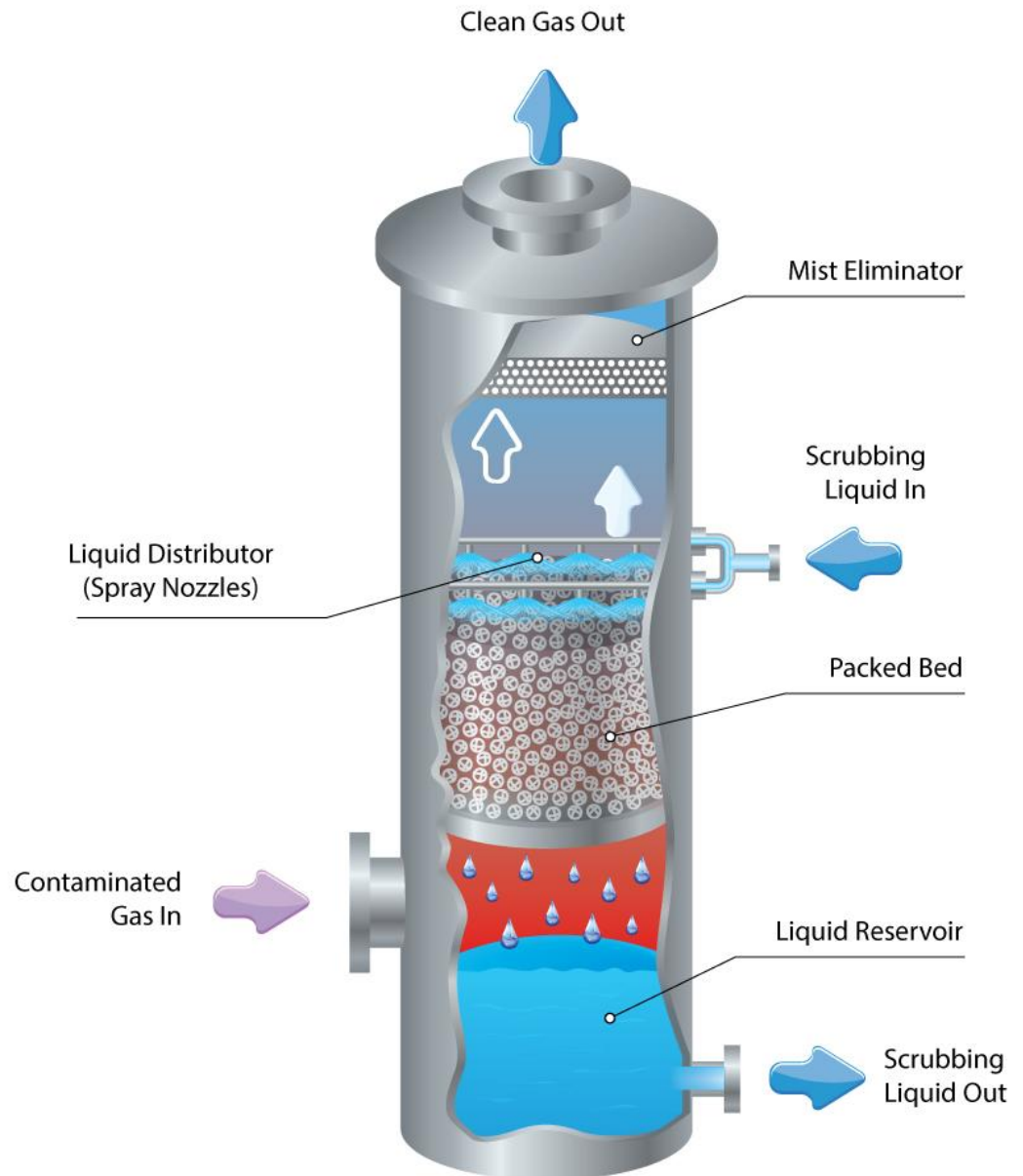


Προσρόφηση αέριων ρύπων Σχεδιασμός πλυντρίδων

Γεράσιμος Λυμπεράτος,
Καθηγητής ΕΜΠ



Πύργοι απορρόφησης (Πλυντρίδες)

- είναι συσκευές καθαρισμού αερίων ρευμάτων που βασίζονται στην ικανότητα μεταφοράς (διάλυσης) των αέριων ρύπων σε ένα υγρό ρεύμα που εισάγεται στον πύργο γι' αυτόν τον σκοπό.
- Η απορρόφηση αυτή μπορεί να είναι είτε φυσική (απλή μεταφορά στην υγρή φάση) είτε χημική (υποβοηθούμενη από αντίδραση του ρύπου με μια χημική ένωση που υπάρχει στην υγρή φάση).

Σχεδιασμός των πλυντρίδων

- Βασίζεται στην καμπύλη ισορροπίας υγρού-αερίου του προς απομάκρυνση ρύπου
- Τα πλεονεκτήματα χρησιμοποίησης των πλυντρίδων έναντι άλλων διατάξεων απορρόφησης αέριων ρύπων από αέρια ρεύματα, όπως τα φίλτρα ενεργού άνθρακα, είναι:
 - Έχουν χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.
 - Τα αιωρούμενα σωματίδια που τυχόν υπάρχουν στο αέριο ρεύμα δεν επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργία τους.
 - Δεν υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με τη θερμοκρασία και την υγρασία του εισερχόμενου αέριου συστήματος
 - Δεν απαιτείται ιδιαίτερη συντήρησή τους, μιας και η κατασκευή μιας πλυντρίδας χωρίς κινητά μέρη, είναι πολύ απλή.

Στην κατάσταση ισορροπίας η διαλυτότητα των αερίων διέπεται από τον νόμο του Henry:

$$p = K_H \cdot x_{eq}$$

όπου x_{eq} το μοριακό κλάσμα ισορροπίας του αερίου συστατικού στην υγρή φάση

K_H σταθερά Henry, (atm)

p η μερική πίεση του αερίου συστατικού στην αέρια φάση (atm)

Εναλλακτικά η σταθερά Henry εκφράζεται αδιάστατα ως λόγος μοριακών κλασμάτων σύμφωνα με τη σχέση:

$$y_{eq} = K'_H \cdot x_{eq}$$

όπου

K'_H σταθερά Henry

y_{eq} το μοριακό κλάσμα του αερίου συστατικού στην
αέρια φάση

Η σταθερά του Henry ($\times 10^{-5}$)(atm) διαφόρων αερίων σε σχέση με τη θερμοκρασία

Αέρια	Θερμοκρασία (°C)						
	0	5	10	15	20	25	30
Ακετυλένιο	0,72	0,84	0,96	1,08	1,21	1,33	1,46
Αέρας	0,43	0,49	0,55	0,61	0,66	0,72	0,77
CO ₂	0,73	0,88	1,04	1,22	1,42	1,64	1,86
CO	0,35	0,40	0,44	0,49	0,54	0,58	0,62
H ₂	0,58	0,61	0,64	0,66	0,68	0,70	0,73
Ethane	0,13	0,16	0,19	0,23	0,26	0,30	0,34
H ₂ S	26,8	31,5	36,70	42,30	48,30	54,5	60,9
Methane	0,22	0,26	0,30	0,34	0,38	0,41	0,45
N ₂ O	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26	0,29	0,30
N ₂	0,53	0,60	0,67	0,74	0,28	0,87	0,92
NO ₂	-	1,17	1,41	1,66	1,98	2,25	2,59
O ₂	0,25	0,29	0,33	0,36	0,40	0,44	0,48

Άσκηση

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα διαλυτότητας του SO_2 σε καθαρό νερό υπολογίστε τη σταθερά Henry K_H σε ατμοσφαιρική πίεση (760 mmHg) και για θερμοκρασία 40°C

Μερική πίεση του SO₂ (mmHg) σε υδατικά διαλύματα σε πίεση 760 mm/Hg

g SO ₂ /100g H ₂ O	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
0,0	-	-	-	-	-	-	-
0,5	21	29	42	60	83	111	144
1,0	42	59	85	120	164	217	281
1,5	64	90	129	181	247	328	426
2,0	86	123	176	245	333	444	581
2,5	108	157	224	311	421	562	739
3,0	130	191	273	378	511	682	-
3,5	153	227	324	447	603	-	-
4,0	176	264	376	518	698	-	-
4,5	199	300	428	588	-	-	-
5,0	223	338	482	661	-	-	-

π.χ. για $c_{\text{SO}_2} = 1,5 \text{ gSO}_2/100 \text{ g H}_2\text{O}$

το μοριακό κλάσμα SO_2 στην υγρή φάση υπολογίζεται:
($100/18=5,55$)

$$x = \frac{c_{\text{SO}_2} / 64}{c_{\text{SO}_2} / 64 + 5,55} = \frac{\frac{1,5}{64}}{\frac{1,5}{64} + 5,55} = 0,0042|$$

