

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 理化科

佳作

031623

生生不息--生質產氫發電

學校名稱：苗栗縣立照南國民中學

作者： 國二 林穎淳 國二 劉芸彤 國二 劉若珩 國二 盧慶璋	指導老師： 楊立豪
-------------------------------------------------------------	------------------

關鍵詞：厭氧發酵產氫、顆粒污泥、培養溫度

“生生不息”—生質產氫發電

摘要

本研究中，我們利用厭氧產氫菌分解有機質，由過程中找出厭氧產氫菌醱酵產氫最佳環境因子，再於攪拌式反應器中添加活性炭粉進行連續式醱酵產氫實驗。在一系列的研究下，最終找到最佳環境因子醱酵產氫，分別為污水處理場污泥、培養溫度 40°C、攪拌速率 150 rpm、蔗糖為基質碳源濃度為 30000 mg COD/L、pH 值維持在 pH=6.0，為最有利於厭氧產氫菌進行產氫。而於攪拌式反應器內添加活性炭粉，將有助於液態產氫污泥凝聚成顆粒污泥，而本研究於 HRT=1 h 時，產氫速率可提高到 7.03 L/h/L，相當於每日每公升反應器可產生 168 L 的 H₂，最後產生的氫氣結合氫氣純化裝置與燃料電池後，產生電壓最大可達 3 V，已成功讓 1.5 V 燈泡發亮、電風扇轉動與進行水的電解實驗。希望本研究將進一步應用在澱粉或纖維素醱酵產氫，以分解自然界許多過剩的廢棄物質，成爲一種潔淨環保再生的未來能源。

壹、研究動機

最近國際石油價格逼近 120 美元，石油輸出國家組織(OPEC)主席表示，油價不排除會漲到 200 美元，讓世界各大工業國可說是人心惶惶。正巧我們從自然與生活科技課本第四冊 5-2 「常見的有機化合物」課程的相關內容得知，工業革命以來，大量燃燒化石燃料，砍伐森林，也增強了溫室效應，使得全球暖化的現象更加明顯。而石油與天然氣是目前最受依賴的能源，根據科學家評估與推斷，本世紀將會有用盡的一天，因此尋求代替能源已爲重要課題。

近年來，替代能源的開發中，氫氣能源能帶給人類能源的永續供應與乾淨使用的希望，因爲氫氣燃燒只產生水蒸氣，且每克氫氣所產生的熱值約爲化石燃料的 2.75 倍，因此引起我們好奇上網查詢有關製造氫氣的方法，得知利用微生物厭氧醱酵產氫過程可在常溫、常壓下，經過醱酵作用產生有用的氫氣，並將含有再生的能量資源回收再利用，若再結合現今的氫氣純化及燃料電池技術，更能符合綠色電力的使用條件，更能帶來潔淨的環境。於是開始了我們的研究，希望能爲地球的永續經營有所貢獻。

貳、研究目的

- 一、探討環境因子批次實驗對產氫潛能的影響。
- 二、使用連續醱酵產氫反應器找出水力滯留時間(HRT)最佳的操作策略探討。
- 三、利用最佳操作策略提高氫氣產量。
- 四、利用氫氣純化與燃料電池技術產生電力。
- 五、即時生物醱酵產氫發電系統之應用。

參、實驗原理

一、厭氧醱酵產氫(暗醱酵產氫)

在缺氧或厭氧的情況下，暗醱酵產氫微生物廣泛存在於沼澤或污泥，在厭氧且不需要光源的情形下能夠將有機質轉換成氫氣(H₂)、二氧化碳(CO₂)與液相代謝物(乙醇、乙酸、丙酸、丁酸等)，而這些液相代謝物又可被其它微生物進一步再利用。

二、生物產氫特性優缺點比較

產氫菌種分類	優點	缺點
綠藻類	※ 可自水體產氫 ※ 太陽能轉換效率較高，為樹和農作物的 10 倍	※ 需要光能做為產氫能量來源 ※ O ₂ 對系統具有危險性
藍綠細菌	※ 可自水體產氫 ※ 產氫酵素為 Nitrogenase ※ 可自大氣中進行固氮作用	※ 需要陽光。 ※ 所產生的氣體包含 30% O ₂ ※ O ₂ 會抑制 Nitrogenase ※ 氣相包含 CO ₂
光合細菌	※ 可利用廢棄物作為碳源 ※ 可利用頻寬較廣的光波作為光源	※ 需要光能做為產氫能量來源 ※ 醱酵過程會產生廢水污染 ※ 氣相包含 CO ₂
醱酵細菌	※ 可不需光源下產氫 ※ 產氫速率較快 ※ 可利用多種碳源做為基質 ※ 液相代謝物可產生乙酸、丁酸等 ※ 沒有受到 O ₂ 限制的問題	※ 醱酵過程代謝物需要再處理，否則易造成水污染 ※ 氣相包含 CO ₂

三、厭氧醱酵產氫分解程序

厭氧生物分解過程可分為三個步驟，水解酸化、乙酸化和甲烷化等三步驟。複雜的高分子有機物，如纖維素或多醣體，先被水解酸化菌水解成小分子單體，如胺基酸、單糖類等。接著將小分子的單體進行酸化反應，生成揮發性有機酸與醇類等，其中氣相產生 H₂ 和 CO₂，接著由乙酸化菌將這些還原性的醱酵產物，如有機酸、醇類，氧化成乙酸、H₂ 和 CO₂ 等，最後再由嗜氫甲烷菌和嗜乙酸甲烷菌利用 H₂、CO₂、乙酸、甲酸、甲醇等物質生成甲烷。由圖 1 得知，當有機物進行厭氧甲烷化過程中，會有氫氣的生成，但由於乙酸化菌及甲酸化菌的存在，會將氫氣轉化成乙酸或甲烷。因此，若要在微生物厭氧消化分解程序中獲取大量的氫氣，就要抑制厭氧甲烷系統中之甲烷菌生長即可，使系統中的水解酸化菌成為優勢菌種，就可產生大量的氫氣。一般常見用來抑制系統中甲烷菌生長的方法為酸/鹼處理及熱處理(100°C)，這兩種前處理方法皆可有效的抑制甲烷菌生長而產氫，使系統順利的進行生物產氫程序

四、厭氧醱酵產氫菌的種類

一般所認知的厭氧產氫菌包括 *Enterobacter*、*Citrobacter*、*Klebsiella*、*Bacillus* 和 *Clostridia* 等菌種，其中最具代表性的是梭狀芽苞桿菌 *Clostridia* 菌屬。*Clostridia* 屬細菌普遍存在於農業廢棄物、都市下水污泥、垃圾掩埋場等環境中，或是以共生的方式存在反芻動物的瘤胃(牛、羊等)及白蟻的腸道中。

