

鐵錳共存之地下原水進行快濾處理之影響探討

Study on the Groundwater Treatment by Rapid Sand Filtration in the Presence of Both Iron and Manganese

謝永旭¹ 薛振達²

摘要

目前台灣地區之淨水場大都以氧化/快濾之處理方式來去除地下原水中之二價鐵、錳，由於缺乏以原水水質及操作條件併同處理水量做為硬體設計數據之依據，故常見去除效果因原水水質之變化而呈現欠穩定之情形。本研究係利用實驗室之模廠對人工合成之模擬原水進行以氧化/快濾去除二價鐵、錳之連續流試驗，並以鐵錳濃度比、pH值控制及停留時間的變化做為研究探討的變因。研究結果顯示，在鐵、錳共存的水質條件下，由於錳離子的存在，會抑制整體顆粒的成長，隨著錳濃度比的增加及停留時間的延長，對於顆粒粒徑的成長與二價錳的去除率，相對地呈現明顯的助益。同時，pH的提高，有利於二價錳的氧化，但是卻不利於三價鐵顆粒的凝聚去除，所以在Fe/Mn為4/1的濃度比及pH=9時，二價鐵、錳皆有較佳的處理效果；而此時降低pH值，二價鐵雖有理想的去除效率，但二價錳則不能被有效地氧化去除，若提高pH值，則因形成的顆粒過於微細，而皆無法被濾除。

¹ 國立中興大學環境工程研究所教授

² 國立中興大學環境工程研究所碩士

一、前言

自然水體環境中鐵、錳為相當常見的金屬元素，一般而言地下水與深層湖泊水的鐵、錳含量較地表水為高。鐵、錳的安定氧化態為三價鐵與四價錳，但在還原的條件下，鐵與錳易以二價的形式存在，因此造成地下水或深層湖泊水中含有較高含量的二價鐵、錳存在。鐵、錳為人體所需要的元素，在公共給水的影響上，並非因其本身具有毒性，而是就經濟觀點與給水美學的論點來看這個問題。一般對飲用水中鐵含量的限制，主要是因為當水中的鐵含量高於一定值以上，其與空氣中的氧接觸而被氧化成難溶性的三價鐵化合物，形成黃褐色的膠狀懸浮物；對於公共給水上易造成如下的問題發生：(1) 高濃度的鐵存在易造成金屬臭味的產生，(2) 洗衣用水中，微量鐵的存在易讓衣物染上顏色，造成利用上的不便，(3) 產生鐵化合物沈澱會阻礙水管與促進鐵細菌生長，而造成紅水現象，(4) 對造紙、紡織、製革等產品會影響產品品質，(5) 鐵易引起鐵配管與冷卻系統的腐蝕。至於錳的存在，在公共給水所產生的問題與鐵十分類似，除了會有臭味外，錳含量多時對人體將有不良的影響，易造成停止生長與妨礙骨骼之發育。

一般而言在厭氧條件下，中性偏酸的地下水水質條件，水中的鐵、錳之穩定態係以二價形式存在，而在含氧及鹼性的水質條件下，則以三價鐵與四價錳的狀態最為穩定，依據鐵、錳隨pH—Eh的改變其主要物種分佈圖顯示，提高水質的pH值，即使在較低的氧化還原電位下，鐵、錳亦可以高價的型態存在，因此，利用此特性在處理地下水的鐵、錳金屬物質時，常以曝氣方式將空氣中的氧溶入水中並趕走部份的二氧化碳，以提高pH值，使二價鐵、錳氧化為難溶性的三價鐵及四價錳，並形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 及 MnO_2 等固體顆粒而被濾除。

在溶解度平衡方面，二價鐵、錳之氫氧化物溶解度均較三價鐵氫氧化物及二氧化錳為高。就其在一定量鹼度存在的情況下，隨著pH值的改變，在pH>9.5時二價鐵、錳的溶解度以 $\text{Fe}(\text{OH})_{2(\text{S})}$ 及 $\text{Mn}(\text{OH})_{2(\text{S})}$ 之溶解平衡為主，而在pH<9.5時則以 $\text{FeCO}_{3(\text{S})}$ 及 $\text{MnCO}_{3(\text{S})}$ 之溶解平衡為主。

二、實驗設備與方法

本研究是以模廠方式進行實驗，以人工原水模擬實際地下水源之水質參數，模廠設備如圖1所示，實驗方法及基本流程如圖2所示，首先以逆滲透水注入1000L之PE桶內，密封此貯水設備，以厭氧曝氣裝置持續曝以 N_2 氣體約4小時左右，此時PE桶內的溶液之溶氧值可降到0.2mg/L以下，以模擬自然環境中地下水的厭氧還原條件，再依所需研究探討的水質條件變因，添加 FeCl_2 和 MnCl_2 與其他造成該水質條件的藥劑至目標值，然後以 N_2 氣體持續曝氣，並以循環馬達迴流攪拌來維持溶液的均勻狀態，再藉硝酸的酸化，使桶內溶液保持在pH=6.5，且在實驗操作期間，須不斷監測與調整使溶液維持在DO=0.2mg/L、pH=6.5的水質條件。至於實驗期間溫度不另行調整，大致在19~26℃之間。

配製完成的人工原水以蠕動馬達定量抽送至3.5m高的氣曝塔，以曝氣氧化的方式，氧化溶液中的二價鐵、錳，藉pH控制器的調整，控制溶液的pH值，以利於鐵、錳的凝集，溶液在停留槽內經設定的停留時間後，以溢流方式進入過濾管柱，在過濾管柱內以定速率方式過濾，水位保持在濾料表面以上90公分處，溶液經粒狀層的過濾後，由集水渠收集再經流量控制器後放流。

在過濾實驗操作時，每間隔1小時由放流水處取樣，監測隨過

濾時間的改變，出流中殘留鐵、錳含量之總量與溶解量鐵、錳的變化，同時並記錄濾床的總水頭損失的變化情形，大致上以總水頭損失達1.5m或出流水中殘留鐵、錳的濃度高於目前台灣省的飲用水水質限值時，則停止過濾操作，而在實驗結束的同時，在停留槽溢流口處取樣，以雷射粒徑分析儀分析溶液中顆粒的粒徑分佈狀況，以便判讀最佳操作條件與濾床的過濾效率。

三、結果與討論

1. 鐵錳濃度比的影響

本項實驗係模擬地下水質中二價鐵、錳共同存在的水質條件下，選擇二價鐵、錳濃度比為(Fe:Mn)=4:0、4:0.2、4:1三組水質條件，控制人工原水之DO=0.2mg/L，pH=6.5，實驗操作條件如下：曝氣停留後DO=7.0±0.5mg/L，pH=7.5±0.25，平均停留時間30min，以200m/d之濾速通過有效粒徑ES=0.5mm、濾砂深70cm之粒狀層。本項實驗過程中檢測溢留口溶液中鐵、錳形成的顆粒粒徑分佈，濾床總過濾阻力的變化及出流水中鐵、錳含量的濃度。

由圖3發現鐵、錳顆粒粒徑的成長隨著原水中二價錳濃度的增加，溶液中形成的顆粒粒徑 D_{50} 由76 μm 下降到43.7 μm ，整體粒徑分佈有明顯遞減的趨勢。而由圖4即可發現過濾阻力亦以(Fe:Mn)=(4:1)這一組實驗的增加率最小，再從圖5及圖6其鐵、錳的去除效率來看，總量鐵的去除率皆可達99%以上，符合要求之限值，但錳的去除則相當不佳，在此pH值操作下，以(Fe:Mn)=(4:1)較佳，但亦僅在10%附近而已。

就理論觀點而言，由於二價錳的氧化遠較二價鐵不易，因此在pH=7.5時，大部分的二價錳仍無法氧化為四價的難溶性固體物，因

此在出流水中便可偵測到大量溶解性的錳離子存在，但由於錳離子的存在，使三價鐵在結晶凝聚過程中，錳離子可能吸附在鐵顆粒表面或進一步嵌入晶體格子內，產生共沈澱現象，因而影響與抑制了鐵顆粒的成長，故粒徑分佈曲線隨著錳濃度的增加而左移。也因為整體顆粒粒徑的減小，所以膠羽較易深入濾層中，致使過濾阻力的增加率減緩。

