www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

3. SEPARAZIONE PER ASSORBIMENTO CON COLONNE A PIATTI

PROF. ERNESTO SALZANO
ernesto.salzano@unibo.it

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

L'operazione di assorbimento consiste nel trasferimento di uno o più componenti da una fase gassosa ad una fase liquida sfruttando la dissoluzione selettiva dei componenti nel liquido:

- I componenti gassosi trasferiti sono detti **soluti**
- Il liquido utilizzato viene detto **liquido assorbente o solvente**

I componenti di interesse possono essere tutti, soltanto quelli trasferiti o quelli non trasferiti

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Le separazioni per assorbimento hanno avuto larga diffusione per effetto delle elevate richieste di qualità ambientali, ad esempio nella purificazione da componenti indesiderati che non possono essere espulsi nell'atmosfera.

Es. abbattimento di acido solforico presente nelle correnti gassose da inviare al camino in centrali termoelettriche

Sono anche molto utilizzate per il recupero di componenti più o meno pregiati quali, ad esempio, il recupero di vapori di benzina mediante l'utilizzo di un olio (liquido assorbente)

- Si può avere **assorbimento fisico** (*acqua o olio come solvente*) o **chimico** (*reazione tra soluto e solvente*).

Es. soluzione acquosa di NaOH per l'assorbimento di un gas acido…. , rapida e irreversibile neutralizzazione)

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Solute	Absorbent	Type of Absorption
Acetone	Water	Physical
Acrylonitrile	Water	Physical
Ammonia	Water	Physical
Ethanol	Water	Physical
Formaldehyde	Water	Physical
Hydrochloric acid	Water	Physical
Hydrofluoric acid	Water	Physical
Sulfur dioxide	Water	Physical
Sulfur trioxide	Water	Physical
Benzene and toluene	Hydrocarbon oil	Physical
Butadiene	Hydrocarbon oil	Physical
Butanes and propane	Hydrocarbon oil	Physical
Naphthalene	Hydrocarbon oil	Physical
Carbon dioxide	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrochloric acid	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrocyanic acid	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrofluoric acid	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrogen sulfide	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Chlorine	Water	Reversible chemical
Carbon monoxide	Aq. cuprous ammonium salts	Reversible chemical
CO_2 and H_2S	Aq. monoethanolamine (MEA) or diethanolamine (DEA)	Reversible chemical
CO_2 and H_2S	Diethyleneglycol (DEG) or triethyleneglycol (TEG)	Reversible chemical
Nitrogen oxides	Water	Reversible chemical

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

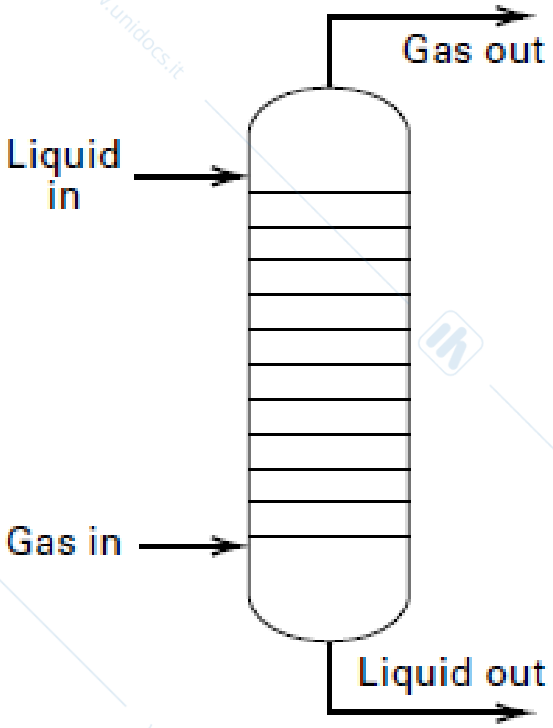
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

L'operazione di assorbimento, una volta effettuato il passaggio dei componenti desiderati dal gas al liquido, è spesso completata con un processo di separazione che coinvolge il solvente ed i componenti trasferiti (*stripping*)

- È quasi sempre necessario recuperare i componenti assorbiti, in quanto devono essere opportunamente trattati sia nel caso si tratti di componenti pregiati sia che si tratti di inquinanti

- Anche il solvente è spesso recuperato in quanto riutilizzato all'interno di un ciclo chiuso

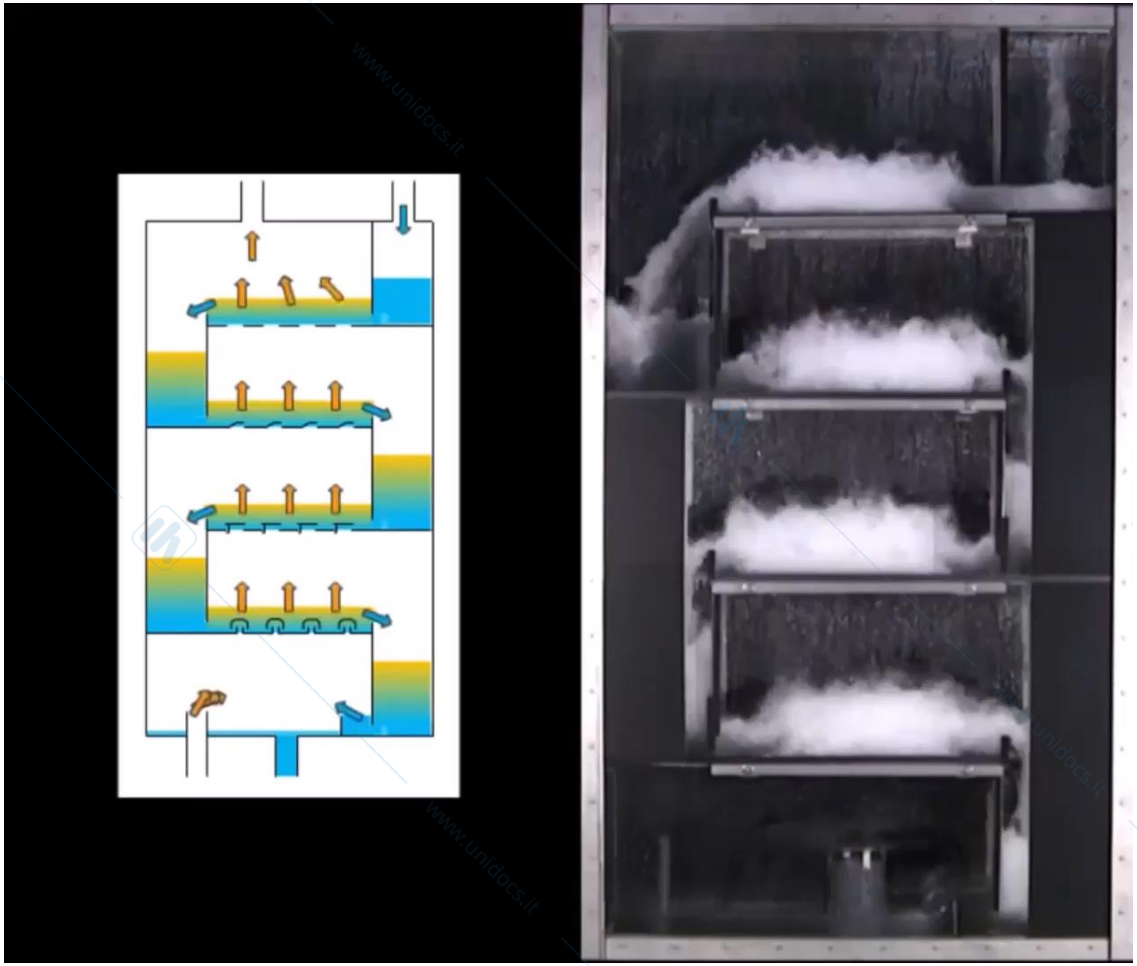
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



Colonna a piatti (trayed tower)

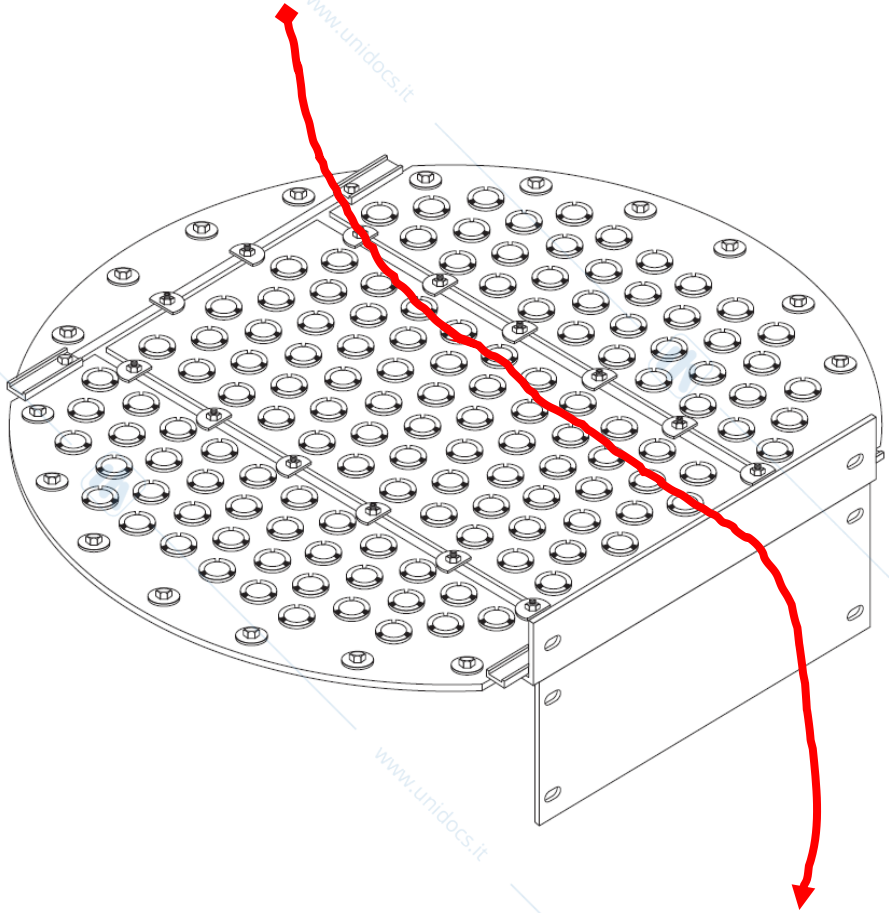
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

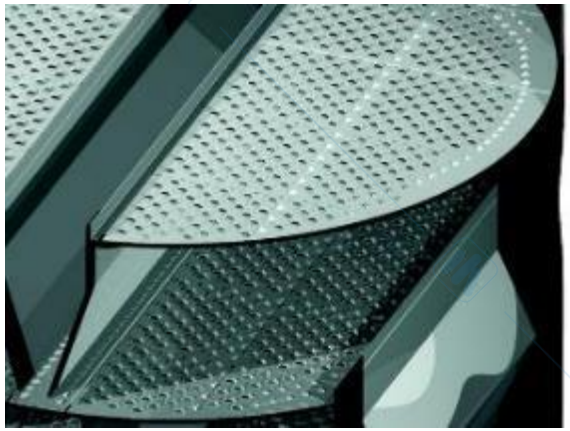
Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti

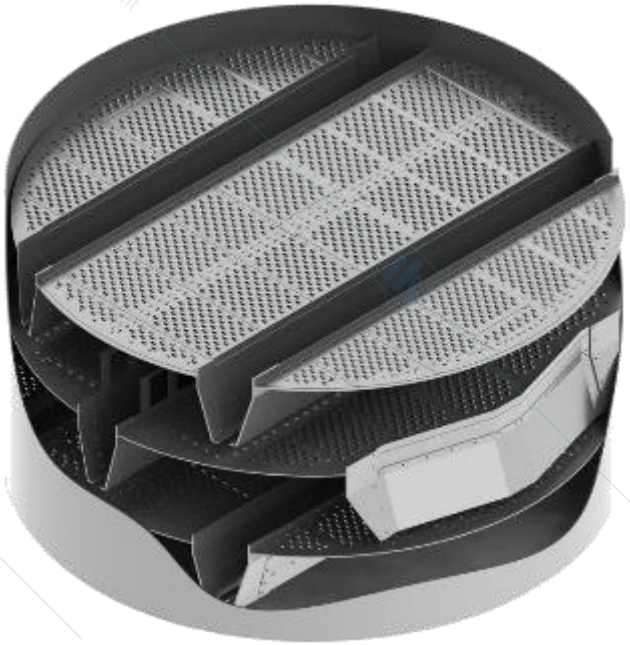


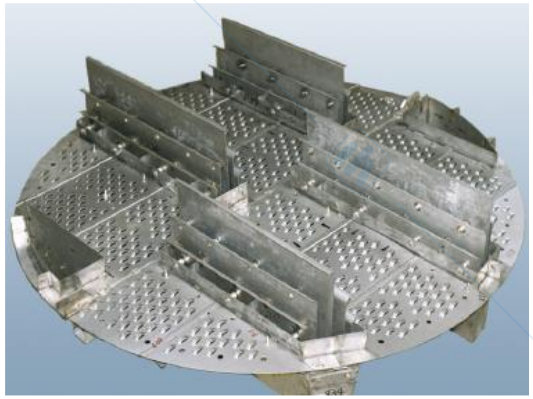
Piatti forati o Sieve tray

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti



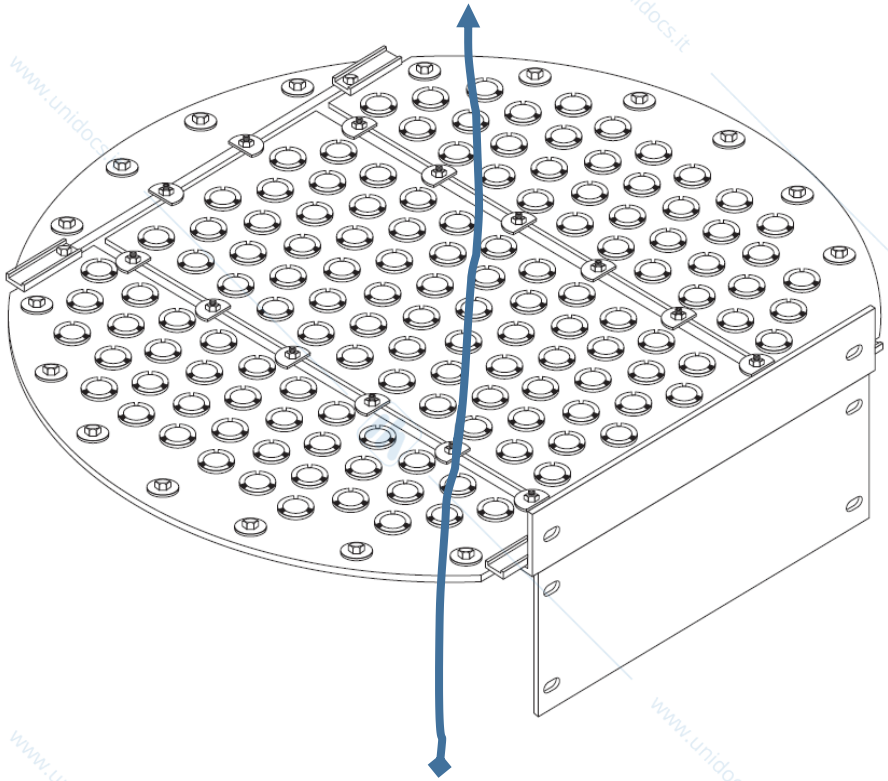


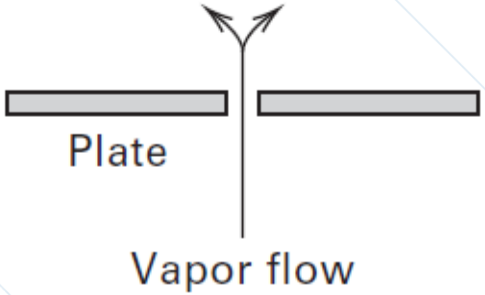


Piatti forati o Sieve tray

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti

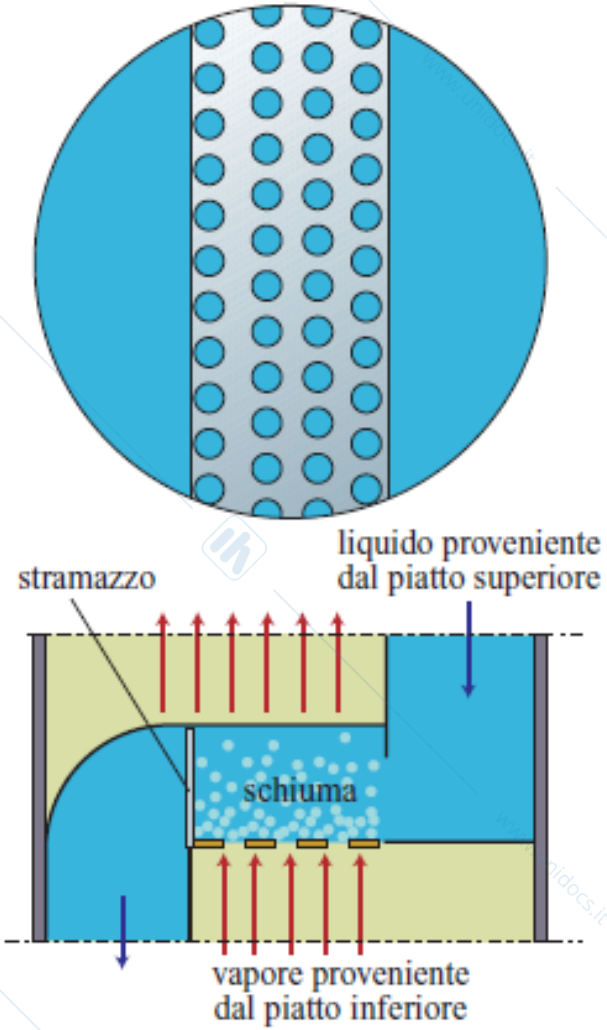


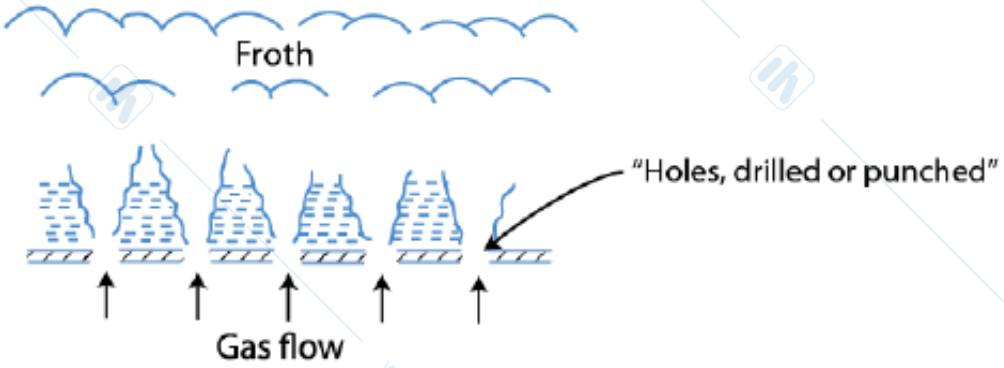


Diametro Foro = 1/8 – 1/2 inch

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti

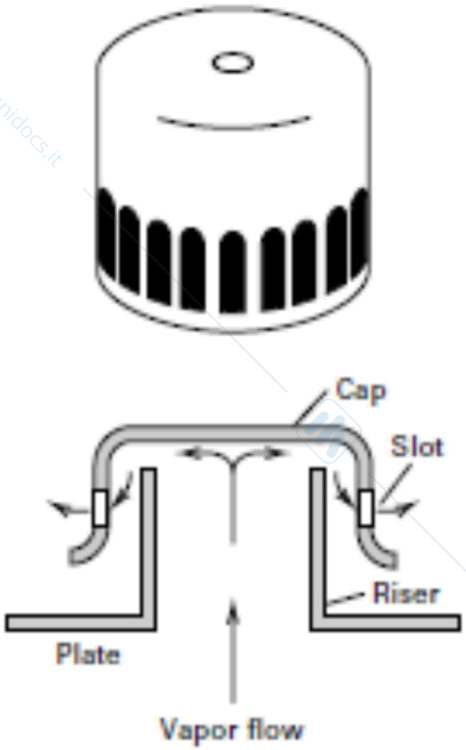




Piatti forati o Sieve tray

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti

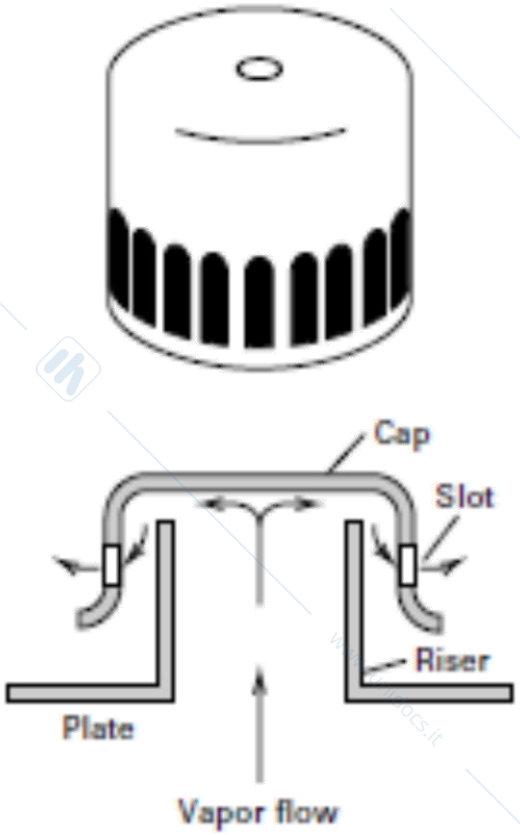


Diametro cup = 3 – 6 inch

Piatti forati tipo bubble-cap

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

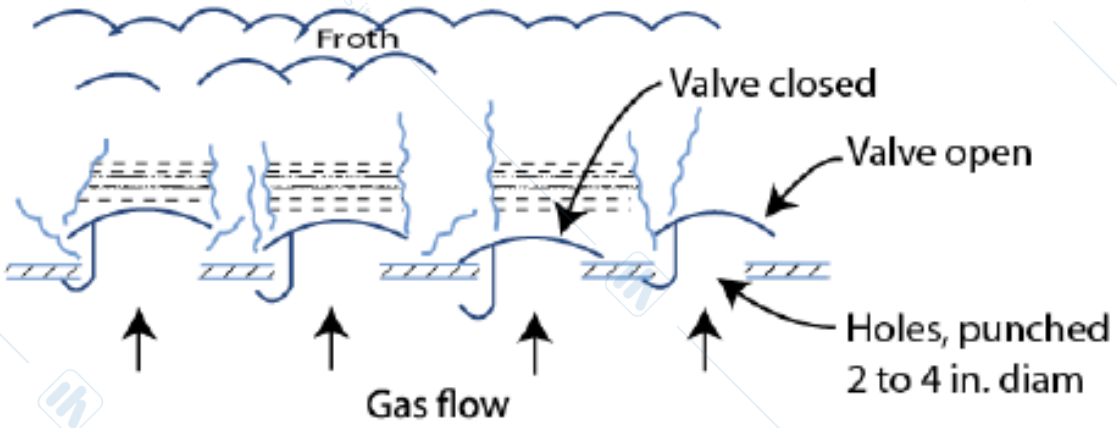
Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti



Diametro cup = 3 – 6 inch

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

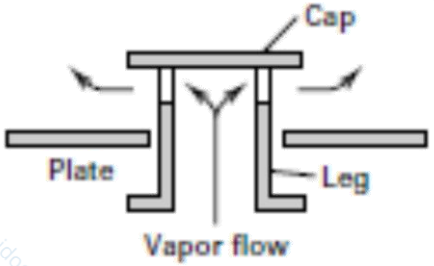
Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti



Piatti forati tipo bubble-cap

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti



Diametro valvola = 1 – 2 inch

Piatti forati a valvola

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

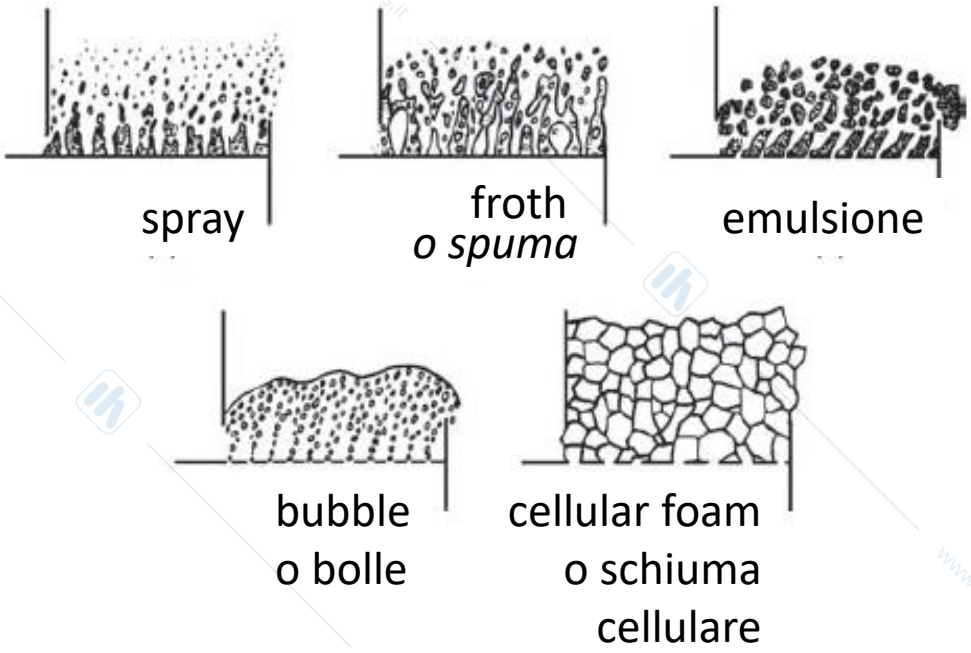
Un piatto di diametro pari a 11-ft può avere:

i. 50000 (1/16 -inch-diameter perforation)
ii. 1000 (2-inch-diameter valve cap)
iii. 500 (4-inch-diameter bubble cap)

I piatti perforati sono più economici e sono preferiti a meno di necessità specifiche. I piatti bubble-cap sono ormai rari.

