第二十三屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA23-490

隊伍名稱：藍碘試劑的學問

作品名稱：藍碘試劑的學問

The Discussion for the Preparation of Blue Amylose-Iodine and Improving Its Talent at serving as a Quick Test Reagent

參賽類別：化學

關鍵字：可溶性澱粉、藍碘試劑、試紙

摘要.....1
壹、研究動機.....1
貳、研究目的.....1
參、研究方法-實驗設計.....2
肆、研究過程與初步結果.....3
討論一、確認本研究使用的市售碘液濃度.....3
討論二、確認溫度對配製藍碘標準溶液的影響.....4
討論三、確認不同濃度澱粉液的過濾速度以此限制澱粉液的最高濃度.....6
討論四、確認 [I_2-amylose] 吸收光譜尋找偵測波長以及限制碘液用量上限.....6
討論五、探討澱粉液與碘液以不同的混合速率得到之藍碘溶液.....9
討論六、以澱粉分子量證明上述累進滴定法的數據可信度並解釋藍碘機制.....10
討論七、探討不同澱粉種類和碘作用之藍碘溶液.....13
討論八、探討藍碘溶液的時間穩定性.....15
討論九、藍碘溶液食品應用效果測試及未來展望.....16
討論十、開發藍碘試紙(使用澱粉沉澱物製作).....19
討論十一、藍碘試紙的應用情況.....21
伍、決賽新增研究內容.....23
陸、結論.....27
柒、未來展望.....27
附錄、參考文獻.....28
附錄、研究器材與藥品.....29
附錄、實驗步驟.....30
討論一、確認本研究使用的市售碘液濃度.....30
討論二、確認溫度對配製藍碘標準溶液的影響.....30
討論三、確認不同濃度澱粉液的過濾速度以此限制澱粉液的最高濃度.....31
討論四、確認 [I_2-amylose] 吸收光譜尋找偵測波長以及限制碘液用量上限.....31
討論五、探討碘液與不同濃度澱粉液反應得到之藍碘溶液.....31
討論六、探討澱粉液與碘液以不同的混合速率得到之藍碘溶液.....32
討論七、以澱粉分子量證明上述累進滴定法的數據可信度並解釋藍碘機制.....32
討論八、探討不同澱粉種類和碘作用之藍碘溶液.....33
討論九、探討藍碘溶液的時間穩定性.....33
討論十、藍碘溶液食品應用效果測試.....33
討論十一、使用澱粉沉澱物製作藍碘試紙.....34
附錄、原始數據.....35
附錄、決賽新增數據.....38

摘要

為了在食安議題能夠有所貢獻。本研究旨在建立使用藍碘作為偵測試劑的方法學，製備具有良好再現性的直鏈澱粉-碘錯合物，並掌握所有可能造成顏色偏差的隨機因素，最後還將其製作成可廣泛應用的試紙。

實驗參考過去所有藍碘為題的科學文獻，均沒有人去解釋澱粉-碘錯合物在以簡單混合時會造成顏色偏差的問題，這是藍碘很常被使用來作為指示劑卻無法成為科學上正統比色試劑的原因。本研究從碘濃度、澱粉濃度、系統水量等切入，終於找到規則性，確立藍碘試劑的合成 SOP，並進一步討論其穩定性以及褪色機制，最後製作出藍碘的顏色檢量線。

本研究將藍碘應用於免洗筷的快速篩檢，還進一步發現其具有辨別豆漿新鮮性的能力。本研究還發現使用食鹽來對藍碘的膠體進行凝聚所形成之沉澱物可以製作成不脫落的藍色試紙，擴大其應用層面。

壹、研究動機

由於近期食安問題層出不窮，想開發一種能廣泛檢測各種物質的試劑提供民眾使用。在閱讀了大量的資料後，從參考文獻(可溶性澱粉定量法辨別蜂蜜優劣)中得到啟發，發現碘和澱粉所產生的藍碘溶液能夠檢測所有能使其褪色的物質(如：醣類、竹筷殘留之漂白劑、豆漿新鮮程度)，符合廣泛應用以及接近大眾的優點，於是我們進行了深入研究，想製作出穩定的檢測試劑！最終經過大量的研究、查詢資料、不同的證明實驗後，確立了藍碘比色試劑的 SOP，並延伸使用鹽析作用，製作出了比試劑更方便攜帶的藍碘試紙。

貳、研究目的

1. 探討製作藍碘比色試劑之所有影響因素
2. 建立藍碘比色試劑之配置 SOP
3. 探討不同澱粉源替代所製的藍碘比色試劑
4. 探討藍碘比色試劑之應用
5. 自製藍碘試紙，並探討其應用

參、研究方法-實驗設計

研究架構：

從參考文獻(可溶性澱粉定量法辨別蜂蜜優劣)作為啟發，我們想利用碘和澱粉所產生之藍色溶液作為檢驗餐品中是否含有抗氧化物質之比色試劑，然而卻在配製過程中遇到了一些困難。

一個良好的檢測試劑所具有的特色必須是每一次配製的條件及結果必須相同，但實驗起初就發現直接將碘與澱粉混合所合成的藍碘物質，沒辦法每一次都做出相同顏色，也就是再現性不好，所以實驗認為，即使在條件相同之情況下(溫度相同、比例相同)，在混和過程中仍有其他不確定因素影響結果(影響藍碘顏色深淺)。

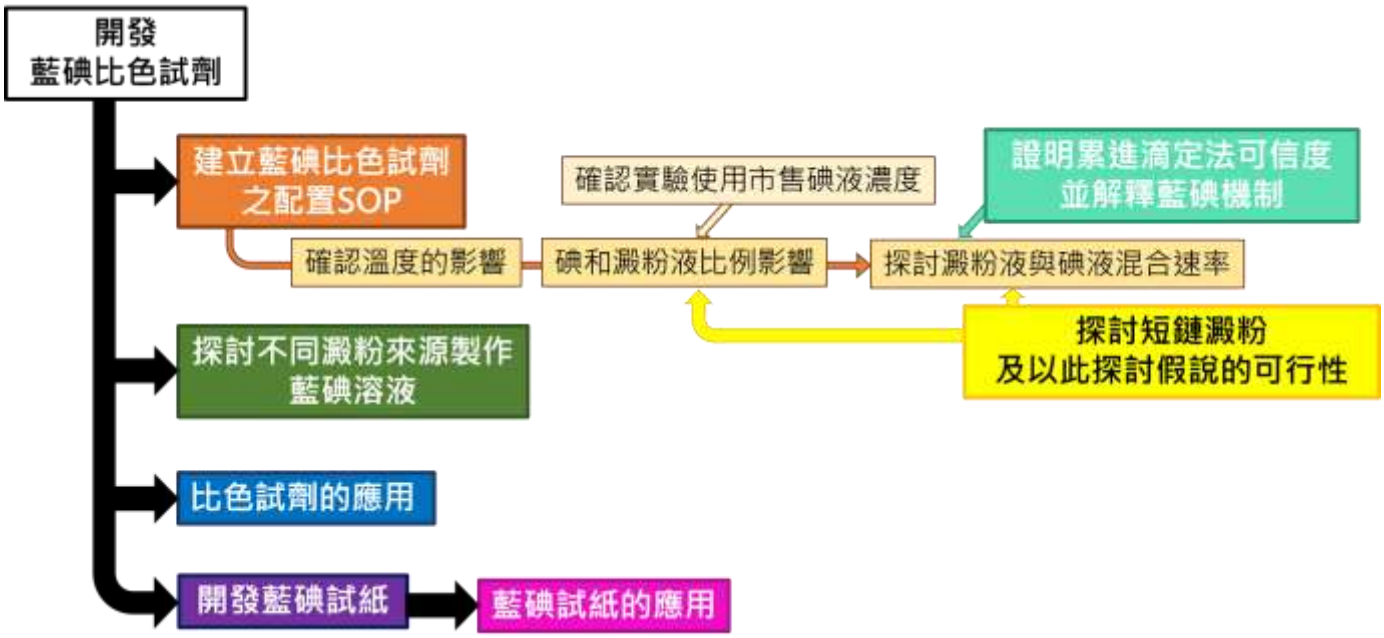
為了找出影響的因素，實驗逐步從溫度、澱粉液濃度、與碘混合速率等因素著手，成功找到之前沒辦法有再現性的原因，並進一步使用各種方法(雙氧水、短鏈澱粉)驗證研究所提出之假說。

確定所有影響因素後，實驗確立了藍碘比色試劑的配製 SOP，接著就是進一步尋找澱粉源的替代選擇。實驗選擇了一些常見的例如筋麵粉、植物澱粉等來作為澱粉源，並探討他們對於所製成藍碘試劑的差異。

實驗從以高筋麵粉作為澱粉源來製作藍碘試劑的實驗結果作為靈感，首先想到含有蛋白質對於藍碘的影響，因此提出藍碘試劑可能可以用來檢驗像是豆漿的新鮮程度。

本研究的藍碘的用途很廣，可以用來檢驗一切能使藍碘褪色的物質，像是竹筷殘留的漂白劑等，但畢竟試劑並不容易保存，雖然試劑可以用於比色定量，但對於民眾使用仍然不是那麼方便。

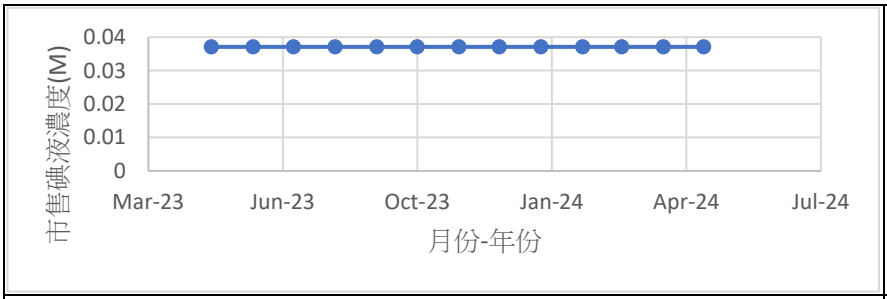
實驗進一步想將藍碘做成藍碘試紙，主要是希望能提供民眾快速使用。實驗之初，我們發現藍碘溶液其實並沒有那麼容易可以附著在紙張上，即使是使用像圖畫紙表面凹凸不平。因此研究嘗試要讓藍碘物質能產生較大的顆粒，實驗利用高分子的特性，加入鹽類使其發生鹽析，就可以製得藍碘試紙。



肆、研究過程與初步結果

討論一、確認本研究使用的市售碘液濃度

本研究使用的碘液牌子如下，為了確保其濃度維持不變，必須防止碘液照射到紫外線以及與氧氣過度接觸(有鑑於文獻第 58 屆中小學科展高中化學科魔法藥「碘」所提)，實驗也會在每次實驗監控碘液濃度，實驗發現：只要使用後蓋上蓋子，並且依照包裝指示不要放置在太陽下加熱。



【圖】每次使用時標定的濃度每個月的長條圖

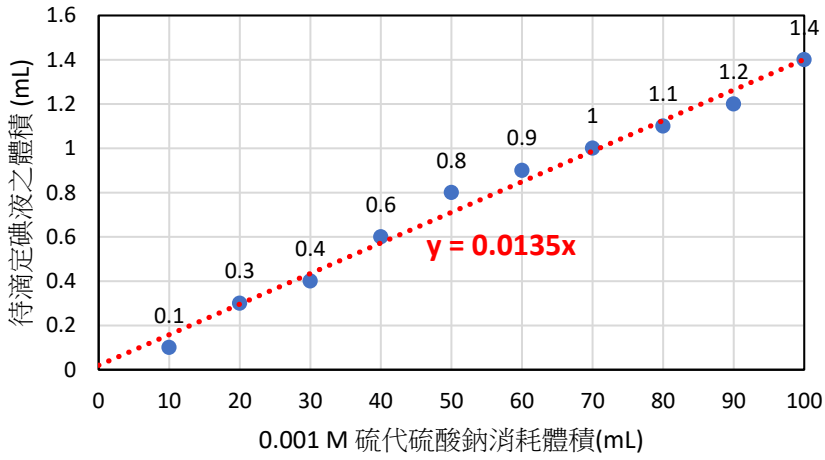
【圖】本研究所使用的碘液牌子

本研究會使用市售的碘液來做實驗，因此事先使用標準品來進行一系列的滴定，來得到準確的市售碘液濃度。

實驗先利用草酸鈉標定過錳酸鉀，再用標定後的過錳酸鉀來標定硫代硫酸鈉，並將硫代硫酸鈉調整至 0.001 M，最後使用硫代硫酸鈉來標定市售碘液得知其[I_2]=0.0371 M。
方程式如下：

(1) $5C_2O_4^{2-} + 2MnO_4^- + 16H^+ \rightarrow 10CO_2 + 2Mn^{2+} + 8H_2O$

(2) $5S_2O_3^{2-} + 8MnO_4^- + 14H^+ \rightarrow 10SO_4^{2-} + 8Mn^{2+} + 7H_2O$



【圖】以 0.001M 硫代硫酸鈉來滴定之不同體積的市售碘液之滴定體積關係迴歸線

(3) $I_2 + 2S_2O_3^{2-} \rightarrow 2I^- + S_4O_6^{2-}$

由滴定方程式得知氧化劑與還原劑作用達當量點時莫耳數比 n(I_2)：n($S_2O_3^{2-}$)=1：2
再由滴定體積關係迴歸線統計出，達滴定終點之體積比 V(I_2)：V($S_2O_3^{2-}$)=0.0135：1

經計算後，市售碘液濃度[I_2] = $0.001 \times \frac{1}{2} \div 0.0135 = 0.0371$ M，確認濃度以方便後續實驗計算。

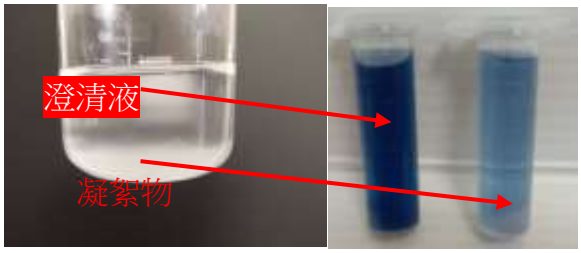
討論二、確認溫度對配製藍碘標準溶液的影響

首先本研究為了確保每次都能配製出「相同色深」的藍碘溶液，需要先確定澱粉液「熱製」好之後，大約要「降溫到 T 度」後再使其與選擇的市售碘液混合，才不會對配製的藍碘標準液造成影響。

一、熱製

	澱粉液沒有事先煮沸	澱粉液有事先煮沸
先備知識	使用已知濃度的碘液直接與常溫澱粉粉體在冷水中進行混和不會變色。因此澱粉液的正常配製，通常需要先將澱粉在冷水中「分散後」再進行煮沸，值得一提的是，不能先將水煮沸然後才加入澱粉，這樣澱粉會直接勾芡而混濁，而無法製成「澄清」的澱粉液。這樣會導致後來做出的藍碘溶液也是混濁的。	澱粉顆粒是澱粉分子間因為氫鍵作用而纏在一起，文獻(跟著鄭大師玩科學烘焙的科學（二）澱粉糊化)提若加熱至 65~90℃可使水滲入進而拆開其團聚形成單一水合澱粉的狀態稱為糊化，通常底部會殘留半糊化的沉澱物，可以透過過濾去除。
解釋	因為澱粉主要是鏈狀聚合物，在其還是固態粉體的時候由於聚合物性質 Random walk 直鏈會交纏在一起，使得澱粉的葡萄糖鏈沒辦法去纏繞 I_2 分子而配位形成[I_2-amylose]藍色錯合物。因此通常，我們製作澱粉溶液時，需要先將澱粉在水中加熱，透過熱能提高聚合物的自由度，使其原本纏繞一起的聚合物鏈可以拆開、散開，這樣的澱粉水溶液才可以顯得更清澈。	**【遇到的問題】** 但即使我們事先將澱粉溶液稍微冷卻，再混和碘液，顏色依然有所變動。意思是高溫下澱粉液要變成藍黑色所需碘量有時多有時少，每次的藍碘溶液使用碘量及顏色並不相同。

實際測試之澱粉液外觀



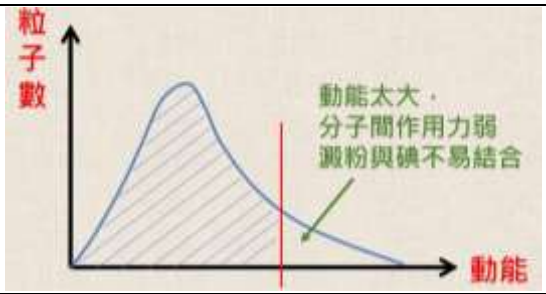
生澱粉(本研究是使用試藥級可溶性澱粉)經過熱水燙過(本研究是浸泡 70~80℃左右熱水)之後降溫的澱粉水溶液會像左圖，上層液若直接加入碘液會變成較藍的溶液，反之下層的類似凝絮的沉澱物也會與碘變成藍色，但是顏色明顯淡了許多。可以了解到上層是已經被熱水拆開的單一水合澱粉，顯得澄清；而下層應是尚未完全糊化的仍較大的澱粉顆粒。

以上與文獻(解開「澱粉~碘」的藍色密碼，第 47 屆中小學科展)結果符合，文獻還提到以 70℃可以有效從澱粉粒中溶出澱粉鏈，80℃時溶出直鏈澱粉效果最佳，而 90~100℃則會破壞澱粉。而本研究著重於「加熱後降溫」對於藍碘顏色的影響。

