

國立交通大學
環境工程研究所

碩士論文

混凝程序中加藥組合及攪拌強度對
顆粒去穩定之影響 - 模廠試驗

Effect of chemicals combination and mixing strength on
particle destabilization in coagulation process - A pilot study

研究生：洪銘佑

指導教授：黃志彬 教授

中華民國一〇二年七月

混凝程序中加藥組合及攪拌強度對顆粒
去穩定之影響 - 模廠試驗

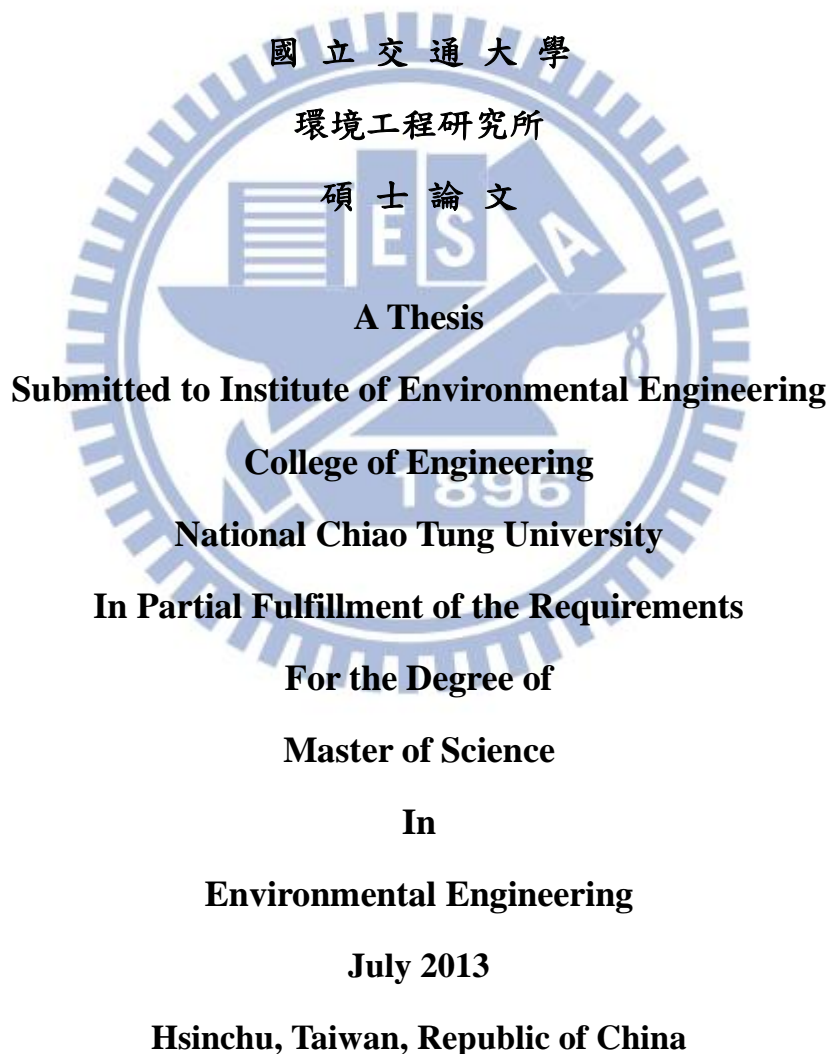
**Effect of chemicals combination and mixing strength on
particle destabilization in coagulation process - A pilot study**

研究生：洪銘佑

Student : Ming-Yu Hung

指導教授：黃志彬

Advisor : Chihpin Huang



中華民國一〇二年七月

混凝程序中加藥組合及攪拌強度對顆粒 去穩定之影響 - 模廠試驗

研究生：洪銘佑

指導老師：黃志彬 教授

國立交通大學環境工程研究所

摘要

淨水場混凝操作之快混攪拌強度(G 及 t 值)的選擇與混凝膠羽之形成密切相關，而天然濁水之水質及混凝加藥組合會影響混凝去穩定顆粒的程度及膠羽生長特性，故本研究主要即為探討在不同天然濁水濁度條件下，調整快混攪拌強度對不同混凝加藥組合之混沉除濁效能及膠羽生長特性的影響。本研究引用林內淨水場天然濁水以最大處理水量 100 CMD 之模廠進行連續式混凝試驗，並使用膠羽影像色彩分析裝置(FICA)及小角度雷射光散射粒徑分析儀分析混凝膠羽粒徑與碎形維度，以評估在單獨聚氯化鋁加藥、聚氯化鋁搭配 PolyDADMAC 加藥及聚氯化鋁搭配氯化鐵混凝加藥組合下，混凝去穩定顆粒之成效。此外，藉由調整混凝操作之快混攪拌強度，評估攪拌強度對混沉除濁效能之影響。

模廠混凝試驗結果顯示，使用單獨聚氯化鋁加藥及聚氯化鋁搭配 PolyDADMAC 加藥混凝處理低濁水(<100 NTU)時，增加快混強度可使混沉上澄液殘餘濁度降低，明顯提昇混沉除濁效能，且隨攪拌強度增加會使混凝膠羽增大且結構更為密實，而 FICA 系統監測之膠羽影像 RGB 標準偏差值亦會隨膠羽粒徑增加而上升。但當單獨使用聚氯化鋁混凝劑處理高濁水(>100 NTU)時，增加快混強度對混沉除濁效能並無明顯提昇，而採聚氯化鋁搭配氯化鐵同時加藥混凝時，增加快混強度可提高顆粒去穩定及膠羽生長的效率，並降低混沉上澄液的殘餘濁度。在低濁水(<100 NTU)條件下，使用單獨聚氯化鋁加藥混凝，於快混 Gt 值小於 2×10^4 的範圍內，增加快混攪拌強度可明顯降低混沉上澄液殘餘濁度，而當以聚氯化鋁搭配氯化鐵加藥混凝時，增加快混攪拌強度至快混 Gt 值大於 2×10^4 會造

成濁度去除效率下降。此外，在高濁水(> 100 NTU)的條件下，以聚氯化鋁搭配氯化鐵同時加藥混凝，在快混 Gt 值大於 4×10^4 時增加快混攪拌強度將使混沉上澄液殘餘濁度升高，但採用單獨聚氯化鋁加藥混凝時，調整快混強度對混沉除濁效能影響不顯著。

關鍵字：水處理、混凝、快混強度



Effect of chemicals combination and mixing strength on particle destabilization in coagulation process - A pilot study

Student : Ming-Yu Hung

Advisor : Prof. Chihpin Huang

Institute of Environmental Engineering

National Chao Tung University

Abstract

The velocity gradient (G) and duration (t) in rapid-mixing process for water treatment plant (WTP) predominate the formation of floc formed by coagulation. However, the performance of particle destabilization and floc growth are also significantly affected by the strategy of coagulant dosing and the quality of raw water. This study aims to understand the relationship between the removal in particle and the characteristics of floc formed with various rapid-mixing strength in the coagulation of different natural turbid water. In this study, a pilot-plant with water supply capacity of 100 CMD in Linnei WTP has been continuously operated to evaluate the performance of particle destabilization by PACl coagulation with and without the addition of PolyDADMAC or FeCl_3 , where the size and fractal dimensions of flocs were analyzed by particle sizer and floc image colorimetric analyzer (FICA). In addition, the coagulation with various rapid-mixing strength was conducted to evaluate the effect of velocity gradient and duration in rapid-mixing on particle removal by sedimentation.

The results of pilot-plant test has indicated that the reduction in turbidity after coagulation-sedimentation process can be effectively improved by increased rapid-mixing strength for low-turbidity water (<100 NTU) when PACl coagulation is performed with and without the addition of PolyDADMAC. With increasing rapid-mixing strength, the flocs become larger and compact, while the standard deviation of RGB measured by FICA system increases with the size of flocs. For

high-turbidity water (>100 NTU), the reduction in turbidity by PACl coagulation and sedimentation process cannot be effectively improved by increased rapid-mixing strength. When PACl and FeCl_3 were simultaneously added at the initial rapid-mixing in the coagulation process, the particle destabilization and floc formation can be effectively improved by increased rapid-mixing strength, which reduces the residual turbidity of supernatants. At low-turbidity water (<100 NTU), the residual turbidity of supernatants can be substantially reduced with increased rapid-mixing strength for PACl coagulation when Gt is less than 2×10^4 , while the removal in particles becomes worsen with increased rapid-mixing strength for PACl coagulation with the addition of FeCl_3 when Gt is higher than 2×10^4 . At high-turbidity water (>100 NTU), the residual turbidity of supernatants increases with increased rapid-mixing strength for PACl coagulation with the addition of FeCl_3 when Gt is higher than 4×10^4 . However, the removal in particles is insensitive to rapid-mixing strength for PACl coagulation.

Keywords: water treatment, coagulation, rapid-mixing strength

誌謝

感謝大學時吳志超教授的鼓勵，讓學生更有信心進入研究所就讀。經過這兩年的碩班生活，能夠精進各方面的能力，實則感謝吾師黃志彬教授及袁如馨教授在研究計畫執行期間及論文撰寫上給予學生諸多指正及教導，讓學生得以克服研究上的各種困難並即時找尋到正確的方向邁步向前，有幸能在交大獲得如此豐富的學習機會是學生最珍貴的求學經驗。除此之外，在口試期間承蒙李篤中教授及康世芳教授以及秦靜如教授對於論文的指教，並且不吝提供許多寶貴的建議，使本研究的內容更加完整，學生在此一併致上最誠摯的謝意。

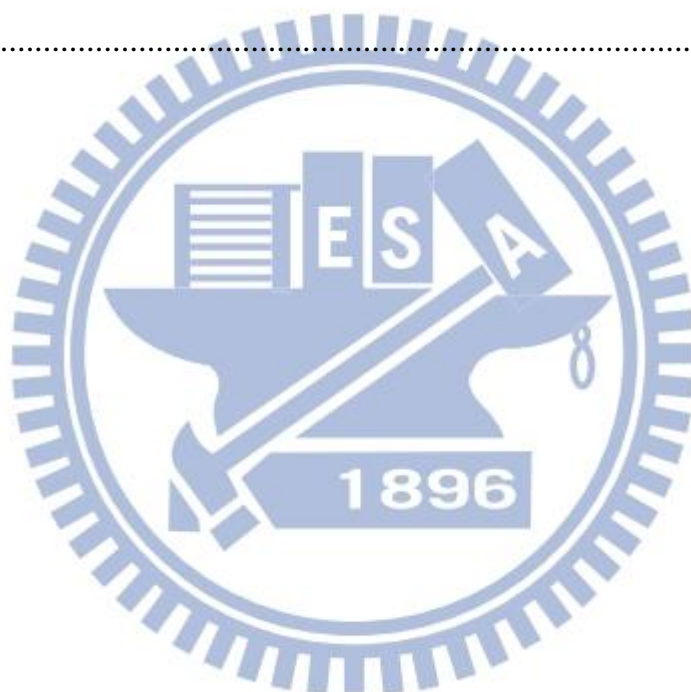
碩士班的學習過程中，首要謝謝志麟學長在實驗規劃及文章撰寫方面的指導與協助，也由衷感謝大為學長傳授給我許多模廠操作秘笈及與人應對進退的實用經驗談。在日常生活上，非常謝謝 Harry、文彬、賴打學長還有 OK 及靖宜學姊，以及大王、SuSu、阿富、世軒、孟序、BOB、ViVi、KT 及 JD，與你們聊天總是能有不同的收穫，另外更要特別謝謝佳卉及小胖總是罩著我，還有同窗的 GaGa、小天、凱哥及山山，以及各個深藏不露的學弟妹們，能與你們一起流血流汗、胡言亂語、飲酒高歌的緣分實在彌足珍貴，謝謝你們陪我度過每一段酸甜苦辣的時刻。除此之外，還要特別感謝內務總管小甜及瑄瑄平時無微不至的照顧，還有世界最強的涑達工程大哥們及林內淨水場同仁在研究執行期間的各種協助，因為有你們各位，讓我的碩班生活更加精彩而充實。

今天得以順利完成碩士學業要感謝每一位家人，尤其是爸媽及老哥的包容，在求學過程中，你們總是給我最大限度的自由，使我能無後顧之憂地衷於自己的決定，勇敢跨步走出自己的未來。此外，還要特別謝謝采璇陪我一起走過碩班期間各個艱辛的時刻，妳的加油與鼓勵總能讓我充滿能量，克服每一個挑戰。在此衷心感謝大家的愛與關懷，你們的支持永遠是我前進的動力，最後僅將此份完成學業的喜悅與大家分享，謝謝你們！

目 錄

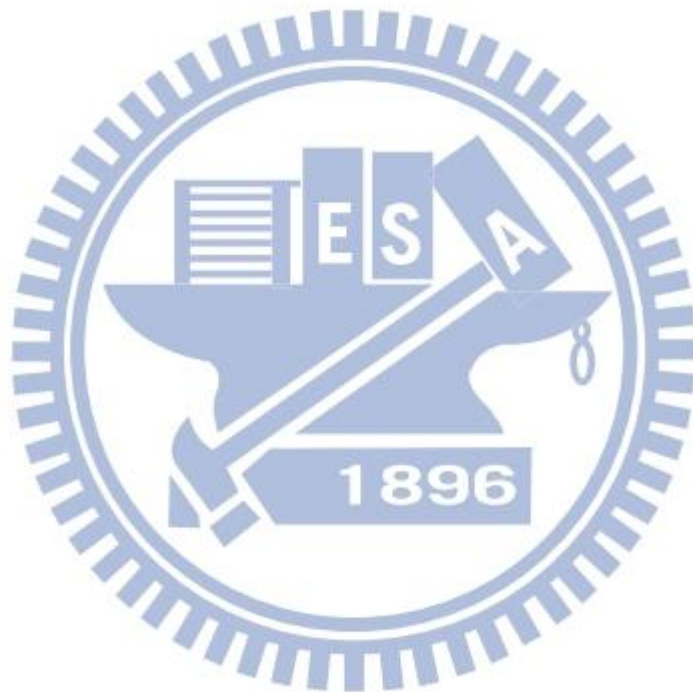
摘 要	I
Abstract	III
誌 謝	V
目 錄	VI
表目錄	VIII
圖目錄	IX
第一章 前言	1
1-1 研究緣起	1
1-2 研究目的	2
第二章 文獻回顧	3
2-1 原水濁度及顆粒特性對混沉除濁成效之影響	3
2-2 快混操作參數對混沉除濁成效之影響	5
2-2.1 快混強度、時間對混凝膠羽生成及混沉效能之影響	5
2-2.2 混凝劑種類對混凝去穩定濁度顆粒效能之影響	10
2-3 混凝膠羽生長特性對混沉除濁效能之影響	15
第三章 研究方法	18
3-1 模廠設備及處理流程	20
3-2 混凝膠羽生長特性分析	24
3-3 模廠混凝試驗	27
第四章 結果與討論	29
4-1 天然濁水水質特性	29
4-2 混凝加藥組合對混凝膠羽生長特性之影響	31
4-2.1 單獨 PACl 加藥混凝	31

4-2.2 PACl 搭配 PolyDADMAC 加藥混凝	35
4-2.3 PACl 搭配 FeCl ₃ 加藥混凝	36
4-3 快混攪拌強度(G 及 t 值)對混沉除濁效能之影響	41
第五章 結論與建議	53
5-1 結論	53
5-2 建議	54
參考文獻	55
附錄 A	59
附錄 B	64



表目錄

表 1 快混強度及時間對混沉效能之影響	9
表 2 天然濁水水質特性	30



圖目錄

圖 1	研究架構	19
圖 2	模廠處理單元	22
圖 3	模廠外觀	22
圖 4	模廠處理流程及程序控制	23
圖 5	膠羽粒徑分析裝置	24
圖 6	膠羽影像色彩分析(FICA)監測系統之裝置	26
圖 7	本研究採用之天然濁水	30
圖 8	不同快混強度下 PACl 加藥混凝高濁水及低濁水之混沉除濁效能 (PACl dosage: 1.0 mg/L as Al)	32
圖 9	連續式監測瓶杯試驗混凝過程之膠羽粒徑及碎形維度	34
圖 10	不同快混強度下 PACl 搭配 polymer 之混沉除濁效能 (PACl dosage: 0.5 mg/L as Al; PolyDADMAC dosage: 0.1 mg/L)	36
圖 11	不同快混強度下 PACl 搭配 FeCl ₃ 之混沉除濁效能 (PACl + FeCl ₃ dosage: 0.5 mg/L as Al; 0.5 mg/L as Fe)	37
圖 12	各混凝加藥組合下之膠羽粒徑與膠羽影像 RGB 標準偏差值	39
圖 13	低濁度下不同快混 Gt 值之混沉除濁效能及膠羽特性 (PACl dosage: 1 mg/L as Al)	43
圖 14	低濁度下不同快混 Gt 值之混沉除濁效能及膠羽特性 (PACl + FeCl ₃ dosage: 0.5 mg/L as Al; 0.5 mg/L as Fe)	44
圖 15	高濁度下不同快混 Gt 值之混沉除濁效能及膠羽特性 (PACl dosage: 1 mg/L as Al)	46
圖 16	高濁度下不同快混 Gt 值之混沉除濁效能及膠羽特性 (PACl + FeCl ₃ dosage: 0.5 mg/L as Al; 0.5 mg/L as Fe)	47

圖 17 不同濁度下 PACl 混凝之膠羽粒徑及碎形維度 (a)低濁水；(b)高濁水
(PACl dosage: 1 mg/L as Al)49

圖 18 不同濁度下 PACl 搭配 FeCl₃ 混凝之膠羽粒徑及碎形維度 (a)低濁水；
(b)高濁水 (PACl + FeCl₃ dosage: 0.5 mg/L as Al; 0.5 mg/L as Fe)50

圖 19 不同濁度下混凝之顆粒聚集模式預測 (a)低濁水；(b)高濁水
(PACl dosage: 1 mg/L as Al)51



第一章 前言

1-1 研究緣起

淨水場混凝單元為整體淨水操作中最重要之環節之一，混凝主要藉由快混單元將混凝劑均勻分散至污染物表面使其去穩定，故快混須提供足夠之攪拌強度 (Amirtharajah and Mills, 1982)，以驅使水中混凝反應能充分進行。然混凝濁度顆粒去穩程度及膠羽的生成特性會因不同混凝劑加藥種類而有差異，因此使用各種混凝劑所適用的快混攪拌強度應有所調整。一般而言，使用鐵系混凝劑所生成之膠羽大多呈現密度高及碎形維度大的特性，在混凝時不需要過高的混合強度即可使膠體顆粒碰撞並快速聚集，而使用鋁系混凝劑所生成的膠羽緻密性則較鐵系混凝劑低^(劉, 2007)，適合以高快混強度促使水中藥劑分散，且須有足夠的反應時間達到對顆粒去穩定的效果。當天然原水濁度及混凝劑使用種類改變時，混凝對濁度顆粒的去穩定程度隨之改變，進而影響後續沉澱及過濾單元之濁度去除效率，因此混凝劑種類及原水水質會影響淨水場快混攪拌強度之決定及混凝操作效能。

快混強度通常以攪拌的速度梯度(velocity gradient, G)表示，加上快混延時(t 值)的條件，在混凝程序中改變 G 及 t 值的搭配可調整快混攪拌強度，故快混攪拌強度常以 G 及 t 值的乘積(Gt 值)表示。增加快混強度有助於混凝劑均勻分散，以提高顆粒去穩程度，並可提昇混凝劑與顆粒間之吸附速率 (Amirtharajah and Mills, 1982; Gregory, 1996)。雖然增加快混 G 值可使生成膠羽之粒徑隨之增加 (Clomer *et al.*, 2005)，但 G 值增加至一定範圍外之後，若繼續提高快混 G 值，雖可提昇膠體碰撞效率，不過因剪力增加造成水中膠體發生破碎，此時水中顆粒聚集體的粒徑將降低 (Aktas *et al.*, 2013)。此外，快混 t 值亦是影響膠羽生長之重要因子， t 值過小會限制膠羽的生長，而 t 值過長會使膠羽變小且密實 (Letterman *et al.*, 1973)。不過混沉除濁效率不單只因膠羽粒徑而改變，且並非以粒徑最大者最易於沉澱，而是以膠羽的沉降性及強度決定沉澱去除濁度的效率 (Bache and Gregory, 2010)，由此可知快混操作 G 及 t 值之調配對膠羽生

長特性及混沉除濁成效影響甚巨。然而，淨水場操作不易隨原水濁度變化及混凝劑使用種類之改變而調整所需因應之快混 G 、 t 值，而時常發生混凝劑過量或不足加藥之情形，致混凝效能不彰，故淨水場現場快混操作 G 、 t 值之調配是影響混凝顆粒去穩定效能之關鍵。因此本研究主要利用模廠試驗進行混凝天然濁水之快混操作及加藥策略評估，在不同濁度的天然濁水條件下，採用不同混凝加藥組合，探討快混攪拌強度(G 及 t 值)對混沉除濁效能及膠羽特性之影響。

1-2 研究目的

本研究以不同混凝加藥組合(單獨聚氯化鋁加藥、聚氯化鋁搭配氯化鐵加藥及聚氯化鋁搭配 PolyDADMAC 加藥)，在不同濁度之天然濁水條件下，探討快混 G 、 t 值調配對混沉除濁效能及膠羽生長特性之影響程度，評估快混攪拌強度(G 及 t 值)如何交互影響混凝顆粒去穩定成效。



第二章 文獻回顧

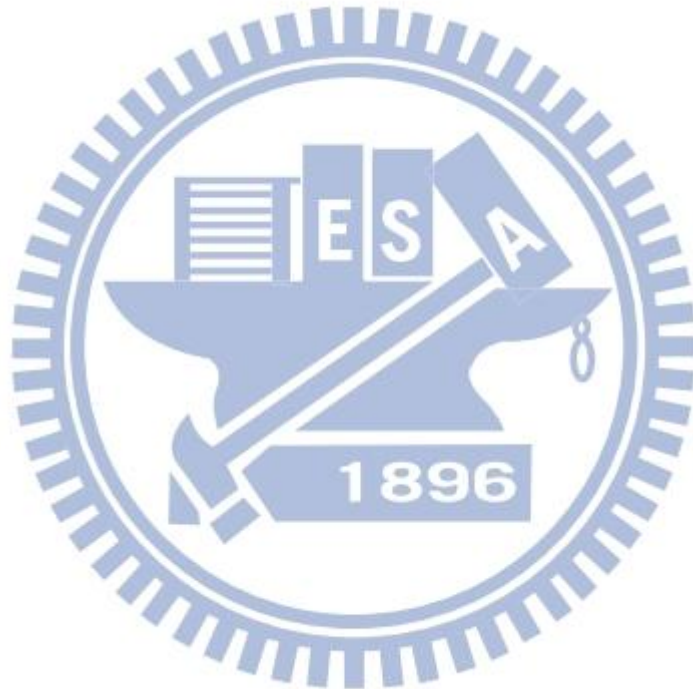
2-1 原水濁度及顆粒特性對混沉除濁成效之影響

以水庫或河川等地表水體為原水的淨水場，其原水水質易受瞬間豪雨、颱風或水庫洩洪等原因而有急遽的變化，尤其雨季期間造成原水濁度瞬間驟升至數千 NTU，常使淨水單元無法負荷而需減量供水甚至暫停供水。而處理高濁度原水時，大多需增加混凝劑添加量，但增加混凝劑量也將提高污泥產生量，依人工原水進行的瓶杯試驗結果，濁度由數百 NTU 上升至數千 NTU，混凝劑約需額外增加 50~100% 的加藥量才能達到混沉上澄液殘餘濁度低於 5 NTU 的水質標準，且污泥量隨加藥量上升而明顯增加^(翁, 2003)。雨季洪水不僅使原水濁度升高，暴雨沖刷土壤夾帶大量天然有機物質(natural organic matter, NOM)，致使原水之耗氯量物質增加，且鋁系混凝劑中單體鋁物種易與 NOM 鍵結反應，其反應所生成的膠羽微小不利沉降^(Yan *et al.*, 2008)，因此難以透過混沉處理將之去除。

天然濁水中顆粒粒徑在 1~5 μm 之間最易形成比重大且沉降速度快的理想膠羽，而顆粒粒徑界於 10^{-3} ~1 μm 之微小膠體顆粒(colloid)，由於體積甚小且表面積大，故在水體中呈現穩定的狀態，為色度及濁度之主要來源。水中色度多由懸浮親水性膠體造成，主要靠混凝劑水解聚合物與膠體官能基反應，透過化學作用產生中性鹽沉澱以去除之，而混凝作用去除濁度顆粒的機制則不同，是藉由水中顆粒及細小膠體提供形成膠羽所需的核(nucleus)物質，以利膠羽生成而將顆粒沉澱去除，當水中顆粒數越多，膠羽的生成量及生長速率隨之增加，而顆粒比重增加時，其形成之膠羽更易於沉澱^(高, 1978)，此顯示原水中富含顆粒雖會使濁度升高，但同時也增加混凝膠羽生成的機會，對於混沉除濁並非完全無益。

