

# 中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 農業與食品學科

## 團隊合作獎

052203

更精準掌控發酵-酵母菌在麵團中發酵程度的電  
特性大數據研究

學校名稱：新北市私立光仁高級中學

作者：  高二 陳品豪  高二 湯佳豪  高二 翁仕明	指導老師：  張鈞睿  江明岳
---	-----------------------------

關鍵詞：酵母菌、發酵程度、發酵電特性

## 摘要

麵包的成功除了材料外，精準的掌控發酵程度是關鍵，傳統發酵程度判斷僅看其膨脹高度及指壓回彈。我們用跨領域想像來思考來此問題，是否可更精準掌控發酵程度。麵團中含有蛋白質、食鹽與水，應具有一定程度的導電性，而發酵時產生的二氧化碳孔洞會使麵團的導電路徑長度變長或截面積變小，依電學研判麵團電阻值會變大。

本研究以市面常用 3 種不同蛋白質含量的麵粉進行測試，我們將麵團放入發酵容器，運用電極板及探針兩種偵測方式，歷經多次測試失敗，從原先直接測試電阻法到最後採用電極板間接測試法，終於成功證實我們假設是正確，也成功設計了發酵到位提醒裝置，過程中發現麵粉團具電感特性且會儲能，且 PH 值由 5-6 變成 7-8，我們的元氣麵包夢想近了。

## 壹、研究動機

新手麵包師傅一開始在製作麵包時，常常遇到麵團發酵失敗的狀況，大多是因為每一種酵母菌或麵團的發酵時間、發酵環境溫度或是麵團溫度不同而造成控制不得宜的所致(食尚先生，2017)。有經驗的師傅可以依據麵團膨脹高度與受壓後的回彈程度判斷，但兩者皆須不斷反覆觀察，才不會錯過最佳的發酵狀態，一個不留神就有可能過度發酵。為了解決此問題，我們設想如果能有一種方式能直接判斷麵團發酵的程度，便能跳過酵母菌種、麵團特性以及溫度等錯綜複雜的交互關係，以最簡單純粹的方式得知何時該停止發酵、進入烤箱。

麵團中的蛋白質與氯化鈉皆具有導電特性，使麵團在某個程度上具有導電物的性質。蛋白質的基本單元為胺基酸，其胺基、羧基以及另外的官能基都能接收或釋出氫離子，在不同的環境 pH 值下可能帶不同淨電荷。氯化鈉溶解於水中時由於可解離為氯離子與鈉離子，故具備導電特性(林育璋，106)。能導電的物質應具備可測量之電阻，電阻是一個物體對於電流通過的阻礙能力，相關方程式如下： $R = V / I$ 。

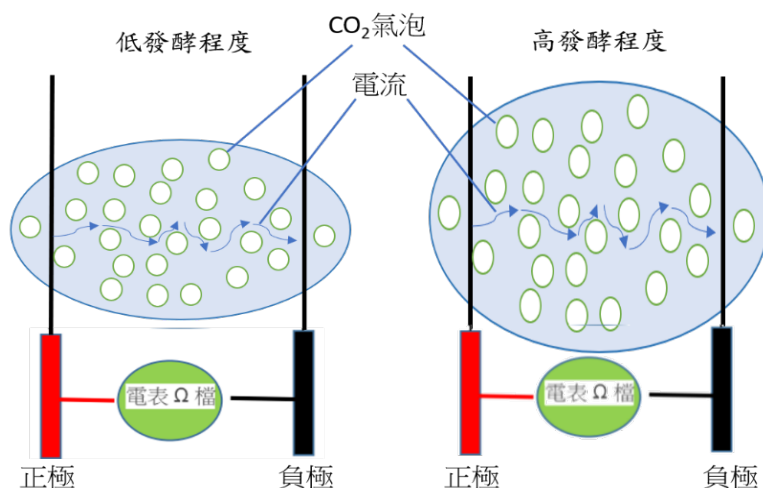


圖 1 低發酵程度(左)與高發酵程度(右)麵團中電流路徑變化示意圖

麵團中的酵母在生長過程中，將糖分轉換成酒精與二氧化碳以獲得能量，二氧化碳以混和之初的泡泡為核心逐漸累積膨大(Chiotelis and Campbell, 2003)，造成麵包的多孔隙結構。根據上述方程式的描述，當麵團發酵、二氧化碳氣泡變大時，可能使得電流路徑增加，造成電阻值的上升(圖 1)。

以跨領域想像思考到利用電阻定律(電導率、電阻率和導電路徑之長度)來測試能否對應到麵團的發酵狀況，期望此實驗能透過分析電阻值變化及麵團發酵程度找到其規律性，以作為設計精準控制麵團發酵的創新裝置原理。

## 貳、研究目的

本研究選用四種不同蛋白質含量之麵粉，分別為駱駝牌(13.7%)、麥典高筋(12.7%)、凱薩琳麵粉(11.6%)、大家發麵粉(8%)，麵粉糰製作成分：麵粉 125g、砂糖 13g、鹽 2g、奶油 13g、水 75ml、酵母菌 1.5g，測試麵粉糰載具分兩種，一種是不同直徑的發酵杯(500ml、1000ml)及不用發酵杯方式，在麵粉團底部用 1.5 x 4 cm 電極板，兩電極相隔 3cm(圖 6b2)測試麵粉糰發酵電阻變化，另一種是平面型，底座有兩片 1.5 x 4 cm 電極板，兩電極相隔 4cm(圖 10a)，實驗測試分直接測量法與間接測量法(圖 13)：

實驗一：麵粉團電阻隨時間的變化能否呼應發酵程度(直接測量麵粉糰電阻)

測試 1-1：發酵杯有加酵母菌麵粉糰發酵時間與電阻變化

測試 1-2：發酵杯無酵母菌麵粉糰發酵時間與電阻變化

實驗二：比較不同盛裝方式對麵團電阻變化的影響

測試 2-1：發酵杯麵粉糰發酵時間與電阻變化

測試 2-2：平面型麵粉糰發酵時間與電阻變化

實驗三：比較不同蛋白質含量麵團的電阻差異

### 直接測量法

連續測量 10 分鐘並記錄最終膨脹體積，然後休息 5 分鐘，重複兩次(共 40 分鐘)

測試 3-1：麥典高筋(測量麵粉糰發酵時間與電阻之變化)

500ml 杯子(第一團)、500ml 杯子(第二團)

因為此法測試多種麵粉均出現曲線 1(16 頁)及曲線 2(16 頁)電阻變化，所以僅列測試 3-1 說明：直接測量法我們做的次數至少有 20 次以上，是休息 5 分鐘及電錶長時間監測時會自動切掉後再啟動所導致，最後考量配合未來發酵定位警示，改成間接測試法，詳細說明請參閱討論四。

間接測量法(測量麵粉糰發酵時間與電阻之變化)接線如圖 13 所示

## 1. 純高筋麵粉

測試 3-2 駱駝牌；測試 3-3 麥典高筋；測試 3-4 凱薩琳麵粉

## 2. 高筋麵粉+低筋麵粉

測試 3-5 麥典高筋+大家發低筋

實驗四：嘗試製作麵團發酵狀態的提醒裝置，並應用於發酵程度控制

測試 4-1 運用前面測得過度發酵電阻值製作發酵提醒裝置

測試 4-2 運用麵糰發酵狀態提醒裝置製作麵包並評估民眾偏好程度

# 參、研究設備與器材

## 一、麵團製作

### (一)材料配方

1. 基本配方：本實驗為減少不必要的變因，僅使用最基本的材料製作麵團，其一份的組成材料如下：麥典高筋 125g、砂糖 13g、鹽 2g、奶油 13g、水 75ml、酵母菌 1.5g (圖 2)。



圖 2. 基本配方由左至右分別為麥典高筋(蛋白質含量 12.7%)、高筋麵粉成分表、無鹽奶油、乾酵母



圖 3. 不同蛋白質含量之麵粉，由左至右分別為駱駝牌(13.7%)、凱薩琳麵粉(11.6%)、大家發低筋麵粉(8%)。

2. 不同蛋白質含量的麵粉：為瞭解蛋白質含量對麵團電阻值的影響，除了上述統一麥典之外，我們準備以下兩種不同蛋白質含量的高筋麵粉作為施測對象(圖 3)。此外，為了增加蛋白質含量的差異性，另外準備一款低筋麵粉，與高筋麵粉混合以降低其蛋白質含量。

## (二)揉製

由於手工揉製容易因個人製作手法、身體狀況而有所差異，加上開放式的環境更使得便因難以控制。因此我們採用麵包機(圖 4、Panasonic 麵包機，型號 SD-BM103T)來揉製麵團，以減少人為誤差。設定行程為酵母菌→麵團，需時約一小時。

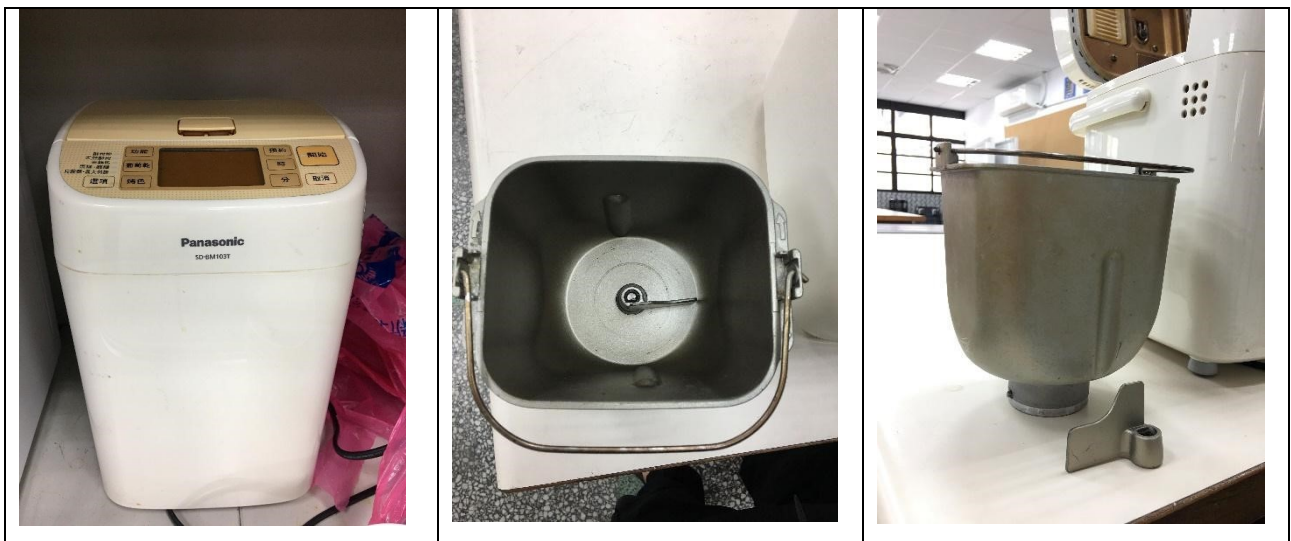


圖 4. Panasonic 麵包機，型號 SD-BM103T，由左至右分別為外觀、內鍋以及攪拌器。



圖 5. 晶華冷熱兩用電子行動冰箱，外觀與內部結構。

## 二、發酵環境控制

由於溫溼度會影響麵團發酵，後續操作盡可能保持在恆溫裝置中，本實驗採用晶華冷熱兩用電子行動冰箱(圖 5、型號 CLT-25A)，實驗中預先設定為 35°C 以控制實驗環境溫度。此裝置平時亦可充當冰箱使用。

### 三、電特性與體積測量具

#### (一) 麵團盛裝方式與體積測量

為瞭解麵團膨脹後的體積，實驗中採用市售 500、1000cc 的食物用量杯(圖 6a)模擬麵包機內鍋，以目測方式記錄麵團體積(圖 6b)，並於底部鑽孔以作為電極版裝置進出。另外，我們也嘗試將麵團放置於方格紙上(圖 6c)，模擬極大的容器中的發酵情形，以瞭解容器壁對電阻變化造成的影響。

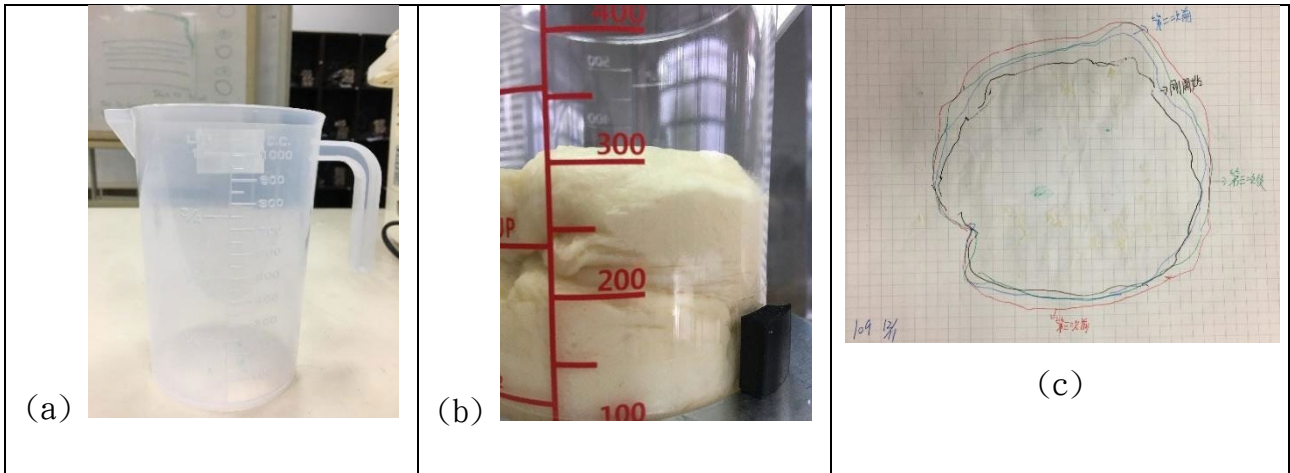


圖 6. 實驗用量杯 1000ml(a)、500ml 盛裝麵團後(b)以及(c)平面測試紀錄

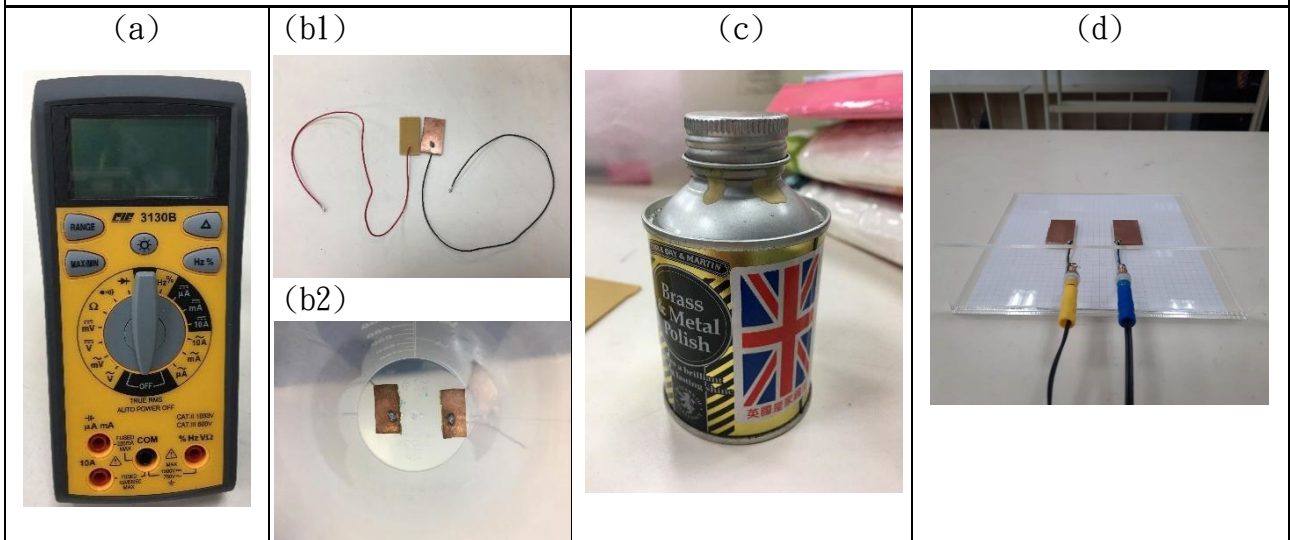


圖 7. 電流特性量測工具：(a) CIE-3130B 多用電表、(b1)電極板正反面、(b2)電極板安裝於量杯底部、(c)銅油、(d)平面測試電極裝置

#### (二) 電特性測量工具與電極

為測量麵團電阻，本實驗採用 CIE-3130B 多用電表(圖 7a)，並搭配電極板(圖 7b1)對麵團施測，電極板尺寸為 1.5 x 4 cm。發酵筒中兩電極相隔 3cm(圖 7b2)，以魔術黏土固定於容器底部，組裝後如圖 8。麵團以平面方式發酵時如圖 7d，其中兩電極相隔 4cm，以泡棉膠固定於壓克力底座。電極板使用後表面易產生污垢，故每次實驗前須使用銅油(圖 6c)拋光，以確保導電性。