2. pH 值的影響

(1) 在 Fe/Mn=4/0.2 之濃度比時

在本項實驗中以 $[Fe^{2+}] = 4\text{mg/L}$ ， $[Mn^{2+}] = 0.2\text{mg/L}$ ， $DO = 0.2\text{mg/L}$ ， $pH = 6.5$ 為人工原水水質條件，選擇 pH 控制因子為 7.5、9.0 及 10.5 三組變因。圖 7 為三組變因下所呈現之顆粒粒徑分佈圖，隨著 pH 值的上升顆粒的成長受抑制，曲線往左移動， $pH = 10.5$ 已超出儀器偵測範圍。而圖 8 是濾床的過濾阻力隨時間的變化，在 pH 達到 9 以上，過濾阻力的變化便不太明顯。而由圖 9 與圖 10 可看出，在此條件下，總量鐵的去除效率以 $pH = 7.5$ 時最為良好，然後隨 pH 值提高其去除率依序遞減，至 $pH = 10.5$ 時僅達 20% 左右。而對於錳的去除效率則以 $pH = 9.0$ 時最佳，去除率在 20% 附近，其他兩組則不足 10%。

就理論上分析，欲去除水中二價鐵、錳，則必需先將其氧化成高價形態的金屬物種，使其形成難溶性固體顆粒，再予以濾除。而對於二價錳的氧化，據文獻記載，以曝氣氧化二價錳時，原水 pH 需在 9 以上方能氧化之，若不能攪拌則 pH 需 10.3 以上才可反應完全。由圖 7、9 與 10 得知，在 $pH = 7.5$ 時因鐵顆粒的凝聚效果較佳，但不利於二價錳的氧化，故鐵的去除率可達 98.5% 以上，而錳的去除率尚不足 10%。當 pH 調整至 9.0 時，二價錳已部分開始氧化，但因鐵的表面電性增強，致使凝集

不易，故整體顆粒粒徑 D_{50} 僅 $3.26\mu\text{m}$ ，不易為濾床所濾除，故鐵的去除率降至25%，但錳的去除率卻因部分不溶性固體顆粒的濾除或伴隨鐵的共沈澱效應被濾除而提高至20%附近。當pH至10.5時，由於形成的鐵、錳顆粒過於微細，因此大部分貫穿濾床，使鐵、錳的去除率再度下降。

(2) 在 $\text{Fe}/\text{Mn}=4/1$ 之濃度比時

本項實驗基本條件與(1)項相同，以 $[\text{Fe}^{2+}]=4\text{mg/L}$ 及 $[\text{Mn}^{2+}]=1\text{mg/L}$ 的濃度比為水質條件。選擇pH=7.5、9.0與10.5做為研究因子，圖11是三種不同pH值下所形成的顆粒粒徑分佈曲線，其隨pH值的增加，曲線往左移動， D_{50} 由 $43.7\mu\text{m}$ 依序遞減為 $26.9\mu\text{m}$ 及 $6.8\mu\text{m}$ ，顯然因為錳含量的比值提高，鐵錳共沈澱現象愈趨顯著，在pH=7.5時，因鐵的膠體顆粒凝集甚佳，所以部分的錳顆粒或錳離子伴隨鐵顆粒而凝聚成膠羽。當pH=9.0時，部分二價錳已開始氧化形成不溶性錳顆粒且濃度足以促進溶液中原本較細小的鐵顆粒凝聚至 $D_{50}=26.9\mu\text{m}$ 的膠羽。當pH提高至10.5時，雖有利於二價錳之氧化，卻不利於鐵顆粒的凝聚，因此形成的懸浮顆粒大部分為 $4\sim 10\mu\text{m}$ 的微細膠羽。此與圖7以三價鐵化合物為主要物種所呈現的顆粒特性有極大差異。

由圖12可看出，過濾阻力隨時間的變化率亦因pH的增加、粒徑的遞減而漸減。而圖13及圖14為鐵、錳的去除效率，發現對於總量鐵的去除在pH=7.5及pH=9.0時，其去除率皆可達98%以上，而pH=10.5時，則降至20%附近，此為其他水質條件下，pH控制研究中未出現的現象，主要因為形成的顆粒粒徑較易於濾除之故。而對於錳的去除，以pH=9.0時最佳，主要因為在此條件下，二價錳的氧化與形成的顆粒足以為濾床

濾除，而pH=10.5時，則因形成的膠體顆粒仍過於微細，造成濾床的貫穿，所以使錳的去除效率再度降低。

3. 停留時間的影響

(1) 在Fe/Mn=4/0.2 濃度比時

在本項實驗中以 $[Fe^{2+}] = 4\text{mg/L}$ 、 $[Mn^{2+}] = 0.2\text{mg/L}$ 、 $DO = 0.2\text{mg/L}$ 、 $pH = 6.5$ 為人工原水水質條件，選擇平均停留時間 30min 及 60min 做為研究探討因子。如圖 15 所示，隨著平均停留時間的增加，整體顆粒粒徑有顯著成長的現象，停留時間由 30min 增加至 60min， D_{50} 則由 $51.3\mu\text{m}$ 增加至 $64.9\mu\text{m}$ ，顯示在錳離子存在的影響之下，金屬顆粒的成長速率受到抑制，因此停留時間的延長有助於鐵、錳共沈澱現象下的顆粒成長，此種情況與單純鐵顆粒的成長在 15 分鐘內即可達到一穩定狀態有極大差別。而圖 16 即為在不同停留時間下，過濾阻力隨操作時間的變化。

由圖 17 與圖 18 可得知在過濾操作中鐵、錳金屬之去除效率，對於總量鐵的去除而言，兩組實驗結果相近，去除率皆可達 99% 以上，並可符合飲用水限值標準，但對於總量錳的去除，停留時間的增加，明顯有利於錳的去除，由於錳(II)的氧化屬於自媒反應動力模式，且錳(II)在 $pH = 7.5$ 時其氧化速率並不高，因此在實驗的過程中，隨著溶液中錳(II)的逐漸被氧化為 $MnO_2(S)$ ，並經由自行催化其他尚未氧化的二價錳，所以隨著停留時間的增加，錳的去除效率明顯提升，且出流水中顆粒性的錳氧化物絕大部分已伴隨鐵顆粒為濾床所去除，殘留的錳含量皆以溶解性為主。

(2) 在Fe/Mn=4/1 濃度比時

本項實驗以 $[\text{Fe}^{2+}]=4\text{mg/L}$ 、 $[\text{Mn}^{2+}]=1\text{mg/L}$ 、 $\text{DO}=0.2\text{mg/L}$ 、 $\text{pH}=6.5$ 為人工原水水質條件，為提高錳的去除效率並兼顧鐵的去除，故在本實驗中選用 $\text{pH}=9.0$ 為控制條件。由圖19顆粒粒徑分佈圖來看，在此實驗條件之下，溶液中顆粒成長的情形， D_{50} 由 $26.9\mu\text{m}$ 凝聚至 $60.5\mu\text{m}$ ，隨著停留時間的增加，成長非常明顯，因為受到鐵、錳共沈澱的效應，使得原先在 $\text{pH}=9.0$ 時，不易凝聚的鐵膠羽，併同錳之氧化物而凝集成較大的金屬顆粒。圖20即為兩種不同停留時間下，溶液中的金屬顆粒對濾床所造成的過濾阻力變化。

由圖21與圖22可得知，因為此兩組實驗所形成的膠體顆粒，能夠在濾層中為濾料所濾除，所以其總量鐵去除效率可達98%以上，而在總量錳的去除方面，因為在 $\text{pH}=9.0$ 時，二價錳較易氧化成高價的氧化物，且能夠凝聚成足以濾除的顆粒粒徑，因此相對於 $\text{pH}=7.5$ 時有較佳的去除效果，且停留時間愈長愈有利於錳的氧化去除，惟去除效率隨過濾時間的增長而呈現逐漸下降的情形。

四、結論與建議

1. 在鐵、錳共存的水質條件下，由於錳離子的存在，抑制整體顆粒的成長，隨著錳濃度比的增加，及停留時間的增加，對於顆粒的成長，與二價錳的去除率，相對有明顯的助益。
2. 在鐵、錳共存的水質條件下， pH 值的提高，有利於二價錳的氧化，但是不利於三價鐵顆粒的凝聚去除，所以在 Fe/Mn 為4/1的濃度比及 $\text{pH}=9$ 時，二價鐵、錳皆有較佳的處理效果；而此時降低 pH

