

操作績效自我評估管理制度手冊

生物濾床

撰稿者：盧重興 教授
白曠綾 教授
張國財 博士
許世杰

補助單位：科學工業園區管理局

執行單位：國立中興大學環境工程學系

國立交通大學環境工程研究所

中華民國九十二年九月二日第一版

目錄

| | |
|-------------------------|----|
| 1-1 生物濾床基本原理 | 1 |
| 1-2 評估生物濾床之最佳操作參數 | 4 |
| 1-3 常見之操作問題與解決方法 | 8 |
| 1-3.1 常見之操作問題 | 8 |
| 1-3.2 問題改善方法 | 10 |
| 1-4 生物濾床操作紀錄維護項目 | 13 |
| 1-5 生物濾床操作績效自我評估 | 18 |
| 1-6 參考文獻..... | 20 |

表目錄

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 表 1.1 | 化合物生物分解能力分類表 | 2 |
| 表 1.2 | 生物濾床常見問題與操作改善一覽表 | 12 |
| 表 1.3 | 生物濾床基本資料表..... | 15 |
| 表 1.4 | 生物濾床保養維護紀錄項目 | 16 |
| 表 1.5 | 生物濾床操作紀錄表..... | 17 |
| 表 1.6 | 生物濾床操作績效自我評估表 | 19 |

圖目錄

| | | |
|-------|---------------|---|
| 圖 1.1 | 生物濾床處理流程..... | 3 |
|-------|---------------|---|

1-1 生物濾床基本原理

生物處理法可分為固定式及懸浮式兩種，生物濾床法(biofilter)、生物滴濾塔法(biotrickling filter)屬於前者，生物洗滌塔法(bioscrubber)則屬於後者。固定式生物處理法主要原理是利用附著在介質上的生物膜，將揮發性有機物氧化，再將無二次污染反應生成物(如水及少量二氧化碳、硝酸根...等)排出，因此，生物處理法的適用對象，是以可被微生物作用分解氧化的 VOC_S 為主，處理效率則決定於污染物的傳輸效率、氧氣的傳輸效率及生化反應速率等三大因素。目前已知可以生物處理的污染物包括：碳氫氧組成的各類有機物、簡單有機硫化物、有機氮化物、硫化氫及氨氣等無機類。生物對有機化合物分解能力，整理如表 1.1 所示^{[1][2]}，而生物處理法對於濃度低、廢氣量大之 VOC_S 廢氣處理特別有效，且較洗滌法、吸收法及焚化法經濟，亦無二次污染問題，但一般工業廢氣並非連續排放，系統可能會遭遇工廠停機而無法供給碳源給微生物合成新細胞，因此，可考慮緩衝系統來解決此問題。

生物濾床法為一種固定生物膜(fixed biofilm)處理法，其作用主要是讓廢氣通過多孔隙濾材，利用附著在濾材表面的微生物去除廢氣中的 VOC_S，並且透過控制濾床的溫度、溼度、pH 值等，讓微生物發揮最大活性，加速反應進行，提升濾床效率，其典型流程見圖 1.1。

表 1.1 化合物生物分解能力分類表^{[1][2]}

| 生物分解能力 | 化 合 物 |
|--------|--|
| 極易 | 芳香族化合物：甲苯、二甲苯 含氧化合物：醇類、醋酸類、酮類 含氮化合物：胺類、氮鹽類 |
| 高 | 脂肪族化合物：正己烷 芳香族化合物：苯、苯乙烯 含氧化合物：酚類 含硫化合物：硫醇、二硫化碳、硫氰酸鹽 含氮化合物：胺類 |
| 中 | 脂肪族化合物：甲烷、正戊烷、環己烷 含氧化合物：醚類 含氯化合物：氯酚、二氯甲烷、三氯乙烷 |
| 低 | 含氯化合物：二氯乙烯、三氯乙烯、醛類 |
| 可分解無機物 | H ₂ S、SO ₂ 、NO _x 、NH ₃ |

