

SCRUBBERS

Corso di
IMPIANTI di TRATTAMENTO degli EFFLUENTI INQUINANTI

Scrubbers: aspetti generali

- Gli “scrubbers” sono utilizzati per la rimozione di particolati e/o gas inquinanti da scarichi di impianti industriali.
 1. Tradizionalmente gli scrubber sono stati intesi come dei sistemi di rimozione di inquinanti da correnti gassose per mezzo di getti o correnti liquide fatte interagire con la corrente gassosa.
 2. Una più recente classe di applicazione di tali sistemi prevede l'utilizzo reagenti secchi (o di sospensioni in acqua di reagenti secchi) iniettati nella corrente gassosa al fine di rimuovere, per mezzo di una reazione chimica, eventuali inquinanti (tipicamente gas acidi) dalla corrente.

Scrubbers: aspetti generali

- La definizione del sistema di scrubbing ottimale (scelta della tipologia, dimensionamento, stima della efficienza finale del sistema nella rimozione degli inquinanti) per la specifica applicazione non può quasi mai essere fatta in maniera analitica ma richiede un certo grado di esperienza e di prove sperimentali (su modelli in scala ridotta e, successivamente, sul sistema finale) al fine di individuare le scelte più efficaci e le condizioni di lavoro alle quali sono soddisfatti i requisiti di progetto.
- Solitamente, sulla base delle conoscenze di letteratura e di esperienze pregresse si sceglie la configurazione che meglio si adatta alle condizioni (caratteristiche della corrente gassosa e natura degli inquinanti) e si utilizzano alcune relazioni (per larga parte empiriche) per dimensionare il sistema in relazione ai requisiti di progetto (che sono essenzialmente dettati dalle normative relative alle concentrazioni massime di inquinanti ammissibili allo scarico). In ogni caso è necessario prevedere un sistema di monitoraggio degli inquinanti allo scarico al fine di verificare l'efficienza del sistema realizzato e apportare, se necessario, le opportune correzioni.

Scrubbers: tipologie

- In corrispondenza delle due tipologie cui si è fatto cenno in precedenza è possibile operare una prima distinzione degli scrubber in due categorie principali:

Wet Scrubbers

Dry Scrubbers

Wet scrubbers

- I sistemi “Wet scrubber” sono così indicati poiché essi fanno uso di liquidi (sostanzialmente acqua) per la rimozione di inquinanti dalle correnti gassose attraverso molteplici meccanismi di interazione.
- La corrente di gas viene fatta interagire con il liquido sia atomizzando il liquido nella corrente gassosa che facendo gorgogliare il gas in un recipiente contenente il liquido.
 - Esistono anche configurazioni più complesse che fanno uso di combinazioni opportune di questi due meccanismi.
- La configurazione fluidodinamica utilizzata (ovvero il disegno del sistema di adduzione della corrente liquida e il meccanismo di interazione utilizzato) dipendono fortemente dalla natura del problema di inquinamento che si intende risolvere.

Wet scrubbers

- Gli scrubber possono essere disegnati per la eliminazione di particolati e/o inquinanti gassosi.
 - Nel caso dei particolati la rimozione nei wet scrubbers avviene attraverso la cattura degli stessi in goccioline liquide generate opportunamente per mezzo di sistemi di atomizzazione.
 - Nel caso di inquinanti gassosi l'eliminazione avviene per mezzo di processi di dissoluzione o assorbimento del gas nel liquido.
- In entrambi i casi in seguito alla rimozione degli inquinanti è necessario risolvere il problema di rimuovere eventuali goccioline residue (che contengono sostanze inquinanti) dalla corrente di uscita dallo scrubber prima di inviarla al camino per mezzo di un sistema di separazione della componente liquida (*mist eliminator*).
- Inoltre, è necessario prevedere un sistema di trattamento del liquido utilizzato ai fini di un successivo riutilizzo (molto frequente) o il suo smaltimento.

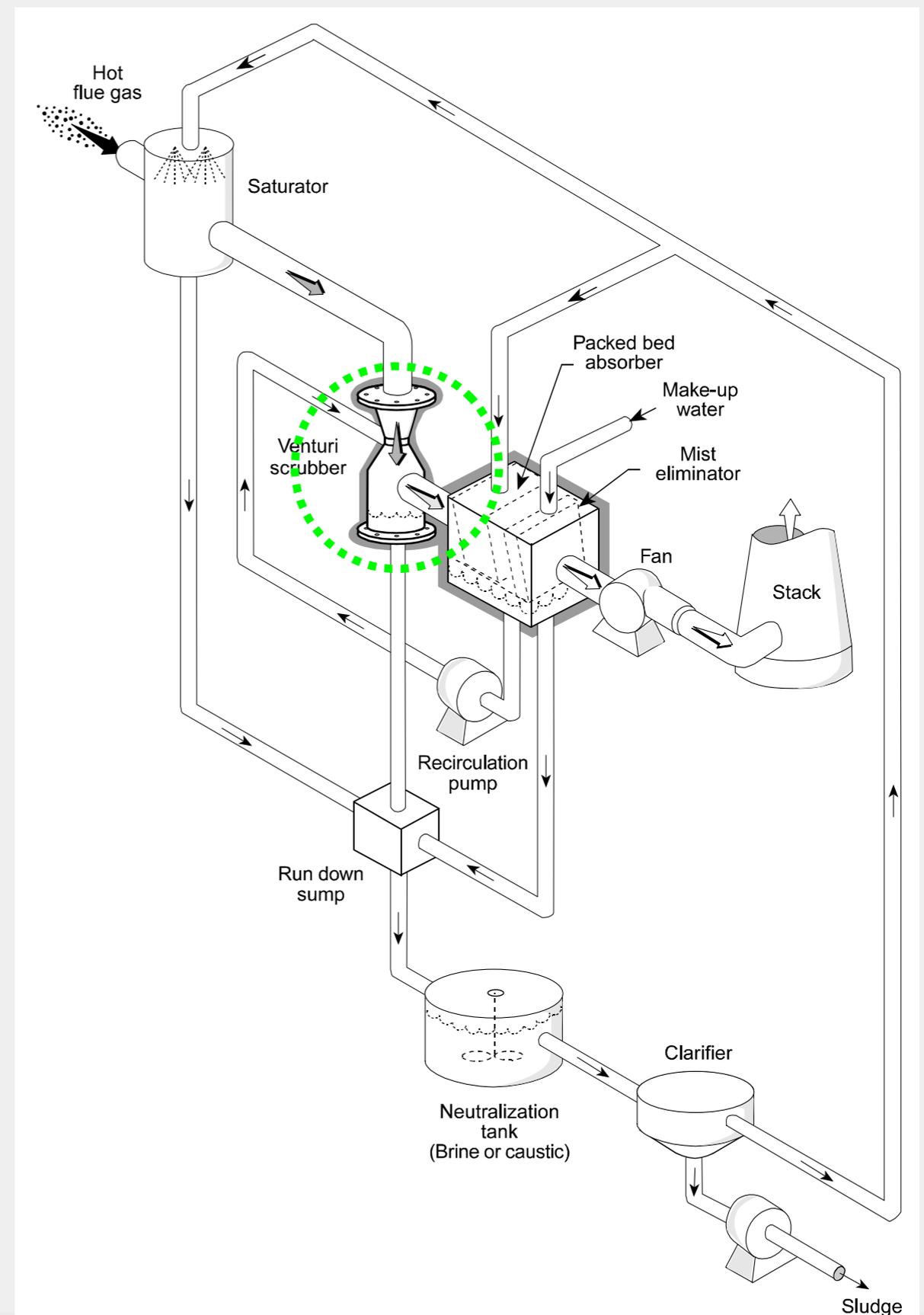
- Nel seguito analizzeremo le caratteristiche dei differenti tipi di wet scrubbers in relazione al tipo di inquinanti che si vuole abbattere, agli impianti nei quali si utilizzano ed in relazione alla loro efficienza e costo di impianto ed esercizio.
- Preliminarmente diamo una valutazione comparativa di vantaggi e svantaggi dei wet scrubber rispetto ad altri sistemi di abbattimento a secco (filtri a manica e precipitatori elettrostatici)

vantaggi e svantaggi dei wet scrubber

<i>vantaggi</i>	<i>svantaggi</i>
<p>richiedono poco spazio Poiché i wet scrubber abbassano la temperatura ed il volume del flusso gassoso tutti i sistemi (ventole, condotti, recipienti) possono essere di dimensioni più piccole rispetto a quelle di altri sistemi con conseguente riduzione di spese ed ingombri.</p>	<p>Corrosione La presenza di acqua e di inquinanti chimici in essa disciolti può formare soluzioni acide altamente corrosive. Ciò richiede una attenta scelta dei materiali costruttivi in particolare nelle zone prossime ai battenti liquidi.</p>
<p>Assenza di sorgenti secondarie di polveri Poiché le particelle sono intrappolate in una matrice liquida esse difficilmente possono essere liberate durante le fasi di trasporto.</p>	<p>Alto consumo di energia Essendo l'efficienza dei sistemi wet scrubber legata ad una alta caduta di pressione nel passaggio della corrente gassosa e a causa del ridotto effetto di "buoyancy" dovuto al raffreddamento è, di solito, necessario provvedere ad una efficace azione di pompaggio della corrente al camino con conseguente aumento dei costi di impianto ed esercizio.</p>
<p>Permettono di trattare correnti ad alta temperatura e umidità</p>	<p>Problemi nello scarico dell'acqua A causa della presenza nell'acqua di polveri e composti inquinanti è necessario prevedere un sistema di trattamento della stessa prima di poterla scaricare nel rispetto delle normative ambientali.</p>
<p>Ridotto rischio di esplosioni ed incendi</p>	<p>Difficoltà nel recupero dei prodotti l'eventuale recupero dei prodotti asportati alla corrente gassosa rende necessario l'uso di complessi processi di essiccamento e separazione.</p>
<p>Permettono di eliminare simultaneamente sia inquinanti gassosi che particolati</p>	<p>Presenza di un pennacchio di vapore al camino</p>

componenti di un wet scrubber

- Oltre al recipiente di scrubbing un sistema wet scrubber deve prevedere alcune componenti aggiuntive necessarie per il pretrattamento ed il post-trattamento della corrente gassosa e del liquido:
 - condotti e ventole
 - camera di saturazione (opzionale)
 - separatore di nebbie
 - sistema di pompaggio (ed eventualmente ricircolo) del liquido
 - sistema di trattamento (o riciclaggio) del liquido esausto
 - camino di uscita



Principi di funzionamento / 1

● *Meccanismi di cattura di particolati / 1*

- I sistemi “wet scrubber” rimuovono le particelle dalla corrente gassosa inglobandole in gocce di liquido o in lamine liquide provvedendo, successivamente, a separare la fase liquida dal gas.
- I principali parametri che influenzano il processo di cattura del particolato sono:
 - i. dimensioni del particolato
 - ii. dimensioni delle gocce
 - iii. velocità relative tra particolati e gocce
- In generale particolati più grandi sono anche più semplici da catturare.

Principi di funzionamento / 2

● *Meccanismi di cattura di particolati / 2*

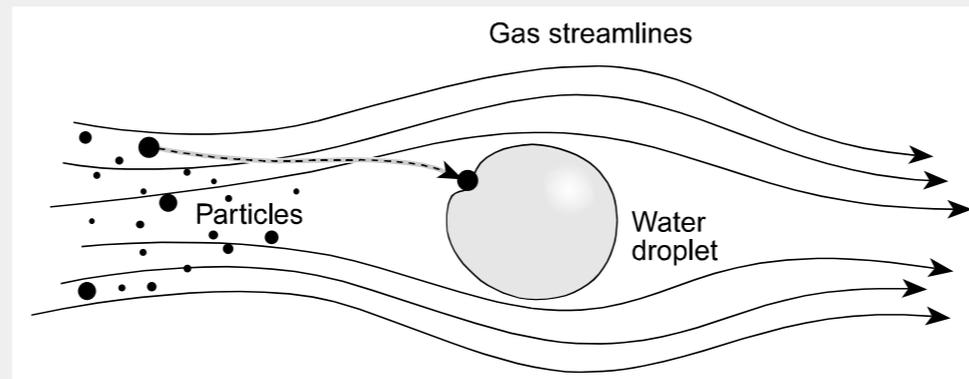
- L'efficienza di cattura da parte della nube di gocce aumenta al diminuire delle dimensioni delle gocce e al crescere della loro densità. La maggiore energia da fornire per generare dispersione di gocce molto fini e dense giustifica l'affermazione precedente secondo la quale a maggiore efficienza corrisponde maggiore consumo di energia.
- Inoltre una velocità relativa più grande tra la corrente gassosa (ed il particolato presente in essa) e le gocce di liquido favorisce una migliore cattura.

Principi di funzionamento / 3

● *Meccanismi di cattura di inquinanti gassosi*

- La cattura degli inquinanti gassosi avviene attraverso un meccanismo di dissoluzione nel liquido.
- è necessario che il gas da eliminare sia solubile nel liquido.
- eventualmente è possibile aggiungere degli additivi al liquido in maniera da incrementare la solubilità.
- In questo caso la configurazione aerodinamica deve essere tale da garantire un elevato grado di miscelamento tra le due fasi per un tempo di residenza sufficientemente lungo da garantire una soddisfacente dissoluzione del gas nel liquido.

interazioni particelle-gocce / 1



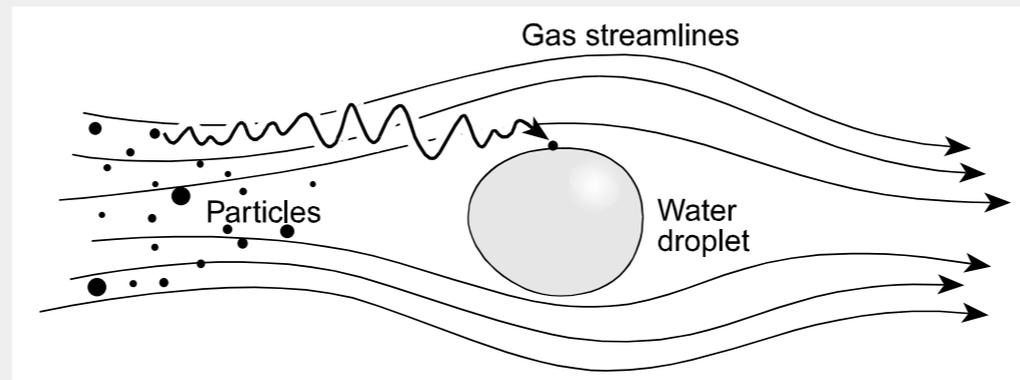
● *Impatto*

- le particelle tendono a seguire le linee di flusso del gas tanto più quanto più esse sono piccole. In funzione delle dimensioni relative di gocce e particelle e della loro velocità relativa si può avere una certa frequenza di impatto sulle gocce. Il numero indicativo di tale possibilità è il numero di Stokes:

$$St = \frac{C_c \rho_p d_p^2 V_{td}}{18 \mu_G d_d}$$

- La possibilità di impatto cresce via via che le particelle sono di dimensioni maggiori e la velocità relativa è più alta a causa della loro minore disponibilità a seguire le linee di flusso del gas. Inoltre gocce più piccole favoriscono l'impatto.
- L'impatto è il meccanismo predominante di raccolta per velocità del gas maggiori di 0.3 m/s e particelle di dimensioni microniche.

interazioni particelle-gocce / 2



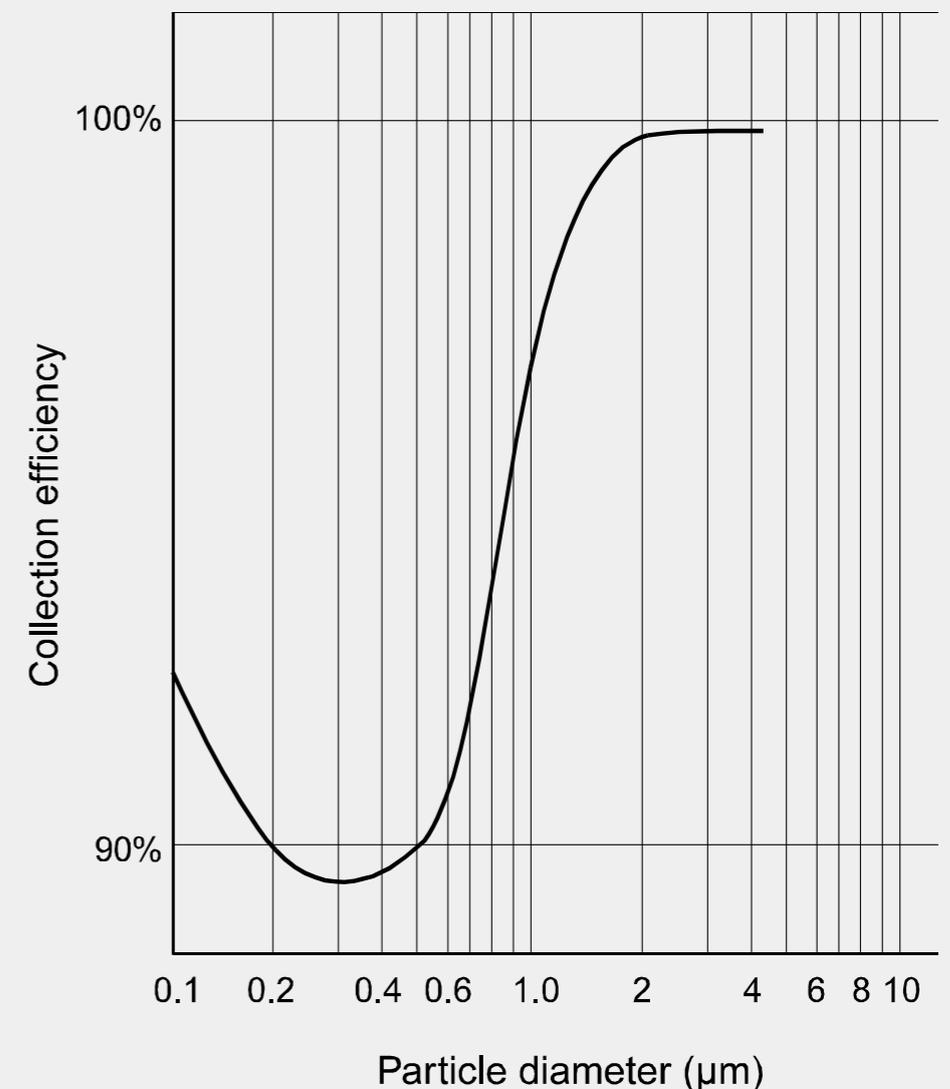
● *Diffusione*

- Particelle molto piccole (con diametri inferiori a $0.1 \mu\text{m}$) tendono mediamente a seguire le linee di flusso del gas attorno alle gocce. Per tale motivo la loro probabilità di impattare inerzialmente sulle gocce è estremamente bassa ed il meccanismo precedente è per esse sostanzialmente inattivo.
- D'altra parte tali particelle sono soggette a rilevanti moti casuali causati dalla loro interazione con le molecole di gas (moti Browniani). Tale moto casuale permette alle particelle di diffondere nel gas in maniera indipendente dalle linee di flusso del campo di moto del gas stesso. Ciò rende possibile un loro impatto con le gocce di liquido.
- In pratica per particelle molto piccole (ed in opportune condizioni) tale modalità di cattura è la più rilevante.

interazioni particelle-gocce / 3

● *Altri meccanismi di interazione*

- Un andamento dell'efficienza di cattura in funzione delle dimensioni delle gocce è riportato a lato.
- Per particelle con diametri compresi tra 0.1 e 1 μm nessuno dei meccanismi citati garantisce una efficiente rimozione.
- Per tale motivo vengono utilizzati alcuni meccanismi ausiliari di cattura, che siano efficienti in tali campi di dimensioni, quali i sistemi elettrostatici e le tecniche di condensazione di vapor d'acqua sulle particelle. In entrambi i casi si cerca di accrescere le dimensioni delle particelle da catturare in modo da facilitarne l'impatto sulle gocce di acqua.



Parametri di controllo

● Caduta di pressione

- Uno dei parametri maggiormente usati per la definizione delle prestazioni di uno scrubber è costituito dalla caduta di pressione che lo caratterizza. Essa è definita come la differenza tra la pressione statica della corrente gassosa alla sezione di ingresso dello scrubber e la pressione statica alla sezione di uscita.
- Generalmente per la rimozione di particolati si utilizzano cadute di pressioni maggiori di quelle utilizzate per la rimozione di inquinanti gassosi.

● Rapporto Liquido/Gas

- Un altro parametro comunemente riportato per i wet scrubber è il valore del rapporto (L/G) tra la portata di liquido e quella di gas.
- Generalmente per la rimozione di particolati si usano rapporti L/G inferiori a quelli utilizzati per la rimozione di inquinanti gassosi.

Wet scrubbers: classificazione /1

- Il processo di pulitura operato in uno scrubber è, ovviamente, caratterizzato da un consumo di energia.
- Si osserva, in generale, che l'energia richiesta per ripulire una corrente gassosa è tanto maggiore quanto più piccole sono le dimensioni degli inquinanti.
- L'energia necessaria può essere fornita al sistema sia dalla corrente gassosa stessa sia attraverso il liquido (cui viene fornita durante il processo di atomizzazione).
- La modalità con la quale l'energia viene fornita permette di definire un criterio di classificazione dei wet scrubber.

