

生質柴油製程之線上監測

李文聖¹，謝志誠²，于明嘉¹

1. 國立台灣大學生物產業機電工程學研究所研究生
2. 國立台灣大學生物產業機電工程學系教授，本文通訊作者

摘 要

本研究利用大豆油作為原料，以甲醇進行轉酯化反應產製生質柴油，並以氫氧化鈉作為觸媒。在相同實驗參數下：醇油比例 15% (15g / 100g)、氫氧化鈉用量 0.5g、攪拌器轉速 500rpm、反應溫度 70°C、反應時間 2 小時，測試反應物之電導度、pH 值與透射率，發現透射係數可以作為判斷脂肪酸甲酯（即生質柴油）轉化率之指標。至於反應物之透射係數與脂肪酸甲酯轉化率之關係，經迴歸分析發現：兩者皆呈穩定之指數遞增關係，且脂肪酸甲酯轉化率比透射係數先到達穩定。經進一步分析發現當透射係數介於 0.409~0.552 間時，兩者呈現高度正相關，且關係式為：

$$y = 0.125 \times \ln(16990\tau_x - 6566.5)$$

其中， y 為脂肪酸甲酯轉化率， τ_x 為反應物透射係數。

此關係式可作為線上監測判斷脂肪酸甲酯轉化率之依據。

關鍵詞：生質柴油、轉酯化、透射係數、線上監測

ON-LINE MONITOR FOR BIODIESEL PRODUCTION

Wen-Sheng Lee¹, Jyh-Cherng Shieh², Ming-Jia Yu¹

1. Graduate Student, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University
2. Professor, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Corresponding Author.

ABSTRACT

A study was made of the transesterification reaction of soybean oil by means of methanol, using sodium hydroxide as catalyst. Under the same experiment parameters: alcohol/oil ratio 15% (15g / 100g), catalyst concentration 0.5 wt % , stirring speeds 500rpm, reaction temperature 70°C, reaction time 2 hours, the conductivity, pH value and transmittance of reactants were measured continuously during transesterification. The results revealed that transmittance could be taken as an indicator to estimate the conversion rate of fatty acid methylesters (FAME or biodiesel). The relationship between transmission coefficient and conversion rate of biodiesel can be described by

$$y = 0.125 \times \ln(16990\tau_x - 6566.5)$$

where y is the conversion rate of biodiesel and τ_x is the transmission coefficient of reactant defined within 0.409~0.522.

This equation can be a reference for on-line monitor for biodiesel production.

Keywords: Biodiesel, Transesterification, Transmission coefficient, On-line monitor

一、前 言

1893年8月10日，使用花生油之柴油引擎公開試轉成功，1912年，柴油引擎發明人 Rudolf Diesel 在一場演講中即提到：將來有一天，使用植物油作為引擎燃油之重要性將會與石化燃料一樣。1920年代以後，石油業者挾著低成本優勢，大幅開拓市場，柴油引擎製造者也改變引擎設計，以適應黏度較低之石化柴油，使得生質燃料之生產與研究工作停擺了數十年。一直到1980年代，人類開始體會到過去因大量使用石化能源所導致之後遺症，而逐漸重視全球氣候變遷與溫室氣體減量等議題，連帶地，發展生質柴油做為替代能源之趨勢也越來越受到肯定。

生質柴油(Biodiesel)又稱生物柴油，是一種潔淨之替代燃料，因不含石化成分，且可以獨立或與石化柴油混合使用於既有或稍作少許修改之柴油引擎，是一種使用方便、無毒、生物可分解性之燃料。生質柴油係以未加工過或使用過之植物油，如：油菜籽油(rapeseed oil) (Canaki and Van Gerpan, 2003)、大豆油(soybean oil) (Alcantara et al., 2000)、棕櫚油(palm oil) (Dorado et al., 2002)、橄欖油(olive oil) (Dorado et al., 2002)、海藻(algae) (Gordana et al., 2005)、向日葵油(sunflower oil) (Antol'n et al., 2002)等，或動物脂肪(Ma et al., 1999; Tashtoush et al., 2004)通過不同反應所產製之生質燃料(Biomass fuel)。這些方法(Schwab et al., 1987)包括混合稀釋(Blending / Diluting) (Zubik et al., 1984)、微細乳化(Microemulsion) (Goering et al., 1983)、熱解(Pyrolysis) (Niehaus et al., 1986)與轉酯化(Transesterification)。其中，以轉酯化方法最佳，具有轉化率較高與反應時間較短等優點。目前已商業運轉之生質柴油生產工廠都採用轉酯化方法。

