

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

自來水處理慢混操作對水中微粒
凝集動力與形成膠羽特性之影響

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 89 - 2211 - E - 009 - 005 -

執行期間：88 年 08 月 01 日至 89 年 07 月 31 日

計畫主持人：黃志彬 教授

共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學環境工程研究所

中華民國 八十九 年 十 月 二十五 日

自來水處理慢混操作對水中微粒 凝集動力與形成膠羽特性之影響

The Effects of Flocculation Operation Parameters
on the Aggregate Dynamics and Agglomeration Properties

計畫編號：89-2211-E-009-005-

執行期間：88/08/01 - 89/07/31

主持人：黃志彬 交通大學環境工程研究所教授

一、中文摘要

台灣的淨水單位近來飽受高濁度原水的困擾，其主要原因之一為混沈效果不佳。由於淨水場混凝/膠凝單元的操作，對後續沈澱與過濾單元處理的成效影響甚鉅，因此本研究乃針對慢混操作影響微粒聚集動力與膠羽特性進行研究。

本研究首先探討 4 種攪拌方式對人工水樣的濁度去除以及特定粒徑(0.2~2、2~15 μm)顆粒去除的影響，並於膠凝階段導引水樣至光纖膠羽偵測儀(Photometric Dispersion Analyzer)，以觀察在不同操作參數下顆粒聚集的狀態。接下來研究之中採用了 3 種常用的攪拌器，並針對攪拌器的型式對混凝膠凝的影響進行評估。最後則比較混凝劑多元氯化鋁 (PACl) 及硫酸鋁 (alum) 在不同攪拌方式下上層液的殘餘濁度以及形成膠羽的沈降特性。

結果顯示不同的攪拌形式及攪拌器形式對高濁度原水的沈澱處理有極大的影響。此外，比較兩種混凝劑的凝集動力以及膠羽特性後，發現兩種混凝劑的最佳的使用方式因其特性有所不同。

關鍵字：混凝、膠凝、濁度、多元氯化鋁、硫酸鋁、顆粒計數器

英文摘要

In Taiwan, highly turbid water disturbs the drinking-water purification process. One of major reasons is inefficient operation of coagulation and flocculation. The operation efficiency of sedimentation and

filtration is directly related to the performance of coagulation and flocculation, which has been proved critical in the performance of water treatment. In this study, the effects of operational parameters on the aggregate dynamics and agglomeration properties in the flocculation were evaluated.

We investigated the effects of mixing conditions, geometric parameters of the mixer and coagulant types on the coagulation/flocculation for highly turbid waters. First, the effects of four mixing conditions were evaluated by measuring residual turbidity as well as particle number between $d = 0.2 \mu\text{m} \sim 15 \mu\text{m}$. The impacts on the flocculation were also observed by Photometric Dispersion Analyzer (PDA). Next, three types of commonly used mixer were applied. The effects of mixer types on coagulation were examined. Finally, the residual turbidity followed various mixing conditions and the flocs settlement behaviors of two coagulants, PACl and alum, were investigated.

The results show that mixing conditions and mixer types contribute great impact on coagulation/flocculation/sedimentation. In addition, comparing with the PACl and alum coagulation, the optimal operations are quite different due to their specific characteristics.

Keyword: Coagulation, Flocculation, Turbidity, PACl, Alum, Particle Counter

二、緣由及目的

在環保署新修訂的飲用水管理條例中，對飲用水水質作更清楚與嚴格的規定，飲用水的濁度限值於民國 89 年 12 月，將由現行的 4 NTU 限值降至 2 NTU，面對此一趨勢，台灣省自來水事業於各地的淨水場勢必提升其淨水效能以符合要求。

然而經蔣氏⁽⁸⁾及本實驗室⁽⁶⁾評估國內淨水場的操作效能後發現部份淨水場內混凝/膠凝單元操作不佳，而影響後續處理單元的操作效率，因此提昇此單元的操作效率實為當務之急。根據以上所述，在進流原水為高濁度的情況下，混凝/膠凝單元處理的效率更是水中濁度去除的決定因子。而國內外的研究對於混凝程序之中混凝作用機制有著較廣泛的探討，但對於顆粒聚集動力的研究則不多見。混凝機制討論的是如何使顆粒能夠相互接觸聚集，但沒有涉及聚集速度的討論。

