



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

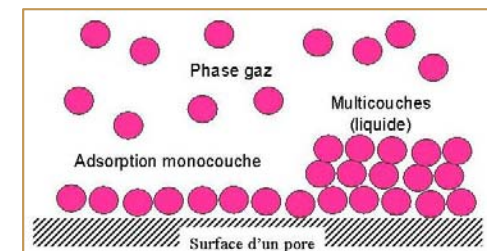
MM900

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΣΗΣ



3^η ΕΝΟΤΗΤΑ, Μέρος 2 Προσρόφηση (adsorption)

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





Εισαγωγή

- **Προσρόφηση** είναι η διεργασία κατά την οποία μόρια ενός αερίου ή υγρού έρχονται σε επαφή και προσκολλώνται σε μία στερεή επιφάνεια. [Σε αντίθεση, **απορρόφηση-absortion** είναι η διαλυτοποίηση των μορίων μέσα στο μέσο συλλογής, κυρίως σε υγρά]. Χρησιμοποιείται από τη δεκαετία του 50.
- Η προσρόφηση χρησιμοποιείται για την αφύγρανση ενός αερίου ρεύματος μαζί με τον έλεγχο **σειράς περιβαλλοντικών προβλημάτων**, όπως:
 - **Απομάκρυνση ιχνών (<100 ppm) αερίων** με ιδιαίτερη οσμή
 - **Συγκέντρωση και ανάκτηση διαλυτών**: βιομηχανία ημιαγωγών, χημική βιομηχανία κτλ. (βενζόλιο, αιθανόλη, φρεον, κτλ)
 - Εκπλήρωση των **απαιτήσεων σε εκπομπές VOC** (τυπικά, η προσρόφηση είναι αποτελεσματική για κάθε οργανική ουσία με MW μεγαλύτερο από ~45 για συγκεντρώσεις από 10 μέχρι 10000 ppm).
 - **Απομάκρυνση ιχνών από επικίνδυνους αέριους ρύπους (HAPs)**, όπως: πολυκυκλικές οργανικές ενώσεις, διοξίνες, φουράνια, εντομοκτόνα, φαινολικές ενώσεις κτλ.
 - **Απομάκρυνση ατμών υδραργύρου.**



Εισαγωγή

- Η προσρόφηση δε συνιστάται εάν το αέριο προς επεξεργασία περιέχει σημαντικές ποσότητες σωματιδίων ή άλλων υλικών που μπορούν να φράξουν το προσροφητικό υλικό.
- Όταν απομακρύνονται οργανικές ουσίες θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι η συγκέντρωση του αερίου δεν υπερβαίνει το 25% του κατώτερου επιπέδου εκρηξισιμότητας (LEL). Εναλλακτική μέθοδος: καύση.

Ε: Παραδείγματα από την καθημερινή μας ζωή:





Εισαγωγή

Η διεργασία προσρόφησης διακρίνεται σε φυσική και χημική - 2 μηχανισμοί

Φυσική Προσρόφηση (Προσρόφηση van der Waals):

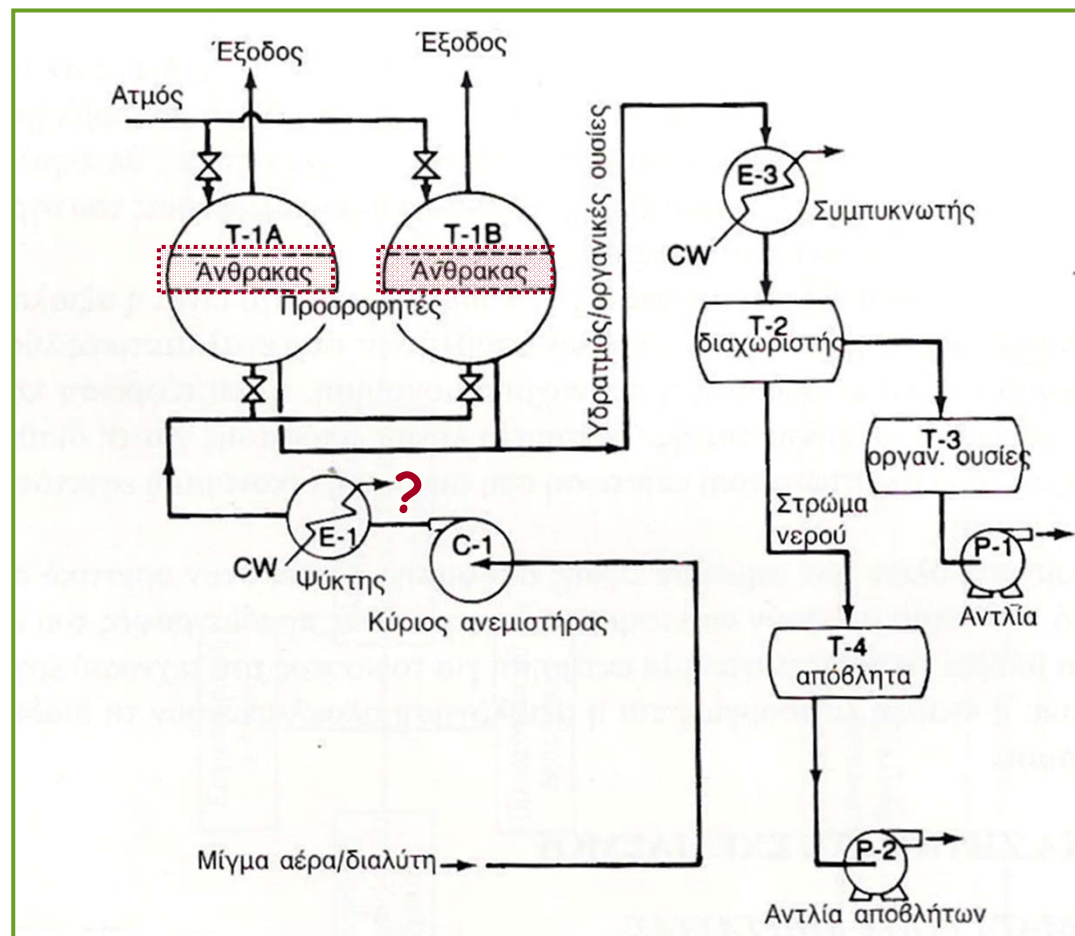
- ασθενής δεσμός του μορίου του αερίου με το στερεό - οι δυνάμεις ηλεκτροστατικές (δυνάμεις van der Waals)
- αντιστρεπτή διεργασία (με θέρμανση ή μείωση της πίεσης)
- εξώθερμη-απελευθερώνεται θερμότητα ($\sim 0,1$ kcal/mole)

Χημιορρόφηση (π.χ. μετατροπή SO_2 σε SO_3 σε ενεργό άνθρακα, προσρόφηση H_2S σε οξειδία Fe)

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



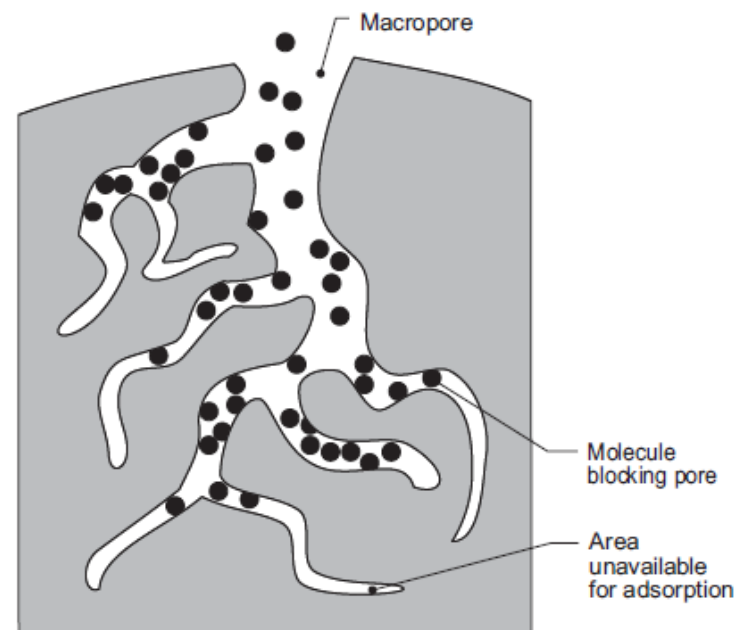
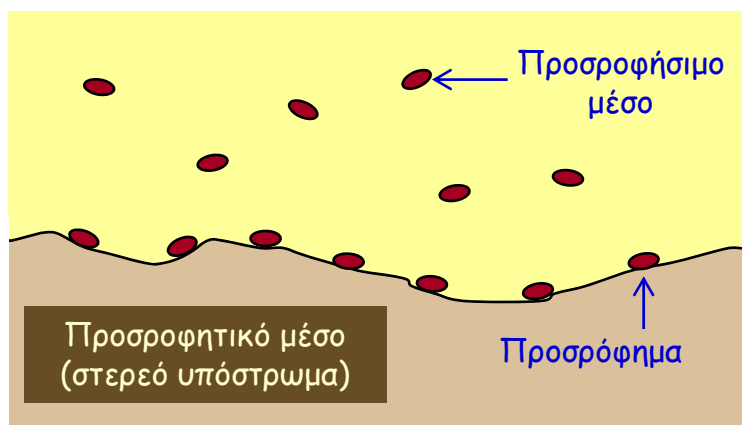
Παράδειγμα



Προκαταρκτικό διάγραμμα ροής για ένα σύστημα ανάκτησης διαλύτη (τολουολίου/οξικό αιθύλιο) με προσρόφηση σε σταθεροποιημένη κλίνη άνθρακα.



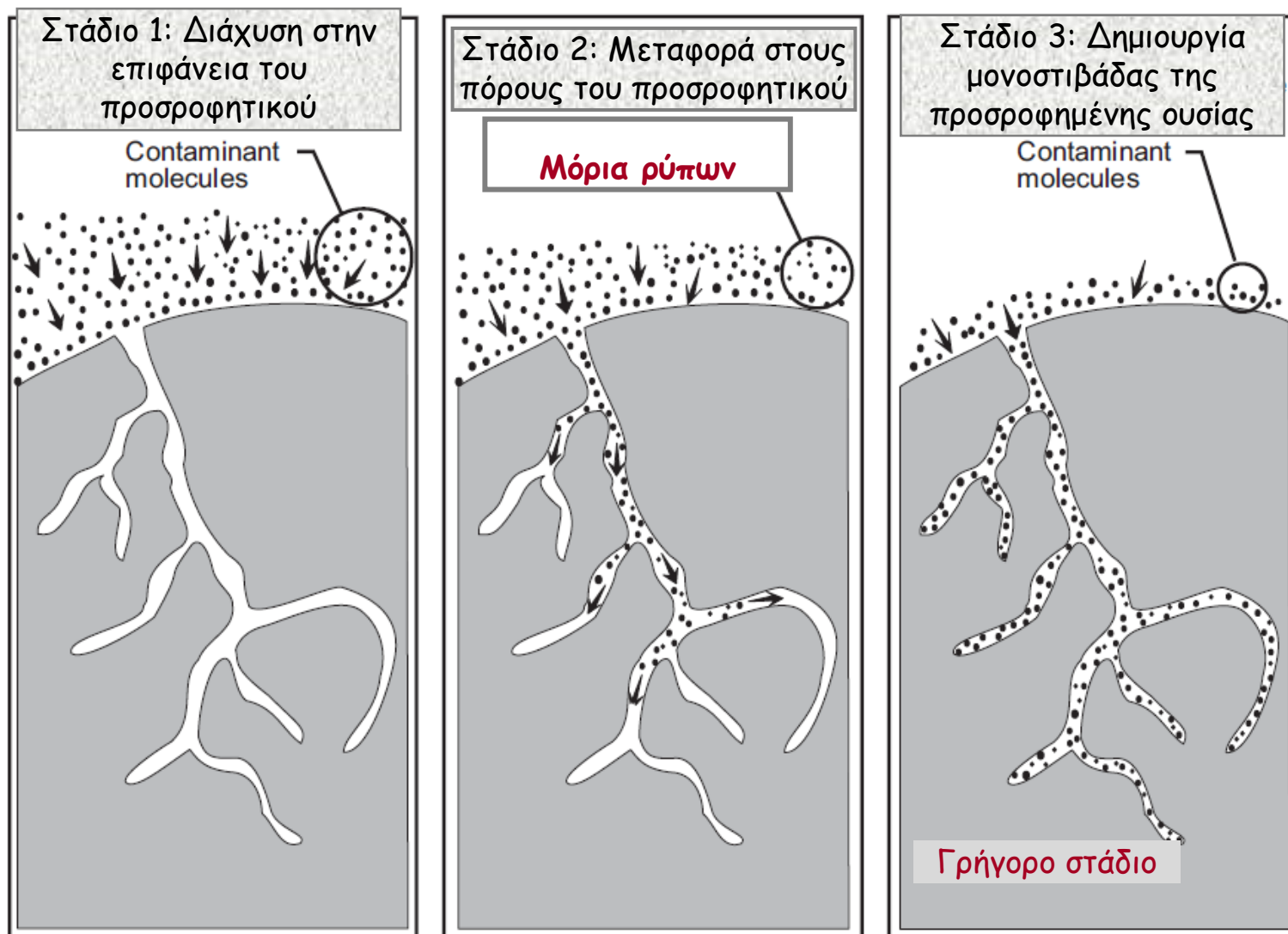
Ορισμοί



- Το στερεό υπόστρωμα πάνω στο οποίο επιτελείται η προσρόφηση καλείται **προσοφητικό μέσο ή προσοφητής** (adsorbent, sorbent).
- Τα προσοφούμενα είδη είναι το **προσοφήσιμο υλικό** (adsorptive)
- Το προσοφημένο υλικό είναι το **προσρόφημα** (adsorbate, sorbate)
- Προσρόφηση συμβαίνει στις εσωτερικές επιφάνειες των πόρων



Μηχανισμοί Προσρόφησης





Προσροφητικά Μέσα

- ✓ Ενεργοποιημένος (ή ενεργός) άνθρακας
 - Ενεργοποιημένη αλουμίνα (ή και βωξίτη)
 - Silica Gel
 - ✓ Μοριακά κόσκινα (Molecular Sieves, zeolite)
 - ✓ Συνθετικά πολυμερή
- } *άμορφα*
- } *κρυσταλλικό*

Πολικοί και Μη-πολικοί προσροφητές

Παράγοντες που επιδρούν στην χωρητικότητα ενός προσροφητή:

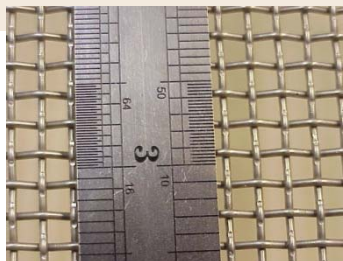
- ειδική επιφάνεια (surface area)
- το μέγεθος και η κατανομή των πόρων
- πολικότητα (polarity).

Τυπικό μέγεθος κόκκων μιας κλίνης: ~1 mm



Προσροφητικά Μέσα: ενεργοποιημένος άνθρακας (activated coal)

- Ο κοινότερος προσροφητής
- Διάφορα υλικά
- Παράγεται από πολλά ανθρακούχα υλικά (τσόφλι καρύδας, οστά, ξύλο, κάρβουνο, petcoke...), κυρίως από πισσούχο άνθρακα
- **«Ενεργοποίηση»:** η διεργασία με την οποία παράγεται η πορώδης δομή (αύξηση της επιφάνειας), ουσιαστική για την αποτελεσματική προσρόφηση. Αρχικά η «ενανθράκωση» (πυρόλυση-θέρμανση χωρίς αέρα) και εν συνεχεία εκτίθεται σε οξειδωτική ατμόσφαιρα (600-1200°C)
- Προσελκύει τα **μη-πολικά μόρια** (π.χ. υδρογονάνθρακες, διαλύτες, οσμές)
- Τυπικές ειδικές επιφάνειες: 800 - 1200 m²/g [πόροι: 4-30 Å]
- Διαστάσεις: 4 x 6 and 4 x 20 mesh
- Για απομάκρυνση υδραργύρου θα πρέπει να εμποτιστεί με ιώδιο ή θείο



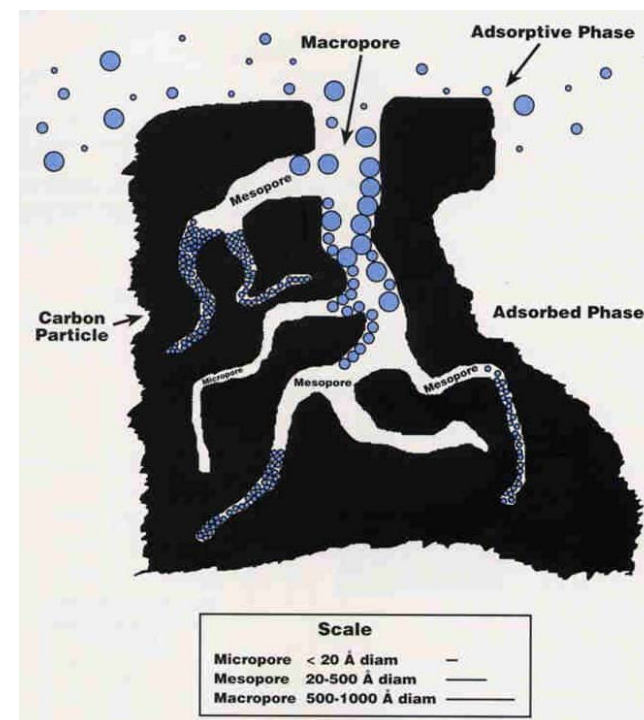
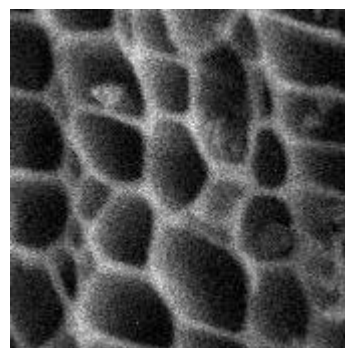
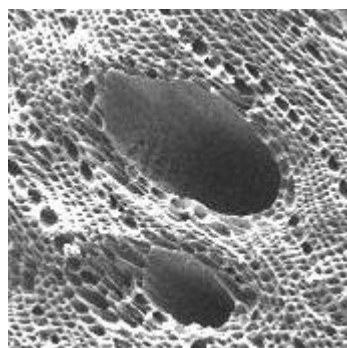


Προσροφητικά Μέσα: ενεργοποιημένος άνθρακας (activated coal)

Ιδιότητες Ενεργού Άνθρακα

Bulk density	22–34 lb/ft ³
Heat capacity	0.27–0.36 Btu-lb°F
Pore volume	0.56–1.20 cm ³ /g
Surface area	600–1600 m ² /g
Average pore diameter	15–25 Å
Regeneration temperature (steaming)	100–140°C
Maximum allowable temperature	150°C

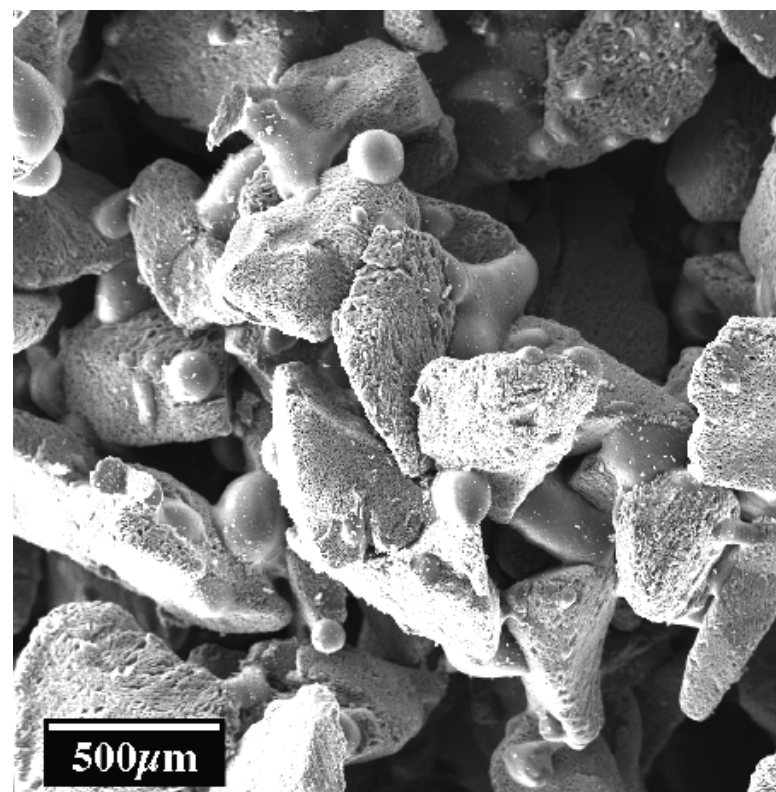
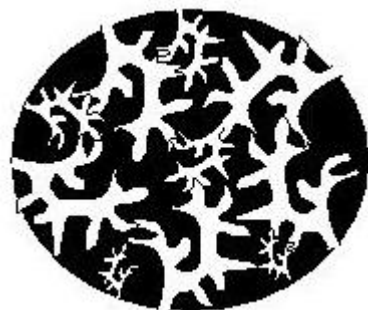
Για τη μείωση της πτώσης πίεσης σε σταθεροποιημένη κλίνη, χρησιμοποιείται άνθρακας σε κοκκώδη μορφή ή σε πελέτες. Μέγεθος κόκκου: ~ 1-2 mm





Προσροφητικά Μέσα: ενεργοποιημένος άνθρακας

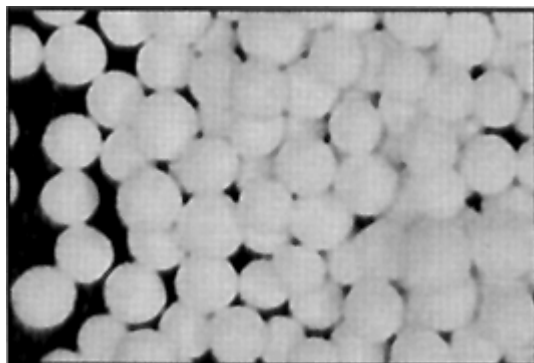
- Διάφοροι τρόποι χαρακτηρισμού του ενεργ. άνθρακα
- **Αριθμός τετραχλωράνθρακα** (carbon tetrachloride activity): ο λόγος της μάζας του CCl_4 που προσροφάται ανά μονάδα μάζας του προσροφητή (ASTM D-3467-94).
[g CCl_4 /100 g άνθρακα]
- Παρομοίως, **αριθμός ιωδίου** [g I_2 /100 g άνθρ.]
- Από το 1993, χρησιμοποιείται το **n-βουτάνιο**
- Αρ. CCl_4 = 2,57 x Αρ. βουτάνιου (ASTM D5228-92).



