

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 化學科

第三名

030212

光彩奪「木」—探討不同變因對透明木特性的影響

學校名稱：高雄市立福山國民中學

作者：  國二 黃郁閔  國二 馬悅慈  國二 林子薰	指導老師：  鄭士鴻
---	------------------

關鍵詞：透明木、木質素、透光率

## 摘要

我們查詢綠建築資料時發現可製造「透明木材」當環保建材，但相關資訊大多是介紹如何做出成品而沒有定量討論不同變因的影響，因此我們開始設計實驗探討不同因素會如何影響透明木的特性，並可將結果拓展至應用層面來推廣此綠建築材料。

實驗發現鹼性亞硫酸鈉法中的氫氧化鈉與亞硫酸鈉是以不同的反應機制分別將木片中的木質素溶解出來，濃度越高、溫度越高效果越好，但氫氧化鈉濃度或反應溫度過高都會有反效果；以極性質子性的醇類當溶劑效果最好，次佳為極性非質子性的丙酮；不同種類去木質素藥劑與木片填充物都可成功製出透明木只是成品特性不同；最後成功製出較厚的透明木得到較強的韌度與較好的隔熱率，為綠建築的應用增加更多可變性。

## 壹、研究動機

由於全球經濟的擴張，生產產品帶來的能源消耗與日俱增。全球現有建築物的能源消耗超過40%，占全球二氧化碳排放量的24%，可見建築節能的重要性與急迫性。而木材因為相較玻璃、鋼鐵更為環保，以及具有較優異的強度、耐久性、隔熱率與絕緣性。使其可以取代玻璃或塑膠應用在家具或窗戶，具備環保節能的優點。於是我們以木材當出發點來查詢木材相關的綠建築資料，最後在社交媒體看到一篇有關「製造透明木材當環保建材」的介紹影片，對此我們深感好奇，進而查詢相關資料，發現所得資訊不多，大多只是做出成品而沒有定量討論不同變因對木材的透明度影響，因此我們開始設計一連串的實驗，想藉此了解不同因素會如何影響透明木材成品的特性，並可將結果拓展至應用層面來推廣此綠建築材料。

## 貳、研究目的

一、測量去木質素溶液對木片的影響

(一)不同濃度比例                      (二)不同浸泡溫度                      (三)不同去木質素液

二、探討不同有機溶劑對成品透明度的影響

(一)不同溶劑種類                      (二)不同溶劑混和比例

三、觀測不同填充物形成的透明木差異

(一)不同種類的填充物                      (二)填充物的預聚合時間長短所造成的差異

四、試驗不同厚度形成透明木材的可能性

## 參、研究設備及器材

- 一、實驗器材：真空裝置、電子秤、計時器、溫度計、照相設備、熱熔槍、各式燒杯、各式量筒、錶玻璃、光度計、手電筒、紙箱、鑷子、漏斗、定量瓶、恆溫槽、攪拌器、攪拌子、玻棒、滴管、矽膠模具、自製韌度測量儀(木條、木板、不銹鋼全牙粗螺絲30公分、螺帽、螺絲、塑鋼土、電子天秤、一字形墊片、C型萬用夾)、探針式電子溫度計、鹵素燈、烤箱。
- 二、實驗藥品：氫氧化鈉、亞硫酸鈉、醋酸鈉、醋酸、亞氯酸鈉、雙氧水、甲醇、乙醇、異丙醇、乙醚、乙酸乙酯、丙酮、環氧樹脂(A劑：環氧氯丙烷、B劑：雙氰胺)、PMMA(A劑：甲基丙烯酸甲酯、B劑：偶氮二異丁腈)。

## 肆、文獻探討

### 一、木片組成與結構(郭明智, 2018)

- 1.纖維素：是自然界中分布最廣、含量最多的有機化合物，也是植物細胞壁的主要成份。由1,000-1,500個葡萄糖單體以 $\beta$ -1,4鍵結相連而成之長鏈狀高分子結構物。化學式為 $(C_6H_{10}O_5)_n$ ，其中n為聚合度，一般高等植物纖維之聚合度為7,000~15,000。
- 2.半纖維素：由多種不同醣類聚合而成如葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖、甘露糖及木糖等，其中木糖是最主要的單醣，約含200個木糖單元。易溶於鹼，也容易被酸水解。
- 3.木質素：是一種非晶體的高分子化合物，屬於芳香族化合物，基本結構單元是苯丙烷(C6-C8)型的結構，以醚鍵(-C-O-C-)和(C-C)鍵結合成的。在植物體內的含量僅次於纖維素和半纖維素，在一般草本植物中約含15%~20%，而木本植物含量則可高達30%左右。木質素可以透過形成交織網來硬化細胞壁，提高剛性與防腐性質。且雖然纖維素及半纖維素是透明無色的，但木質素為深色且複雜的結構，可在木質孔部產生大的可見光散射。
- 4.灰分及樹脂

### 二、透明木製作 我們查詢到目前最常見的透明木製作有兩種配方：

#### 1.配方一：鹼性亞硫酸鈉法(Herbert Lien, 2021)

先將氫氧化鈉、亞硫酸鈉依次加入水中，攪拌均勻後放入裁切好的木片，並加熱8至10個小時，將木片取出、浸泡至雙氧水中進行漂白，再浸泡至乙醇中以洗去木質素。最後，依比例調配好環氧樹脂並抽真空，放入木片再抽一次真空，並靜置至環氧樹脂成型。

## 2. 配方二：亞氯酸法(沃特，2022)

首先，將醋酸鈉、醋酸、亞氯酸鈉加入水中，攪拌後放入木片，加熱至80°C，以去除木質素。浸泡7個小時之後，再將木片浸泡在乙醇及丙酮等溶劑中來去除木質素。最後，將木片放入預聚合過的聚甲基丙烯酸甲酯，並抽真空後，放入烤箱加熱進行固化，4小時後將其取出。

### 三、論文參考

查詢歷屆科展作品我們發現只有一篇透明木相關論文—第62屆科展「隱形的木材-透明木材的製作、性質與應用」(陳稚澧，2022)，其中作者指出鹼性亞硫酸鈉法中的氫氧化鈉與亞硫酸鈉濃度會影響木頭最終透明度結果，我們很好奇這兩者的角色是什麼?是否會先交互作用再與木頭反應?還是各自有各自的作用?兩者的反應機制都一樣嗎?另外，作者在實驗另一種去木質素液配方時(亞氯酸方法)，不僅成品的透光率極差，還會使木片變得很脆弱無法成型，但我們查到的製作影片卻能達到不錯的成功率，我們想知道其中能成功或失敗的原因是什麼?以及兩種配方所造成的透明木差異在哪裡?

## 伍、研究過程、結果與討論

### 一、【實驗一】測量去木質素溶液對木片的影響

#### 【實驗1-1】不同濃度去木質素溶液對製作透明木之影響

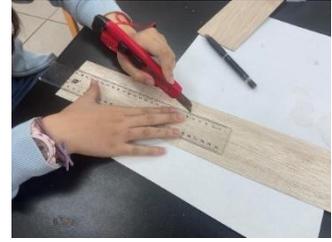
(一) 研究目的：在查詢資料後，我們發現網路上對於鹼性亞硫酸鈉法中的氫氧化鈉與亞硫酸鈉濃度配方並沒有解釋為什麼是以此濃度標準與比例去配置的，我們很好奇這兩者的角色是什麼?是否會先交互作用再與木頭反應?還是各自有各自的作用?兩者的反應機制都一樣嗎?因此，我們想藉由此實驗了解氫氧化鈉和亞硫酸鈉的濃度比例對木片中木質素去除能力的差異。

(二) 變因：

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/體積/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 乙醇濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 環氧樹脂體積/溫度/硬化時間 6. 抽真空：(1)氣壓：接近0帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同濃度比例的氫氧化鈉/亞硫酸鈉	不同濃度比例の木質素溶液所製成的透明木透光率差異

## 1.控制變因

(1)木材：首先我們要找一種木頭當我們的實驗標準木材，木材種類非常的多，我們需要尋找一種方便取得、好裁切的木材當對象，經多番探訪店家與查詢資料我們發現一種木材 巴沙木(又稱飛機木)，它是美術作品及模型飛機專用的木材，紋理直，結構細而均勻、質輕便宜好裁切，許多參考資料也是以此木頭當標準木材來做實驗，因此我們採取厚度 0.1cm的飛機木作為實驗對象(如圖1)。



▲圖1 厚度 0.1cm的飛機木

(2)去木質素溶液種類/體積/溫度/反應時間：本實驗我們採用鹼性亞硫酸鈉法來去除木質素，每杯配置氫氧化鈉及亞硫酸鈉混和溶液250ml來反應，並將溫度提高到 70°C以增快反應速率，持續浸泡 7小時。

(3)浸泡雙氧水濃度/體積/溫度/時間：根據參考資料，我們將浸泡完去木質素溶液的木片泡入濃度(35%)、體積 50 ml的雙氧水，並且在室溫下浸泡 15小時，使殘餘的木質素變質來漂白木片(如圖2、圖3)。



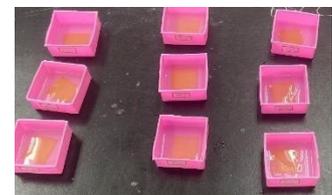
▲圖2 木片漂白前

(4)浸泡乙醇濃度/體積/溫度/時間：為了洗去木片中卡在纖維素裡被分解的木質素與雜質，我們將木片泡入濃度95%、體積 50ml的乙醇中，並在室溫下浸泡24小時。



▲圖3 木片漂白後

(5)環氧樹脂比例與體積：我們購買的環氧樹脂是以A劑：B劑=3：1的質量比來混和，攪拌均勻後倒入底面積5cm\*5cm的矽膠模中，由於木片厚度1mm，為了避免木片無法均勻的浸入樹脂中，每盒矽膠模皆倒入3mm高度的樹脂，故每次都量取體積 $5*5*0.3\text{cm}^3$ 的樹脂來浸泡每片木片(如圖4)。



▲圖4 矽膠模+樹脂+木片

(6)抽真空/靜置時間與次數：為了將木片中殘餘的溶劑(乙醇)抽出並讓環氧樹脂填入木片中，我們將填入環氧樹脂的木片放入抽真空裝置中，以接近0帕氣壓抽10分鐘後(如圖5)，再打開氣壓閥恢復一大氣壓，靜置10分鐘來讓樹脂進入木片裡的中空纖維管空腔，並且重複此動作3次。



▲圖5 抽真空裝置

2.操縱變因：我們想知道鹼性亞硫酸鈉法中，氫氧化鈉與亞硫酸鈉的作用是什麼？兩者會發生什麼反應？不同濃度氫氧化鈉與亞硫酸鈉的比例對製作透明木的成品會有什麼影響，故本實驗分別探討：

配方(一)：固定氫氧化鈉濃度(參考文獻的標準濃度2.5M)，搭配不同濃度的亞硫酸鈉(0.8M、0.4M、0.2M、0.1M)所製成的透明木透光率差異

配方(二)：固定亞硫酸鈉濃度(參考文獻的標準濃度0.4M)，搭配不同濃度的氫氧化鈉(5 M、2.5M、1.25M、0.625M)

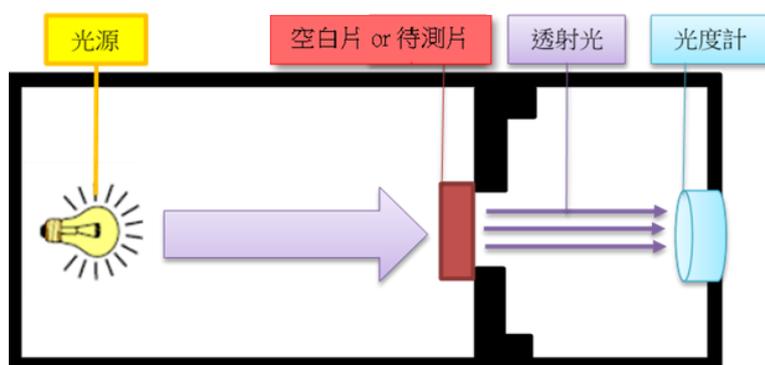
3.應變變因：我們自製簡單「透光率測量儀」來測量不同濃度比例的木質素溶液所製成的透明木透光率差異，並藉此了解氫氧化鈉和亞硫酸鈉的濃度比例對木片中木質素去除能力的關係。

(三) 測量方法：

1.我們首先要觀察的是不同狀況下透明木成品的透光率成效差異，所以我們以紙箱、黑色西卡紙與瓦楞板、光度計、白光LED來設計並組裝一台簡單「透光率測量儀」(如圖7)。

2.首先取23\*12\*16.5cm的紙盒當外框，接著在一端設置LED手電筒當光源，另一端放置光度計來接收能穿透樣品的光量，中間則是設計一個距離光源15公分處的插槽來放入黑色瓦楞隔板，隔板上有孔洞可放置測試片(如圖6)，最後設計一個側蓋將暗室完全遮蔽以減少外在光源的誤差。

3.每次測量前會先記錄純環氧樹脂的透明片當空白組時照度值為X，接著將測試片放入隔板後再測一次照度值為Y，最後以 $\frac{Y}{X} \times 100\%$ 記錄為該測試片的透光率。