反觀原水濁度低時，水中膠體數量少，在混凝時顆粒碰撞機率低，需提高快混 G 值增加顆粒碰撞機率，較能有利膠羽生成^(黃, 2010)。但實場在處理低濁度原水時，通常採取降低混凝劑量因應之，當原水濁度降低(10 NTU 以下)，易造成混凝

劑量調控的困難，發生混凝劑加藥量不足的現象，會使混凝去穩定效果降低，尤其在水中濁度顆粒少的條件下，鋁系混凝劑無法與膠體有效的混合產生氫氧化物沉澱，將使混凝劑在水中殘留溶解性單體鋁物種，不僅無法去除濁度還可能造成沉澱出水濁度及顆粒數都比原水濁度和顆粒數高之現象^(劉，2007)，因此低濁度的原水所含濁度顆粒少，反而較不易達到混凝去穩定的效果。



2-2 快混操作參數對混沉除濁成效之影響

混凝程序是淨水處理去除水中顆粒的重要環節之一，而混凝程序主要藉由添加帶高正電荷特性的水解性鋁系或鐵系混凝劑於天然濁水中，再以高攪拌強度的混合方式使混凝劑均勻分佈至水中顆粒表面，此時水中帶負電性的顆粒或 NOM 與混凝劑進行電性中和、架橋或沉澱掃除等作用而逐漸形成微膠羽，而後減低攪拌強度，透過慢混促使水中微膠羽間發生碰撞並聚集，微膠羽不斷聚集而生成粒徑大的膠羽，生成的膠羽內含濁度顆粒、NOM 及混凝劑的膠體物質，並於後續的沉澱及過濾單元被去除。顯見在整體水處理程序中，混凝單元是使水中顆粒去穩定的重要關鍵，快混操作條件不同，會影響水中顆粒碰撞與聚集程度，使混凝膠羽之密度、碎形維度及粒徑分佈等特性各有不同，造成膠羽在水中沉降性之差異，並會影響後續沉澱除濁之效率及濾床的過濾效能^(黃, 2010)，因此探討快混強度、時間及混凝加藥組合等操作參數對混沉除濁效能的影響，是評估快混操作及混凝加藥策略的重點。

2-2.1 快混強度、時間對混凝膠羽生成及混沉效能之影響

混凝攪拌的主要功能即是使混凝藥劑有效均勻分散，使水中膠體顆粒與混凝劑充分反應而達到去穩定顆粒的作用。快混時，混凝劑加藥量的調整會隨原水條件而變動，在不同快混強度(G 值)及快混時間(t 值)操作下，生成膠羽之粒徑及密實度等特性亦隨之改變，造成後續沉澱及過濾處理的濁度去除效率有所變動，而主要影響膠羽生長特性之因子如下所述。

(1) 快混強度

快混單元藉由提供足夠混合強度使混凝劑在水中均勻分散，在實場中有機械式、水躍式及管中快混等多種快混型式，由於機械式攪拌混合效率高且操作彈性大，因此成為水場最常使用之快混方式，其典型的快混 G 值約 $600\sim 1000\text{ s}^{-1}$ 。一般機械攪拌設備依構造及葉片型式可分三種，分別為螺旋槳驅動輪(propellers)、渦輪槳翼(turbine impellers)以及翼片槳翼(paddle impellers)。螺旋槳翼通常為 2~3

片，其與另外兩種葉片之差異在於其翼片些微傾斜，因此轉動時會產生軸向螺旋水流，其轉速範圍約在 400~1750 rpm，較渦輪及翼片槳翼來得快。渦輪槳翼 (impellers) 之直徑通常為 30%~50% 快混池直徑或寬度，渦輪槳翼之轉速約為 10~150 rpm；翼片槳翼通常有 2~4 個翼片，槳翼直徑通常為 50~80% 池直徑或寬度，其轉速為 20~150 rpm^(Reynolds and Richard, 1996)，一般淨水場通常以翼片槳翼為主，因槳翼的投影面積大，能產生較大的紊流及混合效率。

攪拌槳的設計多是為了產生更大的攪拌強度，許多研究已指出混凝主要受初始快混強度影響顆粒之間的聚集與破碎，是膠羽生成的重要關鍵^(Amirtharajah and Mills, 1982; Spicer *et al.*, 1998)，若混凝攪拌強度不足，易因混凝劑分散不均使水中局部過量加藥，造成膠體顆粒再穩定而懸浮，同時未充分與藥劑反應的水中膠體亦難以被去除，在攪拌不均的條件下，即使提高混凝劑加藥量，對水中懸浮顆粒的去穩定作用仍有限。而高快混強度不僅可增加混凝初期膠體顆粒之間的碰撞機率，更使得混凝劑與膠體顆粒充分反應達到電性中和而去穩定。

在不同混凝作用機制下，快混強度會改變膠羽的聚集特性，若以聚氯化鋁 (polyaluminium chloride, PACl) 混凝劑進行混凝加藥，當混凝機制為吸附及電性中和時，快混強度對混凝作用成效存在明顯的影響，增加混凝攪拌強度可以提高顆粒間碰撞的效率，達到較佳的混凝效果。高效率的顆粒碰撞及聚集作用會形成聚集體與聚集體的膠羽聚集型態 (cluster-cluster aggregation)，此時形成膠羽之結構較鬆散，但其膠羽粒徑增大，增加沉降性有利混沉上澄液殘餘濁度降低，但若快混強度低，此時的顆粒聚集效率較低，聚集方式大多呈現顆粒與聚集體的聚集型態 (particle-cluster aggregation)，但生成膠羽之結構較為密實^(Wiesner and Klute, 1998)。因此，混凝時快混強度的改變將使水中顆粒聚集型態產生變化，在低快混 G 值的條件下，雖水中膠體顆粒多以聚集為主，但因顆粒碰撞效率差使其聚集的膠體粒徑仍小，應將 G 值增加以利於提昇膠體碰撞及聚集的效率，使膠羽的生長與破碎達到平衡，此時即為生成膠羽之粒徑可達最大值的條件，但若繼續提高快混 G 值，雖高 G 值可使膠體碰撞效率提昇，不過因剪力增加造成水中膠體發生破碎，此時水

中顆粒的聚集體將破碎至原本的顆粒粒徑而無法聚集生長^(Aktas et al., 2013)，顯示過高強度的快混易使膠羽聚集後再破碎，造成混沉除濁效能下降，因此最適用之快混強度範圍仍需測試後方能得知。

在適用之快混強度範圍內，增加快混強度不僅可促進混凝劑於水中的分散性，高快混強度使生成之混凝膠羽內部結構密實，有助於降低後續混沉上澄液殘餘濁度及溶解性 NOM 的濃度，而若減低快混 G 值則使生成之膠羽內部結構鬆散，此鬆散結構使得膠羽內部的微小顆粒易在混合攪拌過程裡被釋出至水中，但因膠羽內部顆粒釋出卻也增加了膠羽表面對水中 NOM 吸附的機會^(Sheng et al., 2006)，顯示快混強度對混凝膠羽生長特性的影響，更間接造成混沉除濁成效的不同。

此外若再大幅度提高快混強度，以管中快混設備產生遠大於一般淨水場快混操作之 G 值(4501 s⁻¹、16514 s⁻¹、22802 s⁻¹)，可明顯提昇後續沉澱單元之濁度去除率，且在原水濁度低的條件下，提高快混 G 值可明顯增加混沉上澄液之過濾性，但對水中溶解性有機物(dissolved organic carbon, DOC)移除之助益並不明顯，而當原水濁度升高時，提高快混 G 值僅使殘餘濁度些微降低^(黃, 2010)。由此可知提高快混 G 值雖可增加水中混凝藥劑分散性，但混凝及沉澱程序去除水中濁度的成效仍受原水水質條件影響。

(2)快混時間

混凝操作攪拌時間的設計與攪拌強度之選擇具相同考量，兩者皆以使水中膠體顆粒與混凝劑充分混合為主要目的，實場中典型的快混 t 值依淨水場處理量而異，大多約為 10 至 30 sec。混凝劑在水中的水解反應快速，添加混凝劑後經過約 6 sec 的水解反應時間，混凝藥劑即與水中顆粒進行電性中和及吸附等作用，此後再延長快混時間，對其混凝作用無太大變化^(Edzwald et al., 1998)。不過實場進行混凝劑加藥時仍受混凝劑種類、劑量、快混強度等因素影響藥劑於水中的分散性，一般而言，增加快混時間可有助於提高藥劑於水中均勻分散的程度。快混時間增加可提高膠羽間碰撞的機會，但膠羽經過長時間的破碎與再聚集會改變其膠羽表面特性，而導致顆粒聚集的效率降低，因此過長的快混 t 值會使生成膠羽之粒徑減小，

造成水中大多為粒徑一致的小膠羽^(Yu et al., 2010a)。因此在混凝時，快混時間有其合適的操作範圍，例如以 PACl 混凝處理高嶺土人工原水時，初始增加快混 t 值可使生成膠羽之粒徑增大，但再持續增加快混時間則會使得其生成膠羽之粒徑明顯減小，而在使用聚矽酸鐵混凝劑時亦會有此相似的結果^(Aktas et al., 2013)，顯示快混時間對膠羽的生成具有顯著影響，過長的快混時間並不利於膠羽生長。

快混時間的選擇應視混凝劑於水中的分散性及反應情況而定，當混凝劑已均勻分散至水中後，提高快混強度可使生成之混凝膠羽內部結構密實，但再持續增加快混攪拌時間，會使膠羽內部結構受到壓擠而些微減小膠羽粒徑，造成膠羽內部微小顆粒被擠出，或發生部分膠羽內 NOM 釋出的現象^(Sheng et al., 2006)，因此在設計快混 t 值時應考量供水量需求、混凝劑特性及加藥狀況作調整。

由前述可知快混 G 及 t 值調控對混沉效能影響甚巨，因此實場混凝單元常依快混 G 及 t 值乘積的典型 Gt 值($2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$)進行設計，以確保混凝單元對顆粒的去穩定效能。不過，即使在合理的快混 Gt 值範圍內，當改變快混 G 及 t 值的調配時，仍會影響生成膠羽的特性，例如在相同的快混 Gt 值條件下進行混凝，不論採用鋁系或鐵系混凝劑，在快混 G 值高而 t 值短的條件可使得混凝生成之膠羽粒徑變大，而降低快混 G 值並延長 t 值的方式卻會使膠羽減小^(Aktas et al., 2013)，因此典型快混 Gt 值雖可作為單元設計的參考，但操作時仍需對快混 G 及 t 值進行調整，尤其在不同原水水質或改變混凝劑使用種類時，更應針對瓶杯試驗結果選擇適合的快混 G 及 t 值搭配方式。

此外，在不同的混凝機制下快混 G、t 值的調配會影響顆粒的聚集型態，改變混凝生成膠羽的特性，當混凝機制為沉澱掃除時，其生成之膠羽大多為鬆散結構，且膠羽外部呈多分支的不規則外型，其適用低快混 G 值而 t 值長的操作方式，使膠體可在緩慢的攪拌下逐漸碰撞而聚集，避免鬆散的膠羽因過度攪拌而破碎，因為在沉澱掃除機制下破碎的小膠羽表面仍帶正電性，易使得膠羽顆粒間斥力增加且減少小膠羽碰撞再聚集的機會，而產生小膠羽懸浮於水中^(Yu et al., 2009)，如此不僅膠羽沉降性差且更容易造成濁度殘留。而在電性中和的混凝機制下，只需快混

G 值足夠使混凝劑充分分散，即可生成結構密實的膠羽而有利沉降。其它各種濁度原水條件下，採用鋁系或鐵系混凝劑，調整快混 G 及 t 值對混沉除濁效能之影響另彙整於表 1 中。

表1 快混強度及時間對混沉效能之影響

原水來源	原水濁度 (NTU)	混凝劑種類	快混 G 及 t 值對混沉效能之影響	參考文獻
天然濁水	91	PACl	G ↑ → 濁度去除率 ↑ t 值過長 → 膠羽內顆粒再釋出	Sheng <i>et al.</i> , 2006
天然濁水	20~600	PACl	G ↑ → 濁度去除率 ↑ → DOC 去除率 ↑	黃, 2010
人工濁水	8~180	Alum PACl	t ↑ → 濁度去除率 ↑	Kan <i>et al.</i> , 2002
人工濁水	8	Alum PACl	G 及 t ↑ → 濁度去除率 ↑ → DOC 去除率 ↑ G ↑ → 膠羽粒徑 ↓	Yan <i>et al.</i> , 2009
人工濁水	1	PACl PSI	G ↑ → 顆粒聚集速率 ↑ → 濁度去除率 ↑	Ebie <i>et al.</i> , 2006a
人工濁水	5~50	PACl PSI	G ↑ → 濁度去除率 ↑ → 上澄液過濾性 ↑	Ebie <i>et al.</i> , 2002
人工濁水	10	PSI	G 及 t ↑ → 微膠羽粒徑 ↑ → 濁度去除率 ↑	Park <i>et al.</i> , 2006

2-2.2 混凝劑種類對混凝去穩定濁度顆粒效能之影響

混凝加藥操作方式會影響混凝劑於水中反應的完整性，使混凝生成膠羽特性有所不同，而混凝膠羽生長特性與混沉除濁效能具有相關性。為了生成密實而沉降性佳的膠羽，混凝時可添加具有高正電荷特性的混凝劑，因混凝劑含高電荷可更容易達到顆粒電性中和的目的，故可減少混凝劑的加藥量，以限制混凝劑與膠體反應之氫氧化物生成量，由於金屬氫氧化物是一種含水量很高的膠體顆粒，避免過量加藥可減少膠羽內的含水量，降低膠羽生成時吸收水分的能力，混凝生成之膠羽組成以顆粒含量高而含水量低，間接可增加生成膠羽的緻密性，可使膠羽密度增加且強度上升而有利沉降^(Bache and Gregory, 2010)。但是不同種類的混凝劑受水質 pH 影響而改變其水解反應的程度不同，為了使添加的混凝劑充分作用，混凝時需考量混凝劑的適用條件，因此以下將討論有關於鋁系及鐵系混凝劑的混凝操作適用條件，以及混凝加藥搭配助凝劑添加對混沉除濁效能之影響。

(1) 鋁系混凝劑

鋁系混凝劑受水中 pH 變化影響其水解作用，由於鋁系混凝劑內鋁成分在 pH 接近中性時溶解度最低，可使混凝劑水解與水中膠體反應生成之氫氧化物沉澱，此反應在混凝及膠凝程序中扮演重要角色^(Duan and Gregory, 2003)。金屬鹽類在水中的水解反應因 pH 而變化，隨著水質 pH 上升，金屬鹽類混凝劑在水中之主要物種變化如式 1 所示。



在特定 pH 範圍內混凝劑可與水中膠體反應生成固態物質而沉澱，以鋁系混凝劑而言，當快混時水中 pH 值約在 6 至 7 的情況下，混凝劑水解產物以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 為主，使水中顆粒容易聚集生成膠羽而沉澱。以常見的混凝劑 PACl 為例，其成分特性會因藥劑水解聚合型態之單體鋁(Al_a)、聚合鋁(Al_b)、顆粒鋁(Al_c)的鋁型態比例影響混凝效能，而鋁型態與其鹽基比($B = [\text{OH}^-] / [\text{Al}^{3+}]$)有關，B 值越低則表示單體鋁成分比例越高，隨 B 值增加則聚合鋁成分減少而顆粒鋁比例增加，其中

聚合鋁藉由電性中和機制對 NOM 及顆粒去穩定，為對水中 NOM 及顆粒去穩定作用之主要物種，而顆粒鋁藉吸附作用去穩定 NOM，此研究結果顯示混凝劑中聚合鋁及顆粒鋁物種對混凝沉澱效率最有助益^(Yan et al., 2009)。水中 pH 值及混凝劑成分等因素，除了會對混凝劑本身的混沉除濁成效有所改變之外，亦會影響清水中殘餘混凝劑濃度。混凝劑 PACl 在水中的水解反應會隨 pH 改變，造成其所含鋁的水解聚合型態有所變動，在 pH 接近中性時聚合鋁及顆粒鋁為 PACl 的主要水解型態，當 pH 在 5 至 8 之外時單體鋁成分的比例會突增，尤其在 pH 9 以上的條件，單體鋁會成為水中主要水解物種^(林, 2008)。混凝劑成分中對顆粒去穩定反應性不佳者會降低混沉成效，尤其鋁系混凝劑之單體鋁成分對混凝沉澱除濁成效較差，其加藥後未與顆粒充分反應的混凝劑容易造成殘留，且因混凝作用反應不佳，使混沉的濁度去除效率下降，沉澱池上澄液殘餘濁度越高，殘餘總鋁量亦增加，兩者變化呈現正相關性。在相同水質條件下，單體鋁含量高的混凝劑由於去穩定反應性不佳，需提高加藥量以使濁度顆粒達到電性中和，常因過量加藥導致未與顆粒反應之藥劑造成殘餘總鋁濃度增加^(Yang et al., 2011)。

(2) 鐵系混凝劑

在混凝程序中，鐵系混凝劑也是常用的混凝藥劑之一，鐵系混凝劑內金屬鹽成分約在 pH 7 至 8 之間時溶解度最低，在此 pH 條件下混凝劑以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 為主要水解產物，而亞鐵則在 pH 4 至 6 之間以 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 為主要物種^(Martin, 1991)，所以鐵系混凝劑適用的混凝操作條件較鋁系混凝劑廣，一般而言在 pH 4 至 10 的水質條件下，鐵系混凝劑可生成氫氧化物沉澱。常見的鐵系混凝劑依價態可分為二價鐵 (Fe^{2+}) 和三價鐵 (Fe^{3+}) 之形式，例如硫酸鐵、硫酸亞鐵和氯化鐵等，其中以三價的氯化鐵混凝劑較常被使用在淨水處理上。

氯化鐵混凝劑在水中因不同 pH 值及劑量而影響其混凝機制，在低於 pH 6 的條件時，氯化鐵以去穩定為主要混凝機制，而在 pH 6 以上時，足夠的劑量可使氯化鐵在水中生成氫氧化物進行沉澱掃除反應^(Johnson and Amirtharagjah, 1982)，有利膠羽的生成。此外，以鐵系混凝劑加藥所生成的膠羽與鋁系加藥生成之膠羽特性不

同，以人工原水和天然濁水進行混凝，當以鐵系混凝劑加藥時，混凝膠羽之密度和碎形維度都比鋁系大^(劉, 2007)，且生成之混凝膠羽在相同的膠羽粒徑範圍內，添加鐵系混凝劑所生成的膠羽，其膠羽密實度高於鋁系混凝劑加藥之膠羽，因此以鐵系加藥之混凝膠羽具有高強度，而不易在攪拌過程中發生破碎，且增加快混攪拌強度有助於降低混沉上澄液殘餘濁度^(Ohno et al., 2004)。雖然氯化鐵加藥之混凝膠羽密度高，不論是快混攪拌強度的調整或是可適用操作之 pH 值範圍皆比鋁系廣，但氯化鐵混凝劑 pH 值甚低且具強烈腐蝕性，在加藥時需考量藥劑本身的耗鹼度特性，若處理低鹼度原水時，應避免加藥後水中 pH 值降低而落於適用操作的範圍之外，此外因氧化鐵物種呈深褐色，若鐵系混凝劑加藥後殘留過多鐵金屬於水中，可能造成清水色度上升，因此混凝操作應盡量控制水中 pH 值於鐵系最低溶解度(約為 pH 7 至 8 時)的範圍之內，以減少溶解性鐵物種殘留造成清水色度問題。

(3) 高分子聚合物

當混凝劑效能不足以使顆粒充分去穩定時，以高分子聚合物(polymer)搭配混凝劑加藥，可增加架橋作用將水中濁度顆粒聚集沉澱的機會，同時使膠羽結構更加密實，增進膠羽之沉降速度，而降低混沉上澄液殘餘濁度^(翁, 2003)，甚至直接以高分子聚合物為混凝劑，可避免混凝劑產生過多氫氧化物膠體顆粒的問題^(駱等, 2010)。由於混凝劑搭配助凝劑的加藥方式會影響生成膠羽的結構，因此混凝加藥模式需依照原水條件適度調整，當原水濁度過高，而水中大量懸浮微粒導致混凝劑混沉除濁成效不彰，需在混凝程序中添加助凝劑時，鋁系混凝劑常搭配陽離子型高分子聚合物共同加藥使用，如此可有效提昇水中濁度顆粒及有機物去穩定成效，並減少混凝劑所需的添加量^(Kim et al., 2006; Libeck, 2011)。

此外，混凝劑與助凝劑加藥後對水中膠羽結構及聚集特性會有所改變，透過硫酸鋁與 PolyDADMAC 搭配添加的方式，其混凝後發生破碎的膠羽具有再聚集特性，且再聚集後生成的膠羽仍可達到破碎前的膠羽粒徑，但若以硫酸鋁進行高加藥量混凝時，膠羽明顯會有較多不可逆的破碎現象發生，使得水中小膠羽數量增加^(Yu et al., 2010b)。然而，不論 PACl 或硫酸鋁混凝生成之膠羽經破碎後，部份不可

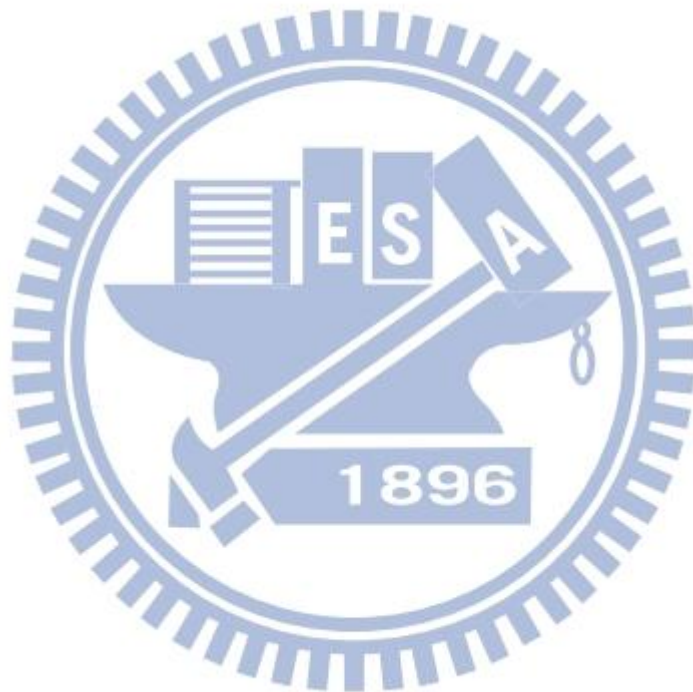
逆的膠羽破碎現象仍會直接使得殘餘濁度增加^(Yukselen and Gregory, 2004)，因此在適當的混凝劑添加量下，配合 polymer 與水中顆粒進行架橋作用，可提昇破碎膠羽再聚集的特性，此再聚集的現象可使水中小膠羽數量明顯減少，增加膠羽結構的緻密性，避免因水中顆粒殘留造成殘餘濁度上升。

近期研究發現，高分子聚合物的添加方式也會影響膠羽生長狀況，比較快混時依不同順序各別加入 Polyferric chloride (PFC)、PolyDADMAC 進行混凝，以及先行混合 PFC 及 PolyDADMAC(簡稱 PFC-PD)後再同時加藥混凝，由兩者膠羽特性及混沉成效之差異，發現先添加 PFC 進行混凝後，再加入 PolyDADMAC 之操作方式可使膠羽生長速率最快且膠羽碎形維度最大，而先行混合藥劑成 PFC-PD 的方式雖加藥後膠羽生長速率慢，卻可生成粒徑較大的膠羽^(Wei et al., 2009)。而水中有機物的去除效率不受混凝劑與助凝劑的加藥順序影響，雖高分子聚合物的電性中和能力可促進有機物去穩定，但使用有機的高分子聚合物時，應特別注意加藥量的控制，過量添加有機的 polymer 易使藥劑殘留，反而導致水中殘餘溶解性有機物濃度增加^(Yang et al., 2012)。

雖添加助凝劑具有降低混沉上澄液殘濁的優點，但陽離子高分子助凝劑帶有很高正電荷特性，在加藥後易使水中膠體表面界達電位突升^(Wei et al., 2009)，所以 polymer 在使用上有一定的加藥範圍，且 polymer 劑量與殘餘濁度之關係並沒有一定之相關趨勢，而是有其最適加藥量存在^(翁, 2003)。因此隨原水水質的變化，在使用 polymer 前應有部分的瓶杯試驗基礎數據，找出所選用之混凝劑與助凝劑間的最佳加藥配比，避免 polymer 過量加藥造成水中膠體電性逆轉而發生再穩定的現象。