Ενεργός άνθρακας, «κολλημένος» επάνω σε ένα φίλτρο.



Προσροφητικά Μέσα: Ενεργοποιημένη Αλουμίνα



- ❖ Παρασκευάζεται με θερμική ενεργοποίηση αλουμίνας ή βωξίτη (σε αδρανή ατμόσφαιρα)
- ❖ Κυρίως για ξήρανση αερίων
- ❖ Μέγεθος κόκκων: 3-8 mm, Ειδική επιφάνεια ~ 300 m²/g
- ❖ Αναγέννηση με θέρμανση σε θερμοκρασία 180 - 320°C
- ❖ Εφαρμογές: ξήρανση, απομάκρυνση οξέων, προσρόφηση υδρογονανθράκων κτλ.

Ιδιότητες Ενεργής Αλουμίνας

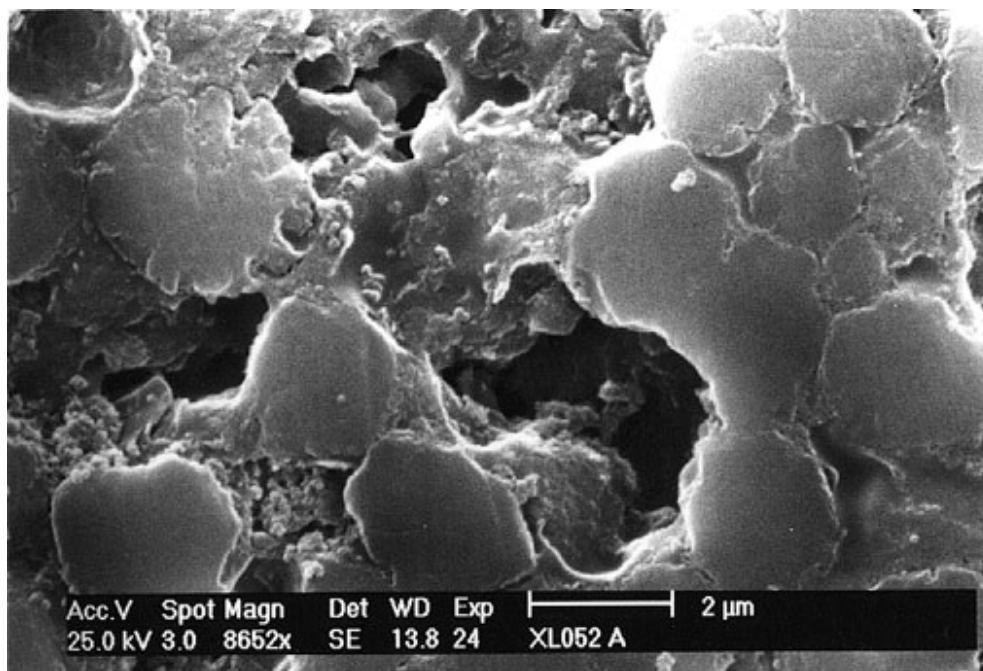
Density in bulk	
Granules	38–42 lb/ft ³
Pellets	54–58 lb/ft ³
Specific heat	0.21–0.25 Btu/lb-°F
Pore volume	0.29–0.37 cm ³ /g
Surface area	210–360 m ² /g
Average pore diameter	18–48 Å
Regeneration temperature	200–250°C
Stable up to	500°C

Air Pollution
Engineering
Manual (1992)



Προσροφητικά Μέσα: Μοριακά κόσκινα

- Σε αντίθεση με τους άλλους προσροφητές έχουν κρυσταλλική δομή
- Κρυσταλλικοί ζεόλιθοι
- Ομοιόμορφοι πόροι για τον επιλεκτικό διαχωρισμό ουσιών με το μέγεθος και το σχήμα.
- Κυρίως για αφαίρεση υγρασίας



Μοριακό κόσκινο 13X

[www.mb.uni-siegen.de/e/iff3/GASADSRP.HTM]

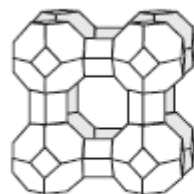


Προσροφητικά Μέσα: Μοριακά κόσκινα

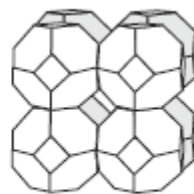


Ιδιότητες Μοριακών κόσκινων

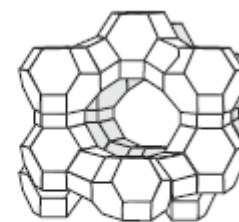
	Anhydrous Sodium Aluminosilicate	Anhydrous Calcium Aluminosilicate	Anhydrous Aluminosilicate
Type	4A	5A	13X
Density in bulk (lb/ft ³)	44	44	38
Specific heat (Btu/lb-°F)	0.19	0.19	—
Effective diameter of pores (Å)	4	5	13
Regeneration temperature	200–300°C	200–300°C	200–300°C
Stable up to (short period)	600°C	600°C	600°C



Type A



Sodalite



Faujasite
(Type X, Y)



Προσροφητικά Μέσα: Silica Gel

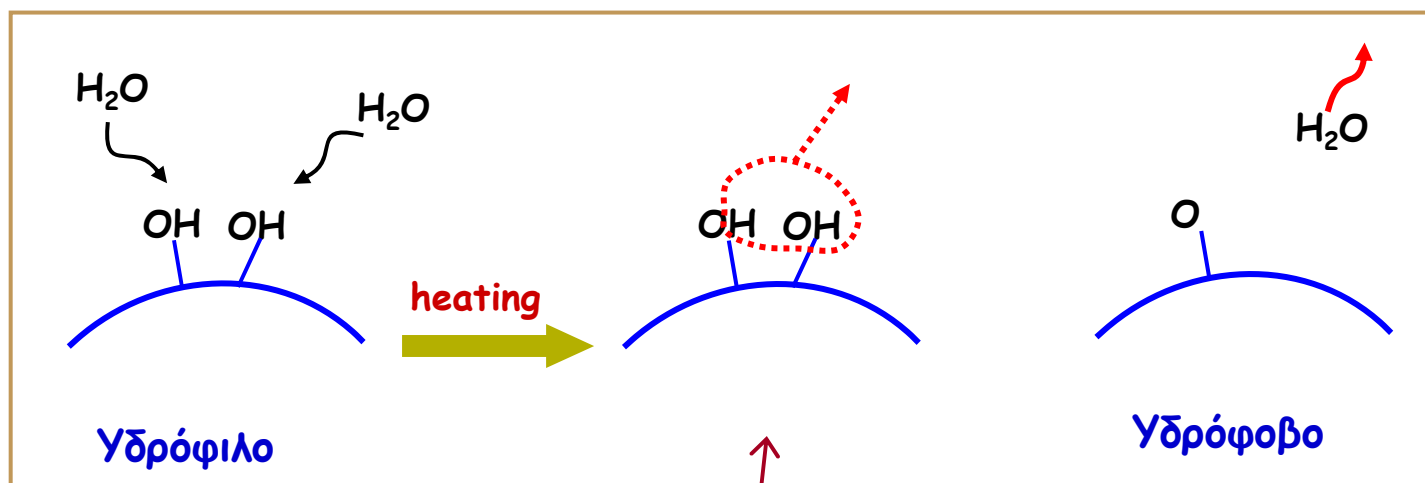


Παρασκευή: διάλυμα πυριτικού νατρίου οξινίζεται και παράγεται ένα ζελατινώδες κατακρήμνισμα το οποίο, αφού πλυθεί και αφυδατωθεί, παράγει το άχρωμο silica gel. Για την ορατή ένδειξη της υγρασίας του προστίθεται τετρακοβαλτιούχο αμμώνιο, $(\text{NH}_4)_2\text{CoCl}_4$. Αυτό κάνει το υλικό να είναι μπλε όταν είναι άνυδρο και ροζ όταν έχει υγρασία.

Χρησιμοποιείται κυρίως για αφαίρεση υγρασίας

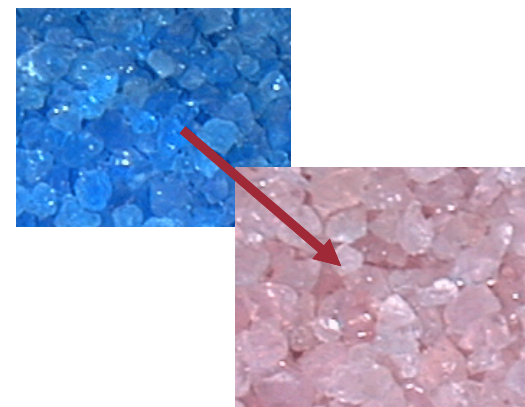


Προσροφητικά Μέσα: Silica Gel



Ιδιότητες Silica Gel

Bulk density	44–46 lb/ft ³
Heat capacity	0.22–0.26 Btu/lb-°F
Pore volume	0.37 cm ³ /g
Surface area	750 m ² /g
Average pore diameter	22 Å
Regeneration temperature	120–250°C
Stable up to	400°C



Air Pollution Engineering Manual (1992)



Διεργασίες προσρόφησης και Προσροφητικά Μέσα

Adsorption Processes and Type of Adsorbent

Substance to Be Removed	Adsorbent			
	Activated Carbon	Activated Alumna	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	



Φυσικές ιδιότητες Προσροφητικών Μέσων

Table 4-1. Physical Properties of Major Types of Adsorbents

Adsorbent ²	Internal Porosity, (%)	Surface Area, (m ² /gm)	Pore Volume, (cm ³ /gm)	Bulk Dry Density, (gm/cm ³)	Mean Pore Diameter, (Å)
Activated Carbon	55-75	600-1600	0.80-1.20	0.35-0.50	1500-2000
Activated Alumina	30-40	200-300	0.29-0.37	0.90-1.00	1800-2000
Zeolites (Molecular Sieves)	40-55	600-700	0.27-0.38	0.80	300-900
Synthetic Polymers ¹	-	1080-1100	0.94-1.16	0.34-0.40	-

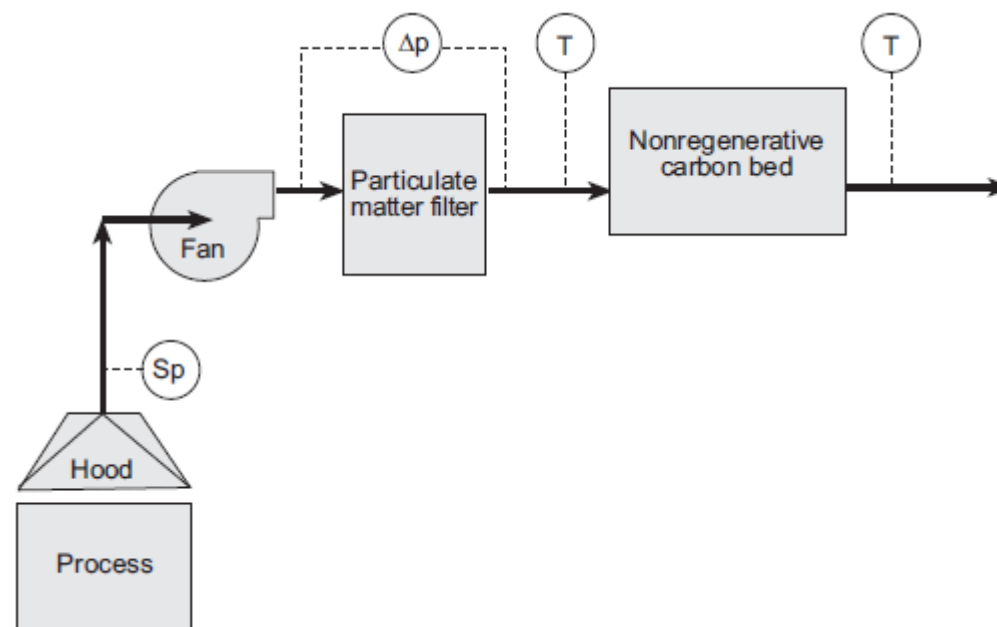
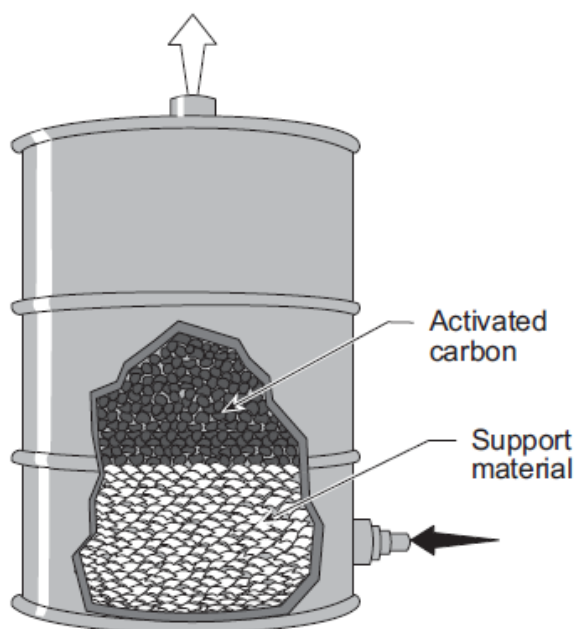
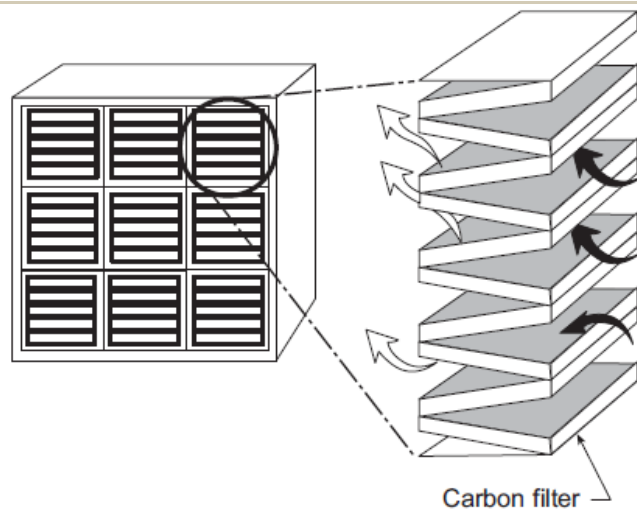
1. Data provided applied to Dow XUS -43493.02 and XUS-43502.01 adsorbents⁴

2. Data on silica gels not available.

EPA, Control of Gaseous Emissions



Μη-αναγεννήσιμα Προσορητικά Συστήματα

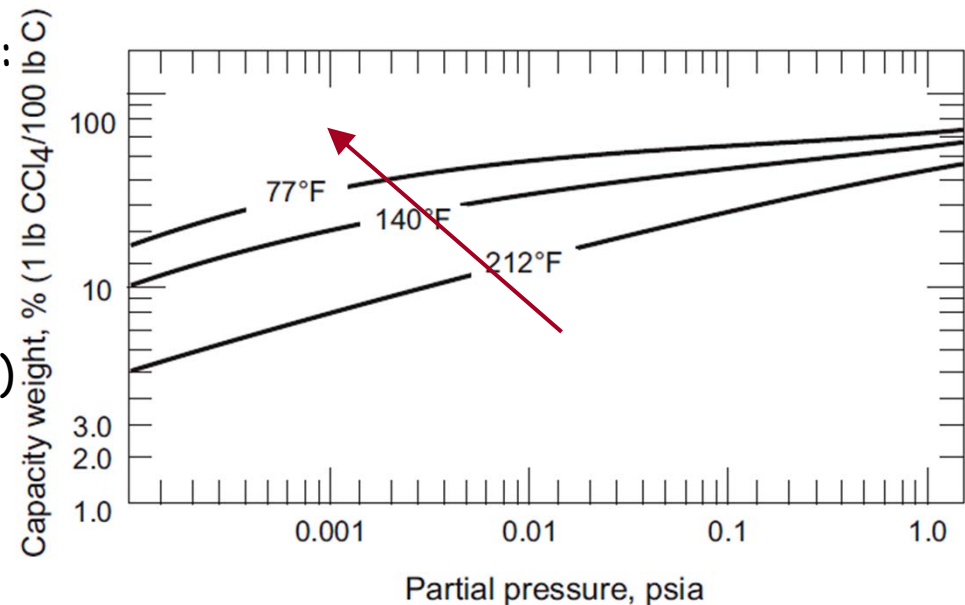


EPA, Control of Gaseous Emissions



Ισόθερμες

- Η ικανότητα ενός προσροφητή να προσροφήσει μία συγκεκριμένη ουσία είναι **ανάλογη του MB** της ουσίας και **αντιστρόφως ανάλογη της τάσης ατμών της**.
- Τα περισσότερα δεδομένα προσδιορίζονται σε συνθήκες ισορροπίας, δηλαδή στη μέγιστη δυνατή ποσότητα ατμών που μπορεί να προσροφηθεί στις δεδομένες συνθήκες.
- Δύο οι κυριότερες μεταβλητές: **Θερμοκρασία και πίεση**
- Δύο ειδών διαγράμματα ισορροπίας:
(α) **ισόθερμες** - σε σταθερή T , και
(β) **ισοβαρείς** - σε σταθερή P .
- Η ισόθερμος καμπύλη δείχνει την ικανότητα προσρόφησης ως προς τη μερική πίεση (ή τη συγκέντρωση) της προσροφούμενης ουσίας σε μία θερμοκρασία





Ισόθερμος Langmuir

Ισόθερμος Langmuir: η μάζα του προσροφημένης ουσίας ανά μονάδα μάζας του προσροφητικού μέσου σε ισορροπία και σε συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Ρυθμός προσρόφησης $r_a = C_a p(1 - f)$

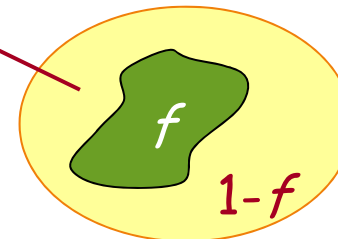
C_a, C_d, C_a' : σταθερές

f : κλάσμα της καλυμμένης επιφάνειας

p : μερική πίεση της προσροφούμενης ουσίας

Ρυθμός εκρόφησης $r_d = C_d f$

Στην ισορροπία $r_a = r_d \Rightarrow f = \frac{C_a p}{C_a p + C_d}$



Για μονομοριακή κάλυψη, η μάζα της προσροφημένης ουσίας ανά μονάδα μάζας του προσροφητή είναι ανάλογη του κλάσματος της προσροφημένης επιφάνειας

$$a = C_a' f$$



Ισόθερμος Langmuir (II)

Ισόθερμος Langmuir

Επειδή C_a, C_b, C_a' σταθερές $\Rightarrow a = \frac{k_1 p}{k_2 p + 1}$

$$\Rightarrow \frac{p}{a} = \frac{1}{k_1} + \frac{k_2}{k_1} p$$

Για πολύ χαμηλή p

$$\Rightarrow a = k_1 p$$

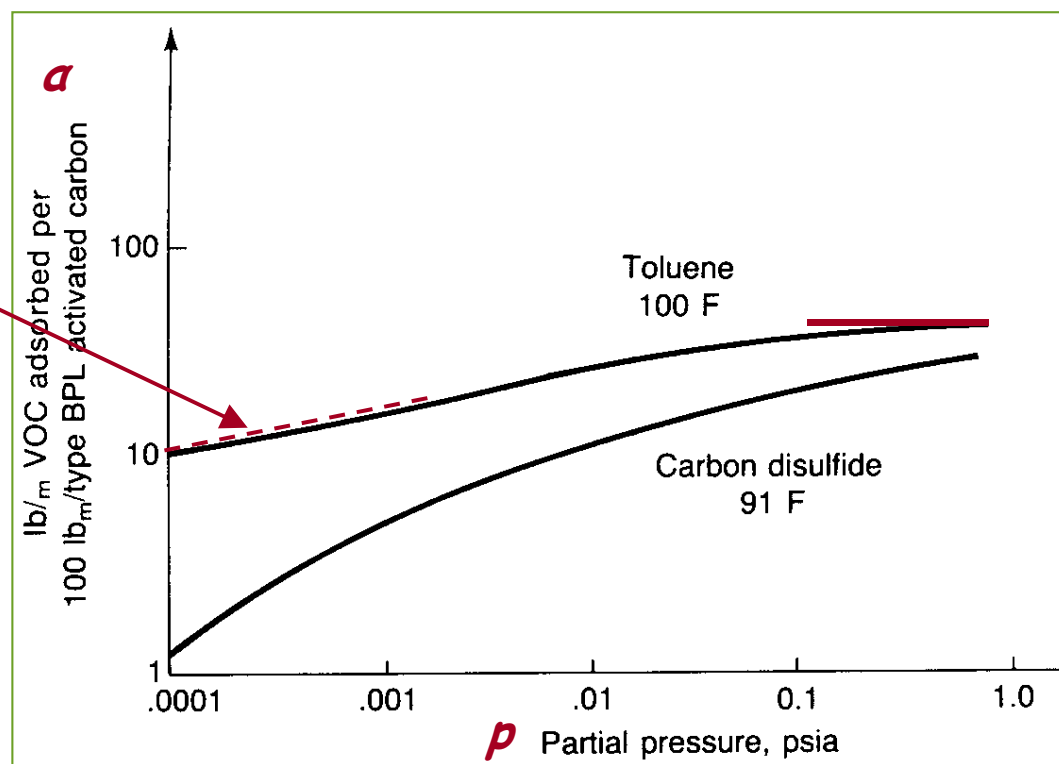
Για πολύ υψηλή p

$$\Rightarrow a = \frac{k_1}{k_2}$$

Ενδιάμεσες τιμές

$$a = k \cdot p^n$$

Εξίσωση Freundlich



Ισόθερμες προσρόφησης για ενεργό άνθρακα



Ισόθερμος Freundlich

$$a = k \cdot p^n$$

Table 10.3
Freundlich Isotherm Parameters for Some Adsorbates

Adsorbate	Temperature (K)	k • 100	n	Partial Pressure (Pa)
Acetone	311	1.234	0.389	0.69-345
Acrylonitrile	311	2.205	0.424	0.69-103
Benzene	298	12.602	0.176	0.69-345
Chlorobenzene	298	19.934	0.188	0.69-69
Cyclohexane	311	7.940	0.210	0.69-345
Dichloroethane	298	8.145	0.281	0.69-276
Phenol	313	22.116	0.153	0.69-207
Toluene	298	20.842	0.110	0.69-345
Trichloroethane	298	25.547	0.161	0.69-276
m-Xylene	298	28.313	0.0703	6.9-345

The amount of adsorbed is expressed in kg adsorbate/kg adsorbent.
The equilibrium partial pressure is expressed in Pa.
Data are for the adsorption on Calgon activated carbon (4 x10 mesh).