	Sieve Trays	Valve Trays	Bubble-Cap Trays
Relative cost	1.0	1.2	2.0
Pressure drop	Lowest	Intermediate	Highest
Efficiency	Lowest	Highest	Highest

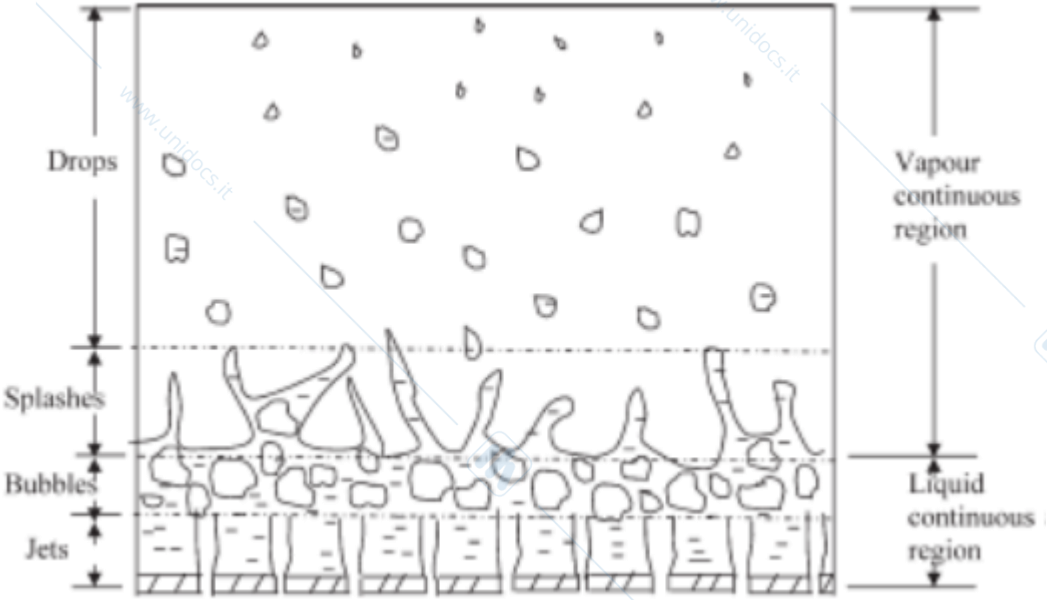
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



Regimi di flusso vapore–liquido per un piatto a contatto

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

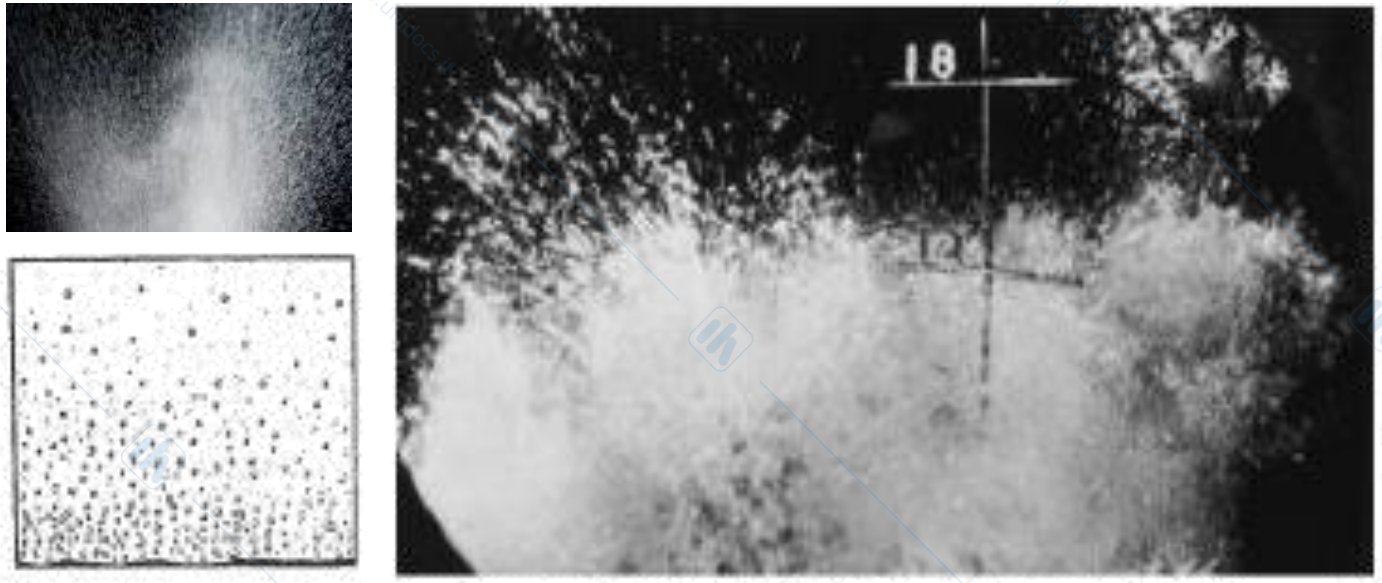
Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti



Regimi di flusso: spuma (froth)

E’ il regime favorito: la fase liquida è continua e il gas passa attraverso essa in forma di jet o come bolle

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

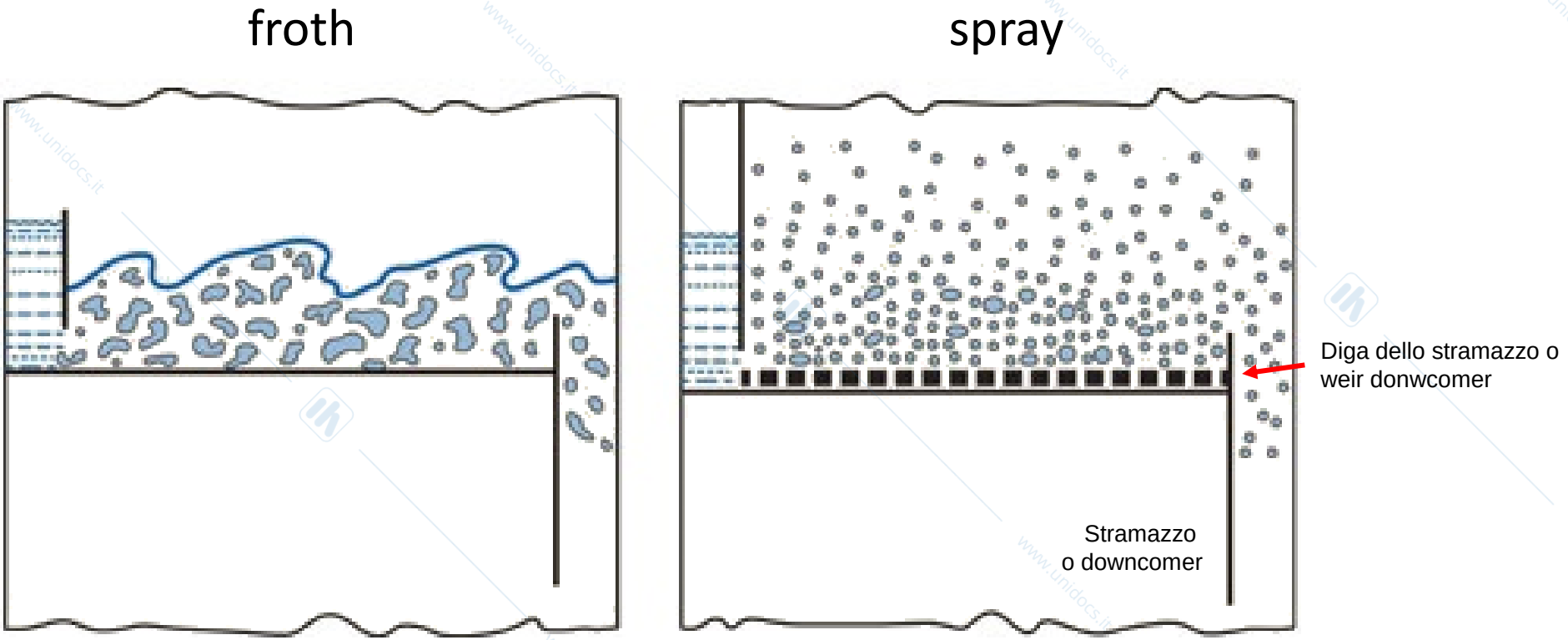


Regimi di flusso: spray

Bassi livelli di liquido (diga dello stramazzo di piccola dimensione) e alte portate di gas

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

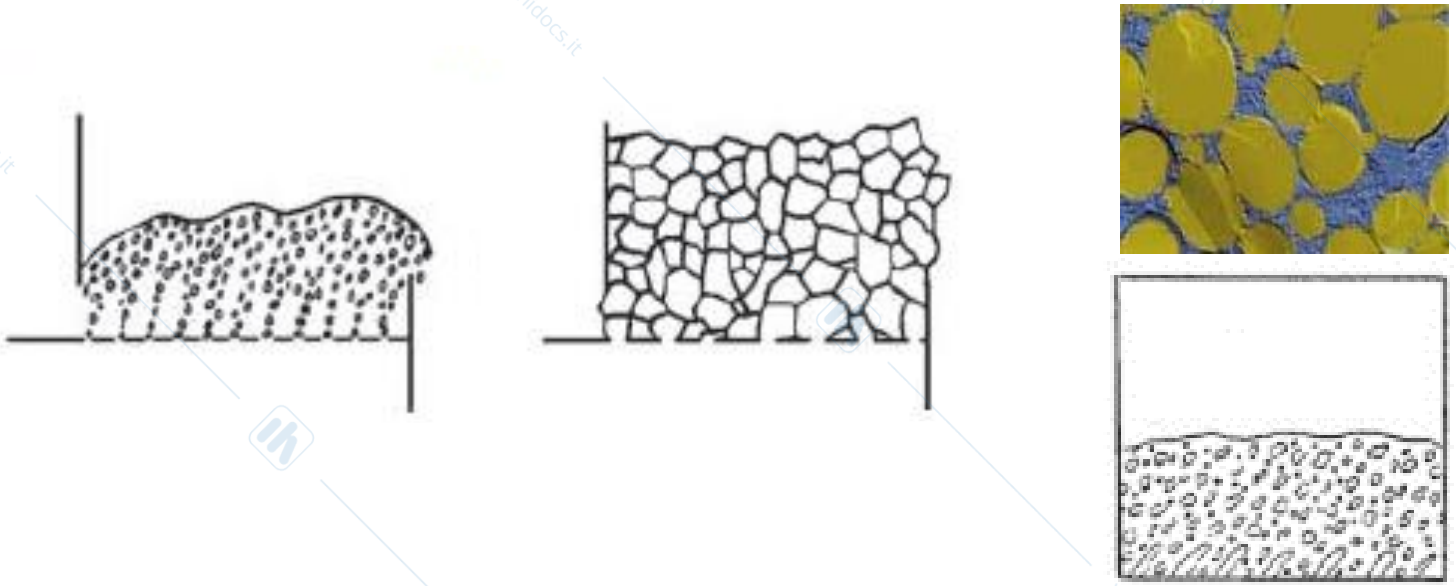
Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti



Froth : la fase liquida è continua
Spray : la gase gas è continua

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Separazione per Assorbimento: Colonna di assorbimento a piatti



Regimi di flusso: bubble, schiume cellulari e emulsione

Il liquid è quiescente, le portate di gas sono basse.
Ad alte portate di liquido, le bolle possono provocare emulsione e schiume indesiderate

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

PROGETTAZIONE DI UNA COLONNA DI ASSORBIMENTO A PIATTI

- Metodi grafici e analitici (metodo di Kremser): per miscele diluite di soluto e operazioni all'incirca isoterme
- Metodi numerici: per miscele concentrate, con equilibri multifase ed effetti termici significativi

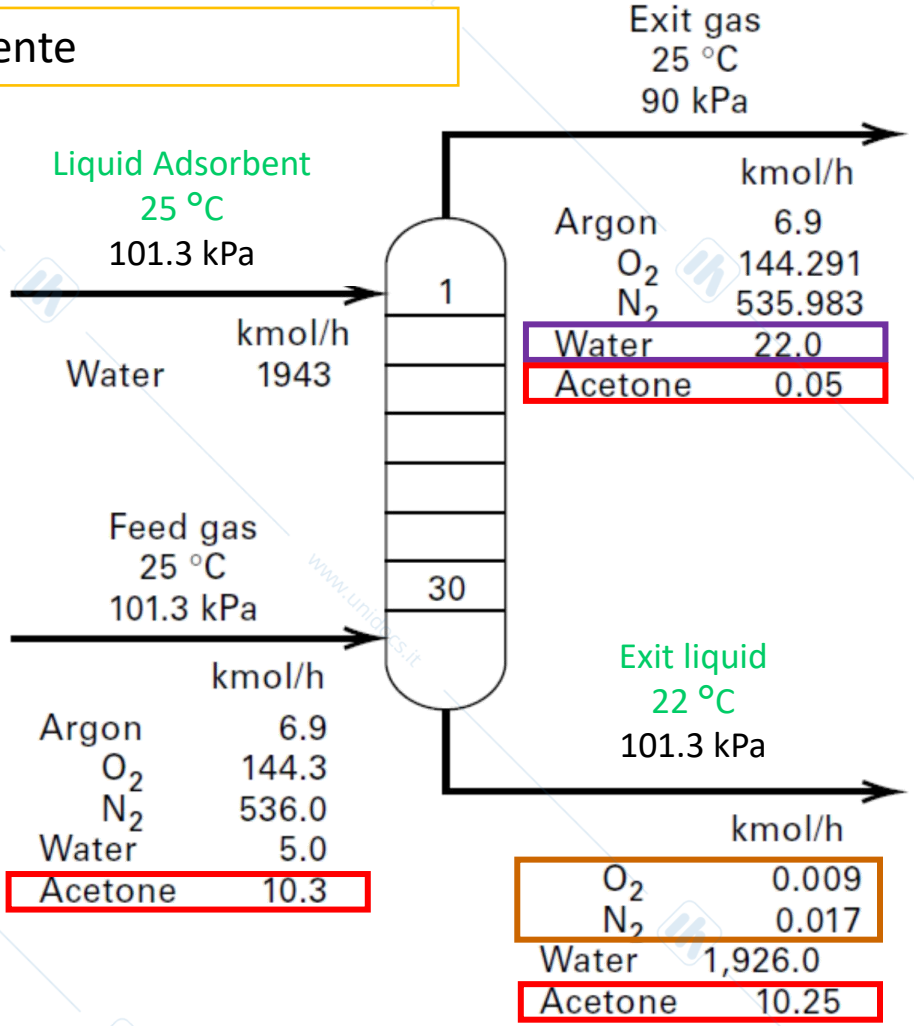
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Operazione di assorbimento: rimozione di acetone da una corrente d'aria proveniente da un essiccatore di fibre di cellulosa

Apparecchiatura a piatti con flusso in controcorrente

Si notino:

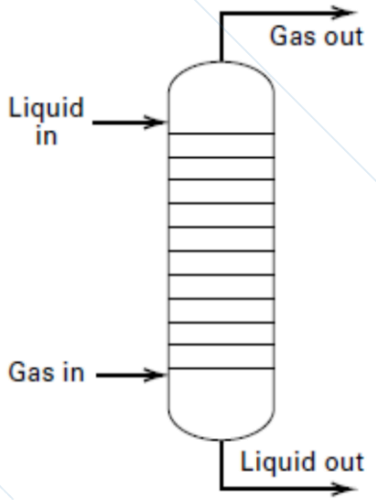
- Lo strippaggio (incompleto) dell'acqua
- La riduzione della temperatura del liquido per evaporazione
- La saturazione in acqua del gas
- La saturazione in aria del liquido



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Ipotesi di lavoro: Rimozione di un componente in fase gas con solvente puro

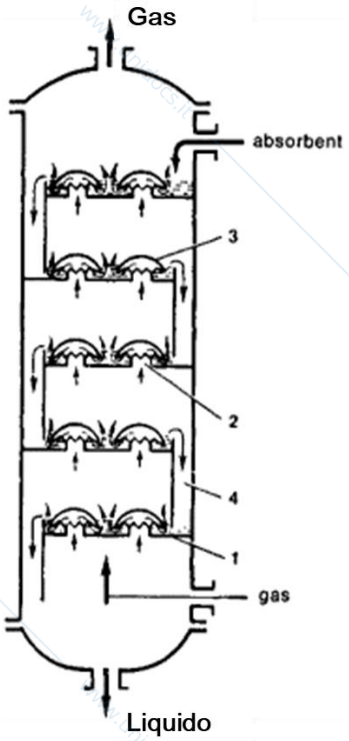
i. **Il sistema è isotermo e isobarico**
ii. Il calore di assorbimento è trascurabile
iii. Il carrier gas è insolubile
iv. Il solvente non è volatile

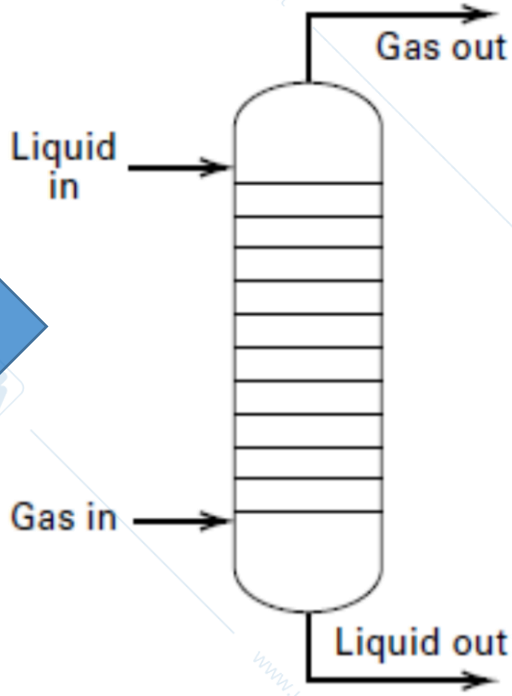


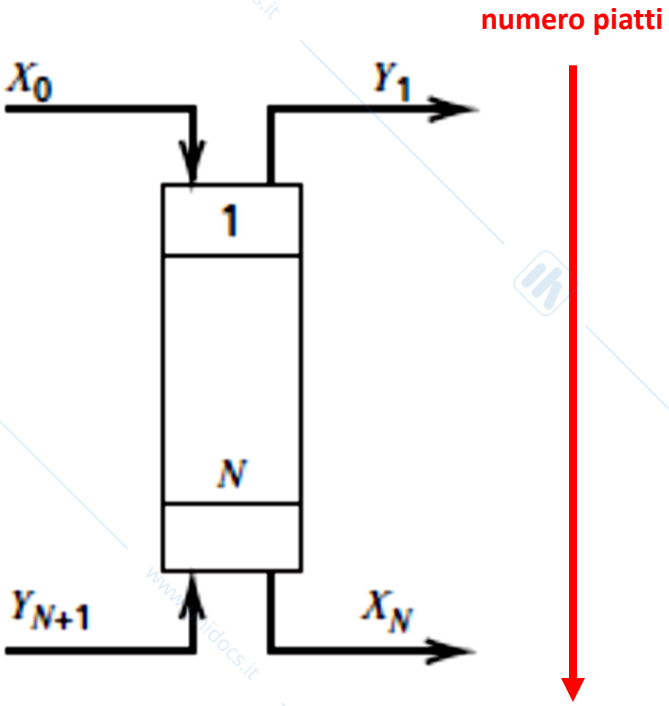
A Temperatura e Pressioni sono costanti, la legge di Henry verifica – in condizioni ideali – che fissata la composizione in fase vapore rimane fissata la composizione in fase liquida e viceversa

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

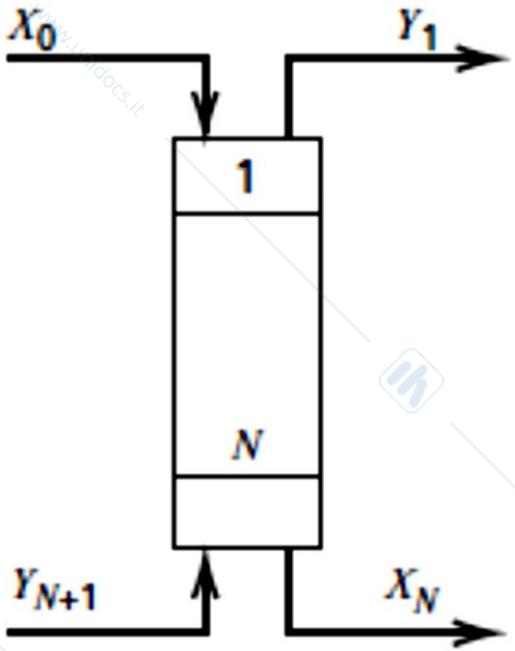
Separazione per Assorbimento: Progettazione di una Colonna di assorbimento a piatti







www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



Ogni **piatto ideale** è uno stadio di equilibrio.

