> , προκειμένου να έχουμε ικανοποιητική απόδοση.
- **Βασικά μειονεκτήματα:**
  - μεγάλος όγκος θαλάμου που απαιτείται.
  - πολύ χαμηλή απόδοσή τους για σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 20μm.

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Κυκλώνες



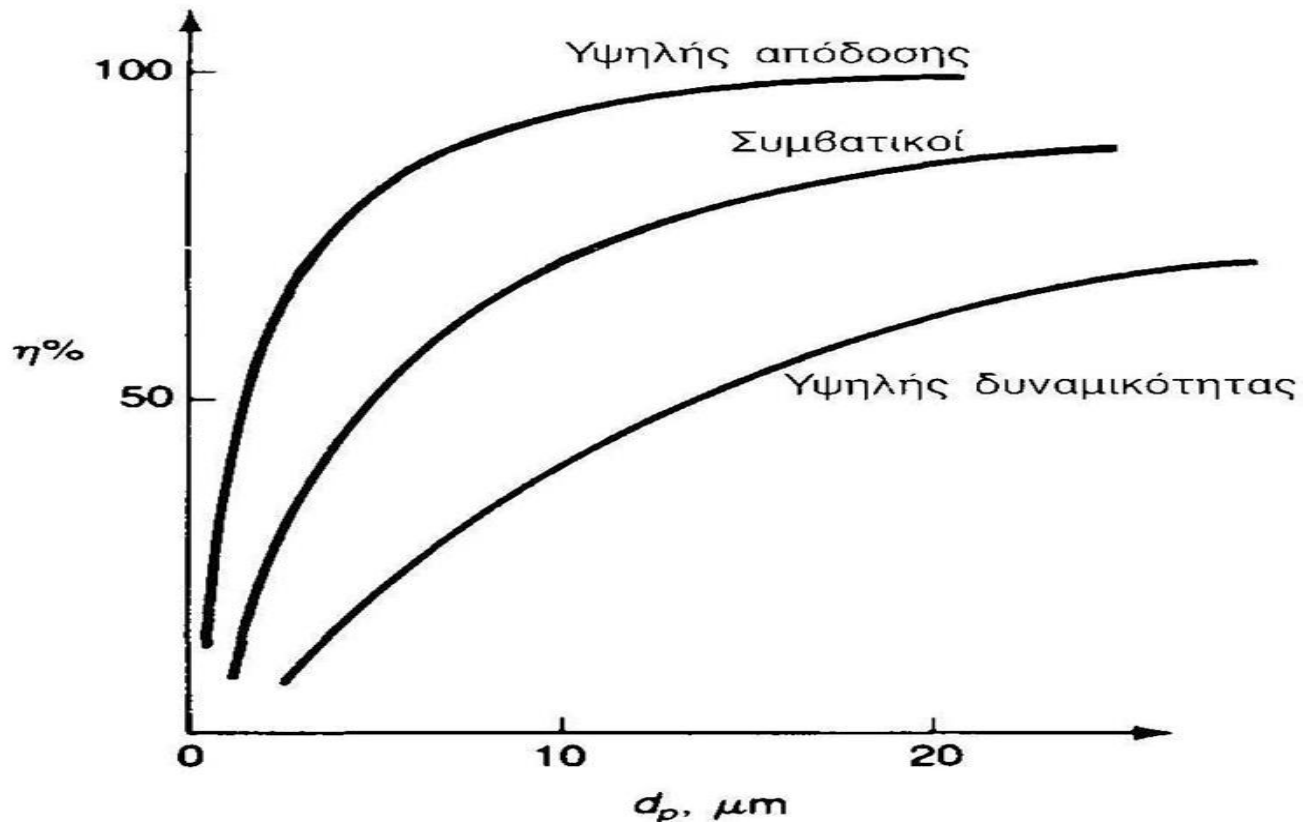
- **Κυκλικές διατάξεις** που περιλαμβάνουν ένα κωνικό τμήμα στο κάτω μέρος τους, **στις οποίες το αέριο ρεύμα εξαναγκάζεται σε περιστροφική κίνηση.**
- **Αρχή Λειτουργίας:**
  - I. Το φορτισμένο σε σωματίδια ρεύμα εισέρχεται εφαιπτομενικά από το επάνω μέρος του κυκλώνα (με ταχύτητες 20-40 m/s)
  - II. **Εκτελεί σπειροειδή κίνηση με κατεύθυνση προς τα κάτω**, λόγω του σχήματος του κυκλώνα και της διεύθυνσης κίνησης στην είσοδο.
  - III. Πριν το τέλος του κωνικού τμήματος του κυκλώνα το αέριο **αναστρέφει** την προς τα κάτω σπειροειδή του πορεία **και κινείται προς τα πάνω** σε μια εσωτερική μικρότερη σπείρα.
  - IV. Το καθαρισμένο ρεύμα εξέρχεται από το πάνω μέρος ενός σωλήνα (ανιχνευτής δίνης) ενώ τα σωματίδια εξέρχονται από το κάτω μέρος του κυκλώνα μέσω ενός αγωγού

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Κυκλώνες

- Μπορούν να συλλέξουν ικανοποιητικά τα **αιωρ. σωματίδια** με **εύρος διαμέτρου** από **10-200 $\mu\text{m}$**  (π.χ. αέριες εκπομπές από διεργασίες θραύσης, άλεσης, λειοτριβής, κοσκινίσματος, ξήρασης, ανάμειξης κοκκώδων υλικών, συσκευασίας στερεών υλικών σε μορφή σκόνης ή κόκκων κ.α.).
- Ενδεικτικά, οι **αποδόσεις** που επιτυγχάνονται από **απλούς συμβατικούς κυκλώνες** είναι της τάξεως του **90%** για σωματίδια **> 10 $\mu\text{m}$** .
- **Πλεονεκτήματα:**
  - Μικρό κόστος εγκατάστασης
  - Απουσία κινητών τμημάτων (τα οποία φθείρονται και κατά συνέπεια πρέπει να αντικαθίστανται)
  - Μεγάλη τους αντοχή σε σκληρές συνθήκες λειτουργίας (μεγάλες θερμοκρασίες, τοξικά αέρια, μεγάλες παροχές κ.λ.π.)
- **Μειονεκτήματα:**
  - Χαμηλές αποδόσεις (ειδικά για τα πολύ μικρής διαμέτρου σωματίδια, <5 $\mu\text{m}$ )
  - Υψηλό κόστος λειτουργίας (σχετίζεται με τη μεγάλη πτώση πίεσης που παρατηρείται)

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων



**Διάγραμμα:** Γενική σχέση της απόδοσης συλλογής έναντι του μεγέθους σωματιδίου για κυκλώνες

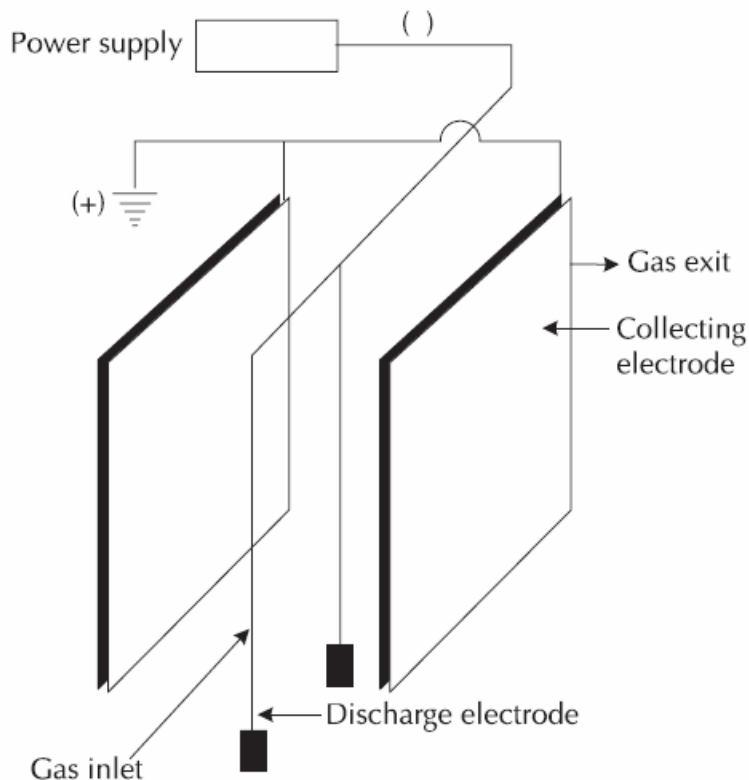
# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Ηλεκτροστατικά φίλτρα

