

廢 PET 分解再生製程的經濟評估

Economic Evaluation for the Processes of Waste PET Hydrolysis

高志宇* 戴煜暉 萬本儒
國立台灣大學化工系

Abstract

The process design and economic evaluation for the depolymerization of polyethylene terephthalate (PET) waste was studied. The reaction of hydrolytic depolymerization was used for the generation of useful chemicals of ethylene glycol (EG) and terephthalic acid (TPA).

Based on the economic scale of reclaiming 8640 tons of PET waste per year, the plant design and cost estimation were made for three kinds of processes of PET hydrolysis. It was found that high reclaiming cost was required for the process catalyzed by sulfuric acid or ammonium hydroxide, and the process of PET hydrolysis at high temperature showed profitable. The capital investment of the high temperature process is about \$2.3 million, and the annual cost of operating is \$1.7 million. The economic evaluation of this process showed that the pretax annual return of this reclaiming

plant is 28 % when the average products price of TPA and EG is \$400/ton and the cost of PET waste feed is \$200/ton.

關鍵詞：廢PET，綠色化學，永續經營，化工程序經濟評估，PET 水分解程序

摘要

本研究是有關將 PET 廢棄物轉化為有用的化學品，以避免污染物的產生及資源的浪費。研究中設計及評估了三種水解廢PET的化學程序，這些程序可將廢 PET 轉化為對苯二甲酸和乙二醇化學品，可做重新生產 PET 或其他聚酯原料之用。在每年 8640 公噸廢 PET 處理量的評量基準下，進行建廠的程序設計與成本估算。研究結果發現，以硫酸催化的製程設備因為使用抗腐蝕的材料，造成建廠的總投資費用高出其他兩種製程很多。此外，以氫氧化銨或以硫酸催化的程序中必須消耗多量的硫酸，及產生石膏或硫酸銨廢棄物，因而所需的操作費用較高。所以三種水解製程中，以高溫水解 PET 的

再生製程最具競爭力，其建廠投資費用約為美金二百三十萬元，生產成本每年約需美金一百七十萬元。經濟效益分析的結果顯示，當產物的價格在\$400 / ton、進料廢PET的價格在\$200 / ton時，此再生工廠稅前的年投資報酬率約為 28 %。

一、研究背景

1.1 研究背景與動機

廢塑膠回收利用的議題，過去幾年在國際上受到各界廣泛的重視^(1,2)。包括政府部門、社會大眾和民間團體對於各種回收計劃均加以大力推廣並具體實施，而許多研究機構及工業界也致力於創新各種回收技術及建立相關的回收產業。

廢塑膠循環利用的發展歷程，最早可回溯至商業化塑膠工業開始運轉的初期⁽²⁾。在當時即已將生產過程中產生的塑膠廢料加以回收、再製利用，以降低整體生產成本。消費者使用過的塑膠回收利用則起源於 1970 年代初的能源危機時期，目的是希望藉此減少對原油的依賴。能源危機過後，此議題便沈寂下來，直至 1980 年代的綠色革命運動（green revolution）倡議對環境生態的保護，才使得包括塑膠等固體廢棄物的處置及循環使用再度受到重視。為了迎合立法及市場對綠色產品及製程的要求，近幾年廢塑膠的循環使用已有較大規模的擴展，其中聚對苯二甲酸二乙酯（polyethylene terephthalate, PET）的回收利用是其中最成功的案例之一。

PET 具有優異的物理及化學性質，因此廣泛用於製造纖維、包裝容器、碳酸飲料瓶、磁帶、膠片及工程塑膠等產品。早期 PET 回收的對象主要是一般照相底片或特定的醫用 X 光軟片等，而目前佔回收大宗的

則是使用量龐大的寶特瓶；以美國地區為例，在 1993 年僅由街道收集點即回收了約六十八萬噸的 PET 容器^(2,3)。由於 PVC（polyvinyl chloride）與玻璃製品將陸續被取代，英國工業分析家 PCI（Leatherland, UK）幾年前預估 PET 容器的需求量至這個世紀初將成長至四百六十萬噸⁽³⁾。這時龐大消費量所造成的廢棄容器瓶，若無法妥善處置將嚴重衝擊環境生態，因此 PET 回收及再利用工作具有相當的重要及急迫性。

