

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 化學科

佳作

030202

萬象「糞」新-探討勾芡液的黏度變化

學校名稱：高雄市立陽明國民中學

作者： 國二 鄧安庭 國二 陳泰升	指導老師： 翁郁凰 蘇筱茵
-------------------------	---------------------

關鍵詞：勾芡、黏度、直鏈澱粉

壹、摘要

本研究旨在探討各類芡粉糊化後所形成的勾芡液黏度與芡粉性質之間的關係。首先觀察測量並比較各芡粉的澱粉粒大小、直鏈澱粉含量、糊化、老化現象等特性，並自行發展製作旋轉式黏度計，用以測得實驗中蓮藕粉、樹薯粉及不同支鏈澱粉比例的玉米粉勾芡液在不同條件下的黏度，並與芡粉特性做綜合討論。支鏈澱粉含量高的勾芡液黏度大、耐剪切；芡粉糊化前加酸即難起糊，加鹽、加蔗糖對不同種類芡粉的黏度變化有不同效果。

貳、實驗動機

每當我們在吃羹時，如果沒有及時吃完，會發現隨著時間過去，碗中的羹會慢慢的變稀，看起來就像湯一樣，失去了原本黏稠的特性。對於這種現象的發生，我們感到很疑惑，為了瞭解羹變稀的原因，我們使用網路搜尋，得知羹變稀的現象稱為「返水」，而羹是由樹薯粉或玉米粉等芡粉加水勾芡而成，其黏稠度會隨著芡粉中「直鏈澱粉」和「支鏈澱粉」的比例而有所不同。老師告訴我們，國一所學的澱粉可利用碘液檢驗呈藍黑色，其中直鏈澱粉和支鏈澱粉加入碘液後會有不一樣的呈色情形，我們便在好奇心的趨使下，利用理化所學的濃度、力、速度，設計出一連串的實驗研究不同芡粉勾芡液的黏度變化有何不同，並探討勾芡食譜上註明調味料加入的時機。

參、實驗目的

- 一、觀察測量並比較各芡粉的特性(澱粉粒大小、直鏈澱粉含量、糊化、老化現象)
- 二、自製黏度計以測量液體的黏度
- 三、測量在不同變因下各勾芡液黏度的變化
- 四、探討芡粉特性與勾芡液黏度的關係

肆、研究設備及器材

- 一、器材：定量瓶、試管、玻棒、燒杯、鐵架、陶瓷纖維網、三叉夾、滴管、碼錶、刮勺、廣用試紙、酒精燈、漏斗、秤量紙、砝碼、分光管、溫度計

二、儀器：攝影機、筆電（含 EXCEL、Tracker 影像分析軟體、Logger Lite 軟體）、顯微鏡（含目鏡測微器、載玻片測微器）、分光光度計(SPECTRONIC 20D)、電子天平(EJ-610)、加熱板(PC-420D)、恆溫水槽(BH-230D)

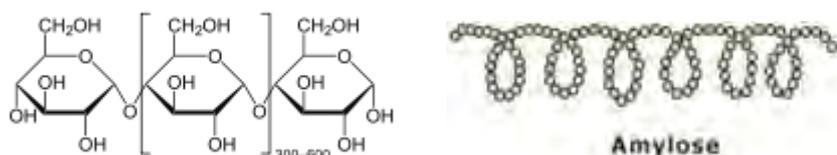
三、藥品：醋酸、碘酸鉀、碘化鉀、鹽酸、氫氧化鈉、酒精、甘油、鹽

玉米粉	蓮藕粉	樹薯粉	太白粉	直鏈澱粉 (來源：馬鈴薯)	支鏈澱粉 (來源：玉米)
					

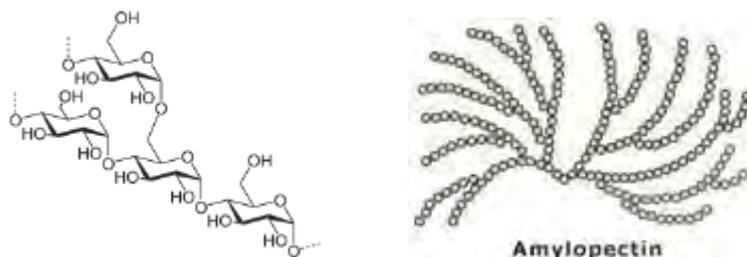
伍、研究過程及方法

一、文獻探討

各式芡粉的主要成分皆為澱粉，澱粉是一種由葡萄糖聚合而成的有機物，其分子結構一般是鏈狀，但分為直鏈和支鏈兩種。直鏈澱粉(amylose)的結構為較規則的螺旋狀，是麥芽糖結構的延伸；因結構較為整齊，它可以佔有較少的體積，其糊化溫度較高。支鏈澱粉(amylopectin)大約 20~30 個葡萄糖單元便會有一分支，它的結構較不規則，呈現球狀，因而將較多的結構包在裡面，相對分子質量較大，佔有的體積也較大。不同的植物來源，澱粉中直鏈澱粉和支鏈澱粉的比例會有差異，澱粉的性質亦因此有分別。

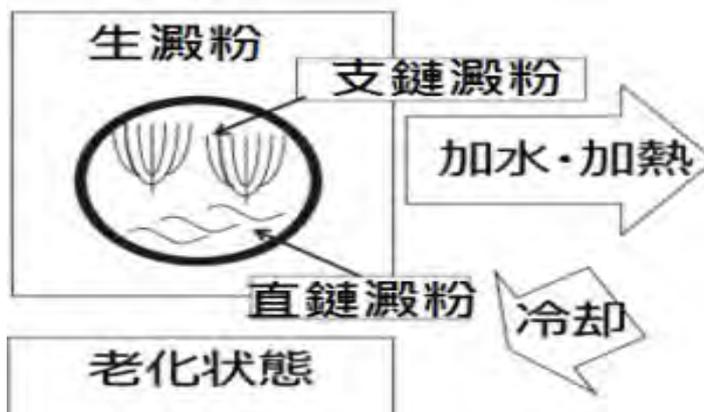


圖(一)直鏈澱粉的鍵結方式與結構示意圖



圖(二)支鏈澱粉的鍵結方式與結構示意圖

將澱粉液加熱時，澱粉分子經歷如右圖的階段：澱粉粒先吸水並逐漸膨脹，隨著溫度升高，澱粉粒破裂，水分子進入分子結構中、直鏈澱粉溶出，澱粉的結構變得鬆散而成為黏稠液體，此現象稱為糊化現象。支鏈澱粉比例愈高者，在三維網狀空間複雜的支鏈結構重新排列形成氫鍵，故表現出愈黏稠的特性。冷卻後，澱粉分子在降溫下又排列成序，且保留了許多水分子在其中，故澱粉液看起來形成凝膠狀，隨著時間，支鏈澱粉中枝與枝間及直鏈澱粉間的水分排出，此過程為澱粉的老化(回凝)。



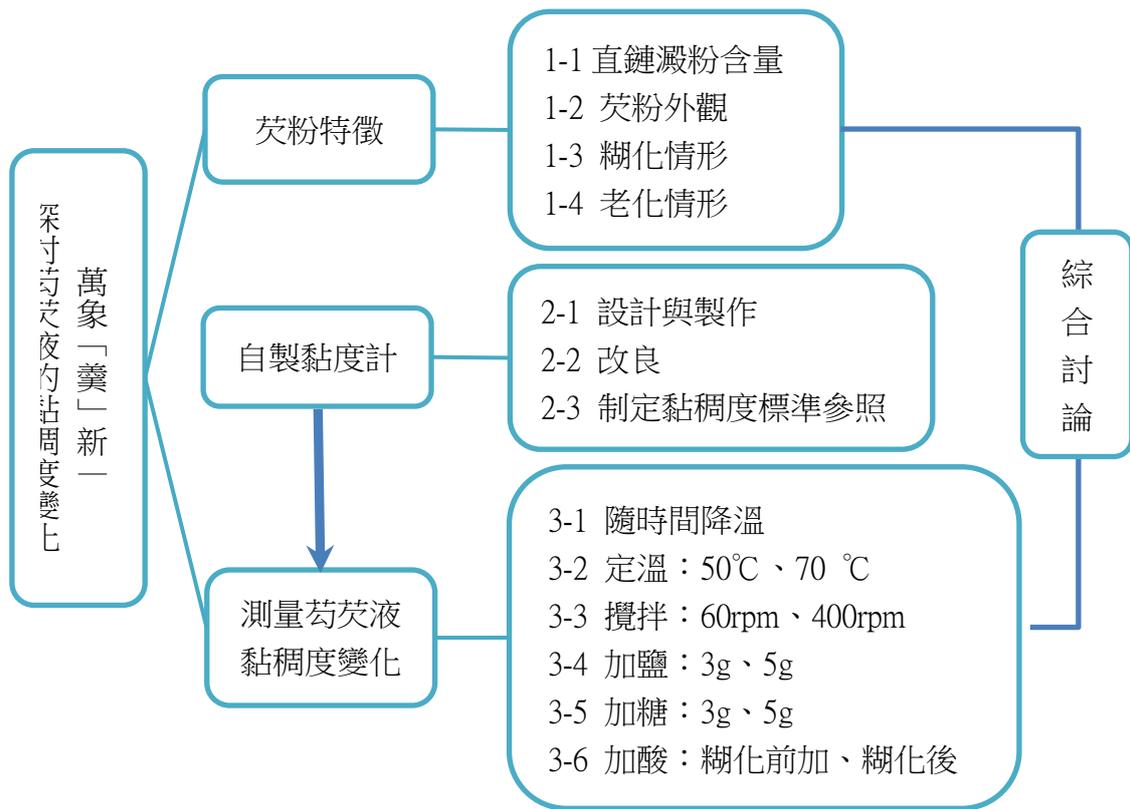
取自 https://www.alic.go.jp/joho-d/joho08_000553.html

當澱粉溶於水經過加熱糊化後形成流體，流體可依流動行為分為牛頓流體和非牛頓流體。牛頓流體在定溫定壓下的黏度為一定值，意即牛頓流體的黏度不隨攪拌速度而變，與流體所受的力無

關，例如水，無論攪拌得多快，水都能繼續表現出流體的性質；而非牛頓流體則與牛頓流體相對，其黏度會隨著受到的壓力或速度而變化，例如果醬、油漆等，攪拌將使黏度下降使其流動得更多。

由於勾芡液屬於非牛頓流體，因此我們想量測它的黏度須考慮非牛頓流體的特性。一般常見測量黏度的方法有毛細管法(將待測液置入細管，測量一定體積的液體通過時所須的時間即可求出黏度)、落體法(將測試液加入玻璃置的圓管內，在中心軸上使落體落下，測量落體落下的速度即可求出黏度)及旋轉法(利用圓筒，以一定角速度使其旋轉，測量當時產生黏性的轉矩而求得黏度)，其中毛細管法及落體法一般適用於牛頓流體，而旋轉法的應用較廣，亦適用於非牛頓流體。市售的旋轉式黏度計是利用馬達旋轉，以經過校正的精密游絲帶動轉子同步旋轉，使轉子表面與液體間產生相對摩擦力，當液體黏度大於游絲彈性時，會帶動指針於刻度盤上產生一個偏角，再經由簡單的換算公式轉換成黏度值。而一般實驗室常用的旋轉式黏度計則是根據黏滯係數(黏度)的定義所設計：利用重力帶動一在空心圓柱體中的圓柱體，此時介於此二圓柱體中之液體因摩擦(黏滯)力而被帶動旋轉，量度內圓柱體以定速轉動下所需施加的力矩，則可由定義計算出液體的黏滯係數。

二、研究架構



研究(一) 觀察、測量並比較各芡粉的特性

實驗 1-1 測定各芡粉中直鏈澱粉的含量

為了定量各芡粉中的直鏈澱粉和支鏈澱粉的比例，可利用直鏈澱粉會與碘形成藍色錯合物的特性，藉由分光光度計測定直鏈澱粉標準品吸收峰的波長，再配製不同濃度的直鏈澱粉與支鏈澱粉標準液製作檢量線，便可由量測各芡粉在直鏈澱粉吸收峰的波長下之吸光值，推算出各芡粉中直鏈澱粉的含量，進而得到直鏈澱粉與支鏈澱粉的含量比。

1. 觀察各類芡粉與碘液在不同比例下的呈色情形

為測量各芡粉的吸收光譜，必須了解芡粉與碘液在不同比例下的呈色情形，找出合適的濃度比例。

步驟：

- (1) 配製 0.02% 的芡粉液：分別秤取 0.02g 的蓮藕粉、樹薯粉、玉米粉和太白粉，將其溶於 10mL、0.5N NaOH 溶液中，接著放入恆溫水槽以 80°C 恆溫 10 分鐘，取出冷卻後加入 1N 醋酸水溶液中中和至中性，加水定量至 100mL。

(2) 配製 0.001N 碘液：秤取 0.11 克 KIO_3 及 1 克 KI，加水溶解後再加入 1mLHCl，定量至 100mL 後，取出 6.50 mL 稀釋至 100mL。

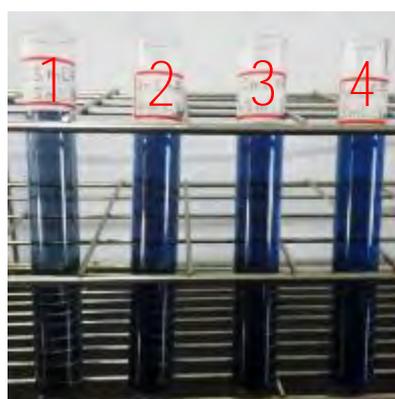
(3) 依下列比例配製出不同的樣品

試管編號	1	2	3	4	5
0.02% 芡粉液 (mL)	1.5	2	2.5	3	3.5
0.001N 碘液 (mL)	2.5	2	1.5	1	0.5
水 (mL)	4	4	4	4	4

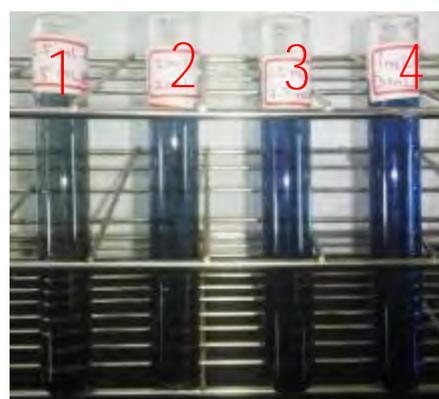
(4) 觀察其呈色變化。

結果

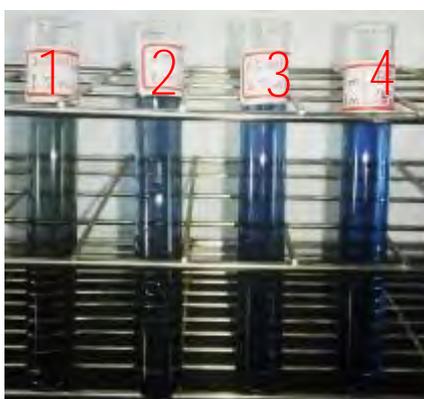
- (1) 蓮藕粉隨著碘液濃度減少，顏色越深，且都呈藍色(見圖三)。
- (2) 玉米粉隨著碘液濃度減少，顏色逐漸由暗藍綠色→藍色→深藍色(見圖四)。
- (3) 太白粉隨著碘液濃度減少，顏色逐漸由暗藍綠色→淡藍色→藍色(見圖五)。
- (4) 樹薯粉隨著碘液濃度減少，顏色逐漸由黃綠色→淺藍綠色→淡藍色(見圖六)。



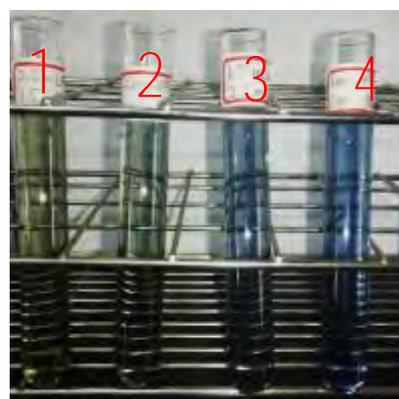
圖(三)蓮藕粉液與碘液混合呈色情形



圖(四)玉米粉液與碘液混合呈色情形



圖(五)太白粉液與碘液混合呈色情形



圖(六)樹薯粉液與碘液混合呈色情形

討論

由於直鏈澱粉與碘液形成的澱粉-碘錯合物呈藍色，當各芡粉液濃度相同時，顏色愈藍表示直鏈澱粉含量愈高，由各芡粉液與碘液混合的呈色結果可以推知直鏈澱粉的含量多寡應為蓮藕粉>玉米粉>太白粉>樹薯粉，且試管編號 4 的呈色皆為藍色較適中。

