

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 生活與應用科學科

040811

『酯難行鈦』—以固態酸催化酯化反應生成生質
柴油的研究與探討

學校名稱：國立新竹高級中學

作者： 高二 黃功詳 高二 尹浩瑋	指導老師： 林健志
---------------------------------	------------------

關鍵詞：固態酸、酯化反應、二氧化鈦

摘要

我們利用硫酸涵浸之固態酸 TiO_2 奈米管催化酯化反應，最佳涵浸硫酸濃度為 0.1M，最佳加熱時間為 18 小時，轉化率可達 90%，重複使用六次後轉化率仍可達 70%，再使用過錳酸鉀強氧化劑提升其催化效率及次數，可使用達十五次，轉化率仍維持 70% 以上。

壹、研究動機

TiO_2 奈米管為廣為人知的光觸媒，在照射特定波長的紫外光後，會產生電子-電洞對，市面上最常用於太陽能電池、自潔器材等原料，但「有機反應的固態催化劑」在國內卻少有研究。酸催化劑對設備有腐蝕作用，反應後難從反應物中分離，且後處理過程易造成環境污染，而鹼催化劑易生成皂化反應，相對成本較高。隨著石化能源的消耗殆盡，許多新興的替代能源不斷出現，如：太陽能、風力、水力、潮汐、生質能源等。由於技術及資金的問題，以上提到的替代能源都需要一些較為精密及貴重的儀器。因此，我們選擇方便及低成本的固態酸 TiO_2 奈米管催化油酸與甲醇的酯化反應以製造生質柴油。

貳、研究目的

- 一、探討替代濃硫酸作為油酸酯化反應之催化劑的固態酸 TiO_2 奈米管製備
- 二、探討及比較濃硫酸及固態酸 TiO_2 奈米管催化油酸酯化反應的最佳時間、濃度、使用次數及轉化率
- 三、探討回收固態酸 TiO_2 奈米管催化油酸酯化反應使用次數及轉化率關係
- 四、探討過錳酸鉀強氧化劑活化使用後之固態酸 TiO_2 奈米管催化油酸酯化反應使用次數及轉化率關係

參、研究設備及方法

一、理論推演與文獻探討：

由參考資料得知，固態酸具容易回收、可重複使用等特性，且可應用於催化有機化學反應。我們查閱文獻時，得知在製備固態酸 TiO_2 奈米管的過程中，可使用硫酸涵浸 (impregnation)，並應用於生質柴油之製備。生質柴油通常是以鹼性物質為催化劑，使原料油酸與醇類進行酯化反應，副產品為甘油及水。但是，鹼催化製程的催化劑回收困難，須在無水條件下反應，否則強鹼易與游離脂肪酸產生皂化反

應，而以液體酸為催化劑則不易回收，因此，我們嘗試製作固態酸 TiO₂ 奈米管，作為油酸酯化反應之催化劑以製造生質柴油。

二、藥品與器材：

(一).藥品：

銳鈦礦 TiO ₂ (粉末 (試藥級))	品牌：德國 Aldrich 公司
氫氧化鈉 NaOH (試藥級)	品牌：日本 島久藥品株式會社
矽油	品牌：臺灣 景明化工
安息香酸	品牌：WAKOPURE (和光純藥)
氫氧化鉀 KOH (試藥級)	品牌：島久、和光、片山
甲醇 (CH ₃ OH)	品牌：日本 島久藥品株式會社
乙醇 (C ₂ H ₅ OH) 95%	品牌：台灣 菸酒公賣局
乙醚 (C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅)	品牌：島久藥品株式會社
酚酞	品牌：第一化工原料股份有限公司
12.00M 鹽酸 (HCl)	品牌：島久藥品株式會社
18.00M 濃硫酸 (H ₂ SO ₄)	品牌：島久藥品株式會社
油酸	品牌：第一化工原料股份有限公司
過錳酸鉀 (KMnO ₄)	品牌：第一化工原料股份有限公司

(二).器材：

電子天平(0.001g)-----	1 臺
電磁加熱攪拌器-----	1 臺
鐵架-----	2 座
PFA 瓶(Polytetrafluoroethene)-----	1 個
水銀溫度計-----	1 支
攪拌匙-----	2 個
2L 燒杯-----	1 個
抽濾機-----	1 臺
2L 抽濾瓶-----	1 個
6 號濾紙-----	1 盒
5 號濾紙-----	1 盒
研鉢-----	1 個
煅燒箱-----	1 臺

塑膠吸量管-----1 支
錐形瓶-----1 個
攪拌器-----1 臺

(三). 試藥配製：

1. 配製 10.00M NaOH 溶液於 PFA 瓶中，將其冷卻至室溫。
2. 配製 0.10M HCl 溶液 1500mL。
3. 配製 0.10M KOH 溶液
4. 分別配製 0.05 M、0.10 M、0.50 M、1.0 M、2.0 M H₂SO₄ 溶液

肆、 研究過程及方法

一、 製備固態酸 TiO₂ 奈米管

(一). 目的：製備高純度的固態酸 TiO₂ 奈米管

(二). 實驗步驟：

1. 秤重 1.500g 的銳鈦礦 TiO₂ 粉末倒入裝有 10.00M 600mL 的 NaOH 溶液於 1L 的 PFA 瓶內，以水熱法在 110⁰C 的矽油中加熱攪拌至內容物未再沉澱後，冷卻至室溫
2. 取出溶液加水至 2000mL，用攪拌器攪拌 60 分鐘，抽氣過濾
3. 將水洗抽濾後的濾餅倒入 1500mL 的 0.10M 鹽酸中，用攪拌器攪拌 30 分鐘，之後再用濾紙抽氣過濾，此時成分為 H₂Ti₃O₇
4. 將過濾後的濾餅加水至 1500mL，用攪拌器攪拌 30 分鐘，抽氣過濾
5. 將濾餅放入烘箱中以 110⁰C 固定溫度下烘 12 小時後，取出研磨
6. 將 H₂Ti₃O₇ 粉末研磨並以 30 mL 之 0.05M 硫酸溶液涵浸
7. 重複步驟 1 至 6，並將 H₂Ti₃O₇ 粉末分別以 0.10M、0.50M、1.0M、2.0M 之硫酸涵浸
8. 改質煅燒：將含有 SO₄²⁻ 的 H₂Ti₃O₇ 粉末放入坩鍋中，再放入高溫爐，以每分鐘上升 1⁰C 的溫度梯度由 110⁰C 升溫至 400⁰C 後，煅燒 3 小時後，自然降溫至常溫



TiO₂ 奈米管之硫酸涵浸圖



TiO₂ 奈米管水熱法裝置



酸洗、水洗抽濾裝置圖

二 A、以硫酸催化酯化反應

(一). 目的：分別以 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 濃硫酸催化油酸進行酯化反應，尋找最佳加熱時間並計算油酸甲酯的轉化率

(二). 實驗步驟：

1. 秤量油酸 20.000g、甲醇 13.800g、濃硫酸（18.00M）0.200g 加入 250mL 燒瓶（油酸與甲醇莫耳數比為 1：6）並放入攪拌磁石
2. 用電磁加熱攪拌器將裝置開始加熱至 55°C 後分別計時 12、24、36、48、60、72、84、96、108、120 小時取出

3. 分離油酸甲酯與水
4. 改變硫酸重量分別為 0.400g、0.600g、0.800g、1.000g 並改變加熱時間，重複步驟 1 至步驟 3

二 B、以固態酸 TiO_2 奈米管催化酯化反應

(一). 目的：以 1.17% TiO_2 奈米管催化油酸進行酯化反應

(二). 實驗步驟：

1. 秤量油酸 20.000g、甲醇 13.800g、以 0.05M 硫酸涵浸之固態酸 TiO_2 奈米管 0.400g，加入 250mL 燒瓶（油酸與甲醇莫耳數比為 1：6）並放入攪拌磁石
2. 用電磁加熱攪拌器將裝置開始加熱至 55°C 後分別計時 6、12、18、24 小時後取出
3. 以離心機分離固態酸 TiO_2 奈米管與油酸甲酯、水
4. 分別改用 0.10M、0.50M、1.0M、2.0M 硫酸涵浸之固態酸 TiO_2 奈米管 0.400g，重複步驟 1 至步驟 3

