

平行流微過濾法之過濾行爲理論及 應用於濾池反沖洗廢水處理之研究

The Filtration Laws in Crossflow-Microfiltration
and Application to the Treatment of Filter Backwash
Wastewater

張棟江

摘要

平行流微過濾法 (Crossflow-Microfiltration) 是薄膜過濾法之一種，能非常有效的去除粒徑在 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 範圍內之微粒，在此範圍粒徑之微粒以其他固液分離之處理方式如沉澱、離心或深層過濾法均無法有效可靠的去除，因此平行流微過濾法目前已逐漸被廣泛的應用於淨水及廢水之處理。而此項處理方法之一項特色是進流水水流與薄膜表面成平行方向，因剪力作用使聚積在薄膜表面之泥餅厚度減小至一低限狀態，如此得以保持較高之濾速。

本研究報告係以實驗來檢視由荷曼斯 (HERMANS) 及布雷迪 (BREDEE) 所提出之四種不同過濾行爲理論。實驗係以各種不同孔徑之薄膜及不同性質、粒徑之懸浮液在各種不同之操作條件下如不同之平行流速及壓力等進行探討，由實驗結果所獲得的結論是；過濾進行之過程可分為四個區段，依序為初始區段 (Initial region)，標準閉塞區段 (Standard blocking)，轉換區段 (Transition region) 及最終的濾餅過濾區段 (Cake filtration region)，其中包含了布、荷式所提出之二種過濾行爲理論，而另二種過濾行爲理論則未發生。

本報告中亦對平行流微過濾法應用於淨水場快濾池反沖洗廢水處理之適當性及經濟性進行研究分析。

壹、前言

目前有四種主要的薄膜處理方法應用於水及廢水處理程序中分別是電透析法 (ED)、逆滲透法 (RO)、超過濾法 (UF) 和微過濾法 (MF)，電透析法及逆滲透法用於去除水中鹽類，而超過濾法及微過濾法則對去除大分子、膠狀體和懸浮固體物是非常有效。

平行流過濾法不同於一般標準過濾技術的是進流水之水流與濾器表面呈平行方向，因剪力作用使聚積於濾料表面之泥餅厚度減小至一低限狀態 (圖 1)，在理論上當壓力差保持固定，則濾過液流量不因時間而減小，可保持一穩定狀態，然而此一理想狀態在實際操作狀況下卻無法達成。

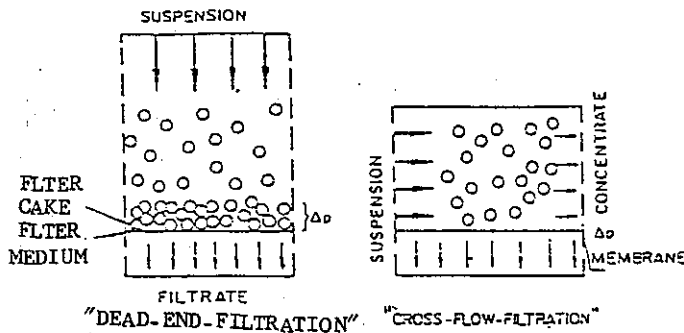


圖 1. 過濾原理之比較

平行流微過濾法 (CMF) 去除範圍從 0.02 至 $10\mu\text{m}$ (圖 2), 目前應用於許多不同用途的固液分離技術上, 包括淨水處理、污泥處理、化學處理程序、生物化學應用、食品飲料製造程序, 膠片、電子和製藥工業、二度油回收等等。雖然其用途很廣泛, 唯至今對平行流微過濾法的研究尚做的很少, 尤其是對其過濾過程上的研究更少。本文係藉實驗結果來驗證過濾理論, 並推展應用於淨水場快濾池反沖洗廢水之處理。

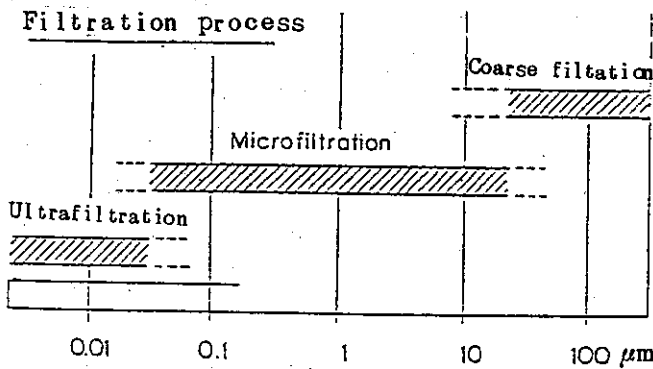


圖 2. 微過濾法分離範圍

貳、薄膜阻塞機構

荷曼斯和布雷迪 (1936) 根據過濾阻抗 r 與濾過液體積 V (亦即 $\phi = dr / dv$) 之關係將過濾機構分為四種型式, 而 ϕ (阻塞速率) 和 r (阻抗) 的關係是代表過濾機構的特性, 茲將四種不同之過濾機構分述如下:

2.1 濾餅過濾理論 (Cake filtration principle)

在某一時間, 水力阻抗 R_t 為薄膜阻抗 R_m 及沉積在薄膜表面濾餅阻抗 R_d 之和。

亦即
$$R_t = R_m + R_d$$

在此
$$R_d = \frac{rWV}{A}$$

A = 薄膜面積

r = 每單位重濾餅之過濾比阻抗

V = 在某一時間之濾過液體積

W = 每單位體積過濾液所含乾固體物含量

因此 R_c 能寫成以下型式

$$R_c = R_m + \frac{r w V}{A}$$

從達西公式 (Darcy's Law)

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu \cdot R_c}$$

在此 μ = 進流水之黏滯性

假設壓力差保持不變則

$$\int_0^t dt = \int_0^V \left(\frac{\mu w r V}{\Delta P A^2} + \frac{R_m \mu}{\Delta P A} \right) dV$$