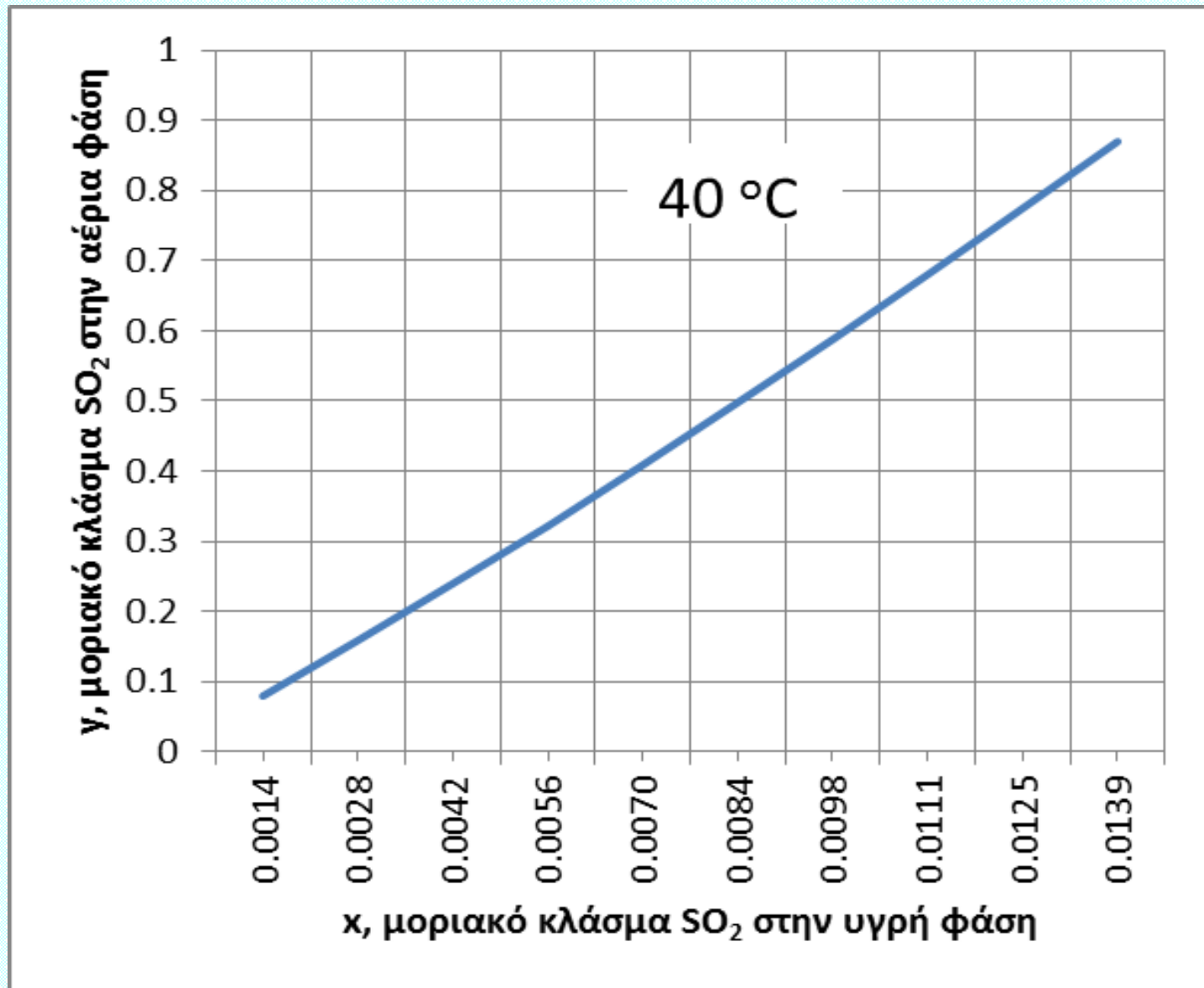
ενώ το μοριακό κλάσμα SO_2 στην αέρια φάση υπολογίζεται:

$$y = \frac{181}{760} = 0,238|$$

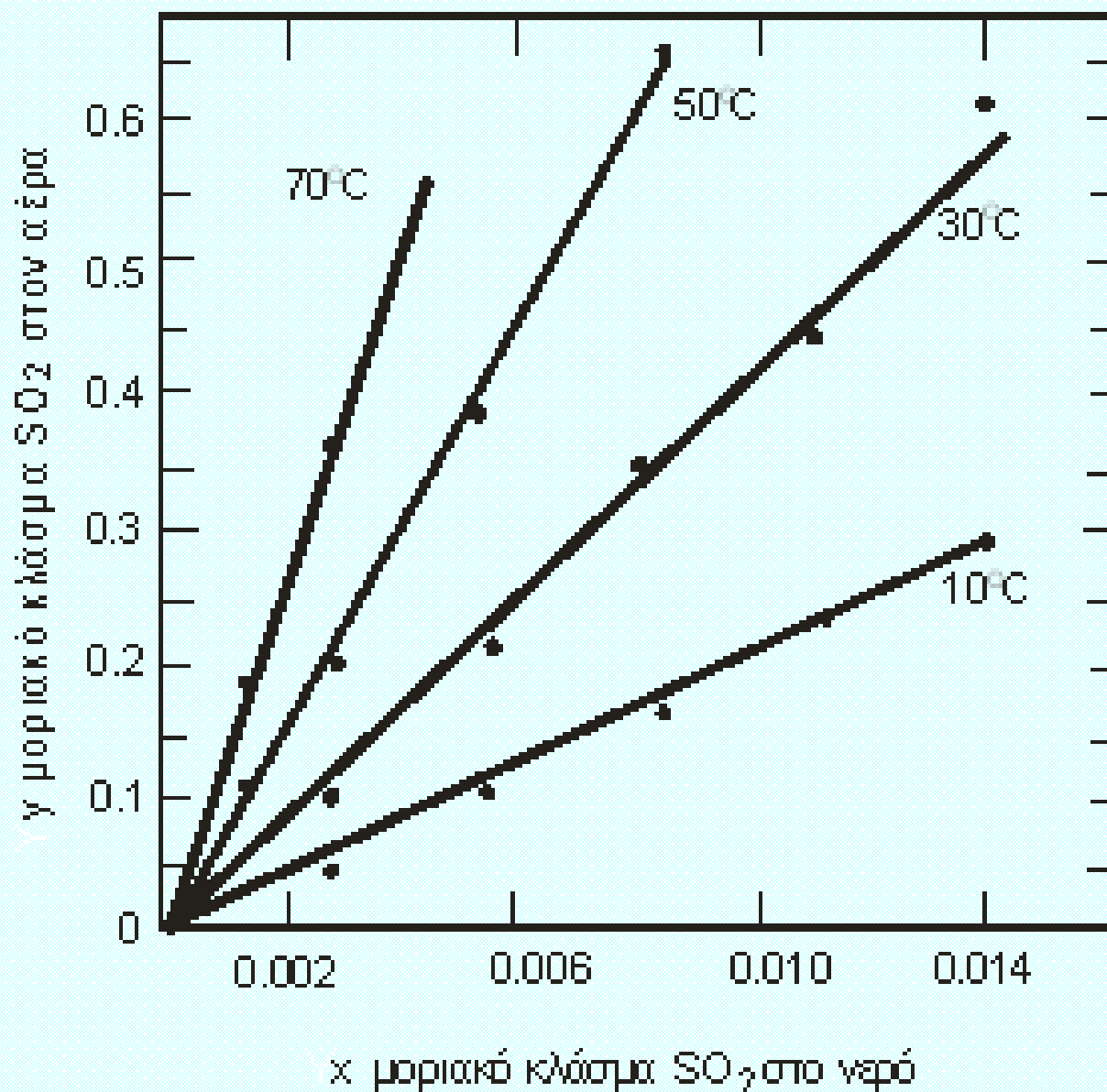
Συμπληρώνουμε τον παρακάτω πίνακα

gSO ₂ /100 g H ₂ O	Μερική πίεση SO ₂ (mmHg)	x	y
0,5	60	0,0014	0,079
1	120	0,0028	0,158
1,5	181	0,0042	0,238
2	245	0,0056	0,322
2,5	311	0,0070	0,409
3	378	0,0084	0,497
3,5	447	0,0098	0,588
4	518	0,0111	0,682
4,5	588	0,0125	0,774
5	661	0,0139	0,870

Η κλίση είναι 63,59 (σταθερά Henry K_H')



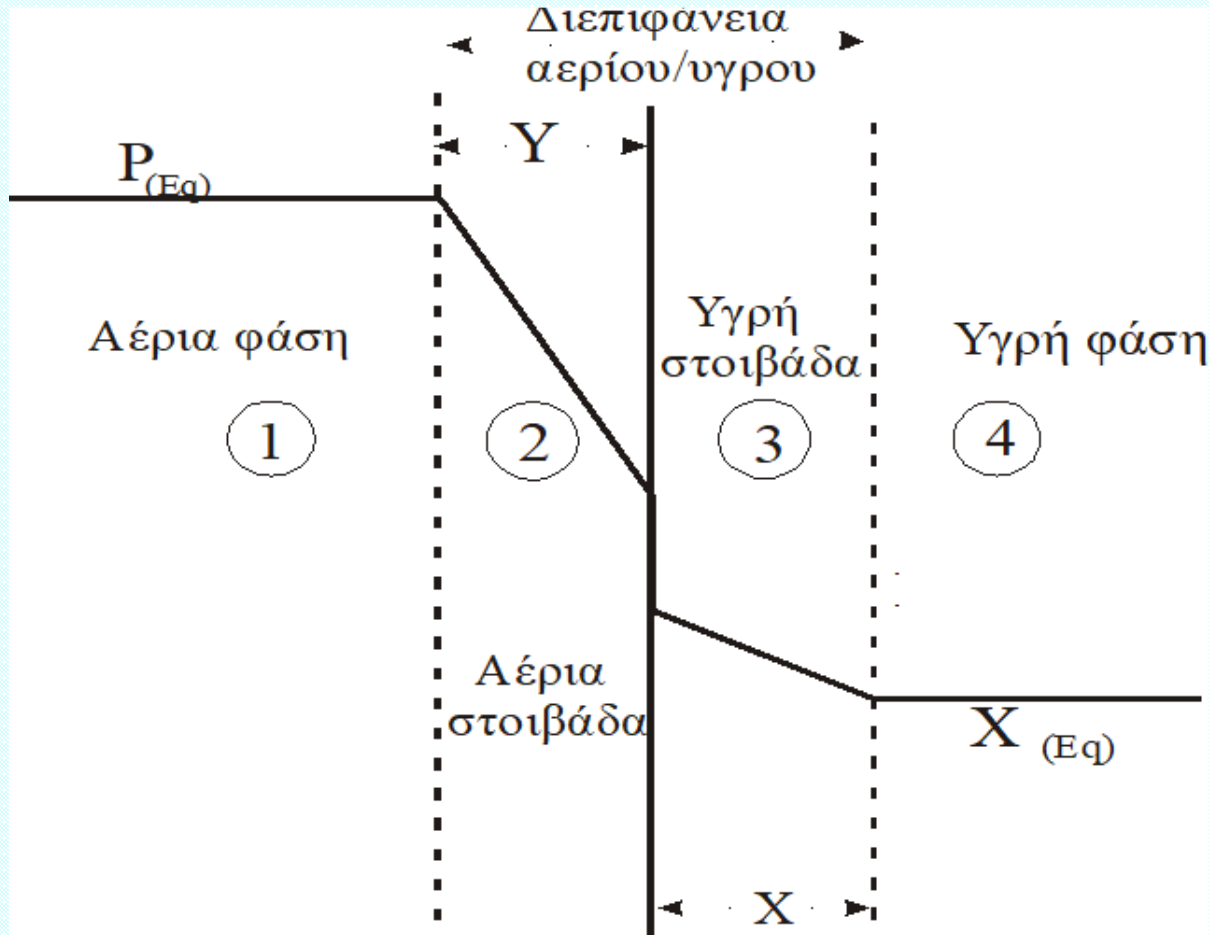
Καμπύλες ισορροπίας σε διάφορες θερμοκρασίες για ατμοσφαιρική πίεση