值，二價鐵雖有理想的去除效率，但二價錳則不足被氧化去除；提高pH值，則因形成的顆粒過於微細，而皆無法被濾除。

五、誌謝

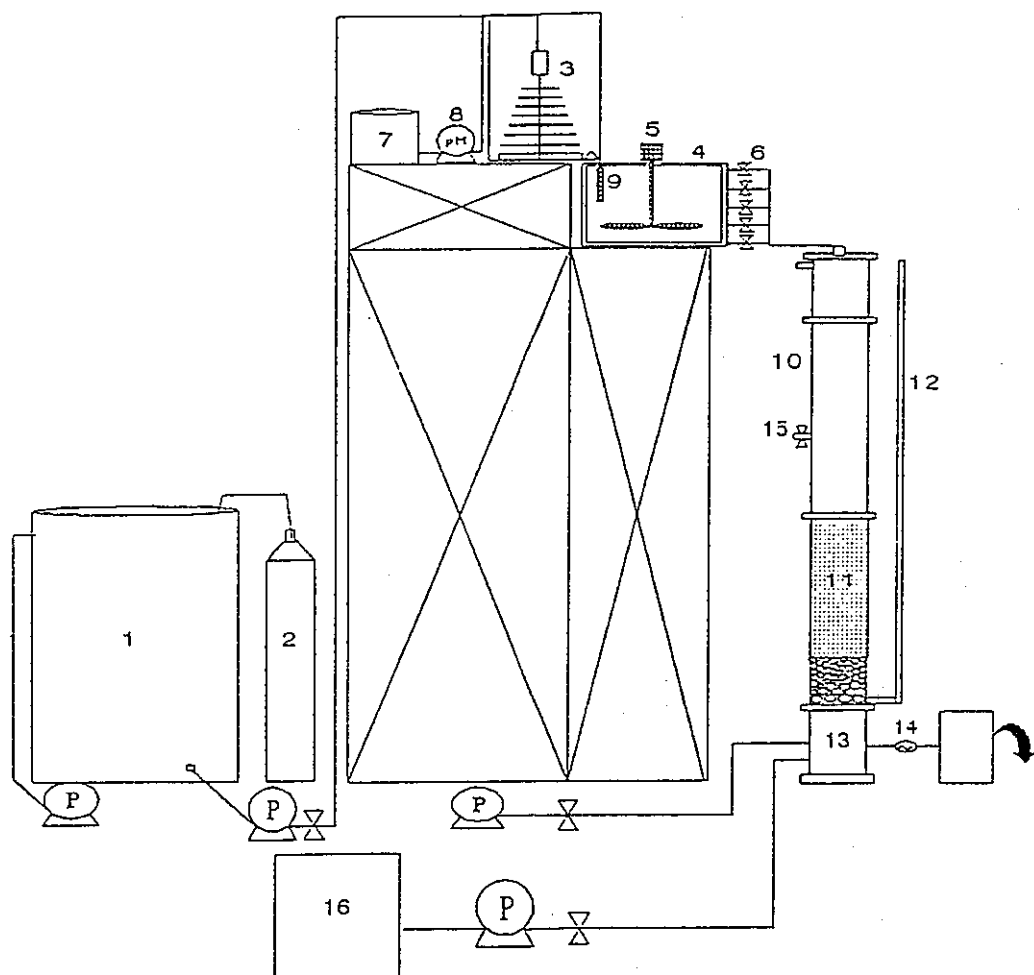
本研究承台灣省自來水公司提供經費補助始得以完成，又研究期間承藍炳樟先生、洪世政先生、許文雄先生、許廷發先生等先進之資料提供與大力協助，在此一併誌謝。

六、參考文獻

1. AWWA, "Water Quality and Treatment", 3rd ed., McGraw-Hill Inc., New York (1971).
2. 葉宣顯，"調查地下水源含砷、氟、鐵、錳等污染成份及處理效率之研究"，國立成功大學環境工程研究所(1983)。
3. Itamar, B., et al, "Environmental Inorganic Chemistry" , Pergamon Press Inc. (1988).
4. Hem, J.D., "Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water" ,2nd ed., Water Supply Paper, No.1473, U.S. Geological Survey, Washington, D.C. (1970).
5. Stumm, W. and Morgan, J.J., "Aquatic Chemistry" ,2nd e., John Wiley and Sons Inc., New York (1981).

6. Morgan, J.J., " Application and Limitations of Chemical Thermodynamics in Water Systems in Equilibrium Concepts in Natural Water System" , [Ed.]Gould, R.F., American Chemical Society, Washington, D.C. (1967).

7. Morgan, J.J., " Chemical Equilibria and Kinetic Properties of Manganese in Natural Waters" , in Principles and Applications in Water Chemistry, [Ed.]Faust, S.D. and Hunter, J., Sons Inc., New York (1967).



- | | |
|----------------|------------|
| 1 1000L-PE 儲水桶 | 9 pH meter |
| 2 厭氧曝氣裝置 | 10 過濾管柱 |
| 3 曝氣塔 | 11 濾料層 |
| 4 停留槽 | 12 水頭損失計量管 |
| 5 攪拌馬達 | 13 集水區 |
| 6 溢流裝置 | 14 流量控制器 |
| 7 驗液儲存桶 | 15 水位調整閥 |
| 8 pH 控制器 | 16 反沖洗裝置 |

圖 1 模型廠結構圖

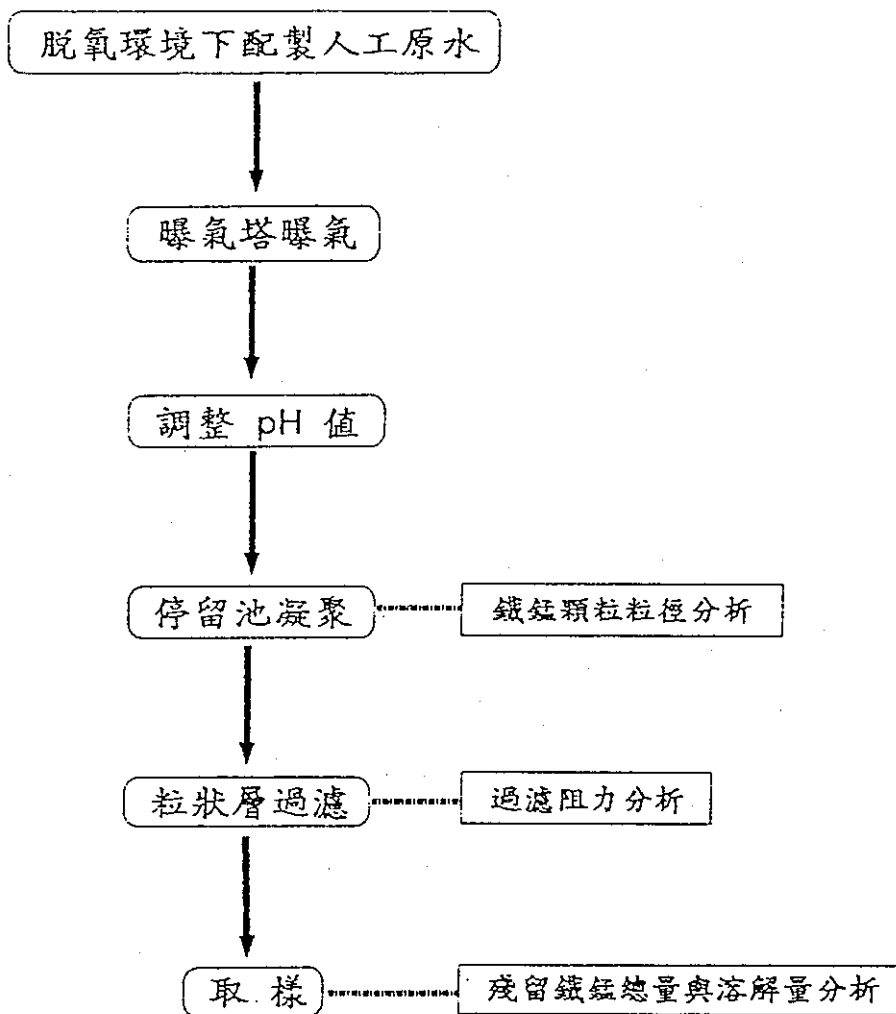


圖 2 研究方法及基本流程

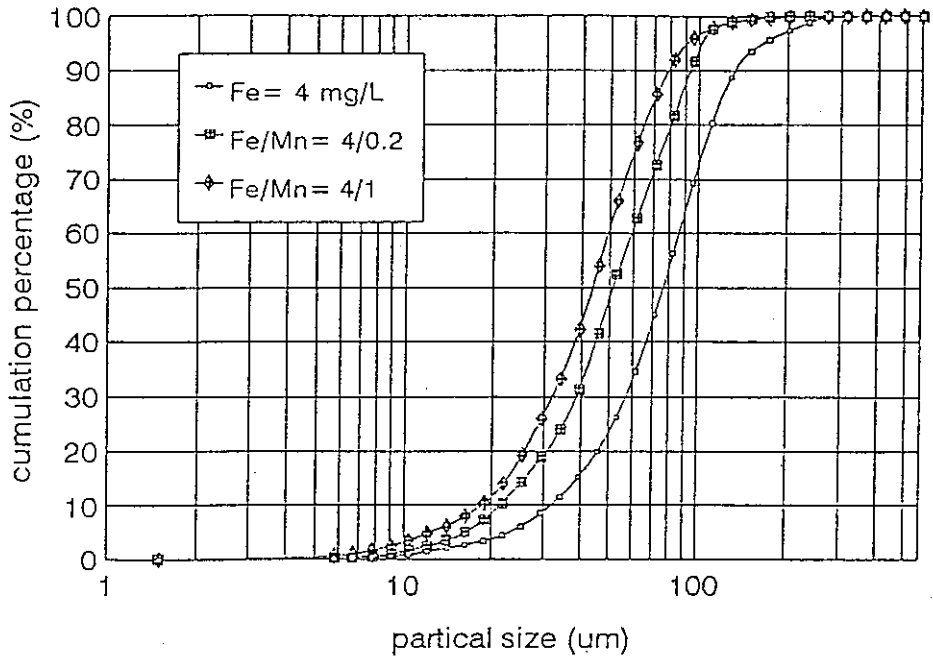


圖 3 鐵錳共存時,鐵錳濃度比影響顆粒粒徑分佈試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $D0 = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 7.5$, 停留時間 30 min, 濾率 200 m/d, 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