三、以回收後固態酸 TiO_2 奈米管催化酯化反應

(一). 目的：以上述實驗二 B 第 3 步驟所分離出之固態酸 TiO_2 奈米管持續催化油酸進行酯化反應，探討其使用次數及轉化率關係

(二). 實驗步驟：

1. 秤量油酸 20.000g、甲醇 13.800g、實驗二 B 第 3 步驟取出之固態酸 TiO_2 奈米管，加入 250mL 燒瓶（油酸與甲醇莫耳數比為 1：6）並放入攪拌磁石
2. 用電磁加熱攪拌器將裝置開始加熱至 55°C 後開始計時，以實驗二 B 最佳加熱時間進行酯化反應後取出
3. 以離心機分離固態酸 TiO_2 奈米管與油酸甲酯、水分離
4. 重複步驟 1 至步驟 3

四、以過錳酸鉀強氧化劑活化使用後之固態酸 TiO_2 奈米管

(一). 目的：探討使用後之固態酸 TiO_2 奈米管之使用次數及轉化率關係

(二). 實驗步驟：

1. 將 1.185g KMnO_4 、1.103g H_2SO_4 、30ml H_2O 、實驗三回收之固態酸 TiO_2 奈米管及攪拌磁石置入 50ml 燒杯中
2. 以磁石攪拌機攪拌 10 分鐘
3. 以離心機將固態酸及反應後的溶液分離
4. 以回收後的固態酸 TiO_2 奈米管進行實驗四之步驟

五、檢測油酸甲酯之酸價

(一). 目的：計算轉化率

(二). 實驗步驟：

1. 配製 KOH 酒精溶液以滴定油酸甲酯(5.611g KOH 加入 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 至 50mL 容量瓶)。
2. 以 KOH 酒精溶液滴定油酸甲酯 (滴定油酸甲酯 10g + 乙醇 25mL + 乙醚 25mL+兩滴酚酞)。
3. 以 KOH 酒精溶液做空白滴定 (滴定 10g H_2O +乙醇 25mL +乙醚 25mL+兩滴酚酞)。
4. 測油酸甲酯酸價並計算轉化率

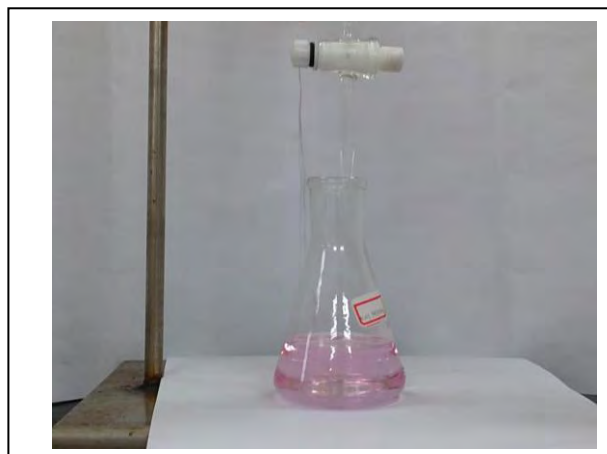
A：反應物或生成物之 KOH 溶液消耗量

B：空白滴定 KOH 溶液消耗量

N：KOH 溶液濃度

$$\text{酸價} = \frac{(A - B) * N * \text{KOH 分子量}}{\text{樣品重(g)}}$$

$$\text{轉化率} = \frac{\text{反應物之酸價} - \text{生成物之酸價}}{\text{反應物之酸價}} \times 100\%$$



油酸甲酯滴定

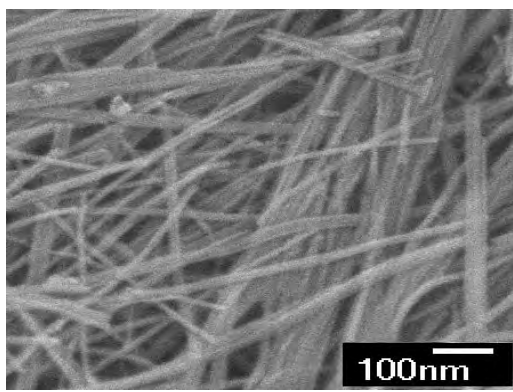
伍、 研究結果與討論

一、 製備固態酸 TiO₂奈米管

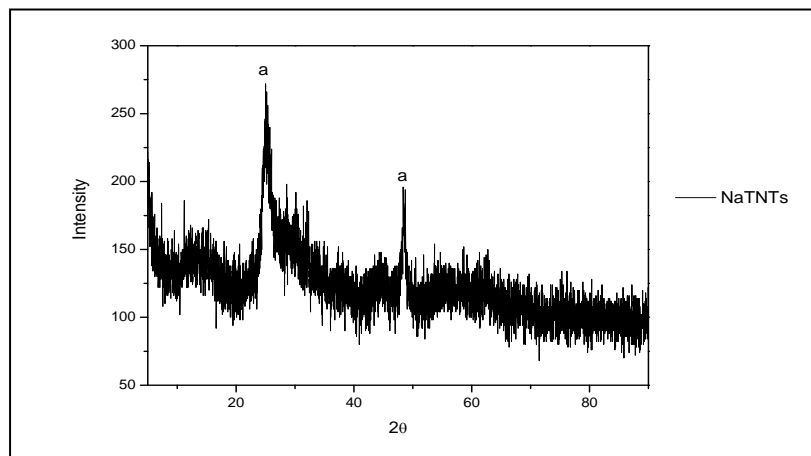
(一).結果：平均 1.582 g

▼表 1 TiO₂奈米管煅燒所得重量

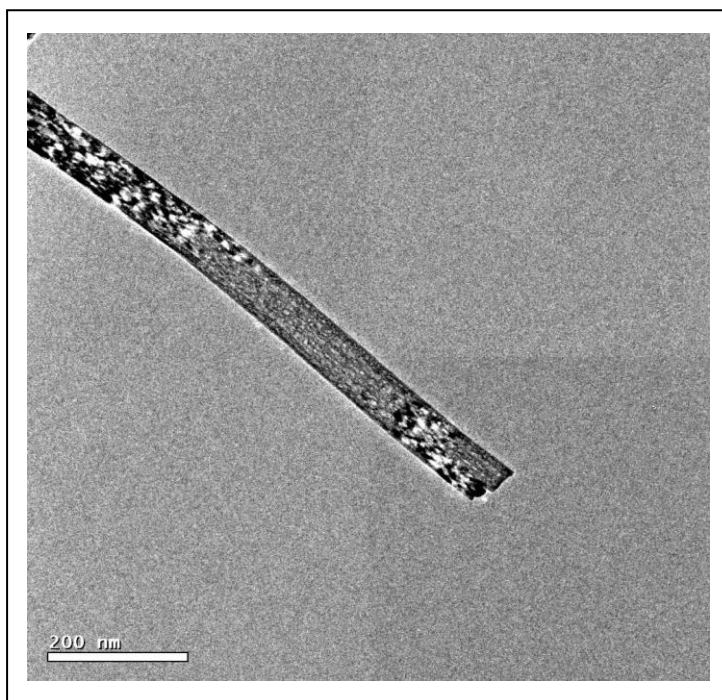
次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
重量 (g)	1.475	1.369	1.773	1.592	1.689	1.584	1.566	1.360	1.578	1.836



TiO₂奈米管 SEM 圖片 (5 萬倍)



TiO₂奈米管在 400°C
煅燒後的 XRD 圖
形；標 a 處為銳鈦礦
訊號。



TiO₂ 奈米管 TEM 圖片
(5 萬倍)

