

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 化學科

080207

蛋白生"氣"了！~蛋白起泡性之探究

學校名稱：高雄市左營區舊城國民小學

作者： 小六 陳秉鉸 小五 李曼玉 小五 張詠禎	指導老師： 蕭妃茹 余虹滿
---	-----------------------------

關鍵詞：蛋白質、起泡、變性

摘要

本研究透過蛋白起泡的過程，了解蛋白質變性現象、影響蛋白起泡因素，並分析蛋白泡比重與打發階段之關聯性。研究發現轉速 1200RPM 適合將蛋白質鏈結打開。添加液態糖、水、或提高蛋白溫度都有利於蛋白質鏈結打開，打出比重小、但安定性較差的蛋白泡。添加糖的時間點及糖量也會影響蛋白鏈打開，研究發現先攪打 2 分鐘將鏈結打開後再加糖，可使蛋白泡起泡佳，若加入超過 80% 以上的糖就可穩固蛋白質結構，打出安定性佳的蛋白泡。不同蛋種的蛋白泡比重為鵝鶉蛋 > 雞蛋 > 鵝蛋 > 鴨蛋。最後發現比重在 $0.38 \text{ g/cm}^3 \sim 0.28 \text{ g/cm}^3$ 的蛋白泡，介於濕性與硬性發泡之間，適合應用在烘焙食品。透過實作了解適當比重的蛋白泡具有彈性，可拉出小尖頭並做出紋路凹陷率大、表面光滑的蛋白糖。

壹、研究動機

膨鬆的蛋糕、雲朵般的蛋白糖（馬林糖）都是我們的最愛，最近學校新成立了烘焙教室，藉著手作簡單的甜點課程，我們發現蛋白打發是甜點烘焙的靈魂，但坊間對蛋白打發技巧眾說紛紜，所以我們想先了解蛋白起泡的化學原理，以及探討影響蛋白起泡的因素有哪些，只有對蛋白有更進一步的了解，才能好好的控制不同點心所適合的蛋白霜，做出完美的成品。（5 年級康軒自然與生活科技第六冊燃燒與生鏽）

貳、研究目的

- 一、轉速對蛋白起泡性之影響
- 二、糖的種類對蛋白起泡性之影響
- 三、糖量對蛋白起泡性之影響
- 四、糖加入時間對蛋白起泡性之影響
- 五、添加水量對蛋白起泡性之影響
- 六、蛋白溫度對蛋白起泡性之影響
- 七、蛋的種類對蛋白起泡性之影響
- 八、蛋白泡在烘焙領域之應用性

參、研究設備及器材

雞蛋、鴨蛋、鵝蛋、鵪鶉蛋、電子秤、計時器、擠花袋、砂糖、Tachometer GM8905 數字轉速表、臺灣衡器-微量化學天平（NHB-300）、鍋寶攪拌機（TM-8020）、pH 計。



肆、研究過程與方法

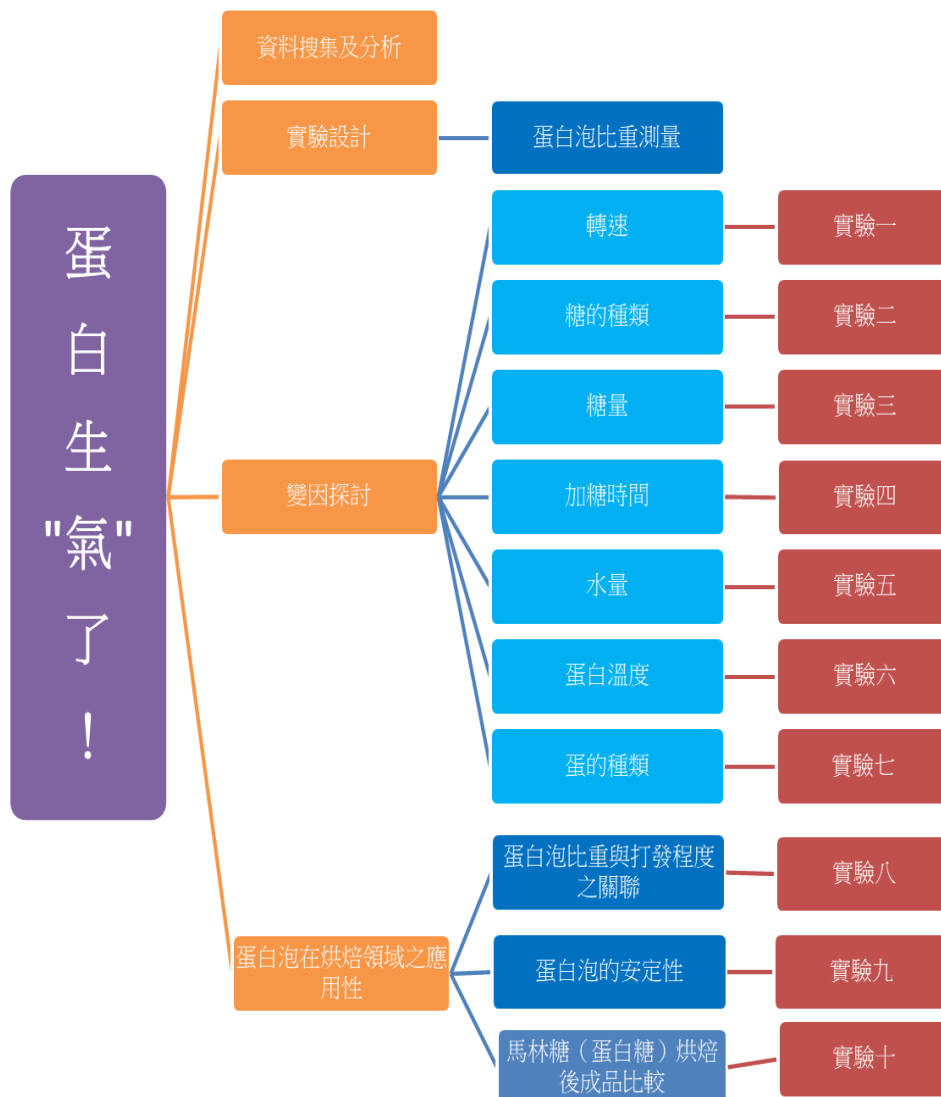


圖 1 研究架構流程圖

一、文獻探討

(一) 蛋白的化學成份

雞蛋中蛋白約占蛋重的 60% ，蛋黃約占蛋重的 30% ，蛋殼約占 10% 。蛋白內約含有 40 種蛋白質，各種蛋白成份含量及它的特性如下表 1，其中卵球蛋白、卵黏蛋白對蛋白的起泡性影響最大。(施明智等人，2013，p496-498)

表 1 蛋白成份含量及特性

蛋白質	比例	天然功能	烹飪特性
卵白蛋白	54%	養分	71.5°C 開始凝固
伴白蛋白	12%	結合鐵	凝固點 57.3°C ，熱穩定性最低。
卵類黏蛋白	11%	阻擋消化酵素	
卵球蛋白	8%	阻塞蛋殼膜與蛋殼之缺陷處	72°C 開始凝固，容易發泡
卵黏蛋白	3.5%	稠化蛋白，抑制病毒	穩定泡沫
溶菌酶	3.4%	消化細菌細胞壁	75°C 開始凝固，穩定泡沫

(二) 蛋白質的結構：由於蛋白質主鏈肽鍵上羰基(C=O)上的氧原子可以和鹼氨基(NH)上的氫原子藉由分子間氫鍵的引力作用，將主鏈纏繞成 α 螺旋或 β 折疊，因此蛋白質長鏈糾纏成一團如 (圖 2)，因蛋白中含大量水，使得蛋白質長鏈中的親水端向外，而疏水端向內。

(跟著鄭大師學科學)

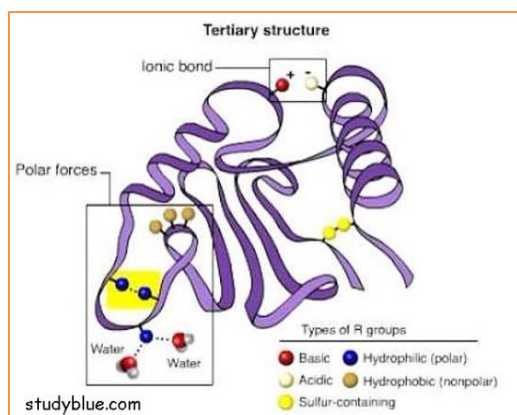


圖 2：蛋白質三級結構示意圖 (資料來源：studyblue.com)

(三) 蛋白的起泡原理

蛋白的泡沫性包含 (1) 起泡性：是否容易產生泡沫。(2) 泡沫安定性：是指形成的泡沫不容易消失的性質。蛋白透過攪拌棒攪打的動作，使空氣進入蛋液中形成泡沫。攪打會使卵球蛋白原本摺疊的結構展開，蛋白鏈上的疏水端與空氣鍵結，親水端與水鍵結，最後形成包圍空氣的蛋白質網。卵黏蛋白則使形成的氣泡表面變性，形成固化的薄膜，使氣泡內空氣不致於外洩。持續攪打，氣泡逐漸變小變多，在空氣與蛋白液交接面的蛋白質受到延伸及乾燥而有部份變性的情形，這樣的變性可以穩固泡沫的持久性。若過度攪打，使過多空氣進入，會造成過度變性，反而使蛋白膜變薄且缺乏彈性。(施明智等人，2013，p500-501)

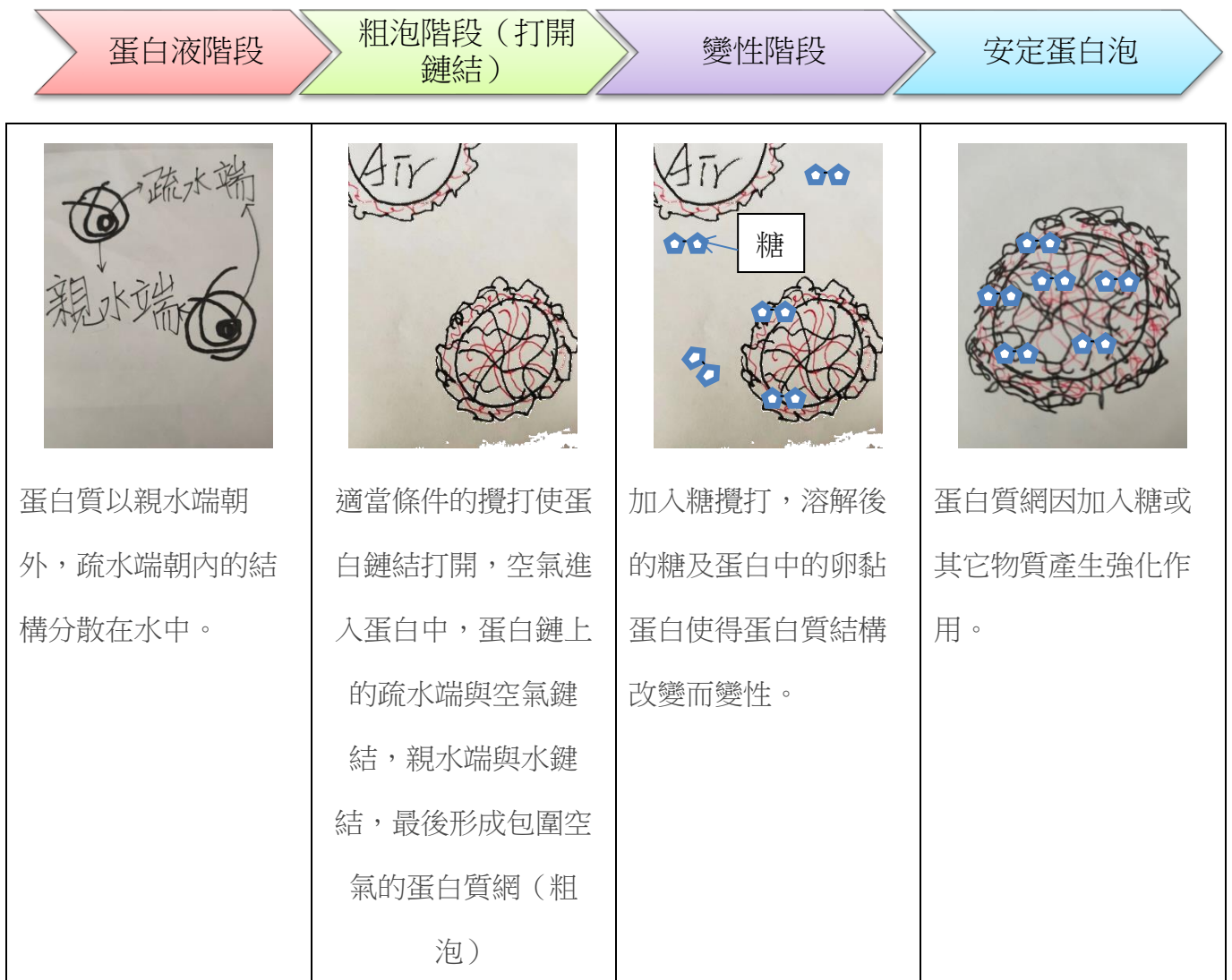


圖 3 蛋白起泡過程 (參考施明智等人，2013，p501 圖 10.24，作者手繪示意圖)

(四) 蛋白打發的階段

利用蛋白打發後的蛋白泡應用在烘焙食品上就稱為「蛋白霜」，蛋白打發的過程一般以人為判斷為主，可以分為以下四個階段（圖 5），但因無一定標準，人為判斷誤差大，再加上不同的甜點對蛋白霜打發程度各有不同的考量，常為甜點失敗的主因：（曾道一、賈宜琛，2011，P182）



圖 4 打發程度之定性描述圖說

(五) 歷屆科展分析比較

表 2：蛋白泡相關作品分析比較

主題（屆數）	作品內容與結果	分析
蛋白棉花~蛋白霜之研究（54 屆全國科展）	一、尋找影響蛋白打發的變因。 結果發現蛋白高度變化率 3.2 達乾性發泡階段。	此作品以蛋白霜的高度變化率來判斷是否達乾性發泡，因發泡後呈不規則表面，測得的高度誤差大， 本研究改以蛋白泡比重來判斷起泡程度 ，若將該研究之高度變化 3.2 代入換算成比重約 0.33g/cm^3 ，此點落在本研究提出之比重範圍內，且本研究含蓋可用於烘焙領域之蛋白霜更廣泛。
神奇出奇蛋變棉花了！（40 屆全國科展）	一、研究不同鮮度的蛋白其起泡性的差異與持久性 二、比較在蛋白中加入不同性質的物質對起泡性及持久性之影響	蛋白起泡性只以外觀文字描述，蛋白出水情況以出水體積做判定。該研究探討之變因較少。



二、實驗設計

(一) 蛋白泡比重測量

蛋白泡體積膨鬆呈不規則狀，我們利用比重來說明蛋白膨脹程度，利用水的密度為 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 的特性，求出盛裝泡沫的杯子體積，再將蛋白泡輕輕擠入杯子內，以筷子刮平，測量蛋白泡的質量，最後利用以下公式求出蛋白泡比重，比重越小，代表打入的空氣越多，越膨鬆。

$$\text{蛋白泡質量} \div \text{蛋白泡體積} = \text{蛋白泡比重}$$

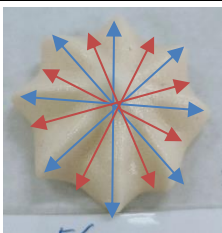
表 3 蛋白泡比重之測量

測量空杯體積 (V)	測量蛋白泡質量(M)	計算蛋白泡比重(D)
		蛋白泡比重 (D) = 蛋白泡質量 (M) ÷ 蛋白泡體積 (V)

