

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 環境學科

團隊合作獎

052604

阿摩尼亞__拜拜！——以電化學氧化法去除廢
水中的氨氮

學校名稱：新北市立板橋高級中學

作者： 高二 游承恩 高二 陳昱曦 高二 謝定穎	指導老師： 黃韶韻
---	------------------

關鍵詞：廢水汙染處理、氨氮、電化學氧化法

摘要

本實驗研究目的是以電化學氧化法降低廢水中的氨氮濃度，藉由使用石墨導電塗層/壓克力電極，改善石墨機械強度低的問題。我們使用導電度計法測量水溶液導電度並計算其氨氮濃度，處理後的廢水濃度符合台北市放流標準，且去除率皆高於 75 %，比配置的氨氮溶液高，可知電化學直接氧化法更適合應用於處理實際廢水。本研究的副產物硝酸鹽濃度皆低於 1.19 ppb，對實驗影響極小。實際處理廢水時，使用石墨導電塗層/壓克力電極所需的電耗能相較於使用石墨電極減少約 93 %，但能和使用石墨電極達到相同的去除率。

壹、前言

一、研究動機

有次老師上課時，介紹了水的淨化過程以及工業廢水的處理方法，讓我們對於水質淨化產生了興趣。在搜尋資料的過程中發現：若氨氮廢水不經過適當處理就直接排進河川中，會造成河水優養化或魚類中毒死亡的問題。行政院環保署規定公共廢水下水道放流水氨氮排放標準為 75 mg/L，台北市環保局則規定在 10 mg/L 以下才可排放。由於科技產業新興，半導體產業、食品加工、製革業、醫療院所、印刷業等，都會產生含有氨氮的廢水。目前去除氨氮技術最廣泛使用的是生物法，但生物法有佔地面積大的缺點，而其他方法大部分會產生副產物，所以我們想以一種簡單、有效率、不需佔大面積土地且減少副產物的方式來處理廢水。以電化學氧化法去除氨氮，大部分產物都是氮氣，是相對環保且效率高的去除方式，且具有能在短時間內快速去除氨氮、不會產生淤泥類廢棄物、佔地面積小等優點。雖然會產生副產物硝酸鹽，但其毒性低且產量極少。我們也會確保硝酸鹽濃度沒有超過行政院環保署規定的排放標準 50 mg/L。電化學氧化法目前最受歡迎的電極材料為石墨，因其為惰性電極且具優良的導電性。不過石墨卻有機械強度低的缺點，因此，我們試圖以石墨導電噴劑及壓克力板製造電極解決此問題。

二、研究目的

- (一) 分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨電極以電化學直接氧化法進行實驗，檢測氨氮濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。

(二) 分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法進行實驗，檢測氨氮濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。

(三) 使用石墨電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度並計算氨氮去除率。

(四) 使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度並計算氨氮去除率。

三、文獻回顧

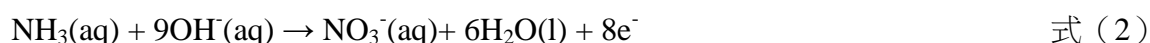
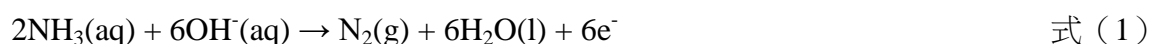
(一) 電化學氧化法 (electrochemical oxidation)

以電化學氧化法去除氨氮的方式分為兩種：直接氧化和間接氧化。

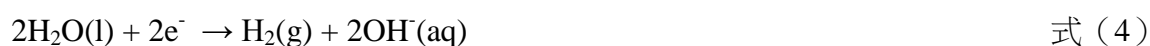
1. 直接氧化法 (direct oxidation)

直接氧化法依靠電極本身直接與污染物進行氧化還原反應，僅有電子轉移，無加入其它物質參與反應。陽極會先和水反應產生氫氧自由基 ($\text{OH}\cdot$)，氫氧自由基會附著在陽極表面，再與氨氮反應成氮氣，反應如式 (1) 所示。無論是直接氧化還是間接氧化都會產生電解水，反應式如式 (3) 和式 (4) 所示；一部分的氨氮會和氫氧根結合，形成副產物硝酸鹽，反應如式 (2) 所示；而主要反應式 (1) 及式 (4) 的總反應如式 (5) 所示。因為電解後的水溶液含有副產物硝酸鹽或其他離子，導致導電度改變，無法準確測量剩下氨氮的導電度，所以在測量導電度前先蒸餾，可確保水溶液內只有氨氮，再測量水溶液的導電度。相較於直接氧化法，間接氧化法反應時必須控制 pH 值且會產生較多具有污染性的副產物，因此我們選擇直接氧化法進行實驗，整體來說較為簡單且環保。

陽極：



陰極：



結果：



2. 間接氧化法 (indirect oxidation)

間接氧化法是利用氯離子進行反應，陽極會把氯離子氧化成氯氣，如式（6）所示，接著氯氣會與水反應成次氯酸和鹽酸，如式（8）所示。次氯酸會解離成氫離子跟次氯酸根，如式（9）所示。在陰極會使次氯酸根會還原成氯離子，如式（7）所示。銨離子會與次氯酸反應成氮氣，如式（10）所示。同時會產生跟直接氧化法相同的電解水副反應及副產物硝酸鹽。電解水副反應會使氧化氯離子的反應減少，次氯酸的產量降低，導致氨氮的去除效率下降。反應式如下：

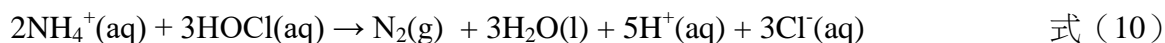
陽極：



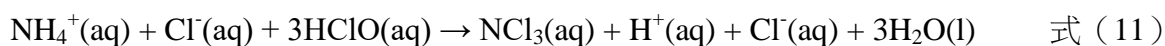
陰極：



結果：



由我們試作的實驗數據得知，若在氨氮水溶液中加入氯化鈉進行電解，在 10 分鐘內 pH 值會急速下降，根據呂佳原（2015）的實驗結果所示，此現象會造成氨氮的去除率下降。因為在低 pH 值的條件下，氯離子容易以氯氣的形式存在，不利於氨氮的降解，容易產生副產物三氯胺（ NCl_3 ），反應如式（11）所示。若是在高 pH 值的環境下過度電解次氯酸根會氧化成氯酸和過氯酸，導致整體效率降低，產生副產物。



加入過多的氯化鈉會導致鈉離子的含量過高，使電解過程中產生的次氯酸根反應形成次氯酸鈉，影響次氯酸的形成，從而影響反應效率，反應如式（12）所示。



（二）電極介紹

石墨是一種化學穩定性佳、導電性佳且不易與氧化合的材料。不僅便宜，作為電極時也不會因水溶液的 pH 值而造成數據不同，非常適合當電極。但是石墨卻有機械強度低的問題，多次使用後容易在實驗過程中崩解，使數據有產生誤差的疑慮。而壓克力具有機械性高、易於加工和回收的特性。使石墨附著於基材上的方法有兩種，分別為粉底塗裝及直接使用噴劑噴塗。不過，粉底塗裝需加熱至 200 °C 以上，但壓克力基材加熱超過 90 °C 就會變形，而且學校也沒有設備可讓我們粉底塗裝。因此，我們採用石墨導電

噴劑噴塗壓克力板來解決石墨機械強度不高的問題。石墨導電噴劑成分為石墨 1 ~ 5 %、異丙醇 25 ~ 50 %，加入了揮發性有機溶劑使石墨成為噴劑，噴出後會揮發至空氣中。在有機溶劑揮發後，壓克力板上只會有石墨。

(三) 蒸餾

電解後的水溶液內含有氨氮、副產物硝酸鹽及其他離子，為了去除副產物及其他離子，因此需要執行蒸餾步驟。在蒸餾前會將電解後樣品的 pH 值調整至 11，因水溶液 pH 值為 11 時，會使水中的氨氮大多以分子形式 (NH₃) 存在，加熱時更容易產生氨氣，如式 (13) 所示。接著蒸餾樣品使氨氣從水溶液中逸出，通過冷凝管後溶進收集瓶內的水，再以電磁加熱攪拌器調整溫度至 25 °C，以導電度計測量其導電度再代入檢量線計算氨氮濃度。因為氨氣產生的速率較水的冷凝快，所以在蒸餾前會先在收集瓶內加入 30 mL 的水，避免先產生的氨氣無法溶於水中，導致裝置內氣壓過大，造成危險。



(四) 實驗後氨氮廢水的處理方式

本研究的實驗過程中僅使用硫酸銨配置氨氮廢水，廢水經處理後氨氮濃度皆達行政院環保署規定的公共廢水下水道放流水氨氮排放標準 75 mg/L，已透過實驗降低氨氮濃度，且實驗過程中所產生的副產物硝酸鹽濃度極低，因此廢水的處理方式是將加大量清水稀釋後直接倒入水槽，使實驗對環境的汙染降到最低。

(五) 歷屆氨氮相關研究比較

大部分科展歷屆與氨氮相關的研究都是使用生物法去除氨氮，並無使用電化學氧化法去除氨氮的先例。比較如下：

表 1

歷屆氨氮相關研究比較表

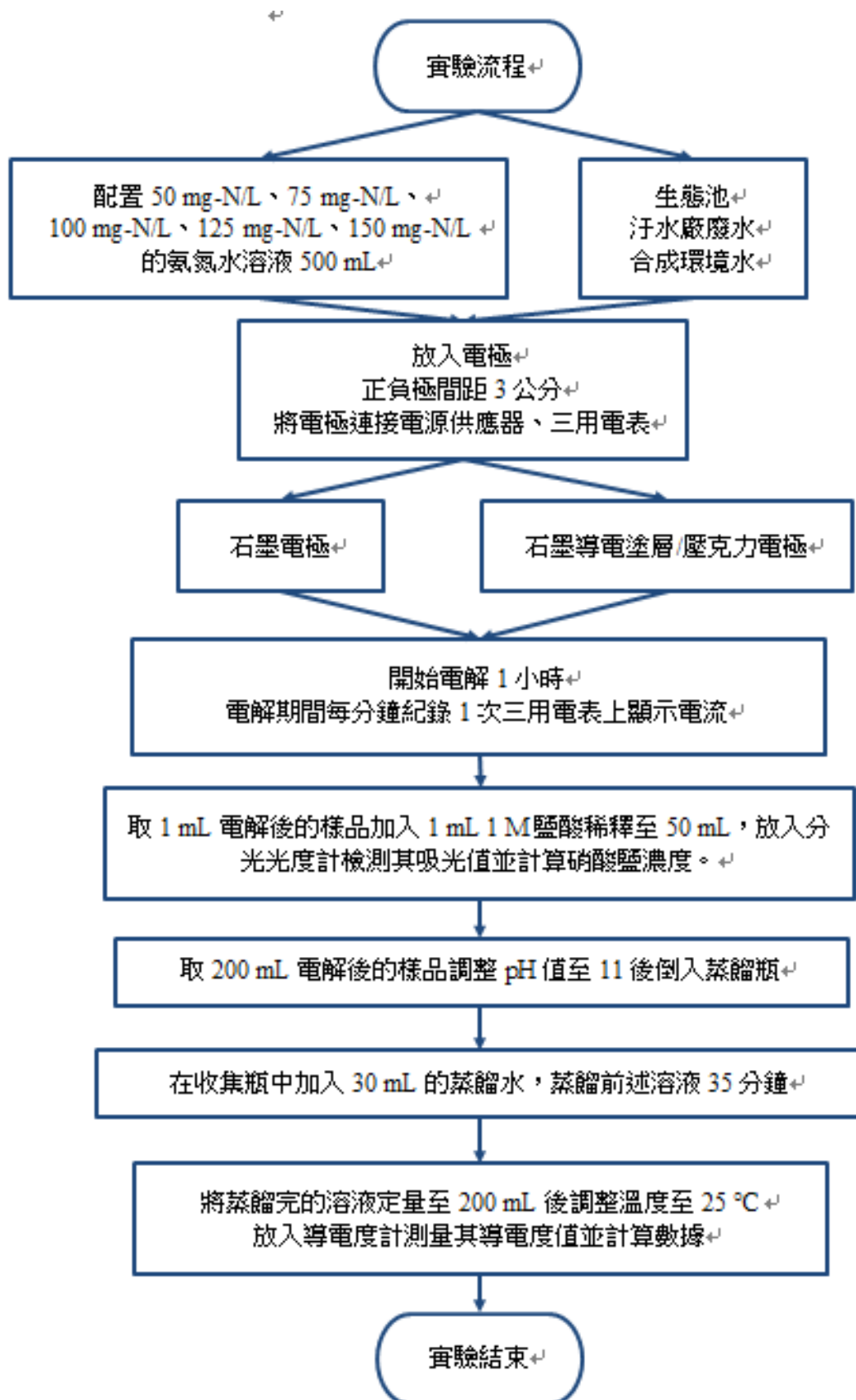
科展作品名稱	研究內容	研究結果
那些年，我們一起分解的氨氮—微生物處理廢水氮化物之探討	培養細菌並以細菌分解水中的氨氮	特定菌種能有效降低氨氮濃度
生物分解新主張，污水處理有一套	設計一個裝置，搭配細菌去除水中的氨氮及污泥	成功設計出可有效去除氨氮及減少污泥的裝置
嗜廢水者為「菌」解-高氨氮廢水於微生物電池的應用，及其裝置之探討	以高氨氮培養基篩選菌種後作用於微生物燃料電池	研發出的第三代微生物燃料電池實用性較高