五、Clostridia 的產氫特性

Clostridia 菌屬為目前已知產氫菌中產氫能力較佳的菌種，外型為短桿狀，適合生長於厭氣、中溫(25~60°C)及中性 pH 的環境下，*Clostridia* 在較不適合生長的環境下會產生內孢子而進入休眠狀態，此類菌屬可分解各類的碳水化合物而產生氫氣，包括：葡萄糖、蔗糖、糖蜜、纖維素、澱粉與有機廢棄物等。

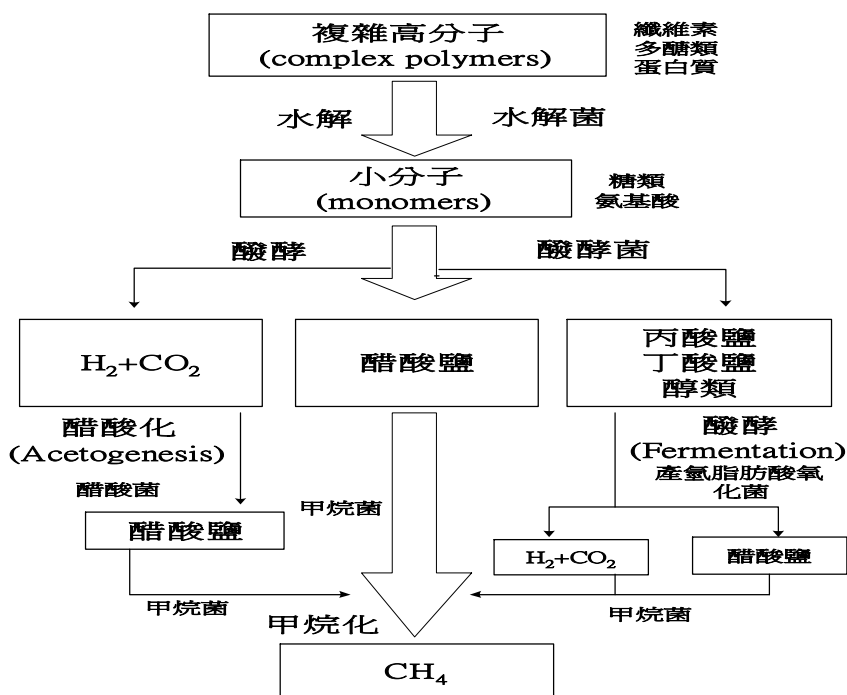


圖 1. 厭氧醱酵產氫分解程序

肆、研究設備及器材

一、實驗儀器

項次	物品名稱	用途
1	血清瓶	批次實驗醱酵產氫
2	恆溫震盪槽	控制批次實驗溫度
3	排水集氣箱	收集批次產生氣體
4	酒精燈	污泥熱前處理
5	三腳架	污泥熱前處理
6	pH 計	監測厭氧菌 pH 值
7	氣相層析儀	分析氣體(H ₂ 、CO ₂)比例
8	分光光度計	檢測糖利用率
9	電子天平	稱量藥品重
10	針筒	抽取醱酵後產生氣體
11	攪拌式反應器	污泥厭氧醱酵產氫

12	氣液分離器	分離產生氣體與液體
13	濕式氣體流量計	測量產生氣體體積
14	進料幫浦	基質進料
15	恆溫控制器	恆定溫度
16	離心機	使菌液沉降分離
17	氫氣純化裝置	以 NaOH 吸附 CO ₂
18	燃料電池	即時發電系統應用
19	燈泡、小型電風扇、水的電解裝置	即時發電系統應用

二、實驗藥品

項次	物品名稱	用途
1	各類污泥	批次實驗醱酵產氫
2	微量金屬(氯化鎂、硫酸鐵、硫酸錳、硫酸銅、氯化鈷)	提供為生物所需微量金屬元素
3	活性炭粉	凝聚液態產氫污泥
4	蔗糖(二號砂糖, Sucrose)	提供實驗基質碳源
5	果糖(Fructose)	提供批次實驗基質碳源
6	葡萄糖(Glucose)	提供批次實驗基質碳源
7	澱粉(Starch)	提供批次實驗基質碳源
8	碳酸氫銨(NH ₄ HCO ₃)	提供實驗基質氮源
9	碳酸氫鈉(NaHCO ₃)	調控基質 pH 值
10	磷酸氫二鉀(K ₂ HPO ₄)	提供實驗基質磷源、鉀源
11	氯化鈣(CaCl ₂ ·2H ₂ O)	增加菌體凝聚成顆粒



圖 2. 產氫實驗儀器



圖 3. 產氫實驗藥品



圖 4. 攪拌式反應器



圖 5. 氣液分離器

伍、研究過程或方法

一、實驗污泥

我們經由文獻得知，有些厭氧微生物可將各類碳水化合物分解進而產生氫氣或甲烷，這類微生物大都存在於沼澤或污泥中，因此我們嘗試尋找不同地區的污泥，希望能藉由實驗篩選到厭氧產氫菌。

本研究之污泥分別取自某污水處理場污泥、中港溪河口潮間帶污泥、學校水溝污泥、學校花園泥土，為了抑制甲烷菌生長，各類污泥取回後以熱前處理方式 95~100°C 加熱維持 1 小時(如圖 6)，以去除甲烷菌等耗氫菌。

二、培養基(基質)組成

本研究以蔗糖為醱酵產氫之碳源，其濃度為 30000 mg COD/L(26718 mg/L)，其他無機鹽類及微量元素則參考 Endo 等人在 1982 年進行有機物厭氧酸化所使用之配方，其組成如表 1 所示。

表 1. 培養基質及無機鹽成分

成分	濃度 (mg/L)
蔗糖(Sucrose)	26718
NH ₄ HCO ₃	7860
NaHCO ₃	3000-10000*
K ₂ HPO ₄	125
CaCl ₂ .2H ₂ O	100
MgCl ₂ .6H ₂ O	100
MnSO ₄ .6H ₂ O	15
FeSO ₄ .7H ₂ O	25
CuSO ₄ .5H ₂ O	5
CoCl ₂ .5H ₂ O	0.125

* pH 調控

三、尋找最佳環境因子批次實驗

(一) 不同污泥之產氫實驗

1. 首先配製基質蔗糖碳源濃度為 20000 mg COD/L (相當於 17812 mg / L), 其餘與 Endo 配方相同。準備 4 個血清瓶, 將基質 75 ml 與不同菌液 75 ml (某污水處理場污泥、中港溪河口潮間帶污泥、學校水溝污泥、學校花園泥土) 分別倒入 4 個血清瓶內, 其反應有效體積為 150 ml, 並檢測溶液 pH 值。
2. 將瓶口密封後, 而後以真空泵抽氣使血清瓶內部呈現真空狀態, 再沖堤氫氣使瓶內之氮氣、氧氣趕出血清瓶外, 以達到厭氣之狀態(如圖 7)。
3. 將血清瓶置入恆溫震盪槽(如圖 8), 把三向閥插入排水集氣箱, 並打開三向閥釋放瓶內壓力, 再將量筒倒放入排水集氣箱內(如圖 9)。
4. 將恆溫震盪槽溫度設定 40 °C, 攪拌速率 150 rpm, 每隔一段時間紀錄量筒內所產生氣體體積, 並於量筒上方取樣口以針筒抽取氣體(如圖 10), 於氣相層析儀分析產生氣體(H₂、CO₂)濃度比例(如圖 11)。
5. 待反應結束後, 檢測溶液 pH 值。

