

2011 年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

編號：100021

作品名稱

利用農業廢棄物進行連續產氫之研究

得獎獎項

二等獎

作者姓名：張簡翊晴、林郁庭

就讀學校：國立屏東高級工業職業學校

指導教師：王美惠、舒玉珍

關鍵字：農業廢棄物、產氫微生物、化工製程

作者簡介



我叫張簡翊晴（右），目前就讀屏東高級工業職業學校化工科三年級。平日我會藉由寫書法和聽音樂來放鬆心情及紓解壓力。在高二下我曾參加專題製作競賽，在每一步的過程中學習到遇到問題時，能積極主動思考、馬上解決問題的能力，還有團體之間合作的重要性，也考驗了我的耐性；因為如此，讓我對化學工程領域產生更大的興趣。由於我熱愛閱讀，參加了圖書館舉辦的「悅讀之音」，看完每本書，透過討論可以更進一步理解書中想表達的涵義，也有機會和組員交換彼此的心得，瞭解到他人的想法，並上台報告推薦好書，訓練口才和膽量。因此也參加中學生網站所辦理的「讀書心得寫作比賽」和「全國高級中等學校小論文寫作比賽」，都得到名次，所以很高興能再次獲得肯定通過國際科展初審，希望有機會能代表國家比賽。

我叫林郁庭（左），就讀屏東高工化工科三年級。平常喜愛閱讀課外讀物，曾

代表學校參加屏東縣高中組作文比賽得到名次，另外也參加了專題製作競賽，製作專題的過程中成長許多，我學習到如何整合資料、研究實驗以及處理問題的應變能力，也克服了上台面的恐懼，這些學習都是經由每次比賽淬鍊而成的，若不是一點一滴堅持到最後，也不可能會有今日如此的表現。雖然過程中常常必須忍受實驗失敗的結果，但是這些挫折卻讓我越挫越勇！不管參加任何比賽，都告訴自己要更努力去準備，不去在乎成敗，只求自己能在一次又一次的經驗中獲取那份最初精神。很高興作品能在國際科學展覽會中展現，我會盡自己最大的努力去克服所有難題，相信一定能呈現出最完整最棒的作品。

摘要

本研究嘗試以沒有經濟價值之農業廢棄物，經由化學反應轉換為氫能源，並藉由化工程序來達到連續製程。

我們用爛掉的香蕉為基質，從校園及生活周遭的環境尋找產氫微生物，發現可生產氫氣之微生物隨處可得。在培養溫度 35°C 下，選擇不同濃度之基質，發現基質濃度與產氫量成正比，且產氫微生物適合在弱酸（約 pH=5.5）環境中生長。

以此條件進行連續式反應，當反應槽體積為 700ml 時，經過 26 小時後，槽內基質消耗殆盡，此時開始連續進料，當進料流速為 138 毫升/小時，則水力停留時間為 11.67 小時，產氫量為 5.43 升/天，最後連接氫燃料電池，可得到連續產生的電能。另外本實驗也以爛木瓜進行批次反應，同樣也能獲得氫氣。

經由實驗結果可得知，利用農業廢棄物為基質，可運用化工程序發展為連續產氫製程，且應用於實務上，能提升全球環保的概念，我們期待能開創一個能取代「碳經濟」的「氫經濟」。

Abstract

This research attempts to transfer the economically valueless agricultural waste into hydrogen energy through chemical reaction, and proceed to continuous system by Chemical engineering procedure.

Through series of experiments using rotten banana as substrate and seeking for hydrogen-producing microorganism around the campus and our living environment, we found that hydrogen-producing microorganism is easily available. In the temperature at 35°C, We chose different weight percent of substrate, which is in positive ratio with hydrogen producing amount, plus controlling the developing status as weak acid (approximately pH=5.5), and we can successfully develop the hydrogen-producing microorganism.

In the experiment, when the substrate was utilized for hydrogen-producing microorganism in the reaction tank of 700ml after 26 hours, we started feeding materials continually at the speed of 138ml/per hour, with the hydraulic retention time (HRT) for 11.67 hours. Thus the produced hydrogen amounted to 5.43 liter/per day. Finally the continually generated power can be harvested if connected to the hydrogen-fueled battery. Besides, this experiment also contained batch reaction conducted with rotten papaya, and was similarly able to obtain hydrogen.

We can conclude from the experiment that agricultural waste can be used as substrate in the chemical engineering to proceed as serial production process, and further be applied in daily use to promote the concept of global green. We sincerely hope that, through such technique, an era that replaces “carbon economy” with “hydrogen economy” will be created.

目錄

中文摘要	iv
英文摘要	v
壹、 前言	1
一、 研究動機	1
二、 研究目的	2
貳、 研究方法及過程	3
一、 文獻探討	3
二、 研究設備及器材	8
三、 研究過程	8
參、 研究結果與討論	18
一、 菌種馴化	18
二、 純氫	19
三、 批次反應	20
四、 連續反應	24
五、 其他基質	26
肆、 結論與應用	28
一、 討論	28
二、 結論	30
三、 應用	31
伍、 參考文獻	34

壹、前言

一、研究動機

今年夏季臺灣的水果進入盛產期，尤其是香蕉，由於產期集中，導致價格暴跌，南部產地的收購價格甚至每公斤只剩3~5元，採收成本遠大於販賣成本，農委會除了從優收購外，也積極輔導出口及加工，提高香蕉的附加價值；但是香蕉是非常脆弱的食物，容易因為碰撞擦傷、果皮變黑而導致賣相變差被淘汰，另外，高溫及梅雨季也容易使香蕉熟成而腐敗，這些爛掉的香蕉就面臨被丟棄的命運，有沒有什麼辦法可以將這些廢棄物轉換成有用的物質呢？

香蕉含有豐富的碳水化合物，或許可以把它當作細菌的食物，因此我們查閱了資料，發現自然界中有許多的異營菌可以透過生化反應轉化有機物產生能量，並代謝生成甲烷、氫氣、二氧化碳及酸性物質等。在化學課中，我們學習到甲烷及二氧化碳都是造成溫室效應的氣體，但氫氣卻可以當作燃料，與氧氣產生氧化還原反應，反應後的產物是水⁽¹⁾，不會汙染環境。氫氣除了可以電解水來產生之外，也可以利用細菌來製造，所以如果可以利用細菌分解廢棄農產品(爛香蕉)，產生氫氣來取代化石燃料，不僅環保，還能減少污染。

近年來，環境遭受污染的範圍已超乎預期，因此許多人積極尋找可替代化石燃料的能源，就長期能源發展的趨勢而言，雖然現階段化石能源及核能還是必要的選擇，但隨著能源新科技的發展，如果能穩定供應乾淨、低成本的新能源或再生能源，不僅滿足我們經濟發展及生活品質的需求，更能協助我國建立「非碳家園」的終極目標。所以我們便決定用爛掉的香蕉來培養細菌產生氫氣，結合化學反應及化工製程，並連接氫燃料電池產生電力，希望能連續產生氫能源，開創一個替代能源的新領域。

二、 研究目的

1. 探討以農業廢棄物（香蕉），利用生物法製造氫氣之可行性。
2. 產氫菌種馴化及選取。
3. 決定最佳反應條件。
4. 架設連續產氫裝置。
5. 連接氫燃料電池以確認電力。
6. 探討其他基質之可行性。

貳、 研究方法及過程

一、 文獻探討

1. 氫能源

氫的原子序是 1，是週期表中第一個元素，在常溫常壓下為氣態，是目前已知元素中最輕的。氫也是宇宙中最豐富的元素，氫發生核反應而轉變成為氦，所產生的能量是恆星的主要來源。

