Journal of Science and Engineering Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 9-22 (2023)

作業環境甲醛逸散之改善與管末防治技術研究

許豪弘
萬能科技大學 環境工程系
320676 桃園市中壢區萬能路 1 號
david.hsu0318@gmail.com

摘 要

甲醛是一種無色及有強烈刺激性氣味的氣體，易溶於水及醇醚，而其對人體的傷害主要是表現在嗅覺異常、刺激、過敏及肺功能異常等方面，排氣甲醛若沒有妥善處理，將會導致作業人員之健康受到甲醛之危害，去除排氣中所含甲醛氣體，為本研究之目標。

本研究係針對一家傢俱材料工廠，就其管道排放甲醛的收集效率與以水洗塔去除甲醛的最佳化操作參數進行探討。結果顯示，施工後該作業環境之甲醛濃度有時會出現未達廠方要求的控制值 0.3 ppm，導致此結果之原因有作業區溫度、甲醛逸散面積及甲醛濃度梯度之變異以及半圍封方式集氣效率偏低，尚需輔以適當換氣。為符合廠方要求，宜有效控制作業場所之溫度（溫度越高，甲醛之逸散率越大）及制定人員作業 SOP 以有效控制甲醛之捕集效率。排氣甲醛之去除在符合經濟性條件下，最佳操作條件為雙塔串聯模式處理，並設計自動加藥系統維持其洗滌液 pH 值即可達到排氣甲醛最佳之去除率。

關鍵詞：甲醛，換氣率，洗滌塔，操作參數

End-of-Pipe Control Technology and Reductions of Formaldehyde Emissions in the Workplace

HAO-HUNG HSU
Department of Environmental Engineering, Vanung University
No. 1, Wanneng Road, Zhongli District, Taoyuan City 320676, Taiwan, R.O.C.
david.hsu0318@gmail.com

ABSTRACT

Formaldehyde is a colorless gas with a strong pungent smell, and it is easily soluble in water and alcohol ethers. Its harm to the human body is mainly manifested in an abnormal sense of smell, irritation, allergies, and abnormal lung function. Formaldehyde exposure harms the health of workers, and the removal of formaldehyde gas in exhaust fumes was the goal of this research.

This research focused on a furniture material factory. The efficiency of collecting formaldehyde discharged from pipes and the optimal operating parameters for formaldehyde removal using water washing are discussed herein. After construction, the concentration of formaldehyde in the working environment sometimes exceeded the control value of 0.3 ppm required by the factory. The reasons for

this are variations in the operating area temperature, formaldehyde emission area, and formaldehyde concentration gradient and the low gas collection efficiency of the semi-enclosed method. Adequate ventilation was necessary. To meet manufacturer requirements, the temperature of the workplace should be effectively controlled （the higher the temperature, the greater the formaldehyde emission rate）, and standard operating procedures should be formulated for personnel operations to effectively control the efficiency of formaldehyde capture. The removal of formaldehyde from exhaust gases is economically feasible. The optimal treatment method is double-tower series treatment. The first stage involves using NaOCl as a washing liquid, adjusting the chlorine concentration to 600 mg/L, and adjusting the pH to 6.5 using sulfuric acid. In the second stage of the series, NaOH is used as the washing liquid, the pH is adjusted to 12.0 for double-tower series washing, and an automatic chemical dosing system is used to maintain the pH value of the washing liquid to achieve the optimal removal rate of exhaust formaldehyde.

Key Words: formaldehyde, air exchange rate, scrubber, operating parameters

一、 前言

（一）研究緣起

甲醛是一種無色及有強烈刺激性氣味的氣體，其對人體的危害主要是表現在嗅覺異常、刺激、過敏及肺功能異常等方面。美國衛生與人群服務部（Department of Health and Human Services，DHHS）基於充分的人類和動物吸入研究，在 2011 年將甲醛歸類為人類致癌物。甲醛也是工業廢氣之一，環保署亦訂有排放標準管制其排放 [5]，因此企業一定要重視對甲醛廢氣的處理以避免危害員工健康及污染環境。

本研究為針對所選定的一家傢俱材料生產工廠之牛皮紙原料，該原料於製程中所使用之甲醛雖已作好收集處理，但因成品尚殘留有甲醛，使得牛皮紙存放作業區之甲醛濃度雖未超過勞工作業場所容許暴露標準 1 ppm [4]，但業主基於牛皮紙製程與產品量變動大，將該廠存放作業區甲醛濃度限定為 0.3 ppm。依據廠方 2021 年在三處牛皮紙成品貨架週邊進行的每日一次監測數據可知在未包覆疊放牛皮紙成品貨架的情況下（1-4 月），存放區甲醛濃度的月平均值為 0.27–0.42 ppm，而經適當包覆後（5-12 月），存放區甲醛濃度的月平均值為 0.18–0.42 ppm，其中約有 2/3 的數據超過所設定的上限值 0.3 ppm，此意謂其目前所採用之換氣率與集氣效率仍有改善空間，此為本研究第一個欲探討之問題。另外，廠方採用純水水洗塔去除所收集的逸散甲醛，雖屬成熟技術，但如何找出水洗塔之最佳化操作參數，以確保符合排放標準與降低處理成本，則需經模場實驗方能決定，此為本研究第二個欲探討之問題。

（二）研究目的

本研究之目的如下所述：

1. 量測牛皮紙疊放作業環境之甲醛濃度以找出改善該作業區甲醛逸散之熱點位置與降量方法。
2. 進行牛皮紙疊放區排疊貨架之集氣效率實驗，並估計要符　合作業環境空氣中甲醛濃度限值所需的整體廠區換氣率，以降低作業人員暴露於甲醛，危害其健康的風險。
3. 建立以填充式洗滌塔去除廢氣所含甲醛之最佳操作參數，以供實廠後續操作參考。

二、 實驗材料及研究方法

(一) 實驗藥品

本研究所使用之藥品如表 1 所示。

(二) 填充式洗滌塔實驗模場

本研究所用之實驗設備為自行設計製作之填充式廢氣洗滌塔如圖 1，其規格如下所述：材質為 PP，Ø 250 mm× H 3711 mm×2 台，可單塔操作或雙塔串聯；填充層為Ø 250 mm× H 500 mm×4 層，法蘭銜接可依需求高度拆裝；循環水箱：

表 1. 實驗藥品

藥品	用途	濃度或濃度範圍	供應商及製造地
甲醛	廢氣來源	37 %	勝一化工/台灣高雄
氫氧化鈉	調整 pH	1～45 %	三福化工/台灣台南
濃硫酸	調整 pH	98 %	元杰企業/台灣桃園
次氯酸鈉	氧化劑	12 %有效氯	綠亞實業/台灣桃園
過氧化氫	還原劑	30～60 %	三福化工/台灣台南

圖 1. 填充式洗滌塔實驗模場正視圖

L 500 mm ×W 500mm ×H 400mm=100 L；排風機材質為 FRP，2 HP×1 台（變頻控制），Q=10 CMM，SP=220 mmAq；立式泵浦為 0.5HP×2 台（變頻控制），全流量為 190 L/min；加藥系統為 pH×2，ORP×1，加藥機×3 台。

(三) 甲醛分析儀器及氣體來源

本研究所使用之甲醛氣體偵測儀器分別為環境濃度偵測（圖 2）及防治設備管道濃度偵測（圖 3）兩種，其功能及規格如下所述。環境甲醛濃度偵測器為手提式甲醛氣體偵測器，Mode 為 htV/htV-m（PPM/英國製），偵測範圍為 0.01~10 ppm，偵測原理為電化學式，具有溫度及濕度補償功能，感測器具自我清潔功能且具數據儲存功能，內含可自行校正的甲醛校正管，適用於偵測室內空氣品質（圖 2）。防治設備管道甲醛濃度偵測器為 Dräger Polytron 700 固定式甲醛氣體偵測設備，具 4～20 mA 訊號輸出功能，偵測原理為電化學式，DrägerSensor Organic Vapors 是一種電化學三電極傳感器，偵測範圍為 0.5~100 ppm，用於連續即時監測環境空氣中的 C_2H_4O（環氧乙烷）和其他選定的有機蒸汽，特別是用於檢測洩漏（圖 3）。

固定式甲醛氣體偵測設備需搭配小型抽氣幫浦分別連接於試驗設備之入、出口（圖 4），並搭配記錄器（圖 5）以每秒一次記錄試驗設備入、出口之甲醛氣體濃度，同時透過網路連接電腦儲存數據作為分析之依據。