轉酯化反應是指油脂、醇類在某一比例下進行反應，生成酯類的過程。其中，為了加速反應之速度與產物之生成，常加入催化劑(catalyst)，包括酸性催化劑(acid catalyst) (Lotero et al., 2005; Canakci and Van Gerpen, 2003)、鹼性催化劑(alkali catalyst) (Nye et al., 1983; Freedman et al., 1984)、異質催化劑(heterogeneous catalyst) (Kim et al., 2004)、解脂酵素(lipase) (Lai et al., 2005)，但也有不使用催化劑，而將甲醇加熱加壓至超臨界狀態(supercritical condition)者(Cao et al., 2005; Kusdiana and Saka, 2004)。

目前，工業上最普遍採用之強鹼製程係以氫氧化鈉(NaOH)作為催化劑，採用高純度之甲醇進行轉酯化反應，以生成脂肪酸甲酯(Fatty Acid Methyl esters, FAME) (即生質柴油)與甘油(副產物) (圖1)。其中，醇油莫耳比為3~8，催化劑比例為0.5~2.5%，反應溫度約為50~80℃，攪拌速率約為100~400rpm。

轉酯化反應過程，一般以目測反應物是否呈現均質化作為研判反應是否終了之依據，一旦認定反應結束，即將反應物靜置一段時間，然後取出下層之甘油，經蒸餾、純化作為副產品，上層

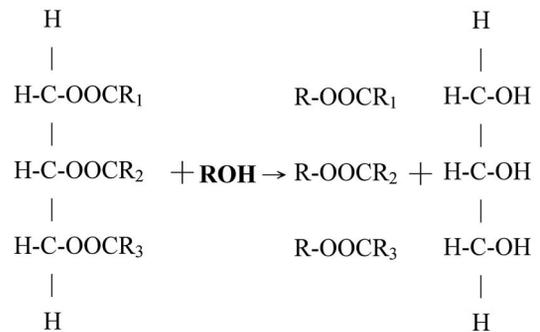


圖1 三酸甘油酯之轉酯化反應
Fig.1 Transesterification of Triglyceride

顏色微黃者，經水洗、過濾、甲醇回收後取得 FAME，而後再據以推斷轉化率之高低。前者缺乏量化依據，後者所耗時間冗長，且難以線上監測。

爲了線上監測轉酯化反應之 FAME 轉化率，本研究利用核磁共振儀(Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer, NMR Spectrometer)量測反應物之 ^1H 光譜，計算 FAME 之轉化率，再從轉酯化反應中可量測之物理或化學性質，找出可作爲研判轉化率之依據。研究結果發現：反應物在轉酯化反應過程之透射係數與轉化率呈現關聯性，經進一步分析得知透射係數介於 0.409~0.522 之間時，轉化率與透射係數間呈現高度正相關，利用趨勢方程式計算所得之轉化率與透射係數關係式可以作爲線上監測轉化率之依據。

二、材料與方法

(一) 實驗設備與材料

1. 光源：雷射二極體，ACHTUNG Laser Diode，波長： $650 \pm 20\text{nm}$ ，最大輸出 $< 5\text{mW}$ 。
2. 感測器：LI-COR Pyranometer PY18195。
3. 顯示器：LI-COR Light Meter LI-189。
4. 加熱攪拌器：Fargo HMS-102。
5. 電導度量測系統：自製。
6. pH 值量測系統：ORIN MODEL 720。
7. 血清瓶：SCHOTT 21801365-1，250ml，70mm \times 138mm (瓶徑 \times 瓶高)。
8. 高磁場核磁共振儀：Varian 400MHz X3 NMR Spectrometer。
9. 試驗油料：台糖大豆沙拉油 (3 公升裝)。
10. 甲醇(CH_3OH)：Fisher Chemical Methanol UN1230，99.9%。
11. 氫氧化鈉(NaOH)：Nacalai Tesque, INC Sodium Hydroxide V2N8878，96%。
12. 氘代氯仿(d' -chloroform, CDCl_3)。
13. 電源供應器：GW GPC-3030D，Laboratory DC Power Supply。
14. 鋁擠型(30mm \times 30mm)與連結器。

(二) 轉酯化反應參數

本研究進行之轉酯化反應參數：

1. 大豆沙拉油量：100g。
2. 醇油比例(% wt)：15% (15g / 100g)。
3. 氫氧化鈉用量：0.5g。
4. 攪拌器轉速：500rpm。
5. 反應溫度：70°C。
6. 反應時間：2 小時。

(三) 透射率與量測系統

透射率(Transmittance, T)是通過一定介質後輻射傳播量之量度，等於透射輻射量 I 與入射光輻射量 I_0 之比值。

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

本研究用以測定轉酯化反應物透射率之量測系統(Hinds, 1999)，左側放置雷射(laser)光源，中間放置加熱攪拌器(mixer)與反應槽(reactor)，右側放置透鏡組(lens)與感測器(sensor) (圖 2)。其中，雷射光源提供特定功率且光通量穩定之光源，水平向右照射，經過轉酯化反應槽(血清瓶)後，由透鏡將光線聚焦於感測器上。

