



行政院環境保護署

108 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解 之長效現地測試

期末報告(定稿)

主辦單位



行政院環境保護署

專案執行單位

中原大學／環境工程學系

專案主持人

游勝傑 教授

專案執行期間

108 年 01 月 4 日起至

108 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 108 年 12 月 印製





專案基本資料表

| | | | | | | | |
|-------------------------|------------|---|------------|-----------------|-------------|--|--|
| 專案性質 | | <input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質 | | 專案類別(單選) | | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 | |
| 研究主題 | | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他 | | | | | |
| 申請機構系所 | | 中原大學環境工程學系 | | | | | |
| 機構地址 | | 桃園市中壢區中北路 200 號 | | | | | |
| 專案主持人 | | 游勝傑 | | 職等／職稱 | | 教授 | |
| 協同主持人 | | 王雅玢 | | 職等／職稱 | | 教授 | |
| 專案 名稱 | 中文 | 以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試 | | | | | |
| | 英文 | Visible-light-driven photocatalytic commercial module for degradation of SVE exhaust in long-term treatment of field pollution. | | | | | |
| | 關鍵字 | SVE 尾氣、可見光、光催化、商業模組 | | | | | |
| 執行期程 | | 自民國 108 年 01 月 04 日起 至民國 108 年 11 月 30 日止 | | | | | |
| 專案主持人 | | 姓名：游勝傑 E-mail：sjyou@cycu.edu.tw | | | | 專線：03-2654911 手機：0928-210407 | |
| 專任助理 | | 姓名：陳余育 E-mail：maybeloveforever@gamil.com | | | | 專線：03-2654909 手機：0911-128032 | |
| 經費 分析 總表 | | 專案預估總經費 | | 第一年 申請金額 | 第二年 申請金額 | 編列說明 | |
| | | 1. | 人事費用 | 260,000 | | (1~5 項相加之 50%為限) | |
| | | 2. | 貴重儀器使用含維護費 | 0 | | (與計畫實驗相關) | |
| | | 3. | 消耗性器材與主要費用 | 570,000 | | (與計畫主體相關) | |
| | | 4. | 其它研究相關費用 | 0 | | (差旅與租賃費用) | |
| | | 5. | 雜項費用 | 0 | | (1~6 項相加之 5%為限) | |
| | | 6. | 行政管理費 | 20,000 | | (1~5 項相加之 10%為限) | |
| | | 7. | 自籌款 | 0 | | (自行籌備款項) | |
| | | 申請補助金額(1~6 項) | | 850,000 | | 總金額：850,000 | |
| | | 計畫總金額(1~7 項) | | 850,000 | | 總金額：850,000 | |

專案主持人（簽名及蓋章）：

日期：





中文摘要

當土壤受到油氣污染時多以氣體抽除法進行整治，該法為防止土壤氣體污染氣體直接排放進入大氣環境，抽出之氣體經由管線至尾氣處理設備，經活性炭處理後排放，以確保排放符合氣體標準，該尾氣處理方式需要添加活性炭吸附劑。因此，本計畫擬發展利用可見光催化劑將 SVE 法尾氣進行催化降解，並將殘存的尾氣再透過活性炭進行吸附。由於使用“可見光催化+吸附膜組”，既較一般光催化劑節省能源，又減少傳統方法對大量活性炭的依賴，大大降低了尾氣處理之成本，降低空氣汙染風險。

於執行計畫過程中本團隊發現了前期吸附模組可能內部有短流現象的問題，並透過 ANSYS 有限元素分析軟體進行內部流場分析，結果顯示前期模組確實內部會產生短流現象，為減少吸附模組內部短流現象以利活性炭吸附，本團隊重新設計一套吸附模組，同時也透過 ANSYS 有限元素分析軟體對其內部流場進行分析，分析結果顯示，重新設計之模組因其內部增加了整流版，因此模組內部污染物可有效透過整流板擴散至吸附模組內部，使活性炭可有效與污染物進行接觸且吸附。

本團隊接著進行了實際污染場址之接洽，與桃園環保局、中油油品行銷事業部桃園營業處及新野科技股份有限公司進行協商後，現已可對商業化模組進行實際廠址實驗，經由測試後，發現可將 40-50ppm 之 SVE 尾氣降至 0.8ppm 以下，去除效率高達 95% 以上，因此，本團隊認為本商業化模組可取代現有 SVE 尾氣處理設備，降低土壤整治費用。



Abstract

Recently, soil vapor extraction (SVE) has been widely applied as in-situ remediation of groundwater contaminated by petroleum hydrocarbon. In order to prevent contaminated gas emissions, the pumped polluted gasses were adsorbed by activated carbon at tail gas treatment unit before their release in the atmosphere, which prevents the pollutant gases being discharged directly into the atmosphere. Activated carbon requires expensive costs, problem of adsorption over-saturation and high energy consumption so that it is not suitable for SVE method

In our study, utilization of visible-light-driven catalyst developed to degrade SVE process toluene, then the remaining exhaust gas is adsorbed by activated carbon. Compared to the general photocatalyst, it not only saves energy but also reduces the amount of activated carbon in the traditional method due to the use of the "photocatalysis module + adsorption module." It significantly reduces the cost of treating exhaust gas and the risk of air pollution. In the first half of 2019 years, we found that the pre-adsorption module may have a short-flow phenomenon inside and through the ANSYS software for internal flow field analysis. The results depicted that there are short-flow phenomena inside the early modules. To facilitate the adsorption of activated carbon to reduce the short-flow phenomenon inside the adsorption module. We have redesigned an adsorption module and analyzed its internal flow field via ANSYS finite element analysis software. The results indicated that a rectified version has been added to the redesigned module, so that the module's internal pollutants can be effectively diffused through the rectifying plate into the adsorption module.

We also conducted the actual pollution site in the first half of 2019. The commercial module can now be implemented after discussion with Taoyuan EPB, CPC Corporation and Xinye Technology Co., Ltd. We are expected to insert the completed commercial module into the actual site in the second half of the year and find that the removal performance could be achieved to 95%, which the treated gas could be lower than 0.8 ppm. By means of a real data test to evaluate the efficiency and cost of the commercial module, the commercial module is expected can replace existing SVE exhaust gas treatment equipment and reduce soil remediation costs.



目錄

| | |
|------------------------------------|----|
| 中文摘要 | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| 目錄 | I |
| 表目錄 | IV |
| 圖目錄 | V |
| 一、 前言 | 1 |
| 二、 研究目的 | 3 |
| 三、 文獻探討 | 4 |
| 3.1、 我國土壤地下水受油氣污染現況 | 4 |
| 3.1.1、 加油站類型事業單位可能洩漏源及洩漏原因分析 | 5 |
| 3.1.2、 我國現有部份油氣污染控制廠址 | 7 |
| 3.1.3、 我國現有分部加油站整治污染廠址 | 9 |
| 3.2、 土壤地下水污染整治技術 | 10 |
| 3.2.1、 土壤氣體抽除法 | 11 |
| 3.2.2、 生物通氣法 | 12 |
| 3.2.3、 低溫加熱脫附法 | 14 |
| 3.2.4、 空氣注入法 | 16 |
| 3.2.5、 現地化學氧化法 | 18 |
| 3.2.6、 雙相抽除法 | 21 |
| 3.3、 本團隊模廠擬測試之場址說明 | 24 |
| 3.3.1、 本場址公告資料 | 24 |
| 3.4、 土壤氣體抽除法(SVE)介紹 | 25 |
| 3.4.1、 污染物移除機制 | 25 |
| 3.4.2、 土壤氣體抽除法(SVE)設備元件說明 | 26 |
| 3.4.3、 SVE 尾氣處理方法 | 28 |
| 3.4.4、 本場址 SVE 尾氣處理說明 | 29 |
| 3.5、 光催化原理簡介 | 30 |
| 3.5.1、 光催化之發展 | 31 |
| 3.5.2、 半導體種類 | 32 |
| 3.5.3、 奈米材料理論 | 33 |
| 3.5.4、 二氧化鈦晶型結構 | 34 |



| | |
|---|-----------|
| 3.5.5、改質二氧化鈦成為可見光催化劑 | 35 |
| 3.6、前期計畫及已獲之研究成果 | 39 |
| 3.6.1、光催化模組效益評估 | 39 |
| 3.6.2、模組測試 | 39 |
| 四、研究方法與過程 | 44 |
| 4.1、光催化模組之開發 | 46 |
| 4.1.1、降解對象 BTEX 之危害 | 47 |
| 4.1.2、污染廠址選擇及現場污染物調查 | 47 |
| 4.1.3、光觸媒製備 | 47 |
| 4.1.4、光催化模組效益評估 | 48 |
| 4.2、光觸媒塗佈載體模組開發 | 49 |
| 4.2.1、光催化載體模組製備 | 49 |
| 4.2.2、光觸媒製備 | 50 |
| 4.2.3、進行多組分氣體的光催化降解測試 | 51 |
| 4.2.4、組裝“光催化+吸附”多模塊的商業模組 | 51 |
| 4.2.5、商業化模組的優化和綜合性能評估 | 51 |
| 4.2.6、光催化載體模組實廠尾氣催化效能評估 | 52 |
| 4.3、整體可行性分析 | 52 |
| 4.3.1、可搭配廣泛型 SVE 技術，利於市場推廣 | 52 |
| 4.3.2、利用奈米光催化劑，一次性降解揮發性有機廢氣 | 52 |
| 4.3.3、已具有實用性的光催化商業模組雛形 | 53 |
| 4.3.4、組裝光催化+吸附多模塊的商業模組，實現 plug-and-play | 54 |
| 4.4、工作進度甘特圖 | 55 |
| 五、執行結果 | 57 |
| 5.1、新吸附模組建置 | 57 |
| 5.1.1、前期吸附模組測試 | 57 |
| 5.1.2、前期吸附模組模流分析 | 58 |
| 5.1.3、吸附模組再設計 | 61 |
| 5.1.4、新吸附模組模流分析 | 66 |
| 5.1.5、吸附模組穩定性測試 | 70 |
| 5.1.6、載體數量測試 | 71 |
| 5.1.7、活性碳置入量測試 | 73 |



| | |
|----------------------------------|------------|
| 5.1.8、 污染物進氣流量測試 | 74 |
| 5.1.9、 吸附模組比較 | 76 |
| 5.2、 光催化商業模組測試 | 78 |
| 5.2.1、 環境濕度影響 | 78 |
| 5.2.2、 污染物進氣流量測試 | 80 |
| 5.2.3、 實驗室模場長效型測試 | 82 |
| 5.3、 各模組去除效率比較 | 84 |
| 5.4、 污染場址測試 | 86 |
| 5.4.1、 實際場址測試 | 87 |
| 5.5、 成本分析 | 88 |
| 六、 結論與建議 | 90 |
| 6.1、 結論 | 90 |
| 6.2、 檢討與建議 | 91 |
| 七、 參考文獻 | 92 |
| 附錄一 108 年度專案成果績效自評表 | 1-1 |
| 附錄二 申請計畫書審查意見回覆對照表 | 2-1 |
| 附錄三 期中報告書審查意見回覆對照表 | 3-1 |
| 附錄四 期末報告書審查意見回覆對照表 | 4-1 |



表目錄

| | |
|---------------------------------------|----|
| 表 3.1、台灣地區土壤污染案例統計表 | 4 |
| 表 3.2、油品洩漏可能原因 | 6 |
| 表 3.3、台灣地區油氣污染控制場址中污染物種類 | 8 |
| 表 3.4、台灣油氣污染整治場址及污染物種類 | 9 |
| 表 3.5、擬測試控制場址公告資料 | 24 |
| 表 3.6、美國環保署對土壤氣體抽除法尾氣處理建議 | 29 |
| 表 5.1、載體數量對甲苯降解最大去除量 | 72 |
| 表 5.2、單層載體置入不同量活性碳對甲苯降解最大去除量 | 73 |
| 表 5.3、不同污染物流量於吸附模組對甲苯最大去除量 | 75 |
| 表 5.4、吸附模組於 30 分鐘去除甲苯總量 | 75 |
| 表 5.5、光催化商業模組於不同環境濕度下對甲苯降解最大去除量 | 79 |
| 表 5.6、光催化商業模組於不同污染物流量下甲苯最大去除量 | 81 |
| 表 5.7、各模組於 90 分鐘最大甲苯去除量 | 85 |
| 表 5.8、光催化商業模組成本計算 | 89 |



圖目錄

| | |
|---|----|
| 圖 3.1、空氣注入法適用性評估 | 17 |
| 圖 3.2、土壤抽氣搭配空氣注入法示意圖 | 25 |
| 圖 3.3、常見 SVE 系統示意圖 | 27 |
| 圖 3.4、移動式推車 SVE 設備主要組成圖 | 28 |
| 圖 3.5、為光催化原理圖 | 31 |
| 圖 3.6、在 PH=7 的中性溶液中，可發生於二氧化鈦表面之氧化還原反應 | 31 |
| 圖 3.7、半導體之能階間距分佈圖 | 33 |
| 圖 3.8、 TiO_6 八面體 | 34 |
| 圖 3.9、 TiO_6 八面體連接方式 | 35 |
| 圖 3.10、銳鈦礦(ANATASE)和金紅石(RUTILE)的晶體結構圖 | 35 |
| 圖 3.11、光生電子和空穴的產生、分離和複合 | 36 |
| 圖 3.12、二氧化鈦氧空位示意圖 | 37 |
| 圖 3.13、光催化模組圖 | 39 |
| 圖 3.14、可見光暗箱吸附圖 | 41 |
| 圖 3.15、紫外光暗箱吸附圖 | 41 |
| 圖 3.16、清洗前紫外光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖 | 42 |
| 圖 3.17、清洗後紫外光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖 | 42 |
| 圖 3.18、可見光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖 | 43 |
| 圖 3.19、光催化比較之甲苯濃度變化圖 | 43 |
| 圖 4.1、研究方法三部曲框架圖 | 44 |
| 圖 4.2、光催化實廠模組設計圖 | 45 |
| 圖 4.3、光催化降解 BTEX 之反應流程之設計 | 47 |
| 圖 4.4、光催化實廠模組設計 | 49 |
| 圖 4.5、鍺參雜二氧化鈦製備流程 | 50 |
| 圖 4.6、土壤廢氣之光催化實廠商業模組設計圖 | 51 |
| 圖 4.7、常見 SVE 系統示意圖 | 52 |



| | |
|--|----|
| 圖 4.8、商用 P25 及 1WT%LA-TiO ₂ SEM 圖 | 53 |
| 圖 4.9、污染氣體降解測試平臺 | 53 |
| 圖 4.10、光催化商業化模組設計圖（圖左）及實物圖（圖右） | 54 |
| 圖 5.1、不同數量活性碳置於吸附模組對甲苯吸附比較 | 57 |
| 圖 5.2、吸附模組設計圖 | 58 |
| 圖 5.3、附模模組 ANSYS 分析模型 | 59 |
| 圖 5.4、附模模組 ANSYS 分析網格 | 59 |
| 圖 5.5、附模模組 ANSYS 分析邊界條件 | 60 |
| 圖 5.6、附模模組 ANSYS 流場分析 | 60 |
| 圖 5.7、新吸附模組外觀 | 61 |
| 圖 5.8、新吸附模組含內部組件剖面圖 | 62 |
| 圖 5.9、新吸附模組不含內部組件剖面圖 | 62 |
| 圖 5.10、新吸附模組尺規前視圖 | 63 |
| 圖 5.11、新吸附模組尺規側視圖 | 63 |
| 圖 5.12、新吸附模組尺規上視圖 | 64 |
| 圖 5.13、新吸附模組內部組件外觀 | 64 |
| 圖 5.14、新吸附模組內部組件尺規前視圖 | 65 |
| 圖 5.15、新吸附模組內部組件尺規側視圖 | 65 |
| 圖 5.16、新吸附模組內部組件尺規上視圖 | 65 |
| 圖 5.17、新吸附模組實品圖 | 66 |
| 圖 5.18、新吸附模組 ANSYS 分析模型 | 67 |
| 圖 5.19、新吸附模組 ANSYS 分析網格 | 67 |
| 圖 5.20、新吸附模組 ANSYS 分析邊界條件 | 68 |
| 圖 5.21、吸附模組內部流體分析左上視圖 | 69 |
| 圖 5.22、吸附模組內部流體分析右視圖 | 69 |
| 圖 5.23、吸附模組內部流體分析上視圖 | 70 |
| 圖 5.24、具整流板之吸附模組穩定時間測試 | 71 |



| | |
|------------------------------------|----|
| 圖 5.25、載體數量對甲苯降解濃度影響 | 72 |
| 圖 5.26、不同數量活性碳於單層載體測試 | 74 |
| 圖 5.27、不同污染物流量對吸附模組去除效率影響 | 76 |
| 圖 5.28、整流板於吸附模組去除效率比較 | 77 |
| 圖 5.29、光催化商業模組於不同濕度下甲苯去除率 | 80 |
| 圖 5.30、不同污染物流量於光催化商業模組處除效率比較 | 81 |
| 圖 5.31、光催化商業模組長效型測試 | 83 |
| 圖 5.32、不同模組之甲苯去除效率 | 85 |
| 圖 5.33、實際污染場址整治設備 | 86 |
| 圖 5.34、實際污染場址整治設備 | 86 |
| 圖 5.35、光催化商業模組實際污染場址測試 | 87 |
| 圖 5.36、光催化商業模組實際場址測試 | 88 |





一、前言

有機污染一直地下水最主要的污染來源，目前常見的污染可以分成兩大類，第一類為石化類碳氫化合物，其污染來源大部分為加油站地下油槽或是大型儲槽洩漏，由於地震造成管線鬆脫或是由於腐蝕造成管線與儲槽洩漏，皆容易導致土壤與地下水污染，第二類則是含氯有機溶劑污染，在過去許多工場以含氯有機溶劑作為脫脂劑，但因缺乏環保觀念隨意傾倒或操作不慎導致洩漏而不自知，致使其污染土壤與地下水。

石化產業的有機污染物有部分可以被生物分解，一般分解狀況與分子結構有關，低碳數以及直鏈型的有機物容易被生物分解，高碳數或單環、多環化合物則較不容易被生物分解。當土壤與地下水受到這類化合物污染時，常見的處理方法包括：空氣注入法配合土壤蒸氣萃取法、化學氧化法、加強生物處理法、抽出處理法。

其中化學氧化法雖然可以有效處理地下水中有機污染物，但對於土壤中的污染物則因為無法確認是否與污染物接觸，致使處理效果較差，且加入強化劑進入地下水中對周遭生態或環境可能產生破壞，如土壤中的物質可能受到氧化產生其他物質，又或是土壤中的微生物可因強氧化劑加入而死亡。

加強生物處理法對於土壤中污染物的處理效果較差，雖然屬於較環保的處理方式，但因生物處理較難控制，往往需耗費相當長的時間，除非整治時程不受到限制，因此大部分公司不願意採用此種處理方法。地下水抽出處理法，在過去較常被使用，但由於抽水水量無法有效控制，經常會有抽不到水的狀況，假設無法找到形成「非水相液體(NAPL, Nonaqueous Liquid Phase)」之位置，處理效果將會無法控制，在另一方面，大量抽出地下水其相關之處理費用會增加，這也是主要的缺點之一，目前使用抽出處理法，除了處理有機物外，另一個重要的目的在控制地下水流動，避免污染物移出管制範圍外。

基於上述理由，將空氣注入法配合土壤蒸氣萃取法處理受有機物污染場址，視為重要的處理程序之一，但此處理方法有一個缺點為只能針對揮發性較高的有機物進行處理，對於揮發低的有機物相對處理效率較差，如果遇到形成 LNAPL(Light Nonaqueous Liquid Phase)之污染狀況，可預期獲得一定的處理結果，若污染物屬於含氯有機溶劑，則處理更加困難，大部分含氯有機溶液比重皆比水重，容易以 DNAPL(Dense Nonaqueous Liquid Phase)的形式存在於地下水中，不但不容易以上述方法處理，氯含量較高的有機溶劑如三氯乙烷、四氯乙烯等也不容易以微生物進行分解，在此情況下使用化學氧化的機會將增加。

化學氧化程序中的氧化劑包括過錳酸鹽、Fenton 試劑、臭氧及過硫酸鹽，在過去較常使用過錳酸鹽做為氧化劑，但由於容易形成二氧化錳沉澱導致管線阻塞，Fenton



試劑需要酸性環境較能夠發揮效用，臭氧則須現場製造，因此近年來使用過硫酸鹽的機率逐漸增加，但如前所述，使用氧化劑容易破壞現地生態且對於土壤中的有機物處理效率較差。

對於受含氯有機溶劑污染場址，空氣注入法配合土壤蒸氣萃取法仍為重要的選擇處理方法之一，為防止此氣體抽除法之土壤氣體污染氣體直接排放進入大氣環境，抽出之氣體經由管線至尾氣處理設備進行處理，經活性碳吸附處理後排放，以確保排放符合氣體標準，惟該等尾氣處理方式需要添加昂貴之活性碳，且活性碳回收脫附或直接廢棄均需再進行處理，相當耗能，對於土壤抽除法之尾氣端處理仍是一大挑戰。

因此，本計畫擬發展利用可見光催化設備直接連於現場將 SVE 法尾氣端進行光催化降解，不需讓尾氣端的氣體經由活性碳吸附後排放，使用本光催化裝置即可達到效果，由於本計畫擬採用低耗能的光催化設備，需使用可見光進行光催化，因此需採用可吸收可見光之光催化劑，將與一般 P25 等市面販售的光催化劑進行必較，也因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。

光催化技術係利用光之能量來使觸媒價軌域能帶和傳導能帶間發生電子轉移，進而產生電子-電洞對(conduction-band electron and valence-band hole)，在水中時，將會使觸媒附近之水分子或游離出的氫氧根離子(OH^-)產生氫氧自由基(OH radicals, $\cdot\text{OH}$)，這些氧化力極強的氫氧自由基可以有效的礦化或是分解水中的化學物質。目前土壤污染尾氣之可見光催化劑國內外相關開發仍少，極具發展價值。



二、 研究目的

在土壤與地下水污染整治程序中 AS 與 SVE 均為重要的整治程序，本團隊目的，係開發光商業化模組處理技術能直接應用於土壤地下水污染場址，受 SVE 法處理後的尾氣端的處理。

由於發展新的吸附劑主要考慮原因乃使用活性碳來吸附逸散出的有機污染物，雖然可以獲得高吸附容量，但活性碳製作成本高，往往使污染復育的操作成本增加，且有機物只能吸附於活性碳表面，過去曾利用吸附劑奈米鈦管，並利用有機物質改質表面，使表面性質由親水性變為疏水性，奈米鈦管合成過程簡單，且具有高比表面積，在過去使用 AS 與 SVE 的過程中遭遇的另一問題為水蒸氣對有機物吸附所造成的干擾。

因此尾氣端的處理上是整套土壤氣體去除法的關鍵，透由使用低耗能之可見光觸媒進行光催化的降解，其低耗能以及高經濟價值是為具有突破現有技術的可能性。

考慮目前使用空氣注入法配合土壤蒸氣萃取法時，抽出的氣體大部分以活性碳進行吸附，在操作過程中常因活性碳成本高，往往需要花費昂貴的操作費用，若能降低成本，則可使此計畫所獲得之成果更有實用性，因而在此在本團隊一併考慮發展成本較低廉的光催化設備。綜合上述內容，本團隊計畫可以歸納出以下主題，其內容如下：

1. 建立商業光催化降解 BTEX 氣體之模組 1 套。
2. 通過 BTEX 分析測試設備，完成污染場址污染情況之調查分析報告，包括污染物種類，污染物濃度水準，環境因素等環境條件。
3. 建構的實用性光催化商業模組進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行為期 6 個月以上的降解分析。
4. 討論影響商業模組降解效率之環境影響因素。
5. 完成實際污染場址進行 SVE 法尾氣測試，並進行有機污染物降解測試和報告。
6. 根據現地長效測試結果，從模組設計、模組參數、耗能等方面進行各參數優化，並將之設計為可拆卸更替之商業化模組。
7. 撰寫系統運行情況和建議報告，針對影響實廠整治之環境因素，進行長效可行的整治測試評估和效能分析。
8. 與傳統 SVE 之活性炭吸附效果相比，評價利用該商業模組的降解效率之差異，以及可以節省的活性炭的量以及能耗。



三、 文獻探討

大型石化貯槽及加油站如因管線老舊或地層下陷等原因，將會導致地下水受到油氣污染，目前油氣地下水污染土壤多以氣體抽除法進行整治，該法為防止土壤氣體污染氣體直接排放進入大氣環境，抽出之氣體經由管線至尾氣處理設備，經活性碳吸附處理後排放，以確保排放符合氣體標準，惟該等尾氣處理方式需要添加昂貴之活性碳，且活性碳回收脫附或直接廢棄均需再進行處理，相當耗能。因此，本計畫擬發展利用可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，不需再利用活性碳吸附，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。目前土壤地下水污染尾氣之可見光催化劑國內外相關開發仍少，極具發展價值。

3.1、 我國土壤地下水受油氣污染現況

設立歷史悠久之大型石化儲槽，可能因儲槽、管線老舊腐蝕失修、地層下陷變動及操作管理不當等原因，致儲槽、管線破裂毀損，儲槽中儲存物質滲漏污染土壤或地下水，地下儲槽有可能成為地下水污染潛在來源。行政院環保署於民國 90 年至 92 年陸續辦理大型儲槽地下水潛在污染源調查計畫，初步建立台灣地區大型儲槽區之概況資料及完成污染潛勢調查工作，期能及早發現問題防止地下水體遭受油品或污染物之污染。由其調查之結果可看出污染物主要有三氯乙烯、四氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯、酚類、五氯酚、汞、柴油等如表 3.1 所示：

表 3.1、台灣地區土壤污染案例統計表

| 污染場址及來源 | 污染物 | 污染型式 | 污染對象 | 污染範圍 | 污染影響 |
|---------------|--------------|--------|------|---------|-------|
| 桃園縣八德市 RCA 廠 | 三氯乙烯 四氯乙烯 | 操作不當滲漏 | 工業用地 | 六千立方米土方 | 污染地下水 |
| 台灣氯乙烯公司頭份廠 | 二氯乙烯 氯乙烯 | 操作不當滲漏 | 工業用地 | 廠區與鄰近地區 | |
| 桃園楊梅東北亞公司 | 酚類 | | 工業用地 | 廠區與鄰近地區 | 污染地下水 |
| 中國石油化學開發公司安順廠 | 五氯酚 汞 | 操作不當滲漏 | 工業用地 | 0.3 公頃 | 污染地下水 |
| 中油苓雅寮儲運所 | 柴油 | 操作不當滲漏 | 工業用地 | 廠區與鄰近地區 | |

資料來源：(台灣地區土壤污染現況與整治政策分析)



另國內站齡超過十年以上之加油站，可能因儲槽、管線老舊腐蝕失修、地層下陷變動及操作管理不當等原因，致儲槽、管線破裂毀損，儲槽中儲存物質滲漏污染土壤或地下水故加油站有可能成為地下水污染潛在來源，行政院環保署為掌握加油站地下儲油槽系統運作情形，預防土壤及地下水污染，確保土地及地下水資源永續利用，並落實土水法及相關法規之規定，於民國九十年至九十二年陸續辦理加油站地下水潛在污染源調查計畫，初步建立台灣地區加油站之概況資料及完成污染潛勢調查工作，期能及早發現問題及防止地下水體遭受油品或污染物之污染。經過調查，受油品污染之加油站地下水中常見苯(Benzene)、甲苯(Toluene)、乙苯(Ethylbenzene)、二甲苯(Xylenes)等四種揮發性有機碳氫化合物。其中甲苯(Toluene)，乙苯(Ethyltoluene)，二甲苯(Xylene)對人體中樞神經系統危害甚鉅。BTEX 常見於石油及天然氣生產所，加油站，地上儲油槽(Above-ground storage tanks)，和地下儲油槽(Underground Storage Tanks)等與汽油和石油工業產品相關的環境。

3.1.1、加油站類型事業單位可能洩漏源及洩漏原因分析

1. 卸油口及卸油管線

卸油口及卸油管線附近常因卸油溢滿或卸油處理不當造成污染，卸油管線如發生銹蝕，卸油過程中亦將造成油品洩漏。

2. 油槽

國內加油站每座大都配置 4 至 5 個地下油槽，深度大都位於地下 5 公尺內；除有卸油管線連接卸油口外，亦有輸油管線連接加油機，油槽設有人孔，供站方以油尺進行人工量油、緊急情況時抽油或日常維護用。測漏管大都設於儲槽區，以監測油槽旁土壤氣體。

3. 輸油管線

輸油管線大都位於地下 1 公尺內，連接油槽與加油機，一旦管線接合處發生鬆脫現象，將造成油品洩漏。以往調查資料顯示管線區污染潛勢較高，如欲確實掌握加油站污染潛勢，對輸油管線經過區域之調查工作將不可忽視。

4. 泵島(或稱為加油島)

泵島為加油機設置區域，地下亦有輸油管線經過，其連接加油機之接點為最易發生洩漏之區域。

另各加油站可能洩漏分析如表 3.2 所示，可分為操作管理或設備裝置不當卸油過程中發生洩漏及溢滿情形地下油槽及管線腐蝕洩漏其他原因等，其說明詳見表 2。



表 3.2、油品洩漏可能原因

| 主要原因 | 說明 |
|----------------|--|
| 操作管理或設備裝置不當 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 加油過程之疏忽導致油品洩漏地面，進而污染土壤。 2. 加油機未裝設盛油盤，導致維修人員於更換加油槍濾心、閥門、墊片等零件時，殘留油品直接滴落加油機下方土壤。 3. 站方人員進行油槽人孔或陰井清洗作業時，將含有油漬或油花之積水直接倒入排水溝內。 |
| 卸油過程中發生洩漏及溢滿情形 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 油罐車於卸油過程中或結束後，部分殘留油品洩漏於地面，並經由相關傳輸途徑(如未緊閉之測漏管)污染土壤。 2. 加油站常因油量計算錯誤而使得卸油過量，或卸油過程中因站方與卸油人員之協調錯誤或疏忽造成卸油溢滿。 |
| 地下油槽及管線腐蝕洩漏 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 因施工不當使得鋼筋與油槽或油管相連接，造成油槽或管線外包覆物質破損而加速腐蝕。 2. 電鍍或管線包覆施工不良，使管線外露與土壤接觸而腐蝕。 3. 雖然目前大部分油槽採用犧牲鎂陽極等陰極防蝕措施，惟若因施工不當使得鋼筋與油管或接地網相連接，將造成鎂陽極消耗迅速。 4. 若上述陰極防蝕系統未設置檢測點，將無法得知鎂陽極消耗速率及是否有效，造成防護措施之盲點。 |
| 其他原因 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 長期承受車輛重壓及震盪，導致油管接頭 |



| | |
|--|---|
| | <p>脫落與油品洩漏。</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. 因地震等天然災害造成油槽晃動傾斜及管線斷裂脫落，造成洩漏。 3. 油槽組出油口端沉油泵頭內部銜接處之 O 型環破損老化，造成泵體內油品溢漏至人孔底部，再由空隙滲漏至土壤中。由於此處之油品滲漏量甚少，不易由總量管制察覺，惟長時間滲漏之結果亦會造成嚴重污染。 |
|--|---|

(資料來源：土壤及地下水污染整治基金管理會)

3.1.2、我國現有部份油氣污染控制廠址

環保署土壤及地下水污染整治基金管理會每年會進行全台灣污染控制與整治場址調查，目前我國現有油氣污染控制場址地如表 3.3 所示，由表中可看出各加油站土壤或地下水污染為苯、二甲苯、乙苯、總石油碳氫化合物/苯、甲苯、萘、甲基第三丁基醚、TPH-D 總石油碳氫化合物-柴油類有機物(C9-C28)。



表 3.3、台灣地區油氣污染控制場址中污染物種類

| 場址名稱 | 土壤/地下水污染物 |
|------------------------------|--|
| 台灣中油股份有限公司忠孝東路加油站 | 苯;總石油碳氫化合物/苯;甲基第三丁基醚;TPH-D 總石油碳氫化合物-柴油類有機物(C9-C28) |
| 台灣優力豐富站 | 苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/苯;甲苯;萘 |
| 土城加油站 | 苯;總石油碳氫化合物/苯;甲基第三丁基醚;總石油碳氫化合物 |
| 育昇加油站 | 苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/苯;萘;甲基第三丁基醚;總石油碳氫化合物 |
| 北嶺加油站 | 乙苯;總石油碳氫化合物;苯;甲苯;二甲苯/苯;萘;甲基第三丁基醚;總石油碳氫化合物 |
| 台亞岡山交流道加油站 | 苯;總石油碳氫化合物/二氯甲烷;甲基第三丁基醚;總石油碳氫化合物;苯 |
| 上源加油站股份有限公司上源加油站 | 苯;甲苯;二甲苯;總石油碳氫化合物 |
| 台灣中油股份有限公司五股加油站 | 苯;甲苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物 |
| 士香加油站股份有限公司. | 苯;甲苯;二甲苯;二甲苯/苯;甲苯 |
| 台亞湖口北上加油站 | 苯;總石油碳氫化合物/苯;甲基第三丁基醚;總石油碳氫化合物 |
| 台亞湖口南下加油站 | 苯;總石油碳氫化合物/萘;TPH-D 總石油碳氫化合物-柴油類有機物(C9-C28) |
| 寶群加油站有限公司 | 苯;甲苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/苯 |
| 台亞台鳳加油站 | 總石油碳氫化合物;苯/苯;甲基第三丁基醚 |
| 台灣中油股份有限公司油品行銷事業部東部營業處(北埔油庫) | 二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/苯 |

(資料來源：土壤及地下水污染整治基金管理會)



3.1.3、我國現有分部加油站整治污染廠址

控制場址經初步評估後，有危害國民健康及生活環境之虞時，所在地主管機關應報請中央主管機關審核後公告為土壤、地下水污染整治場址（以下簡稱整治場址），並於中央主管機關公告後七日內將整治場址列冊，送各該直轄市、縣（市）政府、鄉（鎮、市、區）公所及地政事務所提供閱覽，目前我國現有油氣污染整治場址如表 3.4 所示，其中常見之污染物有苯、甲苯、二甲苯、乙苯、總石油碳氫化合物/苯、甲苯、三氯乙烯。

表 3.4、台灣油氣污染整治場址及污染物種類

| 場址名稱 | 土壤/地下水污染物 |
|-------------------------------------|---|
| 統一精工小北加油站 | 苯;甲苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/ 苯;甲苯;三氯乙烯 |
| 嘉仁加油站股份有限公司所屬嘉仁加油站 | 苯;甲苯;二甲苯;乙苯;總石油碳氫化合物/ 苯;總酚;萘 |
| 永信加油站股份有限公司永信加油站 | 總石油碳氫化合物;苯/苯 |
| 南昇加油站 | 苯;二甲苯;總石油碳氫化合物/苯;總酚 |
| 統一精工左營加油站 | 苯;總石油碳氫化合物/苯 |
| 大旗楠加油站股份有限公司大旗楠加油站 | 苯;總石油碳氫化合物/苯;甲苯 |
| 竹東鎮明星段 593 之 1 及 594 之 1 地號(二重埔加油站) | 苯;甲苯;二甲苯;總石油碳氫化合物/苯;甲苯;總酚;萘;TPH-D 總石油碳氫化合物-柴油類有機物(C9-C28) |
| 屏東縣佳冬鄉昌北段 1188 地號 | 苯;總石油碳氫化合物/苯;甲苯;萘 |

(資料來源：土壤及地下水污染整治基金管理會)



3.2、 土壤地下水污染整治技術

污染場址整治技術可依受污染土壤或地下水之取出與否、整治機制、處理程度差異及待整治之污染物濃度分類，受污染土壤或地下水之取出與否可分為現地方法及離地方法。依整治技術所使用之機制歸屬可分為物理化學方法、生物方法、熱處理方法等[1]。

依其對污染物之處理程度差異又可以分成不移動化或阻絕技術、破壞性技術、分離濃縮技術、毒性/移動性降低技術等。依待整治之污染物濃度及強度則又可分為污染源整治技術、污染團中心區整治技術、以及污染團邊緣區整治技術等。其中在污染源區域整治方式，主要是應用物理、化學或熱方法加強回收或現地破壞之方法，包括油液回收、介面活性劑或共溶劑熱加強回收、蒸氣注入回收、熱加強回收及化學氧化法[2]。

而在污染團中心區的整治方法，則包括空氣注入與土壤氣體抽取法、生物復育法、化學氧化法及化學還原法等。污染團邊緣區的整治方法則包括有監測式自然衰減法、生物整治法、化學氧化法、化學還原法及透水性反應牆等。在進行油品類儲槽系統整治技術選取之前，須瞭解並無一種整治技術能適用於所有場址，並保證其整治成效。一個成功的整治場址，往往具有許多客觀的條件來達成，且大部分可以在整治之前作進一步釐清，以節省整治所需之時間及金錢。以下簡介我國環保署編撰手冊摘述美國環保署編製之超級基金場址整治措施選擇原則之提示檔內容[3]。

油氣整治技術分類如下所列：

- (1) 土壤整治技術：土壤氣體抽除法、土耕法。
- (2) 離地處理法：抽出處理法、開挖處理法。
- (3) 現地生物法整治技術：生物通氣法、生物堆法、自然衰減法、生物曝氣法、現地地下水生物整治法、生物漱洗法。
- (4) 現地物理法整治技術：低溫加熱脫附法、空氣注入法、雙相抽除法、井內氣提法。
- (5) 現地化學法整治技術：化學氧化法、介面活性劑及共溶劑淋洗法、電動力法。
- (6) 其他：滲透性反應阻牆法、植物復育法。



3.2.1、土壤氣體抽除法

(1)原理:

土壤氣體抽除法（Soil Vapor Extraction, SVE）係針對不飽和層或通氣層（Vadose Zone）土壤中高揮發性污染物進行整治之方法。本技術利用真空抽氣，使存在於土壤中之污染物產生揮發作用，污染物由固相或液相轉移為氣相，並因抽氣井使污染區土壤產生負壓，使污染物隨土壤氣體往抽氣井方向移動，而被抽出，被抽除土壤氣體可進行回收或經處理後排放。本技術於操作時，常在地表上覆蓋一層不透水布，以避免產生短流現象，並增加抽氣井影響半徑及處理效率。