貳、研究設備及器材

藥品					
鹽酸 hydrochloric acid 32.4 % , HCl		氫氧化鈉 sodium hydroxide > 99 % , NaOH		硫酸銨 ammonium sulfate > 99 % , (NH ₄) ₂ SO ₄	
硝酸鉀 potassium nitrate 99.8 % , KNO ₃		石墨棒 11 cm * 0.8 cm 		KONTAKT CHEMIE G-33 石墨 導電噴劑 	
器材					
電子秤 A&D Fx-200i 		分光光度計 Metertech SP-8001 		電源供應器 Human , 直流電 	
導電度計 Model 3177M 		pH 計 EUTECH instruments pH510 		電子溫度計 GE-363D 	
電磁加熱攪拌器 FARGO , HMS-102 		烘箱 SR-T901 		可調式微量吸管 AWE-770060 	
蒸餾瓶	燒瓶	布氏漏斗	冷凝管	攪拌磁石	燒杯
秤量紙 10 cm * 10 cm	圓形濾紙 直徑 11 cm	錐形瓶	容量瓶	壓克力板 10 cm * 0.8 cm * 0.5 cm 	

參、研究過程或方式

一、研究架構



二、名詞定義及檢測方法

(一) 氨氮：

在水中以分子氨 (NH_3) 或銨離子 (NH_4^+) 形式存在的氮名為氨氮。

(二) 石墨導電塗層/壓克力電極：

取 $10\text{ cm} * 0.8\text{ cm} * 0.5\text{ cm}$ 壓克力板，將其以石墨導電噴劑噴塗並放入烘箱烘烤，作為研究目的 (二) 及研究目的 (四) 的電極。以下為製備步驟：

1. 將壓克力板洗淨並擦乾，和噴罐保持 20 公分的距離，使噴劑均勻附著於壓克力板上。



圖一、洗淨後的壓克力板



圖二、噴塗電極示意圖

2. 將附著噴劑的壓克力板送入烘箱，調整烘箱溫度至 $60\text{ }^\circ\text{C}$ ，烘烤 1 小時。



圖三、電極放入烘箱示意圖



圖四、電極成品圖

3. 再重複上述步驟 2 次，製作附著三層石墨導電噴劑的石墨導電塗層/壓克力電極。

(三) 合成環境水：

取學校生態池池水，加入硫酸銨充分混合後，作為研究目的 (三) 及研究目的 (四) 的第三種樣品。以下為製備步驟：

1. 取學校生態池水 10 L。
2. 秤取硫酸銨 4.718 g 加入至池水裡充分攪拌。

(四) 氨氮去除率 Δm (%) 計算公式如下：

$$\Delta m = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} 100 \%$$

C_0 ：氨氮初始濃度 (mg-N/L)。

C_t ：電解後的氨氮濃度 (mg-N/L)。

(五) 電耗能計算方式如下 (焦耳)：

$$E = \frac{I \cdot 6 \cdot 3600}{60 \cdot 1000}$$

E：每分鐘電耗能 (J)。

I：每分鐘平均電流 (A)。

$$\text{電耗能} = \sum_0^{60} E = \frac{I \cdot 6 \cdot 3600}{60 \cdot 1000}$$

(六) 氨氮濃度測定方法——導電度計法

1. 以 0.01 M 氯化鉀溶液校正導電度計。

2. 製作檢量線

(1) 稱取硫酸銨 1.179 g 並加入適量蒸餾水溶解，倒入容量瓶加水定量至 500 mL，配置濃度為 500 mg-N/L 的氨氮水溶液。

(2) 分別取上述溶液 12.0、16.0、20.0、24.0、28.0 mL，加水稀釋至 200 mL，其濃度分別為 30 ppm、40 ppm、50 ppm、60 ppm、70 ppm。

(3) 分別將稀釋後的溶液以氫氧化鈉水溶液調整 pH 值至 11，倒入蒸餾瓶。

(4) 在收集瓶中加入 30 mL 蒸餾水，將上述溶液蒸餾 35 分鐘。

(5) 蒸餾結束後，將蒸餾液加水定量至 200 mL。以電磁加熱攪拌器調整水溶液溫度至 25 °C，接著使用導電度計檢測導電度值繪製檢量線。

註：a. 導電度是一種具有加乘性的水質參數，代表水溶液的導電能力。

b. 收集到的蒸餾液為氨水。

3. 檢測樣品

(1) 取 200 mL 電解後的樣品，以氫氧化鈉水溶液調整 pH 值至 11，倒入蒸餾瓶。

(2) 在收集瓶中加入 30 mL 蒸餾水，將上述溶液蒸餾 35 分鐘。

(3) 蒸餾結束後，將蒸餾液加水定量至 200 mL。以電磁加熱攪拌器調整水溶液溫度至 25 °C，接著使用導電度計檢測導電度值並帶入檢量線計算氨氮濃度。

(七) 硝酸鹽濃度測定方法——比色法

1. 取 1 mL 1 M 鹽酸加水稀釋至 50 mL 作為空白溶液校正分光光度計。

2. 檢量線

- (1) 秤取硝酸鉀 0.3609 g，加入適量蒸餾水溶解，倒入容量瓶加水定量至 0.5 L。接著取前述溶液 50 mL，加入蒸餾水定量至 500 mL。
- (2) 使用可調式微量吸管取 0.1、0.2、0.4、0.8、1.6、3.2 mL 步驟 (1) 所配置的溶液，濃度分別為 0.04 ppb、0.08 ppb、0.16 ppb、0.32 ppb、0.64 ppb。分別加入 1 mL 1 M 鹽酸，使用蒸餾水將其定量至 50.0 mL。
- (3) 將稀釋後的溶液放入分光光度計檢測並繪製檢量線。

3. 檢測樣品

- (1) 取 1 mL 1 M 鹽酸並加入 1 mL 電解後樣品，加水稀釋至 50 mL，放入分光光度計測量 220 nm 及 275 nm 的吸光度，硝酸鹽之淨吸光度為 220 nm 之吸光度減 2 倍 275 nm 之吸光度，代入檢量線求硝酸鹽濃度，再依下列算式計算樣品中硝酸鹽的濃度。

$$C_s = C \times F$$

C_s ：樣品中硝酸鹽濃度 (mg NO₃⁻-N/L)

C ：檢量線求得之硝酸鹽濃度 (mg NO₃⁻-N/L)

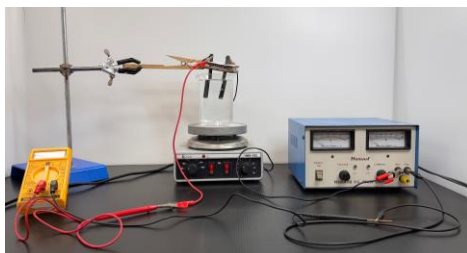
F ：稀釋倍數

註：以上資料來源為環署檢字第 0950062980 號公告，水中硝酸鹽氮檢測方法-分光光度計法 (NIEA W419.51A)。

三、實驗步驟

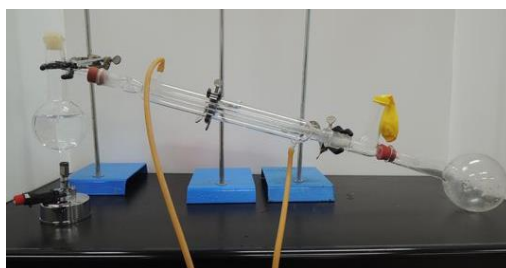
- (一) 分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨電極以電化學直接氧化法進行實驗，檢測氨氮濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。
 1. 秤取硫酸銨 1.179 g 加入適量蒸餾水溶解後，倒入容量瓶加水定量至 500 mL，配置濃度為 500 mg-N/L 的氨氮水溶液。
 2. 將已配置好的 500 mg-N/L 氨氮水溶液分別稀釋為 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L。
 3. 分別以燒杯裝取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的水溶液各 500 mL，將攪拌磁石放入燒杯中，並把燒杯置於電磁加熱攪拌器上

4. 將石墨棒放入燒杯中，使其沒入水溶液 3 cm，控制正負極間距為 3 cm，接上電源供應器及三用電表，並將電壓調整為 6 V，電解 1 小時，在電解期間每分鐘記錄 1 次三用電表上顯示的電流，裝置如圖五所示。



圖五、電解裝置圖

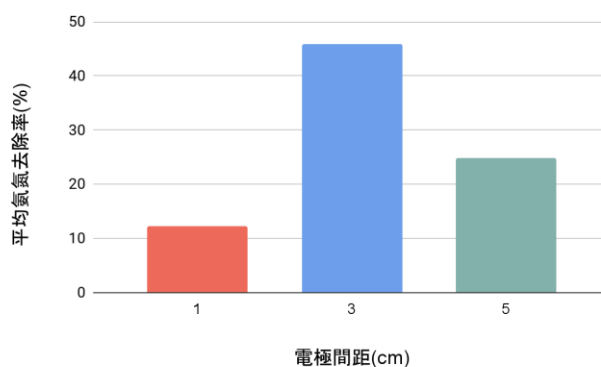
5. 取 1 mL 電解後的樣品加入 1 mL 1 M 鹽酸稀釋至 50 mL，放入分光光度計檢測其吸光值並計算硝酸鹽濃度。
6. 取 200 mL 電解後的樣品，以氫氧化鈉水溶液調整 pH 值至 11，倒入蒸餾瓶。
7. 在收集瓶中加入 30 mL 蒸餾水，將上述溶液蒸餾 35 分鐘，如圖六所示。



圖六、蒸餾裝置圖

8. 蒸餾結束後，將蒸餾液加水定量至 200 mL。以電磁加熱攪拌器調整水溶液溫度至 25 °C，接著使用導電度計檢測導電度值並計算氨氮濃度。

註：使用石墨電極處理 100 mg-N/L 氨氮水溶液時，電極間距 1 cm 及 5 cm 較 3 cm 時的氨氮去除率低，如圖七所示，因此我們選擇控制電極間距為 3 cm。除了能獲得較佳的實驗結果外，電極間距相同也能減少實驗的變因。



圖七、兩石墨電極的不同間距與平均氨氮去除率關係圖

(二) 分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法進行實驗，檢測氨氮濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。

1. 秤取硫酸銨 1.179 g 加入適量蒸餾水溶解後，倒入容量瓶加水定量至 500 mL，配置濃度為 500 mg-N/L 的氨氮水溶液。
2. 將已配置好的 500 mg-N/L 氨氮水溶液分別稀釋為 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L。
3. 分別以燒杯裝取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的水溶液各 500 mL，將攪拌磁石放入燒杯中，並把燒杯置於電磁加熱攪拌器上。
4. 將石墨導電塗層/壓克力電極放入燒杯中，使其沒入水溶液 3 cm，控制正負極間距為 3 cm，接上電源供應器及三用電表，並將電壓調整為 6 V，電解 1 小時，在電解期間每分鐘記錄 1 次三用電表上顯示的電流。
5. 取 1 mL 電解後的樣品加入 1 mL 1 M 鹽酸稀釋至 50 mL，放入分光光度計檢測其吸光值並計算硝酸鹽濃度。
6. 取 200 mL 電解後的樣品，以氫氧化鈉水溶液調整 pH 值至 11，倒入蒸餾瓶。
7. 在收集瓶中加入 30 mL 蒸餾水，將上述溶液蒸餾 35 分鐘。
8. 蒸餾結束後，將蒸餾液加水定量至 200 mL。以電磁加熱攪拌器調整水溶液溫度至 25 °C，接著使用導電度計檢測導電度值並計算氨氮濃度。

(三) 使用石墨電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度並計算氨氮去除率。

1. 取學校生態池池水 10 L，秤取硫酸銨 4.718 g 加入至池水裡充分攪拌，配置成合成環境水。
2. 以燒杯分別裝取 500 mL 由新竹廢水處理廠的廢水、學校生態池採集到的池水及合成環境水，將攪拌磁石放入燒杯中，並把燒杯置於電磁加熱攪拌器上。
3. 將石墨棒放入燒杯中，使其沒入水溶液 3 cm，控制正負極間距為 3 cm，接上電源供應器及三用電表，並將電壓調整為 6 V，電解 1 小時，在電解期間每分鐘記錄 1 次三用電表上顯示的電流。
4. 取 1 mL 電解後的樣品加入 1 mL 1 M 鹽酸稀釋至 50 mL，放入分光光度計檢測其吸光值並計算硝酸鹽濃度。
5. 取 200 mL 電解後的樣品，以氫氧化鈉水溶液調整 pH 值至 11，倒入蒸餾瓶。
6. 在收集瓶中加入 30 mL 蒸餾水，將上述溶液蒸餾 35 分鐘。

