

屏東縣第 61 屆國中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：化學科

組 別：國中組

作品名稱： 白雪皚皚

—樟腦結晶探討—



關 鍵 詞：樟腦結晶、結晶核、溶解與結晶

編號：B3031

目錄

摘要	1
壹、研究動機.....	1
貳、研究目的與問題.....	1
參、名詞釋義.....	2
一、樟腦結晶	2
二、結晶核	2
三、溶解與結晶	3
肆、研究設備與器材.....	4
伍、研究架構與步驟.....	4
一、研究架構	4
二、實驗步驟	5
陸、研究結果與討論.....	9
一、不同質量硝酸鉀、氯化銨水溶液與不同質量樟腦酒精溶液對樟腦結晶的影響	9
二、升溫溶解後再結晶次數對樟腦結晶的影響	13
三、不同的降溫速率對樟腦結晶的影響	14
四、不同結晶核對樟腦結晶的影響	15
五、不同水質對樟腦結晶的影響	18
柒、結論.....	20
一、結論	20
二、感想	21
捌、參考資料.....	21

摘要

本研究主要目的在探討不同質量硝酸鉀、氯化銨水溶液，與不同質量樟腦酒精溶液對樟腦結晶的影響，其次探討升溫溶解後再結晶次數、不同降溫速率、不同結晶核與不同水質對樟腦結晶的影響。研究者以硝酸鉀與氯化銨水溶液，加入樟腦酒精溶液，形成的混合液為研究對象；以實驗研究設計。採用 EXCEL 統計與質性探討。本研究主要的結果發現：

- 一、不同質量硝酸鉀、氯化銨水溶液與不同質量樟腦酒精溶液，會影響樟腦的結晶。
- 二、升溫溶解後再結晶次數不會影響初次產生結晶溫度與結晶形狀。
- 三、不同的降溫速率不會影響樟腦發生結晶溫度，但會影響樟腦結晶形狀。
- 四、不同結晶核會影響樟腦的結晶出現的溫度。
- 五、水質會影響樟腦結晶的發生溫度、結晶量與結晶形狀。

壹、研究動機

有一次去逛街看到店家出售天氣瓶，產品介紹說到：瓶中的漂亮結晶可以預測天氣變化。當下讓我讚嘆不已！這麼漂亮的結晶竟然可以預測天氣變化？於是上網搜尋資料發現這個漂亮的羽狀結晶只是樟腦結晶，但是它真能預測天氣變化嗎？我們是否能調整其中配方，自製出漂亮的結晶呢？於是我們展開一連串實驗探究，希望能”種出”漂亮的羽狀結晶，並了解影響樟腦結晶的因素。

貳、研究目的與問題

- 一、探討不同質量硝酸鉀、氯化銨水溶液與不同質量樟腦酒精溶液對樟腦結晶的影響。
 1. 不同質量硝酸鉀對樟腦結晶的影響是什麼？
 2. 不同質量氯化銨對樟腦結晶的影響是什麼？
 3. 不同質量樟腦砂對樟腦結晶的影響是什麼？
- 二、探討升溫溶解後再結晶次數對樟腦結晶的影響。
 1. 升溫溶解再結晶次數對樟腦結晶的影響是什麼？
- 三、探討不同的降溫速率對樟腦結晶的影響。

1.不同降溫速率對樟腦結晶的影響是什麼？

四、探討不同結晶核對樟腦結晶的影響。

1.不同結晶核對樟腦結晶的影響是什麼？

五、探討水質對樟腦結晶的影響。

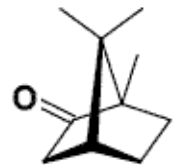
1.不同水質對樟腦結晶的影響是什麼？

叁、名詞釋義

為了能更清楚界定本研究的用語，茲將研究所涉及的幾個特定名詞，敘述如下。

一、樟腦結晶

樟腦砂 (Camphor, $C_{10}H_{16}O$) 可從樟樹樹幹中利用蒸餾法提煉出，在國際純粹與應用化學聯合會 (IUPAC) 的名稱為 1,7,7-三甲基二環[2.2.1]庚烷-2-酮，是一種有機化合物，室溫下為白色結晶性粉末或無色半透明的硬塊，易昇華隨水蒸氣揮發，純樟腦砂具有特殊香味。易溶於乙醇(溶解度約為 2.5 克/10 毫升乙醇)、脂肪油中；在水中溶解度極小，其分子結構如右圖所示。



本研究將樟腦砂溶於乙醇後，加入由硝酸鉀、氯化銨所形成的溶液中，充分混合兩溶液，升高溫度使混合液中白色物質溶解，降溫後再觀察樟腦結晶狀況；實驗同時改變混合液中物質組成、升溫溶解後再結晶次數、不同降溫速率及改變結晶核與水質等方式探討樟腦結晶變化。

二、結晶核

溶液產生結晶主要原因是溶液中，所含溶質已超過溶劑所能溶解最大量。但因為物質溶解度的不同特性，結晶的方法可分為冷卻法、恆溫蒸發法及絕熱蒸發法等，且產生結晶通常需要有結晶核的存在，結晶核可以由分子、原子或離子形成，這些微粒在水溶液中快速的運動，產生有效碰撞，使溶液所含微粒有機會產生較大的群集，終致成核。過飽和為成核的第一要素，但在成核的過程中發生其他非必要的碰撞，例如：攪拌、震動等亦可能開始形成結晶核；而溶液中若含有其他少量不純物，也可能對成核和成長速率產生深遠影響(陳崇賢等 2006)。

許良榮(2015)認為硝酸鉀、氯化銨以及水，主要的作用為促使樟腦晶核的形成（nucleation）。

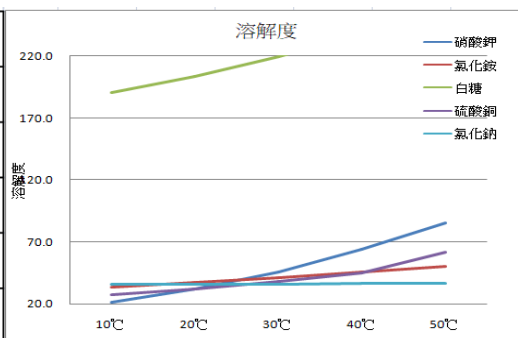
因此，本研究使用熱水浴，使混合液成為澄清無色溶液，再設置如右圖之實驗裝置。冷卻方式為在實驗裝置中加入冰塊以進行快速降溫、放入冰水以進行中速降溫、或是放在一般水中進行自然降溫。進而探討不同降溫速率、不同結晶核取代溶液中硝酸鉀、氯化銨的方式，及使用不同種類水質進行實驗，觀察樟腦結晶變化與型態。



三、溶解與結晶

不同溶質在不同溫度下，其溶解度不同。固體物質的溶解度是指在固定溫度下，此物質在 100g 水中達到飽和時溶解的質量；而影響溶解度的因素有溫度、壓力等。固體的溶解度大多數物質隨溫度升高而增大，例如：硝酸鉀、氯化銨、硫酸銅及白糖等，屬於高水溶性物質，少數物質的溶解度不易受溫度變化影響，如氯化鈉。當溶質分子進入溶液時，因為粒子可以自由移動，有些分子碰撞到未溶解的晶體表面(結晶核)，會被吸附到晶體表面析出，即發生結晶或沉澱。

溶解度(g/100g水)	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C
硝酸鉀	20.9	31.6	45.8	63.9	85.5
氯化銨	33.3	37.2	41.4	45.8	50.4
白糖	190.5	203.9	219.5	238.1	260.4
硫酸銅	27.5	32.0	37.8	44.6	61.8
氯化鈉	35.8	35.9	36.1	36.4	36.6



本研究使用高水溶性的硝酸鉀、氯化銨、白糖以及硫酸銅等，可能提升系統內的樟腦結晶成核速度，使其對溫度的變化更敏感，同時也能使結晶的型態成為鬆散美麗的羽毛狀，更容易觀察也更具有觀賞價值。