面對日益擴增的廢棄 PET 處理量，亟需有效的資源化再利用之方法。目前國外已有製程將其分解、再生產為新的 PET，而台灣地區是 PET 的主要生產國，尤應重視此相關技術的發展。特別在未來環保法令和國際公約的壓力下，產品中須含有一定比例的再生量將會成為必然的趨勢，若未達標準即可能被市場所淘汰。因此 PET 的回收製程除了本身具有極大的發展潛力外，同時也將牽動原有的 PET 生產模式，有關產業應予以重視。因此，本論文即是屬 PET 分解製程的發展研究，期能評估出新穎的反應製程有效再生 PET，以符合環保及經濟的雙重效益。

1.2 PET 回收的商業應用價值

PET 是一種熱塑性（thermoplastic）及縮合型（condensation type）的聚酯（polyester），因此物理和化學兩種處理方式皆適於 PET 的回收利用。例如，物理方式的回收是將廢塑膠熔融後作二次加工，包括撚絲或射出成型等；而化學方式的回收是將廢塑膠分解為單體（monomer）、寡聚物（oligomers）、原物料（raw materials），或裂解為油料或其它化學品等。

一般以物理方式處理廢棄的 PET 塑膠，是先將其細切成碎片後，除去雜物並加以清

洗、乾燥。然後加熱熔解，就可依需要分別作塑模或抽絲等加工，因此生產的成本非常低。然而以此方式再製的 PET 品質不易控制，使得產品的用途受到限制，故大多應用於生產地毯、寢具或玩具填充物，以及像汽車零件、傢俱建材等較低階的產品。此外，微生物在 PET 熔解的過程中仍可能存活，因此美國政府已規定以物理方式回收的 PET 不能再製成食品容器，以確保衛生安全。

工業界實際以物理方式再生 PET 的如 Wellman 公司，其早自 1972 年起就開始以回收的 PET 再製成纖維。不過有鑑於產品的應用性不廣，該公司近年來也致力於創新，以再製的 PET 生產出滑雪衣、毛衣、毛氈及鞋子等高級產品，希望能擴展這方面的市場。不過在 PET 回收處理量日益擴增的情況下，主要仍須仰賴化學的方式加以回收，而且物理回收再製的產品最終也必須以化學回收處理，才能完全解決 PET 廢塑膠的問題。

在化學回收方面，由於 PET 的回收管道獨立，不易混雜它種塑膠，且在其分子組成中含氧量較高的情況下，並不適合以熱裂解的方式處理 PET。較具應用價值的方式是利用 PET 為縮合型聚酯的特性，以化學轉化依其合成的逆方向進行分解反應，將 PET 轉化為單體、寡聚物或原物料等小分子產物。這些產物經過傳統的純化程序處理後，可再重新生產為 PET 或其它聚酯。由於與全新的 PET 無異，以此分解再生的最後成品同樣可作全面性的應用，包括於食品包裝等，而無衛生安全上的疑慮⁽²⁾（自 1991 年起，美國食品藥物管理局准許以化學回收的 PET 作為食品包裝的應用）。

在澳洲則已有實際成功的案例⁽⁴⁻⁶⁾，由 West's Company Swig 和 Smorgon Consoli-

dated Industries 聯合開發名為 Renew 的製程，可成功將回收的 PET 分解後，再生產為新的樹脂。根據他們的估算，若以每年一萬噸的產量，其每噸的生產成本為 940 元美金；而當時 PET 的市場價格為每噸 1300 元美金，足以顯現其商業價值。此外，自 1990 年起，國際間的各大廠商，包括 Eastman、Du Pont、ICI 及 DSM 等都陸續提出和投入化學分解回收 PET 的生產計劃。兩家主要的飲料公司 Coca-Cola 及 Pepsi 也分別與 Hoechst 及 Goodyear 合作由分解程序回收 PET，他們同時宣稱往後製造販賣的飲料瓶將含有 25 % 以上的再製 PET⁽²⁾。

1.3 PET 分解的製程簡介

工業上生產 PET 的製程是先合成出 PET 單體^(7,8)，即雙乙氫氧基對苯二甲酸酯（bis-2-hydroxyethyl terephthalate, BHET），再由單體經聚縮合（polycondensation）反應製得長鏈的高分子。目前合成 PET 單體的方法主要有兩種，第一種是以對苯二甲酸二甲酯（dimethyl terephthalate, DMT）和乙二醇（ethylene glycol, EG）為原料進行轉酯化（transesterification）反應，第二種是以對苯二甲酸（terephthalic acid, TPA）和乙二醇為原料直接進行酯化反應。