2. 取得製作直鏈澱粉濃度檢量線最佳的溶液比例

我們將上述所得的試管編號 4 芡粉液測其吸收光譜，發現在 610nm 處有最大吸收，但吸收值超過 1，故我們決定降低澱粉液濃度，並尋找與碘液的合適比例以製作直鏈澱粉檢量線。

步驟

- (1) 將 0.01% 直鏈澱粉液，與 0.001N 碘液依下列體積混合。

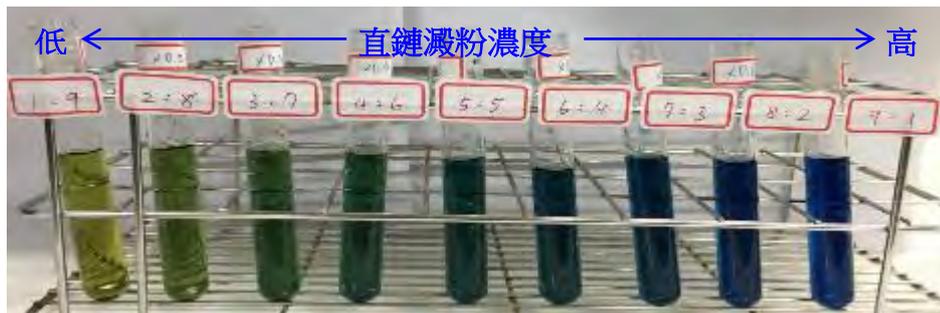
0.01%直鏈澱粉(mL)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.001N 碘液(mL)	9	8	7	6	5	4	3	2	1

- (2) 將 0.01% 支鏈澱粉液，與 0.001N 碘液依下列體積混合。

0.01%支鏈澱粉(mL)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.001N 碘液(mL)	9	8	7	6	5	4	3	2	1

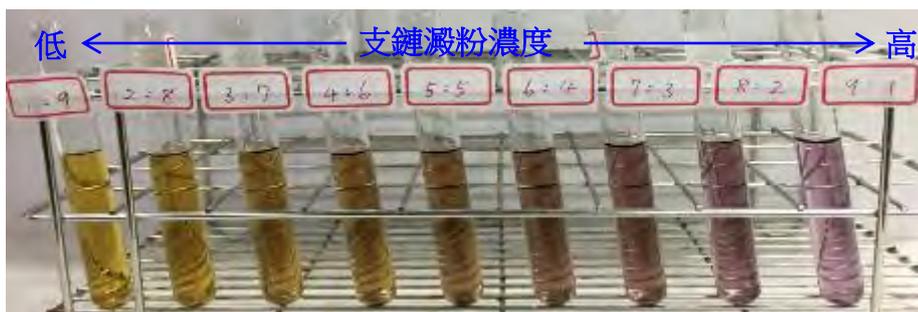
結果

- (1) 依直鏈澱粉濃度由低至高，顏色由黃逐漸變綠再變藍。(如圖七)



圖(七)直鏈澱粉加入不同比例的碘液後呈色情形

- (2) 依支鏈澱粉濃度由低至高，顏色由黃變紫。(如圖八)



圖(八)為支鏈澱粉加入不同比例的碘液後呈色情形

討論

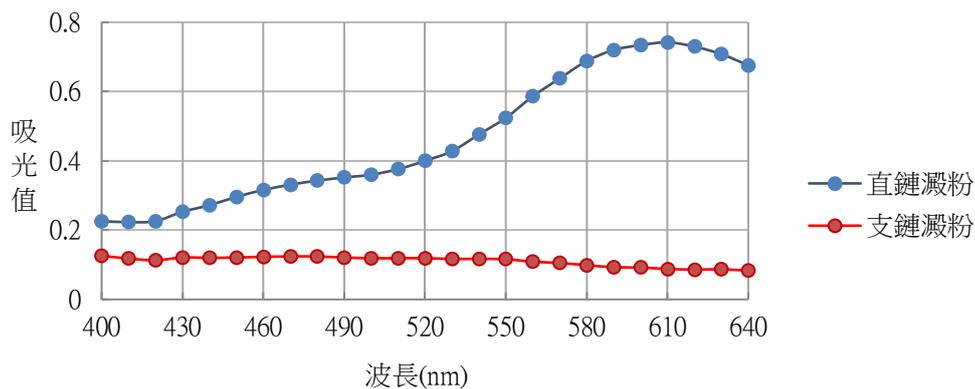
- (1) 直鏈澱粉過量使溶液呈藍色；碘液過量使溶液呈黃綠色。因我們想獲得澱粉液中的澱粉含量，應使碘液些微過量，故選擇呈色為藍色偏綠的澱粉液：碘液體積比 6：4 為佳。
- (2) 支鏈澱粉與碘液形成的錯合物為紫紅色，支鏈澱粉：碘液體積比需大於 6：4 才能看得出有偏紫的顏色。

3. 測定直鏈澱粉、支鏈澱粉的吸收光譜，並找出直鏈澱粉的最大吸光值。

步驟

- (1) 取 6mL、0.01%直鏈澱粉液加入 4mL、0.001N 的碘液，均勻混和後置入分光管
- (2) 設定波長範圍為 400~640nm，每隔 10nm 讀取吸光值
- (3) 將直鏈澱粉液改為支鏈澱粉液，重複步驟 1、2。

結果如圖(九)



圖(九)直鏈澱粉和支鏈澱粉在不同波長下的吸光值

討論

重新調整澱粉液與碘液的比例後，順利使波長 400nm~500nm 之間的吸光值降下，且直鏈澱粉最大吸光值位於 610nm，故可以此波長建立直鏈澱粉檢量線。

4. 建立直鏈澱粉檢量線

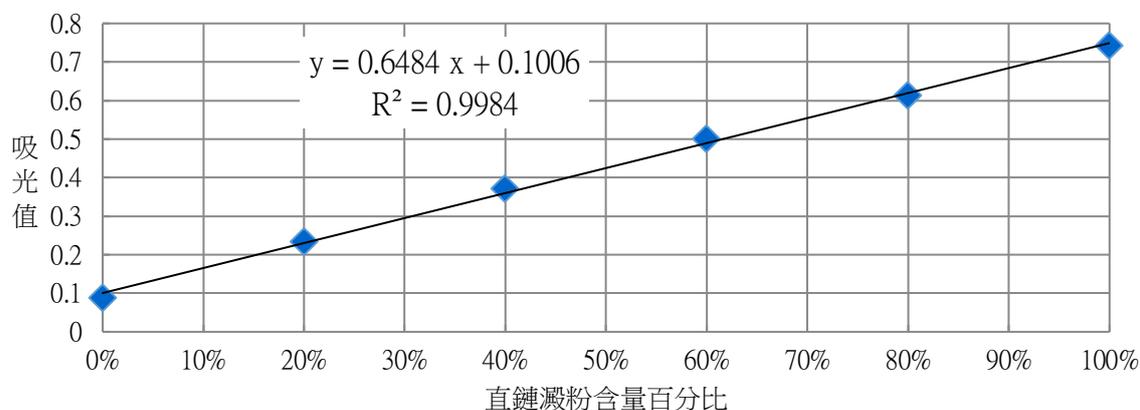
步驟

- (1) 取 0.01%的直鏈澱粉和支鏈澱粉，依下表配製不同直鏈和支鏈比例的澱粉液：

直鏈澱粉含量百分比	0	20%	40%	60%	80%	100%
直鏈澱粉(mL)	0	2	4	6	8	10
支鏈澱粉(mL)	10	8	6	4	2	0

- (2) 將不同比例的澱粉液各取 6mL，並加入 4mL、0.001N 的碘液，均勻混和後置入分光管。
- (3) 另取 6 mL 水加 4mL、0.001N 的碘液做空白試驗。
- (4) 在波長 610nm 下讀取各澱粉液的吸光值。

結果(如圖十)



圖(十)於波長 610nm 建立直鏈澱粉檢量線

討論

我們做出的直鏈澱粉檢量線趨勢線方程式為 $y = 0.6484x + 0.1006$ 。

5. 定量各芡粉中直鏈澱粉與支鏈澱粉的比例

步驟

- (1) 配製 0.01% 芡粉液：分別取 0.01 克的蓮藕粉、玉米粉、太白粉、樹薯粉，各溶於 10mL、0.5N 的 NaOH 中，將溶液置入 80°C 恆溫槽 10 分鐘使澱粉充分溶解，待冷卻後逐量加入 1N 的醋酸至中性，再加水定量至 100mL。
- (2) 各取 6mL 的芡粉液，加入 4mL 的 0.001N 碘液。
- (3) 在波長 610nm 下讀取各芡粉液的吸光值。
- (4) 將各芡粉的吸光值代入檢量線，求得各芡粉中直鏈澱粉和支鏈澱粉含量比。

結果

澱粉	蓮藕粉	玉米粉	太白粉	樹薯粉
吸光值	0.307	0.287	0.239	0.218
直鏈澱粉比例	31.9%	28.8%	21.4%	18.2%
支鏈澱粉比例	68.1%	71.2%	78.6%	81.8%

我們所求得各芡粉中直鏈澱粉的含量多寡依序為蓮藕粉>玉米粉>太白粉>樹薯粉。

實驗 1-2 觀察芡粉的外觀

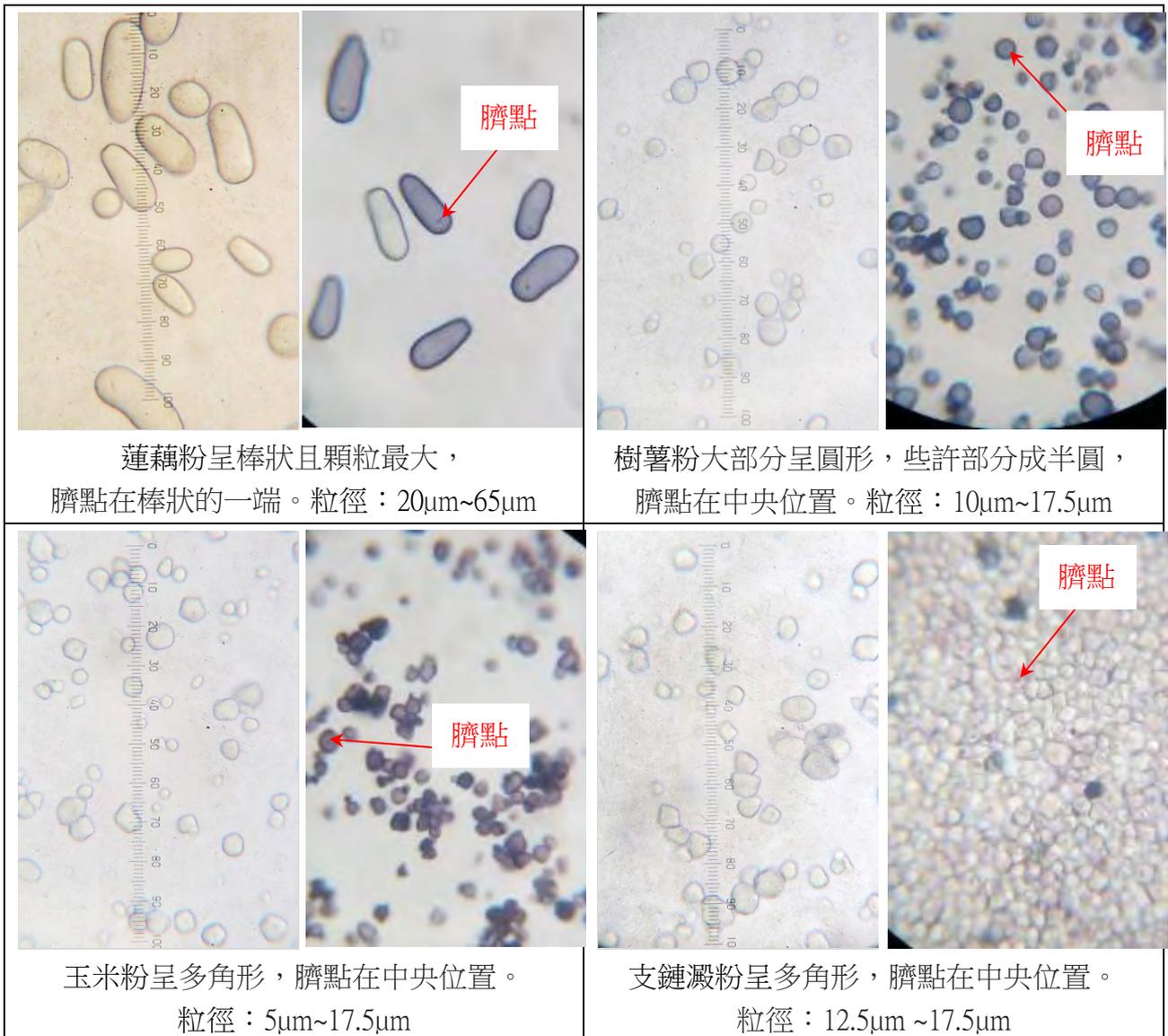
由於時間有限，我們決定以直鏈澱粉含量最多的蓮藕粉和最少的樹薯粉進行實驗，另外將玉米粉和來源同為玉米的支鏈澱粉共同比較。

步驟

- (1) 取少量蓮藕粉、樹薯粉、玉米粉和支鏈澱粉，於甘油:水=1:1 的比例下均勻混合。
- (2) 另取少量蓮藕粉、樹薯粉、玉米粉和支鏈澱粉，各加入 1 滴碘液。
- (3) 將步驟 1、2 的芡粉分別以 400x 顯微鏡觀察，並利用測微器估算澱粉粒大小。

結果

直接以肉眼觀察四種芡粉，除了蓮藕粉為粉紅色顆粒外，樹薯粉、玉米粉及支鏈澱粉皆為白色粉末。將其利用顯微鏡觀察(左為在甘油:水=1:1 下、右為在碘液下之結果)：



討論

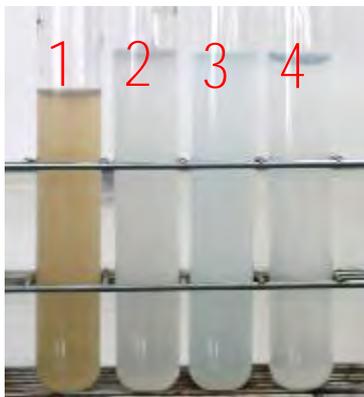
- (1) 由觀察結果發現，不同植物來源的澱粉粒形狀不同，而支鏈澱粉來源是玉米，故形狀和玉米粉十分相似。
- (2) 蓮藕粉、樹薯粉和玉米粉澱粉粒加了碘液後顏色變化明顯，呈藍色，支鏈澱粉顆粒則呈淡的紫紅色，由此可知，碘較容易與直鏈澱粉結合形成藍色的錯合物，與支鏈澱粉的親和力較小。

實驗 1-3 觀察芡粉糊化後的外觀

步驟

- (1) 配置 4% 蓮藕粉、玉米粉、支鏈澱粉和樹薯粉勾芡液，蓮藕粉、樹薯粉加熱至 75°C，玉米粉、支鏈澱粉加熱至 85°C 使之糊化。
- (2) 20 分鐘後取出 3.5 毫升的勾芡液，滴入少許碘液。
- (3) 以 400x 顯微鏡觀察，並利用測微器估算澱粉粒大小。

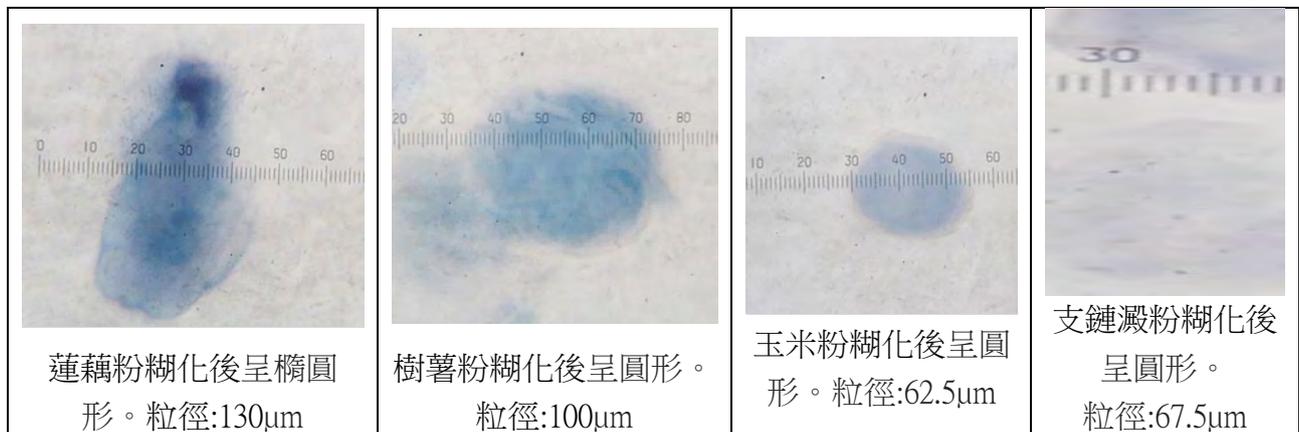
結果



各芡粉糊化後的勾芡液：

- 1：蓮藕粉呈深紅色，微透光
- 2：樹薯粉呈淡米黃色，微透光
- 3：玉米粉呈不透明白色
- 4：支鏈澱粉透明度最高

下圖為芡粉加入碘液後自顯微鏡觀察的結果：



討論

- (1) 由四種勾芡液加碘液在顯微鏡下的觀察可以發現，糊化 20 分鐘後澱粉粒皆吸水膨脹，蓮藕粉及樹薯粉澱粉粒破裂，周圍呈藍色反應，可知直鏈澱粉溶出，而玉米粉及支鏈澱粉之澱粉粒仍完整，雖已經加熱溫度提高至 85°C，仍較難糊化。
- (2) 由於澱粉加熱糊化時，直鏈澱粉分子形成氫鍵彼此纏繞並使水進入晶格中，使得直鏈支鏈澱粉比例不同的勾芡液透明度不同，蓮藕粉、樹薯粉和支鏈澱粉的支鏈澱粉含量高，糊化後的顏色較為透明，玉米粉則因直鏈澱粉含量多呈不透明的乳白色。

