

2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	100039
參展科別	工程學
作品名稱	研發奈米材料快速降解水中偶氮染料及其自動化循環系統
得獎獎項	四等獎

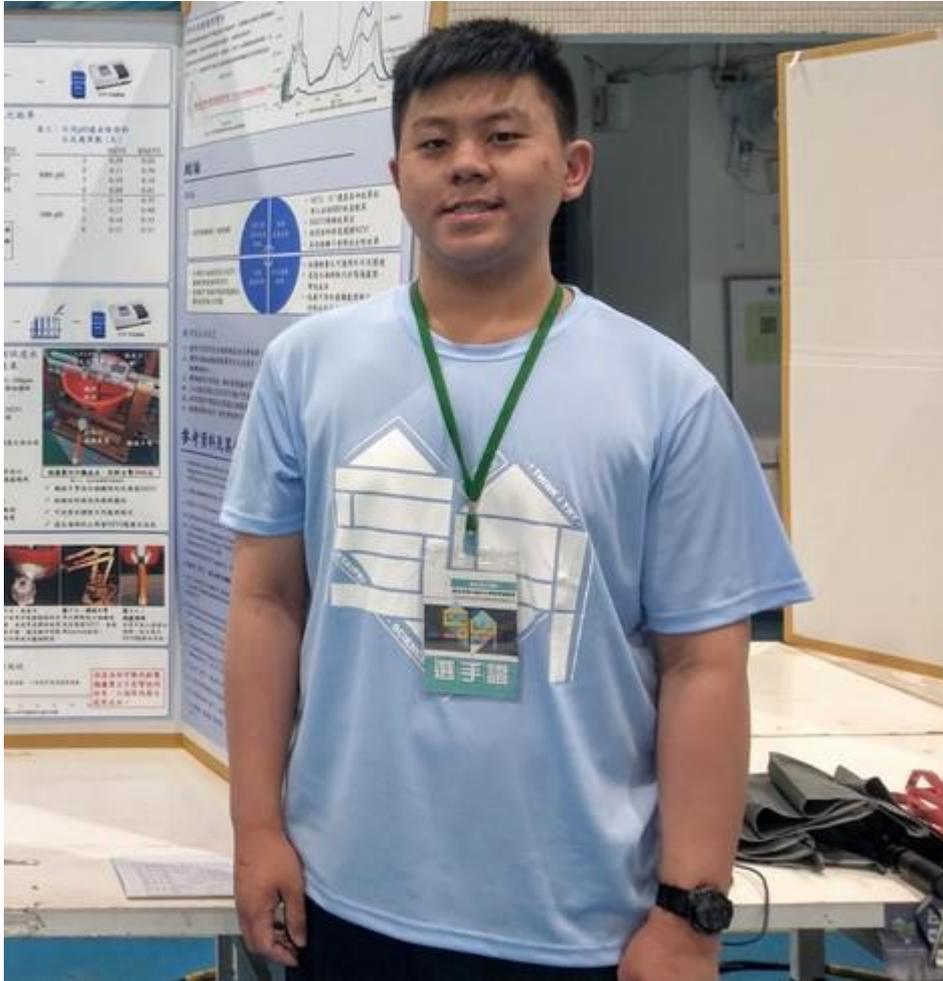
就讀學校 臺北市立麗山高級中學

指導教師 施養信、張堯卿

作者姓名 董宣玖

關鍵詞 奈米零價鐵、降解、自動化循環

作者簡介



大家好，我是目前就讀臺北市立麗山高級中學三年級的董宣玖，從高二校內科展一路過關斬將至國際科展的舞臺，從無知到精熟的過程雖然辛苦，但也讓自己有所成長，疫情期間臺灣口罩產量大增，同時染料廢水處理的成本也相對增加，讓我更是多了一份責任與使命感。

受到疫情影響，轉瞬之間原本的計畫全被打亂，於是居家線上學習時間，我便運用 Webduino 結合 NZVI 降解與芬頓反應，設計一款自動化設備，透過降低廢水處理與重複利用水資源等方式，繼續為生態環境盡一份心力，也期待本研究能被世界各國看見，運用此設備來改善人們的生活環境。

摘要

本研究為開發可適用於染整廠去除有機偶氮染料使用的自動化淨水設備，於設計設備前先探討奈米零價鐵（NZVI）去除化學染料效率，並針對不同操縱變因進行實驗，了解其化學反應性質。

在淨水設備的設計上，運用區域網路間 Webduino Smart 開發板、行動裝置、Webduino Blockly 進行串聯，進行手動同步操作或自動化控制，使染整廠不僅降低人事成本及環境負擔，也避免染料外洩產生不可逆的環境嚴重汙染，同時節省染整過程使用的水資源。

操作部分選用 Webduino Blockly 來直接操控 Webduino，使設備能在短時間內作動，避免第三方平台問題，也可提升設備的適地性。為了使染整廠能夠以最低成本達到類實驗室環境來處理廢水，特將模組與超音波清洗機調整成物聯網模式，以公式將光照度轉換為染料濃度，進而控制 NZVI 投加量並上傳雲端資料留存；超音波清洗機用以模擬超音波震盪機，使 NZVI 投加前均勻分散，發揮最佳降解效果。

本研究亦切合聯合國 17 項永續發展目標（SDGs）第六項：清潔飲水及衛生設施、第十二項：確保永續消費和生產模式。

Abstract

To develop automatic water purification equipment suitable for the removal of organic azo dyes in dyeing and finishing plants, the efficiency of nano zero-valent iron (NZVI) to remove chemical dyes was discussed at the beginning of the study. Experiments for different manipulation factors were conducted, demonstrating its chemical properties.

In the design of the equipment, the Webduino Smart motherboards, mobile devices, and Webduino Blockly were connected to one another by the local area network to perform manual or automatic control, and the equipment can enable the plants to recycle their wastewater in a more beneficial way. It can not only reduce personnel costs and environmental burdens but also avoid irreversible serious environmental pollution caused by dye leakage. Also, it can save a lot of water resources used in the process of dyeing and finishing.

During the operation, Webduino Blockly is used to directly control the Webduino Smart motherboards so that the device can react in a short time, avoiding the network problems that may occur on the third-party platforms and improving the suitability of the device. In order to enable the plants to treat wastewater in a laboratory-like environment at the lowest cost, the photometer module and the ultrasonic cleaning machine are specially designed for IoT usage. The illuminance from the module can

be converted into the dye concentration with Webduino Blockly so the dosage of NZVI is controlled. The equipment will upload the data to cloud drives for analysis. The ultrasonic cleaning machine is used to simulate the ultrasonicator in a lab so that the NZVI can be dispersed evenly before adding to the equipment, exerting the best degradation effect.