(2)適用時機及環境介質

土壤氣體抽除法可成功地運用在處理位於中透氣性及高透氣性土壤中含有揮發性污染物成分，並被大量運用在含氯溶劑污染的場址中。其限制說明如下：

1. 不適用於低揮發性或低亨利常數之污染物，亦不適合處理水分含量高或黏土質之土壤，更不適用於低透氣性的土壤環境中。雖可以運用工程技術克服上述不利的條件，但會顯著增加整治之經費。
2. 土壤對揮發性有機物之吸附力，會降低土壤氣體抽除系統對揮發性有機物之萃取率，亦即將揮發性有機物轉化為氣體之效率，土壤對污染物吸附力的影響，在整治階段後期最為明顯，土壤氣體抽除法將需要更長的操作時間，以處理最後殘留於土壤的揮發性有機物。
3. 土壤的異質性亦將影響土壤氣體抽除系統的成效，氣體易在大粒徑土壤中流動，但不易在粒徑小的黏土中流動，且在一般情形下，揮發性有機物亦累積在黏土表面，因此，相對地流過高污染土壤的氣流量將極為有限。

(3)優點:

1. 在國外相關整治成效已被證明，使用者容易取得設備，設置安裝容易。
2. 對場址運作之干擾最小。
3. 整治期程短：在理想情況下，一般整治期程約6個月至2年。
4. 整治價格具競爭性。
5. 易與其他技術結合運用，如空氣注入法、生物整治法、生物漱洗法等。
6. 可運用於建築物下方或其他不能進行開挖的地方。



(4)缺點:

1. 污染物濃度降低 90% 以上不易達成。
2. 當應用於低滲透性土壤或分層土壤之場址時，其處理效果之可靠性低。
3. 經抽除後之土壤氣體，為符合空氣排放標準，其廢氣處理費用可能需支付較昂貴的處理費用。
4. 僅適用不飽和層土壤污染之整治；飽和層土壤及地下含水層部分需要採用其他整治方法。

(5)對於環境的影響:

土壤氣體抽除法對環境造成之影響，主要在於其抽出之氣體是否有效的被處理，如無設置適當之尾氣處理設備，可能會造成空氣污染。此外，系統運作中亦有可能抽出含污染物之地下水，亦須妥善加以處理。依環保署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。土壤氣體抽除法在 3.3 節另做詳細介紹。

3.2.2、生物通氣法

(1)原理:

生物通氣法(Bioventing)是一種常用的現地(in-situ)的處理技術，主要係針對吸附於不飽和層土壤間隙的有機物污染物，進行抽取移除的機制。其處理程式類似土壤氣體抽除法，亦即其主體設備仍為土壤氣體抽除設備，藉以抽除土壤層中的揮發性有機污染物，但其中比較特別的是多加了一個整治程式單元，於土壤層中添加了營養鹽(Nutrient)的成份，其目的係為增加土壤的生物分解作用，以加速土壤層中污染物質降解速率，使得部分分子量較大、揮發性較低，或是吸附於土壤顆粒微細間隙、吸附引力較強、不易抽離的污染物，可以藉由生物降解作用，將污染物水解或分解成小分子中間產物，而得以再繼續藉由抽氣引力，離開土壤微細間隙，或是較容易抽離土壤層。

土壤層中原本即可能存在有一些現地微生物，部分微生物本身可能可以利用有機污染物做為生長基質，而產生代謝污染物的作用，進而分解污染物質，達到總污染量下降的目的。但生物分解作用有其必要、合適的環境限制條件，例如溫度、濕度、氧氣、污染物與生物接觸途徑等，若沒有適當的環境，微生物可能無法直接利用，或是大量利用有機污染物做為分解基質，其中一項重要的影響因數就是營養鹽。因為微生



物生長所必須之碳源，可以由有機污染物提供，但是其他生長代謝所需的物質，例如氮、磷、微量元素等，就必須從外面提供足夠的量，否則土壤層環境中並不會存在足量的這些物質。

生物通氣法現地馴養微生物的目標種類，主要為好氧性微生物，也就是生物分解的代謝過程中，微生物必須利用氧氣做為電子接受者，而以污染物做為電子提供者，完成完整的降解程式。自然土壤層中的原始氧濃度可能不足以達到促進生物大量分解污染物的需求，因此，土壤層中的氧濃度也成為一項相當重要的因數，而生物通氣法的土壤層通氣作用，正好提供了一個良好的通氣環境。

生物通氣法適用於油品類污染，例如汽油、柴油、航空燃油等，但在處理柴油、航空燃油等污染時更具成效，因為汽油污染往往使用 SVE 即可得達到良好的成效（揮發性相對高），但柴油、航空燃油等污染，SVE 所能達成的成效就有限，利用生物通氣法的生物降解輔助作用，可加強其功效。

(2)適用時機及環境介質

關於污染物濃度，建議總石油碳氫化合物（TPH）濃度不大於 25,000 ppm，而重金屬也必須小於 2,500 ppm。若超出建議濃度範圍是否可以執行，必須另外進行生物毒性試驗，或是必須延長預估整治時間期程。

(3)優點

1. 簡單可得之工具器材，容易設置。
2. 操作的空間較小。
3. 較短的處理時間，在已調整為最適的操作狀況之下，平均約 6 個月至 2 年間可以完成整治工作。
4. 每噸土壤處理費用約 45~140 美元，較其他地面處理程式便宜。
5. 可以和簡單地和其他類型的整治技術結合，例如整治地下水的空氣注入法（air sparging）、抽出處理法（groundwater extraction）等。
6. 可能不需要昂貴的尾氣處理費用。

(4)缺點

1. 濃度太高的成份，可能對於微生物造成毒性。
2. 在低透水性、黏土質高的土壤層，可能不適用，或是地質條件未調查明確的情況下可能效能有減低的現象。
3. 土壤若有分層，恐造成效能降低。



4. 無法達到太低的污染物濃度處理目標。

(5)對於環境的影響

地下水的曝氣作用可能造成地層擾動，因此務必遵照設計操作參數操作。除此之外，整治過程中有可能產生好氧微生物，協助進行污染物分解，因此須注意地下水下游地區是否有過量之生菌數。至於加裝 SVE 抽除氣體的排放，須符合國內相關空氣污染防治法令。依環保署「空氣污染防治法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防治設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。

3.2.3、低溫加熱脫附法

(1)原理

低溫加熱脫附法(Low-Temperature Thermal Desorption)常以英文縮寫 LTDD 簡稱。低溫加熱脫附法被歸類為離地(ex-situ)型態的處理技術，針對受到油品類污染之土壤，利用「物理性」處理方式，移除受污染之土壤，主要係將受污染土壤挖除之後，送入加熱脫附機，使得污染物和土壤分離。低溫加熱脫附法之加熱脫附機內主要污染物去除機制可能由下列三項單元組成：一、熱揮發(thermal volatilization) 二、熱脫附(thermal stripping) 三、熱烤(soil roasting)，被移除之污染物因屬於有機氣體成分，因此需要利用後續「二次處理」(secondary treatment)設施進行處理，例如：一、焚化：設置焚化器(incinerator)，將污染物焚化成二氧化碳及水。二、觸媒氧化：設置觸媒氧化器(catalytic oxidation chamber)，同樣將污染物分解成無機性之二氧化碳及水。三、冷凝：設置凝結器(condenser)等，將含污染物高溫氣體凝集之後收集，蒐集之液體再進行後續處理。四、吸附：設置活性碳吸附設備(carbon adsorption unit)吸附氣體中之污染物，將其移除。若用焚化法、觸媒氧化法可將有機物直接分解成無機性碳源後排放，但冷凝法及活性碳吸附法則必須再進行廢水、廢棄物等型態之處理。焚化產生之熱能，可以利用熱交換器回收，但焚化產生之粒狀污染物，必須加以蒐集處理，例如設置集塵袋等。

部分污染土壤必須進行初篩工作，以避免大型土壤顆粒或石塊進入低溫加熱脫附器之中，通常篩選器設定土壤粒徑應至少小於 2 英吋(約 5 公分)較佳。低溫加熱脫附法處理完成之乾淨土壤，因已經熱交換，因此土壤溫度已降至一般環境溫度，惟其必須依政府規定或整治計畫書規劃，回填原址，或是送交其他合格處理單位辦理後續處置。若要回填至原址，則必須注意是否再視需要添加水分、營養份等，以增加土壤肥力，提昇再利用之價值。



低溫加熱脫附處理器可分為「移動型設備」及「非移動型設備」。移動型設備可以搬至污染場址內，現場直接處理挖除的土壤；而非移動型設備則因設置於場外，污染土壤可能會有運送行為產生，必須注意運送過程中，避免土壤二次污染產生，以及進行必要的運送管制作業。低溫加熱脫附法對於處理油品類污染土壤相當有用，但對於地下含水層污染而言，本項方法並不適用。至於加熱溫度一般經常控制於 150~540°C，最高不超過 650°C 左右下操作。較低溫度下可以脫附油品類物質中汽油等成分，而不產生燃燒作用；柴油、煤油等則必須達到 370°C 以上；至於不具揮發性的潤滑油、加熱用油等，則需要更高的加熱溫度才能脫附。

(2)適用時機及環境介質：

低溫加熱脫附法僅適用於處理受污染之土壤，對於地下水含水層污染並不適用。

(3)優點

1. 現場（on-site）或離場（off-site）的技術及設備上取得容易，已經商業化。
2. 非常快速的處理時間，商業化系統每小時處理量可達 25 噸土壤。
3. 處理大量土壤時（大於 765 立方公尺），具有競爭優勢，每噸土壤處理費用約 30~70 美元，但不包括離場（off-site）處理方式的土壤運輸費用。可以快速處理主污染區（hot spot）的高濃度油品污染。
4. 可以簡單的和其他技術再進行結合處理，例如空氣注入法等。
5. 經處理土壤可以回填原場址，或是做為原污染場址以外地方之其他填土用途（惟必須經環保機關同意）。
6. 可持續降低 TPH 至 10 ppm 以下，以及 BTEX 至 100 ppb 以下，或甚至更低。

(4)缺點

1. 必須挖除土壤，但一般限制在地表以下深度 7.6 公尺以內。
2. 現地處理必須有足夠的設備設置空間（大約大於 2,000 平方公尺），離場（off-site）處理方式的土壤運輸費用較高。
3. 欲處理地下水面以下之含水層土壤者，必須以抽水等方式先降低地下水位元元。

(5)對於環境的影響

VOCs 氣體逸散濃度必須符合國內相關空氣污染防制法令。依環保署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣汙染物排放標準」或特定業別、區域或設施



之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2ppm 與 2ppm，且排放之氣體若有臭味（或厭惡性異味），亦須符合相關標準規定，否則恐有違法之虞。此外，以焚化方式處理尾氣者，另會產生粒狀污染物，粒狀污染物經集塵袋等處理之後，其排放濃度亦必須符合我國「固定污染源空氣污染物排放標準」規定，依據煙囪高度、管徑大小等，計算粒狀污染物之排放許可濃度。若遭污染土壤中含有 PCBs 或是其他含氯化合物，即有可能在處理過程中產生戴奧辛，須考量採取戴奧辛去除之措施。

3.2.4、空氣注入法

(1)原理

空氣注入法(Air Sparging)被視為最常用的現地(in-situ)的處理技術，主要針對吸附於土壤或溶解於地下水中的揮發性或半揮發性有機物質進行處理，將未受污染的乾淨空氣注入地下水污染區(通入含水層)中，藉由水中曝氣作用，使得有機物質從溶解的液相中吹出移除，當其到達不飽和層之土壤層中，可藉由土壤氣體抽除設備如SVE(Soil Vapor Extraction)等抽除。其經評估對於遭受油品污染的地下水，有相當良好的效果。

(2)適用時機及環境介質

有關使用空氣注入法的適用性，可採用圖 3.1 所示的初步篩選、細部評估、系統設計、操作及監控計畫等四個流程來評估。

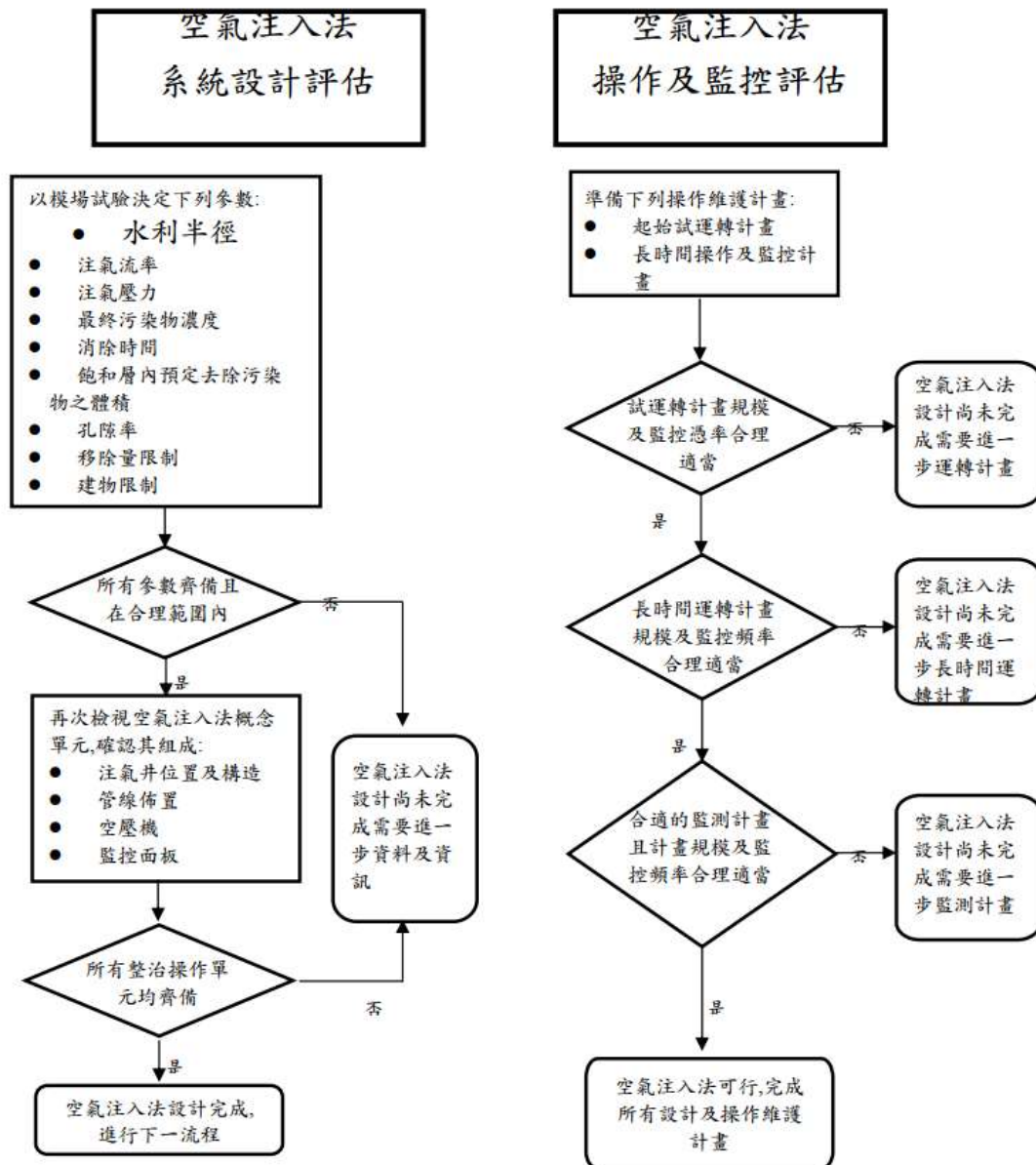


圖 3.1、空氣注入法適用性評估

(3)優點

1. 簡單可得之工具器材，容易設置。
2. 操作空間較小。
3. 較短的處理時間，在特定條件操作下，整治期程小於 1 至 3 年。
4. 每噸土壤處理費用約 20~50 美元，較其他地面處理程式便宜。
5. 不須移除、處理、儲存、處置遭受污染的地下水。
6. 可以 SVE 加強處理效能。

(4)缺點



1. 若有自由相浮油存在，不能同時處理，必須先移除浮油。
2. 不能處理遭特殊地質侷限之污染團。
3. 土壤若有分層，恐造成效能降低。
4. 一些化學性、物理性、生物性的交互作用尚不清楚。
5. 缺乏實廠及實驗室數據支持設計考量因數，場址差異性影響參數，不能通用。
6. 會造成組成物的移動須細部設計模場試驗，確認氣體揮發之控制。

(5)對於環境的影響

地下水的曝氣作用可能造成地層擾動，因此務必遵照設計操作參數操作。除此之外，整治過程中有可能產生好氧微生物，協助污染物分解，但必須注意地下水下游地區是否有過量之生菌數[4]。至於加裝 SVE 抽除氣體的排放，須符合國內相關空氣污染防制法令。依環保署「空氣污染防制法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯與二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm。美國環保署針對 SVE 尾氣之 VOC 濃度高低進行分類，並建議適用之空氣污染防制設備，可供國內業者選擇尾氣處理設備之參考：

1. VOC 濃度大於 2,000ppmv：建議使用熱氧化法。
2. VOC 濃度介於 100 至 2,000ppmv：建議使用觸媒氧化法。
3. VOC 濃度介於 35 至 100ppmv：建議使用顆粒活性碳（GAC）吸附。
4. VOC 濃度低於 35 ppmv：可直接排放。

故正確作法應視尾氣排放污染物濃度之高低，選擇設置適當之空氣污染防制設備，以處理 SVE 系統排放之污染物，並定期更換活性碳等耗材以維持處理功能正常，避免造成二次污染。

3.2.5、現地化學氧化法

(1)原理

現地化學氧化法，顧名思義係利用各種化學氧化劑，注入土壤或地下水污染層中，氧化油品污染所造成環境中存在之各項化合物，使其成為二氧化碳及水。本手冊將介紹各種現地常用之化學氧化劑，這些氧化劑曾被廣泛應用於廢水處理程式，現逐漸被利用於土壤及地下水污染之現地處理。現地化學氧化法之特點為處理時間較快，相對



於生物整治法而言，需要的反應時間較短。然而，因為地質條件限制，以及各種氧化劑的特性，都會限制氧化的時間以及效果，可以根據需求來加以選擇。例如，有的氧化劑雖然反應較慢，但可以緩慢持續與污染物接觸反應，提供較長的接觸時間，在氧化劑的選擇上須加以評估。現地化學氧化法最主要的考量因數是土壤與氧化劑的反應性，如果土壤中含有大量的其他有機質，那麼有可能會消耗大量的化學藥劑，造成成本的浪費。又例如 Fenton 氧化劑(過氧化氫)可能不適用於含有大量碳酸鹽的地下水，因為過氧化氫的氫氧自由基，在尚未與地下水中油品反應之前，即與碳酸鹽離子進行反應耗盡，造成浪費耗損與效率降低。相反地，含有大量碳酸鹽的地下水，則有助於高錳酸鹽類氧化物對於油品的氧化作用。

(2)適用時機及環境介質

現地化學氧化法適用於土壤、地下水污染併同處理，快速且有效率。但可能因化學藥劑較貴，考量經濟因素下，往往優先應用於小污染區域場址，或是為了縮小污染區範圍之目的而使用。在使用現地化學氧化法前，必須先進行自由相 (free product) 之回收，在確定場址內沒有浮油層之後，才會使用現地化學氧化法，其理由有兩點：1.避免發生浮油與氧化劑產生劇烈的氧化作用而發生危險。2.避免浪費太多化學藥劑，造成成本浪費。基於安全的理由，現地化學氧化法常常搭配其他整治技術，例如土壤氣體抽除法(SVE)一併施行，以幫助緩和和安全問題，控制可能因各種化學氧化劑添加所產生的氧化作用，所引起含有揮發性有機物(VOCs)、氧氣和其它反應副產物的尾氣 [5]。

在多重整治方法併同處理的整治趨勢下，現地化學氧化法在應用時機上，往往扮演一個先趨的角色，亦即在整治初期，先以現地化學氧化法控制污染擴大趨勢，爭取整治時間，後續再以生物整治方式，將剩餘之污染量移除，因為氧化劑於地下水殘餘的結果，會持續形成高溶氧狀態，提供微生物分解代謝過程中所需之電子接受者。現場的化學處理必須考慮化學物質的宿命(fate)，也就是該物質於土壤中的傳輸、擴散及反應等。於應用化學處理時，必須特別注意所加的化學藥劑可能含有害性化學物質，而且所添加的量也可能很大，這些都是現場處理前必須考慮的環境影響因素。就 Fenton 氧化法而言，因為過氧化氫於處理過程中用量較大，但是在自然環境中會被分解為氧氣及水[15]，其所添加的 Fe^{2+} 催化劑是自然界含量頗高的化學物質，因此相較於高錳酸鉀及臭氧而言，其對環境的衝擊較小。所以如用過氧化氫加鐵催化的 Fenton-like 法處理受有機污染之土壤及地下水之改善方式，亦成為後續現地化學氧化法發展的核心。

(3)優點

1. 污染物可以在現地被破壞移除。



2. 處理效率較為快速。
3. 處理過程中沒有廢棄物、廢水等產生，場址中加藥氧化過程產生的氣體也不多。
4. 可以氧化 MTBE 等油品類較難分解污染物。
5. 減少操作及監測成本。
6. 殘餘的碳氫化合物可以持續由氧化劑產生的溶氧等，加強後續的生物分解作用。
7. 對於場址運作幹擾最小。

(4) 缺點

1. 初設成本及總成本可能較高。
2. 滲透性較差的地方，化學氧化劑可能無法到達以及氧化污染物。
3. 過氧化氫可能在現場產生危害性氣體，可能需要輔以其他設備抽除，避免危險。
4. 在處理數週至數月後，溶解性的水中污染物濃度可能回升。
5. 污染團結構及範圍可能在施作數週之後改變。
6. 化學藥劑之使用，有健康風險以及場址作業安全之考量。
7. 僅用現地化學氧化法將場址整治至非常低的濃度是不經濟的甚至技術上很難達成的。
8. 化學藥劑有可能浪費在與土壤層中其他物質作用而消耗。
9. 有可能造成沉澱性固體，阻塞土壤層中的顆粒間隙。

(5)對於環境的影響

一、過氧化氫

1. 可能有逸散氣體進入附近建物，造成民眾健康風險，因此，可能要加裝氣體抽除裝置如 SVE
2. 增加污染團結構改變的風險。
3. 氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性的土壤層氧化污染，可能產生不被預期產生的有害副產物。
4. 需要現地儲槽。
5. 有可能造成沉澱性固體，而阻塞了土壤層中的顆粒間隙。

二、高錳酸鹽



1. 氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性土壤層氧化污染。
2. 可能產生不被預期產生的有害副產物。
3. 需要現地儲槽。
4. 有可能造成沉澱性固體，而阻塞了土壤層中的顆粒間隙。

三、臭氧

1. 可能有逸散氣體進入附近建物，造成民眾健康風險，因此，可能要加裝氣體抽除裝置如 SVE 等。
2. 增加污染團結構改變的風險。
3. 氧化劑不可能在短時間內穿透低滲透性的土壤層氧化污染。
4. 需要現地氣體產生機。
5. 可能產生不被預期產生的有害副產物。
6. 需要現地儲槽。

3.2.6、雙相抽除法

(1)原理

雙相抽除法亦稱為多相抽除法(multi-phase extraction)、真空抽除法(vacuum-enhanced extraction)以及生物漱洗法(bioslurping)，屬於現地處理方式之一。主要於污染區土壤上方，挖設一個回收整治井，井中設置泵，由泵抽離、移除土壤及地下水中以不同型態存在的污染物質[17]，其中包括液態之地下水自由相(free product)、溶解相，以及不飽和土壤層中以氣相存在之揮發性有機物等物質，屬於油、水、氣可同時抽除處理之整治技術[18]。

抽除之各種型態之污染物，經處理之後排放或廢棄、回收。雙相抽除法在不飽和土壤層中，由於土壤氣體遭不斷的抽除，造成不飽和層趨向真空的狀態，而也因回收井附近之抽氣作用，使得污染區以外之遠方乾淨土壤氣體引入，造成通氣氣流之現象，持續補助整治區之土壤層供氣供氧，產生類似生物通氣法之作用，如此可以加強不飽和層土壤層之生物降解作用。雙相抽除法特別適用於油品類污染之場址，尤其是在自由相之浮油尚未移除之前，並不適合直接利用生物或化學方法進行整治的場址。因此，在污染場址採取多重處理方法併用原則下，針對有浮油層的場址，雙相抽除法往往優先於其他整治程式，被選擇來處理地下環境中之污染物。在系統的設計上，大致可分為單泵與雙泵兩種。單泵與雙泵的差異在於前者採用單一泵同時從回收井中回收浮油與地下水，後者則是一組泵抽取浮油，另外有一組泵抽取地下水同時提供必要的水位



洩降。單泵系統適用於具有低到中等程度透水性的地質，其設置成本低也較容易，其抽取量一般藉於 5gpm 到 20gpm 之間，抽取方式則是藉液位元元偵知器做間歇性的抽取。由於任何的泵型式，在抽取過程中均會造成乳化現象，致使溶解相之濃度升高，所以地表上都必須設置油水分離與水處理設備。至於雙泵系統，其主要目的是最佳化洩降錐的程度以達到最高的浮油回收效能，同時讓油水混合的狀況減至最低，因此這種系統採用一組泵只抽取地下水以製造所需之洩降錐，第二組泵則只抽取浮油。抽取地下水的抽取量需經過適當的調整以控制洩降之深度，抽除浮油的部分則採用油類偵知器作為啟動與關閉泵的機制。藉由平衡地下水與浮油之抽取量，即可以將乳化現象減至最低，甚至可以達到不需要油水分離設備的程度。

(2)適用時機及環境介質

使用雙相抽除法的適用性評估詳圖 10.2-1 所示。雙相回收抽除系統適用於土壤、地下水污染併同處理，甚至包括浮油之回收，具有氣、液、油共同處理之適用優勢。

1. 雙相回收抽除系統的適用條件包括：
2. 低到中等的透水性地質(<10⁻³ cm/s)或較薄的浮油厚度(<15cm)。
3. 地下水位介於 1.5 到 6 公尺。
4. 傳統的抽出法或回收溝技術不適用。
5. 浮油位於鋪面或不透氣表面之下。

當雙相回收系統之浮油回收體積不夠多的時候，就該考慮停止操作，所以訂定停止運作之標準也是系統建置時必須審慎考慮的條件。停止運作的標準可能包括總浮油回收率(例如：每個月少於 2 加侖或者浮油回收體積對地下水抽出速率的比例小於 0.1%)與回收/監測井中浮油厚度(例如：小於 3 公分)。浮油厚度應按季或按月進行監測，以確保回收/監測井中的浮油厚度在規定時間內(如 2 年)沒有超過閾值(如 3 公分)，此閾值也可同時作為重新啟動回收設備的參考

(3)單泵雙相抽除法優缺點

優點：

1. 在低滲透性地質特性場址中，整治較有效。
2. 操作空間較小。
3. 較短之處理時間（一般在最適條件下操作約為至 6 個月至 2 年）。
4. 增加污染地下水之抽除速率。
5. 可以應用於有浮油的場址，並且可以結合其他整治技術併行，例如空氣注入法、



生物整治法等。

6. 在有建物或其他地上物之地方，也能輕易施工建置。

缺點：

1. 在高滲透性地質特性場址中，要達到整治目標所需之經費較高。
2. 在地下水水位變動較大之區域難以處理。
3. 處理抽除之土壤氣體或是分離油、水兩相之經費可能較高。
4. 在地面上，必須設置能夠處理大量地下水的設備。
5. 須有特殊的機器設備以及有經驗的操作及試驗技術。
6. 操作期間需要複雜的操作、控制以及監測計畫。

(4)雙泵雙相抽除法優缺點

優點：

1. 廣泛適用於各種條件之地質狀況，機具設備較容易獲得。
2. 處理設施運作之空間需求較小。較短之處理時間（一般在最適條件下操作約為 6 個月至 2 年）。
3. 對於地下水位變化較大的區域有較大的彈性運用空間。
4. 可以應用於有浮油的場址，並且可以結合其他整治技術併行，例如空氣注入法、生物整治法等。在有建物或其他地上物之地方，也能輕易施工建置。

缺點：

1. 對於地下環境之資訊不完整之場址有使用上的限制，可能較無效。
2. 氣體處理需要較多的經費。
3. 分離油、水兩相，經費可能較高。
4. 操作期間需要複雜的操作、控制以及監測計畫。

(5)對於環境的影響

抽取地下水可能造成地下水擾動，以及局部性的水位變化。地下水抽出井位置除了需要符合污染整治效率需求之外，也必須仔細評估是否會影響到地下水污染管制區外的地下水文流向、流速及水質，必要時應規劃足夠的水文緩衝區。一般建議進行小規模抽水試驗，並求得影響半徑，藉此再推估大規模整治工程之可能影響範圍，再選擇合適之設備。抽水量必遵照規劃設計操作參數操作。抽出的地下水進行油水分離的



處理，油的部分可回收或送交處理業者進行有害廢棄物處理。地下水後續處理可能進行排放，若場址位於工廠之內，一般建議納入工廠之污水處理設施處理，但必須符合污水處理設備之處理量；若污染場址附近並無既存運轉之污水處理設備，處理後之放流水須符合「放流水標準」。至於抽除之土壤氣體經處理後排放的尾氣，必須符合國內相關空氣污染防治法令。依環保署「空氣污染防治法」第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防治設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以污染物苯、甲苯及二甲苯而言，其除須符合排放標準外，於周界亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 及 2 ppm，且排放之氣體若有臭味（或厭惡性異味），亦須符合相關標準規定，否則恐有違法之虞。

由上述技術評估可看出，無論使用何種處理方法，多會用到 SVE 系統，也多需要選擇設置適當之空氣污染防治設備來處理 SVE 系統排放之污染物，惟該等尾氣處理方式需要添加昂貴之活性碳，且活性碳回收脫附或直接廢棄均需再進行處理，相當耗能。因此，本計畫擬發展利用可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。目前土壤地下水污染尾氣之可見光催化劑國內外相關開發仍少，極具發展價值。

3.3、本團隊模廠擬測試之場址說明

本團隊擬與新野科技股份有限公司合作，將執行期間上半年度所發展之低能耗可見光催化套裝模組應用於新野科技股份有限公司，協助整治加油站污染場址尾氣處理。

3.3.1、本場址公告資料

本場址公告資料如表 3.5 所示。

表 3.5、擬測試控制場址公告資料

| | |
|------|--|
| 發文日期 | 中華民國 ○ 年 ○ 月 ○ 日 |
| 發文字號 | ○ 環水字第 10X070X8XX 號 |
| 主旨 | 公告台灣中油股份有限公司所屬 XX 加油站所在土地為地下水污染管制區，即日起管制區內之土地使用或人為活動予以管制或限制。 |
| 依據 | 土壤及地下水污染整治法第 16 條規定辦理。 |



| | |
|-------|--|
| 場址名稱 | (X1XXX5) XX 加油站 |
| 場址面積 | 2711.94 平方公尺 |
| 公告污染物 | 苯:36(mg/Kg); 甲苯:1121(mg/Kg); 總石油碳氫化合物:2250(mg/Kg)/ 苯:0.252(mg/L) |

3.4、土壤氣體抽除法(SVE)介紹

本團隊已於 3.2 節略述土壤氣體抽除法(Soil vapor extraction, 以下簡稱 SVE)，本節將針對本擬測試場址之土壤氣體抽除法進行介紹。

土壤氣體抽除整治技術，係以去除不飽和層土壤中的揮發性有機物(Volatic organic compounds, VOCs)為目標。該整治技術適用於受高揮發性化學物質污染土壤之整治，此整治技術已於國內廣泛應用。

由於 SVE 主要原理為利用真空抽氣，使存在於土壤中之污染物產生揮發作用，污染物由固相或液相轉移為氣相，並使污染物隨土壤氣體往抽氣井方向移動而被抽出，有許多別稱，像是土壤通氣、土壤真空抽除、真空抽除、地表下通氣等。此外，為了提昇土壤氣體抽除成效與強化污染傳輸速率(transport rate)，SVE 往往搭配會其他輔助整治技術，常見之搭配整治技術(如現地加熱法、蒸氣注入等)，土壤抽氣搭配空氣注入法示意圖詳圖 3.2。

SVE 的處理速率，往往隨著地層透氣性(air permeability)、污染物濃度、尾氣處理系統(offgas treatment system)特性等因素的作用，而在不同場址有顯著不同[13]。

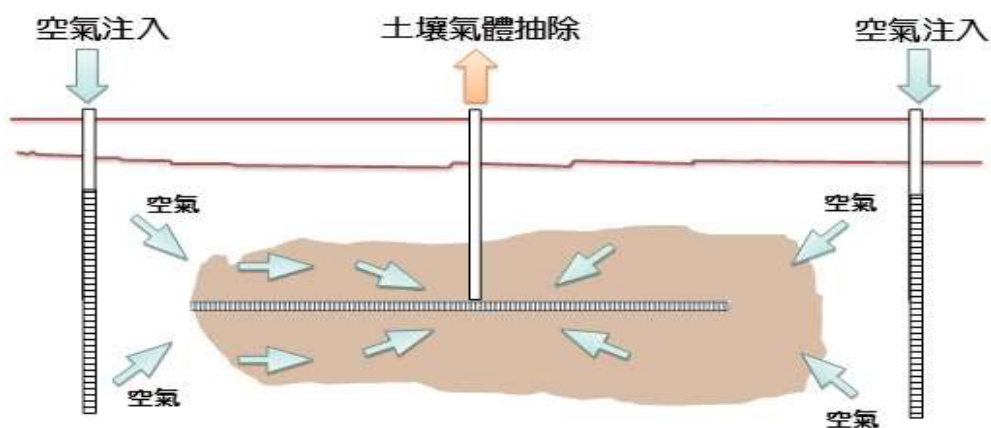


圖 3.2、土壤抽氣搭配空氣注入法示意圖

3.4.1、污染物移除機制

SVE 係利用垂直/水準井或溝渠，於抽取空氣時所引發的壓力梯度變化(pressure



gradient)，進而提昇土壤中 NAPL 及溶解於孔隙水中之污染物揮發作用，及土壤表面污染物的脫附速率(desorption rate)。以 SVE 去除 VOCs 的機制，包含水準對流(advection)、揮發(volatilization)、脫附(desorption)、生物降解(biodegradation)與擴散作用(diffusion)等[14]，以下將針對主要影響 SVE 處理成效的作用，包含水準對流及擴散作用進行說明：

(1)水準對流

使用 SVE 從土壤抽走空氣後，揮發性有機物揮發成為氣相的污染物，將伴隨著大量空氣移動至滲透性較高的區域，這種過程稱為水準對流。通常而言，低滲透性區域的水準對流作用相對較低。

理論上，當污染物可完全揮發，並存在於相互連接的土壤孔隙中時，可達到最高的去除率。因此，當污染物的去除受水準對流率限制時，就污染移除原理而言，應可直接增加空氣流量(airflow rate)提昇去除率。然而，往往受其他污染物特性或污染物存在型態的限制。如增加空氣流量，亦無法移除揮發率有限的 NAPL 或水相污染物；或無法提昇土壤顆粒表面的污染物脫附作用等。

(2)擴散作用

利用經氣體抽除後孔隙間污染物氣體濃度降低，與尚未有完成抽氣部份之污染濃度，所產生的濃度梯度變化，誘使高濃度污染物區域將隨著空氣擴散往低濃度的方向移動，稱之為擴散作用。然而，擴散作用通常遠比水準對流慢，尤其在滲透性較低的區域，污染去除率會受較大的限制。

曾有研究顯示土壤溼度對 VOCs 於土壤管柱(soil column)中擴散的影響，研究證實當污染物在濕沙中的移動時間比乾沙高出 2~3 倍。這樣的延遲作用，歸因於孔隙水(pore water)的分配效應(effect of partitioning)。例如，在汽油或燃油的污染場址，其 LNAPL 污染物會殘留在地下水位與毛細作用帶附近，亦即污染物累積於飽和層的地下水位變動區間內的濕度變化。由於土壤孔隙體積為定值，當 LNAPL 佔據該區間的孔隙後，將與氣體抽除作用競爭流動位置，導致未飽和帶的擴散作用延遲。因此，濕度往往成為該類型場址的傳輸機制限制。

3.4.2、土壤氣體抽除法(SVE)設備元件說明

典型的 SVE 系統如圖 3.3 所示，由一或多個抽取井(extraction well)、氣液分離器(air/water separator)，及鼓風機(blower)或真空泵(vacuum pump)所組成，也可能包含一或多個空氣入口或注入井、地表上的不透水鋪面，及空氣或水流處理系統。使用 SVE 時需要依據污染物特性(例如揮發性)，及土壤性質(例如透氣性與地層結構)進行系統設計。本技術指引將該整治技術常見使用設備彙整如下：



1. 井場系統：抽氣井、井頭設施
2. 管線系統：抽吸管線、流量計、球閥、壓力錶
3. 抽氣主系統：鼓風機、氣/液分離器、空氣過濾芯
4. 二次污染防治設備：尾氣處理系統、廢液處理系統
5. 操作監測設備：PID/FID、主動式空氣採樣箱、採氣袋
6. 其他：不透水鋪面(impermeable cap)

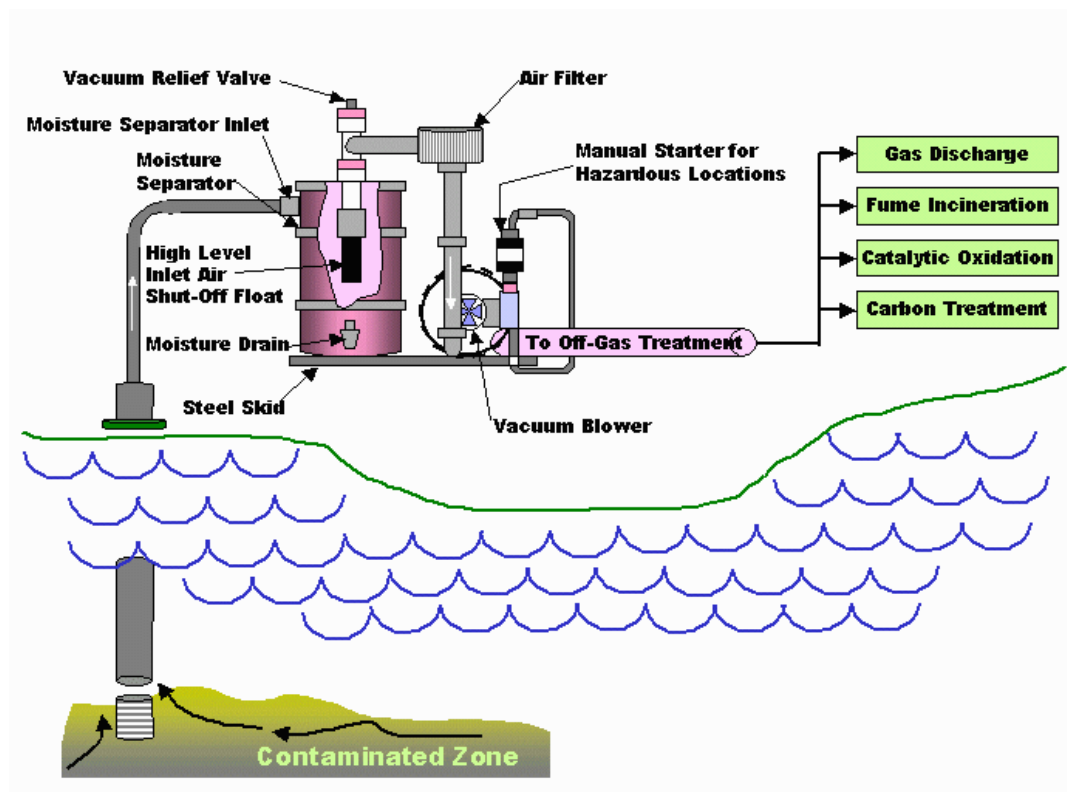


圖 3.3、常見 SVE 系統示意圖

一般現地整治常將 SVE 整治設備以移動式推車型式進行組裝，方便運輸以及現地進行位置轉換，移動式土壤氣體抽除設備主要組成如圖 3.4 所示，主要設備如下說明：相關設備規格初步說明如下：