防治設備排氣 Cl_2 濃度偵測器為 Riken 所出產之便攜式多氣體監測儀，其型號為 GX-6000，Cl_2 偵測範圍為 0~10.00 ppm 且具 0.05 ppm 之解析度，檢測方法為泵吸式，開放流量為 0.45 L/min 以上，操作溫度為-20～50 °C，操作濕度為 0～95% RH 以下，如圖 6。

本實驗模組之甲醛氣體來源是於洗滌設備之入口端放置裝有甲醛之 PE 桶，PE 桶加裝設有調整閥之進氣孔及小型曝氣裝置，可控制進氣量以便調控甲醛濃度，桶槽出口上方則設置抽氣罩經由導管進入洗滌設備，如圖 7，由於固定式甲醛氣體偵測設備之偵測下限為 0.5ppm，受限於儀器靈敏度，故需調高試驗設備入口甲醛氣體濃度以利操作試驗去除率。

圖 2. 甲醛環境濃度偵測器

圖 3. 固定式甲醛氣體偵測器

圖 4. 偵測器及抽氣幫浦

圖 5. 記錄器

圖 6. 手提式 Cl_2 氣體偵測器

圖 7. 甲醛廢氣來源

(四) 通風換氣之測試

1. 作業現場甲醛濃度之量測及記錄（由廠商提供）

於每個工作日以手提式甲醛氣體偵測器在牛皮紙疊放作業環境進行多點偵測並記錄其濃度變化，以了解作業方式與甲醛濃度變化的關聯性。

2. 單位面積甲醛逸散率之量測（委託 SGS 量測）

使用乾燥箱法（JIS A1460 甲醛釋出量檢測）量測單位面積甲醛之逸散率，設備示意圖如圖 8 所示。甲醛釋放量是將試樣的規定表面積放入裝有規定量的蒸餾水或離子交換水的乾燥器中，24 小後再測定控制在恆溫下之蒸餾水或離子交換水中所吸收之甲醛濃度。至於測定蒸餾水或離子交換水所吸收的甲醛濃度則是利用 Hantzsch 反應，甲醛會與銨離子和乙酰丙酮反應生成二乙酰二氫二甲基吡啶（DDL）。

經量測所得之甲醛逸散濃度為 4.75 mg/L，對乾燥箱作甲醛之質量平衡得知為 0.0033 mg/L · min，再由測試樣品之表面為(10.1×4.9 cm^2)及樣品容器之體積為 0.3 L 可知甲醛之逸散速率及單位面積逸散速率分別為 0.001 mg/min 及 0.20 mg/min · m^2。

3. 作業區換氣率評估

依據牛皮紙疊放區之作業特性，評估該疊放區內未能收集處理之甲醛逸散量，並依我國作業環境甲醛允許暴露濃度，評估換氣率（見表 2）[3]，由該換氣率與牛皮紙疊放區室內體積，計算出評估換氣量。其牛皮紙排疊區之空間體積為 3000 m^3（以下稱作業區），換氣量為 750 m^3/min。而牛皮紙暫存區之空間體積為 400 m^3(以下稱暫存區)，換氣量為 120 m^3/min。

上述之評估換氣量為整體換氣方式之概估值，依其作業方式評估：

(1) 作業區因大部分為人員及堆高機進出之動線，逸散甲醛之牛皮紙均置放於貨架上，已知環境甲醛濃度每日監測值均<0.5ppm 屬低濃度環境，且後續規劃，貨架會以局部排氣方式設計，故暫以換氣次數 15 次評估換氣量。

(2) 暫存區，規劃庫板隔間及設置 PVC 快速捲門及抽氣導管，因將牛皮紙置放於隔間內，甲醛濃度可能高於作業區，故暫以高於作業區換氣次數 18 次評估換氣量。

4. 局部排氣裝置之設計評估

(1) 作業區出入口增設 PVC 快速捲門，減少外部污染進入該作業區。

(2) 作業區貨架以 PC 板包覆，正面增設 PVC 快速捲門防止甲醛逸散及提高捕集效率，如圖 9。

(3) 作業區貨架背面下方設抽氣導管（甲醛比空氣重），提高抽氣導管格柵開口捕集風速。

(4) 暫存區庫板隔間及設置 PVC 捲門及抽氣導管，如圖 10。

(5) 設置空調系統控制作業區之溫度以降低甲醛逸散量，並注入新鮮空氣使進、排氣平衡。

5. 計算牛皮紙之總擴散面積及總擴散速率

(1) 牛皮紙擴散面積（業主提供）

作業區由一個棧板擴散面積 7.026 m^2 乘 14 個貨架各 3 層，總擴散面積則為 295.092 m^2；暫存區則為 208.566 m^2。

(2) 牛皮紙之總逸散速率

作業區之總擴散速率＝59.62 mg/min。

暫存區之總擴散速率＝42.14 mg/min。

6. 實際所需換氣量之計算

依業者所要求之作業環境甲醛平均容許濃度為 0.3 ppm

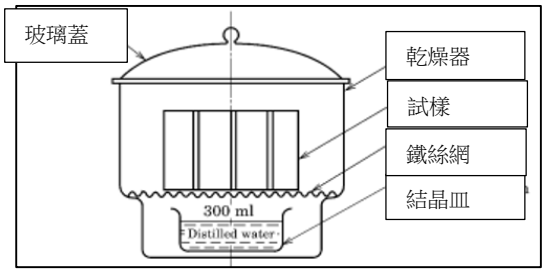

圖 8. 乾燥器法

表 2. 工業通風設計各場所換氣次數

場 所 種 類		次 數
工 場	一般作業室	6
	塗裝室	20
	發電變電室	20
有害氣體塵埃發出地方		20 以上

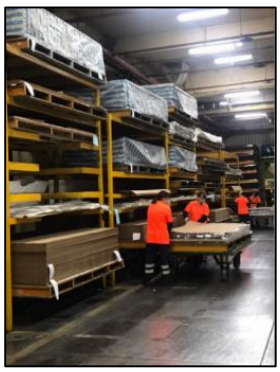

圖 9. 貨架及作業區實況

圖 10. 暫存區隔間

或是 0.37 mg/m^3。另由實際換氣量＝K× 理論換氣量，其中 K 值稱為安全係數，在供、排氣位置及混合效率良好時，可設定其值為 1~2，如果位置及混合效率不良時，K 值則需設定為 5~10 以確保整體換氣效果。在此，我們採用 K＝1.5 進行實際換氣量之計算。實際換氣量計算如下所述。

由於作業區與暫存區兩者之作業方式並不相同，因此兩者在估算實際換氣量時所使用之計算方法亦不相同，其中作業區因採開放式作業有捕集風速之需求故採氣罩模式設計。

作業區同時間作業有 5 個開口，故採簡單開口式氣罩計算 [1]，換氣量如式(1)：

$$換氣量\ Q＝V（10\ X^2＋A） \qquad (1)$$

其中：A＝氣罩開口面積，V＝捕集風速，X＝向外沿軸上的距離。

作業區計算條件如下：4’×8’（3 個開口）截面積＝13.5 m^2，6’×8’（1 個開口）截面積＝5.4 m^2，6’×12’（1 個開口）截面積＝6.525 m^2。則氣罩開口總面積 A＝25.425 m^2，V＝捕集風速（取 0.5 m/sec），X＝向外沿軸上的距離＝0，則作業區實際所需換氣量 Q＝762.75 m^3/min。至於暫存區實際所需換氣量採用 K＝1.5，則換氣量 Q＝170 m^3/min。

由上面之計算可知作業區之設計換氣量 762.75 m^3/min 大於評估之換氣量 750 m^3/min，暫存區之設計換氣量 170 m^3/min 亦大於評估之換氣量 120 m^3/min，總設計換氣量取整數（760+170）則為 930 m^3/min。

7. 判別室內甲醛平均濃度是否符合業主之要求

依上述設計之風量及甲醛之逸散率可用於判別甲醛濃度是否符合業主之要求。計算式如式(2)：

$$\frac{甲醛逸散量\left(\frac{mg}{min}\right)\times\frac{1g}{10^3mg}\times\frac{1}{甲醛分子量}\left(\frac{mole}{g}\right)\times甲醛之莫耳體積\left(\frac{L}{mole}\right)\times\frac{1m^3}{10^3L}\times10^6}{單位時間換氣量\left(\frac{m^3}{min}\right)} \qquad (2)$$