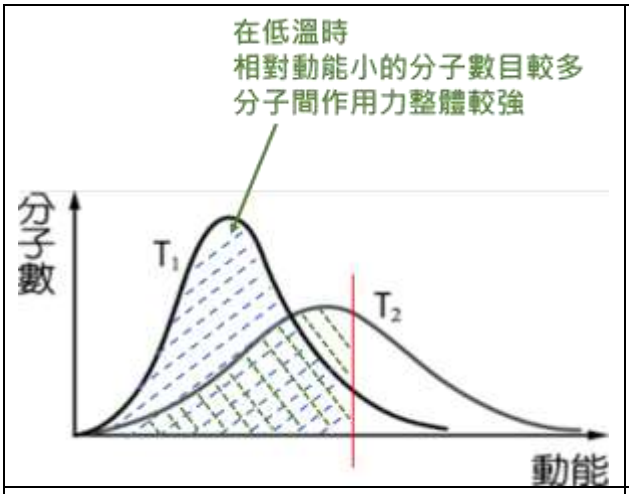
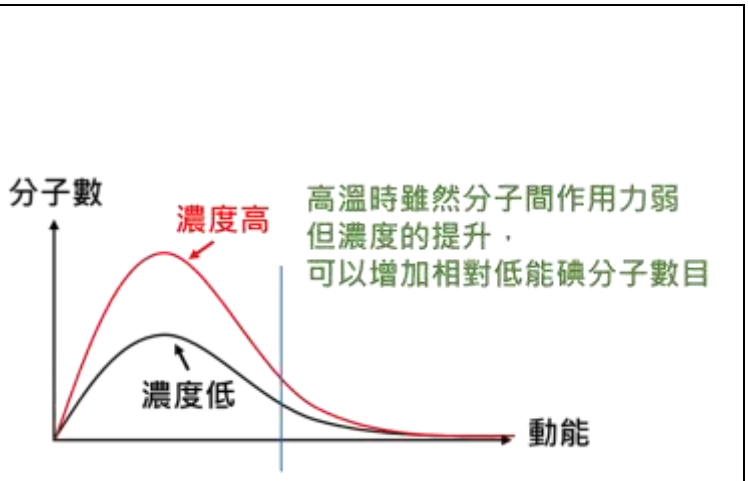
二、降溫 初步假設熱製好的澱粉液還需要降溫到 T 度以下：

1. 假設降溫至 T℃之澱粉液與 >T℃之澱粉液相比，可以產生具有較大色深斷層，表示澱粉與碘分子的結合有一個臨界溫度。
2. 假設降溫至 T℃之澱粉液與 >T℃之澱粉液相比，產生相同色深的藍碘時所需要的碘量有一個使用量斷層，表示澱粉與碘分子的結合有一個臨界溫度。

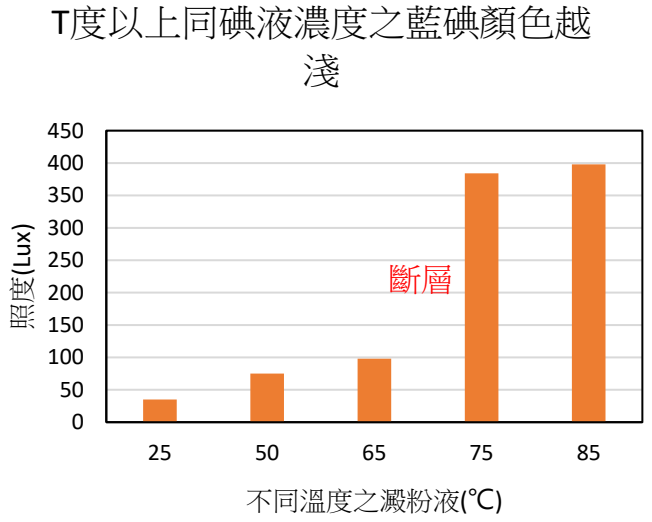
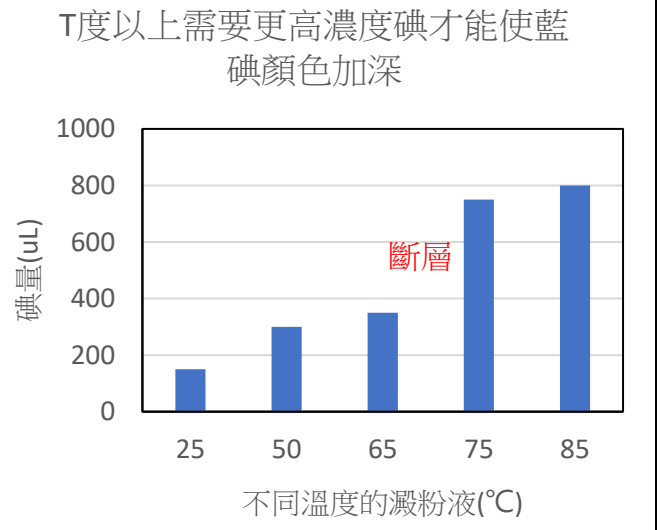
這個 T 溫度影響了這些物質的動能分布曲線，由於高溫時藍碘顏色較淡，降溫時顏色又加深，猜測動能太大的物種不利於藍碘生成。



假設的學理根據：

	
解釋：溫度太大時，則相對低能的物種數目較少，整體的分子間作用力可以作用的位置點較少使結合較弱，導致不利於藍碘生成。	解釋：即使高溫時相對低能的物種特別少，但是當碘濃度提高時，仍可以增加相對低能的碘分子數目，因此高溫時只要加的碘液夠多，澱粉仍可以變成藍色。

實驗結果：

	
【圖】降溫至不同溫度的澱粉液加入等量的碘液之藍碘的照度(照度越高表示藍色越淡)	【圖】降溫至不同溫度的澱粉液變成照度 001 的藍碘，所需加入的碘液量
證明 70℃附近以上，需要更多的碘才能得到相同顏色(照度 001)	證明 70℃附近以上，需要更多的碘才能得到相同顏色(照度 001)

小結論：

1. 在 65~75℃之間某個溫度是澱粉鏈與碘分子結合的臨界溫度。
2. 在此溫度之上，澱粉不容易與碘形成藍碘，但是加入兩倍或是巨量的碘，仍可以讓高溫的澱粉液變成藍色，並非像課本所說 70℃以上藍碘會褪色，實驗認為他只是平衡的關係，高溫的時候平衡常數變小，依然可以利用濃度使平衡向右。高溫時可能誤加入過量的碘，然而降回室溫時由於平衡關係，藍碘的顏色不再是原本顏色，選擇高溫時就加入碘，會浪費很多碘來製作藍碘。
3. 在此溫度以下，澱粉容易與碘形成藍碘，且放置室溫 25 度之藍碘溶液所需的用碘量最少，在之後的實驗都將冷卻至 25 度。
4. 在這個 sop（先煮沸、降溫至 25 度才與碘液混和）下，不僅能確定相同碘量下能夠做出最深的藍色(吸光係數最大)，還能夠確保每次做出的藍碘溶液是相同的顏色。

討論三、確認不同濃度澱粉液的過濾速度以此限制澱粉液的最高濃度

【圖】澱粉液配製好的外觀

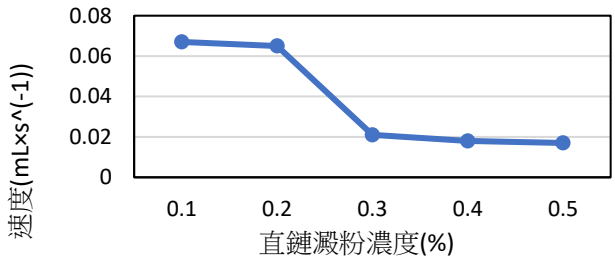
【圖】重力過濾的圖

【圖】澄清的澱粉液

由於最直觀上，濃度會直接影響到過濾速度，並且濃度越高，過濾速度越慢。

【表】不同濃度直鏈澱粉過濾速度

直鏈澱粉濃度 (%)	0.1%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%
速率 ($mL \times s^{-1}$)	0.067	0.065	0.021	0.018	0.017



【表】不同濃度直鏈澱粉過濾速度

實驗發現：
0.2%以上濃度過濾效率並不好。

討論四、確認 [I_2-amylose] 吸收光譜尋找偵測波長以及限制碘液用量上限

由於我的實驗構想受到重視，因此跟學校申請使用「光度計」提供我接續之後的實驗。

從過去文獻可以得知 I_2、I^-主要的吸收峰在 203、226 nm 而三碘離子 I_3^-的主峰跟次峰在 288 跟 350 nm，也就是只有三碘離子在比較接近可見光(400 nm 附近)有吸收，以分光光度計能夠測到的波長 360~1100 nm 來說，實驗如果使用紅色箭頭 360 nm 位置的吸光係數 ε 也才大約 20000 L mol^{-1} cm^{-1} 左右，其實這樣的吸光係數並不高。

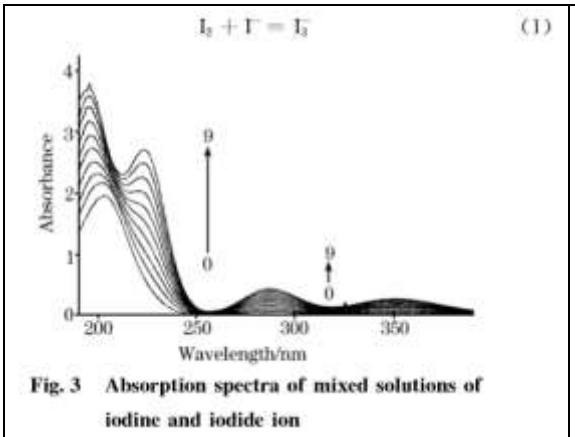


Fig. 3 Absorption spectra of mixed solutions of iodine and iodide ion

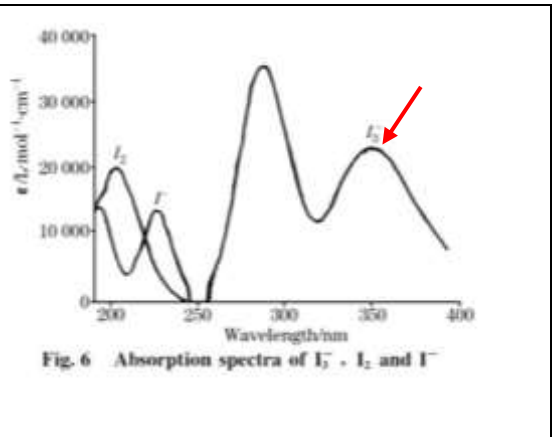
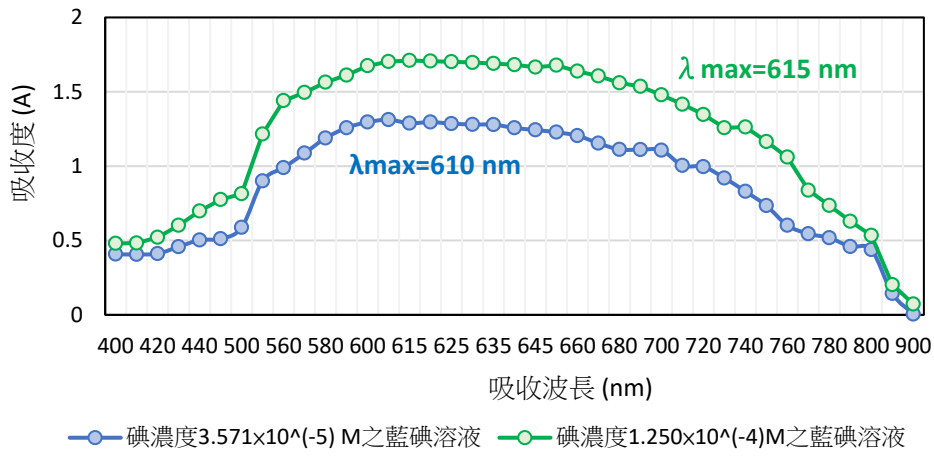


Fig. 6 Absorption spectra of I_3^-, I_2 and I^-

(魏永巨, Vol.25, No1, pp86-88, January, 2005)

經過研究(之後會提到)，利用碘與澱粉恰完全反應的濃度與吸光度換算得到，本研究藍碘溶液在 610 nm 的吸光係數 ε =5.39x10^4，明顯是三碘離子在 350 nm 的兩倍，這表示如果能夠使用藍碘錯合物將可以提升靈敏度。唯獨要注意碘量，因為藍碘可能會因為加入太多碘而使其變色。



•左為[I_2]=3.57×10^{-5} M 之藍碘溶液
•右為[I_2]=1.25×10^{-4} M 之藍碘溶液

【圖】相同澱粉濃度之 I_2-srtarch 錯合物溶液的吸收光譜

實驗發現：溶液中黃色碘與藍碘錯合物的物理混色會使得溶液吸收峰出現偏移，而由於最大吸收波長的偏移，導致溶液在 610 nm 波長的吸收度偏離比例關係 1.7/1.3≠12.5/3.57

【圖】直鏈澱粉 0.1%、100mL 水配成之澱粉液，並在其中加入碘液的顏色變化

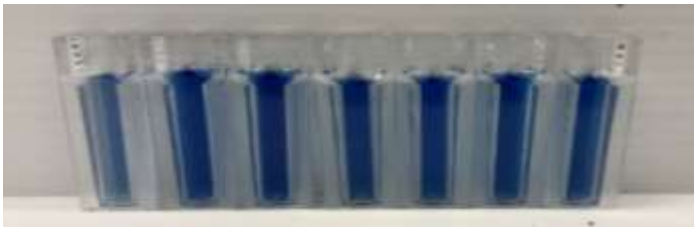
且發現無論澱粉處於何種濃度，只要碘濃度高於 1.250×10^{-4} M，也就是相當於在 100 mL 澱粉液加入超過 350 uL 碘液時，吸收度開始出現波動，且依肉眼看眼色顏色開始轉變為綠色，因此在後續的實驗中，碘量濃度皆控制在<350 uL(1×50~7×50 uL)原濃度碘液/100 mL 以內，確保碘液不過量的情況來討論藍碘。

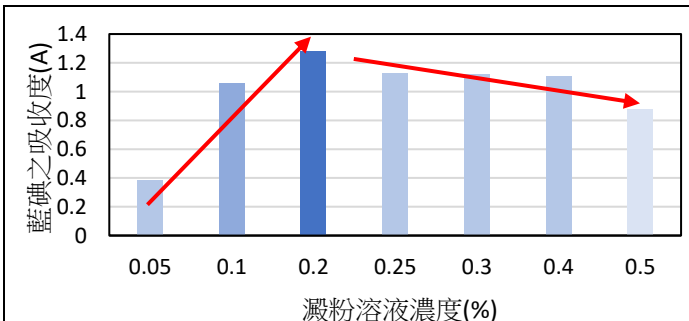
討論五、探討碘液與不同濃度澱粉液反應得到之藍碘溶液

實驗假設：碘與澱粉液混合時，只要碘液濃度相同且澱粉過量，藍碘顏色結果便會相同。
實驗結果：並非如此，發現相同碘液量濃度要形成藍碘，澱粉液濃度有合適的範圍。

實驗發現：
在每 100 mL 的藍碘溶液中含碘量為 0.0371 M×0.1 mL 的情況下，澱粉液濃度在 0.2%時吸光度最大，而後濃度的藍碘溶液吸光度漸漸下降，表示 0.2%澱粉液所得到的藍碘顏色會呈現最大值。

一般來說當澱粉液濃度太稀，導致藍碘顏色較淡，可以解釋成是澱粉量不足的緣故(碘液過量但沒有更多的澱粉鏈與碘作用)，能合理解釋澱粉液低濃度區間(<0.2%)藍碘吸光度隨澱粉液濃度的遞增趨勢；然而卻發現當相同濃度碘與更濃澱粉液(>0.2%)作用時，藍碘顏色反而變淡的情況。



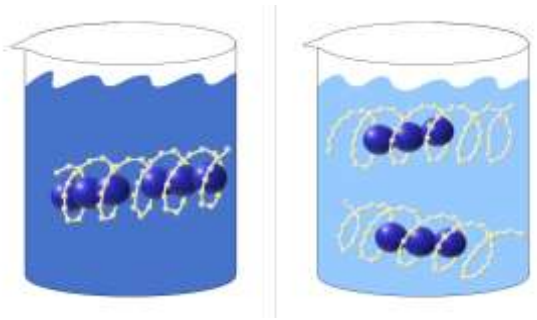


【圖】「固定碘量」、系統水量尋找其藍碘吸光度最大所需之澱粉溶液濃度。(每 100 mL 的可溶性澱粉液中含碘量為 0.0371 M×100 uL)

這不合一般理解(因為依照高中所學理解，分子之間進行反應有兩個特點，一者是完全反應的計量化學，顏色只受限量試劑(碘量)影響，不受過量試劑影響(澱粉)；二者是部分反應的平衡關係，受勒沙特列原理影響)的結果，然而假設反應的方程式是「碘+澱粉→藍碘」這存在平衡常數的話，無論水中澱粉濃度或是碘濃度的提高，藍碘都應該變深而不是變淡。我們初步理解：對於碘來說澱粉過量並不能合成出同樣深度的藍碘，可能牽涉的原因示意圖如下：