綜合上述可知，最適當之快混參數會受原水水質特性、混凝加藥組合等因素影響，導致合適的快混強度(G)與快混時間(t)範圍差異大，若以電性中和為主要之混凝機制，其最適快混 G 值較大，因有效鋁水解物種形成的速度快，必須快速地使藥劑均勻分散至濁度顆粒表面進行去穩定作用，故需藉由提高快混強度來達到此目的。若以沉澱掃除為主要之混凝機制，因主要藉由 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 膠體對濁度顆粒

進行沉澱掃除，故快混強度不需太高，但相較之下最適快混時間可能較長^(Yu et al., 2009)。另外，若針對使用高分子聚合物(polymer)進行混凝時，具低電荷密度高分子量之陰離子 polymer 會使顆粒聚集速率較快，具高電荷密度之陽離子 polymer 對顆粒之聚集速率較慢，這也會影響快混攪拌時間之決定及膠羽之生成特性^(Yu et al., 2006)，若沒有針對加藥種類調整快混 G、t 值，在不適當的混凝反應下，有可能發生混沉上澄液殘餘濁度上升或溶解性有機物去除效率不彰等反效果。



2-3 凝膠羽生長特性對混沉除濁效能之影響

依照膠羽生長的方式，凝膠聚集水中顆粒的機制約可分為兩種，較優勢的膠羽生成機制為聚集體與聚集體的膠羽聚集型態(cluster-cluster aggregation)，但其生成大膠羽之密度低，因此有較低的碎形維度(fractal dimension, D_f)，而結構較緊密之膠羽的生成機制，乃由顆粒與聚集體的聚集型態(particle-cluster aggregation)之結合，或藉由剪力(shear)而使膠羽進行結構重組^(Gregory, 1997)，膠羽生長過程受剪力影響使其結構重組或發生破碎與再聚集，有利增加其結構的密實度而提高膠羽的碎形維度^(Wang et al., 2009)，結構密實的膠羽有利沉降可降低混沉上澄液殘餘濁度，而鬆散大膠羽在生成過程中，經過破碎及再聚集過程，使原本隱藏在膠羽內部的孔隙可以出現在膠羽表面，因而增加小顆粒及初始形成之聚集體能與大膠羽聚集的機會^(Wang et al., 2011; He et al., 2012)，此聚集特性可減少水中懸浮小顆粒的數量，不過混沉除濁效能並非單以膠羽粒徑越大或碎形維度越高者表示除濁效果最佳，因為大膠羽沉降時可網除水中小顆粒，但過大而鬆散的膠羽經長時間攪拌容易發生破碎，故凝膠羽之碎形維度及粒徑會交互影響濁度顆粒的去除效率。

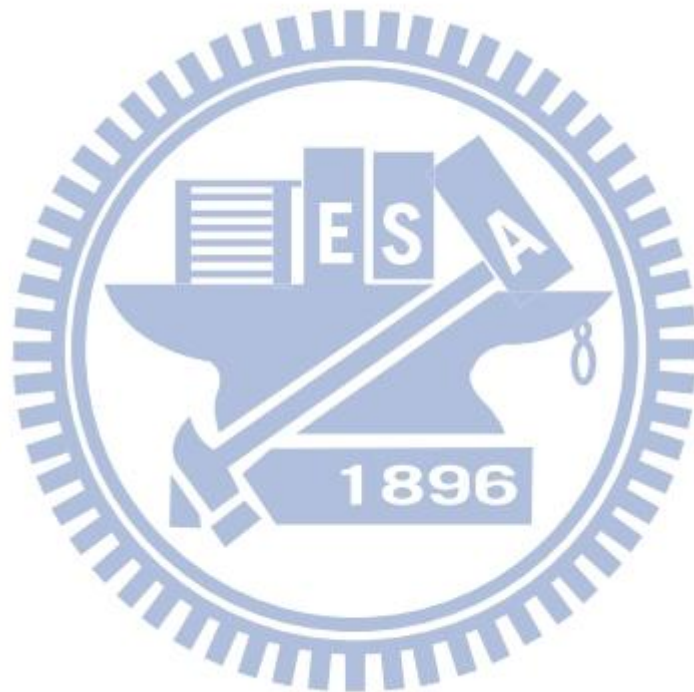
過去關於凝膠羽生長特性變化的研究，常以光纖膠羽偵測儀(photometric dispersion analyzer, PDA)進行凝水樣監測，PDA 的原理係以高發光強度 LED 照射流動的水樣並偵測穿透水樣的光強度，由於偵測到的光強度變化與顆粒的散射係數有相關性，透過其關係式即可算出絮凝指數(flocculation index, FI)，通常隨膠羽形成而粒徑增大時 FI 值也會隨之增加^(Jarvis et al., 2005)。利用膠羽水樣 FI 值的變化特性，施(2002)以 PDA 即時監測凝水樣，當凝劑加入水樣後，水樣之 FI 值隨著慢混時間的增加而逐漸上升，當膠羽生長與破碎達平衡後 FI 值亦即趨平穩，顯示膠羽的變化與 PDA 量測之 FI 值具相關性^(施, 2002)。而將其用於凝加藥後水樣的連續監測，可發現隨快混時間增加，水樣之 FI 值會逐漸上升達最高的平穩值，而混沉上澄液殘餘濁度變化趨勢與 FI 值相反，混沉上澄液殘濁會隨快混時間增加而下降，當殘餘濁度降低至趨平穩的同時即為 FI 的最高平穩值^{(Kan et al.,}

2002)，因此可由 FI 值的變化趨勢得知膠羽生長的粒徑變化過程，判斷膠羽生長所需的反應時間。

此外，近年來亦有發展新式的非侵入式膠羽特性量測技術，採用與 PDA 相似的膠羽散色光偵測原理，在不破壞膠羽結構的條件下，擷取混凝過程中水樣的光學影像，當水中懸浮微粒濃度越高，則散射光強度越強，依此原理透過膠羽影像色彩分析系統(floc image colorimetric analyzer, FICA)直接分析膠羽影像三原色(RGB)值的變化，以評估混凝膠羽生成情況^(吳, 2008)。在不同初始濁度及混凝劑量下，混沉除濁效果越佳者，其快混階段之 RGB 值下降趨勢越明顯，且 RGB 三個值標準偏差計算結果越大，而慢混階段之 RGB 值跳動幅度大且標準偏差值越大時，生成膠羽亦增大^(陳, 2012a)，表示利用 RGB 之標準偏差值大小判斷混凝膠羽生長狀況是可行的。而以 FICA 量測水樣 RGB 值時，原水顆粒特性也會反應測值的變化，含黏土質的地表原水呈現土黃色，導致在水樣變化過程中 R 值的變化程度較 B 值及 G 值明顯，而含砂質的原水水色偏深灰色，水樣影像的 B 值及 G 值變化會較明顯，因此混凝產生膠羽時，慢混水樣的色彩 RGB 值會有不同的變動特性，利用 RGB 色彩模式分析可用來判斷混凝程序膠羽變化的情形，且可觀察混凝膠羽生成狀況^(陳, 2012b)。因此觀察慢混水樣 RGB 值的變動幅度，或計算 RGB 值的標準偏差，當 RGB 值變動幅度增加且標準偏差值上升時即表示水中膠羽粒徑增大，藉此可了解慢混時水中膠羽的生長狀況。

綜合前述，混凝攪拌強度會影響膠羽結構特性，且已有許多研究指出低的攪拌強度，在膠羽聚集、重組及破碎的過程中，與混凝膠羽生成的粒徑及結構特性有關^(Becker et al., 2009; Thill et al., 2001; He et al., 2012)，當攪拌 G 值上升時會使得膠羽平均粒徑下降，膠羽碎形維度隨高 G 值攪拌時間增加而逐漸升高，並隨著持續的攪拌使膠羽粒徑逐漸減小，而膠羽碎形維度則持續緩慢上升，此表示高 G 值攪拌時，膠羽內部結構受擠壓使水分被排出而增加膠羽結構密實度^(Sheng et al., 2006)，此時膠羽外型更接近球形因此碎形維度值隨之上升。雖高攪拌強度可增加膠羽密度，但隨攪拌時間增長也同時造成膠羽破碎，使水中膠體顆粒增加，因此攪拌強度及時間對

水中顆粒及混凝初始微膠羽的聚集生成很重要，是影響膠羽結構及後續混沉除濁成效的關鍵。此外，膠羽結構除了受快混攪拌強度影響外，混凝的加藥組合也會改變生成膠羽的特性，其中密實的膠羽沉降性佳，而鬆散的膠羽則易在破碎後增加水中小顆粒數量造成殘餘濁度上升，因此膠羽特性對混沉除濁效能的影響，主要與膠羽密實度及沉降性較具相關性。



第三章 研究方法

本研究之架構如圖 1 所示，主要欲探討混凝程序中，調整快混攪拌強度(G 、 t 值)及混凝加藥組合對天然濁水混沉除濁效能及膠羽生長特性之影響，藉由混凝膠羽之粒徑及碎形維度評估快混攪拌強度(G 及 t 值)如何交互影響混凝顆粒去穩定成效。

本研究混凝試驗引用林內淨水場之天然濁水，以最大處理量 100 CMD 的模廠進行連續式的混凝操作，並分批次在高濁度(>100 NTU)及低濁度(< 100 NTU)的天然濁水條件下進行混凝試驗。由於考量 FeCl_3 加藥後產生深褐色氧化鐵顆粒可能造成色度的問題，故本研究未單獨以 FeCl_3 加藥進行試驗，而單獨添加鋁系混凝劑可能發生混沉上澄液殘餘鋁量過高的問題，故本研究另以 PACl 搭配 FeCl_3 或助凝劑的加藥組合進行混凝試驗，並比較其與單獨 PACl 加藥之混沉除濁效能的差異，因此本研究混凝劑加藥組合分別為單獨 PACl (1.0 mg/L as Al)加藥，以及降低鋁系混凝劑添加量，採取 PACl (0.5 mg/L as Al)搭配高分子聚合物 PolyDADMAC (0.1 mg/L)加藥混凝，及 PACl (0.5 mg/L as Al)搭配 FeCl_3 (0.5 mg/L as Fe)加藥混凝。在各種混凝加藥組合下調整快混強度分別在 G 值為 100 s^{-1} 、 350 s^{-1} 、 650 s^{-1} 、 1000 s^{-1} 、 1350 s^{-1} 、 1800 s^{-1} ，以及 t 值為 15 sec、60 sec 的條件下進行混凝試驗，並以膠羽影像色彩分析系統(FICA)連續進行慢混水樣膠羽影像 RGB 值的分析，並計算 RGB 三個值的標準偏差，同時批次式採集慢混水樣至實驗室以小角度雷射光散射粒徑分析儀(Mastersizer 2000, Malvern, UK)分析混凝膠羽特性(粒徑、碎形維度)，並觀察膠羽影像 RGB 標準偏差值與混凝膠羽粒徑之相關性，另外再由實驗室瓶杯混凝試驗，連續式量測不同濁度天然濁水在混凝過程的膠羽粒徑及碎形維度變化，藉以觀察混凝過程的顆粒聚集方式。最後綜合模廠各混凝加藥組合之試驗結果，同時比較各組合之混沉上澄液殘餘濁度，用以評估調整快混攪拌強度(G 及 t 值)對不同濁度天然濁水混沉除濁成效之影響。

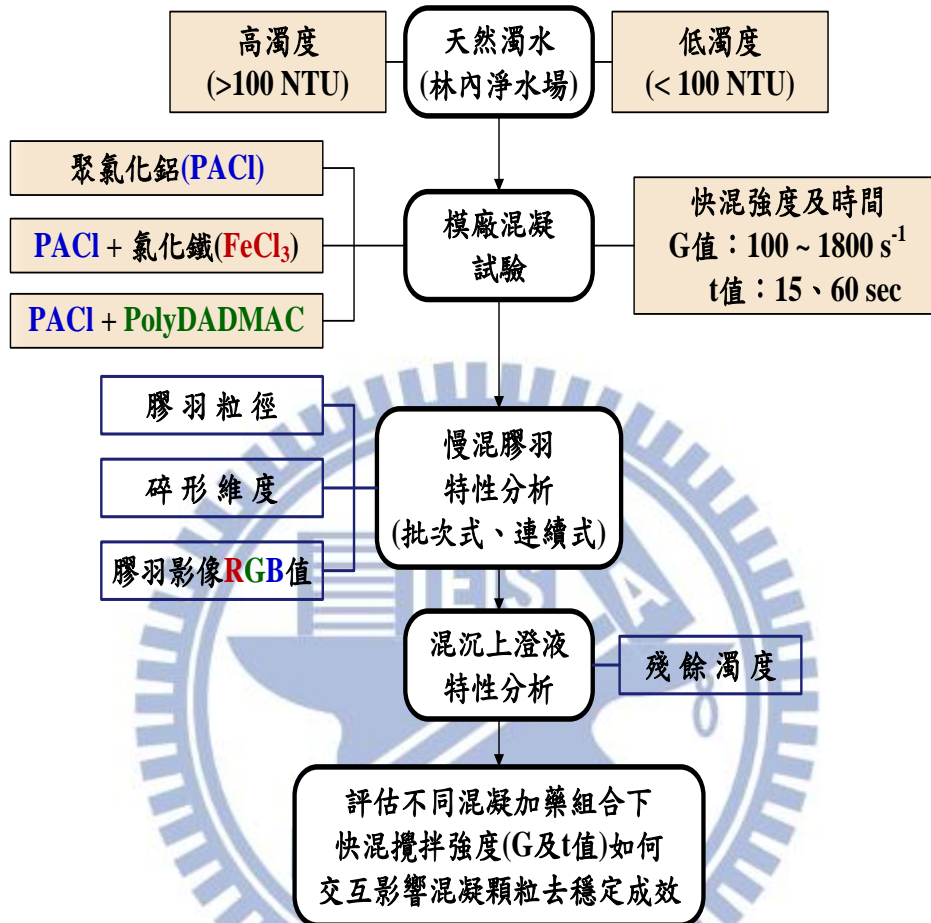


圖1 研究架構

3-1 模廠設備及處理流程

本研究模廠設置於林內淨水場，模廠設計之最大處理水量為 100 CMD，所有淨水單元與儀表監控設備放置於 2 個 20 呎貨櫃內，處理程序為國內淨水場最多使用之傳統處理程序，原水經原水採樣槽、快混槽、慢混槽、沉澱槽，最後經快濾槽完成處理，各處理單元及程序控制(如圖 2 至圖 4)概述如下：

(1)原水槽及原水採樣槽

原水槽可調節原水流量並穩定水質，槽體體積設計為 1.55 m^3 (長 $1 \text{ m} \times$ 寬 $1 \text{ m} \times$ 高 1.55 m)，槽內設置水位計以控制原水槽內水量，使進水維持一定流量。原水以連續式將部分原水抽入採樣槽內，經 pH 計(DPC1R1A, Hach)、溫度計(DPC1R1A, Hach)及原水濁度計(SS7 sc, Hach)等線上量測儀器，即時監測原水水質變化。

(2)快混槽及混凝劑

快混槽體積為 0.0218 m^3 (長 $0.25 \text{ m} \times$ 寬 $0.25 \text{ m} \times$ 高 0.35 m)，水體體積為 0.0175 m^3 (長 $0.25 \text{ m} \times$ 寬 $0.25 \text{ m} \times$ 高 0.28 m)，依原水流量控制調整快混時間約為 15~60 秒。快混攪拌槳設計為模擬實場之三刃螺旋槳，攪拌機以垂直軸向轉動，具備轉速調整功能(0 ~ 500 rpm)以達所需 G 值。本研究混凝藥劑皆取自林內場實場用藥，其中聚氯化鋁混凝劑原液濃度為 10% Al_2O_3 (含單體鋁 38.6%、聚合鋁 10.6%及顆粒鋁 50.8%)，而氯化鐵混凝劑及 PolyDADMAC 濃度分別為 38% FeCl_3 及 10%，將其經過適量稀釋後作為模廠混凝劑用藥，並以蠕動幫浦進行定量加藥。

(3)慢混槽

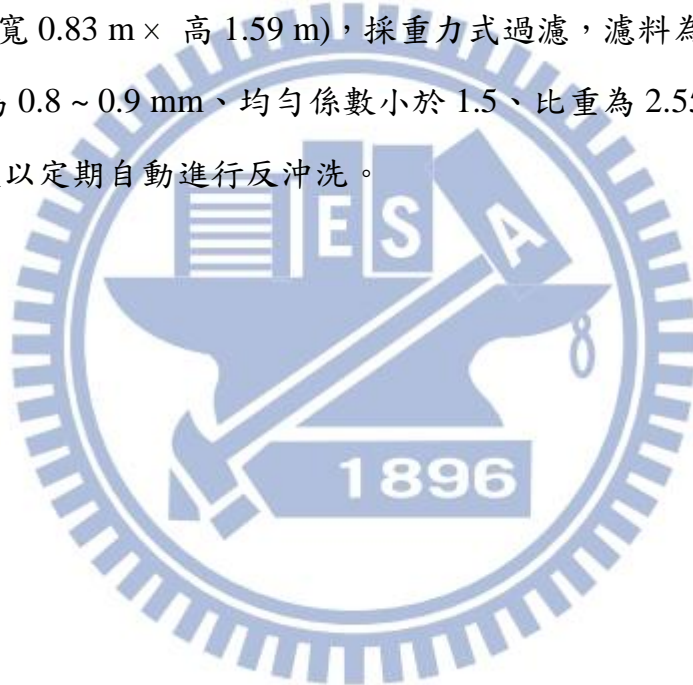
慢混槽體積為 1.9 m^3 (長 $1 \text{ m} \times$ 寬 $1 \text{ m} \times$ 高 1.9 m)，水體體積為 1.7 m^3 (長 $0.98 \text{ m} \times$ 寬 $0.98 \text{ m} \times$ 高 1.77 m)，最短攪拌時間約為 26 min，攪拌機和快混槽相同以垂直軸向轉動，亦具備轉速調整功能以達所需 G 值，模廠參考實場三段式慢混平均 Gt 值範圍($6 \times 10^4 \sim 10^5$)，設定慢混 Gt 值約為 67000，並在慢混出水處以蠕動幫浦抽取水樣至 FICA 系統，同步監測膠羽影像之 RGB 值。

(4) 沉澱槽

沉澱槽體積為 6.36 m^3 (長 3.3 m × 寬 1.07 m × 高 1.8 m)，水體體積為 5.3 m^3 (長 3.28 m × 寬 1.05 m × 高 1.54 m)，最短水力停留時間約為 81 min ，表面溢流率約為 $29 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ，採重力式沉澱，槽內設有傾斜板，進水由下往上流，出水端經溢流堰匯集流至重力式快濾池，其間設置線上濁度計(1720E, Hach)監測沉澱出水濁度。沉澱槽底污泥以重力方式匯集至排泥溝槽，再以重力式批次排放。

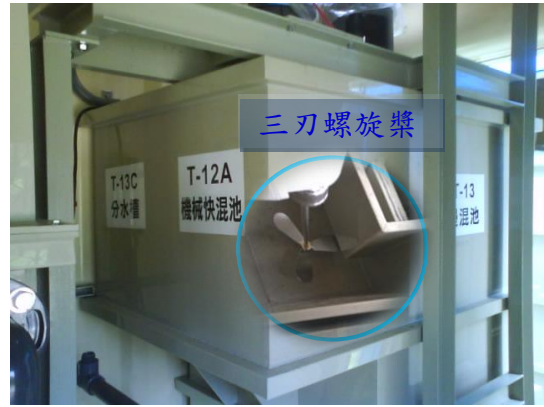
(5) 過濾槽

過濾槽體積為 1.3 m^3 (長 0.9 m × 寬 0.85 m × 高 1.7 m)，水體體積為 1.16 m^3 (長 0.88 m × 寬 0.83 m × 高 1.59 m)，採重力式過濾，濾料為石英砂(濾層厚 80 cm ，有效粒徑為 $0.8 \sim 0.9 \text{ mm}$ 、均勻係數小於 1.5 、比重為 $2.55 \sim 2.65$)，並設定固定濾池水頭損失以定期自動進行反沖洗。





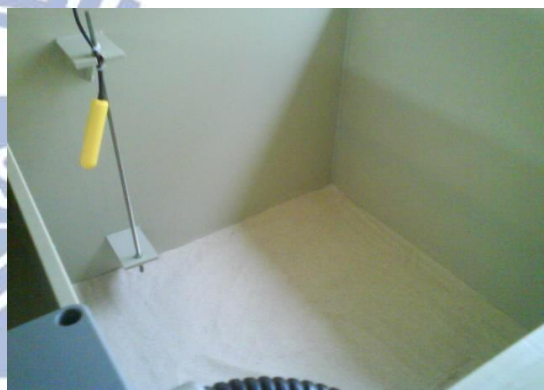
原水槽及原水採樣槽



快混槽及慢混槽



沉澱槽



重力式快濾槽

圖2 模廠處理單元



圖3 模廠外觀

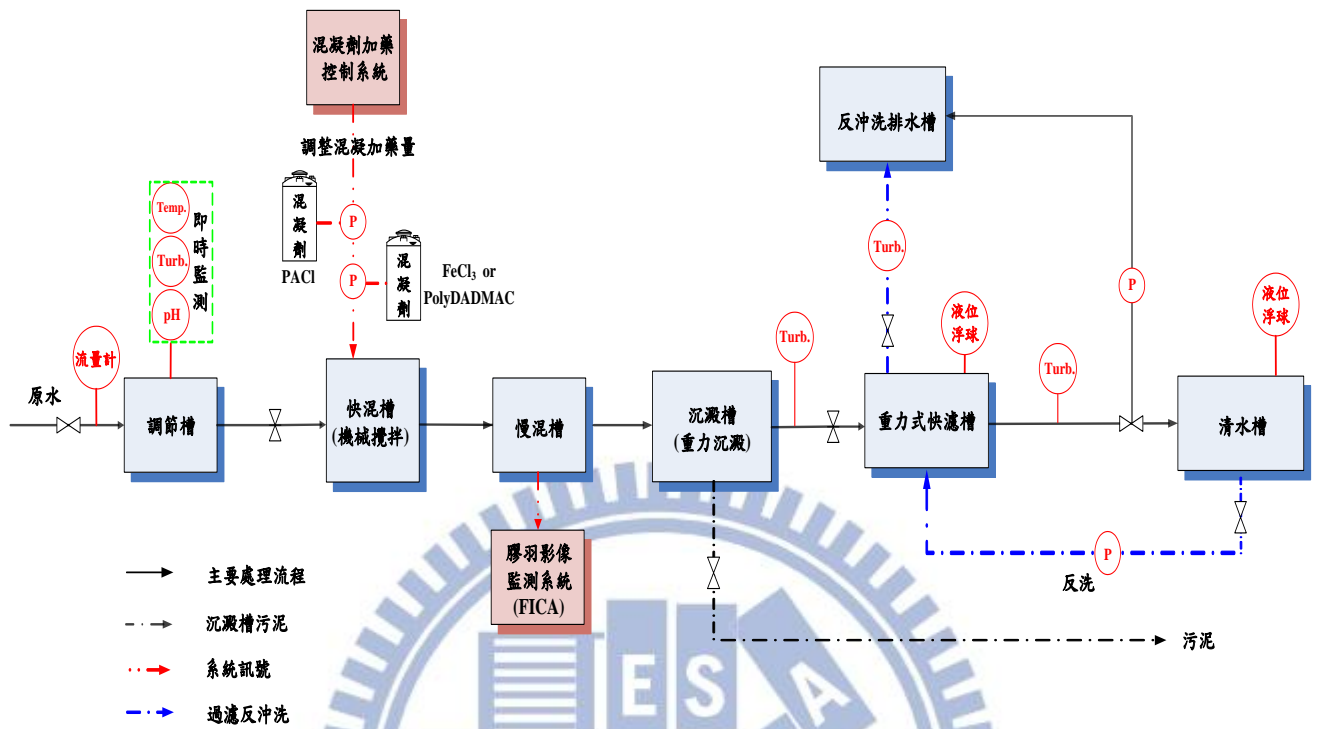


圖4 模廠處理流程及程序控制

3-2 凝膠羽生長特性分析

(1) 粒徑

膠羽粒徑的分析係取慢混水樣使用小角度雷射光散射粒徑分析儀 (Mastersizer 2000, Malvern, UK) 量測之，其偵測原理乃利用氦氖紅光雷射配合藍光雷射穿過一組反傅立葉鏡頭再透過水樣中之顆粒，經過多角度偵測器量測出粒徑分佈範圍，其適用顆粒濃度較高之水樣且可測得粒徑範圍介於 0.02 ~ 2,000 μm 之間。量測裝置如圖 5 所示，試驗中以蠕動幫浦為驅動力，水樣經軟管抽入儀器光感測區測量其顆粒粒徑，進樣流量等速維持在 30 mL/min。