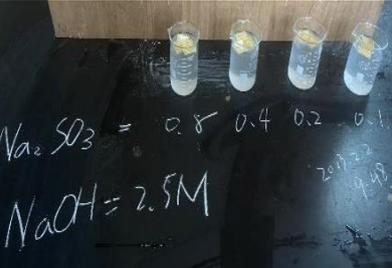
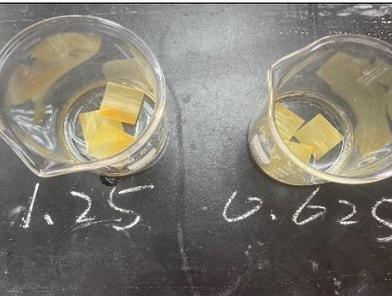
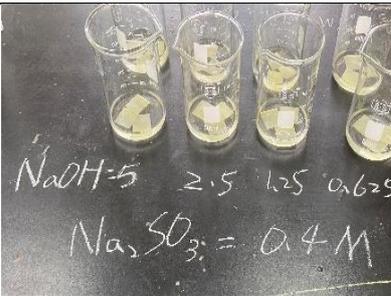
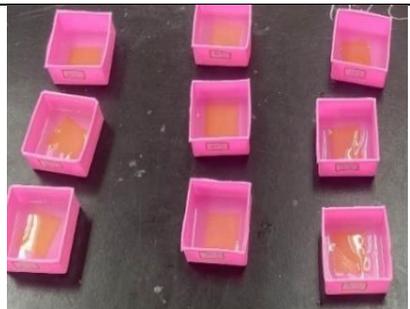
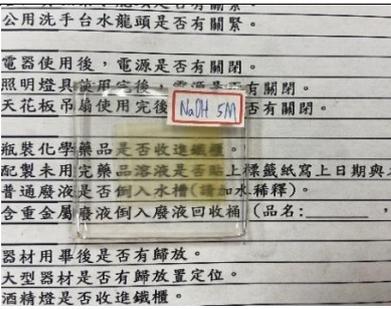
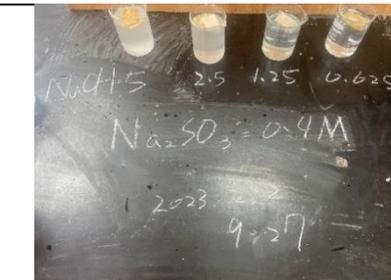


▲圖6 透光率測量儀結構



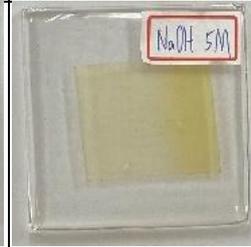
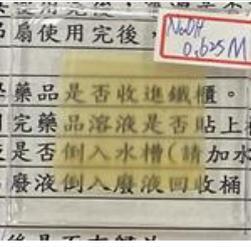
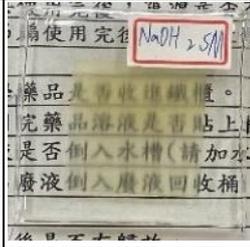
▲圖7 測量透光率

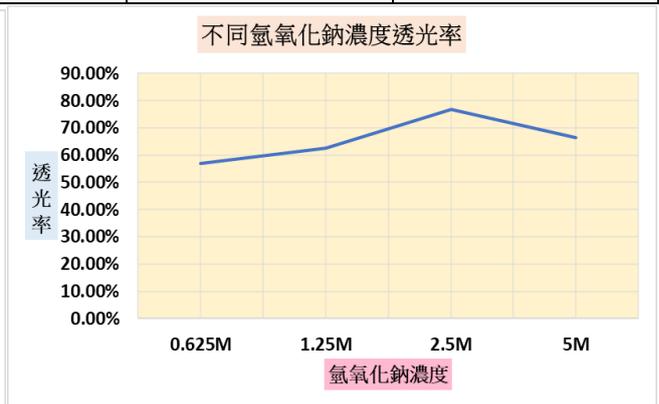
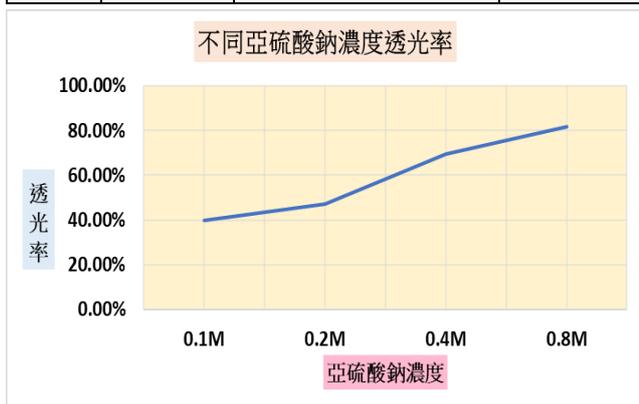
(四)實驗步驟：

		
<p><b>1.裁切木片</b> 將厚度0.1cm的木片裁切成面積3*3cm的大小。</p>	<p><b>2.去除木質素(配方一)</b> 固定氫氧化鈉濃度並加入不同亞硫酸鈉濃度來配置去木質素溶液，再將木片浸入。</p>	<p><b>3.加熱去木質素溶液</b> 以恆溫槽加熱至70°C後浸泡7小時。</p>
		
<p><b>4.洗滌木片</b> 取出木片浸泡於2杯80°C的熱水各洗滌5分鐘。</p>	<p><b>5.漂白木片</b> 再將木片浸泡在35%的雙氧水中，靜置15小時。</p>	<p><b>6.洗去木質素與雜質</b> 把漂白後的木片浸泡於95%的乙醇中，靜置24小時。</p>
		
<p><b>7.填入環氧樹脂</b> 取出木片並置入內有環氧樹脂的矽膠模內。</p>	<p><b>8.抽真空</b> 把矽膠模置入真空裝置中，抽真空10分鐘後靜置10分鐘，重複此步驟3次</p>	<p><b>9.靜置成型</b> 最後取出矽膠模並靜置48小時等待成型，脫模後並測其性質。</p>
<p><b>10. 配方二實驗</b> 將步驟2改成固定亞硫酸鈉濃度並加入不同濃度氫氧化鈉來配置去木質素溶液，再將木片浸入其中，重複以上步驟3~9。</p>		

(五) 實驗結果：(註：純透明環氧樹脂空白組照度值=80.2\*100流明)

濃度	亞硫酸鈉0.1M	亞硫酸鈉0.2M	亞硫酸鈉0.4M	亞硫酸鈉0.8M
配方一：固定氫氧化鈉濃度2.5M				
透明木成品				
透明度				
照度值	32.28*100流明	38.08*100流明	56.12*100流明	65.44*100流明
透光率	40.0%	47.2%	69.5%	81.6%

濃度	氫氧化鈉0.625M	氫氧化鈉1.25M	氫氧化鈉2.5M	氫氧化鈉5M
配方二：固定亞硫酸鈉濃度0.4M				
透明木成品				
透明度				
照度值	46.12*100流明	50.52*100流明	61.98*100流明	53.68*100流明
透光率	57.1%	62.6%	76.7%	66.5%



1. 配方一實驗結果發現當氫氧化鈉的添加量固定時，**亞硫酸鈉添加的量愈多，溶出木質素的效果以及成品透光率愈好。**

2. 配方二實驗結果發現當亞硫酸鈉的添加量固定而氫氧化鈉濃度介於0.625~2.5M時，氫氧化鈉濃度越高，溶出木質素的效果愈好、透光率愈好；但氫氧化鈉濃度**達到5M時反而出現溶解木質素的效果下降、透光率變差的現象。**

### 【實驗1-2】不同去木質素溶液溫度對製作透明木之影響

(一) 研究目的：在查詢資料時，我們發現網路上對去木質素溶液的加熱溫度沒有一定標準，已知一般化學反應溫度越高，反應速率越快，故有些作者會以較高溫度反應，但有些完全沒提到溫度的控制，這使我們好奇鹼性亞硫酸鈉法在不同的浸泡溫度下，對於去木質素的影響和差異。

(二) 變因：

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/濃度/體積/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 乙醇濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 環氧樹脂體積/溫度/硬化時間 6. 抽真空：(1)氣壓：接近0帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同溫度的去木質素溶液	不同溫度的去木質素溶液所製成的透明木透光率及硬度差異

1. 控制變因：去木質素溶液濃度：根據【實驗1-1】的結果我們以效果最好的2.5M的氫氧化鈉及0.8M的亞硫酸鈉作為標準去木質素溶液的濃度去做後續實驗。

2. 操縱變因：我們想了解溫度會不會對去木質素的效果產生影響?在不同溫度下木片會有什麼變化? 故我們便以恆溫槽製作不同溫度的去木質素溶液(20°C、45°C、70°C及95°C)來觀察製出來的透明木成品差異(如圖8)。

3. 應變變因：我們在先前試做實驗時發現不同溫度去木質素溶液會導致木片本身形狀改變，甚至變薄、結構密度有所變化的現象，故我們設計了「自製韌度測量儀」來測量浸泡不同溫度去木質素溶液後的木片韌度會有什麼差異。



▲圖8 恆溫槽

### (三) 測量方法：

為了可以較客觀的測量浸泡不同溫度去木質素溶液後的木片韌度會有什麼差異，我們改造學校去年學長姊參加科展所製作的物品強度觀測儀(黃昀綦，2022)來測量木片韌度，**本實驗將木片的韌度定義為「貫穿木片所需最小力量」**，於是我們便開始著手設計能測定貫穿不同條件木片所需最小力量的儀器：

1. 首先以長30cm直徑1cm的不銹鋼全牙粗螺絲與相對應的螺帽當下壓力量來源，使每圈轉動下壓的距離都一樣，讓粗螺絲可以慢慢旋轉下降給予穩定的下壓力；
2. 第二，我們需要一個可以穩定貫穿木片的裝置，我們將螺帽及2 cm長的螺絲以塑鋼土將它們穩定的黏合在一起(如圖9)，並鎖至粗螺絲下方末端當貫穿木片的探針
3. 由於木片在試作實驗中被貫穿時常會因為左右偏移而產生誤差，所以我們便自製一個待測片固定台，將兩組C型萬用夾固定到木製平台上，夾子上下皆輔以標上待測片位置記號的長方形固定片來夾住待測片以減少偏移所造成的誤差(如圖10)。
4. 將待測片與固定台置於電子天秤上，當木片被貫穿時裝置下壓的力量會精確的傳至天秤並顯示在螢幕上，此時的讀數就是**木片被貫穿所需的最小力量，即為韌度。**



▲圖9 探針材料與組合



▲圖10 待測片固定台



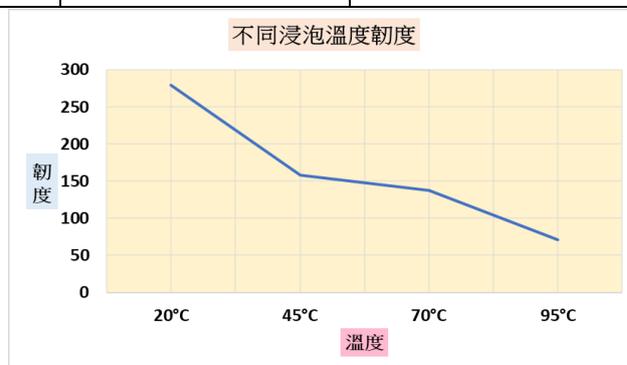
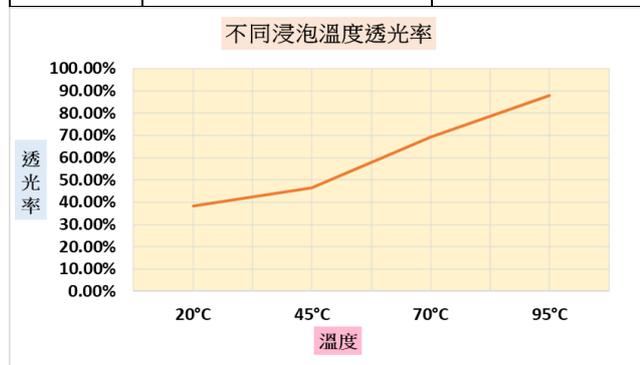
▲圖11 自製韌度測量儀

### (四) 實驗步驟：

1. 將厚度0.1cm的飛機木裁切成面積3\*3cm的木片。
2. 配置2.5M的氫氧化鈉及0.8M的亞硫酸鈉做為去木質素溶液後將木片浸入，再以恆溫槽加熱至20°C浸泡7小時。
3. 取出木片浸泡於2杯80°C的熱水各洗滌5分鐘，再將其浸泡在35%雙氧水中靜置漂白15小時。
4. 把漂白後的木片浸泡於95%的乙醇中靜置24小時洗去木質素與雜質。
5. 取出木片放入裝有環氧樹脂的矽膠模內，放入真空裝置抽真空10分鐘後再靜置10分，重複3次
6. 取出矽膠模並靜置48小時等待成型，脫模後取出測其性質。
7. 分別將步驟2改成加熱至45°C、70°C及95°C並重複以上步驟3~6。

(五) 實驗結果：(註：純透明環氧樹脂空白組照度值=73.7\*100流明)

溫度	20°C	45°C	70°C	95°C
透明木成品				
透明度				
照度值	28.3*100流明	34.2*100流明	51.2*100流明	64.8*100流明
透光率	38.4%	46.4%	69.5%	87.9%
韌度	279.7gw	157.9gw	137.5gw	71.0gw



實驗結果發現溫度越高，透明度越佳，但高溫時有明顯韌度下降的現象

(六) 實驗討論：

### 【實驗1-1】 不同濃度去木質素溶液對製作透明木之影響

實驗結果發現：

1. 配方一當氫氧化鈉的添加量固定時，**亞硫酸鈉添加的量愈多，溶出木質素的效果以及成品透光率愈好**，且在烹煮木片去木質素時所觀察到木片被溶出沉澱物的量也跟著增加(如圖12)；相反的在配方二的實驗中，當亞硫酸鈉的添加量固定而氫氧化鈉濃度增加時，我們