氫氣是目前全世界都公認的乾淨能源，去年行政院已經通過經濟部所規劃的「綠色能源產業旭升方案」，預計在 2015 年前，將氫能與燃料電池列為重點發展產業，與風力、生質能等產業提升至總產值每年 1680 億元，一公斤的氫能大約一加侖的汽油，如果以氫燃料電池驅動車輛，能源效率提升為引擎的兩倍。目前，世界各國也都投入大量經費在氫能技術的開發，如果台灣自 2015 年開始導入氫能燃料電池汽車，假設至 2050 年達到全部新增的小客車都替換成燃料電池電動車時，我們口中的「加油站」將改稱為「加氫站」，如果氫氣能大幅取代汽油，不但降低了對汽油的依賴程度，同時高效率的氫能車也減少二氧化碳的排放⁽²⁾。

台灣目前也有許多關於氫燃料電池的研發，包括工研院、中科院與核能研究所，都是進行發電機組與 3C 應用領域的技術開發，還有明道大學也以燃料電池汽車做為研發項目，目前已經進展到第四代燃料電池汽車，未來還將開發燃料電池巴士。未來氫能源的大量使用，將徹底改變人類的能源消費模式⁽³⁾。

2. 微生物製氫方法

目前獲得氫氣的方法，主要是由石化工業在製程中的產物，另外，電解水也可以製得，但是電量消耗很大，並不具經濟效益。因此利用微生物產生氫氣，便成了另一種產氫的方式。目前微生物產氫技術，可以分為光合作用及非光合作用

兩大類：

(1) 光合菌產氫

微生物需要光能來累積生長所需的能量，並以水或有機物為電子供給者進行產氫，這些光合菌製氫的研究，在 1970~80 年代就已經有相當的了解，例如 1974 年，貝內曼觀察到柱孢魚腥藻，可以吸收光能後裂解水，產生氫氣和氧氣；另外，伽夫羅也發現了珊藻（*Scenedesmus*）也有能力進行光裂解水產生氫氣。

而另一種厭氧光合產氫，則是靠厭氧光合細菌，其光合放氫過程不產氧，而且即使在黑暗條件下，厭氧光合細菌也可以利用葡萄糖和甲酸等有機酸，醱酵產生氫氣和二氧化碳，這早在 1939 年，蓋斯特就已經發現厭氧光合細菌可利用有機物光合放氫，但目前研究內容仍停留在高活性產氫菌株的優化篩選，以及環境條件控制方向及提高氫氣產量。

(2) 非光合作用

非光合微生物則藉由對有機質之發酵所扮隨之產氫作用，因不需光源而命名為暗發酵。包括兼性厭氧、嚴格厭氧等醱酵產氫細菌；這些非光合微生物可以將葡萄糖或蛋白質(也可以是纖維素或有機廢水廢棄物等)作為原料，來製造氫氣，由於微生物製氫技術具有常溫、常壓、能耗低、環保等優勢，所以成為國內外重點研究的產氫製程方向⁽⁴⁾。

3. 產氫微生物

目前許多研究發現最適合產氫的菌屬包括梭狀芽胞桿菌屬（*Clostridium*）及脾桿菌屬（*Enterobacter*）。梭狀芽胞桿菌屬於目前產氫能力較佳之菌種（Gottschalk，1986），適合生長在厭氧、中溫及中性 pH 值的環境（Minton and Clarke，1989），但在不適合生長的環境中會產生內孢子而進入休眠狀態⁽⁴⁾。

反應式：（以葡萄糖為例）



4. 產氫技術

(1) 台灣逢甲大學 2004 年的「蔗糖醱酵產氫發電系統」開發計畫，整合了非光合微生物製氫、氫純化和燃料電池三個分項系統，完成了利用糖水暗醱酵 (dark fermentation) 產氫，經初步純化後接到氫燃料電池 (PEMFC)，直接讓燈泡發光且展示氫能發電系統的發展模型。據目前研發成果，1 公斤蔗糖能產生 250 公升氫氣，相當於 0.4 度電能，40 瓦燈泡可使用 10 小時，800 瓦微波爐可使用半小時⁽⁵⁾。

(2) 成功大學化工系張嘉修教授所執行之「新型光生物反應器之開發及光醱酵與暗醱酵生物產氫程序之整合計畫」，主要目的在尋求本土光合菌進行光合產氫之最適化操作條件，並且開發創新之光纖光生物反應器以及評估串聯光醱酵與暗醱酵生物產氫程序之可行性研究。並進一步利用太陽能激發光纖光生物反應器，以降低使用人工光源所衍生之電力耗損，藉由整合光纖科技、光合菌以及太陽能集光技術，建構一套高效率、低耗能之整合型生物產氫系統。

(3) 中國大陸任南琪等科學家，也成功嘗試以厭氧活性污泥為菌種來源，以廢糖蜜為基質原料，產製氫氣；另外，樊耀亭等科學家，則是以牛糞堆肥作為天然混合產氫菌來源，以蔗糖和澱粉為基質，通過厭氧醱酵產氣；由於這種技術採用的是混合菌種，使得生產流程更容易操作和管理，讓微生物製氫技術商業化的目標，前進了一大步⁽⁶⁾。

5. 儲氫設備

(1) 壓縮氫氣—氫氣在常溫常壓下為氣體，可以加壓後將其儲存在加壓

罐內，壓力可以大到 400 大氣壓，但需要注意安全。

(2) 液化氫氣—氫氣分子的沸點是 20K，降低溫度及加壓可使氫氣液化，但需要特殊的設備保持低溫，以減少氫氣的蒸發。

(3) 固態儲存—使氫氣吸附在金屬氧化物或奈米碳管上以儲存，目前市面上可買到的儲氫罐多為這種方式。

6. 基質

(1) 香蕉

香蕉為芭蕉科、芭蕉屬、多年生草本植物蕉樹的果實，俗稱甘蕉、弓蕉、芽蕉，果實長，有稜；果皮黃色，果肉白色，味道香甜。主要生長在熱帶、亞熱帶地區。原產於亞洲東南部熱帶、亞熱帶地區⁽⁷⁾。香蕉的營養價值非常高，在每百克果肉中，含蛋白質 1.2%，脂肪 0.6%，碳水化合物 19.5%，粗纖維 0.9%，還含有微量的鈣、磷、鐵及胡蘿蔔素等，此外，香蕉中鉀的含量高達 472 毫克，是水果中含量最高的⁽⁸⁾。

(2) 木瓜

木瓜原產於熱帶美洲，屬於番木瓜科半草本作物。木瓜樹幹高，葉片大，葉柄細長，莖中空組織柔嫩，肉質根，不耐強風豪雨容易引起根腐，因此栽培園地的選擇格外重要。木瓜果實肉質甜美，營養價值高，含有蛋白質、脂肪、醣類和豐富的礦物質及維生素，更含有木瓜酵素，可幫助消化，治療胃病⁽⁹⁾。

7. 儀器

(1) 氣相層析儀(GC)

A、原理：試樣注入層析儀後，混合物中之各成分被移動相帶著通過固定相，因為移動速率隨成分不同，因此可分離出所需的成分⁽¹⁰⁾。

B、偵檢器：

a、火燄游離偵檢器(FID)：利用火燄的高溫將試樣在火燄中產生離子化，然後收集於電網成為電流，而偵檢出試料成份。在操作時，必須供應氫氣和空氣，以便點燃火燄。

b、熱傳導偵檢器(TCD)：利用攜行氣體及樣品成份通過一個電熱絲時，熱傳導度的不同，來偵檢出樣品成份。

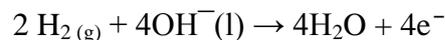
C、應用：

a、定性分析：氣相層析法可依滯留時間的不同，來做成份確認。

b、定量分析：利用波峰的高度或面積計算個別成份含量的多寡。配製標準液，建立標準曲線，可求得未知物之濃度⁽¹⁰⁾。

(2) pH 計：藉著兩極間的電位差變化，可測得溶液中的 pH 值。

(3) 燃料電池：燃料電池是以多孔性碳板為電極，碳板上覆蓋銀鎳或鉑為催化劑，分別通入氫氣與氧氣於負極及正極，燃料電池放電原理是陽極的反應：當氫氣通過陽極時，氫分子被吸附於金屬催化劑表面上，而形成氫原子，此氫原子與強鹼的 OH^- 反應是放出電子而成水，即