透過各快混條件下之慢混水樣粒徑測量，分析其膠羽在不同快混強度下的膠羽生長情形，並取其粒徑分佈 50% 的粒徑值 (d_{50}) 代表各水樣之膠羽平均粒徑，由各慢混水樣膠羽平均粒徑評估其對混沉上澄液殘餘濁度的影響，了解模廠凝膠羽生長情況與混沉除濁效能的相關性。

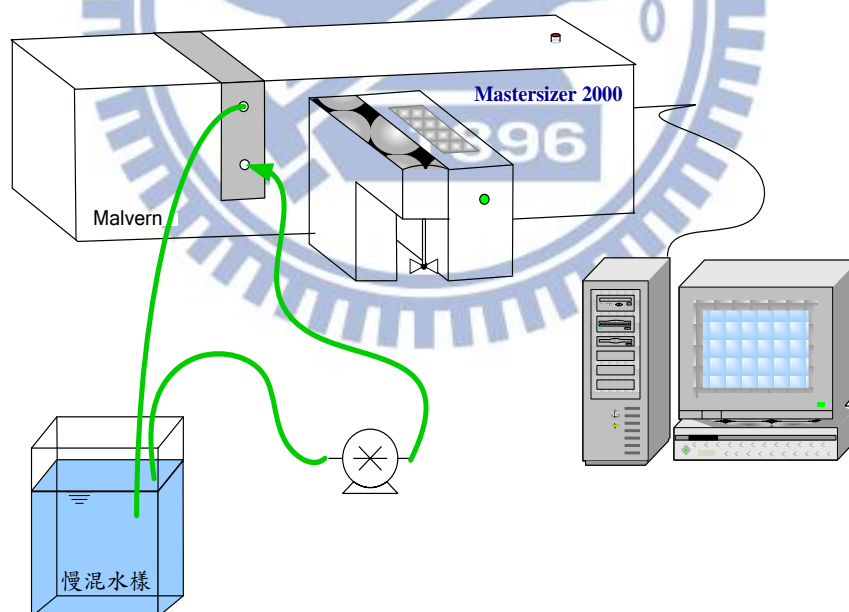


圖5 膠羽粒徑分析裝置

(2)碎形維度

膠羽的碎形維度(fractal dimension, D_f)同樣採用前述膠羽粒徑分析裝置之小角度雷射光散射粒徑分析儀(Mastersizer 2000, Malvern, UK)進行量測。該儀器在不同角度間(0.01° 至 40.6° 之間)具有光感測器，光感器可檢測經光束照射後樣品的散射光，膠羽之碎形維度可利用該儀器之量測數據搭配公式求得，而碎形維度範圍介於 1~3 之間，若 D_f 值愈大表示膠羽形狀越接近於球形($D_f=3$)，結構緊密而完整；反之則表示膠羽結構越鬆散，形狀越接近於線狀($D_f=1$)，故膠羽碎形維度可作為評估其沉降性之參考。

碎形維度之計算方法為一經驗公式，假設氬氬雷射通過水樣時，其測定總散射光強度為 I ， n 為流體之折射率， λ 為雷射光於真空下之波長，則散射波長之無因次係數為 Q (如式 2)，且 I 與 Q 之關係為 $I \propto Q^{-D_f}$ ，碎形維度(D_f)即可由 $\log I$ 與 $\log Q$ 圖形之斜率的負值求得，其中 Q 之範圍須介於 10^{-3} 至 4.5×10^{-4} 之間求得之 D_f 較具正確性(Lin *et al.*, 1989)。

$$Q = \frac{4\pi n \sin(\theta/2)}{\lambda} \quad (式 2)$$

(3)膠羽影像 RGB

本研究使用的膠羽影像色彩分析裝置(floc image colorimetric analyzer, FICA)係為中央大學環工所秦靜如老師研究室所發展之非接觸式光學監測混凝系統技術，應用於膠羽影像監測裝置量測慢混膠羽影像之三原色(RGB)值，以分析模廠混凝膠羽聚集特性之變化。FICA 系統由影像擷取系統與光學影像色彩模式分析系統組成，其中影像擷取系統裝置於一密閉的箱中以避免外來光源干擾，其設備包含攝影機、石英觀測視窗、LED 平面背光模組、以及影像擷取電腦，裝置如圖 6 所示。慢混水樣由重力方式經過石英管，藉由攝影機鏡頭擷取畫面後，利用 LabView 程式進行影像分析水樣 RGB 值之統計運算。膠羽影像色彩分析系統的原理是利用混凝過程中，隨著膠羽生長的情況，慢混水樣產生色彩變化，由於

三原色光波長及能量強度不同，當膠羽生成時，藉由影像分析軟體偵測膠羽影像的色彩三原色(RGB)值，因背光模組投射之部分光源會被石英管中的膠羽吸收或反射，此造成 Red、Green 及 Blue 三個讀值的差異，故以膠羽影像之 RGB 標準偏差值可作為評估混凝膠羽生長狀況的依據。

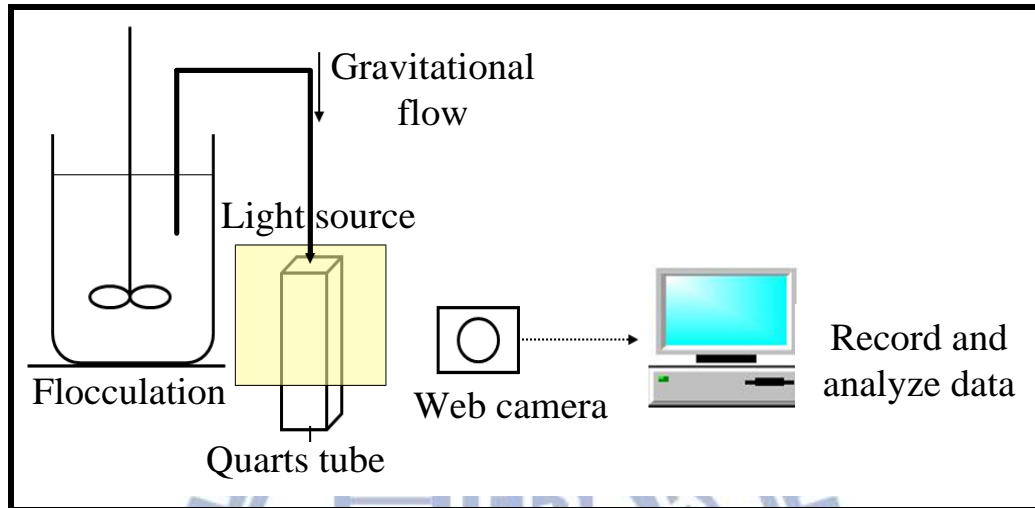


圖6 膠羽影像色彩分析(FICA)監測系統之裝置

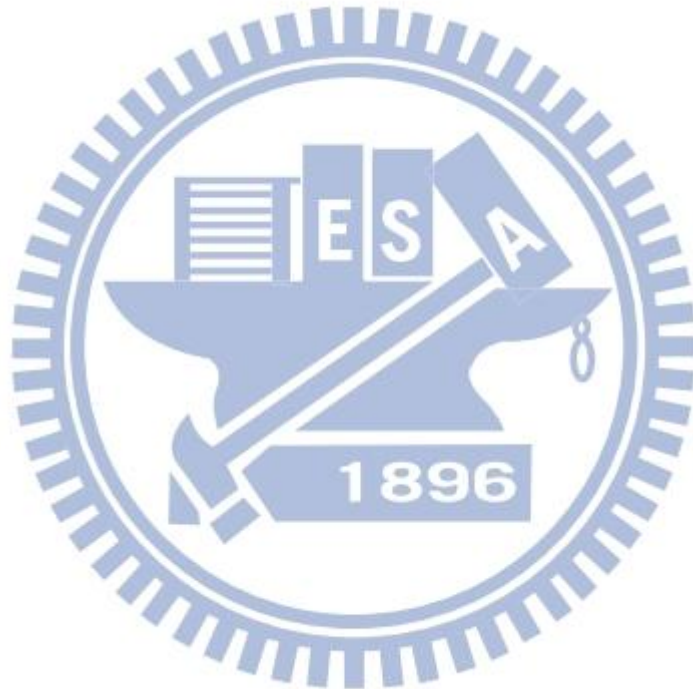
3-3 模廠混凝試驗

模廠混凝試驗採用傳統淨水混凝處理流程，並於各淨水單元裝置自動化監控系統，因此混凝過程中原水濁度、慢混膠羽影像 RGB 值、沉澱槽及快濾槽之殘餘濁度皆會連續監測並記錄，不過膠羽粒徑及碎形維度仍需自行批次式採集慢混水樣，以小角度雷射光散射粒徑分析儀(Mastersizer 2000, Malvern, UK)進行量測。本研究混凝試驗分別在低濁度(<100 NTU)及高濁度(>100 NTU)之天然濁水條件下，各別採取單獨 PACl 加藥、PACl 搭配 PolyDADMAC 加藥及 PACl 搭配 FeCl₃ 的混凝加藥組合，並調整不同快混強度($G=100\sim 1800\text{ s}^{-1}$)及快混時間($t=15\text{ sec}$ 及 60 sec)，其中快混 t 值為 15 sec 的條件下，單獨 PACl 混凝加藥測試之混沉及過濾效能監測記錄如附錄 A 所示，而 PACl 搭配 PolyDADMAC 加藥混凝之連續監測記錄則摘錄於附錄 B 中。

然而模廠混凝試驗中快混 t 值係透過調整原水流量所控制，為求在原水流量改變時仍能有一致的沉澱時間，因此本研究在快混 t 值為 15 sec 、 60 sec 的條件下，皆直接由慢混槽取膠羽水樣，將 2 L 的水樣置於瓶杯試驗的方型杯中，經過相同沉澱時間(90 min)後，取液面下 10 cm 之水樣以濁度計(2100P Turbidimeter, HACH)直接進行殘餘濁度量測，而在各快混強度下，三種混凝加藥組合之混沉上澄液殘餘濁度皆以此方式測得，藉由殘餘濁度評估快混攪拌強度(G 及 t 值)對不同濁度天然濁水之顆粒去穩定成效的影響。

為了連續觀察混凝過程中，不同濁度天然濁水之顆粒聚集情況，本研究採取瓶杯混凝試驗，同時連續式量測混凝過程中顆粒之粒徑及碎形維度。瓶杯混凝試驗採用林內淨水場之天然濁水，分別為高濁度(298.7 NTU)及低濁度(55.9 NTU)之天然濁水，各別以方形之瓶杯容器盛裝 2 L 之天然濁水，並置於瓶杯試驗機(PB900, Phipps & Birds, USA)中均勻攪拌一分鐘，使水樣維持懸浮的狀態，隨後添加 PACl (1.0 mg/L as Al)，並進行快混強度為 650 s^{-1} 、快混時間為 15 sec ，慢混強度為 25 s^{-1} 、慢混時間為 20 min 的瓶杯混凝試驗，為了能夠連續觀察顆粒聚集

及膠羽的生長特性，試驗中以蠕動幫浦為驅動力，在快混階段之前即將混凝水樣經軟管抽入小角度雷射光散射粒徑分析儀中，採非侵入式的方式，測量混凝過程之顆粒粒徑及膠羽碎形維度隨時間的變化，而量測後的水樣再流回瓶杯中，水樣流量維持在 30 mL/min，藉由此循環量測的方法連續式監測混凝過程的顆粒聚集狀況，直至 20 min 的慢混階段結束後而停止量測。



第四章 結果與討論

本研究之模廠混凝試驗主要欲探討不同快混攪拌強度(G 及 t 值)及混凝加藥組合下，各種濁度天然濁水之混沉除濁效能及混凝膠羽特性的變化。文獻研究，在不同原水濁度下，不僅混凝劑加藥量會影響顆粒聚集的型態，當水中顆粒越多時，膠羽的生成量及生長速率亦隨之增加，而顆粒比重增加時，其形成之膠羽更易於沉澱^(高, 1978)，所以水中濁度顆粒數量也可能影響混凝膠羽生長的形式。由於有多種因素可能影響膠羽生長特性，而在各原水濁度及不同混凝加藥組合下，應有個別適用的快混攪拌強度，故本研究混凝試驗即欲探討，混凝處理不同濁度的天然濁水時，調整快混 G 及 t 值對膠羽生長特性的影響，並比較不同混凝加藥組合下，膠羽之粒徑及碎形維度與混沉濁度去除效率的相關性。以下將各別詳述不同天然濁水濁度條件下，調整快混 G 及 t 值對各混凝加藥組合之膠羽生長特性及混沉除濁效能的影響。

4-1 天然濁水水質特性

本研究試驗期間之天然濁水水質條件如表 2 所示，因試驗採用之天然濁水為林內淨水場原水，其水源主要來自濁水溪，因此原水濁度隨季節變化明顯，濁度範圍約為 50~600 NTU，除了春季枯水期的原水濁度低於 100 NTU 以外，其它季節時原水皆為濁度高於 100 NTU 的高濁水，且雨季發生暴雨時甚至會造成原水濁度突增至 500 NTU 以上，但原水 pH 值(約為 7.8~8.2)、鹼度(約為 142 mg/L as CaCO₃)及 DOC 濃度(約為 0.7~1.1 mg/L)之變化則較小，而天然濁水中雖顆粒多，且水色深呈現深灰色，但顆粒特性較為穩定，其平均粒徑約 7.8 μm (如圖 7 所示)，而顆粒表面界達電位約為 -19 mV，整體而言水質呈現高濁度、高鹼度及高 pH 值的特性。

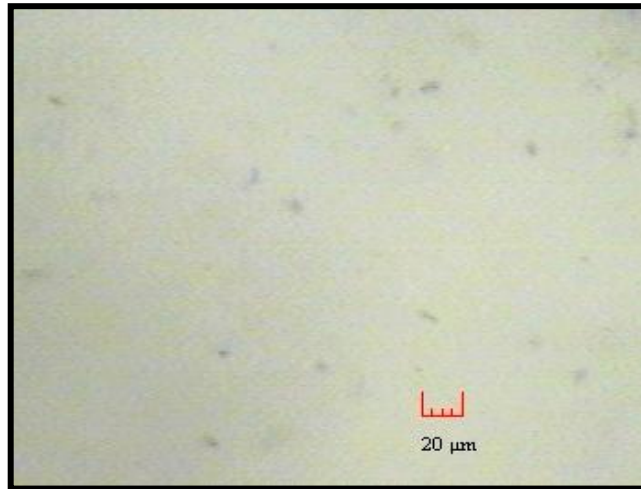


圖7 本研究採用之天然濁水

表2 天然濁水水質特性

水質項目	水樣	
	低濁水	高濁水
pH	8.1 ±0.1	8.0 ±0.1
濁度 (NTU)	54.1 ±21.4	277.8 ±168.0
DOC (mg/L)	0.7 ±0.1	1.0 ±0.2
鹼度 (mg/L as CaCO ₃)	141.7 ±2.5	141.7 ±2.1
顆粒界達電位 (mV)	-18.9 ±0.4	-19.9 ±1.3
顆粒平均粒徑 (μm)	7.8 ±0.4	7.9 ±0.3

*採樣期間：2012年9~11月及2013年5月（高濁水）
2013年1~3月（低濁水）

4-2 混凝加藥組合對混凝膠羽生長特性之影響

不同混凝劑加藥組合的水解反應差異，可能對混凝膠羽生成特性造成影響，而混凝膠羽生長特性與混沉除濁效能具有相關性，為了使添加的混凝劑充分發揮對濁度顆粒去穩定的作用，混凝時需考量混凝劑的適用條件，因此以下分三節討論單獨 PACl 加藥及 PACl 搭配助凝劑(PolyDADMAC)加藥，以及 PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝，各別探討三種混凝加藥組合在固定的快混延時($t=15$ sec)條件下，增加快混強度對混凝膠羽粒徑及碎形維度的影響，並評估膠羽影像 RGB 標準偏差值與膠羽粒徑的相關性，以了解不同混凝加藥組合之混沉除濁效能及其對混凝膠羽生長特性之影響，其詳細實驗結果如下所述。

4-2.1 單獨 PACl 加藥混凝

調整快混強度對水中顆粒聚集方式的影響，可能會因不同原水濁度而有程度上的差異，在高濁水的條件下，水中顆粒數越多，膠羽的生成量及生長速率隨之增加，當顆粒比重增加時，其形成之膠羽更易於沉澱^(高, 1978)，而低濁水因水中膠體數量少，在混凝時顆粒碰撞機率低，需提高快混 G 值以增加顆粒碰撞機率，較能有利膠羽生成^(黃, 2010)。因此，本研究分別在天然濁水為高濁水及低濁水的條件下，以相同的 PACl 加藥量(1.0 mg/L as Al)進行混凝試驗，其混凝膠羽粒徑、碎形維度值及混沉上澄液殘餘濁度如圖 8 所示，當原水濁度高達 234.4 NTU 時，增加快混強度對顆粒聚集效率影響不大，其混凝膠羽的碎形維度值低($D_f < 2.10$)，膠羽呈現鬆散結構且粒徑皆小於 50 μm ，因此混沉上澄液殘餘濁度並未隨快混 G 值增加而有明顯變化。而當原水濁度在 83.3 NTU 時，其混凝膠羽碎形維度值較高($D_f > 2.25$)，且膠羽粒徑皆大於 100 μm ，並隨快混 G 值增加而有粒徑增大的趨勢，當快混 G 值提高至 650 s^{-1} 以上時，混沉上澄液殘餘濁度可明顯降低，此種膠羽生長特性明顯異於高濁水時的情況，主因濁度低時，水中濁度顆粒數較少，增加快混強度有利水中顆粒聚集效率提昇，當顆粒經由顆粒-聚集體(particle-cluster aggregation)模式聚集時，水中小顆粒有機會進入聚集體內部，可形成密實的膠羽

而不易因混凝攪拌過程發生破碎，故低濁水之膠羽粒徑明顯大於高濁水混凝生成之膠羽^(黃, 2010)，且增加快混強度有利於提高混沉除濁效能。而在高濁水的混凝試驗中，雖水中顆粒碰撞效率高，但因混凝劑不足以使顆粒充分去穩定而聚集，造成混凝過程中破碎的膠羽無法再聚集生長，此時增加快混強度對顆粒聚集效率的影響並不顯著，且會因過高的快混強度造成聚集的顆粒破碎，使其混凝膠羽呈現鬆散的結構。

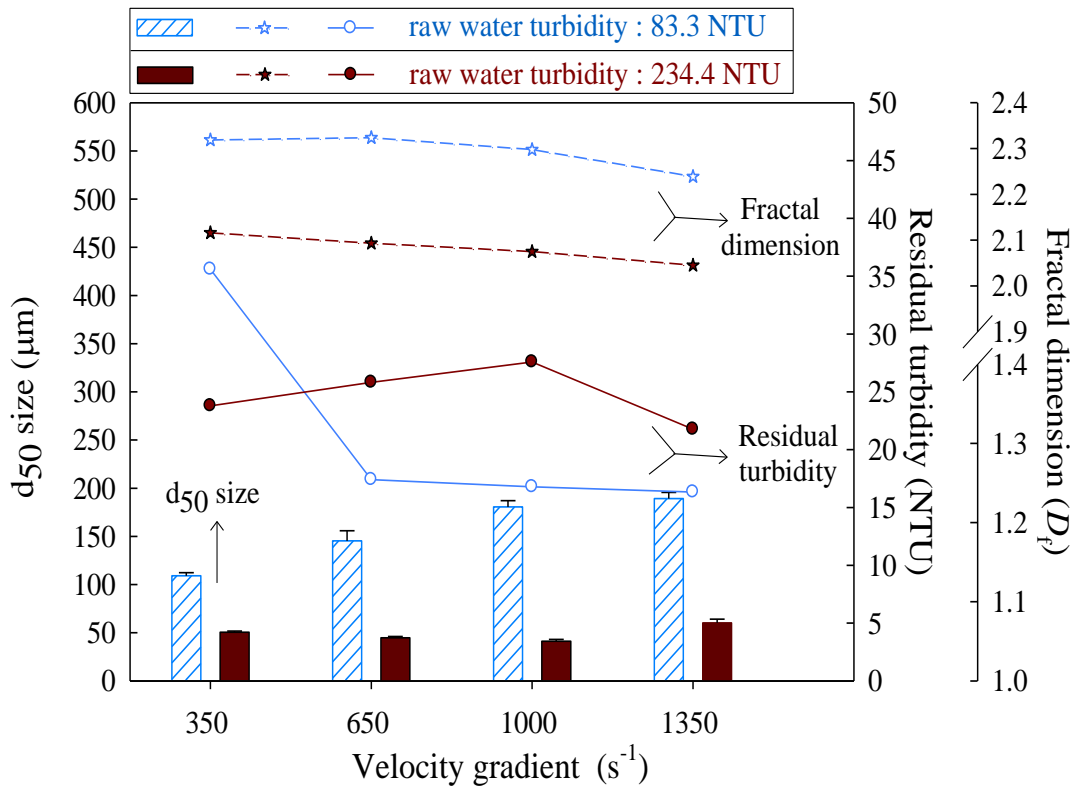


圖8 不同快混強度下 PACl 加藥混凝高濁水及低濁水之混沉除濁效能 (PACl dosage: 1.0 mg/L as Al)

在不同原水濁度的混凝試驗中，調整快混強度對混凝膠羽粒徑及碎形維度的影響程度會因原水濁度而不同，尤其當原水濁度低時，增加快混強度可提高水中顆粒聚集的效率，而濁度高時調整快混強度則對顆粒聚集效率影響不顯著。為了確認不同原水濁度下，混凝時顆粒的聚集情況，本研究分別採用濁度 298.7 NTU 及 55.9 NTU 的天然濁水進行混凝瓶杯試驗，並連續式監測混凝過程中膠羽粒徑及碎形維度隨時間的變化。

如圖 9 所示，在相同的 PACl 混凝劑量(1.0 mg/L as Al)及快混強度(G 值為 650

s^{-1})下，高濁度(298.7 NTU)原水經 15 sec 的快混後，水中顆粒聚集速率快，其顆粒在慢混階段的前 240 sec 內快速聚集生長，當膠羽成長至一定粒徑(約 50 μm)之後聚集生長速率則趨於平緩，而低濁度(55.9 NTU)原水在混凝過程中顆粒聚集速率則相對較為緩慢，在慢混階段的前 240 sec 內水中顆粒緩慢聚集，而後微小膠羽逐漸聚集，使水中膠羽粒徑快速增大，經過 20 min 的慢混階段後膠羽粒徑可達到約 130 μm 。此瓶杯試驗結果與文獻研究成果相似，因濁度高之原水所含顆粒數多，在混凝過程中顆粒碰撞效率高，使其顆粒聚集速度快，容易形成聚集體-聚集體(cluster-cluster aggregation)的聚集模式，初始形成之聚集體相互聚集而快速生成膠羽(Lin *et al.*, 2008)，而低濁度原水則因水中顆粒數較少，混凝過程中顆粒經由顆粒-聚集體(particle-cluster aggregation)的模式聚集，緩慢的聚集過程使小顆粒有機會進入聚集體內部，並逐漸生長為大膠羽，故不同濁度原水條件下混凝膠羽粒徑有如此顯著之差異。

但此瓶杯試驗混凝膠羽之碎形維度與前述圖 8 的模廠混凝試驗結果不同，此試驗結果以高濁水混凝所生成的膠羽碎形維度較高，依文獻研究指出，膠羽經過長時間破碎並再聚集之後所生成的膠羽，其膠羽碎形維度值明顯高於破碎時間短的條件下所生成的膠羽，因此膠羽的生成過程經過破碎及再聚集的生長型態有利於使其結構更加密實(Wang *et al.*, 2009)，而瓶杯試驗的混凝膠羽生長過程中，膠羽持續增大並沒有發生破碎及再聚集，所以其膠羽結構鬆散而碎形維度值較低，僅高濁水混凝的條件下，膠羽在快速聚集生長到一定程度之後，膠羽生長速率趨緩，而經過長時間的結構重組，使其生成膠羽的結構變得更密實，因此其碎形維度高於低濁水混凝生成的膠羽。