(二) 紋路凹陷率

將打好的蛋白泡以八齒擠花嘴擠出，蛋白泡越安定，結構穩定，烘焙出的蛋白糖紋越明顯，本研究以成品底部最長連線（藍線）與最短連線（紅線）平均的差異，計算出紋路凹陷率，紋路凹陷率越大代表紋路越明顯。

表 4 紋路凹陷率之測量

	紋路凹陷率= (最長連線平均-最短連線平均) /最長連線平均 *100%
---	---

三、變因探討

《實驗一》轉速對蛋白起泡性之影響

前言：透過攪拌器可以將空氣打入蛋白內，但是我們發現不同機型的攪拌機器適合攪打的轉速都不同，我們想了解轉速對蛋白打發有影響嗎？

實驗步驟：

- 1、先用數位顯示鐳射轉速計來測量鍋寶電動攪拌器機器上的 1 到 5 速，每分鐘有幾轉 (RPM)。
- 2、取 100g 的蛋白與 100g 的白砂糖，使用鍋寶電動攪拌器分別以機器上的 1 到 5 速攪打 6 分鐘，測量蛋白泡比重。

《實驗二》糖的種類對蛋白起泡性之影響

前言：糖的功能除了提供甜味，對蛋白起泡是否有影響？我們以常用的固體糖和液體糖來進行打發，觀察不同糖類打出的蛋白泡沫有何差異？

實驗步驟：

- 1、取 100g 的蛋白與 100g 的白砂糖，以鍋寶攪拌器轉速 4 攪打 6 分鐘，測量蛋白泡比重。
- 2、重複步驟 1，分別改為黃砂糖、黑糖、上白糖、果糖、蜂蜜。

《實驗三》糖量對蛋白起泡性之影響

前言：依照坊間的食譜，如果要做成功的馬林糖，蛋白和糖的比例要高達 1:2，這個甜度對許多人而言實在太甜了，所以為了健康，大家會試著減少糖量使用，我們想知道添加不同糖量對蛋白泡比重有什麼影響，想要減糖可以減到什麼程度呢？

實驗步驟：

- 1、取 100g 蛋白與分別與稱量 20g(20%)、40g(40%)、60g(60%)、80g(80%)、100g(100%)白砂糖，以鍋寶攪拌器轉速 4 攪打蛋白，分別在 4 分鐘內取出適當的蛋白泡，並測量蛋白泡比重。

《實驗四》糖在不同的時間加入對蛋白起泡性之影響

前言：許多烘焙的書籍都提到加糖打發蛋白時，要在攪拌到中段時再加糖，可以幫助蛋白打發，我們想知道在不同時間點加糖對蛋白泡比重有什麼影響？

實驗步驟：

- 1、取 100g 的蛋白與 100g 的白砂糖，以鍋寶攪拌器轉速 4 攪打，分別在攪打蛋白 0 分鐘、2 分鐘、4 分鐘、6 分鐘後加入白砂糖，繼續攪打到 10 分鐘，測量 6 分鐘、7 分鐘、8 分鐘、9 分鐘、10 分鐘蛋白泡比重。

《實驗五》添加水量對蛋白起泡性之影響

前言：從上面實驗發現水分高的液態糖，可以讓蛋白起泡速度加快，所以我們想知道外加水對蛋白起泡是否有影響，所以我們進行不同水量對蛋白起泡性的影響。

實驗步驟：

- 1、取 100g 的蛋白與 100g 的白砂糖，以鍋寶攪拌器轉速 4 攪打，分別添加 10g(10%)、20g(20%)、30g(30%)、40g(40%)、50g(50%)的水量，測量 6 分鐘蛋白泡比重。

《實驗六》蛋白溫度對蛋白起泡性之影響

前言：烘焙書上總是提到雞蛋有沒有冰過對蛋白打發會有影響，我們想透過蛋白泡比重來看蛋白溫度如何影響蛋白起泡。

實驗步驟：

- 1、分別取不同溫度之蛋白 100g 與 100g 的白砂糖，以鍋寶攪拌器轉速 4 攪打，測量 6 分鐘蛋白泡比重。

《實驗七》不同蛋種對蛋白泡起泡性質的探討

前言：一般我們都是以雞蛋為蛋白來源，但生活中有許多種類的蛋，例如鴨蛋、鵝蛋或鵪鶉蛋都可提供蛋白，我們想知道這些不同的蛋白來源對蛋白起泡效果有沒有影響，所以我們進行不同蛋種對蛋白泡起泡性質的探討。

實驗步驟：

- 1、以游標尺測量各種蛋的大小尺寸。
- 2、分離各種蛋之蛋白與蛋黃，稱重量。
- 3、以酸鹼計及廣用試紙進行蛋白酸鹼值測定。
- 4、取 100g 的蛋白與 100g 的白砂糖，以轉速 4 攪打 6 分鐘，測量蛋白泡比重。

四、蛋白泡在烘焙領域之應用性

《實驗八》蛋白泡比重與打發程度的關聯

方法：我們將實驗過程中所打出的蛋白泡在攪拌棒上的情況、鋼盆內蛋白泡的紋路情形和計算出的蛋白泡比重進行分析歸納，（詳如實驗記錄本附件），擷取以下代表性資料，歸納如圖 10。

《實驗九》蛋白泡穩定性探討

前言：在烘焙領域所使用的穩定蛋白泡就是所謂的蛋白霜，如果將打好的蛋白泡要應用在烘焙食品上，除了要考慮起泡狀況之外，還要考慮蛋白泡的安定性，有些蛋白泡置放一段時間會在泡沫下層出現半透明的液體，我們稱為出水現象，這些透明液體都是水嗎？

實驗步驟：

- 1、將蛋白泡靜置 30 分鐘後，底部沒有液體的安定組，取出蛋白泡沫觀察。
- 2、將蛋白泡靜置 30 分鐘後，底部有液體的不安定組，分離上層泡沫及下層液體。
- 3、取不穩定組的下層液體加熱，並觀察上層泡沫性質。

《實驗十》馬林糖（蛋白糖）烘焙成品比較



實驗步驟：

- 1、取 100g 的蛋白與 100g 的白砂糖，進行攪打，分別取出不同比重的蛋白泡，以 8 齒擠花嘴擠出約 3 公分直徑大小的蛋白泡，進行 100 度烘烤 120 分鐘，觀察成品外觀特徵。
- 2、描繪出成品底部的紋路，取最凸點與最凹點的長度平均，計算出成品的紋路凹陷比例。
- 3、以小尖點觀察蛋白泡的彈性，並觀察蛋白泡的光澤。

伍、結果

《實驗一》探討轉速與蛋白起泡性之關係

表 5 不同轉速之蛋白泡比重

記錄 轉速	成品 照片	具體描述	蛋白泡比重(g/cm ³)				比重平均 (g/cm ³)
			1	2	3	4	
轉速 1 (733RPM)		蛋白呈液體狀、泡沫無法停留在攪拌器	0.46	0.46	0.45	0.45	0.46
轉速 2 (985 RPM)		蛋白呈液體狀、泡沫無法停留在攪拌器	0.42	0.42	0.40	0.41	0.41
轉速 3 (1084 RPM)		蛋白泡表面有明顯的攪拌痕跡。	0.40	0.39	0.38	0.40	0.39
轉速 4 (1200 RPM)		蛋白泡表面有明顯的攪拌痕跡。	0.37	0.37	0.36	0.37	0.37
轉速 5 (1371 RPM)		鍋子周圍有粗糙蛋白泡，中間留下攪拌過	0.39	0.39	0.38	0.40	0.39

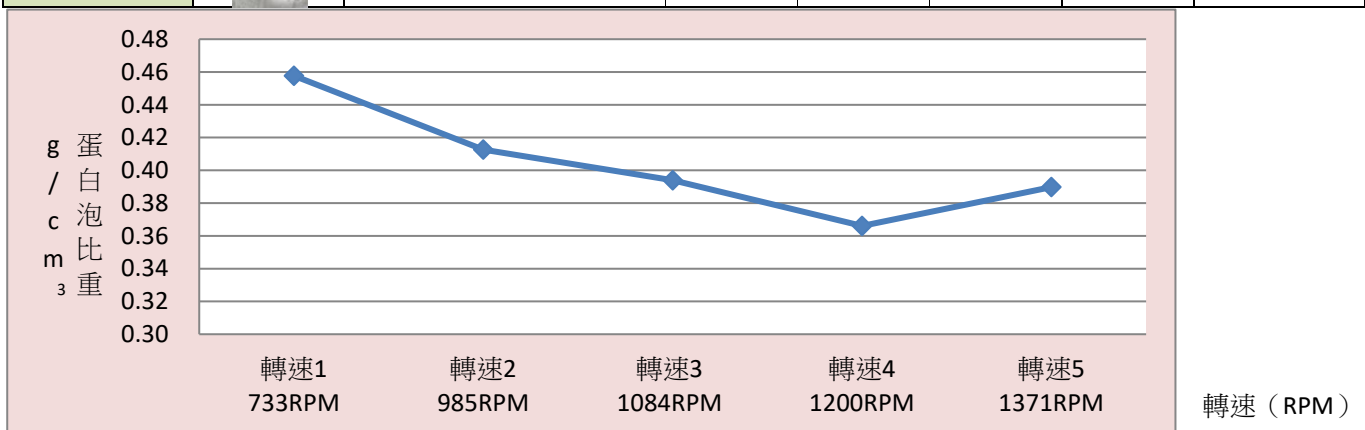


圖 5 轉速對蛋白比重之影響

小結：

- 轉速低於 985 RPM 時，無法將蛋白鏈打開，空氣包覆差，蛋白泡流動性高，屬「起始擴展期」，蛋白泡的比重高於 0.4g/cm³。
- 轉速 1371 RPM，速度過快，原本的長鏈又糾纏在一起擠出空氣，反而不利於蛋白泡形成。
- 以轉速 1200 RPM 攪打 6 分鐘所得到的蛋白泡比重最小 (0.37g/cm³)，蛋白泡外觀細緻，泡沫可停留在攪拌器上而且泡沫呈彎勾狀，屬「濕性發泡期」。

《實驗二》：不同糖的種類對蛋白起泡性之影響

表 6 不同糖類之蛋白泡比重

記錄 糖的種類	蛋白泡比重(g/cm ³)				蛋白泡比重平均 (g/cm ³)
	1	2	3	4	
白砂糖	0.41	0.41	0.39	0.40	0.40
黃砂糖	0.42	0.42	0.40	0.41	0.41
黑糖	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
上白糖	0.38	0.38	0.37	0.33	0.37
果糖	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
蜂蜜	0.36	0.35	0.33	0.29	0.33

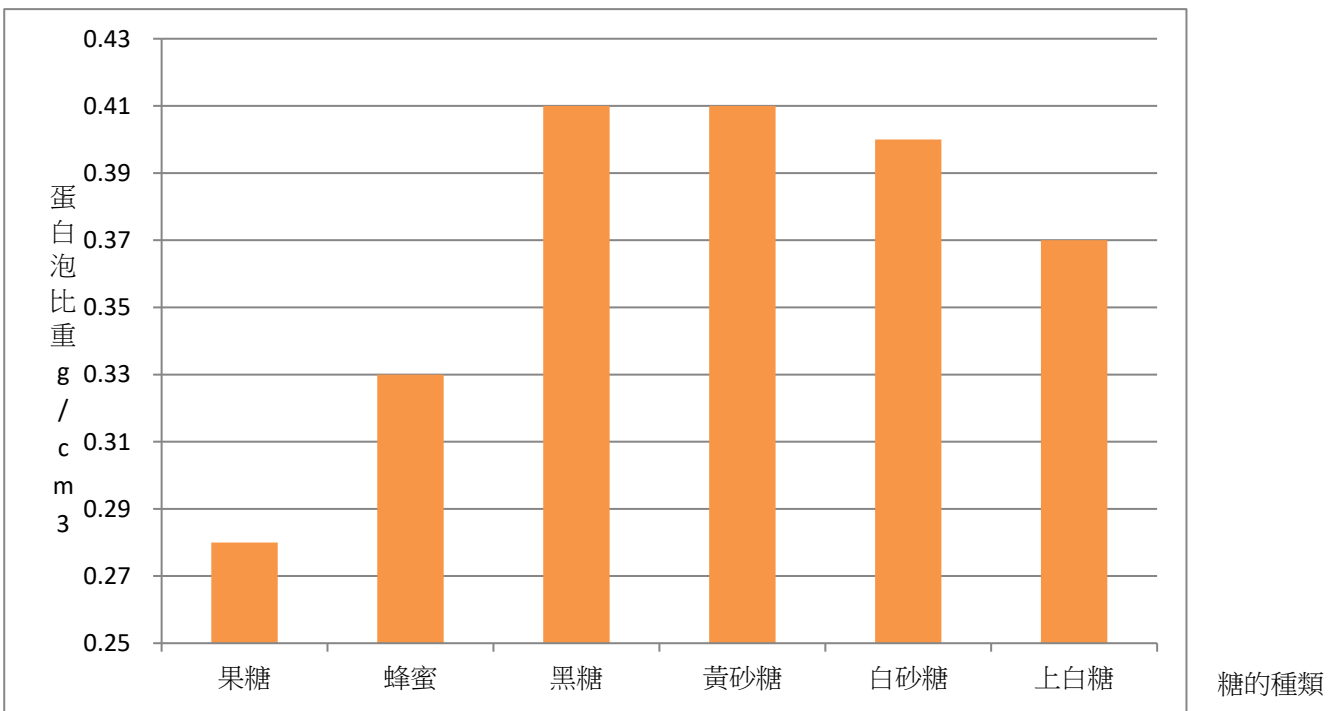


圖 6 糖的種類對蛋白比重之影響

小結：

1. 由實驗發現不同的糖類對蛋白起泡效果會不同，添加果糖打出的蛋白泡比重最小，添加黑糖或黃砂糖打出的蛋白泡比重偏高。
2. （果糖、蜂蜜）打出的蛋白泡比重小，容易出水，安定性差。
3. 同樣屬蔗糖，純度較高的白砂糖、上白糖比重較低，純度較低的黑糖、黃砂糖比重較高。

《實驗三》糖量對蛋白起泡性之影響

表 7 添加不同糖量之蛋白泡比重

糖量 \ 記錄	蛋白泡比重(g/cm ³)			蛋白泡比重平均(g/cm ³)
	1	2	3	
20%糖量	0.16	0.16	0.16	0.16
40%糖量	0.18	0.20	0.19	0.19
60%糖量	0.25	0.24	0.24	0.24
80%糖量	0.30	0.31	0.31	0.31
100%糖量	0.36	0.36	0.36	0.36

