

Biofiltrazione di emissioni gassose contaminate da sostanze organiche volatili

Prof. Attilio Converti, Dott. Mario Zilli, Ing. Simone Cascioli, Prof. Emilio Palazzi (Dipartimento di Ingegneria Chimica e di Processo "G.B. Bonino", Università di Genova)

Sommario

La biofiltrazione è una tecnica di controllo dell'inquinamento atmosferico impiegata per la rimozione degli odori e delle sostanze organiche volatili. Un confronto con altre tecniche biologiche mostra come i biofiltri si caratterizzino per la loro semplicità di operazione e per un più vasto campo di impiego, grazie ai minor costi di investimento ed operativi. Viene fornita una panoramica delle applicazioni della biofiltrazione da cui risulta che l'efficienza di rimozione supera spesso il 90%. La biofiltrazione è una tecnica più economica rispetto ad altre tecniche tradizionali di trattamento, quali incenerimento e adsorbimento, in particolare per il trattamento di grandi volumi di aria contenenti basse concentrazioni di inquinanti facilmente biodegradabili. A titolo di esempio vengono presentati i risultati ottenuti per il trattamento di emissioni gassose contenenti toluene e stirene.

Introduzione

La biofiltrazione è la rimozione di inquinanti attuata da microrganismi aerobi immobilizzati in un mezzo solido poroso. In un biofiltro, l'aria inquinata passa attraverso un materiale di riempimento biologicamente attivo, ove gli inquinanti sono degradati da microrganismi e trasformati in prodotti innocui, quali acqua, anidride carbonica e biomassa. Dato che questi inquinanti sono usati come unica fonte di carbonio ed energia, è evidente come la biofiltrazione sia limitata ai gas non tossici e facilmente biodegradabili.

Nei primi lavori, che risalgono alla fine degli anni '50, furono impiegati letti di terra per il trattamento di gas maleodoranti provenienti da impianti di depurazione delle acque reflue e dei fanghi, da impianti di compostaggio e da inceneritori (1, 2). Nel 1991 i biofiltri ed i letti di terra usati per il controllo di emissioni maleodoranti erano 50 negli USA, più di 500 in Germania ed Olanda e poche unità nel resto d'Europa (1). In Giappone le installazioni passarono da 40 negli anni '80 a 90 nel decennio successivo (3). Dall'inizio degli anni '80 la biofiltrazione viene sempre più impiegata nella depurazione di emissioni. Il numero di applicazioni è notevolmente aumentato in conseguenza: a) di una maggior conoscenza dei processi di biodegradazione; b) dell'isolamento, della selezione e della costruzione di batteri capaci di utilizzare composti recalcitranti; c) di un miglior controllo delle condizioni operative; d) del miglioramento delle tecniche di costruzione dei biofiltri; e) della crescente attenzione alla qualità dell'ambiente; e f) degli standard sempre più rigorosi delle emissioni.

I biofiltri

I bioreattori impiegati per il trattamento di gas inquinati possono essere distinti fra quelli in cui le cellule sono liberamente sospese nella fase liquida (bioscrubber) e quelli in cui le cellule risultano immobilizzate dentro di un materiale inerte (filtri biologici a percolamento e biofiltri). Al contrario dei bioscrubber e dei filtri biologici a percolamento, nei quali la fase liquida si muove in continuazione, nei biofiltri (Figura 1) essa è stazionaria. Come illustrato nella Figura 1, il processo di biofiltrazione prevede una serie di pretrattamenti: a) la rimozione di particelle per prevenire ostruzioni; b) l'equalizzazione del carico nel caso la concentrazione sia molto variabile; c) il controllo della temperatura; e d) il controllo del grado di umidità.

I bioscrubber ed i filtri biologici a percolazione vengono usati principalmente nel caso di gas inquinati da composti idrosolubili, mentre i biofiltri, per via della vasta area superficiale a disposizione del trasferimento di massa e della loro elevata selettività di reazione, sono più indicati per il trattamento di aria inquinata da composti poco solubili in acqua, diluiti (concentrazione <1000 ppm) e facilmente biodegradabili.

