

# 新竹市第 44 屆國民中小學科學展覽會

## 作品說明書

科別	生活與應用科學(三)
組別	國小組
作品名稱	「植」染重生：再生紙品質優化及植物染色適性之研究
關鍵字	<u>再生紙</u> 、 <u>天然色素</u> 、 <u>染紙</u>

# 目錄

<u>作品說明書</u>	1
<u>目錄</u>	2
<u>摘要</u>	3
<u>壹、前言</u>	3
<u>一、</u>	錯誤! 尚未定義書籤。
<u>二、</u>	3
<u>三、</u>	3
<u>貳、</u>	錯誤! 尚未定義書籤。
<u>一、</u>	4
<u>二、</u>	4
<u>參、</u>	4
<u>一、</u>	4
<u>二、</u>	5
<u>研究一:不同廢紙種類之回收紙漿特性分析</u>	5
<u>研究二:影印紙漿製成再生紙之產率與物理特性分析實驗</u>	6
<u>研究三:廢紙回收再生之物理性質分析與比較實驗</u>	6
<u>研究四:添加天然黏合劑(玉米粉與糯米粉)對再生紙物理特性影響</u>	7
<u>研究五:探討熱處理技術在廢紙脫墨與脫膜處理中對再生紙潔白度提升</u>	8
<u>研究六:校園四季植物色素之水萃與醇萃法對影印再生紙染色效果</u>	9
<u>研究七:天然植物色素染色再生紙之立體塑形工藝:糯米漿與玉米漿黏合效果之</u>	
<u>比較研究</u>	10
<u>肆、</u>	11
<u>研究一:不同廢紙種類之回收紙漿特性分析</u>	12
<u>研究二:影印紙漿製成再生紙之產率與物理特性分析實驗</u>	13
<u>研究三:廢紙回收再生之物理性質分析與比較實驗</u>	16
<u>研究四:添加天然黏合劑(玉米粉與糯米粉)對再生紙物理特性影響</u>	21
<u>研究五:探討熱處理技術在廢紙脫墨與脫膜處理中對再生紙潔白度提升</u>	23
<u>研究六:校園四季植物色素之水萃與醇萃法對影印再生紙染色效果</u>	25
<u>研究七:天然植物色素染色再生紙之立體塑形工藝:糯米漿與玉米漿黏合效果之</u>	
<u>比較研究</u>	25
<u>伍、</u>	錯誤! 尚未定義書籤。
<u>陸、</u>	錯誤! 尚未定義書籤。

# 壹、摘要

本研究旨在優化校園廢棄影印紙之再生工藝，並結合四季植物色素開發文創立體紙藝。研究發現，紙漿濃度與投入重量是決定再生紙品質的關鍵因子：實驗證實隨投入量增加（100g 至 500g），纖維交織密度隨之提升，抗拉強度可由 244g 大幅增至 1907g。為解決再生紙質地粗糙問題，首先透過熱處理脫墨純化纖維，並首創加入 2% 糯米粉漿作為天然黏合劑，不僅使抗拉強度突破 2612g，更賦予紙漿極佳的抗重力塑形能力。最後利用校園四季植物進行水草與噴染實驗，透過 RGB 量化分析色票，成功建立一套從廢紙純化、強度補強到立體染色應用的完整綠色工藝流程。

# 貳、前言

## 一、研究動機

我們參與教育大學再生紙線上製作活動時，發現紙漿中混有黑色微粒與塑膠成分，成品常出現明顯塑膠條，影響美觀與品質，且做出的再生紙無法控制。為改善此問題，想嘗試優化再生紙製程，提升紙張品質，並進一步結合校園天然植物色素進行染色應用，期望製作兼具環保、美觀與實用性的再生紙作品，提升再生資源之價值。

## 二、研究目的

- (1) 探討不同回收紙材料對再生紙品質的影響。
- (2) 分析紙漿製作條件對再生紙品質之影響。
- (3) 比較不同植物染料在再生紙上的染色效果。
- (4) 探討媒染劑與紙材對染色適性的影響。
- (5) 建立再生紙品質與植物染色效果之最佳化組合。

## 三、文獻探討：

- (一) 再生紙是將廢紙重新打漿、抄製後形成新紙，其品質會受到原料紙種類、紙漿濃度、紙漿重量、纖維長短與添加物等因素影響。
- (二) 纖維結合力與氫鍵理論：紙張強度取決於纖維間的接觸面積。紙漿濃度越高，單位面積內形成的氫鍵（Hydrogen Bonding）越密集。
- (三) 影印紙脫墨原理：碳粉主要由塑膠樹脂與碳黑組成，加熱可使樹脂軟化，使其與纖維分離。
- (四) 澱粉漿的黏合作用：糯米澱粉的支鏈澱粉比例高，糊化後能填充纖維孔隙，增加物理摩擦力與化學結合力。
- (五) 天然色素與顯色：植物色素（如花青素、藏紅花素）在纖維上的附著受媒染劑與紙張孔隙率影響。
- (六) 媒染劑的原理與作用（明礬、醋酸鐵、醋酸銅）

天然植物色素（如花青素、類黃酮）對纖維的附著力通常較弱，容易隨水流失或受光褪色。媒染劑的作用是在色素分子與紙張纖維之間架起一座「化學橋樑」。

- 明礬：最常用的中性媒染劑，無毒且發色穩定。鋁離子能與色素形成穩定的絡合物，通常能

維持植物原有的鮮艷色彩，具有「提亮」效果。

- **醋酸鐵**：屬於「暗色系」媒染劑。鐵離子會與植物中的單寧酸產生化學反應，使顏色趨向深灰色、墨綠色或黑色，能顯著提升色彩的耐曬性。
- **醋酸銅**：能使顏色產生綠色調偏移。銅離子常被用來固定綠色系植物（如欖仁葉、蝶豆花），能使色澤變得更加沉穩且具備一定的抗菌防腐效果。

#### （七） 色彩分析系統：RGB 與 HSB

在科學研究中，為了避免人類肉眼觀察的主觀誤差，必須使用數位化指標來定義顏色。

- **RGB 顏色模型(Red, Green, Blue)**：
- **定義**：基於加色法原理，將紅、綠、藍三原色以 0~255 的數值進行組合。
- **使用目的**：這屬於「設備導向」的數據，主要用於**精確紀錄**再生紙表面的原始色彩反射率。例如，山黃梔的高 R 與 G 值證實了其高飽和黃色的物理特性。

#### （八） HSB 顏色模型(Hue, Saturation, Brightness)：

**定義**：

- **H(色相)**：顏色的種類（如紅、黃、藍），以 0°~360° 表示。
- **S(飽和度)**：顏色的純度，數值愈高愈鮮艷。
- **B(亮度)**：顏色的明暗程度。

## 參、研究設備及器材

### 一、 實驗器材：

- |          |          |           |           |          |         |
|----------|----------|-----------|-----------|----------|---------|
| 1. 電磁爐   | 2. 數位游標尺 | 3. 料理機    | 4. 燒杯     | 5. 紙抄框   | 6. 濾紙   |
| 7. 塑膠培養皿 | 8. 塑膠盆   | 9. 小攝影棚   | 10. 電子秤   | 11. PH 計 | 12. 吸管  |
| 13. 碼錶   | 14. 電熨斗  | 15. 濁度計   | 16. 低溫烘培箱 | 17. 電磁爐  | 18. 回收紙 |
| 19. 玻棒   | 20. 顯微鏡  | 21. 量筒    | 22. 不鏽鋼鍋  | 23. 木課桌  | 24. 鐵夾  |
| 25. 砝碼   | 26. 噴嘴瓶  | 27. 電動攪拌棒 |           |          |         |

### 二、 實驗藥品及材料：

- |       |        |        |         |           |         |
|-------|--------|--------|---------|-----------|---------|
| 1. 明礬 | 2. 醋酸鐵 | 3. 醋酸銅 | 4. 糯米粉  | 5. 玉米粉    | 6. 檸檬酸  |
| 7. 酒精 | 8. 杜鵑花 | 9. 蝶豆花 | 10. 山黃梔 | 11. 75%酒精 | 12. 欖仁葉 |

# 肆、研究過程或方法

## 一、研究架構








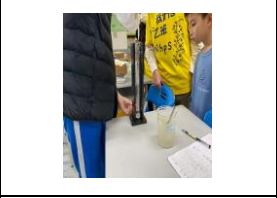




## 二、研究方法

### 研究一：不同廢紙種類之回收紙漿特性分析

- (一) 內容：主要針對 9 種常見廢紙類別進行回收紙漿的特性分析。透過長時間的浸泡實驗，觀察紙張在不同天數（第 2、4、8、10 天）下的物理與化學變化。
- 實驗樣本：影印紙、藍影印紙、牛皮紙、瓦楞紙、牛奶盒、課本、海報、報紙、飲料杯。
  - 測試項目：物理變化：浸泡後的紙重、紙張軟化程度、吸水倍數。
  - 化學與光學變化：浸泡液顏色、透視度（濁度）、pH 值。
  - 產出分析：浸泡 10 天後的過濾纖維重量與纖維微觀型態。
- (二) 實驗設計：實驗採用對照觀測法，以固定的紙張重量（100g）作為基準，觀察時間因子對不同材質紙張的影響。
- 操作變因：廢紙種類（共 9 種材質）。
  - 應變變因：液體特性：pH 值、透視度、顏色變化。
  - 紙漿特性：吸水後的重量增加量、纖維取得重量。
  - 控制變因：原始碎紙重量（均為 100g）、觀測時間點（2、4、8、10 天）、浸泡介面（水）。
- (三) 實驗步驟：
1. 樣本製備與初始配置準備 9 種不同的廢紙樣本，用碎紙機分別裁切為碎紙狀。稱取每種碎紙各 100g，將各樣本分別放入裝有 2000ml（浸泡水）的容器中開始紀錄。
  2. 定期觀測與數據採集（第 2、4、8 天）
    - 觀察顏色與透視度：記錄浸泡液的顏色（如淡灰、淡咖啡等）並使用透視度計測量數值。
    - 測量 pH 值：定期監測液體酸鹼度，觀察是否有腐敗或化學物質釋出導致的 pH 波動。
    - 秤量吸水紙重：取出濕紙團秤重，觀察隨時間增加的含水量變化。
    - 評估軟化度：以觸感紀錄紙張纖維軟化程度（使用 ○、△、× 等符號分級）。
  3. 最終分析與纖維提取（第 10 天），浸泡完成的紙漿加水 2L，打成紙漿，製備成 5% 紙漿。

- 計算吸水倍數：於第 10 天秤量最後紙重，並計算吸水倍數（最終紙重÷100g）。
  - 提取纖維：將浸泡完成的紙漿進行過濾，分離並秤量過濾纖維重。
- (四) 顯微鑑定：將提取出的各類纖維置於顯微鏡下觀察並拍照，紀錄其纖維交織的微觀型態。
- (五) 實驗照片：






