

# 2025 年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

## 普高組 成果報告格式

**題目名稱：**解鎖酵母菌的電子傳遞密碼：探討酵母菌進行發酵作用時的能量轉換

### 一、摘要

微生物燃料電池 (MFC) 是一種生物電化學的電池系統，利用微生物代謝過程產生電能。我們決定以日常生活中隨手可得，也易獲取的真核生物代表——酵母菌，作為我們探究 MFC 的原材料。經資料查找，髮現其髮酵作用能釋放電子，並產生電流。因此，本研究欲通過構建雙室微生物燃料電池 (MFC)，探討不同葡萄糖溶液濃度 (0.1~0.5 M) 對酵母菌的發酵作用及其產生的電流大小的影響。實驗採用鐵氰化鉀為電子受體，飽和生理鹽水為電解質，以石墨電極為載體，通過鹽橋連接陰陽極室。結果顯示，葡萄糖濃度與電流輸出呈正比關係，0.5 M 組在 20 分鐘時達到峰值電流 0.137 mA，但高濃度 (0.4~0.5 M) 下電流穩定性下降。

### 二、探究題目與動機

可持續發展目標是至關重要的課題，可再生能源也逐漸成為未來主要的能量來源，其中微生物能源更值得深入研究。在上生物課時，我們認識到了細胞呼吸的原理，了解到了酵母菌在無氧發酵過程中會分解有機物 (如葡萄糖)，產生乙醇、二氧化碳和少量 ATP，同時釋放電子和質子 ( $H^+$ )。而這些電子可以通過微生物燃料電池 (Microbial Fuel Cell, MFC) 或生物電化學系統 (BES) 被捕獲並轉化為電能。其中影響酵母菌發酵的因素包括了環境溫度，溶液 pH 值，底物溶液的濃度等等。而本組將會選擇使用葡萄糖溶液作為實驗中的底物溶液，並對此展開研究。

### 三、探究目的與假設

為了避免不同菌株代謝活性的差異而影響電流輸出，我們將使用同一批次購買的酵母菌。我們將固定實驗全程的環境溫度，在最適溫度下進行 (25°C)，以維持酵母菌最佳活性環境，確保最大的電流輸出。同時為了維持滲透壓平衡及防止細胞破裂或失活，我們將使用 0.9% 的飽和生理鹽水 (NaCl) 溶液配置所有試劑。

目的：為了探討不同葡萄糖溶液濃度如何影響酵母菌發酵作用所產生的電流大小。

假設：(1) 葡萄糖溶液濃度越高，越能促進酵母菌的髮酵作用及電子傳遞，從而提高電流輸出。

(2) 當葡萄糖濃度超過某一臨界值 (如 0.4 M) 時，滲透壓或代謝副產物積累可能抑制酵母活性，導致電流下降。

### 四、探究方法與驗證步驟

#### 一、研究架構



(圖 1-研究架構圖)

## 二、研究設備與器材

器材	材料
燒杯	葡萄糖
石墨電極	飽和生理鹽水
鱷魚夾導線	1M 鐵氰化鉀
萬用表	1M 碳酸氫鈉
磁力攪拌器	食鹽水 (鹽橋)
滴管	蒸餾水
電子秤	酵母菌
鑷子	紙巾

(表 1- 器材與材料)



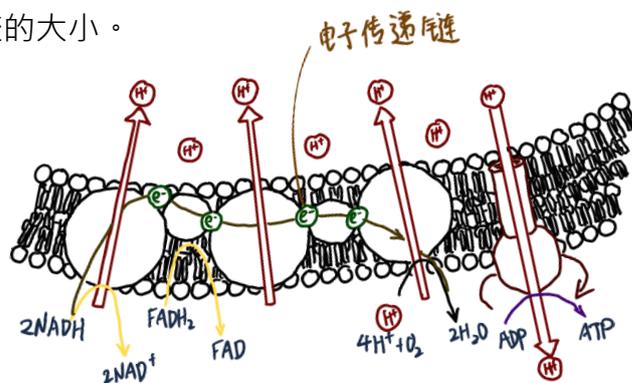
(圖-1 器材與材料)