Wet scrubbers: classificazione /2

● Scrubbers funzionanti grazie all'energia della fase gas

- scrubbers venturi
- torri a piatti
- scrubbers inerziali

● Scrubbers funzionanti grazie all'energia fornita dalla fase liquida

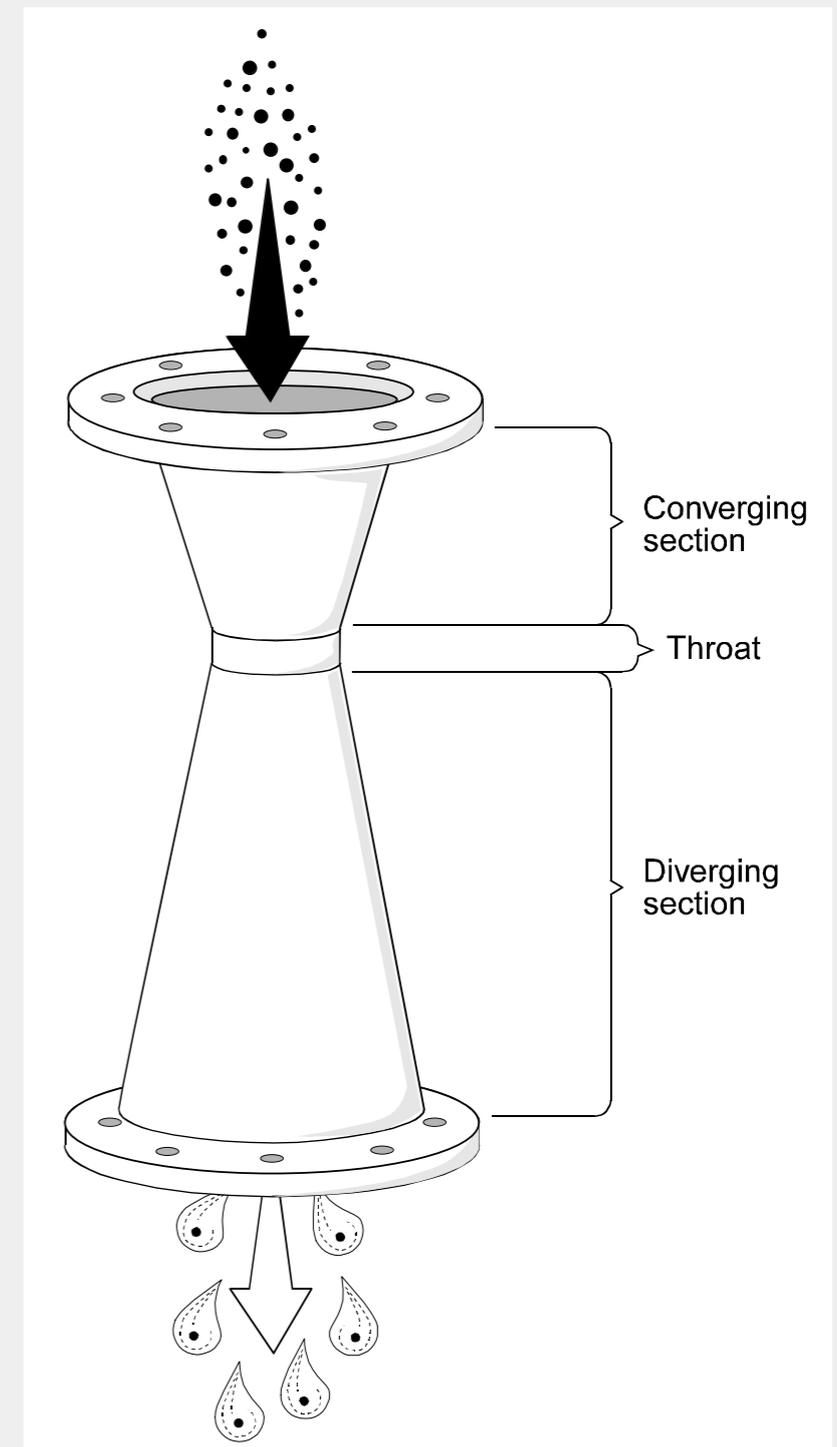
- torri a spray
- eiettori venturi

● Scrubbers funzionanti grazie all'energia fornita da entrambe le fasi

- colonne ad impacchettamento o scrubber a film liquido

Scrubbers Venturi: configurazioni / 1

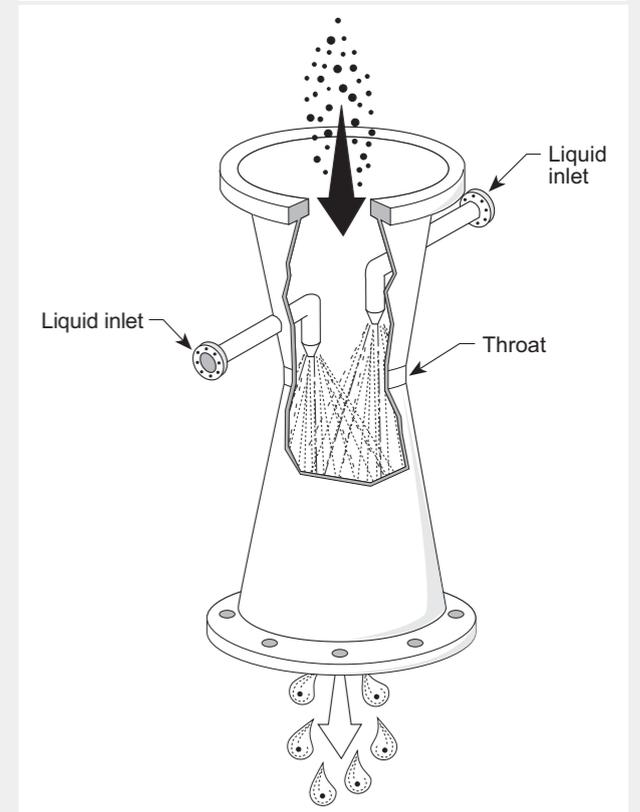
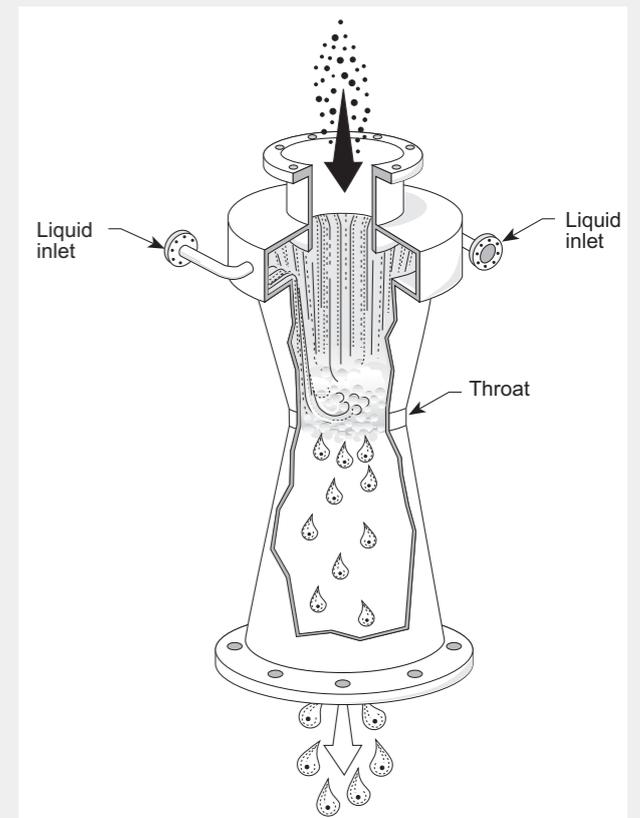
- Negli scrubber Venturi l'energia contenuta nella corrente gassosa viene utilizzata per atomizzare il liquido utilizzato per la pulitura.
- Lo scrubber Venturi ha tre sezioni: una parte convergente, una gola ed una parte divergente.
- La velocità dei gas di scarico aumenta a causa della restrizione della sezione e nella gola strappano dalla corrente liquida (iniettata nella sezione di ingresso o poco prima della gola) formando una dispersione molto fine di gocce.
- L'azione di pulitura avviene in massima parte in prossimità della gola. Il tratto divergente consente di rallentare il flusso facilitando la precipitazione delle gocce.
- Pur essendo utilizzabili per la rimozione sia di gas che di polveri gli scrubber Venturi sono principalmente utilizzati per queste ultime.



Scrubbers Venturi: configurazioni / 2

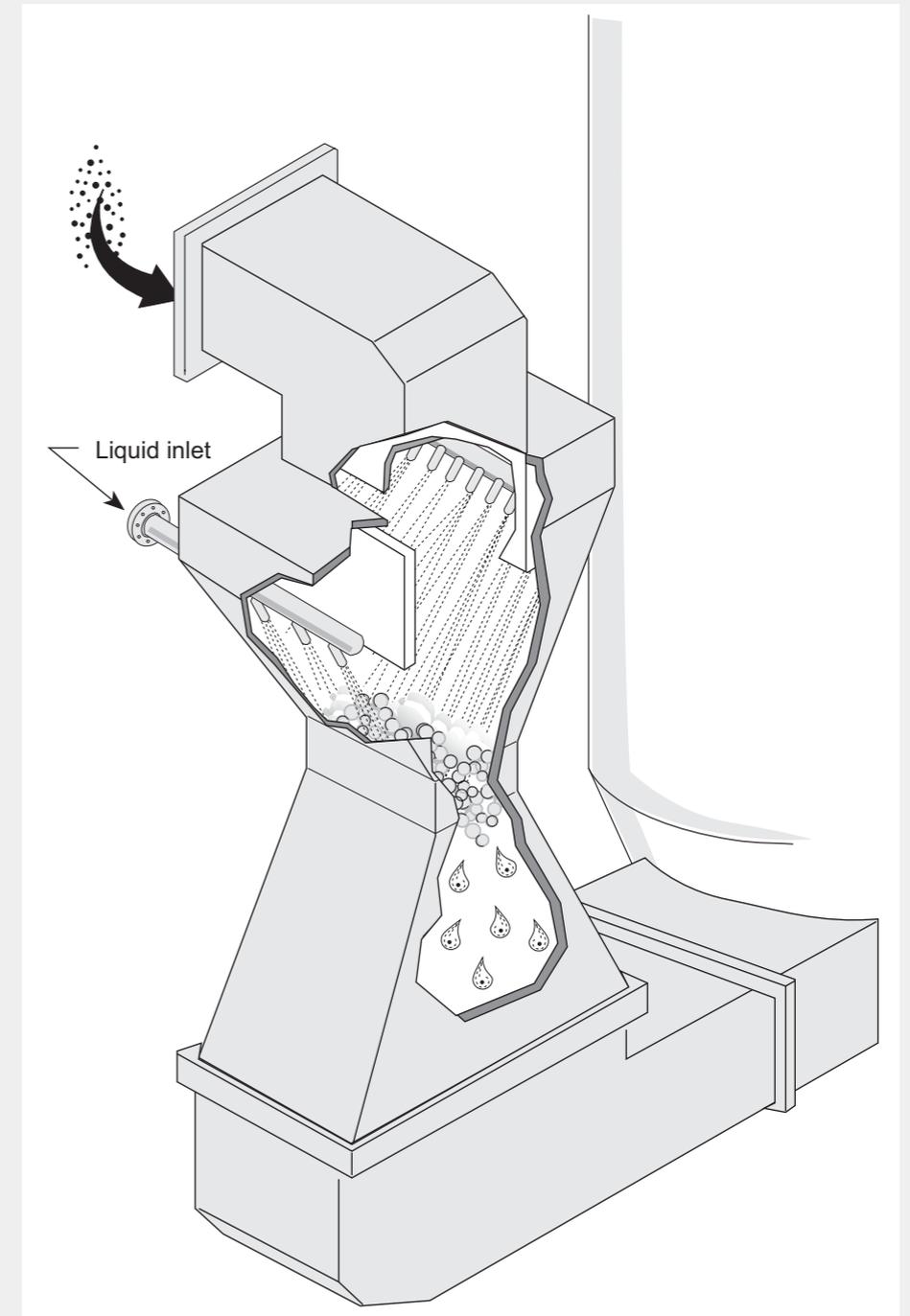
- Iniezione del liquido alla sezione di ingresso
 - Il liquido bagna tutta la sezione convergente e la gola rendendo questa configurazione adatta al trattamento di correnti calde e secche anche contenenti polveri abrasive.
 - In tal caso si parla di Venturi bagnati.

- Iniezione del liquido nella gola
 - in tal caso l'energia per la atomizzazione del liquido viene parzialmente fornita dal liquido. Poiché il liquido non ricopre in maniera soddisfacente la gola questa configurazione non è adatta per correnti gassose secche. In compenso tali sistemi sono energeticamente convenienti per correnti umide e fredde.
 - In tal caso si parla di Venturi non bagnati



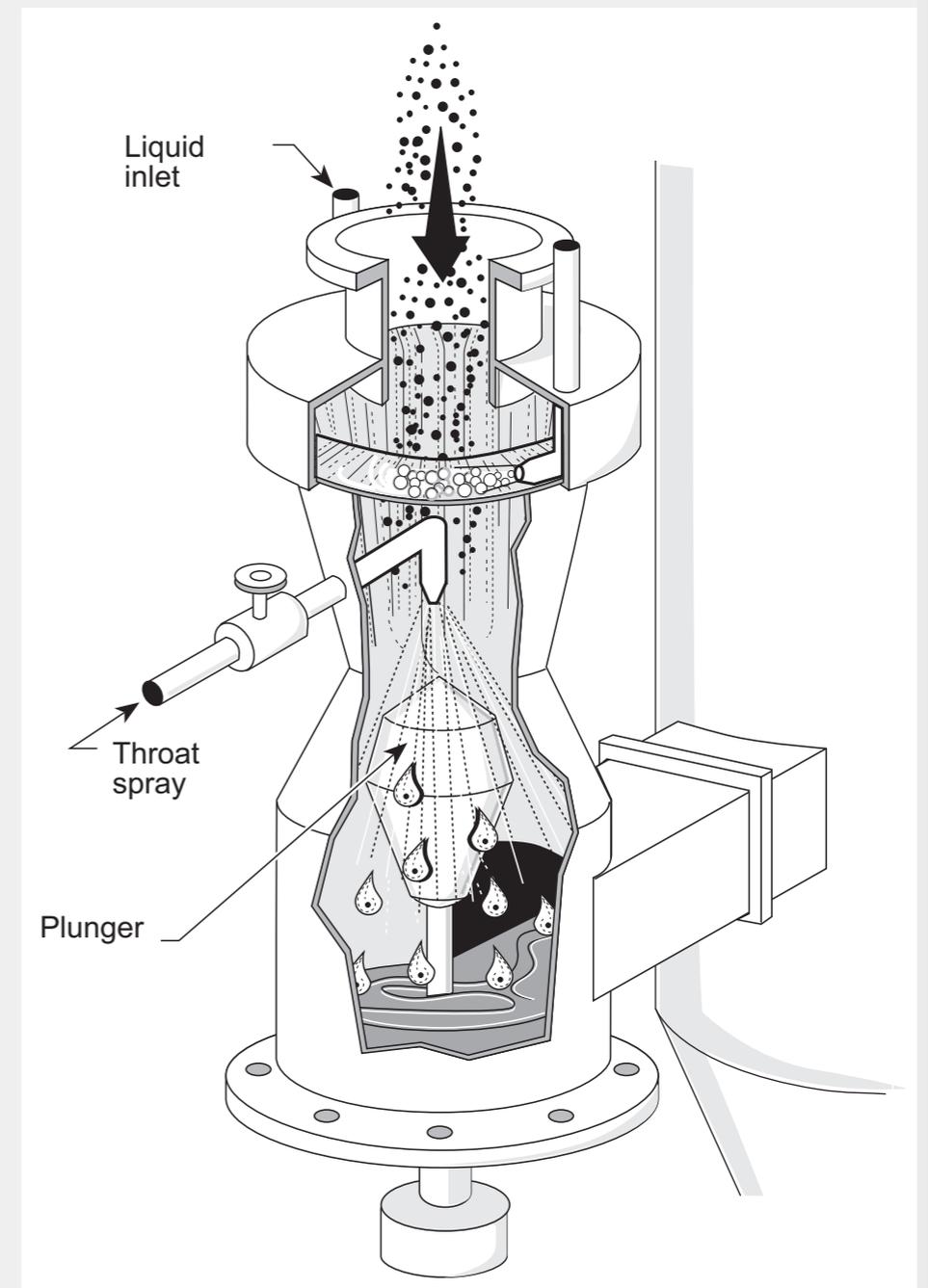
Scrubbers Venturi: configurazioni / 3

- I Venturi con gola rotonde possono essere utilizzate per flussi gassosi fino a circa $90000\text{m}^3/\text{h}$. Per flussi maggiori è difficile garantire, con tale configurazione, una sufficiente uniformità della distribuzione della fase liquida nella gola con conseguente riduzione dell'efficienza dell'azione di pulitura.
- Per tali motivi a grandi portate si preferisce usare sistemi con simmetria rettangolare. In tali sistemi, scegliendo delle geometrie della gola sufficientemente allungate è possibile realizzare delle buone distribuzioni del liquido anche a dimensioni della gola grandi abbastanza da potere trattare grandi portate di gas.



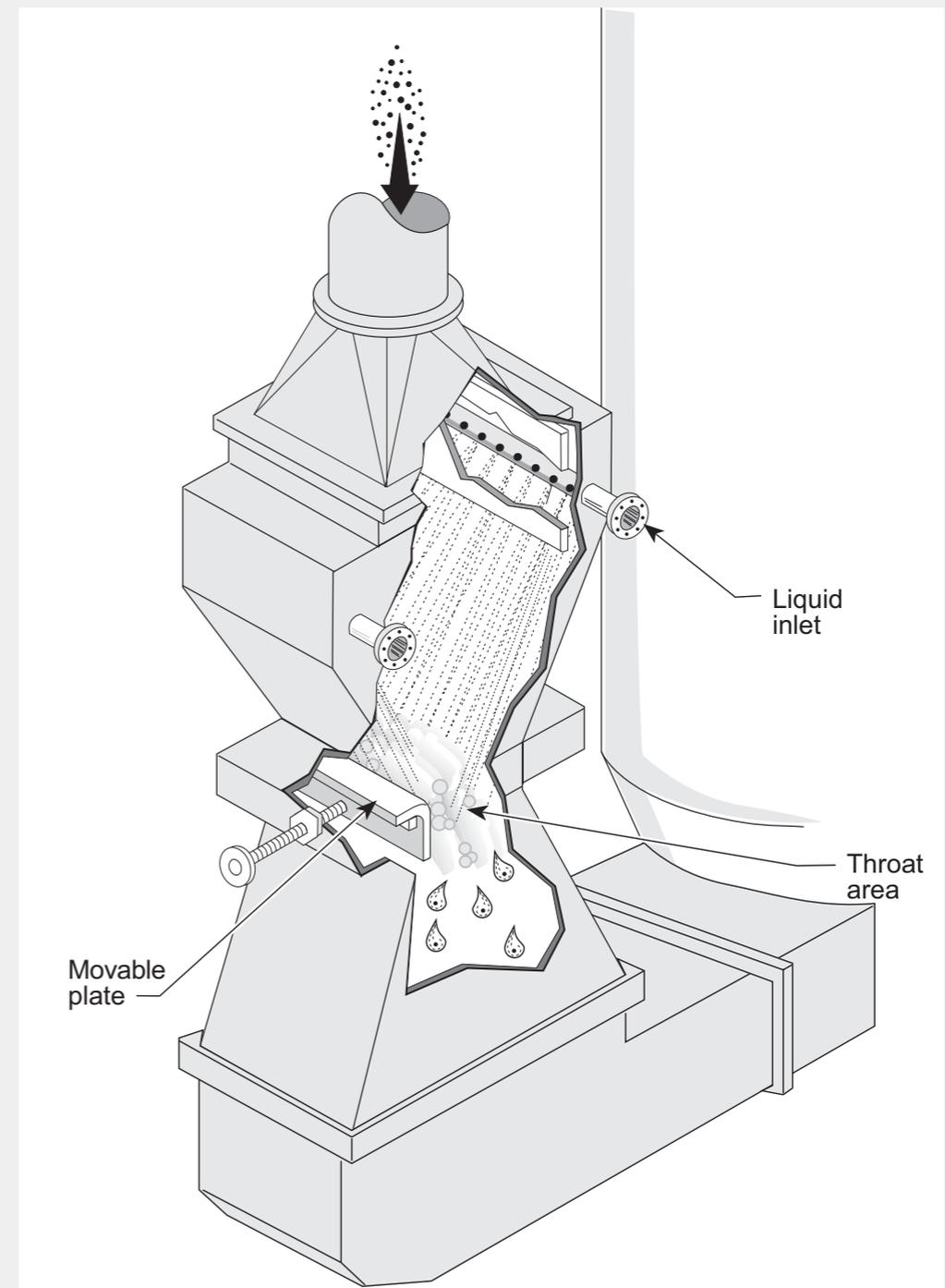
Scrubbers Venturi: configurazioni / 4

- Le configurazioni viste finora hanno una dimensione fissa della gola che permette di trattare solo campi ristretti di portate gassose in maniera efficiente. Se la portata di gas deve variare in un campo abbastanza vasto si usano dei sistemi che permettono di variare la sezione di passaggio della gola in maniera da ottimizzare l'efficienza del sistema alla specifica portata.
- L'uso di un inserto conico nella gola, in maniera da realizzare una sezione di passaggio anulare, presenta anche il vantaggio di favorire il processo di atomizzazione del liquido ed accrescere la turbolenza del flusso gassoso con effetti benefici sul processo di ripulitura.
- Si usano configurazioni in cui il liquido è iniettato dall'alto o spruzzato sull'inserto conico.



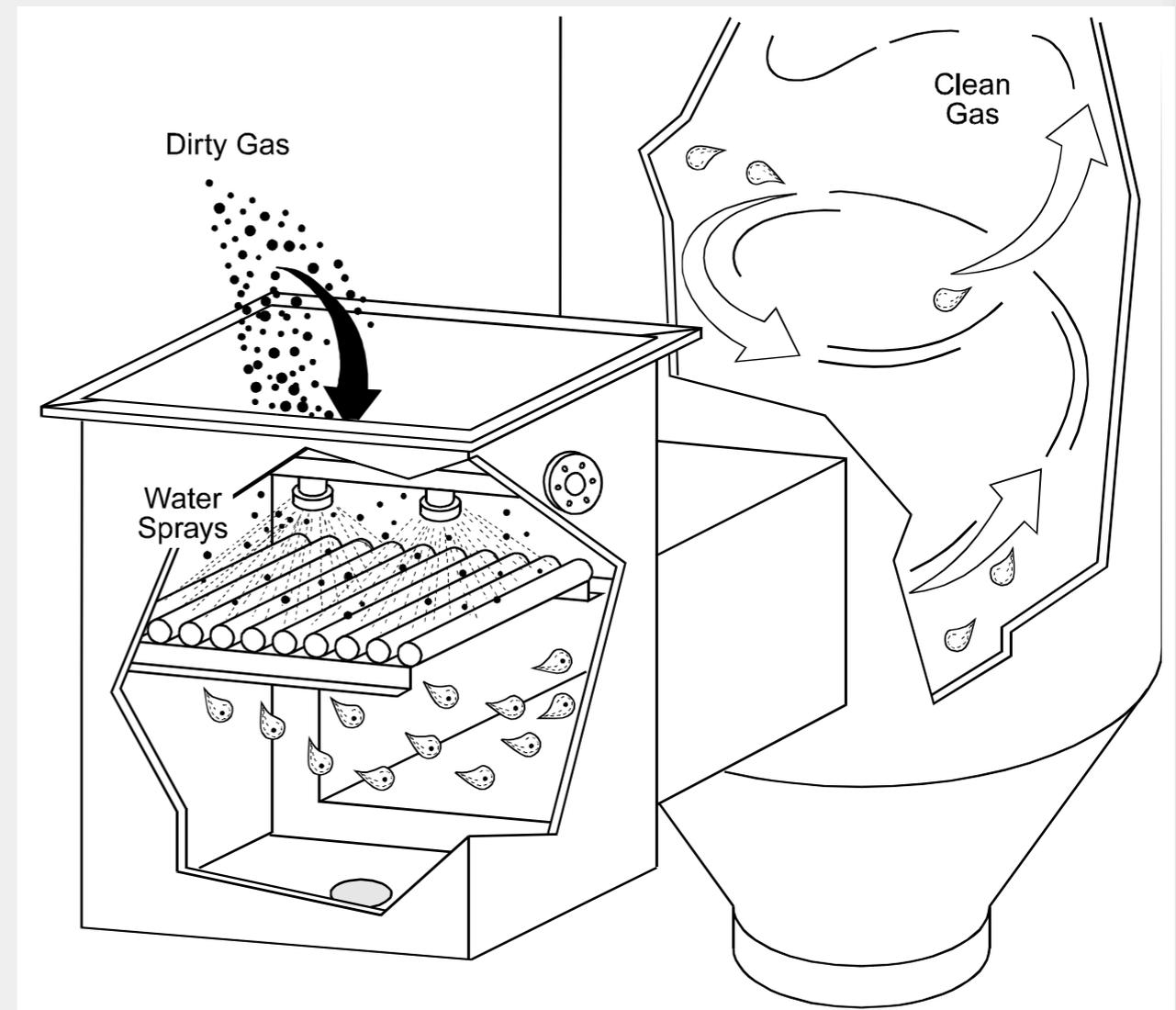
Scrubbers Venturi: configurazioni / 5

- Un'altra configurazione di venturi con gola a sezione variabile utilizza un piatto mobile per la regolazione della sezione (rettangolare) della gola.
- In tal caso per ovviare ai problemi di sporcamento del piatto mobile si fa fluire una corrente di liquido sul piatto.



Scrubbers Venturi: configurazioni / 6

- Una configurazione abbastanza comune utilizza un serie di barre cilindriche affiancate poste trasversalmente alla direzione di passaggio del flusso gassoso.
- In tal caso gli spazi tra le barre realizzano una serie di gole venturi che svolgono la funzione di promozione dell'atomizzazione e concentrazione della dispersione di gocce che promuove l'azione ripulente.
- In tali sistemi il liquido viene spruzzato dall'alto sulle barre al fine di mantenere pulite le gole e ridurre i fenomeni di abrasione dovuti alle polveri ed all'alta velocità del gas nelle gole.



Scrubbers Venturi: applicazioni / 1

● *Rimozione di particolati:*

- I Venturi sono gli scrubber più comunemente usati per la ripulitura da polveri e particolati di correnti gassose e sono caratterizzati dalla maggiore efficienza, tra tutti i wet scrubber, nella rimozione di tali inquinanti. Ciò è dovuto alla buona atomizzazione del liquido realizzata nella gola dalla forte interazione con il flusso gassoso accelerato nella sezione convergente e dalla elevata turbolenza del flusso stesso.
- L'efficienza di ripulitura cresce al crescere della velocità dell'aria nella gola. Ciò comporta una elevata caduta di pressione nello scrubber con conseguente aumento dei consumi energetici del sistema e dei relativi costi di esercizio.
- Le cadute di pressione tipiche di sistemi Venturi utilizzati nella rimozione di particolati variano tra 120 e 2500 mm/H₂O e sono generalmente comprese tra 500 e 1500 mm/H₂O. Le velocità di passaggio del gas nella gola, in corrispondenza di queste cadute di pressione, variano tra i 30 e i 120 m/s.
- L'efficienza del sistema dipende anche dal rapporto tra le portate di liquido e gas. Al di sotto di 0,4 l/m³ la quantità di liquido iniettato non è sufficiente a garantire la presenza di un numero di gocce sufficiente ad avere una buona azione ripulente. Per rapporti oltre 1,3 l/m³ non si ottengono significativi miglioramenti dell'azione ripulente.