陰極的反應：當氧氣通過陰極時，氧分子被吸附於金屬催化劑表面，獲得由陽極經外導線傳導而來的電子而被還原成 OH^- ，即



氫燃料電池遙控車，是利用燃料電池，以氫氣及空氣中的氧氣進行電化學反應，產生電力驅動馬達，並以紅外線遙控燃料電池車行駛。

二、 研究設備及器材

1. 實驗器材：反應槽、磁石、抽濾瓶、精秤天平、溫度計、恆溫槽、橡皮管夾、定量瓶、量筒、燒杯、視訊系統、氣液分離槽、恆溫控制器、pH 控制器、流量計、果汁機、玻棒、滴管。
2. 實驗藥品：爛掉的香蕉、爛木瓜、微量元素 ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 K_2HPO_4)、緩衝溶液 (Na_2HPO_4 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)、 NaOH 、 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 。
3. 儀器設備：
 - (1) 氣相色層分析儀(GC)
 - (2) pH 計
 - (3) 醣度計
 - (4) 氫燃料電池遙控車



pH 計



醣度計



氣相色層分析儀(GC)

三、 研究過程

利用農業廢棄物香蕉來製氫。首先要考慮細菌是否為產氫菌，所以要採集不同地點的樣品，以基質培養並經過馴化後，以 GC 檢驗其產氣中是否含有氫氣，再選定菌種來進行反應，並思考是否能架設為連續裝置，使氫氣源源不絕並能提供持續電能。因此我們考慮以下幾個變數，設計了下列的實驗流程：

1. 產氫微生物來源

採樣於不同地點(學校及住家附近)的菌種，將此菌加熱至沸騰，使水中甲烷菌和雜菌滅除，保留我們要的產氫微生物。根據參考資料可知，產氫微生物為厭氧菌，所以採樣點若為排水溝，應採取較底層為宜，若為土壤，應避開表層土。

2. 添加物質

基質中應額外添加緩衝液和微量元素(如 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 等)供微生物生長。下表為 Endo 之厭氧發酵配方 (Endo et al., 1982) ⁽¹²⁾

化合物名稱	濃度 (g/L)	化合物名稱	濃度 (g/L)
$\text{MnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.015	NH_4HCO_3	5.24
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.025	NaHCO_3	6.72
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.005	備註： 產氫微生物在反應過程會產生二氧化碳，所以將碳酸鹽改成磷酸鹽 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 Na_2HPO_4)。	
$\text{CoCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.000125		
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.1		
K_2HPO_4	0.125		

*說明：

當基質為香蕉時，因為它本身含有豐富的鉀離子，因此外加微量元素中沒有添加鉀離子。

3. pH 值

由於細菌適合在中性至弱酸範圍的 pH 值，且代謝後產物為乙酸、丁酸等物質，會使 pH 值下降，所以可添加鹼性溶液如 NaOH 溶液維持 pH 值。我們選擇 pH5.0、5.5、6.0，進行批次反應。