化學轉化分解 PET 即是合成 PET 的逆向反應，主要可分為三種方式⁽⁹⁻¹¹⁾：(1) 加乙二醇分解（glycolysis）— 即是聚縮合的逆向反應，以乙二醇與 PET 進行反應，可將之還原為 BHET 單體或寡聚物；(2) 加甲醇分解（methanolysis）— 類似轉酯化的逆向反應，即是以甲醇與 PET 進行反應，可直接將 PET 分解為 DMT 和乙二醇；(3) 加水分解（hydrolysis）— 類似酯化的逆向反應，即是以水與 PET 進行反應，可直接將 PET 分解為對苯二甲酸和乙二醇。由於水解再生

的第三種方式成本最低，最具商業應用潛力⁽⁴⁾，所以本研究即著重於水分解程序。

目前所發展的 PET 水解製程主要可分為三種：(1)在高溫（200 – 280 °C）以金屬醋酸鹽催化⁽⁹⁾；(2)在中低溫（120 – 200 °C）以氫氧化物催化^(11,13)；(3)在中低溫（100 – 150 °C）以硫酸催化^(14,15)。由於反應方式的差異，這三種再生工廠所需的設備投資及操作步驟並不相同；然而，目前文獻中尚無有關各製程優劣分析的報導。所以本研究期望分析各程序的優劣點；另一方面，也期望藉由程序的評估，檢討整體製程發展的瓶頸所在，以作為將來進一步改良製程的參考依據。

二、研究方法

2.1 設計標準

近年台灣地區 PET 瓶（保特瓶）的年回收量約在 8000 至 9000 公噸，因此我們設

計再生工廠所選擇的經濟規模為 8640 公噸的年處理量（連續式每小時處理 1 公噸的 PET，一年 360 個工作天），再生工廠每年可回收 TPA 與 EG 共約 10250 公噸（PET 水解反應轉化率定為 97 %）。

2.2 流程設計

在第一種製程中，反應的進料是 PET、水及醋酸鋅觸媒。進行水解後，產生 TPA 及 EG。經過熱交換器降低反應器出口的温度後，將物料導進結晶罐中，將 TPA 的固體析出。將此含 TPA 固體的泥漿導入過濾裝置，作固液分離。液體部分導入蒸餾塔藉此收集高濃度的 EG 產物，並將水蒸氣回饋進 boiler 中，和補充的進料水加熱至所需的温度，再導入反應器中。簡單的流程图如圖 1 所示。第二種製程中，反應的進料是 PET、水及氫氧化銨，進行水解反應後，產生 TPA 鹽及 EG。經過熱交換器降低反應器出口的温度後，進行接續的中和反應，加入

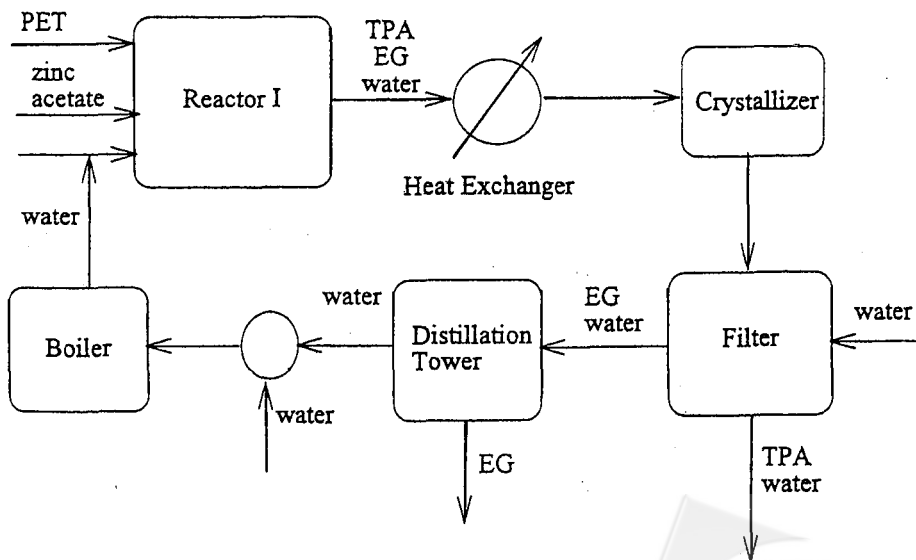


圖 1 Flow diagram for the process of PET hydrolysis catalyzed by zinc acetate.