實驗推測：水中「過多的澱粉」會導致藍碘的褪色，有可能是因為碘分子是平均分配到澱粉，因此實驗暫時不討論澱粉液濃度>0.2%的情況。

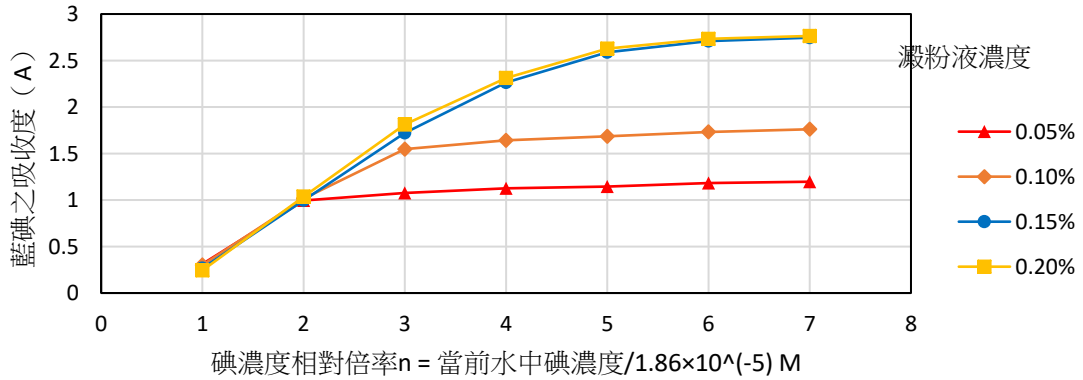
此部分實驗結果，換個角度來說，在 0~0.2%之間，澱粉液濃度比較高的澱粉液隨著碘液的增加可以有效提升藍碘吸光度，基於此發現，我們固定水量，使用累進碘量來探討不同濃度的澱粉液情況。



澱粉少　　澱粉多

【圖】實驗假設與實驗結果趨勢

如下圖，實驗發現，澱粉液濃度 0.05%(紅色數據)、0.1%(橘色數據)、0.15%(藍色數據)、0.2%(黃色數據)都會隨著碘液的增加而提升其成為藍碘溶液的吸光度，尤其 0.15%以上的澱粉液就可以到達吸光度上限，而澱粉液濃度 0.2%形成的藍碘吸光度則與 0.15%幾乎相同。對於 0.15%來說，其實 0.2%水中可能已經含有過量的澱粉，由於擔心水中過量的澱粉可能會對藍碘有褪色的疑慮，因此判斷最佳的澱粉液濃度應為 0.15%左右，可以製得吸光度最高的藍碘溶液，也可以說這個混合比例符合優碘分子與試藥可溶性澱粉高分子反應成藍碘錯合物的恰完全反應計量。



【圖】固定水量、以累進碘量探討不同濃度澱粉液形成藍碘的吸光度

(每 100 mL 的水量下，累進碘量 n×50 uL×1.86×10^{-5} M 在不同濃度澱粉溶液中，0.20%及 0.15%的澱粉溶液吸光度差異不大，皆擁有藍色色深最大值。)備註：

在 100 mL 澱粉液中加入 50 uL 的 0.0371 M 碘液，則混合液中碘液濃度為 1.86×10^{-5} M，若加入 50 uL×n 的碘液，則水中碘濃度為 n×1.86×10^{-5} M。每次都加 50 uL，加入 n 次，n=1~7。

此部分結論：在這個實驗部分，我們找到了碘與澱粉形成穩定藍色之[I_2-amylose]所需配製比例，但當實驗以為這樣就能成功做出再現性很高的藍碘溶液，發現又錯了！

實驗有一次想說要做一大杯大約 500 mL 的藍碘水溶液(含有 5×100 uL 碘液)來提供後續使用，結果做出來的藍碘竟然比 100 mL 還要深……。於是又開啟了下一個實驗。由於碘與澱粉的比例，無論是 100 mL 的小尺寸或是 500 mL 的尺寸量產版，比例相同，沒道理大小杯會有不一樣的顏色深，實驗認為還有尚未控制到的變因在其中！於是實驗進一步討論思考：若澱粉液濃度相同，而我們是將碘液滴入澱粉液中，那麼過程中唯一可以造成不同的地方，應該是碘液進到大量水中擴散而稀釋，因此應該是每一次滴加碘液與澱粉液反應時，澱粉高分子與碘分子的碰撞機率不同導致。

討論五、探討澱粉液與碘液以不同的混合速率得到之藍碘溶液

實驗假設：碘與澱粉液混合時，只要碘液濃度與澱粉液濃度相同，藍碘顏色結果便會相同。

實驗結果：並非如此，澱粉液與碘液的混合速率不同時可能得到吸光度不同之藍碘溶液。

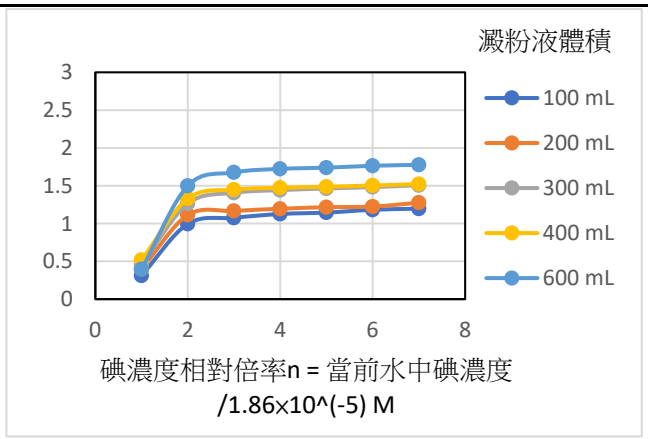
本實驗部分技巧：

本研究的碘液濃度已知，而本研究並不打算先將碘液稀釋來做此實驗部分，為了改變澱粉液與碘液的混合速率，實驗改成以「放大反應系統水量」，而仍然在其中加入原濃度碘液，這樣的話碘液一進入溶液就會立刻擴散開至整杯溶液，而自然促成以相對較低濃度碘液來與澱粉液混合，但又為了使碘液最終濃度要相同，因此系統放大×N 倍水量，總共添加碘液的量也跟著放大×N 倍，唯獨每一次加入碘液的過程都是等到碘液完全擴散至整杯澱粉液後才繼續添加新的碘液，就可以達到「改變混合過程的快慢」，同時又不影響最終藍碘溶液中碘液與澱粉液的比例(碘量×N/水量×N=1 濃度不變)。

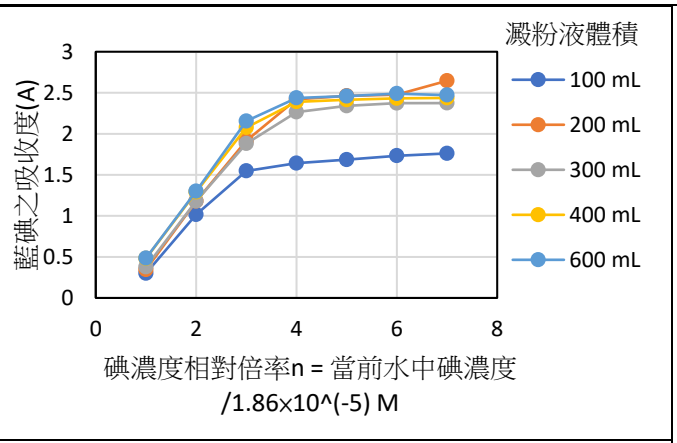
實驗認為，若反應後藍碘的顏色只與碘分子莫耳數、澱粉高分子莫耳數有關的話，那麼只改變系統水量而其他都不變的條件下，藍碘[I_2-amylose]的顏色應該相同。然而實驗發現：

以「不同系統水量」得到之「相同成分濃度的藍碘」的吸光度不相同！

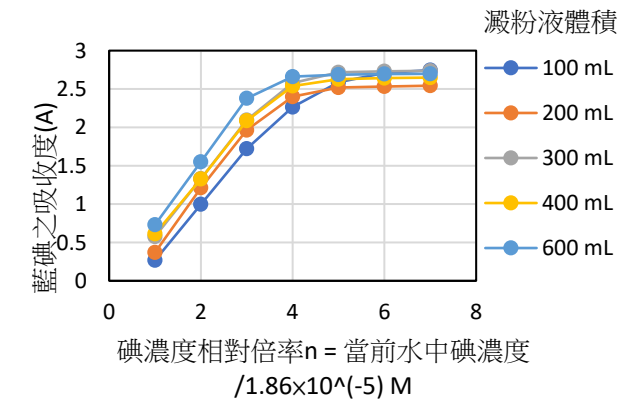
這意味著，藍碘溶液的吸光係數 ε (=吸收度 A/濃度 C)不只有受到澱粉濃度影響，還會受到混合時碘液濃度影響。老師說，藍碘生成的過程，有可能並非簡單的熱力學平衡只受計量化學控制，還可能受到動力學因素的影響。推測可能的原因是由於澱粉是長鏈高分子，並不像一般化學反應的小分子碰撞這麼簡單。



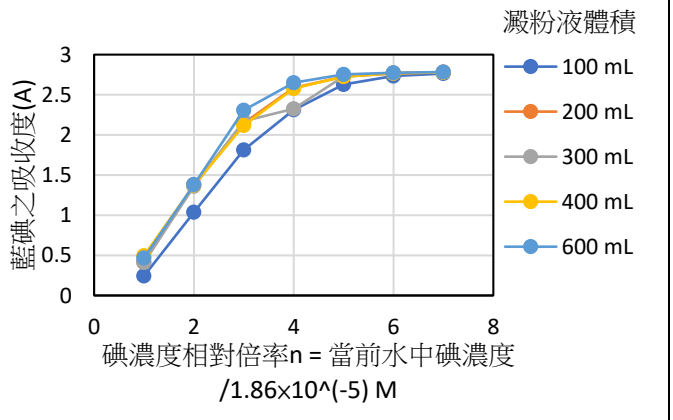
【圖】不同體積之 0.05%澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化



【圖】不同體積之 0.1%澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化



【圖】不同體積之 0.15%澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化



【圖】不同體積之 0.2%澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化

討論五之結論：

1. 在 0.05%、0.1%的實驗數據中發現，即便碘量相同，卻在 100mL 時會使碘和澱粉的反應速率過快，令顏色在其他系統水量得到的藍碘相較下最淺。
2. 在 0.15%、0.2%的實驗數據中發現，澱粉濃度高的情況下，系統水量對於所得當藍碘顏色的影響已經很小了。
3. 在差距中看出，相同濃度澱粉液(例如 0.15%)的系統水量提高，可以減少所需碘量。

確定以上變因之後，實驗便可以確保每次做出之藍碘溶液吸光度相同，SOP 具有再現性。

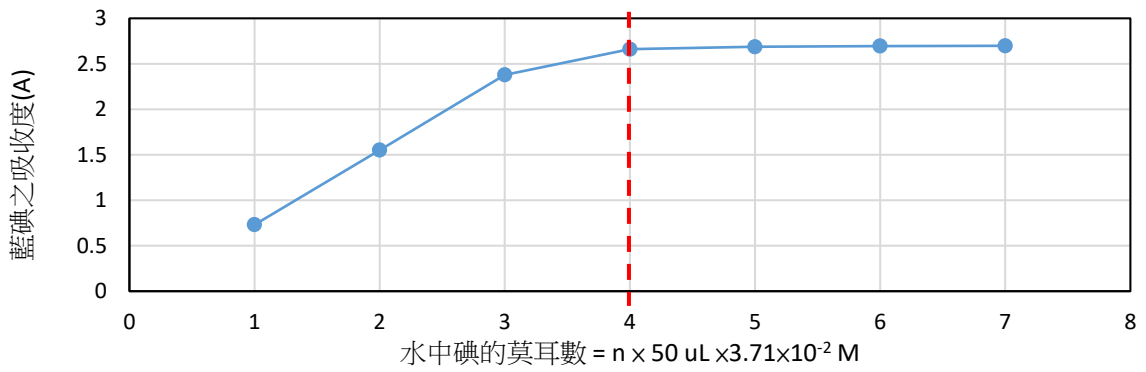
討論六、以澱粉分子量證明上述累進滴定法的數據可信度並解釋藍碘機制

在這個討論部分，主要是利用一些理論來解釋前面所觀察到的現象。

現象 1：澱粉液中澱粉過量且濃度增加時，藍碘顏色不是維持一定，反而顏色較淡。

現象 2：碘、澱粉的水中濃度維持相同但提升系統水量較大時，所形成的藍碘顏色不是維持一定，反而顏色較深，顏色還會隨系統水量增加而逐漸加深。

現象 3：碘對澱粉液的累進滴定量在 n=4 時，藍碘的吸收度達到最大值。



【圖】不同體積之 0.15%澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化
(系統水量控制在 600 mL)

條件

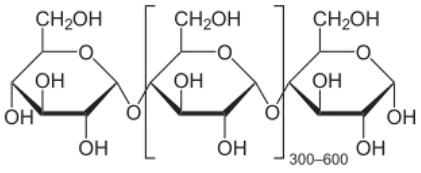
1. 本研究使用的碘液經標定為 3.71×10^{-2} M。
2. 由上圖得知碘分子與澱粉高分子恰完全反應的比例為：在 0.15%的 100 mL 中加入 4 次 50 uL 的原碘液。

<將上述條件 1~2 的數據引入計算澱粉分子量>

以本研究每 100 mL 藍碘中大約含有 0.15 g 澱粉高分子$(C_6H_{10}O_5)n$，大約可以與 $4\times50\ uL\times3.71\times10^{-2}\ M=7.42\times10^{-6}$ mol 的碘分子進行結合。由文獻所提，假設每條澱粉聚合鏈中可以與 a 個碘分子形成藍碘錯合物，假設澱粉高分子的分子量為 D g/mol，因此：

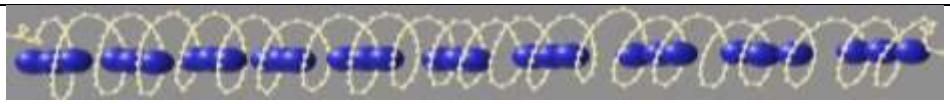
澱粉莫耳數=0.15 g / D g/mol

澱粉莫耳數=碘莫耳數/a=7.42×10^{-6}/a



澱粉分子量 D = 0.15/(7.42×10^{-6}/a) = **$2.03\times10^{4}\times$a**

根據文獻所提，直鏈澱粉的分子量大約落在 10,000~200,000 g/mol 之間，那麼 a 大約是 1~10，符合參考文獻所提，每條澱粉大約可以跟 1~10 個碘分子結合(文獻提到鏈中大約每 20~30 個葡萄糖單元與碘分子形成配位，假設直鏈澱粉則大約含有 300 個左右葡萄糖單元)。

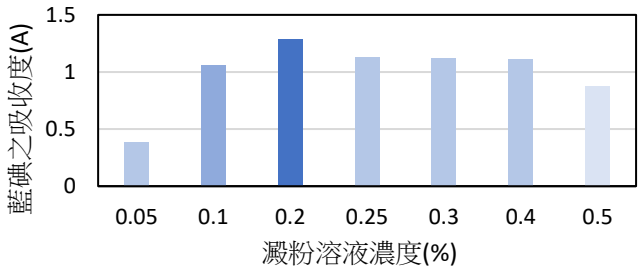


(作者自繪)參考 Sheri Madhu, Infinite Polyiodide Chains in the Pyrroloperylene–Iodine Complex: Insights into the Starch–Iodine and Perylene–Iodine Complexes, Angew. Chem. Int. Ed. 2016, 55, 1–5

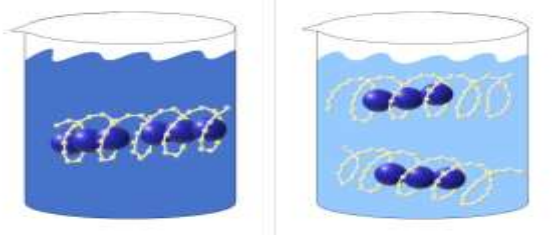
因此這個累進滴定方法(控制水量在 600 mL)有很大的潛力可以用來測量澱粉的分子量，這也代表本研究的累進滴定數據符合直鏈澱粉分子量的實際情況，具有可信度。

在此歸納出本研究重要推導機制之一：

因此實驗推測：碘與澱粉混合時的反應速率會影響到 a 值，若反應速率夠慢(系統水量多，且慢慢滴加碘液)，給予澱粉較長時間與碘分子作用，同一條澱粉鏈就可以挪動空間去跟較多的碘分子結合(也就是碘分子在澱粉鏈上的密度較高)，也就可以形成比較深的藍色，反之當水量較少時若以瞬間高濃度碘液去與澱粉作用時，澱粉鏈會來不及挪動空間(遵守熱力學)而亂接一通(強迫走動力學)，使得這樣形成的藍碘會顏色比較淡。另一方面也可以解釋，當澱粉濃度較高時，則必須加入更高量的碘液，這是因為我們推測同一條澱粉鏈需要同時接很多個碘分子(澱粉鏈上的碘分子密度要夠高)，才能使藍色顯現出來，因此澱粉的濃度太高時也就是水中還沒接碘分子的澱粉鏈過量了、太多了，別條空的澱粉鏈可能會利用化學平衡搶走原本已經接了很多碘分子的澱粉鏈，而使其褪色，進而發生之前提過的下圖情況。