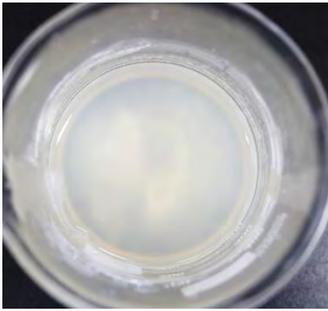
實驗 1-4 觀察勾芡液老化後的情形

步驟

- (1) 配製 4% 蓮藕粉、樹薯粉、玉米粉和支鏈澱粉勾芡液，於室溫下放涼，分別於 1、2、3 天後觀察並記錄其外觀。
- (2) 觀察勾芡液加入碘液後的呈色情形：勾芡液冷卻放置 2 天後，分別於各勾芡液的上層和下層吸取 5 滴液體滴入試管，加入 3 毫升的水攪拌均勻後，滴入兩滴碘液觀察呈色情形。

結果：

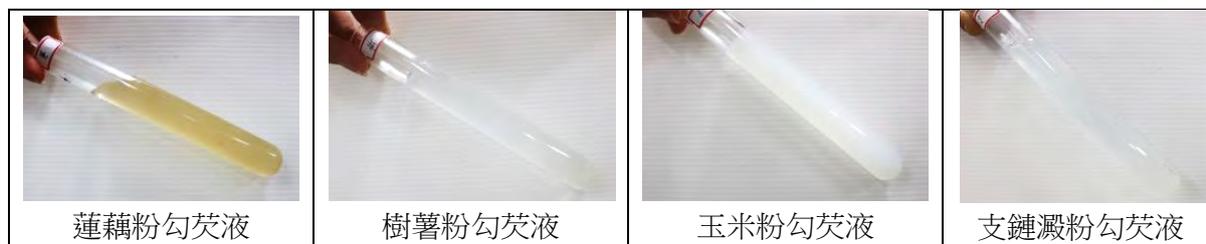
- (1) 觀察外觀：

放置 1 天 後	 蓮藕粉勾芡液	 樹薯粉勾芡液	 玉米粉勾芡液
放置 3 天 後	 蓮藕粉勾芡液	 樹薯粉勾芡液	 玉米粉勾芡液

放置 1 天後，可看出蓮藕粉和樹薯粉上層結成膜，下層變稀；玉米粉則結成一塊呈果凍狀，但最底層還是帶有些微的水分。

放置 3 天後，蓮藕粉及樹薯粉析出大量水份，邊緣及上方留有一層厚約 2mm 的皮膜；玉米粉上層乾裂成塊。

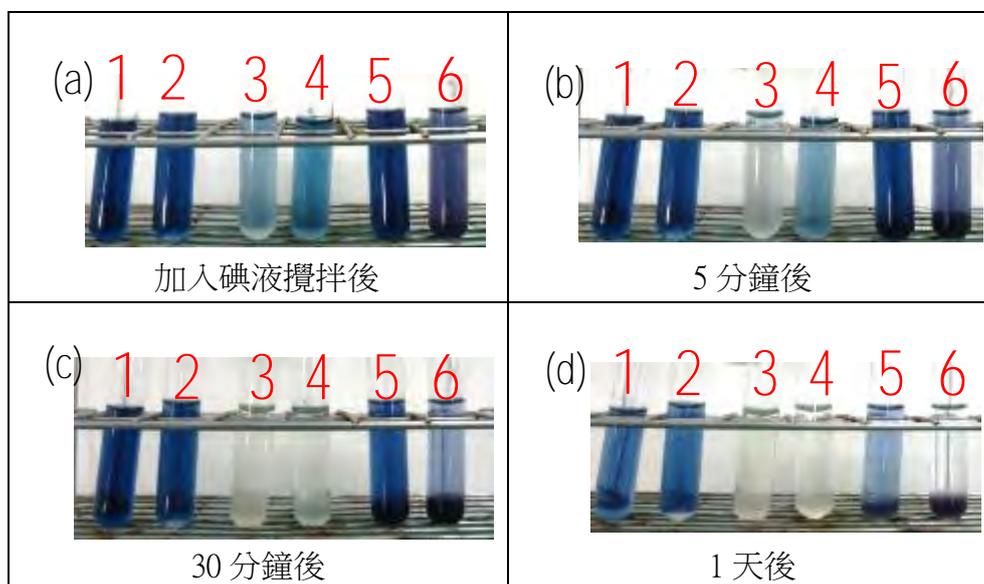
另外，實驗 1-3 的勾芡液於放置兩天後也產生老化的現象，結果如下：



支鏈澱粉芡液出現輕微離水現象，仍維持黏稠感(像濃鼻涕)；玉米粉整管變成無流動性的果凍；樹薯粉上層結成膜；蓮藕粉水解現象較樹薯粉明顯。

(2) 觀察放置兩天的勾芡液加入碘液後的呈色情形：

試管編號	1	2	3	4	5	6
樣品	樹薯粉上層	樹薯粉下層	蓮藕粉上層	蓮藕粉下層	玉米粉上層	玉米粉下層



討論

- (1) 支鏈澱粉糊化後放置長時間，會產生離水的現象，但表面完全不會成膜，可知直鏈澱粉為成膜的關鍵，也是膜的主成分。
- (2) 樹薯粉勾芡液加碘液後呈深藍色，為糊化後直鏈澱粉溶出的結果，而上層顏色較下層略深，由此可知樹薯粉凝結成的皮膜中，所含的直鏈澱粉濃度較大，推論一是因為冷

卻時澱粉分子逐漸接近而以氫鍵結合，直鏈澱粉結構整齊，能快速形成三度空間的網狀結構形成上層高強度的皮膜；二是因為直鏈澱粉形成網狀結構時會排出水份，而降低下層尚未成膜的直鏈澱粉濃度。

- (3) 滴入碘液攪拌後過不久蓮藕粉的顏色即隨之淡去，且上層顏色較快褪去。
- (4) 玉米粉上層呈深藍色，直鏈澱粉含量多，下層偏紫，且上、下層皆有沉澱物，為玉米澱粉糊化後澱粉分子產生凝聚及老化後釋出水份而呈現固、液相分離的結果。
- (5) 由實驗結果可以看出隨著時間經過，勾芡液與碘液反應形成的顏色漸淡，我們判斷原因一是碘液昇華，二是直鏈澱粉會老化凝聚而沉降，因此老化程度愈高上清液顏色愈淡。

研究(二) 自製黏度計量測液體黏度

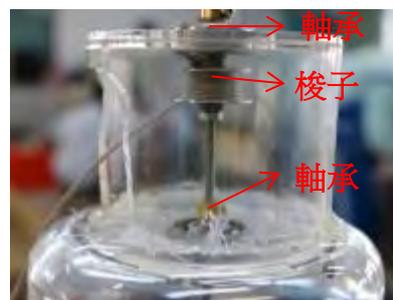
由於勾芡液屬於非牛頓流體，為了測量其黏度，我們根據市售及實驗室使用的旋轉式黏度計之設計原理自製簡單的黏度計，並加以改良以測量待測勾芡液的黏度變化。

實驗 2-1 自製旋轉式黏度計

第一代旋轉式黏度計：

構想：我們參考文獻的旋轉式黏度計原理，透過定滑輪使砝碼所受的重力施加力矩帶動黏度計轉子轉動，而容器內盛裝的待測液體因摩擦（黏滯）力被帶動旋轉。因此測量轉子以定速轉動下所需施加的力矩，根據黏度定義計算出液體的黏度(黏滯係數)。

材料：兩個大小不相同的圓底壓克力容器、兩個軸承、中心軸(3mm 牙條)、尼龍壁虎、梭子、轉子(鋁製圓柱)、定滑輪、棉線、底片盒、游標尺、大型紙板、奇異筆、攝影機。



圖(十一)為梭子纏繞棉線時的情形

- (1) 取兩個底部為圓形的壓克力容器，使用電鑽分別在兩容器底部的圓心位置鑽洞，並使洞的大小與軸承相合，另在小的壓克力容器壁做一個開口。
- (2) 將軸承、梭子、軸承依序利用尼龍壁虎固定在中心軸上。
- (3) 因梭子有固定的半徑，可用來作為鼓軸，將棉線一端整齊規律的纏繞梭子(見圖十一)。

(4) 將小壓克力容器的開口對著大壓克力容器底部接合，並使中央軸穿進兩容器底部，兩軸承分別固定於兩容器底部的洞上，以熱熔膠加強黏合，再於中心軸的最下端裝上轉子即完成黏度計的製作(見圖十二)。

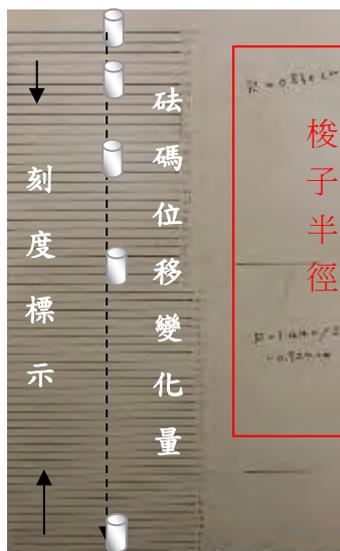
(5) 取大型紙板從底部開始向上每隔一公分作一記號線，直至 60 公分(見圖十三)，將其直立於桌緣，以便計算砝碼下落的距離求得終端速度。



圖(十二)自製黏度計裝置

(6) 將甘油、水、勾芡液盛裝於底片

盒中，棉線的另一端通過固定於桌緣的定滑輪，並吊掛砝碼，利用攝影機拍下砝碼自由落下的過程。(見圖十四)



圖(十三)砝碼落下位移長度參考

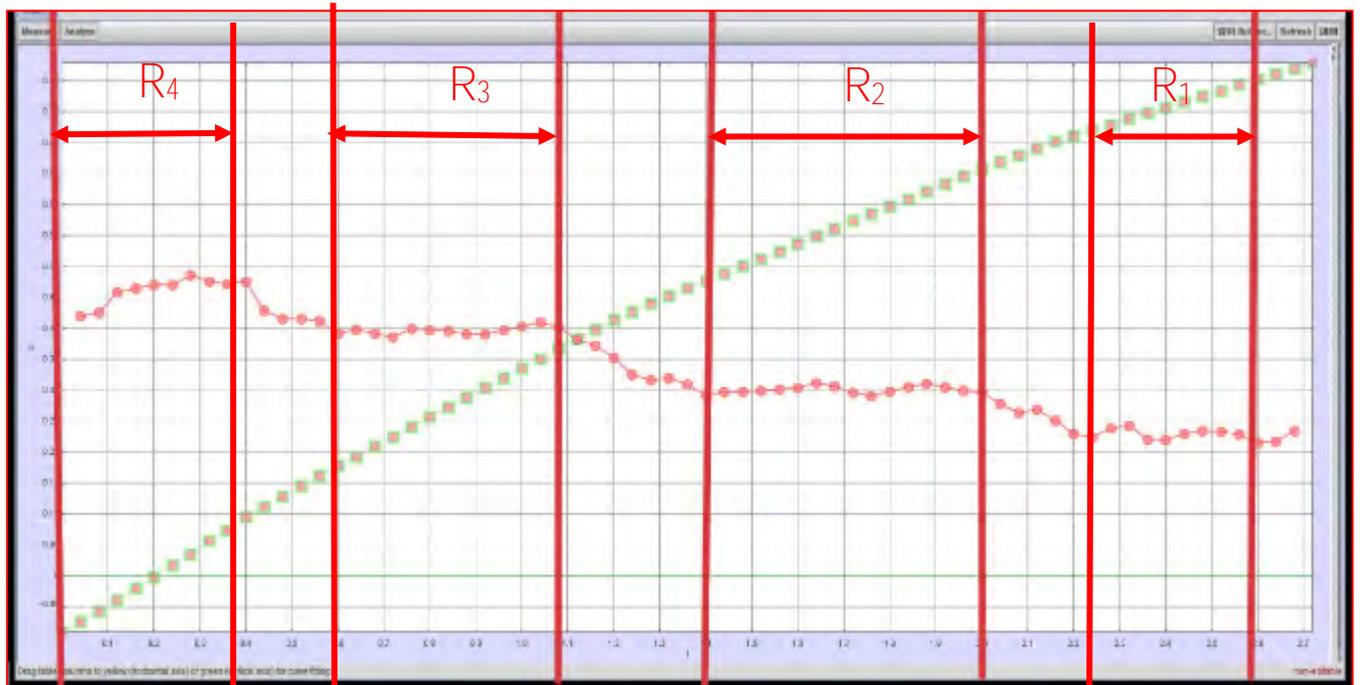


圖(十四)測量黏度過程

(7) 將所拍攝的影片，利用 Tracker 軟體進行分析：定位每一個影格(1/30s)中砝碼掉落的位置(如圖十三)，即可直接由軟體求得砝碼掉落的速度-時間關係圖(v-t 圖)。

結果

以甘油為例，Tracker 軟體分析砝碼掉落的速度-時間關係圖(紅點)及位置對時間關係圖(綠橘點)，如下頁圖(十四)。



圖(十四) 甘油的分析圖

討論

- (1) 我們參考文獻自製黏度計。當砝碼下落時，砝碼受到的重力為定值，而砝碼下落帶動轉子轉動時，轉子所受的液體黏滯力會隨著轉速而改變，轉子轉速愈快，所受到液體的黏滯力愈大，當砝碼帶動轉子轉動而受到的液體黏滯力逐漸增大至與重力相等時，砝碼所受的合力為零將做等速度(終端速度)運動，故可利用砝碼下落的終端速度推得液體所受的黏滯力，進一步求得黏滯係數。由文獻^[2]歸納的黏度係數公式可知，黏滯係數是一個只和黏滯係數測定儀(黏度計)有關的常數 A 乘以 m/V 所得的 $\eta = \frac{(b^2 - a^2)gR^2}{4\pi a^2 b^2 l} \cdot \frac{m}{V} = A \cdot \frac{m}{V}$
- (2) 由於我們以內徑較短的梭子做為鼓軸，纏繞棉線每六圈就會繞下一層，導致砝碼掉落時棉線纏繞的梭子半徑不一，故利用游標尺測量每一層棉線纏繞梭子後的半徑 R，並在紙板上將砝碼拉動棉線掉落一層的距離標示出來，以獲得砝碼達終端速度時準確的 R 值。利用游標尺測量黏度計相關的常數如下表：

a(轉子半徑)	b(底片盒內半徑)	l(轉子高)	R(梭子半徑)	g
0.0112m	0.0145m	0.02955m	0.0072m	9.8m/s ²

代入黏滯係數公式，得常數 A 值 = 4.399。



欲測液體黏度時，只要將待測液體裝進底片盒，置入黏度計，將吊掛於棉線上的砝碼質量(m)及砝碼掉落的終端速度(v)代入公式即可求得 η (黏度係數)。

(3) 由圖(卅四)可以發現，測量甘油黏度時，其砝碼掉落 v-t 圖呈現四個階段：

R₄：隨著時間經過，速度增加的趨勢減緩，最終成等速度運動；

R₃：較 R₄ 後段為慢的等速度運動；R₂：較 R₃ 階段更慢的等速度運動

R₁：較 R₂ 階段更慢的等速度運動

推敲原因如下：

A. R₄ 前半段因掉下的砝碼重力大於液體給轉子的摩擦力(黏滯力)，使速度持續上升，但隨著砝碼掉落速度增加，轉子轉動速度也增加，使得液體黏滯力變大，砝碼掉落的加速度漸減，當黏滯力與砝碼所受重力達平衡時，即為 R₄ 後半段的等速度運動。

B. 由於綿線纏繞梭子的半徑 R 會隨著砝碼落下的距離愈長、半徑愈短，使得棉線拉動轉子的力臂變短、力矩變小，故 R₃、R₂、R₁ 速度降低，但仍呈等速度運動。

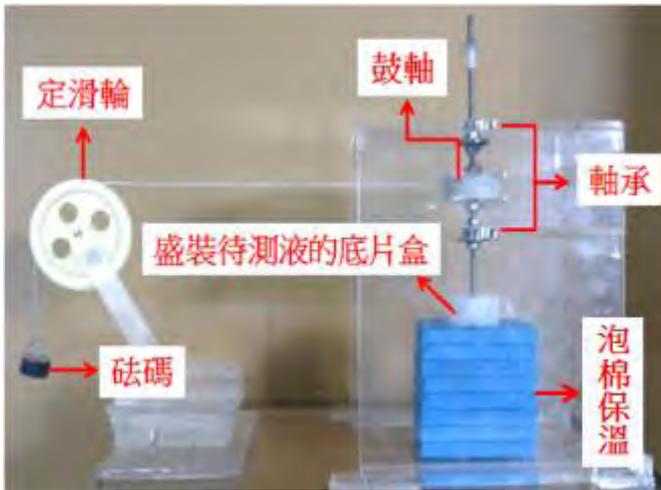
(4) 由於此黏度計棉線纏繞梭子的半徑不一，導致我們做出四個階段的等速度運動，在不同階段的速度求得的黏度值不同黏度值不同，另外，使用 Tracker 軟體分析影片需耗費大量時間，故我們將黏度計進行改良。

