

# 纖維酒精製程中各產物(酒精、葡萄糖與單細胞蛋白質)之經濟及效益評估

沈宥余、王志恒、賴才達、林信成、張志誠、陳玠霖、黃淳、萬本儒\*

\*Email: [benzuwan@ntu.edu.tw](mailto:benzuwan@ntu.edu.tw)

Department of Chemical Engineering, National Taiwan University

國立台灣大學化學工程學系

## 摘要

生質酒精被認為是現今最受矚目的再生能源，年產量佔全球生質燃料的 90% 以上，其優勢在於燃燒過後產生的二氧化碳可再被植物所吸收，因此不會增加二氧化碳的淨排放量。生質酒精的原料主要為糖質、澱粉或木質纖維素三類。以糖質為原料的如巴西的甘蔗酒精，及以澱粉為原料的美國玉米酒精，兩者技術上皆已相當成熟，但都會與糧食生產競爭，導致糧食價格高漲。而第二代生質酒精即纖維酒精則具有原料成本低、來源多樣化及不與糧食生產競爭等優點，因此將會是往後生質酒精的重點發展方向。

本研究的目的是結合纖維酒精的製程與化工程序設計(或評估)的概念，來評估纖維酒精與其他副產物的市場競爭力。纖維酒精製程是以稻草作為原料，其經過稀酸水解及蒸氣爆裂程序後，分別產生木糖與葡萄糖溶液，隨後由發酵方式產生酒精及更多的酵母菌，酒精再經由蒸餾而純化。本研究發現該纖維酒精的製程過於繁瑣，酒精產量過低，因此其生產成本將遠遠高於一般之市場價格，但是其中間產物及副產物(葡萄糖及酵母菌)則具市場競爭力。葡萄糖含大量卡路里，酵母菌則含蛋白質，兩者平時可做飼料，飢荒時則可做食物來源。所以本研究修正傳統纖維酒精程序，將纖維水解後之葡萄糖溶液由蒸發或結晶的方式精煉得到葡萄糖。木糖則與產朊假絲酵母(*Candida utilis*)混合進行發酵，產生酒精與單細胞蛋白質(Single Cell Protein)。本研究將以生產成本的觀點或減少碳排放的觀點，來評估何種程序以及生產何種產物較具效益以及較具可行性。

**關鍵字：**生質酒精、單細胞蛋白質、酵母菌、稀酸水解

## 一、前言

目前世界各國對於能源的消耗與使用的問題皆非常重視，然而各國對能源的需求量日漸增加，石化燃料在未來的可使用量有限，加上燃燒石化燃料所造成的溫室效應已導致全球氣候及環境的惡化，因此再生能源的研究及推廣也已受到全球的重視。

再生能源包括生質能源(生質酒精、生質柴油等)、太陽能、風力等，而生質能源是再生能源中被極為重視的一項，目前全球兩大生質酒精為美國玉米酒精及巴西甘蔗酒精，在 2010 年，前者產量達五千萬公秉，後者則達兩千 6 百萬公秉，兩者共計佔全球生質酒精供應量的 88%[1]。

但是使用糧食作物生產生質酒精，造成了與民爭糧的現象，使得全球玉米、甘蔗的價格逐年上漲，進而影響其他糧食作物的產銷供應鏈，因此近年來纖維酒精的研究也開始受重視。纖維酒精是以農業廢棄物為原料，因此具有不會與糧食互相競爭、原料多樣化等優點。此外，與傳統酒精不同的地方是，纖維酒精產生的二氧化碳是植物進行光合作用時所吸收的二氧化碳，形成封閉的碳循環，因此燃燒纖維酒精對環境中二氧化碳的淨排放量為零。

在生產纖維酒精的製程中，其中間產物為木糖與葡萄糖(分別經由半纖維素與纖維素的稀酸水解而來)，除了作為食物來源，木糖可經由脫水反應產生糠醛(furfural)，糠醛常用於石油煉製品中的溶劑，或是生產呋喃(furan)或四氫呋喃(THF)等其他下游衍伸物，均為工業上常用的原料；葡萄糖除了以作為食物之外，也可以經由脫水反應生產羥甲基糠醛(HMF)，羥甲基糠醛是製造各種石油衍伸物的原料，也可作為燃料，均具有市場競爭力。

同時在生產纖維酒精的發酵過程中，同時槽內的菌體含量也會增加，而這些殘留在槽內的菌體，蛋白質含量豐富，如經過適度的乾燥處理後，可作為一種蛋白質的來源，例如可以作為動物的飼料，或供給人類食用，這些留存的蛋白質稱為單細胞蛋白質(Single Cell Protein，簡稱 SCP)。