## 三、实验基本介绍

### 1. 原理介绍

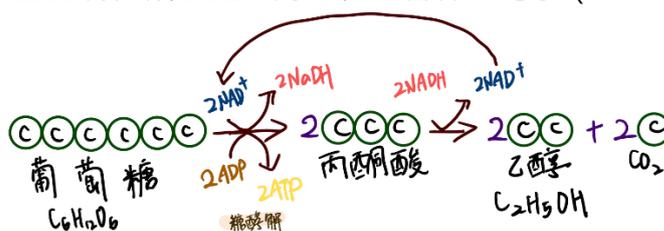
(1) 實驗究竟要在有氣或無氣的條件下進行？

根據資料參考，在有氣呼吸下，由酵母菌分解葡萄糖產生的電子會先貯存在 NADH 及 FADH<sub>2</sub> 中，最後在線粒體內膜上再沿著電子傳遞鏈傳遞 (圖-3 電子傳遞鏈)，最終傳遞給氧氣分子，將氫離子還原成水分子，因此在有氣反應下會導致電極難以俘獲電子，不利於探討所產生電流的大小。



(圖-3 電子傳遞鏈)

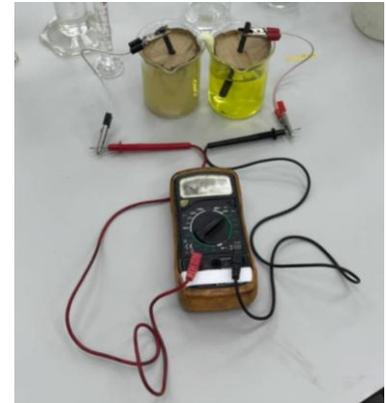
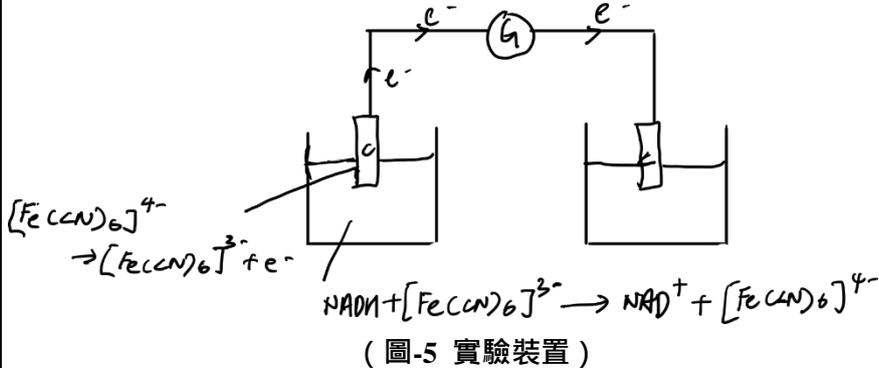
在缺氧呼吸下，酵母菌會進行酒精發酵產生乙醇、二氧化碳和少量能量。與有氣呼吸不同的是，缺氧狀態下的酵母菌不會讓電子沿著電子傳遞鏈傳遞，而是讓糖酵解產生的丙酮酸在相關酶的催化作用下，在細胞質基質利用糖酵解中 NADH 的能量，將丙酮酸分解成乙醇與二氧化碳，且 NADH 轉換成 NAD<sup>+</sup>的過程也會釋放電子 (圖-4 電子的釋放)。



(圖-4 電子的釋放)

## (2) 電子如何傳遞到陽極電極？

在上述基礎上，筆者利用鐵氰化鉀  $K_3[Fe(CN)_6]$  作為電子梭將電子傳遞給陽極（直接或通過電子中介體），協助電子達到電極進行反應（圖-5 實驗裝置），電子流動形成電流，質子通過質子交換膜（PEM）遷移至陰極完成回路。這是由於鐵氰化鉀具有可逆的氧化還原特性（能在兩種氧化態間快速、穩定地循環）。



(圖-6 真實實驗裝置)