Source: EAB Control Cost Manual, 3rd.

Οι ισόθερμες προσρόφησης μπορούν να παραχθούν με αρκετές πειραματικές μεθόδους.



Δυναμικό προσρόφησης

Για την επίδραση της θερμοκρασίας στην ικανότητα του προσροφητή.

Δυναμικό προσρόφησης (Goldman & Polanyi, 1928): η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας η οποία συνοδεύει τη συμπίεση ενός γραμμομορίου ατμού από τη μερική πίεση ισορροπίας p_{eq} στη κορεσμένη τάση ατμών p_v σε θερμοκρασία προσρόφησης T .

$$\Delta G = RT \ln \frac{p_v}{p_{eq}}$$

Dubinin (1947): όταν παρόμοια αέρια (π.χ. το i και το j) προσροφώνται στο ίδιο προσροφητή, τα δυναμικά προσρόφησης ανά γραμμομοριακό όγκο V' είναι σχεδόν ίσα:

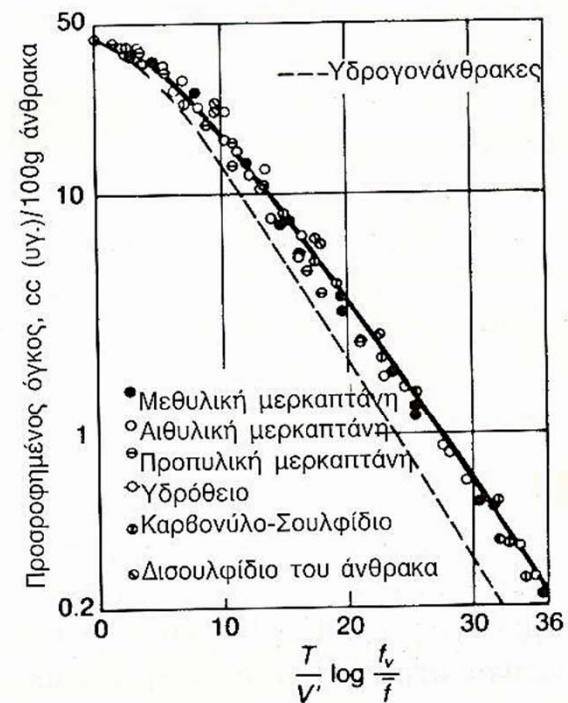
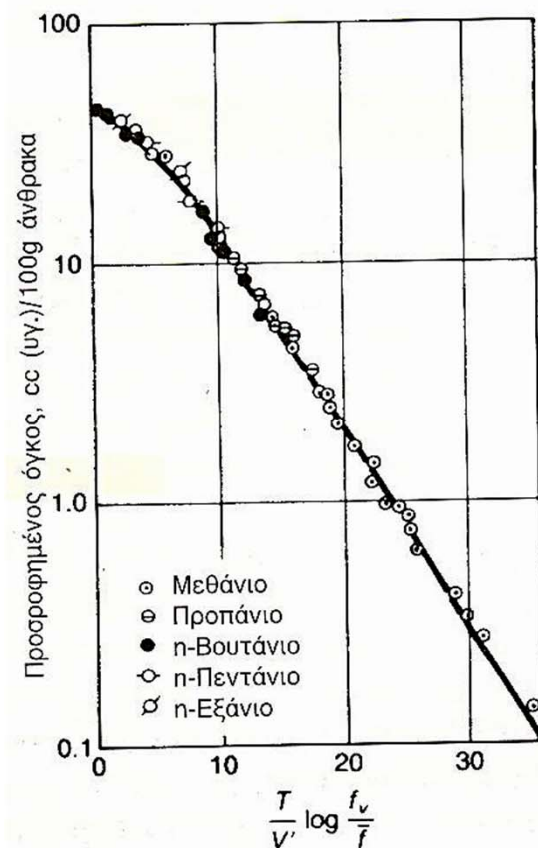
$$\left[\frac{RT}{V'} \ln \frac{p_v}{p_{eq}} \right]_i = \left[\frac{RT}{V'} \ln \frac{p_v}{p_{eq}} \right]_j$$



Δυναμικό προσρόφησης

Grant & Manes, 1966: Γραφικές παραστάσεις του δυναμικού προσρόφησης για υδρογονάνθρακες και ορισμένα αέρια που περιέχουν θείο.

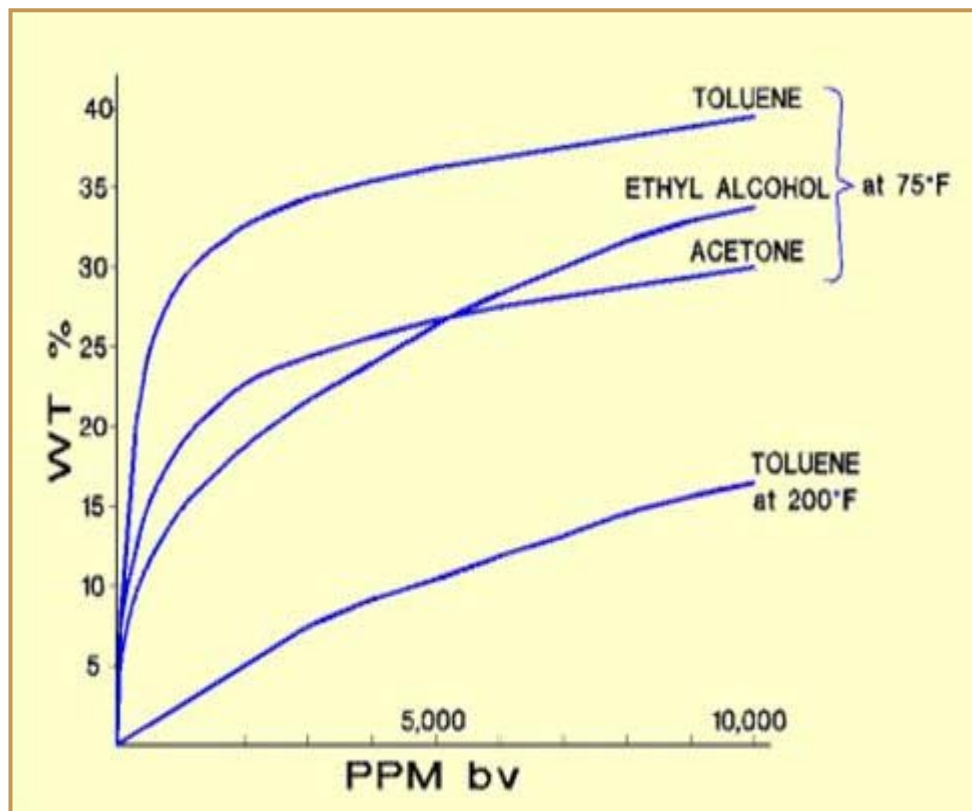
Αντί για πιέσεις, p , χρησιμοποιούνται οι πτητικότητες, f



Δυναμικά προσρόφησης για ΗC και για αέρια



Η ικανότητα προσρόφησης του άνθρακα



Ουσίες με $MB > 130$

Ουσίες χαμηλής πτητικότητας προσροφούνται ισχυρά και η απομάκρυνσή τους κατά την αναγέννηση είναι δύσκολη.

Ουσίες με $MB < 45$

Ουσία με υψηλή πτητικότητα, δεν προσροφάται εύκολα.

Υψηλή θερμοκρασία

Η υψηλή κινητική ενέργεια κάνει το μόριο να απομακρύνεται από την επιφάνεια του άνθρακα

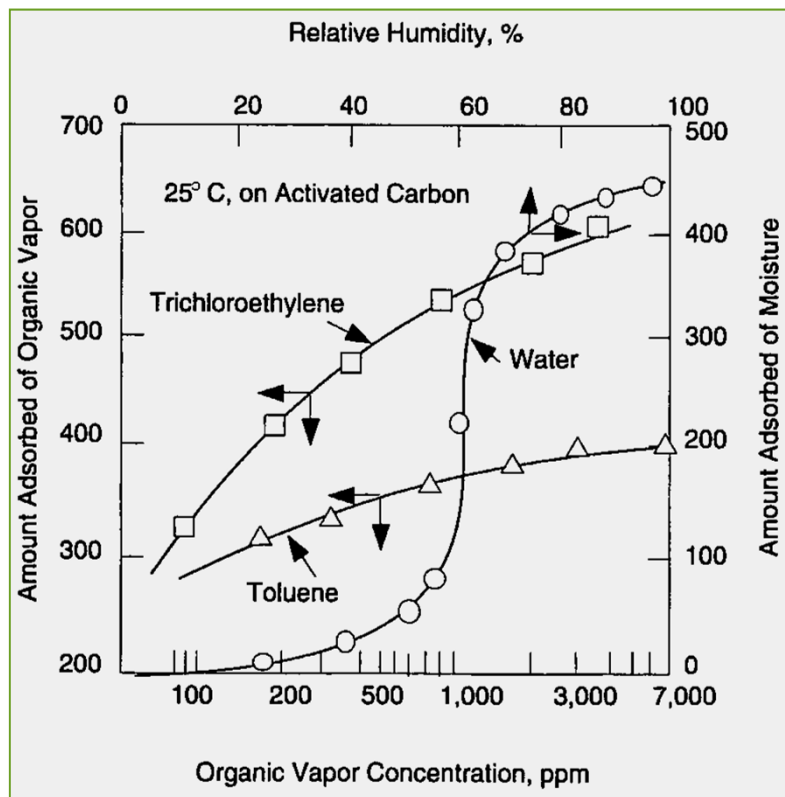
Υψηλή περιεκτικότητα σε σωματίδια

Μπορεί να συμβεί «απόφραξη» των πόρων \Rightarrow χαμηλή απόδοση

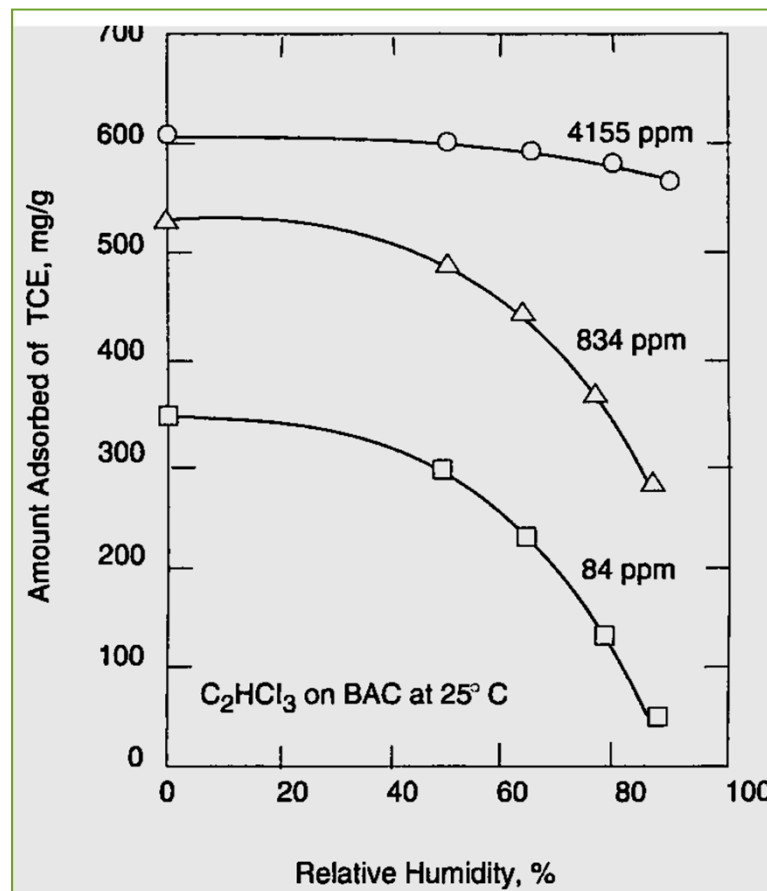


Επίδραση της υγρασίας

Η υγρασία θα καλύψει τους πόρους και την επιφάνεια του προσροφητή \Rightarrow μείωση της απόδοσης συλλογής και της χωρητικότητας



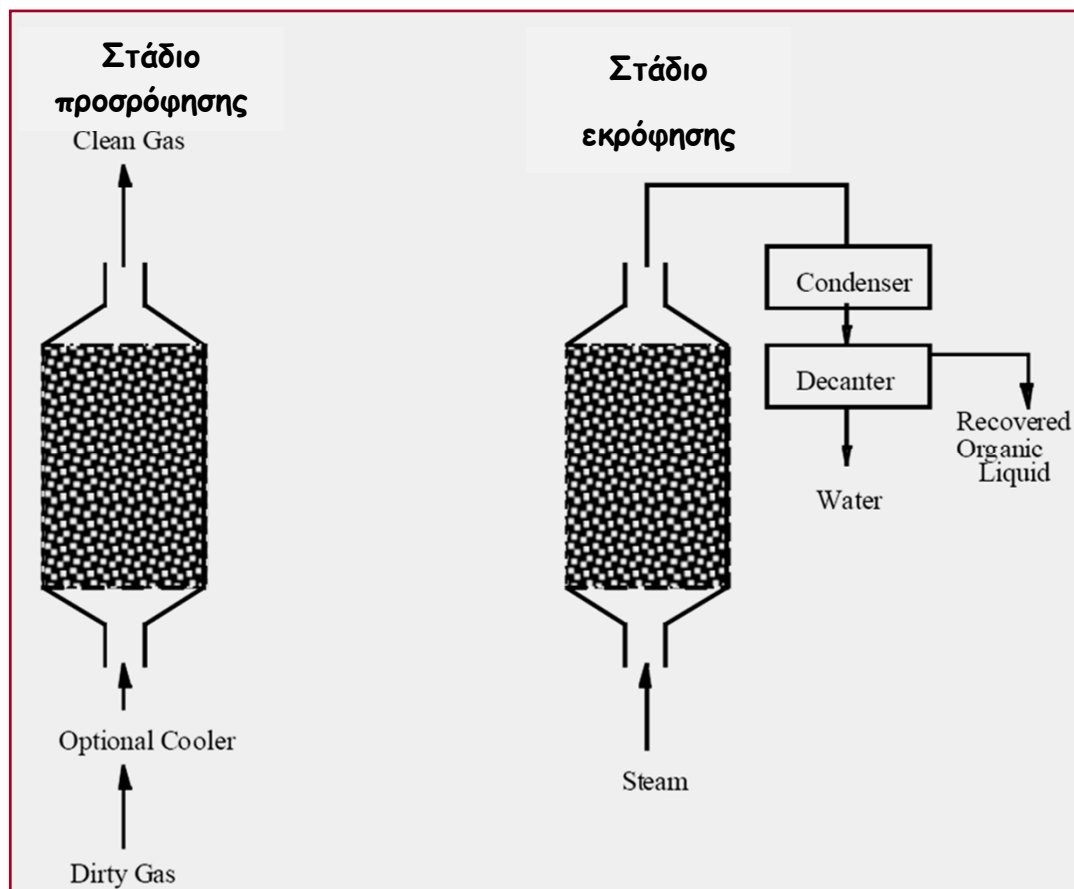
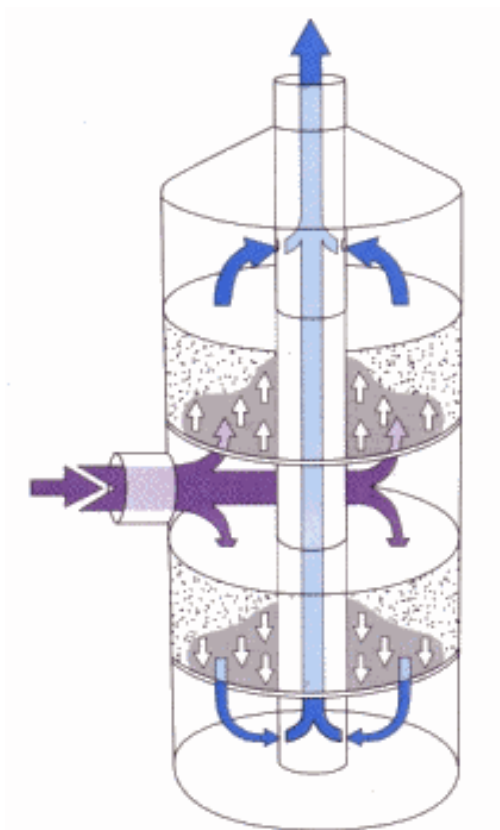
Ισόθερμες προσρόφησης για τολουόλιο, τριχλωροαιθυλένιο και ατμό.



Ποσότητα του τριχλωροαιθυλένιου ως συνάρτηση της σχετικής υγρασίας.