Διαδικασία απορρόφησης αέριων ρύπων σε υγρά

- Στη διαλυτότητα των αερίων ρύπων στο νερό βασίζεται ο μηχανισμός απομάκρυνσής τους είτε από την αέρια φάση (**έκπλυση**) είτε από την υγρή φάση (**απογύμνωση**).
- Οι συσκευές που πραγματοποιούν αυτές τις διεργασίες ονομάζονται **πλυντρίδες (scrubbers)** ή **απογυμνωτές (strippers)** αντίστοιχα
- Η πλέον ικανοποιητική θεωρία είναι η θεωρία των δύο στοιβάδων

Θεωρία δύο στοιβάδων

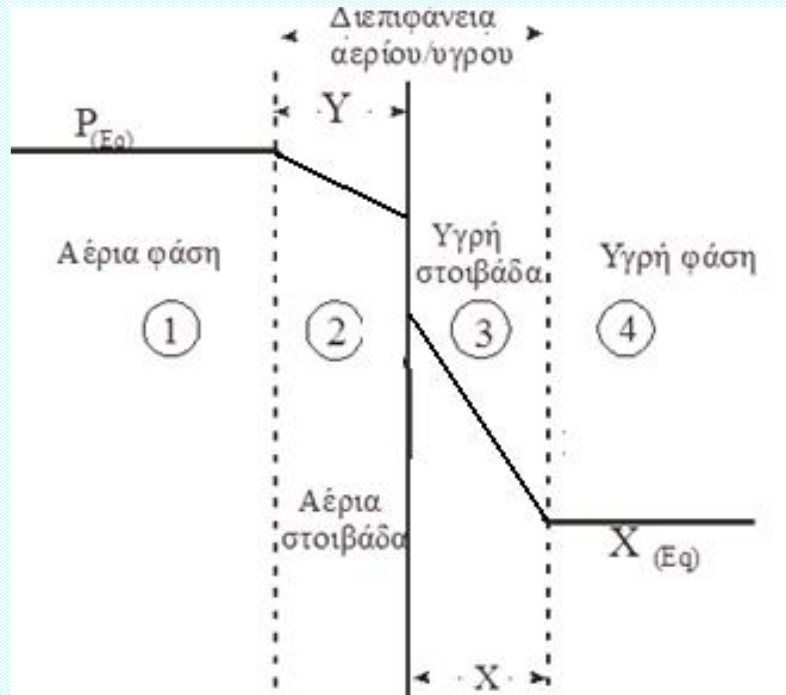


1. Μεταφορά στη διεπιφάνεια της αέριας στοιβάδας
2. διείσδυση στην αέρια στοιβάδα
3. Πέρασμα στην υγρή στοιβάδα
4. Μεταφορά στην υγρή φάση

Το πιο αργό στάδιο καθορίζει και το συνολικό ρυθμό μεταφοράς μάζας

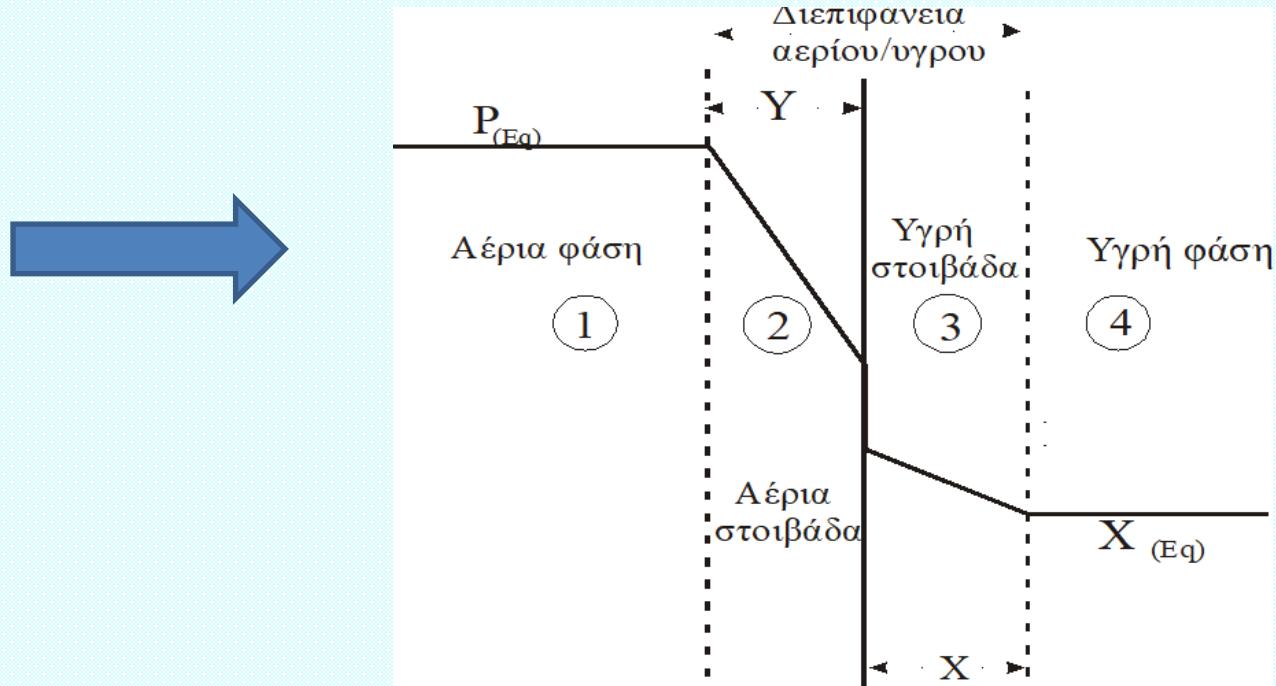
- Για τα αέρια που διαλύονται ελάχιστα στο υγρό, όπως το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα στο νερό, η διάχυση στην υγρή στοιβάδα γύρω από τη διεπιφάνεια ελέγχει το συνολικό ρυθμό μεταφοράς (3^ο στάδιο) – **απογυμνωτές**
- για τα αέρια που είναι πολύ διαλυτά στο νερό, όπως η αμμωνία, τότε τον έλεγχο της όλης διεργασίας μεταφοράς τον έχει η στοιβάδα του αερίου γύρω από τη διεπιφάνεια (2^ο στάδιο) - **πλυντρίδες**

Στους απογυμνωτές (strippers) ο έλεγχος της μεταφοράς μάζας γίνεται από την k_l



$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{K_H \cdot k_g} + \frac{1}{k_l}$$

Στις πλυντρίδες (scrubbers) ο έλεγχος της μεταφοράς μάζας γίνεται από τον k_g



$$\frac{1}{K_{OG}} = \frac{1}{k_g} + \frac{K_H''}{k_1}$$

A blue arrow points from the k_1 term in the denominator of the second fraction to the liquid phase region (4) of the diagram above.

- Η προηγούμενη ανάλυση αναφέρεται στη διεπιφάνεια υγρού/αερίου.
- Αν ορίσουμε την ειδική διεπιφάνεια a ως το πηλίκο της διεπιφάνειας ανά μονάδα όγκου του πύργου απορρόφησης, οι συντελεστές μεταφοράς μάζας $K_{OG}a$, $K_{OL}a$, k_ga και k_la αναφέρονται πια στον όγκο του πύργου απορρόφησης.
- Στην περίπτωση των πύργων με πληρωτικό υλικό, γνωρίζοντας αυτούς τους συντελεστές, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την ειδική επιφάνεια του πύργου (m^2/m^3) που απαιτείται ώστε να πετύχουμε τον επιθυμητό διαχωρισμό.
- Οι συντελεστές αυτοί προσδιορίζονται είτε εμπειρικά από πιλοτικές μονάδες, είτε μέσω αδιάστατων αριθμών

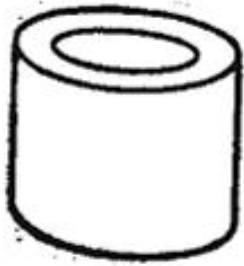
Τιμές του $K_{OL}a$ για συστήματα ελεγχόμενα από την υγρή στοιβάδα

Αέριος ρύπος	Υγρό απορρόφησης	$K_{OL}a$ (L/h/m ³)
Διοξείδιο του άνθρακα	4% NaOH	24,03
Υδροθείο	4% NaOH	70,48
Διοξείδιο του θείου	Νερό	35,24
Υδροκυάνιο	Νερό	70,48
Φορμαλδεΰδη	Νερό	70,48
Χλώριο	Νερό	54,46
Βρώμιο	4% NaOH	59,26
Διοξείδιο χλωρίου	Νερό	70,48