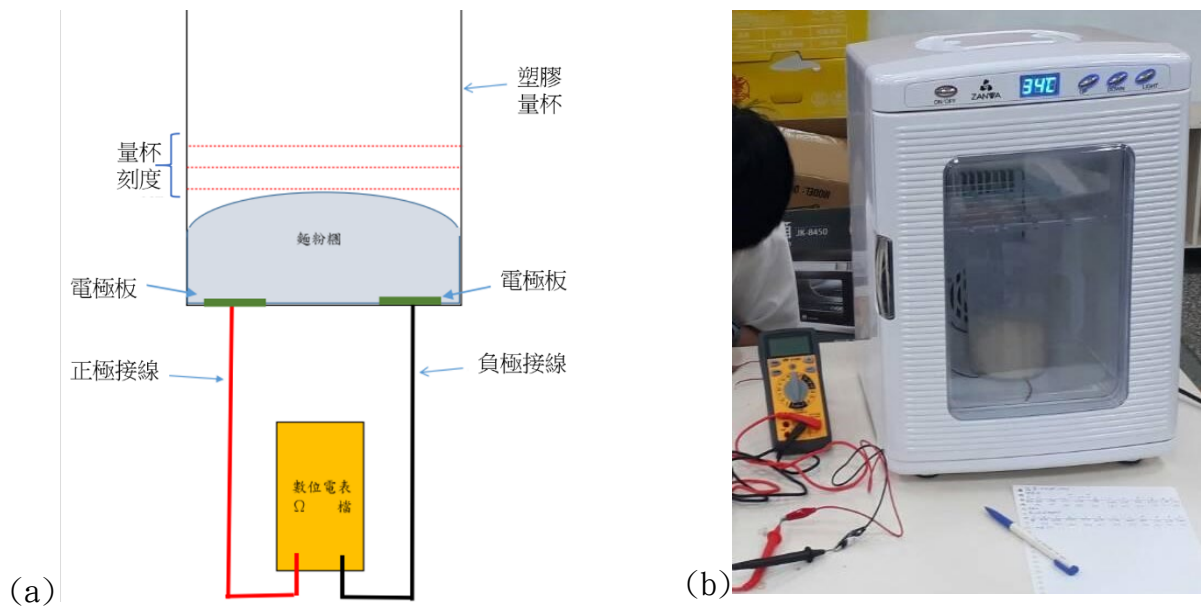


圖 8. 電特性測量裝置組裝示意圖(a)與實際照片(b)

(三) 間接測量法(自行設計圖 9)

為避免多用電表長時間測量導致的斷電困擾，我們另外設計連續供電並改測量電壓的間接測量法，完整架構與原理詳述於下一節(圖 13)。



圖 9. 間接測量法裝置照

## 肆、研究過程與方法

### 一. 研究原理

#### (一) 麵團發酵內部問題

##### 1. 「低筋」、「高筋」到底有什麼差別？

麵粉主要由澱粉、蛋白質和礦物質組成，而所謂的「低筋」、「高筋」，指的就是蛋白質的含量，實務上依用途選擇不同的產品，加水後麵團中的蛋白質會吸水膨脹，之後持續進行攪拌就會形成「麵筋」，麵筋具有彈性、延伸性和韌性，筋度愈高的麵粉加水後黏度愈高、不易鬆散，能夠用來製作不同的料理。因此麵粉的蛋白質含量，決定了麵粉的筋性，大致上可以分成高筋、中筋、低筋麵粉，高筋麵粉是指蛋白質含量約在 12.5% 至 14%，中筋麵粉蛋白質含量在 9% 至 12.5%，而低筋麵粉的蛋白質含量則是在 9% 以下。利用不同麵粉的筋性，可以製作出不同的產品。

##### 2. 蛋白質結構

蛋白質結構是指蛋白質分子的空間結構。作為一類重要的生物大分子，蛋白質主要由碳、氫、氧、氮、硫等化學元素組成。所有蛋白質都是由 20 種不同的 L 型  $\alpha$  胺基酸連接形成的多聚體，在形成蛋白質後，這些胺基酸又被稱為殘基。蛋白質和多肽之間的界限並不是很清晰，有人基於發揮功能性作用的結構域所需的殘基數認為，若殘基數少於 40，就稱之為多肽或肽。要發揮生物學功能，蛋白質需要正確摺疊為一個特定構型，主要是通過大量的非共價相互作用（如氫鍵，離子鍵，范德華力和疏水作用）來實現；此外，在一些蛋白質（特別是分泌性蛋白質）摺疊中，二硫鍵也起到關鍵作用。為了從分子水平上了解蛋白質的作用機制，常常需要測定蛋白質的三維結構。

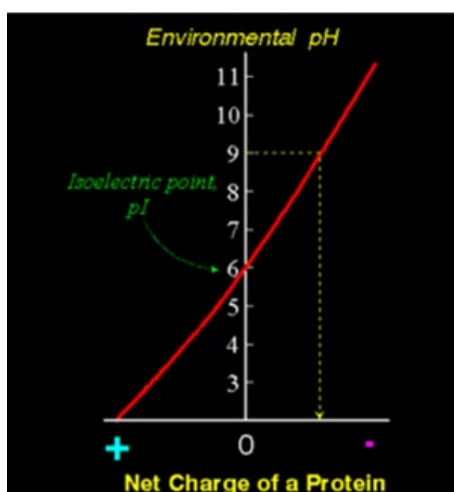


圖 10. 蛋白質在 PH 值與帶電極性圖片

##### 3. 蛋白質帶電特性與泳動率



蛋白質分子上的淨電荷，取決於環境 pH 高低；若環境 pH 高於其 pI，此蛋白質帶淨負電，反之帶淨正電；若剛好等於其 pI，淨電荷為零（正電數目等於負電）。同一分子在不同 pH 環境下，可能帶不同淨電荷(圖 10)，使蛋白質在電場下發生泳動，泳動率公式如下：
$$\text{泳動率} \sim \frac{(\text{所外加 電壓 mV}) \times (\text{分子之 淨電荷密度})}{\text{分子與介質間之 摩擦力}}$$

#### 5. 發酵過程如何改變麵團？這期間發生了什麼事？

酵母吃了糖後，將糖轉化為二氧化碳和酒精（乙醇），也就是所謂的消化副產物。酒精會在烘烤期間蒸發，而二氧化碳則會使麵團膨脹，之後隨著烘烤散出麵包外。製作麵包的原則是只用分量剛好的酵母來做麵包。太多酵母會加速麵團發酵，把可利用的糖消耗殆盡，並產生酒精味。當酵母缺糖的時候，就會開始自我分解，產生我們不太想要的副產品穀胱甘肽，這個副產品會產生類似氨（阿摩尼亞）的味道，對麵團有不好的影響，並弱化麵筋的黏結。

#### 5. 發酵控制

pH 計也適用於控制發酵過程。發酵的成功與否取決於微生物繁殖控制的熟練程度。麵粉的吸水性以及水質硬度和 pH 會影響風味，麵團中使用的水的 pH 應該在 6 到 7 之間。當水和麵粉相互反應時，乳酸菌被啟動並產生乳酸，降低 pH 值。眾所周知，pH 值在 5 左右時，烘焙出來的麵包是最美味的。使用自製酵母製作麵包的師傅也會量測酵母和麵團的 pH 值。例如，使用天然酵母，為黑麥酸麵團或葡萄乾麵包製作酵母時，必須量測 pH 值，一般地，pH 值在 3.5 到 4.5 之間。



圖 11. 發酵後麵包切面照二氧化碳氣泡面積

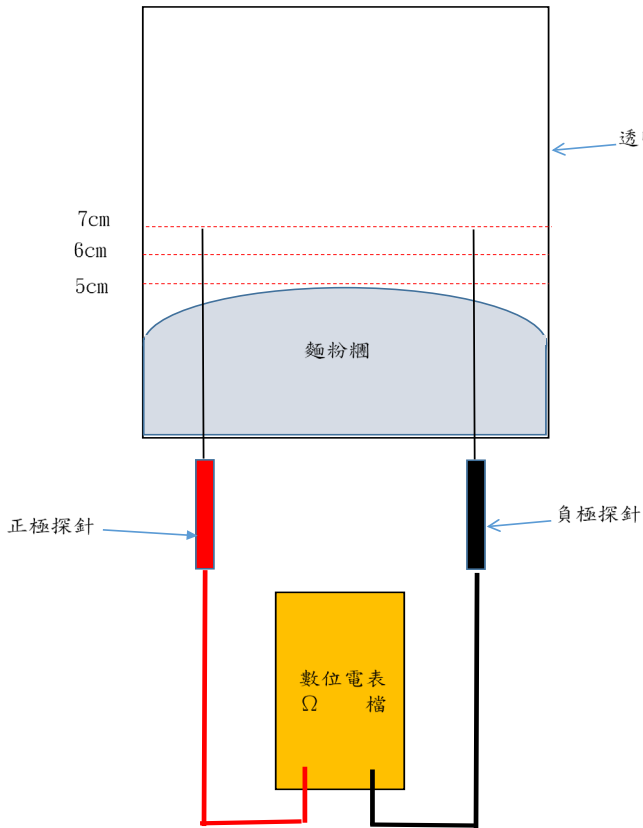
#### 6. 麵粉發酵化學

酵母屬於兼性厭氧型真菌，在有氧和無氧環境下都能夠生存。當在麵團內加入酵母菌以後，酵母菌會迅速繁殖增生，把葡萄糖分解成酒精和二氧化碳，隨著二氧化碳的大量產生，麵團會被撐的鼓~鼓~鼓~，使得麵團出現了蜂窩組織。其中產生的酒精也可以讓麵包帶

有酒香味或者酸味，這就是發酵的原理。如圖 11 所示。

## 二、第一次實驗設計(直接測量法 圖 12)

### (一)探針測試設計(直接測量法)



### (二)電極板阻抗測試法(直接測量法)

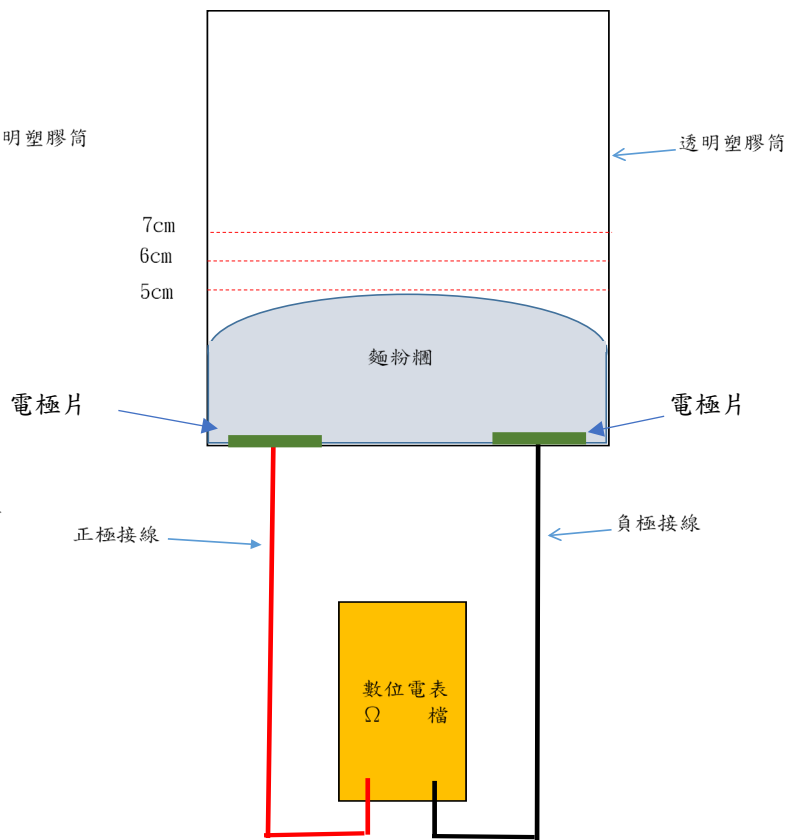


圖 12. 第一次實驗設計(直接測量法)

## 三、第二次實驗設計間接測量法(圖 13)

改進第一次實驗設計避免電錶歐姆檔長時間測量時的自然中斷影響測試結果之新測試

方法測試電路：(採間接測量麵團電阻  $R_m$ )

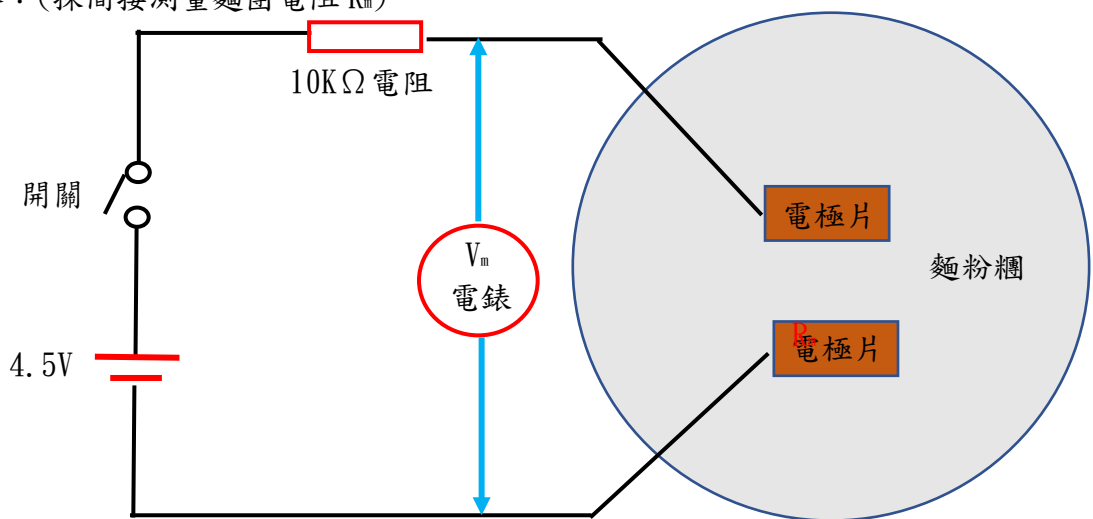


圖 13. 間接測量麵粉糰電阻  $R_m$  電路接線圖

$$\text{電學分壓公式：} V_m = 4.5V \times \left( \frac{R_m}{10K\Omega + R_m} \right) \quad (1)$$

$$\text{可得到麵團電阻 } R_m = \frac{10K \times V_m}{4.5V - V_m} \quad (2)$$

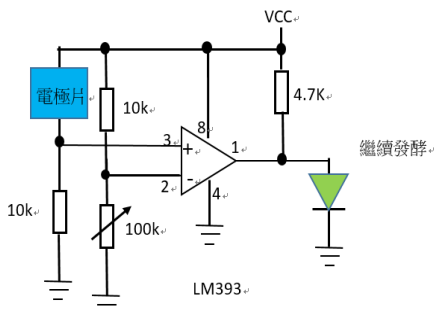
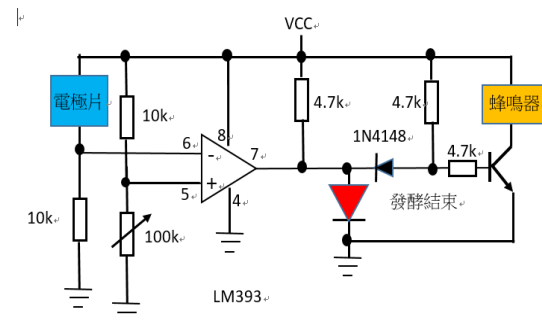
#### 四、整體測試系統(圖 14)