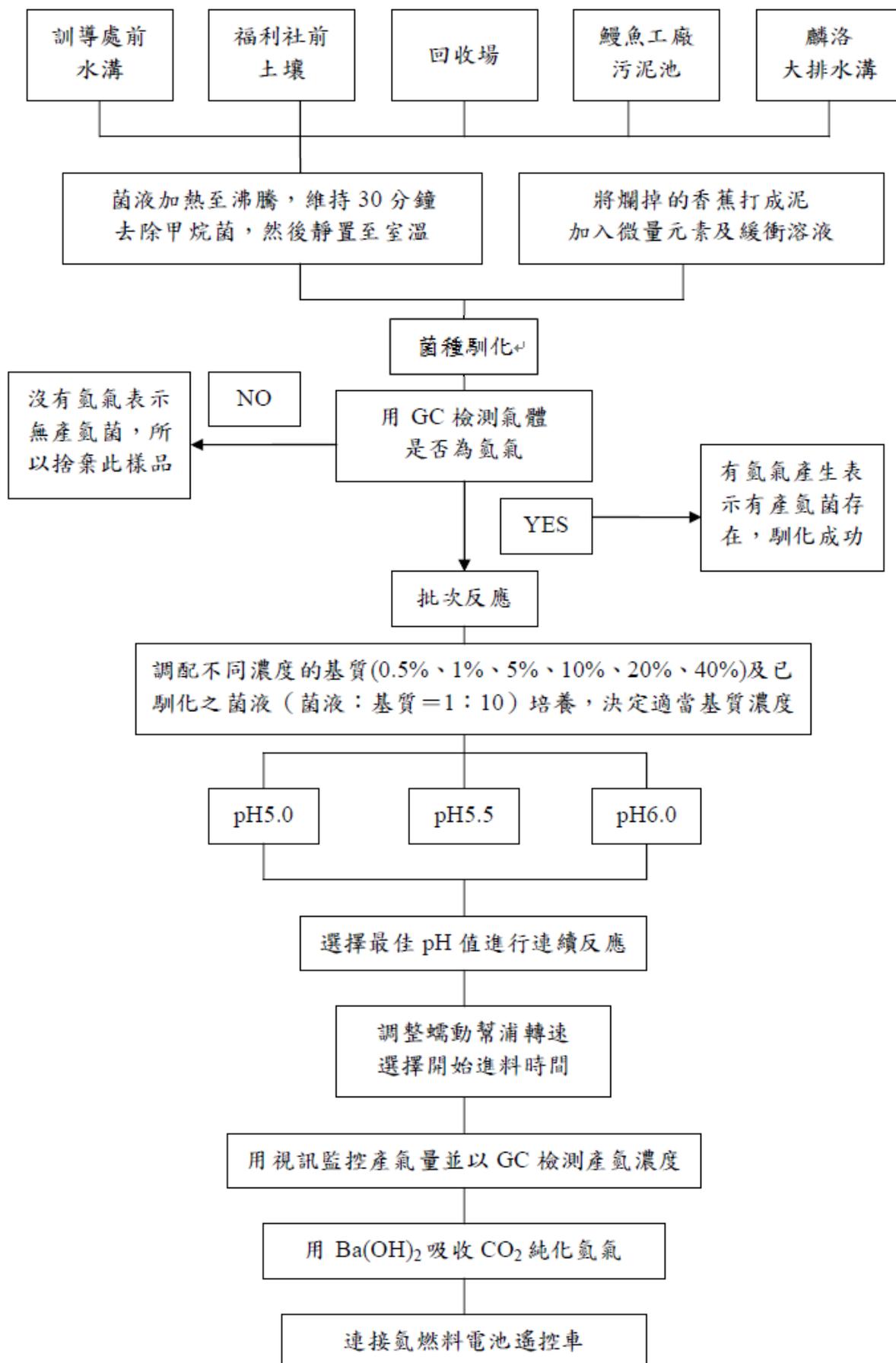
4. 溫度

產氫菌適合在中溫下生存，我們選擇培養溫度為 35°C 下，讓微生物進行反應。

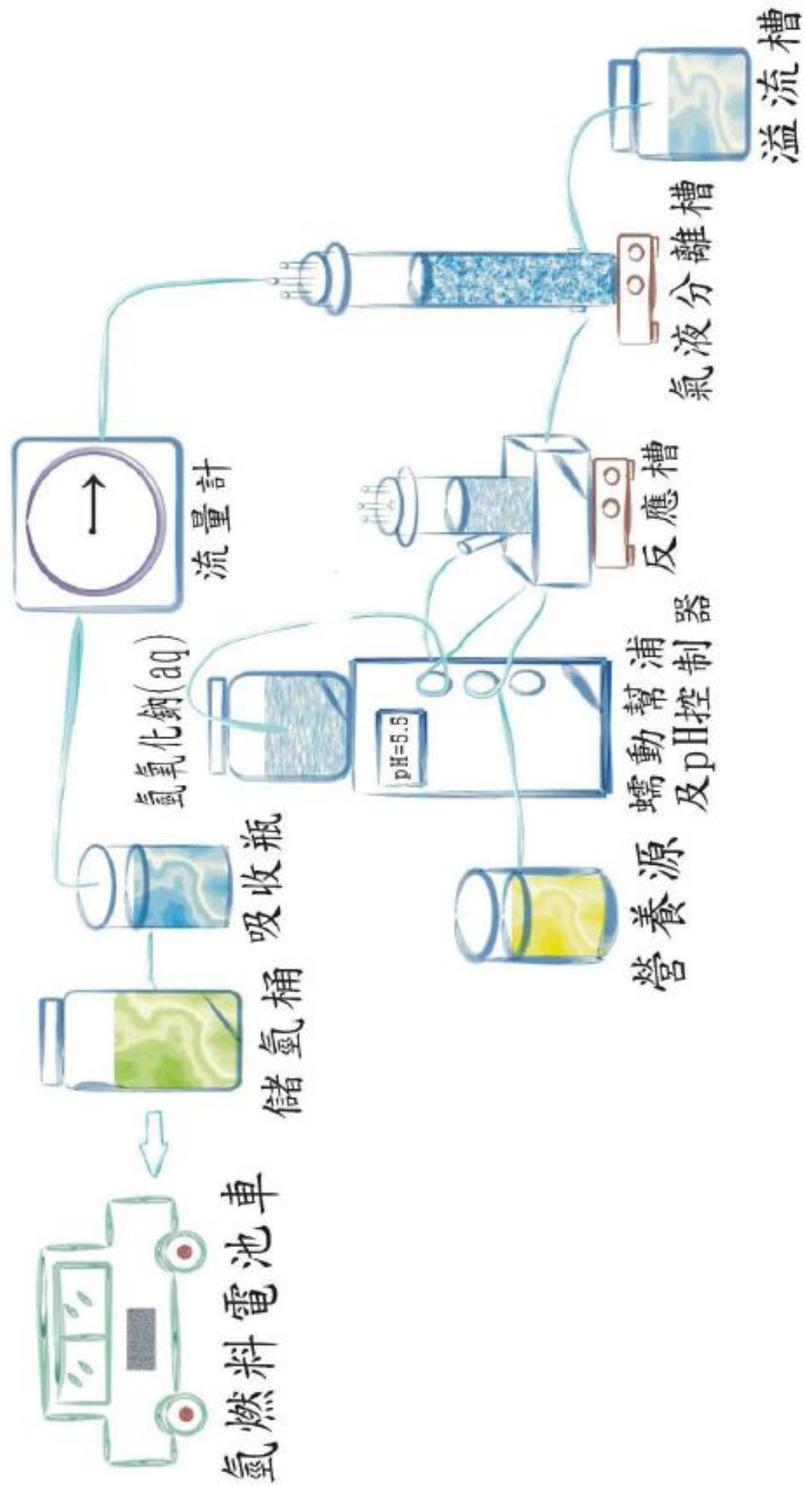
5. 基質濃度

配製不同濃度的基質來進行實驗，考慮是否因基質濃度增加則產氣效果愈好，所以配製不同的基質濃度(0.5%、1%、5%、10%、20%、40%)來進行實驗。最後再選擇最適當之濃度來進行連續反應。

6. 流程圖



7. 裝置圖



8. 實驗步驟

(1) 產氢微生物馴化及選菌

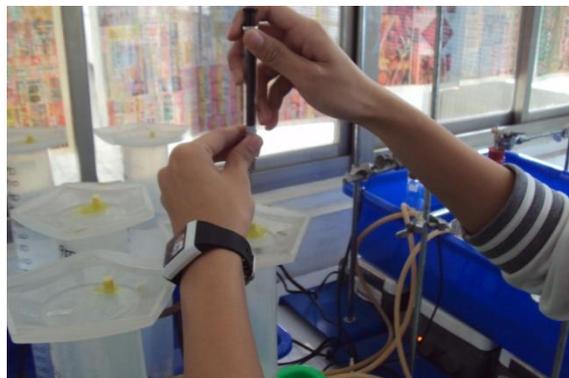
A、採取不同地點(學校訓導處前水溝、福利社前土壤、回收場、萬丹鰻魚工廠污泥池、麟洛大排水溝)的菌液，煮至沸騰，繼續加熱 30 分鐘，可去除甲烷菌及其他雜菌。