				
回收課本	回收牛奶盒	碎紙	收集 9 種回收紙	100g 紙加 2L 水
				
分離泡水紙	透視度檢測液	溶液透視度測試	過濾溶入水紙纖維	用平板加顯微鏡

## 研究二:影印紙漿製成再生紙之產率與物理特性分析實驗

- (一) 內容:將「影印紙」與「藍色影印紙」的回收紙漿，依照不同的紙漿投入重量（100g 至 600g）重新抄製成再生紙，並深入分析成品的品質。
- (二) 實驗設計：量測指標：
- 重量效率：乾紙重量、總生成紙重量、餘紙漿回收重量。
  - 結構維度：紙張厚度（四點測量：上、左、右、下）及其平均值。
  - 物理強度：表面光滑度(cm)與抗拉強度。
  - 應用功能：原子筆與鉛筆的書寫好寫度，(使用 ○、△、× 等符號分級)。
- (三) 實驗步驟：
1. 定量抄製：分別稱取 100g 至 600g 的影印紙漿，利用抄紙設備將紙漿均勻分散，並依序抄製出該重量下可生成的張數（例如 600g 白色影印紙可抄製出 6 張再生紙）。
  2. 乾燥與秤重：利用低溫烘培箱將再生紙完全乾燥後，量測每張「乾紙重量」。加總成紙總重，並收集未成紙的餘紙漿秤重，計算總物料平衡。
  3. 規格精測：
 

使用游標尺測量每張紙的上、左、右、下四個點，並計算平均厚度（mm）以評估紙張均勻度。
  4. 物理性能測試：
    - 製作 30 度斜面測試紙張表面光滑度，以螺絲帽(35g)多遠為依據。
    - 用夾子分別夾住測試紙和桌面以砝碼進行抗拉強度測試，記錄斷裂前的最大受力值。
  5. 書寫體驗評估：
 

分別使用原子筆與鉛筆在不同厚度的再生紙上書寫，觀察有無滲透、斷墨或刮紙現象，並記錄好寫度，使用○、△、× 等符號分級。
- (四) 實驗照片：

				
製造再生紙	製作 30 度斜面測試	游標尺測量紙厚度	抗拉強度測試	好寫度測試

### 研究三:廢紙回收再生之物理性質分析與比較實驗

(一) 內容：本實驗旨在研究多種常見回收紙在重新抄製為再生紙後的品質表現。透過改變紙漿的投入重量，分析不同來源的再生紙在厚度、強度與書寫感上的差異。

分析對象：牛皮紙、瓦楞紙、牛奶盒、課本紙、海報紙飲料紙等。

關鍵測量數據：

- 成紙重量：單張乾紙重、總生成紙重、回收餘漿重。
- 厚度分析：單張紙的四點（上、下、左、右）量測及其平均值。
- 強度指標：抗拉強度與表面光滑度。
- 應用測試：原子筆與鉛筆的書寫好寫度評估，使用 ○、△、× 等符號分級。

(二) 實驗設計：本實驗採用多因子對照實驗設計，比較不同材質與不同投入量對產出的影響。

- 操作變因：回收紙種類和紙漿投入重量：200g、400g、600g。
- 應變變因：再生紙的平均厚度、抗拉強度、光滑度。
- 控制變因：抄紙程序、乾燥條件、厚度量測位置、書寫測試工具。
- 對照基準：各類紙張的「原紙」數據（作為再生紙品質還原度的比較基準）。

(三) 實驗步驟：

1. 分組配置與抄製：

- A. 依據紙漿種類分組（牛皮紙組、瓦楞紙組等），並按設定重量（200g/400g/600g）精確取樣。
- B. 進行重複抄紙，依序產出第一張、第二張至最後一張再生紙，直到紙漿耗盡。

2. 成品乾燥與初步測量：

- A. 待再生紙完全乾燥後，秤量每一張的「乾紙重量」。
- B. 加總各組的生成紙總重量，並回收剩餘紙漿秤重，計算總重量平衡。

3. 規格精測（厚度與均勻度）：

- A. 使用數位游標尺分別測量每張再生紙的「上、左、右、下」四個方位。
- B. 計算四點平均厚度，並與原紙厚度進行比對，觀察再生過程中的厚度變化規律。


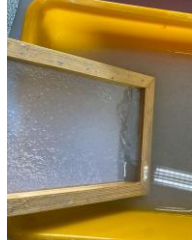



4. 物理強度測試：

- A. 測量再生紙的表面光滑度（cm）。
- B. 進行抗拉強度測試，記錄各張紙在受力下的韌性表現。

5. 功能性書寫測試：

使用原子筆與鉛筆在不同產出順序的再生紙上書寫，使用 ○、△、× 等符號分級。

(四) 實驗照片：

				
攪拌棒打紙漿 5%	45 度放入紙漿盒	再生紙水利乾	用篩網回收紙漿	測紙張光滑度

## 研究四：添加天然黏合劑（玉米粉與糯米粉）對再生紙物理特性影響

(一) 內容：本實驗研究在固定的 200g 紙漿中，分別加入不同濃度的 2% 玉米粉溶液或 2% 糯米粉溶液（添加量分別為 20g、40g、60g、80g、100g），觀察其對成品再生紙各項物理指標的提升效果。

- 實驗對象：玉米紙（添加玉米粉漿）、糯米紙（添加糯米粉漿）。
- 物理特性量測：
- 重量與產率：單張乾紙重、總生成紙重量、回收餘漿重。
- 結構厚度：測量紙張上、左、右、下四點厚度並計算平均值。
- 強度與表面特性：表面光滑度(cm)、抗拉強度(g)。
- 功能測試：吸水率（待測）、原子筆與鉛筆書寫的好寫度評估。

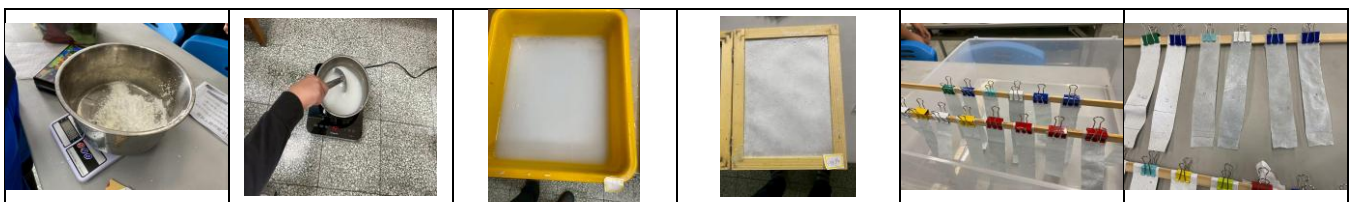
(二) 實驗設計：本實驗採用變因控制法，比較不同種類與數量的粉漿對再生紙品質的改進程度。

- 操作變因：粉漿種類：2% 玉米粉漿、2% 糯米粉漿；添加重量：20g、40g、60g、80g、100g。
- 應變變因：再生紙的平均厚度、抗拉強度、光滑度、總生成重量。
- 控制變因：原始紙漿重量（200g）、粉漿濃度（2%）、乾燥方式、厚度測量位置。

(三) 實驗步驟：

1. 調配黏合粉漿：配製濃度為 2% 的玉米粉溶液與糯米粉溶液。
2. 混合與抄製：秤取 200g 的影印紙漿，依序加入設定重量（20g、40g... 至 100g）的玉米粉漿或糯米粉漿，充分攪拌均勻。
3. 進行抄紙程序，每組樣本依序抄製出第 1 張、第 2 張及第 3 張再生紙。
4. 乾燥與重量分析：將成紙完全乾燥後，秤量每張「乾紙重量」，統計總生成紙重與剩餘回收紙漿重，確認物料平衡狀況。
5. 物理性質檢測：
  - 厚度量測：使用厚度計對每張紙的「上、左、右、下」四點進行檢測，計算平均厚度。
  - 表面與強度：測試紙張表面光滑度，並利用儀器測量抗拉強度
6. 應用效能評估：
  - 書寫測試：以原子筆與鉛筆測試書寫流暢度與紙張耐損性，使用○、△、× 等符號分級。
  - 吸水率測試：將紙張裁切固定尺寸(3 15)，浸入水中特定時間後計算水升高度。

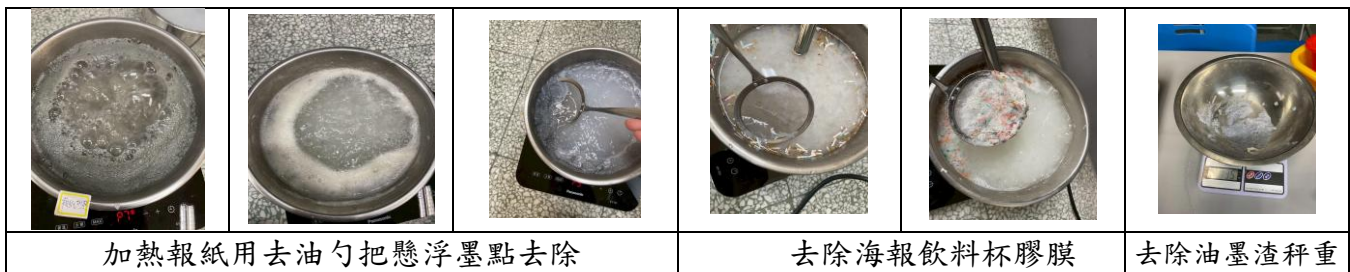
(四) 實驗照片：



配製 2%的玉米粉與糯米粉溶液	200g 影印紙漿加 20g 的玉米粉漿	吸水率測試	加 100g 玉米粉漿，浸入水中，水升高度 0
-----------------	----------------------	-------	-------------------------

## 研究五:探討熱處理技術在廢紙脫墨與脫膜處理中對再生紙潔白度提升

- (一) 內容：本實驗探討利用加熱法處理各類具有特殊塗層或油墨的廢紙（如影印紙、課本、報紙、海報、飲料杯），以去除碳粉、油墨及表面膠膜。
- 脫墨對象：去除影印紙碳粉、課本與報紙的印刷油墨。
  - 脫膜對象：利用受熱性質差異，剝離海報表面的塑膠膜與飲料杯內外的防水膠膜。
  - 預期效果：減少再生紙表面的黑點與雜質，顯著提升紙張的視覺潔白度與纖維純淨度。
- (二) 實驗設計：實驗透過「加熱處理」，觀察不同廢紙在處理前後的品質對比。
- 操作變因：
  - 加熱溫度與時間：不同材質膠膜軟化所需的熱能程度，加熱至沸騰，再繼續加熱 10 分鐘。
  - 廢紙種類：含碳粉影印紙、印刷油墨課本/報紙、含膠膜海報、防水層飲料罐。
  - 應變變因：視覺指標：潔白度、黑點（碳粉/油墨）殘留率。
- (三) 實驗步驟：
1. 影印紙/課本/報紙組：將碎紙紙漿 400g 加熱，利用高溫破壞碳粉與油墨對纖維的附著力，隨後以去油勺把懸浮墨點去除。
  2. 海報/飲料杯組：將碎紙紙將 400g 加熱，待表面膠膜因受熱軟化或失去黏性後，以去油勺把懸浮膠膜去除。
  3. 依序抄製出第 1 張至第 4 張再生紙，並進行乾燥處理。
  4. 利用顯微鏡觀察成品表面的潔白度。
- (四) 實驗照片：