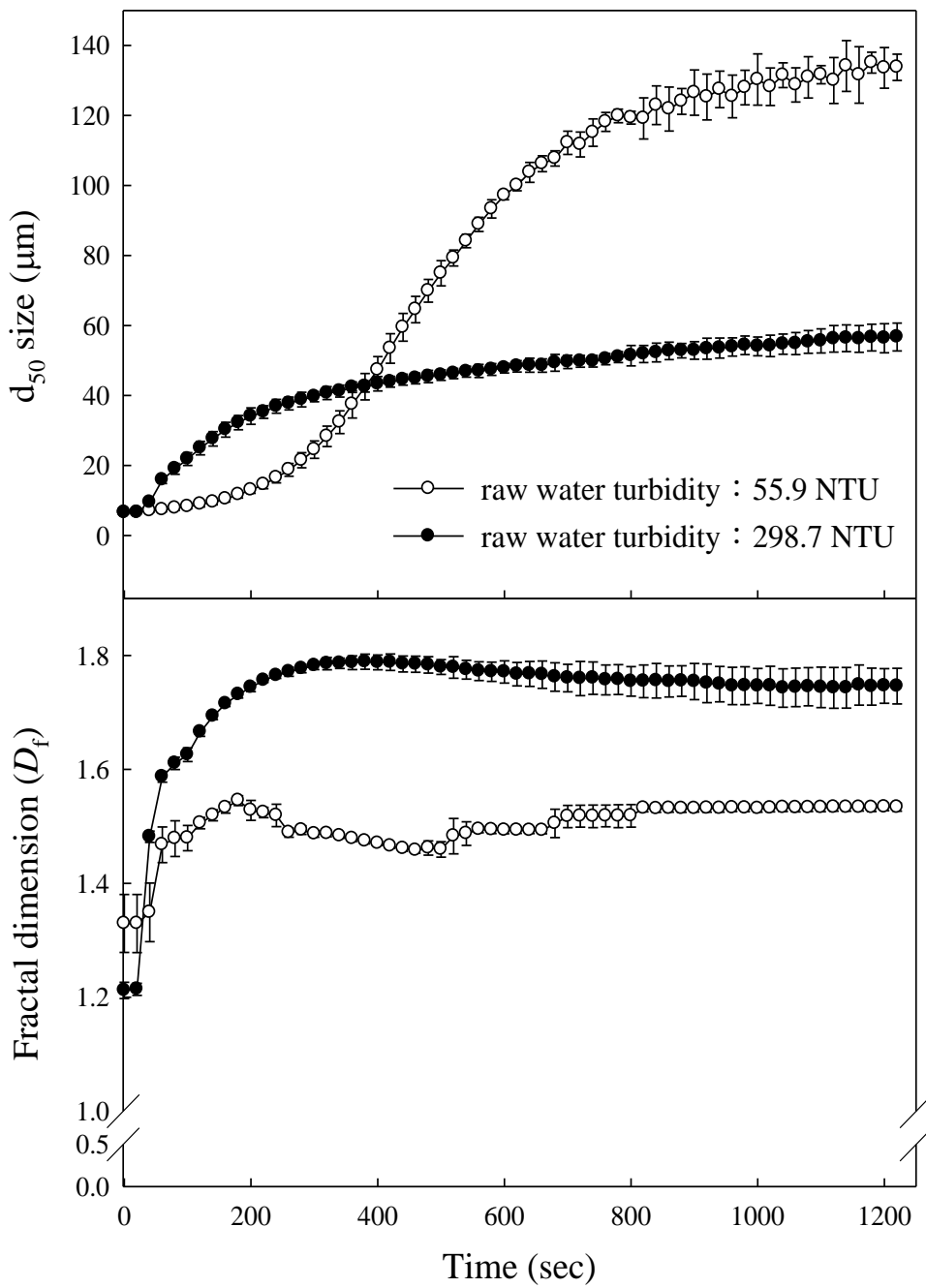


圖9 連續式監測瓶杯試驗混凝過程之膠羽粒徑及碎形維度
(快混時間：15 sec；慢混時間：20 min)

4-2.2 PACl 搭配 PolyDADMAC 加藥混凝

前述混凝試驗結果顯示使用 PACl 加藥混凝時，在源水濁度低的條件下，增加快混強度有利提昇水中顆粒聚集效率，且對混凝膠羽生成特性影響甚大。但在不同混凝加藥組合下，調整快混強度對水中顆粒之聚集效率的影響程度不同，例如採用混凝劑搭配助凝劑進行混凝，會使得顆粒聚集速度加快，而影響生成膠羽的粒徑及結構^(Wei et al., 2009; Yu et al., 2006)，故針對不同混凝加藥組合，需要考量調整快混強度以達適合顆粒聚集的條件。因此本研究進一步探討快混強度在 100~1800 s⁻¹ 範圍內時，以 PACl 搭配助凝劑(PolyDADMAC)加藥混凝對膠羽生長特性之影響，其混凝膠羽之粒徑、碎形維度值及混沉上澄液殘餘濁度如圖 10 所示，當快混強度由 100 s⁻¹ 增至 650 s⁻¹ 時，混凝膠羽粒徑逐漸增加並達到最大值(162 μm)，但持續增加快混強度至超過 650 s⁻¹ 時，混凝膠羽粒徑減小，而此時膠羽碎形維度($D_f > 2.35$)達到最大，且混沉上澄液殘餘濁度可明顯降低，但快混強度增加至 1800 s⁻¹ 時將造成混沉上澄液殘餘濁度再升高。由試驗結果顯示，使用 PACl 搭配 PolyDADMAC 加藥混凝時，當快混強度大於一特定值後，其膠羽的粒徑會明顯減小。據文獻研究結果指出，助凝劑添加於水中，隨著快混強度之增加，混凝膠羽破碎程度會明顯上升^(Kim et al., 2006; Libeck, 2011)，因試驗添加的陽離子助凝劑(PolyDADMAC)在增加快混強度的條件下，膠羽發生破碎與再聚集，雖使得膠羽粒徑減小，但再聚集之後的膠羽結構更加密實，致使膠羽碎形維度會隨快混強度增加而有上升之趨勢，而結構密實的膠羽有利沉降，可使混沉上澄液殘餘濁度明顯下降但過高的快混強度($G = 1800 \text{ s}^{-1}$)仍可能影響顆粒的聚集，不利於膠羽沉降，顯示 PACl 搭配添加 PolyDADMAC 混凝時，適度增加快混強度($G = 650 \sim 1350 \text{ s}^{-1}$)可提高水中顆粒的聚集效率，有利生成結構密實的膠羽，同時可降低混沉上澄液殘餘濁度，因此膠羽特性對混沉除濁效能的影響，主要與膠羽密實度及沉降性較具相關性，並非單以膠羽粒徑越大者表示除濁效果最佳^(Wang et al., 2011; He et al., 2012)。

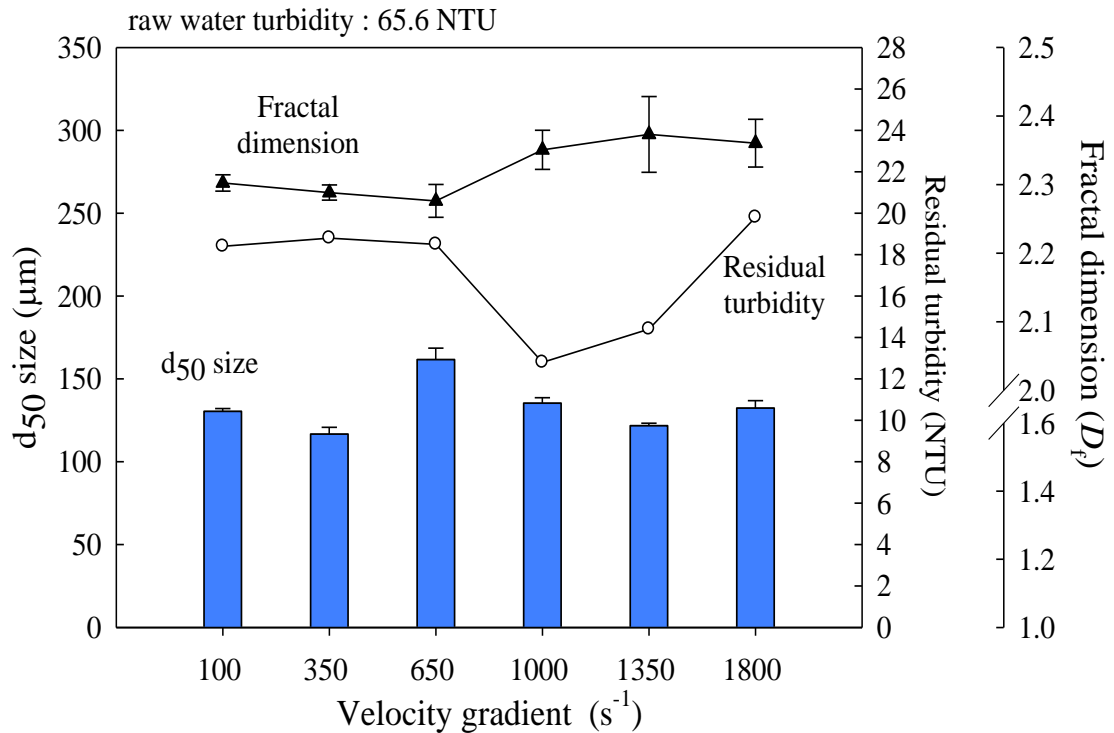


圖10 不同快混強度下 PACI 搭配 polymer 之混沉除濁效能
(PACI dosage: 0.5 mg/L as Al; PolyDADMAC dosage: 0.1 mg/L)

4-2.3 PACI 搭配 $FeCl_3$ 加藥混凝

如圖 11 所示，使用 PACI 搭配 $FeCl_3$ 加藥所生成之混凝膠羽，在快混強度為 $100\sim 1800 s^{-1}$ 的試驗條件下，其混凝膠羽粒徑皆可大於 $100 \mu m$ ，且膠羽結構密實而碎形維度值大於 2.4，隨著快混強度增加可降低混沉上澄液殘餘濁度，僅當快混強度達 $1800 s^{-1}$ 時，膠羽之粒徑及碎形維度值會明顯降低，且造成殘餘濁度上升，顯示添加 $FeCl_3$ 混凝所適用的快混 G 值範圍廣，生成的膠羽密實而不易破碎，但過高的快混強度仍會造成顆粒聚集效率下降。

依據文獻研究鐵系及鋁系兩種混凝劑的混凝反應，以鐵系混凝劑進行混凝，其在快混強度比較低的條件下，即可達到與鋁系混凝劑加藥時相同的混凝顆粒聚集效果，所以鐵系混凝劑的最適快混 G 值比較低^(Ebie et al., 2006b)，因此本研究中 PACI 搭配添加 $FeCl_3$ 混凝時，在快混強度為 $100\sim 1350 s^{-1}$ 的範圍內皆可提供足夠的快混攪拌強度，有效使水中顆粒去穩定而聚集，所以在此條件下增加快混強度，其生成膠羽之粒徑及碎形維度值僅有些許上升，但仍可有效降低混沉上澄液殘餘濁

度，此結果顯示 PACl 搭配添加 FeCl_3 混凝，在快混強度足以使混凝劑均勻分散至濁度顆粒表面的條件下，調整快混 G 值對膠羽生長特性並無直接地顯著影響，不過增加快混強度可提高混凝劑對顆粒的去穩定程度，仍有利提高混沉除濁效能。

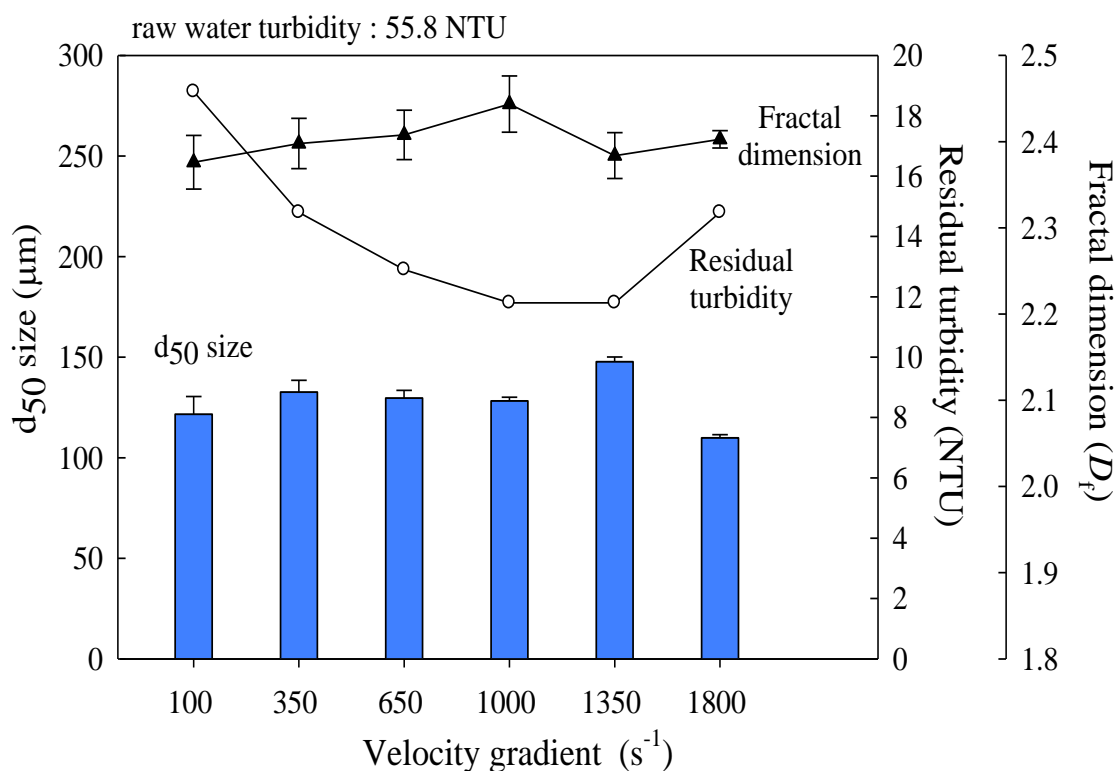


圖 11 不同快混強度下 PACl 搭配 FeCl_3 之混沉除濁效能
(PACl + FeCl_3 dosage: 0.5 mg/L as Al; 0.5 mg/L as Fe)

在不同混凝加藥組合下，調整快混強度對混凝膠羽的生長特性影響程度不同，透過膠羽影像色彩分析儀(FICA)監測慢混水樣之三原色(RGB)值，由 RGB 值之標準偏差可判斷膠羽生長狀況，當 RGB 三個值相對差距變大時，混凝膠羽粒徑會增大^(陳, 2012a)，因此在不同混凝加藥組合下，可由 RGB 值之標準偏差評估各混凝加藥組合對膠羽生長特性之影響。

由於天然濁水含有一定比例之砂石，水色偏深灰色，透過 FICA 監測水樣之三原色(RGB)值，因紅光波長較長而能量較弱，可發現 Green 及 Blue 的訊號強度均高於 Red，而 RGB 三個訊號值的標準偏差即可作為判斷膠羽生長特性的依據，如圖 12 之圖(a)所示，以 PACl 單獨加藥(1.0 mg/L as Al)混凝，在低濁水(83.3 NTU)

的條件下，其慢混膠羽粒徑皆大於 $80\ \mu\text{m}$ ，當膠羽粒徑增大時，水樣之 RGB 標準偏差值亦隨之增加，不過在高濁水(234.4 NTU)的情況下，混凝膠羽粒徑小，但其膠羽影像 RGB 值標準偏差卻明顯大於低濁水混凝所生成的膠羽，且其 RGB 標準偏差值並未隨膠羽粒徑改變而有相同的變化趨勢。此試驗結果之差異，係由於高濁水所含的砂石顆粒多，膠羽含有大量深灰色的顆粒會造成其 RGB 標準偏差值受干擾，導致混凝處理高濁水時，無法直接由膠羽影像 RGB 標準偏差值直接分析膠羽的粒徑變化。而圖(b)是由 PACl 搭配 PolyDADMAC 加藥進行混凝，其膠羽影像 RGB 標準偏差值隨著膠羽粒徑增大而增高，但圖(c)PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝之膠羽影像 RGB 標準偏差值則不隨膠羽粒徑改變而有相對的變化，因此 PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝時，分析慢混水樣的膠羽影像 RGB 標準偏差值並無法判斷出膠羽的生長狀況。

由試驗分析結果得知，水樣 RGB 值會受到原水濁度之影響，在高濁度的天然濁水條件下，水中砂石顆粒含量高而水色呈現深灰色的特性，並不適用於 FICA 監測膠羽影像的 RGB 值，而添加 FeCl_3 混凝劑亦有造成水樣影像 RGB 值干擾的疑慮，所以膠羽影像 RGB 值與膠羽粒徑之相關性，需在低濁水且添加之混凝劑不造成水色變化的條件下，方可藉由 FICA 監測混凝膠羽影像的色彩變化，間接分析混凝膠羽的生長特性。

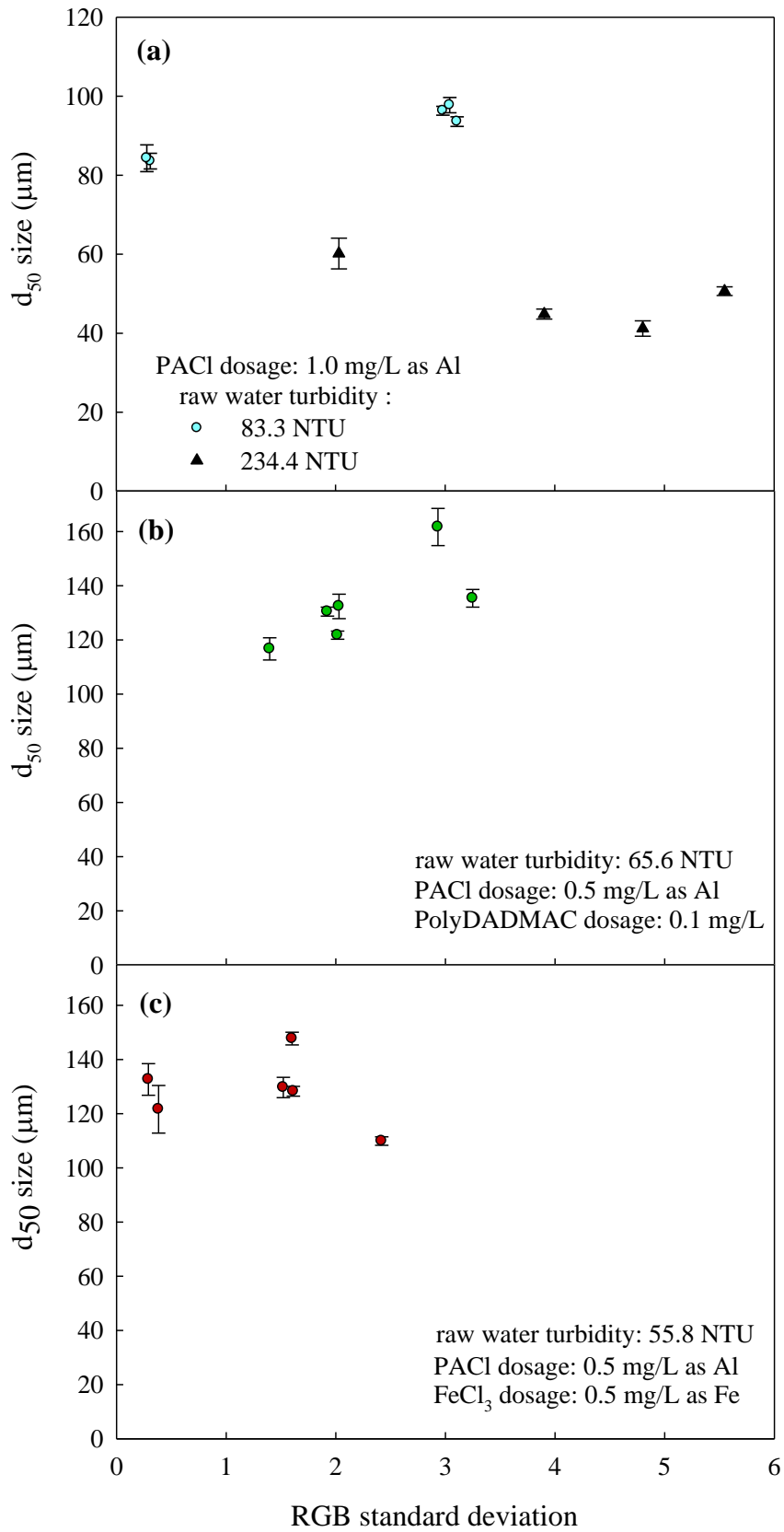


圖12 各混凝加藥組合下之膠羽粒徑與膠羽影像RGB標準偏差值 (a)單獨PACl 混凝、(b)PACl 搭配 PolyDADMAC 混凝、(c)PACl 搭配 FeCl₃ 混凝

綜合上述，採單獨 PACl 加藥混凝時，在高濁水條件下，因混凝劑不足以使顆粒充分去穩定而聚集，此時增加快混強度對顆粒聚集效率及混沉除濁效能的影響並不顯著，但在低濁水時，提高快混強度可增加顆粒聚集效率，且當 G 值提高至 650 s^{-1} 以上時，混沉上澄液殘餘濁度可明顯降低。另一方面，使用 PACl 搭配 PolyDADMAC 混凝時，當快混強度大於一特定值($G > 650 \text{ s}^{-1}$)後，混凝膠羽經過再聚集生長而使得膠羽結構更加密實，致使膠羽碎形維度隨快混強度增加而有上升之趨勢，且混沉除濁效能亦明顯提昇，而當 PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝時，由於 FeCl_3 混凝劑適用的快混 G 值範圍廣，在快混強度為 $100\sim 1350 \text{ s}^{-1}$ 的條件下皆可提供足夠的攪拌強度，此時調整快混強度對膠羽生長特性並無顯著影響，不過增加快混強度可提高混沉除濁效能。



4-3 快混攪拌強度(G 及 t 值)對混沉除濁效能之影響

經由前一章節不同快混強度的混凝試驗結果顯示，於低濁度時在單獨 PACl 加藥及 PACl 搭配 PolyDADMAC 加藥組合下，增加快混強度可提高混凝聚集顆粒的效率，而在 PACl 搭配 FeCl_3 混凝加藥的組合下，僅調整快混強度對於膠羽的生長特性影響有限。因此，本研究進一步針對調整快混 t 值對混沉效能之影響進行混凝試驗，此試驗中同步評估單獨 PACl 加藥及 PACl 搭配添加 FeCl_3 混凝之混沉除濁效能。因增加快混攪拌強度(G 及 t 值)有利混凝劑在水中分散而使顆粒去穩定，但鋁系及鐵系混凝劑適用的快混反應條件不同，因此本研究將快混 t 值由 15 sec 延長到 60 sec，在不同快混強度下($G = 100 \text{ s}^{-1} \sim 1800 \text{ s}^{-1}$)，以 PACl 單獨加藥 (1 mg/L as Al) 以及 PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝 (0.5 mg/L as Al 及 0.5 mg/L as Fe)，觀察兩種混凝加藥組合之膠羽生長特性差異，並以瓶杯試驗之方型杯於模廠慢混槽內各取 2 L 慢混水樣，再經 90 min 沉澱後，量測混沉上澄液殘餘濁度，藉此探討調整快混攪拌強度(G 及 t 值)對各混凝加藥組合之混沉除濁成效的影響。

在低濁水(<100 NTU)條件下，單獨 PACl 加藥混凝試驗之膠羽生長特性及混沉上澄液殘餘濁度如圖 13 所示，在圖中快混攪拌強度(G 及 t 值)對膠羽生長特性之影響，以 G 及 t 值乘積的方式表示，便於在相同 Gt 值(< 4×10^4)範圍內，比較不同快混 G 及 t 值搭配之下，混凝膠羽生長特性的差異。在試驗過程中，快混 t 值為 15 sec 及 60 sec 時，原水濁度約為 80 NTU，此時生成膠羽之粒徑皆小於 100 μm 。在快混 Gt 值小於 4×10^4 的範圍內，混凝膠羽之碎形維度並無隨快混 Gt 值調整而有明顯變化，而對膠羽粒徑之影響僅在 t 值為 15 sec 的情況下，快混 G 值增加(100 s^{-1} 至 650 s^{-1})可使膠羽略為增大，不過整體而言，當 Gt 值大於 10^4 後再提高快混攪拌強度(G 及 t 值)並不會使得生成膠羽之粒徑有明顯增加，但卻可降低混沉上澄液殘餘濁度，雖然如此，但當 Gt 值大於 8×10^4 時，混沉上澄液殘餘濁度將會升高，此結果顯示增加快混 G 及 t 值可提高混沉除濁的效能，但過大的攪拌強度對於提昇濁度去除效率並無助益。

PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝之試驗結果如圖 14 所示，其中快混 t 值為 15 sec 及 60 sec 時，原水濁度約為 52~55 NTU，此時生成膠羽之粒徑可大於 $100\ \mu\text{m}$ ，且結構密實使其碎形維度值大於 2.4，由膠羽生長特性的變化可發現，在快混 Gt 值小於 2×10^4 的範圍內時，提高快混攪拌強度得使生成膠羽隨之增大，且增加快混強度可明顯提昇混沉除濁效能，由此試驗結果顯示在低濁水中，增加快混 Gt 值有利於提昇顆粒去穩定成效。此外，由於鐵系混凝劑在水中反應速率快，其最適的快混 t 值可小於使用鋁系混凝劑加藥者^(Ebie *et al.*, 2006b)，因此圖 14 中快混 t 值為 15 sec 時，膠羽粒徑及碎形維度值皆大於 t 值為 60 sec 時所生成的膠羽，而當快混 Gt 值大於 2×10^4 之後，此時增加快混攪拌強度對膠羽生長特性之影響不顯著。



