

# 2017 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

**作品編號** 200013

**參展科別** 環境工程科

**作品名稱** 自製高效率簡易水解發酵裝置將纖維素轉  
化為生質酒精之新製程

**得獎獎項** 大會獎：四等獎

**就讀學校** 高雄市立高雄女子高級中學

**指導教師** 蘇政宏、游宗穎

**作者姓名** 朱子賢、邱靚綸、廖采滌

**關鍵字** 纖維素、生質酒精、簡易速效水解裝置

## 作者簡介



我是朱子賢(右)，自小，我便對科學的探索、實驗等有著強烈的興趣。進入高中後，我成為了高瞻班的一員，更使我能在科學的領域中有更深入的探索。抱著如此熱忱，我參與了這次的研究。於我而言，過程中遇到的一些瓶頸，能使我愈挫愈勇，加深了我對科學研究的熱愛與喜歡。

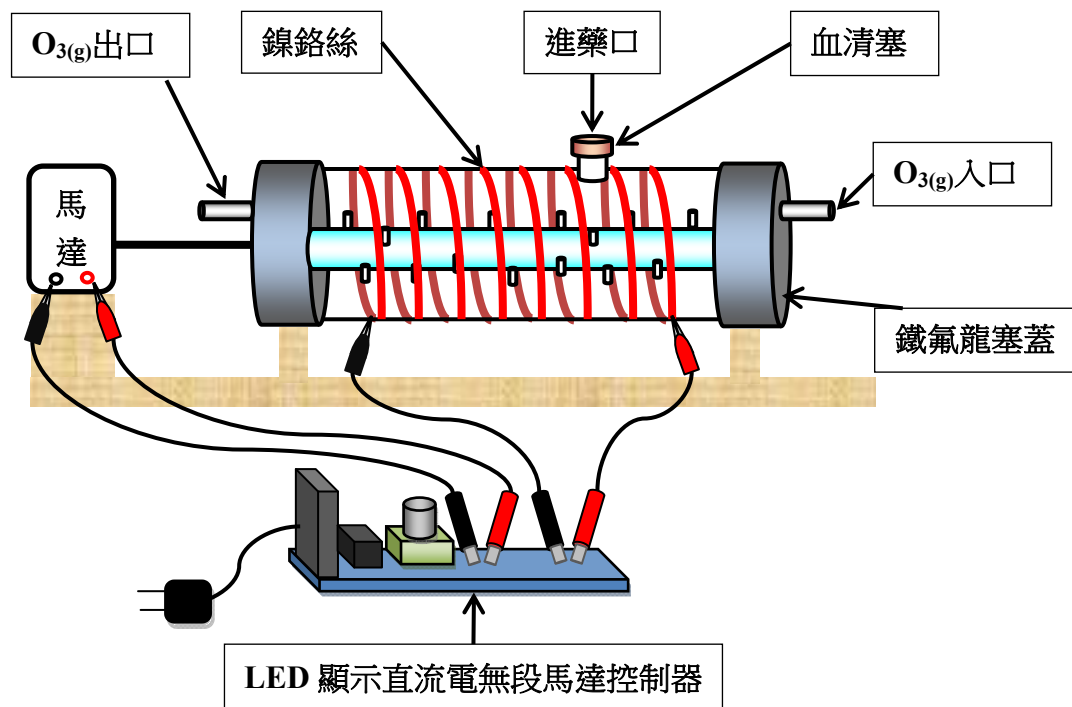
我是邱靚綸(左)，生在一個科學家庭。由於父母都是自然老師，他們從小就培養我對於科學的好奇心和國際觀。從國小就開始參加科展一直持續到高中。做過不同領域的題目，我很喜歡在實驗思考、分析，找出問題的癥結後解決問題。這次的題目環境結合上所學知識，改善世界目前的能源危機和糧食問題，然而要改善這樣的全球問題仍須國際的共同努力。

我是廖采潔(中)，從小就對理科有著強烈的興趣和天分。能參與這次的研究，使我非常的歡喜。科學一直以來都吸引著我，而這次的科展研究，更使我發現環工和化學的結合可以對我們生存的地球環境有所助益，也期待我們此次得研究可在日後更加推廣，多方運用，為永續發展帶來一線曙光。

## 摘要

本研究以不同水解纖維素的方法，包括傳統酸水解、微波及臭氧法，完成效果比較，並以各方法最優勢理論組成最快速且產醣量最高的水解程序。再以麴菌發酵將醣轉為生質酒精，以自製簡易即時取樣發酵裝置並研究效率最佳的麴菌酒精發酵，其中速發酵母平均一天酒精生成率高達約 90.5%。

藉由基礎水解及發酵研究成功設計一套「低耗能、低成本、低汙染、高效率」自製可攜式簡易水解發酵膠囊進行纖維素水解，轉化為醣後又可在同一膠囊中加入麴菌進行酒精發酵，效果極佳，提升轉換率達 63.8%。本研究進一步透過此自製膠囊推廣到廢棄稻草桿、甘蔗渣、甘蔗皮等，皆可得到極佳效果。



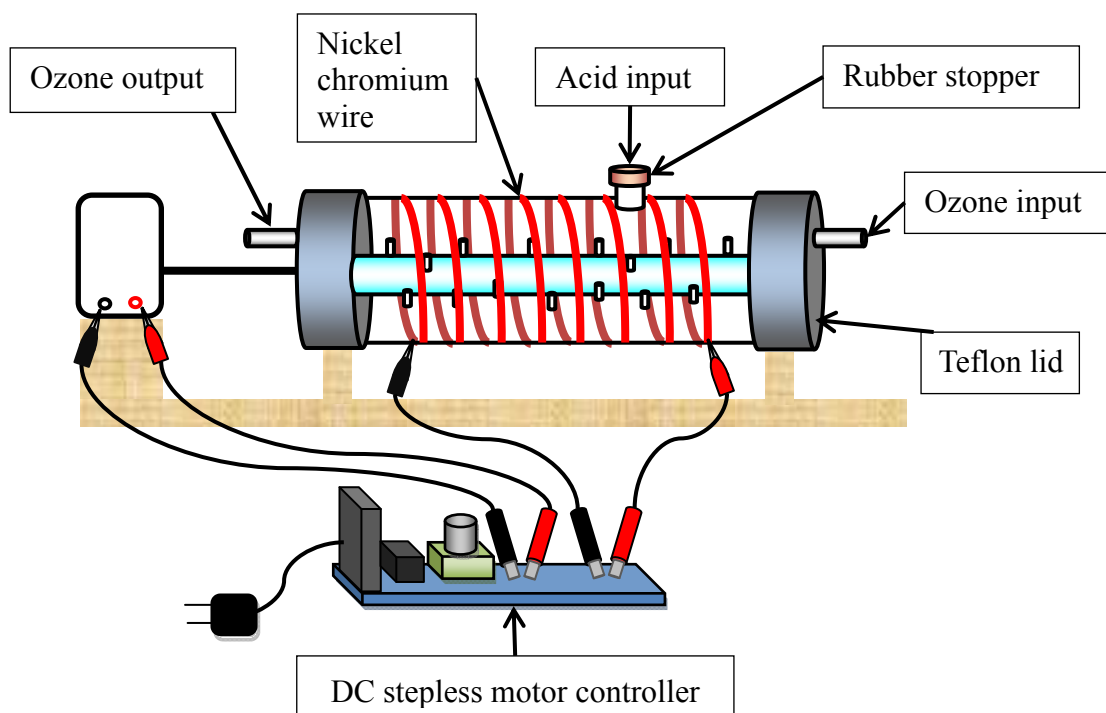
圖一：自製簡易水解發酵膠囊

# Abstract

This research compared traditional acid hydrolysis method, microwave method and ozone method and utilized the advantages of the respective methods to develop a hydrolysis method that is the fastest and has the highest production rate of glucose.

Furthermore, letting yeast convert glucose into biomass ethanol using an innovative instant sampling fermentation device featured a check valve, aiming to find the yeast that produce ethanol most efficiently. It was found that fast-rising yeast has the ethanol production efficiency with a daily production rate up to approximately 90.5%.

Through basic hydrolysis and fermentation studies, a set of innovative hydrolysis fermentation capsule with low energy consumption, low cost, low pollution, and high efficiency were designed. Cellulose is hydrolyzed inside the capsule into glucose, and subsequently fermented into ethanol after adding yeast. This approach has an excellent result with conversion rate reaching 63.8%. This study and the self-made capsule can be further utilized to hydrolyze waste straw, sugar cane bagasse, sugar cane skin...etc., with excellent results expected.



## 壹、研究動機

纖維素的再生與運用一直都是永續發展的重要課題，為了進一步解決人口爆炸所產生的糧食及能源短缺問題，我們想要探討如何有效率及在有限的空間內將**廢棄纖維素**轉化成**生質酒精**。過去眾多水解法中，最常採用的是**化學方法**<sup>5</sup>或利用**生物酵素水解**<sup>2</sup>。其中化學水解方法，最為快速有效，但需伴隨強酸、強鹼、高溫、氧化等條件，而高濃度酸鹼、大量的化學藥劑和耗能的加熱裝置，卻也導致廢棄物處理的問題和安全考量；若以生物或酵素分解纖維素，其培養及酵素保存較不易，且水解的時間過久。故本研究希冀找出及結合各方法最優勢的理論，研發低成本、低耗能、低污染、高效率的**可攜式簡易水解發酵膠囊**，達到最佳化水解程序。

其中，「**降低化學物質的使用**」和「**減少能源的浪費**」是本研究的兩大重點。參考文獻後，我們決定使用在**稀酸環境**下也可進行對極性分子加熱有高度選擇性的**微波水解法**以及**氧化力強的臭氧水解法**<sup>7</sup>，預期這些水解方法的結合可以達成我們目標。再進一步自製**可攜式簡易水解發酵膠囊**將水解生成的**醣**製成**生質酒精**。最後希望充分運用這套水解程序於各種廢棄纖維素處理，使纖維素有效變成醣或酒精，再生利用。