Vale la legge di Henry:

$$\mathrm{P} \cdot \mathrm{y_i} = H(T) \cdot x_\mathrm{i}$$

E per soluzioni diluite:

$$\mathrm{K} = \frac{\mathrm{y_i}}{\mathrm{x_i}} \approx \frac{\mathrm{Y_i}}{\mathrm{X_i}} = \frac{H(T)}{P}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Per soluzioni non diluite, abbiamo già sviluppato le relazioni tra x e X; y e Y:

$$\mathrm{K} = \frac{y}{x} = \frac{\frac{Y}{1+Y}}{\frac{X}{1+X}} = \frac{H(\mathrm{T})}{P}$$

$$\frac{Y}{1+Y} = K\frac{X}{1+X}$$

$$Y = \frac{KX(1+Y)}{1+X} = \frac{KX + KXY}{1+X}$$

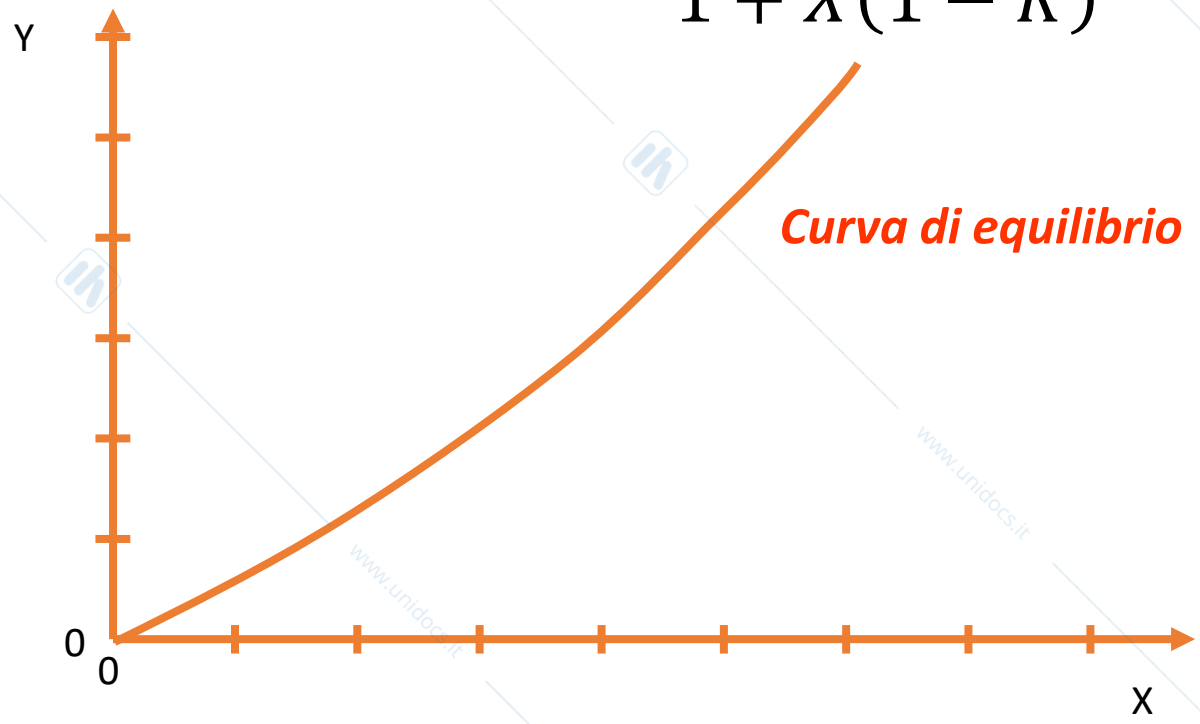
$$Y\left[1 - K\frac{X}{1+X}\right] = \frac{KX}{1+X}$$

$$Y = \frac{KX}{1+X(1-K)}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Separazione per Assorbimento: Progettazione di una Colonna di assorbimento a piatti

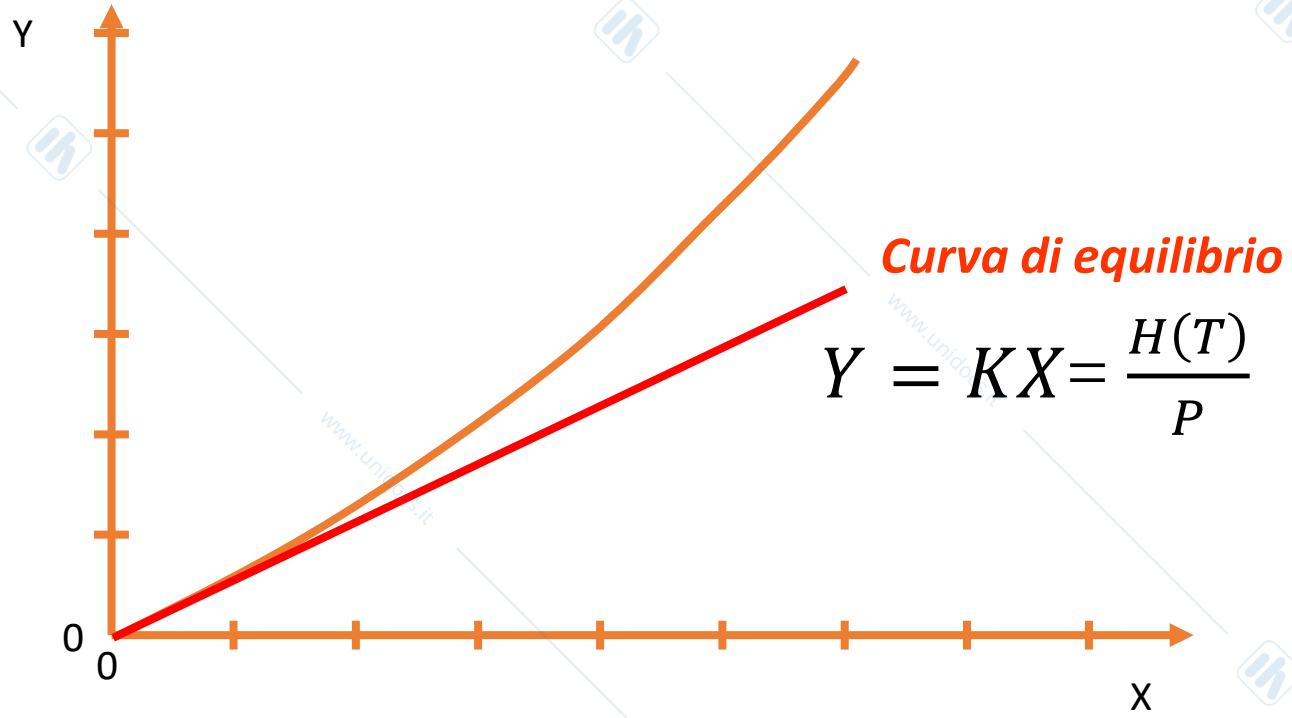
$$Y = \frac{KX}{1 + X(1 - K)}$$



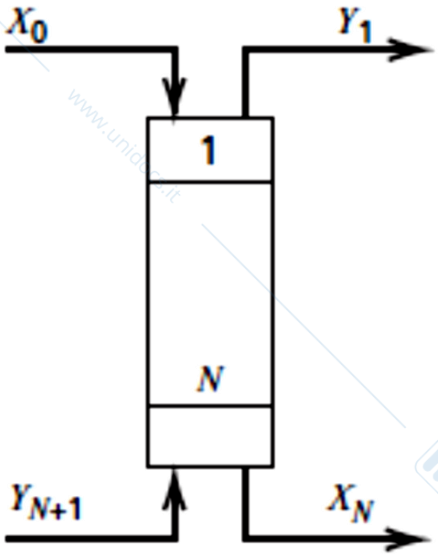
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Se Y << 1 e X << 1 allora x = X e y = Y, e la relazione è lineare

$$Y = \frac{KX}{1 + X(1 - K)} \approx KX$$



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



Piatto 1 = ingresso liquido

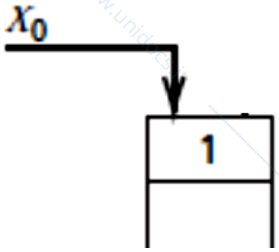
Piatto N = ingresso gas

L = portata molare di solvente puro (senza soluto)

V = portata molare di gas (senza soluto)

Se il solvente non vaporizza e il gas non viene assorbito in quantità rilevanti, allora L e V sono costanti lungo la colonna

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



Se L e V non cambiano allora la portata di soluto in ingresso con il liquido al piatto 1 sarà:

$$portata\ di\ soluto = \frac{moli\ soluto\ in\ fase\ liquida}{tempo}$$

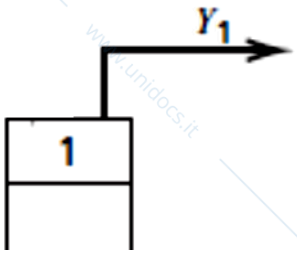
Moltiplico e divido per moli di solvente:

$$portata\ di\ soluto\ = \frac{moli\ solvente}{tempo} \cdot \frac{moli\ soluto\ in\ fase\ liquida}{moli\ solvente}$$

$$portata\ di\ soluto\ in\ ingresso\ in\ fase\ liquida = L \cdot X_o$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Analogamente, in uscita al piatto 1:



$$portata\ di\ soluto = \frac{moli\ soluto\ in\ fase\ gas}{tempo}$$

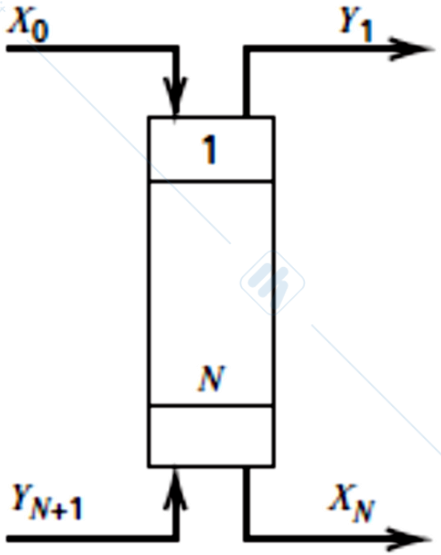
Moltiplico e divido per moli di solvente:

$$portata\ di\ soluto\ = \frac{moli\ solvente}{tempo} \cdot \frac{moli\ soluto\ in\ fase\ gas}{moli\ solvente}$$

$$portata\ di\ soluto\ in\ uscita\ in\ fase\ gas = V \cdot Y_1$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Bilancio di materia per il soluto al piatto 1



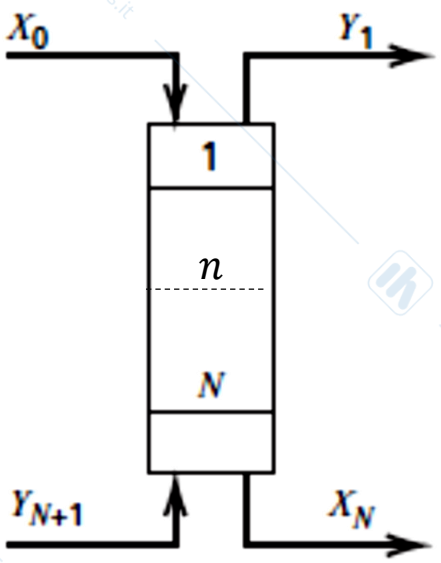
Bilancio di materia sul piatto 1

Soluto In = Soluto Out

$$L \cdot X_o + V \cdot Y_2 = L \cdot X_1 + V \cdot Y_1$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Bilancio di materia per il soluto tra il piatto 1 al generico piatto di colonna o al fondo di colonna



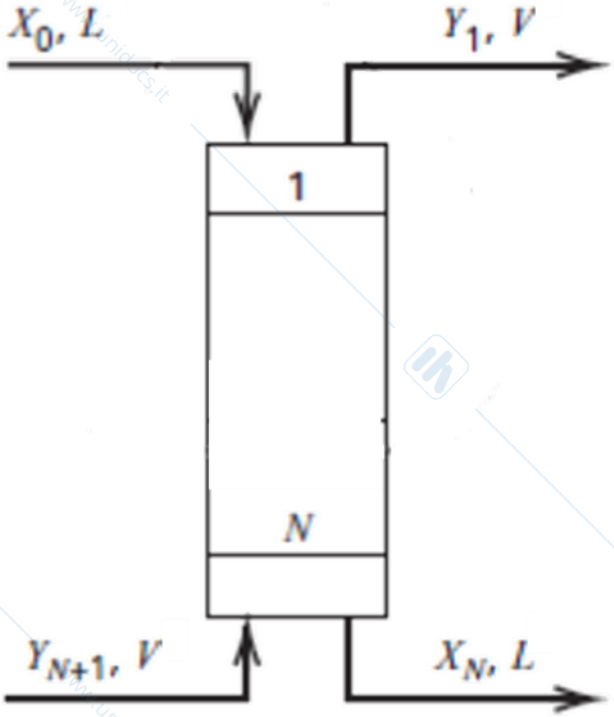
Bilancio di materia globale

Soluto In = Soluto Out

$$L \cdot X_o + V \cdot Y_{n+1} = L \cdot X_n + V \cdot Y_1$$

$$L \cdot X_o + V \cdot Y_{N+1} = L \cdot X_N + V \cdot Y_1$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



$$L \cdot X_o + V \cdot Y_{N+1} = L \cdot X_N + V \cdot Y_1$$

$$Y_{N+1} = \frac{L}{V} \cdot X_N + Y_1 - \frac{L}{V} \cdot X_o$$

Equazione della retta di lavoro

Y = a + bx

$$Y_{N+1} = \left(Y_1 - \frac{L}{V} \cdot X_o \right) + \frac{L}{V} \cdot X_N$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Curva di lavoro (operating line)

$$Y_{N+1} = \left(Y_1 - \frac{L}{V}X_o\right) + \frac{L}{V}X_N$$

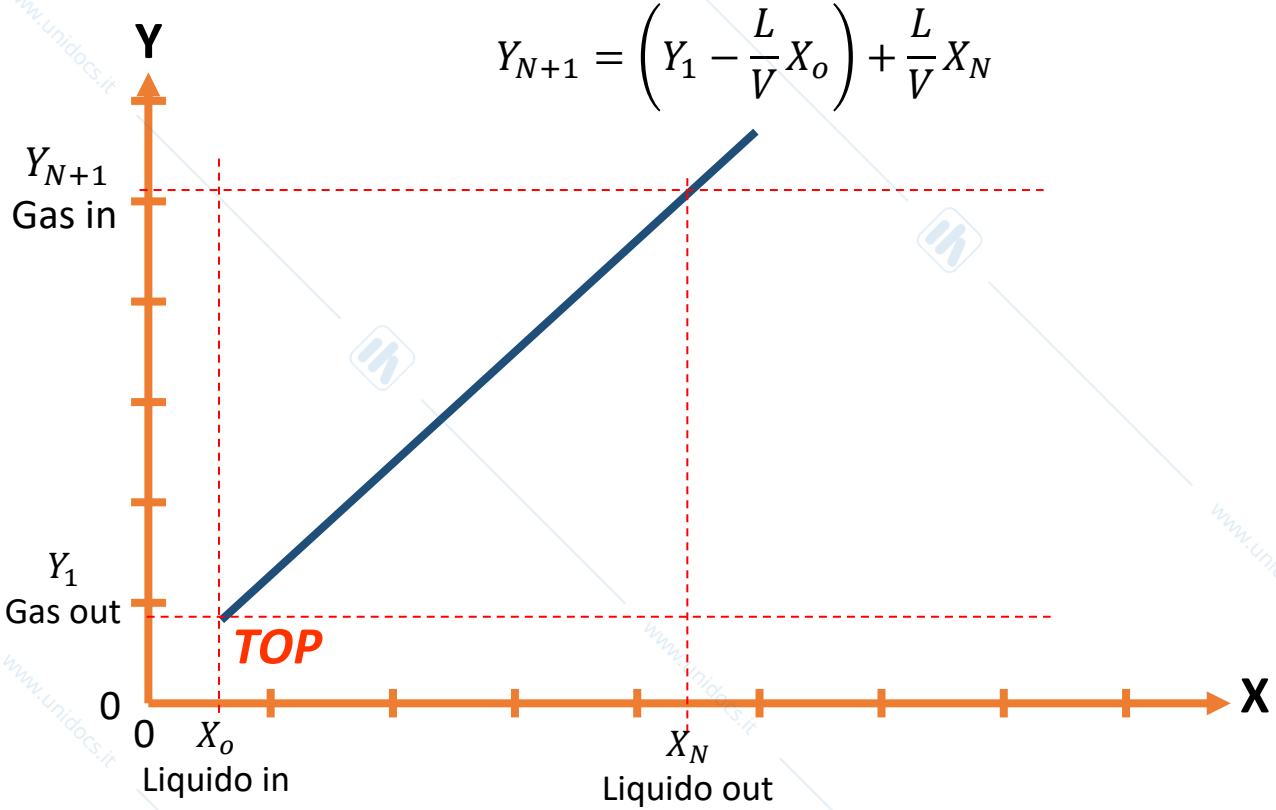
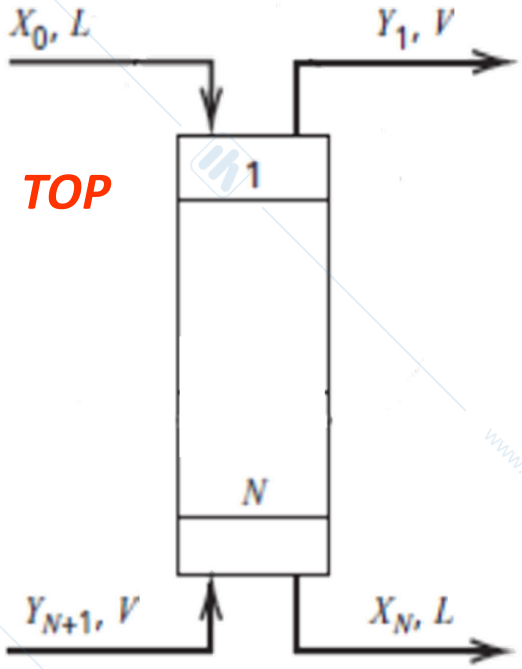


Diagramma di McCabe-Thiele



Ogni curva di lavoro passa per il punto che rappresenta il TOP della colonna e si caratterizza per una pendenza L/V, essendo il punto finale caratterizzato dalle condizioni iniziali del gas Y_{N+1}

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Curva di lavoro (operating line)

$$Y_{N+1} = \left(Y_1 - \frac{L}{V}X_o\right) + \frac{L}{V}X_N$$

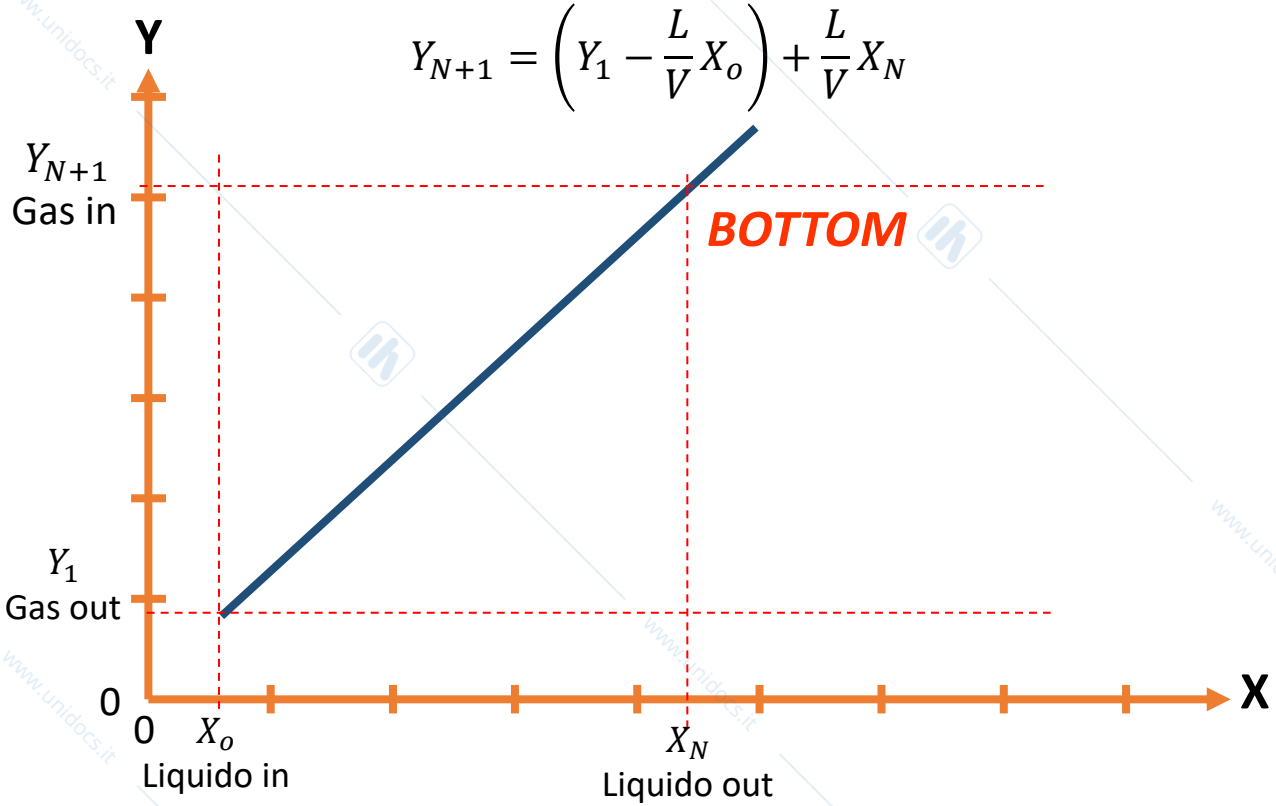
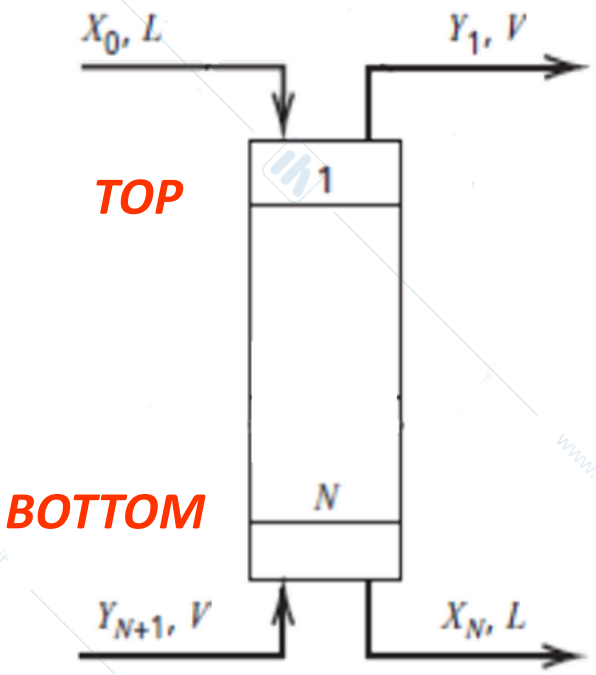