漂亮的羽狀結晶

肆、研究設備與器材

一、實驗藥品：

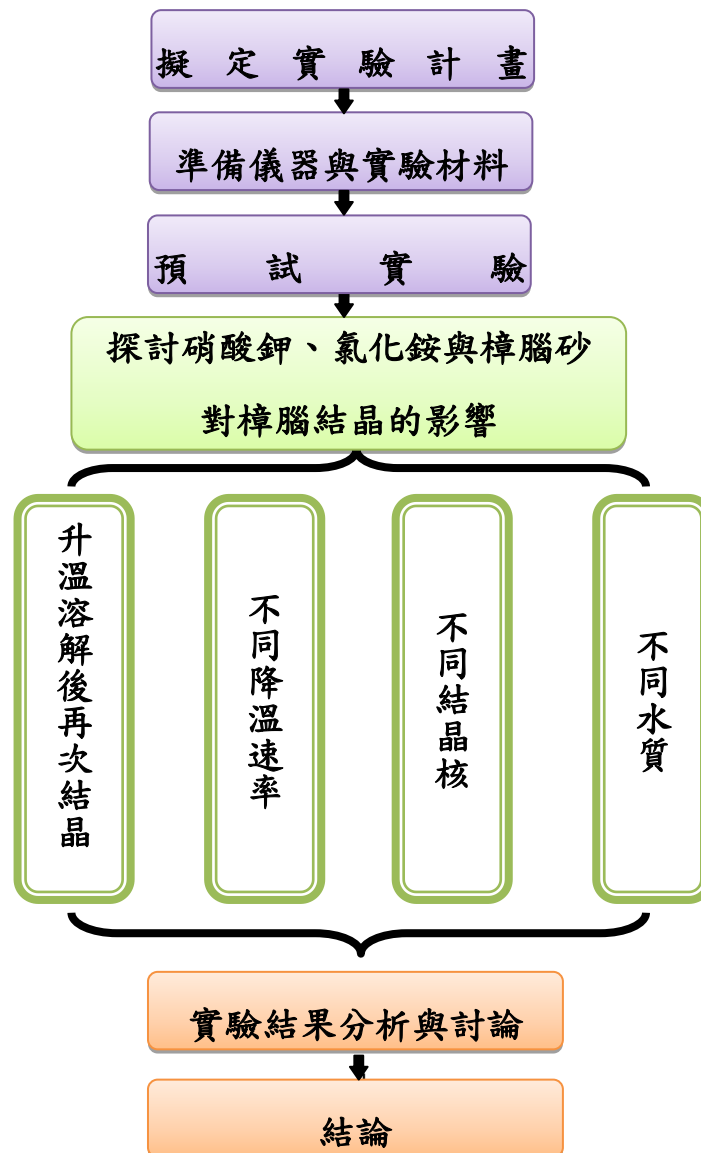
硝酸鉀、氯化銨、白糖、食鹽、硫酸銅、樟腦砂、95%乙醇、礦泉水、地下水、RO水、自來水。

二、實驗器材：

燒杯(500 ml×6、100ml×3)、電子天平(準確至 0.1g)、玻璃棒×6、固體溫度計×3(準確至 0.1℃)、酒精溫度計×3、滴管×6、保鮮膜、橡皮筋、秤量紙、保麗龍盒×2(以黑色電工膠帶黏貼內側方便觀察)、壓克力大水槽(300*300*300mm)、小魚缸(180*130*150mm)、鐵絲、黑色電工膠帶、透明壓克力板(以黑色電工膠帶黏貼遮光)、試管(30*150 mm × 20 支、30*200 mm× 20 支)、鋼尺。

伍、研究架構與步驟

一、研究架構



二、實驗步驟

1. 實驗一：不同質量硝酸鉀、氯化銨水溶液與不同質量樟腦酒精溶液對樟腦結晶的影響。
(因為考量本研究採用試管(容量小)進行實驗，研究者以許良榮(2015)的實驗配方(溶液一：2.5g 硝酸鉀、2.5g 氯化銨加 33 mL 蒸餾水；溶液二：10g 樟腦 ($C_{10}H_{16}O$) 加 40mL 乙醇)為基準等比例縮減，成為實驗配方後進行實驗觀察。)

(1)不同質量硝酸鉀

- ①配置溶液一：稱取硝酸鉀粉末 0.9、1.2、1.5、1.8 及 2.1 公克，分別加入 20 毫升 RO 水，再分別加入氯化銨 1.5g，攪拌溶解。
- ②配置溶液二：稱取樟腦砂 6 g 加入乙醇 24 ml，攪拌至完全溶解。
- ③將上述二步驟的溶液相互混合後，形成白色混濁的溶液加入試管中，以保鮮膜及橡皮筋密封，形成 1-1、1-2、1-3、1-4、1-5 等五支試劑。
(在預試實驗中發現：使用橡皮塞封口，熱水浴時溶液溫度上升，因乙醇釋出使管內蒸氣壓過高，橡皮塞無法完全密封，且橡皮塞之色素會汙染試劑，故以保鮮膜取代橡皮塞封口)
- ④完成後，將混合溶液放置於 45°C 熱水中水浴並輕輕搖晃，使白色沉澱溶解，形成澄清透明溶液。



- ⑤放置室溫下，靜置兩週後進行連續 15 天的觀察，拍照並同時記錄當日氣溫與晶體高度。

(2)不同質量氯化銨

- ①配置溶液一：稱取氯化銨粉末 0.9、1.2、1.5、1.8 及 2.1 公克，分別加入 20 毫升 RO 水，再分別加入硝酸鉀 1.5g，攪拌溶解。
- ②配置溶液二：稱取樟腦砂 6 g 加入乙醇 24 ml，攪拌至完全溶解。
- ③將上述二步驟的溶液相互混合後加入試管中，形成白色沉澱的溶液，以保鮮膜及橡皮筋密封，形成 2-1、2-2、2-3、2-4、2-5 等五支試劑。
- ④完成後，將混合溶液放置於 45°C 熱水中水浴並輕輕搖晃，使白色沉澱溶解，形成澄清透明溶液。
- ⑤放置室溫下，靜置兩週後開始觀察、拍照並記錄。

(3) 不同質量樟腦砂

- ①稱取硝酸鉀粉末 1.5 g、1.5g 氯化銨粉末，加入 20 毫升 RO 水，形成溶液一。
- ②稱取樟腦砂 3.6、4.8、6.0、7.2 及 8.4 g 樟腦砂分別加入乙醇 24 ml，攪拌至完全溶解，形成溶液二。
- ③將步驟①、②的溶液加入試管中相互混合（形成白色沉澱的溶液），以保鮮膜及橡皮筋密封，形成 3-1、3-2、3-3、3-4、3-5 等五支試劑。
- ④將 3-1、3-2、3-3、3-4、3-5 試管，放置於 45°C 熱水浴並輕輕搖晃，使白色沉澱溶解，形成澄清透明溶液。
- ⑤放置室溫下，靜置兩週後開始觀察、拍照並紀錄。



2. 實驗二：升溫溶解後再結晶次數對樟腦結晶的影響。

- (1)稱取硝酸鉀 1.5 g、氯化銨 1.8 g 加入 RO 水 20 ml 攪拌溶解，形成溶液一。

(2)稱取樟腦砂 6 g 加入乙醇 24 ml，攪拌溶解，形成溶液二。

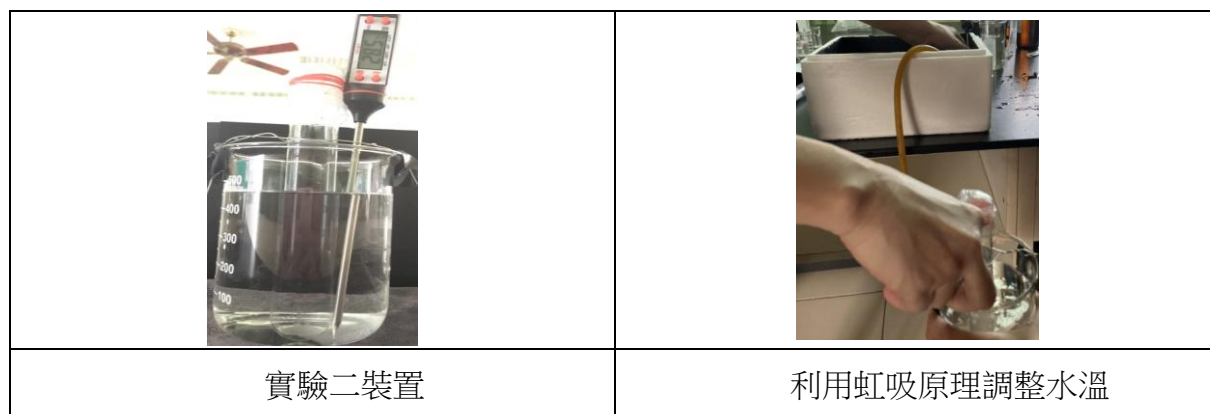
(3)將上述兩溶液充分混合後，以保鮮膜及橡皮筋密封。

(4)將混合液放入熱水(45°C)中(水浴)，使白色沉澱物完全溶解後靜置觀察，裝置如下圖所示。

(5)在裝置中加入冷水，以虹吸原理慢慢調低裝置中的水溫，待樟腦結晶後，再次調高裝置中的水溫，使晶體完全溶解，以此定義為一次降溫循環，重複此步驟 15 次。

(因為查詢網路發現部分言論載明，樟腦結晶需靜置 1~2 週再觀察，但此言論並未獲得明確的驗證，且今年南台灣冬天日夜溫差約 10°C，故假設樟腦結晶在日間會溶解、夜間會有晶體析出，又無法得知自然狀況下白天晶體溶解量，所以研究者將實驗設定為當樟腦結晶完全溶解後再結晶視為一個循環)。