在水處理工程上，膠體顆粒聚集速度是一個極重要的問題，涉及了工程實施的可能性與經濟性。因此本研究即探討慢混操作對顆粒聚集的動力、形成膠羽特性與微粒去除效率的影響，欲探討的參數有不同攪拌形式、攪拌器型式以及混凝劑種類。

三、實驗設備方法

實驗設備

(1) 混凝劑--硫酸鋁($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)

使用默克公司所提供的硫酸鋁藥劑，儲備溶液濃度配製為 10 % as Al^{λ} (100,000 mg/l)。於實驗之前再以蒸餾水將濃度稀釋為 1,000 mg/l as Al^{λ} 。另一種混凝劑為多元氯化鋁 (PACl)，為目前淨水工程中最常被使用的混凝劑種類。使用聯碳企業所提供的多元氯化鋁溶液，濃度為 10% as Al_2O_3 (100,000 mg/l)。於實驗之前再以蒸餾水將濃度稀

釋為 1,000 mg/l as Al，此時 pH 值為 3.9。

(2) 原水水樣製備

水樣為人工原水，為球土 (Ball clay) 所配製之原水，為高濁度水為 180 NTU，pH 值控制在 7.5，水溫 25 °C，比導電度 130~250 μs ，經粒徑分析儀 (Coulter LS-230) 分析後，平均粒徑為 5.1 μm 。研究所採用的稀釋水為自來水經極微過濾 (nanofiltration) 處理後的出流水，水質特性為濁度 0.2 NTU 以下，pH 值 6.5 左右，鹼度 20 以下 (mg/l as CaCO_3)，TOC (NPDOC) 0.4 mg/l 以下，顆粒數 70 count/ml (2~15 μm) 以下，比導電度在 250 以下，鹼度則利用 NaHCO_3 調整，pH 值以 $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$ 或 $\text{HNO}_{3(\text{aq})}$ 調整。

(3) 其他重要實驗設備

光纖膠羽偵測儀、微粒計數器 (0.2~2 μm (Rion)、2~15 μm (Met-one))、界達電位儀 (Zeta-meter)、超音波震盪器 (Branson)，詳細內容可參閱甘氏及黃氏⁽⁷⁾。瓶杯試驗機及攪拌槽則依美國自來水協會⁽⁴⁾所發表之標準規格及步驟進行。

實驗方法

(1) 攪拌方式評估

首先進行混凝劑加藥量的判定，分別使用界達電位儀以及殘餘濁度判定為加藥情形 (不足量加藥、最適加藥、過量加藥)，實驗進行只改變快、慢混攪拌強度 (如表1所示)。於混凝程序中，將攪拌槽中的水樣導引至光纖膠羽偵測儀，以觀察在不同操作參數下水中顆粒聚集之狀況。瓶杯試驗之後，在沈澱10分鐘之後，再取槽中水樣利用微粒計數器進行特定粒徑 (0.2~2、2~15 μm) 的顆粒數目進行比較，並利用濁度計量測混凝沈澱後的殘餘濁度。

(2) 攪拌器的比較

採用3種不同型式的混合攪拌器，分別為三葉螺旋攪拌器 (Three Bladed

Propeller)、六葉渦輪攪拌器(Six Bladed Disk Turbine)及平板攪拌器(Simple Paddle), 混凝槽為邊長11.5公分、高21公分的方形槽, 攪拌器轉數與剪力值呈線性函數關係⁽⁴⁾。

(3) PACl與alum的比較

分別使用PACl及alum作為混凝劑, 採用人工水樣進行混凝試驗, 首先進行加藥量的判定, 並利用微不足加藥量進行以下試驗。在不同快、慢混攪拌強度的搭配下(如表1所示), 進行瓶杯試驗, 分別於5、10、20、40分鐘進行殘餘濁度量測, 分析其沈降特性。再取槽內上層液, 利用微粒計數器進行特定粒徑(0.2~2、2~15 μm)的顆粒數目測量。接下來則利用超音波震盪器進行膠羽破壞, 以釐清PACl及alum對水中顆粒去穩作用的主要作用為何。

