

空氣污染與噪音類

節能與抑制二次污染導向之空污防制技術： 沸石轉輪結合觸媒焚化系統之實廠分析

鄭信暉*、徐文瑞**

摘 要

隨著環保法規日益嚴格與產業永續發展需求增加，針對揮發性有機物 (VOCs) 排放之有效治理，已成為製造業不可忽視的重要課題。本案於國內某光電產業電池製造廠建置以沸石轉輪吸脫附系統結合低溫電熱觸媒氧化爐做為防制設備進行實場應用測試，目標在於有效削減製程排放之異丙醇 (IPA)。經由連續同步監測防制設備進、出口之 VOCs 濃度，量測結果顯示，防制設備整體去除效率達 97.9%，測試證實本系統能有效穩定控制 VOCs 排放，且無二次污染產生， NO_x 濃度未達偵測極限。系統設計除滿足環境部空氣污染物排放標準，亦展現高效、節能與安全等優點，提供半導體與電子產業 VOCs 治理具實用性與兼具經濟效益的解決方案。

【關鍵字】沸石轉輪、吸附、觸媒氧化爐、VOCs 去除

* 麒翰科技工程有限公司

** 麒翰科技工程有限公司

設計副理

總經理

一、緣由及目的

空氣污染已成為影響全民健康的重要環境議題，其中揮發性有機物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 為主要關注污染物之一。若未妥善控制，會對人體造成頭痛、噁心、記憶力衰退等危害。面對法規要求與企業社會責任，業者多採用污染防制設備因應。常見技術包括吸附法、冷凝法、焚化及催化法等；其中，吸附法因具操作彈性及適用範圍廣泛，在國內最為普遍，並常與其他技術整合使用，以提升整體處理效率及降低能源消耗。有效控管 VOCs 排放不僅有助於改善空氣品質，也保障勞工作業環境安全，是企業不可忽視的重要課題。

本文應用案例為光電產業中某電池製造廠（以下簡稱為本案），為有效削減其電池製程中所產生之 VOCs 排放，規劃新設 1 套以沸石轉輪結合低溫觸媒氧化爐之空氣污染防制設備。透過沸石轉輪對低濃度、大風量之 VOCs 廢氣進行濃縮，轉化為高濃度、小風量的氣流，再進入低溫觸媒氧化爐進行催化分解與無害化處理，整體系統具備高效率與低能耗之優勢。本案所採用之空氣污染防制策略，不僅能有效控制製程廢氣對環境空氣品質的影響，同時亦符合國內環保法規，展現企業對於環境永續與職場安全的高度重視，實踐企業應盡之社會責任。

二、VOCs 量測方法

本案之分析採用連續監測方式，利用氣相層析儀搭配火燄離子偵測器 (Gas Chromatography- Flame Ionization Detector, GC-FID) 分析進出口之 VOCs 濃度，相關設備如圖 1 所示。



圖 1 GC-FID 儀器外觀圖（拓堡科技）

2.1 氣相層析儀

氣相層析的原理是基於不同成分在固定相（靜相，Stationary Phase）和流動相（移動相，Mobile Phase）中，根據各化合物的分配係數的差異而實現分離的效果。靜相通常是 1 種填充物，如多孔矽膠或聚合物，塗覆在毛細管或柱狀管中。移動相是氣相層析儀中移動的氣體，通常為氮氣、氬氣或氫氣。樣品透過氣體流注入，各成分以不同的速度通過含有液體的支撐物。由於不同成份具有不同的蒸氣壓，因此它們與液體的相互作用力也不同，在柱內分離所需的時間也不同，進而分離（張仁智，2016）。

2.2 火焰離子偵測器

火焰離子偵測的原理主要是利用 H_2 及 O_2 燃燒生成火焰，待測樣品在火焰中生成離子和電子，形成離子流，由於物質被游離後形成導電的離子，使得接收器中的電流信號增強，而電流信號與有機物之碳數成正比關係，因此火焰離子偵測適用於含 CH -基之有機物之偵測（張仁智，2016）。