(6)觀察並記錄各管開始結晶溫度。



3. 實驗三：不同的降溫速率對樟腦結晶的影響。

(1) 配製三管相同組成溶液。

溶液一(硝酸鉀 1.5g、氯化銨 1.8 g 加入 RO 水 20ml)與溶液二(樟腦砂 6g、乙醇 24ml)，將兩溶液混合後放入熱水(45°C)中，使其完全溶解。

(2)將此三管試劑分別放入實驗裝置一 (在保利綸箱加入中冰塊 640 g)進行快速降溫、實驗裝置二 (每降溫兩度加入 500 ml 的冰水) 進行中速降溫，及實驗裝置三(放在一般水中)進行自然降溫。

(3)觀察並記錄各管開始結晶溫度，與靜置一天後的晶形及晶量。



4. 實驗四：不同結晶核對樟腦結晶的影響。

(1) 配置溶液一：將下表物質加入 20 毫升 RO 水中，形成 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K、L 等十支不同結晶核的試管。

	1.5g	1.8g		1.5g	1.8g		3.3 g
A	硝酸鉀	氯化銨	E	氯化鈉	氯化銨	I	硫酸銅
B		氯化鈉	F	硫酸銅		J	白糖
C		硫酸銅	G	白糖		K	硝酸鉀
D		白糖	H	氯化鈉 3.3 g		L	氯化銨

(2) 配置溶液二：稱取樟腦 6g 加入乙醇 24ml，攪拌使其完全溶解。並將溶液二加入溶液一中，熱水浴(45°C)使白色沉澱物完全溶解。

(在溶液混合後熱水浴使白色物質完全溶解時，發現含有硫酸銅的試管，即使溶液溫度已到達 45°C 仍無法完全溶解，為避免其他管溫度過高乙醇氣化爆瓶，決定不再提高熱水浴溫度而開始進行實驗。)

(3) 將 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K、L 等十支不同結晶核的試管放入下圖裝置中。

利用虹吸原理調整水溫。

(4) 觀察並記錄，各管開始結晶的時間與靜置一天後的晶形及晶量。



5. 實驗五：不同水質對樟腦結晶的影響。

- (1)分別稱取硝酸鉀 1.5 g、氯化銨 1.8 g，加入各 20 毫升的 RO 水、礦泉水、地下水及自來水中。
- (2)稱取樟腦 6g 加入乙醇 24ml，攪拌使其完全溶解。
- (3)將步驟(1)、(2)的溶液混合後，熱水浴(40°C)使白色沉澱物完全溶解。
- (4)將步驟三各混合液之試管放入小魚缸中，觀察並記錄各管開始結晶溫度、與靜置一天及兩天後的晶形及晶量。



陸、研究結果與討論

本研究以瘋迷一時的天氣瓶(storm glass 或 weather glass)的實驗操作方式，進行樟腦砂($C_{10}H_{16}O$)結晶試驗。首先進行實驗配方測試，希望找到屬於研究者所希望看到的漂亮結晶。所謂的「漂亮」是指樟腦結晶形狀有明顯單一特徵(羽狀或是樹枝狀)，而非細碎粉狀、霧狀或晶形混亂不易觀察的型態。找出研究者所希冀的配方後，透過再結晶次數、不同降溫速率、不同結晶核與不同水質等實驗操弄方式，對樟腦結晶進行探討。實驗結果與討論如下：

一、不同質量硝酸鉀、氯化銨水溶液與不同質量樟腦酒精溶液對樟腦結晶的影響

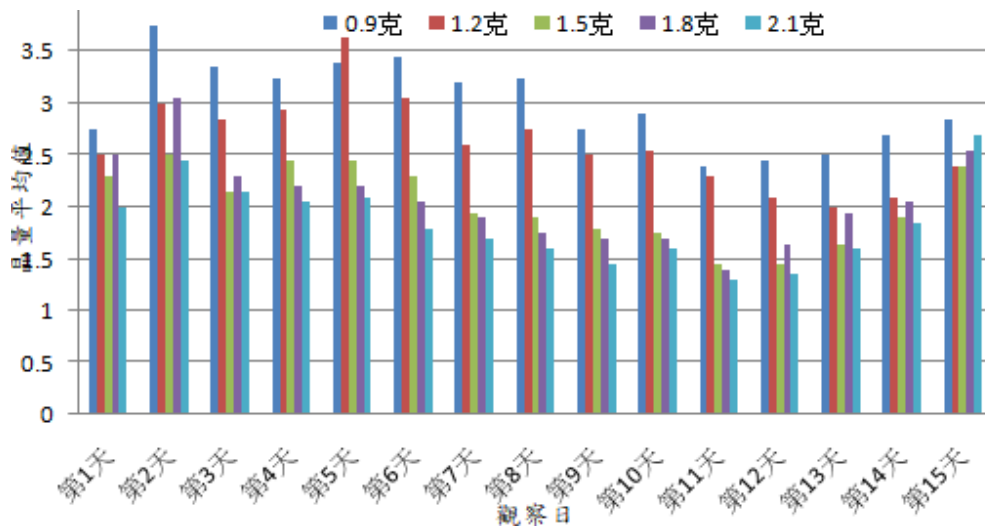
因為考量本研究採用試管容量小，研究者將許良榮(2015)的配方等比例縮減成為本實驗配方參考，配置好溶液後放於室溫下靜置兩週，再開始進行連續 15 天的觀察。

1. 不同質量硝酸鉀對樟腦結晶的影響

本研究利用天氣瓶實驗方式進行樟腦結晶探討，為了解硝酸鉀在樟腦結晶中的影響，研究者將溶液一中，硝酸鉀質量更改為 0.9、1.2、1.5、1.8 及 2.1 公克，分別加入 1.5g 氯化銨及 20 毫升 RO 水，再加入已完全溶解的溶液二(樟腦砂 6 g、乙醇 24 ml)。其結果為：

第 1 天(27°C)	第 2 天(25°C)	第 3 天(25°C)	第 4 天(26°C)	第 5 天(26°C)	0.9克		1.2克			1.5克			1.8克			2.1克				
					天	下層	上層	均值	下層	上層	均值	下層	上層	均值	下層	上層	均值	下層	上層	均值
					第1天	5.3	0.2	2.75	1.5	3.5	2.5	4.5	0.1	2.3	5	0	2.5	4	0	2
					第2天	5.3	2.2	3.75	1.5	4.5	3	5	0	2.5	6.1	0	3.05	4.9	0	2.45
					第3天	5.1	1.6	3.35	1.5	4.2	2.85	4.3	0	2.15	4.6	0	2.3	4.3	0	2.15
					第4天	4.9	1.6	3.25	1.6	4.3	2.95	4.7	0.2	2.45	4.4	0	2.2	4.1	0	2.05
					第5天	5.1	1.7	3.4	1.8	5.5	3.65	4.9	0	2.45	4.4	0	2.2	4.2	0	2.1
					第6天	5.7	1.2	3.45	1.8	4.3	3.05	4.6	0	2.3	4.1	0	2.05	3.6	0	1.8
					第7天	5.6	0.8	3.2	1.2	4	2.6	3.9	0	1.95	3.8	0	1.9	3.4	0	1.7
					第8天	5.9	0.6	3.25	1.8	3.7	2.75	3.8	0	1.9	3.5	0	1.75	3.2	0	1.6
					第9天	5.5	0	2.75	1.1	3.9	2.5	3.6	0	1.8	3.4	0	1.7	2.9	0	1.45
					第10天	5.8	0	2.9	1.6	3.5	2.55	3.5	0	1.75	3.4	0	1.7	3.2	0	1.6
					第11天	4.8	0	2.4	1.1	3.5	2.3	2.9	0	1.45	2.8	0	1.4	2.6	0	1.3
					第12天	4.9	0	2.45	1.2	3	2.1	2.9	0	1.45	3.3	0	1.65	2.7	0	1.35
					第13天	4.8	0.2	2.5	0.8	3.2	2	2.9	0.4	1.65	3.6	0.3	1.95	3.2	0	1.6
					第14天	4.9	0.5	2.7	1.4	2.8	2.1	3.5	0.3	1.9	3.9	0.2	2.05	3.7	0	1.85
					第15天	5.2	0.5	2.85	1.8	3	2.4	4.4	0.4	2.4	4.6	0.5	2.55	4.6	0.8	2.7