由於雷射光係先通過反應槽之玻璃，再通過反應物，最後再通過反應槽之另一側玻璃，因此，量測結果易受到反應槽玻璃之干擾，故必須先計算出反應槽玻璃之透射率。由於雷射光經過反應槽玻璃二次(圖 3)，因此，透射光 I 等於入射光 I_0 乘以玻璃透射率 T_{glass} 之平方。

$$I = I_0 T_{glass}^2 \quad (2)$$

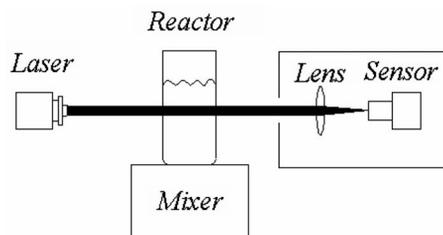


圖 2 透射率量測系統示意圖
Fig.2 Measurement system for transmittance

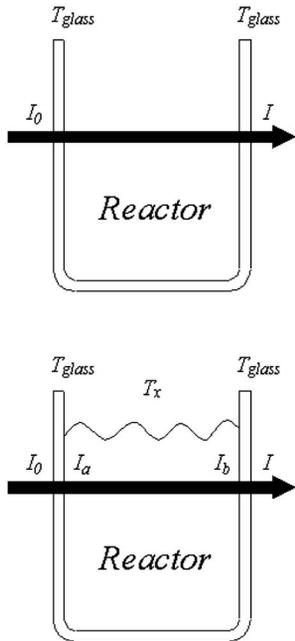


圖 3 反應槽透射光能量示意圖

Fig.3 Description for laser passing through reactor

只要 I 與 I_0 已知，即可由式(2)算出玻璃之透射率 T_{glass} 。本研究選用之反應槽透射率 $T_{glass}=0.9$ 。

至於，轉酯化反應物之透射率 T_x ，則等於 I_b 除以 I_a 。

$$T_x = \frac{I_b}{I_a} = \frac{I}{I_0 \times T_{glass}^2} \quad (3)$$

其中

$$I_a = I_0 T_{glass} \quad (4)$$

$$I_b = \frac{I}{T_{glass}} \quad (5)$$

透射係數(Transmission coefficient, τ)是入射輻射穿過單位厚度之介質後，其所剩餘量之一種量度，依據比爾-朗伯定律(Beer-Lambert Law)，定義透射係數 τ ：

$$\tau = e^{-\alpha} \quad (5)$$

其中， α 為介質對入射輻射之衰減係數(Attenuation coefficient)或消光係數(Extinction coefficient)。

經過厚度為 d 之介質之透射率 T 與該介質之透射係數關係為：

$$T^{1/d} = \tau \quad (6)$$

因本研究所使用之雷射光強度 I_0 為 $50(\text{W}/\text{m}^2)$ ，反應槽內徑為 6.5cm ，代入式(3)可得知轉酯化反應物之透射率 T_x 為 $I/40.5$ ，反應物之透射係數 τ_x ：

$$\tau_x = \left(\frac{I}{40.5} \right)^{\frac{1}{6.5}} \quad (7)$$

四轉酯化反應透射率與FAME轉化率之測試步驟

為了觀察轉酯化反應過程中，反應物之透射率與FAME之轉化率變化，本研究依下列實驗步驟量測入射光 I_0 、透射光 I 和 ^1H 核磁共振光譜 (^1H NMR Spectrum)：

1. 量測入射光 I_0 與透射光 I ，計算反應槽透射率 T_{glass} 。
2. 將 0.5g 氫氧化鈉置入血清瓶中。
3. 將 15g 之甲醇倒入已置放氫氧化鈉的血清瓶中。
4. 設定反應溫度為室溫、攪拌子轉速為 500rpm 。
5. 攪拌 20 分鐘使氫氧化鈉完全溶解於甲醇中。
6. 將 100g 之大豆沙拉油倒入血清瓶中。
7. 設定反應溫度為 70°C 、攪拌子轉速為 500rpm 。
8. 開始攪拌。
9. 每隔 20 分鐘量測一次入射光 I_0 、透射光 I 和 ^1H 核磁共振光譜。
10. 重複步驟 9 至反應 2 小時為止。