▲圖12 亞硫酸鈉組沉澱

所觀察到木片被溶出沉澱物的量差異卻不大(如圖13)，經過查詢與討論我們發現這是因為**亞硫酸鹽會與木片中的木質素發生磺化反應，引進磺酸基，增加了親水性而**

使木質素開始溶出(參考資料5)，故在此配方中(固定[NaOH]=2.5M)加入的亞硫酸鈉量(0.1~0.8M)愈多，透明木的透光率越佳。

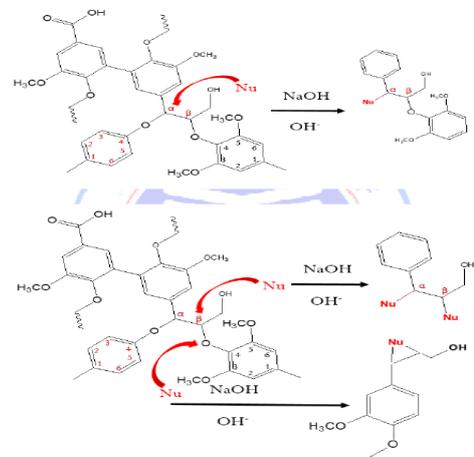


▲圖13 氫氧化鈉組沉澱

2.在配方二的實驗結果我們發現：

(1)當亞硫酸鈉的添加量固定而氫氧化鈉濃度介於0.62

5~2.5M時，氫氧化鈉濃度越高，溶出木質素的效果愈好、透光率愈好，這是因為**氫氧化鈉的OH<sup>-</sup>會與木質素上的碳鏈進行親核反應導致木質素上的鍵結斷裂，產生低分子化而逐漸溶出的效果**(如圖14)(張育維，2018)。



▲圖14 氫氧化鈉對木質素反應

(2)當配方二的氫氧化鈉濃度**達到最高5M時反而出現溶解木質素的效果下降、透光率變差的現象**，經過觀察與討論我們發現

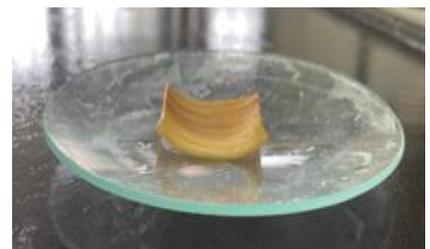
這是因為此配方比例**氫氧化鈉與亞硫酸鈉濃度比例差距過大(5:0.4)**，故溶液中能與木片裡纖維管旁的木質素做有效碰撞與反應的大都是Na<sup>+</sup>與OH<sup>-</sup>，過高濃度的氫氧化鈉反而會有阻礙到亞硫酸鈉接觸木質素的反效果，**使此混和藥劑只剩單一角色能溶出木質素而降低整體效率之虞。**

### 【實驗1-2】不同去木質素溶液溫度對製作透明木之影響

1.實驗結果發現溫度越高，透明度越佳，這是因為一般化學反應溫度越高，反應速率越快，溶液中的粒子有較高的能量與移動速度去與木片中的木質素反應，且**高溫的鹼性溶液可讓木片中的細胞壁膨潤變大(蘇裕昌，2005)，使藥劑的滲透交換速率加快**，故溫度越高、溶出的木質素越多、使木頭的透明度越好。

2.實驗過程我們觀察到雖然溫度越高，相同狀況的木片可以溶出的木質素會越多，

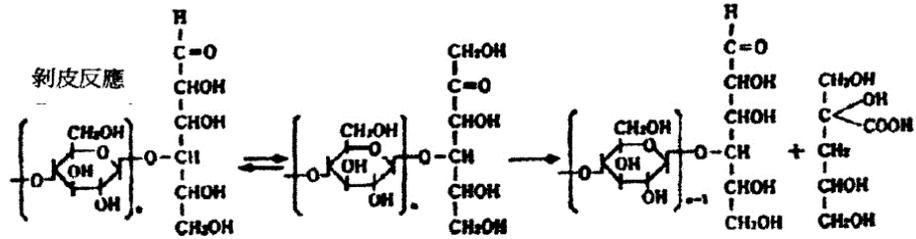
但木片浸泡完**最高溫的95°C去木質素溶液後會有明顯的形變甚至體積縮小的現象(如圖15)**，於是我們便測量各溫度去木質素溶液產生的木片韌度，發現95°C組溶液產生的木片韌度明顯低於其他組，整體結構非常鬆軟易壞，經查詢與討論我們發現這是因為



▲圖15 變形縮小的木片

為鹼性亞硫酸鈉法中的氫氧化鈉對木片中的木質素並非具有攻擊選擇性，它對纖維素、半纖維素也會有相當程度的降解反應發生，**意即纖維素與半纖維素在鹼性環境**

下的加水分解使碳水化合物分子某一端進行連續性的剝離現象，又稱剝皮反應(蘇裕昌，2005)

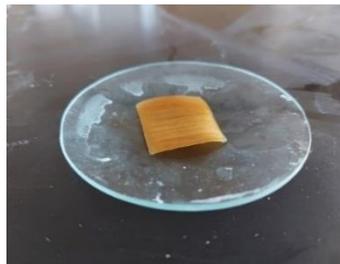


【實驗1-1、1-2 總結】：

▲圖16 剝皮反應

- (1) **氫氧化鈉與亞硫酸鈉是以不同的反應機制分別將木片中的木質素分離出來**，而非兩者間先有什麼交互作用再產生新分子以溶出木片中的木質素。
- (2) 雖然氫氧化鈉與亞硫酸鈉的濃度越高能參與去木質素的粒子也會越多，但5M的氫氧化鈉濃度過高，反而會有阻礙亞硫酸鈉的作用，導致成品透明度降低，故我們以本實驗**效果最好的氫氧化鈉2.5M以及亞硫酸鈉0.8M作為標準去木質素溶液的濃度去做後續實驗**。
- (3) **剝皮反應**造成95°C組木片雖然因高溫而使去木質素反應變快但也同時造成過多的剝皮降解反應，使整體木片過於薄弱，不利於後續製作透明木的加工與應用，故我們建議業者在製作透明木製程時以溫度較高反應速度較快但不會使木片變形、強度變弱的70°C作為標準溫度來進行去木質素溶液的浸泡。
- (4) 在多次實驗中我們也發現在實驗1-1的配方(一)固定氫氧化鈉濃度(2.5M) 但亞硫酸鈉濃度過低時(0.1M) (如圖17)及配方(二)中當固定亞硫酸鈉濃度(0.4M)但氫氧化鈉濃度過高時(5 M) (如圖18)所浸泡出的木頭也會有形變的現象，這與前文提到的高溫鹼液造成的剝皮現象很類似，經過多次觀察、查詢資料與討論後我們發現這是因為在**鹼性浸煮環境下，纖維素與半纖維素的還原性末端(醛基)會被亞硫酸鈉氧化成羧基，起到抑制剝皮反應的作用(徐守才，2006)**，這也讓我們知道為什麼文獻中的鹼性亞硫酸鈉法是以這兩種藥劑去搭配去木質素：兩者各自以不同

機制去溶解木質素，但亞硫酸鈉可以抑制住氫氧化鈉額外的剝皮反應使木片整體結構較穩定，故當實驗1-1的配方(一)亞硫酸



▲圖17 亞硫酸鈉濃度過低



▲圖18 氫氧化鈉濃度過高

鈉濃度過低 (0.1M) 以及配方(二)中氫氧化鈉濃度過高(5 M) 時，亞硫酸鈉量不足以擔任抑制劑的角色導致木片剝皮現象明顯、使木片有形變的現象。

### 【實驗1-3】不同藥劑類型的去木質素溶液對製作透明木之影響

(一) 研究目的：除了前述實驗的鹼性亞硫酸鈉法外，我們還查詢到了另一種「含氯去木質素溶液」的配方，在第62屆科展「隱形的木材-透明木材的製作、性質與應用」(陳稚澧，2022)指出他們作此配方時，不僅成品的透光率極差，還會使木片會變得很脆弱無法成型，但我們查到的製作影片卻能達到不錯成功率與透光率，我們想知道其中能成功或失敗的原因是什麼?以及兩種配方所造成的透明木差異。

(二) 變因：

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液體積/濃度/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 乙醇濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 環氧樹脂體積/溫度/硬化時間 6. 抽真空：(1)氣壓：接近0帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同藥劑類型的去木質素溶液	不同藥劑類型的去木質素溶液所製成的透明木透光率、隔熱率、光霧度及硬度差異

1.控制變因：根據【實驗1-2】可以得知，溫度越高時去木質素的效果越好，但我們發現95°C的溫度過高，容易導致木片變形，因此我們將以溫度較高反應速度較快但不會使木片變形的70°C作為標準溫度來進行後續實驗。

2.操縱變因：我們查詢到目前最常見的透明木製作有兩種配方：配方一的「鹼性亞硫酸鈉法」及配方二「含氯去木質素溶液」，但第62屆科展「隱形的木材-透明木材的製作、性質與應用」(陳稚澧，2022)指出他們用次氯酸鈉+冰醋酸以調整pH至4.6後當去木質素溶液所製成的木片透光率極差，且木片變脆弱無法成型，但我們卻在網路上有查到製作者以「含氯去木質素溶液」製作出不錯的成功率與透光率的透明木成品，於是我們便努力查詢資料討論原因，結果發現兩者所用配方不一樣，所以我們採用後者的配方來做配方二的含氯藥劑以比較兩種配方(鹼性亞硫酸鈉VS含氯去木質素溶液)所造成的透明木差異在哪裡?以及它們對木片的反應有何不同?

兩種配方所含藥劑分別如下：

配方一：鹼性亞硫酸鈉法 25g氫氧化鈉+12.5g亞硫酸鈉配成250ml水溶液

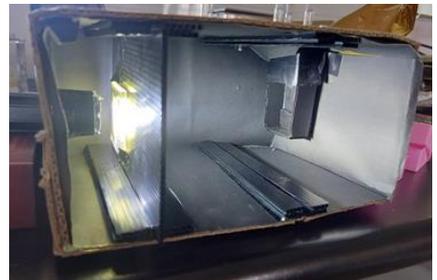
配方二：亞氯酸法 3.34g醋酸鈉+2.3ml醋酸+2.6g亞氯酸鈉配成250ml水溶液

### 3.應變變因：

我們發現木材有優異的強度與隔熱率，且製成透明木後透光率高又有霧面散射光線的效果(如圖20)，有利於將陽光留在透明木中更多時間，提高太陽能板的發電效率，對於製作太陽能板有不錯的優勢，但試做實驗時我們發現這兩種不同的去木質素藥劑配方對木片本身所造成的破壞程度不同，去木質素後木片的顏色與特性都有明顯的差別，故我們想知道如果以製作太陽能板當目標的話，這兩種配方所製成的透明木的透光率、光霧度、隔熱率以及本身木片韌度會有什麼差異。



▲圖19 純環氧樹脂Led光直進



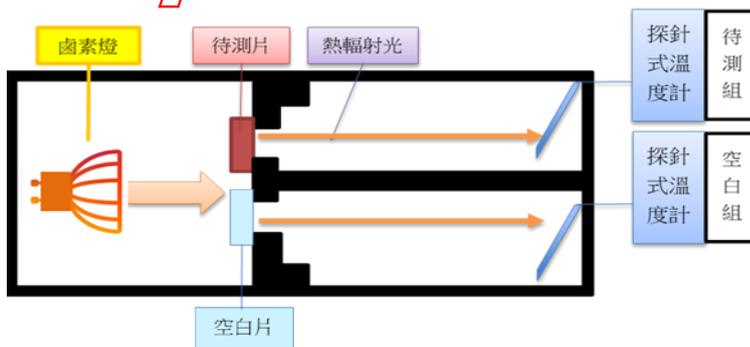
▲圖20 透明木霧面散射光效果

#### (三) 測量方法：

本實驗分別以1-1的「透光率測量儀」測透光率，以及1-2的「韌度測量儀」測木片韌度，另外還設計了「隔熱率測量儀」以及「光霧度測量儀」來測量浸泡不同配方去木質素溶液後的透明木隔熱率及光霧度會有什麼差異，其測量原理分別如下：

1.隔熱率：我們取35\*25\*32.5cm的紙箱並將內部貼上黑色西卡紙，接著在一端設置鹵素燈(300 W)當發熱源，中間則是設計一個距離熱源11公分的插槽來放入黑色紙板來作為隔板，隔板上有兩個孔洞分別對應放置測試片與純透明環氧樹脂空白組溫度計探針的位置，另一端則放置兩個探針式溫度計分別測量經過鹵素燈照射後的待測片與純透明環氧樹脂空白組的溫度差(如圖21)，最後將鹵素燈打開，紀錄兩探針溫度計上升的溫度差異即可得知待測試片的隔熱效果。我們記錄相同照射時間內(3分鐘)純環氧樹脂空白組的上升總溫度變化為X，待測片上升總溫度變化為Y，最後以

$\frac{Y}{X} \times 100\%$ 記錄為該測試片的隔熱率。

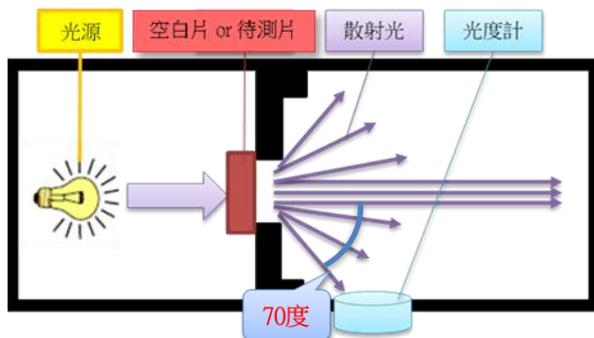


▲圖21 隔熱率測量儀結構



▲圖22 測量隔熱率

2.光霧度：光霧度就是光的擴散程度，光霧度越高，模糊光線的能力就越強。光在穿過透明或是半透明的材料時，會有一部分反射、一部分被吸收，剩餘的部分則會穿透材料，而這穿透的光，又會有兩種表現，分別是平行穿透及散射(參考資料10)。故本實驗的光霧度則是以光度計偵測到散射至固定角度(70度)這部分的光來定義相同光源下不同待測片的散射光量差異(如圖23)



▲圖23 光霧度測量儀結構



▲圖24 測量光霧度

(四) 實驗步驟：

分別配置配方一(鹼性亞硫酸鈉法)與配方二(亞氯酸法)當不同去木質素溶液做實驗，其他步驟參照實驗1-2搭配以上變因的設計實行。

(五) 實驗結果：(註：純透明環氧樹脂空白組照度值=73.9\*100流明)