## (3) 溶液 pH 值的固定使酵母菌保持同樣活性

酵母菌在代謝過程中會有酸性副產物的產生，比如：當髮酵環境中  $NAD^+$  再生不足（如電子傳遞受阻）時，丙酮酸可能通過 乳酸脫氫酶（LDH）轉化為乳酸。或是少量丙酮酸可能進入線粒體，在 丙酮酸脫氫酶 作用下轉化為乙酰-CoA，最終生成乙酸，這些酸都會進一步降低環境 pH，抑製酵母菌的活性。因此，為了保持離子平衡，我們將在陽極和陰極室裡統一添加  $NaHCO_3$  和生理鹽水。雖然生理鹽水（0.9%  $NaCl$ ）本身無緩衝能力，但加入  $NaHCO_3$  後，可形成  $CO_2/HCO_3^-$  緩衝體系，中和代謝產生的  $H^+$ ，維持 pH 值的穩定，其反應如下：



• 中和酸 ( $H^+$ ) :



• 中和鹼 ( $OH^-$ ) :



(圖-7 緩衝原理)

## 四、实验步骤

1. 將酵母菌活化：用溫水(約  $35-40^\circ C$ )溶解 1.25g 酵母,再補水至 22ml，用磁力攪拌器均勻攪拌 1 分鐘。
2. 準備兩個燒杯，一個加入 3.96g 的葡萄糖並將 22ml 的酵母菌懸液倒入其中，再加入 190ml 的飽和生理鹽水、4.4ml 的碳酸氫鈉（1M）、1.1ml 的鐵氰化鉀（1M），均勻攪拌，並插入石墨電極，作為陽極。
3. 另一個燒杯加入 195mL 的 飽和生理鹽水和 4.4ml 的碳酸氫鈉（1M）作為緩衝溶液，再加入 6.6ml 鐵氰化鉀（1M），並將一個石墨電極插入其中，作為陰極。

4. 把紙巾浸入飽和 NaCl 并且將兩端分別插入陽極和陰極，作為鹽橋。
5. 陽極和陰極分別用導線連接。
6. 每隔 10 分鐘觀察並記錄萬用表的讀數，共紀錄 4 次。
7. 重復步驟 1.至 6.兩次，取平均值。
8. 根據葡萄糖濃度為 0.2M、0.3M、0.4M、0.5M 的實驗組的陽極和陰極各溶液的比例重復步驟 1.至 7.

葡萄糖濃度 (M)	生理鹽水體積 (mL)	葡萄糖質量 (g)	碳酸氫鈉體積 ( 1M )	鐵氰化鉀 ( 1M )	酵母菌懸液 (mL)
0.1	190	3.96	4.4mL	1.1mL	22mL
0.2	185	7.93	4.4mL	1.1mL	22mL
0.3	180	11.89	4.4mL	1.1mL	22mL
0.4	175	15.86	4.4mL	1.1mL	22mL
0.5	170	19.82	4.4mL	1.1mL	22mL

( 表 2-陽極各濃度的溶液比例 )

葡萄糖濃度(M)	生理鹽水體積(mL)	碳酸氫鈉體 ( 1M )	鐵氰化鉀 ( 1M )
0.1	195	4.4	6.6
0.2	193	4.4	8.8
0.3	191	4.4	11
0.4	189	4.4	13.2
0.5	187	4.4	15.4

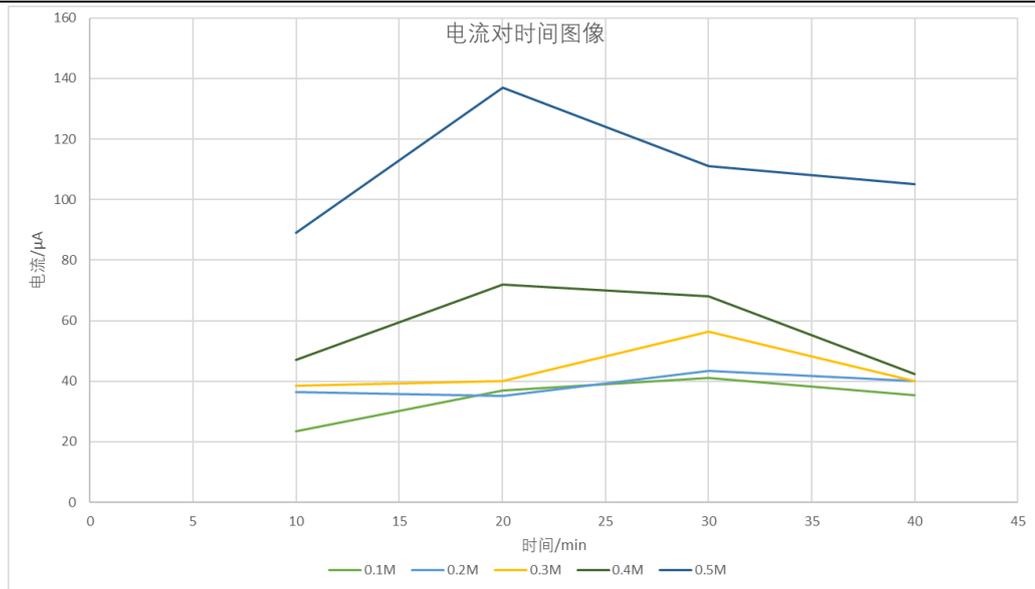
( 表 3-陰極各濃度的溶液比例 )