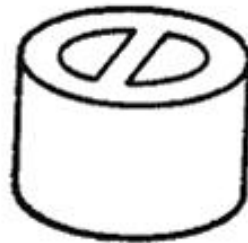
Τιμές του K_{OG} για συστήματα ελεγχόμενα από την αέρια στοιβάδα

Αέριος ρύπος	Υγρό απορρόφησης	K_{OGa} kmol/h/m ³ /atm
Υδροχλώριο	Νερό	224,25
Υδροφθόριο	Νερό	96,1
Αμμωνία	Αραιό οξύ	208,23
Χλώριο	8% NaOH	172,99
Διοξείδιο του θείου	11% Na ₂ CO ₃	142,56

Τα πλέον συνηθισμένα είδη πληρωτικού υλικού



Rasching
ring



Lessing
ring



Cross-partition
ring



Berl
saddle



Single spiral
ring



Double spiral
ring

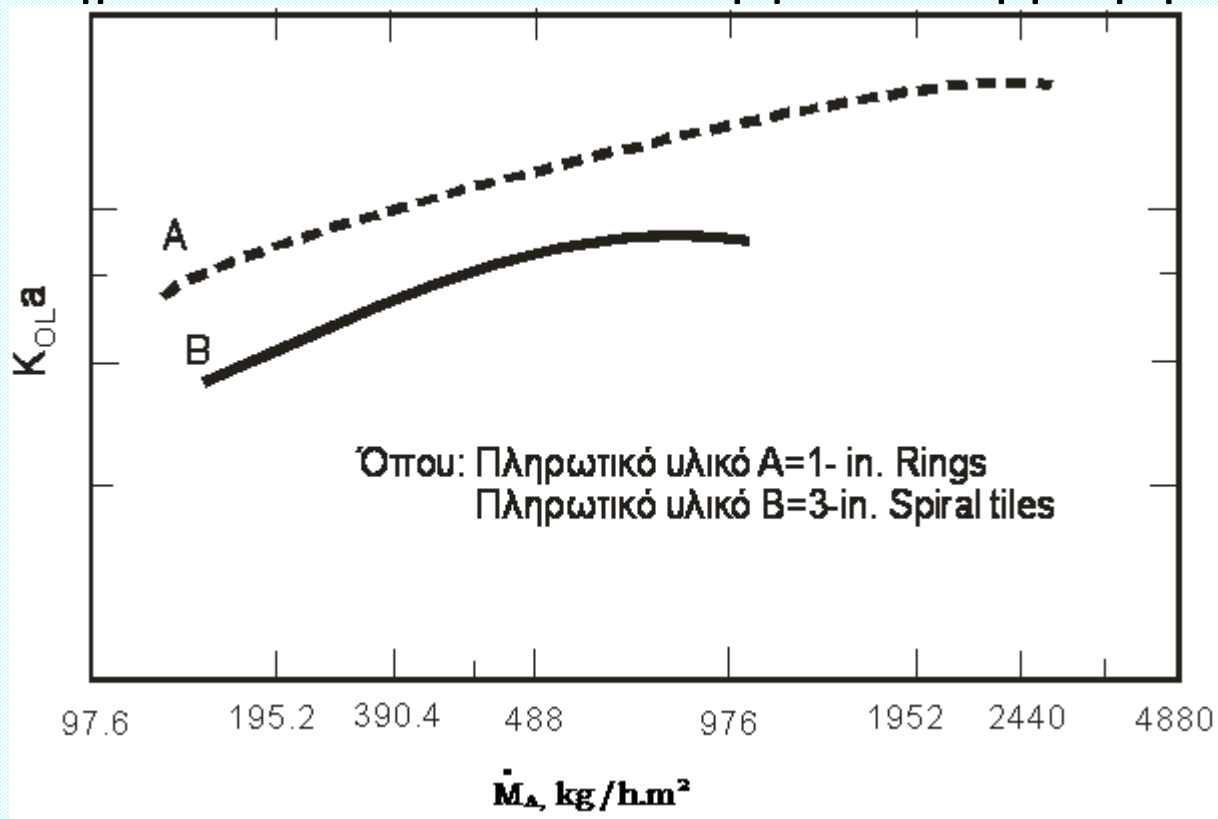


Triple spiral
ring



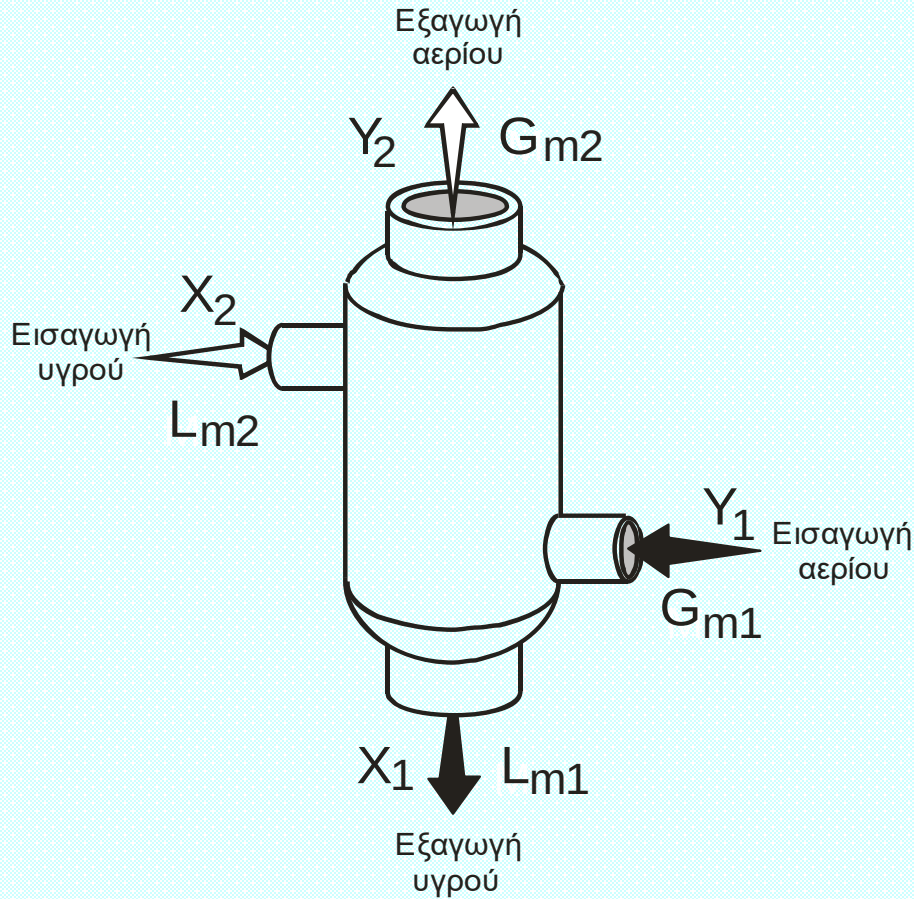
Intalax
saddle

- Οι τιμές των K_{OL} και K_{OG} για το ίδιο σύστημα υγρού-αερίου εξαρτώνται και από το είδος του πληρωτικού υλικού καθώς και από την αέρια επιφανειακή φόρτιση $\dot{M}_A$ ($\text{kg/h}\cdot\text{m}^2$).
- Τέτοια διαγράμματα παρέχονται από τους κατασκευαστές των πληρωτικών υλικών των πύργων απορρόφησης.

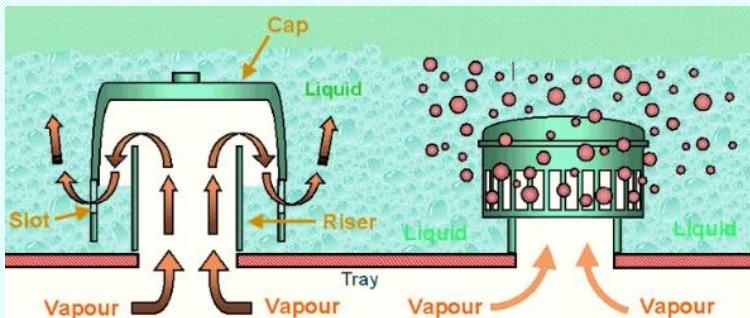


Σύγκριση του συνολικού συντελεστή απορρόφησης για δύο διαφορετικά πληρωτικά υλικά στο σύστημα SO_2 -νερού (Perry 1973)

Πύργος απορρόφησης κατ' αντήρροή



- Από τη βάση του πύργου εισάγεται το αέριο που περιέχει τον αέριο ρύπο.
- Από την κορυφή του πύργου ψεκάζεται το υγρό που θα απορροφήσει τον ρύπο.
- Ο πύργος μπορεί να έχει πληρωτικό υλικό (packed tower) ή “καμπανάκια” φυσαλίδων (bubble-cup trays) ή άλλο μηχανισμό που να εξασφαλίζει καλή επαφή αερίου-υγρού.