7. 蒸餾結束後，將蒸餾液加水定量至 200 mL。以電磁加熱攪拌器調整水溶液溫度至 25 °C，接著使用導電度計檢測導電度值並計算氨氮濃度。

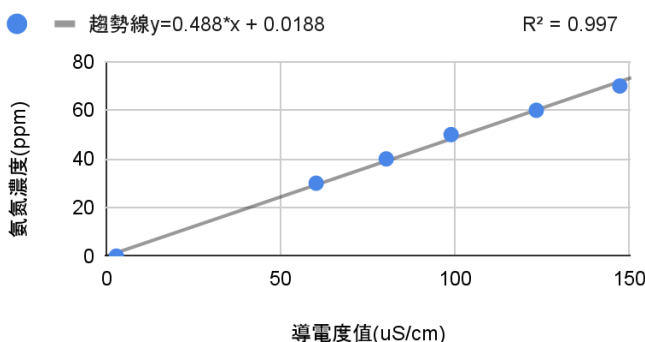
(四) 使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度並計算氨氮去除率。

1. 取學校生態池池水 10 L，秤取硫酸銨 4.718 g 加入至池水裡充分攪拌，配置成合成環境水。
2. 以燒杯分別裝取 500 mL 由新竹廢水處理廠的廢水、學校生態池採集到的池水及合成環境水，將攪拌磁石放入燒杯中，並把燒杯置於電磁加熱攪拌器上。
3. 將石墨導電塗層/壓克力電極放入燒杯中，使其沒入水溶液 3 cm，控制正負極間距為 3 cm，接上電源供應器及三用電表，並將電壓調整為 6 V，電解 1 小時，在電解期間每分鐘記錄 1 次三用電表上顯示的電流。
4. 取 1 mL 電解後的樣品加入 1 mL 1 M 鹽酸稀釋至 50 mL，放入分光光度計檢測其吸光值並計算硝酸鹽濃度。
5. 取 200 mL 電解後的樣品，以氫氧化鈉水溶液調整 pH 值至 11，倒入蒸餾瓶。
6. 在收集瓶中加入 30 mL 蒸餾水，將上述溶液蒸餾 35 分鐘。
7. 蒸餾結束後，將蒸餾液加水定量至 200 mL。以電磁加熱攪拌器調整水溶液溫度至 25 °C，接著使用導電度計檢測導電度值並計算氨氮濃度。

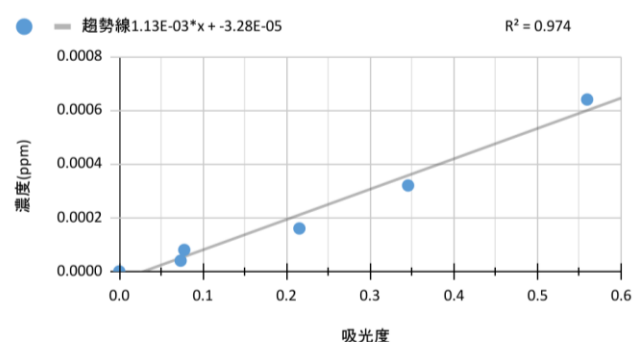
肆、研究結果

本實驗將數據分析並呈現於說明書前已進行 5 次以上的試做，以降低數據誤差。

一、檢量線



圖八、氨氮濃度檢量線



圖九、硝酸鹽檢量線

(一) 氨氮濃度檢量線

由圖八可知，檢測後數據所繪製出氨氮導電度檢量線可得決定係數 R^2 為 0.997，獲得公式為 $y = 0.488x + 0.0188$ ，可測量水樣中的導電度 (x) 代入公式，得到水樣中氨氮濃度 (y)。

(二) 硝酸鹽檢量線

圖九由分光光度計檢測後取波長最高峰之吸光度所繪製，可得決定係數 R^2 為 0.974，獲得公式為 $y = 0.00113x - 0.0000328$ ，因此可將水樣放入分光光度計獲得最高峰之吸光度數值帶入公式 (x)，得到水樣中硝酸鹽濃度 (y)。

二、研究結果

(一) 分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨電極以電化學直接氧化法進行實驗，分別檢測氨氮濃度及硝酸鹽濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。

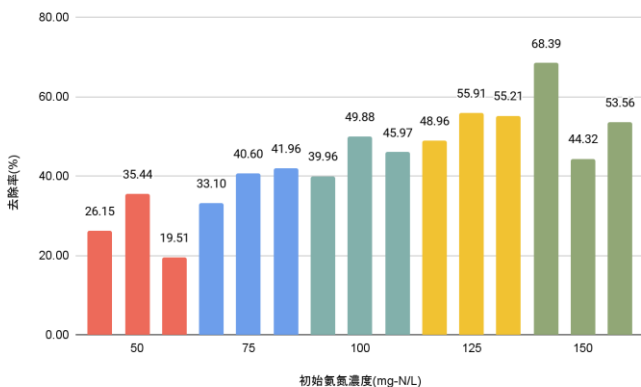
表 2

使用石墨電極電解氨氮水溶液數據一覽表

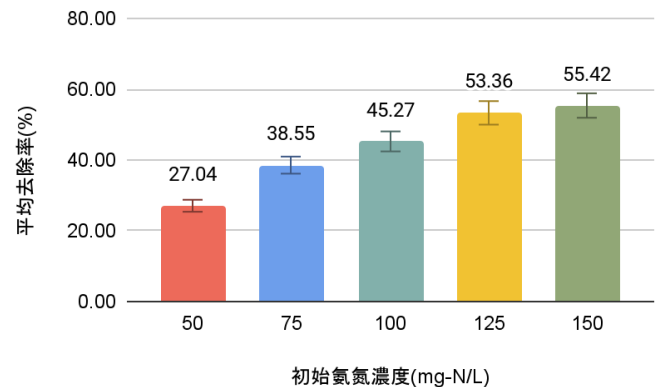
濃度(mg-N/L)	序號	蒸餾後導電度(uS/cm)	電解後濃度(mg-N/L)	氨氮去除率(%)	電耗能(J)
50	1	75.50	36.86	26.15	183.94
	2	66.00	32.23	35.44	207.85
	3	82.20	40.13	19.51	198.99
	平均	74.57	36.41	27.04	196.93
75	1	102.50	50.04	33.10	252.90
	2	91.10	44.48	40.60	283.73
	3	89.10	43.50	41.96	242.96
	平均	94.23	46.00	38.55	259.86
100	1	122.90	59.99	39.96	317.99
	2	102.50	50.04	49.88	397.71

	3	110.50	53.94	45.97	425.66
	平均	111.97	54.66	45.27	380.45
125	1	130.60	63.75	48.96	325.03
	2	112.80	55.07	55.91	428.04
	3	114.60	55.94	55.21	431.01
	平均	119.33	58.25	53.35	394.69
150	1	98.50	48.09	68.39	594.83
	2	171.40	83.66	44.32	433.15
	3	142.60	69.61	53.56	425.43
	平均	137.50	67.12	55.42	417.20

文獻探討提到：裝置中的陽極會先和水反應產生氫氧自由基（OH•），氫氧自由基接著附著在陽極表面，再與氨氮反應產生氮氣後逸散。由表 2 可知：50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液在電解後，得到的氨氮濃度平均數值分別為 36.41 mg-N/L、46.00 mg-N/L、54.66 mg-N/L、58.25 mg-N/L、67.12 mg-N/L，實驗結果與文獻探討相符，上述濃度的氨氮水溶液處理後符合環保署所規定的氨氮流放標準 75 mg-N/L。但有部分的氨氮會和氫氧根結合，產生副產物硝酸鹽。我們使用分光光度計測量電解後主要副產物硝酸鹽的濃度，繪製檢量線進行比對後，發現硝酸鹽的濃度非常低，數據都在 1.19 ppb 以下，因此可排除副產物硝酸鹽對實驗的影響。可藉由表 2 繪製圖十及圖十一。



圖十、初始氨氮濃度與去除率關係圖



圖十一、初始氨氮濃度與平均去除率關係圖

(二) 分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法進行實驗，檢測氨氮析氨氮去除率與濃度的關係。

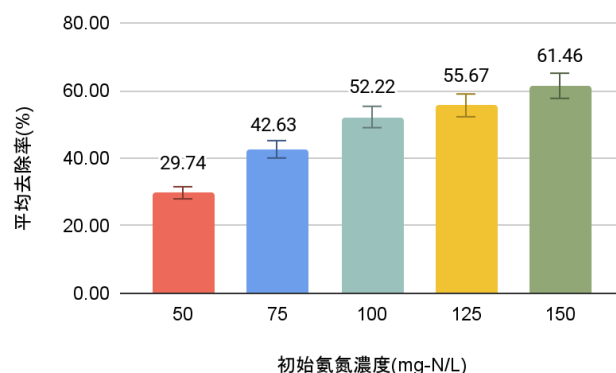
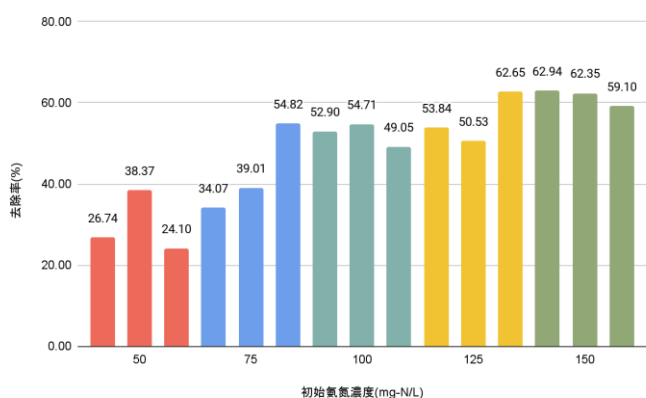
表 3

使用石墨導電塗層/壓克力電極電解氨氮水溶液數據一覽表

濃度(mg-N/L)	序號	蒸餾後導電度(uS/cm)	電解後濃度(mg-N/L)	氨氮去除率(%)	電耗能(J)
50	1	74.90	36.57	26.74	20.24
	2	63.00	30.76	38.37	25.90
	3	77.60	37.89	24.10	19.46
	平均	71.83	35.07	29.74	21.87
75	1	101.30	49.45	34.07	24.33
	2	93.70	45.74	39.01	31.05
	3	69.40	33.89	54.82	21.41
	平均	88.13	43.03	42.63	25.60
100	1	96.40	47.06	52.90	22.55
	2	92.70	45.26	54.71	25.65
	3	104.20	50.87	49.05	35.53
	平均	97.77	47.73	52.22	27.91
125	1	118.20	57.70	53.84	25.55
	2	126.70	61.85	50.53	31.81
	3	95.40	46.57	62.65	17.65
	平均	113.43	55.37	55.67	25.00

	1	113.60	55.46	62.94	23.27
	2	115.40	56.33	62.35	33.76
150	3	127.10	62.04	59.10	35.04
	平均	118.70	57.94	61.46	30.69

由表 3 可知：50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液在電解後，得到的氨氮濃度平均值分別為 35.07 mg-N/L、43.03 mg-N/L、47.73 mg-N/L、55.37 mg-N/L、57.94 mg-N/L。經過處理，上述所有濃度電解後也在環保署所規定的氨氮流放濃度標準 75 mg-N/L 以下。使用分光光度計測得吸光值繪製檢量線進行比對後，發現副產物硝酸鹽的濃度也在 1.19 ppb 以下。由表 3 的氨氮去除率可繪製圖十二及圖十三，分別表示其個別的去除率及平均去除率。



圖十二、初始氨氮濃度與去除率關係圖

圖十三、初始氨氮濃度與平均去除率關係圖

(三) 使用石墨電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度並計算氨氮去除率。

表 4

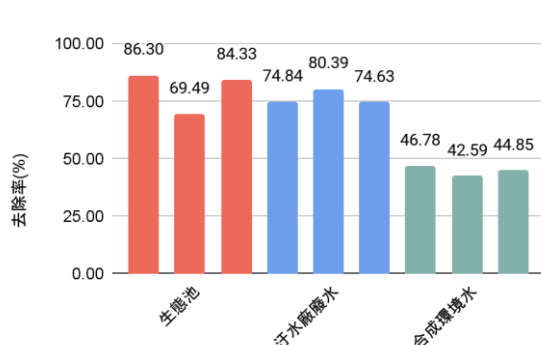
使用石墨電極電解不同來源廢水數據一覽表

廢水來源 初始濃度 (mg-N/L)	序號	蒸餾後導電度 (uS/cm)	電解後濃度 (mg-N/L)	氨氮去除率 (%)	電耗能 (J)
生態池 19.73	1	5.50	2.70	86.30	55.21
	2	12.30	6.02	69.49	54.95
	3	6.30	3.09	84.33	67.18