- Πρωτοχρησιμοποιήθηκαν το 1928 για τη δέσμευση της ιπτάμενης τέφρας.
- Αξιοποιούν **την επίδραση ενός ηλεκτροστατικού πεδίου πάνω σε ένα διερχόμενο αέριο ρεύμα**, φορτισμένο με σωματίδια, προκειμένου να επιτευχθεί ο διαχωρισμός των τελευταίων.
- Η διεργασία του διαχωρισμού περιλαμβάνει:
  - τη διέλευση του αερίου ρεύματος ανάμεσα στα ηλεκτρόδια,
  - τον ιονισμό του αέρα,
  - τη φόρτιση των μορίων και σωματιδίων,
  - τη μετακίνηση και τέλος τη συλλογή του ρυπαντικού φορτίου στις αντίθετα φορτισμένες πλάκες

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Ηλεκτροστατικά φίλτρα (Αρχή Λειτουργίας)



- Συνήθως, χρησιμοποιείται ένα στεμματόμορφο (corona) αρνητικό πεδίο φόρτισης.
- Η υψηλή αρνητική τάση (έως και 100 kV) που εφαρμόζεται ιονίζει τα μόρια του αερίου, δημιουργώντας ελεύθερα ηλεκτρόνια.
- Τα ηλεκτρόνια κυκλοφορούν προς τις γειωμένες πλάκες, συγκρούονται και προσκολλούνται στα ηλεκτραρνητικά μόρια δημιουργώντας αρνητικά ιόντα.
- Λόγω της φόρτισης του πεδίου τα αρνητικά αυτά ιόντα, κατά τη διάρκεια της κίνησής τους μπορεί να συγκρουστούν με μεγάλα σωματίδια ( $>1\mu\text{m}$ ) τα οποία τέμνουν τις γραμμές του πεδίου και να τα παρασύρουν προς τις σταθερές πλάκες του ESP.
- Εναλλακτικά τα αρνητικά ιόντα συγκρουόμενα με σωματίδια πολύ μικρής διαμέτρου ( $<0.2\mu\text{m}$ ) μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό των σωματίων τα οποία από μόνα τους κατευθύνονται λόγω του ηλεκτρικού πεδίου προς τις πλάκες του ESP.

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Ηλεκτροστατικά φίλτρα

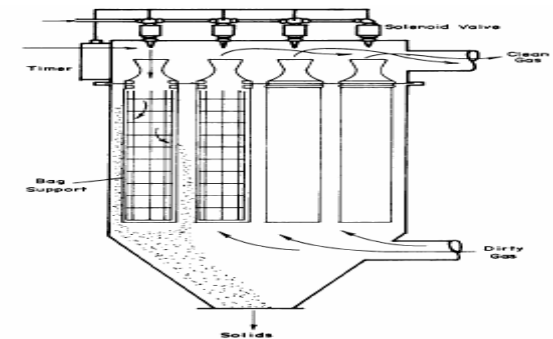
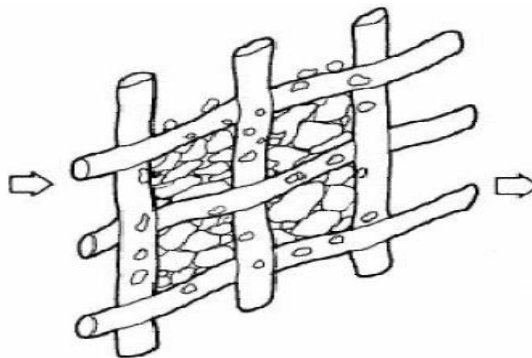
- **Πλεονεκτήματα:**
  - Επιτυγχάνονται πολύ υψηλές αποδόσεις που (>99%) ακόμα και για μικρά σωματίδια (<1μM), χωρίς να υπάρχει μεγάλη πτώση πίεσης
  - επεξεργάζονται ρεύματα με μεγάλη παροχή (έως και 1m<sup>3</sup>/s)
  - μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους
- **Μειονεκτήματα:**
  - Μεγάλο αρχικό κόστος επένδυσης
  - Μεγάλος όγκος που απαιτείται για την εγκατάσταση
  - Ελάχιστα περιθώρια για μεταβολές στις συνθήκες λειτουργίας
  - εξάρτηση της απόδοσής τους από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αερίου ρεύματος
- Αποτελούν περισσότερο συσκευές δευτεροβάθμιου καθαρισμού ρευμάτων τα οποία έχουν ήδη απαλλαγεί (με χρήση απλών συσκευών επεξεργασίας) από σωματίδια μεγάλης διαμέτρου (>5μm) και χρησιμοποιούνται κυρίως για την απομάκρυνση σκόνης από κλιβάνους τσιμέντου και ιπτάμενης τέφρας από καυστήρες κονιορτοποιημένου άνθρακα.

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Σακόφιλτρα

- Θεωρούνται από τους πιο διαδεδομένους συλλέκτες αιωρούμενων σωματιδίων λόγω της απλότητάς τους και των πολύ ικανοποιητικών αποδόσεών τους
- Χρησιμοποιούνται κυρίως για την επεξεργασία αερίων ρευμάτων που προκύπτουν από διακίνηση υλικών, θραύση, άλεση, λειοτριβή κ.α. είτε ως συσκευές πρωτοβάθμιου ελέγχου είτε ως δευτεροβάθμιοι συλλέκτες μετά από κυκλώνες.
- Για τη συγκράτηση των σωματιδίων χρησιμοποιούνται υφάσματα από διάφορα υλικά όπως βαμβάκι, μαλλί,

**Εικόνες:** Χαρακτηριστικά του υφάσματος που χρησιμοποιείται σε σακόφιλτρα (αριστερά) και απεικόνιση ενός σακόφιλτρου (με σύστημα καθαρισμού των φίλτρων) σε λειτουργία (δεξιά).



# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Σακόφιλτρα

- Γενικά, **οι φυσικές ιδιότητες** των υφασμάτων (αντοχή σε θερμοκρασία, πίεση κ.α.) **καθορίζουν την καταλληλότητα ή όχι** του χρησιμοποιούμενου υλικού σε **δεδομένο αέριο ρεύμα**.

**Π.χ.** Υφάσματα με βάση το βαμβάκι χρησιμοποιούνται μόνο σε ρεύματα χαμηλών θερμοκρασιών (<80°C) σε αντίθεση με υφάσματα από teflon τα οποία παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή και σταθερότητα ακόμα και στους 200°C.

- Γενική αρχή λειτουργίας:

- Ανάμεσα από τις ίνες ενός καθαρού υφάσματος **υπάρχουν διάκενα των 50-75 μm**, στα οποία αιωρούνται διάφορα ινίδια και μέσα από τα οποία διέρχεται το αέριο ρεύμα.
- **Στα πρώτα δευτερόλεπτα λειτουργίας** το μεγαλύτερο μέρος των σωματιδίων διέρχεται από το φίλτρο, καθώς το πλάτος των διακενων >> από τη διάμετρο των σωματιδίων
- **Με την πάροδο του χρόνου**, όλο και μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων συγκρατούνται από τα ινίδια (μέσω διεργασιών πρόσκρουσης, ανάσχεσης ή και διάχυσης) → **Σταδιακή μείωση των όρων σε επίπεδα μικρότερα των 5-10μm** → Τελικά, η απόδοση του σακόφιλτρου μπορεί να φτάσει σε ποσοστά μεγαλύτερα του 99% για σωματίδια έως και 1μm.

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Σακόφιλτρα

**Παρατήρηση:** Λόγω της συνεχόμενης μείωσης των πόρων του υφάσματος η πτώση πίεσης σε ένα σακόφιλτρο γίνεται πολύ μεγάλη μετά από κάποιο χρόνο λειτουργίας

→ Απαιτείται αναγέννηση (ή αλλιώς καθαρισμός) του υφάσματος με διάφορες τεχνικές οι οποίες καθορίζουν και τον τύπο του σακόφιλτρου.

Βάσει αυτών των τεχνικών τα σακόφιλτρα διακρίνονται, ως εξής:

- **τα σακόφιλτρα με ρεύμα αντιθέτου ροής**, όπου ο καθαρισμός γίνεται με παροχή αέρα αντίθετης ροής απ' ότι η ροή των επεξεργαζόμενων αερίων.
- **τα σακόφιλτρα δόνησης**, όπου ο καθαρισμός πραγματοποιείται με δόνηση του υφάσματος
- **τα σακόφιλτρα δόνησης με αέρα**, όπου ο καθαρισμός γίνεται με ταυτόχρονη δόνηση και παροχή αέρα υπό πίεση κ.α.