實驗 2-2 改良自製旋轉式黏度計

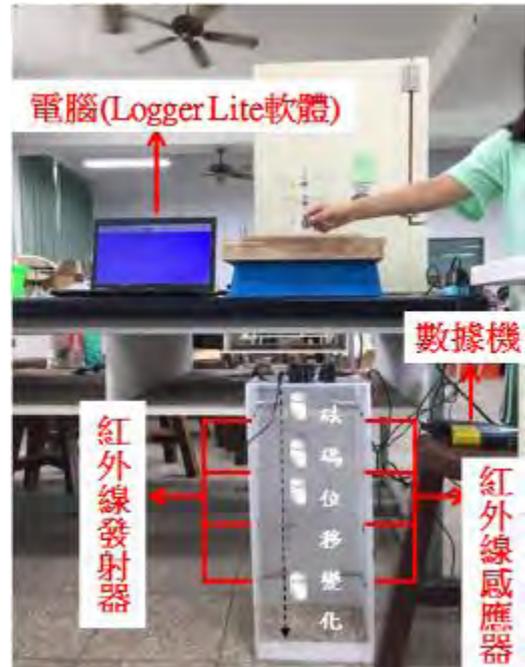
第二代旋轉式黏度計：

構想：由於第一代黏度計棉線纏繞梭子半徑不一，可能影響實驗結果，因此第二代的黏度計，利用相同的原理設計，但使用半徑較大的壓克力製鼓軸，並利用 Logger Lite 軟體取代用 Tracker 進行分析，改善終端速度分為多段及分析耗時的缺點。

材料：壓克力板、兩個軸承、中心軸(4mm 牙條)、螺帽、壓克力製鼓軸、轉子(鋁製圓柱)、定滑輪、棉線、泡棉、底片盒、游標尺、瓦楞板(5mm)、紅外線發射器、紅外線感應器、LED 燈、電腦(Logger Lite 軟體)



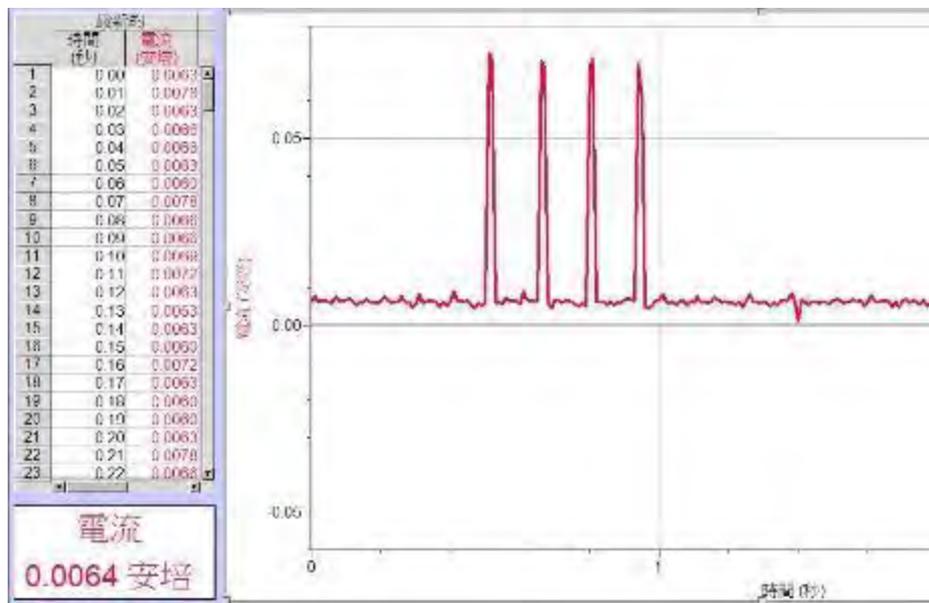
圖(十五) 第二代黏度計



圖(十六) 第二代黏度計測量過程

步驟

- (1) 用瓦楞紙版拼接，在左側每隔 13 公分裝設紅外線發射器，在右側相對應位置加裝感應器，並接上 LED 燈，連接至數據機(如圖十六)。
- (2) 當砝碼下落通過感應器時，會遮斷紅外線訊號，LED 燈同時發亮，產生大的電流訊號。
- (3) 數據機將電流訊號傳至電腦，並以此紀錄砝碼通過各感應器的時間，如圖(十七)。



圖(十七)甘油的數據接收圖

討論

- (1) 我們利用 Logger Lite 軟體讀出的電流訊號，將四個砝碼阻斷訊號的時間差紀錄下來，一方面可以確認砝碼是否已達終端速度，另一方面將計算所得的終端速度值及懸掛的砝碼重代入黏滯係數公式，即可求得待測液體黏度。
- (2) 使用 Logger Lite 軟體進行實驗時，只要得到砝碼阻擋感應器接收訊號的時間，就可以求出終端速度再算出黏度，相較於使用 Tracker 軟體分析砝碼掉落影片，改良後的黏度測量方法可大幅縮短實驗所需時間。

實驗 2-3 制定黏度標準

步驟

1. 查表，利用甘油在不同溫度及濃度下具有不同的黏度，配置出各黏度參照的標準品。

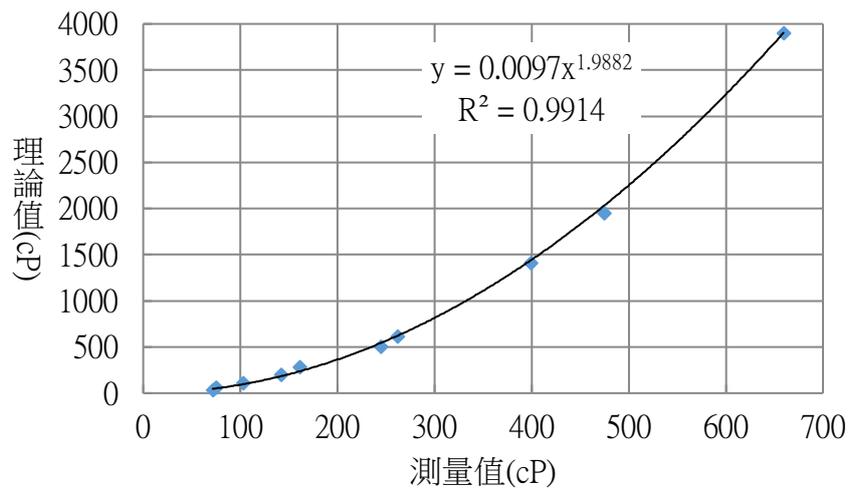
溫度(°C)	10	10	20	30	30	30	30	30	30	30	30
甘油濃度(%)	100	97	100	100	99	98	96	94	90	85	80
黏度理論值 (cP)	3900	1950	1410	612	500	409	281	202	109	58	33.9

2. 依序以自製黏度計測出甘油標準品的黏度。

結果

溫度(°C)	10	10	20	30	30	30	30	30	30	30
濃度(%)	100	97	100	100	99	96	94	90	85	80
吊掛砝碼 質量(g)	40	40	40	40	30	30	30	30	30	30
終端速度 (m/s)	0.233	0.324	0.321	0.585	0.491	0.714	0.809	1.116	1.535	1.614
黏度測量 值(Pa·s)	3.90591	2.03339	0.47827	0.26227	0.24464	0.16131	0.14225	0.10312	0.05179	0.04723
黏度測量 值(cP)	3905.91	2033.39	478.27	262.27	244.64	161.31	142.25	103.12	51.79	47.23

討論



- (1) 利用自製黏度計測得不同濃度及溫度下甘油的黏度，和理論值對照之後，發現兩者之間符合乘冪關係，故之後實驗只要把測量值代入此乘冪關係趨勢線公式： $y = 0.0097x^{1.9882}$ ，即可得到勾芡液的黏度。
- (2) 我們自製的旋轉式黏度計在相同溫度條件下重複測量再現性良好，且不同黏度的液體之黏滯係數也有明顯差距，顯示自製黏度計確實可以做為我們量測勾芡液黏度的工具。

研究(三) 探討在不同變因下各勾芡液黏度的變化

實驗 3-1 探討勾芡液的黏度隨時間溫度變化的關係

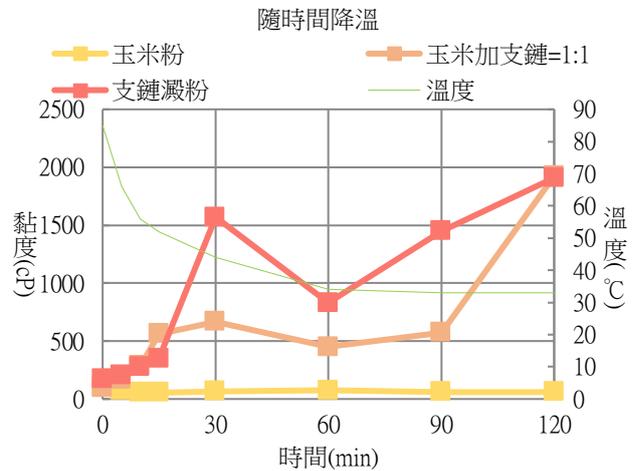
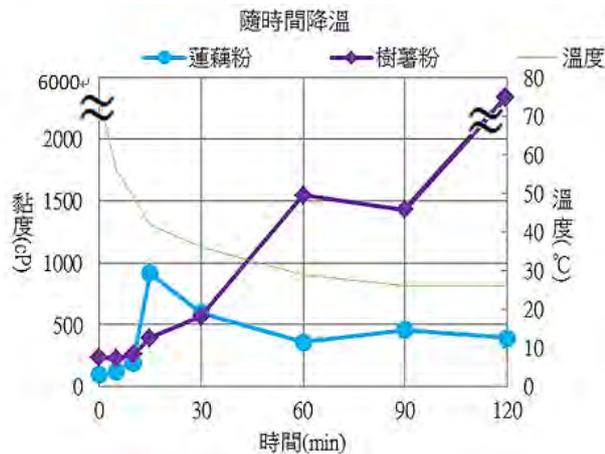
步驟

- (1) 配製 4% 蓮藕粉和樹薯粉勾芡液：分別取 10 克蓮藕粉和樹薯粉溶於 20mL 冷水，攪拌均勻後倒入 230mL 的 70°C 熱水，再持續攪拌加熱至 75°C，芡粉開始糊化形成勾芡液。
- (2) 將勾芡液立刻倒入些許至底片盒，測其黏度(0 min)。
- (3) 將剩餘的勾芡液各倒 20mL 至七個底片盒中，分別於 5、10、15、30、60、90、120 分鐘時，測其溫度和黏度。
- (4) 配製 4% 玉米粉液：依下表質量分配秤取 3 杯玉米粉，分別溶於 20mL 冷水，攪拌均勻後倒入 280mL 的 70°C 熱水，再持續攪拌加熱至 85°C，芡粉開始糊化形成勾芡液。

玉米粉(g)	12	6	0
玉米支鏈澱粉(g)	0	6	12
直鏈澱粉含量/支鏈澱粉含量	28.8%/71.2%	14.4%/85.6%	0.0%/100.0%

(5) 重複步驟 2 和 3。

結果



討論

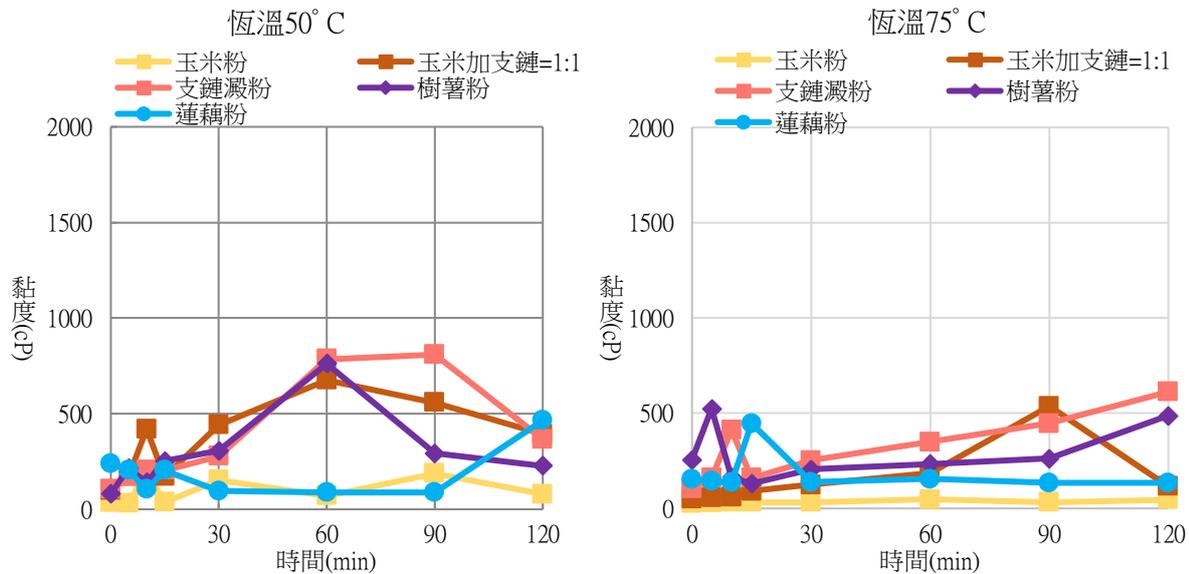
- (1) 由於玉米粉的糊化溫度(85°C)較其它芡粉為高，因此配置玉米粉勾芡液時須加熱至 85°C 開始變黏稠再測量其黏度，然而直鏈澱粉含量高的玉米粉相較於其它芡粉，在相同溫度及經過相同時間時的黏度低且變化小。
- (2) 在實驗過程的前 15 分鐘溫度下降得最快，各勾芡液黏度皆呈上升趨勢。原因除了隨著溫度降低，液體中分子運動的平均速度減小，與臨近分子的接觸時間變長，而使得液體的黏度隨溫度降低而上升，另外，澱粉分子間亦會形成鏈結，而使得黏度增加。
- (3) 由蓮藕粉和樹薯粉的實驗結果可以發現，直鏈澱粉含量較低的樹薯粉，其黏度變化與時間、溫度具有明顯關係，放置時間愈久、溫度愈低、黏度愈大；而直鏈澱粉含量較高的蓮藕粉則從糊化 15 分鐘後黏度逐漸下降至維持一定值。
- (4) 由玉米粉的實驗結果發現，純玉米粉黏度幾乎不隨時間、溫度改變而改變；添加支鏈澱粉的比例愈高、黏度愈大，且支鏈澱粉比例達 85.6%以上者，隨時間經過變得更黏，和樹薯粉(支鏈澱粉比例 81.8%)有相似的情形。
- (5) 綜合上述結果，支鏈澱粉比例愈高者，在三維網狀空間複雜的支鏈結構重新排列形成氫鍵，故表現出愈黏稠的特性。而蓮藕粉的支鏈澱粉含量低於玉米粉，卻較玉米粉黏稠，應是不同來源的澱粉其直鏈澱粉的長度或支鏈澱粉的結構不同所致。