(二). 討論

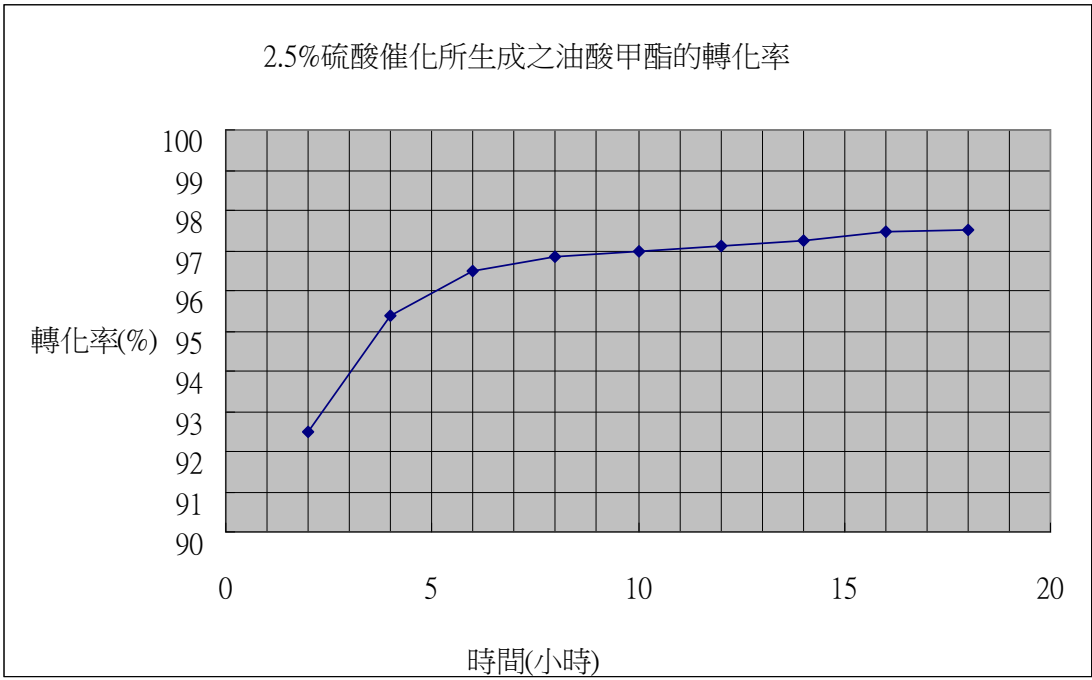
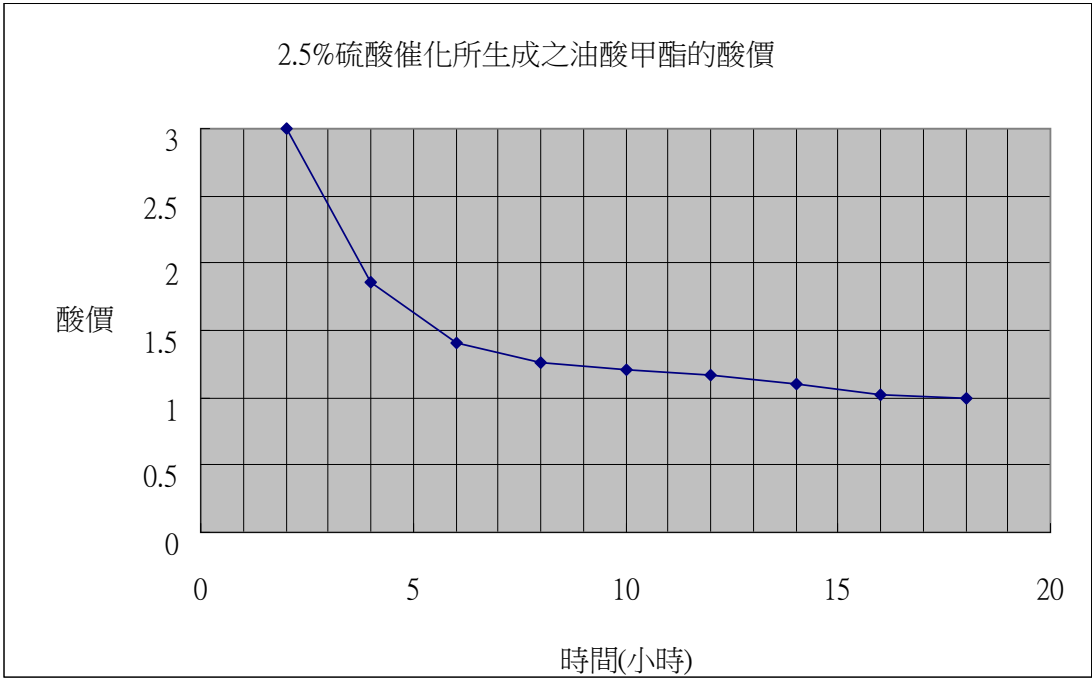
由數據可知，在實驗結束後，我們所得的固態酸 TiO₂ 奈米管的平均重量和反應物是差不多的，顯示只要擁有高中實驗室的儀器及裝置，就可以大量且快速的生產固態酸 TiO₂ 奈米管。

二 A、以硫酸催化酯化反應

(一). 結果：

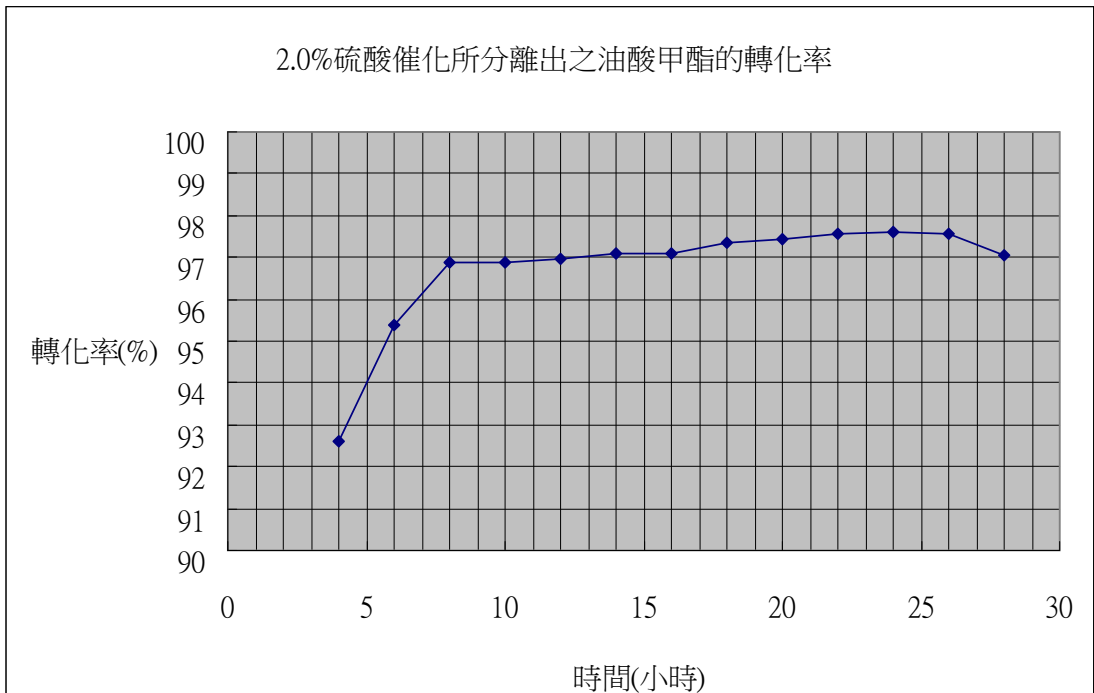
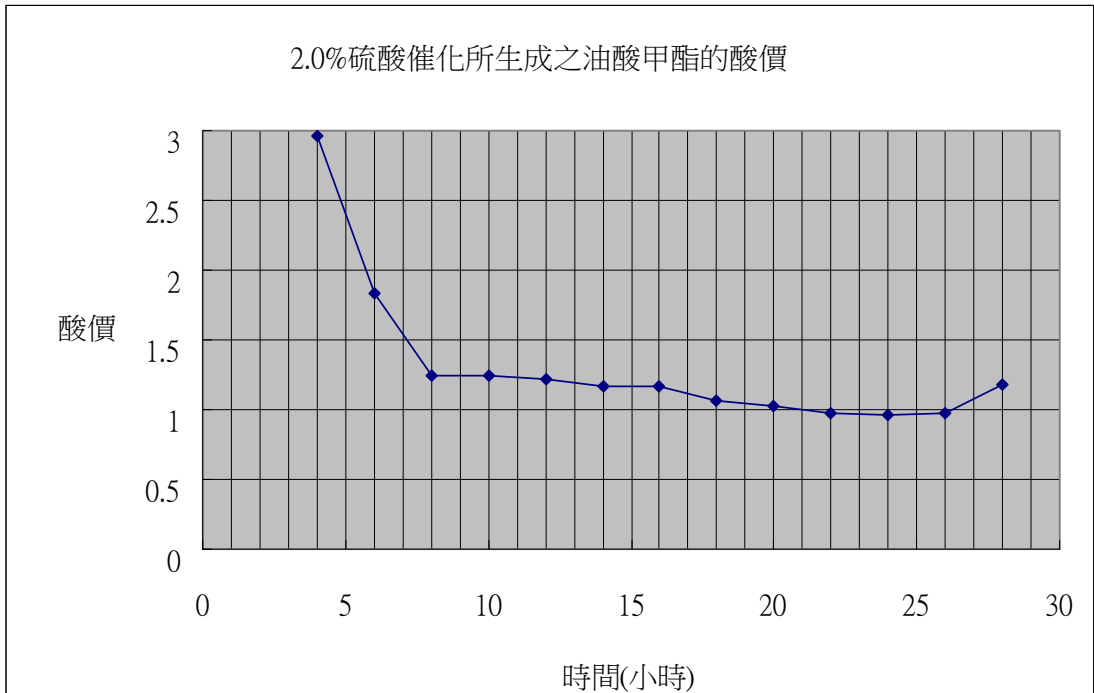
▼表 2 不同時間下 2.5%硫酸催化酯化反應生成之油酸甲酯的酸價與轉化率