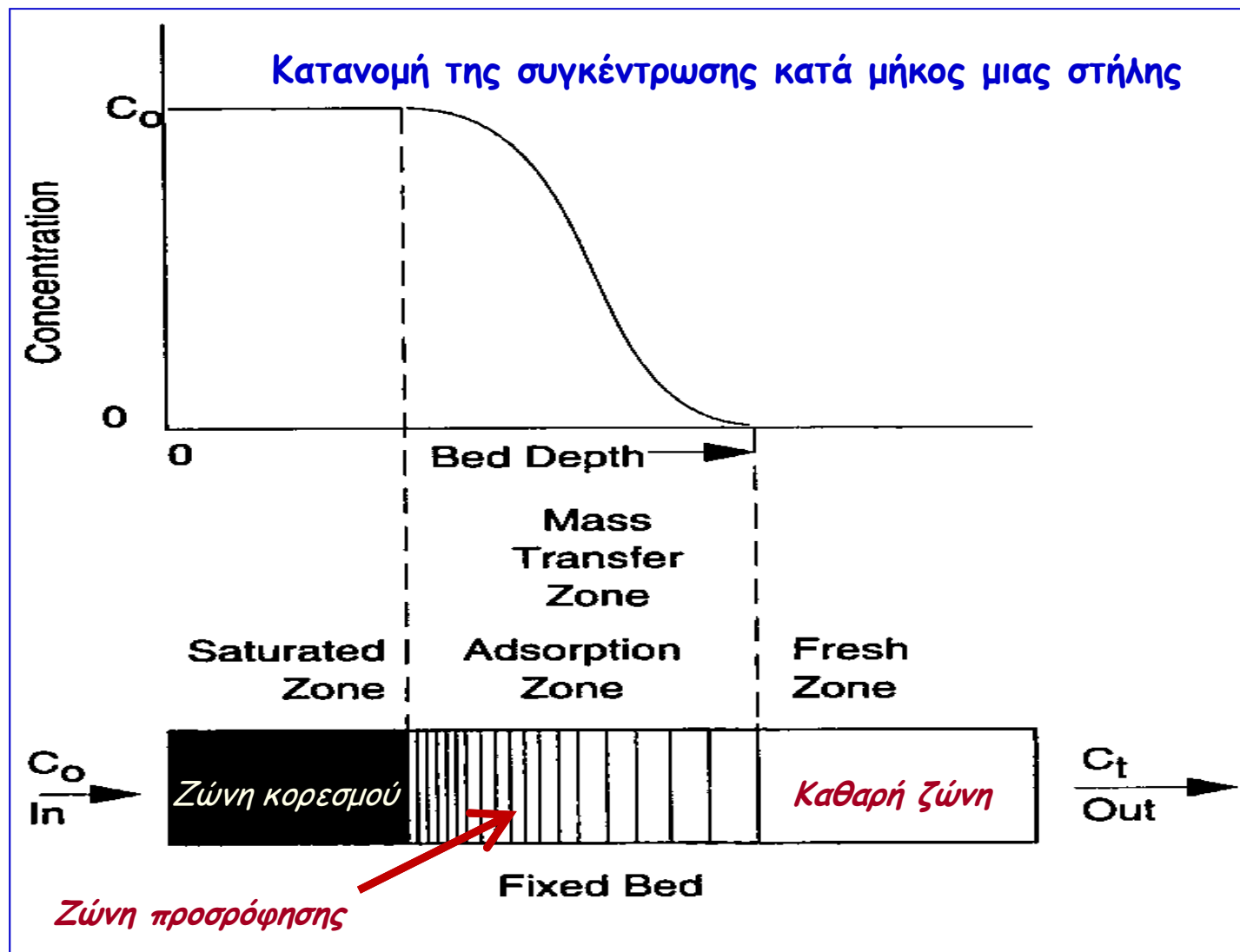


Σύστημα προσρόφησης σε σταθεροποιημένη κλίνη





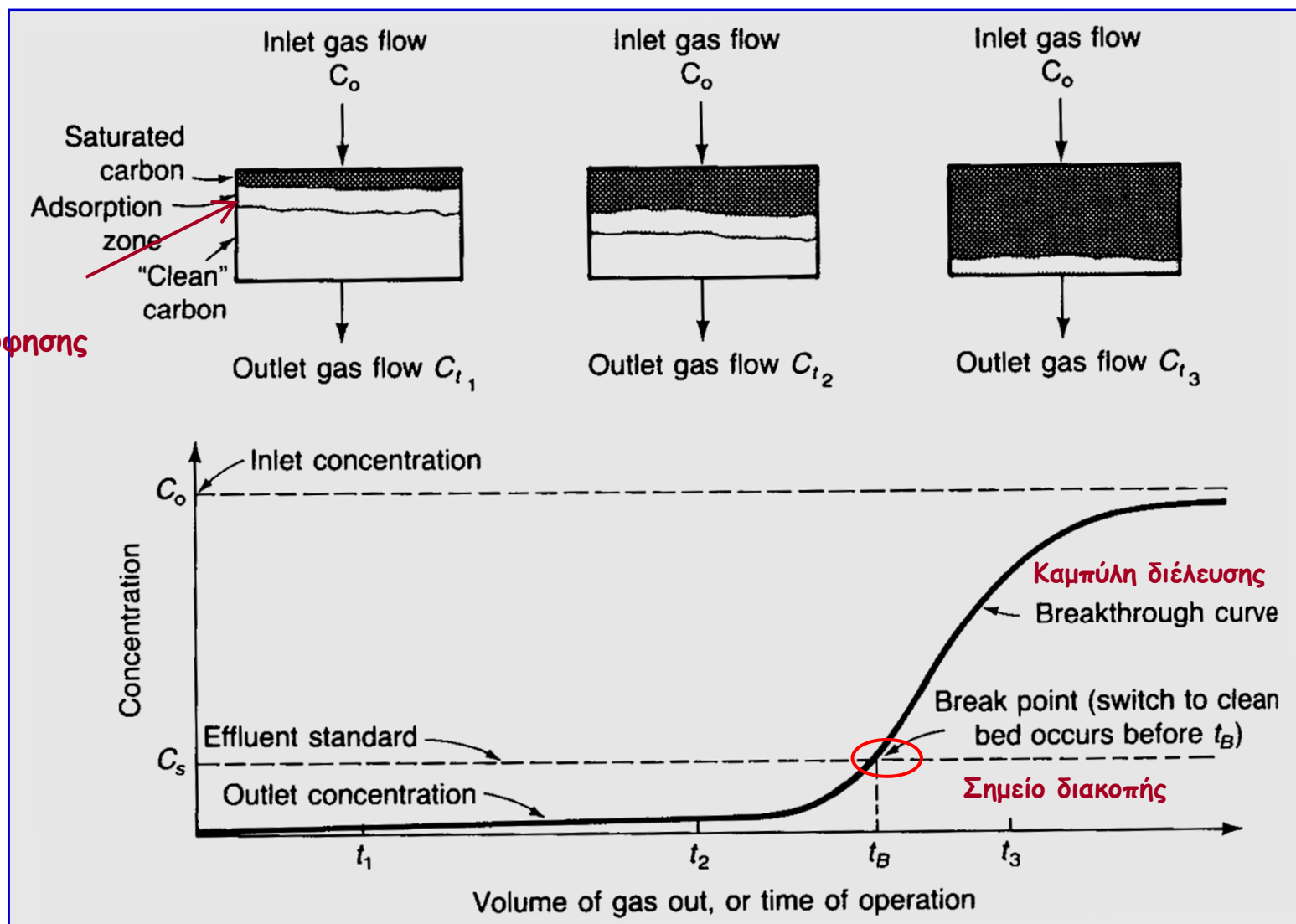
Σύστημα προσρόφησης σε σταθεροποιημένη κλίνη





Το κύμα προσρόφησης και η καμπύλη διέλευσης σε κλίνη ενεργού άνθρακα

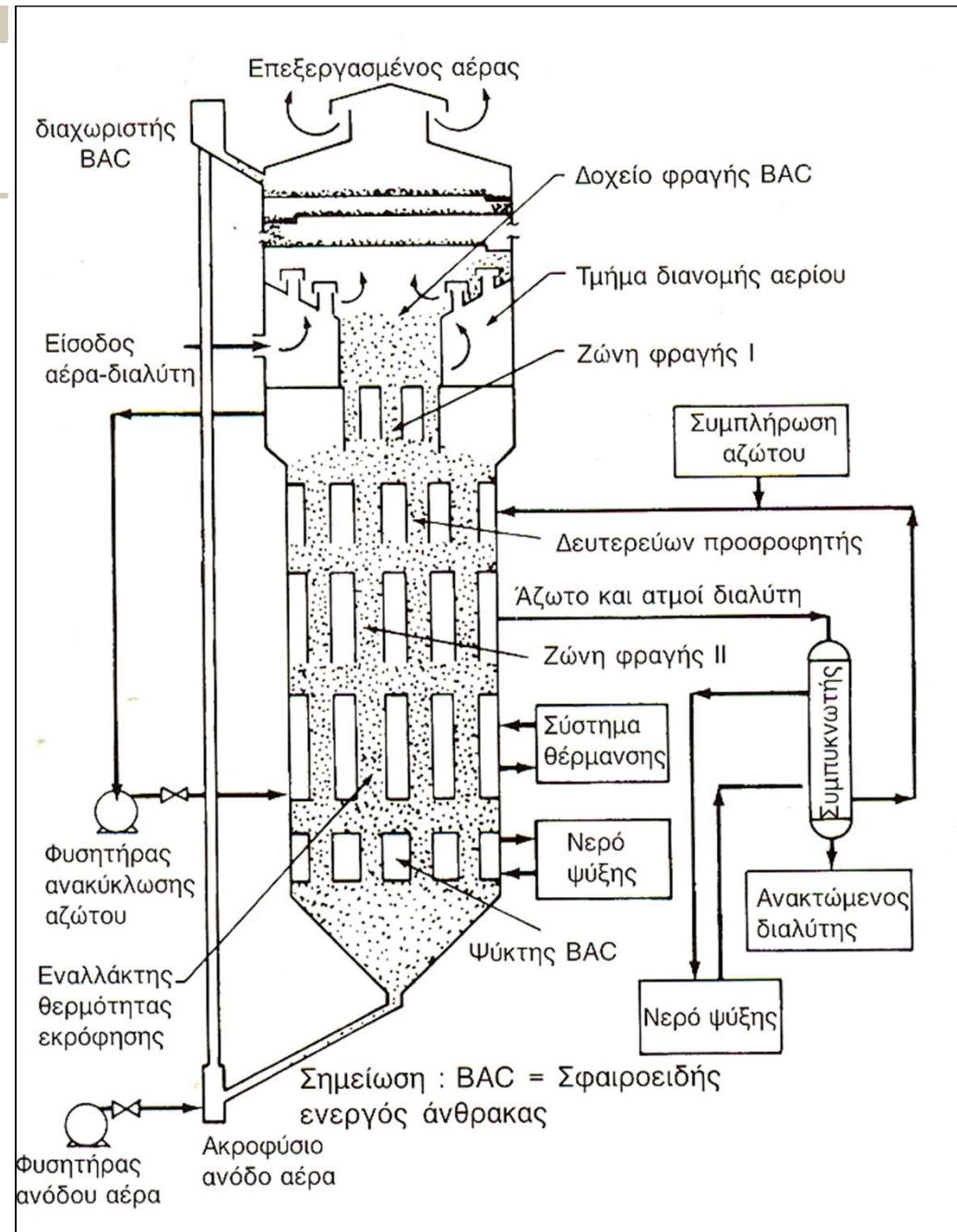
Ζώνη
προσρόφησης



Σύστημα ρευστοστερεάς κλίνης

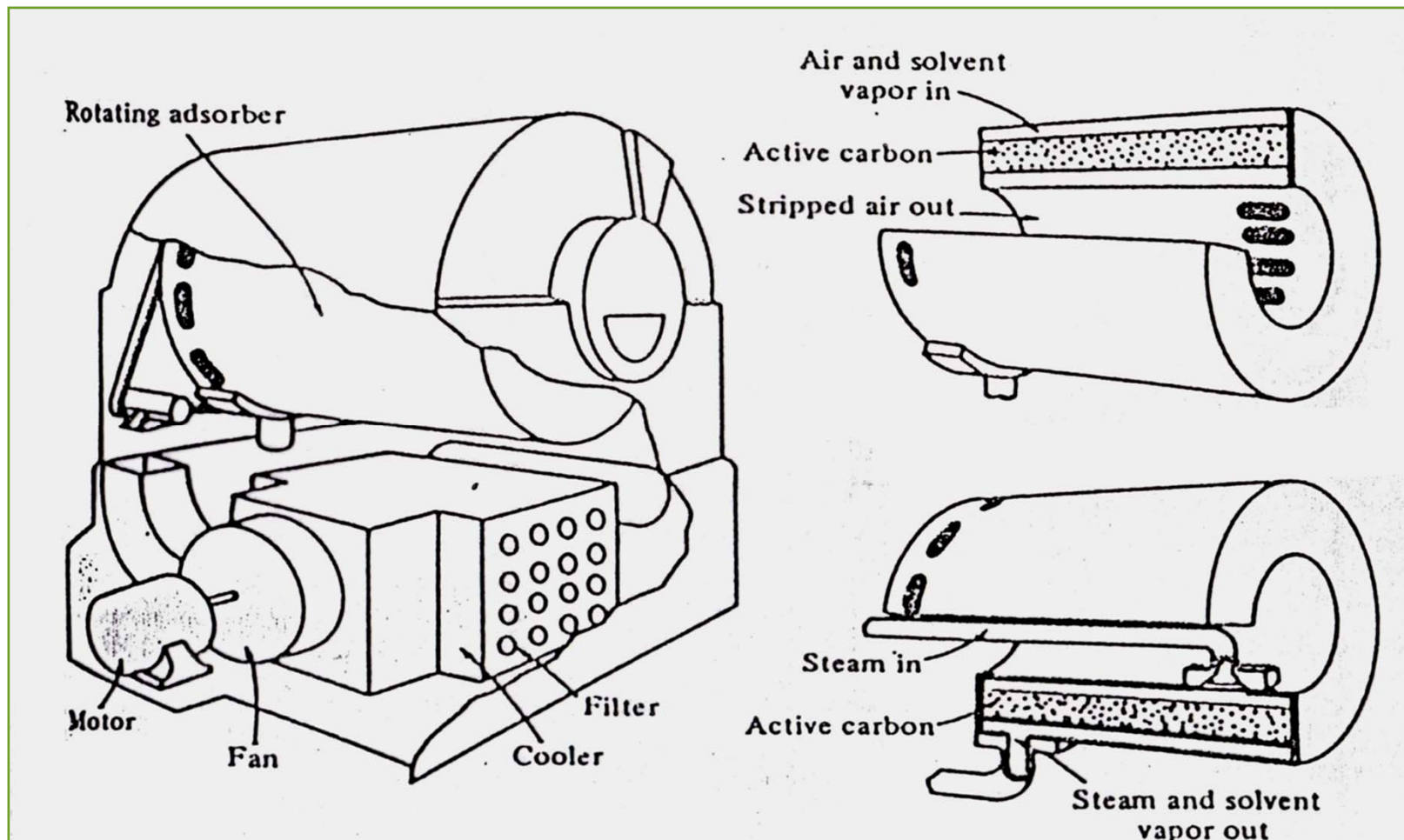
- Εξαιρετική επαφή αερίου στερεού
- Απουσία κύκλου θέρμανσης
- Συχνά για προσρόφηση SO_2

Σχηματικό διάγραμμα
 ρευστοποιημένης κλίνης
 προσρόφησης τύπου Purasiv HR.





Άλλα συστήματα- Σύστημα περιστρεφόμενης κλίνης



Πτώση πίεσης σε μία σταθεροποιημένη κλίνη

Σχέση Ergun

$$\frac{\Delta P \varepsilon^3 d_p \rho_g}{D(1-\varepsilon)G^2} = \frac{150(1-\varepsilon)\mu}{d_p G} + 1,75$$

ΔP : πτώση πίεσης

D : βάθος κλίνης

ε : κλάσμα κενού

G : φαινομενική μαζική παροχή

μ_g : ιξώδες αερίου

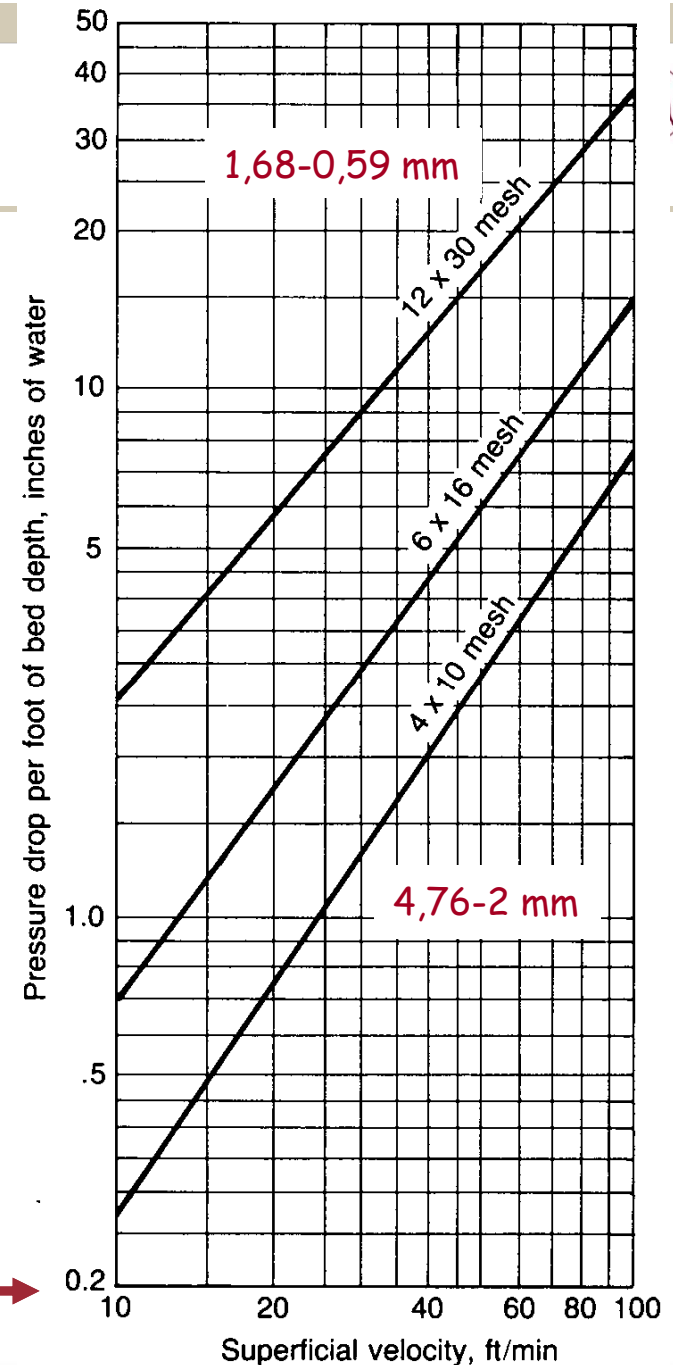
d_p : διάμετρος σωματιδίων

Τυπική περιοχή λειτουργίας :

$< 50 \text{ mm H}_2\text{O}$, $7 < V < 33 \text{ m/min}$

⇒ προσδιορισμός

Μέγιστο Ύψος Κλίνης Προσροφητή





Εμπειρική (απλούστερη) σχέση της Union Carbide

$$\Delta P = 0,37 D \left(\frac{V}{100} \right)^{1,56}$$

ΔP : πτώση πίεσης κλίνης, σε in. H₂O

V: ταχύτητα αερίου (ισχύει για 60-140 ft/min)

D: ύψος κλίνης, (~5-50 inches)

d_p : 4x6 mesh μέγεθος άνθρακα (2x6 mm)



Παράδειγμα 12.1

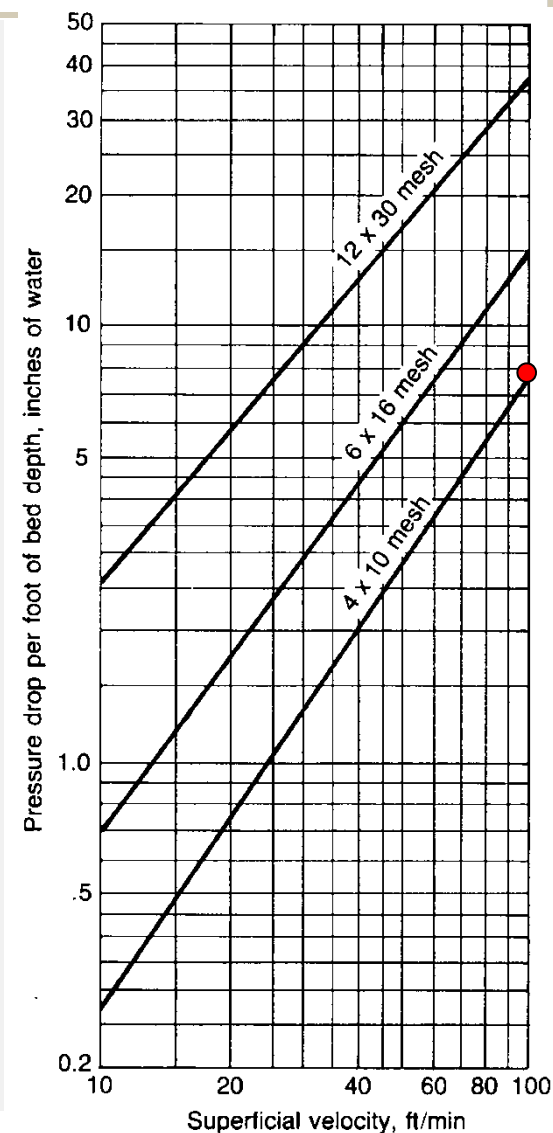
Κλίνη ενεργού άνθρακα με διαστάσεις 12 ft × 6 ft × 2 ft (βάθος) χρησιμοποιείται σε σύστημα ανάκτησης βενζολίου. Το σύστημα είναι συνδεδεμένο για μία ώρα και στη συνέχεια αναγεννάται για άλλη μία ώρα. Το εισερχόμενο ρεύμα αέρα περιέχει 5000 ppm βενζολίου (κατ' όγκο) σε 1 atm και 100°F. Η προσροφητική ικανότητα λειτουργίας της κλίνης είναι 10 lb_m βενζολίου ανά 100 lb_m άνθρακα. Οι φυσικές ιδιότητες του άνθρακα είναι οι ακόλουθες: πυκνότητα = 30 lb_m/ft³, κλάσμα κενού όγκου = 0,40 και μέγεθος σωματιδίων 4×10 mesh (0,011 ft). Να προσδιοριστεί η πτώση πίεσης κατά μήκος της κλίνης από

(α) Εξ.(12.13)
$$\frac{\Delta P \varepsilon^3 d_p \rho_g}{D(1-\varepsilon)G^2} = \frac{150(1-\varepsilon)\mu}{d_p G} + 1,75$$

(β) Εξ.(12.14)
$$\Delta P = 0,37D \left(\frac{V}{100} \right)^{1,56}$$

(γ) Σχήμα 12.6.