圖 14. 間接測量整體測試系統(左平面、右杯子各一套)

#### 五、發酵到位提醒裝置(圖 15)

##### (一) 電路圖

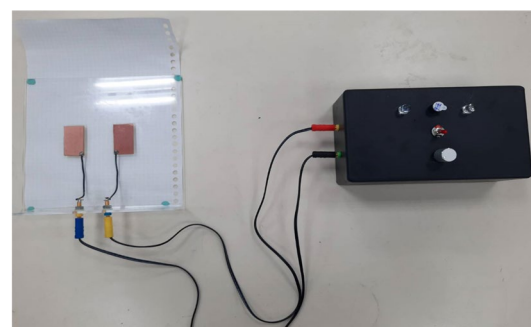


(A) 電路圖

##### (二) 實體照片



(B) 裝置實體照片



(C) 結合極版測試壓克力裝置實體照片

圖 15. 發酵到位提醒裝置

#### 六、麵團電特性實驗

##### (一) 電特性實驗基本操作步驟：

1. 依照比例準備好材料後，使用麵包機揉製麵團模式製作麵團，耗時約一小時。
2. 將麵團取出後，切出一份的量(約 225g)放置於待測容器(發酵筒或平面)。
3. 記錄體積後，在恆溫 35°C 環境下繼續發酵，使用多用電錶搭配電極裝置測量。
4. 直接測量：將電錶測量檔調節至電阻模式，啟動一分鐘後開始每分鐘以紙筆記錄電阻值，連續測量 10 分鐘並記錄最終膨脹體積，然後休息 5 分鐘。重複操作此步驟兩次。
5. 間接測量：將電表測量檔調節至電壓模式，每分鐘以紙筆記錄電阻值、每十分鐘測量體積，連續測量直到過度發酵(手指輕壓後兩分鐘內無法回彈)。

\*為確定電阻變化是因酵母發酵所導致，依照基本配方調配麵團材料但不加入酵母，操作步驟 1~4。



圖 16. 實驗中裝置圖與紀錄

## (二) 比較不同盛裝方式對麵團電阻變化的影響

使用 500ml、1000ml 發酵筒或平面方式盛裝麵團進行上述基本電特性測試。

## (三) 比較不同蛋白質含量麵團的電阻表現差異

此處採用不同蛋白質含量之麵粉製作麵團，分別為駱駝牌(13.7%)、麥典高筋(12.7%)、凱薩琳麵粉(11.6%)，以及高低筋混和麵粉(統一麥典與大家發低筋麵粉各半混和 10.35%)，以此四種濃度分別進行前述麵團電阻表現測試。

## (四) 嘗試製作麵團發酵狀態的提醒裝置

取得發酵終點(過度發酵)電阻之後，依據此電阻值設計提醒裝置

## 七、利用發酵提醒裝置協助控制發酵狀態

台灣已然邁入高齡化社會，2020 年超高齡(85 歲以上)人口占老年人口 10.3%，2070 年增長至 27.4%，各項社會發展皆應戮力回應高齡者的需求。理論上麵團內氣室孔徑隨發酵過程增大，會越來越蓬鬆，經過過度發酵後結構進一步被破壞，我們預想可能會因此更符合老

年人對食物的偏好。

藉由製作出的發酵提醒裝置並實際測試製作麵包，給民眾試吃並以問卷方式分析此提醒裝置的使用是否能呼應偏好(問卷詳見附錄)。根據過去經驗，發酵終點(指壓不回彈)通常發生在出麵包機後 60~90 分鐘之間，因此我們將發酵程度設計為，從麵包機出爐後的 0 分鐘、30 分鐘、發酵終點、發酵終點+30 分鐘、120 分鐘與 150 分鐘共六個時間，分別在設定條件下進入烤箱烘烤，並依序標記為 A~F。

烤箱預熱 200°C，烘烤時間正、反面各 10 分鐘，烤完冷卻後放入恆溫箱中以 35°C 保存。分裝前再取出、以過圓心的方式切成 16 等分盛裝於紙袋中。受試者將獲得六種不同發酵程度的麵包各一片，分別以紙袋盛裝並於紙袋上標記 A~F，以代表不同的發酵程度。受試者在麵包切割好後 24 小時內食用完畢，以維持產品品質。

## 伍、結果

### 一、實驗一：麵粉團電阻隨時間的變化能否呼應發酵程度(直接測量麵粉糰電阻)

測試 1-1、測試 1-2：發酵杯有加酵母菌及無酵母菌麵粉糰中發酵時間與電阻變化

不論是否加入酵母菌，麵團電阻隨著發酵程度而上升，呈現線性關係(有酵母  $R^2=0.95$ 、無酵母  $R^2=0.92$ )但有酵母者上升幅度較無酵母多出許多(圖 17)。而電阻與體積之間大致呈指數關係( $R^2=0.73$ )，電阻值隨體積而增加(圖 18)。

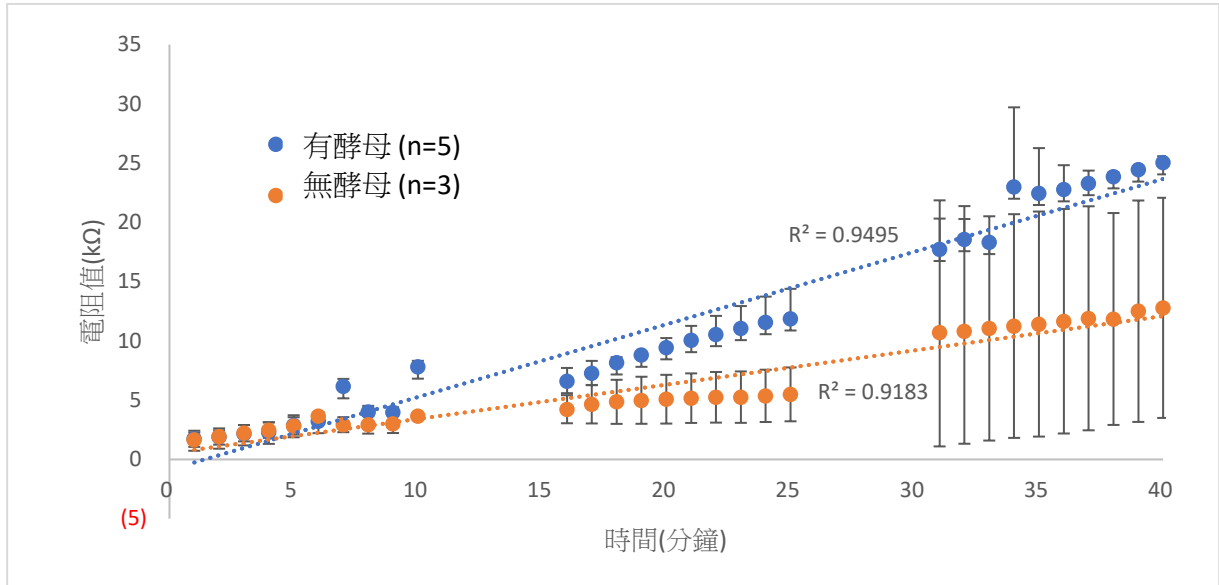


圖 17、麵團電阻值隨時間變化作圖，並區分為有酵母組(藍色， $n=7$ ，虛線為線性趨勢線， $R^2 = 0.9806$ )與無酵母組(橘色， $n=3$ ，虛線為線性趨勢線  $R^2 = 0.9183$ )。

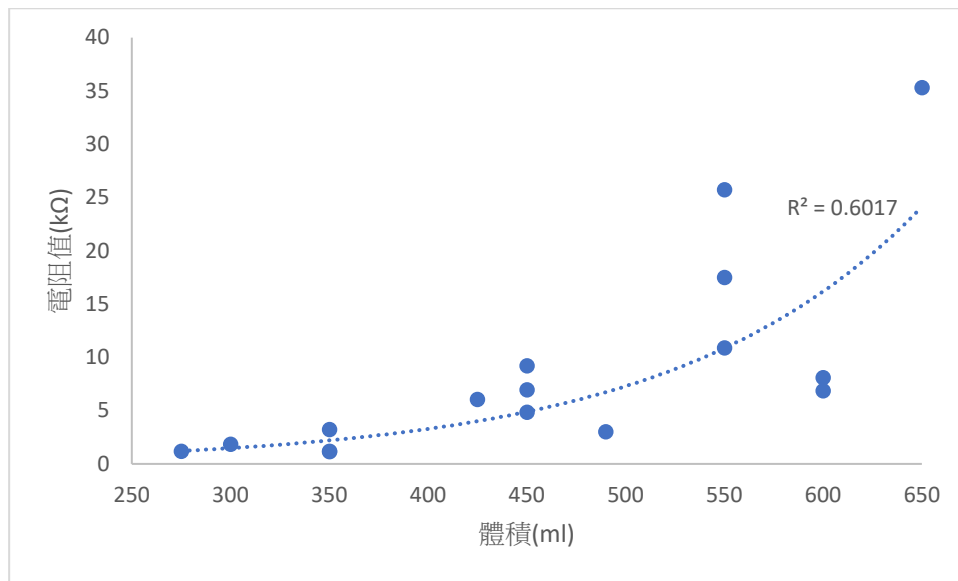


圖 18、麵團電阻值與體積作圖( $n=7$ )，虛線為指數型趨勢線  $R^2 = 0.7289$ 。

實驗二：比較不同盛裝方式對麵團電阻變化的影響

測試 2-1、測試 2-2：發酵杯與平面型麵粉糰發酵時間與電阻變化

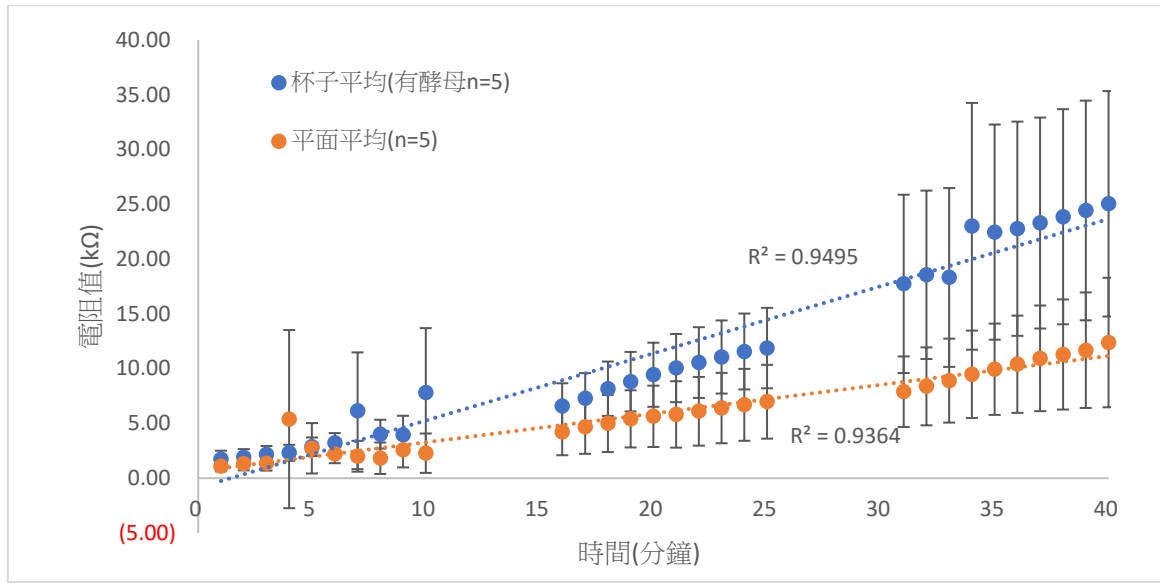


圖 2、不同盛裝方式麵團電阻值隨時間作圖

以杯子盛裝的的電阻值上升幅度較平面呈裝來的快。

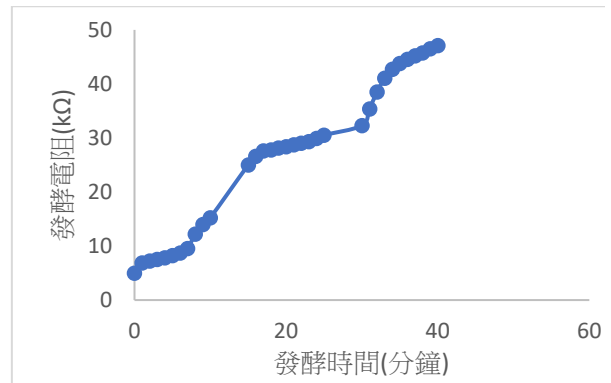
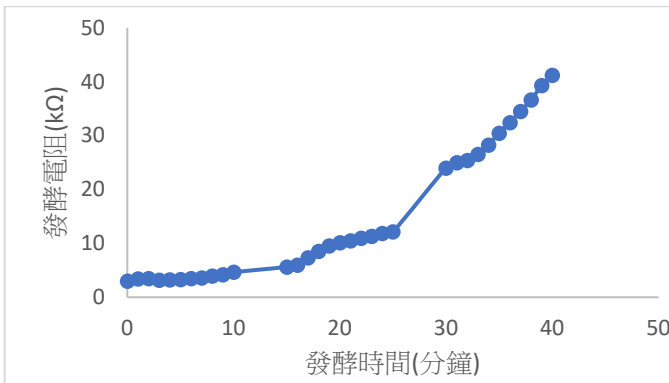
實驗三：比較不同蛋白質含量麵團的電阻表現差異

直接測量法

測試 3-1：麥典高筋 (1) 500ml 杯子(第一團) (2) 500ml 杯子(第二團)

表 1.直接測量法麥典高筋 500ml 杯子測試數據 表 2.直接測量法麥典高筋 500ml 杯子測試數據

時間 (分)	Rm (kΩ)	時間 (分)	Rm (kΩ)	時間 (分)	Rm (kΩ)	時間 (分)	Rm (kΩ)	時間 (分)	Rm (kΩ)	時間 (分)	Rm (kΩ)
0	1200	15	13500	30	8500	0	400K	15	8500K	30	17100K
1	3.4	16	6	31	25.01	1	6.91k	16	26.6k	31	3620K
2	3.46	17	7.33	32	25.42	2	7.25k	17	27.63k	32	2550K
3	3.17	18	8.51	33	26.5	3	7.53k	18	27.82k	33	41.1k
4	3.24	19	9.52	34	28.27	4	7.86k	19	28.14k	34	42.74k
5	3.31	20	10.13	35	30.45	5	8.28k	20	28.42k	35	43.8k
6	3.48	21	10.51	36	32.4	6	8.71k	21	28.78k	36	44.56k
7	3.62	22	10.95	37	34.5	7	9.55k	22	29.06k	37	45.2k
8	3.94	23	11.34	38	36.61	8	12.2k	23	29.36k	38	45.76k
9	4.21	24	11.83	39	39.3	9	13.98k	24	29.95k	39	46.53k
10	4.66	25	12.17	40	41.2	10	15.25k	25	30.53k	40	47.1k
體積前 300	體積後 350	體積前 350	體積後 400	體積前 400	體積後 475	體積前 250	體積後 300	體積前 325	體積後 350	體積前 375	體積後 425
測試前 有回彈	測試後 有回彈	測試前 有回彈	測試後 有回彈	測試前 有回彈	測試後 有回彈	測試前 有回彈	測試後 有回彈	測試前 有回彈	測試後 有回彈	測試前 有回彈	測試後有 回彈