	透明木成品	透明度	照度值	透光率	韌度	隔熱率	光霧度
鹼性 亞硫 酸鈉 法			51.2*100 流明	69.5%	137.5 gw	5.7%	33.5*1 流明
亞氯 酸法			39.7*100 流明	53.9%	192.1 gw	8.3%	5.8*1 流明

## (六)實驗討論：

實驗結果發現不同藥劑類型的去木質素溶液會影響透明木成品的特性：

1.相較於鹼性亞硫酸鈉法，使用亞氯酸法去掉木質素後產生的木片韌度較好、透光率與光霧度較低、隔熱率較好，這是因為亞氯酸法所加入的藥劑會形成以下反應：



2.此反應所形成的二氧化氯是一種選擇性很強的漂白劑，特別是對木質素反應的選擇性很強，能使木質素的醚鍵斷裂、苯環打開，溶於鹼性、酸性或中性水溶液中，而對纖維素和半纖維素破壞很少(徐守才，2006)。所以製成的木片韌度與本身結構完整度較會造成剝皮反應的鹼性亞硫酸鈉法強，所製成的透明木也較厚實、有較佳的熱輻射隔絕吸收率，但同時也造成了木片的透光率較差，使測出來的透光率與光霧度都較低；相反的因為鹼性亞硫酸鈉法有兩種藥劑可以同時溶解木質素外加某些程度的剝皮反應，使透明木吸光度較低、透光率較佳及光霧度較好。

3.由本實驗結果我們建議業者可以參照所需製作的綠建築需求條件來決定用哪種藥劑類型的去木質素溶液，比如鹼性亞硫酸鈉法製成的成品透光率、光霧度較佳適合製作太陽能板來獲得更多光量以及讓光可以停留在太陽能板上更多時間以增加發電效率；而亞氯酸法製成的透明木可以有較佳的強度、韌度及隔熱率，適合製作綠建築材料如窗戶、霧面隔板或是家具零件等。

## 二、【實驗二】測量不同溶劑對製作透明木之影響

### 【實驗2-1】不同溶劑種類對製作透明木之影響

(一)研究目的：木片泡完去木質素溶液後，我們需要將木片中及卡在纖維素裡被分解的木質素與雜質洗去，於是我們需要選擇一個較佳的溶劑，查詢資料時我們發現大部分相關資訊都選實驗室最易取得的乙醇當溶劑，我們想知道這是因為它方便好取得還是有特殊原因?如果使用其他不同有機溶劑的反應結果會有差異嗎?故我們分別使用甲醇、乙醇、異丙醇、丙酮、乙醚及乙酸乙酯進行實驗，來觀察不同溶劑對木片的影響。

(二) 變因：

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/濃度/體積/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 溶劑濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 環氧樹脂體積/溫度/硬化時間 6. 抽真空：(1)氣壓：接近0帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同溶劑種類	浸泡不同溶劑種類所製成的透明木透光率差異

1.控制變因：去木質素溶液種類 由【實驗1-1~1-3】的結果得知，若可將鹼性亞硫酸鈉法的濃度、比例與溫度控制在適宜的條件下，其製作透明木的成功率與透明率皆較亞氯酸法佳，所以我們採2.5M的氫氧化鈉+0.8M的亞硫酸鈉、70°C作為標準浸泡溫度的鹼性亞硫酸鈉法當後續實驗的標準去木質素溶液條件。

2.操縱變因：我們想知道不同溶劑對洗去被分解的木質素及雜質之效果有何差異，故我們採取實驗室常用的不同有機溶劑(分別是：甲醇、乙醇、異丙醇、丙酮、乙酸乙酯及乙醚)浸泡漂白後的木片來探討不同溶劑所製成的透明木透光率差異。

(三) 實驗步驟：

分別使用甲醇、乙醇、異丙醇、丙酮、乙醚及乙酸乙酯去當溶劑做實驗，其他步驟參照實驗1-2搭配以上變因的設計實行。

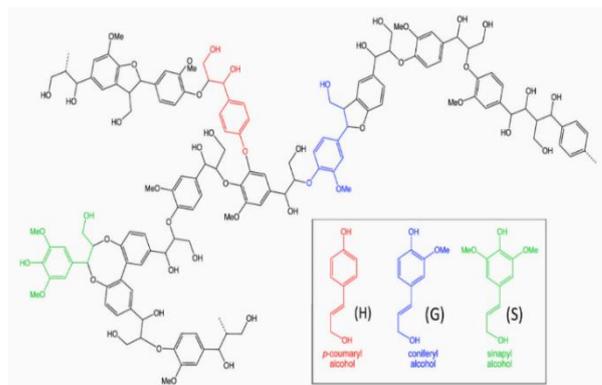
(四) 實驗結果：(註：純透明環氧樹脂空白組照度值=73.3\*100流明)

溶劑	甲醇	乙醇	異丙醇	丙酮	乙酸乙酯	乙醚
透明木成品						
透明度						
照度值	49.4*100 流明	44.3*100 流明	34.8*100 流明	24.2*100 流明	32.6*10 流明	13.4*10 流明
透光	67.4%	60.4%	47.5%	33.0%	4.4%	1.8%

## (五) 實驗討論：

1. 實驗結果發現，浸泡不同種類的溶劑所製成的透明木透光率會有明顯差異：

(1) 浸泡醇類(甲醇、乙醇、異丙醇)的透光率>丙酮>乙酸乙酯>乙醚，這是因為木片中的木質素大都為**聚酚類高分子(如圖25)(張育維，2018)**，本身為**極性及易生氫鍵的特性**對於醇類這種極性質子性溶劑溶解反應相當有利，次佳的為屬於極性非質子性



▲圖25 木質素結構

溶劑的丙酮，而對於屬於非極性溶劑的乙酸乙酯與乙醚溶解反應的效果最差。

(2) 透光率最好的**醇類中以甲醇透光率最好**>乙醇>異丙醇，這是因為甲醇當溶劑時因為分子體積結構最小，較容易進出木片中纖維素之間溶出更多木質素；相反的異丙醇體積最大，造成進出纖維管中困難，溶出的木質素較少。

2. 此外在實驗過程中我們發現使用乙醚當溶劑時，填充環氧樹脂並抽真空後，其產生的氣泡非常多且偏細小、綿密(如圖26)，抽真空與靜置的過程難以完全排除，導致木片表層與其上方的樹脂皆佈滿細小泡沫，與其他溶劑產生的氣泡狀況明顯不同(其他大都為大顆粒、數量少且易散逸的氣泡)(如圖27)，最後製成透明木時我們發現相較於其他溶劑，乙醚溶劑製成的透明木硬化後表面生成一層疏鬆但綿密的極微小氣泡層，且裡面的木頭也呈現如同海綿或千層派般的脆弱結構，經多次反覆實驗與觀察、討論後我們發現這是因為**乙醚分子之間是以微弱的偶極-偶極力 (Dipole-dipole force)和倫敦力 (London force)連結，而乙醇分子和分子間除了偶極-偶極力和倫敦力外還有很強的氫鍵(Hydrogen bond)存在，這導致25°C時乙醚的蒸氣壓 (520 torr)比乙醇的蒸氣壓(75 torr)大7倍之多(陳藹然，2008)**，故浸泡過乙醚的木片在真空桶中散逸出來的乙醚分子間作用力很小但汽化超快，造成氣泡極微小但極大量同時快速出現的現象，此短時間急速大量出現的極細小氣泡易卡在纖維管中破壞結構導致最終成品中的木材部份呈現白色粗糙發泡變厚的狀態，且它們因為體積太小在樹脂中向上的浮力太小不足以克服樹脂的黏滯力而無法脫離環氧樹脂層，導致樹脂部份殘留大量氣泡使整體透明度也極大的下降；相反的乙醇蒸氣壓較乙醚小但分子間作用力大且有氫鍵互相吸引，故汽化速度中等且分子間吸引力大，造成它們被抽離木片時產生的氣泡較大顆(如圖27)、容易脫離樹脂表面不殘留使整體透明度高。



▲圖26 乙醚抽真空



▲圖27 乙醇抽真空

### 【實驗2-2】不同溶劑混和比例對製作透明木之影響

(一) 研究目的：由實驗2-1我們發現以甲、乙醇與丙酮當溶劑效果皆不錯，在查詢資料時也有作者同時以乙醇混丙酮當溶劑來洗滌木片(沃特，2022)，但作者說自己也不知道為什麼要以此兩種溶劑混和去做，故我們想知道將乙醇和丙酮兩種溶劑混和後會對木片中殘餘木質素洗去的效果差異、以及相同時間內哪種比例的去除效率較佳。

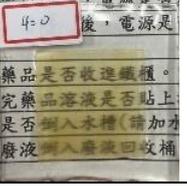
(二)變因：

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/濃度/體積/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 溶劑/體積/溫度/浸泡時間 5. 環氧樹脂體積/溫度/硬化時間 6. 抽真空：(1)氣壓：接近0帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同溶劑混和比例	浸泡不同溶劑混和比例所製成的透明木透光率差異

1.控制變因：溶劑種類：【實驗2-1】我們發現同屬極性溶劑的醇類(極性質子性溶劑)及丙酮(極性非質子性溶劑)溶出與洗去木質素的效果較好，而相反的屬於非極性溶劑的乙酸乙酯和乙醚則效果較差不適用，故我們以實驗室中易取得的兩種不同種類極性溶劑：質子性的乙醇及非質子性的丙酮來做為實驗2-2的混和藥劑種類。

2.操縱變因：已知不同種類的溶劑能洗出木片中不同特性的成分，所以我們想知道如果同時加入洗滌效果皆很好的兩種極性溶劑(質子性的乙醇及非質子性的丙酮)時會對成品的透明度產生什麼樣的影響?不同混和比例下的結果會有什麼差異?故我們將乙醇和丙酮分別以 4：0、3：1、2：2、1：3及0：4的比例製成四種混和溶劑來測量它們所造成的透明木差異。

(三) 實驗結果：乙醇和丙酮混和比例結果(註：純環氧樹脂空白組照度值=82.9\*100流明)

比例	4 : 0	3 : 1	2 : 2	1 : 3	0 : 4
透明木成品					
透明度					
照度值	34.1*100流明	35.2*100流明	33.4*100流明	28.9*100流明	24.2*100流明
透光率	41.1%	42.4%	40.3%	34.9%	29.2%

(四) 實驗討論：

- 1.由實驗結果我們發現將乙醇和丙酮兩種溶劑依不同比例混和會影響洗去木片中殘缺木質素的效果，雖然由實驗2-1中我們知道純乙醇對木質素溶解效果比純丙酮好，但成品的透明度卻是以**乙醇：丙酮=3：1 最好**>4：0>2：2>1：3>0：4。
- 2.我們發現這是因為我們實驗中都是以過量的溶劑來洗總體積很小的木片，故在乙醇：丙酮=3：1與4：0這兩種比例中的乙醇量都是過量溶劑，足以將木片中易被極性質子性溶劑溶解的木質素部分洗出，但乙醇：丙酮=3：1的混和比例多了一份丙酮可以對木片中易被極性非質子性溶劑溶解的部分做更多的洗滌，造成整體透明度更勝純乙醇組，這也是為什麼會有文獻建議此兩種溶劑混浸泡的原因。
- 3.乙醇：丙酮=2：2組雖然兩種溶劑都有，但在相同時間內的洗滌效果卻較差，這是因為木片中的主要木質素結構仍以極性及易生氫鍵的聚酚類高分子為主，故如乙醇的基本量不夠會造成整體的洗滌速度與效果不佳的現象，因此在乙醇：丙酮=1：3當溶劑組的洗滌效果才會明顯更差，故我們建議後續讀者如要做以和我們類似比例配方的透明木時以乙醇：丙酮=3：1當有限時間內的溶劑洗滌效果會更佳。

### 三、【實驗三】 探討不同填充物對透明木的影響

#### 【實驗3-1】 不同種類的填充物對製作透明木之影響

(一) 研究目的：在去除木質素後，木片裡將會出現多處中空空隙使整體透明度不甚理想，這時便需要填充透明物質將其填滿來提高透明度，我們發現眾多文獻中，有些作者使用環氧樹脂當填充物(陳稚澧，2022)、有些則是以填充PMMA為主(沃特，2022)，我們想知道為什麼主要是選用這兩種，以及填入不同介質會有什麼差異。

(二)變因：

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/濃度/體積/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 乙醇濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 抽真空：(1)氣壓：接近0帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同填充物	不同填充物所製成的透明木透光率差異

1.操縱變因：我們想知道不同填充物所製成的透明木差異，故我們分別使用以下物質作為填充物：(1)空氣 (2)乙醇 (3)水 (4)環氧樹脂 (5)PMMA (聚甲基丙烯酸甲酯) A劑為甲基丙烯酸甲酯，B劑為偶氮二異丁腈(AIBN)，並以每50mlA劑+0.141gB劑的混合比例加熱至75°C開始聚合成型，最後以原木片當對照組。

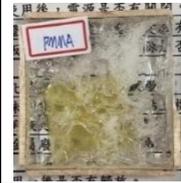
(三) 實驗步驟：

1. PMMA的配置過程：

- (1)將200ml的MMA倒入錐形瓶，以攪拌器攪拌且加熱至70°C後，倒入0.564g的AIBN並加熱至75°C開始預聚合反應15分鐘。
- (2)將預聚合好的PMMA放入冰水中停止聚合反應後即可開始進行填木片抽真空。
- (3)取方型玻璃片並以5mm高的木片在玻璃上黏製面積5\*5cm<sup>2</sup>的容器後將抽真空後的木片與PMMA填入。
- (4)蓋上另一片玻璃片，放入70°C烤箱烘烤4小時後，取出並測其性質。

2. 木片去木質素後，分別將不同樣品木片浸泡在不同介質內抽真空，其餘實驗步驟與環氧樹脂配置步驟參照實驗1-2搭配以上變因的設計實行。

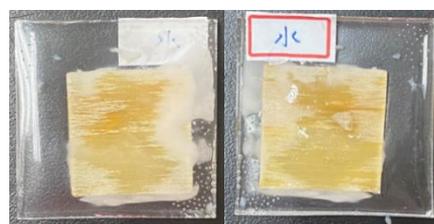
(四) 實驗結果：(註：純透明環氧樹脂空白組照度值=71.8流明)