三、防制設備設計與成效

3.1 沸石 (Zeolite) 簡介

沸石是一種由二氧化矽 (SiO_2) 與氧化鋁 (Al_2O_3) 組成，並與鹼金屬、鹼土金屬或稀土金屬等陽離子結合形成的矽鋁酸鹽類結晶物 (吳榮宗, 1989)，其結晶結構可忍受高溫。其結構為三維晶體，由矽或鋁原子與氧原子形成的 TO_4 四面體 ($\text{T}=\text{Si}$ or Al) 堆疊排列而成，擁有均勻孔徑與高度規則的孔道系統，能提供孔道內金屬離子或水分子的自由移動 (Walton et al., 2006)。在環境工程方面，沸石常作為分子篩使用，可依其孔徑選擇性吸附氣體中的特定污染物，例如 VOCs，並廣泛應用於廢氣處理、氣體乾燥、空氣淨化與污水處理等領域。本案使用沸石為日本東洋紡製造，其特點為使用高分子纖維與矽鋁混合物所製成，能提供較高的單位吸附容量，且熱容量較低，脫附效率高，脫附溫度約 $140\sim 180^\circ\text{C}$ 。

沸石具備以下特性：

1. 高吸附性：多孔性結構可吸附不同大小與性質的分子。
2. 離子交換性：陽離子（如鈉、鈣、鉀、鎂等）可在結構內自由交換，適用於水質處理與離子濃度調整。
3. 催化性能：適合作為觸媒或觸媒載體，廣泛應用於石化、環保等領域。

3.2 影響沸石吸附效能之因素

沸石作為常見的吸附材料，其吸附效能受到本身物理化學特性如比表面積、孔洞大小、孔隙分布、陽離子種類等 (Lee et al., 1996) 與外在操作環境條件的共同影響。

1. 比表面積與多孔性結構：沸石的比表面積愈大，提供的活性吸附位置也愈多，能有效提升吸附效率，其顆粒大小與孔洞結構直接影響比表面積與吸附潛能。

2. 孔洞大小與分布

依據國際純化學暨應用化學聯合會 (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) 之定義，沸石孔徑可分為：

- (1) 微孔洞 (Micropores) : $D < 2 \text{ nm}$
- (2) 中孔洞 (Mesopores) : $2 \text{ nm} < D < 50 \text{ nm}$
- (3) 巨孔洞 (Macropores) : $D > 50 \text{ nm}$

沸石屬於微孔性材料，其孔徑大小對吸附效果具有關鍵影響。氣體透過質傳與擴散作用進入孔隙中並被有效吸附。對於分子體積較小的 VOCs 而言，沸石可提供高度選擇性的通道結構，因此具有優異的吸附效率。

3. 溫度及濕度

吸附過程屬於放熱反應，因此操作溫度對吸附效能有明顯影響。適當的溫度有助於氣體分子進入吸附劑孔隙中，提升擴散速率；但若溫度過高，將抑制吸附反應的進行，使吸附能力下降，導致整體效能停滯。因此，在設計與操作吸附系統時，控制適宜的溫度範圍是確保吸附效能的關鍵。

3.3 沸石轉輪吸脫附系統

沸石轉輪吸脫附系統外觀如圖 2 所示，主要材料為矽鋁及高分子纖維，利用高溫燒結而成之蜂巢狀沸石塊如圖 3 所示，沸石轉輪為一種連續運轉的吸附系統，其運作方式如圖 4 所示，是透過轉輪以每小時約 2~10 轉的速度旋轉，將 VOCs 廢氣進行二階段處理。第一階段為吸附區，污染氣體通過沸石轉輪時，VOCs 被吸附於多孔結構上；隨著轉輪旋轉至第二階段的脫附區，透過後端焚化系統的熱源預熱（約 180℃ 以下），使已吸附的有機物脫附，此時脫附氣體的污染物濃度約為原始廢氣的 5~40 倍；之後轉回吸附區再次進行吸附，達成高效率削減 VOCs 的目的。本案所採用之沸石轉

輪，相關特性如表 1 所示，其沸石含量約為 75%~85%，相較於傳統沸石系統具備較高之濃縮倍率。此外，多數商用沸石轉輪脫附氣流溫度需達 200℃~230℃，本案系統設計可於 180℃ 以下完成有效脫附，顯示其於節能與操作效能上具優勢（廖文山，2019）。

沸石轉輪的優點（舒穎婕，2018）包括：

1. 高選擇性與化學穩定性：沸石具備不燃性、高活性與選擇性吸附能力，適用於多種常見的 VOCs，且不易受到如水氣或其他共存氣體的干擾，有效提升處理效率與穩定性。
2. 耐腐蝕性佳：沸石材料具化學惰性，不會腐蝕反應器本體及輸送管線，延長系統設備壽命並降低維護成本。
3. 可重複再生使用：吸附後的沸石可經由熱脫附再生，重複使用，具良好耐久性與經濟性。
4. 脫附效率高：透過加熱氣體（通常為 140℃~180℃）可快速將 VOCs 脫附，降低殘留風險。
5. 高風量低濃度氣體的處理：適合處理大風量、低濃度的 VOCs 廢氣，能有效進行空氣淨化與氣體濃縮。
6. 大幅提高濃縮效率：透過連續旋轉吸附與脫附的設計，可將 VOCs 濃縮至 5~40 倍以上，產生小風量、高濃度的脫附氣體，有助於後段處理（如催化氧化爐或 RTO）進行有效分解，同時大幅節省能源與降低運轉成本。