Σχεδιασμός

Γνωρίζοντας

- την παροχή του αερίου
- συγκέντρωση του ρύπου σ' αυτό
- τον επιθυμητό καθαρισμό του αερίου

Πρέπει να υπολογίσουμε

- την παροχή του υγρού
- το ύψος στήλης
- τη διάμετρο της στήλης

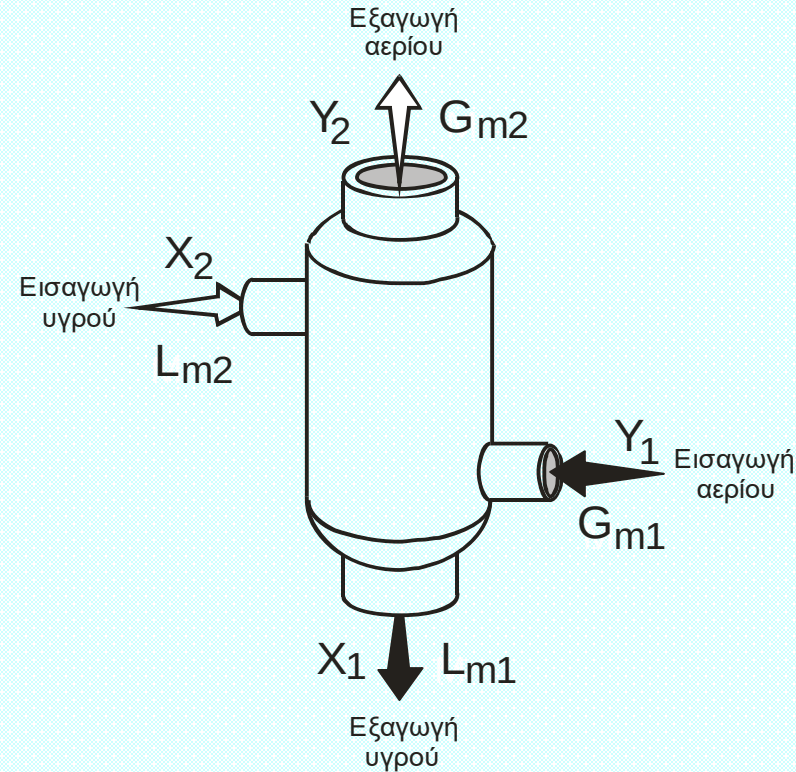
Η πιο συνηθισμένη περίπτωση:

Η παροχή του αερίου G (moles/min) καθώς και η συγκέντρωση του ρύπου στο αέριο (y_1) είναι γνωστά.

Επίσης είναι δεδομένη η επιθυμητή συγκέντρωση του ρύπου στην έξοδο του αερίου (y_2) από την πλυντρίδα.

Η συγκέντρωση x_2 του ρύπου στο εισερχόμενο υγρό (νερό) είναι μηδενική διότι συνήθως χρησιμοποιούμε καθαρό νερό ή καθαρό (από τον ρύπο) χημικό διάλυμα.

Οπότε πρέπει να υπολογίσουμε την ελάχιστη παροχή του νερού



- Η συγκέντρωση x_1 του ρύπου στο εξερχόμενο υγρό μπορεί να είναι το πολύ αυτή που αντιστοιχεί σε ισορροπία με την συγκέντρωση του ρύπου στην αέρια φάση
- Οπότε μπορεί να προκύψει συγκεκριμένα η **ελάχιστη παροχή του υγρού** από το συνολικό ισοζύγιο:

L η παροχή του υγρού σε moles/min

G η παροχή του αερίου σε moles/min

$$y_1 - y_2 = \frac{L}{G} (x_1 - x_2)$$

- Για $x_2=0$ έχουμε

$$L_{\min} = \frac{GK'_H}{y_1} (y_1 - y_2)$$

- Τότε για λόγους ασφάλειας παίρνουμε:

$$L = 1,5L_{\min}$$

Υπολογισμός της παροχής υγρού

Τυπικό διάγραμμα γραμμής λειτουργίας



$$y_1 - y_2 = \frac{L}{G} (x_1 - x_2)$$

$$L_{\min} = \frac{GK'_H}{y_1} (y_1 - y_2)$$

$$L = 1,5L_{\min}$$

Διαστασιολόγηση

Επειδή θεωρείται ότι η ποσότητα του ρύπου που μεταφέρεται από το αέριο στο υγρό είναι μηδαμινή, οι μοριακές παροχές αερίου G και υγρού L παραμένουν σταθερές.

Αν όμως το ποσοστό του ρύπου είναι μεγαλύτερο από 2-3% στην αέρια φάση τότε η υπόθεση αυτή δεν ισχύει.

Ισοζύγιο μάζας σε όγκο dV του πύργου δίνει

$$d(L \cdot x) = d(G \cdot y) = a \cdot \dot{N}_A \cdot dV$$

όπου	x	μοριακό κλάσμα του αερίου ρύπου στην υγρή φάση
	y	μοριακό κλάσμα του αερίου ρύπου στην αέρια φάση
	a	διεπιφάνεια ανά μονάδα όγκου πύργου.

$$V = h \cdot A = -\frac{G}{p \cdot K_{OG} \cdot a} \cdot \int_{p_{A1}}^{p_{A2}} \frac{dp_A}{p_A - p_A^*} = \frac{L}{C_W \cdot K_{OL} \cdot a} \cdot \int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{dC_A}{C_A^* - C_A}$$

V όγκος του πύργου απορρόφησης

h ύψος του πύργου

A επιφάνεια του πύργου

p πίεση του συστήματος

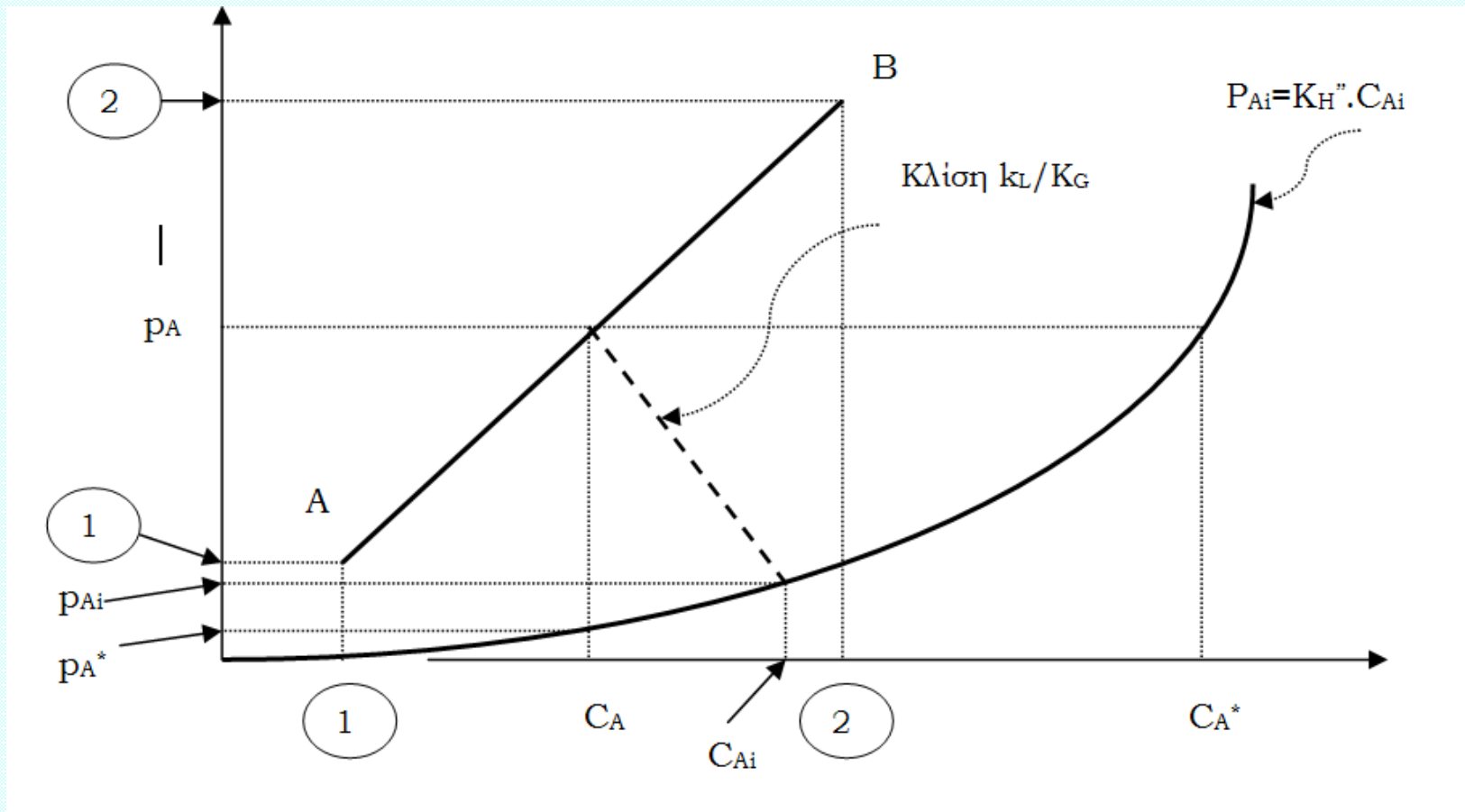
1,2 πυθμένας και κορυφή του πύργου αντίστοιχα

C_w μοριακή συγκέντρωση του νερού (55,5 mol/L)

Η ΑΒ είναι η γραμμή λειτουργίας, με κλίση $(L \cdot P)/(G \cdot C_w)$, και η καμπύλη είναι η γραμμή ισορροπίας (για αραιά συστήματα ευθεία).