填充物	充滿木質素的原木	空氣	水	乙醇	環氧樹脂	PMMA
透明木成品						
透明度						
照度值	39*1 流明	47.5*1 流明	21.4*100 流明	26.6*100 流明	50.8*100 流明	4.7*100 流明
透光率	0.54%	0.66%	29.80%	37.04%	70.75%	7.22%

(五) 實驗討論：

1. 實驗結果發現使用**環氧樹脂做為填充物效果最好**，接著為填充乙醇>水>PMMA>空氣>原木。我們查資料後發現這是因為當**填充物與纖維素折射率愈相近會使得透光率愈好**、效果較佳。纖維素的折射率為1.53(參考資料14)，環氧樹脂為1.50~1.56，相較於空氣折射率(1)、水(1.33)、乙醇(1.36)以及PMMA(1.49)，環氧樹脂的折射率與纖維素最為相近，因此透光率最佳。

2. 其中，乙醇(1.36)折射率雖與水(1.33)相近，但是乙醇折射率較水更接近於纖維素，所以透明木透光率會比填充水還要高一些。除此之外，**環氧樹脂的胺類固化劑中的脂肪胺接觸到水時，會與水反應形成鹽類以及脂類的白色混合物**(參考資料15)，這些鹽類混合物殘留使環氧樹脂看起來變白(如圖28)。且當水接觸到未固化的環氧樹脂時，會分解出**含許多氮與氫的混和產物**。這些產生的氣體除了使整體透明度下降，也會使木片漂浮離開環氧樹脂表面，造成木片內的水蒸發而有明顯的誤差。



▲圖28 填水木片呈白色不透明

3. 而做為填充物透光率最差的空氣，除了因為折射率(1)相較其他填充物與纖維素(1.53)相差最大造成透明度不佳之外，在抽真空將乙醇抽出置換成空氣後，我們發現木片的纖維管束會因失去填充物的支撐而造成**整體結構的崩潰萎縮**，最終產生形變的現象，甚至是在將其浸泡在環氧樹脂中固化的過程時，也會觀察到木片因萎

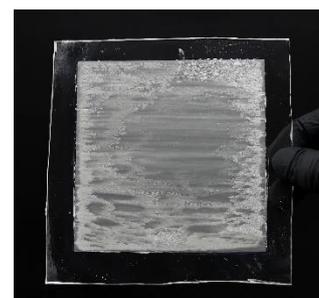
縮而將纖維管內的空氣擠出導致木片周圍出現大量微小氣泡使整體透光率極差的結果。

4.另外，我們使用PMMA的文獻製程所製成的透明木透光率很差，這與PMMA因折射率與纖維素相差較少應為透光率很好的填充物結論相反，經過多次重複實驗與觀察我們發現到這是因為：

(1)參考文獻中木片抽真空填充PMMA後都以木片+少量的PMMA去加壓烘烤(如圖29)，並非如我們將木片完全浸入填充物溶液中使其充分填充減少空氣進入纖維管的機率，故文獻中木片上下的PMMA很少(幾乎是裸木)，接著進行多次的打磨將未填充到PMMA不平整的木片表面打磨掉後，才有基本透光率，只有再進行第二次填充液態PMMA、抽真空再二次烘烤與打磨，過程相當繁複才能得到堪用的透光率(如圖30)(NileRed, 2021)，而我們使用的環氧樹脂標準製程只需抽真空後靜置且不需打磨，便可得到不錯的透光率，既方便成功率也很高。



▲圖29 少量的PMMA



▲圖30 打磨的透明木

(2)實驗在抽真空的過程前期我們發現PMMA組會呈現大量氣泡出現並累積、泡泡消失速度相當緩慢，中期抽真空到第二次10分鐘時PMMA泡泡出現頻率便大為降低，且PMMA表面開始有凝結成固態膜的趨勢，到第三次抽10分鐘時PMMA便幾乎看不到氣泡冒出，但烘烤成型後卻發現成品透明度不佳、PMMA中有大量氣泡的狀況，經過多次觀察我們發現這是因為PMMA在抽真空第二與第三次後便開始部分凝固成型，使木片中剩餘的乙醇無法順利被抽出並讓液態PMMA填入，故烘烤時的高溫環境才會逼使殘餘在木片中的乙醇繼續汽化，此時的**液態PMMA也已經太濃稠無法再進入木片中**，造成木片偏白、不透明及PMMA層累積大量後來才溢出的氣泡後凝固，導致最終整體透明度大為降低。

### 【實驗3-2】填充物的預聚合時間長短所造成的透明木差異

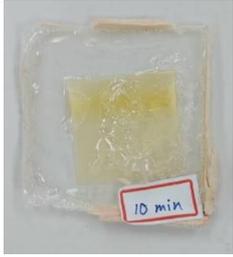
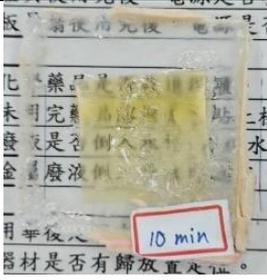
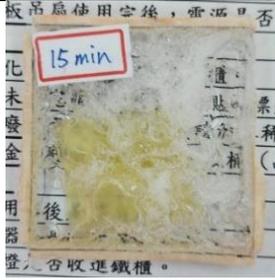
(一)研究目的：在多次試做實驗中我們觀察到若改變預聚合時間的長短，PMMA的A、B劑混和溶液表現出的特性會不太一樣，這讓我們很好奇如果分別將它們填入相同狀況的木片中是否可以提升成品的透光率?且查詢資料後發現大多數作者製作透明木時在填充物事先預聚合時間這方面沒有太多著墨，因此我們想藉由此實驗探討填充物在進入木片前的預聚合時間長短所造成透明木的特性差異。

(二) 變因：

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/濃度/體積/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 溶劑濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 填充物種類(PMMA)/體積/烘烤溫度 6. 抽真空：(1)氣壓：接近0帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	PMMA的預聚合時間長短	不同的PMMA預聚合時間所製成透明木的透光率差異

1.操縱變因：本實驗分別加熱預聚合5、10、15分鐘後馬上將含PMMA的容器放入冰水中降溫終止聚合反應，最後分別填入木片中並觀察最後形成的透明木差異。

(三) 實驗結果：(純透明環氧樹脂空白組照度值=66.3\*100流明)

時間	預聚合5分鐘PMMA	預聚合10分鐘PMMA	預聚合15分鐘PMMA
透明木成品			
透明度			
照度值	19.6*100流明	15.5*100流明	4.7*100流明
透光率	29.63%	23.40%	7.22%

(四) 實驗討論：

1.實驗結果發現PMMA以不同預聚合時間製成的成品透光率由高到低分別為5>10>15分鐘，這是因為PMMA的A、B劑混和均勻並加熱至75°C後便會開始聚合反應，使連結的分子開始變多變大，故實驗3-1參考文獻中預聚合15分鐘後再填入木片時已形成不少體積相當大的聚合物並使整體呈現非常黏稠的狀態，因此在抽真空時會造成氣體

無法離開木片及填充物難以填入纖維管縫隙中，導致整體抽真空交換填充PMMA的程度大為下降，所以最終烘烤後才會呈現木片偏白、PMMA透明層累積大量氣泡的結果。

2.相反的**預聚合5分鐘便填入木片**，此時溶液中的聚合反應尚未完全，所含分子體積較小、**整體呈現較不黏稠的狀態**，因此較容易抽真空與填入纖維管縫隙中，整體抽真空交換填充PMMA的程度也較大，最終**烘烤時也有達反應溫度將剩餘未反應完的A、B劑聚合成PMMA**，所以最終透明木成品的成功率與透明度也較高。

3.由實驗三可發現不同填充物所形成透明木特性不同，分別是：

(1)填充環氧樹脂透光率較高、製程簡單穩定，但成品較軟且需較長固化時間(48小時)

(2)填充PMMA組透光率較低、製程較繁瑣且揮發率較高使成品體積較小，但最終成品較硬且固化時間較短可節省等待時間(4小時)。

(3)由以上結論我們建議業者在設計製程時可根據各自不同的透明木使用需求去參考以上特性來決定填入哪種聚合物以利後續的加工使用，如**環氧樹脂的高透光率可應用於太陽能板的製作，PMMA的高硬度可使用於綠建築家具的使用等。**

#### 四、【實驗四】製作不同厚度的透明木

(一) 研究目的：查詢資料我們發現大部分的文獻都集中在製作1mm透明木，而2和3mm透明木的製作成功率與透明度都相當低，於是我們綜合實驗1-1~3-2的結論，將各實驗製作透明木的變因最優解選出來重新設計實驗方法，試著將透明木的厚度增大並提高成品的成功率與透明度，為綠建築材料增加更多的應用性。

(二)變因：

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：面積3*3 cm <sup>2</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液、雙氧水、溶劑、環氧樹脂的種類/濃度/溫度/體積/反應時間 3. 抽真空：(1)氣壓：接近0帕的真空狀態 (2)抽取/靜置時間與次數	不同厚度的木片	不同厚度的透明木 成功率與特性差異

1.控制變因：綜合前面實驗1-1~3-2的結論，我們將各實驗的各變因最優解方法選出來並重新設計本實驗方法，試著製作厚度更厚的透明木，其實驗方法如下：

- (1)【實驗1-1】 我們發現氫氧化鈉與亞硫酸鈉是以不同的反應機制分別將木片中的木質素分離出來，雖然濃度越高去木質素效果越好，但5M的氫氧化鈉濃度過高，反而會阻礙亞硫酸鈉的作用，導致製作效果較差，故我們以**效果最好的2.5M的氫氧化鈉及0.8M的亞硫酸鈉作為標準去木質素溶液的濃度**。
- (2)【實驗1-2】 溫度越高去木質素的效果越好，但95°C的溫度過高導致木片變形，故我們以**溫度較高反應速度較快但不會使木片變形的70°C作為標準浸泡溫度**來進行去木質素溶液與雙氧水溶液的浸泡；另外由於木片厚度是原本的2到3倍，木片中所含木質素更多需要更長時間來反應，故我們將各實驗步驟中的浸泡時間都加長到兩倍。
- (3)【實驗1-3】 將**鹼性亞硫酸鈉法的濃度、比例與溫度控制在適宜的條件下**，其製作透明木的成功率與透明度皆較亞氯酸法佳，所以我們選擇鹼性亞硫酸鈉法當實驗的標準去木質素溶液。
- (4)【實驗二】 可以得知**極性溶劑的醇類(極性質子性溶劑)及丙酮(極性非質子性溶劑)**溶出與洗去木質素的效果較好，且各自可以洗出木片中不同特性的成分，故我們本步驟設計成以乙醇：丙酮=3：1混合泡48小時當溶劑的控制變因。
- (5)【實驗三】 實驗發現木片填充物採用**折射率最接近纖維素的環氧樹脂，產生的透明木透光率相當高、製備過程方便、藥劑穩定、聚合條件簡單、成品好成型且過程易操作**，故我們選擇環氧樹脂當本實驗的填充物。
- (6)最後抽真空時由於木片厚度大所需抽取與填充的物質也較多，故我們也將每次**抽取時間加倍**以達較佳的效果。

2.操縱變因：分別取2mm與3mm的飛機木，各自裁切成 $3*3\text{ cm}^2$ ( $2/3*3*3\text{ cm}^3$ )的面積來做實驗。

### (三) 實驗步驟：

- 1.將厚度1、2、3mm的飛機木分別裁切成面積 $3*3\text{ cm}^2$ 的木片。
- 2.配置2.5M的氫氧化鈉及0.8M的亞硫酸鈉作為去木質素溶液並將木片浸入，再以恆溫槽加熱至70°C浸泡14小時。
- 3.取出木片浸泡於2杯80°C的熱水各洗滌5分鐘，再將其浸泡在加熱至70°C的35%雙氧水中靜置漂白7小時。
- 4.把漂白後的木片以乙醇：丙酮=3：1混和當溶劑泡48小時洗去木質素與雜質。
- 5.取出木片放入裝有環氧樹脂的矽膠模內，放入真空裝置抽真空20分鐘後靜置20分鐘，重複3次。

6.取出矽膠模並靜置48小時等待成型，脫模後取出測其性質。

(四) 實驗結果：(註：純透明環氧樹脂空白組照度值=85.7\*100流明)

厚度	1mm	2mm	3mm
透明木成品			
透明度			
照度值	51.2*100流明	37.8*100流明	32.0*100流明
透光率	59.7%	44.1%	37.3%
隔熱率	7.2%	9.3%	21.7%
光霧度	33.5*1流明	24.8*1流明	18.6*1流明

(五) 實驗討論：

實驗結果發現我們將各變因的最優解方法選出來重新設計的實驗方法可以成功的將木片厚度2與3mm製成透明木，證明並非只有1mm厚度才能成功，且相較於1mm厚度木頭，較厚的透明木製成之後會有較強的韌度與較好的隔熱率，雖然透光率與光霧度跟著降低但可以根據業者不同需求去設計出不同方向的環保建築材料，為綠建築的應用增加更多可變性。

## 陸、結論

### 一、【實驗1-1】不同濃度去木質素溶液對製作透明木之影響

- 1.實驗結果發現亞硫酸鹽會與木片中的木質素發生磺化反應，使木質素溶出，故在此配方中([固定NaOH=2.5M])加入的亞硫酸鈉量(0.1~0.8M)愈多，透明木的透光率愈佳。
- 2.氫氧化鈉的OH<sup>-</sup>會與木質素上的碳鏈進行親核反應導致木質素上的鍵結斷裂而逐漸溶出，故其濃度越高，溶出木質素的效果愈好，但5M的氫氧化鈉濃度過高，反而會阻礙亞硫酸鈉的作用，導致成品透明度降低。