生物濾床原理為含 VOC_s 之廢氣通過增溼機後進入生物濾床時，氣相中的 VOC_s 與氧氣溶在一起後進入生物膜表面，並利用擴散原理均勻分佈至生物膜內，此時，微生物可將 VOC_s 利用，進而分解成二氧化碳與水，分解後之產物(如：二氧化碳)會隨著氣流離開系統，滲出水則自由滴落至底部而排除或再處理及再循環。濾料為維持微生物存活的關鍵之一，須具備表面積大且孔隙度大、氣體流通散佈性良好、親水性及保溼性佳、不易密化、抗壓強度大，並能提供營養源(如 C、N、P、K...等)和微生物生存的環境。一般常見的生物濾床

為土壤濾床與堆肥濾床兩種，其成分大致為堆肥、泥碳土、牛糞或雞糞培養土與稻穀、蛇煤屑、樹皮及保麗龍以適當的比例混合而成。

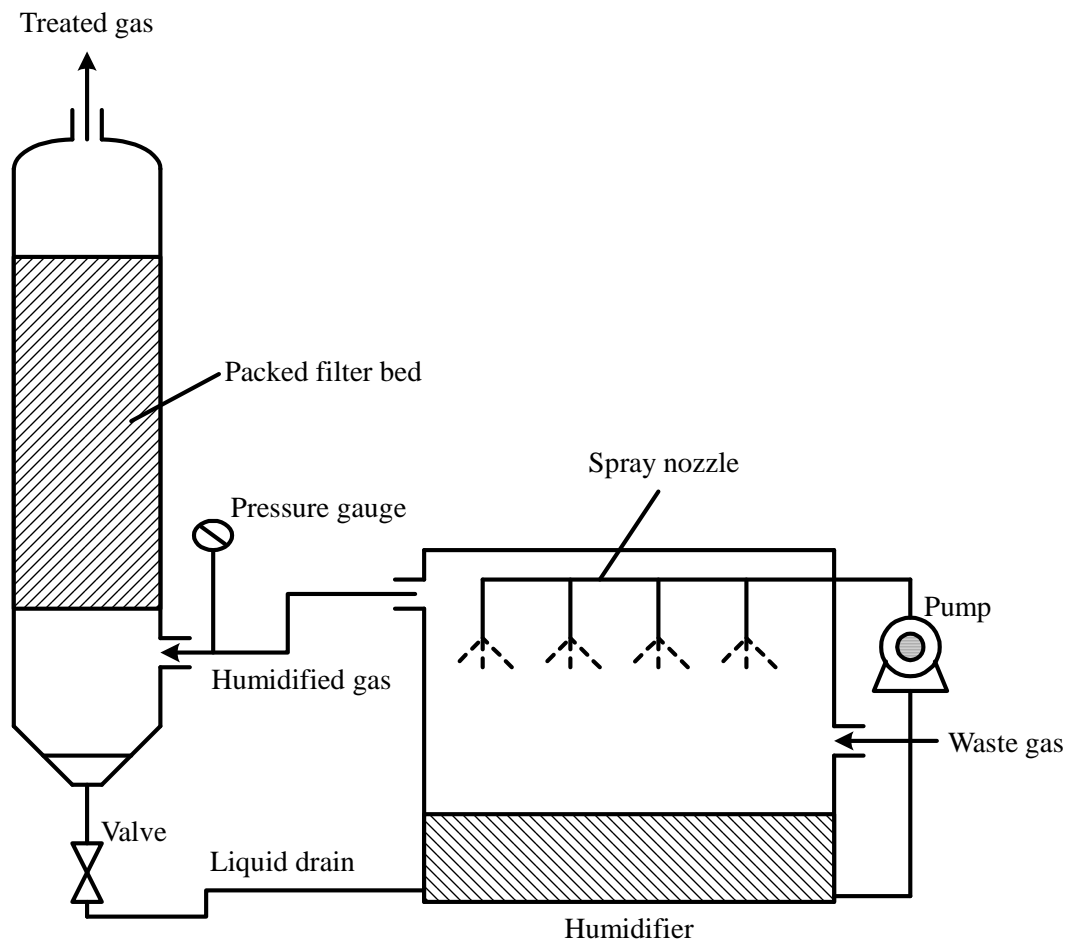


圖 1.1 生物濾床處理流程^[3]