曲線 1. 麥典高筋 500ml 杯子測試曲線(第一團) 曲線 2. 麥典高筋 500ml 杯子測試曲線(第二團)

說明：直接測量法我們做的次數至少有 20 次以上，是休息 5 分鐘及電錶長時間監測時會自動切掉後再啟動所導致，最後考量配合未來發酵定位警示，

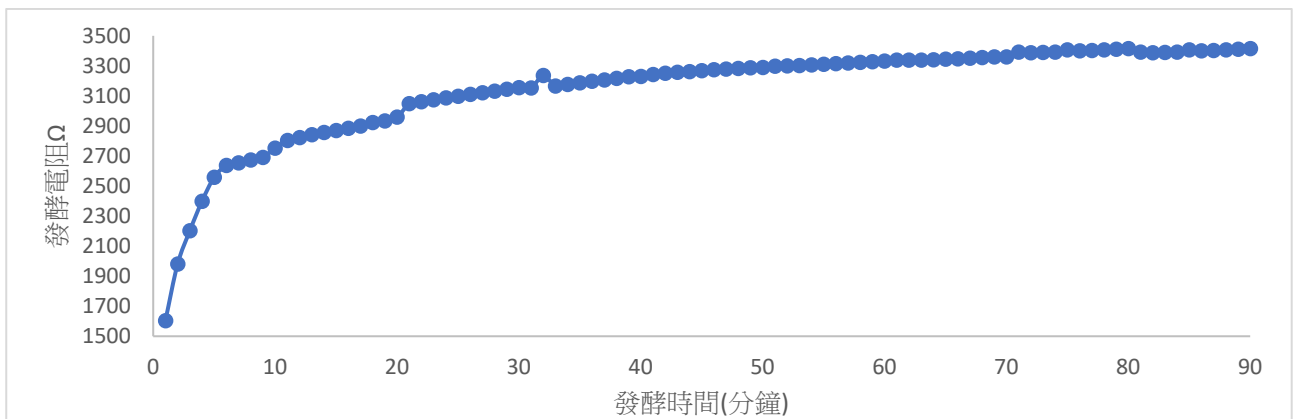
改成間接測試法，詳細說明請參閱討論四。

間接測量法(測量麵團電壓隨時間之變化，以回推其本身電阻值)

#### (一)純高筋麵粉

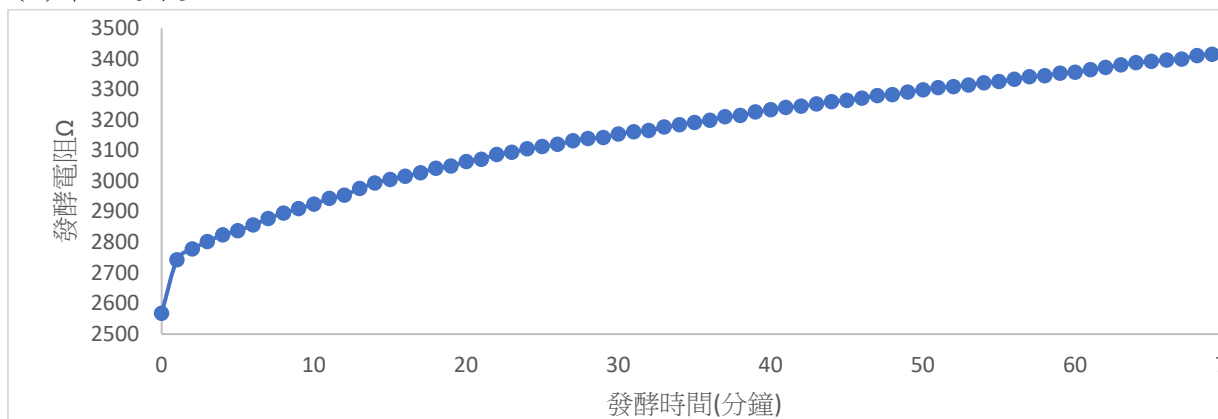
##### 1. 測試 3-2 駱駝牌

##### (1) 1000ml 杯子



曲線 3. 駱駝牌高筋麵粉 1000ml 杯子測試曲線：發酵到 90 分鐘時過度發酵(指壓無回彈)

##### (2)平面底板

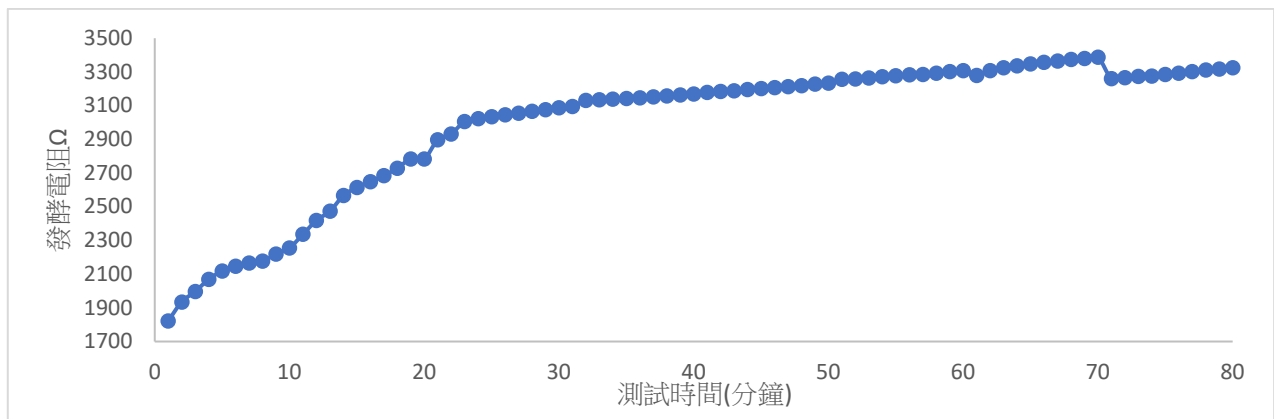


曲線 4. 駱駝牌高筋麵粉平面底板測試數據曲線：發酵到 70 分鐘時過度發酵(指壓無回彈)



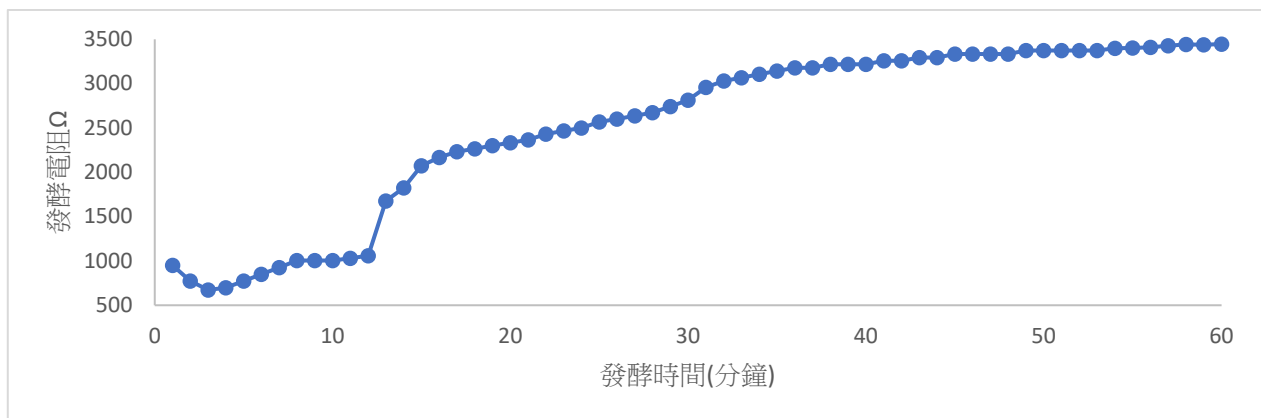
## 2. 測試 3-3 麥典高筋

### (1) 1000ml 杯子



曲線 5. 麥典高筋 1000ml 杯子測試數據曲線：發酵到 80 分鐘時過度發酵(指壓無回彈)

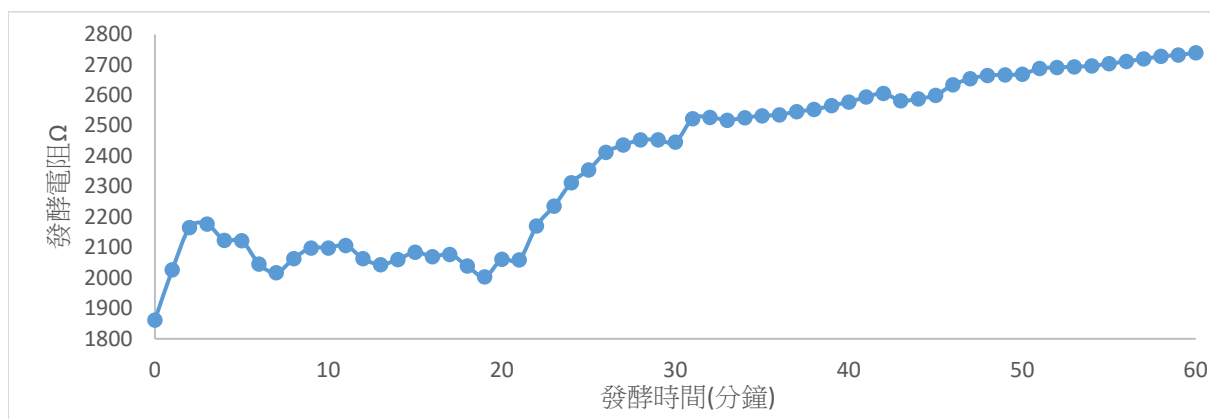
### (2) 平面底板



曲線 6. 麥典高筋平面底板測試數據曲線發酵到 60 分鐘時過度發酵(指壓無回彈)

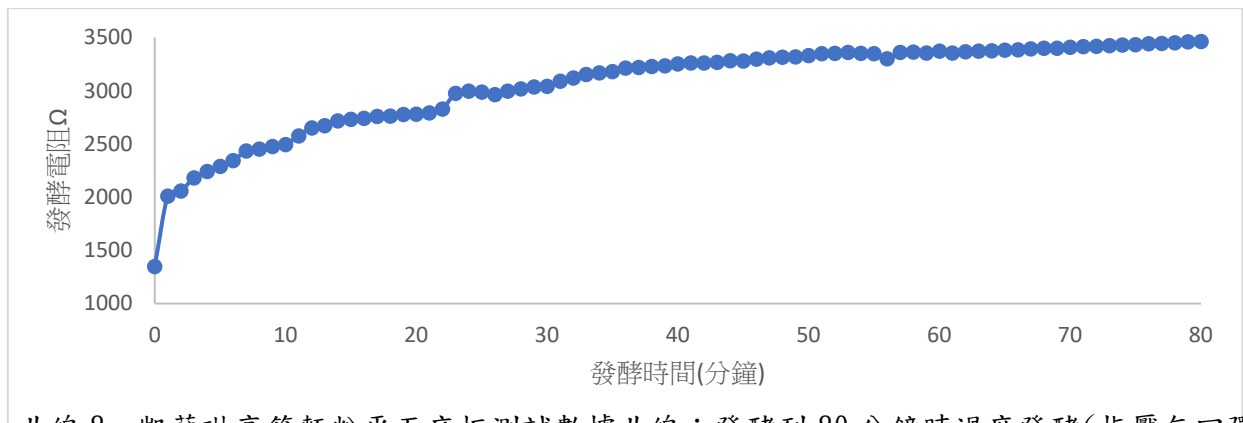
## 3. 測試 3-4 凱薩琳高筋麵粉

### (1) 1000ml 杯子



曲線 7. 凱薩琳高筋麵粉 1000ml 杯子測試數據曲線：發酵到 60 分鐘時過度發酵(指壓無回彈)

### (2) 平面底板

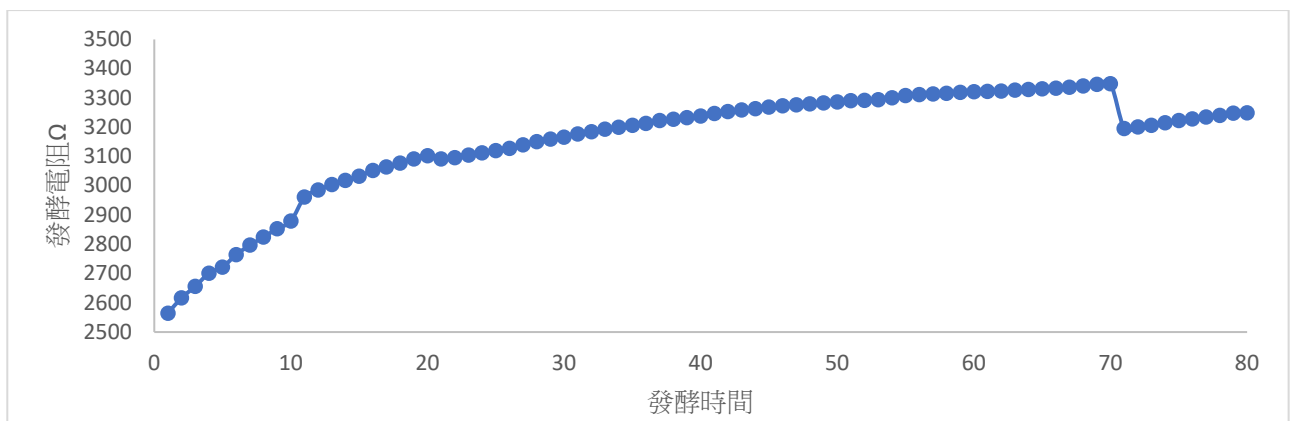


曲線 8. 凱薩琳高筋麵粉平面底板測試數據曲線：發酵到 80 分鐘時過度發酵(指壓無回彈)

