

投稿類別：化學類

篇名：奈米鐵去除水中重金屬離子之效率研究

作者：

邱馨霏 私立曉明女中 二年級 丙班 普通科
王淳妤 私立曉明女中 二年級 丙班 普通科
林鳳慈 私立曉明女中 二年級 戊班 普通科

指導老師：

陳淑媛

壹、前言

一、研究動機

水資源污染是目前全球重要的環境議題，隨著工業化與都市化快速發展，電鍍、採礦及電子製造等產業排放含鉛、鎘、銅等重金屬廢水，使水體污染問題日益嚴重。由於重金屬具有高毒性、難以自然分解且易在生態系中累積，最終可能透過食物鏈影響人體健康，對生態環境與公共衛生造成長期威脅。傳統水處理技術如化學沉澱、離子交換及活性碳吸附，雖能去除部分污染物，但仍存在處理效率有限、成本較高或可能產生二次污染等問題，因此亟需發展更高效且環境友善的新型水處理材料。奈米零價鐵因具有高比表面積、強還原能力及良好吸附特性，能透過氧化還原反應將重金屬離子轉化為較穩定的沉澱物，在近年成為水質淨化領域的重要研究焦點。然而，其反應機制、影響去除效率的條件及實際應用潛力仍有進一步探討的空間。因此，本研究希望透過文獻分析與實作觀察，系統性探討奈米零價鐵在水質淨化中的作用原理與應用效果，評估其作為新型環保水處理材料的可行性與發展潛力，期望為未來水污染治理與永續水資源管理提供參考。

二、研究目的

- (一) 剖析不同奈米金屬的特性及應用
- (二) 比較奈米鐵和一般鐵的差異
- (三) 探究奈米鐵之特性、應用與製備方法
- (四) 探討製備條件對奈米鐵純度之影響
- (五) 評估奈米鐵對不同重金屬的去除效果

貳、文獻探討

文獻探討一般鐵和奈米鐵的差異

(一) 一般鐵的特色：

何川等(2024)指出鐵元素的取得通常透過高溫冶煉程序完成。過程中，鐵礦石會與焦炭及助熔劑一同置於高爐中進行反應。焦炭在高溫下與氧氣燃燒生成二氧化碳；再與過量焦炭反應，轉化為一氧化碳，最終生成金屬鐵。相關反應方程式如下：

1. $C + O_2 \rightarrow CO_2$
2. $CO_2 + C \rightarrow 2CO$
3. $Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2$
4. $Fe_3O_4 + 4CO \rightarrow 3Fe + 4CO_2$

純鐵帶有銀白色金屬光澤，呈灰色且有良好的延展性、導電、導熱性，和很強的磁性，晶體結構則為面心立方或體心立方。鐵及其合金鋼能承受較大的應力和負荷，且韌性好，能在受力變形後不易斷裂，易於進行機械加工、製作磁性材料和電磁設備。除此之外，鐵可以用於製藥、催化劑、機械零部件製品、硬質合金材料製品，或製備電子元器件。

(二) 奈米鐵的特性

奈米鐵是由奈米級的鐵或鐵氧化物顆粒所構成，採用化學還原法、微波輔助法或熱分解法。化學還原法使用硼氫化鈉、檸檬酸鈉等還原劑還原鐵離子，生成奈米級金屬鐵；而微波

輔助法則利用微波能量加熱，反應成奈米顆粒。由於比表面積大幅增加，使奈米鐵在催化反應中活性大，這一特性使其在環境修復應用廣泛，例如：用於去除地下水中的污染物，包括氯化有機物、重金屬離子。奈米鐵還能通過電子轉移有效還原有毒物質，使其轉為無毒的產物。

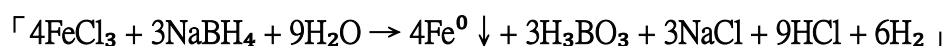
為了增強其生物相容性，奈米鐵表面會進行修飾，例如：包覆高分子材料聚乙二醇。（環境部環境管理署土壤及地下水污染整治基金管理會〔環境部環境管理署土污基管會〕，2020）由於高表面能，易於氧化生成鐵氧化物，影響性能穩定，所以表面修飾技術用於提升奈米鐵的抗氧化能力與穩定性，例如包覆石墨烯或碳層。使其成為材料科學與環境技術的重要研究對象。