## 研究六:校園四季植物色素之水萃與醇萃法對影印再生紙染色效果

- (一) 內容：本實驗旨在利用校園內的四季植物作為天然染料（春天：杜鵑花、夏天：蝶豆花、秋天：山黃梔、冬天：欖仁），探討兩種不同的色素萃取與染色工藝對再生紙品質的影響：
- 水萃加熱法（染漿）：將 500g 植物加入 2000ml 水加熱沸騰，濾渣萃取色素後，加入 400g 經加熱處理的影印紙漿進行混合染色。
  - 醇萃冷法（噴染）：利用酒精與四種植物分別以果汁機打碎過濾，得到酒精色素染劑，隨後直接噴在已製成的各種再生紙張上，並噴上媒染劑，觀察顏色的分佈情形。
  - 影印紙白色紙漿和藍色紙漿各 200g，製成 400g 的再生紙。
  - 評估指標：再生紙的顏色飽和度（RGB 值）、顏色分佈均勻度、紙張厚度與重量。
- (二) 實驗設計：本實驗採用多因子對照設計，比較不同萃取方式與植物種類對染色結果的差異。
- 操作變因：

色素萃取方式：高溫水萃取法（加熱染漿）vs. 常溫酒精萃取法（冷噴染）。  
植物染料種類：杜鵑花（春）、蝶豆花（夏）、山黃梔（秋）、欖仁（冬）。

- 應變變因：  
顏色表現：再生紙表面的 RGB 顏色數值、顏色分佈均勻度。  
紙張性質：乾紙重量、平均厚度（mm）。
- 控制變因：  
原料量：水萃法固定為 500g 植物/2000ml 水/400g 紙漿。  
紙漿前處理：影印紙漿需經加熱處理（研究五所述，去碳粉和油墨純化纖維）。  
顯微鏡觀察條件：使用相同放大倍率觀察表面染色。

### （三）實驗步驟：

#### 1. 第一階段：天然色素萃取與製備

- 水萃取法（加熱）：準備已進行「加熱去碳粉」處理後影印紙漿每次使用 400g。在分別稱取各 500g 的四季植物（杜鵑花、蝶豆花、山黃梔、欖仁）。將各組植物加入 2000ml 的水中，加熱至沸騰，持續煮沸一段時間（如 30 分鐘）以充分萃取色素。進行「濾渣」，收集純淨的植物色素液，並量測其 pH 值。
- 酒精萃取法（常溫）：秤取適量四季植物，分別與酒精混合。使用果汁機將植物組織與酒精打碎。
- 進行「過濾」，收集高濃度的「酒精色素」液體，量測其 pH 值。存放於密閉瓶中備用。








#### 2. 第二階段：染色與抄紙程序

- 水萃組（染漿）：將製備加熱過的影印紙漿（400g）加入各組「水萃色素液」中，充分攪拌使纖維吸附色素。加熱使纖維結構軟化並強化色素附著，紀錄加熱後的總重量進行抄紙，依序產出第 1 張至第 4 張染色再生紙。過濾收集紙漿，再放進紙漿（400g）量測其 pH 值，進行抄紙，共重複做 3 次，其他三種植物色素依序如此操作
- 醇萃組（噴染）：把研究五加熱處理過的影印紙、課本、報紙、海報的白色再生紙固定，先分別噴媒染劑（明礬、醋酸鐵、漢醋酸銅）乾燥後，再使用噴霧瓶將各組「酒精色素」均勻噴灑於紙張表面，觀察色素在乾燥過程中的顏色轉變。

#### 3. 第三階段：成品檢測與數據採集

- 顏色分析（視覺與 RGB）：
- 視覺觀察：觀察酒精噴染組表面的顏色分佈，紀錄是否有暈染、區塊均勻或「黑點（殘留油墨/植物纖維）」干擾。
- RGB 量化：利用色度計或顯微鏡拍照，結合影像處理軟體量化紙張表面的 R、G、B 數值，比較兩種萃取法對顏色表現的飽和度差異（例如，欖仁葉組可能呈現特定的棕褐色 RGB 值）。
- 微觀結構分析（顯微鏡）：利用顯微鏡觀察紙張表面纖維的染色狀態，紀錄色素是均勻包覆纖維，還是僅附著於表面空隙中。

### （四）實驗照片：

						
杜鵑花打成汁	蝶豆花過濾	山黃梔過濾	打碎欖仁葉	量測 pH 值	量測 pH 值	酒精色素噴染液

## 研究七:天然植物色素染色再生紙之立體塑形工藝：糯米漿與玉米漿黏合效果之比較研究

### (一) 內容：

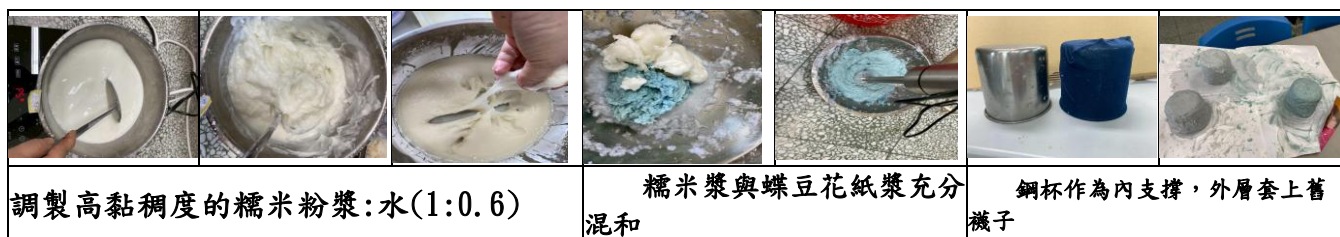
本實驗結合了「天然染色」與「立體成型」技術。首先將加熱純化後的影印紙漿利用校園四季植物色素（杜鵑、蝶豆花、山黃梔、欖仁）進行浸泡染色，接著分別混入高黏稠度的糯米漿與玉米漿作為天然膠結劑。最後，利用鋼杯、碗、漏勺與舊襪組成模具，將黏稠紙漿敷於其上進行立體造形做成盆栽，並透過低溫烘焙技術完成作品。主要觀察：糯米漿與玉米漿對紙漿黏稠度的影響差異，以及立體作品乾燥後的結構強度與顏色呈現。

### (二) 實驗設計：

- 操作變因：黏合劑種類：糯米粉水溶液 vs. 玉米粉水溶液。添加量測試：原定 100g 測試，後優化為 50g 比較（依據黏稠度回饋調整）。
- 應變變因：紙漿黏稠度：觀察何者較易於模具上敷抹且不脫落。成品品質：乾燥後的硬度、收縮程度、四季植物染色的發色狀態。
- 控制變因：紙漿基底：統一使用加熱處理過的影印紙漿 400g。
- 模具規格：使用鋼杯（直 8cm）、碗、漏勺與舊襪組成模具。
- 乾燥條件：統一放入低溫烘烤箱烘乾。

### (三) 實驗步驟：

1. 色素萃取與紙漿前處理
2. 色素準備：將四季植物（杜鵑、蝶豆花、山黃梔、欖仁）依前述水萃法製備出天然色素水溶液。紙漿純化：將影印紙切碎、加熱、打漿，去除碳粉雜質，準備好 400g 熱處理紙漿。
3. 染色與粉漿調製
4. 浸泡染色：將 400g 紙漿放入四季色素水溶液中充分浸泡，待纖維吸飽顏色後過濾取出。
5. 自備粉漿：分別調製高黏稠度的糯米粉漿:水(1:0.6)與玉米(1:3)漿加熱備用。
6. 混和黏合劑：試驗 A 組：取染色紙漿加入 100g 糯米粉水溶液。
7. 試驗 B 組：取染色紙漿加入 100g 玉米粉水溶液。
8. 黏稠度優化：經實驗發現 100g 過於黏稠或比例不符需求，修正為各加入 50g 進行混合，此比例下紙漿手感最適合塑形。
9. 立體造形實作:取鋼杯作為內支撐，外層套上舊襪子，建立具吸水性且易脫模的表面。敷抹塑形：將混入粉漿的染色紙漿，均勻且厚實地敷抹在襪子模具上。觀察糯米紙漿（較黏稠）與玉米紙漿在敷抹過程中的附著力差異。
10. 乾燥與成品完成:將敷好紙漿的模具放入低溫烘烤箱中，以穩定溫度緩慢烘乾，避免高溫導致色澤變質或乾裂。乾燥完成後，從襪模上取下成品。
11. 成果紀錄：拍攝成品照片，紀錄四季顏色的分佈與立體結構的完整性。



# 伍、 研究結果

## 研究一:不同廢紙種類之回收紙漿特性分析

一、 實驗結果:測試結果如下表一。

1. 在所有受測紙種中，瓦楞紙的吸水能力最為顯著，其吸水倍率隨天數急遽上升，第2天即達6.99倍，第10天更達到8.53倍，為全組最高。相對而言，牛奶盒與海報紙的吸水倍率增長緩慢，最終僅約4.2倍左右。
2. 瓦楞紙吸水最重、體積膨脹最大，但其最終的\*\*「過濾纖維重」僅有0.03g，是全組最低。反觀吸水倍率中等的影印紙\*\*，其過濾纖維重高達0.21g，為全組最高。此外，報紙與瓦楞紙的浸泡液透視度最低（最混濁），顯示其纖維在水中極易流失。

表一不同廢紙種類之回收紙漿特性分析表

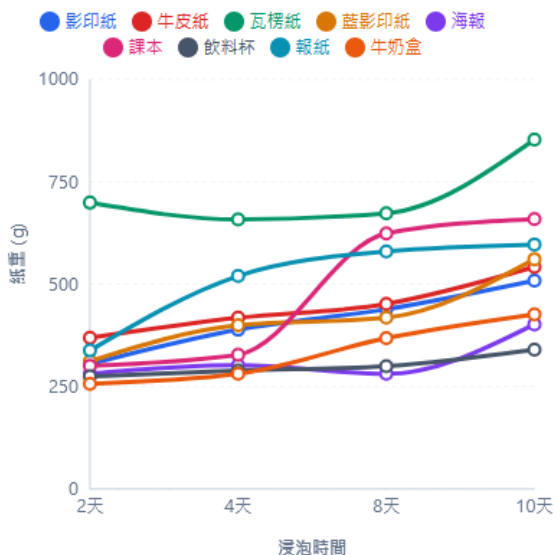
100g 碎紙加 2000ml 水		影印紙	藍影印	牛皮紙	瓦楞紙	牛奶盒	課本	海報	報紙	飲料杯
浸泡水 2 天	浸液色	淡灰	淡藍	淡咖啡	淡咖啡	淡灰色	淡灰	淡黃	淡咖啡	白色
	透視度	17.6	11	>30	11	26.4	16.2	9.5	8	16.5
	pH	7.55	7.58	7.01	6.91	7.08	7.76	7.52	7.56	7.18
	紙重	305	312	369	699	257	301	281	338	275
	紙軟度	○	○	×	×	×	○	×	○	×
第 4 天	顏色	淡灰	淡藍	淡咖啡	淡咖啡	淡灰色	淡灰	淡黃	淡咖啡	白色
	紙重	389	400	418	658	281	328	302	520	289
	紙軟度	○	○	△	△	△	○	×	○	×
第 8 天	顏色	淡灰	淡藍	淡咖啡	淡咖啡	淡灰色	淡灰	淡黃	淡咖啡	白色
	透視度	12.6	11	22.3	10	23.4	14.2	9	6	15.5
	紙重	439	418	452	673	368	624	281	580	300
	紙軟度	○	○	○	○	○	○	×	○	×
浸泡水 10 天	顏色	淡灰	淡藍	土黃	深土黃	淡黃	淡灰	淡黃	灰	土黃
	透視度	8.8	8.6	7.2	5.7	8.7	6.7	6.4	6	6.4
	pH	7.03	7.04	7.01	7.03	7.1	7.02	7.04	7.04	7.03
	紙重	509	561	542	853	426	659	402	597	340
	吸水倍	5.09	5.61	5.42	8.53	4.26	6.59	4.02	5.97	3.40
	紙軟度	○	○	○	○	○	○	×	○	×
	過濾纖維重	0.21	0.17	0.08	0.03	0.09	0.36	0.32	0.20	0.09
纖維										