## (二)高筋麵粉+低筋麵粉

### 1. 測試 3-5 麥典高筋+大家發低筋

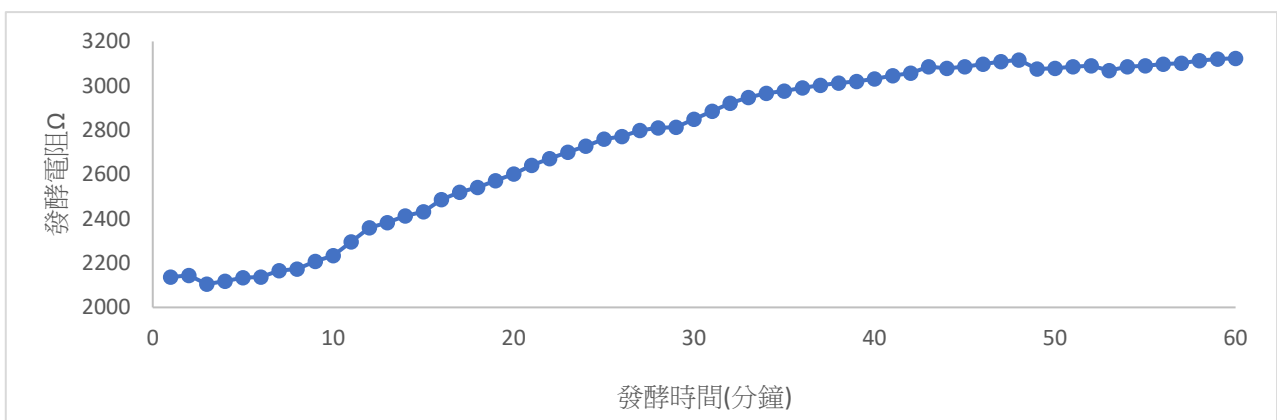
#### (1) 1000ml 杯子



曲線 9. 麥典高筋+大家發低筋麵粉 1000ml 杯子測試數據曲線：發酵到 80 分鐘時過度發酵

#### (2)平面底板

表 10. 麥典高筋+大家發低筋麵粉平面底板測試數據



曲線 10. 麥典高筋+大家發低筋麵粉平面底板測試數據曲線：發酵到 60 分鐘時過度發酵

以我們的操作方式來說，麵團離開麵包機後達到過度發酵大約要 60-90 分鐘。以上結

果顯示，高筋麵粉團起始電阻(約 1600Ω)比起高筋+低筋麵粉團起始電阻(約 2500Ω)，但最終幾乎都落在 3300Ω-3500Ω 左右。

實驗四：嘗試製作麵團發酵狀態的提醒裝置，並應用於發酵程度控制

測試 4-1 運用前面測得過度發酵電阻值(等效電壓值)製作發酵提醒裝置

(一) 持續正常發酵

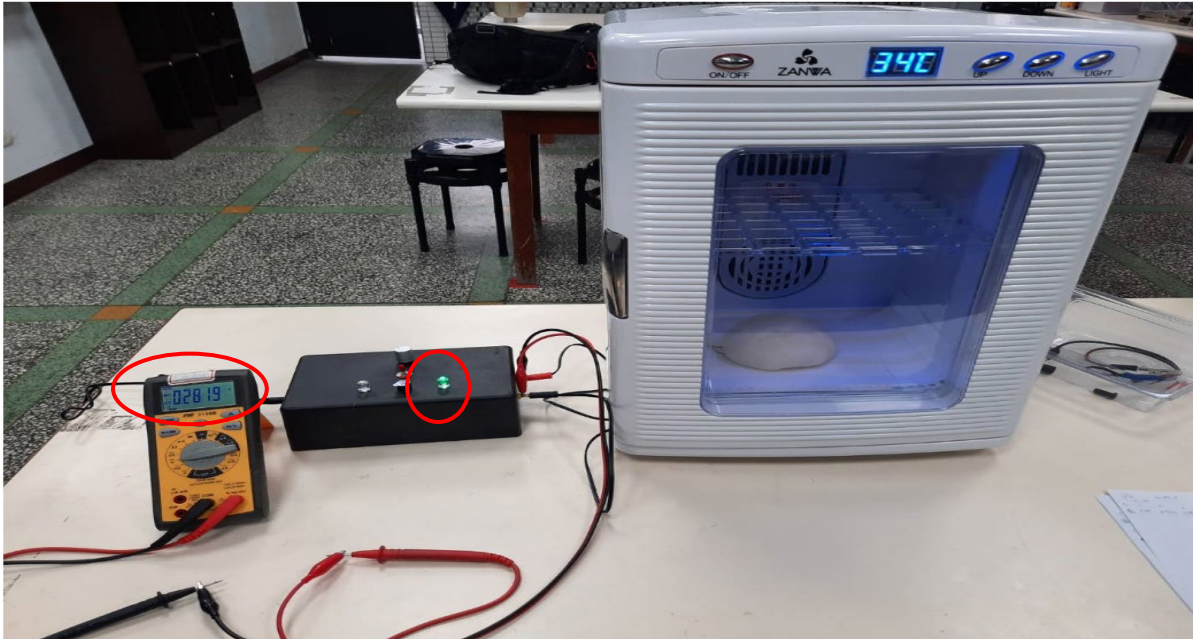


圖 20. 持續正常發酵裝置顯示燈號(綠燈)及電表測試電壓(0.2819V)

(二) 到達發酵定位



圖 21. 到達發酵定位裝置顯示燈號(紅燈)且蜂鳴器發出聲音及電表測試電壓(1.1961V)

4-2 運用麵糰發酵狀態提醒裝置製作麵包並評估民眾偏好程度

本實驗原本設計區分成性別(男、女)以及年齡層(20歲以下、21~60歲、60歲以上)，受到疫情影響僅對老年(60歲以上)之民眾進行調查，其中男女分別為 8 人與 7 人。

由於樣本數不足，數據結果僅能提供大致趨勢，尚無法達到統計意義。

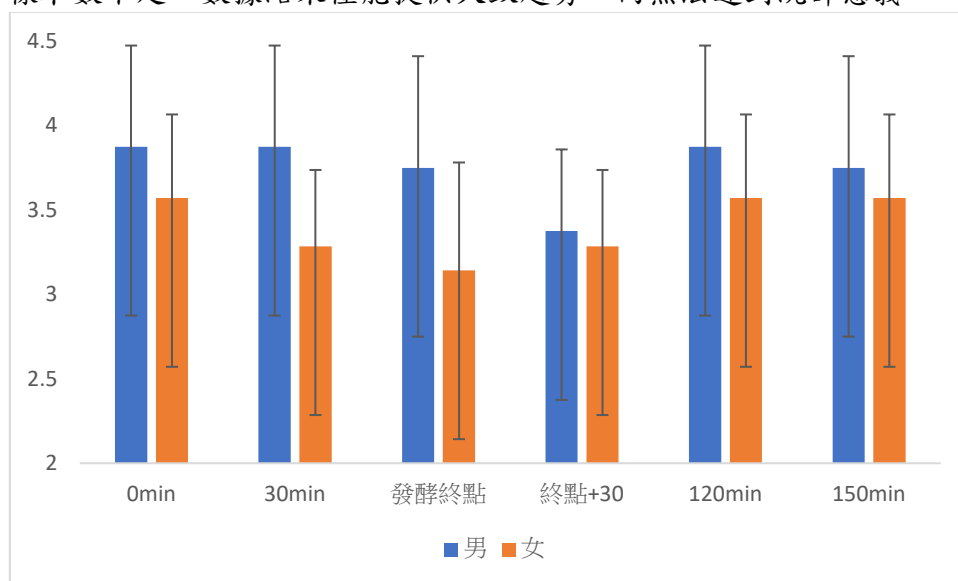


圖 22. 老年人對氣味的評價，3 分為中性評價，以下為負面評價、以上為正向評價。

試吃氣味評價中所有得分皆在 3 分以上，其中女性給分接較男性低，整體來說評價最低的是發酵終點與發酵終點+30 分鐘，持續發酵到 120 與 150 分鐘又再回升。

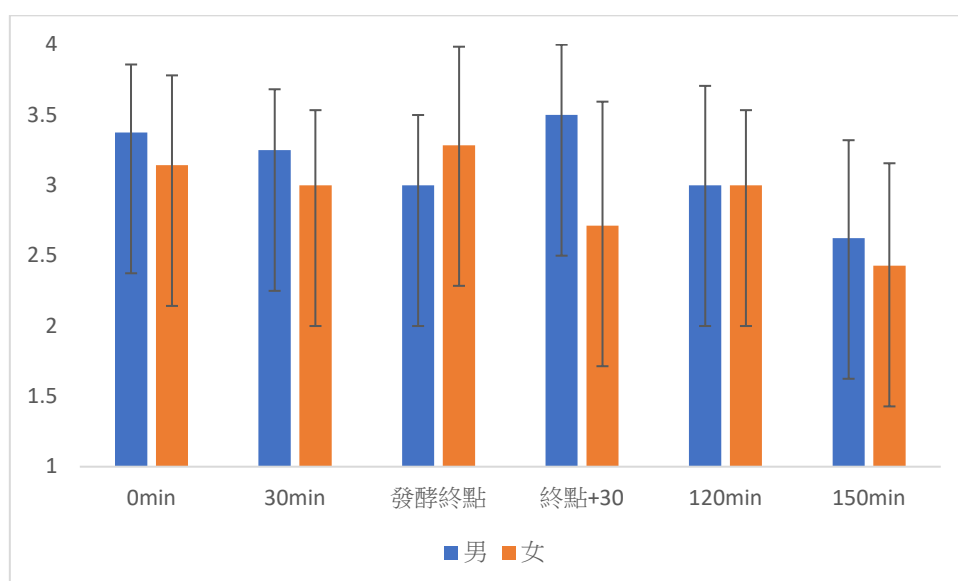


圖 22. 老年人對軟硬度的評價，3 分為適中，以下為偏硬、以上為偏軟。

軟硬度的評價中相較於女性，男性感受多半偏軟，特別是終點+30 分鐘的差異極大。整體來說過度發酵後的硬度感受偏硬，特別是 150 分鐘發酵組，兩性皆有偏硬的感受。

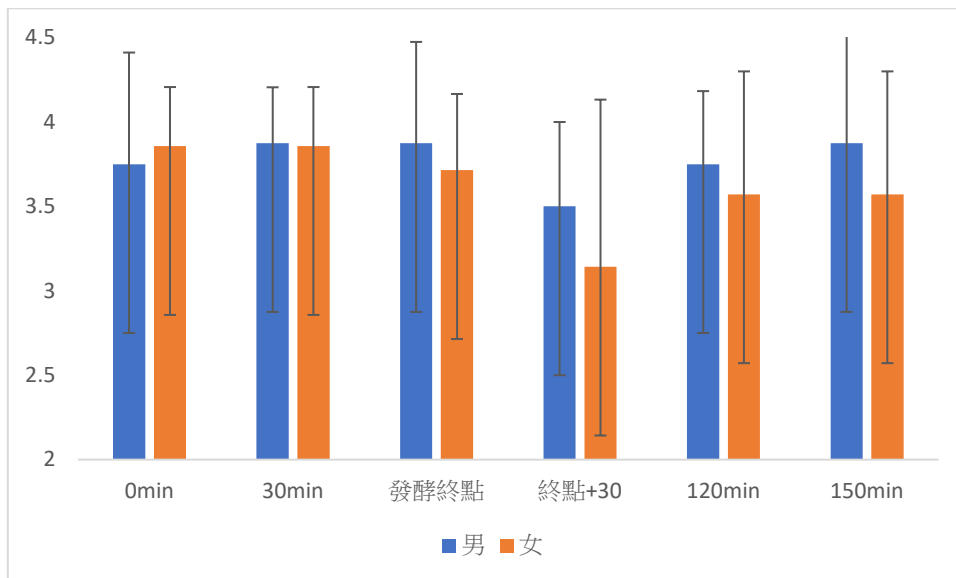


圖 23. 老年人對口感的偏好，分數越高代表越喜歡。

口感的整體偏好度女性與男性相當或略低於男性，其中以發酵終點+30 分鐘組最為明顯。整體給分都高於 3 分，平均大致落在 3.5 分左右，但發酵終點+30 分鐘女性明顯偏低。

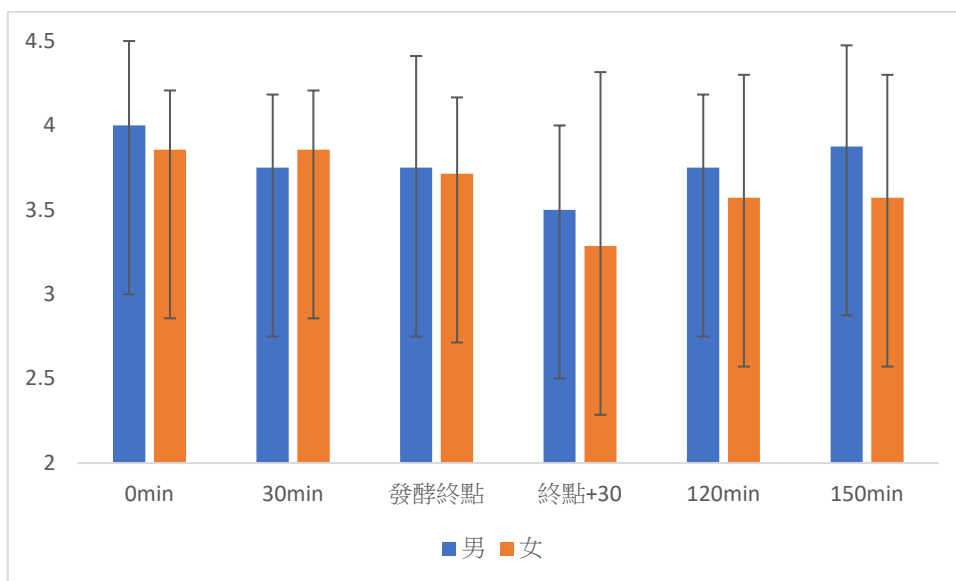


圖 23. 老年人對整體感受的偏好，分數越高代表越喜歡。

整體感受男女性偏好各有高低，女性對於發酵終點後的三組給分較低，其中又以終點+30 分鐘最低，男性對於終點+30 分鐘一組特別低，但後續又再回升。

## 陸、討論

### 一、麵團電阻隨時間的變化能否呼應發酵程度

麵團電阻值與發酵程度呈正相關，與前人實驗相符(Kim et al., 2020)，但若要用電阻值推估發酵程度，有賴更精密、穩定的測量方式方能達成。此外，由於探針會被膨脹的麵團推開變形，因此相關實驗採用電極板作為電特性測量應為較佳選擇。

## 二、比較不同盛裝方式對麵團電阻變化的影響

發酵筒(杯子)的電阻上升速率較快，發酵筒中的麵團受到杯壁擠壓而向上膨脹，可能因此增加電流橫向移動的路徑，使得電阻下降的情形較為緩慢。

## 三、比較不同蛋白質含量麵團的電阻差異

結果顯示高筋麵粉團起始電阻(約 1600 $\Omega$ )比起高筋+低筋麵粉團起始電阻(約 2500 $\Omega$ )來的高，由於麵粉中的蛋白質具有帶電特性，因此蛋白質含量較高的高筋麵粉帶電量較少(電阻較高)，起始電阻比較低是非常合理的狀況。但不論筋性高低在充電後，最終電阻大致落在 3300~3500 $\Omega$ 之間，此特性可供我們製作發酵提醒裝置。

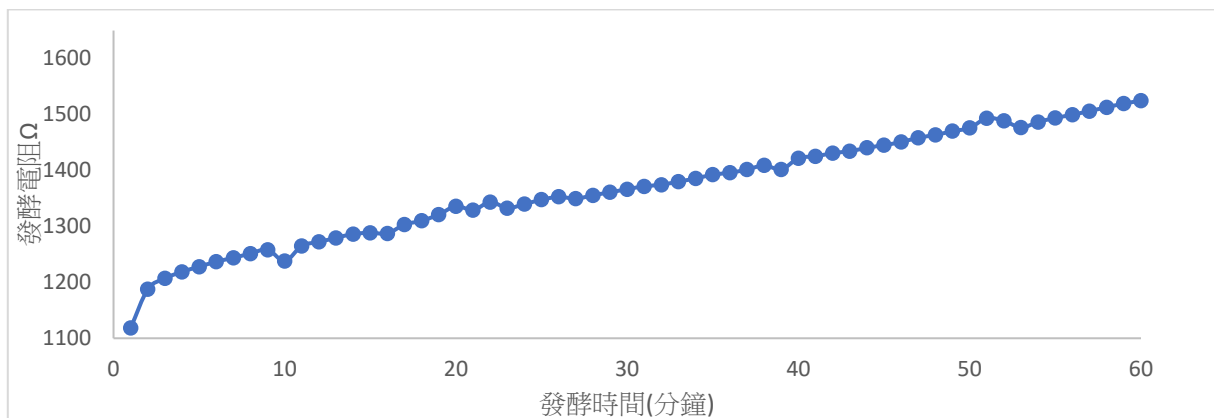
## 四、嘗試製作麵團發酵狀態的提醒裝置

直接測量法我們做的次數至少有 20 次以上，但均被表 1 及表 2 紅色框框數據的高阻所困擾，由於麵團發酵等效電路非純電阻(討論八)，所以休息 5 分鐘再測及電錶長時間監測時會自動切掉後再啟動所導致，最後考量配合未來發酵定位警示，如圖 17 所示，因此圖 13 間接測試改成模擬警示器電路方式，長時間監測不會因電錶中斷所影響，實驗結果非常好。