五 FAME 之轉化率分析

在轉酯化反應中，醇之 alkyl group 與酯之 alkoxy group 交換，成為另一種酯。以用於產製生質柴油之油脂為例，其主要成分為一個分子甘油與三個分子脂肪酸反應組成之三酸甘油酯 (Triglyceride)，若與甲醇 (CH_3OH) 進行轉酯化反應，則甲醇之 CH_3 ，將與三酸甘油酯之 CH_2 、 CH 交換，過程中三酸甘油酯之 R_1 、 R_2 與 R_3 並未參與反應。因此，三酸甘油酯末端 CH_3 之氫原子化學位移 (chemical shifts) (Wade, 1999) 大約為 0.9 (圖 4)，FAME 左右兩端之氫原子化學位移 δ 則分別為 3.6 與 0.9 (圖 5)；由於 R_1 、 R_2 與 R_3 末端都是

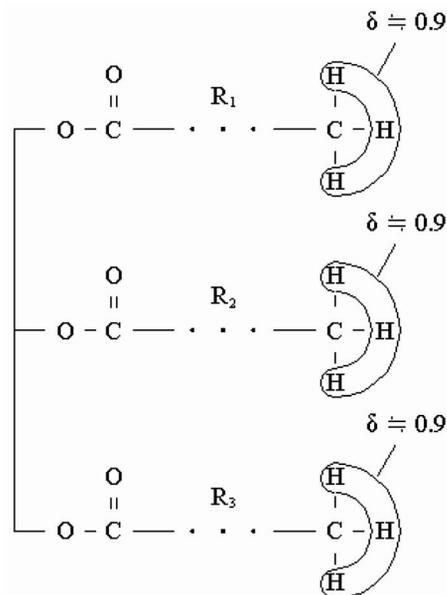


圖 4 三酸甘油酯末端氫原子化學位移
Fig.4 Chemical shifts of H in TG

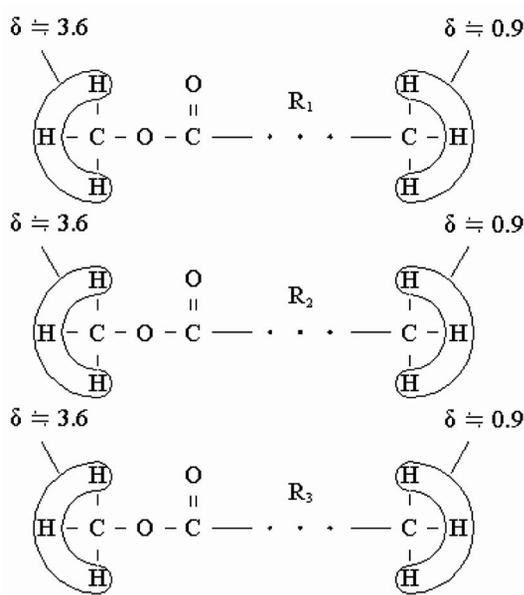


圖 5 脂肪酸甲酯兩端氫原子化學位移
Fig.5 Chemical shifts of H in FAME

飽和的單鍵(CH₃)，因此，FAM兩端之氫原子莫耳比為 1：1，又 ¹H 核磁共振光譜 peak 之面積比相當於氫原子莫耳數之比，因此，FAME 之轉化率可定義為 $\delta = 3.6$ 的積分值與 $\delta = 0.9$ 的積分值之比。

$$\text{轉化率} = \frac{\delta = 3.6 \text{ 之積分值}}{\delta = 0.9 \text{ 之積分值}} \quad (8)$$

三、結果與討論

(一)轉酯化反應透射率測試

本研究為了從轉酯化反應中可量測之物理或化學性質，找出可作為研判 FAME 轉化率之依據，分別測試反應物之電導度、pH 值與透射率，發現導電度相當小，不易量測，而測得之 pH 值則呈現不規律變化（測試資料未留存），僅有透射率與反應時間呈現遞增關係。

為了量測計算反應物透射率與透射係數所需之透射光強度值，本研究將轉酯化反應安排在鋁擠型架設之實驗平台上進行（圖 2），雷射光從

左側進入反應槽，透射光由右側之感測器量測。其中，轉酯化反應之條件包括：採用 100g 之沙拉油、15g 之甲醇與 0.5g 之氫氧化鈉，以及 75°C 之反應溫度與 500rpm 之攪拌速度。

從醇油混合開始計時，每隔 20 分鐘量測一次透射光強度值，一直到 2 小時為止，實驗重複進行三次。表 1 是三次實驗後透射係數之平均值與標準差，其中，反應物之透射係數 τ_x 是由式(7)計算。結果顯示：三次轉酯化反應過程，反應物之透射係數隨反應時間呈現對數遞增關係，約由 0.3 上升到 0.6，且透射係數標準差亦隨反應時間增加呈現微幅上升。綜合而言：透射係數之平均值與標準差在同樣之參數與環境下，改變是穩定的，因此，利用透射係數作為研判 FAME 轉化率之指標是可行的。