（三）奈米鐵的製備

1、一般奈米零價鐵

粒徑大小約 10~100 nm，外殼部份是具有吸附能力的氧化鐵，而內層則是還原能力高的零價鐵組成。（環境部環境管理署土污基管會，2020）比表面積增加，能夠有效降低中間產物生成，其合成也有多種方法，早期以硼氫化鈉還原法合成，此方法所得的純度最高，反應性最佳。

硼氫化鈉還原法化學反應式：（連興隆等，2012；謝彩虹，2008）



2、奈米複合鐵金屬顆粒

簡鈺銘（2013）指出，製備奈米複合鐵金屬顆粒方法為先將奈米級鐵顆粒置於含鈰離子的溶液中，使其充分接觸；隨後藉由化學還原反應，使鈰離子被還原為零價鈰金屬，並沉積於奈米鐵表面，形成複合結構。藉此提高反應性，此外也對有毒產物的生成有抑制效果。

（四）奈米鐵去除重金屬之機制

謝彩虹（2008）指出，奈米零價鐵 (nZVI) 在去除重金屬污染時主要透過吸附、還原與沉澱／共沉澱等多重機制共同作用。奈米鐵具有高比表面積與強還原能力，能先將重金屬離子吸附於其表面，並以零價鐵 (Fe^0) 作為電子供體，將部分高價態金屬離子還原為較低價態或不溶性物質，之後再與鐵氧化物形成沉澱或共沉澱，使重金屬由溶解態轉為固體而被固定，進而降低其在水體中的濃度與毒性。

參、研究方法

一、研究方法

（一）首先，採文獻分析法，蒐集並整理有關奈米零價鐵的文獻資料，作為實驗設計的依據。再者，分別探討硼氫化鈉濃度、反應溫度對奈米鐵純度的影響，以及奈米鐵對不同重金屬離子的去除效果。

(二) 採用實驗法設計實驗與操作之後進行奈米鐵的製備與實際操作，觀察顏色變化並以分光光度計測定吸光度。最後整理並分析實驗數據，歸納出奈米鐵最佳製備條件與去除效果。

