

Session II-3
(13:40~15:00 , B219)

聚乙烯醇改性無機聚合材料可行性之研究 A Feasibility Study on Geopolymer Modified by Polyvinyl alcohol

廖品熏^{1*} 李韋皞² 鄭大偉³

Pin-Hsun Liao¹ Wei-Hao Lee² Ta-Wui Cheng³

1 國立臺北科技大學 材料及資源工程系 大學生

Undergraduate Student, Department of Materials and Mineral Resources Engineering, National Taipei University of Technology

2 國立臺北科技大學 資源工程研究所 助理教授

Assistant Professor, Institute of Mineral Resources Engineering, National Taipei University of Technology

3 國立臺北科技大學 資源工程研究所 特聘教授

Distinguished Professor, Institute of Mineral Resources Engineering, National Taipei University of Technology

* Corresponding author: a0912222490@gmail.com

摘要

聚乙烯醇是一種水溶性聚合物，由德國科學家 Dr. Hermann 與 Dr. Haenel 於 1924 年所製造出來的合成膠體，性質介於塑料及橡膠之間，具有優異的彈性及拉伸強度，現已被廣泛運用在各個行業當中，例如紡織業、建築業與醫療產業等。作為工業上廣泛使用的聚合物之一，其全球每年產量以超過了六十萬噸。

無機聚合材料被視為能夠取代水泥的新興材料，與傳統卜特蘭水泥相比，具有高早強、耐火、耐腐蝕、抗震等優異特性，且在製造過程中，不須經過窯燒，所以不會產生大量的二氧化碳對環境造成傷害。但無機聚合材料與水泥材料同樣為脆性的材料，因此在遭受到外力下，容易產生破裂及裂痕，對其耐久性產生不利之影響。

本研究使用聚乙烯醇水溶液作為改性劑，將其添加至無機聚合材料中，與爐石粉、燃煤飛灰、鹼性溶液及細粒料進行混拌後，製成無機聚合砂漿，並對其進行各項機械性質試驗。根據實驗結果顯示，在無機聚合砂漿系統中添加聚乙烯醇後，其抗彎強度可達 10.29MPa，相較於未添加聚乙烯醇之無機聚合砂漿試體，其抗彎強度可提升約 19%；此外，試體的應變斷裂點從 0.01mm 延長至 0.015mm，提升約 50%。因此，綜合各項實驗結果得知，若於無機聚合砂漿中添加聚乙烯醇，其不僅能有效改善無機聚合材料脆性之特性，更能夠有效的增加其抗彎強度。

關鍵詞：爐石粉、燃煤飛灰、無機聚合技術、聚乙烯醇

壹、前言

傳統卜特蘭水泥(OPC)是現今使用最廣泛的建築材料，在 2019 年全球的生產量接近 40 億噸，為了生產如此大量的卜特蘭水泥，需要大量的窯燒，同時會排放出大量的二氧化碳，造成嚴重的環境問題。為了解決及減緩此種狀況，迫切需要能夠替代水泥材料的研究及開發。經過了大量的嘗試與研究過後，無機聚合材料(Geopolymer)已經被證明能夠替代普通卜特蘭水泥材料 [1]。

無機聚合材料(Geopolymer)作為具有高發展潛力的新興材料，也是近年來各國積極研究的重點之一。其內部結構為 Si-O-Si、Si-O-Al 之三維架狀結構，使無機聚合材料具有非常優異的性能，如高早強、低熱導率、高熱穩定性、耐火、耐腐蝕、抗震等特性，且在其製程中不須經過窯燒，因此其排碳量較傳統卜特蘭水泥低，對於環境影響相對友善。

然而無機聚合材料雖具有優異的機械性能，但仍是一種脆性的材料，非常容易因為外力而破碎和斷裂，侷限此材料之應用，而在無機聚合材料中添加高分子材料，已經被證明能夠有效地降低其剛性，而聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol)材料，簡稱 PVA，是一種合成膠體，為水溶性高分子聚合物，被認為是安全且相對環保的，具有優異的物理性質及耐化性質，如韌性、彈性、耐酸鹼等，應用極其廣泛，可應用在紡織、建築、工程、食品及醫療業等方面。因此本研究期望在無機聚合材料中添加少量聚乙烯醇，憑藉其優異的韌性及彈性，改善無機聚合材料之脆性。

貳、實驗方法

本實驗分為無機聚合純漿及無機聚合砂漿兩部分，並以水淬高爐爐石粉及燃煤飛灰做為主要原料，將聚乙烯醇粉末與蒸餾水製備成聚乙烯醇溶液，添加至無機聚合材料中，比較添加不同濃度與不同添加量的聚乙烯醇溶液，對無機聚合材料的工作性質、收縮性質、抗壓強度、抗彎強度、應力變化、體積密度、吸水率之影響。

2.1 實驗材料

本研究所使用之聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol)，由帝一化工原料股份有限公司所購買，外觀如圖 2.1 所示。其型號分別為 PVA BF-17(75000-80000)，及 PVA BC-20(12000-132000)。



圖 2.1 聚乙烯醇粉末

本研究使用水淬高爐爐石粉及燃煤飛灰做為主要膠結材料，其中水淬高爐爐石粉為中聯資源股份有限公司所提供，燃煤飛灰則為火力發電廠所提供。由於水淬高爐爐石粉為非晶質相之材料，因此其具高活性及反應性[2]，可做為無機聚合反應之膠結材料。材料之 X 光螢光分析儀分析結果，如表 2.1 所示。

表 2.1 本研究材料之化學組成分析。

化學成分 (wt. %)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Others	L.O.I
水淬高爐爐石粉	40.2	34.7	14.1	0.2	7.1	3.7	N.D.
燃煤飛灰	2.7	60.2	19.1	8.7	0	6.4	2.9

此外，本實驗使用一般天然砂作為細粒料，一般天然砂是由力泰建設企業股份有限公司所提供，其粒徑分布如表 2.2 所示，經計算後之細度模數為 2.75，中位徑(D50)約為 1.0 mm。

表 2.2 細粒料之篩分析

篩號	粒徑 (mm)	細粒料之累積百分率 (%)
3/8in	+9.50	0
#4	-9.50 +4.75	1.0
#8	-4.75 +2.36	18.4
#16	+2.36 -1.18	40.1
#30	+1.18 -0.60	57.8
#50	+0.60 -0.30	73.2
#100	+0.30 -0.15	84.6
底盤	-0.075	100
細度模數		2.75

2.2 實驗流程

本研究之實驗分為無機聚合純漿及無機聚合砂漿，無機聚合純漿之詳細流程如圖 2.3 所示。以水淬高爐爐石粉及燃煤飛灰作為主要粉體原料，以液固比 0.55 添加鹼性溶液及聚乙烯醇溶液，分為兩種添加順序，第一種為先添加聚乙烯醇溶液與粉體混拌後，再加入鹼性溶液混拌、第二種為先加入鹼性溶液混拌成漿後，再添加聚乙烯醇溶液混拌。混拌完成後再將漿體灌入 $\Phi 5 \times 10$ cm 之圓柱模具當中，待室溫養護 1

天後脫模，並在室溫養護齡期達到 7 及 28 天時，進行各項測試，探討添加聚乙烯醇對於無機聚合純漿性質之影響。

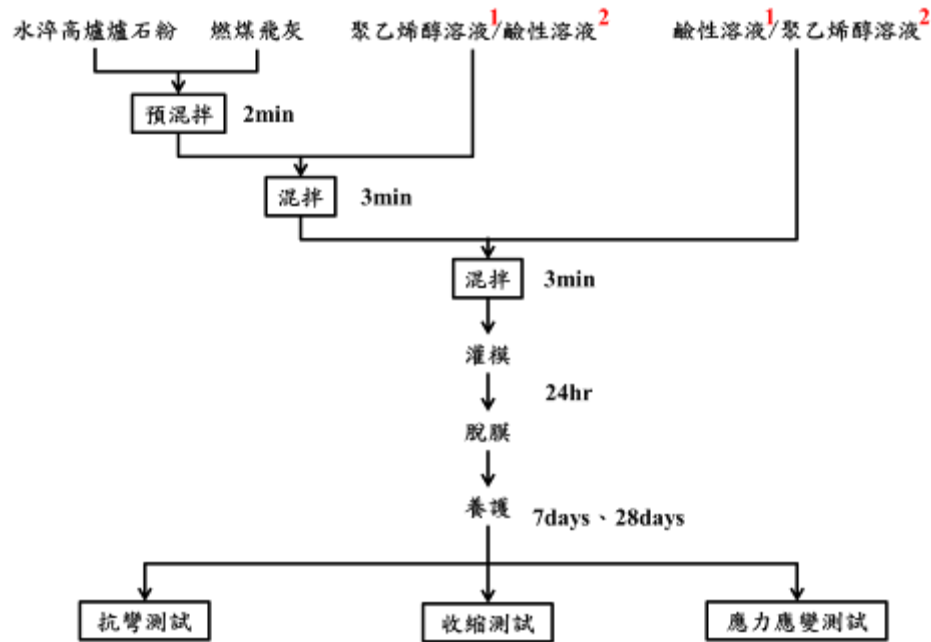


圖 2.3 聚乙烯醇改性無機聚合純漿之實驗流程圖

無機聚合砂漿之詳細流程如圖 2.4 所示。以水淬高爐爐石粉、燃煤飛灰及矽灰石作為主要粉體原料，一般天然砂作為細粒料。粉體原料經過混拌後，以液固比 0.6 添加聚乙烯醇溶液及鹼性溶液進行混拌，其中聚乙烯醇溶液分別使用兩種不同分子量的聚乙烯醇粉末製成。混拌完成後進行工作性質及機械性質之檢測，探討添加聚乙烯醇對於無機聚合砂漿性質之影響。

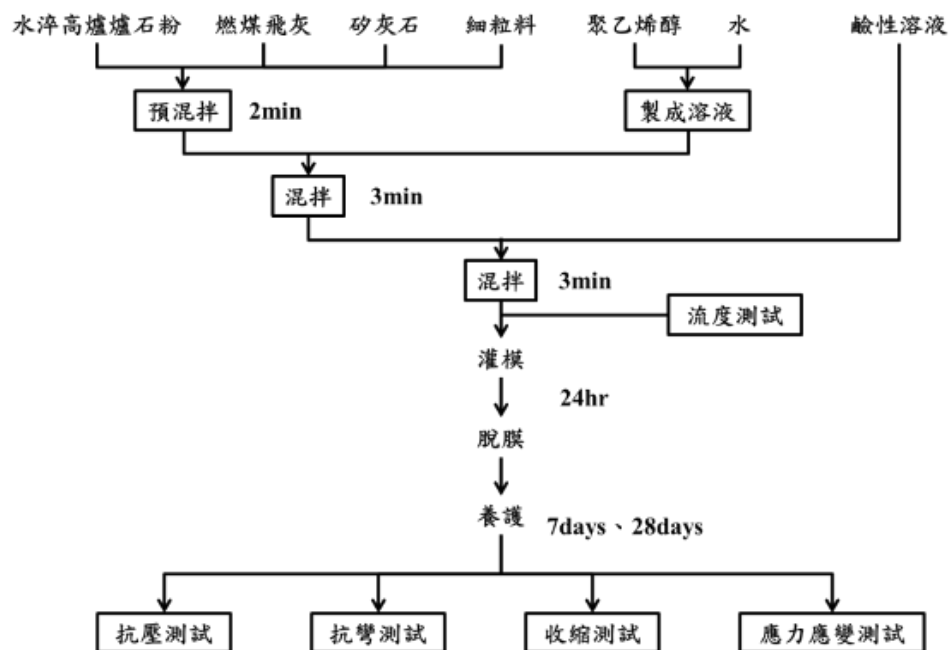


圖 2.4 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之實驗流程圖

叁、結果與討論

3.1 聚乙烯醇改性無機聚合純漿

為瞭解於無機聚合純漿中，添加聚乙烯醇的影響，本試驗以不同的順序添加聚乙烯醇溶液製成無機聚合純漿，並對無機聚合純漿之物理性質、機械強度及收縮率進行探討。其試驗參數如表所示。

表 3.1 聚乙烯醇改性無機聚合純漿試驗參數表

實驗編號	水淬高爐爐石粉 (wt. %)	燃煤飛灰 (wt. %)	額外添加水量 (wt. %)	聚乙烯醇溶液 (wt. %)	聚乙烯醇溶液添加順序	液固比
GP-X	50	50	5	-	-	0.55
GP-F			-	5	First	
GP-A				5	After	

(鹼性溶液：NaOH 濃度為 6M、SiO₂/NaO₂ 莫爾比為 1.28、SiO₂/Al₂O₃ 莫爾比為 50)

(X=不添加聚乙烯醇溶液、F=先添加聚乙烯醇溶液、A=後添加聚乙烯醇溶液)

3.1.1 聚乙烯醇改性無機聚合純漿之抗壓強度

聚乙烯醇改性無機聚合純漿抗壓強度試驗結果如圖 3.1 所示。試驗結果顯示，添加聚乙烯醇，對於無機聚合材料的抗壓強度有明顯不利的影響。Liu(2020)等人，表示在水泥材料中添加聚乙烯醇，會使漿體的黏性大幅增加，且會隨著聚乙烯醇的分子量及水解度增加而提升漿體之黏度，進而影響其機械性質[3]。因此推論添加聚乙烯醇後，漿體的粘度有所上升，使漿體內部的氣泡不易消除，孔隙率上升，導致其抗壓強度下降。

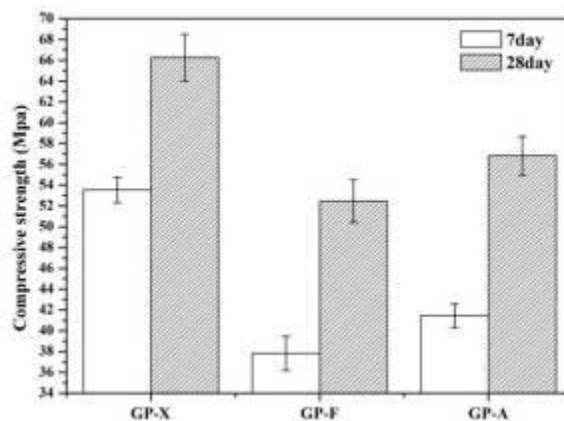


圖 3.1 聚乙烯醇改性無機聚合純漿之抗壓強度

3.1.2 聚乙烯醇改性無機聚合純漿之應力應變

聚乙烯醇改性無機聚合純漿之應力應變試驗結果如圖 3.2 所示。試驗結果顯示，添加聚乙烯醇溶液，對於試體的剛性並無明顯的影響，反而使試體的抗壓強度略為降低。Thong(2016)等人，表示聚乙烯醇薄膜主要生長於粒料及漿體間的介面過渡區(ITZ)，因此在純漿系統下，並無明顯的效果[4]。

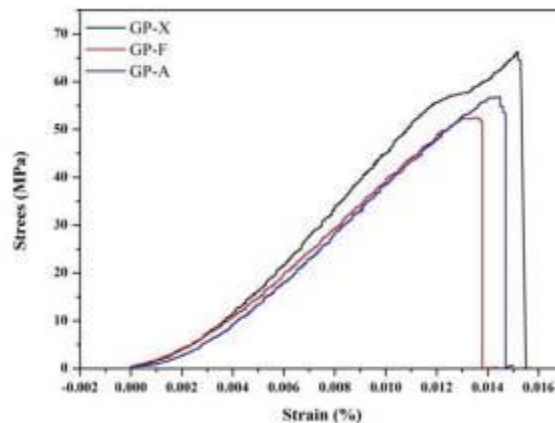


圖 3.2 聚乙烯醇改性無機聚合純漿之應力應變

3.1.3 聚乙烯醇改性無機聚合純漿之收縮性質

聚乙烯醇之無機聚合純漿收縮性質試驗結果如圖 3.3 所示。試驗結果顯示，添加聚乙烯醇，其收縮率會提高，對於試體的機械性質有不利的影響。未添加聚乙烯醇溶液時，其養護齡期 28 天之收縮率為 0.68%；當添加聚乙烯醇溶液之後，其養護齡期 28 天之收縮率為 0.98 及 0.99%。其原因為添加聚乙烯醇後，其漿體的黏度大幅上升，導致漿體內部的氣泡難以消除，而前人文獻指出孔隙率提升使體積密度減少，因此較多孔洞易產生收縮[5]。

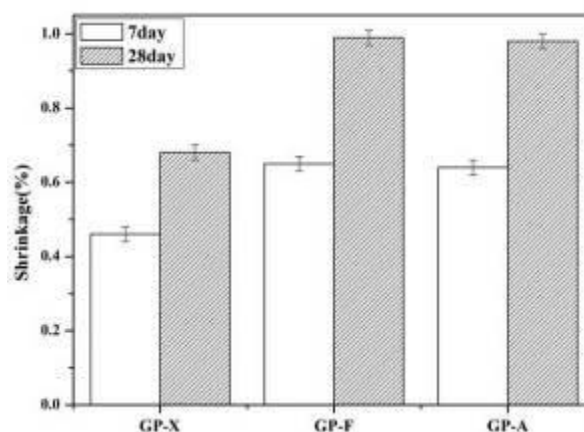


圖 3.3 聚乙烯醇改性無機聚合純漿之收縮性質

3.2 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿

由於聚乙烯醇薄膜主要生長於粒料及漿體間的介面過渡區(ITZ)，因此在純漿系統下，並無明顯的效果，所以此試驗改以無機聚合砂漿進行試驗。而為瞭解於無機聚合砂漿系統中，添加聚乙烯醇之影響，本實驗以不同分子量的聚乙烯醇及不同的聚

乙烯醇溶液濃度，在無機聚合砂漿系統中添加了聚乙烯醇溶液，製成無機聚合砂漿，並對無機聚合砂漿之流動性能、物理性質、機械強度及收縮率進行探討。其試驗參數如表 3.所示。

表 3.2 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿試驗參數表

實驗編號	水淬高爐爐石粉 (wt. %)	燃煤飛灰 (wt. %)	矽灰石 (wt. %)	灰砂比	液固比	額外添加水量 (wt. %)	聚乙烯醇溶液添加量 (wt. %)	聚乙烯醇分子量	聚乙烯醇溶液濃度
GP-Control	50	50	3	1 : 2.75	0.6	5	-		
GP-L 5%						-	5	75000-80000	5
GP-H 5%								120000-132000	5
GP-L 10%								75000-80000	10
GP-H 10%								120000-132000	10

(鹼性溶液：NaOH 濃度為 6M、SiO₂/NaO₂ 莫爾比為 1.28、SiO₂/Al₂O₃ 莫爾比為 50)

(L=低分子量聚乙烯醇、H=高分子量聚乙烯醇)

3.2.1 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之流動性能

聚乙烯醇改性無機聚合砂漿流動性能試驗結果如

表 3.3 所示。試驗結果顯示，隨著聚乙烯醇用量及分子量的增加，其流動性能會隨之下降。其原因為添加了聚乙烯醇後，因聚乙烯醇的內聚力及黏性，會使漿體的黏度大幅上升，導致其流動性能降低。

表 3.3 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之流動性能

試體編號	聚乙烯醇添加量	流度(%)	孔隙率(%)
GP-Control	0	110	20
GP-L5%	5%	85	20
GP-H5%	5%	80	21
GP-L10%	10%	73	21
GP-H10%	10%	70	21

3.2.2 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之抗壓強度

聚乙烯醇改性無機聚合砂漿抗壓強度試驗結果如圖 3.4 所示。試驗結果所示，添加聚乙烯醇溶液後，對於試體的抗壓強度有不利的影響。未添加聚乙烯醇溶液時，其養護齡期 28 天之抗壓強度為 48.2MPa，而添加了聚乙烯醇溶液後，其養護齡期 28 天之抗壓強度分別下降至 39.5、37.1 及 41.4 MPa。其原因為隨著聚乙烯醇用量及分子量的增加，會使漿體的黏度大幅提高，使漿體內部的氣泡不易消除，孔隙率上升，導致其抗壓強度下降。大致上與純漿系統趨勢相似。

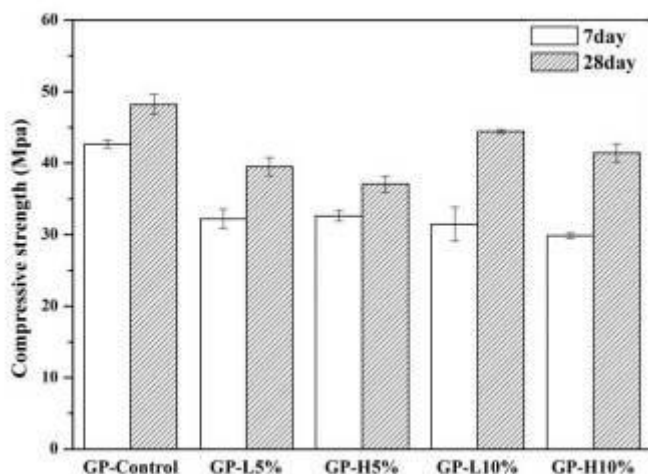


圖 3.1 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之抗壓強度

3.2.3 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之抗彎強度

聚乙烯醇改性無機聚合砂漿抗彎強度試驗結果如圖 3.5 所示。試驗結果所示，隨著聚乙烯醇用量及分子量的增加，其抗彎強度會隨之提升。未添加聚乙烯醇溶液時，其養護齡期 28 天之抗彎強度為 8.63 MPa，而添加了濃度 10%、分子量為 120000-132000 的聚乙烯醇水溶液，其養護齡期 28 天之抗彎強度上升至 10.29 MPa。其原因為聚乙烯醇薄膜在試體內部隙縫中的產生，有效的提高試體的抗彎強度[6]。

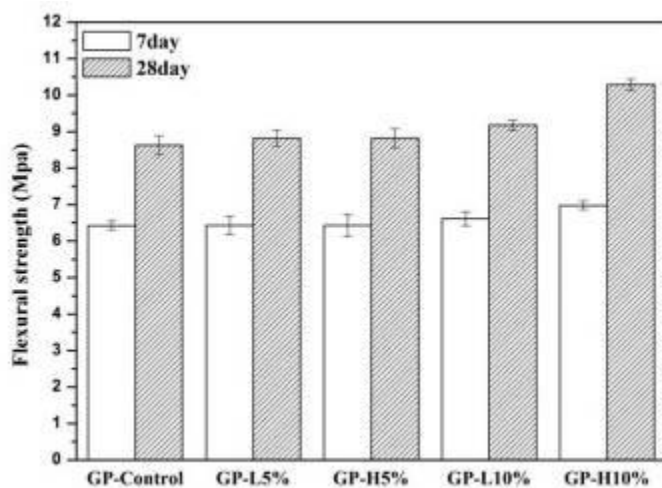


圖 3.2 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之抗彎強度

3.2.4 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之應力應變

聚乙烯醇改性無機聚合砂漿應力應變試驗結果如圖 3.6 所示。試驗結果顯示，添加了聚乙烯醇溶液對於試體的剛性有顯著的改善。當聚乙烯醇溶液度為 5%、分子量為 75000-80000 時，擁有最優異的效果。其原因試體內部產生了聚乙烯醇薄膜，增加了試體的韌性。但過高的聚乙烯醇添加量則會降低其工作性能，而對其機械性質造成不良的影響。

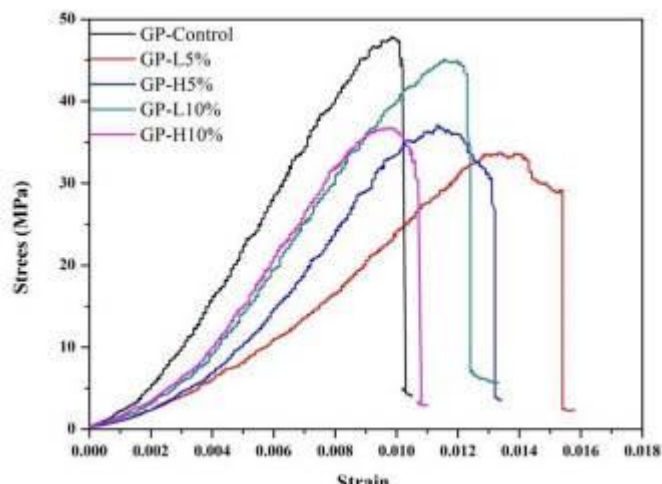


圖 3.3 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之應力應變

3.2.5 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之收縮性能

聚乙烯醇之無機聚合砂漿收縮性質試驗結果如圖 3.7 所示。根據試驗結果顯示，添加聚乙烯醇溶液時，其收縮率會有所提高，對於試體的機械性質有不利的影響。未添加聚乙烯醇溶液時，其養護齡期 28 天之收縮率為 0.3%；當添加了 5% 聚乙烯醇溶液後，其養護齡期 28 天之收縮率提升至 0.34% 及 0.41%，添加 10% 聚乙烯醇溶液之收縮率為 0.31% 及 0.32%。其原因為添加聚乙烯醇溶液後，漿體的黏度大幅上升，導致漿體內部的氣泡難以消除，使體積密度減少，因此較多孔洞易產生收縮[6]。

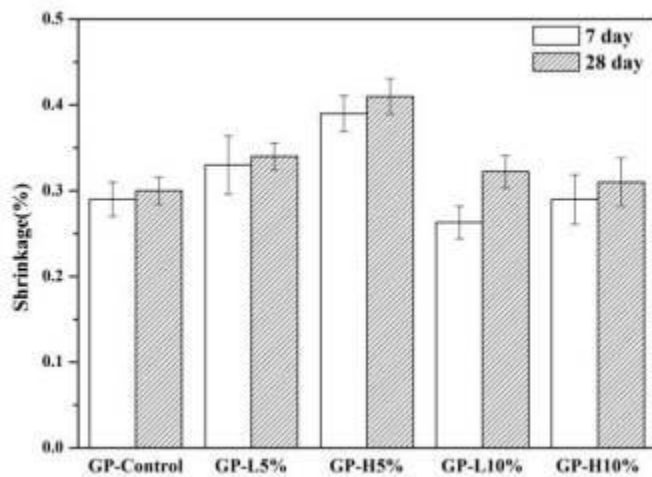


圖 3.4 聚乙烯醇改性無機聚合砂漿之收縮性能

肆、結 論

在無機聚合材料中，添加聚乙烯醇溶液，會使漿體粘度提高、工作性能大幅降低，造成其體積密度減少，以致收縮性質上升。

添加聚乙烯醇溶液進行改性，由於聚乙烯醇薄膜主要生長於粒料及漿體間的介面過渡區(ITZ)，因此對於無機聚合純漿，並無明顯的改善效果，甚至對其機械性質產生不利的影響。

在無機聚合砂漿中，使用聚乙烯醇做為改性劑，對其機械性質有明顯的改善效果，其中以剛性改變及抗彎強度提升，有較明顯的效果，但其工作性能及收縮性質尚須克服。

參考文獻

- [1] U.S. Geological Survey, 2020, Cement Data Sheet - Mineral Commodity Summaries, January.
- [2] 中國鋼鐵公司，2000「爐石利用推廣手冊」。
- [3] Liu F., Wang B., Xing Y., Zhang K., Jiang W. 2020, Effect of Polyvinyl Alcohol on the Rheological Properties of Cement Mortar. Structural Mechanics of Composite Materials and Structures, vol.25, 754.
- [4] Thong C. C., Teo D. C. L., Ng C. K. 2016, Application of polyvinyl alcohol (PVA) in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior. Construction and Building Materials, volume 107, pp. 172-180.
- [5] Fan J., Li G., Deng S., Wang Z. 2019, Mechanical Properties and Microstructure of Polyvinyl Alcohol (PVA) Modified Cement Mortar. Applied Sciences, vol.9, 2178.
- [6] Knapen E., Van Gemert D. 2015, Polymer film formation in cement mortars modified with water-soluble polymers. Cement and Concrete Composites, volume 58, pp. 23-28.

不同型態尼龍 6 奈米纖維對粒狀污染物去除之性能評估

Study on the particulate removal performance of different type nylon 6 nanofibers

鄭羽辰^{1*} 張章堂²

Yu-Chen Cheng¹ Chang-Tang Chang²

1 國立宜蘭大學環境工程學系 大學生

Student, Department of Environmental Engineering, National Ilan University

2 國立宜蘭大學環境工程學系 教授

Professor, Department of Environmental Engineering, National Ilan University

* Corresponding author: Gmamume10101@gmail.com

摘要

過濾法具有價格低廉、設置空間小等優點，纖維過濾器結構簡單、成本低。傳統纖維濾材其纖維尺寸與孔徑大小直徑過大，且堆積密度難以控制。而奈米纖維具大表面積、小孔徑和高孔隙率等特點。靜電紡絲技術可得次微米到奈米尺寸的纖維，且操作簡單、易進行各種材質纖維製作，方便組裝、更換，電紡技術所製奈米纖維易攔截次微米到奈米微粒。

本研究為製作最佳效能纖維，藉由不同參數(紡絲時間、電壓、轉速)進行製作，經由過濾測試可得最佳化纖維。對隨機纖維而言，當紡絲時間為 0.5 小時、電壓為 30kV、轉速為 250rpm 時，其過濾效率約為 83 %，於面速度為 1.0 cm/s 時之壓損約為 1.96 Pa，過濾品質可達到 0.967 Pa^{-1} 。為探討不同形態人造纖維(含交叉與徑向)與添加不同鹽類對各種粒徑微粒之過濾性能，本研究使用銅線來誘導奈米纖維呈現規律地排列，並製造出高度排列方向一致之奈米纖維，含鹽類隨機纖維的過濾效率約為 86 %，於面速度為 1.0 cm/s 時之壓損約為 2.94 Pa，過濾品質約為 0.383 Pa^{-1} ，含鹽類纖維較無添加鹽類纖維過濾品質低。另含鹽類徑向纖維的過濾效率約為 99.6 %，於面速度為 1.0 m/s 時之壓損約為 32.4 Pa，過濾品質為 0.170 Pa^{-1} 。即添加鹽類雖增加過濾效率，但易增加過濾壓損，導致過濾品質下降。

關鍵詞：靜電紡絲、纖維排列方式、鹽類、Nylon 6、微粒處理

一、前言

現代工商業蓬勃的發展，除帶動國家經濟與生活水平外，也造成對環境的衝擊，生活水平的提升，使人們對環境之需求也提高，如何兼顧經濟發展並減少環境之衝擊，為一重大議題[1]。粒狀污染物(particulate matter)為空氣污染中主要污染物之一，其生成與人類活動有著密不可分的關係[2]。由於人為活動與奈米科技應用的增加，人們暴露於奈米及次微米微粒的機會隨之增加，近來已有許多研究開始注重在奈米級微粒的過濾。現今流行病學的研究已指出空氣污染與呼吸，心血管疾病和肺癌等慢性病的正相關，奈米微粒能夠直接進入肺泡並被巨噬細胞吞噬，永遠停留在肺泡裏，對呼吸系統、心血管、神經系統等都會影響。若顆粒通過支氣管和肺泡進入血液，其中的有害氣體、重金屬等溶解在血液中，對人體健康的傷害更大[3]。

由於生活中細微粒(如 $PM_{2.5}$ 與 PM_{10})特別多，對人體有多種危害，因此製作性能高及微粒過濾效果佳的靜電紡絲濾材頗為重要，以利解決傳統靜電紡絲結構不佳與壓損偏高的問題。纖維形態不同又有不同功能(如徑向對齊與交叉形式)的奈米纖維，以利評估纖維型態對微粒去除效率之影響。另 Zhao 等人(2016)研究結果得知[4]，添加鹽類有助於增加奈米纖維對微粒的去除效率，因此本研究為提升對微粒處理效能，乃添加各種鹽類至 Nylon 6 奈米纖維中，並瞭解纖維過濾品質(含過濾效率與壓損)。

目前文獻中多半探討以隨機形式的奈米纖維處理微粒以淨化空氣品質[5]，但其奈米纖維壓損過高，難應用於個人防護器具(如口罩、空氣清淨機)，為降低壓損與提升過濾效率，本研究乃利用靜電紡絲技術製備含鹽類之交叉隨機和徑向排列 Nylon 6 纖維，並比較其過濾品質(含過濾效率與壓損)，探討添加鹽類後對微粒處理效能之提升機制，茲將擬研究主題條列如下。

1. 製作不同鹽類比例 Nylon 6 纖維材料，並處理微粒之各種材料最佳比例。
2. 量測纖維濾材之壓力損失與穿透效率，且評估濾材過濾品質。
3. 進行各種靜電紡絲操作參數(如濃度、進料速率、電壓、轉速、微粒粒徑)對微粒處理性能評估，並建立處理微粒最佳操作條件。
4. 藉由各種影響因素(如鹽類與纖維形式)下性能評估，求出處理微粒最佳操作條件。

二、實驗方法

1. 實驗設計

研究方法含靜電紡絲纖維材料的製備、纖維材料基本性質分析、纖維濾材表面電壓量測、纖維濾材穿透率之量測、纖維濾材之單纖維效率與過濾品質計算，試驗條件如表 1 與表 2 所示，實驗流程如圖 1 所示。

2. 纖維材料選用

本研究所使用的尼龍六購買自美國 Sigma-Aldrich 公司，藥品為分析級，無需要再純化。Nylon 6 因其熔點較低且價格較易入手，且技術上操作溫度範圍很寬，抗衝擊性和抗溶解性強，其機械特性，可藉由加入各種各樣的改性劑而提升。使用 Nylon 6 可達到

半透明效果雖具吸濕氣且不耐溫等缺點但也具有優良的耐磨性、電絕緣性能好、凝固時間較短等特點。

3. 紡絲溶劑選擇

本研究所使用的之溶劑為分析級甲酸(CH_2O_2)，購買自美國 Acros 公司，無需要再純化。為了達到最佳過濾效率以及過濾品質，靜電紡絲製備的纖維直徑是極為重要，纖維直徑隨電紡所用聚合物/溶劑溶液的不同而不同，三個主要的溶液屬性可能會驅動這種纖維直徑的差異：溶液黏度、溶劑介電常數和溶液導電率。較高的黏度溶液通常會產生較厚的纖維，而較高的電導率和較高的溶劑介電常數會導致較小的纖維直徑[6]。由於甲酸具有較高的電導率和較高的溶劑介電常數，故本研究以甲酸作為紡絲溶劑。

4. 纖維型態之參數設定與優缺點比較

本研究選擇兩種型態(交叉隨機徑向排列)纖維進行比較對微粒捕集之穿透率、壓損與過濾品質，其優缺點如表 3 所示。

表 1 材料製作試驗條件

參數	說明
Fiber arrangement	Random, alignment
Voltage (kV)	10, 15, 20, 25, 30
Speed (rpm)	250, 500, 800, 1000rpm
Spinning time (hr)	0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10
Distance between copper wires (cm)	1, 0.5, 0.2
Copper wire thickness (mm)	0.8 (Low), 1.0 (High)

表 2 性能評估試驗條件

參數	說明
Fiber type	N6, NaCl, KCl, LiCl, Na_2SO_3
Solution preparation	10, 15, 20%

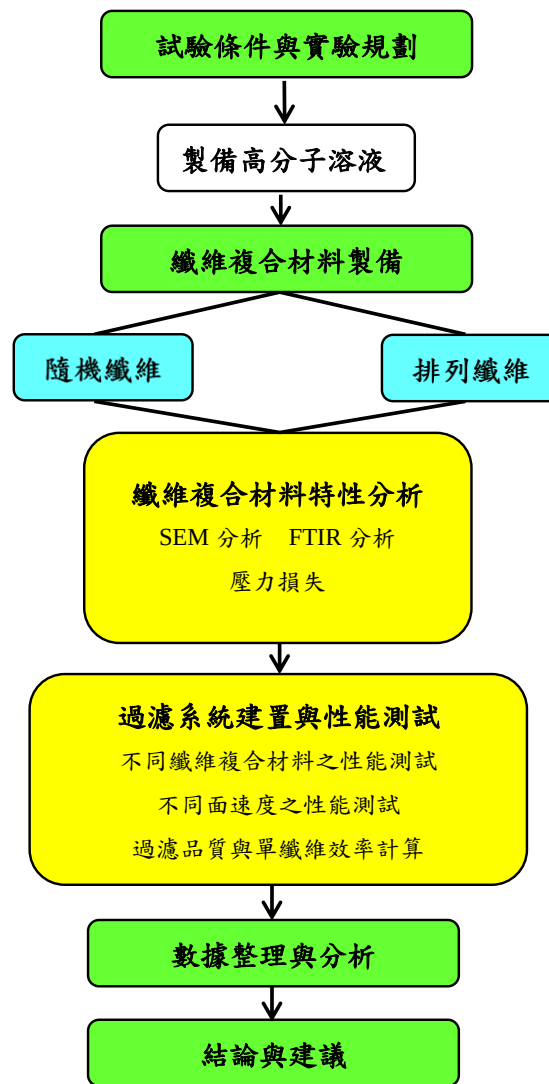


圖 1 實驗流程圖

表 3 交叉隨機與徑向排列纖維優缺點

纖維型態	交叉隨機	徑向排列
優點	1. 製作方法較容易 2. 無需其他材料即可製作 3. 實驗設計較容易	1. 奈米纖維排列角度可排列 2. 對於污染物攔截較可控制 3. 可圖像化 4. 可用於生物醫學
缺點	1. 纖維角度不易觀察 2. 纖維收集較無規律 3. 不易控制過濾污染物結果	1. 製作方法較困難 2. 需其他材料才可製作 3. 紡絲參數設定不易

5. 複合材料製備方法

本研究已製備紡絲聚合物溶液，並製備含鹽類之隨機纖維墊片，如圖 2 及圖 3 所示。為了使製備出的纖維具有足夠的機械強度，方便於實驗中測試，本研究將聚對苯二甲酸乙二酯(Polyethylene terephthalate, PET)、紡粘不織布(Nylon Spunbond)，如圖 4 所示，作為基材放置於滾筒收集器上，將靜電紡絲製程產生之纖維直接紡在 PET 基材上，放置於乾燥箱保存 24 hr 後再疊合上一層 PET 基材，形成夾層之結構，其複合材料示意圖如圖 5 所示，再以護貝機於 60°C 下進行熱壓，即完成不織布纖維複合材料製作，其製備流程如圖 6 所示。



圖 2 紡絲溶液製備流程圖

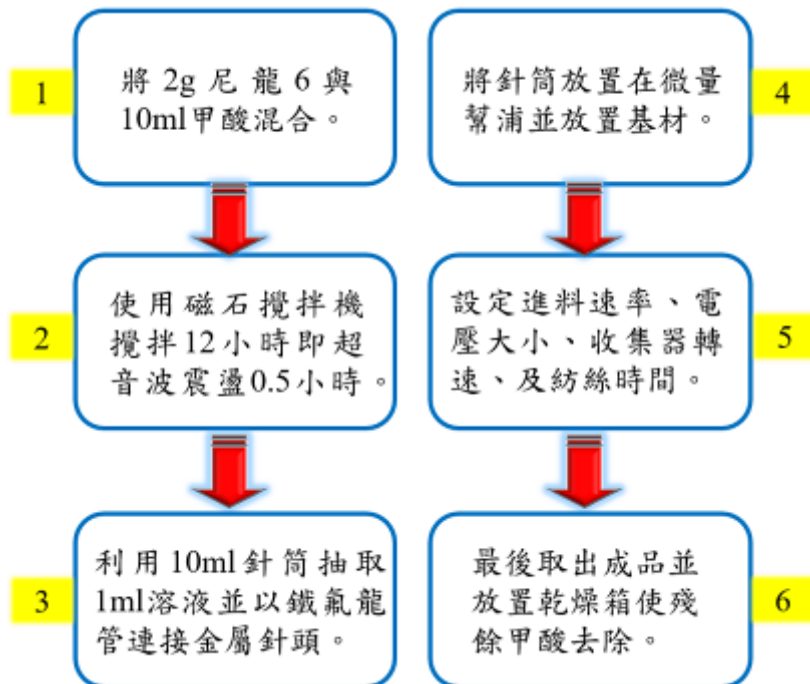


圖 3 製備纖維墊片流程圖

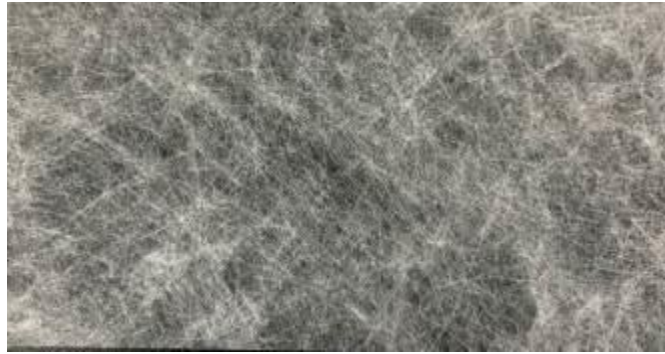


圖 4 PET 不織布基材

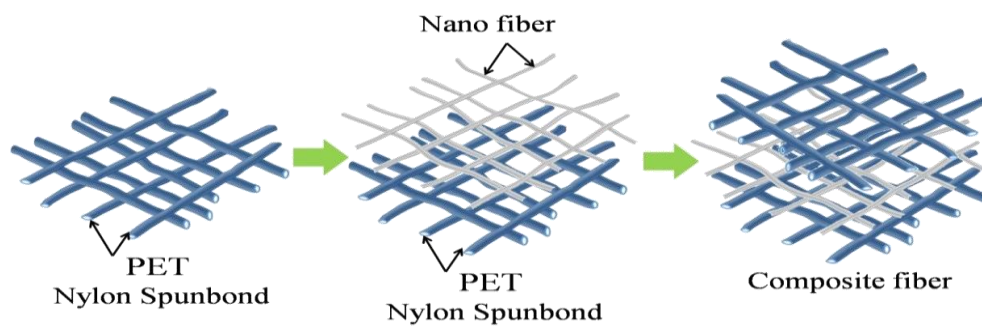


圖 5 複合材料結構示意圖



圖 6 複合材料示意圖

6.靜電紡絲機制

靜電紡絲最基本之四項設備微量幫浦、高壓電供應器、金屬針頭以及金屬收集器，如圖 7 所示，藉由高壓電供應導致金屬針頭前端帶正電，此時紡絲溶液藉由推進幫浦推進至金屬針頭形成液滴，由於液滴受到表面張力及電排斥力影響，導致液滴呈現泰勒錐 (Taylor)。當液滴的電排斥力作用大於表面張力時，溶液便會進入電場拉伸，最後溶劑蒸發並被帶負電之金屬收集器收集纖維。

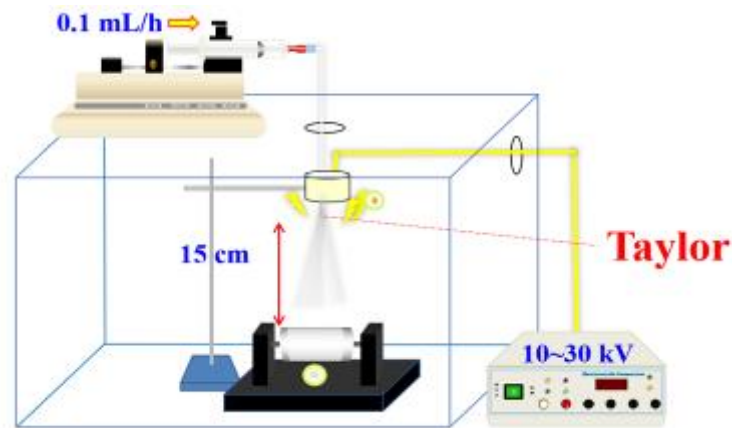


圖 7 靜電紡絲纖維製備示意圖

7.過濾品質計算

過濾品質能直接反應出濾材的過濾性能好壞，計算式如公式(1)所示；然而，除了穿透率外，同時也必須考量濾材的空氣阻抗，即為壓力損失。降低穿透率易導致壓力損失急遽的增加，並影響能源損耗提高，無法應用濾材至實場環境中。因此，為同時考量穿透率與壓力損失，乃使用過濾品質(Quality factor, Q_f) 能更適當地評估濾材的性能，如公式(2)所示。

$$P = \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

其中：

P：穿透率

C_{out} ：排氣之微粒數量濃度

C_{in} ：進氣之微粒數量濃度

$$Q_f = \frac{-\ln(P)}{\Delta p} \quad (2)$$

其中：

Q_f ：濾材之過濾品質

Δp ：濾材測試之壓力損失

8.過濾性能測試

本研究以不鏽鋼夾固定濾材，接著通入微粒產生系統所產生之微粒，並使用寬範圍顆粒粒徑分析儀(Wide-range Particle size Spectrometer, WPS, 1000XP, MSP Inc.)測量過濾前後之 10 - 500 nm 範圍內的微粒數量濃度，同時使用壓差計連接在進氣與出氣端量測濾材壓力損失。使用濾材面積約為 16 cm²，在相同實驗條件下，每種濾材進行 3 重複過濾測試，且每一測試將循環 3 次，共計九組數據，最後取其平均值與標準偏差來表示，

過濾性能測試系統如圖 8 所示。

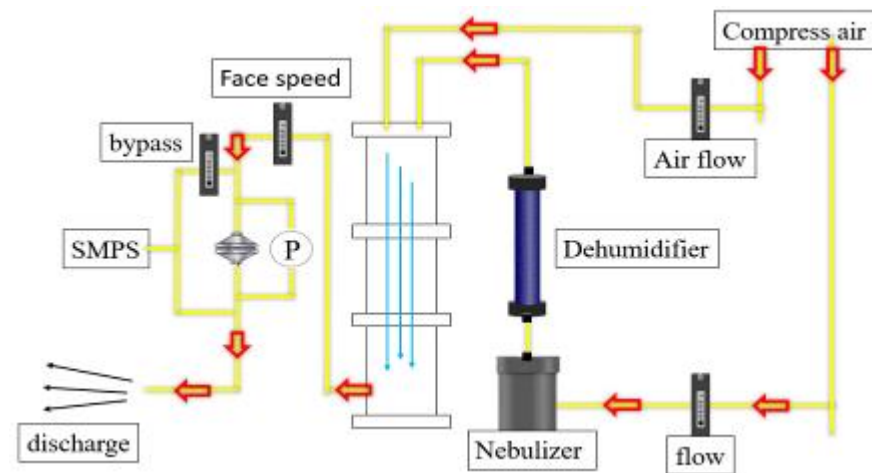


圖 8 過濾性能測試系統

本研究的模擬污染物為 1M NaCl 水溶液，藉由霧化器將 NaCl 水溶液霧化成細小微粒當作過濾測試時的模擬污染物，圖 9 為本次測試過濾分析所模擬的污染物微粒粒徑分布圖。

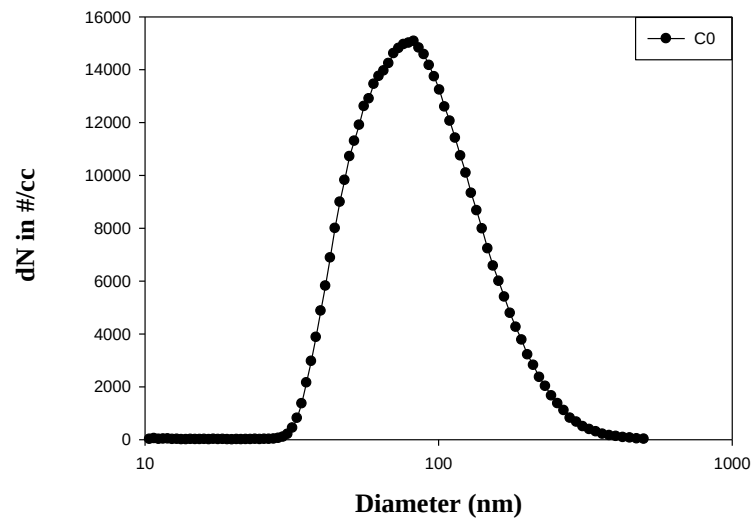


圖 9 霧化 1M NaCl 溶液的污染物微粒數量

三、結果與討論

1.特性分析

(1) SEM 分析

本研究藉由不同直徑的銅線與銅線間的距離增強纖維誘導率所產生的徑向型態纖維，如圖 10 所示，雖可以成功製備出徑向纖維，由 SEM 圖看出纖維徑向性尚不穩定。當製備徑向纖維需要有高轉速(13–15 m/s)馬達，並且通常需要達到每秒 3000 轉，因此成本較高，但本研究利用較低成本之方法製備出徑向纖維。為了增加溶液導電率，本研究添加不同鹽類混合，圖 11 為添加 NaCl 鹽類之隨機型態纖維，可得知鹽類分子確實附載在尼龍 6 纖維中。

本研究中已成功製作出徑向排列及交叉隨機纖維，且經由隨機量測 30 根纖維可得知兩者纖維直徑平均為 0.1 - 0.3 μm ，本研究所製備出的奈米纖維直徑略小於 Ewaldz 等人 (2018) 研究結果，該研究所製得 PVP 纖維的平均直徑為 $1.60 \pm 0.26 \mu\text{m}$ ，PS 纖維為 $0.81 \pm 0.27 \mu\text{m}$ ，PMMA 纖維為 $1.5 \pm 0.30 \mu\text{m}$ ，尼龍纖維為 $0.24 \pm 0.06 \mu\text{m}$ [6]。

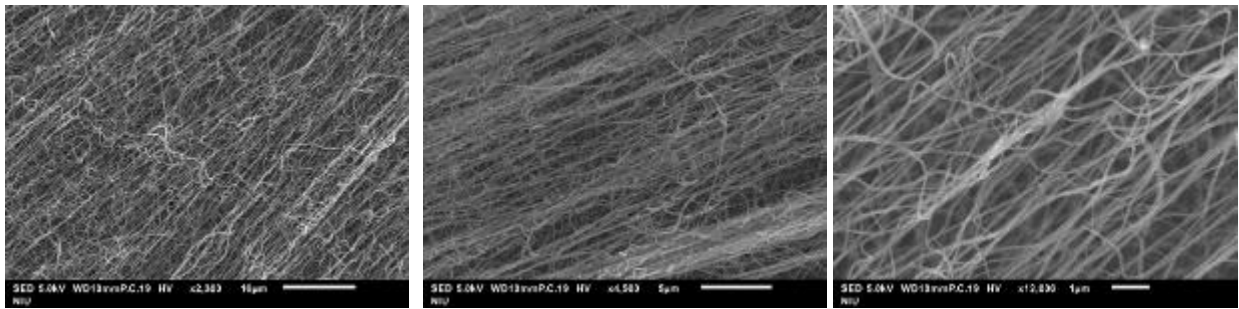


圖 10 徑向排列奈米纖維之 SEM 圖

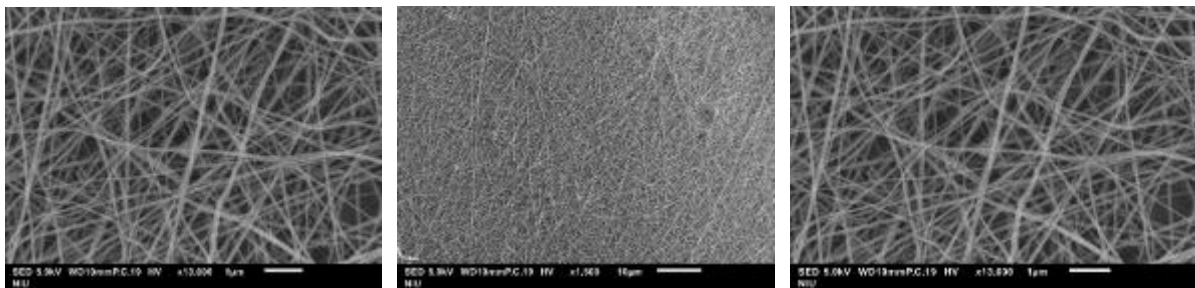


圖 11 一般隨機奈米纖維之 SEM 圖

(2) EDS 分析

本研究為了更加確定鹽類分子有成功與尼龍 6 均勻混合，且進行 EDS mapping 分析。如圖 12 及圖 13 所示，可得知除了尼龍 6 材料本身含有的 C、N、O 元素外，在纖

維上亦可偵測到 Na 及 Cl 元素，證實鹽類分子的確有成功和紡絲溶液均勻混合。

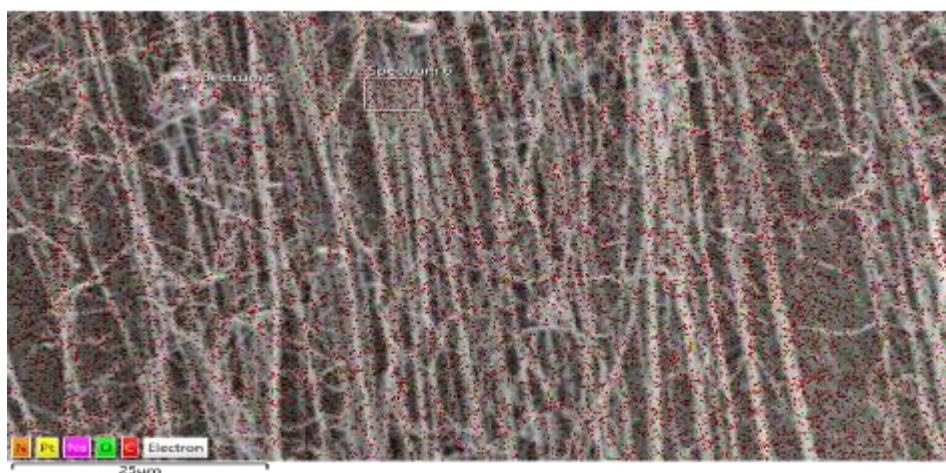


圖 12 20%尼龍 6 與 NaCl 在 20kV 電壓和 1000rpm 轉速下的 EDS 圖

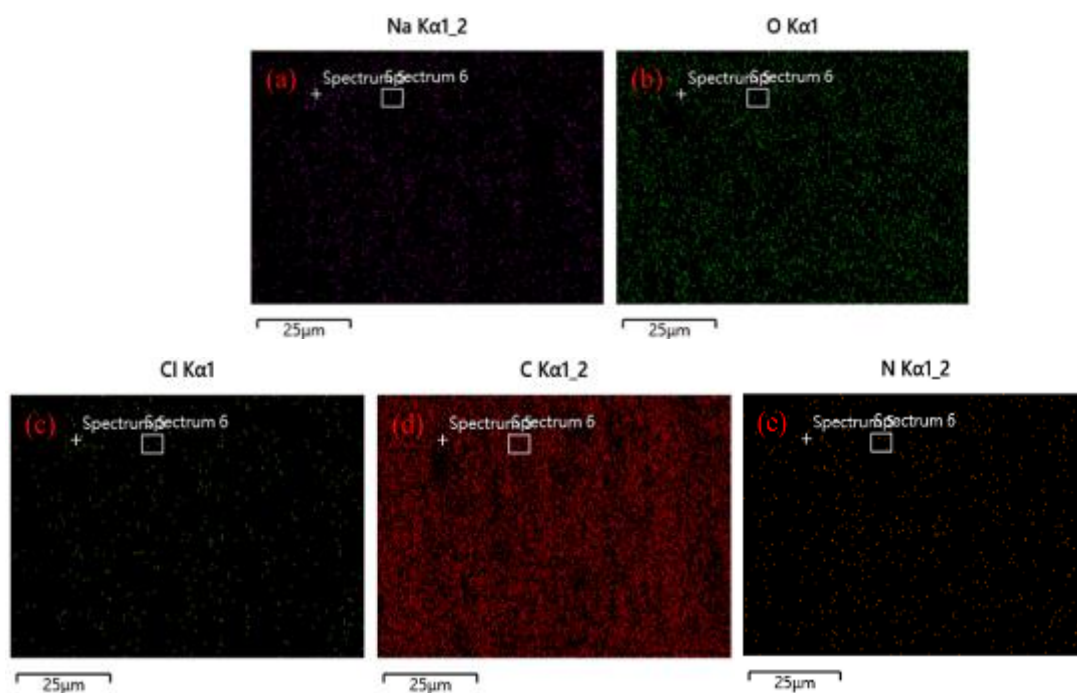


圖 13 含 NaCl 鹽類纖維之元素分布圖(a) Na (b) O (c) Cl (d) C (e) N

(3) FT-IR 分析

本研究除了添加鹽類分子以增強溶液導電率之外，亦有嘗試添加活性碳粉末於高分子紡絲溶液中並進行靜電紡絲，為了使本研究所製備出的奈米纖維除了具備過濾效果之外，結合活性碳粉末以具備吸附功能，外來可用於處理揮發性有機物 VOCs 如丙酮氣體等工廠及環境污染物。由圖 14 可發現在 1380 及 1460cm^{-1} 偵測到活性碳的 C-C 及 C-O 鍵，證實活性碳有成功附載到纖維上。

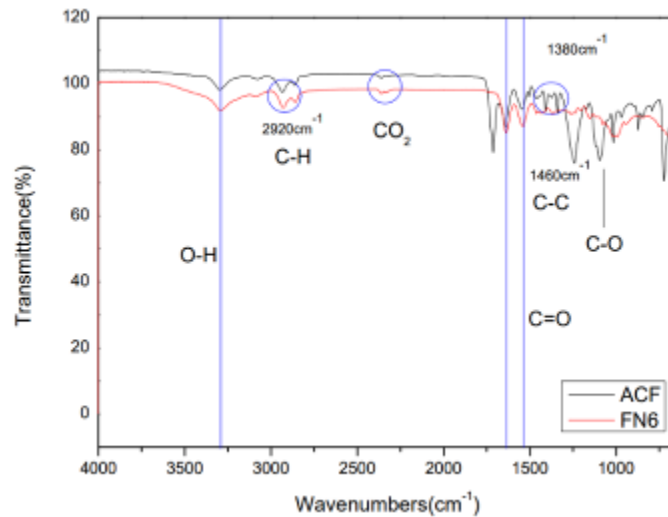


圖 14 尼龍 6 纖維以及含活性碳纖維之 FT-IR

2.不同轉速與時間之過濾性能測試

本研究利用不同電壓、收集器轉速及紡絲時間進行不同參數的靜電紡絲，再利用各參數所製備出的纖維進行過濾測試，並計算其纖維濾材穿透率、過濾效率、纖維複合濾材壓損以及過濾品質進行性能比較，如圖 15 所示。

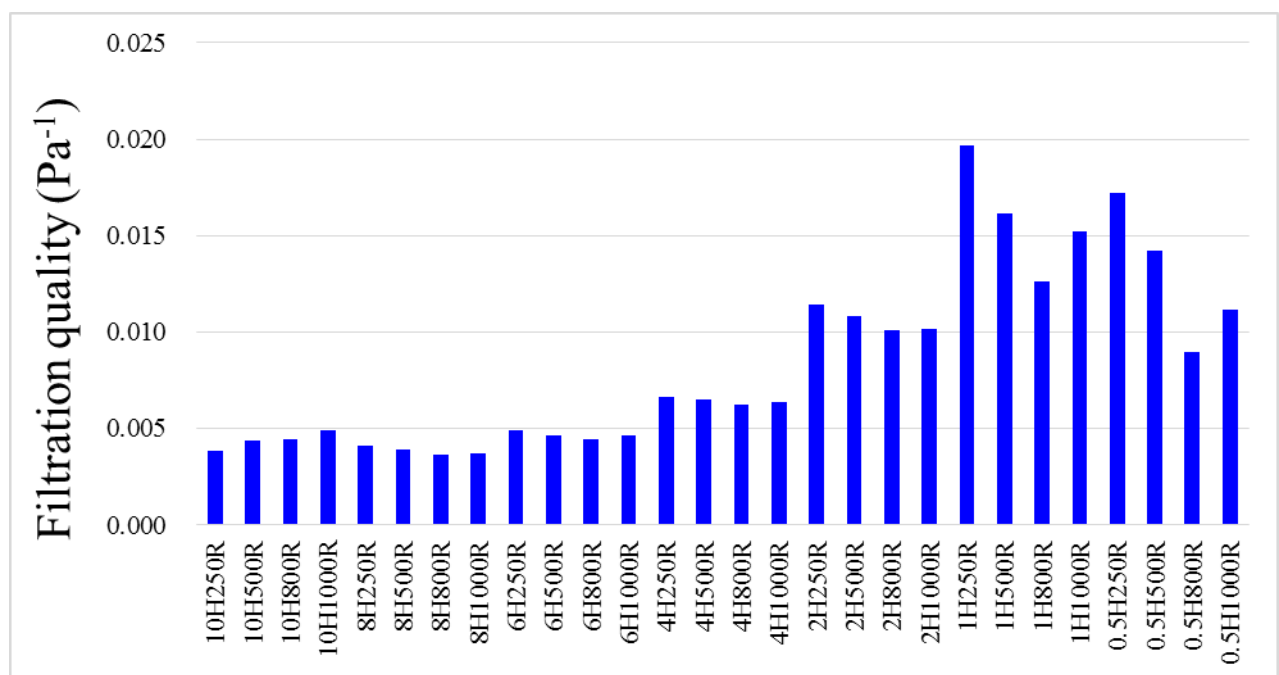


圖 1 不同參數下纖維過濾品質

3.不同電壓之過濾性能測試

藉由本研究可得知優化的收集器轉速與紡絲時間，利用最佳化參數來進行不同電壓

大小對靜電紡絲濾材的過濾性能影響進行評估。圖 16 為 10、15、20、25 與 30kV 不同電壓所製備的濾材的穿透率測試的結果，平均穿透率個別為 35、29、33、19 與 17%，可發現當施加電壓越高，微粒的穿透率降低。當施加電壓越高來進行電紡時，藉由加強電排斥力而造成更細小的纖維直徑，使濾材纖維密集且空隙變少，因此攔截粒狀污染物的效率上升。

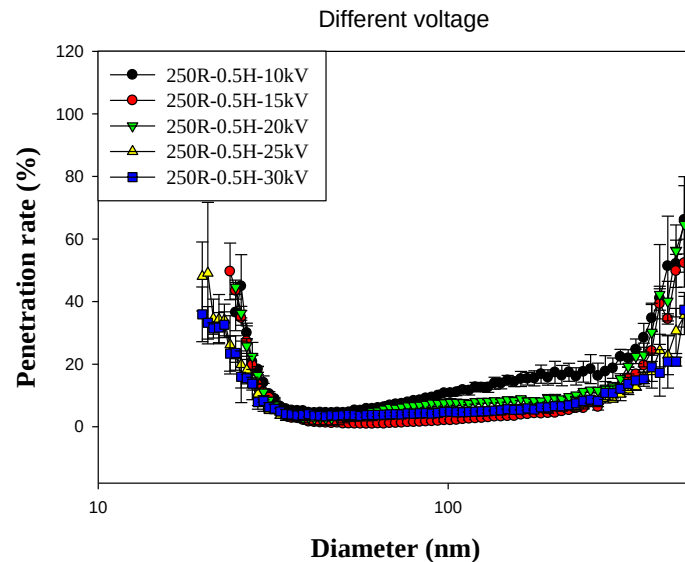


圖 2 不同電壓下纖維穿透率

藉由本研究可得知收集器轉速 250 rpm、紡絲時間 0.5 小時與電壓 30 kV 等最佳化參數後，利用優化參數製備濾材，並進行性能評估。當電壓為 30 kV 時，纖維直徑小，因此造成纖維壓力損失較小。藉由纖維濾材穿透率與壓力損失可計算其過濾品質，由圖 17 可得知，當電壓為 30 kV 時，纖維直徑小，造成微粒穿透率低與壓損較小，纖維過濾品質上升，過濾品質可達到 0.967 Pa^{-1} 。

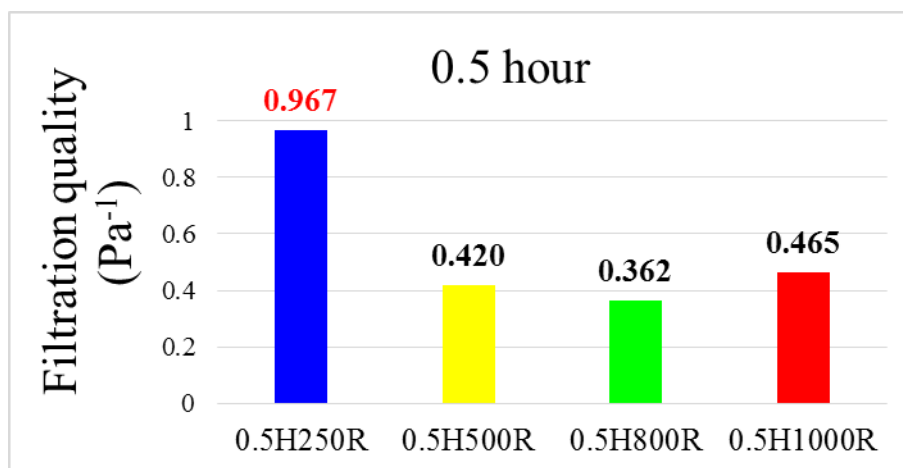


圖 17 30kV 電壓下纖維過濾品質

4.含鹽類對不同型態纖維之過濾性能影響

(1) 含鹽類隨機纖維性能評估

為了瞭解添加鹽類對不同型態纖維的影響，本研究將不同鹽類添加到紡絲溶液中並利用最佳化參數進行靜電紡絲，圖 18 為不同鹽類纖維的壓損評估，可發現當添加鹽類時，有助於提升溶液導電率以及纖維電排斥力，造成壓損較無添加鹽類的纖維低，其中碳酸鈉有最低壓損 2.94 Pa，這可能是因為相較於其他鹽類來看，碳酸鈉鹽類的分子大小較小，因此纖維空隙減少，且壓損降低。

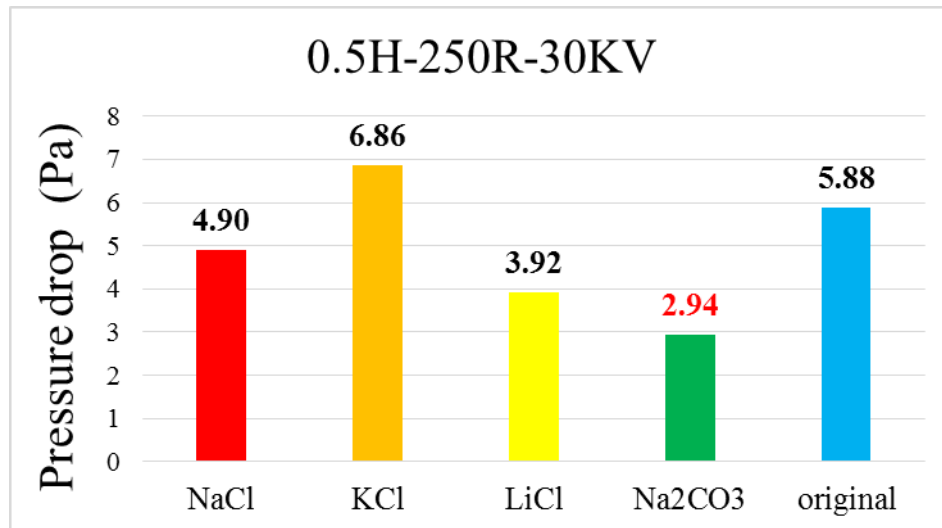


圖 18 含不同鹽類的隨機纖維壓損

(2) 含鹽類徑向纖維性能評估

本研究亦對含鹽類的徑向纖維進行探討，由圖 19 可得知，當添加鹽類後，由於纖維的溶液導電率與電排斥力提升，使纖維直徑變小，即纖維間的空隙被更多鹽類分子與小直徑纖維填入，造成微粒穿透率降低與壓損降低，導致微粒攔截效率與過濾品質提升。

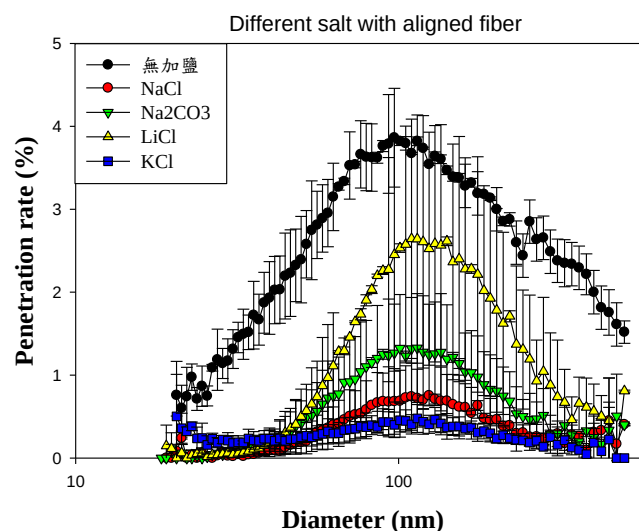


圖 19 含不同鹽類的徑向纖維穿透率

四、結論

- 1.成功製備出最佳化參數的奈米纖維，並且成功利用低成本方法製備出徑向纖維進行含鹽類纖維不同型態之製備。
- 2.SEM 分析結果顯示徑向纖維的成功製備，且觀察到徑向及隨機纖維直徑平均為 0.1 - 0.3 μm ，且均成功附載鹽類分子。
- 3.EDS 分析結果顯示除了尼龍 6 材料本身含有的 C、N、O 元素外，因添加鹽類纖維元素亦含有 Na 及 Cl 元素，證實鹽類分子成功和紡絲溶液均勻混合。
- 4.本研究成功製備出最佳化參數纖維，對隨機纖維而言，當轉速為 250 rpm 時，纖維被收集器平均收集，當轉速過快則會造成纖維不均勻分布，使壓損增加。
- 5.藉由銅線的誘導力成功製備出徑向纖維，當轉速過慢纖維容易沉積於收集器，故最佳轉速為 1000 rpm，可使徑向纖維均勻分布於收集器。
- 6.當電壓為 30 kV 時纖維直徑小，由於電排斥力增強，造成微粒穿透率低與壓損較小，纖維過濾品質上升，過濾品質可達到 0.967 Pa^{-1} 。
- 7.進行含鹽類纖維的過濾性能評估，發現添加鹽類有助於去除微粒的效率，相較於未添加鹽類的纖維的過濾效率為 97.5%，含鹽類纖維的過濾效率高達 99.6%。
- 8.添加鹽類時，有助於提升溶液導電率以及纖維電排斥力，造成壓損較無添加鹽類的纖維低，其中 Na_2CO_3 有最低壓損 2.94 Pa，過濾品質達到 0.383 Pa^{-1} 。
- 9.對徑向纖維而言，含 NaCl 鹽類的纖維壓損最低，因為 NaCl 具有更小的分子大小，這能助於降低纖維間的壓損，並提高過濾品質達到 0.170 Pa^{-1} 。

參考文獻

- [1] Mazaheri, M., Clifford, S., Jayaratne, R., Megat Mokhtar, M. A., Fuoco, F., Buonanno, G., & Morawska, L. (2014). School children's personal exposure to ultrafine particles in the urban environment. *Environmental Science and Technology*, 48(1), 113–120.
- [2] Clarke, K., Kwon, H. O., & Choi, S. D. (2014). Fast and reliable source identification of criteria air pollutants in an industrial city. *Atmospheric Environment*, 95, 239-248.
- [3] Dimitriou, K., Paschalidou, A. K., & Kassomenos, P. A. (2013). Assessing air quality with regards to its effect on human health in the European Union through air quality indices. *Ecological Indicators*, 27, 108-115.
- [4] Zhao, X., Wang, S., Yin, X., Yu, J., & Ding, B. (2016). Slip-Effect functional air filter for efficient purification of $\text{PM}_{2.5}$. *Scientific Reports*, 6(1), 1–11.
- [5] Sambaer, W., Zatloukal, M., & Kimmer, D. (2012). 3D air filtration modeling for nanofiber based filters in the ultrafine particle size range, *Chemical Engineering Science*, 82, 299-311.
- [6] Ewaldz, E., Patel, R., Banerjee, M., & Brettmann, B. K. (2018). Material selection in electrospinning microparticles. *Polymer*, 153, 529–537.

採用紙廠無機副產物與無機聚合技術開發冷壓型普通磚之可行性研究

Feasibility of Utilizing Inorganic Papermaking By-products and Geopolymer Technique to Develop Cold-pressing Commons Bricks

蔡志達^{1*} 李昂軒²

Chih-Ta Tsai^{1*} Ang-Hsuan Lee²

1. 國立成功大學永續環境實驗所 副研究員
Associate Research Fellow, Sustainable Environment Research Laboratories,
National Cheng Kung University

2. 中華紙漿股份有限公司 專案經理
Project Manager, Chung Hwa Pulp Corporation

* Corresponding author: chihta.tsai@gmail.com

摘要

漿紙產業製程中將產出黑液（木質素）、木屑、廢紙渣、水資源處理之無機、有機污泥等副產物或再生資材，透過回收再利用賦予它們嶄新價值，從生命週期循環的角度而言，這是一個取之於自然，終歸於自然的過程，同時形成一個創造循環經濟的市場。華紙公司主要無機副產物產出比例大致為綠泥：飛灰：底渣=7：6：1，目前業已成功透過冷壓資源化技術將上述無機副產物開發作為水泥系建材（再生粗粒料與符合 CNS 382 性能要求的普通磚）。無機聚合材料為類似沸石的一種三維架構鋁矽酸鹽材料，其基本組成原料取得容易，凡是富含鈣、矽、鋁元素之礦物及廢棄物皆可作為無機聚合材料之原料，且製程與設備簡單，於常溫環境下即可進行反應，並具備相當優良的性能，因此相當有潛力成為新一代綠色材料。因此本研究主要係採用無機聚合技術，將上述富含鈣、矽、鋁元素之紙廠無機副產物，進行資源化作為冷壓型普通磚的可行性研究。其中製磚用之無機聚合材料配比係採用經再演繹後的緻密配比邏輯所設計，於骨材系統中：採用之綠泥填塞飛灰的比例（ α ）=0.50；綠泥與飛灰混合料填塞底渣的比例（ β ）=0.80。於漿體系統中：選擇之液灰比（L/S）為 0.60，其中飛灰：綠泥=1：9；鹼液 NaOH 濃度為 10M； $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 1.28； $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50。所開發之無機聚合冷壓型普通磚中綠泥、飛灰、底渣等紙廠無機副產物再生資材可達 100%，而綠建材評定基準中普通磚僅要求：「回收材料乾重比率 40 %以上」。普通磚性能測試結果顯示，其抗壓強度隨齡期持續成長，於齡期 28 天時，抗壓強度可滿足 3 種磚之性能要求；於齡期 365 天時，抗壓強度可滿足 2 種磚之性能要求。此亦表示本研究採用紙廠無機副產物與無機聚合技術開發冷壓型普通磚應屬可行，如此不僅可達成紙廠無機副產物零污染、零掩埋之目標，亦朝「零廢棄全回收資源循環社會」之願景邁進。

關鍵詞：漿紙產業、冷壓資源化技術、普通磚、無機聚合材料、紙廠無機副產物

壹、前言

造紙產業邁向永續經營的優勢，在於紙與大自然的高度親和力，可以循環不息的一再利用。華紙公司關注資源循環再利用的發展，致力於材料生命週期的循環運用，來減少對天然資源的需求。以一棵樹木創造的循環經濟：努力尋求各種方法將木頭中的纖維衍生出跨足許多產業的產品和應用，並以搖籃到搖籃的思維模式研發，為這些來自漿紙產業製程的副產物創造出嶄新的價值^[1]。造紙原料的木材是固定二氧化碳最佳捕手，紙張纖維透過回收再造可重複使用；製程中的副產物容易回收再利用，或資源化成為新產品，紙廠副產物主要分為二類：有機質經過回收再利用可做作為生質燃料與肥料；無機副產物富含鈣、矽、鋁元素，與水泥的成份近似，適合發展作為綠色建材。華紙公司主要無機副產物產出比例大致為綠泥：飛灰：底渣=7：6：1，目前業已成功透過冷壓資源化技術將上述無機副產物開發作為水泥系建材（再生粗粒料^[2]與符合CNS 382性能要求的普通磚^[3]），如圖1所示。



(a) 再生粗粒料



(b) 普通磚

圖 1 水泥系紙廠無機副產物冷壓型綠色建材

無機聚合材料（Geopolymer）最早是由法國科學家Davidovits在1979年所提出，為一種三維架狀的鋁矽酸鹽物質，其結構為矽氧四面體（ SiO_4 ）與鋁氧四面體（ AlO_4 ），共用氧原子相互鍵結形成Si-O-Al之封閉的架狀結構^[4-5]，為類似沸石（Zeolite）的一種三維架構鋁矽酸鹽材料，故具備優良的力學、防火絕熱、耐酸鹼、抗硫防蝕等性質。其與水泥系材料最大不同是：水泥系材料乃透過水泥水化生成水化產物進而硬固；無機聚合材料則係屬化學鍵結（共價鍵）。無機聚合材料主要為非晶質（Amorphous）或半晶質（semi-crystalline）之物質，此材料在合成的過程中，通常使用鋁矽酸鹽原料（變高嶺土、燃煤飛灰或水淬高爐爐石粉）藉由鹼金屬氫氧化物水溶液或鹼金屬矽酸鹽水溶液使顆粒表面之鈣、矽、鋁離子溶出，形成鋁矽酸鹽聚合膠體，最後再與未反應之固體顆粒進行縮聚作用後，固化形成無機聚合材料，此反應可在常溫下進行^[6]。無機聚合材料之原料選用之範圍相當廣泛，凡是富含鈣、矽、鋁元素之礦物、工業副產物，及廢棄物皆可，惟這些添加物在鹼性溶液中需有良好之溶解度。無機聚合材料之添加物可分為3大類，分別為：(1) 鹼性溶液：以鹼金屬氫氧化物與矽酸鈉溶液為主，其用途主要係將

顆粒表面之鈣、矽、鋁離子溶出，並提供Si作為膠結劑（Binders）；(2) 惰性添加物（Inactive Filler）：惰性添加物主要是選用富含可溶性矽及鋁鹽類之礦物或廢棄物粉末，例如：石英、高嶺土、礦山廢料或廢棄污泥等；(3) 活性添加物（Active Filler）：主要採用如變高嶺土、燃煤飛灰、水淬高爐爐渣粉、廢玻璃等具有活性之添加物，其目的在於加強固結作用。由於無機聚合材料基本組成原料取得容易，凡是富含鈣、矽、鋁元素之礦物、工業副產物，及廢棄物皆可作為無機聚合材料之原料，且製程與設備簡單，於常溫環境下即可進行反應，並具備相當優良的性能，因此相當有潛力成為新一代綠色材料。因此本研究期望透過無機聚合技術，將富含鈣、矽、鋁元素之紙廠無機副產物，進行資源化作為冷壓型普通磚，未來甚至可憑藉無機聚合材料的優良性能，將紙廠無機副產物開發成為更高值化的綠色建材，如此不僅可達成紙廠無機副產物零污染、零掩埋之目標，亦朝「零廢棄全回收資源循環社會」之願景邁進。

貳、實驗方法

2-1 實驗材料

1. 鹼性溶液（鹼液）：購自由國立臺北科技大學鄭大偉特聘教授研究團隊所技術移轉之欣得實業股份有限公司，NaOH 濃度為 10M； $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 1.28； $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，其比重約為 1.35。
2. 綠泥：係漿紙產業製漿程序中的白液（主要成份為氫氧化鈉與硫化鈉）添加於蒸解釜中蒸解木片，蒸煮後由木材溶出黑液，透過回收鍋爐燃燒發電後（見圖 2），剩餘熔融物的無機物，成份主要為碳酸鈉、硫化鈉，並含有少量的氫氧化鈉和硫酸鈉等。溶解在水中可用石灰苛化，回收氫氧化鈉。因成分中有少量的氫氧化鐵，呈墨綠色，故稱為綠液。綠液回收至水消機與石灰進行苛性化反應後，而綠液中顆粒部分經洗滌、沉澱後的墨綠色底泥，再與石灰廢渣經壓濾脫水後（含水率約 50-55 %）所產出之紙廠無機副產物，簡稱為綠泥，如圖 3 所示。本研究中綠泥同時扮演二種角色，除於骨材系統中當作填充材與飛灰填塞底渣的空隙外，於漿體系統中亦視為膠結材料。綠泥比重約為 2.44，由組成成分 XRF（見表 1）與 XRD（見圖 4-(a)）分析結果顯示，綠泥主要成分為 CaCO_3 。

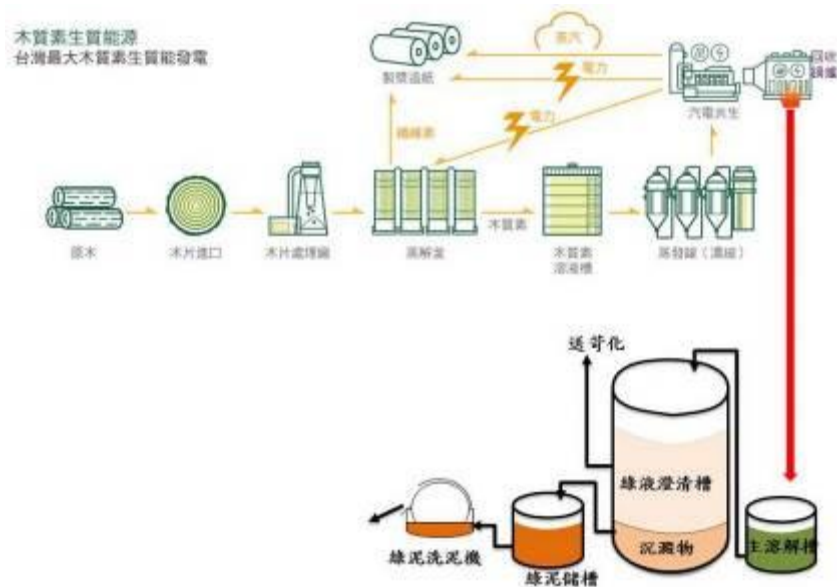


圖 2 綠泥之產出製程



(a) 壓濾後



(b) 烘乾後



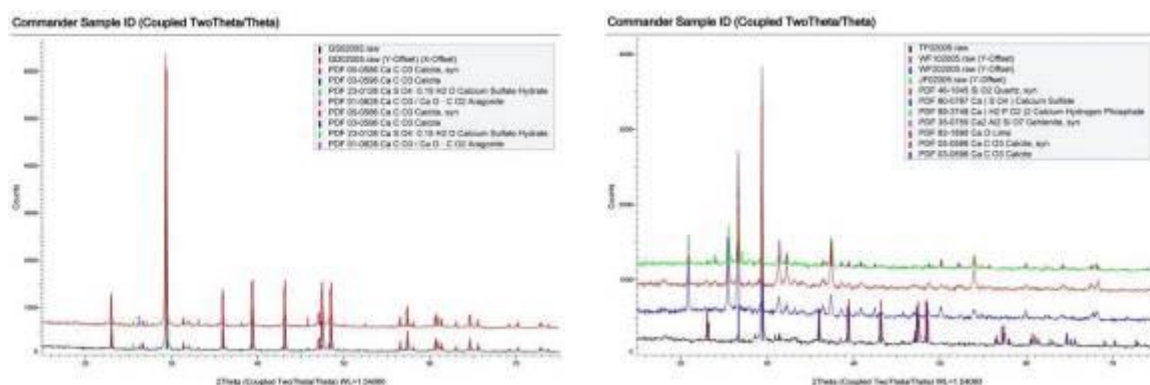
(c) 烘乾破碎後

圖 3 綠泥照片

表 1 紙廠無機副產物 XRF 分析結果

元素	綠泥	飛灰	底渣	元素	綠泥	飛灰	底渣	元素	綠泥	飛灰	底渣
Mg	46042	ND	ND	Fe	9700	30153	36979	Nb	ND	8	10
Al	2173	45041	25236	Co	ND	ND	558	Mo	ND	ND	ND
Si	8965	28049	46441	Ni	ND	ND	ND	Ag	ND	ND	ND
P	2909	1512	1571	Cu	ND	309	190	Cd	ND	ND	ND
S	4218	2942	5555	Zn	118	647	325	Sn	ND	34	35
Cl	ND	5037	5545	As	ND	53	ND	Sb	ND	ND	ND
Ca	348440	297551	176980	Se	ND	ND	ND	Ba	364	782	474
Ti	ND	ND	5252	Rb	ND	22	46	Ce	392	ND	ND
V	ND	ND	ND	Sr	891	286	275	W	ND	ND	ND
Cr	ND	ND	ND	Y	ND	ND	21	Hg	ND	ND	ND
Mn	ND	ND	ND	Zr	ND	355	122	Pb	ND	53	ND

註：元素濃度(PPM)



(a) 綠泥

(b) 華紙公司台東廠飛灰

圖 4 華紙公司綠泥與台東廠飛灰 XRD 分析結果

3. 飛灰：採用華紙公司台東廠流體化床鍋爐所衍生之無機副產物。為配合減少燃燒生煤，由回收紙分離的紙渣廢料製成固態廢棄物衍生燃料（RDF）作為替代燃料，取代部分煤作為燃料混燒，因此所衍生之飛灰係屬混燒煤灰，如圖 5 所示。其比重約為 2.31，由組成成分 XRF（見表 1）與 XRD（見圖 4-(b)）分析結果顯示，飛灰主要成分為 CaO 、 SiO_2 ，及 CaCO_3 。



(a) 烘乾前



(b) 烘乾後

圖 5 華紙公司台東廠飛灰照片

4. 底渣：同採華紙公司台東廠流體化床鍋爐所衍生之無機副產物（見圖 6），其比重約為 2.62，吸水率為 7.28%，粒徑分佈符合 CNS 1240 之規定，如圖 7-(a)所示。由組成成分 XRF（見表 2）與 XRD（見圖 7-(b)）分析結果顯示，底渣組成成分則較為複雜，主要成分為 SiO_2 。



(a) 烘乾前

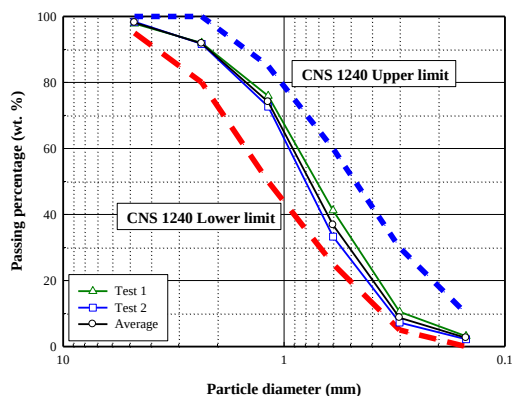


(b) 烘乾後

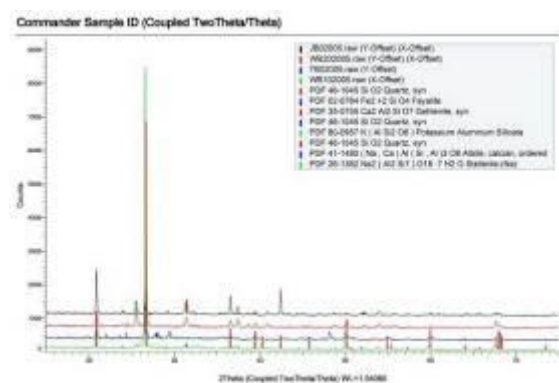
圖 6 華紙公司台東廠底渣照片

2-2 冷壓資源化製磚技術

本研究採用內政部建築研究所補助計畫所開發成功的冷壓資源化製磚技術^[7]，冷壓資源化技術^[8]乃基於材料基本原理（愈緻密其強度等相關性質愈佳）^[9]與複合材料^[10]的觀念，導入水泥化學及卜作嵐材料間互制特性^[11-12]，並依據再生資材的材料特性，藉以改善其界面性質，所開發出兼具低耗能、低 CO₂ 排放的資源化技術。此製磚方式係利用自行開發的冷壓型製磚模具（見圖 8），經簡單的填料、加壓成型、退模等程序，即可成功完成冷壓型砌塊、普通磚，或高壓地磚製作，如圖 8 所示。



(a) 級配曲線



(b) XRD 分析結果

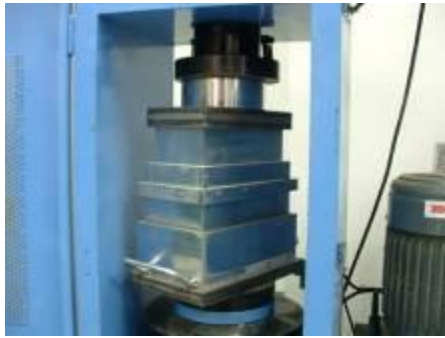
圖 7 華紙公司台東廠底碴級配曲線與 XRD 分析結果



Step 1：填料



Step 2：安裝加壓模



Step 3：加壓成型



Step 4：退模

圖 8 冷壓資源化技術製磚程序

叁、結果與討論

3-1 配比設計

本研究採用紙廠無機副產物所開發的無機聚合系冷壓型普通磚配比，依據經再演繹後的緻密配比邏輯所設計^[13]，乃由於緻密配比邏輯係根據水泥系材料所發展，為使其能滿足無機聚合系材料配比設計使用，故根據組成材料將緻密配比邏輯進行再演繹，而紙廠無機副產物水泥系與無機聚合系普通磚組成材料之差異如表 2 所示。為增加綠泥的使用率，並參考水泥系紙廠無機副產物冷壓型普通磚研究成果^[3]，於骨材系統中，選擇綠泥填塞飛灰的比例 (α) = 0.50；綠泥與飛灰混合料填塞底渣的比例 (β) = 0.80，如公式 (1) 與 (2) 所示。於漿體系統中選用參數為：綠泥：飛灰 = 9：1。表 3 為本研究製作紙廠無機副產物冷壓型普通磚所使用之無機聚合材料配比，表 3 中顯示，本研究採用紙廠無機副產物與冷壓資源化技術，所開發之無機聚合系冷壓型普通磚固體組成材料中綠泥、飛灰、底渣等再生資材可達 100%，而綠建材評定基準^[14]中對普通磚僅要求：「回收材料乾重比率 40% 以上」。因此本研究不僅可有效增加紙廠無機副產物再生資材之使用率，亦可朝紙廠無機副產物零污染、零掩埋之目標邁進。

表2 紙廠無機副產物冷壓型普通磚組成材料之差異

	水泥系	無機聚合系
骨材系統	綠泥、飛灰、底碴	綠泥、飛灰、底碴
漿體系統	水泥、綠泥、強塑劑、水	鹼液、綠泥、飛灰、綠泥含水量

$$\alpha = \frac{W_{\text{綠泥}}}{(W_{\text{綠泥}} + W_{\text{飛灰}})} \text{-----式 (1)}$$

$$\beta = \frac{W_{\text{綠泥}} + W_{\text{飛灰}}}{(W_{\text{綠泥}} + W_{\text{飛灰}}) + W_{\text{底碴}}} \text{-----式 (2)}$$

表 3 無機聚合系冷壓型普通磚配比 (kg/m³)

配比編號	10M 鹼液	飛灰	綠泥含水率調整			底碴
			含水率	綠泥	綠泥含水量	
β=0.80_GP	167.38	659.90 (42.96 %)	19.13 %	560.34 (36.47 %)	66.75	316.00 (20.57 %)

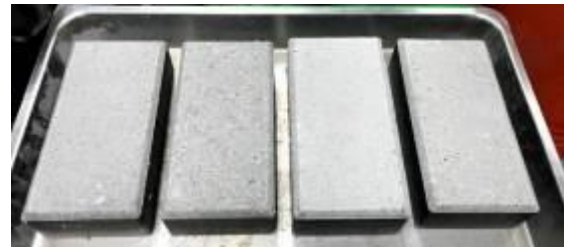
註：() 中係指各組成固體材料之重量百分率

3-2 成型應力、綠泥含水率，及液灰比探討

由於冷壓資源化技術其成型應力與組成材料含水率之相互關係，影響資源化產品性質甚鉅：因為當加壓成型時，若組成材料含水率太低，則不易成型，即使採用較高的成型應力，於解壓過程，將因毛細孔隙吸水產生張力作用，使得資源化產品產生裂縫；反之當加壓成型時，若組成材料含水率過高，於加壓成型過程容易產生壓密排水現象^[15]，所排出的水將形成弱面，進而影響資源化產品相關性質。配合華紙公司試驗模廠既有之製磚設備，故本研究成型應力為12.5 MPa，惟本研究係採用紙廠無機副產物與無機聚合技術開發冷壓型普通磚，於無機聚合物系統中，並未直接使用水，係使用鹼液與液灰比 (L/S) 來控制工作性，且紙廠無機副產物中綠泥係具水份的再生資材，而本研究乃先期可行性研究，故骨材系統中綠泥含水率係根據前期水泥系普通磚^[3]研究成果採用35.0 %，而漿體系統中綠泥含水率則為0.0 %；液灰比 (L/S) 亦依據水泥系紙廠無機副產物冷壓型普通磚配比，利用體積法反推計算後選擇0.60，進行無機聚合系冷壓型普通磚試拌與試壓，試壓結果顯示，本研究採用紙廠無機副產物與無機聚合技術，經再演繹後的緻密配比邏輯所設計的配比，可成功壓製無機聚合系冷壓型普通磚，如圖9所示。



甫製作完成時



靜置 24 小時後

圖 9 無機聚合系冷壓型普通磚試壓結果

3-3 普通磚抗壓強度

本研究依據CNS 382，分別於齡期7、28、365天進行無機聚合系冷壓型普通磚抗壓強度試驗，試驗結果如圖10所示。圖中顯示無機聚合系冷壓型普通磚抗壓強度隨著齡期持續成長，係由於隨著齡期成長，無機聚合反應持續進行，且由於配比中添加大量卜作嵐材料（飛灰），配合卜作嵐反應^[16]，藉以填塞內部孔隙，使其更緻密化，並改善其介面性質，進而使得無機聚合系冷壓型普通磚抗壓強度隨齡期的增長而持續成長。由此亦可研判，本研究採用紙廠無機副產物與無機聚合技術所製作之冷壓型普通磚，其內部應無因膨脹作用而產生微裂縫，進而影響其抗壓強度之情事發生。另圖中亦顯示於齡期28天時，無機聚合系冷壓型普通磚即可符合CNS 382中3種磚抗壓強度性能要求；於齡期365天（1年），可滿足CNS 382中2種磚之抗壓強度要求。