加熱時數	2 小時	4 小時	6 小時	8 小時	10 小時
酸價	2.999	1.855	1.413	1.255	1.214
轉化率 (%)	92.508	95.365	96.469	96.865	96.966
加熱時數	12 小時	14 小時	16 小時	18 小時	
酸價	1.162	1.107	1.021	1.001	
轉化率 (%)	97.096	97.235	97.450	97.500	



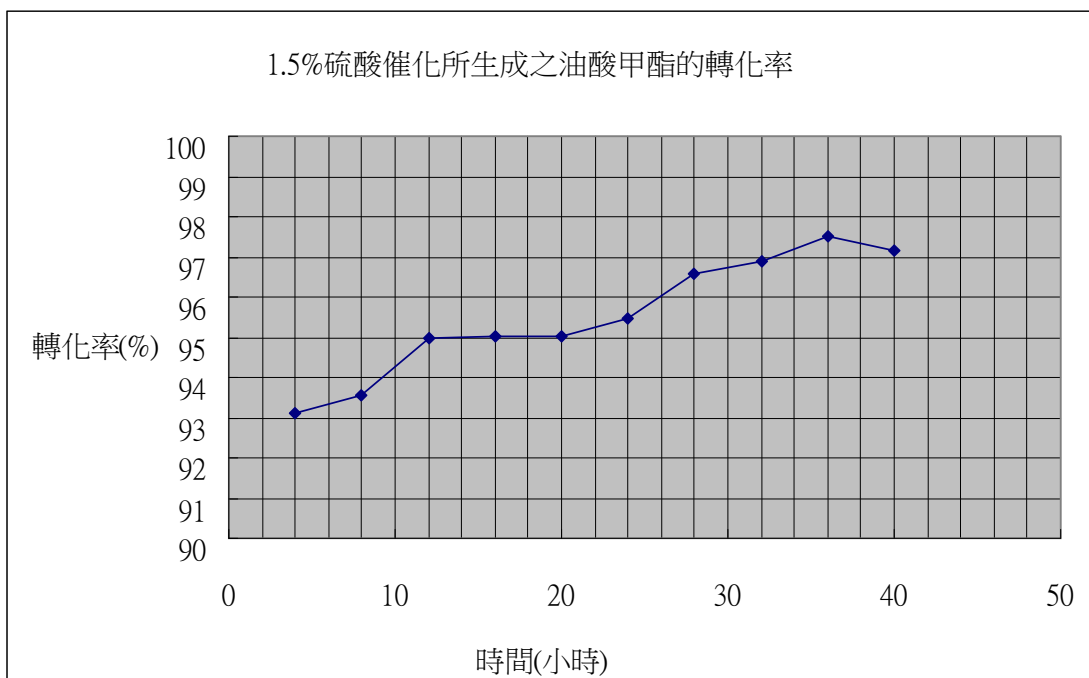
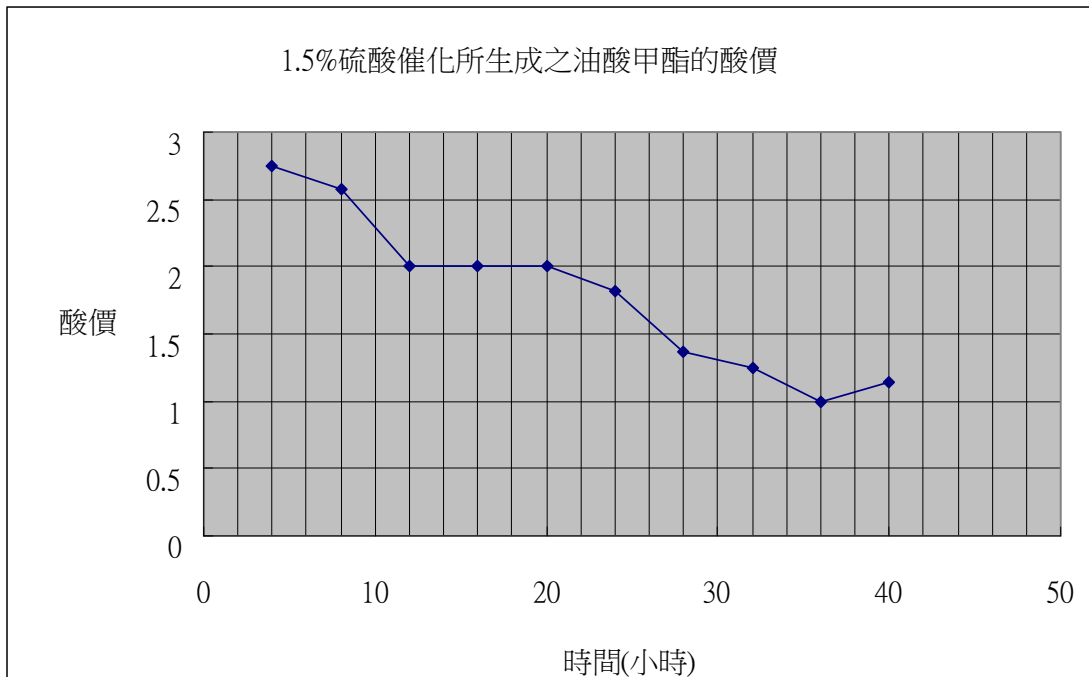
▼表 3 不同時間下 2%硫酸催化酯化反應生成之油酸甲酯的酸價與轉化率

加熱時數	4 小時	6 小時	8 小時	10 小時	12 小時	14 小時
酸價(mole/kg)	2.963	1.839	1.247	1.245	1.220	1.162
轉化率 (%)	92.596	95.405	96.884	96.890	96.953	97.085
加熱時數	16 小時	18 小時	20 小時	22 小時	24 小時	26 小時
酸價(mole/kg)	1.167	1.063	1.021	0.978	0.960	0.971
轉化率 (%)	97.345	97.450	97.556	97.602	97.574	97.059



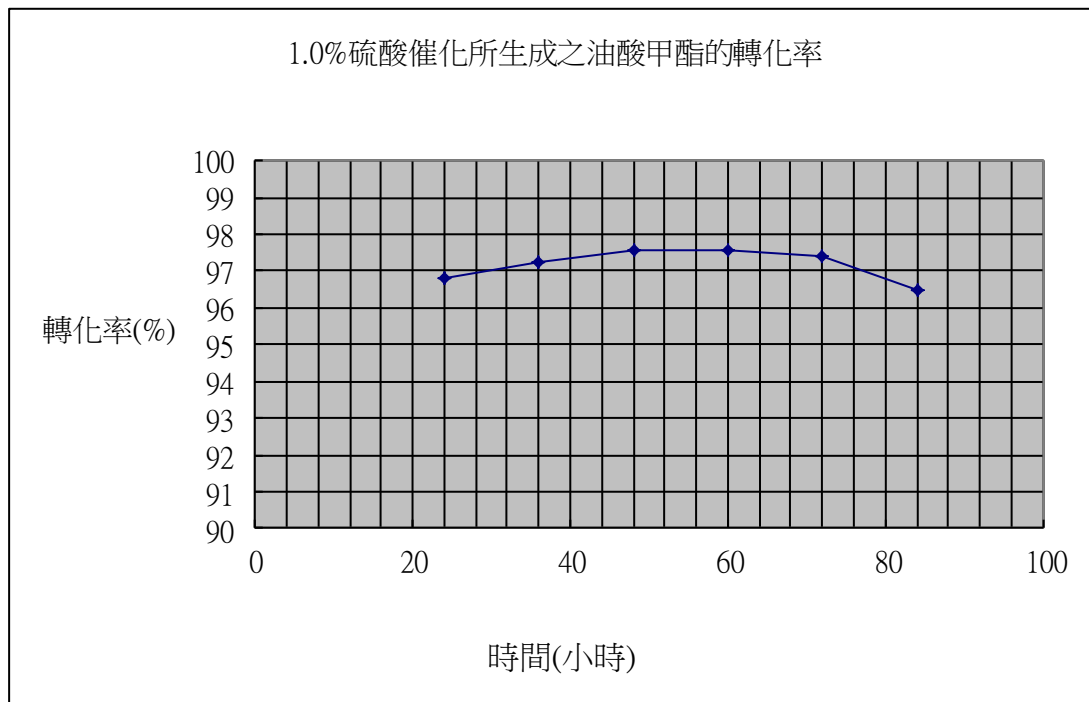
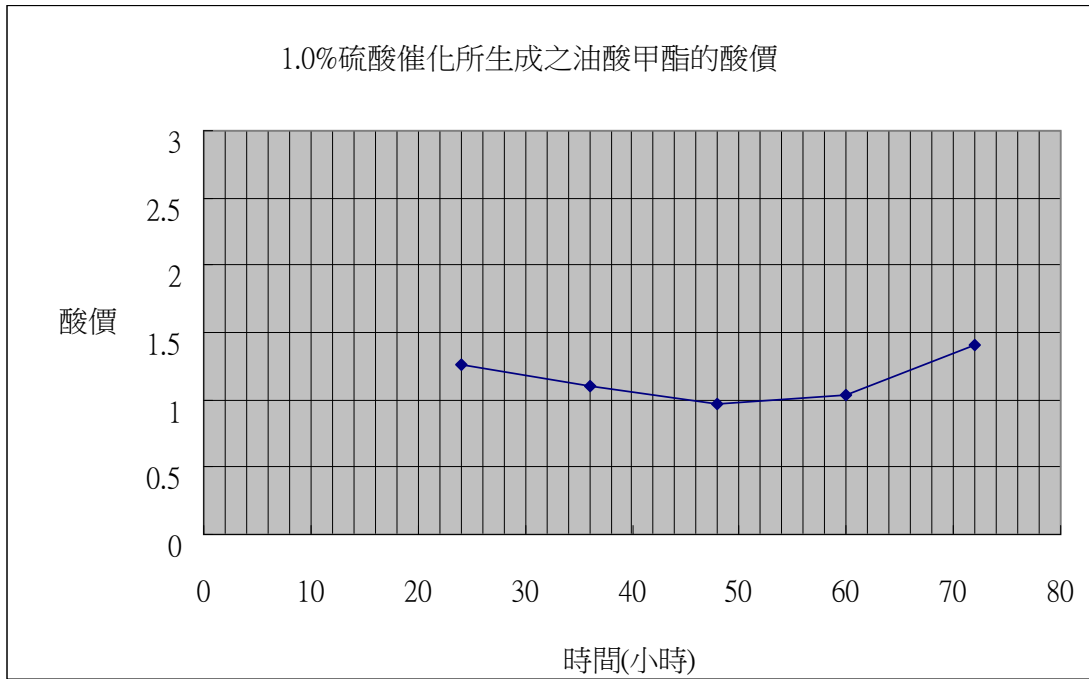
▼表 4 不同時間下 1.5%硫酸催化酯化反應生成之油酸甲酯的酸價與轉化率