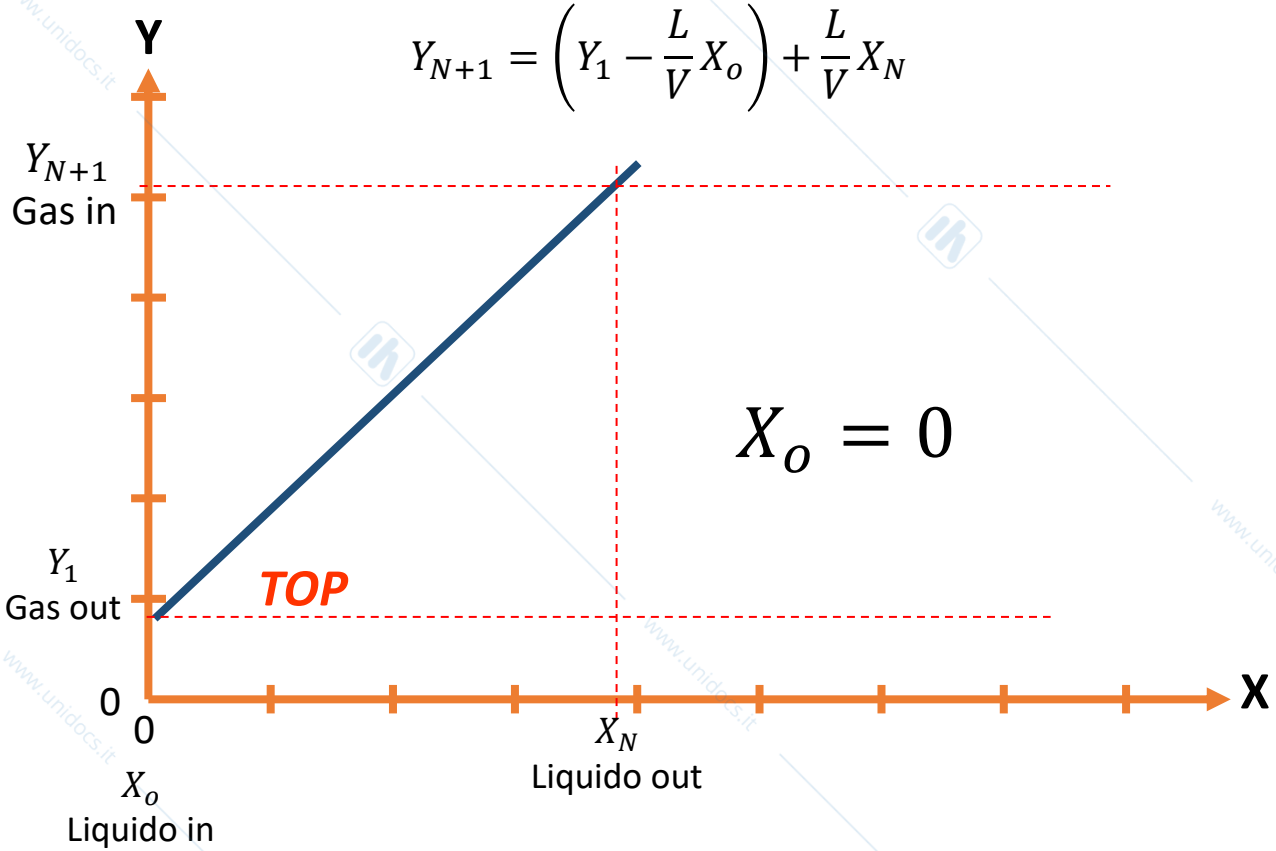
Diagramma di McCabe-Thiele



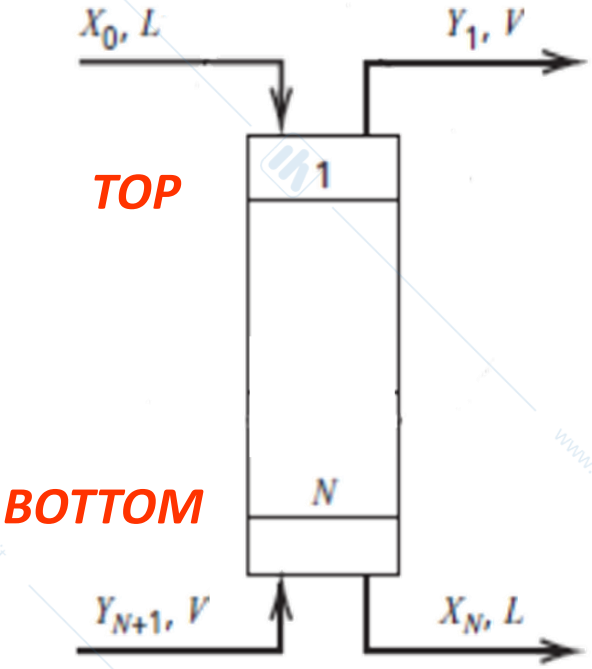
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Curva di lavoro (operating line)

$$Y_{N+1} = \left(Y_1 - \frac{L}{V}X_o\right) + \frac{L}{V}X_N$$



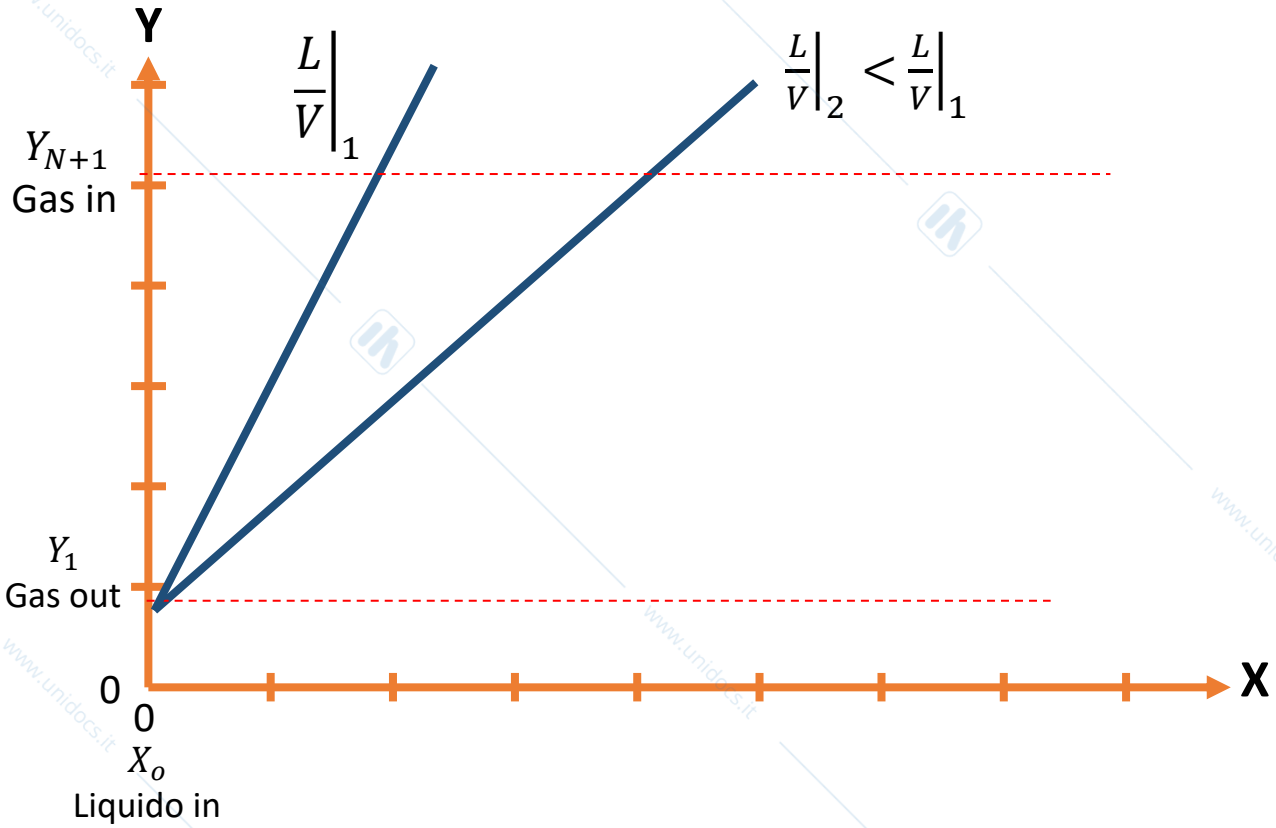
$$X_o = 0$$

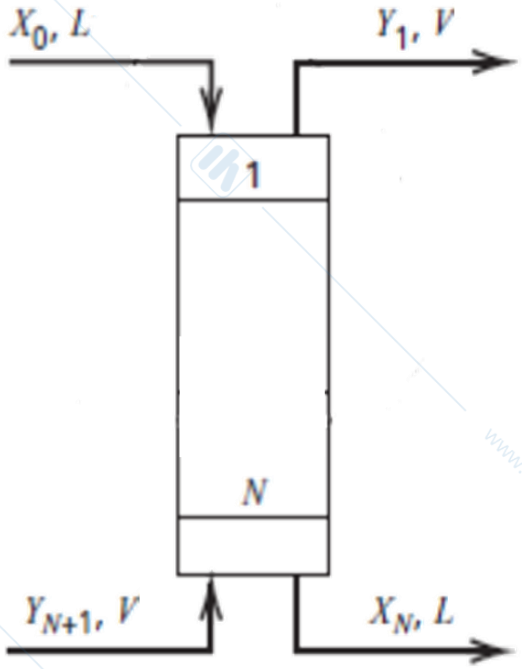


www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Curva di lavoro (operating line)

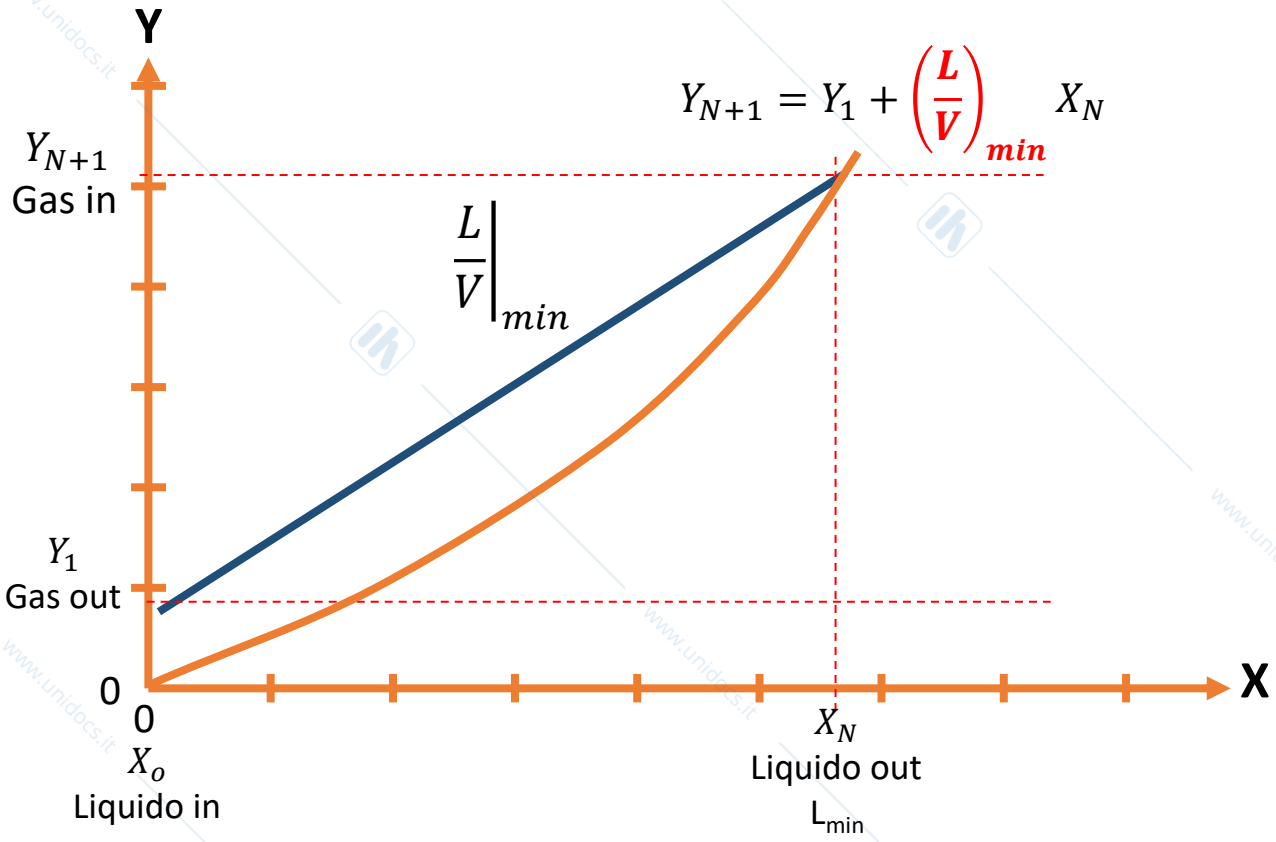
$$Y_{N+1} = Y_1 + \frac{L}{V} X_N$$

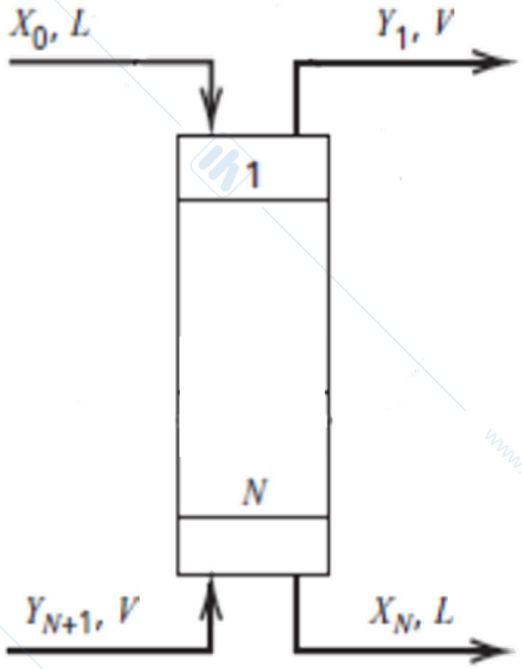




www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Pendenza minima (rapporto L/V)





www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

La portata minima di solvente

Per L = L_{min} si ha che il liquido N e il vapore N+1 sono in equilibrio

Se:

$$\mathrm{K} = \frac{H(T)}{P} = \frac{Y_{N+1}}{1+Y_{N+1}}\frac{1+X_N}{X_N}$$

allora:

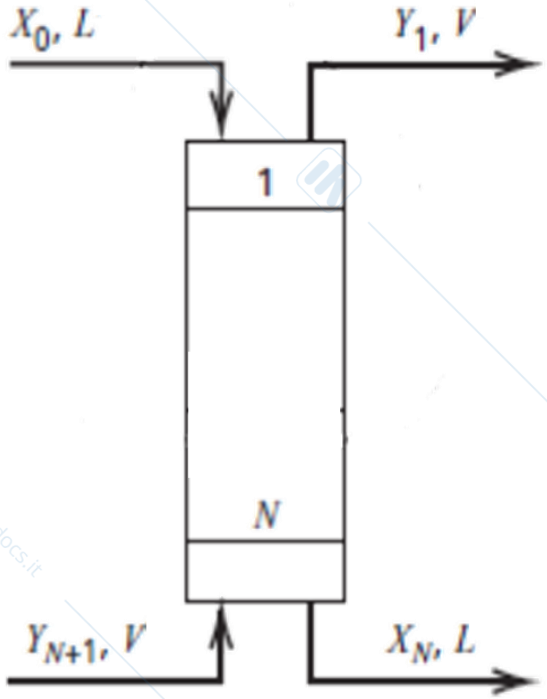
$$X_N = \frac{Y_{N+1}(1+X_N)}{K(1+Y_{N+1})}$$

da cui:

$$KX_N + KY_{N+1}X_N - Y_{N+1}X_N = Y_{N+1}$$

$$X_N \cdot (K + KY_{N+1} - Y_{N+1}) = Y_{N+1}$$

$$X_N = \frac{Y_{N+1}}{K + KY_{N+1} - Y_{N+1}}$$



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Risolvendo e sostituendo nella equazione di bilancio di materia (retta di lavoro) si ha:

$$X_N = \frac{Y_{N+1}}{K + Y_{N+1}(K-1)}$$

$$Y_{N+1} = Y_1 + \left(\frac{L}{V}\right)_{min} \cdot X_N$$

$$Y_{N+1} = Y_1 + \left(\frac{L}{V}\right)_{min} \frac{Y_{N+1}}{K + Y_{N+1}(K-1)}$$

$$Y_{N+1} - Y_1 = \left(\frac{L}{V}\right)_{min} \left(\frac{Y_{N+1}}{K + Y_{N+1}(K-1)}\right)$$

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{min} = \frac{(\boldsymbol{Y_{N+1} - Y_1})}{\dfrac{\boldsymbol{Y_{N+1}}}{\boldsymbol{K + Y_{N+1}(K-1)}}}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{min} = \frac{(Y_{N+1} - Y_1)}{\frac{Y_{N+1}}{K + Y_{N+1}(K-1)}}$$

Se V è la corrente da purificare, nota, allora:

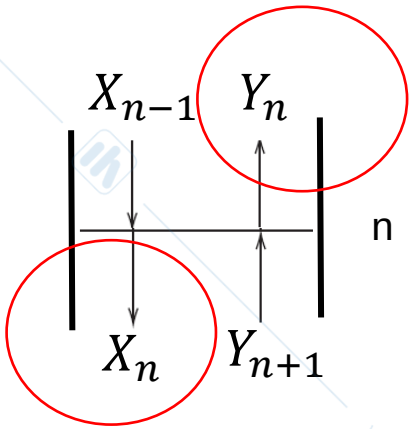
$$L_{min} = \frac{V \cdot (Y_{N+1} - Y_1)}{\frac{Y_{N+1}}{K + Y_{N+1}(K-1)}}$$

La scelta tipica di design è: $1.1\ L_{min} < L < 2\ L_{min}$

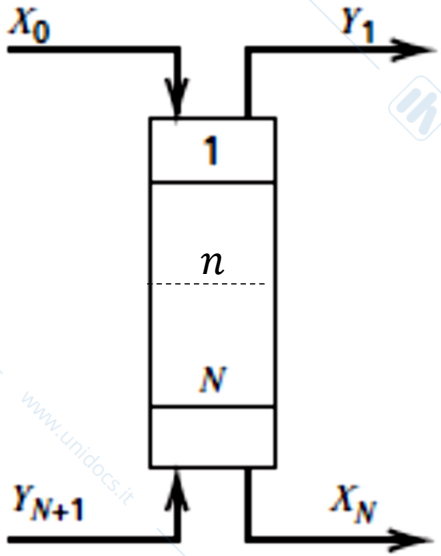
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

La ***curva di equilibrio*** mette in relazione la concentrazione di soluto nel vapore che lascia uno stadio *di equilibrio* alla concentrazione del soluto nel liquido che lascia lo stesso stadio

$$Y_n = \frac{KX_n}{1 + X_n(1 - K)}$$



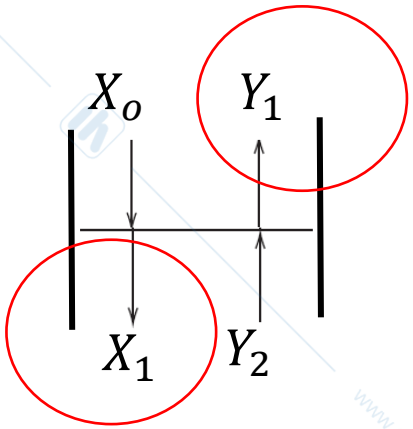
equilibrium curve
(leaving streams)



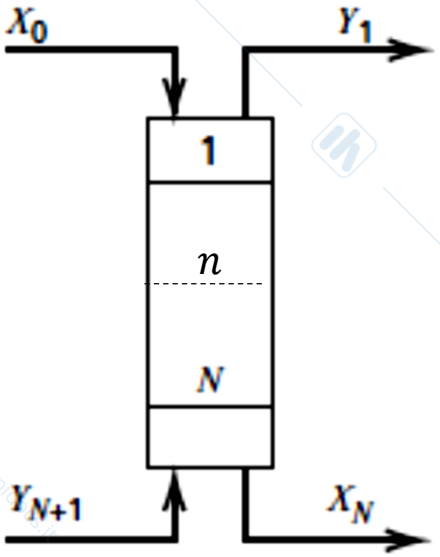
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Al primo piatto vale, ad esempio:

$$Y_1 = \frac{KX_1}{1 + X_1(1 - K)}$$



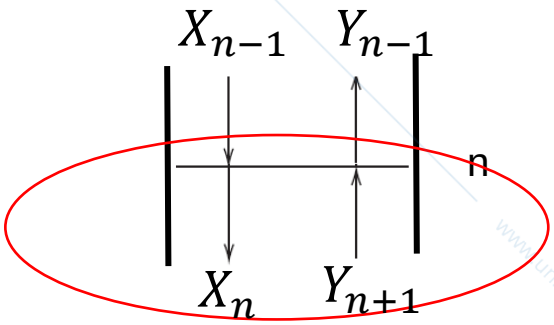
equilibrium curve
(leaving streams)



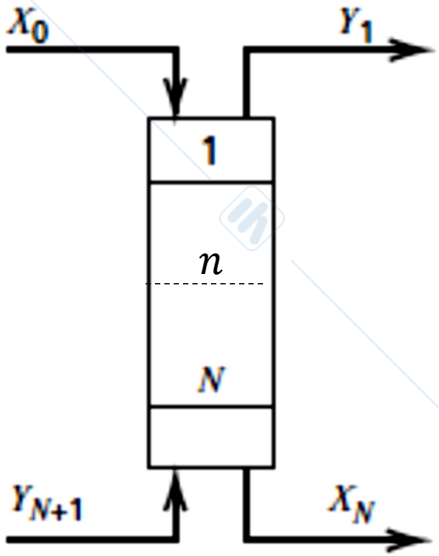
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

La ***operating line*** relaziona la concentrazione del soluto *nella fase vapore* che entra dal basso al piatto *n* alla concentrazione del soluto nel liquido che esce dallo stesso piatto

$$Y_{n+1} = \left(Y_{n-1} - \frac{L}{V} X_{n-1} \right) + \frac{L}{V} X_n$$

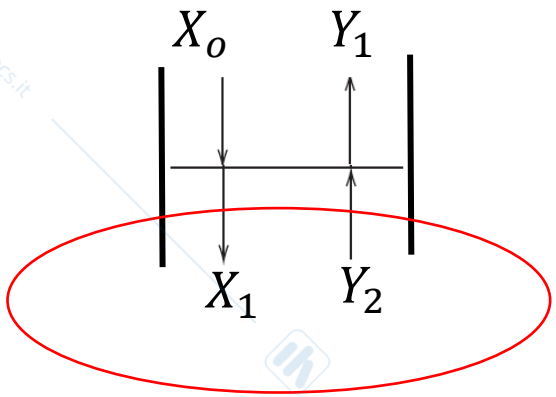


operating line
(passing streams)

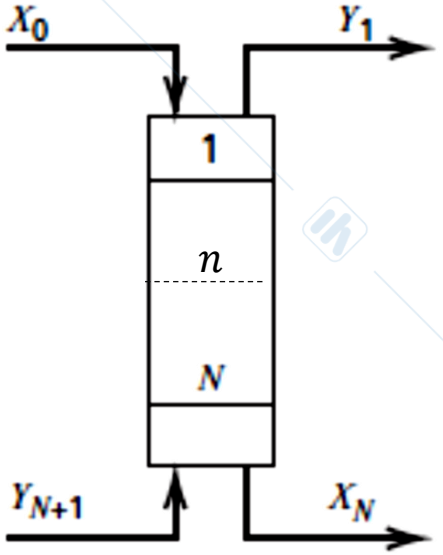


www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Al primo piatto vale quindi:



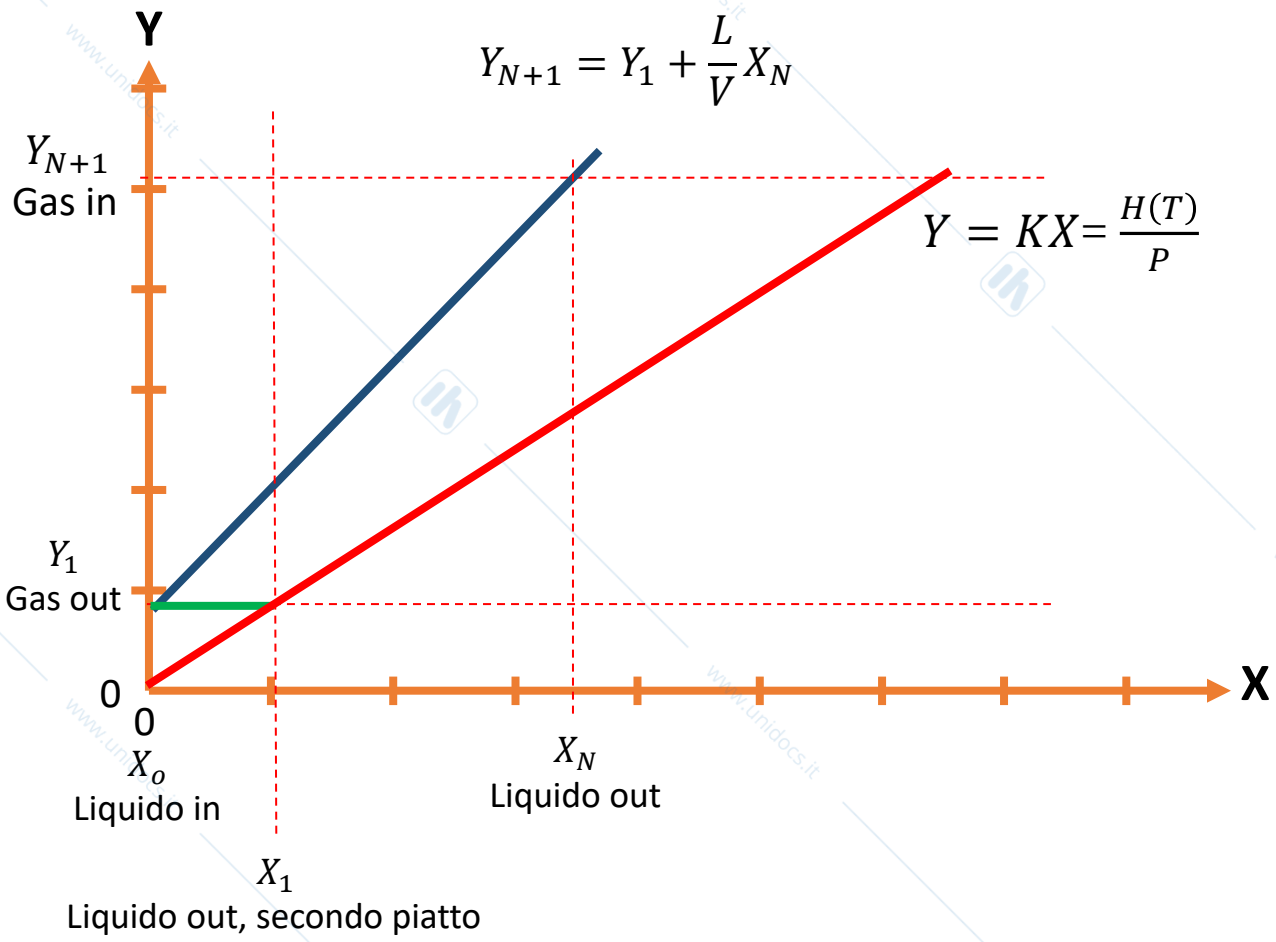
operating line
(passing streams)