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Σακόφιλτρα

- Πλεονεκτήματα:

- μεγάλη και εξασφαλισμένη απόδοση για σωματίδια μικρής διαμέτρου (έως και 1 $\mu$ m),
- Καλή λειτουργία για μεγάλο εύρος σωματιδίων
- Ικανοποιητική διαχείριση μεγάλων παροχών αερίων ρευμάτων

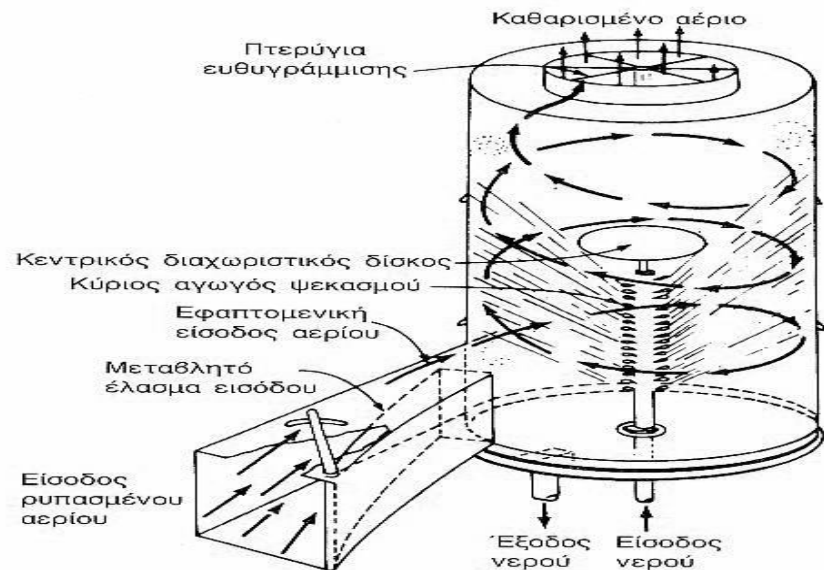
- Μειονεκτήματα:

- Μεγάλη πτώση πίεσης
- Χαμηλή ανθεκτικότητα σε θερμοκρασία και τοξικά χημικά (η οποία αυξάνει τις πιθανότητες ανάφλεξης του υφάσματος)
- Μειωμένες αποδόσεις για ρεύματα με μεγάλο ποσοστό υγρασίας
- Μεγάλη επιφάνεια που απαιτείται για την εγκατάσταση της συσκευής.

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Πλυντρίδες

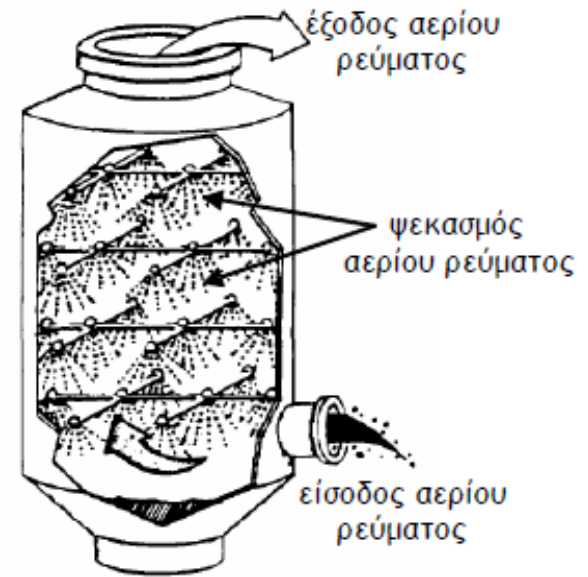
- Συσκευές υγρής συλλογής για καπνούς, ομίχλη και αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται κυρίως από αποτεφρωτήρες, κλιβάνους καύσης, διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη χημική βιομηχανία κ.α
- Η συλλογή των σωματιδίων πραγματοποιείται με κατάλληλη επαφή τους με ένα υγρό (συνήθως νερό).



# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Πλυντρίδες ( Αρχή λειτουργίας)

- Το αέριο ρεύμα εισέρχεται στη συσκευή συλλογής από το κάτω μέρος με κατεύθυνση προς τα πάνω.
- Στο εσωτερικό της συσκευής εισέρχεται υγρό (υπό μορφή σταγονιδίων μικρής διαμέτρου) το οποίο διοχετεύεται με ομοιόμορφη κατανομή προς τα κάτω.
- Η σύγκρουση των σωματιδίων με τις σταγόνες του υγρού και η συλλογή τους γίνεται μέσω ενός μηχανισμού αδρανειακής πρόσκρουσης.
- Άλλοι μηχανισμοί για τη συλλογή των σωματιδίων περιλαμβάνουν διάφορες διεργασίες διάχυσης που αποσκοπούν απομάκρυνση σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 0.1μm



# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

- Τα σταγονίδια έχουν κατά κανόνα τέτοια διάμετρο ώστε:

1. να βελτιστοποιείται η επαφή με τα σωματίδια
2. να διευκολύνεται ο διαχωρισμός τους από το αέριο ρεύμα.

Πλυντρίδες

- Ως εκ τούτου, οι πλυντρίδες ανάλογα με το μηχανισμό επαφής των σωματιδίων με το υγρό, χωρίζονται σε:

- **Απλές συσκευές με θάλαμο ψεκασμού:** ο φορτισμένος με σωματίδια αέρας διέρχεται μέσω ενός κυκλικού ή ορθογώνιου θαλάμου και έρχεται σε επαφή με σταγονίδια υγρού που παράγονται από ακροφύσια ψεκασμού (~βαθμός απόδοσης 90% για σωματίδια  $>8\mu\text{m}$ )
- **Πλυντρίδες που συνδυάζουν θαλάμους ψεκασμού με κυκλώνα:** ουσιαστικά αξιοποιούν τις ιδιότητες και την ικανότητα των κυκλώνων για συλλογή σωματιδιακού φορτίου ταυτόχρονα με την επαφή των σωματιδίων με το χρησιμοποιούμενο υγρό.
- **Πλυντρίδες Venturi:** βελτιστοποιείται η σχετική ταχύτητα μεταξύ του σταγονιδίου του υγρού και των αιωρούμενων σωματιδίων, η οποία αποτελεί σημαντική παράμετρος για την απόδοση συλλογής.

# Επεξεργασία σωματιδιακών ρύπων

## Πλεονεκτήματα:

Πλυντρίδες

- Ευελιξία στη διαχείριση εύφλεκτων και εκρηκτικών ρευμάτων,
- Ικανότητα για απορρόφηση και συλλογή της σκόνης σε μια μόνο μονάδα,
- Διαχείριση καυσαερίων με μεγάλα ποσοστά υγρασίας,
- αδρανοποίηση διαβρωτικών υλικών μέσα στη συσκευή
- Διαφοροποίηση της απόδοσης ανάλογα με την περίπτωση

## Μειονεκτήματα:

- Μεγάλη πτώση πίεσης όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα της συσκευής,
- Ανάγκη για καθαρισμό ή αντικατάσταση των ακροφυσίων,
- Φαινόμενα διάβρωσης των τμημάτων της συσκευής, με πιθανότητα εκροής νερού
- Αύξηση της απαιτούμενης δαπάνης για την επεξεργασία της λάσπης (υγρό + σωματίδια) που συλλέγεται από τη πλυντρίδα

# Επεξεργασία αέριων ρύπων

εκπέμπουν

- **Αέρια ρεύματα εξόδου** (διαφόρων διεργασιών) → **Μεγάλες συγκεντρώσεις αέριων ενώσεων** (επικίνδυνες για τον άνθρωπο και άλλους ζώντες οργανισμούς π.χ. ζώα, φυτά).
- **Εκπομπές αερίων ενώσεων** όπως (CO<sub>2</sub>), (NO<sub>x</sub>), (SO<sub>x</sub>), (VOCs) κ.α. **σχετίζονται με** φαινόμενα όπως αυτό του **θερμοκηπίου**, η **όξινη βροχή**, η **τρύπα του όζοντος**, **κλιματικές αλλαγές**.

Συνεπώς, ο **έλεγχος των επικίνδυνων αερίων ενώσεων** που εκλύονται από:

- στατικές (βιομηχανία, μονάδες παραγωγής ενέργειας κ.α.)
- κινητές (αυτοκίνητα, μέσα μαζικής μεταφοράς κ.α.)

πηγές εκπομπής καθίσταται **επιτακτικός**.