## 五、當間接測示電壓改成 12V 時麵團電阻是否有差異？

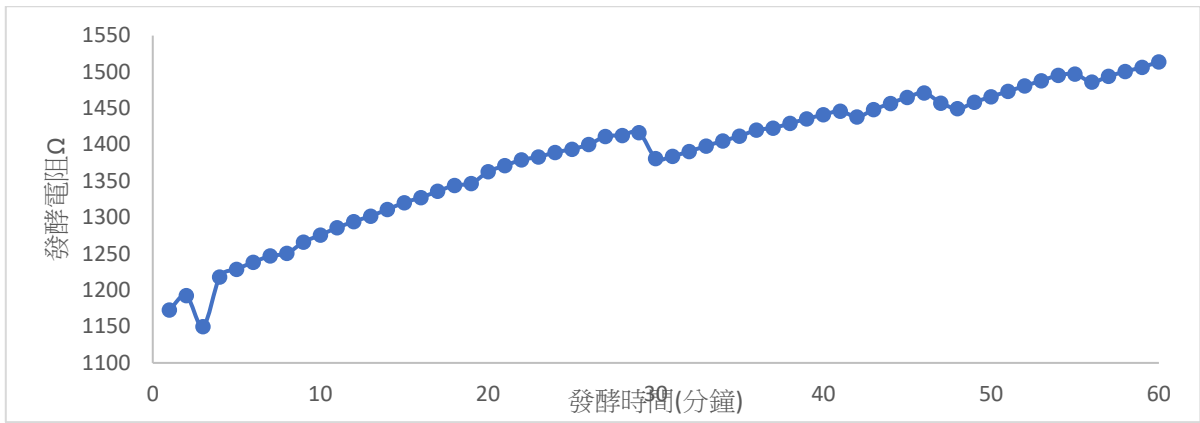
改以電壓變化間接測量電阻後，我們獲得改變電壓的契機，所以額外嘗試改變電壓是否會對電阻值造成影響。

### (一)平面底板 1



曲線 11. 12V 麥典高筋平面底板測試數據曲線 1

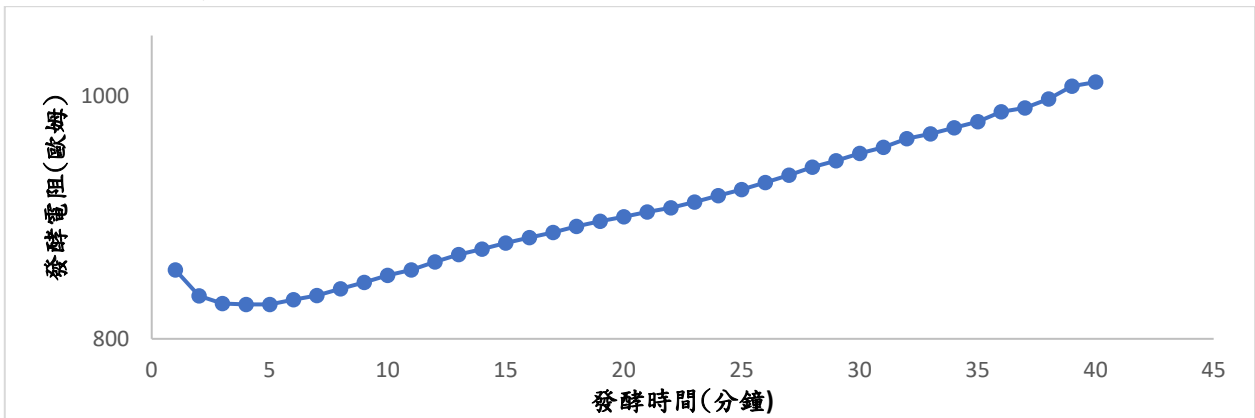
### (二)平面底板 2



曲線 12. 12V 麥典高筋平面底板測試數據曲線 2

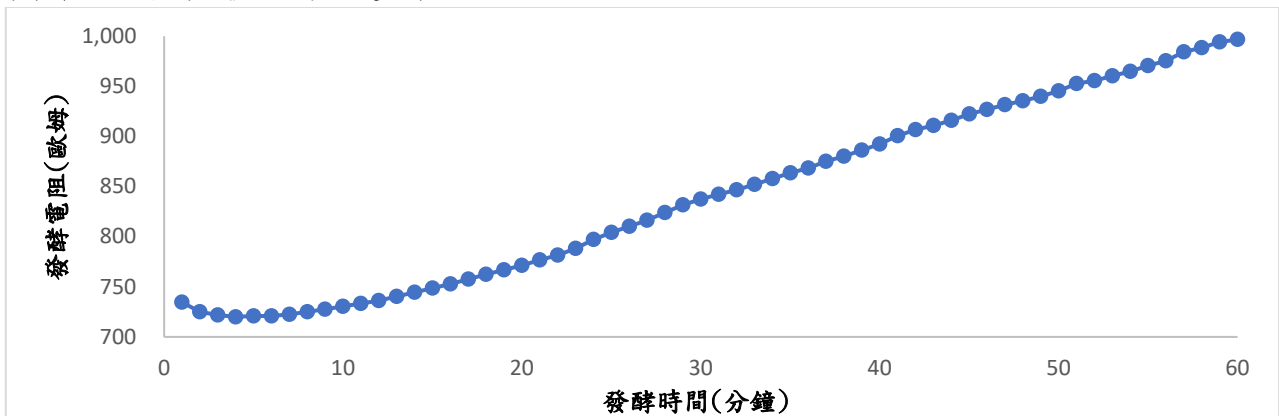
結果顯示兩次測試在 60 分鐘之電阻非常接近僅差 11Ω，也都在 60 分時過度發酵，再現性極佳。然而用 12V 做測試的發酵電阻是電源用 4.5V 的一半，經文獻查證是蛋白質泳動率與外加電壓有關所致。為了試吃問卷的進行，後續實驗我們把(2cmX4cm)銅片改成(5cmX5cm)不銹鋼片減少食安疑慮。

(三)平面底板(麥典高筋)



曲線 13. 麥典高筋麵粉曲線

(2)平面底板(凱薩琳高筋麵粉)



曲線 14. 平面凱薩琳高筋麵粉曲線

圖中可以看出不同材質的電極板面積電阻表現有明顯差異，因此未來進一步測試必須重新進行設備校正。

#### 六、能否運用發酵提醒裝置控制發酵狀態，回應民眾偏好？

老年人對於麵包蓬鬆度的偏好並未如我們預期-隨發酵程度上升，一方面有可能老年人對於麵包「好吃」的感受有既定印象，相較於對口齒的負荷，或許更傾向以過去一致標準衡量面前的食物；另一方面，過度發酵之後可能有除了蓬鬆之外的其他影響，例如發酵產物氣味(如酒精)，或是當內部氣室坍塌，麵包反而變得更緊實。後者我們可以從軟硬度評價中看出，150分鐘發酵組不論男女皆認為麵包偏硬此現象中看出。

我們發現發酵終點+30分鐘無論在氣味、口感與總體評價皆明顯偏低，繼續發酵反而有較高的評價，顯示我們可以利用發酵提醒裝置避開這個最不理想的區間。

#### 七、問卷內容偏差

試吃調查過程中我們發現，凡是有負面表述的內容都沒有被選擇，後續針對部分個案進行質性訪談，長輩們普遍認為「不要打擊年輕人的信心」，因此就算感覺不那麼喜歡，最多就是選擇中性的描述。未來若要進一步進行探究或類似實驗，應加強宣導以避免不必要的「手下留情」，例如強調「對事不對人，批評的是麵包本身而不是手藝」，或是「分數有高有低才有得比較」，以克服長輩的道德束縛。



## 八、等效電路改變

(一)新測量實際數據來看等效電路有很大差異(之前研判的等效電路是錯誤的)

### 1. 從曲線 13 麥典高筋平面

起始時間 1 分時 0.947V 後電壓往下降，一直到時間 11 分時再回到 0.947V

### 2. 從曲線 14 凱薩琳高筋平面

起始時間 1 分時 0.8213V 後電壓往下降，一直到時間 11 分時再回到 0.82V

(二)從上面特徵研判等效電路如下(最早探針型實驗研判有電感特性終於出現)

### 1. C1 應是電極片產生之電容效應，其電容量很小可在麵粉糰放上後由數位電表直接電極

片測得(注意紅棒插孔)，當 SW 剛 ON 時因為 C1 很小它短路後又變成斷路我們數位電表是不易察覺的。此短時間變化需用示波器才看得到。

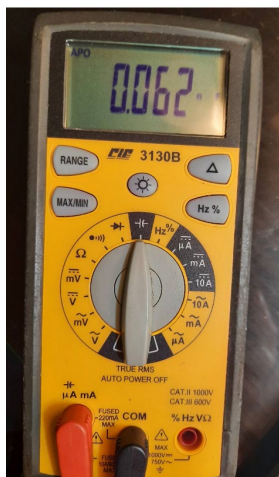


圖 20、數位電表直接測電極片電容

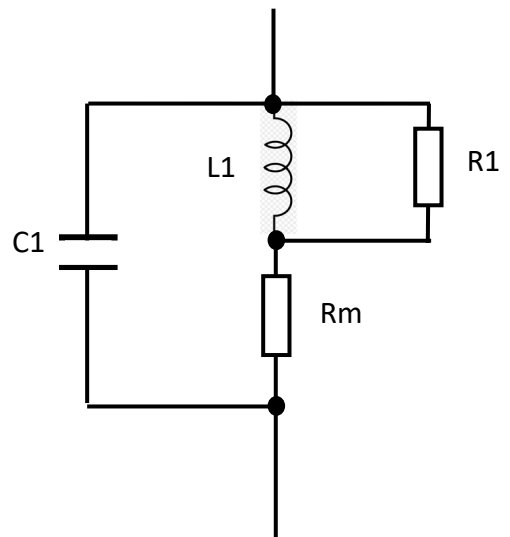


圖 21、麵團中的等效電路

### 2. L1 電阻特性：電源 ON 時他是斷路的等 5 個時間常數後它會呈現短路

所以 SW 剛 ON 時  $V_2 = 12X(R_1 + R_m) / (10K + R_1 + R_m)$ ， $V_2$  電壓比較大，當 L1 在 5 個時間常數後(時間很短)它呈現短路時(R1 就被電感短路消失了)， $V_2 = 12X(R_m) / (10K + R_m)$ ， $V_2$  電壓比較小，當  $R_m$  變大後  $V_2$  電壓就會上升。此處 L1 應該也是很小。

※電極片變大  $R_m$  變比以前小是正常的。

此 L1 電感效應是  $CO_2$  產生導電路徑所形成的電感效應

## 柒、結論

本研究以市面常用 3 種不同蛋白質含量的麵粉進行測試，我們設計固定量之麵團放入特製發酵容器，運用電極板及插入探針兩種偵測方式，歷經多次測試失敗，從原先直接測試電阻法到最後採用電極板間接測試法，終於證實我們兩項假設是正確的，證實 1：過度發酵時間從 60-90 分鐘不等，發酵時間越長電阻越高，而最終大致都在 3300 $\Omega$ -3500 $\Omega$  左右(從曲線 3-曲線 10 可知)。證實 2：麵團電阻質與蛋白質帶電特性有關，高筋麵團蛋質高麵團起始測試電阻較高筋+低筋麵粉團高(從曲線 3-曲線 10 可知)。證實 3：間接測試外加電壓與蛋白質泳動率成正比，外加電壓愈大電阻值越低，也成功設計了發酵到位提醒裝置，過程中發現麵粉團具電感特性會儲能，而且麵粉糰 PH 值由發酵前 5-6 到發酵後變成 7-8，我們的元氣麵包夢想近了。

## 捌、參考文獻

1. Altshuller, G. (1999). The innovation algorithm. (Shulyak, L. & Rodman, S. Trans.). Worcester, MA: Technical Innovation Center. Bose, J. C., 1907.
2. Chiotellis E, Campbell GM. (2003) Proving of bread dough II: measruement of gas production and retention. Food Bioprod. Process. 81:207-216.
3. Kim DH, Jang KA and Lee SJ (2020). Prediction method of CO<sub>2</sub> production from electrical resistance of bread dough measured with a simple electrical multimeter in fermentation. Food Sci Biotechnol. 29(2)235-241.
4. 彼得. 萊因哈特(Peter Reinhart)。《麵包大師的學徒》，大家出版。
5. 江明岳(2015)。「跨領域想像創新方法-以導盲斑馬線為例」，2015 年系統性創新研討會。
6. 林士強(2014)。北美智權報, 解析「TRIZ」系列報導一》初談「TRIZ」概論。
7. 林育瑋(2017)。看完後恍然大悟!原來酵母還分那麼多種類!。每日頭條 2017-11-27  
<https://kknews.cc/zh-tw/food/kr9eb5v.html>
8. 巧兒(2016)。給剛剛開始做麵包的你 — 麵包新手快速入門指南。2016-04-23。  
<https://ciao.kitchen/bread-guide/>
9. 食尚先生(2017)。做麵包發酵失敗原因大匯總。每日頭條 2017-12-21。  
<https://kknews.cc/news/y2vyzza.html>
10. 陳凱詩(2017)。不再傻傻分不清!高筋、中筋、低筋麵粉的用法是...。自由時報 2017-

06-29 <https://food.ltn.com.tw/article/6247>

11. 澧食公益飲食文化教基金會,「低筋」、「高筋」到底有什麼差別?