實驗 3-2 探討定溫下勾芡液的黏度隨時間變化的關係

步驟

- (1) 依實驗 3-1 步驟 1 配製 4% 蓮藕粉和樹薯粉勾芡液，並測量 0 min 黏度。
- (2) 將剩餘的勾芡液放入 50°C 恆溫水槽中，分別於 5、10、15、30、60、90、120 分鐘時，測其黏度。
- (3) 重複步驟 1-2，將勾芡液改置入 75°C 恆溫水槽中，按時測量其黏度。
- (4) 依實驗 3-1 步驟 4，配製不同比例之玉米粉勾芡液。
- (5) 分別將玉米粉勾芡液放入 50°C 及 75°C 恆溫水槽中，並於 0、5、10、15、30、60、90、120 分鐘時，測其黏度。

結果



討論

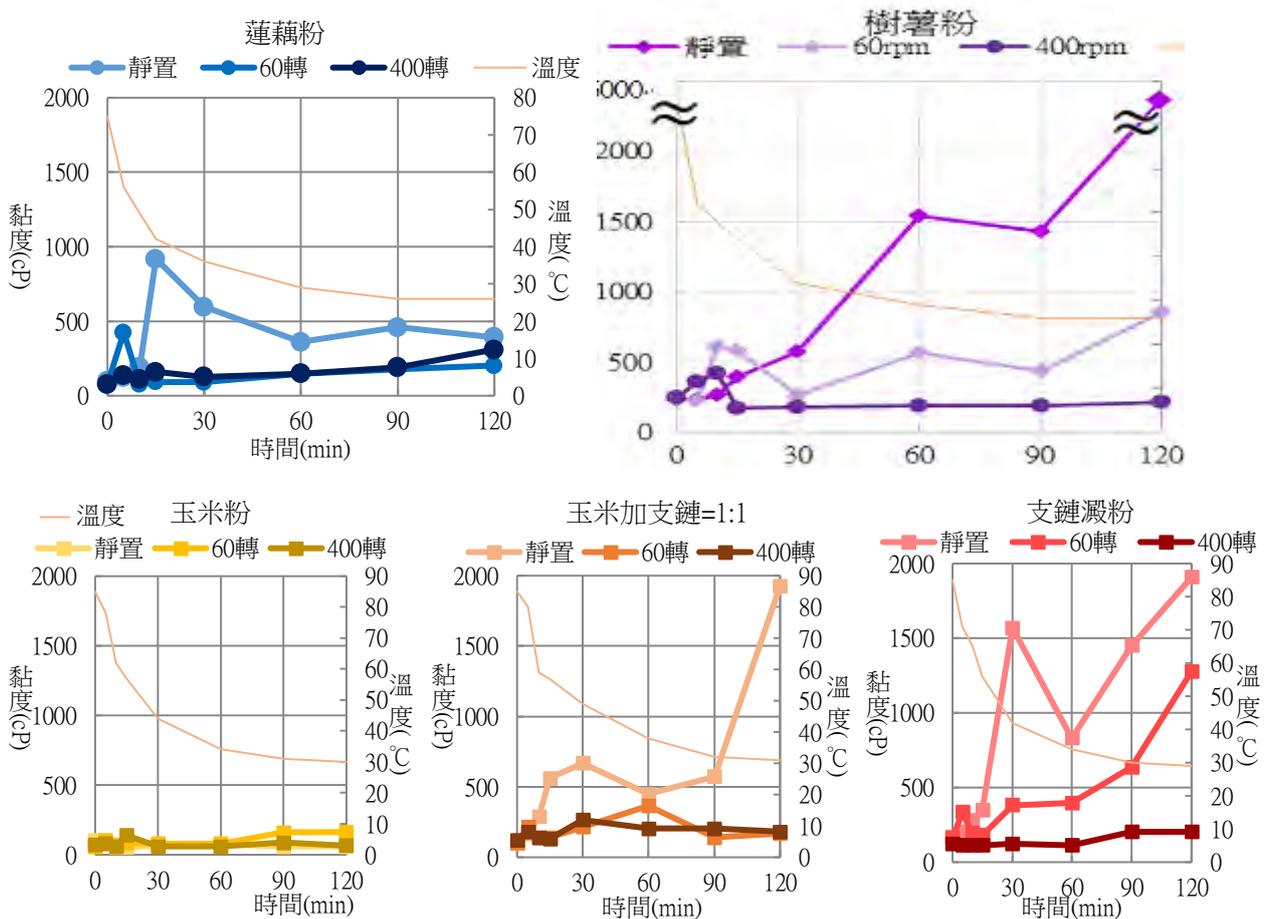
- (1) 各勾芡液於恆溫 50°C 時的黏度大於恆溫 70°C，此結果應與溫度低、分子運動平均速率低有關，且支鏈澱粉含量較高者，溫度改變對其黏度影響較大。
- (2) 於恆溫 70°C，各勾芡液黏度較小且隨時間的變化較小，可能是芡粉糊化後在維持高溫的情況下澱粉粒子破裂，而澱粉鏈在高溫時運動速率快、取向困難，故較難形成穩固的氫鍵；恆溫 50°C 時，支鏈澱粉含量高的樹薯粉、玉米粉加支鏈澱粉、支鏈澱粉勾芡液於糊化後 60 分鐘內黏度逐漸上升，之後則開始下降，且發現支鏈含量愈高者，黏度下降量較少。
- (3) 於恆溫 50°C、70°C 下，玉米粉的黏度皆沒有明顯的變化。

實驗 3-3 探討勾芡液的黏度與攪拌速率的關係

步驟

- (1) 依實驗 3-1 步驟 1 配製 4% 蓮藕粉和樹薯粉勾芡液，於勾芡液中置入磁攪拌子，開啟電磁加熱攪拌器，設定轉速 60rpm 進行攪拌。
- (2) 分別於 0、5、10、15、30、60、90、120 分鐘時，測其黏度及溫度。
- (3) 重複步驟 1~2，製作轉速為 400rpm 的勾芡液。
- (4) 依實驗 3-1 步驟 4 配製 4% 不同支鏈澱粉比例之玉米粉勾芡液，重複步驟 1~3。

結果



討論

- (1) 勾芡液經過攪拌後黏度皆會下降。攪拌勾芡液是進行了剪切作用，轉速愈快使得澱粉分子鏈結斷裂愈嚴重，而降低澱粉分子間的作用力，使黏度下降，在 400rpm 轉速下，由於剪切作用劇烈，當大部份的澱粉分子鏈變短，勾芡的黏度小且變化不明顯。

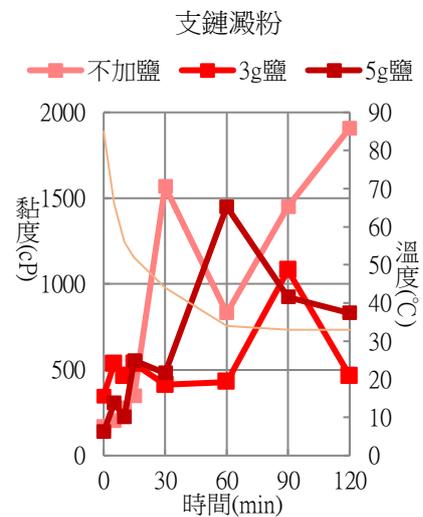
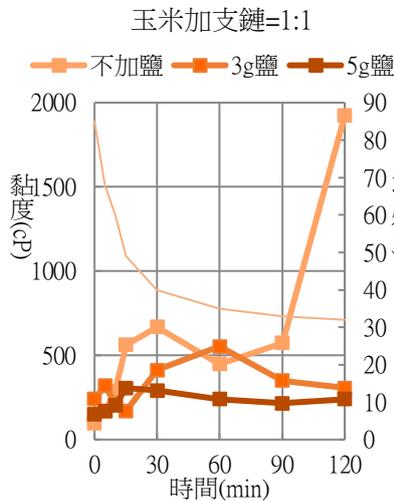
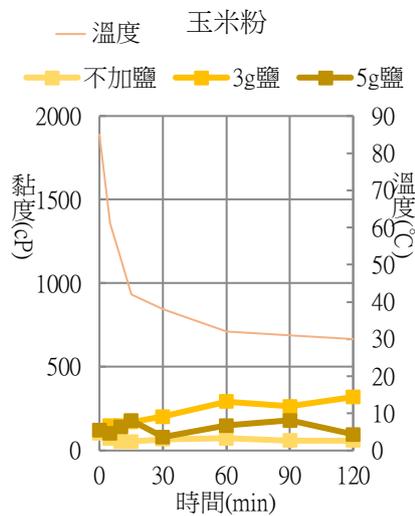
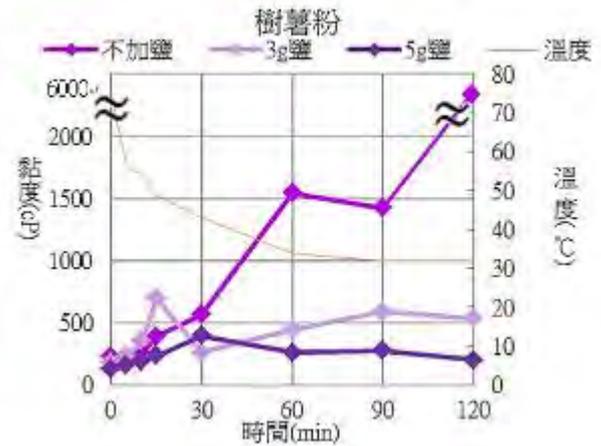
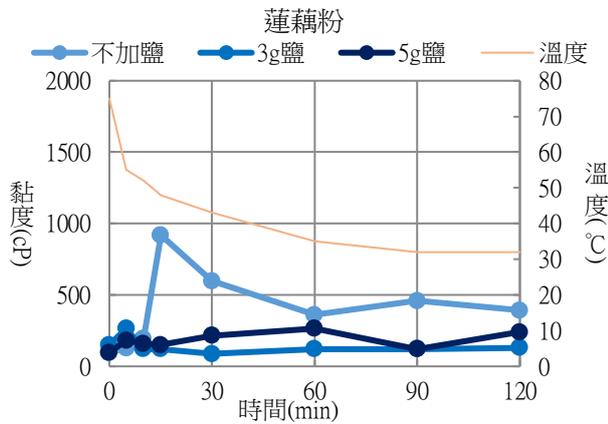
- (2) 直鏈澱粉含量高的蓮藕粉勾芡液以 60rpm 及 400rpm 攪拌後，皆變得相當稀，兩者黏度差異不明顯，可知蓮藕澱粉分子不耐剪切。
- (3) 由樹薯粉、不同比例的玉米粉及支鏈澱粉中發現，支鏈澱粉含量愈高者，轉速較快時，才能使黏稠度下降，推測是支鏈澱粉結構較為複雜，使得須在高轉速情況下才能完全破壞其結構，故支鏈澱粉耐剪切的穩定性較直鏈澱粉好。

實驗 3-4 探討加入鹽之勾芡液黏度的變化

步驟

- (1) 配製蓮藕粉、樹薯粉含鹽(約 1%及 1.6%)勾芡液：分別取 12g 蓮藕粉、樹薯粉，各加入 3g 及 5g 鹽後溶於 20mL 冷水，攪拌均勻後倒入 280mL 的 70°C 熱水，再持續攪拌加熱至 75°C 形成勾芡液。
- (2) 將勾芡液立刻倒入些許至黏度計盛裝容器測其黏度(0min)。
- (3) 將剩餘的勾芡液各倒 20mL 至六個 100mL 燒杯中，分別於 5、10、15、30、60、90、120 分鐘時，測其溫度和黏度。
- (4) 依實驗 3-1 步驟，配置不同比例之玉米粉含鹽芡粉液：分別取 12g 不同比例的玉米粉及支鏈澱粉，各加入 3g 及 5g 鹽後溶於 20mL 冷水，攪拌均勻後倒入 280mL 的 70°C 熱水，再持續攪拌加熱至 85°C 形成勾芡液。
- (5) 重複步驟 2~3。

結果



討論

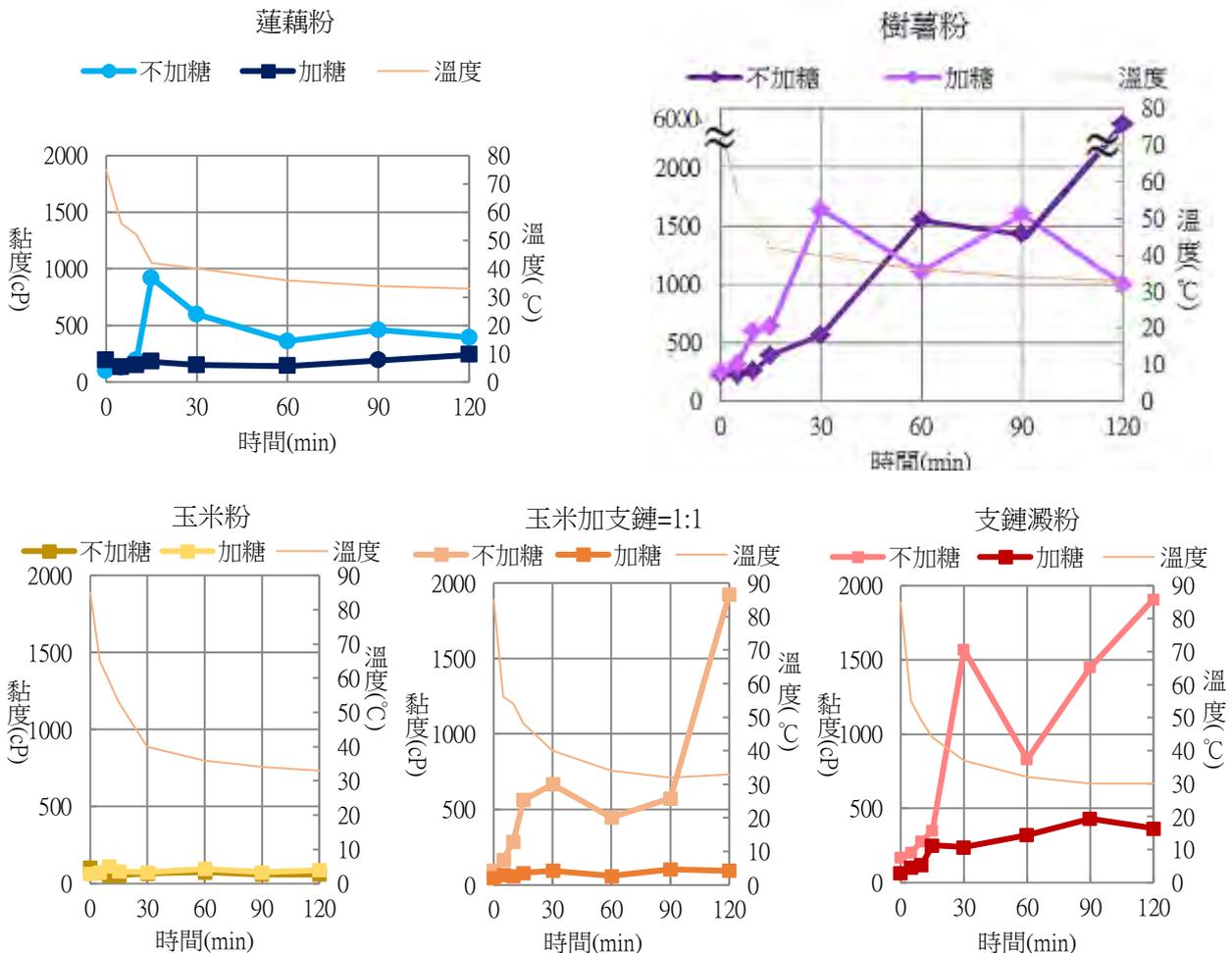
- (1) 除加鹽的玉米粉勾芡液黏度會略為上升之外，各添加鹽的勾芡液黏度皆較不加鹽時下降。可見加鹽有抑制澱粉黏度的效果，但並非在所有種類的澱粉中皆是。
- (2) 由於直鏈澱粉空間阻礙小，老化的速度較支鏈澱粉快，我們發現在蓮藕粉中加鹽亦有效的減緩凝膠產生，可能是鹽解離形成的離子阻礙了蓮藕澱粉的取向而抑制了糊化後的澱粉間氫鍵的生成，減低老化現象的產生。
- (3) 在玉米粉加支鏈澱粉及支鏈澱粉中加鹽，可以使得勾芡液經過較長的時間黏度才有明顯的上升，確定加鹽亦能延緩支鏈澱粉產生離水的現象，然而鹽的濃度與老化時間並非正相關，由本實驗結果可知，加 3g(1%)的鹽延緩離水老化的效果較加 5g(1.6%)為佳。

