

農業廢棄物生產生質酒精之前處理系統應用

林長彥¹、陳韋誠²、盛中德^{1*}

摘要 近年來隨著石油價格持續攀升，所以發展再生能源的工作是勢在必行，而生質能源為再生能源的一種。本研究是由農業廢棄物經過破碎、酵素水解及發酵過程後生產生質酒精，原料取方得面，主要是由農田中方便且易取得之玉米桿，此可減少農業廢棄物產生。在生產生質酒精過程中是一種耗能作業，其先須經過水解的步驟，但又受限於破碎後之原料密度太高會使酵素無法水解或水解後得到的醣濃度偏低，所以生產生質酒精濃度相對降低，造成生產成本增加。一般經由醱化後所產生醣約 4%，因此，本研究使用逆滲透法，將 4%的醣濃縮提高至 20%，可有效提升發酵過程中所產出之酒精量，並可減少蒸餾過程中所耗費之能源。

關鍵詞：生質能源、農業廢棄物、逆滲透應用

The Study of Agricultural Waste Bio-ethanol Production

Chang-Yan Lin¹, Wei-Cheng Chen² and Chung-Teh Sheng^{1*}

ABSTRACT In recent years, as oil prices continue to rise, therefore, the development of renewable energy is imperative, and biomass energy as a renewable energy. In this study is from the agricultural waste after crushing, enzyme hydrolysis and fermentation process to produce biomass alcohol. In terms of raw materials, it is mainly of corn stalks, which can easily obtained from farmland, this will reduce agricultural waste generation. In the production of biomass alcohol is a kind of energy-consuming operations, it must first undergo hydrolysis steps. But limited by the raw materials density is too high after crushing, it will make enzymes can not be hydrolyzed or hydrolyzed sugar concentration is low, so the production of biomass alcohol concentration is relatively reduced, resulting in increased production costs. In general, about 4% of the sugar produced upon hydrolysis, therefore, this study used reverse osmosis, increase the concentration of sugar from 4% to 20%. It can effectively increase the amount of alcohol produced in the fermentation process, and can reduce the energy consumed in the distillation process.

Key Words : Corn stalk, Cellulosic alcohol, Energy saving production

¹國立中興大學生物產業機電工程學系

Dept. of Bio-industrial Mechatronics Engineering, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

²國立屏東科技大學生物機電工程學系

Dept. of Bio-electromechanical Engineering, Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 912, Taiwan

*通訊作者。電子信箱：mins@dragon.nchu.edu.tw

一、前言

近年來能源議題與氣體排放量所造成的溫室效應已經漸漸被大眾所重視，在 1997 年 12 月共有 169 個國家在日本京都簽署京都議定書，研究如何解決工業所造成的二氧化碳汙染問題^[2]。但工業進步也帶來其他問題。根據預估，21 世紀後未來石油只有 41 年，天然氣也只能開採 67 年。由此可知國際原油價格會上升，物價也會上漲^[3]。上述所提到世界能危機與環保意識，世界各國均開始重視「永續性」，開始積極推動再生能源。

生質能源為再生能源的一種，其中包含生質柴油及生質酒精，其原料皆來自於植物，具有可再生能源的特性，並且植物在生長時有固定碳之功能，固定碳是可將空氣中的二氧化碳平衡，在植物生長時所耗掉的二氧化碳和燃燒所排出得二氧化碳的量會平衡^[5]，二氧化碳淨排放量為零，所以被列為具有潛力可用來取代汽油的能源。

溶液濃縮方法有很多，在商業用途上，濃縮(淡化)技術主要可分為兩大類，一為蒸餾法，另一為薄膜法。其中蒸餾法又可細分成多級閃化法 (Multi-Stage Flash · MSF)、多效蒸餾法(Multi-Effect Distillation · MED) 和蒸汽壓縮法 (Vapor Compression, VC) 等三種。薄膜法主要有電透析法 (Electro Dialysis, ED)、逆滲透法 (Reverse Osmosis, RO)與薄膜軟化法(Nanofiltration · NF)等。而全世界在製程方法的應用上，逆滲透法(RO)使用最多，多級閃化法之市場的總佔有率則逐年下降趨勢，電透析法 (ED) 則佔有第三之市場率。其中使用逆滲透法、蒸汽壓縮法及電透析法技術的海水淡化廠均已 在 台 灣 及 金 馬 地 區 有 多 個 運 轉 的 實 績。本 研 究 選 訂 蒸 餾 法 及 逆 滲 透 法 兩 種 技 術 在 生 質 酒 精 的 水 解 後 發 酵 前 糖 溶 液 的 濃 縮 較 為 可 行。