硫酸將 TPA 的固體析出。以過濾裝置作固液分離後，液體部分導入另一反應器與氧化鈣反應，以再生出氫氧化銨。此反應同時產生多量的硫酸鈣，利用過濾裝置將固體分出。分離後的液體導入一蒸發罐，藉此收集 EG 產物，並將氫氧化銨與水蒸氣回饋進主反應器中。在第三種製程中，反應的進料是 PET、水和硫酸，反應產生 TPA 和 EG。經過熱交換器後以過濾裝置作固液分離。過濾分離的液體部分導入另一反應器，利用氧化鈣中和硫酸。反應後產生的硫酸鈣，利用過濾裝置將固體分出。分離後的液體導入一蒸發罐，收集 EG 產物，並將水蒸氣回饋進主反應器中。

2.3 質量與能量平衡

在第一種製程中，反應 PET 與水量的進料比為 1：6，反應的起始溫度設定 235 °C。在第二種製程中，反應 PET 與水量的進料比為 1：10，氫氧化銨的濃度為 7.3 %，水解反應溫度為 204 °C，中和反應使用當量

比的硫酸。在第三種製程中，反應 PET 與水量的進料比為 1：10，硫酸的濃度為 7 M，水解反應溫度為 150 °C，中和反應使用當量比的氧化鈣。程序其他需設定的操作溫度及流量等均作適當的選擇，計算出整體及各單元的質能平衡。

2.4 單元設計

第一種製程中，設計反應器所需的反應動力學數據，是根據我們的實驗結果⁽²⁾，而其他兩種程序是將文獻的數據^(13, 15)加以放大規模來使用。其他的單元則是根據程序的操作所需，設計出設備規格。

2.5 建廠投資費用及運轉操作成本估計

利用 Perry's handbook 中之資料數據⁽⁶⁾，計算送達價格 (delivered cost) 及全廠之固定投資費用 (total fixed investment cost)。此外投資設備每年的維修費用、稅金、保險、及貶值等支出，勞工、管理、及辦公費用，以及工廠每年運轉所需的水電能源⁽⁷⁾等運轉操作費用也一併估算。

Table 1 Capital and operating costs for the reclaiming plants

Hydrolysis Process	Capital Cost (M US\$)	Operating Cost (M US\$/ yr)	Feed (ton / yr)	Production@) (ton / yr)
Process (1) : Zinc acetate	2.28	1.72	PET 8640 Water 4100 Zinc acetate 47	TPA 7470 EG 2780
Process (2) : Ammonium hydroxide	2.57	2.27	PET 8640 Water 7060 H ₂ SO ₄ 8820 CaO 8090	TPA 7470 EG 2780 CaSO ₄ 12240
Process (3) : Sulfuric acid	9.62	3.66	PET 8640 Water 31630 H ₂ SO ₄ 881301 CaO 50800	TPA 7470 EG 2780 CaSO ₄ 122300

三、結果與討論

3.1 製程評比

三種水解製程的再生工廠，經程序設計後計算出建廠固定投資成本及操作運轉成本如表 1 所示。結果發現第三種製程建廠所需的投資成本最高。第一與第二種製程建廠所需的投資成本相近。在硫酸催化程序的設計中，硫酸與氧化鈣進行酸鹼中和放出大量的熱，因此需要散熱裝置，且材質需耐強酸而採用 Hastelloy C，因而使得設備的價格特別昂貴。在其他兩種程序的設計中，佔設備成本最高的是熱交換器，其次為過濾裝置與蒸發罐，而設備成本最低的是反應器。在不考慮反應物料成本的情況下，第一與第二種製程建廠所需的操作運轉成本相近。不過第二與第三種製程的實際操作必須消耗多量的硫酸，因此其運轉成本會遠高於第一種製程。此外，第二種製程中若使用氫氧化鈉、鉀取代氫氧化銨，則整體的程序也是相類似，不過液體產物 EG 會混合在氫氧化鈉、鉀的水溶液中而不易由蒸餾的方式獲得，因此 EG 必須另外利用萃取 (extraction) 或鹽析 (salting out) 的方法加以分離。總體而言，使用氫氧化鈉、鉀的製程所需的裝置成本應該與氫氧化銨的製程相當接近。綜合以上的研究結果，醋酸鋅催化程序的建廠投資費用及操作費用均低於其他的水解製程，因此高溫水解 PET 的再生製程是最具競爭力。

