

## 1. SPRAY TOWER - INTRODUZIONE

Una spray tower è uno scrubber che utilizza un liquido (generalmente acqua) per catturare e rimuovere inquinanti solidi o gassosi da una corrente gassosa. Il liquido viene iniettato nella torre dall'alto attraverso degli ugelli che ne consentono una più o meno fine atomizzazione. Le gocce formatesi, cadendo, incontrano il gas inquinato che risale dal basso, e ne catturano gli inquinanti.

Una tipica rappresentazione di una torre spray è la seguente:

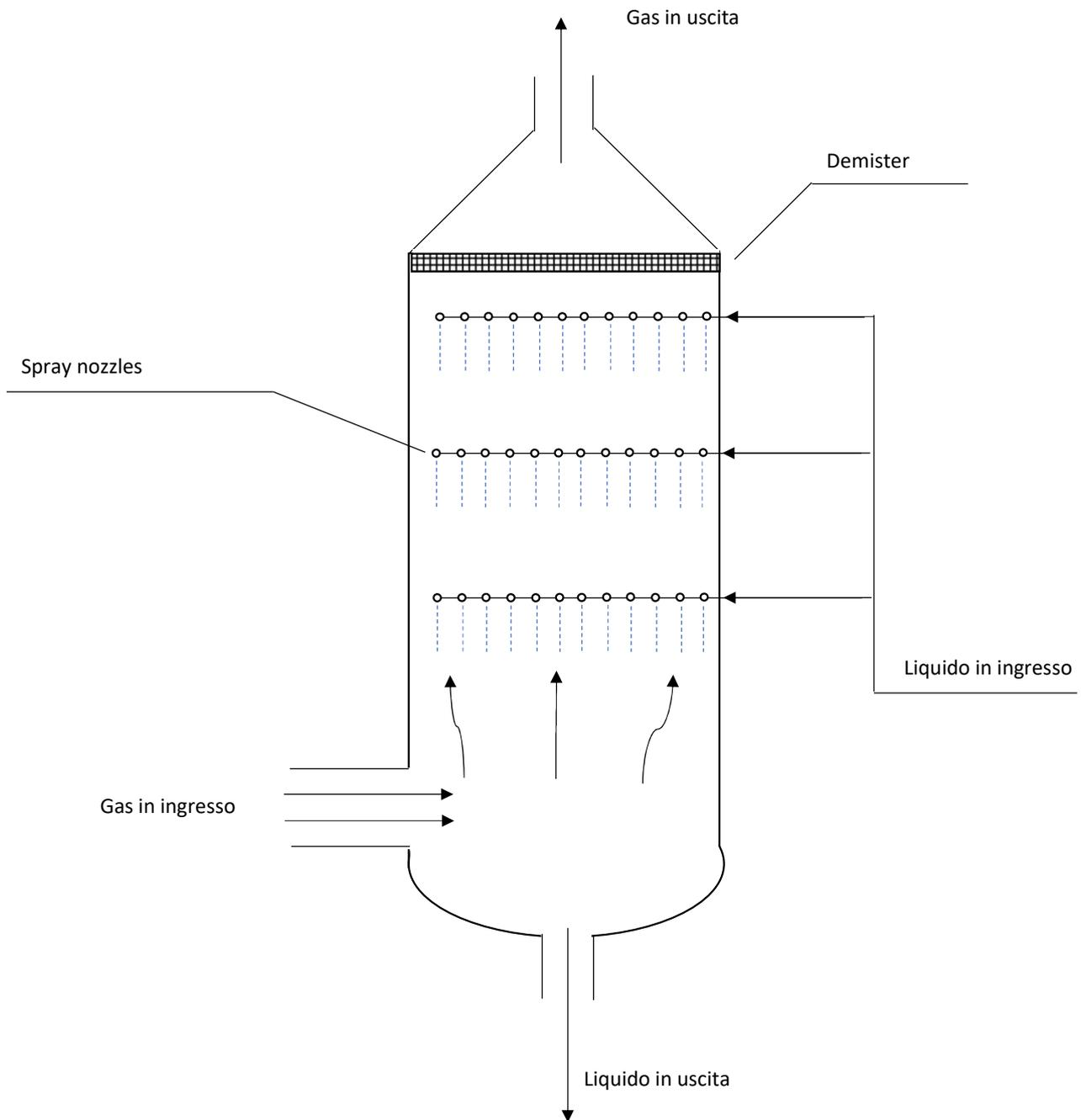


Figura 1: Spray tower

Si tratta quindi di una apparecchiatura semplice, economica e dai consumi molto bassi, e per questo motivo, è spesso utilizzata per abbattere gli inquinanti prima di emettere il gas in atmosfera.

## 2. USO DEL FOGLIO DI CALCOLO

Il foglio di calcolo che ho sviluppato consente di effettuare un calcolo di verifica preliminare di una colonna spray a singolo stadio. Il modello di calcolo utilizzato è descritto alla fine di questo documento (appendice A), che invito a leggere per meglio comprendere l'approccio che ho utilizzato. In questo paragrafo riassumo brevemente quali sono i dati da dare in input al programma e quali risultati è in grado di mostrare.

### 2.1. Inserire i dati di input

Una volta aperto il foglio di calcolo in Excel, esso si presenterà in una immagine simile alla seguente:

		Client	Job			
		Plant	Unit			
		Sheet 1 of 1				
<b>SPRAY TOWER CALCULATION SHEET</b>						
V. 1.0 by M.Meloni						
INPUT DATA FOR DESIGN POINT						
1						
2	Gas flowrate	kg/h	13000	Gas mol. Weight	29.00	
3	Inlet gas pressure	bara	1.013	Inlet gas temperature	°C	40.00
4	Gas dynamic viscosity	cp	0.0225	Solids flow	kg/h	50
5	Solid particle diameter	um	10	Particle density	kg/m3	3000
6		mm	0.01	Cunningham factor		1
7	Liquid flowrate	kg/h	31000	Liquid density	kg/m3	990.0
8	Liquid droplet diam.	um	1000	Scrubber diameter	m	2
9		mm	1	Scrubber height	m	8.0
10	Mist eliminator		YES			
11						
12						
13						
14	CALCULATION RESULTS AT DESIGN POINT					
15	Gas density	kg/m3	1.128	Gas volumetric flow	m3/h	11521.217