二、研究流程

圖 1：研究流程



圖 1 資料來源：研究者繪製

三、研究架構

圖 2：研究架構

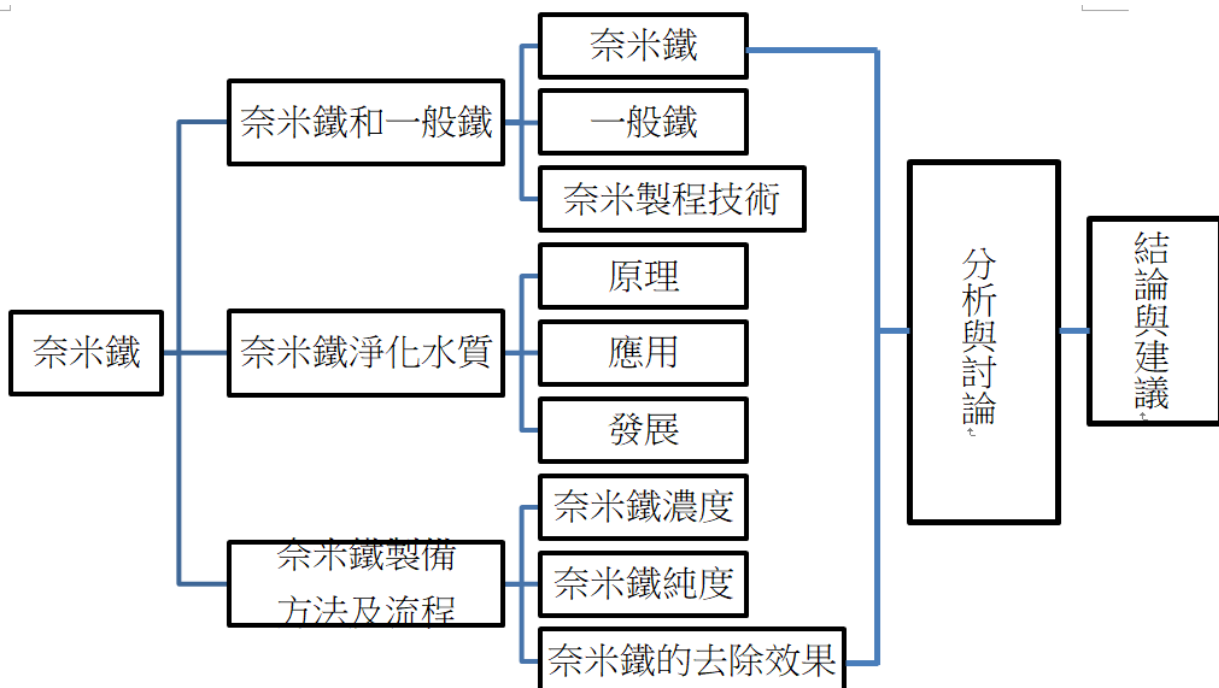


圖 2 資料來源：研究者繪製

肆、研究分析與結果

本研究主要探討奈米零價鐵的製備方法及其去除水中重金屬離子的能力。研究首先以氯化鐵與硼氫化鈉進行還原反應製備奈米鐵，並分析還原劑濃度與反應溫度對奈米鐵純度的影響。再以分光光度計分析奈米鐵對過錳酸鉀、硝酸鈷、硫酸鎳與硫酸銅等金屬離子的去除效果，測試其是否能降低吸光度，以及是否具有良好的還原與吸附能力。

一、奈米鐵的製備方法及具體流程

(一) 實驗步驟

- 1、配製氯化鐵溶液：稱取 2.5 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ，溶於 100 mL 去離子水中
- 2、配製硼氫化鈉溶液：稱取 1.0 g NaBH_4 ，溶於 100 mL 去離子水中
- 3、還原反應：將 FeCl_3 溶液置於磁力攪拌器上，500~800 rpm 攪拌滴加 NaBH_4 溶液
- 4、過濾與洗滌：使用漏斗和真空抽濾裝置過濾產物，並用去離子水洗滌以去除殘餘

(二) 實驗結果

圖 3：硼氫化鈉與氯化鐵之產物 圖 4：真空過濾後的奈米鐵 圖 5：烘乾後的奈米鐵粉



圖 3、4、5 資料來源：研究者拍攝

(三) 結果與討論

奈米鐵因具強還原性及高表面能，極易於空氣中發生氧化反應，生成三價或二價氧化鐵，此類氧化產物將逐漸包覆於其顆粒表面，形成鈍化層，進一步降低其還原能力與催化活性。因此應該將產物儲存在低氧、低濕度環境中，例如置於充氮氣及氬氣之密封容器中保存，置於冷暗處延緩氧化速率。

二、硼氫化鈉的濃度對奈米鐵氧化程度的影響

(一) 實驗步驟

- 1、同上步驟製備出奈米鐵
- 2、分別秤量三種不同的奈米鐵樣品於試管中。用滴管加入 1.00mL 1M 鹽酸，開始計時，輕微攪拌。每 30 秒記錄一次溶液顏色變化，持續 3 分鐘
- 3、依相同方法測試 0.1 M、0.2 M、0.3 M NaBH_4 製備的奈米鐵樣品

圖 6：第一次測試之結果呈現 表 1：第一次測試之顏色隨時間變化結果



時間 (sec)	0.1M	0.2M	0.3M
30	無	無	無
60	無	無	無
90	淡黃	無	淡黃
120	淡黃	淡黃	淡黃
150	黃	淡黃	淡黃
180	橘黃	黃	黃

圖 6 資料來源：研究者拍攝；表 1 資料來源：研究者繪製

圖 7：第二次測試之結果呈現 表 2：第二次測試之顏色隨時間變化結果



時間 (sec)	0.1M	0.2M	0.3M
30	無	無	無
60	無	無	淡黃
90	淡黃	無	淡黃
120	淡黃	淡黃	黃
150	黃	淡黃	黃
180	黃	淡黃	黃