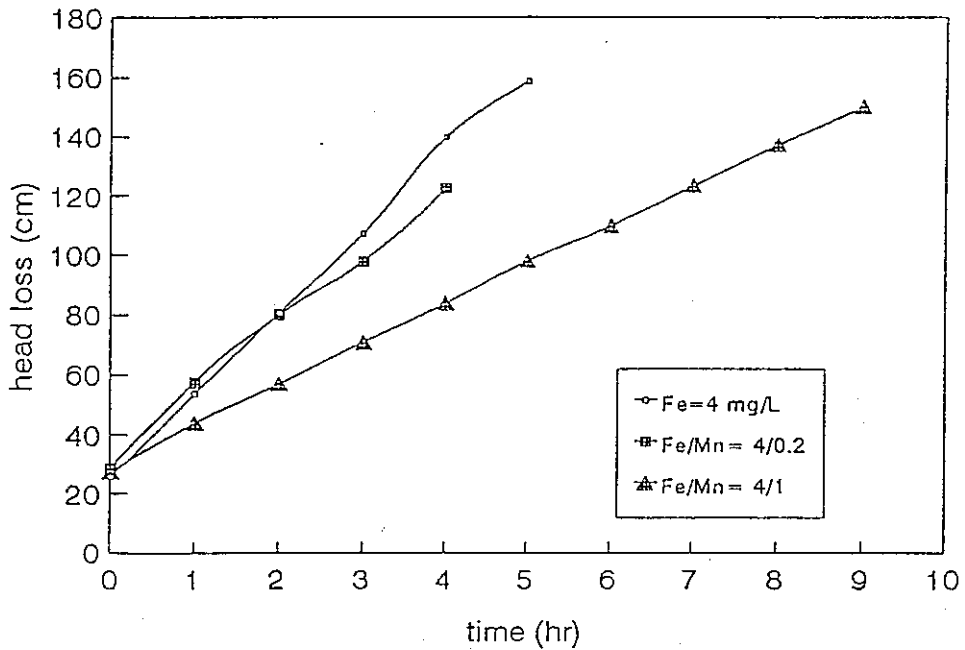


圖 4 鐵錳共存時,鐵錳濃度比影響水頭損失試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $D0 = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 7.5$, 停留時間 30 min, 濾率 200 m/d, 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

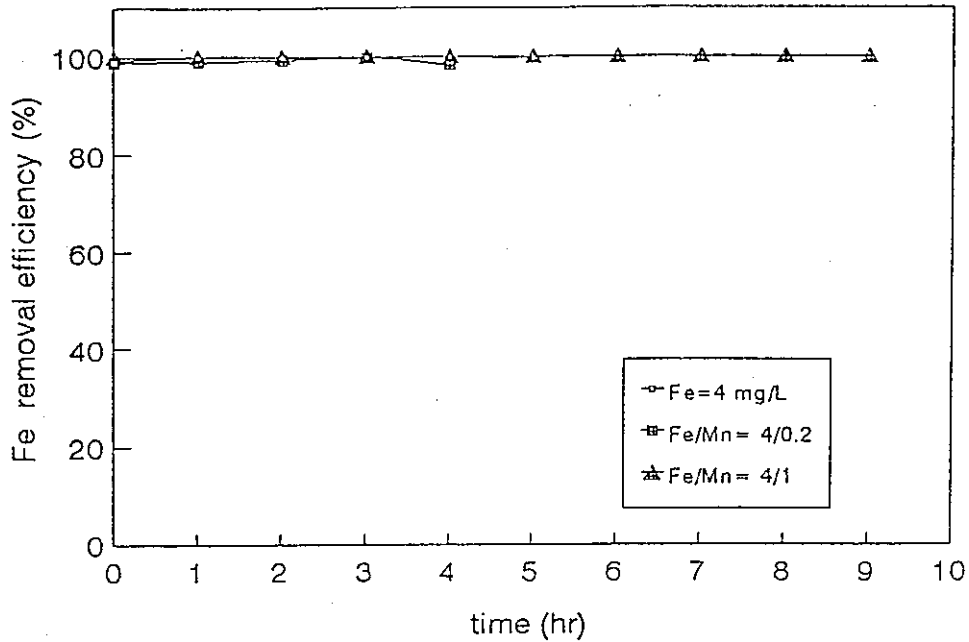


圖 5 鐵錳共存時，鐵錳濃度比影響總量鐵的去除效率試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 7.5$, 停留時間 30 min, 濾率 200 m/d, 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

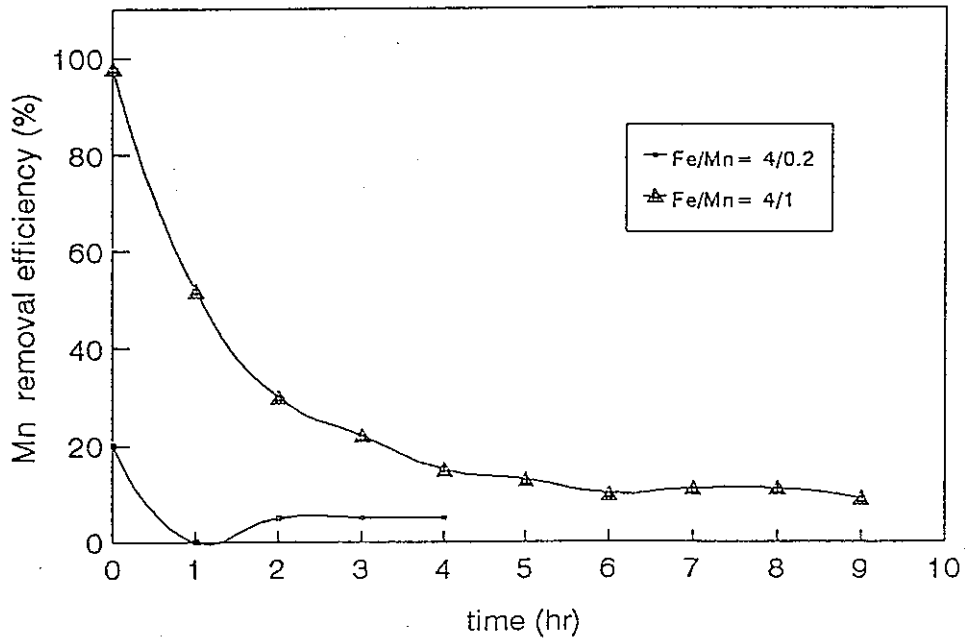


圖 6 鐵錳共存時，鐵錳濃度比影響總量錳的去除效率試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 7.5$, 停留時間 30 min, 濾率 200 m/d, 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