I biofiltri possono essere impiegati in una ampia varietà di applicazioni, in quanto si caratterizzano per una struttura particolarmente semplice, per una gran facilità e stabilità di funzionamento, bassi costi operativi e di investimento ed una ridotta sensibilità alle fluttuazioni della composizione del gas (4).

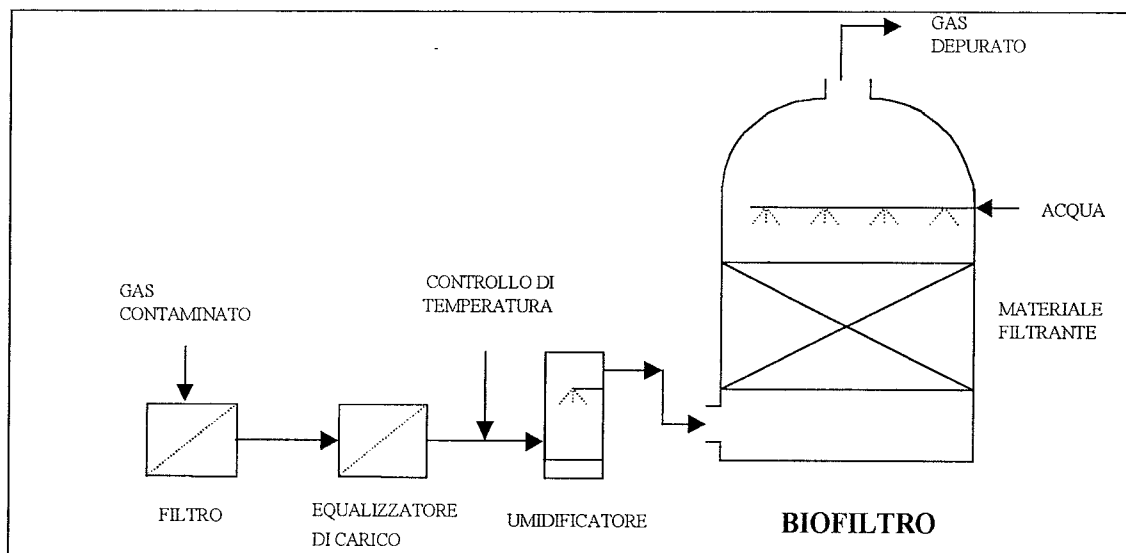


Figura 1. Schema di un biofiltro coperto ad uno stadio.

Parametri di processo

La biofiltrazione è un processo complesso che include trasferimento di massa e reazione ed è influenzato dalla fluidodinamica del flusso gassoso. Per garantire un ambiente il più possibile prossimo alle condizioni ottimali per i microrganismi è necessario controllare un certo numero di parametri.

La scelta del materiale filtrante è fondamentale per mantenere l'efficienza del biofiltro ed è condizionata dalle necessità di a) minimizzare il volume di reazione, b) ottimizzare l'efficienza di rimozione e c) minimizzare il consumo di energia ed i costi di manutenzione. In particolare, il materiale deve essere in grado di garantire la stabilità del letto e condizioni di vita ottimali per i microrganismi e costituire, al tempo stesso, una riserva di nutrienti ed umidità ed un supporto meccanico. I materiali più usati (compost, torba, terra, rami di erice e terre umiche) offrono una vasta area superficiale specifica (da 300 a 1000 m²), un'efficace ritenzione d'acqua e di nutrienti ed una particolare capacità di immobilizzazione cellulare. Con l'obiettivo di contenere le perdite di carico, ridurre l'energia necessaria per spingere il gas attraverso il filtro e prevenire l'invecchiamento e la rottura del letto, nonché la formazione di zone non omogenee, questi supporti sono generalmente miscelati a materiali inerti, quali sfere di polistirene, particelle di lava, palline di vetro, argilla porosa e materiali ceramici.