# Επεξεργασία αέριων ρύπων

Ελληνική &  
Ευρωπαϊκή νομοθεσία

θέτει



Αυστηρά όρια των επιτρεπόμενων  
εκπομπών στο περιβάλλον

επιβάλλει



Χρήση διατάξεων ελέγχου των  
επικίνδυνων αερίων ενώσεων

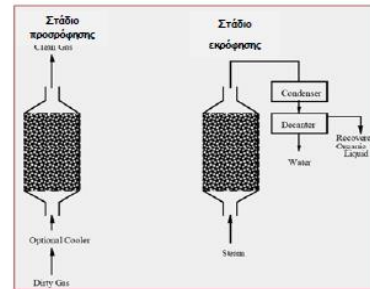
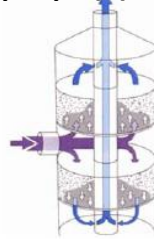
Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου για τον έλεγχο των αερίων εκπομπών καθορίζεται από παράγοντες όπως :

- Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες των αέριων ρύπων
- Η παροχή του αερίου ρεύματος
- Οι συγκεντρώσεις των ενώσεων στο αέριο ρεύμα
- Η θέση και το είδος της πηγής (κινητή ή ακίνητη)
- Η υπάρχουσα νομοθεσία σχετικά με τα επιτρεπτά όρια εκπομπής
- Το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης της συσκευής ελέγχου

# Επεξεργασία αέριων ρύπων

- Σε γενικές γραμμές οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την επεξεργασία αερίων ενώσεων είναι:
- η προσρόφηση,
- η απορρόφηση,
- η συμπύκνωση,
- η καύση (καταλυτική ή μη καταλυτική)
- και η βιολογική αποικοδόμηση.

προσρόφηση



απορρόφηση



Κινητός καταλυτικός μετακαυστήρας VOC.



Καταλυτικός μετακαυστήρας VOC.



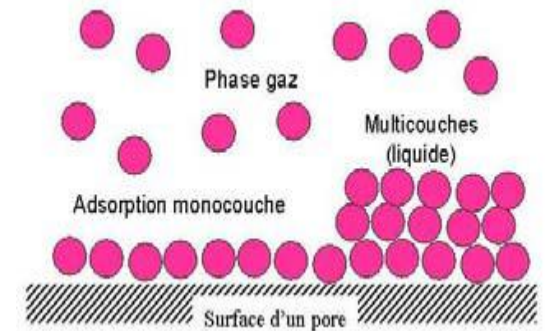
Θερμικός μετακαυστήρας VOC.

καύση

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Προσρόφηση

## Προσρόφηση

- Η διεργασία περιλαμβάνει την επαφή ενός αερίου ρεύματος με ένα κατάλληλο πορώδες στερεό.
- **Σκοπός** : οι ανεπιθύμητες αέριες ενώσεις στο ρεύμα **να συγκρατηθούν πάνω στην επιφάνεια του στερεού** μέσω φυσικής ή χημικής ρόφησης
- **Απαιτείται κατάλληλη επιλογή του προσροφητικού μέσου** και του **χρόνου επαφής** του με το **αέριο ρεύμα** για την επίτευξη μεγάλων αποδόσεων (: δηλαδή συγκράτηση μεγάλου ποσοστού του αερίου που μας ενδιαφέρει να απομακρύνουμε)
- Μπορεί να επιτευχθεί και η ανάκτηση πτητικών διαλυτών όπως το βενζόλιο, η αιθανόλη, το τριχλωροεθυλαίνιο, το φρέον κ.α.



# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Προσρόφηση

Η διεργασία προσρόφησης διακρίνεται σε φυσική και χημική - 2 μηχανισμοί

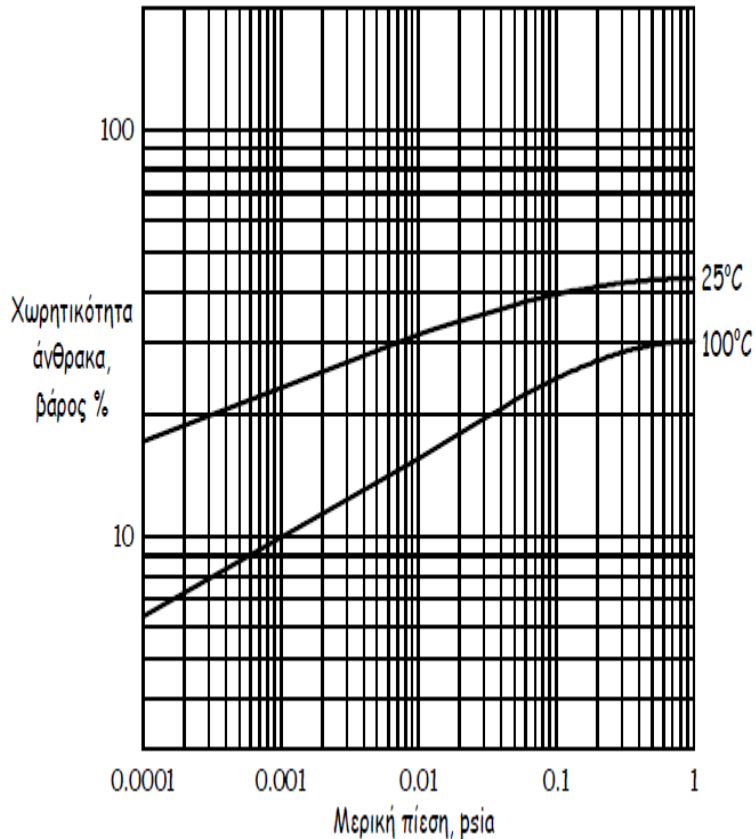
## Φυσική Προσρόφηση (Προσρόφηση van der Waals):

- ασθενής δεσμός του μορίου του αερίου με το στερεό – οι δυνάμεις ηλεκτροστατικές (δυνάμεις van der Waals)
- **αντιστρεπτή διεργασία** (με θέρμανση ή μείωση της πίεσης)
- **εξώθερμη**-απελευθερώνεται θερμότητα (~ 0,1 kcal/mole)

**Χημιορρόφηση** (π.χ. μετατροπή  $\text{SO}_2$  σε  $\text{SO}_3$  σε ενεργό άνθρακα, προσρόφηση  $\text{H}_2\text{S}$  σε οξείδια Fe) :

- χημική σύνδεση με αντίδραση (υπάρχει πραγματικός χημικός δεσμός)
- μη-αντιστρεπτή διεργασία
- ισχυρά εξώθερμη διεργασία (~ 10 kcal/mole) [ίδιες θερμότητες με αντιδράσεις]

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Προσρόφηση



Ισόθερμες ρόφησης για το τολουόλιο (προσαρμογή από EPA-81/05, σελ. 18-9).

- Η ικανότητα ενός στερεού να λειτουργήσει ως καλός προσροφητής για ένα συγκεκριμένο αέριο απεικονίζεται από μια **ισόθερμο καμπύλη**
- Κάθε **σημείο** στην καμπύλη **δείχνει την ποσότητα αερίου που μπορεί να προσροφηθεί** ανά μονάδα μάζας του προσροφητή (: σε δεδομένη θερμοκρασία και συγκέντρωση του αερίου ρεύματος).

**Για παράδειγμα** (βλ. σχήμα) :

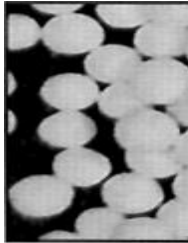
Η χωρητικότητα του ενεργού άνθρακα για τολουόλιο σε πίεση 0.15psia και θερμοκρασία 25°C είναι ίση με 40%.

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Προσρόφηση



Προσροφητικά μέσα είναι:

- ο **ενεργός άνθρακας** (για την απομάκρυνση μη πολικών οργανικών χημικών ενώσεων, π.χ. υδρογονάνθρακες, διαλύτες, οσμές)
- η **αλούμινα** ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , χρησιμοποιείται κυρίως για ξήρανση αερίων)
- ο **βωξίτης**,
- η **silica gel** (πορώδης μορφή οξειδίου του πυριτίου  $\text{SiO}_2$  - χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση αέρια ρεύματα με χαμηλά επίπεδα υγρασίας)
- ορισμένοι **ζεόλιθοι**



# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Προσρόφηση

## Adsorption Processes and Type of Adsorbent

Substance to Be Removed	Adsorbent			
	Activated Carbon	Activated Alumina	Silica Gel	Molecular Sieves
Odors	x			
Oil	x	x	x	x
Hydrocarbons	x	x	x	
Fluorocarbons	x		x	
Chlorinated hydrocarbons	x		x	
Organic sulfur Compounds	x	x		x
Solvents	x			
Moisture	x	x	x	

Σύσταση	Εσωτερικό πορώδες %	Πυκνότητα ξηρού Kg/m <sup>3</sup>	Ειδική επιφάνεια m <sup>2</sup> /Kg
Άργιλος	30	560-880	0.1-0.3
Αλούμινα	30-40	720-880	0.2/0.3
Βωξίτης	30-40	720-880	0.2/0.3
Οστεάνθρακας	50-55	640	0.1
Άνθρακες	55-75	160-480	0.6-1.4
Διηθητική γη	50-55	480-640	0.13-0.25
Οξειδίο σιδήρου	22	1440	0.02
Μαγνήσια	75	400	0.2
Silica gel	70	400	0.32

Πίνακας 1: Ιδιότητες διάφορων στερεών υλικών που χρησιμοποιούνται ως προσροφητές (προσαρμογή από Cooper CD και Alley FC, 2004).