16	Solids inlet conc.	mg/m3	4339.819	Gas normal vol. flow	Nm3/h	10049.562
17	Liquid vol. flow	m3/h	31.31	Terminal velocity - Vdt	m/s	3.73537
18	Liquid/Gas ratio	lt/m3	2.72	Vdt - Vg	m/s	2.72
19	Gas velocity -Vg	m/s	1.02	Re (droplet)		187.3254
20	Stokes number		2.012	Impaction efficiency	%	72.23
21	Solids outlet conc.	mg/m3	170.10	Tower efficiency	%	96.080
22	Tower pressure drop	mbar	4.91			
23						
24						

I dati vanno inseriti dall'utente all'interno delle celle di colore azzurro e solamente in esse. Infatti, le colonne verdi e bianche mostrano dati calcolati dal programma, che non vanno modificati. Di seguito una spiegazione sommaria dei parametri di input:

- Gas flowrate: la portata massica del gas che entra in colonna
- Inlet gas pressure: pressione del gas all'ingresso in colonna
- Gas dyn. Viscosity: Viscosità dinamica del gas assunta costante
- Solid particle diameter: Il diametro della particella trascinata col gas di cui si vuole calcolare l'efficienza di cattura. Poiché in realtà le particelle trascinate avranno una distribuzione variabile di dimensioni (PSD), si può considerare questo diametro come quello della particella la cui frazione in massa nella corrente è la maggiore e di cui si vuole una efficienza di cattura piuttosto elevata (es: >85%).
- Liquid flowrate: la portata massica del liquido che entra in colonna
- Liquid droplet diameter: diametro medio della goccia di liquido prodotta dagli spray nozzles
- Mist eliminator: se il programma deve tenere conto, nella sola stima delle perdite di carico della presenza di un demister
- Gas molecular weight: peso molecolare del gas
- Inlet gas temperature: temperatura del gas in ingresso alla colonna, assunta sempre costante
- Solids flow: portata di polvere/inquinante trascinata col gas
- Particle density: densità della singola particella di inquinante
- Cunningham factor: fattore di correzione di Cunningham per particelle di diametro inferiore a 1 micron. Ai fini del calcolo di una torre spray lo si può considerare sempre pari a 1.
- Liquid density: densità del liquido di lavaggio