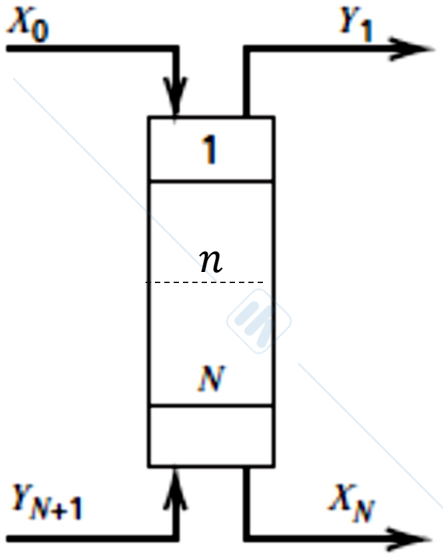


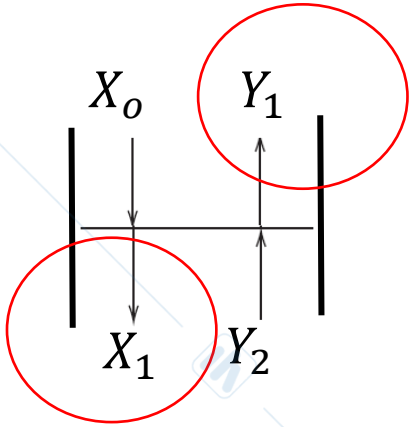
$$Y_2 = \left(Y_1 - \frac{L}{V}X_o\right) + \frac{L}{V}X_1$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Quindi al primo piatto si entra con X_o; Y_1 e si esce all'equilibrio con X_1; Y_1:

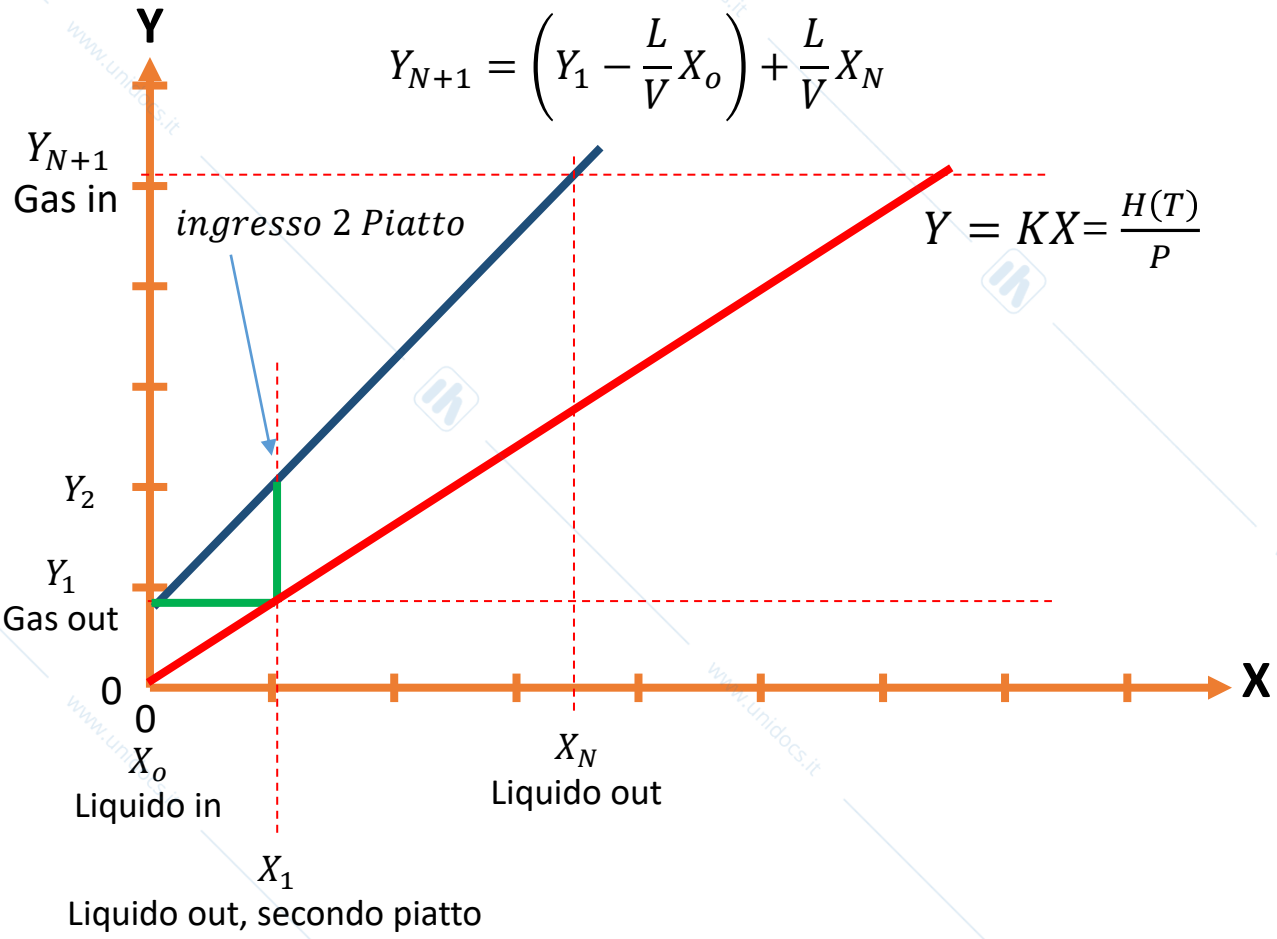




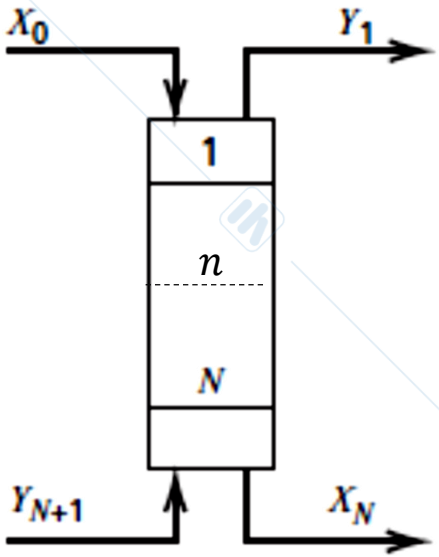


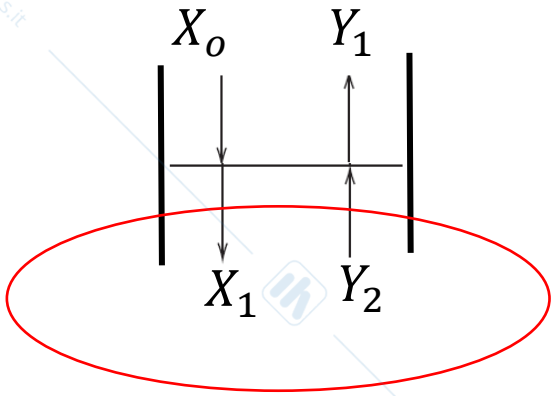
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Al secondo piatto si entra con X_1; Y_1 e si esce all'equilibrio con X_1; Y_2:



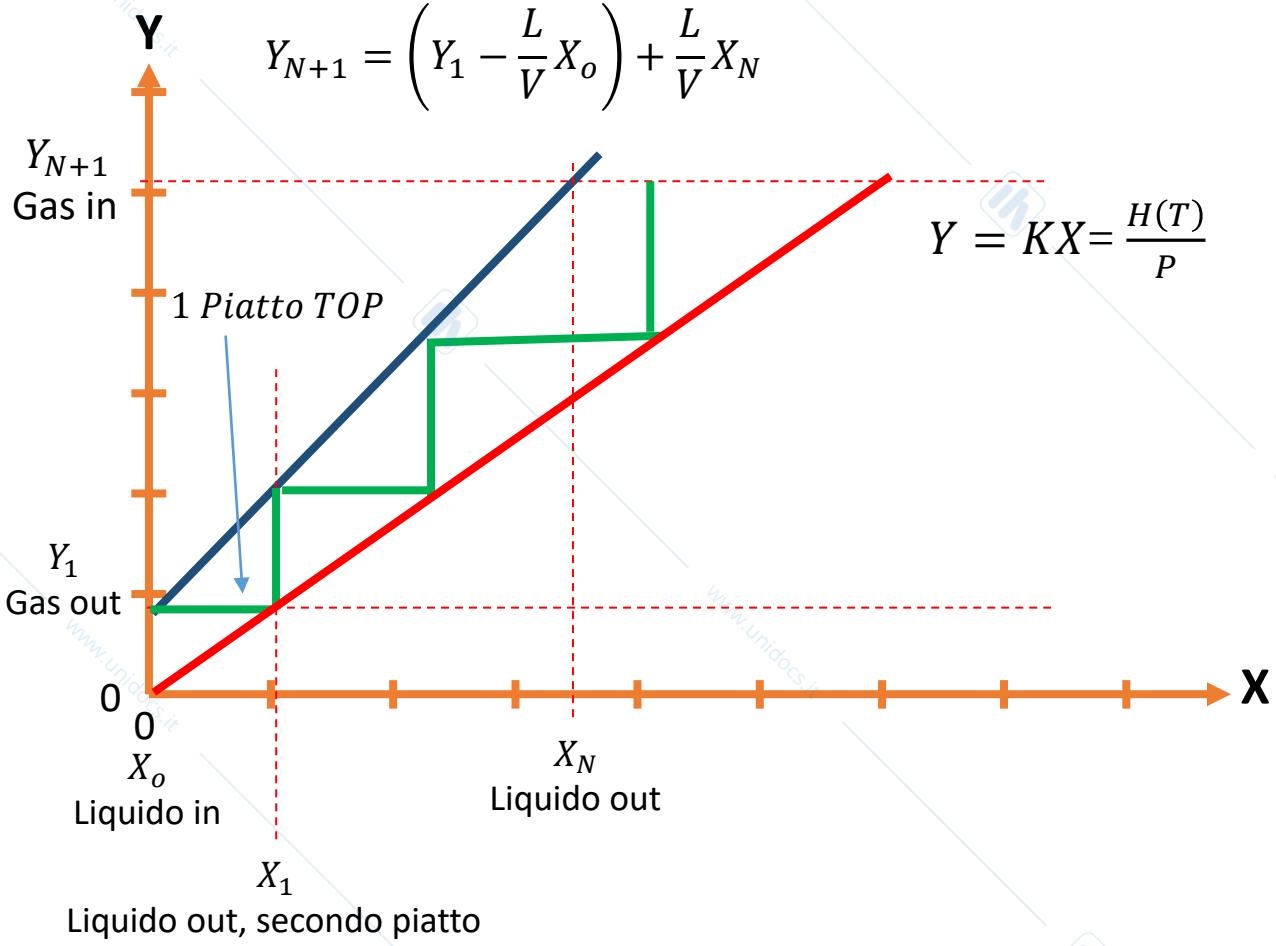
$$Y_{N+1} = \left(Y_1 - \frac{L}{V}X_o\right) + \frac{L}{V}X_N$$

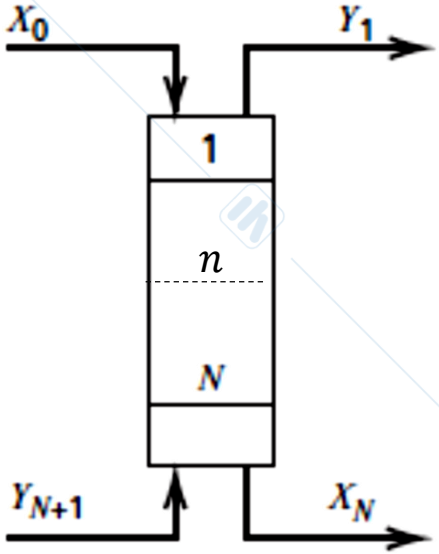




www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

La costruzione grafica si ripete fino al bottom della colonna (il punto più alto), con scelte conservative





www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Il metodo grafico è di difficile applicazione quando:

(1) I soluti sono più d'uno
(2) La concentrazione del soluto è molto bassa o molto alta (diagramma complesso)

Si usano software o metodi analitici

Il **Metodo di Kremser è** un metodo analitico valido rigorosamente per portate molari costanti (*soluzioni diluite*)

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Numero di stadi di equilibrio, metodo di Kremser

Quando la concentrazione del soluto nelle fasi gas e liquido è molto bassa (< 1%), le frazioni molari delle specie y_i e x_i possono essere utilizzate direttamente (i.e., non è necessario convertire y e x in Y e X) e vale la legge lineare per l'equilibrio

Caso 1: La curva operativa e la curva di equilibrio sono linee parallele

$$Y_{N+1} = Y_1 + \frac{L}{V} X_N$$

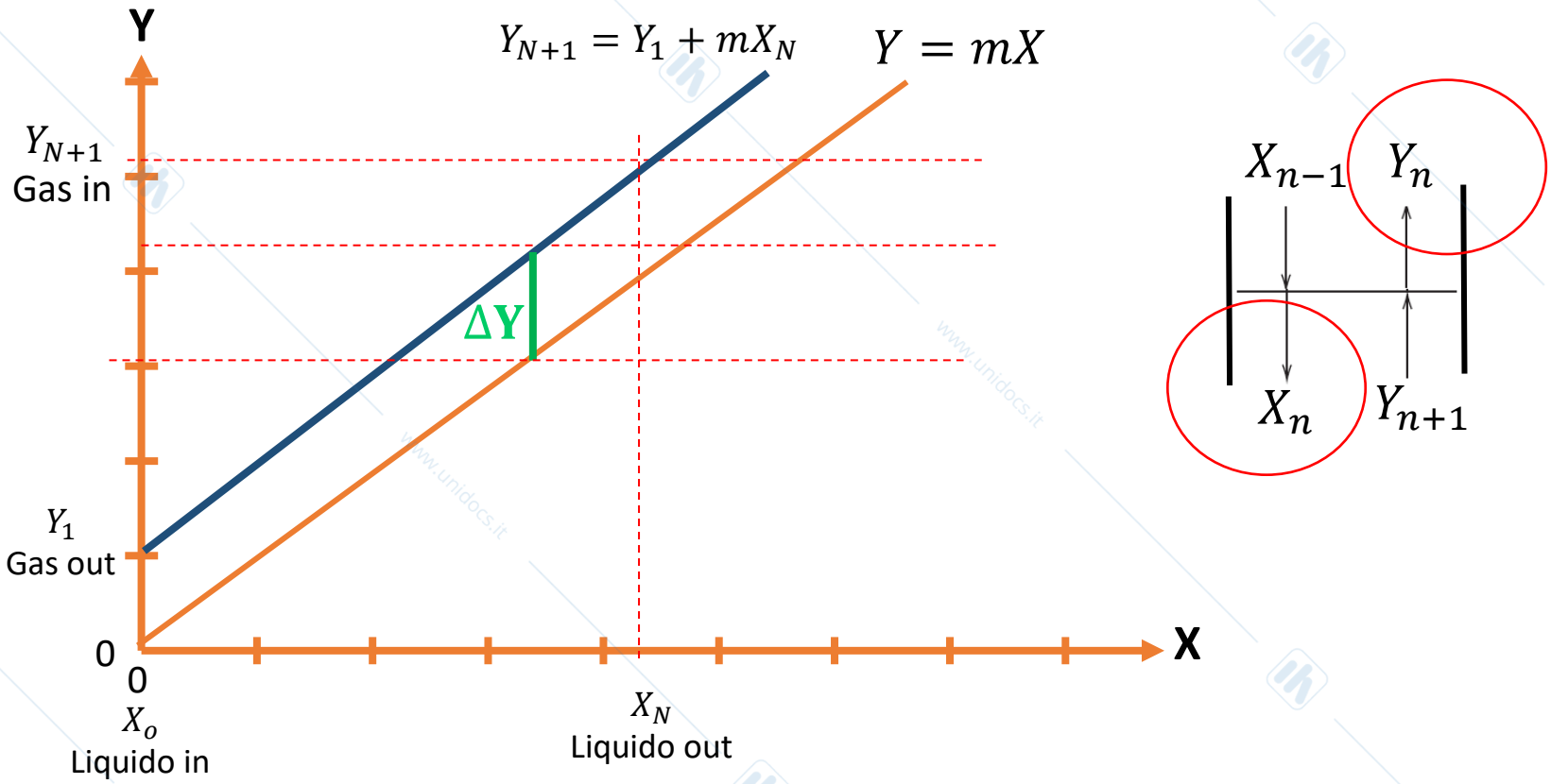
$$Y = KX = \frac{H(T)}{P}$$

$$m = \frac{Y}{X} = \frac{L}{V}$$

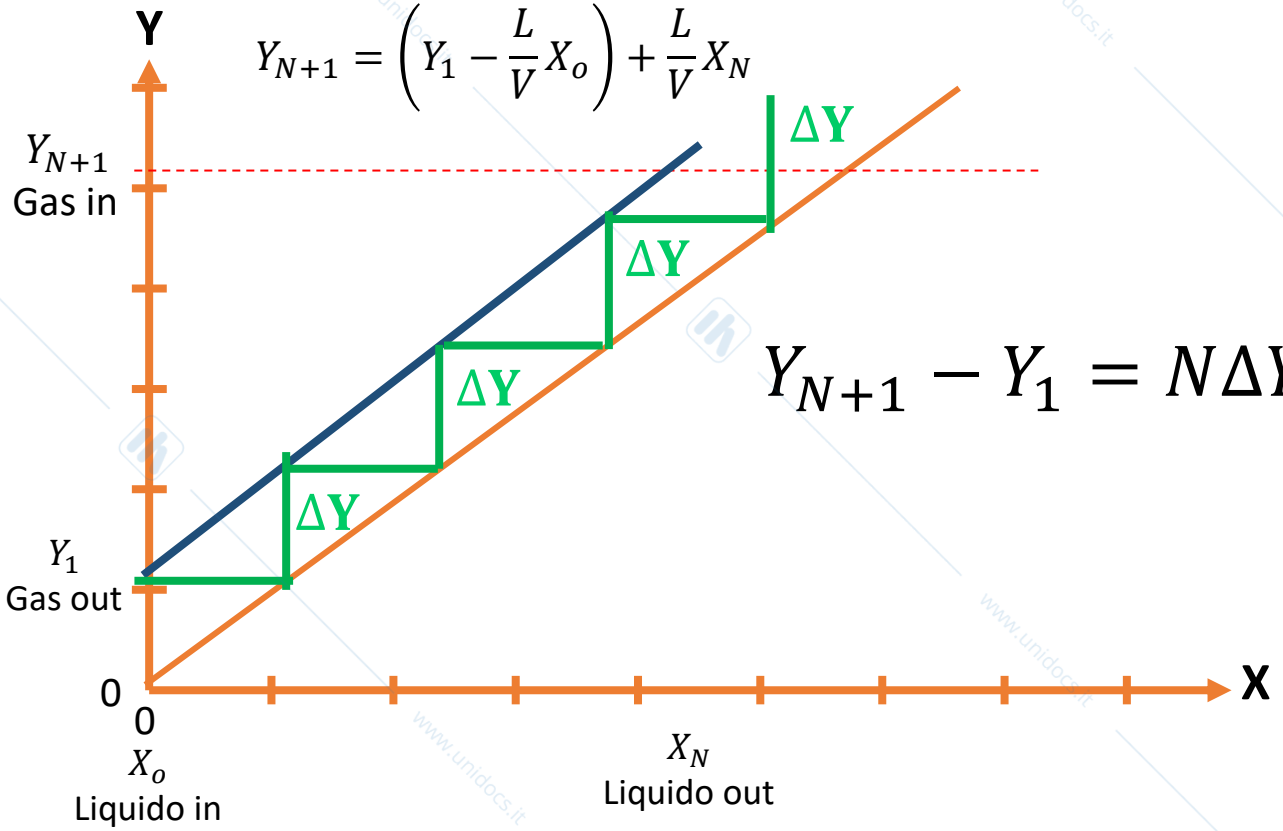
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Fissato il numero di stadi di equilibrio N, il **ΔY** risulta pari alla differenza tra la linea operativa e la linea di equilibrio:

$$\Delta Y = Y_{n+1} - mX_n = Y_1 + mX_n - mX_n = Y_1$$



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



$$Y_{N+1} = \left(Y_1 - \frac{L}{V}X_o\right) + \frac{L}{V}X_N$$

$$Y_{N+1} - Y_1 = N\Delta Y = NY_1$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$\Delta \mathbf{Y} = Y_1$$

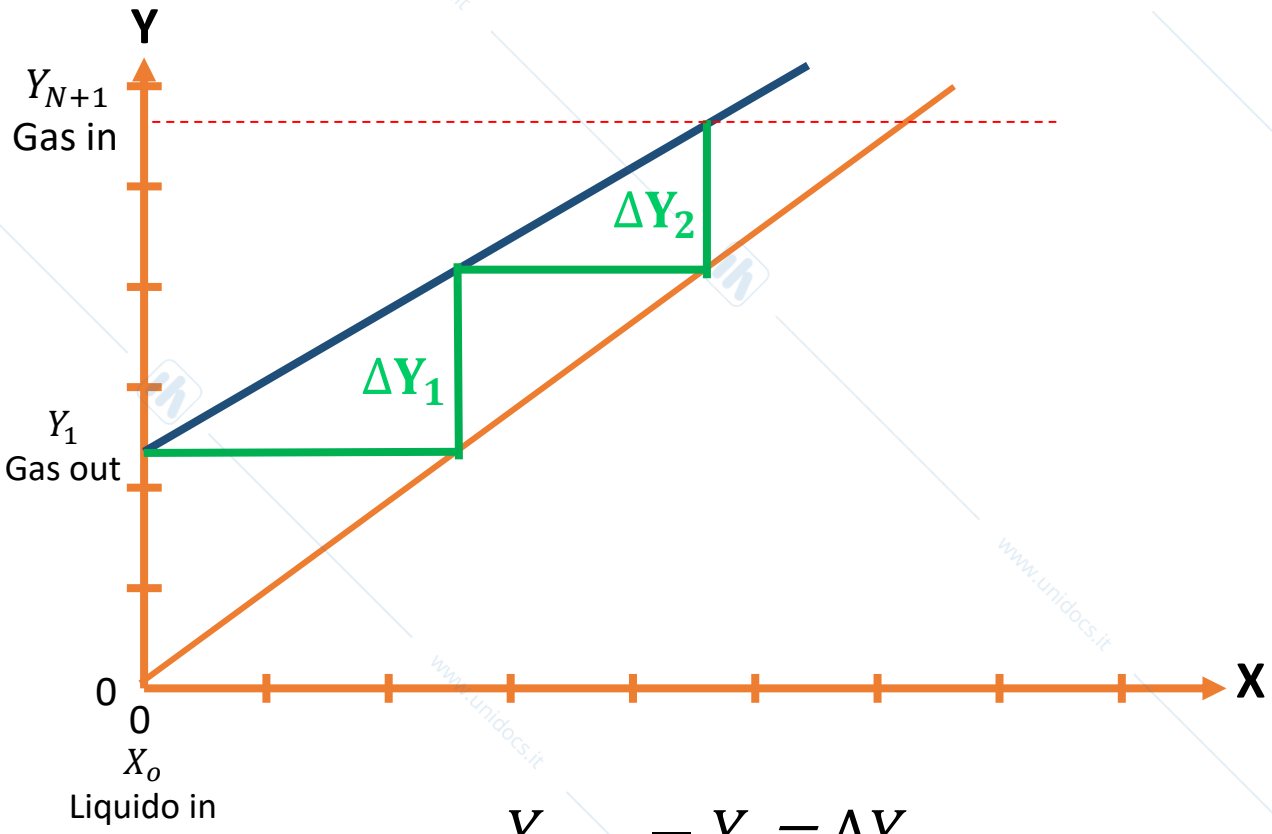
$$Y_{N+1} - Y_1 = N\Delta Y$$

$$N = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{Y_1}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Caso 2: Segmenti non paralleli