3.2 程序最適化操作

3.2.1 進料水量與 PET 的比例

反應水量的多寡將影響 PET 的分解程度及後續分離程序的操作量。水量少將使流體的黏度高，攪拌輸送不易，且受平衡常數的限制，反應程度降低。水量高將使反應器、過濾及蒸餾的程序負荷量增大，設備及

操作成本都會增加。所以，現有的設計條件是以進料水量與 PET 的比例為 6:1，應接近於最適的進料條件。

3.2.2 觸媒的使用

反應價格與體積的關係式⁴⁰為

$$\text{Cost} = C \times V^{0.44} \quad (1)$$

C 是比例常數，V 是反應器體積。因此反應若是沒有使用醋酸鋅，則反應器的體積會增加 35% 而價格增加 15%。不過目前設計的反應器價格為 US\$27,250 (僅佔整體設備價格的 5%)，所以單從固定成本來看，使用觸媒對於增加整體製程的效益有限。不過，使用觸媒可以降低反應溫度及壓力，因此對於能源節約及操作安全方面均有相當程度的助益。

3.2.3 反應進料溫度

目前設計的進料溫度是 235 °C，反應採絕熱進行。對於添加觸媒的系統，此反應條件下 PET 分解速率已相當快，不需要再提高反應溫度。對於沒有添加觸媒的系統，可提高反應溫度以增加水解速率；但由前述的分析結果可知，減少部分反應器的價格，對整體程序的經濟效益貢獻並不大。此外，提高反應溫度會降低平衡轉化率，且使加熱及熱交換裝置的負荷量增加，對於整體程序反而有不利的影響。相對的，降低反應溫度則有相反的效應。不過反應溫度也不適合過低，PET 若在未熔融的狀態下反應，分解的速率會變的很緩慢。所以，現有的設計條件是以進料溫度為 235 °C，應接近於最適的進料條件。

3.2.4 經濟評估

前述程序評比的結果顯示，高溫水解再生 PET 製程是最具競爭力。以下是針對此

種分解 PET 再生 TPA 和 EG 的工廠作經濟效益的分析。

3.2.5 產物價格與進料成本的影響

此再生工廠使以每年處理 8640 公噸的 PET 為分析基準，而每年可生產 TPA 與 EG 共 10250 公噸。所以計算此工廠投資資金的回收年數 N ，可以利用下列的式子估算：

$$N = C_1 / (10250X - 8640Y - C_2) \quad (2)$$

其中是 C_1 固定投資費用， C_2 是製造成本， X 是 TPA 與 EG 平均每公噸的價格， Y 是 PET 進料每公噸的價格。

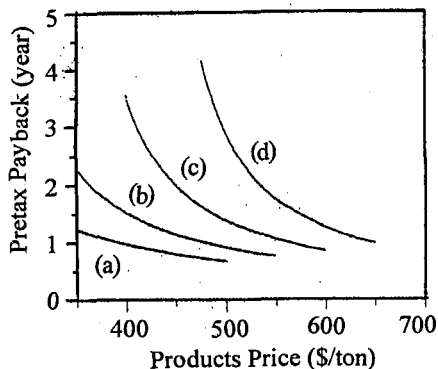


圖 2 Raw material (PET waste) and products prices sensitivity on payback; basis: 8640 ton/yr feed rate. PET waste: (a) \$ 0/ton; (b) \$100/ton; (c) \$200/ton; (d) \$300 /ton.

圖 2 是根據式(2)對於不同產物和進料價格所計算資金回收年數的結果。由圖中的結果可看出，隨著產物價格的增加或進料成本的降低，資金回收的年數會隨之遞減。根據現有的分析基準，當不用計入進料成本時，產物價格在 US\$150 / ton 以下，則資金的回收年數會大幅增長。

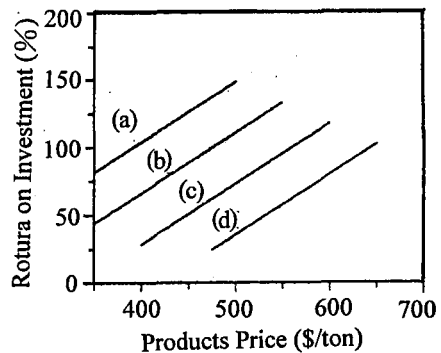


圖 3 Raw material (PET waste) and products prices sensitivity on return rate; basis: 8640 ton/yr feed rate. PET waste: (a) \$0/ton; (b) \$100/ton; (c) \$200/ton; (d) \$300/ton.