(二) 不同攪拌速率之產氫實驗

1. 配製基質(蔗糖碳源濃度為 20000 mg COD/L), 其餘與 Endo 配方相同。將基質 75 ml 與污水處理場污泥 75 ml, 倒入血清瓶內, 反應有效體積為 150 ml, 並檢測溶液 pH 值。
2. 同步驟(一)之 2~3。
3. 將恆溫震盪槽溫度設定 40 °C, 分別改變攪拌速率 0、50、100、150、200 rpm, 每隔一段時間紀錄量筒內所產生氣體體積, 並於量筒上方取樣口抽取氣體, 於氣相層析儀分析產生氣體(H₂、CO₂)濃度比例。
4. 待反應結束後, 檢測溶液 pH 值。

(三) 不同溫度之產氫實驗

1. 配製基質(蔗糖碳源濃度為 20000 mg COD/L), 其餘與 Endo 配方相同。將基質 75 ml 與污水處理場污泥 75 ml, 倒入血清瓶內, 反應有效體積為 150 ml, 並測量溶液 pH 值。
2. 同步驟(一)之 2~3。
3. 將恆溫震盪槽攪拌速率設定 150 rpm, 分別改變不同溫度 30、35、40、45、55°C, 每隔一段時間紀錄量筒內所產生氣體體積, 並於量筒上方取樣口抽取氣體, 於氣相層析儀分析產生氣體(H₂、CO₂)濃度比例。
4. 待反應結束後, 檢測溶液 pH 值。

(四) 不同基質碳源之產氫實驗

1. 分別配製不同基質碳源蔗糖、葡萄糖、果糖、澱粉, 碳源濃度均為 20000 mg COD/L, 其餘與 Endo 配方相同。分別將基質 75 ml 與污水處理場污泥 75 ml 倒入血清瓶內, 反應有效體積為 150 ml, 並測量溶液 pH 值。
2. 同步驟(一)之 2~3。
3. 將恆溫震盪槽溫度設定 40 °C, 攪拌速率 150 rpm, 每隔一段時間紀錄量筒內所產生氣體體積, 並於量筒上方取樣口抽取氣體, 於氣相層析儀分析產生氣體(H₂、CO₂)濃度比例。

4. 待反應結束後，檢測溶液 pH 值。

(五) 不同蔗糖碳源濃度之產氫實驗

1. 分別配製不同蔗糖碳源濃度為 10000、20000、30000、40000、50000 mg COD/L(蔗糖分別為 8906、17812、26718、35625、44530 mg/L)，其餘與 Endo 配方相同。分別將基質 75 ml 與污水處理場污泥 75 ml 倒入血清瓶內，反應有效體積為 150 ml，並測量溶液 pH 值。
2. 同步驟(一)之 2~3。
3. 將恆溫震盪槽溫度設定 40 °C，攪拌速率 150 rpm，每隔一段時間紀錄量筒內所產生氣體體積，並於量筒上方取樣口抽取氣體，於氣相層析儀分析產生氣體(H₂、CO₂)濃度比例。
4. 待反應結束後，檢測溶液 pH 值。

(六) 不同起始 pH 值之產氫實驗

1. 配製基質(蔗糖碳源濃度為 30000 mg COD/L)，其餘與 Endo 配方相同。分別調控改變起始 pH 值 5.0、5.5、6.0、6.5、7.0，分別將基質 75 ml 與污水處理場污泥 75 ml 倒入血清瓶內，反應有效體積為 150 ml，並測量溶液 pH 值。
2. 同步驟(一)之 2~3。
3. 將恆溫震盪槽溫度設定 40 °C，攪拌速率 150 rpm，每隔一段時間紀錄量筒內所產生氣體體積，並於量筒上方取樣口抽取氣體，於氣相層析儀分析產生氣體(H₂、CO₂)濃度比例。
4. 待反應結束後，檢測溶液 pH 值。



圖 6. 加熱 100°C 去除甲烷菌



圖 7. 瓶口密封沖提氫氣



圖 8. 恆溫震盪槽



圖 9. 排水集氣箱收集氣體



圖 10. 針筒抽取產生氣體



圖 11. 氣相層析儀分析氣體

四、蔗糖連續發酵產氫實驗

1. 首先裝置攪拌式反應器系統，系統示意圖(如圖 12、13)，於反應器內加入基質(蔗糖碳源濃度為 30000 mg COD/L) 900 ml、污水處理場污泥 100 ml 及活性炭粉 1 g，使反應有效體積為 1 L，並以氫氣沖提反應器內以達厭氧狀態。
2. 設定培養溫度為 40 °C，攪拌速率 150 rpm，進行厭氧批次實驗，待菌體活化後，以 HRT=8

h 啟動。

3. 操作過程中以進料幫浦將基質穩定打入反應器中，產氣及液體以溢流方式進入氣液分離器，隨即氣體導入濕式氣體流量計以量測產氣量。
4. 改變 HRT=4、2、1 h 操作策略，期間並由氣相層析儀監測其產氣組成、出流水 pH 值、產氫污泥顆粒大小。

五、即時生物發酵產氫發電系統之應用

1. 於 HRT=1 h 下連接氫氣純化裝置(如圖 14)，以 NaOH 吸附 CO₂。
2. 以純化後氫氣連接燃料電池(如圖 15)，再連接燈泡、電風扇、水的電解等裝置，觀察產生電力情形。