## 二、【實驗1-2】不同去木質素溶液溫度對製作透明木之影響

- 1.實驗結果發現溫度越高，溶液中的粒子有較高的能量與速度去反應，且高溫的鹼性溶液可讓木片中的細胞壁膨潤變大，使藥劑的滲透加快，故木片的透明度越好。
- 2.95°C組木片雖因高溫而使去木質素反應變快但也同時造成過多的剝皮、降解反應，使整體木片過於薄弱，不利於後續製作透明木的加工與應用。
- 3.亞硫酸鈉可以抑制住氫氧化鈉額外的剝皮反應使木片整體結構較穩定，故當實驗1-1的氫氧化鈉濃度過高或亞硫酸鈉濃度過低時，木片的剝皮現象明顯而有形變的狀況。

## 三、【實驗1-3】不同藥劑類型的去木質素溶液對製作透明木之影響

亞氯酸法製成的透明木韌度較好、透光率與光霧度較低、隔熱率較好，這是因為此反應形成的二氧化氯是一種選擇性很強的漂白劑，對木質素反應的選擇性很強，對纖維素和半纖維素破壞很少，所製成的透明木較厚實、有較佳的熱輻射隔絕吸收率，但同時也造成了木片的透光率較差，使測出來的透光率與光霧度都較低；相反的因為鹼性亞硫酸鈉法有兩種藥劑可以同時溶解木質素外加某些程度的剝皮反應，使透明木吸光度較低、透光率較佳及光霧度較好。

## 四、【實驗2-1】不同溶劑種類對製作透明木之影響

- 1.因木質素有極性和氫鍵的特性，故醇類這種極性質子性溶劑溶解效果最好，次佳的為屬於極性非質子性溶劑的丙酮，而屬於非極性溶劑的乙酸乙酯與乙醚則最差。
- 2.醇類中，又以分子體積結構最小的甲醇效果最好，因為其容易進出木片的纖維素間以溶出更多木質素；而分子體積最大的異丙醇溶解效果則最差。
- 3.因25°C乙醚的蒸氣壓與汽化速度遠大於乙醇，且分子之間作用力小，抽真空時產生的微小氣泡易卡在纖維素間破壞木材結構使呈白色海綿狀，樹脂層也有大量微小氣泡使整體透明度下降；而乙醇汽化的氣泡較大、不殘留於樹脂表面使整體透明度較高。

## 五、【實驗2-2】不同溶劑混和比例對製作透明木之影響

- 1.乙醇和丙酮混和後對洗去殘缺木質素的效果3：1 > 4：0 > 2：2 > 1：3 > 0：4。
- 2.因為乙醇：丙酮=3：1與4：0的乙醇量都是過量溶劑，但3：1的混和比例多了一份丙酮可以對木片中易被極性非質子性溶劑溶解的部分做更多的洗滌，使透明度更佳。
- 3.在2：2組雖兩種溶劑都有，但木片中的主要木質素結構仍以極性及易生氫鍵的聚酚類高分子為主，故如乙醇的基本量不夠仍會造成整體的洗滌速度與效果不佳的現象。

## 六、【實驗三】探討不同填充物對透明木的影響

- 1.使用折射率與纖維素最為相近的環氧樹脂做為填充物透光率最好，接著為填充乙醇 > 水 > PMMA > 空氣 > 原木。若填充水，則環氧樹脂的胺類固化劑遇水形成的白色混和物會使

透光率變差；以折射率與纖維素相差最大的空氣作為填充物時，木片的纖維管束因失去填充物的支撐造成結構的崩潰萎縮，最終將纖維管內的空氣擠出導致環氧樹脂內木片周圍出現大量微小氣泡使整體透光率極差。

2.相較於其他填充物，使用預聚合15分鐘的PMMA製作出的透明木透光率很差，這是因為此時已形成不少體積相當大的聚合物使整體呈現非常黏稠的狀態，在抽真空第二、三次後便開始部分凝固成型，造成氣體無法離開木片且填充物也難以填入纖維管縫隙中，導致整體抽真空交換填充PMMA的程度大為下降，故烘烤時的高溫環境才會逼使殘餘在木片中的乙醇繼續汽化，造成木片偏白不透明、PMMA透明層累積大量氣泡的結果；相反的預聚合5分鐘便填入木頭，此時PMMA分子體積較小而不過度黏稠，較容易抽真空與填入纖維管縫隙中，整體抽真空交換填充PMMA的程度大，最終烘烤時也有達反應溫度將剩餘沒反應完的A、B劑聚合成PMMA，所以最終透明木成品的成功率與透明度也較高。

## 七、總結

1.如果要製作更厚或透光率高的透明木我們建議可以：

- (1)配置適當比例的”高濃度”+”鹼性亞硫酸鈉法”當去木質素溶液(氫氧化鈉2.5M+亞硫酸鈉0.8M)
- (2)以”溫度較高”反應速度較快但不會使木片變形的70°C作為標準浸泡溫度並加長浸泡時間
- (3)以乙醇：丙酮=3：1混和當溶劑洗去殘缺木質素
- (4)以環氧樹脂當最後填充物

2.我們建議業者可以參照所需製作的綠建築需求條件來決定用哪種配方製作透明木以利後續的加工使用：

- (1)鹼性亞硫酸鈉法製成的成品透光率、光霧度較佳適合製作太陽能板來獲得更多光量及讓光可以停留在太陽能板上更多時間以增加發電效率；亞氯酸法製成的透明木有較佳的韌度及隔熱率，適合製作綠建築材料如窗戶、霧面隔板或家具零件等。
- (2)填環氧樹脂透光率較高可應用於太陽能板的製作、製程簡單且穩定，但成品較軟且需較長固化時間(48小時)；填PMMA透光率較低、製程較繁瑣且揮發率較高使成品體積較小，但最終成品較硬可使用於綠建築家具的使用且固化時間較短可節省等待時間(4小時)。
- (3)較厚的透明木有較好的韌度與隔熱率，雖然透光率與光霧度跟著降低但可以根據者不同需求去設計出不同方向的環保建築材料，為綠建築的應用增加更多可變性。

## 柒、參考資料

- 1.郭明智(2018)。全組成分離木質素產品應用開發。行政院原子能委員會 委託研究計畫研究報告。取自：[https://www.aec.gov.tw/share/file/information/hNs8appvvnq0Tgsh8XAMTg\\_\\_.pdf](https://www.aec.gov.tw/share/file/information/hNs8appvvnq0Tgsh8XAMTg__.pdf)
- 2.Herbert Lien (2021)。最低成本的透明木材實驗。Youtube。  
取自：[https://www.youtube.com/watch?v=ApM\\_zNQxIEI](https://www.youtube.com/watch?v=ApM_zNQxIEI)
- 3.沃特(2022)。我把木頭變透明了！自製可以取代玻璃的新興材料透明木。Youtube。  
取自：<https://www.youtube.com/watch?v=Y3YgKb4M-aQ>
- 4.陳稚澧、賴又瑄、彭雋皓、陳相佐、郭子琦、李若瑄(2022)。隱形的木材-透明木材的製作、性質與應用。科展第62屆。
- 5.木質素。華人百科。  
取自：<https://www.itsfun.com.tw/%E6%9C%A8%E8%B3%AA%E7%B4%A0/wiki-0829804-1195983>
- 6.張育維(2018)。稻稈生質精煉殘餘物以有機溶劑與蘇打法萃取分離木質素之研究。元智大學 化學工程與材料科學學系 碩士論文。
- 7.黃昀蓁、蔡依軒、李宸宇(2022)。生入鹼出一探討不同變因對鹼性蛋白凝膠特性的影響。科展第62屆。
- 8.蘇裕昌(2005)。硫酸鹽製漿的基礎。漿紙技術雜誌，第九卷，第一期。  
取自：<http://for.nchu.edu.tw/uploads/file/thesis/5e9b84df-e82c-4c71-b168-b50128d1cdf4.pdf>
- 9.徐守才(2006)。鹼性亞硫酸鈉法草漿蒸煮廢液資源化綜合利用技術。中國科技論文與引文資料庫。取自：<https://patents.google.com/patent/CN100500991C/zh>
- 10.霧度計的相關原理說明及規範。志宸科技。  
取自：<http://www.chiefdom-tek.com.tw/edcontent.php?lang=tw&tb=5>
- 11.徐守才(2006)。鹼性亞硫酸鈉法草漿的少氯漂白及中段水全封閉回用技術。  
取自：<https://patents.google.com/patent/CN1616761A/zh>
12. NileRed (2021)。Making transparent wood。Youtube。  
取自：<https://www.youtube.com/watch?v=uUU3jW7Y9Ak>
13. 陳藹然(2008)。蒸氣壓。科學online。取自：<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=4482>
- 14.施奇廷(2021)。好看又環保 將木材變透明。人間福報  
取自：<https://www.merit-times.com/NewsPage.aspx?unid=614523>
15. 環氧樹脂乳化變白。淨水百科網。取自：[https://www.bh1978.com/big5/haocai\\_118935](https://www.bh1978.com/big5/haocai_118935)

## 【評語】 030212

本計劃是探討不同的去除木質素之變因對透明木材製備的影響。依據實驗結果討論、推論，有邏輯性。研究架構很完整。由於透明木材為未來的環保建材，此研究值得鼓勵。

- (1) 控制變因可以挑選，不必太多，使研究更聚焦。
- (2) 可簡要說明透明木如何在材料機裡上達到透光與隔熱。
- (3) 內文中，結果與討論有清楚指出所使用的文獻。報告寫法符合科學文章格式。這是值得讚賞的。
- (4) 本研究中為了完成實驗的量測，總共自製四種儀器，包含透光率測量儀、韌度測量儀，隔熱率測量儀，光霧度測量儀。值得讚賞。
- (5) 本結果中，也可將成果量化。從 1 mm 透明木，重新調整優化變因，成功完成放大至 2 到 3 mm 厚度的透明木。
- (6) 本結果有其實用性，應與廠商討論其用於改善市售產品，或新建材之可能。。

## 作品海報



# 光彩奪「木」



—探討不同變因對透明木特性的影響



## 壹、研究動機

我們查詢綠建築資料發現可製造「透明木材」當環保建材，但相關資訊大多是介紹如何做出成品而沒有定量討論不同變因的影響，因此我們開始設計實驗探討不同因素會如何影響透明木的特性，並可將結果拓展至應用層面來推廣此綠建築材料。

## 貳、研究目的

- 一、測量去木質素溶液對木片的影響
  - (一)不同濃度比例
  - (二)不同浸泡溫度
  - (三)不同去木質素液
- 二、探討不同有機溶劑對成品透明度的影響
  - (一)不同溶劑種類
  - (二)不同溶劑混和比例
- 三、觀測不同填充物形成的透明木差異
  - (一)不同種類的填充物
  - (二)填充物的預聚合時間長短所造成的差異
- 四、試驗不同厚度形成透明木材的可能性

## 參、研究設備及器材

- 一、實驗器材：真空裝置、電子秤、光度計、手電筒、恆溫槽、攪拌器、攪拌子、矽膠模具、木板、不銹鋼全牙粗螺絲 30 公分、螺帽、螺絲、塑鋼土、電子天秤、一字形墊片、C 型萬用夾、探針式電子溫度計、鹵素燈。
- 二、實驗藥品：氫氧化鈉、亞硫酸鈉、醋酸钠、醋酸、亞氯酸鈉、雙氧水、甲醇、乙醇、異丙醇、乙醚、乙酸乙酯、丙酮、環氧樹脂 (A 劑：環氧氯丙烷、B 劑：雙氰胺)、PMMA (A 劑：甲基丙烯酸甲酯、B 劑：偶氮二偶氮二異丁腈)。

## 肆、文獻探討與測量方法

- 一、查詢歷屆科展作品我們發現只有一篇透明木相關論文「第 62 屆科展「隱形的木材-透明木材的製作、性質與應用」(陳稚澧, 2022)，其中作者指出驗方法的氫氧化鈉與亞硫酸鈉濃度會影響木頭最終透明結果，我們很好奇這兩者的角色是什麼?他們是否會先交互作用再與木頭反應?還是各自有各自的作用?他們的反應機制都一樣嗎?另外，作者在實驗另一種去木質素配方時(氯方法)，不僅成品的透光率極差，還會使木片會變得很脆弱無法成型，但我們查到的製作影片卻能達到不錯成功率，我們想知道其成功或失敗的原因是什麼?以及兩種配方所製成的透明木有何差異?
- 二、我們依照各實驗不同變因分別設計出不同測量儀器，分別是：

1.透光率：先記錄無測試片時的照度值為 X，接著將測試片放入隔板後再測一次照度值為 Y，最後以 $\frac{Y}{X} \times 100\%$ 記錄為該測試片的透光率	
2.韌度測量儀：我們改造學長姊製作的物品強度觀測儀(黃昀蓁, 2022)並加入自製探針與待測片固定台測木片韌度，本實驗將木片的韌度定義為「貫穿木片所需最小力量」	
3.隔熱率：記錄相同照射時間內(3 分鐘)純環氧樹脂組的上升總溫度變化為 X，待測片上升總溫度變化為 Y，最後以 $\frac{X-Y}{X} \times 100\%$ 紀錄為該測試片的隔熱率。	
4.光霧度：以光度計偵測到散射至固定角度(70度)這部分的光來定義相同光源下不同待測片的散射光量差異。	

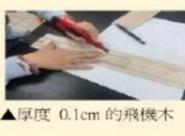
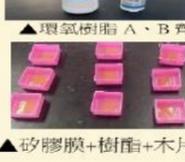
## 伍、研究過程、結果與討論

### 一、【實驗 1-1】不同濃度去木質素溶液對製作透明木之影響

#### (一)變因：

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1cm 的飛機木 2. 去木質素液種類/濃度/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 乙醇濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 環氧樹脂體積/溫度/硬化時間 6. 抽真空：(1)氣壓：接近 0 帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同濃度比例的氫氧化鈉/亞硫酸鈉	不同濃度比例的本質素溶液所製成的透明木透光率差異