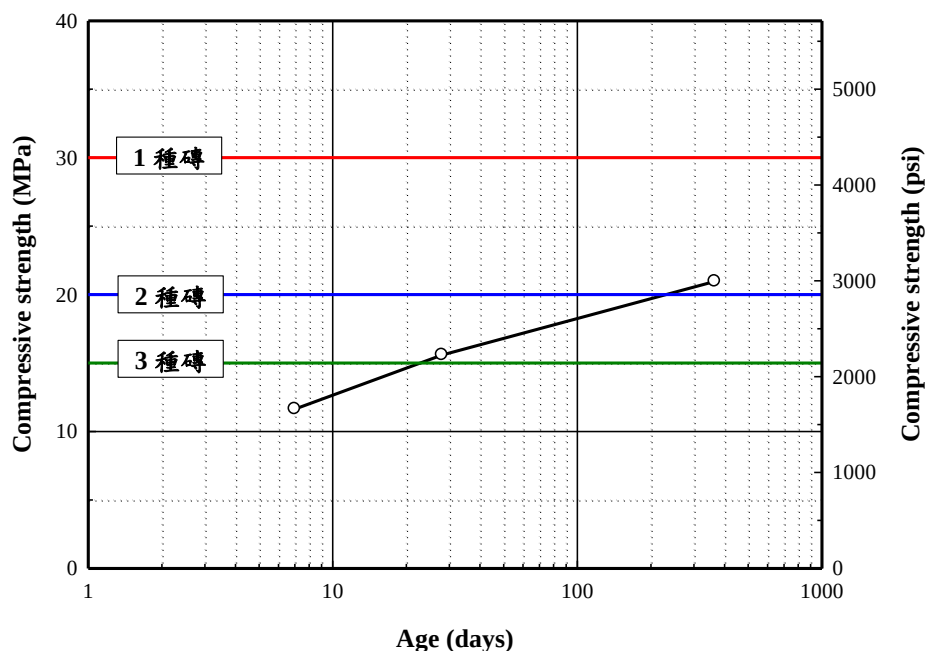


圖 10 無機聚合系冷壓型普通磚抗壓強度成長關係圖

肆、結論與建議

1. 經再演繹後的緻密配比邏輯亦可滿足無機聚合材料配比設計使用，即使對於含水分的再生資材亦適用之。
2. 本研究採用無機聚合與冷壓技術，資源化紙廠無機副產物作為冷壓型普通磚，可有效增加紙廠無機副產物的使用率，除底碴僅作為填充材使用外，綠泥與飛灰均同時扮演二種角色：膠結材與填充材。所開發之無機聚合系冷壓型普通磚固體組成材料中綠泥、飛灰、底碴等再生資材可達 100 %，而綠建材評定基準中對普通磚僅要求：「回收材料乾重比率 40 % 以上」。因此本研究可有效增加紙廠無機副產物再生資材之使用率。
3. 配合華紙公司試驗模廠既有之製磚設備，故本研究成型應力為 12.5 MPa，而本研究屬先期可行性研究，故骨材系統中綠泥含水率係根據前期水泥系普通磚研究成果採用 35.0 %，而漿體系統中綠泥含水率則為 0.0 %；液灰比 (L/S) 亦依據水泥系紙廠無機副產物冷壓型普通磚配比，利用體積法反推計算後選擇 0.60，雖可成功壓製無機聚合系冷壓型普通磚，但整體而言似乎稍乾了點，未來可藉由液灰比 (L/S) 或漿體系統中綠泥含水率進行調整修正之。
4. 無機聚合系冷壓型普通磚抗壓強度試驗結果顯示，抗壓強度隨著齡期持續成長，於齡期 28 天時可符合 CNS 382 中 3 種磚抗壓強度性能要求；於齡期 365 天 (1 年) 則可滿足 2 種磚之抗壓強度要求。由此亦可研判紙廠無機副產物中的綠泥與飛灰，具備作為無機聚合材料原料的潛力，惟係屬活性或惰性添加物，應進一步研究探討，如此方能更適材適所地資源化紙廠無機副產物。
5. 無機聚合材料具備優良的力學、防火絕熱、耐酸鹼、抗硫防蝕等性質，未來可透過無機聚合與冷壓資源化技術，將紙廠無機副產物資源化成為更高值化的功能性建材。

誌 謝

本研究有幸獲得中華紙漿股份有限公司經費支持，並採用內政部建築研究所補助案 - 「再生綠建材開發與推廣應用計畫 (一) (二) (三)」，與經濟部科技研究發展專案-學研聯合研究計畫 98-EC-17-A-10-S2-0063 所開發的冷壓資源化技術，方便本研究得以順利完成，謹此致謝。

參考文獻

- [1] 中華紙漿股份有限公司(2020)：2019 永續報告書，台北。
- [2] 蔡志達、李昂軒、施承瑋、戴佳雄、羅嚮盛、張祖恩(2020)：「利用冷壓技術開發紙廠無機副產物作為再生粗粒料之可行性研究」，2020 資源與環境學術研討會論文集，第 237-250 頁，花蓮。
- [3] 蔡志達、李昂軒、施承瑋、戴佳雄、羅嚮盛、張祖恩(2020)：「透過冷壓技術資源化紙廠無機副產物作為普通磚」，2020 資源與環境學術研討會論文集，第 251-264 頁，花蓮。
- [4] Xu H. and Van Deventer J. S. J. (2000): Thegeopolymerisation of alumini-silicate minerals, *International Journal Minerals Process*, 59, pp. 247-266.
- [5] Schmücker M. and Mackenzie K. J. D. (2005): Microstructure of sodium polysialatesiloxo geopolymer, *Ceramics International*, 31, pp. 433-437.
- [6] Hajimohammadi A., Provis J. L., Van Deventer J. S. J. (2008): One-Part geopolymer mixes from geothermal silica and sodium aluminate, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47, pp. 9396-9405.
- [7] 張祖恩、陳文卿、蔡志達等人(2011)：建築廢棄物再生循環技術開發與推廣應用計畫，內政部建築研究所補助計畫成果報告，台北。
- [8] Tsai, C. T. (2012): *Sintering of Ceramics - New Emerging Techniques*: Chapter 5 Cold-Bonding Technique – A New Approach to Recycle Innocuous Construction Residual Soil, Sludge, and Sediment as Coarse Aggregates, InTech, Rijeka, Croatia.
- [9] Dowling, N. E. (1993): *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*, Englewood Cliffs, NJ.
- [10] Gibson, R. F. (1994): *Principles of composite material mechanics*, Detroit, Michigan.
- [11] Mindess, S. and J. F. Young (1981): *Concrete*, Englewood Cliffs, NJ.
- [12] Mehta, P. K. (1986): *Concrete-structure, properties and materials*, Englewood Cliffs, NJ.
- [13] 蔡志達(2020)：無機聚合材料配比設計方法推演與應用，*土木水利*，第四十七卷，第二期，第 50-56 頁。
- [14] 何明錦(2015)：綠建材解說與評估手冊 2015 年更新版，內政部建築研究所，台北。
- [15] Holitz, R. D. and W. D. Kovacs (1986): *An introduction to geotechnical engineering*, New York.
- [16] 李韋皞（鄭大偉指導，2017）：微結構發展對於無機聚合材料性質的影響研究，國立臺北科技大學工程學院工程科技博士論文，台北。

利用電化學法處理簡易自來水設施之水質改善特性研究

Discussion the improvement of water quality in simple tap water source facilities by the indirect electrochemical method

何志軒^{1*} 畢宜翔²

Chih-hsuan Ho¹ Yi-Xiang Bi²

1 大漢技術學院土木工程及環境資源管理系 副教授

Associate Professor, Department of Civil Engineering & Environmental Resource Management, Institute of Dahan Technology

2 大漢技術學院土木工程與環境資源管理系 研究生

Graduate student, Department of Civil Engineering and Environmental Resource Management, Dahan Institute of Technology

* Corresponding author: ho@ms01.dahan.edu.tw

摘要

對於山區簡易自來水未經過衛生處理及消毒監控下，山泉水經地表逕流為開放性水質，長期暴露在環境之下有許多水生動、植物棲息，較容易遭受來自排泄物衍生出的微生物、寄生蟲等污染導致細菌孳生，因此山區水質為大腸桿菌較為嚴重。

本研究主要針對花蓮地區山區的簡易自來水統，進行水質改善的試驗。實驗對象分別以花蓮縣壽豐鄉米棧村及玉里鎮春日里等二處之簡易自來水設施，以氯化鈉(NaCl)為電解質，進行電化學氧化法殺菌方式淨水處理的效果探討，期能做為山區一級公共用水的使用，研究內容分別為氯化鈉(NaCl)濃度間的關係、石墨電極板片數、電極頭夾法、餘氯及電化學氧化方法、大腸桿菌去除效果，提供山區民眾穩定與安定之用水水質。

實驗條件為利用電化學氧化法，添加不同濃度之氯化鈉，以直流電壓、連續通電時間探討不同濃度電解液之 pH 氫離子活性濃度、氧化還原電位、分光光度計吸收值、導電度及大腸桿菌去除效果。

實驗結果顯示，在實驗的石墨電極板間電壓差為 10v(伏特)、總電壓 30v(伏特)，石墨電極板間電壓差為 6、7v(伏特)、總電壓 30v(伏特)。直流電連續通電 10、20 分鐘儲水塔試驗：以 1:10000 (1ml 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 78.13% 以上。直流電連續通電 20 分鐘，水桶試驗以 1:10000 (1ml 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 93.3% 以上、1:7500 (1ml 電化學氧化劑：7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 100% 完全去除。

關鍵詞：電化學法、食用鹽、氯化鈉、簡易自來水設施

一、前言

以花蓮縣地區而言，部分民眾居住山區，因受地形影響，大多數居民都以地域聚落或是山區分散之地形區域，地形環境限制條件，無法供應到每位山區居民使用設施完善的自來水[2-3]；以民國 108 年為例[1]，花蓮縣 66 處簡易自來水設施供給民生用水，分別散佈於鳳林鎮、玉里鎮、壽豐鄉、光復鄉、瑞穗鄉、豐濱鄉、富里鄉、秀林鄉、萬榮鄉、卓溪鄉等 10 鄉(鎮)，約有 2 萬餘人需依賴簡易自來水供水。依花蓮縣府委託顧問公司辦理 66 處簡易自來水事業的水質檢測結果得知，大腸桿菌不合格情形較為嚴重，至今大腸桿菌不合格情形並未能得以全部改善完成。

水質改善處理以物理、化學與生物方法[6-23]，去除水中的物質及大腸桿菌[5]。本研究目的以電化學氧化法，作為大腸桿菌去除，水質改善之方法，使山區居民使用簡易自來水水源可以安心使用。

本實驗以電化學氧化法處理利用 NaCl(氯化鈉) 為電解質經由石墨板連續通電方式產生次氯酸之氧化劑，處理山區原水中的大腸桿菌，以最佳的條件之下能達到大腸桿菌去除。

二、實驗方法

2-1 實驗材料藥品及儀器設備

氯化鈉、大腸桿菌/大腸菌群快檢片、食用鹽(市售碘鹽)、水中餘氯檢測試劑、氫離子濃度指數計、氧化還原電位偵測計(Oxidation Reduction Potential ；ORP meter)、分光光度計(Spectrophotometer UV/Vis)、電極板、電化學壓克力反應槽、電源供應器、恆溫培養箱、電子分析天平、電磁加熱攪拌器、蒸餾水機

2-2 實驗架構

本研究為實驗室選定最佳濃度、石墨版數量、電壓、時間以便食用鹽取代 NaCl(氯化鈉)，



至實地場所做大腸桿菌去除率之探討；主要研究流程如圖 1 所示。

圖 1 實驗架構圖

2-3 實驗方法與實驗條件

2-3-1 間接電化學法

電化學反應槽濃度間的變化調配不同濃度之 NaCl 氯化鈉(g)與蒸餾水溶液(L)，以每公升不同濃度電解液(g/L)，倒入電化學反應槽 300ml 試驗每公升不同濃度 NaCl(氯化鈉)與蒸餾水混合溶液，並設定固定極板間電壓差 10V(伏特)、連續通電訂定(10、20、30 分鐘)等 3 個時段，通電後測定電解液合計 30 組水樣檢測水中 pH(氫離子活性濃度)、導電度、ORP(氧化還原電位)、溫度變化關係。

石墨版排列數量及通電方式，本實驗以差異性明顯的兩組不同濃度連續通電 10、20 分鐘，固定電壓、選定最佳石墨版排列方式訂定 4 種不同濃度以利反向探討濃度及時間最佳效果。

2-3-2 間接電化學法大腸桿菌試驗檢測

(1)實驗室模擬

最佳石墨板數量、夾法選定：將食用鹽差異性較為明顯的兩種濃度，選定石墨板數量、夾法測定最佳方式，將原水以每公升濃度電解液(g/L)，倒入電化學反應槽 1L(公升)試驗濃度(g)與蒸餾水(L)混合溶液電解水溶液，以相同電壓、時間，不同的石墨版數量、夾法以 1:1000 (使用無菌吸管各抽取 1ml 電解水溶液氧化劑，滴定各 1000ml 水溝水均勻混合) 之混合水溶液使用無菌吸管各抽取 1ml 水樣檢測大腸桿菌菌落數。

最佳濃度選定與最佳的石墨版數量、夾法反向探討濃度間以訂定區分四種條件較為合適的濃度作為大腸桿菌快篩片菌落數培養檢測結果，倒入電化學反應槽 1L(公升)試驗濃度(g)與蒸餾水(L)混合溶液，做濃度間 1:1000 (使用無菌吸管各抽取 1ml 電解水溶液氧化劑，滴定各 1000ml 水溝水均勻混合)之混合水溶液使用無菌吸管各抽取 1ml 水樣檢測大腸桿菌去除效果最佳之濃度，以利爾後實場實驗之條件。

實場放大倍率本實驗至花蓮縣壽豐鄉米棧村採取之山泉水，於實驗室以最佳的條件之電解水溶液氧化劑做為放大倍率分別為 1:1000、1:2000、1:3000、1:4000、1:5000、1:7500、1:10000 (電解水溶液氧化劑 ml：山泉水 ml)，之混合水溶液使用無菌吸管各抽取 1ml 水樣檢測大腸桿菌菌落數，以利實地場所實驗至多倍率的條件。

(2)實地場所實驗

將實驗儀器至實地場所，以壽豐鄉米棧村為例，放大倍率 1:10000 (電解水溶液氧化劑 ml：山泉水 ml)、1:7500 (電解水溶液氧化劑 ml：山泉水 m;)，故採取 10 公升、7.5 公升的原水(L)與最佳條件之電解水溶液氧化劑，分別與山泉水混合，採取混合水溶液使用無菌吸管各抽取 1ml 水樣檢測大腸桿菌菌落數。

將實驗儀器至實地場所，分別為花蓮縣壽豐鄉米棧村儲水塔為 100 噸(T)、玉里鎮春日村儲水塔為 300 噸(T)為實驗地點，電解水溶液氧化劑：放大倍率 1:10000(電解水溶液氧化劑 L：山泉水 L)，故分別到入米棧村 10 公升、春日村 30 公升與山泉水混合等待時間 10 分鐘，至排放口採取混合水溶液使用無菌吸管各抽取 1ml 水樣檢測大腸桿菌去除效果。

三、結果與討論

3-1 氯化鈉(NaCl)、食用鹽濃度間的變化

3-1-1 不同濃度及時間的差異性

電源供應器設定固定石墨電極板間電壓 10v(伏特)，直流電連續通電電解後在 10 分鐘、20 分鐘、30 分鐘，探討不同時間的情況下濃度間 pH、ORP、導電度、溫度變化，掌握不同濃度間在直流電連續通電的情形之下的穩定性，作為後續實驗電解質的濃度選定、氧化分解、通電電解中電流密度之基本條件。由圖 2 實驗過程所監測各項數據(pH、溫度、導電度及氧化還原電位值)等資料，可得如下結果，分別說明如下：

溫度：與連續通電時間、濃度、電流密度成正比關係。

pH 值：隨著連續通電時間拉長，濃度就越下降，而濃度低者為酸性；濃度高者為鹼性。

導電度：連續通電 10、20、30 分鐘測得結果，電流密度與連續通電時間無關係，與水中濃度電解質密度相關。

氧化還原電位：結果 1g、2g、8g、9g、10g/L NaCl(氯化鈉)不穩定，反觀 3~7 g/L NaCl(氯化鈉)效果為良好，得濃度越高效果並不理想。

係因連續通電電解 30 分鐘，於中高溫狀態情形石墨電極板表面剝落嚴重，考量未來以此材質作為電極板，耗材損失利益、電解過程氧化還原電位差異導致實驗數據準性部分之虞，故不採用連續通電 30 分鐘。

符合電解質取得便利、當地居民所知原料，以乾基 95% 為 NaCl(氯化鈉)之食用鹽做為電解質；因食用鹽成份中含有超微量金屬，電解過程中激發離子態，以分光光譜吸收測定濃度間的變化。實驗室試驗 4-3 後之實驗均使用食用鹽為電解質，以符合實地場所之需求。

實驗中所使用反應槽為 300 毫升（高:12 公分、寬:10 公分、長:3 公分），正負極石墨電極板（高:14 公分、寬:10 公分、厚度:0.2 公分）、極板間距:3 公分、石墨板單面與水接觸面積:10.95 平方公分。

因應實地場所所需氧化電解液量龐大，故實驗中所使用反應槽為 10 公升（高:15 公分、寬:20 公分、長:50 公分），石墨電極板（高:20 公分、寬:50 公分、厚度:0.5 公分）、極板間距:3 公分、石墨板單面與水接觸面積:27.386 平方公分。

已知 (H) 石墨板單面與水接觸面積較 (G) 多，致電流密度改變，加入石墨板數量參數考量。因反應槽中石墨電極板本身有電阻率因素、水中加入電解質有電流導通通電效果、電極版間因水中導電效果激發本身的通電效果，故以 3-2 實驗作為實際數據依據。

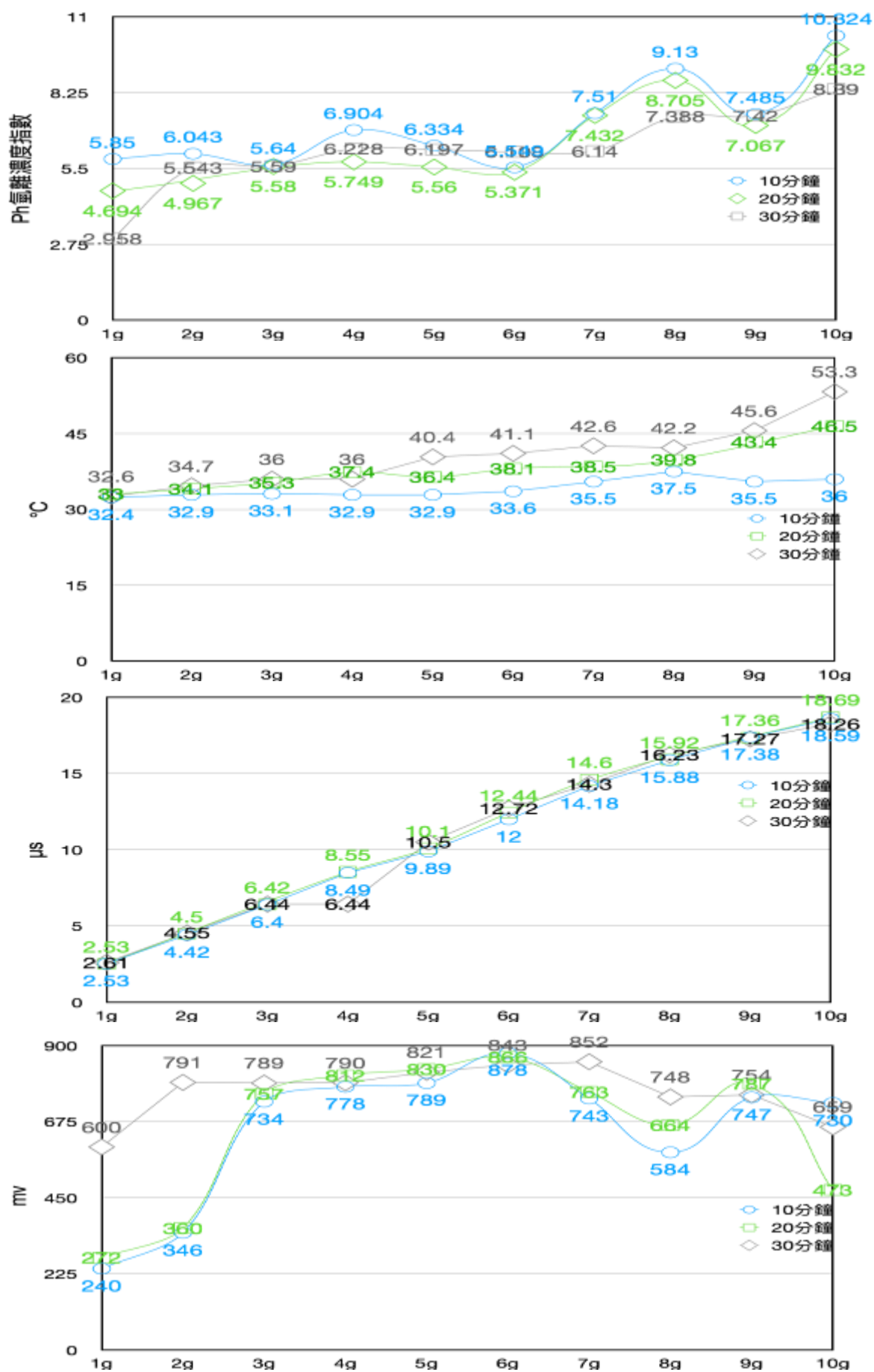


圖 2 不同操作條件下 pH、溫度、導電度及氧化還原電位變化

3-1-2 食用鹽與 NaCl(氯化鈉)分光光譜吸收值變化關係

當濃度 1-10g/L NaCl(氯化鈉)電解液：藥劑純度單一，並無其他微量金屬離子激發，故以高濃度 10g/L NaCl(氯化鈉)，具有強氧化劑效果。

當濃度 1-10g/L 食用鹽電解液：與 NaCl(氯化鈉)差異處，電解過程離子激發態 5g/L 食用鹽吸收值為其最高條件，離子交換區達飽和狀態。

NaCl(氯化鈉)與食用鹽：NaCl(氯化鈉)成分單一，濃度與吸收值成正比上升；而食用鹽中含有超微量金屬因界達電位，電雙層壓縮，離子價數愈高、壓縮力愈強，粒子即可結合產混凝作用；弱酸性陽離子主要離子類型：氫離子、鈉離子，弱鹼性陰離子主要離子類型：自由鹼或氫氧根離子、氯離子。

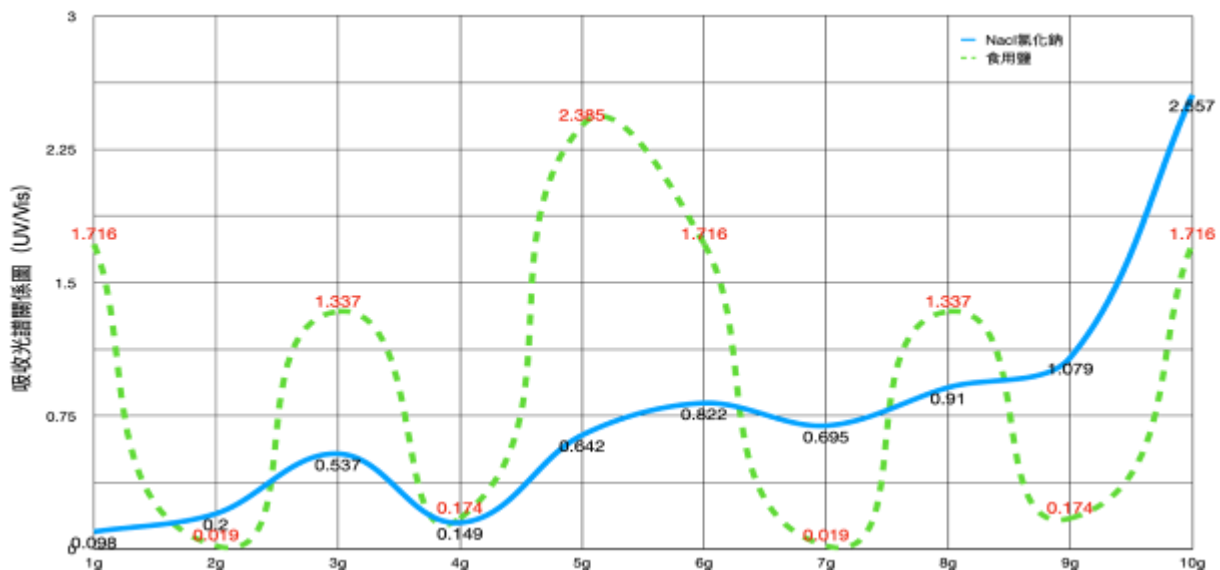


圖 3 1-10g/L NaCl(氯化鈉)與食用鹽電解液之吸收光譜關係圖(波長 293nm)

由圖 3 結果得知，單純以氯化鈉(NaCl)藥劑，經電化學後所產生次氯酸根離子(OCl^-)伴隨不同濃度及通電條件的吸收值變化逐漸增加。而考量未來市售容易取得之便利性，以市售食用鹽為藥劑，因市售食用鹽含有乾基 95%NaCl(氯化鈉)，故檢測此二種不同電解液，以相同條件、方式、檢測作為關係比較，吸收值特定波長 293nm 所得結果二種不同電解質最高峰值甚為相同，可作為未來實地場所實驗之基本條件根據。吸收值相當比較之下，食用鹽中含有超微量金屬，電解過程激發離子態，對於大腸桿菌去除效果有所幫助，水中懸浮物體有混凝效果。

3-2 石墨電極板間數量、夾法的影響

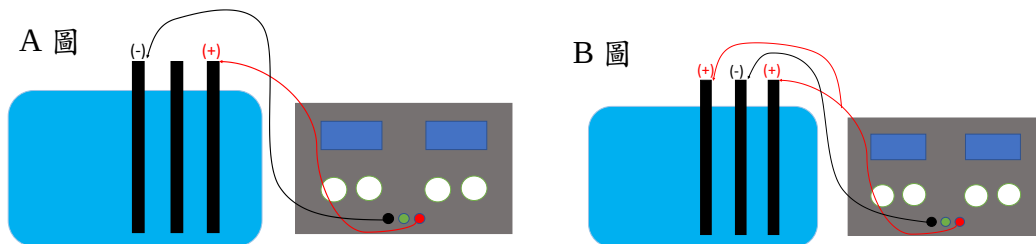
3-2-1 石墨電極板數量、夾法選定

因 3-1 實驗中發現直流電連續通電 30 分鐘發現石墨粉剝落嚴重，效果不如預期，故本次實地場所實驗連續通電時間訂定為 10、20 分鐘。本章節研究所用石墨電極板為長:50 公分、寬:20 公分、厚度:0.5 公分，相較於 3-2 實驗中所使用之石墨電極板體積來的龐大，石墨電極板電阻率受其影響，實驗以食用鹽二種差異性明顯之濃度 2g/L、5g/L，為選定最佳石墨電極板數量、電極頭夾法檢測大腸桿菌去除效果作為實地場所實驗之條件。

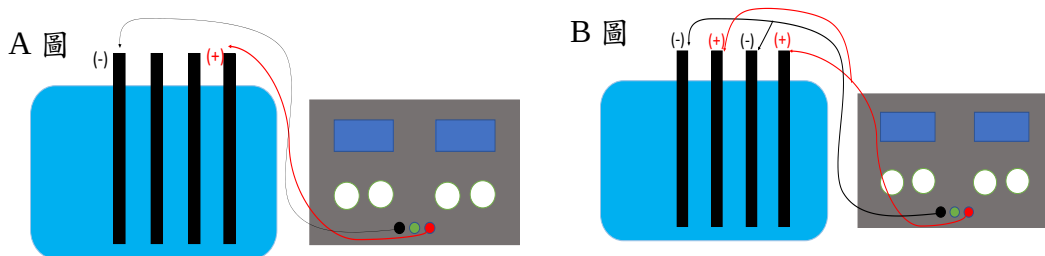
3-2-2 石墨電極板數量、夾法選定探討

實驗結果得知，以 (5 夾 2) 石墨電極版數量:5 片、左正(+)右負(-)之排列方式及夾法較為合適，從氧化還原電位做為參數值，所得數值穩定性佳，以大腸桿菌快篩做實際實驗作為依據，檢測石墨電極板排列方式對大腸桿菌去除效果，作為實地場所實驗所得重要條件之一。然而 pH 氫離子離濃度指數影響電化學氧化劑含量中之 HOCl(次氯酸)，消毒效果較 Ocl-(次氯酸根離子)強 80 倍，pH 效果較好之操作範圍為 5~7.5。如圖 4 為不同電極板數量及不同夾法示意。圖 5 所示為本次實驗設計時電化學反應槽所監測各項數據(pH、溫度、導電度及氧化還原電位值)等資料各項操作條件。

三片：[A 圖]右正(+)左負(-)、[B 圖]正(+)負(-)正(+)



四片：[A 圖]右正(+)左負(-)、[B 圖]負(-)正(+)負(-)正(+)



五片：[A 圖]左正(+)右負(-)、[B 圖]左正(+)中負(-)右正(+)、[C 圖]正(+)負(-)正(+)負(-)正(+)

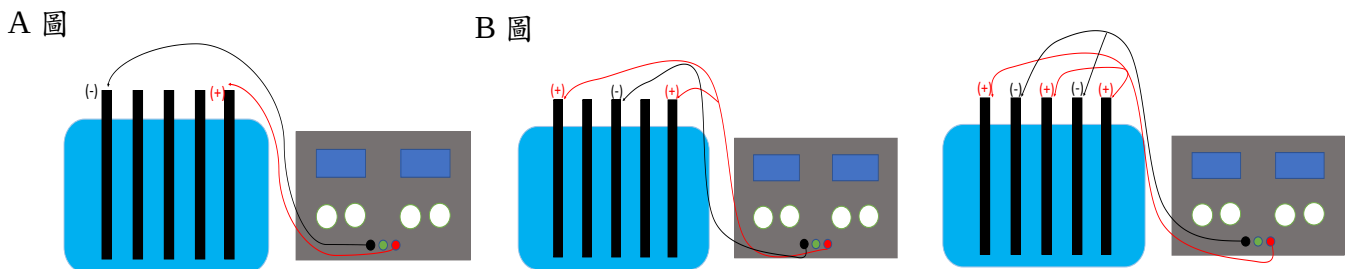


圖 4 不同電極板數量及不同夾法示意圖

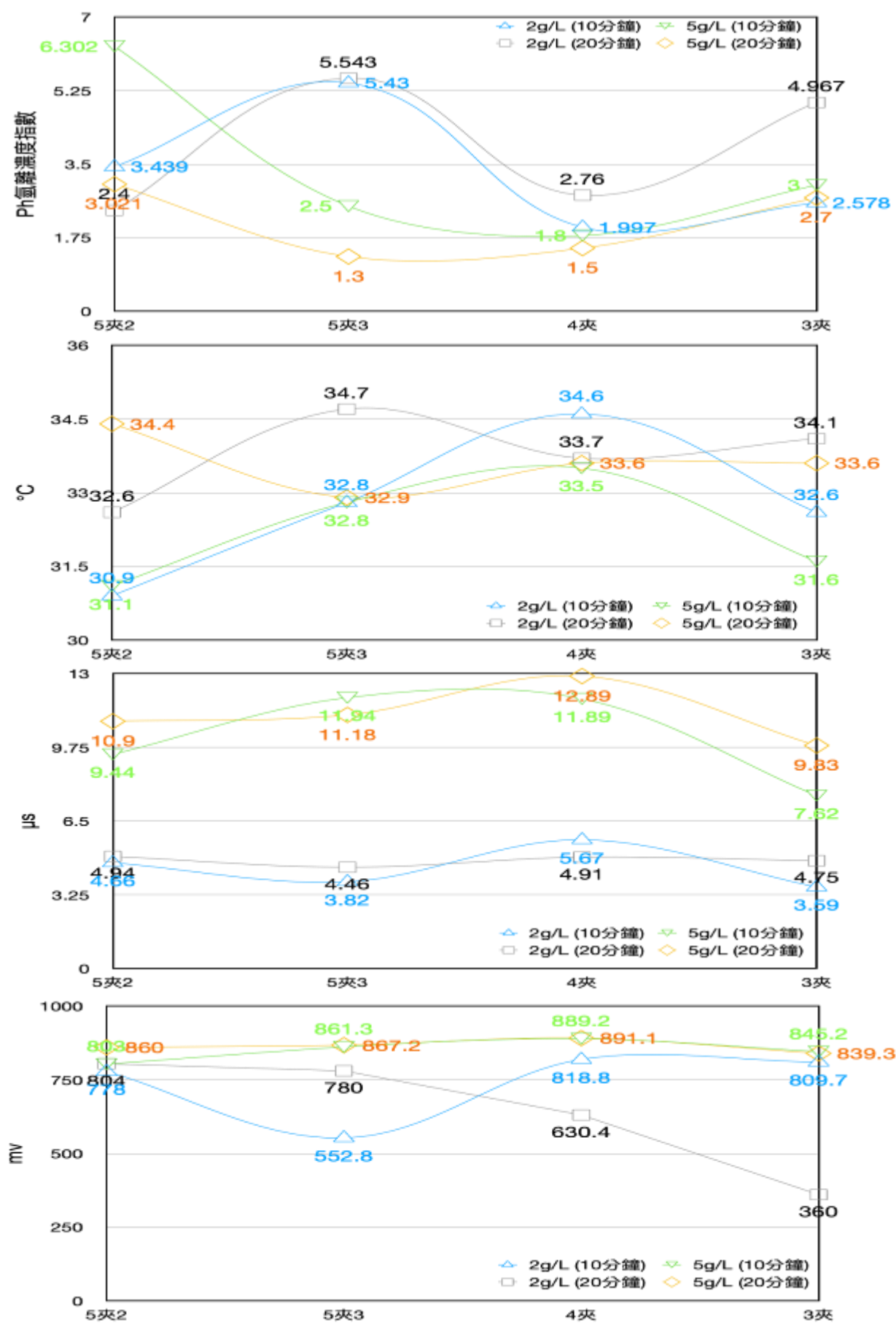


圖 5 石墨電極板不同數量及夾法

石墨電極板間差異性對大腸桿菌去除效果

經直流電連續通電時間至 10 分鐘：由大腸桿菌快篩片檢驗效果，以 1:1000 大腸桿菌去除效果(1ml 電化學氧化劑：1000ml 山泉水)，原水(E.coli count)中大腸桿菌總菌落數含量為 5200CFU/100ml。其每公升 5g/L 食用鹽電化學氧化劑唯(5 夾 3)尚有大腸桿菌未完全去除；而每公升 2g/L 食用鹽電化學氧化劑大腸桿菌(5 夾 2)、(5 夾 3)未完全去除，其於二種排列方式對大腸桿菌完全去除如圖 6 結果。

經直流電連續通電時間至 20 分鐘：其每公升 5g/L 食用鹽電化學氧化劑(3 夾 2)與通電時間 10 分鐘發生變異如圖 7 結果顯示，大腸桿菌並未完全去除。避免實驗數據失真導致爾後實驗走向不確定性，然而以大腸桿菌總菌落數較多的溝渠水實施複查檢驗，以利本研究主軸之重要依據及條件。

主要目的為尋求最佳排列方式，本次試驗採取原水(E.coli count)地點與前者不同，採用溝渠水為複查實驗。此原水(E.coli count) 大腸桿菌總菌落數含量為 8800CFU/100ml 與前者不同地方在於總菌落數中含有大腸桿菌群所干擾，而電化學氧化劑去除大腸桿菌群較為費力。經試驗結果以濃度較為穩定的每公升 5g/L 食用鹽電化學氧化劑，結果顯示如圖 8 結果顯示(5 夾 2)得以 1:1000(1ml 電化學氧化劑：1000ml 溝渠水)；相對於(5 夾 3)、(4 夾 2)、(3 夾 2) 以 1:100(1ml 電化學氧化劑：100ml 溝渠水)即有大腸桿菌尚未去除。

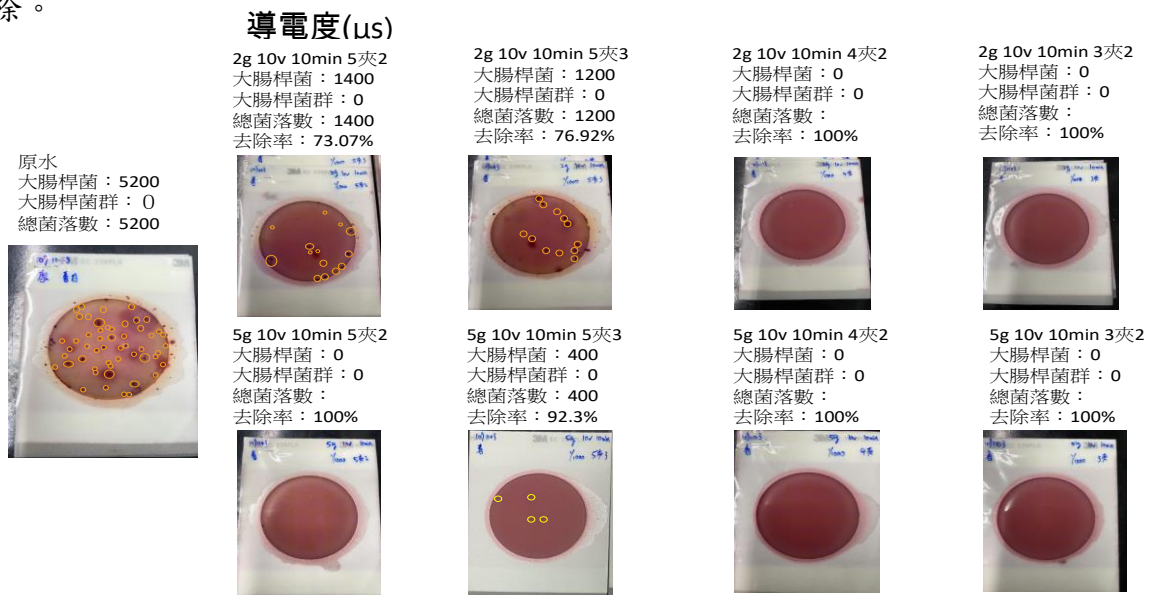


圖 6 石墨電極板間差異性連續通電 10 分鐘對大腸桿菌去除效果

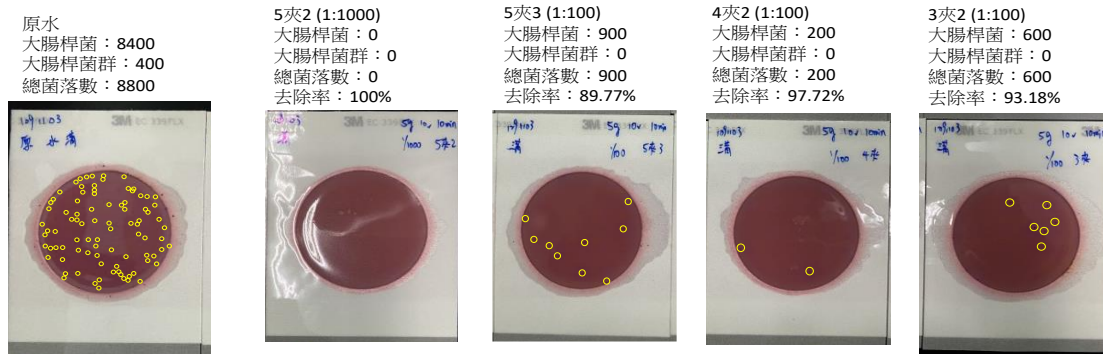


圖 7 石墨電極板間差異性連續通電 20 分鐘對大腸桿菌去除效果

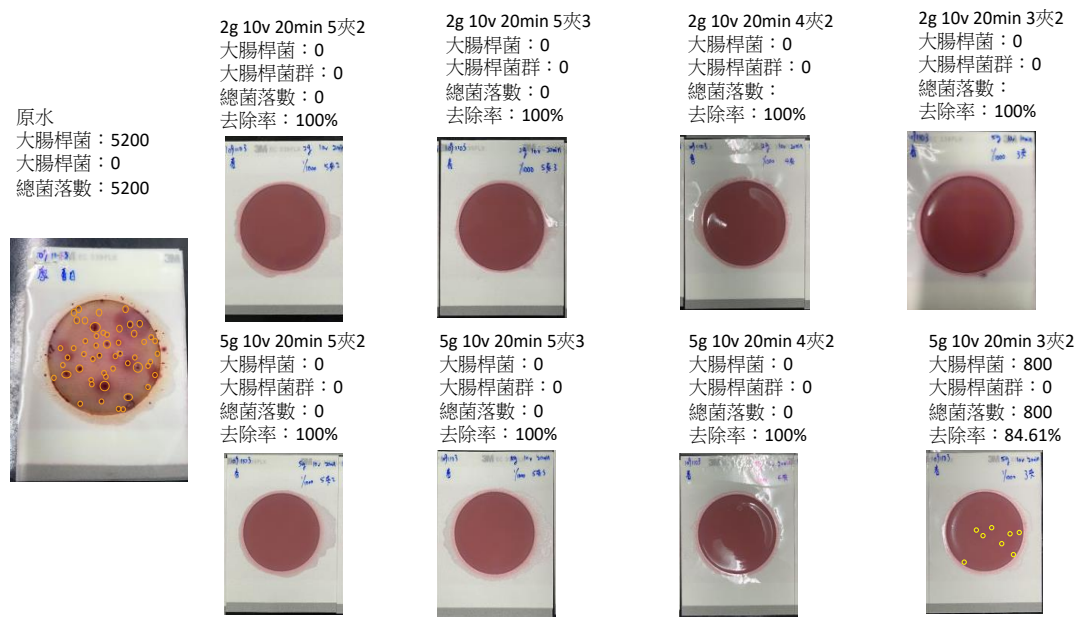


圖 8 溝渠水複查電化學氧化劑對大腸桿菌去除效果

綜合比較，如圖 9 結果顯示，當食用鹽與 NaCl(氯化鈉)分光光譜吸收值濃度差異性明顯之 2g/L、5g/L，於 (4-3-2) 實驗所得氧化還原電位(ORP)結果，(5 夾 2) 排列方式穩定性佳，以每公升濃度 5g/L 電化學氧化劑對大腸桿菌得以完全去除。本章節所用之濃度為差異性明顯之二種，最佳排列方式中並得知最佳濃度為何，於 (4-4) 實驗中所用之濃度為階段性明顯之四種濃度，從中選定最佳濃度，方可將這些條件帶入實地場所實驗條件之中。總菌落數多寡影響電化學氧化劑對大腸桿菌去除率影響成正比關係，則大腸桿菌群的出現也需消耗較多滅菌能量。

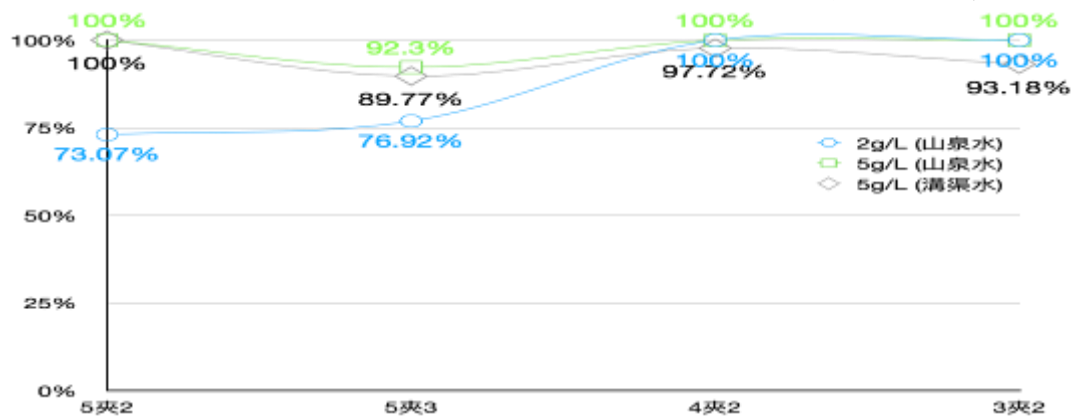


圖 9 電化學氧化劑 10 分鐘對大腸桿菌去除率

3-3 石墨電極板排列方式(5 夾 2)與濃度關係

3-3-1 四種濃度間 pH、ORP、導電度變化

本實驗以 4-2 實驗數據中選定四種階段性明顯之濃度，試驗結果得最佳石墨電極板排列條件(5 夾 2)，電極板間電壓差 10v(伏特)。以各每公升 2g/L、5g/L、8g/L、10/L 食用鹽電解液，連續通電時間為 10、20 分鐘，選定較佳 pH、ORP 氧化還原電位、導電度、餘氯及對大腸桿菌去除效果，既定實地場所實驗之重要條件。

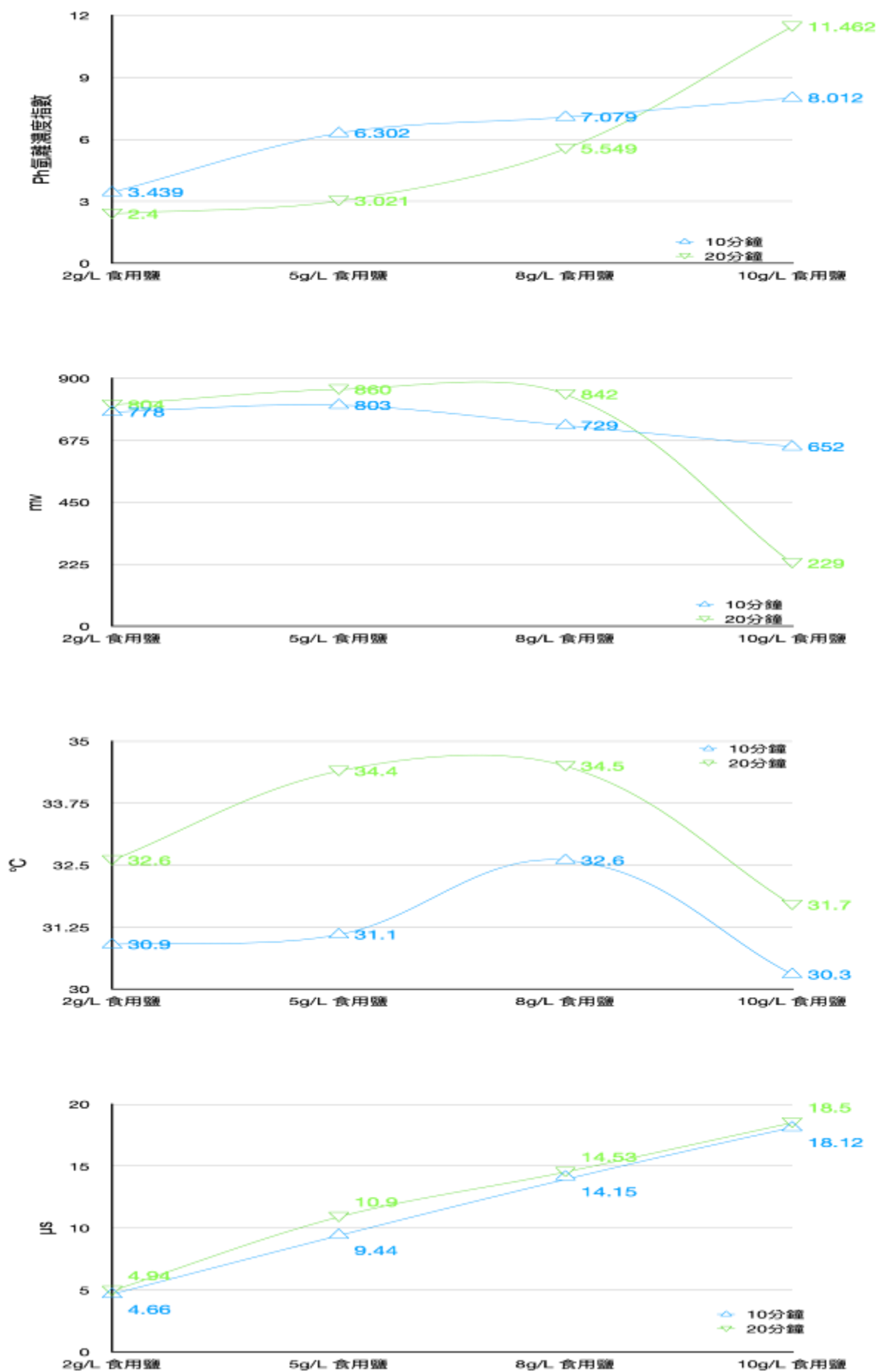


圖 10 石墨電極板排列方式(5 夾 2)與濃度關係

四種濃度之餘氯監測

經由電化學實驗後得知由氧化還原電位(ORP)的結果，每公升 5g/L 測值為最佳條件，其穩定性良好，條件可供實地場所實驗條件選定。因此檢測其電化學氧化劑於餘氯值，如圖 11 結果得知，初次測得結果 10、20 分鐘均為每公升 5g/L 效果最佳。

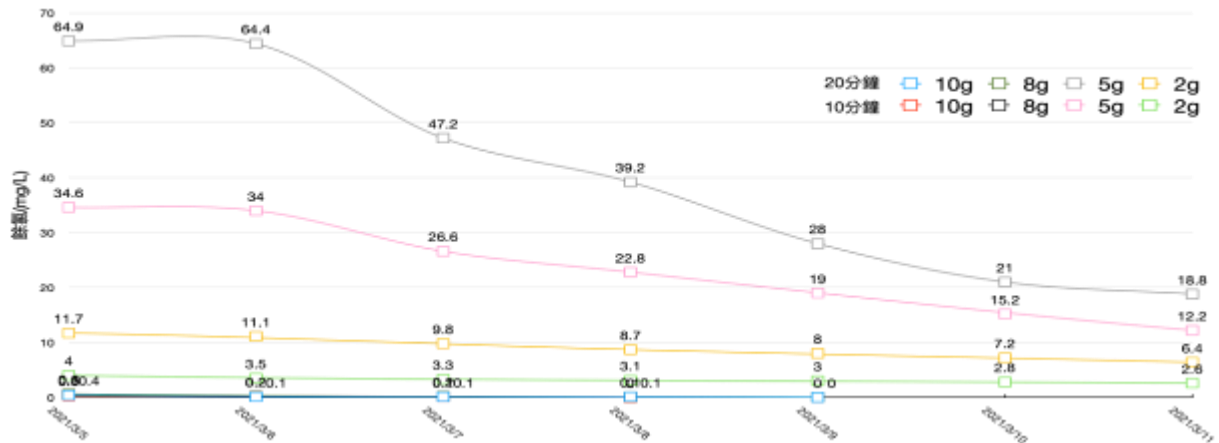


圖 11 連續七日餘氯監測

由圖 12 為經電化學後電解液在通電 10、20 分鐘下每公升 5g/L，靜置到第七日 (D+7) 餘氯，對大腸桿菌具有相當的去除效果。電化學氧化劑隔日 (D+1) 衰退率並不明顯，經第二日 (D+2) 衰退後均有明顯的差異性。而每公升 8、10g/L 電化學氧化劑氯鹽效果並不如期，得知濃度越高並無相對減菌效果。

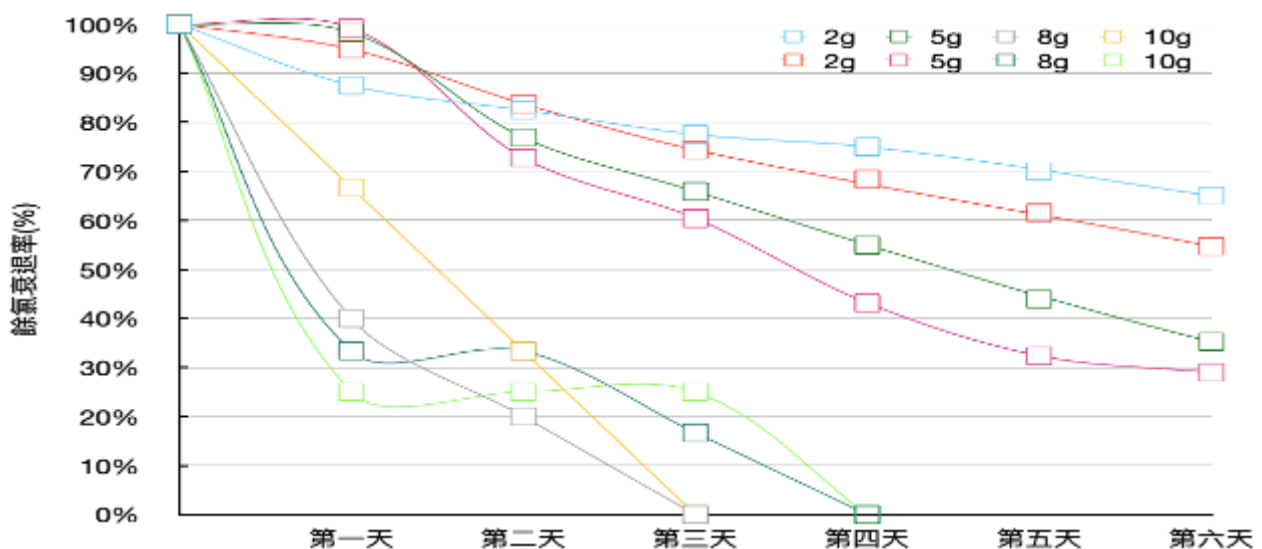


圖 12 餘氯監測衰退率

四種濃度 10、20 分鐘對大腸桿菌去除效果

實驗無論連續通電時間 10、20 分鐘，最佳濃度為 5g/L 之濃度電解液，大腸桿菌去除率達 90% 以上；次為 10g/L 之濃度電解液，大腸桿菌去除率達 86% 以上。四種濃度間餘氯監測結果得知，每公升 5g/L，10、20 分鐘第七日 (D+7) 餘氯: 10 分鐘 12.2(mg/L)、20 分鐘 18.8(mg/L)；對應至每公升 2g/L 第一日 (D+1) 餘氯: 20 分鐘 11.7(mg/L)。如

每公升 5g/L 電化學氧化劑存放於陰涼處 7 日，其大腸桿菌去除率尚有 75% 以上滅菌效果對大腸桿菌去除率達 90% 以上之條件，尋求放大倍率效果探討。如圖 13 所示

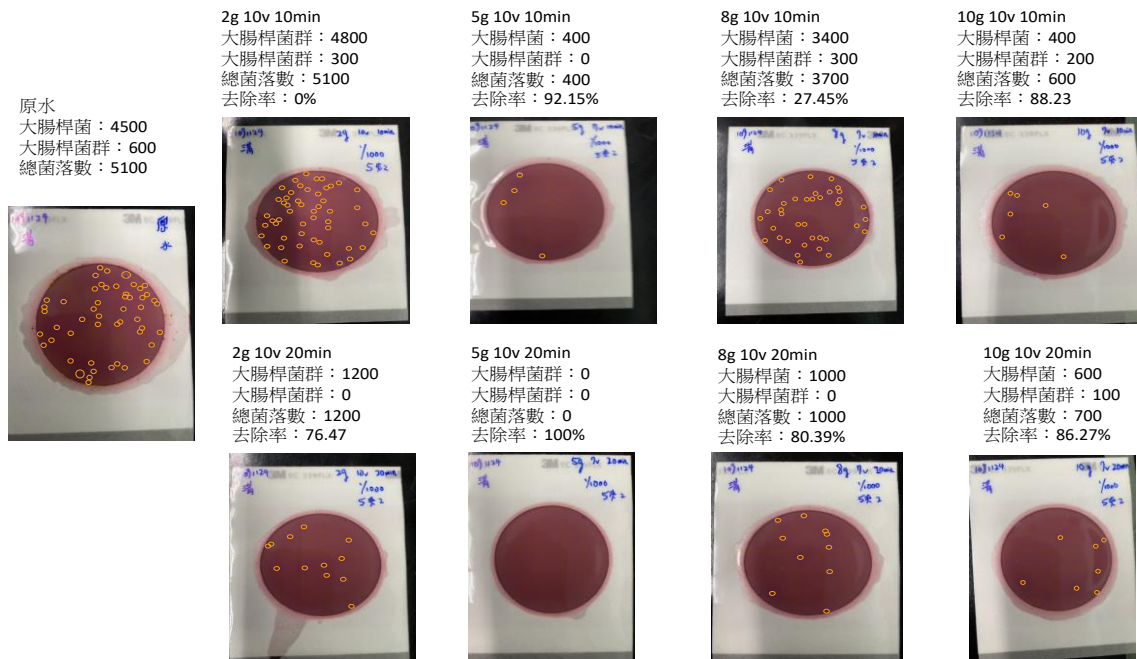


圖 13 四種不同度電解液對大腸桿菌去除效果

放大稀釋倍率對大腸桿菌去除效果

實驗結果得石墨電極板排列條件(5 夾 2)，電極板間電壓差 10v(伏特)連續通電 10、20 分鐘，每公升 5g/L 之食用鹽電解液，大腸桿菌去除率達 90% 以上。本實驗室模擬實地場所放大倍率試驗，稀釋倍率條件 1:1000、1:2000、1:3000、1:4000、1:5000 (電化學氧化劑 ml：山泉水 ml) 對原水(E.coli count)大腸桿菌總菌落數含量為 6900CFU/100ml 去除如(圖 14-15)，分別以 10、20 分鐘大腸桿菌去除效果探討。

溝渠水原水(E.coli count)中大腸桿菌總菌落數含量有 600CFU/100ml 大腸桿菌群及其他干擾質所干擾，最初所加入之氯與水中氨氮反應成結合有效氯，仍具偶消毒能力，但反應慢，故消毒效果較自由餘氯差，所導致消毒效果不比實驗中所用之山泉水原水(E.coli count)大腸桿菌去除效果好。

不圖混合比條件在 1ml 電化學氧化劑與 5000ml 山泉水混合，連續通電 20 分鐘去除效果 92.75% 仍比 10 分鐘去除效果 81.16% 較佳。直流電連續通電 10 分鐘放大稀釋倍率所得結果稀釋倍率至 5000 倍，對大腸桿菌去效果達 81.16%。直流電連續通電 20 分鐘放大稀釋倍率所得結果稀釋倍率至 5000 倍對大腸桿菌去效果達 92.75% 以上。

原水	稀釋1000倍	稀釋2000倍	稀釋3000倍	稀釋4000倍	稀釋5000倍
大腸桿菌：6800	大腸桿菌：0	大腸桿菌：200	大腸桿菌：800	大腸桿菌：900	大腸桿菌：1300
大腸桿菌群：100	大腸桿菌群：0	大腸桿菌群：0	大腸桿菌群：0	大腸桿菌群：0	大腸桿菌群：0
總菌落數：6900	總菌落數：0	總菌落數：200	總菌落數：800	總菌落數：900	總菌落數：1300
	去除率：100%	去除率：97.1%	去除率：88.4%	去除率：86.95%	去除率：81.16%

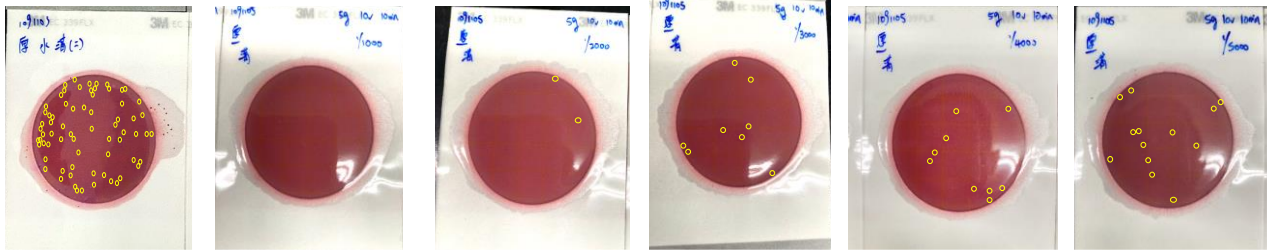


圖 14 直流電連續通電 10 分鐘放大稀釋倍率對大腸桿菌去除效果

原水	稀釋1000倍	稀釋2000倍	稀釋3000倍	稀釋4000倍	稀釋5000倍
大腸桿菌：6800	大腸桿菌：0	大腸桿菌：500	大腸桿菌：500	大腸桿菌：100	大腸桿菌：600
大腸桿菌群：100	大腸桿菌群：0	大腸桿菌群：0	大腸桿菌群：0	大腸桿菌群：0	大腸桿菌群：0
總菌落數：6900	總菌落數：0	總菌落數：0	總菌落數：0	總菌落數：0	總菌落數：0
	去除率：100%	去除率：92.75%	去除率：92.75%	去除率：98.55%	去除率：92.75%

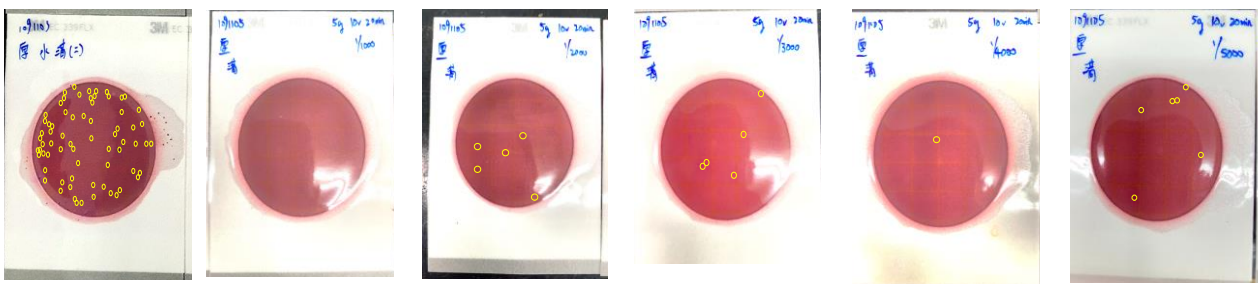


圖 15 直流電連續通電 20 分鐘放大稀釋倍率對大腸桿菌去除效果

3-4 實場實驗

3-4-1 實驗室模擬與實地場所差異性

大腸桿菌效果達 80% 以上，成效良好。故將二種實驗室模擬實場模組至實地場所進行實驗。實驗室模擬實場所使用蒸餾水水溶液，故石墨電極板間電壓差為 10v(伏特)，實地場所使用簡易自來水水源(原水)做為本次實驗之水溶液，故石墨電極板間電壓差為 6、7v(伏特)，電解液為每公升原水 5g/L 食用鹽進行電解反應之電化學氧化劑，分別進行水桶試驗、儲水塔試驗。

因應儲水塔以連續通電 10、20 分鐘電化學氧化劑對大腸桿菌消毒，分別以不同天進行實驗，因氣候變故及氣溫影響山泉水原水(E.coli count)有所落差，含容大腸桿菌、大腸桿菌群不一。水溶液為原水，於電解過程中消耗電化學氧化劑成分，既使稀釋倍率為 1:10000 (電化學氧化劑 L：山泉水 L)，對於儲水塔大腸桿菌去除率仍達 78% 以上。

3-4-2 米棧村大腸桿菌去除效果：(儲水塔容積量為 100 噸之蓄水池)

10 分鐘 (109 年 11 月 27 日)

由圖 16 得知原水(E.coli count)大腸桿菌總菌落數 4000CFU/100ml、無大腸桿菌群。

水桶試驗：以 1:10000 (1L 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 70%、1:7500 (1L 電化學氧化劑：7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 75%。

儲水塔試驗：以 1:10000 (10L 電化學氧化劑：100T 山泉水) 大腸桿菌去除率達 82.5%。

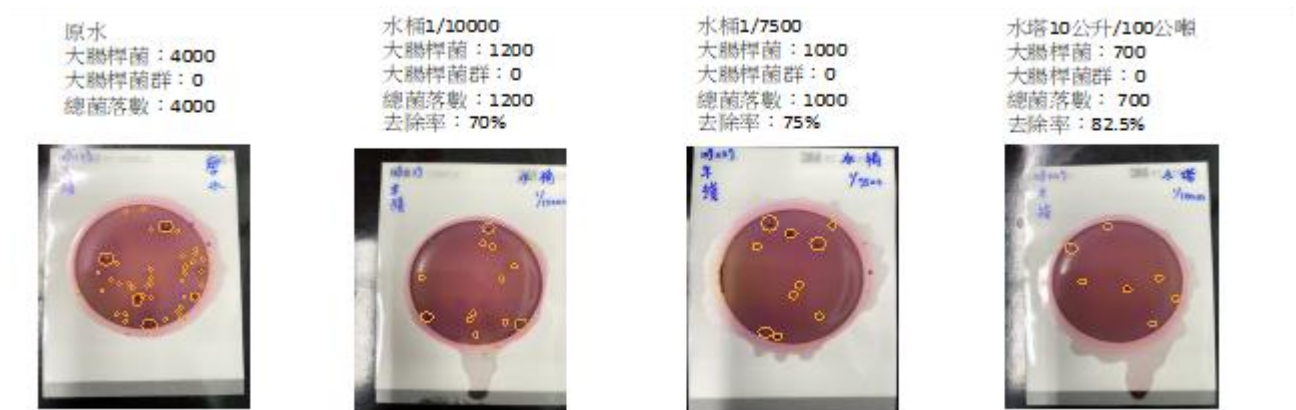


圖 16 壽豐鄉米棧村 電化學間接法連續通通電 10 分鐘實地場所實驗
20 分鐘 (110 年 3 月 14 日)

原水(E.coli count)大腸桿菌總菌落數 2100CFU/100ml、大腸桿菌群 300CFU/100ml。

水桶試驗：以 1:10000 (1L 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 95.23%、
1:7500 (1L 電化學氧化劑：7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 100%。

儲水塔試驗：以 1:10000 (10L 電化學氧化劑：100T 山泉水) 大腸桿菌去除率達 80.95%。如圖 17 結果。

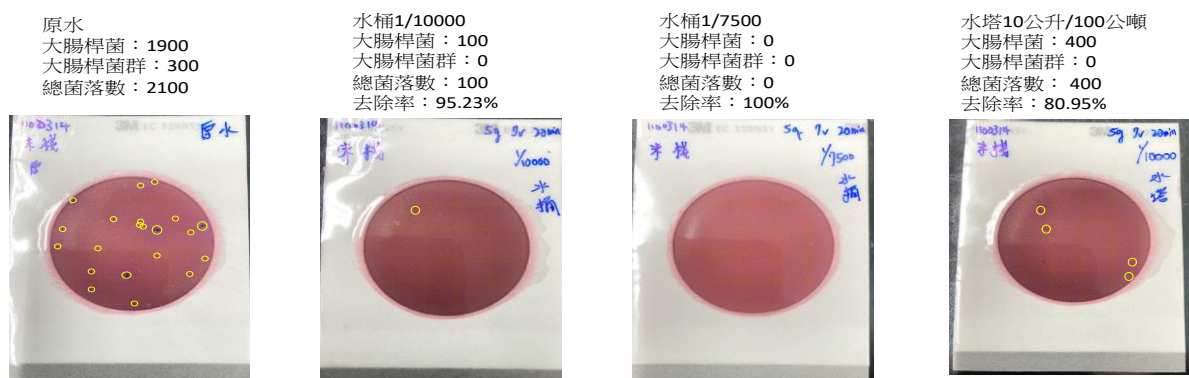
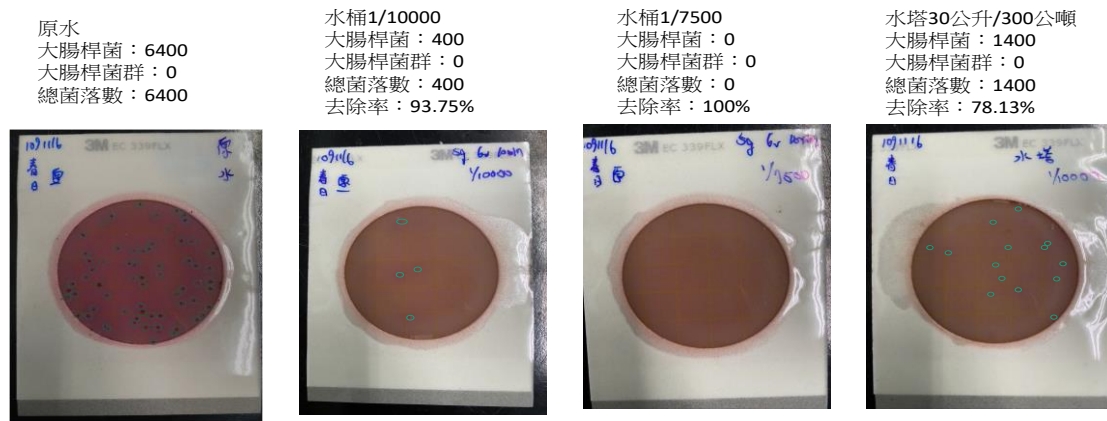


圖 17 壽豐鄉米棧村 電化學間接法連續通通電 20 分鐘實地場所實驗
3-4-3 春日村大腸桿菌去除效果(儲水塔容積量為 300 噸之蓄水池)
10 分鐘 (109 年 11 月 16 日)

如圖 18 得知原水(E.coli count)大腸桿菌總菌落數 6400CFU/100ml、無大腸桿菌群。

水桶試驗：以 1:10000 (1L 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 93.75%、
1:7500 (1L 電化學氧化劑：7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 100%。

儲水塔試驗：以 1:10000 (30L 電化學氧化劑：300T 山泉水) 大腸桿菌去除率達



78.13%。

圖 18 玉里鎮春日村 電化學間接法連續通通電 10 分鐘實地場所實驗
20 分鐘 (110 年 3 月 14 日)

如圖 19 結果，原水(E.coli count)大腸桿菌總菌落數 1500CFU/100ml、無大腸桿菌群。
水桶試驗：以 1:10000 (1L 電化學氧化劑：10L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 93.3%、1:7500
(1L 電化學氧化劑：7.5L 山泉水) 大腸桿菌去除率達 100%。儲水塔試驗：以 1:10000
(30L 電化學氧化劑：300T 山泉水) 大腸桿菌去除率達 100%。

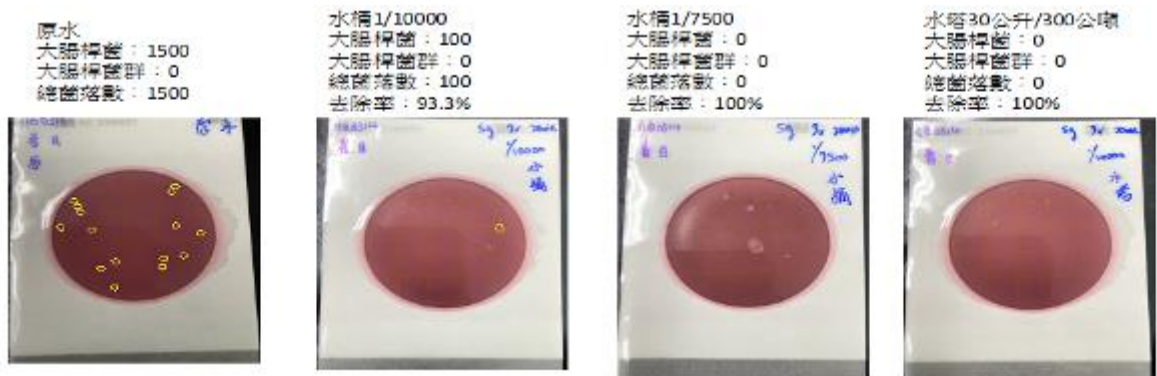


圖 19 玉里鎮春日村 電化學間接法連續通通電 20 分鐘實地場所實驗

四、結 論

在食用鹽與 NaCl(氯化鈉)電化學氧化劑，以分光光譜儀吸收峰值(293nm)得吸收值結果得知，由於電解和離子化，食用鹽乾基 95%為 NaCl(氯化鈉) 及其他微金屬元素鐵、磷、碘等離子激發態，故不同濃度電解交換過程中造成水中離子濃度達平衡時至飽和區，不同濃度之 Hocl(次氯酸)含量有所影響。

石墨電極板排列條件：(5 夾 2)，極板間電壓 10v(伏特)，連續通電 10、20 分鐘，每公升 5g/L 之食用鹽電解液，(1ml 電化學氧化劑：1000ml 溝渠水) 得大腸桿菌去除率達 90%以上。

實驗時模擬放大 5000 倍率 (1ml 電化學氧化劑：5000ml 山泉水) 連續通電 20 分鐘大腸桿菌消毒可達 92.75%去除率。

經實驗室模擬實場所使用蒸餾水水溶液，得石墨電極板間電壓差為 10v(伏特)、總

電壓 30v(伏特)；而實地場所使用簡易自來水水源（原水）水溶液，得石墨電極板間電壓差為 6、7v(伏特)、總電壓 30v(伏特)。

實地場所(壽豐鄉米棧、玉里鎮村日村)：直流電連續通電 10、20 分鐘儲水塔試驗：以 1:10000（1ml 電化學氧化劑：10L 山泉水）大腸桿菌去除率達 78.13%以上。直流電連續通電 20 分鐘，水桶試驗以 1:10000（1ml 電化學氧化劑：10L 山泉水）大腸桿菌去除率達 93.3%以上、1:7500（1ml 電化學氧化劑：7.5L 山泉水）大腸桿菌去除率達 100% 完全去除。

參考文獻

- <https://www.dgbas.gov.tw/public/Data/06216654198HDY1K.pdf> 國情統計通報(第 102 號)，(修訂於 109 年 6 月)
- 花蓮縣政府 108 年度原住民地區簡易自來水系統營運計畫，(108 年 9 月)
- 自來水-全國法規資料庫 <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=J0110064>
- 行政院環保署-地面水體及水質標準
- <https://oaout.epa.gov.tw/law/LawContent.aspx?id=FL015490>
- 飲用水水質標準-全國法規資料庫
- <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=o0040019>
- 自來水工程設施標準-全國法規資料庫
- <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=J0110064>
- 蔡大勇，「化學法與電化學改善山區水質殺菌效果之研究」，大漢技術學院土木工程與環境資源管理系碩士班，碩士論文（2020）。
- 無自來水地區供水改善計畫簡易自來水工程及系統營運補助申請及管考作業要點-經濟部水利署 <https://law.moea.gov.tw/LawContent.aspx?id=FL084261>
- 花蓮縣政府 109 年度原住民地區簡易自來水系統營運計畫，(109 年 11 月)
- 飲用水連續供水設備使用及維護管理辦法
- <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?PCode=O0040014>
- 夏平，「化學混凝法處理高色度染料廢水的研究」，湖州職業技術學院學報，Vol. 4(4)，p 81-84，(2003)。
- 鄭曦，「高鐵絮凝劑的電合成及其在染料廢水處理中的應用」，福建師範大學學報，Vol.18(3)，pp.54-57，(2002)。
- 姜鳳玲，「試論染色廢水的生物處理技術」，蒙自師範高等專科學校學報，Vol. 5(4),p.28-31，(2003)。
- 樊毓新，周增炎，「染料廢水的處理方法現狀與發展前景」，環境保護，Vol.9，pp.22-26，(2002)。
- 何志軒，「以化學法與電化學氧化分解有機反應性染料之探討」，淡江大學水資源及環境工程學系博士班，博士論文(2001)。
- 何志軒、楊禎祿，「混合市售漂白水與有機染料 RB-19 之化學反應動力特性」，大漢技術學院、大漢學報，第廿二期。
- 何志軒、陳俊成、楊禎祿、劉士偉、黃信智，「利用電化學產生氧化劑方式氧化裂解

有機反應性染料之特性」，2009 資源與環境學術研討會資料。

何志軒、陳俊成、楊禎祿，「利用次氯酸鈉氧化裂解有機反應性染料」，中華民國環境工程學會，2008 廢水處理技術研討會資料。

楊萬發教授譯，「水及廢水處理化學」，「茂昌圖書有限公司(177-206)。

行政院環境保護署，<https://www.epa.gov.tw>。

張聖雄、陳建財，「廢水生物處理程序常見問題實務探討」，工業污染期刊。

維基百科，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/氯化鈉>，(修訂於 2020 年 5 月)。

3M™ Petrifilm™ 大腸桿菌/大腸菌群快檢片 6404，微生物快速檢驗測試片手冊.pdf

Session III-1
(15:40~17:00 , B215)

以南部某人造樹脂廠為例探討採樣管線水份影響 CEMS 監測數據問題
Taking A Man-Made Resin Factory In The South As An Example To Discuss The
Influence Of Water In Sampling Pipelines On CEMS Monitoring Data

簡聰文¹，曾庭科²，孫偉碩^{3*}，廖昭傑⁴

Tsung-Wen Chien¹ Ting-Ke Tseng² Wei-So Sun^{3*} Jhao-Jie Liao⁴

1 Assistant Researcher, Sustainable Environment Research Laboratories, National Cheng Kung University

2 Assistant Researcher, Research Center for Energy Technology and Strategy, National Cheng Kung University

3 Project Manager, Sunway Environment Technology Co., Ltd.

4 Deputy Regional Manager, Sunway Environment Technology Co., Ltd.

* Corresponding author: Edwin.sun@leder.com.tw

摘 要

本研究以工作團隊執行環保署與地方環保局查核 CEMS 多年經驗，特以南部某人造樹脂廠排放管道 P401 為例，分析時間區間為 109 年 2 月，此排放管道監測項目包括：氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO₂)、氧氣(O₂)、排放流率(Flow)及不透光率(OP)。

本研究主要以現場測試二氧化硫(SO₂)及氮氧化物(NO_x)應答時間為探討對象，查核流程係依環保署「固定污染源空氣污染物連續自動監測設施管理辦法附錄二」規範，經查核結果得知，業者為使用 Horiba ENDA 640 型號，其中二氧化硫(SO₂)及氮氧化物(NO_x)應答時間皆高於監測設施確認報告書登載數據，採樣管線除水裝置及管線仍可目視發現水滴，相關參考文獻亦說明採樣系統應具備充分加熱保溫除水設備，方可避免樣品氣體中 SO₂ 溶於冷凝水而造成測值低估情形，進而影響監測數據準確性，故被查核廠方應證明既有除水裝置可達乾基並於後續修正監測設施確認報告書載明其品保品管規範 SOP。

本研究將探討採樣管線水份影響監測數據品質之關聯性，期能對連續自動監測設施查核作業，提出具體改善建議以供主管機關查核時參考。

關鍵字: CEMS、應答時間、確認報告書、採樣管線

1.事件說明

研究對象為南部某人造樹酯廠排放管道 P401，分析時間區間為 109 年 2 月，該排放管道之監測項目包括：氮氧化物(NO_x)、氣狀污染物二氧化硫(SO₂)、稀釋氣體氧氣(O₂)、排放流率(Flow)及粒狀污染物不透光率(OP)。

經查核結果得知，氣狀污染物監測分析儀器應答時間高於確認報告書，且採樣管線水分去除裝置及管線未依 CEMS 管理辦法規定每季確認水分去除裝置之效能、監測分析儀器採樣管線加熱溫度未符合 CEMS 管理辦法附錄二(三)3(2)規定：「應避免受排放管道排放污染物之影響，樣品傳輸管需設有加熱保溫措施，應加熱保溫至 120℃ 以上。但公私場所監測設施採稀釋抽離式、現址式及採樣管線之水分去除裝置緊鄰於採樣探頭之後者，不在此限。本項規範自中華民國一百零九年七月一日施行。將請公私場所依據 CEMS 管理辦法進行修正。」

2.應答時間測試

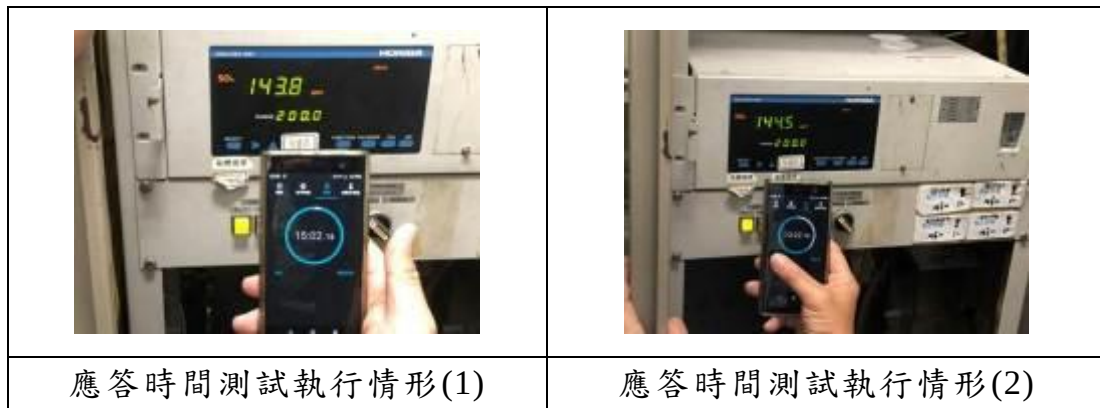
為確認已裝置連續自動監測設施工廠之監測儀器應答時間是否符合「固定污染源空氣污染物連續自動監測設施管理辦法」規定(氣狀污染物為 15 分鐘，稀釋氣體為 10 分鐘)，故進行應答時間測試。

以監測項目標準氣體重複三次測試最高值(全幅濃度之 80~100 %)，紀錄監測設施輸出值達到標準氣體濃度值 95 %之時間；再以低值(全幅濃度之 0~20 %)標準氣體材同樣進行三次測試。計算上述應答時間之平均值及偏差率，以較慢平均應答時間為實際應答時間，確認是否符合管理辦法規定之性能規格。

本研究已於 110 年 2 月 23 日針對南部某人造樹酯廠排放管道 P401 進行應答時間測試，測試結果如表一所示，各監測項目之應答時間雖均符合管理辦法規定，但均高於監測設施確認報告書登載數據，應答時間測試作業如圖一所示。

表一 應答時間測試結果統計

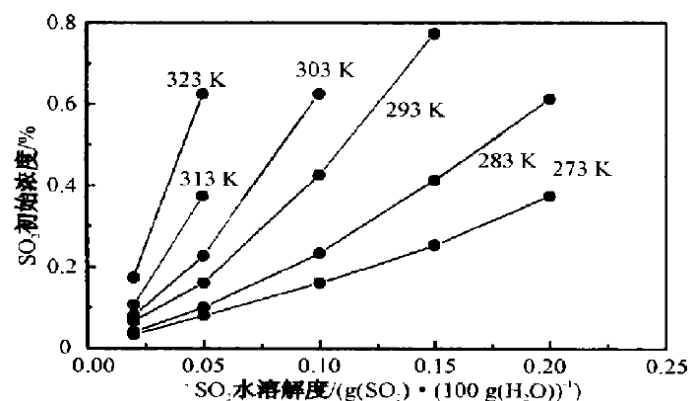
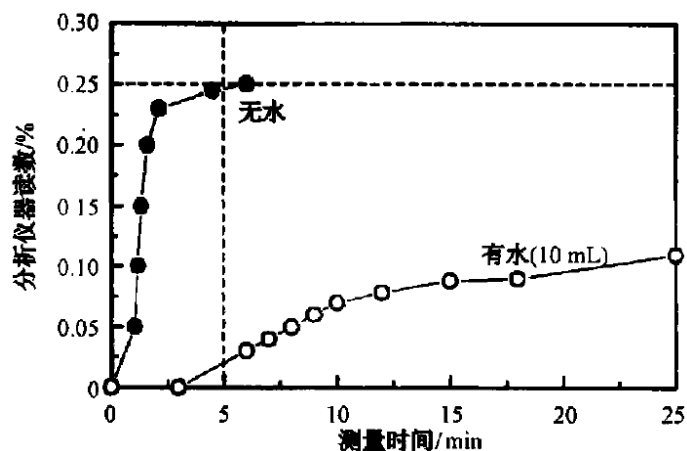
煙道	監測項目	標準氣體	平均應答時間	較慢之平均應答時間	確認報告書	性能規格	是否符合
P401	NO _x	高值標準氣體	116 秒	121.67 秒	60 秒	900 秒	☒ 是 ☐ 否
		低值標準氣體	121.67 秒				
	SO ₂	高值標準氣體	803 秒	803 秒	115 秒	900 秒	☒ 是 ☐ 否
		低值標準氣體	522 秒				
	O ₂	高值標準氣體	127 秒	127 秒	73 秒	600 秒	☒ 是 ☐ 否
		低值標準氣體	125 秒				

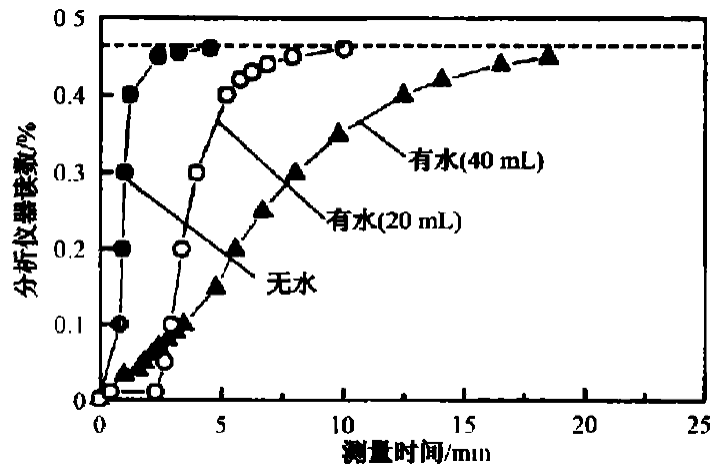


圖一 應答時間測試作業

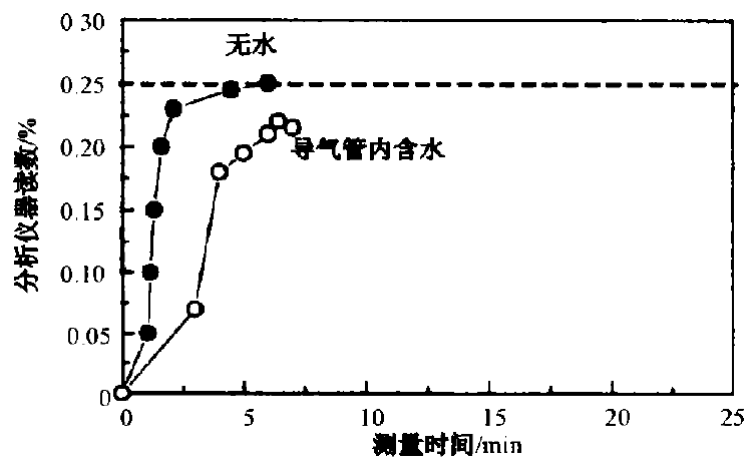
3.文獻探討採樣管線水份影響 SO_2 水溶解度

2002 年由樊保國、祁海鷹、由長福、徐旭常等發表「煙氣中的凝結水對 SO_2 濃度測量的影響」於「燃燒科學與技術」期刊中，指出由於 SO_2 水溶解度(如圖二)甚高，若 CEMS 為冷乾式抽取系統(cold-dry extractive CEMS)，其採樣系統應具備充分加熱保溫除水設備方可避免樣品氣體中 SO_2 溶於冷凝水造成測值低估情形。如圖三～圖五所示，在不同 SO_2 濃度、不同含水率下， SO_2 測值受干擾情形。

圖二 SO_2 在水中溶解度圖三 標氣 SO_2 濃度為 0.25% 在不同含水率時的測量結果

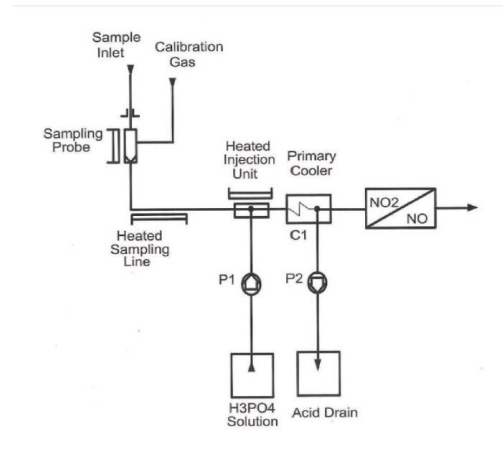


圖四 標氣 SO_2 濃度為 0.466% 在不同含水率時的測量結果



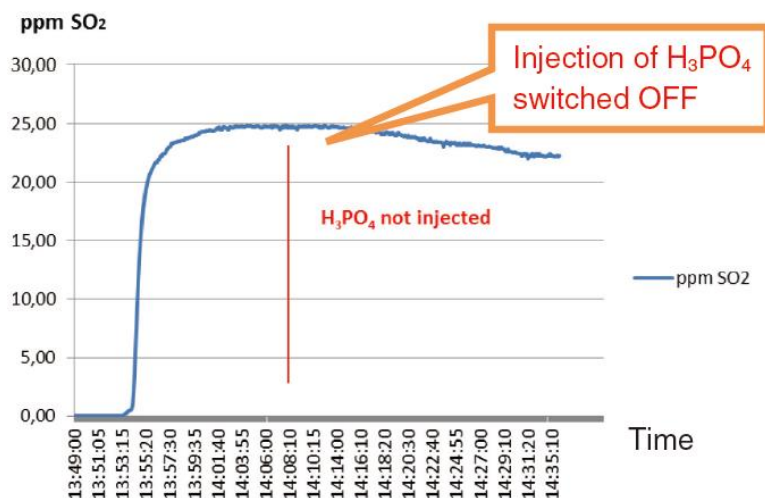
圖五 導氣管內的凝結水對測量精度的影響 (標氣 SO_2 濃度為 0.25%)

傳統上，冷乾式抽取系統其除水設備主要分為半導體致冷(thermoelectric dryer，或稱為電冷式除水器)和薄膜滲透管(permeation tube dryer)二大類。但由 Jaroslav Libal (2012)調查研究顯示，Horiba ENDA-5000 CEMS 原採電冷式除水器已無法滿足歐盟 EN 15267-3 規範(含水率 30%時， SO_2 測值誤差應小於 4%)。因此，Horiba ENDA-5000 CEMS 後續更新防止 SO_2 溶解於冷凝水方式為採用樣品氣體中噴入 H_3PO_4 酸性溶液，使冷凝水 pH 值呈現酸性條件，而防止 SO_2 、 NO_x 等酸性氣體無法再溶入冷凝水中。如圖六所示，採樣探頭及前端傳輸管線應完整加熱，後續先噴注加熱之 H_3PO_4 溶液，再接上電冷除水器 ECP1000-G 操作溫度為 $+5^\circ\text{C}$ 。



圖六 ENDA-5000 採樣系統流程示意圖

由圖七測試結果顯示，為驗證添加磷酸後 ENDA-5000 除水性能，先向系統內通入 71.5 mg/m³ 的 SO₂ 乾燥氣體，儀器應答十分迅速，並立即達穩定。之後通入 SO₂ 濃度為 71.5 mg/m³ 濕氣，濕度為 13~15%，測試結果如圖七所示。含有磷酸添加 ENDA-5000 應答曲線與通入 71.5 mg/m³ 乾燥氣體曲線一致，SO₂ 損失降到 1% F.S. 以內。於系統穩定運行一段時間後，關閉磷酸添加系統，由於磷酸添加的酸性環境亦會持續一段時間，SO₂ 測試值下降比較緩慢，大約 10 分鐘後，酸性環境消失 SO₂ 的溶解損失逐漸變大，使得測試結果下降變快，SO₂ 溶解損失超過 5.72 mg/m³，此時系統 SO₂ 的示值誤差會超過中國 HJ 76-2017 標準要求的 5%。

圖七 ENDA-5000 採樣系統 H₃PO₄ 噴注對 SO₂ 測值之影響

另經現場查驗，監測分析儀(Horiba ENDA640)採樣管線加熱溫度未達到 120 °C，如圖八所示，未符合 CEMS 管理辦法附錄二(三)3.(2)規定。



圖八 現場查驗採樣管線溫度

4. 結論與建議

監測設施功能查核乃依現場進行應答時間測試，雖符合「固定污染源空氣污染物連續自動監測設施管理辦法」氣狀污染物 900 秒鐘、稀釋氣體 600 秒鐘之標準，但確認報告書內容與現況資訊已有落差，採樣管線內水份含量高低會影響監測數據反應時間及濃度，廠房操作維護人員應將訊息落差詳實紀錄，並定期執行應答時間測試，爾後提出確認報告書修訂版時須再修訂，使其確認報告書內容與資訊更貼近實際查核狀況。

本研究個案；南部某人造樹酯廠為採用 Horiba ENDA-640 系列之 CEMS，但其採樣探管(probe)至標準氣體導入口段之管線並未加熱，此處即可能造成煙氣內之水分冷凝及 SO_2 溶解損失低估。此外，其站房似乎已裝設類似磷酸溶液之裝置，但廠方人員無法明確說明該裝置內容物為何，且確認報告書內容亦未載明其採樣系統之詳細完整設計。尤其需持續噴注的操作方式，磷酸溶液應為消耗品，需定期或視情況補充或更換新品，但維護保養記錄並未詳實記錄該項目。建議環保署空保處可參採歐盟規範 EN 15267-3 和中國 HJ 76-2017 規範增訂採樣系統除水性能(組分損失率)，而被查核單位亦可自行安裝溫度顯示器，主動揭露採樣管線加熱溫度已達 120°C 以上。

5. 參考資料

- ◆固定污染源空氣污染物連續自動監測設施管理辦法，行政院環境保護署，109 年 04 月 08 日。
- ◆排放管道中二氧化硫抽取式自動檢測方法-非分散性紅外光法、紫外光法、螢光法 (NIEA A413.75C)，105 年 01 月 04 日。
- ◆樊保國、祁海鷹、由長福、徐旭常，「煙氣中的凝結水對 SO_2 濃度測量的影響」，燃燒科學與技術，第 8 卷、第 5 期，第 453-456 頁，2002 年
- ◆Jaroslav LIBAL, “Modification of HORIBA’ s ENDA-5000 Continuous Emission Monitoring System in order to fulfill requirements of European standard EN 15267-3”, 24 September, 2012. https://www.horiba.com/uploads/media/R39e_18_126_04.pdf

夜市油煙防制設備效率分析-以花蓮東大門夜市為例
Analysis of the efficiency of oil fume prevention and control equipment in the night market- A case in the Dongdamen Night Market of Hualien City

許文昌^{1*} 林憶茹² 吳紀賢³ 孫偉碩⁴

Wen-Chang Hsu^{1*} I-Ru Lin² Ji-Hsien Wu³ Wei-So Sun⁴

1 大漢技術學院土木工程與環境資源管理系 助理教授

Assistant Professor, Department of Civil Engineering & Environmental Resources

Management, Institute of Dahan Technology

2 大漢技術學院土木工程與環境資源管理系 研究生

Graduated student, Department of Civil Engineering & Environmental Resources

Management, Institute of Dahan Technology

3. 祥威環境科技股份有限公司 計畫經理

Project Manager ,Sunway Environmental technology co., ltd

4 祥威環境科技股份有限公司 專案經理

Project Manager ,Sunway Environmental technology co., ltd.