This study is also in line with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) No. 6: Clean water and sanitation, No. 12: Responsible consumption and production.

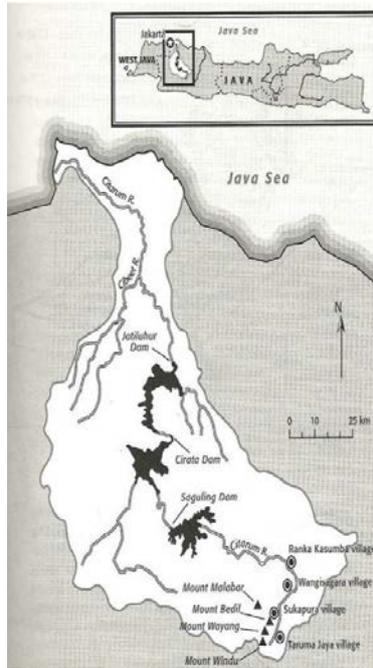
壹、前言

一、研究動機

近年來，化學染整廢水污染日益嚴重，據報導指出，印尼為世界上化學染料排放量最高的國家，尤其是位於西爪哇島的西大魯河。上游數千間紡織廠每天任意棄置高達三十四萬噸的染整廢水，其中約 70% 的化學染料具有偶氮鍵，其釋出之芳香胺使人體細胞發生突變，若這些污染發生後沒有被發現及妥善處理，這些隱形殺手將殘留於西大魯河流域，持續影響居民生活。

反觀我們身處的寶島臺灣，也存在偶氮染料廢水問題。Covid-19 疫情期間彩色口罩成為新時尚，人們爭相搶購，使得染整廠大量使用偶氮染料及水資源製造彩色口罩，同時投入高昂經費處理其廢水，因此身為新世代的我們便結合生物、化學及資訊科技設計一套能夠推廣至國際的自動化處理設備，用以快速降解並再利用廢水。

傳統廢水處理技術難以完整去除水中化學染料，雖然最高可以去除水中約百分之八十的染料，但大部分仍存在於其污泥中，而現今處理化學染料的方式為污泥法及生物法等，其存在反應速率慢、處理週期長、環境條件需求高及不符商業利益等問題。國內外多篇論文運用 NZVI 降解水中化學染料，而 NZVI 粒徑小，反應速率快，因此我們認為其降解偶氮染料的效果備受肯定且具研究價值。我們實際進行了 NZVI 對於偶氮染料 Reactive black 5 (RB5) 的多次實驗，確保其具快速、有效的降解性質，並以嶄新的硼氫化鈉 NZVI 還原法重複利用反應後 NZVI，搭配可使廢水 TOC 值大幅降低的 H_2O_2 —Fenton 反應及離子交換樹脂，使得處理後廢水及 NZVI 可重複利用，達成綠色化學及永續環境的目標。



圖一：西大魯河之地理位置

(圖一資料來源：River Basin Dove et al, 2005: 121)



圖二：因接觸廢水導致之開放性腳部皮膚病變

(圖二資料來源：Cavelle, J., 2013)

二、研究目的

- (一) 以氧化還原法製備NZVI。
- (二) 運用全光譜法測試NZVI對化學染料之反應及降解效率。
- (三) 比較NZVI於不同環境條件與化學染料反應之效率。
- (四) 進行再利用NZVI研究，並設計一設備專用包裝NZVI。
- (五) 結合Webduino模組設計自動化淨水裝置。

貳、研究方法或過程

一、研究方法

- (一) 調查法。蒐集大量資料並分析。
- (二) 實證研究法。運用科學理論分析探討其成效。
- (三) 模擬法。模擬設備使用情境與染整廠的需求。

二、研究設備與器材

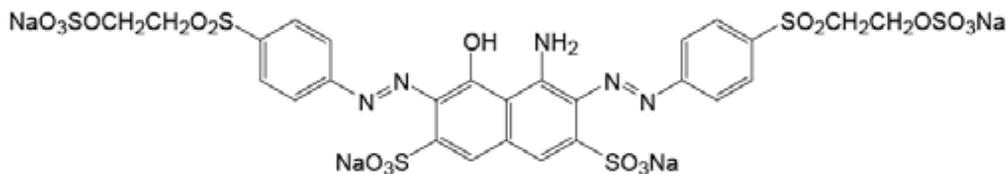
筆記型電腦、智慧型手機、無線網路基地臺、Autodesk 123D Design、Webduino Blockly Pro、強力磁鐵、杜邦線、Micro USB 連接線、高透水生化過濾海綿、Webduino Smart 開發板、繼電器、超音波清洗機、MAX 44009 光度計模組、熱熔膠、鹼性電池、容量瓶、去離子水、不同尺寸燒杯、電子天平、玻棒及刮勺、秤量紙、玻璃試管、塑膠滴管、標籤紙膠帶、鐵架、塑膠針筒、不鏽鋼注射針頭。

三、研究原理

(一) 偶氮染料之性質

「偶氮染料帶有偶氮基，帶有芳香族結構，約有 130 種的偶氮染料會還原釋出有害的芳香胺化合物，釋出的芳香胺經研究證實對人體具有致癌性。」（全國公證檢驗股份有限公司，2013）