1-2 評估生物濾床之最佳操作參數

生物處理法處理含 VOC_S 廢氣時，設計、操作及環境因子扮演著非常重要角色，以下分別就廢氣種類、營養源與毒性、溫度、水分含量、pH 值、氣流流向、填充介質的選擇及微生物菌相等幾項因子加以探討^[4]。

1. 廢氣種類

廢氣生物處理法處理 VOC_S 廢氣時，需依 VOC_S 廢氣生物分解性、單一或混合多種進流基質等不同變化，而作處理方式之選擇或菌種馴養等。早期廢氣生物處理法研究多以去除單一進流臭味物質(如 H₂S)為主。

2. 營養源與毒性

廢氣生物處理法是以廢氣之 VOC_S 作為碳源，因此，對微生物的毒性效應與 VOC_S 濃度及種類有關，通常低濃度 VOC_S 的毒性效應可以被忽略，但是特殊 VOC_S 種類，例如含氯有機化合物、甲醛、硫醇類化合物...等，其微量毒性即會影響微生物生長。例如以泥炭土堆肥作為生物濾床介質，處理含乙酸乙酯及甲苯混合廢氣，微生物所需 N、P、K 與微量元素等營養成分完全由泥炭土堆肥所供給^[7]。因廢氣生物處理法乃在常溫常壓下進行生物分解，除微量元素應供給之外，碳：氮：磷的比值至少也需 100：5：1^[5]。

3. 溫度

一般而言，生物濾床中好氧微生物以嗜中溫性(mesophilic)細菌為主，所以最適合的操作溫度為 25 至 35°C^{[6][7]}。以化學反應的觀點而言，理論上提高反應器溫度可以增加反應和擴散速率，但是 VOC_s 的水中溶解度與在濾床介質中的吸收能力會降低，氣相中的 VOC_s 分配到生物膜的機率亦受到阻礙^{[1][8]}，因此，建議生物濾床的操作溫度在 20 至 35°C 之間，最好不要超過 40°C，否則會降低微生物的活性^[9]。

4.水分含量

生物濾床中填充介質的水分含量為生物濾床操作的重要因素，因為生物膜附著介質之含水率，除影響微生物活性外，亦直接影響進流 VOC_s 廢氣及氧氣的傳輸效果^[6]。生物滴濾塔因其連續噴灑水分，保持滴濾床塔溼度在 95 % 以上，因此，水分與營養源可以提供濾床內微生物生長所必需的物質，當濾床中的水分含量太高時，會有下列狀況產生：

- (1)濾床壓差升高，過濾孔隙開始積水而影響通過氣流的穩定性。
- (2)氧的傳輸問題會導致單位生物膜體積上的氣/液接觸面積減少。
- (3)厭氧層提高並助長臭味生成與降低分解率。
- (4)營養源沖洗介質上的生物膜，容易造成生物膜脫落。
- (5)產生多量且低 pH 值滲出水，須再處理。

濾床中的水分含量太低時，會有下列狀況產生：

- (1)降低微生物分解 VOC_s 的活性。
- (2)介質緊縮而使得材質裂化與縮小停留時間。

(3)介質上生物膜因乾燥而衰減，無法因再溼潤而在短時間恢復原來活性程度。

5. pH 值

對大多數好氧微生物而言，最佳生物濾床操作 pH 值在 7 至 8 之間，但是生物濾床並無循環水洗系統^[1]，因此，對有機填充介質本身所產生酸性物與微生物分解污染物時，所產生之酸性中間代謝產物無法有效排除，特別是 H₂S、NH₃、含氮有機化合物及含氯有機化合物等廢氣，更容易產生硫酸、硝酸、鹽酸等酸性中間代謝產物，而使得 pH 值下降，此時，添加石灰、牡蠣殼碎屑和泥灰土調整 pH 值，可增加 VOC_S 廢氣生物處理法中的緩衝能力^[7]。太低的 pH 值和硫酸鹽的累積會抑制微生物的生長，進而影響生物濾床去除 VOC_S 廢氣效率。

6. 氣流流向

除了生物洗滌塔廢氣流向與噴灑水流反向外，生物濾床法與生物滴濾床法的廢氣流向可以與噴灑水流反向或同向。若廢氣流向與噴灑水流反向者，生物滴濾塔的頂端可以不必覆蓋；但若氣流與噴灑水流同向時，則需要使用防腐材質將生物滴濾塔的頂端密閉，因此，造價會較前者高^[8]。