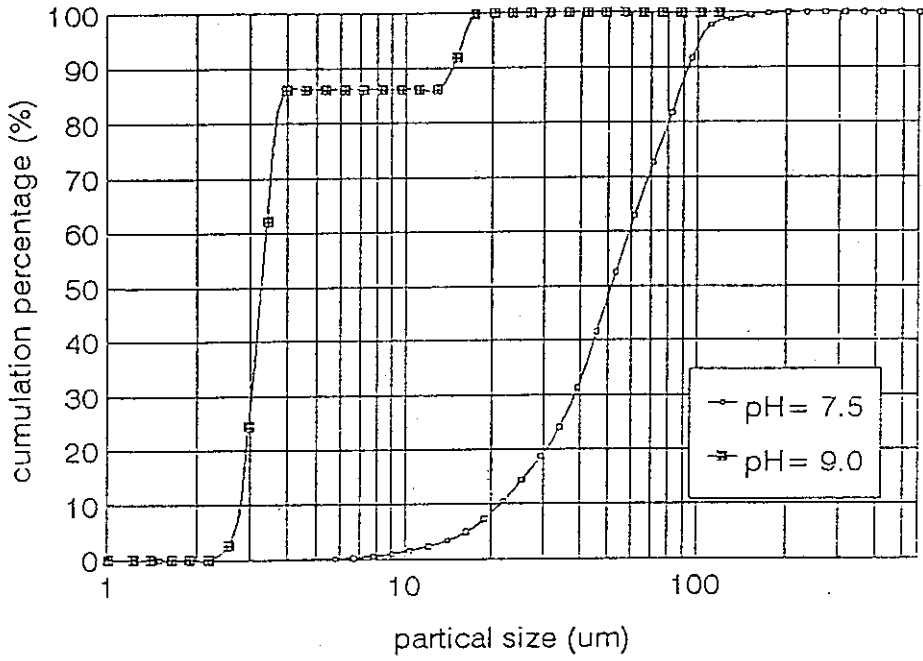


圖 7 鐵錳共存時, (1) pH值影響顆粒粒徑分佈試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 0.2 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, 停留時間30 min
 , 濾率200 m/d, 濾料粒徑 ES=0.5 mm)

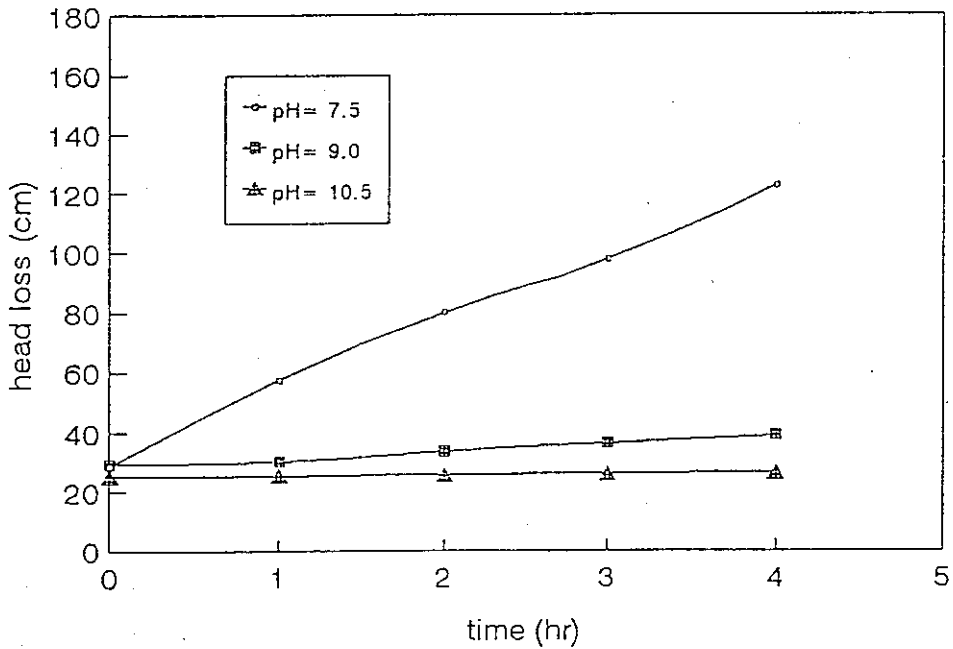


圖 8 鐵錳共存時, (1) pH值影響水頭損失試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 0.2 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, 停留時間30 min
 , 濾率200 m/d, 濾料粒徑 ES=0.5 mm)

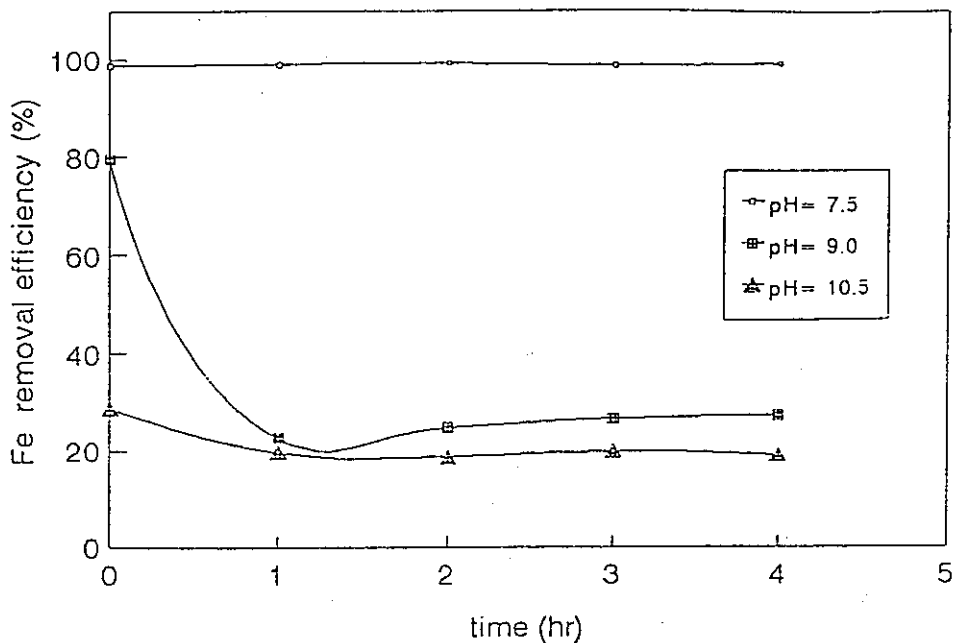


圖 9 鐵錳共存時, (1) pH值影響總量鐵的去除效率試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 0.2 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, 停留時間30 min
 , 濾率200 m/d, 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

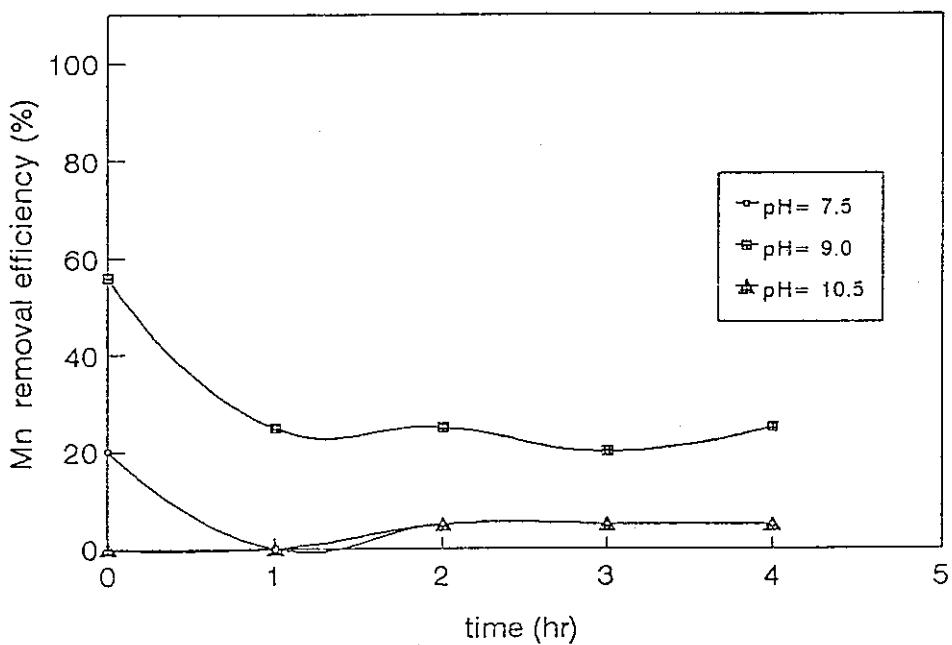


圖 10 鐵錳共存時, (1) pH值影響總量錳的去除效率試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 0.2 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, 停留時間30 min
 , 濾率200 m/d, 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