圖(一)不同質量硝酸鉀中樟腦結晶量



圖(二)不同硝酸鉀質量與樟腦結晶量關係圖

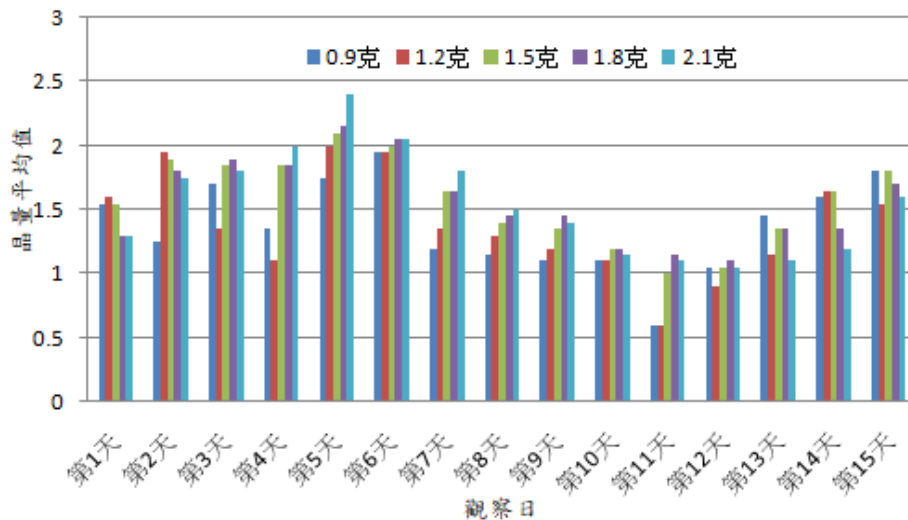
進行實驗觀察期間氣溫變化甚小，所以由圖(一)可看觀察到每日晶體形態與結晶量變化很小。而由圖(二)可以觀察出硝酸鉀質量和樟腦結晶量存在負相關，亦即溶液中硝酸鉀質量愈多，樟腦結晶量未必較多；且本組配方設定在自然溫度(26~28°C)環境下，並未產生本研究想要的漂亮晶形(羽狀結晶)。

2. 不同質量氯化銨對樟腦結晶的影響

利用天氣瓶實驗方式進行樟腦結晶探討，為了解氯化銨在樟腦結晶中的影響，研究者將溶液一的氯化銨質量更改為 0.9、1.2、1.5、1.8 及 2.1 公克，分別加入 1.5g 硝酸鉀及 20 毫升 RO 水，與已完全溶解的溶液二(樟腦砂 6 g、乙醇 24 ml)混合後，以熱水浴使混合液內之白色物質完全溶解。其結果為：

第 1 天(27°C)	第 2 天(25°C)	第 3 天(25°C)	第 4 天(26°C)	第 5 天(26°C)		0.9克			1.2克			1.5克			1.8克			2.1克		
					天	下層	上層	均值	下層	上層	均值	下層	上層	均值	下層	上層	均值	下層	上層	均值
					第1天	3.1	0	1.6	3.2	0	1.6	3.1	0	1.6	2.6	0	1.3	2.6	0	1.3
					第2天	2.5	0	1.3	3.4	0.5	2	3.8	0	1.9	3.6	0	1.8	2.9	0.6	1.8
					第3天	3.4	0	1.7	2.7	0	1.4	3.7	0	1.9	3.8	0	1.9	2.7	0.9	1.8
					第4天	2.7	0	1.4	2.2	0	1.1	3.7	0	1.9	3.7	0	1.9	2.5	1.5	2
					第5天	3.5	0	1.8	4	0	2	4.2	0	2.1	4.3	0	2.2	3.6	1.2	2.4
					第6天	3.9	0	2.0	3.9	0	2	4	0	2	4.1	0	2.1	3.3	0.8	2.1
					第7天	2.4	0	1.2	2.7	0	1.4	3.3	0	1.7	3.3	0	1.7	2.9	0.7	1.8
					第8天	2.3	0	1.2	2.6	0	1.3	2.8	0	1.4	2.9	0	1.5	2.7	0.3	1.5
					第9天	2.2	0	1.1	2.4	0	1.2	2.7	0	1.4	2.9	0	1.5	2.6	0.2	1.4
					第10天	2.2	0	1.1	2.2	0	1.1	2.4	0	1.2	2.4	0	1.2	2.3	0	1.2
					第11天	1.2	0	0.6	1.2	0	0.6	2	0	1	2.3	0	1.2	2.2	0	1.1
					第12天	2.1	0	1.1	1.8	0	0.9	2.1	0	1.1	2.2	0	1.1	2.1	0	1.1
					第13天	2.9	0	1.5	2.3	0	1.2	2.7	0	1.4	2.7	0	1.4	2.2	0	1.1
					第14天	3.2	0	1.6	2.3	1	1.7	3.3	0	1.7	2.7	0	1.4	2.4	0	1.2
					第15天	2	1.5	1.8	3.1	0	1.6	3	0.4	1.7	3.4	0	1.7	3.2	0	1.6

圖(三)不同質量氯化銨中樟腦結晶量



圖(四)不同氯化銨質量與樟腦結晶量關係圖

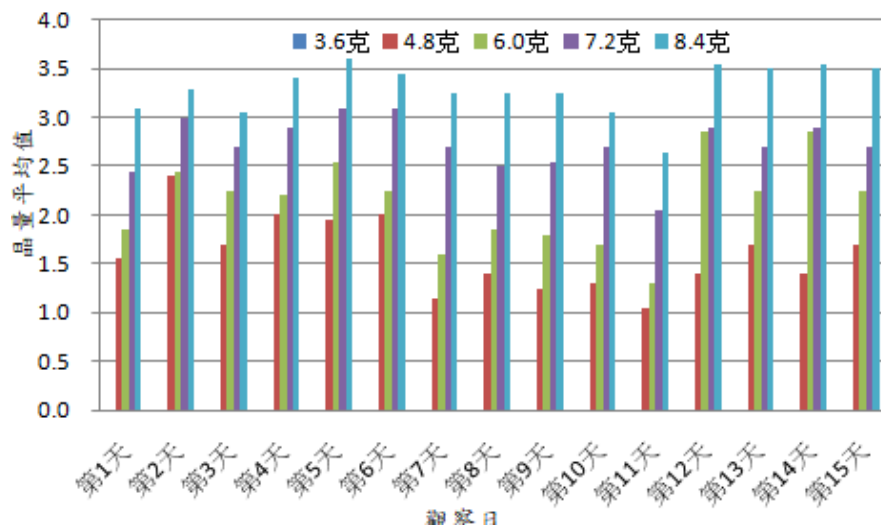
由圖(三)與圖(四)可發現氯化銨質量多寡，並未明顯影響溶液中樟腦結晶生成量。此五管中樟腦結晶晶形多為不規則片狀堆疊，亦未達到本實驗所設定需有明顯晶形(羽狀或樹枝狀)，推測可能是因為實驗觀察期(2週)內氣溫，並無明顯(均介於 26~28°C間)變化引起，而溶液中樟腦溶液達到飽和且存在結晶核，所以可以產生結晶，但溫度未有明顯變化，所以無法產生羽狀結晶。

3. 不同質量樟腦砂對樟腦結晶的影響

為避免不純的樟腦對實驗產生干擾，因此以許良榮(2015)所提建議，用試藥級樟腦砂進行實驗。本階段實驗將 1.5 g 硝酸鉀與 1.5g 氯化銨加入 RO 水溶解，並稱取不同質量(3.6、4.8、6.0、7.2 及 8.4)樟腦砂加入乙醇完全溶解後，再將兩種溶液混合，並以熱水浴使白色物質完全溶解，形成五管試劑放在室溫下靜置觀察。其實驗結果如下圖所示：