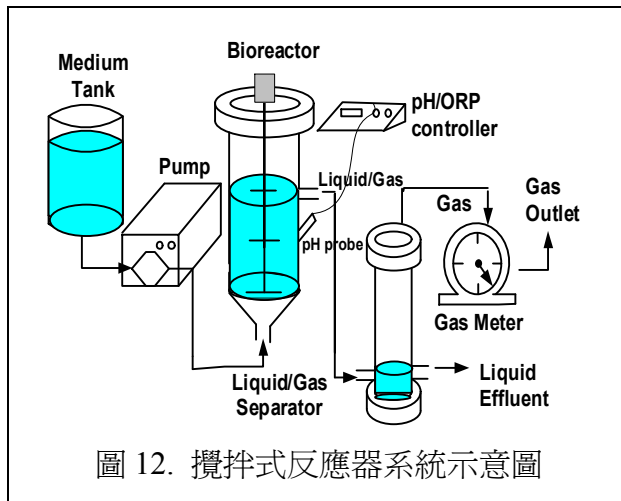


圖 13. 攪拌式反應器系統裝置圖



圖 14. 氫氣純化裝置



圖 15. 燃料電池

陸、研究結果與討論

一、尋找最佳環境因子批次實驗

(一) 不同污泥之產氫實驗

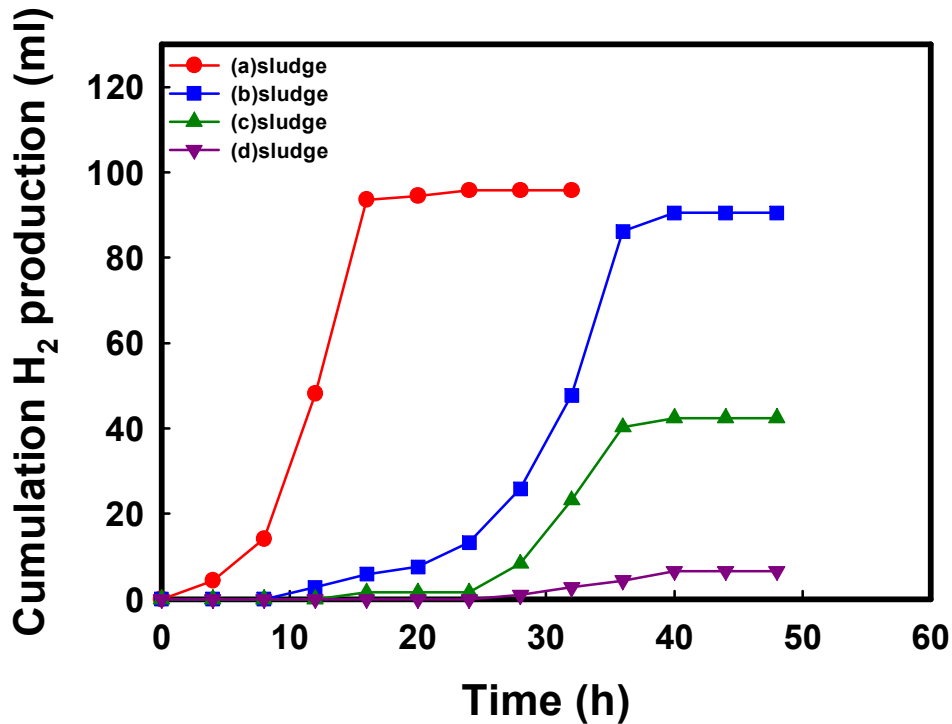


圖 16. 不同污泥之產氫實驗

(※污水處理場污泥累積產氫量最佳)

表 2. 不同污泥之產氫行為

污泥種類	累積時間(h)	累積產氫量(ml)	起始 pH 值	最終 pH 值
(a)某污水處理場污泥	0~32	95.7	7.88	6.24
(b)中港溪河口潮間帶污泥	0~48	90.5	7.95	6.33
(c)學校水溝污泥	0~48	42.4	7.90	6.59
(d)學校花圃泥土	0~48	6.53	7.95	6.79

【小結】圖 16 與表 2 為以不同污泥之產氫比較圖表，在累積產氫量方面可以發現最佳為污水處理場污泥，可能原因為生活污水處理場厭氧產氫菌較多所造成，且污泥可於 32 h 內產生氫氣，相較於河口潮間帶污泥累積產氫量多，其累積產氫量為 95.7 ml，而其厭氧產氫菌推測應為 *Clostridia* 菌屬，因為 *Clostridia* 菌屬為目前產氫能力較佳的菌種。而河口潮間帶污泥產氫效能亦有不錯表現，推測為泥巴處在海岸漲退潮之惡劣環境下，產氫菌生存不易，能生存下來的將是優勢產氫菌，此無意中發現可以顛覆傳統厭氧產氫菌只能在污水處理場或沼澤中找到。而實驗中學校水溝污泥與學校花圃泥土也有產氫情形，但產氫量不及前兩者，可能為厭氧產氫菌太少所導致，接下一連串的批次實驗將以污水處理場污泥作為實驗污泥。

(二) 不同攪拌速率之產氫實驗

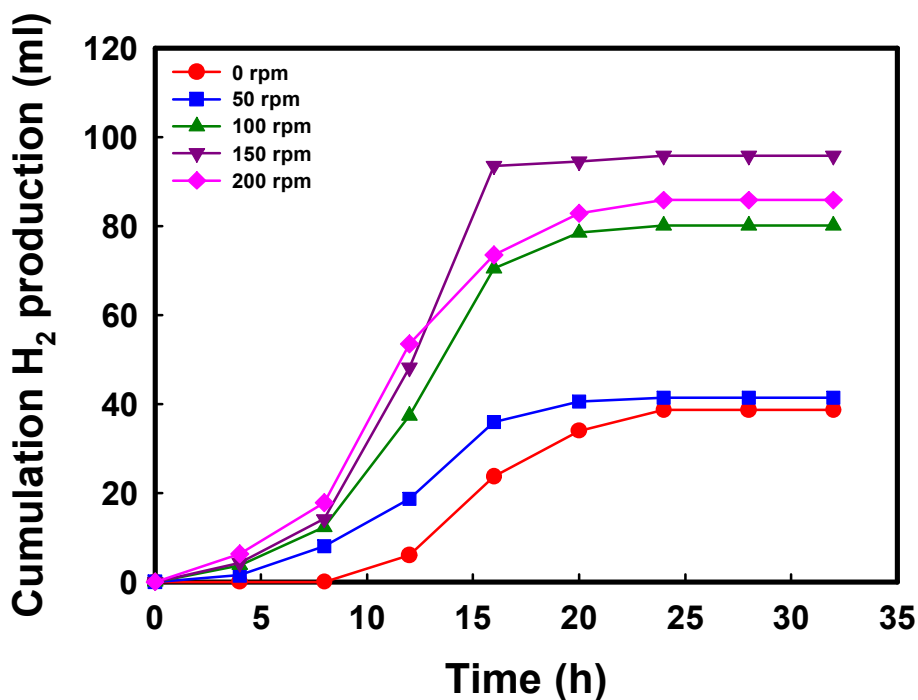


圖 17. 不同攪拌速率之產氫實驗
(※150 rpm 累積產氫量最佳)

表 3. 不同攪拌速率之產氫行為

攪拌速率(rpm)	累積時間(h)	累積產氫量(ml)	起始 pH 值	最終 pH 值
0	0~32	38.6	7.85	6.54
50	0~32	41.4	7.92	6.47
100	0~32	80.1	7.88	6.37
150	0~32	95.7	7.88	6.24
200	0~32	85.8	7.95	6.14