(1) 作業區，甲醛總逸散率為 59.62 mg/min 及設計風量為 760 m^3/min，則作業區甲醛之平均濃度＝0.06 ppm。

(2) 暫存區，甲醛總逸散率為 42.14 mg/min 及設計風量為 170 m^3/min，則暫存區甲醛之平均濃度＝0.20 ppm。

由上述結果可知，不管是作業區或是暫存區，其甲醛之平均濃度皆低於業主所要求之限值，0.3 ppm。

表 3. 填充式洗滌塔設計參數

設計參數名稱	參數範圍	單位	備註
經洗滌器後洗滌液 pH 值	＜7.4～6（鹼氣）或 ＞7.9～11（酸氣）		根據半導體製造業空氣污染管制及排放標準
洗滌塔斷面流速	1.5～2.5	m/sec	
洗滌液流率（循環水量）	>0.1，潤濕因子=洗滌液循環水量÷（填充物比表面積 × 填充段截面積）	m^3/hr	
填充物比表面積	>90	m^2/m^3	
填充段空塔停留時間	>0.5	sec	
液氣比	1～10	L/m^3	

（五）洗滌塔模組之測試

1. 填充式洗滌塔設計參數

有關本研究所使用之填充式洗滌塔其設計參數將參考環境工程技師公會所提出之廢氣處理設計參數 [7]，至於其數值則彙整於表 3。

2. 填充式廢氣洗滌塔（scrubber，SCR）操作模式

(1) 單塔測試，以自來水作為洗滌液測試不同液氣比及停留時間下甲醛之去除效果，取得最佳之液氣比及停留時間。

(2) 單塔測試，以鹼液作為洗滌液用最佳之液氣比及停留時間操作，觀察在不同的 pH 值下甲醛之去除效率。

(3) 雙塔串聯測試，以次氯酸鈉串聯雙氧水使用最佳之液氣比及停留時間操作，觀察在串聯模式下於不同 pH 值及 ORP 值時甲醛之去除效率。

(4) 經由分析循環水之 pH 值變化以取得最適之循環水更換頻率。

三、 結果與討論

（一）通風換氣之測試結果

本節主要在討論於通風換氣前後作業環境甲醛逸散量之變化以了解通風換氣對去除甲醛逸散量之效率是否和（第二章（四）之 1 節）所預測之結果相一致並探討造成其間差異之原因。

1. 作業場所監測數據分析

表 4、表 5、表 6、表 7 及圖 11、圖 12 分別為施工前後之監測數據，由此圖表可獲得下列訊息：

(1) 氣溫對甲醛逸散率的影響如圖 11、圖 12 所示：施工前因值冬季與春季，氣溫對甲醛逸散率的影響較不明顯，加上沒有圍封，室內溫度較高時反而因作業區空氣對流作用較明顯，所以未呈現與氣溫成正比增加的現象（圖

11）；施工後因值春夏兩季，加上半圍封，室內甲醛逸散率則明顯受氣溫影響，呈現甲醛逸散率與氣溫成正比增加的現象，如圖 12，由圖 12 可知，施工後仍有部份月份之甲醛平均值是超出業主之設定，0.3 ppm，但整體來說，進行通風換氣的確可降低室內甲醛之逸散濃度。

下列為施工前後不同季節之逸散率比較：

甲醛之逸散率（mg/min·m^2）＝作業區平均濃度（mg/m^3）×換氣量（m^3/min）/作業區逸散面積（m^2）

施工前（1~3 月）甲醛之逸散率為 1.244 mg/min · m^2。

施工後（5~7 月）甲醛之逸散率為 0.852 mg/min · m^2。

施工後（8~10 月）甲醛之逸散率為 1.285 mg/min · m^2。

(2) 由表 5 可知室內甲醛之逸散濃度和溫度有密切之關係，溫度越高，甲醛濃度亦隨之增高，此點和文獻報告一致。有關甲醛逸散濃度和溫度間之更定量化關係則可見圖 11 及 12，由圖 11 及 12 可知不論施工前後，甲醛逸散濃度的確和室內溫度並非完全呈現正相關。值得注意的是，既使在相似之溫度下，部份甲醛濃度仍有相當明顯之差異，此意謂本作業場所之甲醛逸散濃度除深受溫度影響外，亦可能和下列因素有關。

(3) 溫度為甲醛逸散濃度之關鍵因素，所以必須有效控制作業場所溫度。業主因經濟成本考量變更空調設計，選擇成本較低之涼風扇代替冷氣空調設備至無法有效控制溫度，導致氣溫升高時甲醛逸散量隨之增加。

(4) 面積誤差：原料牛皮紙數量隨時都在變化無固定模式可循。

表 4. 施工前作業場所甲醛濃度之監測數據

月分	測點	平均溫度（℃）	平均濃度 $\bar{x}$（ppm）
1	牛皮紙排疊 6*8	22.1	0.38
	牛皮紙排疊 4*8	22.8	0.42
	牛皮紙排疊 6*12	22.1	0.33
	平均溫度&濃度	22.1	0.36
2	牛皮紙排疊 6*8	24.2	0.35
	牛皮紙排疊 4*8	24.7	0.44
	牛皮紙排疊 6*12	24.5	0.39
	平均溫度&濃度	24.5	0.40
3	牛皮紙排疊 6*8	24.8	0.43
	牛皮紙排疊 4*8	23.9	0.41
	牛皮紙排疊 6*12	24.7	0.38
	平均溫度&濃度	24.7	0.41
4	牛皮紙排疊 6*8	27.3	0.22
	牛皮紙排疊 4*8	27.5	0.31
	牛皮紙排疊 6*12	27.3	0.27
	平均溫度&濃度	27.4	0.27

(5) 濃度梯度差異：業主取消貨架 PVC 快速捲門施作以致影響甲醛逸散捕集效率、進排氣設備未正確開啟或設定錯誤、作業場所進出口 PVC 捲門未依規定確實關閉。

以下即進一步計算施工後其他定量化之參數以供比較。

2. 作業區排氣設備施工前後量化數據比較

由甲醛之質量通量（mg/min·m^2）＝（甲醛濃度（mg/m^3）×排氣風量（m^3/min））/（總逸散面積（m^2），其中排氣風量

表 5. 施工後作業場所甲醛濃度之監測數據

月分	測點	平均溫度（℃）	平均濃度 $\bar{x}$（ppm）
5	牛皮紙排疊 6*8	30.8	0.27
	牛皮紙排疊 4*8	30.8	0.25
	牛皮紙排疊 6*12	30.8	0.27
	平均溫度&濃度	30.8	0.26
6	牛皮紙排疊 6*8	31.1	0.28
	牛皮紙排疊 4*8	31.0	0.26
	牛皮紙排疊 6*12	31.1	0.29
	平均溫度&濃度	31.0	0.28
7	牛皮紙排疊 6*8	32.3	0.30
	牛皮紙排疊 4*8	32.3	0.26
	牛皮紙排疊 6*12	32.7	0.28
	平均溫度&濃度	32.4	0.28
8	牛皮紙排疊 6*8	31.5	0.42
	牛皮紙排疊 4*8	31.1	0.43
	牛皮紙排疊 6*12	31.4	0.44
	平均溫度&濃度	31.4	0.43
9	牛皮紙排疊 6*8	31.6	0.42
	牛皮紙排疊 4*8	31.5	0.43
	牛皮紙排疊 6*12	31.6	0.44
	平均溫度&濃度	31.6	0.43
10	牛皮紙排疊 6*8	29.5	0.35
	牛皮紙排疊 4*8	29.6	0.38
	牛皮紙排疊 6*12	29.5	0.38
	平均溫度&濃度	29.5	0.37
11	牛皮紙排疊 6*8	26.0	0.20
	牛皮紙排疊 4*8	26.1	0.25
	牛皮紙排疊 6*12	26.1	0.24
	平均溫度&濃度	26.1	0.23
12	牛皮紙排疊 6*8	23.5	0.16
	牛皮紙排疊 4*8	24.8	0.19
	牛皮紙排疊 6*12	24.1	0.18
	平均溫度&濃度	23.3	0.18

表 6. 施工前各月份之甲醛平均濃度及質量通量

月份	平均濃度（ppm）	平均濃度（mg/m3）	質量通量（mg/min · m^2）
1	0.36	0.442	1.138
2	0.40	0.491	1.265
3	0.42	0.516	1.329
4	0.27	0.331	1.146
平均濃度	0.36	0.445	1.146

表 7. 施工後各月份之甲醛平均濃度及質量通量

月份	平均濃度（ppm）	平均濃度（mg/m3）	質量通量（mg/min · m^2）
5	0.26	0.319	0.821
6	0.27	0.331	0.852
7	0.28	0.343	0.883
8	0.42	0.515	1.326
9	0.43	0.528	1.359
10	0.37	0.454	1.169
11	0.23	0.282	0.726
12	0.18	0.221	0.569
平均濃度	0.30	0.374	0.963