(二) RB5 的化學結構



圖三：RB5 的化學結構示意圖

（圖三資料來源：C. Chompuchan 等，2009）

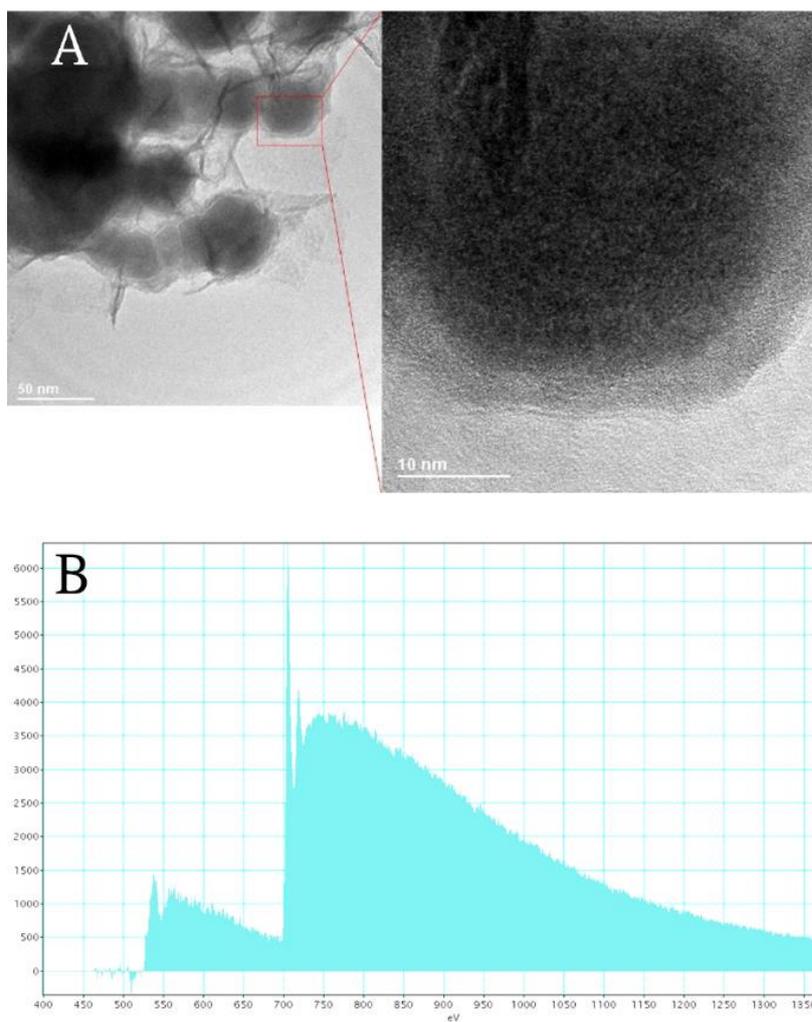
(三) NZVI 降解偶氮染料之原理

根據報告指出，零價鐵可透過還原偶氮染料，去除偶氮染料溶液的顏色。偶氮染料發色團中進行表面介導反應（Surface Mediated Reaction）使得偶氮鍵斷裂而去除顏色

(Phukan 等, 2015)。「在某些條件下, 偶氮鍵的分解會形成胺基基團, 這樣的化合物稱為胺。」(Nimkartek Blog, 2015)

(四) NZVI 之電位及粒徑分析圖

由下方圖四之 A 圖可以看出, NZVI 之實際粒徑約為 10~100nm, 且具有些許絮凝現象; 以 DLS 分析 NZVI 表面電性的結果如 B 圖所示。

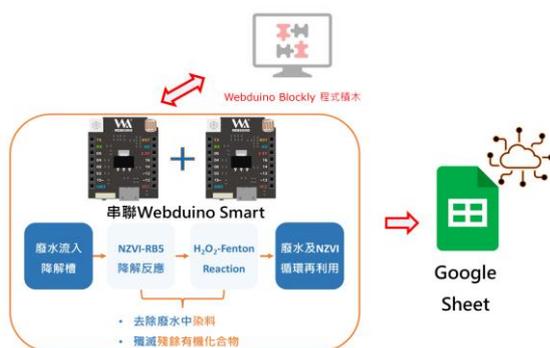


圖四：穿透式電子顯微鏡拍攝之粒徑分析圖 (A)

DLS 分析之表面電位圖 (B)

(圖四資料來源：國立臺灣大學農業化學系)

(五) 物聯網自動化設備架構圖



圖五：自動化設備程式關聯圖

(圖五資料來源：研究者繪製)

四、研究步驟

(一) H_2O_2 —Fenton 反應測試

1. 配製 100ppm RB5 溶液 100mL 共 4 杯，各預留 3mL 於試管中備用。
2. 在其中一杯染料溶液中加入 NZVI (5g/L) 0.5mL，開始計時。



圖六：以針筒抽取 NZVI (5g/L) 液

(圖六資料來源：研究者拍攝)

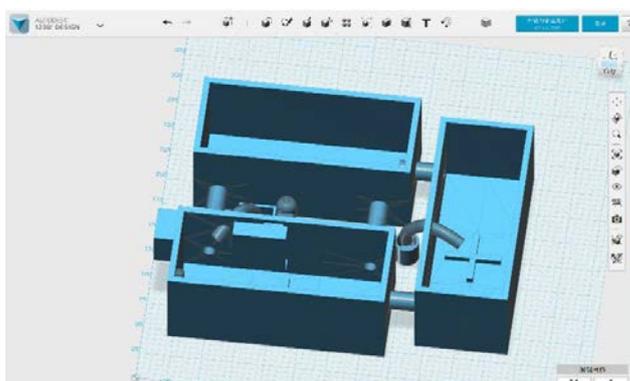
3. 在第 5、10、15、20 分時，以針筒抽取燒杯中混合液，以 Syringe Filter 過濾至一試管中。
4. 使用 TOC Analyzer 分析混合液中的 TOC 值並記錄。
5. 其他三杯染料溶液則分別改加入 5% 雙氧水、NZVI (5g/L) 0.5mL+5%、10% 雙氧水，進行 TOC 分析。
6. 數據分析並繪製圖表。

(二) 設計思考與界定問題

1. 蒐集大量文獻及新聞報導，了解印尼當地廢水汙染現況。
2. 想出一個可以描述現況的語句，並不斷提出問題，分析發生原因。
3. 持續延伸現況，並將多次收斂、界定後的問題以圖表方式記錄下來。
4. 針對問題進行下一階段的設備設計。

(三) 自動化設備設計

1. 繪製設備草圖，設計水槽、水管及各零件比例大小。
2. 使用Autodesk 123D Design軟體繪製零件。

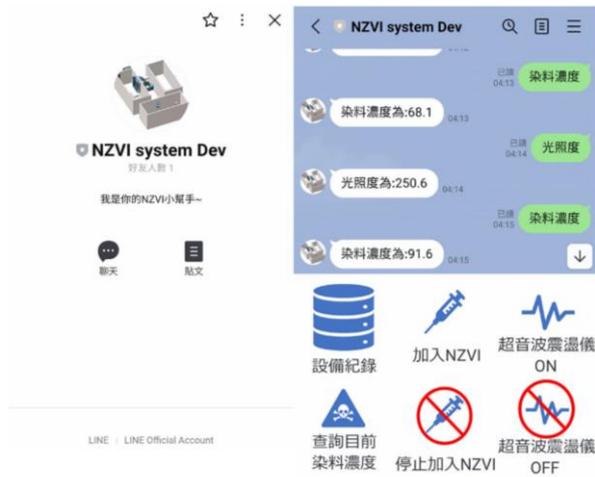


圖七：Autodesk 123D Design 軟體
(圖七資料來源：研究者繪製)

3. 輸出為STL檔。

(四) 範例模組實作

1. 準備三塊 Webduino Smart 開發板並進行初始化設定。
2. 將兩個繼電器、一個 MAX44009 光度計模組分別連接至開發板上。
3. 將超音波清洗機與繼電器連接，將其改造為物聯網超音波震盪儀。
4. 將抽水馬達線路與繼電器連接，用以透過物聯網自動加入 NZVI。
5. 將光度計模組固定於一暗箱，防止偵測時被外在環境干擾。
6. 使用 Webduino 雲端平台將範例程式與開發板連接。
7. 校正光度計模組，使其能正確轉換染料濃度輸出。
8. 行動裝置加入 Line Chatbot 好友，並啟動 Webduino Blockly 程式。