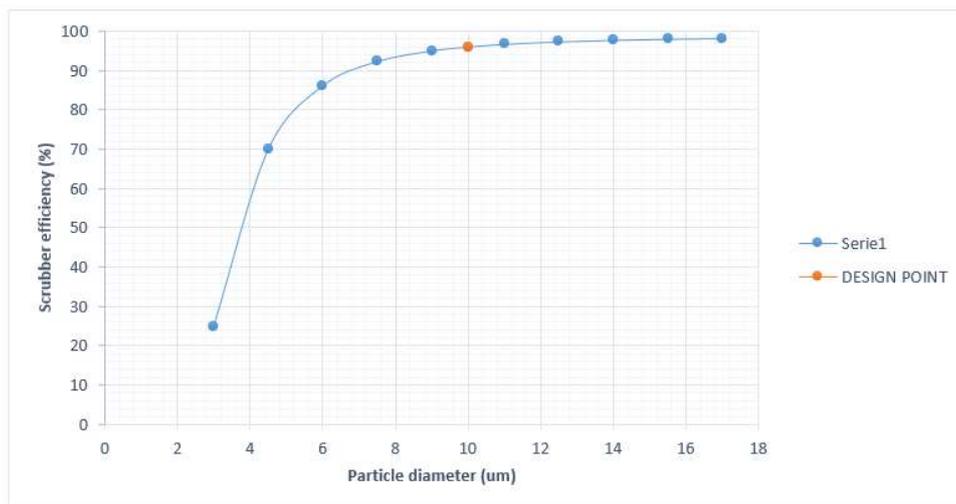
- Scrubber diameter: diametro interno della torre spray
- Scrubber height: altezza della parte di torre coinvolta nello scambio gas/liquido (dal distributore superiore fino al fondo della colonna)

## 2.2. Interpretazione dei risultati

Il programma effettua un calcolo di verifica di una torre spray e mostra i risultati del calcolo nella sezione "Calculation results at design points". I parametri evidenziati in neretto rappresentano i dati più importanti:

- Efficienza globale della torre
- Concentrazione dei solidi in uscita
- Stima delle perdite di carico totali

È importante evidenziare che in questa prima versione, tutti i calcoli sono effettuati per una specifica dimensione della particella di solido da catturare e ad essa si riferiscono. Per esempio, l'efficienza stimata dalla torre rappresenta la capacità di cattura della torre nei confronti della particella di diametro X specificata dall'utente. Particelle di diametro inferiore avranno efficienze di cattura inferiori, mentre il contrario accade per quelle di diametro superiore. Ho comunque aggiunto un grafico che illustra l'andamento dell'efficienza della torre spray per particelle di dimensioni fino a 70% inferiori o 70% superiori rispetto al dato di design.



Infine, il programma suggerisce alcuni valori raccomandati in letteratura per il corretto dimensionamento di una torre spray. È fortemente raccomandato non uscire dagli intervalli consigliati.

Recommended parameter for a spray tower	Recommended	Calculated
Liquid/gas ratio (l/m <sup>3</sup> )	0.7 - 2.7	2.718
Height/diameter ratio	Min. >=2	4.00
Pressure drop (mbar)	1.2 - 7.5	4.91
Droplet size (um)	500-1500	1000.00
Gas velocity (m/s)	0.3-1.2	1.019
Particle diameter (design value)	> 8 um	10.0
Tower efficiency ad design point	>85%	96.08

## 3. APPENDICE A - MODELLO DI CALCOLO

Il modello di calcolo assume che ogni goccia prodotta, di forma perfettamente sferica e di diametro definito, si muova in contro corrente con il gas entrante in colonna. Si assume inoltre che non vi siano variazioni sostanziali delle portate di gas e liquido in colonna né reazioni chimiche.