作為單細胞蛋白質生產的原料基本分為藻類、真菌、細菌及酵母菌這幾類。生產單細胞蛋白質有以下優點，一、原料(碳源)要求低且極為廣泛，因此糖質、石油原料，及石油化工產品[2]都可作為原料；二、生長

速率遠比動、植物要快，微生物的倍增時間比動物快上許多，例如藻類約 2-6 小時，酵母約需 1-3 小時，細菌約 0.5-2 小時[3]，而動物大約需數個月之久；三、佔地面積小且生產不受氣候變化影響；四、營養價值高，其蛋白質含量最高可達 85%[3]，且富含人體每天所必需的數種胺基酸，因此為適合人體食用的一種蛋白質替代品。

近年來由於人口的快速增加及糧食價格的上漲，使全球糧食的供應明顯趕不上人口增加的速度。由於單細胞蛋白質具有前段所述之優點，因此被認為是一種極具潛力的食物來源。且平常當糧食供應不虞匱乏時，能成為動物的飼料；而發生戰亂或饑荒時，可作為一種生產容易且品質優良的食物來源。

纖維酒精製程中產生的兩種主要產物，分別為酒精及單細胞蛋白質。本研究為探討生產單細胞蛋白質是否更具有競爭力，因此針對生產單一產物(酒精或單細胞蛋白質)的不同修改製程參數，進而發展出其他兩個製程(two alternatives)；根據這三種製程，分別以經濟(回收年限)、二氧化碳減量及糧食替代(SCP)等不同的角度，評估哪種製程以及生產何種產物是最具競爭力。

## 二、製程定義與比較

在本研究中，反應進料為稻草，進料量為 36000 公斤。稻草的主要成分為纖維素、半纖維素、木質素及灰份，其平均組成為纖維素 37.08%、半纖維素 30.48%、木質素 14.18%，剩餘則為灰分[4]，此外，纖維素分解後的產物為葡萄糖，半纖維素分解後的產物則為木糖。

稻草經球磨機切碎之後，成為約 1 公分的碎料，接著進行稀酸水解反應，操作溫度設定為攝氏 165 度。反應後經過濾程序分別獲得液體及固體，液體中的木糖(由半纖維素水解而來)可用適當的酵母菌行之後的發酵程序，固體部分則主要是纖維素，纖維素經過蒸氣爆裂法及酵素水解之後，被分解為葡萄糖溶液。葡萄糖溶液則根據生產不同產物(酒精、葡萄糖固體、SCP)的取向，在本研究中評估三種(A,B,C)不同的製程。

製程(A)是以生產酒精為取向(也就是一般的生質酒精製程)。如圖 1 所示，在稀酸水解後，濃度為 40g/L 之木糖溶液與 *Pichia stipitis* CBS 6054 發酵[5]，結果約可得濃度為 15g/L 之酒精。葡萄糖溶液則以 *Saccaromyces cerevisiae* 進行發酵產生酒精，再蒸餾至 99.5%成為無水酒精。本研究是根據 Ko 等人的研究結果[6]，是控制發酵槽內的溶氧量為零(厭氧環境)，葡萄糖溶液起始濃度為 100g/L，最後可發酵出酒精濃度最大值為 45g/L 與 SCP 濃度為 20g/L 之溶液。

製程(B)以生產食物為取向，是將木糖溶液與 *Candida utilis* ATCC 9256 發酵產生單細胞蛋白質。根據 Holde.r 等人的文獻[7]，起始濃度為 40g/L 之木糖溶液，發酵後應可得濃度為 15g/L 之 SCP。葡萄糖溶液則經由蒸發的方式把水蒸乾產生葡萄糖固體，作為營養補充品。

製程(C)的生產取向是生產單細胞蛋白質(SCP)。木糖水溶液也是以 *Candida utilis* ATCC 9256 發酵產生單細胞蛋白質[7]。同時將葡萄糖溶液以 *Saccharomyces cerevisiae* 進行發酵產生 SCP，是根據 Ko 等人的研究結果[6]，在溶氧量為 0.75mg/L 的條件下，葡萄糖溶液可發酵出 SCP 的最大產量是 60g/L，而酒精濃度幾乎為零。