* Corresponding author: kenhsu@ms01.dahan.edu.tw

摘 要

針對夜市攤商油煙防制設備去除效率量測選定東大門第O家烤肉串進行，依據靜電集塵器集塵板清洗後不同運作天數分析其防制效率量測結果，當靜電集塵器清洗後 1 天，其平均防制效率為 73%；清洗 7 天後平均防制效率為 50.3%；清洗 14 天後防制效率為 48.4%，顯示隨著使用天數增加，防制效率逐步下降。由清洗後第 1 天靜電集塵器整體去除率僅 73%，與行政院環境保護署-餐飲油煙防制設備設置組合指引手冊中，靜電集塵器油煙處理效率 75~95%，相差甚多。操作 7 天後靜電集塵器的去除效率則下降接近 23%，因此，若要維持較高去除效率建議靜電集塵器清洗頻率定為每 1 周清洗一次。

關鍵詞：夜市、PM_{2.5}、即時性監測儀、靜電集塵器、防制效率。

壹、前言

1.1 研究動機

位於花蓮縣境內最大「東大門國際觀光夜市」，占地 9 公頃，號稱「東台灣最大的夜市」以原有南濱夜市、福町夜市、自強夜市、彩虹夜市遷移整併而來；夜市內各式特色商品、益智遊戲及特色小吃超過 400 攤。

由於夜市是一個非常密集的戶外烹飪環境，當烹調污染物濃度過高，這些烹飪過程所產生的油煙對夜市裡的廚師和遊客是有害的〔1〕。餐飲業烹飪時除了油煙污染外，亦會有PM_{2.5}產生。許多流行病學研究結果顯示，PM_{2.5}易附著戴奧辛、多環芳香烴及重金屬等有害物質，長期吸入可能會引起過敏、氣喘、肺氣腫、肺癌、心血管疾病、肝癌、血液疾病等，餐飲業之異味產生主要來自於烹煮過程中，產生大量油煙未經處理就直接逸散到空氣中，尤其油煙容易吸附於物品上，油漬與臭味清洗極為不易，讓餐飲業鄰近住戶難以忍受。

根據相關研究報告結果指出，廚房油煙會提高致癌機率，且家中無裝抽油煙機之婦女罹患肺癌機率為有裝設者的 8.3 倍〔2〕。無論長期或短期暴露在高濃度PM_{2.5}環境之下，皆會提高呼吸道疾病及死亡的風險，尤其是對於敏感性族群的影響更為顯著。

而夜市餐飲業烹調所排放的油煙若未經妥善處理，易導致遊客及鄰近居民不良之感受，其常見問題包含：

1. 油煙收集效果不佳，導致油煙瀰漫危害健康。
2. 排放口設計不良，油煙、異味(熱氣)直接影響民眾、廢氣排放至溝渠，造成油垢阻塞及容易發臭。
3. 擴散條件不良或防制設備未定期保養，將導致年久失修故障而無法運作。

雖然近年花蓮東大門夜市餐飲業油煙污染防制設備已達成設置率百分之百，但後續設備的定期維護保養也同等重要，如餐飲業者未重視設備現況，將引發後續控管的問題。

有鑑於此，本研究將進行探討花蓮東大門夜市內餐飲業之油煙污染防制設備效能分析及清潔保養前後差異，冀望研究出一套防制設備效能評估之標準方法。

1.2 研究目的

目前國內雖已針對餐飲業擬定相關法規，但所推估之排放量均為有店面之餐飲業，對於夜市之餐飲業並未有明確規定，因此如夜市餐飲業未對於油煙異味進行管制，或未妥善維護防制設備，對於民眾及業者將產生影響，而本研究將以東大門夜市為主要研究對象，針對攤商之油煙防制效率進行分析，主要研究目的如下：

1. 以自行設計的量測系統，找出合適的微粒產生來源，以利進行分析防制設備效率的實驗。
2. 建立夜市攤商靜電集塵器去除效率的實際量測方法，同時配合集塵板清洗維護期程，於清洗後不同天數分別進行靜電集塵器的去除率實驗，以了解集塵板的最佳清洗頻率。

貳、實驗方法

2.1 研究流程

圖 2.1-1 為本研究之流程圖，本研究調查夜市內高污染餐飲業類別產生微粒質量濃度，後續依照調查分析數據，選定攤商油煙防制設備進行微粒實驗分析，並探討其設備之微粒濃度削減情形，其研究流程說明如下：

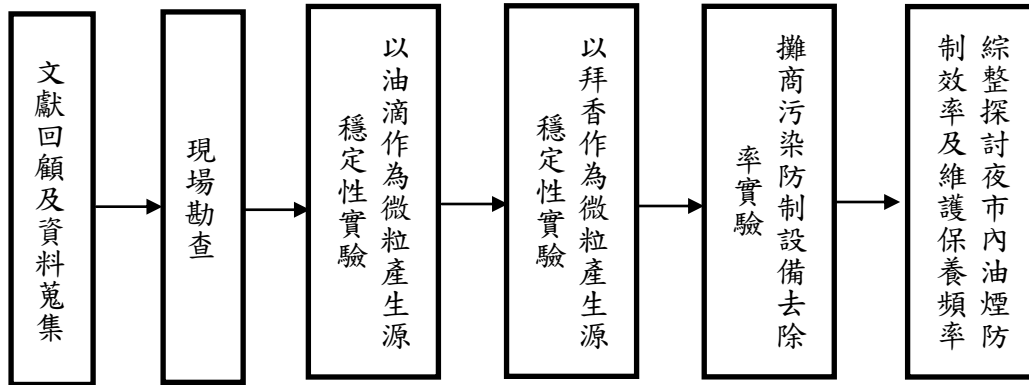


圖 2.1 研究流程圖

2.2 實驗儀器介紹

本研究運用TSI公司生產的自動監測儀器DUST-TARK II 8530 氣溶膠監測儀(簡稱TSI-8530)，本設備為手動監測儀器。

TSI公司生產的自動監測儀器DUST-TARK II 8530 氣溶膠監測儀(簡稱TSI-8530)，為一電池式儀器，具有資料記錄功能及保護套空氣系統，以在光學室中隔離氣溶膠，保持光學乾淨達到更佳的可靠度，並降低維護保養負擔。可測量PM₁、PM_{2.5}、PM₄(呼吸性粉塵)、PM₁₀，可測得微粒尺寸範圍 0.1~10 μm，質量濃度 0.001~400mg/m³，儲存間隔 1 秒~1 小時/筆，其偵測原理是以光散射法，當光照射在空氣中懸浮顆粒物上時，會產生散射光，散射光的強度與其質量濃度成正比。通過測量散射光強度，應用質量濃度轉換係數，得出顆粒物濃度值，可即時測量出氣溶膠質量讀值(如圖 3.3-1)。



圖 2.2-1 DUST-TARK II 8530 氣溶膠監測儀

2.3 實驗規劃說明

本次研究實驗規劃說明如下：

1. 如何產生穩定的微粒濃度以利油煙防制效率實驗的進行，故本研究自行設計設備(如圖2.3-1)，以油滴與拜香作為微粒產生來源，選擇較為合適的微粒產生方式。

使用即時性微粒監測儀器以燒炭溫度維持 400~450°C，每 3 分鐘滴下 0.05CC 葵花油進行PM_{2.5} 濃度採樣，每次實驗時間控制在 15 分鐘，以每 30 秒紀錄 1 筆濃度值，紀錄值存檔備用。



圖 2.3-1 模擬油滴產生器模組

2. 選定攤商進行油煙防制設備對於粒狀污染物(PM_{2.5})去除率實驗；並配合攤商設備操作維護期程，於清洗後不同天數分別進行靜電集塵器的去除率實驗，以了解集塵板的最佳清洗頻率。

本研究於東大門夜市知名攤商「第O家烤肉串」進行靜電集塵器微粒處理效率實驗，實驗模組如圖 2.3-2，該攤商設置集氣罩、三台靜電集塵器，如圖 2.3-3，本研究為不造成攤商營業間困擾，故利用日間進行實驗，使用TSI-8530 儀器以燃香 100 隻進行PM_{2.5} 濃度採樣(如圖 2.3-4)，時間分別控制在 60 及 30 分鐘，以每秒紀錄 1 筆濃度值，濃度紀錄值存檔備用。



圖 2.3-2 微粒質量濃度採樣模組



圖 2.3-3 靜電集塵器



圖 2.3-4 燃香盤插香示意圖

2.4 研究相關數據計算公式

1. 控制設備的效率 η (%) 是指進入控制設備前的微粒質量濃度 $C_0(\text{mg}/\text{Nm}^3)$ 被去除

的百分率〔3〕：

$$\eta(\%) = \left[1 - \frac{C_1}{C_0} \right] \times 100\%$$

其中 C_1 是指經控制設備後的微粒質量濃度(mg/Nm^3)。

若有兩個以上的控制設備串聯在一起，則總控制效率 $\eta_T(\%)$ 為：

$$\eta_T(\%) = \left[1 - \left[\frac{\eta_1}{100} \right] \left[\frac{\eta_2}{100} \right] \cdots \left[\frac{\eta_n}{100} \right] \right] \times 100\%$$

其中 η_1 、 η_2 、 $\cdots$ 、 η_n 為第 1、2 $\cdots$ n 個控制效率。

本研究實體為三台靜電集塵器，單一去除率為：

$$[[C_0(1-X)(1-X)(1-X)]] = C_1$$

$$C_0(1-X)^3 = C_1$$

$$(1-X)^3 = \frac{C_1}{C_0}$$

$$(1-X) = \sqrt[3]{\frac{C_1}{C_0}}$$

$$X = 1 - \sqrt[3]{\frac{C_1}{C_0}}$$

$$\eta(\%) = 1 - \sqrt[3]{\frac{C_1}{C_0}} \times 100\%$$

$$2. \quad \text{變異係數} = \frac{\text{標準偏差}}{\text{平均值}}$$

3. 平均質量濃度 = 區間濃度總和/採樣總筆數

4. 尖峰值平均 = 各尖峰值總和/峰值總筆數

叁、結果與討論

3.1 以油滴作為微粒產生來源的穩定性實驗結果

2021 年 4 月 2 日在大漢技術學院實驗室進行以油滴作為微粒產生來源的穩定性實驗(以下簡稱油滴實驗)，以 15 分鐘為測量基準，每 30 秒紀錄 1 筆濃度值，探討模擬炭烤業者將油滴入炭火中產生微粒，測得分析結果(如圖 3.1-1)如下：

經由六次油滴實驗結果(表 3.1-1)，發現 $\text{PM}_{2.5}$ 總平均質量濃度介於 $374 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 1,161 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間變動，峰值平均值介於： $5,362 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 10,340 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，變異係數介於 12%~34%，多超過 15%，由此結果可知，以油滴作為微粒產生源無法產生穩定濃度的微粒，推究其原因，可能由於木炭燃燒溫度無法一致，造成油滴落至木炭時，每次所產生之煙霧因燃燒溫度不同，所產生煙霧濃度變化較大。

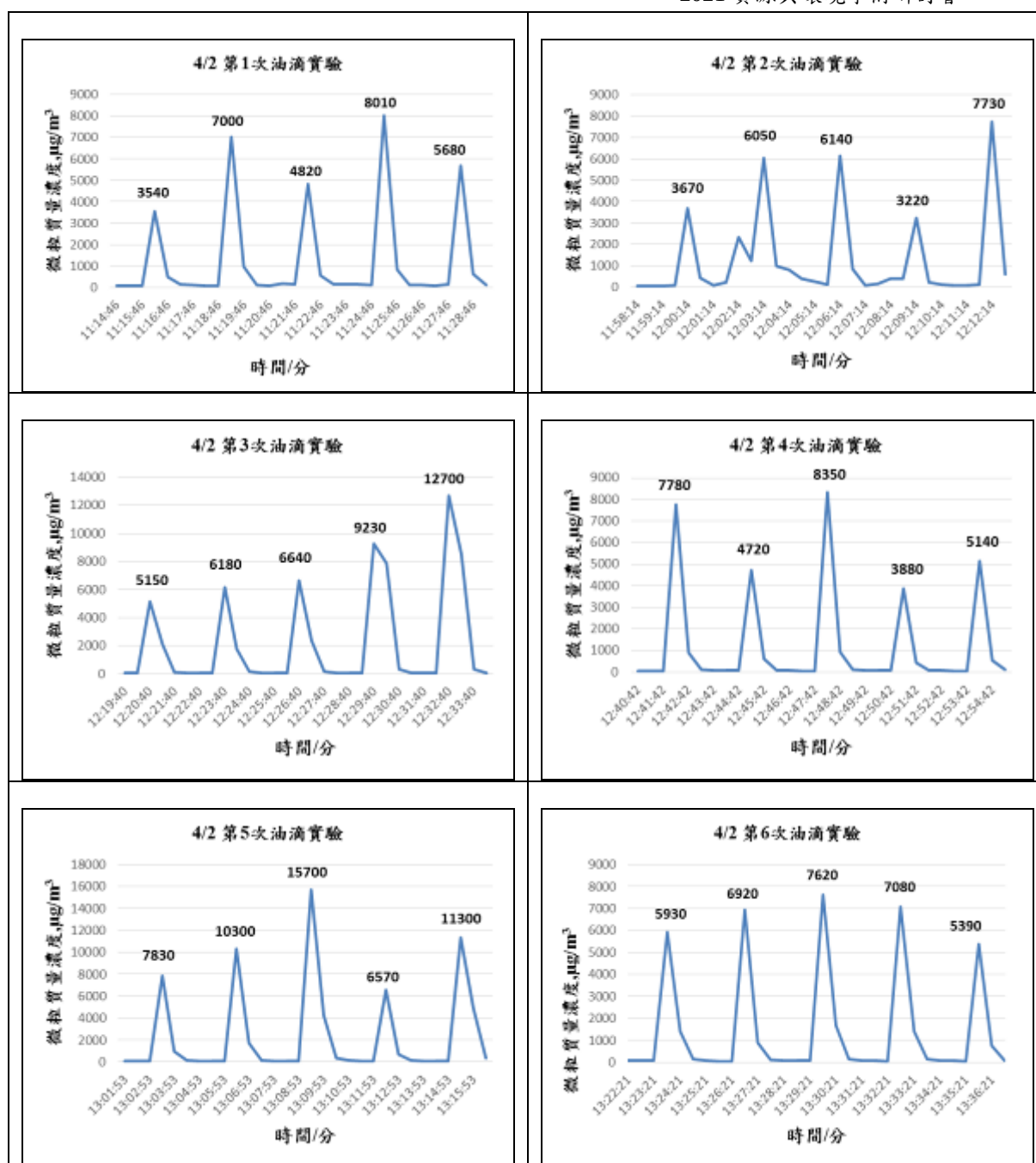
圖 3.1-1 以即時性儀器量測PM_{2.5} 六次油滴實驗曲線圖

表 3.1-1 以油滴作為微粒產生來源的穩定性實驗結果綜整

採樣時間	總平均值 (µg/m ³)	峰值平均值 (µg/m ³)	標準差(µg/m ³)	變異係數(%)
2021-0402-(11:37-11:52)	1,161	5,810	1,575	27%
2021-0402-(11:58-12:12)	399	5,362	1,682	31%
2021-0402-(12:19-12:34)	691	7,980	2,716	34%
2021-0402-(12:40-12:55)	374	5,974	1,764	30%
2021-0402-(13:01-13:16)	706	10,340	3,168	31%
2021-0402-(13:22-13:36)	437	6,588	811	12%

3.2 以拜香作為微粒產生來源的穩定性實驗結果

前節(3.1 節)以油滴作為微粒產生來源無法產生穩定濃度的微粒濃度，因此，參考曾俊晏，2019[4]碩士論文之實驗，設計以拜香作為微粒產生來源進行穩定性實驗。

以即時性量測儀器監測PM_{2.5} 實驗(燒香 100 隻，未開設靜電機採樣 1 小時)共 6 次(如圖 3.2-1)，研究結果顯示 1-10 分鐘為燃煙濃度上升期，11-30 分鐘為燃煙穩定期，31-60 分鐘為燃煙濃度下降期；而 11-30 分鐘質量濃度平均值介於 903~1292 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，11-30 分鐘所產生微粒質量濃度的變異係數介於 4.6~9.4%(如表 3.2-1)，顯示以拜香作為微粒產生源可獲得穩定濃度的微粒。

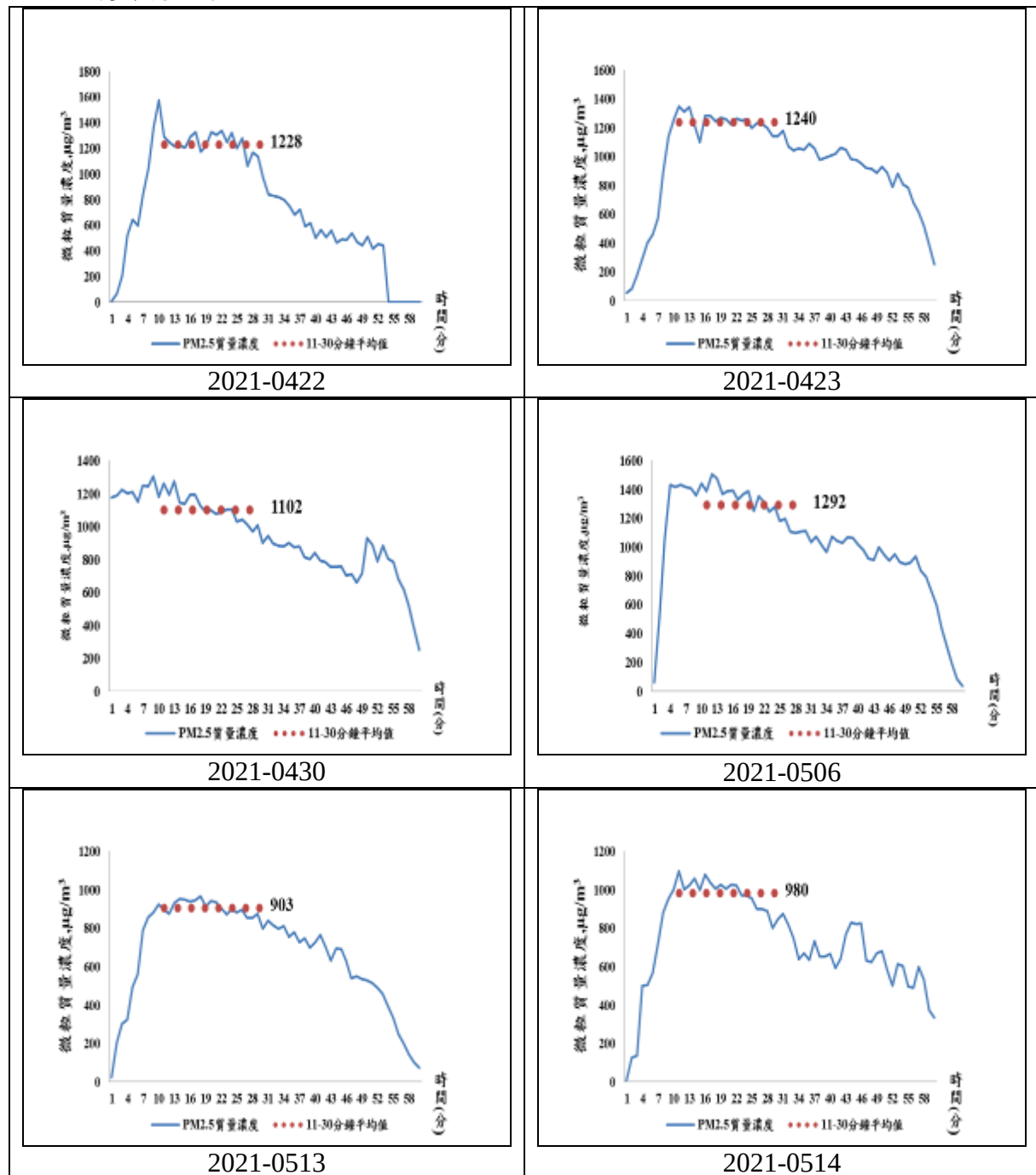


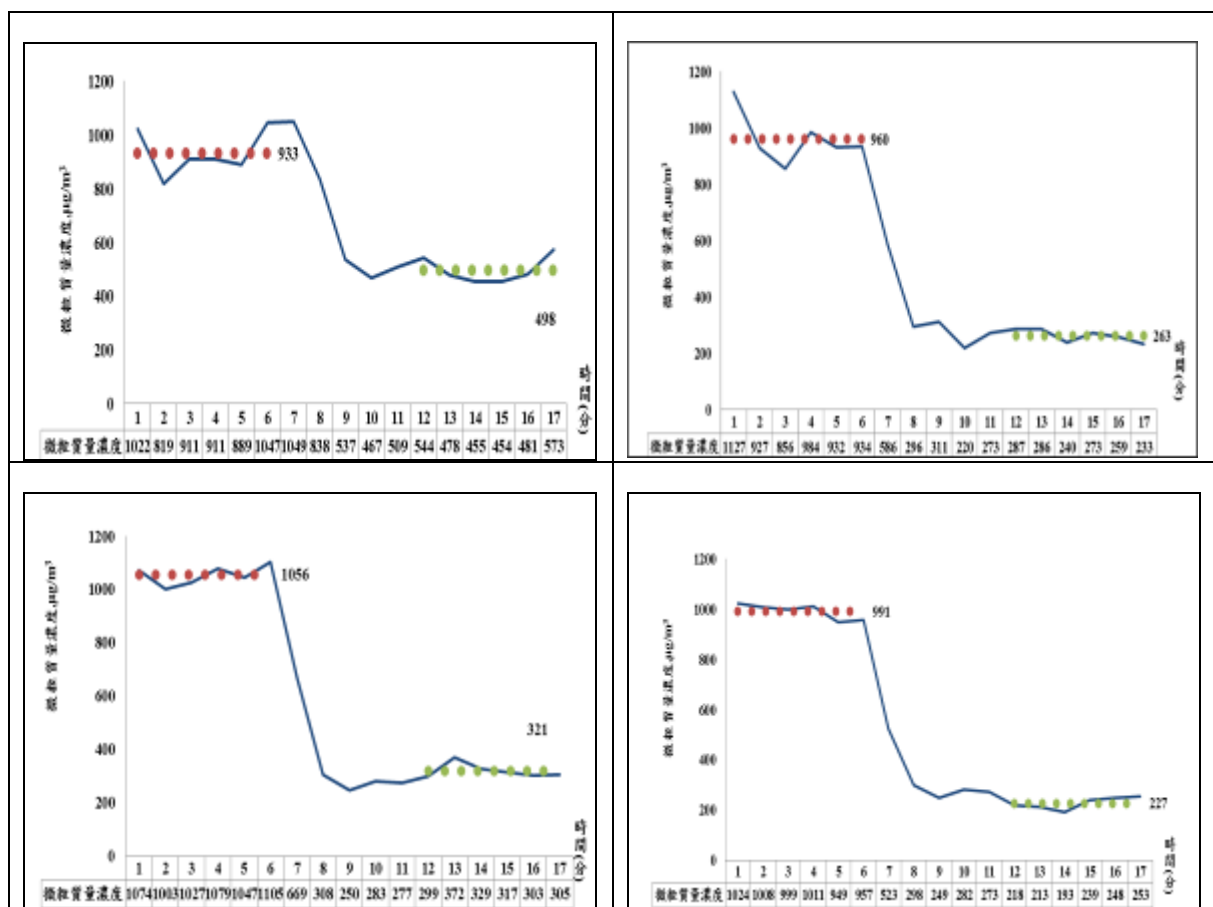
圖 3.2-1 以即時性儀器量測連續燒香 1 小時每分鐘PM_{2.5} 平均值曲線圖

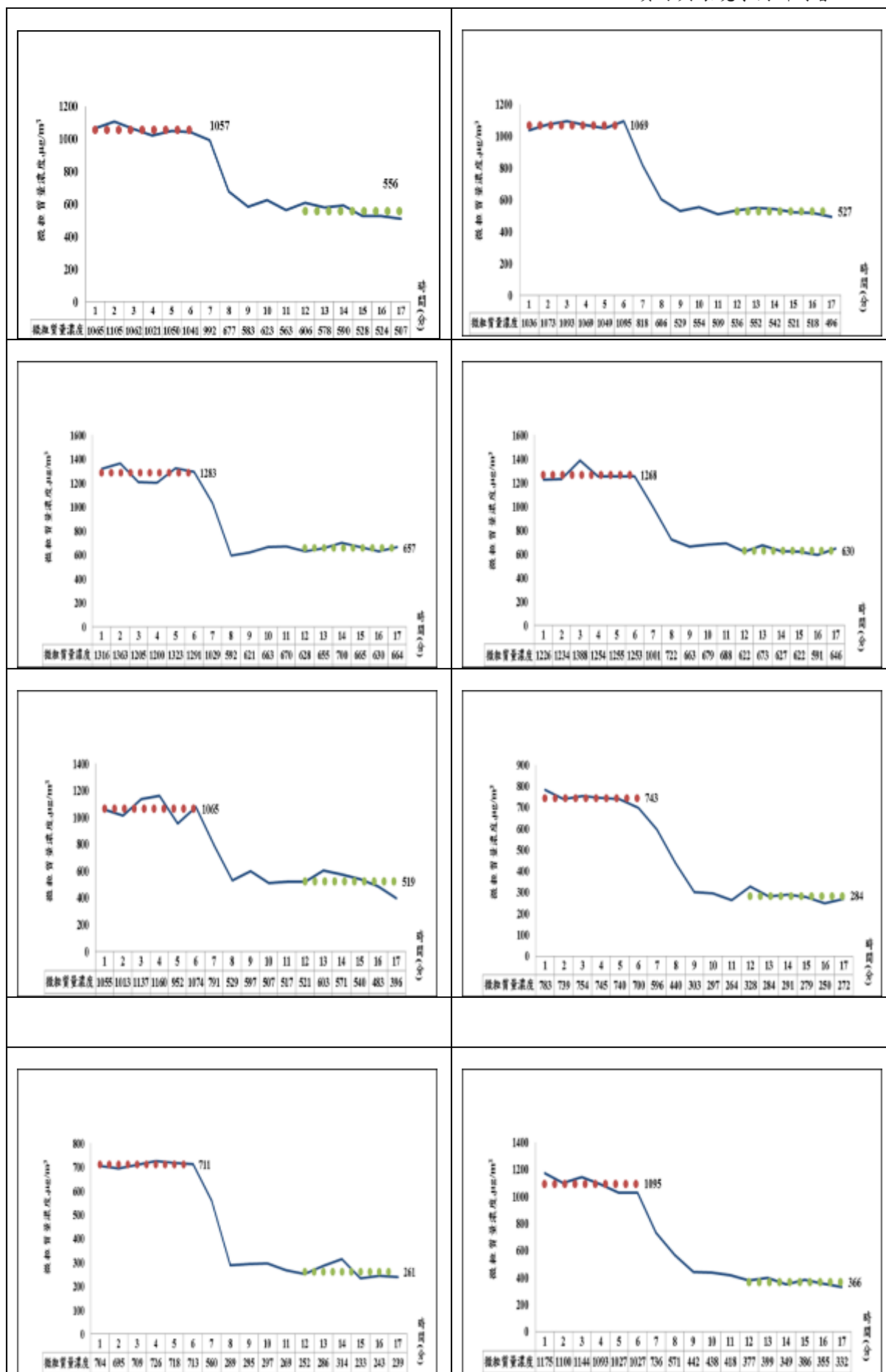
表 3.2-1 以拜香作為微粒產生來源的穩定性實驗結果綜整

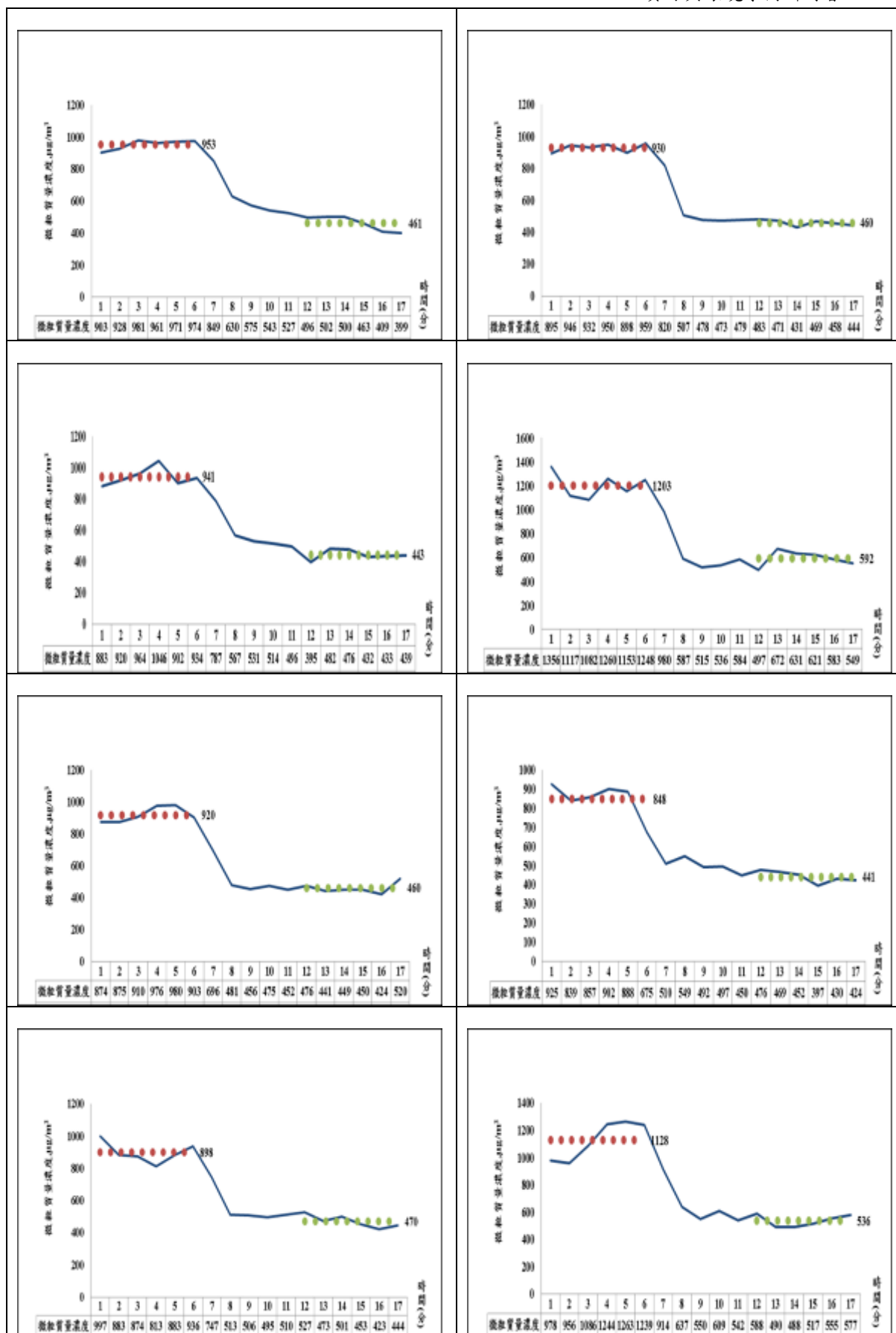
採樣時間	平均值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	標準偏差($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	變異係數(%)
2021-0422-(09:58-10:55)	1,228	91.74	7.5%
2021-0423-(10:00-11:00)	1,240	62.09	5%
2021-0430-(10:00-11:00)	1,102	91.74	8.3%
2021-0506-(10:19-11:19)	1,292	122.01	9.4%
2021-0513-(09:57-10:57)	903	41.49	4.6%
2021-0514(09:33-10:33)	980	75.40	7.7%

3.3 靜電集塵器防制效率實驗

由前節實驗結果得知使用拜香可產生較穩定之微粒質量濃度，期微粒穩定期為拜香開始點燃的 11 至 30 分鐘，因此在進行靜電集塵器防制效率實驗，以拜香開始點燃起進行 30 分鐘的 $\text{PM}_{2.5}$ 量測，每 1 秒紀錄 1 筆濃度值，於第 11~16 分鐘開始的監測數據粒列入防制前的微粒濃度量測，第 17 分鐘開啟靜電集塵器，第 17~21 分鐘為靜電集塵器的暖機期，第 22 分鐘至 27 分鐘為防制後質量濃度的量測期，藉由靜電集塵器開啟前後的微粒質量濃度監測結果，計算業者設置之靜電集塵器防制效率，實驗曲線圖如圖 3.3-1。







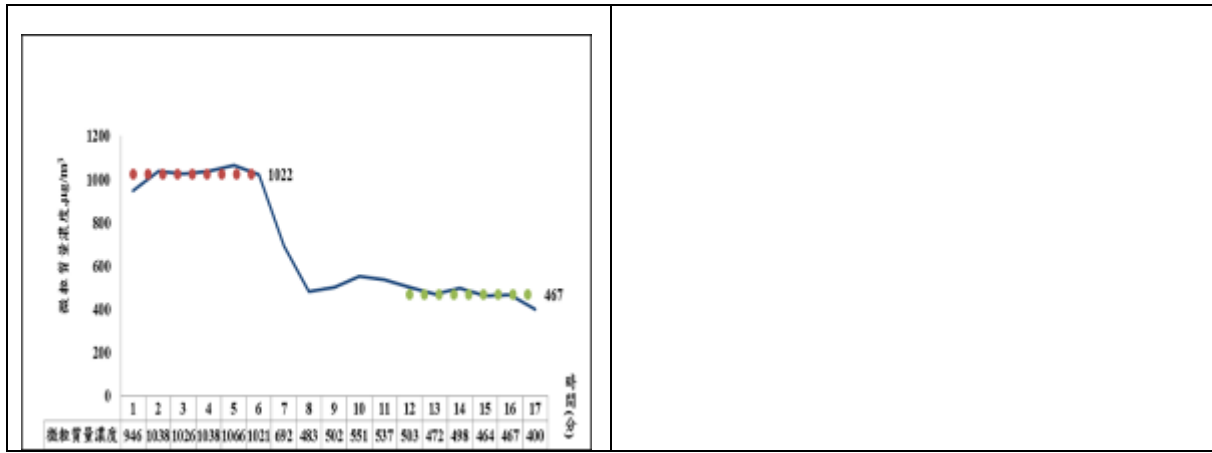


圖 3.3-1 東大門第0家烤肉串以即時性儀器量測PM_{2.5}曲線圖

本次研究共進行 21 次實驗，檢測結果如表 3.3-1，若以實驗執行時間順序加以說明，自 2021 年 4 月 22 日執行清洗後 14 天的防制效率為 46.7%，隨後攤商清洗靜電集塵板，4 月 23 日執行清洗後第 1 天的防制效率介於 69.6~77.1%之間，平均防制效率為 73.0%；4 月 30 日執行清洗後第 7 天的防制效率介於 47.5~50.7%之間，平均防制效率為 49.1%；5 月 6 日執行清洗後第 14 天的防制效率介於 48.8~50.7%之間，平均防制效率為 50.1%。

自 2021 年 5 月 7 日至 5 月 14 日進行第二周期的實驗。期間廠商由三組靜電集塵器串連的設備其中有 1 組有異常，使得 5 月 7 日執行清洗後第 1 天的防制效率介於 61.8~66.6%之間，平均防制效率為 63.9%；5 月 13 日執行清洗後第 7 天的防制效率介於 50.6~53.3%之間，平均防制效率為 51.5%；5 月 14 日執行清洗後第 8 天的防制效率介於 47.7~54.3%之間，平均防制效率為 50.5%。隨後實驗受到全國疫情三級警戒導致東大門夜市暫停營業，實驗無法持續。

由實驗結果顯示，清洗後第 1 天後的最佳防制效率為 73 %；清洗後第 7 天的防制效率為 49.1~51.5%(平均 50.3%)；清洗後 8 天其防制效率為 50.5%；清洗後 14 天後防制效率為 46.7~50.1%(平均 48.4%)。顯示隨著使用天數的增加其防制效率隨之下降，使用 1 週靜電集塵器的防制效率下降 21.5~23.9%(平均 22.7%)，使用 2 週後與使用 1 週的防制效率相比下降 1.9%，兩者差異不大，顯示每週清洗 1 次將可維持良好之防制效果，2 週清洗 1 次也可維持防制效率達 50%以上，而東大門攤商清洗頻率最多為每月 1 次，次多為 3 個月 1 次，如依照本研究量測結果，超過 1 個月以上始進行靜電集塵器清洗作業，恐造成防制效率不佳，使得餐飲油煙逸散於東大門環境當中，對長時間暴露於東大門夜市之業者，將造成身體之負擔，而遊客也將暴露於高濃度PM_{2.5}環境下。

表 3.3-1 夜市業者靜電集塵器PM_{2.5}防制效率量測結果綜整表

案 例	風車 轉速	整體 去除 率	單一去 除率	C ₀ 平均值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	C ₁ 平均值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	C ₀ 標準 偏差 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	C ₁ 標準 偏差 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	C ₀ 變異 係 數	C ₁ 變異 係 數	備 註
2021/4/22 清洗後 14 天	6000	46.7%	18.89%	933	498	78.4	44.92	8%	9%	
2021/4/23 清洗後 1 天(1)	6000	72.5%	35.07%	960	263	83.86	21.03	9%	8%	
2021/4/23 清洗後 1 天(2)	6000	69.6%	32.66%	1056	321	34.2	24.96	3%	8%	
2021/4/23 清洗後 1 天(3)	6000	77.1%	38.79%	991	227	28.13	21.16	3%	9%	
2021/4/30 清洗後 7 天(1)	6000	47.5%	27.51%	1057	556	25.94	37.33	2%	7%	
2021/4/30 清洗後 7 天(2)	6000	50.7%	29.76%	1069	527	21.61	18.41	2%	3%	
2021/5/6 清洗後 14 天(1)	4950	48.8%	28.44%	1283	657	60.79	24.54	5%	4%	更換抽 油煙管
2021/5/6 清洗後 14 天(2)	4950	50.3%	29.53%	1268	630	54.74	24.9	4%	4%	
2021/5/6 清洗後 14 天(3)	6000	51.3%	30.19%	1065	519	70.61	66.64	7%	13%	
2021/5/7 清洗後 1 天(1)	4950	61.8%	39.19%	743	284	24.31	23.58	3%	8%	一台靜 電機故 障
2021/5/7 清洗後 1 天(2)	4950	63.2%	39.36%	711	261	9.84	29.08	1%	11%	
2021/5/7 清洗後 1 天(3)	6000	66.6%	42.16%	1095	366	54.76	23.01	5%	6%	
2021/5/13 清洗後 7 天(1)	6000	51.6%	30.42%	953	461	29.11	43.12	3%	9%	
2021/5/13 清洗後 7 天(2)	6000	50.6%	29.70%	930	460	25.1	17.64	3%	4%	
2021/5/13 清洗後 7 天(3)	6000	53.0%	31.42%	941	443	53.15	29.55	6%	7%	
2021/5/13 清洗後 7 天(4)	4000	50.8%	29.82%	1203	592	94.37	57.45	8%	10%	
2021/5/14 清洗後 8 天(1)	6000	50.0%	29.28%	920	460	43.34	30.83	5%	7%	
2021/5/14 清洗後 8 天(2)	6000	48.0%	27.89%	848	441	82.02	27.41	10%	6%	
2021/5/14 清洗後 8 天(3)	6000	47.7%	27.65%	898	470	57.13	35.04	6%	7%	
2021/5/14 清洗後 8 天(4)	4950	52.4%	31.06%	1128	536	127.72	39.87	11%	7%	
2021/5/14 清洗後 8 天(5)	4950	54.3%	32.28%	1022	467	36.86	33.4	4%	7%	

肆、結 論

本研究以自行設計的量測系統，利用拜香作為微粒產生來源，透過實驗的設計，建立夜市攤商靜電集塵器去除效率的實際量測方法，同時配合集塵板清洗維護期程，於清洗後不同天數分別進行靜電集塵器的去除率實驗，以了解集塵板的最佳清洗頻率，所得結論說明如下：

1. 本研究以油滴作為微粒產生源，經由六次實驗結果顯示， $PM_{2.5}$ 總平均質量濃度介於 $374 \mu g/m^3 \sim 1,161 \mu g/m^3$ 之間變動，峰值平均值介於 $5,362 \mu g/m^3 \sim 10,340 \mu g/m^3$ ，變異係數介於 12%~34%，多超過 15%，顯示以油滴作為微粒產生源無法產生穩定濃度的微粒，推究其原因，可能由於木炭燃燒溫度無法一致，造成油滴落至木炭時，每次所產生之煙霧因燃燒溫度不同，所產生煙霧濃度變化較大。
2. 本研究選定東大門第 O 家烤肉串靜電集塵器做為實驗對象，以即時性量測儀器監測 $PM_{2.5}$ 實驗(燒香 100 隻，未開設靜電機採樣 1 小時)共 6 次，結果顯示 1-10 分鐘為燃煙濃度上升期，11-30 分鐘為燃煙穩定期，31-60 分鐘為燃煙濃度下降期；而 11-30 分鐘質量濃度平均值介於 $903 \sim 1292 \mu g/m^3$ ，11-30 分鐘所產生微粒質量濃度的變異係數介於 4.6~9.4%，顯示以拜香作為微粒產生源可獲得穩定濃度的微粒。
3. 本研究以東大門夜市第 O 家烤肉串業者設置的靜電集塵器進行防制效率量測，以拜香為微粒的產生來源，以即時性微粒監測儀器量測未開啟及開啟防制設備的 $PM_{2.5}$ 質量濃度，藉以計算防制設備的防制效率，共進行 21 次實驗，結果顯示，清洗後第 1 天後的最佳防制效率為 73 %；清洗後第 7 天的防制效率為 49.1~51.5%(平均 50.3%)；清洗後 8 天其防制效率為 50.5%；清洗後 14 天後防制效率為 46.7~50.1%(平均 48.4%)。顯示隨著使用天數的增加其防制效率隨之下降，使用 1 週靜電集塵器的防制效率下降 21.5~23.9%(平均 22.7%)，使用 2 週後與使用 1 週的防制效率相比下降 1.9%，兩者差異不大，顯示每週清洗 1 次將可維持良好之防制效果，2 週清洗 1 次也可維持防制效率達 50% 以上。

誌謝

本研究首要感謝指導教授許文昌 博士以及土環系學姊宥琳及學長李恆的多方教導，同時感謝祥威環境科技同仁協助以及東大門夜市攤商的配合，最後要感謝先生東霖全力支持，謹致由衷謝忱。

參考文獻

- [1] Ping Zhao, Kuo-Pin Yu, Chi-Chi Lin, "Risk assessment of inhalation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in Taiwanese workers at night markets," *Int Arch Occup Environ Health*, 84(3), 231–237, 2011.
- [2] 張筱玲、張淑如、陳秋蓉、宋鴻樟，〈餐飲業勞工疾病調查研究〉，行政院勞委會勞工安全衛生研究所職業醫學暨勞動保健研究成果發表會論文集，2002。。
- [3] 行政院環境保護署，甲乙級空氣汙染防制專責人員訓練班教材。
- [4] 曾俊晏，〈即時性微粒監測儀對逸散性粒狀污染物排放特性之案例研究〉，大漢技術學院土環系碩士論文，2019。

利用觸媒去除空氣中氮氧化物 Application of Catalyst to Abate NO_x in Air

陳彥佑¹ 邱求三²

Yan-You Chen¹ Chyow-San Chiou²

1 國立宜蘭大學環境工程學研究所 碩士班

Graduate student, Department of Environmental Engineering

National Ilan University

2 國立宜蘭大學環境工程學系 教授

Professor, Department of Environmental Engineering

National Ilan University

* Corresponding author: cschiou@niu.edu.tw

摘要

隨著時代的發展進步，工業和交通燃燒的石化燃料也越多，因而造成空氣汙染，而其中氮氧化物會對環境造成許多危害，所以，國家便對氮氧化物的排放訂定了排放標準。氮氧化物於燃燒尾氣中，絕大多數是一氧化氮(NO)，其組成占比約為 90-95%，一氧化氮水溶性很低，一般的濕式洗滌塔很難直接應用於去除氮氧化物。若將一氧化氮(NO)轉化成水溶性較高的二氧化氮(NO₂)，便提高可利用水洗法來處理氮氧化物的可行性。

本研究嘗試利用實驗室自行製作的觸媒氧化劑來處理氮氧化物，以NO為進流氣體，探討溫度、NO濃度、觸媒量等實驗參數對處理效率的影響，並探討觸媒管後串接濕氏洗滌瓶時，對氮氧化物去除效率的影響。實驗發現，於反應溫度 150°C，觸媒量 30 克時，處理效率較好，觸媒管後接洗滌瓶，可提升處理效率。

關鍵詞：一氧化氮、二氧化氮、氧化劑

壹、前言

1. 氮氧化物介紹

氮氧化物(NO_x)分別是NO、NO₂、NO₃、N₂O、N₂O₃、N₂O₄、N₂O₅ 的統合，在空氣中的NO_x通常是由人為燃燒及動植物活動所產生的，而NO經過氧化後會產生NO₂這是導致空氣汙染的原因之一。^[1-3]

(1) 自然形成:

在自然環境中有許多方式會產生氮氧化物，像是動植物活動所產生的固氮和脫硝作用，閃電造成大氣中氮氣及氧氣的化合，生物厭氧分解所產生的氨氣在大氣中發生再氧化^[4]。

(2) 人為形成:

人為產生氮氧化物的方式可以分為燃燒及非燃燒兩種，在燃燒產生的方式中可以分為由移動污染源產生的，像是汽機車、飛機，以及由固定污染源所排放的，例如火力發電廠、鍋爐、焚化爐等。在非燃燒的產生方式則有在工廠中電鍍及炸藥爆破的過程有所產生，或是以染料、硝酸等化學物品的製成使用中所產生的。

(3) 氮氧化物對環境危害:

氮氧化物會與空氣中的水分結合，反應生成硝酸及亞硝酸，是酸雨的主要成分。酸雨會對環境中的動植物及土壤等造成傷害。酸雨會溶解土壤中的金屬元素，導致土壤礦物質流失，會導致農作物減少。酸雨會改變水中的酸鹼值，影響湖泊、河川水中生物的生存環境。

氮氧化物中 90-95%為一氧化氮，一氧化氮在大氣中迅速的與氧氣反應生成二氧化氮，在紫外線的照射之下與碳氫化合物(C、H₂)反應產生光化學作用，形成光化學煙霧(Photochemical smog)，傷害植物，並使大氣能見度降低。光化學煙霧形成機制之簡化如下^[5]:

- (1) $\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}^\cdot$
- (2) $\text{O}_2 + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$
- (3) $\text{O}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$
- (4) $\text{O} + \text{RHR}^\cdot \rightarrow (\text{多種自由基}) + \text{產物(包含醛類)}$
- (5) $\text{O}_3 + \text{RH} \rightarrow \text{R}^\cdot + \text{產物(包含醛類)}$ (R[·] 為一可能含氧或不含氧之自由基)

(4) 氮氧化物對人體危害

低濃度的氮氧化物會刺激人體的眼睛、鼻子、喉嚨及肺，造成呼吸急促咳、嗽或噁心等症狀。而呼吸到高濃度的氮氧化物之後會造成呼吸道灼傷、上呼吸道腫脹、肺積水及死亡。根據國際癌症研究機構(The International Agency for Research on Cancer (IARC))，氮氧化物歸類在非潛在的致癌物質

美國職業安全及健康管理局(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)規定勞工在工作場所一天 8 小時工時或是一週 40 小時工時空氣中,一氧化氮的濃度不能超過 25ppm,二氧化氮的在工作場所中的濃度 15 分鐘暴露量的極限是 5ppm。而根據台灣勞工作業場所容許露標準,工作場工時空氣中平均容許濃度一氧化氮為 25ppm,二氧化氮為 5ppm^[6]。

2. 氮氧化物檢測

(1) 化學發光法(Chemiluminescence)

化學發光法是在氮氧化物分析儀中利用氣相的一氧化氮(NO)與臭氧(O₃)反應,使NO活化成NO₂此時產生的為NO₂*激發態,當NO₂*激發態回復至基態時便會產生波長大於 600nm的螢光。此螢光的強度與NO的濃度成正比,因過公式計算螢光的強度便可得知一氧化氮的濃度。

(2) NO_x氣體感測器(NO_x gas sensor)

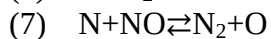
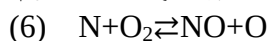
依照其測量原理可以分為半導體氣體感測器(Metal oxide semiconductor gas sensor)、固態電解質氣體感測器(Solid state electrolyte gas sensor)、觸媒燃燒式氣體感測器(Catalytic combustion gas sensor)以及電化學氣體感測器(Electrochemical gas sensor)

本實驗使用的是含有電化學氣體感測器的手提式煙道分析儀。該電化學氣體感測器是由陽極、陰極以及電解質液所組成,當氣體通過選擇性擴散膜穿透該電池,並產生與所吸收氣體成比例的電流,測量到此電流後將其數位化並進行溫度補償,最後透過微處理器處理顯示。

3. NO_x產生機制

(1) 燃料型氮氧化物(Fuel NO_x)

石化燃料中多數含有以C-N鍵結形式存在的氮,此單鍵結構在燃燒過程中易與氧結合形成氮樣化物,其生成機制與反應溫度、燃料種類有關。下為反應式:



(2) 熱力型氮氧化物(Thermal NO_x)

大氣中原本穩定的氣體分子會因為燃燒產生的高溫而被破壞,產生氮、氧原子或是OH等自由基,這些活性物質再與其他氣體分子反應進而產生氮氧化物。此生成方式為一吸熱反應,需在高溫環境下才會產生。下為反應式^[7]:



(3) 快速型氮氧化物(Prompt NO_x)

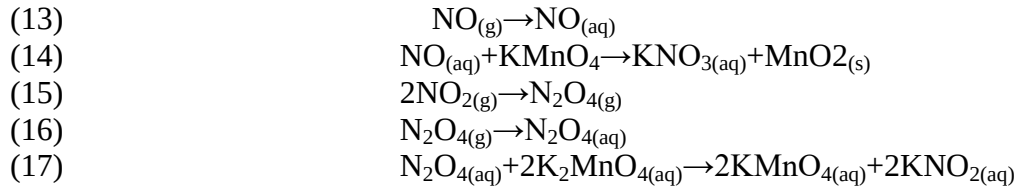
大氣中原本穩定的氣體分子會因為燃燒產生的高溫而被破壞,產生氮、氧原子或是OH等自由基,這些活性物質再與其他氣體分子反應進而產生氮氧化物。此生成方式

為一吸熱反應，需在高溫環境下才會產生。下為反應式：



4. 氧化-吸收法去除 NO_x ^[8]

一氧化氮^[9]在水中之溶解度很低，因此使用強氧化劑使一氧化氮氧化成二氧化氮或四氧化二氮^[10]，使其溶於水後再加以吸收，常用之氧化劑有過錳酸根、過錳酸鉀^{[11][12]}以及氫氧化鉀。下為反應式：



5. 吸附法去除 NO_x

吸附法是利用吸附劑來吸附煙道中的氣體，再利用其會因為溫度和壓力改變的特性，讓吸附的氣體進行脫附反應。

(1) 活性碳吸附法^[13]

活性碳對於低濃度的氮氧化物有很強的吸附能力，約有 80% 但由於活性碳在 300°C 以上的環境中有可能自燃，所以對於吸附和再生造成困難。

(2) 矽膠吸附法

矽膠對水氣的吸附能力較強，含水分的氮氧化物可用矽膠去濕。乾燥氣體因矽膠的催化作用被氧化為二氧化氮並被矽膠吸附，吸附一般在 30°C 以下進，然後加熱脫附再生。矽膠在溫度超過 200°C 時會乾裂，這種性質限制它的應用範圍。

6. 研究目的

本研究利用觸媒氧化劑來處理空氣中的氮氧化物，實驗中以一氧化氮為測試物種，探討觸媒氧化劑在不同溫度、不同氧化劑重量及不同進流氣體濃度下的處理效率，後續並探討接上洗滌瓶對處理效率的影響。

貳、實驗方法

1. 實驗儀器

- (1)手提式煙道分析儀:E4500，美國Isumnt出品。
- (2)氣體質量流量控制器讀表:KD-1000，台灣高敦科技股份有限公司出品。
- (3)質量流量控制器:5800E series，美國BrooksImn出品。
- (4)電子天秤:ATY224，日本SHIMADZU股份有限公司出品。
- (5)超音波振盪器:DC200H，台灣台達電子工業股份有限公司出品。
- (6)管狀高溫爐:D-35，台灣DENG YNG公司出品。
- (7)石英管:內徑 22mm，台灣和裕科技有限公司出品。

2. 分析儀器-手提式煙道分析儀

通過儀器內部的幫浦，使用氣體探頭吸入氣體樣品。氣體樣品通過過濾器冷卻乾燥並清除濕氣和雜質/顆粒，然後通過電化學氣體感測器分析氣體。分析儀器中的各種測量感測器有不同的反應時間，因此需要等待至少 3 分鐘以上以確保獲得的數據有可靠性。在每次測驗前都必須進行零點校正，確保氧氣的讀數在 20.8~21.0%之間。

3. 實驗步驟

本實驗所使用的實驗裝置如圖 2-1 所示，氣體是由氮氧化物與空氣兩道氣體組成，接著兩道氣體混合均勻經由質量流量控制氣調整所需的氣體流量，以控制實驗設定的氣體濃度。本實驗共進行五組實驗，分別改變反應溫度，改變一氧化氮濃度，改變氧化劑重量以及使用不同材質之觸媒進行實驗

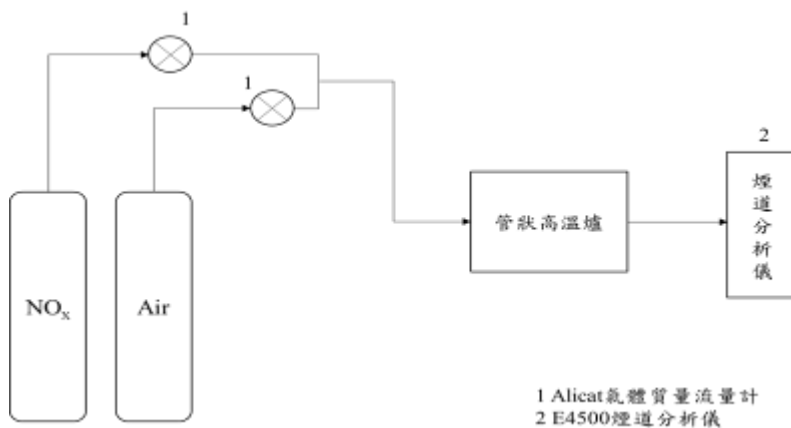


圖 2-1 實驗設備裝置圖

3-1.不同溫度對去除效率之探討

在此實驗中，取 30 g 的觸媒置入內徑 22 mm 石英管中，以銅網固定住觸媒後，將石英管放入管狀高溫爐中，通入實驗氣體。實驗參數設定為，空氣每分鐘為 1L，氮氧化物每分鐘為 20 mL。測試溫度分別為室溫、100℃、150℃、200℃、250℃、300℃ 如表 2-1

表 2-1 觸媒反應溫度變化實驗參數

項目	參數
觸媒	氧化劑
反應器	石英管(內徑 22mm)
溫度	室溫、100℃、150℃、200℃、250℃、300℃
持續時間	2 小時
進流濃度	1000 ppm

3-2. 不同煙氣濃度對去除效率之探討

在此實驗中，取出 30g 的觸媒置入內徑 22mm 石英管中，以銅網固定住觸媒後，將石英管放入管狀高溫爐中，通入實驗氣體。實驗參數設定為，空氣每分鐘 1L，氮氧化物每分鐘 10、20、30、40、50mL。測試溫度 150℃ 如表 2-2

表 2-2 觸媒濃度變化實驗參數

項目	參數
觸媒	氧化劑
反應器	石英管(內徑 22mm)
溫度	150℃
持續時間	2 小時
進流濃度	500、1000、1500、2000、2500 ppm

3-3. 不同觸媒重量對去除率之探討

在此實驗中是以不同重量的觸媒來進行，分別是 15g、20g、25g、30g 的觸媒。將其置入內徑為 22mm 的石英管中，以銅網固定住觸媒後，將石英管放入管狀高溫爐中，通入實驗氣體。實驗參數設定為空氣每分鐘 1L，氮氧化物每分鐘 20mL。測試溫度為 150℃ 如表 2-3

表 2-3 觸媒重量變化實驗參數

項目	參數
觸媒	氧化劑 15g、20g、25g、30g
反應器	石英管(內徑 22mm)
溫度	150℃
持續時間	2 小時
進流濃度	1000 ppm

3-4. 不同觸媒對去除率之探討

在此實驗中使用不同 30g 重的觸媒來進行，分別為氧化劑觸媒、活性碳、活性氧化鋁，置入內徑 22mm 石英管中，以鋼網固定住觸媒後，將石英管放入管狀高溫爐中，通入實驗氣體。實驗參數設定為，空氣每分鐘 1L，氮氧化物每分鐘 20mL。測試溫度 150℃如表 2-4

表 2-4 不同觸媒變化實驗參數

項目	參數
觸媒	氧化劑、活性碳、活性氧化鋁
反應器	石英管(內徑 22mm)
溫度	150℃
持續時間	2 小時
進流濃度	1000 ppm

3-5. 氣體通過觸媒後有無經過洗滌瓶對去除率之探討

在此實驗中使用 30g 重的觸媒來進行，置入內徑 22mm 石英管中，以鋼網固定住觸媒後，將石英管放入管狀高溫爐中，通入實驗氣體，分別為氣體通過觸媒後有無進入洗滌塔。實驗參數設定為，空氣每分鐘 1L，氮氧化物每分鐘 20mL，洗滌塔為 1M NaOH。測試溫度 150℃如表 2-5

表 2-5 觸媒進入洗滌瓶變化實驗參數

項目	參數
觸媒	氧化劑
反應器	石英管(內徑 22mm)
溫度	150℃
持續時間	6 小時
進流濃度	1000 ppm

實驗數據計算

根據煙道分析儀所測量之氣體濃度差異，可計算一氧化氮及氮氧化物之去除率。

去除率方程式如下：

$$\text{NO 去除率} = \frac{[\text{NO}]_{\text{inlet}} - [\text{NO}]_{\text{outlet}}}{[\text{NO}]_{\text{inle}}} \times 100\% \quad (18)$$

$$\text{NOx 轉化率} = \frac{[\text{NOx}]_{\text{inlet}} - [\text{NOx}]_{\text{outlet}}}{[\text{NOx}]_{\text{inle}}} \times 100\% \quad (19)$$

叁、結果與討論

1. 不同溫度對去除效率之探討

在這組實驗中(圖 3-1)，探討不同反應溫度對於觸媒去除一氧化氮效率的影響，溫度分別為室溫、100℃、150℃、200℃、250℃、300℃，實驗結果如圖所示，從圖中可得知在通氣速度相同及觸媒重量相同的操作條件下，觸媒的轉換率是受到溫度變化影響的，在室溫到 250℃的範圍內，氧化劑的轉換率會隨著溫度增加而上升^[14,15]，而當反應溫度到達 250℃後，轉換率反隨溫度升高而降低。

圖 3-1 為各溫度測試 120 分鐘之結果，由圖 3-1 可得知室溫時效果僅有 82.15%，持續加溫效果則越好 200℃為最佳效果有 95.46%之去除率，當溫度超過 200℃時，去除效果則會緩慢降低

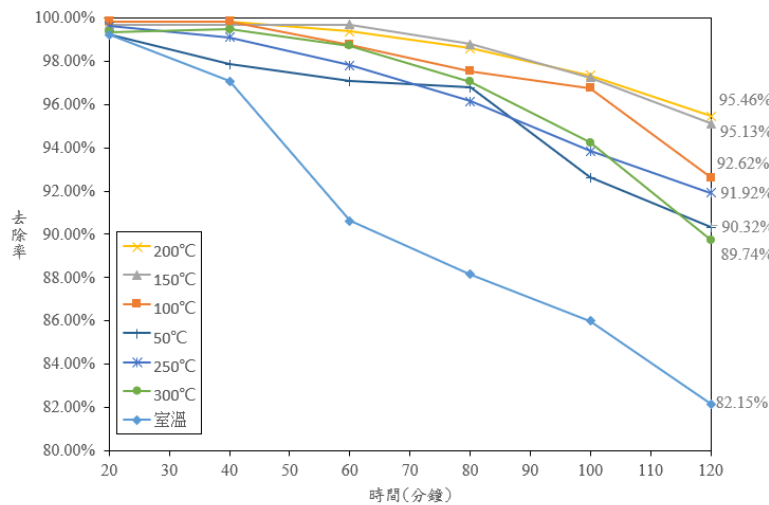


圖 3-1 觸媒在不同溫度下之NO去除率。

(觸媒:氧化劑 30g; 氣體: Air:1.0 L/min, NO: 1000 ppm)

2. 不同煙氣濃度對去除效率之探討

從前項數據可以得知最佳溫度為 150℃，因此在這組實驗中(圖 3-2)使用不同濃度的氮氧化物來進行實驗，氮氧化物的進流量為每分鐘 10、20、30、40，其對一氧化氮的去除率如下圖所示，在觸媒重量和反應溫度操作條件相同的情況下，進流端的一氧化氮流速會影響觸媒的去除效率，當進流端的氮氧化物進流量每分鐘 20mL(1000 ppm)時，在 120 分鐘一氧化氮的去除率有 95.46%，當進流端的氮氧化物進流量每分鐘 40mL(2000 ppm)時，在 120 分鐘一氧化氮的去除率僅有 61.74%，從數據中可得知，觸媒的去除率會隨氮氧化物的流量增加而下降。

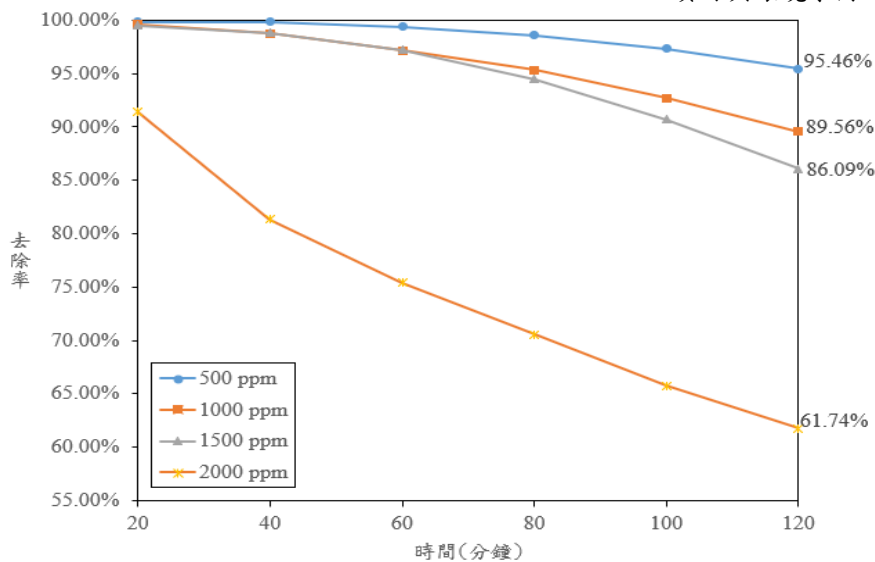


圖 3-2 觸媒在不同氮氧化物濃度下之NO去除率
(觸媒:氧化劑 30g; 氣體:Air:1.0 L/min)

3. 不同觸媒重量對去除率之探討

在這組實驗中(圖 3-3)，會使用不同觸媒的重量來進行測試，觸媒的重量分別為 15g、20g、25g、30g，實驗中反應溫度控制於 150℃，氮氧化物進流量為每分鐘 20mL(1000 ppm)，其對一氧化氮的去除率如下圖所示，從圖中可得知當觸媒重量只有 15g時去除率僅有 59.79%，放置的觸媒到 20g時轉化率提升到 73.32%，在氮氧化物流速相同和反應溫度相同的情況下，當放置的觸媒越多，觸媒對一氧化氮的去除率就越好。

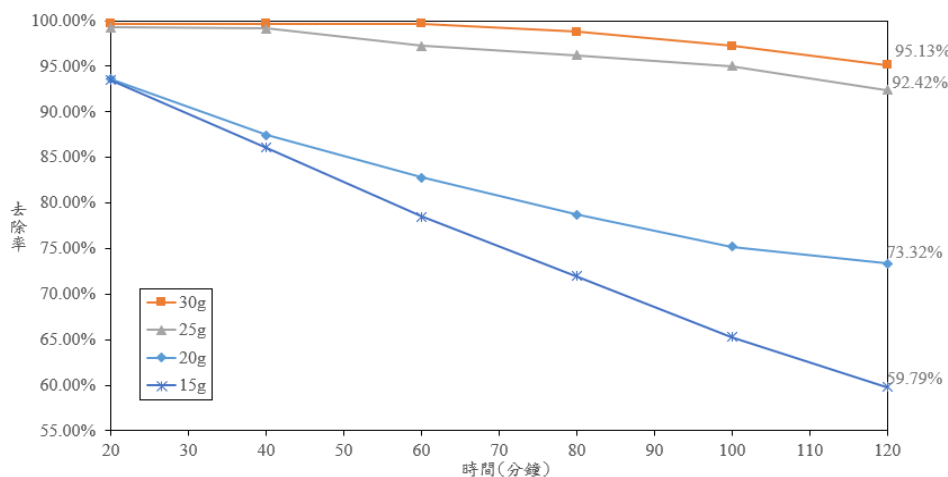


圖 3-3 觸媒在不同重量下之NO去除率。
(氣體:Air:1.0 L/min, NO: 1000 ppm)

4. 不同觸媒對去除率之探討

在這組實驗中(圖 3-4)，使用不同的觸媒來進行實驗，分別是氧化劑觸媒、活性碳、活性氧化鋁，氮氧化物每分鐘 20mL。測試溫度 150℃，其對一氧化氮的去除率如下圖所示。從途中可得知氧化劑觸媒在溫度 150℃時，其去除率在 120 分鐘時有 95.13%，活性碳及活性氧化鋁，在此實驗中，顯示其無法對一氧化氮進行去除。

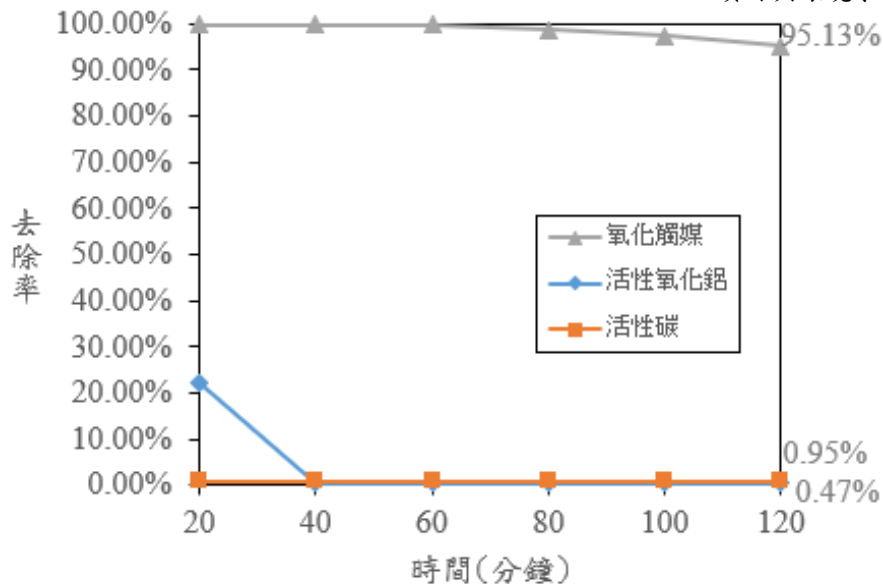


圖 3-4 氧化劑、活性碳、活性氧化鋁對NO之去除率。
(各材料均為 30g; 氣體: Air: 1.0 L/min, NO: 1000 ppm)

5. 氣體通過觸媒後有無經過洗滌瓶對去除率之探討

在這組實驗中(圖 3-5)，先讓氣體通過觸媒後，分別測試有無串接濕氏洗滌瓶，氮氧化物每分鐘 20mL。測試溫度 150℃。可得知經過觸媒後再經過洗滌塔，從煙道分析儀檢測，有經過洗滌瓶之去除率在 300 分鐘時有 78.96% 的去除率而未經過洗滌瓶在 300 分鐘時去除率剩下 43.73%，從數據中可得知，洗滌瓶和觸媒之搭配有助於提高一氧化氮之去除率。

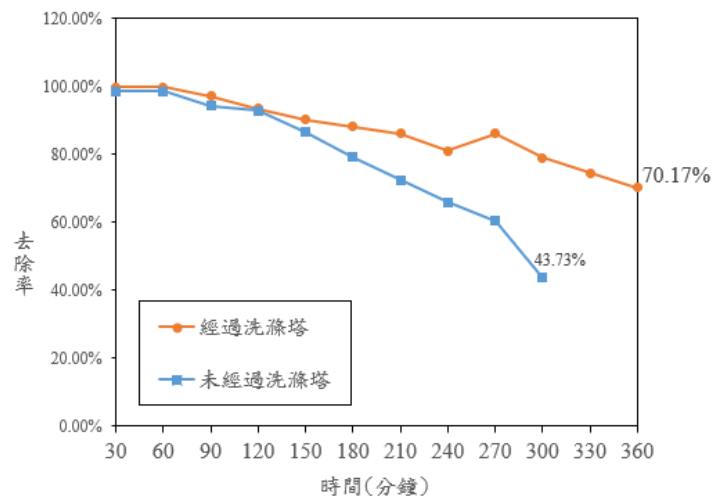


圖 3-5 氣體通過觸媒後有無經過洗滌瓶對去除率之比較
(觸媒: 氧化劑 30g; 氣體: Air: 1.0 L/min, NO: 1000 ppm)

肆、結 論

1. 反應溫度在 200℃ 以下的低溫範圍內時，觸媒的轉化率會隨著反應溫度的升高而增加；當溫度超過 200℃ 之後，觸媒的轉化率則會隨著反應溫度的升高而降低。
2. 在改變進料氮氧化物濃度的實驗中可以得知，隨著氮氧化物濃度的上升，觸媒的轉化率愈低。

3. 在NO為 1000 ppm時，隨著觸媒重量的增加，NO的去除率也隨之增加。當觸媒重量為 30g時，觸媒去除率達到最佳值，再增加觸媒量對NO的去除率提升效果不大，而當觸媒重量小於 15g時其觸媒的數量無法有效去除NO_x。
4. 使用活性碳時在未加熱時具有 60%的去除率，當活性碳加熱時其去除率會下降，使用活性氧化鋁，於未加熱和加熱的情況下，對NO的去除率均不佳，氧化觸媒對氮氧化物具最佳的去除率。
5. 觸媒在 300 分鐘時去除率剩下 43.73%，當觸媒配合洗滌塔後其去除率上升至 78.96%，可以得知 1M NaOH洗滌塔有助於提升對一氧化氮之去除率。

參考文獻

1. Yu HS, Zhu QY, Tan ZC., "Absorption of nitric oxide from simulated flue using different absorbents at room temperature and atmospheric pressure Appl ". Energy, pp.93:53, 2012.
2. 張君正，張木彬，“氮氧化物生成機制與控制技術之探討”，工業污染防治期刊，第 50 期，pp.19-35,1994。
3. 詹德隆，“鍋爐燃料與燃燒”，中華民國鍋爐協會，pp.67-87,1998。
4. ATSDR, "Tox FAQs for Nitrogen Oxides", 2002.
5. 施英隆，環境化學，五南圖書出版股份有限公司，pp.540，2008
6. 行政院勞動部，“勞工作業場所容許暴露標準”，2014。
7. Y. B. Zeldovich, "The Oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions", Acta Physicochimica USSR, Vol. 21, No. 4, pp. 577-628, 1947.
8. M. Machida, D. Kurogi, T. Kijima, "NO_x storage and reduction characteristics of Pd/MnO_x-CeO₂ at low temperature", Catal. Today, 84, pp.201, 2003.
9. K. Ramesh, L. Chen, F. Chen, Y. Liu, Z. Wang, Y. Han "Re-investigating oxidation mechanism over unsupported MnO, Mn₂O₃ and MnO₂ catalysts", Catal. Today, 131, pp.477, 2008
10. Sada, E., H. Kumazawa, N. Hayakawa, I. Kudo, T. Konodo, "Absorption of NO in Aqueous Solutions of KMnO₄", Chem. Eng. Sci., Vol.32, No.10, pp.1171-1175, 1977
11. D. Delimaris, T. Ioannides, "VOC oxidation over MnO_x-CeO₂ catalysts prepared by a combustion method", Appl. Catal. B, 84, pp.303, 2008.
12. Yaying Ji, Dongyan Xu, Mark Crocker, Joseph R. Theis, Christine Lambert, Agustin Bueno-Lopez, Deb Harris, Dave Scapens, "Mn-based mixed oxides for low temperature NO_x adsorber applications", Applied Catalysis A, General, 567, pp.90-101, 2018.
13. Spivey, J.J., 1988, Recovery of volatile organics from small industrial sources, Environ. Prog., 7, pp. 31-40
14. I. Atribak, I. Such-Basé, I. A. Bueno-López, J. Catal. 250, pp.75-84, 2007.
15. L. Guo, L. Guo, D. Zhao, Z. Gao, Y. Tian, T. Ding, J. Zhang, L. Zheng, X. Li, Catal. Today 297, pp.27-35, 2017.

利用靜電紡絲技術製備附載金屬離子奈米纖維用於去除微粒之研究
Study on nanofiber with metal ion prepared by electrospinning for particle removal

江英琦^{1*} 張章堂²

Ying-Chi Jiang¹ Chang-Tang Chang²

1 國立宜蘭大學環境工程學系 大學生

Student, Department of Environmental Engineering, National Ilan University

2 國立宜蘭大學環境工程學系 教授

Professor, Department of Environmental Engineering, National Ilan University

* Corresponding author: s96015c@gmail.com

摘 要

由於人為活動與奈米科技應用的增加，人們暴露於奈米及次微米微粒的機會隨之增加，常見微粒之分離技術如靜電集塵法、旋風集塵法、濕式洗滌法、過濾法等等，另外，傳統纖維濾材其纖維尺寸與孔徑大小直徑過大，且堆積密度難以控制。而奈米纖維具大表面積、小孔徑和高孔隙率等特點。靜電紡絲技術所製之奈米纖維易於攔截次微米到奈米微粒，且靜電紡絲技術操作簡單，易進行各種材質纖維製作，方便組裝與更換。

本研究為製作最佳效能纖維，探討不同參數(金屬離子、金屬離子濃度、電壓、轉速)進行製作各種纖維，經由過濾測試可得最佳製作條件。為探討添加不同金屬離子與不同濃度對各種粒徑微粒之過濾性能，本研究使用三種金屬離子(TiO_2 , AgNO_3 與 ZnO)進行過濾性能測試，以利得知最佳金屬離子濃度，其中使用 1.0wt% TiO_2 配製 Nylon 6(N6)之紡絲溶液，於電壓為 20kV 與轉速為 250rpm 時，進行靜電紡絲製備，於面速度為 4.0 cm/s 時，過濾效率約為 80.2%，壓損約為 20.6Pa，過濾品質約為 0.078 Pa^{-1} ；當電壓為 35kV 與轉速為 150rpm 時，過濾效率約為 98.8%，壓損約為 56.1Pa，過濾品質可達到 0.079 Pa^{-1} 。即提高電壓雖會增加過濾效率，但易增加過濾壓損，導致過濾品質不易提升。

關鍵詞：靜電紡絲、金屬離子、Nylon 6、微粒處理

一、前言

隨著現代工業的蓬勃發展，帶動了國家經濟與社會生活水平，卻也造成空氣污染使得人體健康受到危害，近年來人們對環境之要求與環保意識也逐漸提高，因此如何兼顧經濟發展與減少環境衝擊，將成為值得深入探討之議題[1]。根據世界衛生組織的報告，大多數與空氣污染相關的死亡來自非傳染性疾病。事實上，空氣污染會導致中風、肺癌、慢性阻塞性肺病及心血管疾病，除了對人類健康造成嚴重影響外，粒狀污染物還會影響生活環境，例如影響大氣能見度[2]。另外，空氣中廣泛存在生物氣溶膠，包括空氣傳播的病毒、細菌和花粉，吸入後會引發各種疾病，包括過敏[3]。

由於生活中細微粒(如PM_{2.5}與PM₁₀)特別多，對人體有多種危害，因此製作性能高及微粒過濾效果佳的靜電紡絲濾材頗為重要。而玻璃纖維、熔噴纖維等纖維，廣泛應用於各種空氣過濾裝置中，但這種纖維過濾裝置通常對細微米顆粒表現出較低的過濾效率[2]。然而，靜電紡絲技術操作方法簡單，且可製備超細纖維，此纖維具有大表面積、孔徑小及高孔隙率等優點，可有效解決超細顆粒的過濾問題[4]。另外，本研究為探討人造纖維對超細微粒(粒徑小於 1 μ m)之過濾性，乃於人造纖維中添加二氧化鈦、奈米銀及氧化鋅奈米顆粒以提升其過濾效能，並比較不同複合材料之效能變化。

目前利用許多聚合物，已成功以靜電紡絲生產高性能空氣過濾器，證明靜電紡絲是生產具有高過濾效率和低空氣阻力之濾材的理想選擇[5]。因此本研究之目的乃以靜電紡絲法製備含金屬離子之纖維，且比較複合不同金屬離子之效能變化，探討材料對細微粒處理效能，茲將研究目的條列如下。

- 1.製作含有不同金屬離子之Nylon 6(N6)纖維材料：研求各別處理微粒之最佳材料。
- 2.量測並計算纖維濾材之壓力損失與穿透效率：且評估濾材過濾品質。
- 3.進行各種靜電紡絲操作參數性能評估：濃度、電壓、轉速對微粒處理性能評估，並建立處理微粒最佳操作條件。

二、實驗方法

1.實驗設計

實驗方法含靜電紡絲纖維材料的製備、纖維材料基本性質分析、纖維濾材表面電壓量測、纖維濾材穿透率之量測、纖維濾材之單纖維效率與過濾品質計算，試驗條件如表 1 所示，實驗流程如圖 1 所示。

表 1 材料製作試驗參數

參數	說明
Voltage (kV)	20, 25, 30, 35
Speed (rpm)	50, 100, 150, 200, 250rpm
Additives	ZnO, AgNO ₃ , TiO ₂
TiO ₂ content	0.5, 1.0, 1.5, 2.0 %

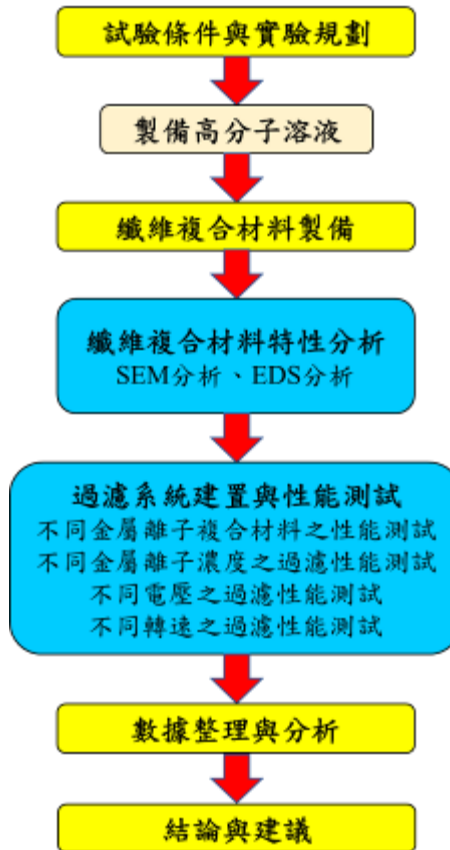


圖 1 實驗流程圖

2. 纖維材料選用

本研究所使用的 Nylon 6 購買自美國 Sigma-Aldrich 公司，藥品為分析級，無需要再純化。Nylon 6 因其熔點較低且價格較易入手，其機械特性，可藉由加入各種各樣的改性劑而提升。使用 Nylon 6 可達到半透明效果雖具吸濕氣且不耐溫等缺點但也具有機械强度高、有較高的抗拉與抗壓強度之特性，且具優良的耐磨性、電絕緣性能好、凝固時間較短等特點。

3. 紡絲溶劑選擇

本研究所使用的之溶劑為分析級甲酸(CH_2O_2)，購買自美國 Acros 公司，無需要再純化。為了達到最佳過濾效率以及過濾品質，靜電紡絲製備的纖維直徑是極為重要，纖維直徑隨電紡所用之聚合物/溶劑溶液不同而有所差異，三個主要的溶液屬性可能會驅動這種纖維直徑的差異：溶液黏度、溶劑介電常數和溶液導電率。較高的黏度溶液通常會產生較厚的纖維，而較高的電導率和較高的溶劑介電常數會導致較小的纖維直徑[6]。為了製作具有較小纖維直徑之濾材，因甲酸具有較高的電導率和較高的溶劑介電常數，因此本研究採用甲酸作為紡絲溶劑。

4. 複合材料製備

本研究已製備紡絲聚合物溶液，並製備含金屬離子之隨機纖維墊片。為了使製備出的纖維具有足夠的機械強度，方便於實驗中測試，本研究將聚對苯二甲酸乙二酯 (Polyethylene terephthalate, PET)、紡粘不織布 (Nylon Spunbond)，作為基材放置於滾筒收集器上，將靜電紡絲產生之纖維直接紡在 PET 基材上，放置於乾燥箱保存，進行過濾測試時，再疊合上一層 PET 基材，形成夾層之結構，其複合材料示意圖如圖 2 所示。

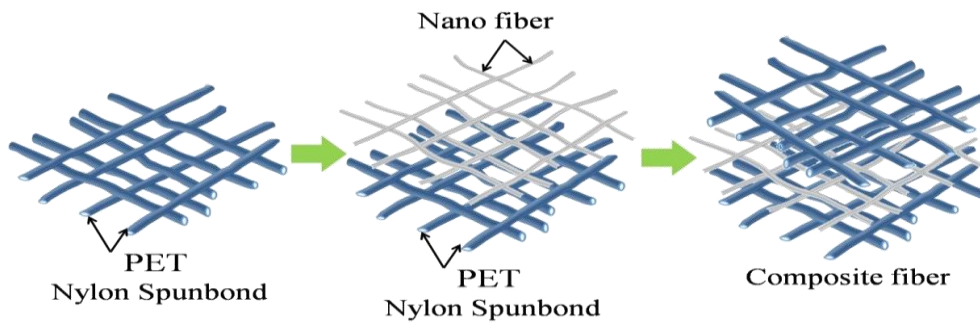


圖 2 複合材料結構示意圖

5. 靜電紡絲原理

靜電紡絲最基本之四項設備微量幫浦、高壓電供應器、金屬針頭以及金屬收集器，如圖 3 所示，藉由高壓電供應導致金屬針頭前端帶正電，此時紡絲溶液藉由推進幫浦推進至金屬針頭形成液滴，因同電荷相斥，使電場力與溶液表面張力方向相反，隨附加於高分子聚合物溶液的電場增大，在針頭尖端的液滴轉變成圓錐體，即稱為泰勒錐 (Taylor)。當液滴的電排斥力作用大於表面張力時，溶液便會進入電場拉伸，最後溶劑蒸發並被帶負電之金屬收集器收集纖維。

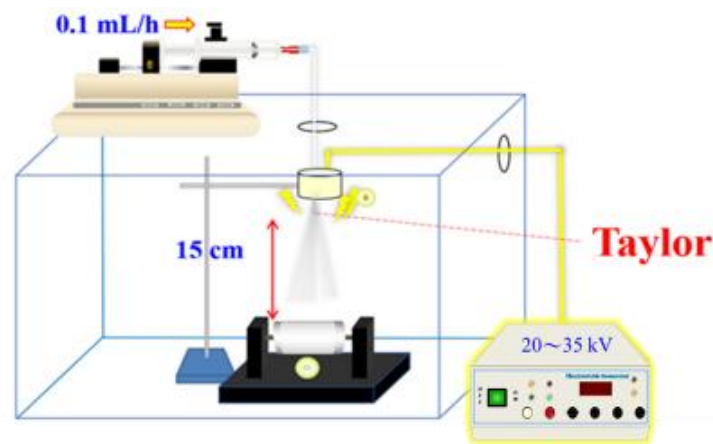


圖 3 靜電紡絲纖維設備示意圖

6. 過濾品質計算

過濾品質能直接反應出濾材的過濾性能好壞，計算式如公式(1)所示；然而，除了穿透率外，同時也必須考量濾材的空氣阻抗，即為壓力損失。降低穿透率易導致壓力損失

急遽的增加，並影響能源損耗提高，無法應用濾材至實場環境中。因此，為同時考量穿透率與壓力損失，乃使用過濾品質(Quality factor, Q_f)為濾材性能指標，能更適當地評估濾材的性能，如公式(2)所示。

$$P = \frac{C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

其中：

P：穿透率(%)

C_{out} ：排氣之微粒數量濃度

C_{in} ：進氣之微粒數量濃度

$$Q_f = \frac{-\ln(P)}{\Delta p} \quad (2)$$

其中：

Q_f ：濾材之過濾品質

Δp ：濾材測試之壓力損失

7.過濾性能測試

本研究以不鏽鋼夾固定濾材，接著通入微粒產生系統所產生之微粒，並使用寬範圍顆粒粒徑分析儀(Wide-range Particle size Spectrometer, WPS, 1000XP, MSP Inc.)測量過濾前後之 10-500 nm 範圍內的微粒數量濃度，同時使用壓差計連接在進氣與出氣端量測濾材壓力損失。使用濾材面積約為 16 cm^2 ，在相同實驗條件下，每種濾材進行 3 重複過濾測試，且每一測試將循環 3 次，共計九組數據，最後取其平均值與標準偏差來表示，過濾性能測試系統如圖 4 所示。

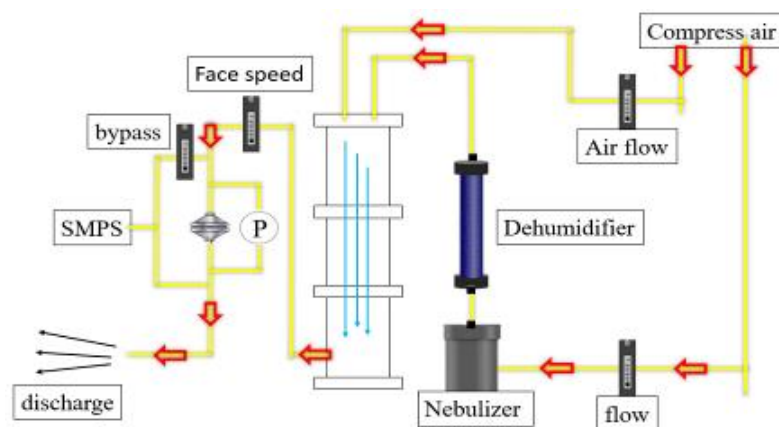


圖 4 過濾性能測試系統示意圖

本研究的模擬污染物為 1M NaCl 水溶液，藉由霧化器將 NaCl 水溶液霧化成細小微粒當作過濾測試時的模擬污染物，圖 5 為本次測試過濾分析所模擬污染物微粒粒徑分布圖。

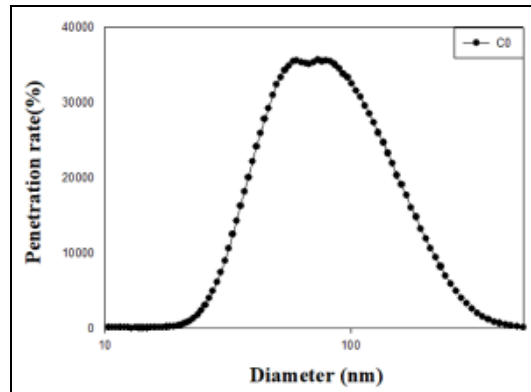


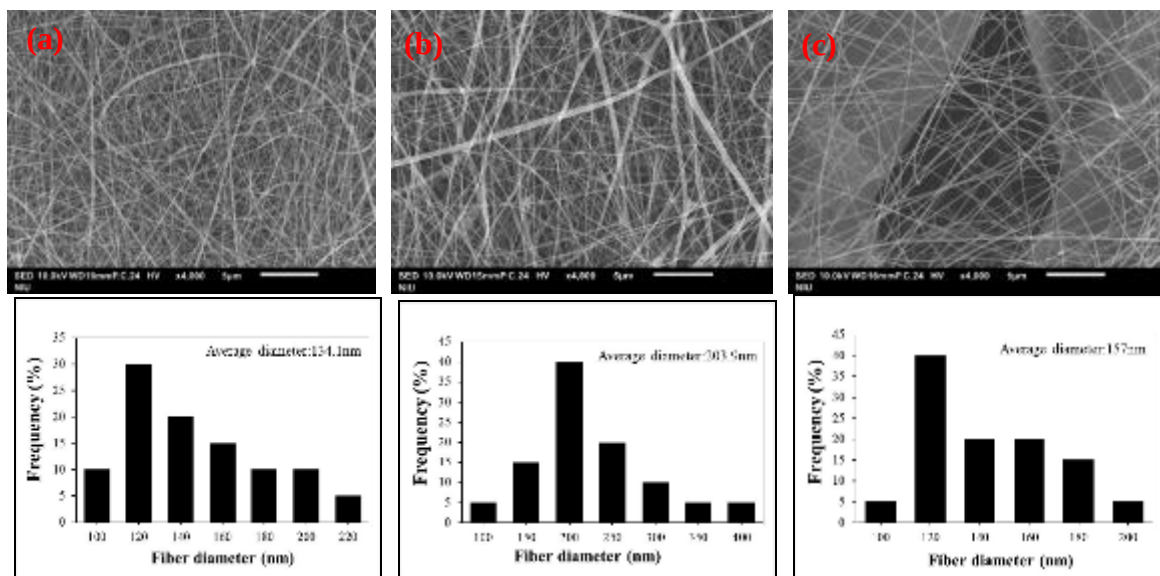
圖 5 霧化 1M NaCl 溶液的污染物微粒數量

三、結果與討論

1. 特性分析

(1) SEM圖像

本研究利用 SEM 觀察 N6-0.5% AgNO₃、0.5% ZnO 與 0.5% TiO₂ 所紡絲出之纖維型態與平均直徑。三種負載金屬離子之纖維表面皆光滑平整，在 SEM 圖無法清楚觀察出金屬奈米顆粒的原因，可能為金屬離子直徑太小而被纖維所包覆住[7]。從圖 6(a)及(b)中可以看出 0.5% AgNO₃ 和 0.5% ZnO 產生出較密集之纖維，濾材平均纖維直徑分別為 134.1 與 203.9 nm。而從圖 6(c)可得知 0.5% TiO₂ 之纖維較少且不密集，且纖維與纖維之間出現蜘蛛網狀之較細纖維，其濾材平均纖維直徑為 157nm。

圖 6 SEM圖(a) N6-0.5%AgNO₃ (b) N6-0.5%ZnO (c) N6-0.5%TiO₂

(2) EDS分析

本研究為了更加確定金屬離子成功與N6 均勻混合，因此進行EDS mapping分析。測試之纖維是利用含有 0.5wt%金屬離子之纖維在 20kV和 250rpm轉速下進行紡絲，如圖 7 所示，可得知在N6-0.5wt% AgNO₃ 紡絲之濾材上，除了N6 材料本身含有的C、N、O元

素外，亦可偵測到Ag元素；由圖 8 可得知在N6-0.5wt% ZnO紡絲之纖維上亦可偵測到Zn元素；圖 9 則可得知進行N6-0.5wt% TiO₂ 纖維EDS分析，可偵測到Ti元素，皆證實金屬離子確實有成功和紡絲溶液均勻混合。