(二)反應物透射係數與FAME轉化率迴歸分析

在轉酯化反應過程中，同時量測透射光強度 I 與 ¹H 核磁共振光譜，得到表 2 之實驗數據，其中，FAME 之轉化率係依據式(8)計算所得。

圖 6 與圖 7 為大豆沙拉油轉酯化反應前與轉

表 1 透射係數之平均值與標準差

Table 1 Average value and standard deviation of transmission coefficient

NO.	時間 (分鐘)	透射係數 τ_x				
		第一次	第二次	第三次	平均	標準差
1	20	0.366	0.367	0.365	0.366	0.0014
2	40	0.429	0.409	0.409	0.416	0.0111
3	60	0.497	0.465	0.462	0.475	0.0191
4	80	0.545	0.522	0.506	0.524	0.0194
5	100	0.571	0.546	0.533	0.550	0.0194
6	120	0.590	0.579	0.546	0.572	0.0226

表 2 反應物透射係數與脂肪酸甲酯轉化率比較

Table 2 Comparison of transmission coefficient of reactant and conversion

NO.	時間 (分鐘)	透射係數 τ_x	轉化率
1	20	0.367	0.449
2	40	0.409	0.747
3	60	0.460	0.901
4	80	0.522	0.968
5	100	0.546	0.980
6	120	0.579	0.983

酯化反應 120 分鐘後之 ^1H 核磁共振光譜。由圖 6 可看出，轉酯化反應前，甲醇尚未取代掉甘油，因此，化學位移 $\delta=3.6$ 附近之積分值為零，即 FAME 轉化率為零。由圖 7 可看出，化學位移 $\delta=0.9$ 附近之積分值為 9，而化學位移 $\delta=3.6$ 附近的積分值為 8.85，因此，依據式(8)計算之 FAME 轉化率為 0.983 (98.3%)。

圖 8 是反應物透射係數、FAME 轉化率與反應時間的關係圖，圖 9 是反應物透射係數與 FAME 轉化率迴歸分析圖，線性 $R^2 = 0.82$ 。由圖 9 可看出，反應物透射係數與 FAME 轉化率之間並非線性關係，而是呈現指數趨勢，因此，令 X 代表反應物之透射係數 (τ_x)，Y 代表 FAME 轉化率 (y) 之指數函數：

$$X = \tau_x \quad (8)$$

$$Y = e^{cy} \quad (9)$$

當以不同常數 c 值代入做 X-Y 迴歸分析，得知 $c=8$ 時， R^2 最大 (0.9739)，若進一步將反應物透射係數 X 限制在 0.409~0.522 之間（相對之 FAME 轉化率 y 在 0.747~0.968 之間），則 R^2 可達到 0.9999（圖 10）。由於，在 0.409 < X < 0.522 區間內，X 與 Y 成高度正相關；因此，在量測反應物透射係數 X 後，可以直接使用趨勢線方程式 $Y = mX + b$ 計算出 Y 值，又因 $X = \tau_x$ 、 $Y = e^{cy}$ ，故得知反應物透射係數 τ_x 與 FAME 轉化率 y 之關係：

$$y = (1/c) \times \ln(mx + b) \quad (10)$$

其中 $c = 8$ ， $m = 16990$ ， $b = -6566.5$ 。

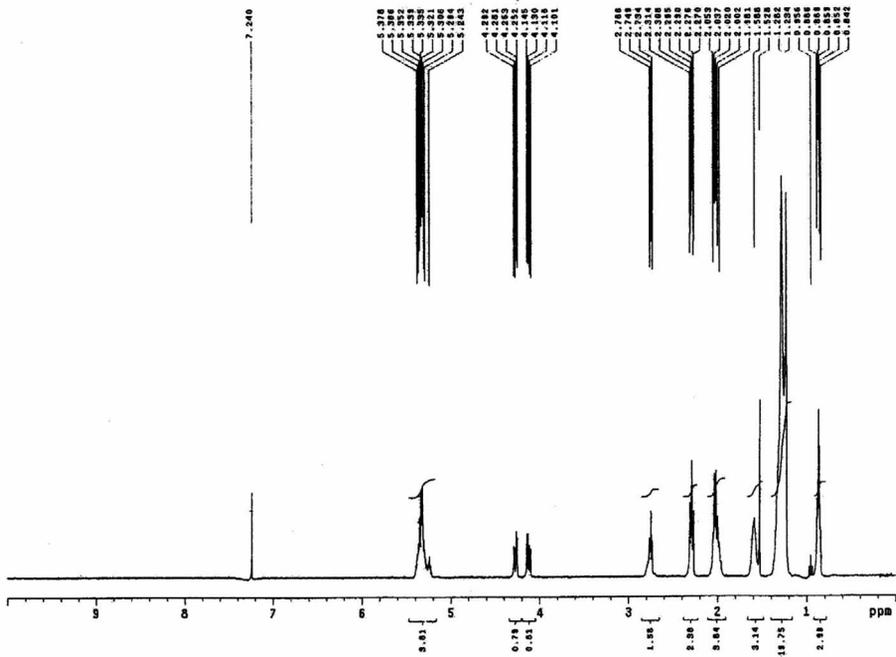


圖 6 ¹H 核磁共振光譜 (轉酯化反應前)
 Fig.6 ¹H NMR Spectrum (before transesterification)