加熱時數	4 小時	8 小時	12 小時	16 小時	20 小時
酸價	2.775	2.655	2.057	2.331	1.994
轉化率 (%)	93.123	93.568	94.999	95.004	95.007
加熱時數	24 小時	28 小時	32 小時	36 小時	40 小時
酸價	1.865	1.429	1.251	1.071	1.149
轉化率 (%)	95.453	96.589	96.888	97.520	97.134



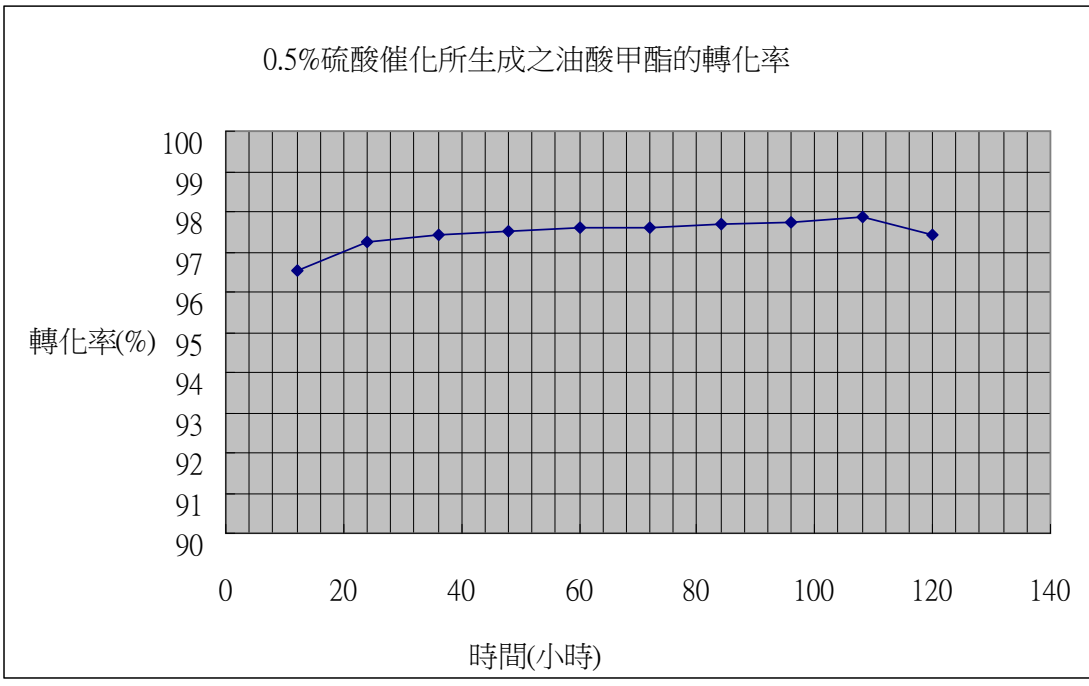
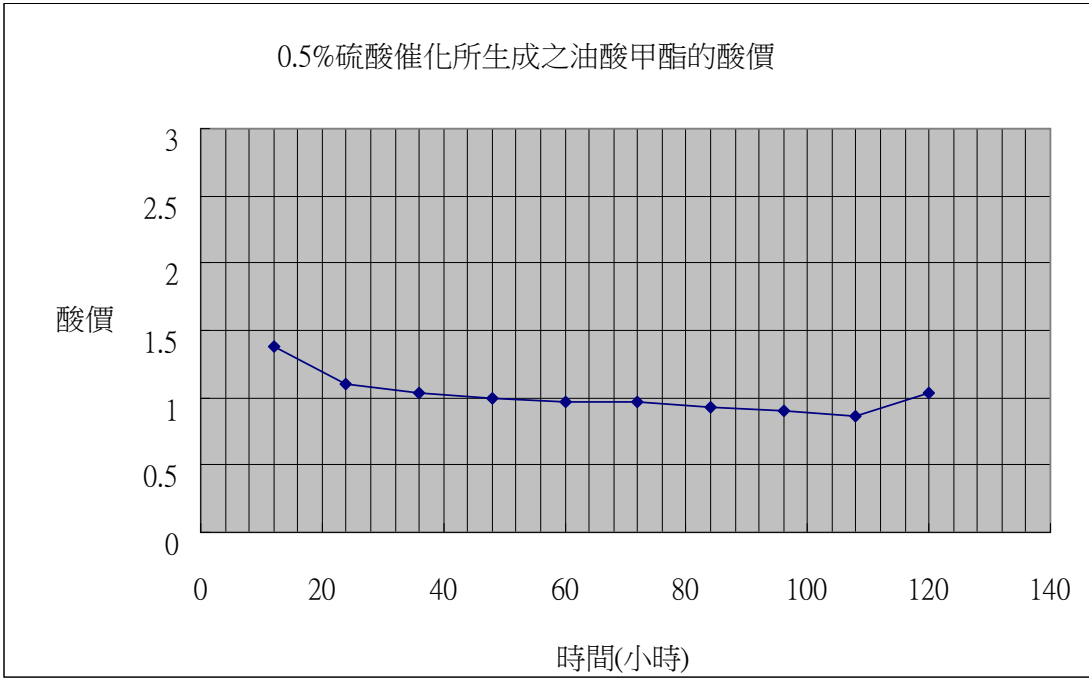
▼表 5 不同時間下 1%硫酸催化酯化反應生成之油酸甲酯的酸價與轉化率

加熱時數	24 小時	36 小時	48 小時	60 小時	72 小時	84 小時
酸價	1.267	1.105	0.975	0.971	1.031	1.412
轉化率 (%)	96.833	97.239	97.563	97.573	97.422	96.471



▼表 6 不同時間下 0.5%硫酸催化酯化反應生成之油酸甲酯的酸價與轉化率

加熱時數	12 小時	24 小時	36 小時	48 小時	60 小時
酸價	1.383	1.105	1.032	1.001	0.966
轉化率 (%)	96.545	97.239	97.421	97.500	97.586
加熱時數	72 小時	84 小時	96 小時	108 小時	120 小時
酸價	0.965	0.925	0.900	0.860	1.032
轉化率 (%)	97.589	97.689	97.752	97.852	97.422



(二).討論:

1. 由表 2 得知，以 2.5%硫酸催化，十六小時的催化效果最好。十六小時前，轉化率隨時間上升而呈現正相關增加。在十二小時到十八小時之間，轉化率的變化趨勢並不顯著，十六小時達到高峰。在十六小時之後，轉化率開始有下降的趨勢。
2. 由表 3 得知，以 2.0%硫酸催化，二十二小時的催化效果最好。在十八小時前，轉化率會隨時間的上升而成正相關增加，其趨勢與 2.5%硫酸催化大致相同。
3. 由表 4 得知，以 1.5%硫酸催化，三十六小時的催化效果最好。而在三十六小時前，轉化率會隨時間的上升而成正相關增加。其趨勢與 2.5%硫酸催化大致相同。
4. 由表 5 得知，以 1.0%硫酸催化，六十小時的催化效果最好。而在六十小時前，轉化率會隨時間的上升而成正相關增加。其趨勢與 2.5%硫酸催化大致相同。
5. 由表 6 得知，以 0.5%硫酸催化，一百零八小時的催化效果最好。而在一百零八小時前，轉化率會隨時間的上升而成正相關增加。其趨勢與 2.5%硫酸催化大致相同。

二、 以 1.17%TiO₂奈米管催化酯化反應

(一). 結果：

▼表 7 不同時間下 0.05M 硫酸涵浸之 TiO₂奈米管(1.17%)催化酯化反應生成油酸甲酯之酸價與轉化率 (%)

加熱時數	6 小時	12 小時	18 小時	24 小時
酸價	16.989	11.656	4.595	11.546
轉化率 (%)	57.55	70.88	88.52	71.15

▼表 8 不同時間下 0.10M 硫酸涵浸之 TiO₂奈米管(1.17%)催化酯化反應生成油酸甲酯之酸價與轉化率 (%)

加熱時數	6 小時	12 小時	18 小時	24 小時
酸價	20.785	10.847	3.740	10.099
轉化率 (%)	51.87	72.90	90.65	74.77

▼表9 不同時間下0.50M 硫酸涵浸之 TiO₂奈米管(1.17%)催化酯化反應生成油酸甲酯之酸價與其之轉化率 (%)

加熱時數	6 小時	12 小時	18 小時	24 小時
酸價	26.185	11.222	4.488	11.222
轉化率 (%)	34.58	71.96	88.79	71.96

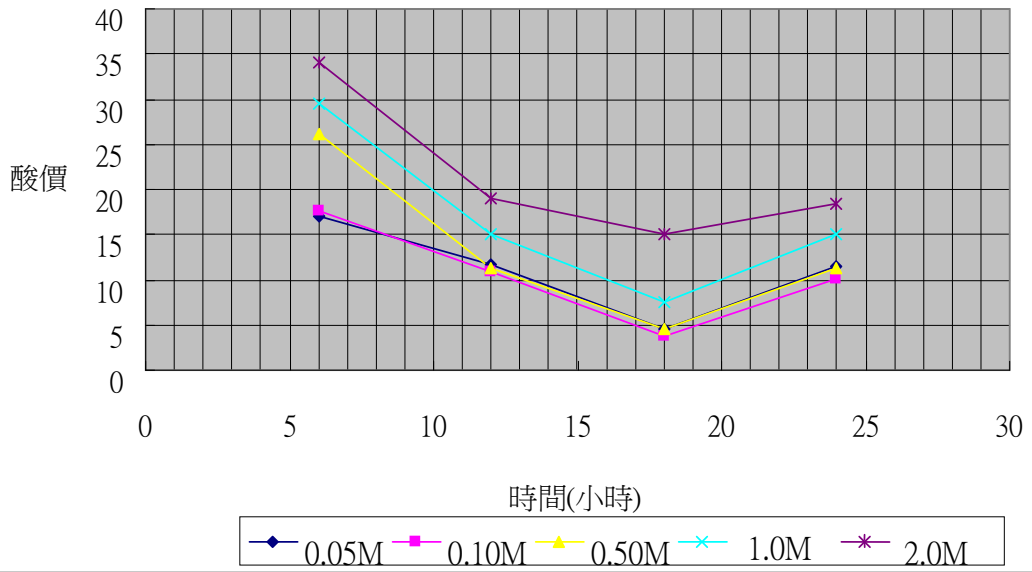
▼表10 不同時間下 1.0M 硫酸涵浸之 TiO₂奈米管(1.17%)催化酯化反應生成油酸甲酯之酸價與其之轉化率 (%)

加熱時數	6 小時	12 小時	18 小時	24 小時
酸價	29.551	14.963	7.481	14.963
轉化率 (%)	26.17	62.62	81.31	62.62

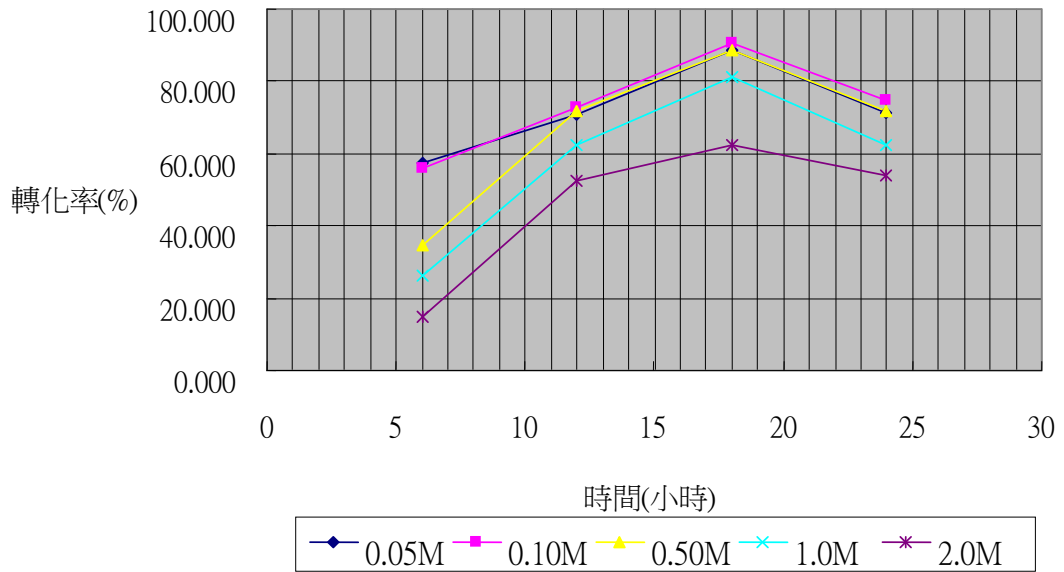
▼表11 不同時間下 2.0M 硫酸涵浸之 TiO₂奈米管(1.17%)催化酯化反應生成油酸甲酯之酸價與其之轉化率 (%)

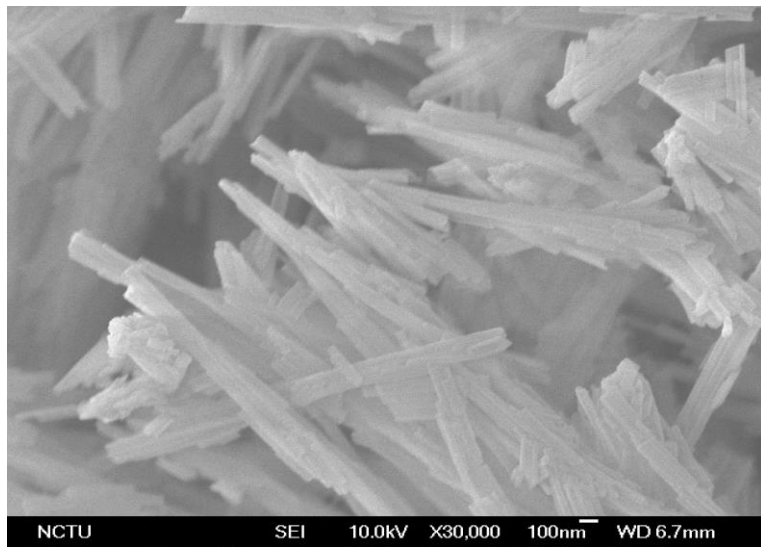
加熱時數	6 小時	12 小時	18 小時	24 小時
酸價	34.04	19.077	14.963	18.329
轉化率 (%)	14.95	52.34	62.62	54.21