實驗 3-5 探討加入糖之勾芡液黏度的變化

步驟

- (1) 配製蓮藕粉、樹薯粉含糖勾芡液：取 12g 蓮藕粉、樹薯粉，加入 3g(1%)蔗糖後溶於 20mL 冷水，攪拌均勻後倒入 280mL 的 70°C 熱水，再持續攪拌加熱至 75°C 形成勾芡液。
- (2) 將勾芡液立刻倒入些許至底片盒測其黏度(0min)。
- (3) 將剩餘的勾芡液各倒 20mL 底片盒，分別於 5、10、15、30、60、90、120 分鐘時，測其溫度和黏度。
- (4) 依實驗 3-1 步驟，配製不同比例之玉米粉含糖芡粉液：分別取 12g 不同比例的玉米粉及支鏈澱粉，各加入 3g(1%)糖後溶於 20mL 冷水，攪拌均勻後倒入 280mL 的 70°C 熱水，再持續攪拌加熱至 85°C 形成勾芡液。
- (5) 重複步驟 2~3。

結果



討論

- (1) 蔗糖分子有羥基，且較澱粉親水性大，形成勾芡液時會與澱粉爭奪水分，因此糊化較差，而糊化後蔗糖與其它澱粉分子競爭形成氫鍵，降低澱粉分子間以氫鍵結合的數目，抑制了勾芡液的老化。
- (2) 實驗發現，除了加糖的樹薯粉勾芡液較未加糖時黏度較快上升之外，其餘芡粉加糖都較難糊化、黏度較低。可見蔗糖亦有抑制澱粉糊化的效果，但對於樹薯粉卻是促進糊化及老化的發生。

實驗 3-6 探討加入醋酸之勾芡液黏度的變化

我們在查詢資料時發現，針對勾芡的技巧有文章強調要先完成調味再勾芡，有的卻說勾芡完成後再加醋，因此本實驗分為在芡粉糊化前先加醋及糊化後再加醋兩種方法。

步驟

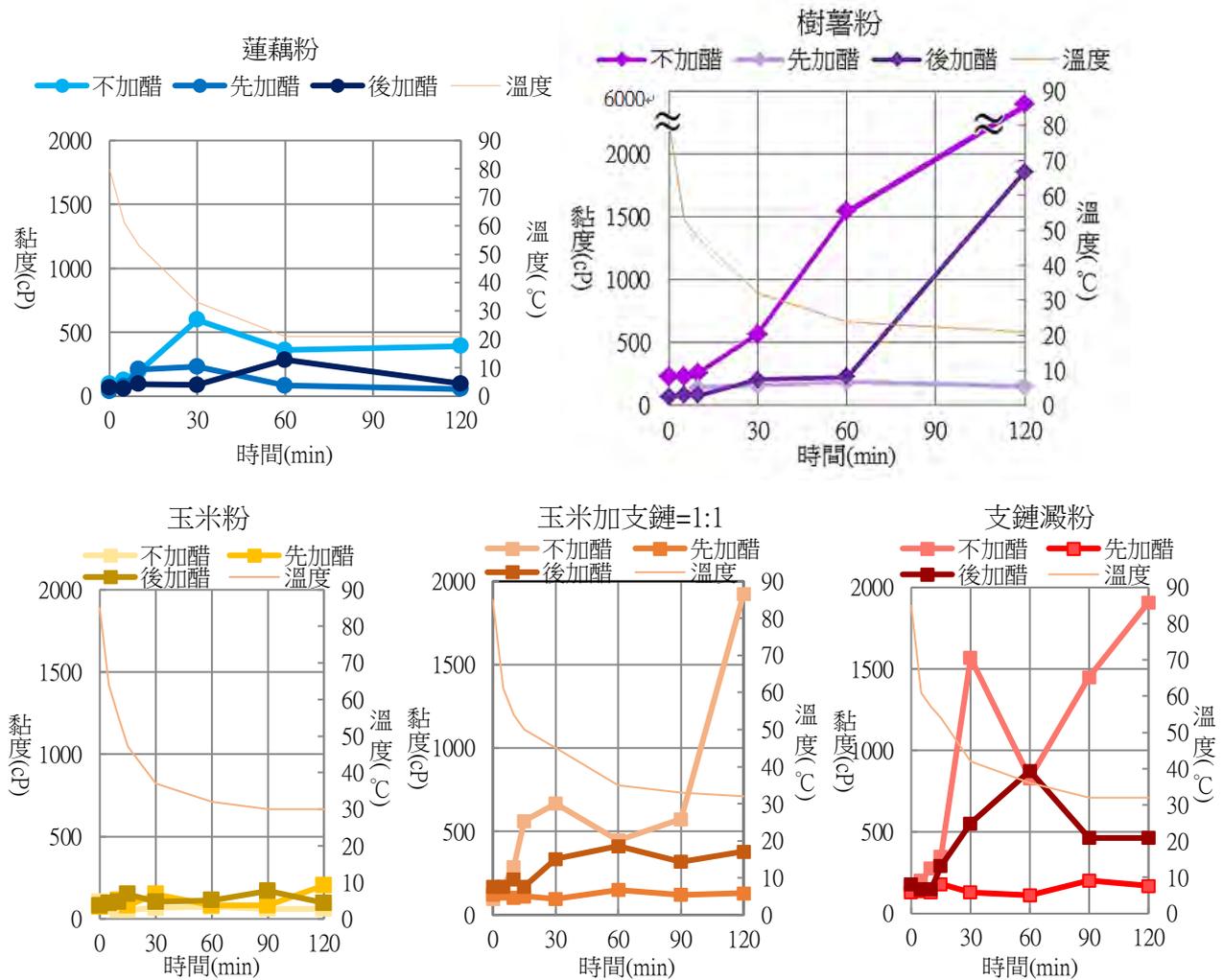
1. 糊化前先加醋：

- (1) 配製 3% 的蓮藕粉、樹薯粉芡粉液：取 20mL 冷水，加入 9g 的芡粉並攪拌均勻，再取 280mL 熱水加入 1mL 的醋酸，加熱至 80°C 時倒入芡粉液使其糊化。
- (2) 依實驗 3-1 步驟 4，配製不同比例之玉米粉芡粉液：取 20mL 冷水，加入 12g 的芡粉並攪拌均勻，再取 280mL 熱水並加入 1mL 的醋酸，加熱至 85°C 時，倒入芡粉液使其糊化。
- (3) 將步驟 1、2 之勾芡液分別於 0、5、10、30、60、120 分鐘時，測其溫度及黏度。

2. 糊化後再加醋：

- (1) 配製 3% 的蓮藕粉、樹薯粉芡粉液：取 20mL 冷水，加入 9g 的芡粉並攪拌均勻，取 280mL 熱水，加熱至 80°C 時倒入芡粉液，糊化後加入 1 mL 的醋酸。
- (2) 依實驗 3-1 步驟 4，配製不同比例之玉米粉勾芡液：取 20mL 冷水，加入 12g 的芡粉並攪拌均勻，再取 280mL 熱水，加熱至 85°C 時，倒入芡粉液使其糊化後，加入 1 mL 的醋酸。
- (3) 將步驟 1、2 之勾芡液分別於 0、5、10、15、30、60、90、120 分鐘時，測其溫度及黏度。

結果

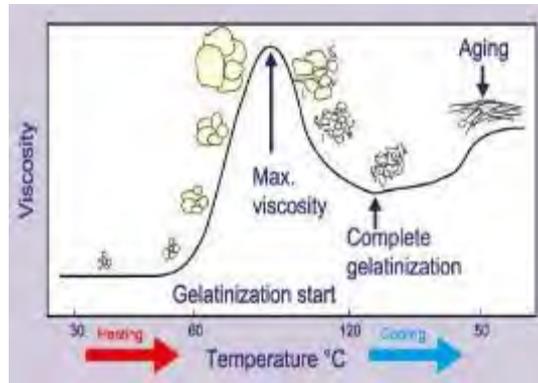


討論

- (1) 各勾芡液加醋酸後黏度皆明顯下降，糊化前先加醋於勾芡中的黏度比糊化後再加醋的黏度低許多。其中，於糊化後再加醋的勾芡液與未加醋的相比，其黏度值較晚上升，而糊化前先加醋的勾芡液黏度則不會上升。因為酸能促進水解，使得加入醋酸的勾芡液黏度明顯較未加醋的低，我們猜想，糊化前先加醋使得澱粉分子在尚未吸水澎潤前即接觸大量的氫離子，使澱粉快速水解成較小的分子，故難以糊化增稠，若於糊化後再加醋則澱粉已吸水澎潤，氫離子較難滲入，故水解量較少，勾芡黏度上升較慢。
- (2) 加酸的支鏈澱粉含量高的樹薯粉、玉米粉加支鏈澱粉及支鏈澱粉勾芡液黏度下降量相當大，因為支鏈澱粉的末端多、分枝多，故水解速度快。

陸、討論

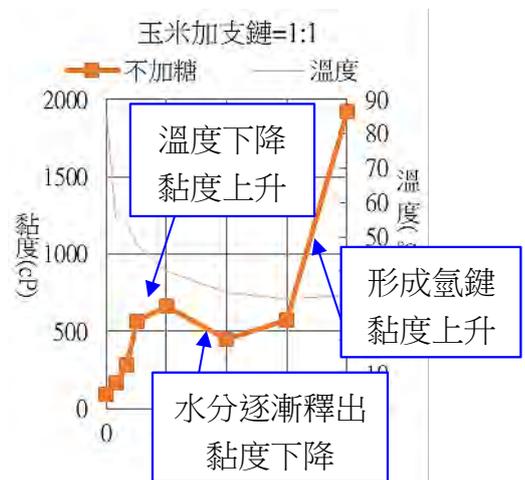
一、從糊化至老化的過程，其黏度對溫度的關係如下圖：



取自 <http://www.hosokawamicon.co.jp/en/applications/1047>

一般來說，由於直鏈澱粉空間障礙小，所以較支鏈澱粉易於老化，而根據我們的實驗結果顯示，直鏈澱粉含量低的勾芡液於 60-90 分鐘後會變得更黏稠，我們猜想可能是支鏈澱粉結構複雜，故分子間重新排列形成氫鍵所需時間長，故老化速度慢，其勾芡液放置一天後仍黏稠，而直鏈澱粉含量較高的勾芡液，則因為老化速度快，當勾芡液溫度不再改變時黏度亦維持定值。

二、我們發現，不同勾芡液的黏度對時間關係圖大致分為三區(如圖十八)，我們判斷一開始所測量到勾芡液黏度上升的原因主要來自溫度下降及直鏈澱粉鏈之間形成氫鍵結合，隨著澱粉鏈間形成的鍵結愈多，水分被排擠出的量愈多，使得黏度下降，最後，佔芡粉含量最多的支鏈澱粉緩慢的形成氫鍵，使黏度再度上升。



圖(十八) 勾芡液黏度對時間關係圖
(以玉米粉加支鏈澱粉為例)

三、由於勾芡液經過長時間的冷卻，老化形成凝膠及離水的現象使得相態分離，無法使用黏度計測其黏度，因此我們只取糊化後 2 小時、尚未產生相態分離的黏度進行討論。

柒、結論

- 一、利用直鏈澱粉和支鏈澱粉標準品建立直鏈澱粉檢量線趨勢線方程式為 $y = 0.6484 x + 0.1006$ 。經過定量之後，我們使用的芡粉中，直鏈澱粉的含量依序為蓮藕粉(31.9%)>玉米粉(28.8%)>太白粉(21.4%)>樹薯粉(18.2%)。
- 二、我們自製的旋轉式黏度計經過反覆測試後具有良好的再現性。
- 三、由玉米粉實驗結果發現，玉米粉顆粒小、糊化溫度高，應是玉米澱粉中直鏈含量多、氫鍵較強且結構較為緊密的關係，因此我們加熱至 85°C 仍無法使分子中交結的氫鍵斷裂而難以起糊，勾芡液中仍有未完全糊化的玉米澱粉顆粒，使得勾芡液透明性差、黏度低，老化後形成果凍般的凝膠。
- 四、若不加任何調味料的實驗結果可以發現，純玉米粉黏度幾乎不隨時間、溫度改變而改變；添加支鏈澱粉的比例愈高、黏度愈大，和樹薯粉有相似的情形。
- 五、定溫的情況下，支鏈澱粉含量愈高者，黏度較高，且溫度改變對其黏度影響較大。高溫時，直鏈分子運動速度較快，不利氫鍵形成，故直鏈澱粉含量較高的勾芡液不易產生老化現象。
- 六、經過攪拌後，各勾芡液的黏稠度皆有明顯的下降。其中，因為支鏈澱粉的結構較為複雜，需較大的轉速破壞其結構，才能使黏度下降。
- 七、鹽和蔗糖能使勾芡液的黏稠度有明顯的下降，延緩及降低老化離水的現象，然而並不是所有芡粉都適用，加鹽會提高玉米粉的黏度，加蔗糖則促進樹薯粉的老化。
- 八、酸能促進水解，使得勾芡液加入醋後黏稠度下降。且先加醋於勾芡中的黏稠度下降量更大並且不會隨著時間上升。而後加醋的勾芡則是需經較長的時間黏度才會上升。
- 九、根據實驗結果，勾芡的黏稠度除了受到芡粉中直鏈澱粉的比例影響之外，和芡粉的種類亦有很大的相關。我們建議製作勾芡料理時建議先加入芡粉糊化後再加入醋等調味料，避免勾芡液無法變稠。而以蓮藕粉勾芡穩定性較差，黏度易受時間、溫度、攪拌、加鹽糖酸而影響；以樹薯粉勾芡黏度隨著時間遞增；以玉米粉勾芡時需要較高的溫度才能使其黏稠。

捌、主要參考資料

1. 中興大學 普通物理實驗室。黏滯係數。2018年3月6日。
取自 http://experiment.phys.nchu.edu.tw/EZphysics/ex_g.htm
2. 甘油黏度表。2018年5月26日，取自 <http://food.ltn.com.tw/article/5051>
3. 鍾逢或(2014)。「泡膜」雲起 「膜」登寶「澱」—澱粉起泡、成膜性質的探討及應用。中華民國第54屆科展。
4. 周芳瑜、江庭瑩、卜嘉榕、何毓倫(2008)。碘液調色盤--直鏈澱粉定量方法之改良。中華民國第48屆科展。
5. 陳子寧、陳雅菁(2008)。「如膠似漆乎」-液體的黏滯性之研究。中華民國第48屆科展。
6. 王暉崙、邱耀慶、郭主歆(2007)。解開「澱粉~碘」的藍色密碼。中華民國第47屆科展。
7. 林怡慈、蘇雅婷、郭嘉元、劉曙豪(2002)。大驚失色~碘 - 澱粉混合液變色的研究。中華民國第42屆科展。
8. 巫秉修、羅悅瑜、江伯源(2010)。探討蓮藕澱粉理化性質及其回凝特性。台灣農學會報 11(2):150-171。
9. 張根生、孫靜、岳曉霞、何麗瑩(2010)。馬鈴薯澱粉的物化性質研究。OOD & MACHINERY, 26(5)。
10. 郭重吉(主編)(2016)。國中自然與生活科技 第四冊。南一版。
11. 黃廷瑋、張容華(主編)(2018)。國中自然與生活科技 第一冊。康軒版。
12. 史家瑩(主編)(2017)。國中自然與生活科技 第五冊。翰林版。

【評語】 030202

1. 題目有趣生活化。
2. 研究態度認真，值得鼓勵。
3. 能自製旋轉式黏度計並改良為二代很不錯，但有些數據與理論值差異大未說明。
4. 能完整討論勾芡現象及原理，並能解釋調味料何時加入勾芡效果較好，但是常用的太白粉沒有檢驗，有點可惜。

摘要

本研究旨在探討各類芡粉糊化後所形成的勾芡液黏度與芡粉性質之間的關係。首先觀察測量並比較各芡粉的澱粉粒大小、直鏈澱粉含量、糊化、老化現象等特性，並製作旋轉式黏度計，用以測得實驗中蓮藕粉、樹薯粉及不同支鏈澱粉比例的玉米粉勾芡液在不同條件下的黏度，並與芡粉特性做綜合討論。支鏈澱粉含量高的勾芡液黏度大、耐剪切；芡粉糊化前加酸即難起糊，加鹽、加蔗糖對不同種類芡粉的黏度變化有不同效果。

壹、實驗動機

每當我們在吃羹時，隨著時間過去，碗中的羹會慢慢變稀。上網搜尋得知羹變稀的現象稱為「返水」，而羹是由樹薯粉或玉米粉等芡粉加水勾芡而成，其黏稠度會隨著芡粉中「直鏈澱粉」和「支鏈澱粉」的比例而有所不同，於是我們利用國中理化所學的知識內容，設計出一連串的實驗研究不同芡粉勾芡液的黏度變化，並探討勾芡食譜上註明調味料加入的時機。

貳、實驗目的

- 一、觀察測量並比較各芡粉的特性
- 二、自製黏度計以測量液體的黏度
- 三、測量在不同變因下各勾芡液黏度的變化
- 四、探討芡粉特性與勾芡液黏度的關係

參、研究過程與方法

一、文獻探討

☆直鏈澱粉vs支鏈澱粉

直鏈澱粉 (amylose)的結構為較規則的螺旋狀，結構較為整齊，它可以佔有較少的體積，其糊化溫度較高。

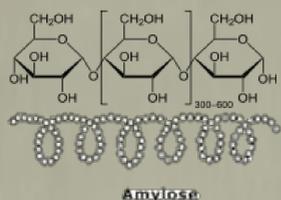


圖1 直鏈澱粉的鏈結方式與結構示意圖

支鏈澱粉(amylopectin)的結構較不規則呈現球狀，因而將較多的結構包在裡面，相對分子質量較大，佔有的體積也較大。

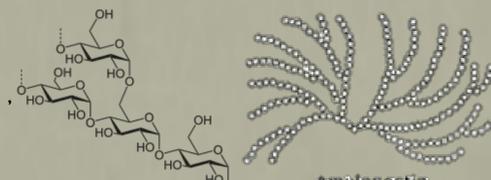


圖2 支鏈澱粉的鏈結方式與結構示意圖

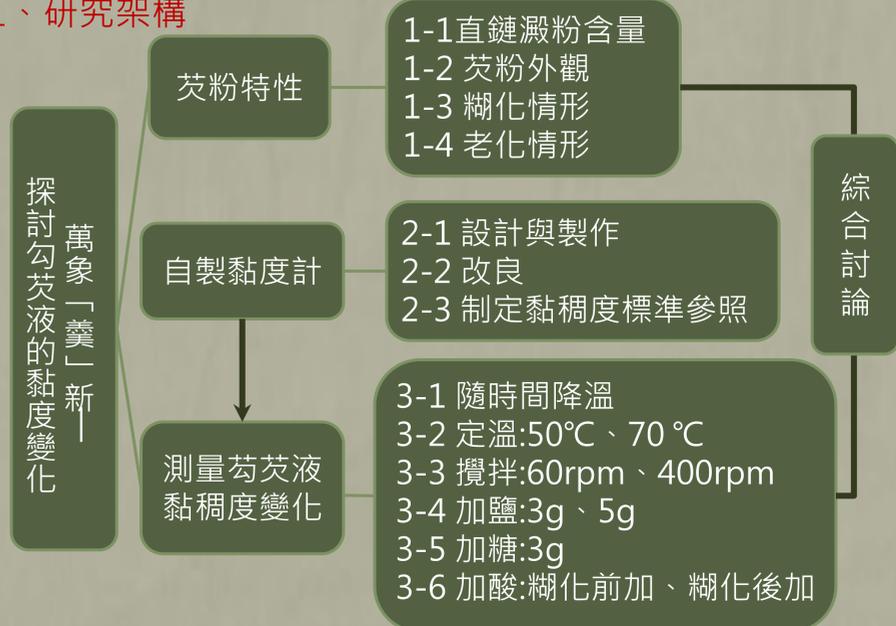
☆旋轉式黏度計

旋轉式黏度計是根據黏滯係數的定義所設計：利用重力帶動一在空心圓柱體中的圓柱體，此時介於此二圓柱體中之液體因摩擦(黏滯)力而被帶動旋轉，量度內圓柱體以定速轉動下所需施加的力矩，則可由定義計算出液體的黏滯係數。

☆澱粉從糊化到老化的過程

澱粉粒先吸水並膨脹，隨著溫度升高，澱粉粒破裂，水分子進入分子結構中，直鏈澱粉溶出，結構變得鬆散而成為黏稠液體，此現象稱為糊化現象。冷卻後，澱粉分子在降溫下又排列成序，且保留許多水分子在其中，故澱粉液看起來形成凝膠狀，隨著時間，支鏈澱粉中枝與枝間及直鏈澱粉間的水分排出，此過程為澱粉的老化(回凝)。

二、研究架構

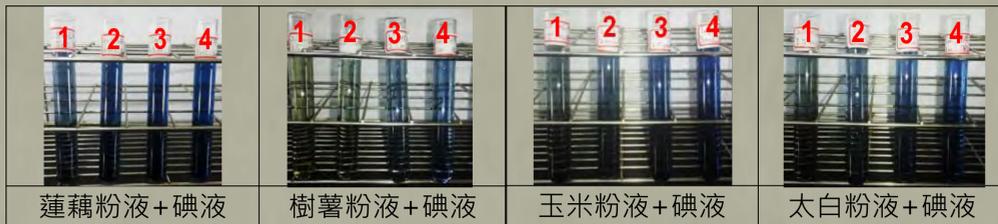


研究(一) 觀察、測量並比較各芡粉的特性

實驗1-1 測定各芡粉中直鏈澱粉的含量

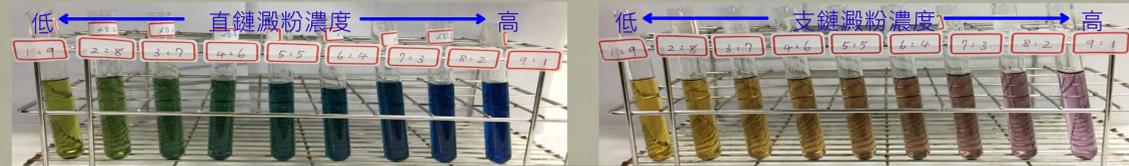
1.觀察各類芡粉與碘液在不同比例下的呈色情形

試管編號	1	2	3	4
0.02%芡粉液 (mL)	1.5	2	2.5	3
0.001N碘液 (mL)	2.5	2	1.5	1
水 (mL)	4	4	4	4



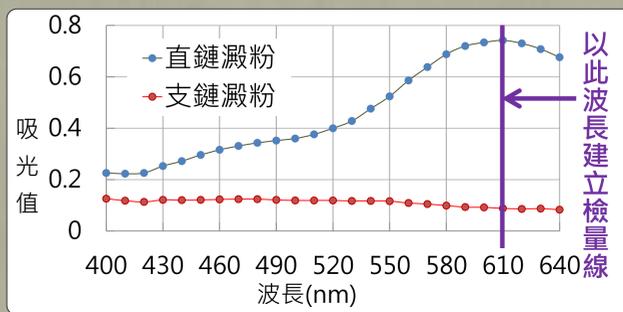
2.取得製作直鏈澱粉濃度檢量線最佳的溶液比例

0.01%直鏈澱粉(mL)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.001N碘液(mL)	9	8	7	6	5	4	3	2	1



直鏈澱粉選擇呈色為藍色偏綠的澱粉液：碘液體積比6：4為佳。
支鏈澱粉：碘液體積比需大於6：4才能看得出有偏紫的顏色。

3.測定直鏈澱粉、支鏈澱粉的吸收光譜



4.直鏈澱粉檢量線之建立

直鏈澱粉含量百分比	0	20%	40%	60%	80%	100%
直鏈澱粉(mL)	0	2	4	6	8	10
支鏈澱粉(mL)	10	8	6	4	2	0

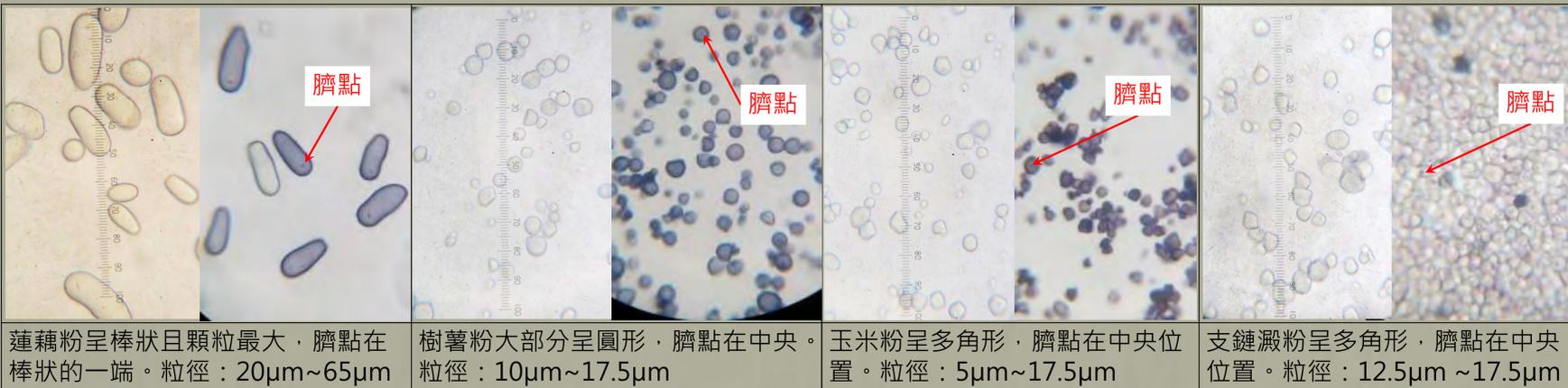


5.定量各芡粉中直鏈澱粉與支鏈澱粉的比例

做法：依實驗1-2芡粉液與碘液比例配製樣品，將各芡粉吸光值代入檢量線趨勢線方程式，求各芡粉中直鏈澱粉和支鏈澱粉含量比例如下表。

芡粉	蓮藕粉	樹薯粉	玉米粉	太白粉
吸光值	0.307	0.218	0.287	0.239
直鏈澱粉比例	31.9%	18.2%	28.8%	21.4%
支鏈澱粉比例	68.1%	81.8%	71.2%	78.6%

實驗1-2 觀察芡粉的外觀

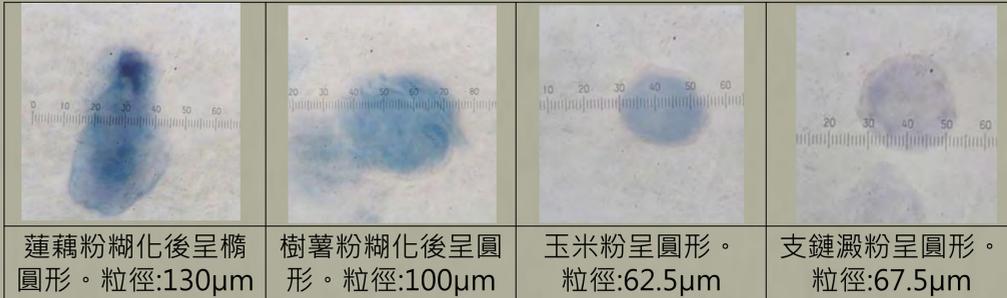


- 不同植物來源的澱粉粒形狀不同，而支鏈澱粉來源是玉米，故形狀和玉米粉十分相似。
- 蓮藕粉、樹薯粉和玉米粉澱粉粒加碘液後顏色變化明顯，呈藍色，支鏈澱粉則呈淡的紫紅色，由此可知，碘較易與直鏈澱粉結合成藍色的錯合物，與支鏈澱粉的親和力較小。

實驗1-3 觀察芡粉糊化後的外觀

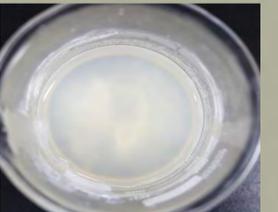


- 蓮藕粉呈深紅色，微透光
- 樹薯粉呈淡米黃色，微透光
- 玉米粉呈不透明白色
- 支鏈澱粉透明度最高



- 蓮藕粉及樹薯粉澱粉粒破裂，周圍呈藍色反應，可知直鏈澱粉溶出。而玉米粉及支鏈澱粉之澱粉粒較完整、較難糊化。
- 直鏈支鏈澱粉比例不同的勾芡液透明度不同，蓮藕粉、樹薯粉和支鏈澱粉的支鏈澱粉含量高，糊化後的顏色較為透明，玉米粉則因直鏈澱粉含量多呈不透明的乳白色。

實驗1-4 觀察勾芡液老化後的情形

	蓮藕粉勾芡液	樹薯粉勾芡液	玉米粉勾芡液
放置1天後	 上層結成膜，下層變稀	 上層結成膜，下層變稀	 呈果凍狀，但最底層帶有些微的水分
放置3天後	 析出大量水份，邊緣及上方留有一層厚約2mm的皮膜	 析出大量水份，邊緣及上方留有一層厚約2mm的皮膜	 上層乾裂成塊，下層有水分

觀察靜置兩天後之勾芡液上、下層與碘液的呈色情形：

試管編號	1	2	3	4	5	6
樣品	樹薯粉上層	樹薯粉下層	蓮藕粉上層	蓮藕粉下層	玉米粉上層	玉米粉下層

加入碘液攪拌後	5分鐘後	30分鐘後	1天後
			

隨著時間經過，勾芡液與碘液反應形成的顏色漸淡，我們判斷原因一是碘液昇華，二是直鏈澱粉會老化凝聚而沉降，因此老化程度愈高、上清液顏色愈淡。

研究(二) 自製黏度計測量測液體黏度

實驗2-1 自製旋轉式黏度計

第一代旋轉式黏度計：

構想：參考文獻的旋轉式黏度計原理，透過定滑輪使砝碼所受的重力施加力矩帶動黏度計轉子轉動，而容器內盛裝的待測液體因摩擦(黏滯力)被帶動旋轉。當砝碼帶動轉子轉動而受到的液體黏滯力逐漸增大至與重力相等時，砝碼所受的合力為零將做等速度(終端速度)運動，此時即可利用黏滯係數的定義推得公式如下：

$$\eta = \frac{(b^2 - a^2)gR^2}{4\pi a^2 b^2 l} \cdot \frac{m}{V} = A \cdot \frac{m}{V}$$

測量液體黏度做法：

取大型紙板定出長度參考(圖3)，將待測液體盛裝於底片盒中，棉線的另一端通過固定於桌緣的定滑輪，並吊掛砝碼，利用攝影機拍下砝碼自由落下的過程(圖4)，以Tracker軟體進行分析，得到砝碼掉落的終端速度。

欲測液體黏稠度時，只要將待測液體裝進底片盒，置入黏度計，將吊掛於棉線上的砝碼質量(m)及砝碼掉落的終端速度(V)代入公式即可求得 η (黏度係數)。

實驗2-3 制定黏度標準

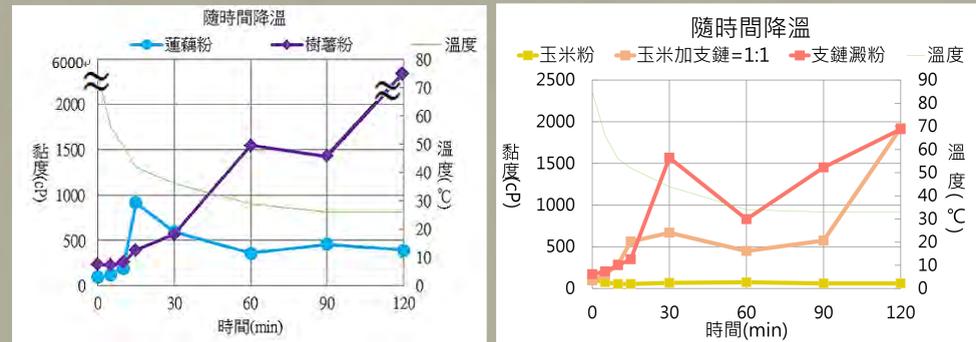
做法：查表，利用甘油在不同溫度及濃度下具有不同的黏度(理論值)，配置出各黏度參照的標準品，再以自製黏度計測量其黏度(測量值)。

我們發現甘油黏度理論值和測量值之間符合乘幂關係，故只要將自製黏度計測得的測量值代入此乘幂關係趨勢線方程式： $y = 0.0097x^{1.9882}$ ，即可換算勾芡液的實際黏度。

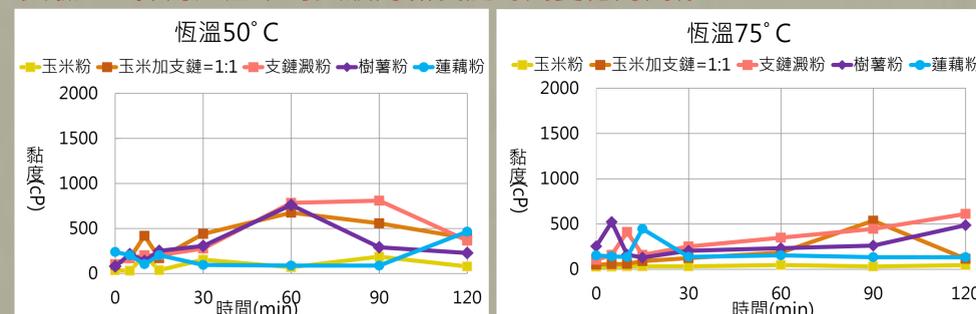
研究(三) 探討在不同變因下各勾芡液黏度的變化

做法：配置4%的芡粉液，觀察不同變因下各勾芡液隨時間的黏度變化，其中蓮藕粉液及樹薯粉液於加熱至75°C時開始測量其黏度，玉米粉液、玉米粉加支鏈澱粉液、支鏈澱粉液於加熱至85°C開始測量其黏度。