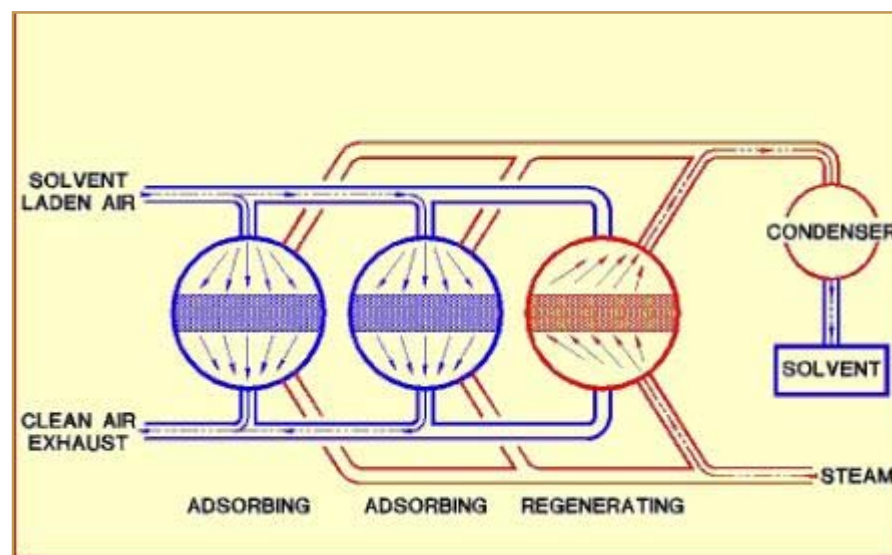
$$U = \frac{7540}{12 \times 6} = 104 \text{ ft/min} \Rightarrow \Delta P / \text{ft} \approx 8 \text{ in.H}_2\text{O} \Rightarrow \Delta P \approx 16 \text{ in.H}_2\text{O}$$





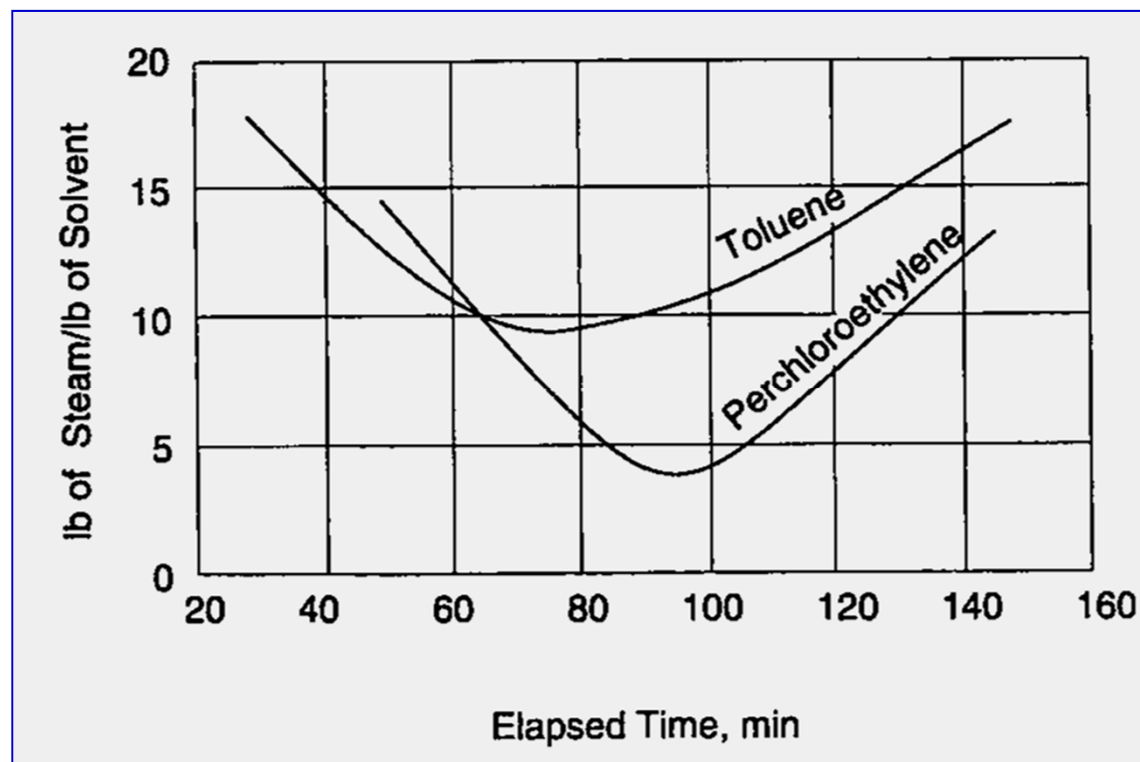
Αναγέννηση

- Όταν η κλίνη γίνεται σχεδόν κορεσμένη, η ροή διακόπτεται και η κλίνη «αναγεννάται», ώστε να προκληθεί εκρόφηση.
- **Ανάκτηση του προσροφητή και αξιοποίηση του προσροφήματος.**
- Η αναγέννηση επιτελείται με πολλούς τρόπους ανάλογα με τον τύπο του προσροφητή
 - ❖ Κύκλος θερμοκρασίας (αργό στάδιο)[κοινό τρόπος, ροή θερμού αέριου κατ' αντιστροφή στην κλίνη]
 - ❖ Κύκλος πίεσης
 - ❖ Απογύμνωση με αδρανές αέριο





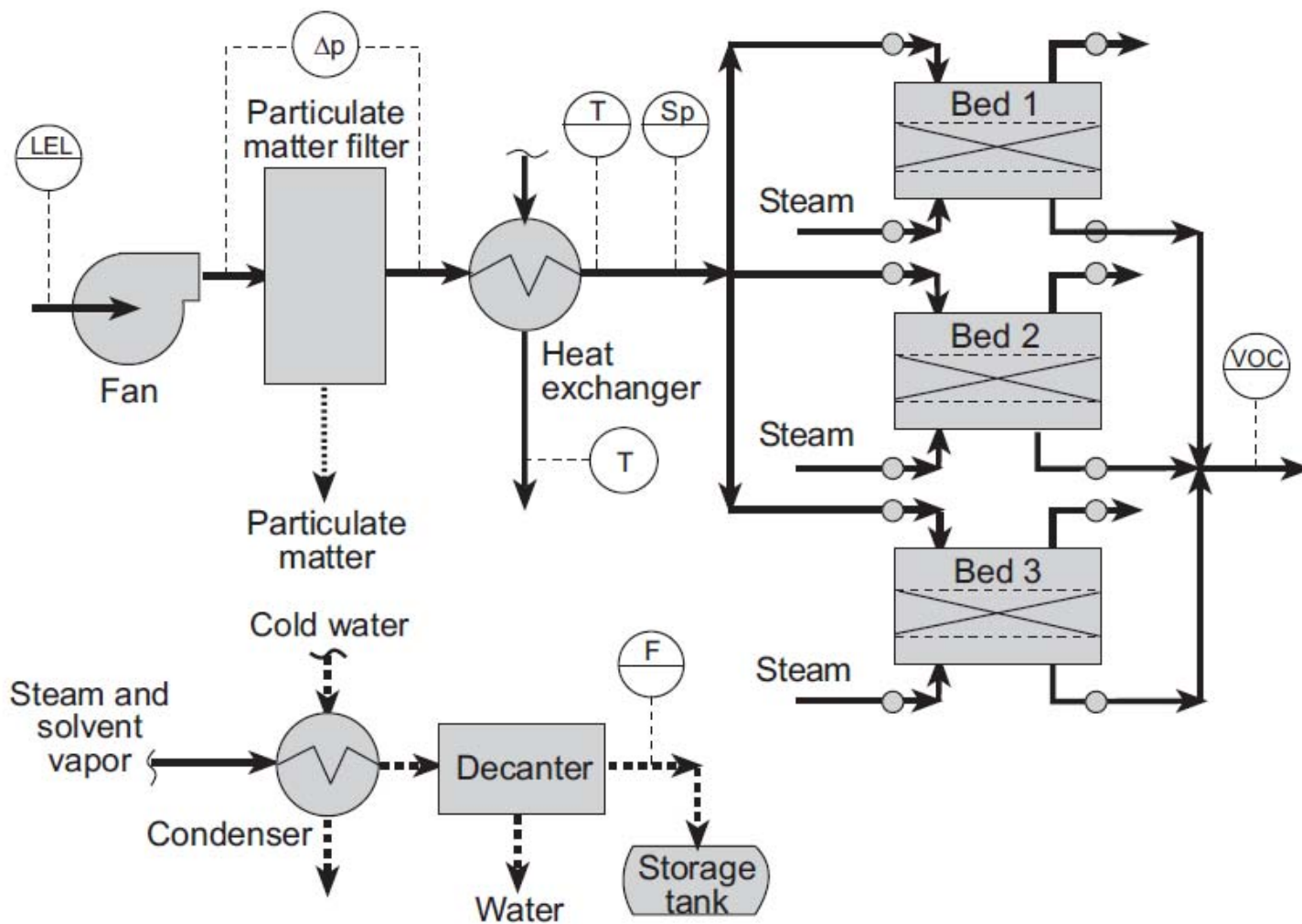
Κατανάλωση ατμού ανά μονάδα μάζας του διαλύτη που ανακτάται



- Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα έχει κατανάλωση ατμού στην περιοχή 1-4 kg ατμού/kg του διαλύτη που ανακτάται ή 0,2-0,4 kg ατμού/kg άνθρακα.
- Σε μία συνεχή λειτουργία απαιτούνται τουλάχιστον 2 μονάδες προσρόφησης.



Flowchart of a three-bed (deep bed) absorber





Activated Carbon & Solvent Recovery- Adsorption of VOC & Odours
<http://www.edie.net/products>



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

MM900

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΣΗΣ

3^η ΕΝΟΤΗΤΑ, Μέρος 3 Απορρόφηση (absorption)

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

Cooper & Alley: Κεφάλαιο 13





Εισαγωγή

- **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 στο υγρό και αποτελεί διεργασία μεταφοράς μάζας
- Τις περισσότερες φορές το υγρό: **νερό**
- Αναφέρεται και ως **καθαρισμός ή έκπλυση αερίου** (gas scrubbing)

Εφαρμογές

- Ανάκτηση αμμωνίας στη βιομηχανία λιπασμάτων
- Απομάκρυνση HF από τα απαέρια του φούρνου υάλου
- Έλεγχος H_2S από την αποθείωση απαερίων (FGD)
- Ανάκτηση διαλυτών (μεθανόλη, ακετόνη)
- Έλεγχος οσμών.



Εισαγωγή

- Η **διαλυτότητα** ενός αερίου είναι πολύ σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την ποσότητα του ρύπου που μπορεί να απορροφηθεί.
- Η διαλυτότητα είναι συνάρτηση κυρίως της θερμοκρασίας (και λιγότερο της πίεσης)
- Η πιο 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

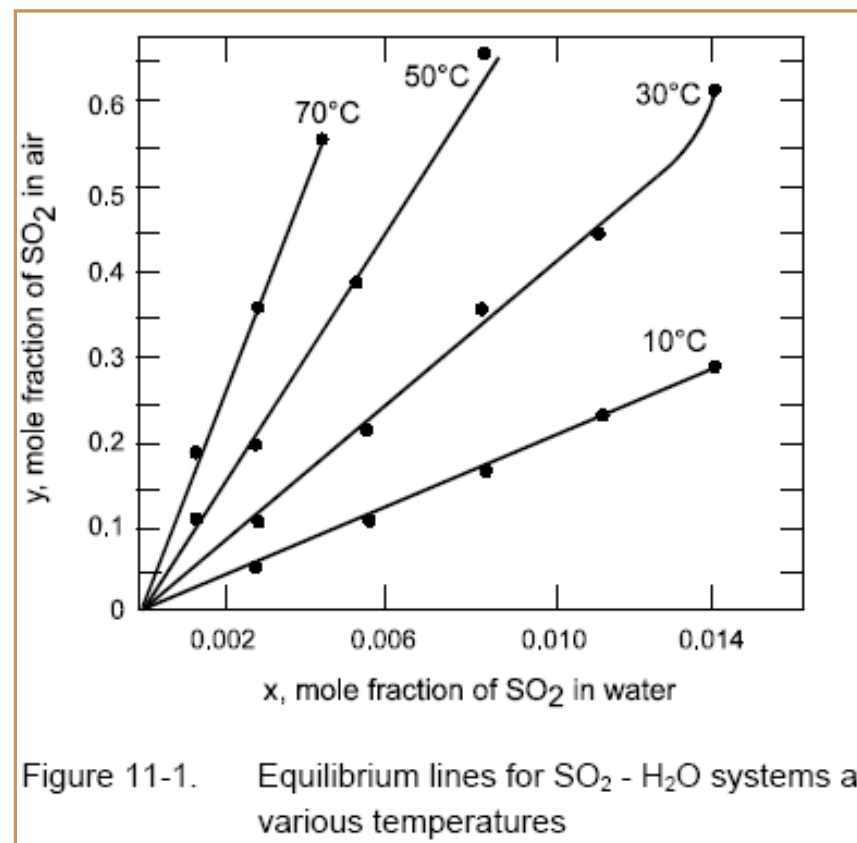


Figure 11-1. Equilibrium lines for SO₂ - H₂O systems at various temperatures



Εισαγωγή - σταθερά Henry

Table 11-2. Henry's law constants for gases in H ₂ O ¹		
Gas	20°C	30°C
N ₂	80.4	92.4
CO	53.6	62.0
H ₂ S	48.3	60.9
O ₂	40.1	47.5
NO	26.4	31.0
CO ₂	1.42	1.86
SO ₂	0.014	0.016

1. Expressed in $H \times 10^{-5}$, atm/mole fraction.



Εισαγωγή- Απορρόφηση αερίων

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
- Η μεταφορά μάζας επιτελείται τόσο με **μοριακά μέσα** όσο και με **συναγωγή**. Μπορεί να ελέγχεται είτε από την αντίσταση στην αέρα φάση είτε από την αντίσταση στην υγρή.

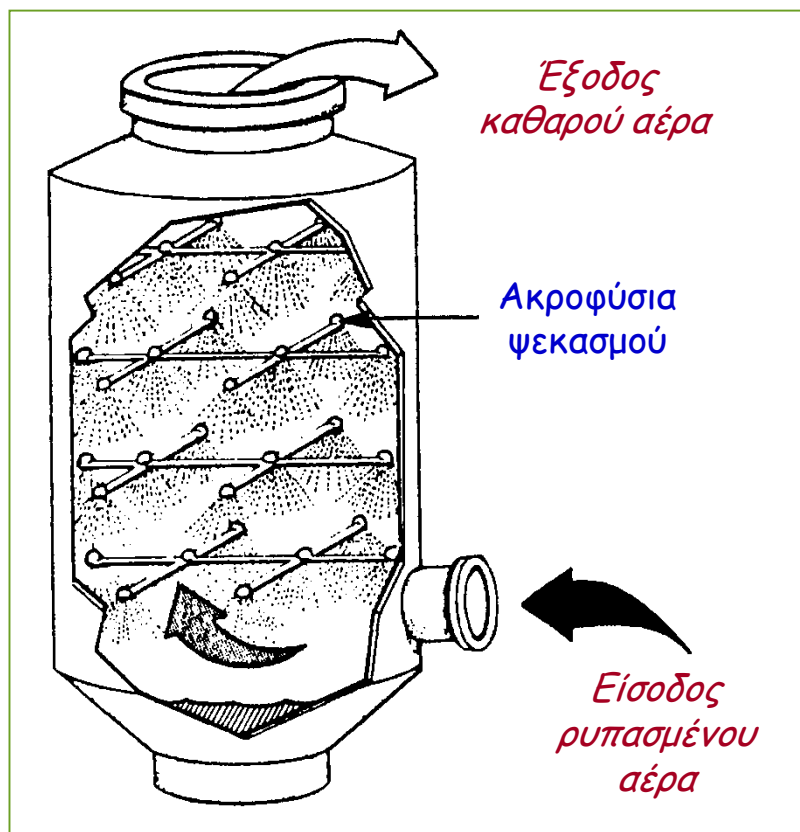
Σχεδιαστική Προσέγγιση:

- ✓ Υψηλά επίπεδα τύρβης
- ✓ Μεγάλη επιφάνεια επαφής των δύο φάσεων
- ✓ Τις περισσότερες φορές, χρήση **στηλών με πληρωτικά υλικά** κατ' αντιρροήν
- ✓ Εύλογη πτώση πίεσης



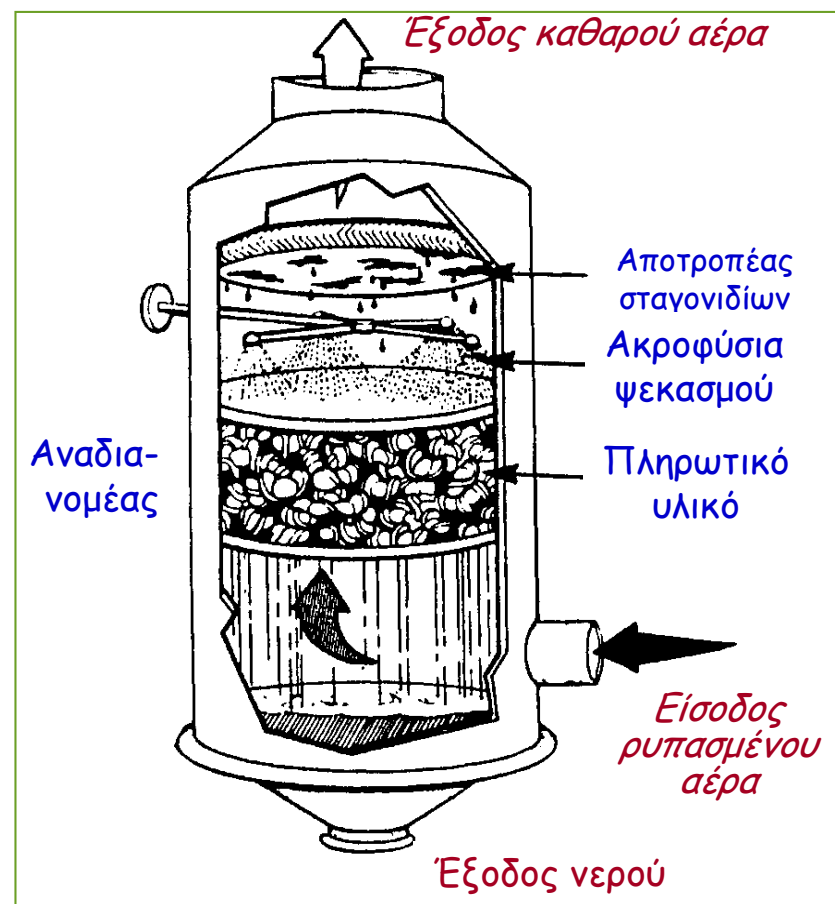
Συσκευές απορρόφησης αερίων - Packed beds

Πύργος ψεκασμού



Mycock et al., 1995

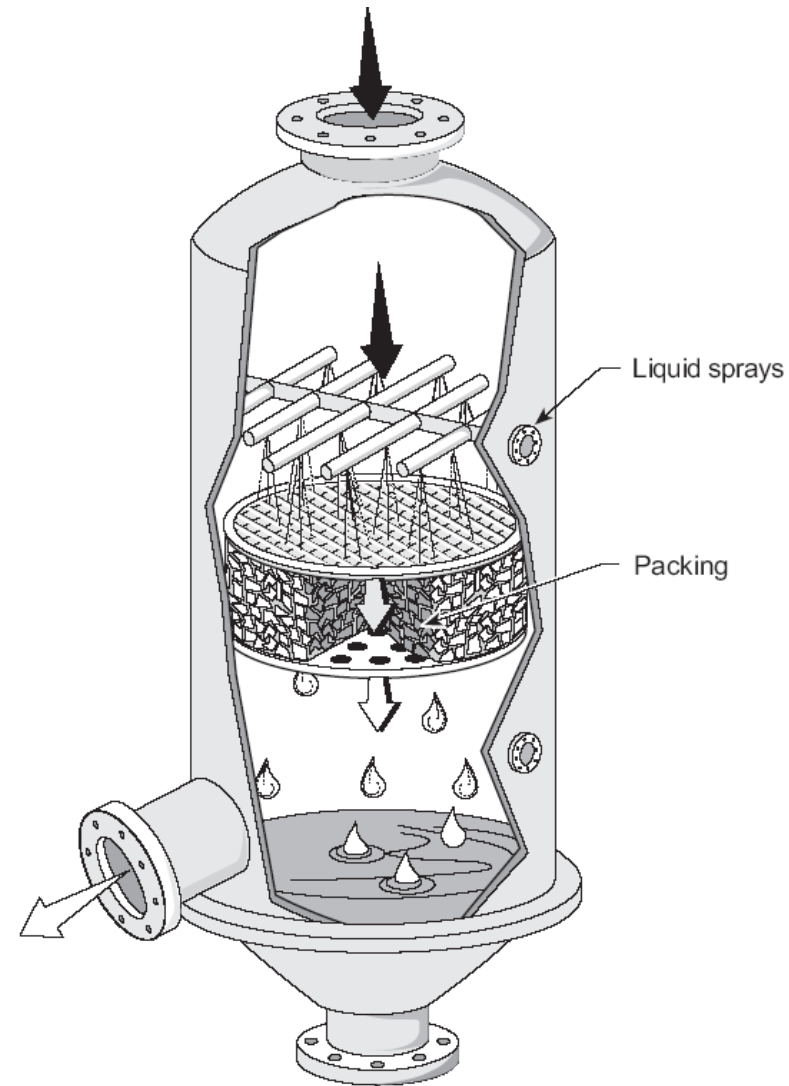
Πύργος με πληρωτικό υλικό κατ' αντιστροφή (η κοινότερη συσκευή)



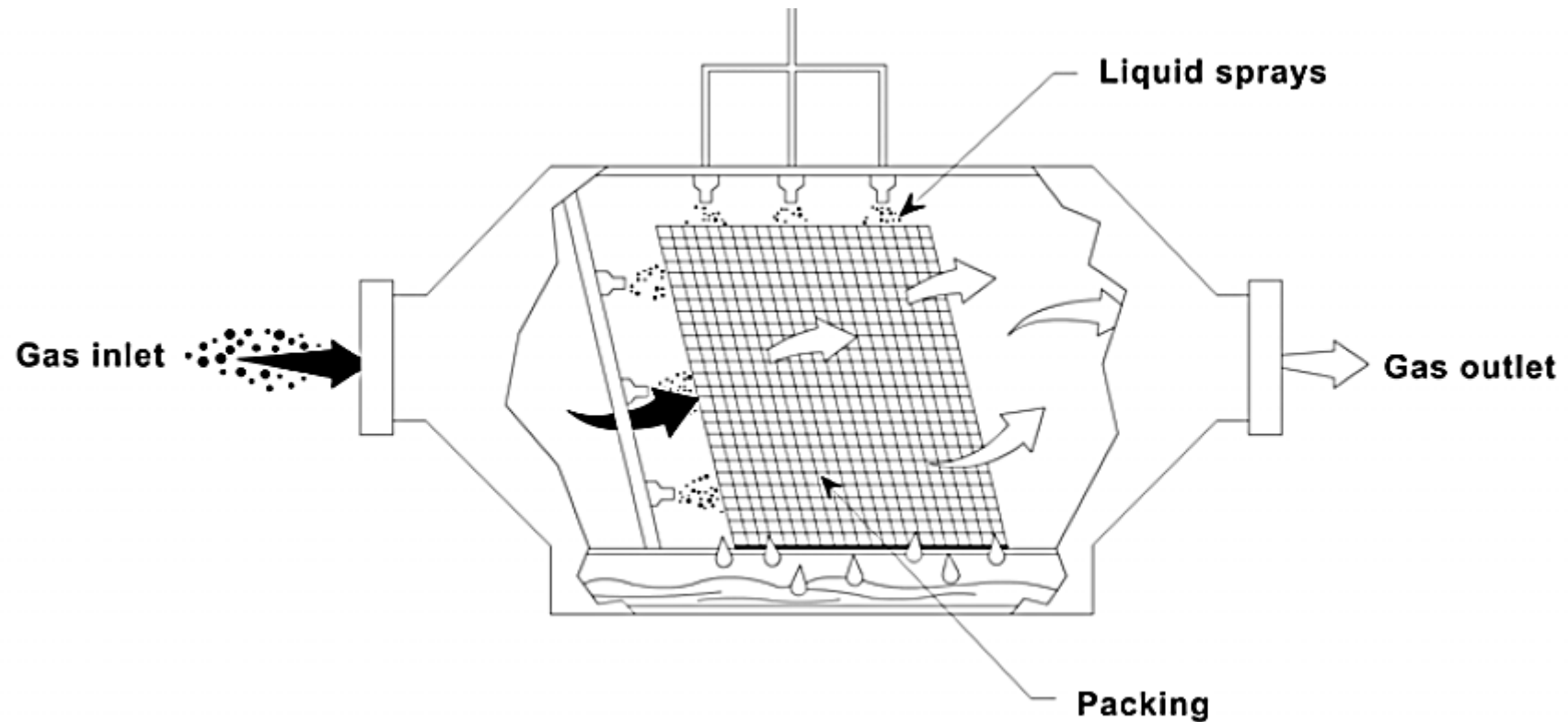
Συσκευές απορρόφησης αερίων- Packed beds