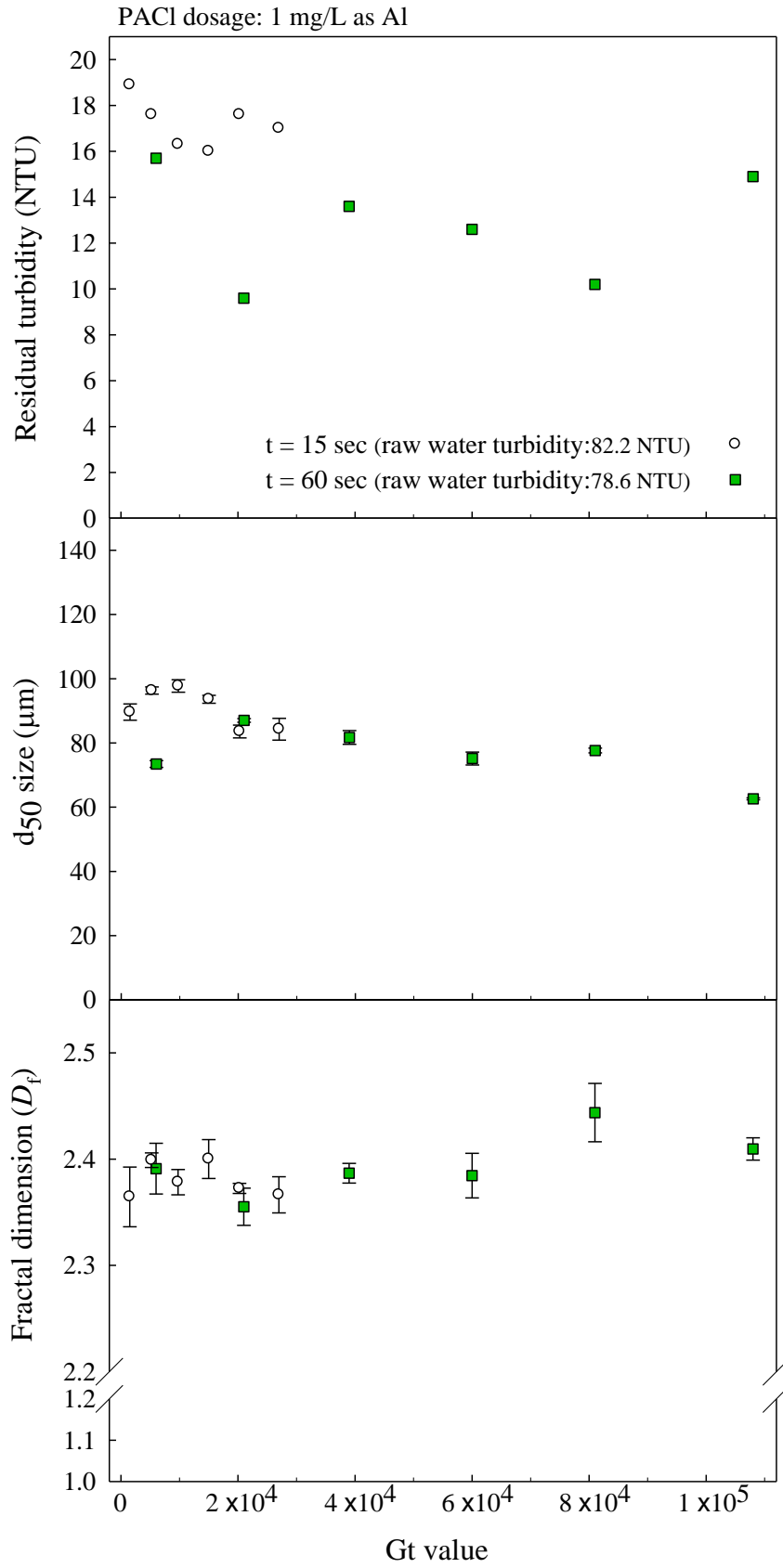


圖13 低濁度下不同快混 Gt 值之混沉除濁效能及膠羽特性
(PACl dosage: 1 mg/L as Al)

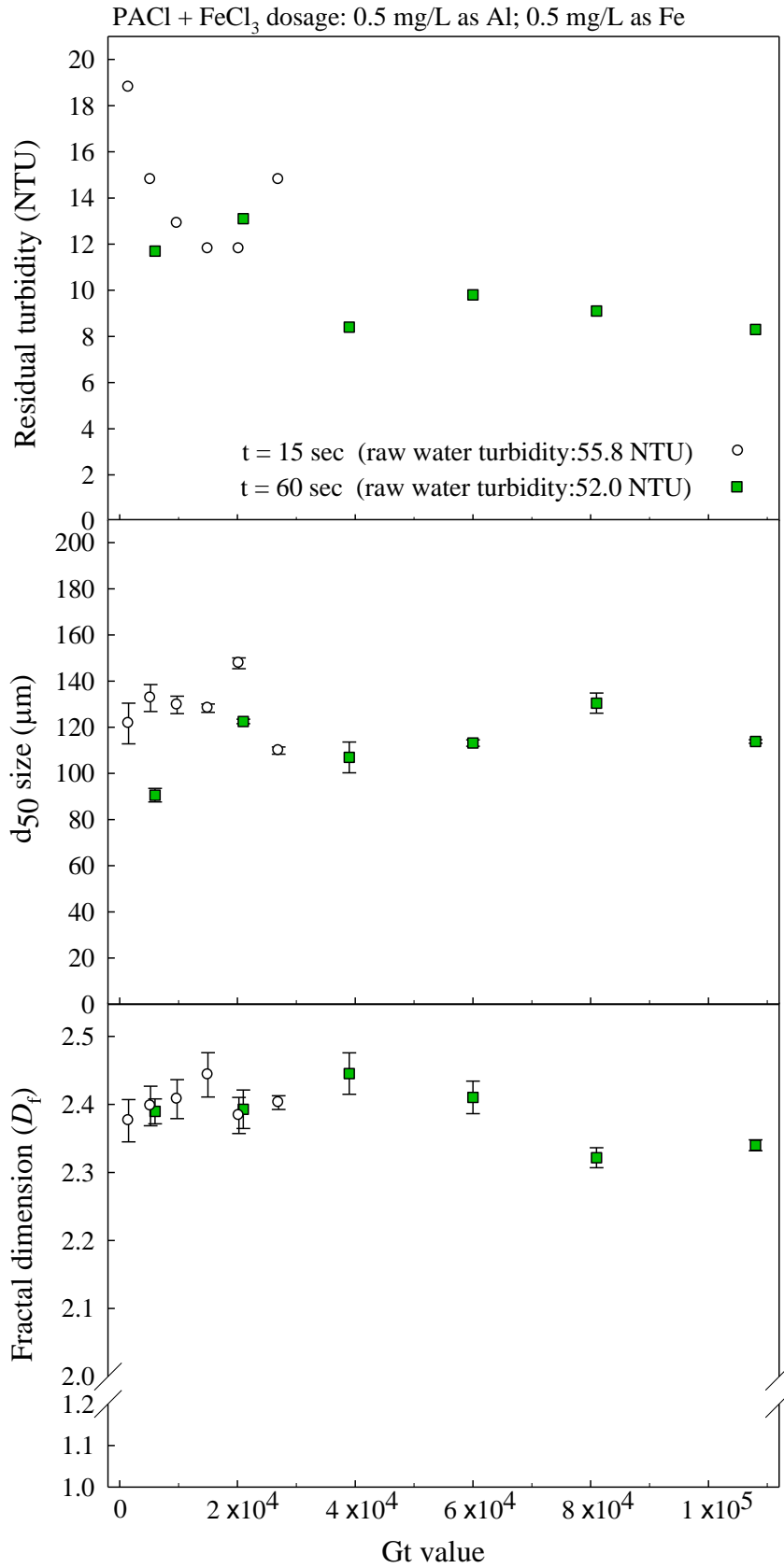


圖14 低濁度下不同快混 Gt 值之混沉除濁效能及膠羽特性
(PACl + FeCl₃ dosage: 0.5 mg/L as Al; 0.5 mg/L as Fe)

高濁度原水(濁度約 450~621 NTU)，在不同快混強度下(100 s^{-1} ~ 1800 s^{-1})，單獨使用 PACl 加藥，進行快混 t 值為 15 sec 及 60 sec 的混凝試驗結果如圖 15 所示。當原水濁度高達 450 NTU 以上，其混凝生成之膠羽粒徑小於 $20\text{ }\mu\text{m}$ ，且碎形維度值低於 1.9。雖然高濁水之濁度顆粒多可增加混凝時顆粒的碰撞效率，但因混凝劑不足以使顆粒充分去穩定而聚集，造成混凝過程中破碎的膠羽無法再聚集生長，因此生成之膠羽粒徑甚小，尤其在快混 t 值為 60 sec 的情況下，生成膠羽呈現鬆散的結構，其混凝膠羽碎形維度值隨快混 Gt 值增加而降低，顯示在此條件下增加快混攪拌強度對顆粒聚集效率並無益處。

另外，PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝處理高濁度原水(濁度約 360~461 NTU)之混凝試驗結果如圖 16 所示，其混凝膠羽粒徑隨快混 Gt 值增加而減小，且碎形維度值也呈現下降的趨勢，尤其在快混 t 值為 15 sec 的條件下，快混攪拌強度增加使得混凝過程中顆粒的聚集體容易發生破碎，而膠羽減小的情況更為明顯，生成不利沉降的鬆散小膠羽，致使混沉上澄液殘餘濁度升高，故此混凝條件下增加快混 Gt 值對於提昇混沉除濁效能之影響並不顯著。

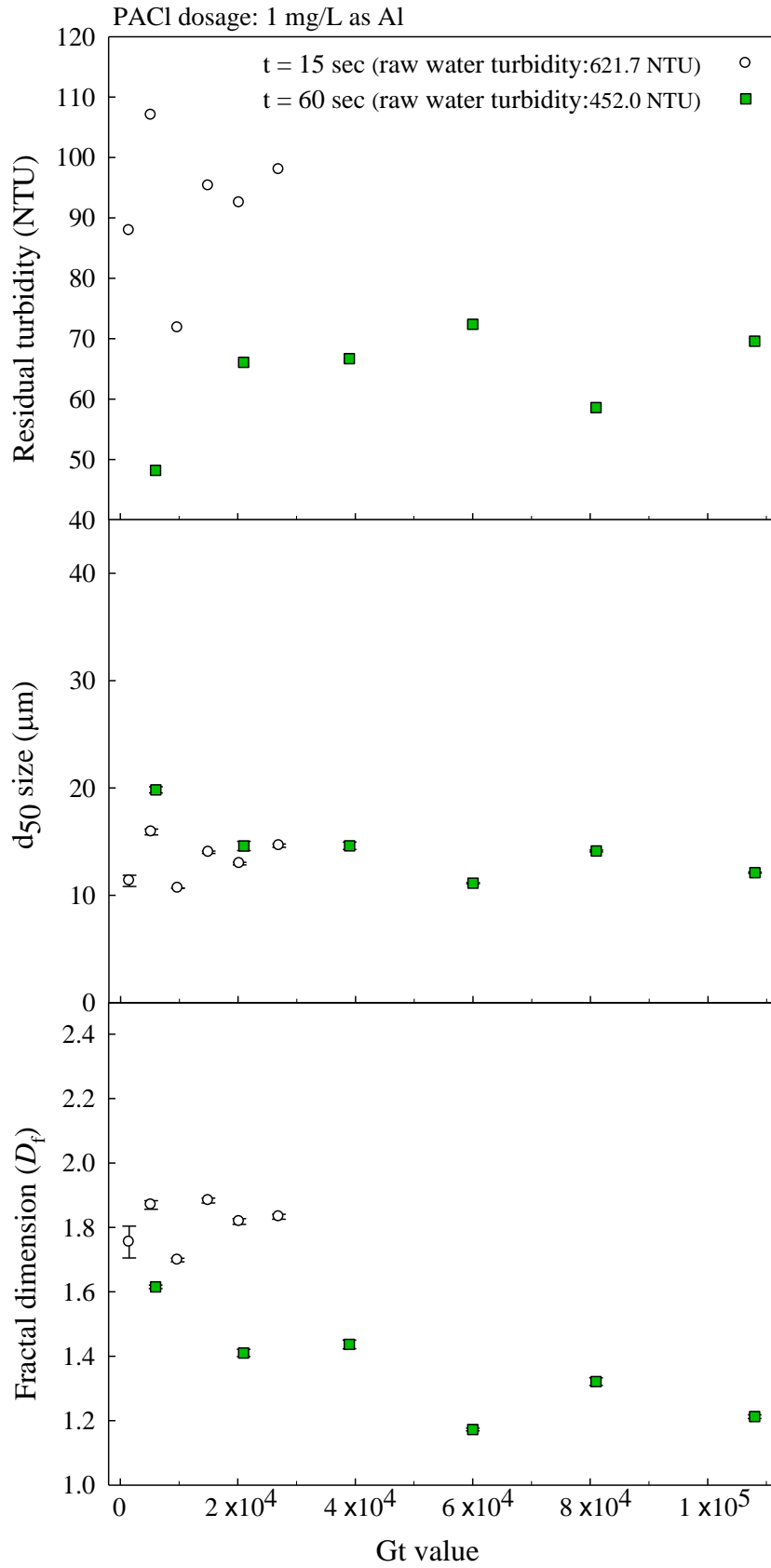


圖 15 高濁度下不同快混 Gt 值之混沉除濁效能及膠羽特性
(PACl dosage: 1 mg/L as Al)

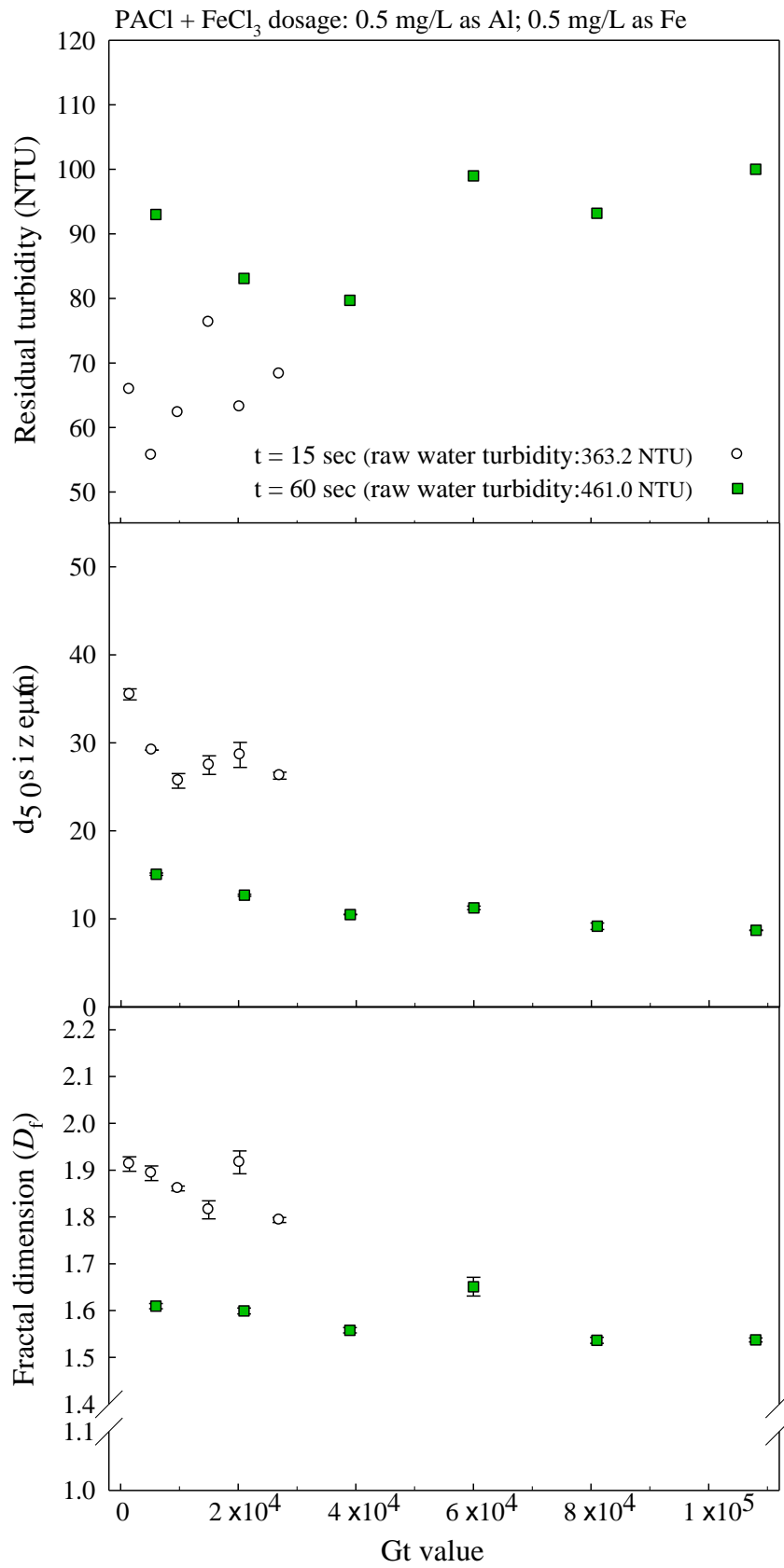


圖16 高濁度下不同快混 Gt 值之混沉除濁效能及膠羽特性
(PACl + FeCl₃ dosage: 0.5 mg/L as Al; 0.5 mg/L as Fe)

由上述不同快混 Gt 值之混凝試驗結果，發現在高濁水及低濁水條件下，顆粒聚集特性不同，如圖 17 為單獨 PACl 加藥混凝之膠羽粒徑與碎形維度的關係，當原水為低濁水時，混凝膠羽之粒徑普遍在 60 μm 以上，且快混 t 值為 15 sec 時可生成大於 120 μm 的大膠羽，但是膠羽粒徑越大，其碎形維度卻越低，因此相較之下膠羽生長得越大則其結構越為鬆散。因為當快混 t 值短($t=15$ sec)時，聚集的微膠羽粒徑小，而在慢混時微膠羽聚集生成大膠羽，此種聚集體相互聚集的生長模式使膠羽快速增大，不過膠羽之結構也因此越趨鬆散，因此膠羽碎形維度即隨之降低，而在快混 t 值長($t=60$ sec)的條件下，快混時水中顆粒的聚集時間充足，故逐漸生成粒徑大的微膠羽，但其微膠羽經過長時間的快混攪拌容易發生破碎，使得混凝膠羽粒徑小於快混 t 值為 15 sec 時所生成的膠羽。在高濁水條件下混凝時，生成膠羽之粒徑偏小，甚至小於 20 μm ，此條件下當膠羽些微增大時，膠羽碎形維度即明顯增加，不過其碎形維度值仍小於低濁水混凝所生成的膠羽，其中不同的快混 t 值導致生成微膠羽的差異，混凝膠羽以快混 t 值為 15 sec 時所生成的膠羽較大，而 t 值為 60 sec 時膠羽粒徑($< 20 \mu\text{m}$)明顯較小。由於高濁水之濁度顆粒多，在快混時濁度顆粒即以聚集體的形式快速聚集，而至慢混階段時水中仍有部分小顆粒未相互聚集，經由慢混攪拌使小顆粒逐漸與聚集體結合，此聚集模式可填滿聚集體表面的空隙，因此混凝膠羽可更加密實，故當膠羽粒徑越大時，膠羽碎形維度也會隨之升高。

PACl 搭配 FeCl_3 混凝之膠羽粒徑與碎形維度如圖 18 所示，在原水為低濁水時，混凝膠羽之粒徑可大於單獨 PACl 加藥之混凝膠羽，且其膠羽碎形維度隨粒徑增大而降低，而高濁水混凝時，膠羽粒徑增大則碎形維度會隨之增加，但其膠羽碎形維度值($D_f < 2.1$)仍低於低濁水混凝所生成的膠羽。在相同的天然濁水濁度下，以快混 t 值為 15 sec 時所生成的膠羽較大，而 t 值為 60 sec 時膠羽粒徑明顯較小，顯示本試驗在不同快混 t 值的條件下，PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝之顆粒聚集模式與單獨 PACl 混凝時相似，故兩種加藥組合之混凝膠羽粒徑及碎形維度有相同的變化趨勢。

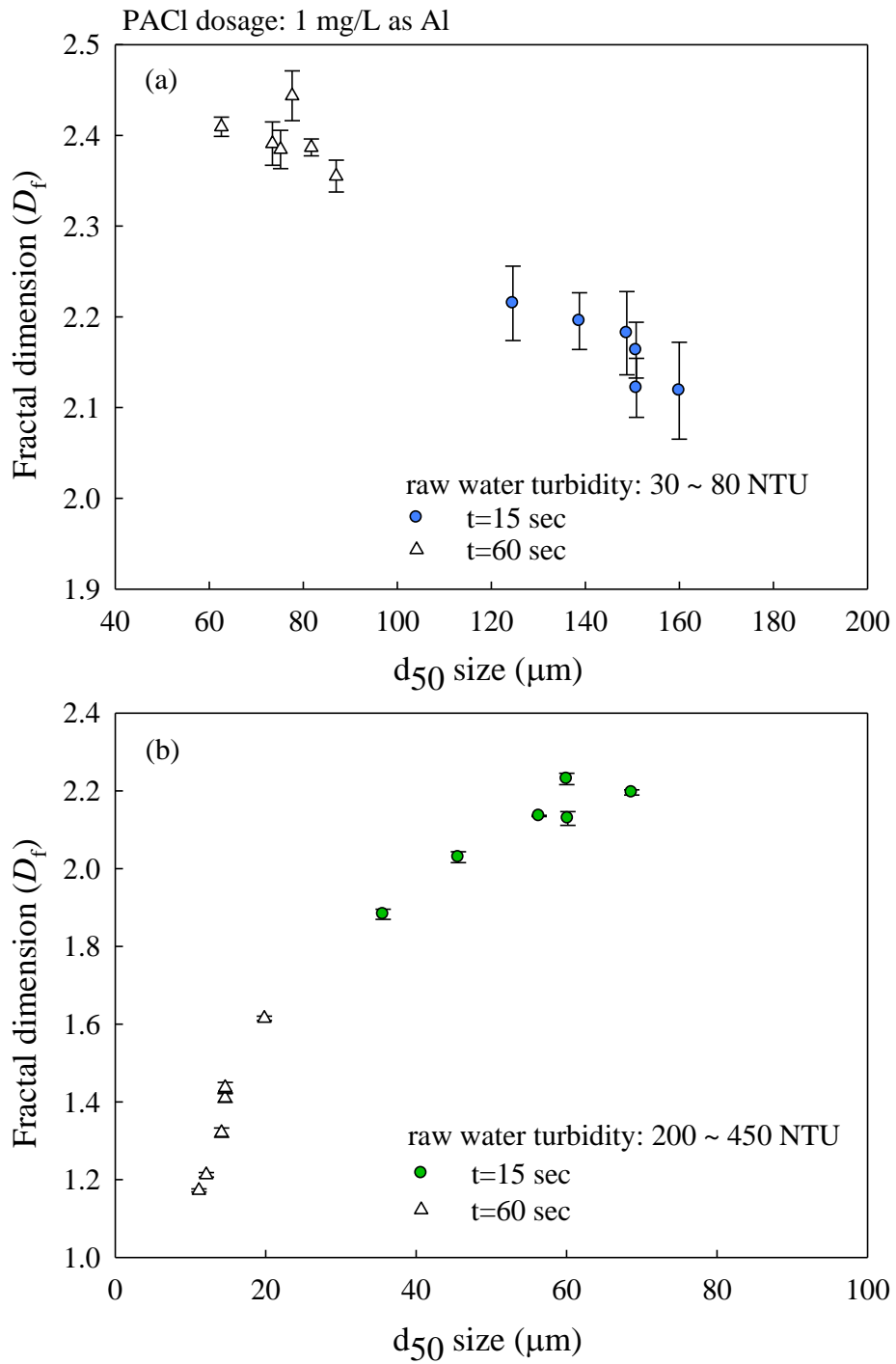


圖17 不同濁度下 PACl 混凝之膠羽粒徑及碎形維度 (a)低濁水；(b)高濁水 (PACl dosage: 1 mg/L as Al)