四、結果討論

(I) 攪拌方式評估

1. PACl 劑量判定

原水中濁度顆粒表面的界達電位為-20 mv, 屬於穩定的膠體系統。因此採用了7種0.5~10 mg/l as Al^3 的加藥量進行混凝, 在各加藥量下, 所得到的顆粒界達電位值與Jar-Test之後的殘餘濁度如圖1所示。在0.5 mg/l加藥量下, 顆粒的界達電位達到-15 mv, 殘餘濁度15.1 NTU。在1 mg/l以及1.5 mg/l加藥量下, 顆粒的界達電位達到-7 mv及-2 mv, 在沈澱之後, 即可得到6.5及4.8 NTU的殘餘濁度。增加至2、3 mg/l時, 界達電位轉為0、5 mv, 上層液的殘餘濁度為3、3.5 NTU。至10 mg/l的混凝加藥量時, 雖然此時界達電位為8.3 mv, 已有電性逆轉的情況, 然而殘餘濁度並沒有很明顯的升高趨勢, 上層液的殘餘濁度即維持在3.5 NTU左右。

由於PACl的聚集物具有相當高的表面積體積比, 所以能更有效地以電性中和的方式吸附於帶負電的顆粒上。對於高濁

原水而言, PACl的混凝作用機制主要為電性中和, 由於水中具有足量的鹼度, 因此pH值可維持在0.3個單位以內。另一模擬水樣, 利用球形黏土(ball clay)所配製。殘餘濁度與界達電位的變化與淨水廠原水的結果趨勢相同, 在此不再提細節討論。

2.不同攪拌形式的影響

在加藥量為0.5及1 mg/l as Al^3 的情形下, 量測的平均ZP值皆為負值, 顯示在此0.5及1 mg/l為不足加藥, 接下來試驗之中則利用不足加藥的條件來探討探討四種不同的攪拌形式(如表1所示)對高濁原水混沈的影響。其結果如圖2所示, 比較Type 1及Type 2的操作, 兩種攪拌的形式都隨著加藥量的增加, 殘餘濁度與顆粒數也逐漸下降。但在0.5 mg/l的加藥量之下, Type 1的操作流程下可以得到較低的殘餘濁度與顆粒數目, 在Type 2的操作之下, 雖然殘餘濁度有顯著差距, 但在2~15 μm 的顆粒數量上卻相差不多, 其原因為在此加藥量之下, 小於2 μm 的顆粒數目遠多於Type 1, 利用0.2~2 μm 顆粒計數器分析後, 發現有6至10倍的差距, 因此會在殘餘濁度上有較顯著的差距。

在Type 4的操作條件下, 殘餘濁度相當高, 部分樣品也因為濁度太高而需稀釋, 利用微粒計數器量測時需注意稀釋問題。而在Type 3的操作下, 除了0.5 mg/l所得的殘餘濁度略高於20 NTU, 其他的加藥量皆可達到11 NTU以下的殘餘濁度, 顯示出在原水高濁度情況下, 快混操作也是決定混凝成效主要因子。根據文獻⁽¹⁾指出, 在原水高濁度的情況下, 混凝劑去穩作用是否完全是決定性的因子。由於水中顆粒濃度高, 因此混凝劑的有效作用基擴散不易, 容易產生局部過量加藥, 局部卻不足量加藥的情況, 在混凝劑作用基可均勻地達到顆粒去穩作用之後, 後續膠凝階段的顆粒結合則可較快速達成。

在慢混的程序中，Smoluchowski 在 1917 年所提出顆粒碰撞公式：

$$\frac{dn}{dt} = -\left(\frac{4}{3}\right)kTn^2$$

式中 n 為顆粒數目， dn/dt 為顆粒總數的減少速率（即凝聚速度）， T 為溫度， μ 、 k 為常數。所以凝聚速度與水溫有關，與顆粒數目濃度的平方成正比，因此高濁度的原水，如果所有的顆粒可完全去穩，那麼在凝聚的過程中，由於水中顆粒濃度高，凝聚速度也會極快，所以慢混階段所需的時間也可縮短，這也是在我們的試驗中只需 5 分鐘的慢混攪拌 (Type 3)，亦可達到良好聚集的效果。膠體顆粒的聚集則可利用光纖膠羽偵測器來觀察。