<https://www.fullfoods.org/news/%E9%AB%98%E7%AD%8B%E3%80%81%E4%B8%AD%E7%AD%8B%E3%80%81%E4%BD%8E%E7%AD%8B%E9%BA%B5%E7%B2%89%E6%9C%89%E5%93%AA%E4%BA%9B%E5%B7%AE%E7%95%B0%EF%BC%9F/>

12. 台大暑期生物技術課程, 酵素分析方法, 蛋白質的帶電性。

13. 維基百科全書, 蛋白質結構。

<https://zh.wikipedia.org/wiki/蛋白质结构>。

14. 維基百科全書, 電阻。

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%94%B5%E9%98%BB>

15. 莊榮輝(2008)。蛋白質電泳率

<http://juang.bst.ntu.edu.tw/ECX/Ana3.htm>

## 玖、附錄

利用發酵提醒裝置製作不同發酵程度麵包之試吃問卷

本問卷僅供學術使用，為了解台灣民眾對於麵包的偏好，懇請試吃並協助回答以下問卷：

日期：\_\_\_\_/\_\_\_\_ 您的性別：男生 女；年齡層：未滿 20 歲 20~39 歲 40~59  
60 歲以上

	麵包 A	麵包 B	麵包 C	麵包 D	麵包 E	麵包 F
氣味(嗅覺) 1 很臭 2 臭 3 無感 4 香 5 很香						
口味(味覺) 1 很糟 2 糟 3 無感 4 棒 5 很棒						
口感(硬度、嚼勁) 1 太硬 2 硬 3 剛好 4 軟 5 太軟						
整體口感 1 很糟 2 糟 3 無感 4 棒 5 很棒						
總體評價 1 很糟 2 糟 3 無感 4 棒 5 很棒						
其他描述 (至少五字)						

## 【評語】 052203

1. 本研究以市面常用 3 種不同蛋白質含量的麵粉進行測試，發現發酵時間越長電阻越高，而最終大致都在  $3300\ \Omega$ - $3500\ \Omega$  左右。高筋麵團之電阻高與其蛋白質含量以及帶電特性有關。本研究並成功設計了發酵到位提醒裝置，並發現麵粉團具電感特性會儲能等。構想有創新性，且能自行設計結合電學與食品發酵領域的電阻測定儀，精神可嘉。
2. 組間數據誤差頗大，是否具有統計差異？此外曲線圖亦應列入圖號，放於結果中。
3. 發酵到位與否亦會受環境溫度、溼度以及麵粉量配方等因素影響，本研究之提醒裝置的實際應用性如何未知。
4. 實驗設計上，應比較傳統經驗法製作的麵包，與電阻法製作的麵包是否有差異。實用性有待商確，如果用計時器即可評估麵團發酵程度，是否有必要大費周章測量麵團的電阻質？
5. 未實際引用之文獻不宜列入，參考文獻之年代應統一為西元。

## 作品簡報

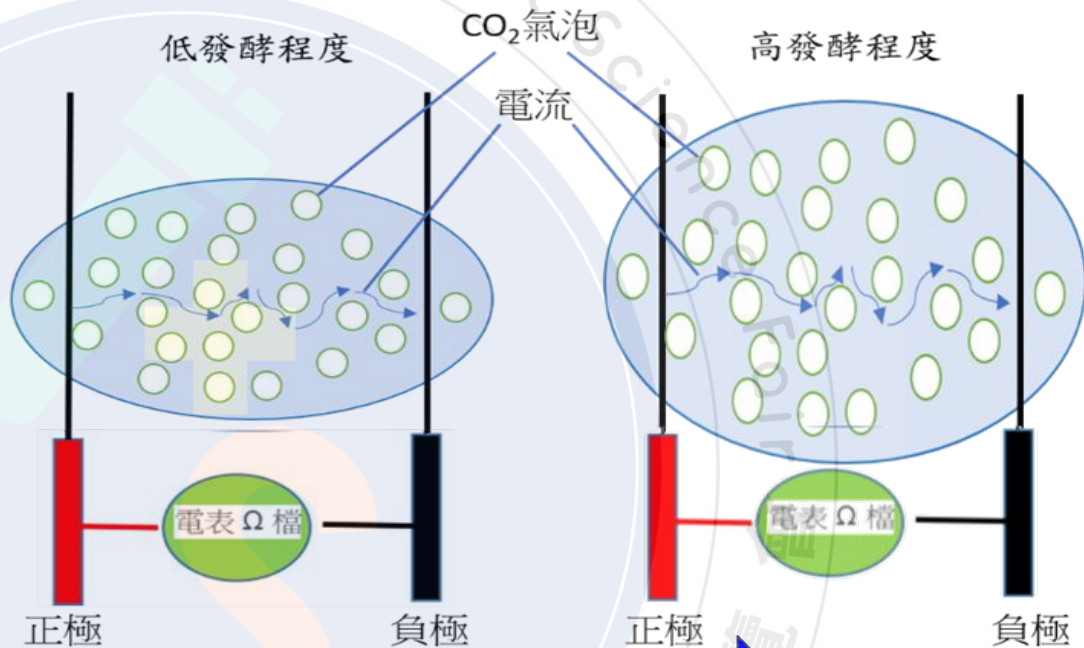
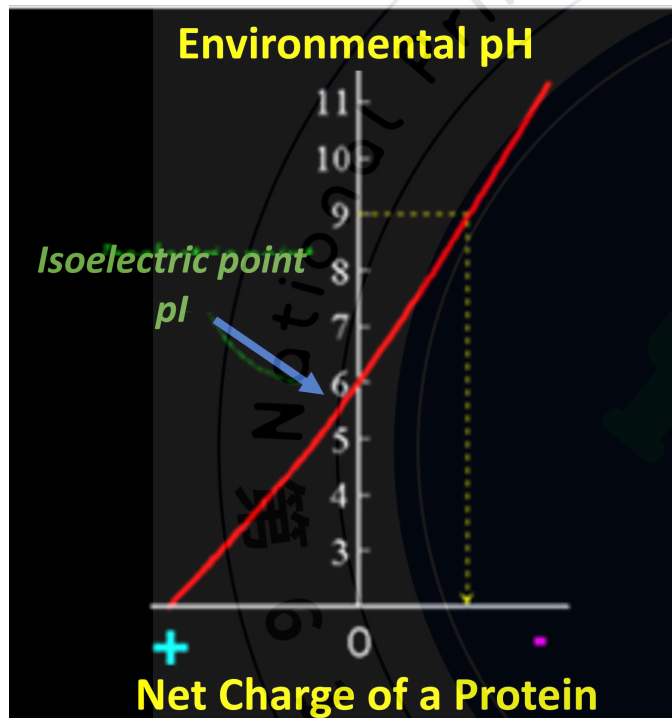
# 更精準掌控發酵-酵母菌在麵團中 發酵程度的電特性大數據研究



組別:高中組

科別:農業與食品學科

# 研究問題



蛋白質在不同 pH 環境下帶不同淨電荷

CO<sub>2</sub>氣泡變大  
電流路徑增加  
電阻值上升

# 研究目的

- (一) 麵團**電阻**隨時間的變化**能否呼應發酵程度**
- (二) 比較**不同盛裝方式**對麵團電阻變化的影響
- (三) 比較**不同蛋白質含量**麵團的電阻表現差異
- (四) 製作**發酵提醒裝置**

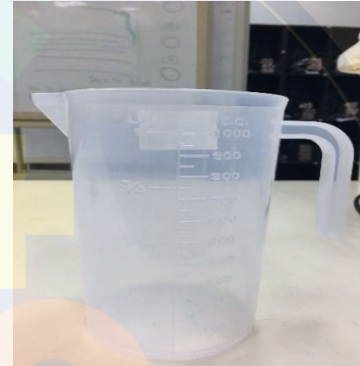


# 研究材料與設備

(一) 麵團體積與電阻關聯性 (二) 杯裝與平面的變化



VS



VS



(三) 不同蛋白質含量麵團的電阻表現



13.7%



12.7%



11.6%



+



10.35%

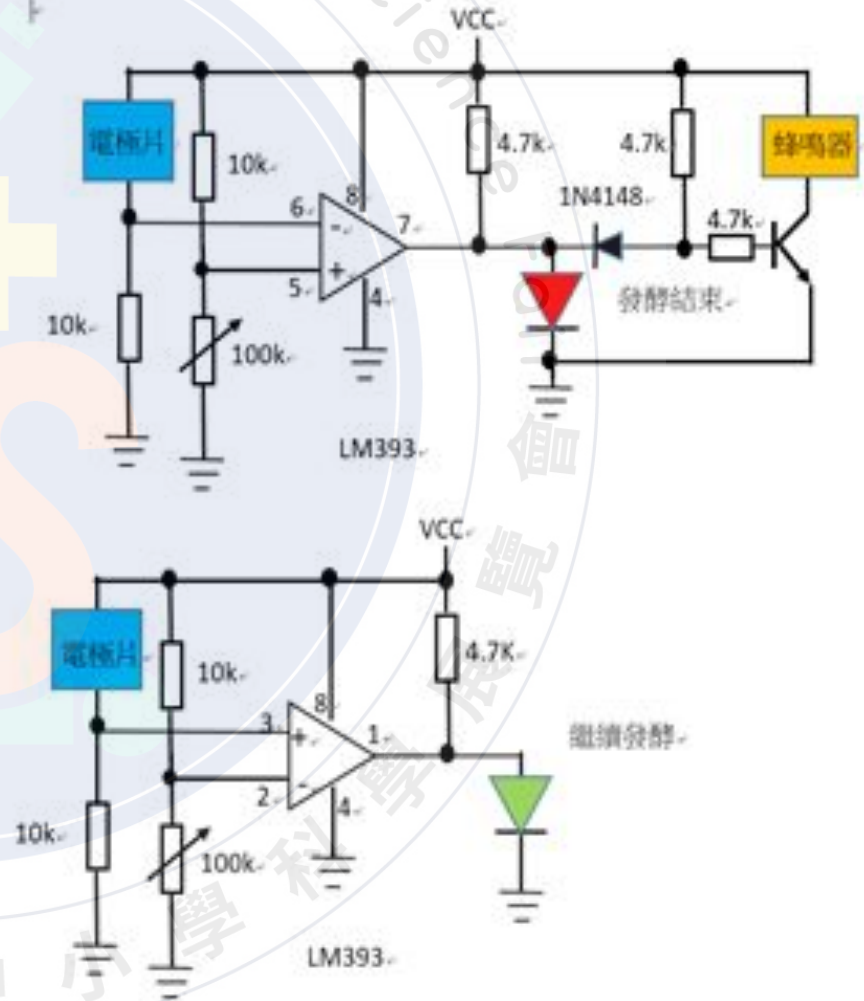
# 研究材料與設備

## (四) 發酵提醒裝置

亮綠燈  
(可繼續發酵)

停止發酵  
蜂鳴器(叫)、紅燈(亮)

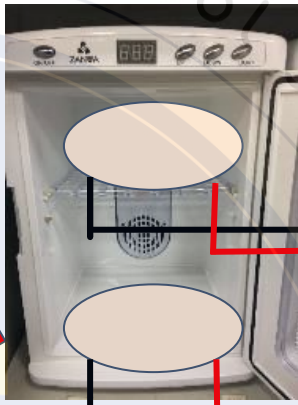
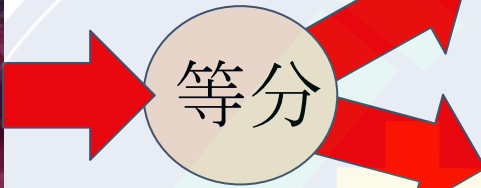
接電極片



# 研究方法



揉麵團



## 1. 直接測量法

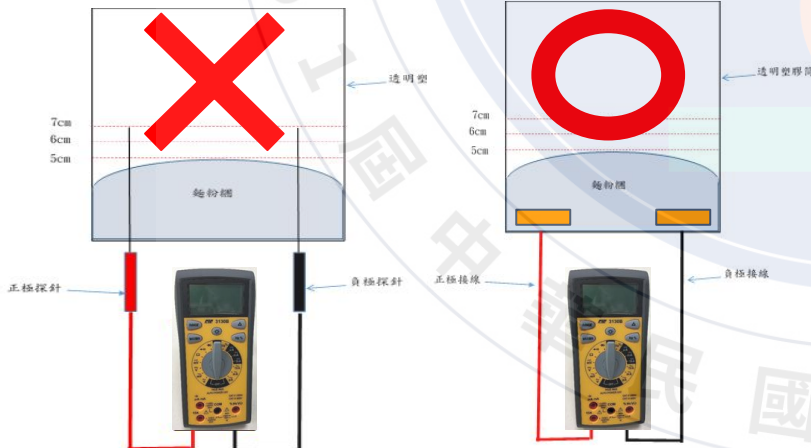


圖 14. 探針式麵粉糊發酵程度與導電性測試圖

## 2. 間接測量法

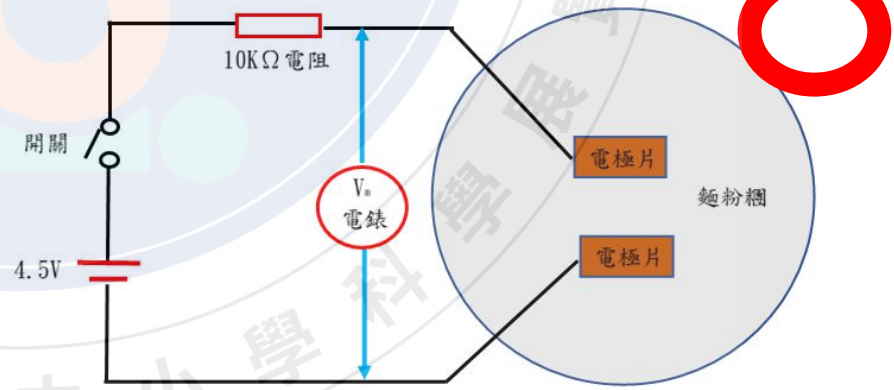


圖 13. 間接測量麵粉糊電阻 R<sub>x</sub> 電路接線圖

圖 15. 電極板麵粉糊發酵程度與導電性測試圖

# 研究結果與討論

前測：  
有酵母的電阻  
上升較快

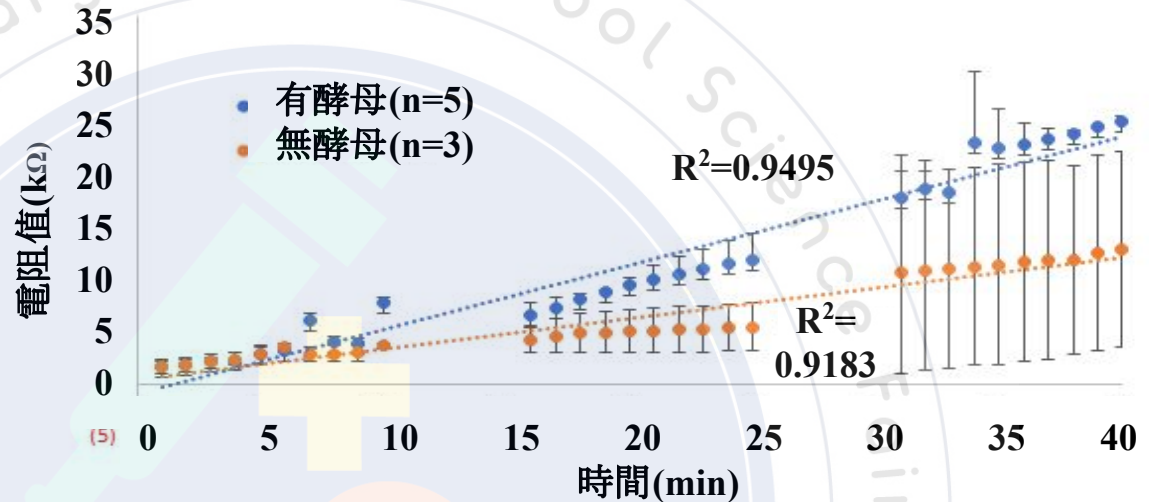


圖1. 麵團電阻值隨時間變化作圖麵團電阻值隨時間變化作圖，並區分為有酵母組(藍色，n=5，虛線為線性趨勢線， $R^2 = 0.9495$ )與無酵母組(橘色，n=3，虛線為線性趨勢線 $R^2 = 0.9183$ )。

