

CONDENSAZIONE

La condensazione è la trasformazione fisica che fa passare una sostanza dalla fase vapore alla fase liquida. La realizzazione di questa trasformazione dipende dalle condizioni di temperatura e pressione, ed è favorita da bassi valori della prima ed alti valori della seconda.

Avendo non una sostanza pura, ma una miscela di prodotti ciascuno con diverse caratteristiche chimico-fisiche, a parità di pressione abbassando la temperatura condenseranno successivamente tutti i singoli componenti a diverse specifiche temperatura. L'energia termica da asportare dipende dai valori dei calori latenti di vaporizzazione e di fusione e dal calore sensibile della sostanza da abbattere. La tecnica è quindi adatta all'abbattimento di composti relativamente pesanti in concentrazione elevata e con bassa tensione di vapore.

Descrizione tecnica

L'utilizzo dei condensatori è generalmente limitato a tutti quei processi che prevedono emissioni di vapori inquinanti, soprattutto di natura organica, con alte concentrazioni e basse portate. In alcuni casi il controllo degli inquinanti può essere eseguito utilizzando esclusivamente la condensazione, la maggior parte delle applicazioni industriali richiede, però, dei sistemi di abbattimento supplementari quando nelle emissioni risultano presenti inquinanti che condensano molto difficilmente o del particolato aerodisperso.

Comunemente vi sono 3 tipi diversi di condensatori, suddivisi sulla base delle sostanze utilizzate per causare l'abbassamento della temperatura:

- i condensatori convenzionali;
- i condensatori refrigerativi;
- i condensatori criogenici.

I **condensatori convenzionali** sono dispositivi di abbattimento relativamente semplici che si servono dell'aria o più spesso dell'acqua per ridurre la temperatura del flusso da depurare a valori che arrivano fino a 4°C. Temperature di -15°C possono essere raggiunte utilizzando opportune soluzioni saline. Esistono in circolazione essenzialmente due tipi di condensatori convenzionali: quelli a contatto diretto o "a miscela" e i condensatori a superficie.

I **condensatori a miscela** sono in definitiva dei dispositivi molto simili a quelli di lavaggio: depurano le emissioni mettendo a contatto diretto il flusso d'aria da trattare con il liquido di raffreddamento, di solito l'acqua.

Il principale vantaggio dei condensatori per contatto consiste nella loro semplicità e nel basso costo. Lo svantaggio è invece dato dal miscelamento dei contaminanti che si sono condensati con l'acqua, cosa che implica un aumento del trattamento delle acque di scarico o costi supplementari per il recupero dei contaminanti.

I condensatori a superficie vengono utilizzati quando i vapori generati nel corso dei processi industriali non possono essere miscelati con l'acqua di raffreddamento. In genere questo problema si riscontra quando i vapori di processo sono altamente corrosivi o tossici oppure quando il trattamento dell'acqua reflua risulta particolarmente oneroso. Di seguito una figura di condensatore a miscela



Fonte: US EPA

Il **condensatore a superficie** è generalmente uno scambiatore di calore a fascio tubiero. Questi dispositivi sono solitamente costituiti da un involucro cilindrico che racchiude numerosi piccoli tubi che corrono paralleli all'asse del cilindro. La sostanza condensante, di solito l'acqua, fluisce lungo questi tubi al loro interno, mentre il flusso d'aria calda da trattare fluisce all'interno del rivestimento ed al di fuori dei tubi. Il calore dell'aria da trattare viene trasferito attraverso i tubi all'acqua di raffreddamento, riducendo così la temperatura dell'aria contaminata e favorendo la condensazione degli inquinanti (in pratica i vapori si condensano a causa del

contatto con la fredda superficie dei tubi).

I condensatori di superficie sono più costosi di quelli a contatto sia per quanto riguarda la costruzione che la manutenzione, comunque hanno il grosso vantaggio che il contaminante raccolto non viene miscelato con il liquido di raffreddamento.