圖 7 資料來源：研究者拍攝；表 2 資料來源：研究者繪製

(三) 討論

由表 1、2 的實驗得知，整體趨勢顯示，隨著硼氫化鈉濃度的增加，以 0.2 M 硼氫化鈉為最佳濃度條件，可獲得純度較高且穩定性較佳的 Fe^0 ；而 0.1 M 硼氫化鈉還原效果不足，易生成氧化產物；0.3 M 則可能因副反應與粒子不均勻導致 Fe^0 純度反而下降。

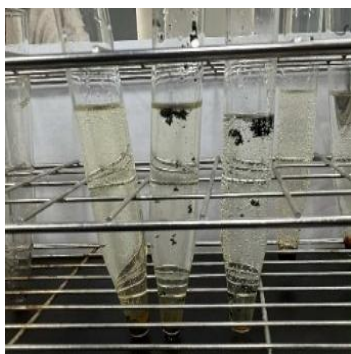
三、水溫對奈米鐵純度的影響

(一) 實驗步驟

- 1、同上步驟製備奈米鐵
- 2、分別秤量三種不同的奈米鐵樣品於試管中。加入 1.00 mL 1 M 鹽酸，開始計時。
- 3、輕微攪拌。每 30 秒記錄一次溶液顏色變化，持續 3 分鐘。
- 4、依相同方法測試不同溫度下（25°C、40°C、60°C）製備的奈米鐵。

(二) 實驗結果

圖 8：第一次測試之結果呈現 表 3：第一次測試之顏色隨時間變化結果



時間 (sec)	0.1M	0.2M	0.3M
30	無	無	無
60	無	無	無
90	淡黃	淡黃	淡黃
120	淡黃	淡黃	淡黃
150	淡黃	淡黃	淡黃
180	淡黃	淡黃	淡黃

圖 8 資料來源：研究者拍攝；表 3 資料來源：研究者繪製

圖 9：第二次測試之結果呈現



表 4：第二次測試之顏色隨時間變化結果

時間 (sec)	0.1M	0.2M	0.3M
30	無	無	無
60	無	無	無
90	淡黃	淡黃	淡黃
120	淡黃	淡黃	淡黃
150	黃	黃	黃
180	黃	黃	黃

圖 9 資料來源：研究者拍攝；表 4 資料來源：研究者繪製

(三) 討論

快速變黃或橙色代表鐵的純度低，氧化程度高。而顏色變化緩慢代表鐵的純度較高，氧化程度低。而由表 3、4 結果顯示，三組樣品的顏色變化速度與最終變化幅度極為接近，無論在反應初期或三分鐘結束後，溶液的顏色深淺均無明顯差異。此現象指出：在控制其他變因，反應溫度於 25 - 60°C 範圍內，對奈米鐵之 Fe^0 純度影響極其有限。

四、奈米鐵對不同重金屬的去除效果差異

(一) 實驗步驟

1. 將重金屬過錳酸鉀、硫酸鎳、硝酸鈷、硫酸銅於固定波長條件下測量其吸光度。
2. 設定不同處理條件進行對照反應
3. 各組樣本皆加入 0.1 g 奈米零價鐵粉末，依時間記錄各處理條件下的反應進展。
4. 於反應進行 20 分鐘、40 分鐘與 24 小時後，分別取出 5 mL 溶液樣本
5. 使用分光光度計量測其吸光度。透過此方式分析奈米鐵對各重金屬的去除能力。