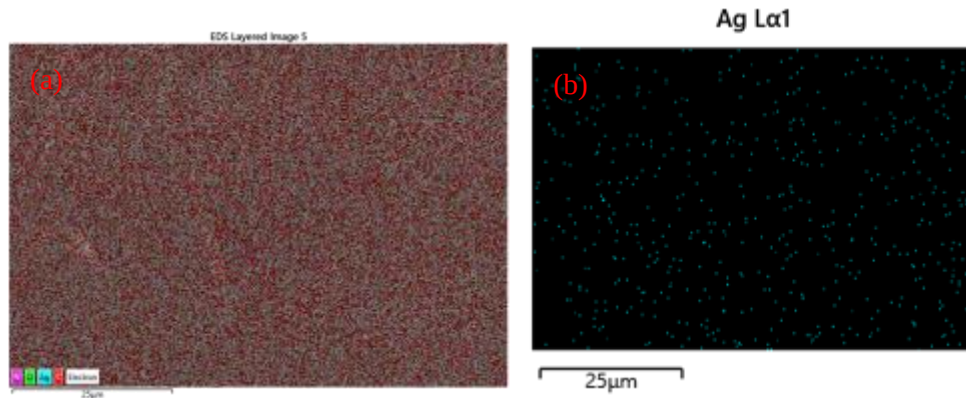


圖 7 EDS mapping圖 (a) 含 0.5wt% AgNO₃ 複合纖維之元素分布 (b)Ag之元素分布圖

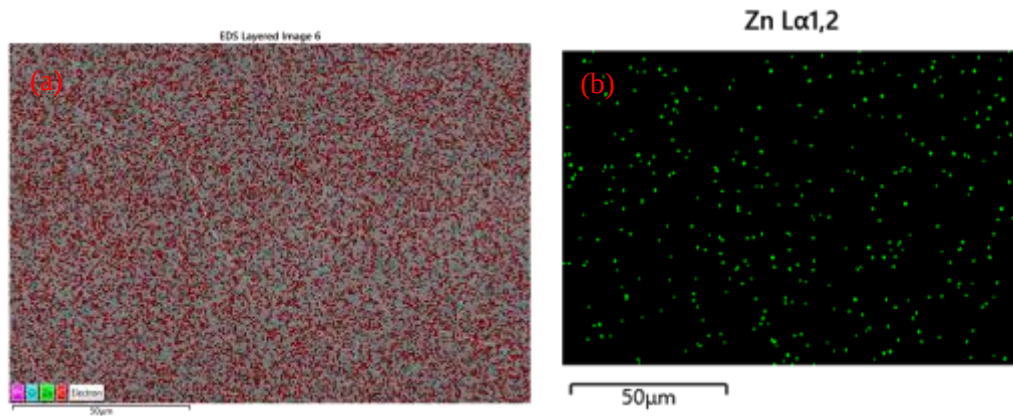


圖 8 EDS mapping圖 (a) 含 0.5wt% ZnO複合纖維之元素分布 (b) Zn之元素分布圖

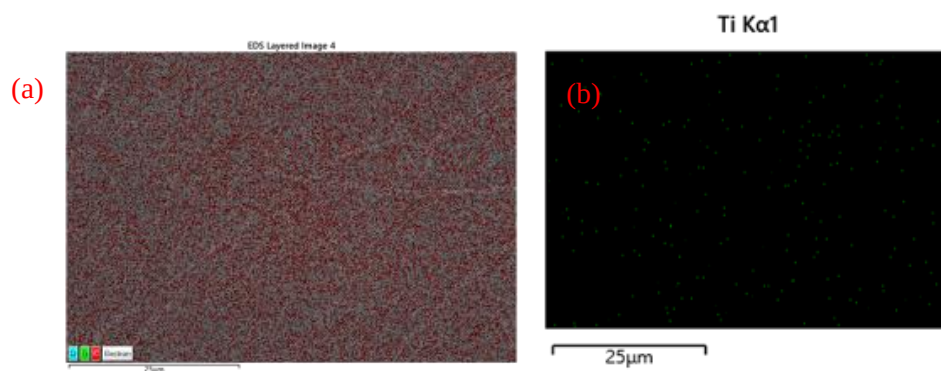


圖 9 EDS mapping圖 (a) 含 0.5wt% TiO₂ 複合纖維之元素分布 (b) Ti之元素分布圖

2.性能評估

本研究利用不同金屬離子、金屬離子之濃度、不同電壓及收集器轉速進行不同參數對靜電紡絲過濾品質之影響，再利用各參數所製備出的纖維進行過濾測試，並計算其纖維濾材穿透率、纖維複合濾材壓損以及過濾品質，並進行性能比較。

(1)不同金屬離子之過濾性能測試

為了解添加不同金屬離子對纖維性能產生之影響，並探討出紡絲溶液經由與金屬離子混合及靜電紡絲後，以利得知最佳過濾性能之離子種類，本研究藉由加入 0.5wt%的 TiO_2 、 AgNO_3 與 ZnO 來評估其對穿透率、纖維複合濾材壓損以及過濾品質之影響。由圖 10(a)可得知三種金屬離子複合纖維膜之穿透率，其中 TiO_2 的平均穿透率最高(高達 24.1%)，即纖維過濾微粒之效果最差； ZnO 的平均穿透率為 14.1%，而 AgNO_3 平均穿透率最低(僅為 6.5%)，造成此結果的原因為 AgNO_3 纖維直徑較細(僅約為 134.1nm)，且形成之纖維較密集，導致其過濾效率較佳。另外，由圖 10(b)可得知使用三種金屬離子複合纖維之壓損，可得知含有 TiO_2 、 AgNO_3 與 ZnO 之壓損分別為 23.5、100.0 與 50.1Pa，其中 AgNO_3 的壓損最高，主要原因為含 AgNO_3 纖維直徑較細。圖 10(c)為纖維之過濾品質，可得知含有 TiO_2 、 AgNO_3 與 ZnO 的過濾品質分別為 0.061、0.027 與 0.039 Pa^{-1} ， TiO_2 過濾品質最高的原因為其壓損較低，因而在穿透率相差不大時，計算出的過濾品質即會較高。

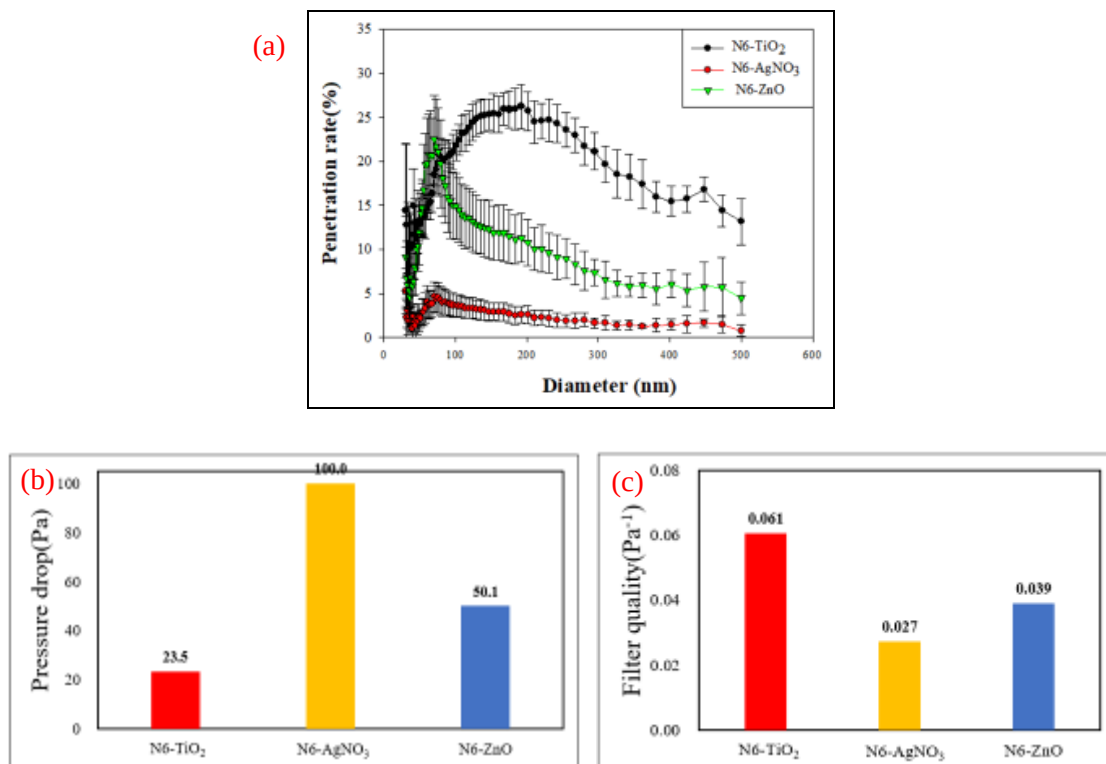


圖 10 添加 0.5wt% TiO_2 、 AgNO_3 與 ZnO (a)穿透率 (b)壓損 (c)過濾品質

(2)不同金屬離子濃度之過濾性能測試

藉由本研究可得知附著 TiO_2 之纖維具有較高的過濾品質(約為 0.061 Pa^{-1})，為了解添加不同 TiO_2 濃度對不同型態纖維過濾品質的影響，本研究將不同金屬離子濃度添加到紡絲溶液中進行測試與比較。如圖 11(a)所示，添加 0.5、1.0、1.5 與 2.0wt% 的平均穿透率分別為 24.1、19.8、9.3 與 8.5%，其中以含有 2.0wt% TiO_2 之纖維穿透率最低，推測原因為添加較多 TiO_2 時，使紡絲出較密集且較厚的纖維，因此過濾效率較高，相對因為纖維較密集，孔洞面積減小，造成壓損增高，約為 35.3Pa(如圖 11(b)所示)，進而影響到其過濾品質。由圖 11(c)可看出過濾品質最高的為添加 1.0wt% TiO_2 之纖維(約為 0.078 Pa^{-1})，因其壓損最低，可能原因為添加適當劑量的 TiO_2 有助於提升溶液進行紡絲時纖維的均勻度，導致纖維壓損降低，而 TiO_2 濃度過高時，則可能導致纖維堆積過厚，造成壓損過高。

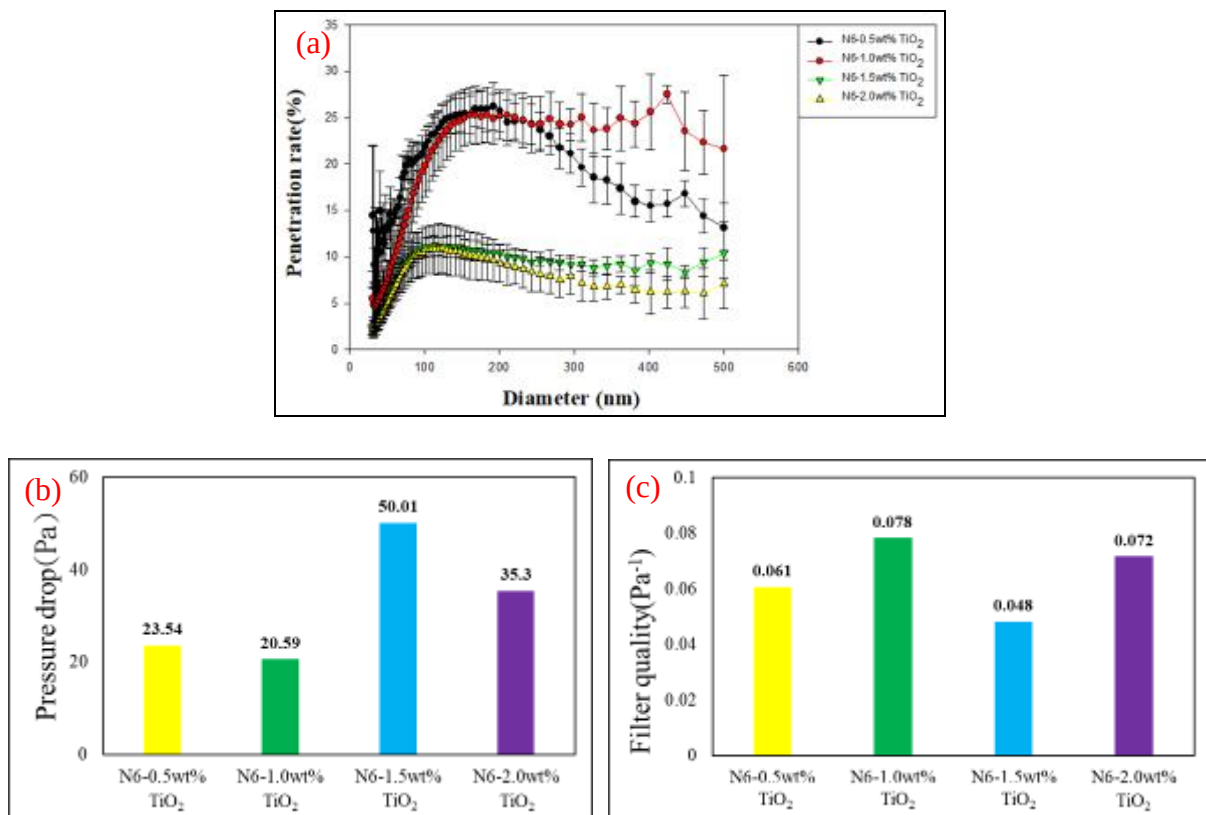


圖 11 添加不同金屬離子濃度 (a)穿透率 (b)壓損 (c)過濾品質

(3)不同電壓之過濾性能測試

藉由本研究為評估不同電壓大小對靜電紡絲濾材的過濾性能之影響，乃進行不同電壓(20、25、30 與 35kV)所製備的濾材穿透率測試。圖 12(a)為不同電壓所製備的濾材穿透率測試結果，平均穿透率分別為 25.9、17.5、13.9 與 7.9%，可得知當施加電壓越高，微粒的穿透率降低。當施加電壓越高來進行電紡時，藉由加強電排斥力而造成更細小的纖維直徑，使濾材纖維較密集且孔洞面積變小，因此增加攔截粒狀污染物的效率，由圖 12(b)可看出壓損隨著電壓升高而略為增加，可能因為電壓升高產生纖維較密集且厚度較高。從圖 12(c)可觀察出由於靜電排斥力增強，造成微粒穿透率低，纖維過濾品質上升，在電壓為 35kV 下，過濾品質可達到 0.052 Pa^{-1} 。

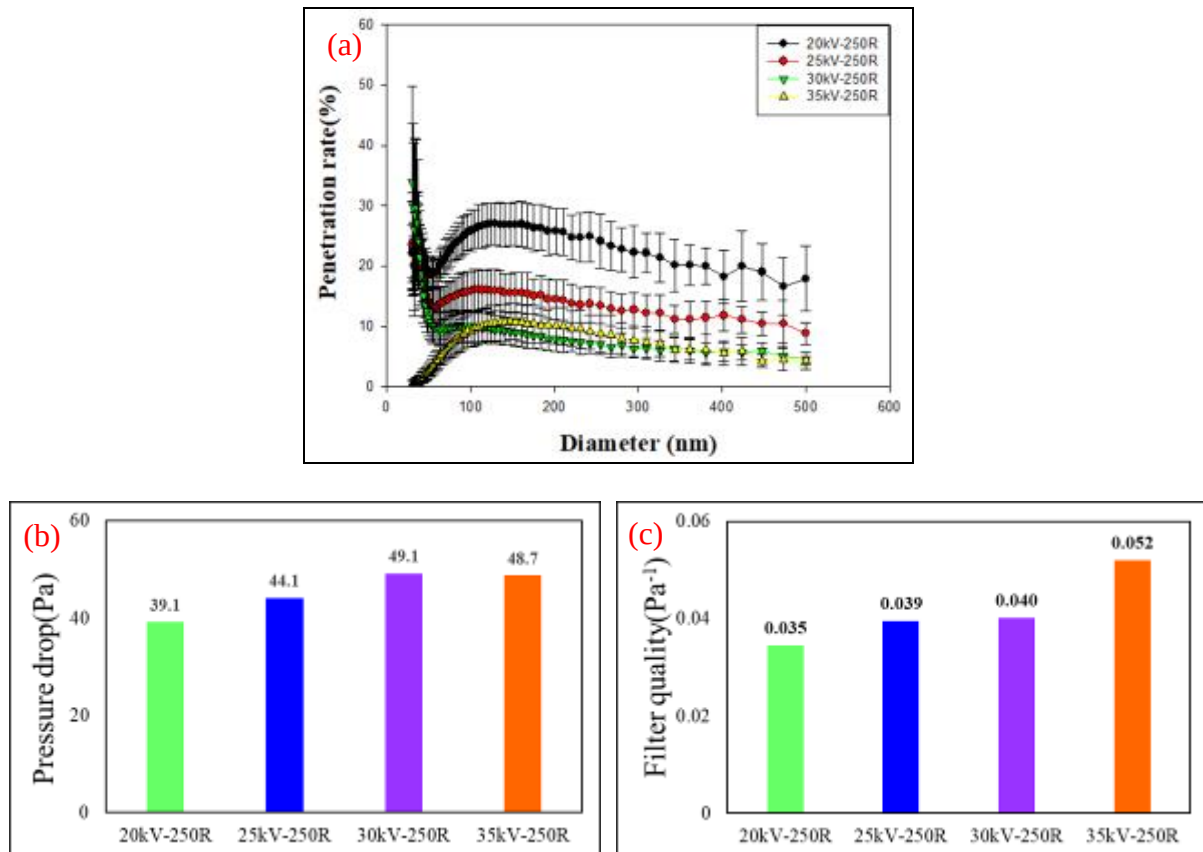


圖 12 不同電壓 (a)穿透率 (b)壓損 (c)過濾品質

(4)不同轉速之過濾性能測試

藉由本研究為評估不同收集器轉速對靜電紡絲濾材的過濾性能之影響，乃進行轉速為 50、100、150、200 與 250rpm 之穿透率測試，由圖 13(a)可看出結果，平均穿透率分別為 9.77、1.51、1.19、10.88 與 21.19%，150rpm 之穿透率最低的可能原因，推測為當轉速過慢或過快，纖維皆容易沉積於收集器，紡絲纖維密集度分佈較不均勻，因而造成穿透率提高。由圖 13(b)可得知壓損會隨著轉速升高而降低，50rpm 的壓損高達 118.7Pa，250rpm 的壓損約為 28.7Pa，原因為低轉速時纖維沉積，造成濾材厚度較厚，因此越高轉速纖維越薄，導致壓損較低。過濾品質最高的纖維為 150rpm 之濾材(約為 0.079Pa^{-1})，如圖 13(c)所示。主要因為此轉速下收集器上的纖維相對平均分布，過濾效果上升且由於纖維層數不多，濾材的壓損會相對較小。

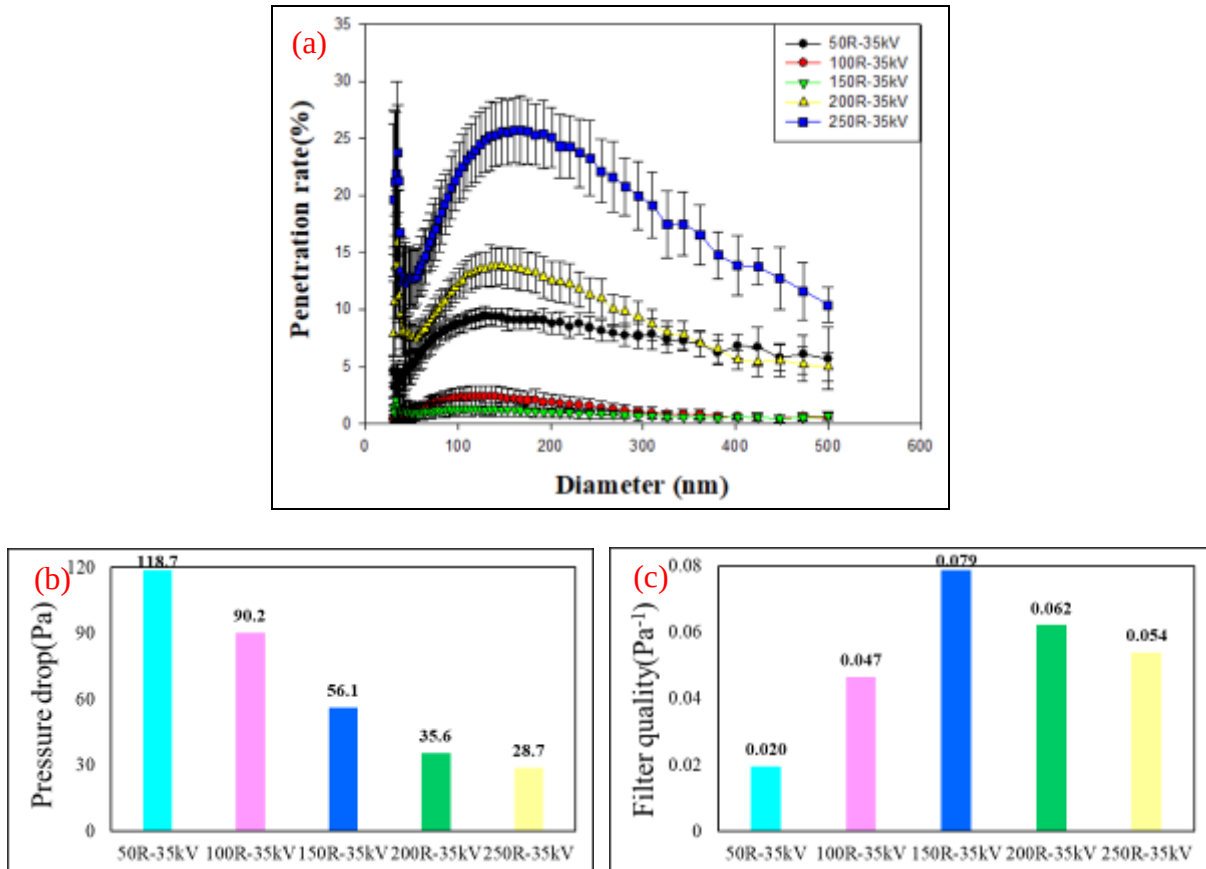


圖 13 不同轉速 (a)穿透率 (b)壓損 (c)過濾品質

四、結論

- 1.本研究成功製備含 1wt% TiO_2 之奈米纖維，最佳操作參數電壓為 35kV與轉速為 150rpm，過濾品質可達到 0.079 Pa^{-1} 。
- 2.SEM分析結果得知 0.5% TiO_2 、 AgNO_3 和 ZnO 纖維直徑平均分別為 157、134 與 204 nm。
- 3.由EDS mapping圖可證實金屬離子成功和紡絲溶液均勻混合。
- 4.含 0.5wt%的 TiO_2 之濾材具有最低壓損(23.5 Pa)，過濾品質達到 0.061 Pa^{-1} ，添加 1.0wt% TiO_2 纖維之過濾品質最高(約為 0.078 Pa^{-1})。
- 5.含 1wt% TiO_2 之奈米纖維在電壓為 35kV與轉速為 250rpm下，平均穿透率約 7.9%，過濾品質可達到 0.052 Pa^{-1} 。

參考文獻

- [1] Ming-Han, Lin. (2018). Study on the preparation of nylon 6 nanofibers by electrospinning on bacterial inhibition and particle removal, 1-95.
- [2] D Lv, R Wang, G Tang, Z Mou, J Lei, J Han, S D Smedt, R Xiong, and C Huang. (2019). Ecofriendly Electrospun Membranes Loaded with Visible-Light-Responding Nanoparticles for Multifunctional Usages: Highly Efficient Air Filtration, Dye Scavenging, and Bactericidal Activity, ACS Appl. Mater, 12880-12889.
- [3] Victor, F.S., Kugarajah, V., Bangaru, M. et al. Electrospun nanofibers of polyvinylidene fluoride incorporated with titanium nanotubes for purifying air with bacterial contamination. Environ Sci Pollut Res 28, 37520-37533 (2021).
- [4]Chen, Xuan-Jun. (2021). Study on Cerium Dioxide Fiber Prepared by Electrospinning and Its Application in Particle Filtration and Photodegradation Simultaneously, 1-128
- [5] Qijun Zhang, Qian Li, Timothy M. Young, David P. Harper, and Siqun Wang. (2019). A Novel Method for Fabricating an Electrospun Poly(Vinyl Alcohol)/Cellulose Nanocrystals Composite Nanofibrous Filter with Low Air Resistance for High-Efficiency Filtration of Particulate Matter. ACS Sustainable Chem. Eng, 8706-8714.
- [6] Ewaldz, E., Patel, R., Banerjee, M., & Brettmann, B. K. (2018). Material selection in electrospinning microparticles. Polymer, 153, 529-537.
- [7] Juuti, Paxton. Nikka, Markus. Gunell, Marianne. Eerola, Erkki. Saarinen, Jarkko J. Omori, Youichi. Seto, Takafumi. Mäkelä, Jyrki M. (2019). Fabrication of Fiber Filters with Antibacterial Properties for VOC and Particle Removal. Aerosol and air quality research, 19 (8) , 1892-1899.

Session III-2
(15:40~17:00 , B204)

花蓮地區公共工程採購決標比與工程品質關聯性研究
A Study of the Relationship Between the Bidding Rate of Government Procurement and Quality of Public in Hualien Area

張菟茹¹ 王世忠^{2*} 邱天佑³

Wan-Ju Chang¹ Shih-Chung Wang² Tien-You Chiu³

1 大漢技術學院土木工程與環境資源管理系 研究生

Professor, Department of Civil Engineering & Environmental Resource
Management, Institute of Dahan Technology

2 大漢技術學院土木工程與環境資源管理系 助理教授

Assistant Professor, Department of Civil Engineering & Environmental Resource Management,
Dahan of Institute Technology

3 大漢技術學院企業管理系 助理教授

Assistant Professor, Department of Business Administration, Dahan Institute of Technology

* Corresponding author: xeen@ms01.dahan.edu.tw

摘 要

一直以來，公共工程一旦發生工安意外或者品質瑕疵，常被認為與投標價格高低有關，其無論以「最低標」或「最有利標」方式辦理決標，均合於政府採購法決標原則之範疇，機關於辦理工程採購，適當考量個案特性，選擇合宜之決標方式，並且落實履約及驗收，工程品質即應達個案要求，不應該受決標方式影響。

由於 110 年 4 月 2 日花蓮縣秀林鄉因「北迴線 K51+170~500 山側邊坡安全防護設施工程」工程車翻落，造成太魯閣號鐵道事件之憾事，再度引起社會對於低價搶標的議論，對於花蓮區決標比與工程品質是否存在關聯性，實有探討之必要，本研究蒐集 107 年及 108 年受工程查核件數 261 件，排除最有利標決標 25 件、未定底價 2 件，資料異常 1 件，分析最低標決標並受工程查核案件 233 件，以查核分數作為工程品質量指標，了解花蓮地區決標比與工程品質之間的關聯性，運用 SPSS 軟體進行迴歸統計分析，分析結果：決標比與工程品質的關聯性微弱或不相關。研究結果證實「最低標」並不影響工程品質，建議未來可再探討花蓮地區影響工程品質因子，作為改善的對策。

關鍵詞：決標比、工程品質、最低標

壹、緒 論

公共工程促進國家經濟發展、增加就業機會、提升國民生活環境品質，同時也帶領著工程產業增加國際競爭力，爰此，最佳的工程規劃、最具效益的工程成本、良好的工程品質即為政府及人民所樂見與期盼。

鑒於公共建設之規模及金額日益龐大，涉及範圍廣泛，故於 84 年 7 月成立行政院公共工程委員會（簡稱工程會），統籌公共工程之規劃、審議、協調及督導，並於 87 年 5 月頒布政府採購法，為求依公平、公開之採購程序，提升採購效率與功能，確保採購品質。

1-1 研究動機

政府採購法決標方式分為最低價標及最有利標兩種，最低標即價格最低者得，優點在於招標過程迅速明確且能有效掌控預算，缺點則較易使廠商削價競爭且有偷減工料之虞，最有利標以評選的方式辦理，分數高者得標，此法能汰除資格不符或履約能力欠佳的廠商，選擇最合適的施工團隊，缺點則是招標時間較攏長且較易受評審小組主觀意識影響，二者各有優缺點，無論以「最低標」或「最有利標」方式辦理決標，均合於政府採購法決標原則之範疇。

一直以來，公共工程一旦發生工安意外或者品質瑕疵，常被認為與投標價格高低有關，110 年 4 月 2 日花蓮縣秀林鄉因「北迴線 K51+170~500 山側邊坡安全防護設施工程」工程車翻落，造成太魯閣號鐵道事件之憾事，再度引起社會對於低價搶標的議論，台北市長柯文哲表示^[1]「政務官要有勇氣採最有利標，為自己的標案負責，全部用價格標，就是公務員不想負責的結果」，前內政部長李鴻源直言^[2]「台灣公共工程有最低標的文化，但便宜沒好貨，讓公共工程始終問題不斷」，社會輿論均將太魯閣號鐵道事件歸咎於低價搶標所致，為此，公共工程委員於 110 年 4 月 8 日刊登新聞稿^[3]補充說明該案件採公開招標、最低標決標，決標金額 1 億 2,480 萬元，為底價之 97%，故最低標尚非影響本案執行之因素。

蔣致善(2009)^[4]以 581 件軍事工程的投標價格與施工品質的關係進行分析後，發現「決標比」的高低，確實影響工程品質；而康德龍(2019)^[5]分析 2010 年 1 月至 2014 年 2 月間，由行政院公共工程委員會建置之工程採購資訊網內一百萬元以上，曾經有查核的實際工程採購案例計 6055 件，指出「低價搶標」與「公共工程施工品質」間沒有明顯關係，由上述對於決標比與工程品質之間正反論述說明，以及 110 年花蓮縣秀林鄉太魯閣號鐵道事件引發的社會對於最低標的疑慮，是以，花蓮地區決標比與工程品質是否存在關聯性，實有探討之必要。

1-2 研究目的

本研究針對 107 年至 108 年間花蓮區受查核且有評分之案件為對象，利用迴歸分析法，探討花蓮地區決標比與公共工程施工品質間是否存在關聯性，以分析低價搶標在花蓮地區的存在性。

1-3 研究流程

機關於辦理工程採購落實履約及驗收，工程品質即應達個案要求，不應該受決標方式影響，本研究藉由文獻回顧、統計分析，以次級資料透過敘述統計及迴歸分析法進行量化分析，進而依據其結果整理結論並提出建議，研究流程如圖 1。

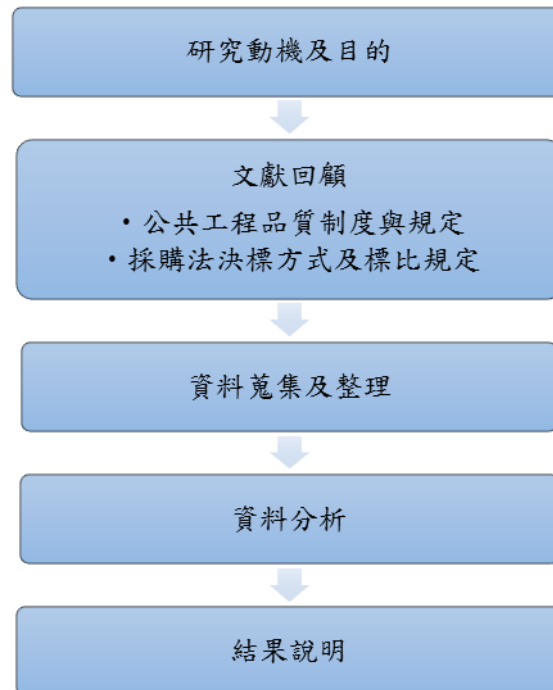


圖 3 研究流程圖

貳、文獻回顧

本研究為探討花蓮地區決標比與工程品質是否存在關聯性，就公共工程品質制度與規定與決標比等相關問題進行文獻探討。

2-1 公共工程品質制度與規定

2-1-1 公共工程與法源

採購法的制定是為建立政府採購制度，依公平、公開之採購程序，提升採購效率與功能，確保採購品質，主管機關為行政院公共工程委員會。

依公共工程專業技師簽證規則第 3 條：所稱公共工程，為政府機關、公立學校、公營事業（以下簡稱機關）興辦或機關依法核准由民間機構參與或投資興辦之工程。

採購法適用範圍包括政府機關、公立學校、公營事業（以下簡稱機關）及非政府機關接受政府機關補助辦理採購，補助金額占採購金額半數以上，且補助金額在公告金額以上，及機關委託法人或團體辦理之採購，皆屬之。

2-1-2 品質的定義

CNS12680 所謂品質，是為滿足顧客與其他直接相關的利害相關者之需求和期望，其產品與服務之品質，不僅包括其預定功能與性能，亦包括其顧客所感受到的價值與利益，簡單來說品質就是：「產品或是服務，符合或超越顧客期望」。

費根堡博士(Feigenbaum 1983)認為「品質是檢查出來的」與戴明管理循環 (PDCA) 全面品質管理的運作中的查核 (Check)，均表示品質的良窳是須透過稽核制度進行落實性的檢查。

就公共工程而言，工程會依據政府採購法第 70 條於 1993 年起推行「公共工程施工品質管理制度」，訂定公共工程施工品質管理作業要點，作為全國公共工程施工品質管理之統一規範，透過公共工程品質查核機制，得以判定並管制工地整體施工品質。

2-1-3 三級品管制度

依據行政院於 82 年 10 月 7 日以台 82 內字第 35370 號函頒布「公共工程施工品質管理制度」及 91 年 2 月依政府採購法第 70 條規定，將公共工程施工品質管理制度分為施工品質管制系統、施工品質保證系統及施工品質查核機制，為三層級品管制度，架構如圖 2 所示，茲分別說明如下^[6]：

一、 施工品質管制系統

為達成工程品質目標，應由廠商建立施工品質管制系統。工程開工前，廠商應依工程之特性與契約要求擬定施工計畫並提出品質計畫，設立品管組織，訂定各項工程品質管理標準、材料及施工檢驗程序、自主檢查表、缺失改善紀錄，以及建立文件紀錄管理系統等，俾便施工人員熟習圖說規範與各項品管作業規定，以落實品質管制。

二、 施工品質保證系統

為確保工程的施工成果能符合設計及規範，監造單位應建立施工品質保證系統，成立監造組織，訂定監造計畫，辦理施工及材料設備之抽(查)驗作業，並對抽(查)驗結果留存紀錄，檢討成效與缺失，達成提昇工程品質之目標。

三、 施工品質查核機制

為確認工程品質管理工作執行之成效，主管機關採行工程施工品質查核，以客觀超然的方式，評定工程品質優劣等級。督導結果可供作為主辦工程單位考評之依據，並可作為改進廠商品管作業及評選優良廠商之參考，藉以督促監造單位落實品質保證及廠商落實品質管理，達成提升工程品質的目標。

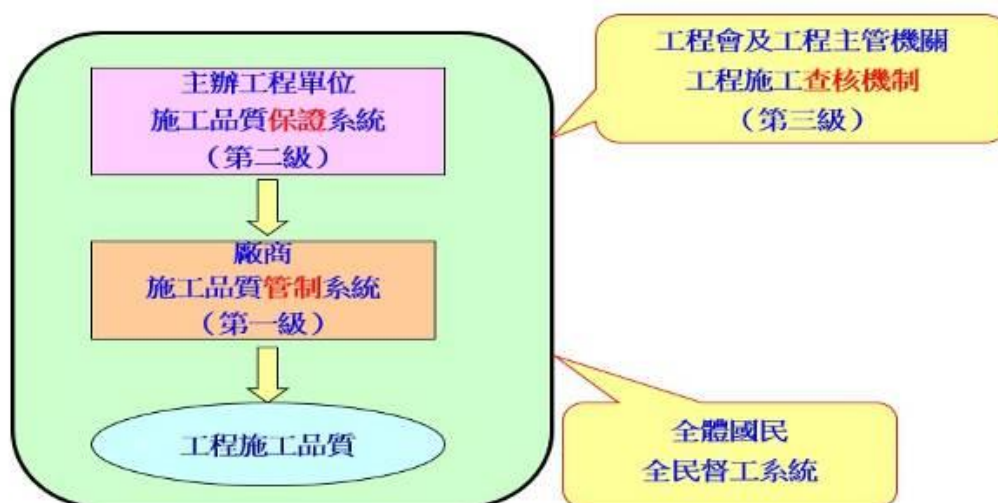


圖 4 公共工程施工品質管理制度架構圖
(資料來源：公共工程品質管理訓練班教材)

2-1-4 工程查核概述

工程施工查核小組作業辦法依政府採購法第七十條第四項規定訂定之，工程施工查核小組進行查核時，以現場查核為主，書面資料審查為輔，且依行政院訂定之公共工程施工品質管理制度、相關法令及工程契約規定，參照工程施工查核作業參考基準，查核工程品質及進度等事宜。

- 一、查核小組每年應辦理工程施工查核之件數比率以不低於當年度所屬新臺幣一百萬元以上工程標案（不含補助及委託其他機關辦理案件）之百分之十為原則，且各規模之工程應查核件數如下：

表 4 查核件數規定一覽表

項次	工程採購金額	查核比例	說明
1	5,000 萬元以上	20 件以上	當年度未達 20 件，全數查核
2	1,000 萬~5,000 萬	15 件以上	當年度未達 15 件，全數查核
3	100 萬~1,000 萬	10 件以上	當年度未達 10 件，全數查核

- 二、查核成績之計算，以每一位查核委員評分之總和平均計算，結果有小數時，採四捨五入進位方式，整數計算之，分數對應等第方式如下表：

表 5 查核分數等第一覽表

項次	查核分數	等第
1	90 分以上	優等
2	80~90 分	甲等
3	70~80 分	乙等
4	70 以下	丙等

工程查核小組，由上級機關及學者專家組成，透過定期及不定期查核對於工程品質評定優劣，並給予給予明確量化分數，蔣至善(2009)^[4]、張馨櫻(2018)^[7]、康德龍(2019)^[5]等研究均以查核分數作為工程品質的量化值。

2-2 採購法決標方式及標比規定

2-2-1 採購法招、決標方式

一、招標：依據採購法第 18 條採購之招標方式，分為公開招標、選擇性招標及限制性招標。

(1) 公開招標，指以公告方式邀請不特定廠商投標。

(2) 選擇性招標，指以公告方式預先依一定資格條件辦理廠商資格審查後，再行邀請符合資格之廠商投標。

(3) 限制性招標，指不經公告程序，邀請二家以上廠商比價或僅邀請一家廠商議價。

二、決標：原則上分為最低標及最有利標二大項。

(1) 最低標：係指價格最低且無標價偏低者為得標廠商

(2) 最有利標：經評選小組評分，分數最高這為得標廠商。

2-2-2 決標比相關研究

採購法第 58 條明定機關辦理採購採最低標決標時，如認為最低標廠商之總標價或部分標價偏低，顯不合理，有降低品質、不能誠信履約之虞或其他特殊情形，得限期通知該廠商提出說明或擔保。廠商未於機關通知期限內提出合理之說明或擔保者，得不決標予該廠商，並以次低標廠商為最低標廠商。

所指低價偏低，則明訂於採購法實行細則第 79 條，訂有底價者，廠商之總標價低底價百分之 80 者及未訂底價且未設評審委員者，以廠商之標價低於預算金額或預估金額百分之 70 者，認定為總標價偏低，是以，決標比之高低可認為是標價合理性的指標。

決標比之計算，工程會在「公共工程技術服務契約範本」及「公共工程專案管理契約範本」中稱「底價標比」為決標金額與底價之比值，「預算標比」為決標金額與預算之比值。康德龍(2019)^[5]蒐集 2010 年 1 月至 2014 年 2 月有效樣本 6055 件，運用變異係數分析標比離散性，發現底價標比離散性較小，故本研究決標比採用「底價標比」計算。

參、研究方法

本研究探討花蓮地區決標比與公共工程品質關聯性，以次級資料分析法進行研究分析，即運用既存的政府統計資料或大型學術資料庫來對研究主題進行實證探究得的社會研究法，本研究係引用公共工程委員會全球資訊網^[9]，彙整花蓮地區 107 年及 108 年工程查核案件，分析決標比與工程品質的關聯性。

3-1 研究樣本資料來源

一、查核案件樣本來源

透過公共工程委員會全球資訊網^[9]取得花蓮地區 107 年及 108 年受工程查核件數共 261 件，排除最有利標決標 25 件、未定底價 2 件，資料異常 1 件，共計 233 件，由此取得最低標決標並受工程查核案件樣本及分數。

二、工程案件基本資料

取得查核樣本後至公共工程委員會全球資訊網查詢決標公告^[10]，取得包含招標次數、投標家數、決標金額等工程案件基本資料。

三、廠商基本資料

關於廠商基本資料，本研究透過內政部營建署全球資訊網^[11]，營造業登記資料查詢取得承攬廠商基本資料。

3-2 分析方法

一、顯著水準

康德龍(2019)^[5]參考周文賢(2004)^[8]認為不同的科學應用領域，對所分析結果的要求嚴謹度不同，自然對顯著水準(α 值)的要求也不同，如下表所示。

表 6 應用科學中顯著水準設定建議

應用科學	研究領域	顯著水準
生命科學	生物科技、醫學工程、基因工程、農業、公共衛生等	0.01
管理科學	企業管理、國際貿易、會計、經濟、工業工程等	0.05
社會科學	營建(工程)管理、社會、教育、心理、政治、警政等	0.10

本研究係探討花蓮地區決標比與公共工程品質關聯性，屬於營建管理範圍，故本研究證實統計分析的顯著水準(α 值)設定為 0.1。

二、敘述統計

資料收集之後即進行資料分析，做為樣本資料與推論統計的基礎，為瞭解樣本是否有極端值，是否需進行刪減及過濾，本研究以敘述統計進行樣本基礎分析。

三、迴歸分析

簡單迴歸分析用於探討單一自變數及應變數之間關係，主要在探討自變數(X)與應變數(Y)之間的線性關係，透過迴歸模型的建立，可以推論和預測應變數(Y)，本研究探討決標比與工程品質之間的關聯性，符合簡單線性迴歸要件。

四、研究模型

本研究決標比與工程品質之間的關聯性，採用簡單線性迴歸分析，茲將研究模型敘

明如下。

(1) 假設模型為： $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$ 。

(2) Y為應變數，為本研究樣本之工程品質，以查核分數為量化值，系因：

工程查核小組，由上級機關及學者專家組成，對於工程品質評定優劣，並給予明確量化分數，工程品質相關研究文獻多以以查核分數作為工程品質的量化值，故本研究以查核分數為工程品質之量化值。

(3) X為自變數，為本研究樣本之決標比，以底價標比計算之

決標比有底價標比及預算標比二種，康德龍(2019)^[5]運用變異係數分析標比離散性，發現底價標比離散性較小，故本研究決標比採用「底價標比」計算。

肆、結果與討論

本研究蒐集 107 年及 108 年受工程查核件數 261 件，排除最有利標決標 25 件、未定底價 2 件，資料異常 1 件，分析最低標決標並受工程查核案件 233 件，使用敘述統計、簡單線性迴歸分析方式，運用 SPSS 統計套裝軟體程式進行迴歸統計分析。

4-1 敘述統計分析

本研究樣本敘述統計結果如下表。

表 7 敘述統計分析表

變數	統計量	全距	最小值	最大值	平均數	標準差
查核分數(Y)	233	20	69.00	89.00	79.50	2.44
決標比(X)	233	0.32	0.73	1.05	0.94	0.06

一、應變數(Y)即查核分數，最小值為 69.0，最大值為 89.0，平均數為 79.5。

(1) 本研究樣本查核分數最小值為 69.0，工程評分為丙等；列丙等工程除整體評分未達 70 分或主結構試驗不合格或有缺失情節重大影響安全，本研究樣本中列丙等工程計 2 件，施工廠商均為同一家土木包工業者，決標日期為同一天，決標比分別為 0.913 及 0.909，決標比符合政府採購法第 58 條，無標價偏低之情形。

(2) 花蓮地區 107 年及 108 年查核分數平均為 79.50，落在甲等跟乙等之間，工程查核不僅只針對施工廠商評分，亦包含監造單位及主辦機關，工程品質之提升相信需落實三級品管制度。

二、自變數(X)即決標比，最小值為 0.73，最大值為 1.05，平均數為 0.94。

(1) 本研究樣本決標比最小值為 0.73，低於採購法第 58 條不得低於底價 80%之限制，但得限期通知該廠商提出說明或擔保後決標予該廠商，本研究樣本決標比低於 80%共計 8 件，查核分數甲等 7 件，乙等 1 件，平均分數為 80.13，整體表現良好，並不受決標比影響。

- (2) 決標比最大值為 1.05 大於 1，為超底價決標案件，依採購法第 53 條規定，最低標價仍超過底價而不逾預算數額，機關確有緊急情事需決標時，應經原底價核定人或其授權人員核准，且不得超過底價 8%，可決標於該廠商；本研究超底價決標案件計 8 件，查核分數均為甲等，平均分數為 81 分，整體表現未因超底價標比而有超高分數，工程品質並未受決標比影響。

4-2 決標比與工程品質關聯性分析

將樣本運用 SPSS 統計套裝軟體，進行線性迴歸分析，相關係數如表 4-2。

表 8 迴歸分析摘要表

	B	標準錯誤	β	T	顯著性
(常數)	78.123	2.268		34.449	.000
底價標比	1.475	2.420	.040	.610	.543

a. 應變數：查核分數

- (1) 假設模型： $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$ 。
- (2) 相關係數為 0.04，趨近於 0，說明決標比與查核分數微弱或不相關。
- (3) 底價標比顯著性為 $p = 0.543 > \alpha = 0.1$ ，說明決標比與查核分數間未達顯著關聯性。
- (4) 本研究樣本分析數據顯示，決標比與工程品質關係微弱或不相關，低決標比並不表示工程品質相對不良，依目前研究數據顯示，可以說低價搶標在花蓮地區並不存在。

伍、結 論與建議

一直以來，公共工程一旦發生工安意外或者品質瑕疵，常被認為與投標價格高低有關，本研究蒐集 107 年及 108 年受工程查核件數 261 件，排除最有利標決標 25 件、未定底價 2 件，資料異常 1 件，分析最低標決標並受工程查核案件 233 件，以查核分數作為工程品質指標，了解花蓮地區決標比與工程品質之間的關聯性，運用 SPSS 軟體進行迴歸統計分析，研究結果證實低決標比並不影響工程品質，是以，以「最低標」方式決標，並不影響公共工程施工品質，其無論以「最低標」或「最有利標」方式辦理決標，均合於政府採購法決標原則之範疇，機關於辦理工程採購，應適個案特性，選擇合宜之決標方式，落實履約及驗收，工程品質即應達個案要求，建議未來可再探討花蓮地區影響工程品質因子，作為日後改善工程品質的參考。

參考文獻

- [1] 聯合新聞網「太魯閣燒出公共工程弊端 柯文哲：採低價標因沒人想負責」，2021/04/07，<https://udn.com/news/story/122094/5370904>。
- [2] 三立新聞網「太魯閣案撞出工安危機，李鴻源：台灣最低標文化害命！」，2021/04/06，<https://www.setn.com/News.aspx?NewsID=921416>。
- [3] 行政院公共工程委員會全球資訊網，新聞稿，「工程會宣導機關因案制宜善用決標方式並落實履約管理」，110 年 4 月 8 日，<https://www.pcc.gov.tw/Index.aspx>。

- [4] 蔣致善(2009)，「軍事工程決標差異對施工品質影響與關連性之研究」，中央大學營建管理研究所碩士論文。
- [5] 康德龍(2019)，「低價搶標與公共工程品質關聯性」，台北科技大學土木工程系土木與防災研究所博士論文。
- [6] 行政院公共工程委員會全球資訊網，品管教育訓練教材，品管班教材（109.06 版）。
<https://www.pcc.gov.tw/cp.aspx?n=BDB00AA0DDA4EE72>
- [7] 張馨櫻(2018)，「公共工程採購決標比與工程品質關係之研究」，國防大學管理學院財務管理學系碩士論文。
- [8] 周文賢(2004)，多變量統計分析：SAS/STAT，台北：智勝文化
- [9] 行政院公共工程委員會全球資訊網，公共工程標案管理系統，
https://www.pcc.gov.tw/Content_List.aspx?n=AD6908DFDDB62656
- [10] 行政院公共工程委員會，政府電子採購網，決標公告，
<https://web.pcc.gov.tw/tps/pss/tender.do?method=goSearch&searchMode=common&searchType=advance&searchTarget=ATM>
- [11] 內政部營建署全球資訊網，營造業登記資料查詢，
<http://cpabm.cpami.gov.tw/menu?id=8a1aaba7b1c6094205fe9c00a577f56e0f85930aa770e7ef7362d10be596b298>

微鋼纖維對超高性能混凝土拉力行為之研究
The Effect of Micro-Steel Fiber on the Tensile Behaviors of Ultra High Performance Concrete

黃建曄¹、李明輝^{2*}、賴怡君³、戴毓修⁴、潘煌鎰⁵

Jian-Ye Huang¹ Ming-Hui Lee^{2*} Yi-Chun Lai³ Yuh-Shiou Tai⁴ Huang Hsing Pan⁵

1 高雄科技大學土木工程與防災 碩士班研究生

1 Graduate student, Department of Civil Engineering, Kaohsiung University of Sciences and Technology

2* 陸軍軍官學校土木工程系教授

Professor, Department of Civil Engineering, R.O.C. Military Academy

*Corresponding author: g990406@gmail.com

3 陸軍軍官學校土木工程系講師

Lecturer, Department of Civil Engineering, R.O.C. Military Academy

4 HiPer Fiber 責任有限公司工程師

Chief Technical Officer, HiPer Fiber LLC, USA

5 國立高雄科技大學土木工程系教授

Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

摘 要

本研究主要探討超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)添加不同體積含量之微鋼纖維(直徑 0.175mm, 長度 12.5mm)後, 對力學行為的影響。實驗的過程分別針對立方試體與狗骨頭形狀試體進行抗壓與直接拉伸試驗。拆模後進行 72 小時熱養護, 所有試體在七天的抗壓強度均大於 150MPa。研究顯示隨著纖維體積分量的增加, 限制了微裂縫的擴展進而導致抗壓強度提升, 然而, 效果並不顯著, 因為更多的能量的損耗將反映在裂縫擴展過程中纖維拔出的階段。為此, 利用MTS伺服液壓試驗機進行直接拉伸試驗, 得到UHPC的材料拉伸應力-應變曲線。利用應力應變曲線擷取重要的材料性能參數, 計算材料吸收應變能, 藉以評估材料韌性行為。試驗結果顯示, 初始開裂強度、極限拉伸強度及其對應之應變量會隨鋼纖維含量增加而提升, 以添加 3%鋼纖維含量之UHPC整體表現較佳; 觀察試體破壞模式, 能夠看到多重裂縫的形成與分佈狀態, 也顯示材料會因應力重分配能夠吸收更多能量, 提高材料韌性。

關鍵詞: 超高性能混凝土、直接拉伸、應力應變曲線、應變能

壹、前言

超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)是新一代的建築材料，其出色的力學與耐久性能，使得UHPC已經廣泛地被使用在新一代的建築結構中[1-4]。UHPC不僅具有非常高的抗壓和抗拉強度，在韌性與吸能性質等亦十分出色。Sritharan等[5]的研究證明了UHPC能夠達到 172-225 MPa的抗壓強度。與普通混凝土或高性能混凝土(HPC)相比，UHPC抗壓強度的增加可歸因於透過緻密顆粒堆積和特殊粉體材料的選擇，以及控制混合採用極低的水灰比等因素[6-9]。不同於一般混凝土使用粗細骨料UHPC配比以顆粒直徑 500-70 微米的石英砂為骨材，降低了粗、細粒料所致的不均勻性，也減輕了受力過程中在骨材與漿體介面的應力集中。

在UHPC（不含纖維）上進行直接拉伸強度得出的平均拉伸強度值為 7-10 MPa [10-11]。日本[12]提出的平均抗拉強度值為 5 MPa，而法國的SETRA/AFGC建議的設計抗彎強度的平均抗拉強度值分別為 8 MPa。另一方面，對於添加了鋼纖維的UHPC的抗拉強度值能顯著的增加，約在 7-15 MPa的範圍內[13]。

在UHPC中加入鋼纖維能有效提升抗拉強度。其中，所添加鋼纖維形狀，長度與直徑及體積率等都會影響UHPC在抗壓及抗拉時的強度[14]。Wu 等[15] 的研究指出在固定強塑劑量下，添加體積率 3%的鋼纖維可有效提升UHPC抗壓與撓曲強度，但是較高的鋼纖維摻量將降低新鮮UHPC的工作性能。Yoo等[16] 對鋼纖維 0.5%、1%、1.5%及 2%等含量進行研究，同時考慮形狀(直線、彎鉤及螺旋狀)與長徑比(65、97.5 及 100)對撓曲強度之影響，研究結果指出使用 1%，長徑比為 100 的螺旋狀鋼纖維可得到較好之撓曲強度。Wille等[17-18]研究直線型、彎鉤型及螺旋狀鋼纖維對UHPC拉伸行為之影響，結果顯示添加 1.5%彎鉤型或螺旋狀之鋼纖維，其抗拉強度可達 13MPa，對應之應變量為 0.6%，相較於添加直線型鋼纖維時，抗拉強度與應變能力分別增加了 60%與 300%。

鑒於在相同體積含量下，改變鋼纖維尺寸會影響所添加的纖維總數，為了更大化的促進纖維在UHPC基材內的分布，本研究使用 0.175 mm較小直徑的微纖維進行直接拉伸試驗，探討 1%、2%與 3%鋼纖維含量對材料拉伸性能之影響，同時，透過實驗所獲得的拉伸應力-應變曲線探討鋼纖維含量對UHPC韌性行為之影響。

貳、實驗方法

2.1 配比設計

在混凝土中加入高強度鋼纖維以增加抗拉能力是普遍方法之一，本研究使用的鋼纖維長度為 12.5mm，直徑 0.175mm，長徑比(Aspect Ratio)為 71.4，單根纖維的抗拉強度大於 2000 MPa，如圖 1 所示。添加的鋼纖維體積比分別為 1%、2%及 3%。此外，UHPC的構成材料包含波特蘭一型水泥，粒徑約 11-15 μ m；為了降低水泥使用量，使用爐石粉取代 50%的水泥，其優點可降低水化熱，同時因其粒徑小於水泥顆粒，除了與水泥共同作用形成水化產物之外，也用於填充料以填充顆粒間的孔隙；非緻密砂灰，粒徑小於 0.2 μ m；構成 UHPC 的骨架為石英砂，所使用的砂的粒徑介於 104 μ m 到 250 μ m。由於 UHPC 要達到超高強度的目標，需控制拌合水量低於 0.25，為此，要獲得良好的工作性能，強塑劑是混合過程中必要的外加劑，本研究使用聚羧酸基高效減水劑。控制砂與二元水泥(水泥+爐石粉)的比值為 1:1 對於改善工作度與降低硬固 UHPC 的自體收縮具有重要的意義，本研究對於砂的用量為水泥用量的 1.03 倍，並根據鋼纖維摻量進行調整，混合比例如表 1 所示。



圖 1 鋼纖維外觀與尺寸

表 1:UHPC 材料配比

編號	A	B	C
水泥	0.5		
爐石粉	0.5		
矽灰	0.25		
石英砂(粗)	0.413	0.401	0.389
石英砂(細)	0.619	0.602	0.584
水	0.2		
強塑劑	0.04		
鋼纖維*	1%	2%	3%
水灰比	0.23		
*鋼纖維為體積分數			

2.2 試體準備與養護條件

材料混合的過程使用容量 8 升小型水泥砂漿拌合機進行。將所有乾料置於容器中使用低速進行充分攪拌，以確保材料均勻分散，其次將水與強塑劑充分混和後，緩慢加入攪拌容器中，約 3-5 分鐘後，材料將逐漸產生反應，使用相同混合速度繼續攪拌 5 分鐘使材料呈現泥漿狀。依據不同的體積含量逐漸加入鋼纖維，為了使鋼纖維能被均勻分散於漿體中以發揮其抑制裂縫的功能，加入鋼纖維後繼續拌合 5-7 分鐘，其後將漿體澆鑄於試體模中，並以塑膠模覆蓋表面以防止表面水分迅速喪失形成裂縫。為了加速 UHPC 早期強度的發展，試體於澆鑄 2 天後拆模，並以 90°C 熱水養護 72 小時，完成後將試體取出放置於室溫下直到 28 天後進行試驗。

叁、試驗方法

3.1 抗壓試驗

抗壓實驗利用全自動抗壓試驗機(如圖 2)，依據ASTM C109 [19]，對 50mm×50mm×50mm立方體進行加壓直到試體破壞所得最大抗壓強度，加載速度控制在 $0.6 \pm 0.2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ 。每一組試體進行三個試體的試驗，並依試驗結果計算平均強度與標準差。



圖 2 全自動抗壓試驗機

3.2 抗拉試驗

直接拉伸試驗使用MTS 819 伺服液壓試驗機進行(如圖 3)，此一試驗機之最大出力為 50kN。試體受力歷程使用Kistler 9351B壓電式測力規(如圖 3)進行量測，拉伸過程中試體的變形歷程是透過在試體上架設之LVDT位移計(如圖 3)所量測，而非直接採用引伸桿之位移歷程進行應變之計算，因為該行程包含了儀器勁度與夾持邊界效應之影響，將高估彈塑性階段之變形量。

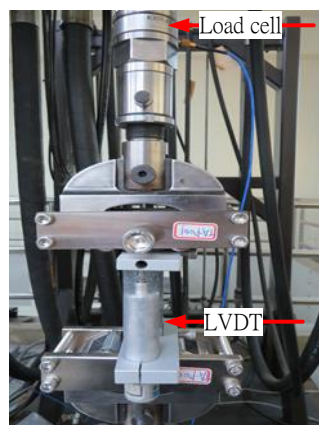


圖 3 MTS 819 伺服液壓試驗機

由於直接拉伸試驗所得到之應力-應變曲線，將可以直接用於比較 UHPC 在鋼纖維強化後的行為，除了可以觀察拉伸強度、基材微裂縫形成到裂縫局部化之間的應力趨勢，透過積分亦可以評估材料所呈現之韌性性質，由於高韌性是超高性能混凝土追求的目標之一。為了將前述性質進行量化分析，本研究將擷取幾項重要的材料性能參數，包括初始開裂強度(Initial Cracking Strength, ICS)、極限拉伸強度(Peak Cracking Strength, PCS) 及對應之應變量(Peak Strain, PS)，初始開裂強度(ICS)是指材料受拉伸時機剛出現裂縫時的應力值，此時應力-應變曲線將產生勁度的變化。由於纖維開始作用限制裂縫的擴展，試體中的應力將重新分配。此時，應力仍將持續上升，同時，許多的微小裂縫

將逐漸形成，此為一應變硬化的階段，直至上升至最大應力值，即極限拉伸強度(PCS)，之後材料開始應力軟化，曲線下之面積稱為韌性容量(Ductility Capacity)，韌性代表材料在塑性變形和斷裂過程中吸收能量的能力，為材料在破裂前所能吸收的能量與體積的比值。一般而言，在應力應變曲線中，當材料試體開始加載直到極限拉伸強度後，此區間曲線下面積，稱為材料吸收能量(Energy Absorption，簡稱EA)，為了最佳的呈現纖維的效應，本研究將觀察加載至微裂縫完成局部化後的階段，取應力下降至 95%PCS 為界，如圖 4 所示，計算公式可參考式(1) [20]。

$$EA = \int_0^{\delta_i} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

其中， δ_i 為 95%PCS 所對應之變形量。

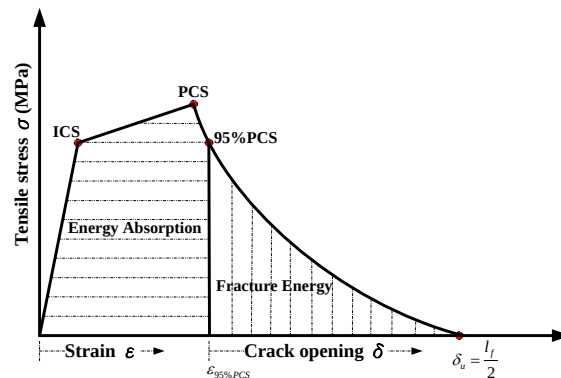


圖 4 典型 UHPC 拉伸應力應變曲線材料特性示意圖

肆、實驗結果與討論

4.1 抗壓試驗結果

為了確保本次實驗所製作之試體符合超高性能混凝土抗壓強度大於 150MPa 之要求，同時製作了 50mm×50mm×50mm 立方試體，在相同條件下進行養護，並於 UHPC 試體的齡期為 7 天時進行抗壓試驗。所測得之抗壓強度如圖 5 所示。對於鋼纖維體積含量 1% 之 A 試體，平均抗壓強度可達 162MPa，標準差為 5.2。對於鋼纖維體積含量 2% 與 3% 的 B 與 C 試體，平均抗壓強度分別為 172MPa 與 174MPa，標準差分別為 5.6 和 1.3，其抗壓強度有增加之趨勢，然而增益的比例僅 6.2% 和 7.4%。導致強度增加的因素主要在於鋼纖維對於微裂縫的橋接(bridging)限制了柏松效應所致的試體的側向變形，而此一效應隨著纖維含量增加而增加，故導致了抗壓強度增加。

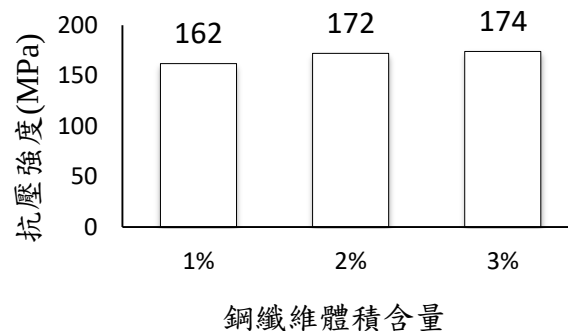


圖 5 不同鋼纖維含量試體 7 天抗壓強度

4.2 抗拉試驗結果

直接拉伸試驗之結果如圖 6 及表 2 所示。圖 6 中應力-應變曲線下所涵蓋的面積越大即表徵材料具有較佳的韌性，由圖 6 中對於 A、B 與 C 組的試驗結果顯示，隨著鋼纖維的含量增加，整體的拉伸性能均有顯著的提升。對於 1% 之 A 試體的初始開裂強度為 5.4 MPa，2% 之 B 試體的初始開裂強度為 7.6 MPa，增加 40.7%；3% 之 C 試體的初始開裂強度為 9.9 MPa，相較於 A 增加 83.3%。對於極限張力強度，1%A 試體為 6.7 MPa，2% 的 B 試體與 3% 的 C 試體分別增加 73.1% 與 103%，達到 11.6 MPa 與 13.6 MPa。顯示了本研究使用的微鋼纖維強化 UHPC，在拉伸行為的表現方面，與文獻[12]使用 0.3×30 mm 的螺旋型纖維或是光滑直纖維有一致性的結果。然而，由於纖維的數量更多，在確定有良好的分散的狀況下，試體在承受拉力時將能呈現出多重裂縫開裂的破壞模式，如圖 7 所示。從圖 7 觀察，鋼纖維含量 1% 之試體細微裂紋較少，隨著纖維含量增加 2% 及 3%，可以明顯地看到細微的裂紋。由於基材開裂後，纖維的橋接效應限制了裂紋進一步的擴展，並透過應力的重分配，不斷的形成新的裂紋，此一機制將有利於變形過程中能量的吸收。對於 3 組試體的吸能性質分別為 46 kJ/m³、83 kJ/m³，及 103 kJ/m³，與鋼纖維含量成正成長趨勢。

	A(1%)	B(2%)	C(3%)
ICS(MPa)	5.4	7.6	9.9
PCS(MPa)	6.7	11.6	13.6
95%PCS(MPa)	6.4	11.0	12.9
PS (%)	0.6	0.2	0.5
EA(KJ/m ³)	46	83	103

表 2:UHPC 材料拉伸行為參數

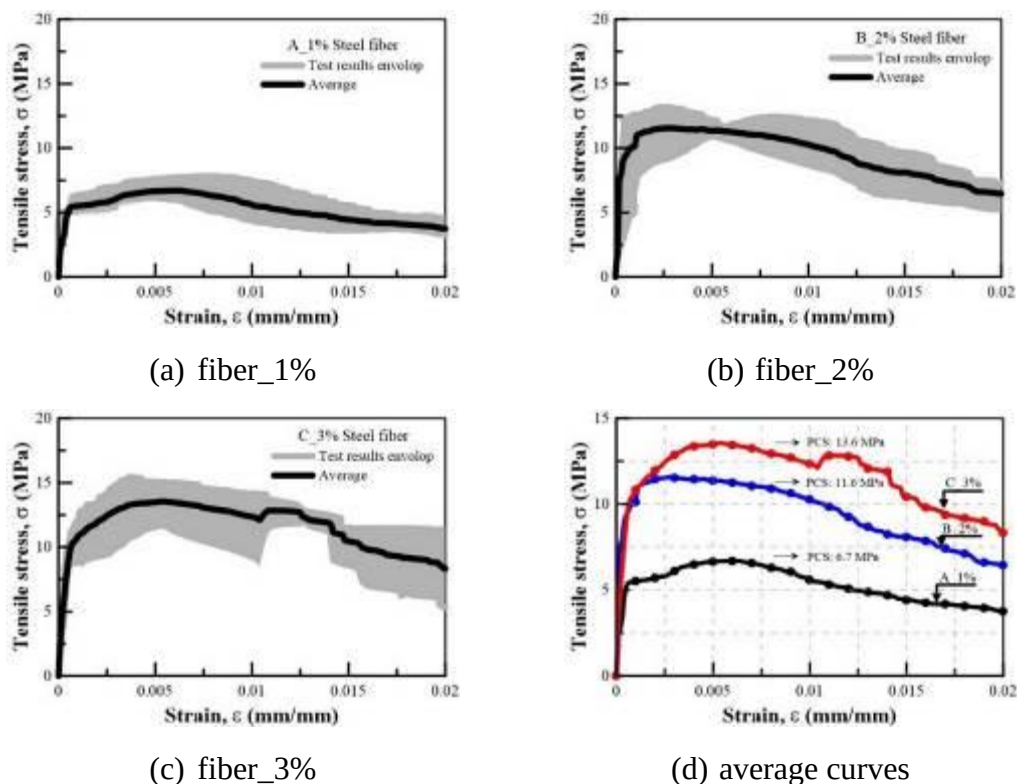


圖 6 不同鋼纖維含量直接拉伸應力-應變曲線

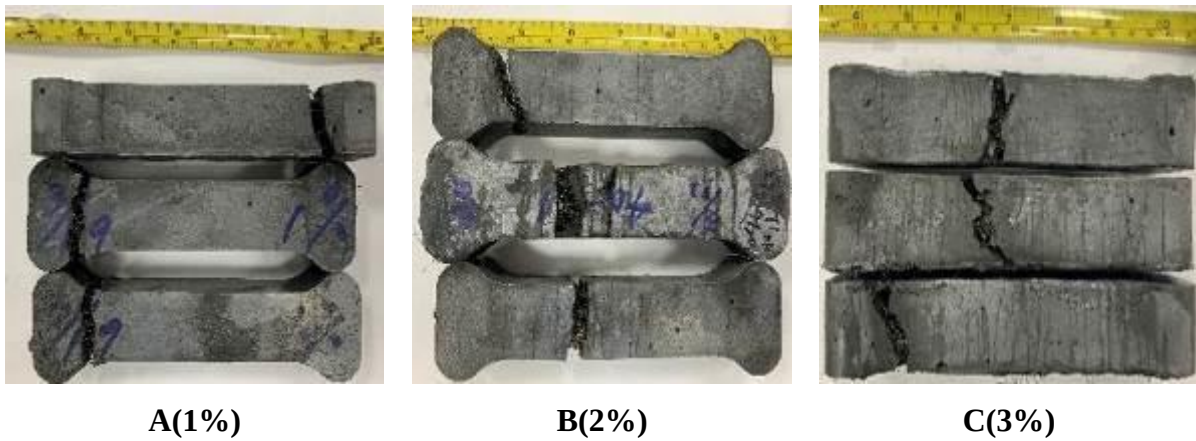


圖 7 不同鋼纖維含量試體破壞模式

伍、結論

本研究主要透過實驗探討微鋼纖維含量(1%、2%與 3%)對 UHPC 抗壓與拉伸力學行為。由抗壓試驗結果顯示，抗壓強度隨著鋼纖維含量增加而增強。主要由於纖維對試體受力過程中側向變形的圍束效應，導致抗壓強度的增加。在拉伸試驗方面，本研究使用 MTS 伺服式油壓試驗機進行直接拉伸實驗，實驗結果顯示試體受力過程中，初始開裂強度、極限拉伸強度及對應之應變量隨鋼纖維含量增加而提升。鋼纖維添加量 2%與 3%時，當材料進入塑性階段也明顯應變硬化階段，尤以當纖維含量增加至 3%，試驗結果包含初始開裂強度、極限張力強度與吸能性質等均有顯著的差異。同時，透過對試體破壞模式的觀察可以看到多重裂縫的形成與分佈狀態，顯示了材料的利用應力的重分配能吸收更多能量及更有效率。

參考文獻

- [1]. Akhnoukh, Amin K., and Chelsea Buckhalter. (2021). Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials* 15.
- [2]. El-Tawil, S., Tai, Y. S., Belcher II, J. A., & Rogers, D. (2020). Open-Recipe Ultra-High-Performance Concrete: Busting the cost myth. *Concrete International*. 33-38..
- [3]. Zhou, M., Lu, W., Song, J., & Lee, G. C. (2018). Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering. *Construction and Building Materials*, 186, 1256-1267..
- [4]. Rebentrost, Mark, Gavin Wight, and E. Fehling. (2008). Experience and applications of ultra-high performance concrete in Asia. 2nd international symposium on ultra high performance concrete. Vol. 10.
- [5]. Sritharan, S., Bristow, B.J., and Perry, V.H. (2003). Characterizing an Ultra High Performance Material for Bridge Applications Under Extreme Loads, 3rd International Symposium on High Performance Concrete, PCI, Orlando, Florida.
- [6]. Lequesne, R.D., Setkit, M., Kopczynski, C., Ferzli, J., Cheng, M.Y., Parra- Montesinos, G., and Wight, J.K. (2011). Implementation of high-performance fiber reinforced concrete coupling beams in high-rise core-wall structures, ACI Special Publication,

SP-280, 94-105.

- [7]. Lequesne, R.D., Setkit, M., Parra-Montesinos, G.J., and Wight, J.K. (2009). Seismic detailing and behavior of coupling beams incorporating high-performance fiber reinforced concrete, Antoine E. Naaman Symposium Four decades of progress in prestressed concrete, fiber reinforced concrete, and thin laminate composites, SP-272, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 14, 205-222.
- [8]. Park, S.H., Kim, D.J., Ryu, G.S., and Koh, K.T. (2011). Tensile behavior of ultra-high performance hybrid fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol.34, 172-184.
- [9]. Acker P., Behloul, M., (2004). Ductal Technology, A Large Spectrum of Properties, A Wide Range of Applications, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany.
- [10]. Buitelaar, P., (2004). Heavy Reinforced Ultra High Performance Concrete, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany.
- [11]. Dallaire, E., Aitcin, P.C., and Lachemi, M. (1998), High Performance Powder, *Civil Engineering*, ABI/INFORM Global.48.
- [12]. JSCE Guidelines for Concrete No. 9 , (2006). Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft), Research of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Japan Society of Civil Engineers (JSCE).
- [13]. Association Française de Génie Civil (AFGC)/ Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA), Bétons fibres à ultra-hautes performances, (2002). Recommendations provisoires, Janvier.
- [14]. Zemei W., Caijum S., and Kamal H.K., (2019). Investigation of Mechanical Properties and Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete. Influence of Steel Fiber Content and Shape, *Composites Part B*, Vol. 174, 1-12.
- [15]. Wu Z., Shi C., He W., and Wu I., (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra-high performance concrete, *Constr. Building Mater*, Vol. 103, 8-14.
- [16]. Yoo D.Y., Kim S., Park G.J., Park J.J., and Kim S. W., (2017). Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high performance fiber reinforced cement composites, *Compos Struct*, Vol. 174, 375-388.
- [17]. Wille K., Naaman AE., EI-Tawil S., and Parra-Montesinos G.J., (2012) .Ultra- high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing, *Mater Struct* Vol. 45(3), 309-324.
- [18]. Hassan A.M.T, Jones S.W., Mahumd G.H. (2012). Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC), *Construction and Building Materials*. Vol. (37), 1-9.
- [19]. ASTM C109/C109M-16a Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), (2016). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [20]. N.T. Tran, and D.J. Kim, (2019). Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads, *Cement and Concrete Composites*, Vol.78, 132-145.

利用高性能相變化金屬有機骨架材料處理揮發性有機物之研究
Outstanding behaviour of MOF over AC inclusive phase changing behavior for removal of VOCs

陳熠芹^{1*} 張章堂²

Yi-Qin Chen¹ Chang-Tang Chang²

1 國立宜蘭大學環境工程學系 大學生

Student, Department of Environmental Engineering, National Ilan University

2 國立宜蘭大學環境工程學系 教授

Professor, Department of Environmental Engineering, National Ilan University

* Corresponding author: Gmamume10101@gmail.com

摘 要

近幾十年來科技技術日月飛梭的進步，高科技產業迅速地發展，但在進步的路途上也難免會產生對環境具有污染的物質，尤其在工業中產生的揮發性有機化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)極需要進行管控，以利避免以及預防在作業上排放 VOCs 對環境產生危害。本研究透過月桂酸/活性碳相變複合材料(Lauric acid/ activated carbon Phase Change Material, LA/AC PCM)與 Zn-MOF 金屬有機骨架複合材料(Zn-Metal organic framework composite, Zn-MOF)。通過動態丙酮吸附裝置，分別進行 LA/AC PCM 與 Zn-MOF 在室溫下對 200ppm、400ppm、600ppm、800ppm 的丙酮吸附能力評估。研究結果得知 Zn-MOF 對丙酮的吸附能力較 LA/AC PCM 對丙酮的吸附能力，相對比較高。另經由等溫吸附模擬得知 Zn-MOF 對丙酮吸附作用屬於多層物理吸附行為。

關鍵詞：相變材料、金屬有機骨架複合材料、丙酮、吸附

一、前言

揮發性有機化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)包括很多液體和氣體，其中許多是無色無味的。由於它們是揮發性的，因此在室溫下容易蒸發。揮發性有機化合物因其能夠與低層大氣中的其他污染物(如氮氧化物)反應，形成臭氧而受到普遍關注。地面高濃度的臭氧會危害人體健康、破壞作物並影響橡膠等材料。一些 VOCs 可能含致癌物質，從而直接危害人體健康。其中丙酮是最常見的揮發性有機化合物之一，當有人接觸到一定濃度的丙酮時，易對人類健康產生威脅。空氣中丙酮的檢測和去除丙酮，以防止丙酮危害。因此，控制空氣中丙酮的濃度至關重要。目前對丙酮處理已經開發多種技術，包括氣體吸附、電漿催化、氧化等。最廣泛採用方法為吸附，即將丙酮捕獲於吸附材料表面，最常使用的吸附材料為活性碳(Activated carbon, AC)，主要因為 AC 具有發達的孔結構和高表面積特性，但 AC 屬於親水性材料，易受水氣影響。

而近年來大家開始探討及開發吸附能力更高之吸附材料，如金屬有機骨架(Metal organic framework, MOF)，是新材料在金屬有機材料(Metal organic materials, MOM)中的一個重要分類。MOF 材料因其具有疏水性、高孔隙率、大比表面積、可調結構等優點，所以在氣體吸附與分離領域顯示出廣闊的應用前景。

文獻中已經有不少研究討論，吸附材料孔洞結構和碳表面化學性質對 VOCs 吸附的影響。如 Xiancheng Ma 等人(2018) 以廢煙梗為碳前體，乙二胺為氮源，通過水熱法成功製備氮摻雜多孔碳。所得 氮摻雜多孔碳具有高比表面積 ($906\text{--}2940\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$) 和化學成分 ($1.80\text{--}5.22\%$ N 和 $5.81\text{--}11.77\%$ O)。顯示出高丙酮吸附容量，即在 25°C 和 18 kPa 下為 16.91 mmol g^{-1} 。Li-qing Li 等人(2012)利用三種商業活性碳樣品在固定床恆溫吸附實驗一定條件下進行的，其中甲苯、丙酮和 1,2-二氯乙烷作為吸附劑。結果得知，孔徑梯度有利於加強內擴散。在相同條件下，有機氣體的吸附趨於選擇性，甲苯、丙酮位置，吸附在活性碳 2-二氯乙烷主要分別在 $1.27\text{--}1.49\text{ nm}$ 、 $0.67\text{--}0.84\text{ nm}$ 和 $1.39\text{--}1.75\text{ nm}$ 範圍內。Peng Huo 等人(2021) 採用蒸汽二次活化法製備了具有較大比表面積、較大孔隙網絡和豐富化學官能團的改性活性炭纖維，並進行乙醇和水吸附試驗。在 ACF-850 上成功建立微介孔分級多孔結構。結果得知，ACF-850 在乙醇吸附過程中表現出最高的靜態吸附容量(12.59 mmol/g)、最低的活化能和最低的等量熱。

二、實驗方法

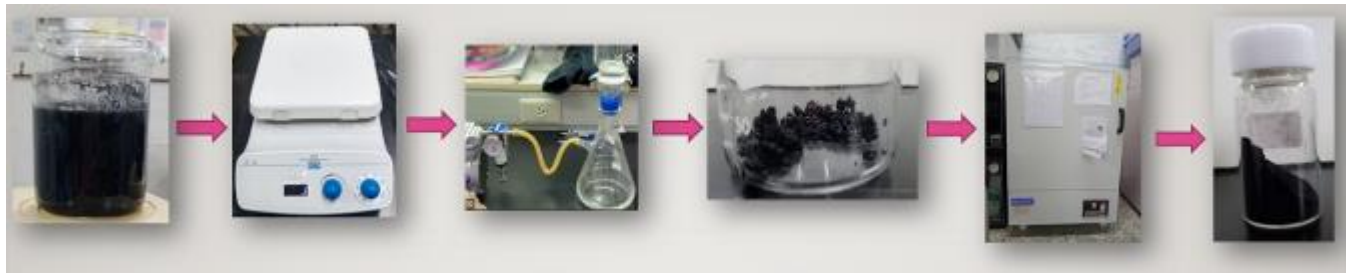
2.1 材料和方法

月桂酸購自 Acros(organics)，活性碳購自 Alfa Aesar，氫氧化鈉(NaOH)購自 Nihon Shiyaku (Japan)，甲醇(MeOH)購自 Honeywell (Germany)，所有其他化學品均為本地供應商所提供的試劑級藥品。

2.2 LA/AC PCM 製作

先將 2g 的月桂酸與 2g 的活性碳(研磨至粉狀)及 100 mL 的水混合並利用加熱行磁

石攪拌器在溫度 60 度、轉速 200rpm 下進行加熱攪拌 1 小時，混合後利用過濾裝置把沉澱物取出並放入 35 度的烘箱中進行烘乾 4 小時。



SA+AC 溶劑 進行磁石攪拌 過濾裝置 沉澱物取出 烘乾 4 小時 PCM 成品

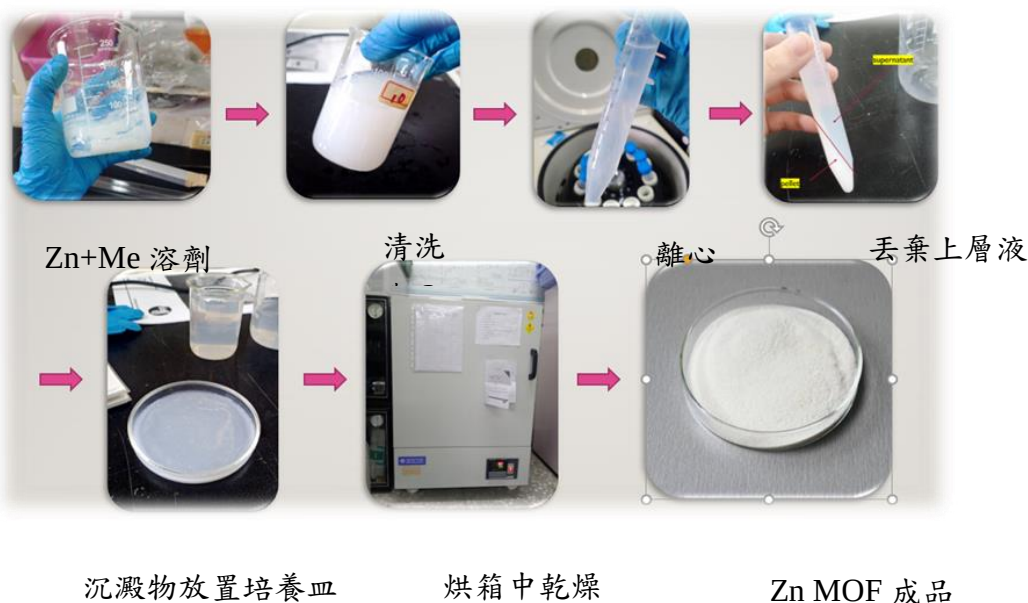
圖 1 實驗步驟之流程圖

2.3 Zn MOF 製作

先將 Zn(0.66g)、Me(1.09g)與 25mL 的甲醇及 1 mL 的 TEA(三乙醇胺)進行混合 2 小時再以 50 mL 的甲醇及 50 mL 的水清洗並離心 3 次，離心後丟棄上層液取出沉澱物放置培養皿中放入 105 度的烘箱中乾燥。

本研究將探討 LA/AC PCM 與 Zn MOF 複合材料對不同濃度丙酮的吸附性能，研究主題條列如下。

- 1.製作 LA/AC PCM 與 Zn-MOF 材料，並處理至球狀冷凍乾燥後取相同重量進行吸附實驗。
- 2.利用通過動態丙酮吸附裝置進行吸附作用，且評估相變化材料之吸附特性。
- 3.針對不同丙酮濃度進行丙酮吸附性能評估，並建立設定材料量至最佳操作條件。
- 4.藉由不同材料於各種濃度下對丙酮吸附性能評估，以利研求對丙酮吸附性能較佳的材料。



沉澱物放置培養皿 烘箱中乾燥 Zn MOF 成品

圖 2 Zn MOF 製作實驗步驟示意圖

2.4 特性分析

進行 X 射線衍射(X-ray diffraction, XRD, Rigaku TTRAX 3)分析，並以 0.5°/min 的掃描速率及 0.02°步距間隔和 3 - 40°的 2 θ 角度範圍進行測量。利用傅立葉轉換紅外光譜(Fourier Transform Infrared spectroscopy, FTIR)，機型為 Nicolet iS10 (Thermo Scientific™)，確認官能團。使用掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy, SEM)觀察吸附材料結構，機型為 JSM-IT100 (In Touch Scope™)。

三、結果與討論

本研究為進行材料特性分析，分別使用 SEM 進行材料外觀分析，FTIR 進行材料官能團測定，利用 XRD 射線繞射原理研究物質內部結構。為評估材料性能，乃針對丙酮進行吸附作用不同操作參數(含濕度、進流濃度、停留時間、溫度與材料再生性)，以及觸媒反應不同操作參數對丙酮去除效率影響之評估，另為瞭解吸附與觸媒反應特性，為實場應用可行性，乃進行等溫吸附模式分析模式分析，與探討吸附與觸媒反應機制。

3.1 特性分析結果

3.1.1 XRD

通過甲醇清洗 Zn 與 Me 的稠狀化學溶劑，離心製備基於 Zn 的 MOF，即 Zn-MOF。MOF-1(Zn)與 MOF-2 (吸附前的 Zn-MOF)相比，MOF-1 的 X 射線衍射圖譜變化有明顯變化(圖 2)。MOF-2 的 XRD 圖譜中有許多峰消失，並由 2 θ 處 5.6°、11.2°、14.4°、24.6° 的個尖峰所取代。由 XRD 圖譜的變化，可瞭解 Zn-MOF 中 Zn 與金屬離子反應，使結晶過程中形成高度有序的晶體結構。Zn-MOF 經過吸附後的 XRD 圖譜與吸附前的 Zn-MOF 並無太大的差異，可得知 Zn-MOF 不論是在吸附前，吸附後的晶體結構皆為穩定狀態。

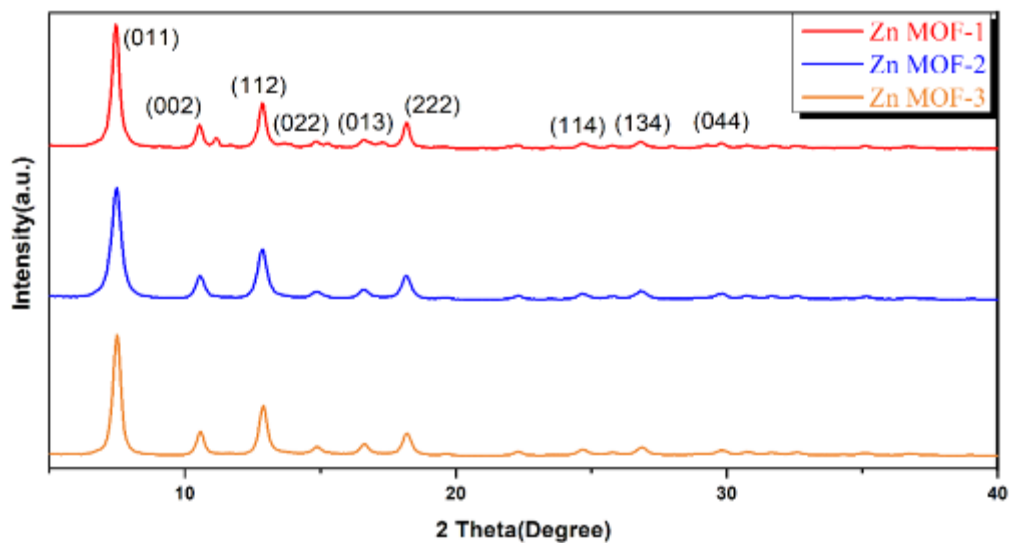


圖 1 Zn-MOF 的 X 射線衍射圖譜

3.1.2 FTIR

在本研究中，透過 FTIR 光譜瞭解 Zn-MOF 結構與官能團及結構穩定性，圖 2 為 Zn-MOF、Lauric acid、Zn/Lauric acid-MOF 的 FTIR 圖。其結果顯示 Zn-MOF 在 3400 cm^{-1} 有 O-H 官能團； 1614 cm^{-1} 附近有 C=O 官能團； 1576 cm^{-1} 有 C-N 官能團而在 753 cm^{-1} 附近有 ZnO 官能團。與 Lauric acid、Zn/Lauric acid-MOF 比較後發現，Zn-MOF 所有官能團皆能在 Lauric acid 上發現，且在 3400 cm^{-1} 左右的官能團從單峰變成沒有鋒面狀態，並在 1576 cm^{-1} 左右，可以發現 C-N 官能團。即 Zn-MOF 的官能團皆存在於 Zn/Lauric acid-MOF，顯示結構穩定。

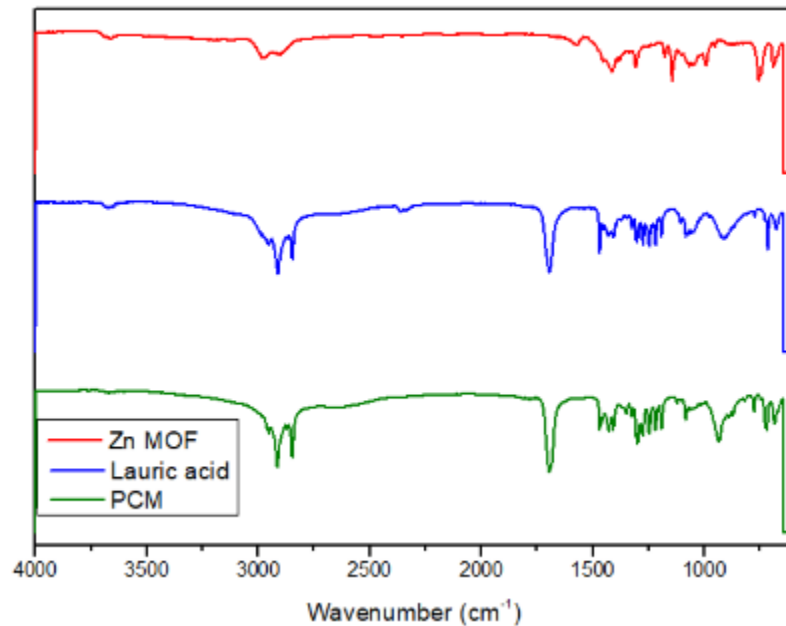
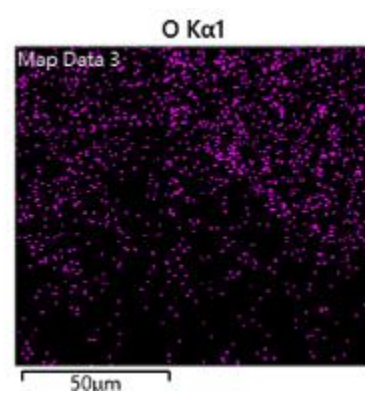
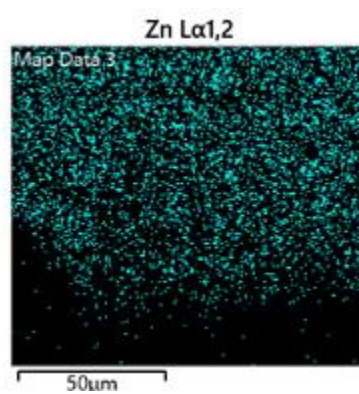
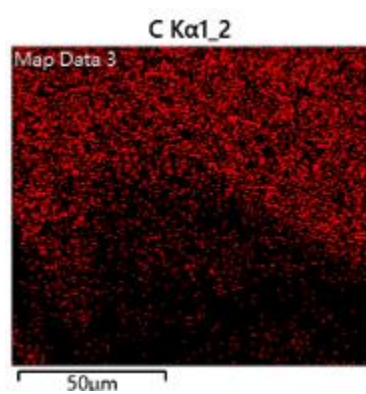
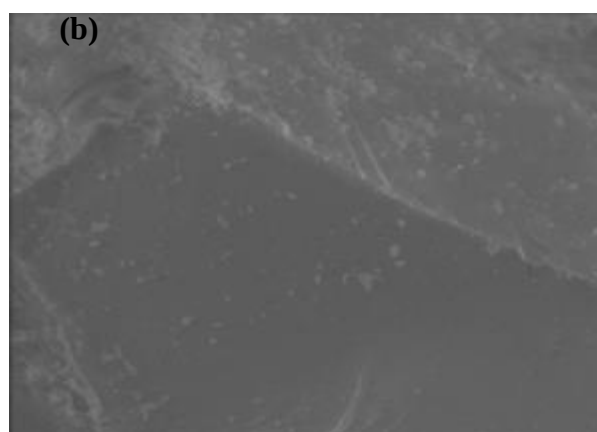
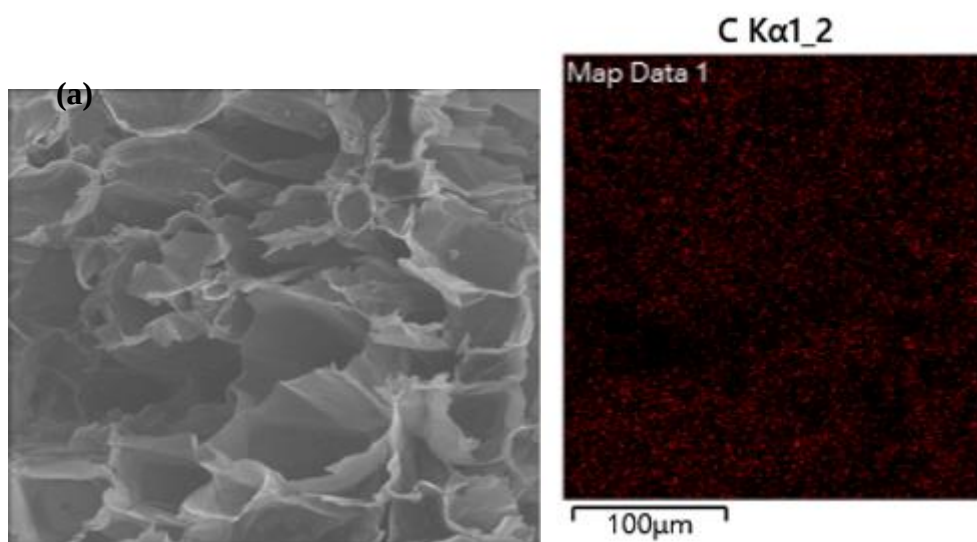


圖 2 Zn-MOF、Lauric acid、Zn/Lauric acid-MOF 的傅立葉轉換紅外光譜 (FTIR)

3.1.3 SEM

圖 6 為 LA/AC PCM、Zn-MOF、Zn/Lauric acid-MOF 的光學顯微鏡圖像。圖 6(a) 為 LA/AC PCM 的 SEM 圖像，圖 6(b) 為 Zn-MOF 的 SEM 圖像，圖 6(c) 為 Zn/Lauric acid-MOF 的 SEM 圖像。由圖可知，Zn-MOF、Zn/Lauric acid-MOF 均顯示出無定形結構。LA/AC PCM 的孔徑大小較大。Zn 在添加 Lauric acid 連接劑以製成 MOF 之後，可以觀察到顆粒均勻地團聚在一起。