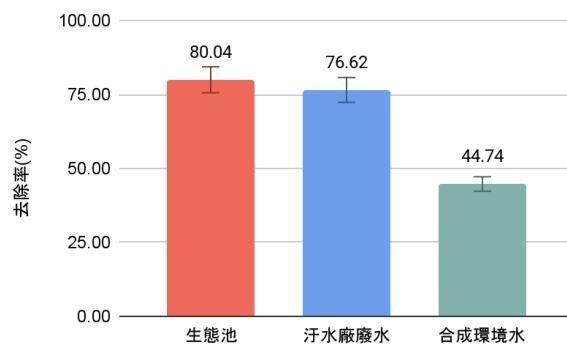
	平均	8.03	3.94	80.04	59.11
污水廠 23.74	1	12.20	5.97	74.84	201.87
	2	9.50	4.65	80.39	211.81
	3	12.30	6.02	74.63	164.59
	平均	11.33	5.55	76.62	192.76
合成環境 水 101.18	1	110.30	53.85	46.78	420.79
	2	119.00	58.09	42.59	409.82
	3	114.30	55.80	44.85	411.61
	平均	114.53	55.91	44.74	414.07

由表 4 可知：學校生態池水的初始氨氮濃度為 19.73 mg-N/L，污水廠廢水的初始氨氮濃度為 23.74 mg-N/L。採集到的廢水初始濃度雖符合環保署規定流放標準，但在電解後學校生態池水的平均濃度達到 3.94 mg-N/L，污水廠廢水的平均濃度降低至為 5.55 mg-N/L，使兩種廢水濃度能符合台北市所規定的氨氮流放標準 10 mg-N/L。由表 4 的氨氮去除率可繪製圖十四及圖十五，分別表示其個別的去除率及平均去除率。

另外由表 4 也能發現：合成環境水的初始濃度為 101.18 mg-N/L，平均氨氮去除率為 48.70 %。經過處理，電解後的氨氮濃度在環保署所規定的流放標準 75 mg-N/L 以下。使用分光光度計測得吸光值繪製檢量線進行比對後，也發現副產物硝酸鹽的濃度在 1.19 ppb 以下。



圖十四、不同廢水氨氮去除率關係圖



圖十五、不同廢水平均氨氮去除率關係圖

(四) 使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度並計算氨氮去除率。

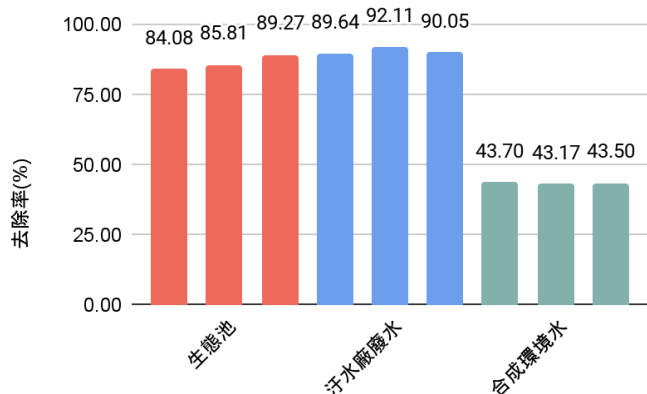
表 5

使用石墨導電塗層/壓克力電極電解不同來源廢水數據一覽表

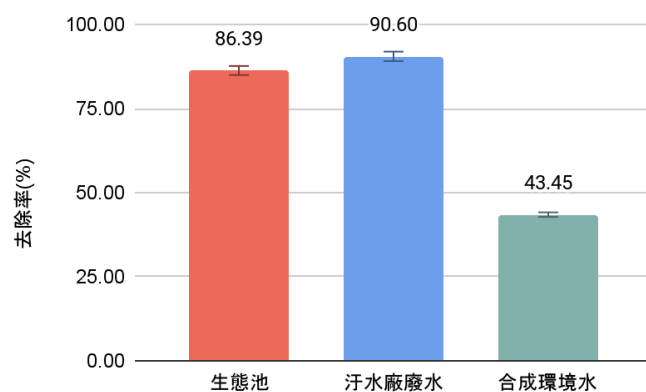
廢水來源 初始濃度 (mg-N/L)	序號	蒸餾後導電度 (uS/cm)	電解後濃度 (mg-N/L)	氨氮去除率(%)	電耗能(kJ)
生態池 19.73	1	6.40	3.14	84.08	16.08
	2	5.70	2.80	85.81	21.66
	3	4.30	2.12	89.27	16.17
	平均	5.47	2.69	86.39	17.97
汗水廠 23.74	1	5.00	2.46	89.64	20.01
	2	3.80	1.87	92.11	32.56
	3	4.80	2.36	90.05	22.91
	平均	4.53	2.23	90.60	25.16
合成環境 水 101.18	1	116.70	56.97	43.70	38.92
	2	117.80	57.51	43.17	32.91
	3	117.10	57.16	43.50	33.72
	平均	117.20	57.21	43.45	35.18

由表 5、圖十六及圖十七可知：處理學校生態池水與汗水廠廢水的平均電耗能分別為 17.97 J 和 25.16 J，分別為使用石墨電極所需電耗能的 30.40 % 和 13.05 %，兩者電解後的氨氮濃度甚至低於使用石墨電極進行的實驗。因為電解後濃度較使用石墨電極低，使兩種廢水的去除率提升，學校生態池水的去除率上升了 6.35 %，汗水廠的廢水去除率上升了 13.98 %。因此，我們發現：石墨導電塗層/壓克力電極相較於石墨電極更適合處理廢水。

由表 5、圖十六及圖十七也能發現：使用石墨導電塗層/壓克力電極處理合成環境水的平均氨氮去除率為 43.45 %。經過處理，電解後的氨氮濃度在環保署所規定的流放標準 75 mg-N/L 以下。使用分光光度計測得吸光值繪製檢量線進行比對後，也發現副產物硝酸鹽的濃度在 1.19 ppb 以下。



圖十六、不同廢水氨氮去除率關係圖

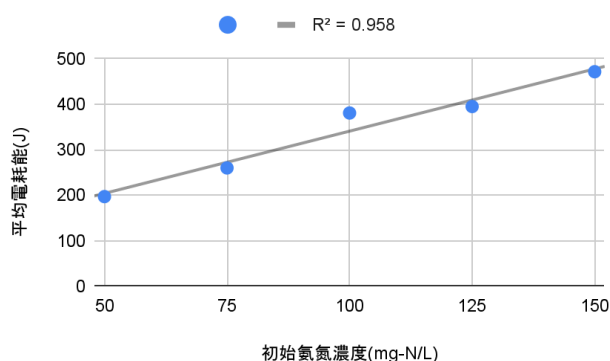


圖十七、不同廢水平均氨氮去除率關係圖

伍、討論

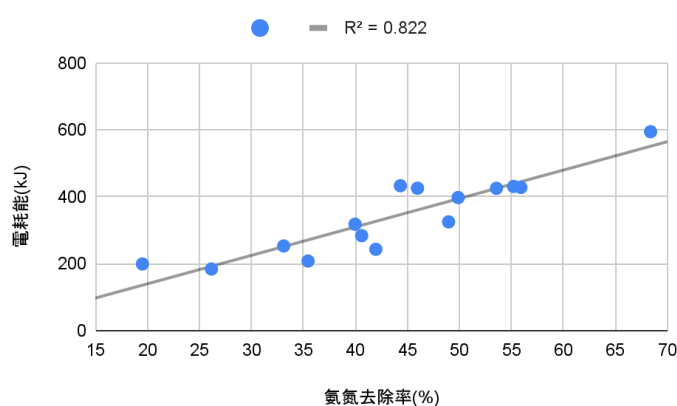
一、分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨電極以電化學直接氧化法進行實驗，檢測氨氮濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。

(一) 由表 2 可知：在持續供應 6 V 電壓，總電解時間為 1 小時的條件下，50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 氨氮水溶液在電解過程中使用石墨電極的平均電耗能，分別為 196.93 J、259.86 J、380.45 J、394.69 J、417.20 J。由上述數據及水溶液的初始氨氮濃度可繪製圖十八，其線性關係的 R^2 為 0.958，表示以此方程式可應用於推測本實驗濃度範圍內的電耗能。



圖十八、使用石墨電極的平均電耗能與初始氨氮濃度關係圖

(二) 由水溶液的初始氨氮濃度及電解後的氨氮濃度可計算出氨氮去除率。在持續供應 6 V 電壓，總電解時間為 1 小時的條件下，由 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液電解後，計算出氨氮去除率分別為 27.04 %、38.55 %、45.27 %、53.35 %、55.42 %。由不同初始氨氮濃度的水溶液在電解過程中的電耗能及氨氮去除率可繪製出圖十九。由圖十九可知，其線性關係的 R^2 為 0.822，大於一般所規定的 0.75。此數據的線性關係擬合度佳，能夠預測範圍內電耗能與氨氮去除率的關係，表示：水溶液中的氨氮濃度越高，內含的離子數越多，能夠通過的電子越多，所需要的電流越大，電耗能也就越大。未來可藉由此圖的趨勢線計算氨氮去除率所對應的電耗能。



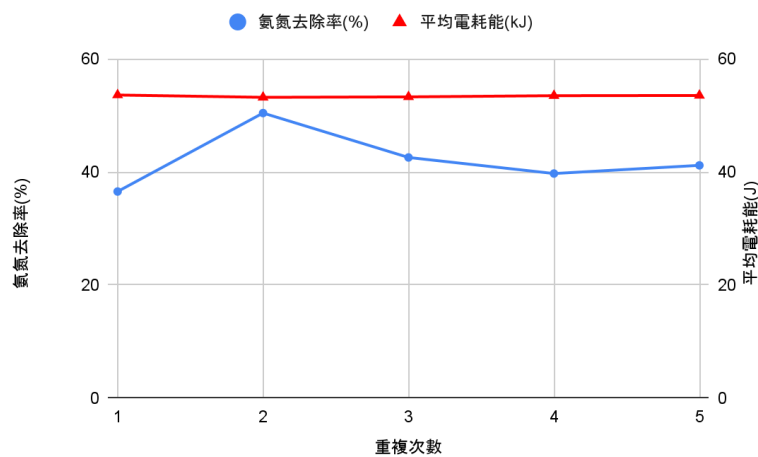
圖十九、使用石墨電極的電耗能與氨氮去除率關係圖

二、分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法進行實驗，檢測氨氮濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。

(一) 我們使用石墨電極進行實驗時，發現石墨電極在重複使用多次後，在電解過程中會從電極底部緩慢流出一種棕色的稠狀物，使水溶液呈棕色，如圖二十所示。推測造成此現象的原因是：石墨表面有些微小孔隙，在電解過程中吸收溶液至石墨棒內。若重複使用至石墨電極崩解，會將其先前儲存於電極內部的棕色稠狀物溶入目前的電解液中。這種現象的發生使實驗數據有產生誤差的疑慮，因此我們想藉由噴塗石墨至壓克力板上解決石墨電極機械強度不高的問題。由圖二十一可以發現：在電耗能差距不大的狀況下，第 1 次的氨氮去除率略低於第 2~5 次，第 2 次的氨氮去除率略高於第 1、3、4、5 次，第 3~5 次的數據相對平穩，在 40 % 上下。推測塗料在第 1 次電解過程中會吸收能量，第 2 次去除率升高之後會趨於穩定，使用處理過 2 次氨氮水溶液後的石墨導電塗層/壓克力電極可減少實驗誤差。