圖八：Line Chatbot 聊天機器人
 (圖八資料來源：研究者繪製)

9. 由 Google 試算表上的設備紀錄確認開發板是否正確運作。

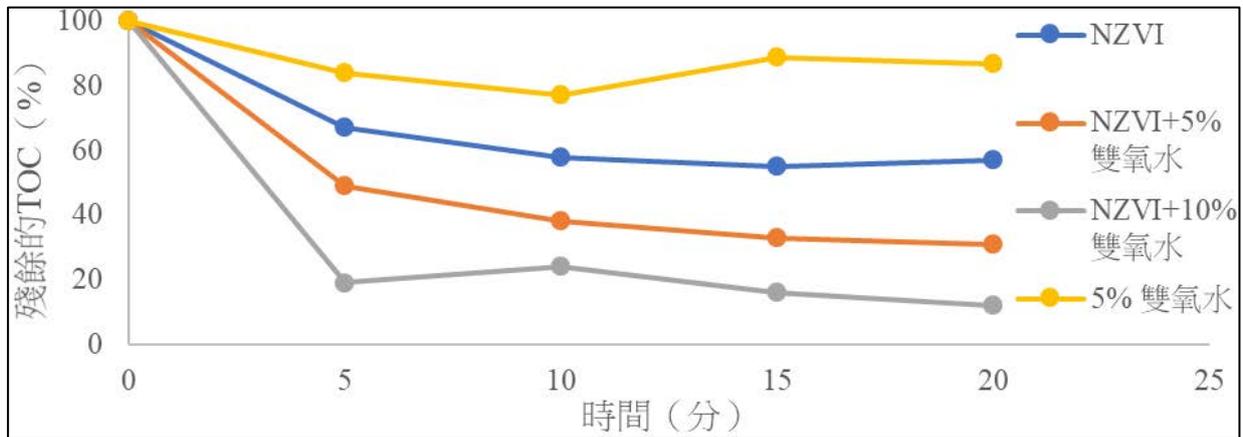
	A	B	C
14	2021/9/8_4:12:42	使用者查詢ppm	
15	2021/9/8_4:12:54	使用者查詢ppm	
16	2021/9/8_4:13:49	使用者查詢ppm	
17	2021/9/8_4:14:5	使用者查詢lux	2!
18	2021/9/8_4:14:54	定期偵測	-1!
19	2021/9/8_4:15:4	使用者查詢ppm	!
20	2021/9/8_4:15:30	使用者查詢ppm	!
21	2021/9/8_4:16:20	程式上線	使用者行為
22	2021/9/8_4:16:35	程式上線	使用者行為
23	2021/9/8_4:18:37	定期偵測	!
24	2021/9/8_4:18:48	程式上線	使用者行為
25	2021/10/21_23:21:26	程式上線	使用者行為
26	2021/10/21_23:23:56	程式上線	使用者行為
27	2021/10/21_23:26:51	程式上線	使用者行為
28	2021/10/21_23:28:0	程式上線	使用者行為
29	2021/10/21_23:28:40	程式上線	使用者行為
30	2021/10/21_23:28:45	開啟超音波	使用者行為
31	2021/10/21_23:29:35	程式上線	使用者行為
32	2021/10/21_23:29:41	開啟超音波	使用者行為
33	2021/10/21_23:30:21	開啟超音波	使用者行為
34	2021/10/22_0:12:41	程式上線	使用者行為
35	2021/10/22_0:12:41	程式上線	使用者行為
36	2021/10/22_0:13:29	開啟超音波	使用者行為
37	2021/10/22_0:15:56	程式上線	使用者行為
38	2021/10/22_0:16:36	開啟超音波	使用者行為

圖九：Google 試算表上的設備紀錄
 (圖九資料來源：研究者繪製)

參、研究結果與討論

一、H₂O₂ – Fenton 反應測試

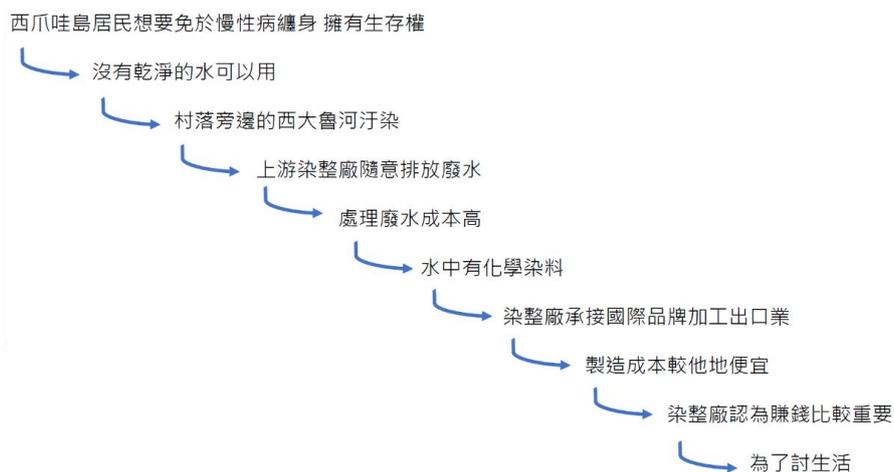
由圖十可知，NZVI 搭配雙氧水可發生 H₂O₂ – Fenton 反應，降低水中 TOC 值，其中搭配 10% 雙氧水的組合效果最好。



圖十：以不同反應液去除 RB5 溶液中 TOC 分布圖
(圖十資料來源：研究者繪製)