Il meccanismo di cattura primario considerato è ad impatto.

Una particella trascinata dal gas, muovendosi verso l'alto con velocità  $V_p$ , avrà una certa probabilità di impattare con una goccia di liquido che si muove verso il basso con velocità  $V_d$ , e di essere trascinata via con essa. Non tutte le particelle saranno catturate in questo modo, tuttavia, si assume ai fini del modello che questo sia il meccanismo di cattura primario. Si assume inoltre che la velocità di movimento della particella sia uguale a quella del gas che la trascina  $V_g$ :

$$V_p = V_g \quad (1)$$

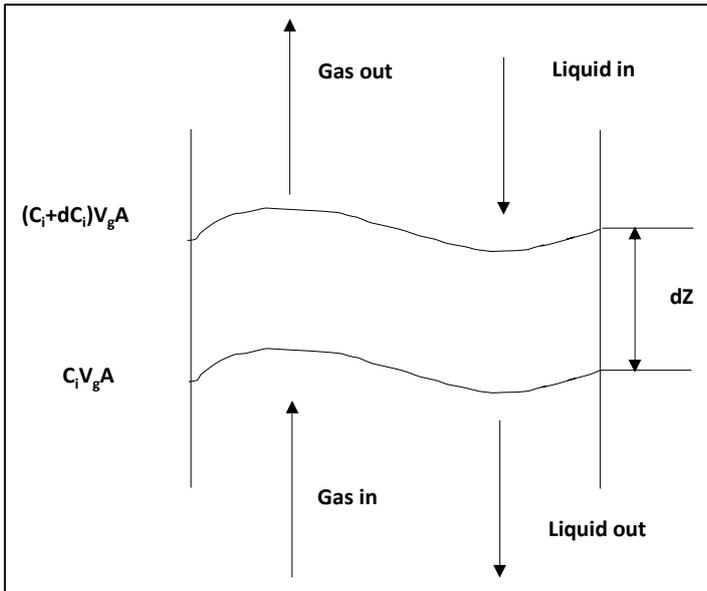


Figura 2: Bilancio di materia per una sezione di colonna

Considerando una sezione di torre di altezza infinitesima  $dZ$ , è possibile ricavare il seguente bilancio di materia per la sezione considerata:

$$C_i V_g A - (C_i + dC_i) V_g A - M_c = 0 \quad (2)$$

Dove

$C_i$  = Concentrazione inquinante in ingresso,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$A$  = Sezione di passaggio della torre,  $\text{m}^2$

$M_c$  = Portata totale di inquinante uscente con il liquido in basso,  $\text{kg}/\text{h}$

E dove  $V_g A = Q_g$ , portata di gas ( $\text{m}^3/\text{h}$ ), assunta costante in ingresso e uscita per la sezione considerata.

Ora, considerando che il numero totale di

gocce di liquido che entrano nella sezione  $dZ$  è pari a:

$$\frac{Q_l}{\pi d_d^3 / 6} \quad (3)$$

Con  $Q_l$  = portata di liquido entrante, assunta uguale a quella uscente ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) e  $d_d$  diametro della goccia di liquido ( $\text{m}$ ).

Si può ricavare la massa di particelle catturate dalle gocce per unità di tempo:

$$\eta_d V_{dt} C_i \frac{\pi d_d^2}{4} \quad (4)$$

Dove  $\mu_d$  è l'efficienza di rimozione dovuta all'effetto di una singola goccia e  $V_{dt}$  rappresenta la velocità limite della singola goccia.