高中課程範圍： 高一基礎化學(一) Ch4化學與能源<sup>3</sup>

高二基礎化學(二) Ch3生物體內的化學<sup>4</sup>

## 貳、研究目的

本研究首先**比較傳統水解法、微波水解法與臭氧水解法**差異，找出在酸最低的濃度、最低加熱溫度及最短反應時間下，產醱效果最佳者。嘗試使用在**稀酸環境**下也可進行水解對極性分子加熱有高度選擇性的**微波水解法**，並氧化力高的**臭氧水解法**。最後，我們試著結合以上的優點找出一個最佳化的水解方法及程序，**自製可攜式簡易水解發酵膠囊**將水解生成的醱製成生質酒精。

### 一、DNS 總還原糖分析法之建立

### 二、傳統加熱酸水解木屑

- (一) 探討不同硫酸濃度對水解木屑之效率
- (二) 探討不同溫度對水解木屑之效率

### 三、微波法水解木屑

- (一) 探討不同微波強度對水解木屑之效率
- (二) 探討不同硫酸濃度對微波水解木屑之效率

### 四、臭氧法氧化水解木屑

- (一) 探討不同臭氧濃度對水解木屑之效率
- (二) 探討家用臭氧機對水解木屑之效率

### 五、化學水解法的最佳程序

以**傳統酸加熱法、微波及臭氧水法**研發最佳水解木屑程序

### 六、生物法酵素水解木材屑

探討不同種類之酵素**(自製、市售、工業用)**對水解木屑效率的影響

### 七、研究醱發酵成酒精的方法

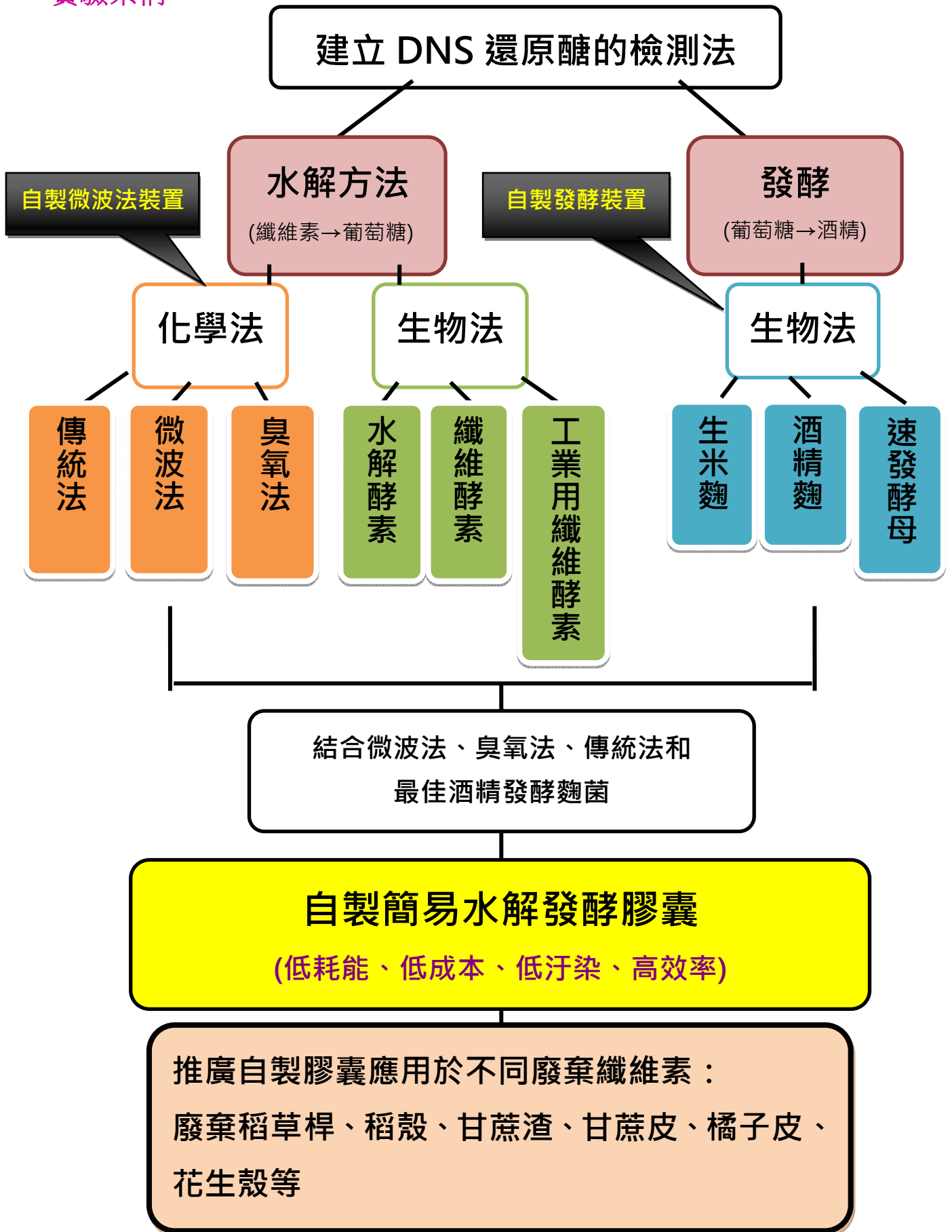
- (一) **自製即時取樣發酵裝置**來發酵製造生質酒精
- (二) 探討不同種類之麴菌對醱發酵為乙醇之效率

### 八、結合微波法、臭氧法、傳統法和最佳酒精發酵麴菌，自製簡易水解發酵膠囊

### 九、推廣自製膠囊罐應用於不同廢棄纖維素的再生運用

探討使用攪碎過篩之纖維素粉末：稻草桿、稻殼、甘蔗渣、甘蔗皮、橘子皮、花生殼製造**生質酒精之效率**

# 實驗架構



## 參、器材及藥品

### 一、儀器

儀器名稱	儀器名稱
去離子超純水機	三頸瓶/冷凝管
恆溫槽	家用臭氧機(小螃蟹臭氧機)
加熱磁攪拌器	家用微波爐
分光光度儀	自製微波水解裝置
超音波震盪儀	自製簡易即時取樣發酵裝置
pH 測量儀	自製發酵水解膠囊
酒精度計	直流電無段馬達控制器

### 二、藥品

藥品名稱	藥品名稱
3,5-二硝基水楊酸	纖維酵素
酒石酸鉀鈉	工業酵素(CellicCTec3)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	生米麴、酒精麴
NaOH	速發酵母
葡萄糖	木屑、稻稈、甘蔗渣...

### 自製微波水解裝置、自製簡易即時取樣發酵裝置



圖 1-1：自製微波水解裝置

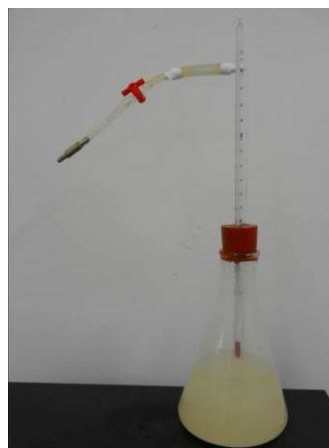


圖 1-2：簡易即時取樣發酵裝置



## 自製發酵水解裝置零件介紹：



圖 1-3：自動攪拌發酵水解膠囊

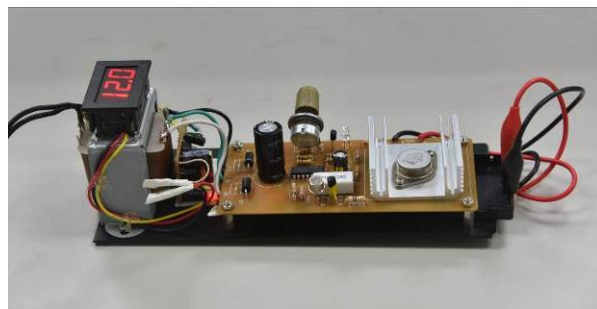


圖 1-4：直流電無段馬達控制器

## 文獻探討：生質酒精製造程序和技術<sup>1</sup>

製造生質酒精的原料大致區分為 3 類，根據不同種類的原料，轉化成酒精的方式也不同。

**第 1 類是糖質原料**，如甘蔗、甜高粱等富含簡單的醣類。利用其莖榨成汁後經酵母菌發酵製成約 13~17% 的含水酒精，再蒸餾提高濃度到 95%，最後分子篩脫除水分成無水酒精。

**第 2 類是澱粉質原料**，如小麥、玉米等，澱粉含量分別約為 70~75%、60~70%。這些作物須先經前處理步驟使澱粉釋放出來，而澱粉是一種聚合醣，須經液化、醣化分解成可發酵的單醣（葡萄糖），隨後的發酵、蒸餾製程則同糖質酒精，這類酒精稱為澱粉質酒精。

**第 3 類是纖維質原料**，多半是農業廢棄物，是由纖維素（約占 38~50%）、半纖維素（約占 23~32%）及木質素（約占 15~25%）三者所組成。纖維素是長鏈狀的高分子結構，和澱粉一樣，但兩者結構不同。半纖維素則是短分子鏈，由多種糖類單體組成，以五碳糖居多。製程上須先經化學或物理方法破壞植物的細胞壁並把半纖維素降解為五碳糖，再以酵素把纖維素水解成六碳糖，最後經酒精發酵把五碳糖和六碳糖轉化成酒，稱為纖維酒精。

纖維酒精所用的原料是木質纖維素，存在於地球上的植物中，並非人或動物的食物，因此沒有排擠糧食的問題，對農地利用的影響也較小此外，國內最大宗的農業廢棄物——稻草稈，年產量約 200 萬噸，大部分是就地燃燒，造成空氣污染，如能做為生質酒精的原料，將有環保、節約能源等多重效益。