二、設計思考與界定問題

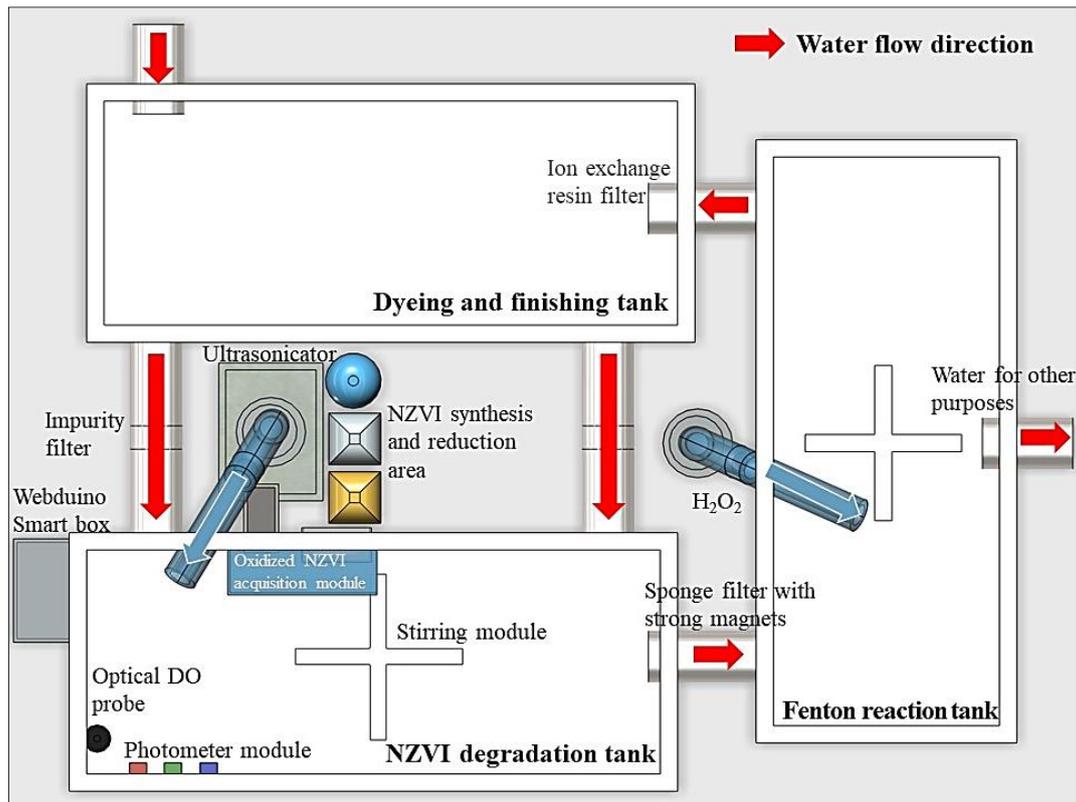
我們先前已掌握了印尼西爪哇島居民的需求，接著我們不斷問為什麼，向下逐步尋找洞見，找出污染發生根本原因，如圖十一所示。



圖十一：西爪哇島居民的需求與問題洞見
(圖十一資料來源：研究者繪製)

因此能以一句話描述：「使用者需要以低成本方式改善化學染料環境污染這件事很重要」。

三、自動化設備設計

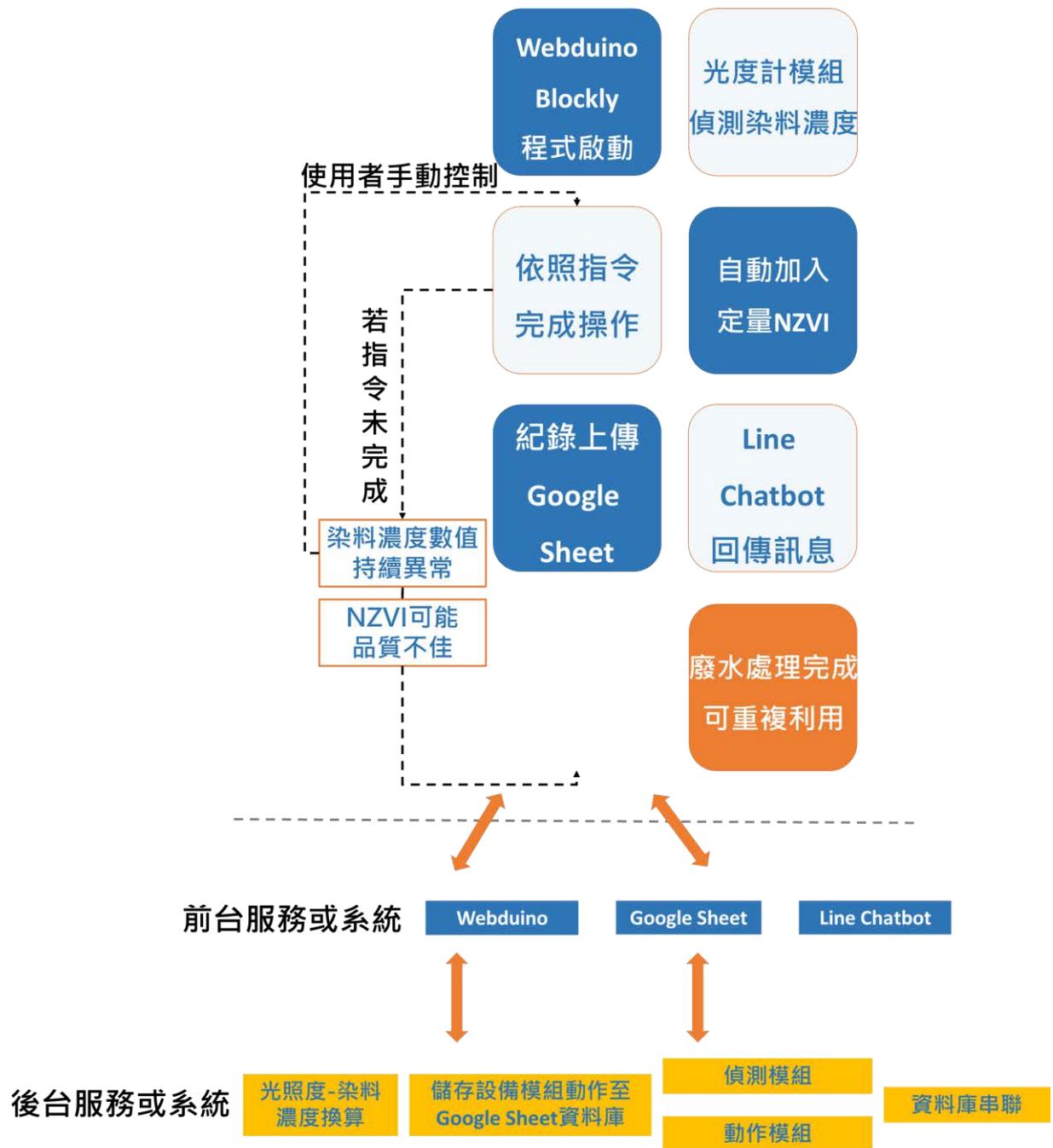


圖十二：自動化設備上視構想圖

(圖十二資料來源：研究者繪製)

上圖十二說明設備整體操作流程與方法。染整槽使用後的染料廢水經由雜質過濾管過濾較大顆的雜質後進入 NZVI 降解槽，光度計模組偵測染料的色度進而判斷染料濃度，提供 NZVI 製備區指示添加定量 NZVI，同時攪拌模組開始攪拌。NZVI 製備區有藥品罐、燒杯、超音波震盪機及絕氧封蓋，搭配機械手臂及抽水馬達可將其添加到 NZVI 降解槽中，NZVI 加入後，光度計模組及溶氧偵測探針持續監控降解過程。