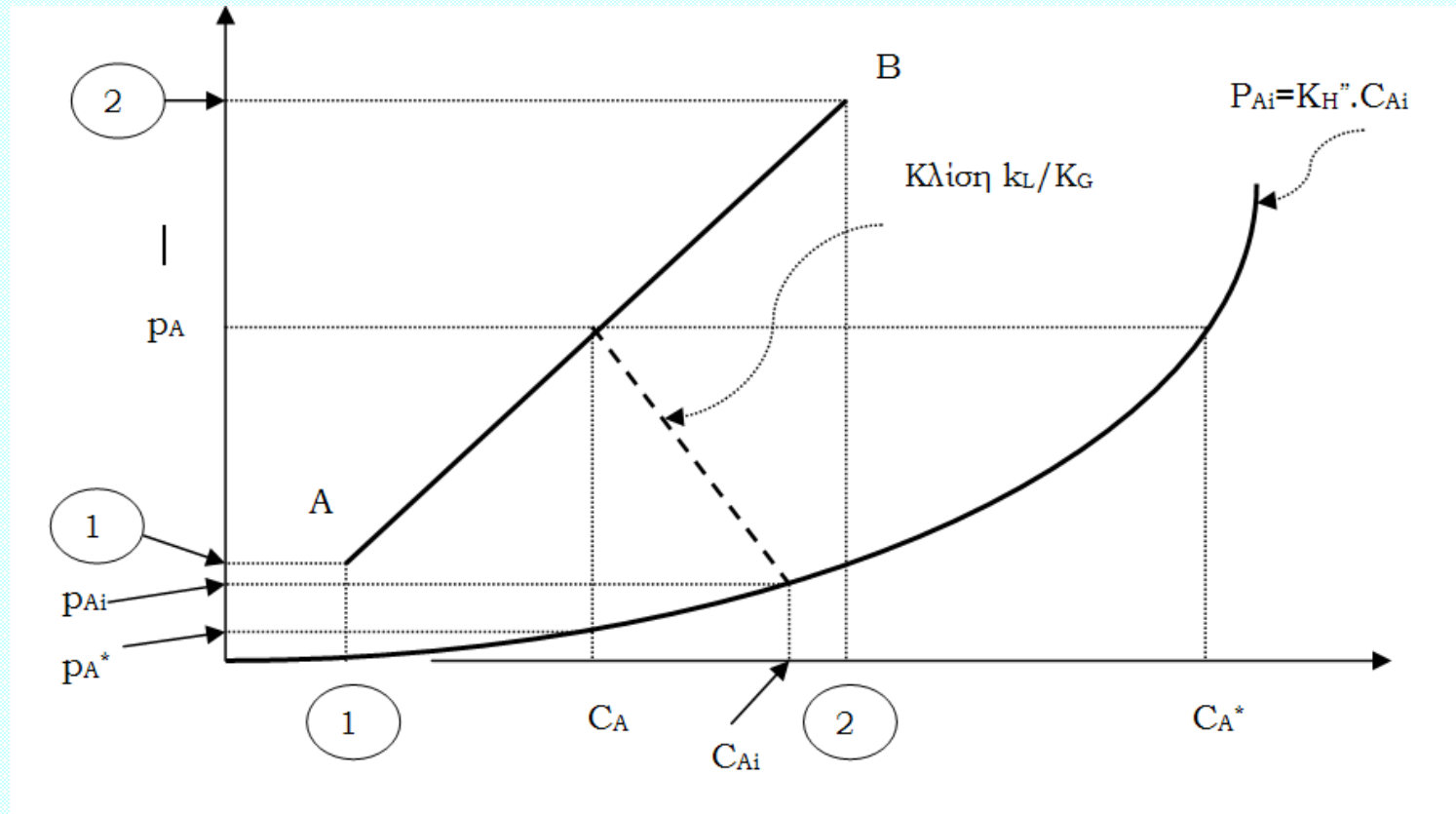
Για κάθε σημείο C_A , p_A βρίσκουμε το p_A^* και υπολογίζουμε τον όρο $1/(p_A - p_A^*)$

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για διάφορες τιμές C_A και p_A πάνω στην γραμμή λειτουργίας υπολογίζουμε γραφικά το ολοκλήρωμα, που δίνει τον όγκο (και το ύψος) του πύργου.



Εναλλακτικά για κάθε σημείο C_A , p_A βρίσκουμε το C_A^* και υπολογίζουμε το $1/(C_A^* - C_A)$.

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για διάφορες τιμές C_A και p_A υπολογίζουμε γραφικά το ολοκλήρωμα, που δίνει τον όγκο (και το ύψος) του πύργου.



Για γραμμική σχέση ισορροπίας

$$V = \frac{G}{p \cdot K_{OG} \cdot a} \cdot \frac{\ln \left[\left(\frac{Y_1}{Y_2} \right) \left(1 - \frac{K'_H G}{L} \right) + \frac{K'_H G}{L} \right]}{1 - \frac{K'_H G}{L}}$$

Άσκηση

Υπολογίστε την ελάχιστη απαιτούμενη παροχή καθαρού νερού για την απομάκρυνση 90% του SO_2 από μία ροή αερίου παροχής $40 \text{ m}^3/\text{min}$ που περιέχει 3% SO_2 κατ' όγκο. Η θερμοκρασία είναι 40°C και η πίεση 760 mm Hg . Η σταθερά Henry είναι:

$$K'_H = 62,69 \frac{\text{μοριακή αναλογία } \text{SO}_2 \text{ στον αέρα}}{\text{μοριακή αναλογία } \text{SO}_2 \text{ στο νερό}}$$

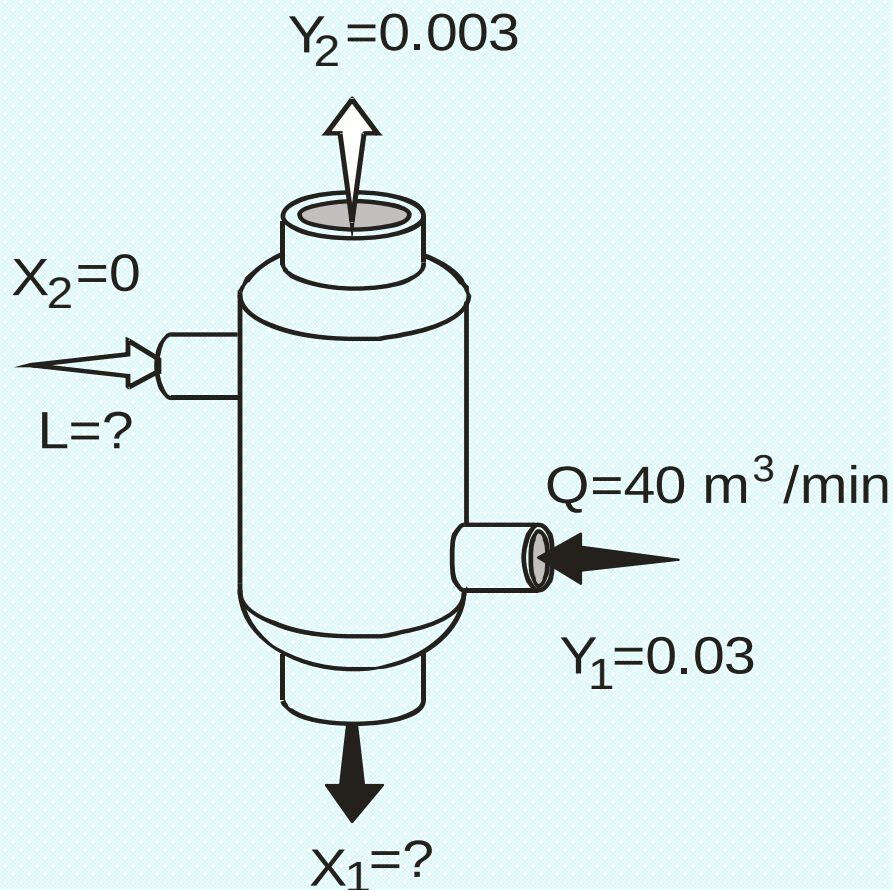
Επίσης αν $K_{OG} a = 100 \text{ kmoles}/(\text{h} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{atm})$ βρείτε τον όγκο της πλυντρίδας

Λύση

Υπολογίζουμε τις μοριακές αναλογίες στην αέρια φάση:

$y_1 = 3\% \text{ SO}_2$ ογκομετρική αναλογία = 0,03 μοριακή αναλογία του SO_2

$y_2 = (10\%)(y_1) = 0,003$ μοριακή αναλογία του SO_2



Η μέγιστη συγκέντρωση του SO₂ στο νερό κατά την έξοδό του από την πλυντρίδα αντιστοιχεί στη συγκέντρωση ισορροπίας.

Η σταθερά Henry είναι: $K'_H = 62,69 \frac{\text{μοριακή αναλογία SO}_2 \text{ στον αέρα}}{\text{μοριακή αναλογία SO}_2 \text{ στο νερό}}$

$$\text{οπότε } X_1 = \frac{Y_1}{K'_H} = \frac{0,03}{62,69} = 0,000479$$

Η ελάχιστη αναλογία υγρού/αερίου υπολογίζεται από τη σχέση

$$L_{\min} = \frac{GK'_H}{y_1} (y_1 - y_2)$$

Υπολογίζουμε τη μαζική παροχή G του αερίου προσαρμοσμένη στις συνθήκες λειτουργίας της πλυντρίδας. Υποθέτουμε ότι έχουμε ιδανικό αέριο:

στους 273K είναι $22.4 \text{ L/min} = 0.0224 \text{ m}^3/\text{mole}$

Η ογκομετρική παροχή του αέρα στους 40°C είναι

$$G = \frac{40 \text{ m}^3 / \text{min}}{0,0224 \text{ m}^3 / \text{mole}} = 1557,2 \text{ mole} / \text{min}$$

Η ελάχιστη απαιτούμενη ροή νερού είναι:

$$L_{\min} = 1557,2 \text{ mole} / \text{min} \cdot (62,69) \cdot \frac{0,03 - 0,003}{0,03} = 87876 \text{ mole} / \text{min}$$

$M_{\text{H}_2\text{O}} = 18$ και $\rho = 1 \text{ kg} / \text{L}$

$$L_{\min} = 87876 \text{ mole} / \text{min} \cdot 18 \text{ g} / \text{mole} = 1581,7 \text{ kg} / \text{min}$$