Πύργος με πληρωτικό υλικό
σε ομοροή



Συσκευές απορρόφησης αερίων - Packed beds

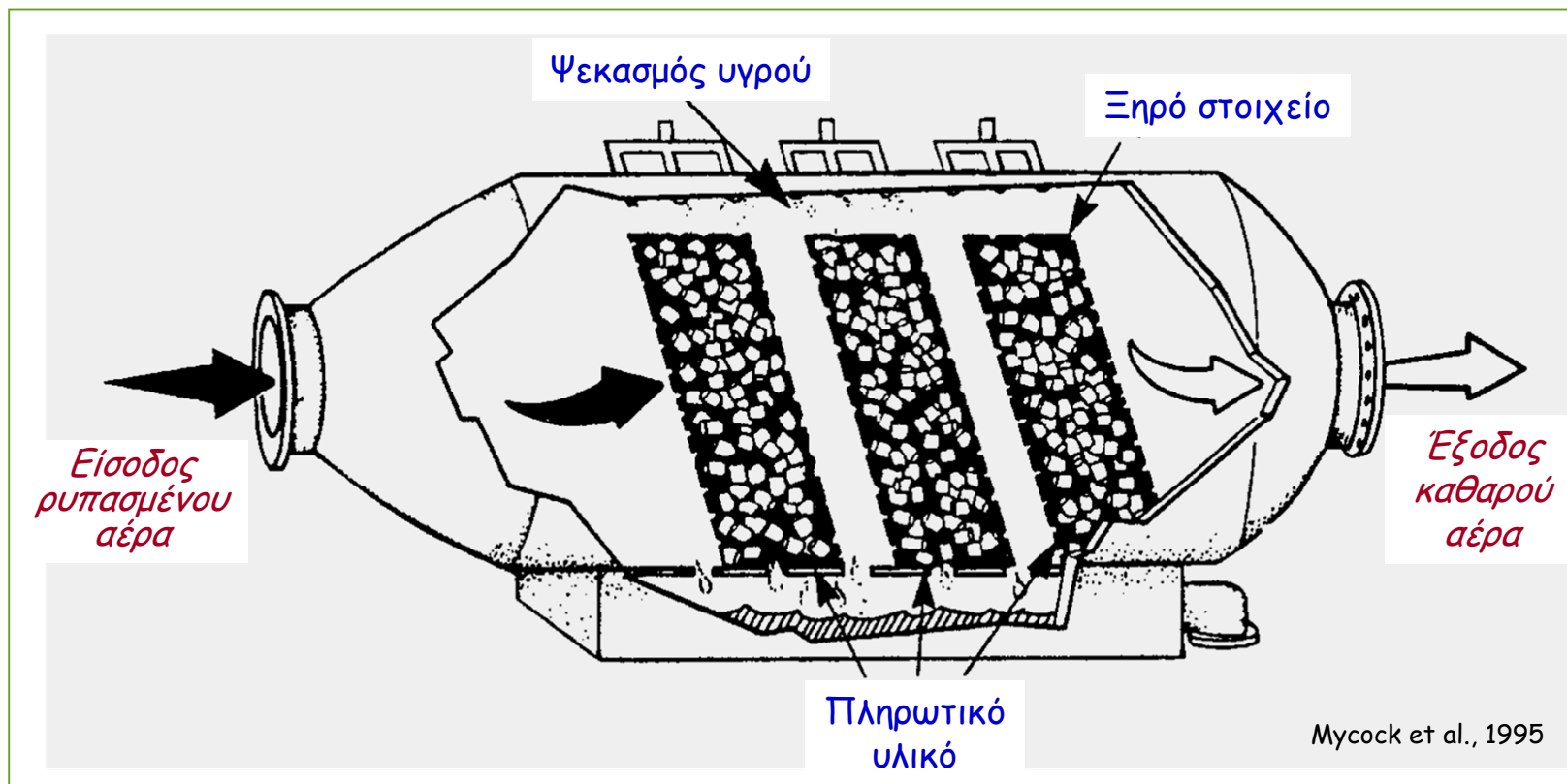


Πύργος με πληρωτικό υλικό με διασταυρούμενη ροή



Συσκευές απορρόφησης αερίων - Packed beds

Πύργος τριών κλινών με διασταυρούμενη ροή



Οι συσκευές απορρόφησης διασταυρούμενης ροής μπορούν να σχεδιαστούν μικρότεροι και να έχουν μικρότερη πτώση πίεσης από άλλα συστήματα πληρωτικών κλινών.



Πληρωτικά υλικά

Πληρωτικά υλικά στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της επαφής των δύο φάσεων και στη χαμηλή πτώσης πίεσης.

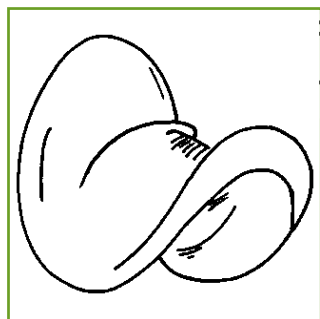
Επιθυμητά χαρακτηριστικά:

- Μεγάλη επιφάνεια διαβροχής ανά μονάδα όγκου
- Μικρή πυκνότητα (δηλ. μικρό βάρος)
- Ικανοποιητική χημική και μηχανική αντίσταση
- Χαμηλή συγκράτηση (holdup) του υγρού
- Χαμηλή πτώση πίεσης
- Χαμηλό κόστος

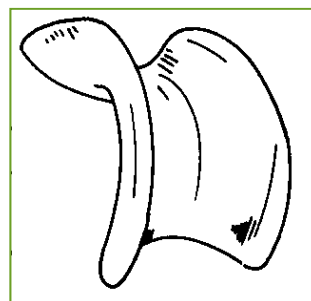




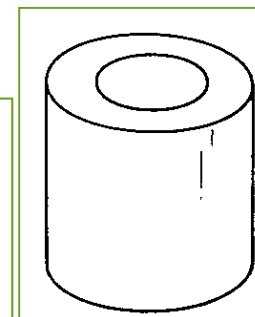
Πληρωτικά υλικά: διάφορα σχήματα και υλικά



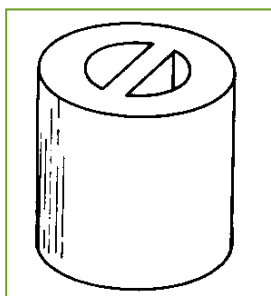
«σαμάρι» Berl



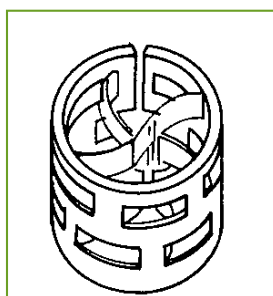
«σαμάρι» Intalox



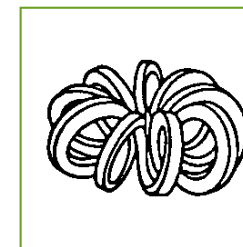
Δακτύλιος Raschig



Δακτύλιος Ring



Δακτύλιος Pall



Tellerette

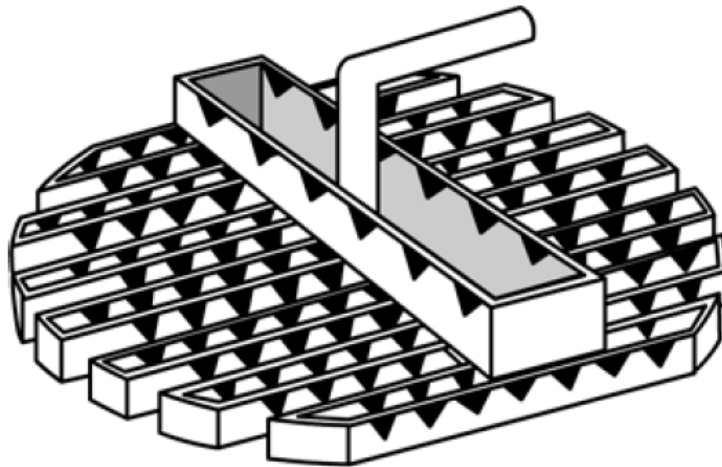
Πληρωτικά υλικά:

χαρακτηριστικά

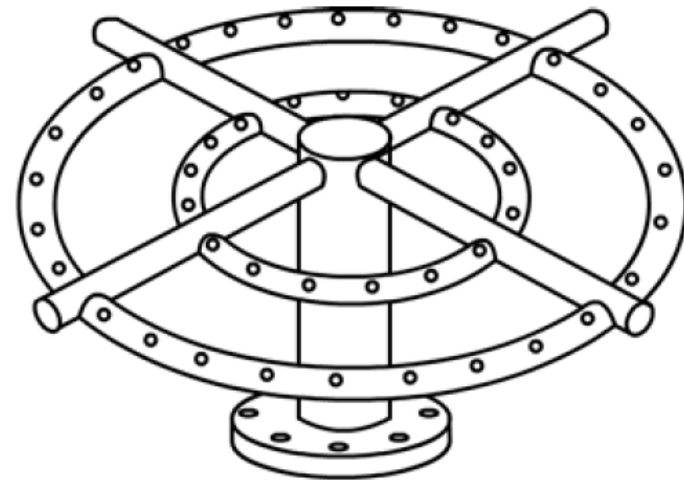
Packing	Size (in.)	Weight (lb/ft ²)	Surface area, a (ft ² /ft ³ packing volume)	Void fraction (%)	Packing factor, F (ft ² /ft ³)
Raschig rings (ceramic and porcelain)	1/2	52	114	65	580
	1	44	58	70	155
	1 1/2	42	36	72	95
	2	38	28	75	65
	3	34	19	77	37
Raschig rings (steel)	1/2 × 1/32	77	128	84	300
	1 × 1/32	40	63	92	115
	2 × 1/16	38	31	92	57
Berl saddles (ceramic and porcelain)	1/4	55	274	63	900
	1/2	54	155	64	240
	1	48	79	68	110
	2	38	32	75	45
Intalox saddles (ceramic)	1/4	54	300	75	725
	1/2	45	190	78	200
	1	44	78	77	98
	2	42	36	79	40
Intalox saddles (plastic)	1	6.00	63	91	30
	2	3.75	33	93	20
	3	3.25	27	94	15
Pall rings (plastic)	5/8	7.0	104	87	97
	1	5.5	63	90	52
	2	4.5	31	92	25

yosemite.epa.gov/

Κατανομή νερού στους πύργους με πληρωτικά υλικά



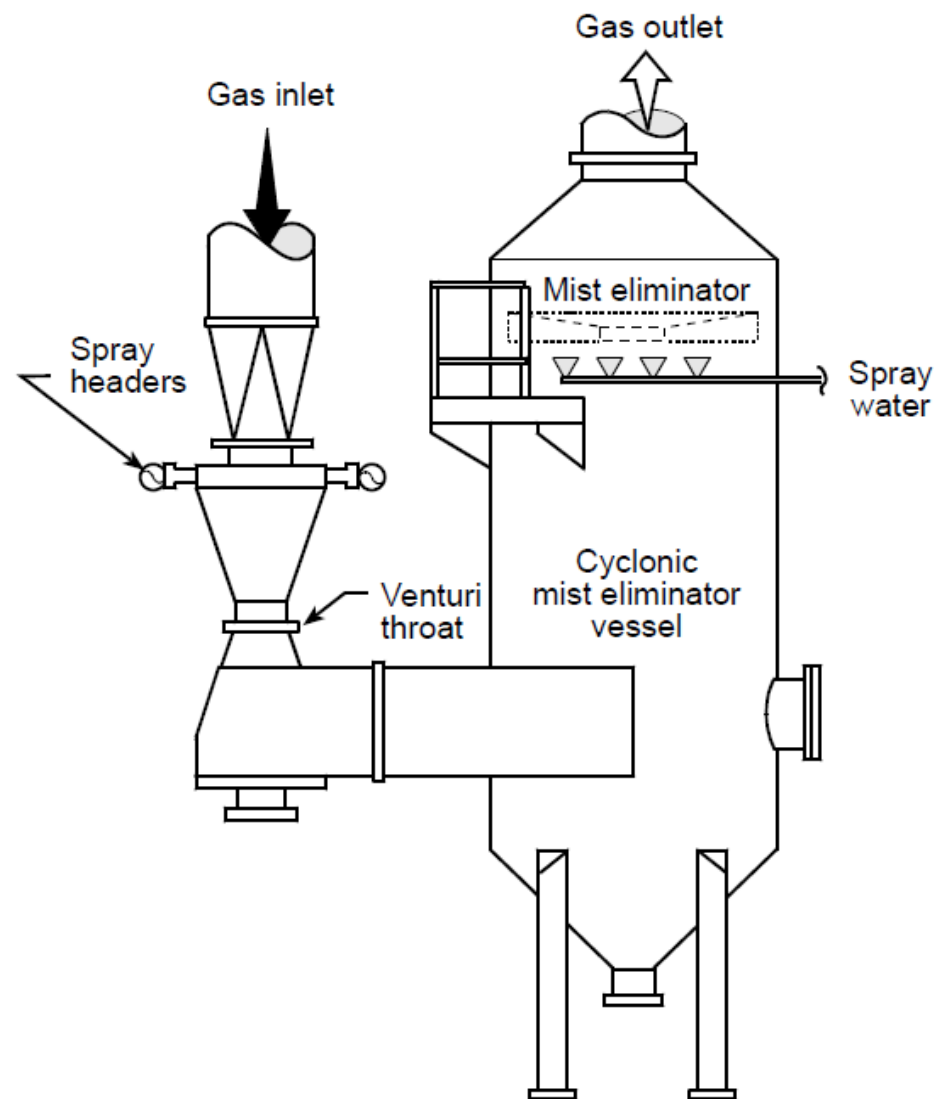
(a) Trough and weir type



(b) Perforated pipe



Συσκευές απορρόφησης αερίων - τύπου Venturi



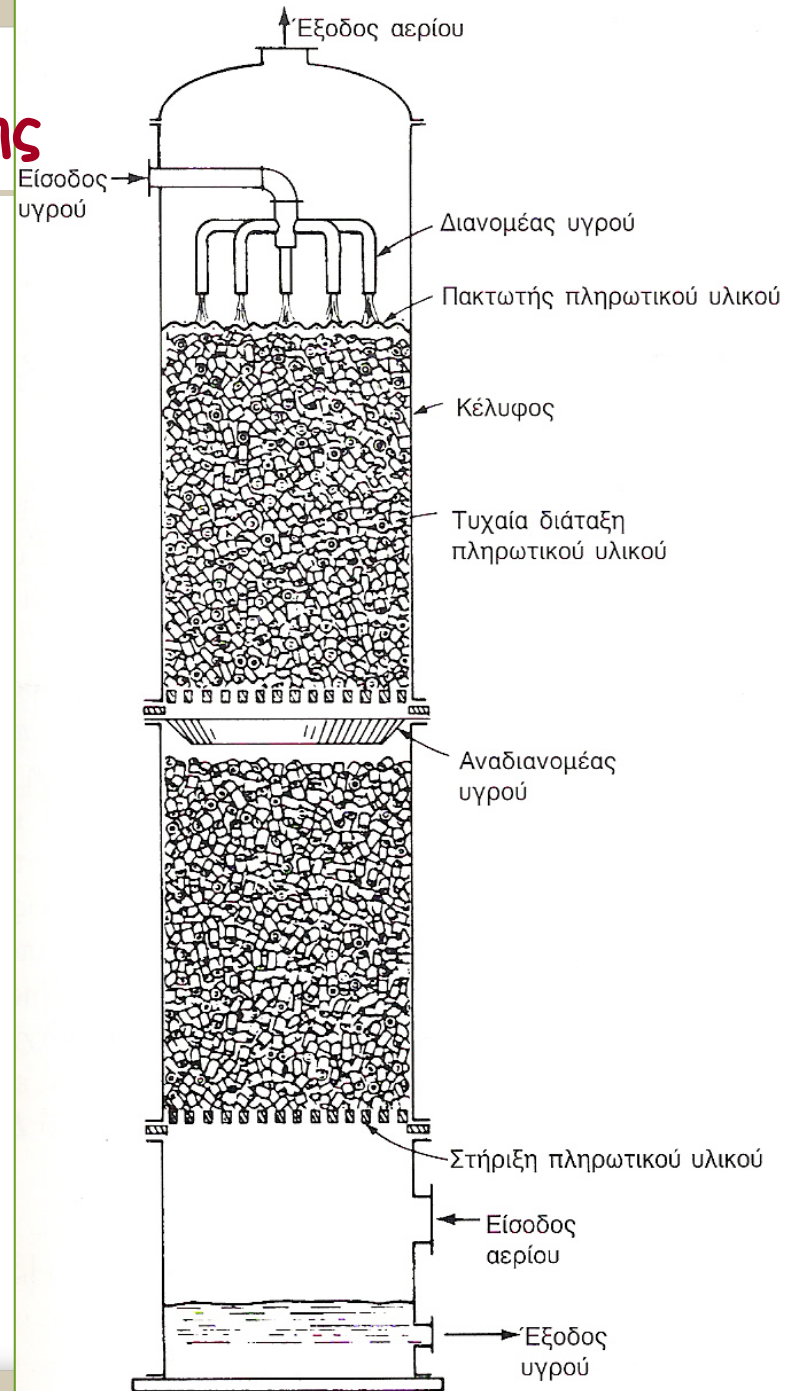


Σχεδιαστικά Κριτήρια

- **Χαρακτηριστικά του αερίου ρεύματος:** μέση και μέγιστη ογκομετρική παροχή, χημικές ιδιότητες όπως σημείο δρόσου, διαβρωτικότητα, pH, και διαλυτότητα του προς απομάκρυνση ρύπου
- **Υγρό μέσο:** ο τύπος του υγρού έκπλυσης και η παροχή του, το ιξώδες, το pH και τα αιωρούμενα στερεά.
- **Πτώση πίεσης:** παρακολούθηση της πτώσης πίεσης με μανόμετρα
- **pH:** το pH λειτουργίας του απορροφητήρα (θα πρέπει να παρακολουθείται)
- **Απομάκρυνση του συμπαρασυρμένου υγρού:** διαχωριστής ή mist eliminator
- **Προδιαγραφές εκπομπών:** απόδοση συλλογής για να πληρούνται οι προδιαγραφές

Σχεδιασμός πύργου απορρόφησης

- **Ισοζύγια μάζας** του πύργου για να καθοριστεί ο **ρυθμός** ανακυκλοφορίας του υγρού
- Υπολογισμός του **ύψους** του πληρωτικού υλικού
- **Καθορισμός της διαμέτρου** της στήλης ώστε να μπορεί να δεχθεί τις απαιτούμενες παροχές υγρού και αερίου





Μεταφορά μάζας - Θεωρία των δύο υμένων (two-film theory)

Ρυθμός μεταφοράς του A σε μίγμα A+B

$$\frac{N_A}{A} = -DC_T \frac{dy}{dz} + y \frac{N_A + N_B}{A} \quad (13.1)$$

N_A : ροή συστατικού A (mol/s)