滲透法 (Reverse Osmosis) 簡稱 RO，是利用半透膜的材質，及水分子滲透的特性，由於半透膜兩端之濃度梯度產生不平衡，就會形成逆滲透，此時半透膜兩端之液面的高度差即為滲透壓，若在濃度高之一端加壓，則溶劑之滲透方向將會改由高濃度溶液流向低濃度溶液，以達到濃縮之效果，所以逆滲透的基本配件就是半透膜與加壓馬達，此即逆滲透之原理。逆滲透技術是一種分離程序廣被用於海水淡化或超純水的製造，另外，因逆滲透程序沒有相變化，可在常溫下操作而達到濃縮溶液的目的，因此可用於濃縮或分離熱敏感和化學敏感的物质，例如

果汁、牛奶及酵素的濃縮等^[1]。

農業剩餘資材在纖維素酒精生產時需粉碎至 100-200 μm ，再以一定比例的原料跟水混合加入酵素進行水解醱化作業，但加入比例若太高則待水解溶液會過於濃稠而使生產設備無法運作，故一般採用固液比例不超過 2 : 10，以此比例進行酵素水解醱化後，所得之糖濃度約僅 5-6%，而一般發酵工程中之酒精發酵通常採用的糖濃度約 15-20%以上，糖濃度不足不但影響總發酵率，而降低纖維素酒精產量，並使得蒸餾階段的能源消耗增加。本研究擬運用逆滲透原理，藉由提高糖濃度以增加生產後的酒精濃度，減少纖維生質酒精純化之製作成本。

二、材料與方法

(一)材料

由台中農民提供台南 22 號之玉米桿，利用破碎機進行初破碎再進行風乾，經乾燥過的玉米桿再利用粉碎機進行粉碎，其粒徑大小為可通過 100 目之篩網 (0.149mm)。

(二)實驗設備

1. 可移動式能源監測設備：電壓 220V、最大容許電流 50A，由瓦時計、電源插頭、連接單機之插座及外殼所組成，主要使用於逆滲透機及水解設備之使用電量監測。(如圖 1)



圖 1、可移動式能源監測設備

Fig. 1 Portable energy monitoring equipment

2. 逆滲透濃縮試驗機：主要使用於糖溶液的濃縮(圖 2)

- (1) 單向抽水馬達：型號 TQ400 馬力輸出 0.5 hp/0.37 kW；輸出電壓 220V；頻率 60Hz。
- (2) 加壓馬達：馬力輸出 0.5 hp/0.37 kW；輸出電壓 220V 頻率 60Hz。
- (3) FILMTEC 100G RO 膜最大承受壓 13kg/cm²，最大操作壓力 8.5 kg/cm²。

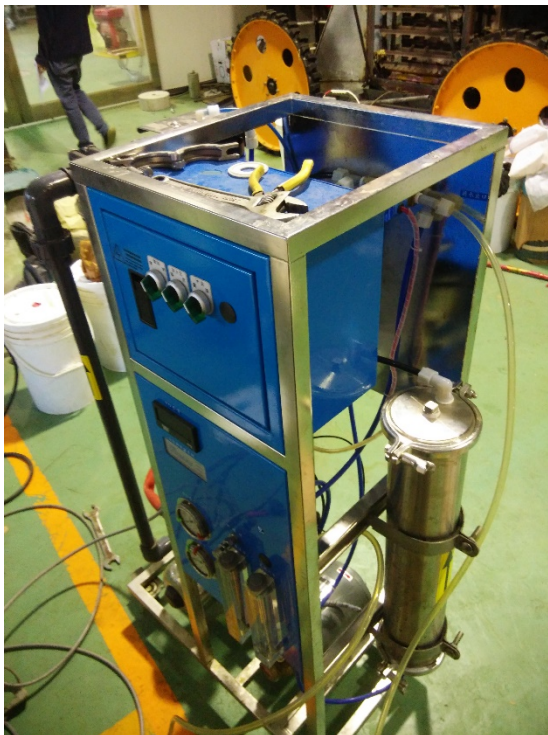


圖 2、逆滲透機

Fig. 2 Reverse osmosis machine

3. 糖度計：濃縮過程取樣溶液中糖度量測(圖 3)