1. 鼓風機
2. 微粒過濾器(inlet air filter)
3. 出口消音器(discharge silencer)
4. 氣液冷凝分離槽(moisture separator)
5. 液位開關(level switch)



6. 其他裝置：氣體流量計、移動式推車、控制箱、稀釋閥控制閥、液位開關

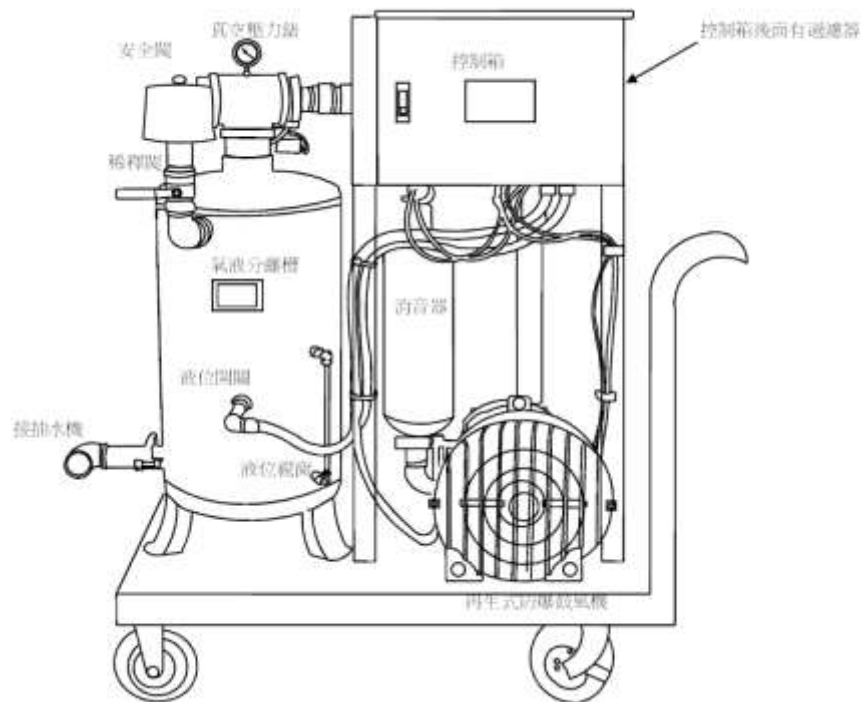


圖 3.4、移動式推車 SVE 設備主要組成圖

3.4.3、SVE 尾氣處理方法

根據美國環保署對土壤氣體抽除法尾氣處理建議(如表 3.6 所示)，尾氣端處理可透過熱氣化法、觸媒氧化法、顆粒活性炭(GAC)吸附等方式進行處理，但由於我國環保署「空氣污染防制法」中第 23 條規定，「公私場所應有效收集各種空氣污染物，並維持其空氣污染防制設施或監測設施之正常運作」，若污染整治場址為公告管制之事業或有屬於公告列管之製程，則尚須符合「固定污染源空氣污染物排放標準」或特定業別、區域或設施之空氣污染物排放標準。以常見土壤揮發性污染物苯、甲苯與二甲苯為例，除須符合法定之排放標準外，對周界濃度亦須分別低於 0.5 ppm、2 ppm 與 2 ppm，因此我國對於低於 35ppmv 之 VOC 仍需進行處理，本節將討論各土壤氣體抽除法尾氣端處理技術並對其進行分析。



表 3.6、美國環保署對土壤氣體抽除法尾氣處理建議

| VOC 濃度範圍 | 建議作法 |
|------------------|----------------|
| 大於 2,000 ppmv | 使用熱氧化法處理 |
| 100 至 2,000 ppmv | 使用觸媒氧化法處理 |
| 35 至 100 ppmv | 使用顆粒活性炭(GAC)吸附 |
| 低於 35 ppmv | 可直接排放 |

3.4.4、本場址 SVE 尾氣處理說明

抽除氣體進入氣液分離桶後，將土壤氣體中的液體蒐集並排出，可能造成鄰近水體的污染，而抽出氣體的排放亦可能造成場址鄰近大氣的污染。因此，為了避免二次污染的產生，應加裝二次污染防治設備，包含尾氣處理設備及廢液處理設備。依照長期地下水水位監測結果顯示，本場址地下水水位約 9m，本計畫最深抽氣井設置深度為 6m，因此截至目前操作結果，均無土壤氣體中的液體抽出之情況，故二次污染防治工作著重於尾氣處理設備。

土壤氣體抽除法操作期間，為防止土壤氣體污染氣體直接排放進入大氣環境，抽出之氣體經由管線至尾氣處理設備，經活性炭吸附處理後排放，並定期每月以 PID/FID 進行監測，以確保排放符合氣體標準。藉由密集之尾氣監測頻率，掌握最佳活性炭之更換時機，避免造成空氣之二次污染。尾氣排放標準則是延續前控制計畫所提之 35ppmV，若尾氣 PID/FID 監測結果高於 35ppmV 將立即更換活性炭。而本計畫擬發展利用可見光催化劑直接於現場將 SVE 法尾氣進行催化降解，不需再利用活性炭吸附，且由於使用可見光催化劑，因此較一般光催化劑節省能源，可降低尾氣處理之成本。



3.5、 光催化原理簡介

光催化是一種在光的照射下，自身不起變化，卻可以促進化學反應的物質，就象植物的光合作用中的葉綠素。光觸媒的材料多種多樣，但是最為著名和研究最為徹底的是納米二氧化鈦。光觸媒在太陽光的照射下能產生羥基自由基、超氧自由基等活性物種，因而具備抗菌、除臭、油污分解、防黴防藻、空氣淨化的作用[6]。

光觸媒【Photocatalyst】是光【Photo=Light】+觸媒(催化劑)【catalyst】的合成詞。光觸媒是一種在光的照射下，自身不起變化，卻可以促進化學反應的物質，光觸媒是利用自然界存在的光能轉換成為化學反應所需的能量，來產生催化作用，使周圍之氧氣及水分子激發成極具氧化力的 OH^\cdot 及 O_2^\cdot 自由負離子。幾乎可分解所有對人體和環境有害的有機物質及部分無機物質，不僅能加速反應，亦能運用自然界的定律，不造成資源浪費與附加污染形成。

半導體光催化劑大多是 n 型半導體材料（當前以為 TiO_2 使用最廣泛）都具有區別於金屬或絕緣物質的特別的能帶結構，即在價帶(Valence Band, VB)和導帶(Conduction Band, CB)之間存在一個禁帶(Forbidden Band, Band Gap)。由於半導體的光吸收閾值與帶隙具有式 $K=1240/E_g(\text{eV})$ 的關係，因此常用的寬頻隙半導體的吸收波長閾值大都在紫外區域。當光子能量高於半導體吸收閾值的光照射半導體時，半導體的價帶電子發生帶間躍遷，即從價帶躍遷到導帶，從而產生光生電子(e^-)和電洞(h^+)。此時吸附在納米顆粒表面的溶解氧俘獲電子形成超氧負離子，而電洞將吸附在催化劑表面的氫氧根離子和水氧化成氫氧自由基。而超氧負離子和氫氧自由基具有很強的氧化性，能將絕大多數的有機物氧化至最終產物 CO_2 和 H_2O ，甚至對一些無機物也能徹底分解[7]。圖 3.5 為光催化原理圖。

可作為環保光觸媒之半導體材料其能階間距需位於太陽光能量範圍內，如此材料內的價電子在光的照射下，可被激發至導電帶，藉此同時產生還原與氧化能力。圖 3.6 為常見半導體之能階間距分佈圖。如前述，二氧化鈦是已知很好的一個光觸媒[19]，由圖 3.6 可知，二氧化鈦在 PH=7 中性溶液中，吸收光線（380nm，3.2eV）所產生之電洞其氧化電位相對於標準氫電極（SHE）為+2.53V，如果說該電洞與水起反應，可產生氫氧根自由基（ $\cdot\text{OH}$ ），電洞所餘之氧化還原電位則僅略小於+2.53V，由圖 3.6 可知此時之電洞與氫氧根自由基之氧化能力均強於臭氧(+2.07)。臭氧由於其氧化能力，已廣泛被應用於環保與除菌方面，二氧化鈦經光激化後，可顯現更強的氧化能力，此為二氧化鈦可作為環保光觸媒使用的主要原因之一。



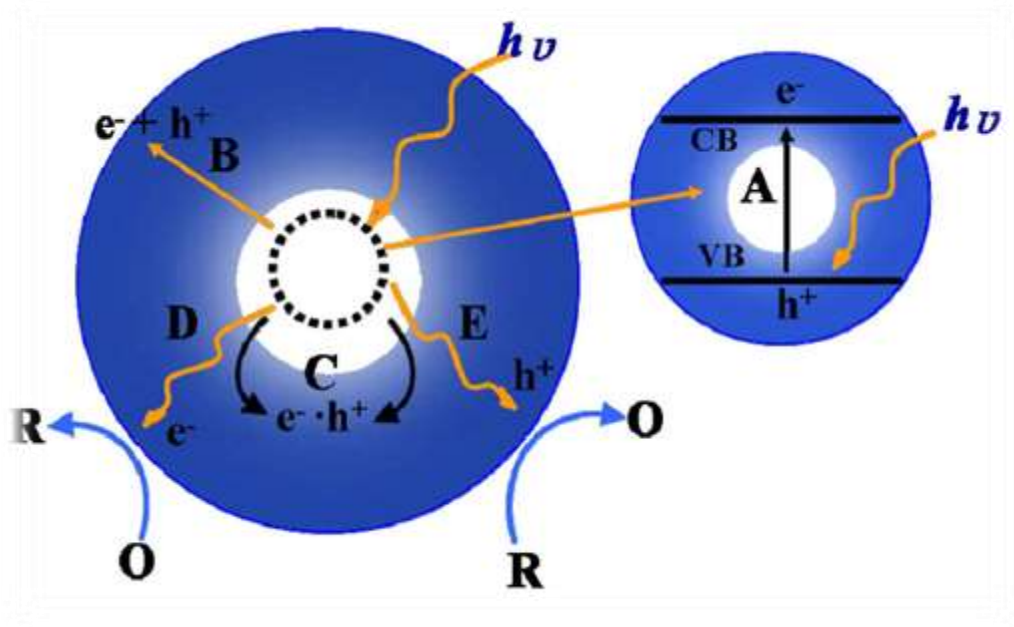
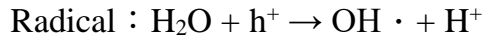
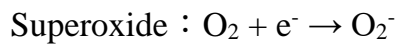
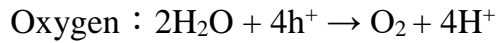


圖 3.5、為光催化原理圖

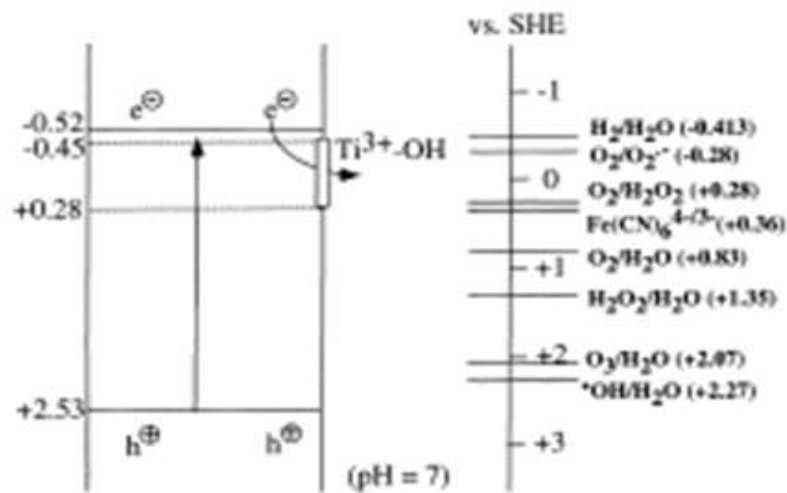


圖 3.6、在 pH=7 的中性溶液中，可發生於二氧化鈦表面之氧化還原反應

3.5.1、光催化之發展

光觸媒於 1967 年被當時還是東京大學研究生的藤島昭教授發現。在一次試驗中對



放入水中的氧化鈦單結晶進行了光線照射，結果發現水被分解成了氧和氫。這一效果作為「本多-藤島效果」(Honda-Fujishima Effect)而聞名於世，該名稱組合了藤島教授和當時他的指導教師----東京工業大學校長本多健一的名字[20]。

由於是藉助光的力量促進氧化分解反應，因此後來將這一現象中的氧化鈦稱作光觸媒。這種現象相當於將光能轉變為化學能，以當時正值石油危機的背景，世人對尋找新能源的期待甚為殷切，因此這一技術作為從水中提取氫的劃時代方法受到了矚目，但由於很難在短時間內提取大量的氫氣，所以利用於新能源的開發終究無法實現，因此在轟動一時後迅速降溫[21]。

1992 年第一次二氧化鈦光觸媒國際研討會在加拿大舉行，日本的研究機構發表許多關於光觸媒的新觀念，並提出 應用於氮氧化物淨化的研究成果。因此二氧化鈦相關的專利數目亦最多，其它觸媒關連技術則涵蓋觸媒調配的製程、觸媒構造、觸媒擔體、觸媒固定法、觸媒性能測試等[22]。以此為契機，光觸媒應用於抗菌、防汙、空氣淨化等領域的相關研究急劇增加，從 1971 年至 2000 年 6 月總共有 10,717 件光觸媒的相關專利提出申請。二氧化鈦 TiO_2 光觸媒的廣泛應用，將為人們帶來清潔的環境、健康的身體。

物體之長度為 10^{-6} 米稱為微米(Micrometer; μm)， 10^{-9} 米稱為奈米(Nanometer; nm)。各種應用材料也將由微米逐漸進入奈米時代。奈米材料由晶粒 1~100nm 大小的粒子所組成。粒徑極為微細，具有極大的比表面積，且隨著粒徑的減少，表面原子百分比提高[23]。在表面上由於大量原子配位的不完全而引起高表面能的現象。表面能量佔全能量的比例大幅提高，使奈米材料具吸附、光吸收、熔點變化等特性。利用奈米超微粒子技術與特性[24]，研發出材料本身在反應時完全不參與作用，卻可促進並提高反應能量，以催化目標反應的觸媒技術已運用於環境清潔作用上，促使有害或有毒物質加速反應成為穩定而無害物質，達到環保效果[25]。

奈米二氧化鈦光觸媒是一種在光的照射下，自身不起變化，卻可以促進化學反應的物質，就象植物的光合作用中的葉綠素。 TiO_2 光觸媒在太陽光或室內紫外光的照射下能產生抗菌、除臭、油污分解、防黴防藻、空氣淨化的作用[26]。

3.5.2、半導體種類

目前廣泛研究的半導體光觸媒大多數都屬於寬禁帶的 n 型半導體化合物，如硫化鎘(CdS)、二氧化錫(SnO_2)、二氧化鈦(TiO_2)、氧化鋅(ZnO)、硫化鋅(ZnS)、硫化鉛(PbS)、三氧化鉬(MoO_3)、鈦酸鋇(SrTiO_3)、五氧化二釩(V_2O_5)、三氧化鎢(WO_3)、二矽化鉬(MoSi_2)等。這些半導體中 TiO_2 、 CdS 、 ZnO 的催化活性最高，但 CdS 、 ZnO 在光照時不穩定，因為光陽極易腐蝕而產生 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} ，這些離子對生物有毒性，並對環境有害[27]。下圖 3.7 為常見半導體之能階間距分佈圖。



二氧化鈦為一具能帶間隙(band gap) ~ 3.2 eV 的半導體物質，填滿電子的價帶是 O 的 2p 軌域組成而未填電子的傳導帶則為 Ti 的 3d、4s 和 4p 軌域所組成。其中傳導帶比較低能量的部分的主要貢獻者為 Ti 3d 軌域。二氧化鈦光催化材料是當前最有應用潛力的一種光觸媒[28]。它的優點是：光照後不發生光腐蝕、耐酸鹼性好、化學性質穩定、對生物無毒性、來源豐富(世界消費量為 350 萬噸)、能隙較大，產生光生電子和電位的電位高，有很強的氧化性和還原性；另外，二氧化鈦為白色粉末，根據需要，可製成白色或無色塊體和薄膜[29]。以二氧化鈦作為耐久性的光觸媒已經被應用在處理各種環境問題上[30]。

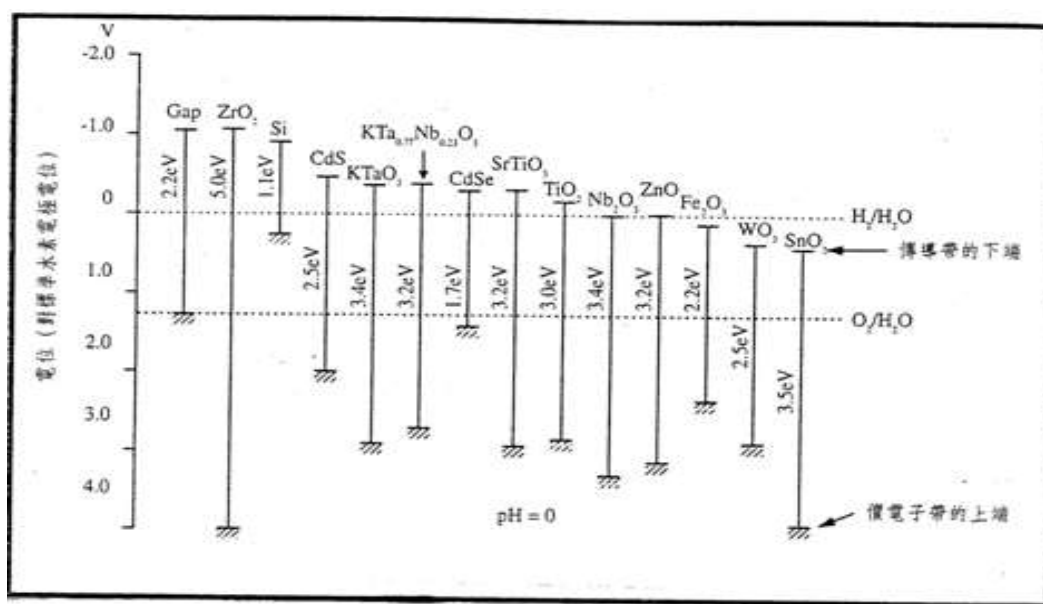


圖 3.7、半導體之能階間距分佈圖

3.5.3、奈米材料理論

奈米材料是指組成材料的基本單位，在三維空間中至少有一維在一百奈米以下，而一奈米的長度相當於十億分之一公尺。製造奈米材料的方法通常分為兩種，一種是由上而下 (top down)，是把一個巨觀的材料經外力作用，例如研磨方式，把它的尺寸由上而下減至奈米尺度範圍內；另外一種方式則是由下而上 (bottom up)，是以一種從小到大的方式產生奈米材料，例如化學反應生成等方法，把分子或原子狀態的物質，利用成核、結晶的途徑合成具有奈米尺度的材料[7]。

奈米碳管為例，奈米碳管是一種由碳原子所組成，且直徑僅有數個奈米大小的碳纖維，而不同直徑的奈米碳管會具有金屬和半導體兩種不同的性質，其軸向的硬度甚至高於鑽石，但徑向卻呈現完全不同的可撓性，可見奈米碳管是一種極為特殊的材料。另外，奈米碳管的抗張強度是鋼的一百倍，並可做為顯微探針等用途。此外，奈米材料因具有較高的表面能量，故使得奈米粒子的熔點與燒結溫度都比常規材料低，例



如奈米鉛粒子的熔點是絕對溫度 288 K，比常規鉛粒子的 600 K 低了許多。除此之外，奈米材料常常具有與巨觀材料不同的光學性質，例如巨觀的金屬材料通常具有不同顏色的金屬光澤，但是奈米尺寸下的金屬材料幾乎都呈現黑色，這表示奈米金屬微粒對可見光的反射率相當低，導致其外表呈現黑色[31]。

奈米表面效應是奈米材料相當重要的一個特性，當粒子達到奈米尺度時，其表面原子占有所有原子的比例變高，導致粒子表面能量升高，因此奈米粒子具有較巨觀材料大的表面活性[32]。又因為表面原子的總數增加，使得奈米材料的比表面積大幅增加。這種表面能升高與比表面積增加的現象，稱為奈米表面效應。在實際產業應用方面，以化學機械研磨所使用的氧化鈾粉體為例，當氧化鈾粉體達到奈米等級之後，可以使被研磨的表面更加平坦化；在積層陶瓷電容方面，當其燒結體的粒徑在奈米等級時，介電常數可大大地提升；而在鋰離子二次電池方面，使用奈米等級的粉體當陰極材料時，電池所表現出來的電容量也會有明顯的提升[8]。

3.5.4、 二氧化鈦晶型結構

二氧化鈦有 3 種晶型結構，分別為銳鈦礦(Anatase)、金紅石(Rutile)、板鈦礦(Brookite)。這些結構的共同點是，其組成結構的基本單位是 TiO_6 八面體(如圖 3.8)。這些結構的區別在於，是由 TiO_6 八面體通過共用頂點還是共邊組成骨架(如圖 3.9)。銳鈦礦和板鈦礦是二氧化鈦的低溫相，而金紅石是相對穩定的高溫相，在 500-600°C，銳鈦礦和板鈦礦會轉變為不可逆的金紅石相。不同晶相還具有尺寸相關的穩定性，例如金紅石在 35 nm 以上是最穩定的晶相；銳鈦礦在 11 nm 以下是最穩定的晶相；而板鈦礦在 11-35 nm 範圍內是最穩定的晶相。

氧化鈦晶胞(grain cell)的結構取決於 TiO_6 八面體是如何連接的[33]。銳鈦礦結構是由 TiO_6 八面體共邊組成，而金紅石和板鈦礦結構則是由 TiO_6 八面體共頂點且共邊組成。板鈦礦實際上可以看做是一種四面體結構，而金紅石和板鈦礦則是晶格稍微有畸變的八面體結構，其中又以銳鈦礦和金紅石最為常見。圖 3.10 為銳鈦礦和金紅石的晶體結構圖。

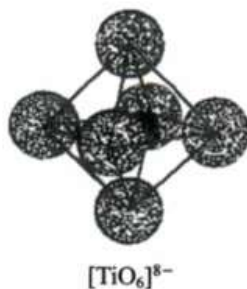


圖 3.8、 TiO_6 八面體

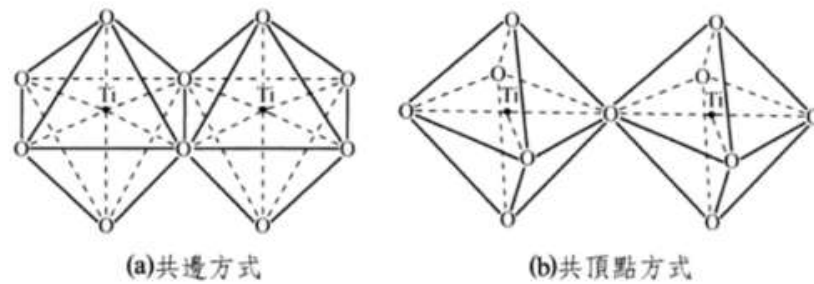
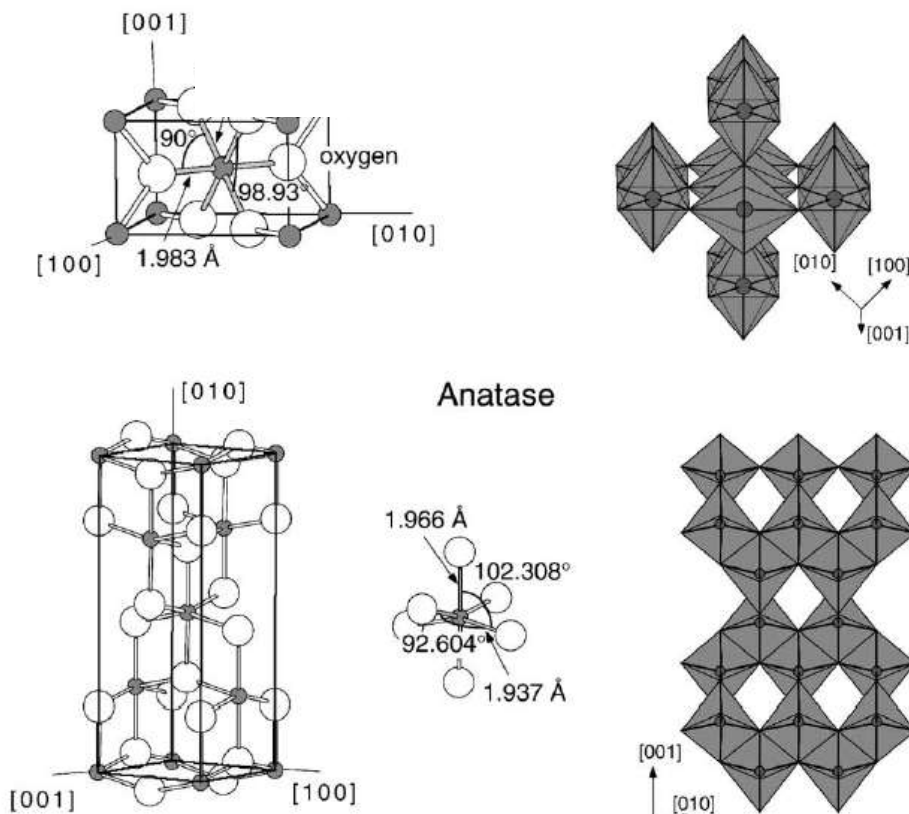
圖 3.9、 TiO_6 八面體連接方式

圖 3.10、銳鈦礦(Anatase)和金紅石(Rutile)的晶體結構圖

3.5.5、改質二氧化鈦成為可見光催化劑

由於二氧化鈦的能隙較大(3.2eV)，所以必須利用紫外光(波長小於 387 nm)激發才具有光催化效應，幾乎無法吸收可見光，紫外光佔陽光約 5%，而可見光佔陽光的 48%，這限制了二氧化鈦的應用[33]。半導體光催化的機制是：在一定波長的光激發後，價帶上的電子被激發，越過能隙進入導帶，同時在價帶上產生相對應的空穴。這些光生電子空穴對有一定能量可以自由遷移，但是光生電子和空穴都不穩定，極易複合，當沒有俘獲劑存在的時候，光生電子和空穴便簡單的複合並釋放熱能[9]。因此抑制光生載流子的複合，提高介面電子轉移速率常數是改善光催化性能的有效方法。利用離子



摻雜來提高二氧化鈦的光催化性能，其主要原因有以下三點：

(1) 引入中間能級，降低二氧化鈦的能隙

一方面由於摻雜金屬元素的 d 軌域和二氧化鈦晶格中 Ti 離子的 d 軌域的導帶重疊，使二氧化鈦導帶寬化下移，使能隙變窄，而使改質的二氧化鈦能吸收可見光，吸收光譜紅移，從而使光催化劑對可見光的響應。另一方面陰離子的摻雜產生的摻雜能級與二氧化鈦的價帶發生重疊，相當於使二氧化鈦的價帶變寬上移，而使其能隙變窄。或者，一些金屬元素摻雜後，和二氧化鈦形成氧化物固溶體，這些金屬能隙比二氧化鈦要窄，從而吸收可見光。

(2) 成為電子和空穴的淺勢捕獲阱，抑制光生電子和空穴的複合

在二氧化鈦中引入一些摻雜物能在二氧化鈦能隙中引入供體(donor)和受體(acceptor)等雜質能級，對二氧化鈦本征激發產生的光生載流子起到了俘獲阱的作用[10]。適量的淺勢俘獲阱可以促進受激載流子在二氧化鈦粒子內部的擴散過程，延長受激載流子的壽命，大大減少電子空穴對的表面複合，增強光催化劑的光催化活性(如圖 3.11)。

如摻雜金屬離子，因為金屬離子是電子的有效接收體，可以捕獲導帶中的電子，而金屬離子對電子的爭奪，使得光生電子和空穴的分離，減少了二氧化鈦表面光生電子與光生空穴的複合，從而使二氧化鈦表面在光輻射作用下產生更多的氫氧自由基($\cdot\text{OH}$)提高催化活性[11]。但如果摻雜量過大，過多的俘陷阱易造成受激載流子在遷移的過程中失活[34]。

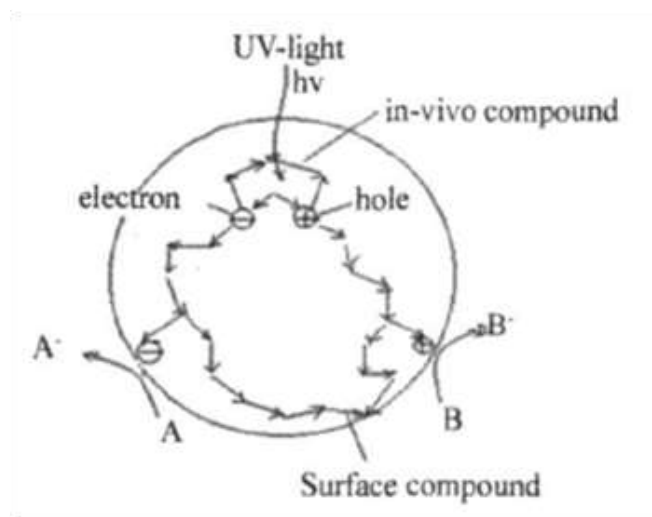


圖 3.11、光生電子和空穴的產生、分離和複合

(3) 造成晶格缺陷，增加氧空位

金屬離子進入二氧化鈦晶格內，取代了原來鈦原子的位置，或非金屬原子摻雜取



代氧原子的位置，從而產生了局部晶格畸變或形成了新的氧空位，這些作用均會對晶型轉變產生一定的作用。例如 Y^{3+} 、 Eu^{3+} 摻雜到二氧化鈦中取代晶格位置上的 Ti^{4+} ，這樣二氧化鈦晶格中將缺少一個電子，為了平衡電價，必然在近鄰位形成氧空位，同時 Ti^{4+} 被還原為 Ti^{3+} 。若 F 摻入二氧化鈦後進入晶格並取代氧，則產生氧空位。氧空位和 Ti^{3+} 還原中心可以充當反應活性位置，固體表面氧空位數量的增加將使表面光化學過程紅移至可見光區。圖 3.12 為二氧化鈦氧空位示意圖[35]。

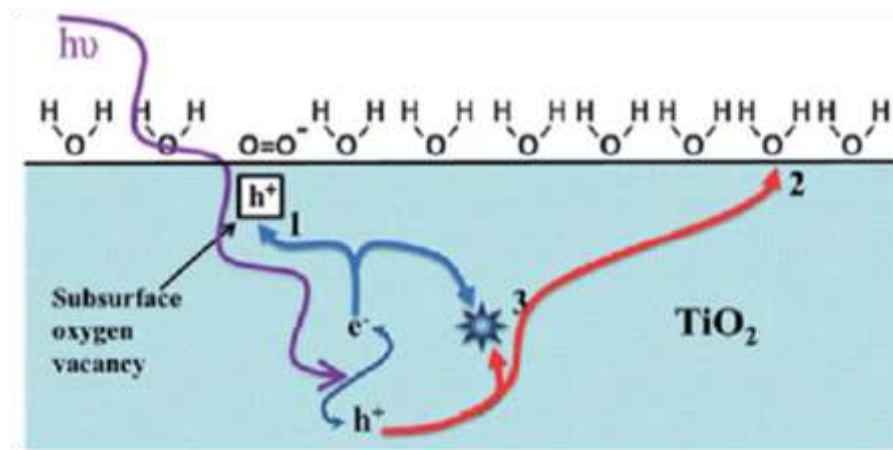


圖 3.12、二氧化鈦氧空位示意圖



改質二氧化鈦一般可分成金屬摻雜、非金屬摻雜、雙元素共摻雜(co-doped)以及三元素共摻雜(tri-doped)，其中三元素共摻雜改質二氧化鈦的報導很少，且對其機制的報導更少，以下為不同摻雜類型的介紹：

(1)金屬摻雜

金屬摻雜二氧化鈦被認為是第二代光催化劑，具有提高光催化活性，甚至部分金屬摻雜產生了顯著的可見光活性。由於金屬離子的差異，一些條件下金屬離子並沒有摻雜進入晶格，而是以單質或氧化物形式分散在二氧化鈦奈米粒子晶格表面形成複合結構。而金屬摻雜二氧化鈦的光催化活性影響因素非常複雜，與摻雜元素的 d 電子構型、摻雜物濃度、在晶格中形成的電子能級、摻雜物質的分佈、電子受體濃度以及光強等因素均有關。二氧化鈦常見的金屬摻雜元素有 Fe、Cr、Cu、Au、W、Co 等[13]。

稀土元素又稱鑼系元素，亦屬於金屬元素的一種，而稀土元素在中國擁有豐富的礦產資源，成礦條件優越，儲量位居世界之首。稀土離子具有 4f 電子，易產生多電子組態，其氧化物也具有多晶型、吸附選擇性強、電子導電性和熱穩定性好等特點[34]，由於其特殊的電子層結構和較大的離子半徑，在二氧化鈦中摻雜後會引起晶格膨脹，而適度的晶格膨脹有利於光生載流子的分離，許多研究針對稀土元素對二氧化鈦進行改質，並且有顯著提高二氧化鈦的光催化活性，常見利用於改質二氧化鈦的稀土元素有 La、Ce、Er、Pr、Gd、Nd、Sm、Eu[12][36]。

(2)非金屬摻雜

非金屬摻雜二氧化鈦被認為是使二氧化鈦產生可見光響應的最有效方法之一，因此被稱為第三代催化劑。非金屬摻雜二氧化鈦的研究始於 2001 年 Asahi 在 Science 發表的氮摻雜的報導，隨後摻雜元素幾乎涉及所有非氫和非惰性元素的非金屬元素。非金屬摻雜可以取代二氧化鈦中的 O^{2-} ，並且能減小能隙的寬度，提升二氧化鈦在可見光吸收的範圍，增強光催化活性。二氧化鈦常見的非金屬摻雜元素有 N、S、C、F、B、P 等[13]。

(3)雙元素共摻雜

利用雙元素來摻雜改質二氧化鈦是很常用的一種方法，利用共摻雜離子間以不同機制協同作用(Synergistic effect)來提高二氧化鈦的光催化活性，它可以取各摻雜離子的優勢來互補，不僅提高了紫外光下的光催化效率，也使二氧化鈦吸收光譜擴展到紫外光區，提高了其在可見光下的光催化能力。常見的雙元素共摻雜有金屬與金屬(metal-metal)共摻雜、非金屬與非金屬(non metal-non metal)共摻雜、金屬與非金屬(metal-non metal)共摻雜[14]。



3.6、 前期計畫及已獲之研究成果

3.6.1、 光催化模組效益評估

光觸媒製備完成後需評估其光催化降解待測污染物性能，將光觸媒置入在直徑 19cm 之圓柱狀反應器槽(如下圖 3.13，表示其容量 6785.84mL，本模組使之管線皆採用 1/2”之鐵氟龍管(PTFE)，使用 Swagelok 式氣體接頭經由質子流量器設定甲苯氣體濃度以及流量(3L/min)，設定其停留時間為 2.23 mins，在經由浮子流量計調整所需要模擬環境的濕度(濕度 0~80%)氣體流速以及污染物濃度至 15ppmV，使用鐵氟龍管連於反應槽中，首先在避光條件下通入氣體，使之甲苯氣濃度達 15ppmV，後在黑暗條件下（約 30 分鐘）進行光觸媒吸附污染物之調查，再將紫外光燈（Philips TL T8 18W）、可見光(東亞 FL20D18)開啟，反應時間為 120 分鐘，最後將反應後之氣體透由固定式 VOC 氣體監測儀分析計算污染降解程度與降解曲線，評估光催化去除待測污染物效率。

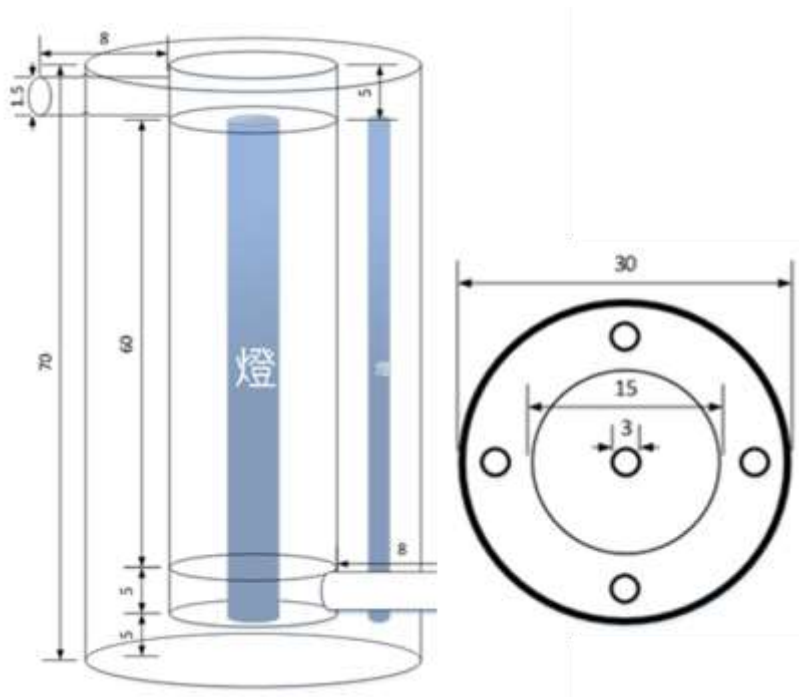


圖 3.13、光催化模組圖

3.6.2、 模組測試

本節將討論光催化玻纖布對於降解甲苯氣體之實驗結果，其降解環境設定是在濕度 60%的環境下，採用 1wt% La/TiO₂ 鍍摻雜光觸媒，將觸媒附著於玻纖布上，將載體置入模組中，以外圍四道燈管及中央柱的燈管為光源照射中間的槽體，其使用 UVA 紫外光燈管(波長為 320~400nm)照射或是東亞 FL20D18 T8 燈管，標定甲苯氣體濃度為 15ppm，將氣體導入模組中央的反應槽中，進行三十分鐘的暗箱吸附，再進行兩小時