降解完成後，氧化 NZVI 採集模組最外層的閘門會開啟，讓水流經安裝於隔槽滑軌的強力磁鐵，大多數氧化 NZVI 會被吸附在採集模組內，隨即關閉外層閘門及移除強力磁鐵，將氧化 NZVI 送至 NZVI 還原區以硼氫化鈉還原（目前實驗顯示其還原率約為 50%），接著處理後的水再經由強磁透水海綿過濾管至 Fenton 槽，此過濾管可以攔截未遭採集的氧化 NZVI，以利後續反應進行。在 Fenton 槽中，攪拌模組提供慢速攪拌，透過加入雙氧水與水中殘餘二價、三價鐵離子產生 H_2O_2 -Fenton 反應，大幅降低水中 TOC 值，使反應後的水可以重複利用，達成綠色化學，讓 H_2O_2 -Fenton 反應處理後的廢水流經離子交換樹脂，吸附未反應之二價、三價鐵離子後可重複利用，若有需要其使用後的離子交換樹脂也可以進行 NZVI 的還原，而所有流程皆由 Webduino Smart 來自動化控制，讓染整廠可以降低廢水處理成本，由工廠處理也相對減少碳足跡產生。



圖十三：自動化設備程式流程圖
 (圖十三資料來源：研究者繪製)

四、範例模組實作

類實驗室光度計模組可偵測染整廢水光度，進而經公式判斷染料濃度，同時提供 NZVI 製備區指示，添加定量 NZVI 至反應槽中，如圖十四所示。



圖十四：測試用光度計模組
(圖十四資料來源：研究者拍攝)

Webduino 可遠端控制繼電器的通電與否，進而控制超音波震盪儀模組作動，使 NZVI 加入降解槽前能均勻分散，如圖十五所示。



圖十五：測試用超音波震盪儀模組
(圖十五資料來源：研究者拍攝)

過濾管環形主體結構中放入經壓縮的高透水生化過濾海綿，管壁四周安裝強力磁鐵，可增加過濾效率，用以過濾反應後廢水中未經採集的氧化 NZVI，如圖十六所示。



圖十六：NZVI 強磁+海綿過濾管截面模型

(圖十六資料來源：研究者拍攝)

同時我們也計算了強力磁鐵與過濾海綿的鐵回收率，計算過程如下：

$$\text{估算原始 NZVI 重 (公克)} = 2.4 \times \frac{5g}{L} = 0.012(g)$$

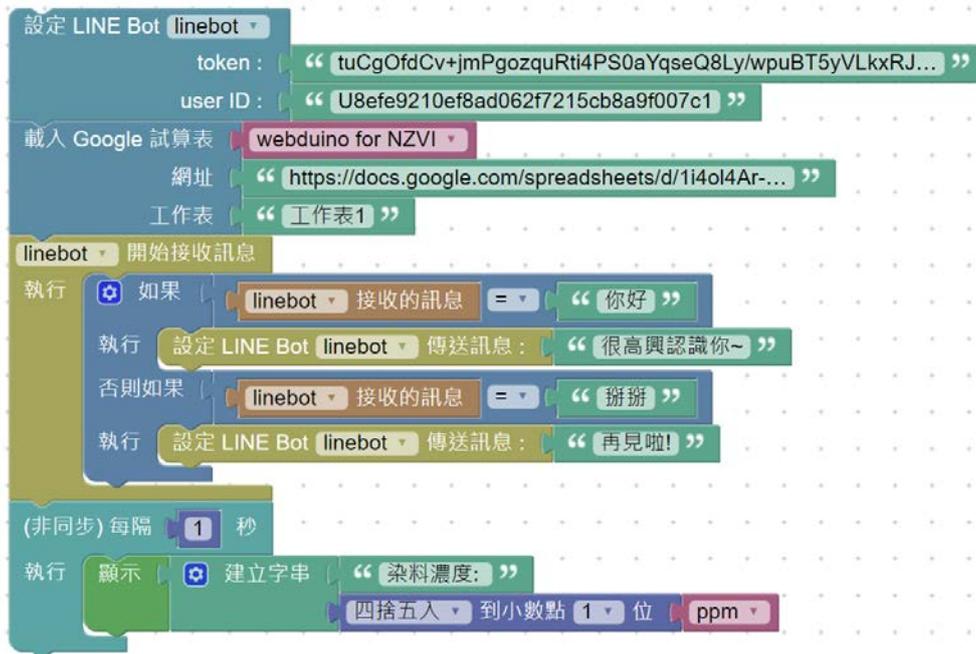
強力磁鐵蒐集鐵重 (公克)：0.010g

原始海綿重 (公克)：10.02g

吸附 NZVI 後海綿重 (公克) 10.03g

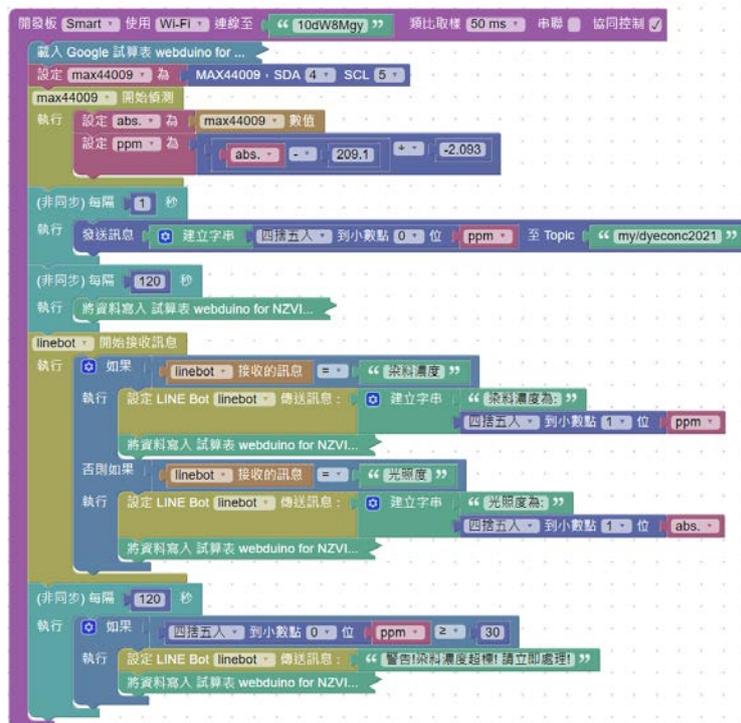
故鐵之回收率為 { 強力磁鐵蒐集鐵重 + (吸附 NZVI 後海綿重 - 原始海綿重) } / 估算原始 NZVI 重 = $0.916 \sim 0.92 \rightarrow$ 約為 92%