亦即
$$\frac{t}{V} = \frac{\mu w r V}{2 \Delta P A^2} + \frac{R_m \mu}{\Delta P A}$$

可化為
$$\frac{t}{V} = \frac{K_c \cdot V}{2} + \frac{1}{Q_0}$$

在此
$$K_c = \frac{\mu w r}{\Delta P A^2} \quad Q_0 = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu R_m}$$

2.2 中間閉塞過濾理論 (Intermediate Blocking Principle)

薄膜孔隙被阻塞的機率與可供過濾水通過之薄膜面積成一函數關係，因此在某一時間 $t + dt$ 時，可供過濾水通過之薄膜孔隙表面積為

$$A_t + dt = A_t - \sigma (Q_r) t \cdot dt \frac{A_t}{A_0}$$

在此 A_t = 在時間 t 時可供過濾水通過之薄膜孔隙表面積

σ = 阻塞係數

Q_r = 時間 t 時之過濾流量

代入達西公式

$$dA = - \sigma \frac{\Delta P}{\mu R A_0} A^2 dt$$

上式積分可得

$$Q_r = \frac{Q_0}{1 + \frac{\sigma \Delta P}{\mu R} \cdot t}$$

上式亦可化為

$$\frac{1}{Q_r} = \frac{\sigma \Delta P}{Q_0 \mu R} t + \frac{1}{Q_0}$$

從達西公式

$$\frac{\Delta P}{\mu R} = V_r = \frac{Q_0}{A_0}$$

所以
$$\frac{1}{Q_r} = K_r t + \frac{1}{Q_0}$$

在此 $K_r = \sigma / A_0$

過濾壓力差保持特定值時

$$\frac{d}{dV} \left(\frac{1}{Q_r} \right) = \frac{d^2 t}{dV^2}$$

亦即
$$\frac{d^2 t}{dV^2} = K_r \frac{dt}{dV}$$

2.3 標準閉塞過濾理論 (Standard Blocking Principle)

假使薄膜孔隙體積之減小與濾過液之體積成比例關係，並假設薄膜孔隙係一具有幾何形

狀之圓柱體毛細孔，則可得下列公式：

$$N (-2\pi r dr L_p) = C_v dV$$

在此 N = 薄膜孔隙數

r = 薄膜孔隙半徑

L_p = 薄膜孔隙長度

C_v = 沉降微粒體積 / 過濾體積

由波義耳公式 (Poiseuille's Equation)，圓柱形毛細孔可寫為

$$Q_0 = \frac{dV}{dt} = N \Delta P \frac{\pi r^4}{8L_p \rho}$$

由前二公式可得

$$Q_t = Q_0 \left(1 - \frac{K_s V}{2}\right)^2$$

在此 $K_s = \frac{2C_v}{L_p A_0}$

上述式子可化為

$$\frac{t}{V} = \frac{K_s t}{2} + \frac{1}{Q_0}$$

亦可化為

$$\frac{d^2 t}{dV^2} = K'_s \left(\frac{dt}{dV}\right)^{3/2}$$

在此 $K'_s = K_s Q_0^{1/2}$

2.4 完全閉塞過濾理論 (Complete Blocking Principle)

從達西公式在時間 t 時

$$Q_t = \frac{\Delta P \cdot A_t}{\mu R}$$

在此 $A_t = A_0 - \sigma V$

σV 是孔隙阻塞比率，和微粒直徑及微粒濃度有一函數關係如下：

$$\sigma V = \left(\frac{V^* \rho_m \cdot s}{\rho_s}\right) \left(\frac{6}{\pi d^3}\right) \left(\frac{\pi d^2}{4\phi}\right)$$

在此 V = 濾過液體積

V^* = 懸浮液體積

ρ_m = 懸浮液比重

ρ_s = 微粒比重

s = 懸浮液中微粒比率

d = 微粒直徑

ϕ = 微粒形狀係數

同前 $Q_t = Q_0 - \frac{\Delta P \cdot \sigma V}{\mu R}$

亦即 $Q_t = Q_0 - K_b V$

上式亦可轉化為

$$\frac{d^2 t}{dV^2} = K_b \cdot \left(\frac{dt}{dV}\right)^2$$

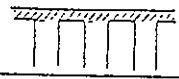

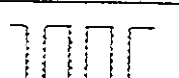
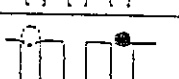
2.5 過濾理論公式歸納：

上述四種不同的薄膜阻塞機構能以下述公式表示

$$\frac{d^2 t}{dV^2} = K \left(\frac{d t}{dV} \right)^n$$

在此公式中之係數 k 和 n 隨著不同的過濾機械作用而變茲摘錄於表 1。

表 1

Filtration principle		n		Linear equation
Cake filtration		0	$K = K_c = \frac{\mu \delta \cdot \dot{p} \cdot s}{\Delta p A (1 - m_s)}$	$\frac{t}{V} = \frac{K_c V}{2} + \frac{1}{Q_0}$
Intermediate blocking		1	$K = K_i = \frac{\delta}{A_0}$	$\frac{t}{V} = K_i t + \frac{1}{Q_0}$
Standard blocking		3/2	$K = K_s = \frac{2 C_v}{L_p A} \frac{1}{Q_0^2}$	$\frac{t}{V} = \frac{K_s t^2}{2} + \frac{1}{Q_0}$
Complete blocking		2	$K = K_b = V_{i0} \delta$	$Q = Q_0 - K_b V$

叁、實驗

3.1 實驗設備

實驗設備概要流程及薄膜濾器詳圖 3，進流水從儲筒底部壓力抽送至薄膜濾器中，大部份進流水迴流至儲筒中，少數則以濾過液過濾出來，本設備並設有繞流系統以控制操作壓力及平行流速。