Il buon funzionamento di un biofiltro dipende dal contenuto di umidità del letto, che è di fatto il parametro più critico. Il valore ottimale di umidità in un biofiltro varia fra il 40 ed il 60% in peso, a seconda del materiale (5). La carenza di umidità può provocare a) rottura del letto nella zona di ingresso, b) diminuzione dell'attività microbica, c) formazione di canali preferenziali, d) contrazione del letto e e) aumento dei costi energetici. Un eccesso di umidità può a) causare occlusione dei pori, riducendo il tempo di permanenza e l'efficienza, b) ridurre l'interfaccia gas-acqua, con problemi di trasferimento dell'ossigeno e c) diminuire il drenaggio dei componenti. Per garantire condizioni ideali per i microrganismi (grado di saturazione > 95%) è necessario umidificare in continuazione il flusso gassoso o direttamente il supporto con aspersori superficiali, atomizzatori, ecc.

Nella biofiltrazione l'attività microbica è massima per valori di pH compresi fra 6 e 8. Poiché la fase liquida è stazionaria, l'ossidazione di inquinanti solforati, azotati ed alogenati porta alla formazione di acidi che tendono ad accumularsi nel supporto e ridurre l'attività microbica, compromettendo l'efficienza del sistema. In questi casi è necessario aggiungere al supporto sostanze tamponanti, quali calce, dolomite, calcare, fosfati, ecc.

Anche la temperatura influenza la crescita microbica. Poiché i microrganismi aerobi normalmente presenti nei biofiltri sono mesofili, questo parametro deve essere controllato fra 20 e 40°C, con valore ottimale di 35°C, mediante pre-raffreddamento del gas, iniezione d'acqua o umidificazione del materiale.

Principi della biofiltrazione

Secondo il modello di Ottengraf (6), basato sui principi della catalisi eterogenea, le particelle di supporto sono ricoperte da un biofilm. A causa dell'attività microbica aerobica, si forma un gradiente di concentrazione responsabile del trasferimento continuo dell'inquinante e dell'ossigeno dalla fase gasosa a quella liquida. I prodotti della

biodegradazione (CO₂ ed acqua) diffondono in direzione opposta, sono trascinati dal flusso e quindi espulsi dal reattore. Grazie alle ridotte dimensioni delle particelle ed alla bassa solubilità degli inquinanti, la resistenza al trasferimento di massa nella fase gassosa è pressoché nulla e pertanto le concentrazioni degli inquinanti all'interfaccia gas-biofilm possono considerarsi in equilibrio e correlarsi mediante la legge di Henry.

Supponendo che il flusso gassoso sia del tipo "plug flow" e che la degradazione avvenga secondo l'equazione di Monod (7), sono possibili due diverse situazioni: a) cinetiche di ordine zero, in cui il biofilm è pienamente attivo ed il biofiltro funziona alla sua massima capacità (reazione limitante al di sopra di una concentrazione critica, C_{crit}) e cinetiche di ordine uno, in cui solo la parte più esterna del biofilm è attiva (diffusione limitante al di sotto di C_{crit}). Un gran numero di lavori dimostrano che cinetiche di ordine zero sono tipiche della biodegradazione di diversi composti volatili, anche a concentrazioni molto basse (6, 8, 9).

Applicazioni della biofiltrazione

Si utilizzano, specialmente in Europa, biofiltri di dimensioni variabili (area compresa fra 10 e 2.000 m²) per la rimozione di una gran varietà di miscele di composti presenti nelle emissioni di varie industrie, i cui flussi (1.000-150.000 m³/h) e concentrazioni (generalmente inferiori a 1.000 ppm) sono ugualmente molto variabili. Inoltre, persino le diverse classi di inquinanti ed i diversi inquinanti afferenti alla medesima classe si caratterizzano per una diversa biodegradabilità (8, 10-13). I microrganismi idonei alla rimozione di composti facilmente biodegradabili sono generalmente presenti nel materiale filtrante, mentre per i composti più recalcitranti sono necessari inoculo ed arricchimento con specie selezionate. I risultati ottenuti in scala pilota ed industriale (Tabella 1) mostrano che l'efficienza di rimozione è spesso superiore al 90% (6, 10, 13-18).