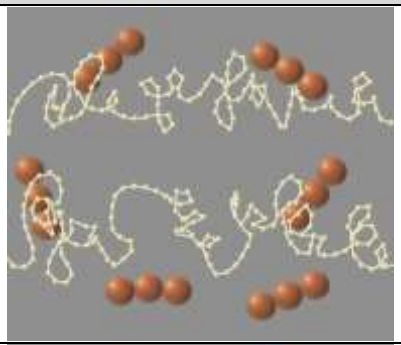
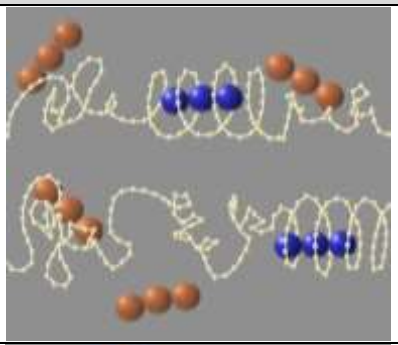
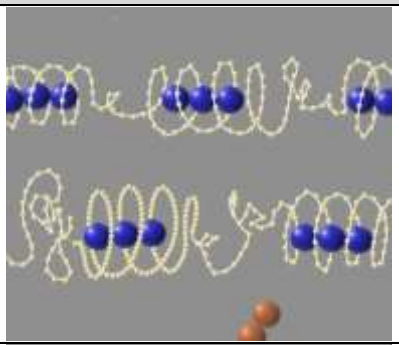
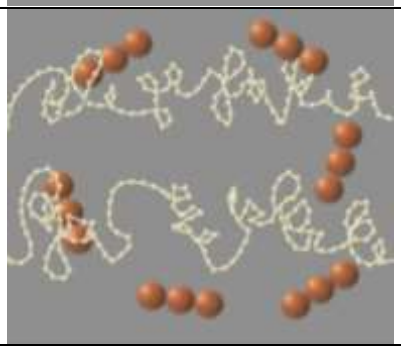
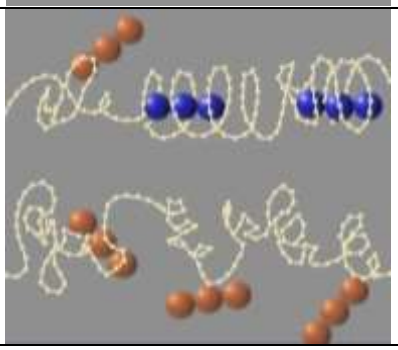
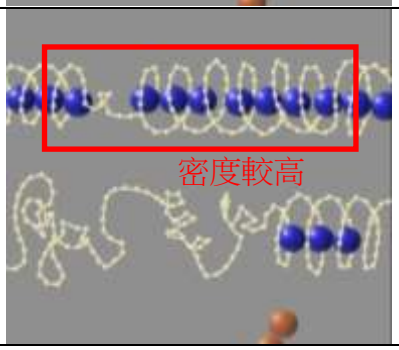


【圖】固定碘量、系統水量探討不同澱粉液濃度對所形成藍碘水溶液顏色深淺的影響



【圖】假說。澱粉可以吸收不只 1 個碘分子，澱粉濃度過高時，會使碘鏈密度下降

依照上述「澱粉濃度因素」的邏輯，以下為推測「系統水量因素」可能的機制模擬圖

	1.碘與澱粉剛接觸瞬間	2.澱粉將碘吃進去結構之中	3.水中的碘都變成藍碘	碘鏈
水量高				均勻
水量低				不均勻

(作者自繪)

以下為推測假說

水量較低的狀態，將碘液滴入澱粉液，碘液比較沒有辦法很分散，可能導致區域碘濃度過高，由碰撞機率來解釋，所以該處的澱粉鏈可能會一次將很多碘分子納入結構中，使得極少數澱粉鏈內部碘分子鏈密度較高，這會導致其他很多澱粉鏈內部是「空」的而沒有碘分子，或是碘分子很少，也就是其他附近的澱粉鏈內部碘分子鏈密度會小很多，如果只有局部澱粉鏈是填滿碘分子，而大部分澱粉鏈則是空的，這可能導致水中碘量相同，但是形成的藍碘水溶液比較淡。

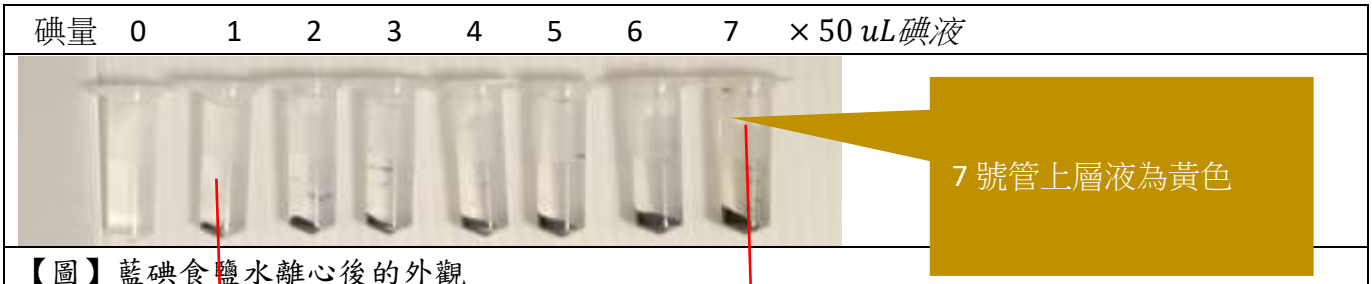
反之，在水量較高的情況中，也是逐漸滴加碘液，但相較於水量低的情況，碘液會在混合時被稀釋的更嚴重，減少其與澱粉的碰撞機率，使得碘分子可以在澱粉鏈周圍更分散，故此情況下澱粉鏈內部的碘分子鏈密度，應該會比較平均，與水量較少的情況相比，即使水中碘量相同，但是形成的藍碘水溶液比較深

為了證實這個假說，也就是澱粉去抓碘分子進入自己的結構中的過程，是可以不用那麼均勻的。實驗利用後面討論會運用到的實驗技巧。老師教我實驗先在澱粉液中加入食鹽使其飽合，食鹽的作用是會對高分子產生鹽析作用，可以降低高分子在水中的溶解度。

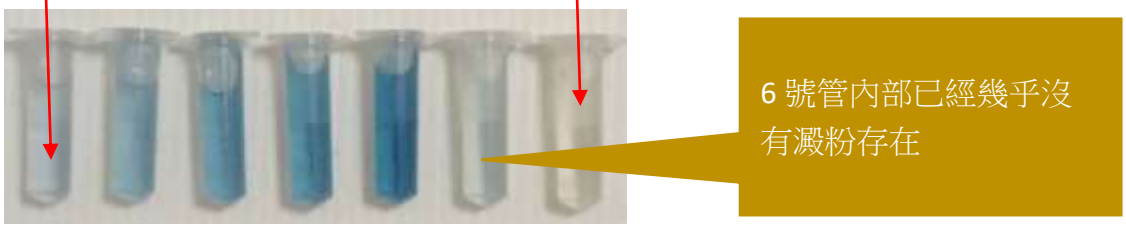
實驗假設當水中只有飽和食鹽及澱粉鏈的時候，由於澱粉的分子量還不夠大，可以看到圖中的 1 號管，故此時分子間作用力不夠大還不會沉澱，但從 2 號管開始加入每次 50 uL 的 0.0371 M 碘液，碘分子會進入澱粉鏈中使其分子量變大(I=127 就接近於澱粉鏈中一個葡萄糖基 $C_6H_{10}O_5$=162)，此時澱粉鏈之間的吸引力會變大直到其聚集沉降，而從 1~6 依序沉澱量增大(肉眼可看出)，而 6~7 則沒有明顯增加沉澱量。

實驗可以發現上層液呈無色，可以確定沒有藍碘存在，因為藍碘都沉澱了。但由於加入更多碘仍有更多藍碘沉澱代表上層有澱粉的存在，也就是上層液都是空的澱粉鏈，而沉澱的部分都是有接碘分子的澱粉，表示在水中碘分子本來就不是那麼均勻分配到澱粉鏈中。

由於無法判斷哪一個階段澱粉恰用盡，因此將上層液取出加入雙氧水，可以得到藍色依序從 1~5 逐漸加深，到 6 時出現顏色斷層而突然失去藍色。實驗巧妙利用碘液中原本就存在過量的碘離子，與雙氧水反應後生成碘分子，再與上層液中剩餘的澱粉作用，隨著加入越多雙氧水越多(但是碘離子維持足量)，在上層液仍含有剩餘澱粉的條件下，就產生越深的顏色，然而從 6 號管開始，水中已經及幾乎沒有澱粉的話，就會不再成藍色，這也代表這個位置附近，就是最一開始碘與澱粉完全反應的比例，因此前述討論所提碘與澱粉大約完全反應的比例應該從 n=4 修正為 n=6。



【圖】藍碘食鹽水離心後的外觀



【圖】藍碘食鹽水離心後的上層液加入雙氧水的情況

討論七、探討不同澱粉種類和碘作用之藍碘溶液

實驗假設：碘與不同來源之澱粉液混合時，所形成之藍碘顏色深度結果不同。
實驗結果：是的，不同來源之澱粉混合物配成相同%，仍得到吸光度不同之藍碘溶液。

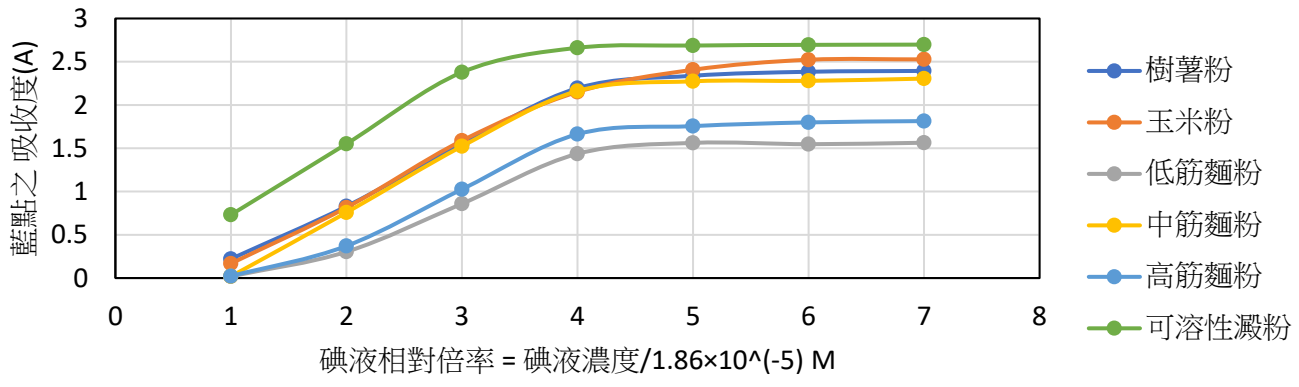
在完成的實驗中，是以可溶性澱粉作為標準品，但如果這個研究要推廣到民眾也能自行製作藍碘試劑的話，勢必要用到「生活中常見的澱粉」來源，而非試劑級標準品。

本研究接著探討不同澱粉形成的藍碘溶液差異，實驗發現：

1. 不同種類澱粉和碘液反應後出現不同顏色藍碘，例如藍紫色。
2. 不同種類澱粉先天能產生藍碘的色深極限不同，而且無法形成勾芡。
3. 有些種類的澱粉會造成藍碘水溶液自發隨時間褪色，必須小心選擇。

【表】不同粉種澱粉溶液和碘作用的藍碘性質整理表

粉種	樹薯粉	玉米粉	白糊精	低筋麵粉	中筋麵粉	高筋麵粉
濃度顏色關係	0.1%以下顏色過淺	0.1%顏色處於高峰(最深)	無論何種濃度都會快速褪色	0.05%顏色最深，其餘的顏色隨濃度變深(和樹薯粉並無不同)		
	0.1～0.2%最佳濃度			0.05%以下澱粉量不足，造成褪色快速		
	>0.2%過濾效率差			0.05%以上蛋白質過多，造成褪色快速		
顏色	藍	未過濾玉米粉加碘溶液呈紫色，過濾後為藍色澄清液	紫紅色	未過濾澱粉加碘溶液偏紫藍，過濾後為藍色澄清液	藍	藍
照片						



【圖】不同來源的 0.15%、600 mL 澱粉液在(1~7)×1.86×10^(-5) M 碘濃度時的吸收度(以可溶性澱粉作為對照組)

實驗發現：

1. 樹薯粉的特性更接近試藥級可溶性澱粉，推測是因為其直鏈澱粉含量較高緣故，比其它我們測試的澱粉中直鏈澱粉的含量都高。

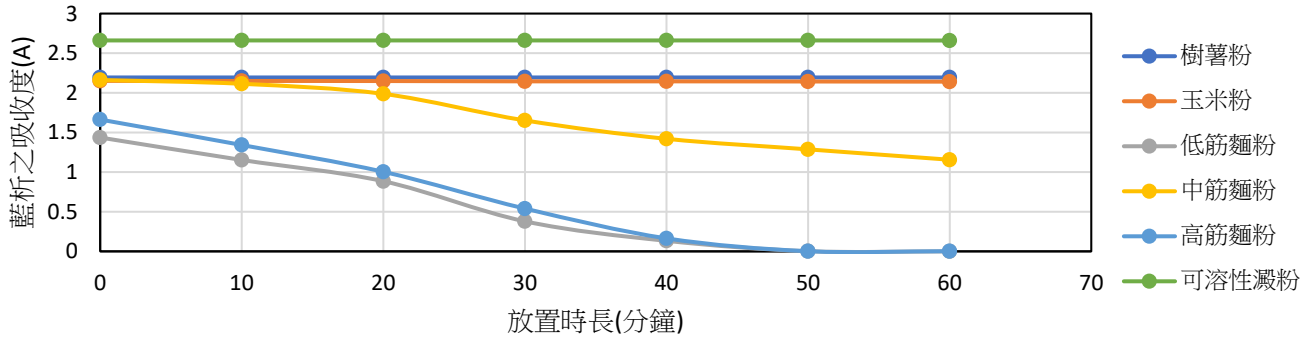
2. 值得一提的是，白糊精使用直接加入熱水中，顏色會較紫藍，無法形成勾芡且同是溶於熱水

加碘的白糊精，0.1%加碘並不變色，但 1%卻會變成紫藍色。

【表】不同實驗步驟下白糊精呈色情形

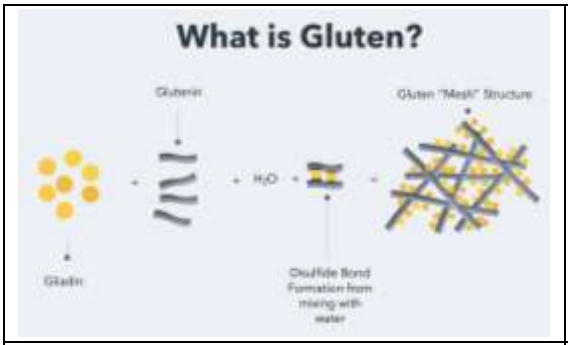
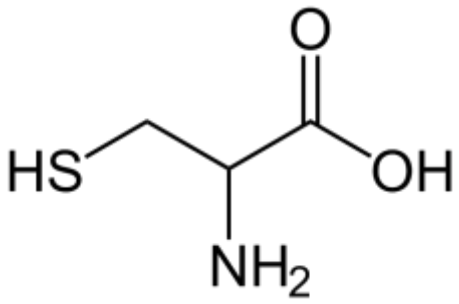
僅溶於冷水	溶於冷水並加碘	溶於熱水並加碘	溶於冷水後水浴加熱並加碘

3. 麵粉會使藍碘溶液急速褪色，是因為麵粉當中含有麩質蛋白，遇水的麩質蛋白會將遇水膨脹的澱粉嵌入其中，使藍碘失去長鏈澱粉分子而褪色；另一方面，而麩質蛋白中的半胱氨酸會將藍色物質還原，進而無法形成藍碘溶液。



【圖】不同來源的 0.15%、600 mL 澱粉液在 $4\times1.86\times10^{-5}$ M 碘濃度時藍碘溶液隨時間的褪色情形

關於麩質蛋白可能造成藍碘褪色的推測原理：

	
Gluten mesh structure 原理	半胱胺酸（cysteine）

資料來源：網路

推測 1：麵粉中所含的麥膠蛋白（gluten）、麥穀蛋白（glutenin）藉由小麥中含硫的胺基酸：半胱胺酸（cysteine）的硫醇基(-SH)與另一側的-SH，透過氧化成雙硫鍵(-S-S-)，並利用分子作用力形成大分子的網絡結構（Gluten mesh structure），而這個網路結構會將澱粉包入其中，使藍碘褪色。

推測 2：這類蛋白質水解出的半胱氨酸的硫醇基（thiol group）具有還原劑的特性，可能使碘分子變回碘離子，藉此將藍碘中的碘還原，使褪色。

由以上可知：

1. 若要配製供試劑用途的藍碘，不可選擇麵粉類，其中高筋等含有較高含量的蛋白質，蛋白質會氧化利用分子作用力形成大分子結構將澱粉包入其中，使藍碘褪色；或是其中可能有游離的胺基酸可能導致碘液褪色。
2. 若要配製供試劑用途的藍碘，不只可使用樹薯粉，也可以選擇玉米粉，只是其具有支鏈的葡萄糖短鏈，顏色會比較偏藍紫色。
3. 若要配製供試劑用途的藍碘，不建議使用白糊精，除了由於它褪色速率較快以外，在不同濃度上的表現也不穩定。