【小結】圖 17 與表 3 為以不同攪拌速率之產氫比較圖表，圖中可發現在 150 rpm 下有較佳的產氫效能。而 0 rpm 與 50 rpm 累積產氫量相差不多約為 38~41 ml 間，表示此產氫污泥即使在不攪拌情形下，亦可產生一定量的氫氣。而 100 與 200 rpm 則產氫效能不佳，其中攪拌速率 200 rpm 累積產氫量為 85.8 ml 較 150 rpm 差，推測原因為攪拌速率太快，氣體產生太快使得污泥倒流回排水集氣箱，導致污泥量減少，累積產氫量因而降低。藉由此實驗可得知適當攪拌速率將可增加產氫速率，而未來將以攪拌速率 150 rpm 進行實驗之。

(三) 不同溫度之產氫實驗

【小結】圖 18 與表 4 為以不同溫度之產氫比較圖表，圖中各溫度均在 25 h 後累積產氫量維持持平，主要原因為基質已被細菌利用而導致不產氫。在累積產氫量方面，以 40 °C 最佳、35 °C 次之、55 °C 最差，而 30 °C 與 45 °C 累積產氫量相差不多約為 41~45 ml 間。因此可發現 40 °C 將

有助於產氫菌生長，而經由文獻亦可證明此厭氧產氫菌為中溫菌，較不適合於高溫培養，未來將以 40°C 作為培養溫度。

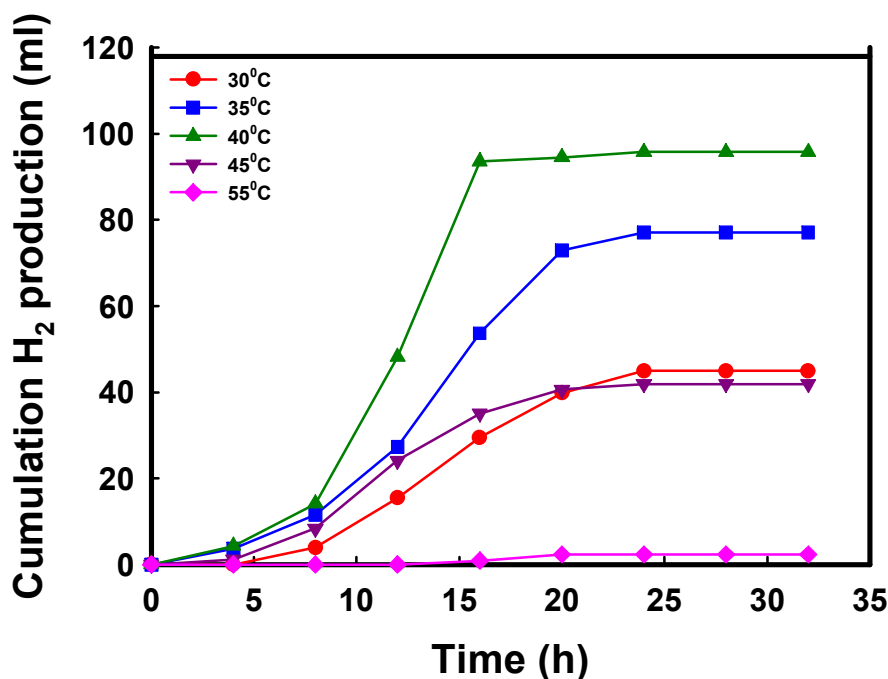


圖 18. 不同溫度之產氫實驗
(※40°C 累積產氫量最佳)

表 4. 不同溫度之產氫行為

溫度(°C)	累積時間(h)	累積產氫量(ml)	起始 pH 值	最終 pH 值
30	0~32	44.8	7.84	6.41
35	0~32	77.1	7.93	6.34
40	0~32	95.7	7.88	6.24
45	0~32	41.8	7.90	6.85
55	0~32	2.31	7.84	7.52

(四) 不同基質碳源之產氫實驗

表 5. 不同基質碳源之產氫行為

基質碳源	累積時間(h)	累積產氫量(ml)	起始 pH 值	最終 pH 值
蔗糖	0~32	95.7	7.88	6.24
葡萄糖	0~32	88.6	7.85	6.29
果糖	0~32	85.7	7.88	6.31
澱粉	0~32	61.8	7.88	6.32

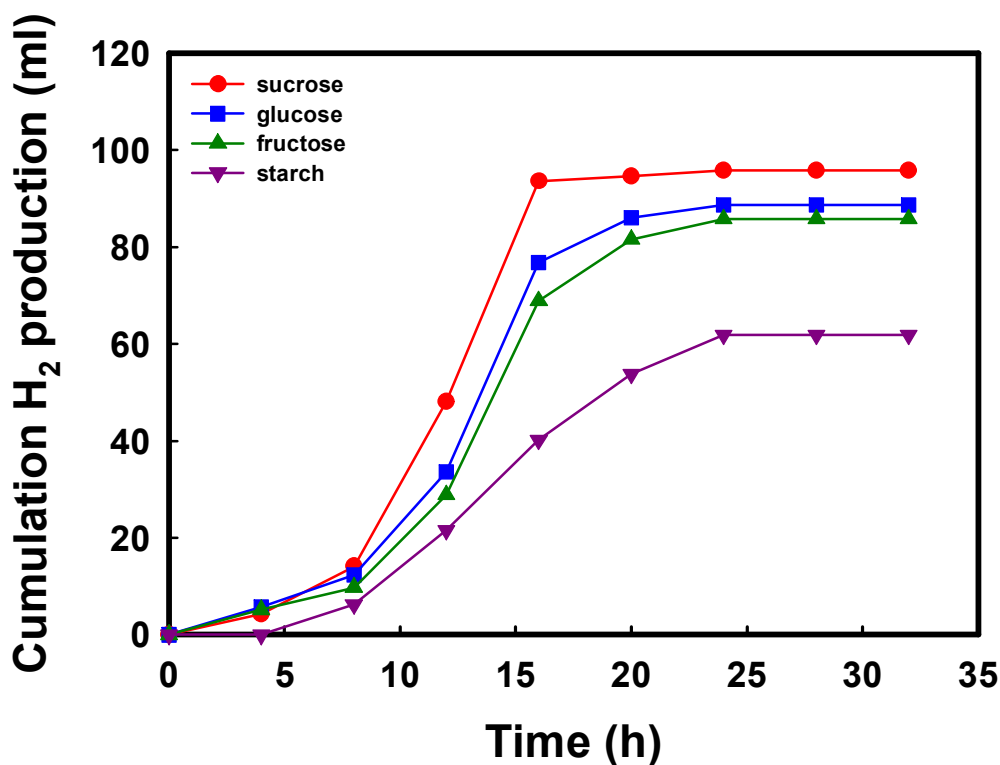


圖 19. 不同基質碳源之產氫實驗

(※蔗糖累積產氫量最佳)