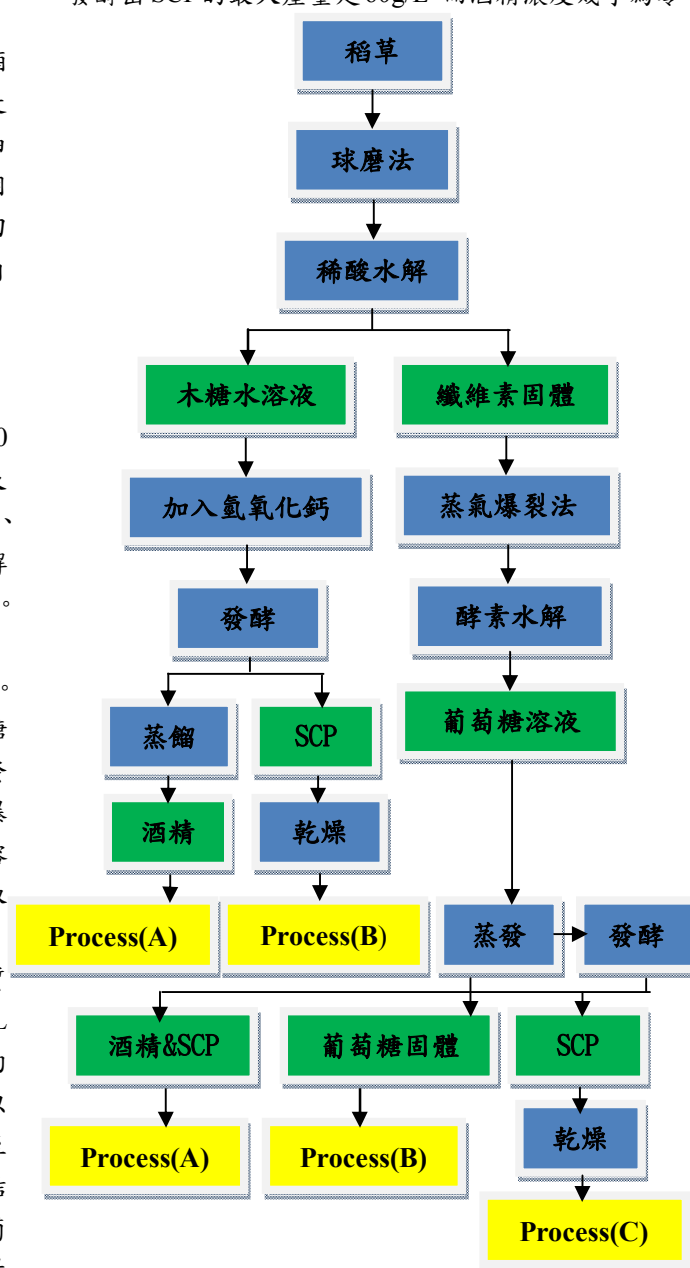


圖 1、製程(A),(B)&(C)之反應設計流程圖

### 三、經濟評估及二氧化碳減量評估

根據圖一的程序設計，兩在計算出應有的產物產量後，將產物以市價售出所獲得的收入減去變動成本之後，由式(1)可知利潤，再由式(2)即可得到回收年限。回收年限的定義為回收固定成本所需要的時間，同時也是評估製程好與壞的指標。在市價方面，葡萄糖粉末約為 1.3 萬元/公噸，酒精約 2.9 萬元/公噸，單細胞蛋白質約 3 萬元/公噸。

$$\text{利潤} = \text{收入} - \text{變動成本} \quad (1)$$

$$\text{回收年限} = \text{固定成本} / \text{利潤} \quad (2)$$

$$\text{折舊費用} = \frac{\text{購買時之設備成本} - N \text{年後設備剩餘價值}}{N \text{年}} \quad (3)$$

$$\text{生產成本} = \frac{(\text{變動成本} + \text{固定成本(折舊)}) - (\text{副產物價值})}{\text{產物產量}} \quad (4)$$

表 1、經濟及二氧化碳減排量評估

|                           | Process(A) | Process(B) | Process(C) |
|---------------------------|------------|------------|------------|
| 稻草用量                      | 5575.18    | 5100.3     | 4327.8     |
| 變動成本                      | 1268.2     | 1107       | 983.5      |
| 固定成本                      | 54774      | 48626      | 46692.5    |
| 酒精產量                      | 621.1      | X          | X          |
| SCP 產量                    | 136.5      | 265.2      | 674.8      |
| 葡萄糖產量                     | X          | 682.7      | X          |
| 回收年限                      | 58         | 83         | 45         |
| 生產成本                      | 8.96       | -          | 6.9        |
| 生產成本/市價之比值                | 3.09       | -          | 2.3        |
| CO <sub>2</sub> 減排量       | 1405.87    | 1435.73    | 1105.51    |
| 單位稻草之 CO <sub>2</sub> 減排量 | 0.252      | 0.28       | 0.255      |