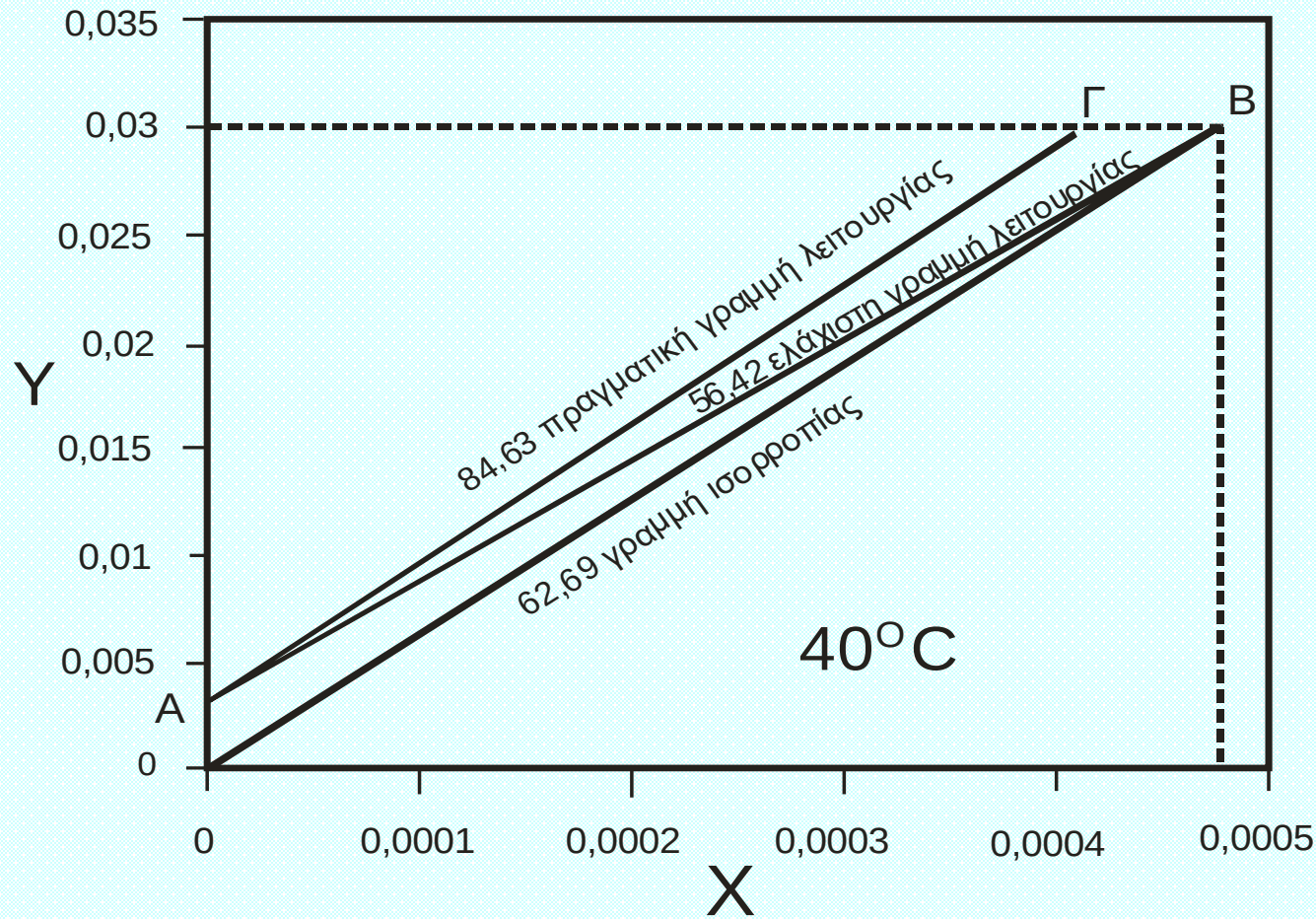
$$L = 1,5 L_{\min} = 2372 \text{ L} / \text{min} = 2.3 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O} / \text{min}$$

Η κλίση είναι $\left(\frac{L}{G}\right)_{\min} = \frac{87876}{1557,7} = 56,42$

$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{σχεδιασμού}} = 56,42 \cdot 1,5 = 84,63$

Για να τοποθετήσουμε την πραγματική γραμμή λειτουργίας ΑΓ πολλαπλασιάζουμε την κλίση της ελάχιστης γραμμής λειτουργίας ΑΒ με 1,5.

$ΑΓ = 1,5 ΑΒ = 1,5 (56,42) = 84,63.$



Εφαρμογή του τύπου:

$$V = \frac{G}{p \cdot K_{OG} \cdot a} \cdot \frac{\ln \left[\left(\frac{Y_1}{Y_2} \right) \left(1 - \frac{K'_H G}{L} \right) + \frac{K'_H G}{L} \right]}{1 - \frac{K'_H G}{L}}$$

δίνει **V=4,6m³**

Υπολογισμός της διαμέτρου μιας στήλης με πληρωτικό υλικό

Έχοντας δεδομένη την αναλογία του υγρού/αερίου, σε μια στήλη με πληρωτικό υλικό:

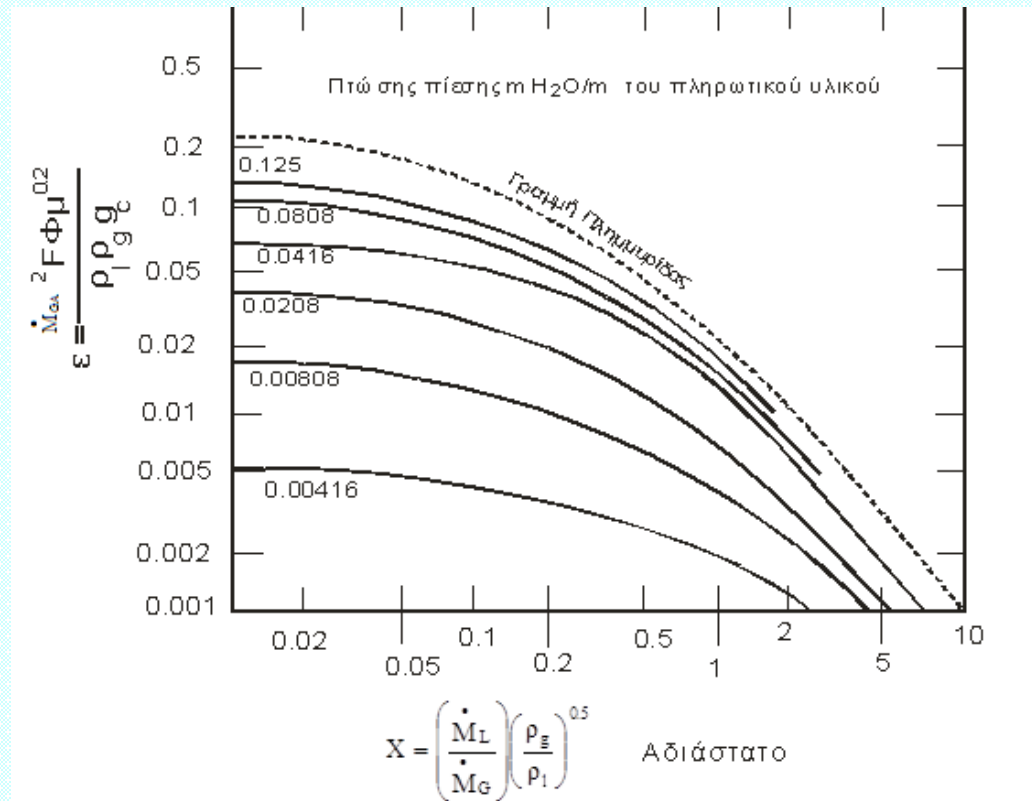
- όσο ελαττώνεται η διάμετρος της στήλης, τόσο αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου και από κάποιο σημείο και πέρα η κάθοδος του υγρού, δια μέσου της ελεύθερης επιφάνειας του πληρωτικού υλικού, αρχίζει να παρεμποδίζεται. Το σημείο αυτό αναφέρεται **ως σημείο φόρτισης** (loading point).
- Επίσης όσο ελαττώνεται η διάμετρος της στήλης τόσο αυξάνεται και η πτώση πίεσης του διερχόμενου αερίου.
- Λίγο μετά το σημείο φόρτισης η ελεύθερη επιφάνεια του πληρωτικού υλικού αρχίζει σταδιακά να καλύπτεται με το υγρό και από κάποια διάμετρο και πέρα η κορυφή της στήλης καλύπτεται πλήρως από το υγρό μη επιτρέποντας το επί πλέον προστιθέμενο υγρό να κατρακυλά προς τα κάτω και έτσι εμφανίζεται **το φαινόμενο της πλημμυρίδας** (flooding).

Υπολογισμός της διαμέτρου μιας στήλης με πληρωτικό υλικό

- Η ταχύτητα του αερίου όταν εμφανίζεται το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ταχύτητα πλημμυρίδας** (flooding velocity).
- Η ταχύτητα αυτή ορίζει μία οριακή λειτουργία της στήλης και με βάση αυτήν την ταχύτητα διαστασιολογείται η στήλη.

- Από την άλλη πλευρά, όσο μεγαλώνει η διάμετρος της στήλης τόσο καλύτερα λειτουργεί η στήλη αποφεύγοντας το σημείο πλημμυρίδας αλλά **αυξάνεται το κόστος της διεργασίας.**
- Στην πράξη η διάμετρος μιας στήλης σχεδιάζεται έτσι ώστε **η ταχύτητα του αερίου εντός της στήλης να είναι το 50-75% της ταχύτητας πλημμυρίδας.**

Διάγραμμα Sherwood



$\dot{M}_{GA}$ μαζική επιφανειακή φόρτιση αερίου, g/s·m²

$\dot{M}_G, \dot{M}_L$ μαζικές παροχές αερίου και υγρού g/s

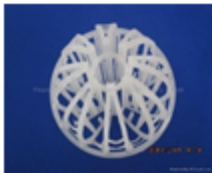
ρ_g πυκνότητα του αερίου, kg/m³, ρ_l πυκνότητα του υγρού, kg/m³

g_c σταθερά βαρύτητας, 9,82 m/s²,

F συντελεστής πλήρωσης

Φ λόγος του ειδικού βάρους του υγρού προς το ειδικό βάρος του νερού

μ ιξώδες του υγρού

Πληρωτικό υλικό		Μέγεθος (in.)	βάρος (lb/ft ²)	Ειδική επιφάνει	Κενός χώρος	Συντελεστής F
	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
	Raschig rings (steel)	1/2 x 1/32	77	128	84	300
		1 x 1/32	40	63	92	115
	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
	intalox saddles (plastic)	1	6.00	63	91	30
		2	3.75	33	93	20
	Pall rings (plastic)	5/8	7.0	104	87	97
		1	5.5	63	90	52
	Pall rings (metal)	5/8x0.018	38	104	93	73
		1 1/2 x 0.02	24	39	95	28
	Telerettes	1	7.5	55	87	40
		2	3.9	38	93	20
		3	5.0	30	92	15

Χαρακτηριστικά πληρωτικών υλικών

Η πορεία υπολογισμού της διαμέτρου μιας στήλης με πληρωτικό υλικό έχει ως εξής:

1. Υπολογίζουμε την τιμή στον άξονα των X

$$\text{Τιμή στον άξονα X} = \left(\frac{\dot{M}_L}{\dot{M}_G} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5}$$

2. Από την καμπύλη πλημμυρίδας υπολογίζουμε την τιμή ε στον άξονα των Y.