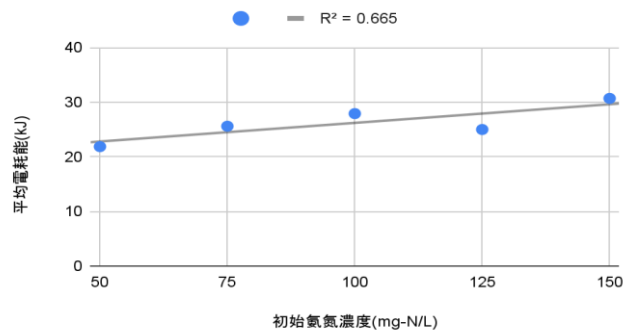


圖二十、電解後出現的棕色水溶液

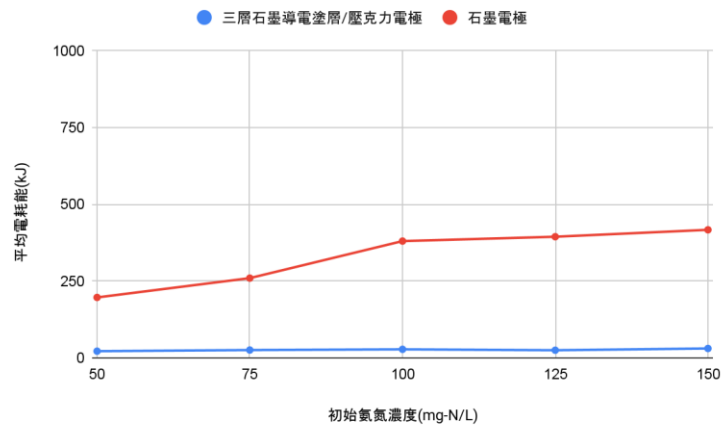


圖二十一、石墨導電塗層/壓克力電極前 5 次去除率及平均電耗能折線圖

(二) 由表 3 可知：在持續供應 6 V 電壓，總電解時間為 1 小時的條件下，50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液在電解過程中的平均電耗能，分別為 21.87 J、25.60 J、27.91 J、25.00 J、30.69 J。由上述電耗能及水溶液的初始氨氮濃度可繪製出圖二十二，其 R^2 為 0.685，小於一般所規定的 0.75，因此只能約略估計其在一定濃度範圍內的趨勢。和使用石墨電極不同的是：我們發現使用石墨導電塗層/壓克力電極進行實驗所需的電耗能較使用石墨電極少，由圖二十三可知：初始氨氮濃度的不同也會造成兩種電極的電耗能差距不同。使用石墨導電塗層/壓克力電極電解初始氨氮濃度分別為 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 水溶液，所需的電耗能分別為使用石墨電極的 9.00 %、10.15 %、13.63 %、15.79 %、13.59 %。推測因導電外層較薄，可經過的電子較石墨棒少，電流降低，使電耗能下降。

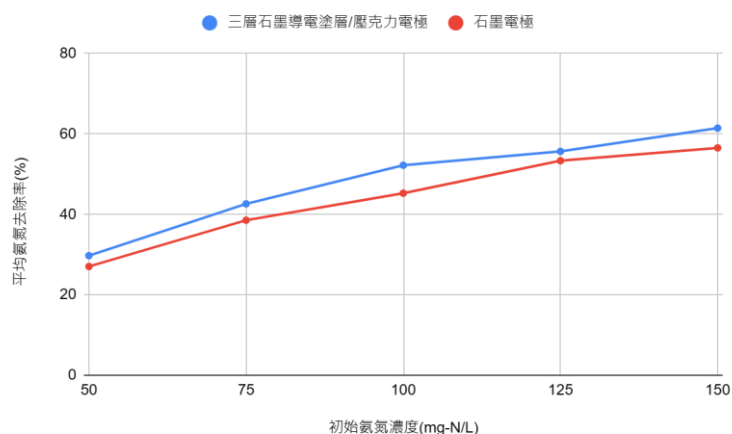


圖二十二、使用石墨導電塗層/壓克力電極的平均電耗能與初始氨氮濃度關係圖



圖二十三、使用不同電極的平均電耗能與初始氨氮濃度關係圖

(三) 在持續供應 6 V 電壓，總電解時間為 1 小時的條件下，50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液電解後，可計算出的氨氮去除率分別為 29.74 %、42.63 %、52.22 %、55.67 %、61.46 %。去除率上升，電耗能也有與其一同上升的趨勢。由上述去除率及使用石墨電極時的去除率可繪製圖二十四。由圖二十四可知：使用石墨導電塗層/壓克力電極和使用石墨電極的平均去除率差異不大，石墨導電塗層/壓克力電極的去除率甚至略高於石墨電極，但其平均電耗能卻只有石墨電極的 7 %。



圖二十四、使用不同電極的初始氨氮濃度與平均氨氮去除率關係圖

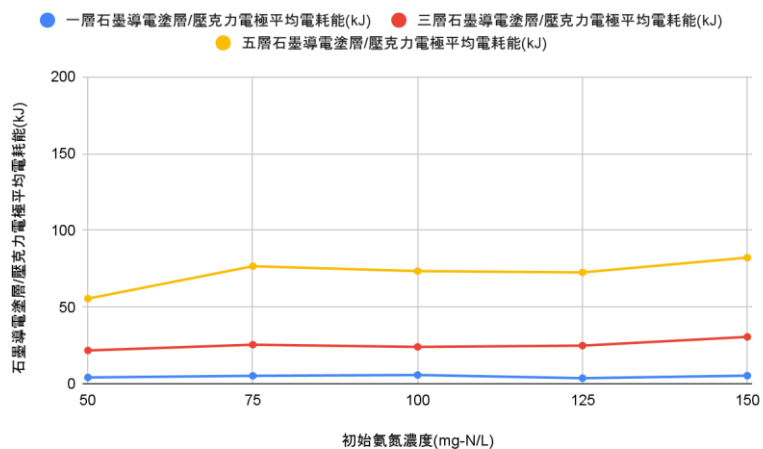
(四) 表 6 顯示使用不同噴塗層數石墨導電塗層/壓克力電極電解不同初始氨氮濃度，由表 6 的平均電耗能及氨氮初始濃度可繪製圖二十五。由圖二十五可知：分別使用噴塗一層、三層、五層噴劑的導電塗層/壓克力電極電解 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，其噴塗層數越多，所消耗的平均電耗能越高。造成此現象的原因可能是：噴塗的塗層越厚，單位時間內能通過的電子越多，所需的電耗能也就越高。取表 6 數據可繪製圖二十六，由圖二十六可知，使用噴塗一層、三層、五層的導電塗層/壓克力電極的去除率差距極小，基於噴塗一層噴劑的電耗能小於噴塗三層及五層噴劑，我們應該選擇噴塗一層的導電塗層/壓克力電極進行實驗。但我們在實驗過程中發現：噴塗一層噴劑的導電塗層/壓克力電極使用後的剝落情形嚴重，由圖二十七可見兩種電極分別進行 3 次實驗後的剝落情形。和噴塗三層的電極比較，噴塗一層的導電塗層/壓克力電極能使用的次數較少，剝落後可能會影響電子的通過，表面塗層的不完整也可能造成第一次使用和多次和後續使用的數據有差異。

表 6

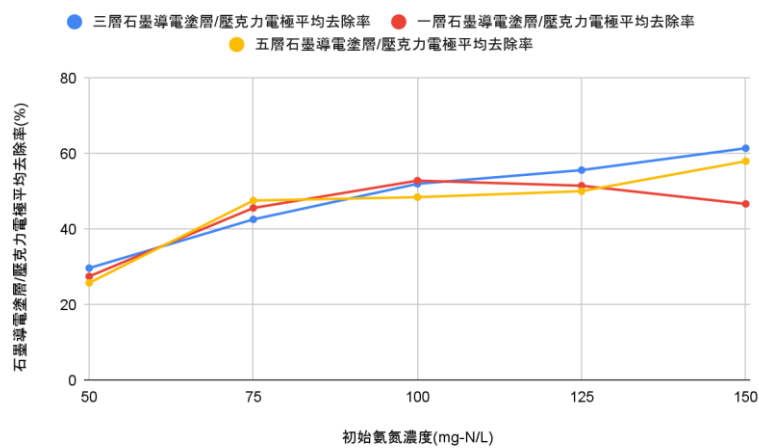
使用不同噴塗層數石墨導電塗層/壓克力電極電解不同初始氨氮濃度數據一覽表

初始濃度 (mg-N/L)	噴 塗 層 數	蒸餾後 平均導電度 (uS/cm)	電解後 平均濃度 (mg-N/L)	平均 氨氮去除率 (%)	平均電耗能 (J)
50		74.20	36.23	27.55	3.81
75		83.50	40.77	45.65	4.30
100	1	96.50	47.11	52.89	5.35
125		124.10	60.58	51.54	5.89
150		163.70	79.90	46.73	5.46
50		71.83	35.07	29.74	21.87
75	3	88.13	43.03	42.63	25.60
100		97.77	47.73	52.22	27.91

125		113.43	55.37	55.67	25.00
150		118.70	57.94	61.46	30.69
50		75.90	37.06	25.83	55.61
75		80.40	39.25	47.62	76.69
100	5	105.30	51.41	48.51	73.51
125		128.00	62.48	50.10	72.67
150		129.00	62.97	58.02	82.29



圖二十五、使用噴塗層數不同的導電塗層/壓克力電極平均電耗能與初始氨氮濃度關係圖



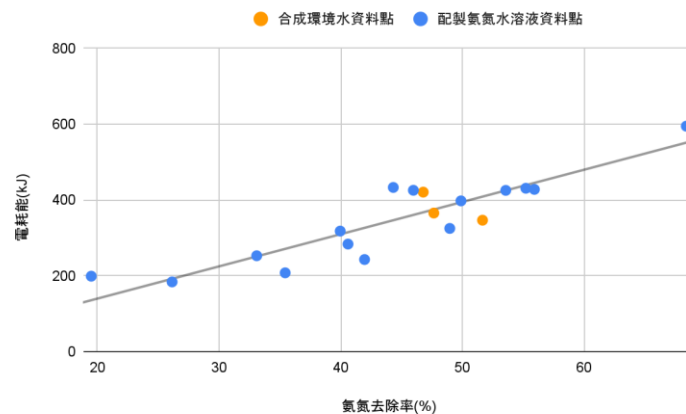
圖二十六、使用噴塗層數不同的導電塗層/壓克力電極平均去除率與初始氨氮濃度關係圖



圖二十七、噴塗三層與一層之石墨導電塗層/壓克力電極使用後剝落情形比較圖

三、使用石墨電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度並計算氨氮去除率。

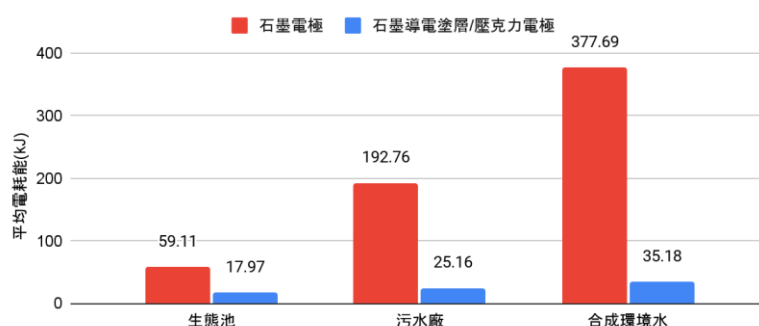
- (一) 雖然學校生態池水及汙水廠廢水的初始氨氮濃度都很低，但是這兩種廢水的平均去除率皆大於 75 %，和使用氨氮水溶液相比，其最低初始濃度的氨氮水溶液平均去除率僅有 27.04 %，不符合預期結果。我們推測可能是因為採集到的廢水內含有其他電解質，在處理過程中能加快電解反應，因此在固定時間內去除率會比使用氨氮水溶液高。由表 4 數據可知：實際處理成分較複雜的廢水時，去除率會比配置的氨氮水溶液高很多，有利於應用在實際廢水的氨氮處理。
- (二) 取合成環境水及圖十九的數據可繪製出圖二十八。使用合成環境水進行實驗時，我們發現其電耗能與去除率的關係和與使用氨氮水溶液時類似。合成環境水初始濃度為 101.18 ppm，去除率為 48 %，和配置的氨氮水溶液相比，100 ppm 的氨氮水溶液去除率為 45 %，兩去除率差距不大。但此結果與上述推論矛盾，可能原因為：廢水內含的電解質濃度須超過特定比例，才對去除水中的氨氮有幫助。



圖二十八、使用石墨電極的電耗能與氨氮去除率關係圖

四、使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度並計算氨氮去除率。

(一) 由表 5 可知：學校生態池水與污水廠廢水的平均電耗能分別為 17.97 J 和 25.16 J，分別為使用石墨電極所需電耗能的 30.40 % 和 13.05 %。因為電解後濃度較使用石墨電極低，造成兩種廢水的去除率提升，學校生態池水的去除率上升了 6.35 %，污水廠的廢水去除率上升了 13.98 %。因此，我們發現：石墨導電塗層/壓克力電極相較於石墨電極更適合處理廢水。



圖二十九、使用不同電極去除不同廢水與平均電耗能的關係比較圖

五、與歷屆相關科展研究比較

歷屆科展所使用的去除氨氮方法皆為生物法，以生物法處理氨氮不僅需要大範圍曝氣，還需要細菌與氨氮長時間作用。相對的，使用電化學氧化法處理氨氮的效率較高、不需要大空間即可處理氨氮、相較於生物法所耗費的時間較少，且主要產物和生物法同為氮氣，在電解過程中會逸散至空氣中。若使用我們自製的石墨導電塗層/壓克力電極進行實驗，其處理廢水的電耗能符合經濟效益，且在實際處理生態池水時的平均去除率大於 80 %。由此可知：電化學氧化法適合實際應用於處理廢水。由於使用生物法處理氨氮廢水的流程較為繁瑣，僅取生物法主要去除氨氮的地點深槽階段曝氣池進行比較。表 7 為電化學氧化法與生物法的比較，內容如下：