光學膠羽偵測儀 (PDA)，可用來監測流動性的懸浮固體溶液顆粒的聚集狀態，PDA 的 Ratio 輸出值可作為懸浮液中顆粒聚集的指標並可進行顆粒膠凝聚集 (flocculation) 的動力分析⁽³⁾。利用 PDA 進行膠凝的動力分析，結果如圖 3 所示，Ratio 輸出值於膠凝的階段中於不同的時間達到最大值之後皆逐漸減少，由文獻⁽²⁾指出 PDA 的 Ratio 輸出達最大值時為膠凝聚集達穩定平衡，之後 Ratio 值則因聚集的膠羽沉降，水中顆粒濃度減少而下降，因此 Ratio 值最高點可視為膠體已經凝聚成可沉降之膠羽的平衡點。

在 Type 1 以及 Type 2 兩種不同的快混攪拌形式下，利用 PDA 對慢混階段顆粒的聚集情形進行分析，結果如圖 3 所示，可以發現於 0.5 mg/l 的 PACl 加藥量對豐原原水進行混凝，Type 1 於 2.5 分鐘時顆粒聚集達平衡，Type 2 於 5.5 分鐘時顆粒聚集達平衡。由此可知，在原水為高濁度的情況下，快混攪拌強度以及混凝劑加藥量對於膠凝階段的顆粒聚集有相當的影響，與前一小節所述相互印證，這是因為快混攪拌強度高，因此在膠凝階段初期充分去穩膠體顆粒數目較多，因此在膠凝階段其顆粒聚集的速度也會較快。

(II) 攪拌器評估

由於 3 種攪拌器的尺寸及幾何形狀的不同，因此相同攪拌的速度所提供的剪力大小不一樣，試驗之中，混合攪拌器快、慢混轉速控制則如表 2 所示，快混攪拌時間 1 min，慢混攪拌時間為 20 min，混凝劑加藥量 1 mg/l，水樣為人工球土原水。

結果如圖 4 所示，為 5 次批次試驗的平均，可以發現利用三葉螺旋攪拌器所得的混沈效果最差，平均殘餘濁度 9.1 NTU，其顆粒數目 780 cnt/ml；六葉渦輪攪拌器所得的混沈效果次之，平均殘餘濁度 7.5 NTU，顆粒數目 290 cnt/ml；利用平板攪拌器的混沈效果最佳，平均殘餘濁度 5.0 NTU，顆粒數目 280 cnt/ml。在試驗的控制之下，3 種不同型式的攪拌器雖然提供了相同的剪力進行攪拌，然而由於幾何形狀的差異，所造成的水流流動情況 (Flow Pattern) 並不一樣⁽⁵⁾，根據所得的結果，顯示出可造成上下循環流的平板攪拌器以及六葉渦輪攪拌器其混沈效果優於單一循環流的三葉螺旋攪拌器。

(III) PACl 與 alum 的比較

利用人工配製球土原水 (180 NTU) 進行以下試驗，首先進行加藥量的判定，可以發現到 PACl 於 1 mg/l 與 alum 於 5 mg/l 時界達電位接近 0，此時兩者皆為電性中和的混凝作用機制。利用不同的攪拌形式進行混凝劑種類與攪拌對高濁原水混沈處理的評估。結果如圖 5 所示，可以發現到對於兩種混凝劑而言，攪拌方式仍是混凝效果的決定因子，然而使用 alum 進行混凝，不良的攪拌方式的影響確是較不明顯。

這是因為利用 alum 進行混凝時，其操作重點在鋁鹽自身的水解速度極快，激烈的混合將較高價的鋁鹽物種分佈，並對膠體顆粒進行較有效的去穩，若混合較差，無法將鋁鹽物種在水解前與顆粒進行有效結合，則會形成去穩效力較差的鋁水解產物，其大部份為 $Al(OH)_3(am)$ 或 $Al(OH)_3(s)$ ，此水解產物仍微帶正電，此即表示帶正電荷的顆粒增加，除仍具有電

性中和的機制，沈澱拌除的作用機制也具備，因此利用 alum 對高濁水進行混凝，即使在快混操作不佳的情況之下，依舊有濁度去除的效果，透過沈降的觀察，在沈降時間拉長之後，alum 所得的殘餘濁度反而較 PACl 來的低。相關 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的作用可從超音波震盪破壞膠羽的試驗中發現。