第 1 天(27°C)	第 2 天(25°C)	第 3 天(25°C)	第 4 天(26°C)	第 5 天(26°C)		3.6克			4.8克			6.0克			7.2克			8.4克		
					天	下層	上層	均值	下層	上層	均值	下層	上層	均值	下層	上層	均值	下層	上層	均值
					第1天	0	0	0.0	3.1	0	1.6	3.7	0	1.9	4.9	0	2.5	6.2	0	3.1
					第2天	0	0	0.0	4.8	0	2.4	4.9	0	2.5	5.4	0.6	3.0	5.8	0.8	3.3
					第3天	0	0	0.0	3.4	0	1.7	4.3	0.2	2.3	4.9	0.5	2.7	5.6	0.5	3.1
					第4天	0	0	0.0	3.8	0.2	2.0	4	0.4	2.2	4.9	0.9	2.9	5.6	1.2	3.4
					第5天	0	0	0.0	3.9	0	2.0	4.8	0.3	2.6	5.4	0.8	3.1	6.4	0.8	3.6
					第6天	0	0	0.0	3.7	0.3	2.0	4.1	0.4	2.3	5.4	0.8	3.1	6.2	0.7	3.5
					第7天	0	0	0.0	2.3	0	1.2	2.7	0.5	1.6	4.7	0.7	2.7	5.7	0.8	3.3
					第8天	0	0	0.0	2.6	0.2	1.4	3.2	0.5	1.9	4.3	0.7	2.5	5.6	0.9	3.3
					第9天	0	0	0.0	2.4	0.1	1.3	3.2	0.4	1.8	4.4	0.7	2.6	5.7	0.8	3.3
					第10天	0	0	0.0	2.6	0	1.3	3.4	0	1.7	4.9	0.5	2.7	5.9	0.2	3.1
					第11天	0	0	0.0	2.1	0	1.1	2.6	0	1.3	4.1	0	2.1	5.3	0	2.7
					第12天	0	0	0.0	2.6	0.2	1.4	5.3	0.4	2.9	5.1	0.7	2.9	6.3	0.8	3.6
					第13天	0	0	0.0	3.3	0.1	1.7	4.2	0.3	2.3	5.1	0.3	2.7	6.6	0.4	3.5
					第14天	0	0	0.0	2.6	0.2	1.4	5.3	0.4	2.9	5.1	0.7	2.9	6.3	0.8	3.6
					第15天	0	0	0.0	3.3	0.1	1.7	4.2	0.3	2.3	5.1	0.3	2.7	6.6	0.4	3.5

圖(五)不同質量樟腦砂中樟腦結晶量



圖(六)不同氯化銨質量與樟腦結晶量關係圖

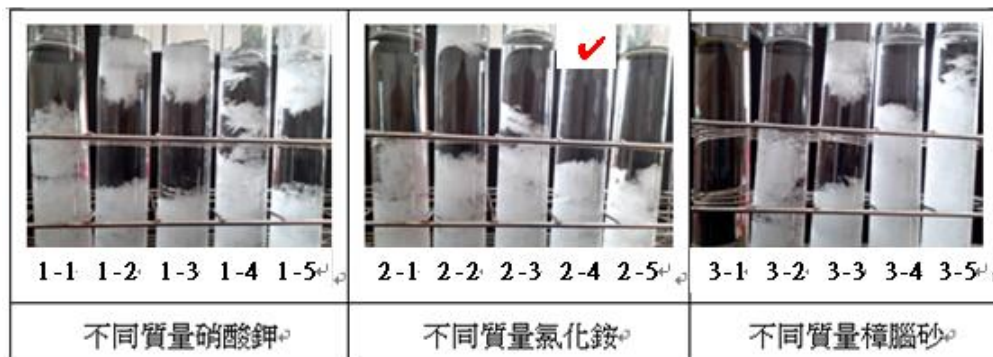
由圖(五)及圖(六)可發現，溶液結晶量隨樟腦砂質量增加而增加，溫度升高時結晶量略有變少，而結晶量與靜置天數無明顯相關。

本實驗使用乙醇量為 24ml，在 31.4°C 時最多可溶解樟腦砂 6g，實驗設置 3.6g 及 4.8g 這兩組為不飽和溶液、6g 組恰飽和、7.2g 與 8.4g 兩組為飽和有沉澱溶液。故實驗前會以熱水浴使管中晶體完全溶解。由實驗後晶體沉澱量推測：本研究所配置溶液，樟腦結晶量與加入的樟腦砂質量為正相關。而本組實驗晶體形狀為不規則片狀，故本操作未達研究者所設定需有明顯晶形之要求(羽狀或樹枝狀)，且無論試管上方或下方，多數組別出現結晶，會影響觀察。

綜上所述，最直接影響樟腦結晶量的因素是樟腦砂質量，想得到較多結晶需增加樟腦砂質量，並同時使用適量的硝酸鉀與氯化銨。

實驗操作過程中，一直無法觀察到美麗的晶形(羽狀或樹枝狀)，因此持續進行觀察(約 2 個月)，終於在一次的寒流過境隔天觀察到圖(七)，美麗的羽狀結晶。於是得知：美麗的羽狀結晶需要在 10~20°C 的環境，且較長時間靜置(一夜)始能生成。因為實驗(2)第四組的羽狀結

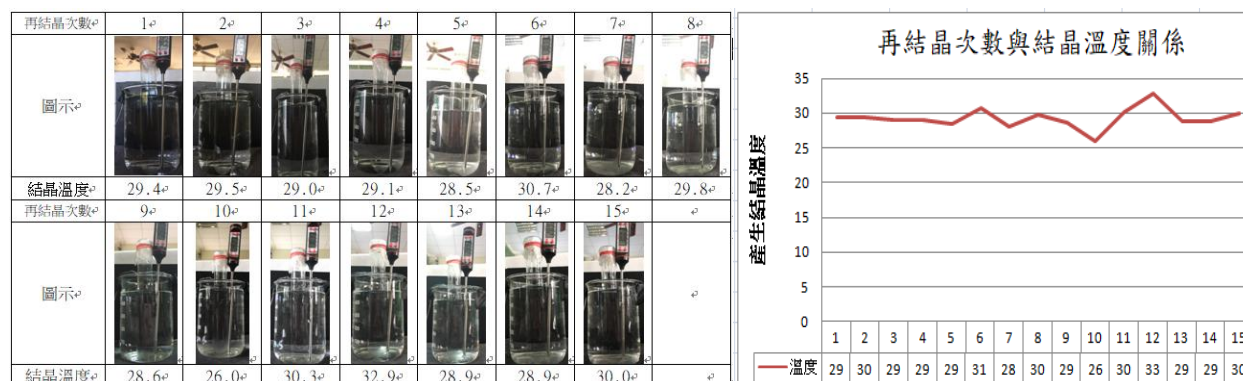
晶狀況佳(羽幹清晰、羽量多且規則)，且液面上未產生結晶干擾觀察，故接下來的實驗操作決定以：1.5 克硝酸鉀、1.8 克氯化銨加入 20 毫升 RO 水作為溶液一，而溶液二則使用 6 克樟腦砂溶於 24 毫升乙醇，進行後續各項實驗探討。



圖(七)寒流來襲隔天的結晶狀況

二、升溫溶解後再結晶次數對樟腦結晶的影響

在查閱文獻的過程中，經常發現部分言論載明：天氣瓶的操作需要靜置 1~2 週後觀察。但此言論並未獲得明確的驗證，所以這個階段實驗將預設：樟腦結晶於日間會溶解、夜間晶體才析出(今年南台灣冬天日夜溫差約 10℃)；因無法得知自然狀況下白天晶體溶解量，所以研究者將實驗設定為完全溶解後，再結晶為一個循環。實驗操作時，以熱水浴(40℃)將晶體完全溶解，再以冷水浴讓溶液降溫產生結晶，以此方式進行 15 次再結晶試驗，觀察記錄樟腦結晶出現溫度。其研究結果與討論如下：



圖(八)再結晶次數與發生結晶時的溫度關係

由圖(八)可以發現：本研究所配置的溶液，升溫完全溶解後，降溫產生結晶的溫度在 28~30℃ 之間；且發生結晶溫度和再結晶次數無關，亦即將溶液配置完就可以開始進行實驗，不須再等待 1~2 週。

在實驗操作過程中發現：大部分結晶的發生都是由試管底部開始產生霧狀，當霧狀出現

後不久，就會從試管壁開始產生點狀小晶體。推測可能是因為冷水密度大，試管底部接觸的水溫較低，會先產生霧狀結晶，其次因為試管壁會先接觸到燒杯裡的冷水，進而開始產生點狀小晶體。

三、不同的降溫速率對樟腦結晶的影響

以實驗一選定的配方，配製三管相同組成的溶液後，用熱水浴(40°C)使白色混合物完全溶解，再將三個試管分別放在，裝有 640 g 冰塊之冰水共存的保利綸箱中進行快速降溫、在另一個保利綸箱中加入 500 ml 的冰水，(只要降溫兩度就替換等量冰水)進行中速降溫，第三個試管放在常溫水中進行自然降溫。實驗結果討論如下：