結果一：  
發酵電阻隨體  
積上升

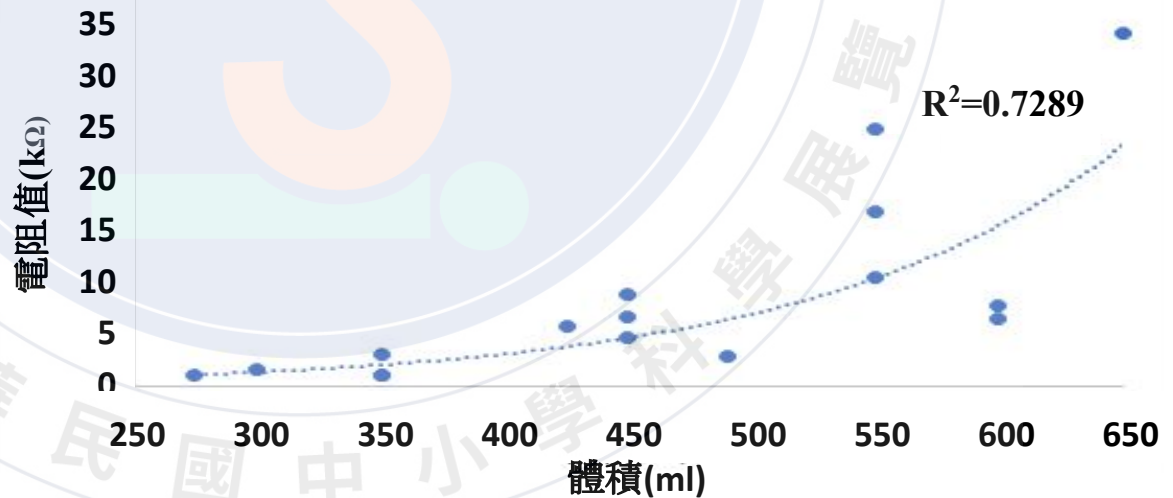


圖2. 麵團電阻值與體積作圖(n=7)，虛線為指數型趨勢線 $R^2 = 0.7289$ 。

# 研究結果與討論

結果二：  
電阻上升幅度  
杯子較平面大

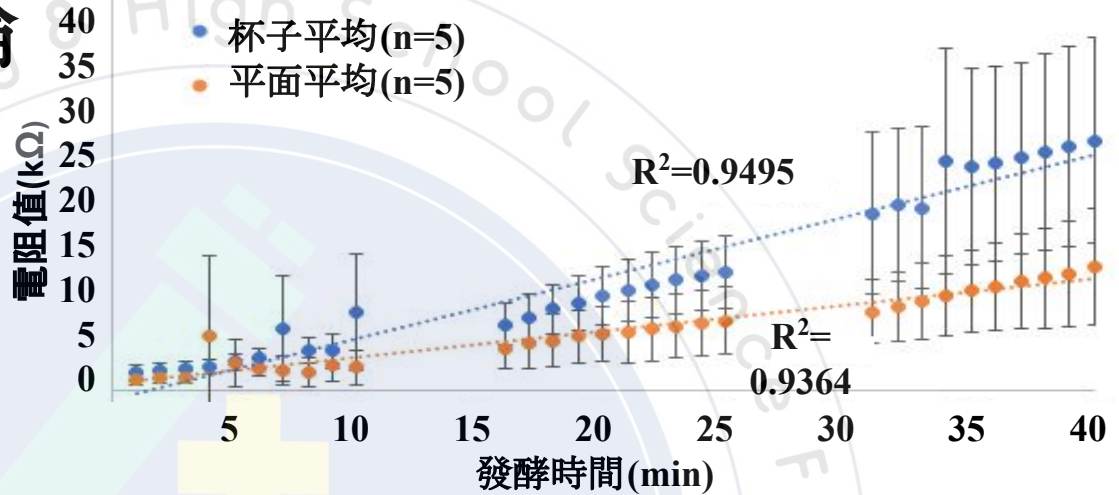


圖3.不同盛裝方式麵團電阻值隨時間作圖並區分為有杯壁組(藍色, n=5, 虛線為線性趨勢線,  $R^2 = 0.9495$ )與無杯壁組(橘色, n=5, 虛線為線性趨勢線  $R^2 = 0.9364$ )。

結果三：  
蛋白質含量愈高，起  
始電阻愈低；  
發酵終點大致落在  
3300-3500Ω

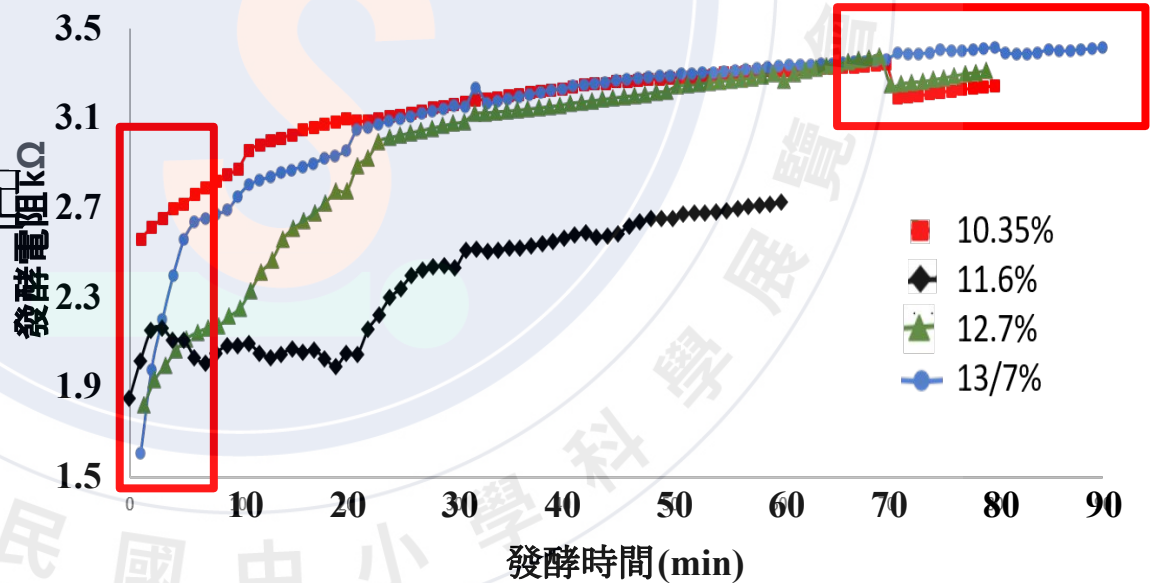


圖4.不同蛋白質含量麵團的電阻表現差異，蛋白質含量愈高，起始電阻愈低；發酵終點大致落在 3300-3500Ω。

# 研究結果與討論

結果四：  
 發酵終點+30分鐘  
 偏好度偏低  
 (尚未達統計顯著)

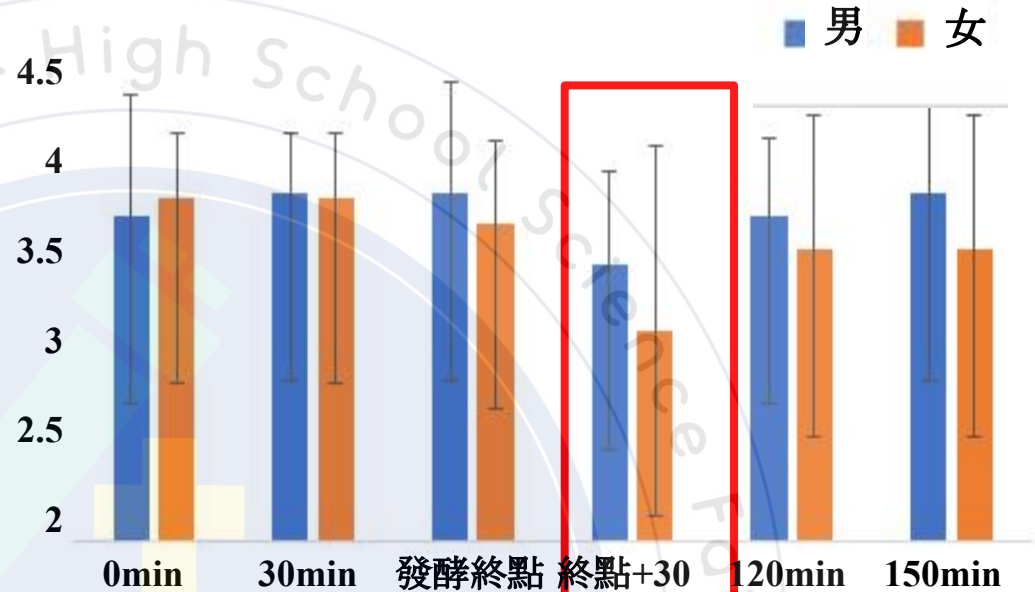


圖5.問卷分析:不同發酵時間之口感偏好程度評價,其中發酵終點是由自製提醒裝置判斷,時間大約落在60~90分鐘之間,但非固定數值。

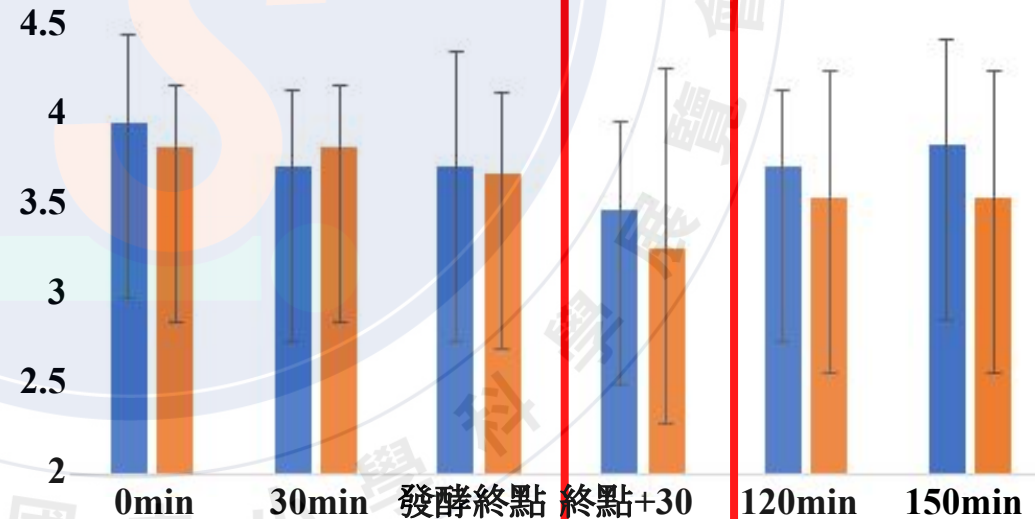


圖6.問卷分析:不同發酵時間之整體偏好程度評價,其中發酵終點是由自製提醒裝置判斷,時間大約落在60~90分鐘之間,但非固定數值。

# 研究結果與討論

延伸一：  
高電壓降低電阻

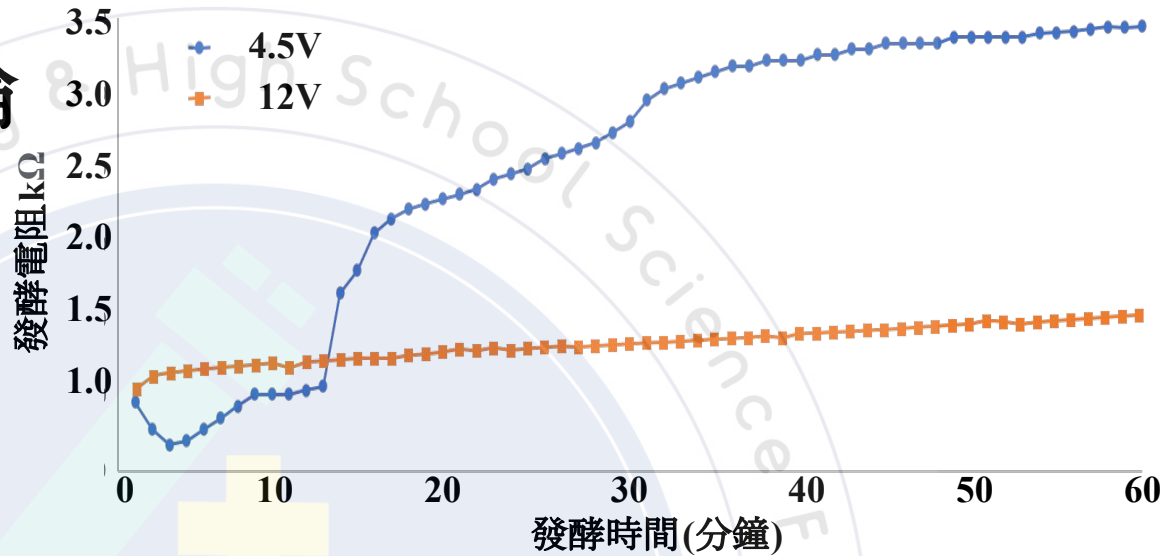


圖7.間接測量得配置下, 分別提供麵團4.5V或12V, 除了開頭10分鐘左右不穩定的情況之外, 大體來說12V的電阻遠小於4.5V

延伸二：  
不鏽鋼片與銅片電阻上升趨勢相同。

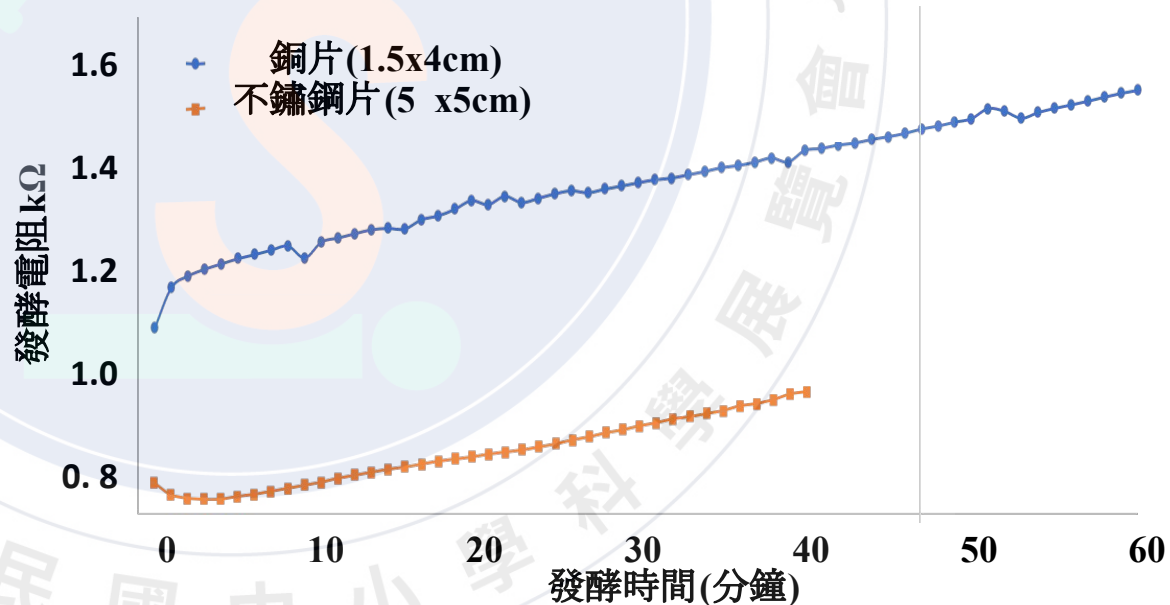


圖8.不同材質的電極板面機電阻差異, 銅片與不銹鋼片的電阻上升趨勢大致相同, 但不銹鋼片整體電阻較低。

# 結論

證實一：酵母發酵會使麵團電阻升高

證實二：麵團電阻與體積變化有關

證實三：容器壁的存在會影響麵團電阻表現

證實四：麵團電阻值與蛋白質含量有關

證實五：可利用麵團電阻值製作發酵提醒裝置

延伸一：外加電壓增加麵團電阻值降低

延伸二：麵團具儲能特性



# 未來發展

未來可利用測量麵團電阻的方式，製作提醒發酵狀態的智慧型發酵箱或更精確的麵包機。

## 文獻

1. Altshuler, G. (1999). The innovation algorithm. (Shulyak, L. & Rodman, S. Trans.). Worcester, MA: Technical Innovation Center. Bose, J. C., 1907.
2. Chiotellis E, Campbell GM. (2003) Proving of bread dough II: measurement of gas production and retention. Food Bioprod. Process. 81:207-216.
3. Kim DH, Jang KA and Lee SJ (2020). Prediction method of CO<sub>2</sub> production from electrical resistance of bread dough measured with a simple electrical multimeter in fermentation. Food Sci Biotechnol. 29(2)235-241