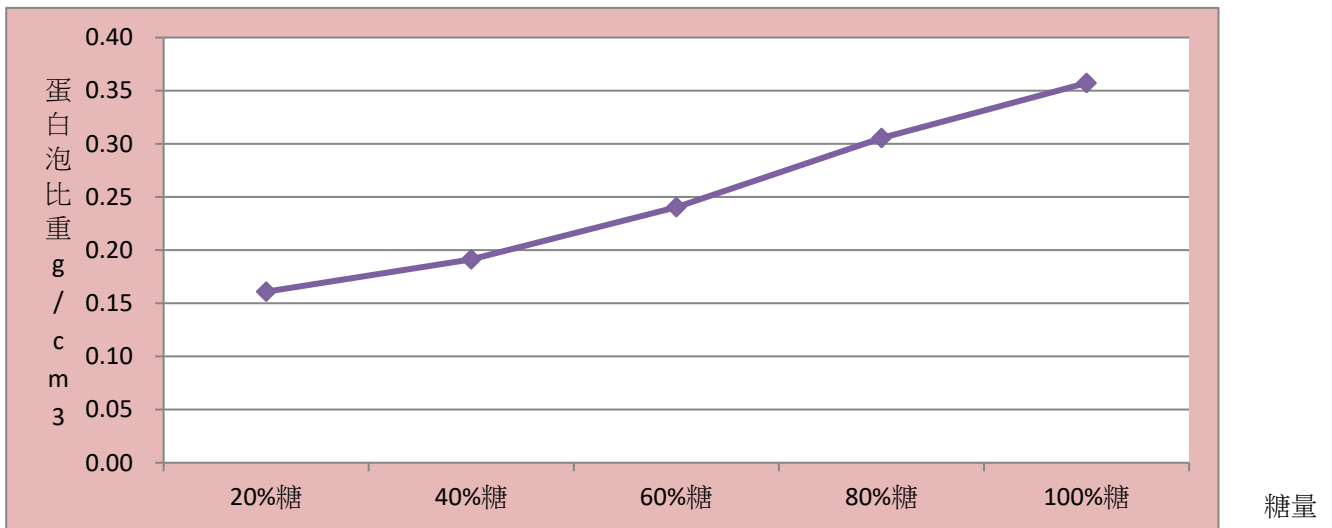


圖 7 糖量對蛋白泡比重之影響

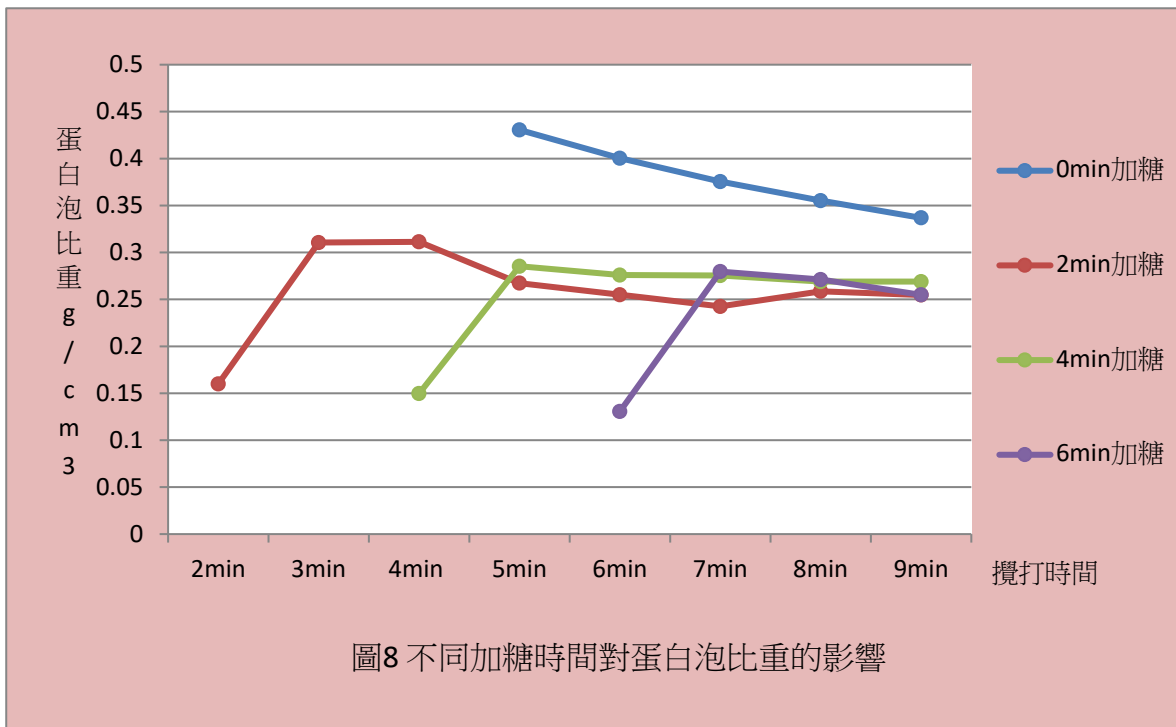
小結：

- 1、糖量越少，蛋白起泡效果越好，但糖量低於 60%，蛋白泡都已呈乾性發泡期，蛋白泡粗糙且不穩定。
- 2、增加糖量會使蛋白泡起泡速度變慢，但所打出的蛋白泡質地細緻穩定，介於濕性發泡期及硬性發泡期之間，應用範圍較廣泛。

《實驗四》糖在不同的時間加入對蛋白起泡性之影響

表 8 不同加糖時間之蛋白泡比重

糖加入的時間		蛋白泡比重(g/cm ³)			比重平均(g/cm ³)
		1	2	3	
0min 加糖	6 分鐘	0.41	0.41	0.39	0.40
	7 分鐘	0.38	0.38	0.37	0.38
	8 分鐘	0.36	0.36	0.35	0.36
	9 分鐘	0.32	0.34	0.34	0.34
	10 分鐘	0.33	0.34	0.33	0.33
2min 加糖	2 分鐘	0.16	0.16	0.16	0.16
	3 分鐘	0.31	0.31	0.31	0.31
	4 分鐘	0.31	0.31	0.32	0.31
	5 分鐘	0.30	0.30	0.30	0.30
	6 分鐘	0.26	0.26	0.24	0.25
	7 分鐘	0.26	0.24	0.24	0.24
	8 分鐘	0.26	0.26	0.26	0.26
	9 分鐘	0.26	0.26	0.25	0.25
	10 分鐘	0.26	0.26	0.26	0.26
4min 加糖	4 分鐘	0.14	0.16	0.15	0.15
	5 分鐘	0.29	0.29	0.28	0.29
	6 分鐘	0.28	0.28	0.27	0.28
	7 分鐘	0.28	0.28	0.27	0.28
	8 分鐘	0.27	0.27	0.26	0.27
	9 分鐘	0.27	0.27	0.26	0.27
	10 分鐘	0.26	0.28	0.27	0.27
6min 加糖	6 分鐘	0.13	0.13	0.13	0.13
	7 分鐘	0.28	0.28	0.27	0.28
	8 分鐘	0.28	0.27	0.26	0.27
	9 分鐘	0.26	0.26	0.25	0.25
	10 分鐘	0.25	0.26	0.25	0.25



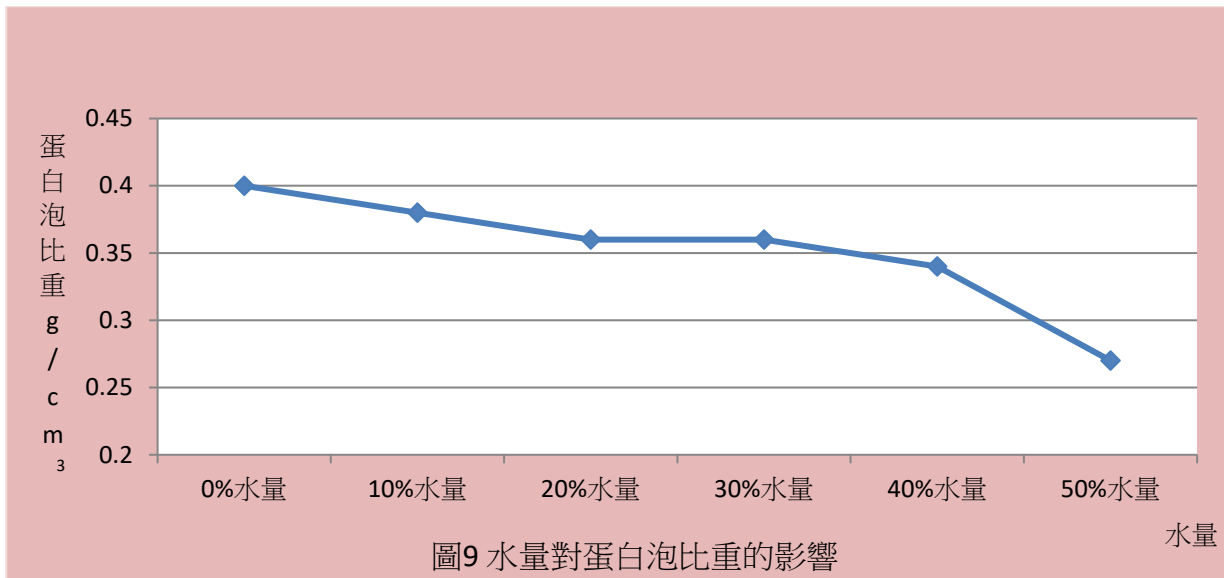
小結：

- 1、未加糖攪打時，有利於蛋白鏈打開，並且快速包覆空氣，所以比重會降到很低(0.2g/cm³以下)，但蛋白泡質地粗大且不穩定。
- 2、若形成粗蛋白泡後，再加入糖，糖溶解後，會與蛋白鏈形成穩定的結構，最後達到蛋白質變性，此時蛋白泡變小，質地細緻。

《實驗五》添加水量對蛋白起泡性之影響

表 9 添加不同水量之蛋白泡比重

水量	記錄	蛋白泡比重(g/cm ³)			蛋白泡比重平均(g/cm ³)
		1	2	3	
0%水量		0.41	0.40	0.40	0.40
10%水量		0.39	0.39	0.37	0.38
20%水量		0.36	0.36	0.36	0.36
30%水量		0.41	0.41	0.41	0.36
40%水量		0.34	0.34	0.33	0.34
50%水量		0.27	0.27	0.26	0.27



小結：

- 1、以添加水量越多，蛋白泡的比重越小。
- 2、添加水有助於蛋白泡鏈結打開後，包覆大量空氣，使得蛋白泡比重變小，但過多水會影響糖溶解後，穩固蛋白泡的特質，所以出水情況明顯。

《實驗六》蛋白溫度對蛋白起泡性之影響

表 10 不同蛋溫之蛋白泡比重

記錄		蛋白泡比重(g/cm ³)			蛋白泡比重平均 (g/cm ³)
		1	2	3	
冰蛋白(12.4°C)	6分鐘	0.36	0.35	0.34	0.35
常溫蛋白(22.2°C)	6分鐘	0.37	0.37	0.35	0.37
溫蛋白(36°C)	6分鐘	0.31	0.31	0.30	0.31

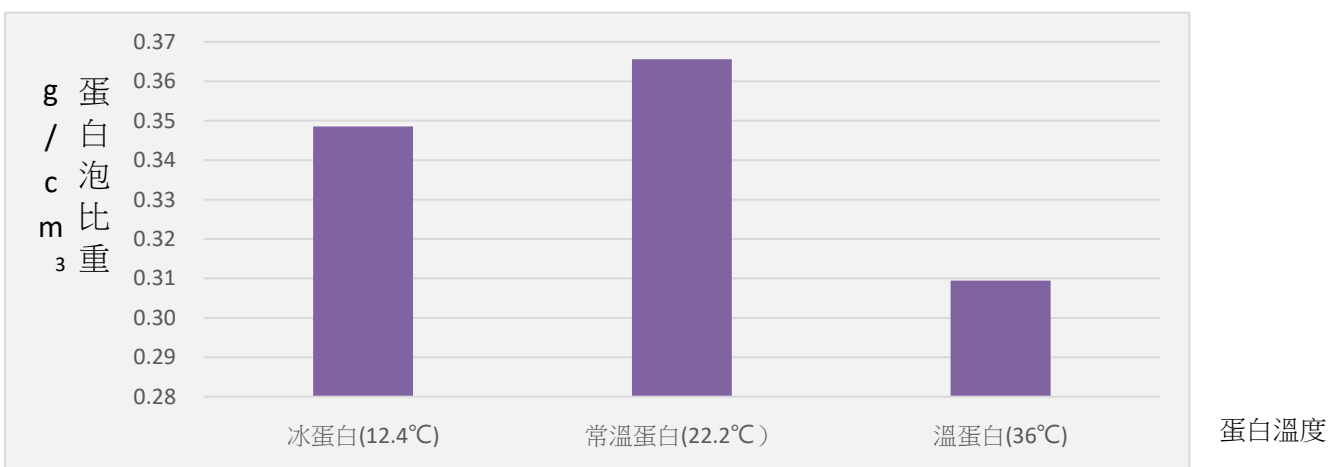


圖 10 蛋白溫度對蛋白泡比重之影響





小結：

1、 實驗發現常溫蛋白打出的蛋白泡比重最大，溫蛋白打出的蛋白泡比重最小。

《實驗七》不同蛋種對蛋白泡起泡性質的探討

《實驗七之一》不同蛋種之分析比較

表 11 不同蛋種之分析

	雞蛋	鴨蛋	鵝蛋	鸚鵡蛋
外觀				
尺寸(寬-高)	4.5 cm -5.64 cm	4.7 cm -5.8 cm	5.5 cm -8.76 cm	2.53 cm -3 cm
蛋白(g)/蛋黃(g)	36/20	37/21	65/62	5/4
蛋白蛋黃比值	1.8	1.76	1.04	1.25
酸鹼值	pH8.1	pH8.2	pH7.9	pH8.0

《實驗七之二》不同蛋種對蛋白泡起泡性質的探討

表 12 不同蛋種之蛋白泡比重

記錄		蛋白泡比重(g/cm ³)			蛋白泡比重平均 (g/cm ³)
		1	2	3	
雞蛋	6 分鐘	0.41	0.41	0.39	0.40
鵝蛋	6 分鐘	0.40	0.40	0.39	0.40
鸚鵡蛋	6 分鐘	0.42	0.42	0.39	0.41
鴨蛋	6 分鐘	0.41	0.41	0.41	0.36