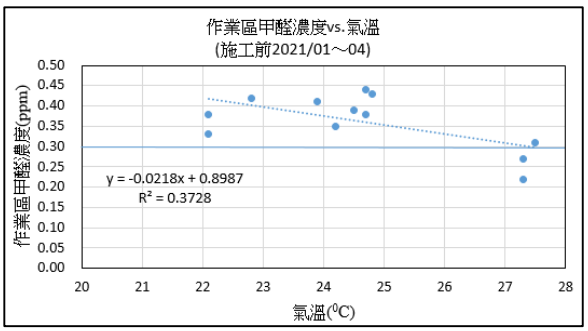

圖 11. 施工前甲醛量測濃度 vs 氣溫

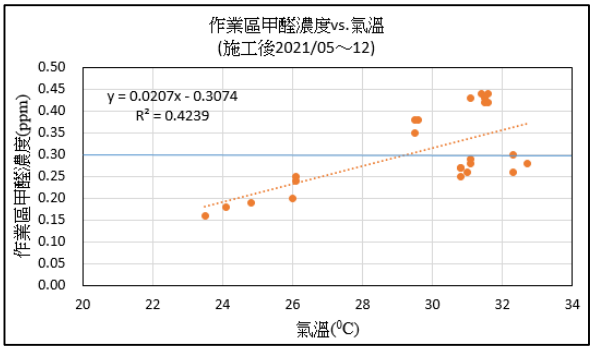

圖 12. 施工後甲醛量測濃度 vs 氣溫

為 760 m^3/min，作業區總逸散面積為 295.1 m^2，可計算施工前後各月份之甲醛質量通量，如表 6 及表 7 所示。如下：

(1) 施工後之甲醛質量通量 （0.569~1.359） mg/min · m^2 > 自然逸散之甲醛質量通量 0.2 mg/min · m^2。

(2) 施工後甲醛之平均濃度 0.347 mg/m^3 <由施工前甲醛之平均濃度 0.445 mg/m^3，由此可知設計風量符合需求。

(3) 由施工前後甲醛之逸散率（g/hr）＝作業區總疊架曝露面積（m^2）×甲醛之質量通量（g/hr · m^2） 可知：施工前甲醛之逸散率＝20.29 g/hr； 施工後甲醛之逸散率＝17.05 g/hr。

由上述三結果可知所設計之排風量 760 m^3/min 的確可達通風換氣之效果，降低甲醛逸散量之效果。

3. 圍封後甲醛逸散量改善率與集氣效率

牛皮紙疊放架圍封後甲醛逸散率（%）＝（圍封前甲醛逸散量（g/hr）-圍封後甲醛逸散率（g/hr））/圍封前甲醛逸散量=（20.29 g/hr-17.05 g/hr）/20.29 g/hr）=15.96%，顯示改善有限。

進一步估計圍封後甲醛的集氣效率，以管道排放甲醛量在夏季室內溫度超過 30 ℃時之（9 月）甲醛逸散率為 1.359 mg/min · m^2 計（參考表 7），則甲醛之逸散率＝24.06 g/hr，大於估計值甲醛逸散量 17.05 g/hr；在室內溫度不超過 30 ℃時，甲醛量最低之月份（12 月）甲醛逸散率為 0.569 mg/min · m^2 計，則甲醛之逸散率＝10.07 g/hr，其集氣效率也只有 40.9 %，在 5 月至 10 月較高室溫期間，其集氣效率將呈現負值。此一結果顯示，以標準檢驗方法估之甲醛逸散量有低估情形，研判係實廠甲醛逸散量受到較高室溫（5 月至 10 月期間）與通風效應影響，導致實廠甲醛逸散量高於標準檢驗方法估計值，因此集氣效率仍有改善空間。

另由台灣勞工作業場所容許暴露標準規定甲醛的工作場所中八小時日時量平均容許濃度（PEL-TWA）為 1 ppm（或 1.2 mg/m^3） [1]可進行換氣評估，換句話說，由（（容許濃度）/（施工前平均逸散率×總逸散面積））＝10.6 min，可知如果不換氣，則超過 10 分鐘作業區甲醛平均濃度就會超過法定標準。另一方面，若按業者要求設定作業環境甲醛平均容許濃度為 0.3 ppm（或 0.37 mg/m^3），則為 3.3 min，如果不換氣，則超過 3 分鐘作業區甲醛平均濃度就會超過業主所設定之標準。最後，法定下限換氣率＝（施工前平均逸散率×總逸散面積）/容許濃度＝281.8 m^3/min，而最低集氣效率則為 3000 m^3/10 min=300 m^3/min。

(二) 洗滌塔模組之測試結果

1. 試驗模組設計及操作參數

以下討論及分析本研究實驗模組之設計及操作參數。

(1) 洗滌塔斷面流速：由設計風量 5.88 m^3/min 及過濾面積可得洗滌塔斷面流速為 2 m / sec，此值符合表 3 所列填充式洗滌塔之設計參數範圍 1.5～2.5 m / sec 之要求。

(2) 填充物之比表面積：填充物選用 K1B 50 × 18H，其比表面積為 181 m^2/m^3（如圖 13），大於半導體製造業空氣污染管制及排放標準所要求的 90 m^2/m^3。

PLASTIC(TELLERETTE)Type

TYPE	Demensions mm	Std. Bulk density (Kg/m³)	Surface Area 表面積 (m²/m³)	Std. Thicknes % (mm)	VOID SPACE 空間率 %	(Pcs/m³) 充填個數
K1A	45×18H	130	186	2.5	88	32,500
K1B	50×18H	100	181	2.5	89	25,000
K1B	75×28H	80	128	3.2	89	8,000
K1B	100×38(H)	80	96	3.5	90	3,600

圖 13. 洗滌塔填充材（資料來源：基隆貿易產品型錄）

(3) 洗滌液流率：為了使液體能夠均勻分佈在填充物上，以增加氣體與液體完全接觸之面積，洗滌液體的澆注量需符合最小潤濕因子（Minimum-Wetting Factor：MWF）值的要求（半導體製造業空氣污染管制及排放標準所要求的潤濕因子應大於 0.1 m^2/hr 或 2.77×10^{-5} m^2 / sec）。由潤濕因子之定義，式(3)：

$$\text{潤濕因子}\left(\frac{m^2}{hr}\right)=\frac{\text{洗滌塔循環水量}\left(\frac{m^3}{hr}\right)}{\text{填充物比表面積}\left(\frac{m^2}{m^3}\right)\times\text{填充段截面積}\ (m^2)} \quad (3)$$

假設 V_L 為液體空塔流速及 a 為填充物比表面積，則潤濕因子＝V_L/a，再由採用的填充物其比表面積為 181m^2/m^3 可知所需之最小空塔流速 $V_L=5.0137\times10^{-3}$ m/s，已知洗滌塔噴灑面積 A＝0.049m^2，則最小液體流量為 $A\times V_L$＝14.74L/min。

另由潤濕因子之定義分別代入比表面積 181m^2/m^3 及截面積 0.049 m^2 則亦可計算出不同潤濕因子所對應之洗滌液流率，如表 8 所示。

(4) 液氣比

洗滌塔是利用液體將空氣中污染物吸收處理，所以液氣比為一相當重要之操作參數，其對洗滌塔的效率有很大的影響。由上述之計算可知，於最小潤濕因子值的要求下（即 0.1 m^2/hr），以填充物之 a＝181 m^2／m^3 為設計，則所需之最小液體流速 $V_L=5.0137\times10^{-3}$ m / s。實務設計上，當氣體流速（V_G） 大於 2.5 m/s 時易導致溢流（flooding）現象之發生而最佳氣體流速則往往設計為為溢流點（flooding point）所對應氣體流速之 60 至 80 %，即 V_G＝(1.5~2) m/s。依上述之 V_L 及 V_G 可計算所需液氣比(L_M/G_M)如式(4) [2]：

$$L_M/G_M=(V_L\times A\times\rho_L)/(V_G\times A\times\rho_G) \quad (4)$$

其中 ρ_L 及 ρ_G 分別為液體和氣體之密度（Kg/m^3），A 為塔之截面積。當氣體流速分別取溢流點所對應氣體流速之 60 至 80% 時，其所對應之液氣比分別為：2.5 m/s 之 60 %＝3.13，2.5 m/s 之 80 %＝2.34。則所需液氣比之範圍為 2.34～3.13 L/m^3，符合表3所列填充式洗滌塔設計參數1～10 L/m^3之範圍。另由洗滌液流率及設計風量5.88 m^3/min 亦可計算不同潤濕因子下所對應之液氣比，如表9所示。

(5) 停留時間（Dwell Time，DT）

洗滌設備中氣體流過填充段之時間即為填充段空塔之滯留時間，依半導體製造業空氣污染管制及排放標準其填充段空塔之滯留時間應大於 0.5 sec。本實驗模組共有 4 層填充層，每層填充層之體積為 0.049 m^2× 0.5 m（高）＝0.0245 m^3。由停留時間之定義（DT＝填充層體積/設計風量）可知經由組裝不同數量之填充層高度可搭配不同的停留時間，如表 10 所示。