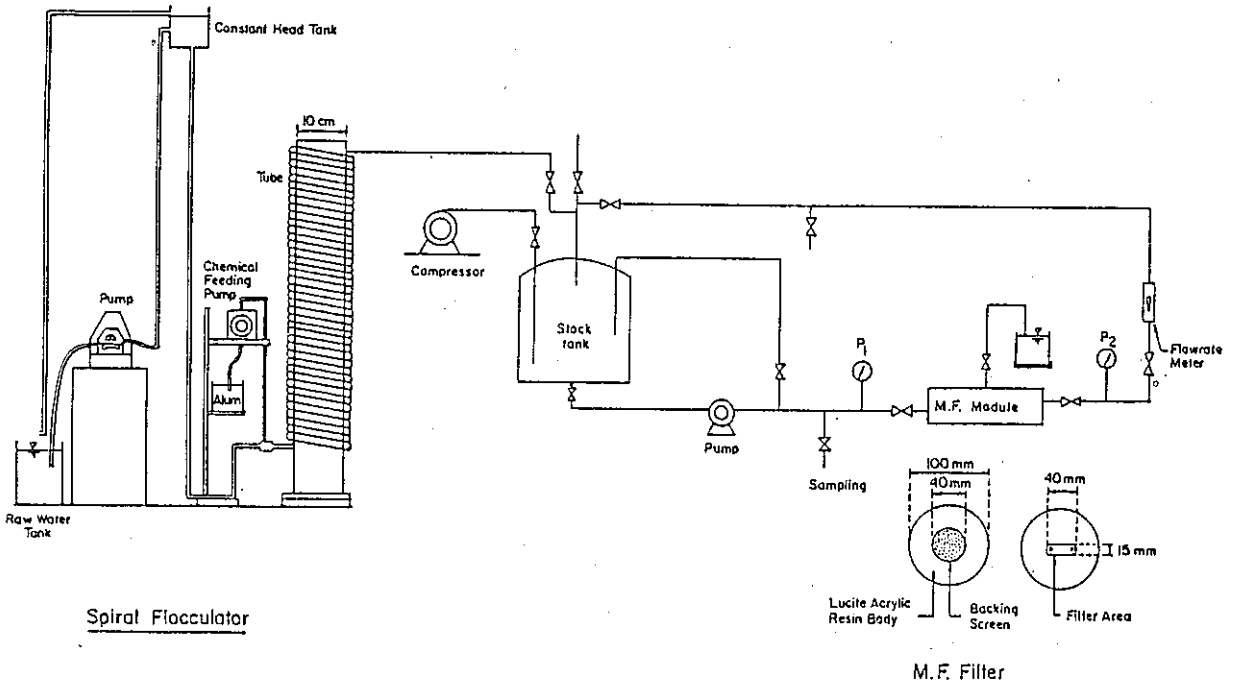


圖 3. 實驗設備配置圖

3.2 懸浮液特性

(1) 高嶺土懸浮液 (Kaolin clay suspension) :

以定量的高嶺土與已知量的水混合後，並以濁度計可求得濁度與高嶺土懸浮液濃度之關係曲線，用以控制懸浮固體物之濃度。不同之粒徑範圍之高嶺土懸浮液可由不同之沉澱時間來控制，茲以未沉澱，經沉澱 2.5 小時、經沉澱 6 小時，可分別求得懸浮固體平均粒徑為 3.0、3.6 和 5.0 μm 。

(2) 乳液懸浮液 (Latex suspension) :

由市售微粒粒徑大小為 0.2 和 0.99 μm 之乳液取代高嶺土做部份之實驗，懸浮液由已知之乳液濃度與水混合而成，並以濁度計可求得濁度與乳液懸浮液濃度之關係曲線。

(3) 廢水水樣 :

本水樣取自泰國曼谷邦肯淨水場快濾池反沖洗廢水，研究以平行流微過濾法處理之可行性，水樣特性如表 3.1。

表 3.1 廢水水質性質

Parameters	Range of values
Temperature	29°C
pH	7.6
Turbidity	300 NTU
Total Solids	1.1 g/l

(4) 膠羽懸浮液

以市售之硫酸鋁 [$\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$] 之溶液為混凝劑，經過螺旋膠凝器 (Spiral Flocculator) (詳圖 3) 與懸浮固體膠凝形成膠羽懸浮液。

3.3 薄膜 :

本實驗所用的薄膜為硝酸纖維素薄膜，孔徑分別為 0.3 μm 、0.45 μm 、0.65 μm 、1.2 μm 、3 μm 、5 μm 和 8 μm ，薄膜直徑為 4.7 cm，厚度為 150 μm 。

3.4 實驗操作 :

本實驗操作分為二部份：

(1) 高嶺土、乳液懸浮液和廢水水樣部份 :

懸浮液及水樣在儲筒中保持一特定壓力下，抽送已知流量之懸浮液及水樣至濾器中，濾過液流量隨著時間變化，並測濾過液水質直至薄膜阻塞為止。本實驗係以在不同的操作條件下 (不同之平行流速，操作壓力，薄膜孔徑，微粒粒徑及濃度等) 研究對薄膜過濾效率影響情形。

(2) 膠羽懸浮液部份 :

高嶺土懸浮液濃度為 100 mg/l，以最佳硫酸鋁加藥量 40 mg/l 通過螺旋膠凝器膠凝之，所形成膠羽之大小以通過螺旋膠凝器管中之流速來控制，而在各種不同流速下，不同的水頭損失可求得不同之 G 值，有關 G 值，管中流速及管徑之經驗公式求得如下： $G = 6.02(v/d)^{1.15}$

，本實驗中控制G 值從25 1/s至 300 1/s，以求得不同之膠羽粒徑如表 3.2。

表 3.2

velocity through the Flocculator tube (cm/s)	G (s ⁻¹)	detention time in Flocculator (min)	average floc size (μm)
3.0	25	20.3	40
9.7	95	6.4	26
18.6	200	3.3	15
26.4	300	2.3	9