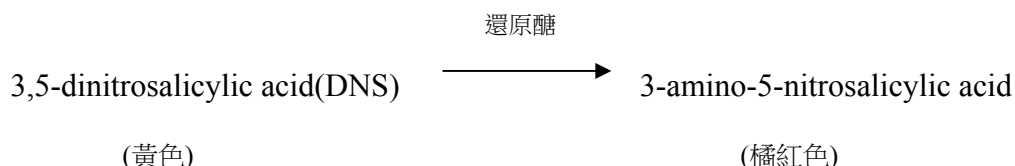
以農林廢棄物做為原料生產第 2 代酒精，更符合經濟效益和環保要求。但目前的發展仍有不少障礙。我們想挑戰這個障礙。希望能達成夢想。

## 肆、研究過程與方法

### 【實驗一】 建立 DNS 還原醣檢測法

#### (一)實驗原理

3,5-dinitrosalicylic acid(DNS)具有還原力，能將醣類中的醛(或酮)基氧化，使顏色的深淺強度和還原糖濃度成正比，因此可由其顏色變化之特性來檢測樣品中還原醣的比例。



#### (二)實驗試劑

##### DNS 試劑：

DNS 1 g、酒石酸鉀鈉 30 g 和 NaOH 1.6 g 稀釋至 100mL

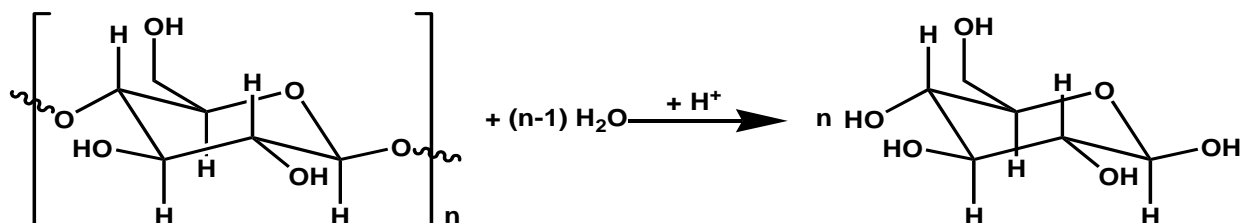
#### (三)實驗步驟

- 1.取葡萄糖標準溶液 2mL 和 DNS 試劑 2mL 混合後，隔水加熱 5 分鐘。
- 2.冷卻至室溫，利用分光光度計測量其在 560nm 吸光值。
- 3.製作檢量線。

### 【實驗二】 傳統加熱酸水解木屑

#### (一)實驗原理

纖維素水解的方法有很多種，其中濃酸水解法價格便宜且水解率高，最為工業界所青睞。纖維素水解反應如下：



## (二)實驗想法

近來最廣泛水解木屑作法為以稀硫酸水解木屑，普遍用高溫高濃度來達到最佳水解效果。本實驗以**溫度**和**硫酸濃度**作為變因來觀察其水解效果。

## (三)探討不同反應條件對水解木屑之效率

(1) 於三頸瓶中加入 2.0 克的木屑和 2.0M  $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$  400mL，200°C 下加熱迴流，改變不同的反應條件後，抽取瓶中 4ml 的澄清溶液，以 DNS 試劑檢測還原醣量。

(2) 反應條件：

$\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$ 濃度：0.5M、1.0M、2.0M、3.0M、5.0M

反應時間：1hr、2hr、3hr、4hr、5hr

反應溫度：200.0°C、150.0°C、100.0°C

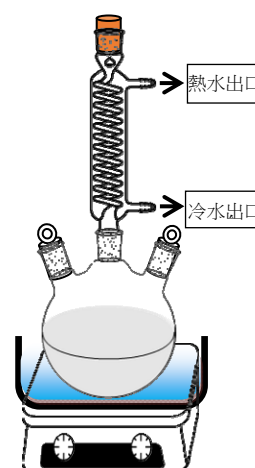


圖 2-1

## 【實驗三】微波法水解木屑

### (一)實驗想法

考慮到儘量能節能來水解纖維素，若能利用微波對極性分子具有高度選擇性的優點，或許能夠提高水解效果，再加上傳統密閉式迴流法有耗時、操作不易、耗材等問題，我們設計一個可以在家用微波爐進行短暫水解的迴流裝置。

### (二)探討不同微波強度對水解木屑之效率

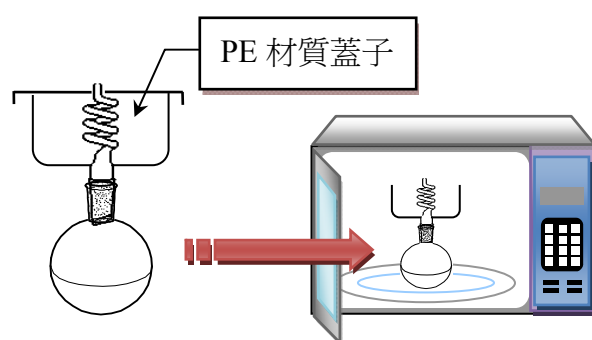
1. 操縱變因：微波強度(強、中強、中、中弱、弱)

$\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$ 濃度(0.5M、1.0M、2.0M)

反應時間：2min、4min、6min、8min、10min

2. 實驗步驟：

(1) 裝置如右圖。於平底燒瓶中置入 1.0 克木屑和不同濃度  $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$  40 mL。



\*註：冷凝管盡量保持乾燥，避免水分子吸收微波影響冷凝管效果

圖 2-2 簡易微波迴流裝置

(2) 乾冰填入微波迴流冷凝管，於不同強度反應後抽取燒瓶中 4mL 的澄清溶液，中和後，以 DNS 試劑檢測還原醣量。

### (三)探討不同硫酸濃度對微波水解木屑之效率

1. 操縱變因： $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$ 濃度(0.05M、0.5M、1.0M、1.5M、2.0M、2.5M)

2. 實驗步驟：同上。

## 【實驗四】 臭氧法氧化水解木屑

### (一)實驗想法

氧化法可採用各種不同的強氧化劑，但思考加熱所需的耗能與廢棄物處理的問題，因此我們嘗試研究臭氧對纖維素水解的效果，再者也想試試已日漸普及的家用型臭氧機。

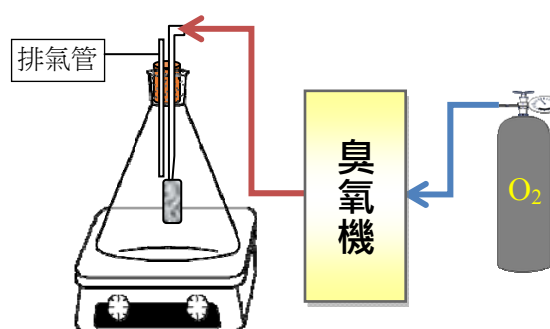


圖 2-3 臭氧水解裝置

### (二)探討不同臭氧濃度對水解木屑之效率

1. 操縱變因：臭氧濃度(高、中、低)

$\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$ 濃度(0.5M、1.0M、2.0M)

2. 實驗步驟：

(1) 裝置如右圖。常溫 25°C 下，將 10.0 克木屑和不同濃度之硫酸 400ml 加入錐形瓶中。

(2) 反應條件：

分別在 1 小時、2 小時、3 小時、4 小時、5 小時抽取瓶中 4ml 的澄清溶液，中和後，加入 DNS 試劑以檢測還原醣量。

### (三)探討家用臭氧機對水解木屑之效率

1. 操縱變因：反應溫度：0°C、20.0°C、30.0°C

2. 實驗步驟：同上。

## 【實驗五】化學水解法的最佳程序

### (一)實驗想法:

我們分析上面傳統法、微波法和臭氧法，嘗試結合各水解法的優點，並由文獻資料<sup>5</sup>得知微波法可以水解大分子的纖維結晶和木質素，故將其放在第一個步驟，臭氧可水解大分子纖維素成小分子纖維素，故將其放在第二個步驟，最後是傳統法在稀酸時，不易脫水的優點，將前面已被分解成小分子的纖維素和寡醣繼續水解成還原醣，我們想找出水解的最佳實驗程序為：**微波法→臭氧法→傳統法**

### (二)探討不同合併方法對水解木屑效率的影響

1. 操縱變因：臭氧法、家用臭氧法、微波家用臭氧接續法(重複五次)

2. 實驗步驟

(1) 實驗的程序為**微波法→臭氧法→傳統法**

方法 \ 步驟	1	2	3
甲	微波法	臭氧法	傳統法
乙	微波法	家用臭氧法	傳統法
丙	微波家用臭氧接續法(重複五次)		傳統法

(2) 在 1M 硫酸環境下水解法最佳的實驗條件：

- 微波法：微波強度為中，時間 5 分鐘
- 臭氧法：高臭氧濃度，通氣 5 小時(甲方法)
- 傳統法：150°C 下，加熱迴流 4 小時
- 家用臭氧產生器：室溫下，以空氣為來源，反應 24 小時
- 微波家用臭氧接續法：微波強度為中，加熱 5 分鐘後，接上家用臭氧機通氣 1 小時，重複 5 次

## 【實驗六】 生物法酵素水解木屑

### (一)實驗想法

為了因應環保的考量，很多人選擇利用生物酵素來水解纖維素來滿足這種風評，故本實驗也嘗試以不同種類的酵素進行反應，觀察其效果，是否真的有其價值。

### (二)探討不同種類之酵素對水解木屑之效率

1. 操縱變因：酵素種類(自製酵素、纖維酵素、工業用纖維酵素 CellicCTec3)

2. 實驗步驟：

- (1) 自製即時取樣生物水解發酵裝置如圖。於錐形瓶中取加入 400ml 的水、20g 的纖維素和 2g 的酵素。
- (2) 每隔一天取一次樣做 DNS 檢測，檢測葡萄糖含量。