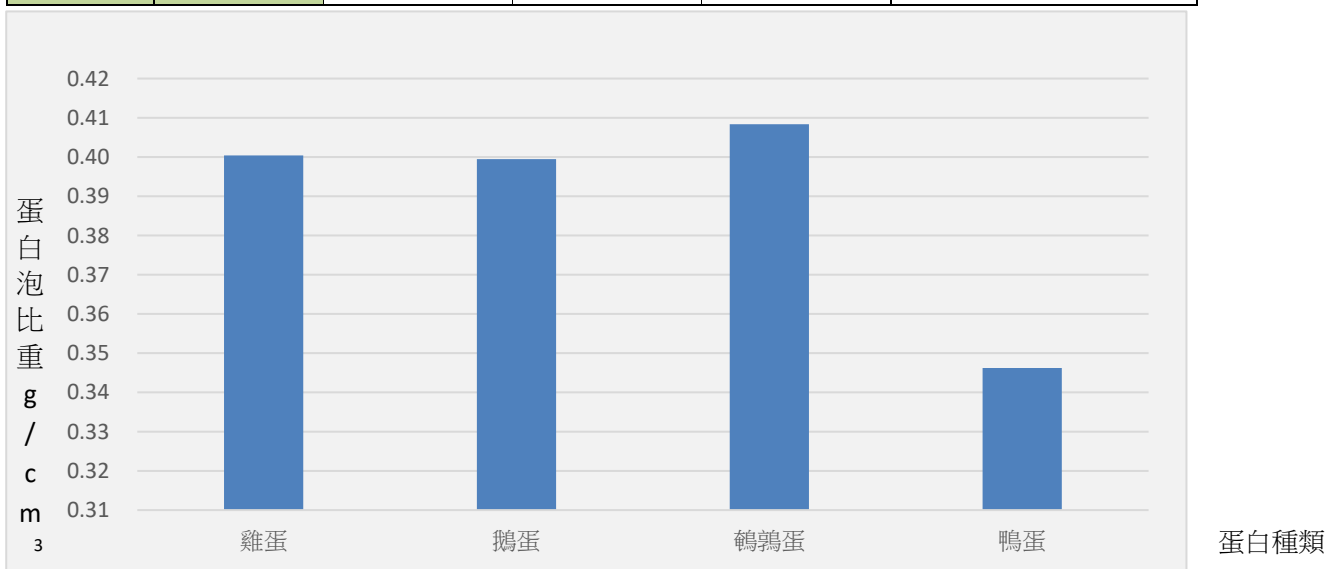


圖 11 蛋白種類對蛋白泡比重之影響

小結：

- 1、 酸鹼值 (pH) 以鴨蛋 > 雞蛋 > 鵪鶉蛋 > 鵝蛋。
- 2、 蛋白蛋黃比值以雞蛋 > 鴨蛋 > 鵪鶉蛋 > 鵝蛋。
- 3、 由鴨蛋蛋白所打出的蛋白泡比重會最小，鵪鶉蛋蛋白所打出的蛋白泡比重會最大。

四、蛋白泡在烘焙領域之應用性

《實驗八》蛋白泡比重與打發程度的關聯

說明：

綜合實驗所得到的數據分析後，發現蛋白打發的階段是一個連續性變化的過程，打發階段之間沒有明顯的分界，我們發現比重介於 $0.38\text{g/cm}^3 \sim 0.28\text{g/cm}^3$ 的蛋白泡，（圖 13 漸層圖），介於烘焙過程的濕性發泡與乾性發泡之間，比較適合應用在烘焙食品。打發過程的比重與打發時間的關係如圖 12：

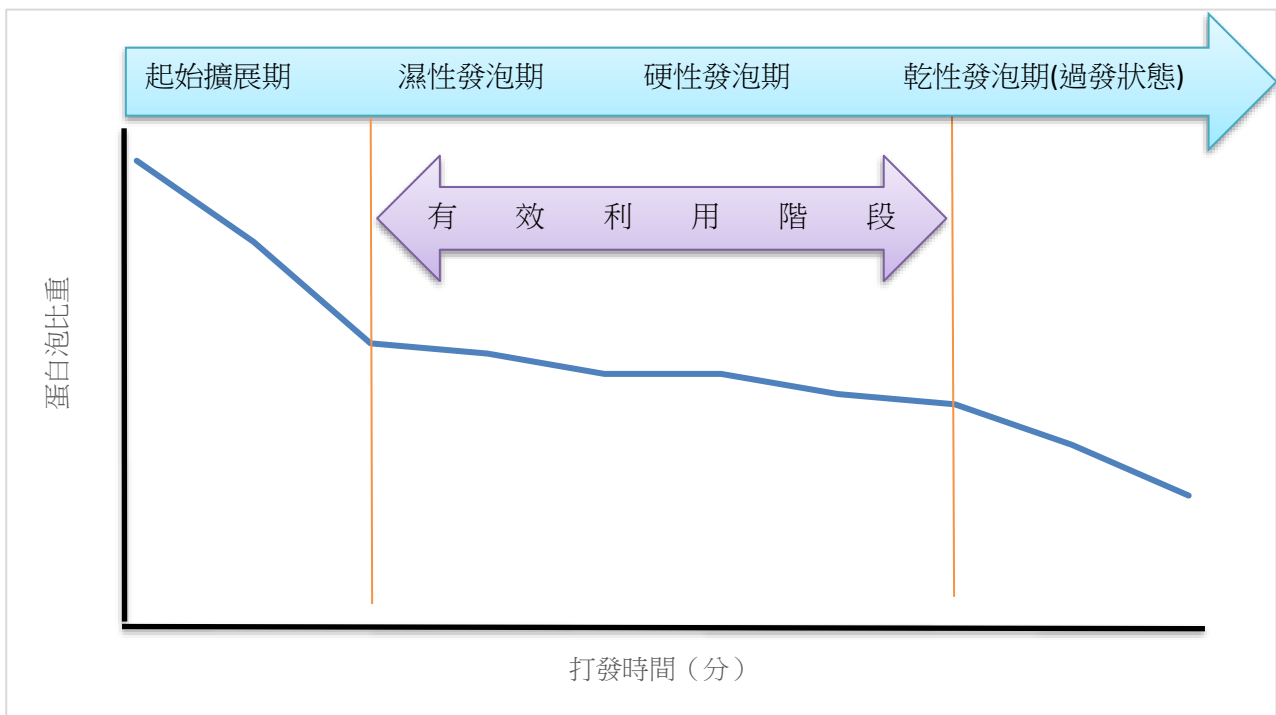




















圖 12 蛋白起泡階段與打發時間關係圖

照片									
條件	上白糖 5 分鐘	水量 10% 6 分鐘	水量 10% 8 分鐘	水量 20% 6 分鐘	鵝蛋 7 分鐘	水量 20% 7 分鐘	鵝蛋 10 分鐘	水量 20% 8 分鐘	冰水 10 分鐘
比重	0.40 g/cm ³	0.38 g/cm ³	0.37 g/cm ³	0.36 g/cm ³	0.35 g/cm ³	0.34 g/cm ³	0.33 g/cm ³	0.32 g/cm ³	0.31 g/cm ³

起泡擴展期

濕性發泡期

照片									
條件	水量 20% 10 分鐘	水量 20% 11 分鐘	果糖 5 分鐘	水量 50% 6 分鐘	水量 50% 8 分鐘	100%糖量 8 分鐘	100%糖量 10 分鐘	60%糖量 9 分鐘	未加糖 2 分鐘
比重	0.30 g/cm ³	0.29 g/cm ³	0.28 g/cm ³	0.27 g/cm ³	0.26 g/cm ³	0.25 g/cm ³	0.24g/cm ³	0.18 g/cm ³	0.16g/cm ³

濕性發泡期







硬性發泡期

乾性發泡期 (過發狀態)

圖 13 蛋白泡比重與打發程度之關係圖

《實驗九》蛋白泡的穩定性

表 13 蛋白泡的穩定性（放置 30 分鐘）













組別	支撐度	出水現象	歸納	應用
穩定組				可以直接加熱或與其他麵糊進行混合。
	蛋白泡比重較大但支撐性好。	蛋白泡仍穩定。	蛋白泡在水分自然蒸發後，剩下的蛋白泡乾。	
不穩定組				烘烤時蛋白泡沫無法使產品產生膨鬆感
	蛋白泡比重小，但支撐度差。	放置 30 分鐘，上層泡沫，下層液體。	下層液體加熱偏乳白色的固體，持續加熱會得到焦黑之固體。	

小結：

- 1、由穩定組的探究可知蛋白的起泡過程是一個不可復原的蛋白質變性過程。
- 2、由不穩定組探究可推測蛋白鏈和空氣產生包覆後，如果無法提供穩固蛋白結構的物質，可能無法和空氣形成穩定的膠狀懸浮液，導致過一段時間就出水。

《實驗十》蛋白糖烘焙成品比較表

表 14 蛋白糖烘焙成品比較表

蛋白泡及比重						
	0.3 g/cm ³	0.29 g/cm ³	0.28 g/cm ³	0.27 g/cm ³	0.25 g/cm ³	0.24 g/cm ³
烘焙成品						

紋路 凹陷 率	19%	29%	34%	33%	25%	23%
說明	表面光滑，可拉出尖頭	表面光滑，可拉出長尖頭	表面光滑，可拉出長尖頭	表面光滑，可拉出尖頭	表面光滑，可拉出尖頭	表面粗糙，無尖頭

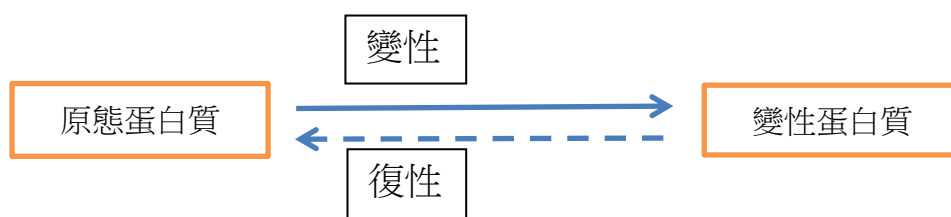
結果：

不同比重的蛋白泡烘焙後的成品外觀特徵會有差異，比重較大的濕性蛋白泡紋路凹陷率小及蛋白濕軟拉出尖頭較彎較小。反之接近硬性發泡的蛋白泡紋路凹陷率大且蛋白具有彈性，拉起的尖頭高且尖挺。乾性發泡（過發狀態）的蛋白泡雖然紋路凹陷率大，但因蛋白泡過度變性而缺乏彈性，所以無法拉出尖頭且表面粗糙。

陸、討論

- 一、由《實驗一》發現攪拌器的轉速會影響蛋白泡的起泡狀況，當攪拌棒通過蛋白時，金屬會拉起蛋白，將摺疊的蛋白質分子打開，如果轉速太低，蛋白質的鏈結無法完全打開，影響後面抓取空氣和水的效果，使得起泡時間會變長，如果轉速太高，一旦打的時間過長，容易造成打開的蛋白鏈又會糾結在一起，讓原本抓住的空氣又跑掉，使得蛋白泡的比重又會增加。
- 二、由《實驗二》發現添加不同的糖類對蛋白會有不同的起泡效果，整體而言液態的糖（果糖、蜂蜜）打出的蛋白泡比重比固態糖（白砂糖、黃砂糖、黑糖、上白糖）小，我們推測液態糖因為本身含有水分，可以使蛋白質的鏈結快速打開，所以抓取空氣的速度快，蛋白的起泡快。
- 三、雙醣結構的糖（白砂糖、黃砂糖、黑糖、上白糖），可能因為分子團較易和蛋白鏈形成氫鍵，而使蛋白質的結構穩固，所以打出的蛋白泡穩定性好，而單醣結構的糖（果糖、蜂蜜）所打出的蛋白泡就相對不穩定。

- 四、由《實驗三》發現糖量會影響蛋白的起泡速度及質地，增加糖量會使蛋白泡起泡速度變慢，但所打出的蛋白泡質地細緻穩定，介於濕性發泡及乾性發泡之間，應用範圍較廣泛。過度減糖會使蛋白泡一下子就達到過發狀態，且質地不穩定，易出水。
- 五、由《實驗四》發現添加糖的時間，會影響蛋白泡的形成，太早加糖，會使蛋白液變黏稠，反而阻礙蛋白鏈的打開，蛋白泡形成的速度較慢。太晚加糖一旦蛋白泡的結構因攪打而產生變性，再加入糖也無法改變蛋白質結構，這樣的蛋白泡在烘焙的應用性較差。
- 六、由《實驗五》發現在蛋白內添加水量愈多，有利蛋白質的鏈結快速打開，蛋白泡的起泡速度起快且比重越小，而且蛋白鏈包圍的空氣越大顆，形成的蛋白泡就會比較粗糙。
- 七、由《實驗六》發現溫度高的蛋白黏度低，使得蛋白鏈容易打開，變得容易打發，但打出的蛋白泡並不穩定。溫度低的蛋白較黏稠，起泡慢有助於保留住空氣。
- 八、由《實驗七》發現不同蛋種的蛋白起泡效果有差異，影響起泡的因素除了酸鹼值之外，各種蛋白中的水分含量及蛋白成分也可能影響蛋白起泡。
- 九、由《實驗八》歸納發現比重介於 $0.38\text{g/cm}^3 \sim 0.28\text{g/cm}^3$ 的蛋白泡，介於濕性發泡與乾性發泡之間，比較適合應用在烘焙食品。
- 十、蛋白質特性和它本身的結構有很大的關連。當蛋白質原有的結構瓦解，造成蛋白質的本質改變就稱為「變性」，但是有些蛋白質的變性是可以復原的，有些變性是不可逆的。透過實驗我們了解到蛋白起泡的過程是一種不可逆的蛋白質變性過程。



柒、結論

- 一、適當的轉速有利起泡前蛋白質鏈結的打開，轉速 4（1200 RPM）的速度適合打出比重最小，外觀細緻的濕性發泡期。
- 二、使用液態糖、減少糖量或增加水量、提高溫度都可以加速蛋白鏈的打開，使大量空氣進入打出比重小的蛋白泡，但是蛋白泡形成速度越快，當蛋白鏈間的強度不夠時，蛋白泡的穩定度就會降低。

- 三、糖量越多，蛋白打發速度較慢，但可打出較適合使用的穩定蛋白泡，所以打發蛋白的糖量不可少於 80%。
- 四、太早加糖會使蛋白起泡速度變慢，但形成的蛋白泡穩定，太晚加糖時，蛋白泡可能已達變性，即使再攪打也無法改變蛋白泡的性質。
- 五、不同蛋種的蛋白 pH 值均大於 7 都偏鹼性，而打出的蛋白泡比重也不同。鴨蛋蛋白所打出的蛋白泡比重最小，而鵝蛋蛋白所打出的蛋白泡比重最大。
- 六、實驗發現比重介於 $0.38 \text{ g/cm}^3 \sim 0.28 \text{ g/cm}^3$ 的蛋白泡，介於烘焙過程的濕性發泡期與硬性發泡期之間，比較適合應用在烘焙食品。

捌、參考資料

- 一、全國科展作品” 蛋白棉花糖~蛋白霜之研究” 中華民國第54屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 二、哈洛得·馬基（2004），食物與廚藝【麵食·醬料·甜點·飲料】·台北市：大家出版。P135-150
- 三、學研（原作者）；鄭永銘（審訂）（2010），廚房裡的小科學家 第二冊·台北市：三采文化。
- 四、曾道一、賈宜琛（2011），食品科學概論·新北市：新文京開發。
- 五、施明智、蕭思玉、蔡敏郎（2013），食品加工學·台北市：五南圖書。p496-p514
- 六、跟著鄭大師玩科學（鄭永銘老師的BLOG）烘焙的科學（一）蛋白打發
<https://www.masters.tw/166501/%E7%83%98%E7%84%99%E7%9A%84%E7%A7%91%E5%AD%B81>
- 七、愛在廚房（2009）http://www.euphocafe.com/terms/terms.asp?t_id=47
- 八、關於蛋白及其發泡性（2016）<https://www.mobile01.com/topicdetail.php?f=602&t=4957258>

【評語】 080207

本件作品研究蛋白起泡的過程，並探討各種變因對發泡的影響，主題極具生活化，很細膩的探討蛋白起泡因素，找出蛋白泡比重與打發階段之關聯，將蛋白打發階段以量化數值呈現是本研究的亮點。但在討論各項變因時，應更清楚說明選擇這些變因的理由，並用化學的觀點解釋所觀察之現象，例如：四種蛋的選擇原因、高/低溫蛋液在常溫下打發的合理性、各種糖類添加物對發泡的影響、在蛋品種不同的前提下討論 pH 值是否合理。另外，應參考文獻並與文獻比較，強調本研究的特異性，也可與一般蛋糕食譜的做法相比，利用實驗發現提出食譜步驟背後的化學意義。