- (1) 型號：ATAGO POKET REFRACTOMETER PAL-1。
- (2) 量測範圍：0~53%Brix。



圖 3、糖度計

Fig. 3 Brix spindke

4. 「水解、發酵及蒸餾三合一」生質酒精生產設備：本研究使用於酒精的蒸餾試驗(圖 4)

- (1) 槽體容量 100 公升。
- (2) 攪拌器馬達：電壓 220V；頻率 60Hz。
- (3) 冷凝器：流量 20 L/MIN。



圖 4、「水解、發酵及蒸餾三合一」生質酒精生產設備

Fig. 4 Bio-alcohol production equipment

(Hydrolysis, fermentation and distillation triple)

(三)實驗方法與步驟

1. 逆滲透法之操作壓力與濃縮程度研究

- (1) 調配低濃度糖蜜溶液(4%)模擬玉米稈纖維水解後之醱液。
- (2) 利用較大型逆滲透機進行實驗，起始操作壓力設訂為 30 kg/cm²，每 1-2 分鐘以糖度計測定糖液濃度，至糖液濃度無法再提高為止。
- (3) 設訂操作壓力為 40 kg/cm²，重覆(2)的步驟。

2. 逆滲透濃縮耗能實驗

- (1) 取 50 公斤之水解完後的醱液進行逆滲透濃縮。
- (2) 操作壓力設定為本研究採用之逆滲透機之最大壓力 8.5 kg/cm²，如果壓力不足機器會自動提升。
- (3) 每 10 分鐘記錄一次電表之用電量、量出純水重量，並用糖度計測量醱濃度。
- (4) 計算逆滲透機所消耗的用電量，將此換算成

能量單位-焦耳，並與利用理論值推算蒸餾法所耗的能源進行比較。

3. 初始酒精濃度對蒸餾耗能的影響
 - (1) 分別調配酒精濃度為 2、4 及 6% 的酒精溶液，分三次進行蒸餾。
 - (2) 設訂蒸餾溫度為 85°C，蒸餾溫度達到設訂溫度後蒸餾 22 小時。
 - (3) 記錄每次蒸餾之電表用電量、產酒精量(g)及產出酒精的濃度(%)。
 - (4) 比較蒸餾前的酒精濃度與生產每公升純酒精的耗能的相關性。

三、結果與討論

(一) 逆滲透法之操作壓力與濃縮程度的關係

此試驗主要在瞭解逆滲透操作壓力與醱化溶液可濃縮程度之關係，本研究使用業界較大型設備(最大操作壓力 50 kg/cm²)，最終目標為將濃度 4% 的糖溶液，經由濃縮後達到 20% 糖濃度，以符合發酵需求濃度，藉以提高產出酒精的濃度。試驗結果如表 1 所示，操作壓力必需克服糖溶液與純水之滲透壓差異，當糖濃度越來越高時所需的操作壓力就越大。由表 1 中可看出在 40 kg/cm² 的壓力下，可將糖濃度提升至 18.2% 以上，由糖濃度由 4.4% 濃縮至 18.2% 約需時 43 分鐘，即每分鐘提高 0.32% 糖濃度，經過計算預計取出純水 41.75 公斤。(註：此處 RO 值為 TDS 值(總溶解固體)，表示一公升的水中溶有多少毫克溶解性固體，單位為 ppm，即 RO 為每千克水中雜質含量)。