二、 討論:

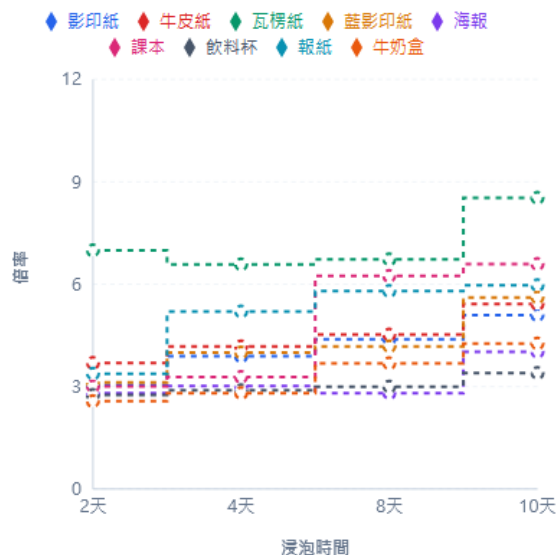
1. 紙張生產工藝對回收特性的影響。瓦楞紙為了緩衝需求，其纖維結構最為疏鬆且未經化學塗佈，因此水分能迅速進入纖維間隙；而牛奶盒與海報紙表面通常含有防水的PE塑膠膜或高嶺土塗層，這些人工屏障有效阻隔了水分滲透。這說明在回收製漿前，瓦楞紙這類材質最容易透過浸泡軟化，而含膜紙類則需更長的浸泡時間或額外的物理處理。

2. 「纖維品質」與「回收價值」的關鍵聯結。影印紙屬於高級文化用紙，含有較多長纖維且纖維强度高，在長時間浸泡下仍能保持結構，因此過濾時能有效截留。而瓦楞紙與報紙多由多次回收的短纖維組成，且含有較多填充物與雜質，在浸泡過程中纖維容易崩解並隨水流失（導致透視度下降）。因此，從「回收經濟效益」來看，高品質的影印紙漿雖然吸水不如瓦楞紙，但其提供的有效纖維產量卻是最高的。

紙張重量變化對比圖



吸水倍率變化對比圖

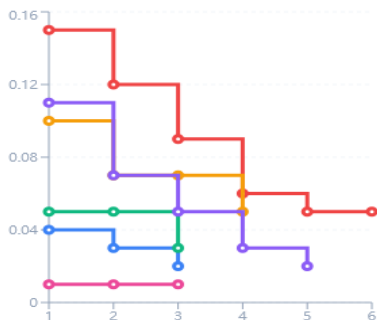


## 研究二:影印紙漿製成再生紙之產率與物理特性分析實驗

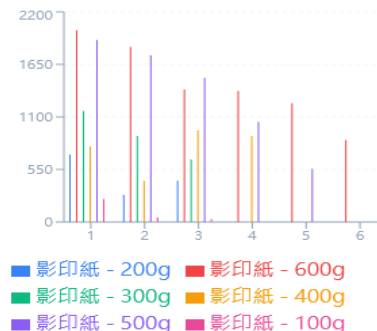
### 一、實驗結果:

1. 影印紙漿製成再生紙之產率與物理特性分析實驗，結果如表二。
2. 紙漿投入量與抗拉強度的正相關規律：
3. 數據顯示，再生紙的抗拉強度隨紙漿投入量（100g 至 500g）的增加而大幅提升。  
以「第1張」再生紙為例：  
100g 組：抗拉強度僅 244g。  
300g 組：抗拉強度上升至 792g。  
500g 組：抗拉強度飆升至 1907g（已超越原紙的 1864g）。

厚度趨勢 (MM)



抗拉強度 (GW)



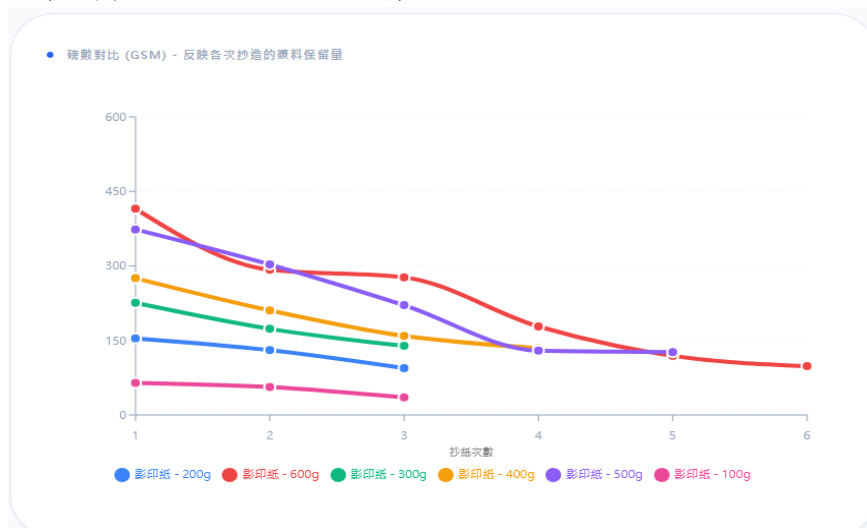
這顯示隨著原料濃度的增加，成紙的結構強度會產生質的飛躍。

#### 4. 再生過程中的「纖維流失」與「厚度均勻度」挑戰

從「生成紙總重」與「紙漿投入量」的對比來看，存在明顯的物料損耗。例如：  
投入 200g 紙漿，實際生成紙重合計僅 3.98g (另有 1.42g 餘漿回收)，總重僅 5.4g。

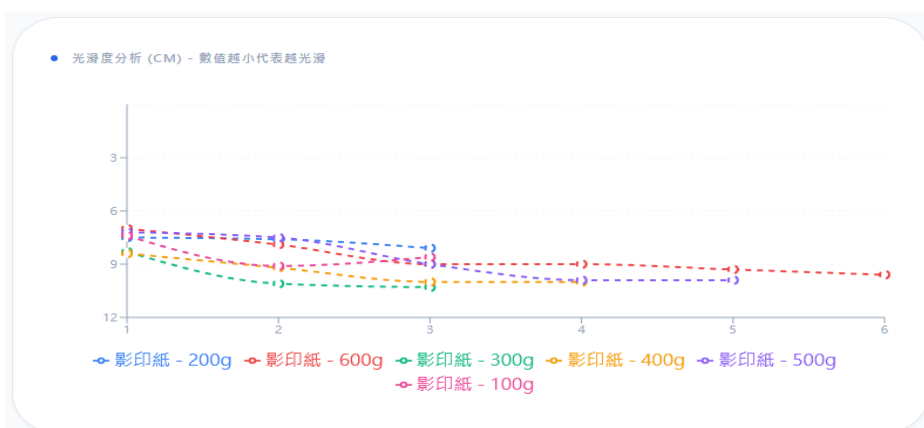
投入 500g 紙漿，生成紙重合計為 12.11g，總重 13.4g。

此外，單張紙的厚度量測中 (上、左、右、下)，常出現厚薄不一的情況 (如 200g 組首張厚度範圍在 0.02~0.08mm 之間)。



## 二、討論：

1. 抗拉強度的提升主要源於纖維交織密度的增加。當投入的紙漿量較多時，單位面積內的紙纖維數量增加，使得纖維間更加密集，形成更穩固的網狀結構。值得注意的是，500g 組的首張再生紙強度甚至超越了原紙，這出一個重點：透過人工控制紙漿濃度，我們可以製造出比市售影印紙更具韌性的特製紙張，但代價是厚度也會隨之增加 (由原紙的 0.04mm 增加至 0.11mm)。
2. 實驗室手作再生紙的兩大限制：產率偏低與均勻度不足。
3. 產率問題：投入數百克的濕紙漿 (含水量高) 僅能產出約 10 餘克的乾紙，顯示紙漿中的固形物 (纖維) 比例以及在抄紙過濾過程中的流失量，是影響回收效率的關鍵。
4. 均勻度問題：數據顯示「下」方的厚度往往大於「上」方，這討論出抄紙時重力沉降的影響—紙漿在網框中分佈不均，導致纖維在乾燥過程中收縮程度不一。
5. 這說明若要商業化或提升品質，必須優化「抄紙網的水平度」以及「紙漿均勻分散技術」，以解決厚度偏差導致的書寫手感不一問題。



表二影印紙漿製成再生紙之產率與物理特性

實驗項目 5%紙漿		生成再生紙 21×15cm <sup>2</sup>			紙張厚度(mm)					紙張物理性質		好寫度	
		乾紙重量 g			上	左	右	下	平均	光滑度 cm	抗拉強度 g	原子筆	鉛筆
		生成紙/餘紙漿回收/總重											
影印紙	原紙	21×15	2.40	---	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	13.5	1864	○	○
	100g 紙漿	第 1 張	0.68	1.64/ /	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	7.4	244	○	○
		第 2 張	0.59		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	9.1	51	○	○
		第 3 張	0.37		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	8.6	31	○	○
	200g	第 1 張	1.62	3.98/ 1.42/ 5.4	0.02	0.03	0.04	0.08	0.04	7.5	708	○	○
		第 2 張	1.37		0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	7.6	283	○	○
		第 3 張	0.99		0.02	0.01	0.01	0.20	0.02	8.1	434	○	○
	300g	第 1 張	2.37	5.65/ 1.46/ 7.11	0.03	0.05	0.06	0.07	0.05	8.3	1164	△	△
		第 2 張	1.82		0.03	0.06	0.06	0.03	0.05	10.1	900	△	△
		第 3 張	1.46		0.02	0.04	0.02	0.03	0.03	10.3	656	○	○
	400g	第 1 張	2.89	8.18/ 2.49/ 10.67	0.08	0.09	0.10	0.11	0.1	8.4	792	○	○
		第 2 張	2.21		0.05	0.09	0.07	0.07	0.07	9.2	432	○	○
		第 3 張	1.67		0.05	0.07	0.06	0.09	0.07	10	961	○	○
		第 4 張	1.41		0.05	0.06	0.04	0.06	0.05	10	900	○	○
	500g	第 1 張	3.92	12.11/ 1.29/ 13.4	0.13	0.10	0.11	0.11	0.11	7.2	1907	△	△
		第 2 張	3.18		0.06	0.08	0.07	0.08	0.07	7.5	1746	△	△
		第 3 張	2.32		0.04	0.05	0.03	0.06	0.05	9	1509	△	△
		第 4 張	1.36		0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	9.9	1051	○	○
		第 5 張	1.33		0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	9.9	559	○	○
	600g	第 1 張	4.36	14.49/ 1.63/ 16.12	0.16	0.13	0.16	0.15	0.15	7	2010	△	△
		第 2 張	3.07		0.08	0.17	0.10	0.12	0.12	7.9	1834	△	△
		第 3 張	2.91		0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	9	1389	△	△
		第 4 張	1.87		0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	9	1374	○	○
		第 5 張	1.25		0.05	0.06	0.04	0.06	0.05	9.3	1247	○	○
第 6 張		1.03	0.03		0.03	0.07	0.06	0.05	9.6	861	○	○	
藍影印紙	原紙	21×15	2.24	----	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	14.1	2316	○	○
	200g	第 1 張	1.36	3.62/ 1.06/ 4.68	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	10.1	458	○	○
		第 2 張	1.28		0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	10.5	369	○	○
		第 3 張	0.98		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	10.1	50	○	○
	400 g	第 1 張	4.26	11.04/ 1.74/ 12.78	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	5.9	1531	△	△
		第 2 張	3.22		0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	9.7	1079	△	△
		第 3 張	2.27		0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	10	449	○	○
		第 4 張	1.29		0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	11	160	○	○
	600g	第 1 張	4.14	17.37/ 2.20/ 19.57	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	8	394	△	△
		第 2 張	3.81		0.13	0.12	0.14	0.12	0.13	8.6	744	○	○
		第 3 張	3.36		0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	8	554	○	○
		第 4 張	2.81		0.08	0.10	0.11	0.09	0.1	9.3	210	○	○
		第 5 張	1.88		0.04	0.05	0.05	0.06	0.05	9	79	○	○
		第 6 張	1.37		0.04	0.05	0.04	0.06	0.05	10	38	○	○