摘要

本研究透過蛋白起泡的過程，了解蛋白質變性現象、影響蛋白起泡因素，並分析蛋白泡比重與打發階段之關聯性。研究發現轉速 1200RPM 適合將蛋白質鏈結打開。添加液態糖、水、或提高蛋白溫度都有利於蛋白質鏈結打開，打出比重小、但安定性較差的蛋白泡。添加糖的時間點及糖量也會影響蛋白鏈打開，研究發現先攪打 2 分鐘將鏈結打開後再加糖，可使蛋白泡起佳，若加入超過 80% 以上的糖就可穩固蛋白質結構，打出安定性佳的蛋白泡。不同蛋種的蛋白泡比重為鵝蛋蛋 > 雞蛋 > 鵝蛋 > 鴨蛋。最後發現比重在 $0.38 \text{ g/cm}^3 \sim 0.28 \text{ g/cm}^3$ 的蛋白泡，介於濕性與硬性發泡之間，適合應用在烘焙食品。透過實作了解適當比重的蛋白泡具有彈性，可拉出小尖頭並做出紋路凹陷率大、表面光滑的蛋白糖。

壹、研究動機

膨鬆的蛋糕、雲朵般的蛋白糖（馬林糖）都是我們的最愛，最近學校新成立了烘焙教室，藉著手作簡單的甜點課程，我們發現蛋白打發是甜點烘焙的靈魂，但坊間對蛋白打發技巧眾說紛紜，所以我們想先了解蛋白起泡的化學原理，以及探討影響蛋白起泡的因素有哪些，只有對蛋白有更進一步的了解，才能好好的控制不同點心所適合的蛋白霜，做出完美的成品。

貳、實驗目的

- 一、轉速對蛋白起泡性之影響
- 二、糖的種類對蛋白起泡性之影響
- 三、糖量對蛋白起泡性之影響
- 四、糖加入時間對蛋白起泡性之影響
- 五、添加水量對蛋白起泡性之影響
- 六、蛋白溫度對蛋白起泡性之影響
- 七、蛋的種類對蛋白起泡性之影響
- 八、蛋白泡在烘焙領域之應用性

肆、研究的過程或方法

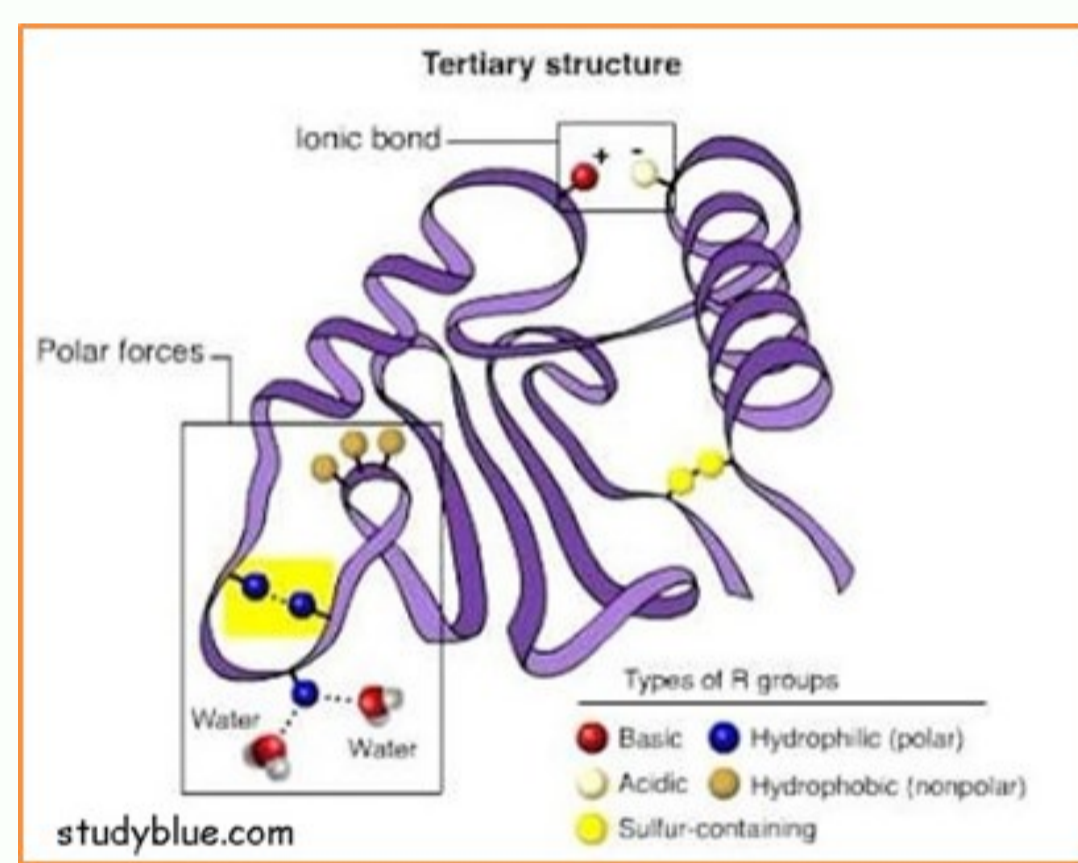
一、文獻探討

（一）蛋白的化學成份

雞蛋中蛋白約占蛋重的 60%，蛋黃約占蛋重的 30%，蛋殼約占 10%。蛋白內約含有 40 種蛋白質，各種蛋白成份含量及它的特性如下表 1，其中卵球蛋白、卵黏蛋白對蛋白的起泡性影響最大。（施明智等人，2013，p496-498）

蛋白質	比例	天然功能	烹飪特性
卵白蛋白	54%	養分	71.5°C 開始凝固
伴白蛋白	12%	結合鐵	凝固點 57.3°C，熱安定性最低。
卵類黏蛋白	11%	阻擋消化酵素	
卵球蛋白	8%	阻塞蛋殼膜與蛋殼之缺陷處	72°C 開始凝固，容易發泡
卵黏蛋白	3.5%	稠化蛋白，抑制病毒	安定泡沫
溶菌酶	3.4%	消化細菌細胞壁	75°C 開始凝固，安定泡沫

（二）蛋白質的結構：由於蛋白質主鏈肽鍵上羰基(C=O)上的氧原子可以和醯氨基(NH)上的氫原子藉由分子間氫鍵的引力作用，將主鏈纏繞成 α 螺旋或 β 折疊，因此蛋白質長鏈糾纏成一團如（圖 2），因蛋白中含大量水，使得蛋白質長鏈中的親水端向外，而疏水端向內。（跟著鄭大師學科學）



（三）蛋白的起泡原理

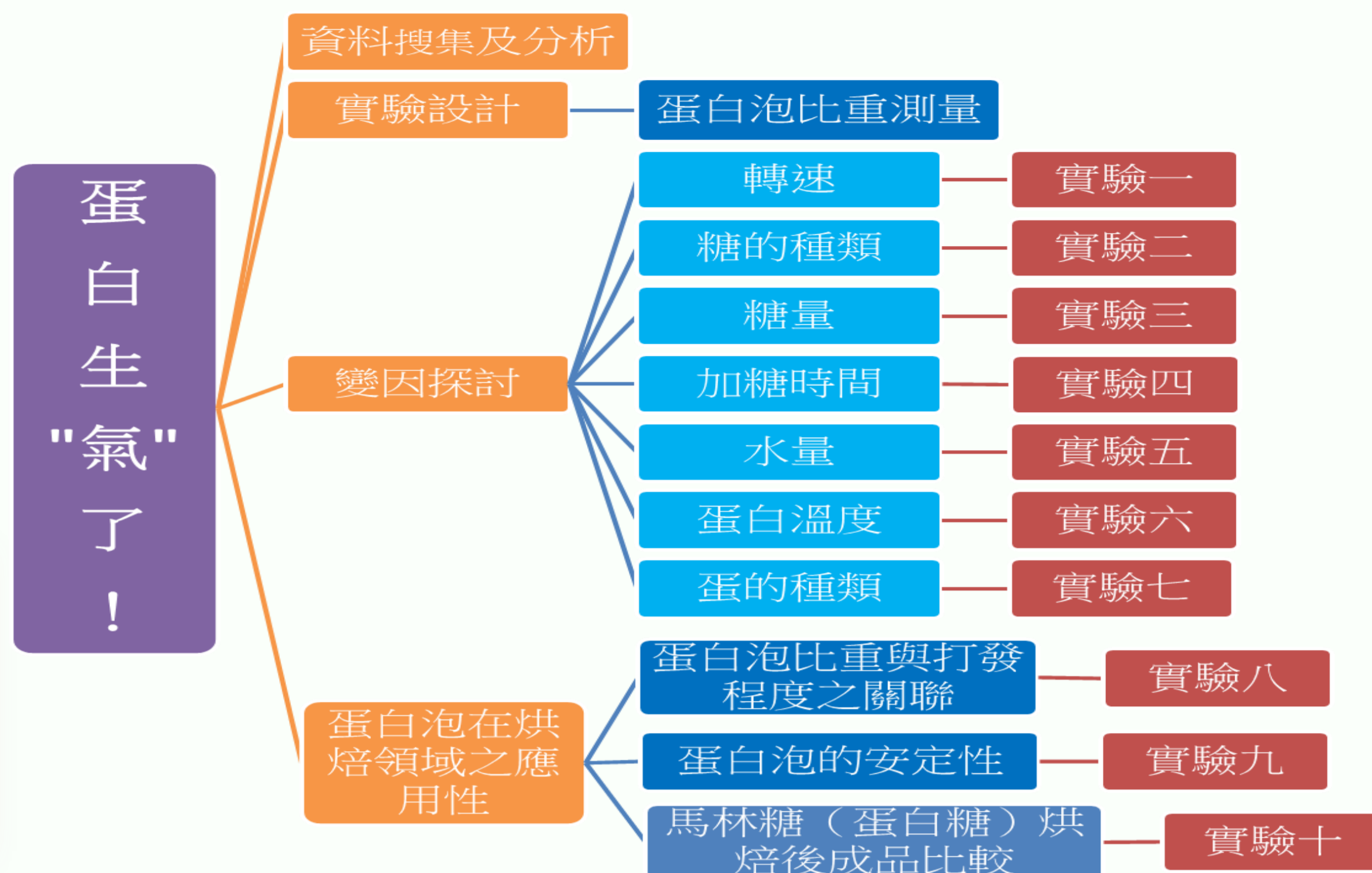
蛋白的泡沫性包含（1）起泡性：是否容易產生泡沫。（2）泡沫安定性：是指形成的泡沫不容易消失的性質。蛋白透過攪拌棒攪打的動作，使空氣進入蛋液中形成泡沫。攪打會使卵球蛋白原本摺疊的結構展開，蛋白鏈上的疏水端與空氣鍵結，親水端與水鍵結，最後形成包圍空氣的蛋白質網。卵黏蛋白則使形成的氣泡表面變性，形成固化的薄膜，使氣泡內空氣不致於外洩。持續攪打，氣泡逐漸變小變多，在空氣與蛋白液交接面的蛋白質受到延伸及乾燥而有部份變性的情形，這樣的變性可以穩固泡沫的持久性。若過度攪打，使過多空氣進入，會造成過度變性，反而使蛋白膜變薄且缺乏彈性。（施明智等人，2013，p500-501）

蛋白液階段	粗泡階段（打開鏈結）	變性階段	安定蛋白泡
蛋白質以親水端朝外，疏水端朝內的結構分散在水中。	適當條件的攪打使蛋白鏈結打開，空氣進入蛋白中，蛋白鏈上的疏水端與空氣鍵結，親水端與水鍵結，最後形成包圍空氣的蛋白質網（粗泡）	加入糖攪打，溶解後的糖及蛋白中的卵黏蛋白使得蛋白質結構改變而變性。	蛋白質網因加入糖或其它物質產生強化作用。

（四）蛋白打發的階段

利用蛋白打發後的蛋白泡應用在烘焙食品上就稱為「蛋白霜」，蛋白打發的過程一般以人為判斷為主，可以分為以下四個階段（圖 5），但因無一定標準，人為判斷誤差大，再加上不同的甜點對蛋白霜打發程度各有不同的考量，常為甜點失敗的主因：（曾道一、賈宜琛，2011，P182）

起始擴展期	濕性發泡期	硬性發泡期	乾性發泡期
蛋白呈液體狀，泡沫無法停留在攪拌器上。	蛋白呈半流體狀，泡沫可停留在攪拌器上而且泡沫呈彎	蛋白泡變性，呈固體狀，泡沫可停留在攪拌器上且泡沫	蛋白過度變性，蛋白泡乾且膨鬆呈棉花狀。



二、實驗設計

（一）蛋白泡比重測量

蛋白泡體積膨鬆呈不規則狀，我們利用比重來說明蛋白膨脹程度，利用水的密度為 1 g/cm^3 的特性，求出盛裝泡沫的杯子體積，再將蛋白泡輕輕擠入杯子內，以筷子刮平，測量蛋白泡的質量，最後利用以下公式求出蛋白泡比重，比重越小，代表打入的空氣越多，越膨鬆。

$$\text{蛋白泡質量} \div \text{蛋白泡體積} = \text{蛋白泡比重}$$

測量空杯體積(V)	測量蛋白泡重量(M)	計算蛋白泡比重(D)
		蛋白泡比重 (D) = 蛋白泡重量 (M) ÷ 蛋白泡體積 (V)

（二）紋路凹陷率

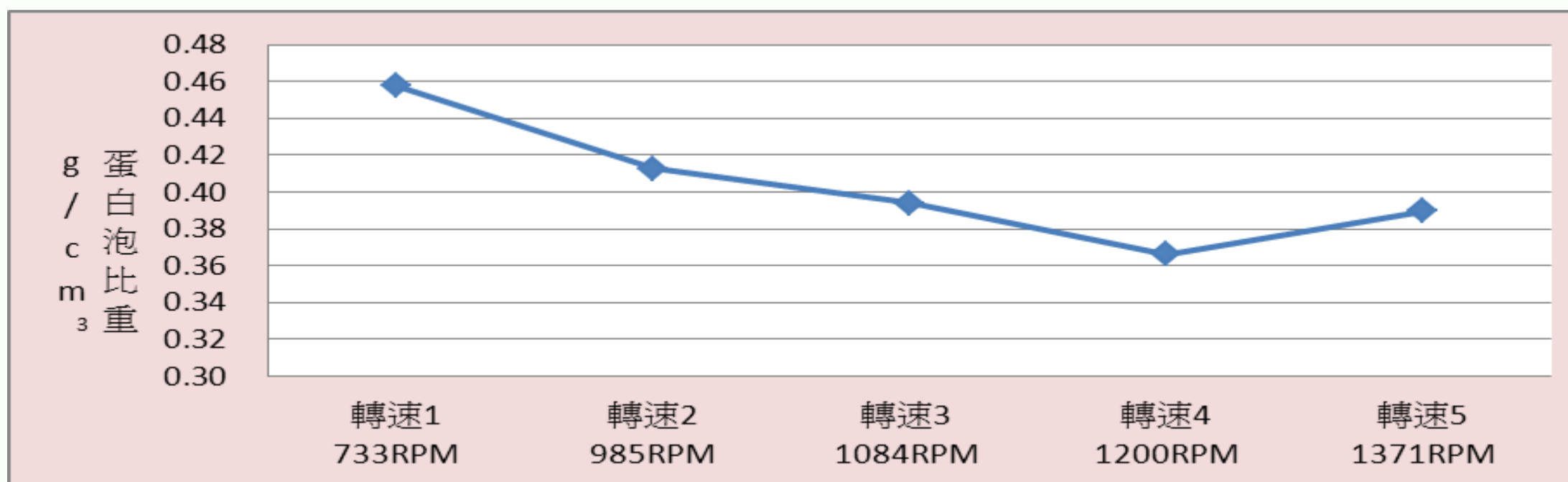
將打好的蛋白泡以八齒擠花嘴擠出，蛋白泡越安定，結構安定，烘焙出的蛋白糖紋越明顯，本研究以成品底部最長連線（藍線）與最短連線（紅線）平均的差異，計算出紋路凹陷率，紋路凹陷率越大代表紋路越明顯。