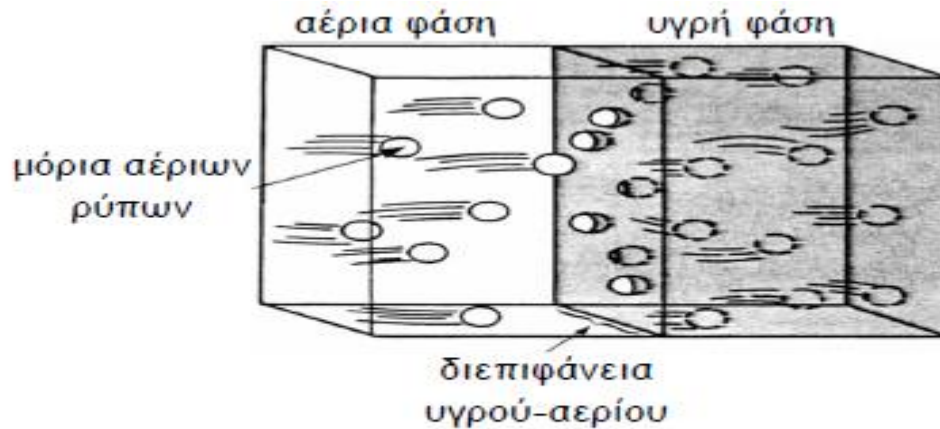
# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Απορρόφηση

- **Απορρόφηση:** η επιλεκτική μεταφορά μιας αέριας ουσίας (απορροφήσιμο μέσο-absorbate ή solute) από ένα αέριο ρεύμα σε ένα υγρό (απορροφητικό μέσο - absorbent), κυρίως νερό, με το οποίο βρίσκεται σε επαφή.
- Βασίζεται στην **κατά προτίμηση διαλυτότητα** ενός αερίου σε ένα συγκεκριμένο υγρό και αποτελεί διεργασία μεταφοράς μάζας.
- Αναφέρεται και ως **καθαρισμός ή έκπλυση αερίου** (gas scrubbing)

## Εφαρμογές

- Ανάκτηση αμμωνίας στη βιομηχανία λιπασμάτων
- Απομάκρυνση HF από τα απαέρια του φούρνου υάλου
- Έλεγχος SO<sub>2</sub> από πηγές καύσης
- Ανάκτηση διαλυτών (μεθανόλη, ακετόνη)
- Έλεγχος οσμών.

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Απορρόφηση



*Μηχανισμός μεταφοράς μιας αέριας ένωσης από την αέρια στην υγρή φάση κατά τη διεργασία της απορρόφησης (προσαρμογή από EPA-81/12, σελ. 4-2).*

- Η διεργασία περιλαμβάνει:
  - Διάχυση της ουσίας από την αέρια φάση μέσω της διεπιφάνειας αερίου-υγρού και τη διασπορά της στην υγρή φάση.
  - Μπορεί να πραγματοποιείται και χημική αντίδραση στο υγρό.

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Απορρόφηση

- Η **διαλυτότητα** ενός αερίου είναι πολύ σημαντική παράμετρος που επηρεάζει το ρυθμό μεταφοράς μάζας της ένωσης προς το διαλύτη.
- Η **διαλυτότητα** είναι συνάρτηση κυρίως της θερμοκρασίας (και λιγότερο της πίεσης)
- Κοινή μέθοδος ανάλυσης των δεδομένων διαλυτότητας είναι το **διάγραμμα ισορροπίας**
- Κάτω από ορισμένες συνθήκες ισχύει ο νόμος του Henry:

$$p = Hx \text{ ή } y = H'x$$

$x$ = κλάσμα μάζας του ρύπου στην υγρή φάση σε ισορροπία με την αέρια φάση

$y$ = κλάσμα μάζας στην αέρια φάση

$p$ =μερική πίεση  $H$  και  $H'$  σταθερές Henry

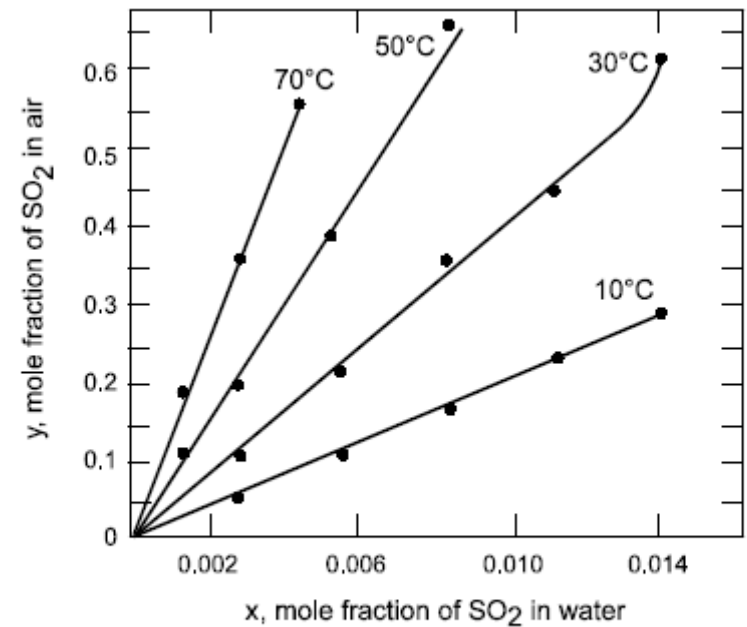


Figure 11-1. Equilibrium lines for SO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O systems at various temperatures

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Συμπύκνωση

- **Συμπύκνωση:** η διεργασία κατά την οποία χρησιμοποιείται ένα υγρό ψύξης (συνήθως το νερό) προκειμένου να συμπυκνωθούν οι ατμοί συγκεκριμένων αέριων ρύπων.
- **Οι συμπυκνωτές** χρησιμοποιούνται επίσης και ως συσκευές ανάκτησης διαλυτών.
- Η απόδοση των **συμπυκνωτών** είναι αρκετά υψηλή και εξαρτάται από :
  - τον αριθμό και τη φύση των ρύπων που πρέπει να συμπυκνωθούν,
  - τη θερμοκρασία στην οποία αυτοί συμπυκνώνονται,
  - το μέγεθος των εγκαταστάσεων συμπύκνωσης,
  - την επιλογή του ψυκτικού μέσου και
  - την παροχή και θερμοκρασία του αέριου ρεύματος.

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Συμπύκνωση

- Οι **συμπυκνωτές** :
  - Αποτελούν **συσκευές προεπεξεργασίας αερίων αποβλήτων** (σημαντικό εάν τα συμπυκνώσιμα συστατικά έχουν οικονομική αξία και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν)
  - **Χρησιμοποιούνται συχνά για την απομάκρυνση συστατικών με διαβρωτική δράση.**
  - **Μειώνουν σημαντικά τον όγκο των απαερίων που απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία.**