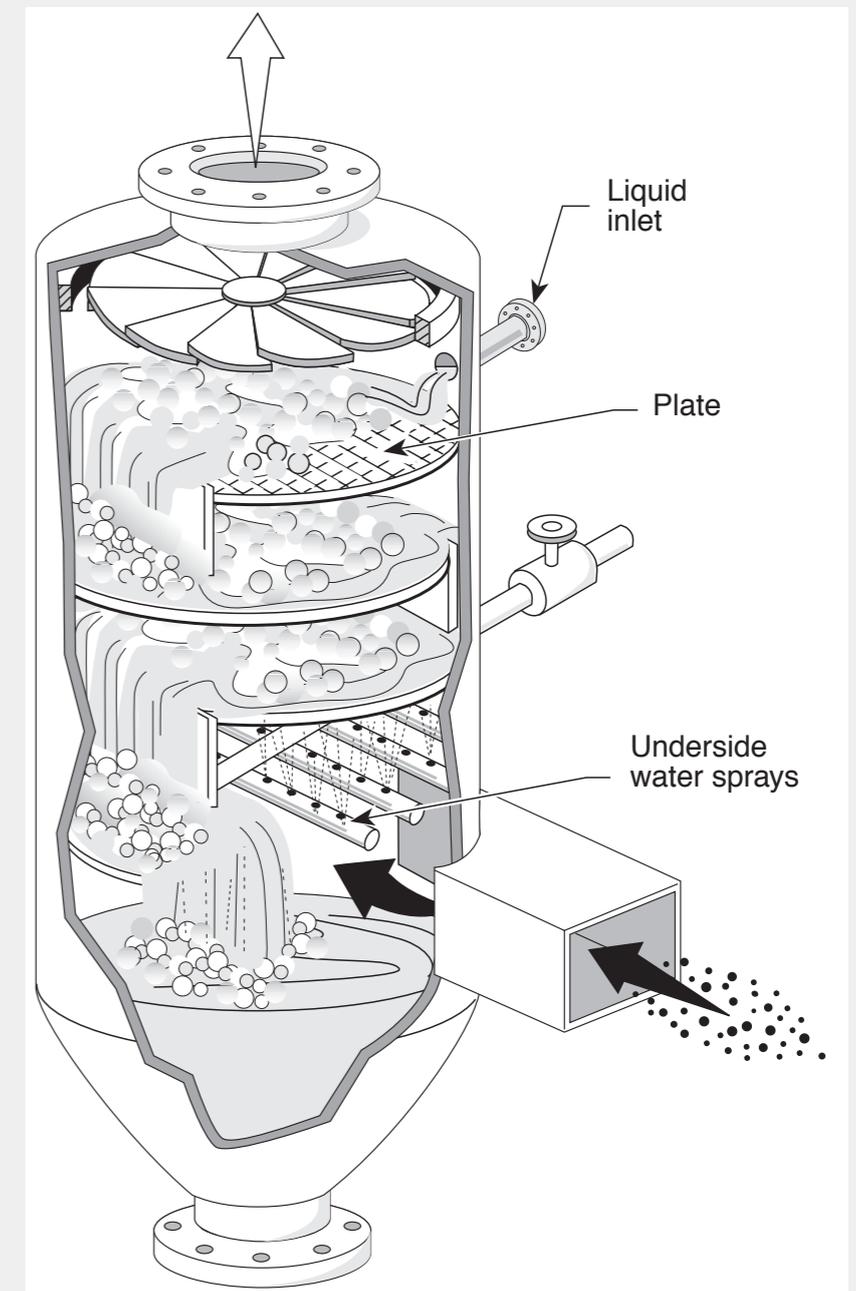
Scrubbers Venturi: applicazioni / 2

● *Rimozione di inquinanti gassosi:*

- I venturi sono usati per la rimozione contemporanea di polveri e inquinanti gassosi. Tuttavia nel caso in cui si debbano eliminare solo inquinanti gassosi non è conveniente utilizzare tali sistemi.
- Infatti a causa delle alte velocità di passaggio i tempi di residenza del gas a contatto con la fase liquida sono troppo brevi per garantire una alta efficienza di rimozione.
- Tuttavia nel caso di presenza di consistenti concentrazioni di polveri assieme agli inquinanti gassosi, il disegno dei Venturi presenta il vantaggio di essere poco soggetto ad occlusioni e dunque ben indicato.
- Una limitazione all'uso dei Venturi per gli inquinanti gassosi è la necessità che tali inquinanti siano ben solubili nel liquido o reattivi con esso.
- Per la rimozione di inquinanti gassosi si utilizzano velocità di transito e cadute di pressioni inferiori a quelle usate per le applicazioni di ripulitura da particolati al fine di realizzare tempi di residenza del gas a contatto con il liquido più lunghi.
- Al fine di accrescere la superficie di contatto tra il liquido e il gas, e quindi di favorire l'assorbimento di quest'ultimo, si utilizzano rapporti liquido/gas più elevati (compresi tipicamente tra 2,5 e 5,5 l/m³).

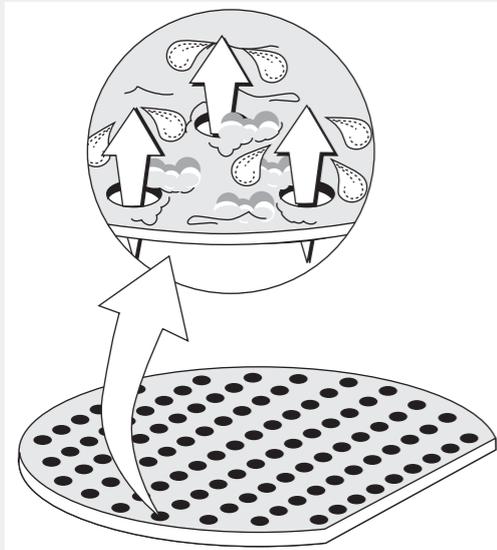
Torri a piatti

- Una torre a piatti è costituita da un recipiente con uno o più piatti perforati orizzontali su cui viene fatto fluire il liquido.
- Il gas entra dal basso e, passando attraverso i fori dei piatti viene in contatto con il liquido che è versato dall'alto passando da un piatto a quello sottostante attraverso opportune aperture.
- Questi sistemi sono molto efficienti nella rimozione di inquinanti gassosi. Nel caso di correnti con alto contenuto di particolati essi non sono molto efficienti e vanno soggetti a problemi di occlusione.



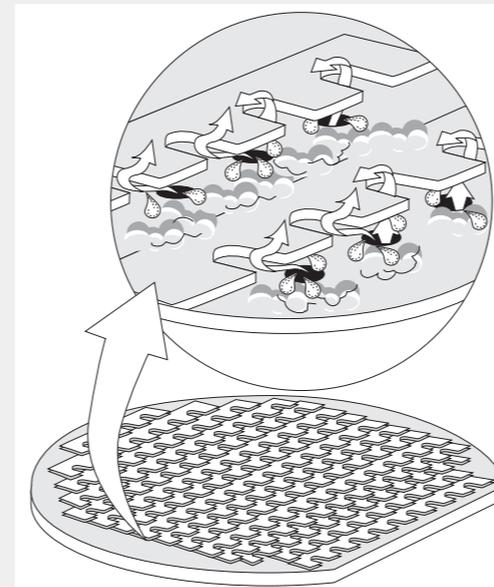
Tipologie dei piatti

- Si usano diversi tipi di piatto in funzione delle esigenze del sistema



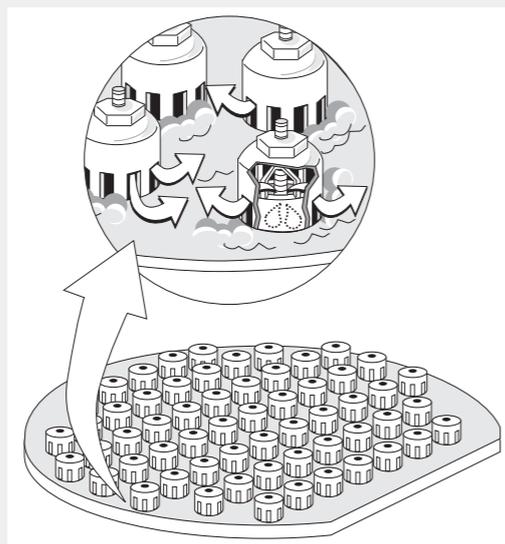
piatto perforato

- disegno semplice
- pochi problemi di occlusione
- adatto in presenza di particolati



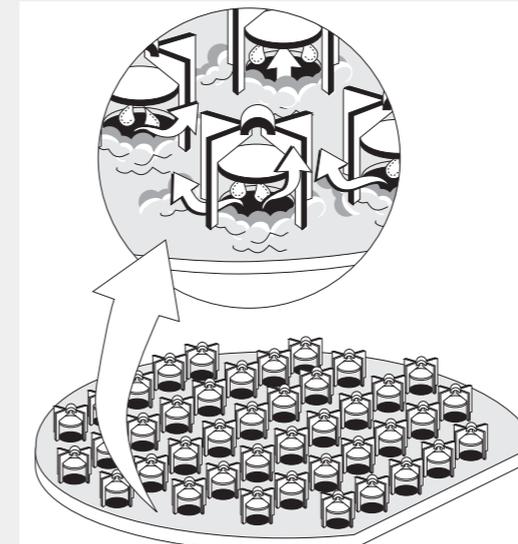
piatto ad impatto

- promuove la atomizzazione
- aumenta la superficie di contatto
- maggiore efficienza dei piatti semplici



piatto a gorgogliatori

- grande superficie di scambio anche a bassi L/G
- problemi di occlusione



piatto a valvole

- simile al piatto a gorgogliatori
- posizione del piattello variabile
- ampio campo di funzionamento

Torri a piatti: applicazioni

● *Rimozione di particolati:*

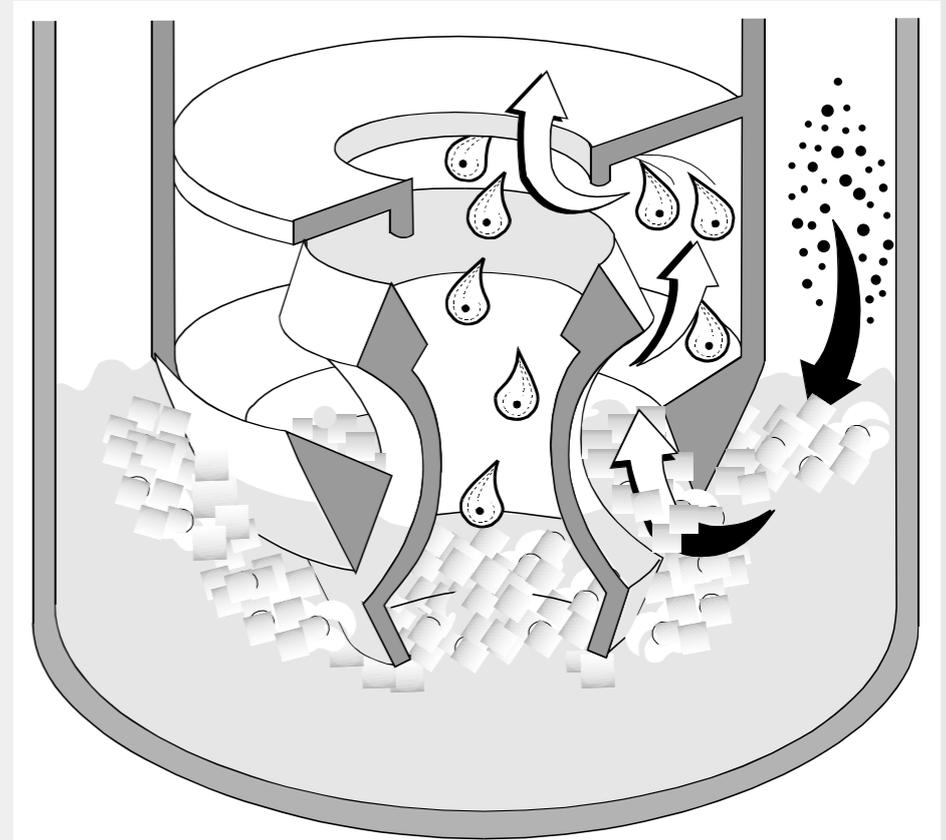
- La rimozione dei particolati ha luogo all'uscita degli orifizi dei piatti a causa della formazione di dispersioni liquide. Sebbene tali sistemi possano avere discrete efficienze di pulitura da particolati con moderata spesa energetica essi non costituiscono un sistema elettivo per tale scopo.
- L'efficienza di rimozione dei particolati non cresce al crescere del numero dei piatti oltre 2 o 3. Sebbene efficienze maggiori si possano ottenere utilizzando piatti con un numero maggiore di fori più piccoli tale soluzione è più dispendiosa e comporta maggiori perdite di carico e maggiori problemi di occlusioni.

● *Rimozione di inquinanti gassosi:*

- Questi sistemi sono estremamente efficienti per la rimozione di particolati gassosi a causa della forte interazione con ampie aree di contatto che si realizza in corrispondenza delle aperture sui piatti.
- L'efficienza del sistema cresce al crescere del numero dei piatti e al crescere del rapporto L/G e della caduta di pressione ad ogni piatto.

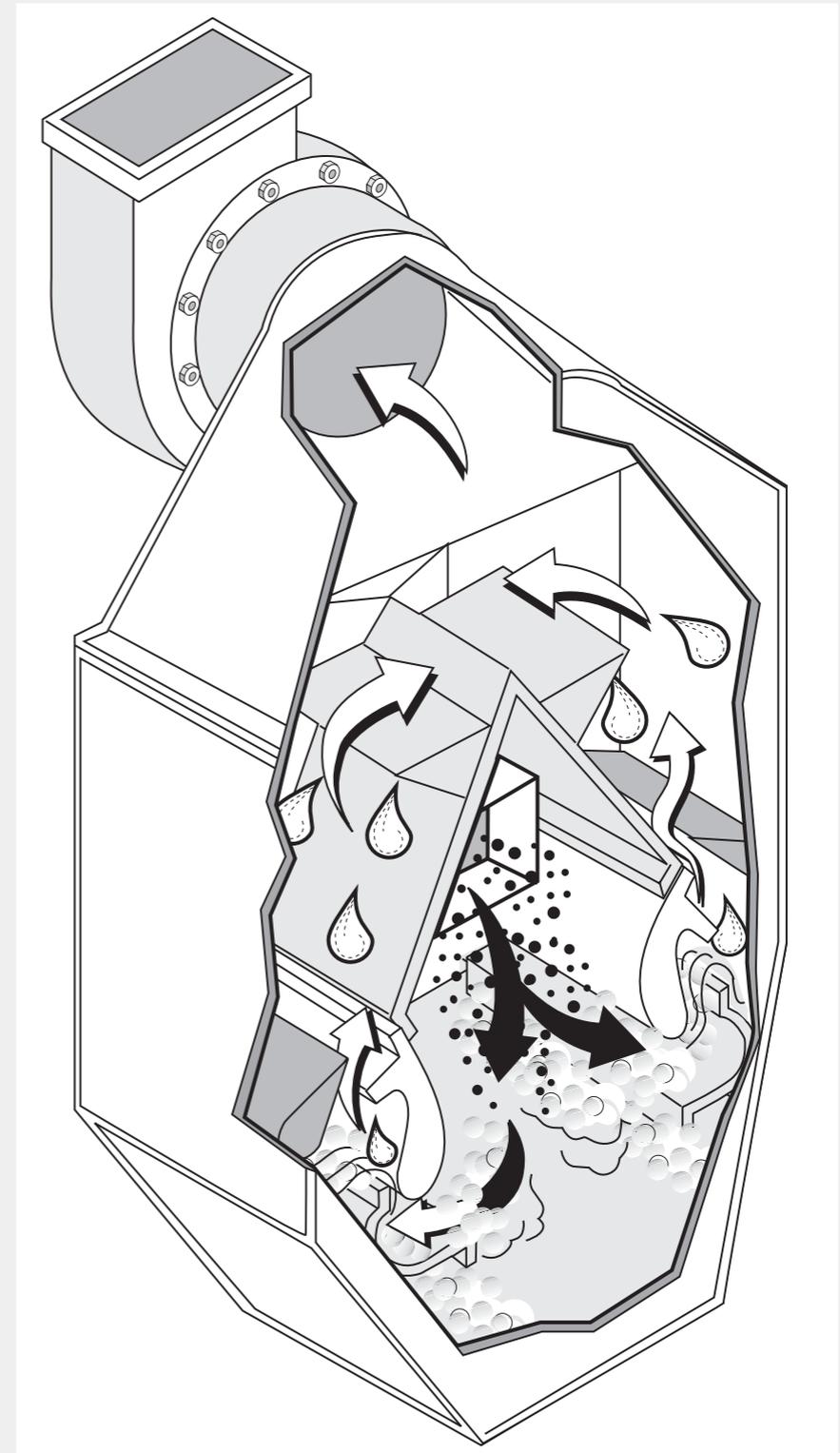
Scrubber inerziali

- In questi scrubber il flusso gassoso è forzato a passare in una vasca contenente il liquido. Successivamente il flusso è fatto passare in condotti sagomati od orifizi al fine di separare la fase liquida dalla corrente gassosa.
- La gran parte della rimozione di particolati e gas avviene durante il passaggio della corrente gassosa nel liquido.
- Questi scrubber sono generalmente usati per la rimozione di particolati. Le particelle più grandi sono rimosse nell'impatto con la superficie del liquido mentre le particelle più piccole sono catturate successivamente per impatto sulle goccioline di liquido. A tale scopo il condotto di uscita è opportunamente sagomato per massimizzare il miscelamento delle gocce e del particolato.



scrubber a spray auto-indotto

- Gli scrubber a spray auto indotto funzionano in maniera molto simile a quelli ad orifizio sommerso. In tal caso, però, il gas è fatto passare in uno stretto passaggio dando luogo ad un processo di atomizzazione vero e proprio all'uscita. In tal modo si possono ottenere buone efficienze di rimozione.
- Per entrambe le configurazioni si pone il problema di rimuovere dal liquido i residui accumulati nel processo di ripulitura senza abbassare il livello del liquido al fine di mantenere una condizione ottimale di funzionamento.



Scrubber inerziali: applicazioni

● *Rimozione di particolati:*

- L'efficienza della ripulitura dipende essenzialmente dal livello del bagno di acqua. Infatti, esso determina la caduta di pressione (ovvero la formazione di gocce nella sezione di uscita), il livello di miscelamento delle fasi ed i tempi di contatto. Ogni configurazione geometrica è caratterizzata da un livello ottimale del liquido cui corrisponde un campo di portate di gas per le quali il sistema funziona in maniera efficiente alquanto stretto. Per tale motivo si preferisce operare questi sistemi a portata di gas fissa eventualmente aggiungendo una portata di gas addizionale a quella da ripulire.

● *Rimozione di inquinanti gassosi:*

- Questi sistemi sono usati raramente per la rimozione di inquinanti gassosi. Nel caso di inquinanti molto solubili o reattivi con il liquido che formino notevoli quantità di precipitati tale tipo di scrubber presenta il vantaggio di non presentare passaggi molto ristretti che possono andare soggetti ad occlusioni (come avviene nelle torri a piatti).

Wet scrubbers: classificazione /2

- Scrubbers funzionanti grazie all'energia della fase gas

- scrubbers venturi
- torri a piatti
- scrubbers inerziali

- **Scrubbers funzionanti grazie all'energia fornita dalla fase liquida**

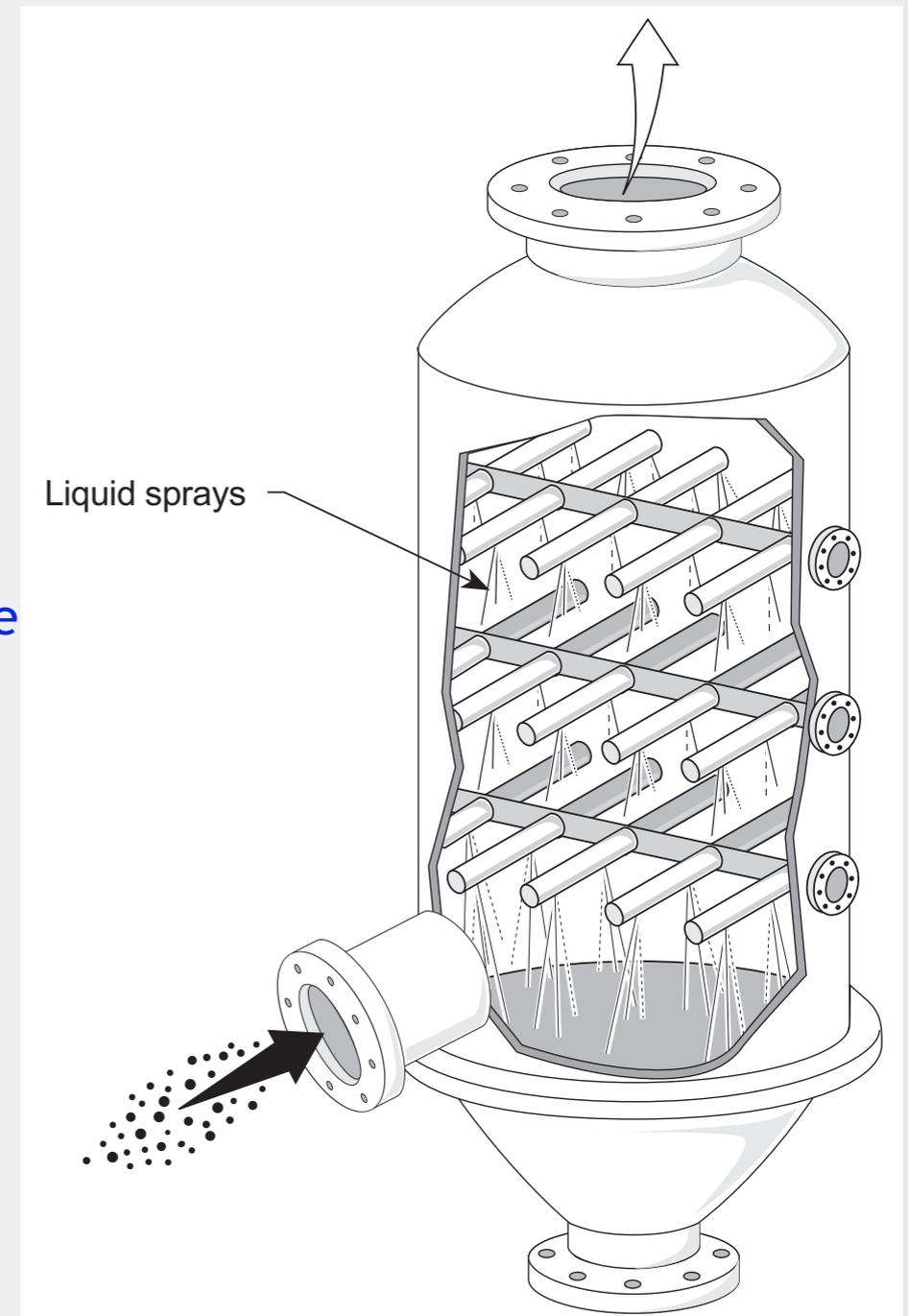
- **torri a spray**
- **eiettori venturi**