快速降溫	照片									
	解說	25 °C 上層出現薄霧	24 °C 上層有 1cm 霧狀、底部霧狀、底部顏色變白尚未結晶	22.5°C 上層 1cm 霧狀、底部約 1cm 霧狀及少許結晶	21.5°C 上層 1.5cm 霧狀、底部出現約 0.3cm 結晶與 1cm 霧狀	20 °C 上層有 2cm 霧狀、下層霧狀顏色愈白(結晶)	19 °C 上層有 2cm 霧狀、下層霧狀轉為結晶	18.4°C 上層有 2cm 霧狀、底部有 3cm 結晶	16.9°C 上層有 2cm 霧狀、底部結晶更多	15.3°C 出現晶花飄落、底部結晶更多
中速降溫	照片									
	解說	22.9°C 底部出現點狀結晶	21.7°C 試管壁上出現小晶花飄落	20.5°C 更多晶花飄落	19.2 較大量雪花飄落、下方出現 3cm 霧狀	18.2 晶花持續飄落、底部霧狀變成晶體 4cm	18 晶花持續飄落、管底結晶變多	17.8°C 晶花持續出現、3/4 管結晶	16°C 4/5 管結晶	15°C 整管都結晶
自然降溫	照片									
	解說	29°C 稀疏點狀小結晶出現	28°C 更多點狀小結晶與小晶花出現	靜置一天的結晶狀態						



表(一)不同的降溫速率對樟腦結晶影響觀察表

根據表(一)可以發現不同降溫速率，溶液出現結晶的溫度不同，快速降溫組在 25°C 產生晶體、中速降溫組於 22.9°C 時產生晶體，而自然降溫組在 29°C 時有些許點狀晶體出現，但降溫速率與產生結晶時的溫度，不存在相關性。

在實驗操作過程中發現，快速降溫組會產生一層霧狀，稍微降溫後試管底部的霧狀會出現小晶體，溶液最頂端也產生霧狀，但是並沒有出現結晶現象，當溫度降的更低(15.3°C)後才開始出現小晶花。中速降溫組與自然降溫組則沒有產生霧狀，而是有小晶花由溶液頂端飄落。所以推測產生霧狀的原因，可能是在冰冷環境中，因為急速冷卻，導致瓶內溶液中有溶質而這些析出物尚無法使樟腦產生結晶，亦即快速降溫組所設定的降溫速率過快，樟腦結晶來不及形成便會產生的霧狀。

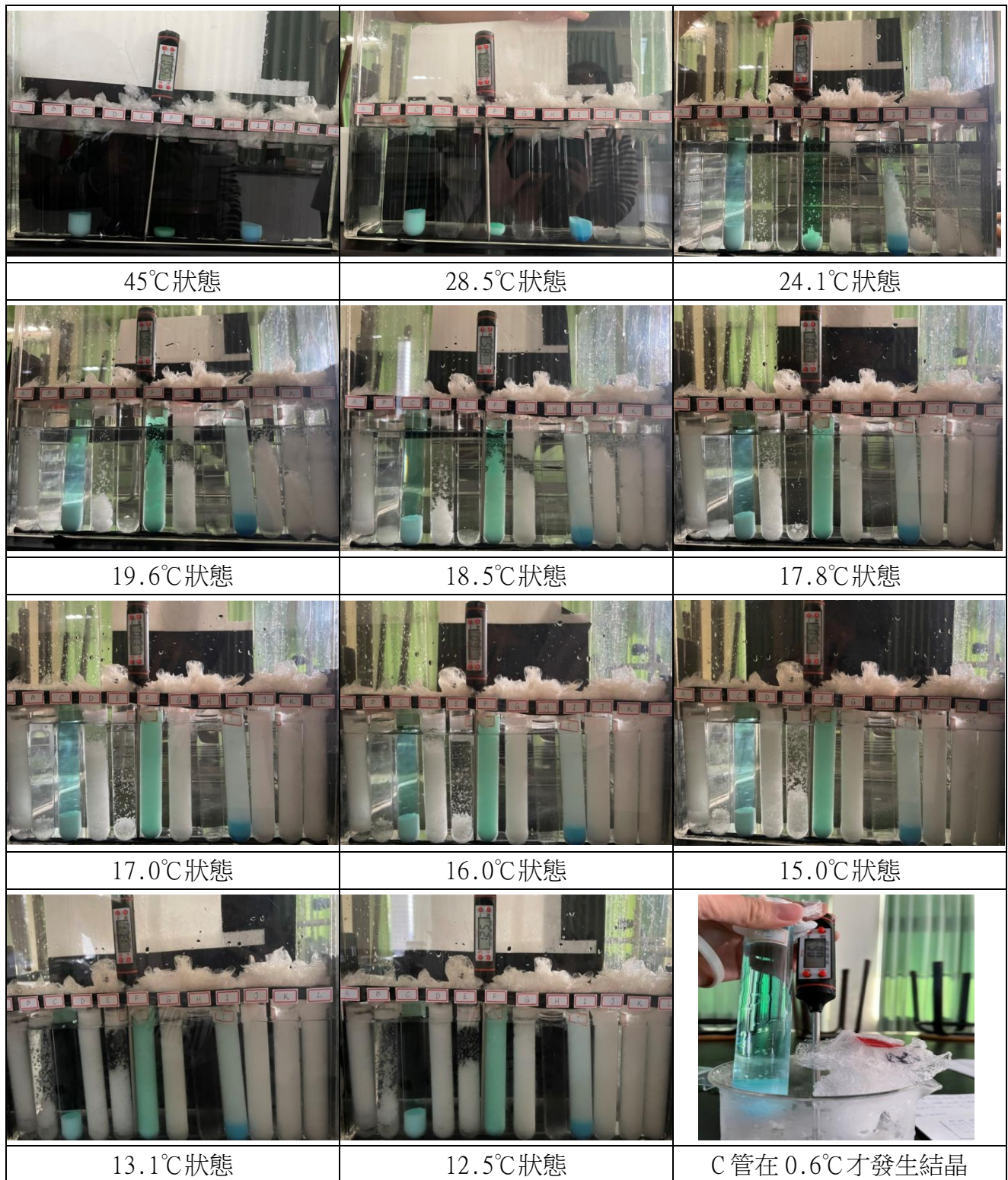
由 15°C 時試管狀況，可以發現中速降溫所形成的結晶量比快速降溫組多，但實驗當日氣溫為 22°C，自然降溫組無法得知 15°C 時結晶量。於是將這三組靜置一晚(實驗當日夜間氣溫為 13°C)後，發現快速降溫組晶面出現絨羽絲狀、中速降溫則出現破碎羽毛狀，而自然降溫組有羽狀結晶。推測：主要原因可能是正常降溫的溶液比較穩定，經過一夜緩慢的降溫，結晶會比較大，因此形成漂亮的羽毛狀；而在實驗操作時，因為溫度降得相對較快，結晶則比較小(呈現點狀或小雪花狀)。

綜上所述，本研究所設定的降溫速率對樟腦結晶而言仍是快速的。溫度的變化率確實會影響結晶的大小與結晶的形狀。

四、不同結晶核對樟腦結晶的影響

天氣瓶的操作中提到硝酸鉀和氯化銨會在混合溶液裡形成結晶核，降溫的時候，樟腦就會附著在結晶核上而形成樟腦結晶(許良榮 2015)。因此，本階段實驗探討當結晶核改變時，對樟腦結晶是否會有所影響。

試管 A 為原始配方(硝酸鉀加氯化銨)，而 B、C、D 分別以氯化鈉、硫酸銅、白糖取代原先的氯化銨，E、F、G 以氯化鈉、硫酸銅、白糖取代原先的硝酸鉀，H、I、J、K、L 僅用氯化鈉、硫酸銅、白糖、硝酸鉀、氯化銨溶於 RO 水中，作為探討在相同實驗操作下，硝酸鉀、氯化銨、氯化鈉、硫酸銅、白糖等物質(即結晶核)對樟腦結晶的影響。以下將針對各管產生結晶溫度、靜置後晶量與晶形進行實驗結果討論：