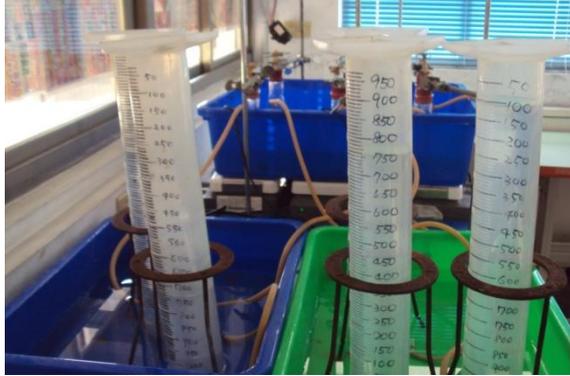
B、放至室溫後，加入基質、緩衝液及微量元素。

C、產氫微生物與基質的體積比是一比十，菌液 20 毫升及基質 200 毫升，反應溫度為 35°C，培養一段時間(約半天)，取上層液作為選菌實驗之產氫微生物。

D、用 GC 檢測是否產生氫氣，若無氫氣產生，則捨棄。



E、 組裝抽濾瓶及量筒，利用排水集氣法收集氣體，紀錄產氣量。



F、 檢測反應前後 pH 值、醣度，並根據產氣量選擇適合的產氫微生物。

(2) 產氣量—架設視訊系統來拍攝流量計，以記錄每天的產氣量。



(3) 批次反應

A、 選擇最佳基質濃度

a、 把香蕉依濃度比例配成基質，菌液 20 毫升及基質 200 毫升，(0.5%、

1%、5%、10%、20%、40%)，加入微量元素及緩衝溶液。



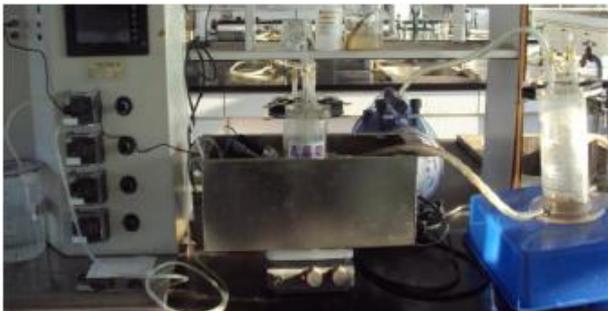
b、恆溫槽水溫控制 35°C，反應前檢測基質的醱度。

c、加入基質及馴化之產氫微生物至反應槽，以磁石攪拌，並測 pH 值。

d、用排水集氣法收集氣體量，依產氣量多寡選擇最佳基質濃度，以進行連續進料反應。

B、選擇最佳 pH 值

a、配製 1M NaOH 溶液，反應槽內加入菌液 70 毫升及基質 700 毫升，控制槽內液體 pH 值維持在 5.0、5.5 及 6.0。



b、依產氣量多寡選擇最佳 pH 值，以進行連續進料反應。

(4) 連續進料反應

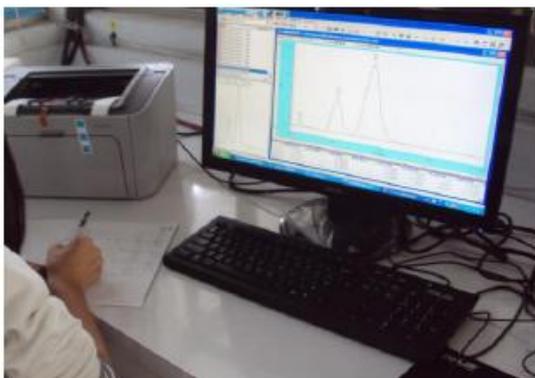
A、 依據批次反應結果，決定最佳基質濃度、pH 值及開始進料時間。

B、 調整蠕動幫浦轉速，控制進料流速及攪拌速度。



C、 記錄時間及流量計數值。

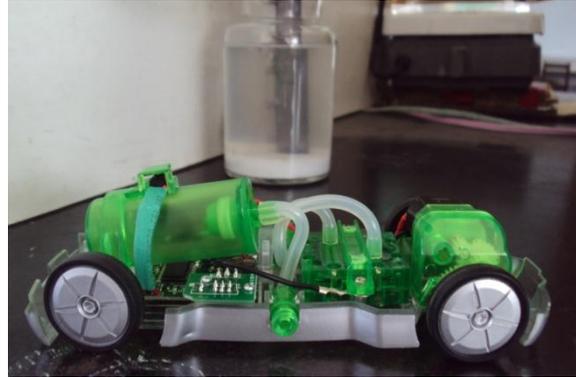
D、 以 GC 測定反應槽內氫氣濃度。



(5) 氫燃料電池

A、 流量計末端接上 CO₂ 吸收槽，吸收槽內裝入鹼液 (Ba(OH)₂)。

B、 連接氫燃料電池遙控車。



(6) 探討其他基質

除了香蕉之外，不管任何水果都會有損壞或腐敗的部份，因此我們再嘗試另一種農業廢棄物—爛木瓜，探討其產氫之情況。

參、 研究結果與討論

一、 菌種馴化

1. 產氫微生物馴化前後 pH 值及醱度測定

表一 不同地點反應前後 pH 值及醱度

	反應前 pH	反應後 pH	反應前醱度	反應後醱度
回收場	7.29	4.95	5.0	2.0
訓導處前水溝	7.29	4.60	5.0	2.0
福利社前土壤	7.29	4.89	5.0	2.0
鰻魚工廠污泥池	7.29	4.53	5.0	2.0

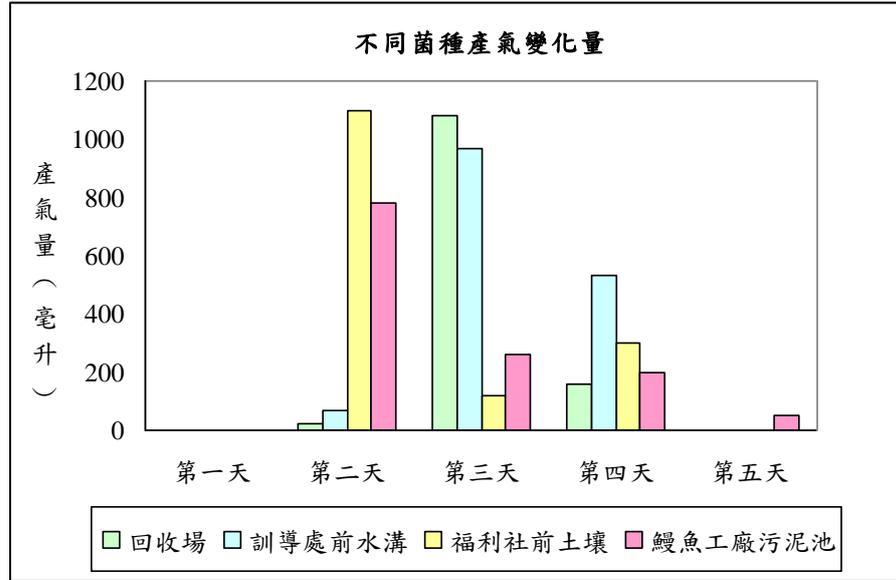
2. 產氫微生物馴化過程之產氣量

表二 不同地點產氣變化量

產氣體積(ml) 採樣地點	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	總產氣量
回收場	0	20	1080	160	0	1260
訓導處前水溝	0	70	970	530	0	1570
福利社前土壤	0	1100	120	300	0	1520
鰻魚工廠污泥池	0	780	260	200	50	1290

由表一可知，反應後醱度及 pH 值下降，應是產氫菌不適於 pH < 5 下生長，且基質已消耗完。表二則可知第二天及第三天為產生最多階段，反應五天後產氣幾乎停止。

3. 菌種馴化過程之產氣量



圖一 不同菌種來源產氣量

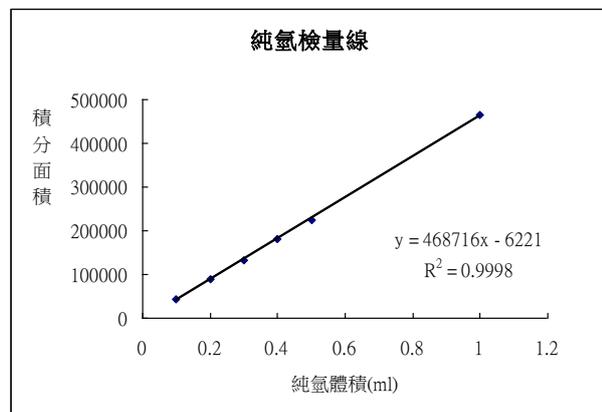
選取不同地點(訓導處前水溝、福利社前土壤、回收場、萬丹鰻魚工廠污泥池、麟洛大排水溝)中，由於麟洛大排水溝所產生的氣體在此時間點左右並沒有 peak，可知產出的氣體不是氫氣，因此淘汰。

由圖一可發現除了鰻魚工廠污泥池的菌種每天持續產氣之外，其他菌種在第五天便停止產氣，相形之下較其他菌種穩定，因而選取此菌種進行連續反應。

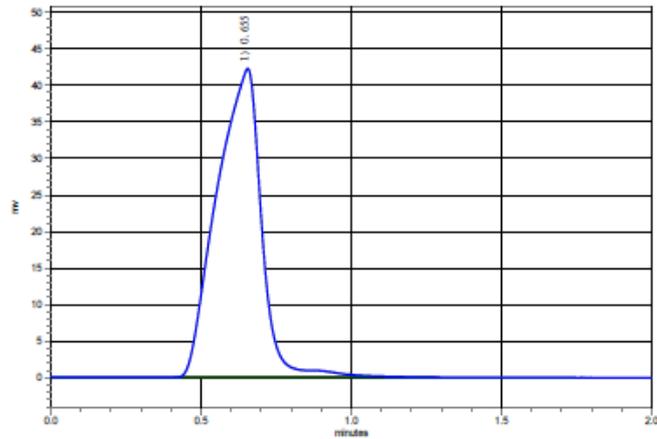
二、純氫

1. 檢量線

純氫體積 (ml)	積分面積
0.1	42120
0.2	89248
0.3	132808
0.4	181386
0.5	224807
1.0	464096



2. 純氫 GC 圖譜



圖二 純氫之 GC 圖譜

3. 分析條件

- (1) 氣相層析儀：SHIMADZU GC-2014
- (2) 管柱型號：Silica gel 80/100 mesh
- (3) 注射口溫度：100°C
- (4) 管柱溫度：35°C，2min.
- (5) 偵測器 (TCD)：100°C
- (6) 載流氣體：Ar，氣體流速：30ml/min.