# 研究三:廢紙回收再生之物理性質分析與比較實驗

## 一、 實驗結果

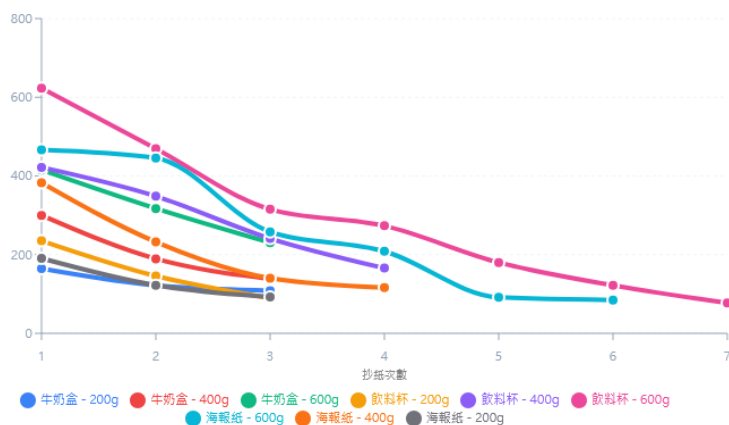
1. 廢紙回收再生之物理性質分析與比較實驗，結果如表三。



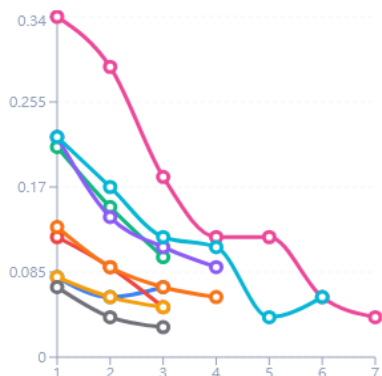
## 2. 紙張材質原生特性對再生紙「抗拉強度」的決定性影響

在相同或接近的紙漿投入量下，牛皮紙展現了遠高於其他材質的抗拉強度。以 400g 投入量為例：牛皮紙首張再生紙的抗拉強度高達 2031g。相比之下，同樣 400g 的其他紙種（如課本或影印紙組），強度通常落在 1700g-1800g 左右，甚至更低。此外，牛皮紙原紙的強度標示為 >2536g，明顯高於其他回收來源。

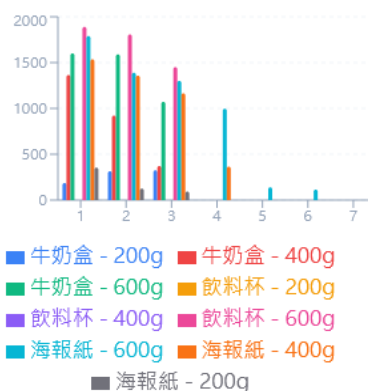
● 磅數對比 (GSM) - 原料耗用趨勢



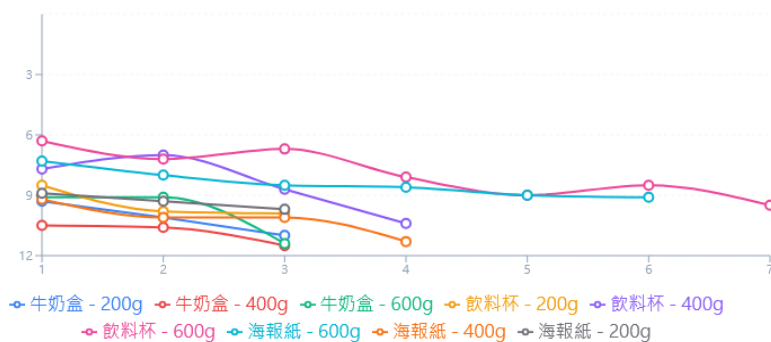
● 平均厚度變化 (MM)



● 抗拉強度對比 (GW)



● 表面光滑度 (CM)

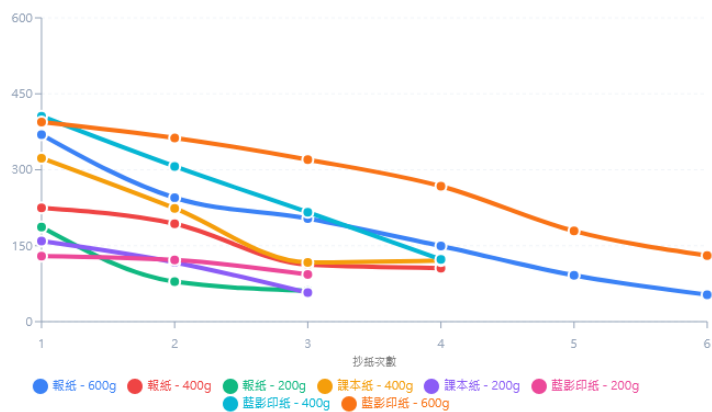


### 3. 再生紙厚度與強度隨「產出順序」遞減的邊際效應

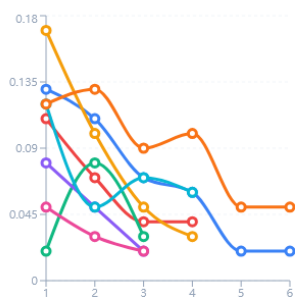
在每一組 (200g、400g、600g) 的連續抄紙實驗中，隨著作出的張數增加 (第 1 張-第 2 張-第 3 張... )，紙張厚度與抗拉強度均呈現劇烈下滑。

以 600g 組為例：第 1 張厚度達 0.34mm，強度 1890g；但到了第 6 張，厚度僅剩 0.06mm，強度也衰減至 384g。光滑度則隨張數增加而上升 (數值變大，代表表面顆粒感降低，纖維變細)。

● 磅數對比 (GSM) - 原料耗用趨勢



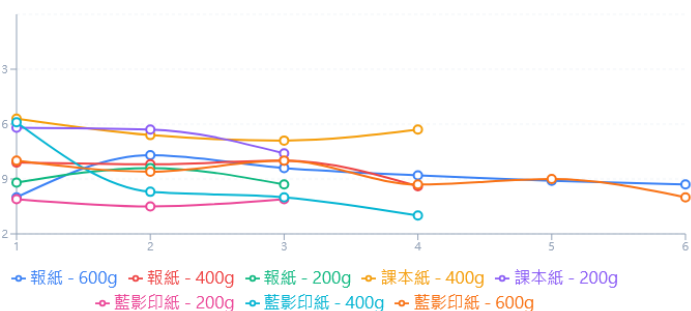
● 平均厚度變化 (MM)



● 抗拉強度對比 (GW)



● 表面光滑度 (CM)



## 二、 討論：

- 再生紙的強度上限受限於「原始纖維的品質」。牛皮紙在製造過程中為了包裝承重需求，通常使用長纖維的針葉木原生漿，且未過度漂白，保留了纖維的完整性與韌性。即便經過回收再製，這些長纖維仍能提供較強的交織力。

2. 若實驗目標是製作「高強度」的再生紙工具（如提袋、紙盒），應優先選擇牛皮紙作為回收料源，而非一般的課本或影印紙。
3. 抄紙過程中「纖維沉降與流失」的物理規律。在第一、二張抄製時，紙漿槽中的纖維濃度最高，且較長、較重的優質纖維優先被抄網截留，形成較厚且結構強健的紙張。隨著次數增加，槽內剩下的多是細碎的短纖維或填料，導致後續產出的紙張變得極薄且脆弱。這討論出在實際生產中，若要維持再生紙品質的一致性，必須採取「定時補充高濃度紙漿」的策略，而非一次性將殘漿用盡，否則後續產出的成品將失去實用價值。
4. 原料材質（長短纖維）決定強度上限，而紙漿濃度（抄製順序）決定成品的一致性。這對於建立標準化的廢紙回收流程具有重要的參考意義。

表三廢紙回收再生之物理性質分析與比較實驗

實驗項目 5%紙漿		生成再生紙 21×15cm <sup>2</sup>			紙張厚度					紙張物理性質		好寫度	
		乾紙重量			上	左	右	下	平均	光滑度 cm	抗拉強度	原子筆	鉛筆
		生成紙/回收/總重											
牛皮紙	原紙	21×15	4.28	—	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	8.4	>2536	△	△
	200g 紙漿	第1張	1.74	4.29/	0.07	0.06	0.08	0.11	0.08	9.7	1127	△	△
		第2張	1.49	1.52/	0.05	0.07	0.05	0.07	0.06	10.1	400	○	○
		第3張	1.06	5.81	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	10.6	112	○	○
	400g	第1張	3.58	8.12/	0.12	0.14	0.11	0.13	0.13	8.1	2031	×	×
		第2張	2.83	2.67/	0.04	0.06	0.10	0.08	0.07	8.4	1410	△	△
		第3張	1.71	10.79	0.05	0.07	0.07	0.01	0.06	9.8	1145	△	△
	600g	第1張	4.62	12.66/	0.25	0.23	0.23	0.27	0.25	7.2	2025	△	△
		第2張	3.81	2.78/	0.16	0.14	0.19	0.14	0.16	7.8	1656	△	△
		第3張	2.66	15.44	0.12	0.17	0.12	0.14	0.14	8.3	1564	△	△
		第4張	1.57		0.04	0.06	0.06	0.07	0.06	8.8	633	△	△
	瓦楞紙	原紙	21×15		—	3.82	3.73	3.55	3.78	3.7	10.1	—	△
200g		第1張	2.31	6.23/	0.05	0.05	0.05	0.08	0.07	9.1	993	△	△
		第2張	2.11	1/	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	9.4	490	△	△
		第3張	1.81	7.23	0.01	0.05	0.02	0.03	0.03	9.9	231	△	△
400g		第1張	4.69	10.48/	0.19	0.23	0.20	0.20	0.21	8.7	1894	×	×
		第2張	2.65	3.29/	0.08	0.09	0.14	0.09	0.10	9.5	1683	×	×
		第3張	1.85	13.77	0.07	0.07	0.06	0.08	0.07	9.8	1246	△	×
		第4張	1.29		0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	10.8	240	△	△
600g		第1張	6.00	19.61/	0.31	0.28	0.22	0.28	0.27	7.8	2025	×	×
		第2張	4.50	1/	0.22	0.20	0.21	0.20	0.21	8	1968	△	×
		第3張	3.88	20.61	0.11	0.15	0.17	0.18	0.15	8.6	1832	△	△
		第4張	2.51		0.07	0.10	0.10	0.11	0.10	9.4	1391	△	△
		第5張	1.56		0.04	0.07	0.08	0.06	0.06	9.7	1043	○	○
		第6張	1.16		0.04	0.07	0.04	0.06	0.05	10.1	300	○	○
牛奶盒		原紙	—	—	—	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	—	△
	200g	第1張	1.73	4.15/	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08	9.3	185	△	△
		第2張	1.28	1.19/	0.05	0.07	0.05	0.06	0.06	10.1	314	○	○
		第3張	1.14	5.34	0.07	0.09	0.05	0.06	0.07	11.0	324	○	○
	400g	第1張	3.15	6.59/	0.15	0.11	0.11	0.12	0.12	10.5	1365	△	△
		第2張	1.99	2.79/	0.07	0.09	0.10	0.08	0.09	10.6	922	△	△
		第3張	1.45	9.38	0.02	0.05	0.30	0.08	0.05	11.5	373	○	○