圖 2 沸石轉輪吸脫附系統外觀圖

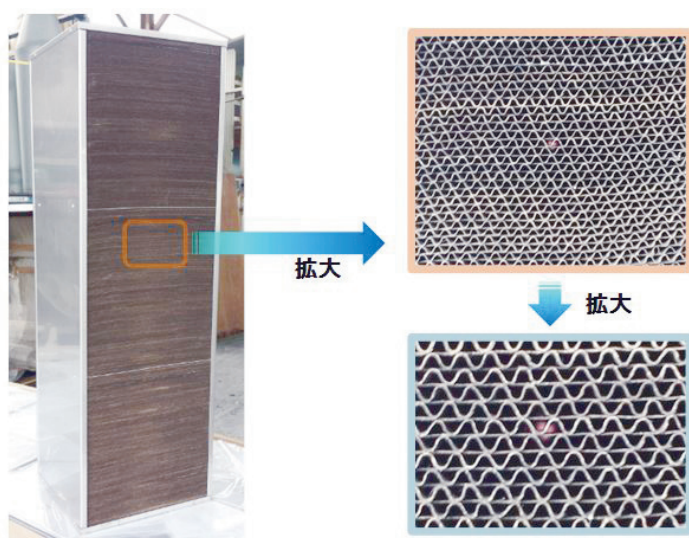


圖 3 沸石外觀 (東洋紡株式會社)

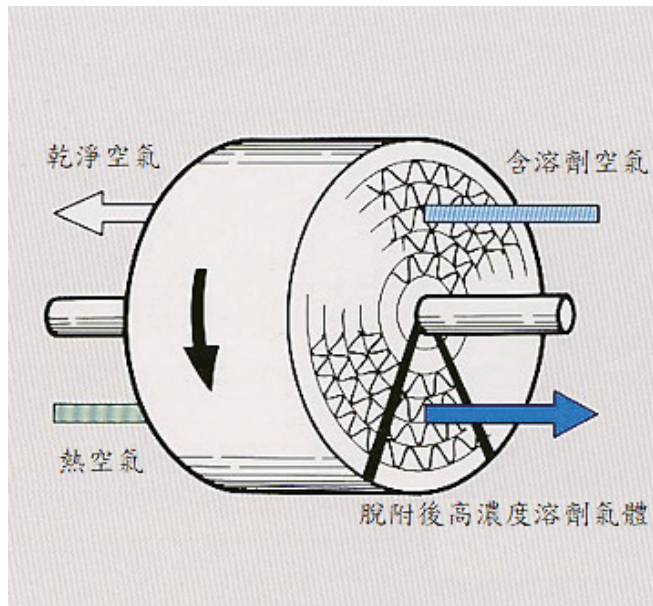


圖 4 沸石轉輪吸脫附原理流程圖

表 1 沸石相關特性

項目	數據 / 描述
材質	矽鋁及高分子纖維
沸石含量	>70%
比表面積 (m ² /g)	400~1,000
脫附溫度 (℃)	<180
濃縮倍率	5~40
耐熱溫度 (℃)	800~1,000
可燃性	不燃

3.4 觸媒氧化系統

觸媒氧化爐是利用觸媒降低化合物燃燒分解所需要的活化能來促進氧化反應，相較於操作溫度高達 600℃ ~800℃ 之傳統焚化爐，觸媒氧化爐操作溫度範圍一般介於 250℃ ~400℃，可有效降低能耗，並於較低溫下將 VOCs 轉化為無害之二氧化碳 (CO₂)

與水蒸氣 (H_2O)，達到空氣污染控制之目的。圖 5 為觸媒熱氧化法 (Catalytic Thermal Oxidization, CTO) 的流程示意圖，系統設計上，焚化設備常搭配熱交換器以提升能源使用效率。廢氣在進入觸媒床層前，會先經由熱交換器預熱，使其溫度接近觸媒反應所需之分解溫度；若預熱後溫度仍不足，則可輔以電或天然氣加熱器進一步升溫，以確保觸媒反應區維持穩定操作條件。氧化後之淨化氣體則再經由熱交換器，釋出熱能以預熱後續進氣，並於冷卻後排放至大氣中，系統外觀圖如圖 6 所示（呂權訓，2020）。