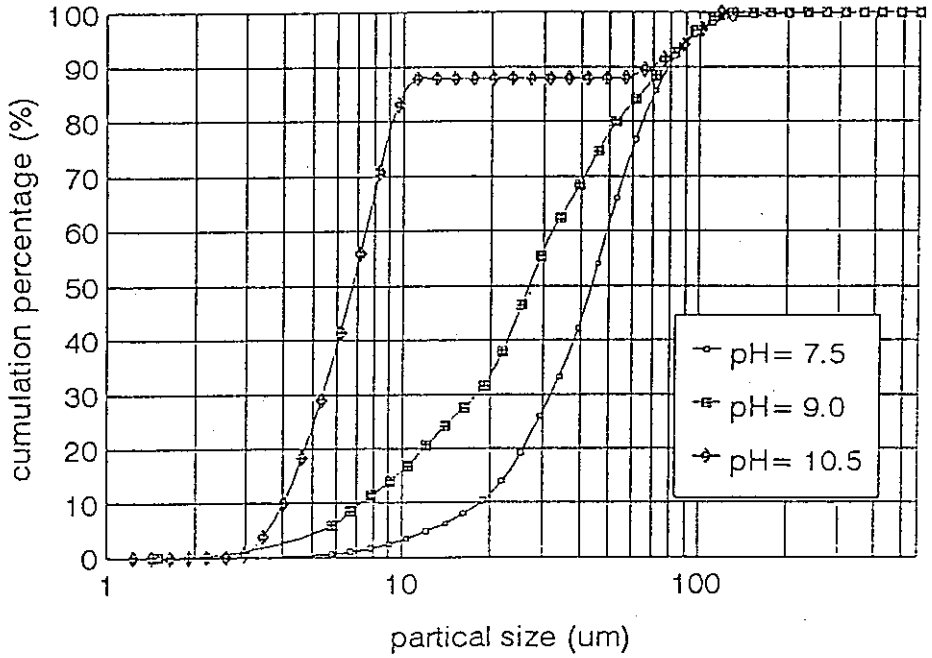


圖 11 鐵錳共存時, (2) pH值影響顆粒粒徑分佈試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 1.0 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, 停留時間 30 min
 , 濾率 200 m/d, 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

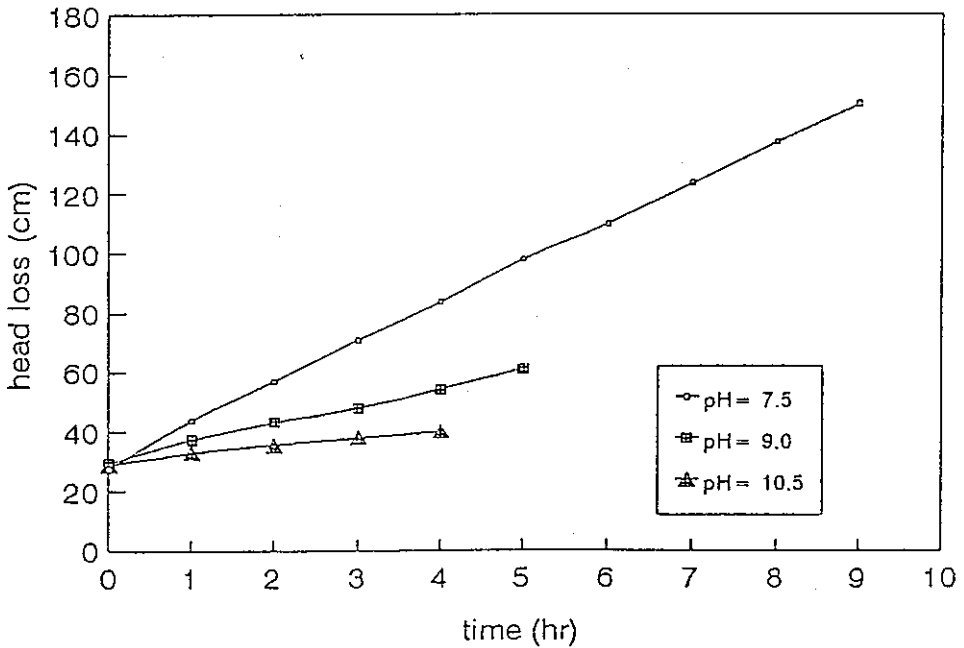


圖 12 鐵錳共存時, (2) pH值影響水頭損失試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 1.0 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, 停留時間 30 min
 , 濾率 200 m/d, 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

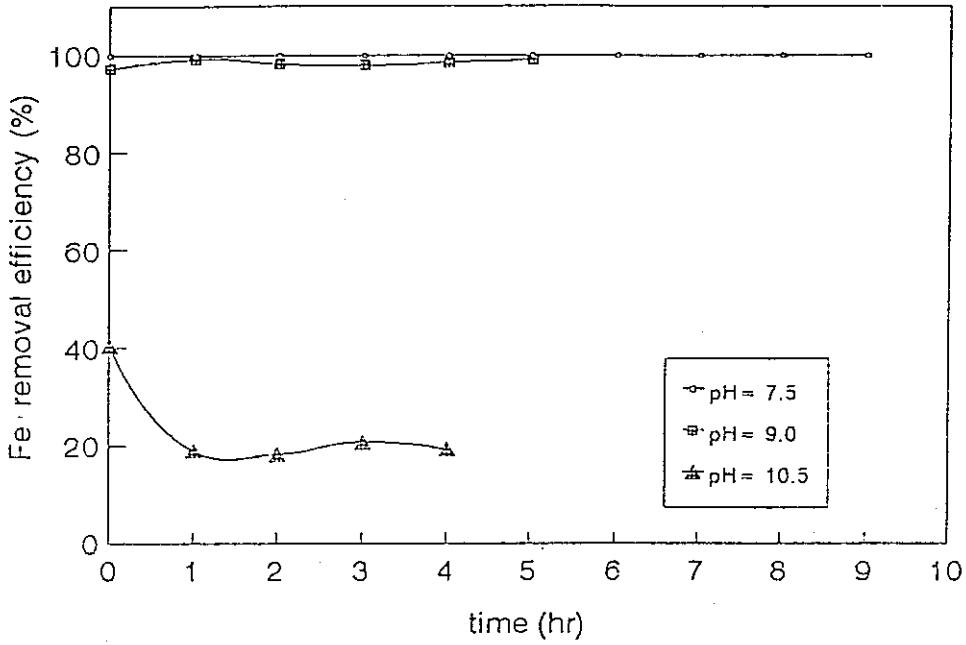


圖 13 鐵錳共存時, (2) pH值影響總量鐵的去除效率試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 1.0 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, 停留時間30 min
 , 濾率200 m/d, 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

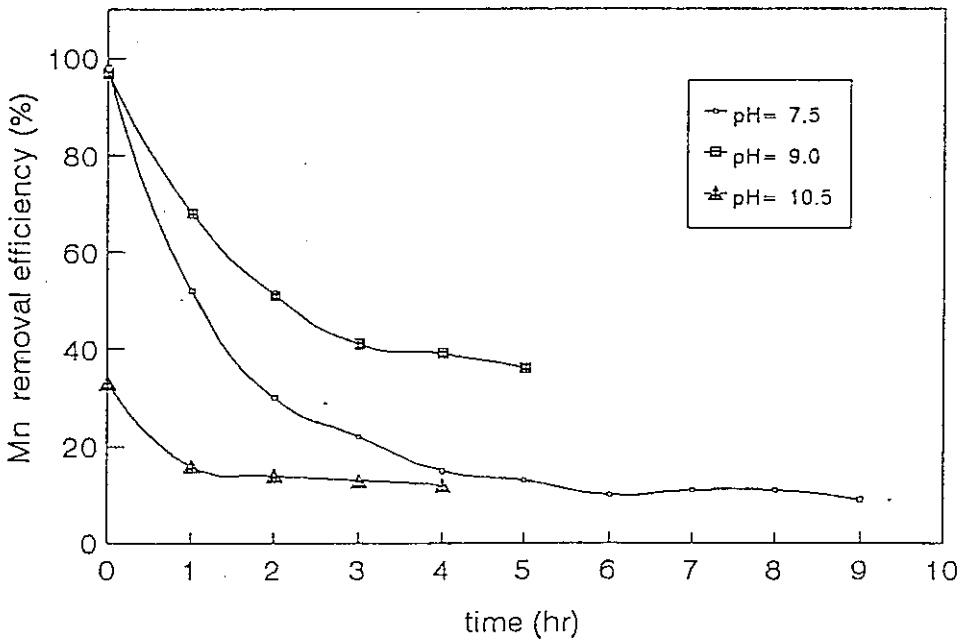


圖 14 鐵錳共存時, (2) pH值影響總量錳的去除效率試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 1.0 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, 停留時間30 min
 , 濾率200 m/d, 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