	紋路凹陷率 = (最長連線平均 - 最短連線平均) / 最長連線平均 * 100%
--	---

三、變因探討

《實驗一》探討轉速與蛋白起泡性之關係

記錄	成品照片	具體描述	蛋白泡比重(g/cm^3)				比重平均(g/cm^3)
			1	2	3	4	
轉速 1 (733RPM)		蛋白呈液體狀、泡沫無法停留在攪拌器上。(起始擴展期)	0.46	0.46	0.45	0.45	0.46
轉速 2 (985 RPM)		蛋白呈液體狀、泡沫無法停留在攪拌器上。(起始擴展期)	0.42	0.42	0.40	0.41	0.41
轉速 3 (1084 RPM)		泡沫可停留在攪拌器上(濕性發泡期)	0.40	0.39	0.38	0.40	0.39
轉速 4 (1200 RPM)		泡沫可停留在攪拌器上而且泡沫呈彎勾狀。(濕性發泡期)	0.37	0.37	0.36	0.37	0.37
轉速 5 (1371 RPM)		鍋子周圍有粗糙蛋白泡，中間留下攪拌過的凹洞。(濕性發泡)	0.39	0.39	0.38	0.40	0.39

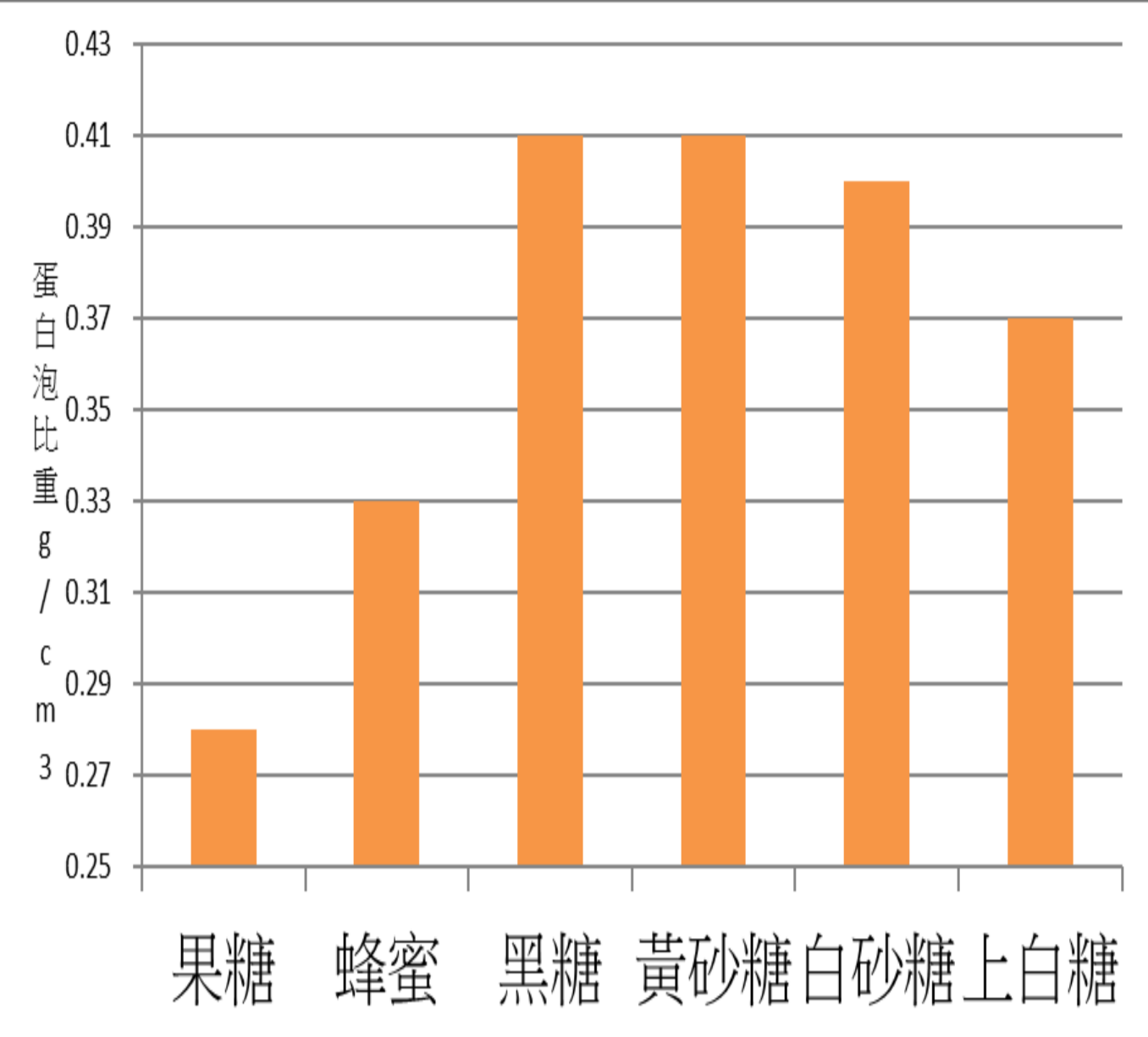


小結：

- 轉速低於 985 RPM 時，無法將蛋白鏈打開，空氣包覆差，蛋白泡流動性高，屬「起始擴展期」，蛋白泡的比重高於 0.4 g/cm^3 。
 - 轉速 1371 RPM，速度過快，原本的長鏈又糾纏在一起擠出空氣，反而不利於蛋白泡形成。
 - 以轉速 1200 RPM 攪打 6 分鐘所得到的蛋白泡比重最小 (0.37 g/cm^3)，蛋白泡外觀細緻，泡沫可停留在攪拌器上而且泡沫呈彎勾狀，屬「濕性發泡期」。
- (參考表 5，圖 5)

《實驗二》糖的種類對蛋白起泡性之影響

糖的種類	蛋白泡比重(g/cm ³)				蛋白泡比重平均(g/cm ³)
	1	2	3	4	
白砂糖	0.41	0.41	0.39	0.40	0.40
黃砂糖	0.42	0.42	0.40	0.41	0.41
黑糖	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
上白糖	0.38	0.38	0.37	0.33	0.37
果糖	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
蜂蜜	0.36	0.35	0.33	0.29	0.33

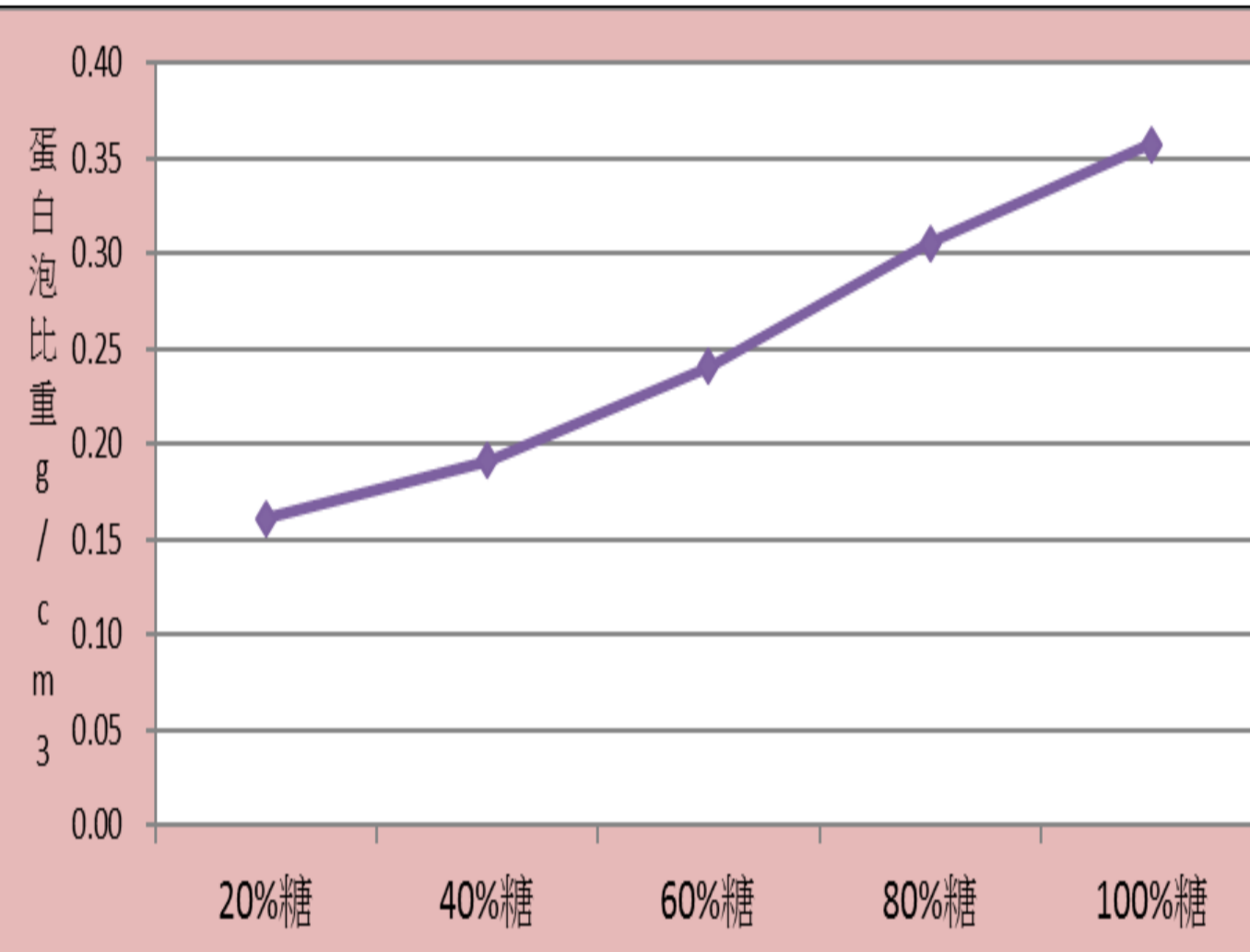


小結：

- 1.由實驗發現不同的糖類對蛋白起泡效果會不同，添加果糖打出的蛋白泡比重最小，添加黑糖或黃砂糖打出的蛋白泡比重偏高。
- 2.（果糖、蜂蜜）打出的蛋白泡比重小，容易出水，安定性差。
- 3.同樣屬蔗糖，純度較高的白砂糖、上白糖比重較低，純度較低的黑糖、黃砂糖比重較高。（參考表 6，圖 6）

《實驗三》糖量對蛋白起泡性之影響

糖量	蛋白泡比重(g/cm ³)			蛋白泡比重平均(g/cm ³)
	1	2	3	
20%糖量	0.16	0.16	0.16	0.16
40%糖量	0.18	0.20	0.19	0.19
60%糖量	0.25	0.24	0.24	0.24
80%糖量	0.30	0.31	0.31	0.31
100%糖量	0.36	0.36	0.36	0.36

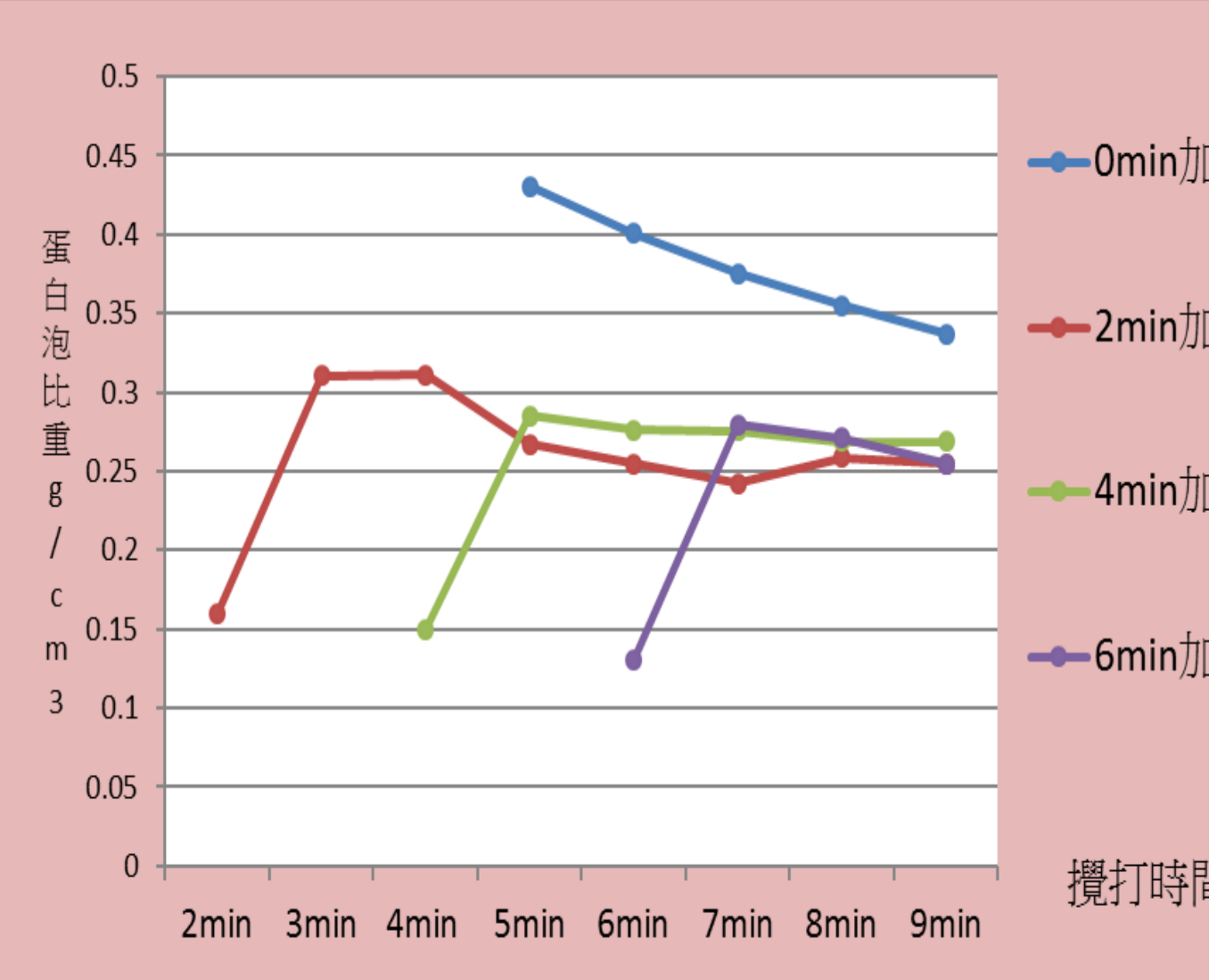


小結：

- 1.糖量越少，蛋白起泡效果越好，但糖量低於 60%，蛋白泡都已呈乾性發泡期，蛋白泡粗糙且不安定。
- 2.增加糖量會使蛋白泡起泡速度變慢，但所打出的蛋白泡質地細緻安定，介於濕性發泡期及硬性發泡期之間，應用範圍較廣泛。（參考表 7，圖 7）