的連續實驗，進行最佳化的光源測試。

為了排除光催化反應空間與光催化載體(此為玻纖布)對光催化氧化甲苯的影響，本團隊使用紫外光照射通以穩定流速及濃度之甲苯反應艙中，定時量測、記錄甲苯之濃度，而從此圖單獨以光源照射乾淨的反應艙後，經過半小時之暗箱作業後，甲苯氣體濃度維持不變，另一方面，使用光源照射空白乾淨的載體亦不會影響甲苯氣體的濃度，故本團隊所使用之反應艙體及載體不會影響光催化氧化甲苯氣體的能力。

圖 3.14~3.15 為暗箱吸附圖，為了排除材料及光催化材料載體對於氣體的吸附性能，故將光催化材料與載體放置在遮蔽光源(全黑)的反應艙中並通以固定濃度的甲苯氣體，從圖中能發現不同的光催化材料及載體在遮蔽光源(全黑)的反應箱中，30 分鐘皆不會影響甲苯氣體的濃度，濃度記錄圖顯示無任何濃度改變發生，甲苯濃度維持 100% 不變，故排除本團隊所用之玻璃纖維對甲苯氣體吸附之問題。

圖 3.16 為清洗前紫外光光催化玻纖布降解甲苯之濃度變化圖，使用飛利浦 TL 18W 之 UVA 紫外光燈管，透過 UVA(波長 320~400nm)照射在附有光觸媒之載體，而從途中發現所製備之光催化玻纖布(後續皆稱玻纖布)皆可降解並氧化甲苯，其中四片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 50.68%，三片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 59.09%，二片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 54.45%，一片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 29.93%，其中以三片玻纖布的效果較佳。但在實驗的過程中，發現玻纖布受到有機揮發物的污染，因此，後續用超音震盪機做清洗表面的動作，並再次測試其玻纖布的效能，觀察數據光催化玻纖布的活性確實能保持其再現性。

圖 3.17 為清洗後紫外光光催化玻纖布降解甲苯之濃度變化圖，使用飛利浦 TL 18W 之 UVA 紫外光燈管，透過 UVA(320~400nm)照射在附有光觸媒之載體，而從途中發現所製備之光催化玻纖布(後續皆稱玻纖布)皆可降解並氧化甲苯，其中四片玻纖布的效果為降解甲苯氣體之效率為 91.03%，三片玻纖布的效果為降解甲苯氣體之效率為 94.84%，二片玻纖布的效果為降解甲苯氣體之效率為 86.46%，一片玻纖布的效果為降解甲苯氣體之效率為 88.71%，其中以三片玻纖布的效果較佳。發現其清洗過後玻纖布的效能反而提升，其可能性在於玻纖布的表面在製程上仍有揮發性有機物附著其上，遮住光觸媒微觀表面的活性點位，導致光化學反應效率不穩定甚至有失去活性的狀況，因此在清洗玻纖布過後，其上附著之揮發之有機物被移除，使載體微觀表面之活性點位恢復功能，並有有效的運作。

圖 3.18 為可見光光催化玻纖布降解甲苯之濃度變化圖，使用東亞 FL20D18 T8 燈管照射在附有光觸媒之載體，而從途中發現所製備之光催化玻纖布皆可降解並氧化甲苯，其中四片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 54.32%，一片玻纖布的效果為降解甲苯氣體效率為 6.72%，其中以四片玻纖布的效果較佳，但數據顯示其後續的還是有



機會繼續對甲苯氣體進行降解，因此，後續會再追補其他數據，來輔助評估載體的放置數量與時效性。

圖 3.19 為光催化比較圖，透過不同光源與不同光催化玻纖布來比較與評估最佳化條件，以及未來進行實廠研究時，為評估方案做強而有力的證據，來輔助實廠研究時，可以做到在不同濃度與流量對其降解效果進行修正。

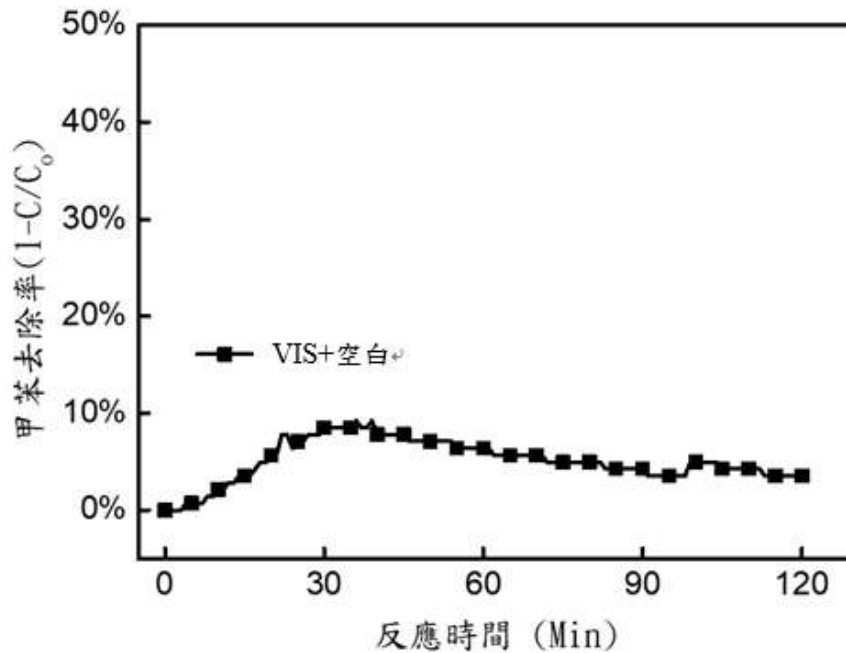


圖 3.14、可見光暗箱吸附圖

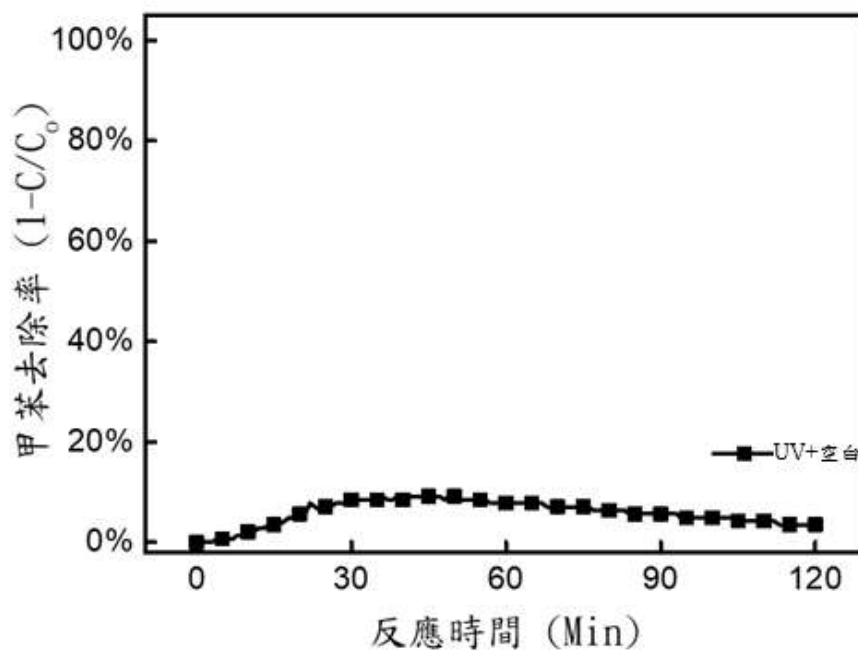


圖 3.15、紫外光暗箱吸附圖

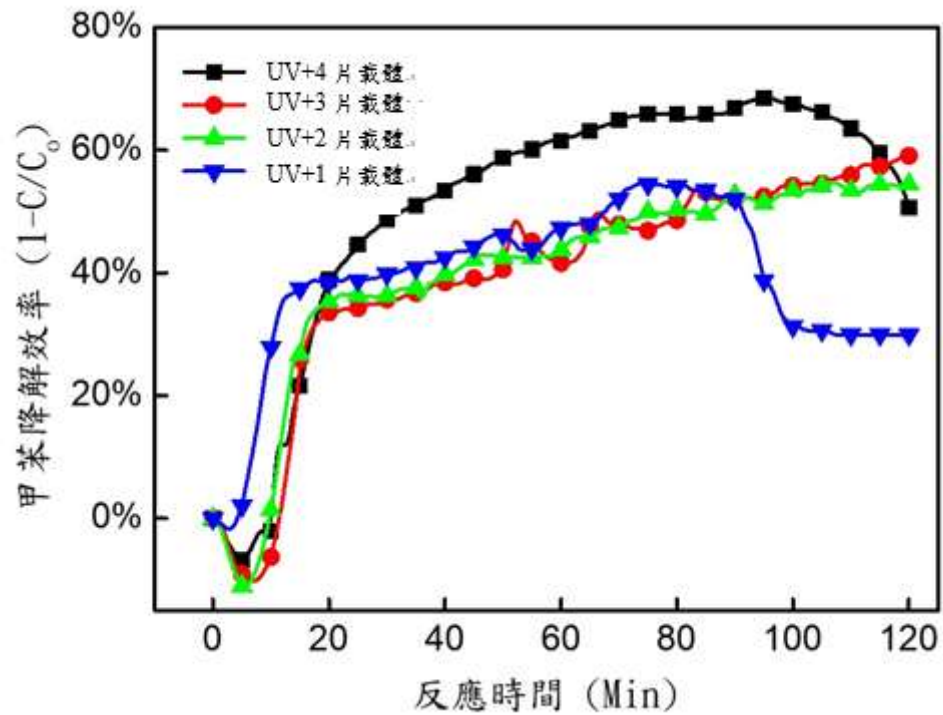


圖 3.16、清洗前紫外光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖

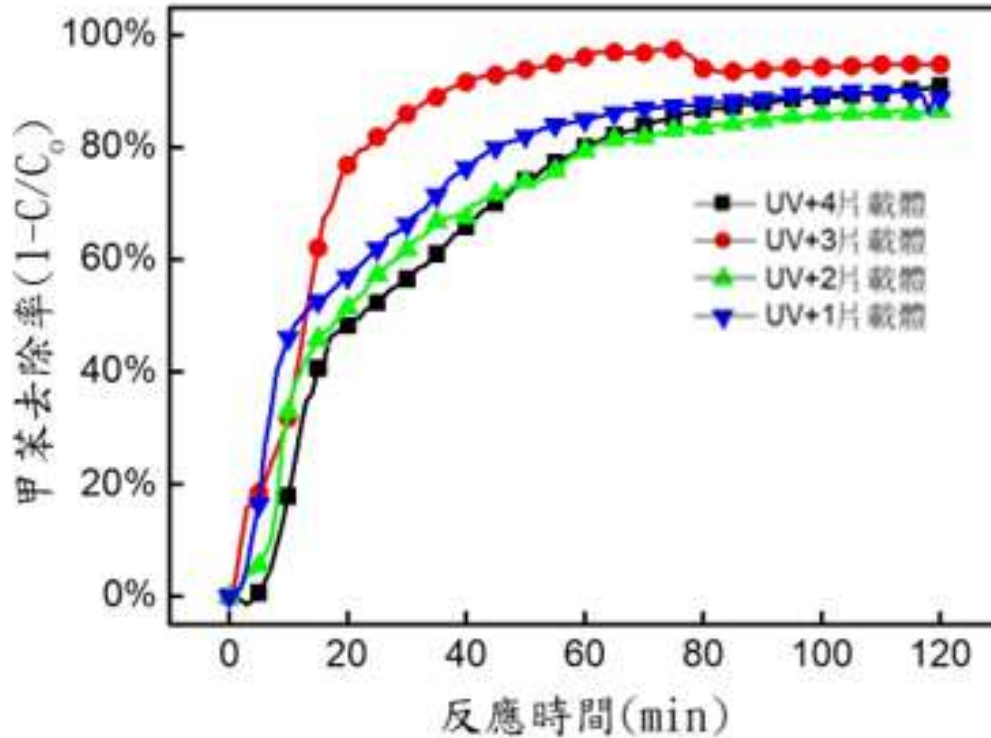


圖 3.17、清洗後紫外光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖

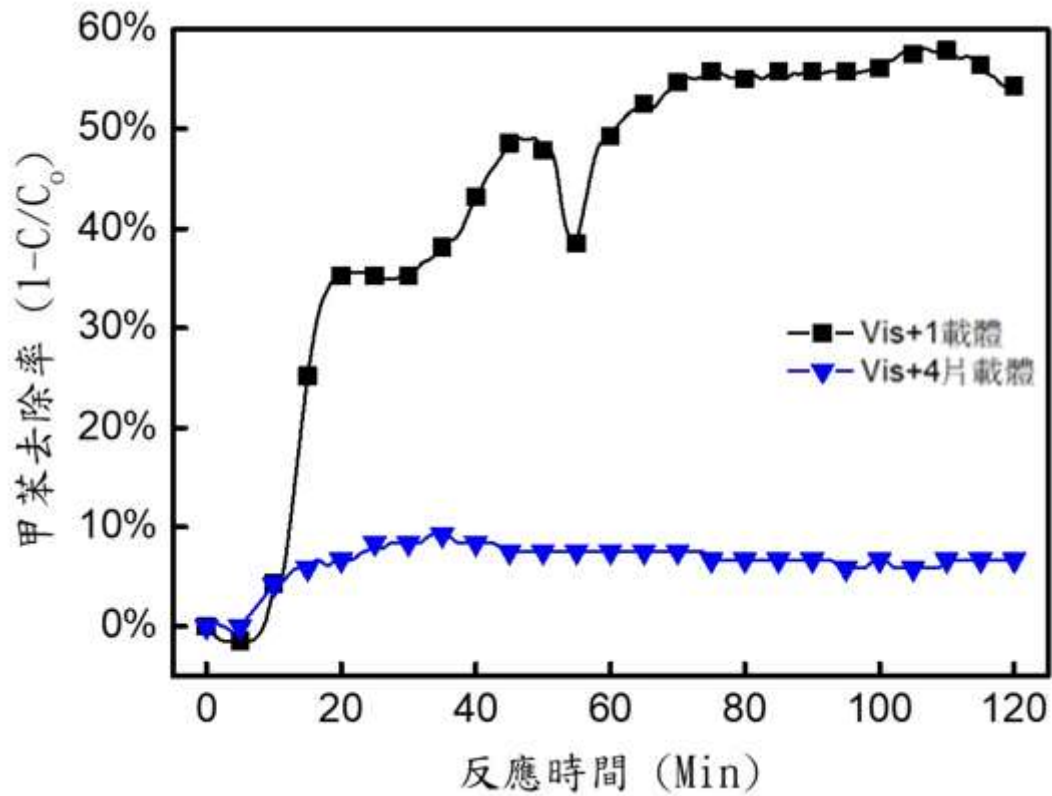


圖 3.18、可見光光催化玻璃纖維布降解甲苯之濃度變化圖

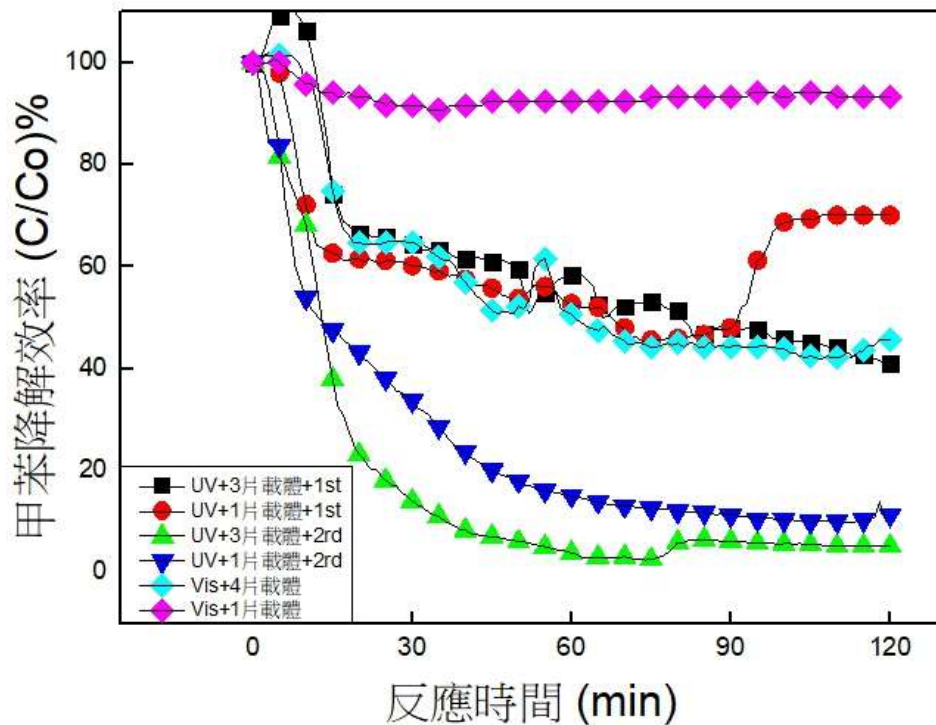


圖 3.19、光催化比較之甲苯濃度變化圖



四、研究方法與過程

本計畫結合中原大學環境工程學系以及新野科技股份有限公司共同執行，規劃以一年時間完成商業化光催化模組之開發以及污染場址實廠測試。

前期(107 年)利用已經設計好的光催化實驗模組進行組裝和實驗室規模的揮發性有機物光催化實驗模擬分析，並開發了低能耗可見光催化商業模組法進行尾氣催化降解。由於使用可見光催化模組+吸附模組，既較一般光催化劑節省能源，又減少傳統方法對大量活性炭的依賴，大大降低了尾氣處理之成本。實驗表明：該模組對揮發性有機物去除率 80% 以上。本計畫(108 年)欲提出以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試。將建構的實用性光催化商業模組進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，針對影響實廠整治之環境因素，進行長效可行的整治測試評估和效能分析。根據整治效果對模組設計、模組參數等方面進行各參數優化。綜上，本團隊將實現 plug-and-play 且可應用於實地污染長效整治的商業化成熟模組。因此，108 年度計劃案將分成三部分進行：(1) 可用於模組整治的污染廠址調查分析，(2) 長效現地現場測試結果反饋並完善優化，(3) 實現 plug-and-play 隨插即用且可應用於實地污染長效整治的商業化成熟模組。研究方法主要分為三大部分（如圖 4.1 所示），最終綜合評估商業化模組參數，對地下揮發性有機污染氣體進行即時監測，運行綜合效率評估，每日去除的總有機物含量等進行計算，使其具有商業化、多功能化應用價值。

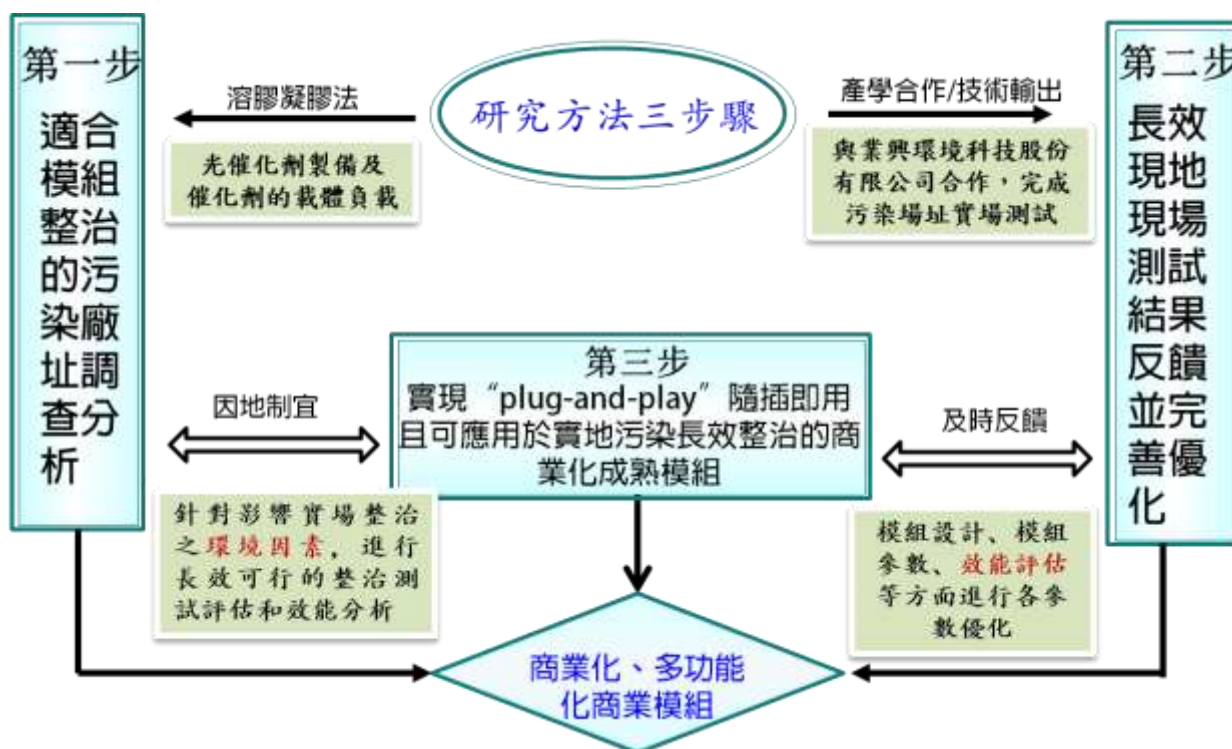


圖 4.1、研究方法三部曲框架圖



第一部分：可用於模組整治的污染廠址調查分析

為了以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試，在污染廠址選擇時，應選擇典型污染廠址區域。大型石化貯槽及加油站整治廠址的污染物多為 BTEX 類有機化合物，該類物質物理化學特性較複雜，且在廠址中之移動行為受廠址個別環境的影響較大，整治與調查技術皆需因地制宜，且須系統的釐清整治之環境影響因素，比如溫度，濕度以及土壤地下污染狀況。有關污染廠址調查分析具體步驟如下：

通過中央環保署和地方環保局的許可協助和相關公文的收發，確立污染廠址整治具體事宜。

本團隊擬與新野科技股份有限公司合作，執行期間將前期所發展之低能耗可見光催化套裝模組應用於新野科技股份有限公司，協助整治加油站污染場址尾氣處理。

通過 BTEX 分析測試設備，調查分析污染場址污染之情況，包括污染物種類，污染物濃度水準，環境因素等環境條件。根據現地污染狀況，根據廠區配置、原有之地下油槽平面及剖面配置圖，確立現地整治具體位置。

根據現地污染狀況，對現有模組在尺度和規格上進行調試和改進，使之可以達到預期污染物降解效果。

第二部分：長效現地現場測試結果反饋並完善優化

本計畫將由中原大學環境工程學系以及新野科技股份有限公司共同執行。圖 4.2 為土壤尾氣之實廠商業模組設計圖。本計畫擬於第四個月至第十個月於污染廠址進行現地整治，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析。通過長期的整治測試，調試設備使在各種環境因素下達到最佳降解效果，預計實驗步驟如下：

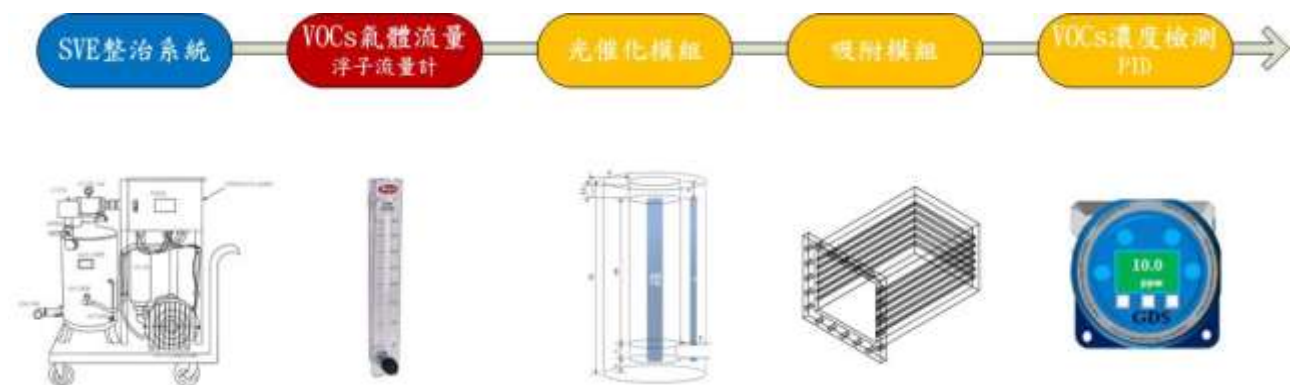


圖 4.2、光催化實廠模組設計圖



與污染廠址進行設備進廠事宜的接洽包括：設備安置位置，水電配置，前處理設備佈置等。

將建構的實用性光催化商業模組進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行為期 6 個月以上的降解分析。

對地下揮發性有機污染氣體進行即時監測，運行綜合效率評估，每日去除的總有機物含量等進行計算。

根據監測結果的反饋，對商業模組的參數進行不斷優化。並且監測評估不同溫度，濕度條件下，對有機物去除率之影響。

同時監測周邊地下土壤地下空氣品質變化情況，獲得實際地下空氣環境品質的改善程度。

將系統運行情況和建議撰寫報告，針對影響實廠整治之環境因素，進行長效可行的整治測試評估和效能分析。

第三部分：實現 plug-and-play 隨插即用且可應用於實地污染長效整治商業化成熟模組。

通過模組之長效現地測試，綜合評估模組的效能，包括：物料消耗，降解效率，以及模組的可拆卸性。第三部分具體步驟如下：

與傳統 SVE 之活性炭吸附效果相比，評價利用該商業模組的降解效率之差異，以及可以節省的活性炭的量以及能耗。

評價 plug-and-play 隨插即用的模組可拆卸性，優化可應用於實地污染長效整治的商業化成熟模組之條件。

4.1、 光催化模組之開發

本計畫前半年開始以光觸媒製備為主，光觸媒材料之光催化性能以光催化降解 BTEX 揮發性有機氣體加以評估，光催化降解 BTEX 之反應流程如圖 4.3 所示：

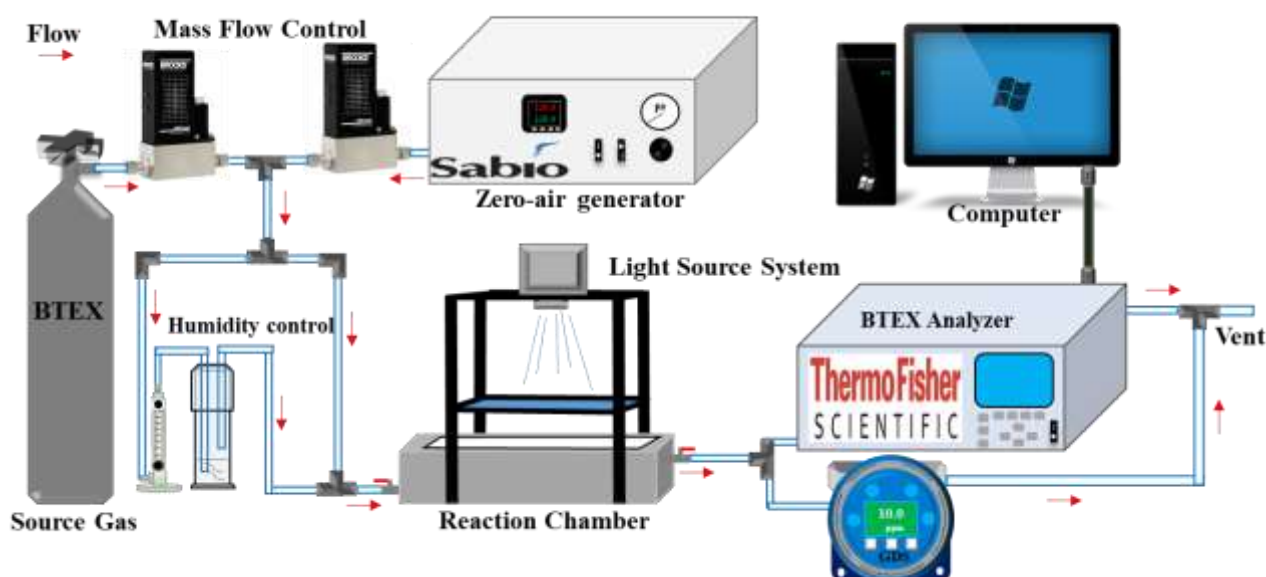


圖 4.3、光催化降解 BTEX 之反應流程之設計

4.1.1、降解對象 BTEX 之危害

依目前公告為地下水污染控制場址及整治場址資料，顯示油品類污染為國內常見之污染類型，其污染指標一般均採 BTEX(苯 Benzene、甲苯 Toluene、乙苯 Ethylbenzene、二甲苯 Xylenes；簡稱 BTEX)，BTEX(苯、甲苯、乙苯和二甲苯)是眾所皆知的污染物，大多數芳香烴對人類有潛在毒性、突變或致癌作用。

4.1.2、污染廠址選擇及現場污染物調查

前期計畫主要為對選定的污染廠址（加油站）進行調查，利用 SVE 技術進行抽樣調查並進行色譜分析，分析主要揮發性有機物的成分組成及含量。具體講，需要再不同溫濕度環境中，分析 VOCs 成分有何不同，有助於後期進行實驗室二元或三元有機污染氣體的降解適應，並在不同溫濕度情況下進行光催化實驗效果測試。

4.1.3、光觸媒製備

光催化研究中所涉及的光催化材料大多在微奈米級，粒徑小且均勻分佈的奈米材料相對於大尺度的材料，表現出更好的物理和化學特性，這對於材料的性能改善非常重要。目前，奈米二氧化鈦的合成方法有許多種，其中主要的合成方法有：溶膠-凝膠法(Sol-gel method)、水熱和溶劑熱法(Hydrothermal method and Solvothermal method)、微乳液法(Microemulsion method)等。

(1)溶膠-凝膠法：

溶膠-凝膠法是一種製備奈米材料常用的方法，不需要大型的設備，製備方法簡單，



反應容易調控，其主要過程為：在偏酸性的有機溶液中，以鈦的醇鹽或無機鹽做為原料，進行水解(hydrolysis)和縮和(condensation)等一系列反應，得到含有二氧化鈦水合物的溶膠，在經過一段時間的陳化後形成濕凝膠。濕凝膠經過乾燥、鍛燒和研磨等後處理方法後，製得所需的奈米二氧化鈦材料。

(2)水熱和溶劑熱法：

水熱合成法是利用水為介質，在特製的密閉反應器(高壓釜)中，通過加熱($T > 25^{\circ}\text{C}$)及加壓($P > 100\text{ kPa}$)，創造一個相對高溫、高壓的反應環境，使得通常難溶或不溶的物質溶解，並重新結晶而進行無機合成材料的一種有效的方法。水熱合成法製備的奈米材料具有純度高和晶粒形成好等特點，避免了因高溫煅燒或球磨等後處理引起的雜質和結構缺陷。但是，水熱合成法只適用於氧化物和少數對水不敏感的硫化物的製備，而對其他一些對水敏感的化合物就不適用，所以水熱合成法存在著一定的局限性。溶劑熱合成法是將水熱合成法中的水換成有機溶劑或非水介質，例如：有機胺、醇、氨、四氯化碳或苯等。採用類似水熱合成法合成原理，以製備在水溶液中無法生長、易氧化、易水解和對水敏感的奈米材料。溶劑熱合成法在一定程度上克服了水熱合成法選擇原料範圍小的缺點。此外，水熱與溶劑熱合成法還能結合超聲法和微波法，製備晶粒尺寸均勻和結晶度更好的奈米材料。

(3)微乳液法：

微乳液法是利用兩種互不相溶的溶劑在表面活性劑的作用下形成均勻乳液，將成核、生長、聚結和團聚等作用限制在微小的球型液滴中進行，從微乳液中析出固相。這種方法可以避免顆粒間的團聚，通常得到球型顆粒，但是通過調節表面活性劑組成和結構也可以得到一些特殊形貌的顆粒。微乳液主要由表面活性劑、表面活性劑助劑(一般為醇類)、油類(碳氫化合物)和水(或電解質水溶液)組成，形成透明、各向同性的熱力學穩定體系。該方法得到的固體前驅物通常為無定型顆粒，需要進一步焙燒處理提高結晶度，這會導致奈米顆粒的聚集和長大。微乳液法可和水熱合成法結合使用，可在較低溫度下獲得高晶化度的樣品。

4.1.4、光催化模組效益評估

光觸媒製備完成後需評估其光催化降解 BTEX 性能，將 0.1g 光觸媒均勻塗布在直徑 9.5 cm 之圓形玻璃盤上，接著置入光催化反應槽中，將 BTEX 氣體透過質量流量計調整所需要氣體流速及污染物濃度通入反應槽中，首先在避光條件下通入氣體，當污染物濃度達到平衡時則打開光源，光源為可見光或者紫外光，反應時間為 1 小時，最後將反應後之氣體通入 GC/MS 測定該濃度，評估光催化去除 BTEX 效率。



4.2、 光觸媒塗佈載體模組開發

本團隊下半年為利用上半年所發展出之最佳光觸媒塗布在實際廠址光催化模組測試並進行實廠測試。

4.2.1、 光催化載體模組製備

將光催化劑均勻塗布在高度 267 mm、直徑 37 mm 中空玻璃管內側，在中空處置入燈管作為光源，將 SVE 法處理後之尾氣通入該模組中進行光催化反應，圖 4.4 為光催化實廠模組設計。再以一定的優化比例負載於多孔載體上（三氧化二鋁、活性炭、分子篩等）製備以高比表面積的催化複合材料。之後，將光觸媒均勻分佈在直徑 19cm 之圓柱狀反應器槽中，將污染物氣體透過質量流量計調整所需要氣體流速及污染物濃度通入反應槽中，首先在避光條件下通入氣體，當污染物濃度以及光觸媒吸附達平衡則打開光源，光源為(UV-vis)紫外到可見光範圍，反應時間為 1 小時，在腔體內的停留時間為 2min，最後將反應後之氣體通入固定式光離子偵測器（PIDScan）測定該濃度，評估光催化去除待測污染物效率。最後，完成光源、催化載體的填充和設備各部件的組裝，針對實廠 SVE 尾氣降解端的設備進行製作，設計兼具經濟、低耗能以及低污染的光催化模組。

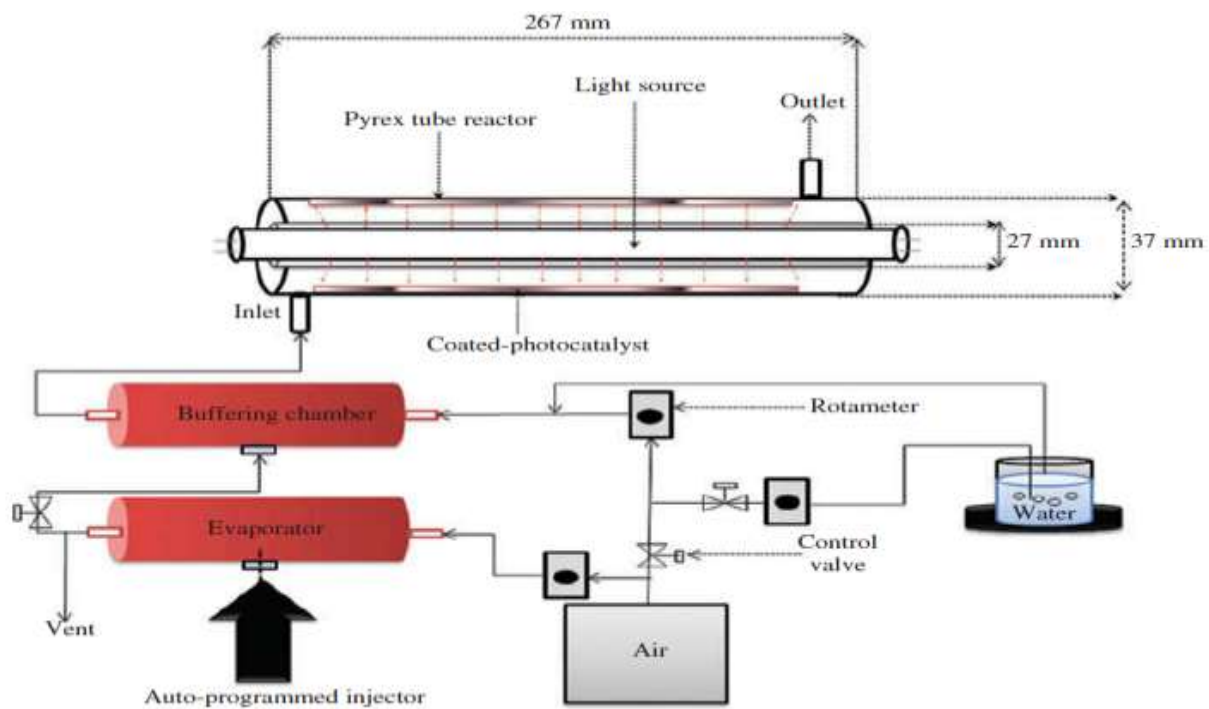


圖 4.4、光催化實廠模組設計



4.2.2、光觸媒製備

本團隊使用溶膠-凝膠法進行攪參雜二氧化鈦之合成，其優點為該方法是低溫反應，因此可參雜大量無機物或有機物，且易將光催化劑塗佈於大面積載體上，其製程如圖 4.所示，首先將 50ml 乙醇及 10ml 鈦酸四丁酯以 400rpm 充分攪拌 10 分鐘，此為反應前驅液，其溶液呈淡黃色，接著將 5M 之 4.5ml 硝酸溶液緩慢加入 4.5ml 去離子水中並溶入 1.864g 之硝酸銅(1%wt)，此溶液為反應催化劑，再將反應催化劑緩慢且滴加入反應前驅液中並以 800rpm 攪拌 10 分鐘，接著封上石臘膜並將轉速調降至 400rpm 攪拌 2 小時，此時溶液會逐漸出現半透明之凝膠，在攪拌完成後將膠體倒入至密閉容器中，將其至於 60℃ 烘箱中使其陳化 12 小時，此時溶液轉變為白色溶膠液體，將膠體取出並放置於室溫下，其將還原為溶膠，接著將溶膠倒入器皿中並將玻璃纖維布浸泡於溶膠內使銅參雜二氧化鈦均勻塗佈，待其乾燥後置入 400℃ 高溫鍛燒爐鍛燒 2 小時便可得光催化玻璃纖維布。