肆、結果與討論

4.1 由結果驗證過濾理論

由不同的微粒粒徑，不同的薄膜孔在各種不同之操作條件下所得之數據分析詳如圖 4. 5. 6。
 。以 t/V 對 t ，和 t/V 對 V 繪出之曲線來研究過濾 機構，圖 7 表示 出完全的濾程及將初
 始過濾情形放大比例來研究，由曲線中之直線部份可看出過濾階段中有標準過濾及濾餅過濾之
 過濾機構發生。

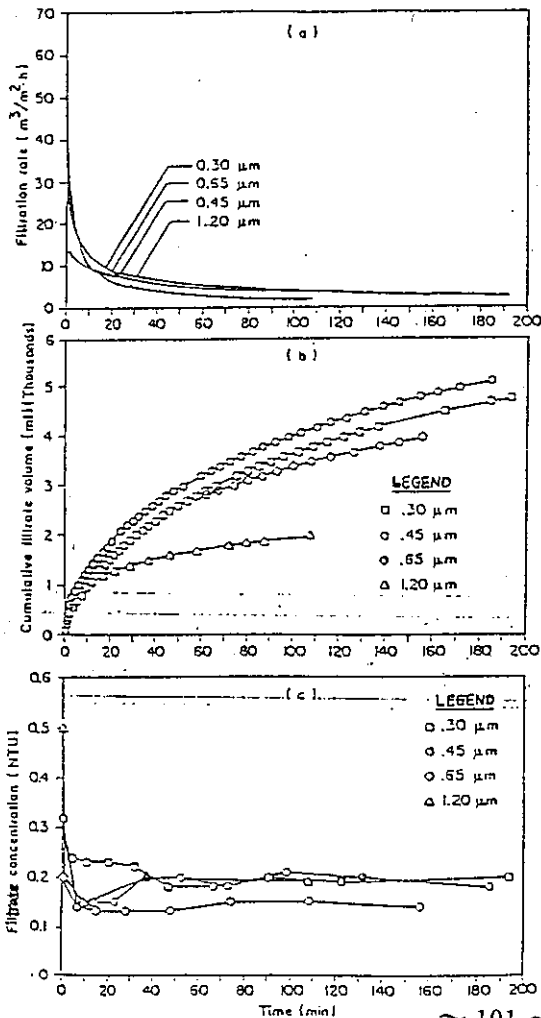


圖 4. 薄膜孔徑不同之影響(a)過濾速率
 (b)過濾速率(c)濾過液濁度；(d_p
 $= 3.6 \mu\text{m}$ ， $C_o = 2.5 \text{mg/L}$ ，
 $v = 2.5 \text{m/s}$ ， $P_1 = 7 \text{psi}$ ， P_2
 $= 2 \text{psi}$ ，kaolin clay Suspension)

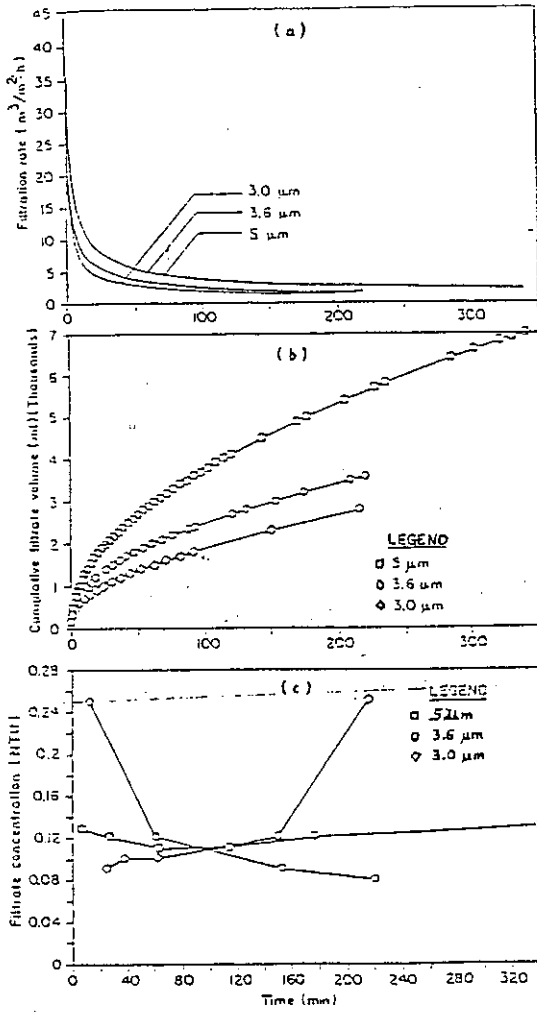


圖 5. 微粒粒徑不同之影響 (a) 過濾速率
 (b) 過濾液累積體積 (c) 過濾液濁度
 ($d_p = 0.5 \mu\text{m}$, $C_0 = 100 \text{mg/L}$,
 $v = 5.37 \text{m/s}$, $P_1 = 24 \text{psi}$,
 $P_2 = 2 \text{psi}$, kaolin clay Suspension)