《實驗四》糖在不同的時間加入對蛋白起泡性之影響

糖加入的時間	蛋白泡比重(g/cm ³)				糖加入的時間	蛋白泡比重(g/cm ³)					
	1	2	3	平均(g/cm ³)		1	2	3	平均(g/cm ³)		
0min 加糖	6分鐘	0.41	0.41	0.39	0.40	4min 加糖	4分鐘	0.14	0.16	0.15	0.15
	7分鐘	0.38	0.38	0.37	0.38		5分鐘	0.29	0.29	0.28	0.29
	8分鐘	0.36	0.36	0.35	0.36		6分鐘	0.28	0.28	0.27	0.28
	9分鐘	0.32	0.34	0.34	0.34		7分鐘	0.28	0.28	0.27	0.28
	10分鐘	0.33	0.34	0.33	0.33		8分鐘	0.27	0.27	0.26	0.27
							9分鐘	0.27	0.27	0.26	0.27
2min 加糖	2分鐘	0.16	0.16	0.16	0.16	6min 加糖	10分鐘	0.26	0.28	0.27	0.27
	3分鐘	0.31	0.31	0.31	0.31		6分鐘	0.13	0.13	0.13	0.13
	4分鐘	0.31	0.31	0.32	0.31		7分鐘	0.28	0.28	0.27	0.28
	5分鐘	0.30	0.30	0.30	0.30		8分鐘	0.28	0.27	0.26	0.27
	6分鐘	0.26	0.26	0.24	0.25		9分鐘	0.26	0.26	0.25	0.25
	7分鐘	0.26	0.24	0.24	0.24		10分鐘	0.25	0.26	0.25	0.25

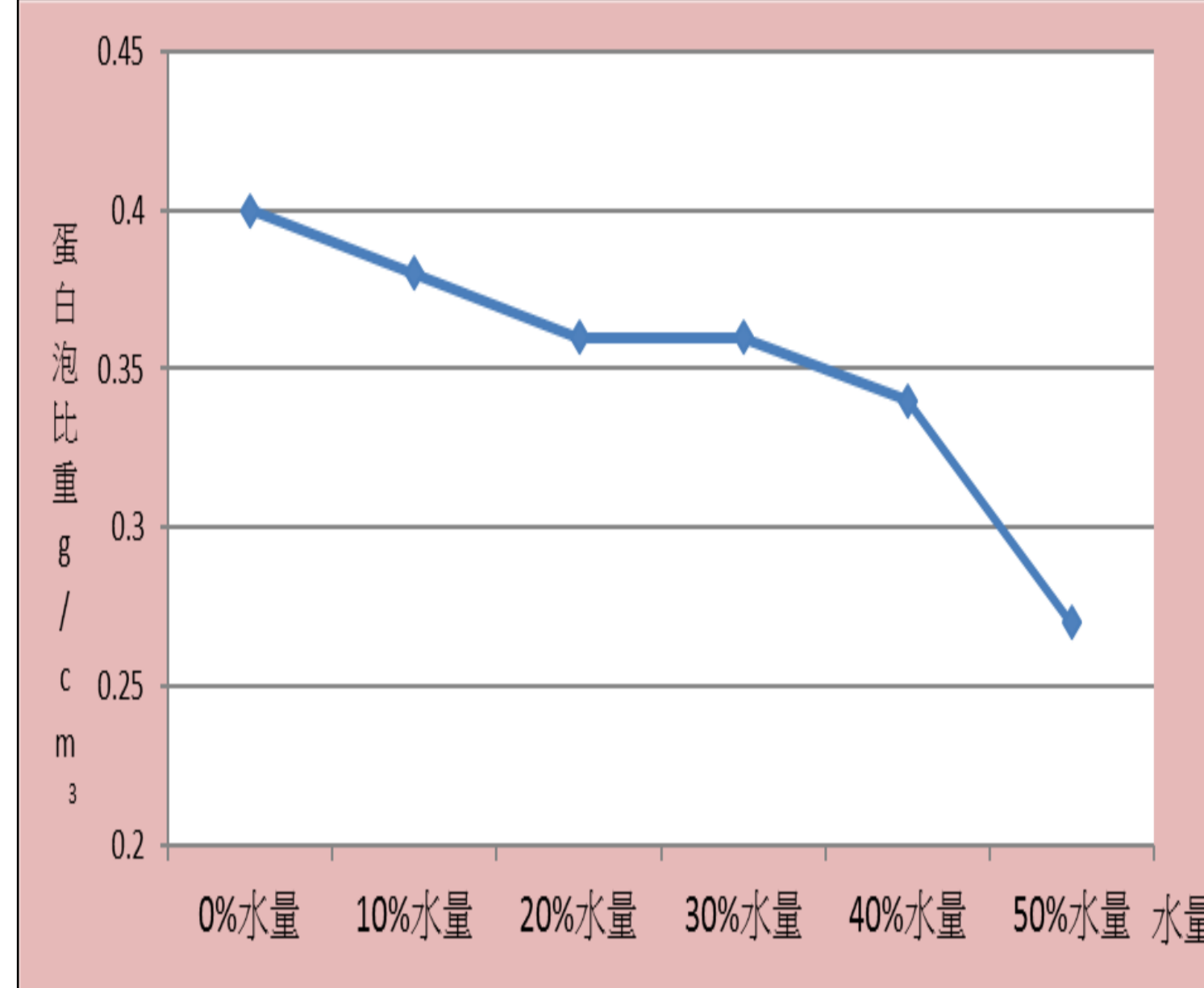


小結：

- 1.未加糖攪打時，有利於蛋白鏈打開，並且快速包覆空氣，所以比重會降到很低(0.2g/cm³以下)，但蛋白泡質地粗大且不安定。
- 2.若形成粗蛋白泡後，再加入糖，糖溶解後，會與蛋白鏈形成安定的結構，最後達到蛋白質變性，此時蛋白泡變小，質地細緻。（參考表 8，圖 8）

《實驗五》添加水量對蛋白起泡性之影響

水量	蛋白泡比重(g/cm ³)			蛋白泡比重平均(g/cm ³)
	1	2	3	
0%水量	0.41	0.40	0.40	0.40
10%水量	0.39	0.39	0.37	0.38
20%水量	0.36	0.36	0.36	0.36
30%水量	0.41	0.41	0.41	0.36
40%水量	0.34	0.34	0.33	0.34
50%水量	0.27	0.27	0.26	0.27

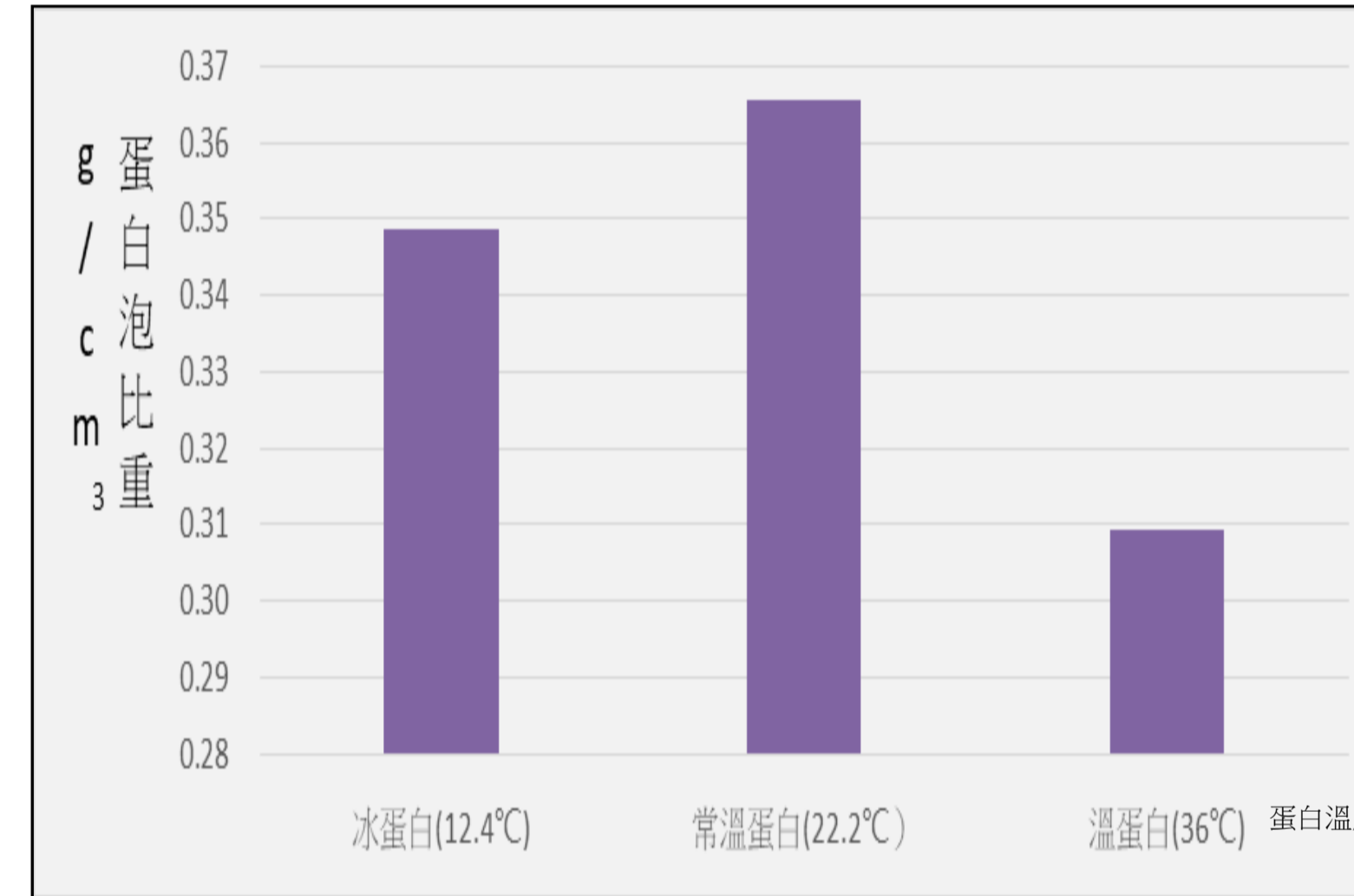


小結：

- 1.以添加水量越多，蛋白泡的比重越小。
- 2.添加水有助於蛋白泡鏈結打開後，包覆大量空氣，使得蛋白泡比重變小，但過多水會影響糖溶解後，穩固蛋白泡的特質，所以出水情況明顯。（參考表 9，圖 9）

《實驗六》蛋白溫度對蛋白起泡性之影響

水量	記錄	蛋白泡比重(g/cm ³)			蛋白泡比重平均(g/cm ³)
		1	2	3	
冰蛋白(12.4°C)	6分鐘	0.36	0.35	0.34	0.35
常溫蛋白(22.2°C)	6分鐘	0.37	0.37	0.35	0.37
溫蛋白(36°C)	6分鐘	0.31	0.31	0.30	0.31



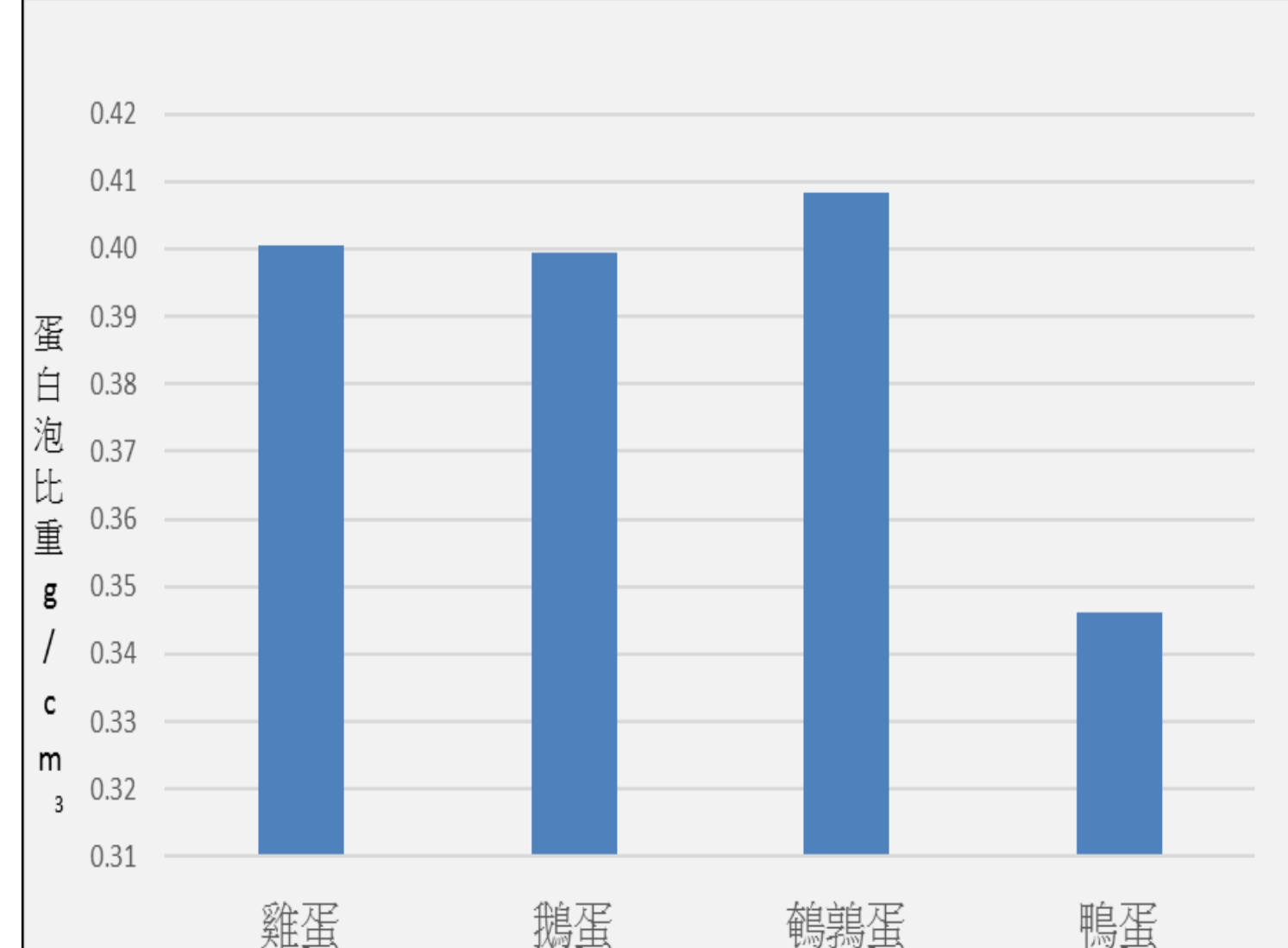
小結：

- 實驗發現常溫蛋白打出的蛋白泡比重最大，溫蛋白打出的蛋白泡比重最小。（參考表 10，圖 10）

《實驗七》不同蛋種對蛋白泡起泡性質的探討

	雞蛋	鴨蛋	鵝蛋	鸚鵡蛋
外觀				
尺寸(寬-高)	4.5 cm - 5.64 cm	4.7 cm - 5.8 cm	5.5 cm - 8.76 cm	2.53 cm - 3 cm
蛋白(g)/蛋黃(g)	36/20	37/21	65/62	5/4
蛋白蛋黃比值	1.8	1.76	1.04	1.25
酸鹼值	pH8.1	pH8.2	pH7.9	pH8.0