【小結】圖 19 與表 5 為以不同基質碳源之產氫比較圖表，由圖中可以看出累積產氫量以蔗糖最佳，葡萄糖次之，再者為果糖，最差者為澱粉。由實驗得知葡萄糖與果糖累積產氫量相近，累積產氫量約為 85~88 ml 之間，推測原因為兩者均為單醣類，且分子量一樣，因此造成產氫量相差不多，而蔗糖為雙醣類因此累積產氫量較單醣多。而本實驗之厭氧產氫菌可分解較大分子的澱粉，產氫量約為 61.8 ml，推測本實驗厭氧產氫菌之 *Clostridia* 菌屬有分解澱粉之產氫能力，如果此菌株經過長時間馴養後，用於澱粉發酵產氫將會有不錯產氫效果表現，因此未來將以蔗糖作為實驗之基質碳源。

(五) 不同蔗糖碳源濃度之產氫實驗

表 6. 不同蔗糖碳源濃度之產氫行為

蔗糖碳源濃度 (mg COD/L)	累積時間(h)	累積產氫量(ml)	起始 pH 值	最終 pH 值
10000	0~32	65.3	7.95	6.32
20000	0~32	95.7	7.88	6.24
30000	0~32	142.6	7.90	5.92
40000	0~32	146.5	7.84	5.84
50000	0~32	138.7	7.86	6.14

【小結】圖 20 與表 6 為以不同蔗糖碳源濃度之產氫比較圖表，由圖中可發現在蔗糖碳源濃度過高濃度為 50000 mg COD/L 時，對產氫速率會有抑制的情形發生，其累積產氫量將降為 138.7 ml。而由圖中可看出蔗糖碳源濃度為 40000 mg/L 時，累積產氫量相較濃度為 30000 mg/L 並無明顯增加，累積產氫量都約為 142~146 ml 之間，因此於經濟考量下，以蔗糖為基質碳源時，其較適當的碳源濃度為 30000 mg COD/L，因此未來蔗糖碳源濃度將以 30000 mg COD/L 作為實驗之碳源濃度。

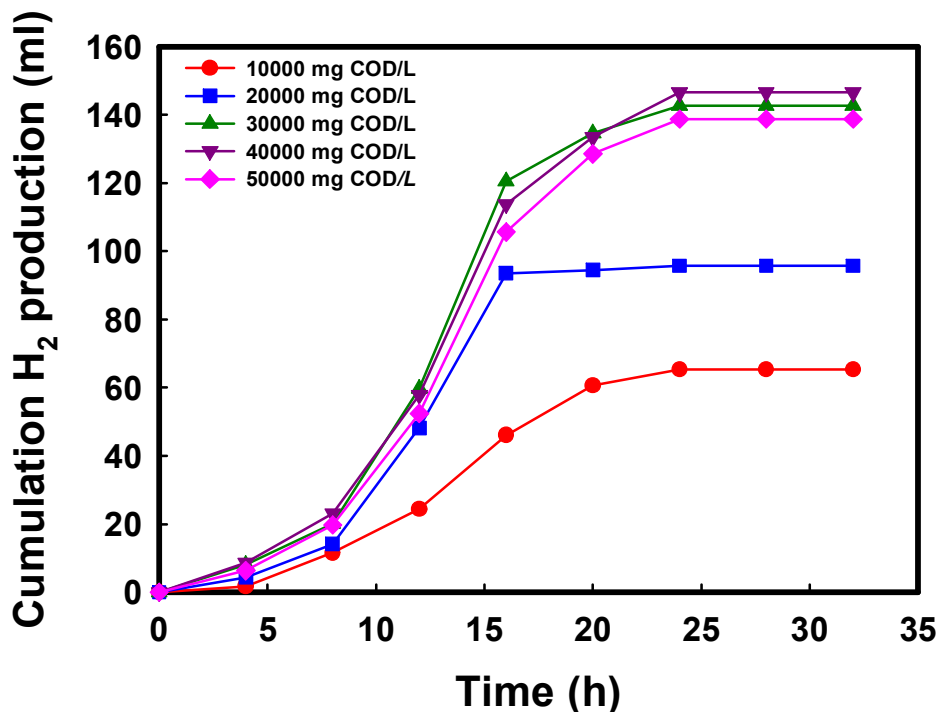


圖 20. 不同蔗糖碳源濃度之產氫實驗
 (※碳源濃度 30000 mg COD/L 累積產氫量最佳)

(六) 不同起始 pH 值之產氫實驗

表 7. 不同起始 pH 值之產氫行為

起始 pH 值	累積時間(h)	累積產氫量(ml)	最終 pH 值
5.0	0~40	103.3	5.99
5.5	0~40	129.8	5.93
6.0	0~40	148.1	5.85
6.5	0~40	99.3	6.15
7.0	0~40	79.6	6.31

【小結】圖 21 與表 7 為不同起始 pH 值之產氫比較圖表，由圖中可發現在起始 pH 值=6.0 下有較佳的產氫效能，其累積產氫量為 148.1 ml。然而由實驗發現，厭氧產氫菌對於過高或過低的 pH 值對產氫並無助益，反而影響厭氧產氫菌的生長，而本實驗最適的 pH 值為 6.0，如在未來進行蔗糖連續發酵產氫操作時，將產氫污泥 pH 值調控於 6.0，將可得到最佳的產氫速率。

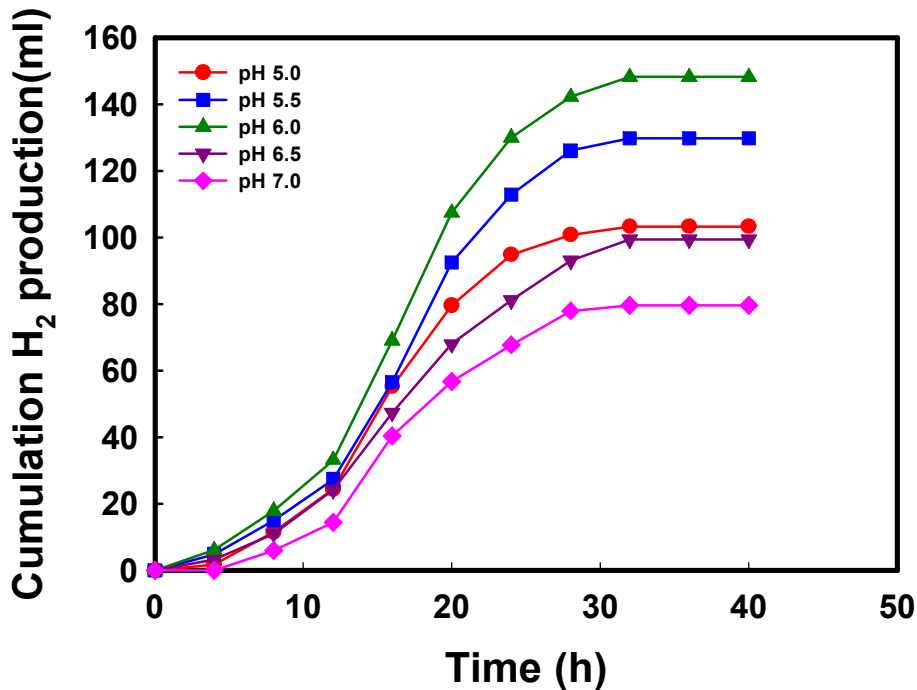


圖 21. 不同起始 pH 值之產氫實驗
 (※起始 pH=6.0 累積產氫量最佳)