不同濃度涵浸之 TiO₂ 奈米管生成油酸甲酯的酸價比較

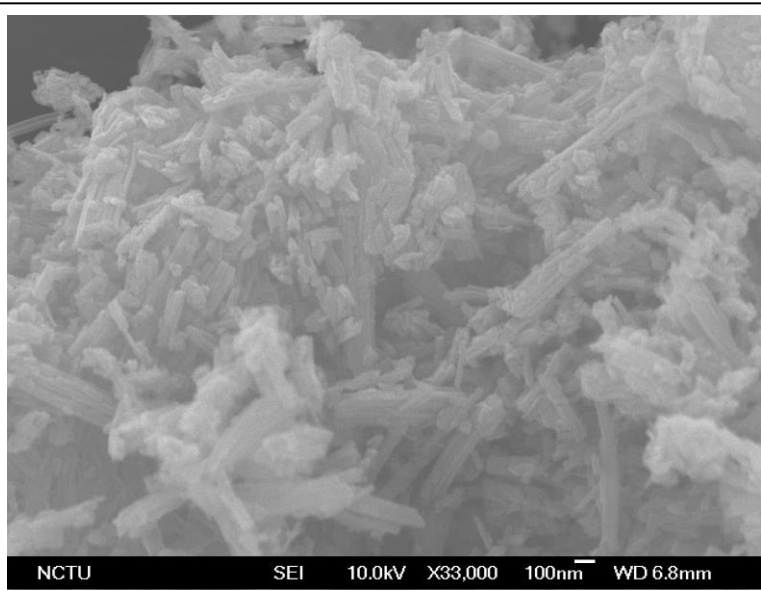


不同濃度涵浸之 TiO₂ 奈米管轉化率比較





以 0.10M
硫酸涵浸
TiO₂ 奈米管
之 SEM 圖片



以 2.0M
硫酸涵浸
TiO₂ 奈米管
之 SEM 圖片

(二). 討論：

1. 由實驗得知，十八小時的催化效果最佳。在十八小時之前，轉換率會隨時間的上升而成正相關增加。而在十八小時之後轉化率就開始有下降的趨勢，可見以 1.17%TiO₂ 奈米管作為催化劑時，十八小時為此實驗最佳的加熱時間。

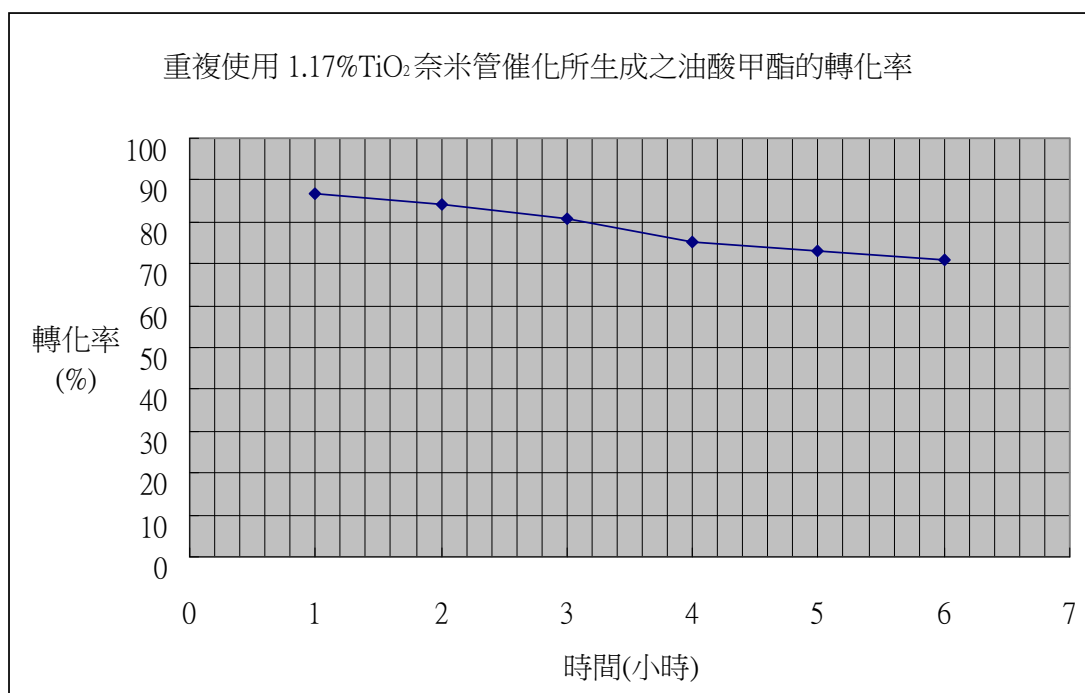
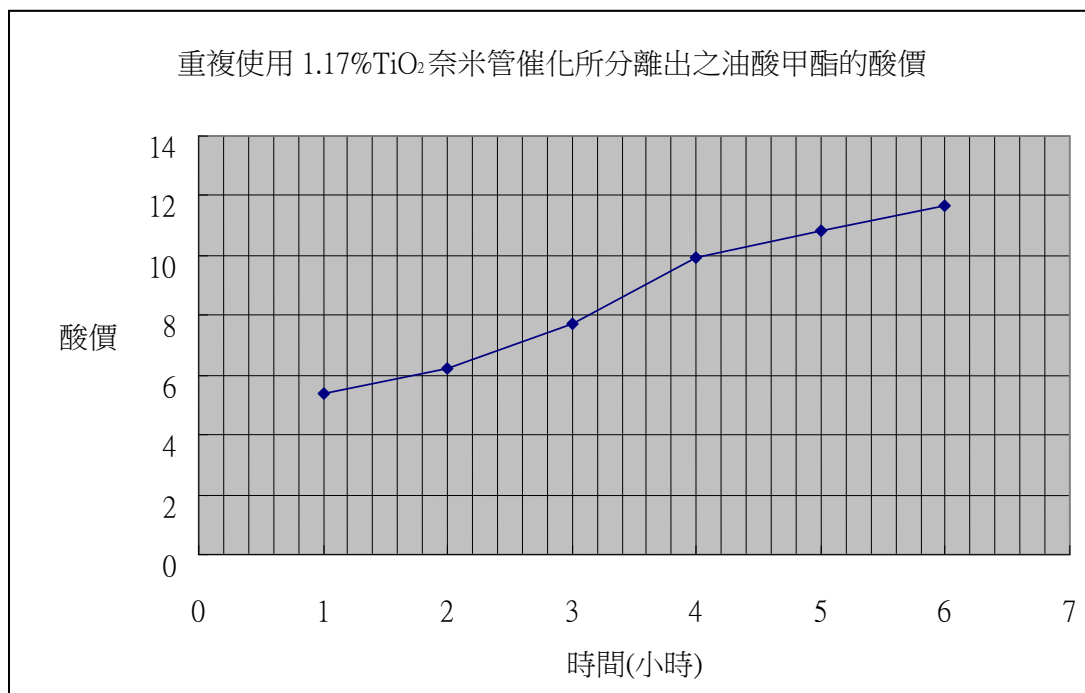
2. 對照之前硫酸催化之數據，以 1.17%TiO₂ 奈米管催化生成油酸甲酯之酸價較高而轉化率較低，這可能是由於我們所使用的濃硫酸濃度為 18M，而相較之下，我們用來涵浸 TiO₂ 奈米管之硫酸濃度為 0.10M，因此，以之作為油酸甲酯酯化反應的催化劑的效果相對來講較不顯著，但整體來說轉化率依然有達到不錯的效率。
3. 一般而言，以較高濃度的硫酸涵浸 TiO₂ 奈米管，酯化反應轉化率應該愈高，但根據數據，以 0.10M 的硫酸涵浸 TiO₂ 奈米管時達到了最高轉化率，我們推測可能原因為高濃度硫酸破壞 TiO₂ 奈米管的管狀結構，我們分別將以 0.10M 及 2.0M 硫酸涵洗的 TiO₂ 奈米管照 SEM，比較兩張 SEM 圖可看出，前者之 TiO₂ 奈米管結構較完整，因此可以印證我們之推論。

三、 重複使用 1.17%TiO₂ 奈米管催化分離出之油酸甲酯的酸價與轉化率

(一). 結果：

▼表 12 使用回收 0.1M 硫酸涵浸之 TiO₂ 奈米管(1.17%)催化酯化反應生成油酸甲酯之酸價與轉化率 (%)

回收次數	1	2	3	4	5	6
酸價	5.372	6.244	7.742	9.903	10.845	11.663
轉化率 (%)	86.576	84.399	80.656	75.255	72.903	70.859