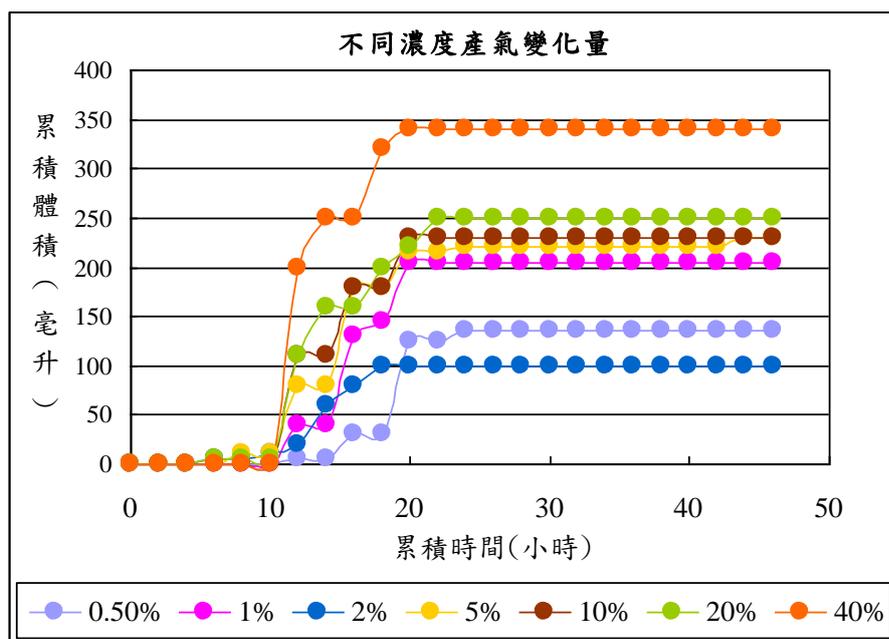
由圖二之純氫圖譜可知在此分析條件下，純氫滯留時間為 0.655 分鐘。

三、 批次反應

1. 不同濃度基質之產氣量變化

表三 不同濃度產氣變化量

產氣體積 (ml) 累積取樣時間(hr)	濃 度					
	0.50%	1%	5%	10%	20%	40%
0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	5	0
8	0	0	10	0	5	0
10	0	0	10	0	5	0
12	5	40	80	110	110	200
14	5	40	80	110	160	250
16	30	130	180	180	160	250
18	30	145	180	180	200	320
20	125	205	215	230	220	340
22	125	205	215	230	250	340
24	135	205	220	230	250	340
26	135	205	220	230	250	340
28	135	205	220	230	250	340
30	135	205	220	230	250	340
32	135	205	220	230	250	340
34	135	205	220	230	250	340
36	135	205	220	230	250	340
38	135	205	220	230	250	340
40	135	205	220	230	250	340
42	135	205	220	230	250	340
44	135	205	230	230	250	340
46	135	205	230	230	250	340



圖三 不同濃度產氣變化量

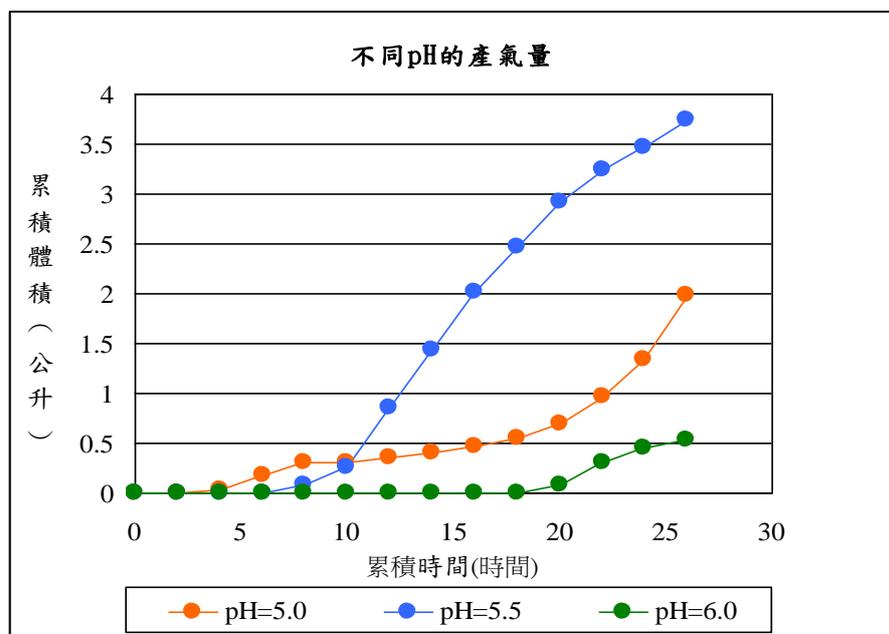
基質濃度與產氣量成正比，但實際操作得知，40%的基質產氣量雖然旺盛，但基質過於濃稠易造成管線阻塞，而且蠕動幫浦不易轉動，所以選擇次高濃度（20%）為連續式反應之條件。

2. 不同 pH 值產氣量變化

表四 不同 pH 值產氣變化量

累積產氣體積(L) 累積取樣時間(hr)	pH=5.0	pH=5.5	pH=6.0
0	0	0	0
2	0	0	0
4	0.03	0	0
6	0.17	0.005	0
8	0.31	0.085	0
10	0.31	0.265	0
12	0.348	0.86	0
14	0.4	1.43	0
16	0.46	2.02	0
18	0.545	2.475	0
20	0.695	2.92	0.08
22	0.965	3.235	0.305
24	1.345	3.47	0.455
26	1.98	3.745	0.54

3. 不同 pH 值產氣量變化



圖四 不同 pH 值產氣量

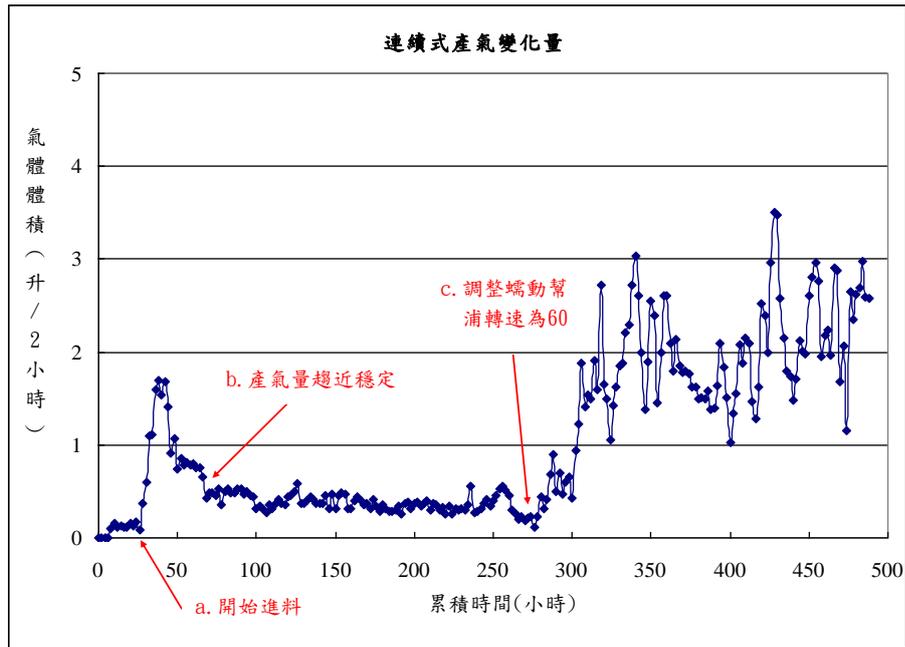
由實驗得知，前 8 小時之前產氣量略有起伏，但 10 小時之後 pH5.5 的產氣量遠超於 pH5.0 和 pH6.0，所以 pH 選擇 5.5。

四、連續反應

1. 進料流速為 60 毫升/小時，產氫濃度由檢量線方程式 $y(\text{面積})=468716x(\text{濃度})-6221$ ，可求得氫氣濃度，如表五所示。