在觸媒氧化爐之應用中，須特別留意觸媒毒化與觸媒燒結等可能影響系統效能之問題。觸媒毒化係指觸媒受到氣流中特定污染物質影響，導致其催化活性降低甚至喪失，進而使反應效率下滑與系統穩定性下降。常見具毒化潛勢之物質包括含氯化合物、含硫化合物以及重金屬等，故於系統規劃與設計階段，應審慎評估進料氣體成分，以預防毒化情形發生。另一方面，觸媒燒結係因長時間處於高溫操作環境，使觸媒表面活性物質產生結構重組，導致活性顯著下降甚至完全失效。操作溫度對於觸媒反應效率具重要影響，雖較高溫度有助於提升有機物之氧化效率，惟當溫度長時間超過 700°C ，將增加觸媒燒結風險與能源消耗，進而提高整體操作成本。因此，於實際應用中應綜合考量觸媒特性、廢氣成分與反應條件，確保系統穩定性與處理效率，達成最佳操作效能。(Chu and Windawi, 1996)。

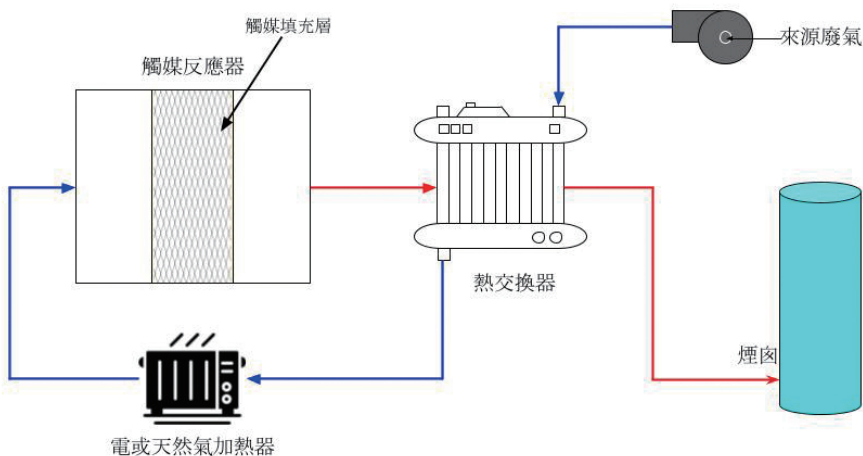


圖 5 觸媒熱氧化法流程圖



圖 6 觸媒熱氧化系統外觀圖

3.5 VOCs 處理成效

本案製程使用化學品為異丙醇，操作時間為 8 小時 / 日、300 日 / 年，製程產生之廢氣於 50℃ 自排氣出口排出，經由降溫設備進行預冷卻處理後，導入本次新設之空氣污染防制設備進行處理，防制設備前後端的廢氣風量可能一樣均為 481 NCMM，各項操作條件如表 2 所示。為評估空氣污染防制設備對製程產生 VOCs 廢氣之去除效率，採用氣相層析火焰離子偵測器 (GC-FID) 進行連續監測。監測位置包含防制設備前端（沸石轉輪入口）與後端（煙囪出口）之排放管道，進、出口同步進行量測。監測作業自 2024 年 12 月 19 日 10 時 40 分起，至同日 11 時 39 分止，總計持續 1 小時。資料擷取頻率為每分鐘 1 次，合計收集 60 筆監測數據，作為設備去除效率評估之依據。

本案依據「排放管道中總碳氫化合物及非甲烷總碳氫化合物含量自動檢測方法－線上火焰離子化偵測法 (NIEA A723.75B)」，其方法偵測極限 (Method Detection Limit, MDL) 約為 1 ppm as CH₄；針對一氧化碳之監測，採用「排放管道中一氧化碳自動檢驗法－非分散性紅外光法 (NIEA A704.06C)」，其方法偵測極限約為 1 ppm。