二、蔗糖連續發酵產氫實驗

由圖 22 中可看出連續式氫氣發酵過程中 HRT、氣體產物、pH 值及氣體濃度隨時間之變化情形關係。圖中所示，系統可成功於 HRT=8 h 啓動，在啓動初期於攪拌式反應器中添加活性炭粉 1 g，希望有助於液態產氫污泥之凝聚成顆粒污泥，而在穩定操作時其產氫速率約維持於 0.390 L/h/L (如表 8)，氫氣濃度則維持在 42.4%，pH 值則大約在 5.8 左右，顯示反應器內 pH 值維持在適當的 pH 值範圍內。當降低 HRT=4 h 時，反應槽內顆粒污泥明顯增多(如圖 23)，使其產氣量顯著上升，其顆粒大小約 3 mm (如圖 26)，而氫氣濃度則維持在 41.7%，其產氫速率約維持於 1.29 L/h/L。待試程穩定後調降 HRT=2 h 時，部分菌體產生流失，但是顆粒污泥又可在短時間內快速長出故不會使整個反應槽菌體流失(如圖 24)，其顆粒大小約 4 mm (如圖 27)，產氫速率約維持於 2.48 L/h/L，氫氣濃度則維持在 44.1%，而 pH 值都維持在 pH=6.0 左右。待試程穩定後改變 HRT=1 h 時，反應槽內顆粒污泥明顯增多(如圖 25)，其顆粒大小約 5 mm(如圖 28)，產氫速率突然提升許多，產氫速率提升至 7.03 L/h/L，氫氣濃度提升為 44.8%，也使反應器產生大量氣泡，隨後氣泡壓迫氣液分離器，因此藉由灑水裝置來消除氣泡，而 pH 值都維持在 pH=6.0 左右。

三、不同 HRT 之蔗糖連續發酵產氫行為比較

表 8 為不同 HRT 之蔗糖連續發酵產氫效能比較，由表中看出系統隨著 HRT 試程的調降，產氫速率也逐漸提升，當調降至 HRT=1 h 時，產氫速率突然提升為 7.03 L/h/L，相當於每日每公升的反應器可產生 168 L 的 H₂，而氫氣濃度也隨著 HRT 試程的調降有逐漸升高的趨勢，氫氣濃度約為 44.8%，在糖利用率方面我們使用酚硫酸法結合分光光度計測量反應器出流水含糖量(如圖 29、30)，但糖利用率則隨著 HRT 的調降而逐漸降低，而相較於 HRT=8 h，HRT=1

h 其糖利用率降為 86.7% (如表 8)，推測原因為在高基質流速下，顆粒污泥未能有效利用糖類，進而轉化氫氣，因此造成糖利用率降低。而在液相溶解態代謝物組成方面，由表 9 中可看出液相溶解態代謝物丁酸組成約為 70~80%，其組成方面多以丁酸為主，乙酸次之，並產生少部分的乙醇及戊酸，由此可推論此實驗之菌體發酵是以丁酸發酵為主。

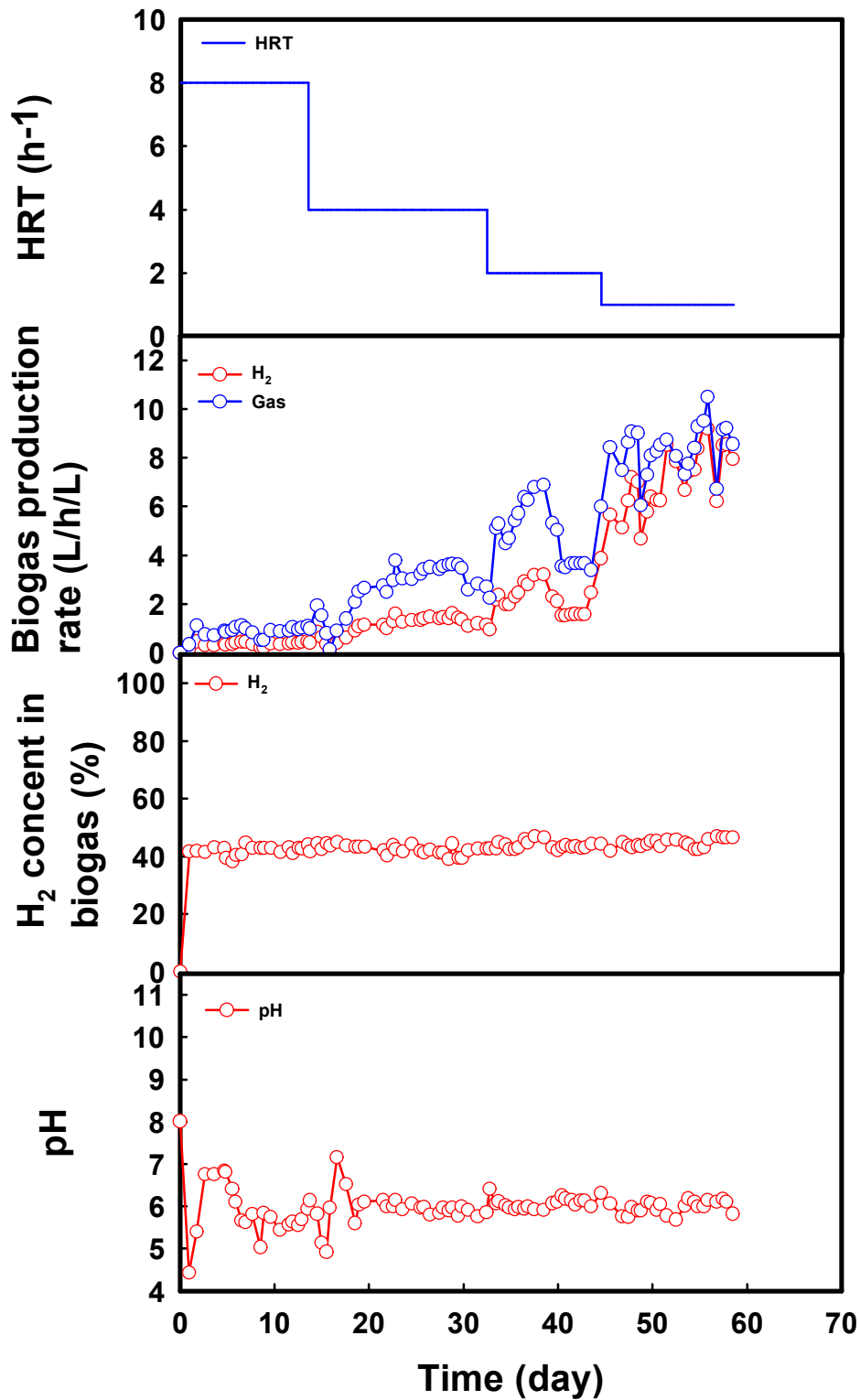


圖 22. 不同 HRT 之蔗糖連續發酵產氫操作

表 8. 不同 HRT 之蔗糖醱酵產氫效能比較

HRT (h)	產氫速率(L/h/L)	氫氣濃度 (%)	糖利用率(%)
8	0.390	42.4	97.4
4	1.29	41.7	91.7
2	2.48	44.1	88.1
1	7.03	44.8	86.7