D: γραμμομοριακή διαχυτότητα (m^2/s)

y: γραμμομοριακό κλάσμα του A στο μίγμα

z: απόσταση στην κατεύθυνση της διάχυσης

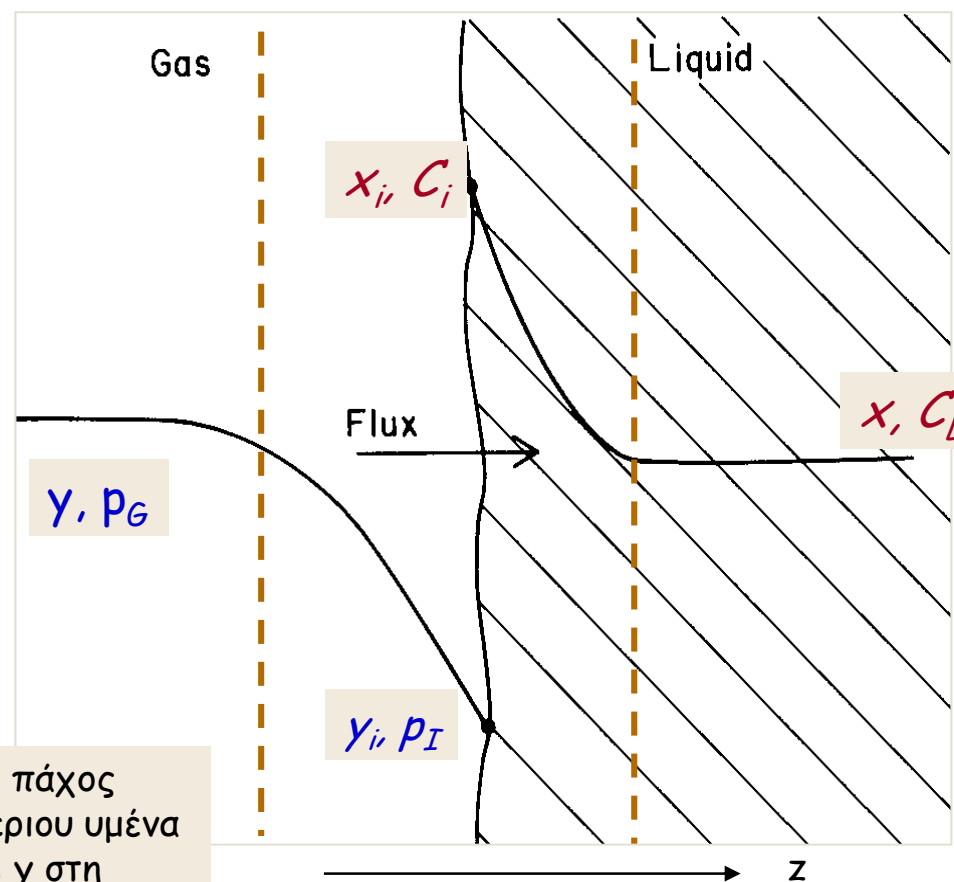
A: επιφάνεια μεταφοράς

Στην περίπτωση της διάχυσης του A μέσω ενός στάσιμου αέριου υμένα του B (π.χ. απορρόφηση ενός διαλυτού αερίου από ένα μη διαλυτό αέριο: NH_3 , αέρας)

$$\frac{N_A}{A} = -DC_T \frac{dy}{dz} + y \frac{N_A}{A} \quad (13.2)$$

$$-\frac{1}{N_A} \int_{y_i}^{y_l} \frac{1}{1-y} dy = \frac{1}{DC_T A} \int_0^B dz \quad (13.3)$$

B: πάχος αέριου υμένα
 y_i : y στη διεπιφάνεια



Προσοχή στο βιβλίο: η CT είναι ενσωματωμένη στο D



Μεταφορά μάζας (II)

$$\frac{N_A}{A} = \frac{DC_T}{B} \ln \left(\frac{1-y_i}{1-y} \right) \quad (13.4)$$

Στην πλειονότητα, τυρβώδης ροή \Rightarrow

$$\frac{N_A}{A} = \frac{D+E}{B} C_T \ln \left(\frac{1-y_i}{1-y} \right) \quad (13.5)$$

E: διαχυτότητα δίνης (m²/s)

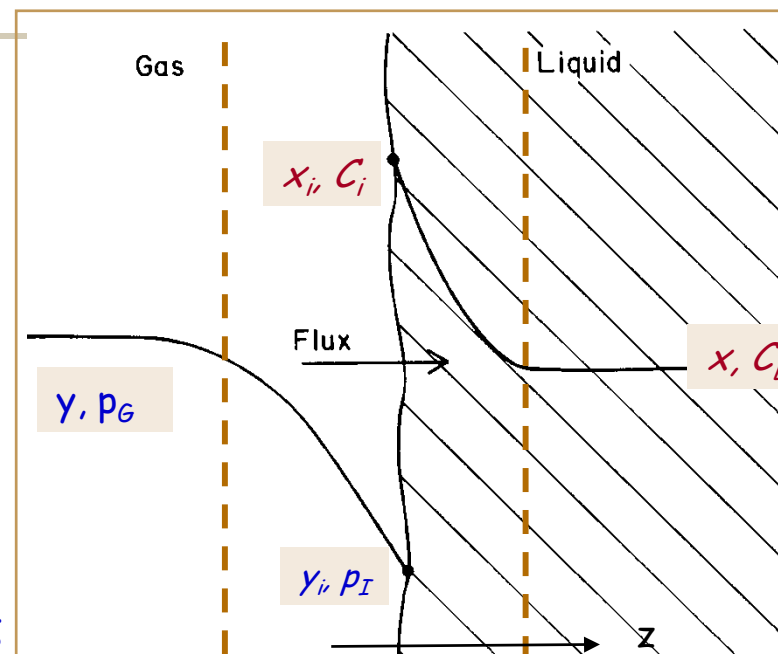
Εισαγωγή μοναδικού συντελεστή μεταφοράς μάζας

$$\frac{k_y}{\phi} = \frac{N_A}{A(y-y_i)} \quad (13.6)$$

φ: διορθωτικός παράγοντας για την κίνηση του κύριου όγκου της φάσης (1 για $y < 0,05$)

k_y : συντελεστής Drew-Colburn για υμένα αερίου

$$\frac{N_A}{A} = \frac{k_y(y-y_i)}{\phi} = \frac{k_y(y-y_i)}{(1-y)_{LM}} \quad (13.7)$$



$$\phi = (1-y)_{LM} = \frac{(1-y_i) - (1-y)}{\ln \left[(1-y_i) / (1-y) \right]}$$

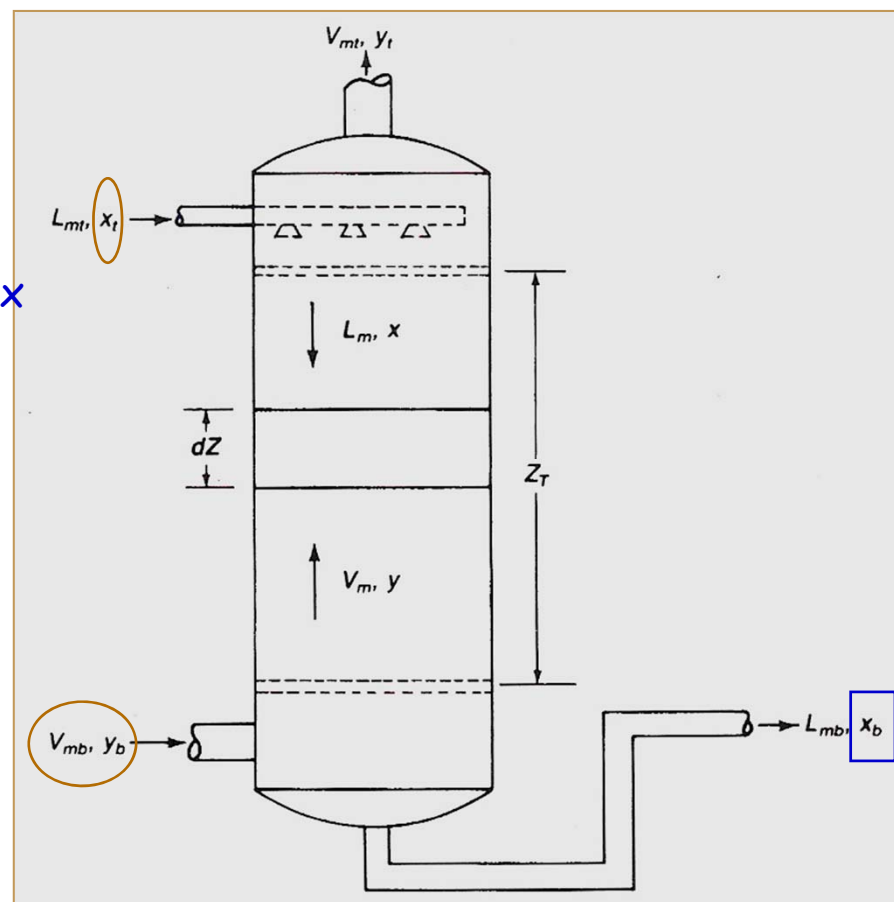
Παρόμοια έκφραση για τον υγρό υμένα

$$\frac{N_A}{A} = k_y(x_i - x) \quad (13.8)$$



Μεταφορά μάζας σε πύργο με πληρωτικά υλικά

- Ισοζύγια μάζας του πύργου για να καθοριστεί ο ρυθμός ανακυκλοφορίας του υγρού:
Γνωστά: V_m, y_b, x_t
 $x_b = f(\text{ρυθμός ανακυκλοφορίας υγρού})$
- [Ρυθμός ανακυκλοφορίας υγρού] = 1,5-3,0 x [ελάχιστου ρυθμού υγρού από υπολογισμό]
- Το ύψος από γραφική ολοκλήρωση
- Η διάμετρος με τη χρήση γραφικής συσχέτισης της πλημμύρισης (παροχή αερίου στο 40-60% της τιμής που αντιστοιχεί στο σημείο πλημμύρισης) και της πτώσης πίεσης.





Μεταφορά μάζας σε πύργο με πληρωτικά υλικά

- Ισοζύγιο του συστατικού από τη βάση μέχρι το z

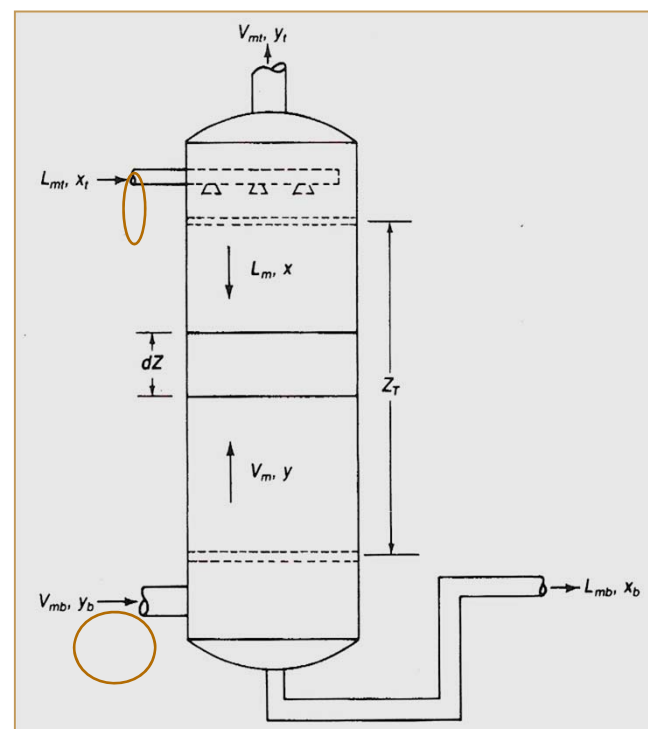
$$L_m x + V_{mb} y_b = L_{mb} x_b + V_m y \quad (13.12)$$

- Έστω L_m' και V_m' οι γραμμομοριακές παροχές (mol/s) χωρίς την ουσία προς απορρόφηση

$$V_m = \frac{V_m'}{1-y} \quad L_m = \frac{L_m'}{1-x} \quad (13.13)$$

- Προκύπτει

$$\frac{y}{1-y} = \frac{L_m'}{V_m'} \left(\frac{x}{1-x} \right) + \left[\frac{y_b}{1-y} - \frac{L_m'}{V_m'} \left(\frac{x_b}{1-x_b} \right) \right] \quad (13.15)$$





Μεταφορά μάζας σε πύργο με πληρωτικά υλικά

- Η γραφική παράσταση της 13.15 δείχνει τη γραμμή λειτουργίας
- Ελάχιστη κλίση της γραμμής λειτουργίας (y_t, x_y) και (y_b, x_b^*)
- Μπορεί να γραφεί για το ρυθμό μεταφοράς/επιφ. Επαφής (εξ. 13.7 και 13.8)

$$dN_A = d(V_m y) = k_y \frac{y - y_i}{\phi} dA = d(L_m x) = k_x (x_i - x) dA \quad (13.16)$$

- Η επιφάνεια
 $dA = \alpha S dz$ (13.17)

α: διαθέσιμη επιφάνεια μεταφοράς μάζας (m^2/m^3 πληρωτικού)
S: εγκάρσια διατομή πύργου

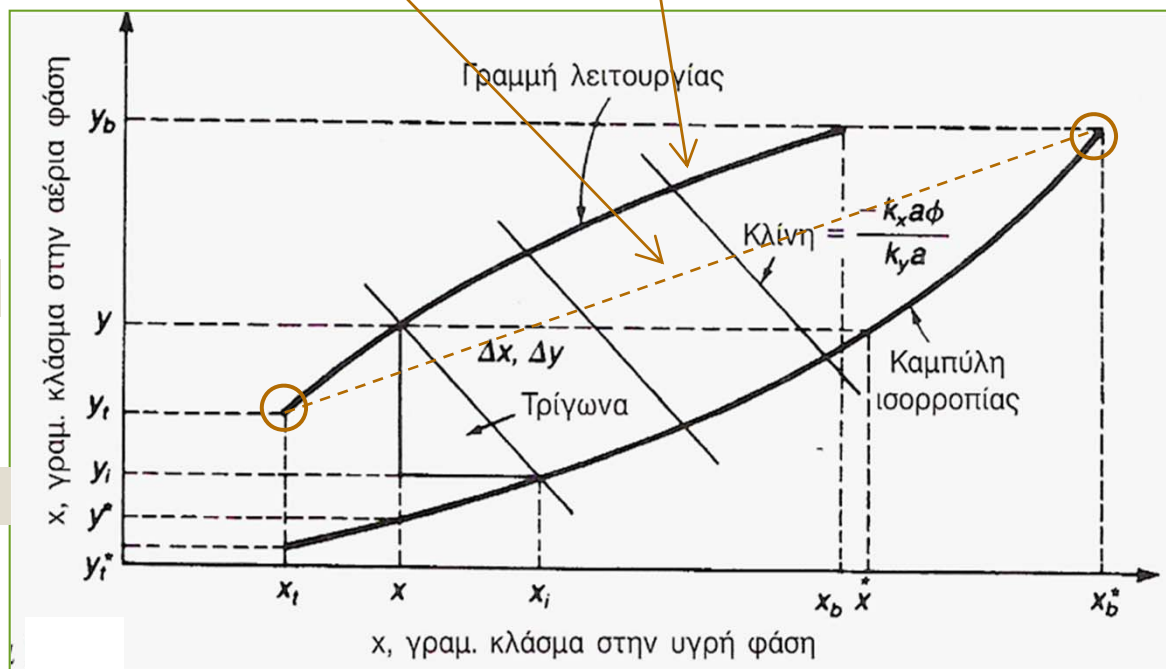
- Συνδυάζοντας

$$k_y a \frac{y - y_i}{\phi} dz = \frac{V_m}{S} \frac{dy}{1 - y} \quad (13.18)$$

Υγρή φάση

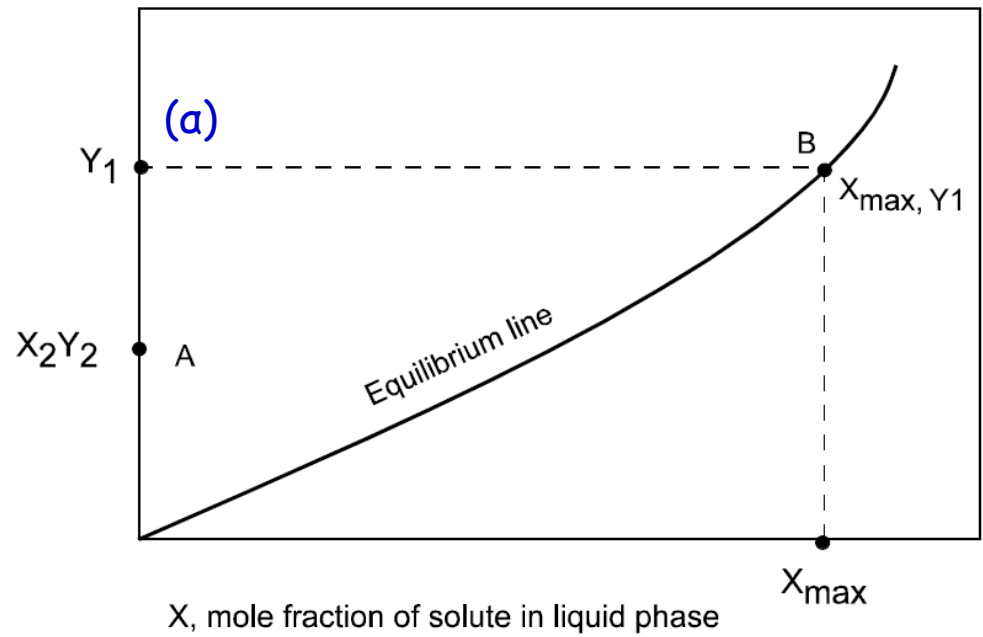
$$k_x a (x_i - x) dz = \frac{L_m}{S} \frac{dx}{1 - x} \quad (13.19)$$

Ολοκληρώνοντας μπορεί να βρεθεί το Z.

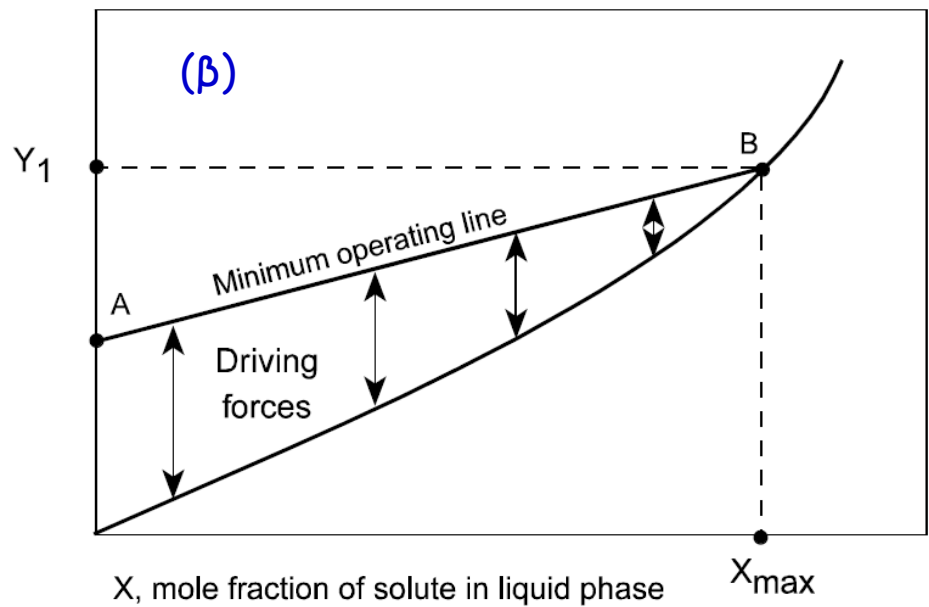


Σχεδιασμός-στάδια

Y, mole fraction of solute in gas phase



Y, mole fraction of solute in gas phase

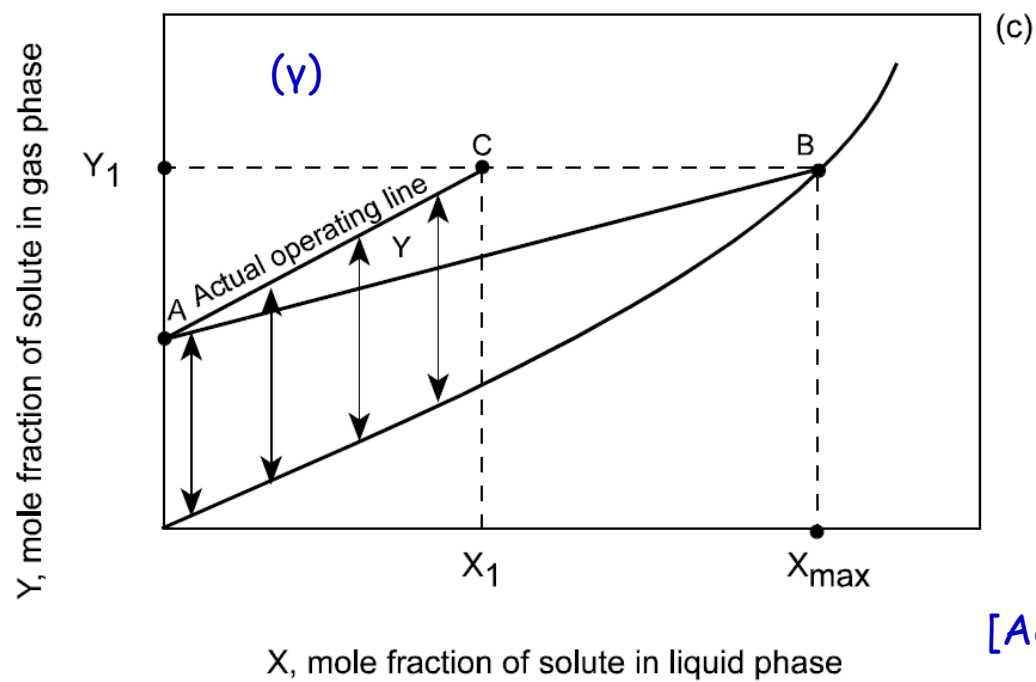


(b)

Slope of the minimum operating line = $\frac{L_m}{G_m}$ (minimum)



Σχεδιασμός



Slope of the actual
operating line =

$$\frac{L_m}{G_m} \text{ (actual)}$$

[Actual] = 1,5 × [minimum]
(1,5-3)



Η ιδέα της μονάδας μεταφοράς

Η εξ. (3.18) μπορεί να γραφεί ως:

$$Z_T = \underbrace{\left(\int_{y_t}^{y_b} \frac{\phi dy}{(1-y)(y-y_i)} \right)}_{N_{ty}} \underbrace{\left(\frac{G_{my}}{k_y a} \right)}_{H_y}$$

V_m/S , γραμμομοριακή ροή του αερίου διαμέσου του πύργου

Μέση τιμή στη βάση και την κορυφή

N_{ty} = αριθμός μονάδων μεταφοράς (NTU)

H_y = ύψος μονάδας μεταφοράς (HTU) βασισμένο στον μερικό συντ. μεταφοράς μάζας του αερίου



Προβλήματα από υψηλή ταχύτητα αερίου

- ❖ **Δημιουργία διαύλων (Channeling):** η αέρια ή η υγρή ροή είναι πολύ μεγαλύτερη σε κάποια σημεία της στήλης.
- ❖ **Φόρτιση (Loading):** η ροή του υγρού μειώνεται λόγω της αυξημένης ροής του αερίου. Το υγρό παραμένει στα διάκενα του πληρωτικού υλικού.
- ❖ **Πλημμύριση (Flooding):** το υγρό σταματά να ρέει και συγκεντρώνεται στην κορυφή του πύργου λόγω της πολύ μεγάλης παροχής του αερίου.