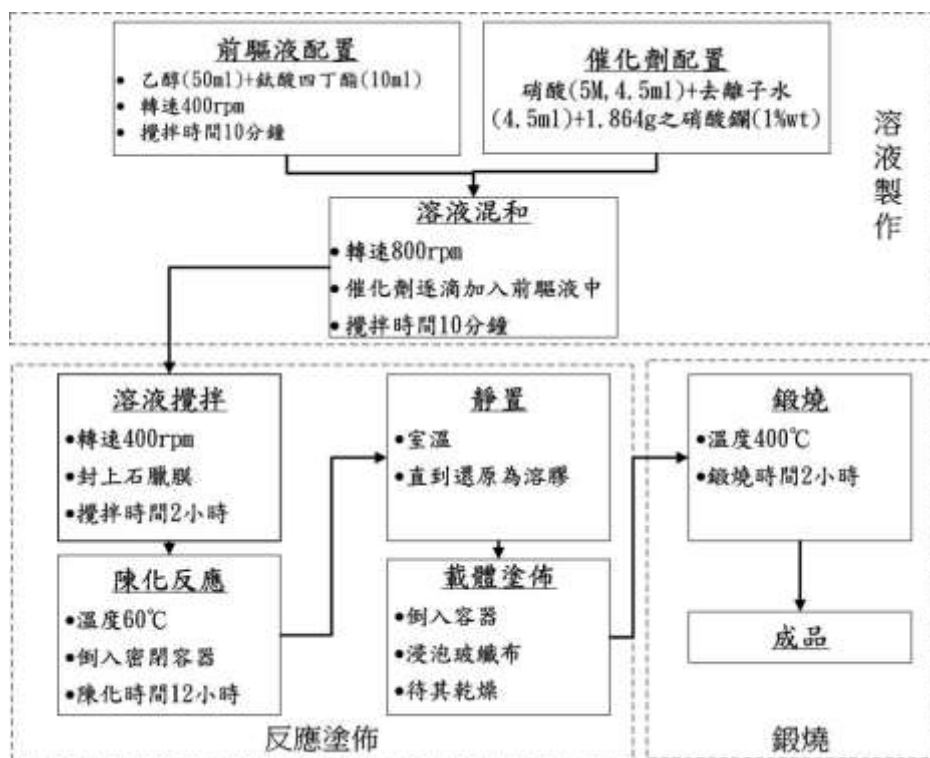


圖 4.5、銅參雜二氧化鈦製備流程



4.2.3、進行多組分氣體的光催化降解測試

考慮到在實際情況中，污染氣體組成複雜且易收到環境濕度和溫度影響，所以本團隊要進行多組分混合揮發性有機污染氣體的光催化模組實驗，並且分析不同溫度和濕度情況下，光催化模組的降解效率。

4.2.4、組裝“光催化+吸附”多模塊的商業模組

為在商業上具有應用性和價值意義，本團隊進行“光催化+吸附”相輔相成的多模塊組裝模式，在安裝上本團隊使用“隨插即用”的模式,如圖 4.5 所示。“一方面，光催化劑可以徹底降解有機污染成分；另一方面，在光催化活性不足情況下，活性炭吸附可以起到暫時的吸附的作用，這樣更加有利於本團隊再生催化劑的動作或者更換新的催化劑。安裝 BTEX 監測傳感裝置，進行綜合效率評估、每日去除的總有機物含量等進行計算。

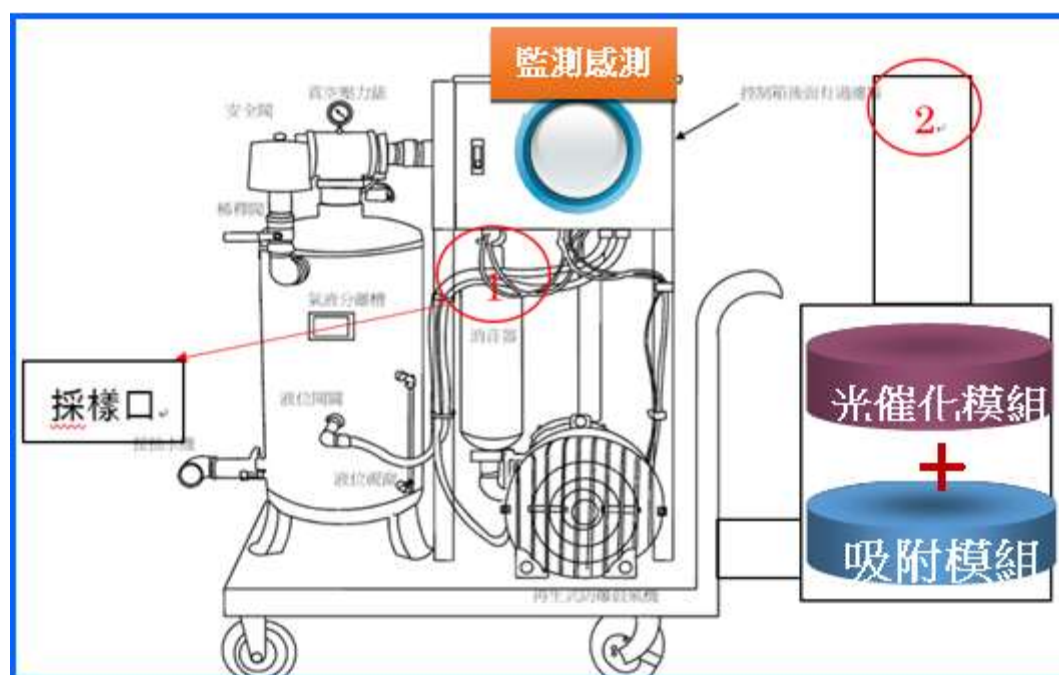


圖 4.6、土壤廢氣之光催化實廠商業模組設計圖

4.2.5、商業化模組的優化和綜合性能評估

針對空氣中揮發性有機污染物例如甲苯、苯及丙酮進行可見光條件下的光催化降解實驗，利用市售 P25、純二氧化鈦、銅摻雜二氧化鈦並塗佈於多孔性載體後進行效能比較，並選擇其最佳適合條件。通過模擬測試，從材料設計、模組設計、模組參數等方面進行各參數優化，最終完成成品化商業產品，對揮發性有機物去除率達到 75 %



以上。

4.2.6、光催化載體模組實廠尾氣催化效能評估

本計畫與新野公司協助操作之實際污染廠址進行 SVE 法尾氣測試，將 SVE 法處理後尾氣之排放經過流量計控制流量通入，將氣體導入模組中進行光催化反應，最後將光催化反應後之氣體排出到大氣中，期間將會進行氣體採樣，利用 GC/MS 測定反應前後之氣體濃度，最後評估其光催化性能以及持續性，探討該模組之可利用性。

4.3、整體可行性分析

4.3.1、可搭配廣泛型 SVE 技術，利於市場推廣

土壤氣體抽除法（SVE）在國外相關整治成效已被證明（系統示意圖如圖 4.7），使用者容易取得設備，設置安裝容易；其對場址運作之干擾最小，在理想情況下，一般整治期程約 6 個月至 2 年，整治期程短。同時，其整治價格具競爭性，易與其他技術結合運用，如空氣注入法、生物整治法等；可運用於建築物下方或其他不能進行開挖的地方。自 80 年代美國工程兵公司研發了土壤氣體抽除法以來，該技術廣泛應用於揮發性/半揮發有機物污染土壤的修復。據美國超級基金統計，1982~2005 年採用土壤氣體抽除法、焚燒、固化/穩定、生物修復等技術修復了美國 1,104 個污染場地土壤。其中，土壤氣體抽除法修復場地的數量和土壤體積均列首位。

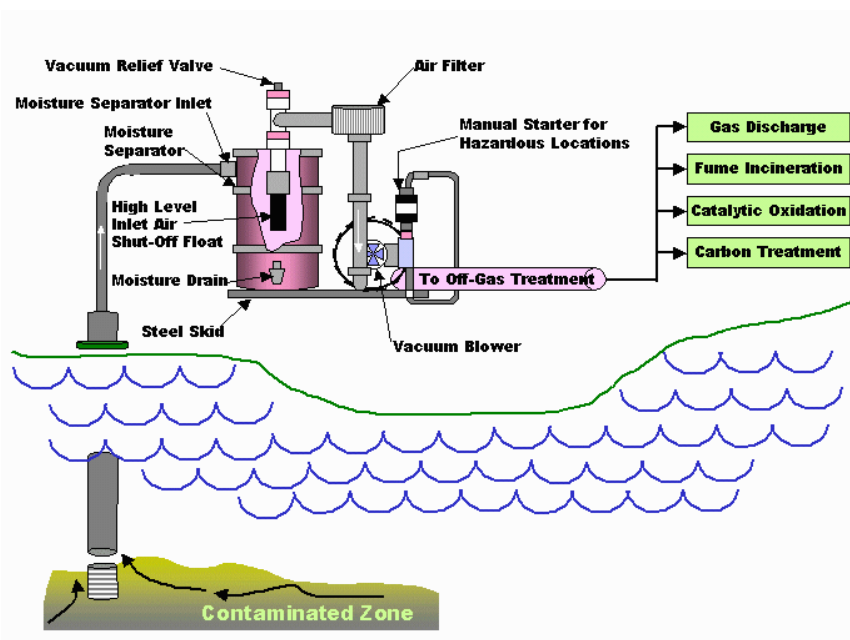


圖 4.7、常見 SVE 系統示意圖

4.3.2、利用奈米光催化劑，一次性降解揮發性有機廢氣

奈米材料具有小尺寸效應、表面效應、量子尺寸效應和宏觀量子隧道效應，使得



不同尺寸、形狀、組成的奈米粒子具有不同的電化學活性、催化活性、光電等性質。奈米材料應具有高的反應活性、較廣泛的溶解性和較好的穩定性，便於進行化學修飾和功能化，對於環境中含有各種低濃度、高毒性、難降解的污染物質有高效的降解效果，並且光催化劑具有低能耗、製備方法可控和過程環境友善性等，可避免在環保應用中產生二次污染。本團隊長期從事光催化空氣污染整治，擁有成熟的奈米材料製備的經驗（如圖 4.8）、物理化學測試（包括 X 射線衍射儀(XRD)、傅立葉紅外光譜儀(FT-IR)、掃描式電子顯微鏡(SEM)、比表面積分析儀(BET)）設備和完善、科學、系統的污染氣體降解測試平臺（如圖 4.9 所示），能為本計劃提供良好的實驗平臺。

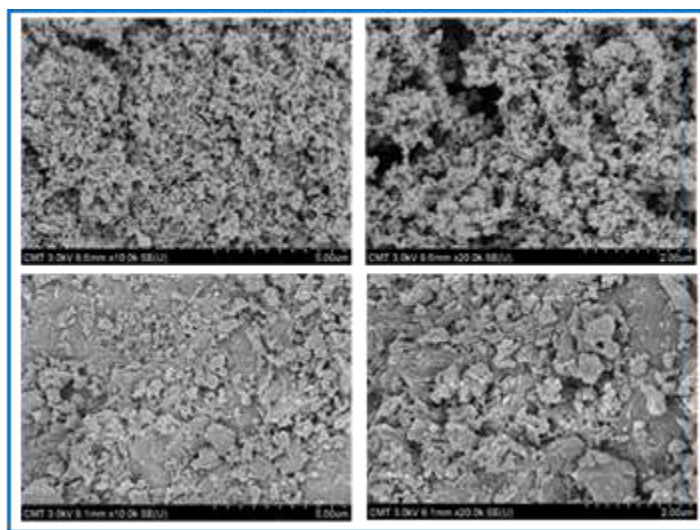


圖 4.8、商用 P25 及 1wt%La-TiO₂ SEM 圖

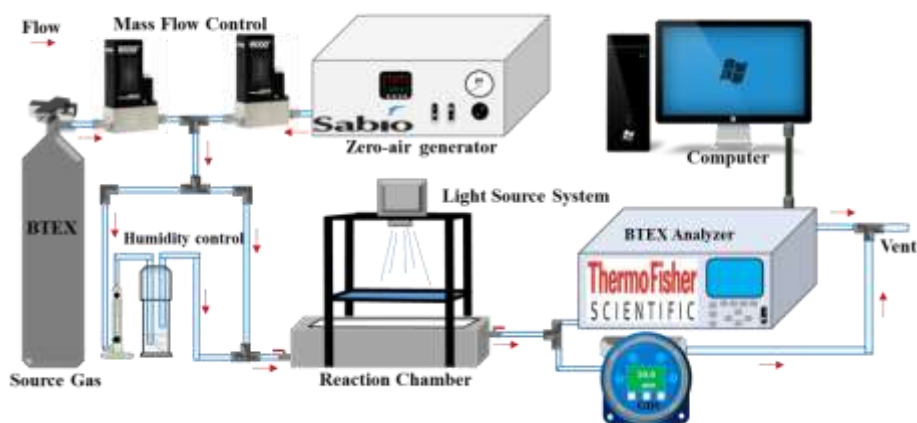


圖 4.9、污染氣體降解測試平臺

4.3.3、已具有實用性的光催化商業模組雛形

本計畫案建立在前期光催化降解模組雛形之上(如圖 4.10)，良好的基礎可以進一步保障實驗的順利進行。本團隊於設計模組過程中，將光觸媒均勻分佈在直徑 19cm 之圓柱狀反應器槽中，將污染物氣體透過質量流量計調整所需要氣體流速及污染物濃



度通入反應槽中，首先在避光條件下通入氣體，當污染物濃度以及光觸媒吸附達平衡則打開光源，光源為(UV-vis)紫外光或可見光，反應時間為 1 小時，在腔體內的停留時間為 2 min，最後將反應後之氣體通入固定式光離子偵測器(PIDScan)測定該濃度，評估光催化去除待測污染物效率。在此基礎之上，本團隊於本年度擬將上述光催化反應系統以商業化角度開發構建具有實用性的光催化商業模組並進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，期能達到揮發性有機物去除率 75 % 以上，接著再從材料設計、模組設計、模組參數等方面進行各參數優化，最終完成成品化商業產品。

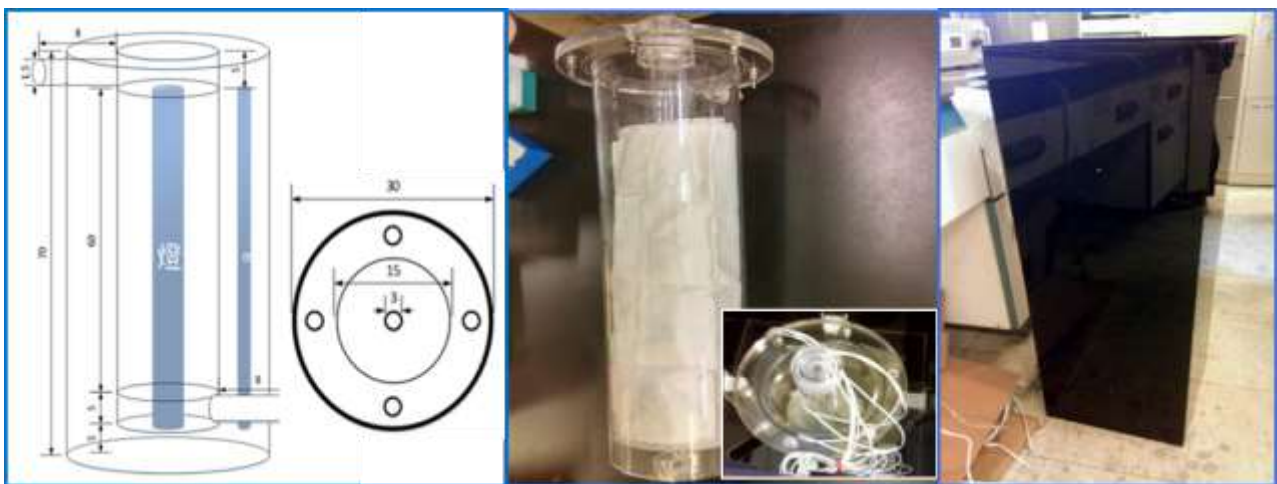


圖 4.10、光催化商業化模組設計圖（圖左）及實物圖（圖右）

4.3.4、組裝光催化+吸附多模塊的商業模組，實現 plug-and-play

為在商業上具有應用性和價值意義，本團隊進行光催化+吸附相輔相成的多模塊組裝模式，在安裝上本團隊使用隨插即用的模式，另一方面，光催化劑可以徹底降解有機污染成分；另一方面，在更換光催化加或光催化活性不足情況下，活性炭吸附可以起到暫時的吸附的作用，這樣更加有利於本團隊再生催化劑的動作或者更換新的催化劑。透過 TVOC 偵測器，進行綜合效率評估、每日去除的總有機物含量等進行計算。



4.4、 工作進度甘特圖

本計畫執行進度如下表

| 月份 工作項目 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 註 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|---|
| 1.通過中央地方環保局的許可協助,確立污染廠址整治具體事宜 | | | | | | | | | | | | |
| 2.調查分析場址污染情況,包括污染物種類,濃度水準等環境條件 | | | | | | | | | | | | |
| 3.根據廠區配置、原有之地下油槽平面及剖面配置圖,確立現地整治具體位置 | | | | | | | | | | | | |
| 4.與污染廠址進行設備進廠事宜的接洽 | | | | | | | | | | | | |
| 5.與業興公司合作,進行污染場址實廠測試為期 6 個月以上降解分析 | | | | | | | | | | | | |
| 6.根據監測結果,評估不同溫度,濕度條件下對有機物去除率之影響並優化模組參數 | | | | | | | | | | | | |
| 7.撰寫報告,針對影響實廠整治之環境因素,進行長效可行的整治測試評估和效能分析 | | | | | | | | | | | | |
| 8.評價利用該商業模組的降 | | | | | | | | | | | | |



| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|--|
| 解效率之差異,以及可以節省的活性炭的量以及能耗 | | | | | | | | | | | | |
| 9.期中報 | | | | | | ※ | | | | | | |
| 10.期末報告 | | | | | | | | | | | ※ | |
| 工作進度估計百分比 (累 積 數) | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 85% | 90% | 100% | |



五、執行結果

5.1、新吸附模組建置

5.1.1、前期吸附模組測試

圖 5.1 為不同數量活性碳置於吸附模組對甲苯吸附比較，實驗結果顯示置入 90g 之活性碳可將甲苯去除約 100%，而隨著活性碳置入量的減少，模組去除甲苯的效率也隨之下降，但可發現從置入 45g 之活性碳開始，甲苯濃度均於 5 分鐘左右便有逐漸上升的趨勢，此結果顯是內部活性碳可能並未完全吸附污染物，本團隊推測其原因可能為此模組設計為長方體造型，如圖 5.2 所示，因內部造型為長方體，固可能因為內部發生短流現象，進而導致模組內之活性碳無法有效利用，因此導致甲苯濃度在活性碳上為吸附飽和前便逐漸升。

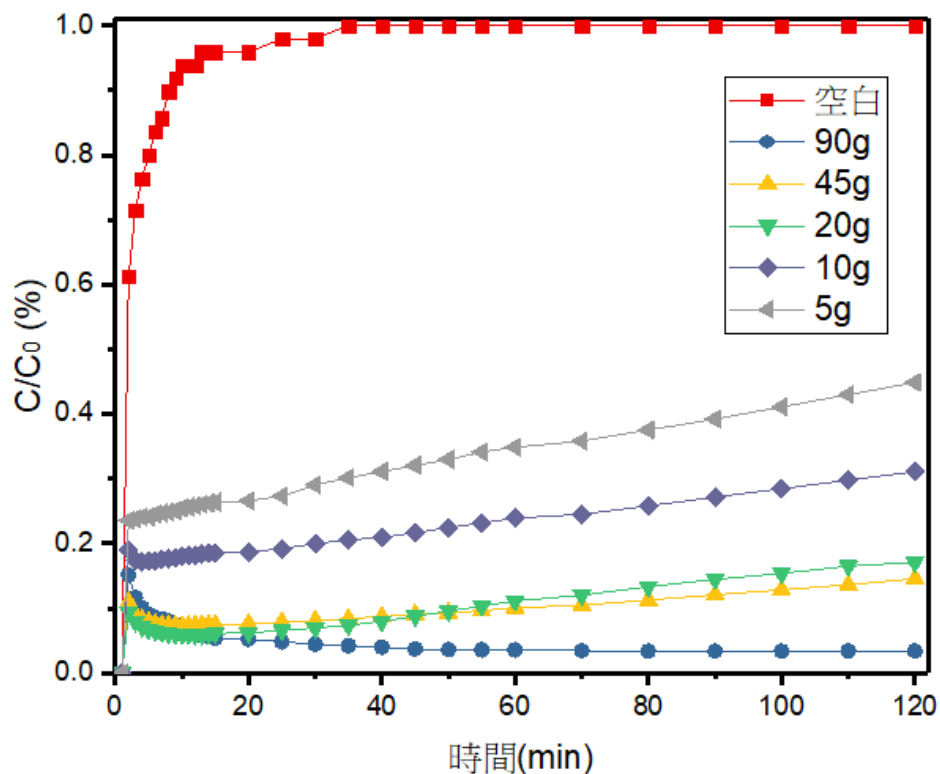


圖 5.1、不同數量活性碳置於吸附模組對甲苯吸附比較

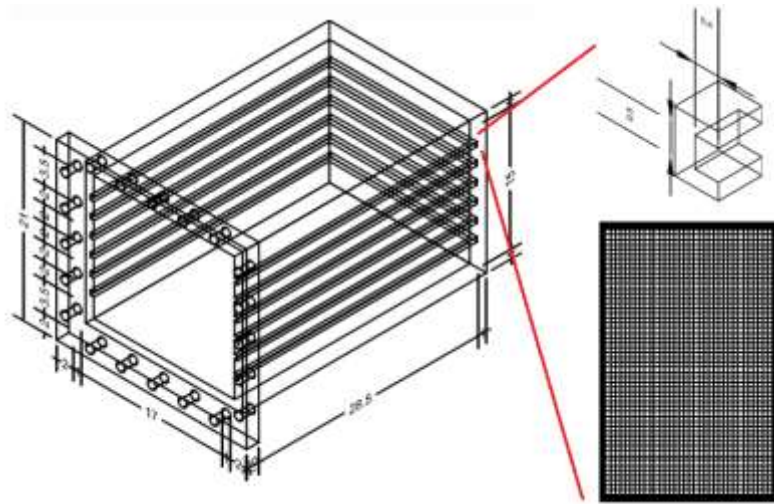


圖 5.2、吸附模組設計圖

5.1.2、前期吸附模組模流分析

因上節之實驗結果顯是前期模組內部可能有短流現象，因此為驗證模組內部是否產生短流現象，固本團隊針對該模組進行了模流分析，本團隊使用之模流軟體為 ANSYS 有限元素分析，該軟體可藉由模擬模組內部流體之流速以確認是否有短流現象，圖 5.3 為該吸附模組使用 ANSYS 分析所建立之模組內部流體模型，圖 5.4 為附模模組使用 ANSYS 分析所建立之網格，圖 5.5 則為模擬所設立之邊界條件，其中 A 為污染物進氣口、B 為污染物出氣口、其於部分均為 C，所設立邊界條件為不受影響之牆壁，內部污染物設定參數為 ANSYS 軟體內建之甲苯氣體，流速則透過下列公式進行計算：

$$\text{進氣流速} = \frac{\text{流量}}{\text{進氣孔面積}} = \frac{3(L/min)}{0.125(in)^2 \times \pi} = \frac{\frac{3 \times 10^{-3}}{60}}{(0.3175 \times 10^{-2})^2 \times \pi(m^2)} = 1.58(m/s)$$

圖 5.6 為附模模組 ANSYS 流場分析結果，由分析結果可得知，模組內部污染氣體主要集中於進氣及出氣孔，其次為兩氣孔間之流道，在靠近附模模組邊界之地方幾乎沒有任何流速，因此可得知該模組內部具有短流現象，因此導致污染物無法有效被模組內部置入之活性炭吸附，也證明了本團隊於上節的猜測為正確的。

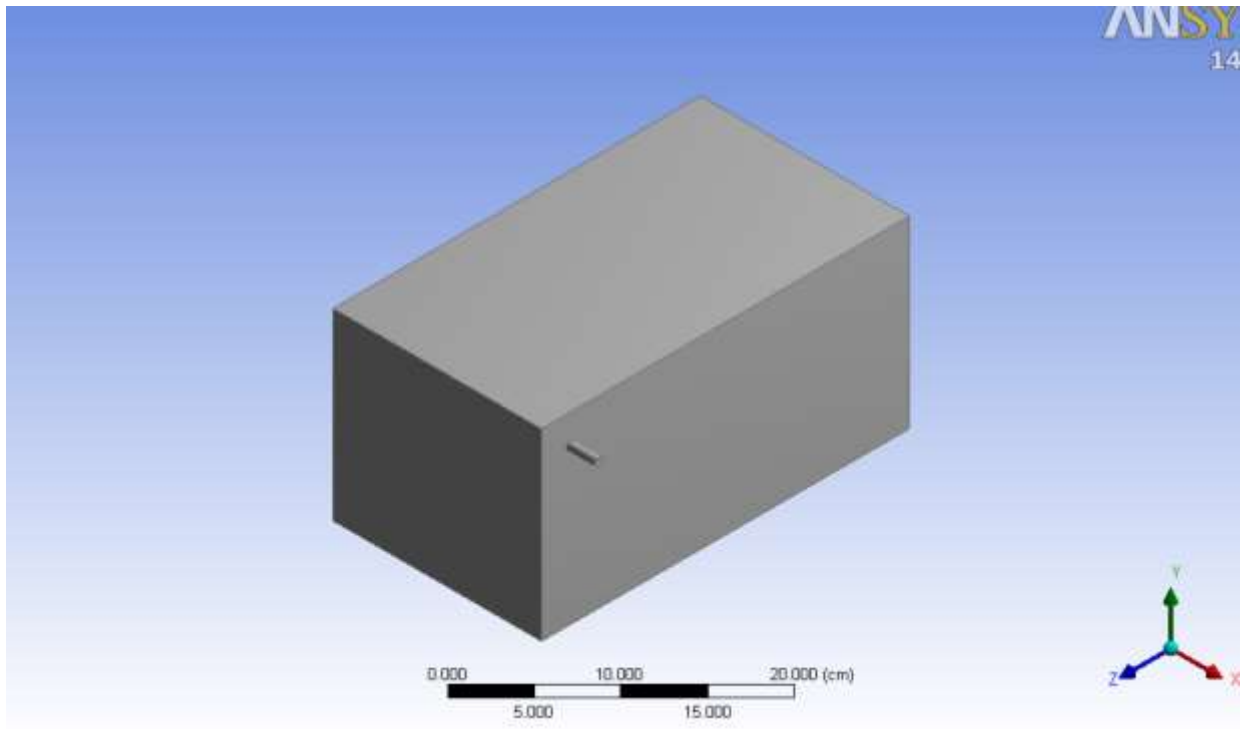


圖 5.3、附模模組 ANSYS 分析模型

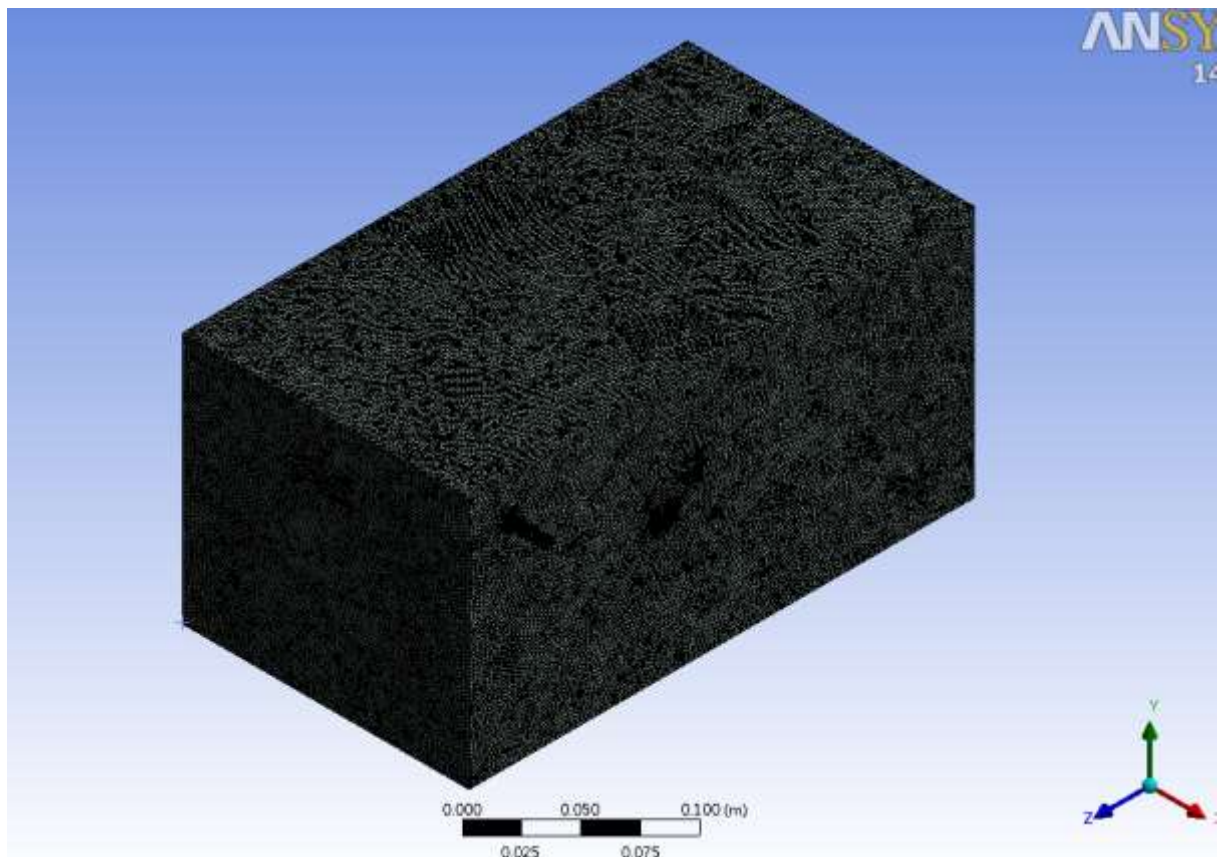


圖 5.4、附模模組 ANSYS 分析網格

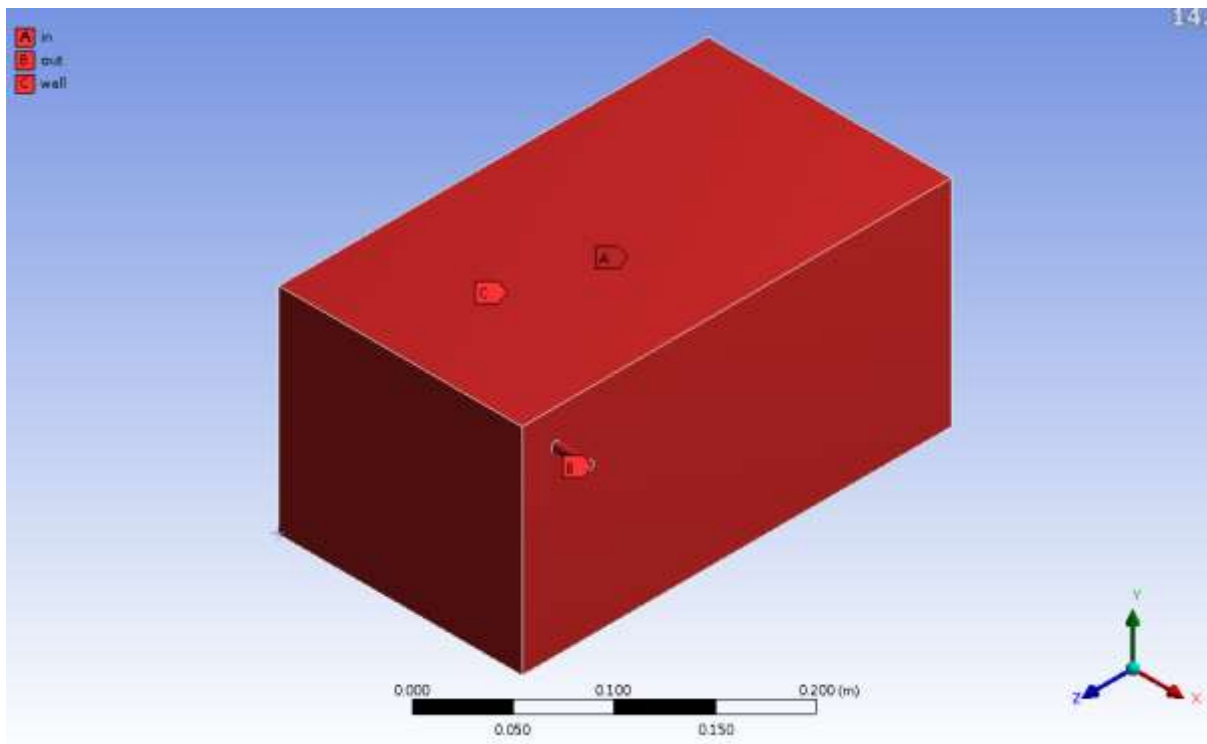


圖 5.5、附模模組 ANSYS 分析邊界條件

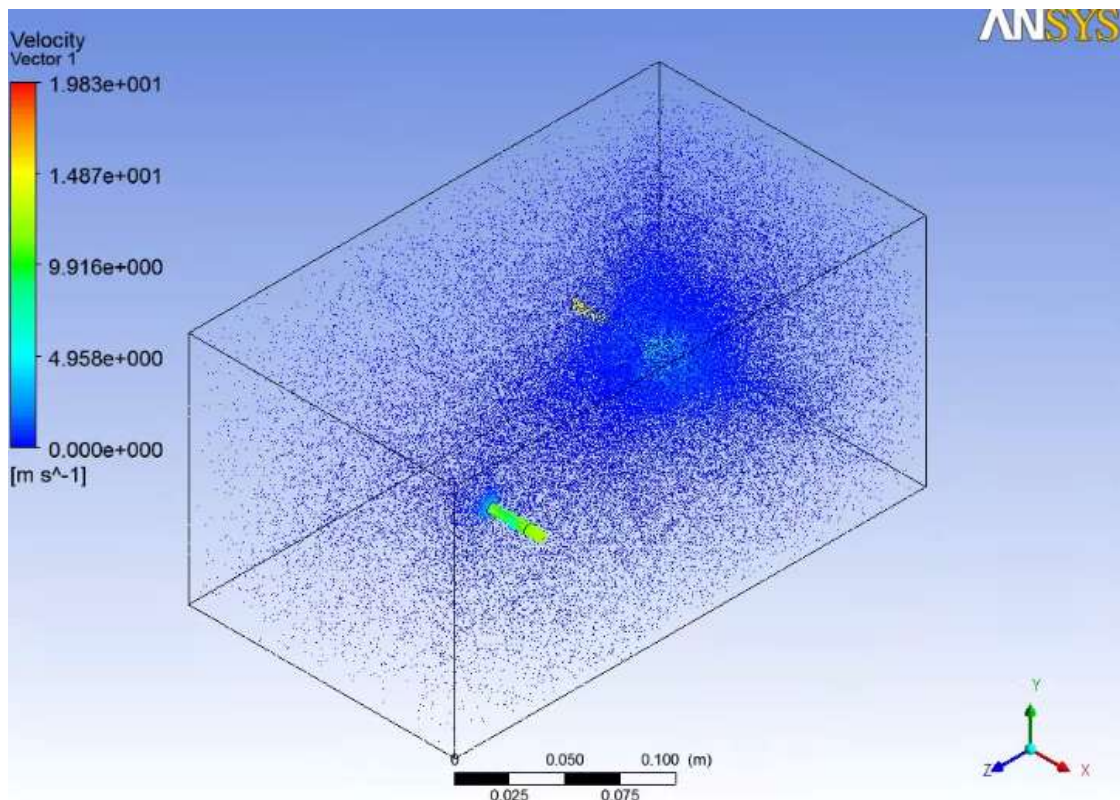


圖 5.6、附模模組 ANSYS 流場分析



5.1.3、 吸附模組再設計

為降低吸附模組內部短流現象以利內部吸附材料能有效對污染物進行吸附，固本團隊針對吸附模組進行重新設計，再設計之吸附模組設計圖如圖 5.7～圖 5.16 所示，吸附模組整體規格為長 22cm、寬 21cm、高 23.5cm 之壓克力模組，並於最底端設置長 2cm、寬 2cm、高 10cm 之腳架，模組上方為直徑 1/4 英吋之進氣孔，下方為直徑 1/4 英吋之出氣孔，在模組上方及下方均設有漸擴流道以利污染氣體能迅速擴散，且最上方設有整流板，整流板內部規格為 14*12 個半徑 0.2cm 之孔洞，而為避免模組於使用期間內部汙染物之逸散，各內部組件均設有 8 個 M3 螺絲之孔洞，並於內部面黏貼一圈樹脂，圖 3.6 為具整流板吸附模組內部載體規格，載體整體規格為長 20cm、寬 16.5cm、高 3cm 之壓克力模組，並於底端設置整流板，整流板內部規格為 14*12 個半徑 0.2cm 之孔洞，該模組設計概念為以各層所設計之整流版強制使污染氣體均勻分散至模組內部各處，而為使設備可連續操作，各載體均可單獨分開更換，也就是說當最上方載體中之活性碳達吸附飽和時，僅需要將第一層載體中之活性碳單獨更換，其於載體中之活性碳可持續對污染物進行處理，借此達到連續操作這一目的。