7. 填充介質的選擇

填充介質，在生物處理設備的設計與操作中，有著重要的地位，其性質必須具備下列幾點：

(1)提供最佳環境—營養源、水分、碳源等的提供，必須沒有限制，

pH 值也必須維持中性。

- (2)最大比表面積—指最大接觸面積或單位介質體積所含反應位置數目必須最大。
- (3)結構完整—介質必須能夠承受因壓差的增加與縮短氣體停留時間所帶來的環境擠壓。
- (4)維持高水分—因為水分是維持微生物活性不可欠缺因子。
- (5)高孔隙率—可保持較低逆壓差與氣體停留時間。
- (6)低體積密度—可減少環境擠壓的程度。

8.微生物菌相

處理 VOC_S 廢氣的生物濾床中，主要以異營菌(heterotrophs)為優勢菌種，其中細菌與真菌為最常見菌相^[1]。微生物菌數與菌種分佈，隨著濾床深度而有層化現象，在廢氣進流層的微生物菌數為最多、菌種較少，廢氣出流層菌數最少但菌種較多，以適應低濃度混合基質，生物濾床中優勢菌種只存在於廢氣進流部份的填充介質上，原因在於承受進流負荷變化之衝擊^[10]，因此，針對難分解之化合物(如苯環化合物、含鹵素化合物...等)，若先分離培養優勢特殊菌種，便能達到較高分解效率。

活性污泥為粒狀活性碳生物濾床常用的菌種來源^[1]，因為活性污泥本身已含有各種污染物的分解菌，因此，亦被用來植入堆肥式生物濾床，以減少微生物適應環境所需時間^[10]。

1-3 常見之操作問題與解決方法

1-3.1 常見之操作問題

生物濾床法的適用對象，是以可被微生物作用分解氧化的 VOCs 為主，處理效率則決定於污染物與氧氣的傳輸效率及生物分解速率等三大因素。在可能操作之問題應發生在污染物的傳輸效率及生化反應，而影響上述問題因素包括 1-2 節所述各點，其中部分屬於濾床設計建造時決定為固定參數，如尺寸及濾料介質；其他參數為操作時可以改變的，有溫度、溼度及廢氣流量等，列舉如下：

1. 溫度

溫度是影響好氧之生物反應的必要條件，根據多數的研究指出生物濾床法必須在 25 至 35°C 之間進行。對於半導體產業而言這是非常重要的，因為半導體廠之有機廢氣來源自無塵室，故廢氣溫度一般都只有 21°C 左右，過低的溫度會造成生物反應速率降低，逐漸失去處理能力，或是減低濾床對 VOCs 的最大負荷能力。因此，廢氣溫度的控制是生物濾床法在半導體產業應用上的首先控制參數，唯有將廢氣溫度作有效之控制，才有其他控制參數之討論。

2. 濕度

來自無塵室之廢氣除了溫度低外，亦有較乾燥之狀況，生物濾床中的微生物生長需要一相當之水活性，故透過適當之灑水可以補充維持生物活性所需之水分，又或是利用一增濕裝置將廢氣溼度增加。溼度控制可能問題如下：

當濾床中的水分含量太高時，會有下列狀況產生：

- (1)濾床壓差升高，過濾孔隙開始積水而影響通過氣流的穩定性。
- (2)氧的傳輸問題會導致單位生物膜體積上的氣/液接觸面積減少。
- (3)厭氧層提高並助長臭味生成與降低分解率。
- (4)營養源沖洗介質上的生物膜，容易造成生物膜脫落。
- (5)產生多量且低 pH 值滲出水，須再處理。

濾床中的水分含量太低時，會有下列狀況產生：

- (1)降低微生物分解 VOC_S 的活性。
- (2)介質緊縮而使得材質裂化與縮小停留時間。
- (3)介質上生物膜因乾燥而衰減，無法因再溼潤而在短時間恢復原來活性程度。