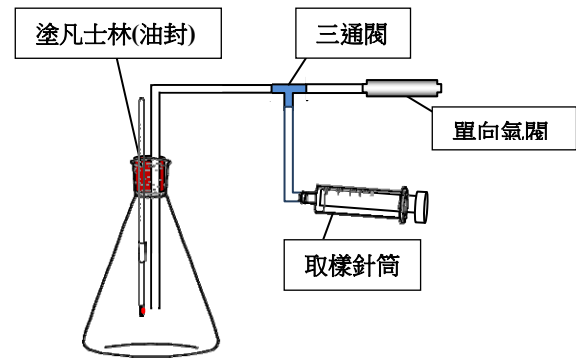


圖 2-4：即時取樣生物水解發酵裝置

## 【實驗七】 研發糖發酵成酒精的方法

### (一)實驗想法

找出木屑水解成葡萄糖的較佳程序後，接著將葡萄糖製成酒精，因此，我們購入不同的菌種，並研究酵素在常溫常壓下對於葡萄糖發酵的速率及成效。



### (二)實驗設計

我們將生物法的實驗分為將木屑分解為葡萄糖後，希望研究將葡萄糖繼續發酵為酒精。其中，在葡萄糖發酵成為酒精的菌種，我們討論了酒精麴、生米麴、生高粱麴、速發酵母在 6 天內發酵之結果。為了尋求高效率，做了速發酵母和酒精麴短時間的實驗，期待可以找到省時、高酒精生成率的酵母短時間內發酵之結果，我們同時利用酒精度計來觀測結果並映證。探討不同種類之麴菌對糖發酵為乙醇之效率。



### (三)探討不同種類之麴菌對醣發酵為乙醇之效率

1.分為兩部分，一個是酒精麴、生米麴、生高粱麴長時間下的結果(實驗一)。

另外，我們為了尋求高效率，做了速發酵母和酒精麴短時間的實驗(實驗二)，期待可以找到省時、高產率的酵母。我們也使用酒精度計測量液體的折射率(實驗三)來應證(實驗一)和(實驗二)的結果。

2.實驗步驟：

- (1) 以自製即時取樣生物水解發酵裝置，加入 400ml 的水、20g 的葡萄糖和 2g 的生高粱麴/生米麴/酒精麴/速發酵母。
- (2) 每隔一天取一次檢測其酒精度和葡萄糖含量。



圖 2 -5：自製即時取樣生物水解發酵裝置示意圖

### 【實驗八】 結合微波法、臭氧法、傳統法和最佳酒精發酵麴菌，自製簡易水解發酵膠囊 (一)實驗想法：

在我們找出最佳條件並融合包含生物方法和化學方法的流程後發現由於每個部份的實驗都有各自的裝置、容器，過程繁瑣。於是我們設計一個膠囊罐來進行所有的實驗簡化流程，達到方便、省能、低藥劑使用的目標，印證綠能科技的精髓。

(二)實驗裝置：

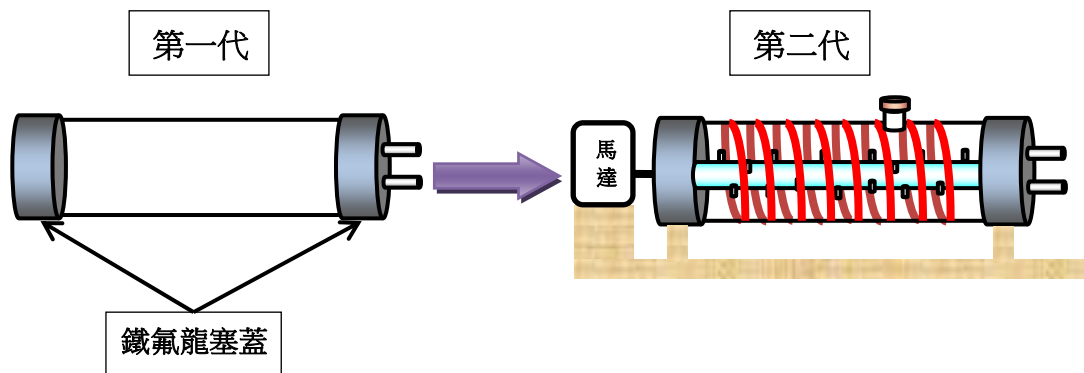


圖 2 -6：第一代與第二代水解膠囊簡圖

### 第一代膠囊罐：

1. 我們利用玻璃製作瓶身，兩邊用不受臭氧、酸影響的鐵氟龍材質做瓶蓋並留有兩個通道一通道通臭氧另一通道排出多餘的氣體。
2. 在進行微波法的時候我們便將整個膠囊罐放置於微波爐內進行加熱。我們在一邊通道上裝上單向閥，避免膠囊罐內的氣體過多、使膠囊罐破裂。

### 第二代膠囊罐：

1. 為改善第一代木屑和藥劑無法有效混合的狀況、我們加入鐵氟龍材質的攪拌棒，並連接於馬達上。
2. 考慮到木屑生成葡萄糖之後要放入麴菌發酵，為使發酵速率穩定且快速，我們在管壁上纏繞鎳鉻絲，對膠囊加熱。使膠囊維持在最利於麴菌運作的溫度。
3. 在進行微波法和臭氧法時我們都須用到酸，為使麴菌可以存活，我們在管壁開了一個側管方便噴鹼、中和。

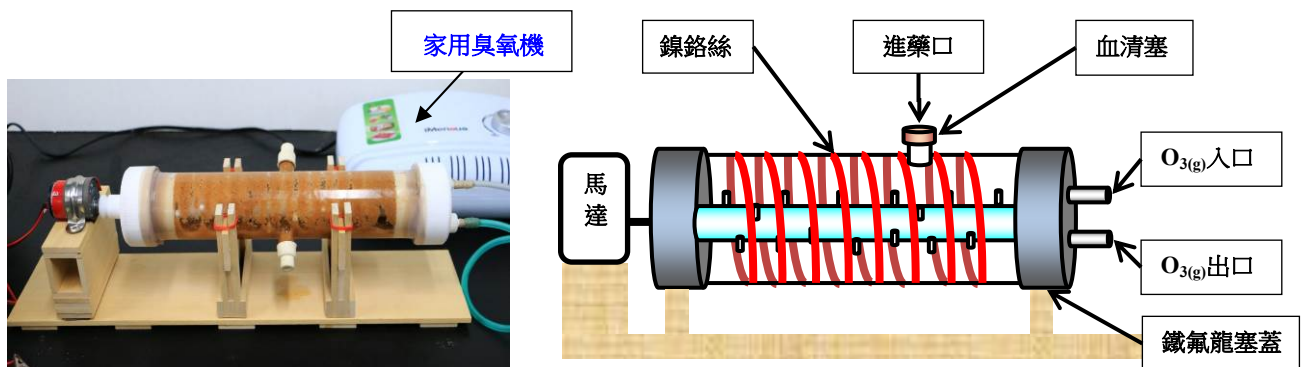


圖 2-7：第二代水解膠囊各部位圖

4. 我們利用學校不要的音響放大器面板以及到電子材料行購買直流輸出變壓器、AC 直流電源無段控制器、直流電 LED 顯示器。組裝成簡易 LED 顯示直流電無段馬達控制器。目的是可以同時對馬達以及加熱用的鎳鉻絲提供電壓。

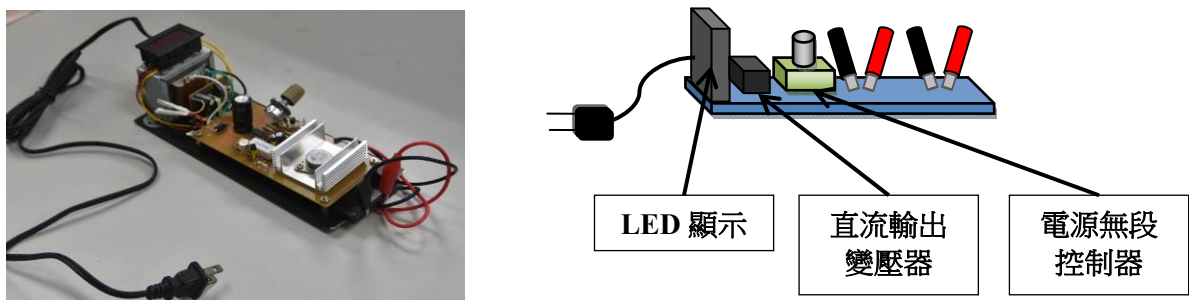


圖 2-8：LED 顯示直流電無段馬達控制器



### (三)實驗步驟：

1. 倒入 20.0 克木屑後加入 1M  $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$  200 mL。
2. 蓋上蓋子後放入微波爐進行微波法(強度為中，5 分鐘)。
3. 取出膠囊罐，接上家用臭氧機通入臭氧 1 小時。
4. 重複步驟 2、3 五次。
5. 以鎳鉻絲加熱維持  $150^\circ\text{C}$ ，4 小時
6. 以 NaOH 中和  $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$ ，初次測量葡萄糖含量。
7. 加入使葡萄糖轉換成酒精效果最好的速發酵母。
8. 使膠囊維持定溫( $30\sim 35^\circ\text{C}$ )，以利麴類發酵；每 1 小時使馬達運轉 10 分鐘，反應攪拌均勻，持續 12 小時。