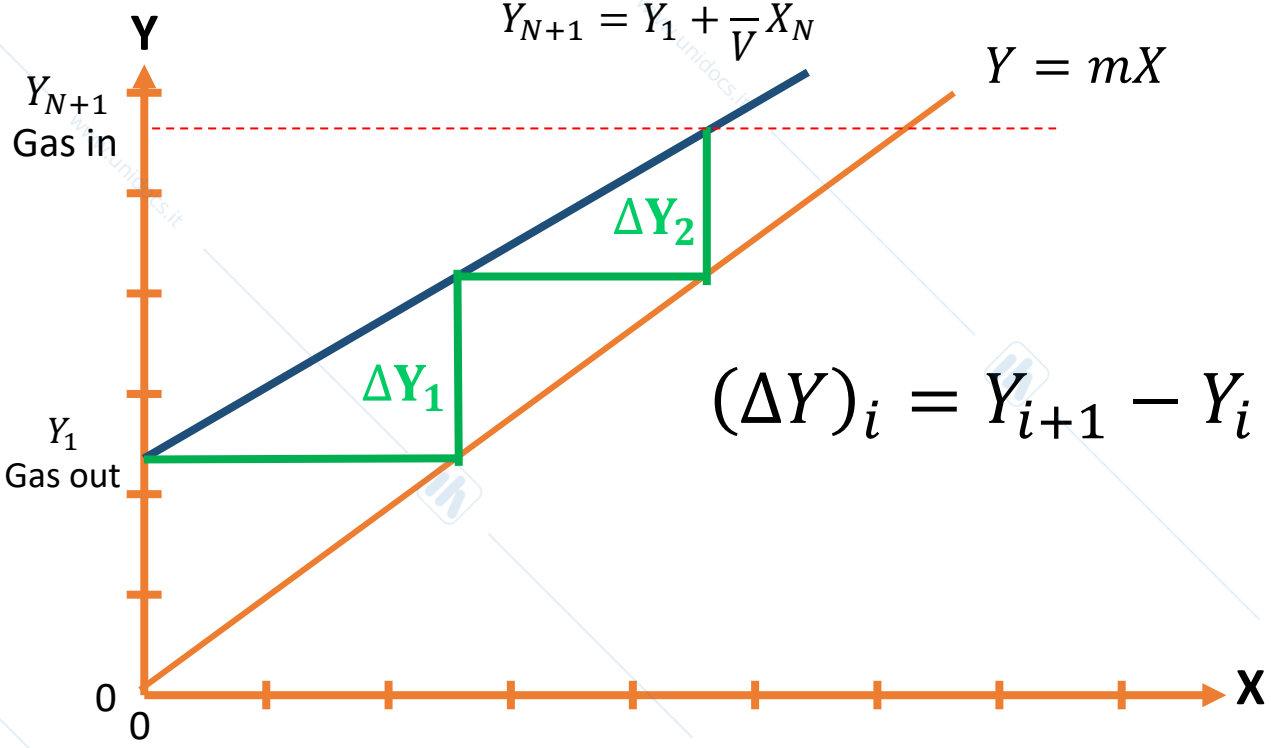
$$m \neq \frac{L}{V}$$



$$Y_{N+1} - Y_1 = \Delta Y$$

$$\Delta Y = (\Delta Y)_1 + (\Delta Y)_2 + \cdots + (\Delta Y)_N$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



$$Y_{N+1} = Y_1 + \frac{L}{V} X_N$$

$$Y = mX$$

$$(\Delta Y)_i = Y_{i+1} - Y_i$$

$$(\Delta Y)_i = Y_{i+1} - Y_i = Y_1 + \frac{L}{V} X_i - mX_i$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$(\Delta Y)_i = Y_{i+1} - Y_i = Y_1 + \frac{m}{m}\frac{L}{V}X_i - mX_i = Y_1 + mX_i\left(\frac{L}{mV} - 1\right)$$

$$Y_1 = (\Delta Y)_i - mX_i\left(\frac{L}{mV} - 1\right)$$

$$(\Delta Y)_{i+1} = Y_{i+2} - Y_{i+1} = \boldsymbol{Y_1} + mX_{i+1}\left(\frac{L}{mV} - 1\right)$$

$$(\Delta Y)_{i+1} = \boldsymbol{(\Delta Y)_i - Y_i\left(\frac{L}{mV} - 1\right)} + Y_{i+1}\left(\frac{L}{mV} - 1\right)$$

$$(\Delta Y)_{i+1} = (\Delta Y)_i + \left(\frac{L}{mV} - 1\right)(\Delta Y)_i$$

$$\boldsymbol{(\Delta Y)_{i+1} = \left(\frac{L}{mV}\right)(\Delta Y)_i}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

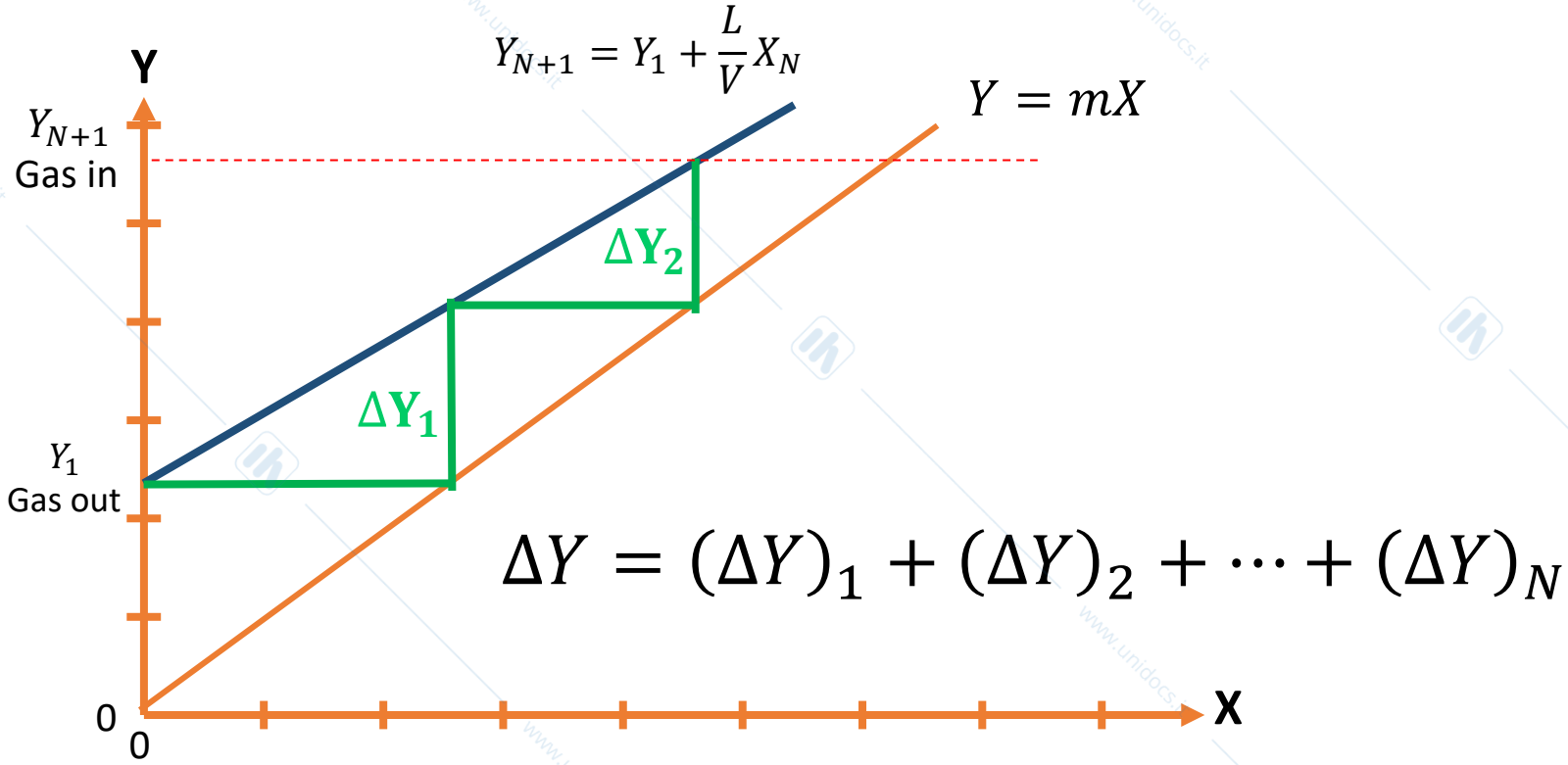
$$(\Delta Y)_2 = \left(\frac{L}{mV}\right)(\Delta Y)_1$$

$$(\Delta Y)_3 = \left(\frac{L}{mV}\right)(\Delta Y)_2 = \left(\frac{L}{mV}\right)\left(\frac{L}{mV}\right)(\Delta Y)_1 = \left(\frac{L}{mV}\right)^2(\Delta Y)_1$$

$$(\Delta Y)_4 = \left(\frac{L}{mV}\right)(\Delta Y)_3 = \left(\frac{L}{mV}\right)\left(\frac{L}{mV}\right)^2(\Delta Y)_1 = \left(\frac{L}{mV}\right)^3(\Delta Y)_1$$

$$(\Delta Y)_j = \left(\frac{L}{mV}\right)^{j-1}(\Delta Y)_1$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$\Delta Y = (\Delta Y)_1 + (\Delta Y)_2 + \cdots + (\Delta Y)_N$$

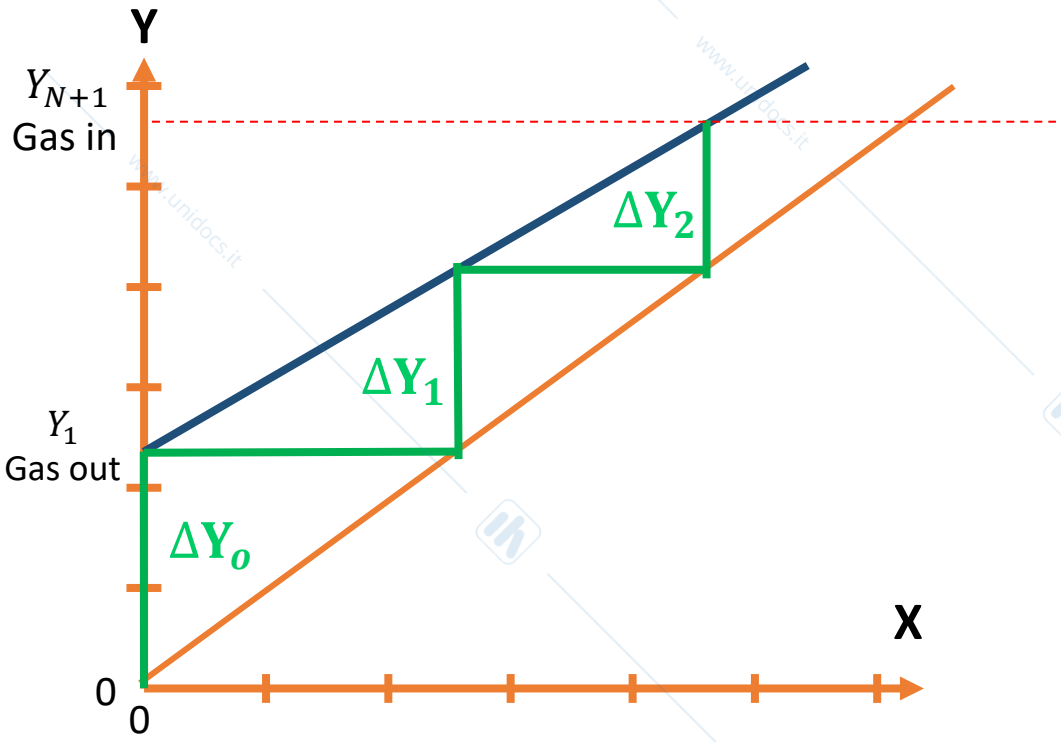
$$\Delta Y = (\Delta Y)_1 + \left(\frac{L}{mV}\right)(\Delta Y)_1 + \left(\frac{L}{mV}\right)^2 (\Delta Y)_1 + \cdots + \left(\frac{L}{mV}\right)^{N-1} (\Delta Y)_1$$

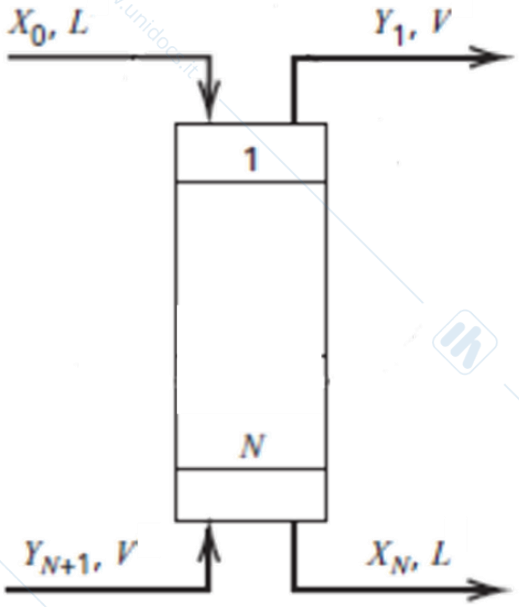
$$\Delta Y = (\Delta Y)_1 \left[1 + \left(\frac{L}{mV}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{L}{mV}\right)^{N-1}\right]$$

$$\boldsymbol{\Delta Y = (\Delta Y)_1 \frac{1 - \left(\frac{L}{mV}\right)^N}{1 - \left(\frac{L}{mV}\right)}}$$

$$\sum_{i=0}^{k} a x^i = a \frac{\left(1 - x^{k+1}\right)}{(1 - x)}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari





Se si introduce:

$$(\Delta Y)_o = Y_1 - Y_1^*$$

$$(\Delta Y)_1 = \left(\frac{L}{mV}\right)(\Delta Y)_o = \left(\frac{L}{mV}\right)(Y_1 - Y_1^*)$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$\Delta Y = (\Delta Y)_1 \frac{1-\left(\frac{L}{mV}\right)^N}{1-\left(\frac{L}{mV}\right)} = \left(\frac{L}{mV}\right)(Y_1 - Y_1^*)\frac{1-\left(\frac{L}{mV}\right)^N}{1-\left(\frac{L}{mV}\right)}$$

$A = \frac{L}{mV}$ è definito *fattore di assorbimento* (in questo caso < 1)

$$\Delta Y = Y_{N+1} - Y_1 = (Y_1 - Y_1^*)\frac{A - A^{N+1}}{1-A}$$

$$\frac{Y_{N+1} - Y_1}{Y_1 - Y_1^*} = \frac{A - A^{N+1}}{1-A}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$\frac{Y_{N+1} - Y_1}{Y_1 - Y_1^*} + 1 = \frac{A - A^{N+1}}{1 - A} + 1$$

$$\frac{Y_{N+1} - Y_1 + Y_1 - Y_1^*}{Y_1 - Y_1^*} = \frac{Y_{N+1} - Y_1^*}{Y_1 - Y_1^*} = \frac{A - A^{N+1} + 1 - A}{1 - A} = \frac{1 - A^{N+1}}{1 - A}$$

$$A^{N+1} = 1 - \frac{Y_{N+1} - Y_1^*}{Y_1 - Y_1^*}(1 - A)$$

$$\frac{A^{N+1}}{A} = \frac{1}{A} - \frac{Y_{N+1} - Y_1^*}{Y_1 - Y_1^*}\frac{(1 - A)}{A}$$

$$A^N = \frac{1}{A} + \frac{Y_{N+1} - Y_1^*}{Y_1 - Y_1^*}\left(1 - \frac{1}{A}\right)$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$\ln A^N = N \ln A = \ln\left[\frac{1}{A} + \frac{Y_{N+1} - Y_1^*}{Y_1 - Y_1^*}\left(1 - \frac{1}{A}\right)\right]$$

$$N = \frac{\ln\left[\frac{1}{A} + \frac{Y_{N+1} - Y_1^*}{Y_1 - Y_1^*}\left(1 - \frac{1}{A}\right)\right]}{\ln A}$$

Equazione di Kremser

$$\boldsymbol{N = \frac{ln\left[\frac{mV}{L} + \frac{Y_{N+1} - Y_1^*}{Y_1 - Y_1^*}\left(1 - \frac{mV}{L}\right)\right]}{ln\frac{L}{mV}}}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Efficienza dello stadio di assorbimento

Nei casi reali la temperatura del liquido e del vapore uscenti da uno stadio sono uguali ma le composizioni all'equilibrio non sono sempre rispettate.

Il modo più semplice è parlare di una efficienza globale E_o che dipende principalmente dalle proprietà fisiche di liquido e vapore:

$$E_o = \frac{N_T}{N_a}$$

E_o è generalmente inferiore a 1.0

N_T è il numero di stadi di equilibrio (teorici)

N_a è il numero reale di piatti richiesti

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Metodi disponibili

1. Similitudine con altri apparati
2. Modelli empirici da sperimentazioni
3. Modelli semi-teorici basati sulle velocità di trasporto di calore e materia
4. Passaggio di scala da dati di laboratorio

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Metodo 1: Similitudine con altri apparati

Effetti combinati del design della colonna

Service	Type Tray	Column Diameter, ft	No. of Trays	Tray Spacing, in.	Average Pressure, psia	Average Temp., °F	Molar Average Liquid Viscosity, CP	Overall Stage Efficiency, %
Absorption of butane	Bubble cap	4	24	18	260	120	0.48	36
Absorption of butane	Bubble cap	5	16	30	254	132	0.31	50
Absorption of butane	Bubble cap	4	16	24	94	117	1.41	10.4

Con piatti a campanella (a gorgogliamento) o bubble-cap tray

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Metodo 1: Similitudine con altri apparati

Effetto del componente

Component	Overall Stage Efficiency, %
Ethylene	10.3
Ethane	14.9
Propylene	25.5
Propane	26.8
Butylene	33.8

Variando il tipo di componente, a parità di colonna (a piatti, con diametro 3 m, con 19 bubble-cap, 70 cm di spaziatura, a 6 bar, 15 °C

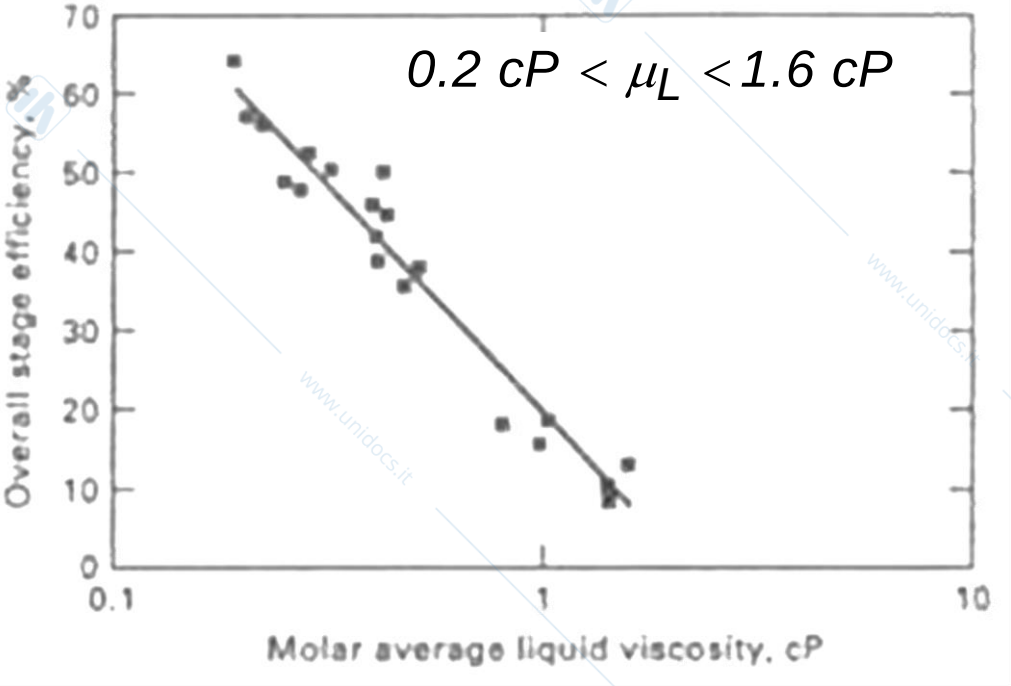
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Metodo 2: Modelli empirici da sperimentazioni

Valutazione da dati di viscosità media molare μ del liquido (solventi a base di idrocarburi, oli).

Correlazione di Drickamer-Bradford

$$E_o = 19.2 - 57.8 \log \mu_L$$



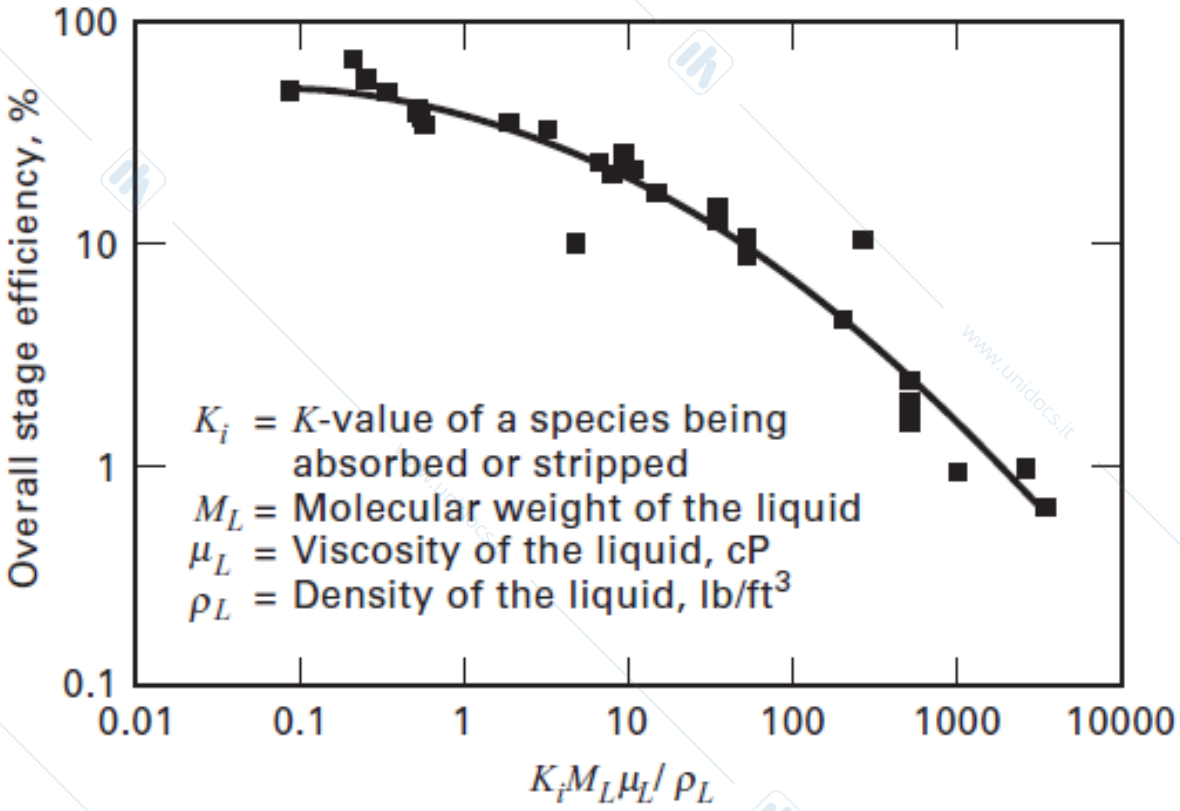
1 cP (acqua a 20°C) = 1 mPa·s = 0.001 Pa·s = 0.001 N·s·m^{-2} = 0.001 kg·m^{-1}·s^{-1}

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Metodo 2: Modelli empirici da sperimentazioni

Valutazione da dati di viscosità media molare μ del liquido (solventi a base di idrocarburi, oli).