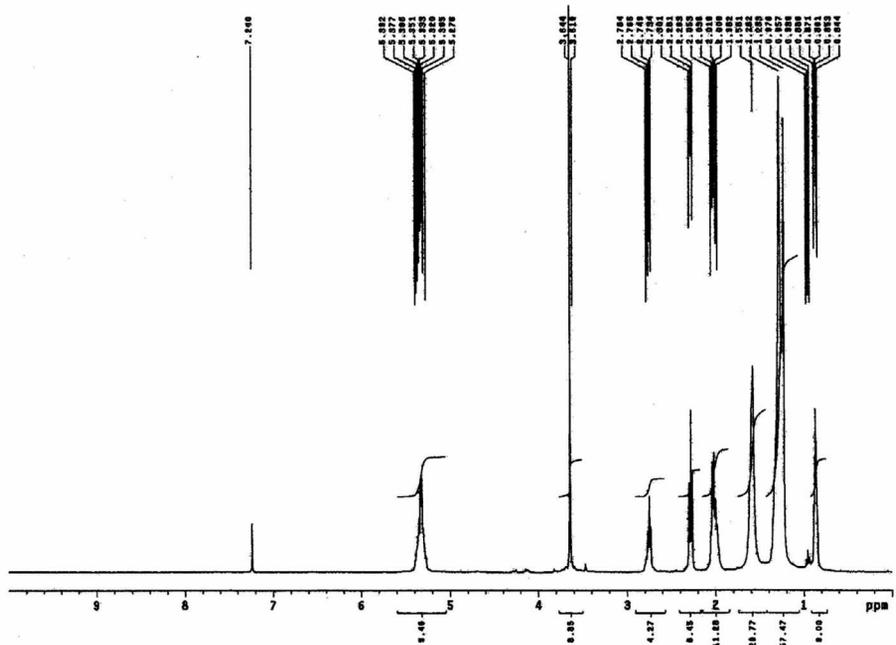


圖 7 ¹H 核磁共振光譜 (轉酯化反應 120 分鐘)
 Fig.7 ¹H NMR Spectrum (transesterification after 120min.)

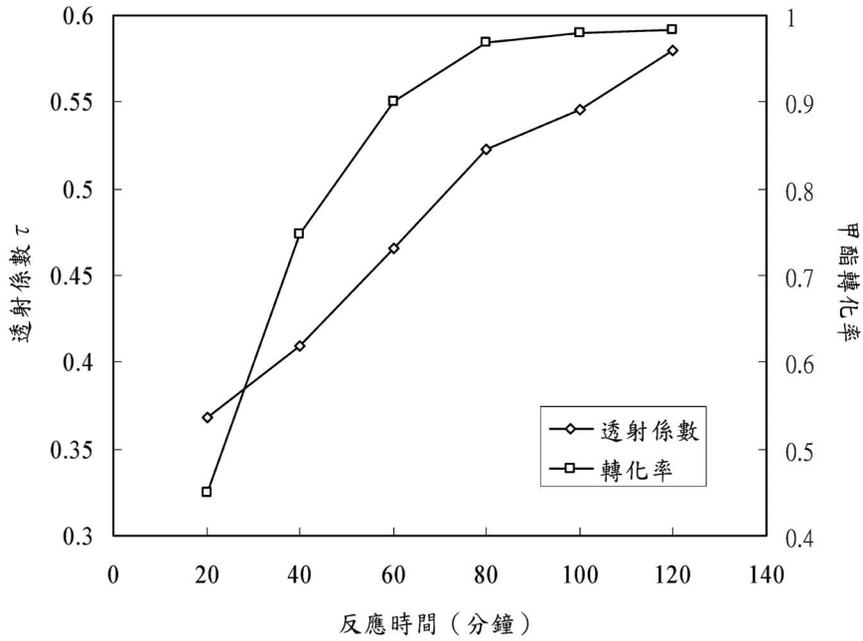


圖 反應物透射係數、脂肪酸甲酯轉化率與反應時間的關係圖

Fig.8 Relationship between transmission coefficient, conversion rate and reaction time