3. 營養鹽與毒性

廢氣生物處理法是以廢氣之 VOC_S 作為碳源，因此，對微生物的毒性效應與 VOC_S 濃度及種類有關，通常低濃度 VOC_S 的毒性效應可以被忽略，但是特殊 VOC_S 種類，例如含氯有機化合物、甲醛、硫醇類化合物...等，其微量毒性即會影響微生物生長。因廢氣生物處理法乃在常溫常壓下進行生物分解，除微量元素應供給之外，碳：氮：磷的比值至少也需 100：5：1。文獻中曾探討在低氮源的供應下，生物滴濾塔處理含甲醇、丁醇、甲苯等廢氣處理效果，試驗結果顯示在氮源缺乏下，生物滴濾塔仍可維持良好操作，其原因可能是微生物利用了死亡細胞體中的氮，故適當提供營養鹽給生物濾床，有助於濾床中之微生物增加其活性，維持生物濾床之高去除率。

4.pH 值

對大多數好氧微生物而言，最佳生物濾床操作 pH 值在 7 至 8 之間，但是生物濾床並無循環水洗系統，因此，對有機填充介質本身所產生酸性物與微生物分解污染物時，所產生之酸性中間代謝產物無法有效排除，特別是 H_2S 、 NH_3 、含氮有機化合物及含氯有機化合物等廢氣，更容易產生硫酸、硝酸、鹽酸等酸性中間代謝產物，而使得 pH 值下降，此時，添加石灰、牡蠣殼碎屑和泥灰土調整 pH 值^[7]，可增加 VOC_S 廢氣生物處理法中的緩衝能力。太低的 pH 值和硫酸鹽的累積會抑制微生物的生長，進而影響生物濾床去除 VOC_S 廢氣效率。

5.進流流場

濾床上部空間之流場變化會影響進入濾料層之氣流分佈，不均勻的氣流分佈會導致局部氣流短流情形，使得操作上對實際停留時間的過分高估，無法達到預期的處理效率。當此情形發生時，可以發現不論上述操作參數如何調整皆無法達到預期處理效率，也就是所有情況皆無法改善效率時，此為最後討論操作因子。

造成此一情況發生，可能原因為進流氣流強度與進、出口位置、溼度過高或分佈不均勻等。

1-3.2 問題改善方法

1.增加廢氣溫度

將增濕室之水溫提高或是將直接噴灑入濾床的水溫提高，如此可有效提升濾床之工作溫度，但是考慮異丙醇為主要 VOC_S 成分。其屬

於全溶性 VOCs，當增濕室內溫度提高時可能會引起增濕室內異丙醇分解菌大量生長，造成增濕室內管線阻塞而當機。所以當廢氣溫度過低時，建議由濾床上部進流口處加裝霧化灑水器，將高溫的水直接霧化噴入氣流加濕及加溫。

2.增加濕度

濕度與溫度在控制上是一並考量的，首先考量增加廢氣溫度所需的水量，其餘由舊有之灑水頭控制濾床溼度。操作上首先使霧化灑水頭之水溫提高，使之連續操作，目的使進流氣流確實溫度提高，同時溼度增加，但濾床內仍有舊有的灑水系統，此一系統保留作為營養鹽添加用及溼度不足時由此系統透過自動化控制，當溼度不足時自動開啟水閥補充濾床水分。

3.營養鹽及 pH 值

透過營養鹽的添加可以增加生物之活性，以及增加濾床中微生物對環境變化的容忍程度，且在營養鹽中本研究小組建議之成分包括 pH 值緩衝劑，確保濾床中環境在 pH 值 7.5 至 8.0 之間，避免微生物代謝產生之酸性物質使環境酸化。