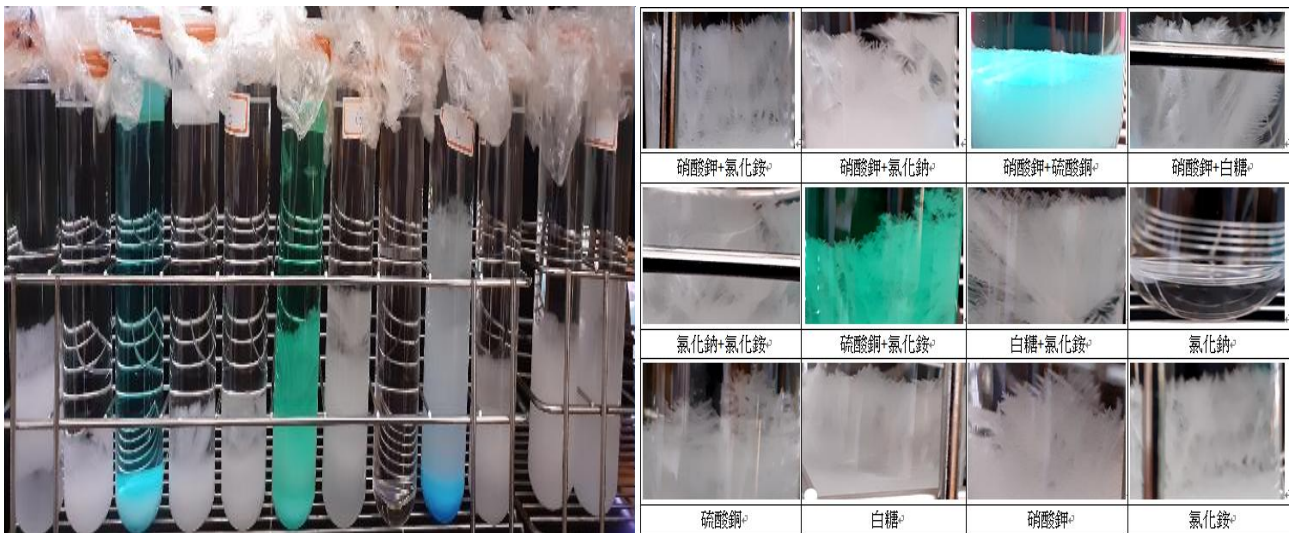


圖(九)不同結晶核對樟腦結晶的影響

	A管	B管	C管	D管	E管	F管	G管	H管	I管	J管	K管	L管
	硝酸鉀+氯化銨	硝酸鉀+氯化鈉	硝酸鉀+硫酸銅	硝酸鉀+白糖	氯化鈉+氯化銨	硫酸銅+氯化銨	白糖 + 氯化銨	氯化鈉	硫酸銅	白糖	硝酸鉀	氯化銨
28.8°C									雪花飄落			
28.7°C										雪花飄落		
28.6°C							雪花飄落					
27.9°C											雪花飄落	
26.6°C												雪花飄落
25.7°C				雪花飄落								
25.6°C						雪花飄落				雪花飄落		
24.1°C	雪花飄落											
20°C	整管結晶									整管結晶	整管結晶	整管結晶
18.5°C					雪花飄落							
17.6°C		雪花飄落				整管結晶						
12.5°C				整管結晶								
2.2°C								雪花飄落				
0.6°C			雪花飄落									

表(二)不同結晶核中樟腦開始結晶的溫度

表(二)發現溶液中含有單一物質時，樟腦結晶較快發生；當混合兩種物質時，以混有白糖組的試管最快發生結晶現象。由文獻探討得知，溫度變化對物質溶解度的影響程度為：白糖 > 硝酸鉀 > 硫酸銅 > 氯化銨 > 氯化鈉。由實驗操作中發現：含氯化鈉的試管結晶生成較慢，可能是因為氯化鈉的溶解度最不易受溫度變化的影響所致，而高水溶性的白糖、硝酸鉀以及氯化銨，可以提升系統內的樟腦結晶成核速度，使其對溫度的變化更敏感，結晶速率更快。實驗操作中亦發現：單純含有硫酸銅是最先發生結晶的，可見得硫酸銅可能增快樟腦結晶的產生；同時發現除了含有硫酸銅這三管外，其餘各管會先出現霧狀後再出現結晶。



圖(十)靜置後各管晶量與晶形

由圖(十)可知，靜置後的各管，除了只含氯化鈉這支試管外，其餘各支試管均有結晶，且結晶面不像實驗進行中一樣都是點狀或六角晶狀之鬆散結構，而是呈現羽狀結晶。因此推

測：冷卻的速度越慢，產生的結晶越大（美麗的羽毛狀），因為只要有一個地方開始結晶，物質會沿著結晶表面繼續規則排列結晶。若降溫太快，物質被迫結晶，則會發生結晶都是較細小的狀況。由此實驗發現，除了硝酸鉀、氯化銨外，亦可使用白糖、硫酸銅做為結晶核。

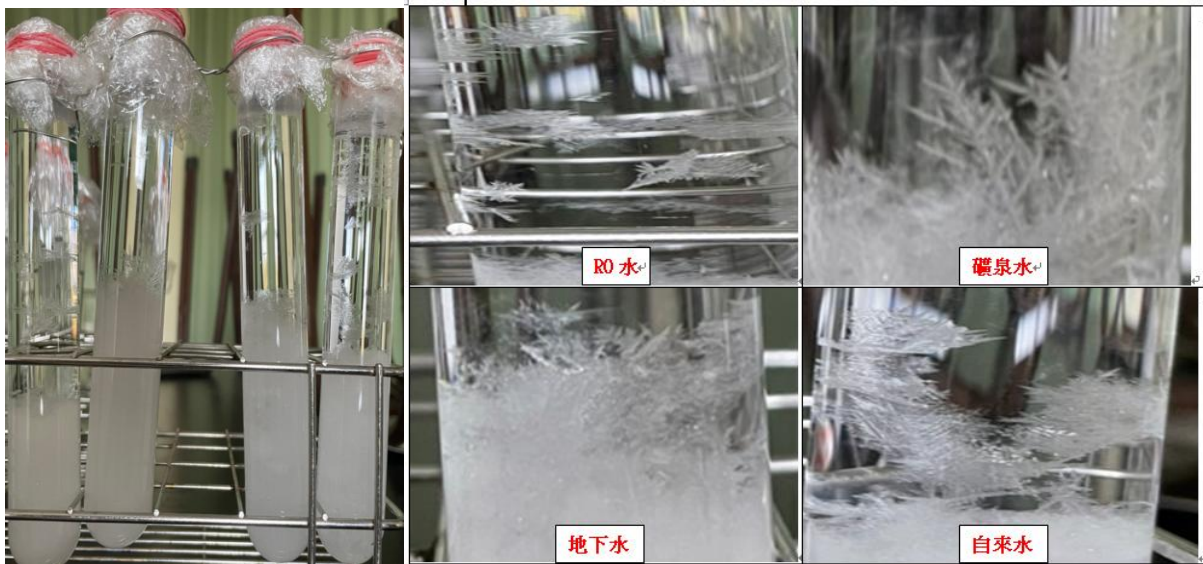
五、不同水質對樟腦結晶的影響

本階段的操縱變因為水質，亦即將硝酸鉀、氯化銨加入礦泉水、地下水或自來水中，取代原先的 RO 水，待物質完全溶解後加入已攪拌均勻的樟腦酒精溶液中，熱水浴使白色混合物完全溶解後，進行實驗觀察。圖(十一)由左而右分別為加入 RO 水、礦泉水、地下水、自來水的試管，其研究結果如下：

	RO水	礦泉水	地下水	自來水
40°C				有少許點狀結晶
39°C			出現3顆結晶	約增加一倍結晶
38°C		出現2顆結晶		
36°C		半管以上為霧狀		
34°C			雪花狀結晶飄落	點狀結晶增加
33°C		33.5°C大量雪花飄	33.5°C 2/3管霧狀	
32°C				32.2°C大塊雪花飄
31°C		31.0°C大量雪花		
30°C		結晶大量增加	30.8°C出現碎雪	
29°C		29.3°C雪花飄落		
28°C	28.2°C出現結晶	28.5°C羽絨狀結晶	28.5°C羽絨狀結晶	
27°C		27.2°C 1/3管結晶	27.9°C羽絨狀結晶	27.2°C雪花狀結晶
25°C		2/3管結晶		1/4管結晶雪花飄
23°C				出現羽絨狀結晶
22°C	幾乎整管結晶		22.8°C大量結晶	
21°C	21.2°C整管結晶			20.5°C大塊結晶