A questo punto si effettua l'ulteriore semplificazione di considerare il tempo di contatto goccia-particella pari al tempo necessario alla goccia per attraversare la sezione  $dZ$ :

$$dt = \frac{dz}{V_{dt} - V_g} \quad (5)$$

La massa totale di particelle catturate da una singola goccia nell'unità di tempo è quindi pari a:

$$\mu_d V_{dt} C_i \frac{\pi d_d^2}{4} \frac{dz}{V_{dt} - V_g} \quad (6)$$

Moltiplicando la (6) per il numero totale di gocce di liquido (3) si ricava  $M_c$ .

Sostituendo l'espressione ottenuta nella (2) è possibile quindi riscrivere il bilancio di materia:

$$-Q_g dC_i = \frac{3}{2} \eta_d \frac{V_{dt}}{V_{dt}-V_g} \frac{Q_l}{d_d} C_i dZ \quad (7)$$

Una volta integrata l'equazione tra  $C_0$ , concentrazione dell'inquinante in ingresso, e  $C$ , concentrazione alla fine della sezione considerata, si ricava la seguente espressione:

$$\frac{C}{C_0} = e^{\left(-\frac{3}{2} \eta_d \frac{V_{dt}}{V_{dt}-V_g} \frac{Q_l Z}{Q_g d_d}\right)} \quad (8)$$

Dove  $\frac{C}{C_0} = P_t$  viene detto fattore di penetrazione.

L'efficienza complessiva della torre spray è quindi pari a:

$$\eta = 1 - P_t = 1 - e^{\left(-\frac{3}{2} \eta_d \frac{V_{dt}}{V_{dt}-V_g} \frac{Q_l Z}{Q_g d_d}\right)} \quad (9)$$

### 3.1. Determinazione del numero di Stokes

La formula 9 sopra ottenuta permette di calcolare l'efficienza complessiva della torre spray una volta noti tutti i parametri contenuti nell'esponenziale. Dei vari parametri, uno solo di essi,  $\eta_d$  non è immediatamente desumibile ma è funzione di un termine definito come numero di Stokes.

Il numero di Stokes è calcolabile tramite la seguente formula:

$$St = \frac{C_f (V_{dt}-V_g) \rho_p d_p^2}{18 \mu d_d} \quad (10)$$

dove  $\rho_p$  è la densità della particella da catturare,  $d^p$  e  $d_d$  rappresentano rispettivamente il diametro medio della particella di polvere e della goccia,  $\mu$  è la viscosità dinamica del gas ed infine  $C_f$  è il fattore di correzione di Cunningham, generalmente da assumere sempre pari a 1 a meno di non considerare diametri delle particelle di inquinante da catturare estremamente piccoli (inferiori a 1 micron).

Diversi autori riportano in letteratura l'uso della seguente espressione di Litch e Calvert per il calcolo di  $\eta_d$ :

$$\eta_d = \left( \frac{St}{St+0.35} \right)^2 \quad (11)$$

Tuttavia, in accordo a quanto illustrato da Wark, Wagner e Wesley, tale espressione non tiene conto di effetti dovuti alla turbolenza, e si suggerisce invece l'uso della seguente espressione ricavata dagli autori attraverso l'approssimazione di Langmuir:

$$\eta_d = \frac{\eta_{vis} + \eta_{pot} Re/60}{1 + Re/60} \quad (12)$$

Dove  $\eta_{vis}$  e  $\eta_{pot}$  sono le efficienze dovute ad effetti del flusso a bassissimi numeri di Re ( $Re < 1$ ) e a  $Re > 2000$  e le cui curve al variare del numero di Stokes sono riportate nel grafico che segue.