Considerazioni economiche

Al confronto con altre tecniche di trattamento, la biofiltrazione è senza dubbio la più economica grazie a: a) minori costi operativi, b) limitata formazione di sottoprodotti, c) facile start-up, d) stabilità operativa, e) moderata temperatura, f) basso costo dei materiali, g) semplici tecniche costruttive, h) semplice sistema di controllo e i) limitati consumi energetici. Rispetto al bioassorbimento, all'assorbimento chimico, all'adsorbimento e all'ozonizzazione, la biofiltrazione consente di risparmiare, a seconda della composizione del gas, rispettivamente il 15-30%, 45-70%, 50-75% e 80% dei costi totali (18-20).

Applicazioni	U_R (m/h)	Q_R (m ³ /h)	Inquinanti	C_{p0} (mg/m ³)	τ (s)	N di stadi	η (%)	Rif.	
Industria alimentare	60-550	9000-120000 90-200	Odore	7500-10 ⁸	12-90	0.6-3	70-99	10,13,14	
			VOC	o.u.	25-60	2	10	10	
			Etanolo					80-100	10,14
			Metano	500-4000				10	10
			Alifatici	700				10-30	10
Etilacetato	200				80-90	10			
Industria petrolchimica	100	8,5-222	BTEX	3-70		1-2	75-95	10,14,18	
			H ₂ S	240		1	90	14	
		8,5-70	Acrilonitrile	16-300					
			Alcoli	60	45-360	1	≤50	18	
			Metano				≤5		
			>C5				40-90		
Altre industrie	65	30000	Odore	10 ⁸ o.u.	14	2	45-95	13,14	
			NH ₃	1.5				13	
			Nicotina	3.5					
			VOC	400-25000	30-108	2-3	40-90	13,14	
			Etanolo		8	1	98	13	
		11700-140000 30000 40000	Benzene	9	30	1	80	13	
			Esteri	1200		2	90	14	
Impianti di trattamento	95-200	10000-30000	Odore	1.3·10 ⁸ o.u.	29	2	75-95	13,14,15	
			H ₂ S	4.7-300		1-2	80-96	13,14,15	
			Acetone	8		2	90-95	13	
			NH ₃	0,15		2	45-60	15	
Impianti di compostaggio	100	154000-240000 16000-22000	Odore		30-47	4	>90	16	
			Odore	45-230 (C)	40-60	1	93-96	6	
			Odore	1.3·10 ⁸ o.u.		2	95	14	
Attività artigianali	200 70		VOC	250		1	50	14	
			H ₂ S	4000 o.u.		2	90	14	
			Stirene	60-600	15-60	1	95	17	

VOC = Composti organici volatili; BTEX = Miscele di benzene, toluene e xileni; o.u. = unit di odore.

Trattamenti di vapori di toluene e stirene

È stato condotto uno studio sperimentale a 20°C in due biofiltri di 0,5 m di altezza, riempiti con una miscela di torba e palline di vetro, impiegando due diversi ceppi di *Acinetobacter sp.* NCIMB 9689 e *Rhodococcus rhodochrous AL*

NCIMB 1325, rispettivamente per la degradazione del toluene e dello stirene. Al fine di determinare la capacità di eliminazione del sistema nei riguardi del toluene, sono state condotte prove di rimozione continua variando la velocità superficiale fra 17.8 e 255 m h⁻¹ e la concentrazione del toluene nel gas fra 0.1 e 4.0 g m⁻³. Il soddisfacente grado di conversione medio (0.65) dimostra la capacità della biomassa di adattarsi a variazioni della concentrazione e di sopportare elevate concentrazioni di toluene. La biofiltrazione di vapori di stirene è stata condotta in modo analogo, variando la velocità superficiale fra 61.2 e 245 m h⁻¹ e la concentrazione entro il range osservato nelle emissioni industriali (0.05-1.2 g m⁻³).

I risultati ottenuti hanno evidenziato come a) il grado di conversione del biofiltro decresca con l'aumento sia della velocità superficiale che della concentrazione del gas e b) la capacità da parte di *Acinetobacter sp.* di degradare il toluene sia maggiore di quella di *R. rhodochrous* di utilizzare lo stirene.