4.進、出流口相關位置

當因為進流氣流強度大幅增加時而導致處理效率下降，可考慮改變出流口位置，由現在進、出流口在對邊，改為同側，可以使濾床中之氣流分佈較為均勻。

以上常見問題與操作改善整理如表 1.2 所示。

表 1.2 生物濾床常見問題與操作改善一覽表

| 問題 | 徵兆 | 改善方法 |
|---------|--|---|
| 濾床未啟動 | 經長時間操作後效率仍無明顯變化。 | 降低濾床負荷，待處理效率提昇後再逐步增加濾床負荷。 |
| 啟動困難 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 每次增加濾床負荷後效率回昇緩慢，對進流有機負荷變化適應能力低。 2. 進流廢氣溫、濕度過低。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 添加營養鹽，可以提高生物濾床對進流有機負荷變化的適應能力。 2. 進流廢氣維持溫度在 25 至 30°C 之間，濕度在 85% 以上。 |
| 濾料含水率過高 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 濾床壓差增加。 2. 濾床出流水水量增加，且 pH 值下降。 3. 濾床臭味增加。 4. 廢氣出流濕度較進流高出許多。 5. 濾床呈現泥濘狀。 6. 由自動監測系統得知濾料含水率過高。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 直接減少濾床內之灑水量。 2. 增加灑水次數減少單次灑水量，使濾床含水率穩定。 |
| 溫度過低 | 直接監測濾床上部氣流之溫度，是否低於 25°C。 | 提高增濕器中灑水之溫度。 |
| 濕度不足 | 直接監測濾床上部氣流濕度，是否低於 85%。 | 檢查增濕器是否有被生物膜堵塞灑水頭或循環水馬達的問題。 |
| 翻堆時機 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 壓差上升。 2. 處理效率下降。 | 開啟濾床上蓋將濾料翻堆，檢查濾料情形，是否有結塊、沖刷的情形，以修正濾床灑水量之操作參考。 |

1-4 生物濾床操作紀錄維護項目

本研究小組建議之表格如下表 1.3 至表 1.5 所示，分為生物濾床基本資料表、保養維護紀錄項目表及操作紀錄表三大項，主要目的在建立生物濾床操作之長期資料，以利發現操作狀況及早排除，各項目內容列述如下：

➤ 生物濾床基本資料表

生物濾床基本資料表為紀錄生物濾床之基本資料，包括濕基廢氣量、進流濃度、濾床之尺寸、溫度、濕度、壓差、效率、濾料厚度及翻堆頻率等原設計值，這些設計值可與操作紀錄表之操作值做比較，供操作上之參考。此表應逐月記錄之。

➤ 保養維護紀錄項目表

保養維護紀錄項目表主要在確認生物濾床及其相關設備之可操作性，屬於機械性之維護項目，如風車、管線等...，這些項目需定期檢查，避免發生機械老化、破損及故障等情形，影響整個處理設備之正常運行。

➤ 操作紀錄表

操作紀錄表為生物濾床每日操作時之所需記錄之操作參數，以增進生物濾床的處理效能。風量在與進流濃度可搭配控制生物濾床之有機負荷，若在濾床負荷固定條件下，風量則可調整濾床上部之流場變化，在進、出流口為濾床對邊之情形下，風量應以較小為原則，此外處理風量與停留時間直接相關，因此，風量之增加可能導致處理效能

之降低，正常運作情形下，處理風量應維持定值。

增濕室水溫及灑水量共同控制進入濾床廢氣之溫、濕度，在廢氣進入濾床之前預先增濕、加溫，有助於污染物被濾料截留及生物分解，在此灑水是必須持續操作，於上述控制濾床乾度之間歇性灑水不同，因為廢氣為持續進入濾床必須持續增濕、加溫，操作依據可參照監測參數過高或不足調整。

濾床乾度是生物濾床自動控制的依據，依照操作員設定之乾度值，當偵測值高於設定值時，表濾料內之含水率低於設定，即開啟水閥灑水補充濾料濕度，此操作值會影響 VOC_s 在濾料中之擴散情形及壓差增加。

濾床壓差隨操作時間延長而逐漸提高，壓差提高亦增加對風車之負荷，過高時應即時翻堆維持正常操作。

表 1.3 生物濾床基本資料表

| | | | |
|-------------|--|---------------|--|
| 設備編號 | | 日期 | |
| 上次翻堆日期 | | 上次添加 營養源日期 | |
| 記錄項目 | | 設計值 | |
| 生物濾床尺寸 | | | |
| 濾料厚度 | | m | |
| 濕基廢氣量 | | CMM | |
| 進流濃度 | | ppm | |
| 濾床溫度 | | °C | |
| 濾床濕度 | | %RH | |
| 濾床壓差 | | Pa | |
| 設計效率 | | % | |
| 翻堆頻率 | | 月/次 | |