600g	第1張	4.36	10.11/	0.21	0.24	0.18	0.22	0.21	9.1	1599	×	×
	第2張	3.33	4.46/	0.13	0.16	0.17	0.14	0.15	9.1	1589	△	△
	第3張	2.42	14.57	0.10	0.11	0.11	0.08	0.1	11.4	1070	△	△

實驗項目名		再生紙生成			紙張厚度					紙張物理性質		好寫度	
		乾紙重量			上	左	右	下	平均	光滑度 cm	抗拉強度	原子筆	鉛筆
		生成紙/回收/總重											
課本紙	原紙	21×15	2.62		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	10.1	2411	○	○
	200g 紙漿	第1張	1.67	3.5/	0.06	0.06	0.09	0.07	0.08	6.2	337	△	△
		第2張	1.23	1.5/	0.03	0.05	0.03	0.04	0.05	6.3	228	△	△
		第3張	0.60	5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	7.6	98	○	○
	400g	第1張	3.39	11.74/	0.14	0.14	0.10	0.14	0.17	5.7	1492	△	△
		第2張	2.35	1.59/	0.07	0.08	0.07	0.07	0.10	6.6	789	△	△
		第3張	1.23	13.33	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	6.9	388	○	○
		第4張	1.27		0.01	0.04	0.03	0.02	0.03	6.3	607	○	○
	600g	第1張	4.90	12.79/	0.17	0.18	0.17	0.19	0.24	8.5	1764	×	×
		第2張	2.49		0.10	0.11	0.11	0.11	0.14	8.7	1483	△	△
		第3張	2.28	1.16/	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	9.5	600	△	△
		第4張	1.66		0.06	0.06	0.06	0.04	0.07	9.4	470	△	△
		第5張	0.78	13.95	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	6.3	167	○	○
	第6張	0.68		0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	7.2	200	○	○	
	海報紙	原紙	21×15	5.52		0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	11.2	>2495	○
200g		第1張	2.00	4.25/	0.07	0.09	0.07	0.05	0.07	8.9	353	△	△
		第2張	1.28	0.05/	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	9.3	124	○	○
		第3張	0.97	4.3	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	9.7	94	○	○
400g		第1張	4.02	9.15/	0.09	0.09	0.10	0.10	0.13	9.2	1536	△	△
		第2張	2.44	2.18/	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	10.1	1357	△	△
		第3張	1.47	11.33	0.04	0.04	0.06	0.07	0.07	10.1	1164	△	△
		第4張	1.22		0.04	0.06	0.04	0.04	0.06	11.3	365	○	○
600g		第1張	4.90	16.33/	0.15	0.19	0.14	0.17	0.22	7.3	1788	△	△
		第2張	4.68	2.46/	0.12	0.14	0.12	0.14	0.17	8	1391	△	△
		第3張	2.71	18.79	0.09	0.09	0.10	0.09	0.12	8.5	1300	△	△
		第4張	2.19		0.06	0.09	0.08	0.09	0.11	8.6	995	△	△
		第5張	0.96		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	9	141	○	○
第6張		0.89		0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	9.1	113	○	○	
飲料杯		原紙	—	—	—	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	—	—	△
	200g	第1張	2.47	4.94/	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	8.5	1270	△	△
		第2張	1.53	1.31/	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	9.8	608	○	○
		第3張	0.94	6.25/	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	9.9	245	○	○
	400g	第1張	4.43	12.36/	0.17	0.15	0.15	0.18	0.22	7.7	1784	×	×
		第2張	3.66	2.4/	0.15	0.14	0.12	0.15	0.14	7.0	1496	△	△
		第3張	2.53	14.76	0.08	0.09	0.08	0.08	0.11	8.7	1090	○	○
		第4張	1.74		0.07	0.06	0.08	0.07	0.09	10.4	362	○	○
	第1張	6.54	17.65/	0.26	0.23	0.24	0.28	0.34	6.3	1890	×	×	

600g	第 2 張	4.93	0.47/ 18.12	0.19	0.23	0.24	0.20	0.29	7.2	1807	×	×
	第 3 張	3.31		0.14	0.11	0.12	0.16	0.18	6.7	1449	×	×
	第 4 張	2.87		0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	8.1	1289	△	△
	第 5 張	1.89		0.09	0.08	0.10	0.09	0.12	9	704	△	△
	第 6 張	1.28		0.05	0.04	0.04	0.05	0.06	8.5	384	○	○
	第 7 張	0.81		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	9.5	145	○	○

實驗項目名		再生紙生成			紙張厚度					紙張物理性質		好寫度	
		乾紙重量			上	左	右	下	平均	光滑度 cm	抗拉 強度	原子 筆	鉛筆
		生成紙/回收/總重											
報 紙	原紙	21×15	1.47		0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	6	2444	○	△
	200g 紙漿	第 1 張	1.96	0.64/ 1.16/ 1.8	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	9.2	454	○	○
		第 2 張	0.83		0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	8.4	224	○	○
		第 3 張	0.64		0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	9.3	104	○	○
	400g	第 1 張	2.36	6.68/ 1.66/ 8.34	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	8.1	474	△	△
		第 2 張	2.03		0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	8.2	433	△	△
		第 3 張	1.18		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	8	412	○	○
		第 4 張	1.11		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	9.4	382	○	○
	600g	第 1 張	3.88	10.16/ 1.59/ 11.75	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	10.0	1940	△	△
		第 2 張	2.57		0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	7.7	933	△	△
		第 3 張	2.14		0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	8.4	483	△	△
		第 4 張	1.57		0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	8.8	474	○	○
		第 5 張	0.96		0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	9.1	374	○	○
		第 6 張	0.56		0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	9.3	98	○	○

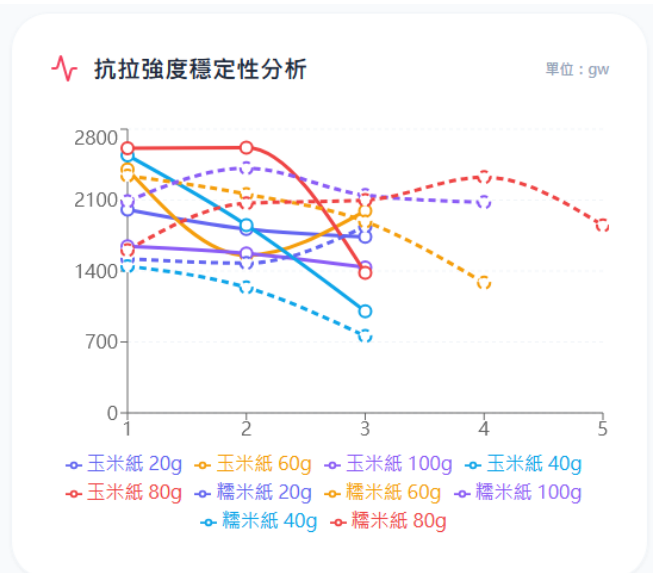
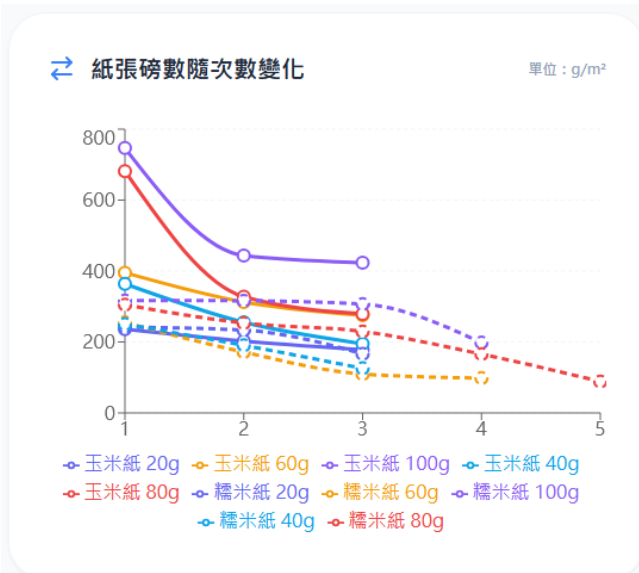
## 研究四：添加天然黏合劑（玉米粉與糯米粉）對再生紙物理特性影響

### 一、實驗結果

1. 添加天然黏合劑（玉米粉與糯米粉）對再生紙物理特性影響，結果如表四  
糯米粉漿在提升「抗拉強度」上優於玉米粉漿，數據顯示，添加糯米粉漿的組別在抗拉強度表現上極為突出。在添加 80g 黏合劑時：糯米紙的首張與第二張再生紙抗拉強度皆超過了儀器量測上限 (>2612g 與 >2619g)。相比之下，添加 80g 玉米粉漿的組別，其強度雖然也隨添加量增加，但數值波動較大，且在更高添加量 (100g) 時強度反而有下降趨勢 (1644g)。
2. 黏合劑添加量與「吸水率」的負相關性  
觀察「吸水」數據可以發現，隨着粉漿（玉米或糯米）添加量的增加，再生紙的吸水數值明顯下降。以玉米紙為例：添加 20g 時吸水值為 7~7.2，當添加量增加至 80g 時，吸水值下降至 2.6~0。糯米紙也呈現相同趨勢：隨粉漿量增加，吸水能力減弱，在高濃度下甚至出現趨近於 0 的紀錄。

### 二、討論：

1. 糯米粉含有極高比例的支鏈澱粉，其分子結構呈分枝狀，在糊化後具有更強的黏性與成膜性。當糯米粉漿均勻分佈在紙纖維之間時，能有效地填充纖維孔隙，並在乾燥過程中形成強力的生物膠結橋樑，大幅增強了纖維間的結合能。而玉米粉含有較多直鏈澱粉，雖然也能提供結合能力，但其脆性較大且膠結強度不如糯米粉穩定，因此在追求「高韌性、高強度」的再生紙工藝中，糯米粉是更理想的天然增強劑。
2. 糯米粉粉漿除了具備黏合功能外，還兼具了「施膠」的效果。  
在造紙工藝中，施膠是為了降低紙張的吸水性以防止墨水擴散。實驗中的粉漿填補了紙張纖維間的毛細孔道，在紙張表面與內部形成了薄薄的澱粉膜，這層膜具有一定的疏水效果，阻止了水分迅速滲透。這項結果討論出一個應用價值：若要製作「適合書寫（不暈墨）」或「具備初步防潮功能」的再生紙，可以透過增加糯米粉漿的比例來調整紙張的抗水性，而不需使用人工合成的化學藥劑。
3. 表四的數據證實了：糯米粉漿是提升再生紙結構強度的最佳天然添加物，且透過調整添加比例，可以有效地控制再生紙的吸水特性，使其更符合實際書寫或包裝的需求。