五、Webduino Blockly 程式



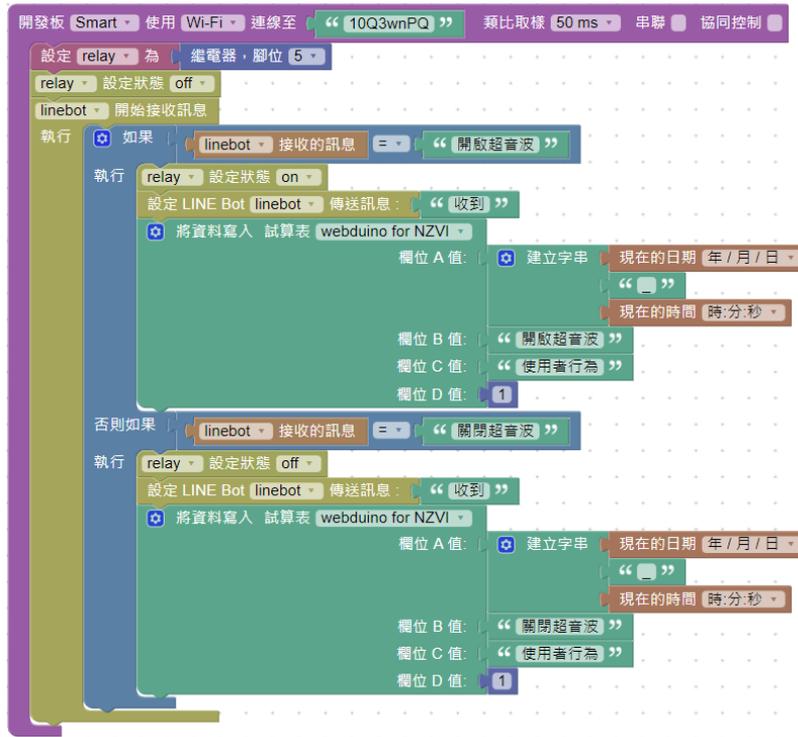
圖十七：設定 Line Chatbot 與開發板程式

(圖十七資料來源：研究者繪製)



圖十八：設定光度計模組

(圖十八資料來源：研究者繪製)



圖十九：設定超音波震盪儀模組
 (圖十九資料來源：研究者繪製)



圖二十：設定抽水馬達模組
 (圖二十資料來源：研究者繪製)

六、物聯網介面與操作



圖二十一：Line Chatbot 圖文選單與操作過程

(圖二十一資料來源：研究者繪製)

webduino for NZVI ☆ 📄 🌐

檔案 編輯 查看 插入 格式 資料 工具 外掛程式 說明 上次編輯是

100% NT\$ % .0 .00 123 預設 (Arial) 10

	A	B	C	D
1	Time	Action	Detail	1-Authorized
2	2021/9/8_3:52:35	定期偵測	91.6	0
3	2021/9/8_3:57:25	使用者查詢ppm	91.6	1
4	2021/9/8_3:57:27	使用者查詢ppm	91.6	1
5	2021/9/8_3:59:9	使用者查詢ppm	91.6	1
6	2021/9/8_4:0:53	定期偵測	91.7	0
7	2021/9/8_4:2:17	使用者查詢lux	2.4	1
8	2021/9/8_4:2:53	定期偵測	91.6	0
9	2021/9/8_4:6:36	使用者查詢ppm	91.6	1
10	2021/9/8_4:7:39	程式上線	使用者行為	1

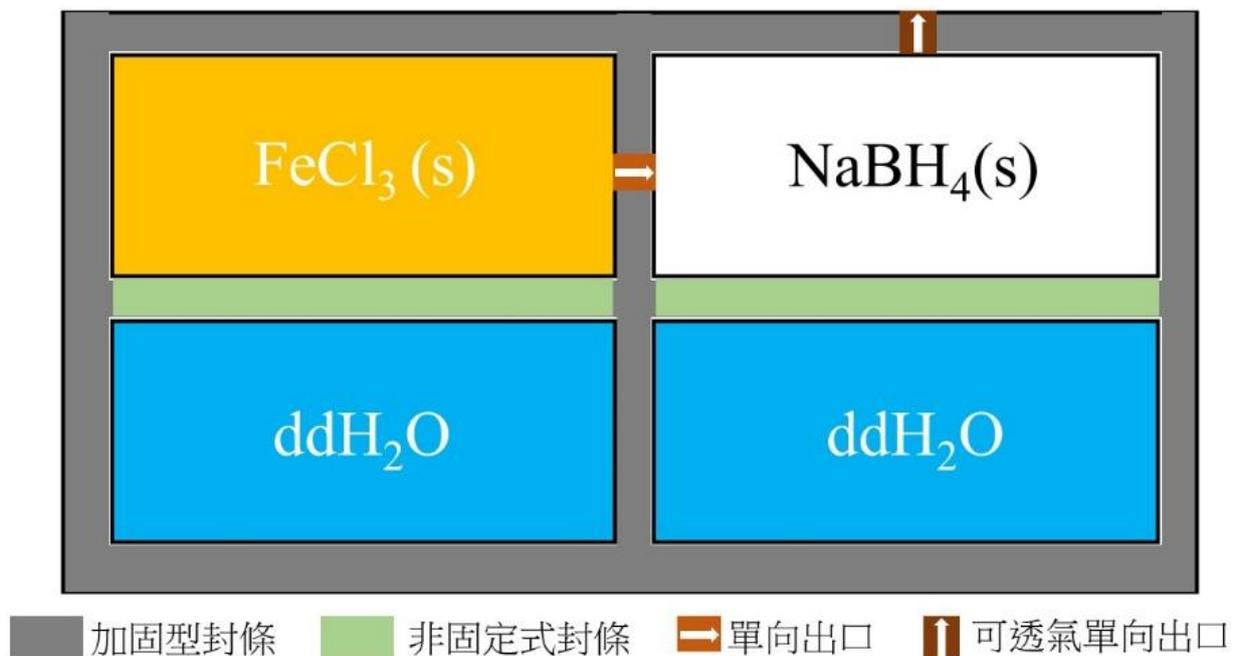
圖二十二：Google 試算表設備管理範例

(圖二十二資料來源：研究者繪製)

七、設備專用 NZVI 包裝

本設計由醫療院所使用之輸液包裝發想，使染整廠無需另購實驗器材或特設置生化實驗室製備 NZVI，搭配自動化設備使用更是相得益彰，使用方法如下：

- (一) 利用水壓壓迫 ddH₂O 與氯化鐵、硼氫化鈉間的非固定式封條，進而配製反應溶液。
- (二) 由於硼氫化鈉溶液會產生氫氣，可透氣單向出口可將多餘的氣體排出，避免危險發生。
- (三) 利用水壓壓迫氯化鐵與硼氫化鈉間的單向出口，使氯化鐵溶液緩慢與硼氫化鈉發生氧化還原反應以製備 NZVI。
- (四) 將外包裝浸於超音波震盪儀中，等候反應完成，使 NZVI 能均勻分散。
- (五) 反應完成後，抽水馬達之水管經可透氣單向出口插入，將 NZVI 投加至反應槽中。