討論八、探討藍碘溶液的時間穩定性

目前確定排除一些可能導致每次配製藍碘顏色不同的原因：

1. 例如混合時的溫度需要小於 70℃
2. 例如加入碘量、反應水量
3. 例如要避免使用「麵粉」類的澱粉來源

只要遵守上述 SOP，就是可以做出每次都相同顏色的藍碘溶液，也就是具有再現性。

但另一方面，我們還有觀察到藍碘褪色的現象，如下：

放置 0 天

放置 5 天

【圖】藍碘隨時間褪色的情況

因為藍碘的配製其實有點麻煩，需要將澱粉液加熱後待其降溫，並且要過濾未完全糊化澱粉的凝絮物，然後再緩慢加入碘液。

於是，我通常是前一天先配製好，但是通常一天、多天之後就會稍微有一點褪色了。

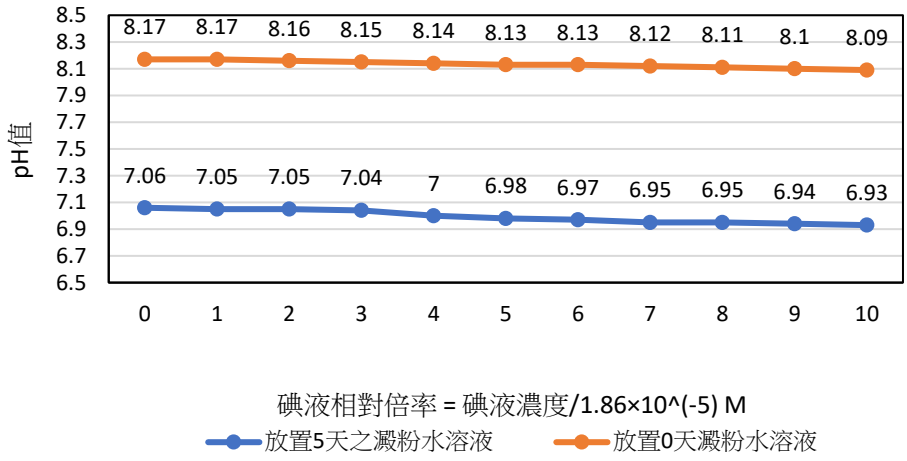
針對藍碘褪色的原因，實驗認為可能的因素有兩個原因

	原因 1：碘分子被破壞	原因 2：澱粉分子被破壞
理論假設	有文獻提到(第 58 屆中小學科展高中化學科魔法藥「碘」)是因為碘分子在水中受到氧氣作用而轉變成碘酸根，但這樣的反應速率其實並不快才對。 $I_2+5/2O_2+H_2O \rightarrow 2IO_3^-+2H^+$ 方程式會讓水溶液酸性增加	可能是澱粉與碘分子進行反應，澱粉變成氧化澱粉，而碘分子變回碘離子。 根據文獻提到氧化澱粉的鏈長較短，與碘作用形成的產物顏色會偏紅。
驗證	如下	也有觀察到這個現象，褪色後的藍碘再加入碘液後，沒辦法呈現像之前的深藍色。

針對觀察放置數天後的澱粉溶液，發現 pH 變化是下降趨勢。

比較不同放置天數澱粉溶液與碘作用所形成之藍碘溶液 pH 值變化

實驗對於此現象做一解釋，老師說，由於碘的還原電位(0.53V)較低，不像次氯酸或是過氧化氫一樣(>1.30V)可以破壞澱粉使其轉變為葡萄糖酸使 pH 下降，但是若澱粉上的 OH 基團如果只是被氧化成 C=O 羰基團，也有可能使溶液的 pH 下降。目前本研究認為是水中氧氣氧化 I_2 而變成 IO_3^- 的可能性較大。



【圖】不同放置天數之澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液 pH 值變化

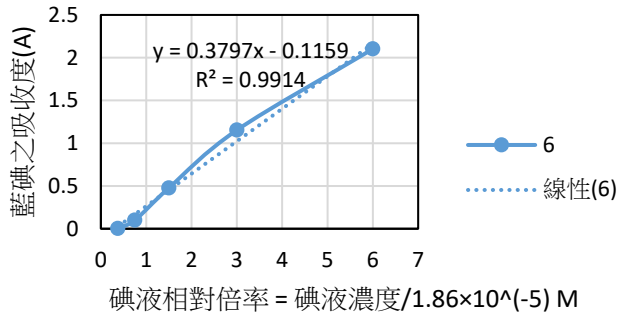
【表】製作藍色螯合澄清液之程序其結果比較		
程序	先加碘液再後濾	先過濾後再加碘液
放置 0 天	深藍色	深藍色
放置 4 天	透明	淡藍色

結論：

1. 放置四天反應後，發現「先碘後濾」較「先濾後碘」之褪色速度更快，也就是更早褪色回透明澄清液。因此之後均為先過濾再加碘。
2. 針對這個現象推測是因為碘液會和底下的未完全糊化澱粉沉澱物結合，而無法完全跟單一澱粉分子結合，而過濾掉沉澱物後所留下的藍碘分子比較少褪色後的顏色便幾乎呈透明

討論九、藍碘溶液食品應用效果測試及未來展望

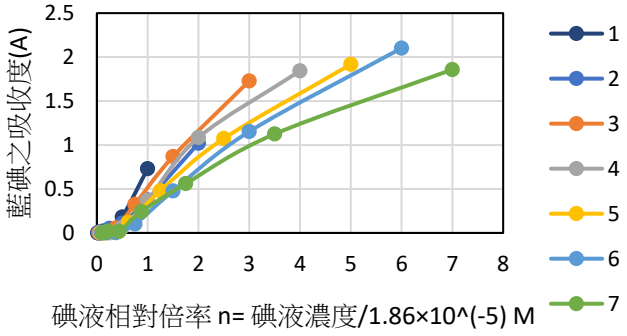
如果要使用藍碘溶液的「顏色褪色」來監控物質成分中的還原性物質的話，需要先製作檢量線。



【圖】本研究會使用 n=6 之藍碘比例製作檢量線

$y = 0.3797x - 0.1159$

$R^2 = 0.9914$



【圖】常見樹薯澱粉製作之藍碘檢量線

未來展望 1-監控竹筷釋放之 SO_2

食藥署表示，業者為了不讓免洗筷變質或漂白，會添加化學劑。而依據標準，免洗筷的二氧化硫殘量應為 500ppm 以下，且不得驗出含有過氧化氫及聯苯等成分。從 2018 年至 2020 年，台灣各地衛生所共抽驗 130 件免洗筷、衛生筷，130 件數的免洗筷均在檢驗標準內，二氧化硫殘量均為 500ppm 以下。事實上，容許範圍是在 0~500 ppm，代表仍可提供民眾透過實驗找出含量最低的筷子使用，實驗推測眾多品牌中是 7-11 竹筷含有之 SO_2 最少。

事實上，經實驗竹筷泡水後釋放 SO_2 的速率會改變，實驗僅能證明 7-11 竹筷釋放之 SO_2 最慢。

0 分	10 分	20 分	50 分	90 分	110 分 完全褪色

【圖】實驗以浸泡 6 cm (模擬竹筷使用插入水中的長度)高之藍碘溶液，不同放置時長的褪色

未來展望 2-監控蛋白質食品新鮮程度

我們一開始想要監測食品是因為從早餐店豆漿汲取靈感，好奇早餐店豆漿的新鮮度怎麼樣，並想要檢測它的新鮮程度。所以實驗最初動機便是將藍碘溶液應用於食品中，做為檢測劑，查詢以後發現蛋白質中的胺基酸擁有還原特性，且豆漿和米漿中也含有蛋白質。

結合條件後，我們使用含有蛋白質的豆漿及米漿來進行實驗。

【表】豆漿和米漿對藍碘溶液褪色時長。

實驗目標	豆漿	米漿
蛋白質含量 (%)	5.1%	0.35%
藍碘褪色時長 (分鐘)	195	360

實驗發現：米漿褪色時長比豆漿多很多，推測是因為米漿內含的蛋白質較豆漿內含的蛋白質少。

於是進一步使用蛋白質百分比不同的豆漿進行實驗，將其放置至室溫 10 分後，再加入藍碘溶液中。

【表】豆漿蛋白質含量對藍色澄清液褪色時長之影響

豆漿品牌	光泉特濃無加糖豆漿	光泉無加糖豆漿
豆漿蛋白質 (%)	5.1%	15.3%
藍碘褪色時長 (分鐘)	20	180

然而卻發現並非如我們預期蛋白質越多，褪色就越快；且更發現放置至室溫 10 分後褪色速度變快許多。

針對這兩個現象，我們分別進行以下探討：

1. 蛋白質和褪色時長的關係：

   實驗表示並非蛋白質越多褪色速度越快，因此推測影響褪色時長的並非是蛋白質，而是蛋白質經水解後的胺基酸，也就是說是胺基酸具有還原作用進而另藍碘溶液褪色，於是我們使用甘胺酸以及由胺基酸鹽組成的味精進行實驗。

2. 豆漿和米漿放置時長和褪色時長的關係：

   藉由對比前兩項實驗，可以發現豆漿放置時間變長，褪色時長便由 195 分鐘縮短成 20 分鐘，可見褪色速度顯著提升。我們推測是因為放置後的豆漿中有物質分解，而此物質具有良好還原性，另藍碘溶液快速褪色，因此我們藉由控制米漿及豆漿的放置時間，探討放置時長對於藍碘溶液褪色時長的影響。

一、探討蛋白質相關內容物和褪色時長的可能性：

為了瞭解是否是蛋白質水解或是水中游離的胺基酸所導致藍碘褪色，實驗以標準品甘胺酸，以及市售味精(也是一種胺基酸，麩胺酸鈉)作為對照。

【表】甘胺酸和味精對藍色澄清液褪色時長之影響(濃度為 1%)

常見胺基酸種類	甘胺酸	味精
藍碘褪色時長(分鐘)	2340	1140

實驗發現：

卻發現這些蛋白質胺基酸對於藍碘溶液的褪色效果奇差無比，可以說幾乎不會造成褪色，表示豆漿及米漿中有其他物質顯著影響著褪色。

二、探討豆漿和米漿放置時長和褪色時長的關係：

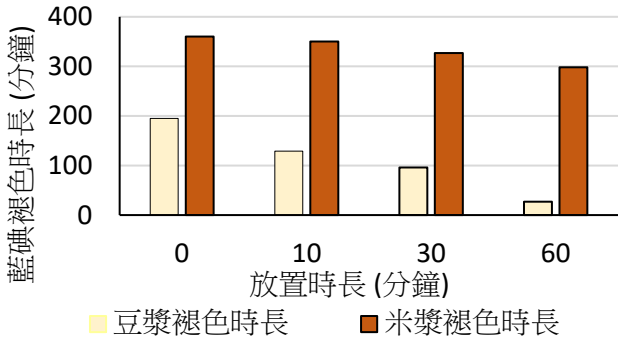
實驗將常溫(25℃)的豆漿和米漿放置不同時長，並比較豆漿和米漿的放置時長對藍碘溶液褪色時長的影響。

【表】豆漿放置時長對藍色澄清液褪色時長之影響

放置時長(分鐘)	0	10	30	60
藍碘褪色時長(分鐘)	195	129	96	27

【表】米漿放置時長對藍色澄清液褪色時長之影響

放置時長(分鐘)	0	10	30	60
藍碘褪色時長(分鐘)	360	350	327	298



【圖】豆漿或米漿放置褪色時長

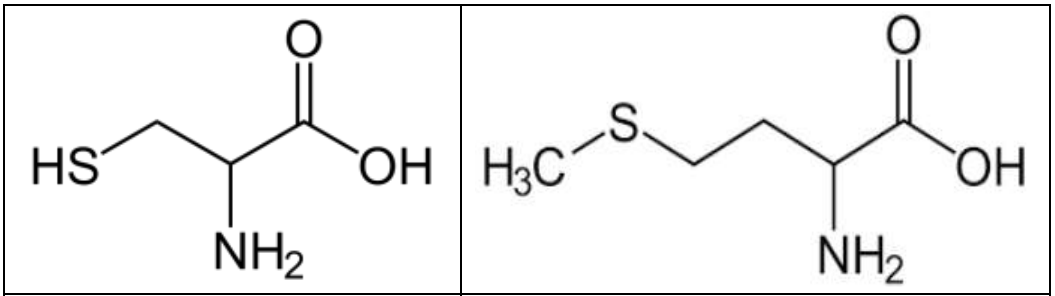
實驗發現：

豆漿及米漿擁有同樣結果，放置時間越長，褪色時長便越短，其中「豆漿」下降趨勢尤為明顯，代表豆漿中放置越久會產多越多還原性的物質。

結合上述兩個實驗結果，推測豆漿及米漿中相較蛋白質的胺基酸，有其他還原力更強的物質在影響著變色。且推測豆漿及米漿經由放置，能夠隨時間產生這種物質，認為很有可能是豆漿這類食物腐敗過程中所產生的物質，而且此物質會隨時間而越來越多，使藍碘褪色速率較快。

藍碘褪色的原因：

查詢大量資料後我們發現，原來豆漿在發酵腐敗的過程中，由於環境的缺氧，其中一些細菌或是厭氧細菌會進行無氧呼吸(Anaerobic respiration)，將半胱胺酸(Cysteine)和蛋胺酸(Methionine)等含硫胺基酸作為能量來源，當中的硫原子會被轉化為硫化氫，硫化氫具有還原性會令藍碘褪色，且細菌也會分解出一些胺類化合物，並隨著豆漿發酵腐敗的時間變長，硫化氫以及胺類化合物便會越來越多。



半胱胺酸(Cysteine)	蛋胺酸(Methionine)

【圖】含硫原子之胺基酸

於是這便解釋了為甚麼當我們使用標準品甘胺酸以及味精時藍碘幾乎不會褪色的原因了，因為要產生硫化氫是需要有「細菌」分解蛋白質，然而標準品當中並沒有這些細菌，便不會造成藍碘褪色。

在不同蛋白質含量和藍碘褪色時長的研究中，光泉無加糖豆漿(15.3%)褪色時間較長；光泉特濃無加糖豆漿(5.1%)藍碘褪色時間反而較短，代表褪色時長和蛋白質含量多寡是沒有關係的。

結論：

所以不只是新鮮程度會影響藍碘的褪色時長，每種不同品牌、品項豆漿間褪色時長也會有差異，因此我們需要做出針對「特定」豆漿的藍碘比色試劑褪色時間，來檢測它的新鮮程度。

討論十、開發藍碘試紙(使用澱粉沉澱物製作)

藍碘溶液能做比色試劑使用，但液體在日常上作檢測劑不易攜帶，還擁有會隨時間褪色的缺點。實驗過程中發現，將過濾澱粉液時殘留在濾紙上的沉澱物收集起來和碘作用形成藍碘，接著塗抹在濾紙上，烘乾後藍碘可以留在濾紙上並且保留藍碘氧化劑的特性，能作為檢測還原性物質的試紙使用。

於是我們開始探討澱粉液沉澱物並用來製作藍碘試紙的應用性。

首先因為藍碘溶液會有褪色的現象，於是我們測試了由沉澱物所製成的藍碘試紙會不會也有同樣的褪色現象。

【表】染色試紙放置顏色變化

0 天	1 天	2 天	3 天	4 天	5 天	6 天	7 天

實驗發現：此試紙具有良好的保存性，不會隨著時間褪色。

由於是使用加熱水來製造沉澱物，但發現所製造的沉澱物遠不及加入的水量多，這樣還滿浪費的。根據實驗步驟、熱製和沉澱物黏稠的特性，聯想到了料理中的「勾芡」，利用澱粉和冷水混和並加熱，便可製造出很多的糊狀黏稠勾芡。可雖然沉澱物的實驗步驟、特性跟勾芡相似，但我們畢竟不熟悉料理，不確定兩者是否為同樣的物質，進而提出疑問：

沉澱物和勾芡是一樣的東西嗎？

於是我們將對沉澱物及勾芡的觀察進行比較。

【表】沉澱物及勾芡實驗結果觀察比較

	沉澱物	勾芡
顏色	半透明	半透明，隨澱粉濃度提高透明度下降
黏稠	無明顯規律	1. 澱粉濃度越高越稠，越低則越稀。 2. 澱粉液濃度 20 % 以上，加熱後無流動性。
試紙製作現象	1. 試紙上形成淡藍色薄膜其中含有藍黑色顆粒。 2. 試紙乾燥過程中薄膜剝落，試紙則不會上色。 3. 因為薄膜的關係，試紙顏色不均勻，且表面不平整。	1. 試紙上形成淡藍色薄膜其中含有藍黑色顆粒。 2. 試紙乾燥過程中薄膜剝落，試紙則不會上色。 3. 因為薄膜的關係，試紙顏色不均勻，且表面不平整。
保存性	放置時間長了會變稀，保存性差	放置時間長了會變稀，保存性差

實驗發現：

1. 澱粉液沉澱糊狀物和勾芡在表現上極為相似，推測兩者是一樣的物質，皆是澱粉經過加熱後糊化形成的物質，只是實驗步驟的不同罷了。
2. 根據文獻(跟著鄭大師玩科學，烘焙的科學（二）澱粉糊化)解釋了沉澱物的形成：是因為澱粉分子間由氫鍵緊密連接的間隙加熱後被分離，水分子會進入以氫鍵跟澱粉分子結合，於是澱粉顆粒膨脹水合變得半透明黏稠，為未完全糊化澱粉。(若繼續加熱，澱粉分子完全分開成單一分子時，會將水分子包圍形成半透明的膠態溶液，這個狀態叫做完全糊化）