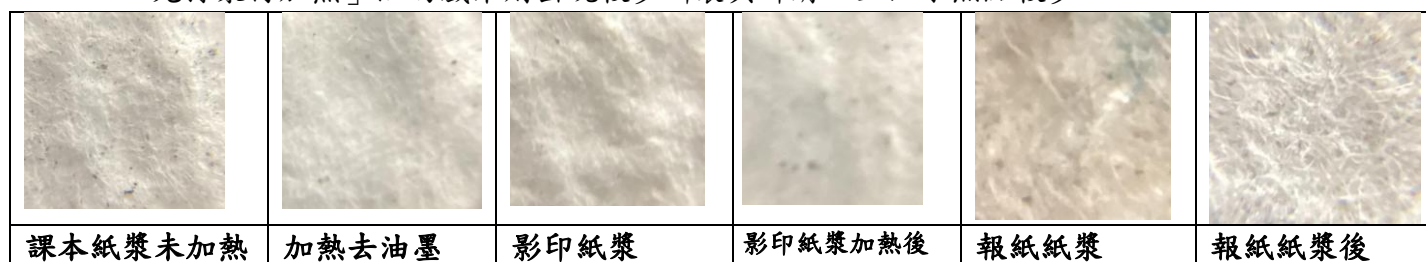
表四添加天然黏合劑（玉米粉與糯米粉）對再生紙物理特性影響

實驗項目	5%紙漿 200g 紙漿 生成再生紙 21×15cm <sup>2</sup>				紙張厚度(mm)					紙張物理性質			好寫度	
	乾紙重量				上	左	右	下	平均	光滑	吸水	抗拉強度 g <sub>c</sub>	原子筆	鉛筆
	生成紙/餘紙漿回收/總重													
玉米紙 加入 2% 玉米粉漿	20g	第1張	2.48	<b>6.48/</b> 4.74/ 11.22	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10.3	7	2007	△	△
		第2張	2.13		0.07	0.10	0.07	0.08	0.08	10.4	7.2	1815	△	△
		第3張	1.87		0.05	0.05	0.06	0.08	0.06	10.3	3.2	1738	△	△
	40g	第1張	3.82	<b>8.55/</b> 3.59/ 12.14	0.15	0.13	0.15	0.18	0.15	10.2	3.2	2542	×	×
		第2張	2.68		0.07	0.08	0.06	0.09	0.07	11.1	3.1	1853	△	△
		第3張	2.05		0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	11.3	3.5	>1003	△	△
	60g	第1張	4.15	<b>10.32/</b> 4.91/ 15.23	0.12	0.12	0.20	0.11	0.14	11.4	2.4	>2404	×	×
		第2張	3.28		0.08	0.14	0.11	0.14	0.12	12.6	2.4	>1556	△	△
		第3張	2.89		0.06	0.05	0.04	0.07	0.07	12.5	3	1994	△	△
	80g	第1張	7.16	<b>13.53/</b> 3.72/ 17.25	0.18	0.18	0.28	0.2	0.21	12.6	2.6	>2612	×	×
		第2張	3.44		0.08	0.13	0.09	0.15	0.11	13.1	2.4	>2619	×	×
		第3張	2.93		0.20	0.10	0.18	0.16	0.18	13.2	0	>1381	×	×
100g	第1張	7.84	<b>16.95/</b> 6.01/ 22.96	0.15	0.2	0.23	0.23	0.20	11.6	0	>1644	×	×	
	第2張	4.66		0.09	0.12	0.14	0.20	0.16	11.3	0	>1574	△	△	
	第3張	4.45		0.09	0.11	0.12	0.15	0.12	10.8	0	>1436	△	△	
糯米紙 加入 2% 糯米粉漿	20g	第1張	2.54	<b>6.74/</b> 3.22/ 9.96	0.08	0.11	0.08	0.07	0.09	8.0	10	>1522	△	△
		第2張	2.45		0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	8.1	9.7	>1478	△	△
		第3張	1.75		0.06	0.07	0.10	0.05	0.07	8.3	9.5	1840	△	△
	40g	第1張	2.63	<b>5.95/</b> 2.18/ 8.13	0.14	0.08	0.12	0.09	0.11	8.4	7.5	1448	△	△
		第2張	2.0		0.08	0.07	0.07	0.09	0.08	7.6	7.8	1238	△	△
		第3張	1.32		0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	10.0	8.5	758	△	△
	60g	第1張	2.68	<b>6.66/</b> 3.61/ 10.27	0.13	0.19	0.10	0.14	0.15	10.0	8.2	>2340	△	△
		第2張	1.80		0.07	0.09	0.06	0.08	0.08	11.3	7	2159	△	△
		第3張	1.15		0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	9.5	7.5	1888	△	△
		第4張	1.03		0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	9.9	6	1284	○	○
	80g	第1張	3.2	<b>10.94/</b> 1.25/ 12.19	0.29	0.13	0.14	0.16	0.18	9.3	8.1	>1607	△	△
		第2張	2.66		0.08	0.10	0.09	0.07	0.09	9.4	6.2	>2068	○	○
第3張		2.41	0.07		0.08	0.09	0.12	0.09	9.9	6.5	>2100	○	○	
第4張		1.74	0.11		0.08	0.08	0.06	0.08	10.6	5	2326	○	○	
第5張		0.93	0.06		0.04	0.06	0.03	0.05	9.7	4.5	1851	○	○	
100g	第1張	3.33	<b>11.95/</b> 3.56/ 15.51	0.15	0.14	0.13	0.16	0.15	7.5	8	>2088	△	△	
	第2張	3.32		0.17	0.14	0.12	0.14	0.14	5.7	4.5	>2414	△	△	
	第3張	3.22		0.07	0.11	0.11	0.21	0.13	8.9	4.5	>2149	×	×	
	第4張	2.08		0.08	0.09	0.13	0.19	0.12	9.3	8.5	>2079	○	○	

## 研究五:探討熱處理技術在廢紙脫墨與脫膜處理中對再生紙潔白度提升

### 一、實驗結果:如下圖用顯微鏡拍攝

顯微鏡觀察證實,「未脫墨組」的紙張表面存在大量碳粉顆粒,這些顆粒鑲嵌在紙纖維的交織點上。在 400x 顯微鏡下觀察發現,「直接加熱打漿」產出的纖維較為細長且邊緣平滑;而「先打漿再加熱」組的纖維則出現較多斷裂與碎屑,且細小黑點較多。



## 研究六:校園四季植物色素之水萃與醇萃法對影印再生紙染色效果

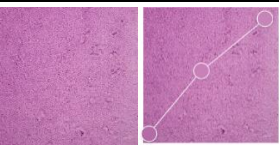
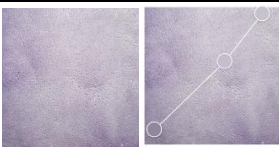
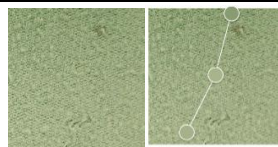
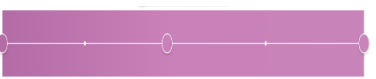


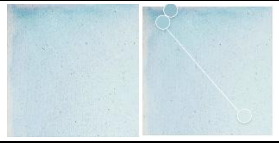

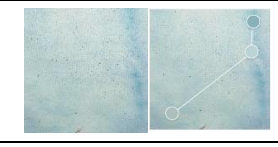



### 一、實驗結果

- 校園四季植物色素之水萃與醇萃法對影印再生紙染色效果,結果如表六.1~六.2
- 不同植物來源對再生紙「顯色能力(RGB)」與「pH 值」的差異性
- 根據染色分析數據,校園四季植物表現出截然不同的光譜特性:
  - **秋季(山黃梔):**產出的 RGB 數值(如 245, 198, 4)在 R(紅)與 G(綠)通道極高,呈現出極為鮮豔的飽和黃色。
  - **夏季(蝶豆花):**雖然原溶液呈現深藍色,但噴塗於紙張後,RGB 數值顯示其色彩分佈受紙張原本的 pH 值影響較大。
- 環境酸鹼值:杜鵑花(3.96)與山黃梔(4.09)的萃取液偏酸性,而蝶豆花(7.43)接近中性。  
萃取工藝(水萃加熱 vs. 酒精冷萃)對顏色均勻度的影響
- 實驗觀察到兩種染色效果的明顯分佈差異:
  - **水萃加熱法(染漿):**色素與紙漿在加熱過程中充分混合,製成的再生紙顏色由內而外一致 RGB 數值在紙張不同位置的偏差較小。
  - **酒精冷萃法(噴染):**顏色僅停留在紙張表面,且容易出現「暈染」與「邊緣富集」現象,黑點(殘留墨跡)在酒精噴塗後反而會變得更明顯。  
藍白影印時各 200 克製成的紙張如表表六.3。

### 二、討論:

- 天然色素的顯色穩定性與其化學性質密切相關。山黃梔含有大量的藏紅花素(Crocetin),這是一種強力的天然染料,對於纖維的吸附力強且不易受 pH 值波動影響,因此能產出最鮮豔的再生紙。
- 加熱水萃法在染色時,熱能使紙纖維膨潤,讓色素分子能滲透進纖維管束內部,達成牢固的化學鍵結或物理吸附。
- 酒精萃取法雖然能快速溶解出高濃度色素,但酒精揮發速度極快,色素尚未進入纖維內部即在表面析出。這討論出一個應用重點:若要製作「高品質、耐摩擦」的彩色藝術紙,應採用水萃染漿工藝;若追求「特殊藝術紋理(斑駁感)」,則酒精噴染更具視覺特色。
- 結果證明了:植物種類決定了色相(RGB 基調),而萃取與染色工藝(加熱與否)則決定了色彩的飽和度與耐用性。這為校園廢紙轉化為高附加價值的「四季文創紙品」提供了科學依據。
- 白色影印紙將可與藍色紙漿共榮盛淡藍色,表示有顏色影印紙可以互染。