表 9. 不同 HRT 之蔗糖醱酵產氫液相溶解態代謝物組成

HRT(h)	乙醇(%)	乙酸(%)	丙酸(%)	丁酸(%)	戊酸(%)
8	0.5	17.3	2.2	80.0	2.4
4	0.5	20.6	2.2	76.6	0.0
2	1.0	9.7	0.0	89.3	0.0
1	1.2	19.9	8.4	70.5	0.0



圖 23. HRT=4 h 反應槽



圖 24. HRT=2 h 反應槽



圖 25. HRT=1 h 反應槽

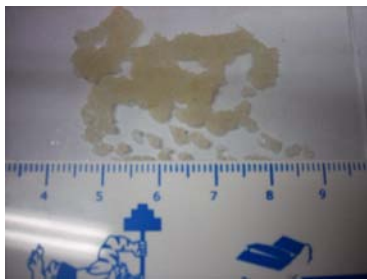


圖 26. HRT=4 h 顆粒污泥

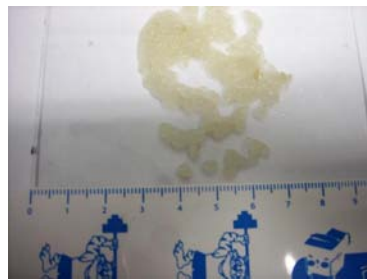


圖 27. HRT=2 h 顆粒污泥



圖 28. HRT=1 h 顆粒污泥



圖 29. 酚硫酸法檢測含糖量



圖 30. 分光光度計檢測含糖量

四、即時生物醱酵產氫發電系統之應用

經過長時間的實驗後，發現經由活性炭粉的添加及反應器的設計，可於短時間大量產生

氫氣，我們於 HRT=1 h，產氫速率可提升至 7.03 L/h/L，我們便連接氫氣純化裝置與燃料電池，由伏特計讀出電壓最大可達 3 V，最後可成功使 1.5 V 燈泡發亮、電風扇轉動及進行水的電解實驗(如圖 31、32、33)。



圖 31.燈泡發亮情形



圖 32. 電風扇轉動情形



圖 33. 水的電解實驗情形

五、以蔗糖為基質碳源進行產氫之經濟效益評估

本實驗經過一連串的研究後，未來應用於實場時如以蔗糖為基質碳源時，因最近國際蔗糖價格不斷飆漲，考慮所投入的營運成本、負擔的能源(水電)價格、設備費用與原料價格等，計算後將超過所產生的 H₂ 與 CO₂ 所得之獲利，也就是預測產氫成本甚高，如今利用蔗糖進行醱酵產氫成本甚高，顯示若本研究以蔗糖為基質，依目前市場行情並無競爭力。但未來如以澱粉、糖蜜廢水為基質碳源進行醱酵產氫，經濟效益相當具有市場競爭力，而國價石油價格未來如不斷攀升至 200 美元，進行本研究之醱酵產氫將可能符合國家綠色電力的使用規劃，更能帶來潔淨的環境。

柒、結論

- 一、本實驗以厭氧產氫菌醱酵進行產氫研究，最終找到最佳環境因子醱酵產氫，分別為污水處理場污泥、培養溫度為 40°C、攪拌速率為 150 rpm、以蔗糖為基質碳源濃度為 30000 mg COD/L、調控 pH 值維持在 pH=6.0，為最有利於厭氧產氫菌進行產氫。
- 二、於攪拌式反應器內添加活性炭粉，將有助於液態產氫污泥之凝聚成顆粒污泥，如進行反應器設計將可於高基質流速下提升產氫速率。
- 三、本研究可成功於 HRT=8 h 啟動，試程於 HRT=1 h 時，產氫速率可提升至 7.03 L/h/L，相當於每日每公升反應器可產生 168 L 的 H₂。
- 四、攪拌式反應器結合氫氣純化裝置與燃料電池後，電壓最大可達 3 V，已成功讓 1.5V 燈泡發亮、電風扇轉動與進行水的電解實驗。
- 五、如以蔗糖為基質碳源進行產氫之經濟效益評估，今利用蔗糖進行醱酵產氫成本甚高，顯示若本研究以蔗糖為基質，依目前市場行情並無競爭力，但未來如以澱粉、糖蜜廢水為基質碳源進行醱酵產氫，經濟效益相當具有市場競爭力。
- 六、希望本研究將進一步應用在澱粉或纖維素醱酵產氫上，以分解自然界許多過剩的廢棄物質，成爲一種潔淨環保再生的未來能源。

捌、參考資料及其他

- 一、林祺能，(2006) "矽膠固定化細胞暗醱酵產氫技術"，逢甲大學化學工程學系博士論文。
- 二、邵信（民86）。產氫處理新方向－產氫技術。廢水處理技術研討會，工研院。
- 三、國中自然與生活科技課本（民97）。台北縣：康軒文教事業股份有限公司，第四冊，5-2。
- 四、張嘉修、李國興、林屏杰、吳石乙、林秋裕（民91）。以環境生物技術生產清潔能源－氫氣。化工，49，6，85-104。
- 五、張仕旻，(2001) "利用薄膜反應器於高溫厭氧產氫生物程序之研究"，國立成功大學環境工程研究所碩士論文。
- 六、Das, D. and T.N. Veziroglu, "Hydrogen production by biological processes: a survey of literature," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 26, pp. 13-28 (2001).
- 七、Endo G., Noike T. and Matsumoto J. (1982) Characteristics of cellulose and glucose decomposition in acidogenic phase of anaerobic digestion. Proc. Soc. Civ. Engrs, Vol. 325, pp. 61-68. (In Japanese)
- 八、Lay JJ, Lee YJ, Noike T. Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste. Water Res 1999; 33:2579-86.

致謝

本研究得以完成在此感謝逢甲大學能源與資源中心提供儀器協助。