(二) 實驗結果

1、過錳酸鉀

圖 10：0.02M 過錳酸鉀水溶液



圖 11：0.02M 過錳酸鉀緩衝溶液



圖 12：0.02M 過錳酸鉀離心水溶液



圖 13：0.01M 過錳酸鉀水溶液



圖 14：過錳酸鉀水溶液在不同處理下的吸光度變化

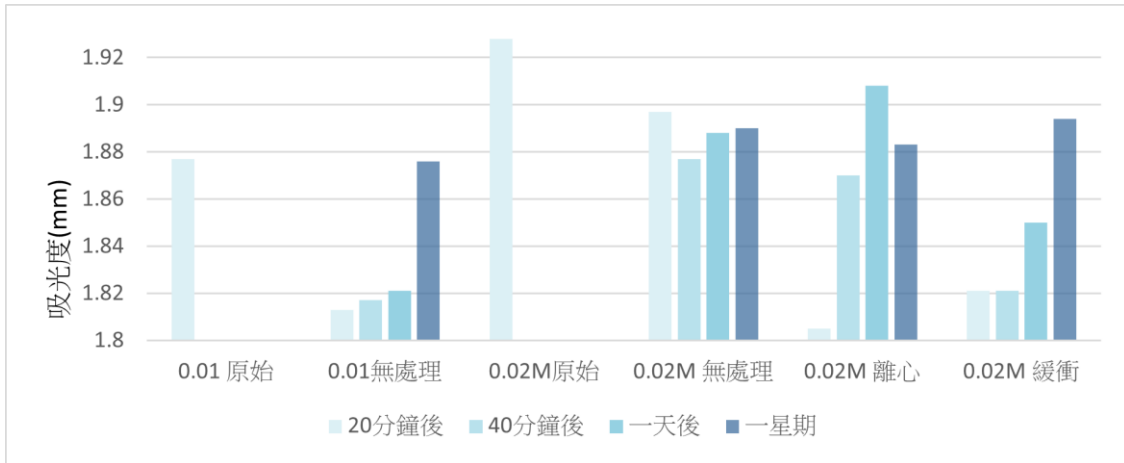


圖 10、11、12、13 資料來源：研究者拍攝；圖 14 資料來源：研究者繪製

圖 14 之結果可說明過錳酸鉀水溶液在加入經過不同處理之奈米鐵後的吸光度變化，根據其顯示，在大多數條件下，加入奈米鐵後過錳酸鉀的吸光度皆明顯下降。而 0.02M 之溶液之吸光度原為 1.928，加入緩衝液或經離心處理之奈米鐵，20 分鐘內即可使吸光度下降至約 1.8 左右，明顯低於對照組之未處理者約 1.897。特別是 0.02 M 再加上離心處理條件，其吸光度在 20 分鐘與 40 分鐘皆維持在 1.805。此外，0.01 M 濃度的奈米鐵雖還原能力稍弱，但也能在短時間內降低吸光度，顯示即使在低濃度下亦具實質效果。