2. 單塔清水洗滌測試

以自來水作為洗滌液，設不同的停留時間和液氣比為操作條件，即 T1～T3 模式，如表 11，進行連續操作 3 小時，所得之排氣甲醛去除率數據為圖 14，結果顯示停留時間越長和液氣比越大去除率越高，由圖 14 證明單塔清水洗滌排氣甲醛去除率最高為 T3-3 模式。

為估計洗滌液更換時間，遂以業主目前操作現況之委外檢測數據，排氣量 760 m^3/min，洗滌液 4800 L 為操作條件，設定最低去除率 75%為基礎，再由（第三章（一）之 1 節，表 7）分別取施工後作業區甲醛平均濃度估算，春夏（5~7

表 8. 不同潤濕因子所對應之洗滌液流率

潤濕因子（m^2/hr）	所需最小流量（L/min）	設計流量（L/min）
0.10	14.74	14.78
0.125	18.47	18.48
0.15	22.13	22.17

表 9. 不同潤濕因子下所對應之液氣比

潤濕因子 ＞0.1（m^2/hr）	液氣比（L/m^3）
0.1	2.51 L/m^3
0.125	3.14 L/m^3
0.15	3.77 L/m^3

表 10. 不同填充層高度所對應之停留時間

風量 Q（m^3/min）	填充層體積 V（m^3）	停留時間（sec）	填充層數
5.88	0.049	0.5	2
5.88	0.0735	0.75	3
5.88	0.098	1.0	4

月）為 0.27ppm 及夏秋（8~10 月）為 0.40ppm，對比 T3-3 模式，起始至 75 % 期間試驗設備入口平均濃度 3.81ppm，操作時間 50 min，則洗滌液連續操作的更換週期如下：春夏（5~7 月）為 262 min，夏秋（8~10 月）為 177 min。

3. 單塔氫氧化鈉洗滌測試

以自來水加氫氧化鈉為洗滌液，先以相同的風量 5.88 m^3/min 及相同的停留時間為基礎，然後設不同的液氣比和 pH 值為操作條件，經由不同的操作條件 T4～T7 模式（表 12）連續操作 3 小時，所得之排氣甲醛去除率數據為圖 15，結果顯示 T7-3 模式去除率最高，但操作用藥量也最高。故選擇去除率較 T7-3 模式相當但操作用藥量相對較少之 T6-3 模式進行後續試驗（圖 16）。

依 T6-3 模式，進行不同停留時間操作即 T6-4 及 T6-5 模式（表 13），其連續操作 3 小時所得之 45% NaOH 用藥量（表 14），然後比較 T6-3、T6-4 及 T6-5 模式之甲醛去除率（圖 17）及 NaOH 用藥量（表 14），選定最適用之操作模式為 T6-4 模式。

表 11. 單塔清水洗滌測試操作條件

測試 No.	風量 (m^3/min)	DT （sec）	液/氣 （L/m^3）
T1-1	5.88	0.5	2.51
T1-2	5.88	0.5	3.14
T1-3	5.88	0.5	3.77
T2-1	5.88	0.75	2.51
T2-2	5.88	0.75	3.14
T2-3	5.88	0.75	3.77
T3-1	5.88	1.0	2.51
T3-2	5.88	1.0	3.14
T3-3	5.88	1.0	3.77

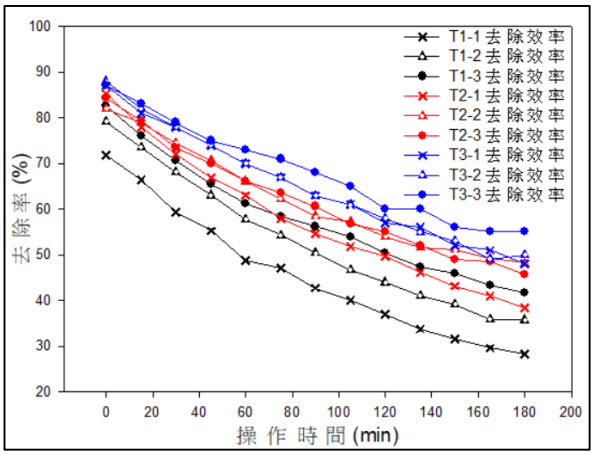

圖 14. T1～T3 模式甲醛去除率

表 12. 單塔氫氧化鈉洗滌 T4～T7 模式測試操作條件

測試 No.	DT (sec)	液/氣 (L/m^3)	洗滌液 pH	45% NaOH 用藥量 180 min 操作用藥量 mL	45% NaOH 用藥量 100 L 洗滌液起始調 pH mL
T4-1	0.5	2.51	9.0	20	10
T4-2	0.5	3.14	9.0	20	10
T4-3	0.5	3.77	9.0	20	10
T5-1	0.5	2.51	10.0	50	20
T5-2	0.5	3.14	10.0	50	20
T5-3	0.5	3.77	10.0	80	20
T6-1	0.5	2.51	11.0	110	50
T6-2	0.5	3.14	11.0	110	50
T6-3	0.5	3.77	11.0	150	50
T7-1	0.5	2.51	12.0	230	510
T7-2	0.5	3.14	12.0	230	510
T7-3	0.5	3.77	12.0	230	510

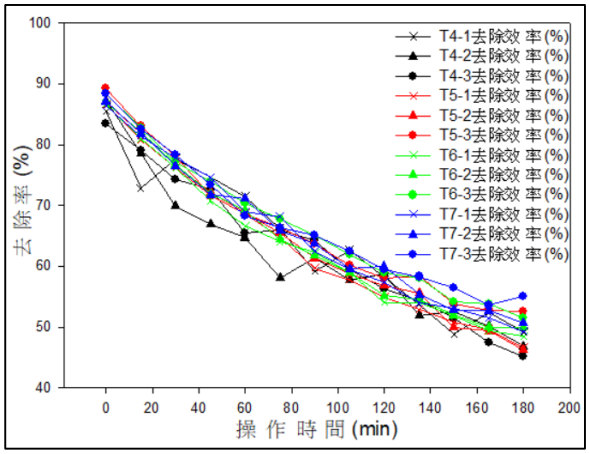

圖 15. T4～T7 模式去除率

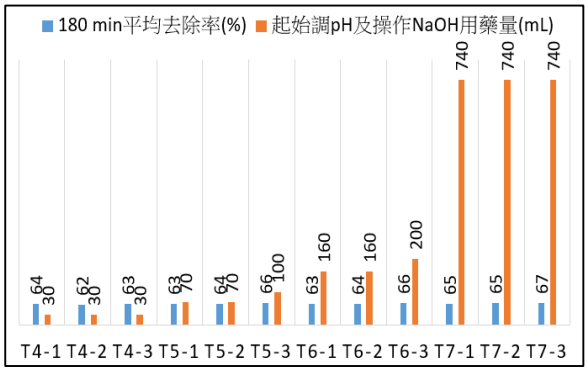

圖 16. T4~T7 模式去除率及用藥量比較

表 13. 單塔氫氧化鈉洗滌 T6-3~T6-5 模式測試操作條件

測試 No.	風量 (m^3/min)	DT （sec）	液/氣 (L/m^3)	洗滌液 pH
T6-3	5.88	0.5	3.77	11.0
T6-4	5.88	0.75	3.77	11.0
T6-5	5.88	1.0	3.77	11.0

表 14. 單塔氫氧化鈉洗滌 T6-3~T6-5 模式操作用藥量比較

測試 No.	DT （sec）	液/氣 (L/m³)	洗滌液 pH	45% NaOH 用藥量 180min 操作用藥量 mL	45% NaOH 用藥量 100 L 洗滌液起始調 pH mL
T6-3	0.5	3.77	11.0	150	50
T6-4	0.75	3.77	11.0	150	50
T6-5	1.0	3.77	11.0	220	50