表五 氫氣濃度

實驗天數	氫氣 R.T 值	積分面積	氫氣濃度%	平均氫氣濃度%
第一天	0.665	194968	42.92	43.90
	0.663	204118	44.88	
第二天	0.673	217750	47.78	47.58
	0.677	215828	47.37	
第三天	0.678	216739	47.57	47.64
	0.671	217443	47.72	
第四天	0.675	221625	48.61	48.73
	0.672	222732	48.85	
第五天	0.684	256248	56.00	55.75
	0.674	253888	55.49	
第六天	0.675	221625	48.61	48.73
	0.672	222732	48.85	
平均氫氣濃度：48.47%				



圖五 連續式產氣量

(1) 連續式反應槽體積約為 700ml，控制最佳反應條件開始進行生物產氣，圖五中 a 點為開始反應第 26 小時之後，氫氣濃度下降，表示營養源已消耗殆盡，所以開始進料，蠕動幫浦轉速為 40，進料速率為 60 毫升/小時。

(2) 從圖五得知，產氣量從第 68 小時之後趨於穩定，所以從 68 小時至 194 小時，累積共產氣 25.575 L，因此每小時平均產氣量為

$$\frac{25.575 \times 1000}{(194 - 68)} = 202.98 (\text{ml/hr})$$

∵ 平均氫氣濃度為 48.47% ∴ 氫氣產量為

$$202.987 \times 48.47\% = 98.39 (\text{mlH}_2/\text{hr})$$

(3) 濃度 20% 的基質 (香蕉乾基重為 0.18)，進料流速為 $60 (\text{ml/hr})$ ，比重為 1.030)，則基質進料為 $60 \times 1.030 \times 0.2 \times 0.18 = 2.225 (\text{g 基質/hr})$

$$\therefore \frac{98.39 (\text{mlH}_2/\text{hr})}{2.225 (\text{g 基質/hr})} = 44.22 (\text{mlH}_2/\text{g 基質})$$

(4) 此裝置為連續製程，因此每天（24 小時）約可產生氫氣

$$98.39(\frac{\text{mlH}_2}{\text{hr}}) \times 24(\text{hr}) = 2361.14(\text{mlH}_2) \approx 2.36\text{L H}_2$$

(5) 為了使產氫量增加，我們考慮將進料增加，因此將蠕動幫浦之轉速調快至 60，由溢流量可得知進料速率為 138 毫升/小時。

2. 進料流速為 138 毫升/小時

(1) 圖五之 c 點為調整蠕動幫浦轉速為 60 後，產氣量明顯增加但呈現不穩定狀態，每 2 小時皆大於 1 L。當進料流速為 138 毫升/小時，則 24 小時之連續製程，每天可產生氫氣 $138 \times 1.030 \times 24 \times 0.2 \times 0.18 \times 44.22 = 5430.61(\text{mlH}_2) \approx 5.43\text{L}$

(2) 由實驗證明，增加基質進料會使產氣量明顯提高，但是產氣量隨著時間增加並沒有像之前反應過程中逐漸趨於穩定的情況，我們觀察之後發現，反應過程中有部份固形物或菌體會隨著氣體逐漸堆擠並累積在氣液分離槽上部，而造成氣體無法順利通行，導致氣液分離效果變差，甚至流到氣液分離槽之外，影響流量計的紀錄，因此可考慮設計一刮除裝置，使這些固形物能流到溢流槽，讓連續製程能順利進行。

五、 其他基質－基質改為爛木瓜

1. 產氫微生物馴化前後 pH 值及醣度測定

表六 不同地點反應前後 pH 值及醣度變化

	反應前 pH	反應後 pH	反應前醣度	反應後醣度
回收場	6.08	4.93	6.5	1.0
訓導處前水溝	6.08	4.50	6.5	1.0
鰻魚工廠污泥池	6.08	2.96	6.5	2.0

2. 產氫微生物馴化過程之產氣量

表七 不同地點產氣變化量

產氣體積 (ml) 採樣地點	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	總產氣量
回收場	0	210	0	0	0	210
訓導處前水溝	0	430	290	0	0	720
鰻魚工廠污池	0	50	0	0	0	50

經由表六及表七得知，校園中的菌液皆有產氣，而鰻魚工廠污泥池之菌種產氣很少，這個結果與之前的現象差異甚大，所以我們又做了一次確認，仍然沒有產氣，所以推論學校訓導處前水溝所採集到之菌種較適合爛木瓜，而鰻魚工廠污泥池之菌種則喜愛爛香蕉，環境中確實存在複雜的菌相，要提供適合的基質才能被有效利用並產生氫氣。

訓導處前水溝及回收場之菌液經培養後，透過排水集氣法所收集之氣體，經由 GC 檢測後，皆為氫氣，所以產氫菌十分容易取得。

肆、 結論與應用

一、 討論

1. 如何選擇基質?

- (1) 由於香蕉在市場上出現供過於求的現象，導致價格大幅下跌，農民血本無歸。班上同學家種植許多香蕉，且香蕉一旦變黃便加速腐敗，經碰撞過的香蕉也因賣相差而遭淘汰。香蕉富含碳水化合物，非常適合細菌的生長。因此本實驗決定以腐爛香蕉來進行。
- (2) 木瓜同樣含有豐富礦物質及維生素，也是個過熟便容易腐爛的水果，於是經由實驗得知木瓜也符合微生物繁殖。

2. 如何選取菌種及菌種馴化?

- (1) 從校園及生活環境附近採樣，由於產氫菌為厭氧菌，所以不論是土壤或者是水溝，若是採樣點為土壤，應避開表層土，挖取較深處的土壤，採樣於水溝則底層為宜，結果發現產氫微生物隨處可得。
- (2) 以適當條件培養，利用排水集氣法收集產生的氣體，透過儀器可檢測是否為氫氣，若有氫氣產生代表馴化成功，若沒有產生氫氣則淘汰此菌種。

3. 如何由批次反應來選擇最佳反應條件?

- (1) 本實驗以 0.5%、1%、5%、10%、20%、40% 的濃度作為比較，發現基質濃度與產氣量呈正比，但是濃度 40% 的基質過於濃稠，導致管線阻塞使蠕動幫浦轉動不易，因此本實驗選擇濃稠度適中的基質濃度—20%。

(2) 反應槽經過一段時間後，基質所代謝為酸性物質乙酸和丁酸，使 pH 值下降，細菌不易生存。因此便以蠕動幫浦打入 1M NaOH 控制反應槽內的 pH 值，以 pH5.0、pH5.5、pH6.0 做為比較，發現 pH5.5 產氣較高—pH 值控制為 5.5。

4. 如何進行連續式反應？

(1) 批次實驗決定控制條件如下—溫度為 35°C，pH 值為 5.5，營養源濃度 20%。

(2) 決定進料時間

A、 氫氣濃度下降

反應開始第 26 小時之後，氫氣濃度下降，表示基質已消耗殆盡。

B、 pH 值上升

反應前 pH 在 7~8 左右，經過反應 8 小時後，pH 降至 5~6 左右，當 pH 低於 5.5，則蠕動幫浦會自動打入鹼液，使 pH 維持在 5.5 上下，但此時若無進料，則反應槽中 pH 會上升至 6 以上，表示此時基質已消耗殆盡。

(3) 進料速度—蠕動幫浦轉速調至 40，轉動 20 秒，停止 10 秒，依此速度由氣液分離槽溢流之體積，可得知流速為 60ml/hr。為了使產氫量增加，我們考慮將進料增加，因此將蠕動幫浦之轉速調快至 60，由溢流量可得知進料速率為 138 毫升/小時。