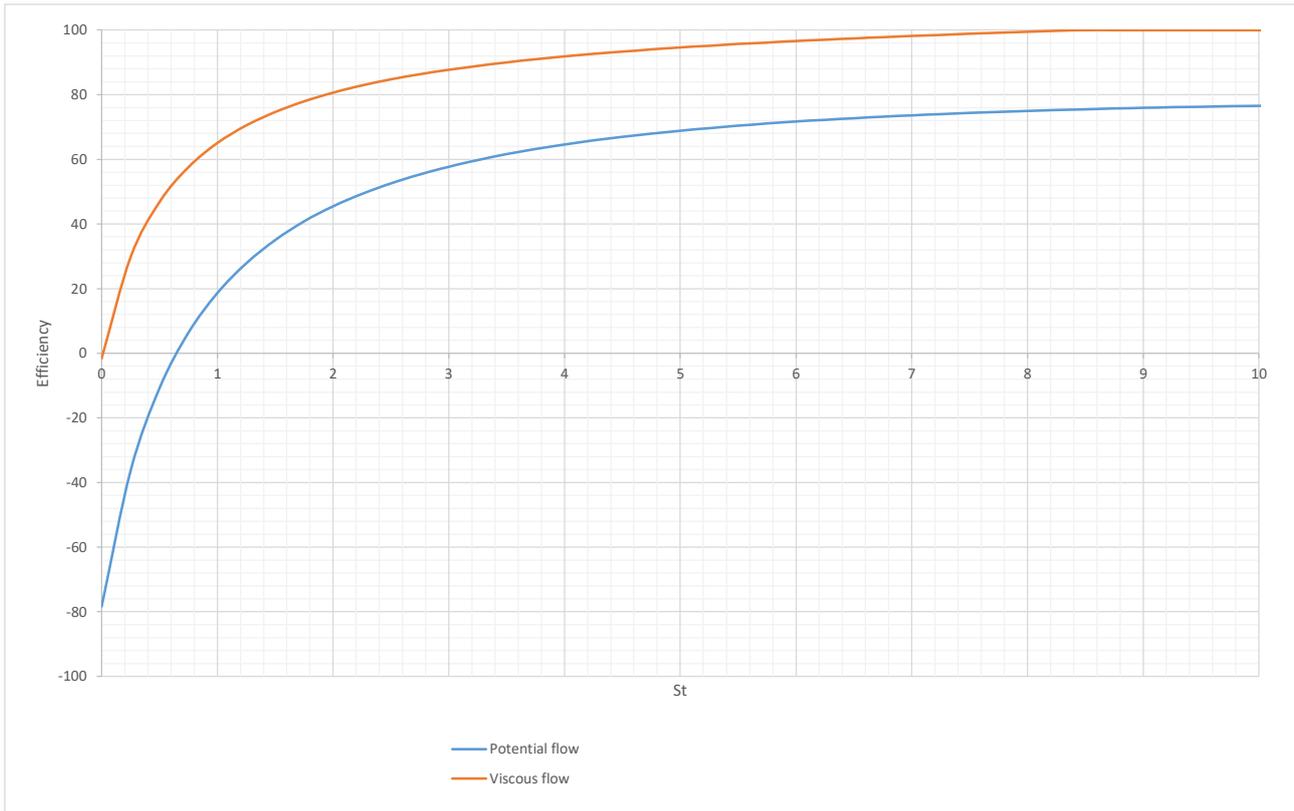


Figura 3: Approssimazione di Langmuir

Il foglio di calcolo utilizza l'approssimazione di Langmuir sopra esposta per stimare l'efficienza di una singola goccia.

### 3.2. Calcolo della velocità limite della goccia

Per determinare  $V_{dt}$ , velocità di caduta limite di una singola goccia, ho utilizzato la nota espressione teorica ottenuta uguagliando la forza di gravità agente sulla goccia con la forza dovuta alla resistenza dell'aria durante la caduta:

$$V_{dt} = \sqrt{\frac{4gd_d(\rho_l - \rho_g)}{3\rho_g C_d}} \quad (13)$$

Dove  $C_d$  è il coefficiente di resistenza aerodinamica (drag coefficient), funzione del diametro della goccia e del numero di Reynolds. La velocità limite  $V_{dt}$  può anche essere riscritta nelle seguenti tre forme in funzione del numero di Reynolds:

- $V_{dt} = \frac{gd_d^2(\rho_l - \rho_g)}{18\mu}$  per  $Re < 2$  (regime in cui è valida la legge di Stokes) (14)

- $V_{dt} = \frac{2.94g^{0.71}d_d^{1.14}(\rho_l - \rho_g)^{0.71}}{\rho_g^{0.29}\mu^{0.43}}$  per  $Re$  compreso tra 2 e 500 (regime di transizione) (15)

- $V_{dt} = 1.74 \sqrt{\frac{gd_d(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g}}$  per  $Re > 500$  (legge di Newton) (16)

Con  $Re = \frac{\rho_g V_{dt} d_d}{\mu}$  (17)

Con  $\mu$  viscosità dinamica della fase gassosa.