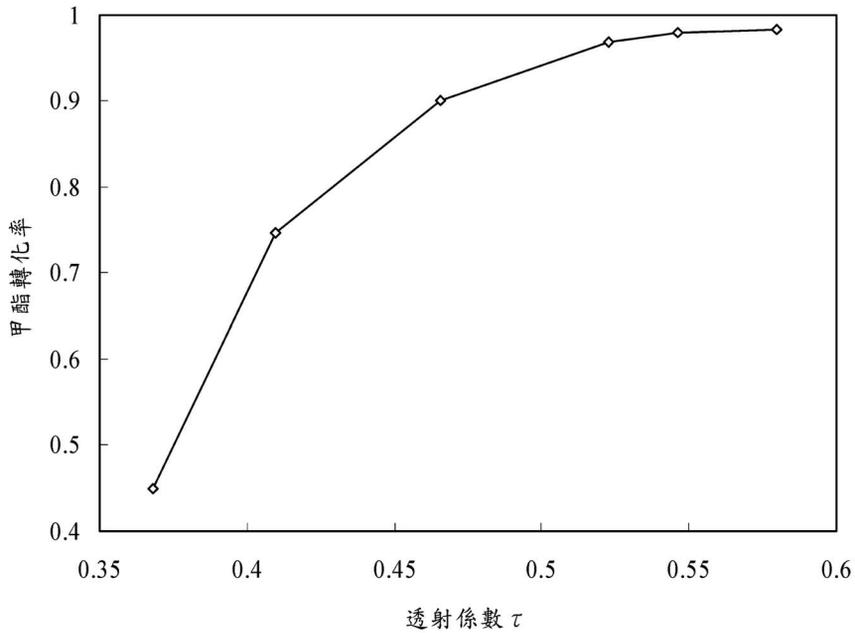


圖 9 反應物透射係數與脂肪酸甲酯轉化率迴歸分析

Fig.9 Regression analysis of transmission coefficient by conversion rate

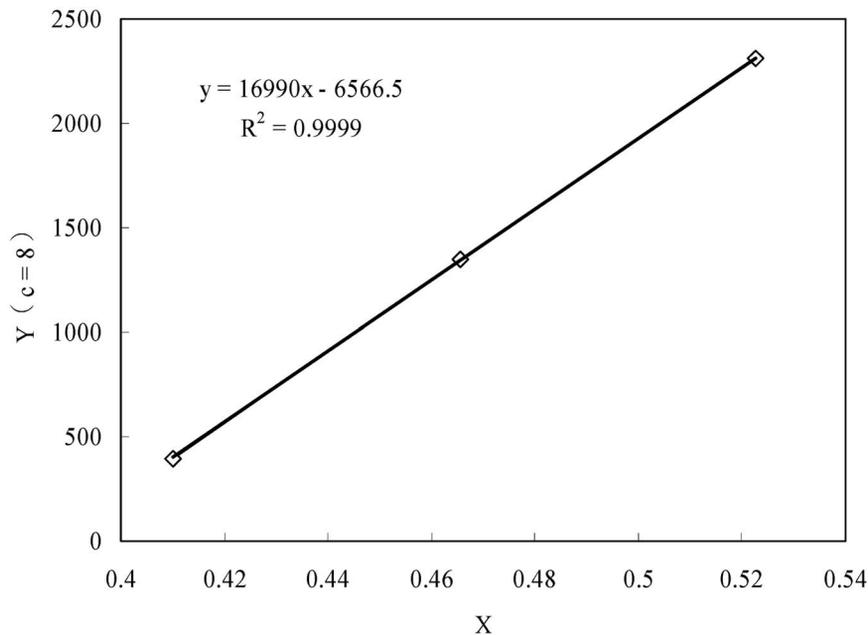


圖 10 X-Y 關係圖 (c=8, 0.409 < X < 0.522)

Fig.10 Relationship between X and Y (c=8, 0.409 < X < 0.522)

四、結 論

本研究之目的在於找出可作為 FAME 轉化率之指標，以達到線上監測轉酯化反應之目標。本研究利用大豆油作為原料，以甲醇進行轉酯化反應，並以氫氧化鈉作為觸媒，在醇油比例 15% (15g / 100g)、氫氧化鈉用量 0.5g、攪拌器轉速 500rpm 之下，測試反應物之電導度、pH 值與透射率，發現：透射係數 τ_x 介於 0.409~0.522 之間時，與 e^{CY} (y 為 FAME 轉化率) 呈現高度正相關 ($R^2=0.9999$)，而導電度相當小，不易量測，pH 值則呈現不規律變化。因此，確定了以透射係數作為研判 FAME 轉化率指標之可行性，進而找出透射係數與 FAME 轉化率間之關係式，以作為線上即時監測系統判斷 FAME 轉化率之依據：