Le buone prestazioni del biofiltro sono evidenti in Fig. 2, da cui può evincersi come la capacità di rimozione di entrambi gli inquinanti aumenti regolarmente con il carico. In accordo con il modello di Ottengraf, si osserva un lineare incremento della capacità di eliminazione (diffusione limitante) sino a valori del carico di circa 100 g m⁻³ h⁻¹ per il toluene e 50 g m⁻³ h⁻¹ per lo stirene. La capacità di eliminazione aumenta più lentamente a carichi maggiori, sino ad un massimo (reazione limitante) di 230-240 g m⁻³ supporto h⁻¹ per il toluene e di 63 g m⁻³ supporto h⁻¹ per lo stirene, corrispondenti a concentrazioni di 4.0 e 0.8 g m⁻³ e velocità superficiali di 127.5 e 245.0 m h⁻¹.

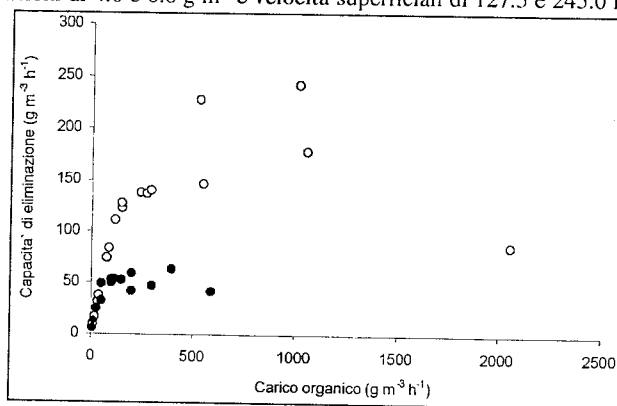


Figura 2. Capacità di eliminazione in funzione del carico organico. Toluene: (○); Stirene (●).

Bibliografia

- [1] Leson G & Winer AM (1991) J. Air Waste Manage. Assoc. 41, 1045
- [2] Kampbell DH, Wilson JT, Read HW & Stocksdale TT (1987) J. Air Pollut. Control. Assoc. 37, 1236
- [3] Cernuschi S & Torretta V (1996) Ingegneria Ambientale 25, 248
- [4] Weber FJ & Hartmans S. In: Dragt AJ & van Ham J, eds. (1992) Biotechniques for air pollution abatement and odour control policies, Amsterdam, Elsevier, p. 125
- [5] Eitner E (1989) VDI-Berichte 735, 191
- [6] Ottengraf SPP. In: Rehm HJ & Reed G, eds. (1986) Biotechnology, Weinheim, VCH, Vol. 8, p. 425
- [7] Monod J (1949) Ann. Rev. Microbiol. 3, 371
- [8] Ottengraf SPP, Meesters JJP, Van Den Oever, AHC & Rozema HR (1986) Bioproc. Eng. 1, 61
- [9] Ottengraf SPP & Van Den Oever A (1986) Biotechnol. Bioeng. 19, 1411
- [10] Swanson WJ & Locher RC (1997) J. Environ. Eng. 123, 538
- [11] Bohn HL (1992) Chem. Eng. Progr. 88(4), 34
- [12] Verein Deutscher Ingenieure (1991) VDI 3477, VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6, p. 1
- [13] Ottengraf SPP & Diks RMM. In: Dragt AJ & van Ham J, eds. (1992) Biotechniques for air pollution abatement and odour control policies, Amsterdam, Elsevier, p. 17
- [14] Dragt AJ & Ottengraf SPP (1987) Conf. on Advanced Technology and Biotechnology for the Environmental Protection, Siracusa, SIBA-ISER, p. 243
- [15] Pescari M & Pizzirani V (1997) "Impianto biologico trattamento odori del depuratore acque reflue città di Bologna", Seminario di studio, Università di Pisa, 23 maggio 1997
- [16] Trentini I & Vismara R (1998) Biologi Italiani, 28(1), 16
- [17] Togna AP & Frish S (1993) 86th Annual Meeting of the Air & Waste Manag. Assoc., Denver, CO
- [18] Leson G & Smith BJ (1997) J. Environ. Eng. 123, 556
- [19] Pearson CC, Phillips VR, Green G & Scottford IM. In: Dragt AJ & van Ham J, eds. (1992) Biotechniques for air pollution abatement and odour control policies, Amsterdam, Elsevier, p. 245
- [20] Blitz JL & Elvidge AF (1992) Environmental Protection Bulletin, 16, 3