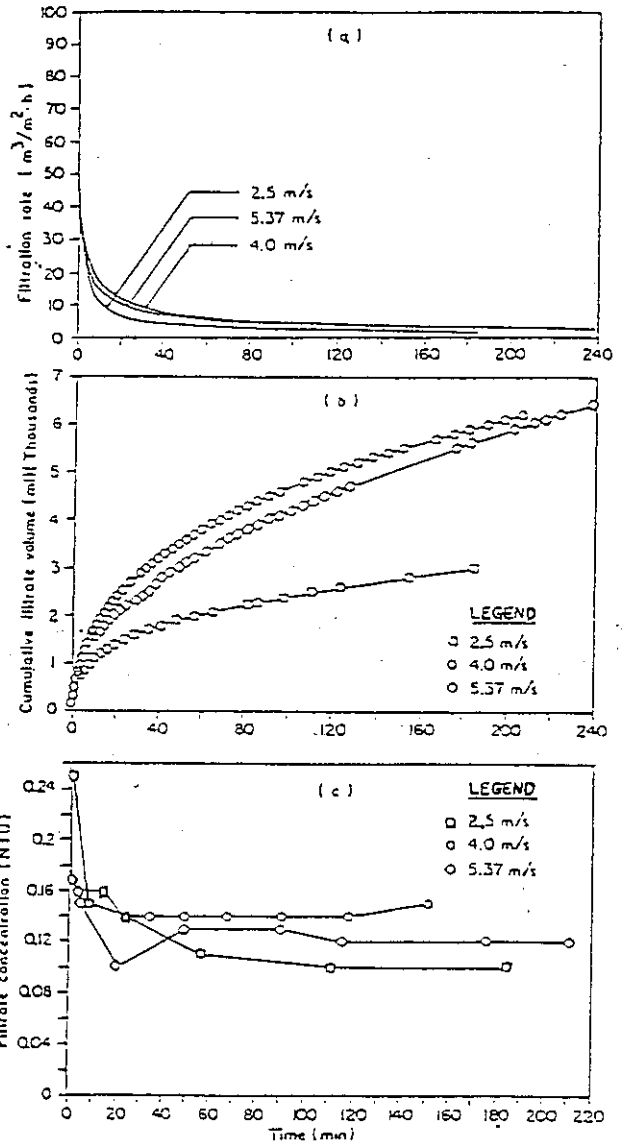


圖 6. 平行流速不同之影響 (a) 過濾速率
 (b) 累積過濾液體積 (c) 過濾液濁度
 ($d_m = 1.2 \mu\text{m}$, $C = 25 \text{mg/L}$,
 $d_p = 3 \mu\text{m}$, $P_1 = 24 \text{psi}$, kaolin
 clay suspension)

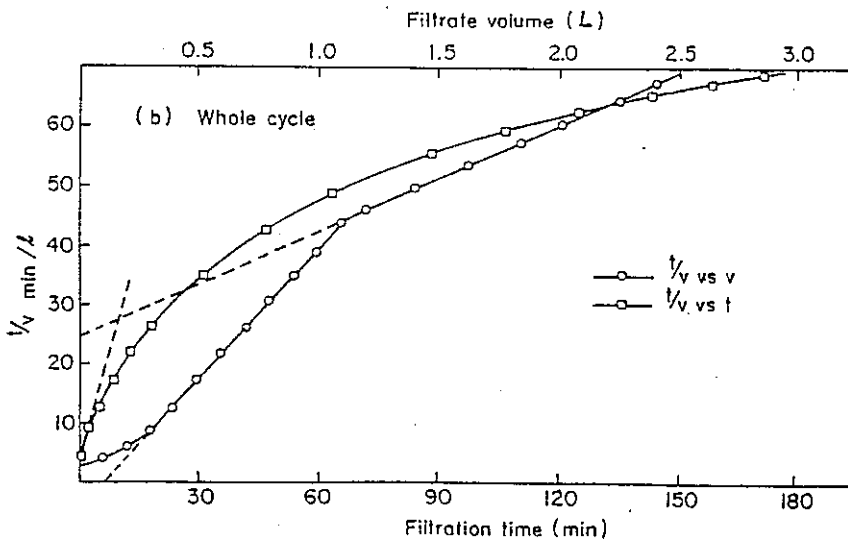
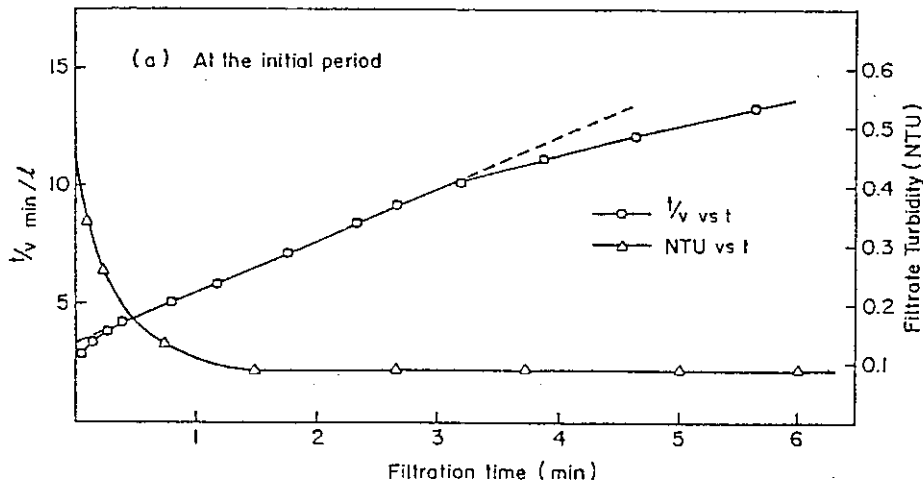


圖 7.過濾行為曲線 ($d_m = 0.3 \mu\text{m}$,
 $d_p = 0.27 \mu\text{m}$, $v_s = 5.37 \text{ m/s}$
 $c_o = 5 \text{ mg/L}$, $\Delta P = 12.5 \text{ psi}$)

一般而言，由所獲得之數據中分析過濾之初始區段既非標準閉塞作用亦非濾餅過濾作用。試以完全閉塞公式應用在初始區段，在所有情形中皆不合，在過濾初始區段中濾過液之濁度較高，尤其所使用薄膜孔徑較大者更是如此，這可能起因於微粒截留程度的快速變化，嗣後濾過液濁度即迅速降低。