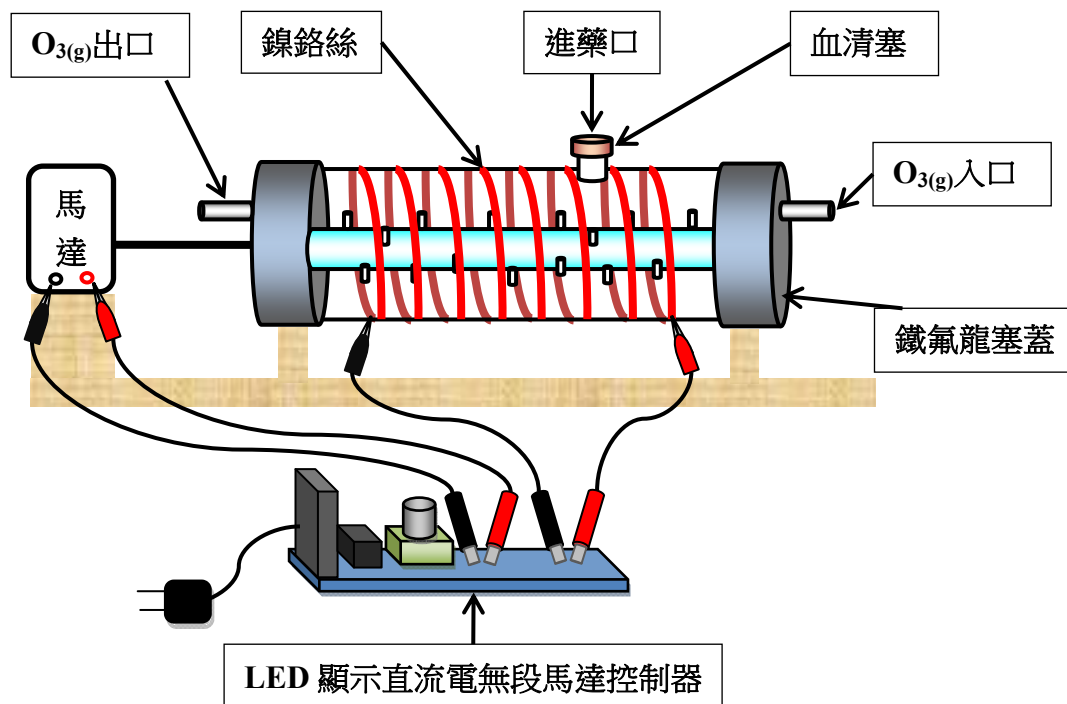


圖 2 -9 ：自製簡易水解發酵膠囊

## 【實驗九】 推廣自製膠囊罐應用於不同廢棄纖維素的再生運用

探討使用攪碎過篩之纖維素粉末：稻草桿、稻殼、甘蔗渣、甘蔗皮、橘子皮、花生殼  
製造生質酒精之效率

### (一)實驗想法：

將自製膠囊罐至不同廢棄纖維素的探討。推廣到稻草桿、稻殼、甘蔗渣、甘蔗皮、  
橘子皮、花生殼來製造生質酒精之效率

### (二)實驗設計

先利用高速粉碎機將不同廢棄纖維素(稻草桿、稻殼、甘蔗渣、甘蔗皮、橘  
子皮、花生殼)粉碎，再使用攪碎過篩之纖維素粉末，最後透過自製可攜式簡  
易水解發酵膠囊將水解生成的醣製成生質酒精

### (三)實驗步驟：

1. 倒入 20.0 克木屑後加入 1M  $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$  200 mL。
2. 蓋上蓋子後放入微波爐進行微波法(強度為中，5 分鐘)。
3. 取出膠囊罐，接上家用臭氧機通入臭氧 1 小時。
4. 重複步驟 2、3 五次。
5. 以鎳鉻絲加熱維持 150°C，4 小時
6. 以 NaOH 中和  $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$ ，初次測量葡萄糖含量。
7. 加入使葡萄糖轉換成酒精效果最好的速發酵母。
8. 使膠囊維持定溫(30~35°C)，以利麴類發酵；每 1 小時使馬達運轉 10 分鐘，反應攪  
拌均勻，持續 12 小時。

## 伍、結果與討論

### 一、DNS 總還原糖分析法之建立

#### (一)實驗結果

葡萄糖濃度(mM)	0.10	0.20	0.50	1.00	2.00	5.00
吸光值(Abs)	0.028	0.041	0.119	0.287	0.582	1.486

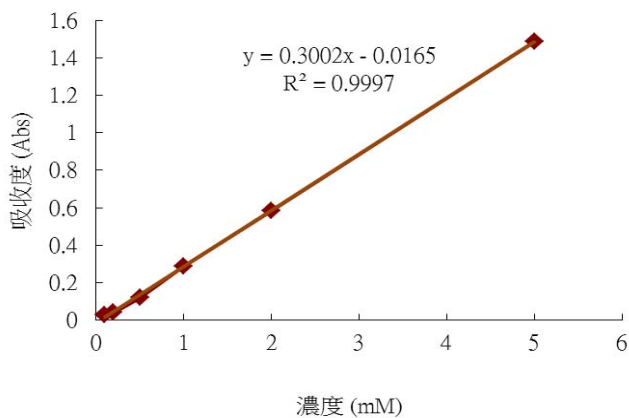


圖 3-1：葡萄糖檢量線

圖 3-2：DNS 檢測還原糖

#### (二)實驗討論

1. 以 UV-VIS 分光光度儀檢測實驗試樣的吸收度，代入檢量線求得樣品濃度
2. 利用檢量線，建立還原糖的測量標準
3. 計算方法：實驗結果以每公克木屑水解出還原糖量，單位(mg/g 之木屑)來表示之。

吸光度	→ 換算 →	樣品濃度	→ 換算 →	水解糖量	→ 換算 →	水解效率
(Abs)	吸收度代入 校正曲線	× 樣品體積	× 分子量(180)	÷ 木屑重量		

## 二、傳統加熱酸水解木屑

### (一)實驗結果

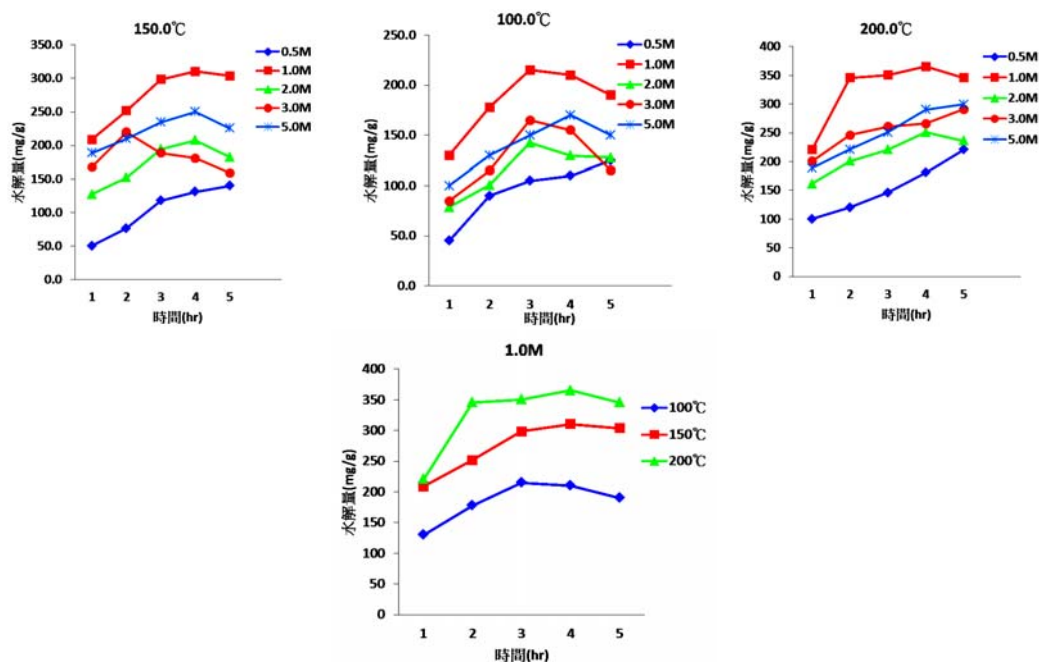


圖 3-3：不同硫酸濃度與溫度

### (二)實驗討論

1. 結果顯示硫酸濃度在 1M 時，水解量達最大。除了當硫酸濃度為 0.5M 時，因為硫酸濃度相當稀薄，脫水現象低外，使得水解量持續上升外，硫酸濃度 1 到 5M 之水解量皆會隨著時間的增加而先上升而後下降，原因是當纖維素被強酸充分水解成小分子還原醣後，已沒有足量的原料進行水解反應，此時具有脫水性質的硫酸就會對這些還原醣進行脫水反應，降低水解量，而溶液也會因脫水產生的碳微粒致使顏色慢慢變黑。
2. 溫度愈高水解量愈高，時間愈長，反應愈完全，水解量也愈高。溫度對於低濃度酸水解影響較大；5M、3M 的硫酸受還原醣被硫酸脫水碳化影響，水解量少且水解現象不顯著；0.5M 硫酸濃度較低，脫水現象不明顯，故水解量隨反應時間增加而持續增加。
3. 利用強酸打斷纖維素中葡萄糖分子組成的長鏈分子結構，進而使纖維素由高分子水解成單糖或雙糖等小分子醣醇糖，達到微生物可吸收利用的效果。
4. 傳統法酸水解木屑需花極長時間反應，且須在高溫高濃度下才可使其達到較佳的效果，效率低又耗能。蒐集資料後，我們決定嘗試以微波水解木屑的方法，觀察其效果並進行比較。

### 三、微波法水解木屑

#### (一)實驗結果

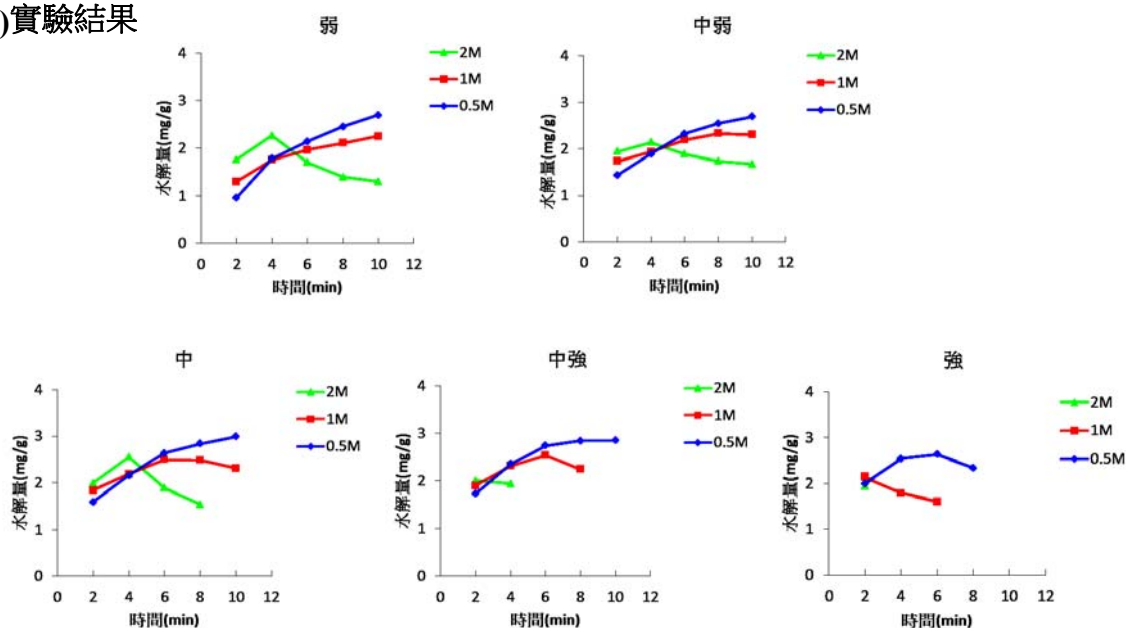
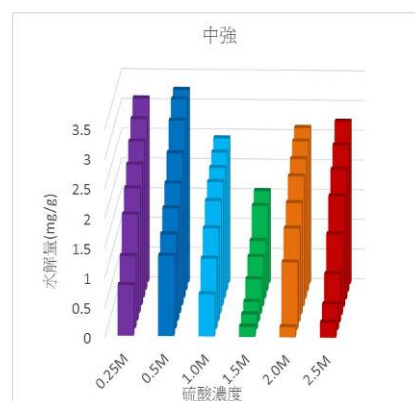