表 1.4 生物濾床保養維護紀錄項目

| 設備編號 | | 日期 | 年 月 日 | |
|------|-------|------|-------|--------|
| 檢查項目 | | 檢查確定 | 備註 | |
| 增濕室 | 灑水頭 | | 異常代號： | |
| | 管線 | | v 正常 | |
| | 循環水幫浦 | | 1 破損 | 5 磨損 |
| | 本體漏水 | | 2 阻塞 | 6 震動 |
| | 本體漏氣 | | 3 漏氣 | 7 潤滑不良 |
| 濾床本體 | 灑水頭 | | 4 漏水 | 8 其他 |
| | 管線 | | | |
| | 漏水 | | | |
| | 漏氣 | | | |
| 其他 | 風車 | | | |
| | 管線 | | | |

表 1.5 生物濾床操作紀錄表

| 日期 | 處理風量 (CMM) | 增濕室 水溫 (°C) | 灑水量 (L/天) | 進流 溫度 (°C) | 進流 濕度 (%) | 濾床 乾度 (%) | 濾床壓差 (Pa) |
|-----|---------------|-------------------|--------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |
| / / | | | | | | | |

1-5 生物濾床操作績效自我評估

根據環保署制定之「半導體製造業空氣污染管制及排放標準」中規定，VOC_S 排放削減率應大於 90 % 或工廠總排放量應低於 0.6 kg/hr(以甲烷為計算準則)。目前園區廠家使用生物濾床處理 VOC_S 廢氣大多可以符合後者標準；但實際操作上削減量卻只有 30 至 40 % 左右，根據本研究小組過去的研究，生物濾床法處理揮發性有機物之效率大多可以達到 95 % 以上，因此，生物濾床法在操作上仍有許多空間可以改善，以因應未來日趨嚴格的法規要求。

表 1.6 為本研究小組所建議之生物濾床操作績效自我評估表，其為逐日紀錄，項目包括進、出流濃度、處理效率、總排放量及能源消耗等。若操作績效自我評估表內有異常或不理想情形則必須對操作予以改善，依操作參數逐項檢討問題原因，使濾床操作績效提升。

1-6 參考文獻

1. Leson, G. and Winer, A. M. "Biofiltration: An Innovative Air Pollution Control Technology for VOC Emission", *J. Air & Waste Mgmt. Assn.*, Vol. 41, pp. 1045~1054, 1991.
2. Bohn, H. L. "Consider Biofiltration for Decon-taminating Gases", *Chem. Eng. Pro.*, Vol. 88, No. 4, pp. 34~41, 1992.
3. Zurlinden, R. A. and Lucas, J. C. "Treatment of Volatile Organic Compounds in a Pilot Scale Biofilter", *Proc. Air & Waste Mgmt. Assn. 86th, Annual Meeting & Exhibition*, 1993.
4. Mumpton, F.A. "Natural Zeolites: a New Industrial Commodity", in *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Uses*, L.B. Sand and F.A. Mumpton ed., Pergamon Press Inc., Elmoord, N.Y., 463-470, 1978.
5. Brauer, H. "Biological Purification of Waste Gases", *International Chem. Eng.*, Vol. 26, pp. 387~395, 1986.
6. Marsh, A. M., Nolen, S. L., Gess, P. S. and Baesen, T. A. "Control Odors from CPI Facilities", *Chem. Eng. Pro.*, Vol. 12, pp. 53~61, 1992.
7. Mueller, J. C. "Biofiltration of Gases a Mature Technology for Control of a Wide Range of Air Pollutants", *A Report to the National Research Council of Canada and the British Columbia Ministry of Advanced Education and Job Training*, Project No. 2-51-797, 1988

8. Bohn, H. L. "Biofiltration: Design Principles and Pitfall", *Proc. Air & Waste Mgmt. Assn. 86th, Annual Meeting & Exhibition*, 1993
9. Dharmararam, S., Casey, J., Timmermans, T. and Van, C. L., "Experimental Evaluation of a Biofiltration Unit for Removal of Acetone", *Proc. Air & Waste Mgmt. Assn. 86th, Annual Meeting & Exhibition*, 1993
10. Ergas, S. J., Schroeder, E. D., Chang, D. P. and Morton, R. L. "Control of Volatile Organic Compound Emissions Using a compost Biofilter", *Wat. Env. Res.*, Vol. 65, pp. 816~821, 1995