由實驗結果所繪出之曲線顯示出整個過濾過程中並非僅有一種過濾機構，而是經歷數種不同的過濾機構，在每一種過濾情況下，過濾區段發展係於初始過濾區段後跟隨著標準閉塞區段，最後則為濾餅過濾區段，而於標準閉塞區段和濾餅過濾區段間夾雜有一轉換區段，

試以中間閉塞過濾公式應用於轉換區段中唯並不適合。在大部份過濾情況下轉換區段範圍均很短，這顯示出其真為一轉換區段而並不符合任何一單獨之過濾機構關係。從 t/V 對 V 和 t/V 對 t 之圖中，吾人可注意到二過濾區段間有一突然斜率變化，這轉換區段起因於斜率的減小或者說是濾餅的阻抗作用較小。

4.2 不同過濾機械作用之係數值

(1) 標準閉塞區段：

在本區段範圍內由實驗結果代入標準閉塞公式 $t/V = K_s/2 \cdot t + 1/Q_0$ ，由繪圖可得斜率 $K_s/2$ 及截距 $1/Q_0$ 之數值如表 4.1，由表中可得知當微粒粒徑為 $0.27\mu m$ 而薄膜孔徑範圍從 $0.3\mu m$ 至 $8\mu m$ ，在薄膜孔徑為 $3.0\mu m$ 時 K_s 值最小，亦即使用孔徑 $3.0\mu m$ 之薄膜時可獲得最大之過濾速率，另截距 $1/Q_0$ 隨著薄膜孔徑增大而減小。

(2) 濾餅過濾區段：

在本區段範圍內由實驗結果代入濾餅過濾公式 $t/V = K_c/2 \cdot V + 1/Q$ 。由繪圖可得斜率 $K_c/2$ 及截距 $1/Q$ 之數值如表 4.1，由表中可得知當微粒粒徑為 $0.27\mu m$ 而薄膜孔徑範圍從 $0.3\mu m$ 至 $8\mu m$ ，而在薄膜孔徑為 $3.0\mu m$ 時平均之 K_c 值為最小，另由表 4.1 中亦可得知當薄膜孔徑不變時，懸浮液中之微粒粒徑愈大所得之 K_c 值愈小。

表 4.1

Membrane pore size (μm)	Particle size (μm)	Solid conc. (ppm)	Straight line (Equ. 2.25)		Straight line (Equ. 2.33)	
			slope, $K_s/2$ (1/L)	intercept $1/Q_0$ (min/L)	slope, $K_c/2$ (min/L)	intercept $1/Q$ (min/L)
0.3	0.27	5	2.21	3.25	0.73	- 4.50
0.65	0.27	5	0.84	3.60	0.29	+24.80
1.2	0.27	5	0.64	2.80	0.27	- 0.67
3.0	0.27	5	0.48	1.60	0.20	+ 1.25
5.0	0.27	5	0.73	1.00	0.19	+ 2.75
8.0	0.27	5	0.48	1.60	0.15	- 2.75
0.3	0.99	5	1.83	2.15	0.16	- 5.75
0.3	3.5	100	1.01	3.60	0.19	- 0.47
0.3	5.0	100	0.48	3.30	0.17	0
					0.18	- 2.25
					0.17	+ 2.25
					0.34	- 4.50
					0.32	+ 5.50
					0.30	- 9.50
					0.15	- 2.00

4.3 應用於過濾池反沖洗廢水之處理

爲了研究以平行流微過濾法處理及回收快濾池反沖洗廢水之可行性，水樣取自泰國曼谷邦肯淨水場之快濾池反沖洗廢水（其水質特性詳表 3.1），並完成二組實驗如下所述：

(1) 平行流速之影響

由圖 8 中以三種不同之平行流速 5.0m/s、4.0m/s 和 2.5m/s 進行實驗分析，因反沖洗廢水總固體物含量及濁度甚高以致造成薄膜之快速阻塞，而在此三種不同平行流速操作下其濾過液之濁度幾乎相同，而濾過液之體積隨著平行流速之增大而增加。

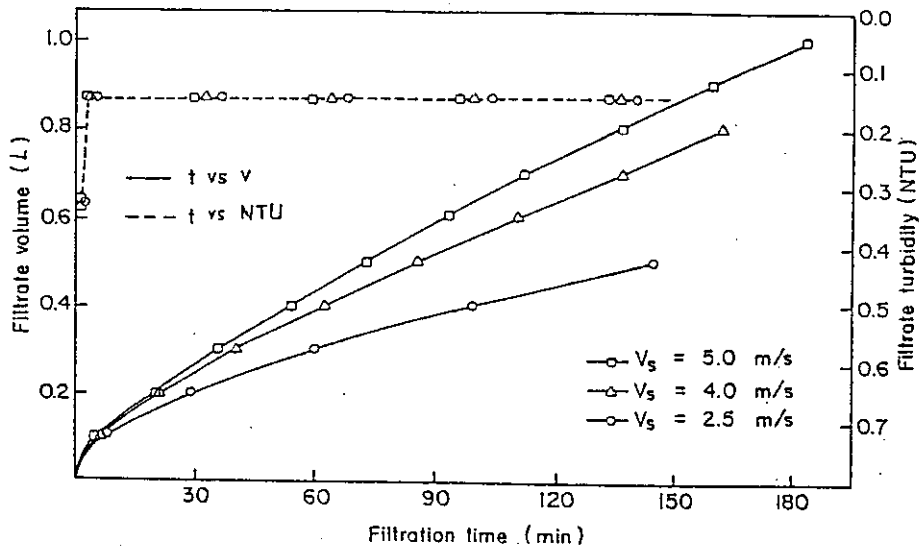


圖 8. 平行流速不同之影響 ($d_m = 0.65 \mu\text{m}$, $\Delta p = 13.0 \text{ psi}$
Turbidity = 300 NTU, TS = 1.1 g/l)