2. 硝酸鈷

圖 15：0.02M 硝酸鈷水溶液

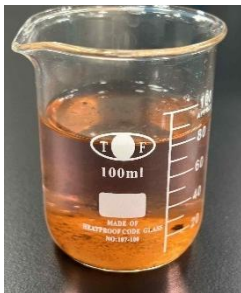


圖 16：0.02M 硝酸鈷緩衝溶液



圖 17：0.02M 硝酸鈷離心水溶液



圖 18：0.01M 硝酸鈷水溶液



圖 19：硝酸鈷水溶液在不同處理下的吸光度變化

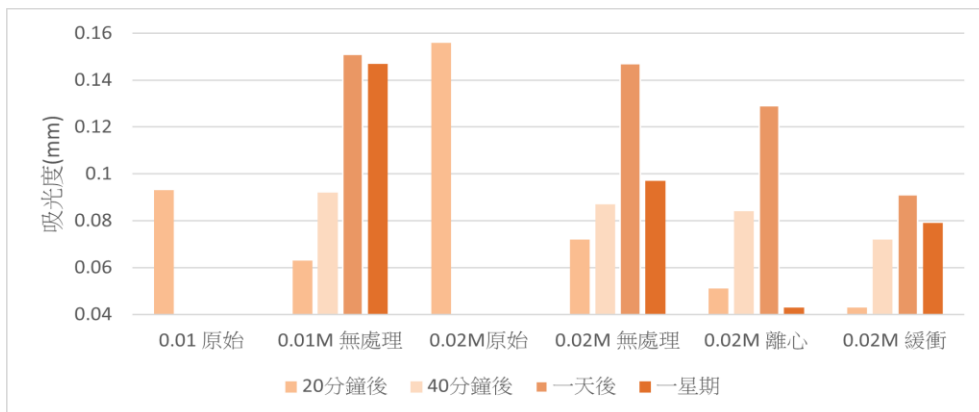


圖 15、16、17、18 資料來源：研究者拍攝；圖 19 資料來源：研究者繪製

圖 19 可說明硝酸鈷水溶液在加入經過不同處理之奈米鐵後的吸光度變化，而其中 0.02M 之溶液之吸光度原為 0.156 加入緩衝液處理之奈米鐵，20 分鐘內即可使吸光度下降至約 0.043 左右，明顯低於對照組未處理者約 0.072。此外，0.01M 濃度的奈米鐵雖還原能力稍弱，但也能在短時間內由 0.093 降低吸光度至 0.063，顯示即使在低濃度下亦具實質效果。圖 15 至 17 可明顯看出顏色與圖 14 有差距，顯示出奈米鐵去除的能力極佳，而奈米鐵對 Co^{2+} 的去除主要可能透過以下機制進行：其一，藉由還原反應將 Co^{2+} 轉化為不溶性或低吸光度的金屬形式，使其脫離溶液相；其二，奈米鐵本身具高比表面積，可吸附大量鈷離子於其表面，再經由沉澱反應移除於液相；其三，在反應過程中產生的 Fe^{2+} 與 Fe^{3+} 亦可能與 Co^{2+} 形成共沉澱結構，將鈷固定於固相或膠體狀態中，進一步提升整體去除效率。（環境部環境管理署土污基管會，2020；Sun et al., 2017）

3. 硫酸鎳

圖 20：0.02M 硫酸鎳水溶液



圖 21：0.02M 硫酸鎳緩衝溶液

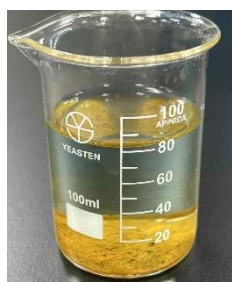


圖 22：0.02M 硫酸鎳離心水溶液



圖 23：0.01M 硫酸鎳水溶液



圖 24：硫酸鎳水溶液在不同處理下的吸光度變化

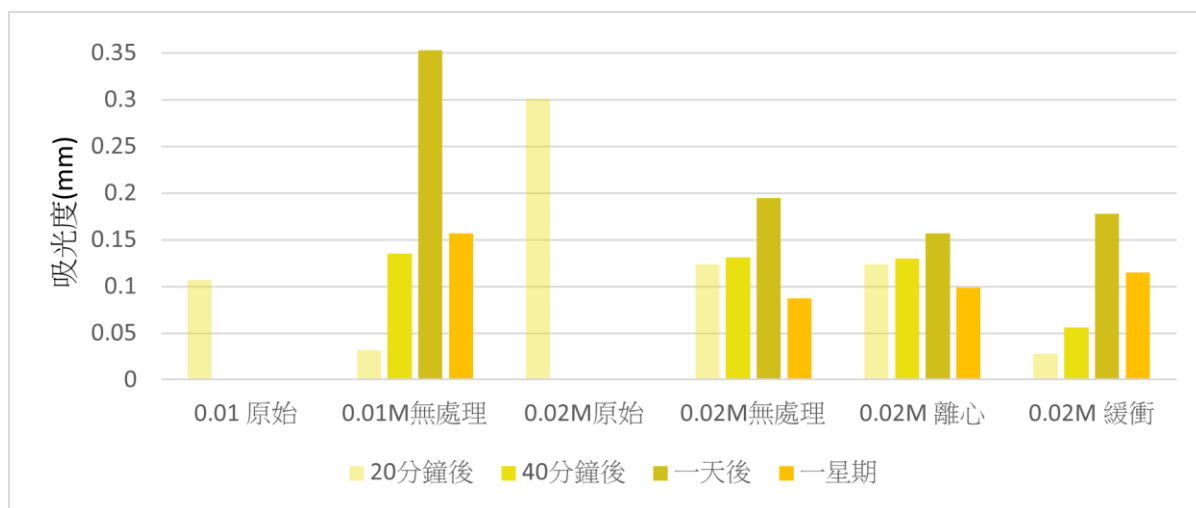


圖 20、21、22、23 資料來源：研究者拍攝；圖 24 資料來源：研究者繪製

圖 24 可說明硫酸鎳水溶液在加入經過不同處理之奈米鐵後的吸光度變化，而其中 0.02M 之溶液之吸光度原為 0.301，加入緩衝液或經離心處理之奈米鐵，20 分鐘內即可使吸光度下降至約 0.124 左右。特別是 0.02M + 緩衝處理條件，其吸光度在 20 分鐘降至 0.028，且圖 20 及 21 明顯的顏色變化可得知，其表現出穩定且持久的還原效果。此外，0.01M 濃度