空氣污染物防制設備對於製程作業產生的 VOC 廢氣的控制效率計算如下公式說明：

平均控制效率 = { 平均排放量（質量流率）inlet – 平均排放量（質量流率）outlet } / { 平均排放量（質量流率）inlet } × 100%

表 2 系統操作條件

操作條件	規格 / 數據
進氣風量 (NCMM)	481
進氣溫度 (°C)	45.1
VOCs 進氣濃度 ppm as CH ₄	96
沸石脫附溫度 (°C)	140
濃縮倍率	20~30
氧化爐溫度 (°C)	300
面速度 (Nm/s)	0.5~1
氧化爐停留時間 (s)	0.2~0.4

3.5.1 防制設備入出口量測結果

根據連續監測資料分析，VOCs 入口濃度最低值為 83 ppm as CH₄，最高值為 101 ppm as CH₄，大部分時間入口濃度介於 90 ~100 ppm as CH₄，平均值為 96 ppm as CH₄，煙囪出口濃度平均值為 2 ppm as CH₄，防制設備系統平均去除效率為 97.9%，測試結果如圖 7 所示。根據環境部公告空氣污染管制及排放標準，防制設備處理效率應大於 90% 或揮發性有機物排放標準應小於 14 ppm as CH₄，表示本案新設之防制設備對排氣之異丙醇污染物有良好的吸附及氧化效果並符合空氣污染物排放標準。

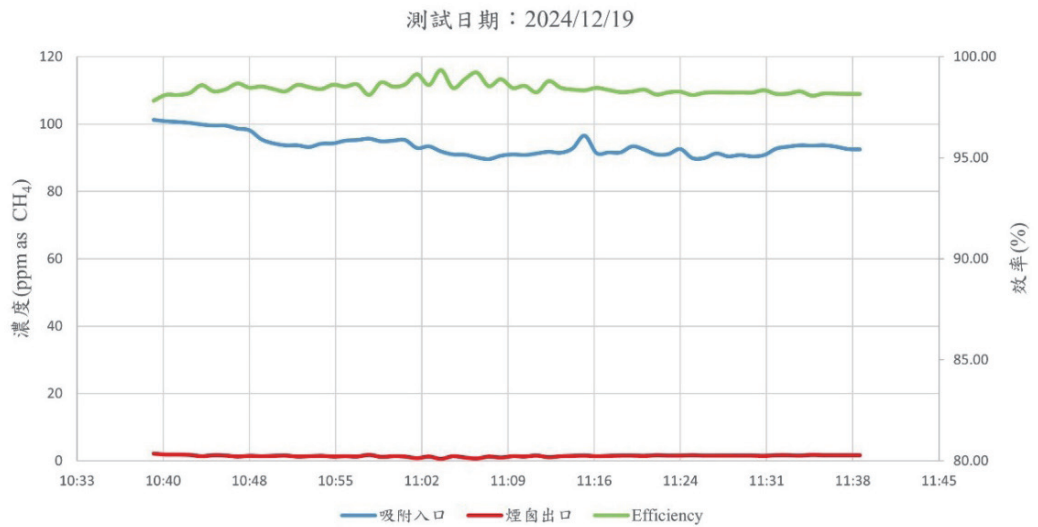


圖 7 沸石轉輪吸脫附系統結合觸媒氧化爐系統監測濃度及處理效率

3.6 觸媒氧化系統與其他熱處理技術之比較分析

為有效控制揮發性有機物及其他空氣污染物之排放，產業界普遍採用多種熱處理技術進行廢氣淨化處理，常見技術包括低溫觸媒氧化系統、蓄熱氧化系統及直燃氧化系統，各類系統在運行特性、污染物去除效率、及適用條件方面皆有所差異，針對上述 3 種熱處理技術進行比較分析，如表 3 所示；並進一步以相同進流條件與操作時間為基準，進行運轉成本之比較分析，運轉成本僅涵蓋電力 / 燃料消耗、以凸顯系統在節能方面之相對優勢，故不含觸媒更換等長期維護成本，其實際費用應視操作條件與觸媒壽命另行估算，相關結果如表 4 所示，此外於各煙囪出口進行氮氧化物 (NO_x) 濃度監測，結果顯示觸媒氧化系統排放濃度低於方法偵測極限，顯示其副產物生成極低；相對地，蓄熱氧化系統及直燃氧化系統皆檢測出約 54 ppm 之 NO_x 排放濃度；根據文獻資料指出，空氣燃燒條件當燃燒溫度達 1,000 °K 時，理論上約產生 37 ppm 之 NO_x，此結果亦與實測數據趨勢相符 (De Nevers, 2010)。