$$y = 0.125 \times 1n(16990 \tau_x - 6,566.5)$$

其中，y 為 FAME 轉化率， τ_x 為反應物透射係數，介於 0.409~0.522 之間。

五、參考文獻

1. Alcantara, R., J. Amores, L. Canoira, E. Fidalgo, M. J. Franco, A. Navarro, 2000. Catalytic production of biodiesel from soy-bean oil, used frying oil and tallow. *Biomass and Bioenergy* 18: 515-527.
2. Antolin, G., F. V. Tinaut, Y. Briceno, V. Castano, C. Perez, A. I. Ramirez, 2002. Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification. *Bioresource Technology* 83: 111-114.
3. Canakci, M., J. Van Gerpan, 2003. A pilot plant to produce biodiesel from high free fatty acid feedstocks. *Trans ASAE* 46 (4) : 945-954.
4. Cao, Weiliang, Hengwen Han, Jingchang Zhang, 2005. Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and co-solvent. *Fuel* 84: 347-351.
5. Dorado, M. P., E. Ballesteros, J. A. de Almeida, C. Schellert, H. P. Löhrllein, R. Krause, 2002. An

- Alkali-catalyzed transesterification process for high free fatty acid waste oils. *Transactions of ASAE* 45 (3) : 525-529.
6. Freedman B., E. H. Pryde, and T. L. Mounts. 1984. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *JAOCs* 61(10): 1638-1642.
 7. Goering, C. E.; Schwab, A. W.; Campion, R. M.; Pryde, E. H., 1983b. Soyoil-ethanol microemulsions as diesel fuel. *Transactions of the ASAE* 26(6): 1602-1604, 1607.
 8. Gordana Vunjak-Novakovic, Yoojeong Kim, Xiaoxi Wu, Isaac Berzin, and Jose C. Merchuk. 2005. Air-Lift Bioreactors for Algal Growth on Flue Gas: Mathematical Modeling and Pilot-Plant Studies. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44: 6154-6163.
 9. Hinds, C. William. 1999. *Aerosol technology-properties, behavior, and measurement of airborne particles*. New York: John-Wiley&Sons.
 10. Kim, Hak-Joo, Bo-Seung Kang, Min-Ju Kim, Young Moo Park, Deog-Keun Kim, Jin-Suk Lee, Kwan-Young Lee, 2004. Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst. *Catalysis Today* 93-95 : 315-320.
 11. Kusdiana, D. and S. Saka, 2004. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. *Bioresource Technology* 91: 289-295.
 12. Lai, Chao-Chin, Zullaikah, Siti, Vali, Shaik Ramjan, Ju, Yi-Hsu. 2005. Lipase-catalyzed production of biodiesel from rice bran oil. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 80 (3) : 331-337.
 13. Lotero, Edgar, Yijun Liu, Dora E. Lopez, Kaewta Suwannakarn, David A. Bruce, and James G. Goodwin, Jr., 2005. Synthesis of Biodiesel via Acid Catalysis. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44: 5353-5363
 14. Ma, F, L. Davis Clements, Milford A. Hanna, 1999. The effect if mixing on transesterification of beef tallow. *Bioresource Technology* 69: 289-293.
 15. Niehaus, Robert A.; Goering, Carroll E.; Savage, Lester D. Jr.; Sorenson, Spencer C., 1986. Cracked soybean oil as a fuel for a diesel engine. *Transactions of the ASAE* 29 (3) : 683-689.
 16. Nye M. J., T. W. Williamson, S. Deshpande, J. H. Schrader, W. H. Snively, T. P. Yurkewich and C. L. French, 1983. Conversion of used frying oils to diesel fuel by transesterification: preliminary tests. 1983. *JAOCs* 60 (8) : 1598-1601.
 17. Schwab, A. W., Bagby, M. O., Freedman, B. 1987. Preparation and properties of diesel fuels from vegetables oils. *Fuel* 66 (10) : 1372-1378.
 20. Tashtoush, Ghassan M., Al-Widyan, Mohamad I.; Al-Jarrah, Mohammad M. 2004 Experimental study on evaluation and optimization of conversion of waste animal fat into biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 45 (17) : 2697-2711.
 21. Wade, L. G., Jr. 1999. *Organic chemistry*. 4th ed., 544-553. New Jersey: Prentice Hall.
 22. Zubik, J.; Sorenson, S. C.; Goering, C. E. 1984. Diesel engine combustion of sunflower oil fuels. *Transactions of the ASAE* 27 (5) : 1252-1256.

收稿日期：2006年4月3日

修改日期：2006年4月12日

接受日期：2006年4月17日