的奈米鐵雖還原能力稍弱，但也能在短時間內由 0.107 降低至 0.032，顯示即使在低濃度下亦具實質效果。結果指出奈米鐵在短時間內對 Ni^{2+} 去除效率極高，可能機制包含還原 Ni^{2+} 為金屬鎳沉積，或透過表面氧化層進行離子交換與吸附反應。奈米鐵表面新鮮、具高比表面積，促進電子轉移與金屬離子還原反應，有效將溶液的 Ni^{2+} 去除。

4、硫酸銅

圖 25：0.02M 硫酸銅水溶液



圖 26：0.02M 硫酸銅緩衝溶液



圖 27：0.02M 硫酸銅離心水溶液



圖 28：0.01M 硫酸銅水溶液

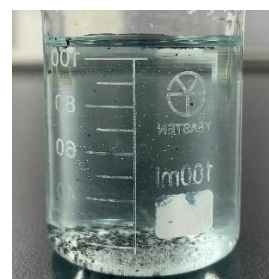


圖 29：硫酸銅水溶液在不同處理下的吸光度變化

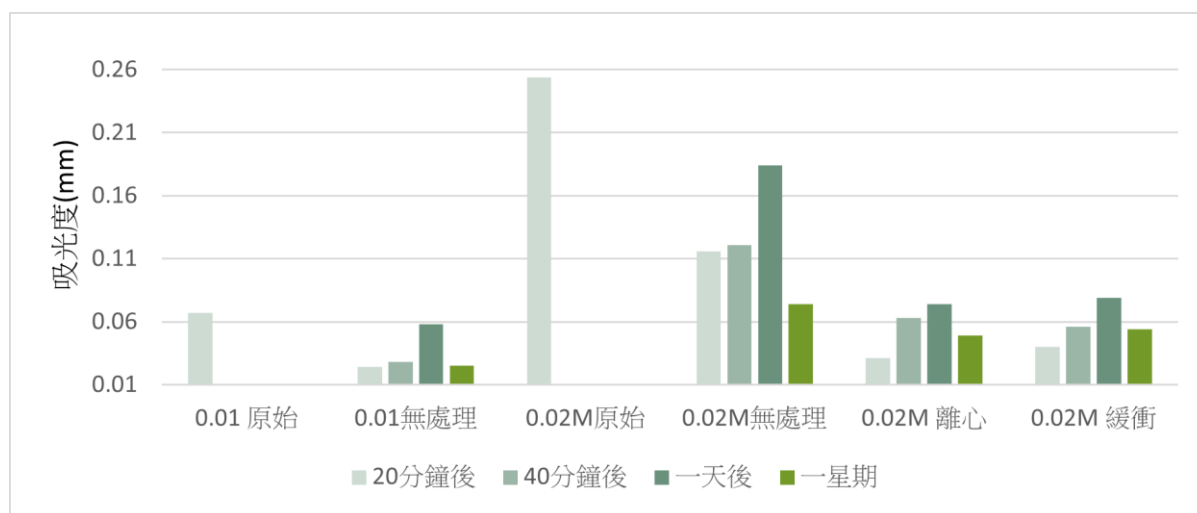


圖 25、26、27、28 資料來源：研究者拍攝；圖 29 資料來源：研究者繪製

圖 29 可說明硫酸銅水溶液在加入經過不同處理之奈米鐵後的吸光度變化，由其數據可知 0.02M 之溶液之吸光度原為 0.254，加入離心處理之奈米鐵，20 分鐘內即可使吸光度下降至約 0.03 左右，明顯低於對照組未處理者約 0.11。特別是 0.02M + 離心處理條件，表現出穩定且持久的還原效果。此外，0.01M 濃度的奈米鐵雖還原能力稍弱，但也能在短時間內由 0.067 降低至 0.024，且由圖 24、25 也可明顯看出顏色變淡，顯示即使在低濃度下亦具實質效果。在標準還原電位方面， Fe^0 ($E^\circ \approx -0.44 \text{ V}$) 可將 Cu^{2+} ($E^\circ \approx +0.34 \text{ V}$) 還原為金屬態 Cu^0 ，反應自發進行，同時奈米鐵表面氧化形成 Fe^{2+} 或 Fe^{3+} 。此外，奈米鐵顆粒表面亦具有大量活性位點，可吸附金屬離子，並促成共沉作用。這些機制綜合促使溶液中 Cu^{2+} 濃度迅速下降，吸光度明顯降低，顯示其可作為有效的重金屬去除劑。

伍、研究結論與建議

一、結論

由上述幾組資料可以發現，雖在前 20 分鐘顯示出明顯的去除效果，吸光度迅速下降，顯示奈米鐵具備強還原能力與吸附能力；然而，40 分鐘後至一天的數據卻呈現出吸光度回升趨勢。首先，奈米鐵主要透過表面還原與吸附作用去除金屬離子，但其反應活性並非持久。反應過程中奈米鐵本身會氧化生成 Fe^{2+} 與 Fe^{3+} ，進一步在溶液中形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 膠體或氧化鐵殼層，進而覆蓋活性表面、阻斷電子傳遞路徑，使反應速率顯著降低。其次，以過錳酸鉀為例，雖然 MnO_4^- 在初期可被奈米鐵還原為 Mn^{2+} ，但反應會消耗大量 Fe^0 並產生酸，導致溶液 pH 下降。在酸性條件下，還原產物如 $\text{Mn}(\text{OH})_2$ 可能重新溶解，甚至促進奈米鐵腐蝕反應，使金屬離子再次釋出。此外，若系統暴露於空氣中，溶解氧將成為氧化劑，使已還原的金屬再次氧化生成紫紅色的高價氧化態錯合物，造成吸光度增加。