#### 四、实验数据与分析

结果(单位: mA)

所產生的電流 (mA)												
	第10分鐘			第20分鐘			第30分鐘			第40分鐘		
	实验1	实验2	平均	实验1	实验2	平均	实验1	实验2	平均	实验1	实验2	平均
<b>0.1M</b>	0.024	0.023	0.0235	0.030	0.044	0.037	0.048	0.034	0.0410	0.047	0.024	0.0355
<b>0.2M</b>	0.035	0.038	0.0365	0.050	0.020	0.035	0.047	0.040	0.0435	0.056	0.024	0.0400
<b>0.3M</b>	0.044	0.033	0.0385	0.053	0.027	0.040	0.053	0.060	0.0565	0.048	0.032	0.0400
<b>0.4M</b>	0.044	0.050	0.0470	0.071	0.073	0.072	0.069	0.067	0.0680	0.045	0.040	0.0425
<b>0.5M</b>	0.072	0.106	0.089	0.100	0.174	0.137	0.061	0.161	0.1110	0.080	0.121	0.1005

( 表 4-實驗數據 )



(圖-8 電流對時間的圖像)

- 1.) 0.1M 濃度在所有時間點的平均電流最低，0.5M 濃度在所有時間點的平均電流最高。
- 2.) 任何濃度條件下，電流都隨時間先升高後降低。
- 3.) 低濃度條件下，電流多在 30 分鐘達到峰值。高濃度條件下，電流多在 20 分鐘達到峰值。

## 五、解釋觀測現象

### 1.) 電流隨葡萄糖濃度的變化：

葡萄糖作為酵母菌代謝的直接能量來源，濃度增加提供了更多電子供體 (NADH)，通過細胞呼吸鏈產生更多還原當量；高糖環境可改變細胞膜電位，膜通透性增強，促進電子向電極的轉移效率。0.5M 時電子傳遞鏈接近飽和狀態，故表現出最高電流。

### 2.) 電流隨時間的變化：

0-20 分鐘時為酵母激活期，需時間啟動糖酵解途徑；10-20 分鐘時代謝酶系達到最大活性；20 分鐘後代謝副產物積累 (如乙醇、CO<sub>2</sub>)，抑制酶活性

## 五、結論與生活應用

### 結論

- 1.) 平均電流與葡萄糖濃度在 0.1M - 0.5M 的範圍內呈正比。葡萄糖濃度越小，平均電流越小，葡萄糖濃度越大，平均電流越大。
- 2.) 低濃度葡萄糖多需較長時間達到峰值，高濃度葡萄糖多需較短時間達到峰值。

### 生活應用

- 1.) 應急能源供應，如災難救援包：配備便攜式 MFC 套件，為應急照明或通信設備提供臨時電源。
- 2.) 可穿戴設備，如 MFC 貼片：利用人體汗液中的乳酸作為底物，為健康監測傳感器供電。
- 3.) 腸道微生物發電：設計可吞服 MFC 膠囊，利用腸道內葡萄糖和共生菌群產生電能，為微型醫療設備供能。

## 參考資料

1. 国立台湾科学教育馆 高中組化學科 040201 醇中帶電 - 酵母菌燃料電池的初探  
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/52/pdf/040201.pdf>
2. 【科学材料站】微生物燃料电池专题 1：微生物燃料电池-结构及其工作原理  
<http://www.scimaterials.cn/NewsDetail.aspx?ID=86>