(2) 薄膜孔徑之影響：

圖 9 之結果顯示出在四種不同之薄膜孔徑 0.3 μm 、0.45 μm 、0.65 μm 和 1.2 μm ，於孔徑 0.45 μm 時可得最大之濾過液體積，另在此四種不同之薄膜孔徑所得之濾過液濁度相同。

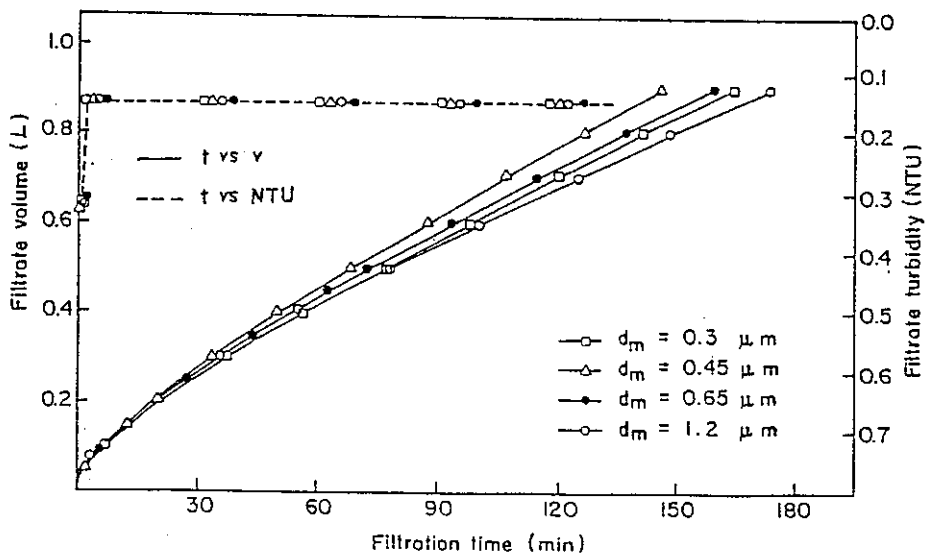


圖 9. 薄膜孔徑不同之影響 ($V_s = 5.0 \text{ m/s}$, $\Delta P = 13.0 \text{ psi}$
Turbidity = 300 NTU, TS = 1.1 g/l)

(3)經濟性：

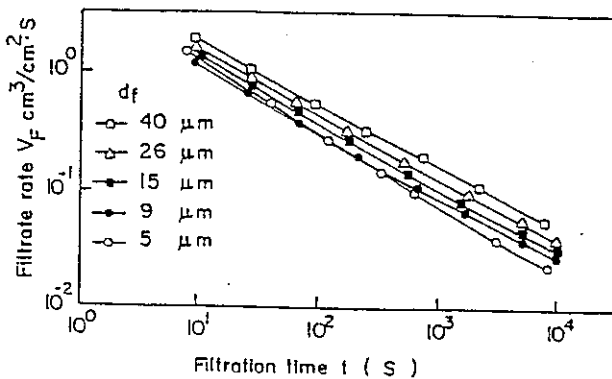
由圖8 數據推算出當操作壓力為 13psi 情況下可得之最大過濾速率約為 0.6m/h，此過濾速率雖然比傳統快濾池之過濾效率小得多，但緊密的薄膜組合體卻有很大的過濾表面積如螺旋纏繞體 (Spiral wound type) 或中空纖維體 (Hollow fibre type)，其組合而成之薄膜處理單元在濾過液體積及濁度上可得到令人滿意之效果，將此應用在自來水淨水場處理方面，尤其是應用在快濾池之反沖洗廢水之處理上可提供一個很好的選擇。

伍、結論

由實驗結果可獲得一結論在濾程進程序中包含有數種不同的過濾機構，其順序分別為初始區段，標準閉塞區段、轉換區段和濾餅過濾區段，以荷曼斯和布雷迪所提出四種型式之過濾機構中，僅有標準閉塞理論和濾餅過濾理論能應用在薄膜過濾濾程之特定區段中。另上述四種過濾理論則均無法應用解釋濾程中初始過濾區段和轉換區段。

在濾程中標準閉塞區段很短，且隨薄膜特性，懸浮微粒特性和操作之變數而變，在此區段開始時濾過液之濁度降低且在後續濾程中均維持不變，而完全閉塞機構及中間閉塞機構在本實驗中則未曾發現。

由實驗結果可知 (圖10) 以膠凝為前處理可增大微粒粒徑可得較大之濾過液體積及較佳之濾過液水質，故可將此應用於處理快濾池之反沖洗廢水上，以膠凝為前處理，並選擇適當薄膜孔徑之濾膜組合體，在適當之操作壓力差及平行流速下，將可得良好之效果，又因薄膜組合體體積小但其過濾表面積卻很大，故將平行流微過濾法應用於淨水、廢水處理單元中，可大幅節省處理廠所需面積，且經處理之濾過水水質良好且穩定，而今薄膜材質正不斷的開發改進，成本亦將降低，故可預測未來平行流微過濾法將為淨水及廢水處理技術的主流。