二、建議

未來研究可從多個面向著手，以提升奈米零價鐵的穩定性與長期去除效能。首先，可利用碳材料或高分子進行包覆，形成複合結構以防止表面氧化並維持電子傳遞的活性。其次，可透過摻雜其他金屬元素或調控粒徑與分散性，改善其反應速率與選擇性。同時，反應系統中的 pH 值、溶氧濃度與攪拌速率等操作條件亦可進一步優化，以減少二次氧化及金屬離子再釋出的現象。此外，未來可嘗試將奈米鐵技術應用於連續流系統，並結合材料再生與循環利用策略，以評估其在實際水處理中的可行性、穩定性與經濟效益，最終達成高效且環境友善的污染物去除目標。

陸、參考文獻

- 何川, 李灿华, 李明晖, 都刚, & 张永柱 (2024 年 1 月 20 日)。纳米零价铁的制备及其可持续性评估。《工业水处理》, 44 (1), 44 - 59。 <https://www.iwt.cn/CN/10.19965/j.cnki.iwt.2022-0978>
- 謝彩虹 (2008)。奈米級零價鐵懸浮液之製備及於土壤飽和層中傳輸模擬之研究。國立臺灣大學環境工程學研究所：碩士論文 <https://doi.org/10.6342/NTU.2008.02126>
- 環境部環境管理署土壤及地下水汙染整治基金管理會 (2020 年 12 月 23 日)。奈米零價鐵粒子的合成及其在水處理、環境整治、催化及其生物學效應中的應用 https://gsr.moenv.gov.tw/GSR_Public/CHT/NewsList_Detail.aspx?Sid=348#PageTitle
- Sun, Y., Tian, H., & Zhu, T. (2017, January 10) A method for preparing nanoscale zero-valent iron and its application (WO2017008204A1). WIPO (PCT). <https://patents.google.com/patent/WO2017008204A1/en>
- 連興隆、蔡春進、劉宗勇、張宣武、蘇鈺珊 (2012 年 5 月)。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 - 175。 <https://doi.org/>
- 簡鈺銘 (2013)。以濕式化學合成法搭配分散劑製備零價金屬降解水中五氯酚鈉之研究。朝陽科技大學環境工程與管理系：碩士論文 <https://www.airitilibrary.com/Article/Detail/U0078-2712201314042871>