而在確認沉澱物為未完全糊化的澱粉的過程中，我們發現一系列用沉澱物製作試紙的困難之處。

一、黏稠度：

如下圖，不同狀態的沉澱物中加入碘，會導致所形成的藍碘在溶液中的分布不均，推測是因為在未完全糊化的澱粉之外還有剩下的水，才會導致藍碘在沉澱物中分布不均。

也能以肉眼發現藍碘顆粒多少有些不同(有極小的顆粒，也有聚集成一片的藍碘顆粒)。

	正常的沉澱物： 發現藍碘能夠均勻分布在溶液中。		過稀的沉澱物： 發現藍碘顏色分布不均，明顯有顆粒散佈。

【圖】不同狀態的沉澱物

二、藍碘顆粒在濾紙上的分布：

實驗將殘留在濾紙上的沉澱物加入碘液並將其混和，而後將沉澱物塗在試紙上待其乾燥。

然而沉澱物不僅不好抹勻，還發現儘管塗抹上去時整張試紙都是藍色，烘乾後卻發現試紙上某些部分的藍碘顆粒是淡藍色的，出現了藍碘顆粒分布不均的狀況。(如右圖)

【圖】藍碘顆粒分布不均勻的試紙

由於沉澱物的稠度不易掌控、保存性差、製作出的試紙不穩定，於是我們重新研究試紙的製作方法。

實驗使用鹽析作為方法，因為澱粉屬於高分子，於是聯想到了皂化反應中的鹽析，加入氯化鈉降低溶解度使高分子析出。於是我們嘗試性的在藍碘溶液中加入了食鹽，發現真的有一顆顆肉眼可見的藍碘沉澱析出！

析出後的藍碘顆粒過濾後能留在濾紙上，和未完全糊化的澱粉凝絮物所製成的濾紙一樣具有良好的保存性！而且能更好的控制製作。

【圖】 實驗發現鹽析可以促成藍碘高分子沉澱。	【圖】 為了製作更均勻的藍碘試紙，嘗試利用高分子在鹽類的鹽析效應而沉澱。	【圖】 左：使用 NaCl、 右：使用 Na_2SO_4 鹽析製作之試紙。(Na_2SO_4 製作的在水中易剝落)

不過同時也發現使用 Na_2SO_4 所製作的試紙放在水中後藍碘顆粒會從試紙上剝落，推測是因為 Na_2SO_4 所析出的藍碘顆粒並不符合濾紙的纖維，沒辦法很好的卡進濾紙，才會從濾紙上剝落。

討論十一、藍碘試紙的應用情況

一、試紙用於檢測黏度低的水溶液

實驗將鹽析所製作出的藍碘試紙重新應用在竹筷檢測上，發現試紙也有很好的檢測作用。

左至右：7-11、八方雲集、雜牌

時長(分)	0	10	20	30
試紙放在純水完全不會脫色		從底部開始褪色		泡入的部分完全褪色

【圖】不同品牌的筷子使藍碘試紙褪色的時長

【表】將藍碘試紙應用於監控竹筷釋放 SO_2 的速率

筷子來源	7-11	八方雲集	雜牌
浸泡試紙褪色時長(分)	約 480 分	20~30 分	20~30 分內

實驗發現，竹筷水使試紙褪色(八方雲集筷子大約要 30 分鐘)的速率比試劑褪色(八方雲集筷子大約只要 10 分鐘)還要慢，因此若使用試紙的話，需要耐心等候較長的時間。

二、試紙用於檢測黏度高的水溶液

另一部分藍碘試紙的實用性用於檢驗常溫(25°C)的豆漿、牛奶，比較兩者在室溫下不同放置時長令試紙褪色的時長。

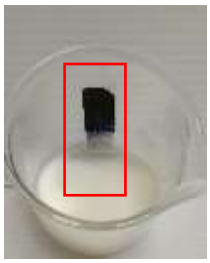
時長(分)	0	10	30	60	120 完全褪色
左至右： 豆漿、牛奶					

【圖】豆漿或牛奶使藍碘試劑褪色的時長

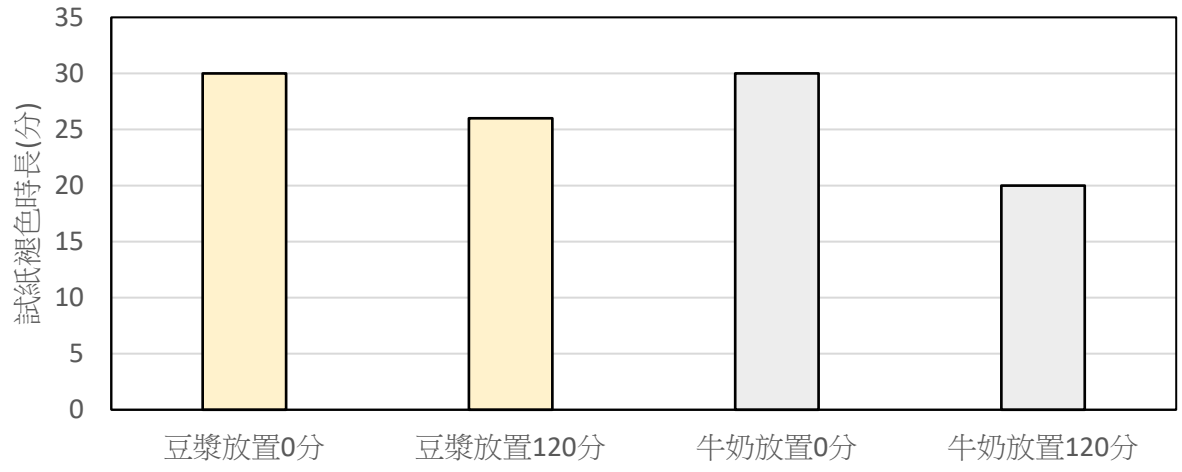
實驗發現濃稠的液體像是豆漿與牛奶並不適合使用試劑，因為褪色速率太慢了，而且可能不均勻。

實驗改使用「試紙」浸泡在待測液中，並觀察試紙的顏色變化，以及浸泡處褪色的時長。

豆漿		試紙褪色

牛奶		試紙褪色
		

【圖】將試紙底部浸泡於待測液中，等待試紙褪色時間。(對照組純水則不褪色)



【圖】隨著在室溫放置越久，雖然外觀上沒有變化，但若以藍碘試紙進行檢測其褪色時間，若褪色時間 ＜30 分鐘則代表其不如一開始新鮮。

實驗發現：

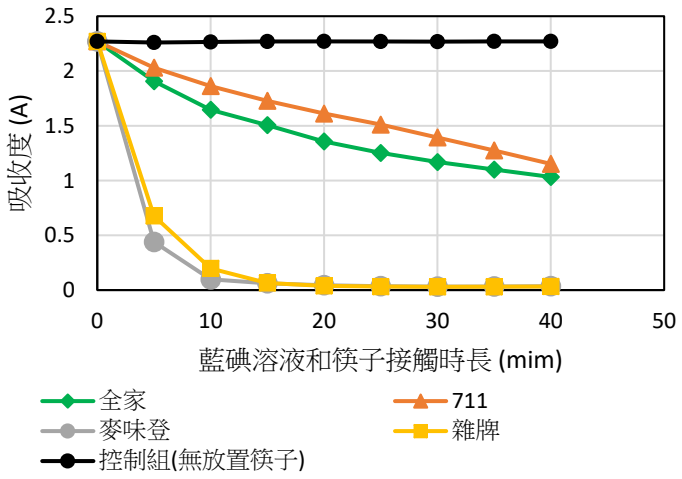
比起試劑，測牛奶和豆漿這類比較「濃稠」的液體，令試紙褪色的時間更短，可見試紙比試劑更加方便。

伍、決賽新增研究內容

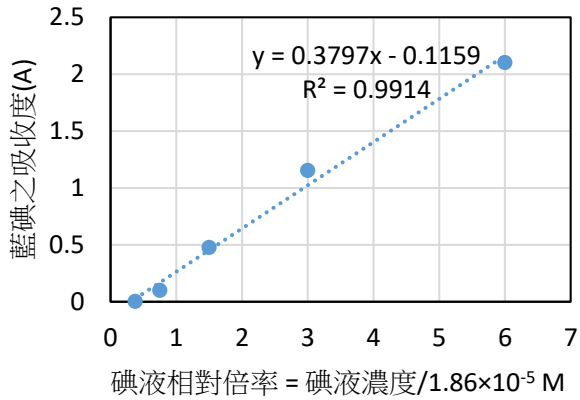
一、以本研究藍碘比色法應用於計算筷子釋放 SO_2 的速率

在先前的實驗我們發現不同品牌間的竹筷褪色時長為：7-11>八方雲集>雜牌。
接著我們使用分光光度計測量不同竹筷與藍碘試劑的接觸時長之吸收度，並計算出竹筷釋放 SO_2 的速率。

實驗將最佳參數藍碘溶液(0.15%澱粉水 600 mL 加入碘量 0.0371 M×300 uL)取出 6 cc 於試管中，並放入竹筷浸泡，將竹筷浸泡 6 cm 高之藍碘溶液是(模擬平時使用竹筷吃火鍋時插入水中的長度)。



【圖】藍碘比色試劑與竹筷(浸泡 6 cm)接觸的褪色情況



由吸收度回推碘液濃度
=(Δy+0.1159)/0.3797*1.86×10^{-5}

【圖】本研究藍碘比色試劑在 2.27A 內的比爾定律線性關係 R=0.99

一根筷子平均 20 公分。一根平均 3.375 公克。
經由計算發現 7-11 的筷子釋放 SO_2 的速率最慢

(1) $\boxed{SO_2} + H_2O \rightarrow HSO_3^- + H^+$

(2) $HSO_3^- + \boxed{I_2} + H_2O \rightarrow 2I^- + SO_4^{2-} + 3H^+$

由方程式可知 SO_2：I_2=1：1

6 cc 藍碘

以**麥味登**竹筷來說，10 分鐘內釋放的 SO_2 量為((2.27-0.44)+0.01159)/0.3797*1.86×10^{-5}*0.006 莫耳

相當於原竹筷質量的 0.5×10^{-6} 莫耳×64 g/莫耳(SO_2=64)/(3.375 g*6/20)=3.08 ppm

只插入 6 cm 竹筷

【表】本研究市售竹筷釋放 SO_2 的速率

	7-11	全家	麥味登
10 分鐘內釋放的 SO_2 量/竹筷重(ppm)	0.687	1.05	3.08

新聞提到的標準是 500 ppm，應該是指竹筷中的所有 SO_2 的濃度。本研究認為纖維間隙是藏匿 SO_2 的位置，因此需要竹筷泡水泡軟了才會逐漸釋放 SO_2，而非遇水瞬間釋放，只要在正常食用時間內不要超標即可。以正常人吃一碗麵(超過 10 分鐘大概麵都冷了難吃了)的前提下，這些市售竹筷雖然有不同釋放 SO_2 的速率，我們可以解釋成 7-11、全家等超商竹筷可能材質品質較好，有效減緩了 SO_2 釋放。這個方法學可以提供給民眾檢測自家愛用雜牌釋放 SO_2 的量化工具。

二、探討氧化澱粉為短鏈澱粉的性質

在初選作品中使用長鏈澱粉來探討藍碘的吸光係數(單位濃度的吸光度)性質

已知：

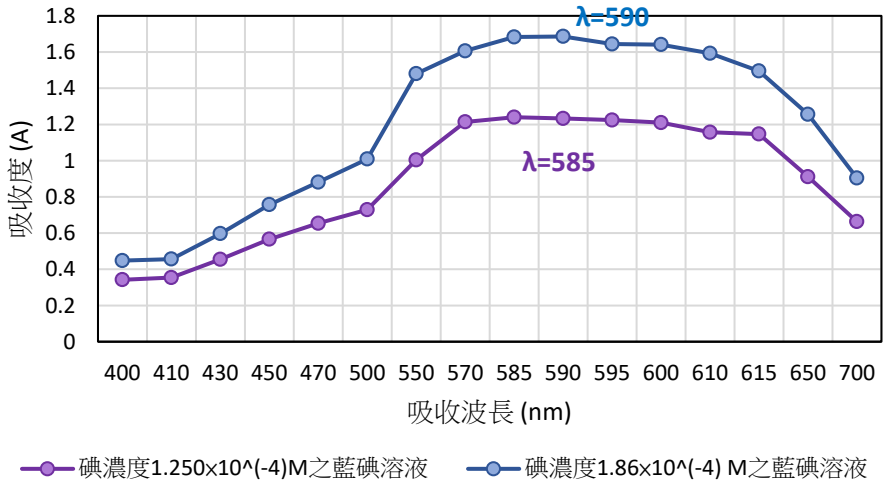
1. 澱粉過量使藍碘吸光係數發生負偏差。
2. 低水量混合時藍碘吸光係數也發生負偏差。

實驗認為這現象可能與其長鏈的結構有關係，因此，此實驗部分選擇短鏈澱粉並重複相同實驗來進行研究。

開始之前，實驗使用和直鏈澱粉相同的 SOP 來製作氧化澱粉藍碘溶液。

發現氧化澱粉配置出的藍碘溶液顏色會更偏向紫色，而加入更多碘液後會慢慢變成靛色，同時也會造成最大吸收波長的偏移，由原本的 585nm 偏移至 590nm，顏色明顯與長鏈澱粉與碘所形成的藍碘有很大的不同。

於是我們用「靛碘」這個稱呼來區分兩者。



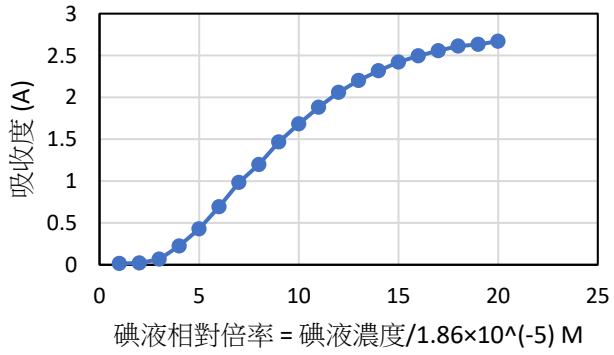
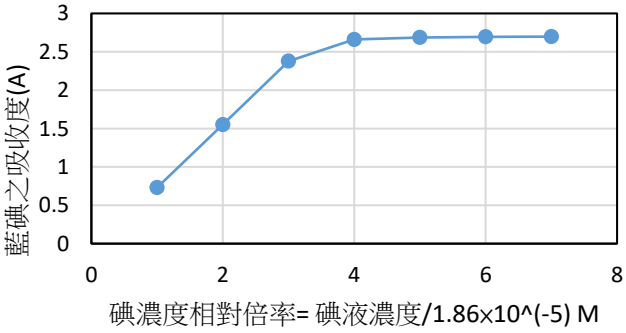
•左為$[I_2]=1.25\times10^{-4}$ M 之藍碘溶液

•右為$[I_2]=1.86\times10^{-4}$ M 之藍碘溶液

【圖】相同氧化澱粉濃度之 I_2-srtarch 錯合物溶液的吸收光譜

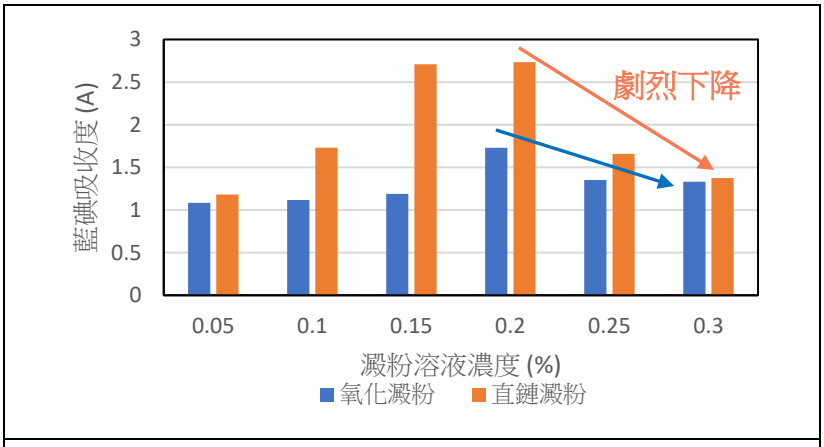
另一方面，由碘的累進曲線以及理論中可知，氧化澱粉分子量大約是長鏈澱粉的 1/5 左右，可以證明其短鏈的結構。

實驗發現：0.1%氧化澱粉約在加入 1000 uL 之碘液時，吸收度才有持平的現象，而一般長鏈則是在 200 uL 左右就持平了。

氧化澱粉	長鏈澱粉(之前數據)
	
【圖】0.1%氧化澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化	【圖】0.1%長鏈澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化