表 1、逆滲透濃縮

Table 1. Reverse osmosis performance table

	操作壓 (kg/cm ²)	溫度 (°C)	濃度 (%)	RO (PPM)
10 分	30	35	4.4	738.0
12 分	30	36	4.5	738.2
14 分	30	36.5	4.8	738.3
16 分	30	37	5.1	738.4
18 分	30	37.5	5.2	738.5
20 分	30	36	5.5	738.6
21 分	30	35	6.1	738.8
22 分	30	36	6.7	738.9
23 分	30	37	6.8	739.1

24 分	30	38	7.0	739.1
25 分	30	39.5	7.1	739.3
26 分	30	40	8.2	739.4
27 分	30	40.5	8.5	739.4
28 分	30	41	8.7	739.4
29 分	30	41.5	9.1	739.4
30 分	30	42	10.5	739.4
31 分	30	42	11.0	739.4
32 分	30	44	12.3	739.4
33 分	30	46	13.1	739.4
34 分	30	47	13.8	739.4
35 分	30	47	13.8	739.4
36 分	30	36	14.0	739.4
37 分	30	37	14.1	739.4
38 分	30	37	15.1	739.4
39 分	30	38	15.6	739.4
40 分	40	39	15.9	739.4
41 分	40	40	16.9	739.4
42 分	40	41	17.7	739.4
43 分	40	42	18.2	739.4

(二) 逆滲透法濃縮及與理論蒸餾法濃縮節能比較

1. 逆滲透法濃縮耗能

研究利用逆滲透機，將水解後的醱進行逆滲透濃縮，可將初始醱的濃度 3.3% 濃縮提升至 7.1% 濃度，耗能如表 2 所示。取得純水量為 32.07kg，此為需去除的水量。

由結果可知 3.4% 至 7.1% 花費能源為 1.4 度電一度電為 1KW·h = 3,600 千焦耳。所以逆滲透花 1.4 度約為 5040 千焦耳。..... (1) 由公式(4)之蒸餾法耗能理論值計算結果，用蒸餾法濃縮所花費能源至少 87122.2 千焦耳，是逆滲透法 17.3 倍。即逆滲透法耗能較蒸餾法少 82082.2 千焦耳，減少的耗能為蒸餾法耗能的 94.2%。

表 2、逆滲透濃縮及耗能表

Table 2. Reverse osmosis enrichment and energy consumption table

	操作壓 (kg/cm ²)	淨水出 水量 (kg)	濃度 (%)	電表 (度)
10 分	8.5	5	3.4	0.1
20 分	8.5	9.34	3.7	0.2
30 分	8.5	13.18	4.1	0.3
40 分	8.5	16.63	4.3	0.4
50 分	8.5	19.42	4.6	0.5
60 分	8.5	21.38	5.2	0.6
70 分	8.5	23.72	5.4	0.8
80 分	8.5	25.66	5.8	0.9
90 分	8.5	27.16	6.1	1.1
100 分	9.1	30.08	6.6	1.1
110 分	9.1	32.02	7.1	1.3
120 分	9.1	32.07	7.1	1.4

2. 蒸餾法耗能理論值

熱化學卡 = 4.184 焦耳，使 1 公克的水溫上升 1 度 C 需要 1 卡的熱量

1 焦耳/秒 = 1 W(瓦特)

水的汽化熱： 2260 千焦耳/千克

蒸餾法：使 50 公升 30 度的水，要讓他蒸發 32.07 公升需要的熱能如下：

使 50 公升 30 度的水加熱到 100 度所需的能量 = 50×(100-30)×4.184=14644 千焦耳(KJ).....(2)

蒸發 32.07 公升的水需要的汽化熱能=32.07×2260=72478.2 千焦耳(KJ).....(3)

合計蒸發 32.07 公升的水需要的總熱能=14644+72478.2 = 87122.2 千焦耳 (KJ) (4)

濃縮至 20%時之節能效能比較：

混合型：逆滲透法混合蒸餾法將糖溶液濃縮到 20%濃度：

用本實驗逆滲透機可將糖溶液濃縮至 7.1%(產出 50-32.07=17.93 公升)，再用蒸餾法濃縮至 20%，理論計算還需再蒸餾 9.75 公升的水。即：

蒸餾 9.75 公升的水需要的能量 = 17.93×(100-30)×4.184+9.75×2260 =27306.84 千焦耳(KJ)..... (5)