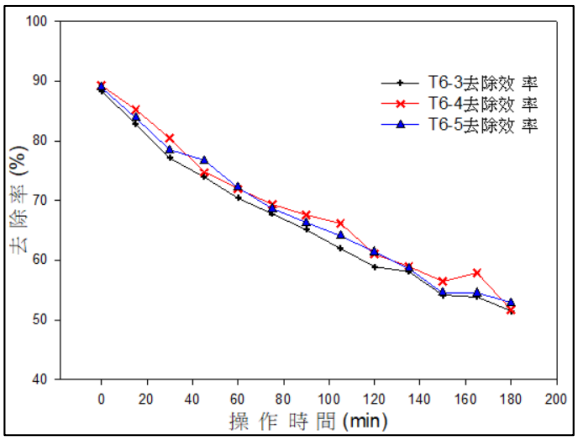

圖 17. T6-3、T6-4 及 T6-5 模式之去除率比較

由圖 17，證明單塔氫氧化鈉洗滌排氣甲醛去除最佳操作模式為 T6-4 模式。

延續（第三章（二）之 2 節）估計洗滌液更換時間之條件為基礎，對比 T6-4 模式，起始至 75 % 期間試驗設備入口平均濃度 4.71 ppm，操作時間 50 min，則洗滌液連續操作的更換週期如下：春夏（5~7 月）為 324 min，夏秋（8~10 月）為 217 min。

4. 雙塔串聯洗滌測試

雙塔串聯洗滌測試以NaOCl 串聯H_2O_2兩段式洗滌及水作為吸收劑進行甲醛排氣處理試驗。

次氯酸鈉一般與酸鹼性吸收液併用，可將氨氧化為氮氣，硫化物氧化為硫、硫酸根、烷基硫氧化物及烷基硫酸等無臭產物，甚至以其他方法難以消除之硫化甲基，使用次氯酸鈉吸收液亦有不錯的控制效果。在溶液中次氯酸鈉係以次氯酸（HOCl）的形式存在，如式(5)，

$$NaOCl + H_2O \rightarrow HOCl + NaOH \quad (5)$$

在鹼性條件下，部分次氯酸會開始解離成次氯酸根（OCl^-）如式(6)，

$$HOCl + OH^- \rightarrow OCl^- + H_2O \quad (6)$$

在酸性條件下部分次氯酸會跟氫離子反應成氯氣（Cl_2）及水，如式(7)，

$$HOCl + H^+ \rightarrow Cl_2 + H_2O \quad (7)$$

由上述可知，次氯酸鈉在水中之型態深受溶液之pH值所影響；在pH=7.5時，NaOCl 溶液之有效氯以 50 % HOCl 和50 %次氯酸根離子（OCl^-）存在。在 pH=10時，只有0.3 %有效氯以 HOCl 形式存在；在pH=11或12，HOCl幾乎完全解離成低氧化能力次氯酸根離子。因此，吸收液pH 控制於微酸或中性較有利於吸收及氧化 [6]。

至於使用次氯酸作為氧化劑以氧化分解甲醛為二氧化碳之步驟如式(8)、式(9)所示，

$$CH_2O + HOCl \rightarrow CH_2O_2 + HCl \quad (8)$$

$$CH_2O_2 + HOCl \rightarrow CO_2 + HCl + H_2O \quad (9)$$

總反應如式(10)，

$$CH_2O + 2HOCl \rightarrow CO_2 + 2HCl + H_2O \quad (10)$$

有鑑於此，以相同的風量5.88 m³/min，先行將NaOCl洗滌pH條件設為弱酸性，以硫酸調pH 6.5條件下使用不同之 NaOCl濃度處理甲醛廢氣，調配 NaOCl洗滌液氯濃度分別為 120、240、360、480、600及 720 mg/L，即T8-1、T8-2、T8-3、T8-4、T8-5及T8-6模式，如表15，試驗結果如圖18及圖19所示。實驗數據顯示，經不同氯濃度溶液洗滌，連續操作 8小時，開始排氣甲醛去除率均在90 %以上，最終也均在40 %以上，顯示NaOCl洗滌對於甲醛氣體有較好的處理效果，其中以氯濃度600 mg/L之T8-5模式去除率最佳，開始前3小時去除率均在90 %以上，最終尚能維持61 %之去除率，其最佳操作 pH 值介於 6.5~7.0 間，如圖20，故選定以T8-5模式，進行雙塔串聯第一段試驗之操作模式。

表 15. 第一段 NaOCl 洗滌液測試不同 Cl 濃 度 操作條件

測試 No.	DT (sec)	液/氣 (L/m³)	洗滌液 Cl 濃度 (mg/L)	100L 洗滌液用藥量 NaOCl 加藥量 (mL)	調 pH6.5 硫酸 加藥量 (mL)
T8-1	0.75	3.77	120	100	7.0
T8-2	0.75	3.77	240	200	11.5
T8-3	0.75	3.77	360	300	18.5
T8-4	0.75	3.77	480	400	22.0
T8-5	0.75	3.77	600	500	27.0
T8-6	0.75	3.77	720	600	34.0

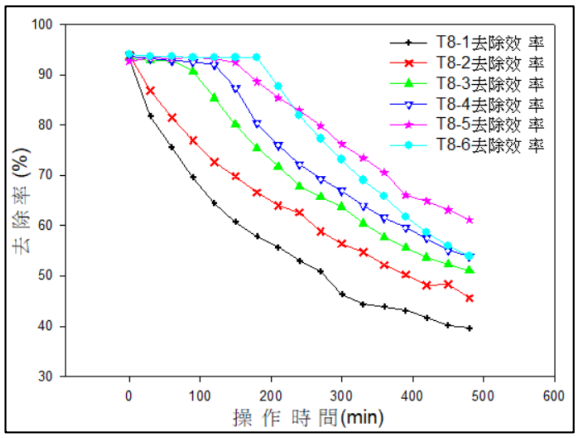

圖 18. T8-1～T8-6 模式之去除率比較

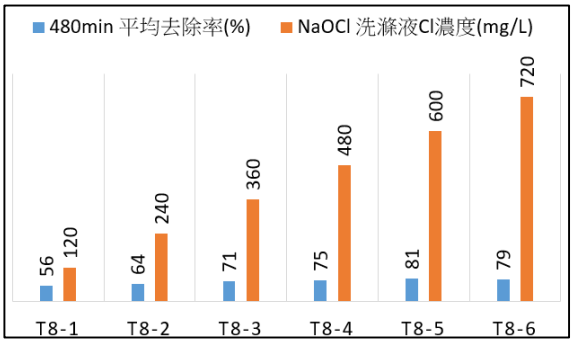

圖 19. T8-1～T8-6 模式 8 hr 之平均去除率及 NaOCl 洗滌液 Cl 濃度比較

利用NaOCl當氧化劑，洗滌後排氣會有Cl_2，為去除Cl_2，本研究選用H_2O_2為除氯劑，其反應式為式(11)，

$$H_2O_2 + 2NaOH + Cl_2 \rightarrow 2NaCl + O_2 + 2H_2O \quad (11)$$

依文獻研究指出 [5]，H_2O_2 於 pH 值 11 以上時，反應速率最高，故設相同的風量 5.88 m³/min，將雙塔串聯試驗之第二段 H_2O_2 洗滌液以 NaOH 調整 pH 為 12.0 進行雙塔

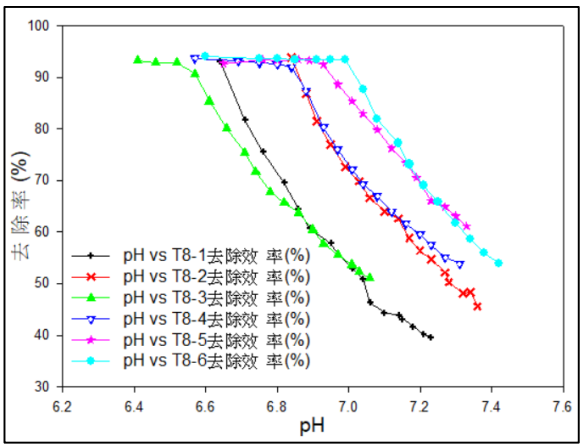

圖 20. T8-1～T8-6 模式 pH vs 去除率比較

表 16. 第二段 H_2O_2 洗滌液測試不同 H_2O_2 濃 度 操作條件

測試 No.	DT (sec)	液/氣 (L/m³)	洗滌液 H_2O_2 濃 度 (mg/L)	100 L 洗滌液用藥量 50% H_2O_2 加藥量 (mL)	調 pH12 NaOH 加藥量 (mL)
T 9-0	0.75	3.77	0	0	520
T 9-1	0.75	3.77	50	10	450
T 9-2	0.75	3.77	100	20	550
T 9-3	0.75	3.77	150	30	600
T 9-4	0.75	3.77	200	40	650
T 9-5	0.75	3.77	250	50	700
T 9-6	0.75	3.77	500	100	750
T 9-7	0.75	3.77	1000	200	850
T 9-8	0.75	3.77	1500	300	1000
T 9-9	0.75	3.77	2000	400	1200
T 9-10	0.75	3.77	2500	500	1350
T 9-11	0.75	3.77	5000	1000	2600