蛋的種類	記錄	蛋白泡比重(g/cm ³)			蛋白泡比重平均(g/cm ³)
		1	2	3	
雞蛋	6分鐘	0.41	0.41	0.39	0.40
鵝蛋	6分鐘	0.40	0.40	0.39	0.40
鸚鵡蛋	6分鐘	0.42	0.42	0.39	0.41
鴨蛋	6分鐘	0.41	0.41	0.41	0.36



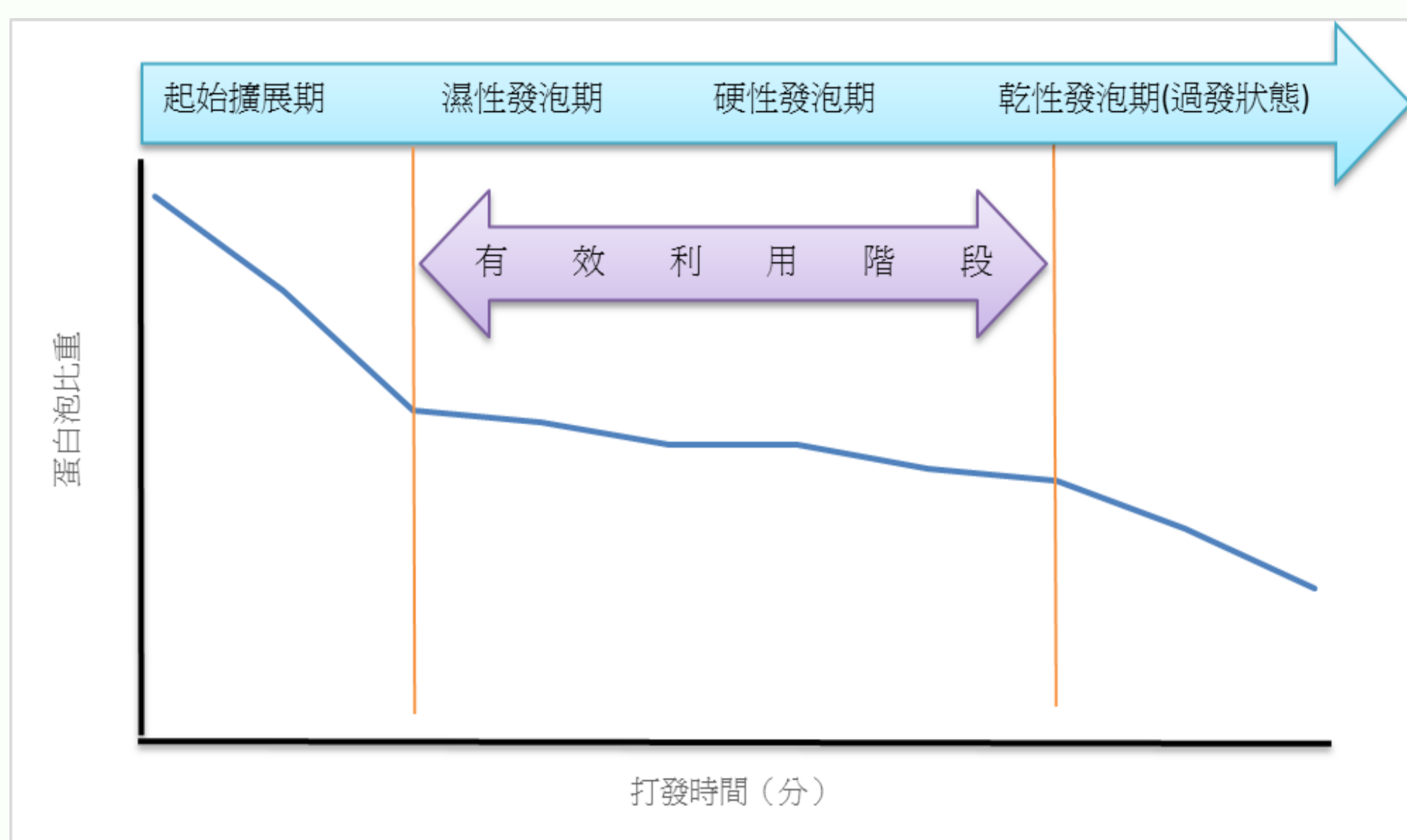
小結：

- 1.酸鹼值 (pH) 以鴨蛋 > 雞蛋 > 鸚鵡蛋 > 鵝蛋。
- 2.蛋白蛋黃比值以雞蛋 > 鴨蛋 > 鸚鵡蛋 > 鵝蛋。
- 3.由鴨蛋蛋白所打出的蛋白泡比重會最小，鸚鵡蛋蛋白所打出的蛋白泡比重會最大。（參考表 11、12，圖 11）

四、蛋白泡在烘焙領域之應用性

《實驗八》蛋白泡比重與打發程度的關聯

說明：綜合實驗所得到的數據分析後，發現蛋白打發的階段是一個連續性變化的過程，打發階段之間沒有明顯的分界，我們發現比重介於 $0.38\text{g/cm}^3 \sim 0.28\text{g/cm}^3$ 的蛋白泡，介於烘焙過程的濕性發泡與乾性發泡之間，比較適合應用在烘焙食品。打發過程的比重與打發時間的關係如圖：(圖 12)



照片	條件	比重
	上白糖 5 分鐘	0.40g/cm^3
	水量 10% 6 分鐘	0.38g/cm^3
	水量 10% 8 分鐘	0.37g/cm^3
	水量 20% 6 分鐘	0.36g/cm^3
	鵝蛋 7 分鐘	0.35g/cm^3
	水量 20% 7 分鐘	0.34g/cm^3
	鵝蛋 10 分鐘	0.33g/cm^3
	水量 20% 8 分鐘	0.32g/cm^3
	冰水 10 分鐘	0.31g/cm^3

照片	條件	比重
	水量 20% 10 分鐘	0.30g/cm^3
	水量 20% 11 分鐘	0.29g/cm^3
	果糖 5 分鐘	0.28g/cm^3
	水量 50% 6 分鐘	0.27g/cm^3
	水量 50% 8 分鐘	0.26g/cm^3
	100%糖量 8 分鐘	0.25g/cm^3
	100%糖量 10 分鐘	0.24g/cm^3
	60%糖量 9 分鐘	0.18g/cm^3
	未加糖 2 分鐘	0.16g/cm^3

《實驗九》蛋白泡安定性探討

	支撐度	出水現象	歸納	應用
安定性佳				可以直接加熱或與其他麵糊進行混合。
安定性差				烘烤時蛋白泡沫無法使產品產生膨鬆感

《實驗十》馬林糖(蛋白糖)烘焙成品比較

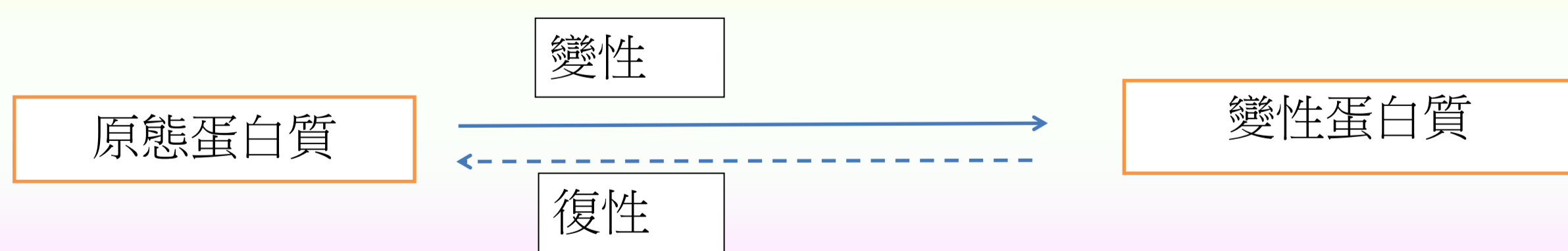
蛋白泡及比重	0.3 g/cm ³	0.29 g/cm ³	0.28 g/cm ³	0.27 g/cm ³	0.25 g/cm ³	0.24 g/cm ³
烘焙成品						
紋路凹陷率	19%	29%	34%	33%	25%	23%
說明	表面光滑，可拉出尖頭	表面光滑，可拉出長尖頭	表面光滑，可拉出長尖頭	表面光滑，可拉出尖頭	表面光滑，可拉出尖頭	表面粗糙，無尖頭

- 小結：**
- 由安定組的探究可知蛋白的起泡過程是一個不可復原的蛋白質變性過程。
 - 由不安定組探究可推測蛋白鏈和空氣產生包覆後，如果無法提供穩固蛋白結構的物質，可能無法和空氣形成安定的膠狀懸浮液，導致過一段時間就出水。(參考表 13)

- 小結：**
- 不同比重的蛋白泡烘焙後的成品外觀特徵會有差異，比重較大的濕性蛋白泡紋路凹陷率小及蛋白濕軟拉出尖頭較彎較小。反之接近硬性發泡的蛋白泡紋路凹陷率大且蛋白具有彈性，拉起的尖頭高且尖挺。乾性發泡(過發狀態)的蛋白泡雖然紋路凹陷率大，但因蛋白泡過度變性而缺乏彈性，所以無法拉出尖頭且表面粗糙。(參考表 14)

伍、討論

- 由《實驗一》發現攪拌器的轉速會影響蛋白泡的起泡狀況，當攪拌棒通過蛋白時，金屬會拉起蛋白，將摺疊的蛋白質分子打開，如果轉速太低，蛋白質的鏈結無法完全打開，影響後面抓取空氣和水的效果，使得起泡時間會變長，如果轉速太高，一旦打的時間過長，容易造成打開的蛋白鏈又會糾結在一起，讓原本抓住的空氣又跑掉，使得蛋白泡的比重又會增加。
- 由《實驗二》發現添加不同的糖類對蛋白會有不同的起泡效果，整體而言液態的糖(果糖、蜂蜜)打出的蛋白泡比重比固態糖(白砂糖、黃砂糖、黑糖、上白糖)小，我們推測液態糖因為本身含有水分，可以使蛋白質的鏈結快速打開，所以抓取空氣的速度快，蛋白的起泡快。
- 雙醣結構的糖(白砂糖、黃砂糖、黑糖、上白糖)，可能因為分子團較易和蛋白鏈形成氫鍵，而使蛋白質的結構穩固，所以打出的蛋白泡安定性好，而單醣結構的糖(果糖、蜂蜜)所打出的蛋白泡就相對不安定。
- 由《實驗三》發現糖量會影響蛋白的起泡速度及質地，增加糖量會使蛋白泡起泡速度變慢，但所打出的蛋白泡質地細緻安定，介於濕性發泡期及硬性發泡期之間，應用範圍較廣泛。過度減糖會使蛋白泡一下子就達到過發狀態，且質地不安定，易出水。
- 由《實驗四》發現添加糖的時間，會影響蛋白泡的形成，太早加糖，會使蛋白液變黏稠，反而阻礙蛋白鏈的打開，蛋白泡形成的速度較慢。太晚加糖一旦蛋白泡的結構因攪打而產生變性，再加入糖也無法改變蛋白質結構，這樣的蛋白泡在烘焙的應用性較差。
- 由《實驗五》發現在蛋白內添加水量愈多，有利蛋白質的鏈結快速打開，蛋白泡的起泡速度起快且比重越小，而且蛋白鏈包圍的空氣越大顆，形成的蛋白泡就會比較粗糙。
- 由《實驗六》發現溫度高的蛋白黏度低，使得蛋白鏈容易打開，變得容易打發，但打出的蛋白泡並不安定。溫度低的蛋白較黏稠，起泡慢有助於保留住空氣。
- 由《實驗七》發現不同蛋種的蛋白起泡效果有差異，影響起泡的因素除了酸鹼值之外，各種蛋白中的水分含量及蛋白成分也可能影響蛋白起泡。
- 由《實驗八》歸納發現比重介於 $0.38\text{g/cm}^3 \sim 0.28\text{g/cm}^3$ 的蛋白泡，介於濕性發泡與乾性發泡之間，比較適合應用在烘焙食品。
- 蛋白質特性和它本身的結構有很大的關連。當蛋白質原有的結構瓦解，造成蛋白質的本質改變就稱為「變性」，但是有些蛋白質的變性是可以復原的，有些變性是不可逆的。透過實驗我們了解到蛋白起泡的過程是一種不可逆的蛋白質變性過程。



陸、結論

- 適當的轉速有利起前蛋白質鏈結的打開，轉速 4 (1200 RPM) 的速度適合打出比重最小，外觀細緻的濕性發泡期。
- 使用液態糖、減少糖量或增加水量、提高溫度都可以加速蛋白鏈的打開，使大量空氣進入打出比重小的蛋白泡，但是蛋白泡形成速度越快，當蛋白鏈間的強度不夠時，蛋白泡的安定度就會降低。
- 糖量越多，蛋白打發速度較慢，但可打出較適合使用的安定蛋白泡，所以打發蛋白的糖量不可少於 80%。
- 太早加糖會使蛋白起泡速度變慢，但形成的蛋白泡安定，太晚加糖時，蛋白泡可能已達變性，即使再攪打也無法改變蛋白泡的性質。
- 不同蛋種的蛋白 pH 值均大於 7 都偏鹼性，而打出的蛋白泡比重也不同。鴨蛋蛋白所打出的蛋白泡比重最小，而鵝蛋蛋白所打出的蛋白泡比重最大。
- 實驗發現比重介於 $0.38\text{g/cm}^3 \sim 0.28\text{g/cm}^3$ 的蛋白泡，介於烘焙過程的濕性發泡期與硬性發泡期之間，比較適合應用在烘焙食品。

柒、參考資料

- 全國科展作品「蛋白棉花糖~蛋白霜之研究」中華民國第 54 屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 哈洛得·馬基 (2004)，食物與廚藝【麵食·醬料·甜點·飲料】·台北市：大家出版。P135-150
- 學研(原作者)；鄭永銘(審訂)(2010)，廚房裡的小科學家 第二冊·台北市：三采文化。
- 曾道一、賈宜琛 (2011)，食品科學概論·新北市：新文京開發。
- 施明智、蕭思玉、蔡敏郎 (2013)，食品加工學·台北市：五南圖書。P496-p514
- 跟著鄭大師玩科學(鄭永銘老師的 BLOG)烘焙的科學(一)蛋白打發
<https://www.masters.tw/166501/%E7%83%98%E7%84%99%E7%9A%E7%A7%91%E5%AD%B81>
- 愛在廚房 (2009) http://www.euphoca.com/terms/terms.asp?t_id=47
- 關於蛋白及其發泡性 (2016) <https://www.mobile01.com/topicdetail.php?f=602&t=4957258>