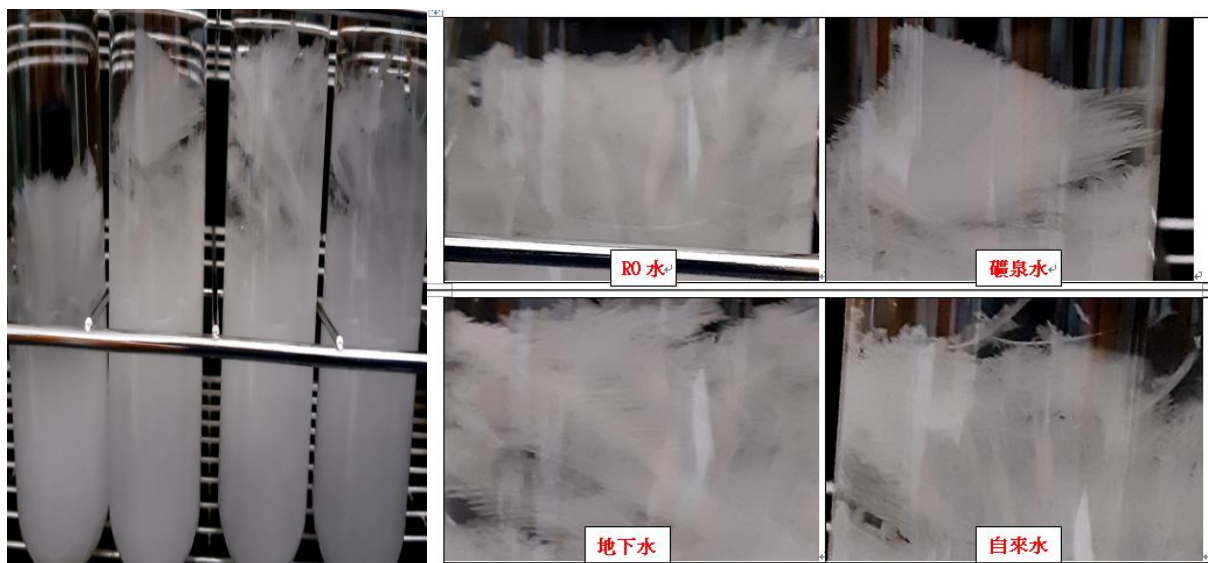
圖(十一)不同水質結晶狀況

由圖(十一)發現加入自來水的試管最早出現結晶，其次為地下水、礦泉水，最後出現結晶的是 RO 水，可以推測研究者所使用的自來水中含有易使樟腦結晶的雜質，讓樟腦可以在 40°C 的高溫中就發生結晶；而礦泉水中含有微量粒子，使樟腦結晶在 33.5°C 發生大量羽絨狀結晶飄落。由圖也可以發現：降溫至 24°C 以前，樟腦結晶量最多的是地下水，其次是礦泉水、第三多是 RO 水，最少的是自來水。雖然自來水最先產生結晶，但結晶量累積不如地下水與礦泉水多，可見自來水中含有讓樟腦結晶的物質數量少，須待溶液降溫後硝酸鉀與氯化銨的粒子析出才能產生大量結晶。



圖(十二)實驗後靜置一天晶體高度與表面結晶狀況

實驗後靜置一天，發現礦泉水結晶高度約 5.5cm、地下水約 5 cm、自來水 4.2 cm、RO 水為 3 cm。由圖(十二)可發現 RO 水、礦泉水、地下水、自來水晶面晶形略有不同，尤其是自來水、地下水中樟腦結晶雜亂，可推論此兩種水中含有會干擾樟腦結晶的微量物質。



圖(十三)靜置一天震動後，再靜置表面結晶狀況

震動後再靜置一天(圖(十三))，RO 水(緻密羽狀結晶(羽幹清晰))、礦泉水(極整齊羽狀結晶層層相疊)、地下水(鬆散羽狀結晶(羽幹清晰))、自來水(鬆散羽狀結晶)表面結晶狀況均為羽狀結晶，可推測：原先讓樟腦產生結晶的微量粒子，可能因為結晶後密度較大(震動後)下沉了，溶液中只剩下硝酸鉀與氯化銨形成結晶核，當夜晚降溫的時候，樟腦就會附著在結晶核上，又因為冷卻的速率慢，因此在表面均產生較大的結晶(美麗的羽毛狀)。

總言之，可使用礦泉水、地下水、自來水作為硝酸鉀、氯化銨的溶劑，但靜置結晶後須再次搖晃，讓干擾粒子沉澱，再靜置低溫中緩慢冷卻，可得到與使用以 RO 水為溶劑一樣的漂

亮羽狀晶形。

柒、結論

一、結論

根據研究動機、研究目的，並結合實驗分析結果，總和歸納出結論如下：

不同質量硝酸鉀、氯化銨水溶液與不同質量樟腦酒精溶液，確實會影響樟腦的結晶。溶液中樟腦砂含量越多結晶量可能越多，而硝酸鉀與氯化銨的含量則同時影響樟腦結晶型態，亦即在本研究中想要得到漂亮羽狀的樟腦結晶，需稱取硝酸鉀粉末 1.5 g、1.8g 氯化銨加入 20 毫升 RO 水，再稱取樟腦砂 6g 溶於乙醇 24 ml，兩者混合形成的混合液，並將混合液靜置在緩慢降溫的低溫(12~20°C) 環境中一段時間(一夜)。

升溫溶解後再結晶次數對產生結晶的溫度、結晶形狀影響不大，因此溶液配置完就可以開始進行實驗，不須再等待 1~2 週。

不同的降溫速率不會影響樟腦發生結晶溫度，但會影響樟腦結晶形狀。本研究所設置的快速降溫組產生霧狀結晶，推測其原因，可能是在冰冷環境中，因為急速冷卻，導致瓶內溶液中有許多不同溶質析出，但這些析出物無法使樟腦產生結晶，亦即本研究所設定的降溫速率過快，樟腦結晶來不及形成，使溶液出現霧狀。但靜置一夜(氣溫低)後發現，自然降溫組有羽狀結晶，可能是正常降溫的溶液比較穩定，經過一夜緩慢降溫，樟腦結晶會比較大且慢慢形成漂亮的羽毛狀。但實驗操作時，因為溫度降得快，結晶則比較小，易呈現雪花狀。因此，溫度的變化速率確實會影響結晶的大小與結晶的形狀。

不同結晶核會影響樟腦結晶出現的溫度、結晶量，但不影響結晶形狀。研究發現溶液中含有單一物質時，樟腦結晶較快發生；高水溶性的硝酸鉀、氯化銨、硫酸銅以及白糖，可以提升系統內的樟腦結晶成核速度，而溶解度不易受溫度影響的氯化鈉，無法在常溫時獲得樟腦結晶。

不同水質會影響樟腦的結晶發生溫度、結晶量與結晶形狀。本實驗所採用的自來水可能含有引起樟腦結晶的微量粒子因此最先產生結晶。猜測微量粒子含量不多，所以較大量的結晶是發生在溫度更低後(即硝酸鉀與氯化銨飽和後)。靜置後的 RO 水、礦泉水、地下水、自來水晶面晶形略有不同，尤其是自來水、地下水，其樟腦結晶雜亂，可推論水質會影響樟腦

的結晶發生溫度、結晶量與結晶形狀。

二、感想

這是一個需要天時、地利的實驗！

實驗開始的兩個月，我們絞盡腦汁仍無法產生漂亮的羽狀結晶。我們一直嘗試用不同方式，希望在實驗室中”養出”美麗的羽狀結晶，卻總是不得其門而入。所幸今年的冬天寒流來襲，長時間的低溫環境(一夜)，終於觀察到美麗的樟腦結晶，讓我聯想起唐詩中的名句：「忽如一夜春風來，千樹萬樹梨花開。」喜出望外的我們體現了大自然的鬼斧神工，也了解到：樟腦的羽狀結晶需要「配方對了，降溫速率對了」才會產生，最美麗的結晶是耐心漫長的時間等待，才養得出來的。

雖是如此，在實驗的過程中，與夥伴們一起遭遇問題、面對問題，一起絞盡腦汁尋找解決之道，並共同解決困難的經歷，將成為我們邁向科學人的最佳養分。

捌、參考資料

1. 維基百科。2020年8月17日參考自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/樟腦>
2. 維基百科。2020年8月17日參考自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/天氣瓶>
3. 許良榮(2015)。改良式天氣瓶。台灣化學教育。第7期，2020年12月17日參考自 <https://web.archive.org/web/20151205083540/http://chemed.chemistry.org.tw/?p=6866>。
4. 陳崇賢(2006)。化工群專題製作指導手冊。2020年7月27日參考自 www.slvs.tc.edu.tw/125/20120921012146.doc
5. 國二上學期自然與生活科技(2020)。第二章-水溶液。出版社：南一書局企業股份有限公司