圖 3-4：不同微波強度與硫酸濃度對水解量的影響

#### (二)實驗討論

1.大致上，硫酸濃度愈大，微波強度愈強，微波時間長些，水解量就較高，但不同強度下，時間對水解量的趨勢沒有絕對的相關性，實驗過程發現，在高強度時會有硫酸脫水的現象，如在微波強度為中強時，水解有明顯的減少，微波強度為強時，硫酸脫水反應強過水解甚多，以致 2 分鐘後木屑即脫水，為了證實我們的想法，我們改以鹽酸來代替硫酸，不僅沒有碳化的現象，且觀察到水解量也隨著時間增加而增加上升，證實硫酸的脫水現象。



2.實驗結果發現，硫酸濃度低，微波水解量反而提高，所以對微波強度為中強有極大的興趣，因此整理數據分析最大值時，發現一個有趣的現象，如圖，所有微波強度都具有相同的趨勢，水解量 0.25M 到 0.5M 增加、0.5M 到 1.5M 減少，1.5M 到 2.5M 又慢慢增加，表示硫酸較低時，微波水解受到硫酸脫水反應的競爭較少，水解量較佳。當硫酸濃度開始提高，水解反應速率增加，卻也使脫水反應加速。尤其在 1.5M 時，水解量有明顯的減少，可能意味脫水反應將取代水解反應。所幸在 2.0M 到 2.5M 水解

反應速率又慢慢提升了。

3.綜合上述結果，最重大的發現就是，微波水解在稀酸條件下，水解量反而最佳，這將作為接下來研究一個重要依據。

#### 四、臭氧法氧化水解木屑

##### (一)實驗結果

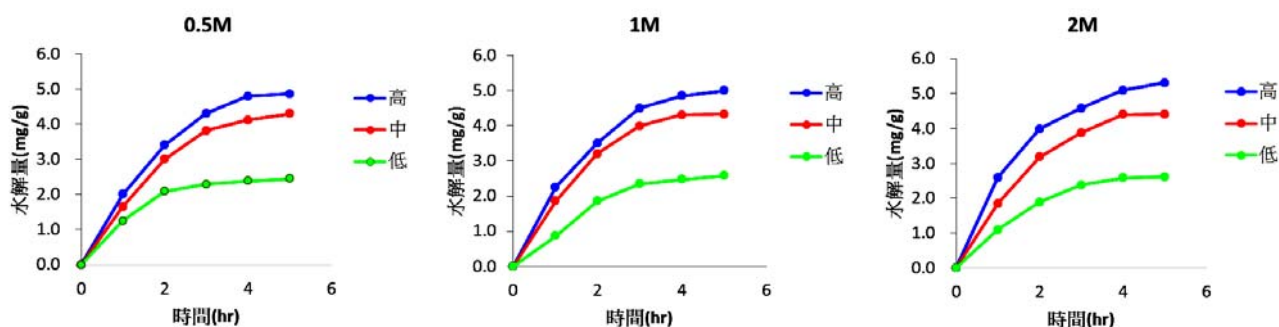


圖 3-6：不同臭氧濃度與硫酸濃度對水解量的影響

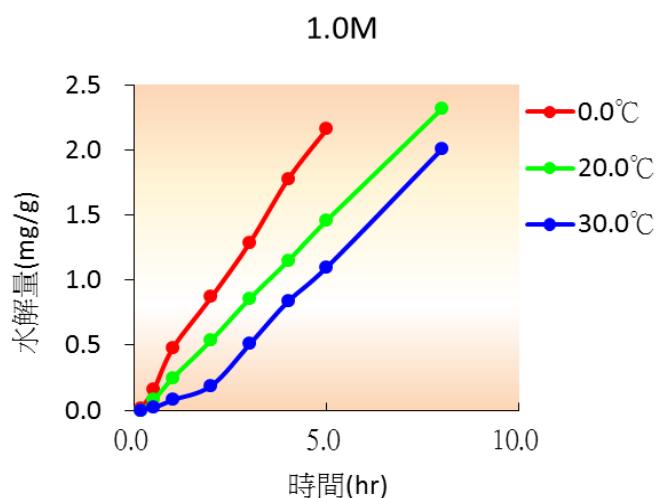
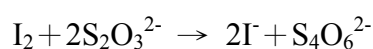
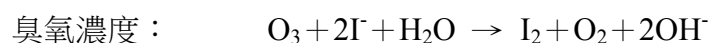


圖 3-7：不同溫度，家用臭氧機對水解量的影響

##### (二)實驗討論

1.臭氧濃度分高、中、低三種，我們利用高二課本上所講臭氧的氧化還原反應來標定



臭氧容量(mg/min)=[Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的滴定量 × Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>濃度]/臭氧通入時間

2.不同 pH 值與臭氧濃度的實驗中發現水解量隨著**臭氧通入時間**和**濃度**增加而遞增，

但因臭氧的強氧化力，還原醣會進一步被氧化為羧酸或二氧化碳，故水解的量漸趨平緩，實驗時我們有做酸鹼度檢測，發現 pH 值明顯降低，證實了這個想法。

3. 家用臭氧機的實驗皆顯示，水解量隨著時間增加而增加，只是水解效果並不如一般臭氧法好，要持續反應 24hr 後才有較好的結果。
4. 高濃度臭氧機的氧化力過強，會把已產出的葡萄糖繼續被氧化，所以系統裝置僅選用低濃度家用臭氧機做為臭氧來源。
5. 兩種方法雖然結果都沒有比傳統法佳，但利用臭氧的強氧化力水解先將纖維素水解成小分子的纖維素和寡醣的能力應該有助於縮短水解製程上的成本。

## 五、化學水解法的最佳程序

### (一) 實驗結果

	方法甲	方法乙	方法丙
水解量(mg/g)	495.1	438.1	557.8
提升效率(%)	61.3	43.9	82.5

### (二) 實驗討論

結合三者的優點，的確可以提升水解量，結果如上表，與同樣低濃度(0.5M)硫酸環境下比較，合併方法平均超過傳統水解量 62.5%，其中又以合併方法丙(微波和臭氧法交互使用重複五次，再接以傳統法)水解量最多。

## 六、生物法酵素水解木材屑

### (一) 實驗結果

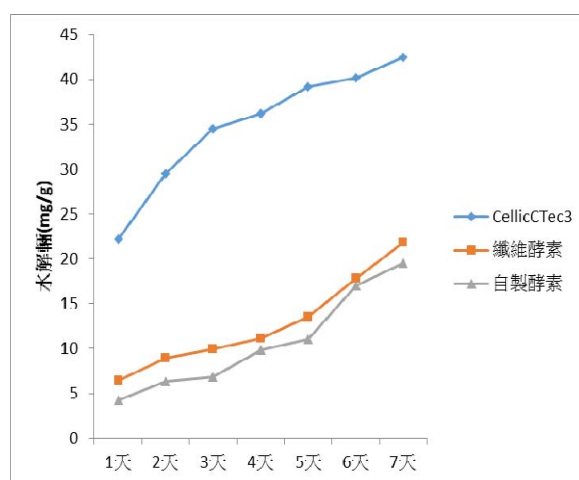


圖 3-8：不同酵素對纖維素發酵之水解量



## (二)實驗討論

- 1.工業酵素(CellicCTec3)、纖維酵素、自製酵素的葡萄糖量都是穩定上升。工業纖維酵素 CellicCTec3 明顯優於纖維酵素。
- 2.有遇到發霉的狀況，證明真的有產生葡萄糖。雖然現在普遍追尋無化學藥劑，但是為了較高的效率，我們在下一階段的實驗中捨棄了用酵素分解纖維素的方法，選擇在膠囊罐中進行微波法、臭氧法及發酵。