註：以上資料是基於工廠運作一年的所產生的產量及成本，產量單位為公噸，成本單位為萬元，稻草用量包括進料及燃燒用稻草，X 代表沒有產量。

由表 1 中可知，在這三種製程當中，製程(B)回收年限為最長，約 83 年，最不具競爭力，因此之後僅針對製程製程(A)與製程(C)做比較。以回收年限而言，本研究發現最有競爭力的為製程(C)，即著重於生產單細胞蛋白質的製程，其回收年限約為 45 年(製程(A)約為 58 年)。若考慮折舊(式(4))，並將回收年限設定為 7 年(7 年為石化工廠之機器設備之法定耐用年數)，再根據

式(3)可得以製程(C)生產單細胞蛋白質的成本為 6.9 萬元/公噸，約為目前 SCP 市價的 2.3 倍。同樣的方式評估製程(A)，則纖維酒精的生產成本約為目前酒精市價的 3.09 倍。

在二氧化碳減量評估方面，經由計算稻草及各產物裡碳所佔的比例，算出若是假設這些稻草若不是拿來生產纖維酒精，而是作為燃燒用途所排放的二氧化碳量，即是由於生成產物所固定的二氧化碳量。經計算後發現在製程(A)與(C)中，單位重量的稻草所固定的二氧化碳重量分別為 0.252 及 0.255(公斤 CO<sub>2</sub>/公斤)。代表當以每公斤的稻草投入製程(A)或製程(C)中時，可節約 0.25 公斤左右的二氧化碳排放到大氣中。由於這兩個製程在二氧化碳減量方面的效益相當，因此僅能就經濟效益方面，結論出生產單細胞蛋白質是比生產生質酒精具較高之可行性。

### 四、以 SCP 取代一般糧食之效益評估

比較 SCP 與大豆(生產力為每公頃 4.94 公斤/天)之生產，以生產同樣食物產量所需要的土地面積為基準，根據(C)的製程，一座兩千平方公尺的單細胞蛋白質工廠，一年總共生產 698.55 公噸的單細胞蛋白質。若要生產同樣重量的大豆，大約需要四萬平方公尺的大豆田。若以同重量的雞肉來衡量，則大約等於 35 萬隻雞，換算成飼養隻雞所需要的面積，則為 1.2 萬平方公尺。因此若以生產單細胞蛋白質代替生產一般糧食(大豆、肉類等…)，在生產時，可同時減少大量的土地使用。

### 五、結論

本研究以纖維酒精製程為基礎，結合程序設計，發展出專門除了生產纖維酒精之外，另外兩個專門生產葡萄糖與單細胞蛋白質的製程，經由比較三者經濟上與減少碳排放量方面上的競爭力，發現生產單細胞蛋白質的市場競爭力其實並不亞於生產纖維酒精，且在糧食替代方面，若以單細胞蛋白質代替大豆、雞肉等常見的食物來源，可節省大量的土地使用面積。

### 六、參考文獻

- [1] Lichts F.O., "Industry Statistics: 2010 World Fuel Ethanol Production," Renewable Fuels Association (2010).
- [2] Ugalde U.O., J.I. Castrillo, "Single cell proteins from fungi and yeasts", *Appl. Mycol. Biotechnol.*, **2**, 123 (2002).

- [3] [Srivastava, M. L.](#), *Fermentation Technology*, Alpha Science International., Oxford (2008).
- [4] Jin Sheng ying ,Hongzhang, Chen ,”Near-Infrared analysis of the chemical composition of rice straw,” *Ind. Crop. Prod.*, **26**, 207 (2007).
- [5] [Frank K. Agbogbo](#), [Kevin S. Wenger](#), “Production of ethanol from corn stover hemicellulose hydrolyzate using *Pichia stipitis*,” *J. Ind. Microbiol. Biot.*, **34**, 723 (2007).
- [6] Jordon Ko, Wen-Jun Su, I-Lung Chien, Der-Ming Chang, Sheng-Hsin Chou, Rui-Yu Zhan, “Dynamic Modeling and Analyses of Simultaneous Saccharification and Fermentation Process to Produce Bio-ethanol from Rice Straw,  
”*Bioprocess. Biosyst. Eng.*, **33**, 195 (2010).
- [7] Holder N.H.M., S.G Kilian , J.C. du Preez, “Yeast biomass from bagasse hydrolysates, [Biological Wastes](#),” *Biol. Waste.*, **28**, 239 (1988).
- [8] Gavin P. Towler,R. K. Sinnott, *Chemical Engineering Design Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*, Elsevier Inc., 2008.