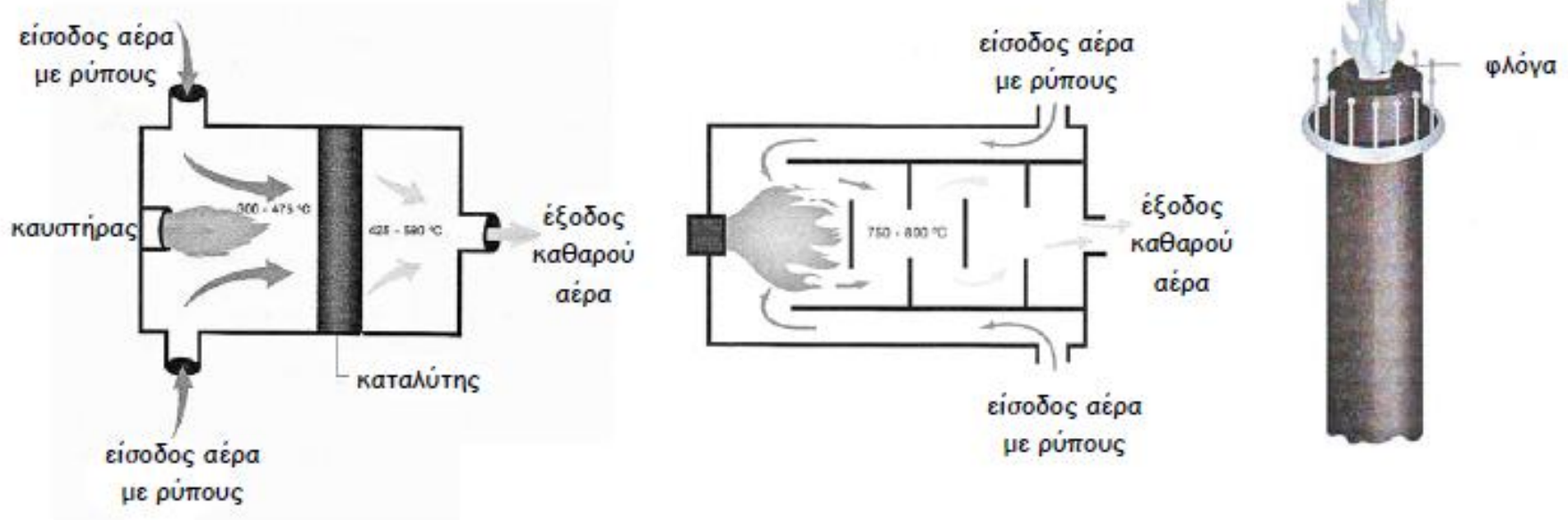
Τέλος, η πλειονότητα των συμπυκνωτών εφαρμόζει τη διεργασία συμπύκνωσης με μείωση της θερμοκρασία των απαερίων *(κυρίως για λόγους οικονομικούς μιας και απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια για την αύξηση της πίεσης όσο και για λόγους ασφαλείας).*

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Καύση

- **Καύση:** Αποτελεσματική τεχνολογία αντιμετώπισης επικίνδυνων αερίων ενώσεων και ταυτόχρονα μια από τις καταστρεπτικές μεθόδους.
- Τελικά προϊόντα (πλήρης καύση) →  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$ , τα οποία εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα.
- Στην **καύση**, οργανικές ενώσεις (και σε μικρότερο βαθμός ανόργανες) καίγονται με περίσσεια αέρα:
  - Είτε σε κλειστούς αντιδραστήρες με χρήση ή όχι καταλυτικών συστημάτων\*
  - είτε στην κορυφή καμινάδων με χρήση φλόγας (πυρσοί).

\*Όταν η **καύση αερίων ενώσεων** πραγματοποιείται **χωρίς τη χρήση καταλυτικών** συστημάτων, ο χώρος μέσα στον οποίο λαμβάνει χώρα η αντίδραση ονομάζεται **μετακαυστήρας**.

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Καύση

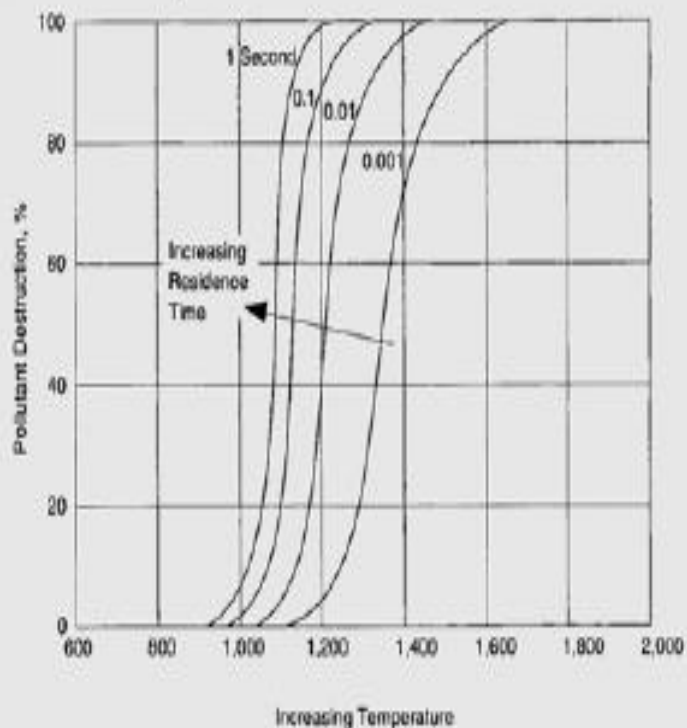


Απεικόνιση και συνθήκες λειτουργίας καταλυτικού μετατροπέα (αριστερά), μετακαυστήρα (μέση) και πυρσού (δεξιά).

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Καύση

## Παράγοντες που επηρεάζουν την καύση

Figure 11.2  
Coupled Effects of Temperature and Time on Rate of Pollutant Oxidation



Source: Buonicore and Davis, Air Pollution Engineering Manual, 1992. Reprinted with permission of John Wiley & Sons, Inc.

## Πλήρης καύση των ρύπων

- **Θερμοκρασία** της φλόγας > **700-800°C**,
- **Χρόνος παραμονής** στον μετακαυστήρα > **1s**.

για οργανικές ενώσεις που περιέχουν αλογόνα (π.χ. το χλώριο):

- η **θερμοκρασία** που απαιτείται  $\geq$  **1100 - 1200 °C**
- **Χρόνος παραμονής** > **4s**

**Σημαντικό μειονεκτήματα** των μετακαυστήρων: η **υψηλή δαπάνη ενέργειας** για τη διατήρηση της φλόγας σε μεγάλες θερμοκρασίες.

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Καύση

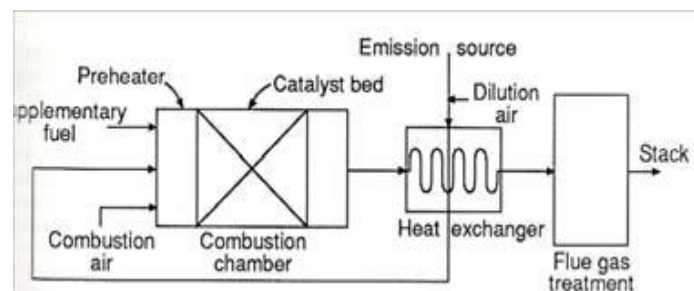
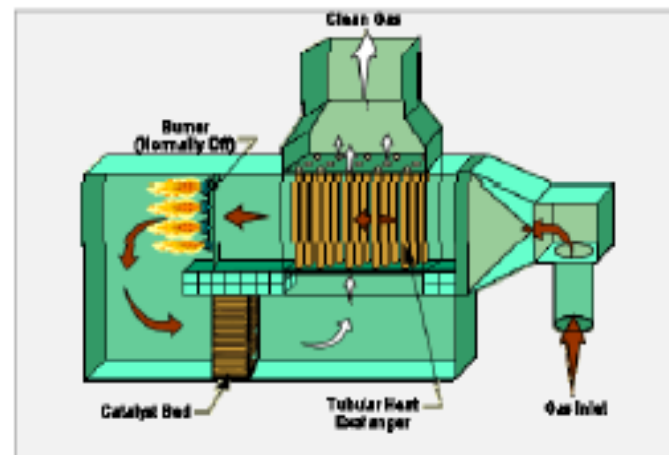
- Περιεκτικότητα των αερίων ρευμάτων με ανθρακούχες, θειούχες και αζωτούχες ενώσεις → Αιωρούμενων σωματιδίων, CO (λόγω ατελούς καύσης) NOx και SOx.
- Απαιτείται η χρήση βοηθητικών συσκευών όπως πλυντρίδες και σακόφιλτρα οι οποίες καλούνται να επεξεργαστούν τα προϊόντα ενός μετακαυστήρα.
- Επίσης, η χρήση συστημάτων απότομης ψύξης των αερίων μετά τους μετακαυστήρες είναι συχνά επιτακτική για την αποφυγή σχηματισμού διοξινών.

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Καύση

- Προκειμένου να μειώσουμε το απαιτούμενο ενεργειακό κόστος αλλά και να ελέγξουμε τη διεργασία της καύσης, μια εναλλακτική στη χρήση των μετακαυστήρων τεχνολογία είναι η χρήση καταλυτικών μετατροπών.