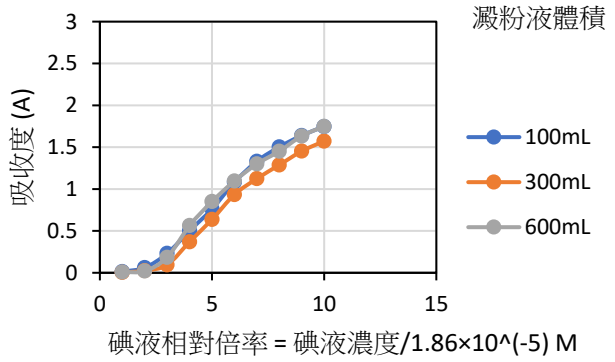
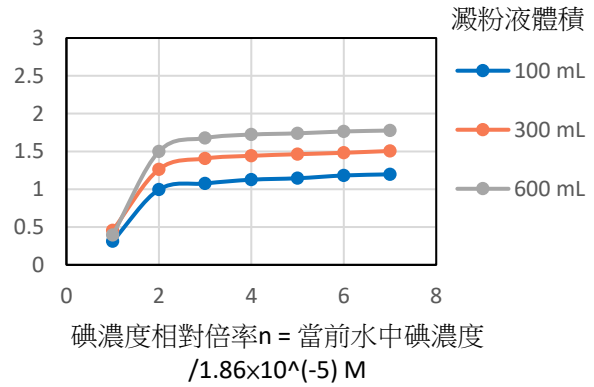
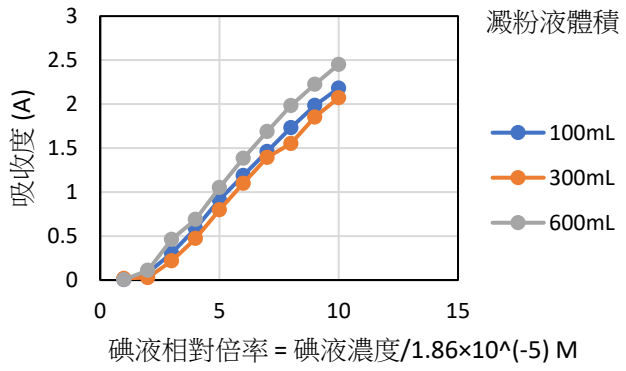
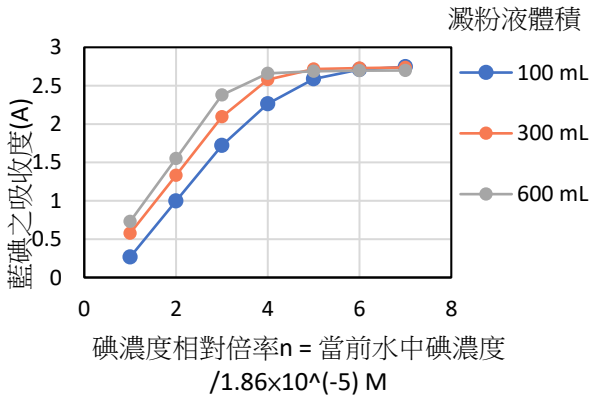
三、以氧化澱粉為短鏈澱粉為研究對象探討本研究假說可行性

實驗假設：與長鏈澱粉相比，氧化(短鏈)澱粉不易受到過量澱粉的影響。
實驗結果：符合假設，不同澱粉量之藍碘溶液吸收度變化較小。

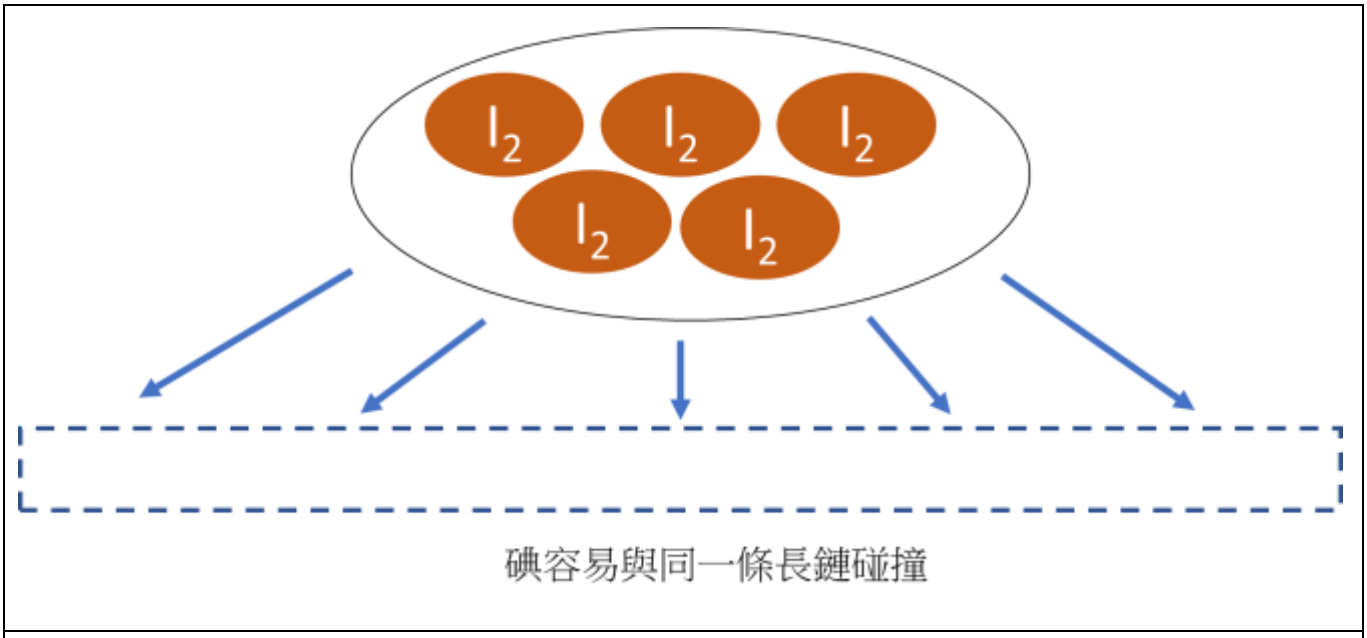


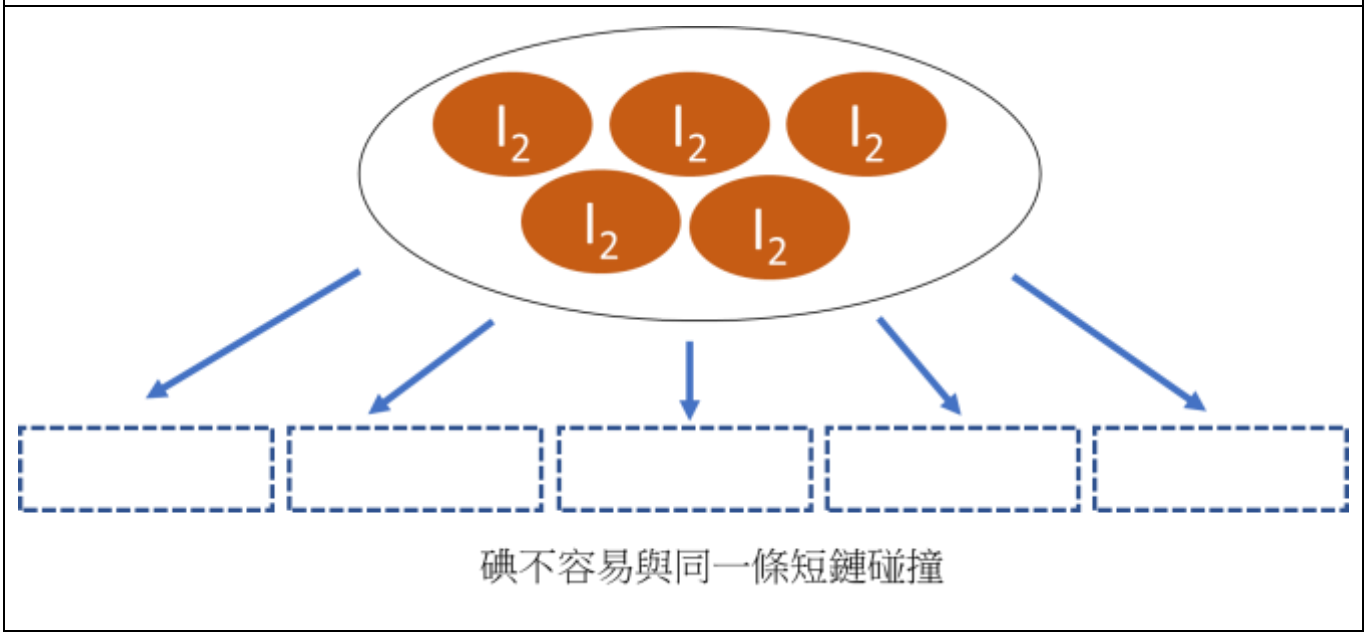
【圖】固定碘量、系統水量下，不同氧化澱粉液濃度及不同直鏈澱粉液濃度吸收度比較。(每 100 mL 的可溶性澱粉液中含碘量為 0.0371 M×300 uL)

實驗假設：氧化(短鏈)澱粉在低濃度澱粉濃度不易受到混和速率的影響。
實驗結果：符合假設，不同混和速率之藍碘溶液吸收度變化曲線幾乎重合。

氧化澱粉	長鏈澱粉(之前數據)
	
【圖】不同體積之 0.05%氧化澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化	【圖】不同體積之 0.05%長鏈澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化
	
【圖】不同體積之 0.15%氧化澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化	【圖】不同體積之 0.15%長鏈澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化

因此繪出以下示意圖來敘述假說：





可以解釋氧化澱粉與碘形成的靛碘錯合物，顏色幾乎不會受到混合速率影響，推測是因為其鏈短，碰撞面積小。

氧化澱粉與碘所形成的靛碘溶液比起藍碘溶液雖然在配製上更不容易造成顏色偏差，然而其具有幾個缺點。

1. 比藍碘溶液更易褪色。(推測可能是氧化澱粉由於表面帶有 COOH)
2. 無法像藍碘一樣能夠製成試紙。(實驗發現：靛碘無法產生鹽析)

陸、結論

1. 65~75℃之間澱粉不容易與碘形成藍碘，但透過加入更多的碘，仍可變成藍色，因此實驗推測它是個平衡關係，並非如課本所說在 70℃以上就無法變色。
2. 高溫時需加入更多的碘才能形成藍碘，但在降溫後平衡關係會改變，在高溫時加碘不僅浪費還可能誤加過量的碘液令溶液呈綠色，而放置室溫 25℃之藍碘溶液所需的用碘量最少，並且藍碘顏色足夠穩定。
3. 0.2%以上的澱粉濃度過濾效率並不好，因此實驗選擇使用 0.2%以下的澱粉濃度來做研究。
4. 碘量濃度皆控制在<350 uL(1×50~7×50 uL)原濃度碘液/100 mL 以內，超過此濃度，藍碘之吸收度會開始出現偏移，且依肉眼看眼色顏色開始轉變為綠色。
5. 過高的澱粉濃度會導致藍碘變淺，因此在固定碘量下，澱粉要夠多，但不能太多。
6. 碘和澱粉結合時會受到混和速率的影響藍碘的深淺，尤其在低濃度的澱粉時影響較嚴重(澱粉濃度為 0.05%)，推測是因為碘分布不均，低澱粉濃度時，澱粉分子間的距離較遠，當碘滴入溶液時大部分的碘會集中到同一澱粉鏈上，而其餘澱粉鏈中沒有碘令整體藍碘溶液顏色較淺。
7. 當澱粉濃度在 0.15%時也會受到混和速率的影響，推測是因為碘分布不均，當混和速率較快時，碘和澱粉的碰撞機率較高，所以碘會集中到同一條澱粉鏈上，但其餘的澱粉鏈中沒有碘令整體藍碘溶液顏色較淺。
8. 使用鹽析和雙氧水來驗證混和速率的假說，將藍碘使用鹽析作用將其沉澱，吸出上層液檢測，利用碘液中本就含有過量的碘離子使用雙氧水還原，檢測上層液中是否含有空澱粉而變色，驗證確實碘在澱粉液中的分布並不均勻，經由計算和實驗得出 0.15%100 mL 澱粉液加入 300 uL 金碘藥水為適當濃度且可得到恰完全反應的藍碘。
9. 筋麵粉類和糊精不適合用來配置試劑用途的藍碘，因為藍碘容易褪色，樹薯粉或玉米粉更適合。麵粉褪色原因推測是其中的蛋白質藉由小麥中含硫的胺基酸：半胱胺酸的硫醇基(-SH)與另一側的-SH，透過氧化成雙硫鍵(-S-S-)，利用分子作用力形成大分子結構將澱粉包入其中，使藍碘褪色；或是其中可能有游離的胺基酸可能導致碘液褪色。
10. 豆漿中的蛋白質並非造成藍碘比色試劑褪色的原因，而是因為豆漿中一些細菌在腐敗過程中會將含硫胺基酸分解，將硫原子轉化為硫化氫，而使藍碘比色試劑褪色。
11. 在不同品牌或是種類的豆漿間，藍碘褪色時長會有差異，需要製作特定品牌、品項豆漿的藍碘褪色時長表來檢視其新鮮程度。
12. 由藍碘比色試劑檢測出 7-11 的竹筷釋放 SO2 的速率較慢。
13. 使用鹽析作用能製作出具有保存性、可用性且方便攜帶的藍碘試紙。
14. 透過短鏈澱粉證明藍碘吸光係數發生負偏差的現象是因為直鏈澱粉高分子特性，只能透過控制混和速率變慢來降低影響。

柒、未來展望

1. 由於研究時間不夠長的緣故，本研究在應用性的測試尚不完善，未來可望將藍碘檢量線用於試劑檢測更多食品，觀察其與藍碘作用的規則。
2. 未來將使用額外經費購買 ORP 氧化還原電位測量來監控豆漿或是牛奶腐敗的過程，並將其與藍碘褪色時間作連結。
3. 未來更詳細深入探討藍碘溶液的褪色機制。

附錄、參考文獻

1. 科展文獻

第四十七屆中小學科學展覽會：解開「澱粉~碘」的藍色密碼
第四十八屆中小學科學展覽會：碘液調色盤--直鏈澱粉定量方法之改良
第五十八屆中小學科學展覽會：建立可溶性澱粉定量法應用於辨別蜂蜜優劣
第五十八屆中小學科學展覽會：魔法藥「碘」

2. Food Resource, Oregon State University, Corvallis, OR。取自：https://web.archive.org/web/20100630214145/https://food.oregonstate.edu/learn/starch.html
3. Sheri Madhu, Infinite Polyiodide Chains in the Pyrroloperylene–Iodine Complex: Insights into the Starch–Iodine and Perylene–Iodine Complexes, Angew. Chem. Int. Ed.(2016)。
4. 小麥麵團可以任我們搓圓捏扁，其實跟小麥蛋白質很有關係！——《麵的科學》 取自：PanSci 泛科學。
5. 烘焙的科學（二）澱粉糊化。取自：跟著鄭大師玩科學。
6. 碘、碘离子和碘三离子的紫外吸收光谱，魏永巨，刘翠格，默丽萍(2003)
7. 豆漿易壞較新鮮？營養師：室溫 2 小時細菌翻倍長(2015)。取自：Uho 優活健康網
8. What is Gluten_ It's probably not what you think.(2018)取自：Paleo Foundation
9. 外帶外送餐點用的免洗筷有毒？ 抽檢 16 件免洗筷 9 件驗出二氧化硫殘留。(2022)取自：yahoo 新聞
10. 「筷」樂人生。取自：2021 全國科學探究競賽-這樣教我就懂
11. 免洗筷真的有毒嗎？2 個方法立刻判斷，破解網路謠言！(2017)取自：風傳媒
12. Anaerobic respiration by yeast – fermentation(2021)取自：FuseSchool - Global Education

附錄、研究器材與藥品

一、藥品			
名稱	**學名**	**化學式**	**來源**
可溶性澱粉	solublestarch	(C6H10O5)n	立統
金碘藥水	Povidone-iodine		杏輝
氯化鈉	Sodium chloride	NaCl	立統
硫酸鈉	Sodium sulfate	Na2SO4	立統
硫代硫酸鈉	Sodium thiosulfate	Na2S2O3	立統
去離子水	Deion water	H_2O	立統

二、器材			
名稱	**學名**	**名稱**	**學名**
燒杯	Beaker	分光光度計	spectrophotometer
漏斗	Funnel	烘箱	Oven
滴管	Drop	洗滌瓶	Wash bottle
濾紙	Filter paper	定量瓶	Graduated flask
試管	Tube	試管架	Tube holder
防風電子秤	Balance	酸鹼計	pH meter
量筒	Graduated cylinder	微量吸量管	Pipette
錐形瓶	conical flask	離心機	Centrifugal
刮勺	Spatula	電磁爐	Electric Oven

圖示					
名稱	烘箱	分光光度計	酸鹼計	微量吸量管	離心機

附錄、實驗步驟

討論一、確認本研究使用的市售碘液濃度

(一) 步驟			
步驟 1-1　用 100mL 定量瓶配製 0.001 M 之硫代硫酸鈉，並使用標準品標定。			
步驟 1-2　使用熱水和可溶性澱粉配製澱粉指示劑			
步驟 1-3　將澱粉指示劑加入 0.001 M 硫代硫酸鈉中			
步驟 1-4　將市售碘液填充滴定管中			
步驟 1-5　利用滴定法，將此液用市售碘液滴至變色			
步驟 1-6　觀察並記錄碘液滴定體積，計算市售碘液濃度			
(二) 圖例說明			
步驟 1-1	步驟 1-2.1-3	步驟 1-4.1-5	步驟 1-6
配製 0.001 M 之硫代硫酸鈉	將配置好的澱粉指示劑加入硫代硫酸鈉中	將市售碘液倒入滴定管中並滴定	達滴定終點記錄滴定體積