#### 1.控制變因：

- (1)我們使用一種美術及模型飛機專用的木材，紋理直，結構細而均勻、質輕便宜好裁切，稱為**巴沙木(又稱飛機木)**作為實驗對象。
- (2)本實驗用**鹼性亞硫酸鈉法**去木質素，每杯配置氫氧化鈉及亞硫酸鈉混和溶液 250ml 來反應，並以 70°C 持續浸泡 7 小時。
- (3)我們將浸泡完去木質素溶液的木片泡入濃度 35%、體積 50ml 的雙氧水，並且在室溫下浸泡 15 小時來漂白木片。
- (4)為了洗去木片中及卡在纖維素裡被分解的木質素與雜質，我們將木片泡入濃度 95%、體積 50ml 的乙醇中，並且在室溫下浸泡 24 小時。
- (5)環氧樹脂以 A 劑:B 劑=3:1 的質量比來混和，攪拌均勻後倒入底面積 5cm\*5cm 的矽膠模中，每盒矽膠膜皆倒入 3mm 高度的樹脂。

- (6)為了將木片中殘餘的溶劑(乙醇)抽出並讓環氧樹脂填入木片中，我們將填入環氧樹脂的木片放入抽真空裝置中，以接近 0 帕氣壓抽 10 分鐘，再打開氣壓恢復一大氣壓，靜置 10 分鐘來讓樹脂進入木片裡的中空纖維管空隙，並且重複此動作 3 次。

#### 2.操縱變因：故本實驗分別探討

配方(一)：固定**氫氧化鈉**濃度(濃度 2.5M)，搭配不同濃度的**亞硫酸鈉**(0.8M、0.4M、0.2M、0.1M)

配方(二)：固定**亞硫酸鈉**濃度(0.4M)，搭配不同濃度的**氫氧化鈉**(5M、2.5M、1.25M、0.625M)

#### (二)實驗步驟：

1. 裁切木片：將厚度 0.1cm 的木片裁切成 3cm*3cm 大小，共 24 片。	2. 去木質素(配方一)：固定氫氧化鈉濃度並加入不同濃度的亞硫酸鈉來去木質素溶液，將木片浸入。	3. 漂白木質素溶液：以雙氧水漂白至木片變白後，浸泡 2 小時。	4. 洗滌木片：將木片浸入 95% 的乙醇中，靜置 24 小時。	5. 漂白木片：將木片浸入 95% 的乙醇中，靜置 24 小時。	6. 洗去木質素與雜質：將木片浸入 95% 的乙醇中，靜置 24 小時。	7. 加入矽膠模：取出木片並置入矽膠模中，將矽膠膜填入木片的中空纖維管內。	8. 抽真空：將矽膠膜置入真空裝置中，抽真空 10 分鐘後靜置 10 分鐘，重複此步驟 3 次。	9. 靜置成形：最後取出矽膠膜靜置 2 小時，待其硬化，完成製成後取出其性質。	10. 配方二實驗：將步驟 2 改成固定亞硫酸鈉濃度並加入不同濃度的氫氧化鈉來去木質素溶液，將木片浸入其中，其餘過程以上步驟 3-9。
---	---	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	--	---	---

#### (三)實驗結果：

配方	濃度	亞硫酸鈉 0.1M	亞硫酸鈉 0.2M	亞硫酸鈉 0.4M	亞硫酸鈉 0.8M	配方	濃度	氫氧化鈉 0.625M	氫氧化鈉 1.25M	氫氧化鈉 2.5M	氫氧化鈉 5M
透明木成品	透明度	28.3*100%照度	34.2*100%照度	51.2*100%照度	64.8*100%照度	透明度	28.3*100%照度	34.2*100%照度	51.2*100%照度	64.8*100%照度	64.8*100%照度
透光率	38.4%	46.4%	69.5%	87.9%	38.4%	46.4%	69.5%	87.9%	38.4%	46.4%	69.5%
韌度	279.7gw	157.9gw	137.5gw	71.0gw	279.7gw	157.9gw	137.5gw	71.0gw	279.7gw	157.9gw	71.0gw

### 二、【實驗 1-2】不同去木質素溶液溫度對製作透明木之影響

#### (一)變因：

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1cm 的飛機木 2. 去木質素液種類/濃度/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 乙醇濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 環氧樹脂體積/溫度/硬化時間 6. 抽真空：(1)氣壓：接近 0 帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同溫度的去木質素溶液	不同溫度的去木質素溶液所製成的透明木透光率及韌度差異

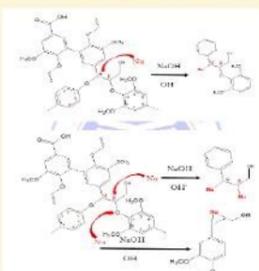
- 1.控制變因：我們以實驗 1-1 效果最好的 2.5M 的氫氧化鈉及 0.8M 的亞硫酸鈉作為標準去木質素溶液的濃度去做後續實驗。
- 2.操縱變因：我們以恆溫槽製作不同溫度的去木質素溶液(20°C、45°C、70°C 及 95°C)來觀察製出來的透明木成品差異。

#### (二)實驗結果：

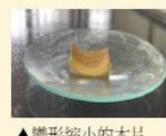
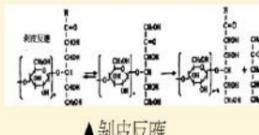
溫度	20度C	45度C	70度C	95度C
透明木成品				
透明度	28.3*100%照度	34.2*100%照度	51.2*100%照度	64.8*100%照度
透光率	38.4%	46.4%	69.5%	87.9%
韌度	279.7gw	157.9gw	137.5gw	71.0gw

#### (三)實驗討論：

##### 【實驗 1-1】不同濃度去木質素溶液對製作透明木之影響

- 1.配方一的氫氧化鈉濃度固定，**亞硫酸鈉會與木片中的木質素發生磺化反應**，引進磺酸基，增加了親水性而使木質素開始溶出，故在此配方中加入的亞硫酸鈉量愈多，透明木的透光率越佳。
- 2.在配方二亞硫酸鈉濃度固定，**氫氧化鈉的 OH 會與木質素上的碳鏈進行親核反應導致木質素上的鍵結斷裂，產生低分子化而逐漸溶出的效果**，雖然濃度越高能參與去木質素的粒子也會越多，但 5M 的氫氧化鈉濃度過高，反而會有阻礙亞硫酸鈉的作用，導致成品透明度降低。

##### 【實驗 1-2】不同去木質素溶液溫度對製作透明木之影響

- 1.高溫提供粒子較高的能量與速度去反應，且**高溫的鹼液可讓木片中的細胞壁膨潤變大，加快藥劑的滲透交換速率**，故木片的透明度較好。
- 2.因氫氧化鈉對木片中的木質素並非具有攻擊選擇性，它對纖維素、半纖維素會有相當程度的降解反應發生(剝皮反應)，造成 95°C 組木片雖然因高溫而使去木質素反應變快但也同時造成過多的剝皮降解反應，使整體木片過於薄弱，不利於後續製作透明木的加工與應用。
- 3.在鹼性煮煮環境下，**纖維素與半纖維素的還原性末端(醛基)會被亞硫酸鈉氧化成羧基**，起到抑制剝皮反應的作用，故當實驗 1-1 的氫氧化鈉濃度過高或亞硫酸鈉濃度過低時，木片的剝皮現象明顯而有形變的狀況。

### 三、【實驗 1-3】不同藥劑類型的去木質素溶液對製作透明木之影響

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/濃度/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 乙醇濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 環氧樹脂體積/溫度/硬化時間 6. 抽真空：(1)氣壓：接近 0 帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同藥劑類型的去木質素溶液	不同藥劑類型的去木質素溶液所製成的透明木透光率、隔熱率、光霧度及硬度差異

- 控制變因：以實驗 1-2 溫度較高反應較快但不會使木片變形的 70°C 作標準溫度
- 操縱變因：兩種配方所含藥劑分別如下：

配方一：鹼性亞硫酸鈉法→25g 氫氧化鈉+12.5g 亞硫酸鈉配成 250ml 水溶液  
 配方二：亞氯酸法→3.34g 醋酸鈉+2.3ml 醋酸+2.6g 亞氯酸鈉配成 250ml 水溶液

透明木成品	透明度	照度值	透光率	韌度	隔熱率	光霧度
鹼性亞硫酸鈉法		51.2*100	69.5%	137.5 gW	5.7%	33.5*1
亞氯酸法		39.7*100	53.9%	192.1 gW	8.3%	5.8*1

#### (三)實驗討論：

- 亞氯酸法去掉木質素後產生的木片韌性較好、透光率與光霧性較低、隔熱率較好，這是因為亞氯酸法所加入的藥劑會形成以下反應：  
 (1)CH<sub>3</sub>COOH 加 NaClO<sub>2</sub> 產生 HClO<sub>2</sub> (2)HClO<sub>2</sub> 再分解成 Cl<sub>2</sub>+ClO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O  
 2.此反應所形成的二氧化氯是一種對木質素選擇性很強的漂白劑，而對纖維素和半纖維素破壞很少。所以製成的木片韌性與本身結構完整度較會造成剝皮反應的鹼性亞硫酸鈉法強，所製成的透明木也較厚實、有較佳的熱輻射隔絕吸收率，但同時也造成了木片的透光率較差，使測出來的透光率與光霧性都較低。  
 3.我們建議業者可以參照所需製作的綠建築需求條件來決定用哪種藥劑類型的去木質素溶液，如**鹼性亞硫酸鈉法製成的成品透光率、光霧性較佳**適合製作太陽能板來獲得更多光量以及讓光可以停留在太陽能板上更多時間以增加發電效率；而**亞氯酸法製成的透明木可以有較佳的強度、韌性及隔熱性**，適合製作綠建築材料如窗戶、霧面隔板或是家具零件等。

### 四、【實驗 2-1】不同溶劑種類對製作透明木之影響

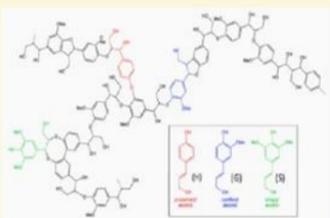
控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/濃度/體積/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 溶劑濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 環氧樹脂體積/溫度/硬化時間 6. 抽真空：(1)氣壓：接近 0 帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同溶劑種類	浸泡不同溶劑種類所製成的透明木透光率差異

- 控制變因：我們採 2.5M 的氫氧化鈉+0.8M 的亞硫酸鈉、70°C 作為標準浸泡溫度的鹼性亞硫酸鈉法當後續實驗的標準去木質素溶液條件。
- 操縱變因：我們以實驗室常用的有機溶劑(甲醇、乙醇、異丙醇、丙酮、乙酸乙酯及乙醚)浸泡漂白後的木片來探討不同溶劑所製成的透明木透光率差異。

溶劑	甲醇	乙醇	異丙醇	丙酮	乙酸乙酯	乙醚
透明木成品						
透明度						
照度值	49.4*100	44.3*100	34.8*100	24.2*100	32.6*100	13.4*100
透光	67.4%	60.4%	47.5%	33.0%	4.4%	1.8%

#### (三)實驗討論：

- 浸泡醇類(甲醇、乙醇、異丙醇)的透光率>丙酮>乙酸乙酯>乙醚，這是因為木片中的木質素大都為**聚酚類高分子**，本身為**極性及易生氫鍵的特性**對於醇類這種極性質子性溶劑溶解反應相當有利，次佳的為屬於極性非質子性溶劑的丙酮，而對於屬於非極性溶劑的乙酸乙酯與乙醚溶解反應的效果最差。
- 透光率以**甲醇>乙醇>異丙醇**，因為甲醇分子體積最小，易進出纖維素間溶出更多木質素；相反的異丙醇體積最大，造成進出纖維困難，溶出的木質素較少。
- 因 25°C 乙醚的蒸氣壓與汽化速度遠大於乙醇，且分子之間作用力小，抽真空時產生的微小氣泡易卡在纖維素間破壞木材結構使呈白色海綿狀，樹脂層也有大量微小氣泡使整體透明度下降；而乙醇汽化的氣泡較大、不殘留於樹脂表面使整體透明度較高。



▲木質素結構



▲乙醚抽真空



▲乙醇抽真空

### 五、【實驗 2-2】不同溶劑混和比例對製作透明木之影響

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/濃度/體積/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 溶劑濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 環氧樹脂體積/溫度/硬化時間 6. 抽真空：(1)氣壓：接近 0 帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同溶劑混和比例	浸泡不同溶劑混和比例所製成的透明木透光率差異

- 控制變因：以極性質子性的乙醇及極性非質子性的丙酮來做為混和溶劑種類。
- 操縱變因：將乙醇和丙酮分別以 4:0、3:1、2:2、1:3 及 0:4 的比例製成四種混和溶劑來測量它們所造成的透明木差異。

比例	4:0	3:1	2:2	1:3	0:4
透明木成品					
透明度					
照度值	34.1*100流明	35.2*100流明	33.4*100流明	28.9*100流明	24.2*100流明
透光率	41.1%	42.4%	40.3%	34.9%	29.2%

#### (三)實驗討論：

- 由實驗結果我們發現將乙醇和丙酮兩種溶劑依不同比例混和會影響洗去木片中殘缺木質素的效果，雖然由實驗 2-1 中我們知道純乙醇對木質素溶解效果比純丙酮好，但成品的透明度卻以**乙醇：丙酮=3:1 最好**>4:0>2:2>1:3>0:4。
- 這是因為我們實驗中都是以過量的溶劑來洗總體積很小的木片，故在乙醇：丙酮=3:1 與 4:0 這兩種比例中的乙醇量都是過量溶劑，足以將木片中易被極性質子性溶劑溶解的木質素部分洗出，但**乙醇：丙酮=3:1 的混和比例多了一份丙酮**可以對木片中易被極性非質子性溶劑溶解的部分做更多的洗滌，造成整體透明度更勝純乙醇組，這也是為什麼會有文獻建議此兩種溶劑混合浸泡的原因。
- 乙醇：丙酮=2:2 組雖然兩種溶劑都有，但在相同時間內的洗滌效果卻較差，這是因為木片中的主要木質素結構仍以極性及易生氫鍵的聚酚類高分子為主，故如乙醇的基本量不夠會造成整體的洗滌速度與效果不佳的現象，因此在乙醇：丙酮=1:3 當溶劑組的洗滌效果才會明顯更差，故我們建議後續讀者如要做以和我們類似比例配方的透明木時以乙醇：丙酮=3:1 當有限時間內的溶劑洗滌效果會更佳。

