



L'utilizzo degli *scrubber* come soluzione ottimale per abbattere le emissioni

■ di Antonello Dimiccoli e Laura Saviano, *consulenti ambientali, studio chimico Kemis*

Gas acidi inorganici

Le emissioni in atmosfera contenenti gas acidi come HF, H₂S, HCl, SO₂ e CO₂ possono essere efficacemente trattate mediante gli "scrubber a umido", che costituiscono una delle più valide tecnologie impiantistiche per ridurre il contenuto di gas acidi inorganici nei fumi, tanto che, per questa specificità, sono anche

conosciute come "*acid gas scrubbers*". L'individuazione del sistema di scrubbing ottimale (tipologia, dimensionamento, efficienza) è, in genere, sempre frutto di un certo grado di esperienza, necessario per identificare le scelte più efficaci e le condizioni di lavoro alle quali sono soddisfatti i requisiti di progetto.

Gli *scrubber* rappresentano, spesso, la migliore soluzione rispetto ad altri tipi di tecnologie (filtrazione a secco, sistemi di assorbimento) per trattare correnti gassose contenenti:

- acido solfidrico (H₂S);
- acido fluoridrico (HF);
- acido cloridrico (HCl);
- anidride solforosa (SO₂);
- acido cianidrico (HCN);
- anidride carbonica (CO₂),

generate da attività produttive come raffinerie, industrie chimiche e petrolchimiche, inceneritori/termovalorizzatori, impianti di produzione di biogas, centrali elettriche, cementifici, fonderie, acciaierie, cartiere, impianti per la produzione di alluminio, impianti di produzione dei fertilizzanti e dei pesticidi.

Un uso frequente degli *scrubber*, oltre al lavaggio dei fumi, è anche la depurazione dei gas di processo.

Gli *scrubber* a umido (*wet-scrubber*)

Con il termine inglese “*scrubber*”, molto più diffuso tra gli operatori del settore rispetto al termine italiano “torri di lavaggio” o “colonne di assorbimento”, vengono indicati i sistemi di abbattimento impiegati per rimuovere particelle solide o sostanze allo stato di gas/vapore, dalle emissioni in atmosfera generate

dai processi industriali. Nella maggior parte dei casi, gli *scrubber* impiegano un liquido per rimuovere gli inquinanti dalle correnti gassose (*wet scrubbers*; si veda la *foto 1*); tuttavia, esistono anche applicazioni in cui un reagente allo stato solido viene messo a contatto con la corrente gassosa da purificare (*dry scrubbers*).

Gli *scrubber* a umido sono tra i principali sistemi impiegati per abbattere le emissioni gassose, specialmente nel caso di gas acidi, e uno dei principali campi di applicazione è, in particolare, la desolforazione dei fumi di combustione (FGD, *flue gas desulfurization*).

In un sistema *scrubber*, la corrente gassosa inquinata viene messa in contatto con il liquido di lavaggio:

- nebulizzando il liquido sul gas, oppure

- forzando il passaggio del gas attraverso un battente di liquido, oppure
- per mezzo di un qualsiasi altro metodo di intimo contatto.

Se l'assorbimento è basato sulla sola solubilizzazione dell'inquinante, si parla di **assorbimento fisico**; se, invece, avviene anche una reazione chimica tra la soluzione assorbente e l'inquinante, si parla di **assorbimento chimico**. Quest'ultimo, se correttamente progettato, fornisce risultati, in termini di assorbimento dell'inquinante, ben più accentuati rispetto al primo; per questo motivo, quasi sempre si preferisce progettare *scrubber* con assorbimento chimico piuttosto che fisico, soprattutto quando il composto gassoso da assorbire non deve essere recuperato tal quale.

Nel processo di assorbimento chimico, siccome gli inquinanti gassosi vengono prima disciolti nel liquido e poi trasformati per mezzo di reazioni chimiche, è, ovviamente, fondamentale che il liquido di assorbimento scelto abbia tanto la capacità di solubilizzare l'inquinante, quanto di reagire chimicamente con esso.

Schema di principio di uno *scrubber* (*wet scrubber*)

In *figura 1* è riportato uno schema semplificato di un tipico sistema *scrubber* in cui si evidenziano le principali parti costitutive.

Il principio di funzionamento generale di uno *scrubber* consiste nel convogliare la corrente gassosa, da depurare, in una sezione di lavaggio, all'interno della quale viene realizzato un intimo contatto tra l'aria inquinata e il liquido di lavaggio. Questo consente di trasferire gli inquinanti dall'aria all'acqua, ottenendo, così, uno scarico in atmosfera che rispetta i limiti di concentrazione imposti dalla normativa.

Il gas depurato, dopo aver attraversato la sezione di lavaggio, prima di



▲ Foto 1 - Esempio di uno *scrubber* a umido

essere emesso in atmosfera, passa attraverso un separatore di gocce, chiamato **demister**. La necessità di impiego del *demister* deriva dal fatto che le goccioline di liquido, che hanno assorbito il gas inquinante, tendono a essere trascinate dalla corrente di gas che è stata depurata. Con l'aggiunta di un *demister*, subito prima della sezione di uscita del gas dallo *scrubber*, le goccioline che si formano vengono, invece, trattenute. Il liquido che ha assorbito l'inquinante, può essere scaricato - previo trattamento - oppure può essere sottoposto a processo rigenerativo e riciclato allo *scrubber*.

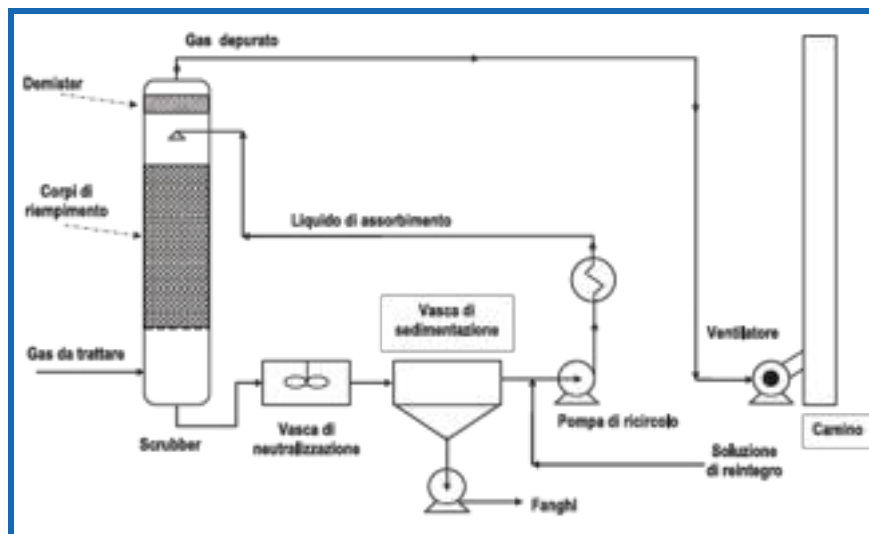
A valle del processo di depurazione con *scrubber* si ritrovano i **fanghi** che devono essere smaltiti nel rispetto delle normative ambientali; in qualche caso, questi ultimi trovano anche una collocazione sul mercato, fornendo una compensazione, sia pur marginale, ai costi di esercizio dell'impianto.

Talvolta, se necessario, la corrente gassosa da depurare viene raffreddata prima di entrare nella sezione di lavaggio. In alcuni casi, è anche necessario prevedere un primo stadio di abbattimento delle ceneri prima dello *scrubber*.

La *tabella 1* indica i principali vantaggi e svantaggi degli *scrubber* rispetto ad altri sistemi di abbattimento.

Il trasferimento di materia: il principio di funzionamento

L'assorbimento è un fenomeno di trasferimento di materia, ovvero un processo che trasferisce una specie chimica da una fase gassosa a una liquida. Il trasferimento di materia può essere paragonato a quello di calore. Entrambi avvengono quando un sistema sta cercando di raggiungere una condizione di equilibrio. Così come nel



▲ Figura 1 - Schema semplificato di un sistema scrubber a corpi di riempimento

processo di trasferimento di calore, viene ceduta energia termica da un corpo caldo a un corpo freddo posti a contatto, finché entrambi non raggiungono la stessa temperatura (equilibrio termico), allo stesso modo, nel processo di assorbimento, si assiste a un trasferimento di materia, in virtù di una differenza di concentrazione tra la corrente gassosa (alta concentrazione di inquinante) e il liquido assorbente (bassa concentrazione di inquinante). L'assorbimento continua fino a quando la concentrazione della specie inquinante nelle due fasi non raggiunge l'equilibrio chimico. Se poi, nel liquido assorbente, avviene anche una reazione chimica (assorbimento chimico), l'inquinante assorbito viene continuamente consumato. Questo mantiene il sistema lontano dalle condizioni di equilibrio chimico e ciò fa trasferire altro inquinante dal gas al liquido.

Alla luce di tutte le considerazioni fin qui esposte, ai fini di una corretta progettazione di uno *scrubber*, si comprende l'importanza di:

- scegliere con molta cura la soluzione assorbente sia in termini di

solubilità dell'inquinante nel liquido di assorbimento sia in termini di reazioni chimiche (nel caso di assorbimento chimico);

- massimizzare la superficie di contatto gas/liquido (area interfacciale);
- assicurare un buon miscelamento tra il liquido assorbente e la corrente gassosa inquinata;
- consentire un sufficiente tempo di contatto tra la fase gas e la fase liquida.

Caso di studio - abbattimento di HF nei gas acidi dei processi di alchilazione

Di seguito sono indicati i fattori chiave di un sistema *scrubber*, a partire da un caso reale affrontato per una raffineria di petrolio in Spagna. Il caso in questione partiva dalla necessità di ridurre la concentrazione di acido fluoridrico (HF) da scarichi acidi di un impianto di alchilazione, in cui il processo utilizza l'acido come catalizzatore.

Questi scarichi, con presenza di idrocarburi leggeri e HF, prima di poter essere inviati in torcia^[1], passa-

[1] La torcia di una raffineria brucia l'eventuale eccesso di gas prodotto dagli impianti rispetto alle esigenze dei forni, nonché il surplus di gas prodotto durante la marcia non regolare degli impianti (avviamenti, fermate e *upset*). Essendo un dispositivo di sicurezza, la torcia è dotata alla sua sommità di una fiamma pilota alimentata da gas combustibile, che viene mantenuta perennemente accesa.

TABELLA 1

VANTAGGI E SVANTAGGI DEGLI SCRUBBER A UMIDO

Vantaggi	Svantaggi
Ingombro contenuto. Gli scrubber riducono la temperatura e il volume delle correnti gassose inquinate e ciò consente di ridurre le dimensioni dello scrubber stesso, dei ventilatori e dei condotti a valle, rispetto a quelle di altri impianti di abbattimento. Le minori dimensioni comportano minori costi di investimento e maggiore flessibilità sull'ubicazione dell'impianto.	Possibilità di corrosione. Alcuni inquinanti, solubilizzati in acqua, formano soluzioni acide molto corrosive. In questi casi è fondamentale scegliere attentamente i materiali costruttivi.
Possibilità di trattare correnti gassose umide. Correnti ad alto tenore di umidità non rappresentano un limite all'utilizzo.	Alti consumi energetici. Per ottenere alte efficienze di abbattimento spesso sono richieste alte portate di ricircolo del liquido che implicano alti costi operativi.
Minimo rischio di incendio ed esplosione. Usando soluzioni acquose si riducono i rischi di incendio ed esplosione.	Necessità di trattamento della soluzione assorbente. La soluzione assorbente deve essere trattata sia nel caso la si voglia ricircolare in impianto sia qualora la si debba scaricare. In quest'ultimo caso, vasche di decantazione o chiarificatori possono essere necessari per rispettare i limiti agli scarichi idrici.
Possibilità di trattare correnti gassose contenenti anche materiale particellare (polveri)	Pennacchio al camino. Gli scrubber aumentano il tenore di umidità della corrente gassosa e questo genera un pennacchio di vapore acqueo al camino.
Possibilità di trattare gas corrosivi	

no attraverso un processo di abbattimento dell'acido, al fine di ridurre i rischi di corrosione delle apparecchiature a valle e minimizzare l'emissione in atmosfera (l'acido fluoridrico attraversa la torcia restando inalterato).

Una particolarità dei gas di scarico è data dal carattere discontinuo della presenza di HF nelle correnti gassose da trattare. Infatti, in generale, gli scarichi provengono:

- dai serbatoi di stoccaggio del catalizzatore (HF);
- dal separatore del reattore (*settler*);
- dal ricontattore dell'acido;
- dall'accumulatore di testa della depropanizzatrice;
- dallo *stripper* propano-HF;
- dagli scarichi delle autobotti di HF;
- ecc.

Inoltre, è possibile anche la presenza di scarichi cosiddetti straordinari, provenienti dagli essiccatori della carica e dai defluorinatori.

Si fa rilevare che, mentre nel caso in esame, la specie da considerare

nello studio dello scrubber è il solo acido fluoridrico, esistono anche casi in cui le correnti gassose contengono più di un gas che partecipa competitivamente all'assorbimento nello scrubber.

Condizioni di ingresso e di uscita del gas

La progettazione e la verifica di funzionamento di qualsiasi impianto di abbattimento delle emissioni (e gli scrubber a umido non fanno eccezione) dipendono dalle condizioni operative e dalle caratteristiche dell'inquinante da abbattere. Nel caso in esame, i parametri relativi alla corrente gassosa in ingresso allo scrubber sono:

- portata del gas (massima): 1.500 m³/h (in condizioni *standard*);
- concentrazione di HF (massima): 5% v/v;
- temperatura del gas: 20 °C;
- pressione del gas: 1 atm.

Relativamente alla concentrazione di HF nel gas in uscita, il valore limite è pari a 5 mg/Nm₃^[2].

Scelta della soluzione di assorbimento

- **Come scegliere la soluzione di assorbimento: la solubilità dei sali di fluoro e l'“effetto dello ione a comune”.** Il liquido di assorbimento maggiormente adoperato negli scrubber per l'abbattimento dell'HF è una soluzione acquosa caustica contenente idrossido di sodio (NaOH) o idrossido di potassio (KOH). Il fenomeno che ne consegue non è un assorbimento fisico (in cui il gas si dissolve nel liquido assorbente senza reagire con esso), ma chimico (il gas assorbito reagisce chimicamente con la soluzione). Lo scrubber della raffineria in esame utilizzava idrossido di sodio come liquido di lavaggio del gas, con problemi di formazione di sali e occlusioni delle apparecchiature. L'impiego di idrossido di potassio, invece, come liquido di assorbimento per l'abbattimento di HF, offre maggiore flessibilità nel prevenire la precipitazione di sali

[2] Valore limite maggiormente applicato nei Paesi dell'Unione europea, in accordo con la direttiva IPPC 96/61/CE e uguale al valore limite stabilito anche dal D.Lgs. n. 152/2006 (cosiddetto Testo unico ambientale) per le raffinerie italiane (parte IV, sezione 1, punto 1.4.).

TABELLA 2

SOLUBILITÀ IN ACQUA DI KF E NaF*

Nome	Formula	Densità (kg/L)	Solubilità a 25°C (g/100g H ₂ O)	Solubilità a 25°C (mol/1kg H ₂ O)
Fluoruro di potassio	KF	2,48	102	17,6
Fluoruro di sodio	NaF	2,78	4,13	0,984

* David R. Lide, "Handbook of Chemistry and Physics", 88th Edition, CRC (2007)

nelle operazioni di scrubbing, a tutto vantaggio dell'efficienza del processo. In primo luogo, l'idrossido di potassio in soluzione acquosa [KOH_(aq)] è da preferire all'idrossido di sodio, perché il corrispondente fluoruro che si forma per reazione con l'acido fluoridrico (fluoruro di potassio, KF) è molto più solubile in soluzioni acquose, rispetto al fluoruro che si formerebbe dall'idrossido di sodio (fluoruro di sodio, NaF), che ha, invece, minore solubilità. In *tabella 2* si riporta la solubilità dei due sali. Una bassa solubilità non è, naturalmente, da preferire poiché si traduce in formazione di sali che precipitano, provocando sporcamenti e occlusioni delle apparecchiature.

In secondo luogo, spesso non si tiene conto del cosiddetto "effetto dello ione a comune", in cui risiede la ragione per la quale la solubilità di KF e di NaF, si riduce in presenza, rispettivamente, di KOH o NaOH nella soluzione acquosa. Pur essendo presente in entrambi i sistemi KOH/KF e NaOH/NaF, questo effetto mostra, tuttavia, un'intensità decisamente minore per il sistema KOH/KF rispetto al sistema NaOH/NaF. Infatti, in una soluzione acquosa di NaOH al 5% m/m, a 20°C, la riduzione di solubilità del NaF è di circa 46% in moli, mentre, in una soluzione acquosa di KOH al 5% m/m, alla stessa temperatura, la solu-

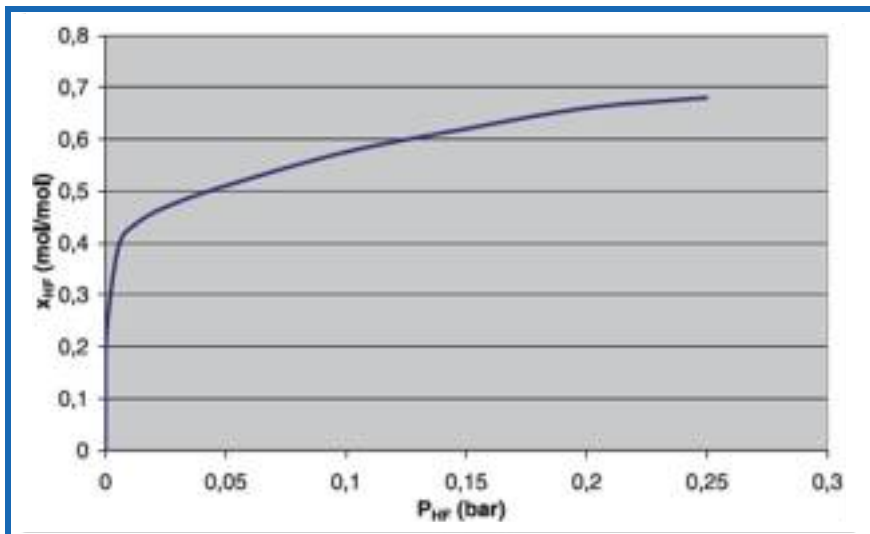
bilità del KF si riduce solo del 4% in moli. Spesso, per contrastare la bassa efficienza di uno *scrubber*, si assiste a ingiustificabili aumenti delle concentrazioni delle soluzioni assorbenti, con la vana speranza che questo possa risolvere il problema. È evidente, invece, come questo non faccia altro che peggiorare la situazione, proprio in virtù dell'effetto dello "ione a comune".

• **Come aumentare la solubilità del gas nel liquido di assorbimento.**

La solubilità di cui si è discusso al precedente punto è riferita al sale che si forma, all'interno della soluzione assorbente, dopo l'assorbimento e la reazione chimica. Nella scelta della soluzione assorbente bisogna tenere conto anche di un altro tipo di solubilità, ovvero di quella relativa alla molecola gassosa inquinante che deve solubilizzarsi nel liquido assorbente durante il tempo di contatto tra le due fasi reagenti. La solubilità del gas nel liquido è uno dei fattori chiave del processo di *scrubbing* poiché determina la quantità di inquinante che può essere assorbita. Da essa dipende la portata di liquido che deve essere ricircolata (il rapporto liquido/gas) e il tempo di contatto minimo necessario perché avvenga l'assorbimento; gas molto solubili richiederanno, infatti, minori portate di liquido e tempi di contatto più brevi tra le

due fasi, a tutto vantaggio dei costi di investimento e di esercizio dello *scrubber*. Il parametro solubilità dipende dalla temperatura del sistema e dalla pressione del componente da solubilizzare. Esso aumenta al decrescere della temperatura e al crescere della pressione del componente gassoso. Nella realtà, è più facile ridurre la temperatura del sistema piuttosto che agire, in modo significativo, sulla pressione. Per questo motivo, molti sistemi *scrubber* possiedono una sezione di raffreddamento del gas prima della colonna di assorbimento (tipico esempio sono gli *scrubber* per i fumi di combustione). Nel caso in esame, l'impiego di una soluzione caustica, come soluzione di assorbimento, è risultata premiante dal punto di vista della solubilità dei gas di HF nella soluzione assorbente. L'acido fluoridrico è, infatti, un gas molto solubile in acqua. La solubilità dell'HF va considerata in acqua piuttosto che in soluzione acquosa di KOH, perché la reazione chimica tra HF e KOH è talmente veloce da far sì che all'interfaccia gas-liquido ci sia uno strato sottile nel liquido in cui la concentrazione di KOH è praticamente trascurabile^[3]. In merito all'andamento della solubilità, come per molti altri gas, bisogna tenere conto del fatto che la dipendenza dalla pres-

[3] Secondo la teoria dei due *film* di Lewis e Whitman (1924), in presenza di una reazione chimica istantanea, quale è quella tra HF e KOH (Astarita 1964), all'interno del *film* liquido le due specie chimiche non coesistono ed esiste un piano di reazione in corrispondenza del quale le due specie reagiscono completamente. Così, dal piano di reazione all'interfaccia liquido-gas è presente solo la specie HF, oltre all'acqua, mentre dal piano di reazione al cuore del liquido è presente solo KOH in acqua.



▲ **Figura 2** - Andamento della solubilità dell'HF in acqua, espressa come frazione molare, in funzione della pressione parziale del gas a una temperatura di 30 °C

sione parziale dell'acido fluoridrico si discosta dalla linearità della legge di Henry già a pressioni molto basse. In *figura 2* è riportato l'andamento della solubilità dell'HF in acqua (espressa come frazione molare) in funzione della pressione parziale del gas^[4].

● **Rigenerare la soluzione di assorbimento può contenere i costi di esercizio.** Durante il processo di assorbimento, all'interno dello *scrubber*, la soluzione assorbente consuma la sostanza inquinante assorbita. La soluzione esausta che esce dal fondo dello *scrubber*, così com'è, non è più in grado di svolgere il suo ruolo nel processo di assorbimento, a meno che non venga rigenerata. Al fine di contenere i costi di esercizio degli *scrubber*, diventa fondamentale progettare l'intero sistema, tenendo conto che la scelta della soluzione assorbente deve preferire sistemi chimici facilmente rigenerabili e, soprattutto, sistemi che siano rigenerabili sullo stesso luogo di produzione (*in situ*). La $KOH_{(aq)}$ rigenerata viene riciclata allo *scrubber*, mentre i fanghi vengono smaltiti come rifiuto speciale.

Prima di ripompare la soluzione rigenerata in carica allo *scrubber*, questa passa attraverso un sedimentatore o un sistema di filtrazione, per rimuovere le particelle abrasive e prevenire occlusioni e abrasioni delle apparecchiature.

L'area interfacciale gas/liquido

Il trasferimento di materia, che governa il fenomeno dell'assorbimento tra la fase gas inquinata e il liquido di assorbimento, richiede che queste fasi vengano in contatto all'interno dello *scrubber*. L'inquinante si trasferisce dal gas al liquido attraverso la superficie di separazione delle due fasi, meglio nota come *area interfacciale*.

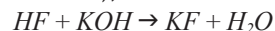
L'area interfacciale dipende dalla tipologia dei sistemi di assorbimento impiegati. In *tabella 3* sono riportati alcuni valori tipici di area interfacciale per alcune tipologie di *scrubber*.

Più area interfacciale o più volume di liquido?

Prima di procedere alla scelta del sistema *scrubber* a umido più indicato per abbattere un inquinante gassoso,

oltre a dover conoscere la chimica del processo di assorbimento che si ritiene di dover applicare (soluzione assorbente, solubilità, rigenerazione ecc.), è fondamentale conoscere il tipo di regime di trasferimento di materia che governa il sistema reagente. Questa informazione determina se lo *scrubber* dovrà sviluppare prevalentemente area interfacciale oppure volume di liquido reagente, il che equivale a restringere la tipologia di *scrubber* adatta allo scopo.

Nel caso in esame del gas acido di raffineria, la reazione può essere considerata istantanea e irreversibile. Infatti, da un punto di vista termodinamico, l'HF disciolto reagisce irreversibilmente con la KOH presente nel liquido di assorbimento (assorbimento chimico), secondo la reazione:



La costante di equilibrio di questa reazione è, a 25 °C, pari a ca. 7×10^{10} . Ciò significa che la reazione è completamente spostata verso i prodotti. Da un punto di vista cinetico, l'assorbimento dell'acido HF nella base forte KOH è considerata una reazione chimica istantanea. Il rapporto tra la velocità della reazione chimica e quella del trasferimento di materia all'interfaccia liquido-gas viene espresso numericamente da un parametro, noto come "numero di Hatta". Questo parametro è fondamentale nel determinare quale sia il fattore controllante del processo di *scrubbing*:

- quando è molto maggiore di 1, l'area interfacciale controlla il processo;
- se, invece, è molto minore di 1, diviene controllante il volume di liquido.

Nel caso dell'assorbimento di HF in $KOH_{(aq)}$, la velocità della reazione chimica è decisamente maggiore della velocità di trasferimento di materia; pertanto, il numero di Hat-

[4] P.G.T. Fogg and W. Gerrard, "Solubility of Gases in Liquids", John Wiley & Sons (1991)

ta è molto maggiore di 1 e il fattore controllante del processo è l'area interfacciale. Per questa ragione, lo scrubber da scegliere dovrà garantire un'alta area interfacciale piuttosto che un grosso volume di liquido in esso contenuto.

Scelta della tipologia di scrubber più adatta

La scelta dello scrubber deve tenere conto di molti aspetti, alcuni dei quali già affrontati:

- efficienza di abbattimento richiesta per riguardare i limiti di emissione;
- solubilità del gas nel liquido assorbente;
- natura chimica del gas e del liquido;
- area interfacciale;
- miscelazione tra fase gas e fase liquida;
- tempo di contatto tra le due fasi;
- formazione di sali;
- portata del gas da trattare;
- rapporto di flusso liquido/gas;
- perdite di carico del sistema;
- particolari costruttivi dello scrubber come i sistemi di distribuzione e re-distribuzione del liquido, i demister e i materiali resistenti alla corrosione.

La tabella 4 descrive, per cinque tipologie di scrubber maggiormente diffuse, le caratteristiche salienti di ciascuno, i vantaggi e gli svantaggi della loro applicazione.

Per il caso in esame dell'assorbimento di HF in $\text{KOH}_{(aq)}$, è stata preferita una colonna spray.

Le colonne spray

Le colonne spray sono molto indicate per l'abbattimento di inquinanti gassosi molto solubili nelle soluzioni di assorbimento. Grazie alla loro facilità di trattamento di grossi volumi di gas inquinati in atmosfere corrosive, sono spesso usate anche nei sistemi di desolfurazione dei fumi di combustione come primo o secondo stadio di depurazione.

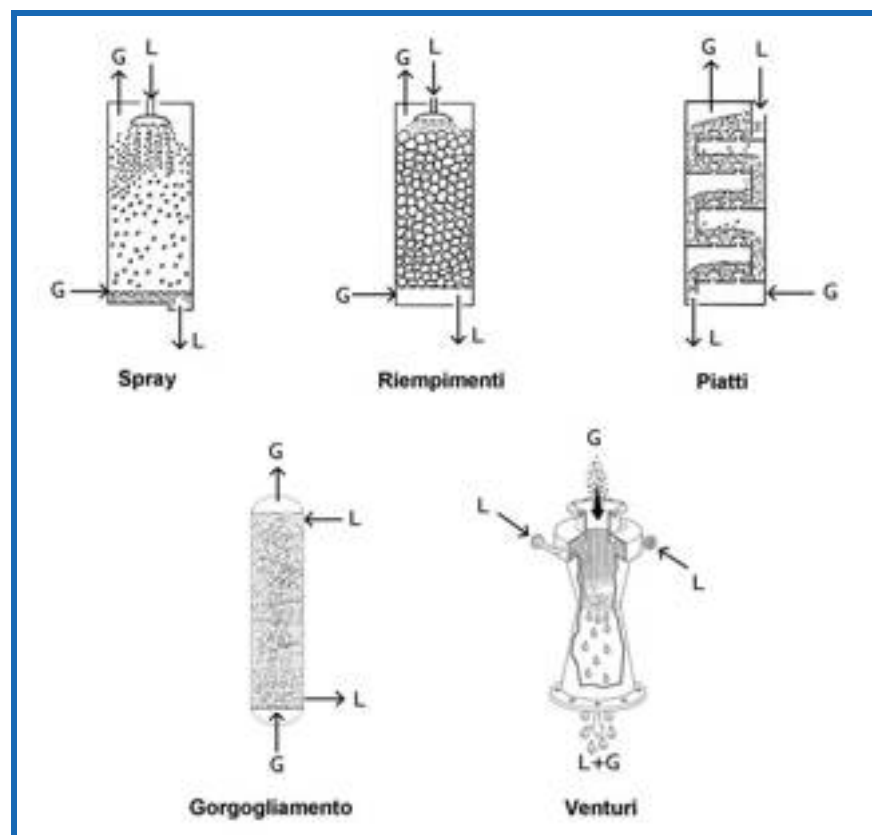
La geometria costruttiva delle colonne spray è piuttosto semplice, consistendo in un corpo cilindrico vuoto realizzato prevalentemente in metallo (ma anche in materiale composito) e contenente al suo interno, nella parte alta, uno o più ugelli atti a spruzzare il liquido all'interno della colonna, dall'alto

verso il basso. Il gas da trattare solitamente entra dal basso della colonna e risale verso la testa. Il liquido e il gas, muovendosi in versi opposti, realizzano un *flusso in controcorrente*, in cui il gas a minore concentrazione di inquinante viene esposto al liquido, appena rigenerato, spruzzato dall'alto.

TABELLA 3

ALCUNI ESEMPI DI AREE INTERFACCIALI ASSOCIATE A VARIE TIPOLOGIE DI SCRUBBER

Tipologia scrubber (per le tipologie si veda la figura 3)	Area interfacciale per volume di liquido (m^2/m^3)	Area interfacciale per volume di reattore (m^2/m^3)
Colonna spray	~ 1200	10÷100
Colonna a riempimenti	~ 1200	~ 200
Colonna a piatti	~ 1000	100÷400
Colonna a gorgogliamento	~ 20	~ 20
Venturi scrubber		1000÷7000



▲ Figura 3 - Rappresentazione schematica semplificata di alcuni tra i più comuni scrubber

TABELLA 4

CARATTERISTICHE SALIENTI, VANTAGGI E SVANTAGGI PER ALCUNI SCRUBBER

Caratteristiche salienti	Vantaggi	Svantaggi
Colonne a gorgogliamento		
<ul style="list-style-type: none"> ● intensità di miscelazione medio-bassa; ● miscelazione provocata principalmente dal gas, a meno che il liquido non sia immesso in colonna come getto; ● alto volume di liquido in colonna (<i>holdup</i>); ● lunghi tempi di residenza per il liquido; ● intensità variabile di retromiscelazione nella fase liquida (<i>back mixing</i>); ● il moto del gas viene considerato del tipo "flusso a pistone" (<i>plug flow</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> ● costruzione semplice e bassi costi di investimento; ● nessuna parte in movimento e bassi costi di manutenzione; ● possibilità di trattare fluidi contenenti solidi; ● facile controllo della temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> ● alte perdite di carico della fase gas a causa dell'altezza piezometrica del liquido; ● l'area interfacciale gas/liquido diminuisce se il rapporto tra l'altezza della colonna e il suo diametro è maggiore di 12, a causa della coalescenza delle bolle di gas. L'installazione di piatti forati in colonna può mitigare il problema, ma aumenta le perdite di carico del gas e ostacola la circolazione del liquido.
Colonne a riempimenti		
<ul style="list-style-type: none"> ● il contatto gas/liquido viene realizzato grazie all'area superficiale dei corpi di riempimento; ● il 40÷60% del volume della colonna è occupato dai riempimenti; ● corpi di riempimento con diametro minore di 3 mm. possono portare a eccessive perdite di carico; ● basso <i>holdup</i> di liquido in colonna. 	<ul style="list-style-type: none"> ● perdite di carico del gas medio-basse; ● in caso di fluidi chimicamente aggressivi è possibile disporre di riempimenti resistenti alla corrosione; ● possibilità di trattare liquidi che formano schiume (<i>foaming</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> ● non idonee nel caso in cui particelle solide siano presenti nelle cariche o si formino durante il processo: i solidi potrebbero, infatti, occludere i vuoti tra i corpi di riempimento; ● nella configurazione in controcorrente, il rapporto di flusso gas/liquido è limitato dal fenomeno di ingolfamento (<i>flooding</i>); ● è necessario mettere in campo delle azioni per prevenire maldistribuzioni di liquido; ● in caso di elevata esotermicità del processo, non è agevole inserire uno scambiatore di calore nella colonna.
Colonne a piatti		
<ul style="list-style-type: none"> ● maggiore <i>holdup</i> di liquido e tempi di residenza del liquido più lunghi rispetto alle colonne a riempimenti; ● possibilità di realizzare un alto numero di unità di trasferimento; ● su ciascun piatto si realizzano condizioni prossime al completo miscelamento; ● disponibili molte tipologie di piatti. 	<ul style="list-style-type: none"> ● possono tollerare la presenza di solidi; ● è possibile, all'occorrenza, inserire serpentine di raffreddamento sui piatti; ● offrono <i>range</i> operativi di portata di liquido e gas più ampi rispetto alle colonne a riempimenti. 	<ul style="list-style-type: none"> ● alti costi di investimento, soprattutto quando vengono impiegati piatti a campanelle o particolari costruttivi brevettati; ● non indicati per liquidi che formano schiume (<i>foaming</i>).
Colonne spray		
<ul style="list-style-type: none"> ● il liquido è la fase dispersa, mentre il gas è la fase continua; ● adatte per l'assorbimento fisico o chimico di gas molto solubili nelle soluzioni assorbenti; ● basso <i>holdup</i> di liquido in colonna; ● alti valori di area interfacciale. 	<ul style="list-style-type: none"> ● adatte a trattare fluidi corrosivi e gas contenenti particelle solide; ● bassissime perdite di carico per la corrente gassosa; ● particolarmente indicate in applicazioni in cui la precipitazione di sali potrebbe causare occlusioni in altri tipi di <i>scrubber</i>; ● costi di investimento relativamente bassi. 	<ul style="list-style-type: none"> ● alti consumi energetici per atomizzare il liquido; ● la coalescenza delle gocce sulle pareti o contro ostacoli interni diminuisce l'efficienza del trasferimento di materia; ● trascinamento di gocce nel gas in uscita.
Venturi scrubber		
<p>Il gas viene forzato a passare attraverso un tubo di Venturi in cui viene immesso anche il liquido di assorbimento. Le due fasi si miscelano energicamente nella gola formando molte goccioline e alti valori di area interfacciale.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● coefficienti di trasferimento di materia molto alti nella gola del Venturi; ● bassi tempi di residenza del liquido; ● dimensioni dello <i>scrubber</i> contenute. 	<ul style="list-style-type: none"> ● alti consumi energetici per pompe e ventilatori; ● significativi fenomeni di attrito se sono presenti particelle solide nel gas; ● trascinamento di gocce nel gas in uscita.

L'assorbimento può essere aumentato riducendo le dimensioni delle gocce e/o aumentando il rapporto di flusso liquido/gas, anche se que-

ste azioni comportano maggiori consumi energetici e costi di esercizio. Inoltre, è possibile aumentare ulteriormente l'area interfacciale,

posizionando gli ugelli anche su più livelli all'interno della colonna. La dimensione delle gocce di liquido assorbente generate dagli ugelli de-

▶ L'articolo continua dopo l'Inserito.

TABELLA 5

PRINCIPALI PARAMETRI OPERATIVI DELLE COLONNE *SPRAY*

Perdite di carico (Δp)	Rapporto di flusso Liquido/Gas (L/G)	Pressione del liquido in ingresso	Efficienza di abbattimento
15 ÷ 75 mm H ₂ O	0,1÷3 L/m ³	70÷2800 kPa	90÷99%

ve essere opportunamente regolata; le gocce piccole aumentano, infatti, l'efficienza di assorbimento, ma al di sotto di certe dimensioni si intensificano i fenomeni di trascinamento del gas che risale. Solitamente, il giusto compromesso nelle colonne *spray* viene realizzato con ugelli che producono gocce con diametri compresi tra 500 e 1000 micron.

Uno dei principali problemi delle colonne *spray*, può essere di tipo mantentivo ed è costituito dalle possibili occlusioni o erosioni degli ugelli, soprattutto quando il liquido di assorbimento viene rigenerato e riciclato. Per ovviare a questo problema, si ricorre a sistemi di sedimentazione e filtrazione sulla linea di ricircolo, per rimuovere le particelle di sali dal liquido di assorbimento prima che questo venga nuovamente pompato in colonna. Spesso si ricorre, con ottimi risultati, anche all'installazione di particolari tipologie di ugelli che hanno una geometria tale da minimizzare i rischi di occlusione (si veda la *foto 2*).

Fatta eccezione per gli ugelli, il grande vantaggio delle colonne *spray*, rispetto ad altri *scrubber*, è la loro geometria completamente aperta e priva di componenti strutturali interni alla colonna. Ciò riduce i problemi di *scale-up*, di sporcamento e di erosione rispetto ad altri *scrubbers*. Pertanto, quando c'è il rischio di formazione di particelle di sali, questi *scrubber* sono preferiti perché soffrono meno di problemi di occlusioni. Le colonne *spray*, infine, consentono di ridurre al minimo le perdite di carico della corrente gassosa.

Uno dei problemi da considerare consiste nella tendenza alla coalescenza delle gocce; dopo aver percorso una certa distanza, infatti, le gocce tendono ad agglomerarsi oppure impattano sulle pareti della colonna. Questo diminuisce l'area interfacciale complessiva del sistema e riduce l'efficienza di abbattimento dello *scrubber*. Opportuni accorgimenti costruttivi della colonna *spray* possono, però, rimediare facilmente a questo inconveniente.

In *tabella 5* sono riportati i principali parametri operativi delle colonne *spray*.

Dimensionamento degli *scrubber*: spunti

Nel dimensionare uno *scrubber* alcuni parametri sono imposti dalle condizioni operative che generano l'emissione (ad es. temperatura, pressione e composizione del gas); altri sono fissati da regolamenti, norme tecniche e limiti di legge (es. la concentrazione degli inquinanti).



▲ Foto 2 - Ugello a spirale

I parametri che, invece, vanno calcolati in modo analitico sono principalmente tre:

- **portata del liquido assorbente in ingresso allo *scrubber***: viene stabilita sulla base del bilancio di materia che coinvolge le correnti gassose e liquide in ingresso e uscita dalla colonna, tenendo conto della presenza della reazione chimica. Una volta calcolata la portata di liquido e nota la portata di gas, è possibile calcolare il rapporto di flusso liquido/gas;
- **diametro della colonna**: viene scelto dal progettista tenendo conto dei vincoli idraulici derivanti dalle portate di liquido e gas che circolano all'interno della colonna e sulla base del tempo di contatto liquido/gas ovvero della velocità del gas ottimale per il fenomeno di assorbimento;
- **altezza della colonna**: si ottiene combinando le equazioni cinetiche e di trasferimento di materia con il bilancio di materia. In alternativa, è possibile determinarla per integrazione grafica o conoscendo i dati di letteratura delle altezze delle unità di trasferimento per il sistema in esame (*HTU - height of transfer unit*). Senza dubbio, la strada che passa dalla conoscenza della cinetica e del bilancio di materia offre maggiori garanzie sul risultato.

Queste tre incognite possono essere calcolate in diversi modi; molto spesso, si ricorre a *software* di simulazione, ma, in questo caso, è fondamentale avere padronanza dei processi chimico-fisici e dei bilanci di materia

che stanno alla base degli algoritmi di calcolo. Solo così, infatti, le apparecchiature potranno essere dimensionate correttamente, evitando rischiosi sottodimensionamenti o costosi sovradimensionamenti.

Rapporto di flusso liquido/gas (L/G)

Un parametro adoperato, nel campo degli *scrubber* a umido, per descrivere sinteticamente le condizioni idrauliche della colonna, è il “rapporto di flusso liquido/gas” che esprime la portata del liquido in funzione della portata di gas da trattare e si esprime in litri di liquido per metro cubo di gas (L/m^3). Il rapporto permette di confrontare rapidamente sistemi di differenti dimensioni.

Velocità del gas

La velocità del gas deve essere mantenuta bassa (per le colonne *spray* ca. $0,3 \pm 1,2$ m/s) al fine di consentire un adeguato tempo di contatto tra liquido e gas e prevenire che le gocce di liquido vengano trascinate dal gas fuori dalla colonna.

Effetto della temperatura

● **Solubilità del sale e del gas.** Nel caso in questione dell'HF, si po-



▲ Foto 3 - Linea di ricircolo (dettaglio)

trebbe essere indotti a operare con alte temperature del liquido di assorbimento per aumentare la solubilità del sale KF e prevenire la sua precipitazione. Questo, però, porterebbe, contemporaneamente, anche a una diminuzione della solubilità del gas HF nella soluzione assorbente. Inoltre, alte temperature potrebbero far evaporare porzioni anche significative di liquido assorbente a scapito dell'efficienza di abbattimento e dei costi di esercizio. La scelta della



▲ Foto 4 - Colonne di stripping e scrubbing in serie

temperatura operativa deve favorire la solubilità del gas.

● **Esotermicità del processo.** Un accurato bilancio di energia del sistema di assorbimento deve tenere in debito conto che l'assorbimento dell'HF in acqua e la successiva reazione chimica di neutralizzazione con KOH sono entrambi fenomeni esotermici; in particolare, il calore di soluzione in acqua dell'HF è di circa 200 kcal/kg, mentre il calore di neutralizzazione è di circa 800 kcal/kg. Sulla base di queste considerazioni, è necessario prevedere uno scambiatore di calore, sulla linea di ricircolo del liquido in testa allo *scrubber*, per raffreddare la soluzione assorbente.

Demister

Nella colonna *spray*, come negli altri *scrubber* a umido, per contrastare il trascinamento di gocce di liquido assorbente nel gas in uscita, vengono installati, subito prima dell'uscita del gas, i separatori di gocce (*demisters*). Sebbene la principale funzione dei *demister* sia quella di prevenire trascinamenti di gocce, essi fungono da abbattimento addizionale dell'inquinante che verrebbe, altrimenti, rilasciato nelle emissioni

BIBLIOGRAFIA

- “Gas liquid contacting”, *Chemical Engineering Progress*, American Institute of Chemical Engineers - July 1999
- Astarita G., “*Mass Transfer with Chemical Reaction*”, Elsevier Publ., Amsterdam, (1967)
- Mamrosh D., Beitler C., Fisher K., Stem S., “Consider improved scrubbing designs for acid gases”, *Hydrocarbon Processing*, Gulf Publishing Co., January (2008)
- Perry R.H., Green D.W., “*Perry's Chemical Engineers' Handbook*”, 8th ed., McGraw-Hill, New York (2007)
- Lewis W.K., Whitman W.G., *Ind. Eng. Chem.*, 16, 1215 (1924)
- Charpentier J.C., “*Mass-Transfer Rates in Gas-Liquid Absorbers and Reactors*”, *Advances in Chemical Engineering*, 11, Academic Press, San Diego (1981)
- Danckwerts P.V., “*Gas-Liquid Reactions*”, McGraw-Hill, New York (1970)
- Levenspiel O., “*Chemical Reaction Engineering*”, 3rd ed., Wiley, New York (1997)
- Dimiccoli A., Di Serio M., Santacesaria E., “*Mass Transfer and Kinetics in Spray-Tower-Loop Absorbers and Reactors*”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, American Chemical Society, Vol. 39(11), 4082-4093 (2000)

insieme con le gocce di liquido assorbente (in assenza di assorbimento chimico). Evitando il trascinarsi di liquido si minimizza anche la perdita di soluzione assorbente a vantaggio del contenimento dei costi di esercizio. I *demister*, pertanto, devono essere considerati una parte costitutiva essenziale di qualsiasi *scrubber* a umido e non un accessorio opzionale.

Perdite di carico

Le perdite di carico attraverso un sistema *scrubber* o un singolo componente sono un fattore importante da considerare nel valutare e con-

frontare le diverse apparecchiature. Grosse perdite di carico, che indicano alte resistenze allo scorrimento dei fluidi nelle apparecchiature, si traducono in maggiori costi energetici per pompe e ventilatori.

Uno dei fattori che rende le colonne *spray* competitive rispetto ad altri *scrubber*, nell'abbattimento degli inquinanti, è rappresentato proprio dalle basse perdite di carico per la fase gas, spesso minori di 25 mm di colonna d'acqua.

Corrosione

Particolare attenzione va posta nella scelta dei materiali costruttivi,

tenendo conto delle temperature in gioco, delle concentrazioni di acido e delle modalità d'uso. Nel caso in questione, l'acido fluoridrico è una specie chimica fortemente corrosiva e, nell'impiego degli acciai, bisogna ricordare che si possono verificare fenomeni di *blistering* da idrogeno. Per soluzioni concentrate di HF sono molto usati il "Monel" e il politetrafluoroetilene (PTFE meglio noto col nome commerciale "teflon"), mentre sono da evitare materiali come la ghisa, gli acciai serie 400, gli acciai temprati e il vetro. Per le guarnizioni, si preferisce adoperare il PTFE. •

Foto 1, 3 e 4 su gentile concessione di Ventilazione Industriale s.r.l. - Lissone (MI)
 Figura 1 a cura di Antonello Dimiccoli dello Studio chimico Kemis - Vicopisano (PI)
 Figura 2 a cura di Laura Saviano dello Studio chimico Kemis - Vicopisano (PI)
 Figura 3 a cura di Antonello Dimiccoli dello Studio chimico Kemis - Vicopisano (PI)
 Foto 2 su gentile concessione di PNR Italia s.r.l. - Voghera (PV)

EDILIZIA E URBANISTICA

DIA, SUPER DIA E PERMESSO DI COSTRUIRE

M. Rezzonico, S. Rezzonico

Il volume è una guida pratica per quanti si occupano professionalmente dell'attività urbanistica ed edilizia, limitatamente agli interventi edilizi, ai titoli abilitativi e alle relative procedure edilizie nonché al sistema sanzionatorio, con esclusione della Parte II del Testo Unico, relativa alle normative tecniche per l'edilizia.

Naturalmente il volume tiene conto del sofferto iter legislativo del D.P.R. n. 380/2001 che ha subito consistenti rimaneggiamenti che hanno adeguato il provvedimento alla nuova disciplina della superDIA, dettata dalla legge-obiettivo. Tiene conto, inoltre, dei principi introdotti dall'affrettata revisione della Costituzione del 2001, che ha dato la stura - particolarmente in materia di "governo del territorio" - a un contenzioso istituzionale senza precedenti tra Stato e Regioni e delle normative sopravvenute.

Il Cd-Rom allegato contiene un'ampia raccolta normativa e un corposo apparato giurisprudenziale.

Pagg. 408 – € 42,00



Il prodotto è disponibile anche nelle librerie professionali.

Trova quella più vicina all'indirizzo www.librerie.ilsolo24ore.com

GRUPPO **24ORE**
 La cultura del fatto