投資效益除了可以資金回收年數為指標外，也可以利用投資報酬率 R 估算。而 R 恰為 N 的倒數如下式所示：

$$R = 1 / N = (10250X - 8640Y - C_2) / C_1 \quad (3)$$

圖 3 是根據式(3)對於不同產物和進料價格所計算資資金投資報酬率的結果。由圖中的結果可看出，投資報酬率隨產物價格與進料成本的差值呈線性增加。

3.2.6 投資與製造成本估算誤差的影響

圖是投資成本變動百分之二十對資金的回收年數的影響，可以看出投資成本的變動與資金回收年數的變動呈線性關係。圖 5 是操作成本變動百分之二十對資金的回收年數的影響。由圖中的結果發現，當操作成本增加百分之二十，而產物價格與進料成本的差值在 US\$200 / ton 以下，則資金的回收年數會增加數倍。所以，估算操作成本的誤差會影響預估資金回收年數的準確性甚鉅。

3.2.7 經濟規模的影響

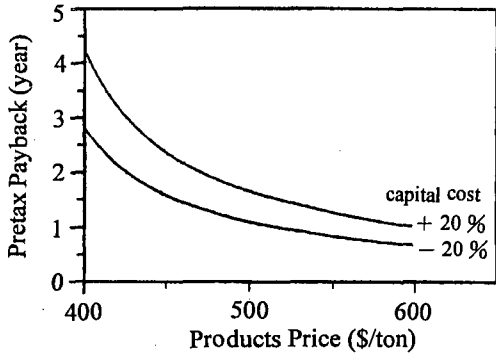


圖 4 Capital cost sensitivity; basis: 8640 ton/yr feed rate, PET waste: \$200/ton.

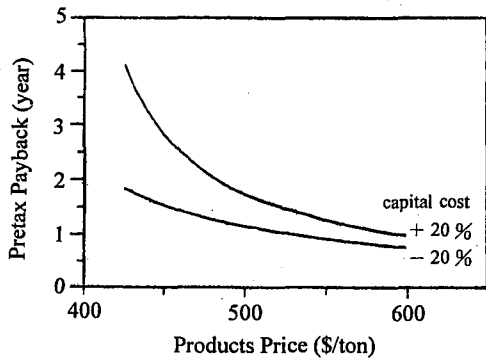


圖 5 Operating cost sensitivity; basis: 8640 ton/yr feed rate, PET waste: \$200/ton.

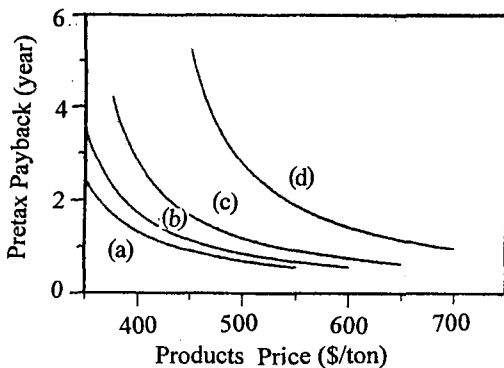


圖 6 Economics scale sensitivity ; PET waste: \$200/ton. (a) 20000 ton/yr (b) 15000 ton/yr (c) 10000 ton/yr (d) 5000 ton/yr.

圖 6 是資金回收年數與經濟規模 (PET 年處理量: 5000 - 20000 ton) 之間的關係圖。結果顯示, 處理量由 5000 ton / yr 增加至 10000 ton / yr 可大幅提高製程的經濟效益, 但處理量增加至 15000 ton / yr 以上, 單位處理量的效益已相當接近。所以根據現階段台灣地區的操作需求, 再生工廠的 PET 處理量以每年 10000 ton 左右的經濟規模較為適宜。

四、結論

三種水解廢 PET 回收對苯二甲酸 (TPA) 和乙二醇 (EG) 的製程, 在相同經濟規模的基準下, 進行建廠的程序設計與價格估算。研究結果發現, 以硫酸催化的製程設備因為使用抗腐蝕的材料, 造成建廠的總投資費用高出其他兩種製程甚多。此外, 以氫氧化銨或醋酸鋅催化製程的設備費用相近, 但前者因為消耗大量硫酸以致所需的操作費用較高。因此, 高溫水解再生廢 PET 製程所需的成本最低。經濟效益分析的結果顯示, 再生工廠的廢 PET 廢處理量以每年 10000 ton 左右的經濟規模最適宜。當產物 TPA 與 EG 的平均價格在 \$400 / ton、進料廢 PET 的價格在 \$200 / ton 時, 高溫水解再生廢 PET 工廠的設備投資回收約需 3 年。

五、誌謝

謝謝姜繼銘、曾怡享、黃家祥、陳敏惠、林怡寧、吳景中等同學, 在台大化工系程序設計課程中對本研究所做的建設及貢獻。

Reference

- (1) C. H. Kline, "Plastics Recycling Takes off in the USA," Chemistry and Industry, No.

- 15, August 1989, pp. 483-486.
- (2) M. M. Nir, J. Miltz and A. Ram, "Update on Plastics and the Environment: Process and Trends," *Plastics engineering*, Vol. 49, No. 3, 1993, pp. 75-93.
- (3) J. Myers, "PET Bottle Growth Is Outpacing Resins Supply," *Modern Plastics International*, Vol. 24, No. 12, 1994, pp. 46-49.
- (4) E. Culp, "Conference Charts a Global Future for Recycling Efforts," *Modern Plastics International*, Vol. 24, No. 5, 1994, p. 24.
- (5) S. M. West, "Improved Polyethylene Terephthalate Decontamination," PCT International Application WO, No. 93-23465, 1993.
- (6) S. M. West, "Improved Polyethylene Terephthalate Decontamination," PCT International Application WO, No. 95-27753, 1995.
- (7) K. Ravindranath and R. A. Mashelkar, "Polyethylene Terephthalate-I. Chemistry, Thermodynamics and Transport Properties," *Chemical Engineering Science*, Vol. 41, No. 9, 1986, pp. 2197-2214
- (8) 萬本儒, "近年來合成 PET 之銻系觸媒效應改進簡介", *塑膠資訊*, Vol. 6, No. 55, 2001, 第 2-5 頁。
- (9) D. Paszun and T. Sychaj, "Chemical Recycling of Poly (ethylene Terephthalate) ," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 36, No. 4, 1997, pp. 1373-1383.
- (10) C. -Y. Kao, B. -Z. Wan and W. -H. Cheng, "Kinetics of Hydrolytic Depolymerization of Melt Poly (ethylene Terephthalate) ," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 37, 1998, pp. 1228-1234.
- (11) B. -Z. Wan, C. -Y. Kao and W. -H. Cheng, "Kinetics of Depolymerization of Poly (ethylene Terephthalate) in a Potassium Hydroxide Solution," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 40, 2001, pp. 509-514.
- (12) 高志宇, 鄭武順, 萬本儒, "PET 分子的高壓水解反應", 第十四屆台灣區觸媒及反應工程研討會論文集, 台灣台南, 1996 年 6 月, 第 378-383 頁。
- (13) W. M. Fassell and D. W. Bridges, "Process for the Destruction of Developed and Undeveloped Photosensitive Film and the Recovery of Products Therefrom," U. S. Patent, No. 3956088, 1976.
- (14) S. F. Pusztaszeri, "Method for Recovery of Terephthalic Acid From Polyester Scrap," U. S. Patent, No. 4355175, 1982.
- (15) T. Yoshioka, T. Sato and A. Okuwaki, "Hydrolysis of Waste PET by Sulfuric Acid at 150°C for a Chemical Recycling," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 52, No. 9, 1994, pp. 1353-1355
- (16) R. H. Perry and D. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6th Edition, McGraw-Hill, New York, 1984, pp. 25-70
- (17) M. S. Peters and K. D. Timmerhaus, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, 1991

*目前服務單位：帝興樹脂股份有限公司，
屏東縣枋寮鄉東海村永翔路 27 號，電話：
：(08) 866-6511