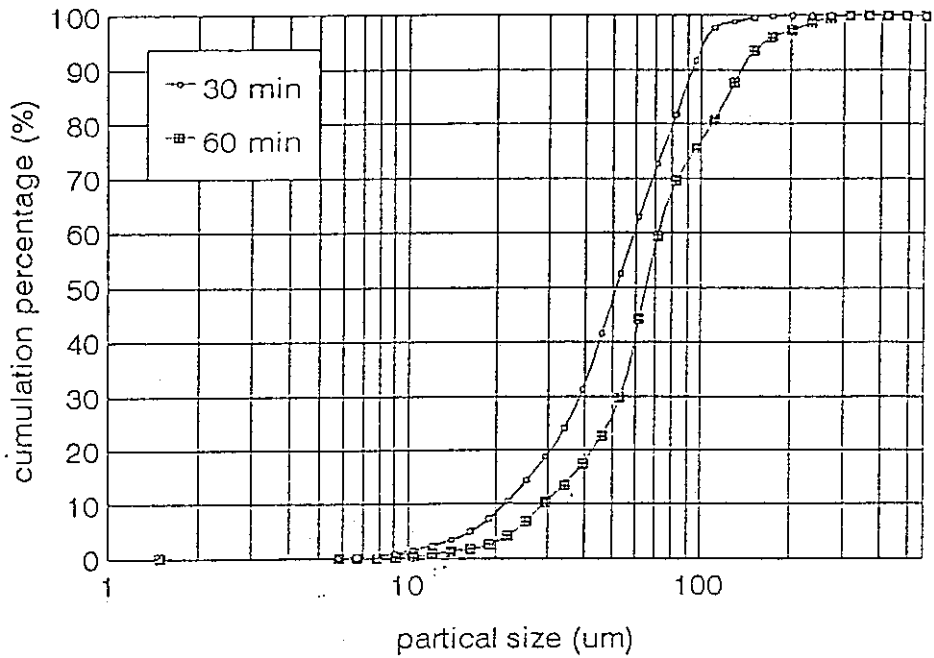


圖 15 鐵錳共存時, (1) 停留時間影響顆粒粒徑分佈試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 0.2 \text{ mg/L}$, $D_0 = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 7.5$, 濾率
 200 m/d , 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

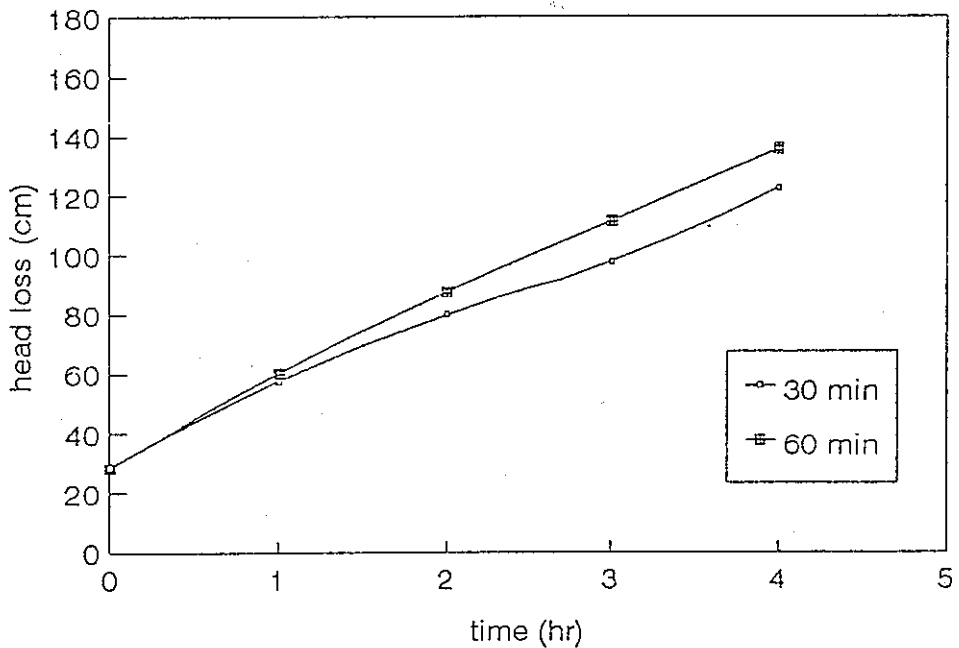


圖 16 鐵錳共存時, (1) 停留時間影響水頭損失試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 0.2 \text{ mg/L}$, $D_0 = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 7.5$, 濾率
 200 m/d , 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

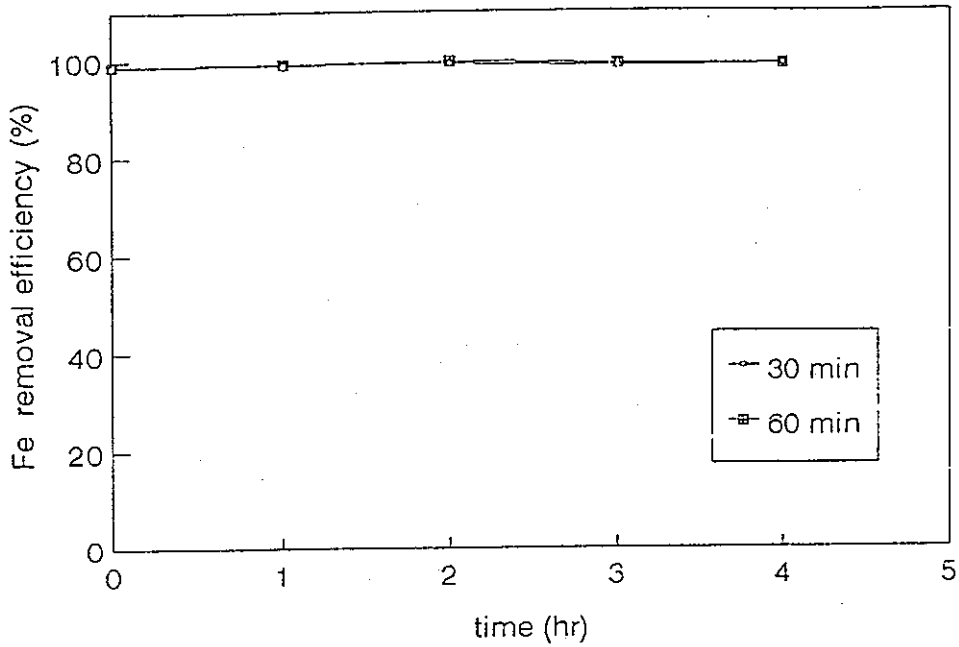


圖 17 鐵錳共存時, (1) 停留時間影響總量鐵的去除效率試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 0.2 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 7.5$, 濾率
 200 m/d , 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

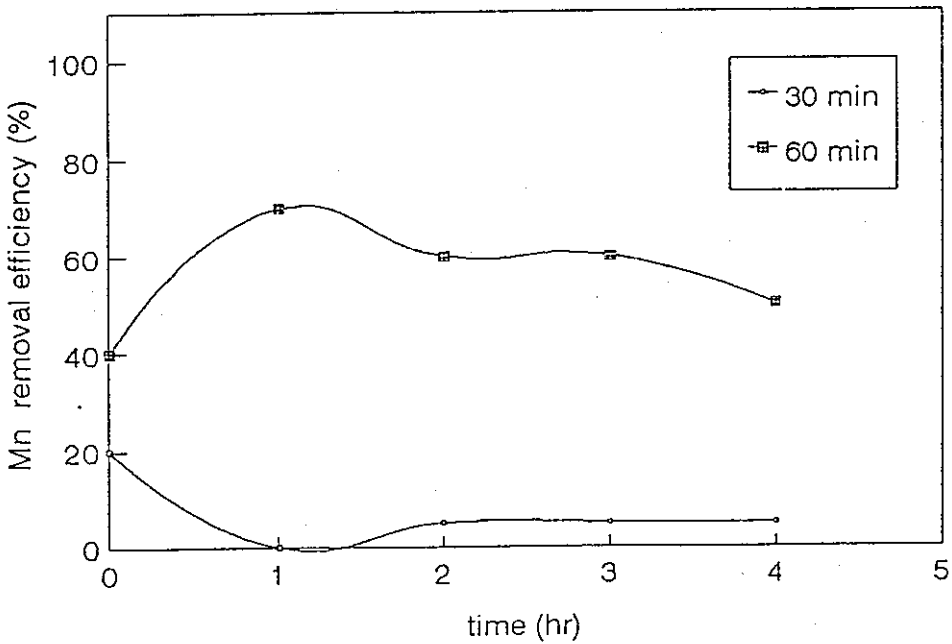


圖 18 鐵錳共存時, (1) 停留時間影響總量錳的去除效率試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 0.2 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 7.5$, 濾率
 200 m/d , 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