圖 5.7、新吸附模組外觀

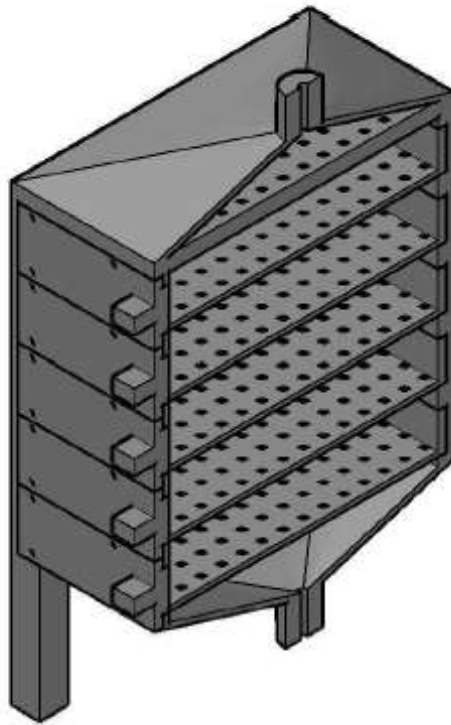


圖 5.8、新吸附模組含內部組件剖面圖

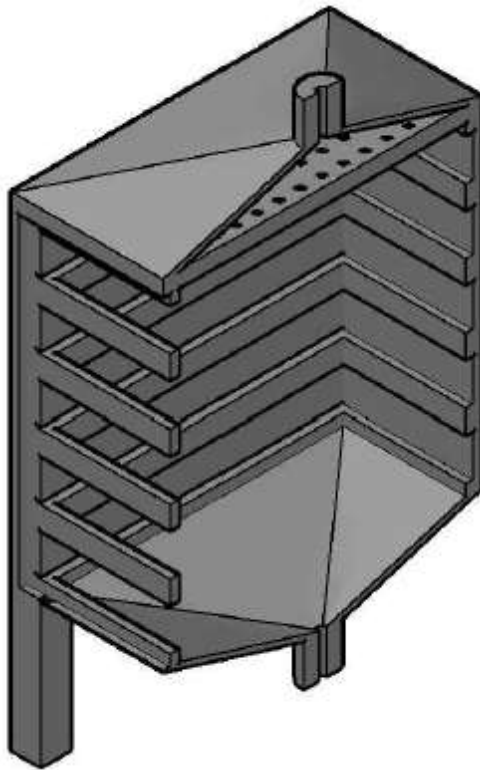


圖 5.9、新吸附模組不含內部組件剖面圖

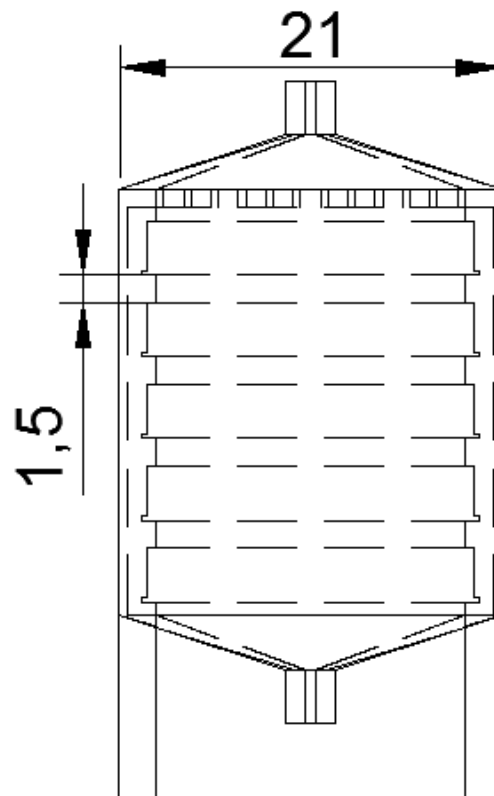


圖 5.10、新吸附模組尺規前視圖

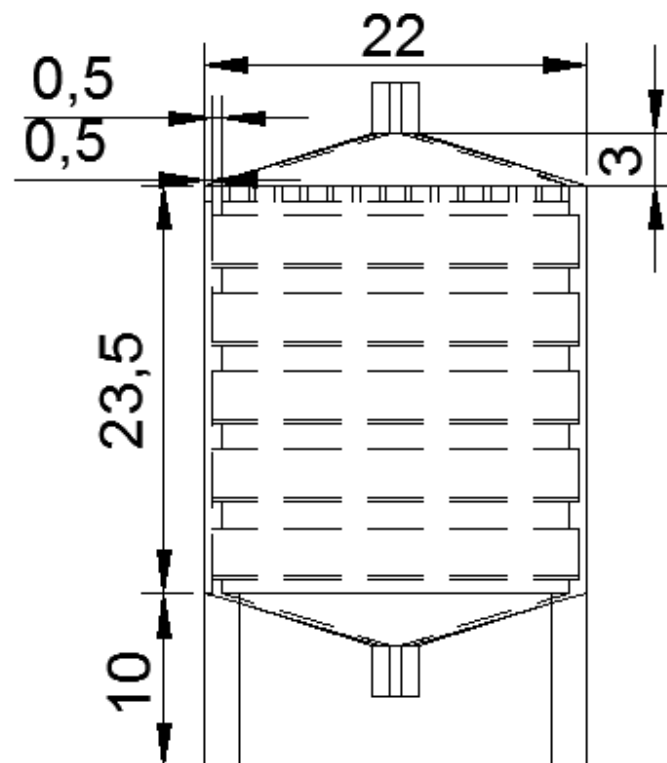


圖 5.11、新吸附模組尺規側視圖

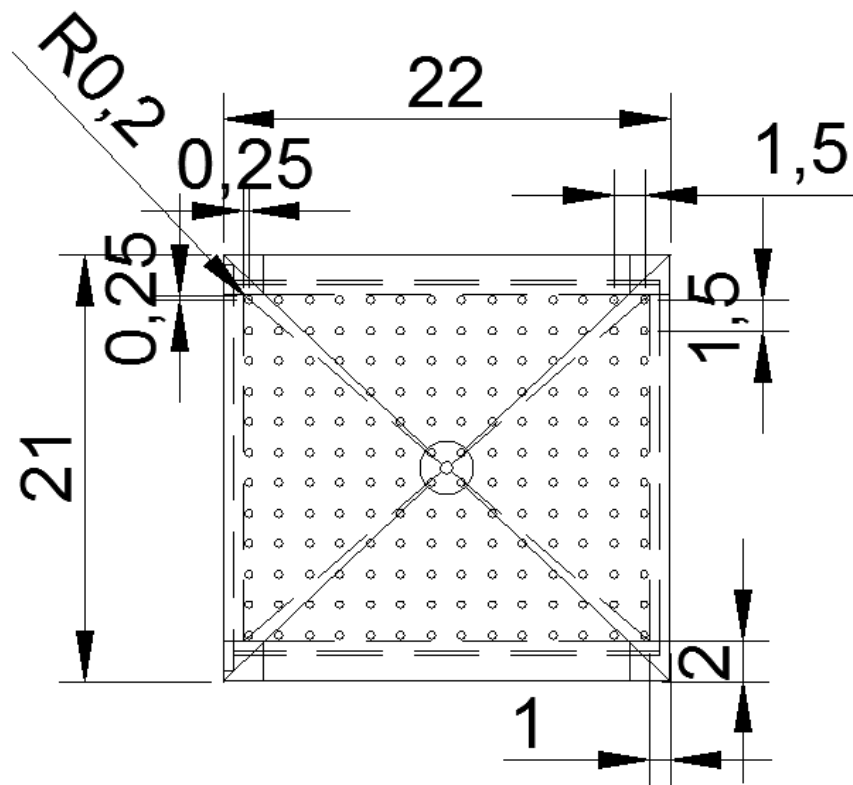


圖 5.12、新吸附模組尺規上視圖

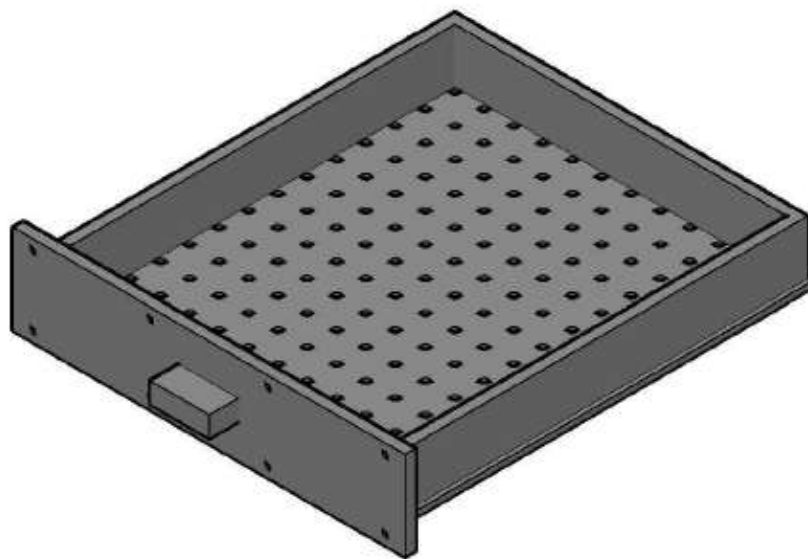


圖 5.13、新吸附模組內部組件外觀

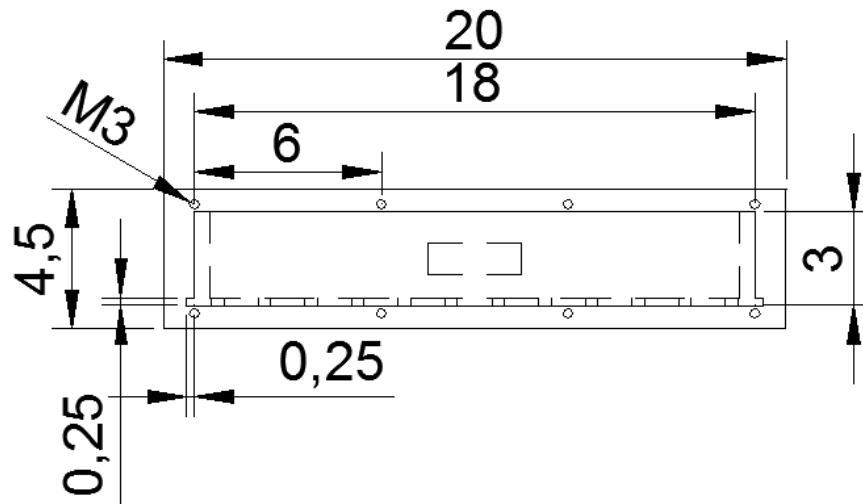


圖 5.14、新吸附模組內部組件尺規前視圖

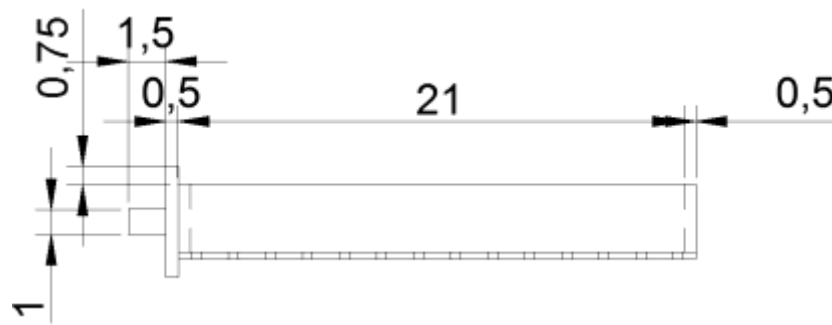


圖 5.15、新吸附模組內部組件尺規側視圖

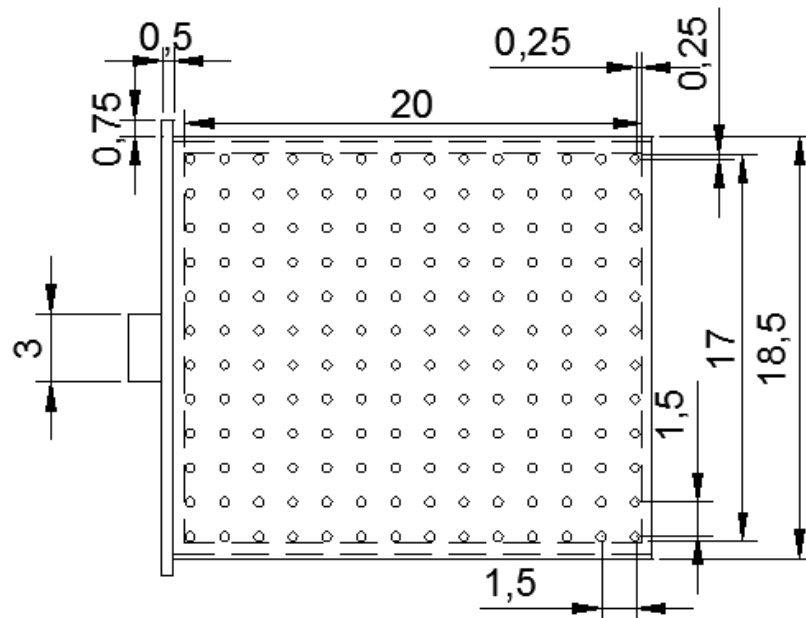


圖 5.16、新吸附模組內部組件尺規上視圖



圖 5.17、新吸附模組實品圖

5.1.4、新吸附模組模流分析

為確保新設計之吸附模組內部短流現象有所降低，因此本團隊使用 ANSYS 有限元素分析對其內部流場進行分析，圖 5.18 為新吸附模組 ANSYS 分析模型，與 5.1.2 節之分析模型不同處在於本次模擬模型僅建立 1/4 模型，其原因為本團隊所設計之新吸附模組為完全對稱形狀，因此在使用 ANSYS 進行模流分析時可根據其對稱面減少模型建立，使用 1/4 模型進行分析可大幅減少進行模流分析之時間，且不影響分析結果，固本次模擬僅使用 1/4 模型，圖 5.19 為 ANSYS 分析所需之網格，圖 5.19 為本次模擬所設立之邊界條件，A 為模組進氣孔、B 為模組出氣孔、C 為模組對稱面、其餘部分則為不受影響之牆壁，內部污染物設定參數為 ANSYS 軟體內建之甲苯氣體，流速則透過下列公式進行計算：

$$\text{進氣流速} = \frac{\text{流量}}{\text{進氣孔面積}} = \frac{3(L/min)}{0.125(in)^2 \times \pi} = \frac{\frac{3 \times 10^{-3}}{60}}{(0.3175 \times 10^{-2})^2 \times \pi(m^2)} = 1.58(m/s)$$

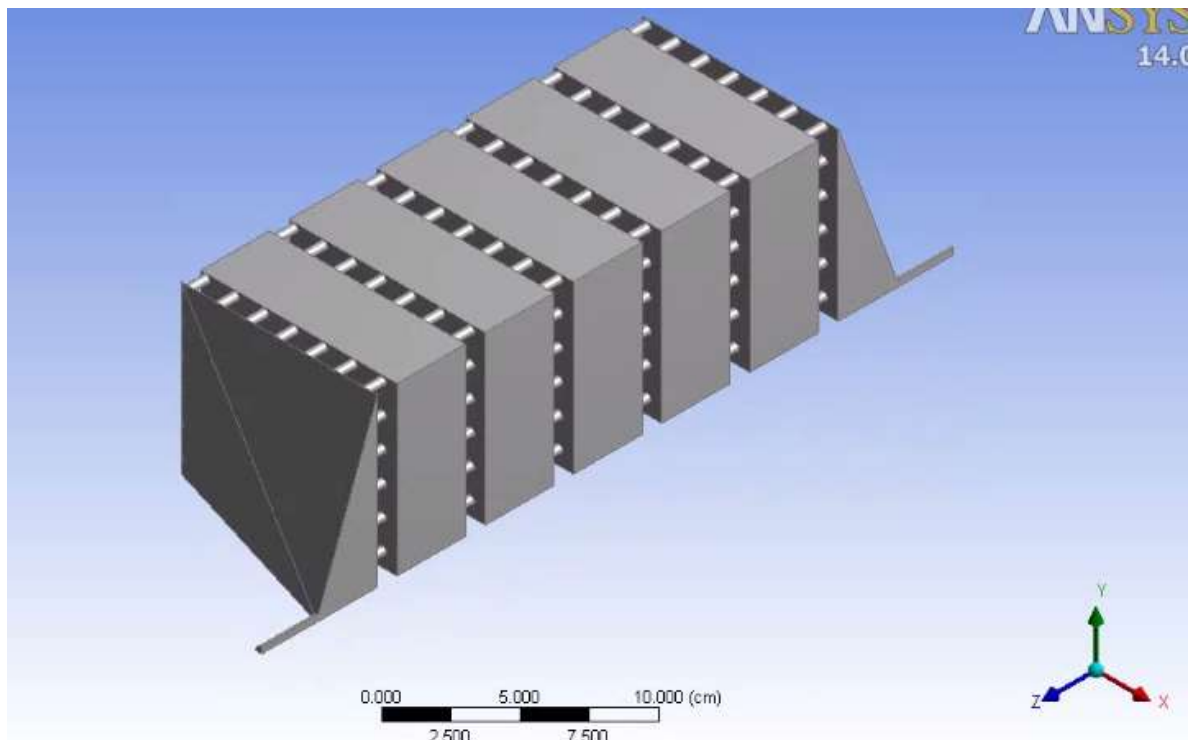


圖 5.18、新吸附模組 ANSYS 分析模型

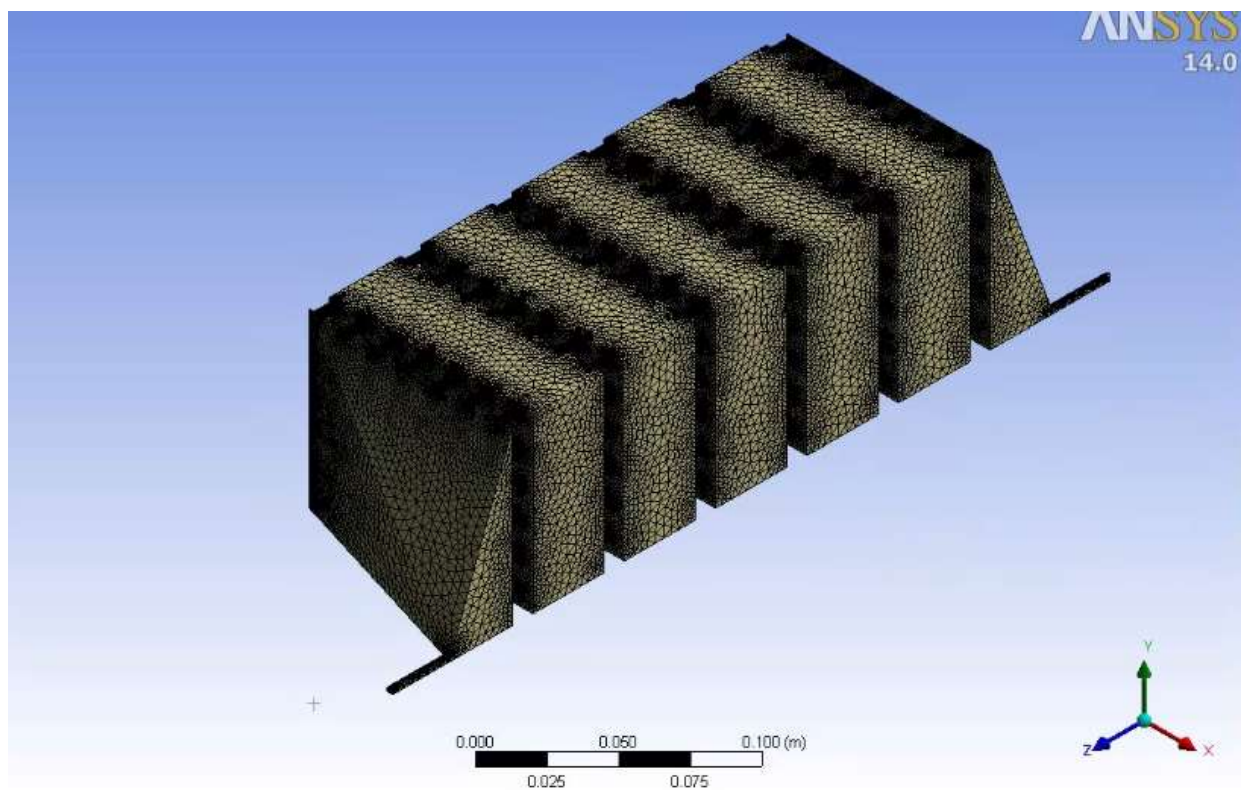


圖 5.19、新吸附模組 ANSYS 分析網格

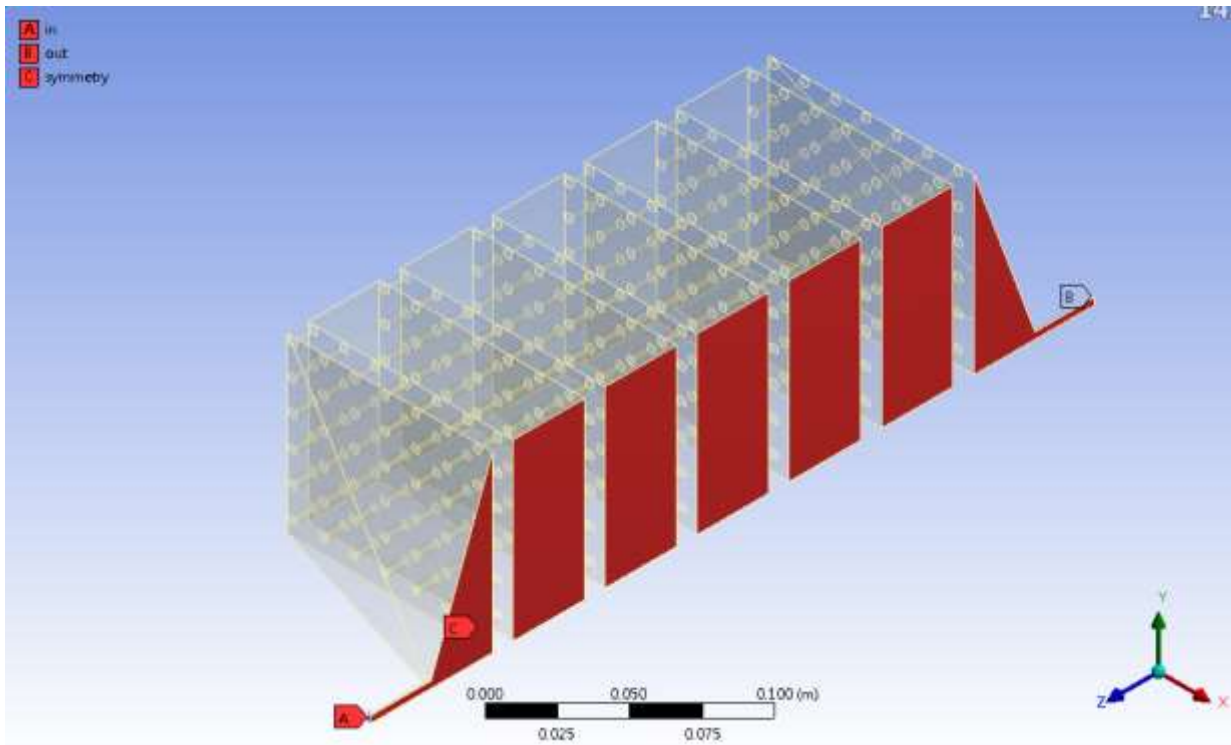


圖 5.20、新吸附模組 ANSYS 分析邊界條件

圖 5.21～圖 5.23 為具整流板之吸附模組流場分析，由於吸附模組內部具有整流板，因此內部可視為近乎沒有短流產生，污染氣體進入吸附模組後，首先會經由第一層固定於模組本體之整流板進行整流，因此污染氣體可分別通過整流板上每一小孔洞，且整流板同時可將污染氣體進氣流速分散，而流體流速較慢時，短流發生情況也會因此減少，雖於第一層整流板並沒有辦法完全使污染氣體均勻分散，但當污染氣體流至第一層模性碳載體時，因其同樣設置整流板，故由第一層載體開始，污染物便可均勻且穩定通過整流板上之小孔，且本吸附模組使用方式為將活性碳平鋪於各載體上，因此就算是第一層載體上之活性碳也可均勻吸附污染氣體，因上述原因，故本團隊後續實驗皆使用具有整流板之吸附模組。

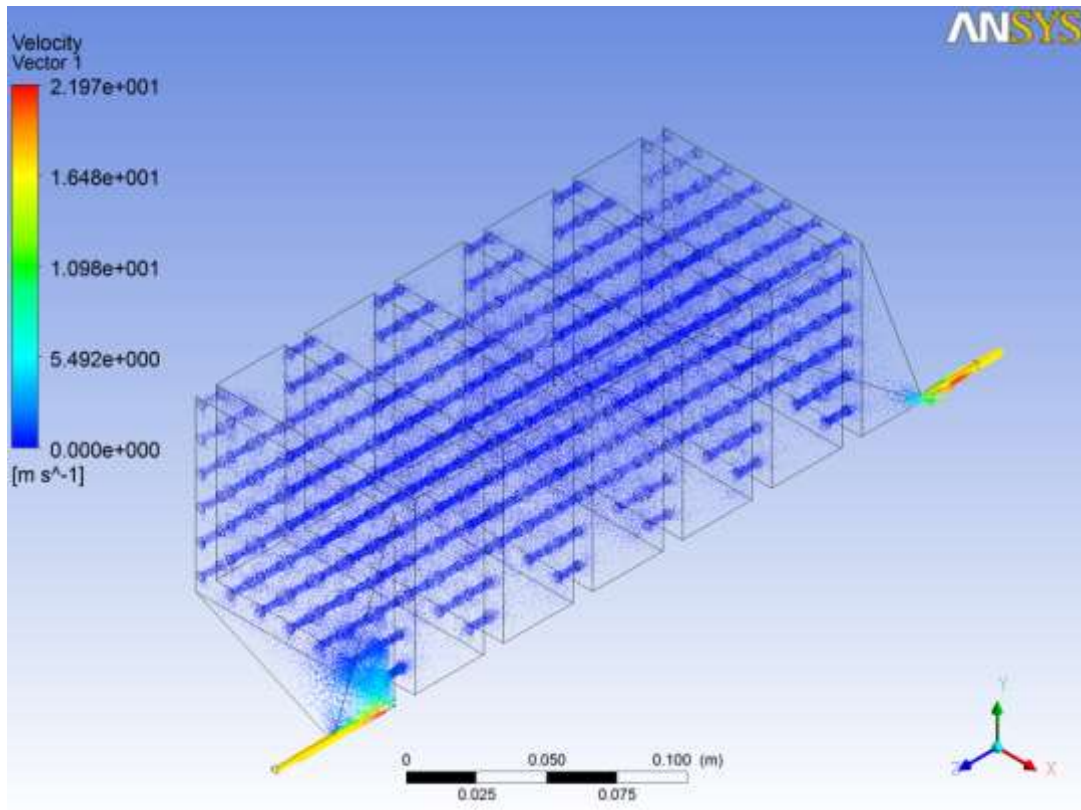


圖 5.21、吸附模組內部流體分析左上視圖

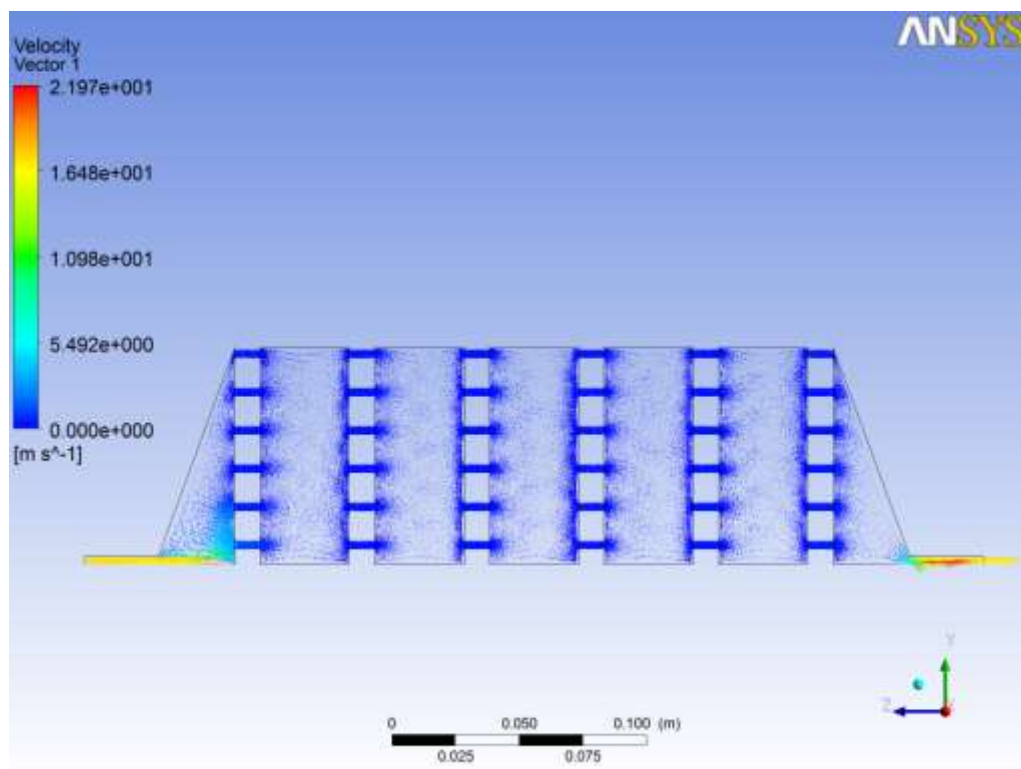


圖 5.22、吸附模組內部流體分析右視圖

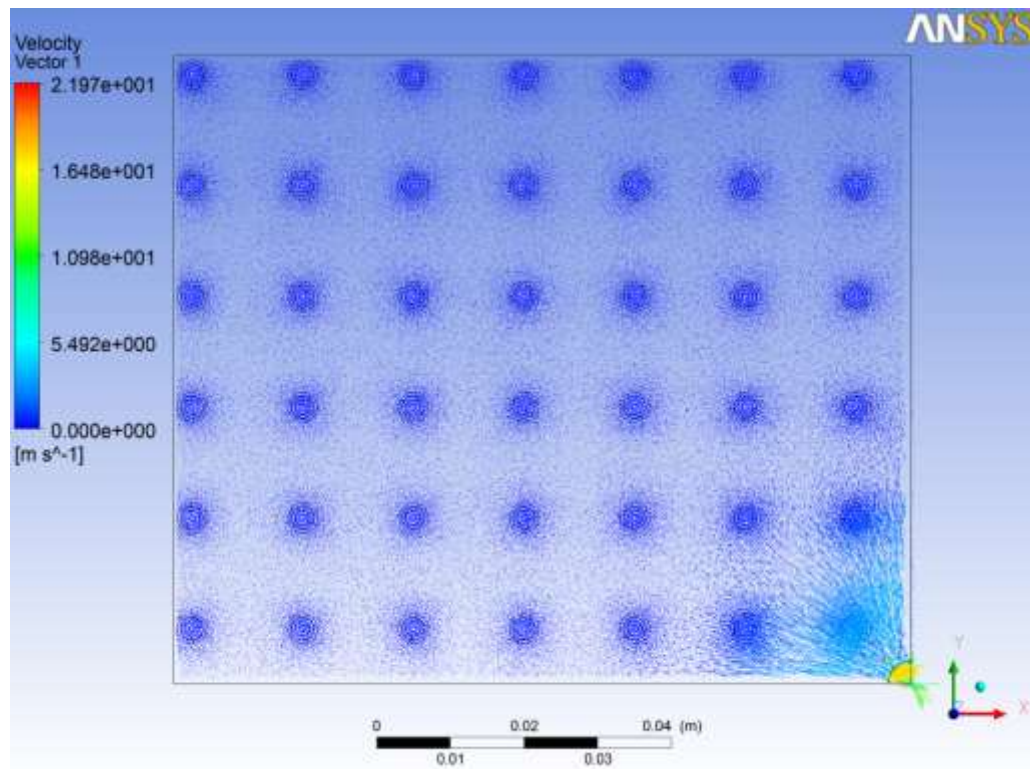


圖 5.23、吸附模組內部流體分析上視圖

5.1.5、 吸附模組穩定性測試

為確保本團隊所設立之實驗時間可使新設計之吸附模組內部污染物維持穩定，因此本團隊將進行吸附模組於使用單層載體時於不同時間下測試結果進行比較，透過將 60g 活性碳平鋪至單層載體上，設定 60g 為活性碳置入重量原因為 60g 活性碳可剛好佈滿載體表面，待載體及活性碳均至入吸附模組內部後便可將 15ppm 及相對溼度低於 4RH%之甲苯氣體通入模組內部進行實驗，最終透過 PID 檢測儀器進行檢測，本實驗總測試時長為 2 小時。

圖 5.24 為不同時間下吸附模組於使用 60g 活性碳平鋪於一層載體時之實驗結果，由實驗結果可看到從 30 分鐘開始甲苯殘餘濃度便已維持穩定，因此後續具整流板之吸附模組將使用 30 分鐘為測試時間。

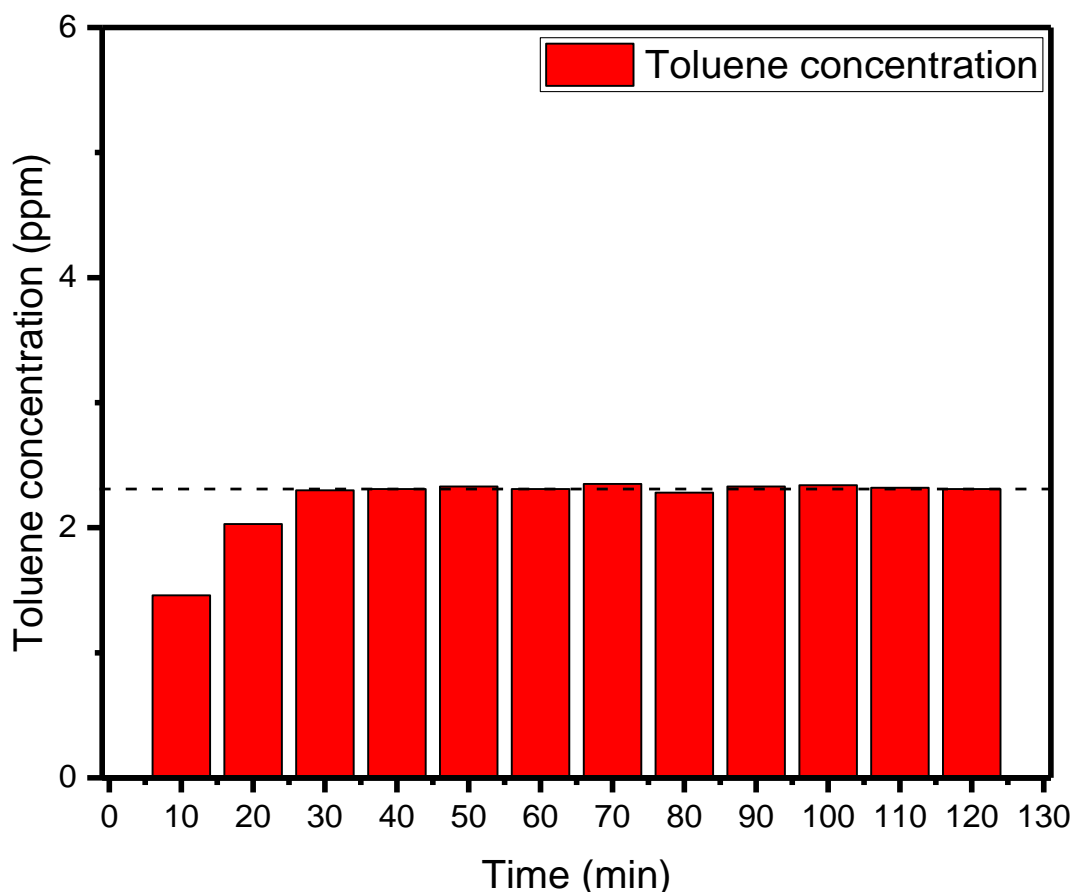


圖 5.24、具整流板之吸附模組穩定時間測試

5.1.6、載體數量測試

為測試不同載體數量對固定活性碳之影響，本團隊透過固定模組內部活性碳總量以維持模組內部可處理之污染物總量，由於單層載體鋪滿活性碳重量為 60g，故本團隊選擇使用 60g 為固定活性碳重量參數，因此本團隊將 60g 之活性碳平均放置於不同數量之載體上進行測試，期望藉由此次實驗得知是否改變模組內部載體數量可使整體去除效率提升。

實驗結果如圖 5.25 所示，實驗結果顯示，效果最好之載體層數為 3 層載體，其中各層載體使用活性碳量為 20g，其對甲苯吸附效果可達 92.4%，而隨著模組內部載體數量增加或減少時，吸附模組對污染物之去除效率也隨之下降，當使用 2 層、4 層及 5 層載體時，吸附模組對污染物之去除效率均約為 90%，而僅使用 1 層載體時，吸附模組對污染物之去除效率僅為 84.7%，因此雖僅使用一層載體可將其鋪滿活性碳，然而實驗結果顯示，過多或過少活性碳均會使吸附模組對污染物之去除效率下降，本團隊



推測其原因為置入過多活性碳可能造成內部整流效果不佳，因此導致整體吸附效果降低，而置入過少活性碳則可能會導致污染物無法完全與活性碳進行接觸，也因此導致吸附模組去除效率降低，因此為確認此推測是否為正確，本團隊將於後續實驗以單層載體並置入不同數量活性碳進行測試，期望透過此測試找出本團隊所建置之吸附模組最佳使用活性碳量，此舉不僅可提高吸附模組對污染物之去除效率，同時亦可使吸附模組使用成本降低。

表 5.1、載體數量對甲苯降解最大去除量

| 60g 活性碳分別置入載體數量(層) | 最大去除甲苯濃度(ppm) |
|--------------------|---------------|
| 1 | 14.09 |
| 2 | 13.83 |
| 3 | 14.19 |
| 4 | 14.2 |
| 5 | 14.19 |