Di seguito

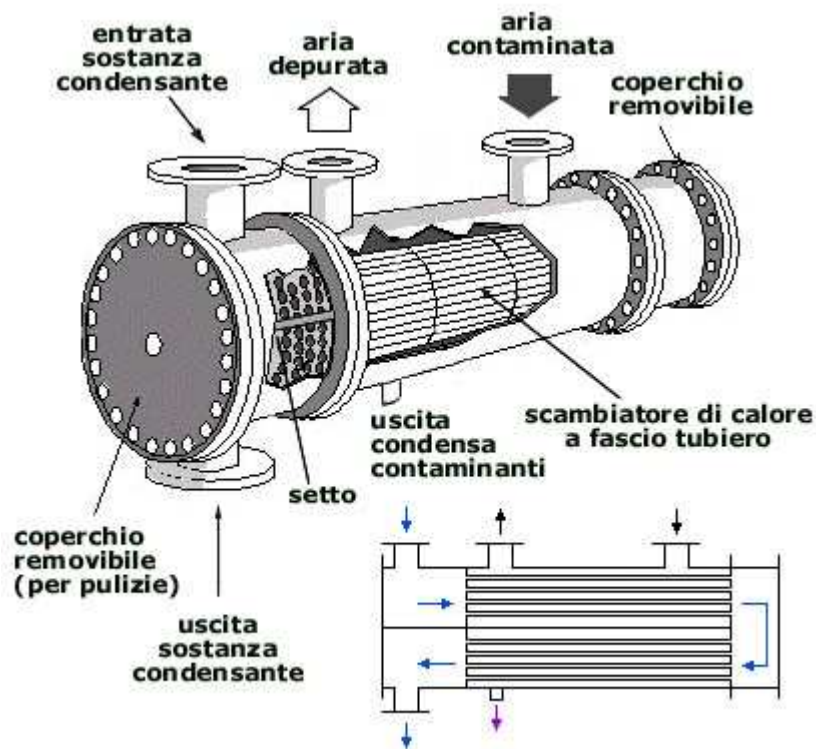


Figura: Condensatore a superficie con scambiatore di calore a fascio tubiero.

I **sistemi di condensazione per refrigerazione** utilizzano refrigeranti compressi ed operano a temperature anche inferiori ai -60°C .

I Clorofluorocarburi (CFC) utilizzati inizialmente sono poi stati abbandonati per la loro azione distruttiva nei confronti dello strato di ozono stratosferico.

I condensatori a refrigerazione sono sempre a superficie, con il liquido refrigerante che scorre all'interno dei tubi in uno scambiatore di calore a fascio tubiero. Questo liquido assorbe il calore dal flusso d'aria da depurare che fluisce all'interno dell'involucro dello scambiatore, riducendo così la temperatura di questo flusso d'aria e causando la condensazione dei vari vapori organici contaminanti. Il calore assorbito fa sì che il liquido refrigerante si trasformi in vapore. A questo punto il vapore refrigerante viene compresso e fatto passare attraverso un altro scambiatore termico dove il calore viene ceduto; il refrigerante riassume così lo stato liquido.

Successivamente il liquido refrigerante compresso fluisce attraverso una valvola di espansione e quindi ritorna al condensatore refrigerativo per ricominciare il ciclo.

A causa della temperatura estremamente bassa dei tubicini dello scambiatore di calore del condensatore, c'è la possibilità che la presenza di umidità nell'aria contaminata porti ad un accumulo di ghiaccio sulle superfici di questi tubi. La presenza del ghiaccio rappresenta un problema in quanto comporta una riduzione nell'efficacia dell'abbattimento degli inquinanti e può causare dei danni a carico del sistema. Per prevenire tutto questo, di solito il flusso d'aria da trattare viene fatto fluire attraverso un altro scambiatore di calore a fascio tubiero mantenuto alla temperatura di circa 4°C . In questo modo si riesce a condensare l'umidità prima che l'aria contaminata passi nel condensatore a refrigerazione.

La **condensazione criogenica** utilizza gas liquefatti come l'azoto molecolare o il biossido di carbonio. Queste sostanze permettono di raggiungere temperature anche inferiori a -160°C e presentano la caratteristica di disperdersi in atmosfera dopo il loro utilizzo. Le temperature estremamente basse consentono un'efficienza operativa anche di molto superiore al 99% e la volatilità dei gas impiegati per attuare la condensazione elimina i problemi di miscelazione che si possono verificare con i già citati condensatori convenzionali.

Nel sistema criogenico più semplice, il gas liquefatto scorre attraverso i tubi in uno scambiatore di calore a fascio tubiero e assorbe il calore del flusso d'aria da trattare che fluisce all'interno del rivestimento dello scambiatore, in questo modo si riduce la temperatura del flusso d'aria e si verifica la condensazione dei contaminanti. Il calore assorbito fa sì che il refrigerante liquefatto passi in stato gassoso, in questa forma il refrigerante viene poi disperso all'aria aperta.

A queste temperature estremamente basse è possibile che il contaminante si accumuli congelato sulle pareti esterne dei tubi. Per impedire che ciò si verifichi, potrebbe rendersi necessario operare con uno scambiatore di calore in parallelo: uno scambiatore scongela mentre l'altro opera la condensazione.