5. 如何連接氫燃料電池？

(1) 氣體純化

A、 由氣液分離槽所分離出的氣體，含有二氧化碳，故將其連接吸收

槽，吸收槽內裝入鹼液，酸鹼中和後，會吸收二氧化碳以便獲得更純的氫氣。而實驗室最常見的鹼液大部分為氫氧化鈉。

B、若二氧化碳被液鹼吸收後能形成難溶性之碳酸鹽類，則更能確定二氧化碳被吸收且容易觀察。我們從分析化學Ⅱ課本附錄可得知，碳酸鹽類如 CaCO_3 及 BaCO_3 之溶解度積各為 4.5×10^{-9} 、 5.0×10^{-9} ，而 Ca(OH)_2 的溶解度遠小於 Ba(OH)_2 ，所以我們選擇 $\text{Ba(OH)}_2(\text{aq})$ 為吸收液⁽¹³⁾。

(2) 將純化過的氣體連接到氫燃料電池遙控車，並利用空氣中的氧氣，供燃料電池進行電化學反應，產生電力驅動馬達，並以紅外線遙控燃料電池車行駛。

(3) 連續式製程所產生並純化過之氫氣，若可經由儲氫桶吸附收集，可以更廣泛地應用在其他元件上。

6. 如何增加產氫量？

(1) 增加基質進料，產氫量會跟著提高，但是反應過程中有部份固形物或菌體會逐漸累積在分離槽上部而造成氣體無法順利通行，導致氣液分離效果變差，因此可考慮設計一刮除裝置，使連續製程能順利進行。

(2) 若要使產氫量提高，可增加更多的基質讓菌體快速繁衍。也能將此整組反應裝置全加大，將獲得更大的產氫量。

二、 結論

1、產氫微生物在環境中十分容易取得，先採取不同地點水樣，經培養後多能產生氫氣。本實驗所選用之產氫菌為產氫較為穩定之菌種。

- 2、產氫微生物適合在 pH5~6 左右生長，選擇三個不同 pH 作為比較，由實驗數據得知，發現 pH5.5 產氣效果最佳。
- 3、由實驗發現基質濃度與產氣量成正比，當基質濃度為 40% 時，因為濃度太高而導致管線阻塞且蠕動幫浦不易轉動。故本實驗採取之基質濃度為 20% 較為適宜。
- 4、當基質流量為 60 毫升/小時，產氫量為 2.36L/天。若提高流量為 138 毫升/小時可使產氫量增加為 5.43 升/天。
- 5、香蕉乾基重為 0.18，每克香蕉可產生 44.22 ml 氫氣。
- 6、若要使氫氣產量提升，可增加更多的基質讓菌體快速繁衍；或是將此整組反應裝置加大，將獲得更大的產氣量。
- 7、基質的選擇可以多元化，尤其是富含碳水化合物的廢棄農產品。
- 8、氫燃料電池是一種透過電化學的反應，反應後只會產生水，對環境並無任何汙染，可直接轉換成電能，是未來能源的發展趨勢。
- 9、本實驗是結合化學反應（發酵）、連續化工製程（進料槽、pH 控制器、反應槽、氣液分離槽、吸收槽），並利用農業廢棄物產生新能源，不僅能取代化石燃料、減少汙染，且響應節能減碳及永續發展的宗旨。

三、 應用

1、 節能減碳，取代化石燃料

目前全球的能源多以燃燒化石燃料及核能的方式取得，這些方式會使空氣中二氧化碳濃度增加，導致溫室效應惡化、北極冰帽急速溶解，以及全球氣候變遷等，這些現象對人類的永續發展十分不利。

氫能源是以氫氣與氧氣反應，最終產物是水，沒有二氧化碳排放的問題，產生的是乾淨無害的物質，是未來能源的發展趨勢。運用「氫能源」可減少碳的使用，達到節能減碳的目的。

2、響應綠色環保，以農業廢棄物為細菌基質

在我們的實驗研究中，利用生活中的農業廢棄物（爛香蕉），當作基質來培養產氫菌，並且產生氫氣。根據文獻所指出，目前生質能源可利用的基質多為糖蜜或尚能食用之食品，因此引發與民爭食的爭議。今年香蕉盛產，造成農民損失慘重，這些廢棄農產品若還能有其他用途，不僅環保，還具有大大的經濟效益。這樣的一個實驗不僅可以將廢棄物再利用，也讓地球更環保，更是一種能永續發展的能源。

3、整套裝置價格低廉

由搜尋資料發現，目前所研發的製氫系統，多採用太陽能電解水產生氫氣，再連接氫燃料電池與蓄電池，但造價仍然偏高。而我們的實驗是一個經由一連串的化學反應及化工製程連結的連續產氫裝置，利用環境優勢減少能源消耗，又可產生持續電力。

4、氫氣燃燒熱值高

氫氣的燃燒熱值很高，每公斤可產生 142 百萬焦耳，是汽油的 3 倍，天然氣的 3.5 倍，燃燒時可產生較高密度的能量及水，不會產生二氧化碳等溫室氣體，是一種潔淨的能源，可減少對高污染燃料的依賴。

5、氫能被高效運用

選擇高密度、低重量的儲氫裝置，可將氫氣儲存起來，以備不時之需。並搭配高效率的氫燃料電池，在實物上更能有效率地運用氫能源，不僅建立起一個氫能永續運用的平台，也將「石油經濟」社會轉換為清潔且零碳排放

的「氫經濟」。

6、氫氣純化

由細菌分解有機物所產生的氣體不只有氫氣，所以由氣液分離槽所釋出的氣體還包含了二氧化碳，因此將氫氣導入燃料電池前必須先經過純化，而物質的濃度若大於溶解度積會發生沉澱，故選用氫氧化鋇溶液來吸收二氧化碳，形成碳酸鋇的沉澱物（白色），以便純化氫氣。

7、代謝物為有機肥

反應完後殘餘或溢流出的液體，仍含有高濃度的有機質及微量元素，可以將其連接管子收集當作果樹及其它植物的肥料。

8、基質變化性選擇

基質可選取當季滯銷的水果，或是大量生產價格低廉又容易腐敗的水果，甚至是棄置不用的果皮、蔬菜皮都非常適合作為細菌的營養來源，例如爛木瓜等。

伍、 參考文獻

- 一、 楊永華、盧麗娟(民 96)。普通化學 II。台北市：三民。
- 二、 張振昌。生質能源_厭氧生物產氫技術。(民 98 年 5 月)。
<http://www.library.fcu.edu.tw/libstories/?p=350>
- 三、 微生物製氫技術。泓能科技顧問。(民 95 年 7 月)
<http://blog.roodo.com/energytech/archives/2636893.html>
- 四、 林成彥(民 92)。高中基礎化學講義。P.166。
- 五、 張振昌。生質能源_厭氧生物產氫技術。(民 98 年 5 月)。
<http://www.library.fcu.edu.tw/libstories/?p=350>
- 六、 微生物製氫技術。泓能科技顧問。(民 95 年 7 月)。
<http://blog.roodo.com/energytech/archives/2636893.html>
- 七、 維基百科。<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A6%99%E8%95%89>
- 八、 台北市立圖書館-兒童版-小博士。
http://www.hulu.com.tw/fru/musa_1f.htm
- 九、 行政院農業委員會農糧署。
http://www.afa.gov.tw/publish_detail.asp?catid=914
- 十、 江漢全(民 90)。儀器分析 I。台北市：東大。
- 十一、 張嘉修(民 98)。生質氫能。科學發展，433 期。
- 十二、 林屏杰(民 91)。以改良式 SBR 程序進行含糖廢水醱酵產氫之饋料進流

策略最佳化探討。逢甲大學化學工程學系碩士論文。

十三、鄭新讚、鄭茜如(2008)。分析化學II。台北市：東大書局。

評語

本作品先挑選適當的菌種，一種厭氧菌，活純化後與香蕉等有機物作用，成功的產生氫氣。作品中並探討產氫的最有效率組合。具創意、完整性及應用性。