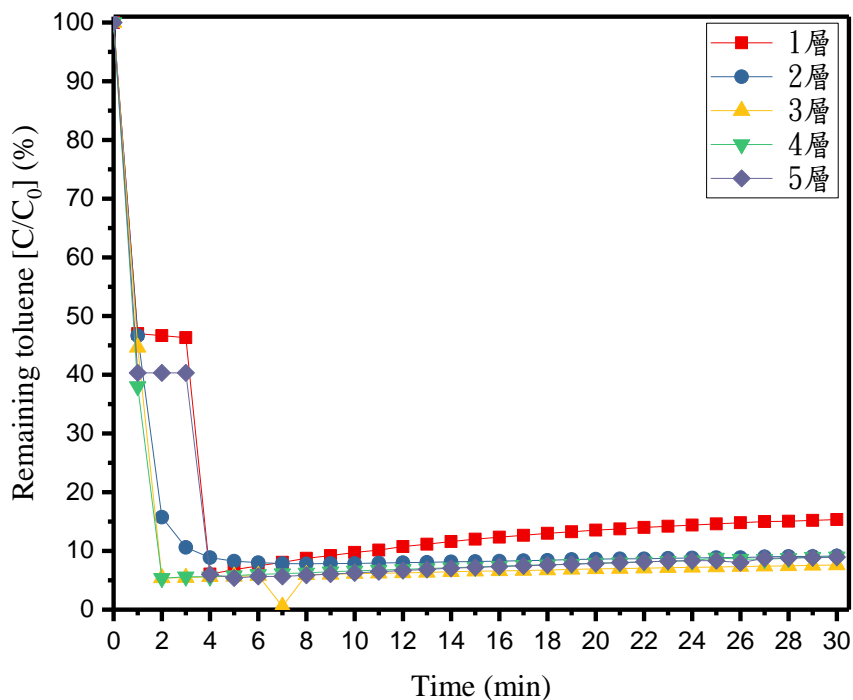


圖 5.25、載體數量對甲苯降解濃度影響



5.1.7、活性碳置入量測試

由於 5.1.6 節之實驗結果顯示活性碳置入量可能影響吸附模組整流板效果，因此本團隊透過將 60 g、50 g、40 g、30 g 及 20 g 活性碳置入於 1 層載體進行測試，其中污染物濃度設定為 15 ppm、環境濕度設定為<4 RH%、污染物流量設定為 3 L/min、實驗長度則設定為 30 分鐘，此次實驗將可確認活性碳置入量是否會影響整流板效率，也可使吸附模組於最少量活性碳達到最大吸附效果，進而減少吸附模組使用成本。

實驗結果如圖 5.26 所示，由實驗結果可得知，吸附效果最佳為使用 30 g 之活性碳於單層載體中，其對甲苯去除效果可達 92.6 %，其次為使用 40 g 活性碳於單層載體中，其對甲苯去除效率為 90.2 %，對甲苯去除效率最低為使用 60 g 活性碳於單層載體中，其對甲苯去除效率為 84.7 %，次低則為使用 20 g 活性碳於單層載體中，其對甲苯去除效率為 85.2 %，透過本次實驗，本團隊推斷出使用 60 g 活性碳於單層載體時會因為整流板上活性碳數量過多，因此導致吸附模組內不知整流板效率不佳，進而造成活性碳無法有效與污染物進行接觸，而使用過少活性碳則會因為吸附效果有限而造成吸附模組無法有效去除污染物，因此適量活性碳部不僅可使吸附模組去除效率增加，也可使整體使用成本下降，固本團隊後續實驗將使用於單層載體至入 30 g 活性碳為實驗之固定參數。

表 5.2、單層載體置入不同量活性碳對甲苯降解最大去除量

| 單層載體置入活性量(g) | 最大去除甲苯濃度(ppm) |
|--------------|---------------|
| 60 | 12.70 |
| 50 | 12.95 |
| 40 | 13.52 |
| 30 | 13.89 |
| 20 | 12.78 |

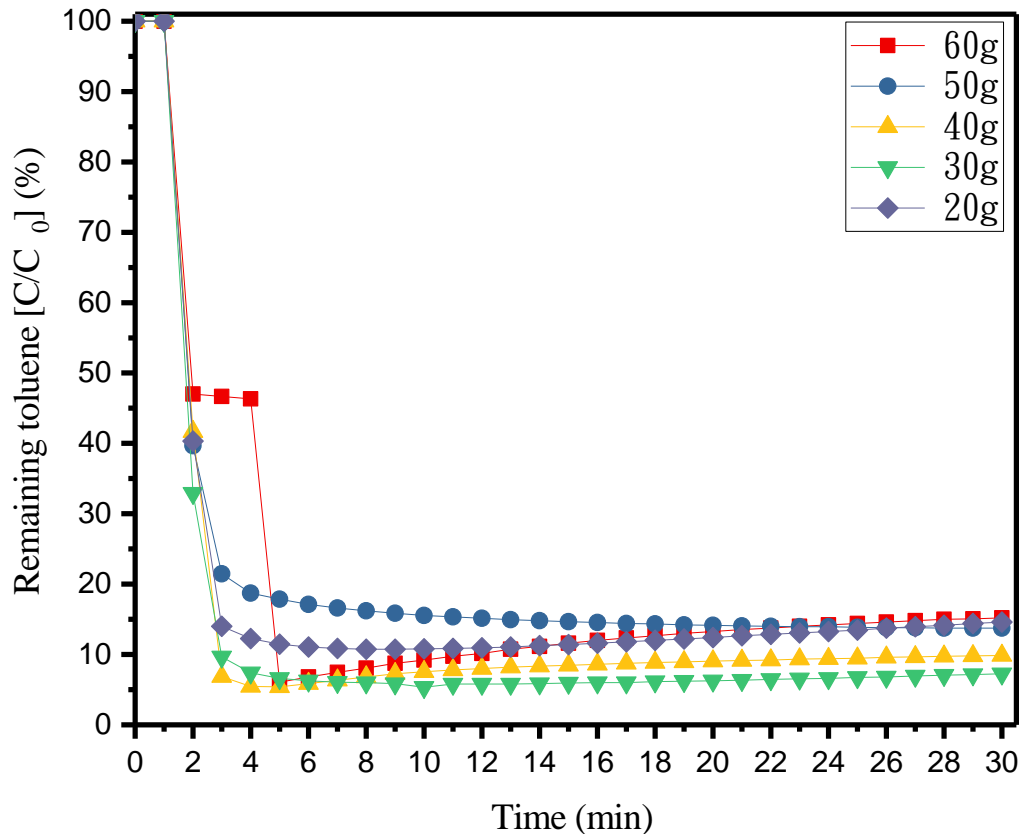


圖 5.26、不同數量活性碳於單層載體測試

5.1.8、 污染物進氣流量測試

污染物流量將影響整體吸附模組於單位時間之去除量，因此污染物流量為本團隊所建置之吸附模組中一重要參數，透過測試不同污染物流量可測試吸附模組單位時間可去除之最大污染量，因此本團隊以污染物流量 1 L/min、2 L/min 及 3 L/min 進行測試，本次實驗污染物濃度設定為 15 ppm、環境濕度設定為<4 RH%、污染物流量設定為 3 L/min、實驗長度則設定為 30 分鐘，而吸附模組內部則於單層載體上置入 30 g 活性碳進行測試。

圖 5.27 為吸附模組於不同污染物流量之去除效率比較圖，由實驗結果可得知，吸附模組於污染物流量 1 L/min 時具最佳去除效率，其去除效果可達 93.5 %，其次為污染物流量 2 L/min，去除效率為 93.3 %，而污染物流量 3 L/min 去除效率則為 92.6%。

雖圖 5.27 顯示污染物流量 1 L/min 時吸附模組去除效率較污染物流量 3 L/min 時高 0.9 %，然而污染物流量 1 L/min 時污染物總量卻低於於污染物流量 3 L/min 時 3 倍，



因此透過下列公式計算後可得知 30 分鐘內吸附模組對污染物去除之總量，其中 C_0 為污染物初始濃度、 Q 為污染物流量、 n 為測試時間、 C_i 為該時間之甲苯濃度。

$$C_0 \times Q - \sum_{i=1}^n (C_i \times Q) = \text{污染物去除量}$$

表 5.4 為透過上式所計算出之吸附模組於 30 分鐘內污染物去除總量比較，由計算結果可得知雖表 4.5 顯示污染物流量 3 L/min 去除效率為最差，但其去除之污染物總量卻為最高，因此考慮經濟成本下，本團隊將以污染物流量 3 L/min 進行後續實驗。

表 5.3、不同污染物流量於吸附模組對甲苯最大去除量

| 污染物進氣流量(L/min) | 最大去除甲苯濃度(ppm) |
|----------------|---------------|
| 3 | 14.13 |
| 2 | 14.03 |
| 1 | 14.02 |

表 5.4、吸附模組於 30 分鐘去除甲苯總量

| 污染物進氣流量(L/min) | 甲苯去除量(mg) |
|----------------|-----------|
| 3 | 1205.46 |
| 2 | 791.58 |
| 1 | 401.7 |

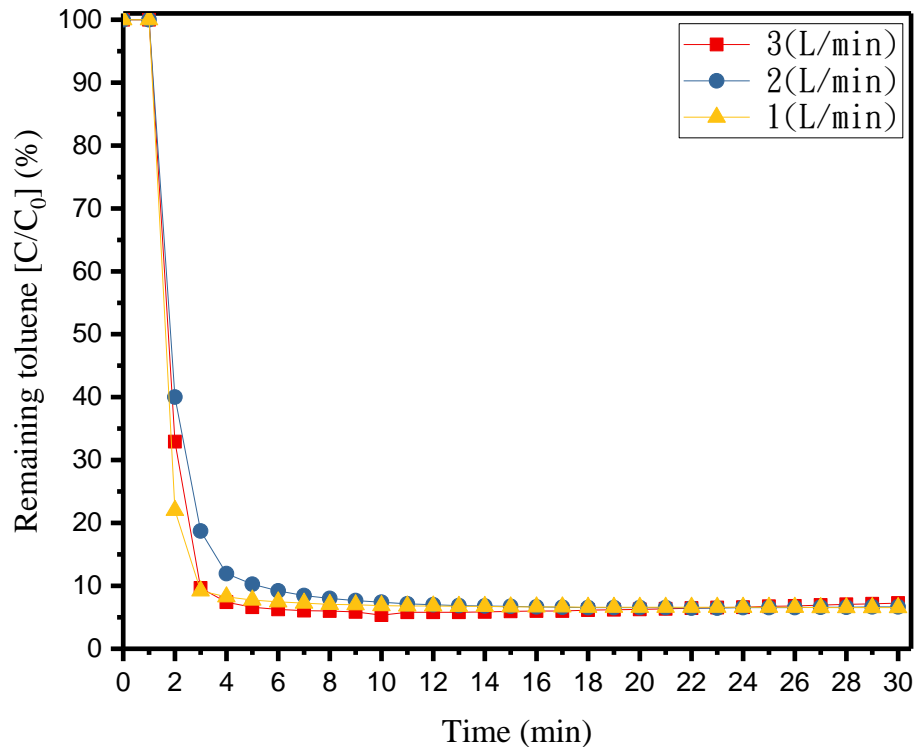


圖 5.27、不同污染物流量對吸附模組去除效率影響

5.1.9、 吸附模組比較

圖 5.28 為具整流板之吸附模組及不具整流板之吸附模組比較，結果顯示不具整流板之吸附模組最大瞬時去除量為 14.06 ppm，而具整流板之吸附模組最大瞬時去除量則為 14.13 ppm，雖兩者最大瞬時去除量相差僅 0.07 ppm，但不具整流板之吸附模組於實驗前 5 分鐘模組內部殘餘之甲苯濃度便已逐漸上升，於實驗開始後 90 分鐘時，具整流板之吸附模組甲苯去除量僅剩 12.57 ppm，而具整流板之吸附模組則維持 13.9 ppm，因此由實驗數據可得知整流板確實具備使模組內部流場穩定之功效，且同時可使吸附模組內部污染物濃度維持穩定。

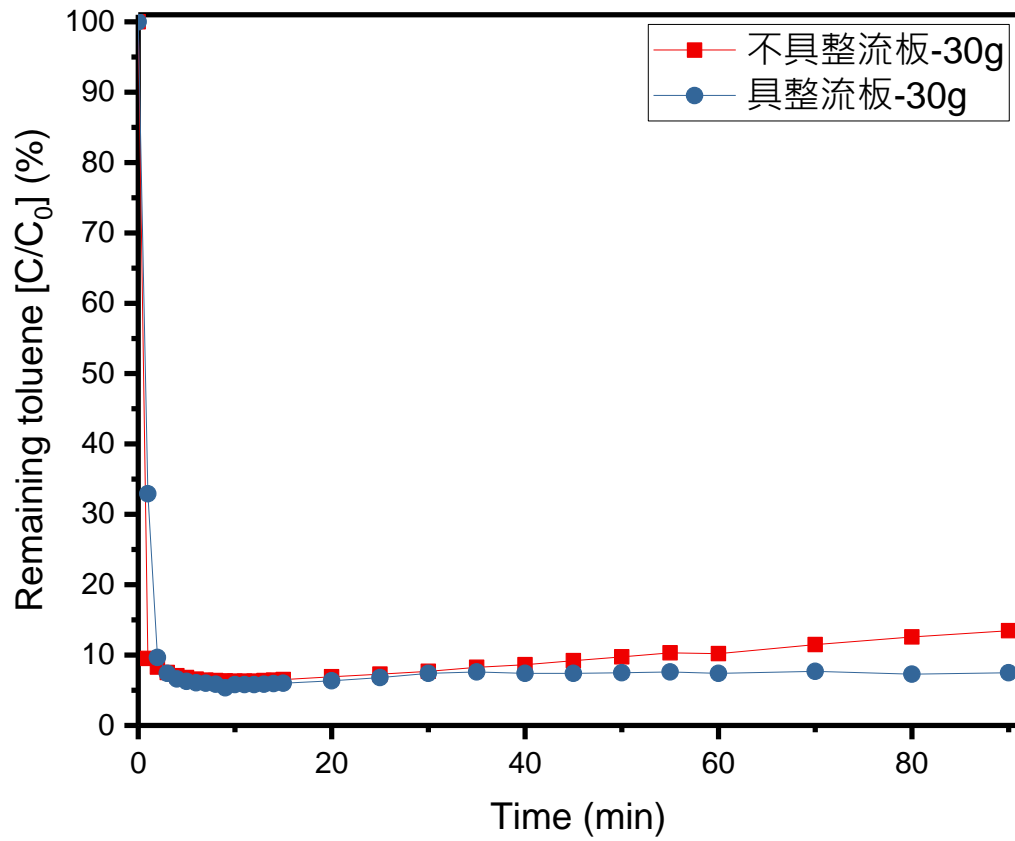


圖 5.28、整流板於吸附模組去除效率比較



5.2、 光催化商業模組測試

測試完吸附模組最佳使用參數後，本團隊將進行光催化商業，該模組為將光催化模組及吸附模組相結合，本團隊將針對不同環境濕度、不同污染物進氣流量及實驗時長 3 天之長效型測試進行實驗，由於光觸媒於一定環境濕度下可增加其對甲苯去除率^[40]，但活性碳對污染物之吸附效果卻會隨環境濕度上升而下降^[3]，因此環境濕度對於本團隊開發之光催化商業模組具有一定影響力，而透過測試不同污染物進氣流量則可測試光催化商業模組最大污染物去除量，完成上述 2 參數之測試後，為評估光催化商業模組對污染物去除之穩定性，本團隊將模擬週五下班時至週一上班時之間無人進行維護之狀態，因此本團隊將進行為期 3 日之長效型測試。

5.2.1、 環境濕度影響

由於光觸媒反應機制為透過光線照射使其得到大於禁帶寬度之能量，進而激發光觸媒上之電子，使電子由價帶躍遷至導帶上，並透過產生之電子及電洞轉移至光觸媒表面之行為進而產生超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)及氫氧自由基($\cdot\text{OH}$)，因此增加環境濕度可使超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)及氫氧自由基($\cdot\text{OH}$)產量增加，固環境濕度為光催化反應中一重要參數，然而環境濕度卻會造成活性碳吸附能力下降，其原因為活性碳除吸附污染物外，同時也會吸附水分子，一旦水分子於活性碳表面凝結，將使其吸附效果下降，而光催化商業模組為結合光催化模組及吸附模組之模組，因此環境濕度對其影響是值得探討之參數。

本團隊所設定之環境濕度分別為<4 RH%、10 RH%、20 RH%、30 RH%、40 RH%、50 RH%及 60 RH%，其中環境濕度 60 RH%為參考台灣歷年平均濕度所設定，且根據文獻指出，鐳參雜二氧化鈦於環境濕度 60 RH%時具最佳去除效果 52.96%^[4]，因此本團隊設定 60 RH%為本次實驗最高環境濕度。

圖 5.29 為不同環境濕度下光催化商業模組測試結果，本實驗使用 4 片光催化玻璃纖維布於光催化模組，並使用 5 支東亞 FL20D18 T8 可見光燈管做為其光源，吸附模組則是使用於單層載體置入 30g 活性碳，使用載體數量為 5 層，而污染物進氣濃度則為 15ppm，進氣流量為 3L/min。



由實驗結果可得知，光催化商業模組於環境濕度小於 4RH%時具有最佳去除效果，其效果可高達 95%，而從該數據可觀察到環境濕度小於 4RH%時，於第 58 分鐘時甲苯濃度產生劇烈變化，其原因為光催化商業模組內部之甲苯濃度已小於 PID 檢測儀器所能檢測之最小值，因此自 58 分鐘後無法詳細檢測到甲苯濃度。

雖單獨使用光催化模組於環境濕度 60RH%時可達到最佳降解效果，然而由光催化商業模組於不同環境濕度下實驗結果可得知，環境濕度對光觸媒造成之正向效益並不如環境濕度對活性碳所造成之負面效益大，因此雖環境濕度 60RH%於單獨使用光催化模組可達最佳降解效率，但於光催化商業模組時卻為最差去除效率 77.12%，當環境濕度低於 10RH%時，光催化商業模組去除效率便可達到 90%以上，當環境濕度<4RH%時，光催化商業模組去除效率可大於 95%，故為使光催化商業模組達到最佳去除效果，後續實驗將以環境濕度<4RH%進行測試。

表 5.5、光催化商業模組於不同環境濕度下對甲苯降解最大去除量

| 環境濕度(RH%) | 最大去除甲苯濃度(ppm) |
|-----------|---------------|
| <4 | 14.25 |
| 10 | 13.84 |
| 20 | 13.30 |
| 30 | 12.83 |
| 40 | 12.47 |
| 50 | 12.10 |
| 60 | 11.57 |

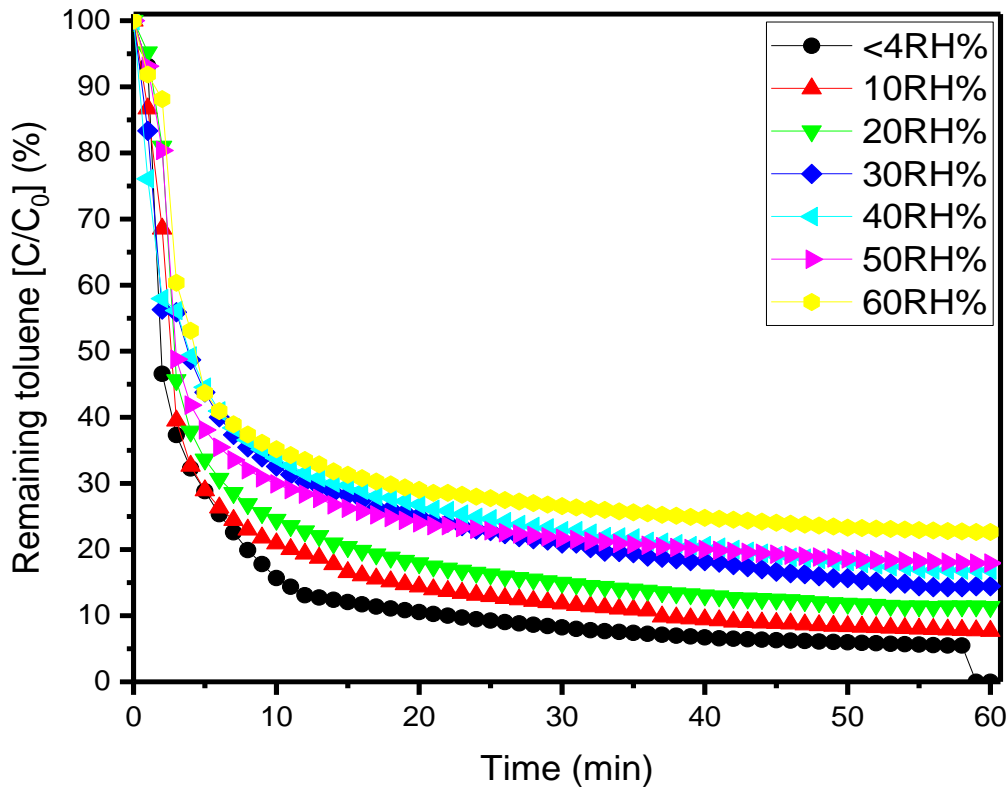


圖 5.29、光催化商業模組於不同濕度下甲苯去除率

5.2.2、污染物進氣流量測試

由於污染物進氣流量可能影響光催化商業模組對甲苯之去除效率，因流量這一參數掌控污染物、光觸媒及活性碳這 3 者接觸時間，且污染物流量越高，則單位時間所能處理之污染物則越多，因此本團隊將針對不同污染物濃度對光催化商業模組去除甲苯之效率進行研究，本實驗使用 4 片光催化玻璃纖維布於光催化模組，並使用 5 支東亞 FL20D18 T8 可見光燈管做為其光源，吸附模組則是使用於單層載體置入 30g 活性碳，使用載體數量為 5 層，而污染物進氣濃度則為 15ppm，環境濕度則設定<4RH%。

圖 5.30 為不同污染物流量下光催化商業模組對甲苯降解效率影響，實驗結果顯示本團隊所建置之光催化商業模組於污染物流量小於每分鐘 3 公升時，其對甲苯去除效率皆可高於 95%，因此為使光催化商業模組效益達到最大，因此後續實驗將載用污染物流量 3L/min 進行測試。



表 5.6、光催化商業模組於不同污染物流量下甲苯最大去除量

| 污染物流量(L/min) | 最大去除甲苯濃度(ppm) |
|--------------|---------------|
| 3 | 14.25 |
| 2 | 14.25 |
| 1 | 14.25 |

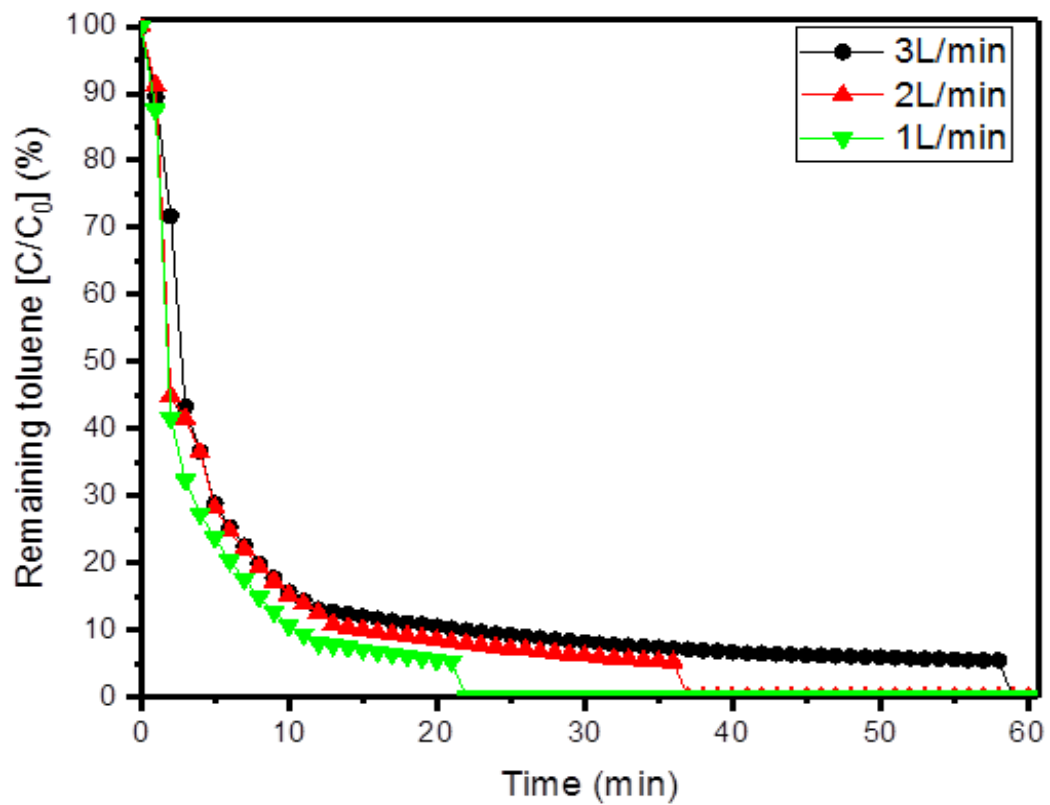


圖 5.30、不同污染物流量於光催化商業模組處除效率比較



5.2.3、實驗室模場長效型測試

為符合我國相關法令之規定，我國現 SVE 整治設備需於現場人員操作下進行整治，因此若本團隊所開發之光催化商業模組可持續且穩定對污染物進行處理，則未來可能可使 SVE 整治設備於無現場人員的情況下進行 24 小時連續運轉，因此本團隊將透過長效型測試進行實驗，以使光催化商業模組未來可實際應用於 SVE 整治設備中。

本實驗使用 4 片光催化玻璃纖維布於光催化模組，並使用 5 支東亞 FL20D18 T8 可見光燈管做為其光源，吸附模組則是使用於單層載體置入 30g 活性碳，使用載體數量為 5 層，污染物進氣濃度則設定為 15ppm，環境濕度則設定<4 RH%，污染物進氣流量為 3L/min，與前述實驗不同處在於本次實驗測試時長為 3 日，其原因為本團隊希望模擬自週五下班後置週一上班前無現場人員操作之時間，若實驗結果顯示本光催化商業模組具備可長時間穩定處理污染物之條件，則未來將光催化商業模組應用於 SVE 整治設備機率可大幅提高。

圖 5.31 為光催化商業模組長效測試結果，由實驗結果顯示本團隊所建置之光催化商業模組於實驗開始後第 22 分鐘開始便可去除約 90%之污染物，而於第 58 分鐘時模組內部污染物濃度僅殘於不到 5%，最終於第 59 分鐘時，模組內部甲苯濃度便已低於 PID 檢測設備之檢測極限且持續維持至實驗結束，透過本次實驗可得知，本團隊所建置之光催化商業模組可長時間並穩定去除污染物，同時也驗證該模組應用於實際廠址之可行性。

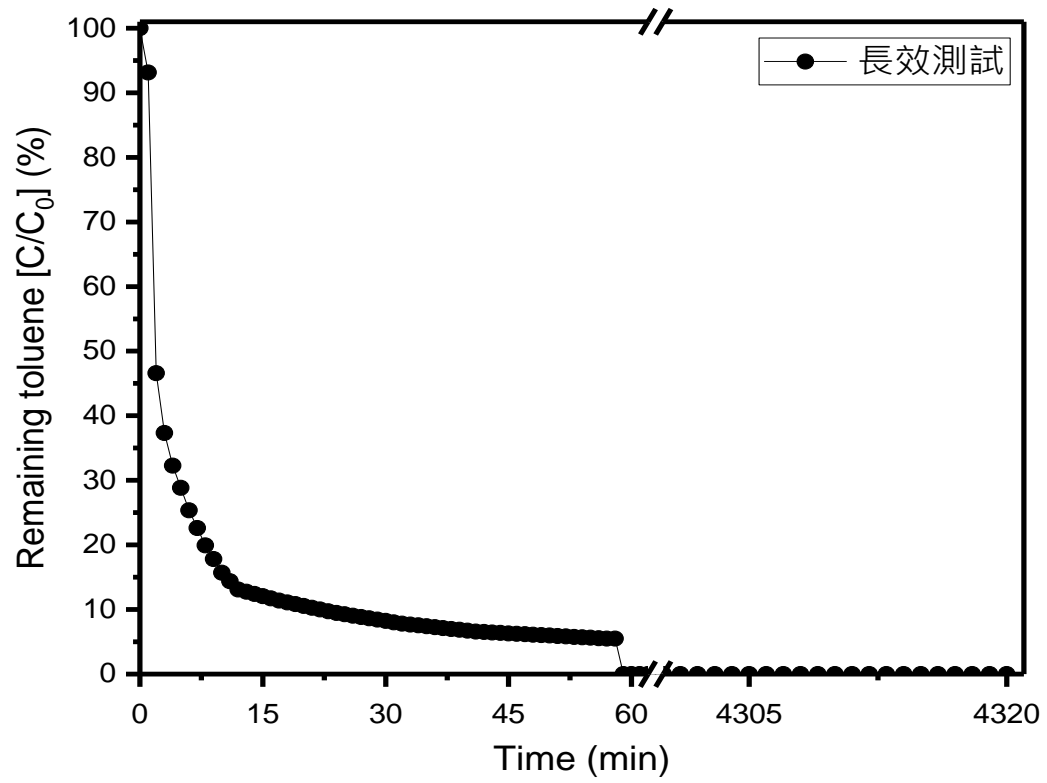


圖 5.31、光催化商業模組長效型測試



5.3、 各模組去除效率比較

本節將討論不同模組對甲苯去除效率之比較，表 5.7 為各模組於 90 分鐘實驗時最大甲苯去除量，其中設定之甲苯濃度為 15ppm，由實驗結果可得知，僅使用光催化模組時，其最大甲苯去除量僅有 8.36ppm，而將其與具整流版之吸附模組相結合後，其最大甲苯去除量可躍升至 14.25ppm，然而雖不具整流版及具整流版之吸附模組最大甲苯去除量則差異僅 0.13ppm，但由圖 4.23 可得知不具整流版之吸附模組於實驗開始後 15 分鐘左右艙體內甲苯濃度便已逐漸上升，而具整流版之吸附模組內之甲苯濃度則近乎穩定。

圖 5.32 為不同模組於濃度 15ppm 及環境濕度<4RH%之甲苯去除效率比較，由實驗結果可得知，光催化商業模組具最佳去除效果，其去除效率高於 95%，其次則為具整流板之吸附模組，其去除效率為 92.6%，而單獨使用光催化模組去除效率為最差，其去除效率為 55.4%，透過此比較圖可得知本團隊所建置之光催化商業模組中光催化模組部分約佔整體去除效率 55%，而吸附模組則佔約 45%，且以吸附模組輔助光催化模組不僅可增加整體去除效率，同時亦可維持其穩定性。

因此若僅使用光催化模組進行甲苯降解處理並無法有效去除污染物，而僅使用吸附模組雖可有效去除污染物，但其效果並不如將光催化模組及吸附模組相結合後之光催化商業模組，其中不具整流版之吸附模組因內部短流現象較具整流版之吸附模組嚴重，因此導致其於實驗前 15 分鐘左右艙體內甲苯濃度便已逐漸上升。



表 5.7、各模組於 90 分鐘最大甲苯去除量

| 污染物進氣流量(L/min) | 最大甲苯去除量(ppm) |
|----------------|--------------|
| 光催化模組 | 8.36 |
| 不具整流板吸附模組 | 14.06 |
| 具整流板吸附模組 | 14.19 |
| 光催化商業模組 | 14.25 |

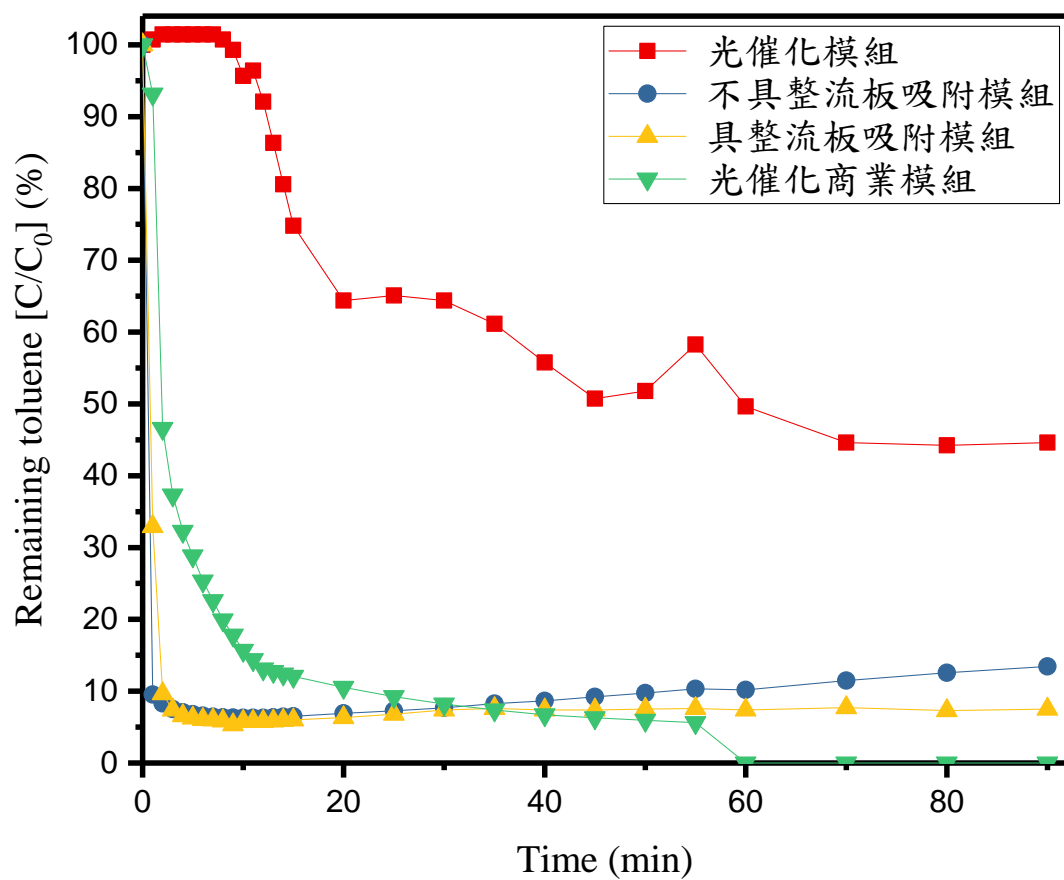


圖 5.32、不同模組之甲苯去除效率



5.4、 污染場址測試

本團隊已於計畫上半年度與新野科技股份有限公司接洽，並進行實際探勘，圖 5.33 及圖 5.34 為新野科技股份有限公司於污染場址所設立之 SVE 整治設備，圖 5.34 為本團隊所建置之光催化商業模組於污染場址實際使用圖，實驗期間將透過 PID 檢測設備進行污染物去除率之計算，並於實驗結束後對本團隊所研發之商業化模組進行成本之估算。



圖 5.33、實際污染場址整治設備



圖 5.34、實際污染場址整治設備



圖 5.35、光催化商業模組實際污染場址測試

5.4.1、實際場址測試

為測試本團隊所開發之光催化商業模組是否可實際應用於 SVE 整治設備上，本團隊與新野科技股份有限公司進行合作，並於台灣北部加油站進行實際場址測試，此次實驗使用 5 支東亞 FL20D18 T8 可見光燈管做光催化模組光源，並於內部置入已塗佈完成之光催化玻璃纖維布，而吸附模組部分則使用於 5 層載體分別置入 30g 活性碳，因實際污染場址並不如實驗試模廠可精確控制環境濕度，故本次實驗並無特別設定環境濕度，而污染物濃度則於實驗開始前進行測定，其流量則透過浮子流量計將其控制於 3L/min，而為避免影響該場址各工項進度，故實際場址測試本團隊將設定 30 分鐘為實驗時長。

圖 5.36 為光催化商業模組於實際場址之測試結果，本團隊所測定之各次實際場址污染物濃度分別為 40.1ppm、52.64ppm 及 54ppm，實驗結果說明，本團隊所建置之光催化商業自實驗開始後 11 分鐘左右便可將模組內部之污染物去除 95% 以上，且於實驗開始後 15 分鐘內便可將污染物濃度降低至低於 PID 檢測儀器之檢測極限 0.8ppm，並維持此去除效率直至實驗結束，因此可得知本團隊所建置之光催化商業模組可有效且快速去除實際污染場之之污染物。

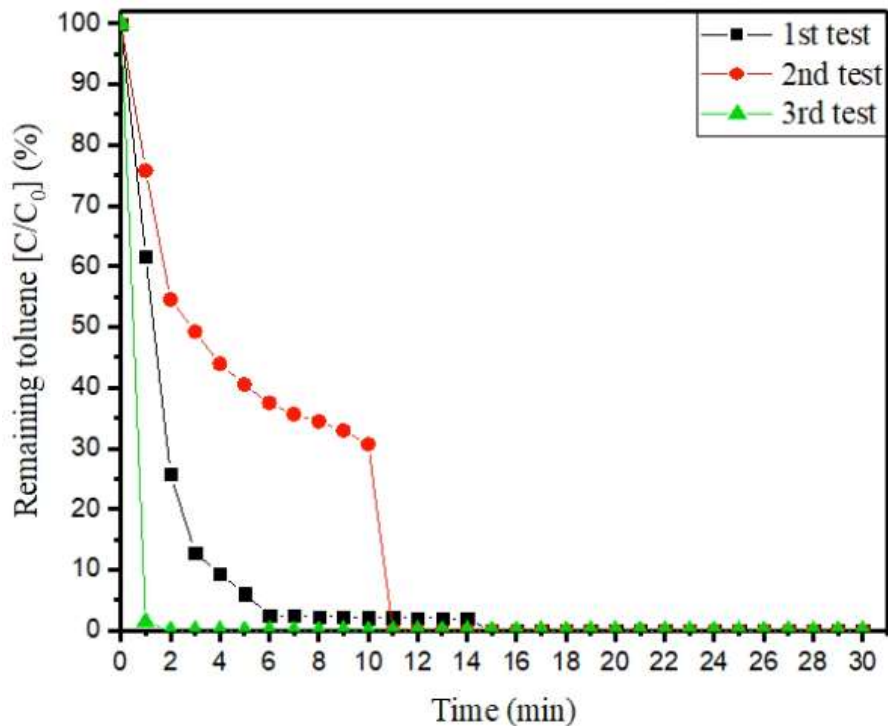


圖 5.36、光催化商業模組實際場址測試

5.5、成本分析

本節將探討光催化商業模組使用成本，其包括使用藥品、耗材及電費等費用，本團隊將透過長效型測試之實驗參數進行成本計算，該實驗參數包含污染物濃度 15ppm、4 片光催化玻璃纖維布及於 5 層載體分別置入 30g 活性碳。

表 5.8 為光催化商業模組使用成本，透過計算，本團隊所製備之光觸媒溶膠成本約為 2.46 元/ml，而光催化玻璃纖維布製備成本則為 520.8 元/片，因此光催化商業模組使用 3 日所需成本為 2144.4 元。

光催化商業模組對污染物去除成本將以下列公式進行計算

$$\begin{aligned}
 & \text{污染物濃度} \times \text{污染物流量} \times \text{時間} \div \text{成本} \\
 &= 15 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times 3 \left(\frac{\text{L}}{\text{min}} \right) \times 1440 \left(\frac{\text{min}}{\text{日}} \right) \times 3(\text{日}) \div 2144.4(\text{元}) \\
 &= 194400(\text{mg}) \div 2144.4(\text{元}) \cong 90.65(\text{mg}/\text{元})
 \end{aligned}$$