## 七、研究醱發酵成酒精的方法

### (一)實驗結果

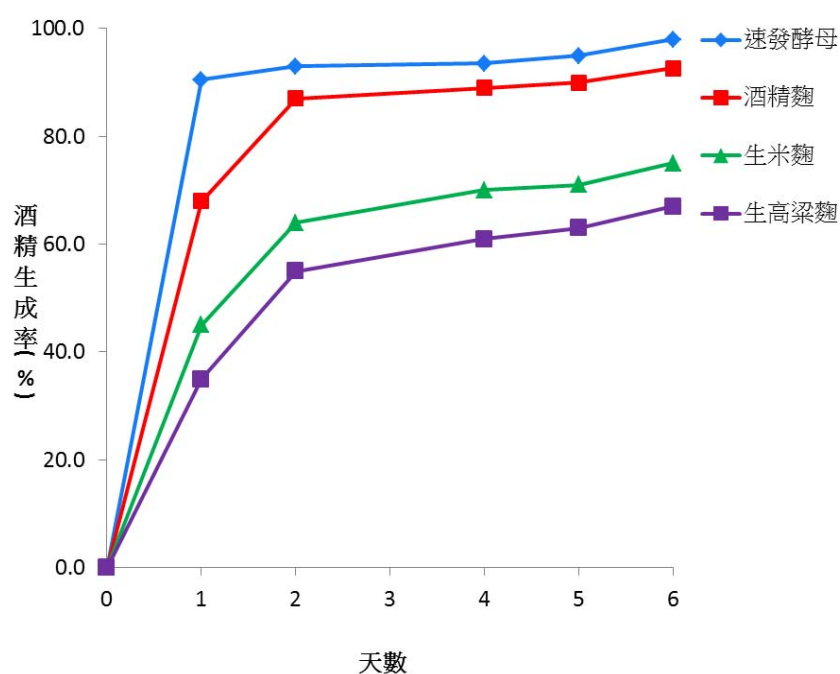


圖 3-9：20g 葡萄糖在速發酵母、酒精麴、生米麴、生高粱麴作用下在六天之內的酒精生成率(實驗一)



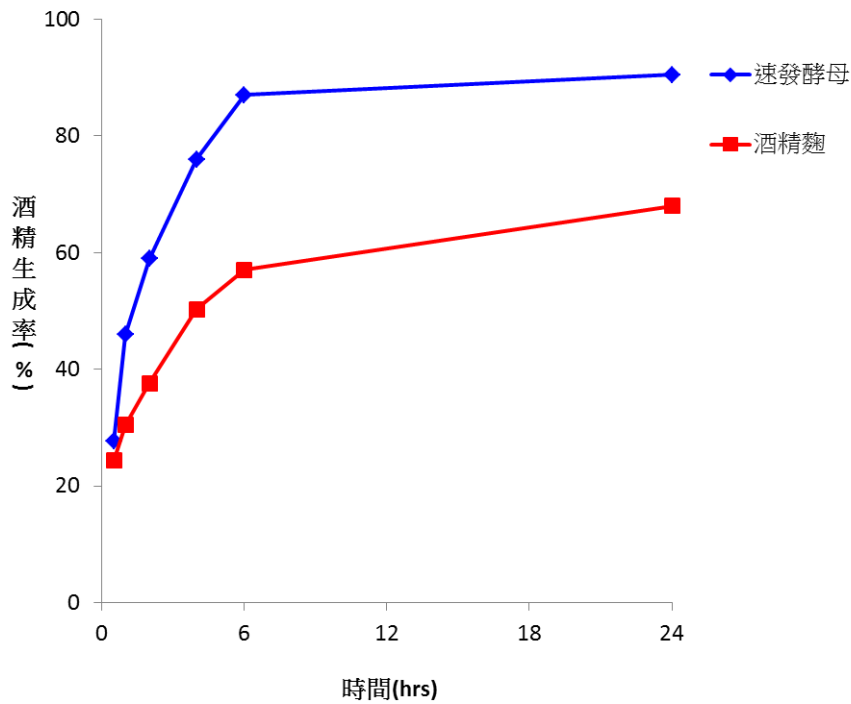


圖 3-10：速發酵母和酒精麴在一天內之酒精生成率(實驗二)

1. 時間：葡萄糖 1g 發酵一天。註：酒精含量=(原葡萄糖量-剩餘葡萄糖量) $\div$ 180 $\times$ 2 $\times$ 46

酵母菌種類	速發酵母	酒精麴	生米麴	生高粱麴
葡萄糖剩餘量	0.095	0.320	0.550	0.650
酒精含量(g)	0.463	0.348	0.230	0.179
發酵率%	90.5	68.0	45.0	35.0

2. 葡萄糖溶液中有無鹽類對速發酵母的影響

比較	24 小時後發酵率
無加 0.5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	90.5%
有加 0.5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	90.0%

## (二)實驗討論

- (1).實驗時為了防止外界干擾因素進入反應槽中，並且因為要在不同時間抽出溶液測還原醣量，我們便利用了三通、止逆閥自製發酵裝置，在取樣時轉動三通使氣體只能出不能入，也可以減少外界的干擾。
- (2).實驗一中，這三種麴類都是要較長時間反應的菌種，為了尋求更高效率的反應，我們找了市面上標榜快速的速發酵母還有標榜專門製酒精的酒精麴做了較短時間的實驗二。
- (3).實驗時發現速發酵母效果十分良好，甚至在第 6 小時，其發酵率快達 100%，但這是在純葡萄糖環境下，干擾因素較少，因此我們又試了中和後會產生的鹽類是否對其有影響，結果顯示，水中有無鹽類  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  並不會影響發酵率。因為**酵素必須先與受質結合才可以催化受質**。我們推測加  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  不影響**酵素的等電點**。



- (4).實驗二中，明顯可知速發酵母將葡萄糖轉化成酒精的速率高於酒精麴，而且效率較高，於是我們在下一階段的實驗中使用速發酵母做為放入膠囊中發酵的酵母。

## 八、結合微波法、臭氧法、傳統法和最佳酒精發酵麴菌，自製簡易水解發酵膠囊

### (一)實驗結果：

- 1.CO<sub>2</sub> 對酵母菌而言是代謝物，CO<sub>2</sub> 溶於水形成碳酸，所以酸性環境不利於它的生長，產率不好，有無中和溶液，酒精產量相差近 6 倍，故實驗時需將木屑水解後的溶液先中和。
- 2.木屑水解部分，發酵效率:丙>甲>乙，推測可能是原先水解後的糖量就是丙>甲>乙。
- 3.不管是甲乙丙哪一種，發酵效率要好，時間上最好是一天(24 小時)就能完成。
- 4.由木屑製造酒精的綜合分析:

代號	水解方法	木屑 (g)	葡萄糖 (g)	酒精 (g)	轉換率 (%)	能量 (KJ)	時間 (hrs)
甲	微+臭+傳	1.00g	0.49	0.23	44.12	12031.23	21.08
乙	微+家臭+傳	1.00g	0.44	0.20	39.63	10663.26	40.08
丙	(微+臭)(重複 5 次)+傳	1.00g	0.56	0.26	50.47	11041.24	22.73
丁	自製簡易水解發酵膠囊	20.00g	14.50	6.40	63.80	4222.81	21.42

### (二)實驗討論：

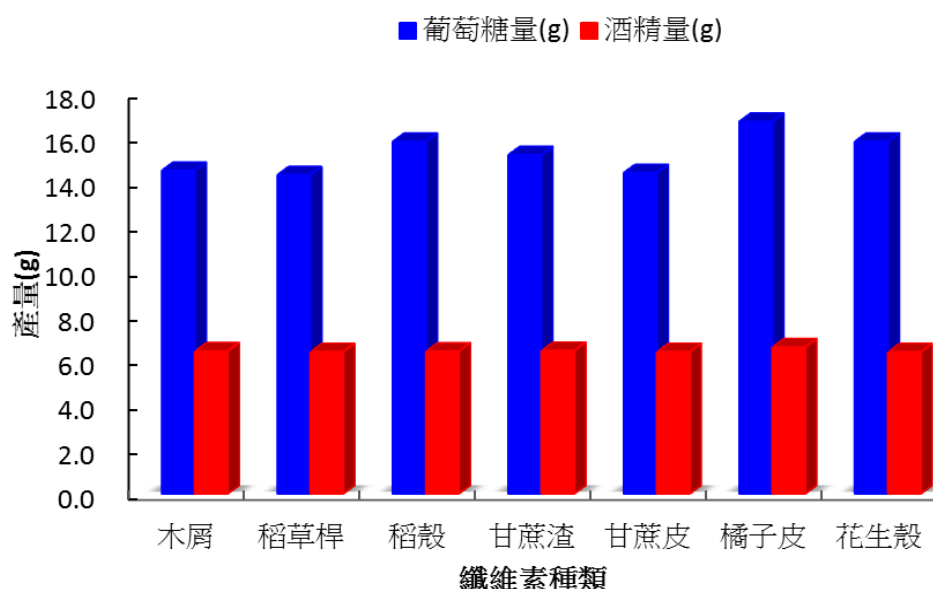
- (1)以轉換率而言，以方法丙最好，時間而言，方法甲丙相近，方法乙消耗的能量最少，但所需時間最久，而且其轉換率也最差，可能是因其臭氧的製造是由家用臭氧機，且 O<sub>2</sub> 來源為空氣，臭氧量較少，故水解效果比專用臭氧製造機差。
- (2)平均而言方法甲 1%轉換率耗能 272.7KJ；方法乙 1%轉換率耗能 269.1KJ；方法丙 1%轉換率耗能 218.8KJ，方法丁自製簡易水解發酵膠囊 1%轉換率耗能 67.2KJ。
- (3)我們的研究顯示，要達到由木屑製成生質酒精的最佳程序是：以自製簡易水解發酵膠囊室溫，在低濃度(1M)硫酸環境下，微波強度為”中”，加熱時間 5 分鐘→通臭氧 1 小時→前述兩程序重複 5 次→100~150℃，加熱 4 小時→稀酸環境下水解成葡萄糖後→再以速發酵母發酵 12 小時，可得轉換率約 63.8%，此程序以時間和能量而言較經濟實惠，且可得較多量的酒精。

## 九、推廣自製程序應用於不同廢棄纖維素的再生

探討使用攪碎過篩之纖維素粉末：稻草桿、稻殼、甘蔗渣、甘蔗皮、橘子皮、花生殼  
製造生質酒精之效率

### (一)實驗結果:

纖維素種類	木屑	稻草桿	稻殼	甘蔗渣	甘蔗皮	橘子皮	花生殼
葡萄糖(g)	14.5	14.3	15.8	15.2	14.4	16.7	15.8
酒精(g)	6.4	6.37	6.39	6.42	6.37	6.58	6.36
轉換率(%)	63.8	64.8	65.3	65.8	64.9	69.7	64.7