(二). 討論：

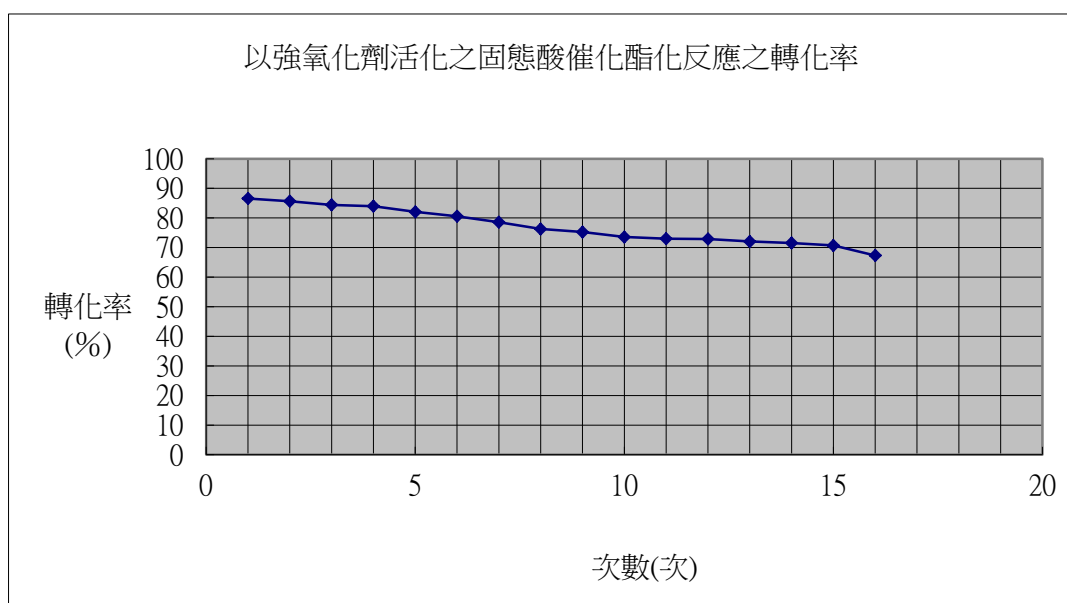
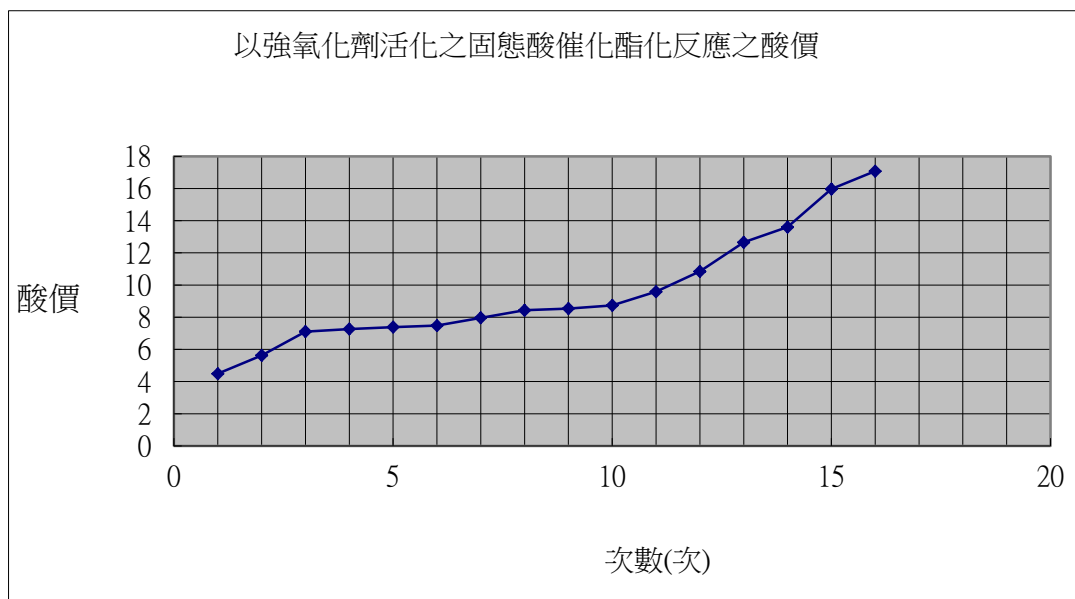
由以上數據及圖表可知，以已使用過一次之 TiO₂ 奈米管催化油酸酯化反應，所得到轉化率與 TiO₂ 奈米管前一次使用時並無太大差別，僅稍微下降，而回收使用至第六次，轉化率仍可達到 70% 以上，顯示我們製備之固態酸 TiO₂ 奈米管具有極高的可重複使用性。

實驗後，我們發現持續使用的固態酸 TiO_2 奈米管顏色有逐漸由白色轉為灰色的現象，推測可能在酯化反應過程中發生氧化還原反應，使得 TiO_2 還原為 TiO 或 Ti_2O_3 ，導致催化效率下降，因此我們嘗試尋找可氧化 TiO 或 Ti_2O_3 的氧化劑，以延長其使用次數。

四、以過錳酸鉀強氧化劑活化固態酸 TiO_2 奈米管

(一). 結果

使用次數	1	2	3	4	5	6	7	8
酸價	4.488	5.623	7.107	7.265	7.384	7.481	7.963	8.432
轉化率 (%)	86.576	85.646	84.399	83.986	82.065	80.569	78.563	76.265
使用次數	9	10	11	12	13	14	15	16
酸價	8.536	8.736	9.586	10.847	12.656	13.598	15.968	17.077
轉化率 (%)	75.255	73.569	73.001	72.903	72.065	71.539	70.699	67.326



(二). 討論

由實驗得知，以過錳酸鉀強氧化劑活化後之固態酸 TiO_2 奈米管的使用次數明顯的增加了。同時也發現，即使使用強氧化劑活化的固態酸 TiO_2 奈米管，仍喪失了部份催化效果，我們推測除了在轉酯過程中 TiO_2 還原為 TiO 之外，可能有雜質附著於其上，導致催化效率無法提升至 90% 以上。

陸、結 論

- 一、以硫酸作為催化劑催化油酸酯化反應的實驗中，2.5% 硫酸的催化反應時間以十六小時為最適當加熱時間。而最佳反應時間隨著硫酸比重的增加而逐漸減少。

- 二、以 1.17%TiO₂ 奈米管作為催化劑催化油酸酯化反應的實驗，最佳濃度為以 0.10M 硫酸涵浸的 TiO₂ 奈米管催化能得最佳效果，而酯化反應的最適當催化時間為十八小時，TiO₂ 奈米管在經過一次酯化反應之後，回收再使用，其催化轉化率僅些微下降，回收使用六次後，轉化率仍維持在 70%以上。
- 三、我們所製備的 TiO₂ 奈米管，僅使用 0.30g 硫酸進行涵浸，其催化效果便可達到和使用 1.00g 硫酸直接進行酯化反應相同，且固態酸 TiO₂ 奈米管擁有可以重複使用的優點，在持續使用六次後，其總產量較使用硫酸直接催化多 5 倍的量。
- 四、在使用過錳酸鉀強氧化劑活化固態酸 TiO₂ 奈米管後，固態酸 TiO₂ 奈米管催化次數明顯的增加許多次，我們發現即使連續酯化使用十五次，其轉化率仍維持在 70%以上。

柒、未來展望

- 一、在未來的實驗中，尋找生質柴油之能量轉換率，並以之計算出我們所製作出油酸甲酯的能量轉化率。
- 二、活化固態酸 TiO₂ 奈米管後的過錳酸鉀水溶液仍呈明顯的深紫色，我們希望可以找出活化固態酸時氧化劑實際上所需使用的莫耳數，期望可以使用最少氧化劑，達到最佳的效果。
- 三、改進我們製備固態酸 TiO₂ 奈米管強度。例如，增加涵浸時所用硫酸濃度及體積使之在催化油酸酯化反應時，能具有更佳效果。
- 四、以過錳酸鉀強氧化劑活化固態酸 TiO₂ 奈米管實驗已證實可行，我們希望可以找到更低成本活化固態酸的方法。
- 五、將製造出來的生質柴油使用於市面上的柴油車，為地球環保盡一分心力。

捌、參考資料

- 一、Chiu-Hsun Lin, Shu-Hua Chein, Jiunn-Hsing Chao, Chyi-yang Sheu, Yu-Cheng Cheng, Ya-Jean Huang, and Chih-Hsiang Tsai,(2002). The synthesis of sulfated titanium oxide nanotubes. Catalysis Letters Vol.80, No.3-4.
- 二、張榮海, 鄔國英, 林西平 (2007)。固態酸催化酯化酸化油合成生物柴油的研究。石油與天然氣化工, 114-117。
- 三、工業技術研究院 能源與環境研究所 (2007)。生質柴油發展之契機與挑戰。
- 四、凌永健 (2010)。基礎化學 (二)。台北市：三民。

【評語】 040811

從環保及資源有效利用的角度切入，並能夠考量所花費的成本，整體而言是個很好的作品，實驗規劃及成果也很完整，團隊的合作情形良好。