### 六、【實驗 3-1】不同種類的填充物對製作透明木之影響

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm <sup>3</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/濃度/體積/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 乙醇濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 抽真空：(1)氣壓：接近 0 帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	不同填充物	不同填充物所製成的透明木透光率差異

- 操縱變因：我們想知道不同填充物所製成的透明木差異，故我們分別使用以下物質作為填充物：(1)空氣 (2)乙醇 (3)水 (4)環氧樹脂 (5)PMMA (聚甲基丙烯酸甲酯)→A 劑為甲基丙烯酸甲酯，B 劑為偶氮二異丁腈(AIBN)，並以每 50mlA 劑+0.141gB 劑的混合比例加熱至 75°C 開始聚合成型，最後以原木片當對照組。

#### (二)實驗結果：

填充物	充滿木質素的原木	空氣	水	乙醇	環氧樹脂	PMMA
透明木成品						
透明度						
照度值	39*100	47.5*100	21.4*100	26.6*100	50.8*100	4.7*100
透光率	0.54%	0.66%	29.80%	37.04%	70.75%	7.22%

#### (三)實驗討論：

- 使用折射率與纖維素最為相近的**環氧樹脂**做為填充物透光率最好，接著為填充乙醇>水>PMMA>空氣>原木。若填充水，則**環氧樹脂的胺類固化劑遇水形成的白色混和物**會使透光率變差；以折射率與纖維素相差最大的空氣作為填充物時，木片的纖維管束因失去填充物的支撐造成**結構崩潰萎縮**，最終將纖維管內的空氣擠出導致環氧樹脂內木片周圍出現大量微小氣泡使整體透光率極差。
- 相較於其他填充物，使用預聚合 15 分鐘的 PMMA 製作出的透明木透光率很差，這是因為此時已形成不少體積相當大的聚合物使整體**呈現非常黏稠的狀態**，在抽真空第二、三次後便開始部分凝固成型，造成氣體無法離開木片且填充物也難以填入纖維管縫隙中，導致整體抽真空交換填充 PMMA 的程度大為下降，故烘烤時的高溫環境才會逼使殘餘在木片中的乙醇繼續汽化，造成木片偏白不透明、PMMA 透明層累積大量氣泡的結果光率極差的結果。

## 七、【實驗 3-2】填充物的預聚合時間長短所造成的透明木差異

### (一)變因

控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：3*3*0.1 cm 的飛機木 2. 去木質素溶液種類/濃度/體積/溫度/反應時間 3. 雙氧水濃度/體積/溫度/漂白時間 4. 溶劑濃度/體積/溫度/浸泡時間 5. 填充物種類(PMMA)/體積/烘烤溫度 6. 抽真空：(1)氣壓：接近 0 帕的真空狀態 (2)每次抽真空/靜置的時間與次數	PMMA 的預聚合時間長短	不同的 PMMA 預聚合時間所製成透明木的透光率差異

1. 操縱變因：本實驗分別加熱預聚合 5、10、15 分鐘後馬上將含 PMMA 的容器放入冰水中降溫終止聚合反應，最後分別填入木片中並觀察最後形成的透明木差異。

### (二)實驗結果：

時間	預聚合5分鐘PMMA	預聚合10分鐘PMMA	預聚合15分鐘PMMA
透明木成品			
透明度			
照度值	19.6*100流明	15.5*100流明	4.7*100流明
透光率	29.63%	23.40%	7.22%

### (三)實驗討論：

- 實驗結果發現 PMMA 不同預聚合時間製成的成品的透光率由高到低分別是 5>10>15 分鐘，這是因為預聚合 15 分鐘再填入木頭時已形成不少體積相當大的聚合物並使整體呈現非常黏稠的狀態，因此在抽真空時會造成氣體離開木片及填入纖維管縫隙的困難，導致整體抽真空交換填 PMMA 的程度大為下降，所以最終烘烤後才會呈現木片偏白、PMMA 透明層累積大量氣泡的結果。
- 相反的**預聚合 5 分鐘便填入木頭**，此時 PMMA 分子體積較小而不過度黏稠，較易抽真空與填纖維管縫隙，整體抽真空交換填 PMMA 的程度大，最終烘烤時也有達反應溫度將沒反應完的 AB 劑聚合成 PMMA，所以最終透明木成品成功率高透明度也較高。

## 八、【實驗四】製作不同厚度的透明木

### (一)變因：

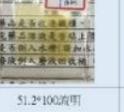
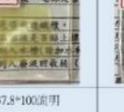
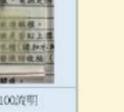
控制變因	操縱變因	應變變因
1. 木材：面積 3*3 cm <sup>2</sup> 的飛機木 2. 去木質素溶液、雙氧水、溶劑、環氧樹脂的種類/濃度/溫度/體積/反應時間 3. 抽真空：(1)氣壓：接近 0 帕的真空狀態 (2)抽取靜置時間與次數	不同厚度的木片	不同厚度的透明木成功率與特性差異

控制變因：綜合前面實驗 1-1~3-2 的結論，我們將各實驗各變因的最優解方法選出來重新設計本實驗方法，試著製作更厚的透明木。

### (二)實驗步驟

- 將厚度 1、2、3mm 的飛機木各裁出 4 片面積 3\*3cm 的木片。
- 配置 2.5M 的氫氧化鈉及 0.8M 的亞硫酸鈉作去木質素溶液後將木片浸入，再以恆溫槽加熱至 70°C 浸泡 7 小時。
- 取出木片浸泡於 2 杯 80°C 的熱水各洗滌 5 分鐘，再將其浸泡在加熱至 70°C 的 35% 雙氧水中靜置漂白 7 小時。
- 把漂白後的木片浸泡於乙醇：丙酮=3：1 的混合溶劑中 48 小時。
- 取出木片放入裝有環氧樹脂的矽膠模內，放入真空裝置抽真空 20 分鐘後靜置 20 分鐘，重複 3 次。
- 取出矽膠模並靜置 48 小時等待成形，完成脫模後取出測其性質。

### (三)實驗結果：

厚度	1mm	2mm	3mm
透明木成品			
透明度			
照度值	51.2*100流明	37.8*100流明	32.0*100流明
透光率	59.7%	44.1%	37.3%
隔熱率	7.2%	9.3%	21.7%
光穩定度	33.5*1流明	24.8*1流明	18.6*1流明

### (四)實驗討論：

實驗結果發現我們將各變因的最優解方法選出來重新設計的實驗方法可以成功的將木片厚度 2 與 3mm 製成透明木，證明並非只有 1mm 厚度才能成功，且相較於 1mm 厚度木頭，較厚的透明木製成之後會有較強的韌性與較好的隔熱性，雖然透光率與光霧度跟著降低但可以根據業者不同需求去設計出不同方向的環保建築材料，為綠建築的應用增加更多可變性。

## 陸、結論

### 一、【實驗 1-1】不同濃度去木質素溶液對製作透明木之影響

- 亞硫酸鹽會與木質素發生磺化反應，使木質素溶出，故在此配方中(固定 NaOH=2.5M)加入的亞硫酸鈉(0.1~0.8M)愈多，透明木的透光率越佳。
- 氫氧化鈉的 OH<sup>-</sup> 會與木質素上的碳鏈進行親核反應導致木質素上的鏈結斷裂而逐漸溶出，故濃度越高，溶出木質素的效果愈好，但 5M 的氫氧化鈉濃度過高，反而阻礙亞硫酸鈉的作用，導致成品透明度降低。

### 二、【實驗 1-2】不同去木質素溶液溫度對製作透明木之影響

- 溫度越高，粒子有較高的能量與速度去反應，且高溫的鹼性溶液可讓木片中的細胞壁膨潤變大，使藥劑的滲透加快，故木頭的透明度越好。
- 95°C 組木片雖因高溫而使去木質素反應變快但也造成過多的剝皮、降解反應，使整體木片過於薄弱，不利於後續製作透明木的加工與應用。

- 亞硫酸鈉可以抑制剝皮反應使整體結構穩定，故當實驗 1-1 的氫氧化鈉濃度過高或亞硫酸鈉濃度過低時，木片的剝皮現象明顯而有形變的狀況。

### 三、【實驗 1-3】不同藥劑類型的去木質素溶液對製作透明木之影響

亞氯酸法對木質素反應的選擇性強，對纖維素和半纖維素破壞少，所製成的透明木較厚實、有較佳的熱輻射隔絕吸收率，但同時也造成了木片的透光率較差，使測出來的透光率與光霧性都較低；鹼性亞硫酸鈉法有兩種藥劑可以溶木質素及剝皮反應使透明木透光率較佳及光霧性較好。

### 四、【實驗 2-1】不同溶劑種類對製作透明木之影響

- 木質素有極性和氫鍵的特性，故醇類等極性質子性溶劑溶解效果最好極性非質子性溶劑的丙酮次佳，非極性溶劑的乙酸乙酯與乙醚則最差。
- 醇類中以分子體積結構最小的甲醇效果最好，因為其容易進出木片中的纖維素間溶出更多木質素；分子體積最大的異丙醇溶解效果則最差。
- 因 25°C 乙醚的蒸氣壓與汽化速度遠大於乙醇，且分子之間作用力小，抽真空時產生的微小氣泡易卡在纖維素間破壞木材結構使呈白色海綿狀，樹脂層也有大量微小氣泡使整體透明度下降；而乙醇汽化的氣泡較大、不殘留於樹脂表面使整體透明度較高。

### 五、【實驗 2-2】不同溶劑混和比例對製作透明木之影響

- 乙醇和丙酮混和後對洗去殘缺木質素效果 3：1 > 4：0 > 2：2 > 1：3 > 0：4。
- 因為乙醇：丙酮=3：1 與 4：0 的乙醇量都是過量溶劑，但 3：1 的混和比例多了一份丙酮可以對木片中易被極性非質子性溶劑溶解的部分做更多的洗滌，使透明度更佳。
- 在 2：2 組雖兩種溶劑都有，但木片中的木質素結構仍以極性及易生氫鍵的聚酚類高分子為主，故乙醇基本量不夠造成洗滌速度與效果不佳。

### 六、【實驗三】探討不同填充物對透明木的影響

- 使用折射率與纖維素最為相近的環氧樹脂做為填充物透光率最好，接著為填充乙醇>水>PMMA>空氣>原木。若填充水，則環氧樹脂的胺類固化劑遇水形成的白色混和物會使透光率變差；以折射率與纖維素相差最大的空氣作為填充物時，木片的纖維管束因失去填充物的支撐造成結構崩潰萎縮，最終將纖維管內的空氣擠出導致環氧樹脂內木片周圍出現大量微小氣泡使整體透光率極差。
- 填充 PMMA 組透光率較低、製程較繁瑣且揮發率較高使成品體積較小，但最終成品較硬且固化時間較短可節省等待時間(4 小時)。
- 由以上結論我們建議業者在設計製程時可根據各自不同的透明木使用需求去參考以上特性來決定填入哪種聚合物以利後續的加工使用，如環氧樹脂的高透光率可應用於太陽能板的製作，PMMA 的高硬度可使用於綠建築家具的使用等。

## 七、總結

- 如果要製作更厚或透光率高的透明木我們建議可以：
  - 配置適當比例的“高濃度”+“鹼性亞硫酸鈉法”當去木質素溶液
  - 以溫度較高反應速度較快但不使木片變形的 70°C 作標準浸泡溫度
  - 乙醇：丙酮=3：1 混和當溶劑洗去殘缺木質素
  - 環氧樹脂當最後填充物
- 業者可參照所需綠建築條件決定透明木製作配方以利後續加工使用：
  - 鹼性亞硫酸鈉法成品透光、光霧佳適合製太陽能板獲得更多光量及讓光停留更多時間增加發電效率；亞氯酸法製成的透明木有較佳的強度、韌度及隔熱性，適合製作綠建築材料如窗戶、霧面隔板或是家具零件等。
  - 填環氧樹脂透光率較高可應用於太陽能板的製作、製程簡單且穩定，但成品較軟且需較長固化時間(48 小時)；填 PMMA 透光率較低、製程較繁瑣且揮發率較高使成品體積較小，但最終成品較硬可使用於綠建築家具且固化時間較短可節省等待時間(4 小時)。
  - 較厚的透明木製有較強的韌性與隔熱性，雖透光與光霧跟著降低但可根據不同需求設計環保建材，為綠建築的應用增加更多可變性。

## 柒、參考資料

- 郭明智(2018)。全組成分離木質素產品應用開發。行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告。
- Herbert Lien (2021)。最低成本的透明木材實驗。YouTube。
- 沃特(2022)。我把木頭變透明了。YouTube。
- 陳稚澧、賴又瑄、彭雋皓、陳相佐、郭子琦、李若瑄(2022)。隱形的木材-透明木材的製作、性質與應用。科展第 62 屆。
- 張育維(2018)。稻稈生質精煉殘餘物以有機溶劑與蘇打法萃取出木質素之研究。元智大學 化學工程與材料科學系 碩士論文。
- 黃昀蔡、蔡依軒、李宸宇(2022)。生入鹼出一探討不同變因對鹼性蛋白凝膠特性的影響。科展第 62 屆。
- 蘇裕昌(2005)。硫酸鹽製漿的基礎。漿紙技術雜誌，第九卷，第一期。
- 徐守才(2006)。鹼性亞硫酸鈉法草漿蒸餾廢液資源化綜合利用技術。中國科技論文與引文資料庫。
- 霧度計的相關原理說明及規範。志宸科技。
- 徐守才(2006)。鹼性亞硫酸鈉法草漿少氯漂白及中段水全封閉回用技術
- NileRed (2021)。Making transparent wood。YouTube。