### (二)實驗討論：

- (1) 在取樣的廢棄農作物樣品(稻草桿、稻殼、甘蔗渣、甘蔗皮、橘子皮、花生殼)來製造生質酒精之效率，以橘子皮的產量較為顯著。順序依序為：橘子皮>甘蔗渣>稻殼>甘蔗皮>稻草桿>花生殼。
- (2) 由實驗數據的數值知幾乎大多數的作物都有纖維素可水解為醣類，進一步反應成生質酒精，若將來我們可以將膠囊罐放大到工廠可用，同時還可以在放大的巨型膠囊內直接內建微波系統，則可大量生產綠能生質酒精。
- (3) 不同的廢棄農作物樣品內纖維素（約占 38 ~ 50%）、半纖維素（約占 23 ~ 32%）及木質素（約占 15 ~ 25%）三者的組成不同。所以製程上的處理方法及時間也應該不同。

## 十、綜合比較探討:

1.分析上面傳統法，臭氧法、微波法，若要在稀酸(0.5M)硫酸環境下水解的最佳實驗條件：

- (1)微波法(簡稱：微)：微波強度為中，加熱時間 5 分鐘
- (2)臭氧法(簡稱：臭)：高臭氧濃度，通氣 5 小時
- (3)傳統法(簡稱：傳)：200℃下，加熱迴流 4 小時
- (4)家用臭氧機(簡稱：家臭)：室溫下，以空氣為來源，反應 24hr
- (5)微波臭氧接續法：微波強度為中，加熱 5 分鐘後，接上家用臭氧機通氣 1 小時，重複 5 次

表：各水解法的比較

水解方法	優點	缺點
傳統法	脫水現象不顯著	時間長、高溫耗能
微波法	室溫方便操作，反應時間短，耗能低，水解難分解的纖維結晶和木質素	脫水碳化
臭氧法	低溫耗能低，水解大分子纖維素	時間長

水解方法	傳統法	微波法	臭氧法
溫度(°C)	200 °C	室溫	30 °C
時間	4 hrs	5 mins	5-24 hrs
硫酸濃度(M)	1	0.5	1
最高水解量(mg)	365.34	8.24	1.10
水解效率(mg/min)	1.21	1.65	0.003

## 陸、結論

1.傳統水解木屑需要在高酸高溫環境下長時間反應，耗能又不環保，若在稀酸低溫下，不利於水解，但卻降低脫水碳化的問題。通臭氧法可助於將纖維素水解成較小分子纖維素和寡糖，有助於縮短硫酸水解製程上的成本，減少能源浪費。加入微波可在稀酸短時間(5min)達到最佳的水解量。

2.比較完成產醣程序時，甲、丙、丁平均需時 **21 小時**，乙平均需時 **40 小時**；所需的總能量甲約為 **12031.2 KJ**，乙平均需要 **10663.2KJ**，丙平均需要 **11041.2KJ**，丁平均只需 **4222.8KJ**。採用丁方法優點：微波可以水解大分子的纖維結晶和木質素，將其放在第一個步驟，接著第二個步驟利用臭氧水解大分子纖維素成小分子，最後是在稀酸時，利用不易脫水的優點，用鎳鉻絲加熱將前面已被分解成小分子的纖維素和寡醣繼續水解成還原醣—故實驗的最佳水解程序為:**自製簡易水解發酵膠囊(微波臭氧接續法)**。

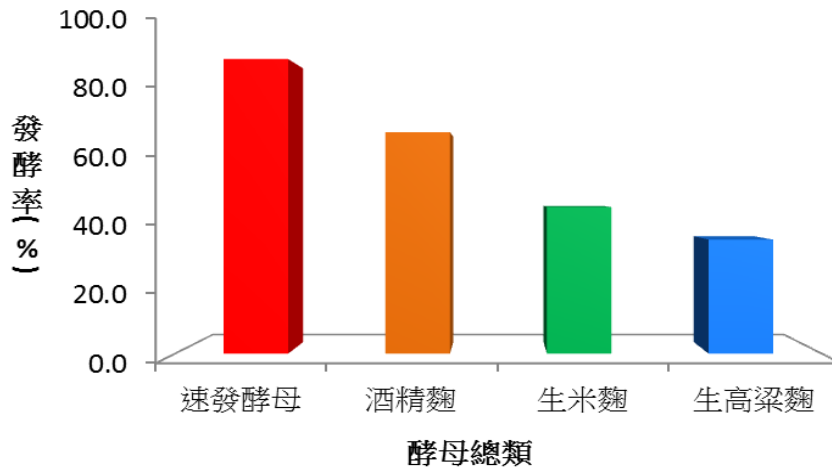
3.在葡萄糖發酵成酒精的實驗中，裝置加裝止逆閥防止外界干擾因素進入反應槽中，且可在不同時間抽出溶液測還原醣量。酵母菌的種類以速發酵母效果較好，葡萄糖溶液中有無  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  並不會影響發酵率，在 24 小時後發酵率皆是 **90.0%左右**。

4.最後將木屑水解後糖溶液先中和，因  $\text{CO}_2$  是酵母菌的代謝物，酸性環境不利於它的生長，再以速發酵母發酵 1 天，轉換率:丙(50.4%)>甲(44.1%)>乙(39.6%)，完成可將廢棄木屑再生成酒精的計畫。

### 5.葡萄糖發酵成酒精的結果：

(1).我們在裝置上加裝了止逆閥，可防止外界干擾因素進入反應槽中，並且可在不同時間抽出溶液測還原醣量。

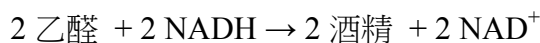
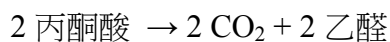
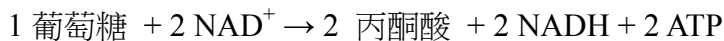
(2).比較不同種類的酵母菌，實驗結果以速發酵母效果較好，生米酵母與生高粱酵母效果較差，酒精酵母介於中間，將數據轉換成圖形如下圖。



24 小時內不同酵母的發酵率

(3).速發酵母效果十分良好，在 6 小時後發酵率快達 100%，葡萄糖溶液中有無加入 0.5MNa<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 鹽類，其在 24 小時後發酵率皆是 90%左右，結果顯示，水中有無鹽類 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 並不會影響發酵率。

(4).酵母菌所分泌的丙酮酸脫羧酶將丙酮酸轉變生成乙醛，接著乙醛在乙醇脫氫酶的作用下作為受氫體被還原為乙醇，此即為酒精發酵，其反應步驟如下：



因此酵母菌在無氧的條件下，總共要通過 12 步反應，才能將 1 分子的葡萄糖反應生成 2 分子的乙醇、2 分子的 CO<sub>2</sub> 和 2 分子 ATP(提供能量給酵母菌使用)。

由於一般酵母菌對酒精的耐受度約為 12~15%，因此發酵酒的酒精度達到這個範圍時，反應就會漸趨停止，因此可藉由氣泡不再生成來判斷是否已經完全變成酒精了。

6.當前許多研究都利用到玉米作為生質燃料，但**芒草及河口淤積的布袋蓮**尚未被廣泛使用在生質酒精上。以台灣而言，山野間遍布著無數的芒草；以及在河流出海口普遍都有**布袋蓮的淤積問題**。因兩者但並無很高的經濟效用，若能善加利用必能為台灣的生質能源發展進一份心力。

## 柒、未來展望

1. 地球上最豐富的多醣為纖維素，且廣泛存在於植物如樹幹、竹竿、草竿、甘蔗渣、布料。  
世界上每天有 10 億多噸木屑、舊報紙、甘蔗渣...等廢物未被利用，若將其中的纖維素加以利用，必為人類創造大量財富。我們可利用水解纖維素產生的葡萄糖發酵為酒精以代替石油，或可使纖維素部份水解用作牲畜飼料。
2. 找尋一種可以永續經營的替代能源實為急迫，然而以種植作物提煉酒精的生質燃料卻又減少人類的糧食供應，於是我們希望能藉由此研究在生質能源上貢獻一份心力。
3. 考慮糧食問題，如何將廢棄木屑轉換成供給生命體的糧食，進行活體試驗？考慮能量再生問題，以及如何將廢棄的農作物轉化而產生的醣類再製成生質能源或供給牲畜可以吃...等。還有很多未知的領域等待的我們去發掘。我們一定會再接再厲繼續完成我們研究理想。
4. 放大改良:內建微波裝置，建立生質酒精工廠，可以大量將廢棄纖維素轉換成酒精。
5. 多方運用:相信此全方位功能型膠囊裝置也可以應用在多種化學或生物實驗上，甚至擴及其他領域，例如：製作水果酵素、發酵與培植等。
6. 還有很多未知的領域等待我們去發掘。



## 捌、參考資料

1. 林佑生、李文乾，生質酒精，*科學發展*，(2009年)，433期，p.20-25
2. 周治羣，李培華，由玉蜀黍穗軸製糠醛之研究，*師大學報*，(民98年)，27，p.715-724
3. 陳秋炳主編(民103年)，高一基礎化學(一)。台南市：翰林出版事業股份有限公司出版
4. 陳秋炳主編(民103年)，高二基礎化學(二)。台南市：翰林出版事業股份有限公司出版
5. 黃維凡，“以前處理提升稻殼纖維素水解效率之研究”，碩士論文，國立台灣大學，  
生物產業機電工程系研究所，台北(2006)。
6. Fan LT, Gharpuray MM, Lee YH. (1987). Cellulose Hydrolysis. Berlin; New York :  
Springer-Verlag.
7. Lemeune S, Jameel H, Chang HM and Kadla JF. (2004). Effects of ozone and chlorine  
dioxide on the chemical properties of cellulose fibers. *J. Appl. Polym. Sci.* 93: 1219-223
8. Zhao et al (2007) Metal Chlorides in Ionic Liquid Solvents Convert Sugars to  
5-Hydroxymethylfurfural, *Science* , 316, 1597-1600.

## 【評語】 200013

本作品比較傳統算水解、微波及臭氧法對纖維素之水解效果，經組合較佳之程序，再以麴菌發酵將醣轉為生質酒精，所自製之簡易水解發酵膠囊，可發揮低耗能與高效率之轉換，展現未來應用之潛力。