表 7

電化學氧化法與傳統生物法的比較

	電化學氧化法	生物法
所需空間	約 0.75 m * 0.3 m	深槽階段曝氣池長 63.3 m、寬 27 m、水深 10 m
所需時間	1 小時	2 天 ~ 6 個月
處理方式是否環保	是	是
可處理的氨氮濃度	約 20 ppm ~ 11000 ppm	約 20 ppm ~ 600 ppm

六、自製石墨導電塗層/壓克力電極與傳統石墨電極比較

我們的自製電極不僅提高了電極的機械性，還減少處理過程中所需的電耗能及提升去除率。以處理污水廠廢水為例，我們自製的石墨導電塗層/壓克力電極在電解過程中所需電耗能較石墨電極少 171.04 J，氨氮去除率卻提升了 13.98%，由此可知：電化學氧化法搭配我們自製的石墨導電塗層/壓克力電極相較於石墨電極，可微幅提高去除率並大幅降低平均電耗能。表 8 為自製石墨導電塗層/壓克力電極與石墨電極的比較，內容如下：

表 8

自製石墨導電塗層/壓克力電極與傳統石墨電極的比較

	石墨電極	石墨導電塗層/壓克力電極
平均電耗能(J)	192.76	25.16
平均氨氮去除率(%)	76.62	90.60
重複使用 可能發生的現象	電極底部 緩慢流出棕色的稠狀物	無

表 9

以不同電極處理一公噸氨氮水溶液所需電耗能換算的金額比較

初始濃度 (mg-N/L)	使用石墨電極花費金額 (NTD)	使用石墨導電塗層/壓克力 電極花費金額 (NTD)
50	178	20
75	254	23
100	413	25
125	432	23
150	462	28

我們將電解過程所需的電耗能，參照台電在 2023 年 4 月 1 日發布的住宅用計價夏月標準：120 度以下每度 1.63 元，121 ~ 330 度每度 2.38 元，換算花費金額。進行比較後，可得表 9 及表 10。由表 9 及表 10 可知：以石墨導電塗層/壓克力電極及石墨電極處理一公噸 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 氨氮水溶液，分別花費新台幣 20 元、23 元、25 元、23 元、28 元及 178 元、

254 元、413 元、432 元、462 元。以石墨導電塗層/壓克力電極處理每公噸氨氮廢水可省下新台幣 38 至 434 元不等的花費，因此我們認為石墨導電塗層/壓克力電極適合實際應用於處理氨氮廢水。

表 10

以不同電極處理一公噸不同廢水所需電耗能換算的金額比較

廢水種類	使用石墨電極花費金額 (NTD)	使用石墨導電塗層/壓克力電極花費金額 (NTD)
生態池	54	16
汙水廠	175	23
合成環境水	457	32

陸、結論

一、分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨電極以電化學直接氧化法進行實驗，檢測氨氮濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。

所有電解後濃度皆符合環保署所規定的流放標準，而副產物硝酸鹽對實驗的影響非常小。平均電耗能與初始氨氮濃度關係圖的 $R^2 = 0.958$ ，可由圖十八推得去除範圍內濃度氨氮所需的耗能。

二、分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法進行實驗，檢測氨氮濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。

石墨導電塗層/壓克力電極相較於石墨電極機械性提高，處理 100 mg-N/L 氨氮水溶液平均消耗的能量降為原本的 7%。且由圖二十四可知，使用石墨導電塗層/壓克力電極去除率和使用石墨電極的差異不大。

三、使用石墨電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度並計算氨氮去除率。

實際應用於處理廢水時，生態池的數據顯示平均氨氮去除率大於 80%，較使用石墨電極時去除率最高的 150 mg-N/L 高約 25%。因此我們推測，電化學直接氧化法有利於應用在實際廢水的氨氮處理。

四、使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度並計算氨氮去除率。

使用石墨導電塗層/壓克力電極相較於使用石墨電極，去除率微幅上升。因此我們推測，石墨導電塗層/壓克力電極相較於石墨電極更適合處理廢水。

五、與歷屆相關科展研究比較。

歷屆科展去除氨氮的方法皆為生物法，生物法需大範圍及長時間作用，而電化學氧化法效率高、裝置小且耗費時間少，兩者主要產物相同。

六、自製石墨導電塗層/壓克力電極與傳統石墨電極比較。

自製石墨導電塗層/壓克力電極較傳統石墨電極機械性高，但兩種電極的氨氮去除率差異不大，其電耗能更是遠低於石墨電極。使用石墨導電塗層/壓克力電極處理氨氮水溶液，將電解過程中消耗的耗能依照台電計價標準換算花費金額，相較於使用石墨電極，可省下新台幣 38 至 434 元不等的花費，合乎經濟效益。

柒、未來展望

我們的研究內容主要以處理較低濃度氨氮廢水為主，而電化學氧化法有簡易、處理速度快及佔地面積小等優勢。未來可將實驗裝置實際架設於小型學校、山區住宅或是偏鄉等位置處理少量氨氮廢水，或是做為家庭廢水的第一道處理程序，達成實際處理氨氮廢水的目的。

捌、參考文獻資料及其他

呂佳原（2015）。pH 值及氯離子對電化學去除氨氮的影響 Effects of pH and chloride on electrochemical removal of ammonia from water〔未出版之碩士論文〕。逢甲大學環境工程與科學學系。

洪啟原（2016）。以電化學法處理含氨氮廢水影響因素之評估 Evaluation of factors affecting ammonia removal from water by electrochemical technique〔未出版之碩士論文〕。逢甲大學環境工程與科學學系。

黃昱齊（2017）。以電化學氧化法去除工業廢水中氨氮之效率改善〔未出版之碩士論文〕。國立中正大學工學院機械工程學系碩士論文。

張群岳（2014）。電解氧化法降解氨氮廢水之研究 *Electrochemical Oxidation of Ammonia Nitrogen Wastewater*〔未出版之碩士論文〕。朝陽科技大學環境工程與管理系。

唐存宏（2013）。工業廢水氨氮處理概述〔環保技術與法規資訊電子報 102 年 12 月 8 日〕。技術資訊。

郭栢瑾、施伶潔、劉亭妤(2016)。嗜廢水者為「菌」解-高氨氮廢水於微生物。〔臺灣國際科學展覽會優勝作品〕

張蔓欣、曹曦、陳俞君（2013）。那些年，我們一起分解的氨氮-微生物處理廢水氮化物之探討。〔中華民國第 53 屆中小學科學展覽會作品說明書〕

孫楷珈、林韋志、邱育漢（2016）。生物分解新主張，污水處理有一套。〔中華民國第 56 屆中小學科學展覽會作品說明書〕

環署檢公告（2000）。水中導電度測定方法-導電度計法（NIEA W203.51B）環署檢字第 70017 號公告。

環署檢公告（2006）。水中硝酸鹽氮檢測方法-分光光度計法（NIEA W419.51A）環署檢字第 0950062980 號公告。

PASCO（2019）。探究為什麼-導電度與濃度（2019 年 5 月 30 日）。應用教學 <https://edu.kyst.com.tw/blog/detail/52?page=15>

水中導電度及其測定 <https://vtedu.mt.ntnu.edu.tw/uploads/1608794327388X6W0pW5x.pdf>

洪雅伶（2019）。電化學氧化法去除水中氨之研究 *Study on Removal of Ammonia in Water by Electrochemical Oxidation Process*〔未出版之碩士論文〕。國立臺灣科技大學化學工程學系。

台灣電力公司（2023）。調整後各類用戶電價表（2023 年 4 月 1 日）。

台北市政府工務局衛生下水道工程處（2023）。迪化污水處理廠簡介（2023 年 6 月 9 日）。

https://www.sso.gov.taipei/News_Content.aspx?n=45121429D9270B0D&sms=C4B1D81C0A0892E0&s=4442E9C0B5609CB5

【評語】 052604

1. 本作品探討以電化學氧化法去除水中(或生態池池水中)的氨氮，分別以石墨電極與石墨導電塗層/壓克力電極進行實驗，得到兩種電極之平均電耗能與初始氨氮濃度(或去除率)之關係圖，對不同廢水中之平均電耗能關係。本作品所採用的方法已有許多相關研究，故創新性較為薄弱。
2. 建議應確認本研究分析氨氮的方法是否恰當，若使用實際污水時是否會有其他干擾物質會影響氨氮分析？並請說明實驗是幾次重複，並標明其標準偏差，較能顯現實驗結果的再現性。
3. 研究結論提出本研究已成功自製一款自動淨水裝置，能夠依照染料之降解情況，自動判定是否完成降解並重複進行降解污染物之動作。建議說明此自動淨水裝置如何依照染料降解情況，自動判定是否完成降解並重複進行降解污染物之動作。

作品海報

阿摩尼亞__拜拜！——

以電化學氧化法去除廢水中的氨氮

摘要

本實驗研究目的是以電化學直接氧化法降低廢水中的氨氮濃度，藉由使用石墨導電塗層/壓克力電極，改善石墨機械強度低的問題。我們使用導電度計法測量水溶液導電度並計算其氨氮濃度，處理後的廢水濃度符合台北市放流標準，且去除率皆高於 75%，比配置的氨氮溶液高，可知電化學直接氧化法更適合應用於處理實際廢水。本研究的副產物硝酸鹽濃度皆低於 1.19 ppb，對實驗影響極小。實際處理廢水時，使用石墨導電塗層/壓克力電極所需的電耗能相較於使用石墨電極減少約 93%，但能和使用石墨電極達到相同的去除率。

動機

- 優養化及水中動物中毒。
- 環保署規定下水道放流水氨氮排放標準為 75 mg/L，台北市環保局則規定為 10 mg/L 以下。環保署規定下水道放流水硝酸鹽排放標準 50 mg/L。
- 科技產業、加工食品、製造業等等，都會產生含氨氮的廢水。
- 電化學氧化法去除氨氮佔地面積較小，副產物毒性較低，能在短時間內快速去除氨氮。
- 石墨電極具有惰性電極的特性及優良的導電性但機械強度較低，我們以石墨導電噴劑及壓克力板製造電極彌補不足。

實驗目的

- 一、分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨電極以電化學直接氧化法進行實驗，分別檢測氨氮濃度及硝酸鹽濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。
- 二、分別取 50 mg-N/L、75 mg-N/L、100 mg-N/L、125 mg-N/L、150 mg-N/L 的氨氮水溶液，使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法進行實驗，分別檢測氨氮濃度及硝酸鹽濃度並分析氨氮去除率與濃度的關係。
- 三、使用石墨電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度與硝酸鹽濃度後計算氨氮去除率。
- 四、使用石墨導電塗層/壓克力電極以電化學直接氧化法處理廢水，檢測氨氮濃度與硝酸鹽濃度後計算氨氮去除率。