而利用 PACl 進行混凝時，由於 PACl 具有高穩定性，水解速度慢，但具有類似高分子聚合物的性質，因此跟顆粒的結合屬於化學性吸附，為一不可逆的反應，其操作重點應是避免單顆粒吸附過多的 PACl 物種而行成少量的顆粒帶有大量的正電荷，此為部份顆粒過量加藥的情況，連帶影響在膠凝階段顆粒碰撞的情況趨向於叢集與單顆粒結合的情況（cluster and particle aggregation），容易造成當水中膠羽沈降後，上層液中殘留大量的穩定顆粒，其 $0.2\sim 2\ \mu\text{m}$ 大小的顆粒更是多數。激烈的混合將 PACl 物種分散，可有效地將去穩的顆粒增加，減低部份顆粒過量加藥的情況，如此，在膠凝階段顆粒的碰撞會趨向叢集與叢集的結合（cluster and cluster aggregation），即使在膠凝不良的情況下，只要拉長沉澱時間，仍舊可得到良好的濁度去除效果。

由圖 6 可以發現到，在 PACl 的作用下，膠羽顆粒在 10 分中以內已完成大部份的沈降，而利用 alum 進行混凝，則需 20 分鐘才完成膠羽顆粒的沈降。但拉長沉澱時間後，alum 可得到更好的濁度去除效果。此外實驗中，利用超音波震盪來觀察 PACl 與 alum 膠羽的顆粒破壞情形，發現 alum 膠羽強度較弱，並蝕碎發生的情形較為嚴重。由以上的結果可得知這也凸顯了 PACl 與 alum 兩種混凝劑形成膠羽特性的差異。

五、結論

在此研究之中，攪拌方式對高濁原水的濁度及 $2\sim 15$ 、 $0.2\sim 2\ \mu\text{m}$ 顆粒的去除影響甚鉅，研究之中也利用 PDA 直接偵測膠羽形成，發現快混攪拌也決定了慢混

階段顆粒聚集的速度幾乎在。在良好快混攪拌之後，顆粒聚集的速度極快，因此即使慢混階段的 Gt 值不足，依舊可得到不錯的混沈效果。而快混攪拌不足，顆粒的聚集速度則明顯變慢，但如果提供足量 Gt 值的慢混，仍可得到良好的混沈效果；若接下來的慢混也為不良的情況，會得到極高的殘餘濁度。

而對於不同型式的攪拌器進行評估，結果顯示利用三葉螺旋攪拌器所得的混沈效果最差，六葉渦輪攪拌器次之，平板攪拌器的效果最佳。利用 alum 及 PACl 進行混凝時，其操作重點因混凝劑本身的特性有所不同，但其相同之處為處理高濁度原水時，攪拌方式實為關鍵。

六、參考文獻

1. Edzwald J. K. (1998) *Treatment Process Selection for Particle Removal*. (Edited by McEwen J. B.), Chap. 4. American Water Work Association Research Foundation.
2. Li G. and Gregory J. (1991) Flocculation and Sedimentation of High-Turbidity Waters. *Wat. Res.*, **25**(9), 1137-1143.
3. Kan, Chichuan and Huang Chihpin (1998). Coagulation monitoring in surface water treatment facilities. *Wat. Sci. Tech.*, **38** (3), 237-244, 1998.
4. AWWA. (1992) Jar Testing. *Operation Control of Coagulation and Filtration Processes*. Denver, AWWA Research Foundation., 1-41.
5. Tatterson G. B. (1994) *Power and Flow. Scaleup and Design of Industrial Mixing Processes*. McGraw- Hill, Inc., 53-105.
6. 甘其銓、黃志彬、張怡怡、蔣本基 “淨水效能評鑑之方法及實例” *自來水會刊*, **16**(4), pp31-50, 民國八十六年九月。
7. 甘其銓、黃志彬 “淨水場快混程序之動力分析” *第十六屆自來水研究發表會論文集*, pp190-206, 台北, 民國八十八年十一月。
8. 蔣本基、張怡怡 “建立國內淨水場綜合效能評估 (CPE) 制度研究” 自來水協會, 民國八十九年五月。

表 1 四種形式的攪拌 G 值及 Gt 值

Type No.	Rapid Mixing Period	G Value	Slow Mixing Period	G Value	Gt Value	Condition Simulated
Type 1	1 min	350	20 min	25	30,000	Good Rapid - Mixing Poor Slow - Mixing
Type 2	1 min	0	20 min	25	30,000	Poor Rapid - Mixing Good Slow - Mixing
Type 3	1 min	350	5 min	25	7,500	Good Rapid - Mixing Poor Slow - Mixing
Type 4	1 min	0	5 min	25	7,500	Poor Rapid - Mixing Poor Slow - Mixing