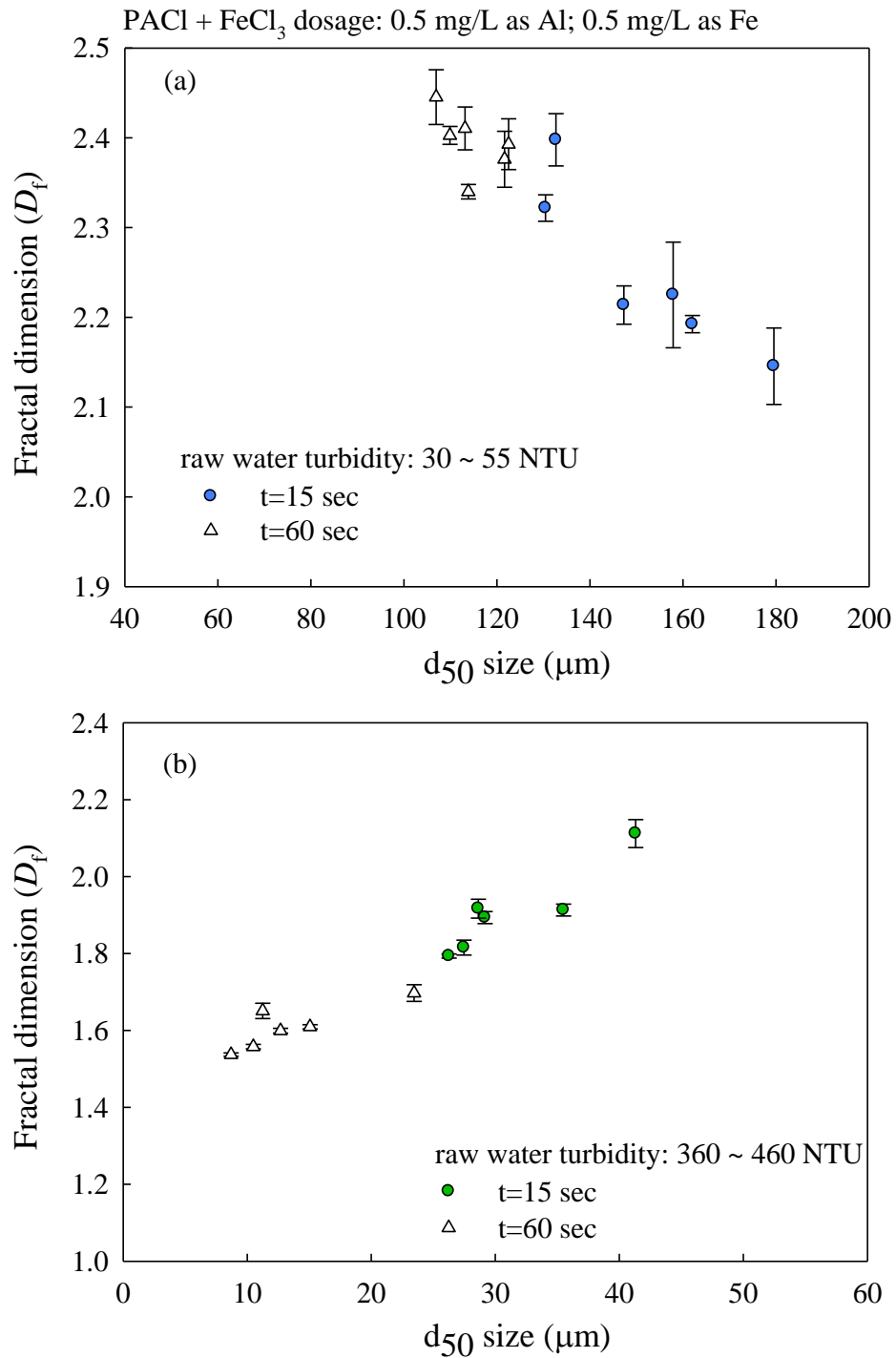
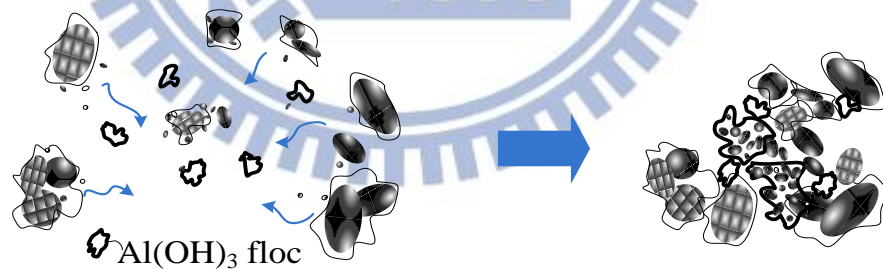


圖18 不同濁度下 PACl 搭配 FeCl₃ 混凝之膠羽粒徑及碎形維度
 (a)低濁水；(b)高濁水 (PACl + FeCl₃ dosage: 0.5 mg/L as Al; 0.5 mg/L as Fe)

由前述實驗結果得知在低濁水時可生成粒徑大的混凝膠羽，但混凝膠羽越大其表面越不規則而使膠羽碎形維度值降低。PACl 加藥混凝時膠羽的生長特性受原水濁度顆粒數量影響，低濁水中濁度顆粒少，添加的混凝劑並未完全與顆粒反應，造成部分未反應的混凝劑在水中形成氫氧化鋁膠羽，且因本研究使用之 PACl 混凝劑含單體鋁 38.6%、聚合鋁 10.6%及顆粒鋁 50.8%，大量單體鋁增加氫氧化鋁膠羽的生成量，如圖 19 (a)所示此種氫氧化鋁膠羽在慢混時與水中膠羽相互聚集，則使膠羽明顯增大但結構卻越趨鬆散。當在高濁水的條件下，水中濁度顆粒數量多，加藥後混凝劑皆與顆粒反應，因此減少未反應混凝劑的氫氧化鋁膠羽生成量，而在攪拌過程中被去穩定的顆粒逐漸聚集，此種顆粒經由去穩定而聚集的混凝反應機制可生成密實的膠羽，且因高濁水中含有大量濁度顆粒，部分未被聚集的顆粒在慢混時得與聚集體相互聚集，如圖 19 (b)所示水中的小顆粒有機會進入聚集體內部，以形成密實的膠羽^(Lin et al., 2008)，所以其膠羽碎形維度會隨膠羽粒徑增大而升高，不過在相同的混凝劑添加量下，高濁水混凝膠羽粒徑仍明顯小於低濁水混凝所生成的膠羽。

(a) 低濁水 (<100 NTU)



(b) 高濁水 (>100 NTU)

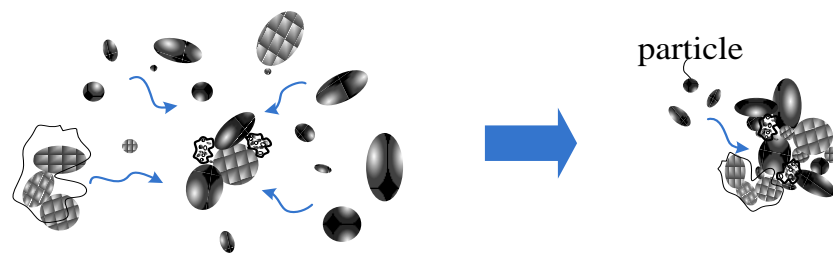


圖19 不同濁度下混凝之顆粒聚集模式預測 (a)低濁水；(b)高濁水
(PACl dosage: 1 mg/L as Al)

綜合上述混凝試驗結果，在低濁水(<100 NTU)條件下，混凝膠羽碎形維度會隨膠羽粒徑增大而降低。整體而言以單獨 PACl 加藥混凝時，提高快混攪拌強度(G 及 t 值)並不會使得生成膠羽之粒徑及碎形維度有明顯增加，不過卻可提昇混沉除濁效能，但過大的快混攪拌強度($Gt > 8 \times 10^4$)對於提昇濁度去除效能並無助益。而在 PACl 搭配 $FeCl_3$ 加藥混凝的條件下，當快混 t 值為 15 sec 時，增加快混 Gt 值可明顯提昇混沉除濁效能，然而 Gt 值過高($Gt > 2 \times 10^4$)時，生成膠羽減小且碎形維度降低，故造成殘餘濁度上升。另一方面，在高濁水的條件下，混凝膠羽碎形維度會隨膠羽粒徑增大而升高，在以單獨 PACl 加藥混凝時，增加快混攪拌強度($Gt > 2 \times 10^4$)，將造成混沉上澄液殘餘濁度上升，尤其在快混 t 為 60 sec 的情況下，其快混 Gt 值越高則膠羽碎形維度值越低，顯示在此條件下增加快混攪拌強度對顆粒聚集效率並無益處。而採取 PACl 搭配 $FeCl_3$ 加藥混凝時，其混凝膠羽隨快混 Gt 值增加而粒徑減小，生成不利沉降的鬆散小膠羽，致使混沉除濁效能降低。



第五章 結論與建議

5-1 結論

1. 單獨 PACl 加藥及 PACl 搭配 PolyDADMAC 加藥混凝時，在低濁水(<100 NTU)條件下，提高快混強度($G > 650 \text{ s}^{-1}$)可生成大且密實的膠羽，有效提昇混沉除濁效能；改使用 PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝時，混凝膠羽結構密實，提高快混強度雖對膠羽粒徑及碎形維度無顯著影響，但可明顯提昇混沉除濁效能。
2. 在低濁水(<100 NTU)條件下，單獨 PACl 及 PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝之膠羽結構密實度會隨膠羽粒徑增大而降低，且在快混 Gt 值小於 2×10^4 的範圍內，提高快混攪拌強度可有效提升混沉除濁效能。
3. 在高濁水(>100 NTU)條件下，單獨 PACl 及 PACl 搭配 FeCl_3 加藥混凝之膠羽結構密實度會隨膠羽粒徑增大而升高，但在快混 Gt 值小於 4×10^4 的範圍內，增加快混攪拌強度對混沉除濁效能影響不顯著。
4. 在低濁水(<100 NTU)條件下，單獨 PACl 及 PACl 搭配 PolyDADMAC 混凝之膠羽影像 RGB 標準偏差值(standard deviation= 1~3)可作為膠羽生長之粒徑($d_{50} = 80 \sim 160$)分析，其 RGB 標準偏差值隨膠羽粒徑變大而升高，但高濁水(>100 NTU)條件下，RGB 標準偏差值隨膠羽粒徑改變並無明顯變化。

5-2 建議

1. 本研究尚未針對更低濁度(< 30 NTU)的天然濁水進行混凝試驗，由於在低濁水(< 100 NTU)條件下，調整快混攪拌強度對混沉除濁效能影響較明顯，因此可再進一步探討更低濁度範圍時，混凝膠羽的生長情況及其混沉除濁效能受快混攪拌強度之影響。
2. 當原水為高濁水(>100 NTU)時，增加快混強度對膠羽粒徑改變不大，建議可針對不同濁度範圍之高濁水，提高加藥劑量並調整快混攪拌強度(G 及 t 值)，對混凝膠羽生長特性作更深入的探討。
3. 低濁水及高濁水之混凝膠羽，其碎形維度會隨膠羽粒徑而有相對的生長變化，藉由此特性可研究膠羽影像之 RGB 標準偏差值與膠羽粒徑的變化關聯性，當克服水中顆粒雜訊干擾 RGB 值量測的問題後，未來有望可直接藉由觀察水樣 RGB 值得知水中膠羽之粒徑及碎形維度。



参考文献

- Aktas, T. S., Fujibayashi, M., Maruo, C., Nomura, M. and Nishimura O. (2013) "Influence of velocity gradient and rapid mixing time on flocs formed by polysilica iron (PSI) and polyaluminum chloride (PACl)" *Desalination and Water Treatment*, 51, 4729-4735.
- Amirtharajah, A. and Mills, K. M. (1982) "Rapid-mix for mechanism of alum coagulation" *Journal American Water Works Association*, 74, 210-216.
- Bache, D. H. and Gregory, R. (2010) "Flocs and separation processes in drinking water treatment: a review" *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 59(1), 16-30.
- Becker, V., Schlauch, E., Behr, M. and Briesen, H. (2009) "Restructuring of colloidal aggregates in shear flows and limitations of the free-draining approximation" *Journal of Colloid and Interface Science*, 339(2), 362-372.
- Clomer, J., Petersb, F. and Marrase, C. (2005) "Experimental analysis of coagulation of particles under low-shear flow" *Water Research*, 39, 2994-3000.
- Duan, J. and Gregory, J. (2003) "Coagulation by hydrolyzing metal salts" *Advances in Colloid and Interface Science*, 100-102, 475-502.
- Ebie, K. and Azuma, Y. (2002) "Reducing turbidity and coagulant residue in treated water through optimization of rapid mix condition" *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(5-6), 103-110.
- Ebie, K., Kawaguchi, T. and Yamaguchi, D. (2006a) "Dynamic analysis of coagulation of low turbidity water sources using Al- and Fe- based coagulants" *Water Science and Technology*, 53(6), 67-74.
- Ebie, K., Kawaguchi, T. and Yamaguchi, D. (2006b) "Dynamic analysis of coagulation of suspended particles in low-turbidity water sources with PACl and PSI coagulants" *Water Science and Technology: Water Supply*, 6(1), 185-192.
- Edzwald, J. K., Bottero, J. Y. and Klute, R. (1998) "Treatment process selection for particle removal" In *America Water Works Association Research Foundation* McEwen, J.B., Ed. Denver, CO, Ch. 4.
- Gregory, J. (1996) "Polymer adsorption and flocculation" In *Industrial Water Soluble Polymers* Finch, C. A. Ed. *Royal Society of Chemistry*, London, 62-75.
- Gregory, J. (1997) "The Density of Particle Aggregates" *Water Science and Technology*, 36(4), 1-13.
- He, W., Nan, J., Li, H. and Li, S. (2012) "Characteristic analysis on temporal evolution of floc size and structure in low-shear flow" *Water Research*, 46(2), 509-520.

- Jarvis, P., Jefferson, B. and Parsons, S. A. (2005) "Measuring floc structural characteristics" *Reviews in Environmental Science and Bio-technology*, 4(1-2), 1-18.
- Johnson, P. N. and Amirtharajah, A. (1982) "Ferric Chloride and Alum as Single and Dual Coagulants" *Journal American Water Works Association*, 75(5), 232-239.
- Kan, C. C., Huang, C. P. and Pan, J. R. S. (2002) "Time requirement for rapid-mixing in coagulation" *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 203(1-3), 1-9.
- Kim, S. H., Kim, H. K., Moon, B. H., Seo, G. T. and Yoon, C. H. (2006) "Effects of addition sequence and rapid mixing conditions on use of dual coagulants" *Water Science and Technology*, 53(7), 87-94.
- Letterman, R. D., Quon, J. E. and Gemmell, R. S. (1973) "Influence of rapid-mix parameters on flocculation" *Journal American Water Works Association*, 65(11), 716-722.
- Libeck, B. (2011) "The effectiveness of humic acids coagulation with the use of cationic polyacrylamides" *Water Science and Technology*, 63(9), 1944-1949.
- Lin, J. L., Huang, C. P., Chin, C. M. and Pan, J. R. (2008) "Coagulation dynamics of fractal flocs induced by enmeshment and electrostatic path mechanisms" *Water Research*, 42, 4457-4466.
- Lin, M. Y., Lindsay, H. M., Weitz, D. A., Ball, R. C., Klein, R., and Meakin, P. (1989) "Universality in colloid aggregation" *Nature*, 339, 360-362.
- Martin, R. B. (1991) "Fe³⁺ and Al³⁺ hydrolysis equilibria. Cooperativity in Al³⁺ hydrolysis reactions" *Journal of Inorganic Biochemistry*, 44, 141-147.
- Ohno, K., Uchiyama, M., Saito, M., Kamei, T. and Magara Y. (2004) "Practical design of flocculator for new polymeric inorganic coagulant - PSI" *Water Science and Technology: Water Supply*, 4(1), 67-75.
- Park, S. M., Jun, H. B., Jung, M. S. and Koo, H. M. (2006) "Effects of velocity gradient and mixing time on particle growth in a rapid mixing tank" *Water Science and Technology*, 53(7), 95-102.
- Reynolds, T. D. and Richard, P. A. (1996) *Unit operations and processes in environmental engineering*, Second Edition, 182-187.
- Sheng, W. Yan., Peng, X. F., Lee, D. J. and Su, A. (2006) "Coagulation of particles through rapid mixing" *Drying Technology*, 24(10), 1271-1276.
- Spicer, P. T., Pratsinis, S. E., Raper, J., Amal, R., Bushell, G. and Meesters, G. (1998) "Effect of shear schedule on particle size, density and structure during flocculation in stirred tanks" *Powder Technol.*, 97, 26-34.

Thill, A., Moustier, S., Aziz, J., Wiesner, M.R. and Bottero, J.Y. (2001) "Flocs restructuring during aggregation: experimental evidence and numerical simulation" *Journal of Colloid and Interface Science*, 243 (1), 171-182.

Wang, D., Wu, R., Jiang, Y. and Chow, C.W.K. (2011) "Characterization of floc structure and strength: role of changing shear rates under various coagulation mechanisms" *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 379(1-3), 36-42.

Wang, Y. L., Feng, J., Dentel, S. K., Lu, J., Shi, B. Y. and Wang, D. S. (2011) "Effect of polyferric chloride (PFC) doses and pH on the fractal characteristics of PFC-HA flocs" *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 379(1-3), 51-61.

Wang, Y., Gao, B. Y., Xu, X. M., Xu, W. Y. and Xu, G. Y. (2009) "Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment" *Journal of Colloid and Interface Science*, 332, 354-359.

Wei, J., Gao, B., Yue, Q., Wang, Y., Li, W., and Zhu, X. (2009) "Comparison of coagulation behavior and floc structure characteristic of different polyferric-cationic polymer dual-coagulants in humic acid solution" *Water Research*, 43(3), 724-732.

Wiesner, M. R. and Klute, R. (1998) "Properties and measurements of particulate contaminants in water" *Treatment Process Selection for Particle Removal*, Edited by Mcewen J. B., *America Water Works Association Research Foundation*, 35-72.

Yan, M. Q., Liu, H., Wang, D. S., Ni, J. and Qu J. H. (2009) "Natural organic matter removal by coagulation: effect of kinetics and hydraulic power" *Water Science and Technology*, 9(1), 21-30.

Yan, M., Wang, D., Ni, J., Qu, J., Chow, C.W. and Liu, H. (2008) "Mechanism of natural organic matter removal by polyaluminum chloride: effect of coagulant particle size and hydrolysis kinetics" *Water Research*, 42(13), 3361-3370.

Yang, Z. L., Gao, B. Y., Cao, B. C., Xu, W. Y. and Yue, Q. Y. (2011) "Effect of OH/Al^{3+} ratio on the coagulation behavior and residual aluminum speciation of polyaluminum chloride (PAC) in surface water treatment" *Separation and Purification Technology*, 80(1), 59-66.

Yang, Z. L., Gao, B. Y., Wang, Y., Zhang, X. X. and Yue, Q. Y. (2012) "The effect of additional poly-diallyl dimethyl ammonium-chloride on the speciation distribution of residual aluminum (Al) in a low DOC and high alkalinity reservoir water treatment" *Chemical Engineering Journal*, 197, 56-66.

Yu, J. F., Wang, D. S., Ge, X. P., Yan, M. Q. and Yang, M. (2006) "Flocculation of kation particles by two typical polyelectrolytes: A comparative study on the kinetics and floc structures" *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 290, 288-294.

Yu, W., Gregory, J. and Campos, L. C. (2010a) "The effect of additional coagulant on the regrowth of alum - kaolin flocs" *Separation and Purification Technology*, 74(3), 305-309.

Yu, W., Gregory, J. and Campos, L. C. (2010b) "Breakage and re-growth of flocs formed by charge neutralization using alum and PolyDADMAC" *Water Research*, 44(13), 3959-3965.

Yu, W., Li, G., Xu, Y. and Yang, X. (2009) "Breakage and re-growth of flocs formed by alum and PACl" *Powder Technology*, 189 439-443.

Yukselen, M. A. and Gregory, J. (2004) "The effect of rapid mixing on the break-up and re-formation of flocs" *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 79, 782-788.