3. Υπολογίζουμε την τιμή του (πλημμυρίδας) από τη σχέση:

$$\dot{M}_{GA} = \left[\frac{(\varepsilon)(\rho_g)(\rho_l)(g_c)}{F \phi \mu_1^{0.2}} \right]^{0.5}$$

4. Προσαρμογή στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας

$$\dot{M}_{GA, \text{ operating}} = (f)(\dot{M}_{GA})$$

Όπου $0,5 < f < 0,75$

5. Υπολογίζουμε την επιφάνεια A της στήλης από τη σχέση:

$$A = \frac{\dot{M}_G}{\dot{M}_{GA}}$$

6. Υπολογίζουμε τη διάμετρο της στήλης από τη σχέση:

$$d = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{0.5} = 1,13 A^{0.5}$$

Άσκηση

Χρησιμοποιείτε τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της προηγούμενης άσκησης και υπολογίστε τη διάμετρο της πλυντρίδας

Η παροχή λειτουργίας του νερού είναι 1,5 φορές η ελάχιστη δυνατή παροχή.

Η ταχύτητα του αερίου εντός της στήλης δεν ξεπερνά το 75% της ταχύτητας πλημμυρίδας και

Το πληρωτικό υλικό αποτελείται από telerettes 1".

Προσδιορίστε την πτώση πίεσης.

1. Υπολογίζουμε τον λόγο $\dot{M}_L / \dot{M}_G$:

$$\dot{M}_L = 1581,7 \text{ kg/min}$$

$$\dot{M}_G = \dot{N}_G \cdot (29 \text{ kg/kg-mol}) = 1,557 \cdot 29 = 45,153 \text{ kg/min}$$

$$\dot{M}_L / \dot{M}_G = 35$$

2. Υπολογίζουμε την ποσότητα:

$$X = \left(\frac{\dot{M}_L}{\dot{M}_G} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.5} = \left(\frac{1581,7}{45,153} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} = 1.226$$

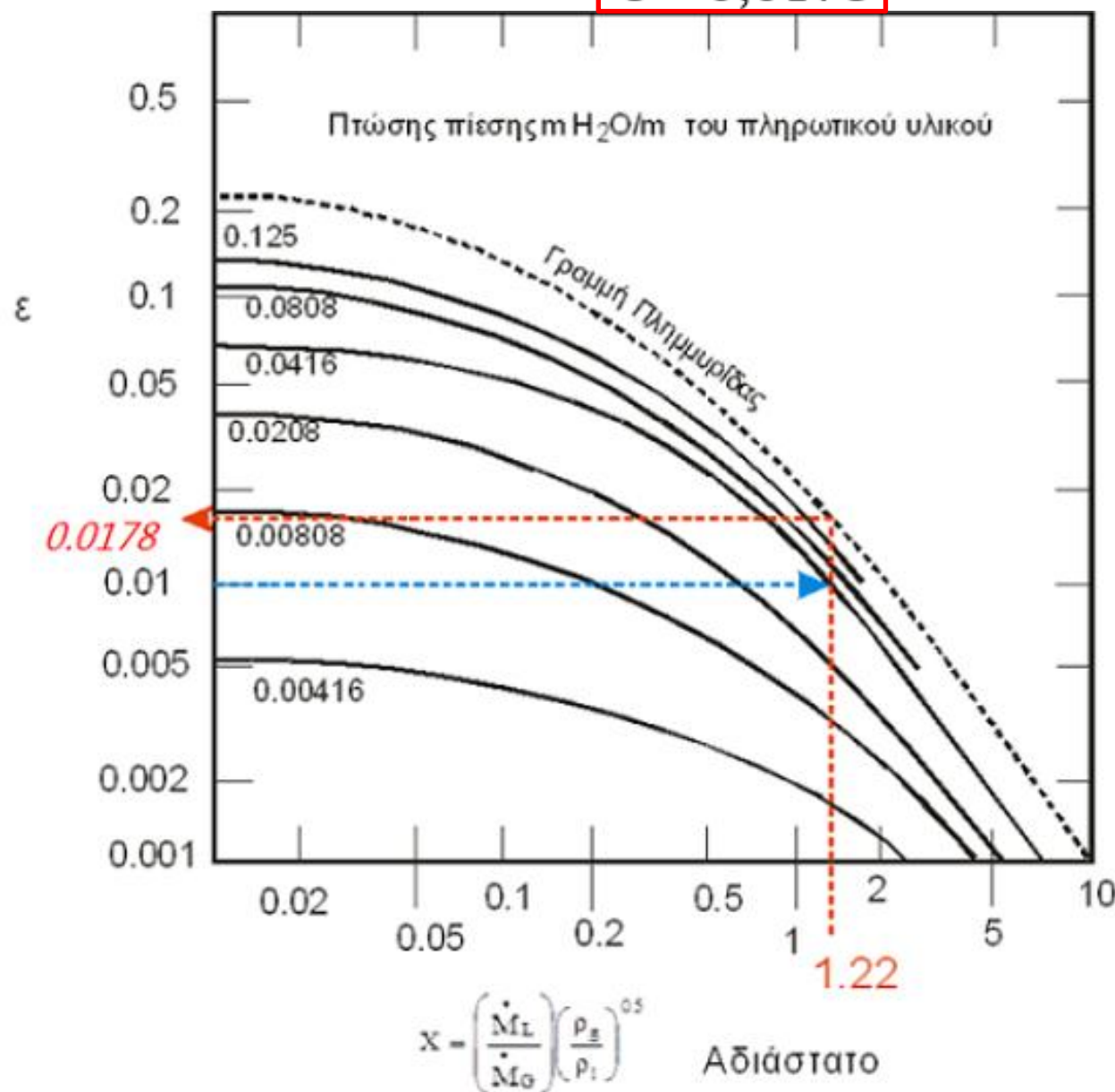
όπου:

ρ_g = πυκνότητα αέρα = 1,2172 kg/m³

ρ_L = πυκνότητα νερού = 992,08 kg/m³

3. Από το διάγραμμα Sherwood διαβάζουμε την τιμή ε :

$$\varepsilon = 0,0178$$



4. Υπολογίζουμε την επιφανειακή φόρτιση στο σημείο πλημμυρίδας:

$$\dot{M}_{GA} = \left[\frac{\varepsilon \rho_g \rho_l g_c}{F \Phi \mu_l^{0,2}} \right]^{0,5} = \left[\frac{0,0178 \cdot 1,2172 \cdot 992,08 \cdot 9,82}{40 \cdot 1 \cdot (0,006209)^{0,2}} \right]^{0,5} = 3,82 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$$

Όπου: $\Phi = 1$

$F = 40 \text{ m}^2/\text{m}^3$ από τον Πίνακα για το πληρωτικού υλικού

$\mu_l =$ δυναμικό ιξώδες του νερού

$$= \rho_l \cdot (0,17487 - 0,004427 \cdot (^\circ\text{C}) + 0,0000405 \cdot (^\circ\text{C})^2) \cdot 10^{-6}, \text{ Pas} = 0.0062 \text{ Pas}$$

5. Υπολογίζουμε την επιφανειακή φόρτιση στο σημείο λειτουργίας θεωρώντας ότι αυτή πρέπει να είναι το 75% της επιφανειακής φόρτισης στο σημείο πλημμυρίδας:

$$\dot{M}_{GA, \text{operation}} = \dot{M}_{GA} \cdot 0,75 = 2,865 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$$

6. Υπολογίζουμε την επιφάνεια της πλυντρίδας από τη σχέση:

$$A = \frac{\dot{M}_G}{\dot{M}_{GA, operation}} = \frac{(45,138 \text{ kg/min})(1 \text{ min}/60 \text{ sec})}{2,865 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2} = 0,263 \text{ m}^2$$

7. Υπολογίζουμε τη διάμετρο της πλυντρίδας:

$$d = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{0.5} = \left(\frac{4 \cdot 0,263}{3,14} \right)^{0.5} \approx 0,579 \text{ m}$$

8. Επαναπροσδιορίζουμε το ε χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\dot{M}_{GA, operation}^2 F \phi \mu_l^{0.2}}{\rho_g \cdot \rho_l \cdot g_c} = \frac{2,865^2 \cdot 40 \cdot 1 \cdot 0,0062^{0.2}}{1,2172 \cdot 992,08 \cdot 9,82} = 0,01$$

και από το διάγραμμα διαβάζουμε την πτώση πίεσης, η οποία ανέρχεται σε $\Delta P = 0,0416 \text{ m/m}$ πληρωτικού υλικού.

Υπολογισμός του ύψους του πύργου

Έχοντας υπολογίσει τον όγκο και τη διάμετρο
προκύπτει το ύψος του πύργου

Για το παράδειγμα είναι $4,6 \text{ m}^3 / 0,263 \text{ m}^2 = \mathbf{17,5 \text{ m}}$