研究過程或方式

一、名詞定義及檢測方法

(一) 氨氮：

在水中以分子氨 (NH₃) 或銨離子 (NH₄⁺) 形式存在的氮。

(二) 石墨導電塗層/壓克力電極如下圖。



圖一



圖二



圖三

(三) 氨氮去除率 Δm (%) 計算公式如下：

$$\Delta m = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} 100 \%$$

C₀: 氨氮初始濃度 (mg-N/L)。

C_t: 電解後的氨氮濃度 (mg-N/L)。

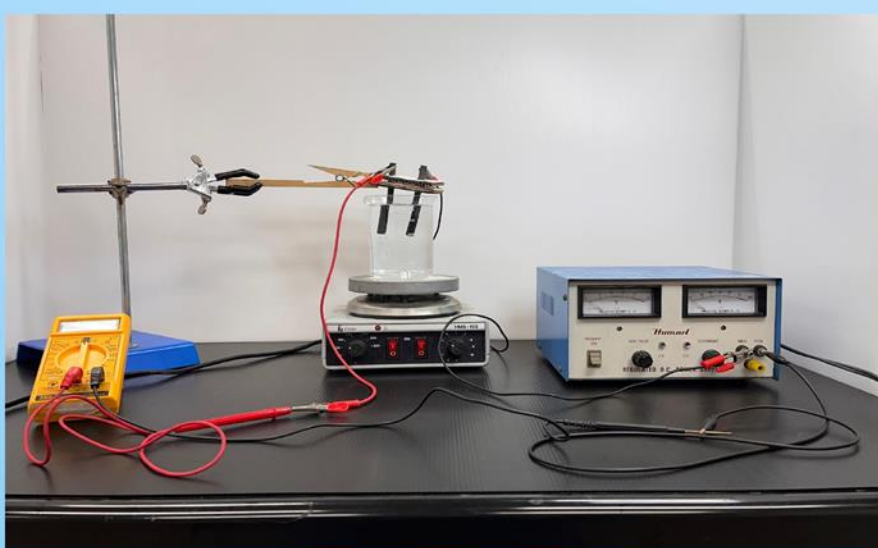
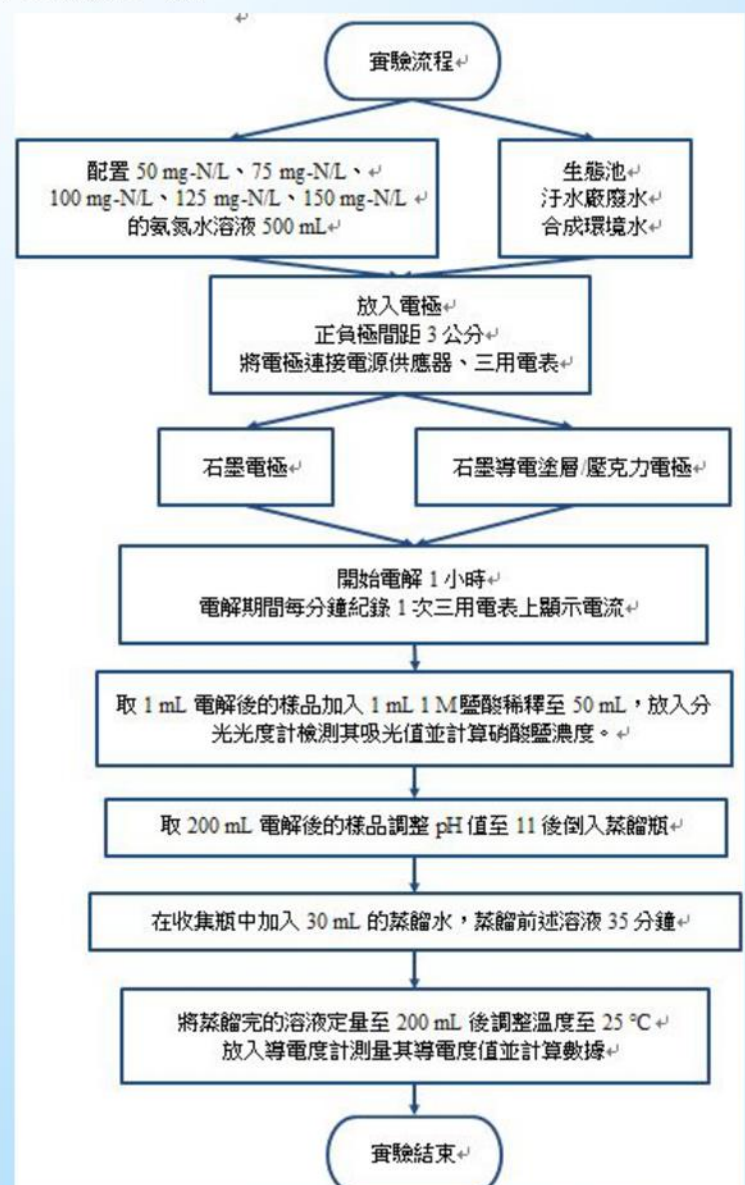
(四) 電耗能計算方式如下 (焦耳)：

$$\text{電耗能} = \sum_0^{60} E = \frac{I \cdot 6 \cdot 3600}{60 \cdot 1000}$$

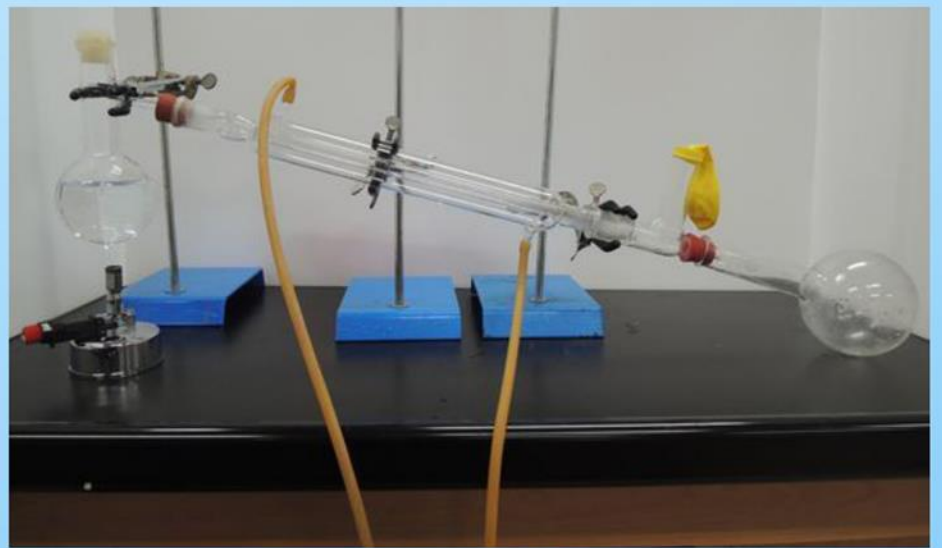
E: 每分鐘電耗能 (J)。

I: 每分鐘平均電流 (A)。

二、實驗步驟



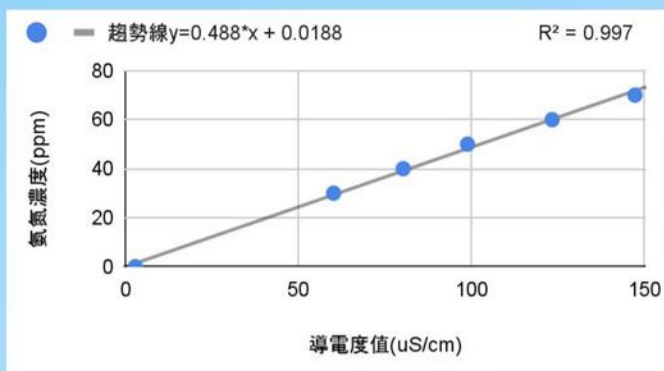
圖四-電解圖



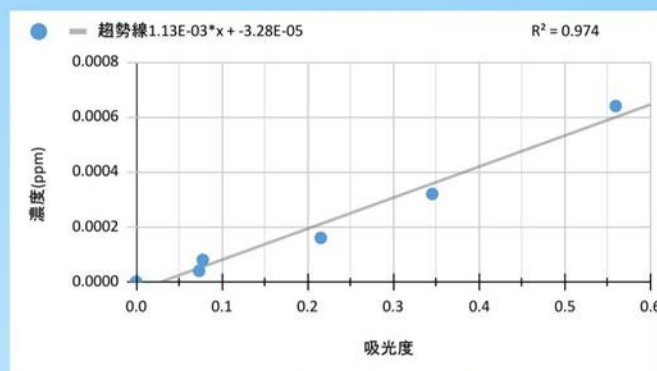
圖五-蒸餾圖

實驗結果

一、檢量線



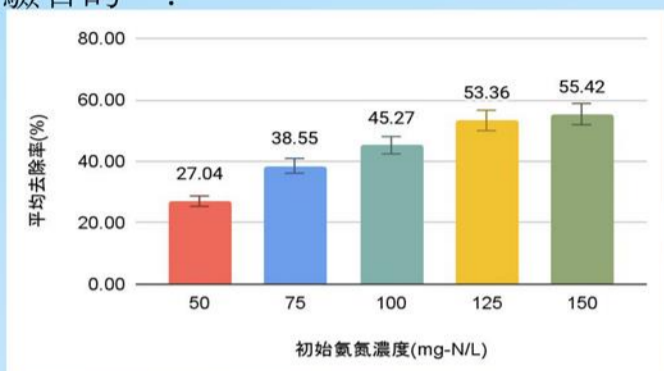
圖七-氨氮檢量線



圖八-硝酸鹽檢量線

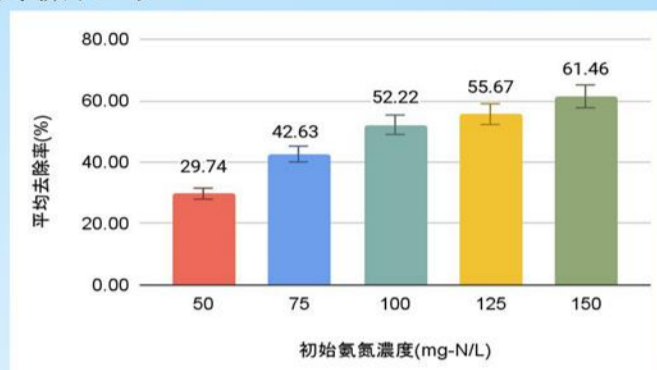
二、研究結果

實驗目的的一:



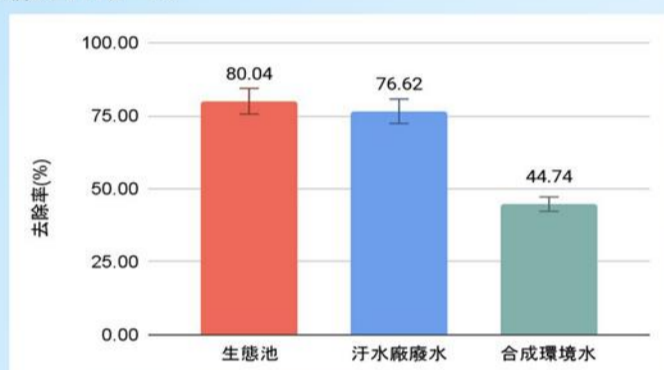
圖十-以石墨電極處理不同濃度氨氮除率關係圖

實驗目的二:



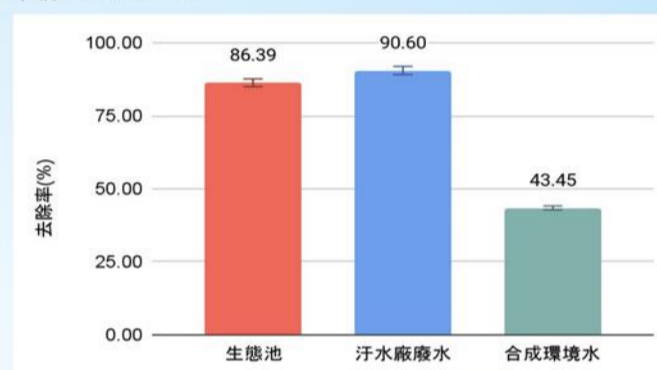
圖十二-以石墨導電塗層/壓克力電極處理不同濃度氨氮除率關係圖

實驗目的三:



圖十四-以石墨電極處理不同汗水平均去除率關係圖

實驗目的四:

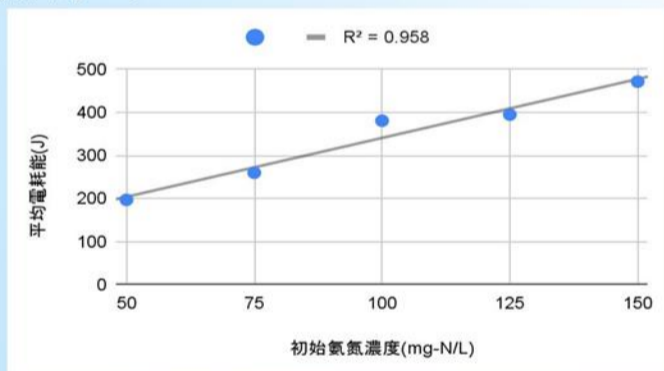


圖十六-以石墨導電塗層/壓克力電極處理不同廢水平均去除率關係圖

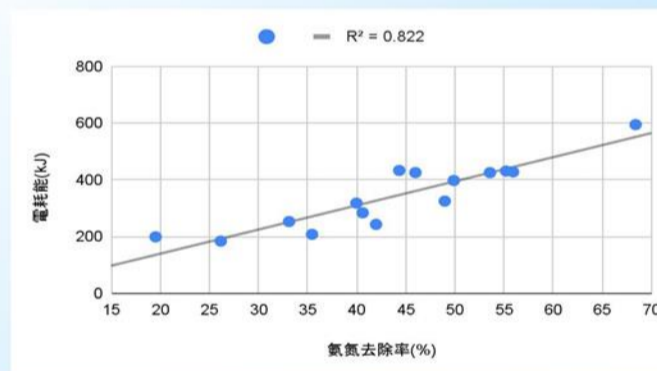
討論

1. 本實驗所有實驗結果皆符合環保署所規定的氨氮流放濃度標準 75 mg/N-L 以下。
2. 實驗後的硝酸鹽濃度皆低於 1.19 ppb, 因此可排除副產物對實驗的影響。

實驗目的的一:



圖十七-以石墨電極之平均電耗能與初始氨氮濃度關係圖



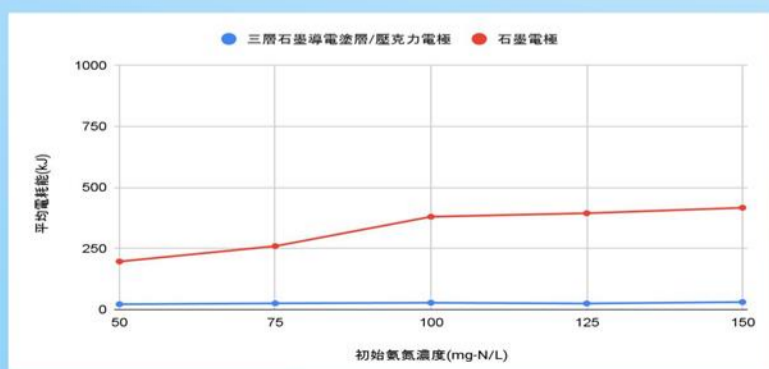
圖十八-以石墨電極之電耗能與氨氮去除率關係圖

實驗目的二:

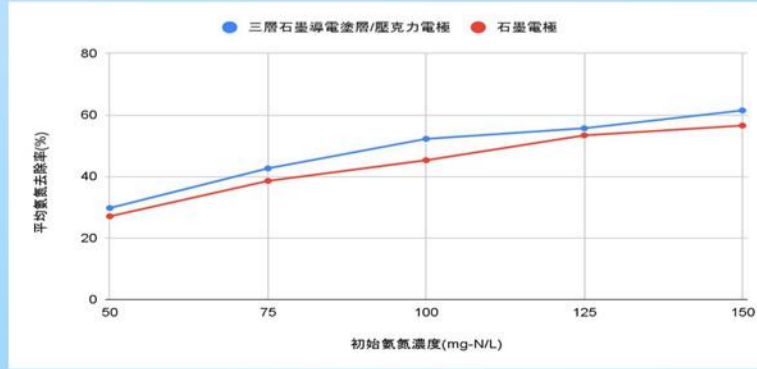
- 此電極經測試後發現:使用處理過 2 次氨氮水溶液後的石墨導電塗層/壓克力電極可減少實驗誤差。
- 使用石墨導電塗層/壓克力電極的電耗能是一般石墨電極的 7%。



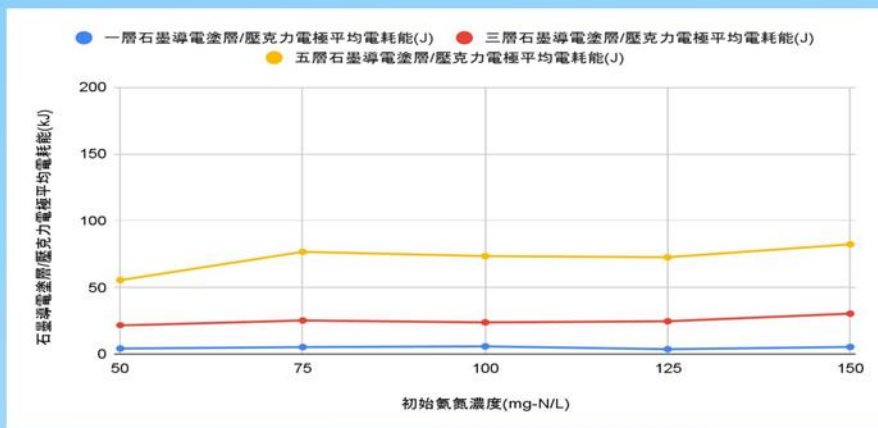
圖十九-電解後出現的棕色水溶液



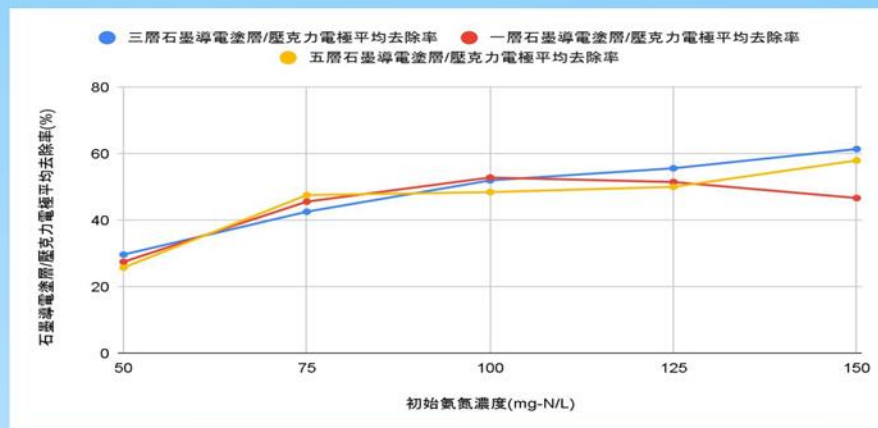
圖二十-使用不同電極平均電耗能與初始氨氮濃度關係圖



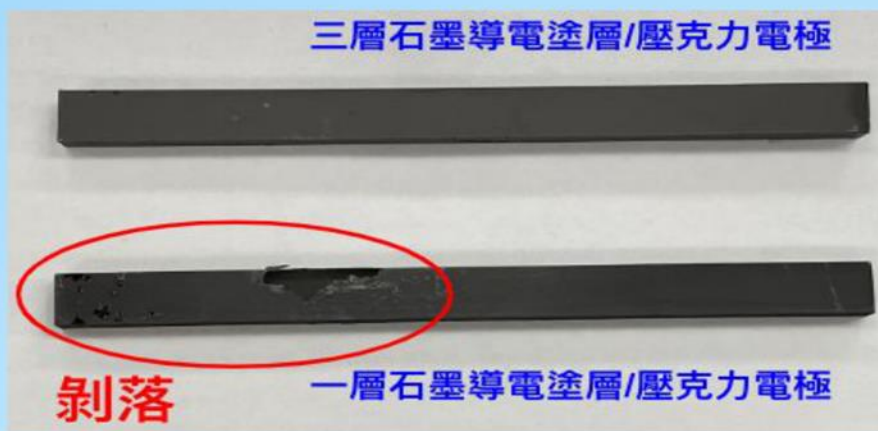
圖二十一-使用不同電極的初始氨氮濃度與平均氨氮去除率關係圖



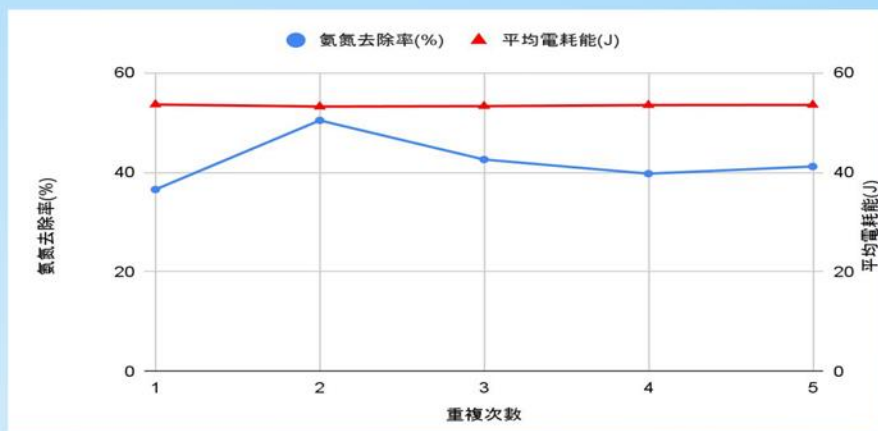
圖二十二-使用噴塗層數不同的導電塗層/壓克力電極平均電耗能與初始氨氮濃度關係圖



圖二十三-使用噴塗層數不同的導電塗層/壓克力電極平均去除率與初始氨氮濃度關係圖



圖二十四-噴塗三層與一層之石墨導電塗層/壓克力電極使用後剝落情形比較圖



圖二十五、使用石墨導電塗層/壓克力電極前 5 次電耗能與去除率關係圖

實驗目的三：

- 處理後廢水皆符合台北市所規定的氨氮流放標準 10 mg/N-L 以下。
- 廢水中還有其他電解質可增加電解效率使去除率大幅提升。
- 可能原因為：廢水內含的電解質濃度須超過特定比例，才對去除水中的氨氮有幫助。

實驗目的四：

- 處理後廢水皆符合台北市所規定的氨氮流放標準 10 mg/N-L 以下。
- 處理學校生態池水與汙水廠廢水所需電耗為一般石墨電極的 30.40 % 和 13.05 %。

廢水種類	使用石墨電極花費金額 (NTD)	使用石墨導電塗層/壓克力電極花費金額 (NTD)
生態池	54	16
汙水廠	175	23
合成環境水	457	32

表一、以不同電極處理一公噸不同廢水所需電耗能換算的金額比較

結論

- 一、所有電解後的樣品濃度皆符合環保署所規定的流放標準，而副產物硝酸鹽對實驗的影響非常小。平均電耗能與初始氨氮濃度關係圖的 $R^2 = 0.958$ ，可由上述圖表推得去除範圍內濃度氨氮所需的耗能。
- 二、石墨導電塗層/壓克力電極相較於石墨電極機械性提高，平均消耗的能量降為原本的 7%。由圖二十一可知，使用石墨導電塗層/壓克力電極去除率和使用石墨電極的差異不大。
- 三、實際應用於處理廢水時，數據顯示氨氮去除率皆大於 75%，相較於實驗目的的一的 50mg/N-L 高。因此我們推測，電化學直接氧化法有利於應用在實際廢水的氨氮處理。
- 四、使用石墨導電塗層/壓克力電極相較於實驗目的三，去除率微幅上升。因此我們推測，石墨導電塗層/壓克力電極相較於石墨電極更適合處理廢水。

	電化學氧化法	生物法
所需空間	約 0.75 m * 0.3 m	深槽階段曝氣池長 63.3 m、寬 27 m、水深 10 m
所需時間	1 小時	2 天 ~ 6 個月
處理方式是否環保	是	是
可處理的氨氮濃度	約 20 ppm ~ 11000 ppm	約 20 ppm ~ 600 ppm

表二、電化學氧化法與生物法的比較

參考文獻

- 呂佳原 (2015)。pH 值及氯離子對電化學去除氨氮的影響 Effects of pH and chloride on electrochemical removal of ammonia from water [未出版之碩士論文]。逢甲大學環境工程與科學系。
- 洪啟原 (2016)。以電化學法處理含氨氮廢水影響因素之評估 Evaluation of factors affecting ammonia removal from water by electrochemical technique [未出版之碩士論文]。逢甲大學環境工程與科學系。
- 黃昱齊 (2017)。以電化學氧化法去除工業廢水中氨氮之效率改善 [未出版之碩士論文]。國立中正大學工學院機械工程學系碩士論文。
- 張群岳 (2014)。電解氧化法降解氨氮廢水之研究 Electrochemical Oxidation of Ammonia Nitrogen Wastewater [未出版之碩士論文]。朝陽科技大學環境工程與管理系。
- 唐存宏 (2013)。工業廢水氨氮處理概述 [環保技術與法規資訊電子報 102 年12月8日]。技術資訊。
- 郭柏瑾、施伶潔、劉李好(2016)。嗜廢水者為「菌」解-高氨氮廢水於微生物。[臺灣國際科學展覽會優勝作品]
- 張憂欣、曹曦、陳俞君 (2013)。那些年，我們一起分解的氨氮-微生物處理廢水氮化物之探討。[中華民國第 53 屆中小學科學展覽會作品說明書]
- 孫惜珈、林章志、邱育漢 (2016)。生物分解新主張，汙水處理有一套。[中華民國第 56 屆中小學科學展覽會作品說明書]
- 環署檢公告 (2000)。水中導電度測定方法-導電度計法 (NIEA W203.51B) 環署檢字第 70017 號公告。
- 環署檢公告 (2006)。水中硝酸鹽氮檢測方法-分光光度計法 (NIEA W419.51A) 環署檢字第 0950062980 號公告。
- PASCO (2019)。探究為什麼-導電度與濃度 (2019年5月30日)。應用教學 <https://edu.kyst.com.tw/blog/detail/52?page=15>
- 水中導電度及其測定 <https://vtedu.mt.ntnu.edu.tw/uploads/1608794327388X6W0pW5x.pdf>
- 洪雅伶 (2019)。電化學氧化法去除水中氨之研究 Study on Removal of Ammonia in Water by Electrochemical Oxidation Process [未出版之碩士論文]。國立臺灣科技大學化學工程學系。
- 台灣電力公司 (2023)。調整後各類用戶電價表 (2023年4月1日)。
- 台北市政府工務局衛生下水道工程處 (2023)。迪化汙水處理廠簡介 (2023年 6月9日)。
https://www.sso.gov.taipei/News_Content.aspx?n=45121429D9270B0D&sms=C4B1D81C0A0892E0&s=4442E9C0B5609CB5