本團隊所建置之光催化商業模組對污染物去除成本約為 90.65mg/元，雖其成本高於活性碳吸附塔使用成本，然而本團隊所建置之光催化商業模組因前端設置之光催化模組可以水洗進行清洗重複利用，故本究所建置之光催化商業模組仍具商業化價值。

表 5.8、光催化商業模組成本計算

| 模組備品 | 項目 | 用量 | 單價 | 總價(元) | 合計總價(元) |
|----------|----------|---------|-----------|-------|---------|
| 光觸媒 | 鈦酸四丁酯 | 50ml | 6.48 元/ml | 322.5 | 738.6 |
| | 99.5% 乙醇 | 250ml | 0.4 元/ml | 100 | |
| | 硝酸(5M) | 22.5ml | 0.4 元/ml | 9 | |
| | 硝酸鋇六水合物 | 9.932g | 24.63 元/g | 244.6 | |
| | 電費 | 25 度 | 2.5 元/度 | 62.5 | |
| 光催化玻璃纖維布 | 光觸媒 | 80.62ml | 2.46 元/ml | 198.3 | 520.8 |
| | 玻璃纖維布 | 1 片 | 315 元/片 | 315 | |
| | 電費 | 3 度 | 2.5 元/度 | 7.5 | |
| 光催化商業模組 | 光催化玻纖布 | 4 片 | 520.8 元/片 | 198.3 | 2144.4 |
| | 活性碳 | 150g | 0.3 元/克 | 315 | |
| | 電費 | 6.48 度 | 2.5 元/度 | 7.5 | |



六、 結論與建議

本團隊乃建構利用低耗能可見光進行 SVE 尾氣降解之光催化模組，並利用吸附模組進行殘存尾氣之吸附，利用此商業化模組進行模擬實場之研究，改善 SVE 尾氣排放之單環芳香烴等類所引發的空氣污染；本團隊先以含浸法將二氧化鈦前驅物均勻塗布在玻纖布上，用以增進光催化劑與空氣污染物之反應面積，接著透過吸附模組進行殘存尾氣之吸附及減少更換光催化劑之空窗期，最後討論此商業化模組在實場上之應用範圍。本團隊結論如下：

6.1、 結論

1. 本團隊所開發之吸附模組最佳活性碳使用克數為 30g/層，其原因為活性碳用量過多時將導致整流版效率降低；另若活性碳太少，則吸附能力有限無法完全吸附污染物，故適當的活性碳使用既可有效整治及處理污染物，亦可節省活性碳之購買成本。
2. 本團隊所開發之吸附模組倘污染物於活性碳飽和吸附能力範圍內時，配合滯留時間足夠之條件下，則改變氣體流量對甲苯的去除效率並不會造成太大影響，去除效率差異小於 1%。
3. 光催化商業模組於不同環境濕度下時，以環境濕度<4RH%有高於 95%之去除效果，雖光觸媒於較高環境濕度下具有較佳去除效率，但光觸媒因環境濕度所提升之去除效率並不如活性碳下降之去除效率。
4. 本團隊所開發之光催化商業模組於足夠污染物停留時間時，最終去除效率皆可高於 95%。
5. 長效型測試結果顯示本團隊所開發之光催化商業模組於光催化模組使用 4 片光催化玻璃纖維布於可見光源下及吸附模組使用 5 層載體並均置入 30g 活性碳時，其於測試前 1 小時內便可維持高於 95%之去除效率。
6. 根據長效型測試所需成本進行計算，本團隊所建置之光催化商業模組去除 1kg 甲苯所需成本為 11,031.4 元。



7. 依據參考文獻 SVE 尾氣僅用光催化模組時，其甲苯去除效率無法達到 60%，而本團隊將光催化模組及吸附模組相結合則可有效去除甲苯，其對甲苯去除效率效率可達到 95% 以上。
8. 本團隊所建置之光化商業模組於污染場址實際操作時，其效率亦與研究室實驗近，去除效率亦可達到 95% 以上，因此可得知本團隊所建置之光催化商業模組可有效且快速去除實際污染場之之污染物。

6.2、 檢討與建議

1. 因現行之 SVE 整治設備運轉時需有作業人員進行現場操作，故作業人員下班或休息時，SVE 設備則無法連續進行整治，建議未來可持續進行實場試驗以增加本團隊建置之光催化商業模組，倘經一定程度實驗、數據分析，評估操作條件之可行性後，則未來 SVE 整治將可達成無人化操作。
2. 本團隊所使用之活性碳為市售活性碳，因此建議未來可尋找並評估其他生物質活性碳種類用以代替商業活性炭，如椰殼活性碳、果殼活性碳等，以達到降低本模組實際使用之成本。
3. 本團隊所測試之光催化商業模組之環境濕度最佳參數為<4 RH%，因此可得知水份影響活性碳對污染物的吸附能力甚大，固建議未來可在吸附模組前增加除濕裝置，如氯化鈣、玻璃纖維、矽膠、海棉、薄膜等，以降低 SVE 尾氣之濕度以便提高去除效率。



七、參考文獻

- [1] 張尊國，台灣地區土壤污染現況與整治政策分析，財團法人國家政策研究基金會 (2002)。
- [2] 土壤及地下水污染整治基金管理會，油品類儲槽系統土壤及地下水污染整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊，行政院環境保護署 (2007)。
- [3] <http://sgw.epa.gov.tw/public/>
- [4] 梁書豪、簡華逸、郭育嘉、楊宗翰、高志明，土壤及地下水整治技術發展簡介，台灣產業服務基金會。
- [5] 土壤及地下水污染整治基金管理會，土壤及地下水污染整治網，行政院環境保護署。
- [6] 楊政憲，環保新尖兵——二氧化鈦光觸媒之簡介，國立臺灣大學環境工程學研究所 (2013)。
- [7] 高濂，鄭珊，張清紅，奈米光觸媒(2004)。
- [8] 王國至，應用二氧化鈦/聚苯胺複合物去除甲醛之研究，中原大學環境工程學系碩士論文(2014)。
- [9] 林榮良，TiO₂ 光催化原理和應用例子， Journal of the Chinese Chemical Society，60，457-461 (2002)。
- [10] 范崇政，肖建平，丁延偉，納米 TiO₂ 的製備與光催化反應研究進展，科學通報，46，265-273 (2001)。
- [11] 徐松梅，高朋召，石宗利雙元素摻雜改性二氧化鈦的研究進展，Bulletin of the Chinese Ceramic Society，27，777-781 (2008)。
- [12] 劉亭亭，季鳴童，稀土摻雜改性納米 TiO₂ 光催化性能，Chemical Engineer (2011)。
- [13] Jiang, J.J., Lee, C.L., Brimblecombe, P., Vydrova, L., and Fang, M.D. (2016) Source contributions and mass loadings for chemicals of emerging concerns: Chemometric application of pharmaco-signature in different water systems. Environmental Pollution, 208, 79-86.
- [14] Jiang, J.J., Lee, C.L., Fang, M.D., Tu, B.W., and Liang, Y.J. (2015) Impacts of emerging contaminants on surrounding aquatic environment from a youth festival. Environmental Science & Technology, 49, 792-799.
- [15] Jiang, J.J., Lee, C.L., Fang, M.D., Boyd, K.G., and Gibb, S.W. (2015) Source apportionment and risk assessment of emerging contaminants: An approach of pharmaco-signature in water systems. PLoS One, 10 (4), e0122813.
- [16] Jiang, J.J., Lee, C.L., and Fang, M.D. (2014) Emerging organic contaminants in coastal waters: Anthropogenic impact, environmental release and ecological risk. Marine Pollution Bulletin, 85, 391-399.
- [17] Fang, M.D., Lee, C.L., Jiang, J.J., Ko, F.C., and Baker, J.E. (2012) Diffusive exchange of PAHs across the air-water interface of the Kaohsiung Harbor lagoon, Taiwan. Journal of Environmental Management, 110, 179-187.
- [18] Jiang, J.J., Lee, C.L., Fang, M.D., Ko, F.C., and Baker, J.E. (2011) Polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in sediments of southwest Taiwan: Regional characteristics and potential sources. Marine Pollution Bulletin, 62, 815-823.
- [19] Andrew Mills, S.L.H. (1997) An overview of semiconductor photocatalysis. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 108, 1-35.
- [20] Jr., J.T.Y.(2009) Photochemistry on TiO₂: Mechanisms behind the surface chemistry. Surface Science, 603, 1605-1612
- [21] Vainshtein B K, F.W.M., Indenbom V L. (1994) Structure of Crystals. Berlin:Mac-millan India Ltd.
- [22] Buchanan Relva C, P., Taeun. (1997) Materials Crystal Chemistry. New York: Marcel



- Dekker, Inc.
- [23] Akira Fujishima, X.Z., Donald A. Tryk. (2008) TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63, 515-582.
 - [24] Diebold, U. (2003) The surface science of titanium dioxide. *Surface Science Reports*, 48, 53-229.
 - [25] Diana V. Wellia, Q.C.X., Mahasin Alam Sk, Kok Hwa Lim, Tuti Mariana Lim, Timothy Thatt Yang Tan. (2011) Experimental and theoretical studies of Fe-doped TiO₂ films prepared by peroxo sol-gel method. *Applied Catalysis A: General*, 401, 98-105.
 - [26] Ye Cong, J.Z., Feng Chen, Masakazu Anpo, Dannong He, Preparation. (2007) Photocatalytic Activity, and Mechanism of Nano-TiO₂ Co-Doped with Nitrogen and Iron (III). *Journal of Physical Chemistry C*, 111, 10618-10623.
 - [27] Xiaoyong Wu, S.Y., Qiang Dong, Chongshen Guo, Huihui Li, Takeshi Kimura, Tsugio Sato. (2013) Synthesis of high visible light active carbon doped TiO₂ photocatalyst by a facile calcination assisted solvothermal method. *Applied Catalysis B: Environmental*, 142-143, 450-457.
 - [28] Swati Sood, A.U., Surinder Kumar Mehta, A.S.K. Sinha, Sushil Kumar Kansal. (2015) Efficient photocatalytic degradation of brilliant green using Sr-doped TiO₂ nanoparticles. *Ceramics International*, 41, 533-540.
 - [29] Xuefeng Wang, H.J., Yanduo Liu, Mengdie Gao. (2015) Rapid microwave-assisted hydrothermal synthesis of Sm, N, and P tridoped anatase-TiO₂ nanosheets from TiCl₄ hydrolysis. *Materials Letters*, 147, 72-74.
 - [30] Margarita Sanchez-Dominguez, G.M.-M., Maria J. Rodriguez-Vargas, Claudia C. Ibarra-Malo, Arturo A. Rodriguez-Rodriguez, Andrea V. Vela-Gonzalez, S.A. Perez-Garcia, Ricardo Gomez. (2015) Synthesis of Zn-doped TiO₂ nanoparticles by the novel oil-in-water (O/W) microemulsion method and their use for the photocatalytic degradation of phenol. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 3037-3047.
 - [31] Ye Cong, J.Z., Feng Chen, and Masakazu Anpo. (2007) Synthesis and Characterization of Nitrogen-Doped TiO₂ Nanophotocatalyst with High Visible Light Activity. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111, 6976-6982.
 - [32] Yanfang Shen, T.X., Hao Du, Huazi Jin, Jianku Shang, Ke Yang. (2009) Phosphorous, nitrogen, and molybdenum ternary co-doped TiO₂: preparation and photocatalytic activities under visible light. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 50, 98-102.
 - [33] Xiaoyang Pan, M.-Q.Y., Xianzhi Fu, Nan Zhang and Yi-Jun Xu. (2013) Defective TiO₂ with oxygen vacancies: synthesis, properties and photocatalytic applications. *The Royal Society of Chemistry*, 5, 3601-3614.
 - [34] Wonyong Choi, A.T., and Michael R. Hoffmann. (1994) The Role of Metal Ion Dopants in Quantum-Sized TiO₂: Correlation between Photoreactivity and Charge Carrier Recombination Dynamics. *The Journal of Physical Chemistry*, 98, 13669-13679.
 - [35] R. Asahi, T.M., T. Ohwaki, K. Aoki, Y. Taga. (2001) Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped Titanium Oxides. *Science*, 293, 269-271.
 - [36] Yuchao Chai, L.L., Ke Zhang, Bin Zhao, Dannong He. (2014) Efficient visible-light photocatalysts from Gd-La codoped TiO₂ nanotubes. *Ceramics International*, 40, 2691-2696.



附錄一 108 年度專案成果績效自評表





行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

108 年度專案成果績效自評表

一、 專案基本資料

填表日期：108 年 10 月 28 日

| | | | |
|--------|--|-------|--|
| 專案性質 | <input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質 | 專案類別 | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |
| 研究主題 | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他 | | |
| 申請機構系所 | 中原大學 | 專案主持人 | 游勝傑 |
| 專案名稱 | 以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試 | | |
| 專案執行期程 | <input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末 | | |

二、 成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一) 學術面

| 項目 \ 目標達成程度 | | | 申請 預估數 | 期中 達成數 | 期末 達成數 | 結案後半 年達成率 | 備註 (說明未達成原因或 學術產出發表名稱) |
|--------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------------------------|
| A 學術 產出 及 活動 | 1.國內投稿 (篇數) | (1)論文 | | | | | |
| | | (2)研討會論文 | | | | | |
| | 2.國外投稿 (篇數) | (1)期刊論文 | 1 | 0 | 0 | | |
| | | (2)研討會論文 | | | | | |
| | 3.報告 (篇數) | (1)技術報告 | | | | | |
| | | (2)研究報告 | 1 | 0 | 1 | | |
| | 4.專著 (本數) | | | | | | |
| | 5.辦理學術 會議(場數) | (1)研討/說明會 | | | | | |
| | | (2)成果發表會 | | | | | |
| | | (3)論壇 | | | | | |
| 6.研發改良 技術(項數) | (1)已開發技術 | | | | | | |
| | (2)技術平台 | | | | | | |
| B 人才 培育 | 7.研發人員 (人數) | (1)碩士 | 2 | 2 | 2 | | |
| | | (2)博士 | | | | | |
| | 8.研究團隊 (個數) | (1)跨領域團隊 | | | | | |
| | | (2)跨機構團隊 | | | | | |
| | | (3)形成研究中心 | | | | | |
| | | (4)形成實驗室 | | | | | |
| 9.其他指標 (請自行命名) | | (請自填) | | | | | |

(二) 產業面



| 項目 \ 目標達成程度 | | | | 申請 預估數 | 期中 達成數 | 期末 達成數 | 結案後半 年達成率 | 備註 (說明未達成原因或 學術產出發表名稱) |
|-------------------|------------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------------------------|
| A 智慧財產權 | 1.專利(件數) | 已核准 | 發明 | | | | | |
| | | | 新 型 / 設計 | | | | | |
| | | | 合計 | | | | | |
| | | 申請中 | 發明 | | | | | |
| | | | 新 型 / 設計 | | | | | |
| | | | 合計 | | | | | |
| B 研發技術轉移 | 2.先期技術 成果移轉 | 件數 | | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | | |
| | 3.技術移轉 (專利) | 件數 | | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | | |
| | 4.技術移轉 (應用技術) | 件數 | | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | | |
| | 5.可移轉產業技術 | (1)技術(件數) | | | | | | |
| | | (2)品種/系(件數) | | | | | | |
| C 產學研合作 | 6.促成合作研究 | 件數 | | | | | | |
| | | 金額(仟元) | | | | | | |
| | 7.促成投資 | 件數 | | | | | | |
| | | 投資金額(仟元) | | | | | | |
| | 8.促成取得 業界科專 | 件數 | | | | | | |
| | | 業界投資金額(仟元) | | | | | | |
| 9.其他指標 (請自行命名) | | (請自填) | | | | | | |



(三) 政策面

| 項目 | | 目標達成程度 | 申請預估數 | 期中達成數 | 期末達成數 | 結案後半 年達成率 | 備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料) |
|-----------------------|--------------|--------|-------|-------|-------|--------------|----------------------------|
| A 服務 便民 | 1.技術服務 | 次數 | | | | | |
| | | 收入(仟元) | | | | | |
| | 2.諮詢服務 | 次數 | | | | | |
| | | 收入(仟元) | | | | | |
| B 支 援 合 作 | 3.協助政府制定(件數) | (1)政策 | | | | | |
| | | (2)法規 | | | | | |
| | | (3)規範 | | | | | |
| | | (4)標準 | | | | | |
| D 社 會 效 益 | 4.獲得認證(件數) | | | | | | |
| | 5.獲得獎項(件數) | | | | | | |
| | 6.提升能源效率(%) | | | | | | |
| | 7.節能減碳效率(%) | | | | | | |
| 8.其他指標 (請自行命名) | | (請自填) | | | | | |

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500字為限）

目前 SVE 尾氣多由活性碳吸附，但其存在吸附飽和後的脫附問題，且活性碳製作成本高，往往使污染復育的操作成本增加，且受到溫度或壓降的影響，會發生逸散現象，因此如何搭配活性碳進行尾氣的整合處理是整套土壤氣體去除法的關鍵。另外，加油站整治廠址的污染物多為 BTEX 類有機化合物，該類物質物理化學特性較複雜，且在廠址中之移動行為受廠址個別環境的影響較大，整治與調查技術皆需因地制宜，且須系統的釐清整治之環境影響因素，進行長效可行的整治技術和效能分析。

本計劃將以土壤氣體抽除法（SVE）為基礎，將建構的實用性光催化商業模組進行污染場址實廠測試，透過使用低耗能之可見光觸媒進行光催化降解，其低耗能以及高經濟價值是為具有突破現有技術的可能性。考慮目前使用空氣注入法配合土壤蒸氣萃取法時，抽出的氣體大部分以活性碳進行吸附，在操作過程中常因活性碳成本高，往往需要花費昂貴的操作費用，若能降低成本，則可使此計畫所獲得之成果更有實用性。另外，本計劃案尾氣處理利用的光催化方法，相較於臭氧、過氧化氫處理法、電化學處理法，成本更低且具有長遠意義上的實用性和可發展性。





附錄二 申請計畫書審查意見回覆對照表





行政院環境保護署

「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

| | | | |
|---|--|--|--|
| 計畫年度 | 108 年度 | 計畫類型 | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |
| 計畫類別 | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他 | 主持人：游勝傑 教授 | |
| 計畫名稱 | 以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試 | | |
| 委員審查意見 | | 計畫單位回覆 | |
| 委員一： 1. 請說明年度計畫與去年(107 年)計畫之延續關係。 2. 有關去年計畫執行光催化商業模組，是否有進行耐久測試，請說明。 | | 1. 謝謝委員的意見，本計畫屬於延續性計畫。107 年利用已經設計好的光催化實驗模組進行組裝和實驗室規模的揮發性有機物光催化實驗模擬分析，並開發了低能耗可見光催化商業模組法進行尾氣催化降解。由於使用“可見光催化模組+吸附膜組”，既較一般光催化劑節省能源，又減少傳統方法對大量活性炭的依賴，大大降低了尾氣處理之成本。實驗結果顯示該模組對揮發性有機物去除率 80% 以上。本計畫(108 年)擬提出以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試。將建構的實用性光催化商業模組進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，針對影響實廠整治之環境因素，進行長效可行的整治技術和效能分析。根據整治效果對模組設計、模組參數等方面進行各參數優化。最終將實現“plug-and-play”且可應用於實地污染長效整治的商業化成熟模組。 2. 謝謝委員的意見，本團隊在去年的計劃案中，（1）採用循環測試法對光催化劑的 | |



| | |
|--|--|
| | <p>穩定性進行了長達 180 小時的催化活性測定。實驗證明，180 小時後，催化活性依舊有較好的表現。(2) 實驗過程為將光催化劑均勻塗布在高度 267 mm、直徑 37 mm 中空玻璃管內側，在中空處置入燈管作為光源，將 SVE 法處理後之尾氣通入該模組中進行光催化反應。光催化商業模組，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，能達到揮發性有機物去除率 75 %。108 年度長效現地測試中，我們將繼續完成光催化商業模組的耐久測試。</p> |
| <p>委員二：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 建議補充說明 BTEX 即時監測裝置的靈敏度。 2. 商業化模組可以分量級製備(小型、中型、大型)，請說明本案所要測試的量級。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員的意見，靈敏度為 0.8ppm。 2. 謝謝委員的意見。目前實驗室模組屬於中小型模組。實際過程為將光催化劑均勻塗布在高度 267 mm、直徑 37 mm 中空玻璃管內側，在中空處置入燈管作為光源，將 SVE 法處理後之尾氣通入該模組中進行光催化反應。最大可處理的污染氣體流量是 3 L/min, 而 SVE 瞬間可抽出的氣體流量為 100 L/min, 對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，預期能達到揮發性有機物去除率 75 % 以上。未來需要根據試劑污染廠址的污染濃度狀況，採取分量級製備(小型、中型、大型)設備，進行規模性放大或縮小，實現模組的最大化利用。 |
| <p>委員三：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 過去研究對長效現地測試之運用差異性？ 2. 如何進一步商業模組？及對 GSR 之效益。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員的意見。針對影響實廠整治之環境因素，對比過去長效可行的整治技術和效能分析。本透過使用低耗能之可見光觸媒進行光催化降解，其低耗能以及高經濟價值是為具有突破現有技術的可能性。考慮目前使用空氣注入法配合土壤蒸氣萃 |



| | |
|--|---|
| | <p>取法時，抽出的氣體大部分以活性碳進行吸附，在操作過程中常因活性碳成本高，往往需要花費昂貴的操作費用，若能降低成本，則可使此計畫所獲得之成果更有實用性。另外，本計畫案尾氣處理利用的光催化方法，相較於臭氧、過氧化氫處理法、電化學處理法，成本更低且具有長遠意義上的實用性和可發展性。</p> <p>2. 謝謝委員的意見。為在商業上具有應用性和價值意義，本團隊進行光催化+吸附相輔相成的多模塊組裝模式，在安裝上本團隊使用隨插即用的模式，未來商業化模組可以分量級製備（小型、中型、大型），並安裝 BTEX（包括易揮發的單芳香碳氫化合物、甲苯、苯乙烷和二甲苯）物聯網即時監測裝置，對地下揮發性有機污染氣體進行即時監測，運行綜合效率評估，每日去除的總有機物含量進行計算，以及催化降解的總量評價，同時監測周邊地下土壤地下空氣品質變化情況，獲得實際地下空氣環境品質的改善程度。</p> <p>本計畫其整治研究方案正是相應了根據綠色及永續導向型整治（GSR）的概念。光催化技術被認為是新世紀環境工程的綠色科技之一。對比過去臭氧、過氧化氫處理法、電化學處理法等長效可行的整治技術和效能分析。本透過使用低耗能之可見光觸媒進行光催化降解且無二次污染，其低耗能以及高經濟價值是為具有突破現有技術的可能性。</p> |
| <p>委員四：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 此為延續性計畫。 2. 計畫主持人主持類似計畫已有成果。 3. 本計畫與既有成果之間的關係待釐清。類 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員對本計畫案的肯定。 2. 謝謝委員對本計畫案前期成果的肯定。 3. 謝謝委員的意見，本團隊自 106 年起申請 |



似計畫的實務應用性建議討論(已執行土汙基金計畫)(尤其是去除率與轉化物)。

4. 具實務應用潛力。
5. 實場應用參數與實務上適用場址的條件(或限制條件)建議討論。
6. 本計畫與執行中的計畫的協調性與整合性建議說明。
7. 計畫書中說明：“...本團隊於本年度擬將光催化反應系統以商業化角度開發構建具有實用性的光催化商業模組並進行污染場址實場測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，期能達到揮發性有機物去除率 75 % 以上，接著再從材料設計、模組設計、模組參數等方面進行各參數優化，最終完成成品化商業產品...”，本年度建議先評估前期的成果，檢討限制因數為何？（水分、HRT、強度、衰減、Coating... 等等）。

貴會經費，擬以四年時間開發可降解 SVE 尾氣之低能耗可見光催化商業模組。第一年(106 年)本團隊已經完成了可見光催化劑的製備和物理、化學性質特徵分析，並利用有機物光催化降解反應系統進行了光催化降解甲苯丙酮的實驗，且已獲得了良好的光催化效果，第二年（107 年）利用已經設計好的光催化實驗模組進行組裝和實驗室規模的揮發性有機物光催化實驗模擬分析，並開發了低能耗可見光催化商業模組法進行尾氣催化降解。由於使用“可見光催化模組+吸附膜組”，既較一般光催化劑節省能源，又減少傳統方法對大量活性炭的依賴，大大降低了尾氣處理之成本。實驗結果顯示該模組對揮發性有機物去除率 80% 以上。本計畫(108 年)擬提出以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試。將建構的實用性光催化商業模組進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，針對影響實廠整治之環境因素，進行長效可行的整治技術和效能分析。根據整治效果對模組設計、模組參數等方面進行各參數優化。綜上，本團隊將實現“plug-and-play”且可應用於實地污染長效整治的商業化成熟模組。

4. 謝謝委員對本計劃案的肯定。
5. 謝謝委員的意見，為了以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試，在污染廠址選擇時，應選擇典型污染廠址區域。大型石化貯槽及加油站整治廠址的污染物多為 BTEX 類有機化合物，該類物質物理化學特性較複雜，且在廠址中之移動行為受廠址個別環境的影響較大，因此



| | |
|---|--|
| | <p>108 年長效現地整治計劃中，應因地制宜，且須系統的討論整治之環境影響因素，如溫度，濕度以及土壤地下污染狀況。通過 BTEX 分析測試設備，調查分析污染場址污染之情況，包括污染物種類，污染物濃度水準，環境因素等環境條件。根據現地污染狀況，根據廠區配置、原有之地下油槽平面及剖面配置圖，確立現地整治具體位置。根據現地污染狀況，對現有模組在尺度和規格上進行調試和改進，使之可以達到預期污染物降解效果。</p> <p>6. 謝謝委員的意見，由於本計劃 108 年主要進行污染廠址長效現地整治。一方面，在整治實施過程中需要進行相關事宜的溝通協調，例如通過中央環保署和地方環保局的許可協助和相關公文的收發，確立污染廠址整治具體事宜。另一方面，本團隊擬與新野科技股份有限公司合作，執行期間需將 107 年度所發展之低能耗可見光催化套裝模組與應新野科技股份有限公司的 SVE 裝置進行技術整合，各方通力合作完成整治加油站污染場址尾氣處理工作。</p> <p>7. 謝謝委員的意見，108 年度計劃案執行過程中，調查分析污染場址污染之情況，包括污染物種類，污染物濃度水準，環境因素（包括水分、HRT、強度等環境條件）對商業模組整治效果的影響。</p> |
| <p>委員五：</p> <p>1. 「長效性」光催化其時間及效率為何？</p> <p>2. 107 計畫與本計畫差異性為何？</p> | <p>1. 謝謝委員的意見。本計劃採用循環測試法對光催化劑的穩定性進行了長達 180 小時的催化活性測定。實驗證明，180 小時後，催化活性依舊有較好的表現。實驗過</p> |



程為將光催化劑均勻塗布在高度 267 mm、直徑 37 mm 中空玻璃管內側，在中空處置入燈管作為光源，將 SVE 法處理後之尾氣通入該模組中進行光催化反應。光催化商業模組，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，能達到揮發性有機物去除率 75 %。108 年度長效現地測試中，我們將繼續完成光催化商業模組的耐久測試。

2. 謝謝委員的意見，本計畫屬於延續性計畫。107 年利用已經設計好的光催化實驗模組進行組裝和實驗室規模的揮發性有機物光催化實驗模擬分析，並開發了低能耗可見光催化商業模組法進行尾氣催化降解。由於使用“可見光催化模組+吸附膜組”，既較一般光催化劑節省能源，又減少傳統方法對大量活性炭的依賴，大大降低了尾氣處理之成本。實驗結果顯示該模組對揮發性有機物去除率 80% 以上。本計畫(108 年)擬提出以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試。將建構的實用性光催化商業模組進行污染場址實廠測試，對主要的有機污染物 BTEX 進行降解分析，針對影響實廠整治之環境因素，進行長效可行的整治技術和效能分析。根據整治效果對模組設計、模組參數等方面進行各參數優化。最終將實現“plug-and-play”且可應用於實地污染長效整治的商業化成熟模組。



附錄三 期中報告書審查意見回覆對照表





行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告

☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

| | | | |
|---|--|--|--|
| 計畫年度 | 108 年度 | 計畫類型 | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |
| 計畫類別 | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它 | 主持人：游勝傑 NO：C1 | |
| 計畫名稱 | 以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試 | | |
| 委員審查意見 | | 計畫單位回覆 | |
| 委員一 針對 SVE 下班時無法啟動及持續整治建議可尋求校內相關系所協助。 | | 1. 謝謝委員的意見，SVE 設備於下班時無法啟動及持續整治之原因主要為我國法規之規定，因此需新野科技公司之現場人員進行操作。 | |
| 委員二 1. 本研究對「長效」與「耐久」之界定，請補充。 2. 計畫探討單一光催化模組及光催化+活性碳吸附多模組，對兩種方法如何選擇，其間之限制或考量點請補充。 3. 研究之實場測試，請補充污染場址之現況與已執行之改善成效，並與本研究成果進行比對。 | | 1. 謝謝委員的意見，本研究所測試之長效型測試為希望了解該模組可連續使用時間，因此並未特別界定長效型式驗及耐久型試驗。 2. 謝謝委員的意見，本計畫主要目的為建置光催化+活性碳吸附多模組以取代現有 SVE 尾氣端之活性碳吸附塔，其原因在於僅使用光催化模組於可見光下並無法有效去除污染物，且當光觸媒失去活性時需打開反應艙進行更換，此舉將導致 SVE 設備需停機等待，而若使用光催化+活性碳吸附多模組近行尾氣端處理，則不僅可使污染物去除效率大幅提升，且當其中一模組需更換時可藉由另一模組先進行尾氣處理，因此本計畫最終將採用光催化商業模組近行測試。 3. 謝謝委員的意見，本計畫已於 108 下半年開始進行實際廠址測試，其測試結果顯示光催化商業模組確實可有效去除 SVE 尾氣端之污染物，其去除效率可達高於 98%，細部成果說明將於期末報告進行呈現。 | |
| 委員三 1. P.8 摘要第 2 段最後一行提及活性碳可有效與污染物進行...，但結果與討論主要為光催化玻纖布的結果，是否有誤植，請確認或宜將本期中報告重點-光催化目前執行進度與成果加以 highlight，較能突顯 | | 1. 謝謝委員的意見，因本期計畫主要重點為光催化商業模組之實場測試，然而本團隊於實驗室模場測試時卻發現前期所建置之吸附模組內部可能產生短流現象，為確認及解決此問題，固本團隊上半年度主要進度為透過 ANSYS 有限 | |



| | |
|---|---|
| <p>計畫成效。</p> <p>2. 大部分的結果篇幅乃是進行流場分析，如果這是實驗重點或關鍵性高於光催化本身的降解反應機制，建議回顧較多的短流發生與改善的前人文獻，並將設計重點放在於改善短流；如果短流現象很容易解決，則應聚焦光催化，讓這導向性研究的目的能具體發揮。</p> | <p>元素分析模組內部流場及吸附模組再設計，其各模組實驗結果將於期末報告中進行詳細說明。</p> <p>2. 謝謝委員的意見，雖吸附模組主要用於輔助光催化模組，但為使吸附模組可於光催化模組耗材更換時持續進行污染物處理，固本團隊認為吸附模組應盡量避免短流現象產生，因此本團隊上半年研究重心主要放在吸附模組再設計及實際場址接洽，然而使用模組進行污染物去除之文獻並不多，其中並未有針對短流現象之分析。</p> |
| <p>委員四</p> <p>1. 第三章文獻探討方面可增加國內外處理SVE尾氣之方法彙整。</p> <p>2. 請詳述以溶膠-凝膠法製備 La/TiO₂ 光觸媒之材料及流程。</p> <p>3. 圖 5.1 圖例表示不清楚。</p> <p>4. 污染場址之詳細情況包含污染物種、濃度及環境條件應詳述。</p> | <p>1. 謝謝委員的意見，依照美國環保署對土壤氣體抽除法尾氣處理建議，其尾氣處理方法可大致分為熱氧化法、觸媒氧化法及使用顆粒活性炭(GAC)吸附，其說明已補充於 p45 及 p46。</p> <p>2. 謝謝委員的意見，以溶膠-凝膠法製備 La/TiO₂ 光觸媒之材料及流程已補充於 p69。</p> <p>3. 謝謝委員的意見，該圖之圖例已於修正版中進行修正。</p> <p>4. 謝謝委員的意見，該場址之相關資料本團對已請新野科技股份有限公司進行協助，其將於期末報告中進行補充。</p> |
| <p>委員五</p> <p>1. 新吸附模組可降低模組內部短流現象，增加活性炭吸附力；在實際污染現場試驗中，光催化加活性炭吸附，對 BTEX 達成(污染防治標準)有何困難？</p> <p>2. 承上，如尚無污染現場經驗，國內外有無類似成果？</p> | <p>1. 謝謝委員的意見，本計畫所建置之光催化商業模組於現場實驗困難處在於實計污染場址較不易控制其污染物相對濕度，因此可能產生濕度過高造成活性炭吸附效果下降。</p> <p>2. 謝謝委員的意見，本計畫已於 108 下半年開始進行實際廠址測試，其測試結果顯示光催化商業模組確實可有效去除 SVE 尾氣端之污染物，細部成果說明將於期末報告進行呈現，而國內外現 SVE 尾氣處理端因成本及效率考量，固普遍均使用活性炭吸附塔進行處理，因此並無類似成果可進行參考。</p> |

**委員六**

1. 臺灣相對濕度高，濕度的增加對活性碳吸附是不利的，針對這部分如何進行去除效率提高？
2. 在催化評價裝置中安裝了濕度調節器，目前 40%-60%濕度時，可以達到比較好催化降解效果。但是，在實際廠址污染氣體降解時，情況會比較複雜，濕度也較難控制，是否有突破方式？
3. 在做模流分析實驗時發現，污染氣體無法有效流經模組邊緣，因此造成模組內部活性碳無法進行有效吸附。在設計吸附模組時進行改善，改良後的吸附模組內部並無短流現象，其原因為各層均有整流版之設計，因此污染物可均勻分散至模組內部，實際成效如何？

1. 謝謝委員的意見，因水份影響活性碳對污染物的吸附能力甚大，固建議未來可在吸附模組前增加除濕裝置，如氯化鈣、玻璃纖維、矽膠、海棉、薄膜等，以降低尾氣的濕度提高去除效率。
2. 謝謝委員的意見，因水份影響活性碳對污染物的吸附能力甚大，固建議未來可在吸附模組前增加除濕裝置，如氯化鈣、玻璃纖維、矽膠、海棉、薄膜等，以降低尾氣的濕度提高去除效率。
3. 謝謝委員的意見，透過實驗室膜廠測試結果顯示，具整流版之吸附模組於相同重量之活性碳使用量下，其污染物吸附量於實驗結束時可高於不具整流版之吸附模組約 1.5ppm，詳細成果說明將於期末報告進行呈現。





附錄四 期末報告書審查意見回覆對照表





行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告 ☐修正計畫書 ☒期末報告 **審查意見回覆對照表**

| 計畫年度 | 108 年度 | 計畫類型 | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |
|--|--|---|--|
| 計畫類別 | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它 | 主持人： | 游勝傑 NO：C1 |
| 計畫名稱 | 以可見光催化模組進行 SVE 尾氣降解之長效現地測試 | | |
| 委員審查意見 | | 計畫單位回覆 | |
| 委員一 | | | |
| 1. 本計畫所研發之「光催化商業模組」可應用於 SVE 之尾氣降解與吸附。 2. 請仔細比較只使用「活性碳吸附模組」和「光催化商業模組」之 SVE 尾氣處理效率以及其成本。 3. 本計畫研發之「光催化商業模組」的實場測試相關資訊請能再詳加的描述，以供參考。 | | 1. 謝謝委員意見，後續將持續針對模組應用進行測試與開發。 2. 謝謝委員意見，本年度計畫並無單純進行僅使用活性碳吸附模組相關實驗，後續計畫將參照委員意見嘗試執行相關實驗。 3. 謝謝委員意見，囿於發文期程，本團隊將洽詢地方主管機關並獲得同意後於明年度執行計畫書中進行描述。 | |
| 委員二 | | | |
| 1. 修正之新吸附模組除了設計圖外，是否有完整近拍照片展示？ 2. 嚴格來說，此模組雖可用於尾氣去除，實質上對場址污染物去除的效益並不高，因此建議探討此模組去除率的同時宜兼顧了解污染場址復育目標的達成。 | | 1. 謝謝委員意見，模場照片詳見圖 5.17 所示。 2. 謝謝委員意見，本研究之目的在於降低由於整治污染場址後對於場址鄰近環境空氣之污染。 | |
| 委員三 | | | |
| 1. 圖 3.14~圖 3.19 之縱軸 C/C0 並非降解效率(降解效率應為 $C_0 - C/C_0$)，請修正。 2. 表 5.1 及表 5.2 所列「最大去除甲苯濃度」意義為何？又如何計算？應清楚說明。 | | 1. 謝謝委員意見，已於期末報告修正稿中修正相關圖示。 2. 謝謝委員意見，表 5.1 及 5.2 最大去除甲苯濃度為圖 5.24、5.25 之瞬時最大去除量，即每一條線的最低點之數字。 | |



| | |
|---|---|
| <p>委員四</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗場址測試時，如有分別通過光催化模組與吸附模組之污染物濃度變化資料，請補充。 2. 成本以 3 天分析，而模組去除效率以 90 分鐘或 30 分鐘比較，請說明。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員意見，本次計畫無進行相關實驗，後續計畫將納入委員意見嘗試執行相關實驗。 2. 謝謝委員意見，成本以 3 天分析是因為模擬週五下班到週一上班之間，現場無作業人員之時間。模組去除效率以 90 分鐘或 30 分鐘比較是因為 90 和 30 分鐘為該模組的穩定時間。 |
| <p>委員五</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 研究成果如預期污染物去除率 95% 值得肯定，若能於成本上再降低，未來成效就更佳。 2. 文中合作的團隊是星野或是新野？ 3. 結論與建議建請獨立一章並將檢討章節亦納入。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員意見，後續將持續優化本技術，期使成本降低，提高本模組效益。 2. 謝謝委員意見，報告中提及之合作團隊為新野科技公司，已修正錯誤文字。 3. 謝謝委員意見，已修正相關章節順序。 |