Un'altra soluzione è l'utilizzo di un sistema a doppio scambio di calore. Nel primo scambiatore di calore il gas liquefatto viene utilizzato per raffreddare un fluido per lo scambio termico ad una temperatura appena sopra il punto di congelamento degli inquinanti. Questo fluido fluisce ad un secondo scambiatore di calore dove è utilizzato per condensare i contaminanti e quindi ritorna nel primo scambiatore.

I condensatori criogenici possono essere progettati anche come sistemi a contatto diretto. E' da notare che questi sistemi a miscela risolvono anche il problema del congelamento degli inquinanti dato che non sono presenti estese superfici a temperature estremamente basse.

Il gas liquefatto viene emesso attraverso delle docce spray in una camera aperta dove viene in contatto diretto con il flusso d'aria da trattare. La camera è isolata per mantenere le temperature più basse possibili. Dei dispositivi termici appositi possono essere montati sulle pareti esterne della camera per la rimozione occasionale del ghiaccio accumulato sulle superfici interne.

1. Temperatura	- 30°C per sistemi indiretti lato fluido refrigerante - 60°C per sistemi a scambio diretto
2. coefficiente globale di scambio termico per sistemi indiretti	80 Kcal/mqh $^{\circ}\text{C}$
3. apparecchi aggiuntivi	Scambiatore di riserva, misuratore di ossigeno e misuratori della temperatura
4. Manutenzione	Controllo e taratura degli strumenti di controllo e regolazione e pulizia degli scambiatori dal ghiaccio Sostituzione e/o verifica del fluido refrigerante secondo le indicazioni del costruttore
5. Informazioni aggiuntive	Nessuna

Campi di applicazione e limiti di operatività

Trova applicazione come stadio di pretrattamento dell'aria per evitare sovraccarichi del dispositivo finale, in particolare nel caso della tecnica di adsorbimento; infatti la condensazione abbassa la temperatura del gas da trattare, favorendo così il successivo processo di adsorbimento. Può anche essere utilizzata per recuperare i gas strippati dai letti adsorbenti, anche se le efficienze di separazione non sono mai elevate e per depurare efficacemente è necessario prevedere ulteriori stadi di trattamento.

In generale la condensazione è più adatta ad essere utilizzata per trattare effluenti che contengono un solo tipo di inquinante e nelle applicazioni nelle quali è conveniente recuperare il solvente a causa dei costi specifici elevati. La tecnica descritta nella presente relazione attualmente risulta applicata in un numero limitato di casi, per portate d'aria molto basse ($< 500 \text{ Nmc/h}$), ad esempio, a valle di reattori chimici dell'industria farmaceutica.

Il limite di questi impianti sta in generale nel fatto che l'umidità dell'aria tende a congelare sulle superfici fredde riducendo nel tempo l'efficienza di scambio termico e causando così un notevole dispendio di energia.

Attualmente la condensazione viene inserita a valle delle camere di lavaggio, come parte integrante del sistema. Si tratta di impianti ermetici che possono raggiungere notevoli dimensioni, e all'interno dei quali l'umidità dell'aria è pressoché assente evitando così il problema della solidificazione di ghiaccio sulle pareti di scambio termico.

Impiego per abbattimento COV provenienti da:

- operazioni di stoccaggio e movimentazione solventi
- operazioni di resinatura, spalmatura e adesivizzazione su supporto solido
- operazioni per produrre mastici, inchiostri, resine, prodotti in solvente, prodotti farmaceutici e chimici con uso di COV
- operazioni di sgrassaggio metalli con solventi e lavaggio tessuti pelli con solventi
- operazioni di finitura di pelli con prodotti in fase solvente
- operazioni con emissioni di COV non espressamente specificate

Efficienza di abbattimento

L'efficienza generale dei sistemi a condensazione dipende essenzialmente dalla temperatura operativa, ma in genere è superiore al 90%, in alcuni casi anche al 99%.

Il controllo dell'efficienza dipende dalla strumentazione di cui è dotato il sistema per controllare i parametri che la influenzano.

La maggior parte dei condensatori a refrigerazione e dei sistemi criogenici ha una strumentazione di controllo adeguata, mentre i sistemi più semplici possono avere, invece, una strumentazione limitata e vanno gestiti mediante una attenta programmazione dei controlli.

In generale, oltre alla valutazione della concentrazione di inquinanti in uscita, dovrebbero essere valutati tutti i principali parametri relazionati al rendimento del sistema per vedere se ci sono degli scostamenti dai valori di base, cosa che potrebbe indicare una diminuzione nell'efficienza della raccolta dei contaminanti.