公式(1)逆滲透法達 7.1% + 公式(5)蒸餾法 7.1%到 20% 需要的能量 =5040(KJ)+27306.84(KJ) = 32346.84 千焦耳(KJ)..... (6)
即混合型的總耗能為 32346.84 千焦耳(KJ)

純蒸餾法總耗能

蒸餾法：使 50 公升 30 度的水，要讓他蒸發 41.75 公升的水可達 20%的糖濃度，需要的熱能如下：
需要的能量 = 50×(100-30)×4.184+41.75×2260= 108999 千焦耳 (KJ).....(7)

所以比較公式(6)及(7)，混合型及蒸餾法提升至 20%的耗能差為 76652.16 千焦耳(約為 21.3 度電)，以工業用電來換算，一度電 2.18 元，每次以混合型方式將 50 公升 3.3%的糖溶液之濃度提升至 20%，可較純以蒸餾法濃縮方式省下 46.4 元的電費。

(三)初始酒精濃度對蒸餾耗能的影響：

如圖 5 之流程說明，本研究分別調配酒精濃度為 2、4 及 6%的酒精溶液 50 公升，充填入小型的「醱化、發酵、蒸餾三合一」設備後，先進行預熱處理，使酒精溶液溫度達設訂蒸餾溫度 85°C，再進行蒸餾 22 小時試驗，記錄每次蒸餾之電表用電量、產酒精量(g)及產出酒精的濃度(%)，以用來比較蒸餾前的酒精濃度與生產每公升純酒精的耗能的相關性。當然以小型設備生產生質酒精是不符合經濟效益的，本研究只是利用相同的設備來蒸餾並比較不同初始酒精濃度的耗能。

試驗結果如表 3 所示，由表 3 中可看出初始酒精濃度提高時，可同時增加產出酒精的濃度與產出量，進而降低每單位純酒精(100%)生產所需的耗能，如初始酒精濃度由 2%增加至 4%時，生產每公升純酒精的耗能由 169.5 度電減少為 66.9 度電，下降幅度達 60.5%;初始酒精濃度再由 4%增加為 6%時，蒸餾耗能進一步降低至 48.0 度電，下降幅度約 28.2%，由此可知提高蒸餾前的酒精濃度(如以逆滲透法提升糖濃度進而提高發酵後酒精濃度)，可有效減少蒸餾耗能(但非線性關係，參考圖 6)。另外，上述以逆滲透法將初始的糖液濃度由 3.3%提高至 7.1%(增加了 3.8%)，可使發酵後的酒精濃度增加約 1.74%(轉換率以 90%計)，且其耗能才 1.4 度電，由此可知逆滲透法在生質酒精生產中深具節能效益。



圖 5、蒸餾試驗流程

Fig. 5 Distillation experimental process

表 3、蒸餾前酒精初始濃度與蒸餾耗能

Table3. The initial concentration of alcohol before distillation and the energy consumption of distillation

初始酒精濃度	2%	4%	6%
預熱時間	8hr 15min	8hr19min	9hr 30min
蒸餾溫度(°C)	83.5-85.4	83- 85.1	83-85
蒸餾 22hr 耗能 (度)	33.9	35.3	35.7
產出酒精濃度(%)	25	44	61
槽內剩下濃度(%)	0.1	1.1	1.4
產出酒精重量(g)	0.8	1.2	1.22
槽內剩下重量(g)	46.86	48.52	47.43
生產每公升純酒精之耗能(度)	169.5	66.9	48.0