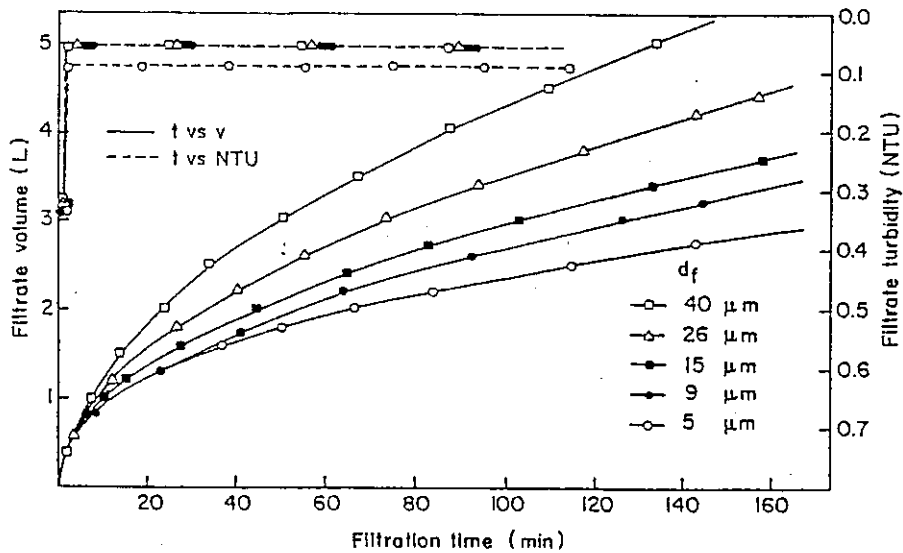


圖10.膠羽粒徑不同之影響 ($d_m = 1.2 \mu m$, $v_s = 4.0 m/s$
 $C_0 = 100 mg/l$, $A_p = 8.5 psi$)

陸、誌謝

本研究承蒙 Prof. R. Ben Aim, Institute of Filtration and Solid-Liquid Separation Techniques, France 提供MF 的實驗器材, 及曼谷邦肯淨水場主管人員允許拿取廢水水樣, 在此敬致謝忱。

柒、參考文獻

REFERENCES

- BENAIM, R. and VIGNESWARAN, S. (1986), Application of Membrane Separation Technology to Water and Wastewater Treatment, AIT Seminar, Bangkok.
- BHATTACHARYA, D. (1978), Ultrafiltration of Complex Wastewaters, Journal WPCF, Vol.50, No.5, pp.846-861.
- FISCHER, E. and RAASCH, J. (1986), Model Tests of the Particle Deposition at the Filter Medium in Cross-Flow Filtration, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universität Karlsruhe, D., World Filtration Congress, Belgium.
- GOLDSMITH, R.L. (1971), Macromolecular Ultrafiltration with Microporous Membrane, Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol.10, No.1, pp.113-120.
- GRACE, H.P. (1953), Resistance and Compressibility of Filter Cakes, Chem. Eng. Prog., Vol.49, No.7, pp.367-377.
- GRACE, H.P. (1956), Structure and Performance of Filter Media, A.I.Ch.E Journal, Vol.2, No.3, pp.307-336.
- GUENNEC, B.L. and MILISIC, V. (1985), Hydrodynamic Model Cross-Flow Filtration Unit, Institut de Mecanique des Fluids de Toulouse., A Personal Communication.

- GUENNEC, B.L., KLABRA, W. and MILISIC, V. (1986), An Engineering Approach to Cross Flow Filtration Modelling, Institut de Mecanique des Fluides de Toulouse.
- HERMANS, P.H. and BREDEE, H.L. (1936), Principles of the Mathematical Treatment of Constant Pressure filtration, JSCI Transactions and Communications, Vol.55, pp.T1-T4.
- HUTTO, F.B. (1957), Distribution of Porosity in Filter Cake, Chem. Eng. Prog., Vol.53, No.7, pp.328-331.
- JOHNSTON, P.R. and BEALS, D.L. (1980), Constant-Pressure Liquid Filtration; Mathematical Model for Fast Plugging of the Filter Medium, JTEVA, Vol.8, No.2, pp.57-62.
- KANE, E.D. (1953), Microfiltration with Resin-Impregnated Wool Filters, Ind. Eng. Chem., Vol.45, No.4, pp.860-864.
- KOTIWITZ, F.A. and BOYLAN, D.R. (1958), Prediction of Resistance in Constant Pressure Cake Filtration, A.I.Ch.E Journal, Vol.4, No.2, pp.175-180.
- KRONER, K.H., SCHUTTE, H., HUSTEDT, H. and KULA, M.R. (1984), Cross Flow Filtration in the Downstream Processing of Enzymes, Process Biochemistry, Vol.19, No.2, pp.67-74.
- LE, M.S. and ATKINSON, T. (1985), Cross-Flow Microfiltration for Recovery of Intracellular Products, Process Biochemistry, Vol.20, No.1, pp.26-31.
- MILISIZ, V. and BENAÏM, R. (1986), Developing a Better Understanding of Cross-Flow Microfiltration, Filtration and Separation.
- NOR, T. (1982), Scour Model for Ultrafiltration of Suspension, Proceedings of the 2nd ASEAN Workshop on Membrane Technology, Bangkok.
- PERRY, R.H. and GREEN, D.W. (1984), Perry's Chemical Engineering Handbook, McGraw-Hill Book Company, 16th Edition.
- PORTER, M.C. (1972), Concentration Polarization with Membrane Ultrafiltration, Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop., Vol.11, No.3, pp.234-248.
- PURCHAS, D. (1981), Solid-Liquid Separation Technology, Croydon Eng., Uplands Press.
- REED, R.H. and BELFORD, G. (1982), Characterization of Fouling Potential for Pressure-Driven Membrane Process, A New Simulated Flow Cell, Wat. Sci. Tech., Vol.14, pp.499-522.
- RUTH, B.F., MONTILLOW, G.H. and MONTONNA, R.E. (1933), Studies in Filtration, Ind. Eng. Chem., Vol.25, No.1, pp.76-82.
- SETIADI, T. (1985), Flocculation Study on Spiral Flocculator, AIT Thesis, No. EV-85-14, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- TILL, F.M. (1953), The Role of Porosity in Filtration, Chem. Eng. Prog., Vol.49, No.9, pp.467-474.
- TILL, F.M. (1966), Filtration Theory Today, Chem. Eng., Vol.73, No.2, pp.151-162.
- TORREY, S. (1981), Membrane and Ultrafiltration Technology, Chem. Tech. Rev., No.226.
- RIPPERGER, S. (1987), Microfiltration Units for Water and Wastewater Treatment. Water, wastewater and Sludge Filtration, CRC Press (to be published).