Per controllare la concentrazione dei vapori organici presenti nel flusso d'aria depurato all'uscita possono essere usati analizzatori appositi, tenendo conto sia delle condizioni di prelievo dei campioni analizzati che dell'integrità del sistema di campionamento; devono essere considerate anche le frequenze e le procedure di calibrazione e manutenzioni dello strumento.

Un ottimo indicatore del rendimento di questi sistemi è la temperatura del flusso d'aria trattato. Dato che la concentrazione in uscita è proporzionale alla pressione di vapore a quella temperatura, una temperatura più alta della norma indica una diminuzione nell'efficienza di raccolta (infatti se la temperatura è maggiore allora i vapori tendono a condensarsi di meno e permangono nelle emissioni).

Un graduale incremento nel tempo della temperatura in uscita si verifica spesso se sulle superfici dello scambiatore di calore vanno accumulandosi ghiaccio o composti organici ghiacciati. Tutte queste incrostazioni devono essere periodicamente eliminate per ripristinare il normale scambio termico.

Un indicatore indiretto del rendimento del sistema è anche la diminuzione della differenza di temperatura fra il punto di entrata e quello di uscita della sostanza raffreddante: sta ad indicare una riduzione nello scambio di calore, cosa che riduce l'efficienza di abbattimento degli inquinanti.

Il controllo periodico della portata del refrigerante è opportuno in quanto una sua riduzione determina una minore efficienza dell'impianto.

Se si è individuata una diminuzione della portata del flusso d'aria da trattare è possibile che ci siano delle fughe e vi è una diminuzione nella raccolta dei contaminanti. Da notare, comunque, che le basse portate possono anche essere il risultato della formazione di ghiaccio o dell'accumulo di composti organici ghiacciati all'interno del condensatore. Queste incrostazioni, oltre a limitare gli scambi termici, impediscono fisicamente l'afflusso dell'aria all'interno.

E' importante anche un attento controllo delle diverse parti della struttura: le parti più sollecitate possono essere soggette ad erosione o a incrostazioni, e particolarmente sensibili sono gli ugelli dei diffusori dei condensatori a miscela. Una diminuzione della temperatura in uscita può indicare che c'è stata una corrosione a carico degli ugelli e quindi una maggiore portata del liquido raffreddante.

Un aumento della temperatura in uscita può indicare invece che vi è un intasamento e che c'è una portata minore.

Una particolare attenzione deve essere riposta anche agli scambiatori di calore in quanto in alcune particolari applicazioni industriali possono essere soggetti ad intasamento per l'accumulo del particolato aerodisperso. In questo caso sono di fondamentale importanza le periodiche operazioni di manutenzione ordinaria e di pulizia.

Costi di investimento e di esercizio

Gli impianti descritti sono largamente utilizzati inseriti a valle di sistemi che prevedono un recupero di solvente (lavametalli, reattori di sintesi, ecc): in questa applicazione il loro costo di investimento non è estraibile dal costo complessivo del dispositivo.

In generale si tratta comunque di costi elevati anche a causa della necessaria strumentazione accessoria per il controllo dei parametri funzionali.

I costi di esercizio sono anch'essi elevati a causa del contributo energetico, dei costi specifici dei fluidi refrigeranti e delle precauzioni che richiede la loro gestione. Il sistema in generale richiede una attenta e puntuale manutenzione e un controllo pressoché costante.

Vantaggi e svantaggi nell'utilizzo, anche in termini di impatti sulle altre componenti ambientali

Il vantaggio più evidente consiste nella possibilità di recuperare il solvente separato dall'aria inquinata; il principale svantaggio consiste nella necessità di gestire il fluido refrigerante e nei costi energetici.

Fonti:

"Indagine, nei processi di verniciatura e di pulizia delle superfici, delle potenzialità di riduzione fornite dall'applicazione della direttiva comunitaria sulla limitazione dell'uso di solventi in alcune lavorazioni industriali: indagine sugli impianti di abbattimento dei solventi" Ricerca realizzata da: Ambiente Italia srl, istituto di ricerche e coordinata da ENEA, Centro Ricerche Casaccia Ambiente, Divisione Caratterizzazione dell'Ambiente e del Territorio, 2002

"L'aria e l'azienda" W. Formenton, Associazione artigiani della provincia di Vicenza, 1989

Nota: i riquadri a fondo grigio riportano le indicazioni contenute nella D.G.R. Lombardia 15/12/2000, n° 7/2663