實驗3-1 探討勾芡液的黏度隨時間溫度變化的關係



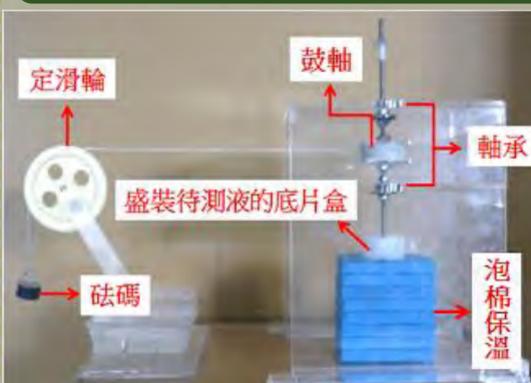
實驗3-2 探討定溫下勾芡液的黏度隨時間變化的關係



實驗2-2 改良自製旋轉式黏度計

第二代旋轉式黏度計：

構想：由於第一代黏度計棉線纏繞梭子半徑不一，可能影響實驗結果，因此第二代的黏度計，利用相同的原理設計，但使用半徑較大的壓克力製鼓軸，並利用Logger Lite軟體取代Tracker進行分析，改善終端速度分為多段及分析耗時的缺點。



第二代自製黏度計裝置

當砝碼下落通過感應器時，會遮斷紅外線訊號，LED燈同時發亮，產生大的電流訊號，數據機將電流訊號傳至電腦，並以此紀錄砝碼通過各感應器的時間(圖6)。

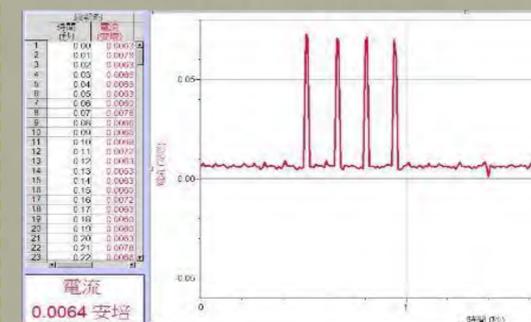


圖6 甘油的数据接收圖

測量液體黏度做法：

用瓦楞紙版拼接，在左側每隔13公分裝設紅外線發射器，在右側相對應位置加裝感應器，並接上LED燈，連接至數據機。

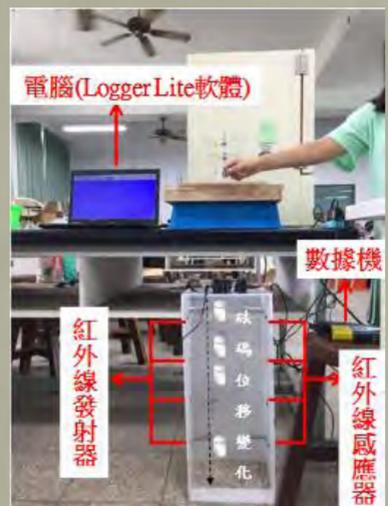
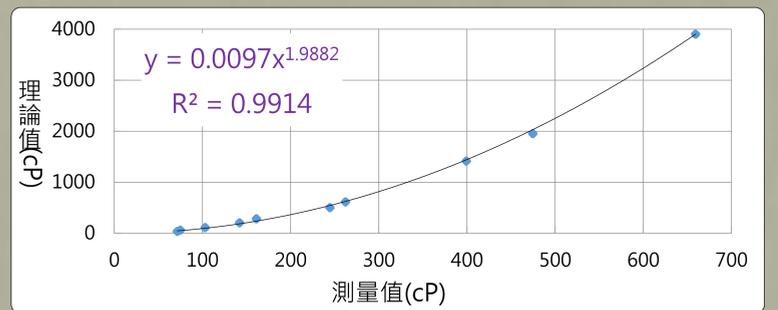


圖5 第二代黏度計測量過程

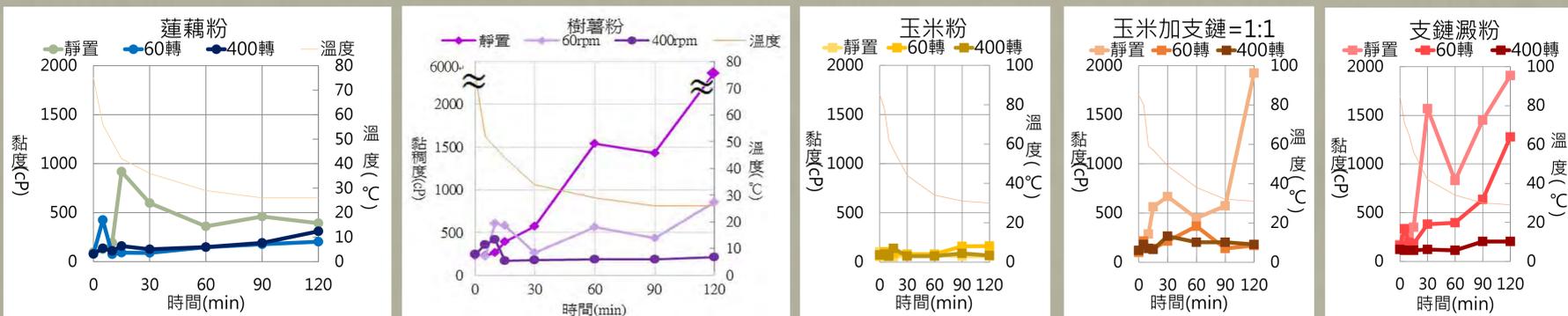
利用Logger Lite軟體輔助算得終端速度值，與懸掛的砝碼重代入黏滯係數公式，即可求得待測液體黏度。



- 隨著溫度降低，液體中分子運動的平均速度減小，與臨近分子的接觸時間變長，而使得液體的黏度隨溫度降低而上升。
- 直鏈澱粉含量較低的樹薯粉，其黏度變化與時間、溫度具有明顯關係，放置時間愈久、溫度愈低、黏度愈大。
- 純玉米粉黏度幾乎不隨時間、溫度改變而改變；添加支鏈澱粉的比例愈高、黏度愈大，且支鏈澱粉比例達85.6%以上者，隨時間經過變得更黏，和樹薯粉有相似的情形。
- 支鏈澱粉比例愈高者，在三維網狀空間複雜的支鏈結構重新排列形成氫鍵，表現出愈黏稠的特性。

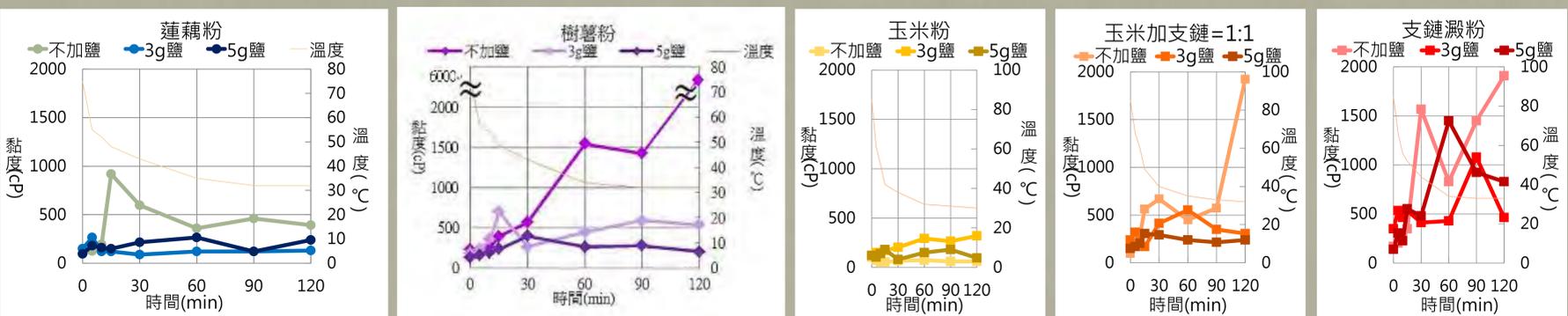
- 各勾芡液於恆溫50°C時的黏度大於恆溫70°C，此結果應與溫度低、分子運動平均速率低有關，且支鏈澱粉含量較高者，溫度改變對其黏度影響較大。
- 恆溫70°C時，各勾芡液黏度較小且隨時間的變化較小，可能是芡粉糊化後在維持高溫的情況下澱粉粒子破裂，而澱粉鏈在高溫時運動速率快，較難形成穩固的氫鍵；恆溫50°C時，發現支鏈含量愈高者，黏度下降量較少。
- 於恆溫50°C、70°C下，玉米粉的黏度皆沒有明顯的變化。

實驗3-3 探討勾芡液的黏度與攪拌速率的關係



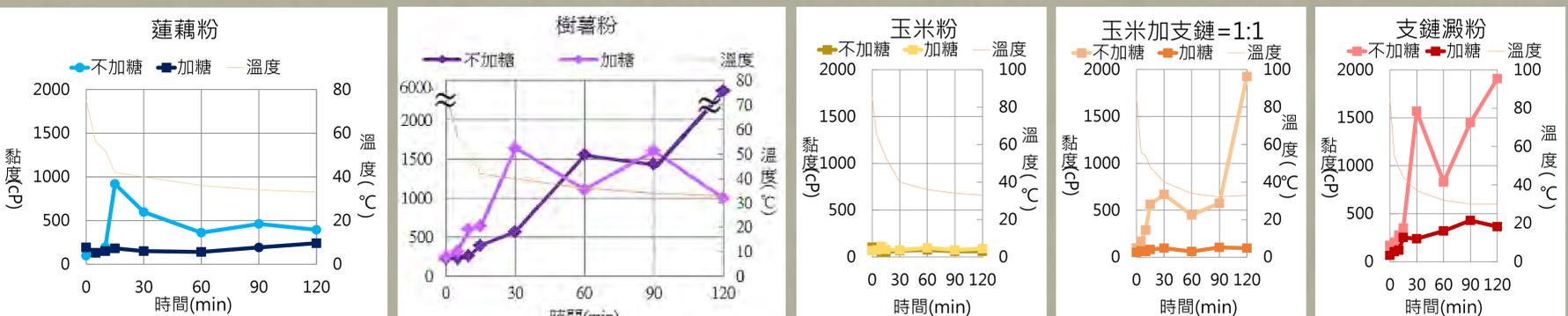
1. 勾芡液經過攪拌後黏度皆會下降。轉速愈快則剪切作用使澱粉分子鏈結斷裂愈嚴重，降低了澱粉分子間的作用力使黏度下降，在400rpm轉速下，由於剪切作用劇烈，當大部份的澱粉分子鏈變短，勾芡的黏度小且變化不明顯。
2. 支鏈澱粉含量愈高者，轉速較快時，才能使黏稠度下降，推測是支鏈澱粉結構較為複雜，使得須在高轉速情況下才能完全破壞其結構，故支鏈澱粉耐剪切的穩定性較直鏈澱粉好。

實驗3-4 探討加入鹽之勾芡液黏度的變化



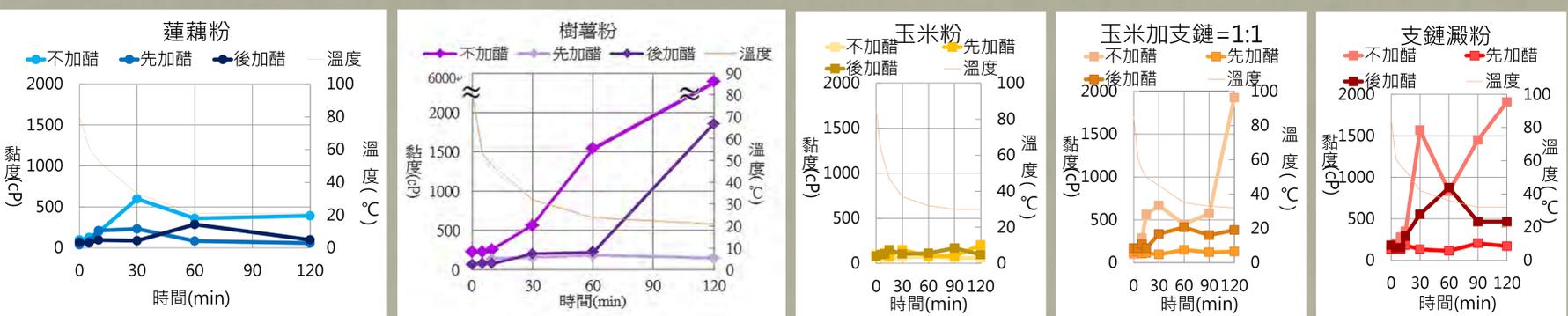
1. 加鹽有抑制澱粉黏度的效果，但並非在所有種類的澱粉中皆是。
2. 由於直鏈澱粉空間阻礙小，老化的速度較支鏈澱粉快，我們發現在蓮藕粉中加鹽亦有效的減緩凝膠產生，可能是鹽解離形成的離子阻礙了蓮藕澱粉的取向而抑制了糊化後的澱粉間氫鍵的生成，減低老化現象的產生。
3. 在玉米粉加支鏈澱粉及支鏈澱粉中加鹽，可使勾芡液經較長時間黏度才明顯的上升，確定加鹽亦能延緩支鏈澱粉產生離水的現象，然而鹽的濃度與老化時間並非正相關。

實驗3-5 探討加入糖之勾芡液黏度的變化



1. 蔗糖分子有羥基，且較澱粉親水性大，形成勾芡液時會與澱粉爭奪水分，因此糊化較差，而糊化後蔗糖與其它澱粉分子競爭形成氫鍵，降低澱粉分子間以氫鍵結合的數目，抑制了勾芡液的老化。
2. 蔗糖亦有抑制澱粉糊化的效果，但對於樹薯粉卻是促進糊化及老化的發生。

實驗3-6 探討加入醋酸之勾芡液黏度的變化



1. 於糊化後再加醋的勾芡液與未加醋的相比，其黏度值較晚上升，而糊化前先加醋的勾芡液黏度則不會上升。因為酸能促進水解，使得加入醋酸的勾芡液黏度明顯較未加醋的低，猜測是因為糊化前先加醋使得澱粉分子在尚未吸水膨潤前即接觸大量的氫離子，使澱粉快速水解成較小的分子，故難以糊化增稠，若於糊化後再加醋則澱粉已吸水膨潤，氫離子較難滲入，故水解量較少，勾芡黏度上升較慢。
2. 加醋於支鏈澱粉含量高的樹薯粉、玉米粉加支鏈澱粉及支鏈澱粉勾芡液黏度下降量相當大，因支鏈澱粉的末端多、分枝多，故水解速度快。

肆、討論

- 一. 我們發現，不同勾芡液的黏度對時間關係圖大致分為三區(圖7)，我們判斷一開始所測量到勾芡液黏度上升的原因主要來自溫度下降及直鏈澱粉鏈之間形成氫鍵結合，隨著澱粉鏈間形成的鏈結愈多，水分被排擠出的量愈多，使得黏度下降，最後，佔芡粉含量最多的支鏈澱粉緩慢的形成氫鍵，使黏度再度上升。
- 二. 由於勾芡液經過長時間的冷卻，老化形成凝膠及離水的現象使得相態分離，無法使用黏度計測其黏度，因此我們只取糊化後2小時、尚未產生相態分離的黏度進行討論。

伍、主要結論

- 一. 根據實驗結果，勾芡的黏度和芡粉的種類有關，另外也會受到芡粉中直、支鏈澱粉的比例影響，支鏈澱粉愈多、勾芡液愈黏稠。
- 二. 我們建議製作勾芡料理時建議先加入芡粉糊化後再加入醋等調味料，避免勾芡液無法變稠。而以蓮藕粉勾芡穩定性較差，黏度易受時間、溫度、攪拌、加鹽糖酸而影響；以樹薯粉勾芡黏度隨著時間遞增；以玉米粉勾芡時需要較高的溫度才能使其黏稠。

陸、主要參考資料

- 一. 中興大學普通物理實驗室。黏滯係數測定。2018年3月6日。取自http://experiment.phys.nchu.edu.tw/EZphysics/ex_g.htm
- 二. 鍾逢或(2014)。「泡膜」雲起「膜」登寶「澱」- 澱粉起泡、成膜性質的探討及應用。中華民國第54屆科展。
- 三. 王暉崙、邱耀慶、郭主歆(2007)。「解開「澱粉~碘」的藍色密碼」。中華民國第47屆科展。
- 四. 郭重吉(主編)(2016)。「國中自然與生活科技第四冊」。南一版。



圖7 勾芡液黏度對時間關係圖 (以玉米粉加支鏈澱粉為例)