串聯試驗，並調 配 H_2O_2 濃 度 分 別 為 0、50、100、150、200、250、500、1000、1500、2000、2500 及 5000 mg/L，即 T9-0、T9-1、T9-2、T9-3、T9-4、T9-5、T9-6、T9-7、T9-8、T9-9、T9-10 及 T9-11 模式（表 16），進 行 雙塔串聯模式連 續 操作 8 hr ，試驗結果如圖 21 及圖 22 所 示 ， 模式 T9-0～T9-11 任一模式對排氣甲醛之 8 小 時 平 均 去除率均在 85±1 %以上（表 17），最終尚能維持 75 %之去除率，其第二段洗滌之最佳操作 pH 值介於 12.0~10.0 間，如圖 23。且第一段洗滌後排氣中的 Cl_2 經第二段洗滌後均未測出 Cl_2 濃度， 平 均 Cl_2 去 除 率 皆 達 100%， 其 中 T9-0 模式第二段洗滌液無添 加 H_2O_2， 僅 添 加 NaOH 調整 pH 為 12.0 操作同樣可除氯達 100 %（圖 24），其 操 作 最 佳 pH 值第一段為 pH 6.5， 第二段為 pH 12.0（圖 25）， 經

上述試驗結果，故 選 用 T9-0 模式為雙塔串聯操作模式，其第二段反應式為式(12)，

$$2NaOH + Cl_2 \rightarrow NaCl + NaClO + H_2O \qquad (12)$$

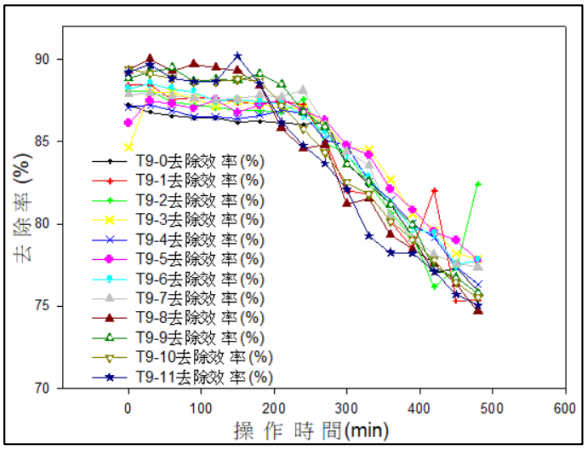

圖 21. T9-0～T9-11 雙塔串聯模式之去除率比較

表 17. T9-0～T9-11 模式雙塔串聯之甲醛去除率比較

操作時間	120 min	240 min	360 min	480 min	全程平均
T 9-0	86	86	81	76	84
T 9-1	88	87	80	76	84
T 9-2	87	88	81	82	84
T 9-3	87	87	83	78	85
T 9-4	87	87	81	76	84
T 9-5	88	87	82	78	85
T 9-6	88	87	81	78	85
T 9-7	88	88	81	77	85
T 9-8	90	85	79	75	84
T 9-9	89	87	81	76	85
T 9-10	89	86	80	76	84
T 9-11	89	85	78	75	84

（去除率單位：%）

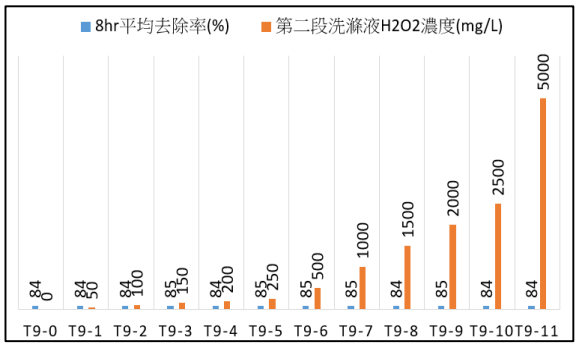

圖22. T9-0～T9-11雙塔串聯模式連 續 操作8 hr之平均去除率及第二段洗滌液之H_2O_2濃度比較

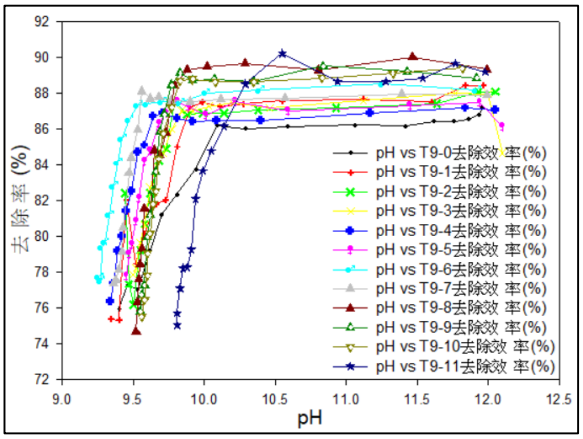

圖 23. T9-0～T9-11 模式第二段 pH vs 去除率比較

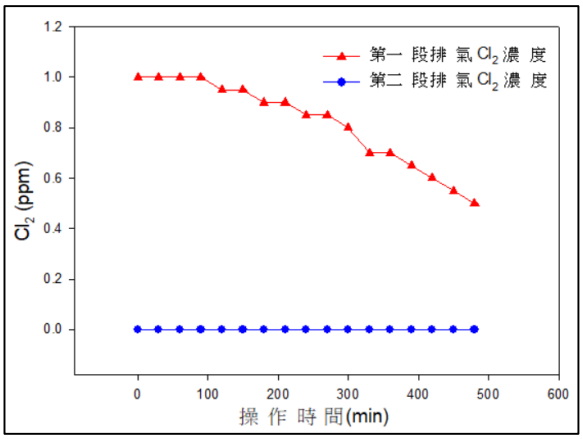

圖 24. T9-0 模式排氣 Cl_2 濃度

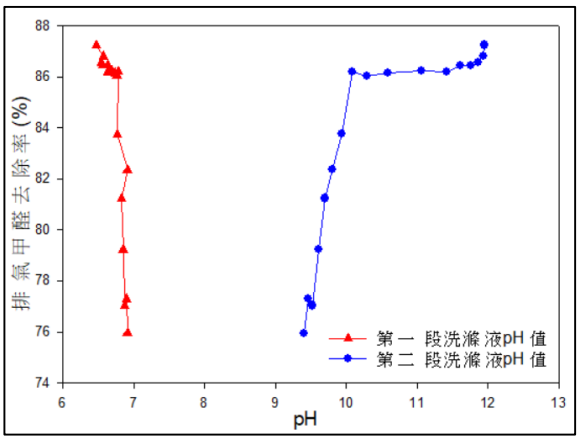

圖 25. T9-0 模式洗滌液操作 pH 值變化

由上述，選定雙塔串聯洗滌排氣甲醛去除最佳操作模式為 T9-0 模式。

延續（第三章（二）之 2 節）估計洗滌液更換時間之條

件為基礎，對比 T9-0 模式，起始至 75 % 期間試驗設備入口平均濃度 3.65 ppm，操作時間 480 min，則洗滌液連續操作的更換週期如下：春夏（5~7 月）為 2410 min，夏秋（8~10 月）為 1627 min。

5. 結論

依據實驗模組量測數據比較：

(1) 由（第三章（二）之 2 節）所示，單塔清水洗滌排氣甲醛去除結果顯示停留時間越長和液氣比越大去除率越高，其排氣甲醛最佳去除率為 T3-3 模式，其操作條件為停留時間 1.0 sec、液/氣比 3.77。選用 T3-3 模式操作，若要維持 75 %之去除率，則洗滌液連續操作的更換週期，春夏（5~7 月）為 262 min，夏秋（8~10 月）為 177 min。

(2) 由（第三章（二）之 3 節）所示，單塔氫氧化鈉洗滌排氣甲醛最佳去除率為 T6-4 模式，其操作條件為停留時間 0.75 sec、液氣比 3.77 及以 45 % NaOH 調洗滌液固定於 pH 11.0 並設定自動加藥。選用 T6-4 模式操作，若要維持 75 %之去除率，則洗滌液連續操作的更換週期，春夏（5~7 月）為 324 min，夏秋（8~10 月）為 217 min。

(3) 由（第三章（二）之 4 節）所示，雙塔串聯洗滌排氣甲醛選定最佳模式為 T9-0 模式，其操作條件為停留時間 0.75 sec、液氣比 3.77，第一段以 NaOCl 為洗滌液，調配氯濃度為 600 mg/L，並以硫酸調 pH 為 6.5，第二段則以 NaOH 為洗滌液，調整 pH 為 12.0 進行雙塔串聯洗滌操作。100 L 的洗滌液，第一段 NaOCl 為用藥量 500 mL，98%硫酸用藥量為 26 mL；第二段 NaOH 用藥量為 520 mL。選用 T9-0 模式操作，若要維持 75 %之去除率，則洗滌液連續操作的更換週期，春夏（5~7 月）為 2410 min，夏秋（8~10 月）為 1627 min。