表 3 熱處理技術之比較分析（張銘恩，2019；王志發，2022）

項目	觸媒氧化系統	蓄熱氧化系統	直燃氧化系統
操作溫度	250~400℃	750~850℃	750~850℃
可處理風量	中小風量較適用	可處理大風量廢氣	中小風量較適用
處理效率	90~98% （依觸媒與設計條件而定）	95% 以上	95% 以上
啟動加熱 / 冷卻時間	快	慢	慢
對污染物耐受性	觸媒易受鉛、硫、鹵素、矽等而毒化	較佳	較佳
副產物	NO _x 、CO 生成量非常少	高溫下可能產生 NO _x	高溫下可能產生 NO _x
設備初期成本	較低	高	高
加熱方式	電熱或天然氣	天然氣	天然氣
適用場合	每天須開機時非常適用，起爐時間短	中大風量、連續操作場域	低廢氣流量、高濃度（熱值）之廢氣

表 4 熱處理技術之成本分析

項目	觸媒氧化系統	蓄熱氧化系統	直燃氧化系統
脫附風量 (NCMM)	22	22	22
進氧化爐 / 燃燒室溫度 (℃)	219	700	630
氧化爐設定溫度 (℃)	300	800	800
氧化爐運轉成本	467,591 元 / 年	605,738 元 / 年	1,071,403 元 / 年

四、結論與建議

4.1 結論

- 一、防制設備前後端同步量測評估的結果顯示，沸石轉輪吸脫附搭配觸媒氧化爐系統可以有效控制製程產生的異丙醇廢氣；異丙醇的平均去除效率為 97.9%，整體處理效率符合環境部之空氣污染物排放標準要求。
- 二、為確認系統運轉對其他空氣污染指標物之影響，亦針對煙囪出口進行 NO_x 與 CO 濃度檢測。經分析結果顯示， NO_x 濃度未達方法偵測極限 (Method Detection Limit, MDL)、CO 濃度僅 1 ppm，顯示本系統操作條件良好，未產生二次污染，亦兼顧空氣品質保護與環境永續之要求。
- 三、觸媒氧化系統設計操作溫度低於傳統熱處理系統，搭配熱交換器可有效回收餘熱降低能源損耗，整體年運轉成本約為 467,591 元，低於蓄熱氧化與直燃系統，有助於企業節能降耗並提升經濟效益

4.2 建議

- 一、定期檢視沸石轉輪的吸附與脫附效能及觸媒氧化爐內部溫度分布，必要時調整廢氣在觸媒床的停留時間與溫度控制，進一步優化處理效果與降低潛在副產物（丙酮）的風險。
- 二、由於目前廢氣成分以異丙醇為主，若未來製程變更導致氣體中含有氯、硫、重金屬等成分時，建議重新評估觸媒材質與防毒設計，以避免觸媒中毒影響處理效率。

參考文獻

吳榮宗，工業觸媒概論，國興出版社，新竹市，1989 年 8 月增訂版。

東洋紡株式會社，<https://www.toyobo.co.jp/>。

拓堡科技，<https://www.topsensors.com.tw/>。

張仁智，「揮發性有機物 (VOCs) 空汙防治設備之蓄熱式燃燒爐 (RTO) 效能提升研究 - 以光電廠為例」，碩士論文，國立屏東科技大學，2016。

舒穎婕，「以沸石轉輪焚化系統處理變壓器塗裝作業 VOCs 效率探討」，碩士論文，國立中央大學，2018。

廖文山，「不同材質沸石轉輪之 VOCs 濃縮燃燒系統之參數最佳化」，碩士論文，國立臺北科技大學，2019。

呂權訓，「以緩衝模組提升兩塔型 RTO 處理效率之可行性探討」，碩士論文，國立中央大學，2020。

張銘恩，「兩種蓄熱式焚化爐應用於半導體製程廢氣處理之效能比較」，碩士論文，國立中央大學，2019。

王志發，「半導體業沸石轉輪運轉與節能分析」，碩士論文，中原大學環境工程學系，2022。

Chu, W., & Windawi, H. (1996). Control VOCs via catalytic oxidation. *Chemical engineering progress*, 92(3).

De Nevers, N. (2010). *Air pollution control engineering*. Waveland press.

Lee, H.-K., Shim, M.-J., Lee, J.-S., & Kim, S.-W. (1996). Characteristics of CO gas adsorption on modified natural zeolite. *Materials Chemistry and Physics*, 44(1), 79-84.

Walton, K. S., Abney, M. B., & Douglas LeVan, M. (2006). CO₂ adsorption in Y and X zeolites modified by alkali metal cation exchange. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1-3), 78-84.