- Scrubbers funzionanti grazie all'energia fornita da entrambe le fasi

- colonne ad impacchettamento o scrubber a film liquido

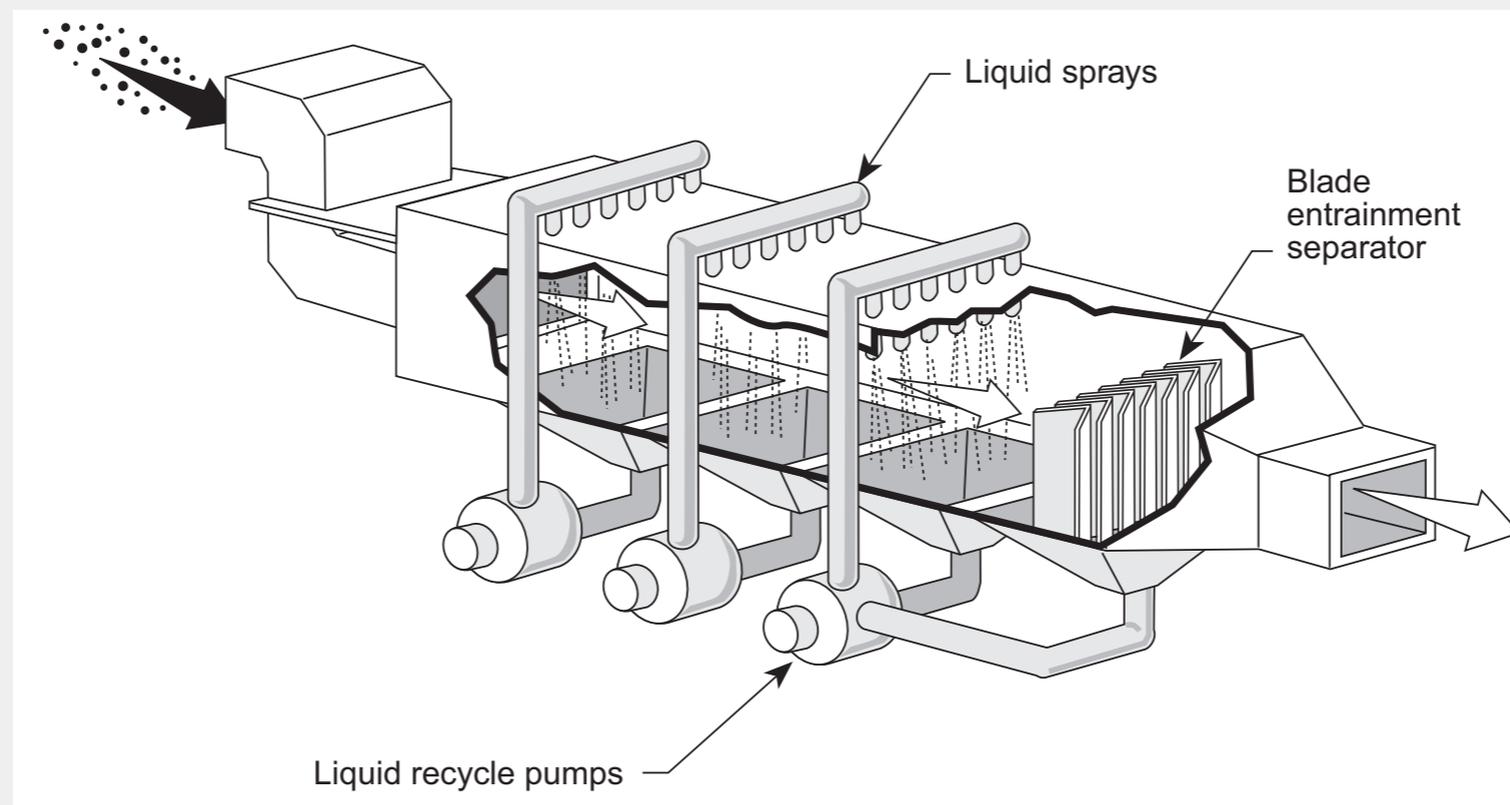
Spray Towers verticali

- Le torri a spruzzo (spray towers) hanno caratteristiche costruttive molto semplici essendo costituite da recipienti (tipicamente cilindrici) nei quali il liquido è spruzzato per mezzo di ugelli.
- la corrente gassosa entra dal basso ed incontra gli spruzzi di liquido che vengono iniettati dall'alto verso il basso (anche su più livelli). Questa configurazione è detta "a controcorrente" ed in essa si realizza una favorevole condizione in cui il liquido più pulito si trova ad interagire con il gas già parzialmente ripulito incrementando l'efficienza della azione di pulitura.
- L'uso di molti ugelli distribuiti nella torre ha lo scopo di formare in tutto il recipiente una concentrazione elevata di piccole gocce al fine di massimizzare gli scambi tra le due fasi. Sebbene dimensioni minori delle gocce aumentino l'efficienza è, tuttavia, necessario evitare che le gocce siano tanto piccole da essere trascinate dalla corrente gassosa. Dimensioni tipiche delle gocce in questi sistemi sono comprese tra 500 e 1000 μm . Parallelamente le velocità del gas vanno tenute basse (max 1.2 m/s). Ciò comporta una notevole dimensioni di tali scrubber a parità di volumi di gas trattati.
- Sistemi con flussi concorrenti (con spray orientati nella stessa direzione della corrente gassosa) sono usati in casi in cui il processo di pulitura è meno difficoltoso con una riduzione delle dimensioni complessive del sistema a causa delle più alte velocità di passaggio usate.



Spray Towers orizzontali

- In un'altra categoria di Spray Tower molto usate il flusso gassoso procede in orizzontale all'interno del contenitore mentre gli spray di liquido sono orientati dall'alto verso il basso così da realizzare un flusso ortogonale tra le due correnti.
- In questi sistemi si utilizzano dei sistemi di riciclaggio del liquido al fine di economizzarne il consumo. Il riciclaggio può essere fatto nelle singole sezioni o tra le varie sezioni. In tal caso si inietta liquido fresco nell'ultima sezione e poi si riutilizza questo liquido, recuperato in vasche poste nella parte bassa del contenitore, nelle sezioni più a monte, dopo un eventuale filtraggio.



Applicazioni delle Spray tower

● *Rimozione di particolati:*

- Le Spray towers sono sistemi di scrubbing a più bassa richiesta di energia rispetto ai sistemi Venturi.
- Le cadute di pressione in questi sistemi sono nell'ordine di meno di 2.5 cm di colonna di acqua.
- per tale motivo sono adatte per la rimozione di particolati di dimensioni relativamente grandi (maggiori di 10-25 μm).
- Migliori efficienze per particolati fini possono essere ottenute utilizzando spray con granulometria molto fine (e conseguente incremento della spesa energetica) ed incrementando la velocità della corrente gassosa. In tal caso, però, la quantità di liquido trascinato dalla corrente gassosa diventa elevata rendendo necessaria l'impiego di stadi di separazione a valle più efficienti. Sebbene tali accorgimenti permettano di utilizzare questi scrubber anche per la rimozione di particolati molto fini essi comportano spese energetiche più alte dei sistemi Venturi a parità di efficienza di pulitura.

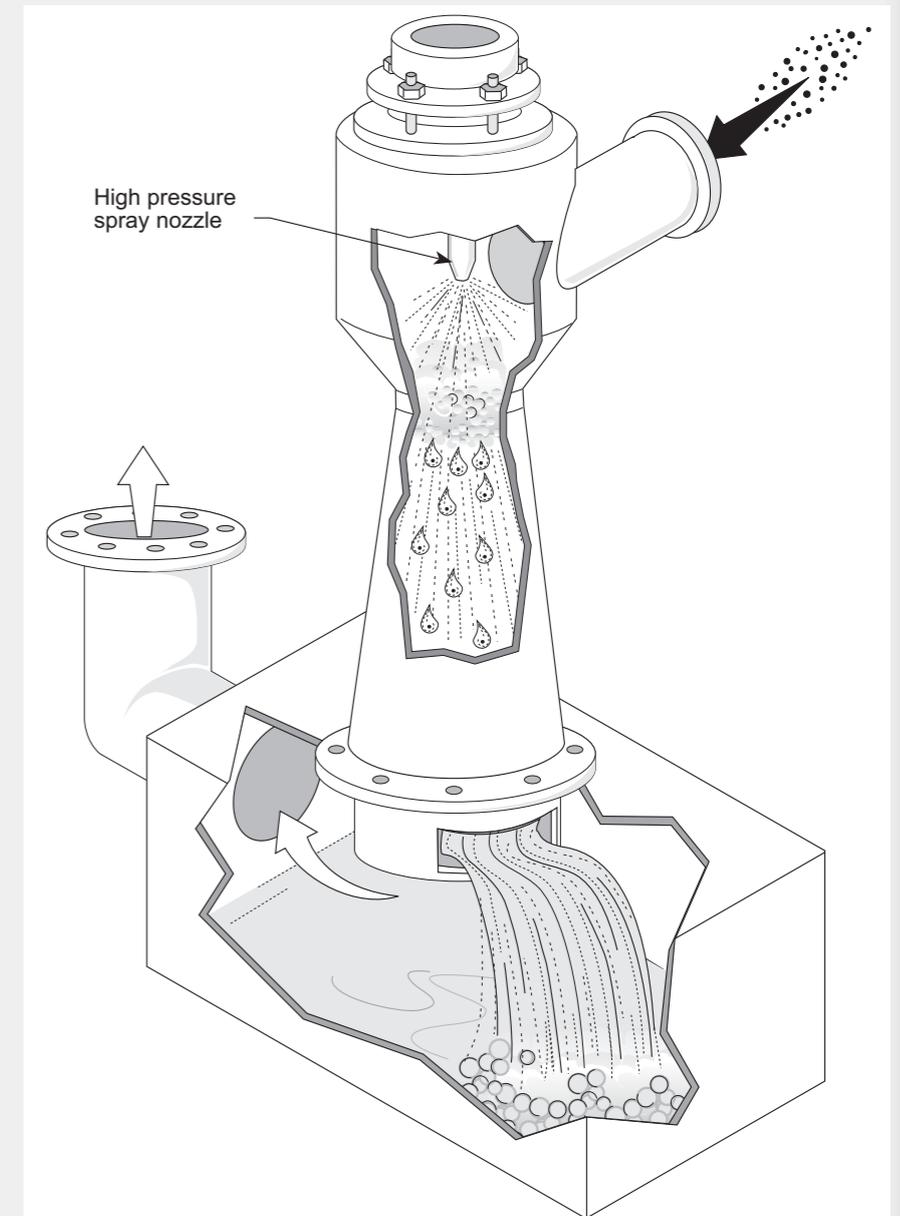
Applicazioni delle Spray tower

● *Rimozione di inquinanti gassosi:*

- Le Spray towers possono essere usate per la rimozione di inquinanti gassosi. Tuttavia esse hanno efficienze di rimozione accettabili solo se i gas da rimuovere sono altamente solubili nel liquido (acqua o acqua additivata).
- In tale caso esse presentano una buona efficienza con un ragionevole consumo energetico e sono largamente usate.
- Poiché tali sistemi possono trattare grandi quantità di aria con bassa velocità sono usate anche in processi di deodorizzazione di arie provenienti da impianti industriali di trattamento di prodotti animali e per la prima desolforazione di scarichi.
- Anche per gli inquinati gassosi migliori efficienze si possono ottenere generando spray più fini e maggiori quantità di liquido ma in tal caso il bilancio energetico è sfavorevole rispetto ad altri sistemi che sono anche più compatti.

Eiettori Venturi

- Gli eiettori venturi rappresentano una combinazione dei sistemi venturi e delle spray tower. In tal caso si usa un atomizzatore che spruzza il liquido, con elevata pressione di iniezione, nella gola.
- La configurazione usata crea una depressione nella sezione superiore del contenitore. Per tale motivo l'energia di pompaggio della corrente gassosa è inferiore. In alcuni casi si può addirittura evitare di usare un sistema di aspirazione del gas. Ciò può essere molto vantaggioso quando è necessario trattare correnti gassose contenenti composti corrosivi o esplosivi.
- L'uso di alte pressioni di iniezioni determina la formazione di spray con gocce molto piccole. Il passaggio delle gocce nella gola, in cui sono presenti alte velocità del gas ed elevata turbolenza, dà luogo ad ulteriori fenomeni di atomizzazione secondaria. Ciò dà luogo a dispersioni liquide molto fini ed elevate efficienze di scambio ma rende necessario l'uso di sistemi di separazione delle gocce dalla corrente gassosa a valle dell'eiettore.



Applicazioni degli Eiettori Venturi

● *Rimozione di particolati:*

- Gli eiettori Venturi sono efficaci nella rimozione di particolati con dimensioni maggiori di 1 μm e non sono usati per particolati submicronici.
- l'efficienza di rimozione aumenta incrementando la pressione di iniezione del liquido (riducendo di conseguenza le dimensioni delle gocce dello spray generato) ed incrementando il rapporto liquido/gas. Entrambe queste operazioni incrementano la caduta di pressione. Pertanto ad un aumento della caduta di pressione si accompagna un incremento dell'efficienza del sistema

● *Rimozione di inquinanti gassosi:*

- A causa dei brevi tempi di residenza del gas nel sistema tali sistemi non sono particolarmente efficienti nella rimozione di inquinanti gassosi a meno che essi non siano molto solubili nel liquido o venga impiegato un liquido molto reattivo. In generale le efficienze massime non eccedono il 95%.
- Per tali motivi questi sistemi non rappresentano una scelta elettiva per la rimozione di inquinanti gassosi a meno che essi rappresentino una componente largamente minoritaria degli inquinanti presenti nella corrente gassosa.

Wet scrubbers: classificazione /2

- Scrubbers funzionanti grazie all'energia della fase gas
 - scrubbers venturi
 - torri a piatti
 - scrubbers inerziali
- Scrubbers funzionanti grazie all'energia fornita dalla fase liquida
 - torri a spray
 - eiettori venturi
- **Scrubbers funzionanti grazie all'energia fornita da entrambe le fasi**
 - **colonne ad assorbimento o scrubber a film liquido**

Torri ad assorbimento / 1

- Nelle torri ad assorbimento (o scrubber a film-liquido) il liquido è spruzzato o versato su di un letto di materiale impacchettato tra dei piatti opportunamente forati. In tal modo un film liquido ricopre il materiale attraverso cui passa la corrente gassosa da purificare. La rimozione degli inquinanti avviene nel passaggio della corrente gassosa attraverso il letto. In tal senso l'energia necessaria alla rimozione viene fornita in misura variabile dalla corrente gassosa o attraverso il liquido.
- L'utilizzo di materiale impacchettato consente di realizzare grandi superfici di scambio tra la fase liquida e quella gassosa ed incrementare i tempi di residenza. Ciò rende questi sistemi molto efficienti per la rimozione di inquinanti gassosi.
- Viceversa per i particolati, anche se tali condizioni potrebbero essere favorevoli, tali sistemi presentano notevoli problemi di intasamento del letto e questo li rende poco adatti alla rimozione di solidi.

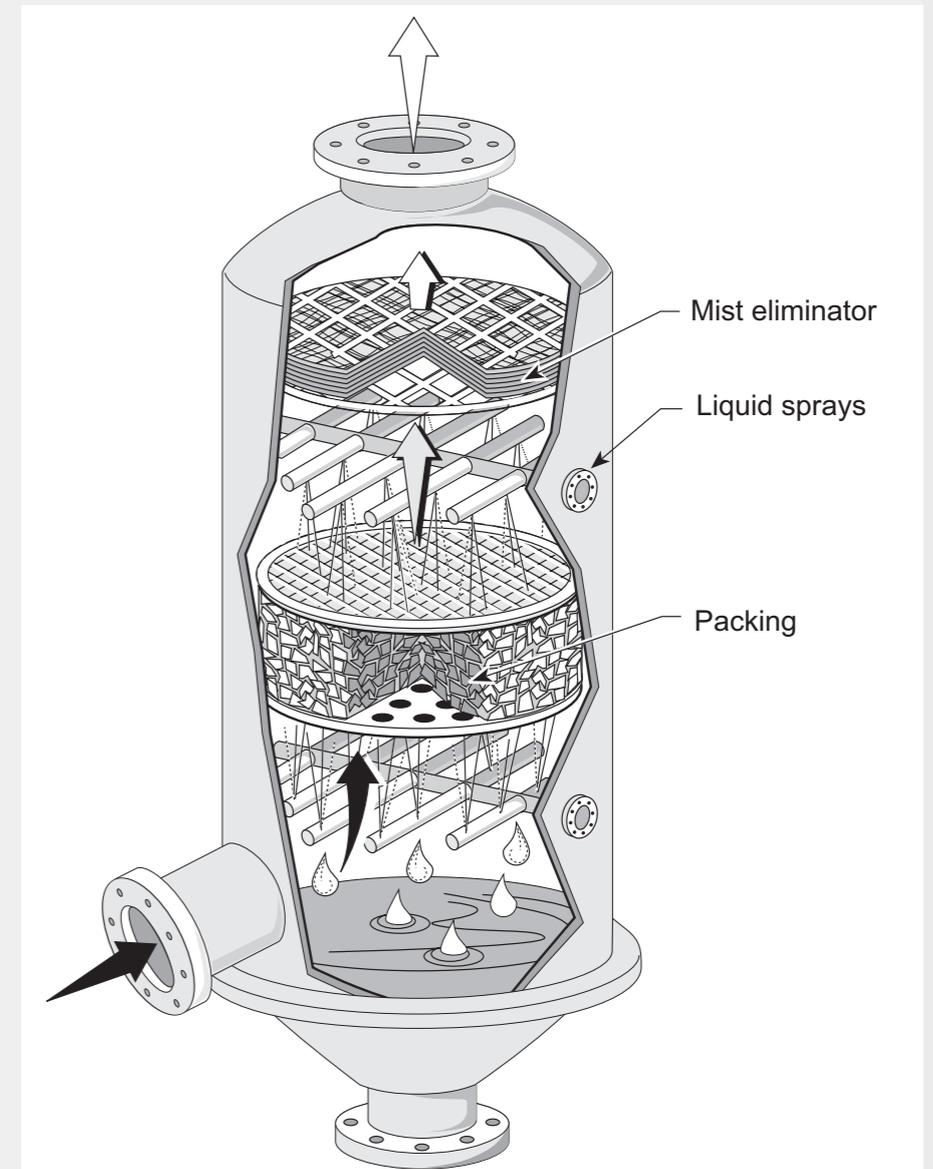
Torri ad impacchettamento / 2

- I parametri che influenzano l'efficienza delle torri ad assorbimento sono:
 - **Solubilità del gas nel liquido**
 - La solubilità del gas rappresenta il parametro più importante da considerare. Al fine di aumentare l'efficienza della rimozione può essere conveniente aggiungere degli opportuni additivi al liquido.
 - **Velocità della corrente gassosa**
 - Questo parametro influenza in maniera decisiva le dimensioni dell'impianto. L'incremento della velocità promuove un più alto livello di turbolenza e di miscelamento delle fasi ma una eccessiva velocità può creare problemi di "allagamento" del letto.
 - **Portata di liquido**
 - In generale l'efficienza aumenta all'aumentare della portata di liquido. Ovviamente maggiori quantità di liquido richiedono, per essere smaltite, dimensioni maggiori dell'impianto e maggiori costi di esercizio. Per tale motivo la quantità di acqua viene ottimizzata in funzione dell'efficienza di pulitura desiderata.
 - **Impacchettamento**
 - Un più denso impacchettamento del letto aumenta le aree di scambio ed i tempi di residenza e, quindi, l'efficienza del sistema. Esso aumenta però anche la caduta di pressione dell'impianto ed i relativi costi di esercizio.
 - **Altezza del letto**
 - Aumentando l'altezza del letto si ottengono gli stessi effetti dell'aumento dell'impacchettamento ma si aumentano anche le dimensioni del sistema ed i costi di impianto. Per tali motivi l'impacchettamento e l'altezza del letto vanno dimensionati con molta cura in funzione dell'efficienza richiesta.

Torri ad impacchettamento: configurazioni / 1

Torri a controcorrente

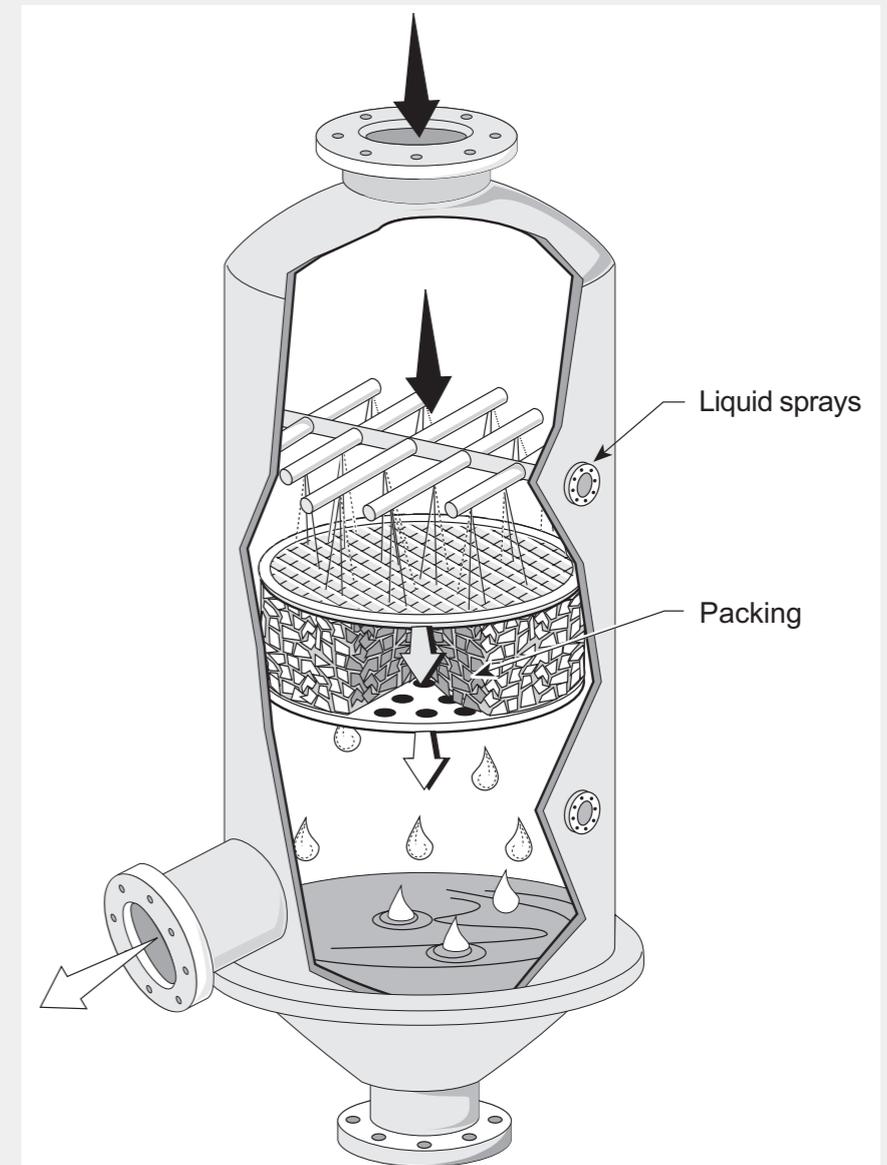
- la configurazione più comune è quella delle torri a controcorrente con ingresso della corrente gassosa dal basso e iniezione del liquido dall'alto (per mezzo di spray o condotti). Questa configurazione è, dal punto di vista teorico, la più conveniente in quanto massimizza la forza spingente di soluzione del gas nel liquido mettendo a contatto liquido più fresco con gas più pulito e liquido già contaminato con il gas a più alta concentrazione di inquinanti (ovvero mantenendo alto il differenziale di concentrazione in tutto il sistema).
- Le torri in controcorrente possono andare soggette a fenomeni di allagamento (*flooding*). Se la velocità del gas e/o la portata di liquido sono troppo alte il liquido rimane intrappolato nel letto e non scorre verso il basso. In tali condizioni l'efficienza del sistema diminuisce notevolmente. tali problemi si può ovviare dimensionando opportunamente il sistema per le portate richieste ma ciò restringe, ovviamente, il campo di condizioni sperimentali utili.



Torri ad impacchettamento: configurazioni / 2

● Torri a flusso concorrente

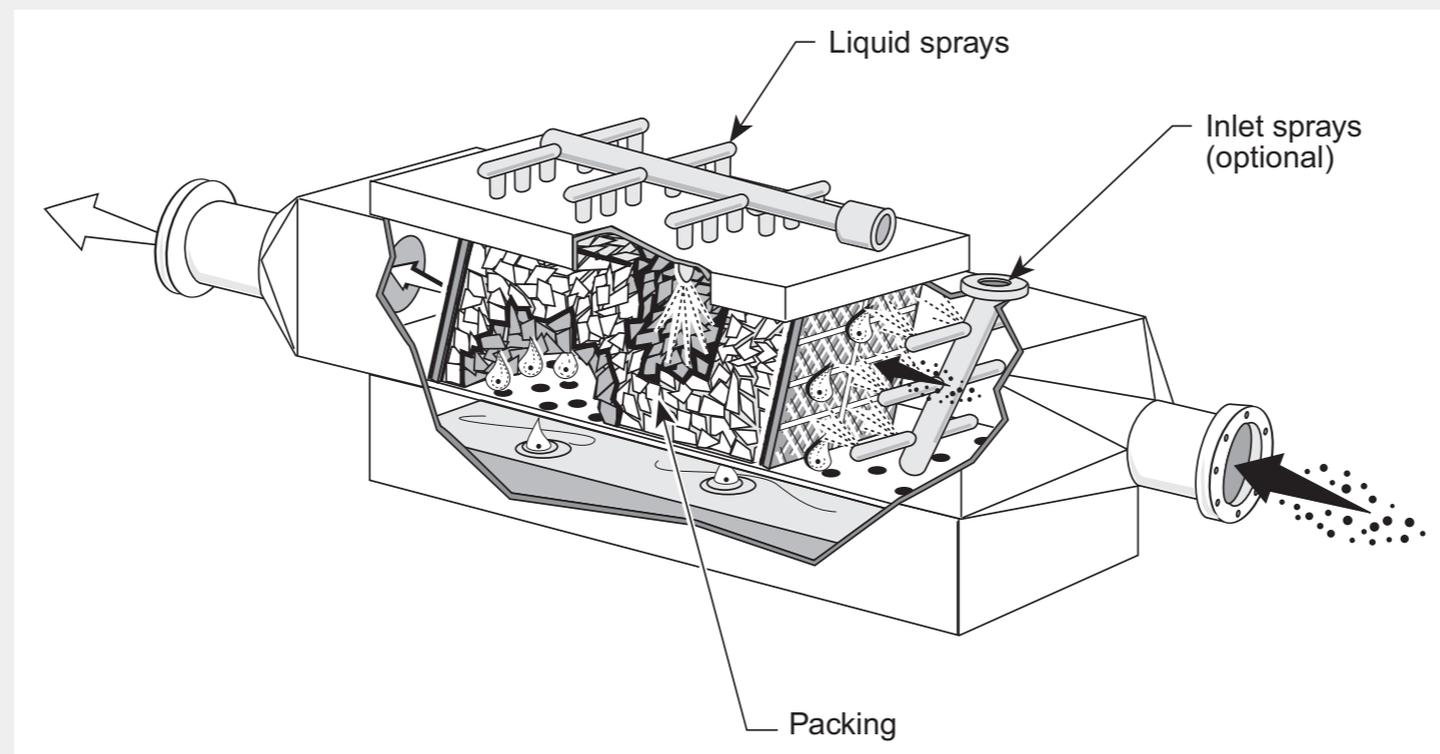
- Al fine di potere operare sistemi di scrubbing con torri ad impacchettamento quando gli spazi disponibili sono limitati (e, di conseguenza le velocità del gas e le portate del liquido devono essere alte) si usano sistemi equicorrente. In tal caso i problemi di allagamento del letto sono assenti ma l'efficienza del sistema è limitata dalla minore forza spingente legata al minore differenziale di concentrazione medio. In compenso la minore caduta di pressione e le dimensioni più compatte riducono i costi di impianto ed esercizio.



Torri ad impacchettamento: configurazioni / 3

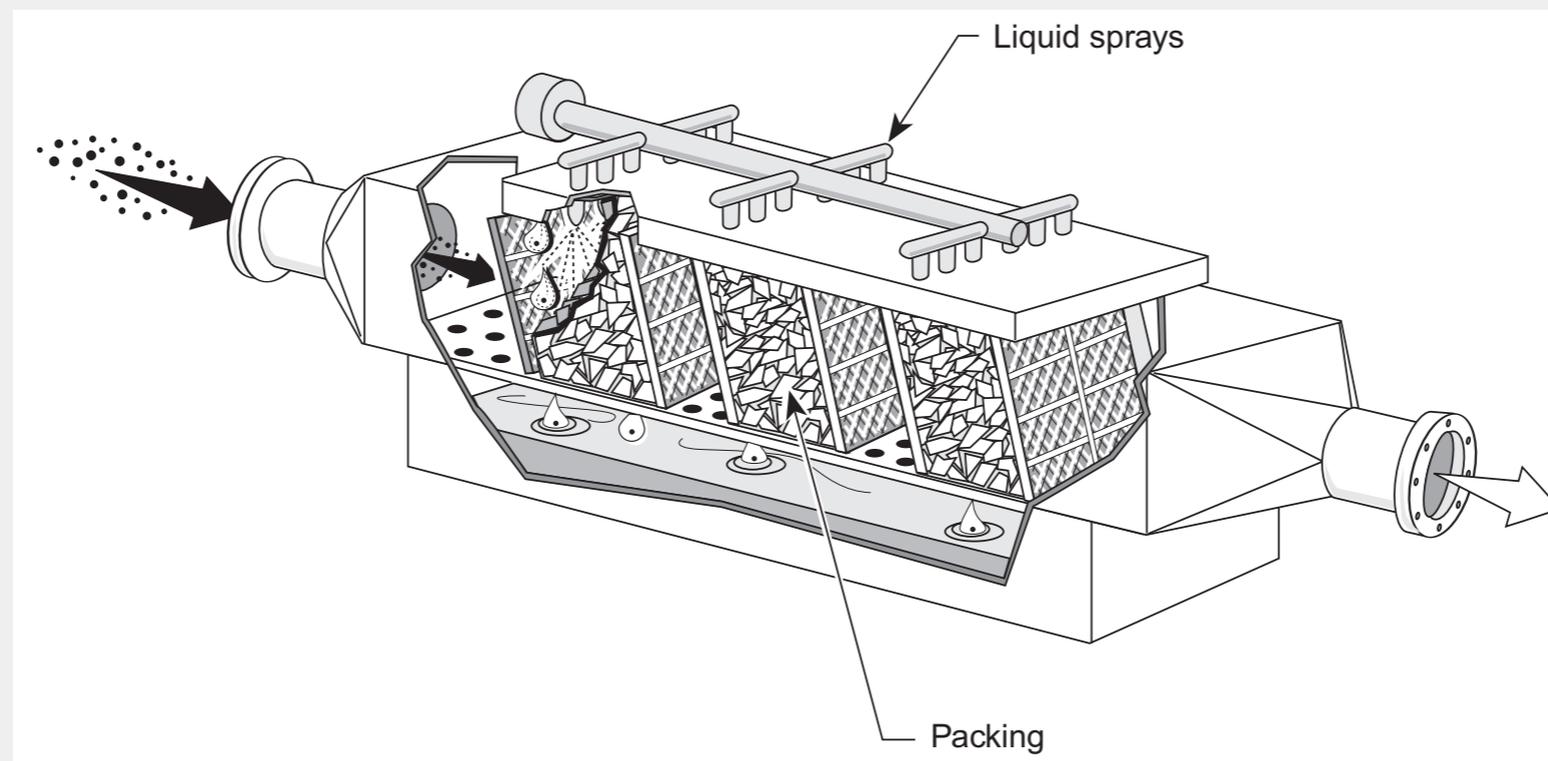
● Torri a flusso trasverso

- In tali sistemi il flusso gassoso attraversa in orizzontale il letto su cui viene spruzzata acqua dall'alto. L'acqua fluisce nel letto in direzione sostanzialmente ortogonale al flusso di gas. Si usa anche posizionare degli spruzzatori in modo da bagnare la faccia d'ingresso del letto per mantenerla pulita. Di solito tale faccia (come anche quella di uscita) sono inclinate in modo da permettere al liquido di scorrervi sopra prima di essere trascinato nel letto dal gas.
- Il dimensionamento di tali sistemi è complicato dal fatto che i gradienti di concentrazione variano in due direzioni a causa dell'incrocio di flussi.



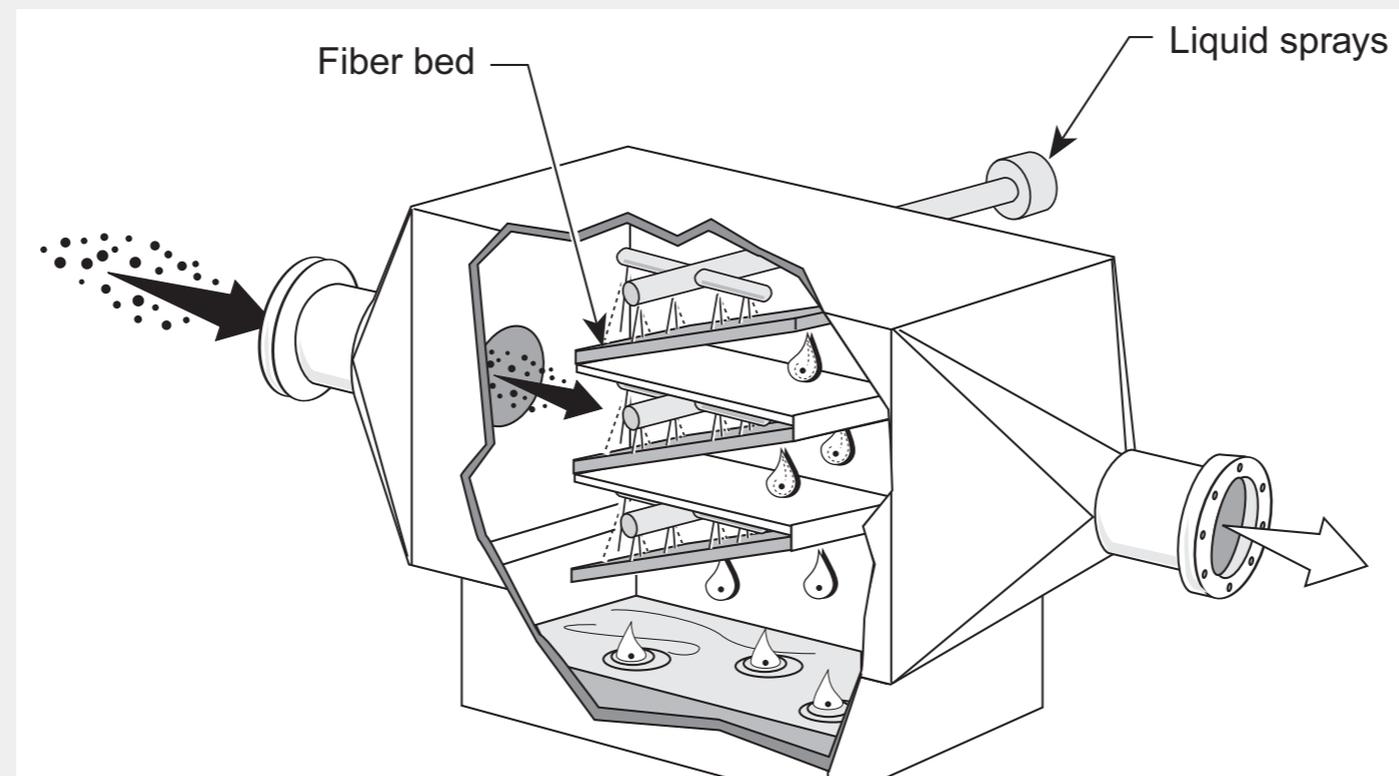
Torri ad impacchettamento: configurazioni / 4

- Gli assorbitori a flusso trasverso permettono di realizzare sistemi di ripulitura estremamente compatti e con bassa caduta di pressione a parità di prestazioni. Inoltre essi possono essere usati anche in presenza di alte concentrazioni di particolato nella corrente gassosa con opportuni accorgimenti. In particolare, provvedendo un elevato flusso liquido nella parte iniziale del sistema si può garantire una buona rimozione dei particolati senza problemi di occlusione. Nei sistemi pratici si usa dividere il sistema in sezioni: Nella prima si usa acqua per la rimozione delle polveri, nella seconda si usa acqua con opportuni additivi per rimuovere gli inquinanti gassosi ed nella parte terminale il letto viene lasciato asciutto per ripulire la corrente gassosa dal residuo liquido.



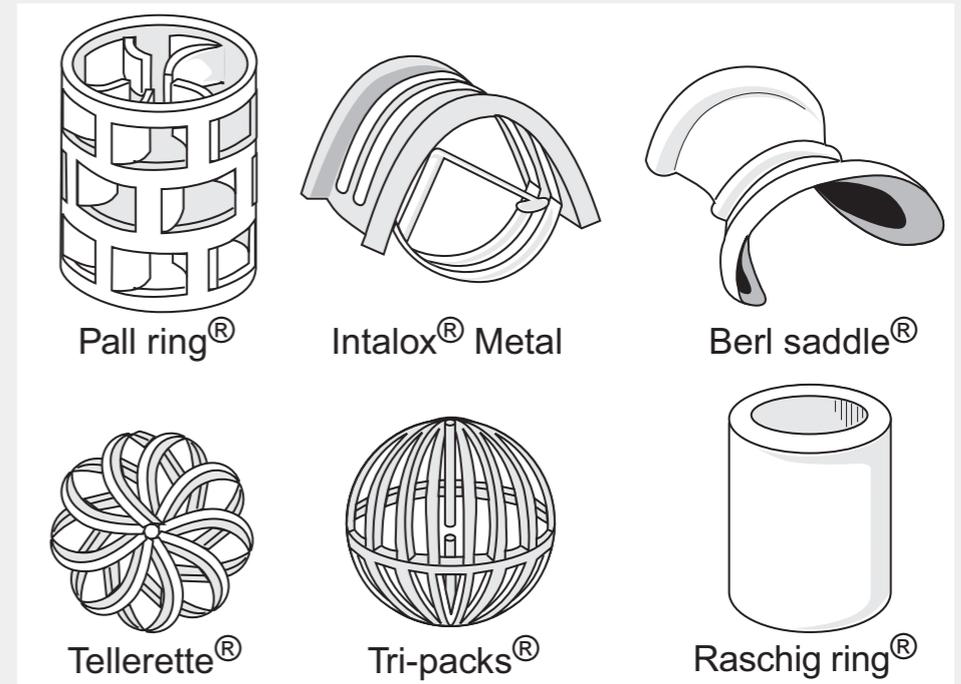
Torri ad impacchettamento: configurazioni / 5

- In alcune applicazioni si utilizza, invece del letto impacchettato, un filtro a fibra (fibra di vetro o plastica) montato su appositi supporti in modo da realizzare delle superfici sulle quali il liquido spruzzato scorra in modo da impregnare la fibra e ripulirla da residui solidi.



Torri ad impacchettamento:

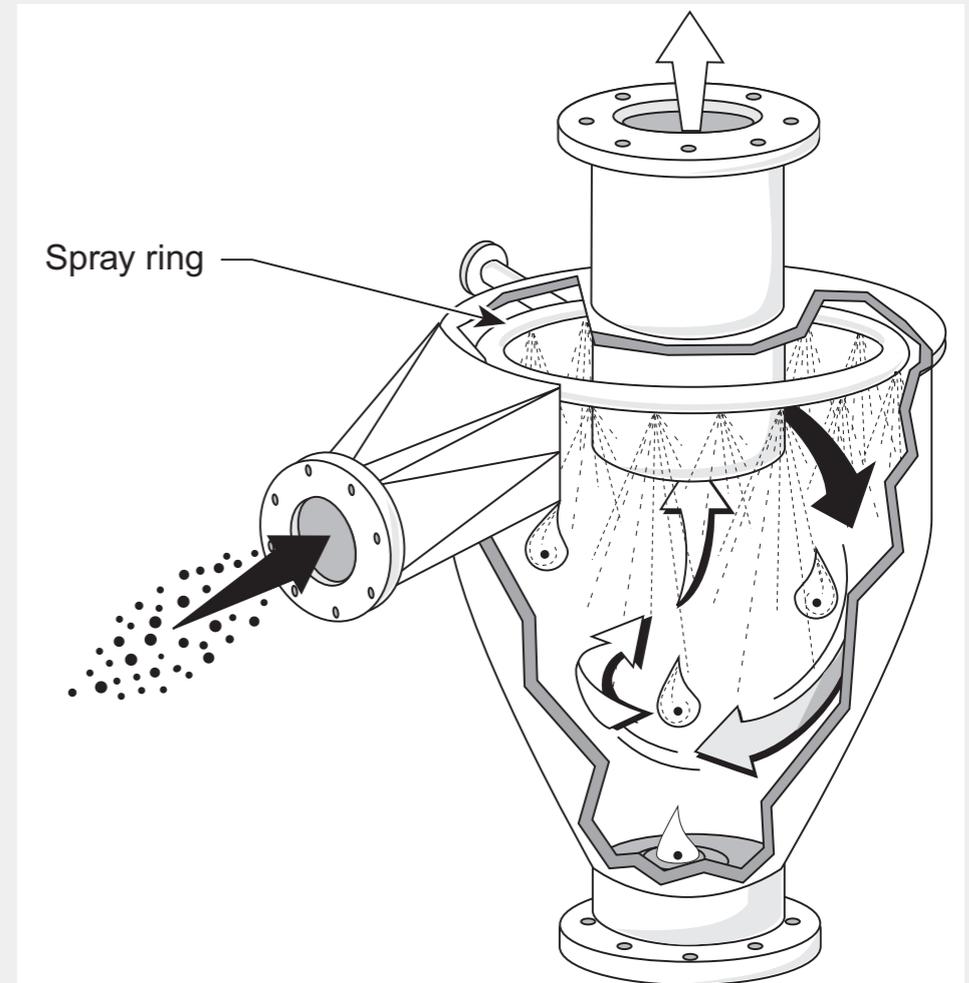
- La scelta del materiale da impacchettare costituisce un punto cruciale del progetto di una torre ad impacchettamento.
- Il materiale deve garantire una sufficiente area di scambio con una perdita di carico compatibile con il sistema.
- I criteri di scelta devono tenere in conto di:
 - costi (materiale: ceramica, acciaio, plastica)
 - perdite di carico (geometria, densità)
 - area specifica (geometria)
 - resistenza strutturale (resistenza agli stress ed ai carichi)
 - peso (carico sulla struttura complessiva)
 - flessibilità (campi portate utili)



Altri scrubber / 1

● Scrubber a ciclone irrigato

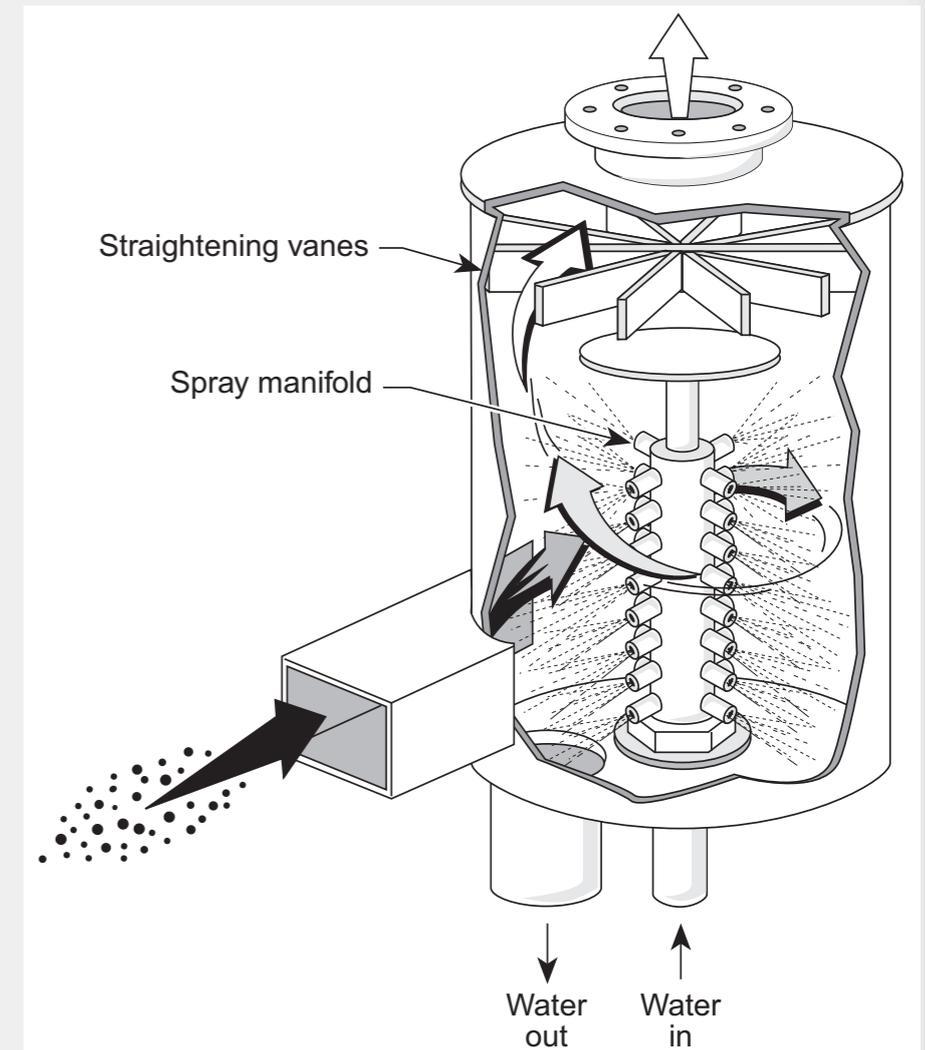
- Questi scrubber utilizzano sia l'energia della corrente gassosa che quella del liquido per realizzare la rimozione degli inquinanti.
- Il gas viene immesso dall'alto e gli viene impresso un movimento circolare (swirl) attraverso una opportuna sagomatura del condotto di immissione.
- La corrente gassosa viene guidata prima verso il basso e poi risale dal centro verso l'uscita.
- La forza centrifuga dovuta al movimento di swirl aiuta ad incrementare il miscelamento tra le due fasi e comporta la deposizione di parte degli inquinanti sulla parete (da cui vengono rimossi per l'azione degli spray).



Altri scrubber / 2

● Scrubber a ciclone con spray

- In questi scrubber l'immissione avviene dal basso con una componente di moto tangenziale.
- Il liquido è spruzzato dal centro verso le pareti investendo il flusso elicoidale di gas.
- Il meccanismo di cattura degli inquinanti è simile a quello che ha luogo nei cicloni irrigati.



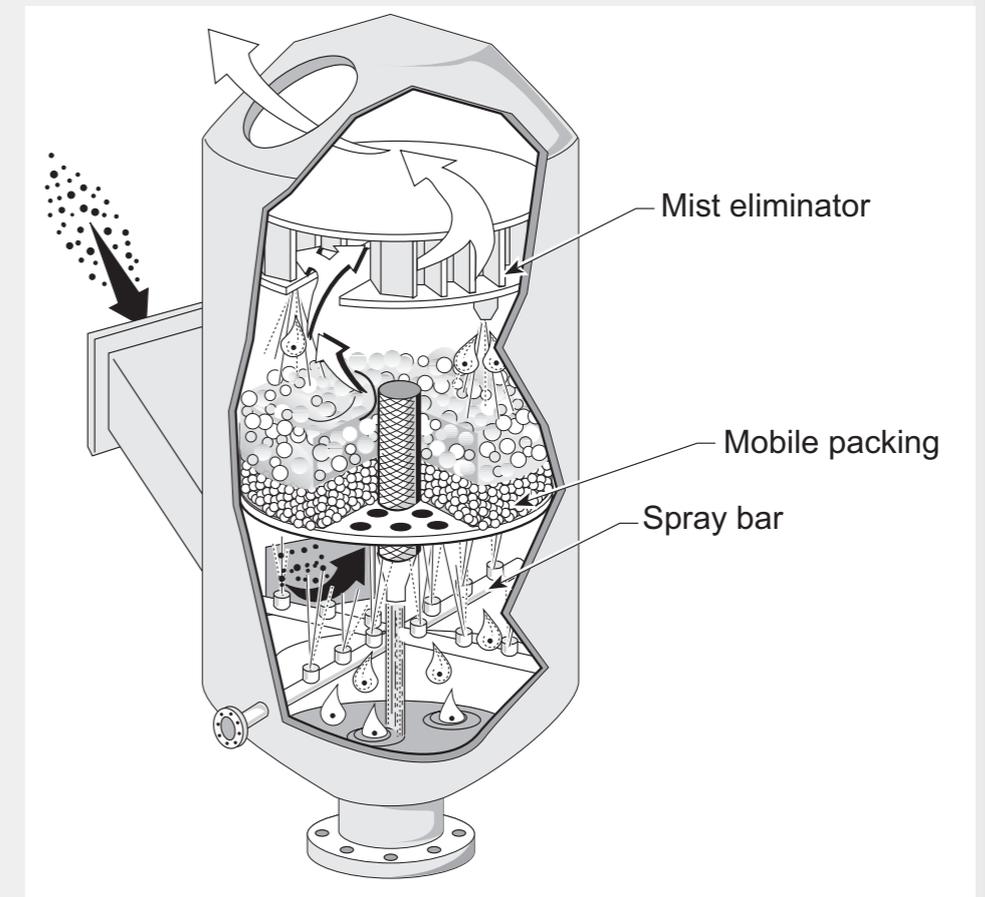
Gli scrubber a ciclone sono più efficienti delle torri a spray a causa della più alta velocità della corrente gassosa nella rimozione di particolati. Essi sono però meno efficienti dei sistemi basati su gole Venturi a causa del minore miscelamento tra le fasi.

Questi sistemi sono poco indicati per la rimozione di gas a causa del breve tempo di contatto che li caratterizza

Altri scrubber / 3

● Scrubber a letto mobile

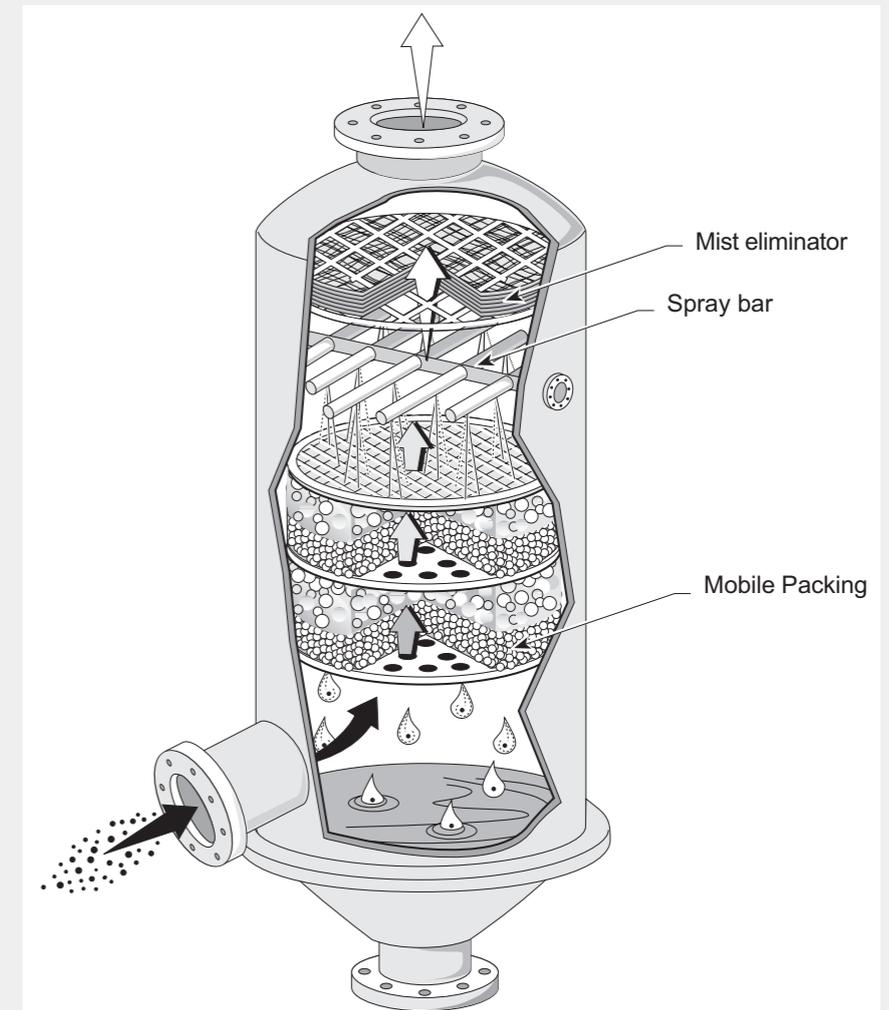
- Questi scrubber sono in linea di principio simili alle torri ad impacchettamento ma, in questo caso, il letto non è fisso bensì mobile.
- Nel caso di letti *flooded* (inondati) il letto viene smosso dalla corrente di aria che passa nel letto.
- Spray posti a monte del letto eliminano le particelle più grandi prima che entrino nel letto, mentre gli spray a valle ripuliscono il letto.
- In tal modo si prevengono i problemi di occlusione del letto che affliggono i sistemi a letto fisso.
- Nella zona appena sopra il letto si forma una nuvola molto fitta di gocce che incrementa l'efficienza del sistema nella rimozione del particolato fine.



Altri scrubber / 4

● Scrubber a letto fluido

- L'unica differenza con gli scrubber a letto mobile è che in questo caso il letto viene fluidizzato dalla corrente gassosa ed è sottoposto a moti interni molto più evidenti.
- Tali sistemi sono più indicati per la rimozione di inquinanti gassosi e. per tale motivo hanno di solito più stadi di assorbimento. Infatti, mentre per i particolati l'uso di più stadi non comporta un significativo aumento dell'efficienza, nel caso di assorbimento di gas l'aumento del numero dei piatti incrementa sempre il tempo di residenza e, di conseguenza, l'efficienza del sistema.



Gli scrubber a letto mobile sono caratterizzati da elevate velocità della corrente gassosa. Ciò li rende più compatti di altri sistemi a parità di quantità trattate. D'altra parte ciò comporta un maggiore consumo di energia per il loro esercizio. Inoltre, essi hanno anche problemi di consumo meccanico del materiale del letto a causa dei fenomeni di abrasione e degli urti cui esso è sottoposto.

Dry Scrubbers

● Generalità

- Il “Dry Scrubber”, a differenza dei wet scrubber non saturano la corrente di gas da trattare di liquido.
- In alcuni casi non viene aggiunta alcuna umidità alla corrente mentre, in altri casi, viene aggiunta la sola quantità di umido che la corrente gassosa può evaporare senza condensazione nel sistema. Per tale motivo i sistemi di dry scrubbing non necessitano di sistemi di trattamento o riciclo del liquido di scrubbing.
- Un aspetto positivo dal punto di vista dell’impatto visivo è l’assenza di pennacchi dovuti alla condensazione del liquido o a residui liquidi al camino.
- I sistemi di dry scrubbing sono primariamente usati per rimuovere gas acidi (quali SO_2 , HCl e HF) da scarichi di sistemi di combustione.

Dry Scrubbers

● Tipologia

- Molti tipi di sistemi di dry scrubbing sono usati nella pratica. Essi sono, però, tutti composti di due sezioni principali:
 - Una sezione nella quale si introduce il materiale sorbente nella corrente gassosa.
 - Una sezione nella quale il particolato formato dalla reazione del sorbente con i gas acidi, l'eccesso di materiale sorbente ed eventuali altri particolati originariamente presenti nella corrente gassosa vengono rimossi.
- I sistemi di dry scrubbing sono divisi in due grandi classi:
 - sistemi ad iniezione secca di sorbente (dry sorbent injectors o DSI)
 - assorbitori con essiccazione di spray (spray dryer absorbers - SDA) anche detti scrubber semi-dry o spray dryers.

Sistemi ad iniezione secca di sorbente

- I sistemi ad iniezione secca di sorbente utilizzano la immissione di materiali alcalini, quali idrossido di calcio o di sodio (generalmente sotto forma di polveri), nella corrente gassosa al fine di farli reagire con i gas acidi in essa contenuti.
- Il sorbente viene iniettato o direttamente nel sistema di combustione, o nel condotto di scarico dei gas (a monte del sistema di separazione del particolato) o, infine, in una apposita camera di reazione.
- In tutti i casi i gas acidi reagiscono con il sorbente alcalino formando dei sali (solidi) che vengono poi separati dal sistema di separazione del particolato.
- Tali sistemi sono molto semplici e sono caratterizzati da efficienze di rimozione alquanto basse. Le efficienze possono essere incrementate aumentando la percentuale di umidità nella corrente gassosa ad esempio raffreddandola per mezzo di getti di acqua.

Assorbitori con essiccazione di spray

- Negli assorbitori con essiccazione di spray (che sono comunemente chiamati spray dryer) i gas da ripulire sono immessi in una colonna di assorbimento dove essi vengono a contatto con una sospensione finemente atomizzata di miscele formate dai sorbenti alcalini ed acqua.
- Le reazioni chimiche che hanno luogo in questo caso sono sostanzialmente le stesse che si hanno nei sistemi a secco ed i prodotti, presenti sotto forma di sali solidi, sono rimossi per mezzo dei consueti sistemi di rimozione di particolati. Infatti, si dimensiona il sistema in modo che il calore della corrente gassosa evapori completamente la componente acquosa della sospensione acqua/sorbente.
- Le efficienze degli spray dryer sono abbastanza elevate permettendo di rimuovere più dell'80% dei gas acidi presenti negli scarichi e tali sistemi sono largamente utilizzati allo scarico di caldaie e inceneritori.

Meccanismi di rimozione dei gas acidi

- Nei sistemi di dry scrubbing i meccanismi di rimozione dei gas acidi coinvolgono sia fenomeni di **adsorbimento** dei gas sulla superficie del sorbente solido che fenomeni di **assorbimento** dei gas da parte delle goccioline della sospensione. In entrambi i casi a questa prima fase segue la reazione chimica dei gas acidi con il sorbente alcalino e la formazione del precipitato salino.

Meccanismi di rimozione dei gas acidi

- In un sistema a secco i fenomeni di adsorbimento sono prevalenti mentre in uno spray dryer hanno luogo entrambi i fenomeni.
- La scelta dei sorbenti è fatta in ragione della loro capacità di reagire con l'acido da neutralizzare e della area superficiale di contatto che li caratterizza. Infatti, essendo entrambi i fenomeni coinvolti legati alla diffusione di gas in una matrice liquida o solida, l'efficienza della rimozione aumenta se si incrementa l'area superficiale disponibile (sia migliorando l'atomizzazione ed il miscelamento dello spray che scegliendo materiali con porosità superficiale maggiore). Per lo stesso motivo anche il tempo a disposizione per la diffusione dei reagenti ed il progresso delle reazioni di neutralizzazione influenza l'efficienza del sistema.
- Un altro fattore importante è la temperatura alla quale il processo ha luogo. A minori temperature l'efficienza del processo è maggiore e, per tale motivo, si utilizzano spesso tecniche di raffreddamento della corrente gassosa prima dell'iniezione del sorbente.

confronto tra dry scrubbers

- Nel caso di iniezione a secco il sorbente viene disperso, sotto forma di una polvere, generalmente per mezzo di un sistema venturi nella corrente gas da trattare.
- Negli spray dryer, il sorbente, sospeso in acqua, è distribuito in un recipiente di reazione (dryer) sotto forma di una dispersione molto fine di goccioline.
- Gli spray dryer presentano il vantaggio di:
 1. Generare molta più superficie di contatto tra gas acidi e sorbente;
 2. Miscelare il sorbente nella corrente gassosa in modo più efficiente.

A fronte di questi vantaggi essi necessitano di sistemi di iniezione più complessi e onerosi.

Criteri di dimensionamento

- Uno dei parametri da definire nel dimensionamento di un sistema di dry scrubbing è la quantità di materiale alcalino da iniettare. I criteri da seguire nel definire tale quantità devono tenere in conto:
 - del tipo di sorbente usato (scelto in relazione agli inquinanti da eliminare) e della stechiometria della reazione di neutralizzazione
 - delle quantità di gas acido presenti nella corrente di ingresso e i valori massimi consentiti nella corrente in uscita
 - dell'efficienza del sistema di dry scrubbing utilizzato

Sorbenti a base di calcio

- Il tipo più usato di sorbenti utilizza idrossido di calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$.
- In tal caso la reazione di neutralizzazione può essere scritta (in maniera semplificata) come:



si può osservare come, nel primo caso, una mole di idrossido di calcio neutralizzi una mole di biossido di zolfo mentre, nel secondo caso, una mole di idrossido neutralizzi due moli di acido cloridrico.

- Nella pratica non si utilizzano quantità stechiometriche di sorbente ma, a causa di inevitabili inefficienze dovute all'imperfetto miscelamento ed al limitato tempo a disposizione ed altre reazioni concorrenti, si lavora con eccessi di sorbente variabili da 1,5 a 4 volte le quantità stechiometriche in funzione dell'efficienza di ripulitura desiderata ed al sistema di scrubbing usato.

Sorbenti a base di sodio

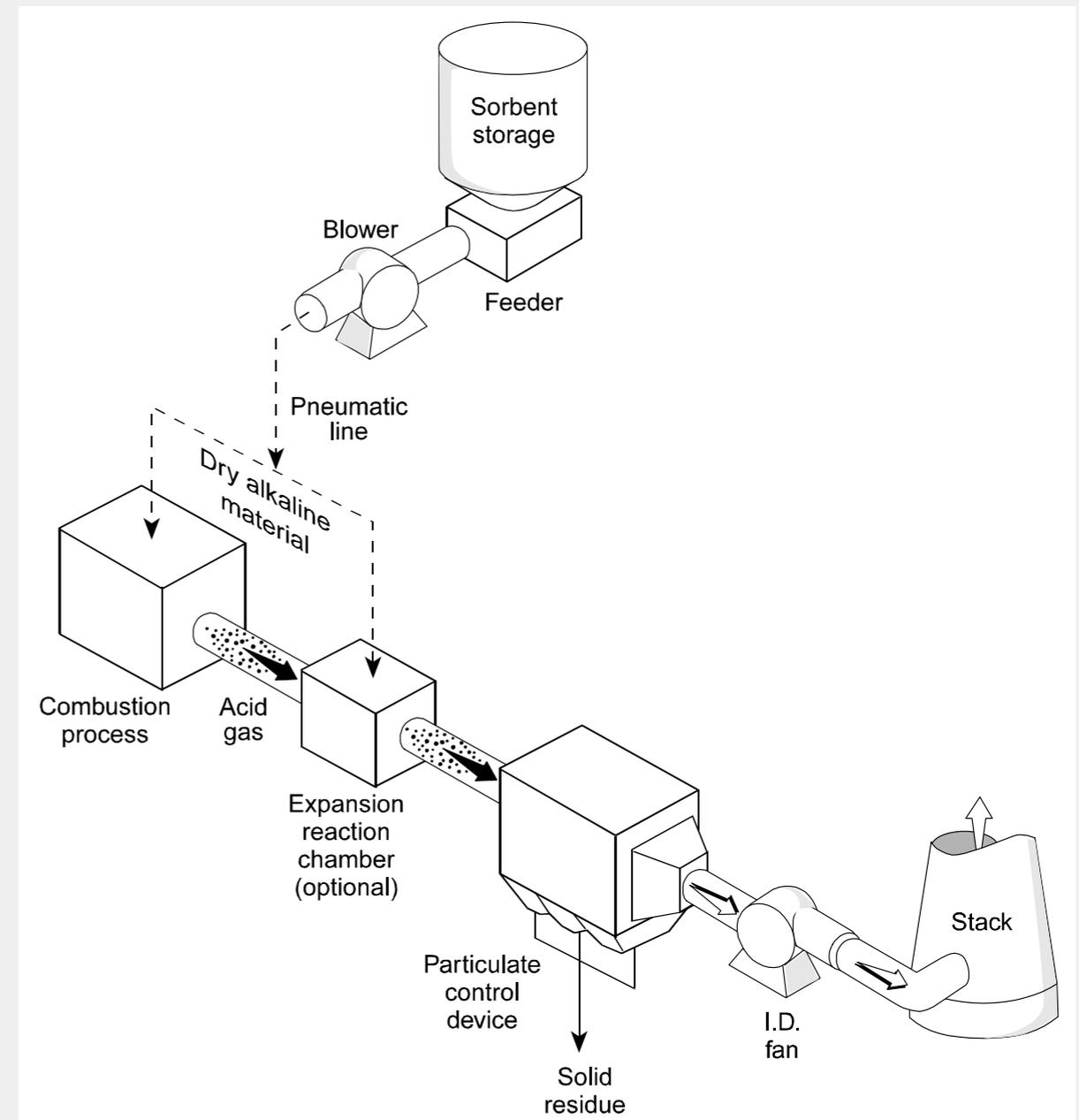
- Le reazioni che hanno luogo quando si usa come sorbente l'idrossido di sodio (NaOH) sono simili. In forma semplificata si può scrivere ad esempio:



- Nella definizione delle quantità di sorbente da immettere è anche necessario tenere conto delle differenti affinità dei sorbenti con i diversi acidi da rimuovere. Ad esempio, in generale l'acido cloridrico è più reattivo dell'anidride solforosa e viene eliminato preferenzialmente quando entrambi i composti sono presenti nella corrente da depurare.

Sistemi ad iniezione secca di sorbente / 1

- I sistemi ad iniezione secca sono alquanto semplici.
- Il sorbente viene immesso in un sistema di alimentazione che provvede a dosarlo e poi trasportato per mezzo di una linea pneumatica, ad un sistema di iniezione basato su un tubo venturi.
- L'iniezione nella corrente da trattare viene effettuata di solito in controcorrente per massimizzare il miscelamento.
- Una camera di espansione viene utilizzata per accrescere i tempi di permanenza del sistema ed incrementare i rendimenti.

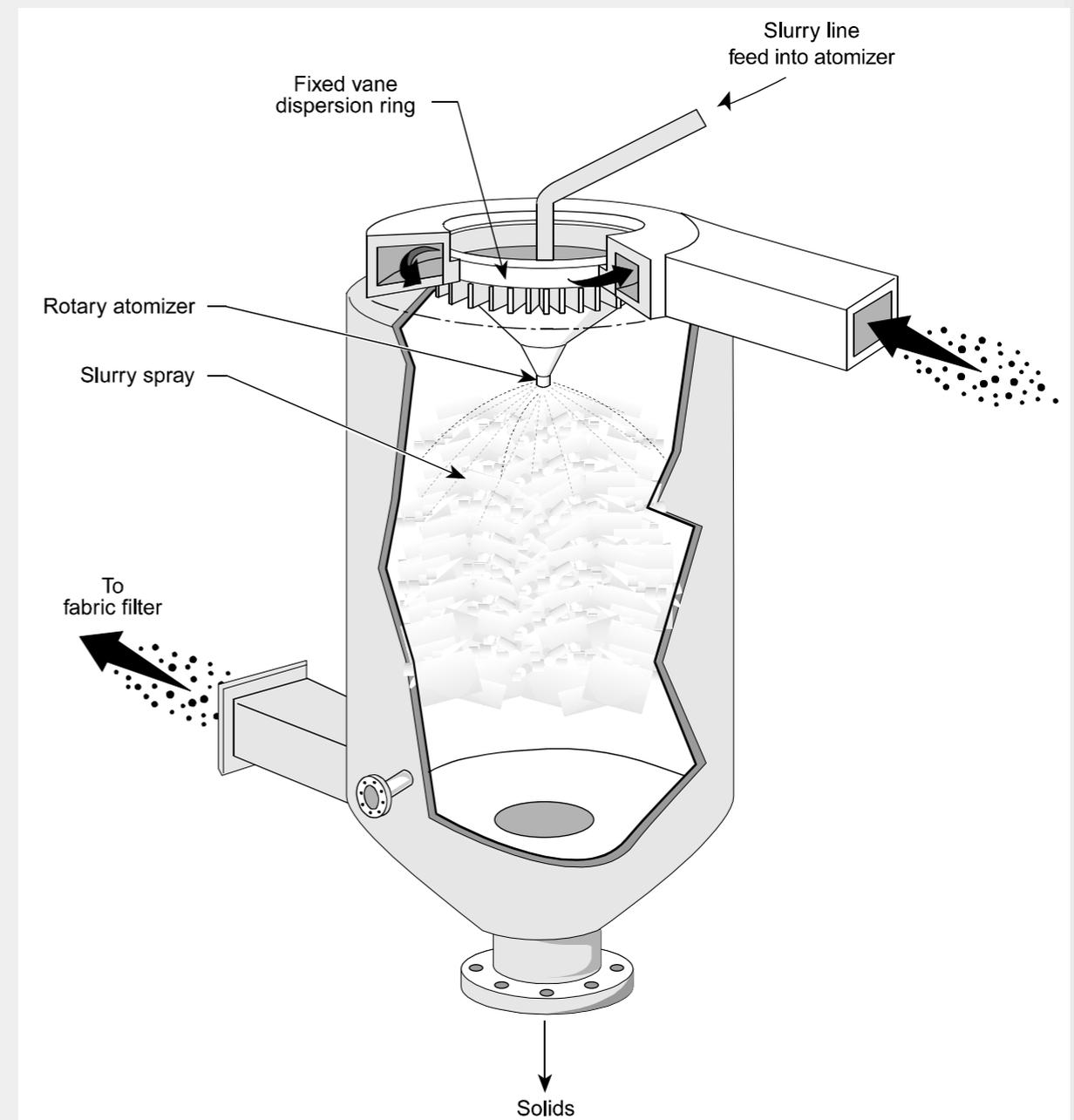


Sistemi ad iniezione secca di sorbente / 2

- I rendimenti dei sistemi ad iniezione secca son alquanto limitati. I tipici rendimenti ottenibili sono nell'ordine del 50% per l'anidride solforosa e del 90% per l'acido cloridrico.
- Tali rendimenti possono essere incrementati se si raffredda od umidifica la corrente gassosa prima dell'iniezione di sorbente in quanto a temperature più basse le reazioni di neutralizzazione sono favorite. Il raffreddamento può essere realizzato per mezzo di scambiatori o attraverso l'iniezione di acqua. In ogni caso la temperatura va, però, tenuta abbastanza alta da consentire la vaporizzazione dell'acqua (sia quella eventualmente utilizzata per il raffreddamento della corrente che quella formata dalla reazione di neutralizzazione).
- A causa dell'eccesso di sorbente immesso nella corrente nel deposito secco raccolto nella sezione di separazione a valle dello scrubber sono presenti notevoli quantità di sorbente che non ha reagito. In taluni casi tali depositi sono riciclati e re-immessi nella corrente al fine di incrementare il rendimento del sistema rispetto alle quantità di sorbente utilizzato.
- I sorbenti a base di calcio sono più economici ma per ottenere soddisfacenti rendimenti di ripulitura è necessario operare il sistema con consistenti eccessi di sorbente. Per tale motivo i sistemi ad iniezione secca trovano applicazione in scarichi di impianti di taglia limitata.

Spray Dryer

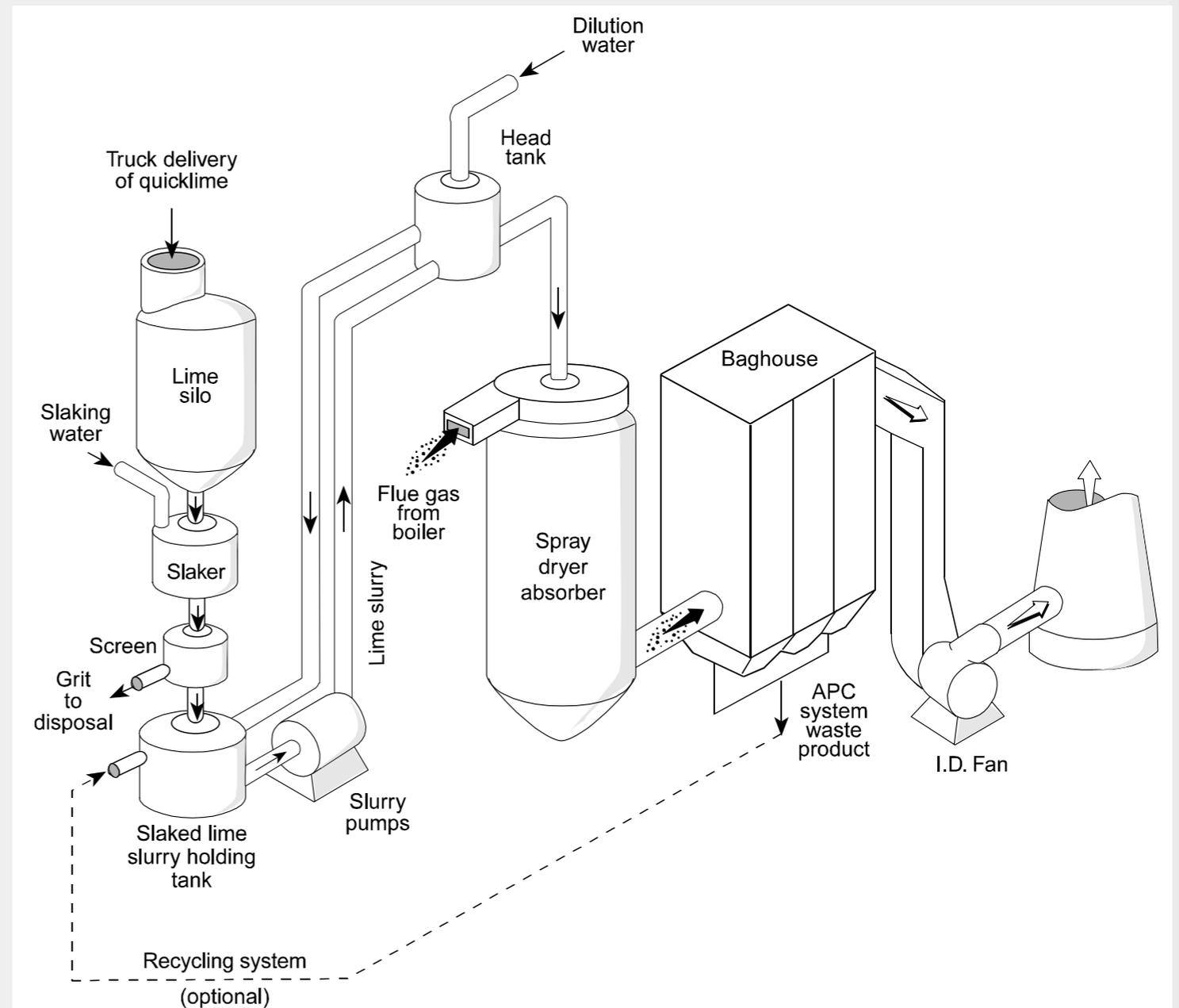
- Negli spray dryer il sorbente, sotto forma di sospensione acquosa, viene atomizzato direttamente nella camera di essiccazione. La sospensione viene in contatto con i gas caldi e l'acqua contenuta in essa evapora raffreddando la corrente gassosa.
- L'acido disciolto nell'acqua o adsorbito sul residuo secco reagisce formando un precipitato costituito da sali di calcio o sodio.
- L'essiccatore deve essere dimensionato in modo da garantire un tempo di reazione sufficiente.
- A valle dell'essiccatore un separatore (un filtro od un precipitatore elettrostatico) provvede ad eliminare dalla corrente i sali formati, eventuali ceneri contenute nella corrente gassosa inizialmente ed il sorbente che non ha reagito.



schema generale di uno spray dryer

● I principali elementi di un sistema spray dryer sono:

- sistema di immagazzinamento e macinatura
- miscelatore e pompa
- atomizzatore (rotativo o a pressione)
- camera di essiccazione (spray dryer)
- sistema di rimozione dai particolati
- eventuale sistema di riciclaggio del sorbente

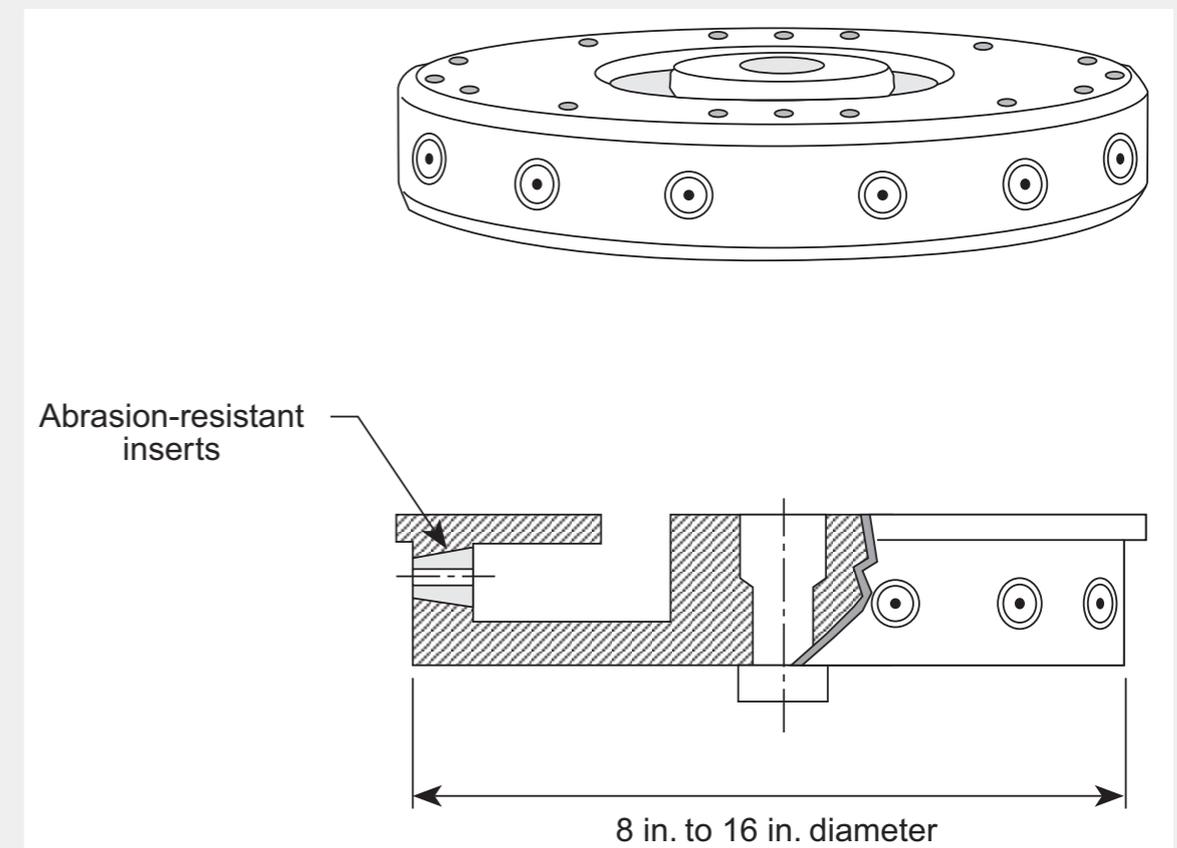


Sistemi di iniezione

- Nella pratica si utilizzano due tipi di atomizzatori per la dispersione della soluzione acquosa di sorbente nello spray dryer:
 - atomizzatori meccanici a dischi rotanti
 - ugelli assistiti ad aria
- La valutazione della efficacia dei due sistemi va misurata nella loro capacità di disperdere finemente il sorbente nella camera di essiccazione in maniera da realizzare il più elevato grado di miscelamento con i gas da rimuovere.

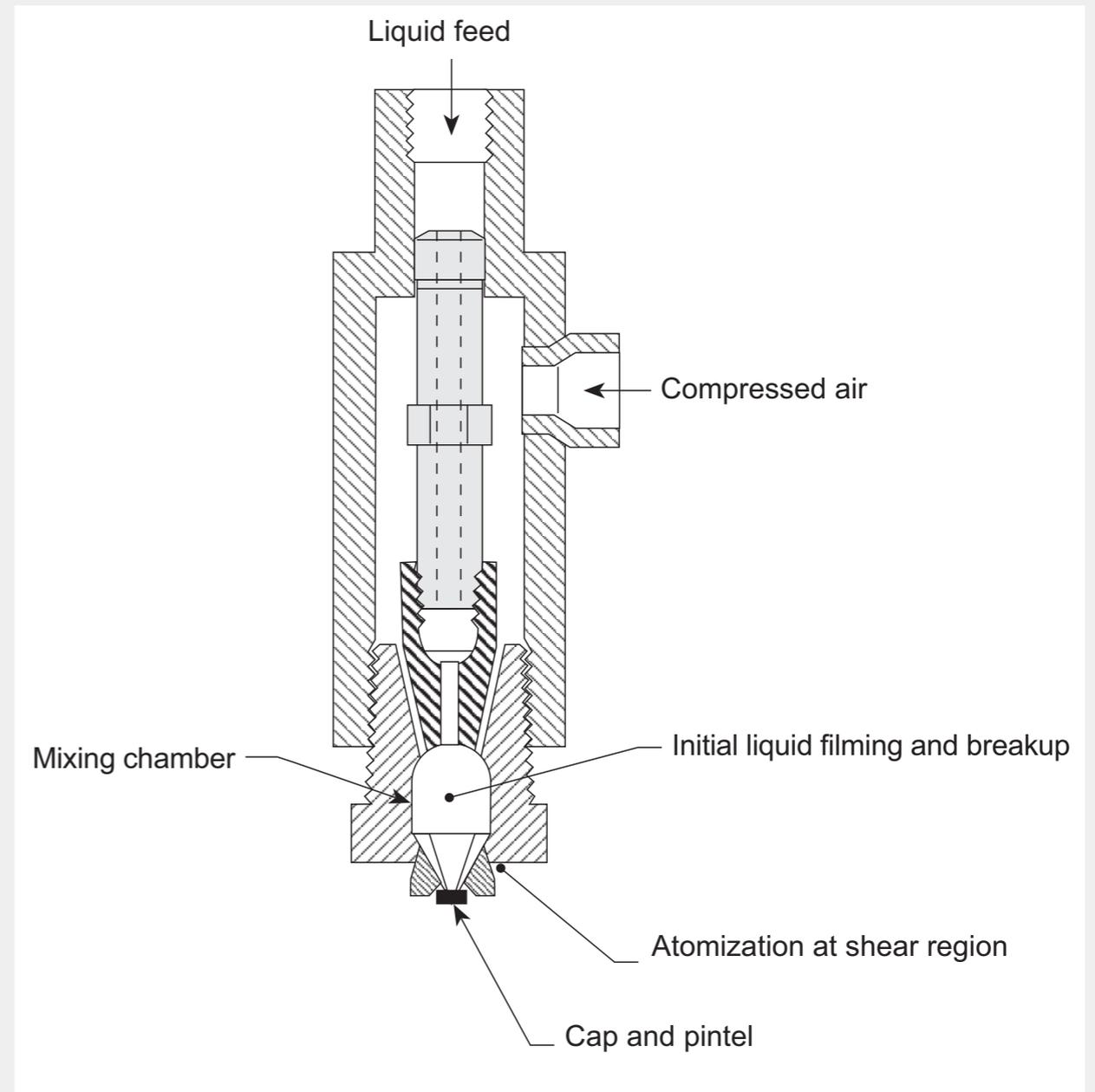
Sistemi di iniezione

- Negli atomizzatori a disco rotante la sospensione è immessa dall'alto nel sistema e fuoriesce dagli ugelli presenti nelle pareti laterali a causa della forza centrifuga indotta dalla rotazione del disco.
- Le velocità di rotazione del disco sono elevate (tra 7000 e 20000 rpm) e le dimensioni tipiche delle gocce formate sono comprese tra 25 e 150 μm .
- A causa del forte potere abrasivo delle sospensioni utilizzate i fori di uscita sono generalmente trattati in modo da ridurre i fenomeni di abrasione. Tipicamente si utilizzano inserti ceramici per ridurre tali problemi.



Sistemi di iniezione

- In alternativa ai sistemi rotanti si utilizzano ugelli assistiti ad aria.
- In tali sistemi le dimensioni delle gocce e la loro dispersione nell'ambiente possono essere ridotte incrementando la pressione, e dunque la velocità, della corrente di aria.

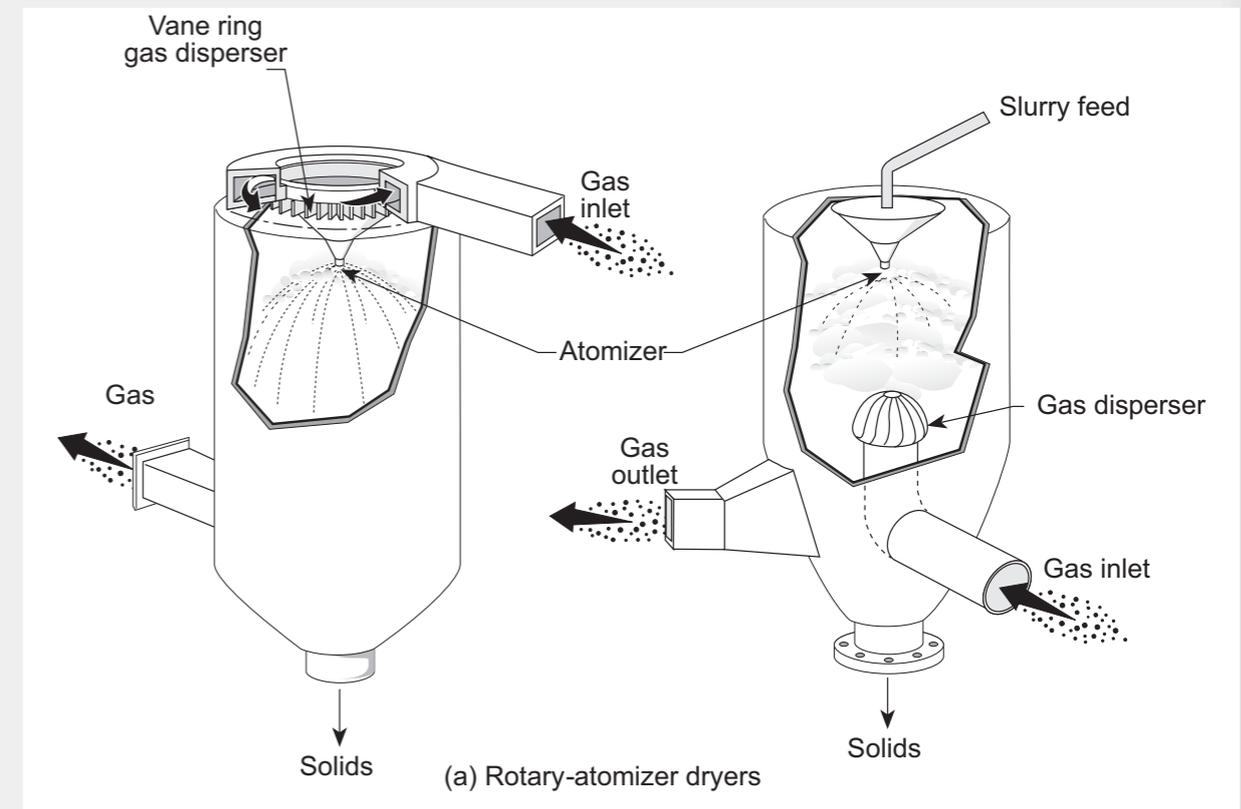


Sistemi di iniezione

- Le dimensioni finali delle gocce prodotte con i due sistemi di atomizzazione sono pressoché uguali e, dunque, essi presentano prestazioni simili. Vi sono però alcune caratteristiche peculiari dei due sistemi che vanno tenute in conto nella scelta dell'uno o dell'altro:
 1. I sistemi basati su atomizzatori rotanti sono più semplici e richiedono una linea di alimentazione più semplice. Tale linea, inoltre, alimenta tutti gli ugelli presenti sul disco rotante. Per gli ugelli assistiti ad aria la linea di alimentazione è più complessa (dovendo prevedere linee separate per liquido ed aria) ed è necessaria una linea separata per ogni ugello. Ciò comporta, specialmente nel caso di impianti di grandi dimensioni, un costo ed una complessità elevate.
 2. La manutenzione degli impianti che impiegano ugelli assistiti ad aria è semplificata dal fatto che è sufficiente rimuovere e sostituire il solo ugello eventualmente malfunzionante senza fermare l'impianto.
 3. Il consumo di energia per i due ugelli è sostanzialmente lo stesso ma, nel caso di ugelli assistiti ad aria, è necessario prevedere un compressore che fornisca l'aria compressa di atomizzazione mentre nel caso dei sistemi a disco rotante è sufficiente un semplice motore.
 4. Le spese di manutenzione dei sistemi a dischi rotanti sono sensibilmente più elevate. infatti, nel caso di malfunzionamenti è necessario sostituire l'intero disco che è molto più costoso di un ugello singolo.

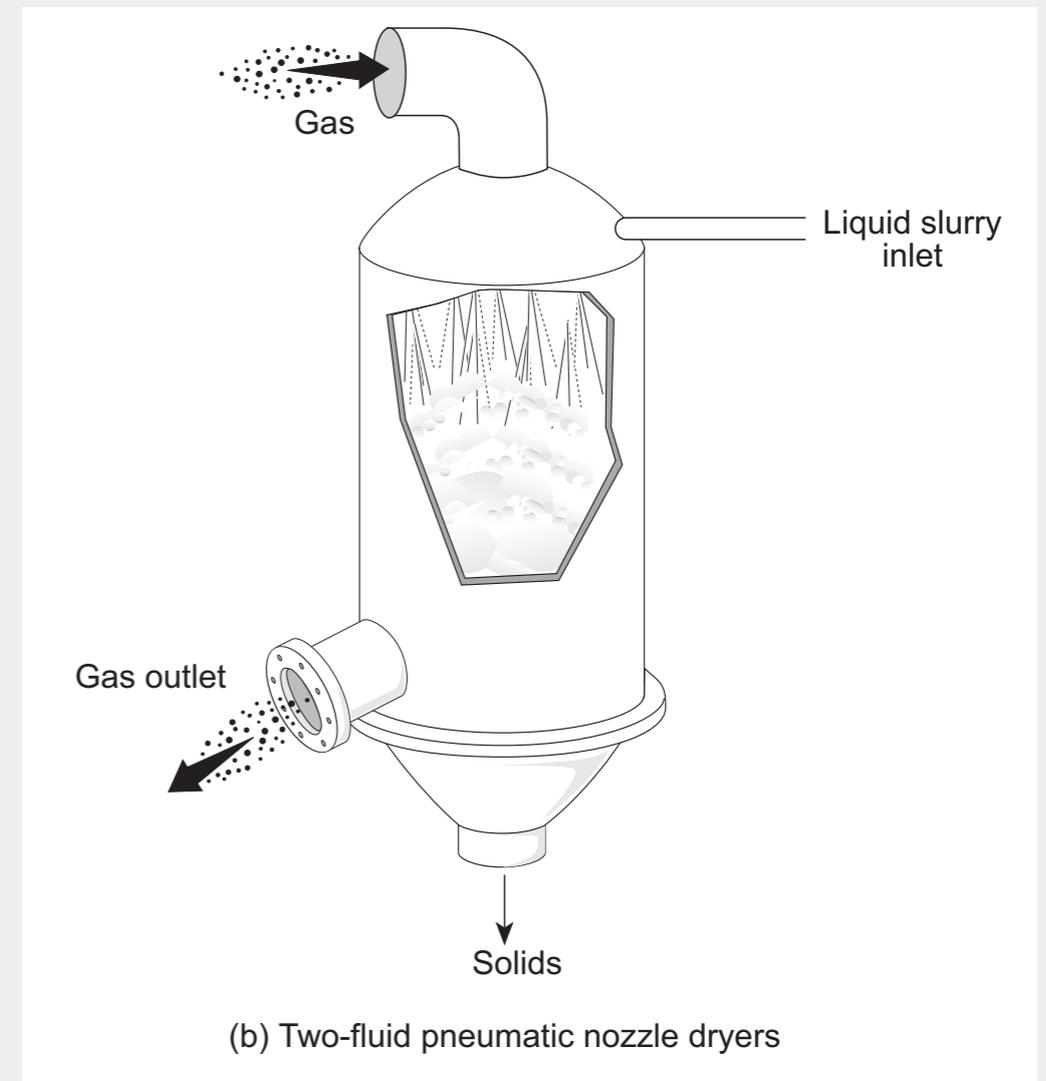
Configurazioni della camera di reazione/1

- Il disegno della camera di reazione dello spray dryer è strettamente legato al tipo di atomizzatore usato.
- Nel caso in cui si usi un atomizzatore rotante i getti di sospensione entrano nella camera in direzione orizzontale e trasversale al flusso. Essi sono piegati dalla gravità e/o dal flusso gassoso e le gocce formate seguono il flusso.
- In tali sistemi il diametro D della camera è paragonabile alla sua lunghezza L (tipicamente $L/D \approx 0.8/1$)
- In tali sistemi è necessario dimensionare sufficientemente il diametro della camera (in funzione delle velocità di transito e delle dimensioni delle gocce) in modo da evitare una eccessiva deposizione del materiale sulle pareti della camera.



Configurazioni della camera di reazione/2

- Se si utilizzano atomizzatori assistiti ad aria la miscela viene iniettata in direzione parallela alla corrente gassosa.
- In tal caso i problemi di deposito sulle pareti sono molto meno sentiti.
- Pertanto i rapporti L/D usati sono molto più grandi (nell'ordine di 2:1) e si privilegia il tempo di contatto rispetto alla forte interazione ottenibile con l'iniezione trasversale.



Dimensioni tipiche degli spray dryer

- Le dimensioni massime degli spray dryer sono limitate:
 - Uno spray dryer utilizzato per il trattamento di scarichi da fornaci ha un diametro compreso tra 8 e 10 metri.
 - I diametri tipici di spray dryer utilizzati per il trattamento di scarichi da impianti industriali arrivano fino a 13-16 metri.
- Nel caso in cui le portate di gas da trattare richiedano diametri maggiori si preferisce utilizzare due o più spray dryer in parallelo. Tali configurazioni presentano il vantaggio di rendimenti maggiori di sistemi più grandi, una maggiore affidabilità e di una struttura modulare per la quale le operazioni di manutenzione sono facilitate.

Geometrie di immissione del gas

- La corrente gassosa da trattare può essere immessa nella camera di reazione di uno spray dryer sia in direzione concorrente a quella della sospensione di sorbente che in controcorrente.
- Nel caso di iniezione concorrente il gas entra dall'alto attraverso un condotto palettato in modo da imprimere alla corrente gassosa una componente di moto tangenziale al fine di accrescere la miscelazione con i getti di sospensione liquida.
 - Questa configurazione è quella comunemente usata nei sistemi di abbattimento di acidi e permette un controllo accurato della temperatura all'uscita dello spray dryer.
- Nel caso di iniezione controcorrente la corrente da trattare entra dal basso e la sospensione è spruzzata dall'alto. Questa configurazione è meno comune ma ha una più alta capacità di essiccazione.
- Vi sono alcune configurazioni, non molto comuni, nelle quali la dispersione della sospensione viene realizzata utilizzando la stessa corrente gassosa. Tali sistemi possono essere utili se si vuole massimizzare il contatto tra i reagenti

Sistemi di rimozione dei particolati

- Una delle componenti cruciali per il buon funzionamento di uno spray dryer è il sistema di rimozione del particolato posto a valle della camera di reazione.
- Tale sistema svolge non solo la funzione di ridurre la percentuale di polveri allo scarico del sistema nei limiti di legge ma anche di contribuire alla rimozione di acidi dalla corrente gassosa. Infatti il sorbente depositato sui filtri ha un ruolo non trascurabile nel processo di reazione degli acidi e nella loro rimozione.
- Per tale motivo si preferisce usare sistemi di filtratura piuttosto che di rimozione elettrostatica delle polveri.
- Nei sistemi di filtratura è importante evitare la formazione di condense che potrebbero indurre fenomeni di corrosione. Per tale motivo è importante prevedere un sistema di controllo della temperatura dei fumi nella sezione di separazione, ricorrendo anche a sistemi di riscaldamento del gas.

Manutenzione di sistemi spray dryer

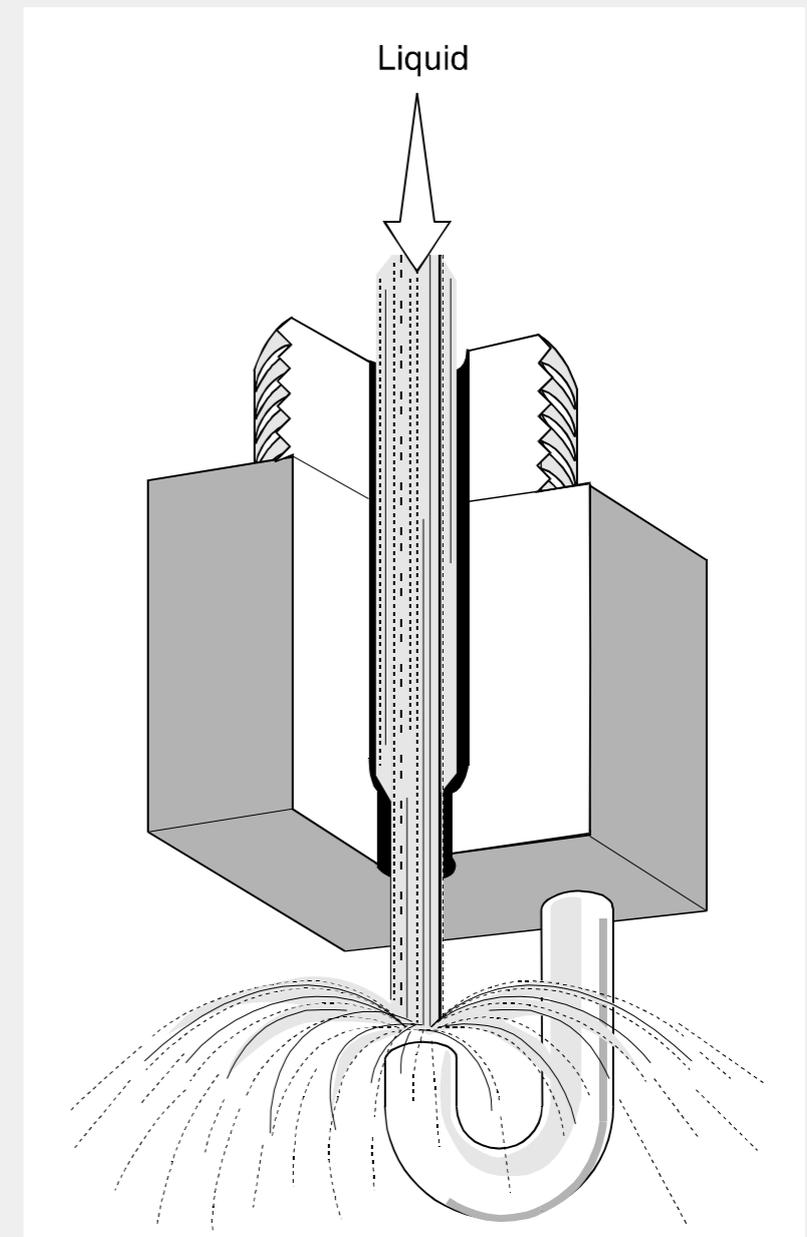
- Gli spray dryer sono sistemi complessivamente semplici che non richiedono eccessiva manutenzione. I tipici problemi che si possono presentare nel loro esercizio sono:
 1. Occlusione delle condotte di trasporto del sorbente solido o della sospensione.
 - Per ridurre tali problemi si usano sistemi di filtraggio e sistemi di condotte flessibili e facilmente ispezionabili. E' necessario in ogni caso un costante controllo dello stato di pulizia dei condotti.
 2. Occlusione dei sistemi di atomizzazione.
 - Per evitare questi problemi si prevede di solito un sistema di flussaggio con acqua del sistema ad intervalli regolari (anche se ciò comporta un temporanea riduzione dell'efficienza del sistema) e si usano sistemi di atomizzazione ad innesto rapido.
 3. Malfunzionamenti del sistema di miscelazione del sorbente con l'acqua.
 - E' necessario prevenire la separazione delle due fasi (sorbente ed acqua) dopo la loro miscelazione. per tale motivo si usano contenitori con sistemi di rimescolamento della sospensione al fine di mantenere quanto più possibile omogenea la sospensione. A questo riguardo anche la qualità della macinazione dei sorbenti è importante.
 4. Occlusione delle condotte in occasione di fermi del sistema.
 - Nel caso di fermi prolungati dell'impianto è necessario flussare tutta la linea al fine di evitare depositi (soprattutto di calcio).

ALTRE COMPONENTI DEI SISTEMI DI SCRUBBING

Iniettori usati negli scrubber / 1

● Ugelli ad impatto

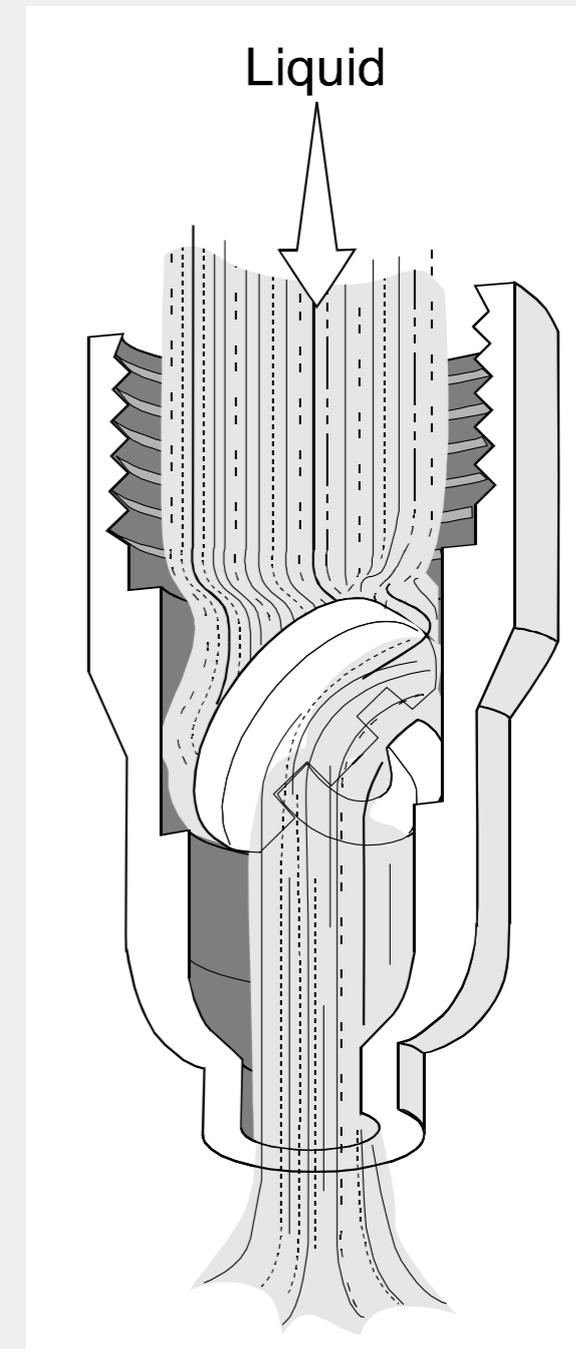
- In tali ugelli un flusso di liquido ad alta pressione viene fatto impattare su un ostacolo (una punta od un piattello) dando luogo alla rottura del getto liquido con la formazione di gocce con dimensioni comprese tra 25 e 400 μm .
- Il vantaggio di tale sistema è l'assenza di passaggi ristretti con conseguente ridotta possibilità di occlusione.
- Al fine di prevenire fenomeni di abrasione e/o corrosione è necessario utilizzare materiali opportuni quali ottone o acciaio inox.



Iniettori usati negli scrubber / 2

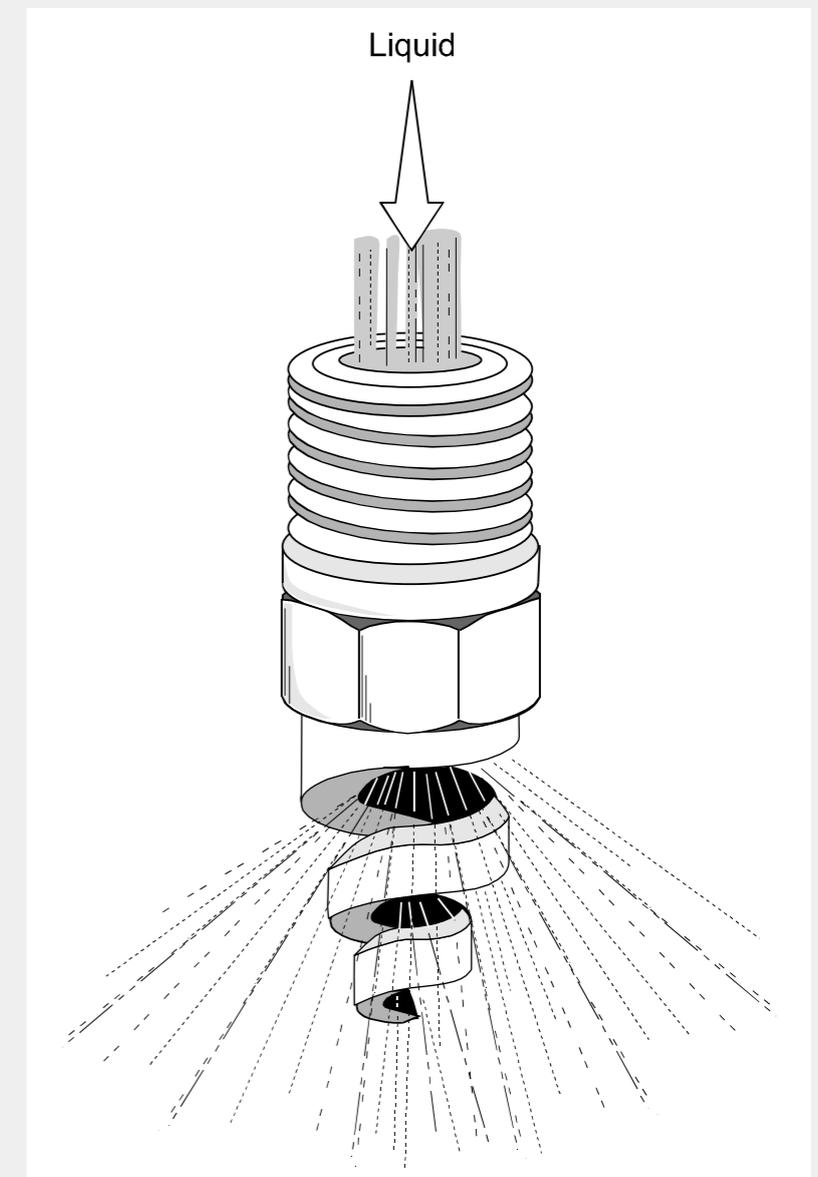
● ugelli simplex

- nei casi in cui i problemi di occlusione siano meno importanti si usano sistemi di ugelli a pressione sia del tipo “solid cone” che “hollow cone” con angoli di apertura dello spray opportunamente scelti per massimizzare il miscelamento con la corrente gassosa.
- Si usano, talvolta anche ugelli che producono impronte non circolari per adattarsi a particolari geometrie del sistema.
- In dipendenza dalle condizioni di esercizio di possono usare ugelli in acciaio, ottone, leghe metalliche, teflon o plastica.



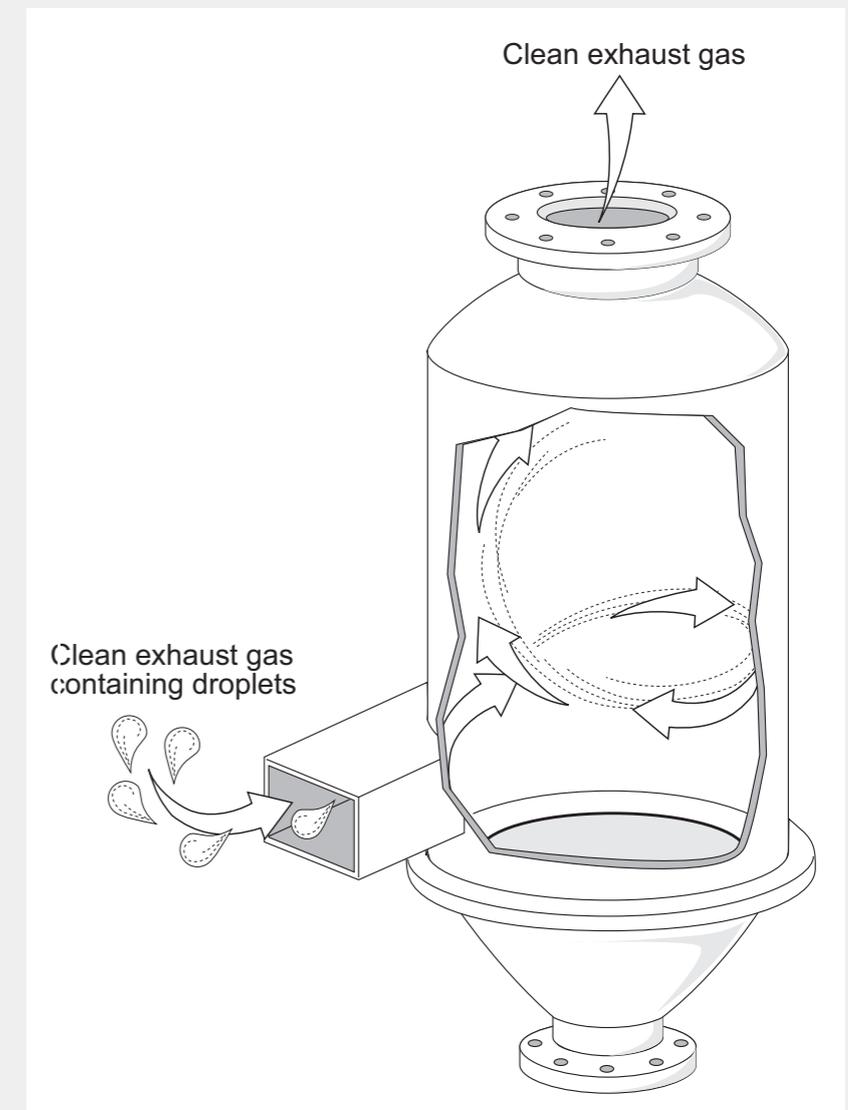
Iniettori usati negli scrubber / 3

- Un altro sistema utilizzato negli scrubber utilizza una superficie a spirale su cui impatta uno spray generato con un ugello a pressione del tipo semplice (*plain nozzle*).
- Con questi sistemi è possibile ottenere dispersioni molto fini di gocce caratterizzate da ampi angoli di apertura con sistemi estremamente semplici e poco soggetti ad occlusioni.
- Anche in questo caso in dipendenza dalle condizioni di esercizio di possono usare ugelli in acciaio, ottone, leghe metalliche, teflon o plastica.



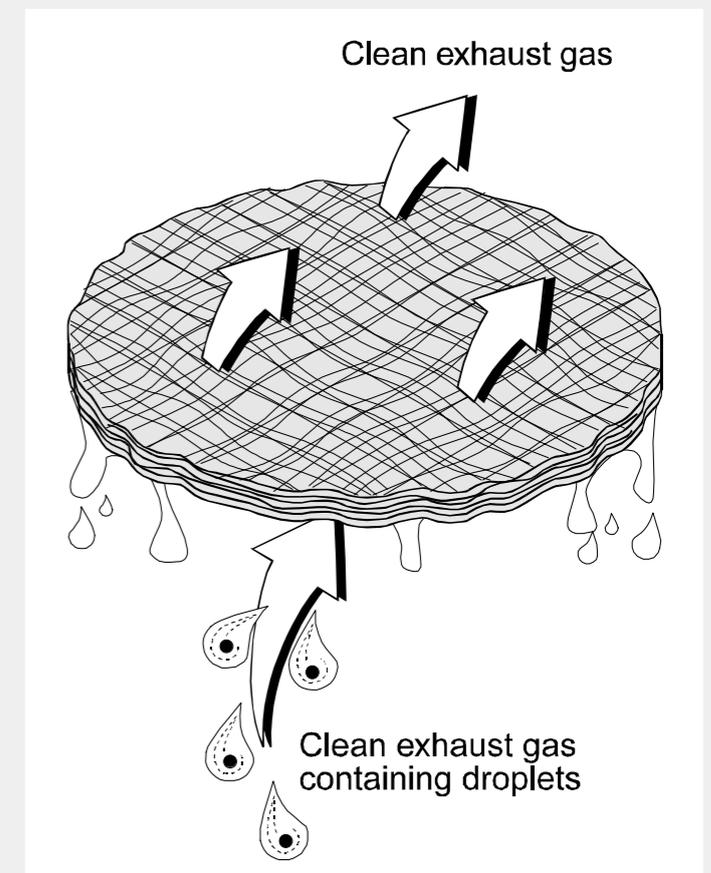
Separatori di nebbie / 1

- A valle dei sistemi di scrubbing si utilizzano dei separatori della residua parte di gocce che viene trascinata dalla corrente gassosa.
- Uno dei sistemi più utilizzati a tale scopo utilizza la forza centrifuga indotta introducendo la corrente gassosa tangenzialmente ad un recipiente. Le gocce di acqua presenti nella corrente vengono trascinate verso le pareti del recipiente dopo si depositano per poi ricadere, per effetto della gravità, in un collettore posto alla base del recipiente.
- Questi sistemi sono estremamente semplici e presentano pochi problemi di occlusione ed una scarsa caduta di pressione.
- Questi sistemi sono efficienti per la rimozione di gocce nel campo tra 10 e 25 μm e possono raggiungere, per gocce di diametro maggiore di 20 μm , efficienza fino al 98%. Essi sono però poco efficaci per la rimozione di aerosol molto fini eventualmente presenti nella corrente gassosa.



Separatori di nebbie / 2

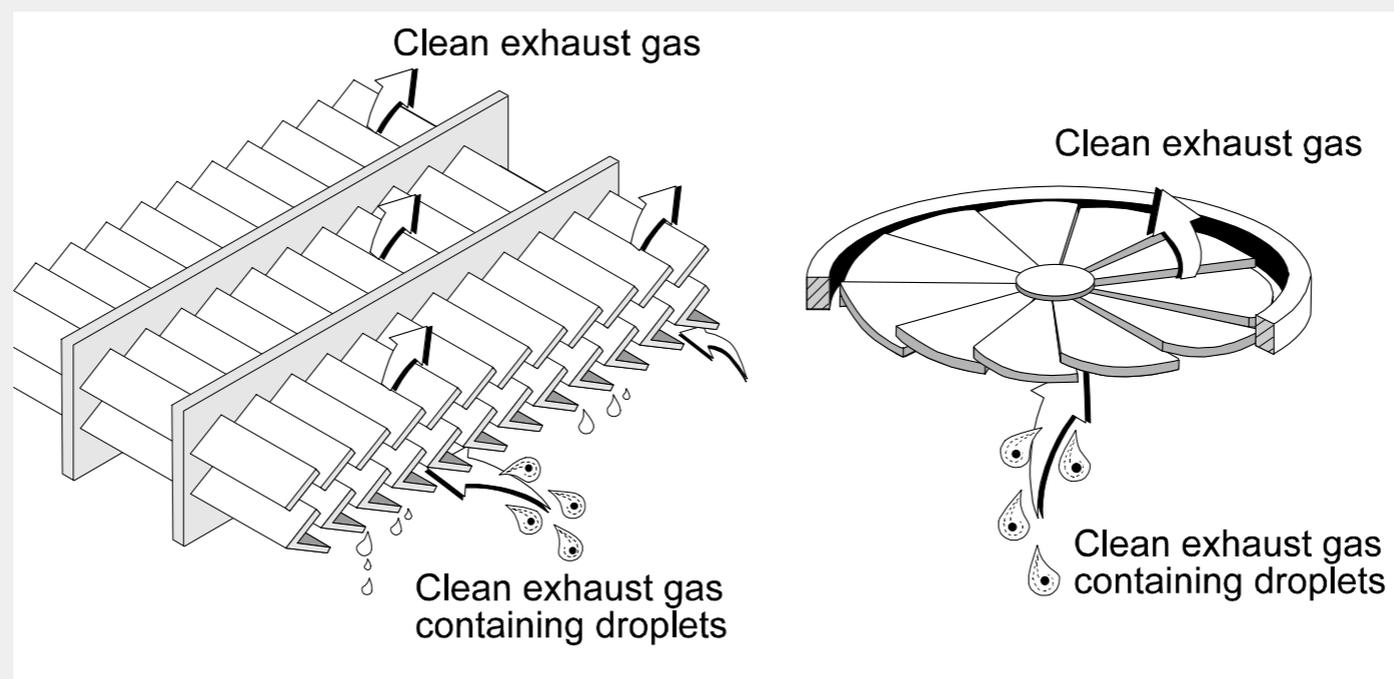
- Per la rimozione di gocce di dimensioni più piccole si utilizzano griglie di fili metallici o plastica. Di solito tali griglie vengono montate in più strati sovrapposti fino a raggiungere altezze comprese tra 10 e 15 cm.
- Le gocce impattano sulle griglie e si depositano agglomerandosi con altre gocce per poi precipitare per gravità verso il fondo del recipiente.
- Questi sistemi permettono di rimuovere più del 95% delle gocce con diametro maggiore di $3\ \mu\text{m}$ dalla corrente gassosa.
- Questi sistemi presentano delle perdite di carico leggermente superiori ai sistemi a ciclone e sono più soggetti ad occlusioni. Al fine ridurre tali problemi si usano sistemi di pulizia che spruzzano periodicamente acqua sulle griglie per rimuovere eventuali materiali depositati.



Separatori di nebbie / 3

- Un altro tipo di separatori largamente usato utilizza sistemi di palette opportunamente orientate attraverso cui è fatta passare la corrente gassosa.
- Si utilizzano sia sistemi nei quali le palette costringono il gas a percorrere un percorso a zig-zag che facilita la deposizione delle gocce sulle palette (chevron grids) sia sistemi del tipo di quelli usati per la creazione di flussi swirlati che convogliano le gocce sulle pareti del condotto facilitandone l'eliminazione.
- Le chevron grids possono essere montate in gruppi sovrapposti al fine di accrescere la loro efficienza.
- Questi sistemi sono abbastanza efficaci per gocce di diametro maggiore di $5\ \mu\text{m}$ e presentano una bassa perdita di carico.

Chevron grids



Impingement separators

Contact Power Theory

- Una teoria generale per stimare la efficienza di rimozione di particolato di un wet scrubber è la cosiddetta "contact power theory". Questa teoria è basata su una serie di osservazioni sperimentali fatte da Lapple and Kamack. L'assunzione fondamentale di tale teoria è la seguente:

"Se si paragonano i sistemi scrubbing a parità di energia consumata essi hanno la stessa efficienza di rimozione di particolato indipendentemente dal meccanismo di rimozione coinvolto e indipendentemente dal fatto che la caduta di pressione sia ottenuta per mezzo della alta portata del gas o del liquido." (Lapple and Kamack 1955)

- In altre parole l'efficienza è determinata solo dalla potenza usata e non dal disegno dello scrubber. Ciò ha molte implicazioni nel disegno di un sistema di scrubbing. Essenzialmente una volta nota la quantità di energia necessaria per ottenere la desiderata efficienza di rimozione il disegno del sistema può essere condotto ai soli fini della ottimizzazione delle condizioni di esercizio dello stesso (in termini di affidabilità, economicità semplicità di esercizio e manutenzione)

Contact Power Theory

- Semrau (1959 and 1963) ha sviluppato la “contact power theory” a partire dal lavoro di Lapple and Kamack. La teoria, nella formulazione di Semrau, definisce, su base empirica, una relazione tra la perdita di pressione totale (P_T) del sistema e la efficienza di rimozione. La perdita di pressione totale è data dalla somma delle perdite di pressione dovute alla fase gas (energia spesa per il trascinamento della corrente gassosa nel sistema) ed alla fase liquida (energia spesa per atomizzare il liquido espressa in termini di salto di pressione all'iniettore):

$$P_T = P_G + P_L$$

dove :

P_T è la potenza totale di contatto espressa in $\text{kWh}/10^3 \text{ m}^3$

P_G è la potenza apportata dalla fase gas espressa in $\text{kWh}/10^3 \text{ m}^3$

P_L è la potenza apportata dalla fase liquida espressa in $\text{kWh}/10^3 \text{ m}^3$

Contact Power Theory

- L'energia necessaria per il trasporto della corrente gassosa può essere espressa come:

$$P_G = 2.724 \cdot 10^{-4} \Delta p, \text{ kWh}/10^3 m^3$$

dove Δp è la caduta di pressione espressa in kPa

- L'energia spesa per atomizzare il liquido può essere espressa come:

$$P_L = 0.28 p_L \frac{Q_L}{Q_G}, \text{ kWh}/10^3 m^3$$

dove :

p_L è la caduta di pressione del liquido espressa in $\text{kPa} \cdot 10^2$

Q_L è la portata di liquido espressa in m^3 / h

Q_G è la portata di gas espressa in m^3 / h

- La potenza totale può, quindi, essere espressa come:

$$P_T = 2.724 \cdot 10^{-4} \Delta p + 0.28 p_L \frac{Q_L}{Q_G}, \text{ kWh}/10^3 m^3$$

Contact Power Theory

- La perdita di pressione totale è correlata, nella teoria di Semrau, con una relazione di tipo esponenziale alla efficienza di pulitura del sistema:

$$\eta = 1 - e^{-\alpha P_T^\beta}$$

- La “contact power theory” non permette di predire l’efficienza in funzione delle dimensioni delle particelle da rimuovere ma fornisce una relazione che è indipendente dalla dimensione dello scrubber. Ciò consente di utilizzare una piccola unità di scrubbing per determinare la perdita di pressione necessaria per ottenere la desiderata efficienza di pulitura e poi realizzare sulla base di tale informazione il sistema nella scala finale.

Table 7.4
Values of α and β for Different Industries

Aerosol	Scrubber type	α	β
Raw gas (lime dust and soda fume)	Venturi and cyclonic spray	1.47	1.05
Prewashed gas (soda fume)	Venturi, pipeline, and cyclonic spray	0.915	1.05
Talc dust	Venturi Orifice and pipeline	2.97 2.7	0.362 0.362
Black liquor recovery furnace fume			
Cold scrubbing water humid gases	Venturi and cyclonic spray	1.75	0.62
Hot fume solution for scrubbing (humid gases)	Venturi, pipeline, and cyclonic spray	0.740	0.861
Hot black liquor for scrubbing (dry gases)	Venturi evaporators	0.522	0.861
Phosphoric acid mist	Venturi	1.33	0.647
Foundry cupola dust	Venturi	1.35	0.621
Open hearth steel furnace fume	Venturi	1.26	0.569
Talc dust	Cyclone	1.16	0.655
Copper sulfates	Solvore (A) with mechanical spray generator (B) with hydraulic nozzles	0.390 0.562	1.14 1.06
Ferrosilicon furnace fume	Venturi and Cyclonic spray	0.870	0.459
Odorous mist	Venturi	0.363	1.41