Correlazione di 'O Connell



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Metodo 3: Modelli semi-teorici basati sulle velocità di trasporto di calore e materia

Ipotesi di lavoro:

i) liquido e vapore che entrano nel piatto hanno composizione uniforme

ii) il liquido uscente ha composizione uniforme

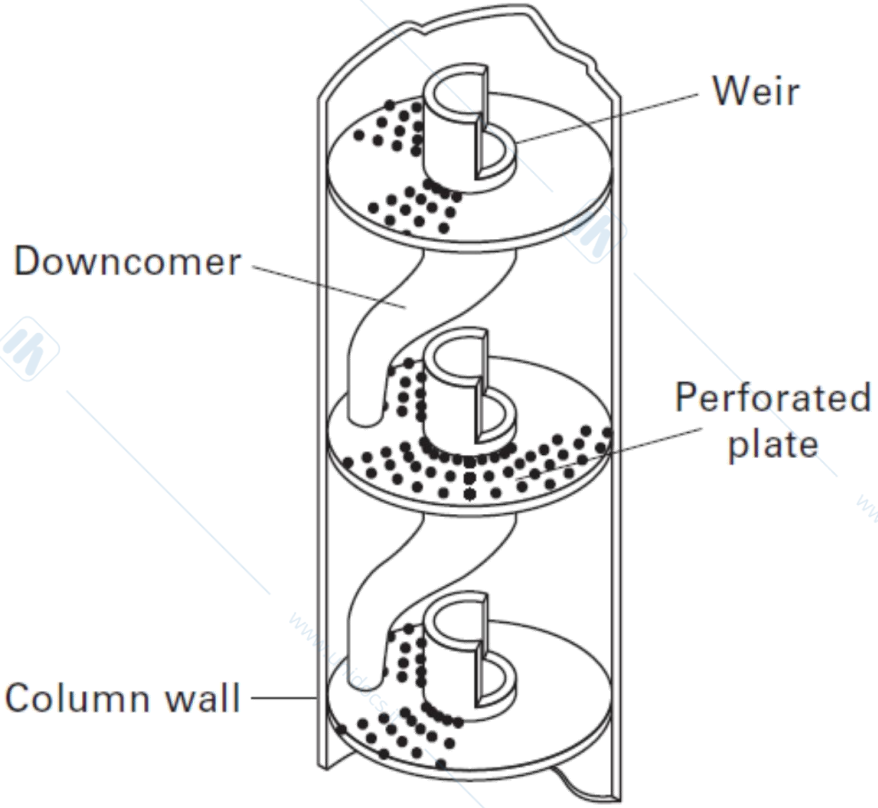
iii) il vapore si comporta come un plug- flow (corrente monodimensionale)

Il modello più noto è quello di Murphree

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Metodo 4: Passaggio di scala da dati di laboratorio

Per sistemi altamente non ideali e per dati di equilibrio non ben noti sono necessari dati di laboratorio

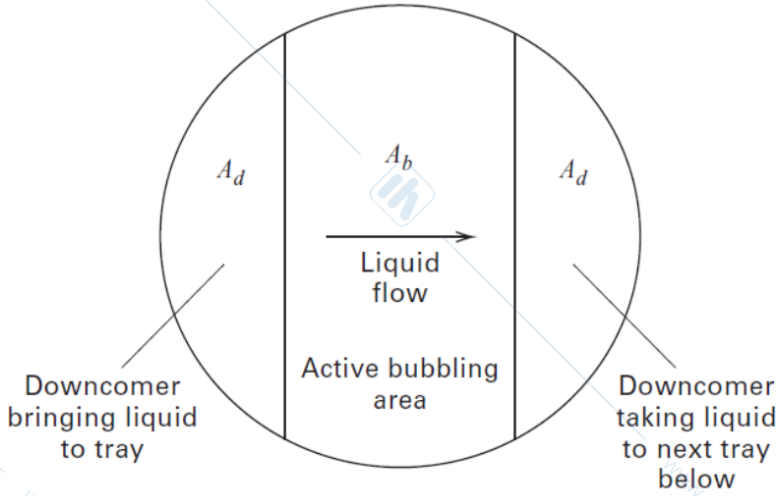


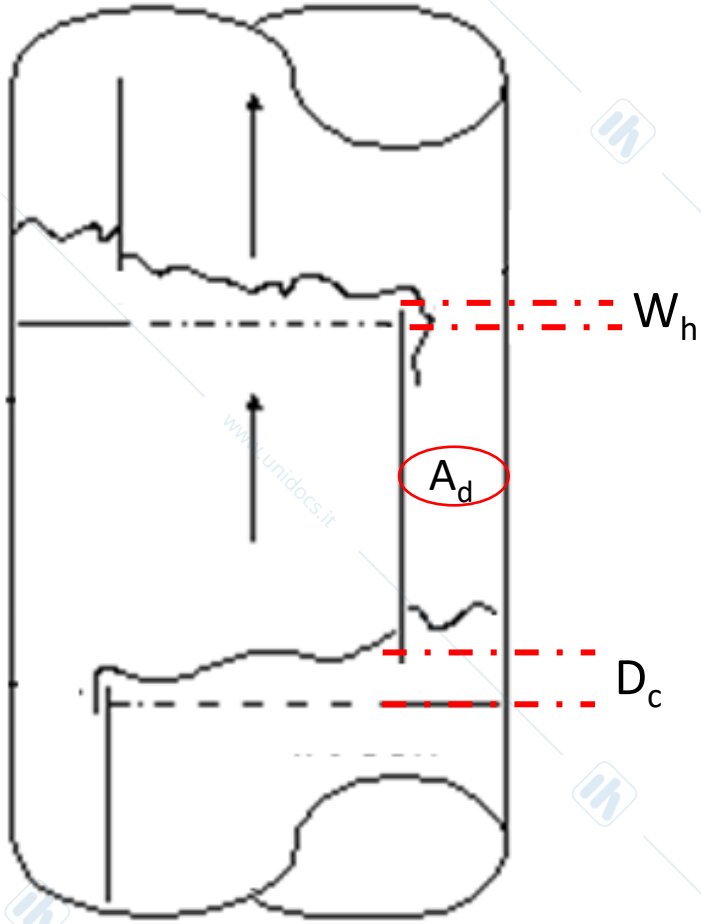
1 to 2 inches in diameter

La colonna di Oldershaw si utilizza con risultati significativi per colonne con diametro da 10 in a 4 ft che lavorino in un range dal 40% al 90 % del flooding.(vedi avanti…)

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

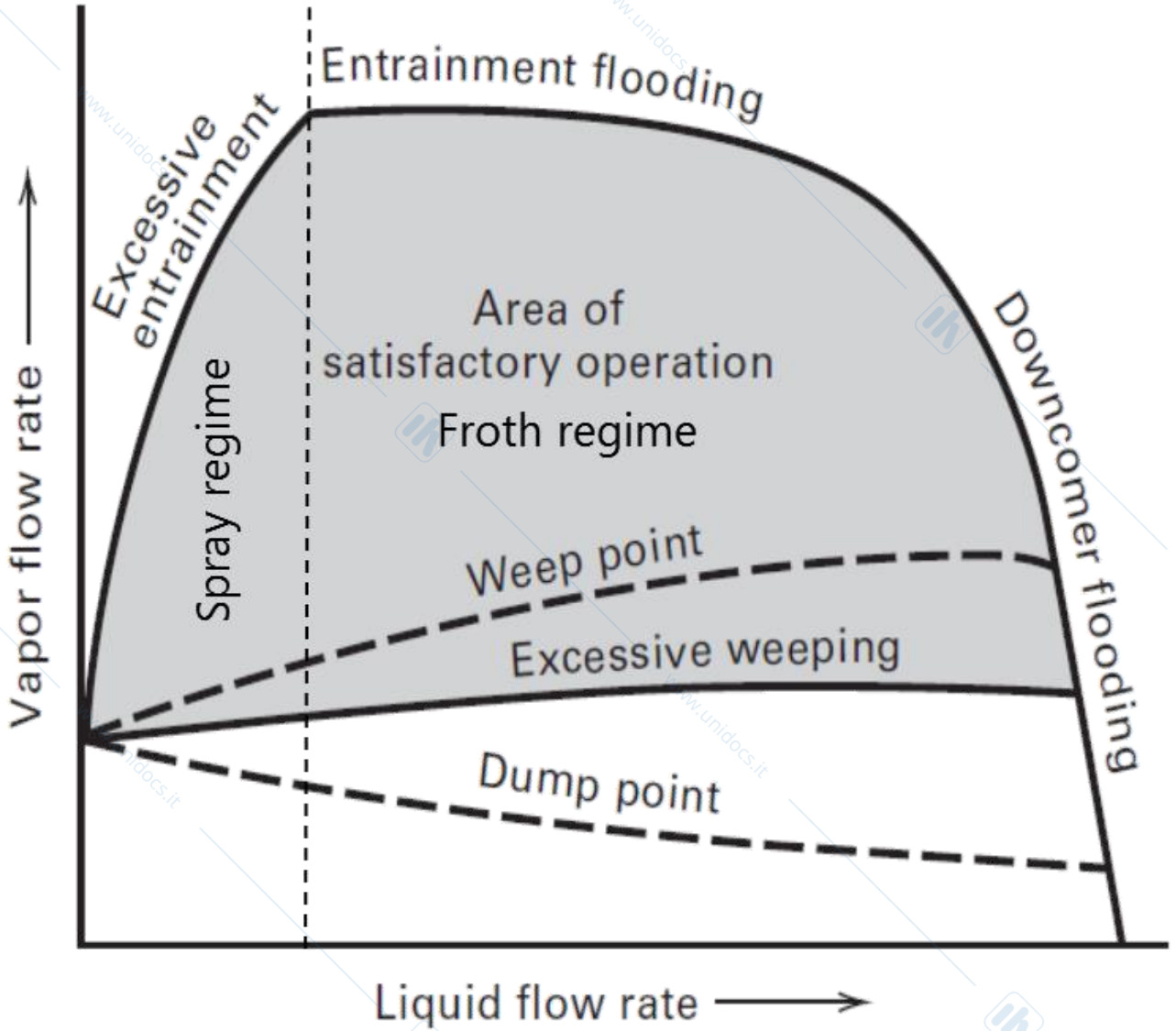
Donwcomer clearance D_c = distanza tra il bordo inferiore del discendente e il piatto sottostante
Downcomer Area A_d = l'area effettiva di passaggio del liquido attraverso il discendente
Outlet weir W_h = altezza dello stramazzo (o sfioratore) rispetto al piatto

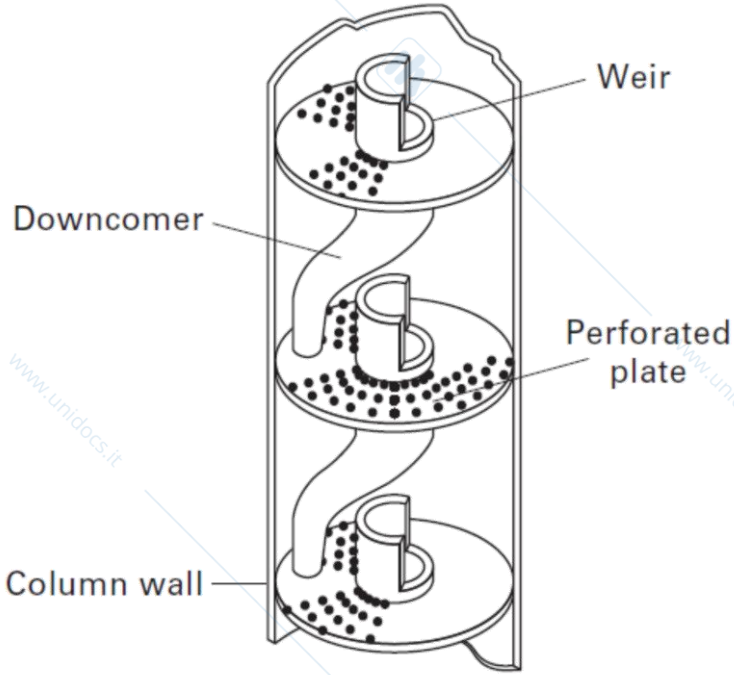




www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

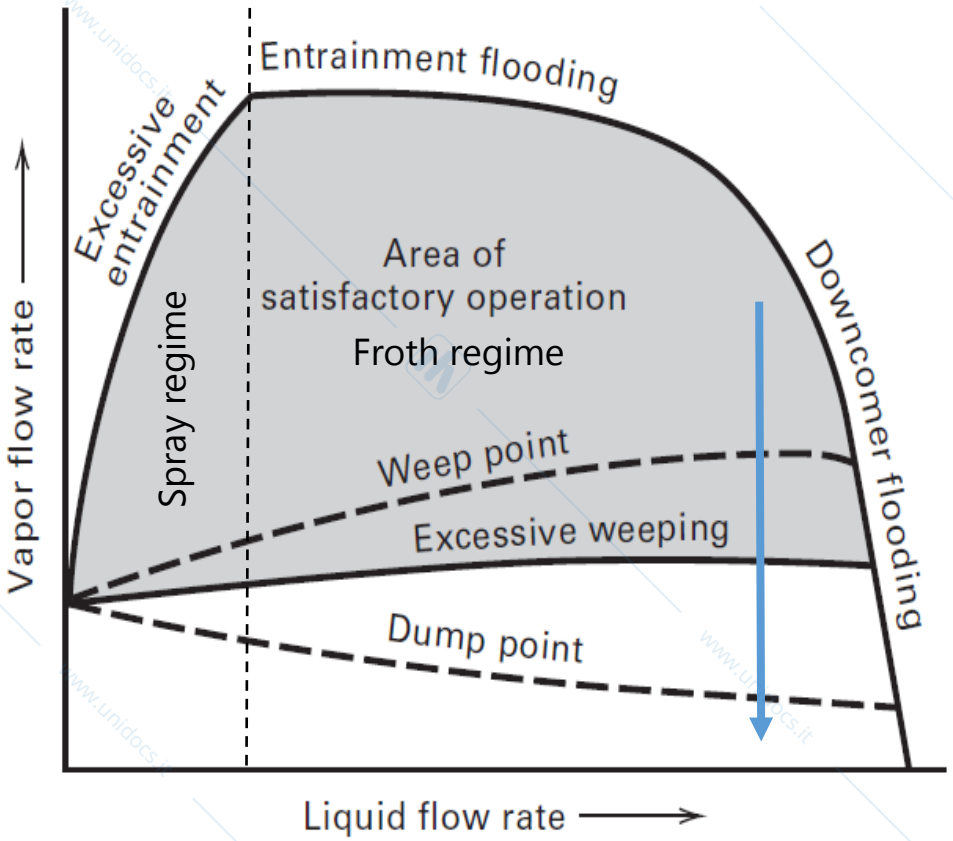
I fenomeni del flooding





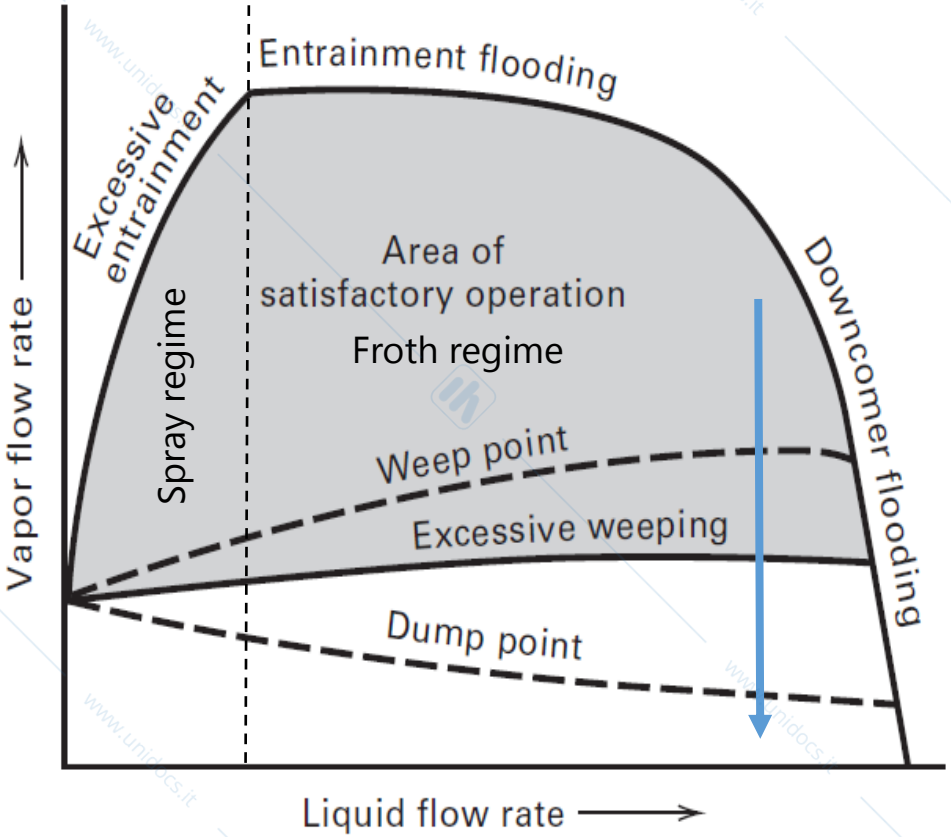
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Fissata la portata di liquido, **al diminuire della portata del vapore** si osservano:



Weep point (punto di sgocciolamento): il liquido scorre verso il basso attraverso I fori del piatto, per effetto della bassa portata di vapore.

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

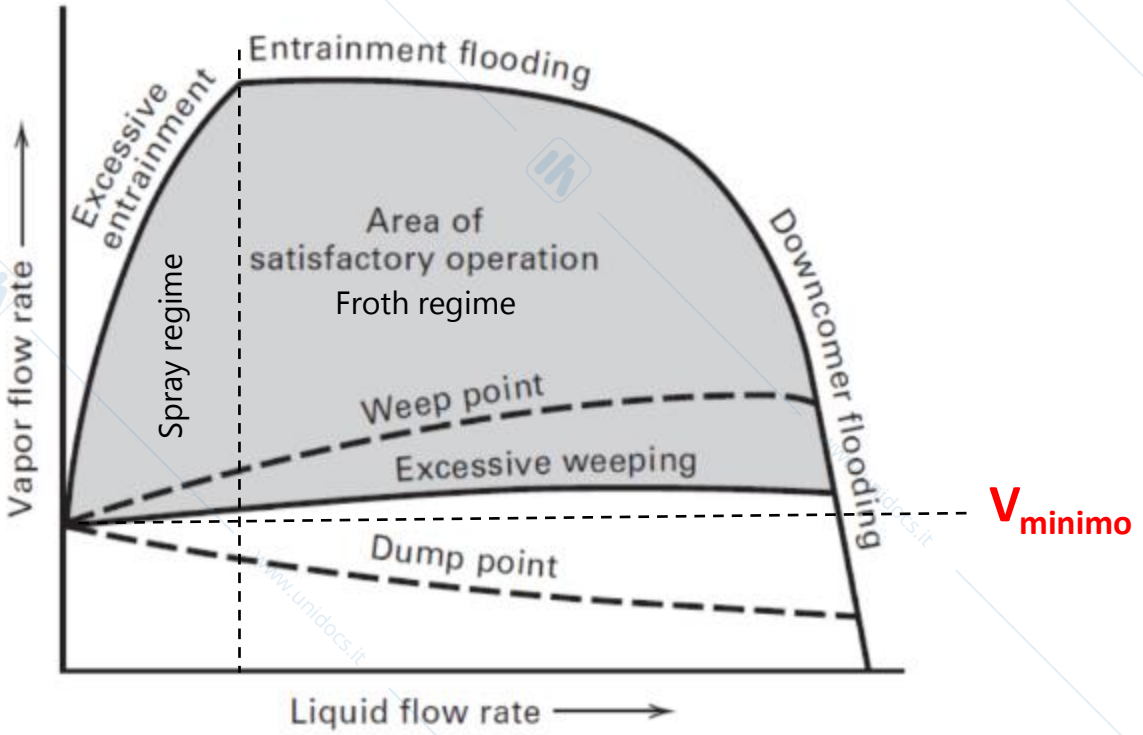


Il "**dump point**" **(scarico o svuotamento)** è il punto oltre il quale si osserva nettamente – anche visivamente – il fenomeno del weeping.

Oltre il dump point le operazioni sono instabili e la separazione è difficile o impossibile

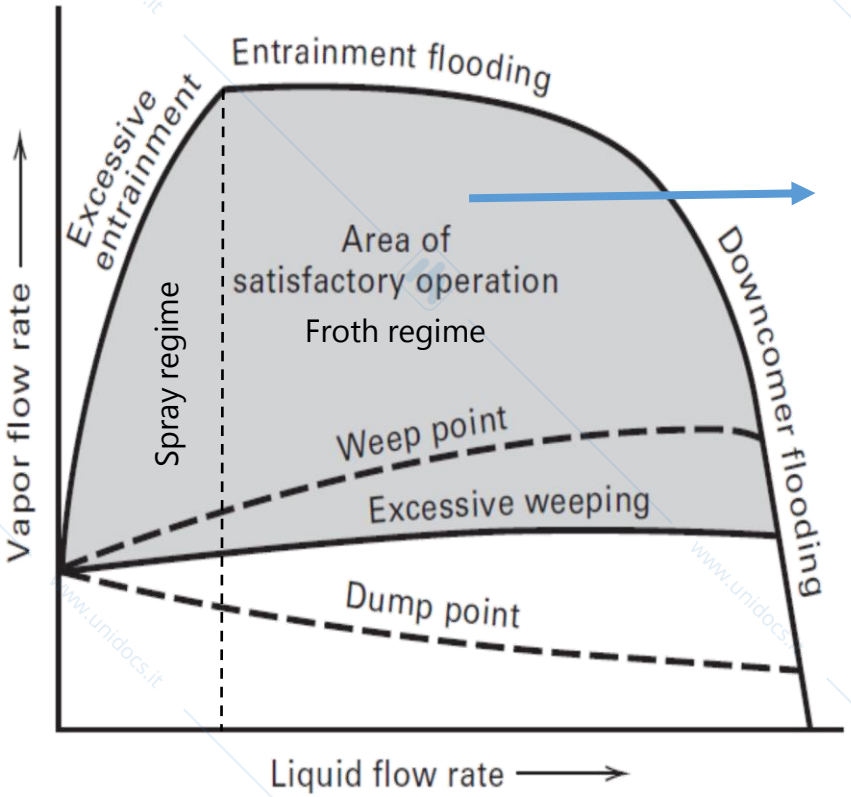
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Esiste una portata minima di vapore V_{minimo} per il weeping (il piatto “piange”) del liquido attraverso i fori del piatto e le aperture dei downcomer

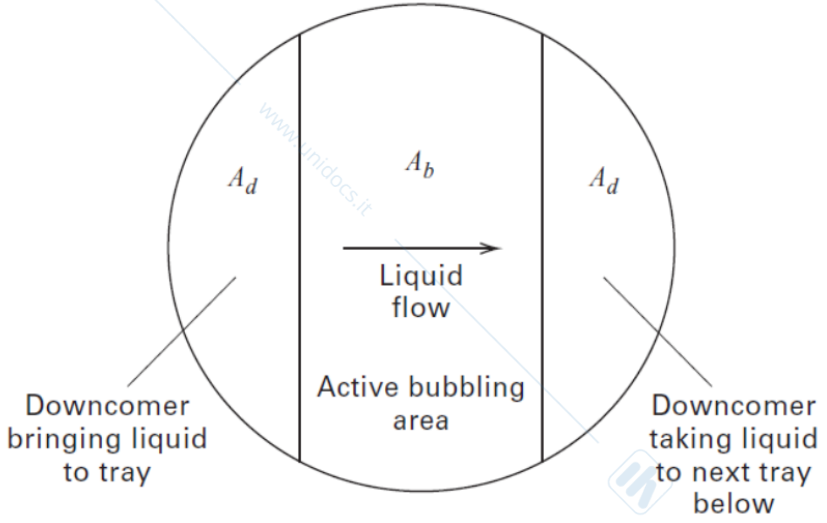


www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Fissata la portata di vapore, all'aumentare della portata del liquido si osservano:

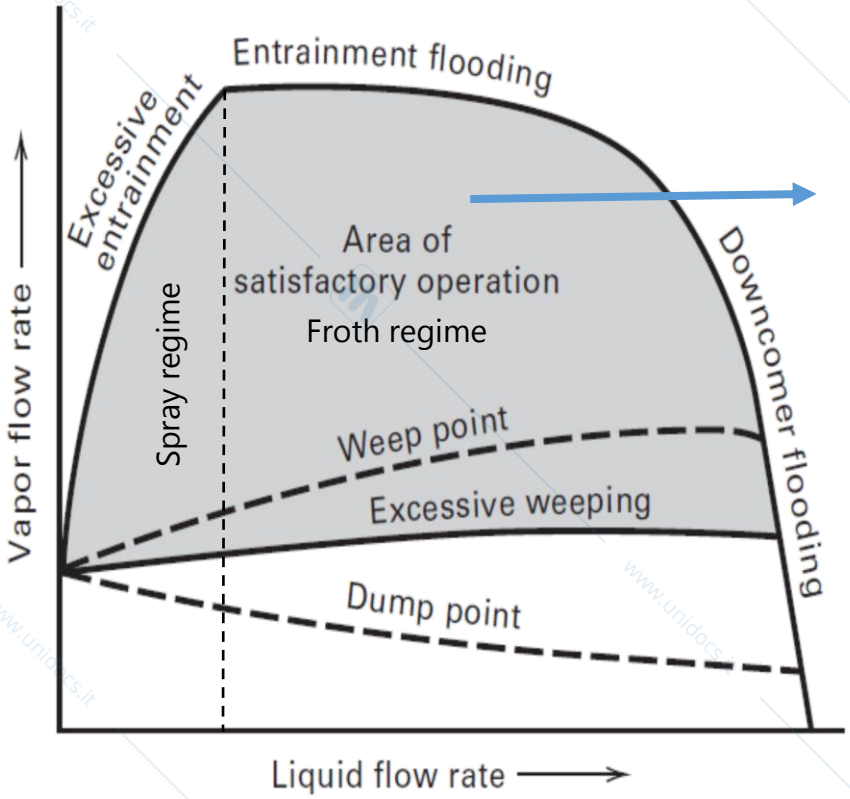


Downcomer o back-up flooding: il liquido si accumula nel discendente perchè l'area di passaggio al downcomer (A_d) è inadeguata al flusso (accumulo) o perchè la D_c è troppo piccola