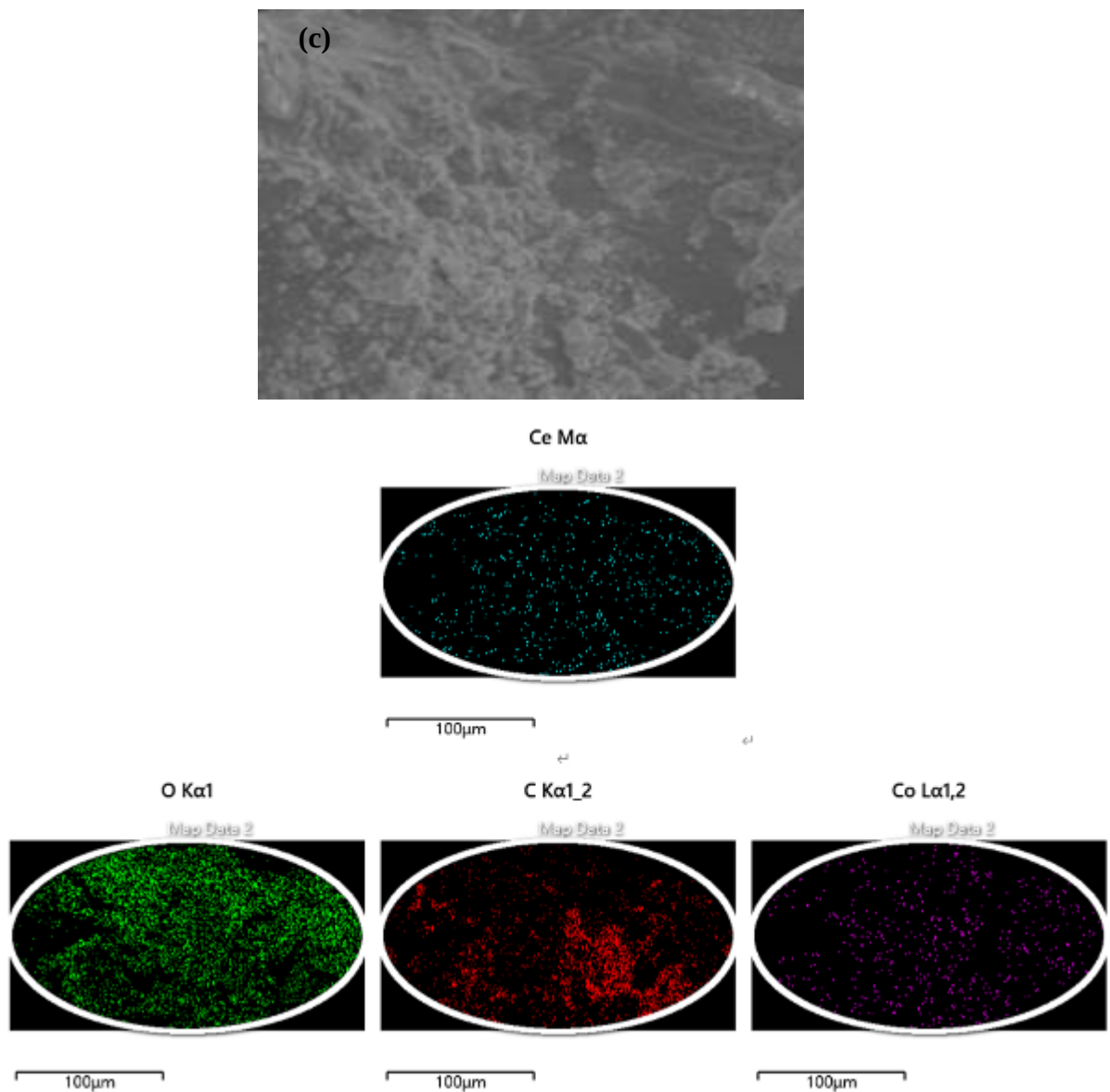


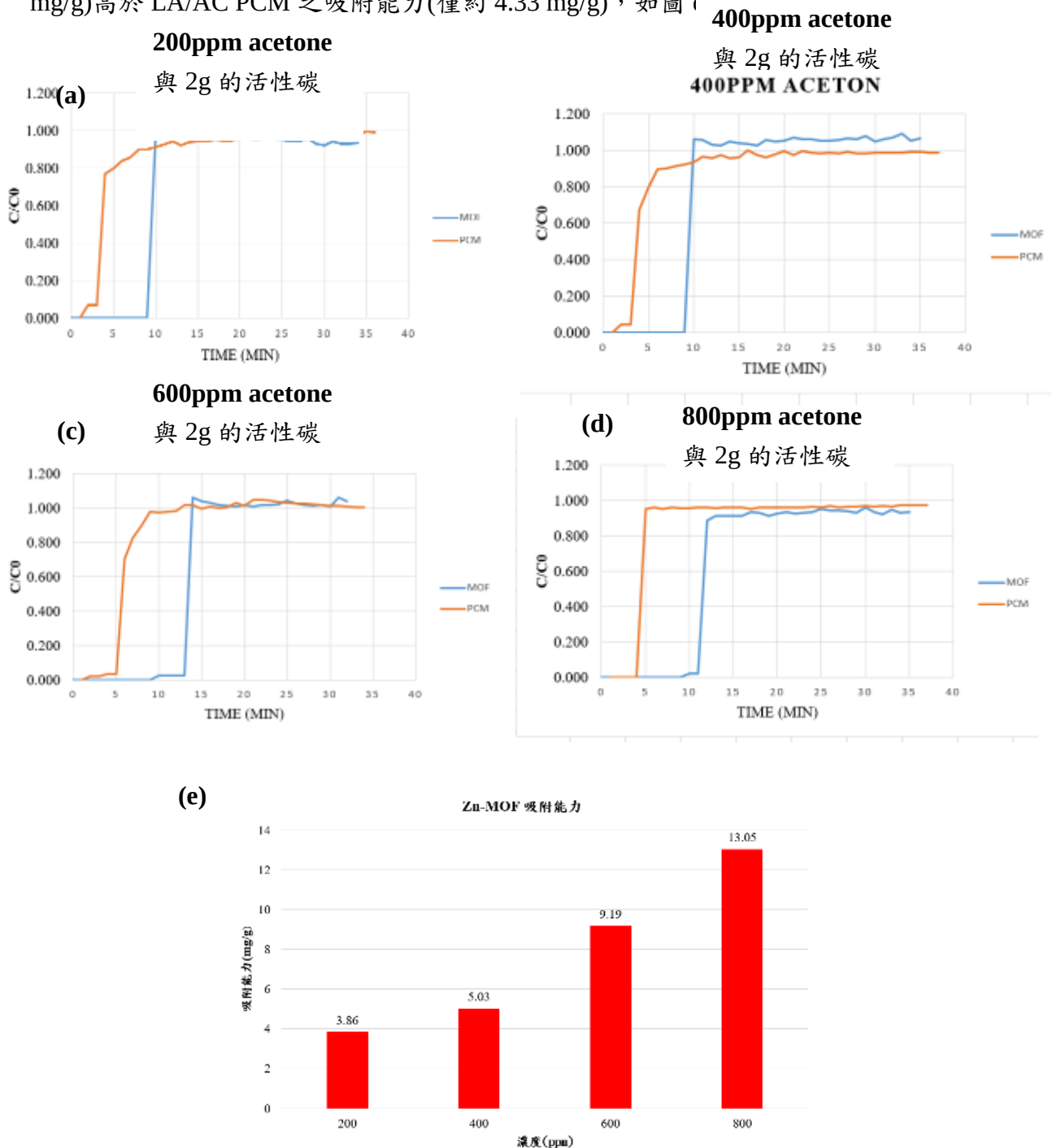
圖 3 [SEM 圖像 \(a\)](#)LA/AC PCM→[\(b\)](#)Zn-MOF→[\(c\)](#)Zn/Lauric acid-MOF [SEM 圖像](#)

3.2 性能評估結果

本研究使用流量計、吸附管(石英管)和其他連接管設計自製裝置，並將其與移動式揮發性 VOCs 氣體偵測儀(Handheld PID Detector)連接，以瞭解所研製材料的吸附能力。利用流量計控制流量以保持一定入流濃度，並使用移動式揮發性 VOCs 氣體偵測儀進行吸附行為監測，以了解貫穿時間與飽和時間，並計算吸附能力，其入流濃度越高，貫穿時間與飽和時間越短，吸附能力越高。—

3.2.1 LA/AC PCM 與 Zn-MOF 對丙酮濃度之吸附性能測試比較

—LA/AC PCM 於四種入流濃度下，其大約在 5 分鐘左右開始貫穿現象，在室溫下對丙酮吸附能力分別為 0.87、1.58、2.92、4.33mg/g，而 Zn-MOF 於四種入流濃度下，其大約在 10 分鐘左右開始有貫穿現象，在室溫下對丙酮吸附能力分別為 3.86、5.03、9.19 與 13.05 mg/g，結果得知在不同濃度(200, 400, 600, 800ppm)下，可知最高吸附能力(13.05 mg/g)高於 LA/AC PCM 之吸附能力(僅約 4.33 mg/g)，如圖 (



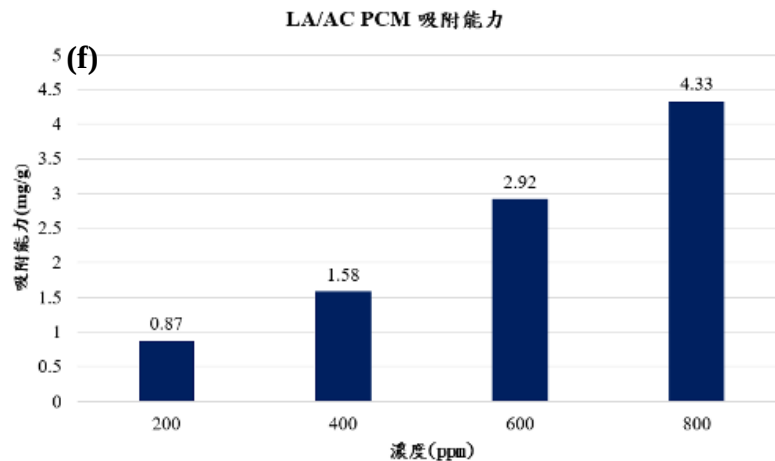


圖 3 LA/AC PCM 與 Zn-MOF 吸附能力比較圖(a)200 ppm (b)400 ppm (c)600 ppm (d)800ppm (e)Zn-MOF 吸附能力 (f) LA/AC PCM 吸附能力

3.3 等溫吸附模式

圖 4、5 分別顯示了 LA/AC PCM 與 Zn-MOF 吸附能力與進流濃度關係。圖中實線為擬合 Langmuir 模式模擬結果，虛線為擬合 Freundlich 模式模擬結果。由表 1 得知 Langmuir 吸附等溫方程式，是假設價電點(points of valency)位於吸附劑表面，且每一個位置可吸附一個分子，亦即被吸附層為一分子厚度，此等溫線僅適用於單層吸附，其方程式常以下式表示： $x/m = abC_o / (1 + aC_o)$ ，式中 x =被吸附物質之量， m =吸附劑重量， C_o =吸附後最終濃度或進流濃度(ppm)， a 及 b =常數。將上式取倒數，將 $1/(x/m)$ 與 $1/C_o$ 進行製圖，可得一直線，由其斜率和截距，可求得常數 a 及 b 跟 Freundlich 吸附等溫方程式，用以描述吸附程序，其基本假設為吸附劑表面具有各種不同吸附位置，而每一位置上之吸附均依循 Langmuir 等溫模式；其方程式為 $x/m = KC_o^{1/n}$ ， x 、 m 、 c 均同上所述， k 及 n =常數。對上式取對數，將 $\log(x/m)$ 與 $\log C_o$ 製圖，可得一直線，由其斜率和截距決定 n 及 k 值。可知由於 Langmuir 與 Freundlich 實驗等溫吸附曲線的數據，可以得知，LA/AC PCM 在丙酮的吸附較適合採用 Langmuir 模式進行預測，即屬於單層吸附行為，而 Zn-MOF 在丙酮的吸附上較適合採用 Freundlich 模式進行預測，即屬於多層吸附行為。

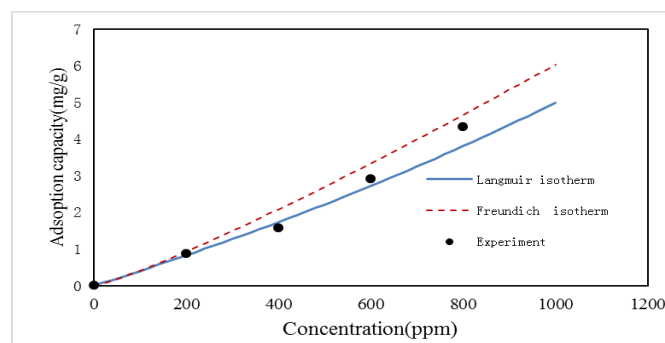


圖 4 LA/ACM 等溫吸附圖

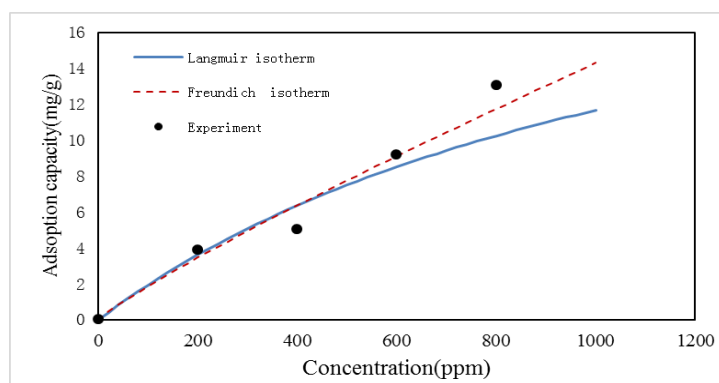


圖 5 Zn-MOF 等溫吸附圖

表 1 Langmuir 與 Freundlich 吸附等溫方程式模擬參數值

Model	Parameters
Langmuir	$q_{\max}(\text{mg g}^{-1})$
	$K_L(10^{-3} \cdot \text{L mg}^{-1})$
	R^2
Freundlich	$K_F((\text{mg g}^{-1})(\text{L mg}^{-1})^{1/n})$
	n
	R^2
Redich-peterson	$K_R(\text{L g}^{-1})$
	$a_R(\text{L mg}^{-1})^\beta$
	β
	R^2

四、結論

在工業中產生的揮發性有機化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)極需要進行管控，以利避免以及預防在作業上排放 VOCs 對環境產生危害。透過月桂酸/活性碳相變複合材料(Lauric acid/ activated carbon Phase Change Material, LA/AC PCM)與 Zn-MOF 金屬有機骨架複合材料(Zn-Metal organic framework composite, Zn-MOF)。通過動態丙酮吸附裝置，分別進行 LA/AC PCM 與 Zn-MOF 在室溫下對 200ppm、400ppm、600ppm、800ppm 的丙酮吸附能力評估(分別為 3.86、5.03、9.19 與 13.05 mg/g)。研究結果得知 Zn-MOF 對丙酮的吸附能力較 LA/AC PCM 對丙酮的吸附能力，相對比較高。另經由等溫吸附模擬得知 Zn-MOF 對丙酮吸附作用屬於多層物理吸附行為。

參考文獻

1. Mohan, N., Kannan, G. K., Upendra, S., Subha, R., & Kumar, N. S. (2009). Breakthrough of toluene vapours in granular activated carbon filled packed bed reactor. *Journal of hazardous materials*, 168(2-3), 777-781.
2. Dobre, T., Pârvulescu, O. C., Iavorschi, G., Stroescu, M., & Stoica, A. (2014). Volatile organic compounds removal from gas streams by adsorption onto activated carbon. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(9), 3622-3628.
3. Li, L., Sun, F., Gao, J., Wang, L., Pi, X., & Zhao, G. (2018). Broadening the pore size of coal-based activated carbon via a washing-free chem-physical activation method for high-capacity dye adsorption. *RSC advances*, 8(26), 14488-14499.
4. Liang, X., Chi, J., & Yang, Z. (2018). The influence of the functional group on activated carbon for acetone adsorption property by molecular simulation study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 262, 77-88.
5. Trinh, Q. H., Gandhi, M. S., & Mok, Y. S. (2014). Adsorption and plasma-catalytic oxidation of acetone over zeolite-supported silver catalyst. *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(1S), 01AG04.
6. Khan, F. I., & Ghoshal, A. K. (2000). Removal of volatile organic compounds from polluted air. *Journal of loss prevention in the process industries*, 13(6), 527-545.
7. Jonas, L. A., & Svirbely, W. J. (1972). The kinetics of adsorption of carbon tetrachloride and chloroform from air mixtures by activated carbon. *Journal of Catalysis*, 24(3), 446-459.
8. Yaghi, O. M., O'Keeffe, M., Ockwig, N. W., Chae, H. K., Eddaoudi, M., & Kim, J. (2003). Reticular synthesis and the design of new materials. *Nature*, 423(6941), 705-714.
9. Ghimbeu, C. M., Gadiou, R., Dentzer, J., Schwartz, D., & Vix-Guterl, C. (2010). Influence of surface chemistry on the adsorption of oxygenated hydrocarbons on activated carbons. *Langmuir*, 26(24), 18824-18833.
10. Guo, Y., Li, Y., Wang, J., Zhu, T., & Ye, M. (2014). Effects of activated carbon properties on chlorobenzene adsorption and adsorption product analysis. *Chemical Engineering Journal*, 236, 506-512.

氣候變遷下常態風特性與風能探討-以花蓮縣北區既有風速測站為例

蘇盈真² 簡慶文¹

Yin-Chen, Su² Ching-Wen, Chien¹

1 大漢技術學院土木工程與環境資源管理系 助理教授

Assistant Professor, Department of Civil Engineering & Environmental Resources

Management, Institute of Dahan Technology

2 大漢技術學院土木工程與環境資源管理系 研究生

Graduated student, Department of Civil Engineering & Environmental Resources

Management, Institute of Dahan Technology

摘要

花蓮縣地形多變，氣候隨區域差異，且 2020 年是台灣氣候史上少見無颱風登陸的一年，本研究對北區(壽豐鄉以北)常態風特性區分近山與近海區域，發現表示風場紊流程度的陣風因子皆高於文獻所示，改以尖峰因子計算後，數值範圍顯見縮小。近山區域因氣壓、地形等變化，尖峰因子與紊流強度關係並不密切，而近海區域尖峰因子與紊流強度關係則出現迴歸判定係數 R^2 為 0.4528(負相關)。紊流強度過大會影響風力機塔疲勞現象，故若風力機塔設置於花蓮縣北區，宜建置於紊流強度較小處。依該年風速製作北區測站之平均風速與瞬時風速風花圖，藉此了解無颱風侵擾情況下，北區風速風向情形。另依既有風速測站歷史資料，以花蓮測站(編號 466990)類推二十年平均風速，以北區最大平均風速測站-和平測站為例，採用統計迴歸分析圖形法(Graphical Method)與 matlab 軟體資料處理求出形狀與尺度參數，再以 K-S 檢定法進行檢定，確認該測站符合韋布分配(Weibull Distribution)，可知風速範圍之機率，進一步則可計算風力機塔產生之風能。

關鍵詞：平均風速、風花圖、韋布分配、和平測站

壹、前言

風力發電，被認為是綠色能源之一，具有無窮潛力且為取之不盡的資源。台灣西部沿海一帶，依據 4C offshore(2014) [1]發布「23 年平均風速觀測」，世界排名前二十座優質風場內，佔有十六席，並具離岸風電水下基礎 60 米設置優勢，成為各風力發電開發商兵家必爭之地。反觀東部沿海，面對水深 4000 公尺海域，但因目前離岸風電技術尚處於水下基礎 2400 米內，風力發電雖貴為綠色能源，卻鮮少成為在地使用的發電方式。

因歷史因素，空軍自大陸轉至花蓮，為探求高空氣象而於 1931 年設立經緯儀氣球測風，而後發展無線電接收站，張儀峰等人(2012) [2]針對氣象局探空觀測與資料進行初步檢視，其中整合蕭長庚(2007) [3]對花蓮上空對流層頂氣候分析之歷史資料。空軍氣象聯隊(2007) [4]亦於同年提出「雷射式剖風儀與傳統高空探空風場資料特徵之比較分析」，為探空方式提供光達的比較。張景鐘、簡慶文等人(2009) [5]對花蓮探空站自然風場之資料進行風速剖面參數分析。2002 年國科會(現科技部)亦啟動「追風計畫」，執行專門監測颱風的「投落送」為防災提供預警。更有花蓮女中學生(林雅欽等，1989 [6]、陳筠喬等，1990 [7])研究花蓮地區風速、風向、海陸風等，發現花蓮地區受地形、季風、海陸溫差等因素，依季節、月份、區域不同，說明花蓮縣全縣及局部區域風特性。整體而言，為花蓮地區垂直高空、水平區域風特性做了初步研究。截至目前為止，仍少見花蓮地區對於風應用於工程上之探討。

貳、分析方法

利用中央氣象局花蓮縣北區局屬測站既有歷史資料，依指數律調整為高度 10 公尺之風速，進行 2020 年風花圖製作。以花蓮測站為基準，做出其他測站迴歸線圖，並類推測站二十年平均風速資料。以北區最大平均風速測站-和平測站為例，採用圖形法與Matlab軟體的Distribution filter App數值進行K-S檢定，確認該測站是否符合韋布分配(Weibull Distribution)。詳細流程請見下圖 1。

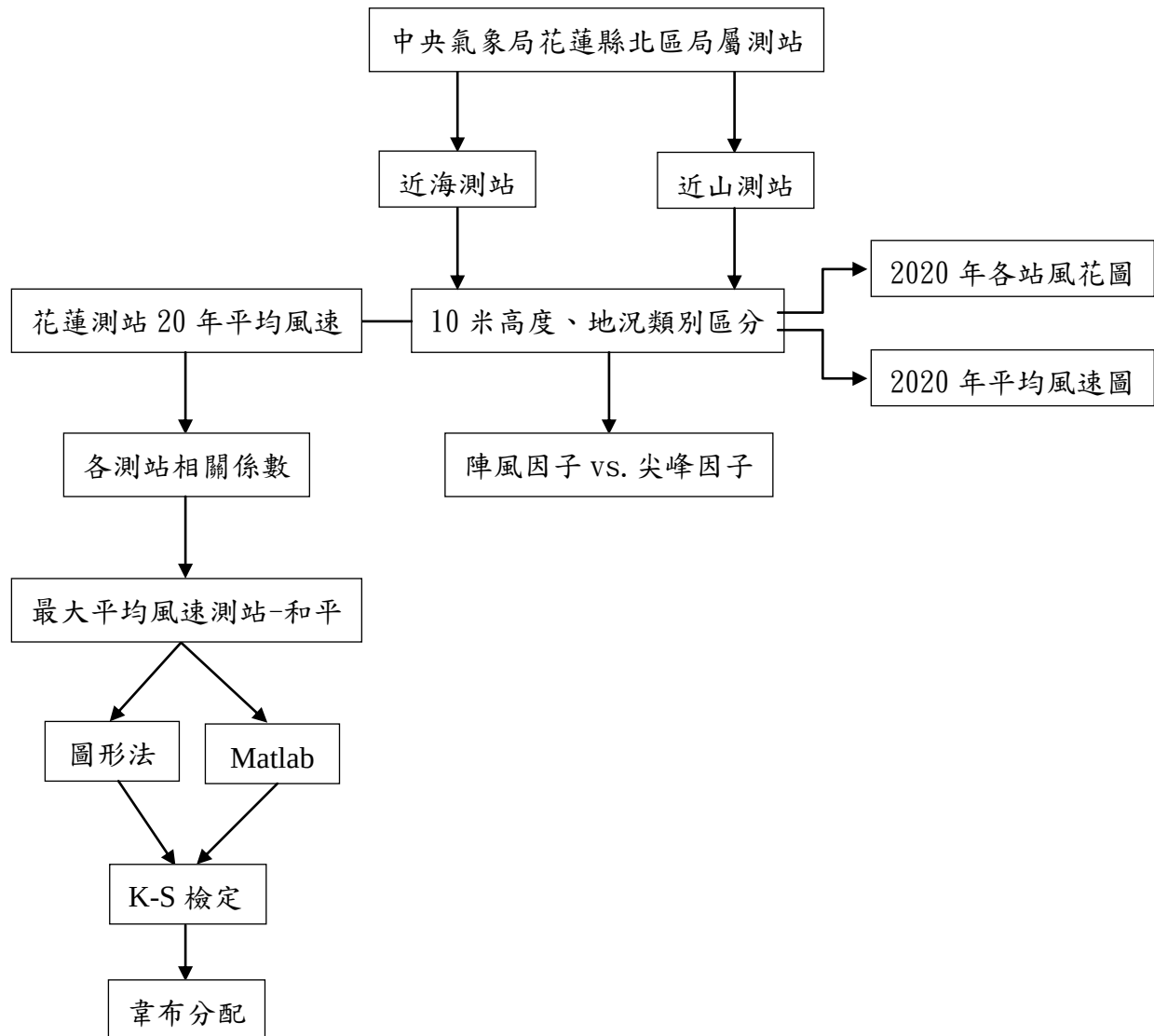


圖 1 分析流程圖

叁、結果與討論

研究最初先了解花蓮縣北區風速測站(壽豐鄉以北)基本位置與資料，並區分近山與近海測站。但 27 個測站有 10 個測站資料庫無留存資料，故僅以這 17 個測站(詳表 1)進行分析。實際風速資料，因測站建置時間不同等因素，資料留存最完整的為花蓮測站(編號 466990)，留存時間長達 20 年，亦為有人測站。餘者為無人測站，風速資料大多留存 2018 年至 2020 年，且報表之風速、風向為觀測時(整點)前 10 分鐘之平均，最大陣風為觀測時(整點)前 1 小時內最大瞬間風速，測站高度多為 6 米，於風工程領域須調整為 10 米高度下 3 秒鐘及 10 分鐘風速資料，並將期間推測為 20 年，再進行以下討論。

表 1 花蓮縣北區測站基本位置與資料表

近海/近山/ 無資料	站號	站名	海拔高度 (m)	測站地點描述	空照圖	圖片顯示	圖像來源 /日期	緯度	經度	地址	資料起始日 期	地況類別	離地面距 離(m)
近海	C0T9D0	和中	8	180-370米處為沙灘；南向 180米、北向90米有住家；離 村區210米；離村區中心390 米；離兩條主要道路70-80 米；43度		小水泥建 築物	google earth/ 2018.12. 01或更晚	24.26676	121.74103	秀林鄉秀林村62號(和平國小和 中分枝校園內)	2004/4/12	C	6
近海	C0Z190	富世	62	離立霧溪約190米；離主道路 約67米；離車站村區中心125 米；離東部發電廠立霧溪貯約 200米；到河邊傾斜44度；有 防風林		建物	google earth/ 2020.12. 29或更晚	24.14743	121.6297	秀林鄉富世村127號(富世國小 校園內)	2017/12/1	B	10
近海	C0Z230	和平	31	大濁水溪南處出口		建物	google earth/ 2020.06. 22或更晚	24.30717	121.77007	秀林鄉克來寶段399地號(和平 工業港安檢所綠洲分隊)	2017/12/1	C	10
近海	C0Z310	清水斷崖	59	離主道路約40米；離沙灘118 米；斜度18度		很小的台 地	google earth/ 2018.12. 01或更晚	24.218294	121.689142	秀林鄉臺9線大清水遊憩區下方 空地	2018/3/23	C	6
近海	C0Z180	新城	34	方面200米內有學校、村落		建物	google earth/ 2020.08. 25或更晚	24.03946	121.60454	新城鄉大溪村光復路570號(新 城鄉公所)	2017/12/1	B	10
近海	466990	花蓮	16.1	距海邊350米；周邊建築林立		有人測站	google earth/ 2019.03. 27或更晚	23.975128	121.613275	花蓮市花崗街24號	1910/1/1	B	10

近海/近山/ 無資料	站號	站名	海拔高度 (m)	測站地點描述	空照圖	圖片顯示	圖像來源 /日期	緯度	經度	地址	資料起始日期	地況類別	離地面距離(m)
近海	C0Z150	吉安光華	27	離花蓮溪約300米；離主道路65米；離村落中心約245米；有大片綠地、防風林；海岸山脈在側出海口		建物	google earth/ 2019.03.21或更晚	23.930925	121.595153	吉安鄉南濱路一段531號(水資源回收中心)	2017/6/3	C	10
近海	C0T9E0	大坑	415	離158米、200米、340米有2戶住家與一寺廟；離主道路128米		綠地	google earth/ 2019.03.21或更晚	23.880628	121.581981	壽豐鄉10鄰山嶺80之1號(中華電信公司寶田山機房)旁	2004/4/8	C	6
近海	C0T9F0	水璉	251	離海邊2945米；農路旁；北坑與十二分坑中間；大片斜坡，傾斜45度；山脊側邊；兩戶住家約距300米；離水璉村舊約2440米；離花蓮溪2023米		綠地	google earth/ 2018.12.20或更晚	23.797131	121.542514	壽豐鄉水璉村	2004/4/12	C	6
近海	C0Z270	蕃薯寮	343	離40米、126米、339米各有一戶；離蕃薯寮溪395米；離海2346米；離芳寮村舊1400米；距離可海斜度45度		綠地	google earth/ 2020.06.06或更晚	23.73835	121.540108	壽豐鄉水璉村蕃薯寮附近山區道路旁(牛山段607地號內)	2017/6/3	C	6
近山	C0Z220	和平林道	589	山腰線		森林	google earth/ 2018.12.20或更晚	24.343922	121.656317	秀林鄉臺電公司東部發電廠碧海機組廠區內(進入管轄約7公里處)	2018/3/23	C	6
近山	C0T790	大禹嶺	2830	山腰線		森林	google earth/2019.10.05或更晚	24.186117	121.316086	秀林鄉立霧溪事業區67林班地(救國團大禹山莊)	1994/11/18	C	6

啟用 Windows
按此以啟用 Windows

近海/近山/ 無資料	站號	站名	海拔高度 (m)	測站地點描述	空照圖	圖片顯示	圖像來源 /日期	緯度	經度	地址	資料起始日期	地況類別	離地面距離(m)
近山	C0T820	天祥	550	寺廟旁、森林；與河坡度44度		森林	google earth/ 2019.10. 05或更晚	24.179597	121.495639	秀林鄉立霧溪事業區80林班地 (天祥祥德寺)	1995/6/27	C	6
近山	C0T9B0	水源	558	120~180公尺內有2-3戶零星住家；直線距離110公尺內可達農路；苗圃內為半零星樹木		苗圃	google earth/ 2020.8.2 5或更晚	23.991861	121.537169	秀林鄉原林務局水源段的苗圃內	2000/8/7	C	6
近山	C0T870	鯉魚潭	135	離湖邊70米；離農路280米；離房屋167米		地面	google earth/ 2020.6.1 4或更晚	23.935639	121.508944	壽豐鄉池南村池南路一段8號 (鯉魚潭風景區旁)	1995/5/3	C	6
近山	C0T9A0	月眉山	498	宏華寺後山；農路；坡度45度		地面	google earth/ 2018.12. 20或更晚	23.809928	121.539828	壽豐鄉月眉山旁的小山丘上(過 米棧大橋往山上水壩方向至四 號橋左轉之山上)	2000/8/11	C	6
近山	C0Z100	車華	36	東華大學環境學院旁空地		平地	google earth/ 2019.3.2 1或更晚	23.89525	121.549833	壽豐鄉大學路二段1號(國立東 華大學)	2013/11/27	C	6

Downloaded from

一、風花圖與平均風速圖

依據各測站站點繪製 2020 年常態風(Normal Wind)下的風花圖，因頁面因素，僅放入和平測站與花蓮測站風花圖(詳圖 2~5)與北區測站平均風速圖(見下圖 6)，可看出北區各站點風速風分布情形，以右上方和平測站風速最為顯明。

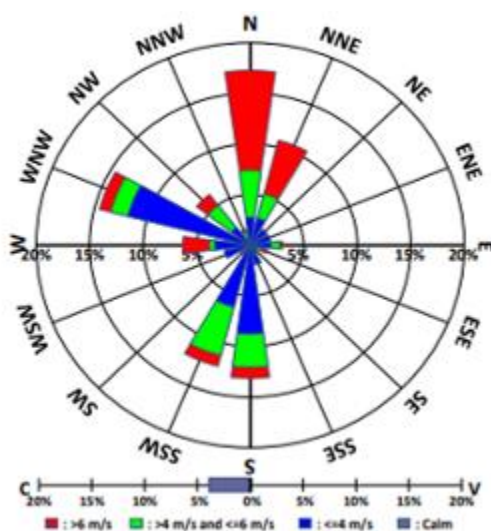


圖 2 和平測站平均風速風花圖

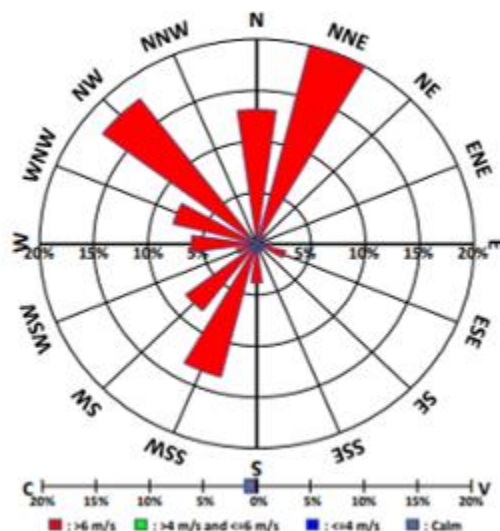


圖 3 和平測站陣風風速

風花圖

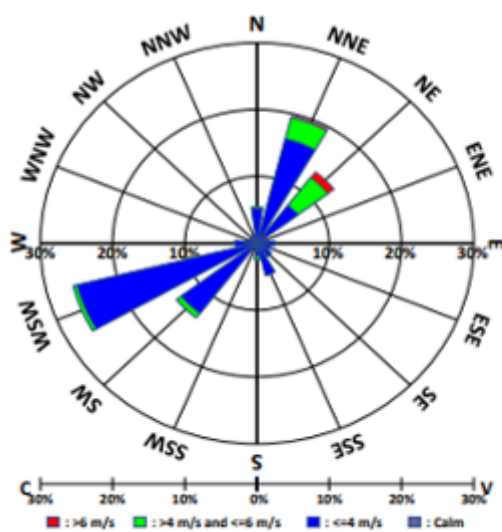


圖 4 花蓮測站平均風速風花圖

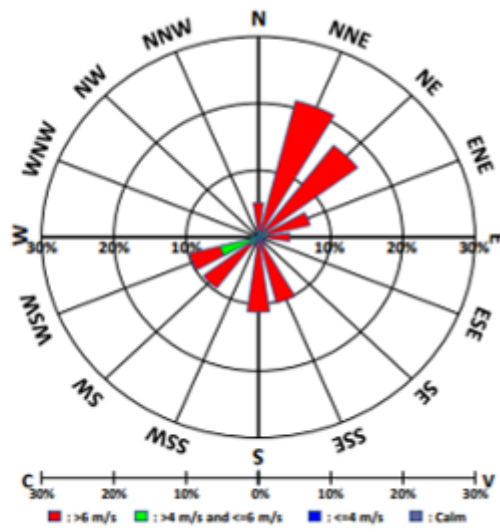


圖 5 花蓮測站陣風風速

風花圖

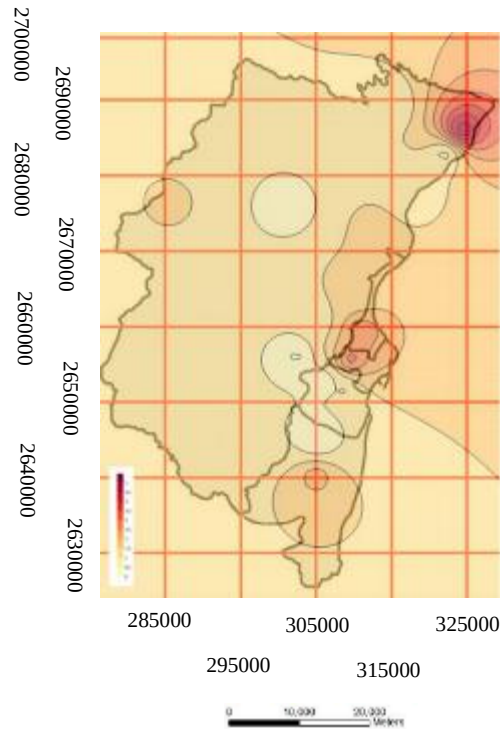


圖 6 花蓮縣北區測站 2020 年平均風速圖

二、紊流強度

2.1 陣風因子(Gust Factor)與尖峰因子(Peak Factor)

陣風因子($G_u(t, T)$)表示風場紊流程度或陣風強弱程度，於風工程領域中常被用作建築或結構物抗風之風載重(wind load)分析之用。其計算一般採下式定義(蕭葆義 (2020) [8])：

$$G_u(t, T) = \frac{u(t, T)_{max}}{U(T)} \quad (1)$$

上式 $u(t, T)_{max}$ 為在風速記錄時距 T 內陣風延時 t 之平均風速最大值， $U(T)$ 為風速記錄時距 T 之平均風速。若採尖峰因子(Peak Factor, Lars Morten Bardala 等人(2016) [9])，其定義為最大風速波動與最大風速間的比率，算式如下：

$$k_{pT, \tau} = \frac{U_{max, \tau} - U_T}{\sigma_u} = \frac{G-1}{I_u} \quad (2)$$

此處 $k_{pT, \tau}$ 為尖峰因子， $U_{max, \tau}$ 為式(1)之 $u(t, T)_{max}$ ， U_T 為式(1)之 $U(T)$ ， σ_u 為縱向風分量的標準差， G 為式(1)之 $G_u(t, T)$ ， I_u 為紊流強度。

陣風因子以 $Gu(3,600)$ (表示最大風速為 3 秒鐘平均風速，平均風速為 10 分鐘平均風速)表達，花蓮縣北區測站數值(表 2)皆高於 Francis K. Davis 等人(1968) [10] (表 3)之研究。平均風速低時，擾動風速會比較大，換句話說紊流強度較大，陣風因子也會較大。但實場在高平均風速時，紊流強度即降低，故陣風因子也會降低，故平均風速低時，陣風因子有可能會大於 2，採大禹嶺測站陣風因子圖(圖 7)為表示。Lars Morten Bardala 等人(2016) 提及紊流強度較強的區域，陣風因子宜改以尖峰因子計算，此時花蓮縣北區測站數值範圍介於 1.89-2.81 間(表 4)。

表 2 2018-2020 年 花蓮縣北區測站陣風因子 Gu(3,600)比較表			
測站及編號	2018 年	2019 年	2020 年
和平 C0Z230	4.68	5.70	2.80
和中 C0T9D0	10.67	17.57	12.83
清水斷崖 C0Z310	12.38	12.60	6.14
富世 C0Z190	6.86	9.88	5.85
新城 C0Z180	6.99	9.90	5.46
花蓮 466990	6.11	6.05	6.95
吉安光華 C0Z150	4.26	6.25	3.42
大坑 C0T9E0	7.60	19.13	8.51
水璉 C0T9F0	9.84	19.24	11.02
蕃薯寮 C0Z270	4.97	8.77	4.50
和平林道 C0Z220	8.42	9.43	5.60
天祥 C0T820	16.02	21.65	13.03
大禹嶺 C0T790	10.06	11.95	5.34
水源 C0T9B0	7.39	11.56	5.77
鯉魚潭 C0T870	14.76	27.16	6.78
東華 C0Z100	12.47	13.70	10.32
月眉山 C0T9A0	8.55	20.84	11.57

表 3 平均風速的陣風因子變化

調查者	陣風因子 間距	平均風速的 時間平均	最大風速 區間
Brekke(1959)	1.3-1.08	不固定	---
Cramer(1960)	1.62-1.38	10 分鐘	瞬時
Deese(1964)	2.0-1.2	5 分鐘	瞬時
Durst(1960)	1.59-1.00	1 小時	1 小時 至 0.5 秒
Faber and Bell(1963)	1.90-1.30	10 分鐘	3-5 秒
Vellozzi & Cohen(1967)	1.56	1 小時	1 秒

資料來源：Francis K. Davis 等人(1968)

表 4 2018-2020 年 花蓮縣北區測站尖峰因子比較表			
測站及編號	2018 年	2019 年	2020 年
和平 C0Z230	4.29	4.75	2.81
和中 C0T9D0	3.68	3.54	2.30
清水斷崖 C0Z310	3.55	3.41	2.30
富世 C0Z190	3.52	3.50	2.54
新城 C0Z180	3.63	3.53	2.45
花蓮 466990	3.85	3.83	2.80
吉安光華 C0Z150	3.75	3.76	2.59
大坑 C0T9E0	3.38	3.43	2.35
水璉 C0T9F0	2.75	2.77	1.89
蕃薯寮 C0Z270	3.65	3.99	2.52
和平林道 C0Z220	2.97	2.86	2.11
天祥 C0T820	3.20	3.08	2.52
大禹嶺 C0T790	3.83	4.21	2.36
水源 C0T9B0	2.94	3.03	2.00
鯉魚潭 C0T870	2.99	2.91	2.19
東華 C0Z100	2.94	2.87	2.18
月眉山 C0T9A0	3.16	3.38	2.23

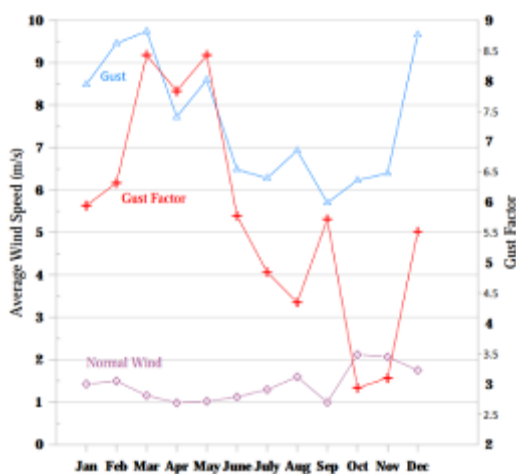
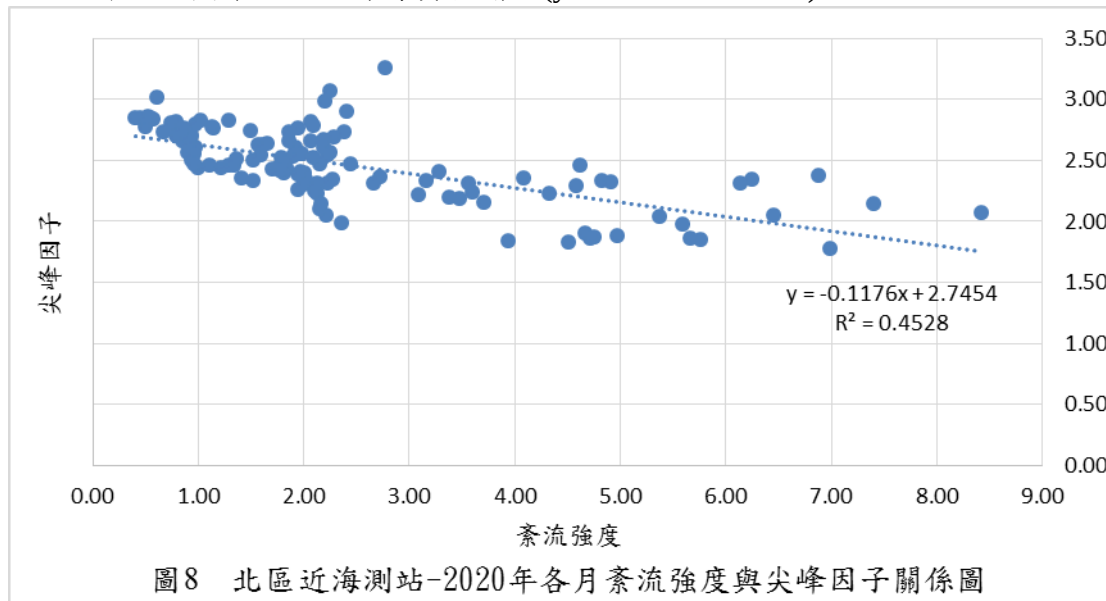


圖 7 大禹嶺測站陣風因子圖

另將測站區分近山與近海測站，發現判定係數為 0.4528(圖 8)，以花蓮縣北區近海測站

而言，尖峰因子與紊流強度存有負相關性($y=-0.1176x+2.7454$)。

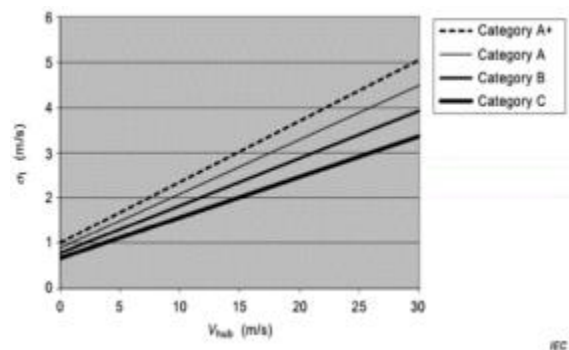
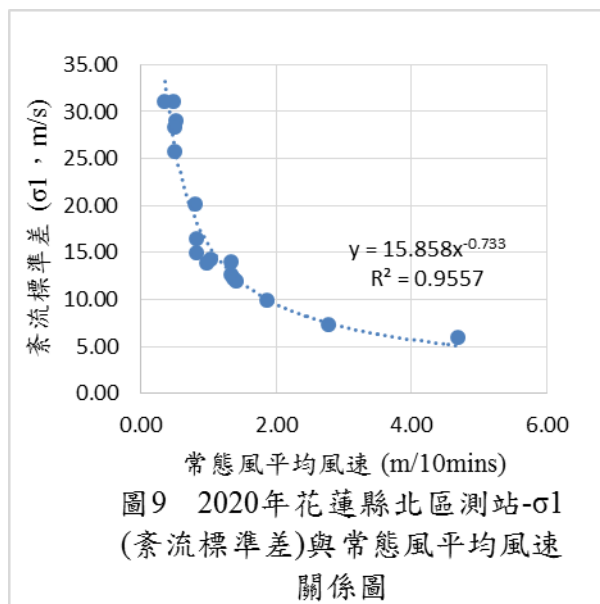


2.2 常態紊流模型(Normal Turbulence Model, NTM)

IEC(國際電工委員會)於 IEC 61400-1 (2019)[9]內提及常態紊流模型，以下式表示：

$$\sigma_1 = I_{\text{ref}} (0.75V_{\text{hub}} + b), \quad b = 5.6 \text{ m/s} \quad (3)$$

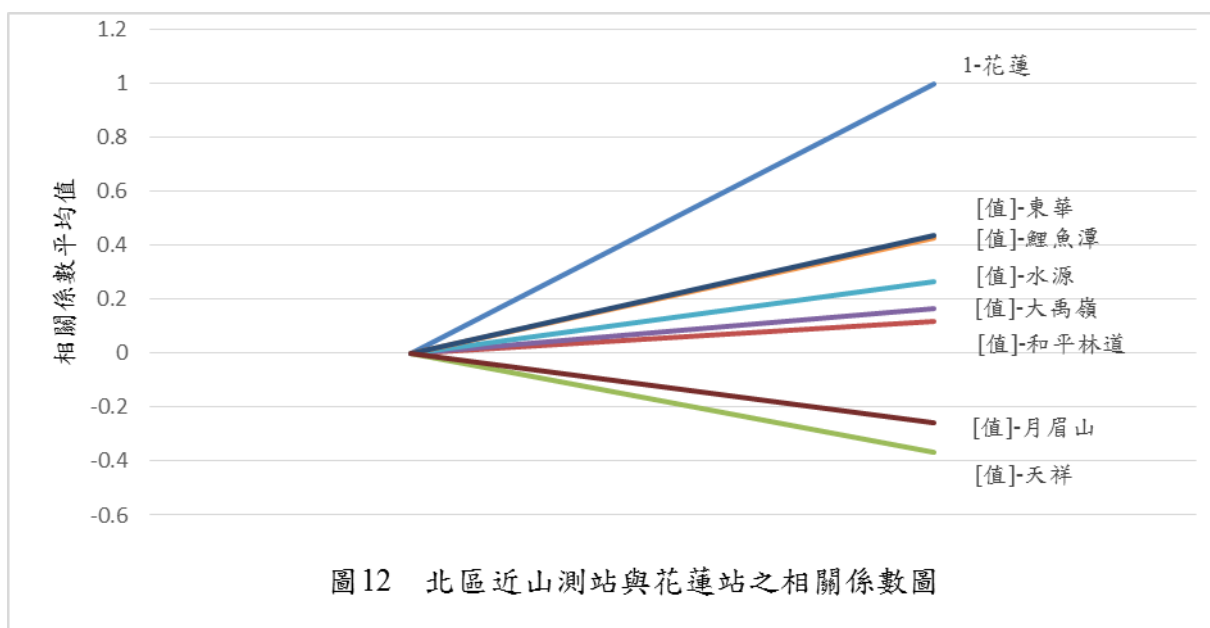
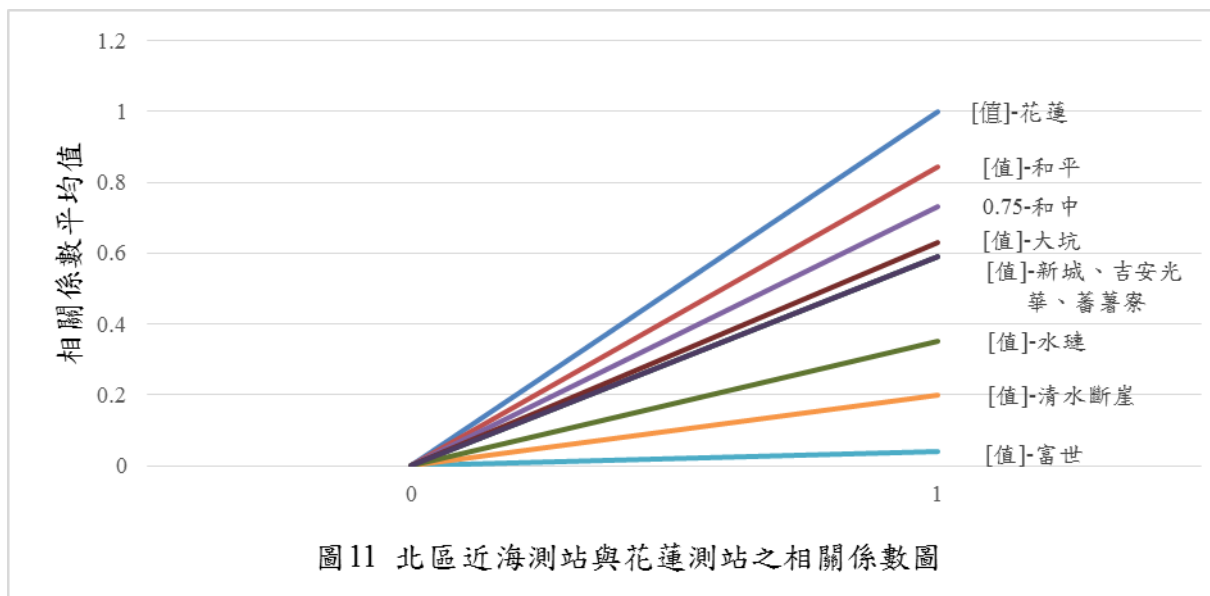
σ_1 為紊流標準差， I_{ref} 為紊流強度參考值(以實際常態紊流值計算)， V_{hub} 輪轂高度處風速(本研究以實際 10 米高度平均風速計算)，得出下圖 9。與圖 10 相比(紊流強度參考值 I_{ref} 介於 1.2~1.8 間)，單位時間略有差異，但足見風力發電機若設立於花蓮縣北區，當往風速高，紊流標準差低處，較符合 IEC 之建議。



三、各測站與花蓮測站之平均風速相關係數並類推各測站 20 年平均風速

3.1 相關係數

以花蓮測站求算各測站相關係數，以下圖 11、12，可看出和平測站相關係數 0.84 與花蓮測站平均風速關係最高，其次為和中測站 0.75，依序是大坑 0.63、新城、吉安光華、蕃薯寮皆為 0.59。僅六個測站與花蓮測站相關係數大於 0.5。



3.2 以花蓮測站風速類推各測站 20 年風速之迴歸線圖

選擇相關係數大於 0.5 之測站為和平、和中、大坑、新城、吉安光華、蕃薯寮六個測站，求出與花蓮測站平均風速迴歸線，如下圖 13~18。

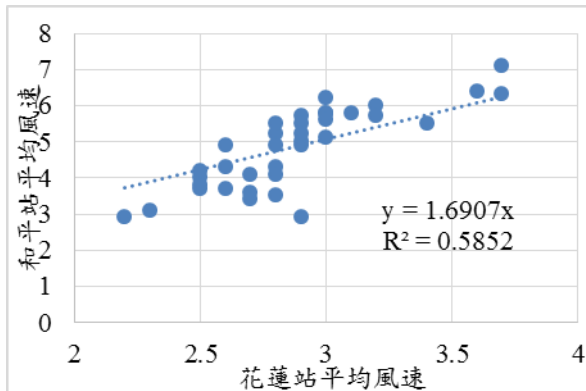


圖13 2018-2020年花蓮站及和平站
平均風速迴歸線圖

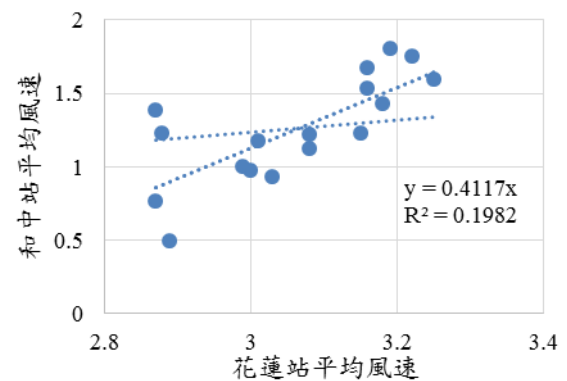


圖14 2004/6-2020年花蓮站及和中站
平均風速迴歸線圖

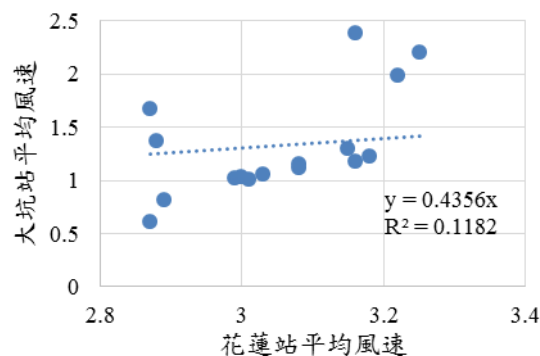


圖15 2005-2020年花蓮站及大坑站
平均風速迴歸線圖

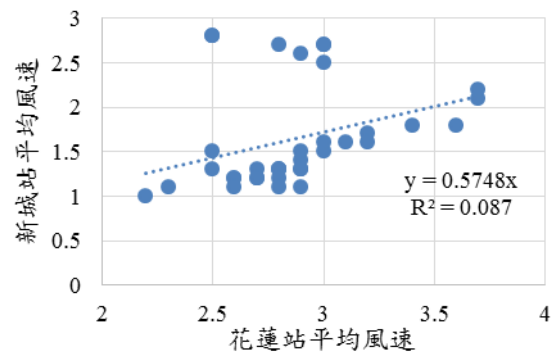


圖16 2018-2020年花蓮站及新城站
平均風速迴歸線圖

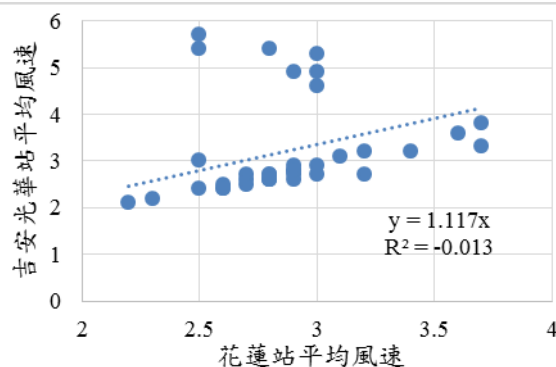


圖17 2018-2020年花蓮站及吉安光華站
平均風速迴歸線圖

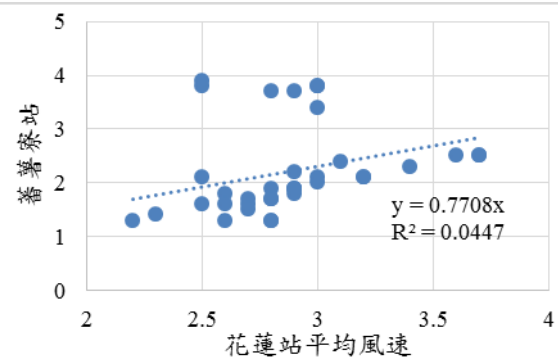


圖18 2018-2020年花蓮站及蕃薯寮站平
均風速迴歸線圖

由此六圖可看出和平站風速為六者最高，平均風速為 5.07m/10mins，是花蓮測站平均風速的 1.6907 倍($y=1.6907x$)。平均風速第二高者為吉安光華站($y=1.117x$)，其他測站雖與花蓮測站相關，但平均風速皆低於花蓮測站平均風速(3m/10mins)。

四、韋布分配

和平測站為花蓮測站類推 20 年平均風速最高測站，故以該站作為風能分析站點。

4.1 韋布分配(Weibull Distribution)的參數

韋布分配內的形狀參數 k 與尺度參數 c ，一般可用 1.圖形法(Graphical Method)；

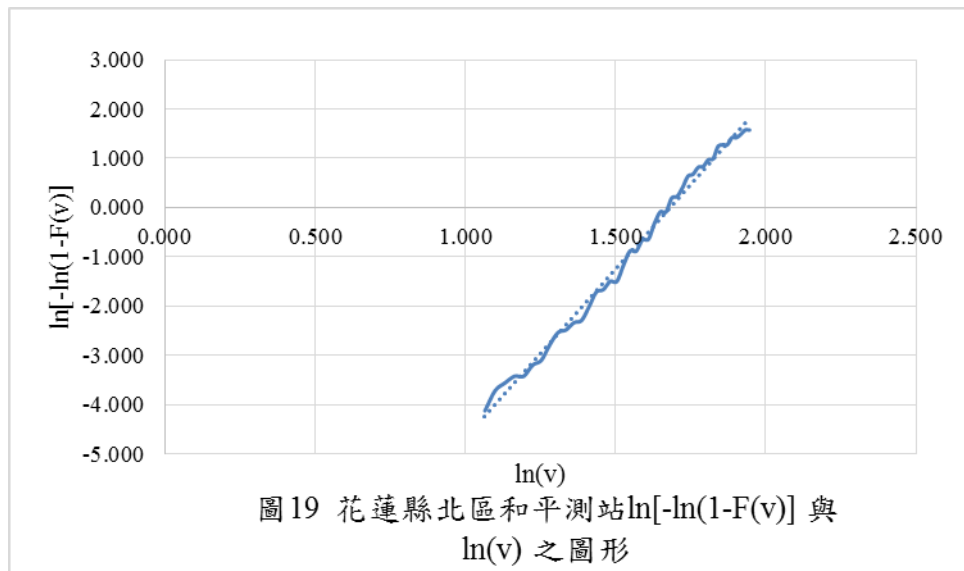
2.標準差法(Standard Deviation Method)；3.動插法(Moment Method)；4.最大概似法(Maximum likelihood Method)；5.能量類因子法(Energy Pattern Factor Method) (M. Sathyajith, 2006) [11]。本文採用現今認為最具密合度的圖形法及matlab軟體內提供的Distribution Filter App求取韋布分配之參數。

4.2 圖形法與K-S檢定

圖形法(Graphical Method)是將累積分布函數用對數轉為線性，公式如下：

$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} = k * \ln(v) - k * \ln c \quad (4)$$

得出圖 19，以虛線(趨勢線)判斷，k是斜率，此處k=6.8578；-k*ln c是截距，此處c=5.3803。而 $\alpha=0.05$ 時，臨界值為0.20283；K-S檢定中， $\max |F(v)-S(v)|$ 為0.074357241，小於臨界值，故不落入拒絕域內，不拒絕 H_0 ，表示採用花蓮測站風速類推和平測站風速20年資料下，和平測站平均風速以圖形法計算符合韋布分配。



4.3 Matlab之Distribution Filter App與K-S檢定

和平測站類推20年月平均風速圖如下圖20。

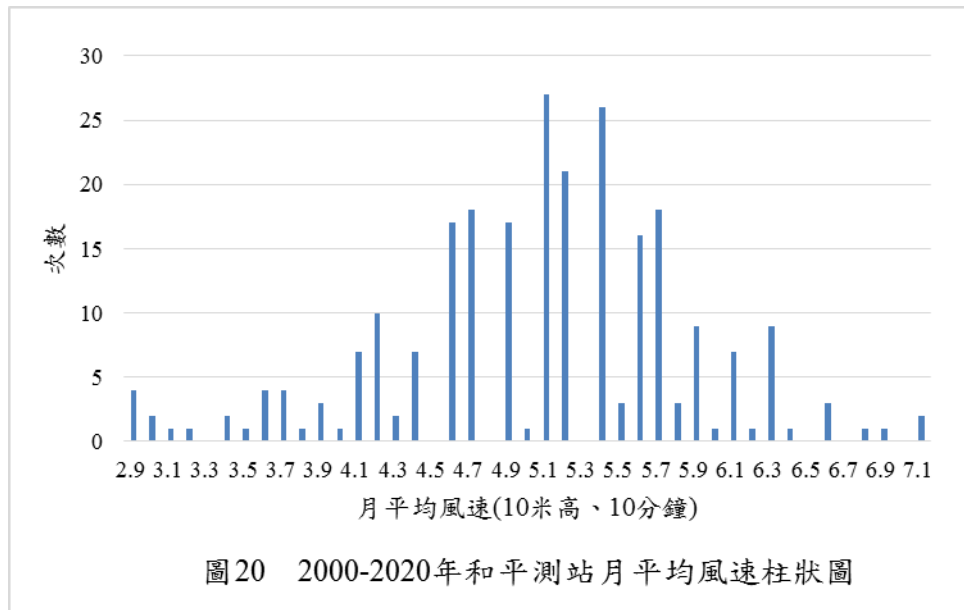


圖20 2000-2020年和平測站月平均風速柱狀圖

採用Matlab之Distribution Filter App方式，得出以下韋布分配圖形(圖 21)、機率密度函數圖(圖 22)及累積機率密度函數圖(圖 23)。可看出 10 公尺高度之平均風速，介於 3~7m/10mins風速之間，而有 50%的機率顯示，該站平均風速為 5~5.5m/10mins。

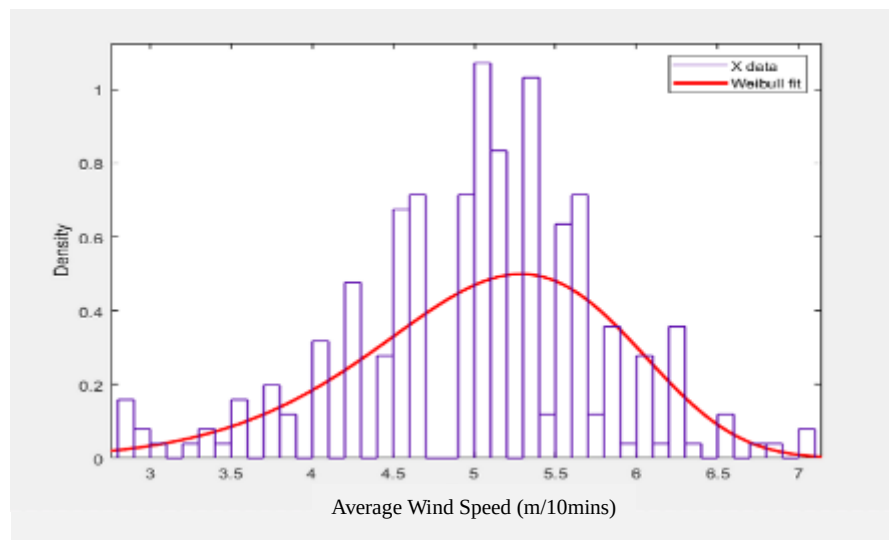


圖 21 2000-2020 年和平測站月平均風

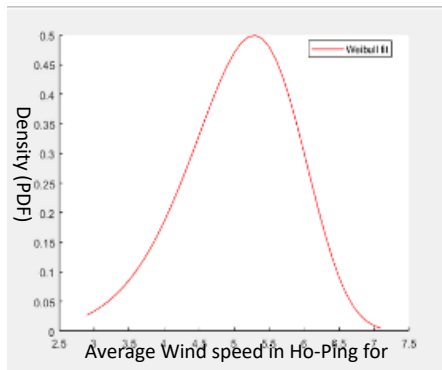
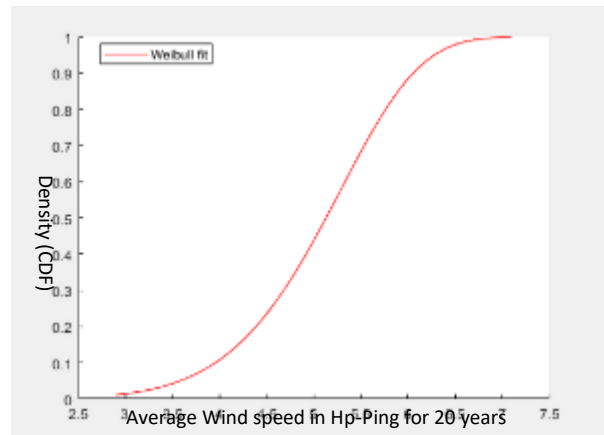


圖 22 和平測站韋布分配之機率密度函數

圖 23 和平測站韋布分配之
累積機率密度函數

參數 $c=5.39662$ 、 $k=7.25325$ ， $\max|F(v)-S(v)|$ 為 0.074066681，小於臨界值，故不落入拒絕域內，不拒絕 H_0 ，同圖形法結果。利用韋布分配之機率可進一步計算出和平測站潛在風能。其他測站亦可依相同方法進行分析。

肆、結 論

花蓮縣各地域、氣候差異，對生活在花蓮縣的居民，感受最大。本研究雖僅對北區(壽豐鄉以北)常態風特性做風力機塔建置之初步研究，且以北區最大平均風速測站-和平測站為例，以統計方法K-S檢定，確認該測站符合韋布分配(Weibull Distribution)，但以花蓮縣北區風速測站的設立地點為未來風力機塔設置區域，並非可行之道。礙於時間精力，僅以北區 27 個測站為例，但卻發現 10 個測站無資料，雖多為人煙罕至區，已足見花蓮地區無人測站被漠視。若以風能開發為主之風力測站，依現今理論，可知山丘上的風具較強氣流，花蓮縣內具海岸山脈、中央山脈與縱谷地形，而縱谷地形處因無風入口而風速低，但未來風能產生的技術亦逐漸突破，若後續研究者欲了解花蓮縣風能情形，除可利用既有測站資料外，亦可朝理論已知之處再行深究。建議以七星潭、海岸山脈臨海處、和平等地形突出之地及近海水深不過 500 公尺處，持續研究在地風能價值。

誌謝

感謝蘇信政、陳宗輝、陳建宏、陳建昌、陳益源、李應德、黎益肇、楊宏宇、簡慶文等老師們。以及Kapol姐、魏本滄與蔡印來老師、老公、女兒以及願意幫助的所有人。感謝耶穌!

參考文獻

- [1] Global Wind Speed Rankings: <http://www.4coffshore.com/windfarms/windspeeds.aspx> , 2014。
- [2] 張儀峰、陳世嵐(2012): 近 30 年之氣象局探空觀測與資料初步檢視, 中央氣象局。
- [3] 蕭長庚(2007): 1987-2006 年台北與花蓮上空對流層頂之氣候分析, 中央氣象局氣象科技研究中心。
- [4] 張培臣、任亦偉、呂崇華、曾德晉(2007): 雷射式剖風儀與傳統高空探空風場資料特徵之比較分析, 空軍氣象聯隊。
- [5] 張景鐘、簡慶文、陳志岳、方炳煌(2009): 台灣地區自然風場風速剖面參數的探討。
- [6] 林雅欽、呂宜瑾、陳筱薇、胡芳瑋, 指導教師廖美菊(1989): 花蓮地區風向與風速的探討, 高中組地球科學科第二名, 省立花蓮女子高級中學。
- [7] 陳筠喬、徐邦琪, 指導教師廖美菊(1990): 花蓮地區海陸風之探討, 高中組地球科學科第一名, 省立花蓮女子高級中學。
- [8] 蕭葆義(2020): 風工程, 五南圖書出版。
- [9] Lars Morten Bardala, Lars Roar Sætrana, ScienceDirect(2016). Wind gust factors in a coastal wind climate. 13th Deep Sea Offshore Wind R&D Conference, EERA DeepWind'2016, 20-22 January 2016, Trondheim, Norway.
- [10] Francis K. Davis and Herman Newstein (1968). The variation of gust factors with mean wind speed and with height.
- [11] M. Sathyajith(2006), 'Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics', Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Session III-3
(15:40~17:00 , B209)

論電腦 3D 技術對珠寶工藝的重要性 Discuss the Importance of the Computer- Aided 3D Design to the Jewelry

章芸^{1*} 彭士芳² 蔡印來³ 魏本嶠⁴

Chang Yun¹ Julia Perng² Yin-Lai Tsai³ Beng-Chang Weⁱ⁴

1.大漢技術學院珠寶技術系 學生

Student ,Department of Jewelry Technology, Institute of Dahan Technology

2.負責人(技術助理教授)

Founder, Aibususo INC

3. 大漢技術學院珠寶技術系 副教授

Associate Professor, Department of Jewelry Technology, Institute of Dahan Technology

4. 大漢技術學院珠寶技術系講師

Lecture, Department of Jewelry Technology, Institute of Dahan Technology

* Corresponding author : daisy111284@yahoo.com.tw

摘 要

本論文主要探討及分析珠寶工藝所面臨之問題，並比較使用與不使用電腦三維（關鍵詞 K1）的優缺點。並探討電腦 3D 如何協助解決珠寶產業的問題。藉由文獻探討,知悉 3D 設計配合列印技術之發達，對於時尚設計如珠寶產業提供了便捷的利基,以及搭配時尚珠寶首飾設計的時代潮流與風格,創造出珠寶產業的另一重要貼近消費者需求的里程碑;而隨著 3D 對設計師及製作的工藝師都有巨大的助益，有效學習 3D 軟體，對於作品將更能有效率的完成與精緻的呈現。

關鍵詞：電腦 3D、匯出三維圖、脫出金屬模子

壹、前言

珠寶 – 最具潛力的創意產業，珠寶成品集結金屬，礦冶，寶石切磨，設計，製作，鑑定，工具設備等相關行業，產業鍊長，產值驚人。珠寶體積小，卻集產業及藝術之大成，是重要的文化軟實力代表。

珠寶相關不論是設計，金屬製作或銷售，是很多年青人嚮往行業。但；光鮮的外表的珠寶產業其實面臨多種問題。

貳、文獻探討與3D設計技術有關之論述

一、文獻探討與專有名詞解釋

從消費者心理需求並配合運用戒指最佳化造形設計的輔助軟體，在客製化戒指造形設計，將創造出更多、更有創意戒指造形概念(陳姿蓉,2015)已成為3D設計的趨勢。

黃顯讚(2006)也認為：時尚珠寶首飾設計的時代潮流與風格，不斷求新求變的設計、新素材的開發與最新的製作技術，而此創新技術，與目前正是流行趨勢的設計工具：3D設計中，從構想到手繪草圖、到使用3D軟體設計，所呈現的效果，於本文中也为主軸探討方向。

3D設計配合列印技術之發達，對於時尚設計之珠寶產業提供了利基(N. Shahrubudina et al,2019)

隨著線上購物之電子商務的普及,消費者對於珠寶客製化之設計,已可透過3D軟體之模擬技術與消費者溝通,設計出專屬且獨一無二的珠寶飾品(Paramjeet Singh et al.(2017).

1.電腦3D:利用電腦繪圖技術在二維(2維)電腦螢幕呈現擬真三維(3 dimension)圖像的效果。

目前擬真的效果(色彩,解析度,顯像速度)已幾近完美,一般企業用等級的電腦已可做到很好的擬真效果。

利用電腦產生很好擬真效果的三維圖像,稱為電腦3D。

2.匯出三維圖:將電腦三維圖像匯出成“STL”(3D列印)的格式,稱為匯出三維圖。

3.脫出金屬模子(或金屬粗胚):將“STL”的格式的圖檔送入3D列印設備以便輸出全蠟或擬蠟模型,再透過脫蠟鑄造的製程,做出金屬粗胚。而金屬半成品則是:將上述的金屬粗胚,進一步細修,拋光,做成金屬半成品。

參、3D設計技術有關之論述：以珠寶設計為主要探討

一、珠寶工藝所面臨之問題：

(一)珠寶的製作流程

談問題前先了解珠寶的製作流程。一件珠寶的完成，傳統程序(不使用電腦3D)大約如下：

A1。設計師發想造型

A2。設計師將造型手繪出，交予師傅

A3。師傅金屬製作，細修，做出金屬半成品(關鍵詞K4)

A4。師傅鑲寶石，成品完成

(二)珠寶產業面臨之問題

A. 手繪圖之限制（發生於本文之（一）A2）。手繪圖無法表現出完整三維的立體實景，尤其是立體的造型。

二、珠寶產業面臨之問題

A. 手繪圖之限制（發生於本文之（一）A2），設計師無法全憑經驗確立造型所有的細節，有些問題等金屬半成品出來時才能被發現，這種狀況常造成以下問題：

A1. 會因局部調整而產生新問題？

A2. 更改金屬胚需經高溫程序，會造成損害嗎？

A3. 多花的時間怎算費用？

A4. 「重工」的問題在製作人力吃緊下是雪上加霜。

有裝潢過房子的都有類似經驗，與室內設計師的討論再周詳；設計師圖出得再精準，施工後仍蹦出不少事前沒有想到之狀況，必須做修正。珠寶製作亦同。

B. 雙方美學不同產生的問題（發生在本文之（一）A2 及 A3 之間之階段）設計者和師傅的美學素養不同。有機線條角度些微的差別，作品的生命力和張力就不同。

角度差一點，長短差一點，大小差一點，那一點，就是決定作品「生動與否」之關鍵，但待金屬外觀完成一段落才發現要做調整，若無3D 軟體將產生極大困擾。

三、技術承傳斷層（發生於本文之（一）A3）

這是珠寶產業中最明顯的問題。珠寶製造大部分需仰賴高素質手工，手工人材短缺全世界珠寶產業都面臨同樣的問題。有經驗的金屬工藝製作師傅人數不增，青黃不接。

而專院校金屬工藝課程內容偏銀銅而少k金，重鍛敲而少鑲嵌，教學偏向「金屬工藝」而不是「珠寶工藝」，學界和業界所需有差距，無法彌補製作貴重珠寶所需之人力荒。大漢「金屬工藝」、「珠寶工藝」皆重珠寶工藝包括金屬製作及寶石鑲嵌，工藝師養成需5-10 年，若不引用 3D，那人材荒完全沒解。

四、國際珠寶業：電腦3D 應用狀況

電腦3D 軟體技術起於歐美，初應用在民生用品製造上，約2000年開始應用在珠寶製作上，解決人力不足之問題。今國際業界使用狀況如下：

(一) 歐美大品牌的珠寶都看到 3D 製作的影子

大品牌珠寶強調尊榮性、獨一性、不會透露用3D，但從其鋪鑽方式就知答案。

(二) 亞洲珠寶重鎮香港及泰國，是名牌珠寶重要代工區，珠寶產業產值驚人，人力需求強勁，2000年就和世界接軌使用3D。

(三) 中國大陸，珠寶產業始於十年前，集中於南方，受香港影響跳躍式進步，大小廠使用3D。

肆、實驗方法與結果：運用3D 於珠寶設計及製作利基之實例

運用3D軟體最大的優點是：

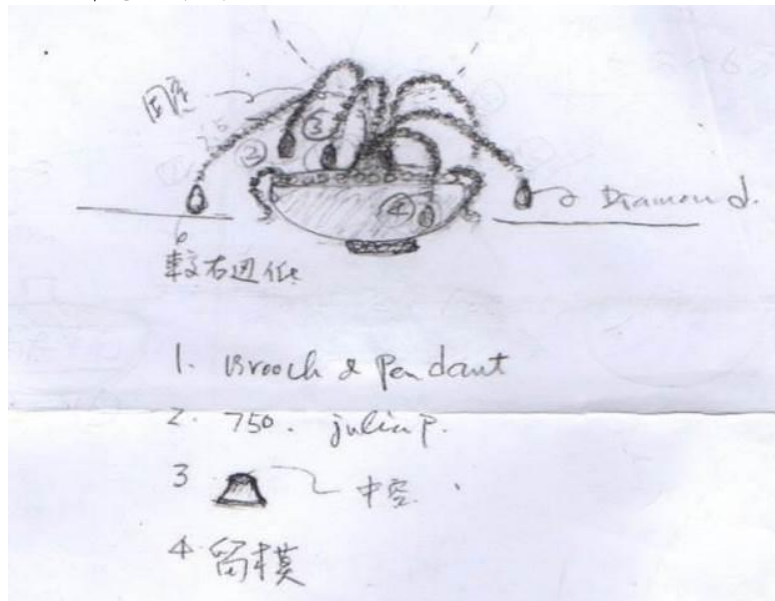
一、設計及製作的問題在電腦的模擬實境下完全揭示，並在電腦上修改至滿意，修

改好的三維圖匯出，再列印金屬模子，完全不會有本文之(一)A 2), 集本文之 (一)A2 及 A3之間之階段) 之問題。

茲以實例幫助了解:

(一) 材料：紅色半圓切割碧璽一片， 筆者設計主題訂為「湧泉」，以手繪將設計1:1 圖示之如附圖

圖1. 手繪圖，將設計想法手繪呈現



流程	不使用3D	使用3D
1. 發想及手繪	需要 (跳到4)	需要
2. 3D繪出三視圖	略	V勝出 * 3D 繪出三視圖，如圖2-1，2-2， 2-3. 並與設計師討論. * 2-1正視圖看起來ok，但設計師從左側視圖 2-2發現編號2、3之泉柱靠太近，程式調整後如圖3-2. 接著，設計師從右側視圖2-3 上發現編號3之泉柱角度太下垂，活潑性不夠. 程式調整後如圖3-3. * 完成滿意到位之三視圖.

修改前	修改後
-----	-----

編號2、3 泉住，在電腦3D 馬上修改

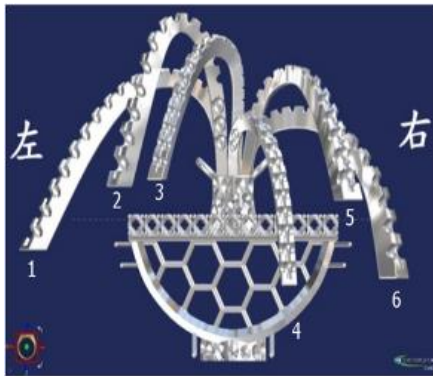


圖 2-1：正視圖

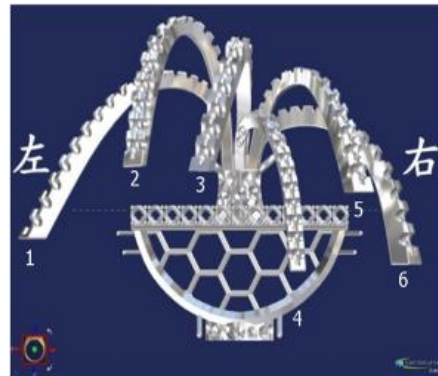


圖 3-1：正視圖



圖 2-2：左側視圖



圖 3-2：修改後之左側視圖



圖 2-3：右側視圖



圖 3-3：修改後之右側視圖



圖 2-4：頂視圖



圖 3-4：頂視圖

完整成品圖



圖 4-1：正視圖

流程	不使用 3D	使用 3D
3.列印,脫出金屬膜	略	V 勝出 * 脫出與三視圖 100% 相同之金屬模.* 師傅精修金屬模，鑲石，完成成品
4. 金屬師傅打版 ,細修,鑲寶石	V 勝出 * 本案例並無實際發包予師傅製作。純粹以筆者數十年手工客制珠寶之經驗判斷，本案例困難處不在工藝，在美感的呈現 *6 支泉噴出的角度與 6 支泉之前、後、高、低的相互位置與圖相似不容易 * 依手繪圖而製的金屬粗胚成型後 90%機率 6 支中有 1~3 支需修改或調整位置 * 但任一支泉的任何變動後，不論是長短角度的修改或位置調整，都可能引起其他 5 支也需相對應的被調整 * 修改過程中金屬粗胚容易因加熱修改而變形甚至毀損、前功盡棄	

	* 師傅與設計師無法同時一起調整作品，走完一步才知下一步的狀況，無法一次修正好。來來回回重複「做 -> 看 -> 改」	
--	---	--

流程	不使用 3D	使用 3D
5. 所需工時	約 30~45 天，或更長	約 20~25 天
6. 成品與設計圖吻合度	約 90%	100%
7. 完成品工藝精緻度		V 勝出 * 所有鑽孔位均在電腦上定位、繪出完鑲後鋪鑽效果整齊美觀 * 背面以蜂窩六角形板美化
8. 設計圖後續之再變化使用	* 限制多，無法隨心運用變化	V 勝出 * 容易變化，衍生系列之設計
9. 製作成本（不含主石，碧璽、金、鑽）		V 勝出 * 約少 30%

伍、結論

1. 「3D 搶工藝師飯碗」，「3D 讓量產規格品充斥市場」的說法，是斷章取義不了解 3D 之辭，3D 將設計師及製作之風險降至最低。它將生產量提升至經濟規模，說它「讓量產規格品充斥市場」，就好比不提刀子的效用只說刀可能會傷人一樣。新技術新科技我們以務實正面的態度才能享受到它所帶來的便利。

2. 「工欲善其事必先利其器」，3D 對設計師及製作的工藝師都有巨大的助益，從業人員或正學習珠寶課程的同學，不論你將來決定走設計或走金屬工藝，一定要花時間學習正確的 3D 軟體，讓它幫助作品更有效率的完成，更精緻的呈現。

誌謝

本文之所以順利完成，該感恩位於台北市的愛不釋手公司彭士芳老師，在暑假期間，經前往該公司實習，彭老師從實務面向(如包鑲與爪鑲)殷勤的教導，真正受益良多，但「工欲善其事必先利其器」的原則下，作為學生的我，還是要善用時間多多學習 3D 繪製技法與運用，才能在珠寶設計領域上有所成效;另也感謝由於參與教育部產業學院項下之精實計畫，才能有此前往業界學習之機會。

參考文獻

[1] 陳姿蓉(104)：珠寶設計構想之發展研究，台南應用科技大學生活服務產業系生活應用科學碩士論文。

[2] 黃顯讚(95)：時尚珠寶首飾設計「造形」研究，國立臺灣師範大學設計研究所在職進修碩士論文。

[3] N. Shahrubudina , T.C. Leea, and R. Ramlan(2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications , Procedia Manufacturing 35 (2019) 1286–1296

[4] Paramjeet Singh et al.(2017).3D Modelling of Customized Jewelry, 2017 Third International Conference on Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA)

廉價光達應用於地表 3D 地圖建立之研究 The application of \$599 Lidar on 3D Mapping

張成華^{1*} 張有和²

Cheng-Hua Chang¹ Yo-Ho Chang²

1 東華大學自然資源與環境學系 助理教授

Assistant Professor, Department of Natural Resources and Environmental Studies, National Dong-Hwa University

2 東華大學自然資源與環境學系 副教授

Associate Professor, Department of Natural Resources and Environmental Studies, National Dong-Hwa University

* Corresponding author: chenghua@gms.ndhu.edu.tw

摘要

攝影測量是建立傳統地圖之最佳選擇，但卻被稱為 2.5D 地圖，因為例如建築物側面等處因拍攝死角沒有資訊。近年來利用無人載具側拍建立建物側面資訊，但側拍仍有許多攝影死角，造成 3D 地圖不夠完整。解決方式可以利用光達掃描以彌補此缺陷，但因為光達設備十分昂貴無法普及。完整的 3D 地圖建立耗費大量人力，需要更快的更新的速率，急需當地人員擔負此重任，這些人員也不可能投資昂貴的光達設備。2019 年底起出現較多廉價光達(1%傳統光達價格)，例如 Livox 產品 (<https://www.livoxtech.com/>)，Livox Mid-40 以小範圍(FOV=380)非重複性掃描，掃描最小角度 0.050，可以達到 2 公分精確度與最遠 260 公尺掃描距離。也出現許多光達操作軟體，可用於靜態掃描(Livox Viewer 0.11.0、Livox SDK、OpenPyLivox)建立 3D 點雲資料，再拼接不同掃描位置點雲得到完整點雲。或動態掃描 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)以慢速(低於 5 公里/小時)掃描(LOAM、Livox_mapping、LeGO-LOAM)。本研究利用無人機載具建立東華大學環境學院 3D 地圖，再比較利用價格昂貴的 Riegl Z360i 地面光達與只有 1/100 價格的 Livox Mid-40 光達建立之 3D 點雲，結果顯示 Livox Mid-40 光達(600g)易於攜帶性價比較高，若嚴格要求資料準確度 Riegl Z360i 地面光達點雲準確度優於 2 公分(Livox Mid-40 約 5 公分)，因無人機建立之點雲資料約為 2-5 公分，所以使用廉價光達搭配無人機建立 3D 地圖方式值得進一步推廣。

中文關鍵字: 地面光達、空載光達、點雲

英文關鍵字: Ground-base Lidar, Airborne Lidar, Pointcloud

壹、前言

Google Map 是目前最常用被使用的 2D 與 3D 地圖，包含約 10m 解析度地形資料與優於 1m 之高解析度衛星影像，都市地區則是使用 Google 街景服務，是實地拍攝街景照片拼貼在虛擬的幾何圖形上，例如球體或立方體以建立照片間相對位置，雖然此類服務目前非常普及用於導航服務，實際之都市 3D 建築模型也逐漸建立，但因為 5G 網路之快速普及與智能運輸在後疫情時代急速發展，目前大規模產製的 3D 地圖模式(例如 Google Map，實際上是 2D 或 2.5D 地圖)，將來非常可能無法產生適用於小區域的 3D 地圖，例如智慧車輛或無人機的運送路線所需高解析度影像(室內或室外數公分)與 3D 資訊(準確度優於數公分)。解決方式有兩種趨勢，一是未來此類智慧載具都必須具備即時建立高解析度影像與 3D 資訊之功能，包括配備各類數位相機(IR, Natural Color and Thermal cameras)、光達(Lidar)、Global Positioning Systems (GPS)、Inertial Measurement Unit (IMU)與電腦；另外一種趨勢則是建立與更新 3D 地圖資料庫可以讓智慧載具利用 5G 服務快速下載。

兩種方案都因為所需硬體價格大幅下降(例如出現部分相似規格之 GPS 或 LIDAR 的價格是 10 年前的 1%)變成可行，但第一種方案因為要及時執行大量測量與電腦運算需要大量能源，在普及化過程不利於環境保護，過去之經驗也顯示 Google Map 在傳統 2D 地圖服務幾乎壟斷市場，所以未來 3D 地圖仍是以此種模式出現比較可能發生。衍生之問題則是 3D 地圖市場不可能用以往建立 Google Map 的模式建立，例如垂直拍攝之衛星影像地面解析度已逼近使用無人機拍攝之影像，所以未來可能建立 10 公分左右全球數值地形，但因為沒有地面建築物之側面影像，仍是只能建立 2.5D 地圖，另外室內也無法利用衛星建立 3D 資訊，所以無法滿足未來 3D 智能運輸所需。

為了滿足未來 3D 智能運輸所需，3D 地圖規範目前依據 LOD (Level of Detail)來劃分，大部分 Google Map 歸類在 LOD 0，因為影像都正射投影在同一高度，所以建築物之屋頂與地面高度相同、LOD 1 是傳統 2.5D 地圖，可以建立地面與屋頂不同高度之建築模型但缺少建築物側面資訊、LOD 2 是利用解析度較高的影像建立屋頂細部形狀，目前傳統攝影測量使用攝垂直影像建立 LOD 1 與 LOD 2 模型、LOD 3 是可以建立建築物外部之細部構造，例如窗戶、門等，可以利用無人機拍攝垂直與傾斜之影像建立、最後 LOD 4 是建立包括室內 3D 模型。所以不同規範要求之解析度與準確度不同，建立 3D 模型所需時間也有極大差異，傳統 2D 地圖只有一個比例尺，但未來的 3D 地圖可能依 LOD 有不同比例尺，假設需要公分級的準確度，極可能要建立大量 3D 地圖圖幅(大比例尺，例如 1/500)，也需要即時更新以適用於未來不同智能城市之應用所需。

3D 地圖建立之規範依據 3D 模型之精密程度，比較完整的規範例如美國建築師協會(American Institute of Architects, AIA) 2009 年提出 Building Information Modelling (BIM)使用的 Level of Detail 或 Level of Development (LOD)，根據地表建物建築進度(評估、規劃、設計、施工、竣工)劃分出 LOD100 (conceptual)、LOD200 (Approximate Geometry)、LOD300 (Precise Geometry)、LOD350 (Precise Geometry with Connections)、LOD400 (Fabrication-ready Geometry)與 LOD500 (Operational/As-built Models)，詳細規範地表建物之 3D 數據，但是實際的 3D 地圖是建築完工後仍可能隨時間而有變動，例如陽台改建、室內裝潢、室外植生與衍生之戶外電源供應、交通配置等。地表建物之外的其它地面物體，例如岩體、植生或其它的土地利用型態(農業、畜牧業、鐵路、公路、電源輸送等)

則未能涵蓋，但相同 LOD 概念也可以用在 BIM 以外的 3D 地圖建立。

不同比例尺 2D 地圖之出現，通常是因為實際需要，例如早期經建版基本地形圖 1/5000、1/25000、1/50000 與 1/100000 等，內容為國土基本狀態之描述，包括主要地貌、地物及基本地理資料，為國土資訊系統之核心及廣泛共用之基本底圖，為國土規劃、國土保育、防救災、經濟建設等所需基礎資料(國土測繪中心全球資訊網-中文網-基本地形圖測(修)製，2021)。1/1000 台灣海岸像片基本圖利用於海岸變遷調查(內政部地政司出版地圖-地圖與遙測影像數位典藏計畫，2021)與 1/500 台北市電子地圖或 106 年航照圖(臺北市區里鄰電子地圖，2021)，其中地面 10 公分道路分隔線清晰可見與目前 Google Map 中都市地區衛星影像解析度相近。由於使用衛星影像或航空照片以攝影測量方式製作之正射影像地圖需要使用控制點，這些控制點近年使用 GPS 測量通常誤差在 1-2 公分左右(內政部地政司衛星測量中心—衛星控制點之設置，2021)。由於 3D 地圖精密程度一定優於 2D 地圖，所以未來 3D 地圖的比例尺應該會優於 1/500 或 1/1000。

近年來大比例尺(1/500 或 1/1000)3D 地圖之建立方法例如，Pasik et al.(2017)使用 Ground-based Lidar 與 RTK-GPS 進行測量，建立高程誤差小於 3 公分 LOD3 的 3D 地圖，用於監測波蘭南極監測站周邊海域侵蝕狀況與長期對監測站建築物之影響，總計產製 2 張 1/500 彩色 3D 地圖，每幅大小為 100 cm × 140 cm，涵蓋範圍 500 m × 700 m。較大區域的 3D 地圖製作，例如德國柏林 3D 地圖則是利用攝影測量與建物資訊系統資料建立 LOD2(890km²) 3D 地圖包括 550,000 棟建築；美國紐約由現有 2D, 2.5D, and 3D datasets 產製的 3D 地圖(3DCityDB Database – Homepage, 2021)以 CityGML 格式(Yao et al., 2018)供免費下載 LOD1 與 LOD2 資訊。芬蘭赫爾辛基同樣採用雷射掃描、攝影測量與建物資訊系統資料在 2015 年夏季建立城市 3D 地圖(<https://www.hel.fi/helsinki/en/administration/information/general/3d>)，利用攝影測量方式在 2018 年提出第二版 3D 地圖，同樣供免費下載 3D 地圖資訊。所以大區域快速 LOD2 的 3D 地圖建立仍是利用攝影測量與照片，但通常此類 3D 地圖中建物模型都有影像扭曲與模型缺陷存在，也沒有提供誤差資訊，小區域 1/500 比例尺 LOD3 的 3D 地圖準確度很高，有特定用途但資訊通常無法免費提供。

3D 模型建立方法可以區分為光達與照片(傳統陸地攝影測量、航空攝影測量與無人機航拍)建立兩種方式。光達方式屬於直接測量，測量精度與準確度都比較容易計算，又可以區分為空載光達(Airborne Lidar)與陸地光達(Terrestrial or Ground-based Lidar)兩種掃描模式，早期這些設備價格都十分昂貴，近年來則出現比較廉價的光達系統(例如 Velodyne, <https://velodynelidar.com/>、YellowScan, <https://www.yellowscan-lidar.com/> 或 Livox, <https://www.livoxtech.com/>)，光達掃描最遠距離介於幾十公尺至數百公尺，可以在地面或無人機上使用，快速建立 3D 點雲資訊。攝影測量可以區分為由相鄰重疊像片中選擇部分點建立 3D 資訊(例如建築物)或一次建立所有 3D 資訊兩種方式，早期電腦運算速度緩慢，所以在建築物中選擇一些點就可以建立大致 LOD2/LOD3 的模型，例如使用 Photomodeler (<https://www.photomodeler.com/>) 或目前普及的 SketchUp (<https://www.sketchup.com/>)等軟體，電腦運算速度增快後，則可以一次計算出所有位置之 3D 點雲(PointCloud)資訊。因為使用攝影測量方式所需軟、硬體價格便宜所以遠比光達方式普及。

但是使用攝影測量方式建立的 3D 資訊的準確度則受限於像片品質或所使用之相機鏡頭，如果使用量測型相機(Metric Camera)，攝影測量成果可以達到 1-2 像素誤差，一般航空攝影測量大都使用量測型相機，購買航照時通常會提供相機參數供校正之用(航測相機參數，農林航空測量所, <https://www.afasi.gov.tw/0000041>)。但是一般單眼數位相機或其它數位相機如果沒有進行相機校正(Camera Calibration)，鏡頭扭曲誤差可能會有數個至數十個像素(Neale et al., 2011)。所以使用無人機航拍(非量測型相機)假設影像

地面解析度 2 cm，就會有 10-100 cm 的 3D 模型誤差。為了降低相機鏡頭扭曲誤差可以進行相機校正，一般有三種類型相機校正，第一類是 Camera Self Calibration (Zhang and Tang, 2016)針對平面校正版進行不同角度拍攝後之影像進行解算，缺點是如果實際拍攝距離與校正時拍攝距離不同，則參數無法使用，特別是無人機空拍時距離都介於 50-120 m 間，校正拍攝距離通常小於 1 m，所以這種最常用的方式事實上效果不佳。目前常用的攝影測量軟體(Pix4D Mapper 或 Agisoft Metashape)中如果沒有自行輸入相機參數，通常會使用航照不同照片中相同點進行鏡頭扭曲誤差參數計算，但此時照片拍攝距離可能有極大差異，對誤差減少可能也沒有太大幫助，需要進行誤差檢驗。第二類是 Laboratory 或 Field Camera Calibration，利用大型實驗室或野外的控制點進行拍攝與計算鏡頭扭曲誤差參數計算，由於拍攝距離比較接近實際拍攝距離，控制點分布也非在同一平面，所以可以有效達到正確計算出鏡頭扭曲誤差參數之目的(Cramer et al. 2017)，可以達到誤差小於 2 個像素。第三種則是請專業相機校正公司進行校正由於數位相機十分廉價，校正一次價格可能遠高於數位相機之價格，另外無人機上使用的相機也不一定可以拆卸下來進行校正。近年來無人機搭載之相機也推出低價量測型相機，例如 DJI 量測型相機 Zenmuse X4S 或 X5S 約 2000 美元，檢測水平誤差 3 公分，最大約 4 個像素(<https://www.gim-international.com/content/news/dji-s-metric-camera-for-aerial-surveying>)。所以使用無人機搭載量測型相機與低價光達系統，在未來也會是普及使用可能的選擇之一。

貳、實驗方法

因為 3D 地圖建立必須先選擇建立方法與 LOD 精細程度，本研究使用攝影測量與雷射掃描建立地面解析度優於 10 公分之 3D 地圖(比例尺 1/500)，為了比較不同 LOD 之 3D 模型之解析度、準確度與所需建立之時間，設定以下 6 種方式進行 3D 點雲建立，包括(1)大範圍 2013 年 10 月 17 日利用 eBee 定翼飛機與 CanonIXUS125HS_4.3_4608x3456 (RGB)相機(<https://www.ebee.com/>)，飛行高度 200m 拍攝 552 張東華大學校園(3.942 km²)影像，平均地面解析度 5.86 cm，建立 LOD 1 與 LOD 2 模型。(2)2019 年 8 月 24 日以互相垂直井字型拍攝東華大學環境學院 1239 張垂直影像，飛行高度 60 m，時間 1.0 小時，地面解析度 2 cm，，建立 LOD 1 與 LOD 2 模型。(3)拍攝小區域 2016 年 4 月 20 日使用 3DR SOLO 與 Gopro 5 相機(<https://3drobotics.com>)以環繞方式(飛行高度 50-100m)拍攝東華大學環境學院垂直與傾斜 332 張影像，建立 LOD 2 與 LOD 3 模型。(4)小區域 2019 年 10 月 16 日使用 DJI Phantom 4 RTK (<https://www.dji.com/tw/phantom-4-rtk>)飛行高度 60m，以垂直井字型拍攝東華大學環境學院垂直與傾斜 1264 張影像，平均地面解析度 2.06 cm，建立 LOD 2 與 LOD 3 模型。(5) 小 區 域 使 用 Livox Mid-40 Ground-based Lidar (<https://www.livoxtech.com/mid-40-and-mid-100>)以靜態掃描方式掃描東華大學環境學院，建立 LOD 3 模型。(6) 小區域使用 Riegl LMS Z360i Ground-based Lidar (<http://www.rieglusa.com/>)以靜態掃描方式掃描東華大學環境學院，建立 LOD 3 模型。最後利用除了利用全測站儀檢測特定點位高度外，以 Riegl LMS Z360i 建立之 3D 模型為參考模型，比較以上不同方式建立 3D 之準確度。

參、結果與討論

本研究建立 3D 地圖使用攝影測量之垂直、傾斜拍攝與地面光達三種方式，搭配不同飛行路徑之拍攝方式，希望釐清最佳建立 3D 地圖之方式，第一種方式是傳統建 2D 地圖使用之方式但提高地面解析度，(1)20131017 使用 eBee 定翼無人機 拍攝東華大學

校區，航高 200m (地面解析度 5.8cm)，飛行路線如圖 1 (上圖)，飛行時間 1.5 小時，圖 1 (下圖) 是東華大學環境學院 LOD 1 / LOD 2 模型，屋頂與地面高度可以清楚辨識出來，也可以看到屋頂外型與一部分建築物側面，利用 Pix4D Mapper (<https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>) 處理時間 2 小時。因為飛行路線是西南西-東北東方向，所以部分建築物側面無影像資料、部分建物側面影像則有扭曲現象，但建築物外型大致完整建立，如果飛行路線是涵蓋兩互相垂直方向，可以有比較完整的 LOD2 資訊，利用全測站儀檢測環境學院 3D 模型平均高程誤差 0.23 m。



圖 1、eBee 定翼無人機飛行路線(上圖)與東華大學環境學院 LOD 1 / LOD 2 模型(下圖)

為了彌補第一種方式部分建築物側面無影像資料，所以採取 2 個互相垂直方向飛行，(2) 20190824 利用 DJI Phantom 4 RTK 四旋翼無人機，以兩方向井字型飛行路線拍攝東華大學環境學院 1239 張垂直影像，飛行路線與正射影像如圖 2 (上圖)，飛行高度 60 m，時間 1.0 小時，地面解析度 2 cm，圖 2 (下圖) 是東華大學環境學院 LOD 1 / LOD 2 模型，屋頂與地面高度可清楚辨識，可以看到屋頂外型與建築物側面完整資訊，利用 Pix4D Mapper 處理時間 2.5 小時。因為飛行路線涵蓋兩垂直方向，所以建築物側面影像資料比較完整，可以有比較完整的 LOD2 資訊，但飛行指資料處理時間都比第一種方式增加一倍以上，利用全測站儀檢測環境學院 3D 模型高程誤差 0.11 m。



圖 2、DJI Phantom 4 RTK 無人機飛行路線(上圖)與東華大學環境學院 LOD 1 / LOD 2 模型(下圖)

為解決建築物側面無影像影像扭曲，也可以傾斜拍攝建築物，(3)2016 年 4 月 20 日使用 3DR SOLO 與 GoPro 5 相機以環繞方式(飛行高度 50-100m)拍攝東華大學環境學院垂直與傾斜 332 張影像如圖 3，拍攝時間 0.5 小時，利用 Pix4D Mapper 資料處理 1 小時，平均地面解析度 2.80 公分，因為傾斜拍攝所以建築物側面資訊比較完整，可以見到屋頂與建築物側面之細節，圖 4 為建立之 LOD 2 / LOD 3 點雲與 3D 模型，此種方式比前一種方式省時，利用全測站儀檢測環境學院 3D 模型高程誤差 0.15 m。

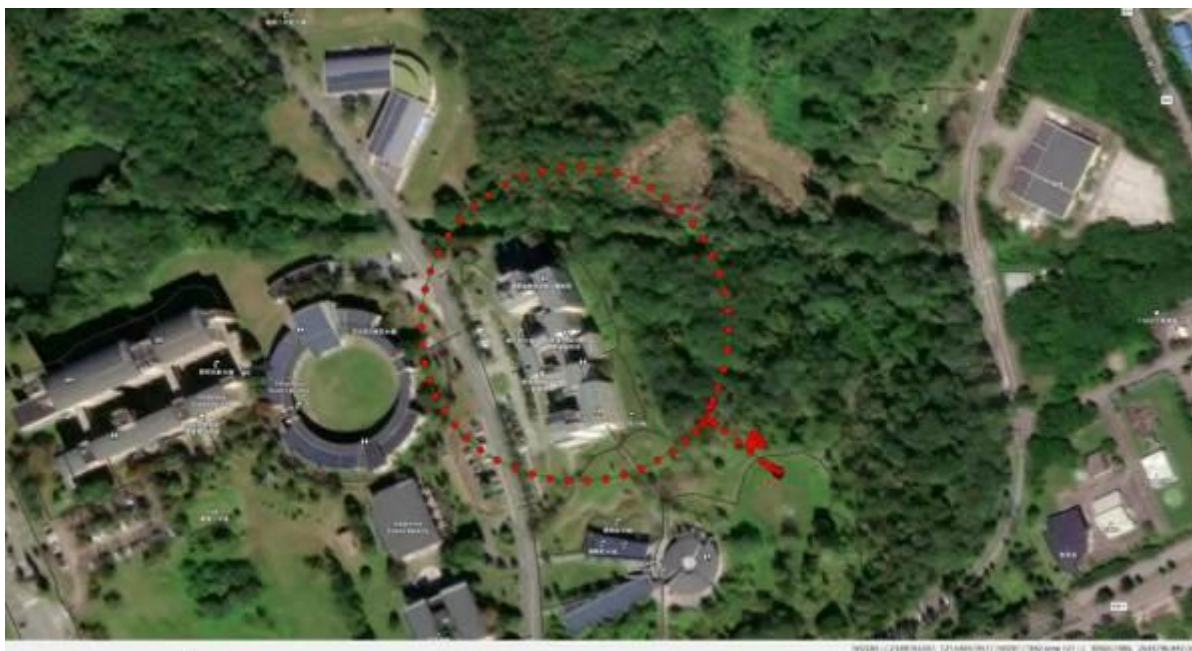


圖 3、3DR SOLO 無人機環狀飛行路線



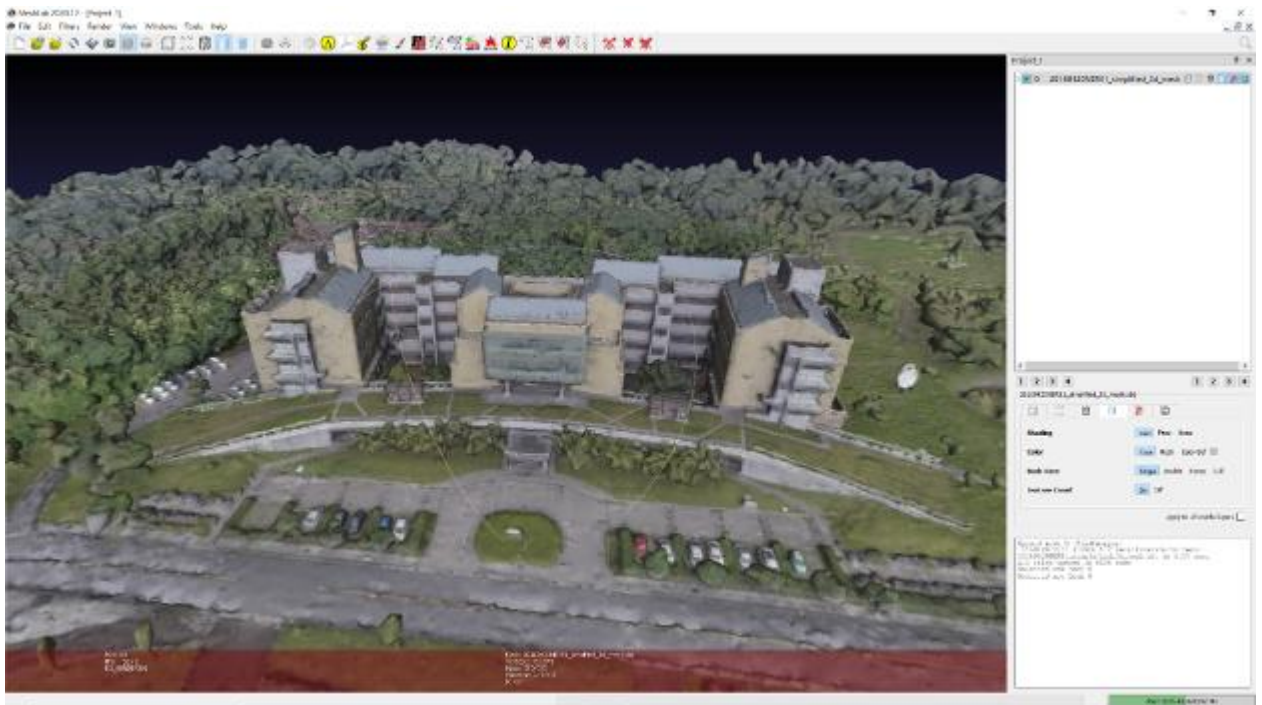


圖 4、東華大學環境學院點雲(上圖)與 LOD 2 / LOD 3 模型(下圖)

除了環繞式拍攝特定建物，也可以有不同拍攝方式，(4)2019 年 10 月 16 日使用 DJI Phantom 4 RTK 飛行高度 60m，以垂直井字型拍攝東華大學環境學院垂直與傾斜 1264 張影像，飛行高度 60m，平均地面解析度 2.06 cm，建立 LOD 2 / LOD 3 模型(圖 5)。





圖 5、DJI Phantom 4 RTK 無人機垂直井字型(上圖)與 3D 點雲與 LOD 2 / LOD 3 模型(下圖)。

由於每個飛行路徑都會拍攝垂直與向前與向後側拍影像 3 張，所以拍攝時間增加為 2 小時，資料處理時間增加為 3 小時，利用全測站儀檢測環境學院 3D 模型高程誤差 0.2 m。將圖 5 中 3D 模型放大如圖 6 (上圖)，雖然增加 3 倍數量照片與將圖四中 3D 模型放大如圖 6 (下圖)差異不大。顯示當有足夠照片時(重疊 70-80%)，增加照片數量無助於提高 LOD 的精細程度。



圖 6、圖 5 之 3D 模型放大後，細部扭曲浮現(上圖)與圖 4 之 3D 模型放大(下圖)相差不大。

前述攝影測量方法由於相機鏡頭扭曲造成誤差以全測站儀測量約有 10-30 公分誤差，大約是數個像素 10 各像素的誤差，可以使用地面光達系統提高模型準確度。(5)小區域使用 Livox Mid-40 Ground-base Lidar 以靜態掃描方式掃描東華大學環境學院，建立 LOD 3 模型。為了完整掃描樹木遮蔽嚴重的環境學院建築物，掃描超過 100 次，使用時間 16 小時，使用免費軟體 Cloudcompare (CloudCompare.org)拼接，包括首先使用 4 個以上相同點進行拼接(align)再使用 50000 點進行細部位置登錄(Fine Registration)，並達到 1-3 公分之拼接誤差。即使如此，由於有太多掃描位置，拼接一圈後仍然會有 error propagation 之問題，可以在中間加入實際測量之控制點以降低整體拼接誤差。圖 7 為

100 個掃描位置拼合點雲，拼合平均誤差(RMS=1-3 cm)，重新取樣為 5 cm 解析度點雲。利用全測站儀檢測環境學院 3D 模型高程誤差 5 cm。

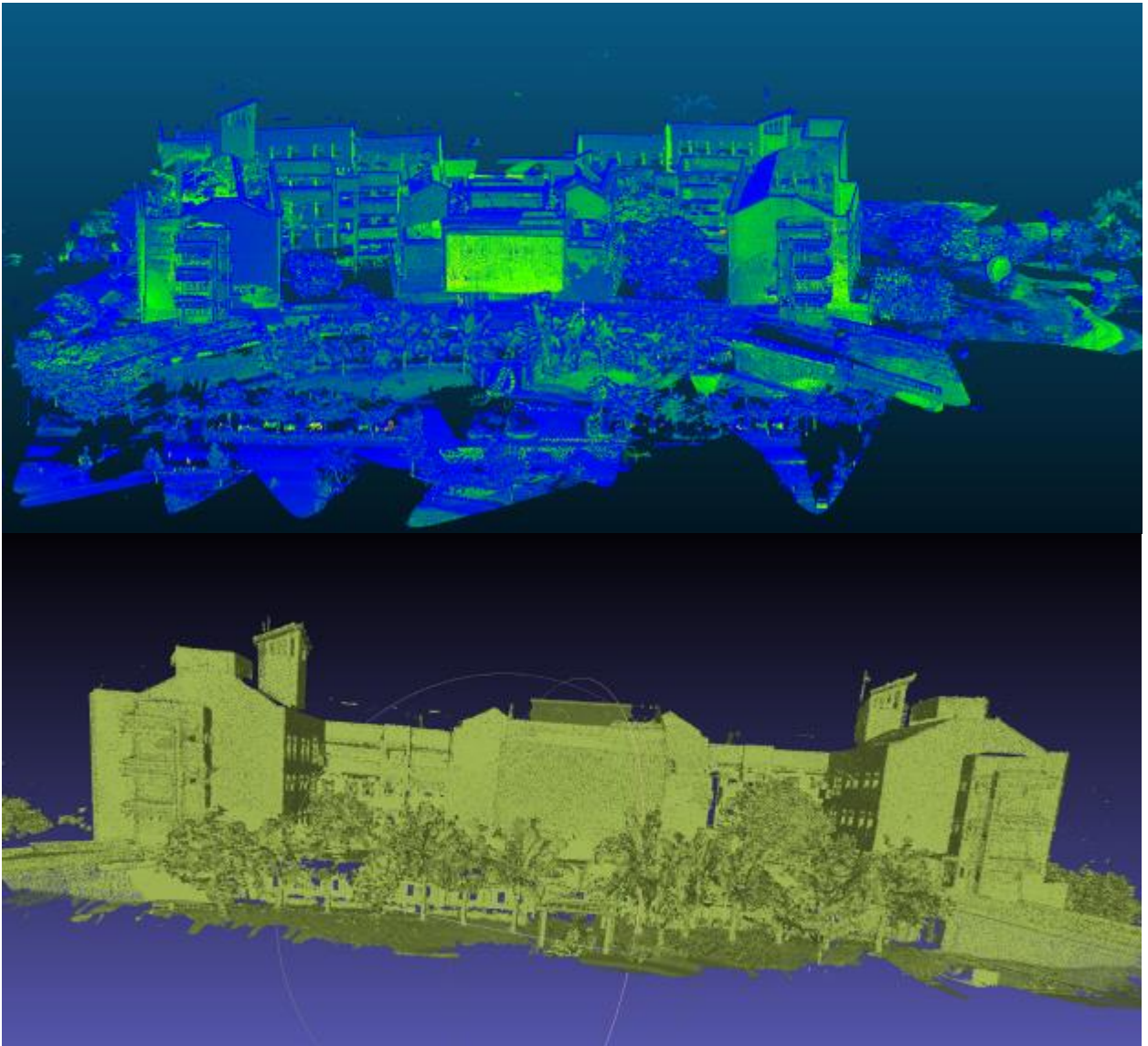


圖 7、拼合 5 cm 解析度點雲(上圖)與 LOD 3 模型 (下圖)

最後一種方式是使用高端昂貴地面光達系統之結果(6) 小區域使用 Riegl LMS Z360i Ground-based Lidar 以靜態掃描方式掃描東華大學環境學院，每站掃描時間 30 分鐘，總計約 4 小時，後處理與建模約 3 小時，建立 LOD 3 模型。圖 8 為利用 Riegl RiScan Pro 軟體之掃描單站結果與環境學院正面掃描 7 站拼接結果，拼接誤差 2.7 cm，利用全測站儀檢測環境學院 3D 模型高程誤差 2 cm。圖 9 為 Riegl (上與中圖)與 Livox Lidar (下圖)掃描結果比較，顯示 Riegl Lidar 掃描的結果顯示出比較多細節。

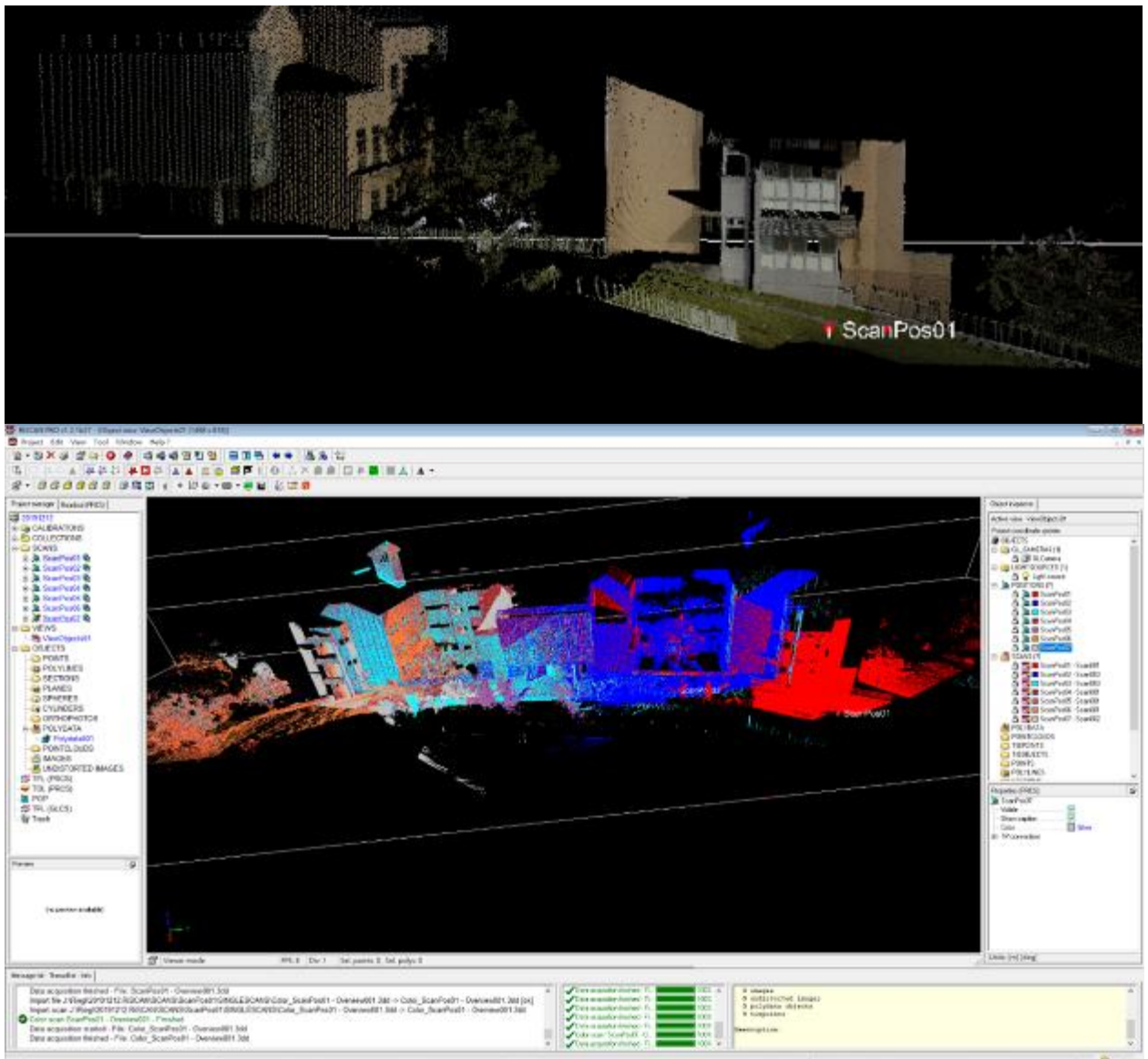
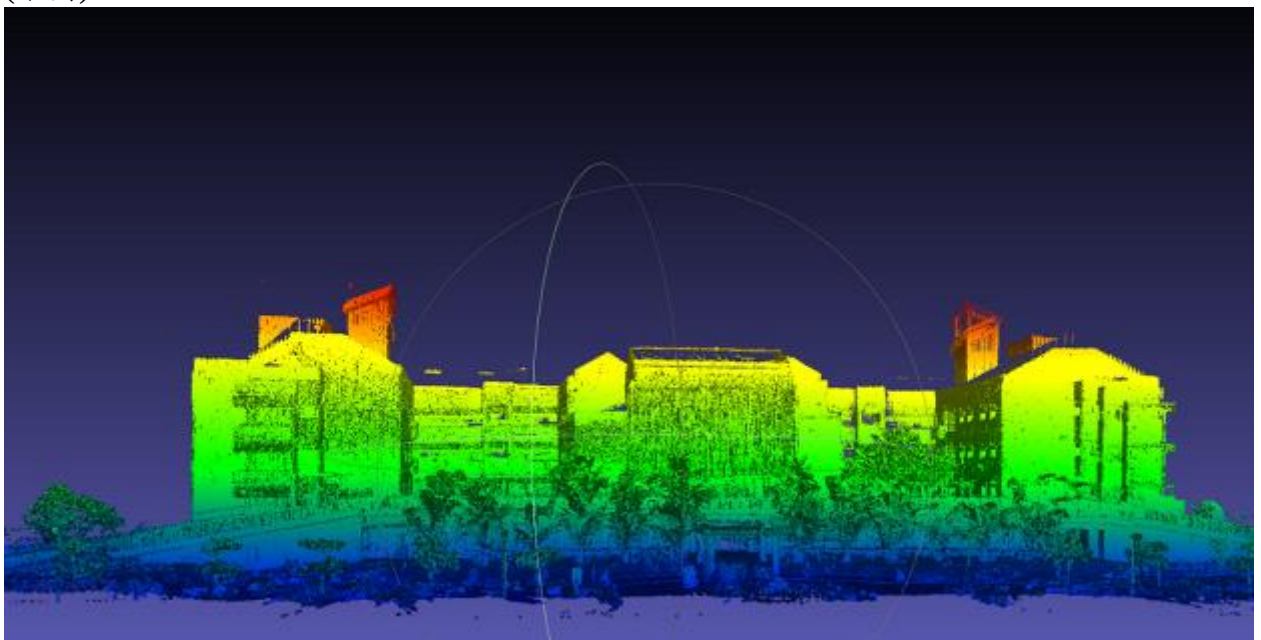


圖 8、Riegl RiScan Pro 軟體之掃描單站結果(上圖)與環境學院正面掃描 7 站拼接結果(下圖)



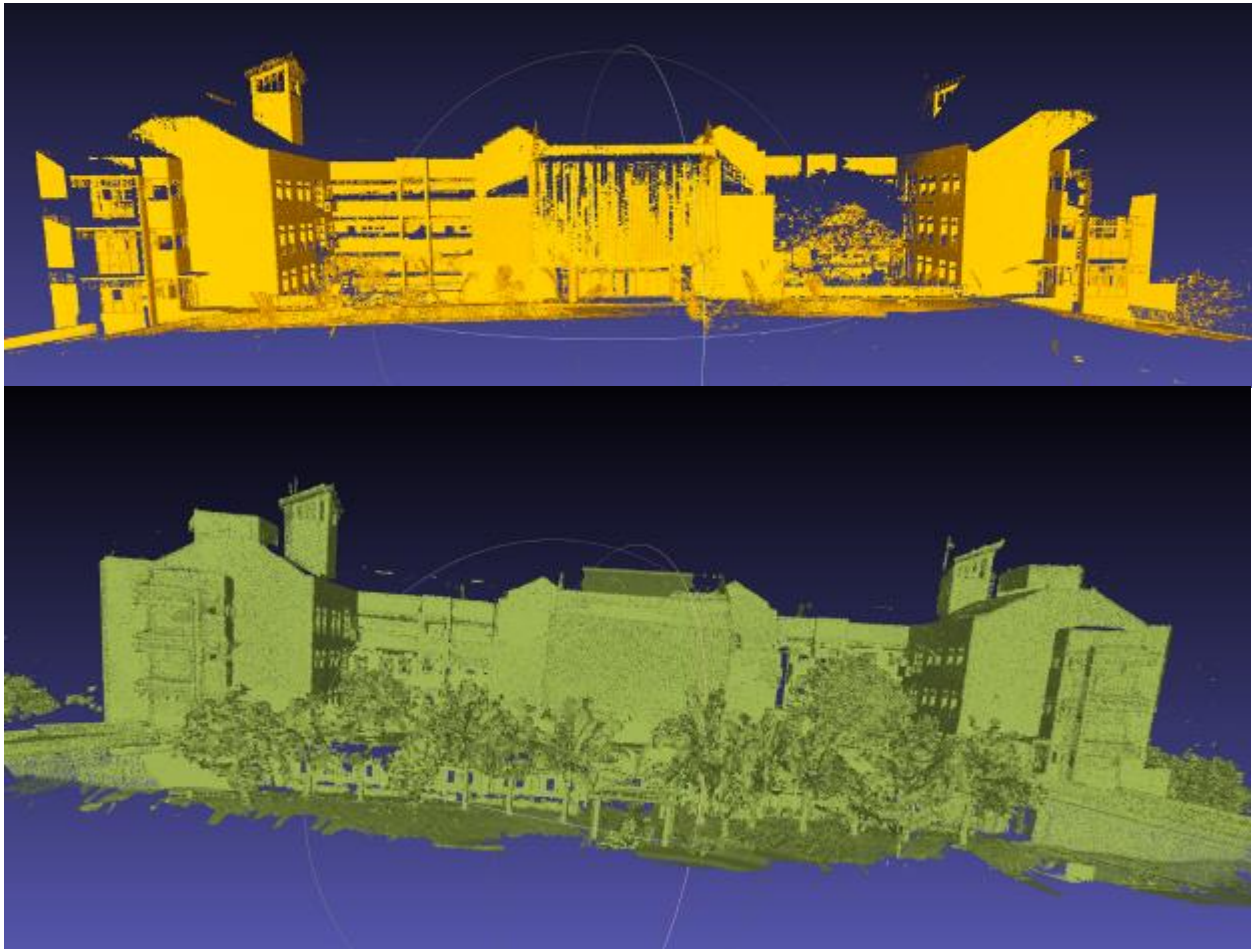
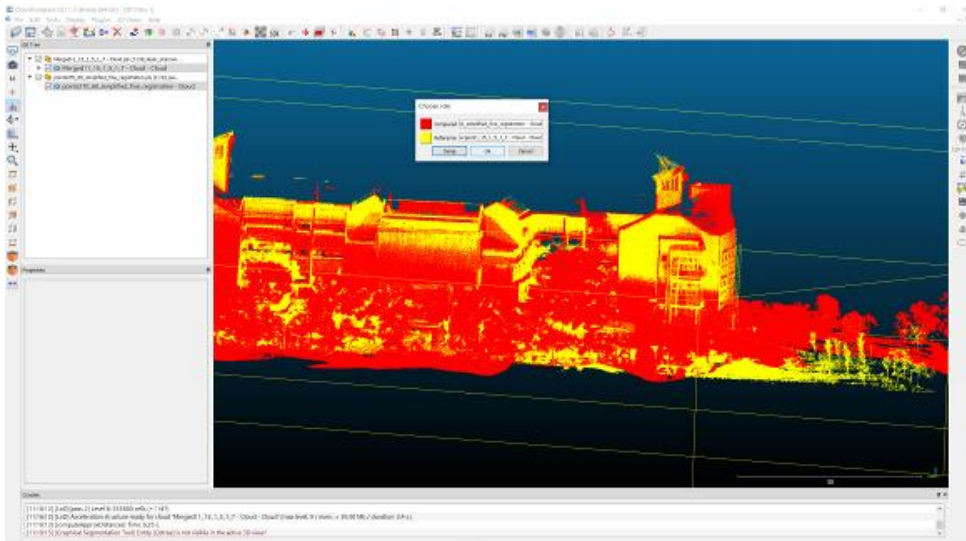


圖 9、Riegl 掃描點雲(上圖)、3D 建模與 Livox Lidar 掃描結果(中圖與下圖)。

由於 Riegl LMS 360i 掃描儀之掃描資料準確度最高，比較 Livox Mid-40 掃描結果與 Riegl LMS 360i 掃描結果，先將 Livox Mid-40 掃描結果(紅色點雲，5 cm 解析度)對準至 Riegl LMS 360i 掃描結果(黃色點雲)如下圖 10 (上圖)，點雲比對誤差 0-0.5 m 分佈圖如圖 10 (下圖)，大部分建築物之誤差都落在 5-10 cm 左右 (圖 11)，建築物有細部結構者，由於點雲解析度為 5 公分，所以會造成較大誤差，左側建築物有較大誤差(<0.5 m)，可能原因是因為過多掃描站造成 error propagation。DJI Phantom 4 RTK 點雲與 Riegl LMS 360i 點雲對比誤差分佈如圖 12，由於至少有 0.2 m 以上之鏡頭扭曲誤差，加上其它前述因素影響但大致小於 1.5 m。



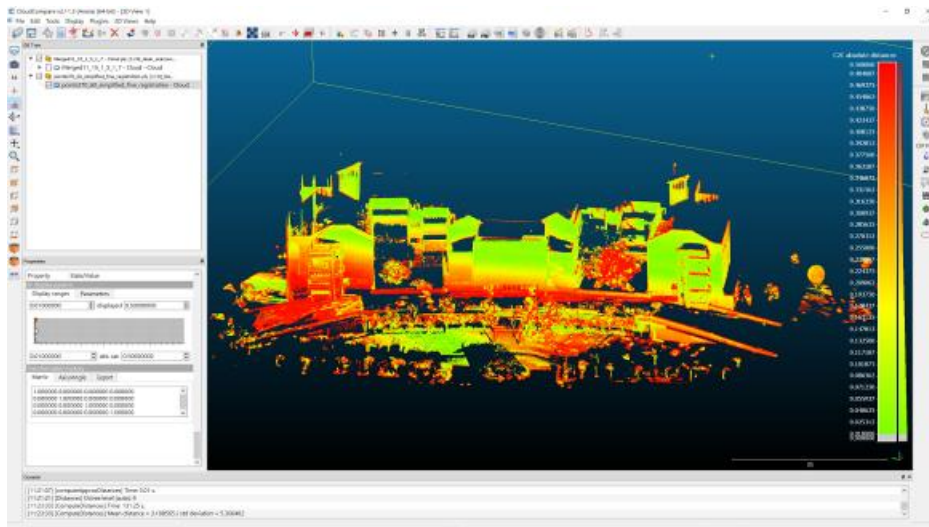
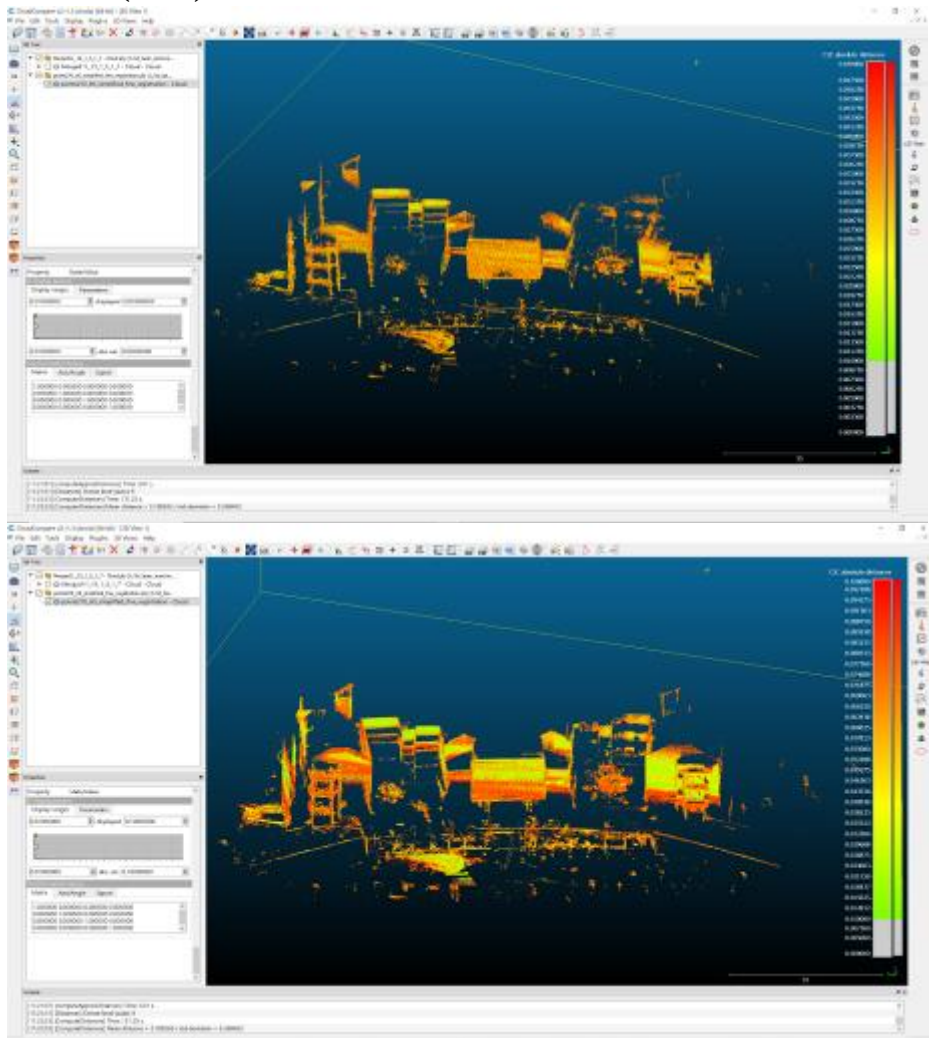


圖 10、Livox Mid-40(紅色)與 Riegl LMS 360i(黃色)掃描點雲 (上圖)，比對誤差 0-0.5 m 分佈圖 (下圖)



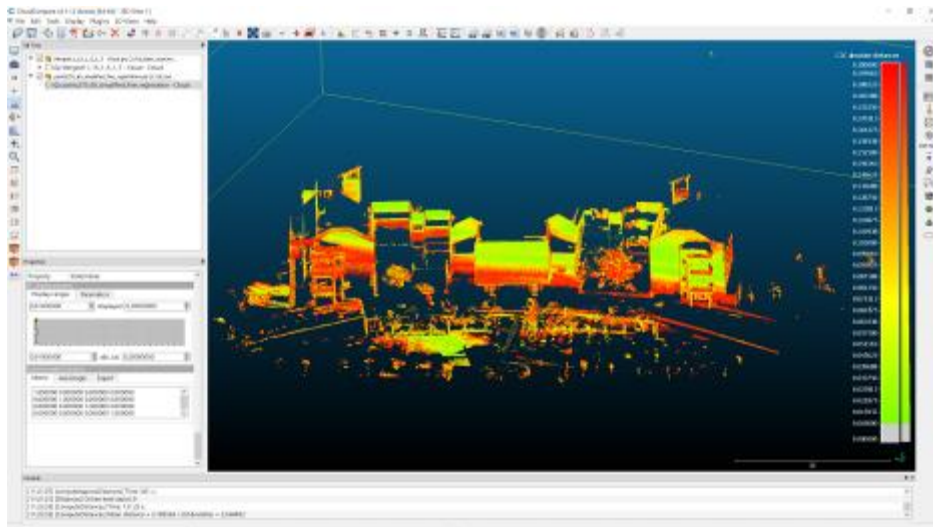


圖 11、Livox Mid-40 與 Riegl LMS 360i 比對誤差分佈圖，5cm (上圖)、10 cm (中圖) 與 20 cm(下圖)

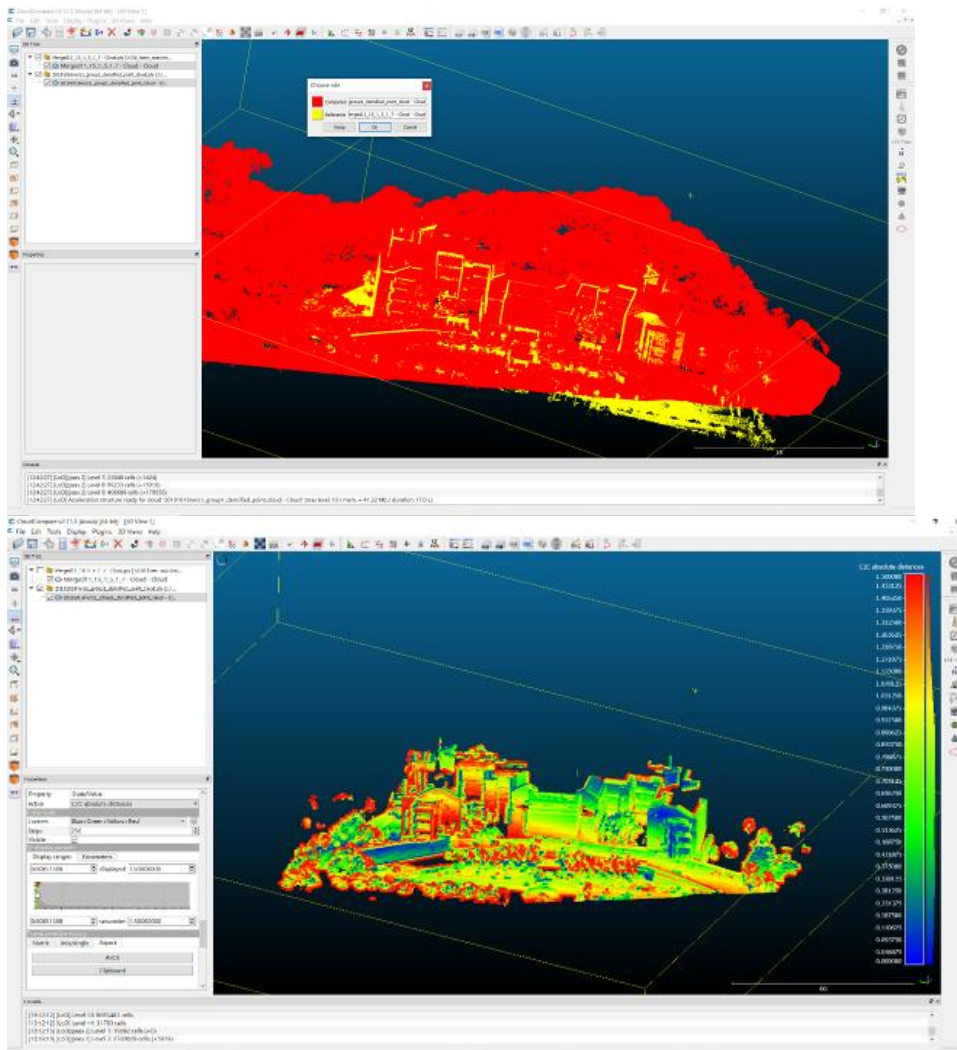


圖 12、DJI Phantom 4 RTK 點雲與 Riegl LMS 360i 點雲對比誤差分佈圖

利用無人機與數位相機拍攝地表建物建立完整 3D 地圖，受限於無人機使用之數位相機不是量測型相機(Metric camera)，鏡頭扭曲參數必須進行 Field camera calibration 或 Laboratory camera Calibration 後，再將這些參數輸入處理軟體之相機資料

庫中，航拍影像處理後才可能達到水平方向 1-2 個像素誤差與垂直 2-4 像素誤差之理論最佳值(Wolf et al., 2014)。但一般無人機之數位相機航照處理只進行利用相鄰航照間相同點之 Self camera calibration，高程誤差約 20 cm，約 8-10 像素(James and Robson, 2014)，雖然一般無人機飛行高度大多介於 50-120 m 間，地面解析度大約介於 1-3 cm，但高程誤差並不因為航高降低而改善。即使進行 Field 或 Laboratory camera Calibration，估計高程誤差約 2-12 cm，所以根據 LOD 定義使用無人機與數位相機進行傳統攝影測量工作，只能達到 LOD 2 / LOD 3 的 3D 建模要求，地面解析度約數公分，準確度約 10-20 公分，可以建立 1/500 比例尺 3D 地圖，成果與芬蘭赫爾辛基市 3D 成果類似(<https://www.hel.fi/helsinki/en/administration/information/general/3d>)。如果使用量測型相機可以提高準確度至數公分，但硬體成本必定大幅提高，例如目前比較廉價的 DJI 量測型相機 Zenmuse X4S 或 X5S 約 2000 美元，檢測水平誤差 3 公分，最大約 4 個像素(<https://www.gim-international.com/content/news/dji-s-metric-camera-for-aerial-surveying>)，必須搭配較大型無人機例如 DJI Inspire 2 價格約 5000 美金。

搭配 Ground-based Lidar，可以提高 LOD 3 模型之準確度與顯示比較細部的建築物資訊，但 Livox Mid-40 沒有相機資訊，只能產生 3D 點雲資料，如果要搭配相機與移動掃描就必須增加相機、GPS 與 IMU 等硬體(https://github.com/Livox-SDK/livox_high_precision_mapping)，靜態掃描(Livox Viewer 0.11.0、Livox SDK、OpenPyLivox)可以達到 1-3 公分、動態掃描，SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 以慢速(低於 5 公里/小時)進行掃描(LOAM、Livox_mapping、LeGO-LOAM)，可以達到 5-10 公分左右掃描精度，動態掃描成本與量測式相機加上大型無人機相近，但因為使用免費軟體之學習使用技術門檻較高(https://github.com/hku-mars/loam_livox，Lin and Zhang, 2019)，後續資料處理也比較費時，不利於推廣使用，可以使用例如 GeoSlam 等商用動態掃描儀(<https://geoslam.com/>)，成果提高約 10 倍，但可以節省系統整合與資料後處理之時間成本與人員訓練之時間。

肆、結論

1. 利用攝影測量垂直與傾斜拍攝建立之 3D 地圖，可以建立 1/500 比例尺高程誤差 10-30 公分之 LOD/LOD3 模型，建議環形或兩互相垂直方向拍攝，飛行高度 60-120m，地面解析度 2-4cm。增加影像數目並不會增加 3D 模型的準確度。
2. 利用地面光達系統可以將 3D 建模準確度提高到 2-5cm，但如果靜態掃描站過多需設置控制點以免誤差累積。
3. Livox Mid-40 價格是 Riegl 光達的 1/100 左右，但可以達到 5cm 準確度，對比於 Riegl 光達的 2cm 是性價比極高的選擇，搭配攝影測量方式可以提高 3D 建模精確度至數公分，對比於目前無人載具搭配相機都不是量測型相機可以有效降低 3D 建模之高程誤差。

伍、參考文獻

- [1] 3DCityDB Database – Homepage(2021), <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/>，2021 年 5 月 11 日瀏覽。
- [2] Cramer, M., Przybilla, H. J., Zurhorst, A. (2017) UAV CAMERAS: OVERVIEW AND GEOMETRIC CALIBRATION BENCHMARK, <http://uavg17.ipb.uni-bonn.de/wp-content/papercite-data/pdf/cramer2017uavg-89.pdf>，2021 年 5 月 11 日瀏覽。
- [3] James, M. R. and Robson, S. (2014) Mitigating systematic error in topographic models

- derived from UAV and ground-based image networks, *Earth Surf. Process. Landforms* 39, 1413–1420.
- [4] Lin, J and Zhang, F (2019) A fast, complete, point cloud based loop closure for LiDAR odometry and mapping. <https://arxiv.org/pdf/1909.11811.pdf>
 - [5] Neale, W., Hessel, D. and Terpstra, T. (2011) Photogrammetric Measurement Error Associated with Lens Distortion. https://www.researchgate.net/publication/268411065_Photogrammetric_Measurement_Error_Associated_with_Lens_Distortion , 2021 年 5 月 11 日瀏覽。
 - [6] Pasik, M., Kowalska, M., Lapinski, S., Rajner, M. and Bakula, K. (2017) Large-scale map and 3D modelling of the Henryk Arctowski Polish Antarctic Station. *Polar Record* 53 (270): 280–288.
 - [7] Yao, Z., Nagel, C., Kunde, F., Hudra, G., Willkomm, P., Donaubaue, A., Adolphi, T. and Kolbe, T. H. (2018) 3DCityDB - a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML. *Open Geospatial Data, Software and Standards* (2018) 3:5, 1-26. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0046-7>.
 - [8] Wolf, P. R., DeWitt, B. A. and Wilkinson, B. E. (2014) *Elements of Photogrammetry with Application in GIS*, 4th Edition , Mc Graw Hill, New York, pp. 676.
 - [9] Zhang, Y. Tang, Q. (2016) Camera Self-Calibration Based on Multiple View Images, <https://cie.nwsuaf.edu.cn/docs/20170614174326815737.pdf> , 2021 年 5 月 11 日瀏覽。
 - [10] 內政部地政司出版地圖 - 地圖與遙測影像數位典藏計畫 (2021) , http://gis.rchss.sinica.edu.tw/mapdap/?page_id=5597&lang=zh-tw , 2021 年 5 月 11 日瀏覽。
 - [11] 內政部地政司衛星測量中心－衛星控制點之設置 (GPS6)(2021) , <https://gps.moi.gov.tw/SSCenter/Introduce/IntroducePage.aspx?Page=GPS6> , 2021 年 5 月 11 日瀏覽。
 - [12] 國土測繪中心全球資訊網 - 中文網 - 基本地形圖測(修)製 (2021) , <https://www.nlsc.gov.tw/cp.aspx?n=1505> , 2021 年 3 月 26 日更新、2021 年 5 月 11 日瀏覽。
 - [13] 臺北市區里鄰電子地圖 , <https://canet.civil.taipei/tp104-1/> , 2021 年 5 月 11 日瀏覽。

應變規用於運動鞋上之探討 Discussion on the use of Strain Gauges on Sports Shoes

翁文彬^{1*} 李治平² 林凱傑²

1 龍華科技大學化工與材料工程系 副教授

2 龍華科技大學化工與材料工程系 碩士生

摘要

本研究以三種金屬材料作為基板，利用材料應用特性及應變規的電阻特性，模擬自行車運動踩踏之狀況；對於研究的初期，為了比較不同金屬材料應用於休閒運動產業的自行車運動上，受到重視的應力感測反應變化模式，本研究將應變規作為力量感測器，分別黏貼於 6061-T6 鋁合金、304 不鏽鋼、鎳鈦合金基板上，設計模擬腳踏板受力方式的夾治具，以便於材料試驗機下施以 0~140kg 的受力實驗，其目的在分析應變量數據並接上動態記錄器，綜合分析力量感測器之電阻值的變化差異。

實驗結果顯示，當三種金屬基板在受力 140kg 時，6061-T6 鋁合金、304 不鏽鋼、鎳鉻合金應變量分別為 600、235、450；在釋放力量時，鎳鈦合金基板會有回彈的力量，實驗應變數值到 -50 後才會回到起始點，因此運動過程中踩踏力量快速變換下較不適合使用；相較之下，6061-T6 鋁合金以及 304 不鏽鋼基板，皆會回到起始點位置，因此選用應變量變化較大的 6061-T6 鋁合金基板置於自行車運動鞋墊內的仿真實驗，以便進行運動仿真測量時，可獲得反應較大的數據變化，以便於做分析。

實驗顯示自行車騎乘者踩踏時，由於左右腳的踩踏施加力量，並沒有辦法完全一致，使得小腿線與踏板垂直線沒有達到平行，進而導致自行車有所偏移及傾斜。

實驗結果顯示，當小腿施力於踏板上產生偏移時，實驗顯示以 40 公斤力量踩踏，且小腿偏移 5mm 騎乘時，自行車轉速將會下降 5 rpm，使得功率值隨之下降 20W。

關鍵詞：應變規、應變測量分析、材料試驗機(MTS)、惠斯登電橋、運動鞋

壹、前言

隨著時代的改變人類科技日新月異，漸漸地節能減碳的運動，變成大環境下的生活重點，因此受到大眾喜愛的自行車運動，就被公認為，最能實踐環保概念的休閒工具。

近年來許多業者投入於「自行車」的趨勢，將焦點放在應變規上，利用應變規受到的力量而產生出電阻值的特性，設計成不同形式的力量感測器，並將其利用於自行車之上，做於計算輸出功率及判斷騎乘者身體狀況。

自行車運動中，由於各式車型不同的規格設定，將影響使用者的騎乘姿態，最常見的不同，在於坐姿高度^{[1][2]}與曲柄長度，因此要找到合適的組合才能發揮最舒適及有效率的騎乘。

自行車的騎乘速度會受風速、坡度、氣候影響，因此功率一直是騎乘能力的指標，因為功率會反應出騎乘者輸出於自行車的能量。而可以踩踏出 350W 的運動者，並不代表該騎乘者能用 250W 的功率連續騎兩小時。因此為了客觀的定義騎乘能力，用功能性閾值功率(Functional Threshold Power，簡稱FTP)來評判騎乘能力，FTP是只騎乘自行車平均功率。因此使用力量感測器來記錄應變量及力量的變化關係，由動態記錄中的數值可以知道力量及轉速，並透過最常被使用的功率計算公式：動力(W) = 力矩(kg) × 轉速(rpm) × $2\pi/60$ ，得到功率值可依照騎乘者的FTP來分配騎乘的體力、踩踏力量。

貳、研究方法

本研究在三種不同金屬材質上黏貼 350Ω 應變規，分別為 6061-T6 鋁合金、304 不鏽鋼及鎳鈦合金基板連接惠斯登電橋電路製作成感測器，透過惠斯登電橋的特性紀錄應變規受力時，金屬絲的細微變化產生的應變量。

參、結果與討論

3.1 三種不同材質基板進行壓力測試

本研究將 6061-T6 鋁合金、304 不鏽鋼及鎳鈦合金三種不同材質所製作的力量感測器進行施加力量，以力量 140 公斤、速度為 10mm/min 進行實驗，從實驗結果分析數據，6061-T6 鋁合金在 140kg 時，應變量為 600，如圖 1 所示；而 304 不鏽鋼因為硬度高，因此應變量較低，在 140 公斤時，應變量為 235，如圖 2 所示；鎳鈦合金在 140 公斤時，應變量為 450，如圖 3 所示。

從應變量方面來看 6061-T6 鋁合金及鎳鈦合金較佳，但在釋放力量時，鎳鈦合金的應變數值會到負值，再回到起始點，在運動過程中力量快速地變換下特性不適合使用。

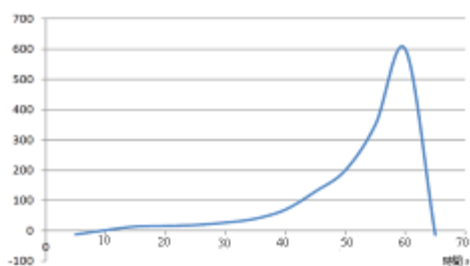


圖 1 6061-T6 鋁合金 基板受垂直
無偏移力量140kg 時應變量

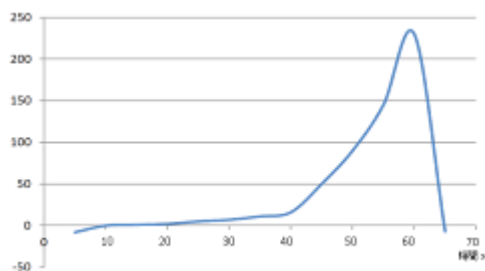


圖 2 304 不鏽鋼 基板受垂直
無偏移力量140kg 時應變量

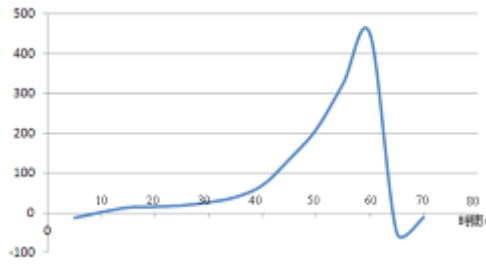


圖 3 鎳鈦合金基板受垂直
無偏移力量 140kg 時應變量

3.2 垂直踩踏力量實驗

本研究將 6061-T6 鋁合金製作的力量感測器裝於運動鞋中再放微電腦伺服材料試驗機中對感測器及踏板垂直施力時，在每個公斤數時，都記錄兩組應變規所產生的應變量，實驗結果發現在起始值歸零後，兩組應變規所產生應變量在同一個公斤下會相等，因此得知微電腦伺服材料試驗機施加在力量感測器上的力量為平均，且可以經由應變量得知施力大小。

表 1 垂直踩踏力量實驗數據

kg	外側	內側	kg	外側	側
0	-17	-16	70	291	2
5	5	6	75	313	4
10	27	28	80	335	5
15	49	50	85	357	8
20	71	72	90	379	0
25	93	94	95	401	2
30	115	116	100	423	4
35	137	138	105	445	5
40	159	160	110	467	8
45	181	182	115	489	0
50	203	204	120	511	2
55	225	226	125	533	4
60	247	248	130	555	5
65	269	270	135	577	8
			140	599	0

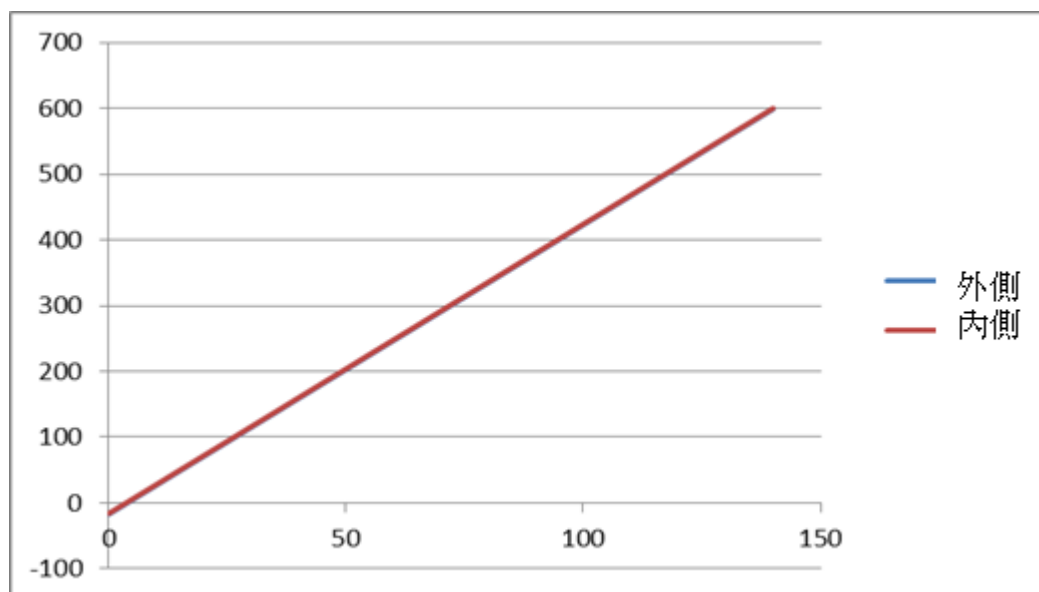


圖 4 垂直踩踏力量實驗數據圖

3.3 垂直踩踏力量偏移實驗

本研究將 6061-T6 鋁合金製作的力量感測器裝於運動鞋中，利用微電腦伺服材料試驗機模擬自行車踏實垂直力量偏移實驗，記錄兩組應變規所產生的應變量，發現在偏移時，兩組應變規的應變量會改變。本研究將偏移實驗設計為-10mm~0mm及 0mm~10mm，以 21 個間隔觀察兩組應變規之間的應變量轉移。將兩組應變規的數據分別繪製成數據圖，如圖 5 及圖 6。從數據圖中，發現在每個間隔的數據途中都沒有交點，說明每個位置所感測到的應變量是獨立的，因此透過兩組應變規所感測到的應變數值做踩踏力量及偏移位置的判定。

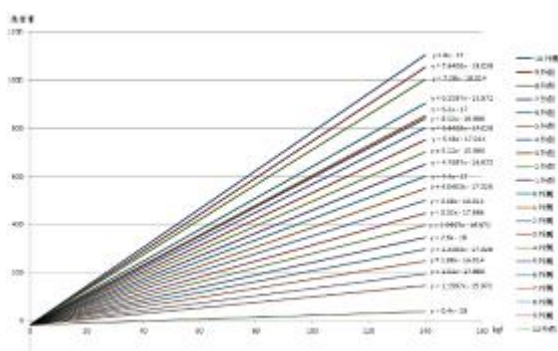


圖 5 外側應變規數值變化圖

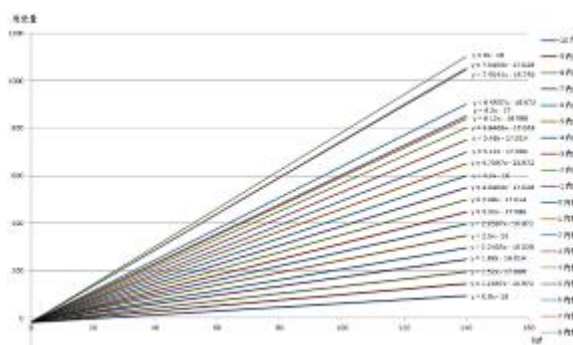


圖 6 內側應變規數值變化圖

3.4 外側及內側應變量轉換為功率

本研究將偏移位置分為 21 個間隔，以下使用 -10mm、-5mm、5mm、10mm 四個偏移位置與小腿垂直踏板說明。實驗結果顯示：當動態記錄器記錄其中一筆應變規數值外側值為 86 內測值為 231 時，將外側應變規數值 86 分別代入外側應變規的方程式 $y=8x-17$ 、 $y=6.2x-17$ 、 $y=4.4x-17$ 、 $y=2.6x-18$ 、 $y=0.4x-18$ 中，求 x 值，在公式中 x 值表示公斤， x 數值分別為 12.875kg、16.612kg、23.409kg、40kg、260kg，這五個公斤數是在外側應變規數值為 86 時，可能產生的公斤數；將這五個公斤數分別代入內側應變規的公式中： $y=8x-18$ 、 $y=6.2x-17$ 、 $y=4.4x-16$ 、 $y=2.6x-16$ 、 $y=0.4x-18$ 求出 y 值，如表 2 所示。在表 2 中，只會有一個數據顯示與內側應變規感測器相同的數值 231，因此此筆數據為 40kg 且重心偏移位置落在 5mm 位置。

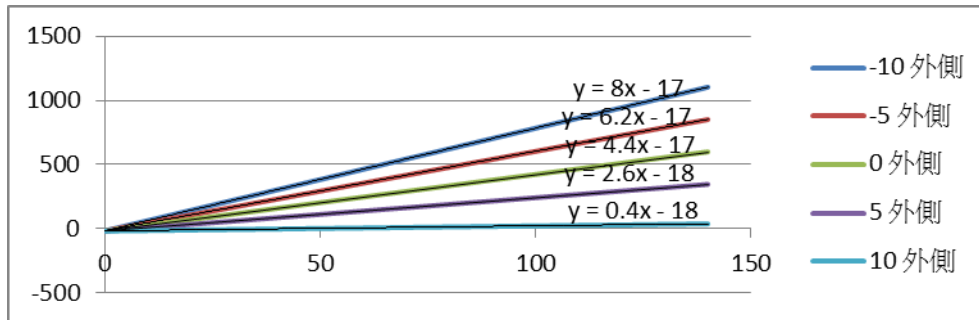


圖 7 外側應變規數值變化圖

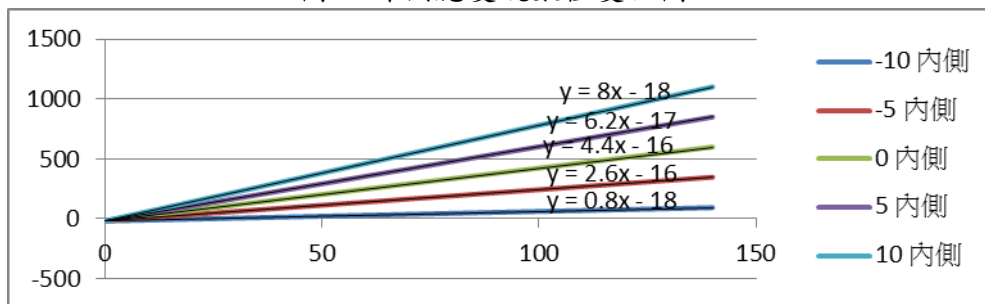


圖 8 內側應變規數值變化圖

表 2 外側應變規可能的 kg 值代入內側應變規公式之中

	-10mm $y=0.4x-18$	-5mm $y=2.6x-16$	0mm $y=4.4x-16$	5mm $y=6.2x-17$	10mm $y=8x-18$
12.875kg	-12.85	17.475	40.65	62.825	85
16.612kg	-11.355	27.191	57.092	85.994	114.896
23.409kg	-8.636	44.863	86.999	128.135	169.272
40kg	-2	88	160	231	302
260kg	86	660	1128	1595	2062

轉速是由動態紀錄器產生的波形的波峰到波峰間的秒數，計算每分鐘的轉速(rpm)值。從功率計算中選用動力(W) = 力矩(kg) × 轉速(rpm) × $2\pi/60$ ，因力矩、轉速都是已知的條件，此公式也是一般功率計算常用的公式。

在小腿垂直於踏板的騎乘姿勢下，施加的力量為 40 kg，轉數為 50rpm，代入公式中：

動力(W)=力矩(kg)×轉速(rpm)× $2\pi/60=40 \times 50 \times 2\pi/60=208(W)$

將應變規數值，外側值為 86 內測值為 231 時，所施加的力為 40kg 偏移位置 5mm，轉數為 45rpm，代入公式中：

動力(W)= 力矩(kg)× 轉速(rpm)× $2\pi/60=40 \times 45 \times 2\pi/60=188(W)$

上列式子中兩者功率值的差值即為小腿未垂直於踏板的情況，與小腿垂直踏板踩踏時所產生的功率差值。

肆、結 論

應變規在工件受到力量時會改變應變量，應變量偵測會因為應變規的面積大小、黏貼位置及工件形狀所影響，本研究透過微電腦伺服材料試驗機來模擬小腿對於踏板施加力量，使力量感測器在踏板與小腿的不同偏移量情況下比較功率值，

- 1.應變規在黏貼前要先分析判斷工件的應變產生位置、應變規正反面及將表面打磨成粗糙面以利應變規與工件的貼合。
- 2.金屬基板的選擇，將 6061-T6 鋁合金、304 不鏽鋼、鎳鈦合金將三種金屬的感測器進行 0~140kg 壓力實驗後，實驗結果顯示 6061-T6 鋁合金的應變量最大，且可回復至起始點，說明 6061-T6 鋁合金在經過大變形量後，可以回復成未施加壓力的情況；304 不鏽鋼基板同樣也能回復於起始點，但由於應變量太小，在數據產生誤差值時不易判斷數據的準確；至於鎳鈦合金應變量為 450，但鎳鈦合金在力量釋放掉時，應變量會掉到負值才回到起始點，此現象用於運動型感測器，在力量快速轉變的情況下，將造成無法判斷正確的數據。因此本研究採用 0~140 公斤力量對力量感測器施力，經過施力後將力量釋放，應變量皆會回到起始點的 6061-T6 鋁合金進行自行車踏板踩踏實驗。
- 3.將 6061-T6 鋁合金製作的力量感測器裝於運動鞋後，進行模擬自行車踩踏實驗，實驗分為兩個部分：1.小腿對踏板垂直施力實驗的中，兩組惠斯登電橋電路在不同公斤數所感測的應變量數值會相等；2.小腿對踏板偏移實驗中，將踩踏垂直力量偏移分為 21 個間隔，並施加 0~140kg 力量時，不同刻度會產生兩組應變數值，將其全部繪製成圖後發現曲線趨近線性，且各組數據線皆不會重疊。
- 4.應變規所感測到的數值，經由偏移實驗中的外側應變規數據所形成的方程式，得知可能產生應變規所感測的應變量數值後，透過內側應變規數據所形成的方程式，獲得騎乘時的力量及偏移位置。實驗結果顯示：對踏板施力皆為 40 公斤時，小腿垂直踏板的功率為 208W；小腿與踏板偏移 5mm 的功率值為 188 W，兩者功率值相差 20 W。若小腿偏移 5mm 要獲得與垂直踩踏相同功率時，踩踏力量大約增加 6 公斤，才能彌補相差 20W 的功率值。在使用相同力量踩踏下每偏移 1mm 時，功率值約減少 2%。

參考文獻

- [1] Burke, E. R., & Pruitt, A. L.. Body positioning for cycling. High-tech cycling-Human Kinetics, 2, (2003), pp. 69–92。
- [2] MacAuley,D..In A guide to cycling injuries:Prevention & treatment. Bristol: A & C`, (1995)。
- [3] 羅譽寅，徹底看懂自行車功率訓練數據，臉譜出版社，(2016)。
- [4] 范凱閔，公路自行車最大踩踏功率的騎乘姿勢研究，碩士論文，國立清華大學，新竹 (2014)。
- [5] Dorothy Mackenize, “Green Design”, pp.76-9, Laurence King, England, (1992).
- [6] 張錚璿.羅懷保.相子元,不同騎乘姿勢對自行車踩踏力量之影響,華人運動生物力學期刊,臺灣師範大學運動科學研究所,臺北市立體育學院運動器材科技研究所,2 (2010), pp.48-56。
- [7] 李尹鑫、陳家祥、嚴笠哲、相子元，自行車踩踏功率的應用與發展，體育學報，51卷，2期，6月，(2018)，pp.145-54。
- [8] 陳明良、歐雅芬、涂瑞洪，隨卡鞋與布鞋對自行車踩踏速度之影響，第三屆運動科學暨休閒遊憩管理學術研討會論文集，(2010)，pp.34-7。
- [9] K.V.Meena RibuMathew JyothiLeelavathi A.Ravi Sankar ,Performance comparison of a single element piezoresistor with a half-active Wheatstone bridge for miniaturized pressure sensors ,Measurement ,Volume 111, December (2017) , pp.340-50。

海報發表

Influence Assessing of Eaglewood Essential Oils on Individual Physiological and Psychological Activities

S.H. Wu¹ and K. S. Yao^{2,3,*}

¹Department of Digital Media Design, Hsiuping University of Technology,
Taichung city 412406, Taiwan.

²Department of Civil Engineering and Soil Environmental Resource Managements,
Dahan Institute of Technology, Hualien 97145, Taiwan.

³Department of Food Science and Technology, National Taitung Jr. College,
Taitung 95045, Taiwan.

*Corresponding author: alexksyao@gmail.com

Abstract

Aromatherapy seems to have attracted much more attention due to the efficiency of plant essential oils on the physiological and psychological activities of humans in recent years. However, the effects of medication depend on different individuals. For example, eaglewood essential oil (EEO) extracted from eaglewood plant (*Aquilaria* sp.) had been widely used as medication for improving patients' various symptoms including empty colic, pyrogenous dysentery, emotional stagnation, paralysis, and diarrhea in many ancient Asia and southeast countries. This work attempts to rapidly assess the possible changes in the physiological and psychological activities of individuals after inhaling EEO. The available information of the individual electroencephalogram (EEG) and salivary alpha-amylase activity after non-invasive testing was therefore recorded. Subsequently, we found that alpha rhythm power was up to 16% in the individual brainwave, but the delta rhythm power was reduced by 22% in the left brain. Moreover, the hydrolysis efficiency of individual salivary alpha-amylase activity (sAA) was lower 11% than that of the control group. In other words, the changes in individual EEG and sAA seem to be used as indicators for rapid testing of physical and mental activity when a single is exposed to the environmental condition of essential oil.

Keywords: eaglewood essential oil (EEO), physiological and psychological activities, electroencephalogram (EEG), salivary alpha-amylase activity(sAA).

1. Introduction

Plant essential oils, a complex compound of secondary metabolism, had been widely used as a medicinal treatment from ancient times. In recent years, it, also named as aromatherapy, has attracted much attention. Many researchers attempt to verify the impact of odors on the physiological and psychological activities of humans (Nasel *et al.*, 1994; Sakuma *et al.*, 1997; Tisserand, 1985). However, the influence of fragrance on those activities of humans appears to exist in many variances, even depending on the difference of individual.

Eaglewood (also named as agarwood, aloeswood, and gaharu) plant belongs to family Thymelaeaceae and is native to China and South East Asia countries including Vietnam, Cambodia, Laos, Thailand, Malaysia, and Indonesia (Barden *et al.*, 2000; Sidik, 2008). In China, the first record concerning the effectiveness of eaglewood was discovered in the Traditional Chinese Medicine (TCM) book named as “Mingyi Bie Lu”, which was edited by Tao Hongjing (A.D. 456-536) in the period of Southern and Northern Dynasty (A.D. 420-581) in China. And this book clearly states that eaglewood is a high-grade herb medicine and able to cure various tumors caused by evil influence as well as poison materials. The eaglewood also enables to improve the situation of organisms by depriving of harmful vapors in the body (Tao, 1986; Tao, 2013). Besides, another medical book, “Bencao Jing Jizhu” also indicates that eaglewood is very useful for curing the malignant tissue disease and tumor (Shang, 2008). Until A.D. 1694 in Qing Dynasty, “Bencao Beiyao” a pharmaceuticals book edited by Wang Ang, also clearly shows that the nature of eaglewood is temperate and its flavor is pungent and hot. The pharmacological effect of eaglewood is to enter into the spleen organ and adjust various “Qi” circulations and bring peace to the body. Due to its surface of black, it can penetrate into the patient’s acupoint of maimen (pluse) and is good for the protection of the kidney system. And it also has the effectiveness regarding nourishing yin, strengthening yang, and invigorating “Qi” circulation (Dai, 2007; Wu & Hsieh, 1987). In other words, it can cure the patient’s symptoms including empty colic, pyrogenous dysentery, emotional stagnation, evil influence, dispelling cold, paralysis, and diarrhea. Recently, lots of research papers show that some compounds of eaglewood can significantly inhibit the proliferation of cancer cell lines, such as human neural cancer (SF-268), breast cancer (MCF-7) and lung cancer (NCI-H460) (Li *et al.*, 2014).

The electroencephalogram (EEG) had been preliminarily recorded by Hans Berger in 1924 (Haas, 2003). Then, it had been widely applied to the practical use for diagnosis in the United States, England, and France (Friess *et al.*, 1994). A new phase for exploration and understanding the activity of human brainwaves was

started from that moment. Brainwaves are approximately divided into four patterns according to the frequencies, which are in the range of 0.5 to 3.5 (Delta), 3.5 to 7 (Theta), 7 to 13 (Alpha), and 13 to 30 (Beta) cycles per second (Hz). Some papers clearly showed that the α wave of an adult is in the main rhythm activity under the quiet and arousal condition. However, it rarely appears in the anxious people, replacing with a more high frequency of β wave (Kiloh *et al.*, 1981). Nowadays, EEG is a new tool for rapid measuring neurological system signals.

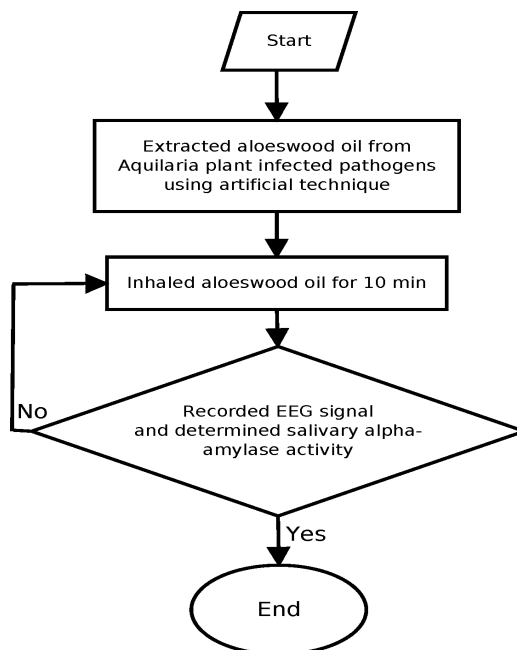
On the other hand, several reports have demonstrated that the release of salivary alpha-amylase (sAA) of humans is related to the autonomic nervous system (ANS) and the sympathetic nervous system (SNS) in particular. As a sensitive non-invasive biomarker for stress-induced changes in the body that reflect the activity of SNS, sAA is a fairly suitable tool at present (Al-Shargie *et al.*, 2016; Sahu *et al.*, 2014). Therefore, the focus of this work is to explore the changes in individual EEG and salivary alpha-amylase activity after inhaling gaharu essential oil and become an assessing indicator of personal mental and physical activity.

2. Materials and methods

2.1 The flowchart for this study

To rapidly understand the experimental procedure, the brief flowchart in this study was outlined as followed.

Fig. 1. The illustrated flowchart of this study.



2.2 Experiment instruments

2.2.1 EEG machine and setup

The equipment of EEG 2000 type (purchased from Mindquest Inc., Taiwan) was used as an EEG collector (Wu *et al.*, 2015; Wu, 2007). Moreover, to obtain the quantification data, the operation of brainwave collector was conducted under the quiet environment and indoor surrounded by interference-free of strong electromagnetic as well as setup directly at FP1, T5, T6, and Fpz points according to the user's manual and the international 10-20 system (Oostenveld & Praamstra, 2001), as shown in Figure 2.

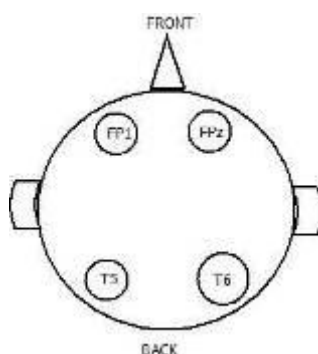


Fig. 2. The diagram of simple electrode of EEG was modified from previous study (Son *et al.*, 2014). Setup the electrodes of EEG, which positions were respectively selected at FP1, T5, T6 and Fpz points, according to the operation instructions of EEG 2000 type machine.

2.2.2 Spectrophotometer and chemicals

The UV-visible spectrophotometer (V-530, JASCO) was used for determining the activity of individual salivary amylase. The chemicals including 3,5-Dinitrosalicylic acid (DNS), soluble starch, and potassium sodium tartrate were purchased from Alfa Aesar Company (USA) and Shimadzu's Pure Chemicals (Osaka, Japan), respectively.

2.3 Procedures

2.3.1 Inhalation of eaglewood essential oil and signal records of EEG

The experimental operation in inhalation of eaglewood essential oil and signal records of EEG were modified from the methods described by Son *et al.* (2014) and Wu *et al.* (2015). Briefly, the operator had to first keep the feelings of calm, cozy, and relax during the tested period. For comparison, keeping close eyes was carried out for 15 min under no fragrance environment. The subject of the individual then inhaled the scent of eaglewood (0.5 g powder) prepared on a hot plate at 200 °C for 10 min under a small study room (2 × 3 × 3 m). Subsequently, the change signals of individual EEG were

recorded under this condition. After experiments finished, the raw data were further assayed using the method of paired t-test. For comparison, the essential oil extracted from the lemongrass plant (*Cymbopogon sp.*) was carried out.

2.3.2 Salivary alpha-amylase activity assay

The assay method of salivary alpha-amylase (sAA) activity was slightly modified from the method described by Hamilton et al. (Hamilton *et al.*, 1998). Briefly, the reaction was started by adding 0.1 mL of saliva enzyme sampled from experimental individual to 0.4 mL soluble starch (1%, w/v) in 0.9% saline solution for one hour at 37 °C. Then the reaction was stopped by adding 0.5 mL of DNS reagent (containing 40 mM 3,5 - dinitrosalicylic acid, 0.4 M NaOH, and 1 M K-Na tartarate). Subsequently, the samples were heated in boiling water bath for 10 min and further allowed to cool down in cold water. For comparison, the DNS reagent was added prior to the substrate solution. After dilution with distilled water (up to 10 mL), the absorption value of optical density (590 nm) was determined by using a spectrophotometer (Model V-530, JASCO, Japan). The reducing sugar produced by enzymatic activity was determined using a standard curve obtained with glucose. Under the reaction at 37 °C, one unit of enzyme activity (U) was defined as the amount of enzyme required to produce 1 µg of glucose from soluble starch per minute.

3. Results and Discussion

3.1 Signal records of EEG

The relative strength value of four patterns including β , α , θ , and δ in the left brainwaves before treated with essential oil was 11.4 ± 1.5 , 38.2 ± 1.4 , 30.3 ± 0.2 , and 19.8 ± 0.4 , respectively (Fig. 3). And the basic values of the right brainwaves were 11.6 ± 1.0 , 41.1 ± 1.1 , 29.2 ± 0.7 , and 17.9 ± 0.6 in order, as shown in Fig. 4. After inhaled eaglewood essential oil for 10 min, somewhat changes of brainwave seemed to exist in the significant difference ($p < 0.05$). Especially, the average promotion proportion of relative strength of α waves were 16.4% in the individual brain, whereas the δ waves of the left brain obviously decreased by 22.9%. In addition, it was also found that there were no apparent differences between the left and right brainwaves while the essential oil of lemongrass was inhaled in the control group (Fig. 5 & 6).

Some researchers have pointed out that the energy consumption of the body and mind is the least when the intensity of the alpha wave is increased. However, the energy obtained by the brain is higher at this time, and the operation of the brain will be faster, smoother, inspired, and intuitive. Some essential oils such as rose and peppermint essential oil also show the effect of relaxation from the observation of EEG records (Liu *et al.*, 2013; Masago *et al.*, 2000).

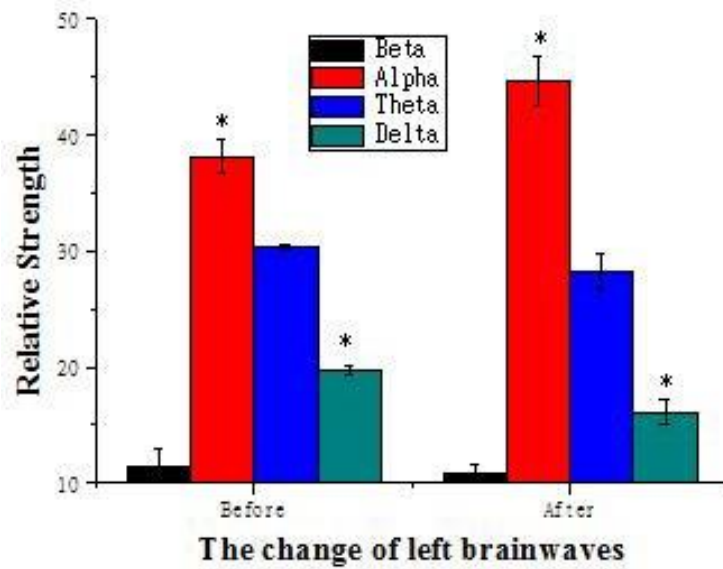


Fig. 3. The EEG changes of left brainwaves after inhaled eaglewood essential oil for 10 min. Values=mean $\pm$ S.D. (n=3, *: $p < 0.05$).

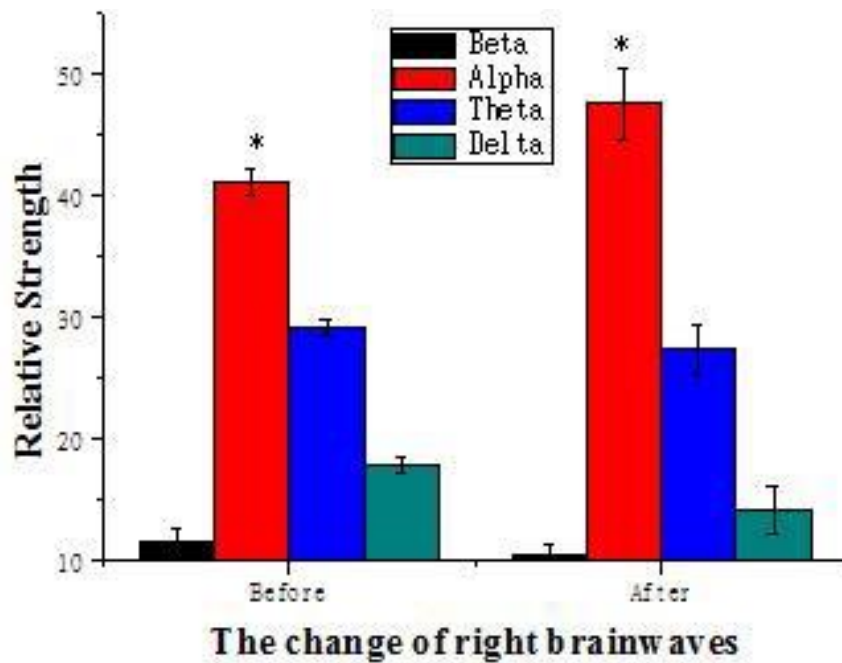


Fig. 4. The EEG changes of right brainwaves after inhaled eaglewood essential oil for 10 min. Values=mean $\pm$ S.D. (n=3, *: $p < 0.05$).

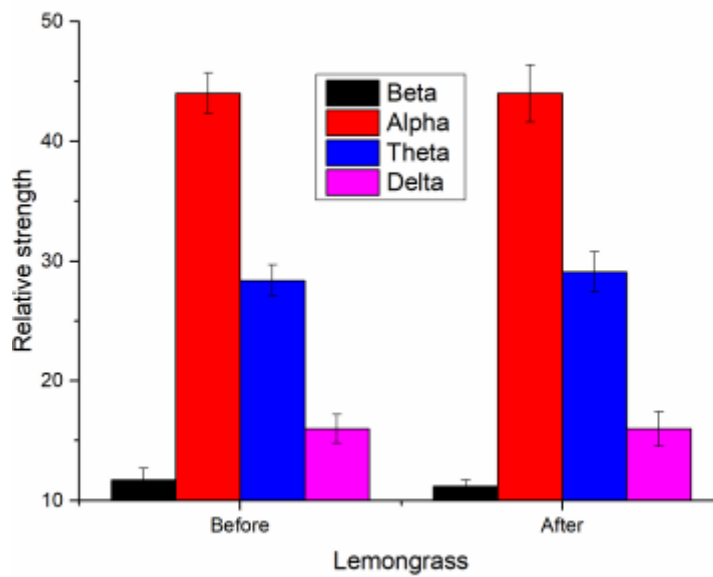


Fig. 5. The EEG changes of left brainwaves after inhaled lemongrass essential oil for 10 min. Values=mean $\pm$ S.D. (n=3).

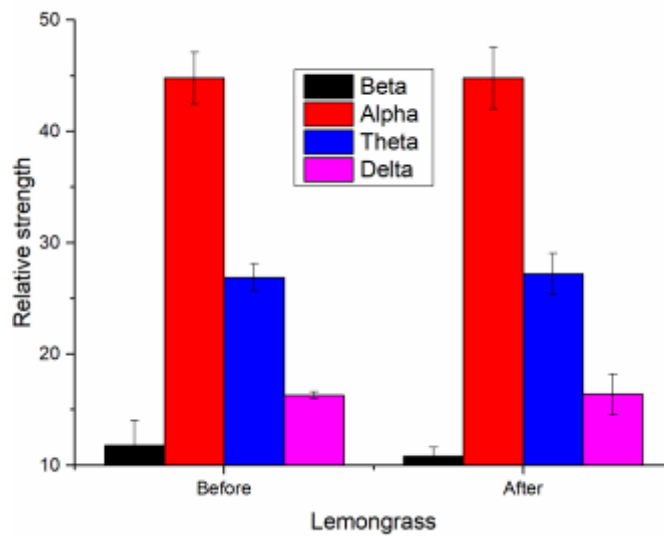


Fig. 6. The EEG changes of right brainwaves after inhaled lemongrass essential oil for 10 min. Values=mean $\pm$ S.D. (n=3).

3.2 Salivary alpha-amylase activity

The standard curve of glucose was obtained at spectrum 590 nm and the coefficient value of R-squared (R^2) was 0.9994, after treated with linear regression analysis. As shown in Figure 7, the activity unit of sAA prior to inhalation of eaglewood essential

oil (EEO) was significantly higher than that of it after inhaled ($p < 0.05$). The reduction proportion of sAA activity was approximately up to 11.2% after inhalation eaglewood. However, there was no significant difference ($p > 0.05$) in the control group of lemongrass essential oil (LEO). Moreover, the evidence seemed to imply that the emotion of individual would get suitable relaxation after smelt the scent of eaglewood essential oil. Recently, several researchers have also considered that the changes of sAA activity depend on the psychological stressors such as indoor environment, gender and age (Sahu *et al.*, 2014; Son *et al.*, 2014; Tahara *et al.*, 2009; Tham & Willem, 2010). Therefore, the evidence in this study is similar to those reports described above.

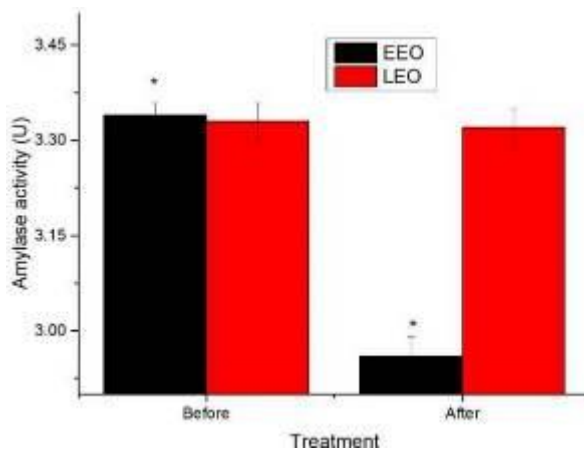


Fig. 7. The changes of salivary alpha-amylase activity (sAA) after inhaled eaglewood essential oil (EEO) and lemongrass essential oil (LEO) for 10 min, respectively. Values=mean $\pm$ S.D. (n=3, *: $p < 0.05$).

4. Conclusion

The evidence of this study showed the changes of physiological indices such as alpha rhythm power of EEG and sAA level to vary on individual mentality indeed. Therefore, the tools seem to have the potential for biomarkers for quickly assessing the effects of sniffing eaglewood essential oils on individual physiological and psychological activities.

References

- Al-Shargie, F., Kiguchi, M., Badruddin, N., Dass, S. C., Hani, A. F. M., & Tang, T. B. (2016). Mental stress assessment using simultaneous measurement of EEG and fNIRS. *Biomedical optics express*, 7(10), 3882-3898.
- Barden, A., Anak, N. A., Mulliken, T., & Song, M. (2000). Heart of the matter: agarwood use and trade and CITES implementation for *Aquilaria malaccensis*. *TRAFFIC International, Cambridge, UK*.
- Dai, H. F. a. M., W.L. (2007). Research on modern medicinal plant in Hainan. (pp. 54-211) Beijing, China Scientific and Technical Publishing House. (2007). *Research on modern medicinal plant in Hainan*. Beijing: China Scientific and Technical Press.
- Friess, E., Bardeleben, U. v., Wiedemann, K., Lauer, C., & Holsboer, F. (1994). Effects of pulsatile cortisol infusion on sleep-EEG and nocturnal growth hormone release in healthy men. *Journal of sleep research*, 3(2), 73-79.
- Haas, L. F. (2003). Hans berger (1873–1941), richard caton (1842–1926), and electroencephalography. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 74(1), 9-9.
- Hamilton, L. M., Kelly, C. T., & Fogarty, W. M. (1998). Raw starch degradation by the non-raw starch-adsorbing bacterial alpha amylase of *Bacillus* sp. IMD 434. *Carbohydrate Research*, 314(3-4), 251-257.
- Kiloh, L., NcComas, A., Osselton, J., & Upton, A. (1981). Normal finding in EEG (ch 4): epilepsy (ch5) in clinical electroencephalography. In: London: Lippincotte.
- Li, D., Chen, Y., Pan, Q., Tao, M., & Zhang, W. (2014). A new eudesmane sesquiterpene from *Nigrospora oryzae*, an endophytic fungus of *Aquilaria sinensis*. *Records of Natural Products*, 8(4), 330.
- Liu, C. W., Wang, C. S., Chuang, K. J., Lo, C. C., & Chen, C. T. (2013). *Electroencephalographic study of essential oils for stress relief*. Paper presented at the Applied Mechanics and Materials.
- Masago, R., Matsuda, T., Kikuchi, Y., Miyazaki, Y., Iwanaga, K., Harada, H., & Katsuura, T. (2000). Effects of inhalation of essential oils on EEG activity and sensory evaluation. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 19(1), 35-42.
- Nasel, C., Nasel, B., Samec, P., Schindler, E., & Buchbauer, G. (1994). Functional imaging of effects of fragrances on the human brain after prolonged inhalation. *Chemical senses*, 19(4), 359-364.
- Oostenveld, R., & Praamstra, P. (2001). The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements. *Clinical neurophysiology*, 112(4), 713- 719.

- Sahu, G. K., Upadhyay, S., & Panna, S. M. (2014). Salivary alpha amylase activity in human beings of different age groups subjected to psychological stress. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 29(4), 485-490.
- Sakuma, K., Kakigi, R., Kaneoke, Y., Hoshiyama, M., Koyama, S., Nagata, O., Takeshima, Y., Ito, Y., & Nakashima, K. (1997). Odorant evoked magnetic fields in humans. *Neuroscience research*, 27(2), 115-122.
- Shang, Z. C. (2008). *Bencao Jing Jizhu* (Edited by H. G. Tao). China: Hsieh Yue Press.
- Sidik, N. A. B. (2008). *Comparison of Gaharu (Aquilaria Malaccensis) Essential Oil Composition Between Each Country*. UMP,
- Son, Y., Choi, Y., Kim, M., Kim, Y., & Chun, C. (2014). *Occupants' stress based on brain waves and salivary alpha-amylase responses on each PMV condition*. Paper presented at the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Indoor Air 2014.
- Tahara, Y., Morito, N., Nishimiya, H., Yamagishi, H., & Yamaguchi, M. (2009). Evaluation of environmental and physiological factors of a whole ceiling-type air conditioner using a salivary biomarker. *Building and environment*, 44(6), 1156- 1161.
- Tao, H. J. (1986). *Famous Doctors*. Beijing, China: People's Medical Press.
- Tao, H. J. (2013). *Mingyi Bielu (Republished)*. China: Chinese Medicine Press.
- Tham, K. W., & Willem, H. C. (2010). Room air temperature affects occupants' physiology, perceptions and mental alertness. *Building and environment*, 45(1), 40-44.
- Tisserand, R. B. (1985). *The art of aromatherapy*. New York: Destiny Books.
- Wu, F. M., & Hsieh, M. H. (1987). *Bencao Beiyao* (Edited by A. Wang). Taipei, Taiwan: Shi-Yi Press.
- Wu, S., Chen, J., Lee, H., & Yao, K. (2015). *Evaluation of impact of various writing tools on individual electro-encephalogram (EEG) characteristics of designer*. Paper presented at the Multimedia, Communication and Computing Application: Proceedings of the 2014 International Conference on Multimedia, Communication and Computing Application (MCCA 2014), Xiamen, China, October 16-17, 2014.
- Wu, S. H. (2007). *Effects of writing practice with a brush dampened ink of four print primary colors on the EEG activities of designer*. (Master). Chao-Yang University of Technology, Taichung City.

空間資訊應用於垃圾車清運點之成效分析-以宜蘭縣羅東鎮為例
Analysis of the effectiveness of spatial information applied to garbage truck collection points-A Case Study of Luodong Town, Yilan County as an example

賴清裕^{1*} 吳至誠²

Ching-Yu Lai^{1*} Jee-Cheng Wu²

1 國立宜蘭大學土木工程學系研究所 碩士班

Graduate student, Department of Civil Engineering, National Ilan University

2 國立宜蘭大學土木工程學系 副教授

Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Ilan University

* Corresponding author: 9610079@mail.e-land.gov.tw

摘 要

垃圾收運是都市衛生與安全的重要工作，掌握更多的動態資訊，配合實地進行模式調整，使垃圾收運管理能達到資訊化與系統化目標。宜蘭縣羅東鎮公所為加強環境清潔整頓，建立清潔舒適的居家環境，重視環境清潔工作，以達到督促改善環境清潔之目的。由於羅東鎮現行垃圾車清運垃圾是固定時間發車，行駛於固定路徑，並在固定時間暫停於固定的清運點，讓鎮民在垃圾車短暫停留時間點內沿街收集垃圾。

空間資訊（Geoinformatics）是 3S 全球定位系統、地理資訊系統、遙感探測(GPS、GIS、RS)整合學理與技術的科技，在以相關科技進行空間資訊蒐集、量測、分析、管理、儲存與顯示。本研究將探討現行路線清運點停留時間適宜性，以及是否能同時兼顧收運效率及節能減碳之目標。在透過地理資訊系統(Geographic Information System,GIS)建立宜蘭縣羅東鎮垃圾車之路徑模型，參考目前垃圾車的收運路線 11 條路徑，配合宜蘭縣政府環境保護局垃圾車車隊管理系統監控，以誤差 5 分鐘以上所占比率清運路線進行分析，探討現行 11 區（11 條路線）收運時間之適宜性、清運點時間清運量、路線總清運量等作為指標，分析調整清運路線收運時間之準確性，以符合實際清運時間，打造羅東鎮整潔舒適的環境，更加符合鎮民需求，提高整體清運收集效率及服務品質之依據。

透過分析進行資料比對結果，找出產生誤差原因，然而不同的收運日會產生不同的垃圾處理量、部分收運路線重疊亦使先經過的垃圾車收運量增加等因素，造成表訂清運時間與實際到站時間的誤差缺失。本研究提供研究數據建議調整行駛路線及到站清運點時間，以求符合民眾需求，提升整體垃圾清運效率。

關鍵字：空間資訊、地理資訊系統、路徑模型、收運路線

壹、前言

「垃圾」是指不需要或者無用的固體或者流體物質，例如都市固體廢物（生活垃圾）、有害垃圾、廢水（如含有糞便和尿的污水和地表徑流）及放射性廢料等等。台灣的人民日常生活產生的一般生活垃圾量，不斷隨經濟發展而成長，只要有大量的生產與消費活動，就會造成了大量的垃圾，因為科技的進步，帶來了很大的環境污染，在日常生活及社會經濟活動中，「垃圾」是人類文明無法避免的產物，它是都市發展中所面臨的棘手問題，因為它是經濟繁榮的指標。

宜蘭縣長期以來被視為「台北的後花園」，以前民眾從台北到宜蘭的公路只有兩條，一是靠山的北宜公路台九線，行車時間約二小時；一是靠海的濱海公路台二線，行車時間約三個小時。對於往返兩地的民眾來說，由於山脈的阻隔，拉長了交通時間。北宜高速公路完工通車後，台北到宜蘭的交通時間將從原先的二、三個小時，大幅縮短為四、五十分鐘，成為大台北都會區範圍內。北宜高速公路通車所造成的衝擊不只提供民眾行的方便外，也加速蘭陽地區產業及觀光旅遊的發展，間接的影響到縣內市區交通與環境問題。

宜蘭縣羅東鎮面積僅 11.3448 平方公里，位於宜蘭縣內中部偏東，北瀕蘭陽溪，東北與東鄰五結鄉，南與西鄰冬山鄉，西北鄰三星鄉，行政區域位置。是臺灣本島面積最小的縣轄行政區（鄉、鎮、縣轄市），亦是全國面積最小的鎮，行政區域內有 23 里，人口數為 71,516（羅東戶政事務所 109 年 10 月底人口統計數），人口密度約為 6,304 人/km²，為全國人口密度最高且唯一逾 5,000 人/km²的縣轄行政區。羅東鎮是宜蘭地區的中心商務區，也是溪南各鄉鎮的主要生活購物中心，是商業與觀光重鎮，若結合衛星城市，市區人口約達 12 萬之眾。每逢週末、假期總是聚集各地觀光客，經濟狀況十分蓬勃。

羅東鎮因國道五號雪隧通車後，提升了地區的聯繫，刺激鄰近人口成長、產業活動增加、觀光事業發展及經濟成長等相關因素等影響，除產生日益嚴重的交通問題，也相對帶來環境的衝擊，垃圾量的爆增，影響垃圾收運時間。「誤點」常引發不少民眾抱怨，垃圾車誤點原因有不同的收運日垃圾超量、人為及交通因素，因此增加清運的時間。隨著資訊科技的快速發展，應用資訊科技的情況也越愈來愈普遍，因應年輕族群生活型態需要，導入行動垃圾車概念，在垃圾車上裝置全球衛星定位系統，無線通訊與地理資訊系統等科技，宜蘭縣政府環境保護局也建置宜蘭垃圾車查詢系統（<http://clean.ilepb.gov.tw/YLRtCQS/>），在 104 年 6 月正式上線，整理完後再做線上資料庫的管理，除了讓民眾能夠方便查詢，政府單位也能掌握資料並加以分析，讓民眾精確掌握車輛行蹤，提供縣民更完整、全面的資訊。「準確掌握垃圾車抵達時間」是民眾對於生活的期待。但裝 GPS 顯示清運路線垃圾車表定到達時間不固定，等著誤點的垃圾車，造成鎮民的不方便及抱怨。羅東鎮市區垃圾清運因人口、巷弄密集，垃圾車行駛車速緩慢，倒垃圾的人習慣上以表定時間為原則，聽到音樂出來倒垃圾為常態，對於誤點一事尚能夠體諒垃圾車工作的辛苦，應用宜蘭垃圾車查詢系統即時動態，似乎較少人使用。

APP 的使用大多是年輕人，長輩對科技產品接受度比較低，還是習慣提早出來等或聽到垃圾車音樂再衝出門。本研究以宜蘭縣羅東鎮公所清潔隊垃圾車收運為案例，以現行收運路徑模型，依各項指標進行分析，將實地統計資料帶入分析，進一步調整行駛路線到站清運點時間，以求符合鎮民需求，提升整體垃圾清運之效率。

貳、實驗方法

根據宜蘭縣政府環境保護局垃圾車隊管理系統每季各公所清運點時間誤差 5 分鐘以上所占比率、宜蘭縣垃圾車管理系統執行扣分彙整表及相關資料進行資料統計分析，並藉由蒐集羅東鎮各路線垃圾相關清運處理量、空間資訊應用、路線規劃分析等方面，整理分析檢討各不同收運日工作負荷量、清運路線重複之路段及無效率之路段，是否對清運量增減造成時間誤差的影響，找出影響因素，提出解決方案，提升未來清運路線收運效能及收運時間的準確性，做為建議意見之基礎。

本研究作業模式，內容為蒐集 108 年第 3 季至 109 年第 3 季羅東鎮 11 區（11 條路線）清運點時間誤差 5 分鐘以上所占比率及宜蘭垃圾車管理系統執行情形扣分彙整表及相關資料統計分析；羅東鎮 108 年 7 月 1 日起至 109 年 9 月 30 日止，11 區（11 條路線）垃圾及回收物平均「日」處理量統計分析；選擇現行 1 條清運點誤差 5 分鐘以上所占比率異常清運路線，針對重疊路徑停留點垃圾及回收物，進行資料比對分析；藉由探討分析影響因素找出改進方案，改善清運點到站時間準確性減少誤差情形，進而提升清運路線收運效率，加強為民服務的品質。

參、結果與討論

一、清運點停留時間誤差分析

宜蘭縣政府環境保護局於每年每季針對縣轄 12 鄉、鎮、市垃圾車清運點清運時間誤差 5 分鐘以上所占比率進行統計，每季抽檢一周（5 天）計算清運點準確性，彙整相關資料後請各公所評估調整轄內清運點表定時間，以符合實際清運時間。本研究資料系依據宜蘭縣環境保護局所提供該項清運點清運時間準確性數據進行彙整研究，

彙整各路線自 108 年第 3 季至 109 年第 3 季清運點清運時間誤差 5 分鐘以上所占比率，（如圖 1）比較各路線清運點清運時間誤差統計，發現第一區（2.5%~15.9%）最為穩定，誤差值皆低於 30%。第七區 108 年第 3、4 季誤差值為 75.8%、82.1%，109 年調整後第 1~3 季誤差值已下降至 30%~37.1%。第四區清運點清運時間誤差呈現不穩定狀態，即起伏性較大，在 108 年第 3 季誤差值 78.3%、108 年第 4 季誤差值 80.9%，109 年調整後第 1 季有明顯降低誤差值至 33.3%，但 109 年第 2 季逐漸上升誤差值至 52.6%、109 年第 3 季又上升誤差值至 77.8%，恢復接近原 108 年第 4 季 78.3% 之誤差值。第六區及第八區原本誤差值在 36.4%~43.8% 之間，自 109 年調整後第 1~3 季有明顯升高誤差值在 62.6%~73.9% 之間，其他路線誤差值則沒有較明顯的差距。針對 108 年每季誤差值較大所占比率之路線，經評估後調整 109 年轄區清運點表定時間運行後亦呈現不穩定狀態。沒有用嚴謹客觀的方法分析，僅憑主觀的經驗評估，針對所影響誤差因素產生之數據來修正調整清運點表定誤差時間，其準確性及誤差值未能顯現穩定改善狀態。

為因應垃圾不落地政策，各縣市發展出沿固定路線的清運方式，羅東鎮為讓長者及婦孺有更安全的垃圾清運環境，規畫垃圾定時定點清運，於 109 年第 3 季（109 年 7 月 1 日起至 9 月 30 日止），選擇位於市中心商業區第十一區（公正、集祥、開明里）試辦定時定點清運垃圾，試辦期間有 3 天在行駛路線中因逢遇廟會、車禍處理及嚴重堵車，影響到站觸發時間誤差 5 分鐘以上，致影響本路線誤差比率，但總誤差比率平均為 28.2%，低於 30.0% 誤差值，排除上述影響因素，誤差情形可達最佳合理範圍內。

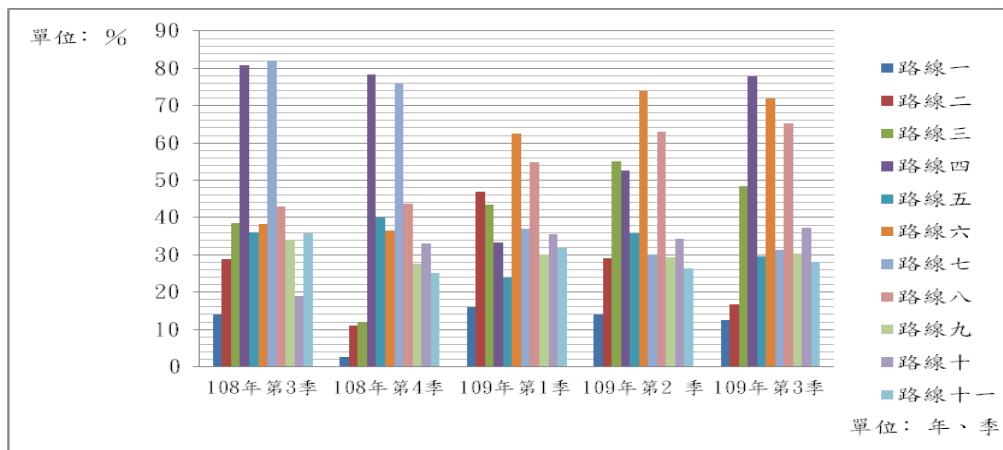


圖 1 十一區各季清運點清運時間誤差統計圖

二、清運量統計分析

垃圾減量政策、清理管理、回收制度是我國垃圾清理三大政策，以「源頭減量、資源回收」為主要。「垃圾不落地」之政策，夜間垃圾清運以家戶產出廢棄物垃圾及資源回收物為主，垃圾車搭配資源回收車為一組進行垃圾清運工作。採定時、定線、定點收運，當垃圾車到達收運區時停留數分鐘，民眾在聽見音樂旋律後，攜帶垃圾步出家門，分別將垃圾及資源回收物分類投擲於垃圾車及資源回收車上，共同維護環境、落實清淨家園，提升社區民眾生活美學。

（一）垃圾車清運量統計分析

宜蘭縣自 95 年 2 月 16 日起，實施「垃圾強制分類、資源物粗分類及周休二日」政策，統一全縣垃圾收運及資源回收日為每週 5 日，星期三和星期六，停止收運 2 天，造成星期四、星期日兩日垃圾量平均增加約 60%處理量（如圖 2）；不同的收運日垃圾有不同的收運處理量，處理過程也會直接影響到收運時間誤差的產生。綜理統計資料結果，以下為各區垃圾「日」平均處理量排序：

- 1. 第八區：6,029 公斤 2. 第四區：6,016 公斤 3. 第二區：5,830 公斤
- 4. 第十一區：5,753 公斤 5. 第三區：5,725 公斤 6. 第六區：5,625 公斤
- 7. 第十區：5,107 公斤 8. 第七區：5,048 公斤 9. 第九區：4,579 公斤
- 10. 第五區：4,489 公斤 11. 第一區：4,427 公斤

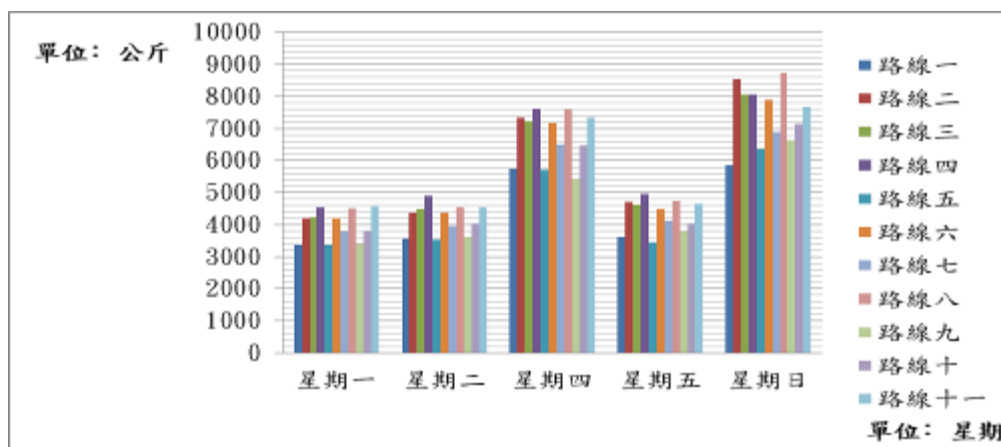


圖 2 十一區垃圾平均日處理量比較圖

(二) 資源回收車清運量統計分析

- 資源回收車乃配合垃圾車清運時間及規劃路線沿途一前一後作業，資源回收物因星期一、五回收廢紙類、舊衣類、廢玻璃類...等回收物質實體重量較重；星期二、星期四、星期日清運資源回收物為紙餐盒紙容器、廢鋁鐵罐、廢塑膠類...等回收物質實體重量較輕。資源回收物因收運日期及回收物種類不同，且與垃圾車搭配清運，主要以垃圾車收運垃圾為主，所以無法以重量區別收運處理量的增減。綜理統計資料結果（如圖 3），以下為各區資源回收物「日」平均處理量排序：

- 1. 第二區：834 公斤 2. 第十一區：833 公斤 3. 第九區：827 公斤
- 4. 第十區：766 公斤 5. 第三區：759 公斤 6. 第四區：734 公斤
- 7. 第五區：655 公斤 8. 第一區：653 公斤 9. 第七區：651 公斤
- 10. 第八區：637 公斤 11. 第六區：610 公斤

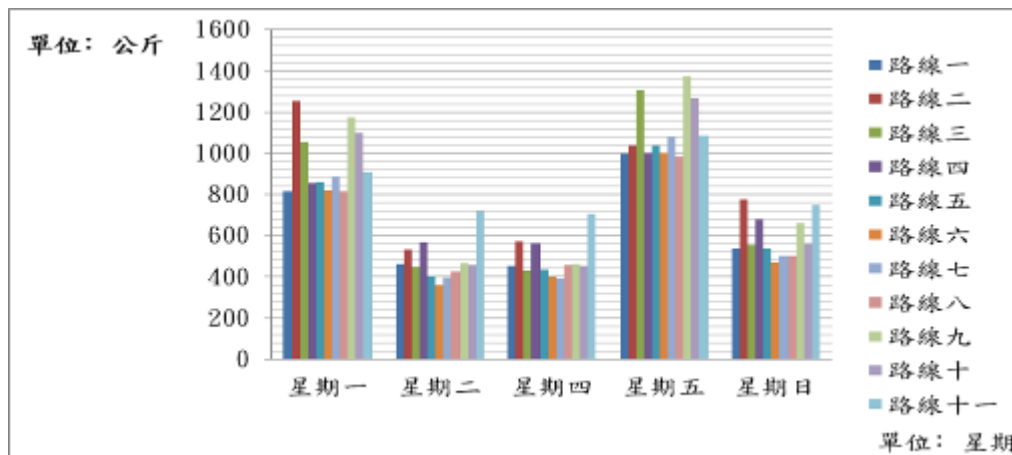


圖 3 十一區資源回收物平均日處理量比較圖

(三) 垃圾清運點路徑分析

垃圾車由停車場出發執勤前，需點擊登入宜蘭縣政府環境保護局垃圾車車隊管理系統，掃描司機編號條碼及當日收運路線條碼，監控台可看到所有車輛的狀態。

- 十一區清運路線以第四區最早（15：26）發車到站觸發，因第一趟收運行駛路線需經過市中心羅東夜市，為避開夜市攤商進場擺攤時間，因此就其他十區路線提早 1 小時 4 分~1 小時 39 分發車收運垃圾。第二趟作業範圍主要在成功國小周圍住宅區域，因第一趟較其他路線提早收運，所以第二趟第一站到站觸發時間 18：08 亦較其他十條路線提早 1 小時 7 分~1 小時 58 分發車收運垃圾。
- 羅東鎮十一區清運路線圖各清運路徑及清運點有部分重疊，在路徑規劃上不盡完善，非清運路徑（過境）重複行駛，增加行車里程（無效）、作業時間，浪費人力疲憊及車輛機具耗損，除上述因素會造成清運時間誤差原因之外，尚可預知因堵車（車禍、活動及假日）亦會造成到站誤點。

由圖 1 十一區各季清運點清運時間誤差統計圖比較各清運路線清運點清運時間誤差統計，發現第四區各季清運點清運時間誤差值顯示呈現不穩定狀態，起伏性較大，且本路線第一趟因行駛路線在市中心夜市區域範圍內的巷道，第二趟跨越兩個里，行駛路徑里程較長。因此本研究選擇第四區（成功、南豪、集祥、中山）進行清運點路徑分析。綜上分析路線因前進方向不同路徑重疊（如圖 4、圖 5），本區路線比其他區路線提早到達，對面收運路線居民會提早跨越道路至本收

運點丟擲垃圾，羅東鎮市區道路狹小，垃圾清運密集，第四區收運路徑增加、造成其他路線無效率之行駛路徑。



圖 4 第四區第 1 趟與其他重疊路線收運圖 圖 5 第四區第 2 趟與其他重疊路線收運圖

肆、結 論

本研究考量清運績效，針對垃圾收運量、固定收運日期差別、清運點到站時間、假日及活動道路使用…等因子，分析其空間性及影響清運到站時間的程度，所造成空間上的差異，作為改善清運點到站時間產生的誤差重要依據。

經蒐集分析 108 年的 3 季至 109 年第 3 季羅東鎮 11 區清運點誤差 5 分鐘以上所占比例及宜蘭垃圾車管理系統執行情形扣分彙整表，發現調整預估到站時間尚存有其他影響因素造成不穩定。

另分析垃圾車及資源回收物處理量，不同的收運日有不同的收運處理量，從第四區表定時間與 109 年 1~3 季到站觸發時間對照發現，雖然增加垃圾處理量，但終點到站時間是提早到站 5 分鐘以上所產生的誤差值，不是延遲到站超過 5 分鐘以上的誤差值，所以處理量不是造成誤差的原因。

檢視羅東鎮十一區清運路線，發現清運路徑及清運點有部分重疊，規劃上不盡完善，經擇第四區作為垃圾清運點路徑分析，明顯看出清運路線與鄰近路線之行使路段與鄰近他區部分收運點有嚴重重疊情形，該清運重疊點使他區垃圾收運量減少，所以增加本區收運工作量，加上有些中途清運點到站時間已拉開差距超過 5 分鐘以上，到站時間都提早超過 5 分鐘，造成到站觸發清運時間產生誤差，應該依據垃圾車管理系統執行情形全面分析檢討表定時間。

建議羅東鎮公所採行原試辦定時定點清運垃圾方式，第一趟及第二趟各選擇 5-8 個定時定點清運點（視路程、距離而定），點與點之間仍保持沿途收運，到達定時定點清運點時延長停留時間 10 分鐘接受民眾丟擲垃圾，有助於改善清運點誤差情形，垃圾車與資源回收車隨車人員於定點收運時車輛靜止狀態下，執行收運任務，讓民眾更安全，清潔隊員執勤時能於安全環境中作業。

參考文獻

- [1] 林冠宇 (2006):「垃圾車收運範圍劃設之研究-以台中市南屯區為例」，朝陽科技大學碩士論文。
- [2] 黃宥禎 (2007):「廢棄物清運績效綜合指標」，國立交通大學碩士論文。
- [3] 趙育隆，2007，都市垃圾清運方式對資源回收量影響之時間序列分析：以垃圾不落地措施為例，都市與計劃，34 卷 2 期，P117-137。
- [4] 陳怡廷 (2016):「應用本體論於空間資訊描述地理定位之研究」，逢甲大學碩士論

文。

- [5] 曾佳媛 (2016):「垃圾清運路線規劃之探討—以羅東鎮公所為例」, 醒吾科技大學碩士論文。
- [6] 葉承宗 (2017):「利用公車動態資料推估公車到站時間之研究」, 國立交通大學碩士論文。
- [7] 鍾惠存、黃庭裕、張惠琳、陳園全, 2018, 臺北市道路擁擠路段預測之分析, 都市交通, 33 卷 2 期, P36 - 48。
- [8] 胡凱傑、蔡云軒, 2019, 整合 Kano 模式、IPA 與目標困難度探討市區公車服務品質改善策略: 以台北市為例, 運輸學刊, 31 卷 3 期, P265-295。
- [9] 沈宗緯、洪迎哲、林雨萱, 2019, 最鄰近點為準之集群調整法於求解具容量限制之車輛途程問題, 運輸學刊, 31 卷 4 期(2019/12/30), P449 - 480。
- [10] I.I. Lyubimov, A.N. Melnikov, N.A. Trubin 2016, The Control System Improvement of the City Motor Transportation, Procedia Engineering 150 ,pp.1192 - 1199.
- [11] Wu, Y. , Yang, H. , Tang, J. & Yu, Y.,2016, Multi-objective-re-synchronizing of bus timetable: Model, complexity and solution. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,67,pp.149-168.
- [12] Khanh Nguyen-Trong, Anh Nguyen-Thi-Ngoc, Doanh Nguyen-Ngoc, Van Dinh-Thi-Hai, 2017, Optimization of municipal solid waste transportation by integrating GIS analysis, equation-based, and agent-based model, Waste Management 59 ,pp.14-22.
- [13] Mohammad Hadi Dehghani, Maral Fanaei Mosavi, Ali Asghar Ale-Sheikh, Zoha Heidarinejad, Mahmood Yousefi, 2018, Experimental data of designing an optimal system for storage, collection and transfer of household waste in the GIS environment: A case study of Tehran, district 22,Iran, Data in Brief 19 ,pp.1605-1613.
- [14] Sujitra Vassanadumrongdee, Suthirat Kittipongvises, 2018, Factors influencing source separation intention and willingness to pay for improving waste management in Bangkok, Thailand, Sustainable Environment Research,28 ,pp.90-99.
- [15] Tao, C., Qi, J., Li, Y., Wang, H., Li, H., 2019, Spatial information inference net: Road extraction using road-specific contextual information, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 158 ,pp.155-166.
- [16] Oguzhan Erdinç, Kaan Yetilmezsoy , Ays,e Kübra Erenoglu, Ozan Erdinc, 2019,Route optimization of an electric garbage truck fleet for sustainable environmental and energy management, Journal of Cleaner Production 234,pp.1275-1286.
- [17] Qiu, Y., Wu, Y., Liu, R., Wang, J., Huang, H. & Huang, R., 2019, Representation of human spatial navigation responding to input spatial information and output navigational strategies: An ALE meta-analysis, Neuroscience and Biobehavioral Reviews 103 ,pp. 60-72.
- [18] Catherine Xiaocui Lou, Jiangtao Shuai, Liuhong Luo, Hongjun Li ,2020, Optimal transportation planning of classified domestic garbage based on map distance, Journal of Environmental Management 254 , 109781.

無人飛行載具應用於優先關注邊坡防避災功能之探討
Discussion on the application of unmanned aerial vehicles to give priority to slope prevention and avoidance

胡琮琛^{1*} 吳至誠^{2*}

Tsung-Chen Hu¹ Jee-Cheng Wu²

1 國立宜蘭大學土木工程學系研究所 碩士班

Graduate, Department of Civil Engineering, Natinal Ilan University

2 立宜蘭大學土木工程學系 副教授

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Natinal Ilan University

* Corresponding author: r0621010@niu.edu.tw

摘 要

台灣歷年因颱風災害頻繁，常造成重大災害引發人民傷亡事件。公路總局致力於蘇花公路山區省道邊坡防災措施，透過現行邊坡地形分級與利用「落石災害評分系統(RHRS)」進行細部定量評估。現今導入科技巡檢(即運用無人飛行載具、空載或地面光達等科技設備)針對中高風險等級(四、五級)的「優先關注邊坡」委外辦理進階檢測，並建置數位化圖資，以提供後續邊坡及處理方式之評估。

引用公路總局以無人飛行載具(UAV)科技巡檢方式，針對優先關注邊坡進行勘測。拍攝災後邊坡運用現行制度及科技設備如何達到有效預警及減災功能。利用RHRS細部定量評估進行邊坡分級，並將中、高風險等級邊坡命名為「優先關注邊坡」。比對分析災害前後邊坡變化量、發生落石原因、邊坡地質影響力以及植被覆蓋量等。由檢測數據建立 3D數位模型，以利爾後邊坡防護工程的應用。

針對台 9 丁線 13K+082、13K+945 兩處邊坡發生落石災害處，從UAV航拍發現兩點：(1)落石發生區植坡稀鬆且鄰近有侵蝕溝，(2)地下水從發生區周圍岩壁中滲出。有此可見，透過無人機進行勘測空拍，可以有效且即時的察覺邊坡可能再次發生災害的危險區域，提供工程單位能對危險區域預先施作防護工程，以達到降低危害公路安全的目的。

關鍵詞:無人機、優先關注邊坡、防避災

壹、前言

台灣最危險山區公路-蘇花公路。時常因天災問題，發生許多人身意外。公路總局積極逐年改善所管轄山區省道邊坡的防災設施，有效大幅提升山區公路防避災能力，透過現行制度進行邊坡細部評估，再導入科技設備檢測，研擬委託評估及邊坡檢設方式與後續處理維護方針。

貳、實驗方法

2-1 無人飛行載具

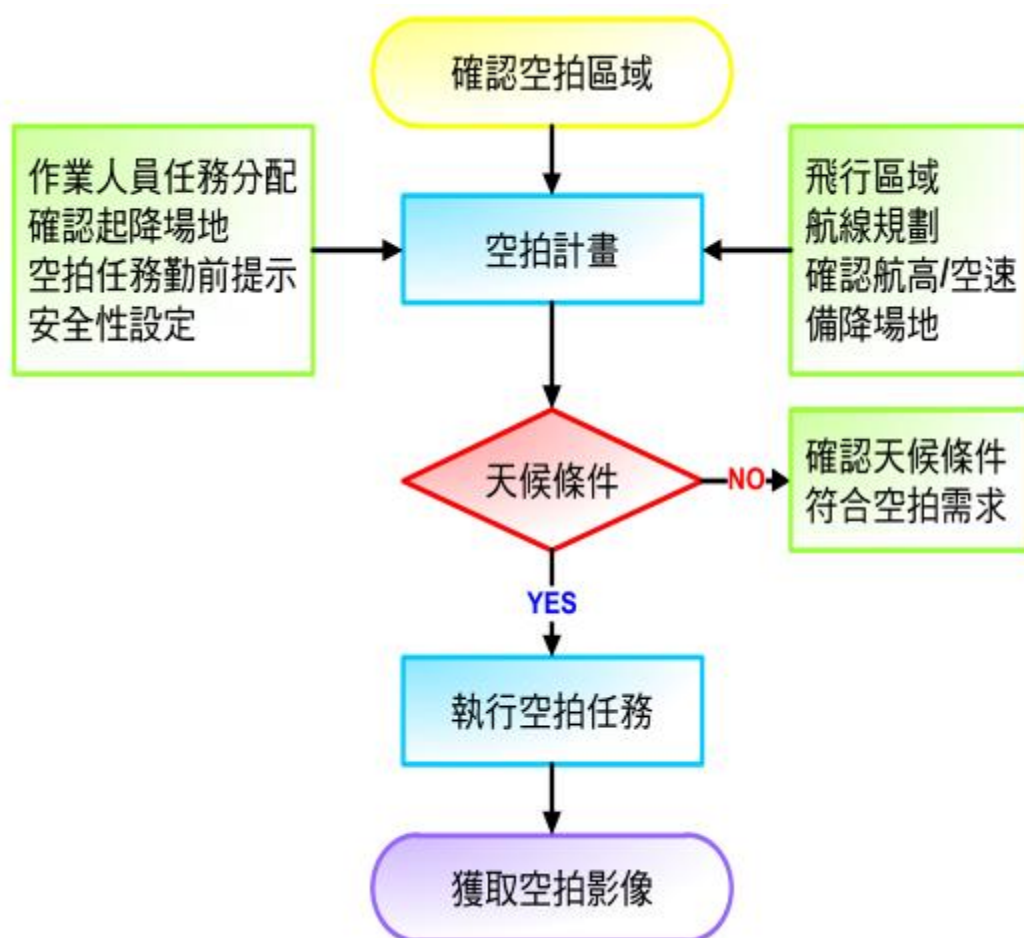
1. 本研究使用之無人機種為大疆創新科技有限公司(Da-Jiang Innovations, DJI)開發之四軸無人載具，型號為Phantom 4 Advanced。該無人載具之全球定位系統搭載了美國GPS與蘇聯GLONASS雙系統模式，鏡頭雲台視野(FOV) -90° 至 $+30^{\circ}$ ，感光元件大小為1英寸CMOS，影像拍攝解析度則為2000萬畫素，攝像時之機械快門為 $8 \sim 1/2000$ s，若電子快門速度則為 $8 \sim 1/8000$ s。如圖1-1及表1-1所示。
2. 利用UAV航拍作業，先行現場會勘災害地點及位置，從而規劃空拍計畫。儀器設備完畢後，等待天候因素許可，方可進行空拍作業。
3. 使用Acute3D所發展的Context Capture Center進行UAV資料處理，可進行空中三角平差、率定，支援輸出DEM、DSM、彩色點雲、正射影像。並將獲取之影像圖片進行3D模型數位化圖資，以便災後修補以及預防措施。應對往後災害發生時，能夠在最短的時間內，做出最有效的防護功能。UAV作業流程圖如圖1-2所示。



圖 1-1 DJI P4 Advanced 實機照(資料來源:交通部公路總局四工處南澳段)

表 1-1 DJI P4 Advanced 技術規格(資料來源:交通部公路總局四工處南澳段)

機長	289.5 mm
翼展	350 mm
高度	196 mm
機體重量	0.9 Kg (不含電池)
有效酬載	0.468 Kg
最大巡航空速	72 km/hr
最大飛行重量	1.368 Kg
最大飛行高度	6000 m
續航里程	10 KM
滯空時間	30 分鐘
類型	一英吋 CMOS
像素 (有效像素)	2000 萬像素
錄影解像度	可到 4K



參、結果與討論

3-1 UAV 航攝作業

1. 無人載具拍攝應記錄飛行軌跡(含自動化飛行軌跡檔)，像片之地面解析度需優於每像素100 mm，重點位置以每像素50 mm 為原則。解算數值地表模型之缺失部分不得位於地形地貌變異重點位置，缺失部分合計面積不得超過每處測繪監測範圍千分之五(以水平投影面積計算)，且道路檢核線上各點位高程誤差不得超過50 mm，所有點位的高程均方差不得超過100 mm，所建置 DSM 精細度應足以觀察災害事件之地貌變異及分析地形變化。
2. 無人機搭載之像機應經率定校核，採精細模式產製數值地表模型，並提供模型檢視檔案及展示程式。無人機拍攝像片產製之數值地表模型需後處理至可與航空像片產製模型相容比較之格式及精度，可於通用之地理資訊系統軟體執行空間分析等相關功能。
3. 空拍影像後製處理及判釋分析：每次勘查任務後需對取得勘查影像進行資訊分析、災情量化及圖檔標示作圖等作業。a.靜態數位影像檔：彩色數位影像檔畫素至少大於1,500萬畫素（像片沖洗尺寸 A3），每次任務執行後每一勘查點至少選擇2~4張較具代表性點位做彩色數位影像電子檔進行後製處理作業及作圖標示。b.動態數位影像檔：彩色數位影像檔畫素至少為 Full HD，對原始成果動態影像檔剪輯較具代表性點位畫面並視需要適時搭配字幕，每次任務執行後每一災害點至少提供至少5~10分鐘經後製處理作業之動態攝影電子檔。

3-2 UAV 模型成果

1. 本研究執行台9丁線13K+082及13K+945共兩處邊坡，進行邊坡防避災分析。引用公路總局委託相關廠商進行邊坡定量分析，將該分析結果報告做對等比較兩處邊坡是否能夠符合定量分析之結論，亦能達到邊坡防避災能力。航拍3D 模型截圖，如圖2-1及圖2-2所示。
2. 經由前述調查與判釋後，針對台 9 丁線 13K+945、台 9 丁線 13K+082 等兩處邊坡進行討論，整合潛在不穩定邊坡破壞模式皆屬岩石邊坡且災害類型屬落石之邊坡型態，亦於科技巡檢中，判釋出岩體倒懸區位、蝕溝側蝕下切區位、浮落石位置，以及量測危石量體大小、落距高度與發生區面積大小等資訊，因此以下針對落石致災後續關注異狀項目、後續維護、補強與整治工法進行建議說明。落石依其成因之形態可分為滾動型與剝離型，分述如下：
 - (1) 滾動型：表層土或固結於土層中含有卵石、礫石、岩塊等因受地表水的沖蝕、地下水的滲透與滲蝕而浮出表面，並使周圍之土壤軟化，致使失去平衡而落下。滾動型落石大多因降雨、融雪時發生。如圖 2-3 所示。
 - (2) 剝離型：節理發達之岩層，因風化、地表水、或地下水滲入岩層裂縫，降低岩石之結合力，或水受凍結致使裂縫擴大，終而剝離落下。同樣也受地震及樹根侵入岩石裂縫影響。如圖 2-4 所示。台 9 丁線 13K+945、台 9 丁線 13K+082 兩處邊坡研判屬此類型。



圖 2-1 台 9 丁線 13K+945 災害後 3D 建模(資料來源:交通部公路總局四工處南澳段)



圖 2-2 台 9 丁線 13K+082 災害後 3D 建模(資料來源:交通部公路總局四工處南澳段)

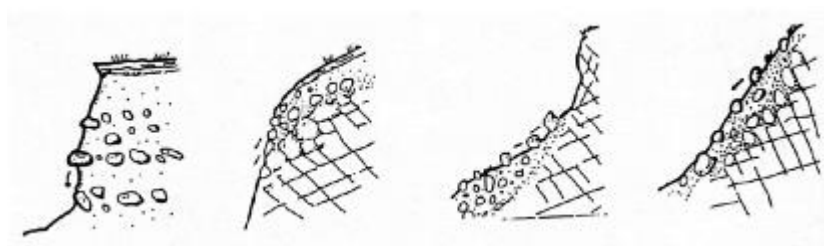


圖 0-3 滾動型落石成因示意圖(資料來源:交通部公路總局四工處南澳段)

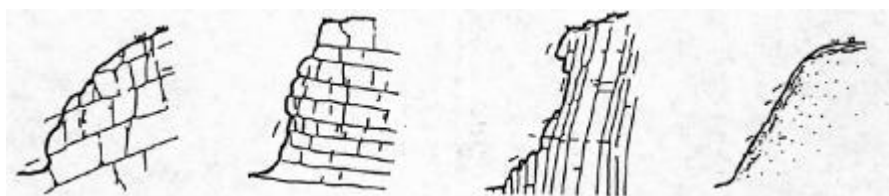


圖 0-4 剝離型落石成因示意圖(資料來源:交通部公路總局四工處南澳段)

肆、結論

根據本研究數據顯示，13K+945 以及 13K+082 兩地皆屬於剝離型落石。依照公路總局自辦邊坡檢測結果比對，邊坡的災害成因主要來自颱風、降雨、地震等。由於預測災害設備及預防措施的作為，並不能有效防止災害發生。近年來極力研究如何將受災區域縮小，也在已災害發生區加設邊坡掛網及邊坡防護措施。將危險區域劃分管理，增強維護頻率及修繕措施，以達到近乎零災害的環境。但因台灣地理環境影響，時常發生天災，災害的預防與災後的修繕一直以來都是國家關切注重的議題。

參考文獻

- [1] 陳進發(2018)：落石災害評分系統於省道邊坡分級管理之應用, 交通部公路總局臺灣公路工程第 44 卷第 10 期。
- [2] 陳榮河、林美玲、林銘郎（1996），台灣區道路落石坍方之危險度分級準則及防治改善工法研究，交通部科技顧問室委託，第 22-43 頁。
- [3] 經濟部中央地質調查所（2010），「高山聚落 地區環境地質資料庫圖集」。
- [4] 林雪美、洪政耀(2008)：坡地災害系統與災害視覺關聯之探討，2008 臺灣災害管理研討會論文集，47-48。
- [5] 洪如江(2009)：坡地災害防治，水利土木科技資訊季刊，46：7-16。
- [6] 陳禹銘、蘇昭郎、黃詩倩(2009)：災害風險評估研究之探討，災害防救電子報，48:1-10。
- [7] 方仲欣(2020)：工程邊坡的健康管理，科學發展第 571 期。
- [8] 交通部公路總局(2021)：公路總局邊坡維護管理制度，邊坡維護管理制度會議。
- [9] 高國書(2015)：山坡地落石防護網系統維護管理階段之探討，中國科技大學土木與防災設計系研究所碩士論文。
- [10] 黃韋凱、李璟芳、楊豐毓、邱俊榮(2019)：山區公路邊坡潛在抑制災區位多尺度評估-以台 9 線南迴公路為例，中興工程第 145 期，55-67。

有機剩餘資材資源化之循環經濟平台 The circular economy platform for resourcization of organic solid wastes

吳俊毅^{1*} 張美玲² 王振興³

Jun-Yi Wu¹ Mei-Ling Chang² Jenn-Shing Wang³

1 遠東科技大學機械工程系 副教授

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Far East University

2 遠東科技大學休閒運動管理系 助理教授

Assistant Professor, Department of Leisure and Sports Management, Far East University

3 遠東科技大學機械工程系 特聘教授

Distinguished Professor, Department of Mechanical Engineering, Far East University

* Corresponding author: jeanswu@mail.feu.edu.tw

摘 要

在農產加工過程中，衍生許多農業有機剩餘資材，如禽畜糞、枯枝落葉、粗糠、咖啡渣、植菇太空包等。此外食品加工廠的下腳料、有機污泥、廢棄蛋殼、廚餘、豆渣、酒糟等。資源化途徑為回收後，生產有機肥料或飼料添加料，但礙於技術門檻無法提升、處理成本相對高以及後端去化能力無法多元。本團隊建議透過循環經濟平台，建構發展以有機剩餘資材處理廠為主軸，系統化分類、分選、摻配、轉質與加值化開發多元產品與新商業模式，包括(1)固態再生燃料(SRF)轉換蒸氣與電力等綠色能源的收入，(2)透過快速製肥程序，以多樣微生物作為催化劑，調整有機質、碳氮比、含水率、反應溫度、pH 與電導度等多項參數，於 8 小時內製成有機肥料回歸農地使用，(3)調整有機資材、粗纖維、粗蛋白與粗脂肪等成分，製成飼料添加料供禽畜養殖，轉成飼料、食料、農業(養殖)剩餘資材等循環再利用以及(4)系統平台之服務與管理，完成循環產業，重拾蓬勃孕育的經濟平台。

關鍵詞：有機剩餘資材、快速製肥、固態再生燃料、肥料、飼料添加料

壹、前言

循環經濟為永續生存且帶來正面影響的生產製造方式，它並非只是單純的資源回收，或是降低負面衝擊，而是儘可能全盤考量。由於台灣無天然礦產資源，超過90 %的能源與資源皆須仰賴進口，在資源供需與價格雙重波動影響下，除了浪費資源且易造成環境生態失衡。國內長期侷限於「低價在地資源」與「有限經濟規模的消費市場」的困境中，既無法掌控能源與原料，也缺乏終端消費市場的支撐力道。

有機剩餘資材種類繁多如桔梗、粗糠、枯枝落葉、果菜渣、植菇太空包、禽畜糞等農業有機資材與食品加工廠、中央廚房與蛋品廠產生的下腳料、咖啡渣、豆渣、酒粕、有機污泥、廚餘與廢棄蛋殼等。上述由於含水率高、種類多且成分複雜、易腐敗臭味逸散等難以處理問題，若經由掩埋場及焚燒處理成本高且浪費資源與燃料，縮短掩埋場與焚化爐壽命，同時造成二次污染。礙於傳統堆肥場帶來的惡臭、醱酵時間冗長等問題，附近居民抗爭，使得堆肥場難以持續營運，在新設堆肥場越來越不容易取得許可設立情況下，亟需發展創新資源化技術、開發多元能資源產品應用與建構循環經濟平台。本團隊整體規劃多元有機剩餘資材透過多項專利技術，創造多元產品和應用以及循環經濟架構如圖1。

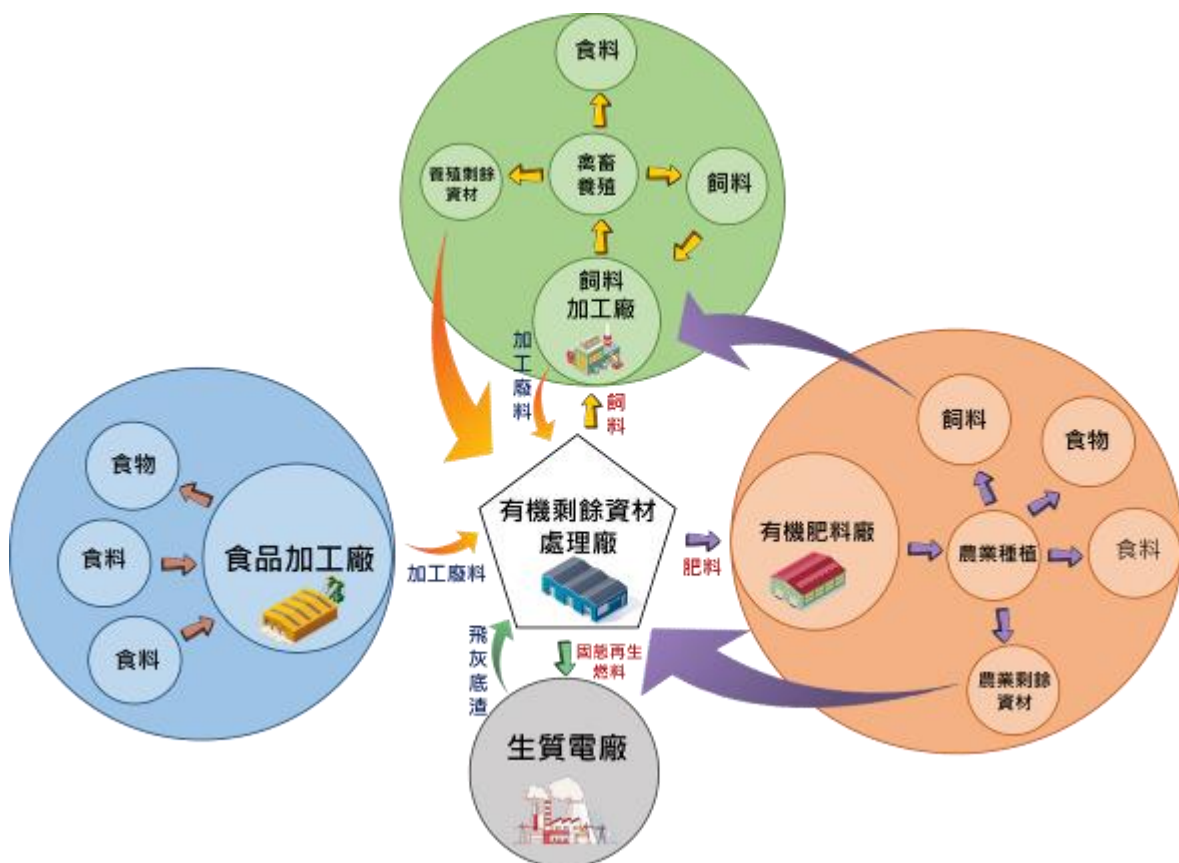


圖1 多元有機剩餘資材循環經濟架構圖

貳、固態再生燃料(SRF)

近年來環保署積極推動固態再生燃料(Solid Recovered Fuel, SRF)，廢料來源包括：可燃燒的廢紙張、廢木材(木屑)、廢塑料橡膠與纖維(舊衣回收)等，具有低環境衝擊、低燃料成本與應用於高效能的流體化床新式鍋爐與燃燒設施等優勢，減少石化原料和天然資源(煤礦、天然氣)開採、浪費以及燃燒後所產生的硫氧化物超標等問題。本團隊曾將有機污泥(食品污泥、漿紙污泥等)、咖啡渣、豆渣、棕櫚渣等多元有機剩餘資材與添加少比例回收切削矽泥分選後的矽粉2~5%等，經與廢食材(下腳料、過期澱粉、廢食用油等)適當比例調配、擠出成型與脫氧改質等程序，客製化製成高熱值固態再生燃料棒，熱值範圍4,500~ 6,800(kcal/kg)，高於一般木質顆粒燃料4,200(kcal/kg)，應用於鍋爐廠、汽電共生廠、水泥窯廠等需要大量能源場所，進行混燒與輔助燃料，達到能資源再利用目的^{[1]~[3]}。由於燃燒後的灰渣(生質炭)具高pH，可做為土壤改良劑使用，藉以改善酸化與鹽化土質。

參、快速製作有機肥料

有機肥料是農用資材中用量最大且對土壤肥力增進最重要的資材之一，因為農業土壤肥力指標為土壤有機質含量。近年來石油價格高漲，化肥價格居高不下，長期且大量施用化學肥料導致土壤普遍酸化、劣化嚴重，因而亟需增加改良土壤有機質肥料需求^[4]。近來環保意識高漲、生產者對農業生產覺醒、消費者對食品安全之關切與重視，皆強化市場對於有機質肥料需求。本團隊利用微生物作為催化劑增加分解菌數量，開發快速製肥技術，針對食品加工業所衍生數量龐大的豆渣為原料，添加植菇太空包、禽畜糞、粗糠與咖啡渣等輔助有機資材，調整有機質、碳氮比，於8小時內快速醱酵為有機質肥料，節省大量時間與土地面積，顯現零污染、零排放、有機質品質穩定、無病菌蟲卵殘留等優點。本資源化技術針對南部某食品加工廠所產生的豆渣為快速製肥處理對象，製成植物性有機肥料，處理流程如圖2^{[5]~[7]}。

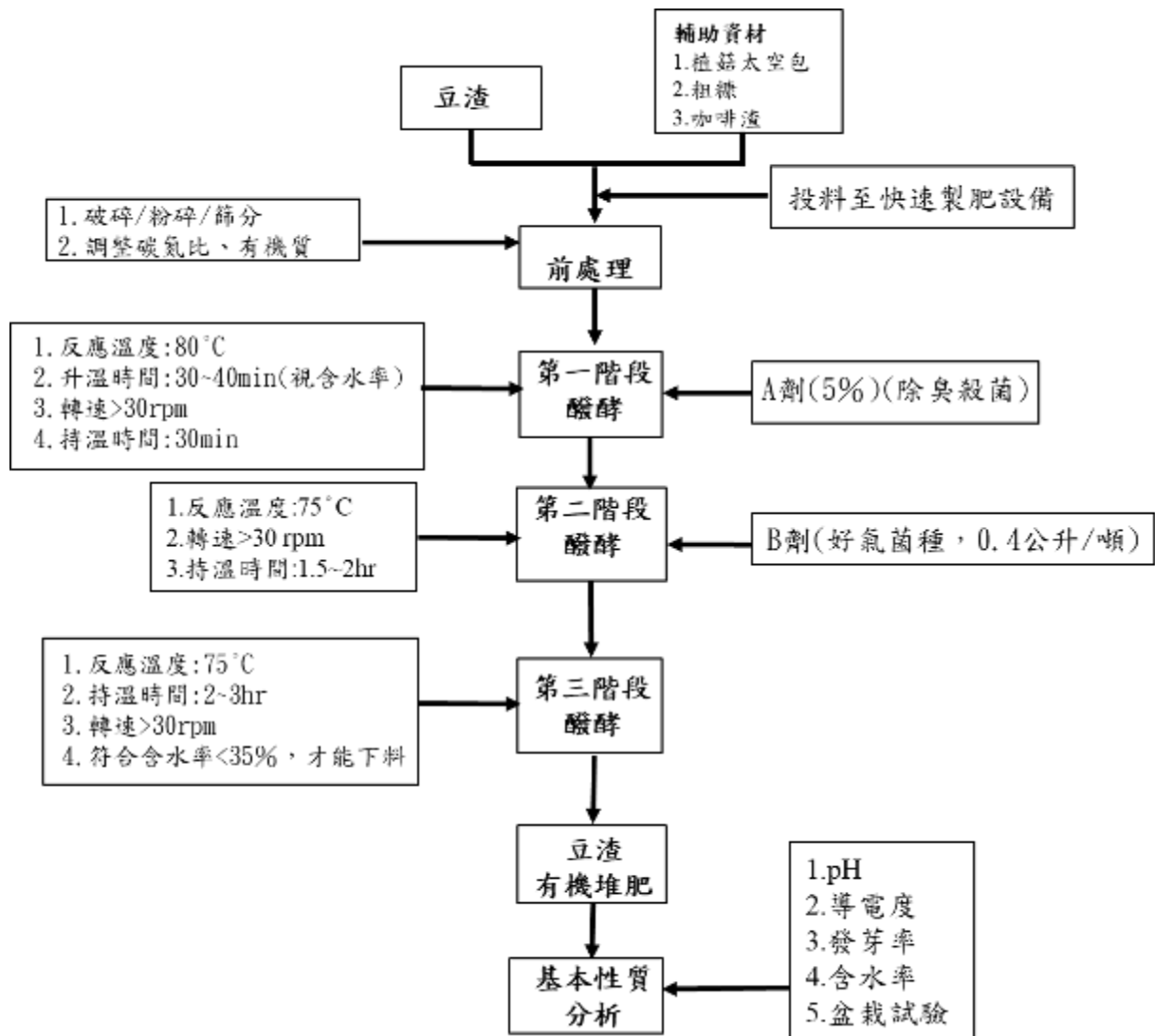


圖 2 有機剩餘資材快速製肥處理流程圖

將豆渣製成植物性有機肥料，分析含水率、pH 與電導度，彙整如表 1，將製成的有機肥料分析種子發芽率測試與盆栽試驗之驗證，彙整如表 2 與表 3。

表 1 食品加工廠之豆渣基本性質分析

分析項目	豆渣
含水率%	47.82
pH	5.8
電導度 (ms/cm)	3.8

表 2 豆渣製成有機肥料之白菜種子發芽率測試

豆渣製成有機肥料之發芽率測試 實驗種子：白菜，農友種苗科技股份有限公司				
天數	第一實驗組 (豆渣有機肥料)	第二實驗組 (豆渣有機肥料)	第三實驗組 (豆渣有機肥料)	對照組 (純蒸餾水)
第 1 天				
	0%(0/25)	0%(0/25)	0%(0/25)	0%(0/25)
第 2 天				
	4%(1/25)	4%(1/25)	4%(1/25)	96%(24/25)
第 3 天				
	84%(21/25)	88%(22/25)	84%(21/25)	96%(24/25)
第 4 天				
	100%(25/25)	100%(25/25)	100%(25/25)	100%(25/25)

表 3 豆渣製成有機肥料之福山萵苣盆栽試驗彙整表

豆渣製成有機肥料之盆栽試驗		
第一週(3/30~4/03)		
		
第二週(4/04~4/10)		
		
第三週(4/11~4/17)		
		
第四週(4/18~4/24)		
		
第五週(4/25~4/30)		
		

有機肥料腐熟程度能由外觀與種子發芽率測試判斷，外觀顏色為深黑色或黑褐色，膨鬆感覺，吸水能力強，味道為土香味，不能有酸壞臭味、惡臭或濃厚氨氣味，即達到穩定化。有機堆肥品質對於作物生長與環境衛生有很大影響，堆肥品質可藉由種子發芽、pH、電導度值、堆肥顆粒大小等方法來判定，其中種子發芽能精確直接地反應種子活力。

本研究將食品加工廠衍生的豆渣快速製肥產物進行盆栽試驗，從 2021 年 3 月 30 日豆渣有機肥料之盆栽試驗生長直到 2021 年 4 月 30 日採收，開始福山萵苣種植前長度每株高平均 3cm，生長期間試驗結果發現在第 5 週生長高度每株約為平均 15cm，且比一般培養土種植長得快，葉片也較茂盛，觀察有添加豆渣有機肥料生長速度較快、色澤也較亮，氮肥可促進葉菜類的葉子變很大。由於栽種時未取得適當距離或翻堆的時候不均勻，導致重量不一，適合於製肥過程中添加，更有利於葉菜類生長^{[8]~[9]}。

肆、快速製造飼料添加料

將食品加工廠產生的豆渣，調整有機質、粗纖維、粗蛋白與粗脂肪等成分與反應參數，製成飼料添加料供給禽畜養殖，轉成飼料原料、食料、農業(養殖)廢棄物等循環再利用。由於豆渣含有蛋白質與高含水率，容易腐敗孳生雜菌與造成環境惡臭，且生豆渣中含有抗胰蛋白酶，阻礙動物體內胰蛋白酶對豆類蛋白質的消化吸收，引起腹瀉、影響生長，需將豆渣高溫煮熟，破壞抗胰蛋白酶成份後才可用於餵食，透過改質技術能將原始豆渣含水率由87%迅速降至15%以下，改質過程中高溫破壞豆渣內抗胰蛋白酶，提高豆渣脂肪含量等，增加禽畜類換肉率。豆渣製成飼料添加料之整體實驗流程如圖3所示，經前處理粉碎在超過100℃反應槽中摻配不同比例的玉米飼料(1:1, 3:1, 5:1與單純小雞飼料對照組)等，進行2~3小時反應轉質後，分析飼料添加料的基本性質以及後續雞隻飼養紀錄情形。歷經四週時間雞隻飼養觀察，以5(玉米飼料):1(豆渣飼料添加料)摻配比例，其生長體重(換肉率)情形為最佳，每週皆取3隻重量的平均值紀錄，彙整如表4所示。

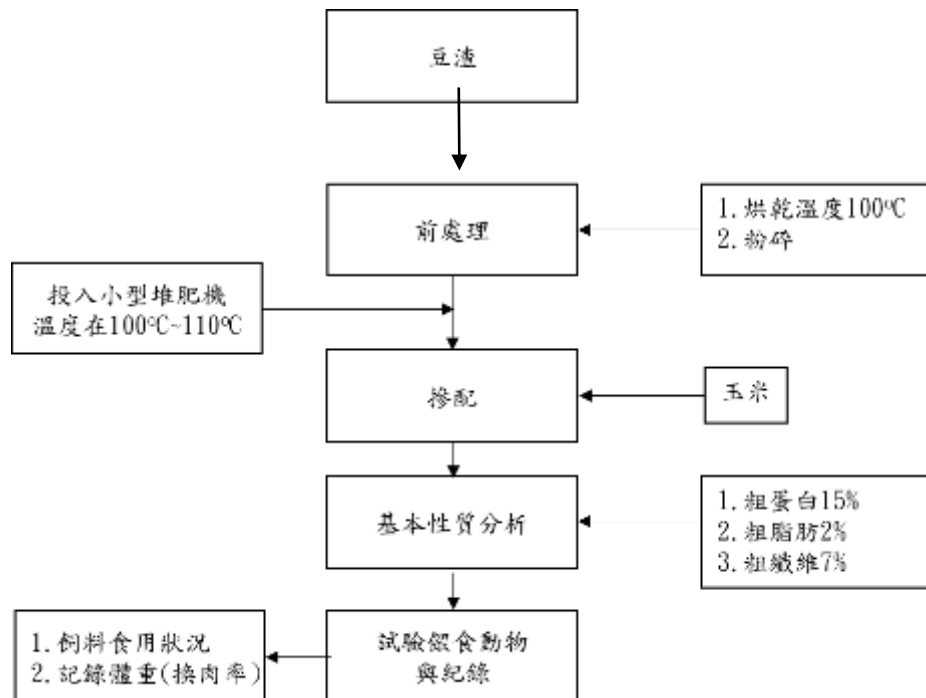


圖3 豆渣製成飼料添加料實驗流程圖

表 4 小雞飼料摻配豆渣添加料比例 5:1 之雞隻 4 週飼養成長紀錄表

NO.	試驗 1	試驗 2	試驗 3	平均重(g)
第一週				41.51
第二週				190.86
第三週				287.53
第四週				429.16

飼養結果以飼料比5:1幼雞體重之平均體重最高，推測原因為(1)豆渣比例較多，其殘留的味道比較刺鼻，易造成飼料會有剩留情況。(2)豆渣本身含有抗胰蛋白酶，會阻礙動物體內胰蛋白酶對豆類蛋白質的吸收消化，造成腹瀉、影響生長，需將豆渣持續高溫煮熟，完全破壞抗胰蛋白酶成份後才可餵食禽畜。(3)由於飼料摻配比僅占5:1，小雞純飼料所佔比例較高，建議將豆渣做為飼料添加料，可將豆渣完全資源化並減少飼料成本。

伍、結論與建議

- 1.將農業有機剩餘資材能資源化，透過循環經濟平台，建構發展系統化分類、轉質與開發多元產品與新商業模式，包括(1)固態再生燃料(SRF)轉換能源，提供蒸氣與綠電，產生的灰渣，轉質再利用做為土壤改良劑使用。(2)開發快速製肥程序，於8小時內製成有機肥料供肥料廠回歸農地使用，(3)調整有機質等成分反應參數，製成飼料添加料供禽畜養殖與(4)科技化系統服務與管理，藉以打通農業循環經濟的靜脈產業，建立農業與事業有機剩餘資材再利用平台以及多元產品循環應用。
- 2.能資源化達成目的，包括(1)降低處理成本(2)減少環境污染(3)去化大量難以處理的食品下腳料與農業廢資材(4)發展固態再生燃料、有機肥料與飼料添加料等多元產品。
- 3.透過產官學跨領域合作，盤點與評估目前各種有機剩餘資材等的循環系統，並打造能資源技術與交易系統化科技平台。
- 4.持續研發與投資剩餘資材的能資源化、商品加值化與產業化。

參考文獻

1. 吳俊毅等3人，有機污泥與廢食用油整合性處理方法、衍生性燃料、飼料添加物，中華民國發明專利，I527770，2016年4月1日。
2. 吳俊毅等6人，以有機污泥製備固態衍生性燃料之方法及其固態衍生性燃料，中華民國發明專利，I639693，2018年11月1日。
3. 吳俊毅等6人，高熱值衍生性燃料製造方法，中華民國發明專利，I664282，2019年7月1日。
4. 莊作權，土壤肥料，三民書局，ISBN 978-957-14-2550-4，1997年2月。
5. 吳俊毅等6人，以有機廢水製造低鋁含量有機肥料之方法，中華民國發明專利，I601709，2017年10月11日。
6. 吳俊毅等6人，以有機廢水製造天然富含鉀有機肥料之方法，中華民國發明專利，I574924，2017年3月21日。
7. 鐘明吉等4人，多站式快速發酵有機質的方法，中華民國發明專利，I702201，2020年8月21日。
8. 鐘明吉等3人，快速醱酵有機質裝置，中華民國新型專利，M572259，2019年1月1日。
9. 鐘明吉等3人，快速醱酵有機質的方法，中華民國發明專利，I728262，2021年5月21日。

廢車粉碎殘餘物能源化之可行性評估 Feasibility Assessment of Energyization of Automobile Shredder Residues to Fuel via Circulating Fluidized Bed

吳俊毅^{1*} 王振興² 張美玲³

Jun-Yi Wu¹ Jenn-Shing Wang² Mei-Ling Chang³

1 遠東科技大學機械工程系 副教授

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Far East University

2 遠東科技大學機械工程系 特聘教授

Distinguished Professor, Department of Mechanical Engineering, Far East University

3 遠東科技大學休閒運動管理系 助理教授

Assistant Professor, Department of Leisure and Sports Management, Far East University

* Corresponding author: jeanswu@mail.feu.edu.tw

摘要

根據環保署基管會統計 2018 年國內回收的廢棄汽、機車就超過 113 萬輛，回收率高達 99.7%。經由分離、分選、粉碎等程序回收處理後的廢車粉碎殘餘物(Auto Shredder Residue, ASR)約佔進料之 18~33%。若將 ASR 粉碎篩選後製成固態再生燃料(Solid Recovered Fuel, SRF)，不僅解決 ASR 處理上之困擾，更可提高資源回收率，創造靜脈產業產值。依據國內中部某廢車粉碎分類處理廠之統計結果，廢車經粉碎分類處理後，三項主要產出物為碎鐵、非鐵金屬與 ASR，其產出比例分別為 65~66%、1~2%與 32~34%。其中 ASR 經三成份分析顯示，水份約 1~2%、灰份約 18~20%、可燃份高達 80%以上。透過元素分析結果得知 ASR 中的碳(C)、氫(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)與氯(Cl)之含量分別約為> 54%、> 6%、> 18%、> 1.0%、> 0.05%與> 0.10%；其高位與低位發熱量之熱值分析介於 5,100~5,500 kcal/kg 範圍。ASR 若依據種類分析熱值，分別為泡棉(> 6,400 kcal/kg)、踏墊(> 4,500 kcal/kg)、海綿(> 5,800 kcal/kg)、棉絮(> 3,700 kcal/kg)與塑膠片(> 9,000 kcal/kg)。團隊針對上述熱值高的 ASR 透過循環式流體化床，屬於無煙囪的汽化爐，將其經由分類、破碎、擠出成型為 SRF 燃料，將其高熱值轉換為廠內蒸汽能源使用與發電衍生其經濟效益。

關鍵詞：廢車粉碎殘餘物、固態再生燃料、循環式流體化床、熱值、效益評估

壹、前言

近年來國內廢棄物處理現況及展望，從廢棄物管理到資源管理，著眼於創新多元能資源化技術。資源回收再利用的物料供應系統，從搖籃到搖籃，依循著(1)加值再利用、(2)原物再利用、(3)更生再利用與(4)降級再利用等處理原則。然而廢棄物未來應強化資源循環六大面向，包含(1)多元技術面、(2)法規政策面、(3)循環經濟面、(4)資源管理面、(5)市場導向面與(6)核心價值宣導面。產品重新設計是循環經濟不可或缺的核心思維，不應該只思考產品，更重要的是如何與周圍的系統整合，包含商業模式、逆流回收系統的接軌。理應把握國內目前正積極推行靜脈產業的潛勢與機會，包括(1)如何有效率的整合能資源技術與平台系統管理、(2)邁向低碳高效能的廢棄物加值化技術、(3)達成循環式能資源的需求供給以及(4)碳權的價格交易等。希冀跳脫經濟與環境兼顧的兩難，打造零廢棄與零污染的循環經濟平台^{[1]~[2]}。

貳、無煙囪循環式流體化床設備

廢棄物能資源再利用向來是各國朝向綠能循環發展之必要趨勢。由於廢車回收廠拆解處理後的廢車粉碎殘餘物(ASR)，屬於事業廢棄物，須受到環保署稽核認證與流向控管、下游資源回收再利用業者無意願且受限於資源化技術門檻、一般焚化爐不願意接收且各縣市焚化爐使用年限皆已超過15年須經常歲修等諸多問題，令廢車回收業者相當煩惱只能長期暫存廠內堆置。本團隊提出可行性的評估與規劃，將可燃份高、含碳量高、熱值高的ASR，採用無煙囪循環式流體化床設備。由於該設備已在日本多處且運轉多年，具有豐富商業運轉服務經驗，包含難處理的廢輪胎、廢塑料橡膠與生活垃圾等，各項空氣污染排放指標皆符合日本環境廳的標準。「無煙囪廢棄物固態再生燃料流體化床」的技術與蒸氣產生流程，如圖1與圖2所示。本設備能客製化符合廢車回收業者處理規模與需求，除了能承受1,500 °C高溫，並且利用真空斷熱材料及技術取代傳統的耐熱磚斷熱，更是提升設備的耐酸鹼能力，除維修簡易更能有效延長設備使用壽命至少20年之久^{[3]~[5]}。



圖1 無煙囪廢棄物衍生性燃料蒸氣產生爐

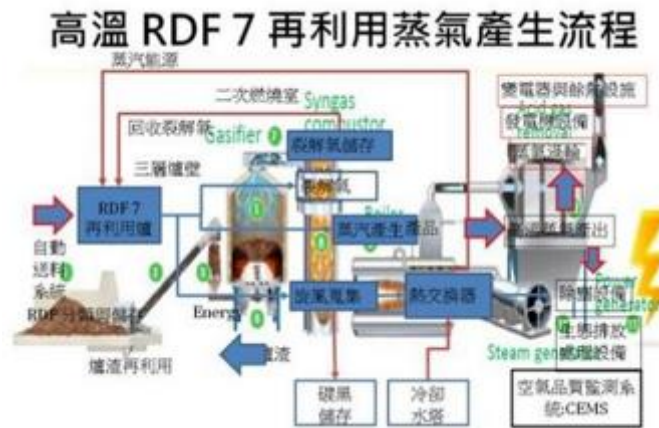


圖2 本設備蒸氣產生流程圖

2.1 零排放

轉廢為能，可燃物的熱值轉換長久以來為最直接有效的方式。透過固態再生燃料製程，設施中除了團隊協助設計製作的旋風集塵塔(Cyclone Dust Collector)、飛灰集塵機(Fly Ash Collector)以外，為使排放空氣品質高於背景環境空氣品質，將尾氣導到「尾氣暫存室」。尾氣暫存室規劃為一座可供參觀的淨化空氣植物溫室。溫室設施包括有益於植物生長的奈米陶瓷過濾管、高溶氧造霧與負離子產生機，並在地面設置大量層架式立體化蚯蚓養殖箱，確保霧化後的冷凝水能夠得到完全的淨化。此設施除了做到尾氣層層把關外，並於每個月得到蚓糞培養土，供日後綠化植栽所用與環境教育課程介紹。

2.2 零耗能

由於本設施採取有效的斷熱工法，將廢棄物製成的固態再生燃料熱值得到完全發揮，除了在點火時需要能耗，絕大部分幾乎是零耗能的。在尾氣暫存室經過模擬自淨空氣的設施後，不僅能得到如雨後般清爽的空氣品質，可再利用的高品質隔熱材料，可供生態教育的有機蚯蚓糞培養土等。由於本設施前置作業是先將廢棄物製成燃料棒，除了作為可靠的熱值來源外，在已可控的熱值數據值中，可利用燃燒過程所產生的蒸氣來發電，提供廢車回收處理廠內熱能所需及綠能發電的舒適環境。透過前處理設施將ASR製成固態再生燃料，更可將廠內已暫存堆積如山的ASR迅速加以去化並高效率地轉換為其他能源型態(蒸氣、熱能、電能等)。固態再生燃料產品如圖3，固態再生燃料與汽電共生系統如圖4。



圖3 固態再生燃料產品



圖4 固態再生燃料與汽電共生系統

參、廢車粉碎殘餘物(ASR)性質分析結果

廢車粉碎殘餘物(ASR)委外檢測分析結果，包含可燃物、不可燃物與總水分與所約佔比例分別為73.5%、26.5%與6.8%如表1所示。多次取樣並委外檢測分析，透過元素分析儀瞭解碳(C)、氫(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)與氯(Cl)之成分組成與含量分別約為> 54%、> 6%、> 18%、> 1.0%、> 0.05%與> 0.10%，利用熱卡計分析其高位與低位發熱量之熱值分析介於5,100~5,500 kcal/kg範圍，個別分析結果彙整如表2、表3與表4。本團隊針對ASR依據種類分析熱值，分別為泡棉(> 6,400 kcal/kg)、踏墊(> 4,500 kcal/kg)、海綿(> 5,800 kcal/kg)、棉絮(> 3,700 kcal/kg)與塑膠片(> 9,000 kcal/kg)，明顯高於木屑熱值，評估可作為SRF，經由高效率循環式流體化床，將高熱值轉換為蒸氣與綠電，提供廠內能源再利用，彙整如表5。將泡棉、踏墊、海綿、棉絮與塑膠片等樣品進行870℃持溫20小時的燒失率試驗，結果顯示除了棉絮外，其餘燒失率皆超過90%，代表燃燒後的灰燼量少，彙整分析結果如表6所示。

表 1 ASR 三成份委外檢測分析結果彙整

樣品採樣日期			2018 年 4 月 11 日	
樣品收樣日期			2018 年 5 月 14 日	
樣品名稱			廢棄物	
項目			濕基(%)	乾基(%)
組成	可燃物	紙類	0.21	0.21
		纖維布類	52.99	52.55
		木竹、稻草、落葉類	0.17	0.17
		廚餘	0	0
		塑膠	7.30	7.41
		皮革、橡膠類	4.79	4.81
		其他(含 5mm 以下之雜物)	8.06	8.09
		合計	73.52	73.24
	不燃物	鐵金屬類	1.11	1.18
		非鐵金屬類	0.86	0.91
		玻璃類	0	0
		其他不燃物(陶土、砂土)	24.51	24.67
		合計	26.48	26.76
總水分(%)			6.84	

表 2 廢車回收廠針對 ASR 性質分析檢測結果彙整

ASR 性質分析(元素分析、高低發熱量、三成份)－1		
樣品採樣日期	2018 年 4 月 11 日	
樣品收樣日期	2018 年 5 月 14 日	
檢測項目	檢測值	單位
碳	15.8	%
氫	4.2	%
氧	37.2	%
氮	0.1	%
硫	0.042	%
氯	0.100	%
乾基熱值	3,830	kcal/kg
濕基高位發熱值	3,580	kcal/kg
濕基低位發熱值	3,320	kcal/kg
水分	6.59	%
灰分	39.7	%
可燃分	53.7	%
物理組成(濕基)可燃物合計	73.52	%
物理組成(濕基)不燃物合計	26.48	%
物理組成(乾基)可燃物合計	73.24	%
物理組成(乾基)不燃物合計	26.76	%

表 3 廢車回收廠針對 ASR 性質分析檢測結果彙整

ASR 性質分析(元素分析、高低發熱量、三成份)－2		
樣品採樣日期	2018 年 9 月 12 日	
樣品收樣日期	2018 年 9 月 17 日	
檢測項目	檢測值	單位
碳	47.2	%
氫	7.0	%
氧	4.6	%
氮	0.4	%
硫	0.024	%
氯	0.025	%
乾基熱值	6,030	kcal/kg
濕基高位發熱值	5,470	kcal/kg
濕基低位發熱值	5,030	kcal/kg
水分	9.33	%
灰分	36.9	%
可燃分	53.7	%

表 4 ASR 性質委外檢測分析結果彙整

樣品採樣日期	2019 年 4 月 10 日	
樣品收樣日期	2019 年 4 月 11 日	
樣品名稱	ASR 車殼廢棄物	
檢測項目	檢測值	單位
廢棄物含水率	1.36	%
灰分	17.52	%
可燃分	81.14	%
碳	54.77	%
氫	6.14	%
氧	18.74	%
氮	1.23	%
硫	0.09	%
氯	0.17	%
高位發熱量	5,453	kcal/kg
低位發熱量	5,113	kcal/kg

表 5 本團隊針對 ASR 依據種類分析熱值(實驗日期: 2019/11/26)

項目	重量(g)	熱值(cal/g)	平均熱值(cal/g)	備註
苯甲酸	1.0041	6,395.4	6,395.4	測試組苯甲酸標準熱值： 6318.0 cal/g
泡棉	0.1535	6,541.7	6,505.5	
	0.1410	6,469.2		
踏墊	0.2272	4,569.2	4,665.1	
	0.2186	4,760.9		
海綿	0.1143	5,816.7	5,943.3	
	0.1095	6,069.8		
棉絮	0.2799	3,714.4	3,891.0	
	0.3005	4,067.5		
塑膠片	0.2982	10,935.1	10,916.2	
	0.2977	10,897.2		

表 6 本團隊針對 ASR 進行燒失量分析結果

實驗日期	實驗日期: 2019/11/26		
操作條件	升溫參數: 870°C 升溫時間 4hr、持溫時間 20hr		
項目	(A)燃燒前(g)	(B)燃燒後(g)	(C)燒失率(%)
泡棉	1.0914	0.0473	95.7
踏墊	1.2965	0.1233	90.4
海綿	0.5545	0.0452	91.8
棉絮	3.3253	1.4432	56.6
塑膠片	3.2624	0.0760	97.7

計算方式： $C = [(A-B)/A] \times 100\%$

肆、結論與建議

1. 透過產官學跨領域合作評估，若將 ASR 粉碎篩選後製成 SRF，不僅解決廢車回收業者 ASR 處理上之困擾，更可提高資源回收率，創造靜脈產業產值。
2. 依據多次取樣委外與團隊自行分析結果，顯示 ASR 為可燃份高、含碳量高、熱值高極具有發展為高熱值的 SRF 固態再生燃料之潛力。
3. 團隊透過無煙囪的循環式流體化床，將其 ASR 經由分類、破碎、擠出成型為 SRF 燃料，將其熱值轉換為廠內蒸汽使用與發電，創造循環經濟效益。

參考文獻

10. 羅時芳、吳周燕。臺灣生質燃料產業趨勢分析/中華經濟研究院綠色經濟研究中心，經濟前瞻，第 174 期，P.112~P.117，(2017)
11. 黃育徵(2017)，循環經濟，天下雜誌，ISBN 978-986-398-229-6。
12. 吳俊毅等6人，以有機污泥製備固態再生燃料之方法及其固態再生燃料，中華民國發明專利，I639693，2018年11月1日。
13. 吳俊毅等6人，高熱值衍生性燃料製造方法，中華民國發明專利，I664282，2019年7月1日。
14. 明果英等2人，一種可燃固體廢棄物的再利用處理方法，中國大陸專利，CN104059712A，2014年9月24日。

邊坡地形變遷分析-以台 9 丁線 46K+900 明隧道工程為例
Analysis of Slope Topography Changes-
A Case Study of 46K+900 Ming Tunnel Project of Taiwan 9 Line as an Example

林家儀^{1*}、吳至誠^{2*}

Jia-Yi Lin^{1*} Jee-Cheng Wu^{2*}

1 國立宜蘭大學土木工程學系研究所 碩士班

Graduate student, Department of Civil Engineering, National Ilan University

2. 國立宜蘭大學土木工程學系 副教授

Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Ilan University

* Corresponding author: a123a852@gmail.com

摘 要

台灣位處歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊交界處，且位處環太平洋地震帶，又位於亞熱帶地區及海島型氣候環境影響，故而長期受到板塊擠壓與強降雨的天氣造成邊坡容易發生崩塌現象，台 9 丁線(舊蘇花公路)位於宜蘭與花蓮之主要連絡幹道，並途經雪山山脈及中央山脈，地形及地質條件極為不佳且常年受颱風、地震及豪大雨影響，導致邊坡及其不穩定。本研究係以探討台 9 丁線(舊蘇花公路)46.9k (舊樁號台 9 線 149.7k，以下簡稱本路段)近年因邊坡經常落石及坍滑為案例，應用「近景攝影測量技術」以無人飛行載具(UAV)搭載定焦相機對目標邊坡進行定航、定焦等多次拍攝，同時又在邊坡設置固定控制點，以利多次航拍影像重疊校正，再將拍攝所得之照片透過建模自動產製點雲運算模組進行邊坡表面地形三維資料重建，做為公路邊坡定期或特別巡檢作業時輔助工具使用，並藉由 2019 年至 2020 年的多時期建模影像三維資料差異比對分析，用來記錄公路明隧道施工之變遷，瞭解其變化趨勢，並對明隧道工程前後進行影像分析之差異性，供未來工地施工監看(測)之參考。

關鍵詞: UAV、邊坡、3D 影像

前言

臺灣之公路邊坡發生崩塌的原因甚廣，主要與長期的降雨及板塊擠壓造成頻繁地震有關，其中蘇花公路東側緊鄰太平洋，西側緊鄰雪山山脈及中央山脈，又位處板塊交界帶及亞熱帶島嶼氣候區，故頻繁發生地震及強降雨，致使經常發生邊坡崩塌及落石，其中本路段受地震及豪大雨等影響，於104年10月發生大規模邊坡坍塌，一度造成交通癱瘓，養護單位為了改善公路邊坡及道路安全，邀集學者專家現勘後表示，該災害類型「順向坡滑動引發岩塊側向崩落」，上邊坡坍塌高度約140m、寬度約30m，邊坡裂縫：1m寬*8m、0.3m寬*20m及0.3m寬*8m，短期改善方案為施作工法為人工刷坡、岩面裂縫噴漿、防落石網，詳圖1，可穩定邊坡擾動，長期改善採以明隧道方案辦理。

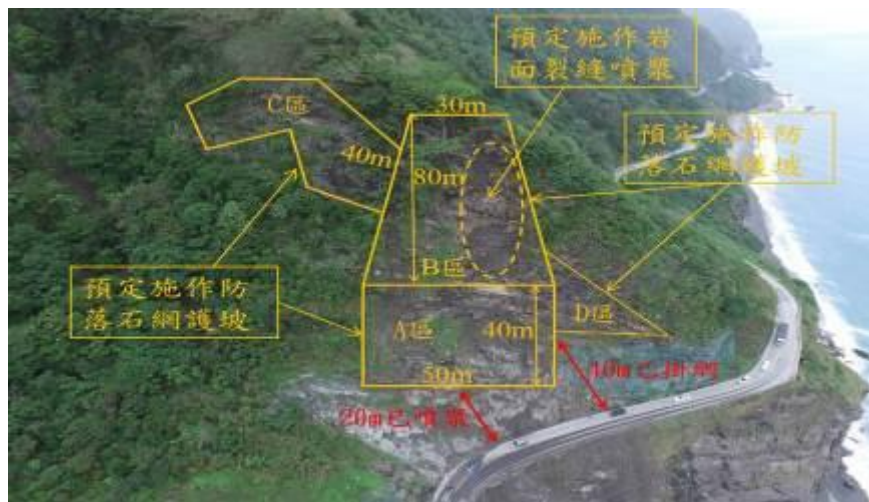


圖1 邊坡改善規劃圖

(資料來源:交通部第四區養護工程處南澳工務段)

實驗方法

該路段邊坡高陡，公路緊鄰坡面蜿蜒路線呈東北東路段恰緊鄰中角度傾向東北片岩邊坡之西南西側坡趾，岩楔傾覆為潛在的邊坡失穩型態，威脅路面通行安全。此路段公路高程至第一道稜線估計超過 120 m 以上，就岩層在高程方向的分佈觀之路面以上至約 1/3 高度處，主要為厚層、完整較佳的片岩；高度 1/3 至 2/3 處片岩、層厚不一層厚較厚的片岩上下，可見風化造成的差異侵蝕，厚層片岩的不連續面空間分佈及裂隙開張，為影響岩楔滑落重要因素。再往上的片岩風化程度較大，可見 4 處以上之崩崖發育岩楔局部陷落呈浮石狀位置在路面高程以上超過 100 m 處。就水平面分佈而言愈朝東北東側坡高變小，但岩層工程特性愈差。坡面仍浮石仍多上方崩崖多處研判邊坡雖無整體的滑動問題，但落石與傾覆風險甚大。

航線規劃方式及研究流程

飛行前使用 Pix4Dcapture 規劃航線(圖 2-1)分別規劃 13 條航帶、飛航高度約 79 公尺，2 條航帶高度約 6 公尺，共 3 次飛行任務。然而天候狀況是影響整個拍攝安全性與成果好壞的最大因素，除此之外現場光線、風向、風速、周邊地形地物狀況與 GPS 接收狀態皆需在良好狀況下才能執行飛行任務，詳圖 2

飛行完成使用 ContextCapture Center 建模後進行誤差比較。



圖 2 飛行航線

無人飛行載具規格說明



圖 3 無人飛行載具

表 1 無人飛行載具規格說明

廠牌	DJI
型號	Phantom 4 por V 2.0
註冊號碼	B-AAA00786
最大上升速度	6m/s
最大水平飛行速度	20m/s
最大起飛海拔高度	6km
最大飛行時間	約 28 分鐘
GPS 懸停經度	垂直: $\pm 0.1\text{m}$ (視覺定位正常工作時); $\pm 0.5\text{ m}$ 水準: $\pm 0.3\text{ m}$ (視覺定位正常工作時); $\pm 1.5\text{ m}$

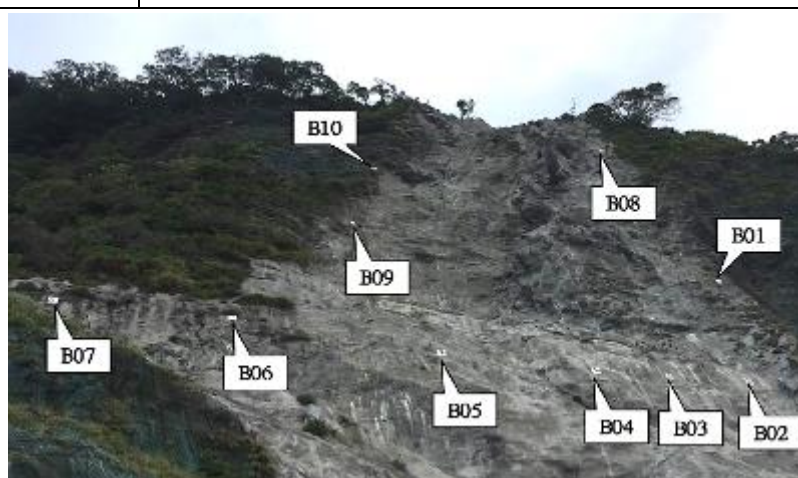


圖 4 控制點與檢核點示意圖

使用 ContextCapture 的座標值和相片數量以及選定

照片總張數:120 張

控制點:B06、B07、B10

檢核點:B01、B02、B03、B04、B05、B08、B09

座標系統:TWD97 二度分帶

表 2 控制點與檢核點基本資料

點名	TWD97 坐標系統			測量模式		備註
	橫坐標 E(X)	縱坐標 N(Y)	高程 EL	平面	高程	
B01	328631.939	2694047.495	138.278	經緯儀定位測量	間接高程	台 9 線-149K+700
B02	328627.862	2694040.301	122.231	經緯儀定位測量	間接高程	台 9 線-149K+700
B03	328621.229	2694036.641	123.010	經緯儀定位測量	間接高程	台 9 線-149K+700
B04	328615.359	2694031.851	123.154	經緯儀定位測量	間接高程	台 9 線-149K+700
B05	328603.530	2694028.899	127.474	經緯儀定位測量	間接高程	台 9 線-149K+700
B06	328588.659	2694020.600	131.990	經緯儀定位測量	間接高程	台 9 線-149K+700
B07	328577.256	2694013.824	134.049	經緯儀定位測量	間接高程	台 9 線-149K+700
B08	328628.677	2694054.379	171.525	經緯儀定位測量	間接高程	台 9 線-149K+700
B09	328592.684	2694045.613	162.365	經緯儀定位測量	間接高程	台 9 線-149K+700
B10	328595.485	2694051.836	179.434	經緯儀定位測量	間接高程	台 9 線-149K+700

結論與討論

施工前

蘇花公路於武塔至漢本路段台 9 丁線 46K+900 落石路段邊坡波高約 200m、寬約 30m，本路段可見岩石裸露係為斜交波，於 2015 年落石較為平凡開始相關單位對此邊坡進行改善，於 2017 年對此邊坡進行邊坡噴漿並對明隧道工程進行設計研究，且於 2017 年開工至 2020 完工。



圖 5 施工前 ContextCapture Center 建模

施工後

現況崩塌之區域施作明隧道，考量未來地質災害持續擴大之可能性，明隧道施作長度約 260m，道路線形配合既有道路改善，路線最小半徑 50m，約 149k+670~149k+740(舊樁號)道路往下邊坡拓寬，由於地勢陡峭，採施作地錨方式縮小基礎尺寸以減少開挖。



圖 6 施工前 ContextCapture Center 建模

結論

本研究應用無人飛行載具（UAV）搭載定焦相機對目標邊坡進行定航、定焦等多次拍攝，同時又在邊坡設置固定控制點，以利多次航拍影像重疊校正，再將拍攝所得之照片透過建模自動產製點雲運算模組進行邊坡表面地形三維資料重建，做為公路邊坡定期或特別巡檢作業時輔助工具使用，於監測期間恰逢公路養護單位辦理台 9 丁線 46K+900

明隧道新建工程，於 2019 年(施工前)及 2020 年(施工後)進行建模差異性比對分析後，除可用於邊坡穩定監測判讀外，亦可做為工程執行過程之紀錄。

經研究後發現，UAV 空拍未來可應用之層面可多方推廣，以往僅為拍攝或一般攝影之應用，經本研究後發現，UAV 建模可做為邊坡監測之應用，亦可作為工程施工過程之紀錄，同時可供未來工程驗收或相關驗證之參考，但 UAV 建模監測邊坡亦有相關之限制，僅適用於坡面保護的人工邊坡或崩塌裸露地自然邊坡，基本上以表面無受植被生長影響為原則。

致謝

首先感謝吳老師及我的父親在這期間幫助我解開很多問題及疑惑，也很謝謝學校研究室的學弟妹們再我遇到瓶頸的時候陪伴我完成，在大學四年和研究所這兩年宜蘭大學教了我很多，很感謝這幾年幫助過我的老師和同學。

參考文獻

1. 林宥伯、吳振佑、陳均維、林詠喬、陳國威、林家興、陳振宇(2020)，UAV 應用於水土保持之現況與趨勢，營建知訊，448:7-14
2. 陳彥宏、林信輝(2019)，崩塌地應用無人機播種植生工法技術研發與試驗性研究，台灣林業，45(6):4-12。
3. 顧承宇、翁孟嘉、高憲彰、陳建忠、李怡先(2006)，三維雷射掃描技術於岩坡落石分析之應用，岩盤工程研討會論文集，387-396:395。

田口實驗設計法最佳化製備 LSCF-GDC 複合陰極材料產物回收率之研究
Product Recovery Rate of LSCF-GDC
Composite Cathode Material with Taguchi Method

藍湧棋^{1*} 余炳盛²

Lan Yung Chi¹ Yu Bing Sheng²

1 國立台北科技大學 資源工程研究所 碩士生

Master, Mineral Resources Engineering, National Taipei University of Technology

2 國立台北科技大學 資源工程研究所 教授

Associate Professor, Mineral Resources Engineering, National Taipei University of Technology

* Corresponding author: h2241369@gmail.com

摘要

Glycine-Nitrate Process(GNP)燃燒合成法是結合溶膠凝膠法和燃燒合成法而衍生的溶膠凝膠燃燒合成法，其製程簡單、低耗能、反應時間短等優點，可以有效利用於合成光觸媒、燃料電池用粉體等高性能材料。由於GNP燃燒合成法反應過程中會放出大量的氣體，故可以抑制晶粒成長，產生蓬鬆的海綿結構，然而常會因為反應劇烈，而導致產物損失。故本研究依據化學結構式 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}\text{-Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ ，利用GNP燃燒合成法製備鈣鈦礦-螢石結構之陰極-電解質複合材料，並配合田口實驗設計法L18 直交表探討各因子對於GNP合成陰極複合材料產物的回收率。本研究設定的因子包含：Ba、Ca、Zn、Cu、Mg與Ni的添加量、LSCF與GDC莫耳比與G/N比。其Ce、La元素來自於廢棄拋光汙泥酸溶所得。研究結果顯示，18 組不同參數的產物回收率平均為 69.5%，最佳值為 92.8%。透過田口變異分析找出回收率最佳化參數，使最佳化回收率提升達 93.4%，相比於前 18 組實驗平均增加了 23.9%回收率。在 8 個因子中，影響回收率最大的為G/N比，其根據添加比例的不同，影響產物回收率的權重達 36.9%。

關鍵詞：LSCF、GNP 合成法、田口法、產物回收率、廢棄拋光汙泥

壹、前言

在世界能源日漸耗竭的背景下，新式能源的開發逐漸受到重視，而其中固態氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)為極具潛力的一項新式能源應用方式。由於高溫工作環境常限制了電池發展，中溫型固態氧化物燃料電池(IT-SOFC)成為近期研發重點。在降低工作溫度的前提下，為了維持或提升燃料電池的轉換效率，陰極材料的創新成為極為重要的課題[1]。

在合成陰極複合材料LSCF-GDC會使用大量的稀土元素做為原料，而國內稀土元素的獲得又必須仰賴進口，在原料取得不易，且昂貴的情況下，尋找替代原料必不可免。拋光製程中所使用的稀土拋光粉中通常含有稀土化合物，如氧化銻、氧化釧等，然而工業上的廢棄拋光汙泥大多會以掩埋或焚燒做為後續處理，導致資源浪費。因此本研究利用回收廢棄拋光汙泥中的稀土元素，既可以降低獲取稀土元素成本且同時讓資源再次被利用 [2]。

在前人文獻中探討了GNP法水溶液前驅物不同對黏度之影響，其中揭露了硝酸鋇、鋇、銅與鐵在不同G/N比下，於室溫時所量測的黏度也會有所不同。不同的硝酸鹽類，受其金屬元素的性質影響，對於GNP燃燒法的結果也會有所變化[3]。因此本研究添加不同的金屬元素，Ba、Ca、Zn、Cu、Mg與Ni，希望透過不同硝酸鹽類對GNP燃燒法之影響進行探討。

Glycine-Nitrate process(GNP)法為利用甘胺酸與金屬硝酸鹽類來進行材料合成的方式，是一種結合溶膠凝膠法和燃燒合成法而衍生的溶膠凝膠燃燒合成法，此法的特點為過程中會產生大量氣體，故可抑制晶粒成長得到蓬鬆的海綿結構產物。此法的優點有：製程簡單、設備便宜且省能源、生產快速、極高的燃燒溫度可以燒除不純物質，使產物純度提高、應用性廣，可合成多種材料等 [4]。

田口方法為一種追求品質，並有效減少錯誤的工程規畫方式，最早由日本田口玄一博士所提出，是將龐大的實驗參數縮減至最低有效限度，並同時達到實驗的目的，後來衍生到業界上用以化繁為簡、去蕪存菁的一種統計方式；至今，包含AT&T、柯達、福特、Motorola等都是此法的遵循者，因此，田口方法在現今已能與實現品質穩定畫上等號[5]。

貳、實驗方法

2.1 廢拋光汙泥酸溶

本研究所使用之廢棄拋光汙泥來自台中某科技股份有限公司提供，並依照先前文獻之酸溶條件[6]，對廢棄拋光汙泥進行酸溶，再利用溶出液製備出SOFC陰極複合材料LSCF-GDC。步驟如下：利用 10N硝酸以固液比 1：5 進行酸溶，條件為溫度 70℃，時間 1 小時。酸溶結束後過濾，將未溶物取出。並以XRD分析，而溶出液使用Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry(ICP-OES)分析。分析之數據經由計算後，回推溶出液中各元素含量。

2.2 田口 L18 直交表規畫

本研究利用 LSCF-GDC 作為基底並摻雜其他元素來進行實驗。使用田口 L18 直交表進行實驗，選擇實驗產生影響最大之因子，一共設定 A~H 八個主要因子為實驗參數，各因子之水準(Level)與 mole %如表 1 所示。A 因子為 GDC 取代 LSCF 的百分比、B 因子為 Ba 取代 La、C 因子為 Ca 取代 La、D 因子為 Zn 取代 Fe、E 因子為 Cu 取代 Fe、F 因子為 Mg 取代 Fe、G 因子為 Ni 取代 Fe、H 因子為 G/N 比。本研究陰極化學式為：

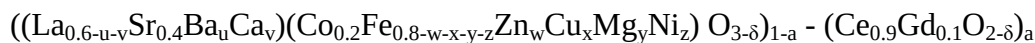


表 1. 各因子之水準(Level)與 mole%

因子	化學式代號	說明	Level 1	Level 2	Level 3
A	a	GDC取代LSCF	0.40	0.50	---
B	u	Ba取代La	0.00	0.05	0.10
C	v	Ca取代La	0.00	0.05	0.10
D	w	Zn取代Fe	0.00	0.05	0.10
E	x	Cu取代Fe	0.00	0.05	0.10
F	y	Mg取代Fe	0.00	0.05	0.10
G	z	Ni取代Fe	0.00	0.05	0.10
H		G/N比	1.00	2.00	3.00

2.3 陰極粉末製備

本研究使用GNP合成法製備陰極粉末，依據田口規劃直交表L₁₈(2¹×3⁷)，取不同劑量的金屬硝酸鹽類與溶出液及甘胺酸混合於燒杯中。放置於磁石加熱攪拌機上加熱攪拌，放入烘箱溫度調至 100℃ 24H，陳化形成前驅物。經由加熱器直接加熱，使其達到燃點自燃，並以自燃所產生的熱量作為提供反應物所需的能量，進而得到陶瓷氧化物粉末。將反應完成的陶瓷氧化物粉末放入高溫爐升溫至 1000℃煅燒，最後獲得陰極粉末。

叁、結果與討論

3.1 廢拋光汙泥分析

3.1.1：廢拋光汙泥 X 光繞射分析

將台中某科技股份有限公司所提供之廢棄拋光汙泥進行 XRD 分析，主要成分為 CeO_2 、 LaF_2 、 LaF_3 。之後使用 200 mesh 的篩網過篩廢棄光粉，將雜質去除再進行 XRD 分析，主要成分和過篩前相同為 CeO 、 LaF_2 、 LaF_3 。最後在 70°C 酸溶 1 小時後，使用濾紙將溶餘物取出，烘乾後再進行 XRD 分析溶餘物主要為 LaF_3 ，如圖 1 所示。 LaF_3 因稀土氟化物在水與無機酸溶液中的溶解率極低，日本學者 Osamu 等因 LaF_3 之難溶性，所以研究 LaF_3 在硝酸體系中的溶解度，結果在顯示濃度 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硝酸中溶解度僅為 $(2.74 \sim 62.38) \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ [2]。

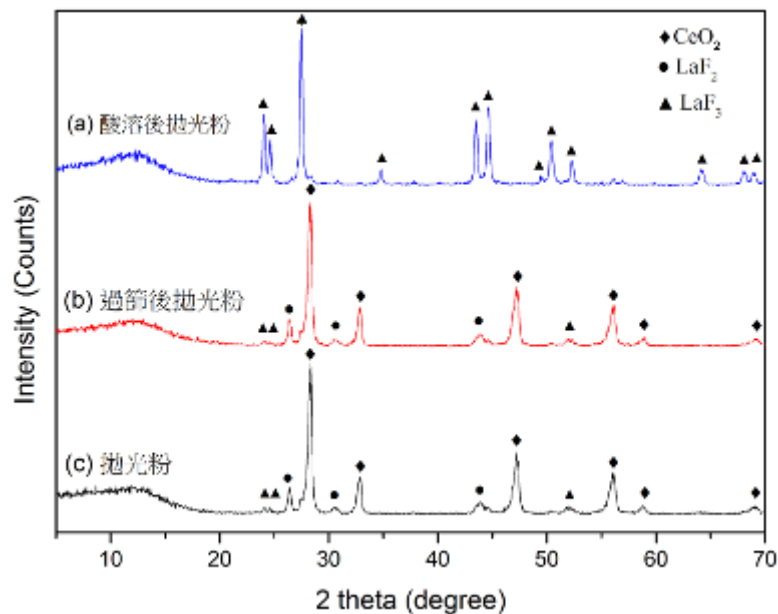
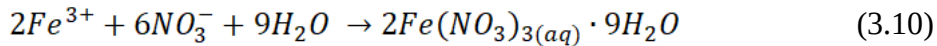
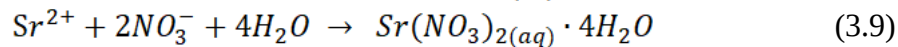
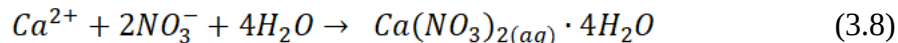
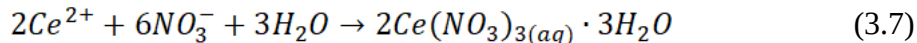
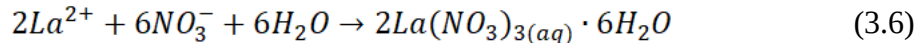
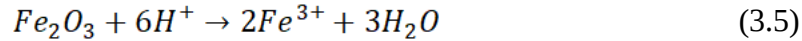
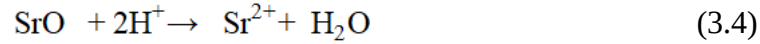
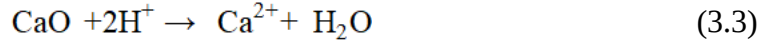
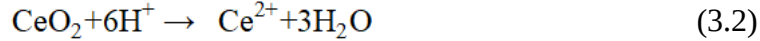
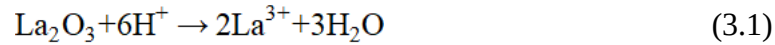


圖 1. 廢棄拋光汙泥粉體之 XRD 圖
(a)酸溶後拋光粉(b)過篩後拋光粉(c)未處理拋光粉

3.1.2：酸溶液化學分析

廢棄拋光汙泥中的化合物大部分皆經由硝酸溶解回收於酸溶液中，其部分氧化物溶解的化學反應式如式 3.1~3.10，產物最終為硝酸鹽類溶液，因此為了得知酸溶液中所含的成分濃度，故使用 ICP-OES 進行元素分析，結果如表 2 所示，溶出物主要成分元素為 Ce，次要成分為 La，其他元素含量較少分別為 Fe、Ca、K 和 Al。



藉由 ICP-OES 所測出的元素濃度，可推算各化合物及溶餘物在拋光汙泥中所佔的比例。經由回推可以得知每 10 克廢棄拋光汙泥，可以回收 6.71 克 CeO_2 ，佔酸溶進酸液粉末總重的 76.92 wt%，其次為 La_2O_3 約為 1.97 克，佔溶進酸液粉末總重的 22.56 wt%，而未溶物為 0.99 克，其可從 XRD 得知成分皆為 LaF_3 。

表 2. 酸溶液中各元素濃度及換算為氧化物後之組成比例

Element	Concentration(ppm)	Compound	Molecular	Compound (wt%)
Ce	546342.00	CeO_2	172.12	76.92
La	167859.75	La_2O_3	325.82	22.56
Fe	299.98	Fe_2O_3	159.69	0.05
Sr	0.00	SrO	103.62	0.00
Ca	1289.27	CaO	56.08	0.21
K	57.44	K_2O	94.20	0.01
Al	1142.47	Al_2O_3	101.96	0.25
Si	0.00	SiO_2	60.08	0.00

3.2 GNP合成法產物回收率

本研究使用GNP合成法進行陰極粉末之合成，利用 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 田口直交表規劃出之18組實驗，記錄每組實驗前後重量差異，並與估算的預測產量進行實驗初始反應率及產物回收率的計算。

本研究利用LSCF-GDC作為基底並摻雜其他元素來進行實驗。使用田口 L_{18} 直交表進行實驗，因子及水準為表1所示。選擇實驗產生影響最大之因子，一共設定A~H八個主要因子為實驗參數，各因子之水準(Level)與mole%如表1所示。A因子為GDC取代LSCF的百分比、B因子為Ba取代La、C因子為Ca取代La、D因子為Zn取代Fe、E因子為Cu取代Fe、F因子為Mg取代Fe、G因子為Ni取代Fe、H因子為G/N比。

初始反應率為在GNP合成法反應中，理論計算預測生產樣品重量與使用GNP合成法燃燒合成後的樣品粉末重量的計算所得知，如公式(3-11)所示。

$$\text{初始反應率} = (\text{預測粉末重量} / \text{GNP合成粉重量}) \times 100 \quad (3-11)$$

產物回收率為在本實驗中，取燒後的樣品重量與實驗中預測GNP合成法合成的樣品粉重計算所得，如公式(3-12)所示。

$$\text{產物回收率} = 1 - ((\text{預測粉末重量} - \text{取燒後重量}) / \text{預測粉重}) \times 100 \quad (3-12)$$

Chick et al.(1990)表示，調整GNP法中的G/N比會改變產生峰值火焰溫度，並且燃燒反應速度也會隨著G/N比的比率變化而有所改變。在文獻中使用G/N比為3的實驗下，儘管GNP反應會產生自燃，但自我維持燃燒的燃燒速度會有所減緩[7]。而在本研究中也出現了在G/N比為3時(因子H3)，燃燒速度反應緩慢現象。本研究發現，當G/N比為3的燃燒反應過程中，會有部份實驗樣品未完全反應。可能原因為，燃燒合成法是一種利用底部加熱的方式，使其底部達到燃點後燃燒，在透過燃燒的方式傳遞溫度能量，因此此反應過程中會有溫度梯度的現象發生。而又因為反應速度緩慢，在傳遞溫度的過程中，導致能量供給不足，使部分上層及外壁的實驗樣品無法正確的達到燃燒反應。本研究發現燃燒後未完全燃燒的實驗樣品呈現類似於膏體的前驅物狀態，此狀態黏稠且具有水份。而這些未完全燃燒的實驗樣品中含有水份就導致樣品總重量有所增加。因此本研究推估此現象就是造成在G/N比為2或3時(因子H2、H3)的實驗條件下，初始反應率會超過100的主要原因，如表3所示。

表 3. L18 組實驗透過GNP合成法產物回收率數值表

編號	預測粉重(g)	GNP合成粉重(g)	初始反應率	1000度瑕燒後重(g)	產物回收率
L1	10.23	9.16	89.5%	8.82	86.2%
L2	9.73	10.79	110.9%	8.12	83.5%
L3	9.22	12.23	132.6%	5.55	60.2%
L4	9.68	11.17	115.4%	3.84	39.7%
L5	9.43	8.86	93.9%	8.40	89.1%
L6	9.44	10.34	109.5%	8.31	88.1%
L7	9.47	10.33	109.1%	4.17	44.0%
L8	9.22	8.84	95.9%	8.55	92.8%
L9	9.23	10.35	112.2%	8.54	92.6%
L10	8.00	7.22	90.2%	6.94	86.8%
L11	8.00	7.91	98.9%	4.51	56.3%
L12	8.00	11.25	140.7%	3.87	48.4%
L13	8.00	4.33	54.1%	3.10	38.7%
L14	8.00	10.73	134.2%	4.40	54.9%
L15	8.00	6.41	80.1%	6.24	78.0%
L16	8.00	6.95	86.9%	5.46	68.2%
L17	8.00	11.62	145.2%	4.33	54.2%
L18	8.00	7.64	95.5%	7.21	90.1%

本實驗產物回收率-品質特性的因子反應如圖 2 所示，最佳產物回收率-因子選擇為 A1 B3 C3 D3 E3 F2 G1 H1 (A1 因子為GDC參雜量 40%、B3 因子為Ba取代La化學式中的莫耳比 0.10、C3 因子為Ca取代La化學式中的莫耳比 0.10、D3 因子為Zn取代Fe化學式中的莫耳比 0.10、E3 因子為Cu取代Fe化學式中的莫耳比 0.10、F2 因子為Mg取代Fe化學式中的莫耳比 0.05、G1 因子為Ni取代Fe化學式中的莫耳比 0、H1 因子為G/N比 1.0)。

產物回收率-品質特性的影響最大因子為H (G/N比)，其Range值為 38.67，減少G/N比，可以增加LSCF-GDC的產物回收率，如表 4 所示。

A因子為GDC參雜在LSCF中的莫耳百分比含量，其結果顯示LSCF與GDC的比例為 6：4 時有較佳的產物回收率。

透過因子B (Ba取代La)、C (Ca取代La)、D (Zn取代Fe)、E (Cu取代Fe)可以發現，隨著元素Ba、Ca、Zn、Cu的添加，達到本研究規劃的化學式中莫耳比最大值 0.10 時，達到最佳的產物回收率品質特性。

因子F (Mg取代Fe) 的添加在本實驗中顯示，化學式中的莫耳比為 0.05 時，擁有最佳的產物回收率品質特性。

因子G (Ni取代Fe) 在本實驗中顯示，在LSCF結構中添加Ni取代Fe，會降低GNP合成LSCF-GDC的產物回收率。並且隨著Ni的增加，產物回收率降低的幅度也會隨之增加。

本研究將最佳化產物回收率(因子A1 B3 C3 D3 E3 F2 G1 H1)進行相同實驗做為實驗驗證。初始反應率達 97.4%，產物回收率達 93.4%，相比田口 18 組不同參數的產物回收率平均的 69.5%，增加了 23.9%產物回收率，如表 5 所示。

實驗結果顯示，添加不同的硝酸鹽類，對於GNP燃燒合成法之產率影響並不明顯。本研究認為可能原因在於硝酸鹽類添加比例相對較低，導致影響不夠顯著。而在G/N比的添加上因子差異為倍數增長，因此在實驗結果上相較於添加硝酸鹽類的不同才有明顯的數值變化。因此後續實驗中，會將硝酸鹽類的添加比例增加，以利不同硝酸鹽類與GNP燃燒法影響之探討。

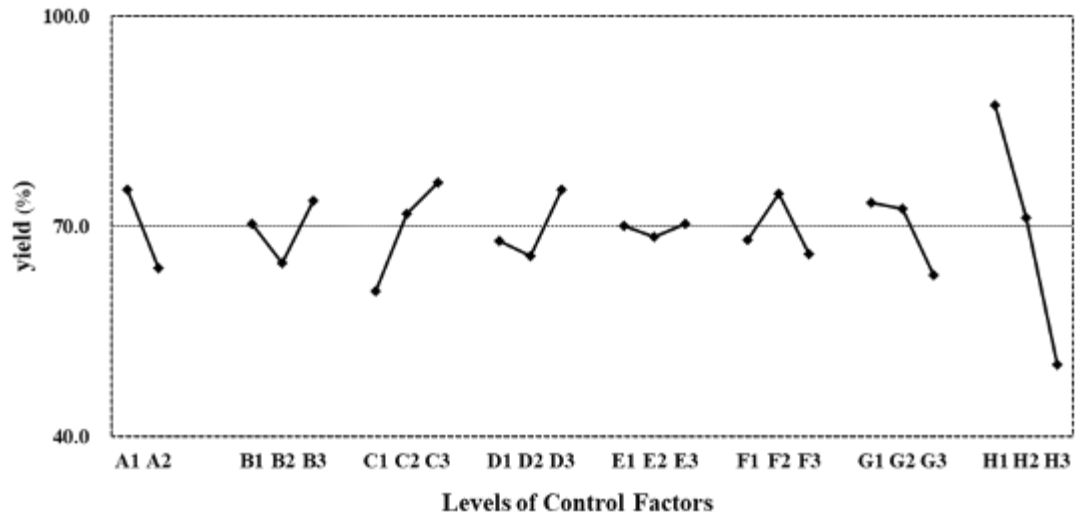


圖 2. 產物回收率-品質特性的因子反應圖

表 4. 產物回收率-品質特性的因子反應表

	AVG							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Level1	107.67	110.46	90.87	106.87	106.12	105.80	109.56	90.84
Level2	102.85	97.86	113.16	100.69	104.96	109.71	107.49	95.42
Level3		107.46	111.76	108.21	104.71	100.26	98.73	129.51
Range	4.81	12.60	22.29	7.52	1.41	9.45	10.83	38.67
Rank	7	3	2	6	8	5	4	1

表 5.最佳化實驗GNP合成法產物回收率數值表

編號	預測粉重(g)	GNP合成粉重(g)	初始反應率	1000度瑕燒後重(g)	產物回收率
L19	9.00	8.77	97.4%	8.40	93.4%

肆、結 論

本研究透過田口直交表 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 進行規劃，使用廢棄稀土拋光汙泥酸溶液添加Ba、Ca、Zn、Cu、Mg與Ni元素，並以燃燒合成法製備固態氧化物燃料電池 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}\text{-Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ 陰極材料，再將合成樣品秤重進行產物回收率計算。

1. 經ICP-OES分析結果顯示，酸液中回收之廢拋光汙泥含有約76.92 wt% CeO_2 及22.56% wt% La_2O_3 。
2. 本研究成功使用廢棄拋光汙泥酸溶的Ce及La，合成出LSDF-GDC陰極材料並無添加額外Ce，有效達到減少成本及資源再利用之目的。
3. 本研究18組不同參數的產物回收率平均為69.5%，最佳值為92.8%。透過田口變異分析找出回收率最佳化參數，使最佳化回收率提升達93.4%，相比於前18組實驗平均增加了23.9%回收率。在8個因子中，影響回收率最大的為G/N比，其根據添加比例的不同，影響產物回收率的權重達36.9%。

參考文獻

- [1] 薛康琳(2006)：燃料電池的原理、應用、與結構，工業技術研究院
- [2] Osamu Amano, Akira Sasahira, Yuko Kani, Kuniyoshi Hoshino, Masakatsu Aoi,.(2016). Fumio Kawamura.,Solubility of lanthanide fluorides in nitric acid solution in the dissolution process of FLUOREX reprocessing system. Journal of Nuclear Science and Technology, pp. 55–60,。
- [3] 林盈甫(2010)：GNP 法之反應機制探討以合成中溫型固態氧化物燃料電池陰極材料為例，碩士論文，國立臺北科技大學資源工程研究所，臺北
- [4] W. Zhou, Z.Shao, R. Ran, H.Gu, W. Jin, N. Xu, “ LSCF nanopowder from Cellulose-Glycine-Nitrate Process and its application in Intermediate-Temperature Solid-Oxide Fuel Cells ”, The American Ceramic Society, vol. 91, pp. 1155-1162, 2008。
- [5] 李輝煌(2000)：國立成功大學工程科學系，田口方法
- [6] 江竣綸(2016)：廢棄拋光粉中回收稀土元素鐳與鈾製備固態氧化物燃料電池複合陰極材料 $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.05}\text{Ca}_{0.1}\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}\text{-Gd}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{2-\delta}$ ，碩士論文，國立臺北科技大學資源工程研究所，臺北
- [7] L.A.ChickL.R.PedersonG.D.MaupinJ.L.BatesL.E.ThomasG.J.Exarhos. (1990).Glycine-nitrate combustion synthesis of oxide ceramic powders. Materials Letters, Volume 10, Issues 1–2, Pages 6-12

利用金屬有機骨架複合材料去除揮發性有機物之研究
Study on removal of volatile organic compounds by metal-organic
framework composite material

蕭詠儀¹、張章堂^{2*}

Yung-Yi Hsiao¹, Chang-Tang Chang^{2*}

1 國立宜蘭大學環境工程學系 大學生

Student, Department of Environmental Engineering, National Ilan University

2 國立宜蘭大學環境工程學系 教授

Professor, Department of Environmental Engineering, National Ilan University

* Corresponding author: ctchang@niu.edu.tw

摘 要

幾十年來，人們已經進行了許多努力來改善空氣品質。在化學和紡織工業中的揮發性有機化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 確實被列為需要管控的嚴重問題，以避免排放毒性物質與降低大氣中臭氧濃度。本研究通過一種綠色簡便的方法製造一種新穎的 β -環糊精金屬有機骨架(Beta-cyclodextrin-metal organic framework, β -CD-MOF)，以達到綠色製程製作環保吸附材料的目的。與純 β -CD (比表面積僅為 22 m²/g) 相比， β -CD-MOF 的結晶度更高，比表面積更大(可達 869 m²/g)。通過動態丙酮吸附裝置， β -CD-MOF 在室溫下對丙酮吸附能力可達 211 mg/g，高於活性碳(吸附能力僅約 192 mg/g)。另經由等溫吸附模擬得知 β -CD-MOF 對丙酮吸附作用屬於單層物理吸附行為，且由動力學模擬得知，吸附作用主要發生在表面吸附，且吸附作用限制條件主要為外部質傳。由熱力學分析研究結果得知，吸附反應屬於自發且放熱的反應。因吸附作用是物理吸附行為， β -CD-MOF 吸附劑重複使用性佳，經過四次實驗，對丙酮吸附能力僅降低約 10 %。本研究已對 VOCs 去除提供一個對環境有善、低成本與高效能解決方案。

關鍵字：丙酮、金屬有機骨架、環糊精、吸附

1.前言

根據世界衛生組織(World Health Organization, WHO)的定義，揮發性有機化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)是沸點為 50 至 260 °C 的有機化合物。它們是光化學氧化劑的前驅物質，有些污染物易對人的神經系統有害，甚至可能導致癌症 [1]。其中，丙酮是在醫藥，農藥和化學工業中經常發現的典型化合物 [2]。因此，控制空氣中丙酮的濃度至關重要 [3]。目前對丙酮處理已經開發多種技術，包括氣體吸附 [4]、催化氧化 [5]、等離子體催化氧化 [6]等。並廣泛使用吸附方法，將丙酮捕獲於吸附劑表面[7]，最常使用的吸附劑為活性碳(Activated carbon, AC)，因活性碳具有發達的孔結構和高表面積特性，且低成本以及高度的表面反應性，為一種極好的吸附劑 [8]。但是，AC 的結構和表面化學性質非常複雜，易影響對丙酮的吸附容量 [9]。

已經有不少研究討論吸附材料孔洞結構和碳表面化學性質對 VOCs 吸附的影響。如 Gil 等人(2014)使用鹼性藥劑進行吸附材料改性，以研製具微孔碳材，研究結果得知所研製碳材具有發達的微孔結構，可以將甲苯的吸附量從 27 mg/g 提升到 288 mg/g [10]。Shu 等人(2016)使用超音波振盪，製備具有不同紋理特性但表面官能團相似的載鐵活性碳，研究結果得知，在 0.7 - 2.0 nm 範圍內的微孔可以增強吸附作用 [11]。Qi 等人(2017)曾合成具有可控孔結構的球形多孔碳，並提出微孔率在表面化學性質相似的碳球，對 VOCs 吸附反應中起關鍵作用。由 Almazan 等人(2007)的研究發現，存在適當尺寸的微孔，對污染物處理有著相當重要作用，另具有含氧基團會抑制烷烴和苯的吸附 [12]。Ghimbeu 等人(2010)曾研究含氧基團與乙醇間相互作用，得知含氧基團可以增強吸附能力[13]。Liang 等人(2018)曾進行分子吸附模擬，研究結果證實加入含氧官能團後，可以增加丙酮的吸附容量[4]。由此可知碳材料上含氧基團與污染物間物理化學作用頗為複雜 [14]。一些污染物經物理吸附在孔洞內，易因為氣流帶動而脫附，但有些可藉由材料上官能團與污染物結合，進行化學吸附[15]。不少研究人員已經進行甲苯、二甲苯和鹵代烷等 VOCs 之物理化學吸附作用探討，並探討對強極性 VOCs(如丙酮)與非極性或弱極性 VOCs 之吸附特性，且進行不同污染物特性之間關係[16]。

近年來不少研究人員開發吸附能力更高之吸附材料，如金屬有機骨架(Metal organic framework, MOF)，MOF 是由金屬離子和有機多功能配體組成的高度有序的晶體材料 [17]。此材料具有高比表面積、多個官能團和可調節的孔隙率，可在氣體分離、氣體存儲、催化、化學傳感、藥物輸送等方面具有廣泛的潛在應用 [18]。不少研究人員為提升 MOF 吸附能力，乃通過在鹼金屬陽離子存在下對環糊精(Cyclodextrin, CD)進行重結晶，並成功製備一系列基於 α -、 β -和 γ -環糊精的無毒 MOF(Cyclodextrin metal organic framework, CD-MOF)[19]。CD-MOFs 在氣體吸附和分離領域具有良好的應用前景。例如通過形成碳酸基團、CO₂ 與 γ -CD-MOF 中的游離伯醇基團牢固，且可逆地結合 [20]。可以透過 γ -CD-MOFs 中羥基之氫鍵鍵合，將甲醛予以吸附 [21]。 γ -CD-MOF 亦可用於吸附六氟化硫，在 1.2 MPa 下處理 12 小時後的封裝容量可達到 $2.7 \pm 0.5\%$ (w/w)[22]。Al-Ghamdi 等人(2016)曾使用 γ -CD-MOF 進行乙醛吸附，其吸附能力可高達 53 $\mu\text{g/g}$ [23]。Li 等人(2018)曾使用 γ -CD-MOF 分離 CO₂ 和乙炔(C₂H₂)的混合物，得知可通過選擇性吸附，藉由 γ -CD-MOF 吸附 CO₂ 以獲得高純度的 C₂H₂ [24]。

因此本研究是以生物相容性的環狀寡糖環糊精的碳水化合物金屬有機骨架為主，且

所研製 CD-MOFs 可以被生物降解及再利用，對於環境危害也較其他金屬有機骨架低，因此本研究之目的為探討 CD-MOF 處理揮發性有機物與處理機制。

2. 實驗部分

2.1 材料和方法

β -環糊精(β -CD, 98%)購自 PanReac AppliChem (Europe)，氫氧化鈉(NaOH)購自 Nihon Shiyaku (Japan)，甲醇(MeOH)購自 Honeywell (Germany)，所有其他化學品均為本地供應商所提供的試劑級藥品。

2.2 β -CD-MOFs 的合成

先將 β -CD (1.46 g)和 NaOH (0.48 g)溶解在去離子水(20 mL)中，然後添加 MeOH (50 mL)以在 30°C 下蒸氣擴散到溶液中 7 天。再將過濾所得到的晶體，使用 MeOH 洗滌 3 次。為了除去間隙溶劑，將 β -CD-MOF 晶體浸入 CH_2Cl_2 中 3 天，並將樣品置於 40°C 的真空烘箱中乾燥 12 小時。



圖 1 實驗步驟之流程圖

2.3 特性分析

採用 Advance D8 X 射線衍射儀(Bruker, MA, USA)進行晶體特性分析，在 40 kV 和 40 mA 下使用 $\text{CuK}\alpha$ 輻射($\lambda = 0.15405 \text{ nm}$)進行 X 射線衍射(X-ray Diffraction, XRD)分析，機型為 Rigaku TTRAX 3，並以 $0.5^\circ/\text{min}$ 的掃描速率及 0.02° 步距間隔和 $3 - 40^\circ$ 的 2θ 角度範圍進行測量。所使用熱重分析儀(Thermal gravity analyzer, TGA)機型 STA(Perkin Elmer Inc.)，乃將樣品(3 - 6 mg)以 $10^\circ\text{C min}^{-1}$ 加熱速率從 40°C 加熱到 600°C 。

利用 X 光電子能譜儀(X-ray photoelectron spectrometer, XPS)可以用於是一種用於測定材料中元素組成、化學式和所含有之元素化學態及電子態，機型為 Theta Probe (Thermo Scientific Inc.)。使用掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy, SEM)觀察吸附材料結構，機型為 JSM-IT100 (In Touch Scope™)。利用傅立葉轉換紅外光譜(Fourier Transform Infrared spectroscopy, FTIR)，機型為 Nicolet iS10 (Thermo Scientific™)，確認官能團。

透過氮氣吸附與脫附分析儀(N_2 adsorption/desorption analyzer)，以瞭解 β -CD-MOF 比表面積及孔隙分佈分析，型號為 ASAP 2000。使用氣相層析火焰離子化偵檢器(Gas chromatograph flame ionization detector, GC-FID, Clarus 680)連接吸附管，以瞭解所開發材料吸附能力。

3.結果與討論

本研究為探討吸附材料之表面外觀特性、氧化化合物總類、元素價態、官能團、比表面積與孔洞大小、還原能力及熱穩定性，乃利用 XRD、XPS、TGA、FTIR、SEM、BET 等貴重儀器進行材料各項特性分析，其分析結果如下。

3.1 特性分析結果

3.1.1 XRD

通過甲醇蒸氣擴散製備基於環糊精的 MOF，即 β -CD-MOF。與 β -CD 相比， β -CD-MOF 的 X 射線衍射圖譜變化有明顯變化(圖 2)。 β -CD 的 XRD 圖譜中有許多峰消失，並由 2θ 處 5.6° 和 11.2° 的兩個尖峰所取代。由 XRD 圖譜的變化，可瞭解 β -CD-MOF 中 β -CD 與金屬離子反應，使結晶過程中形成高度有序的晶體結構。 β -CD-MOF 經過吸附後的 XRD 圖譜與 β -CD-MOF 並無太大的差異，可得知 β -CD-MOF 不論是在吸附前，吸附後的晶體結構皆為穩定狀態。

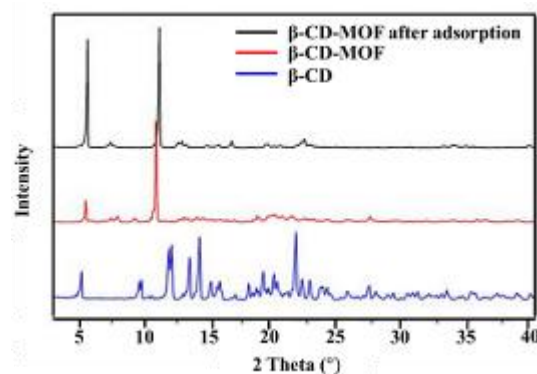


圖 2 β -CD 和 β -CD-MOF 的 X 射線衍射圖譜

3.1.2 XPS

使用單晶 X 射線衍射確定 β -CD-MOF 晶體結構。 β -CD-MOF 的 XPS 結果顯示出 Na 1s 的相應峰，此結果得知，成功地合成 β -CD-MOF。由圖 3 的 XPS 圖可以看出 β -CD-MOF 具有 Na 1s、O KLL、O 1s 及 C 1s 的相應峰，而將 β -CD-MOF 經過吸附後，O KLL、O 1s 及 C 1s 的相應峰均還存在，Na 1s 的相應峰消失，因為在進行吸附過程中，金屬離子會與被吸附之丙酮發生吸附反應，促使丙酮能吸附在金屬有機骨架上，造成 Na 1s 的相應峰消失。

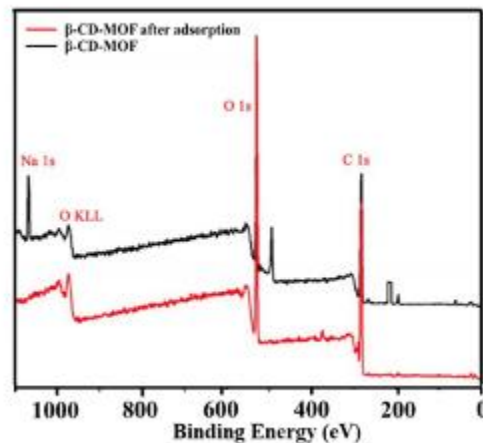


圖 3 β -CD 和 β -CD-MOF 的單晶 X 射線衍射圖

3.1.3 TGA

β -CD-MOF 的熱力學性質可由圖 4 的 TGA 圖可以瞭解其特性。在 100°C 左右時， β -CD、 β -CD-MOF 及經過吸附的 β -CD-MOF 皆有部分重量損失，這是由於水分的蒸發所導致的情形。 β -CD 在 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ 之間，重量急速的損失，由於 β -CD 因為高溫發生裂解，變成更細小的分子，最後變成無機的 CO_2 和 H_2O ，由於高溫蒸發， β -CD 最終的重量幾乎為零。與 β -CD 相比， β -CD-MOF 不論是吸附前還是吸附後，皆在 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 發生裂解，由於 β -CD-MOF 具有較多官能團，因此發生裂解的溫度較原始 β -CD 低。裂解後的 β -CD-MOF 約只剩下 30% 的重量，而吸附後的 β -CD-MOF，會與污染物發生反應，部分變成 CO_2 和 H_2O ，因此重量的損失更為明顯，只剩下 20% 的重量。

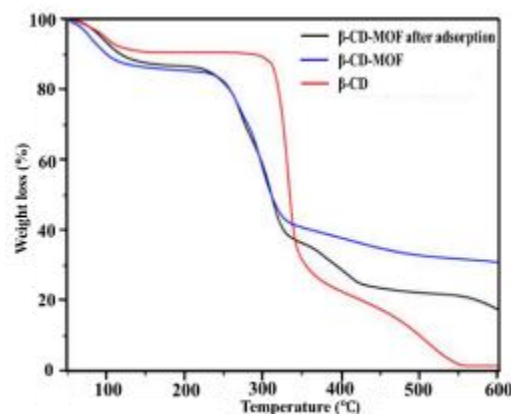


圖 4 β -CD 和 β -CD-MOF 的熱重分析圖

3.1.4 FTIR

在本研究中，透過 FTIR 光譜瞭解 β -CD-MOF 結構與官能團及結構穩定性，圖 5 為 β -CD 和 β -CD-MOF 的 FTIR 圖。其結果顯示 β -CD 在 3400 cm^{-1} 有 O-H 官能團； 2900 cm^{-1} 附近有 CH_2 官能團； 1600 cm^{-1} 有 H-O-H 官能團； 1100 cm^{-1} 附近有 C-H 官能團，而在 1000 cm^{-1} 的官能團為 C-O-C。與 β -CD-MOF 比較後發現， β -CD 所有官能團皆能在 β -CD-MOF 上發現。且在 2900 cm^{-1} 左右的 CH_2 官能團從單峰變成雙峰，並在 1250 cm^{-1}

左右，可以發現 C-N 官能團。即 β -CD 的官能團皆存在於 β -CD-MOF，顯示結構穩定。

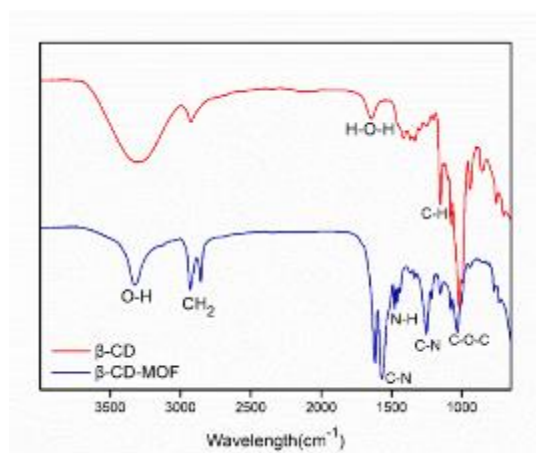


圖 5 β -CD 和 β -CD-MOF 的傅立葉轉換紅外光譜

3.1.5 SEM

圖 6 為 β -CD 和 β -CD-MOF 的光學顯微鏡圖像。圖 6(a)-(b)分別為 β -CD 的 SEM 圖像，圖 6(c)-(d)為 β -CD-MOF 的 SEM 圖像。由圖可知，純 β -CD 和 MOF 均顯示出無定形結構。 β -CD 簇的大小較大，在添加連接劑以製成 MOF 之後，可以觀察到顆粒均勻地團聚在一起。

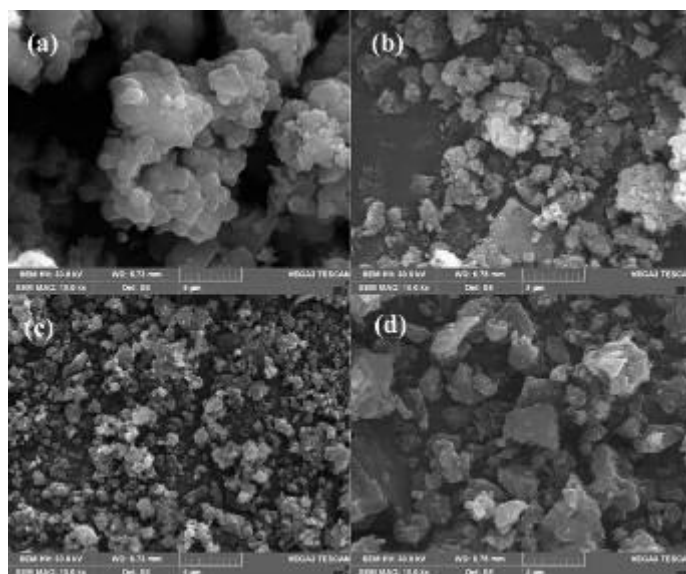


圖 6 β -CD 和 β -CD-MOF 的光學顯微鏡圖像

3.1.5 BET

在 25°C、一大氣壓下進行 N_2 等溫吸脫附實驗，如圖 7 所示。此等溫吸脫附圖屬於第 II 型等溫線(S 型等溫線)，在低 P/P_0 處有拐點，是等溫線的第一個陡峭部，它可以表示單分子層的飽和吸附量。而隨著相對壓力的增加，開始形成第二層，在達到飽和蒸氣壓時，吸附層數可以無限增大。與純 β -CD (比表面積僅為 22 m^2/g) 相比， β -CD-MOF

的結晶度更高，比表面積更大(可達 $869 \text{ m}^2/\text{g}$)。圖 8 和圖 9 為 BJH 吸脫附孔分佈，由圖可知，孔隙分佈大多為中孔洞結構，與圖 7 相呼應。

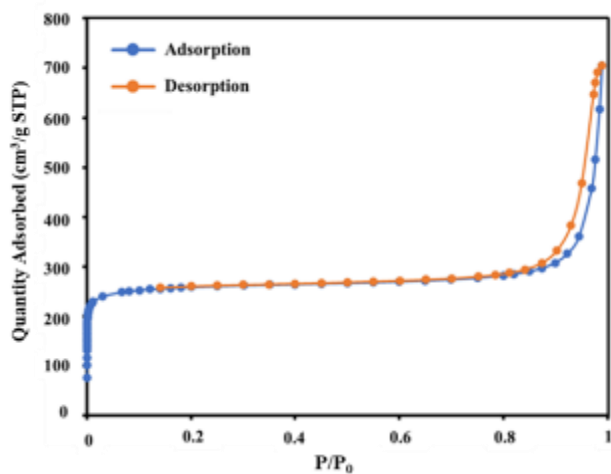


圖 7 N_2 吸脫附實驗

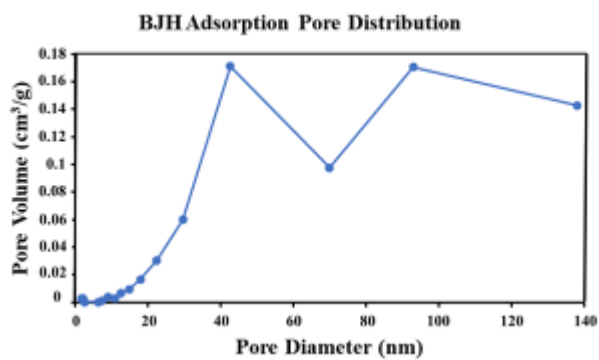


圖 8 BJH 吸附孔分佈

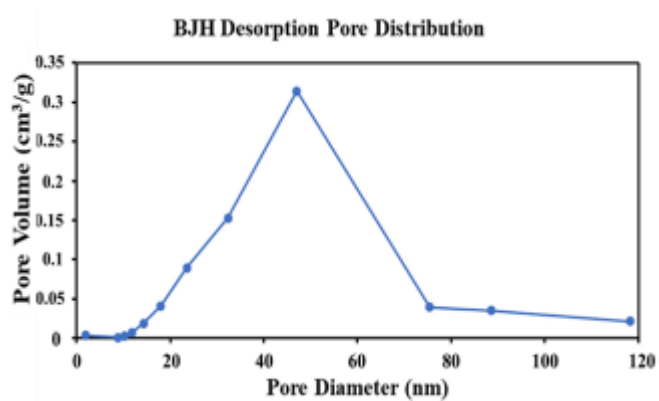


圖 9 BJH 脫附孔分佈

3.2 性能評估結果

本研究使用流量計、吸附管(石英管)和其他連接管設計自製裝置，並將其與 GC-FID 連接，以瞭解所開發材料的吸附能力。利用流量計控制流量以保持一定入流濃度，並使用 GC-FID 進行吸附行為監測，以了解貫穿時間與飽和時間，並計算吸附能力。

研究結果得知在不同濃度(200, 400, 600 與 800ppm)下，入流濃度越高，貫穿時間與飽和時間越短，吸附能力越高。使用 β -CD-MOF 於四種入流濃度下，其貫穿時間分別為 130、100、70 與 68 分鐘，在室溫下對丙酮吸附能力分別為 145、196、197 與 211 mg/g，最高吸附能力(211 mg/g)高於活性碳之吸附能力(僅約 192 mg/g)，如圖 10 所示。

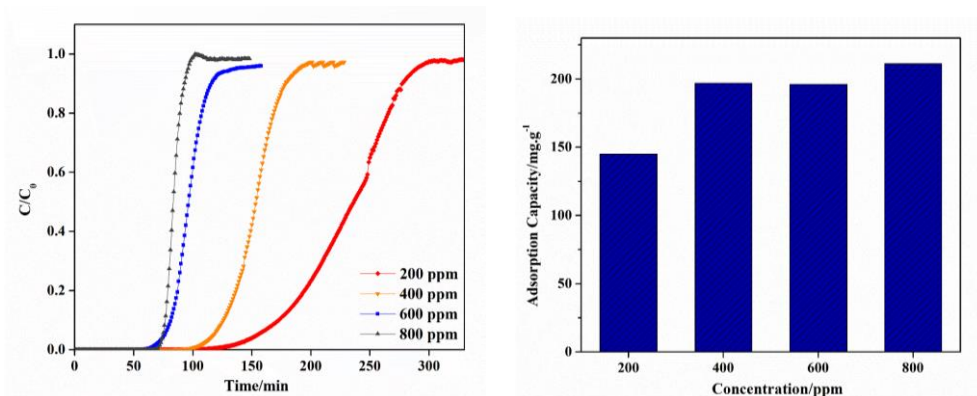


圖 10 不同濃度下之吸附飽和量

為瞭解 β -CD-MOF 此吸附材的回收使用性。將吸附材進行四次吸附回收使用，如圖 11 所示。對丙酮之吸附能力從原本 211 mg/g 減少為 189 mg/g，吸附能力僅降低 10%。因此，此材料可回收重複利用，能減少成本、促進環境友善。

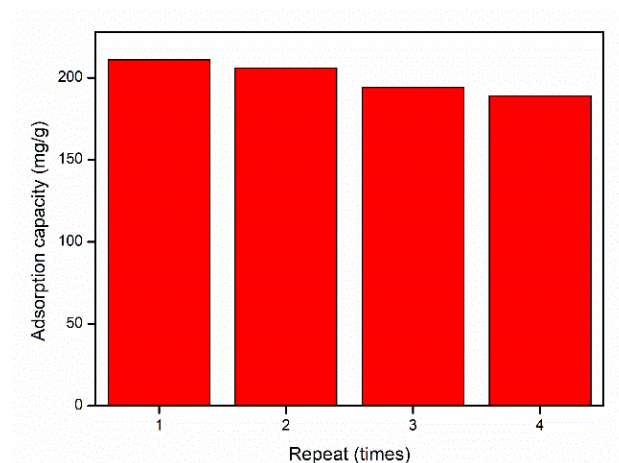


圖 11 重複回收實驗

4. 結論

本研究通過一種綠色簡便的方法製造一種新穎的 β -CD-MOF，經過特性分析，可以得知其比表面積為 $869 \text{ m}^2/\text{g}$ 遠高於純 β -CD ($22 \text{ m}^2/\text{g}$)；而其吸附能力，在室溫下可吸附 211 mg/g 的丙酮，高於活性碳(吸附能力僅約 192 mg/g)。由於 β -CD-MOF 對丙酮吸附作用屬於單層物理吸附行為，因此吸附劑可進行重複使用，經過四次重複回收實驗，對丙酮吸附能力僅降低約 10 %。本研究已對 VOCs 去除提供一個對環境有善、低成本與高效能解決方案。

參考文獻

1. Mohan, N., Kannan, G. K., Upendra, S., Subha, R., & Kumar, N. S. (2009). Breakthrough of toluene vapours in granular activated carbon filled packed bed reactor. *Journal of hazardous materials*, 168(2-3), 777-781.
2. Li, L., Sun, F., Gao, J., Wang, L., Pi, X., & Zhao, G. (2018). Broadening the pore size of coal-based activated carbon via a washing-free chem-physical activation method for high-capacity dye adsorption. *RSC advances*, 8(26), 14488-14499.
3. Trinh, Q. H., Gandhi, M. S., & Mok, Y. S. (2014). Adsorption and plasma-catalytic oxidation of acetone over zeolite-supported silver catalyst. *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(1S), 01AG04.
4. Terencio, T., Di Renzo, F., Berthomieu, D., & Trens, P. (2013). Adsorption of acetone vapor by Cu-BTC: An experimental and computational study. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(49), 26156-26165.
5. Gil, A., Gandía, L. M., & Korili, S. A. (2004). Effect of the temperature of calcination on the catalytic performance of manganese-and samarium-manganese-based oxides in the complete oxidation of acetone. *Applied Catalysis A: General*, 274(1-2), 229-235.
6. Trinh, H. Q., & Mok, Y. S. (2014). Plasma-catalytic oxidation of acetone in annular porous monolithic ceramic-supported catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 251, 199-206.
7. Qi, J., Li, J., Li, Y., Feng, X., Sun, X., Shen, J., Han, W. & Wang, L. (2017). Synthesis of porous carbon beads with controllable pore structure for volatile organic compounds removal. *Chemical Engineering Journal*, 307, 989-998.
8. Chiang, Y. C., Chiang, P. C., & Huang, C. P. (2001). Effects of pore structure and temperature on VOC adsorption on activated carbon. *Carbon*, 39(4), 523-534.
9. Lillo-Ródenas, M. A., Cazorla-Amorós, D., & Linares-Solano, A. (2005). Behaviour of activated carbons with different pore size distributions and surface oxygen groups for benzene and toluene adsorption at low concentrations. *Carbon*, 43(8), 1758-1767.
10. Gil, E. R., Ruiz, B., Lozano, M. S., Martín, M. J., & Fuente, E. (2014). VOCs removal by adsorption onto activated carbons from biocollagenic wastes of vegetable tanning. *Chemical Engineering Journal*, 245, 80-88.
11. Shu, S., Guo, J. X., Liu, X. L., Wang, X. J., Yin, H. Q., & Luo, D. M. (2016). Effects of pore sizes and oxygen-containing functional groups on desulfurization activity of Fe/NAC prepared by ultrasonic-assisted impregnation. *Applied Surface Science*, 360, 684-692.
12. Almazan-Almazan, M. C., Perez-Mendoza, M., Domingo-Garcia, M., Fernandez-Morales, I., del Rey-Bueno, F., Garcia-Rodriguez, A., & Lopez-Garzon, F. J. (2007). The role of the porosity and oxygen groups on the adsorption of n-alkanes, benzene, trichloroethylene and 1, 2-dichloroethane on active carbons at zero surface coverage. *Carbon*, 45(9), 1777-1785.
13. Ghimbeu, C. M., Gadiou, R., Dentzer, J., Schwartz, D., & Vix-Guterl, C. (2010).

- Influence of surface chemistry on the adsorption of oxygenated hydrocarbons on activated carbons. *Langmuir*, 26(24), 18824-18833.
14. Guo, Y., Li, Y., Wang, J., Zhu, T., & Ye, M. (2014). Effects of activated carbon properties on chlorobenzene adsorption and adsorption product analysis. *Chemical Engineering Journal*, 236, 506-512.
 15. Bell, J. G., Zhao, X., Uygur, Y., & Thomas, K. M. (2011). Adsorption of chloroaromatic models for dioxins on porous carbons: the influence of adsorbate structure and surface functional groups on surface interactions and adsorption kinetics. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(6), 2776-2789.
 16. Romero-Anaya, A. J., Lillo-Rodenas, M. A., & Linares-Solano, A. (2014). Activation of a spherical carbon for toluene adsorption at low concentration. *Carbon*, 77, 616-626.
 17. Yaghi, O. M., O'Keeffe, M., Ockwig, N. W., Chae, H. K., Eddaoudi, M., & Kim, J. (2003). Reticular synthesis and the design of new materials. *Nature*, 423(6941), 705-714.
 18. Li, H., Lv, N., Li, X., Liu, B., Feng, J., Ren, X., Guo, T., Chen, D., Stoddart, J. F., Gref, R., & Zhang, J. (2017). Composite CD-MOF nanocrystals-containing microspheres for sustained drug delivery. *Nanoscale*, 9(22), 7454-7463.
 19. Forgan, R. S., Smaldone, R. A., Gassensmith, J. J., Furukawa, H., Cordes, D. B., Li, Q., Wilmer, C. E., Botros, Y. Y., Snurr, R. Q., Slawin, A. M. Z., & Stoddart, J. F. (2012). Nanoporous carbohydrate metal-organic frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, 134(1), 406-417.
 20. Wu, D., Gassensmith, J. J., Gouvêa, D., Ushakov, S., Stoddart, J. F., & Navrotsky, A. (2013). Direct calorimetric measurement of enthalpy of adsorption of carbon dioxide on CD-MOF-2, a green metal-organic framework. *Journal of the American Chemical Society*, 135(18), 6790-6793.
 21. Wang, L., Liang, X. Y., Chang, Z. Y., Ding, L. S., Zhang, S., & Li, B. J. (2018). Effective formaldehyde capture by green cyclodextrin-based metal-organic framework. *ACS applied materials & interfaces*, 10(1), 42-46.
 22. Han, L., Guo, T., Guo, Z., Wang, C., Zhang, W., Shakya, S., Ding, H., Li, H., Xu, X., Ren, Y., & Zhang, J. (2018). Molecular Mechanism of Loading Sulfur Hexafluoride in γ -Cyclodextrin Metal-Organic Framework. *The Journal of Physical Chemistry B*, 122(20), 5225-5233.
 23. Al-Ghamdi, S., Kathuria, A., Abiad, M., & Auras, R. (2016). Synthesis of nanoporous carbohydrate metal-organic framework and encapsulation of acetaldehyde. *Journal of Crystal Growth*, 451, 72-78.
- Li, L., Wang, J., Zhang, Z., Yang, Q., Yang, Y., Su, B., Bao, Z. & Ren, Q. (2018). Inverse adsorption separation of CO₂/C₂H₂ mixture in cyclodextrin-based metal-organic frameworks. *ACS a*

利用靜電紡絲技術研製負載鐵二氧化鈾奈米纖維 與進行光催化降解諾氟沙星之研究

Nano Fe-CeO₂ fiber preparing with electrospinning techniques and its application for Norfloxacin photocatalytic degradation

柯昀佐^{1*} 張章堂²

Yun-Zuo Ko¹ Chang-Tang Chang²

1 國立宜蘭大學環境工程學系 大學生

Student, Department of Environmental Engineering, National Ilan University

2 國立宜蘭大學環境工程學系 教授

Professor, Department of Environmental Engineering, National Ilan University

* Corresponding author: Gmamume10101@gmail.com

摘要

抗生素常使用於預防性投藥以避免開放性創傷導致進一步的傷口感染。但近幾年來有出現藥物濫用的問題，多數的藥品在藥物回收觀念宣導不周全的情況下，輕易的藉由垃圾、水槽、馬桶等方式丟棄，導致地下水及飲用水源被污染。這些污染物隨著食物鏈的傳遞容易傳遞且毒性累積至生物體內，最終導致人們健康遭受到迫害。本研究乃先製作高效能可吸收可見光或紫外光，且易於回收之光觸媒纖維材料，並應用此材料進行光催化技術降解含抗生素廢水。

本研究利用光沉積法將鐵負載至二氧化鈾上，以利得到含鐵二氧化鈾光觸媒材料(Fe-CeO₂)，再利用靜電紡絲技術製成含鐵二氧化鈾聚丙烯腈纖維材料，並利用光催化技術將諾福沙星(Norfloxacin, NF)降解去除。另透過添加氧化劑，提升NF降解能力。本研究將透過靜電紡絲技術研製次微米到奈米尺寸的纖維，此光觸媒纖維具高孔隙、高表面附著及高回收率，可利於水中抗生素處理及減少光觸媒材料流失帶來二次污染。

為得到最佳降解效能，藉由不同參數(附載鐵比例、投加量、初始濃度)進行實驗，研究結果顯示當使用觸媒(8%Fe-CeO₂)劑量為0.2 gL⁻¹，於初始濃度為1ppm內，紫外光強度為8W，且波長為254 nm可達最佳處理效能。

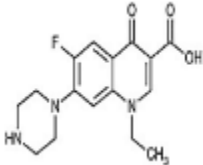
關鍵字：二氧化鈾、鐵、光催化、紡絲、抗生素

一、前言

隨著醫療技術的進步，抗生素常使用於預防性投藥以避免開放性創傷導致進一步的傷口感染(李茂豪, 2013)^[1]。但近幾年來有出現藥物濫用的問題，多數的藥品在藥物回收觀念宣導不周全的情況下，輕易的藉由垃圾、水槽、馬桶等方式丟棄，導致地下水及飲用水源被污染。近年來製藥和個人護理產品(pharmaceuticals and personal care products, PPCPs)在河川、溪流等天然水體與下水系統及廢水處理廠放流口之中被檢測出來的案例逐年增加(王筱歡, 2014; Evgenidou et al., 2015)^{[2][3]}。這些污染隨著食物鏈的傳遞容易傳遞且毒性累積至生物體內，最終導致人們健康遭受到迫害。

氟喹諾酮類抗生素是治療多重抗藥性結核病的重要藥物之一(multidrug-resistant tuberculosis, MDR-TB)，可同時對異菸鹼醯(isoniazid)和利福平(rifampicin)抗藥之結核病進行治療(簡榮彥, 2016)^[4]。而同為氟奎諾酮類之一的 NF 也存有相同的抗菌機制，屬於第三類之氟喹諾酮類(林澄琴, 1987)^[5]。詳細特性如表 1 所示，主要可用於治療尿道感染與腸炎痢疾等問題，但近年來發現這種藥物會遲緩孩童的骨骼發展，還有可能對中樞神經系統、心臟、肝臟、皮膚、胃腸道、聽力以及血糖代謝產生嚴重損害，出現發疹與搔癢、手腳指抽搐、喉部與臉部腫脹、吞嚥困難、呼吸困難、心悸及失去意識等副作用，故現在已經禁止未成年人服用。

表 1 諾氟沙星特性介紹

品項	化學結構	分子式	最大吸收波長(nm)	分子質量(g mol ⁻¹)
諾氟沙星		C ₁₆ H ₁₈ FN ₃ O ₃	273	319

為有效去除在水體中含有的抗生素污染，本研究參考國內外各類抗生素污染物處理技術，得知目前主要處理抗生素之技術大致可分為三類，分別為吸附法、生物處理法與高級氧化技術等，其中處理時間最長的是生物處理法，且生物處理法須聯用其他氧化技術方可對抗生素污染物有效的去除，吸附法則是因為使用活性碳吸附處理成本較高，且不易回收再生，故本研究選擇高級氧化技術進行處理。而常用之高級氧化技術大多搭配氧化劑或觸媒對污染物進行處理，以利提高處理效率，目前常見的觸媒有 TiO₂、ZnO 及 CeO₂ 等半導體材料，本研究即是使用含鐵二氧化鈾材料並搭配靜電紡絲技術，利用光催化法降解諾氟沙星。

靜電紡絲是一種創造具有各種結構的奈米纖維材料的通用技術，從組織工程、能量收集、過濾等眾多領域有著廣泛的應用，近年來已為材料科學領域最重要的學術和技術活動之一。除了在二維(2D)奈米材料的構建中發揮重要作用外，靜電紡絲作為一種穩健的方法，在生產三維(3D)結構方面也大有可為。

通過電紡形成奈米纖維是基於黏彈性溶液的單軸拉伸。利用高壓靜電場，使聚合

物溶液或熔體帶電，在噴嘴末端形成懸浮的錐狀液滴，當排斥力超過其表面張力時，聚合物微液流就會高速噴射出來。這些射流於短時間內被電場拉伸，沉積在收集器上形成奈米纖維。

靜電紡絲製程經由使用各種不同的操控參數，可製備出多樣化型態的奈米纖維。其中每一個單位都可以是一個變數，分別為聚合物的分子量，溶液的性質(黏度、電導度及表面張力)，電壓、流速、濃度，毛細管與收集屏幕之間的距離，溫度、濕度及實驗空間的空氣流速等之環境參數，與收集器之間的甩動模式及纖維大小，不同大小直徑注射針亦會影響整個纖維的形成，如表 2^[6]。

表 5 靜電紡絲技術參數對所形成纖維形態之影響

技術參數	對所形成纖維形態之影響
濃度與粘度	低濃度與粘度產生珠狀的纖維和缺陷，增加濃度與粘度可降低缺陷，纖維直徑隨濃度與粘度增加而增加。
導電性	增加導電性可產生均勻無珠狀的纖維，高導電性一般產生更細的纖維。
表面張力	表面張力和纖維形態之間沒有明確關係。
分子量	提高分子量可減少珠粒的產生。
介電常數	成功紡絲發生在溶劑中具有高的介電常數時。
流量	低流速產生較小的纖維直徑，高流速產生未乾燥的纖維。
電場強度	高電壓時，容易產生珠狀的纖維。
針尖與收集器之距離	距離需要足夠使溶劑揮發，太近或太遠會產生珠狀的纖維。
針頭設計	使用同軸的中空針頭，可產生中空纖維；而同時使用多個針頭，可提高產量。
環境參數	溫度升高導致溶液粘度下降，從而導致更小的纖維，增加濕度會導致纖維外觀上的孔洞。

資料來源: Pham et al., 2006

二、實驗方法

(一) 纖維材料製備

1. 光沉積法製備 Fe-CeO₂

本實驗參考 Dimitrova 等人於 2018 年利用光沉積法負載鉑及銅於二氧化鈦上 (Dimitrova et al. 2018)^[7]。首先計算所需鐵的比例，計算方式如式(1)。之後將硫酸亞鐵融入超純水中，確認溶解後，將液體加入二氧化鈾粉末，加入磁石利用磁石攪拌器均勻混合，放入紫外光反應器內(254nm)，照射紫外光持續 12 小時。結束後，將材料利用超純水及酒精反覆洗滌數次，利用幫浦及濾紙過濾，再將過濾後的固體拿去烘箱內乾燥溫度設定 80 度持續 4 小時，乾燥後的固體物，利用瑪瑙研磨器，均勻研磨成細小顆粒，

並利用篩網過濾，即可得到 Fe-CeO₂ 奈米複合材料。

$$\text{Fe} = \text{FeC} / (\text{FeC} + \text{Ce}) * 100\% \quad (1)$$

其中

Fe: 材料含鐵含量(%)

FeC: 亞硝酸鐵使用重量

Ce: CeO₂ 使用重量

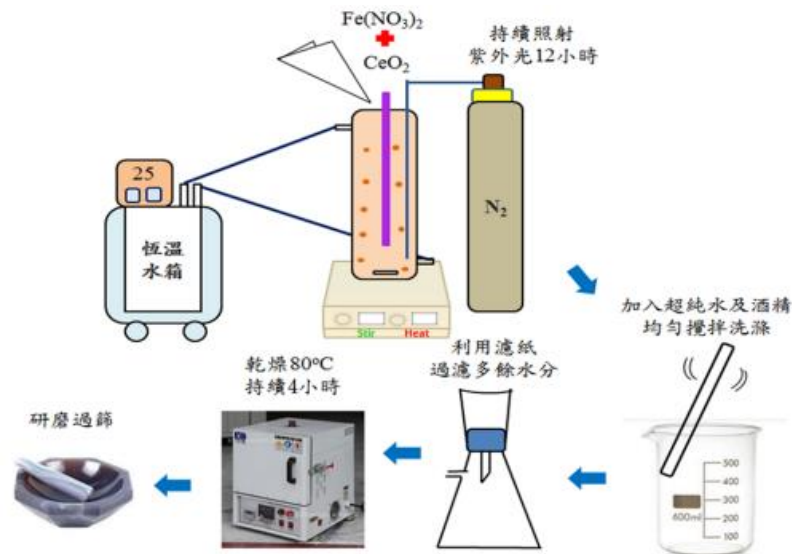
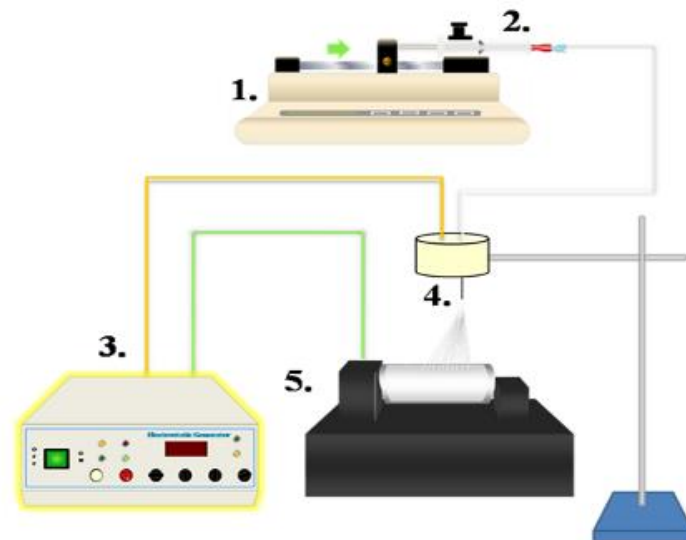


圖 1 光沉積法製備 Fe-CeO₂ 示意圖

2. 靜電紡絲製備 Fe-CeO₂ 纖維

將聚丙烯腈溶解在二甲基乙醯胺(Dimethylacetamide, DMAC)溶劑中，經磁力攪拌 6 小時後，再超音波震盪 1 小時，得到均質的 6 wt% 聚丙烯腈高分子溶液，之後加入 2% 含量的含鐵二氧化鈾材料，放入超音波機器內均勻震盪作為前體溶液，將製備好的前體溶液放置於 10 mL 針管中，以鐵氟龍管連接針管與針頭，設定推進流量於 1.0 mL h⁻¹，收集器與針頭間距設定為 15 cm，控制電場電壓於 13 - 16 KV，旋轉收集器轉度設定為 100 rpm，利用靜電紡絲製程在收集器上收集電紡聚丙烯腈奈米纖維層，將所收集之纖維放置於真空乾燥箱保存。圖 2 為本研究之靜電紡絲實驗系統圖，設備部分包括定量注射器、針筒、高電壓供應器、針頭與旋轉收集器；將前體溶液注入一個 10 毫升的針筒以鐵氟龍管連接至不銹鋼針頭，然後置於注射幫浦(syringe pump)上，針頭接上高壓電源供應器(high voltage power supplier)，所使用直徑為 0.52 mm 的不銹鋼針頭。



1.定量注射器，2.針筒，3.高電壓供應器，4.針頭，5.旋轉收集器

圖 2 靜電紡絲設備圖

(二) 光催化降解性能評估實驗

1. 模擬含抗生素廢水實驗

為探討所製備之 Fe-CeO₂ 紡絲纖維觸媒對水中抗生素降解之效果，本研究進行模擬廢水合成。選擇之污染物諾氟沙星溶解度低且難溶於水，需加入一點 NaOH，以利污染物粉末快速溶解於水中。製備 NF 方式如下，首先秤取 80 mg 的 NF 粉末於定量瓶中，再添加 1 毫升 0.25 莫耳濃度的氫氧化鈉溶液將粉末溶解，最終用超純水把已經溶解的 NF 定量至 1 公升進行避光儲存在進行實驗時，再依照所需濃度(5, 10, 20 與 40ppm)稀釋倍率即可。

2. 材料性能評估方法

本實驗利用 Fe-CeO₂ 紡絲纖維處理為含 NF 廢水。首先使用光催化反應器，其紫外燈波長為 245nm，輸出功率為 8w，及可見光燈管波長 440nm，輸出功率 32W，並且所有實驗都在常溫常壓下進行。首先加入 500 mL 的 NF 液體至反應槽內，再將 Fe-CeO₂ 粉末依比例加入反應槽內，加入磁石利用磁石攪拌器均勻攪拌。前三十分鐘紫外光不打開，其原因為使材料達吸附飽和，其取樣時間為 10、20 與 30 分鐘。之後將紫外光打開，連續照射 2.5 小，設定取樣時間為 40、60、90、120、150 與 180 分鐘。取樣時使用 6 毫升的小針筒，在針頭處套入直徑 33 mm 的 PES 材質過濾頭，過濾口徑為 0.22 μm，將溶液過濾後。並使用 UV-Vis 對 NF 進行全譜波長分析，其分析結果可得最大吸收峰分別於 273 nm 之處，則可設定分析波長於最大吸收峰進行吸光度的測定，實驗流程如圖 3-4 所示(Jin et al. 2016)。^[8]

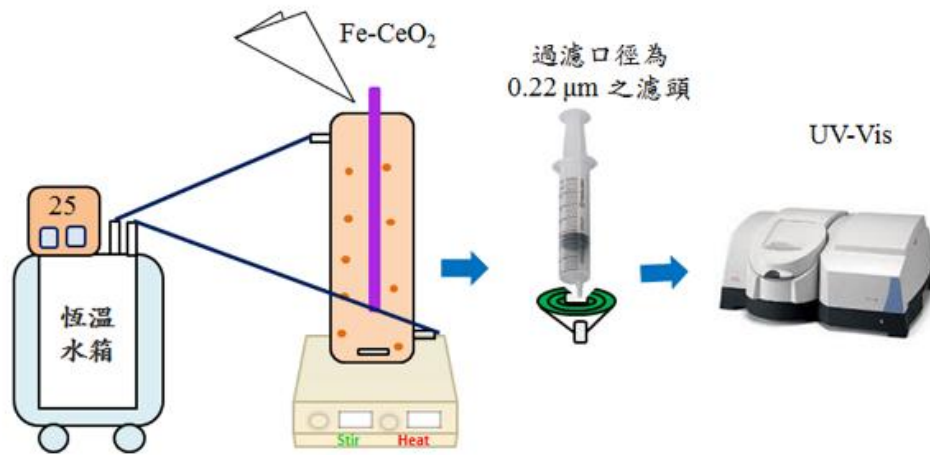


圖 3 光催化降解 NF 實驗流程

三、結果與討論

首先對所製備之 Fe-CeO₂ 粉末及纖維進行表面特性分析 (含 FE-SEM、EDS、FTIR、UV-Vis)，而後研究不同光降解操作參數(污染物的初始濃度、觸媒投加量、Fe 含量、與溶液初始溫度等)對污染物的去除效率影響之評估，最後探討熱力學之關係。

(一)特性分析

1. FE-SEM

為了探討粉末及纖維材料生長情形及奈米結構，本實驗使用 FE-SEM 進行分析，分析結果如圖 4(a)及(b)所示。從圖 4(a)得知當 Fe-CeO₂ 粉末材料放大至 2,700 倍時，可發現含鐵二氧化鈾有團聚現象，且材料團聚大小約在 4–6 μm，整體外觀基本上為塊狀。二氧化鈾粒徑大小約 60 nm，且顆粒大小均一。此微小奈米級顆粒可促進光觸媒反應，並且能接收到足夠的光線來提高其效率。從圖 4(b)得知材料 Fe-CeO₂ 紡絲纖維為隨機不規則絲狀物所構成。

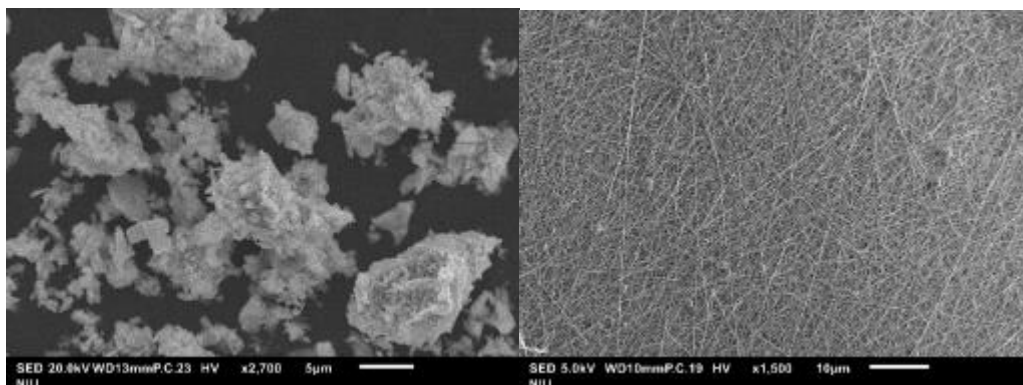


圖 4 FE-SEM 分析圖

圖(a) Fe-CeO₂ 粉末放大 27,00 倍外觀圖 圖(b) Fe-CeO₂ 紡絲纖維放大 150,0 倍外觀圖

2. EDS Mapping

為了瞭解鐵元素在二氧化鈾的分布情況，本實驗利用 Mapping 進行分析，實驗結果如圖 5(a) (b) (c) (d)所示。圖 5(a)為鐵的分布情況，可以看出來均勻分布在材料上，圖 5(b)為鈾的分布情況，圖 5(c)為碳的分布情況，圖 5(d)為氧的分布情況。

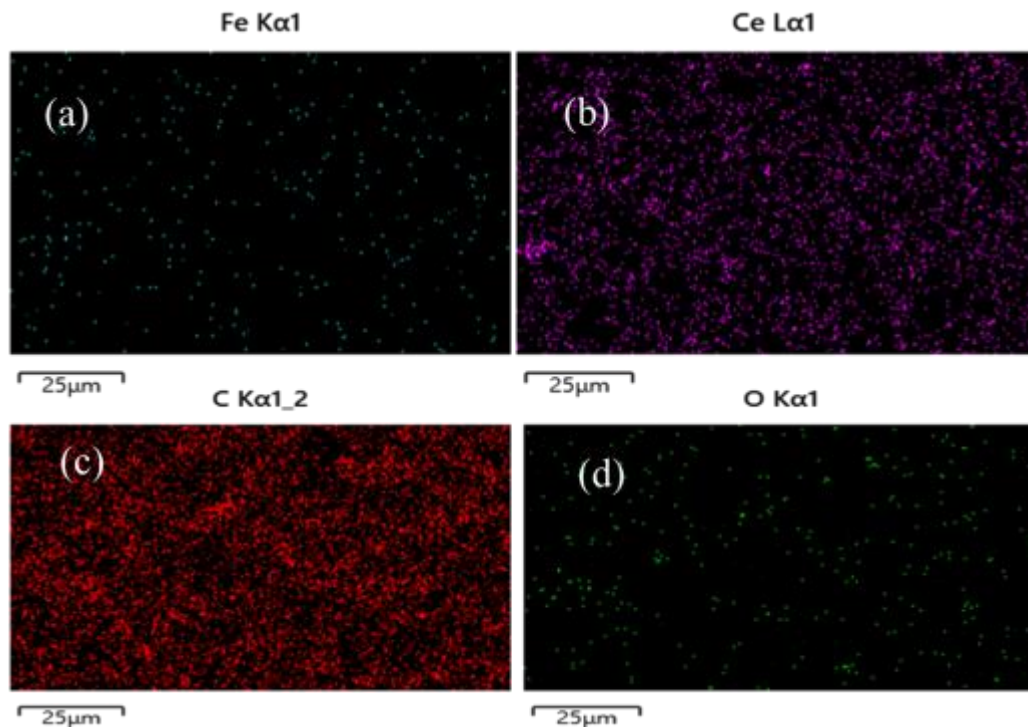


圖 5 8%Fe-CeO₂ 纖維之 EDS Mapping

3. FTIR

利用 FTIR 觀察不同比例含鐵二氧化鈾官能團情況，光譜 677 cm^{-1} 附近存在 Fe-O 鍵，位於 668 cm^{-1} 處的譜帶為 Ce-O 拉伸模式，在 2360 cm^{-1} 附近觀察到較大的寬吸收帶，這與在表面上 C-H 鍵的拉伸振動有關，寬吸收帶 3447 cm^{-1} 歸因於 Fe-CeO₂ 中因吸水的正常聚合 O-H 拉伸振動，如圖 6。

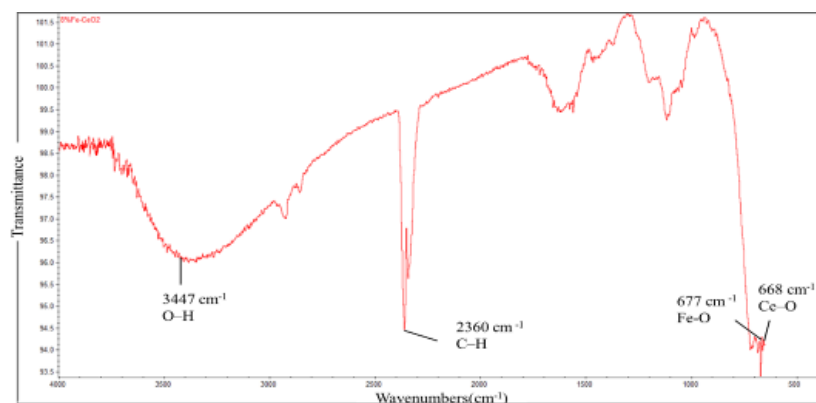


圖 6 FTIR 分析圖

4. UV-Vis

為了瞭解 Fe-CeO₂ 在不同含鐵量的情況下對能隙的影響，本實驗利用 UV-Vis 來計算各鐵含量的能隙。結果顯示如圖 7 所示，在純 CeO₂ 情況下， λ 約為 419.5 nm ，1、2、

4 與 8%Fe-CeO₂ 含量的 λ 分別為 423.4、426.6、431.4 與 473.6 nm，能隙計算結果如表 4-2 所示。隨著鐵含量的增加，能隙從 2.95 eV 下降至 2.62 eV。隨著鐵含量的增加，可見光的最大吸收能力也逐漸增加。故利用光沉積法將鐵負載至二氧化鈰上有助於降低能隙及增加可見光範圍的吸收能力。

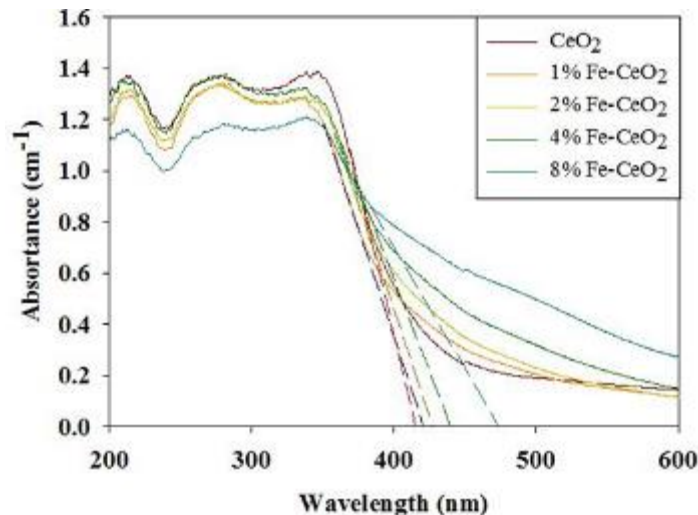


圖 7 Fe-CeO₂ 能隙分析

表 2 能隙計算

觸媒種類	波長 (nm)	能隙(eV)
CeO ₂	419.5	2.95
1%Fe-CeO ₂	423.4	2.92
2%Fe-CeO ₂	426.6	2.90
4%Fe-CeO ₂	431.4	2.87
8%Fe-CeO ₂	473.6	2.62

(二) 諾氟沙星處理能力評估

1. 不同 Fe 含量對 NF 去除效率之影響

為了瞭解鐵含量對於降解諾氟沙星的影響，本實驗使用了 1、2、4 與 8% Fe-CeO₂，投加量為 0.2 g L⁻¹，處理 4ppm 的諾氟沙星，結果如圖 7 所示，顯示 8% Fe-CeO₂ 有最佳的處理效果(處理效率為 50%)。其他鐵含量(1、2 與 4% Fe 含量)的處理效果各別為 40、45 與 45%，隨著鐵含量的增加諾氟沙星降解的效果有些微增加。摻入金屬離子，會引起晶格的畸變，形成缺陷位，反射光催化材料的相變溫度，尺寸大小等產生影響，以及金屬離子作為電子的有效接受體，可俘獲導帶中的電子。由於金屬離子對電子的爭奪，減少 CeO₂ 表面光致電子與光致物體的複合，從而使 CeO₂ 產生更多的氫氧自由基與超氧

自由基，提高催化劑的活性。趙喆等人採用以硝酸鈾、硝酸鐵、碳酸鈉為起始原料，採用共沉澱法製備得到片狀的含鐵二氧化鈾光催化劑，在 120min 時對羅丹明 B 的降解率可以達到 57% (趙喆, 2015)^[9]。

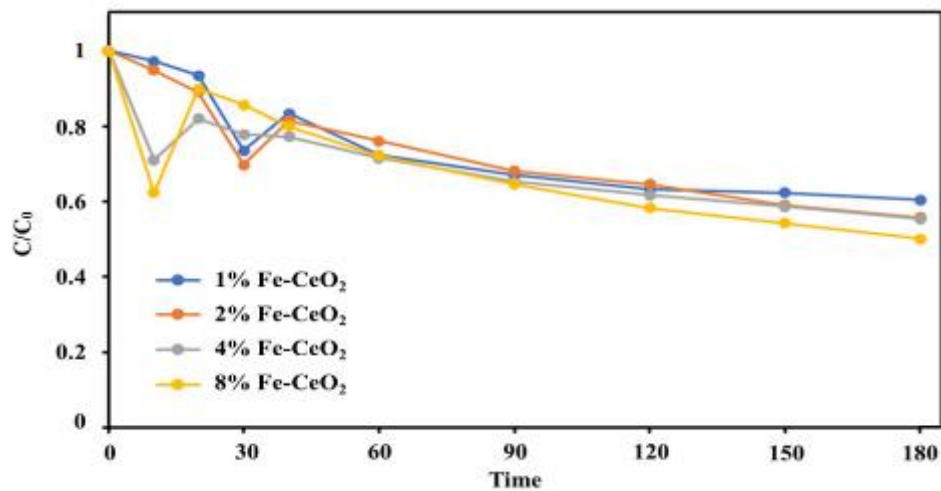


圖 8 不同 Fe 含量之影響

2. 不同觸媒投加量對 NF 去除效率之影響

為評估 8% Fe-CeO₂ 材料投加量對於諾氟沙星處理之影響，本研究進行 0.1、0.2、0.4 與 0.8 g L⁻¹ 的四種條件下處理 5 ppm 的諾氟沙星，並控制溫度在 25 度下進行光降解的實驗。當投加量 0.8 g L⁻¹ 時效率最高，但處理效果只提升了 2.2%，故最佳條件參數選擇 0.2 g L⁻¹。推測其原因為，當投加量超過一定的量時，材料會有團聚的現象，導致內部的材料無法有效地接收到光線的激發，無法產生足夠的電子與電洞，使得降解效率提升程度下降。

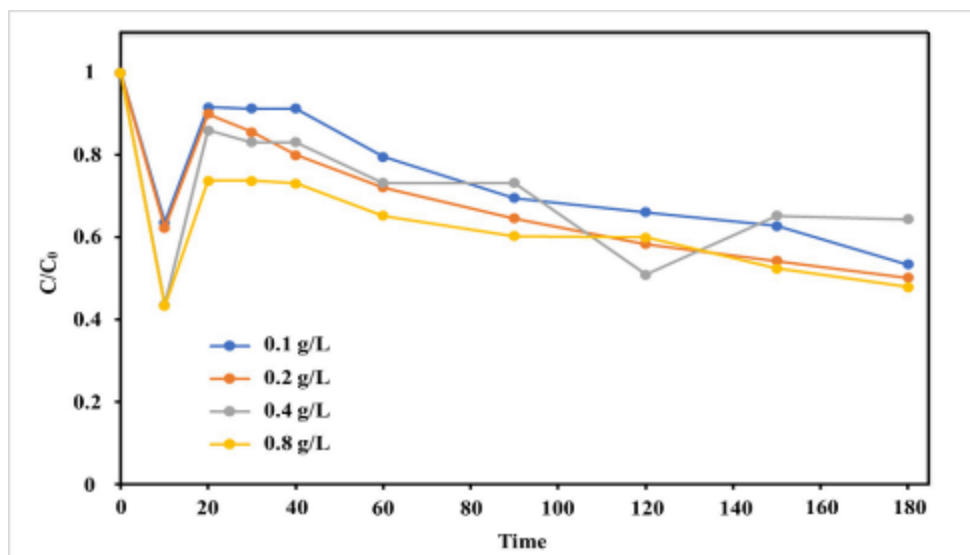


圖 9 不同 Fe-CeO₂ 投加量之影響

3. 不同初始濃度對 NF 去除效率之影響

為了瞭解諾氟沙星初始濃度對使用 CeO₂ 降解能力之影響，本實驗進行 1、2、4 與 8 ppm 的四種初始濃度，利用 0.1 g L⁻¹ 的投加量，溫度控制在 25 度下進行光降解能力評

估。因材料本身能躍升自由基的數量有限導致處理污染物數量有限，在污染物濃度較高(超過 8 ppm)的情況下無法有效的處理過多的諾氟沙星。

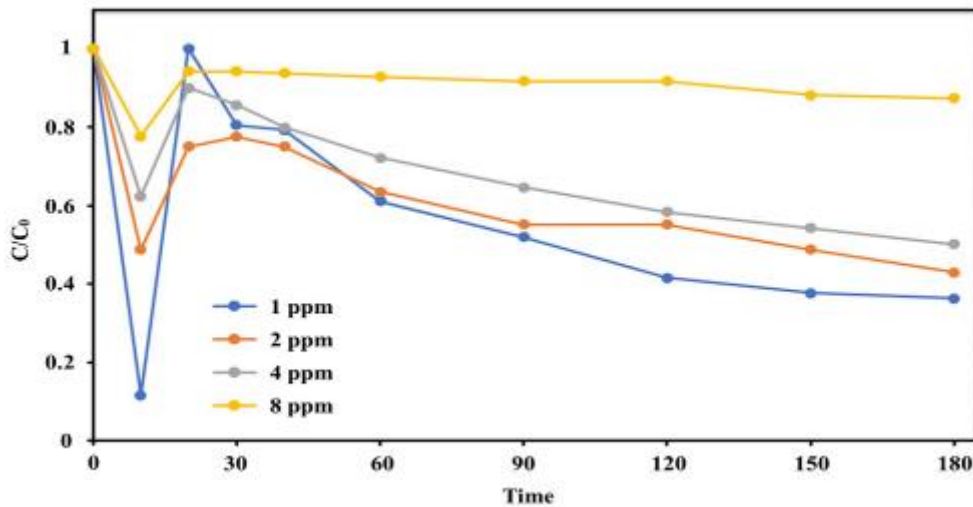


圖 10 不同初始濃度之影響

4. 不同溫度下對 NF 去除效率之影響

為了計算等熱力學及等溫吸附模式，本實驗設計了 288K、298K、308K、318K 四種溫度下，投入 0.2g L^{-1} 的 Fe-CeO₂ 奈米纖維來處理 4 ppm 的諾氟沙星，可以從圖 10 中看出，308K 條件下有最好的處理效果 59%；318K 條件下處理效果為 47%；298K 條件下處理效果為 52%；288K 條件下處理效果為 41%，可得知溫度越高越能促進化學反應的行程，但溫度高也讓原本被材料吸附住的諾氟沙星因為溫度的提高而有些開始有脫附現象的出現，導致處理效果並沒有隨著溫度提高而越來越好的趨勢。本實驗最好處理溫度在 308K 下。在常溫 298K 的情況下就能達到 90% 的處理效果，若增加溫度的情況下最多能增加 7% 的處理效果，選擇室溫 298K 的條件下去做其他參數條件的變化，不僅能節省不必要浪費的能源也能較容易看出其降解效果的好壞。

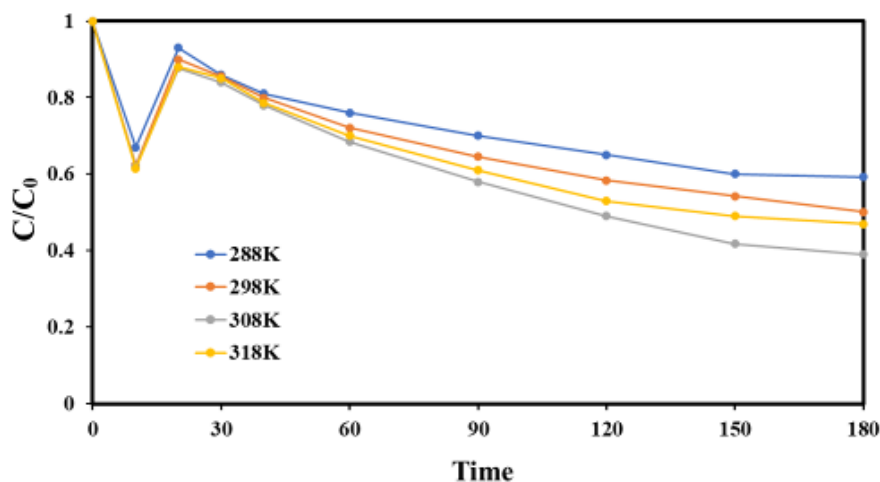


圖 11 不同溫度下對 NF 去除效率之影響

5. 粉末與纖維的光降解性能評估及回收性比較

為了瞭解自製的複合材料在粉末及纖維狀態下光催化效果的差異，本實驗使用 0.2 gL^{-1} 的投加量及 NF 初始濃度為 4 ppm ，紡絲纖維的含鐵二氧化鈾含量為 8% ，並將溫度控制在 298K 下進行光催化降解實驗，並在每次實驗完成後利用超純水及乙醇洗滌數次，並烘乾秤重計算。實驗結果如圖 12 所示，粉末狀觸媒在第一次降解時，可達原新材料性能 80% 的降解效果，但隨著使用次數的增加，在第四次使用時只剩下原新材料性能 40% 的去除效率，即為第一次使用的 50% 剩餘能力。然而在紡絲的部分，在第一次光催化降解的情況下效果可達原新材料性能 62% ，隨著使用次數的增加，在第四次使用時，處理效果還可以維持在原新材料性能 50% 左右。推測其原因為紡絲纖維二氧化鈾的含量較粉末狀低許多，故在第一次使用時，粉末的處理效果較紡絲纖維效果還要來的高，且因粉末較難回收，隨著使用次數的增加，效果會不斷地明顯下降，紡絲纖維在回收能力上還是較粉末來的容易，且不易產生二次污染。

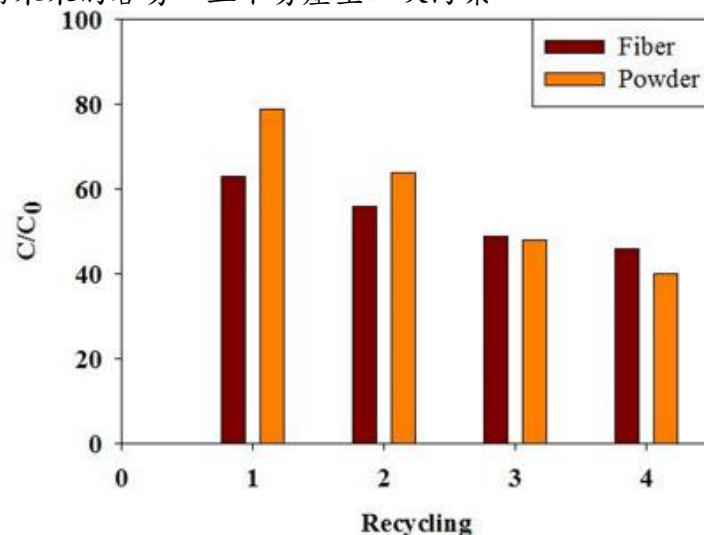


圖 12 光降解重複性實驗

6. 可見光對 NF 去除效率之影響

為了瞭解自製的觸媒材料在可見光下差異性，本實驗使用不同鐵含量的觸媒，初始濃度為 10ppm 的 NF，並使用 0.1gL^{-1} 的投加量，並照射可見光(32W , 440nm)，溫度控制在室溫。結果如圖 13 所示，可以得知當 Fe-CeO_2 含量為 8% 時有最好的處理效果，每單位瓦數之處理效率 (Relative efficiency/Watts, R/W) 可達約 0.30 ，隨著鐵含量的減少，效果逐漸降低，最低的處理效果是沒有改質過的二氧化鈾，此趨勢與圖 7 的使用紫外光區域的最大吸收能力呈正相關性，推測原因為在紫外光的條件下，影響降解的主要因子為材料吸收能力，當鐵負載在二氧化鈾時，因遮蔽紫外光，導致內部的二氧化鈾無法接收到紫外光的激發，因此降解效率隨著鐵含量的增加而降低。

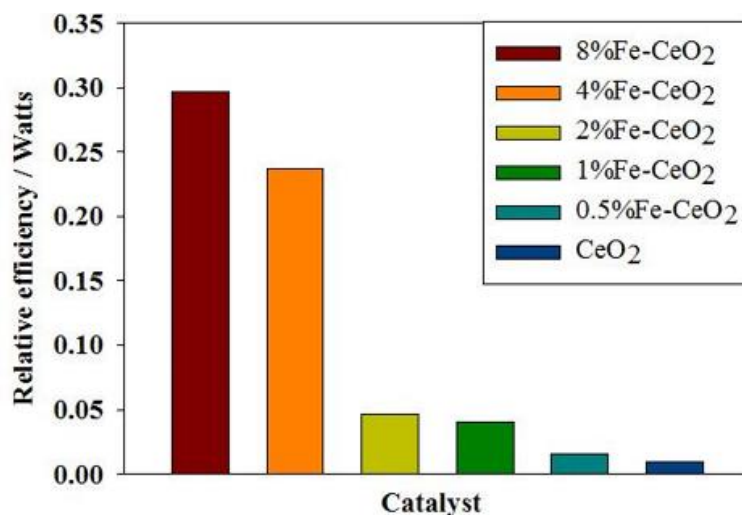


圖 13 使用可見光單位瓦數之處理效率圖

7.熱力學模式分析結果

熱力學重要參數包括吉布斯自由能(Free Energy, ΔG)、焓(Enthalpy, ΔH)以及熵(Entropy, ΔS)，如式(2)，透過這三種參數之間的相互關係可以判斷反應物在熱系統之反應機制，如 ΔG 值為介於 0 至 -20 kJ mol^{-1} 之間，代表此吸附屬於物理吸附， ΔG 值為介於 -80 kJ mol^{-1} 至 -400 kJ mol^{-1} 之間，代表此吸附屬於化學吸附， ΔG 小於 0、 ΔG 大於 0 或 ΔG 等於 0 時，其反應分別可發生自發反應、逆自發反應或平衡反應等等； ΔH 值小於 0 時，其吸附過程屬於放熱反應， ΔH 值大於 0 時，其吸附過程屬於吸熱反應， ΔH 值等於 0 時代表其不作用； ΔS 為判斷其反應亂度的依據，如 ΔS 大於 0 時，代表此吸附過程為非自序反應，如 ΔS 小於 0 時，則代表此吸附過程為自序反應(劉芳等人, 2015; 邱怡娟, 2016)^{[10][11]}。

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2)$$

其中 ΔG 為活化吉布斯自由能(J mol^{-1})

ΔH 為活化焓(J mol^{-1})

ΔS 為活化熵($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)

T 為絕對溫度(K)

本研究將 $1/T$ 對 $\ln K_d$ (K_d 為分佈係數圖) 作得到一直線迴歸方程式後，把截距乘 R (氣體常數) 後得 ΔS ，斜率乘 R (氣體常數)/1000 進行單位換算後得 ΔH 值，迴歸分析結果如圖 14 與表 3 所示。

由表 3 得知 ΔG 為負值時，表示此吸附反應過程為可行的自發性吸附反應，且 ΔG 值為介於 0 至 -20 kJ mol^{-1} 之間，代表此吸附屬於物理吸附； ΔH 值為負值(約為 -3.27 J mol^{-1})，代表此一吸附過程為放熱反應； ΔS (約為 $6.11 \text{ kJ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) 遠大於 0，則證明此吸附過程為非自序，主要原因來自於二氧化鈾表面上的水分子與 NF 進行競爭吸附，並使二氧化鈾於吸附 NF 時產生結構上的改變，導致吸附系統混亂度增加(李松穎, 2017)^[12]。

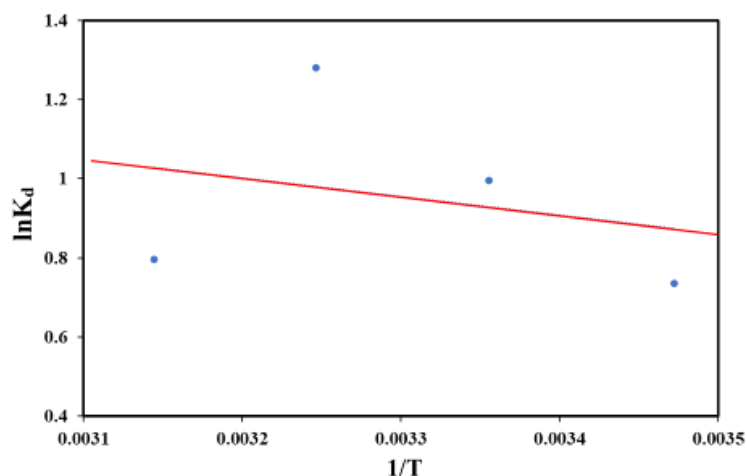


圖 14 NF 降解反應熱力學分析結果

表 3 NF 於不同溫度之熱力學模型參數值

Temperature (K)	ΔG (J mol ⁻¹)	ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔS (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)
288	-8.31947		
298	-8.31399		
308	-8.31386	-3.27	6.11
318	-8.31386		

肆、結 論

本研究通過靜電紡絲技術及光沉積法製做出負載鐵二氧化鈾奈米纖維，由 Fe-SEM 分析結果可得知材料有團聚的現象，顆粒大小約在 60 ± 10 nm 奈米觸媒材料，由 EDS 分析結果可得知所製備材料主要含有 C、Ce 及 Fe 三種元素，證明所製備之 Fe-CeO₂ 奈米纖維不含其他雜質，且分布均勻。研究結果顯示當使用 8%Fe-CeO₂ 觸媒之劑量為 0.8 g L⁻¹，於初始濃度為 1 ppm 內，可達最佳處理效能(超過 64%)。吸附反應過程為自發性且非自序之物理吸附放熱反應。觸媒製備成纖維狀因觸媒含量較低，在降解的效率與產量上較為粉末還要來的低，但在回收實驗上的損失率相對粉末還要少許多。所製成負載鐵二氧化鈾奈米纖維，易於回收性能與重複使用，並能減少光觸媒材料二次污染問題。即可對水中抗生素去除提供一個對環境有善、低成本與有效之解決方案。

參考文獻

- [1] 李茂豪，水域環境中抗藥性微生物的發生與養豬場廢水排放相關性的評估，私立東吳大學碩士論文，2013 年。
- [2] 王筱歡，頭孢子類抗生素與混合藥物於環境水體中自然光轉化機制研究，國立臺灣大學博士論文，2014 年。
- [3] Evgenidou, E. N., Konstantinou, I. K., and Lambropoulou, D. A. (2015). Occurrence and removal of transformation products of PPCPs and illicit drugs in wastewaters: A review. *Science of The Total Environment*, 505, 905-926.
- [4] 簡榮彥，台灣抗藥結核病流行病學及基因變異之臨床應用，國立臺灣大學博士論文，2016 年。
- [5] 林澄琴，Norfloxacin 之藥效藥劑學研究，國立臺灣大學碩士論文，1987 年。
- [6] Pham, Q. P., Sharma, U., and Mikos, A. G., (2006). Electrospinning of polymeric nanofibers for tissue engineering applications: a review., *Tissue engineering*, 12(5), 1197-1211.
- [7] Dimitrova, N. (2018). Pt (Cu) Catalyst on TiO₂ Powder Support Prepared by Photodeposition-Galvanic Replacement Method. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 823(15), 624-632.
- [8] Jin, Xin et al. 2016. The Effect of Cu²⁺ chelation on the direct photolysis of oxytetracycline: a study assisted by spectroscopy analysis and DFT Calculation. *Environmental Pollution*, 214, 831–39.
- [9] 趙喆，一種鐵摻雜的二氧化鈣光催化劑及其製備方法，上海應用技術學院論文，2015 年。
- [10] 劉芳、周仕林、吳大輝、張麗娜、杜帥、張帥、張章堂，靜電紡絲製備鐵(II)/聚丙烯腈複合奈米纖維及其應用於吸附鉻(VI)，《理化檢驗：化學分冊》，第 9 期，第 1311-1315 頁，2015 年。
- [11] 邱怡娟，乾燥微藻吸附水中金屬鉬之熱力學研究，國立中正大學碩士論文，2016 年。
- [12] 李松穎，利用生活污泥製備生質碳材吸附處理廢水之研究，國立宜蘭大學碩士論文，2017 年。

研討會論文查詢 (QR-Code)



研討會路徑查詢：大漢技術學院/學術單位/土木工程與環境資源管理系/研討會資訊
<http://www.dahan.edu.tw/releaseRedirect.do?unitID=184&pageID=5768>