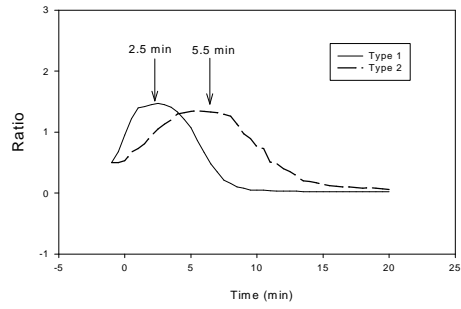


圖 3 Type 1 與 Type 2 於 PACl 加藥量 0.5 mg/l 時 PDA Ratio 輸出值的變化

表 2 混合攪拌器快、慢混轉速控制

Mixing Equipment Type	Rapid Mixing Velocity (rpm)	Rapid Mixing (S ⁻¹)	Slow Mixing Gt
Three Bladed Propeller	300	160	32400
Six Bladed Disk Turbine	100	160	32400
Simple Paddle	120	160	32400

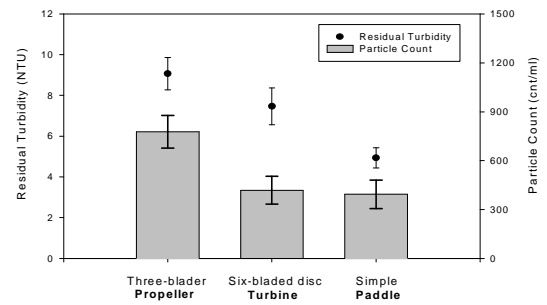


圖 4 殘餘濁度與顆粒數目於不同型式的攪拌器的變化 (1 mg/l PACl 加藥量) (以上為五重複之平均值及其標準偏差)

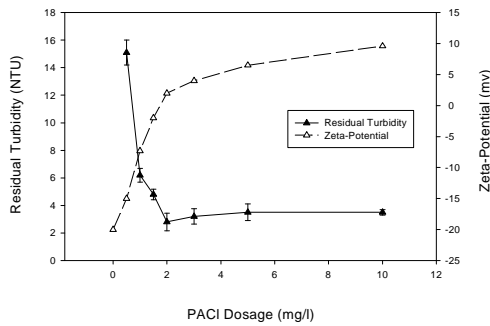


圖 1. 殘餘濁度與顆粒界達電位於不同 PACl 加藥量下的變化(原水濁度 180 NTU)

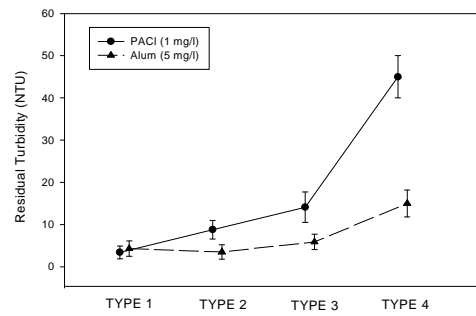


圖 5 PACl 與 alum 於不同攪拌形式下殘餘濁度的變化

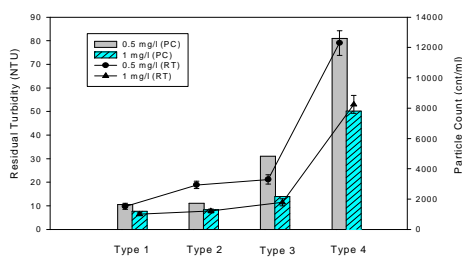


圖 2 殘餘濁度與顆粒數目於不同攪拌形式下的變化 (PACl 加藥量 0.5、1 mg/l)

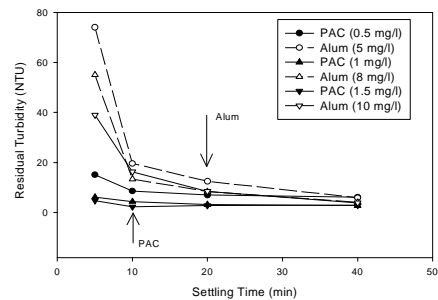


圖 6 PACl 與 alum 於不同加藥量下殘餘濁度隨時間的變化