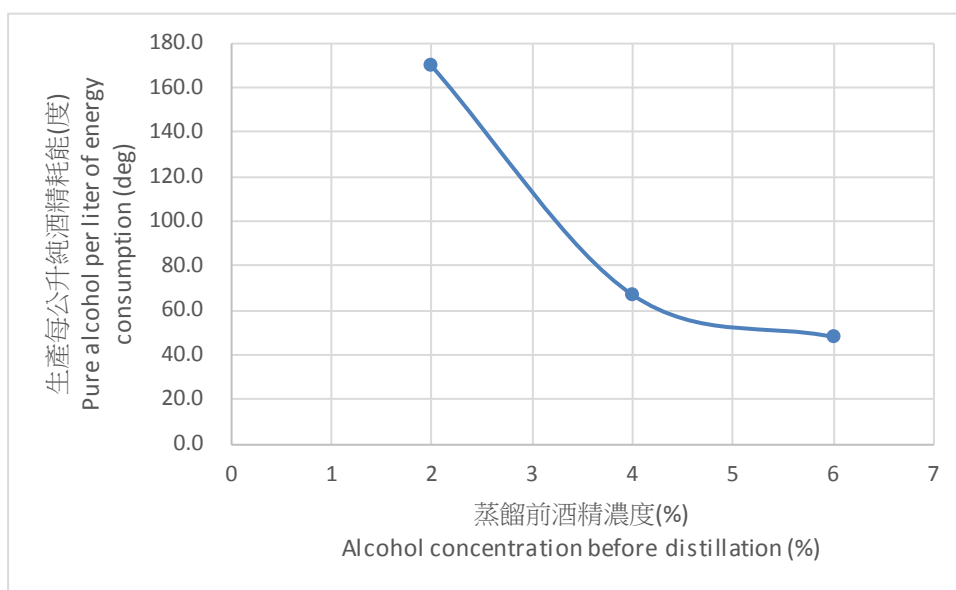


圖 6、蒸餾前酒精濃度與蒸餾耗能的關係

Fig. 6 The relationship between alcohol concentration of before distillation and distillation energy consumption

四、結論

- (一) 利用逆滲透法在操作壓力至 40 kg/cm² 的下，可將 50L 糖溶液的濃度由 4% 提升至 18.2% 以上，得到 8.25 公升的糖溶液，可以解決纖維酒精在醱化時，低濃度問題。可將 6 批次濃縮所得糖溶液集中成為 49.5 公升再進行發酵製程，增加單批次酒精產量，進一步提高生質酒精生產效率及降低生產成本(6 次醱酵製程變成只要 1 次醱酵)。
- (二) 在糖溶液的濃縮有很多方法可行，主要分為蒸餾法及薄膜法兩種，本研究採用的逆滲透法屬薄膜法的一種，比較逆滲透法及蒸餾法在糖溶液濃縮上的耗能，結果顯示逆滲透法可大幅降低耗能，即逆滲透法與蒸餾法比較，逆滲透法可減少耗能約 94.2%。
- (三) 提高每批次蒸餾前之酒精濃度，可同時增加蒸餾後產出酒精的濃度跟產量，因而可大幅降低每批次纖維素生產生質精之耗能。以纖維素為原料因受限於酒醪的濃稠度，其產出的初始酒精濃度大多在 2-3%，本研究顯示若能將初始酒精濃度由 2% 提高至 6%，其蒸餾耗能下降達 72%。
- (四) 在纖維素酒精製程中，於醱化後發酵前的階段，增加一道以逆滲透法的濃縮製程，以節能效益面的考量相當可行。

五、致謝

本論文承蒙科技部能源局「農業廢棄物生產生質酒精之系統應用」計畫(計畫編號：MOST 104 - ET - E - 005 - 001 - ET)之經費補助，特此致謝。

六、參考文獻

- [1] 李茂松、廖啟鐘、張王冠。1998。積體電路產業氫氟酸廢水結晶處理整合回收技術。1998工程實務研討會論文集。
- [2] 彭智平。2008。以逆滲透方法回收氫氟廢水最佳條件。碩士論文，國立中興大學環境工程學系，台中、台灣。
- [3] 李瑋育。2008。利用甘藷生質廢棄物生產生質酒精。碩士論文，國立中興大學食品暨應用生物科學系，台中、台灣。
- [4] 林佳緯。2008。蔬果加工廢棄物在生物酒精生產上之應用。碩士論文，國立中興大學食品暨應用生物科學系，台中、台灣。
- [5] 簡宣裕、張明輝、劉禎棋。2007。木質纖維素產生能源之探討。綠色油田在農業永續發展扮演的角色研討會專刊，行政院農業委員會 P.103-P.114

2017 年 04 月 10 日 收稿
2017 年 08 月 09 日 修正
2017 年 11 月 12 日 接受