綜合比較上述 T3-3 模式、T6-4 模式及 T9-0 模式對排氣甲醛之去除率如圖 26 所示，比較結果證明排氣甲醛去除之最佳操作模式為雙塔串聯洗滌之 T9-0 模式。

6. 經濟評估

評估條件：施工後作業區甲醛平均濃度，春夏（5~7 月）0.27 ppm，夏秋（8~10 月）0.40 ppm，處理風量 760 m^3/min，洗滌液為 4800 L（4.8 m^3），排氣甲醛去除率 75 %以上，操作時間 8 hr/day，廢水委外處理費 45,000 NT $/$m^3$。

(1) 單塔清水洗滌（T3-3 模式）

春夏（5~7 月）＝395,725 NT $ /day

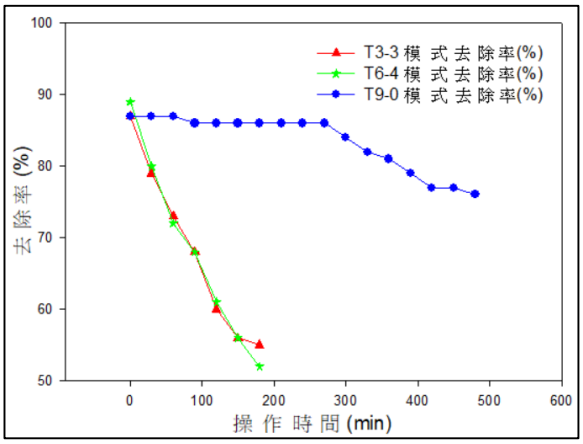

圖 26. T3-3、T6-4 及 T9-0 模式之去除率比較

夏秋（8~10 月）＝585,763 NT $ /day

(2) 單塔氫氧化鈉洗滌（T6-4 模式）

春夏（5~7 月）含藥品費用＝320,230 NT $ /day

夏秋（8~10 月）含藥品費用＝478,018 NT $ /day

(3) 雙塔串聯洗滌（T9-0 模式）

春夏（5~7 月）含藥品費用＝86,961 NT $ /day

夏秋（8~10 月）含藥品費用＝128,369 NT $ /day

四、結論與建議

（一）結論

1. 本研究案例雖然已採用高換氣率（每小時 15 次，抽風量 750 m3/min），然而，限於牛皮紙堆疊與取貨的作業特性，該區不易採取全圍封，且甲醛污染與室內溫度有關（作業環境中的甲醛濃度在夏秋季節室內高於 30℃時，仍然有出現廠方欲控制的上限濃度 0.3 ppm）。以本研究案例若採雙塔串聯洗滌規劃，其集氣成本約占總成本（集氣+水洗塔處理設備）的 50 %，如果能進一步有效集氣，以降低牛皮紙堆疊作業區甲醛逸散的濃度，不僅可以降低換氣風量及換氣成本，也可以降低作業區人員暴露於甲醛的致癌風險。

2. 本研究案例牛皮紙疊放架圍封後甲醛逸散率（%）＝（圍封前甲醛逸散量（g/hr）-圍封後甲醛逸散率（g/hr））/圍封前甲醛逸散量=（20.29 g/hr-17.05 g/hr）/20.29 g/hr）=15.96%，顯示改善有限。進一步估計圍封後甲醛的集氣效率，以管道排放甲醛量在 2021 年 12 月最低其集氣效率

40.9 %，在 5 月至 10 月較高室溫期間，其集氣效率將呈現負值。此一結果顯示，以標準檢驗方法估之甲醛逸散量有低估情形。研判係實廠甲醛逸散量受到較高室溫（5 月至 10 月期間）與通風效應影響，以致實廠甲醛逸散量高於標準檢驗方法估計值，因此集氣效率仍有改善空間。

3. 雖然本研究案例管末排放的甲醛濃度多半低於 0.3 ppm，但甲醛排放濃度仍受室溫及集氣效率影響，一旦廠方進行集氣效率提升，並降低換氣率，以節省換氣之動力成本時，研判管道所排甲醛濃度高於 1.0 ppm 的機率很高，故仍有必要加設水洗塔以適當降低所排放的甲醛濃度。以模場實驗結果顯示，以管末排放的甲醛濃度經加氯的水洗塔洗滌後，可以有效去除，其去除率與洗滌水之液氣比、pH 值與循環水使用時間有關。
4. 本研究比較三種代表性的操作模式：單塔清水洗滌最佳之 T3-3 模式、最佳之單塔氫氧化鈉洗滌 T6-4 模式及雙塔串聯洗滌 T9-0 模式對排氣甲醛之去除率，顯示在高於現況甲醛濃度約 10 倍下，單塔清水洗滌最佳之 T3-3 模式（甲醛＝3.71 ppm，液氣比＝3.77），操作 3 hr 去除率即由 87 % 降至 55 %；單塔氫氧化鈉洗滌最佳之 T6-4 模式（甲醛＝4.70 ppm，液氣比＝3.77），操作 3 hr 去除率由 89 % 降至 52 %；而雙塔串聯洗滌之 T9-0 模式（甲醛＝3.65 ppm，液氣比＝3.77），操作 8 hr 去除率由 87 % 降至 76 %，若將洗滌液 pH 值第一段控制在 pH 6.5，第二段控制在 pH 12.0 則去除率可維持 87 %以上，比較結果證明排氣甲醛去除之最佳操作參數為雙塔串聯洗滌之 T9-0 模式。
5. 實廠水洗塔循環水所需的操作更換頻率與設定的進氣甲醛的質量流率、液氣比、去除率等有關，因本研究採用 10 倍於實廠的甲醛濃度進行水洗塔效能試驗，研判在相同的水洗塔操作條件下，實廠循環水更換時間約可增加 10 倍。另外，受限於儀器靈敏度，固定式甲醛氣體偵測設備之偵測下限為 0.5 ppm，為利於統計低於偵測下限均以 0.5 ppm 替代，研判實廠之去除率應會高於統計數據。
6. 分析結果顯示，在甲醛去除率同為 75 % 的條件下，T9-0 模式洗滌液更換的時間為 T6-4 模式的 7.5 倍及 T3-3 模式的 9.2 倍。再比對（第三章（二）之 6）經濟效益評估，T9-0 模式的操作費用為 T6-4 模式的 27 % 及 T3-3 模式的 22 %。

（二）建議

1. 鑒於本研究案例牛皮紙堆疊與取貨的作業特性，該區不易採取全圍封，且以熱交換器降溫調控牛皮紙堆疊作業區室溫在 30℃以下，勢必增加操作電力成本，故建議採用原始設計（如第二章（四）之 1-（4）-（4.2）節所述），設置可供電動堆高機進出的 PVC 快速捲門，作業區出入口已設置的 PVC 自動快速捲門其操作務必徹底執行，牛皮紙堆疊架未裝設的 PVC 捲門應考慮設置，如此應可提高甲醛的集氣效率。
2. 經由上述比較，建議使用雙塔串聯模式處理排氣甲醛之去除，第一段以 NaOCl 為洗滌液，調配氯濃度為 600 mg/L，並以硫酸調 pH 為 6.5，再串聯第二段以 NaOH 為洗滌液，調整 pH 為 12.0 進行雙塔串聯洗滌操作，並設計自動加藥系統維持其洗滌液 pH 值即可達到排氣甲醛最佳之去除率，此模式也是洗滌液更換時間最長之模式，至於洗滌液確切之更換時間可依業主訂定之排放標準為依據。

參考文獻

1. 王洪鎧（民 84），工業通風設計基礎，頁 33-40，財團法人徐氏文教基金會，新北市。
2. 白曛綾、陳建志（民 92），操作績效自我評估管理制度手冊酸鹼性氣體洗滌塔，頁 6-7，補助單位：科學工業園區管理局，執行單位：國立交通大學環境工程研究所。
3. 全陸詩（民 66），通風經驗設計，頁 13，財團法人徐氏文教基金會，新北市。
4. 全國法規資料庫（107 年 03 月 14 日），勞工作業場所容許暴露標準，112 年 2 月 10 日，取自 https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=N0060004.
5. 行政院環境保護署（110 年 06 月 29 日），固定污染源空氣污染物排放標準，112 年 2 月 10 日，取自 https://oaout.epa.gov.tw/law/LawContent.aspx?id=FL015350.
6. 黃俊榮（民 104），排氣中酚之化學洗滌去除，國立中山大學環境工程研究所碩士論文。
7. 環境工程技師公會（民 100），廢氣處理設計參數及公式彙編，台北。

收件：112.02.17　修正：112.03.01　接受：112.03.22