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Fissata la portata di vapore, all'aumentare della portata del liquido si osservano:



Downcomer choke flooding: se la velocità del liquido è troppo alta, il froth non riesce a superare l'attrito del piatto e vienetrasportato al piatto superiore, causando l'accumulo del liquido al piatto inferiore

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

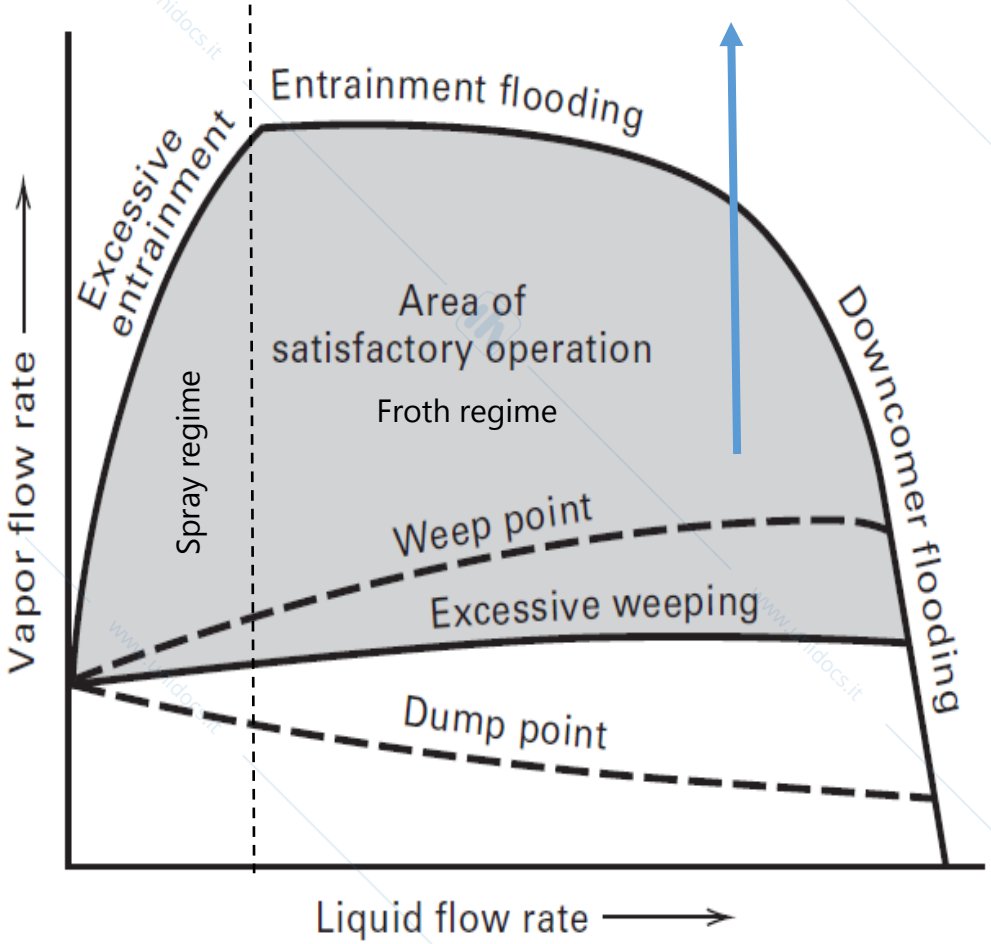
Downcomer (back-up) flooding

Se la downcomer clearance è troppo grande o il bordo dello stramazzo W_h supera il bordo del downcomer, il downcomer stesso diventa “unsealed” (accessibile al passaggio del vapore).
Il vapore fluisce attraverso il downcomer e sposta il liquido, allagando il piatto superiore.

Rule of thumbs (es.): il downcomer flooding avviene raramente se l’area del discendente è almeno pari al 10%% dell’area della colonna, se la distanza tra i piatti è almeno di 60 cm, se il bottom edge del downcomer è mezzo pollice sotto il top edge dello stramazzo….

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Fissata la portata di liquido, **all'aumentare della portata del vapore** si osservano:



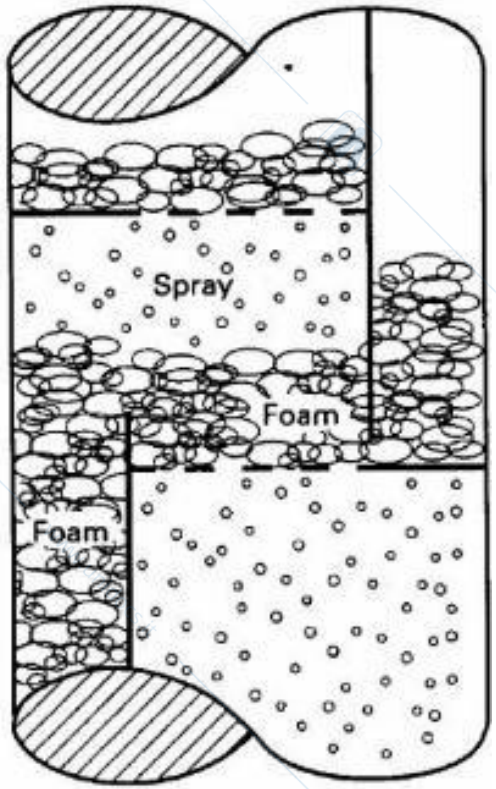
Entrainment flooding: il liquido è trascinato verso l'alto per l'alta velocità del vapore, che fa aumentare l'altezza del *froth*.

Se la distanza tra i piatti è piccola, il *froth* raggiunge il piatto superiore e causa l'accumulo di liquido (flooding) sul piatto superiore.

Il liquido può essere trascinato all'uscita in testa al separatore.

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Spray flooding: il liquido è trascinato verso l'alto per l'alta velocità del vapore in forma di droplet. E' favorite da basse portate del liquido



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

	Sieve Trays	Valve Trays	Bubble-Cap Trays
Relative cost	1.0	1.2	2.0
Pressure drop	Lowest	Intermediate	Highest
Efficiency	Lowest	Highest	Highest
Vapor capacity	Highest	Highest	Lowest
Typical turndown ratio	2	4	5

I piatti a valvola hanno maggiore flessibilità rispetto ai piatti forati

Rapporto di turndown = V/V_{minimo}

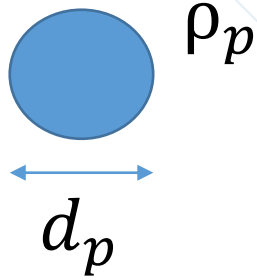
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Per evitare il flooding (spray, entrainment), occorre definire il diametro della *liquid droplet (goccia)* e la velocità del fluido (il vapore) U_v in controcorrente, tale che la goccia sia in quiete (ferma).

Si risolve con il bilancio di forze sulla particella:

$$\sum F = F_{buoyancy} + F_{drag} + F_{gravity} = 0$$

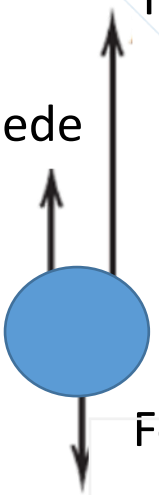
partendo dall'ipotesi che la goccia (o particella p) sia sferica:



$$m_p = \rho_p \cdot V = \rho_p \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_p^3}{8}\right) = \rho_p\left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right)$$

m_p, ρ_p, d_p= massa, densità e diametro

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



Forza d'attrito

$$F_{drag} = C_D \rho_f \left(\frac{\pi d_p^2}{4}\right) \frac{U_f^2}{2}$$

C_D =Drag factor

Forza di Archimede

$$F_{buoyancy} = \rho_f \left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right) g$$

Forza di gravità

$$F_{gravity} = m_p g = \rho_p V g = \rho_p \left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right) g$$

U_f

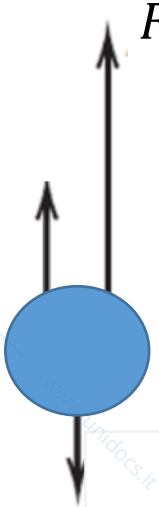
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$\sum F = F_{buoyancy} + F_{drag} + F_{gravity} = 0$$

$$\rho_p \left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right) g - \rho_f \left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right) g - C_D \rho_f \left(\frac{\pi d_p^2}{4}\right) \frac{U_f^2}{2} = 0$$

$$F_{drag} = C_D \rho_f \left(\frac{\pi d_p^2}{4}\right) \frac{U_f^2}{2}$$

$$F_{buoyancy} = \rho_f \left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right) g$$



$$F_{gravity} = m_p g = \rho_p V g = \rho_p \left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right) g$$

$$U_f$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$\rho_p\left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right)g-\rho_f\left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right)g-C_D\rho_f\left(\frac{\pi d_p^2}{4}\right)\frac{U_f^2}{2}=0$$

Risolvendo per v_p si ottiene:

$$v_p^2 C_D\rho_f\left(\frac{\pi U_f^2}{8}\right)=\rho_p\left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right)g-\rho_f\left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right)g$$

$$U_f^2=\frac{(\rho_p-\rho_f)}{\rho_f}\frac{\left(\frac{\pi d_p^3}{6}\right)}{\left(\frac{\pi d_p^2}{8}\right)}\frac{g}{C_D}=\frac{\left(\frac{d_p}{3}\right)}{\left(\frac{1}{4}\right)}\frac{g}{C_D}\left(\frac{\rho_f-\rho_p}{\rho_f}\right)=\frac{4d_p g}{3C_D}\left(\frac{\rho_p-\rho_f}{\rho_f}\right)$$

$$U_f=\sqrt{\frac{4d_p g}{3C_D}\left(\frac{\rho_p-\rho_f}{\rho_f}\right)}=\sqrt{\left(\frac{\rho_p-\rho_f}{\rho_f}\right)}\cdot\sqrt{\frac{4d_p g}{3C_D}}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Considerando che nel nostro caso la particella (droplet) è composta da liquido

$$U_f = \sqrt{\left(\frac{\rho_L - \rho_f}{\rho_f}\right)} \cdot \sqrt{\frac{4 d_p g}{3 C_D}}$$

$$U_f = C \sqrt{\left(\frac{\rho_L - \rho_f}{\rho_f}\right)}$$

C = parametro di capacità di Souders e Brown

$$C = \sqrt{\frac{4 d_p g}{3 C_D}}$$

Per piatti forati e a campanella; conservativa per piatti a valvola

$$C = f \cdot C_F$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$C = f \cdot C_F$$

Occorre definire

1) Il fattore di correzione f dipende da 3 fattori: Tensione superficiale ST, fattore di Foaming F e un fattore geometrico (fractional Hole Area HA):

$$f = F_{ST} \cdot F_F \cdot F_{HA}$$

2) Il fattore C_F, che dipende dal plate spacing

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

F_{ST} = fattore di tensione superficiale (σ, dyne/cm):

$$F_{ST} = \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2}$$

Materiale	Tensione superficiale (N/m)
Acqua	0,073
Mercurio	0,559
Benzene	0,029
Olio di oliva	0,319

1 N = 10^5 dyne

F_F= fattore di «foaming»: per liquidi che non formano schiume F_F = 1, altrimenti F_F = 0.75

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

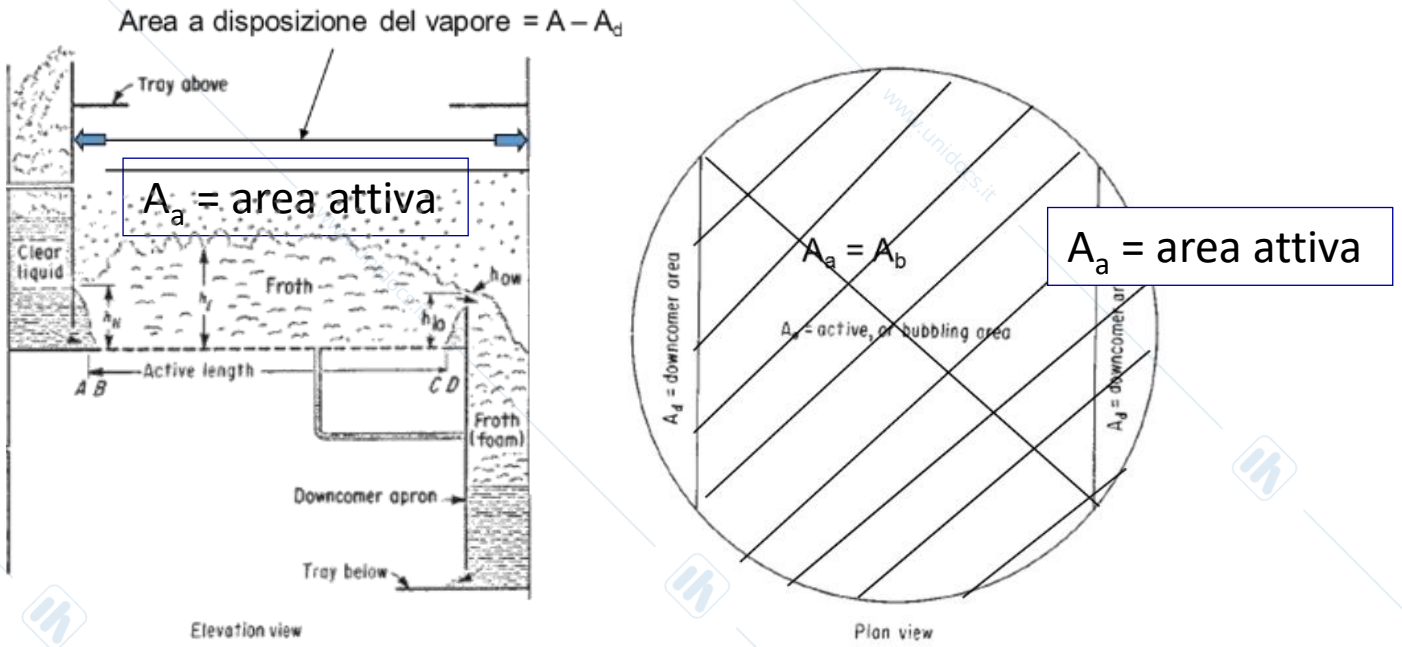
Fattore HA(Hola Area)

$$\frac{A_h}{A_a} \geq 0.1 \rightarrow \boldsymbol{F_{HA}} = 1.0$$

$$\frac{A_h}{A_a} \leq 0.1 \rightarrow \boldsymbol{F_{HA}} = 5\left(\frac{A_h}{A_a}\right) + 0.5$$

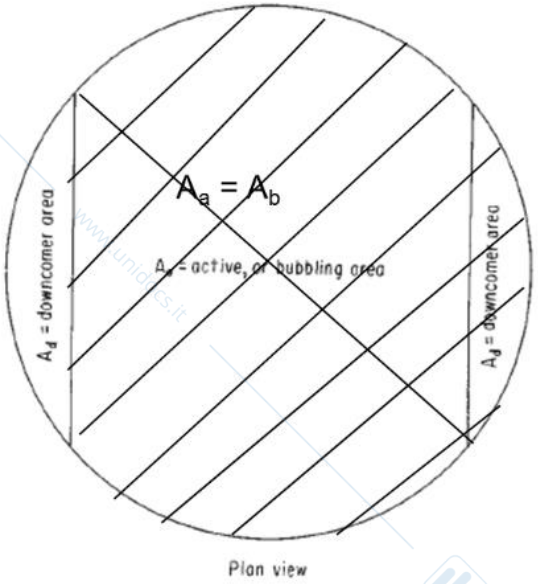
A_h = area dei fori (hole)

A_a = area attiva = Area totale – Area del downcomer = A - A_d

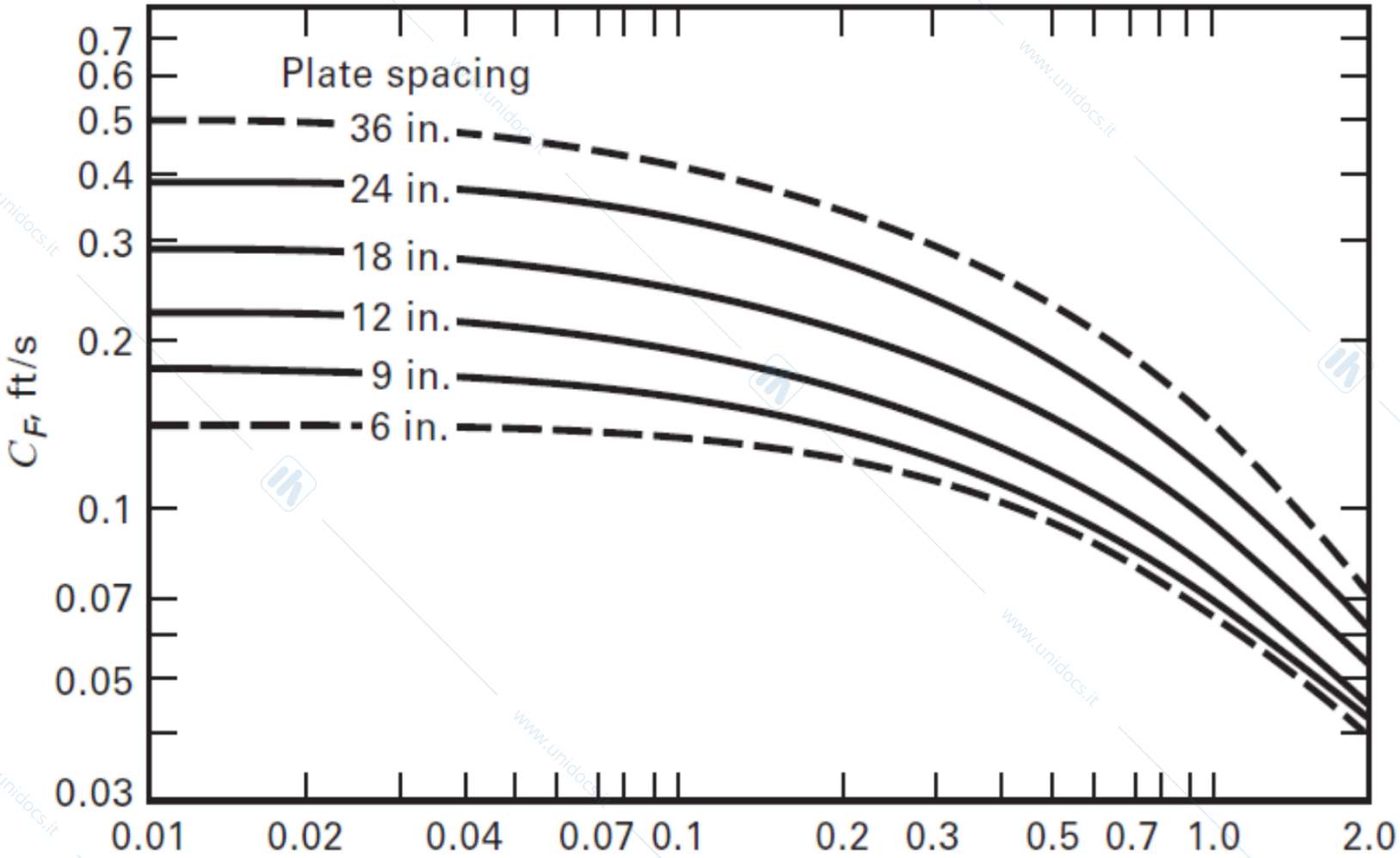


www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$\frac{A_d}{A} = \begin{cases} 0.1 & F_{LV} < 0.1 \\ 0.1 + \dfrac{F_{LV} - 0.1}{9} & 0.1 \le F_{LV} \le 1.0 \\ 0.2 & F_{LV} > 1.0 \end{cases}$$



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L}\right)^{0,5}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Fattore FLV

$$F_{LV} = \frac{L' \cdot PM_L}{V' \cdot PM_V} \cdot \left(\frac{\rho_V}{\rho_L}\right)^{0,5}$$

- Nelle colonne, si identifica con vapore (pedice v, V, V') il fluido f.
- I valori di L' e V' fanno riferimento alle portate globali di liquido e vapore
- I valori di PM del liquido e del vapore fanno riferimento ai valori medi del peso molecolare della soluzione liquida o vapore (v)
- I valori fanno, in genere, riferimento al fondo colonna.

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Il diametro del piatto è basato su una frazione (spesso pari a 0.8) della velocità di flooding U_f

Considerata l'area effettiva di passaggio del vapore rispetto all'area del piatto A, la portata di vapore V' (in moli) che occorre impostare in fase di progetto sarà quindi:

$$V' = \rho_f U_f A_f = 0.8 \frac{\rho_f}{M_f} U_f (A - A_d)$$

Il diametro del piatto sarà quindi:

$$A = \frac{\pi D_T^2}{4}$$

da cui

$$V' = 0.8 \frac{\rho_f}{M_f} U_f \frac{\pi D_T^2}{4} \left(1 - \frac{A_d}{A}\right)$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

$$V' = 0.8\frac{\rho_f}{M_f}U_f\frac{\pi D_T^2}{4}\left(1-\frac{A_d}{A}\right)$$

$$\frac{\pi D_T^2}{4} = \frac{V'M_f}{0.8\rho_f U_f\left(1-\frac{A_d}{A}\right)}$$

$$\boldsymbol{D_T = \sqrt{\frac{4V'M_f}{0.8\rho_f U_f \pi\left(1-\frac{A_d}{A}\right)}}}$$

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

Perdite di carico del vapore attraverso i piatti (valore tipico):
0.35 to 1.03 kPa/tray

$$h_T = h_d + h_l + h_\sigma$$

h_t = Perdita di carico totale al piatto, misurata in termini di altezza del battente di liquido

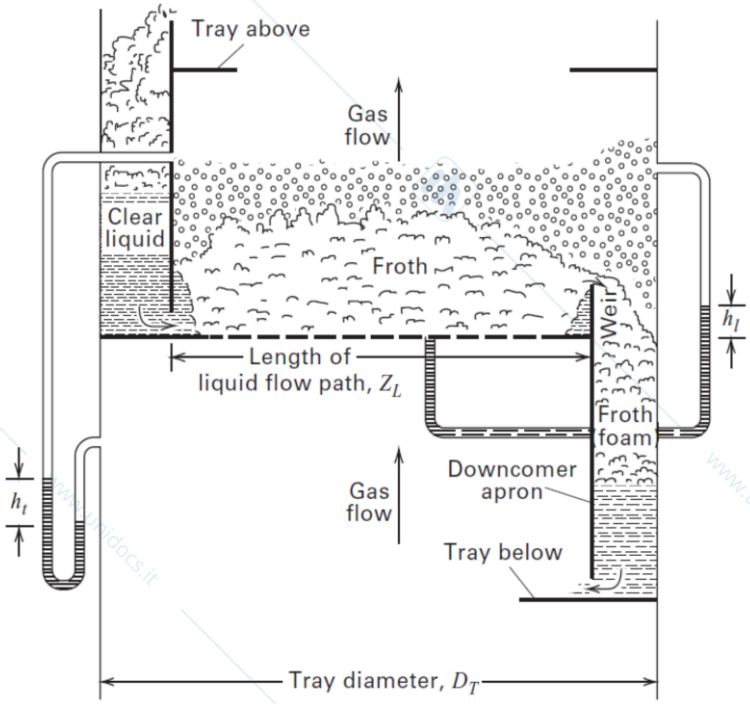
h_d = perdite di carico dovute all'attrito per il vapore che fluisce attraverso i fori del piatto in condizioni «dry»

+

h_l = perdite di carico dovute all'hold-up del liquido sul piatto

+

h_σ = perdite di carico dovute alla tensione superficiale σ



Dalle perdite di carico possono calcolarsi i costi operativi, noti i costi energetici

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari