

東海大學化學工程與材料工程研究所

碩士論文

指導教授：何志松 博士

探討高鐵酸鉀對重金屬在不同 pH 環境下之去除率

**Exploring the removal rates of heavy metals in
various pH environments by potassium ferrate (VI)**

研究生：褚皓偉 撰

中華民國 一百零八年七月

致謝

這兩年的碩班生活中，要感謝的人太多了，首先要謝謝我的指導教授，何志松老師，在論文撰寫過程中，點出我的問題，並且細心的審閱跟引導，給予我新的思維跟方向，讓我對於接踵而來的問題都能順利化解，最後讓我完成實驗與碩士論文。也感謝兩位口試委員，粘譽薰老師與洪東興老師，在口試過程中的提點跟討論，激發出更多想法跟可能性，並且給予我研究之內容的肯定。

對於家庭，父母親自由的教育以及無虞的支持，不僅幫助我在學習的過程中沒有經濟的負擔，更是在我挫折的時候，在名為「家」的避風港等我回去。不論是成長還是生活、順境或逆境，有家人的陪伴就足夠了。

實驗室的生活，不管是 103 的夥伴，還是其他實驗室的朋友，在我需要幫助的時候，適時的伸出援手，讓我在枯燥乏味的生活中，持續保有動力與熱情。

最後還是再感謝曾經幫助我的人，有你們在身後推我一把，就不會造就今天的我。期許能夠比昨天的自己更好，透過不斷得學習，在面對社會的挑戰都可以屹立不搖，以及莫忘初衷。

摘要

高鐵酸鉀(六價鐵)具有高穩定性、強氧化能力及混凝作用，於處理污染物過程中高鐵酸鉀並不會產生任何致癌的物質，且處理後所產生的副產物對環境較不會造成二次污染，故其為一種具氧化、吸附、殺菌及除臭功能為一體的綠色水處理藥劑。合成方式有很多種，有乾式氧化法、電解法、濕式氧化法。本研究利用濕式氧化法中的次氯酸氧化法來製備高鐵酸鉀，再將合成後的高鐵酸鉀應用於重金屬 Co^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} 的去除， Co^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} 在弱酸性溶液中的 UV 吸收波長分別 510, 600 和 800 nm。

本研究主要應用高鐵酸鉀去除溶液中之重金屬，並且探討其對於不同 pH 環境下重金屬去除率之影響。重金屬溶液的濃度為 5 mM，pH 值分別為 3.0, 7.0 和 10.0，找出各種環境下重金屬離子達到 100% 去除率所需最少的高鐵酸鉀劑量。

關鍵詞: 高鐵酸鉀、pH 值、重金屬去除、鉻滴定法

Abstract

Potassium ferrate (VI) possesses high stability, strong oxidizing ability, and coagulation. In the process of treating pollutants, potassium ferrate does not produce any carcinogenic substances. The by-products produced after treatment are more environmentally friendly. Potassium ferrate does not cause secondary pollution so it is a green water treatment agent with oxidation, adsorption, sterilization, and deodorization functions. There are many methods to synthesize potassium ferrate, such as dry oxidation, electrolysis, and wet oxidation. In this study, the hypochlorous acid oxidation which is wet oxidation method will be applied to prepare potassium ferrate. The synthesized potassium ferrate will be applied to remove heavy metals Co^{2+} , Cr^{3+} and Cu^{2+} . The UV absorption wavelengths of Co^{2+} , Cr^{3+} and Cu^{2+} which are in weakly acidic solutions are 510, 600 and 800 nm, respectively.

In this study, potassium ferrate will be used to remove heavy metals from solutions. The effects of potassium ferrate on the removal rate of heavy metals in different pH environments will be explored. The concentrations of the heavy metal solutions are 5 mM. The pH values of solutions are 3.0, 7.0 and 10.0, respectively. The minimum dosages of potassium ferrate required to achieve 100% removal rates of heavy metal ions in various environments will be discovered.

Key words: potassium ferrate, pH value, removal rates of heavy metals, chromium titration

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
目錄.....	III
表目錄.....	VI
圖目錄.....	IX
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	2
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 高鐵酸鉀簡介.....	3
2.2 高鐵酸鉀用途.....	4
2.2.1 用於廢水之處理.....	5
2.2.2 流放水標準.....	9
2.3 高鐵酸鉀穩定度.....	10
2.4 高鐵酸鉀製備方法.....	16
2.4.1 乾式氧化法.....	17
2.4.2 電解法.....	18
2.4.3 濕式氧化法.....	19

2.5 高鐵酸鉀定性與定量分析.....	20
2.5.1 FTIR 分析.....	20
2.5.2 XRD 繞射分析.....	21
2.5.3 SEM 分析.....	22
2.5.4 IR 分析.....	23
2.5.5 UV-Vis 分析.....	24
2.5.6 鉻滴定法.....	25
2.5.7 砷滴定法.....	26
2.6 重金屬廢水處理方法.....	27
2.6.1 物理法.....	28
2.6.2 化學法.....	30
2.6.3 生物法.....	31
第三章 實驗方法及藥品與設備.....	33
3.1 實驗流程.....	34
3.2 實驗藥品與耗材.....	34
3.3 高鐵酸鉀製備步驟.....	36
3.4 高鐵酸鉀產率計算與分析.....	39
3.5 高鐵酸鉀純度分析.....	40
3.5.1 鉻滴定法.....	41

3.5.2	參考樣品純度分析.....	44
3.5.3	參考樣品 UV 校正曲線.....	45
3.6	重金屬去除.....	47
3.6.1	鈷、銅與鉻之 UV/Vis 吸收波長.....	48
3.6.2	重金屬溶液配製.....	57
3.6.3	重金屬去除實驗步驟.....	59
3.3.4	去除率計算.....	60
第四章	結果與討論.....	61
4.1	高鐵酸鉀產率與純度.....	61
4.1.1	高鐵酸鉀產率.....	61
4.1.2	高鐵酸鉀純度.....	63
4.2	重金屬去除.....	66
4.2.1	單一成分溶液之重金屬去除.....	66
4.2.1	兩種成分溶液之重金屬去除.....	94
4.2.3	三種成分溶液之重金屬去除.....	130
4.2.4	重金屬去除綜合比較.....	145
第五章	結論.....	155
	參考文獻.....	156

表目錄

表 1 常用氧化劑之還原電位比較.....	4
表 2 國家飲用水水質標準.....	6
表 3 流放水標準.....	9
表 4 不同成份之重金屬溶液.....	57
表 5 改變 pH 值後之重金屬溶液.....	58
表 6 合成之高鐵酸鉀產率.....	61
表 7 合成之高鐵酸鉀純度.....	64
表 8 高鐵酸鉀合成之總效率.....	65
表 9 重金屬溶液 A1 之 Co^{2+} 去除率計算.....	68
表 10 重金屬溶液 A2 之 Co^{2+} 去除率計算.....	71
表 11 重金屬溶液 A3 之 Co^{2+} 去除率計算.....	74
表 12 重金屬溶液 B1 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	77
表 13 重金屬溶液 B2 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	80
表 14 重金屬溶液 B3 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	83
表 15 重金屬溶液 C1 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	86
表 16 重金屬溶液 C2 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	89
表 17 重金屬溶液 C3 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	92

表 18 單一重金屬溶液在三種環境下達 100% 去除率所需的高鐵酸鉀劑量.....	93
表 19 重金屬溶液 D1 之 Co^{2+} 去除率計算.....	96
表 20 重金屬溶液 D1 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	97
表 21 重金屬溶液 D2 之 Co^{2+} 去除率計算.....	100
表 22 重金屬溶液 D2 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	101
表 23 重金屬溶液 D3 之 Co^{2+} 去除率計算.....	104
表 24 重金屬溶液 D3 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	105
表 25 重金屬溶液 E1 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	108
表 26 重金屬溶液 E1 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	109
表 27 重金屬溶液 E2 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	112
表 28 重金屬溶液 E2 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	113
表 29 重金屬溶液 E3 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	116
表 30 重金屬溶液 E3 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	117
表 31 重金屬溶液 F1 之 Co^{2+} 去除率計算.....	120
表 32 重金屬溶液 F1 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	121
表 33 重金屬溶液 F2 之 Co^{2+} 去除率計算.....	124
表 34 重金屬溶液 F2 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	125
表 35 重金屬溶液 F3 之 Co^{2+} 去除率計算.....	128

表 36 重金屬溶液 F3 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	129
表 37 重金屬溶液 G1 之 Co^{2+} 去除率計算.....	132
表 38 重金屬溶液 G1 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	133
表 39 重金屬溶液 G1 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	133
表 40 重金屬溶液 G2 之 Co^{2+} 去除率計算.....	137
表 41 重金屬溶液 G2 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	138
表 42 重金屬溶液 G2 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	138
表 43 重金屬溶液 G3 之 Co^{2+} 去除率計算.....	142
表 44 重金屬溶液 G3 之 Cr^{3+} 去除率計算.....	143
表 45 重金屬溶液 G3 之 Cu^{2+} 去除率計算.....	143

圖目錄

圖 1 自行製備之紫黑色高鐵酸鉀粉末.....	3
圖 2 共存離子對 K_2FeO_4 穩定性的影響.....	11
圖 3 鹼度對 0.01 M K_2FeO_4 穩定性的影響.....	12
圖 4 鐵離子(1M)的水溶液之 pH vs 還原電位值(Pourbaix diagram)..	13
圖 5 六價鐵離子水溶液中的離子成分與 pH 關連圖.....	15
圖 6 高鐵酸鉀 FTIR 光譜圖.....	20
圖 7 高鐵酸鉀之 XRD 繞射分析.....	21
圖 8 高鐵酸鉀之 SEM 圖.....	22
圖 9 高鐵酸鉀之 IR 光譜圖.....	23
圖 10 高鐵酸鉀之 UV-Vis 光譜圖.....	24
圖 11 實驗流程圖.....	33
圖 12 高鐵酸鉀製備流程圖.....	38
圖 13 高鐵酸鉀吸收強度與濃度之線性回歸圖.....	46
圖 14 Co^{2+} 的 UV/Vis 光譜圖.....	48
圖 15 Co^{2+} 在酸性環境下的 UV-Vis 光譜圖.....	49
圖 16 Co^{2+} 在中性環境下的 UV-Vis 光譜圖.....	49
圖 17 Co^{2+} 在鹼性環境下的 UV-Vis 光譜圖.....	50
圖 18 Cr^{3+} 的 UV-Vis 光譜圖.....	51

圖 19 Cr^{3+} 在酸性環境的 UV/Vis 光譜圖.....	52
圖 20 Cr^{3+} 在中性環境的 UV/Vis 光譜圖.....	52
圖 21 Cr^{3+} 在鹼性環境的 UV/Vis 光譜圖.....	53
圖 22 Cu^{2+} 的 UV-Vis 光譜圖.....	54
圖 23 Cu^{2+} 的 UV-Vis 光譜圖.....	55
圖 24 Cu^{2+} 在酸性環境的 UV/Vis 光譜圖.....	55
圖 25 Cu^{2+} 在中性環境的 UV/Vis 光譜圖.....	56
圖 26 Cu^{2+} 在鹼性環境的 UV/Vis 光譜圖.....	56
圖 27 鉻滴定法達滴定終點時的變色情形.....	63
圖 28 重金屬溶液 A1 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	66
圖 29 重金屬溶液 A1 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	67
圖 30 重金屬溶液 A1 之 Co^{2+} 去除率.....	68
圖 31 重金屬溶液 A2 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	69
圖 32 重金屬溶液 A2 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	70
圖 33 重金屬溶液 A2 之 Co^{2+} 去除率.....	71
圖 34 重金屬溶液 A3 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	72
圖 35 重金屬溶液 A3 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	73
圖 36 重金屬溶液 A3 之 Co^{2+} 去除率.....	74
圖 37 重金屬溶液 B1 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	75

圖 38 重金屬溶液 B1 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	76
圖 39 重金屬溶液 B1 之 Cr ³⁺ 去除率.....	77
圖 40 重金屬溶液 B2 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	78
圖 41 重金屬溶液 B2 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	79
圖 42 重金屬溶液 B2 之 Cr ³⁺ 去除率.....	80
圖 43 重金屬溶液 B3 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	81
圖 44 重金屬溶液 B3 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	82
圖 45 重金屬溶液 B3 之 Cr ³⁺ 去除率.....	83
圖 46 重金屬溶液 C1 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	84
圖 47 重金屬溶液 C1 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	85
圖 48 重金屬編號 C1 之 Cu ²⁺ 去除率.....	86
圖 49 重金屬溶液 C2 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	87
圖 50 重金屬溶液 C2 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	88
圖 51 重金屬溶液 C2 之 Cu ²⁺ 去除率.....	89
圖 52 重金屬溶液 C3 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	90
圖 53 重金屬溶液 C3 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	91
圖 54 重金屬編號 C3 之 Cu ²⁺ 去除率.....	92
圖 55 重金屬溶液 D1 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	94
圖 56 重金屬溶液 D1 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	95

圖 57 重金屬溶液 D1 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率.....	97
圖 58 重金屬溶液 D2 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	98
圖 59 重金屬溶液 D2 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	99
圖 60 重金屬溶液 D2 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率.....	101
圖 61 重金屬溶液 D3 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	102
圖 62 重金屬溶液 D3 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	103
圖 63 重金屬溶液 D3 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率.....	105
圖 64 重金屬溶液 E1 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	106
圖 65 重金屬溶液 E1 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	107
圖 66 重金屬溶液 E1 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率.....	109
圖 67 重金屬溶液 E2 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	110
圖 68 重金屬溶液 E2 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	111
圖 69 重金屬溶液 E2 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率.....	113
圖 70 重金屬溶液 E3 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	114
圖 71 重金屬溶液 E3 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	115
圖 72 重金屬溶液 E3 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率.....	117
圖 73 重金屬溶液 F1 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	118
圖 74 重金屬溶液 F1 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	119
圖 75 重金屬溶液 F1 之 Co^{2+} 和 Cr^{3+} 去除率.....	121

圖 76 重金屬溶液 F2 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	122
圖 77 重金屬溶液 F2 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	123
圖 78 重金屬溶液 F2 之 Co^{2+} 和 Cr^{3+} 去除率.....	125
圖 79 重金屬溶液 F3 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	126
圖 80 重金屬溶液 F3 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	127
圖 81 重金屬溶液 F3 之 Co^{2+} 和 Cr^{3+} 去除率.....	129
圖 82 重金屬溶液 G1 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	130
圖 83 重金屬溶液 G1 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	131
圖 84 重金屬溶液 G1 之 Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率.....	134
圖 85 重金屬溶液 G2 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	135
圖 86 重金屬溶液 G2 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	136
圖 87 重金屬溶液 G2 之 Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率.....	139
圖 88 重金屬溶液 G3 反應前之 UV-Vis 光譜圖.....	140
圖 89 重金屬溶液 G2 反應後之 UV-Vis 光譜圖.....	141
圖 90 重金屬溶液 G3 之 Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率.....	144
圖 91 Co^{2+} 在酸性環境下之去除率比較.....	145
圖 92 Co^{2+} 在中性環境下之去除率比較.....	146
圖 93 Co^{2+} 在鹼性環境下之去除率比較.....	147
圖 94 Cr^{3+} 在酸性環境下之去除率比較.....	148

圖 95 Cr^{3+} 在中性環境下之去除率比較.....	149
圖 96 Cr^{3+} 在鹼性環境下之去除率比較.....	150
圖 97 Cu^{2+} 在酸性環境下之去除率比較.....	151
圖 98 Cu^{2+} 在中性環境下之去除率比較.....	152
圖 99 Cu^{2+} 在鹼性環境下之去除率比較.....	153

第一章 緒論

1.1 前言

隨著工業迅速的發展，環境污染越來越嚴重，科技業和傳統產業大量排放的廢水，讓河川及大海有過多的重金屬汙染，且大多的污染不容易被微生物分解。經過食物鏈的傳遞，河川中的重金屬汙染最後被人體吸收，造成嚴重的疾病，對自然和人類都有很大的傷害。所以要處理水中過多的重金屬汙染，降低對生態圈的危害，是重要的課題。

高鐵酸鉀具有消毒跟淨水的功用，且在去除重金屬的過程，會產生不溶的化合物，讓水中的重金屬濃度降低。此外，高鐵酸鉀在 pH 值 0-14 的範圍中都有作用，水解後所形成的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 具有良好的絮凝作用，可吸附有害物質和懸浮微粒，達到淨水的功效。

高鐵酸鉀可以廣泛用於水和廢水的氧化，消毒，殺菌。因此，高鐵酸鉀是倍受關注的一類新型、高效、無毒的多功能水處理劑。在飲用水的處理過程中，集氧化、吸附、絮凝、沉澱、滅菌、消毒、脫色、除臭等八大特點為一體的綜合性能，是其他水處理劑不可比擬的。

由於市面上販售之高鐵酸鉀單價極為昂貴，純度 93% 的高鐵酸鉀每公克售價為新台幣九千元，所以本研究選擇在實驗室利用次氯酸氧化法來製備高鐵酸鉀。

1.2 研究動機與目的

由於水汙染日趨嚴重，以工業廢水的重金屬汙染為大宗，若可以在汙染河川前對水質進行去除或消毒殺菌，可以降低對環境的傷害。高鐵酸鉀具有良好的去除效果且無危害環境，但市售的高鐵酸鉀過於昂貴，本實驗選定能夠在實驗室量產且純度高的次氯酸氧化法來製備高鐵酸鉀。

水中重金屬離子鈷，濃度超標時會引起很多嚴重的健康問題，如低血壓，癱瘓，腹瀉和骨缺陷等，也會導致活細胞的基因突變。生產金屬鉻和鉻鹽過程中產生的固體廢渣，鉻及其化合物所引起的環境汙染，已成為鉻汙染的重要汙染問題。環境中以三價鉻與六價鉻的含量來規定水質標準。三價鉻與六價鉻對人體健康都有害，但六價鉻毒性更大。銅的冶煉、金屬加工、機器製造、有機合成及其他工業的廢水中都含有銅，工業產生的銅煙霧可能會對上呼吸道有不良的刺激作用。本實驗選定此三種重金屬，調配成濃度 5 mM，且 pH 值分別為 3.0、7.0 和 10.0 之溶液，找出溶液中之重金屬達到 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀劑量。

第二章 文獻回顧

2.1 高鐵酸鉀簡介

高鐵酸鉀是極佳的氧化劑。具有高效的消毒作用，為一種新型非氯高效消毒劑。主要用於飲水處理；化工生產中用作磺酸，亞硝酸鹽，亞鐵氰化物和其他無機物的氧化劑，在煉鋅時用於除錳，銻和砷，煙草工業用於香煙過濾嘴等^[1]。圖 1 為本研究自行製備之高鐵酸鉀粉末。

高鐵酸鉀純品為暗紫色有光澤粉末，在 198°C 以下乾燥空氣中穩定，極易溶於水而成淺紫紅色溶液，靜置後會分解放出氧氣，並沉澱出水合三氧化二鐵（即氧化鐵）。溶液的鹼性隨分解而增大，在強鹼性溶液中相當穩定，是極佳的氧化劑。具有高效的消毒作用。比高錳酸鉀具有更強的氧化性^[2]。



圖 1 自行製備之紫黑色高鐵酸鉀粉末

2.2 高鐵酸鉀用途

高鐵酸鉀是含有 FeO_4^{2-} 的一種化合物，其中心原子的 Fe 以六價存在，在酸性條件下和鹼性條件下的標準電極電勢分別為 2.20 V 和 0.72 V，如表 1^[3]所示。因此，無論在酸性條件，還是鹼性條件下高鐵酸鹽都具有極強的氧化性，可以廣泛用於水和廢水的氧化，消毒，殺菌。因此，高鐵酸鹽是倍受關注的一類新型，高效，無毒的多功能水處理劑。pH 值在 6-6.5 時，每升水加 K_2FeO_4 6-10 mg，常溫下 30 分鐘即可殺滅水體中致病菌、大腸桿菌、傷寒桿菌及病毒去除率為 99.5-99.95% 以上，無異味適口性好，達安全飲用標準。為此本產品在水處理系列產品中顯示出超強的優勢^[4]。

表 1 常用氧化劑之還原電位比較

Disinfectant/ oxidant	Reaction	E°, V
Chlorine	$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e} \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	1.358
	$\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$	0.841
Hypochlorite	$\text{HClO} + \text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$	1.482
Chlorine dioxide	$\text{ClO}_2(\text{aq}) + \text{e} \rightleftharpoons \text{ClO}_2^-$	0.954
Perchlorate	$\text{ClO}_4^- + 8\text{H}^+ + 8\text{e} \rightleftharpoons \text{Cl}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	1.389
Ozone	$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2.076
Hydrogen peroxide	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	1.776
Dissolved oxygen	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e} \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	1.229
Permanganate	$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e} \rightleftharpoons \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	1.679
	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e} \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	1.507
Ferrate(VI)	$\text{FeO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 3\text{e} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O}$	2.20

2.2.1 用於廢水之處理

(1) 生活用水處理

高鐵酸鉀和其他去除砷的藥品相比，具有簡便、效果好、產生污泥量少、無二次污染等優點。對於高砷飲用水，只要高鐵酸鉀投量與原水砷濃度達到 15:1 以上，處理後的水樣中砷殘留量都可以達到國家飲用水衛生標準為 0.01 mg/L 的要求，如表 2^[5]所示。

高鐵酸鉀對氰離子 CN^- 有很好的去除效果。當水溶液中的 CN^- 濃度為 10 mg/L 時時，用 K_2FeO_4 75-167 mg/L 進行除 CN^- 處理，在 pH 為 11.2 的可去除大部分的 CN^- ，其殘餘濃度為 0.062 -0.082 mg/L 去除率可達到 99.18-99.38% 以上。顯示使用本產品在含氰廢水治理中具有良好的應用效果^[2]。

表 2 國家飲用水標準

項目	最大限值	單位
砷 (Arsenic)	0.01	毫克／公升
鉛 (Lead)	0.01	毫克／公升
硒 (Selenium)	0.01	毫克／公升
鉻 (Chromium)	0.05	毫克／公升
鎘 (Cadmium)	0.005	毫克／公升
鋇 (Barium)	2.0	毫克／公升
銻 (Antimony)	0.01	毫克／公升
鎳 (Nickel)	0.1	毫克／公升
汞 (Mercury)	0.002	毫克／公升
氰鹽(以 CN ⁻ 計) (Cyanide)	0.05	毫克／公升
亞硝酸鹽氮(以氮計) (Nitrite-Nitrogen)	0.1	毫克／公升

(2) 工業廢水處理

高鐵酸鉀對於廢水中的鉛、鎘、硫等具有良好的去除作用，10-20 mg/L 的高鐵酸鉀可去除 86% 的氨氮和 75% 的磷，pH 5.5 時，30 mg/L 的高鐵酸鉀，可將水中三氯乙烯去除 85.6%，苯的去除率達 100%。高鐵酸鉀良好的絮凝作用，表現在水中與污染物作用的過程中，經過一系列反應，由六價降至三價，帶有不同電荷的中間態如：Fe(v)/Fe(vi) 等，並逐步被還原成具有絮凝作用的 Fe(iii)。高鐵酸鉀在處理放射性廢水時有優良的性能，以高鐵酸鉀處理含銻，銻廢水，在 pH 值為 11.5-12 時，可將總 α 射線從 3.0×10^6 pCi/L 降至 3.0×10^3 pCi/L 以下 ($1 \text{ pCi} = 10^{-12} \text{ Ci}$)。在美國能源部對放射性廢水的治理中，用 K_2FeO_4 以二步處理過程將總 α 射線從 37000 pCi/L 降到 40 pCi/L。實際應用證明，高鐵酸鉀的性能優於目前流行的放射性廢水的治理方法，處理水濃度大大低於排放標準^[2]。

在印染，製革，印刷，造紙，製藥，石油工業，石化工業等均具有較好應用潛力。該產品在水體淨化中的獨特效果是同時發揮氧化、吸附、絮凝、沉澱、滅菌、消毒、脫色、除臭的協同作用，並不產生任何有毒，有害的物質。用多功能的複合藥劑強化與拓寬現行常規給水處理工藝的淨水效能，可以不改變現有工藝流程，不增加大附屬設

施，適合飲用水消毒技術，具有廣闊的研究開發前景，並可能成為消毒技術研究的一個主要方向^[2]。

2.2.2 流放水標準

除了重金屬廢水，其他產業的廢水最後都會流入大海中，為了保護環境，政府針對各種產業制定流放水標準，防止超標的廢水流入河川及海洋，表 3 行政院環保署制定的流放水標準^[6]。在化工業的流放水標準中，鈷含量標準為 2.0 mg/l、鉻含量標準為 2.0 mg/l、銅含量標準為 3.0 mg/l。

表 3 流放水標準

	化工業	光電材料業	半導體業	科學工業園 區污水下水道	石油化學 專業區污 水下水道
鎘	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
鉛	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
總鉻	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
六價鉻	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
總汞	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
銅	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
鋅	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
銀	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
鎳	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
硒	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
砷	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
硼	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
鈷	2.0	-	-	-	-
鉍	1.0	-	-	-	-
銻	-	0.1	-	0.1	-

單位：mg/l

2.3 高鐵酸鉀穩定度

當高鐵酸鹽溶於水，氫氧化鐵沉澱，會使高鐵酸鹽溶液不穩定，反應式如下。



高鐵酸鉀的分解率很大程度上取決於初始高鐵酸鉀濃度、共存離子、pH 值、和溶液的溫度^[3]。稀釋的高鐵酸鹽溶液比濃縮的更穩定。一個初始高鐵酸鹽離子濃度超過 0.025 M，60 分鐘後將會剩下約 89 %。但是，如果初始濃度大於 0.03 M，幾乎所有的高鐵酸鹽離子都會在同一時期分解。其他研究也發現 0.01 M 的高鐵酸鉀溶液在 2.5 小時內降解 79.5%，而 0.0019 M 高鐵酸鉀溶液在 251°C 下 3 小時和 50 分鐘後僅降解 37.4%。

使用含有氯化鉀(KCl)，硝酸鉀(KNO₃)，氯化鈉(NaCl)和含水氧化鐵(FeOOH)之 0.04 M 高鐵酸鉀的溶液，研究共存離子在溫度 25°C 下，對高鐵酸鉀穩定性的影響^[7]。結果在初始階段，溶液中含有 KCl 和 KNO₃ 時，高鐵酸鹽離子殘餘量較多，且高鐵酸鹽在低濃度下似乎相對穩定，如圖 2^[3]所示。

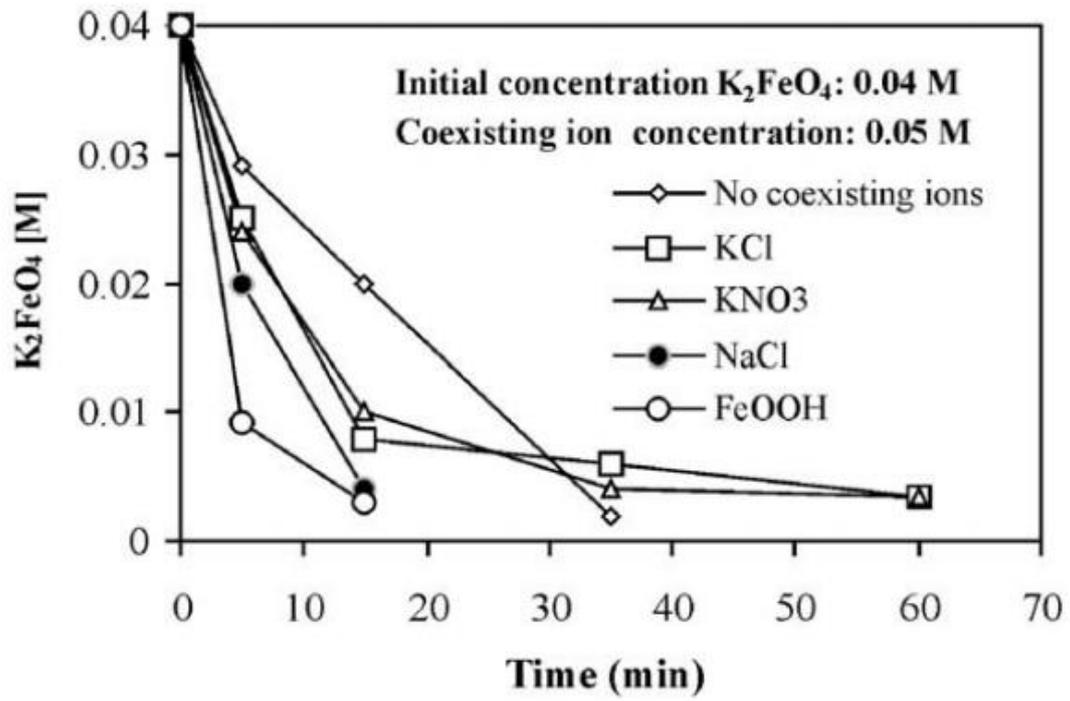


圖 2 共存離子對 K_2FeO_4 穩定性的影響

高鐵酸鹽(VI)溶液的穩定性隨著 pH 值增加而越高^[7]。在 2 小時實驗期間，高鐵酸鉀的濃度在 6 M KOH 時略有下降，但是當它在 3 M KOH 時迅速下降，如圖 3 所示^[7]。用緩衝溶液製備高鐵酸鉀溶液 pH 8 比 pH 7 時更穩定；8 小時後，當 pH 為 7 時，高鐵酸鉀仍然還有 49 %；10 小時後，pH 值為 8 時，仍有 71.4%。

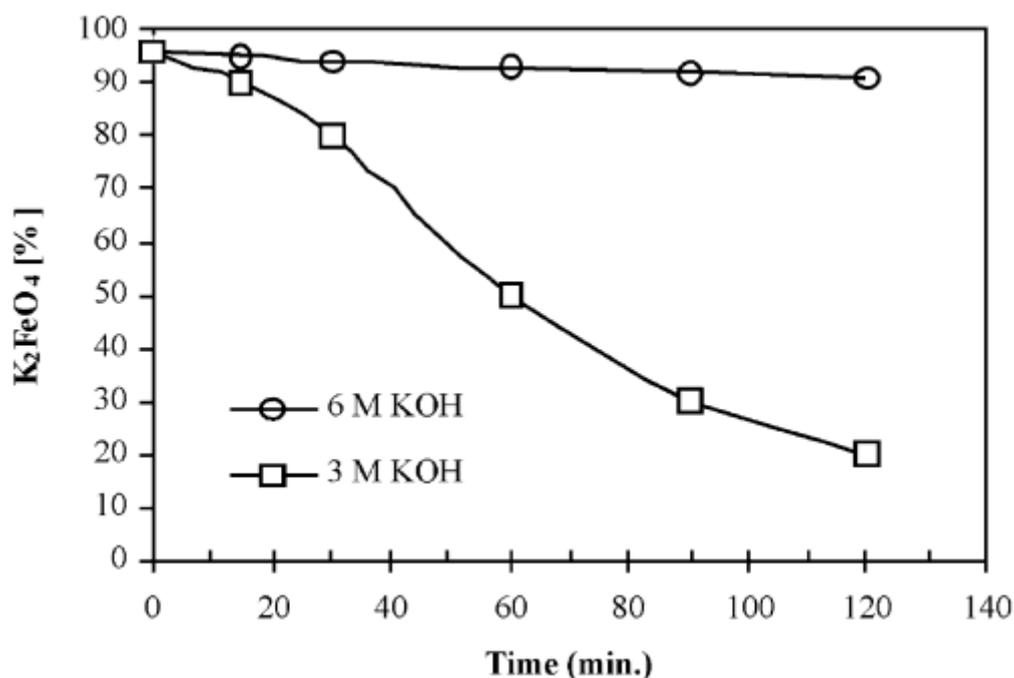
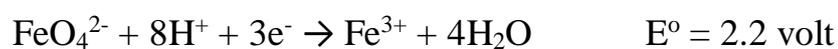


圖 3 鹼度對 0.01 M K_2FeO_4 穩定性的影響

pH 值對於高鐵酸鉀溶液另一個重要影響是還原電位值，如圖 4 所示^[8]。不難看出在酸性環境中，高鐵酸鉀離子具有較高的氧化力，相對的，也較容易還原成三價鐵。因此，高鐵酸鉀離子之氧化反應途徑，與 pH 值相關^[9]。

酸性條件：



鹼性條件：

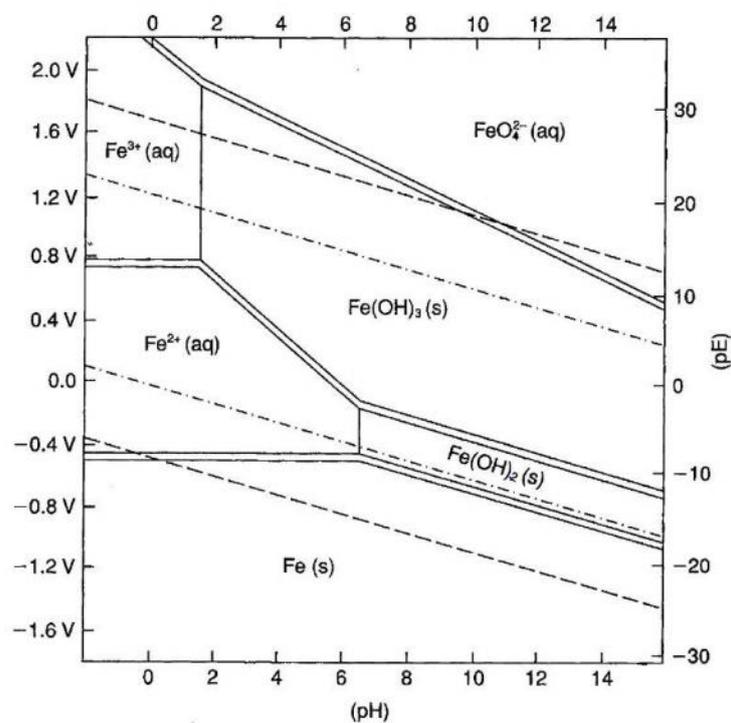


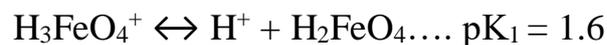
圖 4 鐵離子(1M)的水溶液之 pH vs 還原電位值(Pourbaix diagram)

隨著 pH 值的變化，還原電位跟著改變之外，平衡水溶液中離子物種的分佈比例亦隨之改變。可以圖 5^[10]加以說明。

六價鐵至少存在 3 種質子化態^[11] (protonated forms):



由圖 5 可知，在所有 pH 值的範圍中，有 4 種六價鐵形態存在，而在微鹼的水體中，以 hydrogen ferrate ion (HFeO_4^-) 與 ferrate (FeO_4^{2-}) 為主要離子型態。另外若 pH 值 > 10，ferrate (FeO_4^{2-}) 會選擇另一種還原途徑而產生 $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ 及 $\text{Fe}(\text{OH})_6^{3-}$ 而使 $\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$ 產生量變少。一般情況下六價鐵於水中分解為一階反應 (pH = 3.6-7, rate constant = $7 \times 10^4 - 100 \text{ s}^{-1}$)，在鹼性環境下，六價鐵於水中分解為二階反應 (rate constant $\approx 10^7 \text{ s}^{-1}$)。所有解離過程，可得三個平衡 pKa 值，分別為： $\text{pK}_1 = 1.6 \pm 0.2$ ， $\text{pK}_2 = 3.5$ ， $\text{pK}_3 = 7.3 \pm 0.1$ ，而反應式^[4]如下列所示：



六價鐵於水中分解為二階反應(rate constant $\approx 10^7 \text{ s}^{-1}$)可能反應路

徑為雙六價鐵離子(diferrate (VI))生成之平衡反應:

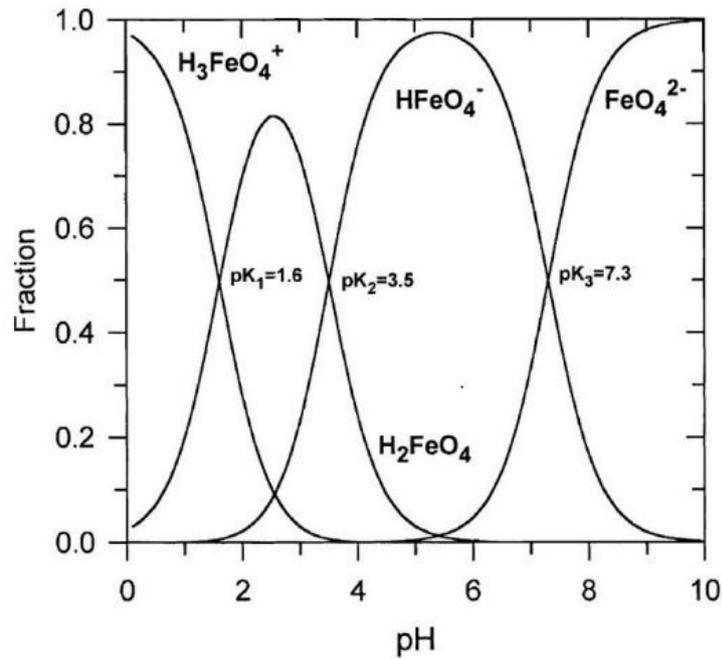
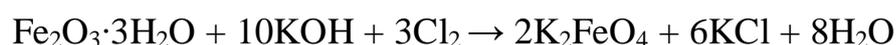


圖 5 六價鐵離子水溶液中的離子成分與 pH 關連圖

2.4 高鐵酸鉀製備方法

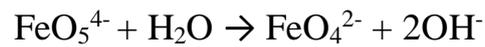
高鐵酸鉀最早在1702年被德國化學和物理學家Georg Stahl首次發現硝酸鉀與鐵粉混合點燃後生成的殘渣，可溶於水而成紫色溶液。1834年，由Eckeberg和Becquerel兩人共同發現三氧化二鐵與氫氧化鉀反應後，得到可溶於水的產物合成高鐵酸鉀。1841年Fremy首次將氯氣通入含有三氧化二鐵之氫氧化鉀溶液合成出高鐵酸鉀，其反應式如下：



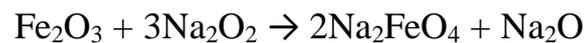
在1897年，由Moeser整理相關資料並描述高鐵酸鹽的化學性質，說明主要有三類高鐵酸鉀的製備方法：乾式氧化法、電解法和濕式酸氧化法。

2.4.1 乾式氧化法

乾式氧化法是最早製作六價鐵的方式，產物為液狀。其製作方式是混合氧化鐵與過氧化鈉或過氧化鉀，在 370°C 時進行氧化反應，並且連續不停的提供乾燥的氧氣，此時產物為陰離子狀態 FeO_5^{4-} ，然後進行水解，形成紅紫色的離子^[12]。此種方式能提高六價鐵的產量，反應式如下所示：



另一種反應為使用氧化鐵在鍍鋅容器^[13]中與二氧化鈉反應混合並加熱至 800°C，進而生成高鐵酸鈉，反應式如下：



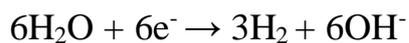
2.4.2 電解法

乃利用電化學的氧化還原原理來合成高鐵酸鉀，即以直流電為電源，鐵合金作為陽極，並以氫氧化鉀或氫氧化鈉作為電解液來進行反應，其基本反應式如下：

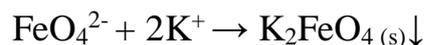
陽極：



陰極：



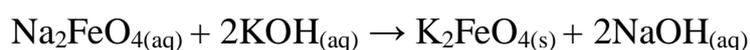
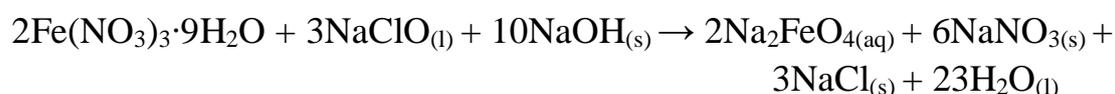
總反應：



電解反應的電流密度、陽極成分及電解液條件不同，均會影響高鐵酸鉀的產率。若電流密度為 3 mA/cm^2 與電解液溫度為 30°C ，高鐵酸鉀的產率為 40% ^[14-17]。而 14 M 的氫氧化鈉是最佳的電解液條件。

2.4.3 濕式氧化法

濕式氧化法中的次氯酸氧化法之原理是利用氯氣或是次氯酸根(OCl)在強鹼下將三價鐵氧化成六價鐵，之後再加入高濃度的氫氧化鉀使固狀的高鐵酸鉀沉澱出來，再脫水乾燥而成^[18,19]。反應方程式如下：



使用不同的鐵鹽先驅物，對於合成時的反應性、產率與粗產物純度均有關鍵性影響。一般而言，使用次氯酸根(OCl)所得高鐵酸鉀的產率和純度均優於使用氯氣者。此外，目前學術界主要以硝酸鐵 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 為鐵源，因為該先驅物同兼具高反應性（室溫操作即可）與高產率，同時粗產物純度也比氯化鐵佳。

本研究根據次氯酸氧化法具有乾式氧化法能大量製備及和電解法純度高之優點，可在實驗室合成大量的高鐵酸鉀。

2.5 高鐵酸鉀定性及定量分析

2.5.1 FTIR 分析

圖 6^[20]為高鐵酸鉀的傅立葉紅外光譜曲線圖，在 3500-3200 cm^{-1} 的範圍出現了比較寬的吸收峰是由-OH 基團振動引起；在 1382.34 cm^{-1} 處出現一個明顯的高穿透率之吸收峰，可能是由可能是 Fe-O 鍵的振動頻率的吸收引起的，這與其他文獻的結果一致^[21,22]；在 970.81 cm^{-1} 處出現的低穿透率之吸收峰，在 823.01 cm^{-1} 處出現的高穿透率之吸收峰和 618.57 cm^{-1} 處出現的低穿透率之吸收峰，均為高鐵酸鉀晶體中 Fe-O 鍵的特徵吸收峰。

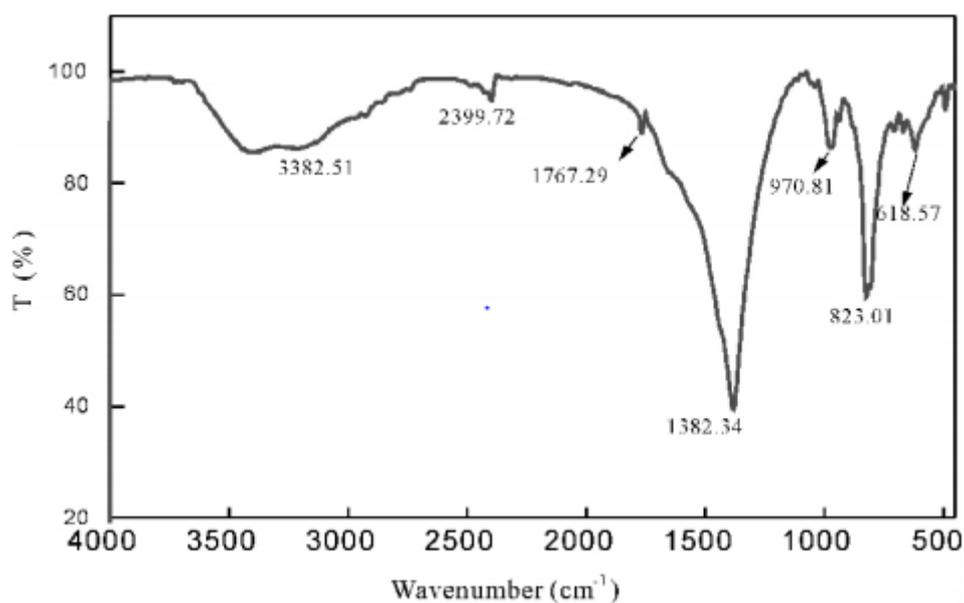


圖 6 高鐵酸鉀 FTIR 光譜圖

2.5.2 XRD 繞射分析

將高鐵酸鉀樣品進行 X 射線繞射分析，結果如圖 7^[20]所示。晶體物質可在確定的角度產生一系列物質的特徵繞射峰，而非晶體物質只出現漫散的峰高，不產生明顯的特徵峰^[23]。由圖 7 可以知，檢索出高鐵酸鉀樣品 $2\theta = 20^\circ \sim 45^\circ$ 之間出現了一系列繞射峰，在 $2\theta = 28.325^\circ$ 處出現最強繞射峰，為高鐵酸鉀的特徵繞射峰。同時 $2\theta = 20.858^\circ$ ， 23.529° ， 30.041° ， 33.821° ， 40.489° ， 41.120° ， 50.54° ， 58.624° 等處也出現了特徵繞射峰^[24]。

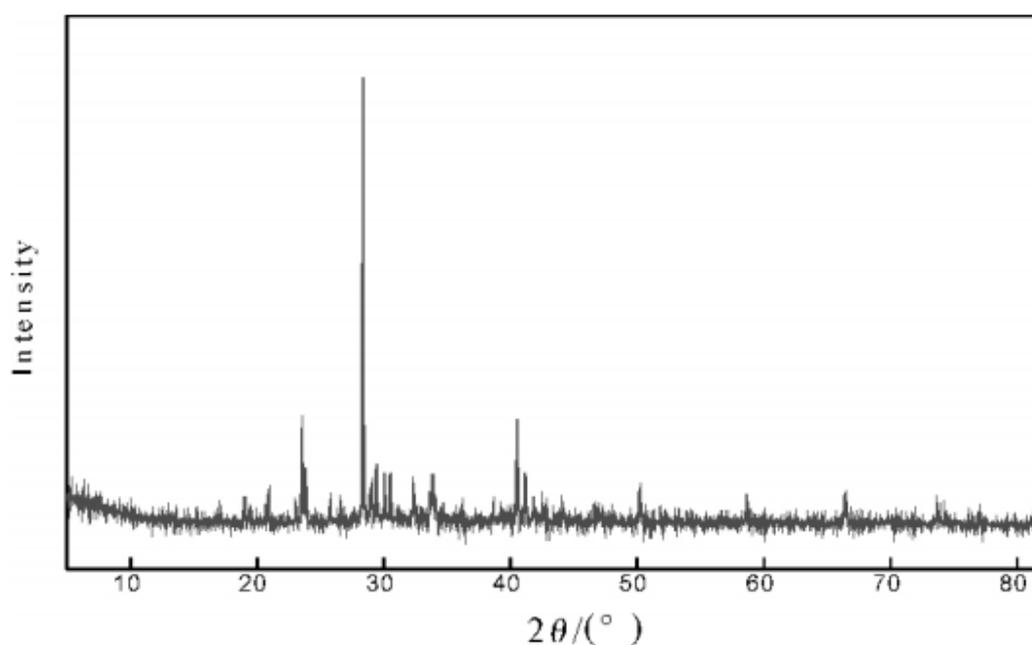


圖 7 高鐵酸鉀之 XRD 繞射分析

2.5.3 SEM 分析

將高鐵酸鉀粉末樣品覆於電導膠上，經噴金處理後置於掃描電子顯微鏡下觀察樣品的表面形貌。如圖 8^[20]所示，高鐵酸鉀晶體的形態飽滿，呈不規則狀態，表面凹凸不平，形成了錯綜複雜的蜂窩狀孔隙，吸附空位增多。

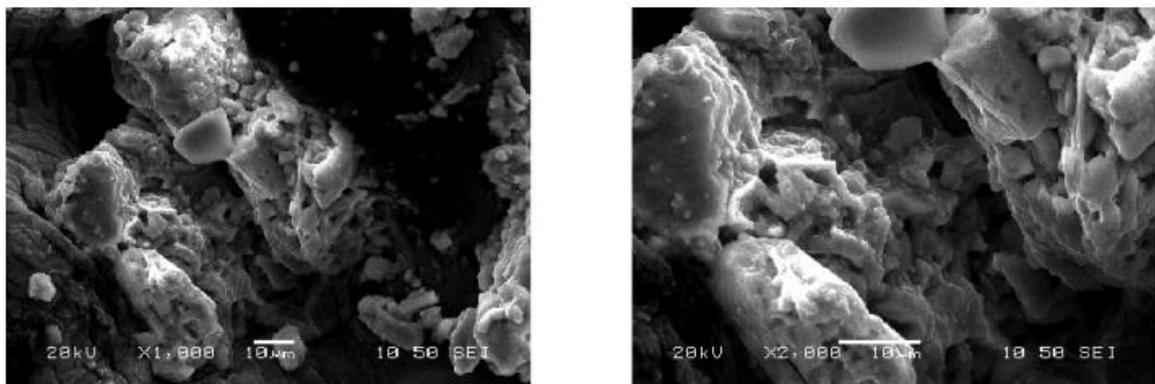


圖 8 高鐵酸鉀之 SEM 圖

2.5.4 IR 分析

在紅外線(IR)光譜學用於定量或定性測定高鐵酸鉀已經引起了更多的關注。圖 9^[24]顯示了兩種高鐵酸鉀波長為 324 和 800 cm^{-1} 時的特徵紅外波峰。

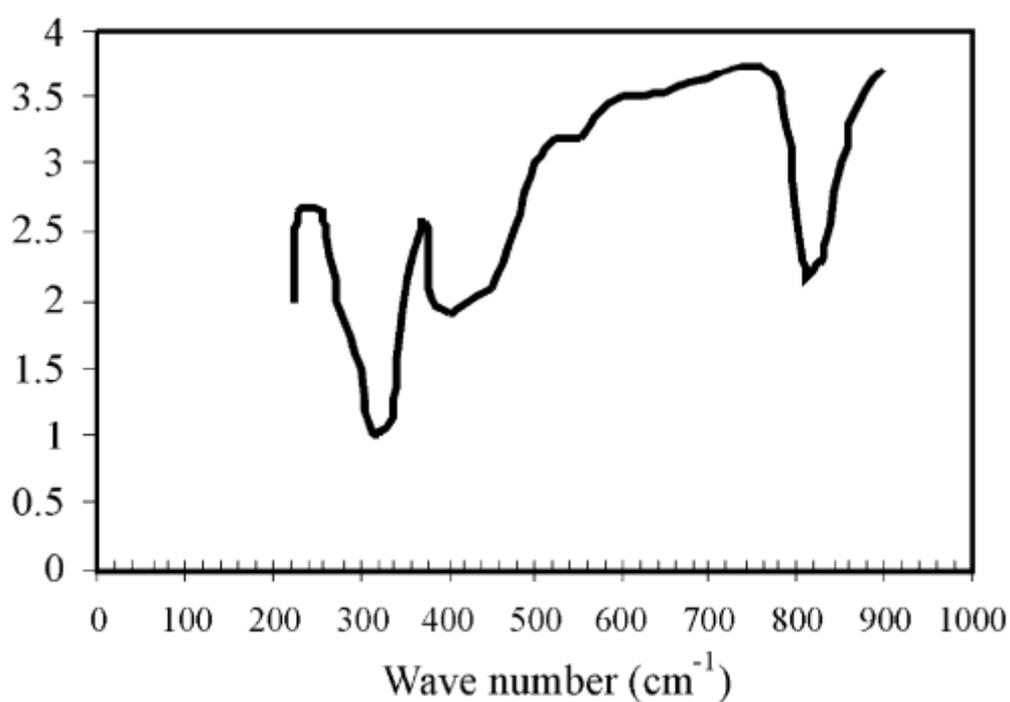


圖 9 高鐵酸鉀之 IR 光譜圖

2.5.5 UV-Vis 分析

高鐵酸根離子水溶液具有明顯的紅紫色，對應於可見光和近紅外吸收光譜約 510 及 800 nm^[25,26]，如圖 10 所示。此方法準確率高，且分析時間較短，所以本研究選定 UV-Vis 來分析高鐵酸鉀。

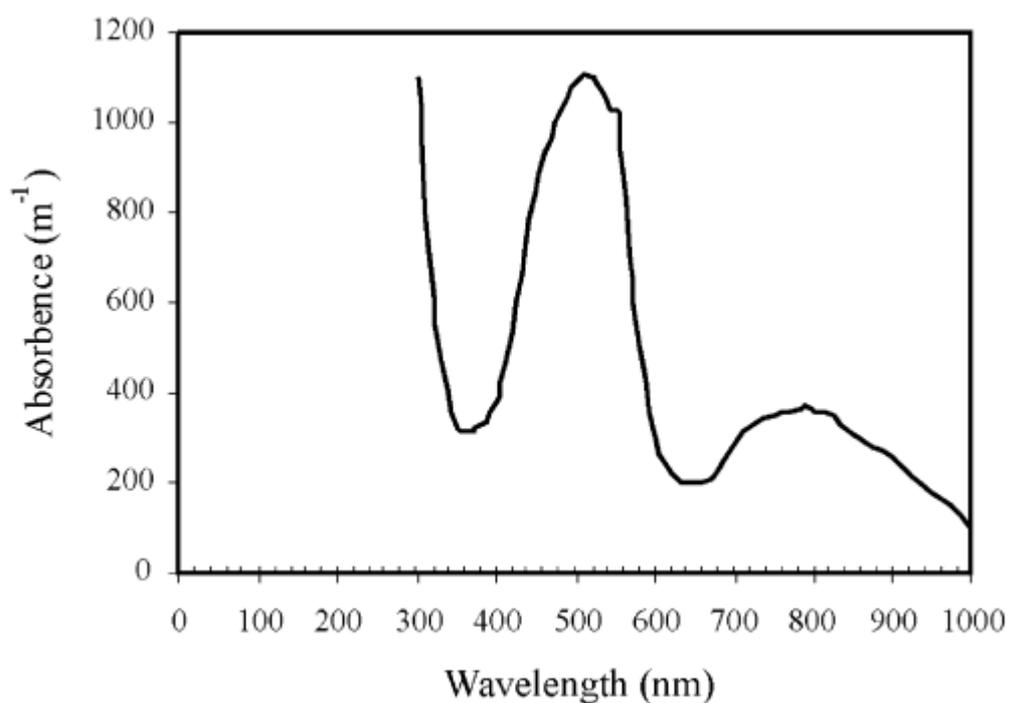


圖 10 高鐵酸鉀之 UV-Vis 光譜圖

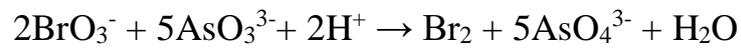
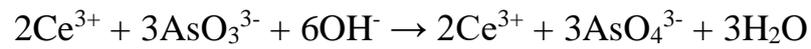
2.5.6 鉻滴定法

此方法的主要原理是利用高鐵酸鉀在強鹼下，將三價鉻氧化成六價鉻酸根離子^[27]，即六價鐵離子轉移了三個電子而還原成三價鐵離子，之後再以硫酸和磷酸酸化，使整個溶液呈酸性條件，並加入二苯胺磺酸鈉溶液當指示劑，最後以還原劑硫酸亞鐵銨溶液(FAS)滴定鉻酸根離子，紫色變綠色即達滴定終點。其反應式如下：



2.5.7 砷滴定法

此種滴定方法需在高鹼度下使六價鐵與大量的砷均勻的混合，將六價鐵反應完全為三價鐵後，再用 BrO_3^- 或 Ce^{3+} 滴定，至滴定終點時，溶液顏色會變成暗黑色^[27]，反應式如下：



2.6 重金屬廢水處理方法

近年來，隨著工業化進程加快，大量含有重金屬的工業廢水和城市生活污水排放到環境中，對大氣、土壤和水環境造成了嚴重污染。重金屬廢水主要含有砷、汞，鉛、銅、鋅、鉻、鎳等元素，大多數來源於電鍍、冶金、礦山、石油化工等行業，重金屬廢水具有毒性強、持久性，不可降解性等特點，這些重金屬在水體中可通過食物鏈影響動植物生長最終威脅人類健康。

水體重金屬污染已成為當今主要的環境問題之一，因此如何無害化處理好重金屬廢水已是當前的極待解決的工作，現階段無害化處理重金屬廢水的方法可分為三類：物理法，包括膜分離法、吸附法、溶劑萃取法、離子交換法、蒸發濃縮法等；化學法，包括化學沉澱法、電化學法；生物法，包括生物修復法、生物絮凝法、生物吸附法^[28]。

2.6.1 物理法

(1) 膜分離法

膜分離技術使用一種特殊的半透膜，在外界壓力作用下，不改變溶液化學形使溶液中一種溶質貨溶劑滲透出來，從而達到分離的目的。根據膜的不同，可以分為電滲析、反滲析、液膜、超濾等。目前反滲透和超濾膜在電鍍廢水中已廣泛應用。

液膜分離技術是將萃取和膜過程結合的一種高效分離技術，萃取與反萃取同時進行，是分離和濃縮金屬離子的有效方法。其中支撐液膜在處理重金屬廢水，提取稀有、貴重金屬離子，如提取鉑、鎳、銅等方面具有低耗能、低成本、效率高等特點，具有廣闊的應用前景。將膜技術與其他技術工藝有機結合起來處理重金屬廢水將是未來發展方向^[29]。

(2) 吸附法

吸附法是利用吸附劑吸附廢水中重金屬的一種方法，其中吸附法被認為是去除痕量重金屬有效的方法。常用的吸附劑有活性炭、沸石、硅藻土、凹凸棒石、二氧化矽、天然高分子及離子交換樹脂等。其中天然沸石吸附能力最強，也是最早用於重金屬廢水處理的礦物材料。

奈米 FeO 是一種有效的脫鹵還原的奈米材料。與常規的顆粒鐵粉相比，奈米 FeO 顆粒有粒徑小、易分散、比表面積大、表面吸附能

力強、反應活性強、還原效率和還原速度遠高於普通鐵粉的特點。奈米 FeO 除了可以高效還原有機氯代物以外,其對 Cr^{6+} 、 Pb^{2+} 和 As^{3+} 等多種重金屬同樣表現出良好的處理效果^[30,31]。

2.6.2 化學法

(1) 化學沉澱法

化學沉澱法是指向重金屬廢水中投放藥劑，通過化學反應使溶解狀態的重金屬生成沉澱而去除的方法。包括中和沉澱法、硫化物沉澱法、鋇鹽沉澱法等。中和沉澱法應用比較廣泛，向重金屬廢水中投放藥劑（如石灰石）使廢水中重金屬形成沉澱而去除。化學沉澱法處理重金屬廢水具有工藝簡單、去除範圍廣、經濟實用等特點，是目前應用最為廣泛的處理重金屬廢水的方法^[32]。

(2) 電化學法

電化學法是應用電解的基本原理，使廢水中重金屬離子在陽極和陰極上分別發生氧化還原反應，使重金屬富集，從而去除廢水中重金屬，並且可以回收利用。

高壓脈衝電凝法(High voltage electrocoagulation system, HVES)^[33]是採用高電壓小電流，系運用電化學原理，將電能轉為化學能，對廢水中有機或無機物進行氧化還原、中和反應。通過凝聚、沉澱、浮除將污染物從水體中分離，從而有效地去除廢水中的 Cr^{6+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 CN^- 、油、磷酸鹽與色度。該方法操作方便、反應迅速，可去除的污染物廣泛、無二次污染、經濟實用，在國外，電化學技術被稱為「環境友好技術」。

2.6.3 生物法

(1) 植物修復法

植物修復法是指利用高等植物通過吸收、沉澱、富集等作用降低已有污染的土壤或地表水的重金屬含量,以達到治理污染、修復環境的目的。該方法實施較簡便、成本較低和對環境擾動少。但是治理效率較低,不能治理重度污染的土壤和水體^[34]。

(2) 生物絮凝法

生物絮凝法是利用微生物或微生物產生的代謝物進行絮凝沉澱的一種除污方法。目前已開發出具有絮凝作用的微生物有細菌、黴菌、放線菌、酵母菌和藻類等共 17 個品種,而對重金屬有絮凝作用的只有 12 個,從多種微生物中提取殼聚糖為絮凝劑回收水中 Pb^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 等重金屬離子。在離子濃度是 100 mg/L 的 200 mL 廢水中加入 10 mg 殼聚糖,處理後 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 濃度都小於 0.1 mg/L, Pb^{2+} 濃度小於 1 mg/L,處理效果十分明顯^[35]。

(3) 生物吸附法

生物吸附法是利用生物體本身的化學結構及成分特性來吸附溶於水中的金屬離子,再通過固液兩相分離去除水溶液中的金屬離子的方法。該方法在低濃度下,選擇吸附重金屬能力強,處理效率高,操作的 pH 值和溫度範圍寬,易於分離回收重金屬,成本低等特點。同

時還可從工業發酵工廠及廢水處理廠中排放出大量的微生物菌體,用於重金屬的吸附處理^[35]。

本研究利用濕式氧化法中的次氯酸氧化法製備高鐵酸鉀,並利用化學法中的化學沉澱法來去除溶液中的重金屬離子。

第三章 實驗方法及藥品與設備

3.1 實驗流程

本研究先以次氯酸氧化法來製備高鐵酸鉀，接著以紫外/可見光譜儀(Thermo Scientific™ GENESYS 10S UV-Vis spectrophotometer)對其做定性分析，再以鉻滴定法對其做純度分析，然後將高鐵酸鉀應用在 Cr^{3+} 、 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 重金屬去除，最後找出以最少用量的高鐵酸鉀來達到 100% 的去除率。實驗流程如圖 11 所示。

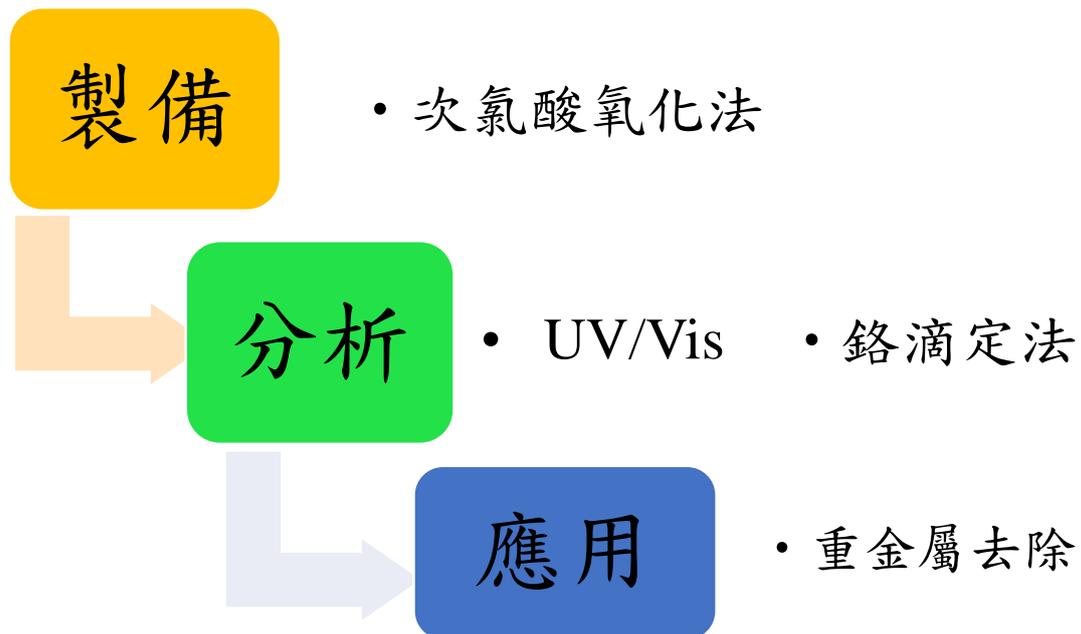


圖 11 實驗流程圖

3.2 實驗藥品與耗材

1. 氫氧化鈉(Sodium hydroxide), NaOH, 97%, SHOWA.
2. 氫氧化鉀(Potassium hydroxide), KOH, 85%, SHOWA.
3. 次氯酸鈉(Sodium hypochlorite), NaClO, 11~14%, ALFA
4. 硝酸鐵九水合物 (Nitrate enneahydrate), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 99%, SHOWA.
5. 異丙醇(Iso-propyl alcohol), $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$, 95% , 聯工化學試藥。
6. 正己烷(n-Hexane), C_6H_{14} , 99%, ALFA.
7. 乙醚(Ethyl ether anhydrous), $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$, 99%, TEDIA.
8. 六水合三氯化鉻(Chloride hexahydrate), $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 93%, SHOWA.
9. 硫酸(Sulfuric acid), H_2SO_4 , 96%, ACROS.
10. 磷酸(Phosphoric acid), H_3PO_4 , 85%, SHOWA.
11. 硫酸亞鐵銨(Ferrous ammonium sulfate), $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99%, SIGMA.
12. 二苯胺磺酸鈉(Diphenylamine-4-sulfonic acid, sodium salt, ACS reagent), $\text{C}_6\text{H}_5\text{NHC}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{Na}$, ACROS.
13. 玻纖濾紙(Glass microfibre filters), GF/A, Whatman.
14. 醋酸銅一水合物 (Copper (II) acetate monohydrate), $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 98.5%, KANTO.

15. 醋酸鈷四水合物 (Cobalt (II) acetate tetrahydrate),

$\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 99.0%, KANTO.

16. 乙醇胺(Ethanolamine), $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$, 95%, ACROS.

3.3 高鐵酸鉀製備步驟

1. 在 100 ml 燒杯中加入 NaOCl (10~12%)20 ml。
2. 在冰浴下攪拌 NaOCl 溶液，緩慢加入 12 g NaOH 避免大量放熱，控制反應溫度不超過 20°C。
3. 將步驟 2 溶液進行離心，轉速 6000rpm、15 分鐘，將液體與沉澱物分離，並收集離心液。
4. 將步驟 3 離心液與 4 g $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 反應，控溫在 20°C，攪拌 40 分鐘。
5. 將步驟 4 的溶液進行離心，6000 rpm、15 分鐘，將沉澱物及液體分離並收集離心液。
6. 將步驟 5 之離心液倒入 50 ml、20°C 的飽和 KOH 溶液反應，攪拌 20 分鐘並控溫在 20°C。
7. 將步驟 6 溶液用玻璃纖維濾紙進行抽氣過濾，將反應完低純度的高鐵酸鉀固體分離出來。
8. 量取 2.1 g 的 KOH 固體並溶於 12.5 ml 的去離子水，調配成 3 M KOH 溶液。
9. 將步驟 7 濾紙上低純度高鐵酸鉀固體刮下，溶於步驟 8 的 3 M KOH 溶液。

10. 將步驟 9 溶液再利用玻璃纖維濾紙進行抽氣過濾，收集下方濾液。
11. 將濾液倒入 50 ml、20°C 的飽和 KOH 溶液反應，攪拌 20 分鐘並控溫在 20°C。
12. 將步驟 11 溶液用玻璃纖維濾紙進行抽氣過濾，將反應完高純度的高鐵酸鉀固體分離出來。
13. 再依序利用 3 ml 正己烷及 3 ml 異丙醇淋洗濾紙上之產物，將其餘鹽類去除。
14. 將濾紙上高鐵酸鉀固體刮至培養皿，用真空烘箱在 80°C 烘 30 分鐘，得高純度高鐵酸鉀固體。

根據上述的步驟，可將製備高鐵酸鉀的整個過程整理成一張圖表，其流程圖如圖 12 所示。

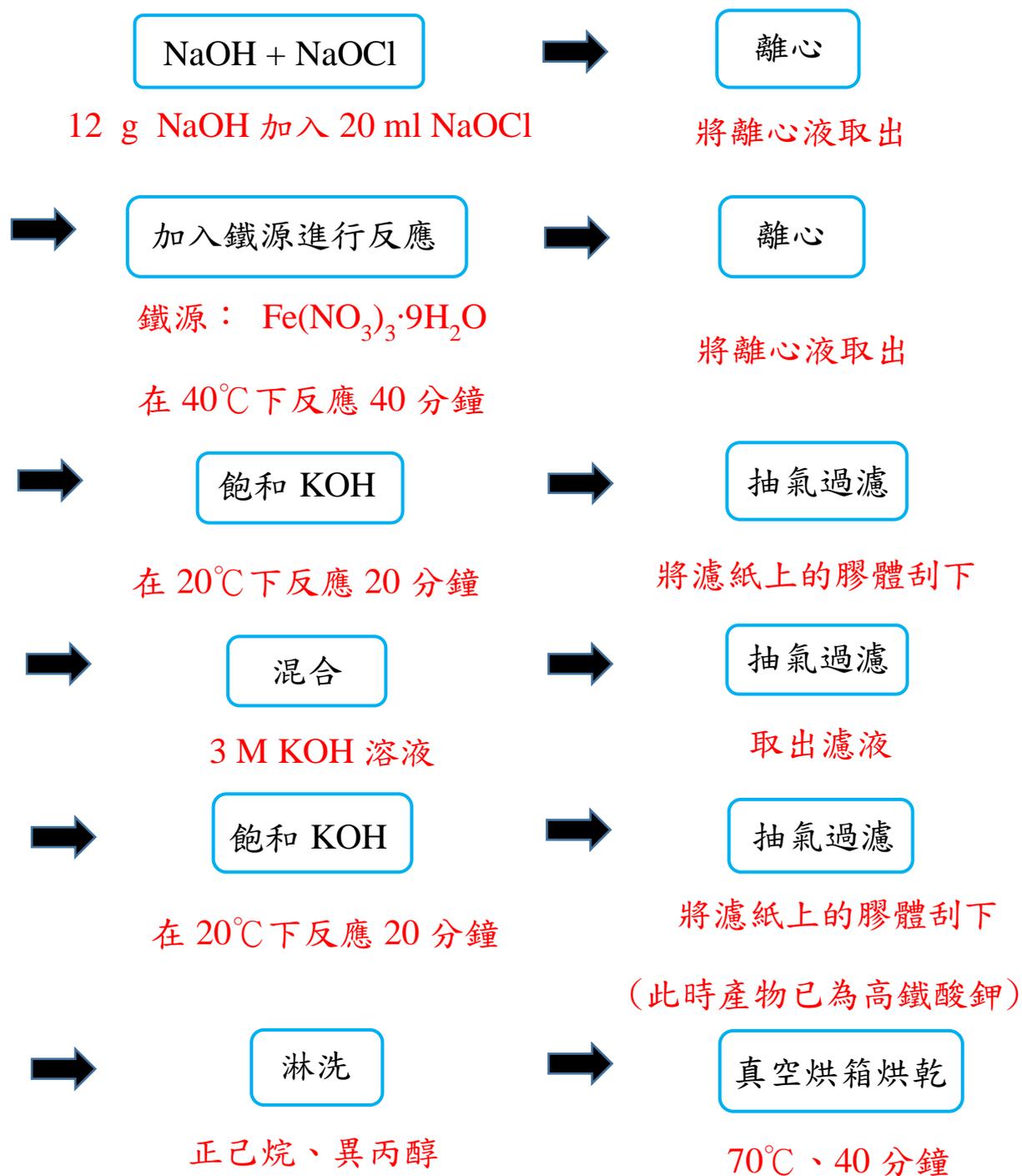


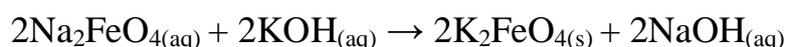
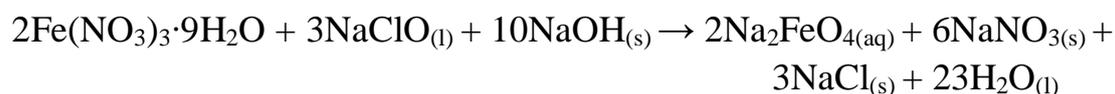
圖 12 高鐵酸鉀製備流程圖

3.4 高鐵酸鉀產率計算與分析

高鐵酸鉀產率計算為：

$$\text{產率}(\%) = \frac{\text{實際產量}}{\text{理論產量}} \times 100\%$$

實際產量為合成之產物經天平量得之重量，理論產量根據下列反應式計算而得到：



硝酸鐵水合物 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 與高鐵酸鉀 K_2FeO_4 之莫耳數比為 1:

1，由此可計算出完全反應所得高鐵酸鉀之理論產量。

$$\text{理論產量} = \frac{\text{硝酸鐵水合物用量}}{\text{硝酸鐵水合物分子量}} \times \text{高鐵酸鉀分子量}$$

此方法的硝酸鐵九水合物用量為 4 g、硝酸鐵九水合物分子量為 404 g/mol、高鐵酸鉀分子量為 198.04 g/mol，帶入算式計算出理論產量為 1.96 g。

3.5 高鐵酸鉀純度分析

製備完的高鐵酸鉀可用分光光度計測量吸光強度，但無法測量其純度，且由於市售的高純度高鐵酸鉀價格昂貴，所以只能選某次合成後的高鐵酸鉀產物當作參考樣品。因為高鐵酸鉀會隨著時間會開始降解，所以在合成後須盡速分析純度。本實驗用鉻滴定法來測定純度。確認純度後，再參考樣品去調製出不同濃度的樣品用分光光度計測量其吸光強度，並自訂高鐵酸鉀濃度範圍與繪製回歸線確認線性關係，讓回歸係數接近 1。在此濃度範圍內可依據其線性關係，利用可見光譜快速分析其他之高鐵酸鉀的純度。

3.5.1 鉻滴定法

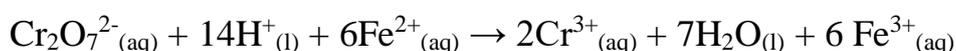
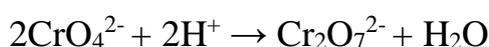
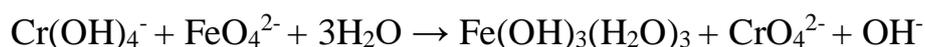
利用鉻滴定法分析參考樣品的純度，先將高鐵酸鉀與 $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ 反應，將 $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ 反應成 CrO_4^{2-} 。在抽氣櫃緩慢加入 H_2SO_4 、 H_3PO_4 之酸性溶液避免大量放熱也避免吸入刺鼻的氣體，使 CrO_4^{2-} 在酸性環境中轉換成 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 。最後添加指示劑(二苯胺磺酸鈉)以硫酸亞鐵銨進行滴定，溶液從紫黑色轉變成淡綠色，即達滴定終點。

滴定步驟如下：

1. CrCl_3 溶液配製：30 ml 去離子水+ 3 g $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}_{(s)}$ 。
2. $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ 溶液配製：取 3 ml CrCl_3 溶液，加入 20 ml 飽和 NaOH 溶液。
3. 取 0.1 g K_2FeO_4 加入 $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ 溶液，攪拌至 K_2FeO_4 完全溶解。
4. 將 100 ml 去離子水、27.5 ml H_2SO_4 、12.5 ml H_3PO_4 倒入步驟 3 溶液。
5. 指示劑溶液配製：0.1 g 二苯胺磺酸鈉(白色粉末)加 20 ml 去離子水。
6. 取 2 ml 指示劑溶液(透明無色)加入步驟 4 溶液。
7. 以硫酸亞鐵銨(FAS) 0.1 N(淺黃色) 進行滴定，每 0.1 ml 觀察顏色變化。

文獻^[36]指出，硫酸亞鐵銨以 0.02、0.01 和 0.1N 進行滴定时，0.01 N 滴定之誤差小於 0.1%，此濃度最為精準，所以使用硫酸亞鐵銨 0.01 N 來滴定高鐵酸鉀之純度。

根據滴定步驟其反應式如下：



其中 Fe^{2+} 為硫酸亞鐵銨(FAS)之二價鐵離子。

首先將 K_2FeO_4 加入 $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ 溶液中，將 Cr^{3+} 氧化成 Cr^{6+} ，其反應式為 $\text{Fe}^{6+} + \text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Cr}^{6+}$ 。

再以 FAS 之二價鐵離子與 Cr^{6+} 反應，將 Cr^{6+} 還原成 Cr^{3+} ，其反應式為 $3\text{Fe}^{2+} + \text{Cr}^{6+} \rightarrow 3\text{Fe}^{3+} + \text{Cr}^{3+}$ 。

達滴定終點時，可藉由其反應式計算 Cr^{6+} 的量。其當量平衡式如下：

$$N_1V_1 = N_2V_2$$

其中 N 為當量濃度，定義為：

$$\frac{\text{溶質莫耳數}(\text{mol})}{\text{溶液體積}(\text{L})} \times \text{氧化數(或還原數)改變量}$$

N_1 為硫酸亞鐵銨當量濃度， N_2 為 Cr^{6+} 當量濃度

V_1 為硫酸亞鐵銨滴定體積， V_2 為 Cr^{6+} 溶液體積

硫酸亞鐵銨分子量為 392.1 g/mol

由於滴定終點時，反應物存在相同溶液中，故體積相等，FAS 當量濃度等於 Cr^{6+} 當量濃度。根據反應式 $3\text{Fe}^{2+} + \text{Cr}^{6+} \rightarrow 3\text{Fe}^{3+} + \text{Cr}^{3+}$ ，其中 FAS 二價鐵離子從 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ，氧化數改變量為 1，故 $1\text{N} = 1\text{M}$ ，而 Cr^{6+} 還原成 Cr^{3+} ，其氧化數改變量為 3，故 $1\text{N} = \frac{1}{3}\text{M}$ 。所以每消耗 1 莫耳之 FAS 可將 $\frac{1}{3}$ 莫耳 Cr^{6+} 還原成 Cr^{3+} 。

再根據反應式 $\text{Fe}^{6+} + \text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Cr}^{6+}$ ，其中高鐵酸鉀之六價鐵離子從 Fe^{6+} 還原成 Fe^{3+} ，氧化數改變量為 3，故 $1\text{N} = \frac{1}{3}\text{M}$ 。而 $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ 之三價鉻離子從 Cr^{3+} 氧化成 Cr^{6+} ，氧化數改變量為 3，故 $1\text{N} = \frac{1}{3}\text{M}$ 。所以每消耗 1 莫耳之高鐵酸鉀可將 1 莫耳 Cr^{3+} 氧化成 Cr^{6+} 。

參考樣品純度定義如下：

$$\text{參考樣品純度} = \frac{\text{達滴定終點之高鐵酸鉀莫耳數} \times \text{高鐵酸鉀分子量}}{\text{合成之高鐵酸鉀用量}} \times 100\%$$

此算式中的高鐵酸鉀用量為步驟 3 使用的高鐵酸鉀用量，為 0.1g。

3.5.2 參考樣品純度分析

對參考樣品進行純度分析時，已知每消耗 1 莫耳之 FAS 可將 $\frac{1}{3}$ 莫耳 Cr^{6+} 還原成 Cr^{3+} ，而 FAS 滴定體積為 112 ml，故 FAS 消耗之莫耳數為 $0.01 \text{ (M)} \times 0.112 \text{ (L)} = 0.00112 \text{ (mol)}$ ，即可將 $\frac{0.00112}{3} = 0.00037$ mol 的 Cr^{6+} 還原成 Cr^{3+} ，已知每消耗 1 莫耳之高鐵酸鉀可將 1 莫耳 Cr^{3+} 氧化成 Cr^{6+} ，故有 0.00037 莫耳之高鐵酸鉀將 Cr^{3+} 氧化成 Cr^{6+} 。

經由參考樣品純度定義計算：

$$\text{參考樣品純度(\%)} = \frac{0.00037(\text{mol}) \times 198.04(\text{g/mol})}{0.1(\text{g})} \times 100\% = 73.27\%$$

3.5.3 參考樣品 UV 校正曲線

以去離子水為空白樣品當背景值，再用分光光度計測量不同濃度之參考樣品，並做成線性回歸線，其中高鐵酸鉀在 UV 光譜的特徵峰為 510 nm。

其步驟如下：

1. 先取 33.66 g 的 KOH 溶於 100 ml 的去離子水中，配製出 6 M 的 KOH 溶液。
2. 秤量參考樣品 99.02 mg 溶於步驟 1. 的 6 M KOH 溶液，配製出 5 mM 的參考樣品溶液。
3. 將步驟 2. 溶液分別取出 2.5、5、10、15 和 20 ml，再用 6 M 的 KOH 溶液稀釋至 25 ml，其濃度分別為 0.5、1、2、3 和 4 mM。
4. 先以去離子水當空白溶液並校正，再測量不同濃度下，高鐵酸鉀於特徵峰 510 nm 的吸光度。
5. 將吸光度與高鐵酸鉀濃度做線性回歸圖，並得線性回歸線。如圖 13。

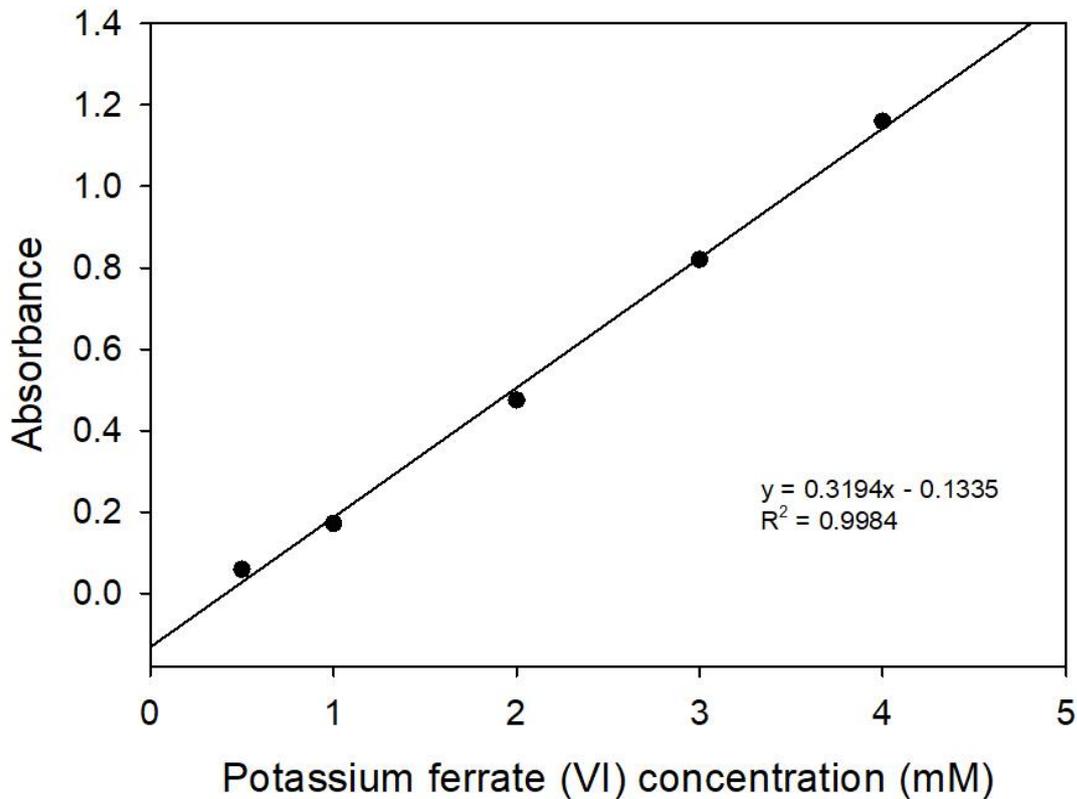


圖 13 高鐵酸鉀吸收強度與濃度之線性回歸圖

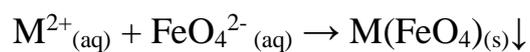
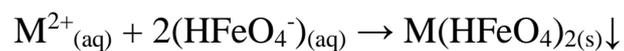
由圖 13 可知，校正曲線得到其決定係數(coefficient of determination) 為 0.9984，表示高鐵酸鉀在濃度 0.5 到 4 mM 之間與吸光強度呈現極高的線性關係。之後未知純度的高鐵酸鉀待測樣品之濃度均配為 4 mM，再將待測樣品與已知純度之濃度 4 mM 的高鐵酸鉀參考樣品的吸光度做比較，即可計算出該樣品之純度。

計算方法如下：

$$\text{高鐵酸鉀樣品純度(\%)} = \frac{\text{高鐵酸鉀樣品吸光度}}{\text{參考樣品吸光度}} \times \text{參考樣品純度(\%)}$$

3.6 重金屬去除

將合成之高鐵酸鉀粉末應用於重金屬去除，本研究重金屬選用鈷、銅、鉻。將藥品配置成重金屬溶液，再加入高鐵酸鉀均勻反應，再利用分光光度器，測量該重金屬溶液在特定的吸收波長，比較反應前與反應後的吸光強度，計算該重金屬去除率。高鐵酸鉀與重金屬溶液反應之去除反應式如下：



3.6.1 鈷、鉻與銅之 UV/Vis 吸收波長

本研究之中金屬去除實驗所使用的重金屬為鈷、鉻與銅，需先確定其在酸性、中性、鹼性環境中的 UV/Vis 吸收波長，才能做去除率的計算。

圖 14 為不同濃度 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ 溶液的 UV-Vis 光譜圖^[37]， Co^{2+} 的 UV-Vis 特徵峰在 510 nm。並沒有文獻明確指出 Co^{2+} 在酸性、中性和鹼性之環境中的吸收波長分別為多少。以本研究的結果為例，圖 15 為 Co^{2+} 在酸性環境下的 UV-Vis 光譜圖，判讀 Co^{2+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 510 nm。圖 16 為 Co^{2+} 在中性環境下的 UV-Vis 光譜圖，判讀 Co^{2+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 510 nm，接近圖 14 的結果。圖 17 為 Co^{2+} 在鹼性環境下的 UV-Vis 光譜圖，判讀 Co^{2+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 638 nm。

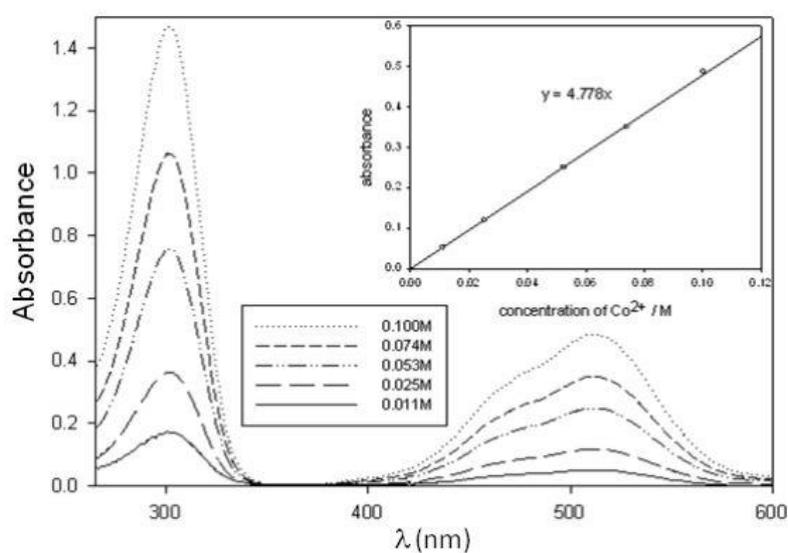


圖 14 Co^{2+} 的 UV-Vis 光譜圖

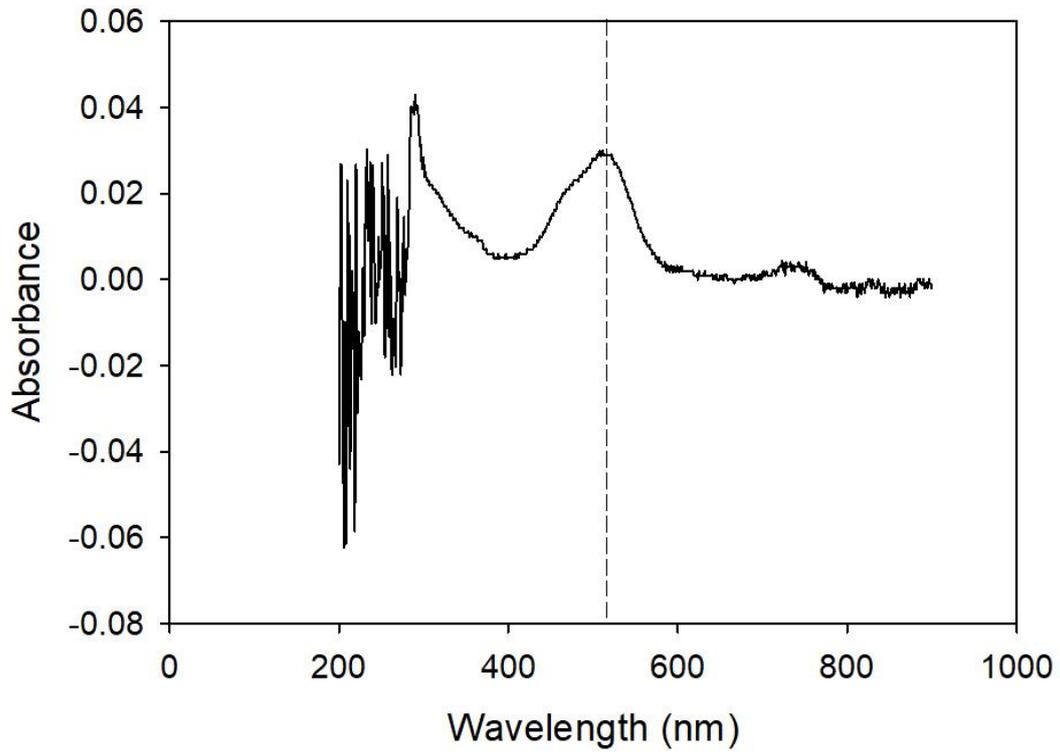


圖 15 Co^{2+} 在酸性環境的 UV/Vis 光譜圖

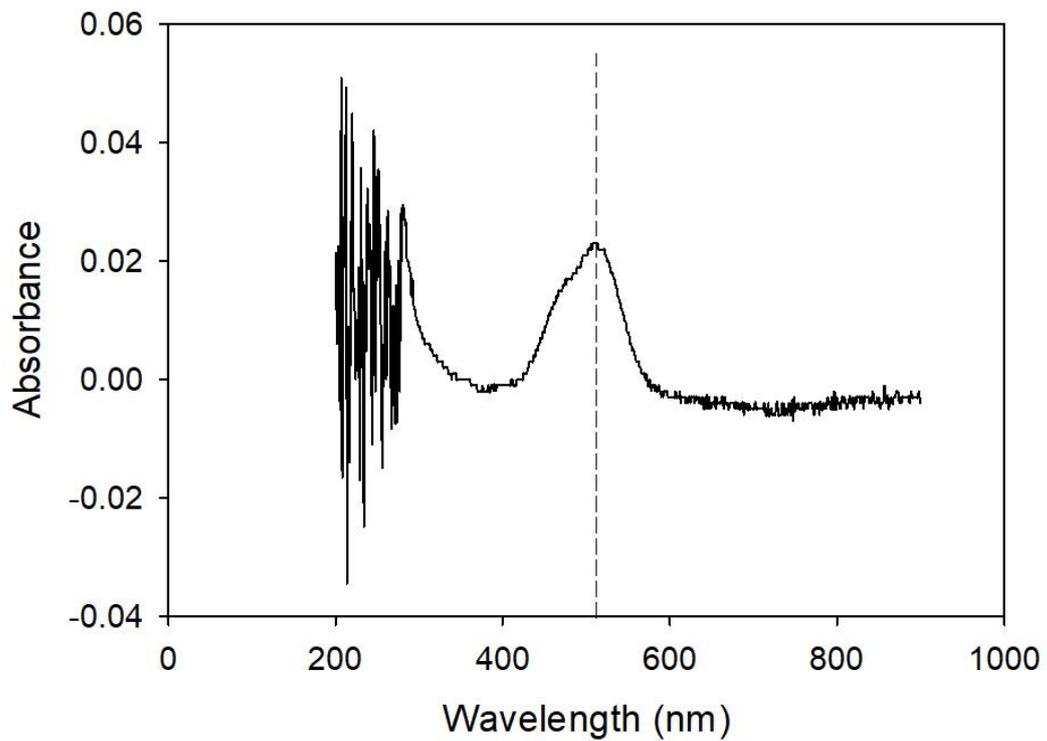


圖 16 Co^{2+} 在中性環境下的 UV-Vis 光譜圖

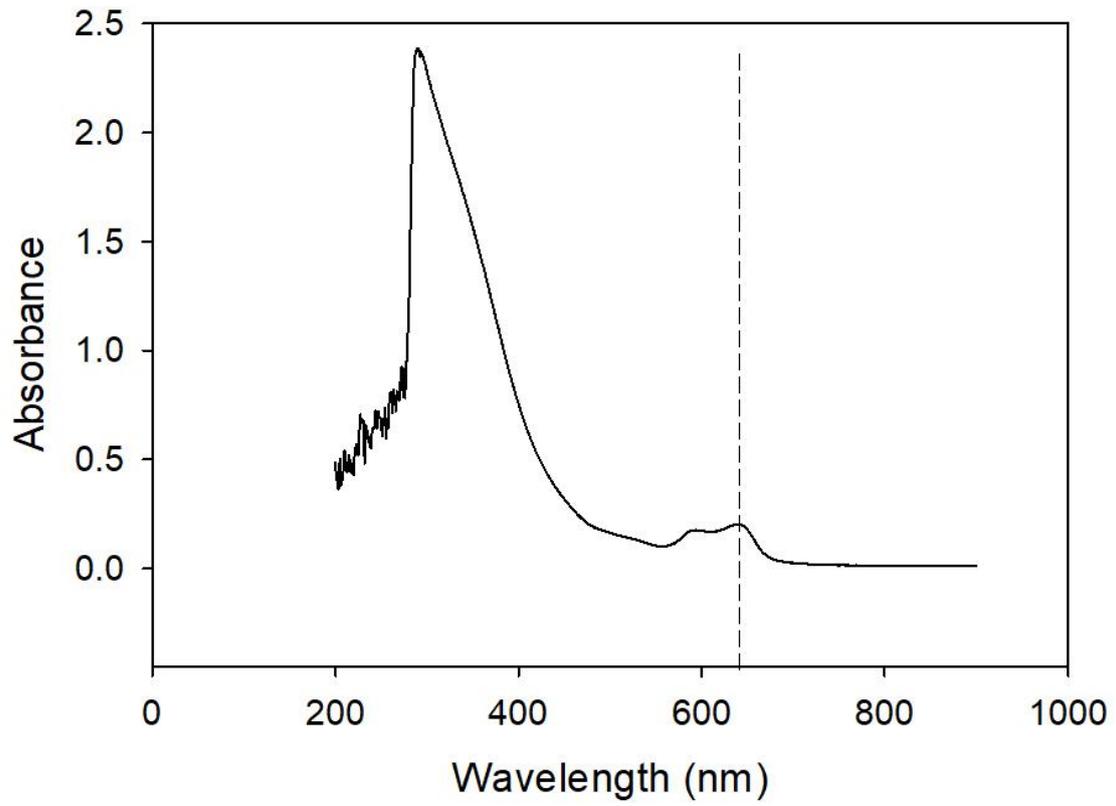


圖 17 Co^{2+} 在鹼性環境下的 UV-Vis 光譜圖

圖 18 為 Cr^{3+} 調配成 0.005 M 之溶液的 UV-Vis 光譜圖^[38]， Cr^{3+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 580 nm。並沒有文獻明確指出 Cr^{3+} 分別在酸性、中性和鹼性之環境中的吸收波長分別為多少。以本研究的結果為例，圖 19 為 Cr^{3+} 在酸性環境下的 UV-Vis 光譜圖，判讀 Cr^{3+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 620 nm。圖 20 為 Cr^{3+} 在中性環境下的 UV-Vis 光譜圖，判讀 Cr^{3+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 600 nm。圖 21 為 Cr^{3+} 在鹼性環境下的 UV-Vis 光譜圖，判讀 Cr^{3+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 580 nm。

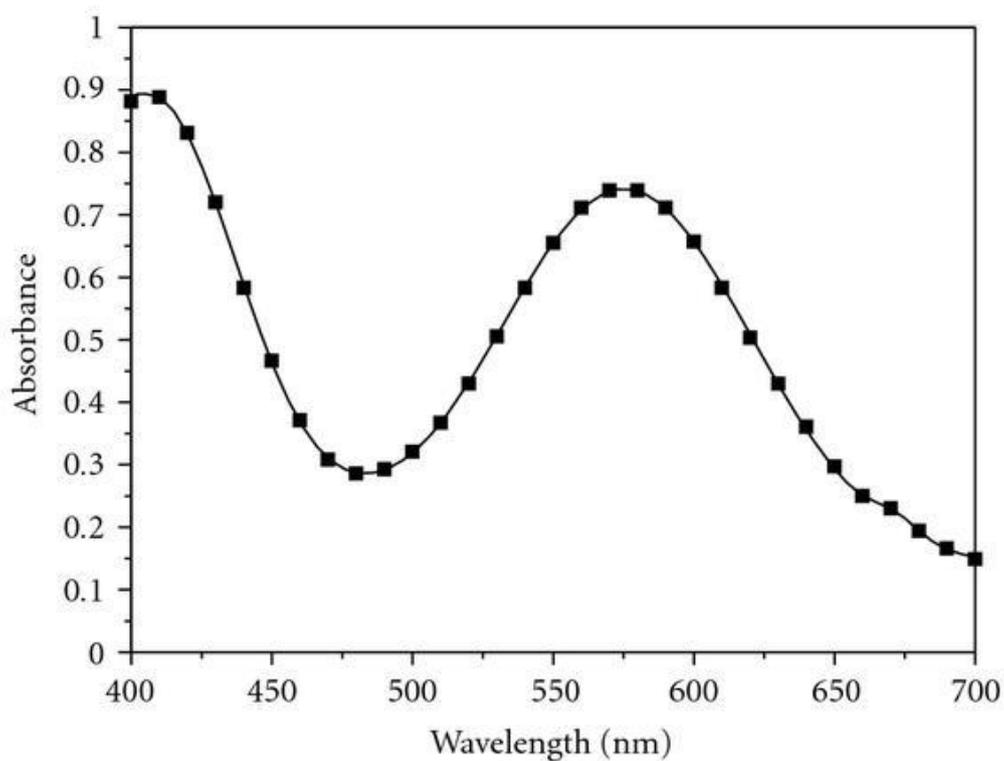


圖 18 Cr^{3+} 的 UV/Vis 光譜圖

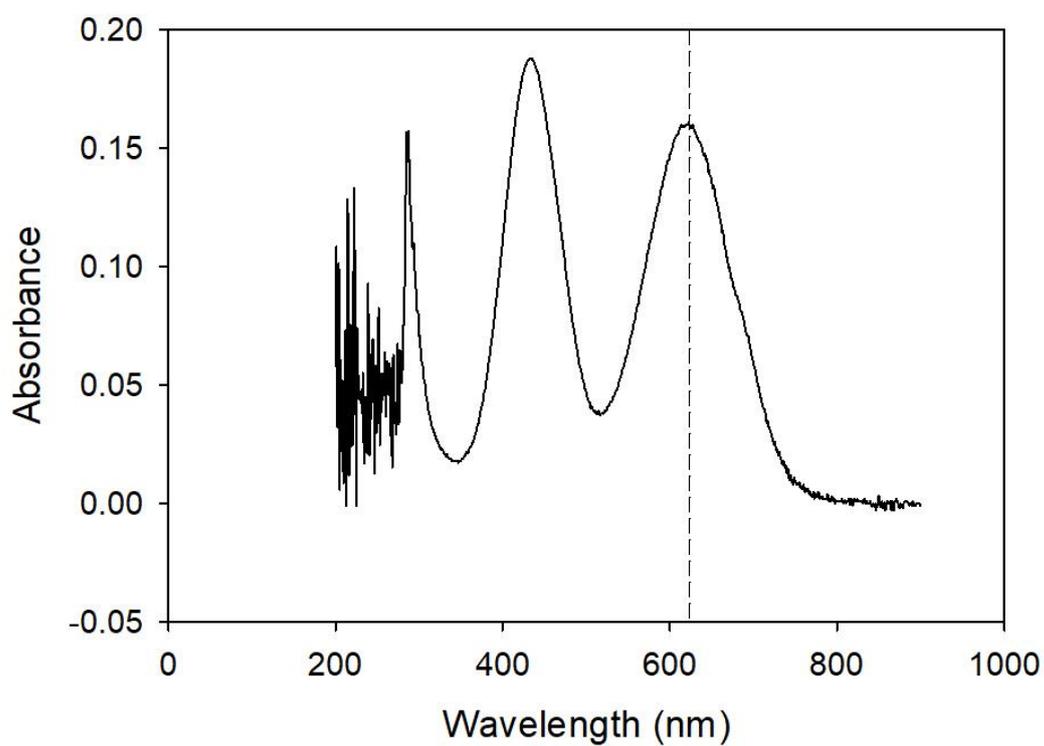


圖 19 Cr^{3+} 在酸性環境的 UV/Vis 光譜圖

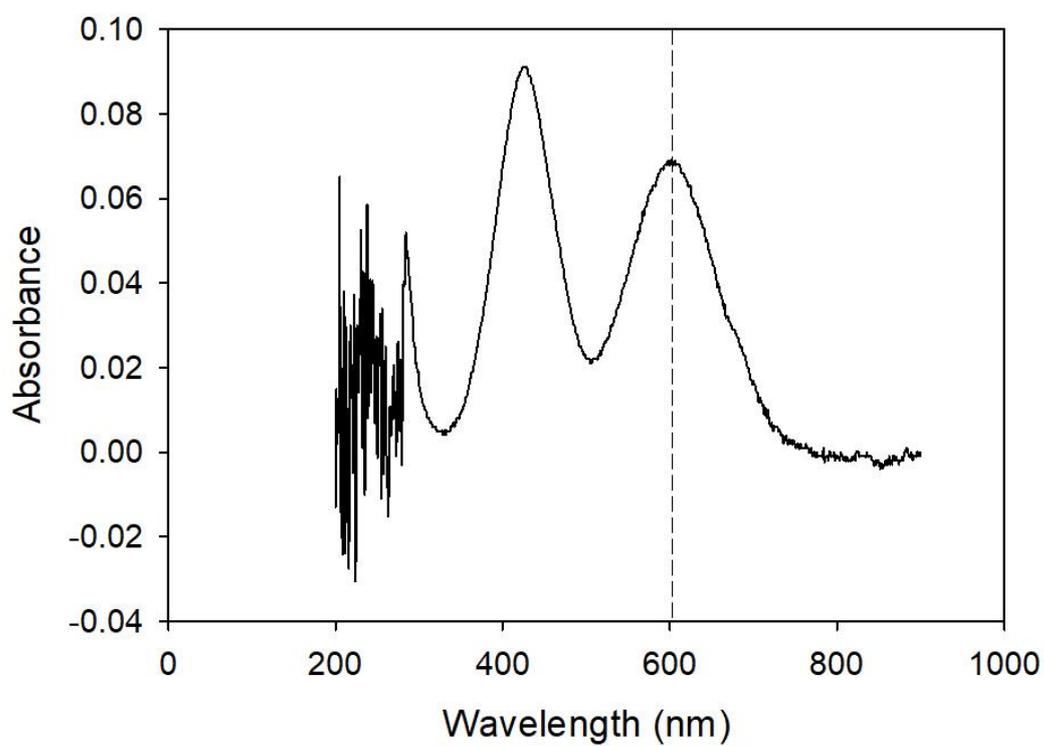


圖 20 Cr^{3+} 在中性環境的 UV/Vis 光譜圖

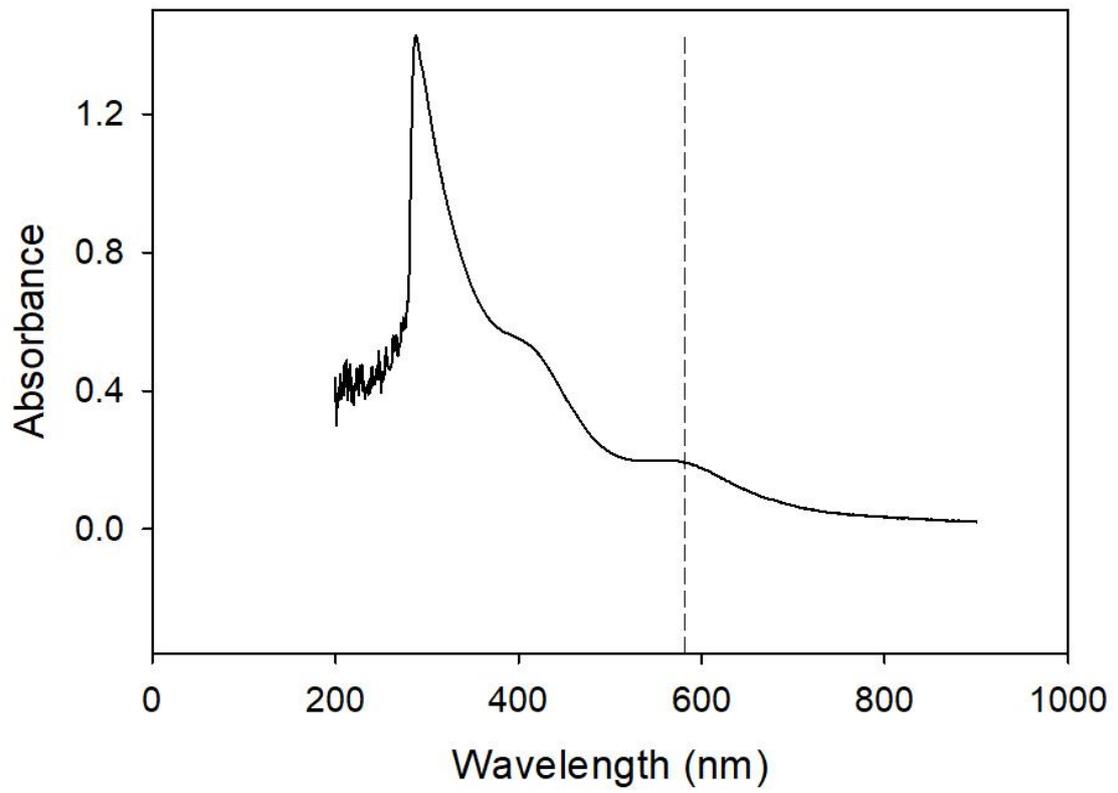


圖 21 Cr³⁺在鹼性環境的 UV/Vis 光譜圖

圖 21 中紫色的線為 CuSO_4 溶液的 UV-Vis 光譜圖^[39]，其中 Cu^{2+} 在此環境為酸性， Cu^{2+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 810 nm。圖 22 中黑色的線為 $\text{CuSO}_4 + \text{TMAH}$ 之溶液的 UV-Vis 光譜圖，其中 Cu^{2+} 在此環境為鹼性， Cu^{2+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 670 nm。圖 23 為 Cu^{2+} 之溶液的 UV-Vis 光譜圖^[39]，其中 Cu^{2+} 在此環境為 pH 7.5 接近中性， Cu^{2+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 720 nm。以本研究的結果為例，圖 24 為 Cu^{2+} 在酸性環境下的 UV-Vis 光譜圖，判讀 Cu^{2+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 800 nm，接近圖 22 的結果。圖 25 為 Cu^{2+} 在中性環境下的 UV-Vis 光譜圖，判讀 Cu^{2+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 720 nm，接近圖 22 的結果。圖 26 為 Cu^{2+} 在鹼性環境下的 UV-Vis 光譜圖，判讀 Cu^{2+} 的 UV-Vis 吸收波長約為 670 nm，接近圖 21 的結果。

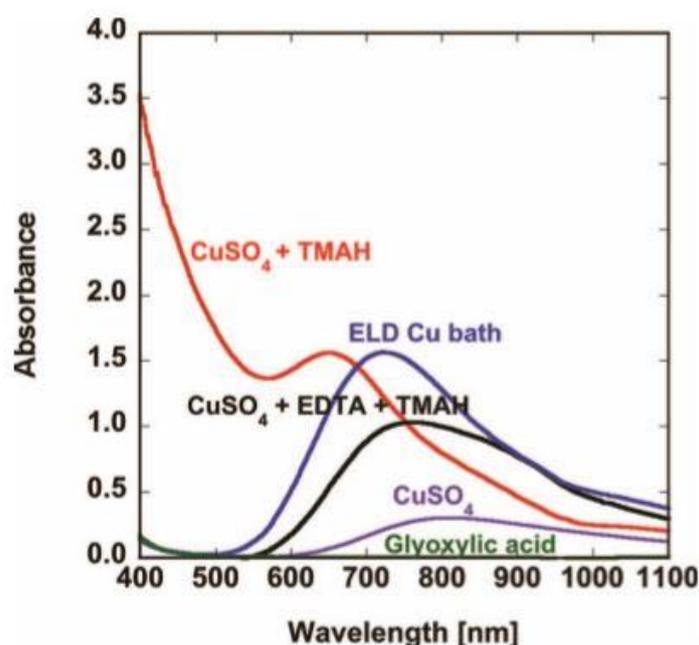


圖 22 Cu^{2+} 的 UV/Vis 光譜圖

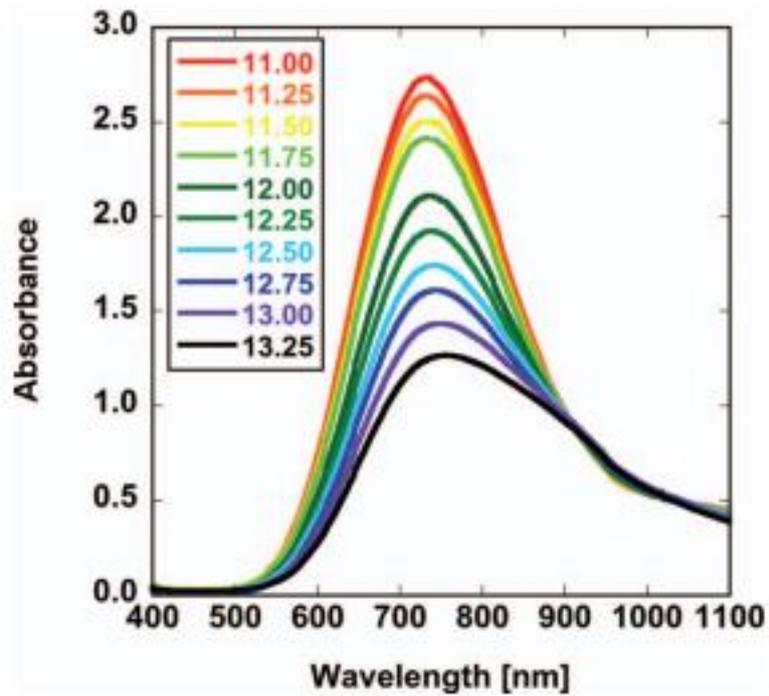


圖 23 Cu^{2+} 的 UV/Vis 光譜圖

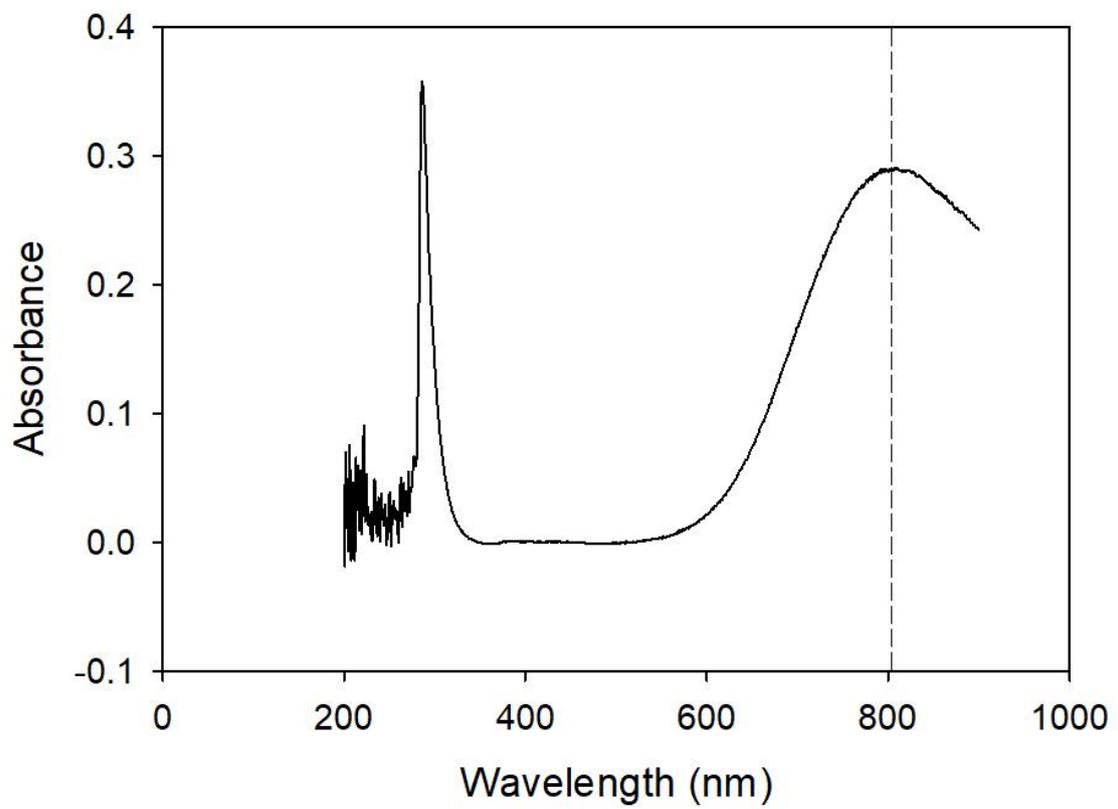


圖 24 Cu^{2+} 在酸性環境的 UV/Vis 光譜圖

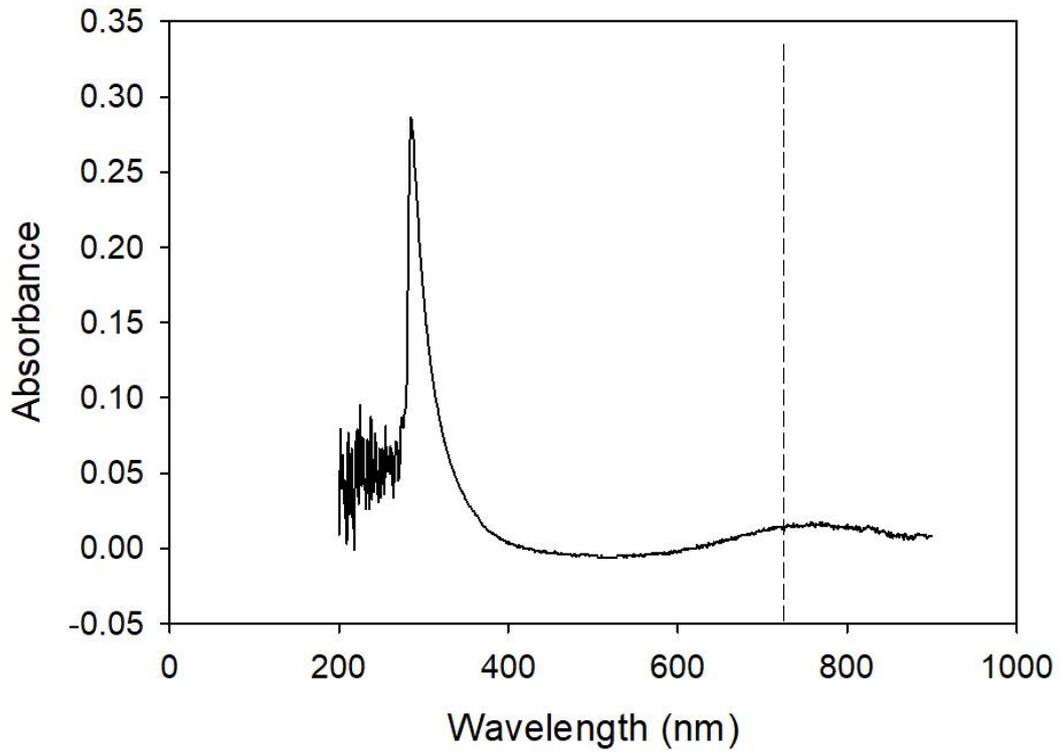


圖 25 Cu^{2+} 在中性環境的 UV/Vis 光譜圖

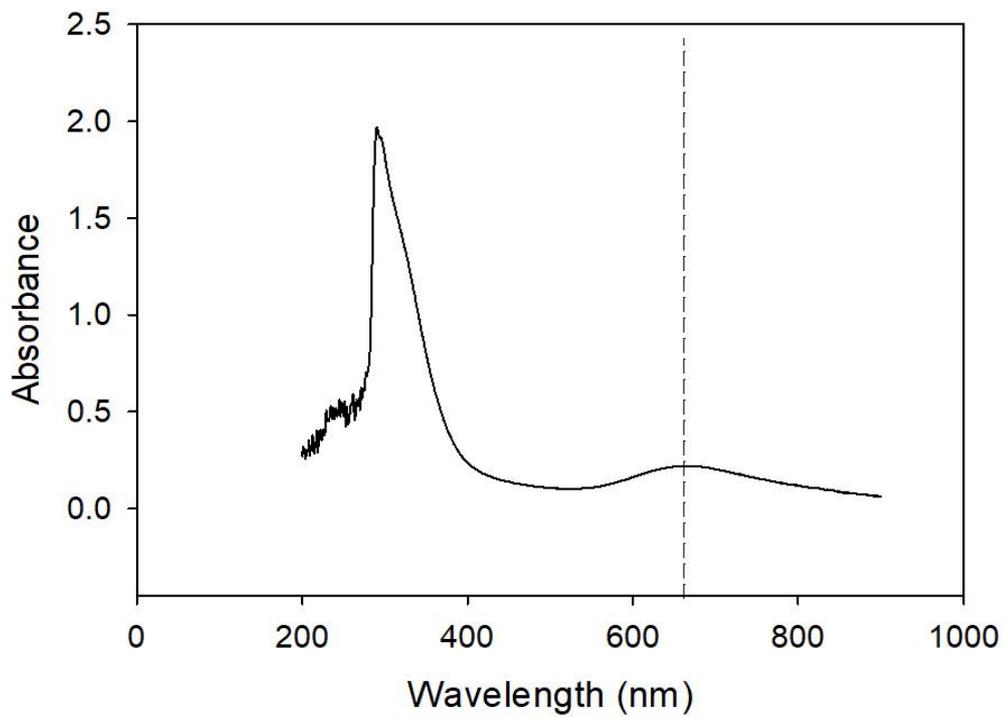


圖 26 Cu^{2+} 在鹼性環境的 UV/Vis 光譜圖

3.6.1 重金屬溶液配製

選用三種重金屬化合物分別是六水合三氯化鉻、醋酸鈷四水合物及醋酸銅一水合物，配製成七種不同混合方式的重金屬溶液，如表 4。所有溶液皆是將中金屬化合物溶於去離子水中，不同成分之重金屬溶液濃度皆為 5 mM。

表 4 不同成份之重金屬溶液

重金屬溶液編號	不同成分之重金屬溶液(5 mM)
A	Co^{2+}
B	Cr^{3+}
C	Cu^{2+}
D	$\text{Co}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$
E	$\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$
F	$\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$
G	$\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$

上述配製好的重金屬溶液，添加硫酸與乙醇胺調整其 pH 值，分別配製成酸性、中性與鹼性三種環境的重金屬溶液，如表 5。再添加高鐵酸鉀，找出每組溶液的重金屬要達到 100% 去除率所需要的高鐵酸鉀之最低用量。

表 5 調整 pH 值後之重金屬溶液

重金屬溶液編號		5 mM 重金屬溶液之 pH 值
A (Co ²⁺)	A1	3.0
	A2	7.0
	A3	10.0
B (Cr ³⁺)	B1	3.0
	B2	7.0
	B3	10.0
C (Cu ²⁺)	C1	3.0
	C2	7.0
	C3	10.0
D (Co ²⁺ /Cu ²⁺)	D1	3.0
	D2	7.0
	D3	10.0
E (Cr ³⁺ /Cu ²⁺)	E1	3.0
	E2	7.0
	E3	10.0
F (Co ²⁺ /Cr ³⁺)	F1	3.0
	F2	7.0
	F3	10.0
G (Co ²⁺ /Cr ³⁺ /Cu ²⁺)	G1	3.0
	G2	7.0
	G3	10.0

3.6.3 重金屬去除實驗步驟

重金屬去除之實驗步驟如下^[40]：

1. 配製重金屬溶液，並取 100 ml 溶液待反應。
2. 添加高鐵酸鉀粉末進行反應。
3. 在 360 rpm 和 20°C 下攪拌 1 分鐘進行反應。
4. 在 60 rpm 和 20°C 下攪拌 20 分鐘使金屬化合物沉澱。
5. 將反應完成後之重金屬溶液以孔徑 0.5 μm 玻纖濾紙抽氣過濾。
6. 將反應前重金屬溶液與反應後之濾液利用 UV-Vis 測量重金屬於特徵峰的吸光度。

3.6.4 去除率計算

先將反應前的重金屬溶液利用 UV/Vis 做定性分析來確認重金屬的種類，同時做定量分析得到反應前的吸光強度，再將反應後之濾液利用 UV/Vis 做定量分析得到反應後的吸光強度，最後將反應前及反應後的吸光度進行去除率的計算。

去除率定義如下：

$$\text{去除率(\%)} = \frac{\text{反應前吸光度} - \text{反應後吸光度}}{\text{反應前吸光度}} \times 100\%$$

第四章 結果與討論

4.1 高鐵酸鉀產率與純度

4.1.1 高鐵酸鉀產率

本實驗以次氯酸氧化法來合成高鐵酸鉀，實驗合成之高鐵酸鉀產率整理如表 6。

表 6 合成之高鐵酸鉀產率

高鐵酸鉀合成編號	產率(%)	高鐵酸鉀合成編號	產率(%)
1	25.80	11	32.42
2	27.24	12	37.63
3	27.86	13	32.78
4	31.26	14	30.63
5	35.89	15	27.29
6	22.06	16	31.91
7	28.26	17	38.52
8	23.59	18	37.51
9	17.65	19	33.46
10	24.49	20	40.12

從表 6 可以看出，產率最高到 40.12%，最低只有 17.65%，而大多落在 25-35%。產率偏高時，推測原因為反應溫度過低，導致反應時會有 KOH 結晶的產生；產率偏低時，推測原因可能為反應溫度偏高，導致 KOH 未達飽和狀態，導致高鐵酸鉀無法完全吸出，所以需要將合成後的高鐵酸鉀再進一步進行純度分析。

4.1.2 高鐵酸鉀純度

先利用鉻滴定法來設定高鐵酸鉀的純度，達滴定終點時，溶液顏色由紫黑色轉變成淡綠色，如圖 27。

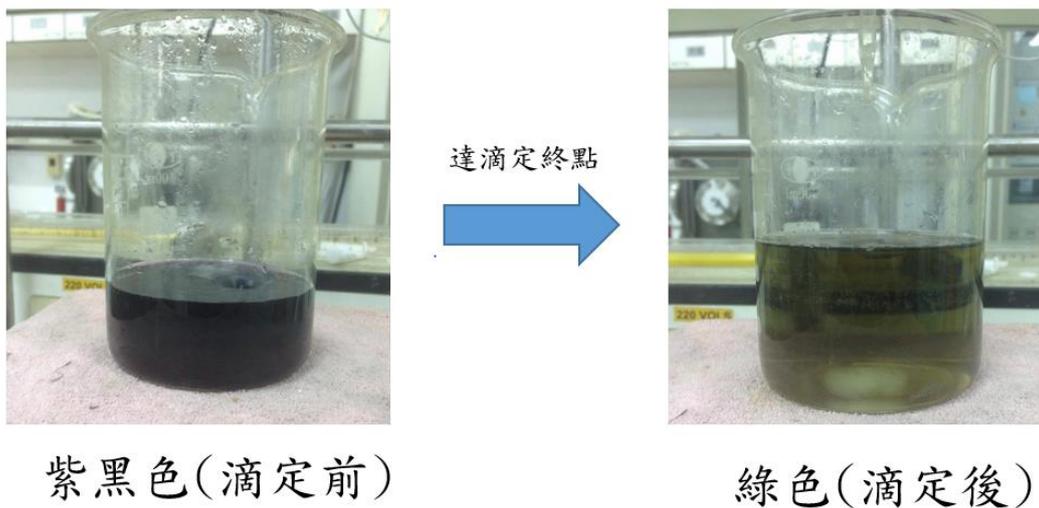


圖 27 鉻滴定法達滴定終點時的變色情形

達滴定終點時，顏色變化明顯，判讀上非常簡單。由硫酸亞鐵銨滴定後，利用消耗的體積來計算合成之高鐵酸鉀之純度。實驗純度計算結果如表 7。

表 7 合成之高鐵酸鉀純度

高鐵酸鉀合成編號	純度(%)	高鐵酸鉀合成編號	純度(%)
1	41.91	11	71.09
2	52.14	12	63.37
3	51.40	13	65.84
4	58.09	14	60.72
5	65.04	15	66.15
6	64.59	16	80.62
7	75.25	17	75.84
8	70.92	18	82.78
9	65.45	19	85.64
10	72.61	20	78.25

合成之高鐵酸鉀純度，最高可達 85.64%，而編號較前的高鐵酸鉀純度偏低，可能為製備手法不夠熟練所造成。純度大部分都在 60% 以上，而理想的實驗結果為高產率與高純度的產物，因此定義鐵源 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 之三價鐵轉換成六價鐵的總效率為：

$$\text{總效率}(\%) = \text{產率}(\%) \times \text{純度}(\%)$$

總效率經整理後如表 8 所示。

表 8 高鐵酸鉀合成之總效率

高鐵酸鉀合成編號	產率(%)	純度(%)	總效率(%)
1	25.80	41.91	10.81
2	27.24	52.14	14.20
3	27.86	51.40	14.32
4	31.26	58.09	18.16
5	35.89	65.04	23.34
6	22.06	64.59	14.25
7	28.26	75.25	21.27
8	23.59	70.92	16.73
9	17.65	65.45	11.55
10	24.49	72.61	17.78
11	32.42	71.09	23.05
12	37.63	63.37	23.85
13	32.78	65.84	21.58
14	30.63	60.72	18.60
15	27.29	66.15	18.05
16	31.91	80.62	25.73
17	38.52	75.84	29.21
18	37.51	82.78	31.05
19	33.46	85.64	28.66
20	40.12	78.25	31.39

4.2 重金屬去除

將高鐵酸鉀粉末與重金屬溶液混合反應，再利用 UV-Vis 測量重金屬再特定波長的吸收強度，比較反應前與反應後的吸光強度，計算其去除率。

4.2.1 單一成分溶液之重金屬去除

(1) 單一 Co^{2+} 溶液

重金屬溶液 A1 為單一 Co^{2+} 溶液在 pH 3.0 的環境下，為了找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 9 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 28 所示。圖 28 顯示，在 510 nm 有一明顯特徵峰。

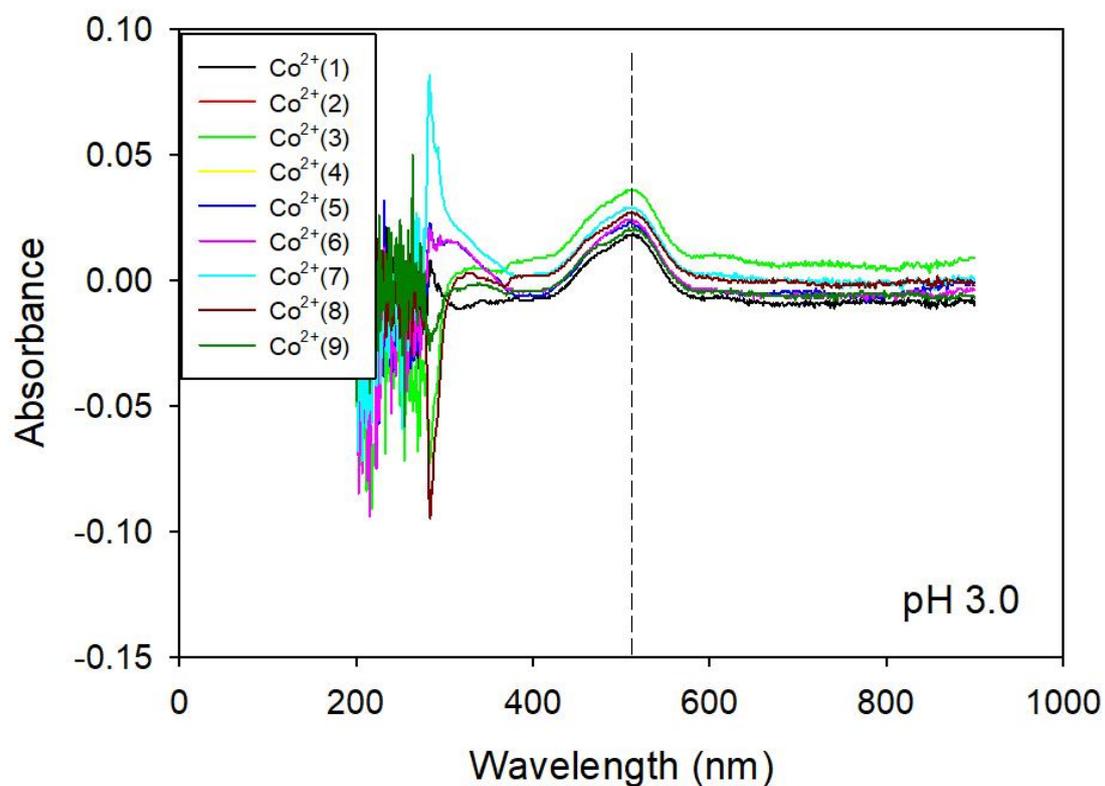


圖 28 重金屬溶液 A1 反應前之 UV-Vis 光譜圖

9 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 29 所示。由圖 29 可看出， Co^{2+} 在 510 nm 的吸光度隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

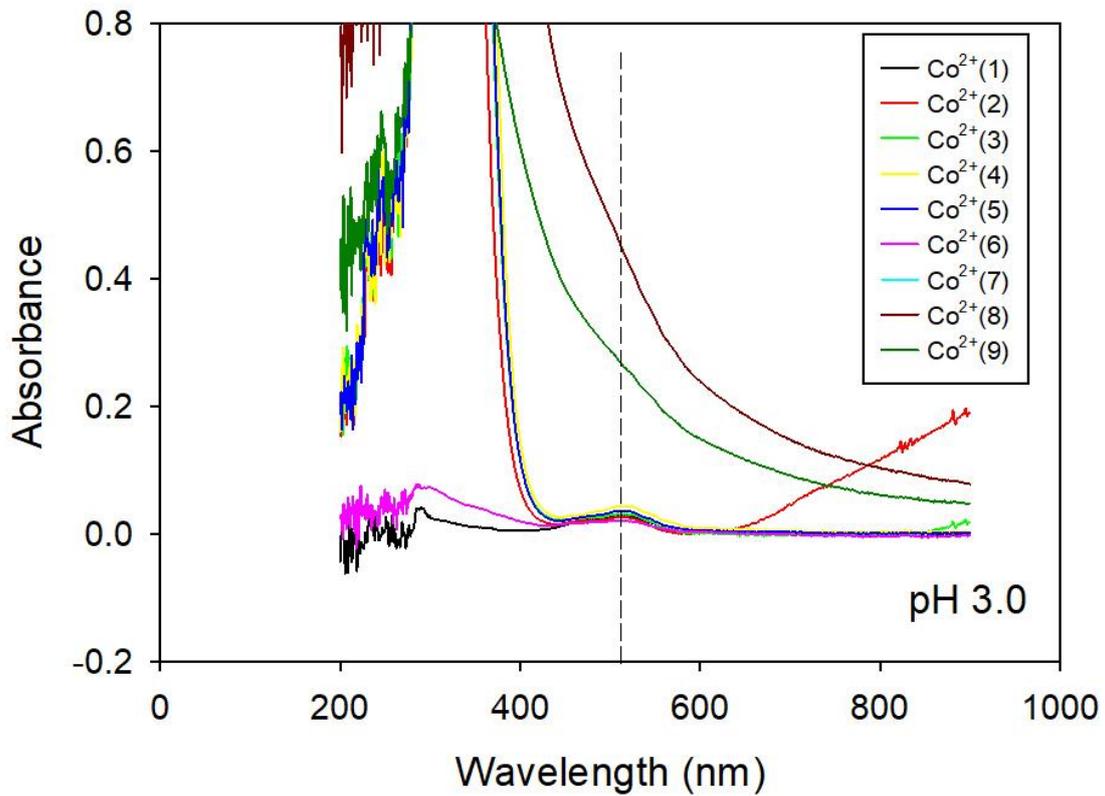


圖 29 重金屬溶液 A1 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 A1 之 Co^{2+} 去除率計算結果如表 9。圖 30 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 A1 中的 Co^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 14.5 mM 時， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 9 重金屬溶液 A1 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Co^{2+} 反應前 吸光度	Co^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	2	0.029	0.015	48.27
2	4	0.078	0.025	67.95
3	8	0.021	0.006	71.43
4	10	0.037	0.009	75.68
5	12.5	0.033	0.006	81.81
6	14	0.028	0.005	82.14
7	14.5	0.029	0	100
8	15	0.022	0	100
9	20	0.022	0	100

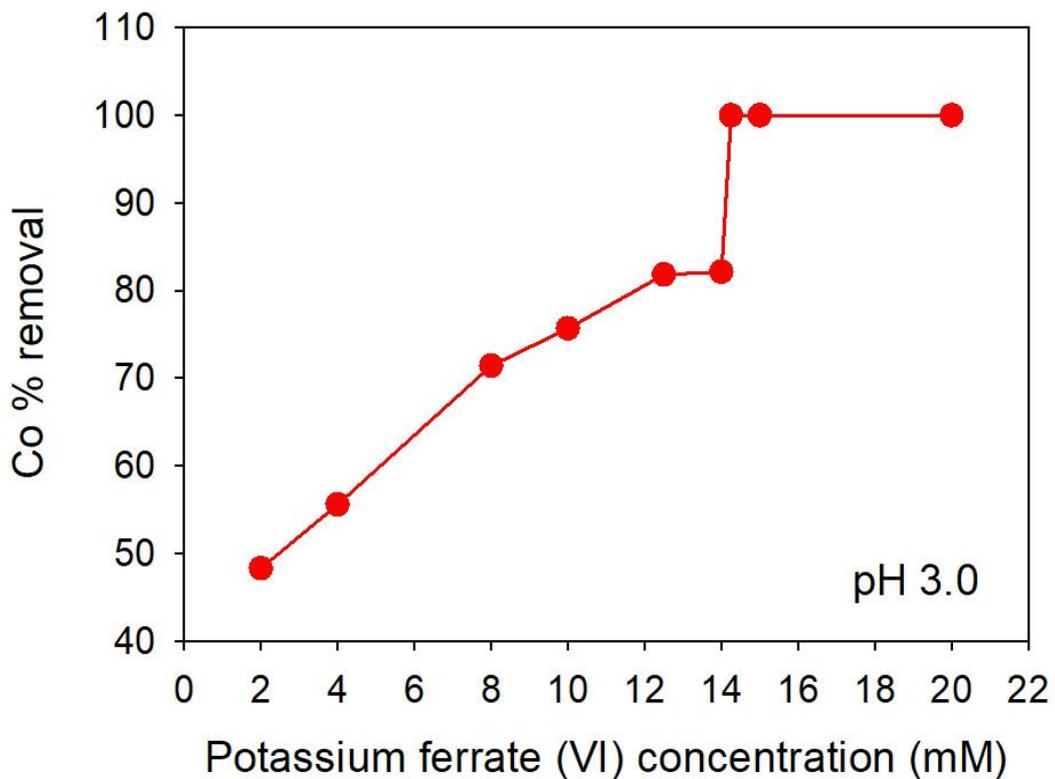


圖 30 重金屬溶液 A1 之 Co^{2+} 去除率

重金屬溶液 A2 為單一 Co^{2+} 溶液在 pH 7.0 的環境下，為了找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 7 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 31 所示。圖 31 顯示，在 510 nm 有一明顯特徵峰。

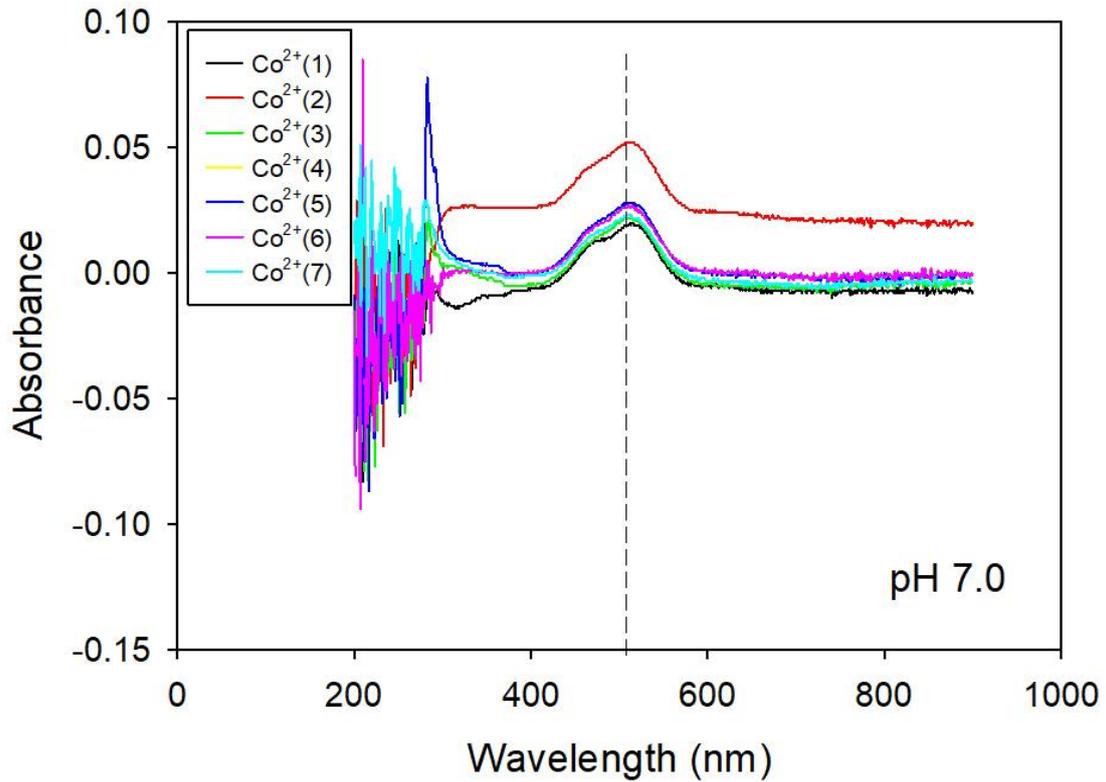


圖 31 重金屬溶液 A2 反應前之 UV-Vis 光譜圖

7 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 32 所示。由圖 32 可看出， Co^{2+} 在 510 nm 的吸光度隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

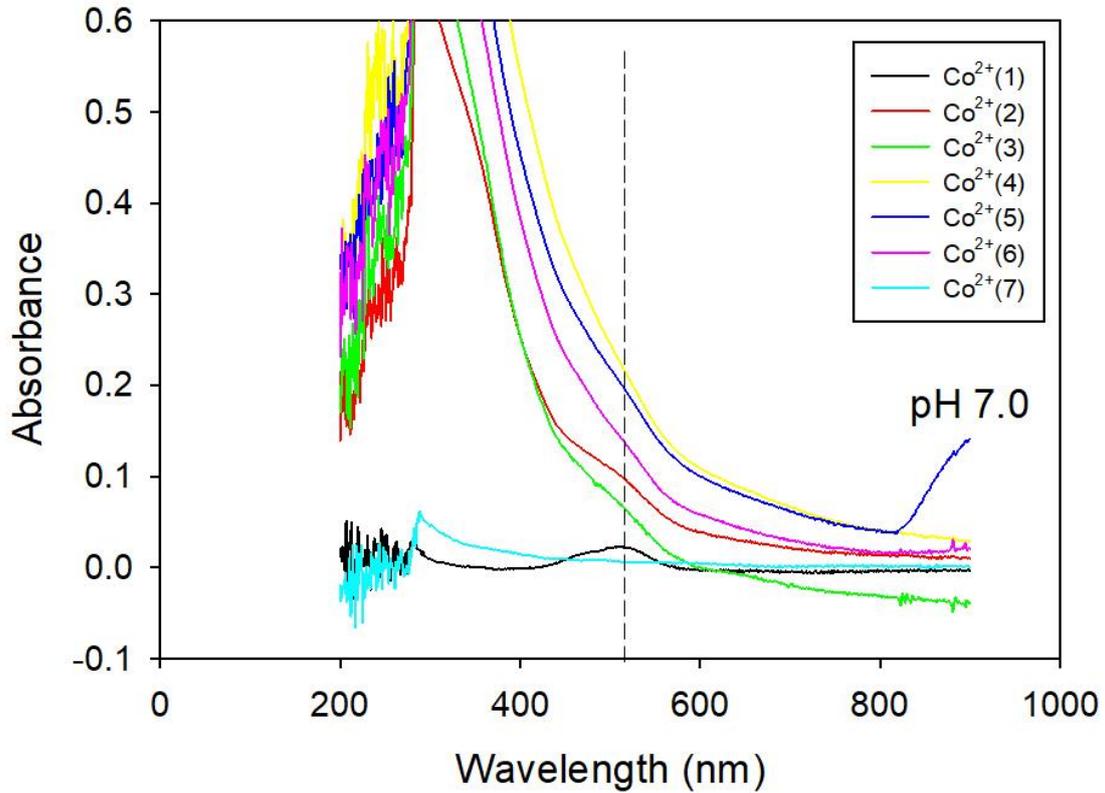


圖 32 重金屬溶液 A2 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 A2 之 Co^{2+} 去除率計算結果如表 10。圖 33 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 A1 中的 Co^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 0.3 mM 時， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 10 重金屬溶液 A2 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Co^{2+} 反應前 吸光度	Co^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.2	0.024	0.010	58.33
2	0.25	0.026	0.003	88.46
3	0.3	0.020	0	100
4	0.5	0.028	0	100
5	0.75	0.027	0	100
6	1	0.023	0	100
7	2	0.022	0	100

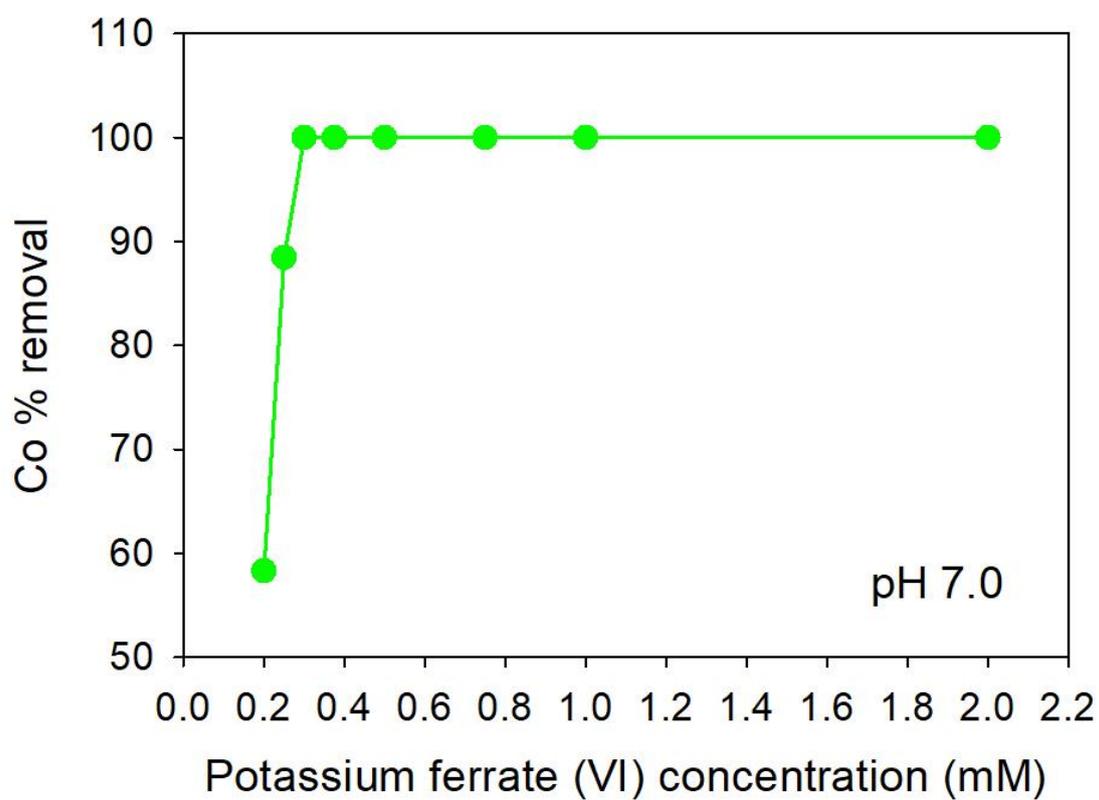


圖 33 重金屬溶液 A2 之 Co^{2+} 去除率

重金屬溶液 A3 為單一 Co^{2+} 溶液在 pH 10.0 的環境下，為了找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 9 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 34 所示。圖 34 顯示，在 638 nm 有一明顯特徵峰。

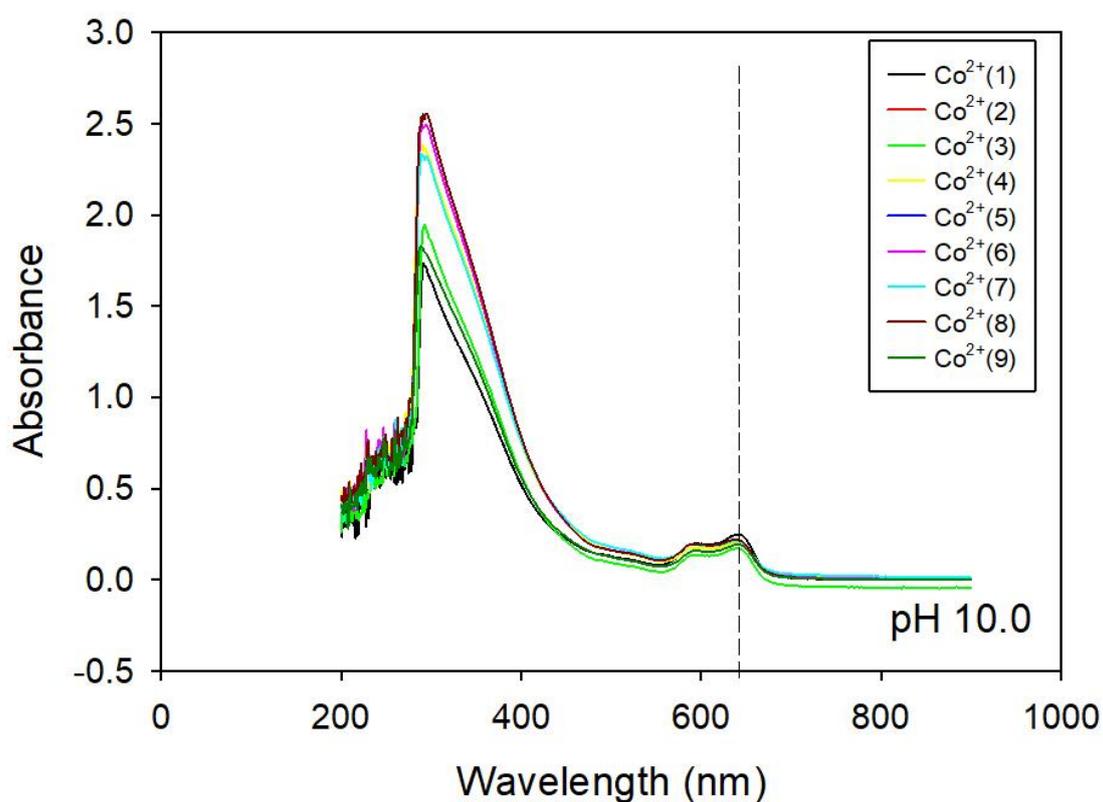


圖 34 重金屬溶液 A3 反應前之 UV-Vis 光譜圖

9 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 35 所示。由圖 35 可看出， Co^{2+} 在 638 nm 的吸光度隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

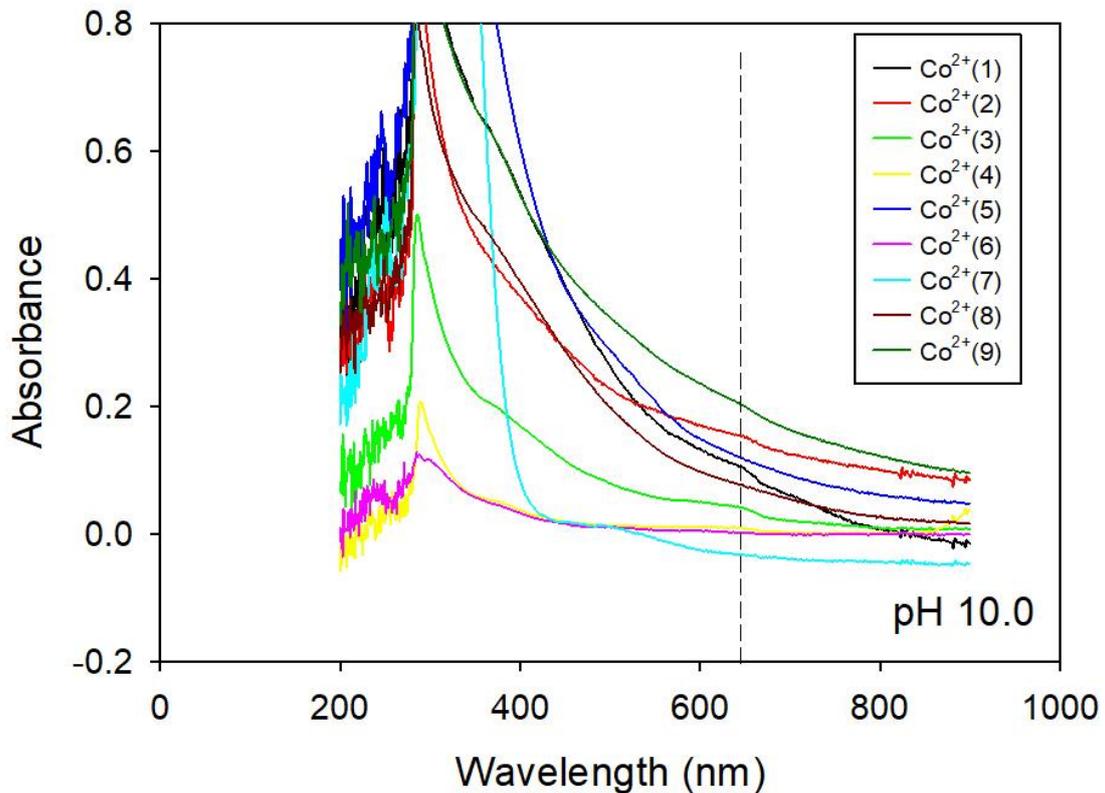


圖 35 重金屬溶液 A3 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 A3 之 Co^{2+} 去除率計算結果如表 11。圖 36 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 A1 中的 Co^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 5.125 mM 時， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 11 重金屬溶液 A3 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Co^{2+} 反應前 吸光度	Co^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	2	0.062	0.006	90.14
2	3	0.125	0.007	94.40
3	4	0.120	0.005	95.83
4	5	0.126	0.004	96.82
5	5.125	0.175	0	100
6	5.25	0.117	0	100
7	5.5	0.138	0	100
8	6	0.108	0	100
9	8	0.128	0	100

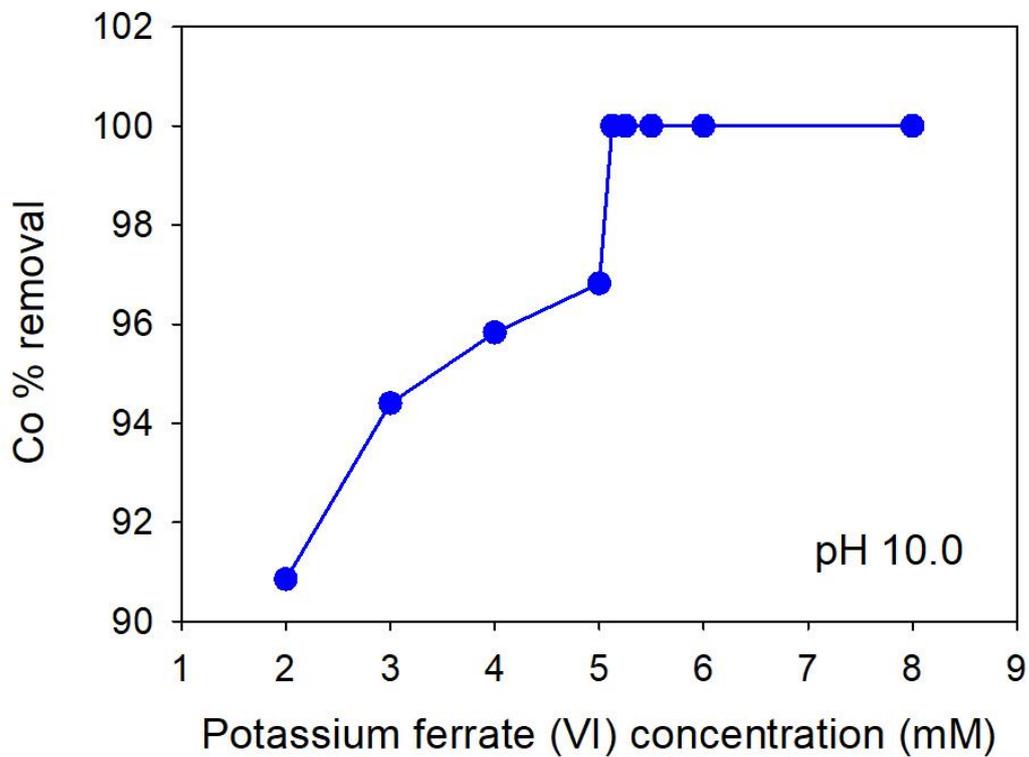


圖 36 重金屬編號 A3 之 Co^{2+} 去除率

2. 單一 Cr^{3+} 溶液

重金屬溶液 B1 為單一 Cr^{3+} 溶液在 pH 3.0 的環境下，為了找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 9 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 37 所示。圖 37 顯示，在 620 nm 有一明顯特徵峰。

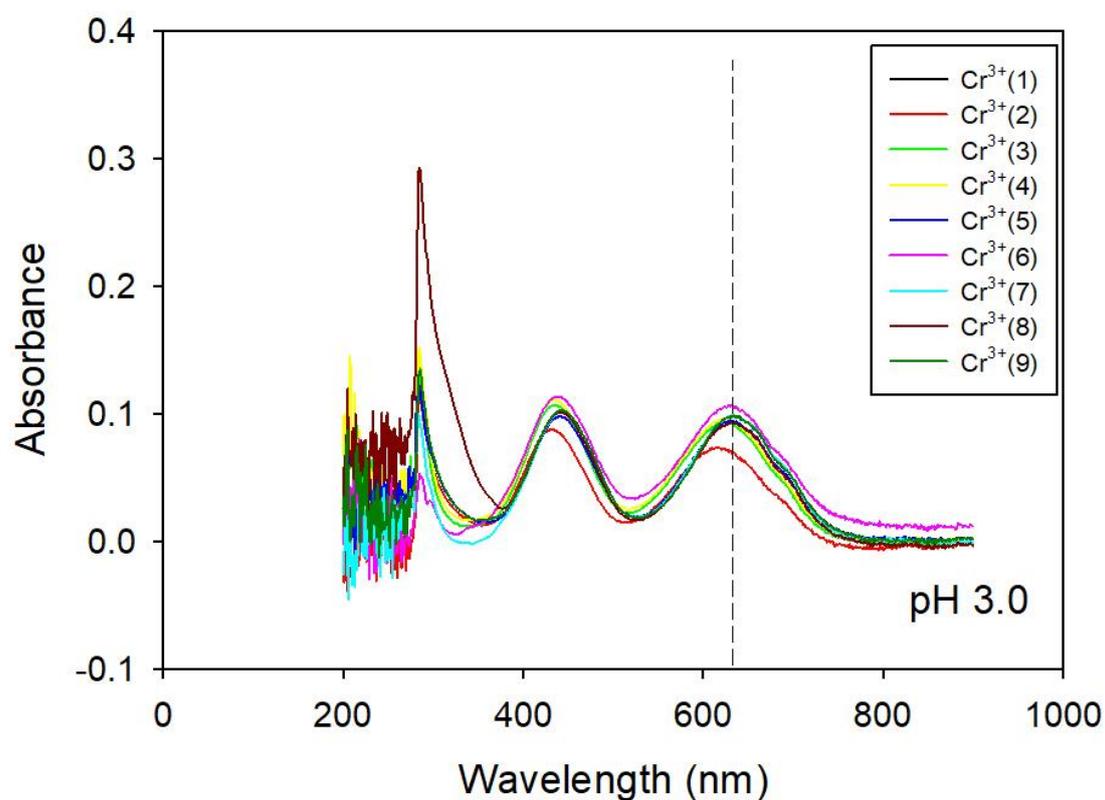


圖 37 重金屬溶液 B1 反應前之 UV-Vis 光譜圖

9 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 38 所示。由圖 38 可看出， Cr^{3+} 在 620 nm 的吸光度隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

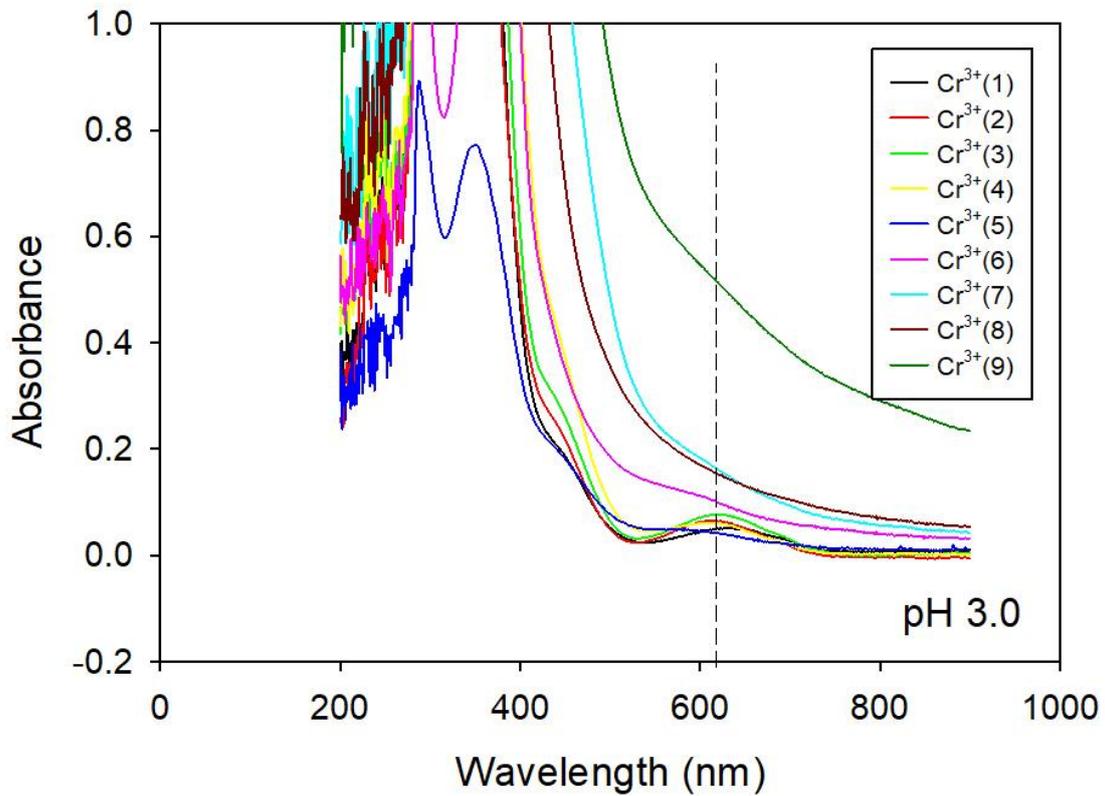


圖 38 重金屬溶液 B1 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 B1 之 Cr^{3+} 去除率計算結果如表 12。圖 39 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 B1 中的 Cr^{3+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 13 mM 時， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%。

表 12 重金屬溶液 B1 之 Cr³⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cr ³⁺ 反應前 吸光度	Cr ³⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	2	0.029	0.0106	69.49
2	4	0.078	0.025	67.98
3	8	0.098	0.027	72.49
4	10	0.096	0.021	78.16
5	12.5	0.098	0.016	83.67
6	13	0.097	0	100
7	13.75	0.099	0	100
8	15	0.106	0	100
9	20	0.093	0	100

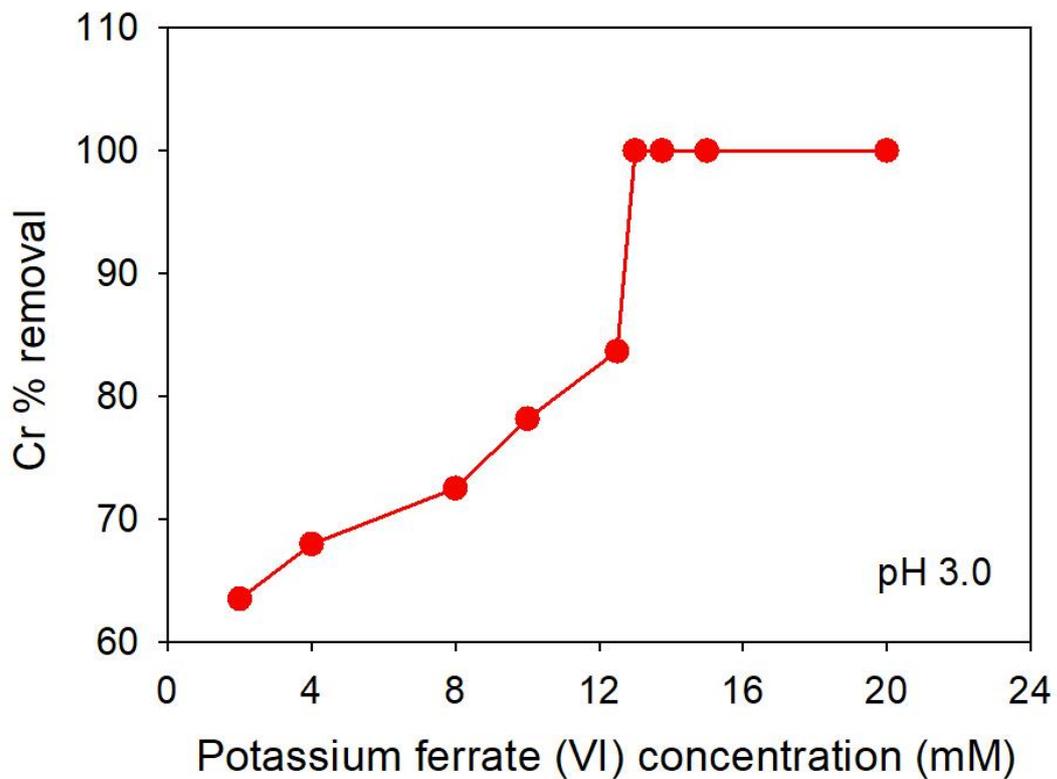


圖 39 重金屬溶液 B1 之 Cr³⁺ 去除率

重金屬溶液 B2 為單一 Cr^{3+} 溶液在 pH 7.0 的環境下，為了找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 7 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 40 所示。圖 40 顯示，在 600 nm 有一明顯特徵峰。

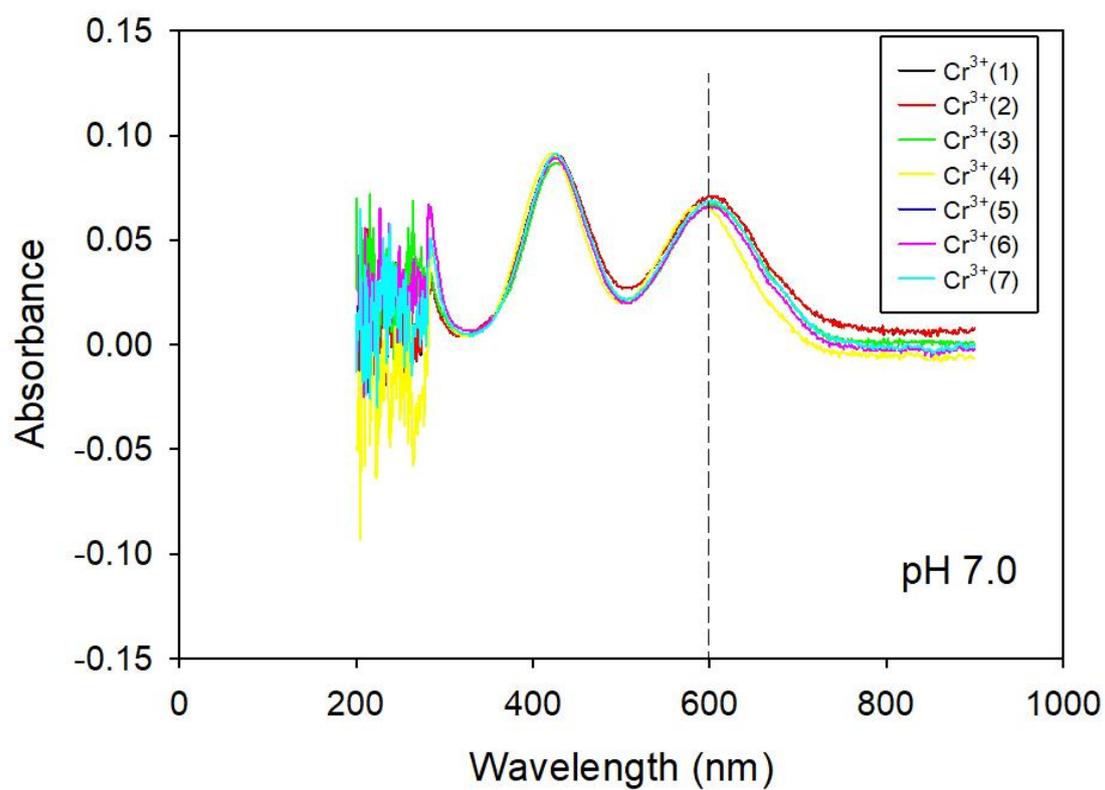


圖 40 重金屬溶液 B2 反應前之 UV-Vis 光譜圖

7 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 41 所示。由圖 41 可看出， Cr^{3+} 在 600 nm 的吸光度隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

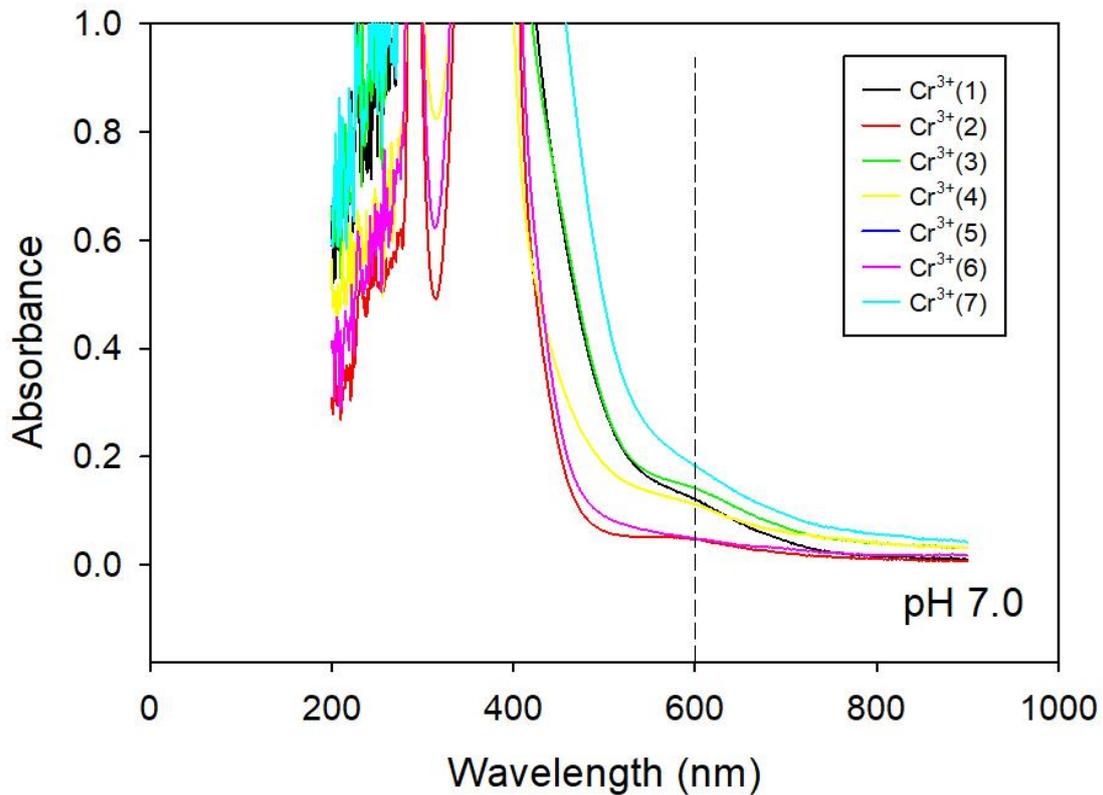


圖 41 重金屬溶液 B2 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 B2 之 Cr^{3+} 去除率計算結果如表 13。圖 42 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 B2 中的 Cr^{3+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 2.75 mM 時， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%。

表 13 重金屬溶液 B2 之 Cr^{3+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cr^{3+} 反應前 吸光度	Cr^{3+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	1	0.068	0.027	60.29
2	2	0.075	0.020	74.37
3	2.5	0.065	0.007	89.23
4	2.625	0.070	0.005	92.89
5	2.75	0.070	0	100
6	3	0.065	0	100
7	4	0.046	0	100

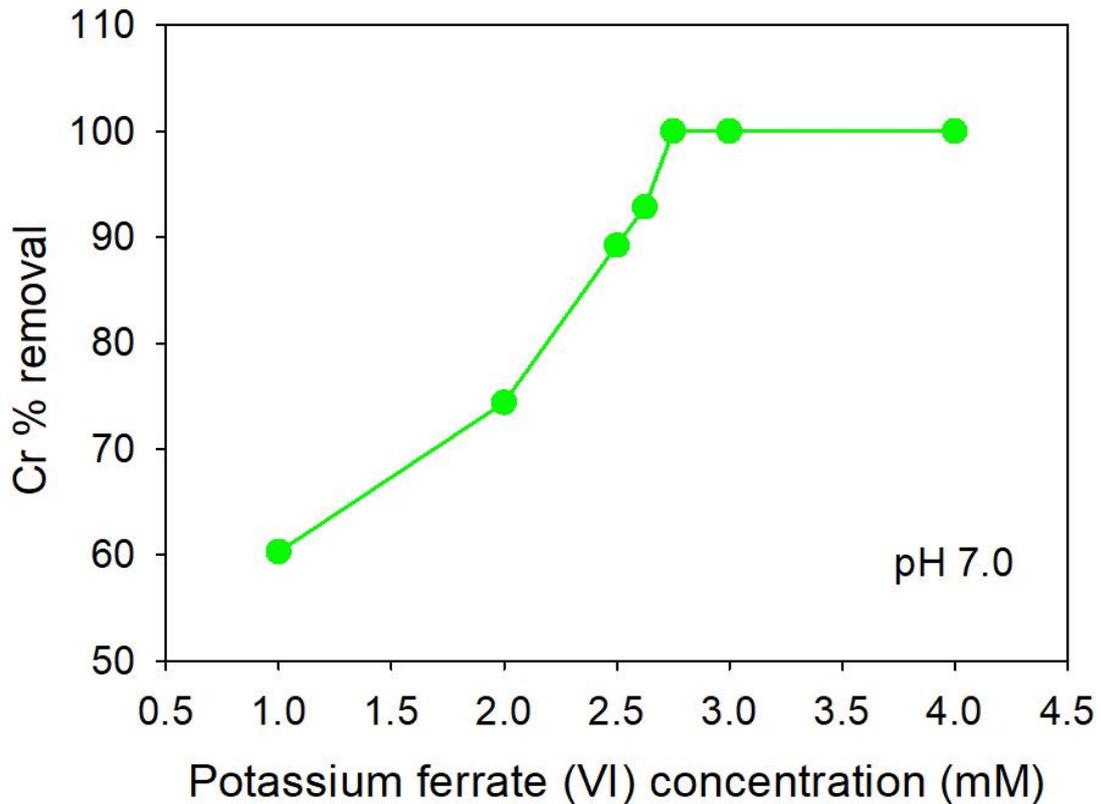


圖 42 重金屬溶液 B2 之 Cr^{3+} 去除率

重金屬溶液 B3 為單一 Cr^{3+} 溶液在 pH 10.0 的環境下，為了找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 6 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 43 所示。圖 43 顯示，在 580 nm 有一明顯特徵峰。

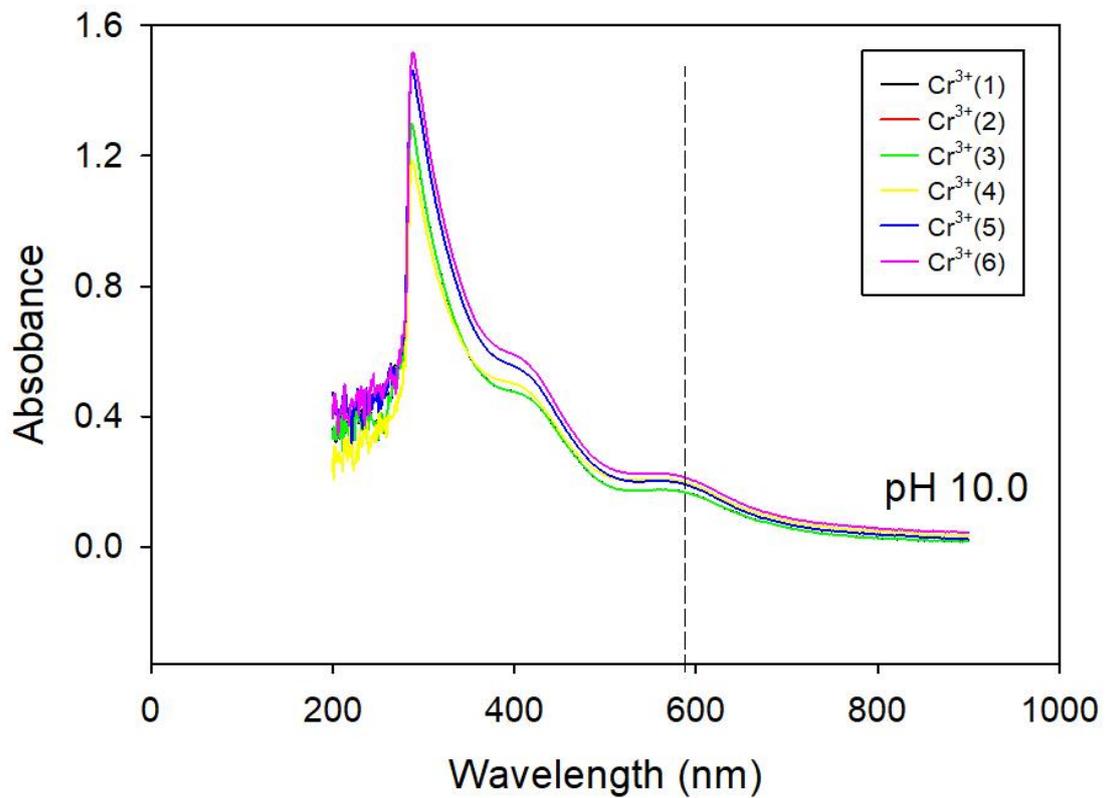


圖 43 重金屬溶液 B3 反應前之 UV-Vis 光譜圖

6 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 44 所示。由圖 44 可看出， Cr^{3+} 在 580 nm 的吸光度隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

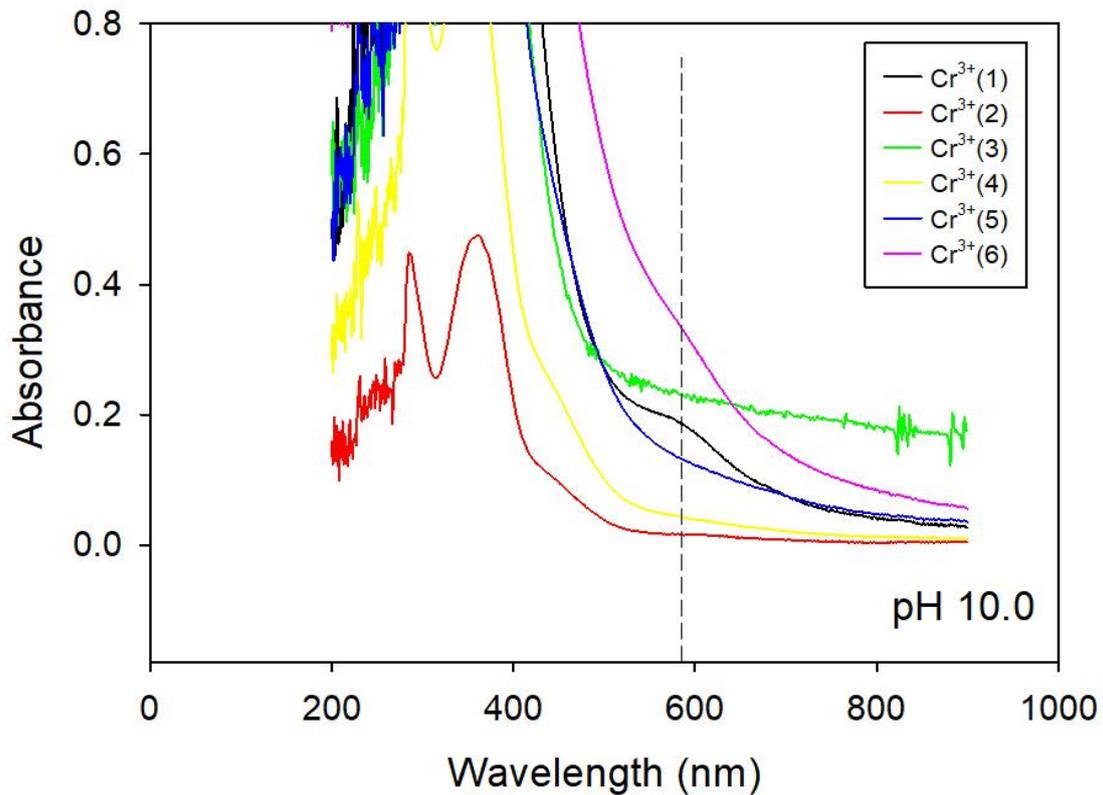


圖 44 重金屬溶液 B3 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 B3 之 Cr^{3+} 去除率計算結果如表 14。圖 45 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 B3 中的 Cr^{3+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 1.125 mM 時， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%。

表 14 重金屬溶液 B3 之 Cr³⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cr ³⁺ 反應前 吸光度	Cr ³⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.5	0.043	0.013	69.76
2	1	0.062	0.014	77.41
3	1.125	0.045	0	100
4	1.25	0.057	0	100
5	1.5	0.038	0	100
6	2	0.034	0	100

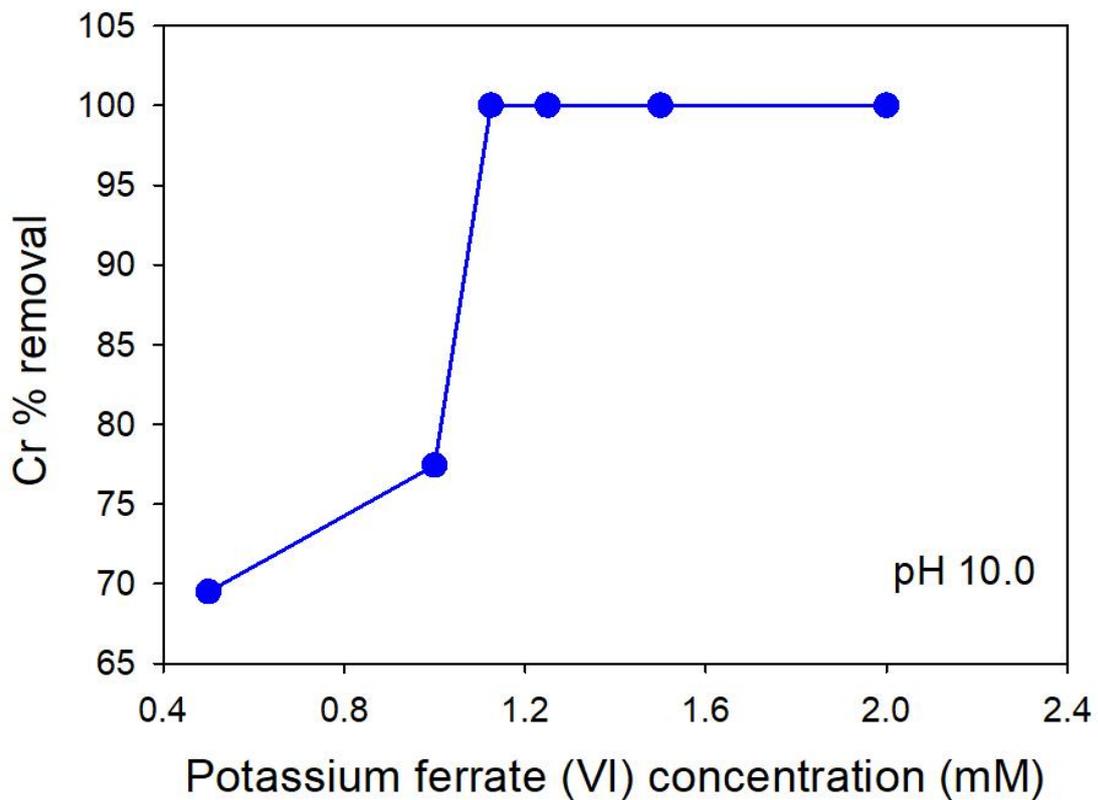


圖 45 重金屬溶液 B3 之 Cr³⁺ 去除率

(3) 單一 Cu^{2+} 溶液

重金屬溶液 C1 為單一 Cu^{2+} 溶液在 pH 3.0 的環境下，為了找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 8 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 46 所示。圖 46 顯示，在 800 nm 有一明顯特徵峰。

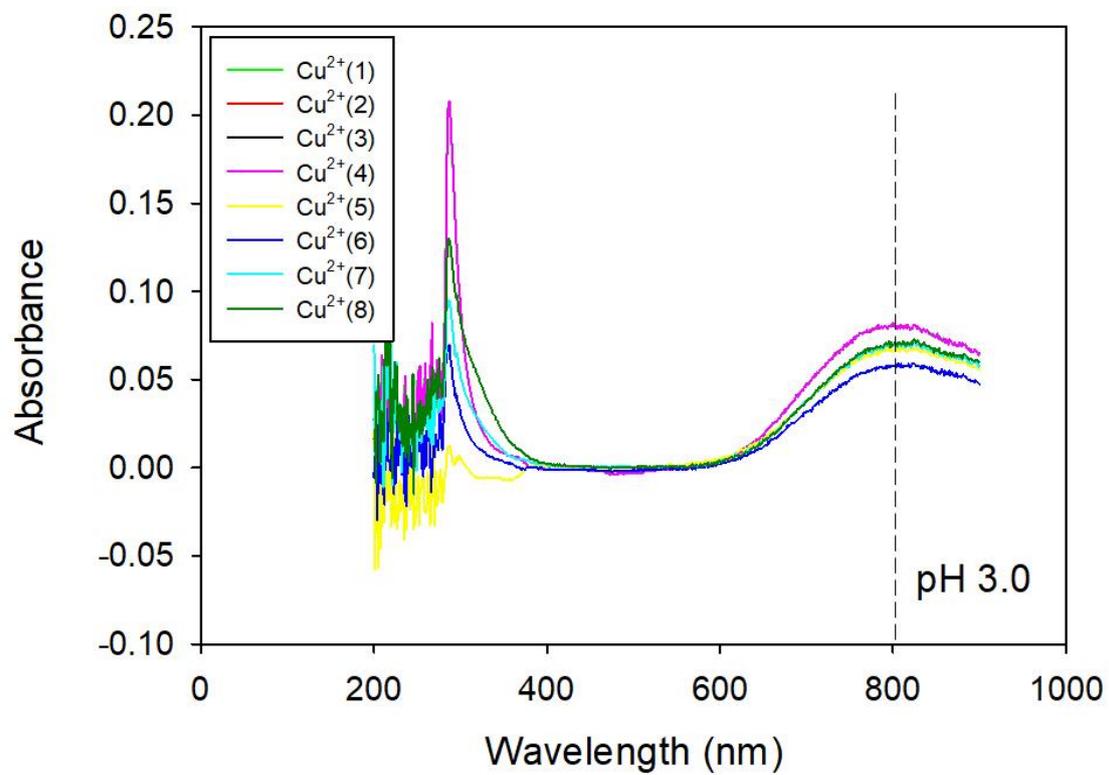


圖 46 重金屬溶液 C1 反應前之 UV-Vis 光譜圖

8 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 47 所示。由圖 47 可看出， Cu^{2+} 在 800 nm 的吸光度隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

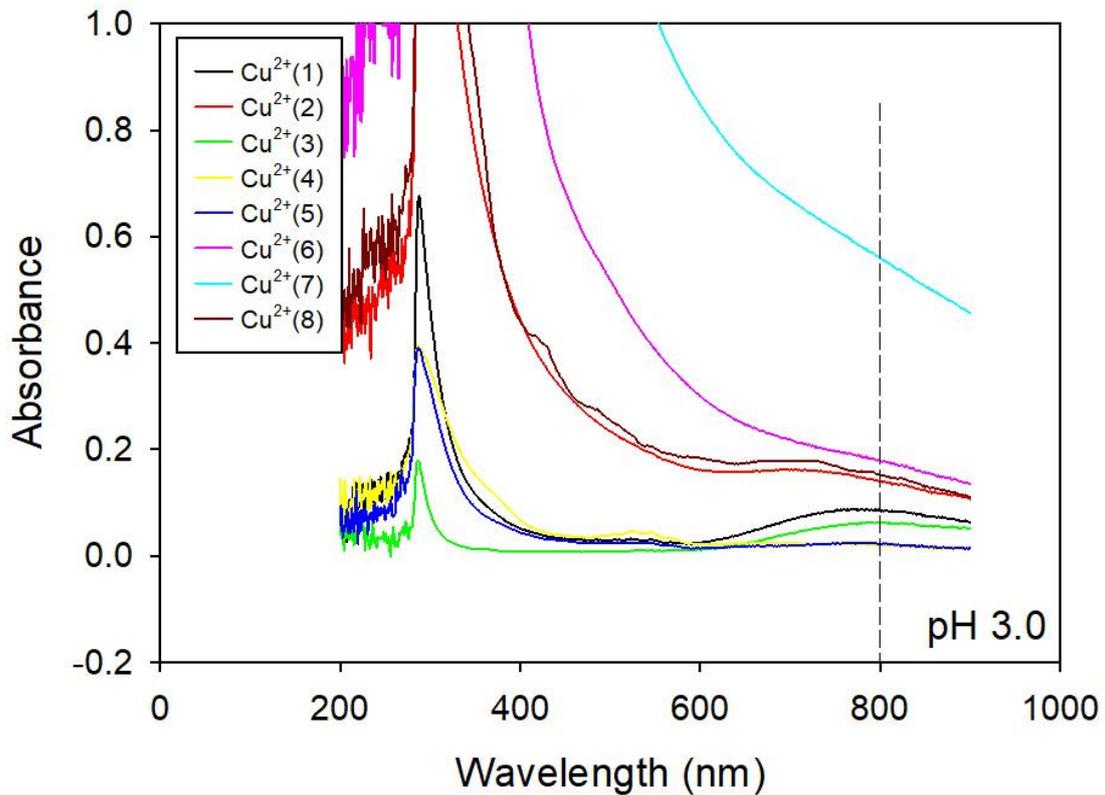


圖 47 重金屬溶液 C1 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 C1 之 Cu^{2+} 去除率計算結果如表 15。圖 48 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 C1 中的 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 15.25 mM 時， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 15 重金屬溶液 C1 之 Cu^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu^{2+} 反應前 吸光度	Cu^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	8	0.055	0.020	63.64
2	10	0.055	0.013	76.36
3	13.5	0.065	0.014	78.46
4	14	0.058	0.008	86.21
5	15	0.070	0.002	97.14
6	15.25	0.063	0	100
7	15.5	0.060	0	100
8	20	0.080	0	100

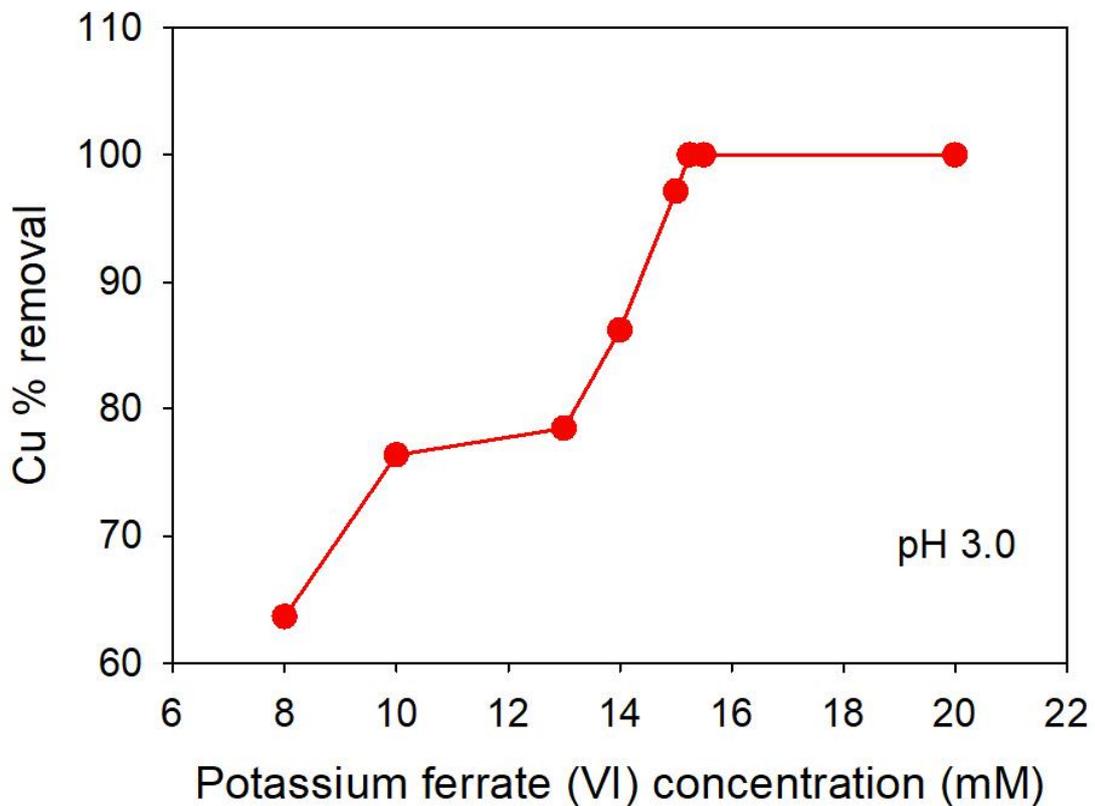


圖 48 重金屬編號 C1 之 Cu^{2+} 去除率

重金屬溶液 C2 為單一 Cu^{2+} 溶液在 pH 7.0 的環境下，為了找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 9 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 49 所示。圖 49 顯示，在 720 nm 有一明顯特徵峰。

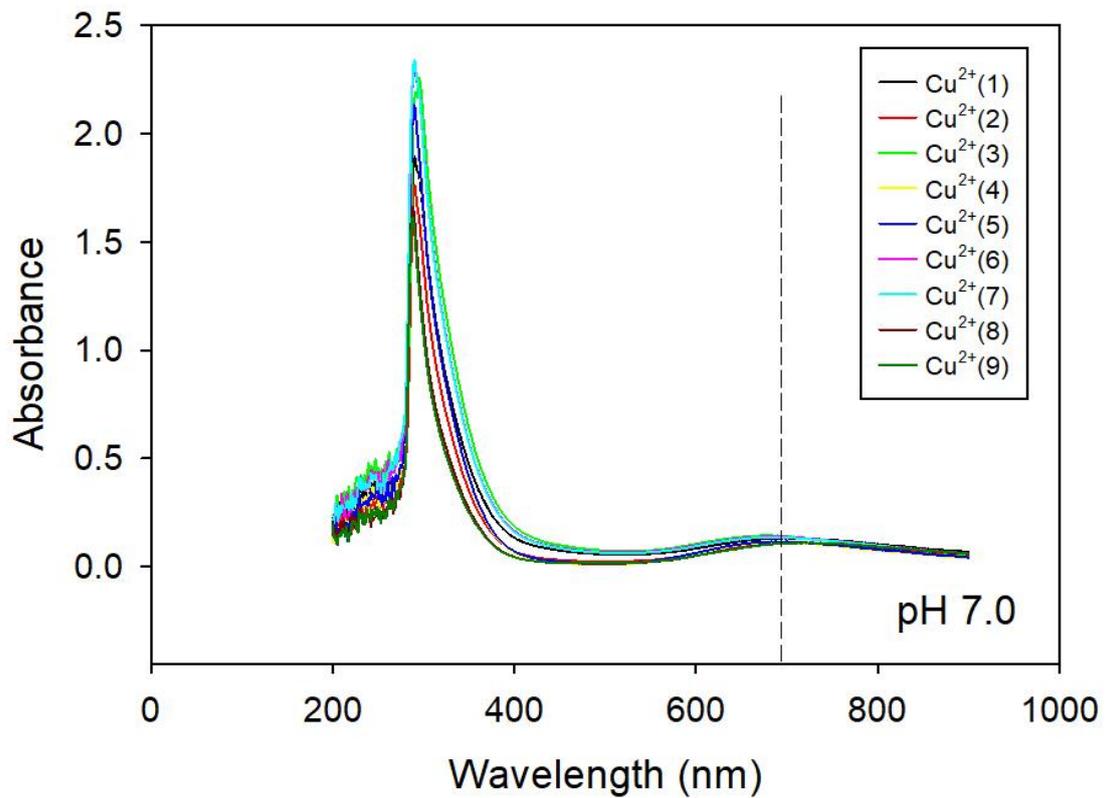


圖 49 重金屬溶液 C2 反應前之 UV-Vis 光譜圖

9 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 50 所示。由圖 50 可看出， Cu^{2+} 在 720 nm 的吸光度隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

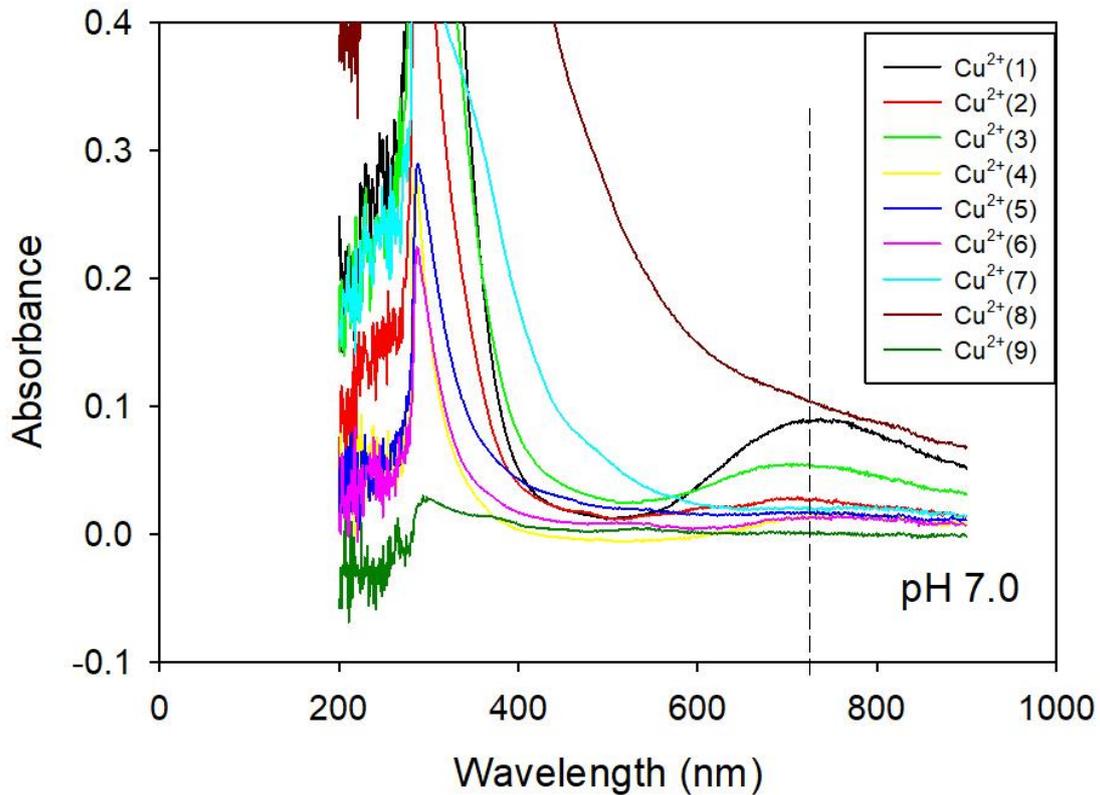


圖 50 重金屬溶液 C2 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬編號 C2 之 Cu^{2+} 去除率計算結果如表 16。圖 51 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 C2 中的 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 2.6 mM 時， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 16 重金屬溶液 C2 之 Cu^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu^{2+} 反應前 吸光度	Cu^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.2	0.079	0.031	60.76
2	1	0.108	0.039	63.89
3	1.5	0.102	0.033	67.68
4	1.75	0.124	0.014	85.57
5	2	0.012	0.0009	92.05
6	2.5	0.161	0.008	95.03
7	2.6	0.097	0	100
8	2.75	0.090	0	100
9	3	0.315	0	100

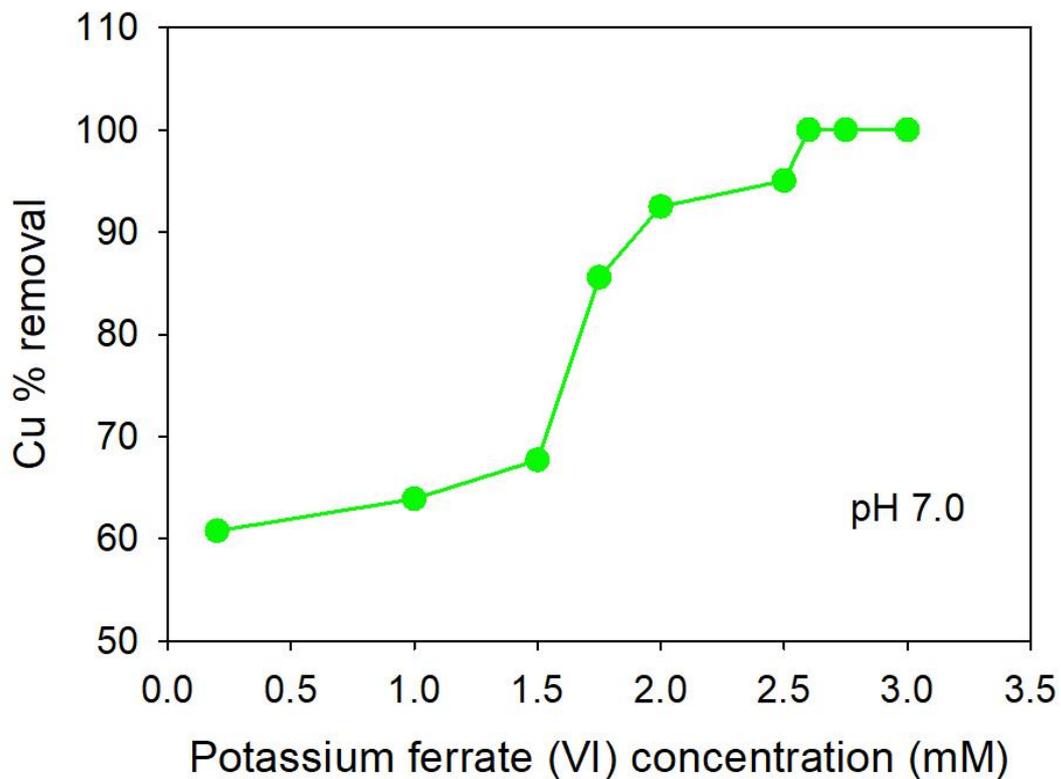


圖 51 重金屬溶液 C2 之 Cu^{2+} 去除率

重金屬溶液 C3 為單一 Cu^{2+} 溶液在 pH 10.0 的環境下，為了找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 9 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 52 所示。圖 52 顯示，在 670 nm 有一明顯特徵峰。

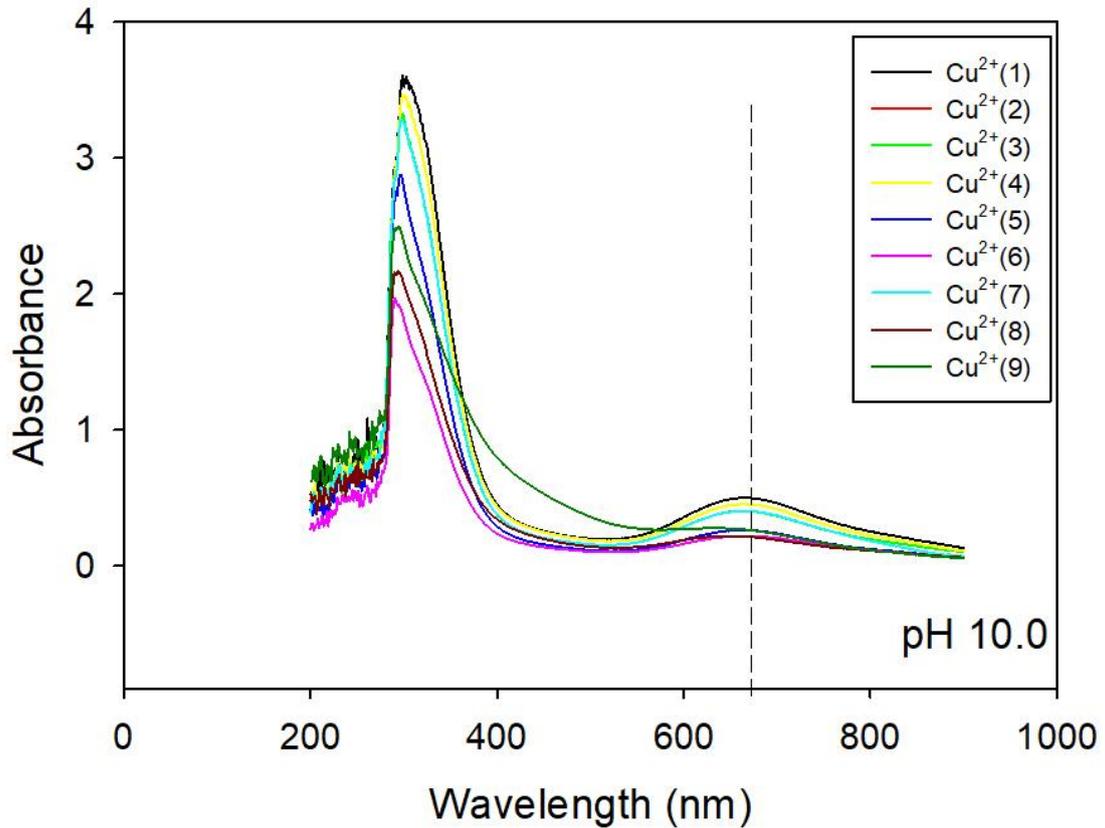


圖 52 重金屬溶液 C3 反應前之 UV-Vis 光譜圖

9 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 53 所示。由圖 53 可看出， Cu^{2+} 在 740 nm 的吸光度隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

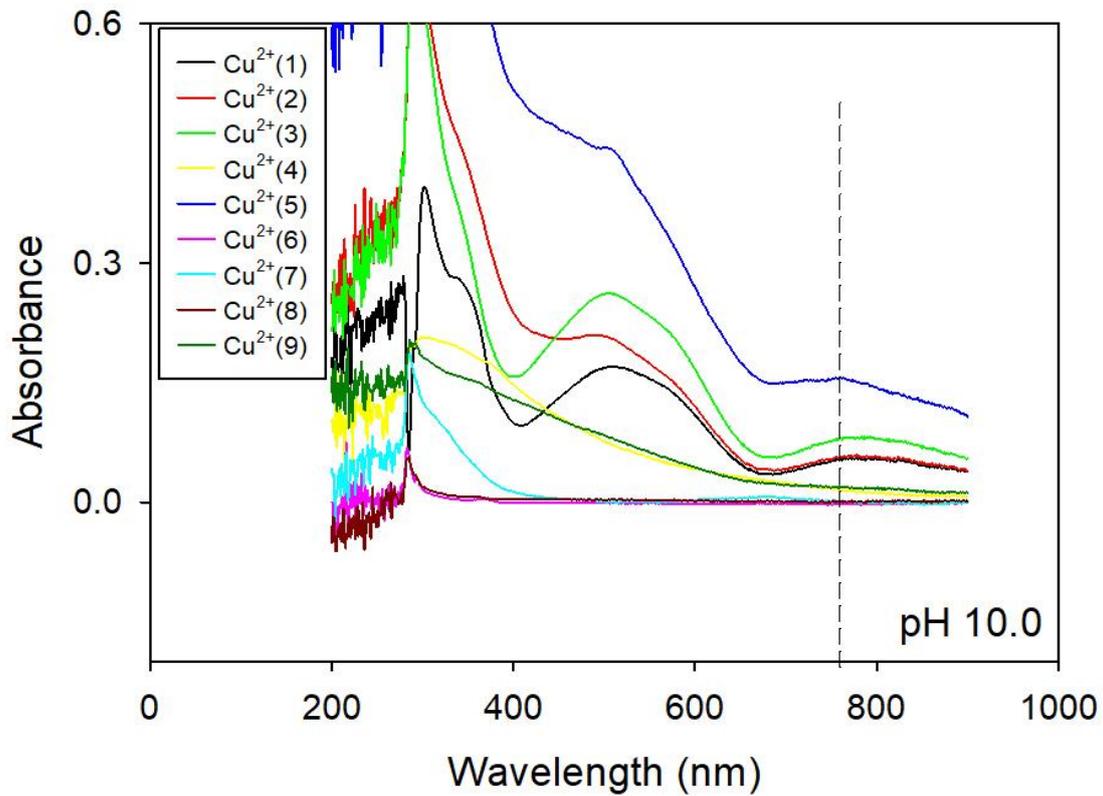


圖 53 重金屬溶液 C3 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 C3 之 Cu^{2+} 去除率計算結果如表 17。圖 54 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 C3 中的 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 2.8 mM 時， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 17 重金屬溶液 C3 之 Cu^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu^{2+} 反應前 吸光度	Cu^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.05	0.252	0.032	87.31
2	0.1	0.250	0.030	88.01
3	1	0.179	0.017	90.51
4	1.5	0.241	0.021	91.29
5	2	0.304	0.024	92.08
6	2.5	0.238	0.016	93.27
7	2.75	0.230	0.011	95.22
8	2.8	0.260	0	100
9	3	0.214	0	100

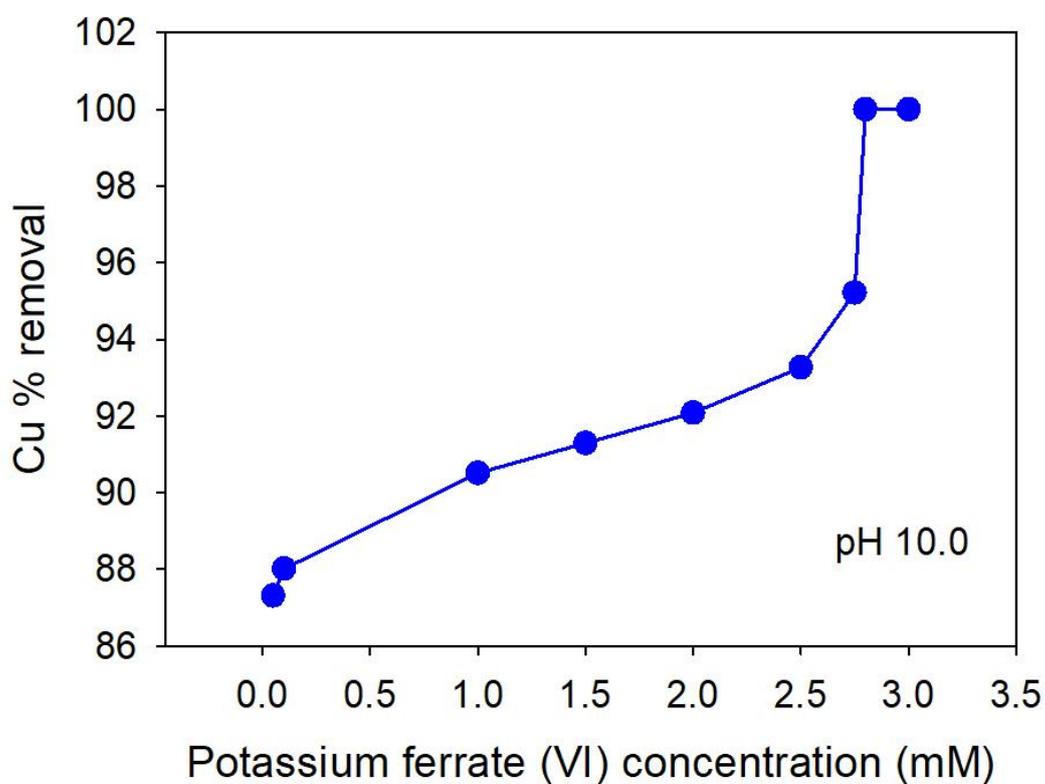


圖 54 重金屬編號 C3 之 Cu^{2+} 去除率

綜合上述的實驗結果可整理出，單一重金屬溶液在 pH 3.0、pH 7.0 與 pH 10.0 三種環境下，達 100% 去除率所需的最低高鐵酸鉀劑量，如表 18 所示。單一 Co^{2+} 在 pH 7.0 的環境下，可以用最少的高鐵酸鉀劑量達到 100% 去除率，劑量為 0.3 mM；單一 Cr^{3+} 在 pH 10.0 的環境下，可以用最少的高鐵酸鉀劑量達到 100% 去除率，劑量為 1.125 mM；單一 Cu^{2+} 在 pH 7.0 的環境下，可以用最少的高鐵酸鉀劑量達到 100% 去除率，劑量為 2.6 mM。結果顯示，在中性與鹼性溶液環境中，單一重金屬溶液之重金屬離子要達到 100% 的去除率，所需要的高鐵酸鉀劑量都比在酸性溶液環境中還低，與文獻結果相似^[41]。

表 18 單一重金屬溶液在三種環境下達 100% 去除率所需的最低高鐵酸鉀劑量

	Co^{2+} 需要的高鐵酸鉀劑量(mM)	Cr^{3+} 需要的高鐵酸鉀劑量(mM)	Cu^{2+} 需要的高鐵酸鉀劑量(mM)
pH 3.0	14.25	13	15.25
pH 7.0	0.3	2.75	2.6
pH 10.0	5.125	1.125	2.8

之後去除兩種及三種重金屬混合溶液中之重金屬離子時，以表 18 的結果作依據，以上述的劑量為基礎，找出重金屬達 100% 去除率時，所需最低的高鐵酸鉀劑量。

4.2.2 兩種成分溶液之重金屬去除

(1) $\text{Co}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$ 重金屬溶液

重金屬溶液 D1 為混合 $\text{Co}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$ 溶液在 pH 3.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 6 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 55 所示。圖 55 顯示，在 510 nm 和 780 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 510 nm 為 Co^{2+} 的特徵峰，780 nm 為 Cu^{2+} 的特徵峰。

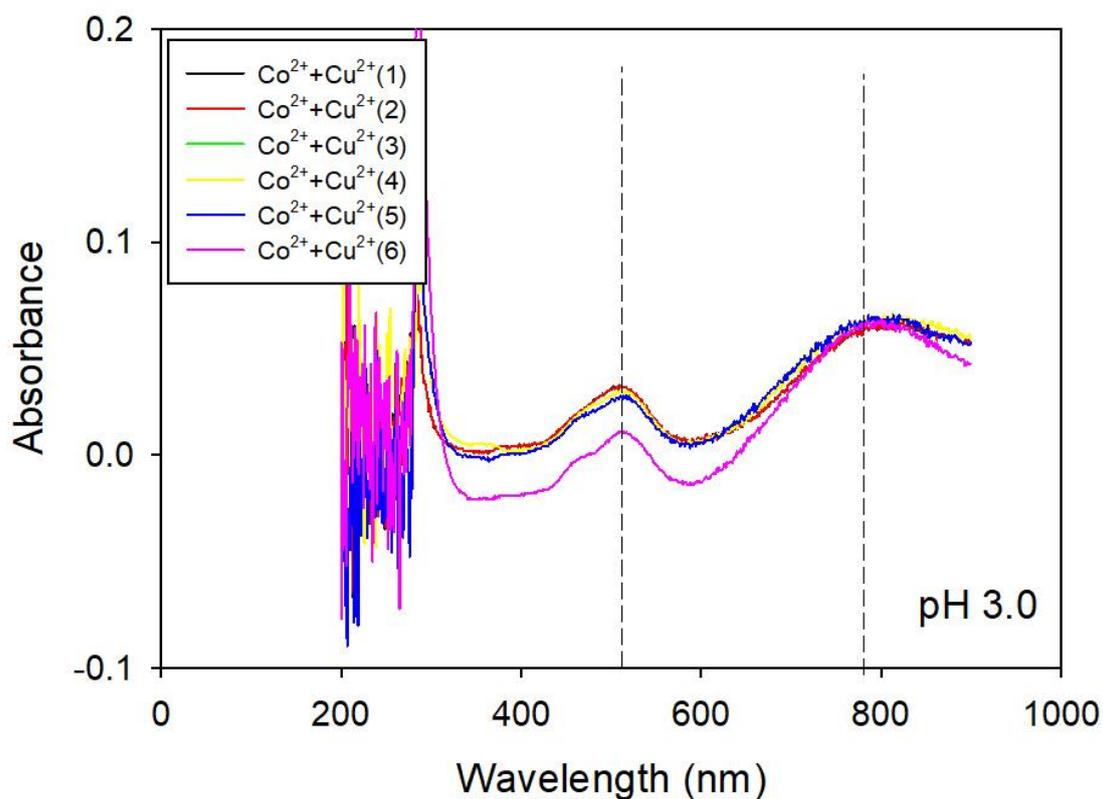


圖 55 重金屬溶液 D1 反應前之 UV-Vis 光譜圖

6 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 56 所示。由圖 56 可看出， Co^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸光度分別在 510 nm 和 780 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

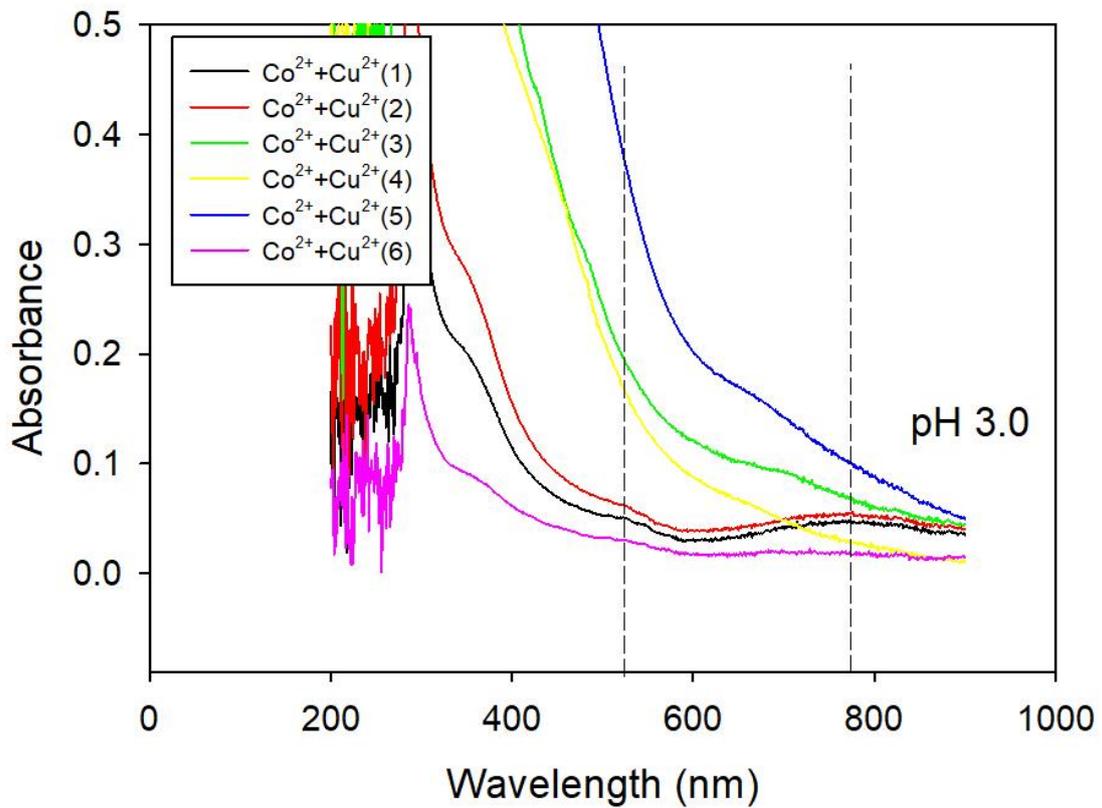


圖 56 重金屬溶液 D1 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 D1 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率計算結果分別如表 19 與表 20。圖 57 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 D1 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 14.5 mM， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 15.75 mM， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 19 重金屬溶液 D1 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Co^{2+} 反應前吸光度	Co^{2+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	14.25	0.031	0.004	87.09
2	14.5	0.028	0	100
3	15	0.028	0	100
4	15.5	0.022	0	100
5	15.75	0.030	0	100
6	16	0.030	0	100

表 20 重金屬溶液 D1 之 Cu^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu^{2+} 反應前 吸光度	Cu^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	14.25	0.062	0.019	69.35
2	14.5	0.063	0.015	75.76
3	15	0.063	0.005	92.06
4	15.5	0.066	0.002	96.97
5	15.75	0.063	0	100
6	16	0.063	0	100

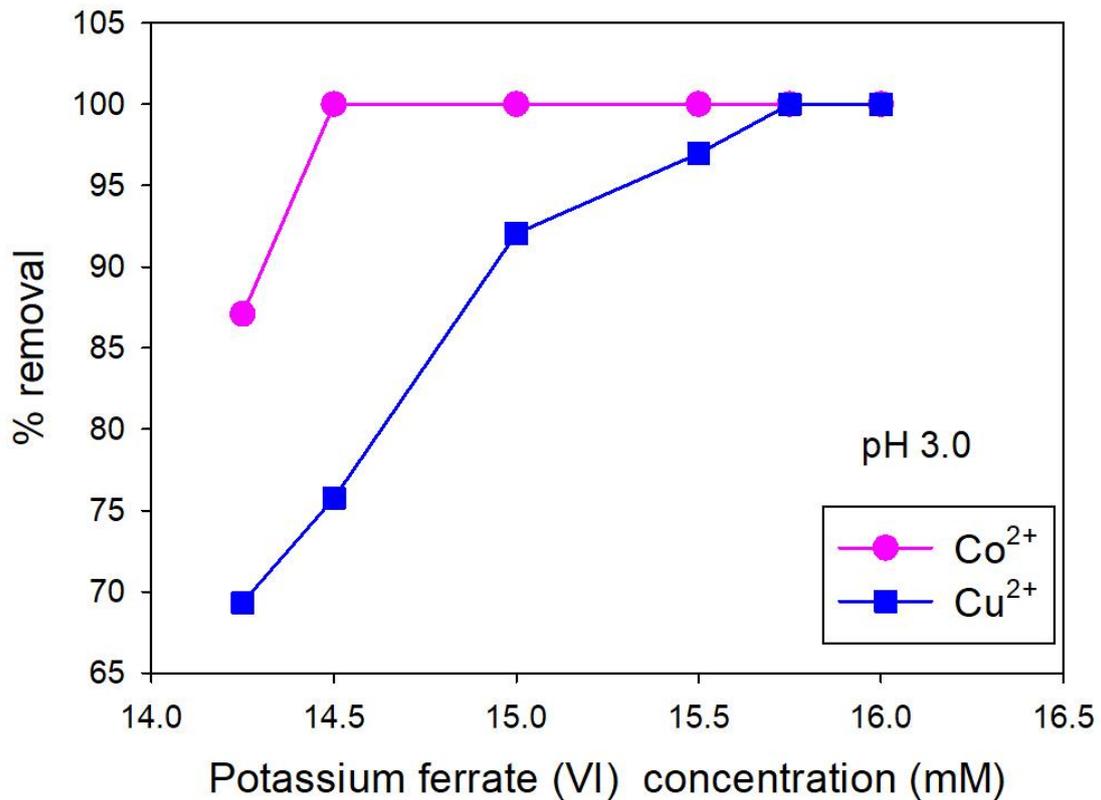


圖 57 重金屬溶液 D1 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率

重金屬溶液 D2 為混合 $\text{Co}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$ 溶液在 pH 7.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 9 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 58 所示。圖 58 顯示，在 510 nm 和 670 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 510 nm 為 Co^{2+} 的特徵峰，670 nm 為 Cu^{2+} 的特徵峰。

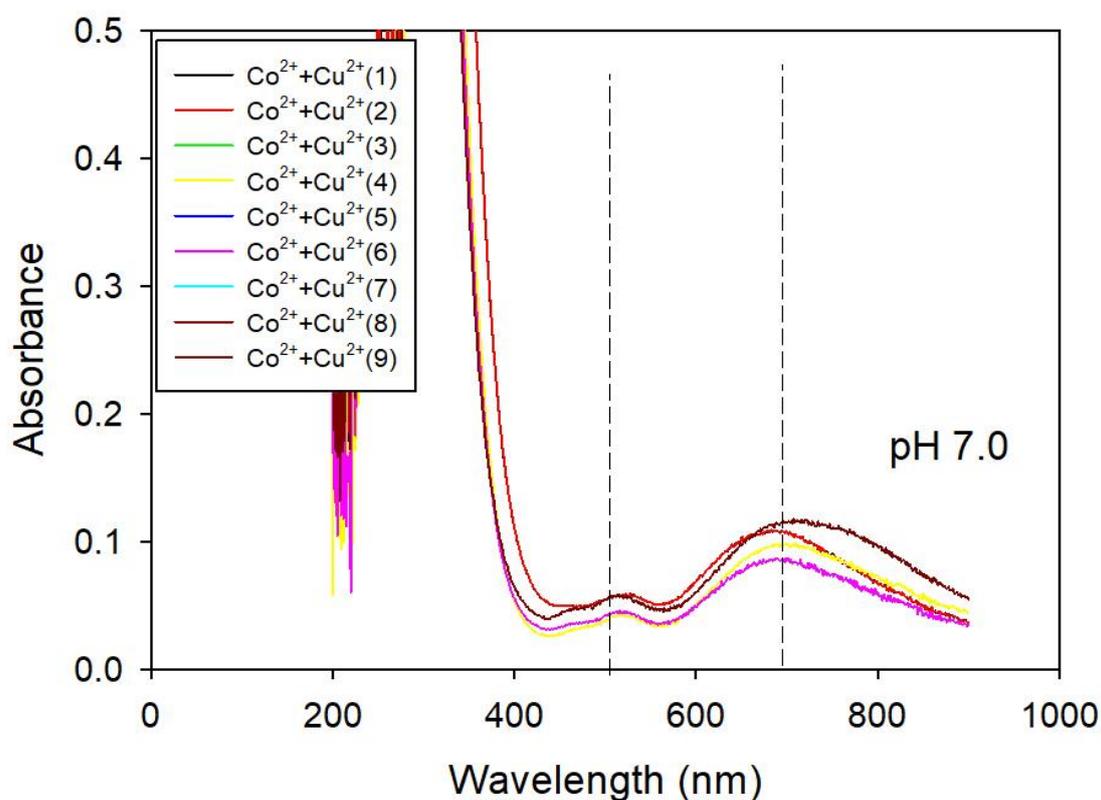


圖 58 重金屬溶液 D2 反應前之 UV-Vis 光譜圖

9 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 59 所示。由圖 59 可看出， Co^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸光度分別在 510 nm 和 670 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

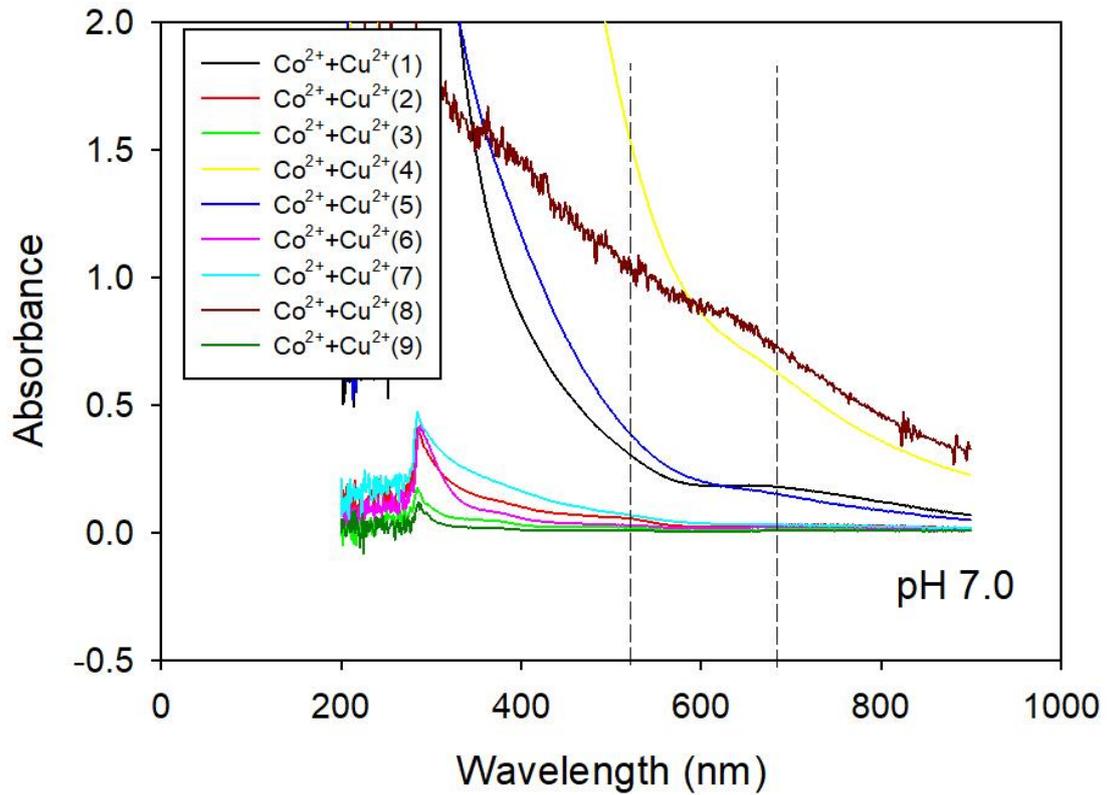


圖 59 重金屬溶液 D2 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 D2 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率計算結果如表 21 與表 22。

圖 60 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 D2 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 2.75 mM， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 2.75 mM， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 21 重金屬溶液 D2 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Co^{2+} 反應前吸光度	Co^{2+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	0.1	0.011	0.008	27.28
2	0.3	0.010	0.006	40
3	2.6	0.010	0.002	80
4	2.75	0.011	0	100
5	3	0.011	0	100
6	4	0.007	0	100
7	4.25	0.008	0	100
8	4.5	0.008	0	100
9	5	0.007	0	100

表 22 重金屬溶液 D2 之 Cu^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu^{2+} 反應前 吸光度	Cu^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.1	0.055	0.009	83.67
2	0.3	0.055	0.007	87.27
3	2.6	0.055	0.004	92.72
4	2.75	0.055	0	100
5	3	0.055	0	100
6	4	0.057	0	100
7	4.25	0.055	0	100
8	4.5	0.055	0	100
9	5	0.057	0	100

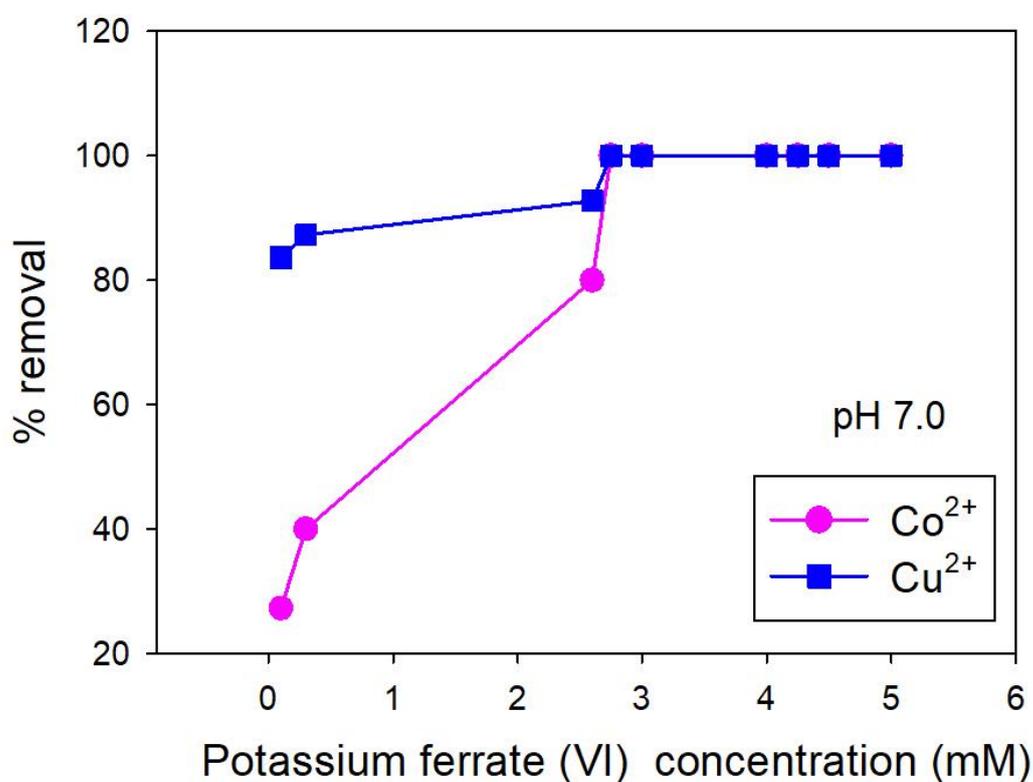


圖 60 重金屬溶液 D2 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率

重金屬溶液 D3 為混合 $\text{Co}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$ 溶液在 pH 10.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 9 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 61 所示。圖 61 顯示，在 510 nm 和 670 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 510 nm 為 Co^{2+} 的特徵峰，670 nm 為 Cu^{2+} 的特徵峰。