## Καταλυτική οξείδωση

- Ο καταλύτης είναι μία ένωση (ή στοιχείο) που επιταχύνει μία αντίδραση χωρίς να υφίσταται ο ίδιος μόνιμες αλλαγές.
- Μειώνει την απαιτούμενη θερμοκρασία κατά εκατοντάδες βαθμούς και τον απαιτούμενο χώρο.
- Θερμοκρασία από το θάλαμο καύσης: 220-550°C.
- Η απόδοση εξαρτάται από τις ιδιότητες του καταλύτη, τη θερμοκρασία λειτουργίας, την ταχύτητα του ρεύματος.
- Αποδόσεις >95% και συχνά >99%.
- Καταλύτης: ευγενές μέταλλο εναποθετημένο σε φορέα αλουμίνας ή ειδικό κεραμικό υλικό.
- Περιορισμοί:
  - Ευαίσθητη συσκευή σε αρκετά μεγάλη συγκέντρωση σωματιδίων
  - Πτώση πίεσης



# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Καύση

*Πλεονεκτήματα της καταλυτικής σε σχέση με τη θερμική οξειδωση*

- Χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου
- Χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας
- Χαμηλές ή μέτριες απαιτήσεις μόνωσης
- Μειωμένος κίνδυνος φωτιάς

*Μειονεκτήματα της καταλυτικής σε σχέση με τη θερμική οξειδωση*

- Υψηλότερο κόστος αρχικής επένδυσης
- Δηλητηρίαση ή απενεργοποίηση καταλύτη
- Τα μεγάλα σωματίδια (και οι υγρές σταγόνες) θα πρέπει αρχικά να απομακρυνθούν
- Προβλήματα αναγέννησης του καταλύτη

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Καύση



Κινητός καταλυτικός μετακαυστήρας VOC.



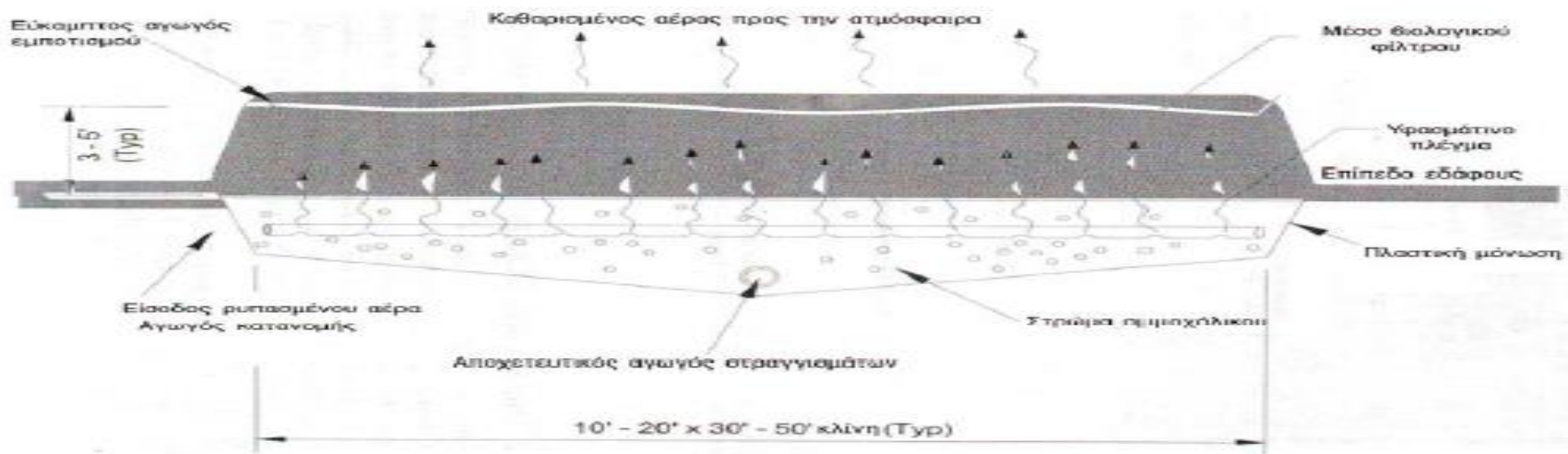
Καταλυτικός μετακαυστήρας VOC.



Θερμικός μετακαυστήρας VOC.

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Βιολογική αποικοδόμηση

- **Βιολογική αποικοδόμηση:** Σχετικά "νέα" τεχνολογία ελέγχου καυσαερίων η οποία βασίζεται στη χρήση βιολογικά ενεργών υλικών για την αποικοδόμηση αέριων ρύπων.
- **Λειτουργία:** Λαμβάνουν χώρα βιοχημικές αντιδράσεις μικροοργανισμών κατά τη διάρκεια των οποίων βιοαποικοδομούνται κυρίως οργανικές αέριες ενώσεις\*.



\***Οργανικές αέριες ενώσεις** → τροφή ή πηγή ενέργειας για τους μικροοργανισμούς και μετατρέπονται μέσα από βιοχημικές διεργασίες σε αβλαβή προϊόντα μεταβολισμού όπως ( $\text{CO}_2$ ) και ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Βιολογική αποικοδόμηση

- **Βιολογικά φίλτρα:** χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση ευδιάλυτων οργανικών χημικών ενώσεων, με μικρό μοριακό βάρος (π.χ. αλκοόλες, αλδεΐδες, κετόνες και διάφορες ενώσεις όπως υδρόθειο ( $H_2S$ ) και αμμωνία ( $NH_3$ )).
- **Αποικοδόμηση** υλοποιείται όταν το αέριο ρεύμα έρχεται σε επαφή με ένα υγρό που βρίσκεται σε κυκλοφορία ή με μια υγρή κλίση μέσα στην οποία διαβιεί ένας υγιής πληθυσμός μικροοργανισμών (βιομάζα).
- **Κατηγοριοποίηση:** βάσει του τρόπου που κινείται το νερό και η βιομάζα στο εσωτερικό των βιολ. φίλτρων

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Βιολογική αποικοδόμηση

## Κριτήρια σχεδιασμού βιολογικών φίλτρων:

- η συγκέντρωση και το είδος των ρύπων του αερίου ρεύματος,
- η ποσότητα του μικροβιακού πληθυσμού,
- ο χρόνος παραμονής του αέρα στο φίλτρο
- καθώς επίσης και παράγοντες όπως το pH, η υγρασία, η θερμοκρασία κ.α.