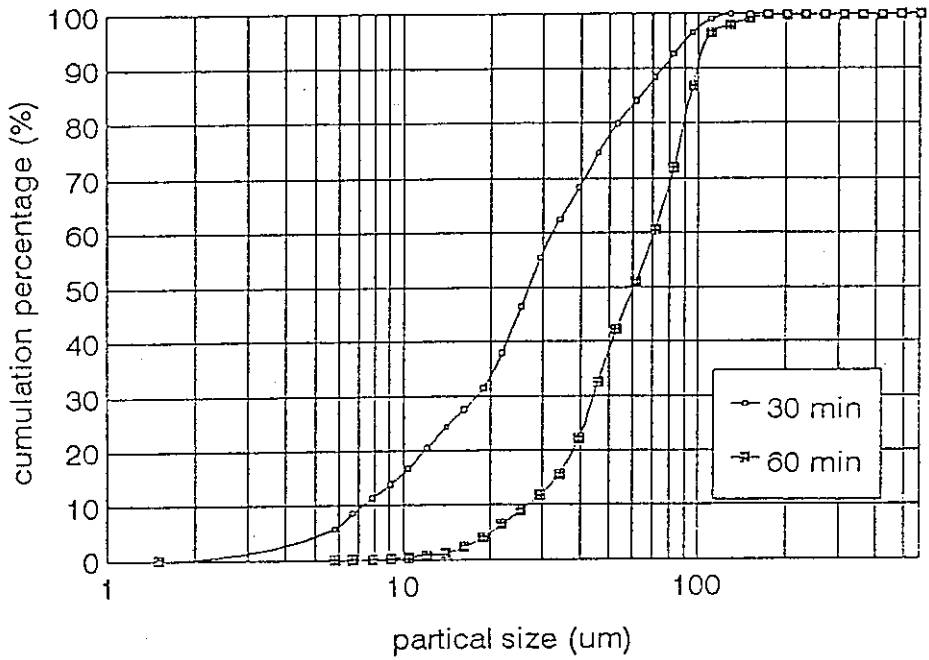


圖 19 鐵錳共存時, (2) 停留時間影響顆粒粒徑分佈試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 1.0 \text{ mg/L}$, $D_0 = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 9.0$, 濾率
 200 m/d , 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

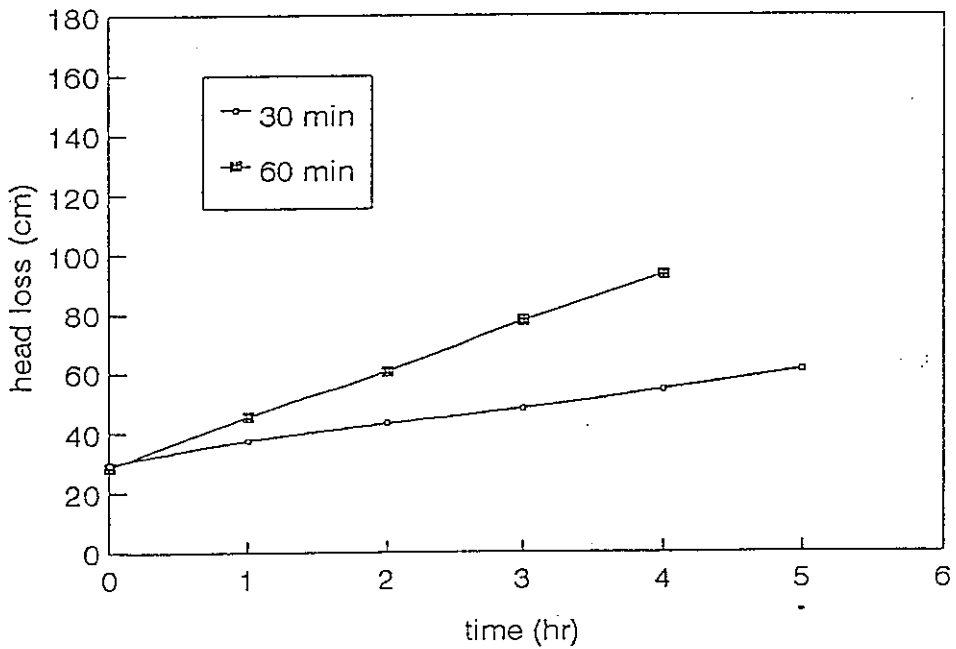


圖 20 鐵錳共存時, (2) 停留時間影響水頭損失試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 1.0 \text{ mg/L}$, $D_0 = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 9.0$, 濾率
 200 m/d , 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

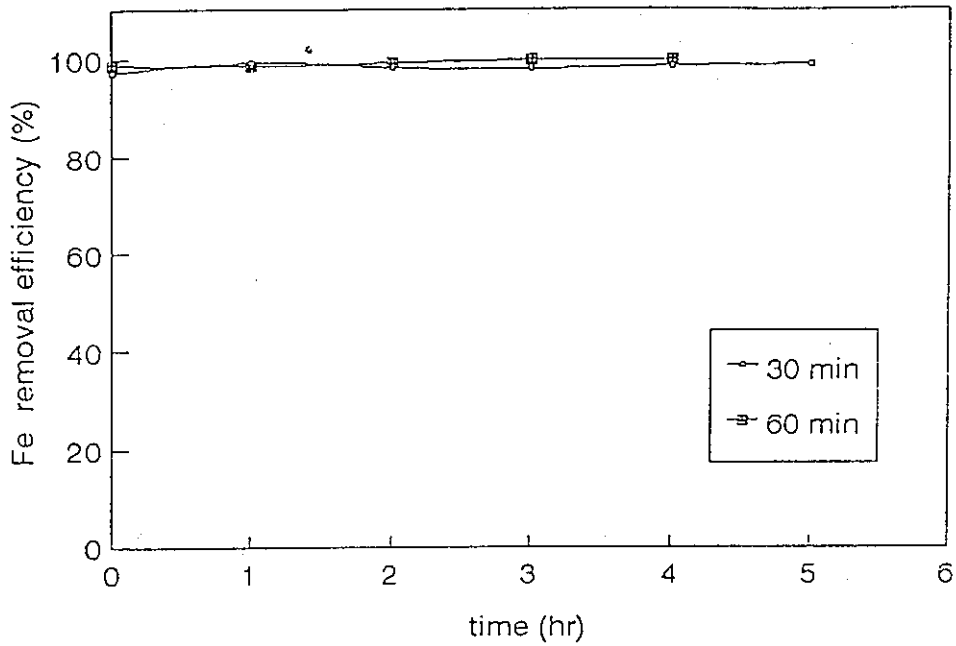


圖 21 鐵錳共存時, (2) 停留時間影響總量鐵的去除效率試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 1.0 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 9.0$, 速率
 200 m/d , 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)

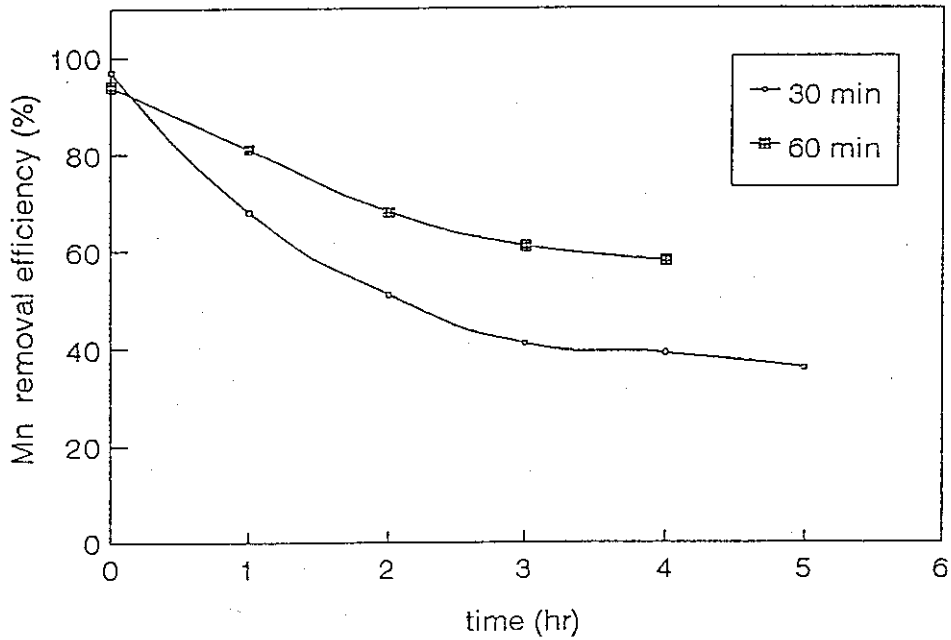


圖 22 鐵錳共存時, (2) 停留時間影響總量錳的去除效率試驗
 ($[Fe^{2+}] = 4 \text{ mg/L}$, $[Mn^{2+}] = 1.0 \text{ mg/L}$, $DO = 7.0 \text{ mg/L}$, $pH = 9.0$, 速率
 200 m/d , 濾料粒徑 $ES = 0.5 \text{ mm}$)