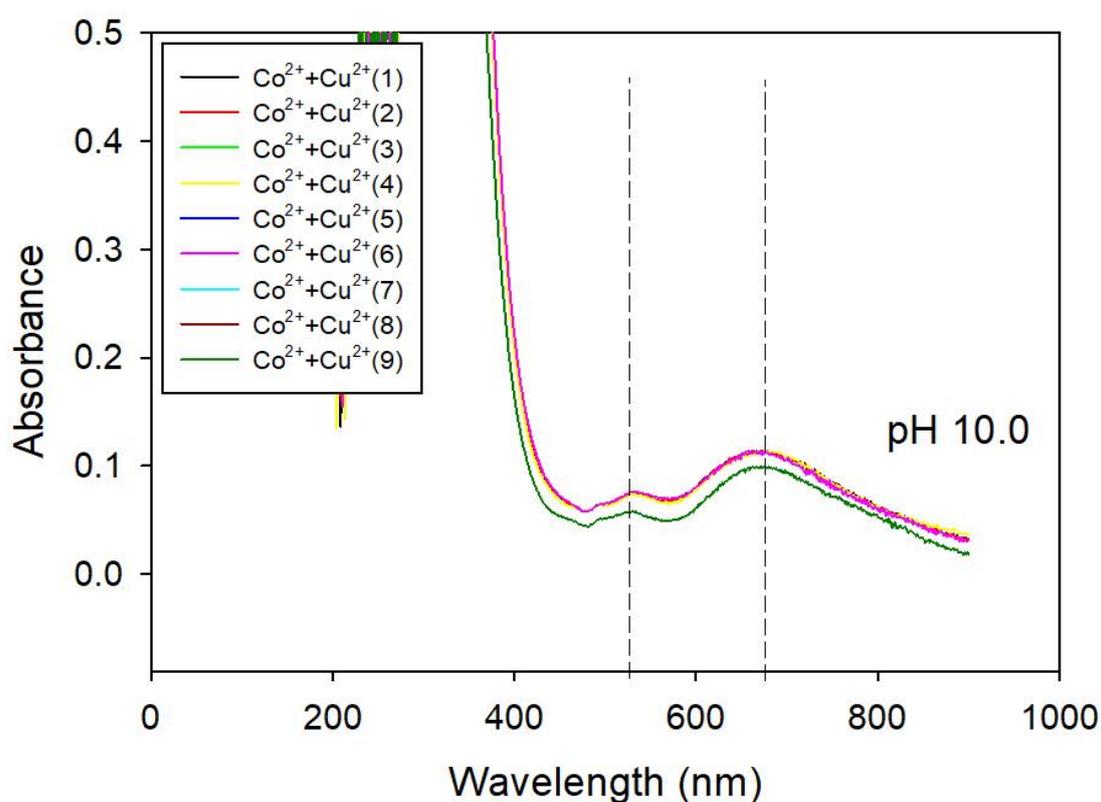


圖 61 重金屬溶液 D3 反應前之 UV-Vis 光譜圖

9 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 62 所示。由圖 62 可看出， Co^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸光度分別在 510 nm 和 670 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

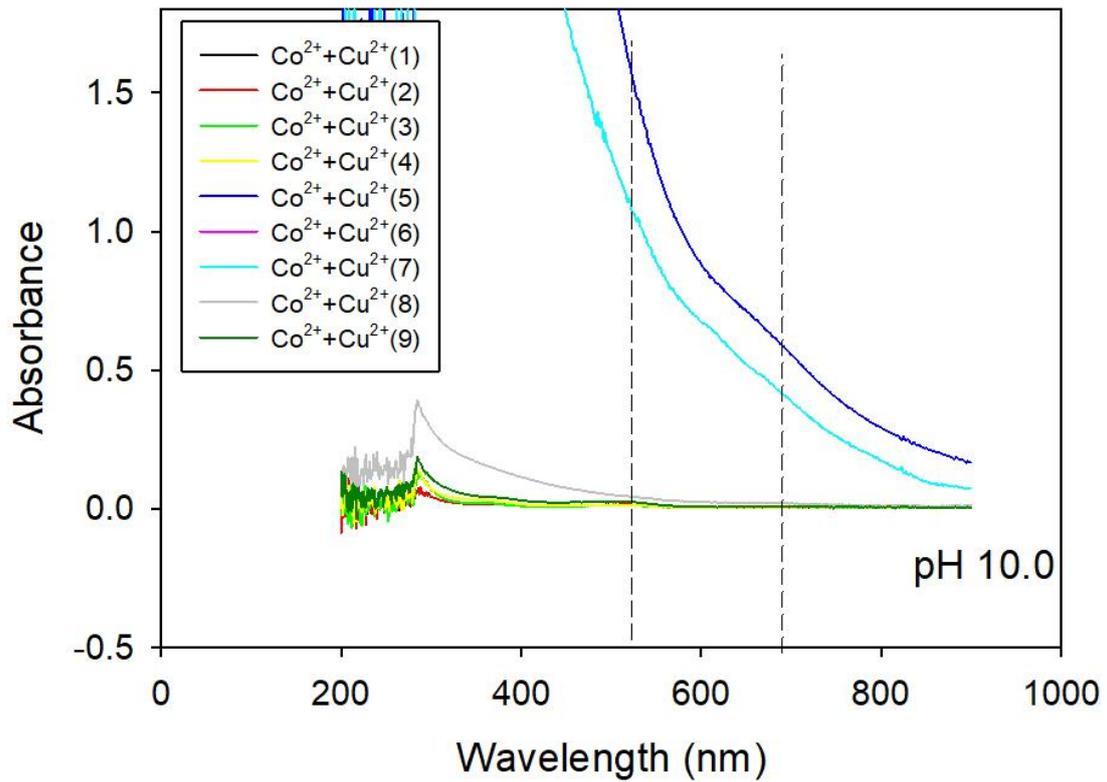


圖 62 重金屬溶液 D3 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 D3 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率計算結果如表 23 與表 24。

圖 63 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 D3 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 3 mM， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 2.8 mM， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 23 重金屬溶液 D3 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Co^{2+} 反應前吸光度	Co^{2+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	1	0.009	0.005	44.44
2	2	0.015	0.006	60
3	2.5	0.015	0.003	80
4	2.8	0.009	0.001	88.89
5	3	0.009	0	100
6	3.25	0.009	0	100
7	3.5	0.013	0	100
8	4	0.013	0	100
9	5.125	0.009	0	100

表 24 重金屬溶液 D3 之 Cu^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu^{2+} 反應前 吸光度	Cu^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	1	0.049	0.005	89.79
2	2	0.050	0.004	92
3	2.5	0.050	0.002	96
4	2.8	0.041	0	100
5	3	0.049	0	100
6	3.25	0.049	0	100
7	3.5	0.045	0	100
8	4	0.045	0	100
9	5.125	0.041	0	100

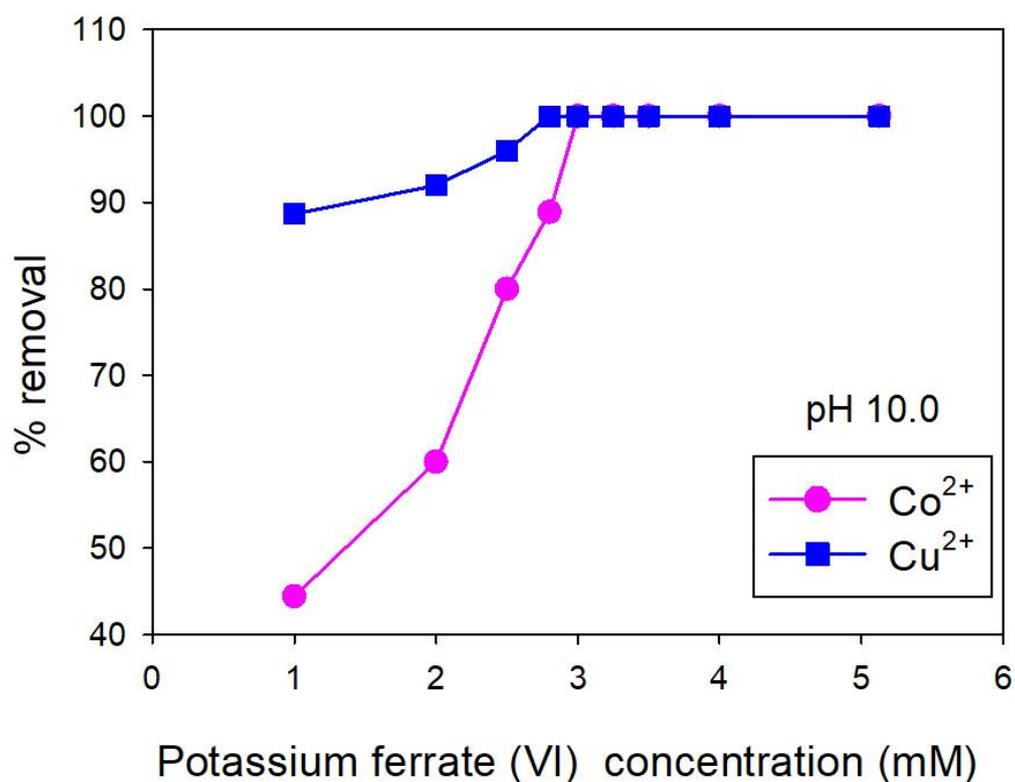


圖 63 重金屬溶液 D3 之 Co^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率

重金屬溶液 E1 為混合 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 溶液在 pH 3.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 7 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 64 所示。圖 64 顯示，在 580 nm 和 780 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 580 nm 為 Cr^{3+} 的特徵峰，780 nm 為 Cu^{2+} 的特徵峰。

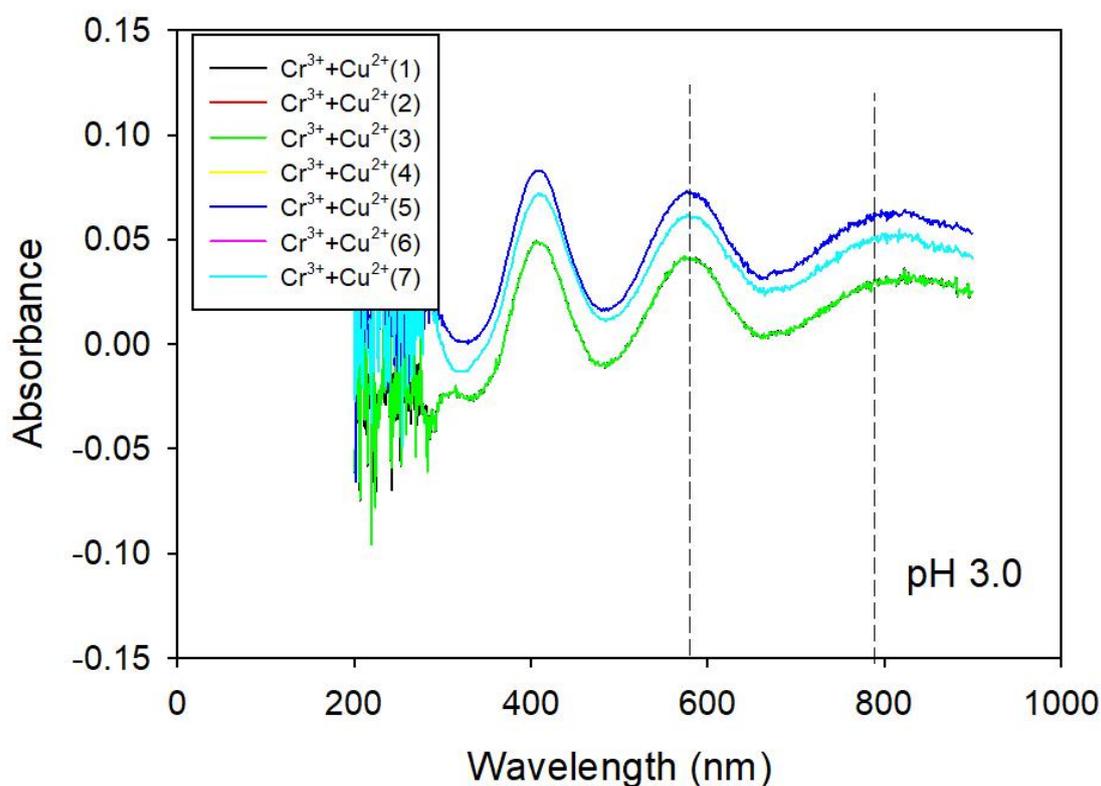


圖 64 重金屬溶液 E1 反應前之 UV-Vis 光譜圖

7 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 65 所示。由圖 65 可看出， Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 的吸光度分別在 580 nm 和 780 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

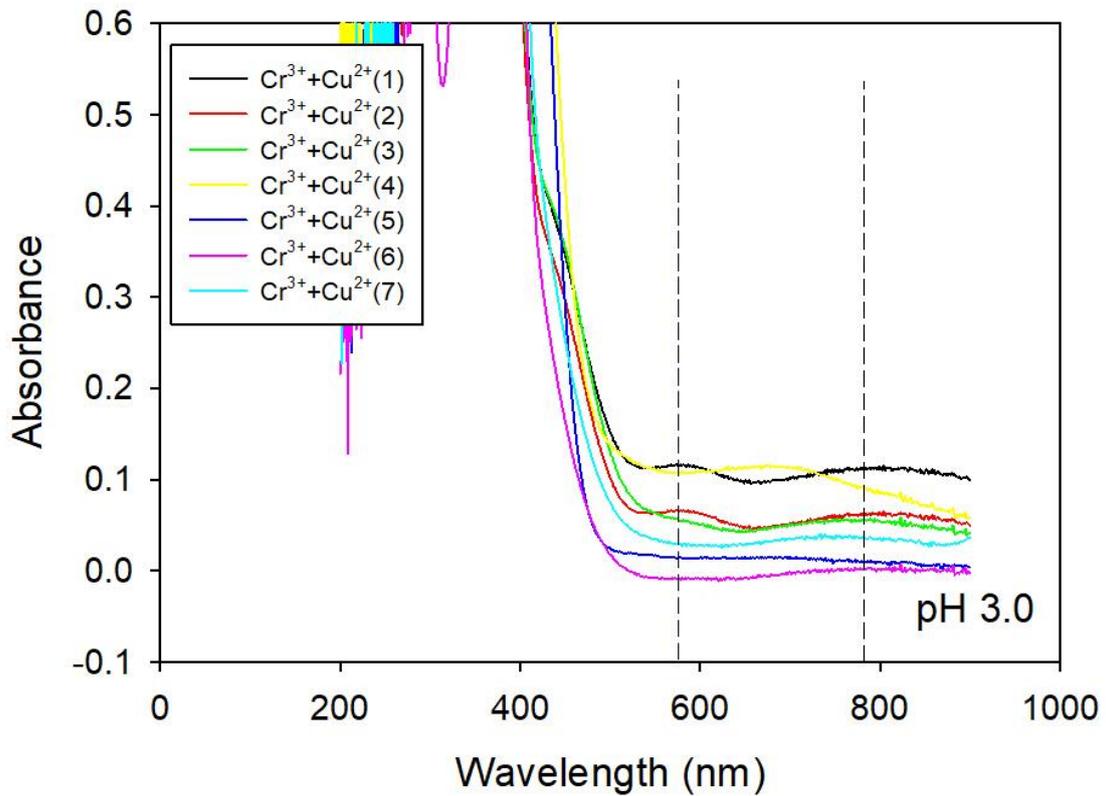


圖 65 重金屬溶液 E1 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 E1 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率計算結果如表 25 與表 26。圖 66 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 E1 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 13 mM， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 17.25 mM， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 25 重金屬溶液 E1 之 Cr^{3+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Cr^{3+} 反應前吸光度	Cr^{3+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	10	0.036	0.004	88.89
2	12	0.040	0.002	95
3	13	0.042	0	100
4	15.25	0.042	0	100
5	16	0.036	0	100
6	17	0.042	0	100
7	17.25	0.040	0	100

表 26 重金屬溶液 E1 之 Cu^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu^{2+} 反應前 吸光度	Cu^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	10	0.025	0.015	40
2	12	0.032	0.016	50
3	13	0.042	0.015	54.55
4	15.25	0.042	0.010	69.70
5	16	0.036	0.0018	92.80
6	17	0.042	0.001	96.97
7	17.25	0.032	0	100

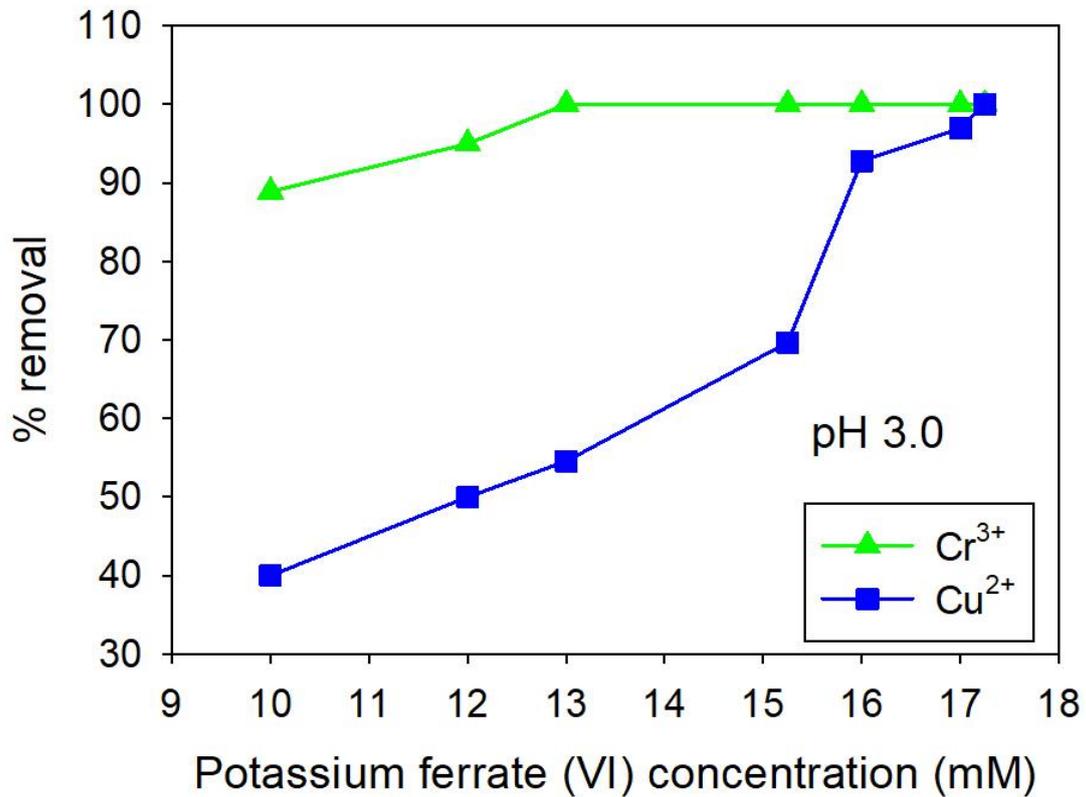


圖 66 重金屬溶液 E1 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率

重金屬溶液 E2 為混合 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 溶液在 pH 7.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 7 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 67 所示。圖 67 顯示，在 580 nm 和 670 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 580 nm 為 Cr^{3+} 的特徵峰，670 nm 為 Cu^{2+} 的特徵峰。

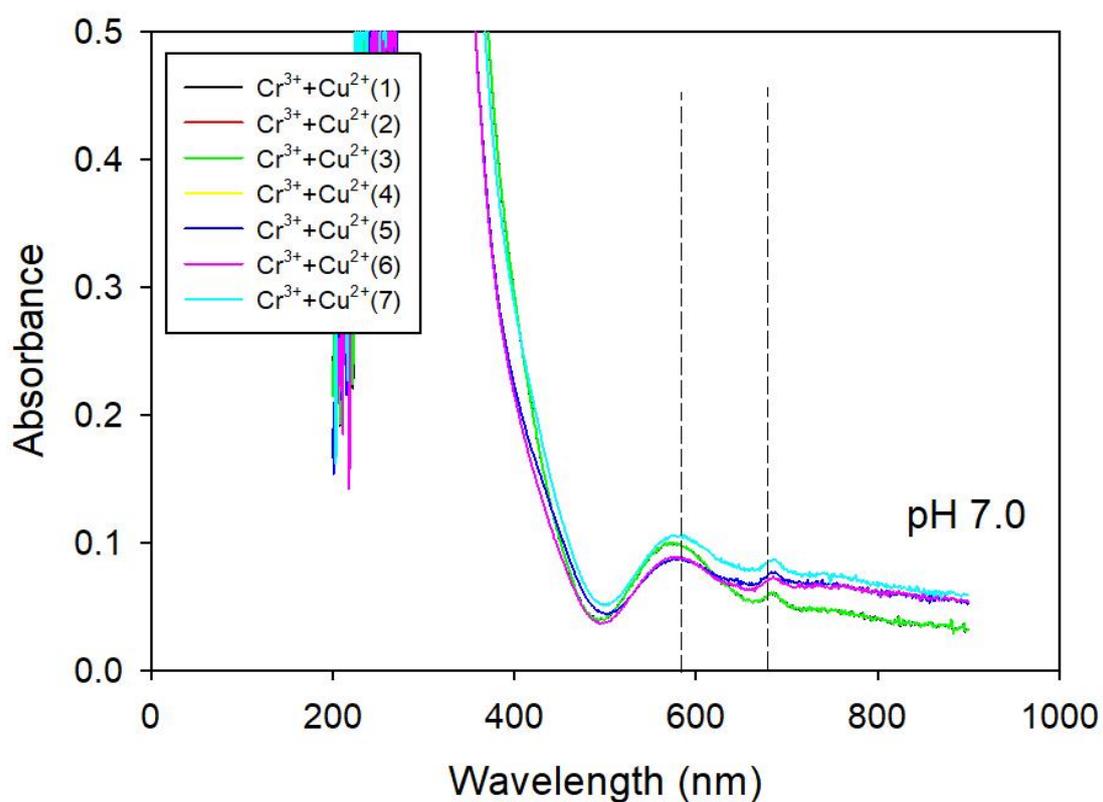


圖 67 重金屬溶液 E2 反應前之 UV-Vis 光譜圖

7 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 68 所示。由圖 68 可看出， Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 的吸光度分別在 580 nm 和 670 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

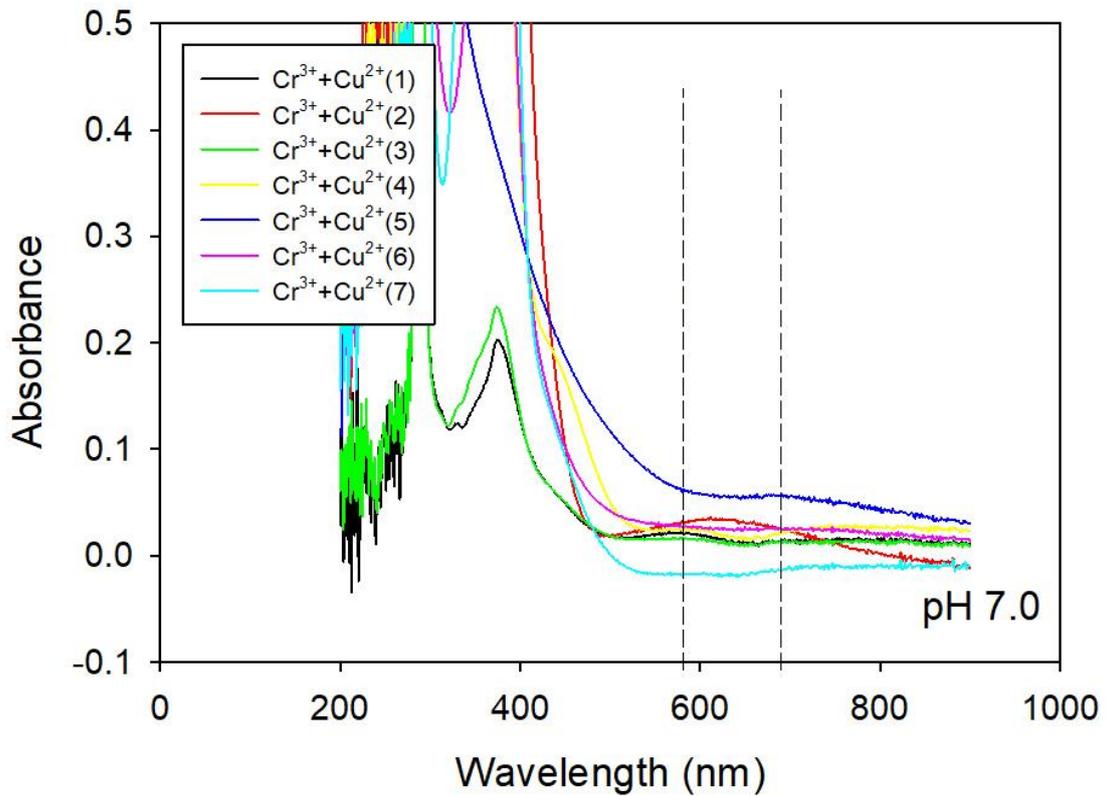


圖 68 重金屬溶液 E2 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 E2 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率計算結果如表 27 與表 28。

圖 69 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 E2 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 4.75 mM， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 2.75 mM， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 27 重金屬溶液 E2 之 Cr^{3+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Cr^{3+} 反應前吸光度	Cr^{3+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	2.6	0.029	0.008	72.41
2	2.75	0.045	0.011	75.56
3	4	0.029	0.006	79.31
4	4.5	0.028	0.005	82.14
5	4.6	0.031	0.003	90.32
6	4.75	0.029	0	100
7	5	0.045	0	100

表 28 重金屬溶液 E2 之 Cu^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cr^{3+} 反應前 吸光度	Cr^{3+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	2.6	0.008	0.001	87.50
2	2.75	0.006	0	100
3	4	0.007	0	100
4	4.5	0.009	0	100
5	4.6	0.006	0	100
6	4.75	0.007	0	100
7	5	0.006	0	100

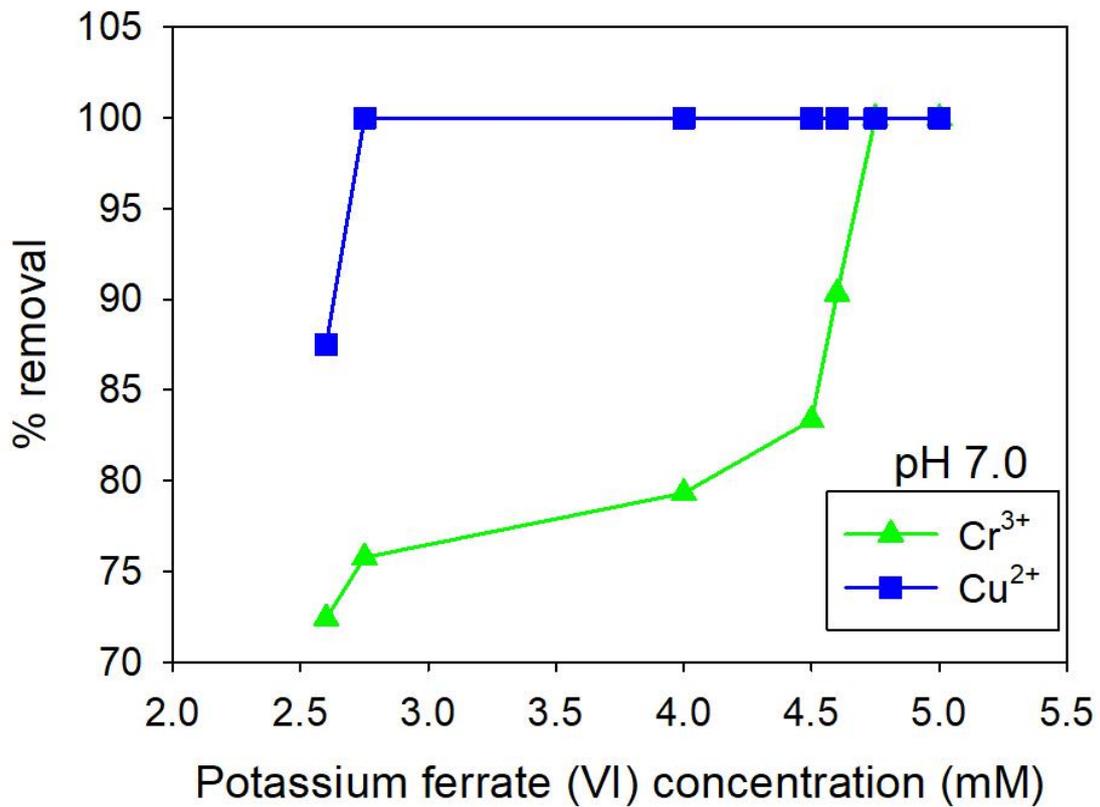


圖 69 重金屬編號 E2 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率

重金屬溶液 E3 為混合 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 溶液在 pH 10.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 7 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 70 所示。圖 70 顯示，在 580 nm 和 670 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 580 nm 為 Cr^{3+} 的特徵峰，670 nm 為 Cu^{2+} 的特徵峰。

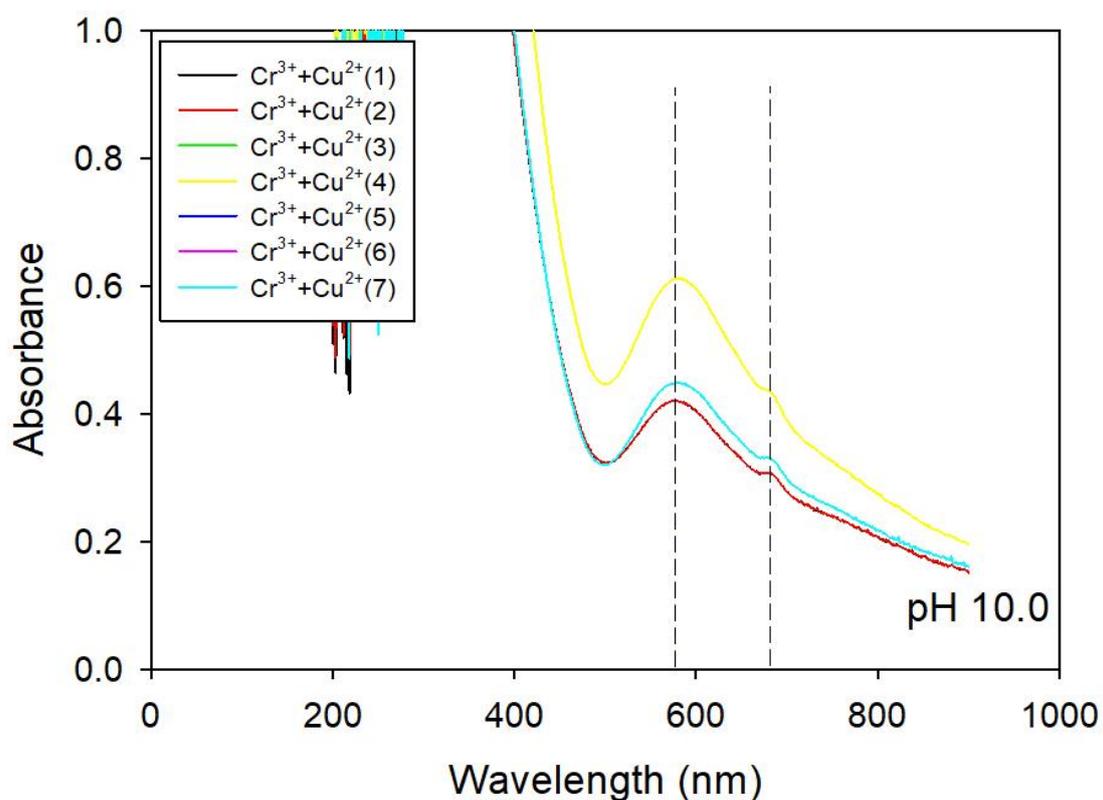


圖 70 重金屬溶液 E3 反應前之 UV-Vis 光譜圖

7 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 71 所示。由圖 71 可看出， Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 的吸光度分別在 580 nm 和 670 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

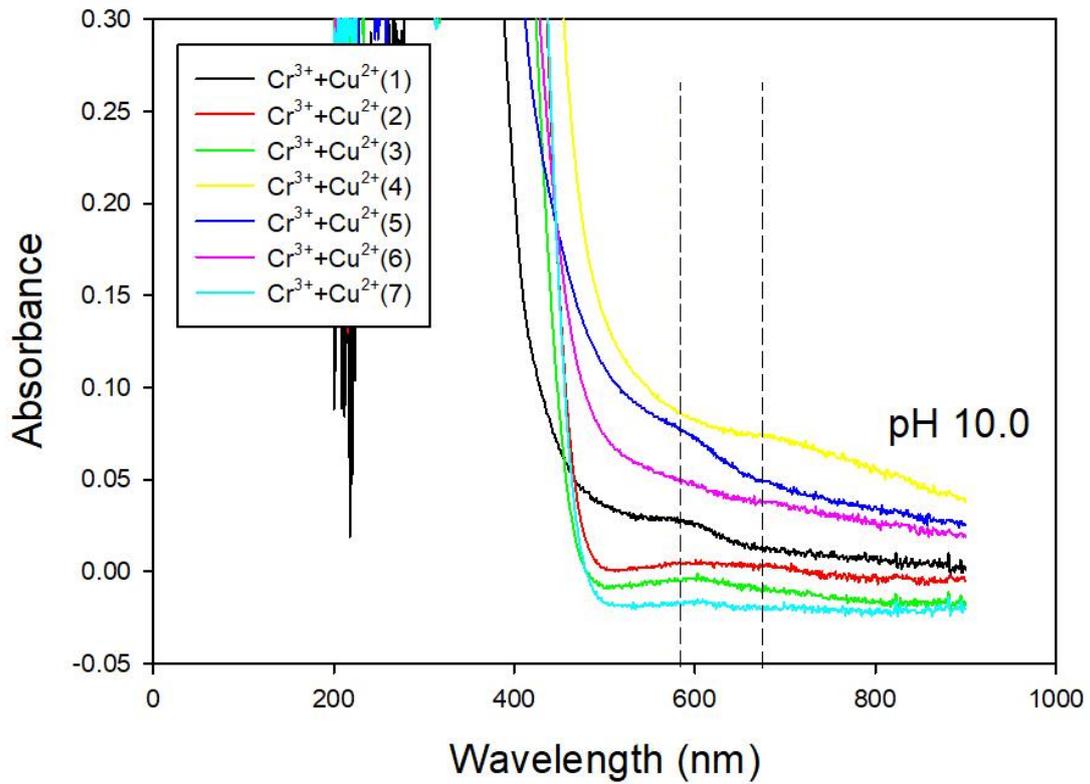


圖 71 重金屬溶液 E3 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 E3 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率計算結果如表 29 與表 30。圖 72 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 E3 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 2.9 mM， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 1.125 mM， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 29 重金屬溶液 E3 之 Cr^{3+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Cr^{3+} 反應前吸光度	Cr^{3+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	0.5	0.096	0.009	90.63
2	1.125	0.115	0.010	91.30
3	2.8	0.115	0.006	94.78
4	2.9	0.096	0	100
5	3	0.159	0	100
6	3.5	0.159	0	100
7	4	0.115	0	100

表 30 重金屬溶液 E3 之 Cu^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu^{2+} 反應前 吸光度	Cu^{2+} 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.5	0.014	0.001	92.85
2	1.125	0.013	0	100
3	2.8	0.013	0	100
4	2.9	0.014	0	100
5	3	0.018	0	100
6	3.5	0.018	0	100
7	4	0.013	0	100

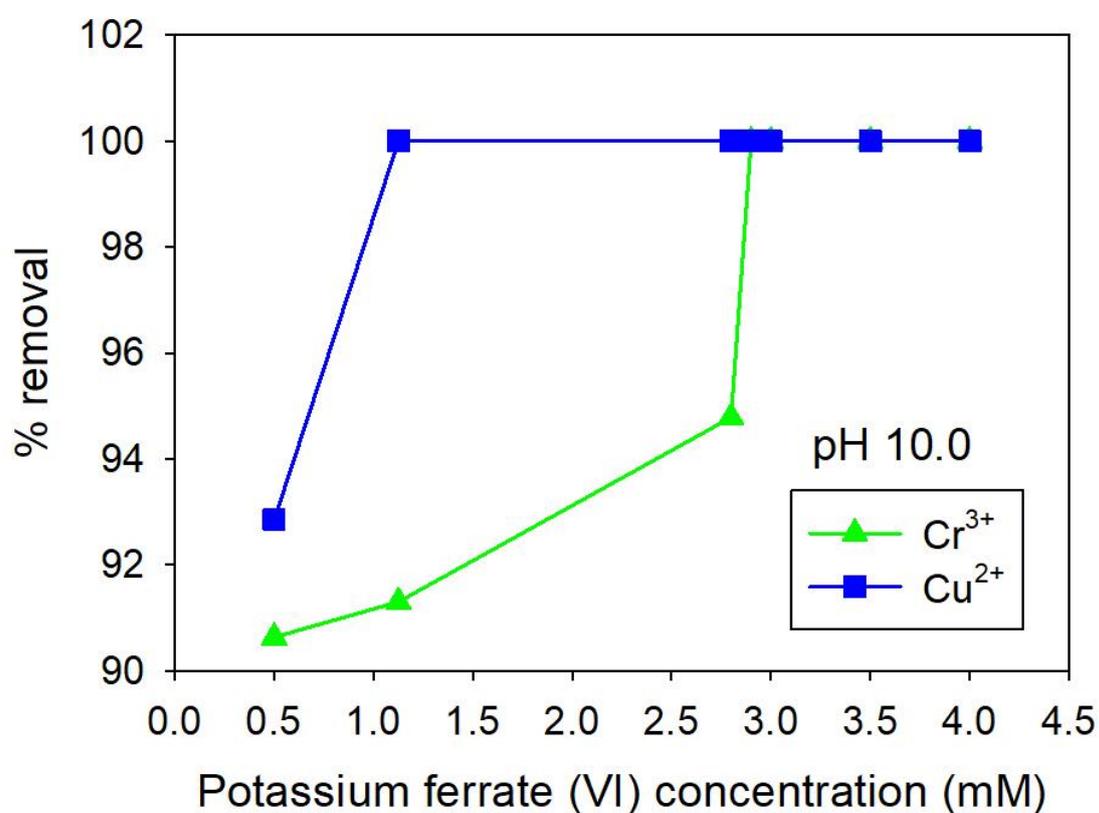


圖 72 重金屬溶液 E3 之 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率

重金屬溶液 F1 為混合 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ 溶液在 pH 3.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 7 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 73 所示。圖 73 顯示，在 410 nm 和 580 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 410 nm 為 Co^{2+} 的特徵峰，580 nm 為 Cr^{3+} 的特徵峰。

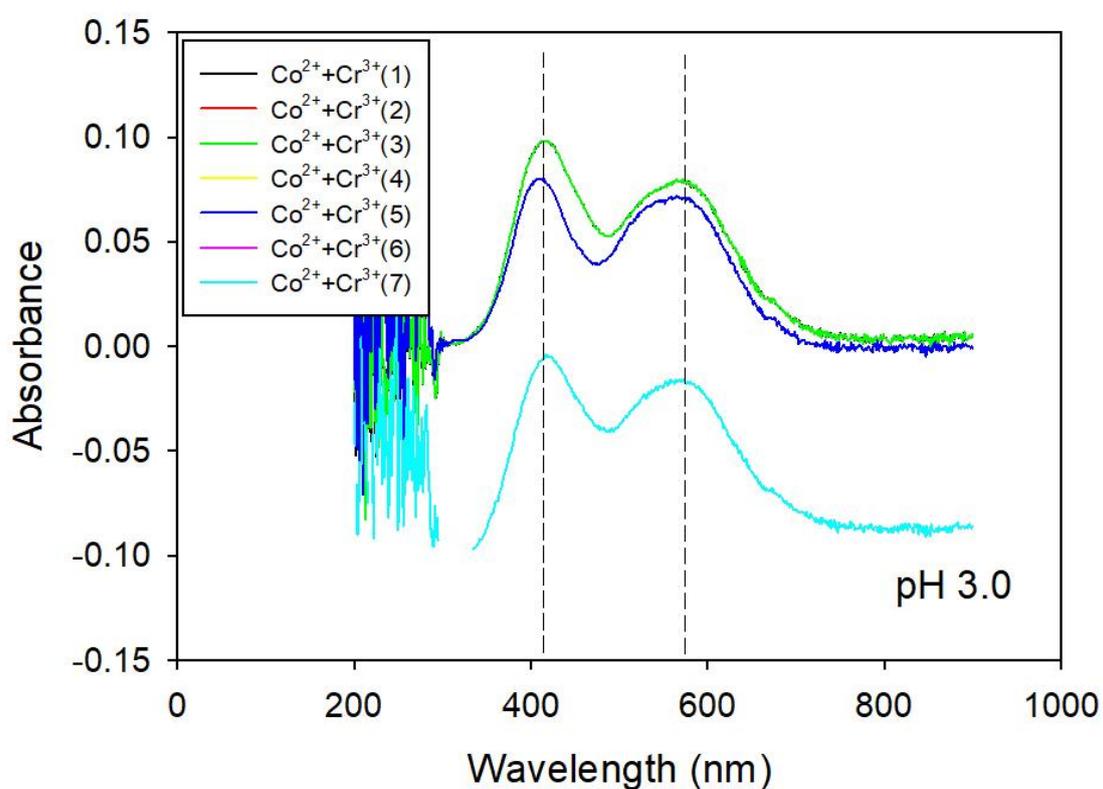


圖 73 重金屬溶液 F1 反應前之 UV-Vis 光譜圖

7 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 74 所示。由圖 74 可看出， Co^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸光度分別在 440 nm 和 580 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

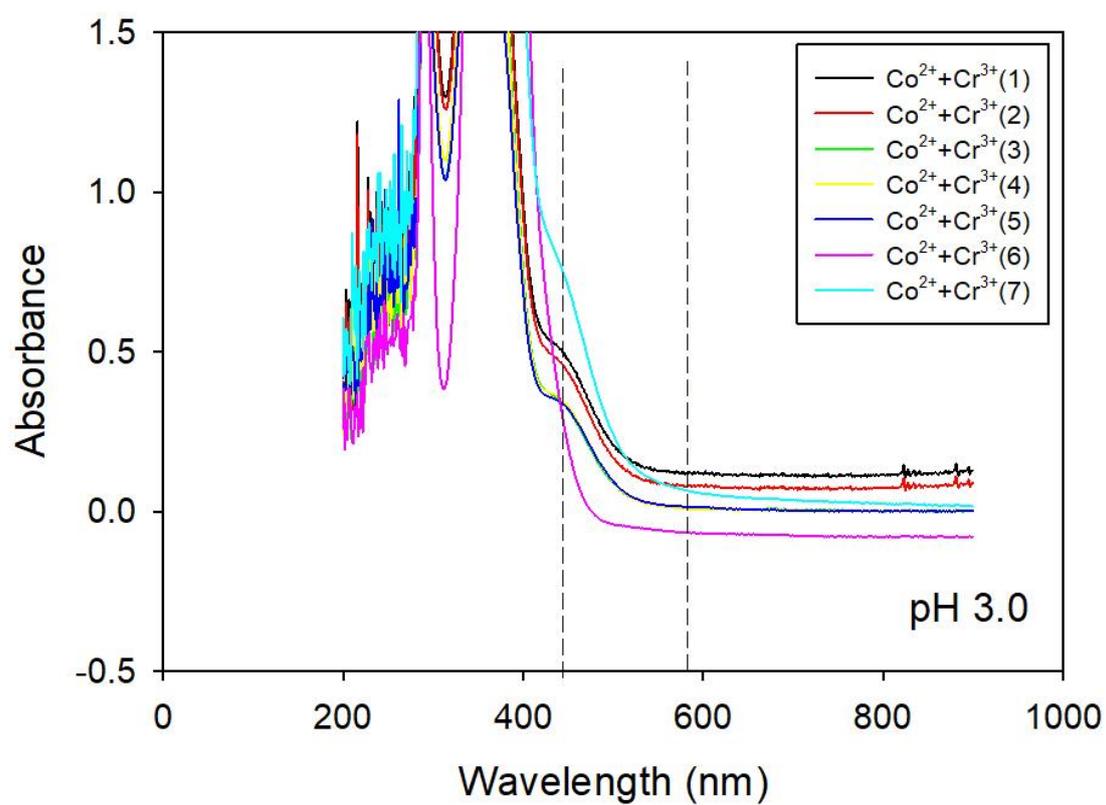


圖 74 重金屬溶液 F1 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 F1 之 Co^{2+} 和 Cr^{3+} 去除率計算結果如表 31 與表 32。圖 75 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 F1 之 Co^{2+} 和 Cr^{3+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 14.25 mM， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 13 mM， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%。

表 31 重金屬溶液 F1 之 Co^{2+} 去除率計算。

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Co^{2+} 反應前吸光度	Co^{2+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	8	0.057	0.040	29.82
2	10	0.066	0.045	31.82
3	13	0.066	0.032	51.52
4	13.5	0.059	0.019	67.80
5	14	0.059	0.009	84.75
6	14.25	0.057	0	100
7	14.5	0.066	0	10

表 32 重金屬溶液 F1 之 Cr³⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cr ³⁺ 反應前 吸光度	Cr ³⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	8	0.053	0.006	88.67
2	10	0.058	0.005	91.38
3	13	0.058	0	100
4	13.5	0.055	0	100
5	14	0.059	0	100
6	14.25	0.053	0	100
7	14.5	0.058	0	100

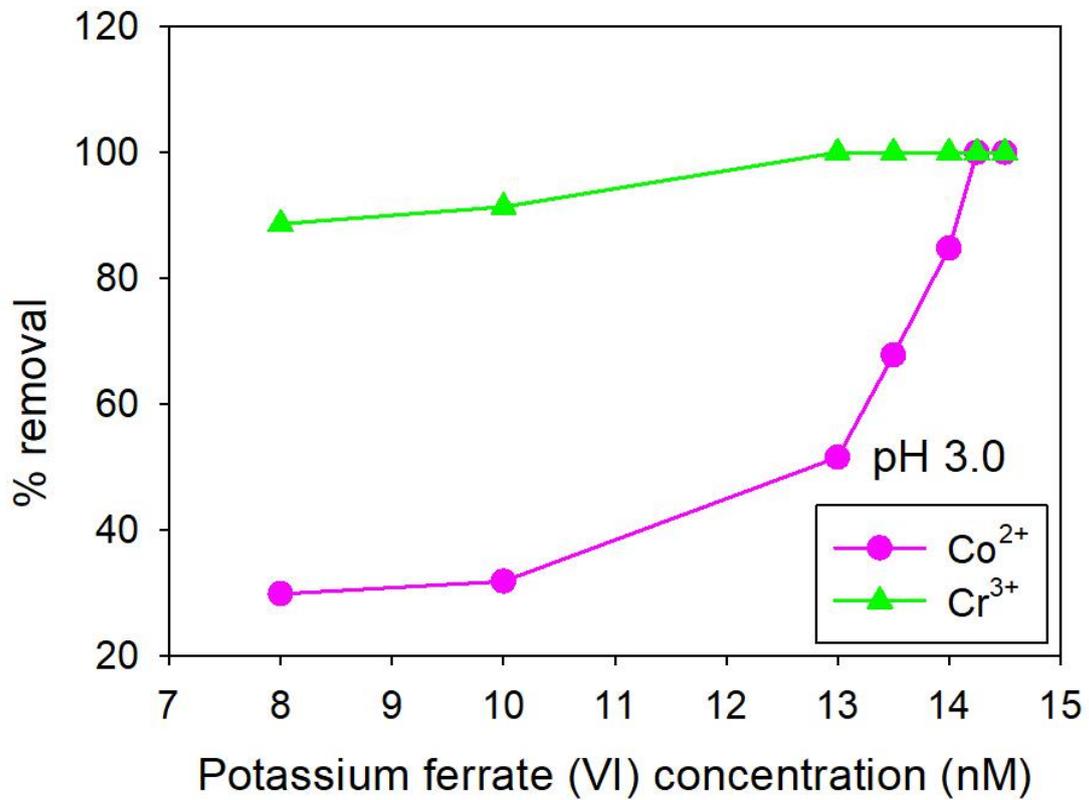


圖 75 重金屬溶液 F1 之 Co²⁺ 和 Cr³⁺ 去除率

重金屬溶液 F2 為混合 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ 溶液在 pH 7.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 8 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 76 所示。圖 76 顯示，在 410 nm 和 560 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 410 nm 為 Co^{2+} 的特徵峰，560 nm 為 Cr^{3+} 的特徵峰。

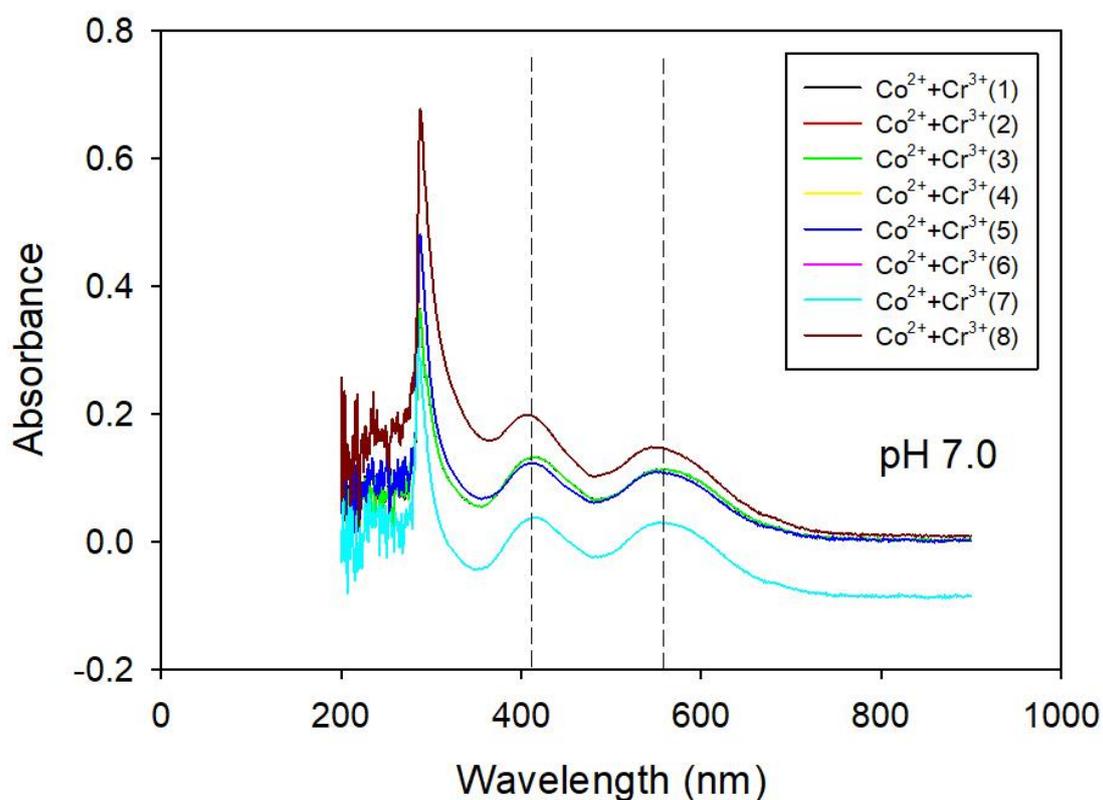


圖 76 重金屬溶液 F2 反應前之 UV-Vis 光譜圖

8 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 77 所示。由圖 77 可看出， Co^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸光度分別在 440 nm 和 560 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

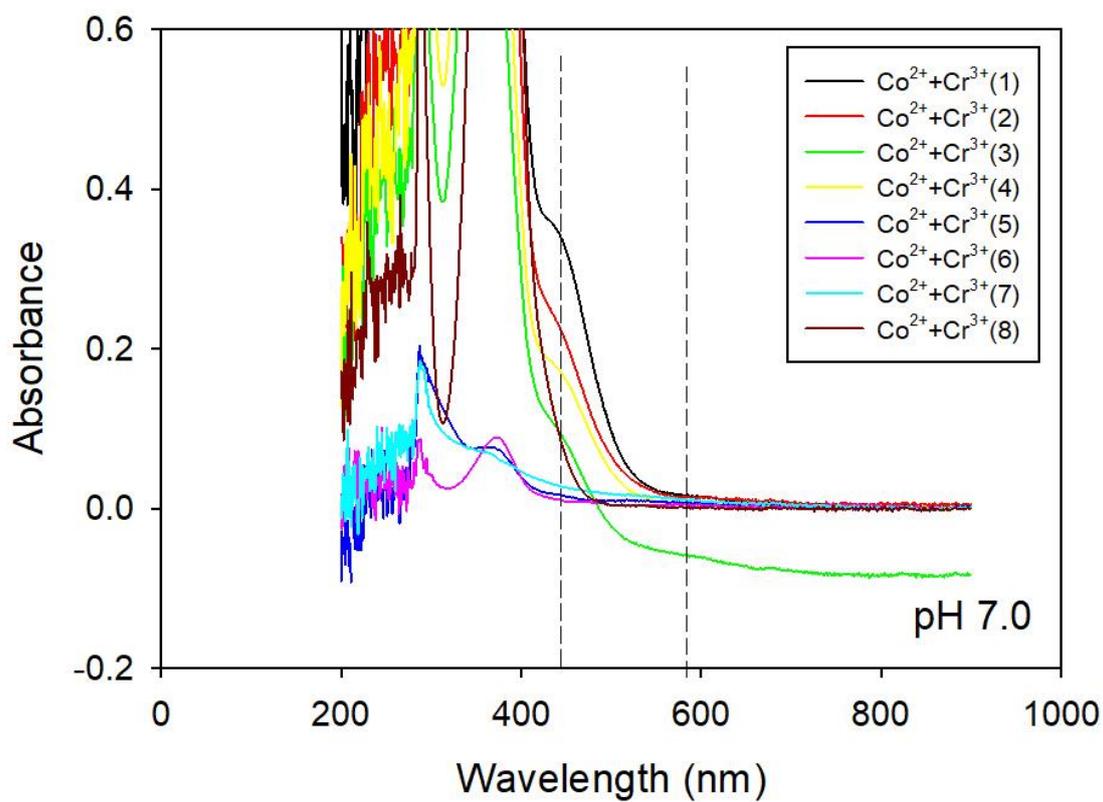


圖 77 重金屬溶液 F2 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 F2 之 Co^{2+} 和 Cr^{3+} 去除率計算結果如表 33 與表 34。圖 78 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 F2 之 Co^{2+} 和 Cr^{3+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 3 mM， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 1.5 mM， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%。

。

表 33 重金屬溶液 F2 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Co^{2+} 反應前吸光度	Co^{2+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	0.3	0.065	0.062	7.62
2	1	0.052	0.048	7.96
3	1.5	0.052	0.036	30.77
4	2	0.052	0.035	32.92
5	2.75	0.067	0.028	58.21
6	2.9	0.065	0.004	93.84
7	3	0.053	0	100
8	4	0.053	0	100

表 34 重金屬溶液 F2 之 Cr³⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cr ³⁺ 反應前 吸光度	Cr ³⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.3	0.068	0.007	86.76
2	1	0.074	0.004	94.59
3	1.5	0.074	0	100
4	2	0.074	0	100
5	2.75	0.064	0	100
6	2.9	0.068	0	100
7	3	0.059	0	100
8	4	0.059	0	100

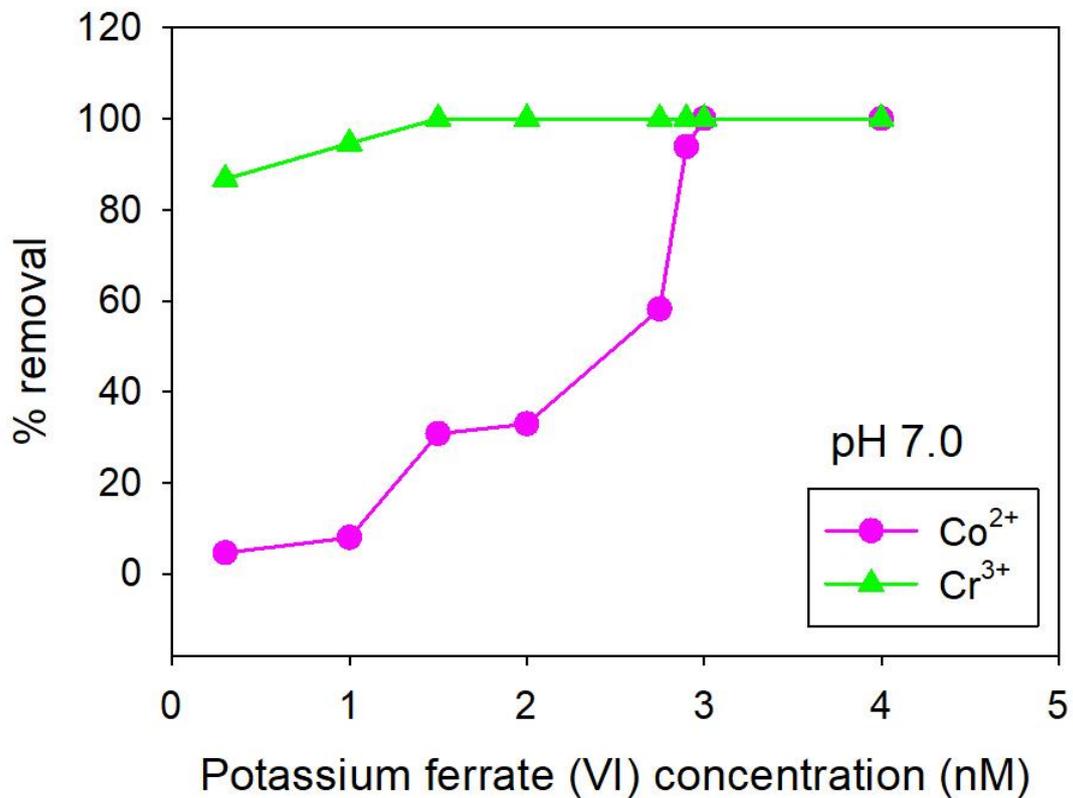


圖 78 重金屬溶液 F2 之 Co²⁺ 和 Cr³⁺ 去除率

重金屬溶液 F3 為混合 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ 溶液在 pH 10.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 8 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 79 所示。圖 79 顯示，在 380 nm 和 560 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 380 nm 為 Co^{2+} 的特徵峰，560 nm 為 Cr^{3+} 的特徵峰。

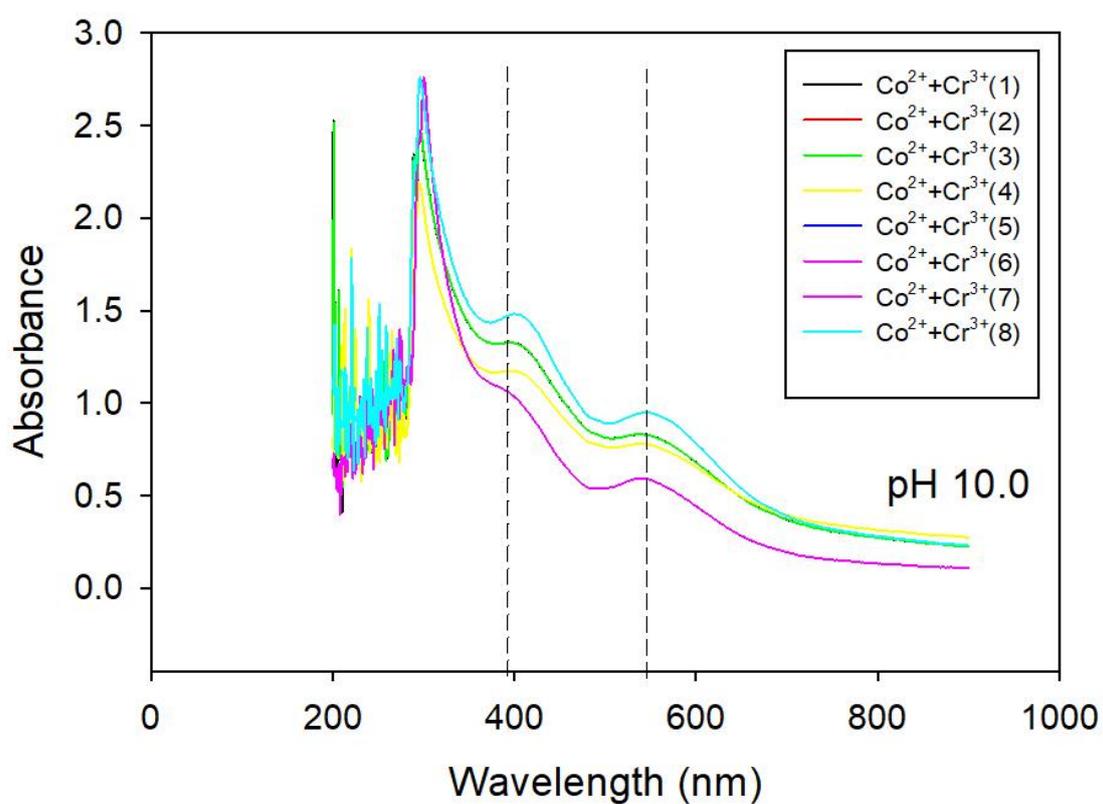


圖 79 重金屬溶液 F3 反應前之 UV-Vis 光譜圖

8 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 80 所示。由圖 80 可看出， Co^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸光度分別在 440 nm 和 560 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

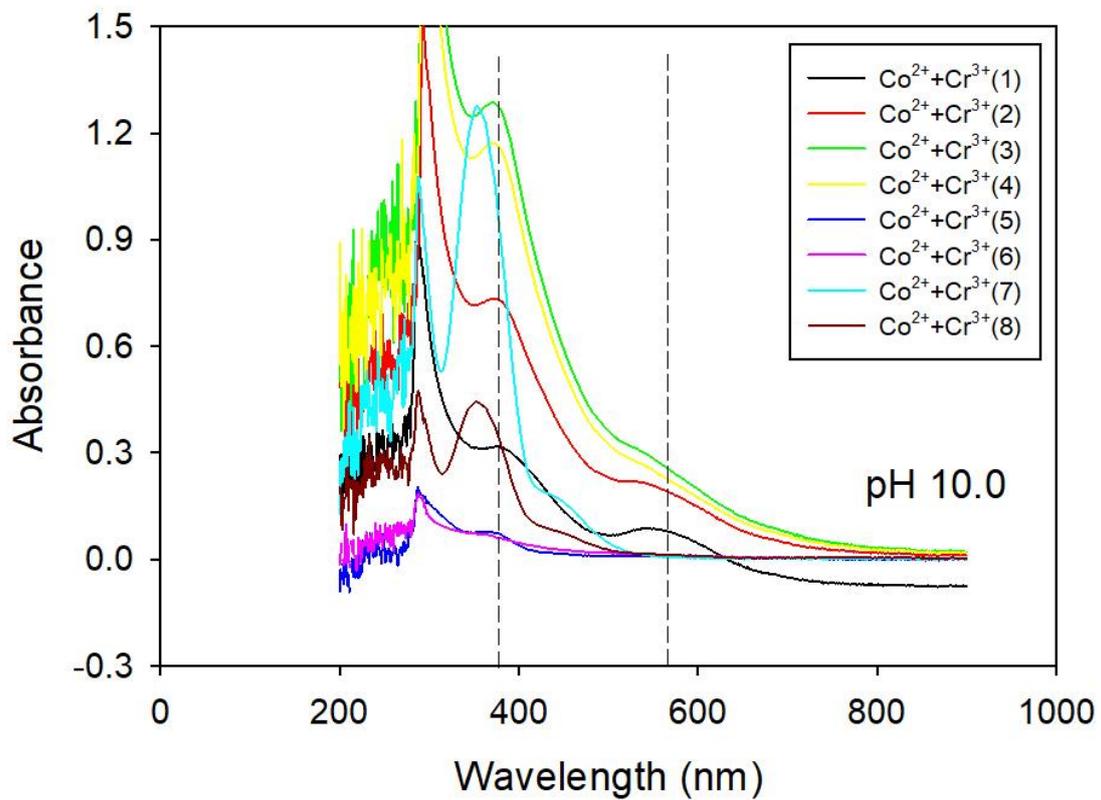


圖 80 重金屬溶液 F3 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 F3 之 Co^{2+} 和 Cr^{3+} 去除率計算結果如表 35 與表 36。圖 81 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 F3 之 Co^{2+} 和 Cr^{3+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 0.75 mM， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 0.8 mM， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%。

表 35 重金屬溶液 F3 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Co^{2+} 反應前吸光度	Co^{2+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	0.1	0.241	0.057	76.35
2	0.3	0.241	0.041	82.98
3	0.5	0.241	0.029	87.97
4	0.7	0.241	0.020	91.70
5	0.75	0.336	0	100
6	0.8	0.330	0	100
7	1.125	0.270	0	100
8	5.125	0.270	0	100

表 36 重金屬溶液 F3 之 Cr³⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cr ³⁺ 反應前 吸光度	Cr ³⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.1	0.256	0.067	73.83
2	0.3	0.203	0.032	84.24
3	0.5	0.203	0.010	95.07
4	0.7	0.203	0	100
5	0.75	0.244	0	100
6	0.8	0.246	0	100
7	1.125	0.254	0	100
8	5.125	0.254	0	100

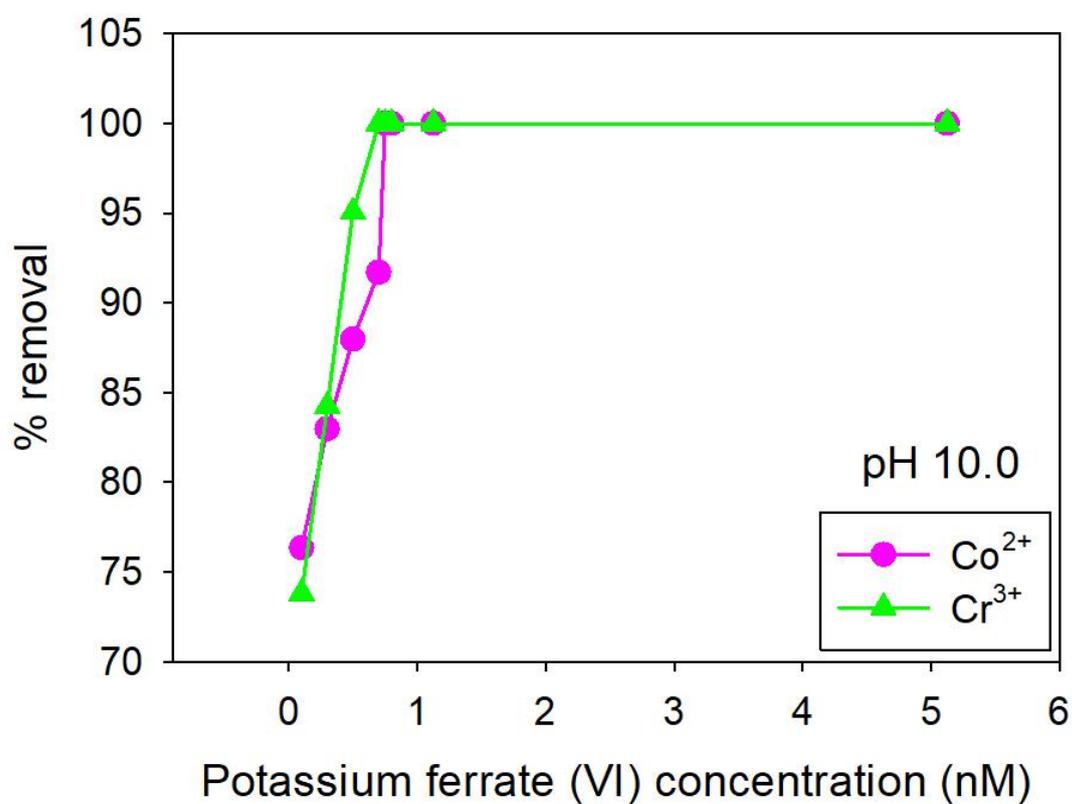


圖 81 重金屬溶液 F3 之 Co²⁺和 Cr³⁺ 去除率

4.2.3 三種成分溶液之重金屬去除

重金屬溶液 G1 為混合 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 溶液在 pH 3.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 10 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 82 所示。圖 82 顯示，在 420 nm 和 560 nm 和 780 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 410 nm 為 Co^{2+} 的特徵峰，560 nm 為 Cr^{3+} 的特徵峰，780 nm 為 Cu^{2+} 的特徵峰。

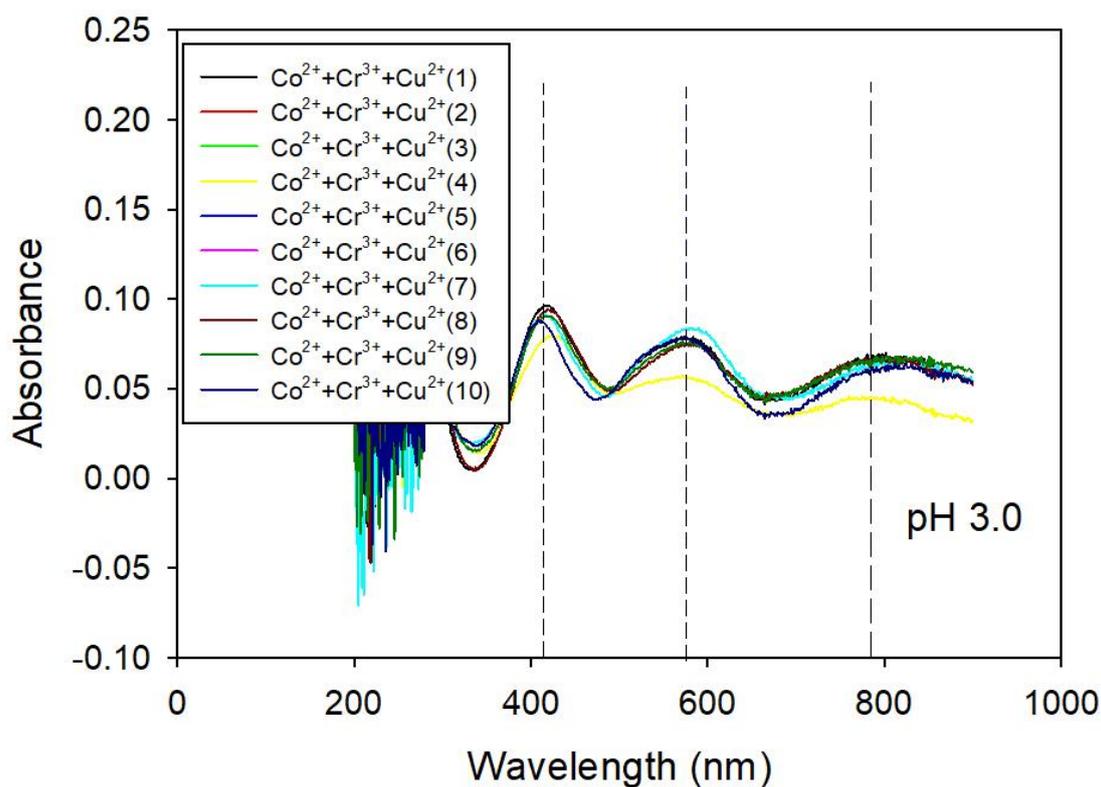


圖 82 重金屬溶液 G1 反應前之 UV-Vis 光譜圖

10 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 83 所示。由圖 83 可看出， Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 的吸光度分別在 440 nm、560 nm 和 780 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

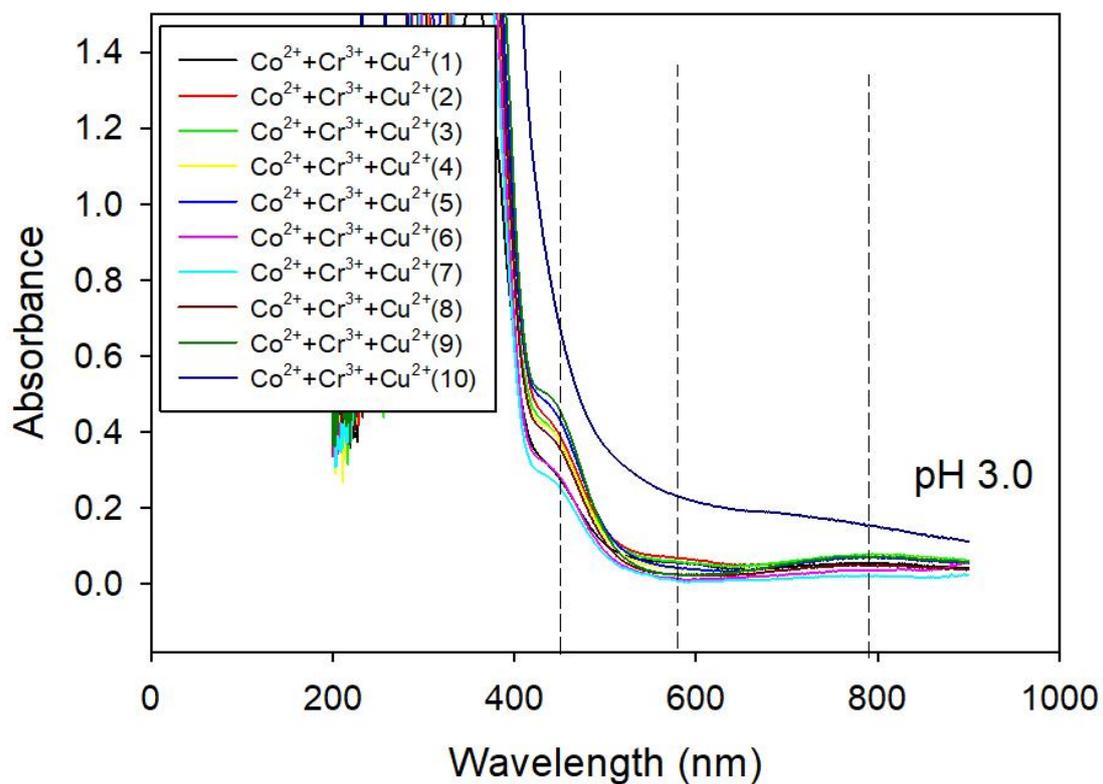


圖 83 重金屬溶液 G1 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 G1 之 Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率計算結果分別如表 37、表 38 和表 39。圖 84 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 F3 之 Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 15.25 mM， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 8.25 mM， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 15.5 mM， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 37 重金屬溶液 G1 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Co^{2+} 反應前吸光度	Co^{2+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	6	0.049	0.028	42.85
2	8	0.036	0.017	52.77
3	8.25	0.038	0.016	57.89
4	8.5	0.045	0.020	55.56
5	10	0.046	0.014	69.56
6	13	0.031	0.007	77.41
7	14.5	0.031	0.003	90.32
8	15	0.049	0.003	95.92
9	15.25	0.042	0	100
10	15.5	0.051	0	100

表 38 重金屬溶液 G1 之 Cr³⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cr ³⁺ 反應前 吸光度	Cr ³⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	6	0.029	0.007	72.41
2	8	0.026	0.002	92.31
3	8.25	0.025	0	100
4	8.5	0.025	0	100
5	10	0.026	0	100
6	13	0.019	0	100
7	14.5	0.019	0	100
8	15	0.040	0	100
9	15.25	0.032	0	100
10	15.5	0.040	0	100

表 39 重金屬溶液 G1 之 Cu²⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu ²⁺ 反應前 吸光度	Cu ²⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	6	0.023	0.016	30.43
2	8	0.021	0.014	33.33
3	8.25	0.023	0.014	39.13
4	8.5	0.024	0.010	41.66
5	10	0.027	0.010	62.96
6	13	0.015	0.004	73.33
7	14.5	0.015	0.002	83.33
8	15	0.024	0.005	79.17
9	15.25	0.032	0.004	87.50
10	15.5	0.022	0	100

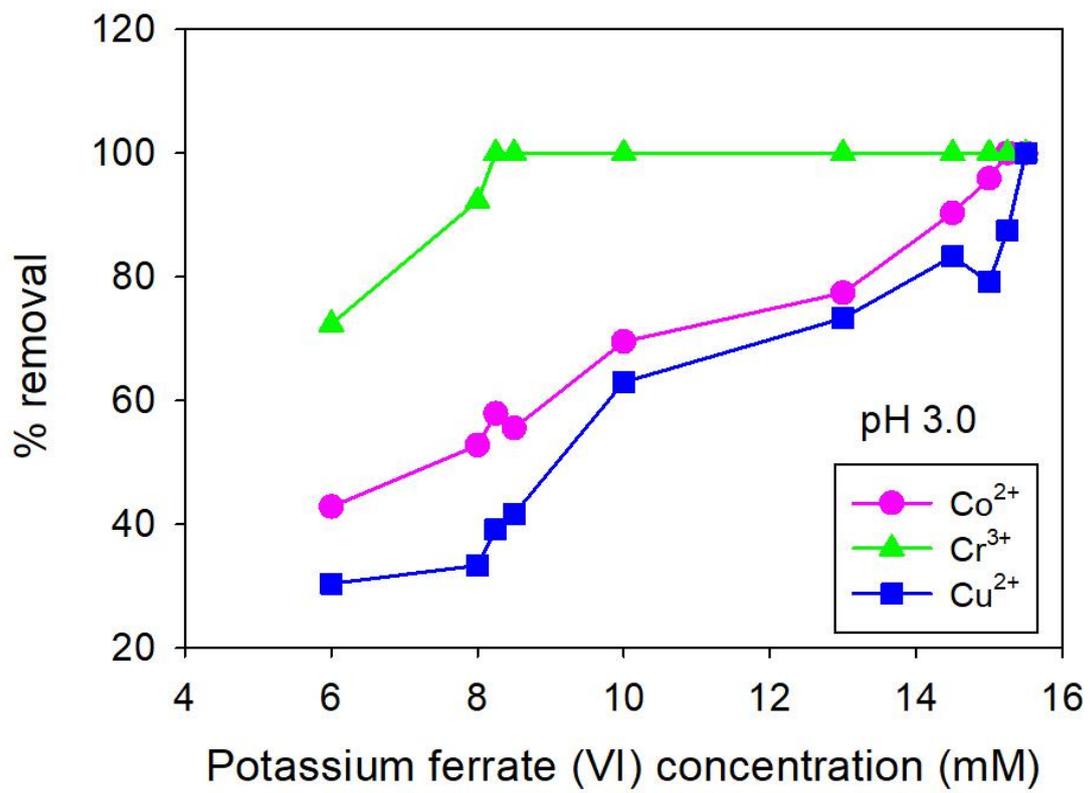


圖 84 重金屬溶液 G1 之 Co²⁺、Cr³⁺和 Cu²⁺去除率

重金屬溶液 G2 為混合 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 溶液在 pH 7.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 9 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 85 所示。圖 85 顯示，在 564 nm 和 681 nm 和 750 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 564 nm 為 Co^{2+} 的特徵峰，681 nm 為 Cr^{3+} 的特徵峰，750 nm 為 Cu^{2+} 的特徵峰。

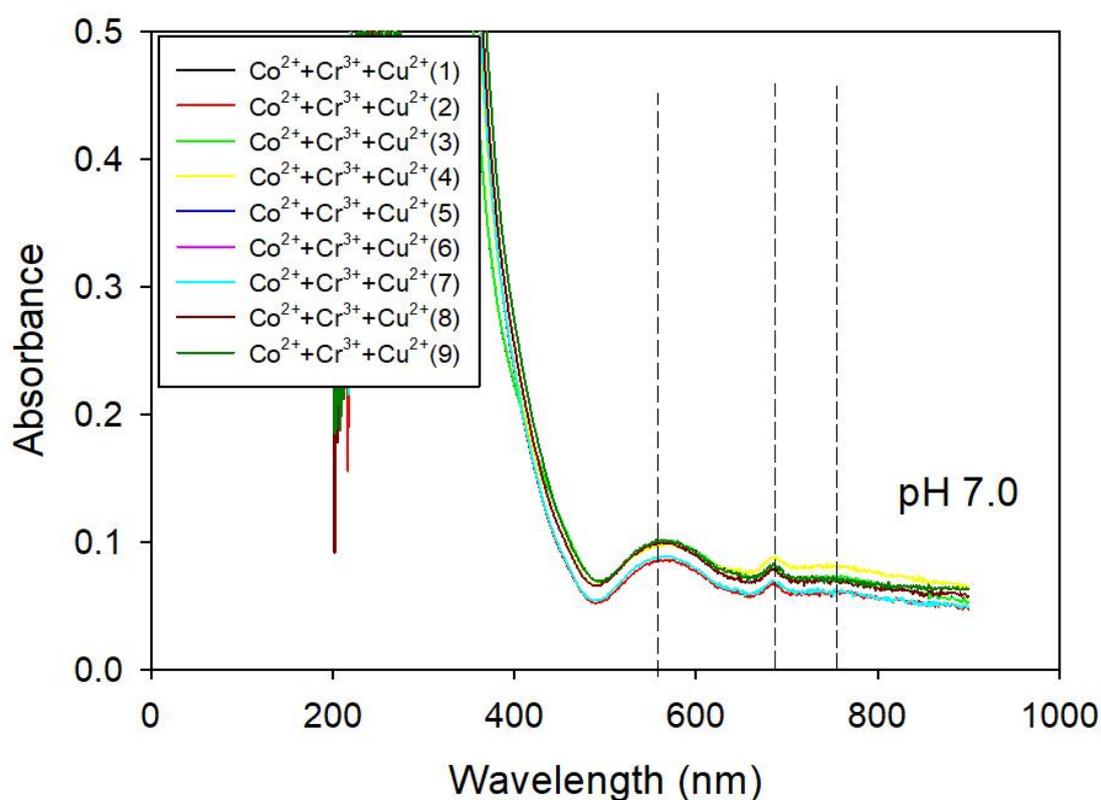


圖 85 重金屬溶液 G2 反應前之 UV-Vis 光譜圖

9 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 86 所示。由圖 86 可看出， Co^{2+} 、和 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 的吸光度分別在 564 nm、681 nm 和 750 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

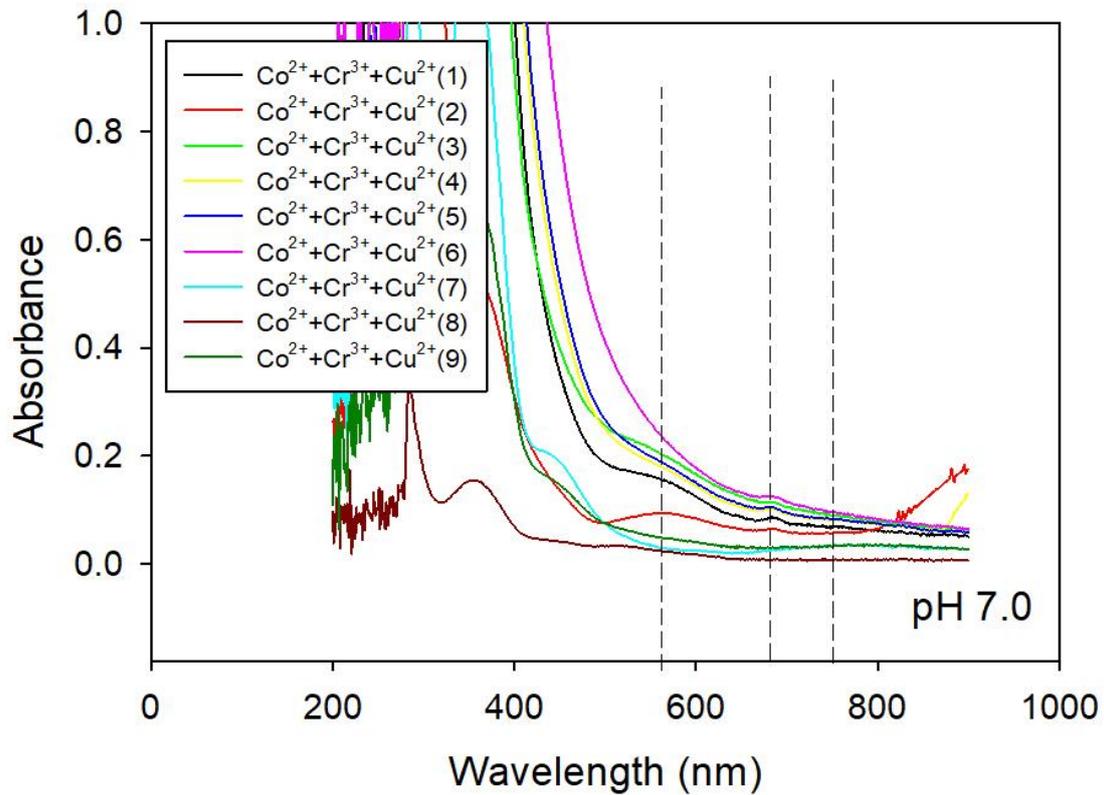


圖 86 重金屬溶液 G2 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 G2 之 Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率計算結果分別如表 40、表 41 和表 42。圖 87 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 F3 之 Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 2.6 mM， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 4.25 mM， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 0.3 mM， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 40 重金屬溶液 G2 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Co^{2+} 反應前吸光度	Co^{2+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	0.2	0.028	0.009	67.86
2	0.3	0.031	0.008	74.19
3	2	0.029	0.004	86.21
4	2.6	0.031	0	100
5	2.75	0.031	0	100
6	4	0.027	0	100
7	4.25	0.028	0	100
8	4.5	0.028	0	100
9	5	0.025	0	100

表 41 重金屬溶液 G2 之 Cr³⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cr ³⁺ 反應前 吸光度	Cr ³⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.2	0.010	0.008	20
2	0.3	0.0078	0.006	23.08
3	2	0.010	0.0064	32
4	2.6	0.0078	0.005	35.89
5	2.75	0.0078	0.003	61.53
6	4	0.012	0.003	83.33
7	4.25	0.011	0	100
8	4.5	0.011	0	100
9	5	0.010	0	100

表 42 重金屬溶液 G2 之 Cu²⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu ²⁺ 反應前 吸光度	Cu ²⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.2	0.006	0.0012	85
2	0.3	0.005	0	100
3	2	0.006	0	100
4	2.6	0.005	0	100
5	2.75	0.005	0	100
6	4	0.006	0	100
7	4.25	0.007	0	100
8	4.5	0.007	0	100
9	5	0.006	0	100

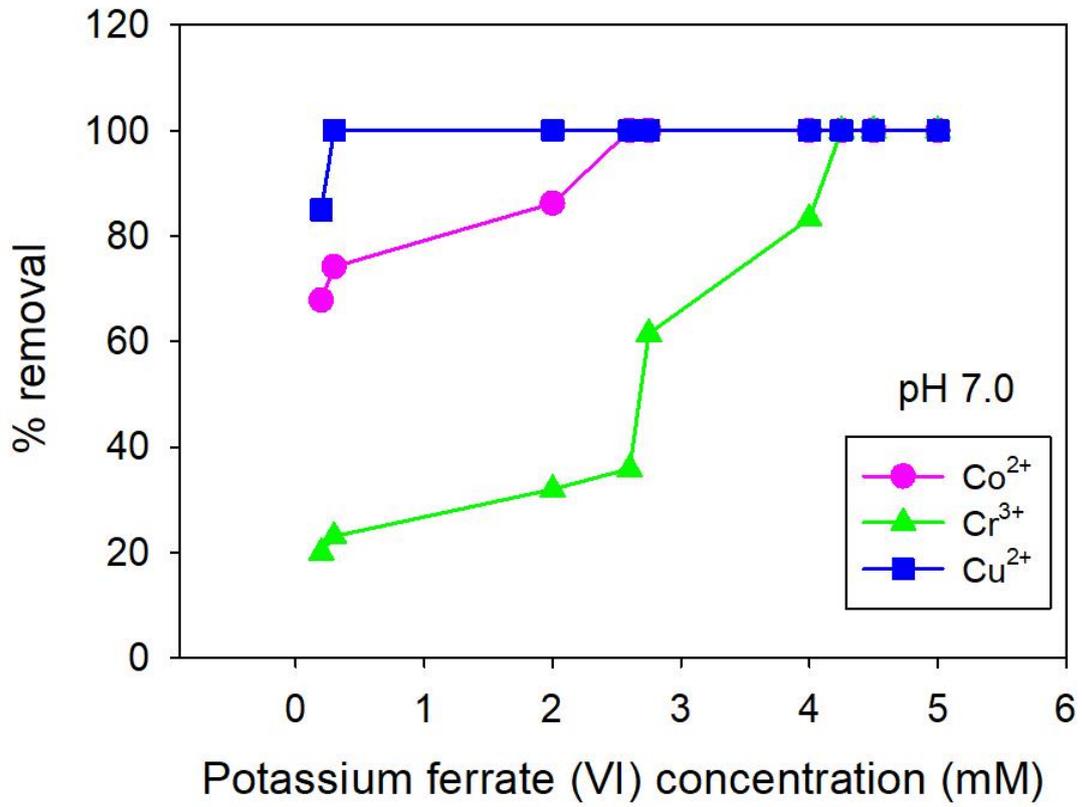


圖 87 重金屬溶液 G2 之 Co²⁺、Cr³⁺和 Cu²⁺去除率

重金屬溶液 G3 為混合 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 溶液在 pH 10.0 的環境下，以表 18 的結果為基礎，找出達 100% 去除率所需的最少高鐵酸鉀用量，總共操作 10 次，其反應前 UV-Vis 光譜圖如圖 88 所示。圖 88 顯示，在 550 nm 和 685 nm 和 760 nm 有明顯特徵峰，經判讀後 685 nm 為 Co^{2+} 的特徵峰，550 nm 為 Cr^{3+} 的特徵峰，760 nm 為 Cu^{2+} 的特徵峰。

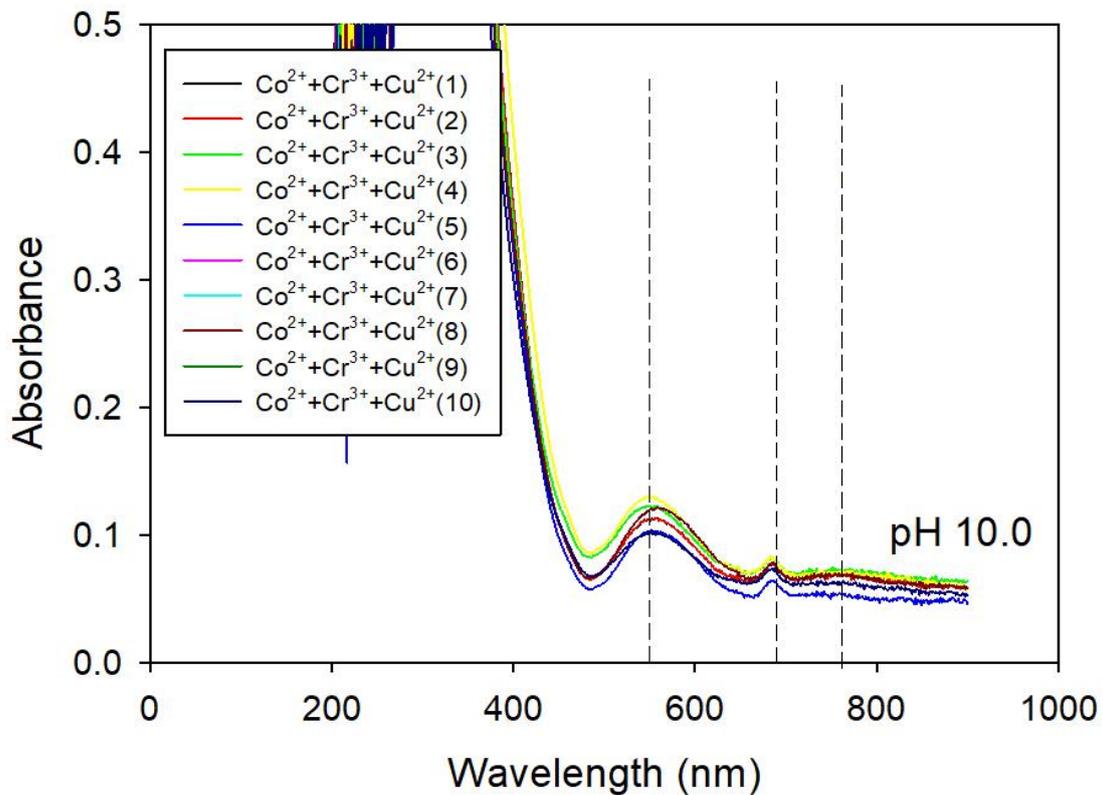


圖 88 重金屬溶液 G3 反應前之 UV-Vis 光譜圖

10 次操作後，反應後的 UV-Vis 光譜圖如圖 89 所示。由圖 89 可看出， Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 的吸光度分別在 685 nm、550 nm 和 760 nm，隨高鐵酸鉀用量的增加而下降。

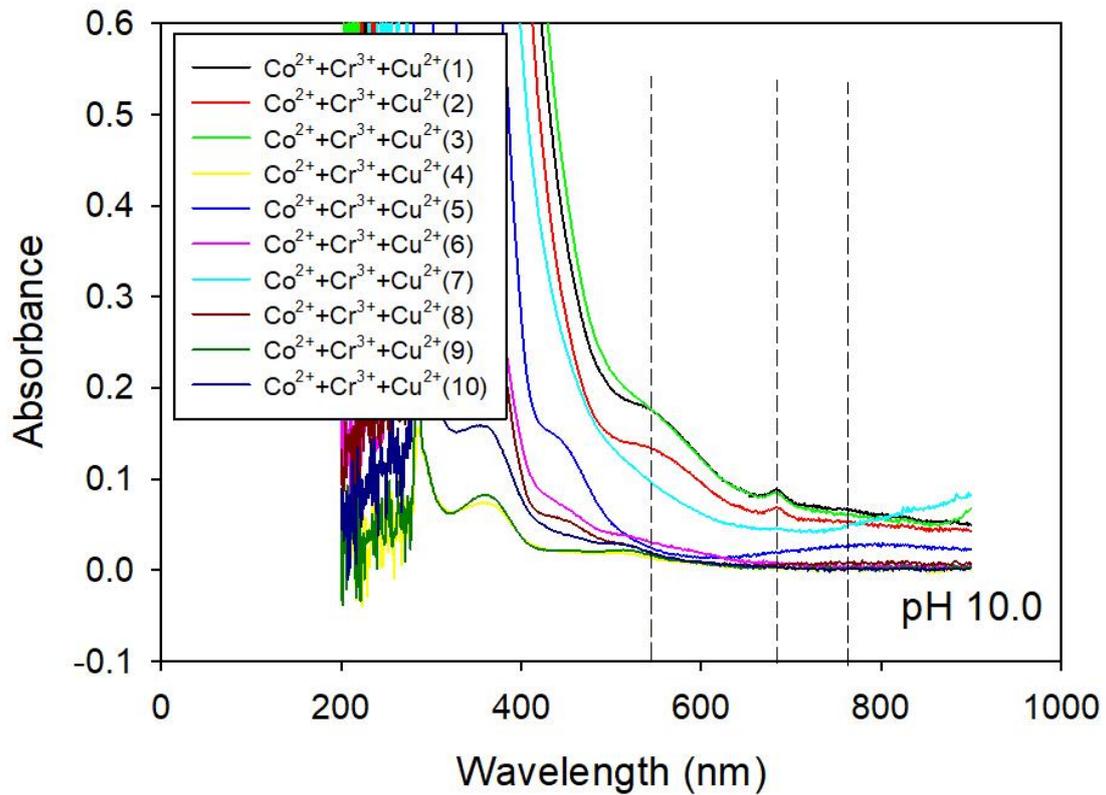


圖 89 重金屬溶液 G3 反應後之 UV-Vis 光譜圖

重金屬溶液 G3 之 Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 去除率計算結果分別如表 43、表 44 和表 45。圖 90 顯示，高鐵酸鉀劑量增加時，重金屬編號 F3 之 Co^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Cu^{2+} 含量降低，去除率增加。結果顯示高鐵酸鉀劑量為 5.25 mM， Co^{2+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 3.75 mM， Cr^{3+} 的去除率可以達到 100%；高鐵酸鉀劑量為 1.125 mM， Cu^{2+} 的去除率可以達到 100%。

表 43 重金屬溶液 G3 之 Co^{2+} 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑量(mM)	Co^{2+} 反應前吸光度	Co^{2+} 反應後吸光度	去除率(%)
1	0.5	0.010	0.007	30
2	1.125	0.0103	0.007	32.04
3	2.8	0.0103	0.006	41.74
4	3.5	0.012	0.003	75.00
5	3.75	0.012	0.0025	79.17
6	4	0.014	0.003	78.57
7	5.125	0.0103	0.001	89.32
8	5.25	0.011	0	100
9	5.5	0.011	0	100
10	6	0.014	0	100

表 44 重金屬溶液 G3 之 Cr³⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cr ³⁺ 反應前 吸光度	Cr ³⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.5	0.043	0.028	34.88
2	1.125	0.033	0.014	57.58
3	2.8	0.033	0.005	84.85
4	3.5	0.043	0.004	90.63
5	3.75	0.040	0	100
6	4	0.037	0	100
7	5.125	0.033	0	100
8	5.25	0.041	0	100
9	5.5	0.042	0	100
10	6	0.037	0	100

表 45 重金屬溶液 G3 之 Cu²⁺ 去除率計算

操作編號	高鐵酸鉀劑 量(mM)	Cu ²⁺ 反應前 吸光度	Cu ²⁺ 反應後 吸光度	去除率(%)
1	0.5	0.006	0.0013	97.83
2	1.125	0.003	0	100
3	2.8	0.003	0	100
4	3.5	0.005	0	100
5	3.75	0.007	0	100
6	4	0.007	0	100
7	5.125	0.003	0	100
8	5.25	0.006	0	100
9	5.5	0.006	0	100
10	6	0.007	0	100

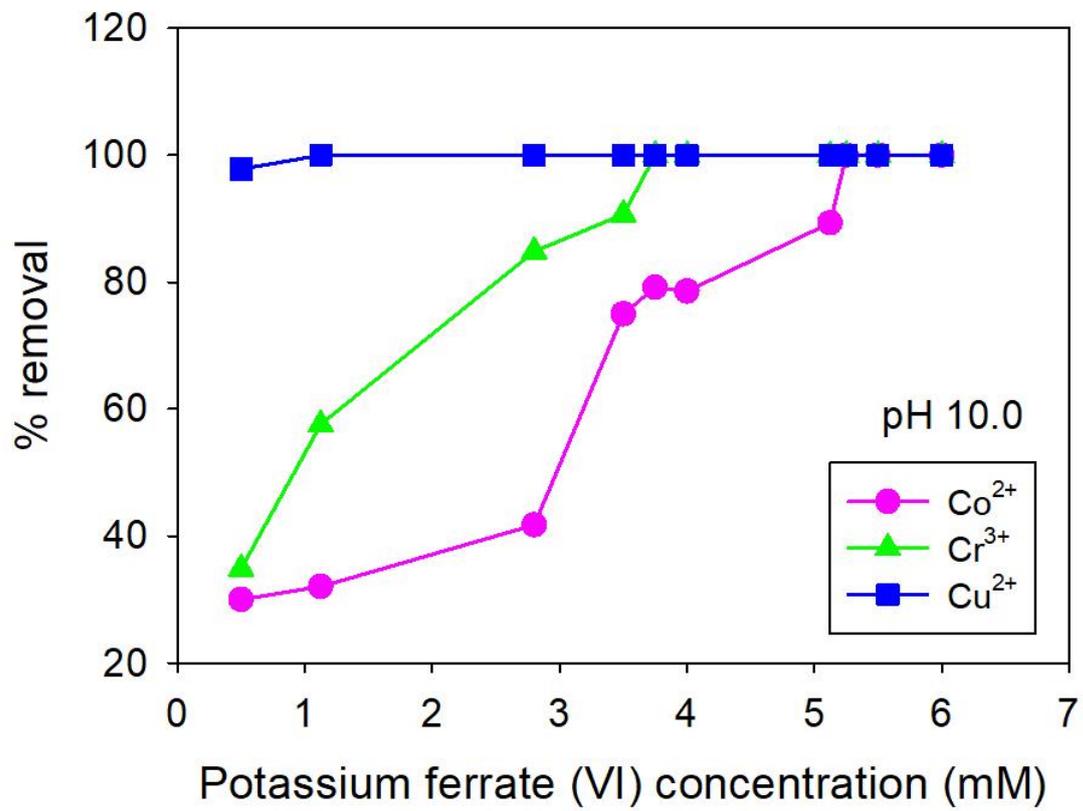


圖 90 重金屬溶液 G3 之 Co²⁺、Cr³⁺和 Cu²⁺去除率

4.2.4 重金屬去除綜合比較

(1) Co^{2+} 在不同環境之去除率比較

圖 91 為 Co^{2+} 在酸性環境下之去除率比較。在單一的 Co^{2+} 之 A1 溶液時，使用 14.5 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100%；在 Co^{2+} / Cu^{2+} 之 D1 溶液時，使用 14.5 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100%；在 Co^{2+} / Cr^{3+} 之 F1 溶液時，使用 14.25 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100%；在 Co^{2+} / Cr^{3+} / Cu^{2+} 之 G1 溶液時，使用 15.5 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100%。比較 Co^{2+} 在不同成分的環境下，當 Co^{2+} 在酸性環境中，D1 溶液中的 Co^{2+} 達到 100% 去除率時，所需的高鐵酸鉀劑量最少，劑量為 14.25 mM。

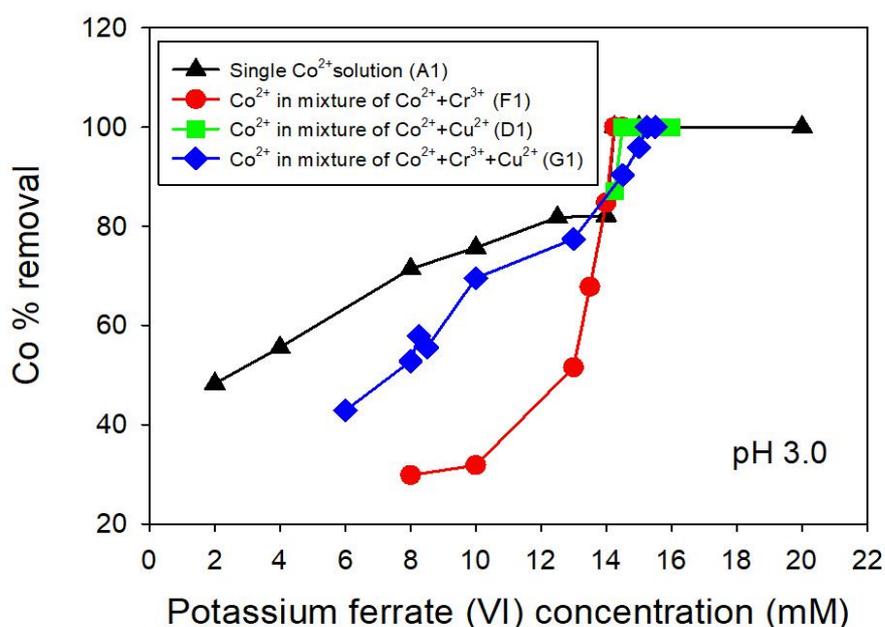


圖 91 Co^{2+} 在酸性環境下之去除率比較

圖 92 為 Co^{2+} 在中性環境下之去除率比較。在單一的 Co^{2+} 之 A2 溶液時，使用 0.3 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100% 去除率；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 D2 溶液時，使用 2.75 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100% 去除率；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ 之 F2 溶液時，使用 3 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100% 去除率；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 G2 溶液時，使用 2.6 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100% 去除率。比較 Co^{2+} 在不同成分的環境下，當 Co^{2+} 在中性環境中，A2 溶液中的 Co^{2+} 達到 100% 去除率時，所需的高鐵酸鉀劑量最少，劑量為 0.3 mM。

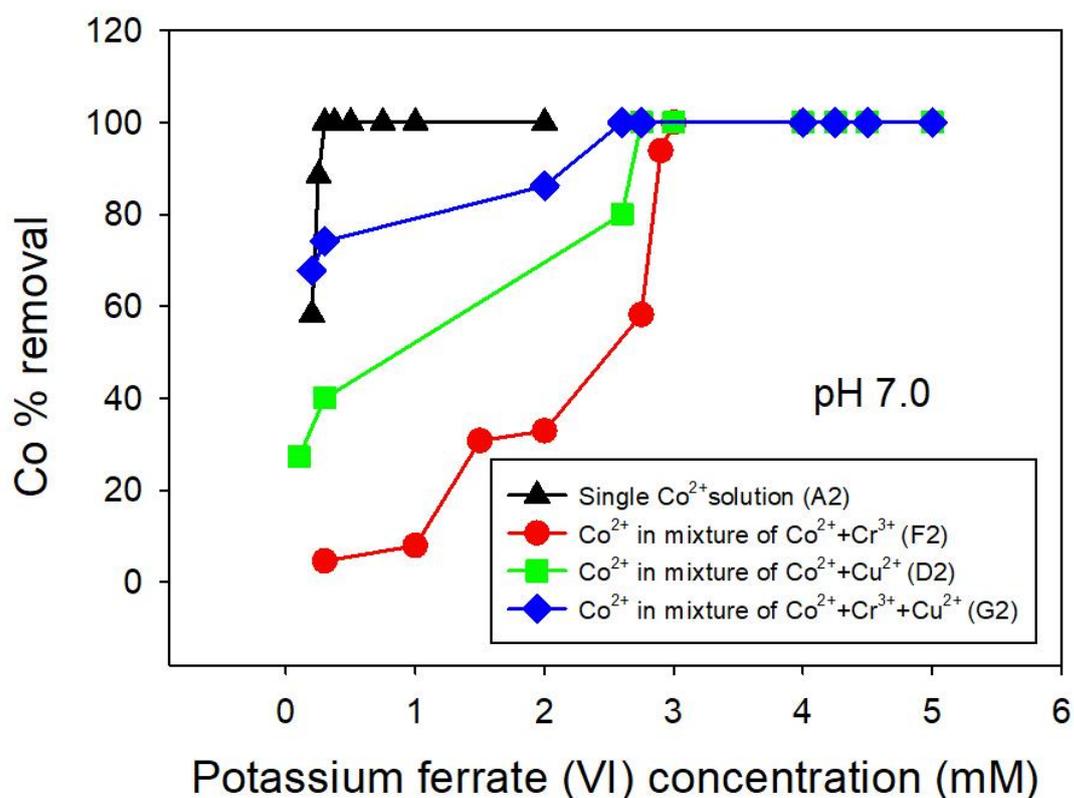


圖 92 Co^{2+} 在中性環境下之去除率比較

圖 93 為 Co^{2+} 在鹼性環境下之去除率比較。在單一的 Co^{2+} 之 A3 溶液時，使用 5.125 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100% 去除率；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 D3 溶液時，使用 3 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率達到 100%；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ 之 F3 溶液時，使用 0.75 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100%；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 G3 溶液下，使用 5.25 mM 高鐵酸鉀， Co^{2+} 的去除率可達到 100%。比較 Co^{2+} 在不同成分的環境下，當 Co^{2+} 鹼性環境中，F3 溶液中 Co^{2+} 達到 100% 去除率時，所需的高鐵酸鉀劑量最少，劑量為 0.75 mM。

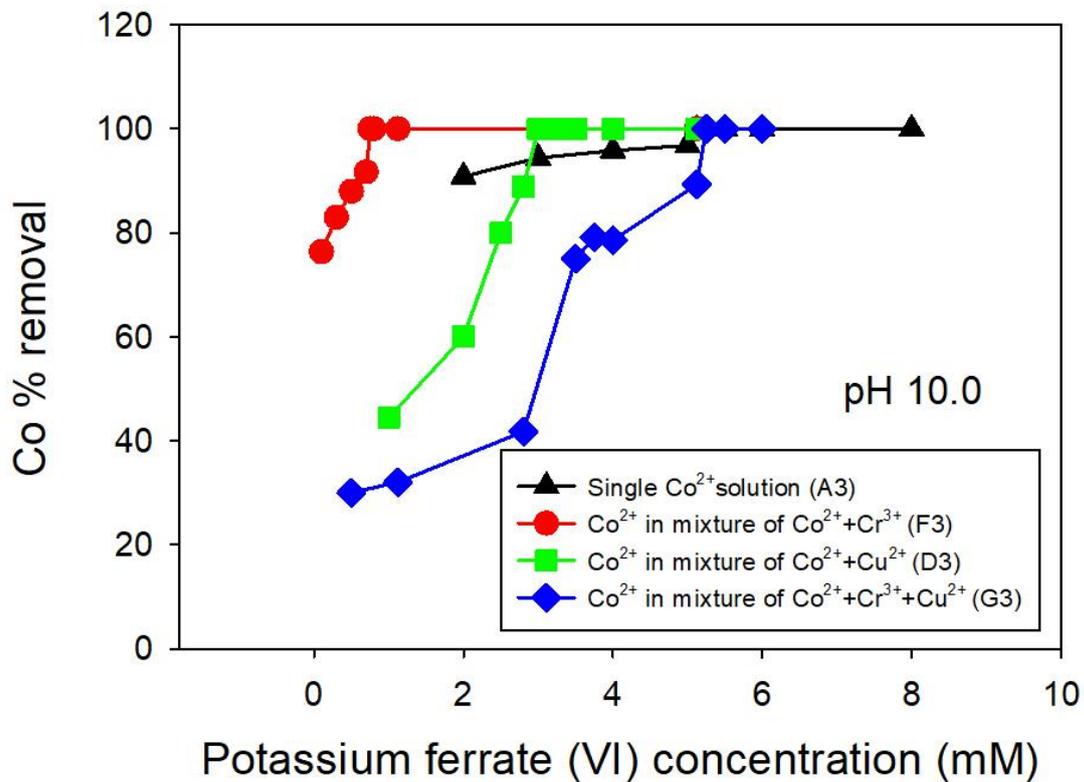


圖 93 Co^{2+} 在鹼性環境下之去除率比較

(2) Cr^{3+} 在不同環境之去除率比較

圖 94 為 Cr^{3+} 在酸性環境下之去除率比較。在單一的 Cr^{3+} 之 B1 溶液時，使用 13 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%；在 Cr^{3+} / Cu^{2+} 之 E1 溶液時，使用 13 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%；在 Co^{2+} / Cr^{3+} 之 F1 溶液時，使用 13 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%；在 Co^{2+} / Cr^{3+} / Cu^{2+} 之 G1 溶液時，使用 8.25 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%。比較 Cr^{3+} 在不同成分的環境下，當 Cr^{3+} 在酸性環境中，G1 溶液中的 Cr^{3+} 達到 100% 去除率時，所需的高鐵酸鉀劑量最少，劑量為 8.25 mM。

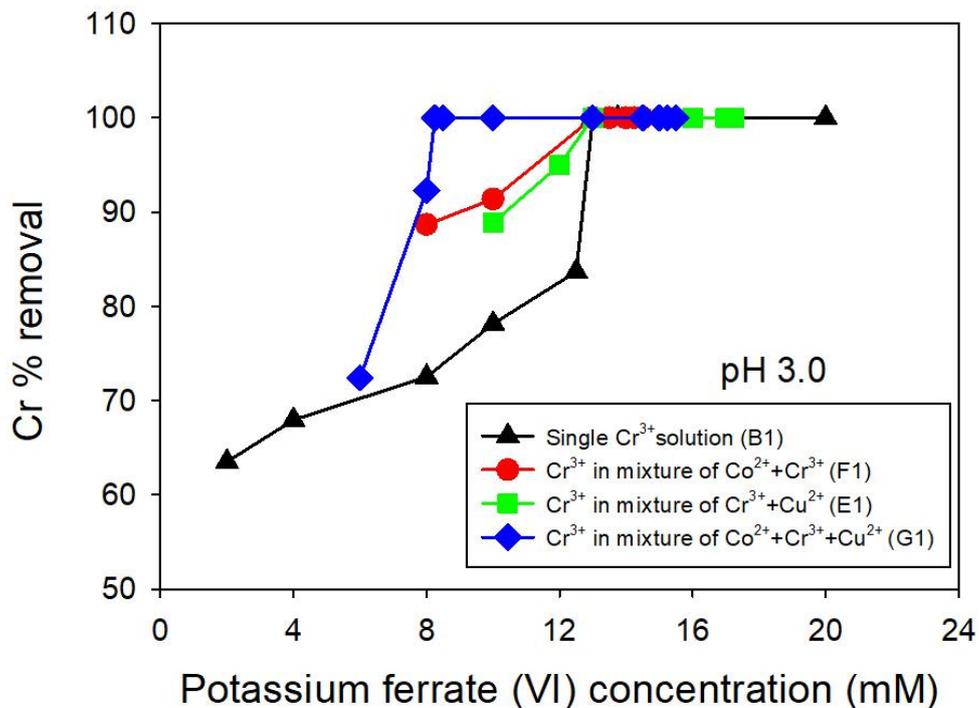


圖 94 Cr^{3+} 在酸性環境下之去除率比較

圖 95 為 Cr^{3+} 在中性環境下之去除率比較。在單一的 Cr^{3+} 之 B2 溶液時，使用 2.75 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%；在 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 E2 溶液時，使用 4.75 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ 之 F2 溶液時，使用 1.5 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 G2 溶液時，使用 4.25 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%。比較 Cr^{3+} 在不同成分的環境下，當 Cr^{3+} 在中性環境中，F2 溶液中的 Cr^{3+} 達到 100% 去除率時，所需的高鐵酸鉀劑量最少，劑量為 1.5 mM。

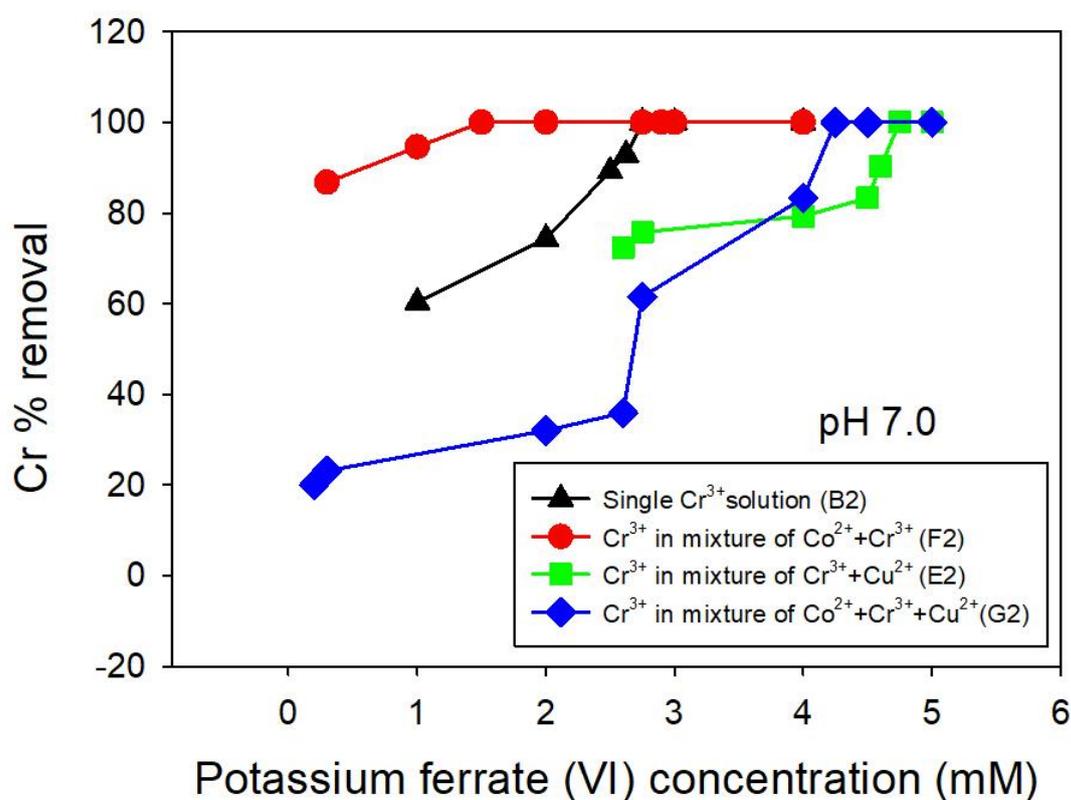


圖 95 Cr^{3+} 在中性環境下之去除率比較

圖 96 為 Cr^{3+} 在鹼性環境下之去除率比較。在單一的 Cr^{3+} 之 B3 溶液時，使用 1.125 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%；在 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 E3 溶液時，使用 2.9 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ 之 F3 溶液時，使用 0.7 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 G3 溶液時，使用 3.75 mM 高鐵酸鉀， Cr^{3+} 的去除率可達到 100%。比較 Cr^{3+} 在不同成分的環境下，當 Cr^{3+} 在鹼性環境中，F3 溶液中的 Cr^{3+} 達到 100% 去除率時，所需的高鐵酸鉀劑量最少，劑量為 0.7 mM。

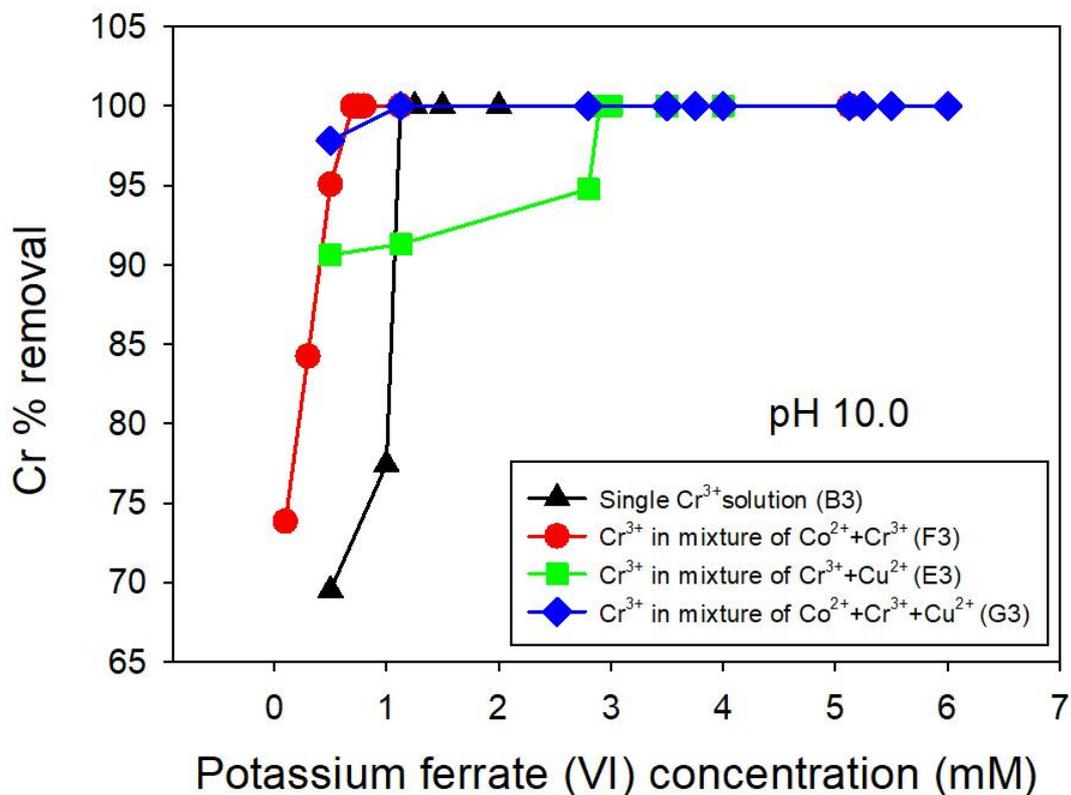


圖 96 Cr^{3+} 在鹼性環境下之去除率比較

(3) Cu^{2+} 在不同環境之去除率比較

圖 97 為 Cu^{2+} 在酸性環境下之去除率比較。在單一的 Cu^{2+} 之 C1 溶液時，使用 15.25 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%；在 Co^{2+} / Cu^{2+} 之 D1 溶液時，使用 15.75 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%；在 Cr^{3+} / Cu^{2+} 之 E1 溶液下，使用 17.25 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%；在 Co^{2+} / Cr^{3+} / Cu^{2+} 之 G1 溶液時，使用 15.5 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%。比較 Cu^{2+} 在不同成分的環境下，當 Cu^{2+} 在酸性環境中，C1 溶液中的 Cu^{2+} 達到 100% 去除率時，所需的高鐵酸鉀劑量最少，劑量為 15.25 mM。

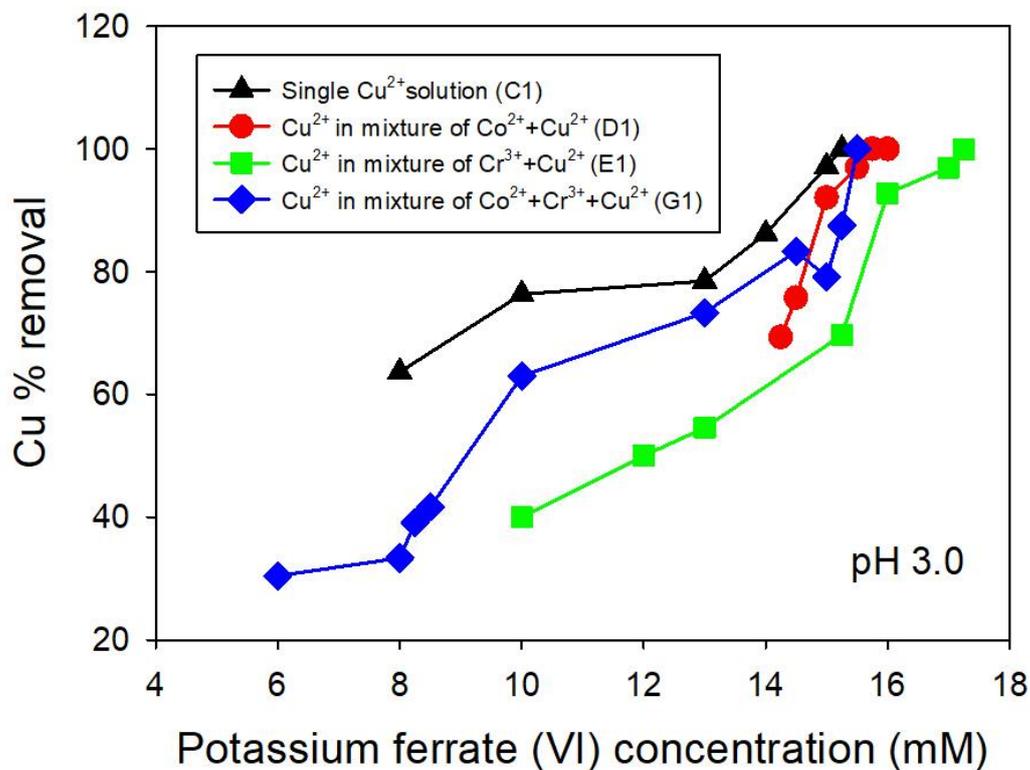


圖 97 Cu^{2+} 在酸性環境下之去除率

圖 98 為 Cu^{2+} 在中性環境下之去除率比較。在單一的 Cu^{2+} 之 C2 溶液時，使用 2.6 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%；在 Co^{2+} / Cu^{2+} 之 D2 溶液時，使用 2.75 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%；在 Cr^{3+} / Cu^{2+} 之 E2 溶液時，使用 2.75 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%；在 Co^{2+} / Cr^{3+} / Cu^{2+} 之 G2 溶液時，使用 0.3 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%。比較 Cu^{2+} 在不同成分的環境下，當 Cu^{2+} 在中性環境中，G2 溶液中的 Cu^{2+} 達到 100% 去除率時，所需的高鐵酸鉀劑量最少劑量為 0.3 mM。

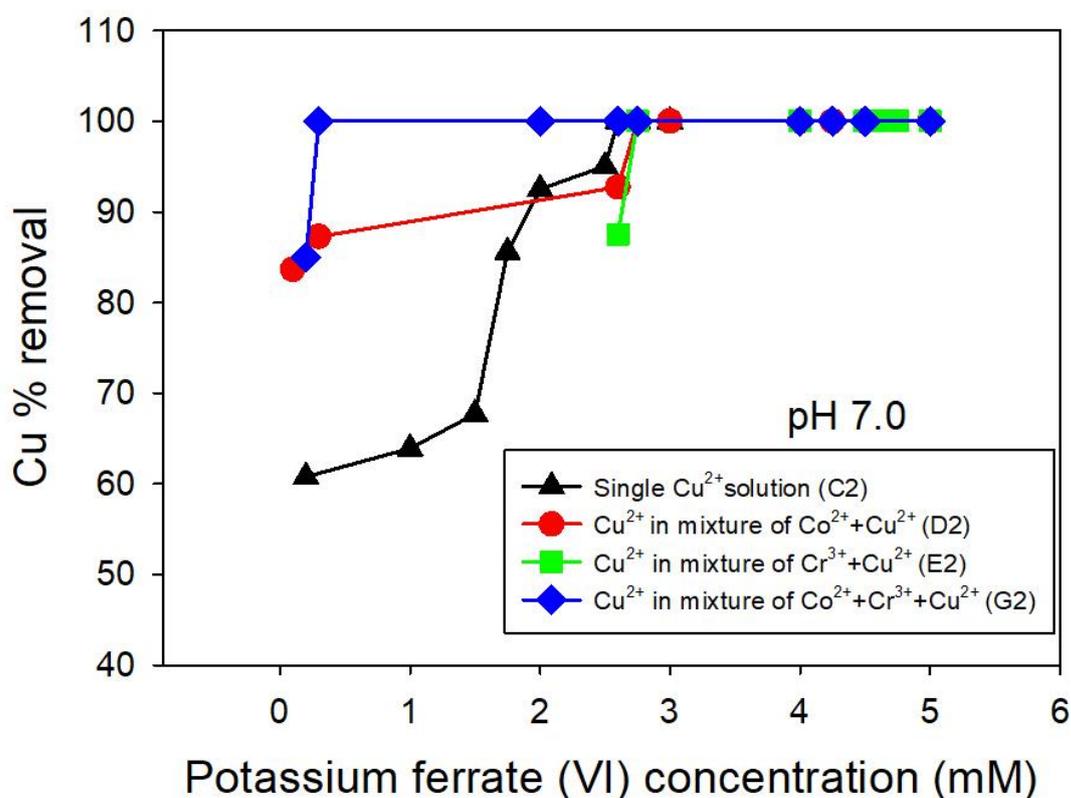


圖 98 Cu^{2+} 在中性環境下之去除率比較

圖 99 為 Cu^{2+} 在鹼性環境下之去除率比較。在單一的 Cu^{2+} 之 C3 溶液時，使用 2.8 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 D3 溶液時，使用 2.8 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%；在 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 E3 溶液時，使用 1.125 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%；在 $\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ 之 G3 溶液時，使用 1.125 mM 高鐵酸鉀， Cu^{2+} 的去除率可達到 100%。比較 Cu^{2+} 在不同成分的環境下，當 Cu^{2+} 在鹼性環境中，E3 溶液與 G3 溶液中的 Cu^{2+} 達到 100% 去除率時，所需的高鐵酸鉀劑量最少，劑量為 2.8 mM。

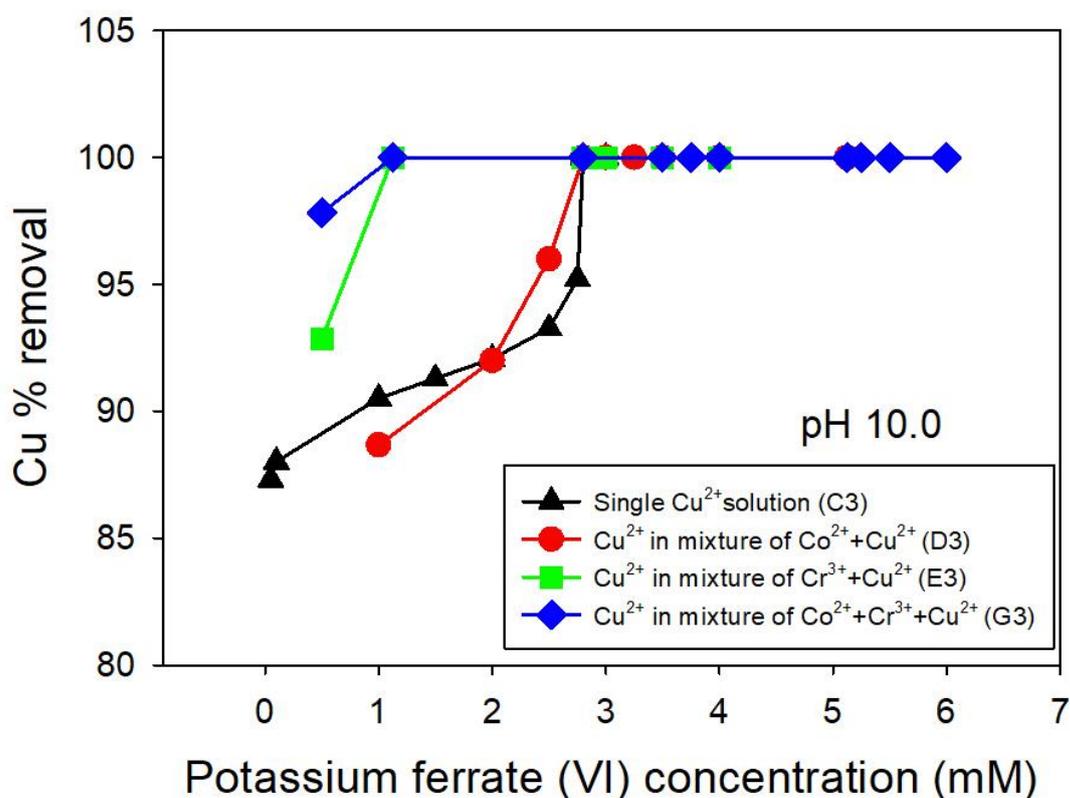


圖 99 Cu^{2+} 在鹼性環境下之去除率比較

綜合以上結果顯示，任一重金屬在單一成分或混合成分中，要達到 100% 去除率時，所需的高鐵酸鉀劑量，並不一定哪種特定環境中的用量會是最低，這與文獻有相似的結果^[41]。

第五章 結論

1. 本研究製備之高鐵酸鉀，其產率介於 17-40%，純度介於 50-85%。
2. 比較所有環境之 Co^{2+} 的去除率，以重金屬溶液 A2 (單一 Co^{2+} , pH 7.0)所需的高鐵酸鉀用量最少， Co^{2+} 的去除率就可達 100%，劑量為 0.3 mM。
3. 比較所有環境之 Cr^{3+} 的去除率，以重金屬溶液 F3 ($\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$, pH 10.0)所需的高鐵酸鉀用量最少， Cr^{3+} 的去除率就可達 100%，劑量為 0.7 mM。
4. 比較所有環境之 Cu^{2+} 的去除率，以重金屬溶液 G2 ($\text{Co}^{2+}/\text{Cr}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$, pH 7.0)所需的高鐵酸鉀用量最少， Cu^{2+} 的去除率就可達 100%，劑量為 0.3 mM。
5. 實驗結果顯示，在中性與鹼性溶液環境中，重金屬離子要達到 100% 的去除率，所需要的高鐵酸鉀劑量都比在酸性溶液環境中還低。

參考文獻

1. 「高鐵酸鉀」維基百科。
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%AB%98%E9%93%81%E9%85%B8%E9%92%BE>
2. 「高鐵酸鉀」百度百科。
<https://baike.baidu.com/item/%E9%AB%98%E9%93%81%E9%85%B8%E9%92%BE/8306487>
3. Jiang, J. Q. & Lloyd, B. (2002). Progress in the development and use of ferrate (VI) salt as an oxidant and coagulant for water and wastewater treatment. *Water Research*, **36(6)**, 1397-1408
4. 行政院原子能委員會，「六價鐵於高濃度頑抗有機廢液處理技術之研究」，委託研究計畫研究報告，2010年。
5. 行政院環保署毒字第 0920028 號，「飲用水水質標準」，2005年。
6. 行政院環境保護署，流放水標準，2019年4月29日。
7. Johnson, M. D. & Sharma, K. D. (1999). Kinetic and mechanism of the reduction of ferrate by one-electron reductants. *Inorganica Chimica Acta*, **293**, 229-233.
8. Graham, N., Jiang, C. C., Li, X. Z., Jiang, J. Q. & Ma, J. (2004). The influence of pH on the degradation of phenol and chlorophenols by potassium ferrate, *Chemosphere*, **56**, 949-956.
9. Eng, Y. Y., Sharma, V. K. & Ray, A. K. (2006). Ferrate (VI) - Green chemistry oxidant for degradation of cationic surfactant, *Chemosphere*, **63**, 1785-1790.

10. Sharma, V. K. (2002). Potassium ferrate (VI): an environmentally friendly oxidant, *Advances in Environmental Research*, **6**, 143-156.
11. Sharma, V. K. & O'Connor, D. B. (2000). Ferrate (V) oxidation of thiourea- a premix pulse radiolysis study, *Inorganica Chimica Acta*, **311**, 40-44.
12. Kisselev, Y. M., Kopelev, N. S., Zav'yalova, N. A., Perfiliev, Y. D. & Kazin, P. E. (1989). The Preparation of Alkali Metal Ferrates VI. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, **34**, 1250-1253.
13. Cici, M. & Cuci, Y. (1998). Production of some coagulant materials from galvanizing workshop waste. *Waste Management*, **17(7)**, 407-410.
14. Bouzek, K. & Roušar, I. (1993). Current efficiency during anodic dissolution of iron to ferrate (VI) in concentrated alkali hydroxide solutions. *Journal of Applied Electrochemistry*, **23(12)**, 1317-1322.
15. Bouzek, K. & Roušar, I. (1996). Influence of anode material on current yields during ferrate (VI) production by anodic iron dissolution Part I: Current efficiency during anodic dissolution of grey cast iron to ferrate (VI) in concentrated alkali hydroxide solutions. *Journal of Applied Electrochemistry*, **26(9)**, 919-923.
16. Bouzek, K., Roušar, I. & Taylor, M. A. (1996). Influence of anode material on current yield during ferrate (VI) production by anodic iron dissolution Part II: Current efficiency during anodic dissolution of white cast iron to ferrate (VI) in concentrated alkali hydroxide solutions. *Journal of Applied Electrochemistry*, **26(9)**, 925-931.
17. Bouzek, K. & Roušar, I. (1997). Influence of anode material on current

- yield during ferrate (VI) production by anodic iron dissolution: Part III: Current efficiency during anodic dissolution of pure iron to ferrate (VI) in concentrated alkali hydroxide solutions. *Journal of Applied Electrochemistry*, **27(6)**, 679-684.
18. Ockerman, L. T. & Schreyer, J. M. (1951). Preparation of sodium ferrate (VI). *Journal of the American Chemical Society*, **73(11)**, 5478-5478.
 19. Schreyer, J. M., Thompson, G. W., Ockerman, L. T., Douglas, B. E., Snyder, M. K. & Moeller, T. (1953). Potassium ferrate (VI). *Inorganic Syntheses*, **4**, 164-168.
 20. 張鵬，王雨露，趙冬琴。「高鐵酸鉀的製備及對 Mn(II)離子的去除研究」。化學研究與應用，第 30 卷，第 6 期，第 1015-1020 頁，2018 年。
 21. 劉汝鋒，劉婷靈，尚小琴。「高鐵酸鉀的製備工藝」。化工進展，第 32 卷，第 8 期，第 1902-1904 頁，2013 年。
 22. 蔣國民，王雲燕，柴立元。「高鐵酸鉀處理含砷廢水」。過程工程學報，第 9 卷，第 6 期，第 1104-1109 頁，2009 年。
 23. 王穎馨，周雪婷，卜洪龍。「高鐵酸鉀的製備及其對水中 As(III)，Pb(II)的去除效能研究」。華南師範大學學報（自然科學版），第 4 卷，第 80-87 頁，2015 年。

24. 鄭懷禮，鄧琳莉，吉方英。「高鐵酸鉀製備新方法與光譜表徵」。
光譜學與光譜分析，第 21 卷，第 2 期，第 2646-2649 頁，2010
年。
25. Wood, R. H. (1958). The heat, free energy and entropy of the ferrate
(VI) ion. *Journal of The American Chemical Society*, **80(9)**, 2038-
2041.
26. Carrington, A. & Symons, M. C. R. (1963). Structure and Reactivity
of the Oxyanions of Transition Metals. *Chemical Reviews*, **63(5)**, 443-
460.
27. Schreyer, J. M., Thompson, G. W. & Ockerman, L. T. (1950). Ferrate
oxidimetry. *Analytical Chemistry*, **22(5)**, 691-692.
28. 李忠光、劉新校、邱惠敏。「重金屬廢水處理技術之進展」。環
保簡訊，第23卷，第6期，第1-3頁，2014年。
29. 「膜分離法」，百度百科。
<https://baike.baidu.com/item/%E8%86%9C%E5%88%86%E7%A6%BB%E6%B3%95>
30. 「吸附法」，百度百科。
<https://baike.baidu.com/item/%E5%90%B8%E9%99%84%E6%B3%95>
31. 「吸附法」，華人百科。
<https://www.itsfun.com.tw/%E6%B4%BB%E6%80%A7%E7%82%AD%E5%90%B8%E9%99%84%E6%B3%95/wiki-3291207-0105086>

32. 「化學沉澱法」，華人百科。
<https://www.itsfun.com.tw/%E5%8C%96%E5%AD%B8%E6%B2%89%E6%B7%80%E6%B3%95/wiki-1590776-8917556>
33. 百度知道。
<https://zhidao.baidu.com/question/1819641574965035068.html>
34. 「植物修復法」，華人百科。
<https://baike.baidu.com/item/%E6%A4%8D%E7%89%A9%E4%BF%AE%E5%A4%8D%E6%B3%95>
35. 「廢水生物處理法」，百度百科。
<https://baike.baidu.com/item/%E5%BA%9F%E6%B0%B4%E7%94%9F%E7%89%A9%E5%A4%84%E7%90%86%E6%B3%95>
36. 李昕儒。「高鐵酸鉀產率及純度之研究」。碩士論文，東海大學，2016年。
37. Sugihara, S., Armes, S. P., Blanazs, A. & Lewis, A. L. (2011). Non-spherical morphologies from cross-linked biomimetic diblock copolymers using RAFT aqueous dispersion polymerization. *Soft Matter*, **7(22)**, 10787-10793.
38. Petrou, A. L., Thoma, V. & Tampouris K. (2010). Kinetics and Mechanism of the Reaction between Chromium (III) and 2,3-Dihydroxybenzoic Acid in Weak Acidic Aqueous Solutions, *Bioinorganic Chemistry and Applications*, **2010**, 348692.
39. Inoue, F., Philipsen, Radisic, A., Armini, S. H., Civale, Y., Shingubara, S. & Leunissen, P. (2012). Electroless Copper Bath Stability Monitoring with UV-VIS Spectroscopy, pH, and Mixed Potential

Measurements. *Journal of The Electrochemical Society*, **159(7)**, 437-441.

40. 李定華。「高鐵酸鉀應用於重金屬去除之研究」。碩士論文，東海大學，2017年。
41. Lim, M. & Kim, M. J. (2010). Effectiveness of Potassium Ferrate (K_2FeO_4) for Simultaneous Removal of Heavy Metals and Natural Organic Matters from River Water. *Water, Air, & Soil Pollution*, **211**, 313-322.