圖二十三：設備專用 NZVI 包裝示意圖

(圖二十三資料來源：研究者繪製)

八、成本效益分析

	彰化某汙水處理廠	自動化設備（估計值）
每立方公尺水處理成本	新臺幣五十元	約新臺幣四十元
系統建置成本	新臺幣六千萬至一億元	新臺幣十萬至一百萬元 （依規模增減）
每立方公尺水處理人事成本	約新臺幣三十元	不到新臺幣十元
汙水處理方式	投加藥劑與生物、光降解法	NZVI 快速降解法
耗材之再利用率	經使用無法重複利用	NZVI 可經硼氫化鈉法再生， 還原率約 50%
汙水處理時長	數個小時	十分鐘內，增加劑量最快可 達一分鐘內
汙水處理後用途	仍具色度，經王功漁港排放	無色無味，工廠內直接重複 使用

肆、結論與應用

- 一、NZVI 可快速降解有機汙染物，去除其色度及毒性。
- 二、Line Chatbot 提供更簡潔、高適地性的操作介面，資訊傳遞速度較第三方軟體迅速。
- 三、透過 Webduino Smart 開發板與 Line Chatbot 可輕鬆、低成本實現物聯網的體驗，設備除了可手動控制外，更能依照處理情形自動化控制，不僅省下系統建置成本、時間成本，最重要的是能省下不少人事成本。
- 四、Google 試算表可記錄設備使用歷程，也可製作分析圖表，了解使用情況。
- 五、設備專用 NZVI 使其製備過程更為方便。
- 六、本設備的發明可同時滿足染整廠及環境的需求，避免汙染發生並重複使用水資源。
- 七、NZVI、廢水皆可重複利用，達成永續環境的目的。

伍、參考文獻

- 一、57東森財經新聞 (2015)。直擊最大染整廢水處理場! 年省4千萬水費 - YouTube。2021年9月2日，取自<http://yt1.piee.pw/3p25hs>。
- 二、全國公證檢驗股份有限公司 (2013)。萬紫千紅隱藏危機：偶氮染料。2020年4月8日，取自<https://pse.is/vzuwf>。
- 三、連興隆、蔡春進、劉宗勇、張宣武、蘇鈺珊 (2012)。奈米零價鐵金屬：從國際到國內；從應用到風險。《工業污染防治》，121，167。
- 四、董宣玖、蔡宇程、王博玄 (2021)。降解有機染料廢水自動化設備研究。臺北市第54屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 五、Buber Hu (2018)。Webduino 使用 LINE 自訂積木(四)：LINE Bot。2021年7月14日，取自<https://reurl.cc/em5pjR>。
- 六、Cavelle, J. (2013). A Political Ecology of the Citarum River Basin: Exploring "Integrated Water Resources Management" in West Java, Indonesia. *Berkeley Undergraduate Journal*, 26(1).
<http://dx.doi.org/10.5070/B3261016209> Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/7zh5n9f6>
- 七、C. Chompuchan, T. Satapanajaru, P. Suntornchot, and P. Pengthamkeerati (2009) Decolorization of Reactive Black 5 and Reactive Red 198 using nanoscale zerovalent iron. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical and Molecular Engineering Vol:3, No:1, 2009*.
- 八、Chandra Devi Raman, S. Kanmani (2016) Textile dye degradation using nano zero valent iron: A review. *Journal of Environmental Management*, 177, 341-355. doi:10.1016/j.jenvman.2016.04.034
- 九、Dikanaya Tarahita and Muhammad Zulfikar Rakhmat (2018)。Indonesia's Citarum: The World's Most Polluted River。2021年8月22日，取自<https://pse.is/3mrz42>。
- 十、Dove, M. R., Sajise, P. E., *Conserving Nature In Culture: Case Studies from Southeast Asia*. Yale University Southeast Asia Studies, New Haven, Connecticut, 2005, pp. 119-143.
- 十一、Meghalim Phukan (2015). Characterizing the ion-selective nature of Fe⁰-based systems using azo dyes: batch and column experiments (master's thesis, University of Melbourne). Retrieved from

<https://pse.is/w8kz3>

- 十二、 Nimkartek Blog (2015)。Banned Amines in Textile and Leather。2020年8月28日，取自 <https://pse.is/wb8rg>。
- 十三、 Suvanka Dutta, Rajnarayan Saha, Harjyoti Kalita, Achintya N. Bezbaruah (2016). Rapid reductive degradation of azo and anthraquinone dyes by nanoscale zero-valent iron. *Environmental Technology & Innovation Volume 5, April 2016, 176-187*. doi:10.1016/j.eti.2016.03.001
- 十四、 Su Y., Lowry G.V., Jassby D., Zhang Y. (2019) Sulfide-Modified NZVI (S-NZVI): Synthesis, Characterization, and Reactivity. In: Phenrat T., Lowry G. (eds) *Nanoscale Zerovalent Iron Particles for Environmental Restoration*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95340-3_9
- 十五、 Unreported World (2017)。The World's Dirtiest River | Unreported World - YouTube。2021年8月17日，取自 <http://yt1.piee.pw/3lymxxp>。
- 十六、 Willis, S. (2020, December 15). How Sustainable Dyeing is Changing the Textile Industry. Plug and Play. <https://pse.is/3buswm>
- 十七、 Yang-Hsin Shih and Chih-Ping Tso. *Environmental Engineering Science*. Oct 2012.929-933. <http://doi.org/10.1089/ees.2010.0433>

【評語】 100039

該作品以奈米鐵材料以 Fenton-like 製程應用於降解染整廠廢水中之偶氮染料去除，並建立自動化循環系統，整體概念研究方法恰當，唯以下幾點需加以考量：

1. 作品內容並無定義何謂 NZVI 與 SNZVI。
2. 實驗可考慮加入 10% H_2O_2 進行去除 RB5 溶液中 TOC 以作為對照組。
3. 結合自製自動化設備確實有效處理廢水，是否有二次廢棄物衍生，需加以探討以利未來實場用。
4. 作品內提及透過還原法處理已使用過之 NZVI，雖還原效率僅有約 50%，其後續再利用 NZVI 後之後染料降解效率需加以研究了解並探討可循環再利用性，以利循環經濟之效。
5. 降解測試可考慮加入溫度效應。
6. 延續性研究，敘事方式有更新，增加 line Chatbot 操作程式，和新的操作原型，具有不少的變動。