Άλλα προβλήματα

- Υψηλή πτώσης πίεσης
- Προβλήματα με την ακτινική διασπορά
- Ανάγκη για χαμηλή παροχή αερίου



Υπολογισμός ταχύτητας πλημμύρισης

L: μαζική παροχή του υγρού

G: μαζική παροχή αερίου

G': μαζική παροχή ανά διατομή της στήλης

F: παράγοντας πλήρωσης

ρ_l : πυκνότητα υγρού

ρ_g : πυκνότητα αερίου

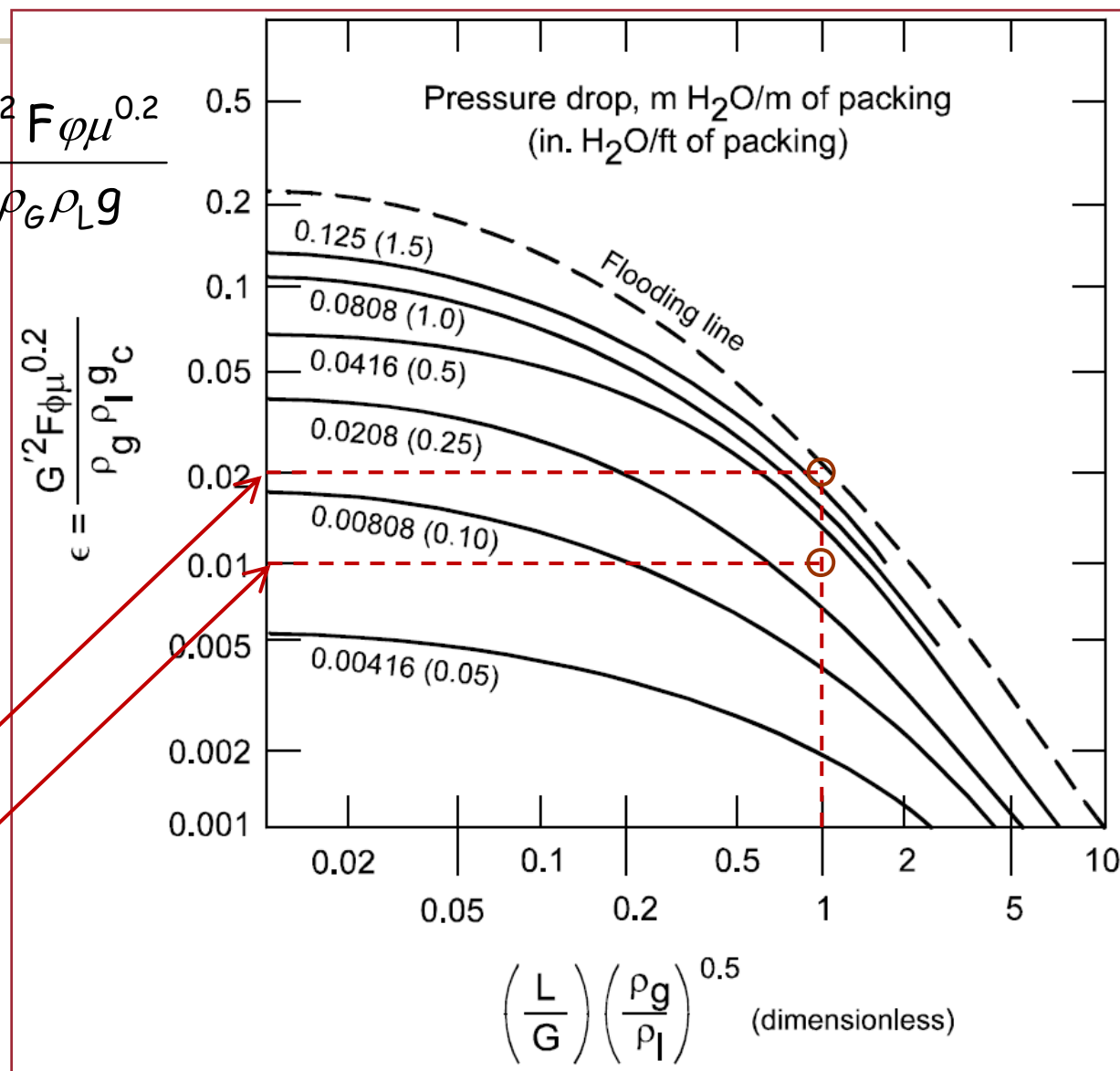
μ : ιξώδες υγρού, c_p

$$\frac{G'^2 F \phi \mu^{0.2}}{\rho_g \rho_l g}$$

$$\epsilon = \frac{G'^2 F \phi \mu^{0.2}}{\rho_g \rho_l g}$$

G'_{flooding}

$G' = 0,5 \times G'_{\text{flooding}}$



Μονάδα απορρόφησης αμμωνίας



Παράδειγμα

$c_{\text{SO}_2} = \frac{\text{g of SO}_2}{100 \text{ g H}_2\text{O}}$	p_{SO_2} (kPa)	$y = p/101.3$	$x = \frac{c_{\text{SO}_2} / 64}{c_{\text{SO}_2} / 64 + 5.55}$
0.5	6.0	0.060	0.0014
1.0	11.6	0.115	0.0028
1.5	18.3	0.180	0.0042
2.0	24.3	0.239	0.0056
2.5	30.0	0.298	0.0070
3.0	36.4	0.359	0.0084

The plot in Figure 11-2 is a straight line; therefore, Henry's law applies.

$$\text{Slope} = \frac{y}{x} = \frac{0.239 - 0.180}{0.0056 - 0.0042} \approx 42.7$$

The slope of the line ($\Delta y/\Delta x$), Henry's law constant (H), is approximately equal to 42.7.

Using the data and results from Example 11-1, compute the minimum liquid rate of pure water required to remove 90% of the SO_2 from a gas stream of $84.9 \text{ m}^3/\text{min}$ (3,000 acfm) containing 3% SO_2 by volume. The temperature is 293°K and the pressure is 101.3 kPa.

Λύση:

- Determine the mole fractions of the pollutants in the gas phase, Y_1 and Y_2 . Then, sketch and label the drawing of the system as shown in Figure 11-9.

$$\begin{aligned} Y_1 &= 3\% \text{ SO}_2 \text{ by volume} \\ &= 0.03 \text{ mole fraction of SO}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_2 &= 90\% \text{ reduction of SO}_2 \text{ from inlet concentration} \\ &= (10\%) (Y_1) \\ &= (0.10) (0.03) \\ &= 0.003 \text{ mole fraction of SO}_2 \end{aligned}$$

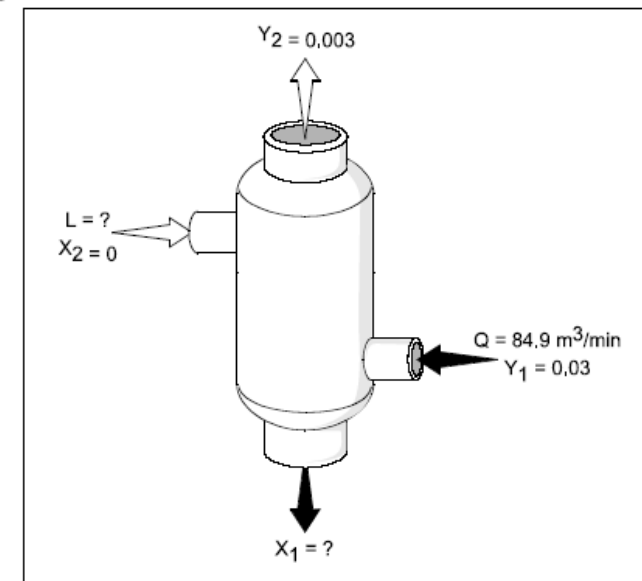


Figure 11-9. Material balance for Example 11-2



Παράδειγμα - συν.

- Determine the mole fraction of SO₂ in the liquid leaving the absorber to achieve the required removal efficiency. At the minimum liquid flow rate, the gas mole fraction of pollutants going into the absorber, Y₁, will be in equilibrium with the liquid mole fraction of pollutants leaving the absorber, X₁, (the liquid will be saturated with SO₂). At equilibrium:**

$$Y_1 = H' X_1$$

and Henry's law constant from Example 11-1 is

$$H' = 42.7 \frac{\text{mole fraction of SO}_2 \text{ in air}}{\text{mole fraction of SO}_2 \text{ in water}}$$

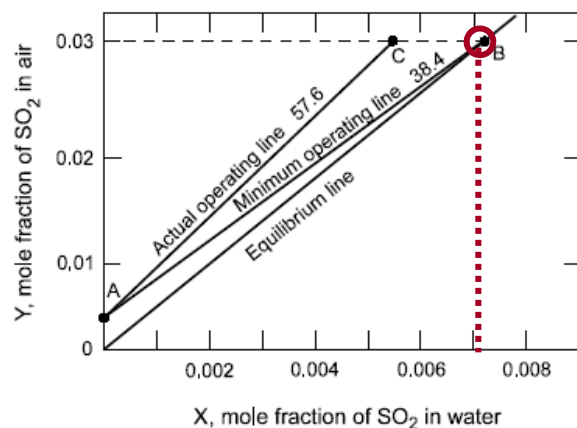


Figure 11-10. Graphical solution to Example 11-2

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{Y_1}{H'} \\ &= \frac{0.03}{42.7} \\ &= 0.000703 \end{aligned}$$



Παράδειγμα - συν.

$$Y_1 - Y_2 = \frac{L_m}{G_m}(X_1 - X_2) \quad (11-15)$$

3. Calculate the minimum liquid-to-gas ratio using Equation 11-15.

$$Y_1 - Y_2 = \frac{L_m}{G_m}(X_1 - X_2)$$

Therefore,

$$\frac{L_m}{G_m} = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2}$$

$$\frac{L_m}{G_m} = \frac{0.03 - 0.003}{0.000703 - 0}$$

$$= 38.4 \frac{\text{g - mol of water}}{\text{g - mol of air}}$$

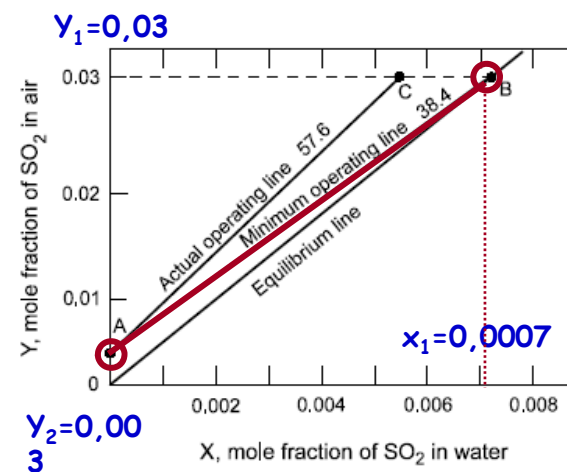


Figure 11-10. Graphical solution to Example 11-2



Παράδειγμα - συν.

4. Convert the exhaust stream flow rate, Q_G , to the exhaust gas molar flow rate, G_m (from units of m^3/min to units of $\text{g-mol}/\text{min}$). At 0°C and 101.3 kPa , there are $0.0224 \text{ m}^3/\text{g-mol}$ for an ideal gas.

First, convert the volume of gas from 0 to 20°C (from 273 to 293°K). At 20°C :

$$0.0224 \text{ m}^3 / \text{g - mol} \left(\frac{293}{273} \right) = 0.024 \text{ m}^3 / \text{g - mol of air}$$

Therefore,

$$G_m = Q_G \left(\frac{1 \text{ g - mol of air}}{0.024 \text{ m}^3} \right)$$

Given: $Q_G = 89.4 \text{ m}^3/\text{min}$

$$\begin{aligned} G_m &= 89.4 \text{ m}^3 / \text{min} \left(\frac{1 \text{ g - mol}}{0.024 \text{ m}^3} \right) \\ &= 3,538 \text{ g - mol of air / min} \end{aligned}$$

Παράδειγμα - συν.

5. Calculate the minimum liquid flow rate, L_{\min} . The minimum liquid-to-gas ratio was calculated in step 3.



$$\left(\frac{L_m}{G_m}\right)_{\min} = 38.4 \frac{\text{g - mol of water}}{\text{g - mol of air}}$$

Therefore,

$$(L_m)_{\min} = G_m(38.4)$$

From step 4:

$$G_m = 3,538 \text{ g-mol of air/min}$$

$$(L_m)_{\min} = \left(3,538 \frac{\text{g - mol of air}}{\text{min}}\right) \left(38.4 \frac{\text{g - mol of water}}{\text{g - mol of air}}\right)$$

$$= 136,000 \frac{\text{g - mol of water}}{\text{min}}$$

$$= 136.0 \frac{\text{kg - mol of water}}{\text{min}}$$

Converting to mass units :

$$= \left(136.0 \frac{\text{kg - mol}}{\text{min}}\right) \left(\frac{18 \text{ kg}}{\text{kg - mol}}\right)$$

$$(L_m)_{\min} = 2,448 \text{ kg/min}$$



Παράδειγμα - συν.

6. Figure 11-10 illustrates the graphical solution for this problem. To obtain the actual operating line, multiply the minimum operating line by 1.5.

$$\begin{aligned} AC &= 1.5 AB \\ AC &= 1.5 (38.4) \\ &= 57.6 \end{aligned}$$

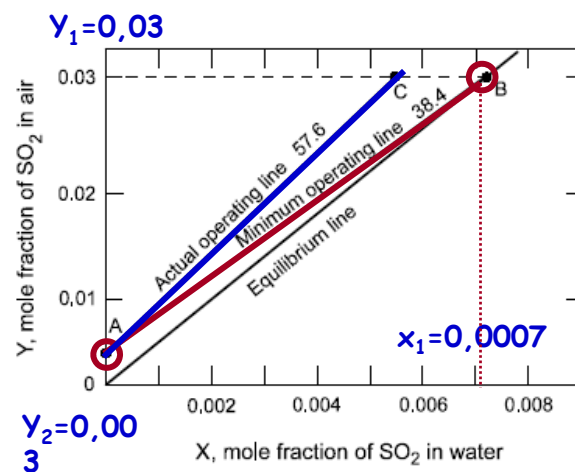


Figure 11-10. Graphical solution to Example 11-2



Παράδειγμα - συν.

Example 11-3

This example illustrates the use of Figure 11-11 for computing the minimum allowable diameter for a packed tower. For the scrubber in Example 11-2, determine the column diameter if the operating liquid rate is 1.5 times the minimum. The gas velocity should be no greater than 75% of the flooding velocity, and the packing material is two-inch ceramic Intalox saddles.

Λύση:

1. **Determine the actual gas and liquid flow rates for the system.** For Example 11-2, the gas molar flow rate in the absorber, G_m , was 3,538 g-mol/min and the minimum liquid flow rate, L_{min} , was 2,448 kg/min. The actual liquid flow rate in the absorber should be 1.5 times the minimum flow rate:

$$\begin{aligned}L &= L_{min} \times 1.5 \\ &= (2,448 \text{ kg/min}) (1.5) \\ &= 3,672 \text{ kg/min}\end{aligned}$$

Assuming the molecular weight of the exhaust gas is 29 kg/mol, convert the gas molar flow rate (G_m) to mass flow rate (G).

$$\begin{aligned}G &= G_m \times (29 \text{ kg/kg-mol}) \\ G &= (3,538 \text{ g-mol/min})(29 \text{ kg/kg-mol}) \\ &= (3.538 \text{ kg-mol/min})(29 \text{ kg/kg-mol}) \\ &= 102.6 \text{ kg/min}\end{aligned}$$

Παράδειγμα - συν.

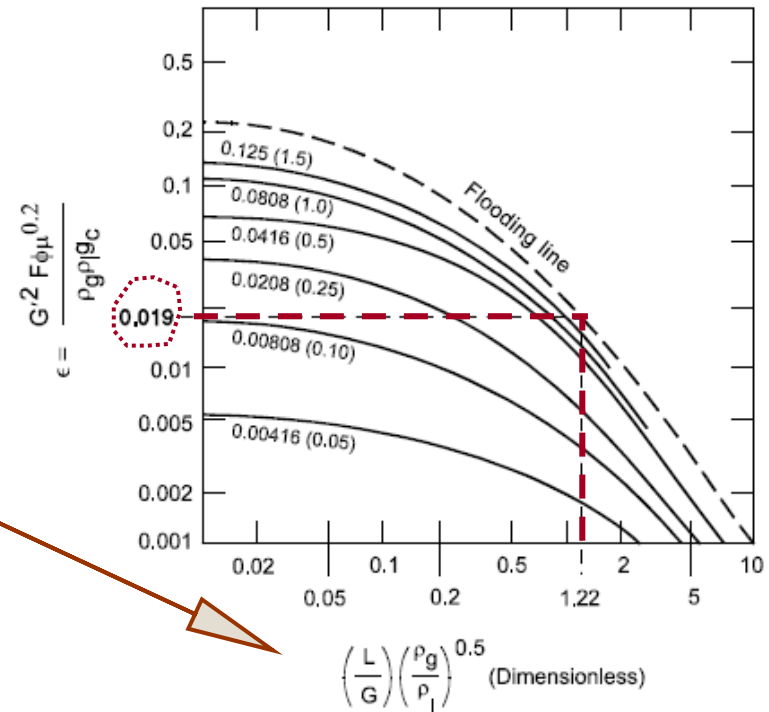
2. Using Equation 11-16, calculate the abscissa for Figure 11-11.

$$\text{Abscissa} = \left(\frac{L}{G} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5}$$

The densities of air and water at 30°C are:

$$\begin{aligned} \rho_g &= 1.17 \text{ kg/m}^3 \\ \rho_l &= 1,000 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Abscissa} = \left(\frac{3,672}{102.6} \right) \left(\frac{1.17}{1,000} \right)^{0.5} = 1,22$$





Παράδειγμα - συν.

4. Calculate the superficial flooding velocity, G' using Equation 11-17. The superficial flooding velocity is the flow rate per unit of cross-sectional area of the tower.

$$G' = \left[\frac{(\varepsilon)(\rho_g)(\rho_l)(g_c)}{F\phi\mu_l^{0.2}} \right]^{0.5}$$

Given:

- $\rho_g = 1.17 \text{ kg/m}^3$, density of air at 30°C
 $\rho_l = 1,000 \text{ kg/m}^3$, density of water at 30°C
 $g_c = 9.82 \text{ m/s}^2$, the gravitational constant
 $F = 40 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$ ($131 \text{ m}^2/\text{m}^3$), the packing factor for two-inch ceramic Intalox saddles (see Table 11-5)
 $\phi = 1.0$, the ratio of specific gravity of the scrubbing liquid(water) to that of water
 $\mu_l = 0.0008 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, the viscosity of liquid

From step 3: $\varepsilon = 0.019$

$$G' = \left[\frac{(0.019)(1.17)(1000)(9.82)}{(1)(131)(0.0008)^{0.2}} \right]^{0.5}$$

$$= 2.63 \text{ kg / s} \cdot \text{m}^2 \text{ at flooding}$$

Packing	Size (in.)	Weight (lb/ft ²)	Surface area, a (ft ² /ft ³ packing volume)	Void fraction (%)	Packing factor, F (ft ² /ft ³)
Intalox saddles (ceramic)	1/4	54	300	75	725
	1/2	45	190	78	200
	1	44	78	77	98
	2	42	36	79	40

Από τον πίνακα

5. Calculate the superficial gas velocity at operating conditions ($G'_{\text{operating}}$) using Equation 11-18.

$$G'_{\text{operating}} = (f)(G'_{\text{flooding}})$$

Where: $f = 75\%$

From step 4: $G'_{\text{flooding}} = 2.63 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$

$$G'_{\text{operating}} = (0.75)(2.63 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2)$$

$$= 1.97 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$$



Παράδειγμα - συν.

6. Calculate the cross-sectional area of the packed tower using Equation 11-19.

$$A = \frac{G}{G'_{\text{operating}}}$$

From step 1: $G = 102.6 \text{ kg/min}$

From step 5: $G'_{\text{operating}} = 1.97 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$

$$\begin{aligned} A &= \frac{(102.6 \text{ kg/min})(1 \text{ min}/60 \text{ sec})}{1.97 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2} \\ &= 0.87 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

7. Calculate the tower diameter using Equation 11-20.

$$d_t = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{0.5}$$

Where: $\pi = 3.14$

From step 6: $A = 0.87 \text{ m}^2$

$$\begin{aligned} d_t &= \left[\frac{4(0.87)}{3.14} \right]^{0.5} \\ &= 1.05 \text{ m} \\ &\approx 1.1 \text{ m} \end{aligned}$$



Παράδειγμα - συν.

8. Use Figure 11-11 to estimate the pressure drop across the absorber, Δp , once the superficial gas velocity for operating conditions has been set. First, plug $G'_{\text{operating}}$ back into Equation 11-17 and rearrange the equation to get the ordinate, ϵ .

$$\epsilon = \frac{G'^2 \phi F \mu_1^{0.2}}{\rho_g \rho_l g_c}$$
$$\epsilon = \frac{(1.97 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2)^2 (1)(131 \text{ m}^2/\text{m}^3)(0.0008 \text{ Pa} \cdot \text{s})^{0.2}}{(1.17 \text{ kg/m}^3)(1,000 \text{ kg/m}^3)(9.82 \text{ m/s}^2)}$$
$$= 0.0106$$

The ordinate equals 0.0106 and the abscissa equals 1.22. Then from Figure 11-13, read Δp . The pressure drop equals **0.0416 m of water/m of packing**.