# Επεξεργασία αέριων ρύπων-Βιολογική αποικοδόμηση

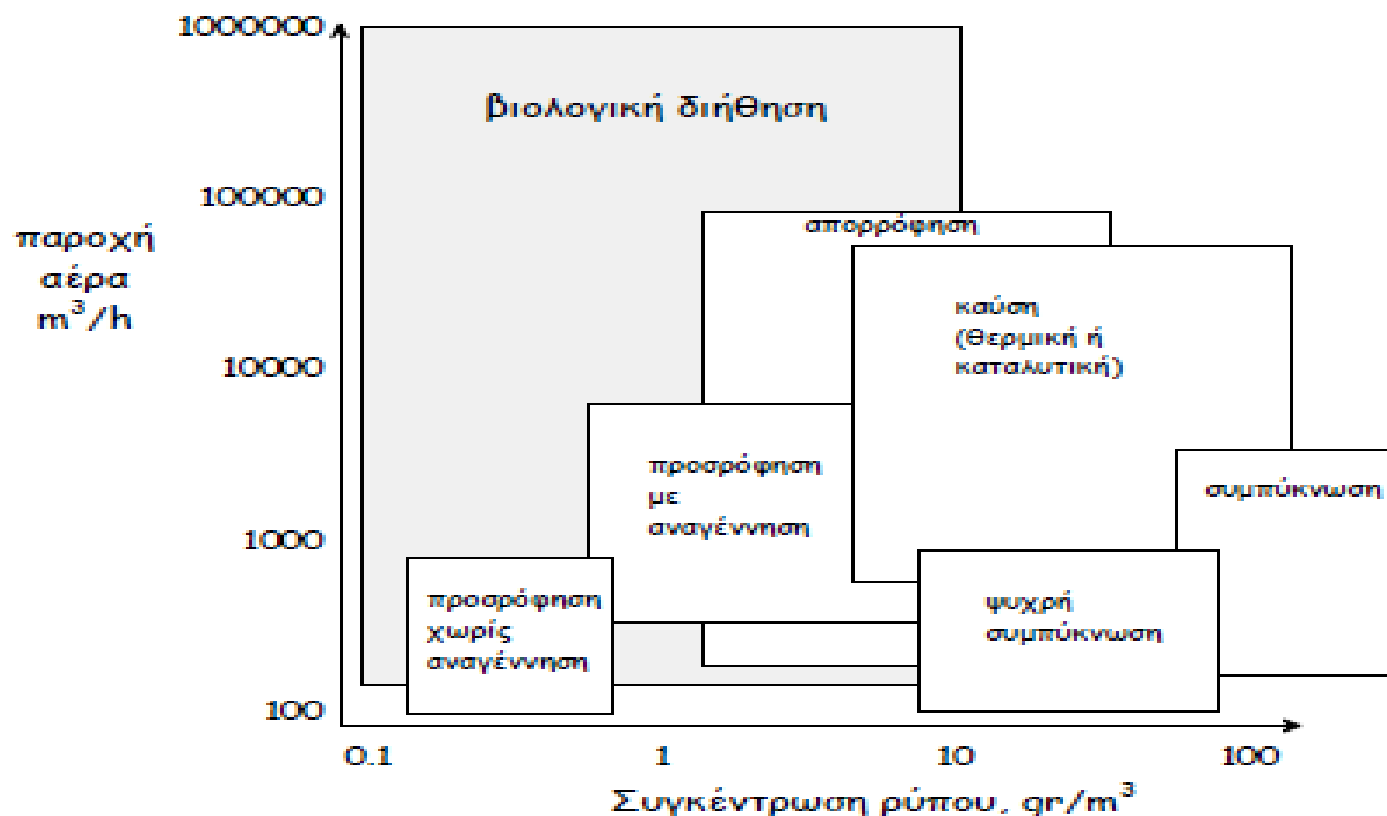
## Βιολογικά φίλτρα

### Πλεονεκτήματα

- Χαμηλές εκπομπές παραπροϊόντων όπως CO και NOx,
- Απλές εγκαταστάσεις που απαιτούνται για τη λειτουργία τους
- Χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας

### Μειονεκτήματα

- Μειωμένη απόδοση για αέρια ρεύματα υψηλών συγκεντρώσεων σε ρύπους,
- ο μεγάλος όγκος που καταλαμβάνουν,
- ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση παραμέτρων όπως η υγρασία
- τέλος τα τεχνικά προβλήματα που αρκετές φορές εμφανίζονται και έχουν να κάνουν με την έντονη ανάπτυξη βιομάζας, το φράξιμο από σωματιδιακή ύλη κ.α



Σχήμα 14:

Έκταση εφαρμογής διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας αέριων πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης των ρύπων και της ολικής παροχής του αερίου ρεύματος (προσαρμογή από Deshusses M.A και Cox H.H., 2002).

# Παραδείγματα εφαρμογών και ενδεδειγμένων μεθόδων επεξεργασίας

Παράδειγμα εφαρμογής	Μέθοδος επεξεργασίας
<b>Ατμοί</b> (μαζί με την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων)	Πλυντρίδες
<ul style="list-style-type: none"> <li>Απομάκρυνση και ανάκτηση της αμμωνίας (<math>\text{NH}_3</math>) στη βιομηχανία λιπασμάτων</li> <li>Απομάκρυνση υδροφθορίου (<math>\text{HF}</math>) από απαέρια φούρνων παραγωγής γυαλιού</li> <li>Έλεγχος του διοξειδίου του θείου (<math>\text{SO}_2</math>) από πηγές καύσης</li> <li>Ανάκτηση υδατοδιαλυτών ουσιών (διαλύτες) όπως είναι η ακετόνη (<math>\text{CH}_3\text{COCH}_3</math>) και η μεθυλική αλκοόλη (<math>\text{CH}_3\text{OH}</math>)</li> <li>Έλεγχος οσμηρών αερίων που εκπέμπονται από διεργασίες τήξης σε βιομηχανίες παραγωγής νιτρικού (<math>\text{HNO}_3</math>), θεικού (<math>\text{H}_2\text{SO}_4</math>) και υδροχλωρικού (<math>\text{HCl}</math>) οξέος</li> <li>Απορρόφηση διοξειδίου του θείου (<math>\text{SO}_2</math>) με αλκαλικά διαλύματα που περιέχουν αμμωνία, αμίνες και θειικό νάτριο</li> <li>Απορρόφηση διοξειδίου του αζώτου (<math>\text{NO}_2</math>) με διαλύματα ουρίας</li> </ul>	Συστήματα απορρόφησης

<ul style="list-style-type: none"> <li>Απομάκρυνση διοξειδίου του άνθρακα (<math>\text{CO}_2</math>) με διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου</li> <li>Απομάκρυνση χλωρίου (<math>\text{Cl}_2</math>), υδροχλωρίου (<math>\text{HCl}</math>) και υδροφθορίου (<math>\text{HF}</math>) με νερό</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Απορρόφηση όξινων αερίων από αλκαλικά διαλύματα</li> <li>Απορρόφηση οσμηρών αερίων σε οξειδωτικά διαλύματα</li> <li>Απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα (<math>\text{CO}_2</math>) και υδροθείου (<math>\text{H}_2\text{S}</math>) σε διαλύματα αμίνης</li> </ul>	Συστήματα χημικά ενισχυμένης απορρόφησης
<p>Ανάκτηση προσροφημένων ουσιών, ατμών, πτητικών διαλυμάτων όπως βενζόλιο, αιθανόλη, τριχλωροαιθυλένιο, φρέον κ.α.</p> <p>Ενεργός αλούμινα: ξήρανση αερίων ρευμάτων και ανάκτηση διαλυμάτων</p> <p>Silica gel: προσρόφηση οργανικών ή ανόργανων πολικών μορίων μόνο όταν δεν υπάρχει υγρασία</p> <p>Ενεργός άνθρακας: προσρόφηση οργανικών χημικών ενώσεων ανεξάρτητα της ύπαρξης ή όχι ατμών και υγρασίας</p>	Συστήματα προσρόφησης

# Παραδείγματα εφαρμογών και ενδεδειγμένων μεθόδων επεξεργασίας

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απομάκρυνση αερίων ρύπων και ατμών</li> <li>• Ανάκτηση διαλυμάτων και ατμών</li> <li>• Απομάκρυνση συμπυκνώσιμων συστατικών, ιδιαίτερα εάν έχουν κάποια οικονομική αξία και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν</li> <li>• Απομάκρυνση συστατικών που μπορεί να έχουν διαβρωτική δράση και ενδέχεται να καταστρέψουν μέρη του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού</li> <li>• Μείωση του όγκου των αερίων</li> <li>• Ψύξη των αερίων ρύπων και ατμών</li> <li>• Ως συσκευές προεπεξεργασίας αερίων</li> </ul>	<p>Συστήματα συμπύκνωσης</p>
<p>Καύση υδρογονανθράκων (H/C) και υδρόθειου (H<sub>2</sub>S) που περιέχονται συνήθως σε αεέρια διαλυτηρίων</p>	<p>Πυρσοί</p>
<p>Απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων αερίων, ατμών, αιωρούμενων σωματιδίων, πτητικών οργανικών ενώσεων, φωτοχημικά δραστικών πτητικών οργανικών χημικών ενώσεων, χλωριωμένων υδρογονανθράκων, τοξικών χημικών ενώσεων, οσμηρών χημικών ενώσεων που εκπέμπονται συνήθως από τυπογραφικά πιεστήρια, χώρους βαφής επιφανειών (αυτοκινήτων, επίπλων κ.α.)</p>	<p>Συστήματα άμεσης καύσης</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων αερίων, ατμών, οργανικών αιωρούμενων σωματιδίων, χλωριωμένων υδρογονανθράκων, διοξειδίου του θείου, πτητικών οργανικών χημικών ενώσεων, διοξινών, διαλυτών, αερίων από την οξειδωση της ασφάλτου ή από μονάδες παραγωγής εκρηκτικών και φορμαλδεΐδης, υδρόθειου, οξειδίων του αζώτου</li> <li>• Επεξεργασία των εκπεμπόμενων καυσαερίων από μηχανές εσωτερικής καύσης σε αυτοκίνητα και μέσα μαζικής μεταφοράς</li> </ul>	<p>Καύση σε καταλυτικούς μετατροπείς</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ευδιάλυτες οργανικές χημικές ενώσεις με μικρό μοριακό βάρος όπως οι αλκοόλες, οι αλδεΐδες και οι κετόνες</li> <li>• Υδρόθειο</li> <li>• Αμμωνία</li> </ul>	<p>Βιοφίλτρα</p>

# Βιβλιογραφία

1. C. David Cooper & F.C. Alley, Έλεγχος Αέριας Ρύπανσης, εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 960-418-039-8
2. Σημειώσεις του μαθήματος: Εισαγωγή στην Επιστήμη του Μηχανικού Περιβάλλοντος, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, 2008

Σας ευχαριστώ πολύ

για την προσοχή σας