討論二、確認溫度對配製藍碘標準溶液的影響

(一) 步驟			
步驟 2-1　(熱製)將可溶性澱粉裝入兩個不同燒杯中，並在燒杯中分別加入冷水或 70~80°C 之熱水 100mL，並待其冷卻至室溫 25°C。			
步驟 2-2　(熱製)使用 pipette 於步驟 2-2 的兩澱粉液中加入相同體積碘液，觀察並記錄其現象。			
步驟 2-3　(降溫)將可溶性澱粉裝入不同燒杯中，每杯都加入 100°C 熱水 100mL，並待其冷卻至不同溫度(25、50、65、75、85°C)。			
步驟 2-4　(降溫)使用 pipette 於步驟 2-3 的五杯澱粉液中加入相同體積碘液。			
步驟 2-5　(降溫)將步驟 2-4 之藍碘溶液吸取 10mL 裝入離心管中。			
步驟 2-6　(降溫)使用自製照度計測量其照度並記錄。			
步驟 2-7　(降溫)重複步驟 2-3 配置五杯不同溫度之澱粉液。			
步驟 2-8　(降溫)使用 pipette 於步驟 2-5 的五杯澱粉液加入碘液直到藍碘溶液達照度 001，記錄其達照度 001 所需碘量(uL)			
(二) 圖例說明			
步驟 2-1.2-3.2-5	步驟 2-2.2-4.2-7	步驟 2-5	步驟 2-6

配置澱粉液	加入碘液	吸取藍碘溶液裝入離心管中	自製照度計測量照度

討論三、確認不同濃度澱粉液的過濾速度以此限制澱粉液的最高濃度

(一) 步驟	
步驟 3-1　使用 100mL 熱水及可溶性澱粉配置不同濃度之澱粉液。	
步驟 3-2　使用重力過濾法過濾，同時計時並記錄過濾體積，最終計算其過濾速率。	
(二) 圖例說明	
步驟 3-1	3-2
配置不同濃度之澱粉液	紀錄過濾體積，計算速率

討論四、確認 [I_2-amylose] 吸收光譜尋找偵測波長以及限制碘液用量上限

(一) 步驟			
步驟 4-1　使用 100mL 熱水及可溶性澱粉配置數杯澱粉液。			
步驟 4-2　重力過濾法過濾取得澱粉澄清液。			
步驟 4-3　透明澄清液中加入不同體積碘液，攪拌，製成不同碘濃度藍碘溶液。			
步驟 4-4　吸取碘液濃度 3.57×10-5 M、1.25×10-4 M 之藍碘溶液滴入分光槽中，使用分光光度計測量吸光度。			
(二) 圖例說明			
步驟 4-1	步驟 4-2	步驟 4-3	步驟 4-4
配置澱粉液	重力過濾法	製成不同碘濃度藍碘溶液	測量吸收度

討論五、探討碘液與不同濃度澱粉液反應得到之藍碘溶液

(一) 步驟
步驟 5-1　秤取不同百分比所需之可溶性澱粉加入燒杯中(以 0.1%為例)
步驟 5-2　加入不同體積熱水至燒杯中，攪拌並放置冷卻，至室溫 25 度
步驟 5-3　用重力過濾法取得澱粉澄清液
步驟 5-4　使用 pipette 吸取碘液，於澱粉澄清液中加入碘液，並攪拌，製成藍碘溶液。
步驟 5-5　使用分光光度計測量吸收度
(二) 圖例說明

步驟 5-1	步驟 5-2	步驟 5-3	步驟 5-4	步驟 5-5
秤取澱粉藥品	加 100mL 熱水配置澱粉液	重力過濾法	加入碘製成藍碘溶液	測量吸收度

討論六、探討澱粉液與碘液以不同的混合速率得到之藍碘溶液

(一) 步驟				
步驟 6-1　秤取不同百分比所需之可溶性澱粉加入燒杯中(以 0.1%100mL 為例)				
步驟 6-2　加入不同體積之熱水至燒杯中，配置成不同體積澱粉液(100、200、300、400、600mL)，攪拌並放置冷卻，至室溫 25 度。				
步驟 6-3　使用重力過濾法取得澱粉澄清液				
步驟 6-4　使用 pipette 吸取碘液，於澱粉澄清液中加入碘液，並攪拌，製成藍碘溶液。				
步驟 6-5　使用分光光度計測量吸收度				
(二) 圖例說明				
步驟 6-1	步驟 6-2	步驟 6-3	步驟 6-4	步驟 6-5
秤取澱粉藥品	熱水配置不同體積澱粉液	重力過濾法	加入碘製成藍碘溶液	測量吸收度

討論七、以澱粉分子量證明上述累進滴定法的數據可信度並解釋藍碘機制

(一) 步驟			
步驟 7-1　將配置好的澱粉澄清液，使用 pipette 吸取碘液，於澱粉澄清液中加入不同體積碘液，並攪拌，製成不同碘濃度之藍碘溶液。			
步驟 7-2　於藍碘溶液中加入氯化鈉使其飽和，產生鹽析作用析出藍碘沉澱。			
步驟 7-3　吸取藍碘沉澱滴入離心管中，並離心，離心後觀察並記錄實驗結果。			
步驟 7-4　將上層液吸出，加入雙氧水，觀察並記錄實驗結果。			
(二) 圖例說明			
步驟 7-1	步驟 7-2	步驟 7-3	步驟 7-4

配置不同碘濃度之藍碘溶液	藍碘沉澱析出	吸取藍碘沉澱滴入離心管	吸出上層液，並加入雙氧水

討論八、探討不同澱粉種類和碘作用之藍碘溶液

(一) 步驟			
步驟 8-1　秤取不同百分比所需之不同來源的澱粉加入燒杯中(以 0.1%樹薯粉為例)			
步驟 8-2　加入 100mL 熱水至燒杯中，配置成不同來源澱粉溶液，攪拌並放置冷卻，至室溫 25 度。			
步驟 8-3　使用重力過濾法取得澱粉澄清液。			
步驟 8-4　使用 pipette 吸取碘液，於澱粉澄清液中加入碘液，並攪拌，製成藍碘溶液。			
步驟 8-5　觀察並記錄結果。			
(二) 圖例說明			
步驟 8-1	步驟 8-2	步驟 8-3	步驟 8-4
秤取樹薯粉	加入 100mL 熱水配置成樹薯粉液	重力過濾法，得到樹薯粉澄清液	加碘液製成藍碘溶液

討論九、探討藍碘溶液的時間穩定性

(一) 步驟			
步驟 9-1　使用 100mL 熱水及可溶性澱粉以先前討論之標準製造程序配置出澱粉澄清液。			
步驟 9-2　使用 pipette 吸取碘液，於澱粉澄清液中加入碘液，並攪拌，形成藍碘溶液。			
步驟 9-3　吸取 10mL 藍碘溶液裝入離心管中。			
步驟 9-4　記錄其放置天數，並監測其 pH 值變化，記錄測量之 pH 值。			
(二) 圖例說明			
步驟 9-1	步驟 9-2	步驟 9-3	步驟 9-4
配置澱粉澄清液	配置藍碘溶液	藍碘溶液裝入離心管	監控 pH 值

討論十、藍碘溶液食品應用效果測試

(一) 步驟
步驟 10-1　將製作好的 0.1%藍碘溶液吸取 10mL 置於離心管中。
步驟 10-2　(以豆漿為例)使用 pipette 吸取 100uL 市售豆漿。
步驟 10-3　將豆漿滴入 10mL 藍碘溶液中，同時開始計時。
步驟 10-4　觀察並記錄藍碘溶液褪色時長。

(二) 圖例說明		
步驟 10-1	步驟 10-2	步驟 10-3.10-4
藍碘沉澱取出 10mL 放離心管	吸取 100uL 市售豆漿	豆漿滴入藍碘溶液，並計時

討論十一、使用澱粉沉澱物製作藍碘試紙

(一) 步驟
步驟 11-1　將製作好的藍碘溶液加入氯化鈉使其飽和。
步驟 11-2　利用鹽析作用，析出藍碘沉澱。
步驟 11-3　使用重力過濾法過濾藍碘沉澱物，留下濾餅。
步驟 11-4　將濾餅放入烘箱烘乾。
步驟 11-5　拿出乾燥濾餅，並修剪成長 4cm 寬 1cm 長條形試紙狀。

(二) 圖例說明

步驟 11-1	步驟 11-2	步驟 11-3	步驟 11-4	步驟 11-5
加氯化鈉於藍碘溶液中	藍碘沉澱析出	重力過濾法過濾沉澱物	將濾餅放入烘箱	修剪濾紙呈長條試紙

附錄、原始數據

以 0.001M 硫代硫酸鈉滴定不同體積的市售碘液之滴定體積

硫代硫酸鈉體積	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
碘液滴定體積	0.1	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.4

降溫至不同溫度的澱粉液加入等量的碘液之藍碘的照度

溫度	25	50	65	75	85
照度	35	75	98	384	398

降溫至不同溫度的澱粉液變成照度 001 的藍碘，所需加入的碘液量

溫度	25	50	65	75	85
照度 001 碘量(uL)	150	300	350	750	800

不同濃度可溶性澱粉過濾速度

濃度	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
速率(mL×s^(-1))	0.067	0.065	0.021	0.018	0.017

固定水量、以累進碘量探討不同濃度澱粉液形成藍碘的吸光度

碘濃度 n×1.86×10^(-5) M \ 澱粉濃度	0.05%	0.10%	0.15%	0.20%
1	0.312	0.3	0.267	0.243
2	0.995	1.016	0.997	1.037
3	1.076	1.547	1.721	1.812
4	1.126	1.642	2.264	2.312
5	1.145	1.685	2.588	2.628
6	1.182	1.732	2.71	2.733
7	1.197	1.761	2.746	2.764

不同體積之 0.05%澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化

碘濃度 n×1.86×10^(-5) M \ 澱粉液體積	100 mL	200 mL	300 mL	400 mL	600 mL
1	0.312	0.395	0.455	0.518	0.397
2	0.995	1.499	1.263	1.329	1.113
3	1.076	1.676	1.406	1.448	1.166
4	1.126	1.723	1.442	1.473	1.195
5	1.145	1.739	1.463	1.487	1.216
6	1.182	1.764	1.482	1.503	1.224
7	1.197	1.776	1.506	1.522	1.276

不同體積之 0.1%澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化

碘濃度 n×1.86×10^(-5) M \ 澱粉液體積	100 mL	200 mL	300 mL	400 mL	600 mL
1	0.3	0.345	0.377	0.481	0.484
2	1.016	1.179	1.18	1.291	1.3
3	1.547	1.915	1.881	2.076	2.155

4	1.642	2.42	2.265	2.39	2.437
5	1.685	2.462	2.34	2.414	2.459
6	1.732	2.477	2.373	2.432	2.489
7	1.761	2.646	2.374	2.437	2.472

不同體積之 0.15%澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化

澱粉液體積 / 碘濃度 n×1.86×10^(-5) M	100 mL	200 mL	300 mL	400 mL	600 mL
1	0.267	0.37	0.577	0.612	0.731
2	0.997	1.212	1.331	1.328	1.551
3	1.721	1.964	2.095	2.086	2.378
4	2.264	2.4	2.578	2.538	2.661
5	2.588	2.519	2.717	2.627	2.687
6	2.71	2.532	2.73	2.642	2.695
7	2.746	2.543	2.737	2.648	2.698

不同體積之 0.2%澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化

澱粉液體積 / 碘濃度 n×1.86×10^(-5) M	100 mL	200 mL	300 mL	400 mL	600 mL
1	0.243	0.414	0.411	0.495	0.466
2	1.037	1.379	1.36	1.375	1.381
3	1.812	2.146	2.172	2.117	2.307
4	2.312	2.586	2.325	2.578	2.65
5	2.628	2.725	2.728	2.726	2.753
6	2.733	2.768	2.767	2.767	2.773
7	2.764	2.779	2.78	2.778	2.783

不同來源的 0.15%、600 mL 澱粉液在(1~7)×1.86×10^(-5) M 碘濃度時的吸收度

不同澱粉液 / 碘濃度 n×1.86×10^(-5) M	樹薯粉	玉米粉	低筋麵粉	中筋麵粉	高筋麵粉
1	0.221	0.168	0.02	0.019	0.022
2	0.829	0.815	0.304	0.757	0.371
3	1.547	1.588	0.859	1.523	1.026
4	2.194	2.151	1.436	2.162	1.663
5	2.338	2.407	1.562	2.274	1.756
6	2.384	2.523	1.547	2.279	1.799
7	2.394	2.527	1.564	2.305	1.814

不同來源 0.15%600 mL 澱粉液在 4×1.86×10-5 M 碘濃度藍碘隨時間褪色情形

不同澱粉液 / 放置時長	樹薯粉	玉米粉	低筋麵粉	中筋麵粉	高筋麵粉
0	2.194	2.151	1.436	2.162	1.663
10	2.194	2.15	1.153	2.114	1.342

20	2.194	2.149	0.885	1.987	1.004
30	2.194	2.145	0.379	1.652	0.54
40	2.194	2.145	0.133	1.42	0.164
50	2.194	2.143	0.002	1.287	0.002
60	2.194	2.141	0	1.156	0.002

比較不同放置天數澱粉溶液與碘作用所形成之藍碘溶液 pH 值變化

碘濃度 n×1.86×10^(-5) M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
放置 0 天澱粉液	8.17	8.17	8.16	8.15	8.14	8.13	8.13	8.12	8.11	8.1	8.09
放置 5 天澱粉液	7.06	7.05	7.05	7.04	7	6.98	6.97	6.95	6.95	6.94	6.93

豆漿和米漿對藍碘溶液褪色時長

	豆漿	米漿
蛋白質含量（%）	5.1%	0.35%
褪色時長（分）	195	360

豆漿蛋白質含量對藍碘溶液褪色時長影響

豆漿蛋白質（%）	5.1%	15.3%
褪色時長（分）	20	180

甘胺酸和味精對藍碘溶液褪色時長影響

	甘胺酸	味精
褪色時長(分)	2340	1140

牛奶和豆漿對藍碘溶液褪色時長

	牛奶	豆漿
褪色時長(分)	57	113

豆漿放置時長對藍碘溶液褪色時長影響

放置時長(分)	0	10	30	60
褪色時長(分)	195	129	96	27

米漿放置時長對藍碘溶液褪色時長影響

放置時長(分)	0	10	30	60
褪色時長(分)	360	350	327	298

不同筷子品牌對藍碘溶液褪色時長影響

筷子品牌	7-11	八方雲集	雜牌
褪色時長(分)	90	60	61

豆漿、牛奶的放置時常對藍碘試紙褪色時長的影響

	豆漿放置 0 分	豆漿放置 120 分	牛奶放置 0 分	牛奶放置 120 分
試紙褪色時長(分)	30	26	30	20

附錄、決賽新增數據

監控竹筷釋放之 SO2 時間軸

時長(分鐘) \ 品牌	對照組	全家	7-11	麥味登	雜牌
0	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27
5	2.26	1.907	2.03	0.44	0.677
10	2.265	1.646	1.862	0.098	0.198
15	2.269	1.506	1.728	0.062	0.065
20	2.27	1.357	1.612	0.045	0.039
25	2.269	1.252	1.511	0.036	0.032
30	2.268	1.169	1.393	0.032	0.03
35	2.27	1.1	1.275	0.033	0.031
40	2.27	1.033	1.152	0.036	0.033

氧化澱粉吸收光譜

吸收波長 (nm) \ 碘濃度 (M)	1.250×10^(-4)M	1.86×10^(-4) M
400	0.342	0.448
410	0.354	0.456
430	0.455	0.597
450	0.566	0.757
470	0.654	0.881
500	0.729	1.009
550	1.004	1.48
570	1.214	1.606
585	1.24	1.683
590	1.233	1.686
595	1.224	1.644
600	1.21	1.641
610	1.157	1.593
615	1.147	1.495
650	0.911	1.256
700	0.663	0.904

固定碘量、系統水量，不同濃度氧化澱粉溶液吸收度(碘濃度 7×1.86×10-5 M)

澱粉濃度(%)	吸收度(A)
0.05	0.844
0.1	0.984
0.15	1.331
0.2	1.983
0.25	1.509
0.3	1.455
0.4	1.419
0.5	1.376

固定碘量、系統水量，不同濃度氧化澱粉及直鏈澱粉吸收度比較(碘濃度 6×1.86×10-5 M)

澱粉濃度(%) \ 澱粉種類	氧化澱粉	直鏈澱粉
0.05	1.083	1.182
0.1	1.118	1.732
0.15	1.188	2.71
0.2	1.729	2.733
0.25	1.352	1.658
0.3	1.332	1.375

不同體積之 0.05%氧化澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化

碘濃度 n×1.78×10^(-5) M \ 澱粉液體積	100mL	300mL	600mL
1	0.013	0.004	0.008
2	0.061	0.025	0.021
3	0.231	0.095	0.185
4	0.502	0.37	0.564
5	0.762	0.637	0.851
6	1.082	0.934	1.097

7	1.332	1.124	1.3
8	1.503	1.288	1.452
9	1.64	1.453	1.634
10	1.747	1.573	1.749

不同體積之 0.15%氧化澱粉水溶液與碘作用所形成之藍碘溶液吸收度變化

澱粉液體積 / 碘濃度 n×1.86×10^(-5) M	100mL	300mL	600mL
1	0.006	0.019	0.004
2	0.083	0.028	0.11
3	0.306	0.218	0.462
4	0.588	0.472	0.689
5	0.914	0.798	1.051
6	1.188	1.099	1.384
7	1.461	1.393	1.688
8	1.732	1.552	1.983
9	1.984	1.852	2.224
10	2.182	2.072	2.451

固定碘量、系統水量 100mL，0.1%氧化澱粉溶液吸收度變化

碘濃度 n×1.86×10^(-5) M	吸收度(A)	碘濃度 n×1.86×10^(-5) M	吸收度(A)
1	0.015	11	1.882
2	0.021	12	2.06
3	0.067	13	2.202
4	0.225	14	2.317
5	0.429	15	2.422
6	0.692	16	2.495
7	0.984	17	2.557
8	1.198	18	2.612
9	1.468	19	2.633
10	1.683	20	2.67