Il calcolo viene quindi effettuato in modo iterativo assumendo una velocità limite di primo tentativo, ricavando Re e iterando fino a convergenza.

### 3.3. Calcolo delle perdite di carico

La perdita di carico totale della torre spray è definita in questo modo:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{friction,dry} + \Delta P_{elevation} + \Delta P_{wet} + \Delta P_{demister} \quad (18)$$

Dove:

- $\Delta P_{friction,dry}$ , contributo dovuto al passaggio della fase gas nella torre spray assunta vuota e in assenza di liquido, incrementato delle perdite concentrate dovute ad ingresso e uscita in colonna;
- $\Delta P_{elevation}$ , contributo dovuto alla risalita del gas nella torre (differenza geodetica);
- $\Delta P_{wet}$ , contributo dovuto alla presenza del liquido che discende dalla colonna sotto forma di gocce;
- $\Delta P_{demister}$ , eventuale contributo dovuto alla presenza di un mist eliminator in cima alla colonna;

I primi due termini sono calcolati rispettivamente applicando la nota relazione di Darcy-Weisbach ( $\Delta P_{friction,dry}$ ) mentre  $\Delta P_{elevation} = \rho_g g Z$ .

Per il calcolo di  $\Delta P_{wet}$ , assumendo che:

- Le gocce costituenti la fase liquida sono sferiche, di dimensione tutte uguali e impenetrabili. Sono quindi approssimabili a particelle solide che ostacolano il cammino del gas;
- Tra fase gas e fase liquida esiste una velocità relativa che è sempre costante, pari a  $V_{dt}$ . Ciò equivale a dire che assunta ferma la fase liquida, la fase gassosa incontra le particelle di liquido con velocità  $V_{dt}$ ;
- Le gocce occupano un volume che si può considerare costante in ogni istante, dato dal prodotto della portata di liquido che discende dalla colonna per il tempo di passaggio (integrazione della formula 5 sull'intera altezza della torre);

Si approssima in questo modo la fase liquida ad una fase solida con un elevato grado di vuoto e  $\Delta P_{wet}$  viene calcolata con una variante dell'equazione di Ergun:

$$\Delta P_{wet} = \frac{V_{dt}}{d_d} \left( \frac{1-\varphi}{\varphi^3} \right) \left( \frac{150(1-\varphi)\mu_g}{D_d} + 1.75\rho_g V_{dt} \right) Z \quad (19)$$

Con  $\varphi$  grado di vuoto e Z altezza della torre.

Infine  $\Delta P_{demister}$  è calcolato con la seguente equazione:

$$\Delta P_{demister} = 1.8061V_g - 0.1912 \quad (20)$$

i cui parametri sono stati ricavati interpolando i dati provenienti da alcuni fornitori di mist eliminators (unità di misura: Pa).

## 4. Riferimenti

1. Perry's Chemical Engineers' Handbook, 8th edition, Don Green, Robert Perry
2. Gas liquid separators, Natural gas processing, chapter 4
3. Particulate Matter Controls, EPA, chapter 6

4. Performance evaluation of wet scrubber system for industrial air pollution control, Danzomo, Momoh-Jimoh E. Salami, Sani Jibrin, Md. R. Khan, and Iskandar M. Nor
5. Handbook of Environmental Engineering Calculations, C. Lee, Shun Lin
6. Air Pollution Control Technology Handbook, Karl B. Schnelle Jr., Charles A. Brown
7. Fundamentals of Air Pollution, Richard W. Boubel, Donald L. Fox, Bruce Turner
8. Air pollution control equipment calculations, Luis Theodore
9. Air Pollution, its Origin and Control, Wark K., Warner C. F. and Wesley A.