吳如雅 (2008), 「非接觸式光學監測混凝系統技術之發展」, 國立中央大學環境工程研究所碩士論文。

林志麟 (2008), 「聚氯化鋁水解物種之混凝行為：膠體去穩定機制及膠羽形成分析」, 國立交通大學環境工程研究所博士論文。

施安琪 (2002), 「藻類存在對濁度混沈去除之影響」, 國立交通大學環境工程研究所碩士論文。

翁韻雅 (2003), 「以高分子凝集劑處理高濁度原水之研究」, 國立成功大學環境工程研究所碩士論文。

高肇藩 (1978), 《給水工程 (衛生工程。自來水篇)》。台南市：編著者發行。

陳大為 (2012b), 「倒傳遞類神經網路於淨水混凝自動加藥前饋控制應用之研究-模廠試驗」, 國立交通大學工學院永續環境科技學程碩士論文。

陳映慈 (2012a), 「膠羽影像色譜分析技術監測混凝程序之開發-以地表原水為例」, 國立中央大學環境工程研究所碩士論文。

黃信元 (2010), 「快混強度對天然濁水混凝效能之影響」, 國立交通大學環境工程研究所碩士論文。

劉嘉宏 (2007), 「混凝劑種類對低濁度原水混凝影響之研究」, 國立成功大學環境工程研究所碩士論文。

駱尚廉, 胡景堯, 張嘉玲 (2010), 「公共給水緊急應變管理系統及高濁度原水處理應變技術之建立(2/2)」, 經濟部水利署研究報告。

附錄 A

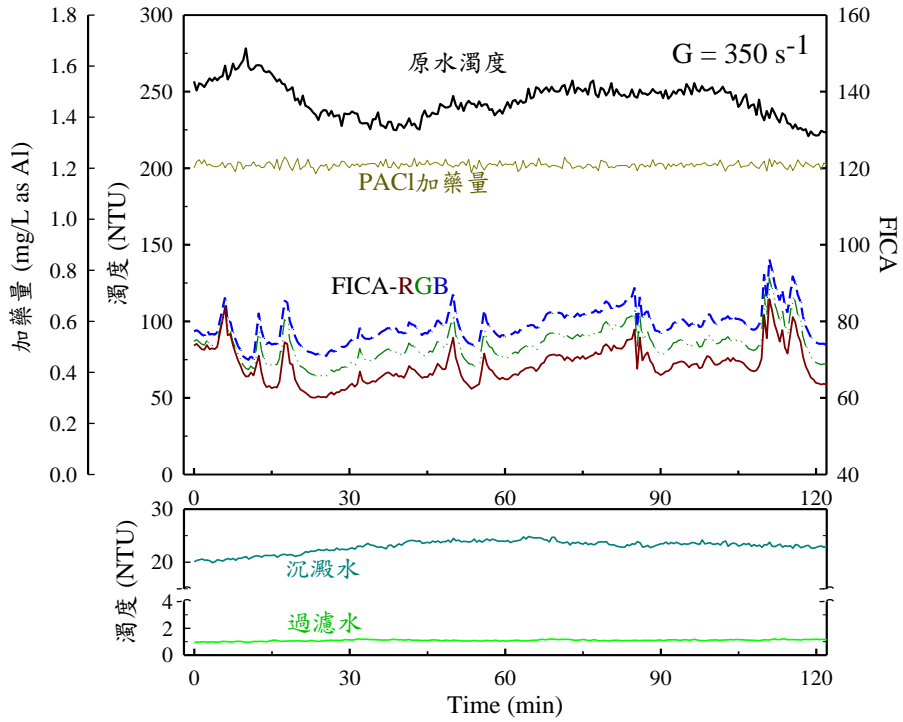


圖 1 快混強度為 350 s^{-1} 下之混沉及過濾效能

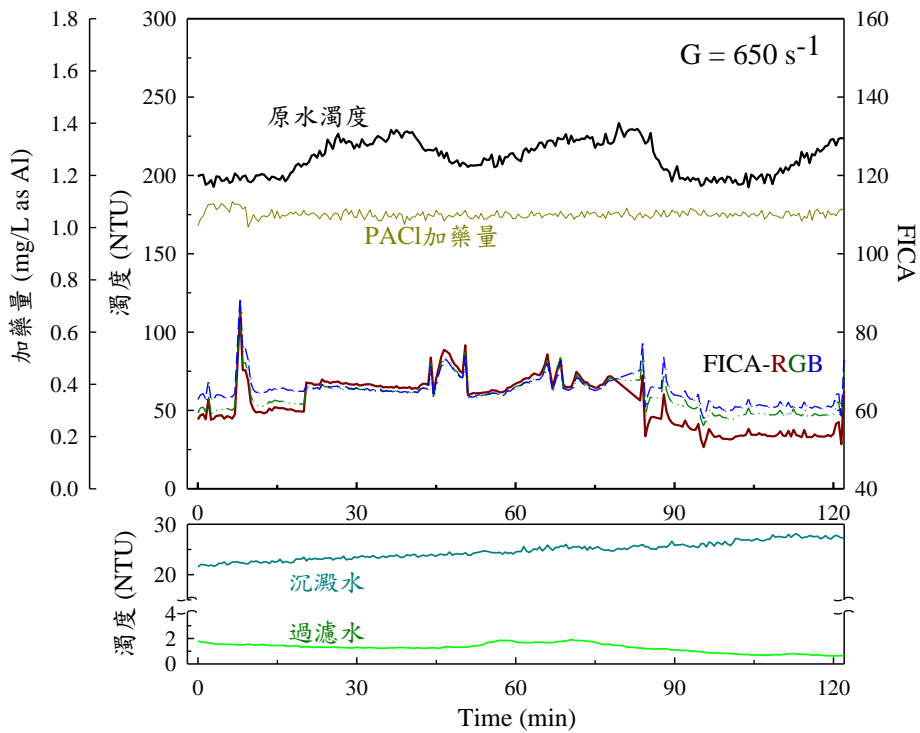


圖 2 快混強度為 650 s^{-1} 下之混沉及過濾效能

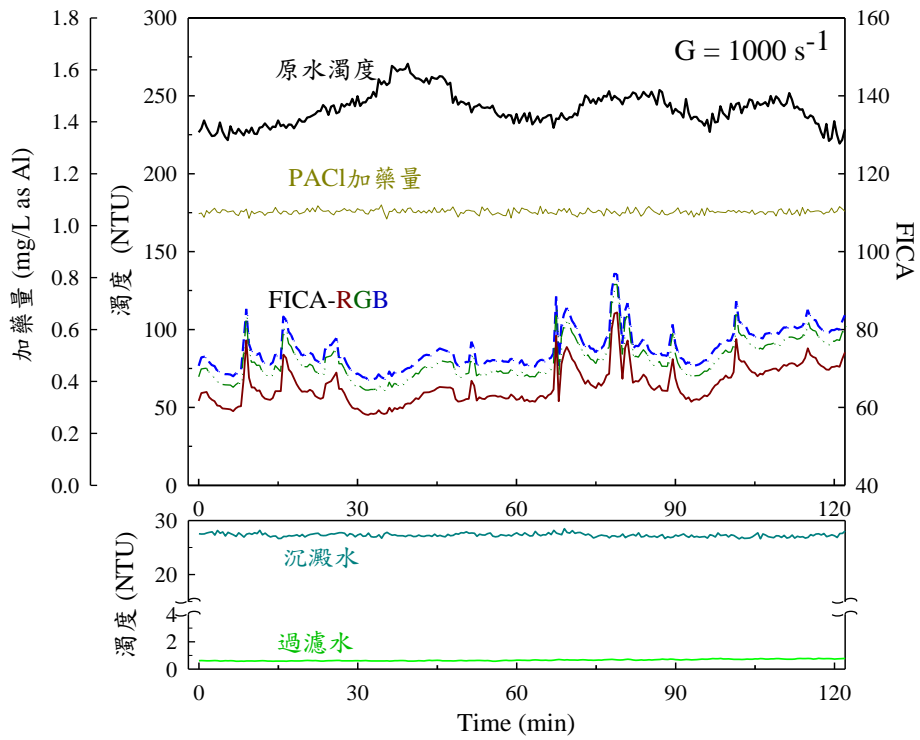


圖 3 快混強度為 1000 s^{-1} 下之混沉及過濾效能

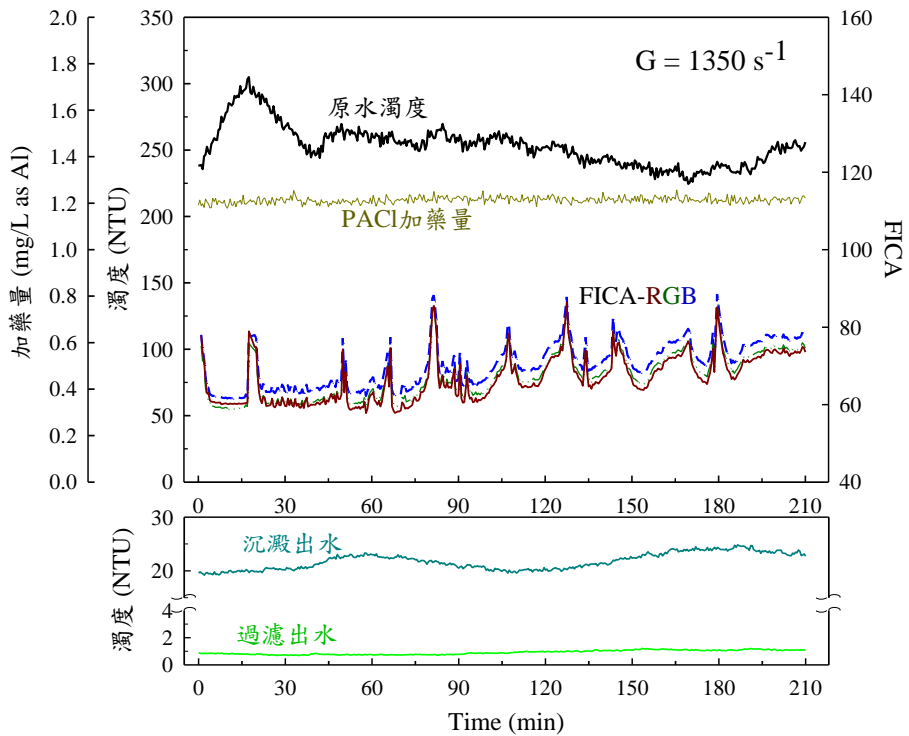


圖 4 快混強度為 1350 s^{-1} 下之混沉及過濾效能

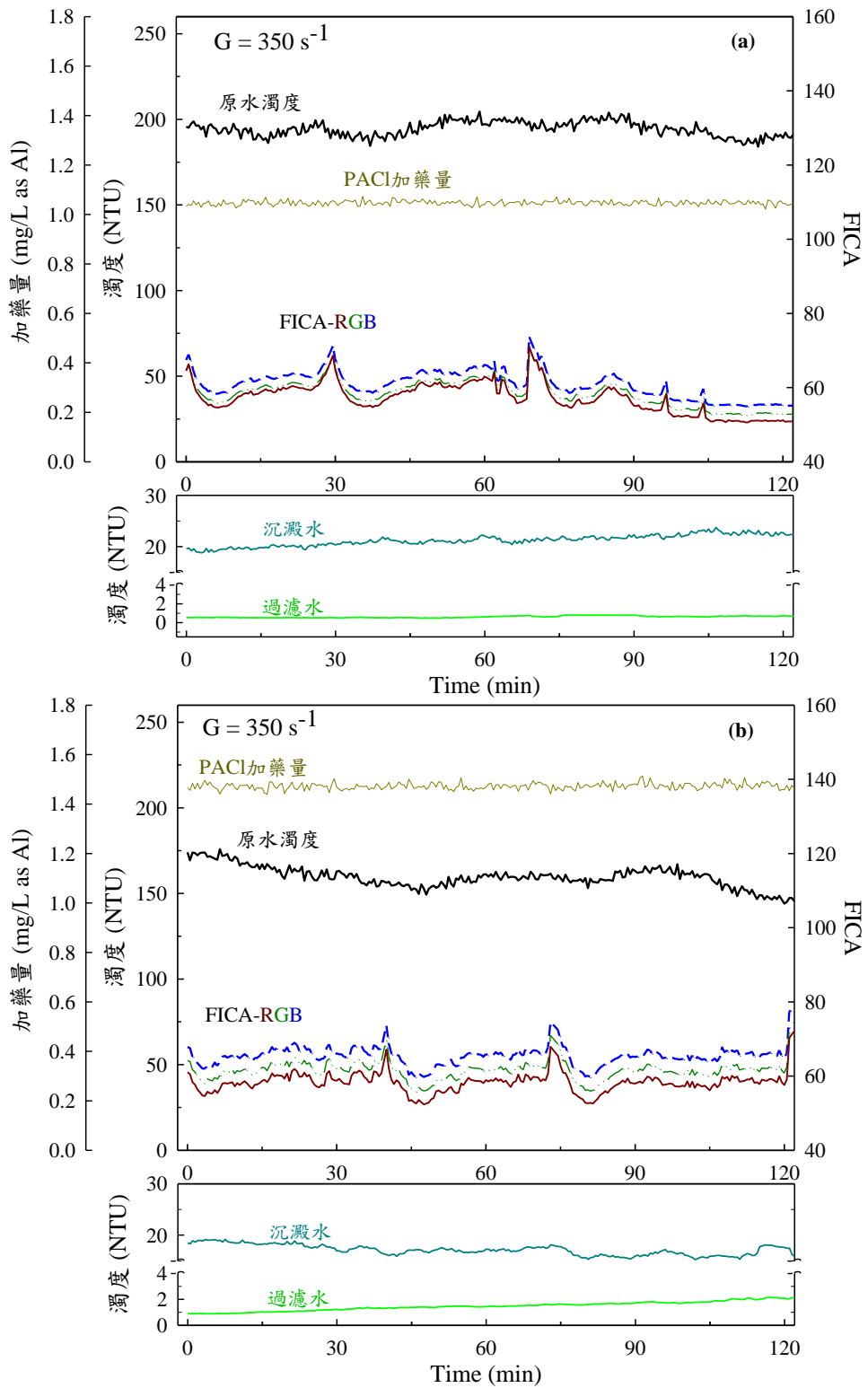


圖 5 低快混強度($G=350 \text{ s}^{-1}$)下不同 PACl 混凝劑量之混沉及過濾效能：
 (a) 1 mg/L as Al (b) 1.5 mg/L as Al

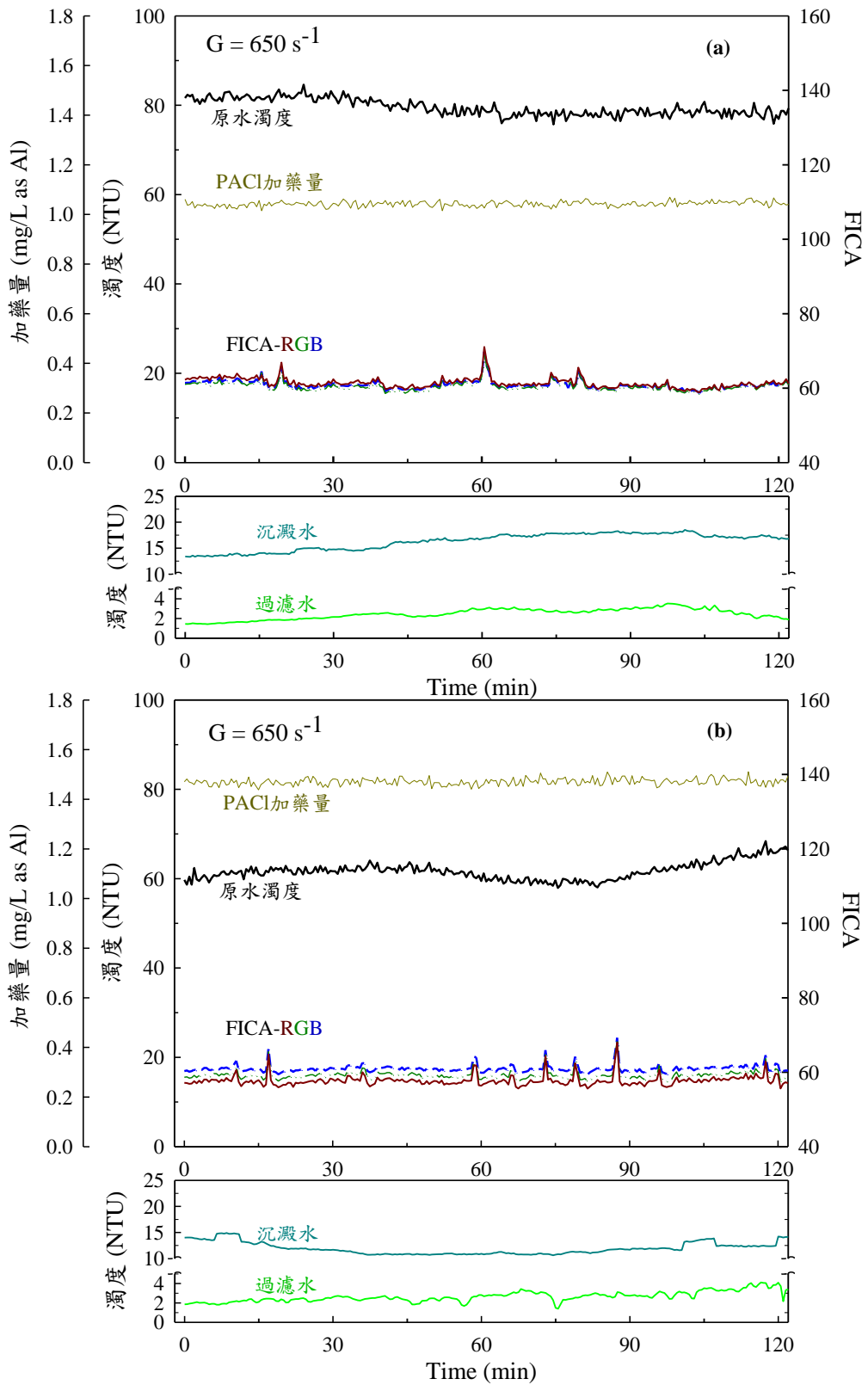


圖 6 中快混強度($G=650 \text{ s}^{-1}$)下不同 PACI 混凝劑量之混沉及過濾效能：
 (a) 1 mg/L as Al (b) 1.5 mg/L as Al

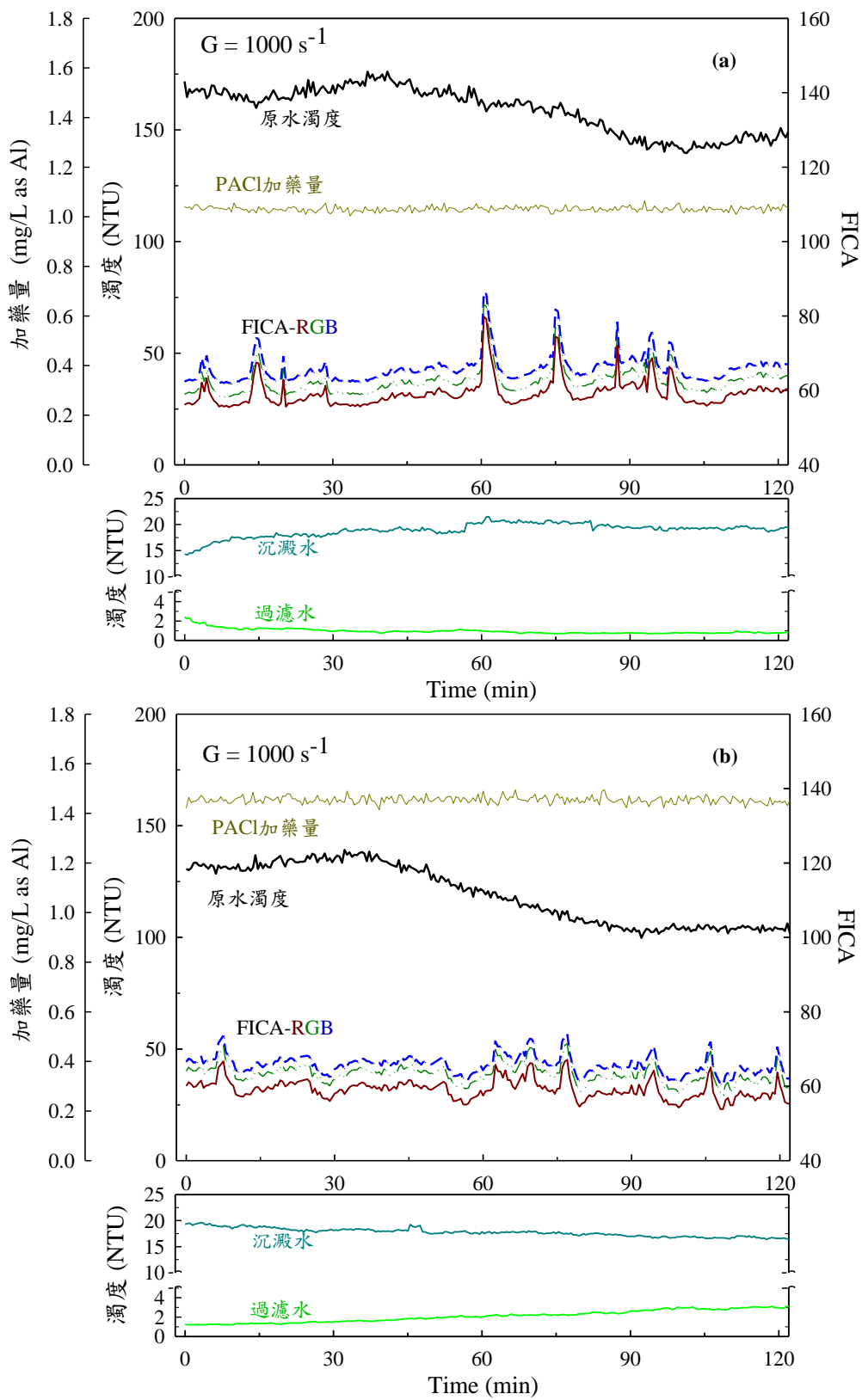


圖 7 高快混強度($G=1000 \text{ s}^{-1}$)下不同 PACl 混凝劑量之混沉及過濾效能：
 (a) 1 mg/L as Al (b) 1.5 mg/L as Al

附錄 B

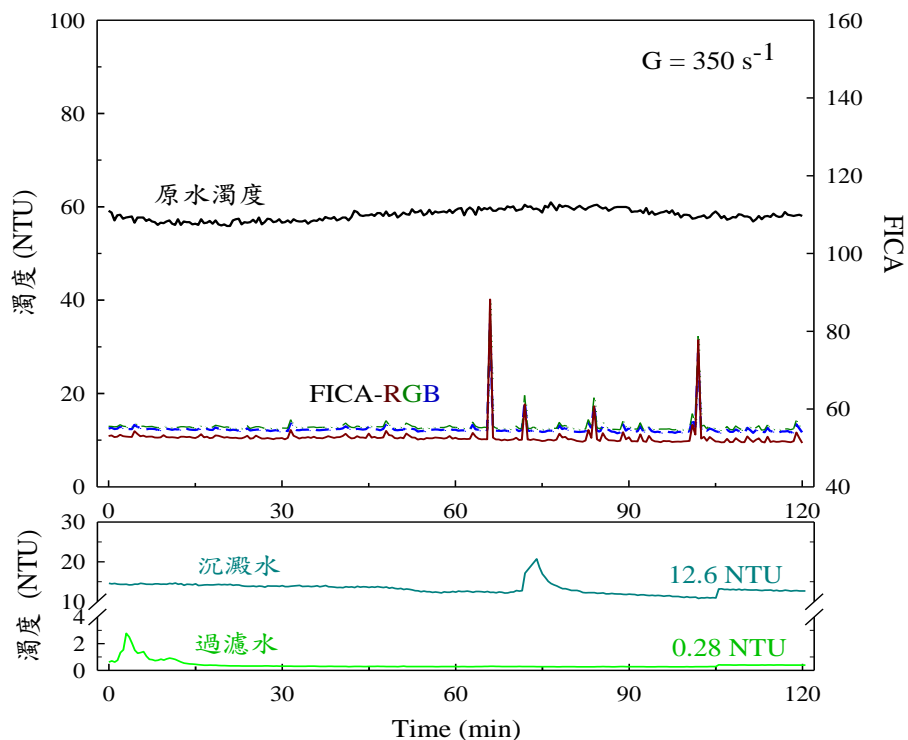


圖 1 低快混強度($G=350 \text{ s}^{-1}$)下 PACl 搭配 polymer 之混沉及過濾效能
(PACl dosage: 0.5 mg/L as Al ; PolyDADMAC dosage: 0.1 mg/L)

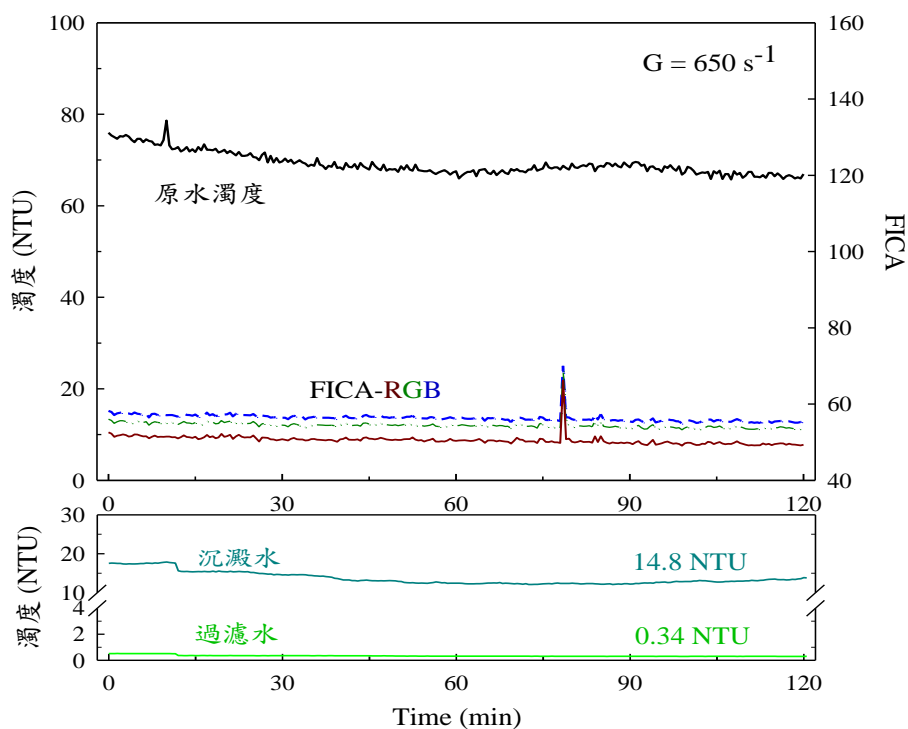


圖 2 中快混強度($G=650 \text{ s}^{-1}$)下 PACl 搭配 polymer 之混沉及過濾效能
(PACl dosage: 0.5 mg/L as Al ; PolyDADMAC dosage: 0.1 mg/L)

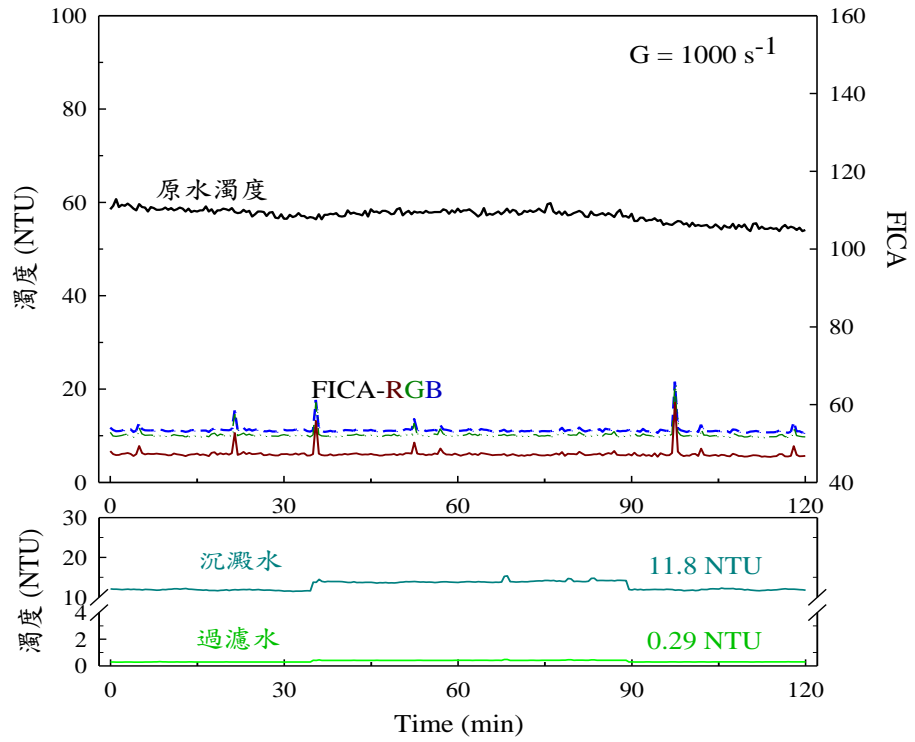


圖 3 高快混強度($G=1000\text{ s}^{-1}$)下 PACl 搭配 polymer 之混沉及過濾效能
(PACl dosage: 0.5 mg/L as Al ; PolyDADMAC dosage: 0.1 mg/L)