四季「植」染重生-顏色分析與命名表六.1

季節	春		
染液材料	紫紅杜鵑花瓣/採收：3月初~3月底		
植物名稱	A1 杜鵑花 pH=3.96	A2 杜鵑花 pH=6.83	A3 杜鵑花 pH=7.11
紙漿配方	杜鵑+飲料杯紙漿加熱 2/4	杜鵑+課本紙漿加熱 2/4	杜鵑+影印紙加熱 2/4
植染色卡			
色彩光譜	 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="background-color: #B36CA6; padding: 2px;">#B36CA6 RGB 179, 108, 166 HSB 311, 40, 70</div> <div style="background-color: #CA81B9; padding: 2px;">#CA81B9 RGB 202, 129, 185 HSB 314, 36, 79</div> <div style="background-color: #C885BA; padding: 2px;">#C885BA RGB 200, 133, 185 HSB 313, 34, 78</div> </div>	 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="background-color: #93879F; padding: 2px;">#93879F RGB 147, 135, 159 HSB 270, 15, 62</div> <div style="background-color: #C8BDCC; padding: 2px;">#C8BDCC RGB 200, 189, 205 HSB 281, 8, 80</div> <div style="background-color: #C8C2CC; padding: 2px;">#C8C2CC RGB 200, 194, 204 HSB 276, 5, 80</div> </div>	 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="background-color: #8A9C72; padding: 2px;">#8A9C72 RGB 138, 156, 114 HSB 86, 27, 61</div> <div style="background-color: #A7B58C; padding: 2px;">#A7B58C RGB 167, 181, 140 HSB 80, 23, 71</div> <div style="background-color: #A6B28A; padding: 2px;">#A6B28A RGB 166, 178, 138 HSB 78, 22, 70</div> </div>
RGB 號	(202, 129, 185)	(200, 189, 205)	(167, 181, 140)
HSB 值	(314,36,79)	(281,8,80)	(80,23,71)
色彩命名	嫣紅杜鵑	晨曦淡紫	校園新綠
季節	夏		
染液材料	蝶豆花花瓣/採收：5~8月		
植物名稱	B1 蝶豆花 pH=7.48	B2 蝶豆花 pH=7.43	B3 蝶豆花 pH=7.58
紙漿配方	蝶(1)+影印紙 2/4	蝶(2)+影印紙 2/4	蝶(3)+影印紙 2/4
植染色卡			
色彩光譜	 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="background-color: #98C0CC; padding: 2px;">#98C0CC RGB 152, 192, 204 HSB 194, 25, 80</div> <div style="background-color: #A5CDD7; padding: 2px;">#A5CDD7 RGB 165, 205, 215 HSB 192, 23, 84</div> <div style="background-color: #D9E9E9; padding: 2px;">#D9E9E9 RGB 217, 233, 233 HSB 180, 7, 91</div> </div>	 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="background-color: #91BED3; padding: 2px;">#91BED3 RGB 145, 190, 211 HSB 199, 31, 83</div> <div style="background-color: #A1C6CF; padding: 2px;">#A1C6CF RGB 161, 198, 207 HSB 192, 22, 81</div> <div style="background-color: #D5E3E3; padding: 2px;">#D5E3E3 RGB 213, 227, 227 HSB 180, 6, 89</div> </div>	 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="background-color: #8883BA; padding: 2px;">#8883BA RGB 136, 179, 185 HSB 188, 27, 73</div> <div style="background-color: #BAD3D7; padding: 2px;">#BAD3D7 RGB 186, 211, 215 HSB 188, 13, 84</div> <div style="background-color: #ADC0BE; padding: 2px;">#ADC0BE RGB 173, 192, 190 HSB 174, 10, 75</div> </div>
RGB 號	(165, 205, 215)	(161, 198, 207)	(186, 211, 215)
HSB 值	(192,23,84)	(192,22,81)	(188,13,84)
色彩命名	初夏蔚藍	仲夏晴空	蝶影晴藍




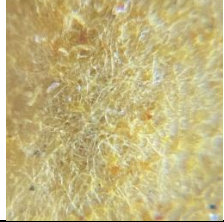
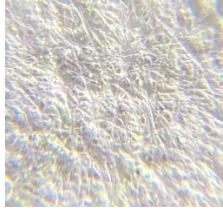
四季「植」染重生-顏色分析與命名表六.1

季節	秋		
染液材料	山黃梔果實/採收：10~11月		
植物名稱	C1 山黃梔 pH=4.09	C2 山黃梔 pH=5.80	C3 山黃梔 pH=5.92
紙漿配方	山黃梔(1)2/4	山黃梔(2)2/4	山黃梔(3)2/4
植染色卡			
色彩光譜	 #DEB305 RGB 222, 179, 5 HSB 48, 98, 87 #F0CA03 RGB 240, 202, 3 HSB 50, 99, 94 #DCBA03 RGB 220, 186, 3 HSB 51, 99, 86	 #EFD002 RGB 239, 208, 2 HSB 52, 99, 94 #F2D400 RGB 242, 212, 0 HSB 53, 100, 95 #E1B902 RGB 225, 185, 2 HSB 49, 99, 88	 #E4BD01 RGB 228, 189, 1 HSB 50, 100, 89 #F1D303 RGB 241, 211, 3 HSB 52, 99, 95 #EBCA02 RGB 235, 202, 2 HSB 52, 99, 92
RGB 號	(240, 202, 3)	(242, 212, 0)	(241, 211, 3)
HSB 值	(50,99,94)	(53,100,95)	(52,99,95)
色彩命名	落葉金黃	餘韻金黃	豐收金黃
季節	冬		
染液材料	欖仁葉(已轉紅)/採收：1月~2月		
植物名稱	D1 欖仁葉 pH=4.58	D2 欖仁葉 pH=5.71	D3 欖仁葉 pH=5.93
紙漿配方	欖仁(1)+課本 2/4	欖仁(2)+二次影 2/4	欖仁(3)+二次影 2/4
植染色卡			
色彩光譜	 #A0846F RGB 160, 132, 111 HSB 26, 31, 63 #C3A694 RGB 195, 166, 148 HSB 23, 24, 76 #C6B19E RGB 198, 177, 158 HSB 28, 20, 78	 #BEAC96 RGB 190, 172, 150 HSB 33, 21, 75 #D3C2B0 RGB 211, 194, 176 HSB 31, 17, 83 #B0947F RGB 176, 148, 127 HSB 26, 28, 69	 #B9B09E RGB 185, 176, 158 HSB 40, 15, 73 #CFC6B7 RGB 207, 198, 183 HSB 37, 12, 81 #C4BBAA RGB 196, 187, 170 HSB 39, 13, 77
RGB 號	(195, 166, 148)	(211, 194, 176)	(207, 198, 183)
HSB 值	(23,24,76)	(31,17,83)	(37,12,81)
色彩命名	欖仁葉紅	古樸棕褐色	冬日大地

植物名稱與 檢測項目	再生紙噴上 媒染劑顏色	春季： A 杜鵑花	夏季： B 蝶豆花	秋季： C 山黃梔	冬季： D 大葉欖仁
原溶液 PH 值		3.96	7.43	4.09	5.44
原始濾紙顏色+ (無媒染劑)	/				
RGB 數值		(190, 90, 178)	(170, 185, 218)	(238, 195, 0)	(174, 75, 70)
HSB 數值		(307,53,75)	(221,22,85)	(49,100,93)	(3,60,68)
海報紙漿再加熱 後製成再生紙 +(明礬)pH					
RGB 數值	(217, 217, 219)	(130, 77, 121)	(195, 175, 184)	(231, 192, 0)	(68, 57, 39)
HSB 數值	(240,1,86)	(310,41,51)	(333,10,76)	(50,100,91)	(37,43,27)
影印紙加熱與 2%40 克糯米漿 製成再生紙 +(醋酸鐵)					
RGB 數值	(216, 195, 150)	(131, 157, 156)	(136, 178, 176)	(200, 154, 16)	(113, 91, 33)
HSB 數值	(41,31,,85)	(178,17,62)	(177,24,70)	(45,92,78)	(43,71,44)
影印紙 [第二次紙漿] +(醋酸銅)					
RGB 數值	(180, 212, 211)	(114, 140, 92)	(118, 165, 154)	(199, 188, 0)	(83, 98, 79)
HSB 數值	(178,15,83)	(93,34,55)	(166,28,65)	(57,100,78)	(107,19,38)







表六.3 藍白紙漿生成

紙漿配方	藍色影印紙	藍色影印紙+白色影印紙	比較圖
植染色票			
RGB 數值	(107, 190, 195)	(173, 225, 223)	
HSB 數值	(183,45,76)	(178,23,88)	

				
校園四季水染紙	顯微下的紙漿 山黃梔(水染)	顯微下的紙漿 杜鵑(水染)	顯微下的紙漿 山黃梔(酒精染)	顯微下的紙漿 杜鵑(酒精染)

## 研究七:天然植物色素染色再生紙之立體塑形工藝：糯米漿與玉米漿黏合效果之比較研究

### 一、實驗結果

					
糯米漿 100g 影印紙漿(黏)	玉米漿 100g 影印紙漿(易滑)	糯米漿 50g 杜鵑花(佳)	糯米漿 50g 山黃梔(佳)	糯米漿 50g 蝶豆花(佳)	糯米玉米漿各 50g 欖仁葉(優)

#### 1. 天然黏合劑對立體支撐力與附著效率的影響

在立體敷抹過程中，糯米紙漿組表現出顯著優於玉米紙漿組的附著性能。實驗發現，加入 50g 糯米漿的紙漿具有極佳的「抗重力性」，能輕易敷抹於鋼杯襪模的垂直面上而不產生下滑或滴落現象。相較之下，玉米紙漿組在敷抹較厚區域時，容易因重力產生裂縫或局部脫落。乾燥後，糯米紙漿成品表面結構緻密，敲擊聲音清脆，顯示其硬度較高。

#### 2. 植物色素在立體纖維中的層次感與固色表現

透過「先染色、後混合粉漿、再塑形」的工序，成品展現出豐富的色彩層次感。由於紙漿經過加熱純化處理，去除了碳粉雜質，使得杜鵑花的粉紫、蝶豆花的深藍、山黃梔的鮮黃及欖仁的棕紅色調在立體表面分佈極為自然。顯微觀察顯示，植物色素不僅附著在纖維表面，更與粉漿混合形成了一層彩色的「生物樹脂層」，使乾燥後的成品具有淡淡的天然光澤。

### 二、討論

- 糯米澱粉漿具有「膠黏彈性」能抵抗重力對濕紙漿的拉扯。此外，糯米漿在烘乾過程中形成的連續性膠膜，能有效包覆纖維，減少了立體結構在乾燥時常見的收縮龜裂問題。這說明在開發立體紙藝品（如杯墊、容器、裝飾品）時，糯米漿是確保造形穩定度的關鍵添加物。
- 傳統平面染色容易因乾燥不均產生水漬痕跡，但在立體襪模塑形中，舊襪子的吸水緩衝作用與低溫烘焙協同效果顯著。襪子纖維能幫助紙漿中的多餘水分緩慢釋放，避免了色素分子隨水分快速移動而聚集在特定邊緣。
- 利用天然粉漿不僅是為了黏合，它同時也充當了色素的「定色劑」，將植物顏色鎖在纖維網格中，增加了色彩的耐光度與立體感。這讓再生紙作品具備了四季更迭的校園文化意義。
- 本階段實驗證實：「糯米粉漿（50g）」是立體造形的最佳黏合配方，而\*\*「襪模低溫烘焙」則是維持天然色彩完整性的核心工藝\*\*。這套流程成功地讓廢棄影印紙轉身成為具有自然美感與結構強度的藝術實體

## 陸、 討論

### 一、 紙漿濃度與重量對成紙物理強度的決定性影響

1. 從表二與表三的數據分析發現，\*\*紙漿投入重量（濃度）是影響再生紙品質的核心變因。
2. **臨界強度現象**：當紙漿投入量從 100g 增加至 500g 時，抗拉強度產生非線性跳躍（從 244g 升至 1907g）。這說明增加紙漿重量能有效填補纖維間的空隙，使氫鍵結合點達到飽和。
3. **產率與均勻度**：實驗觀察到「下」方厚度普遍大於「上」方，且隨產出順序（第 1 張至第 6 張）強度遞減。這討論出在連續造紙過程中，纖維沉降速度與剩餘濃度的變化會導致成品一致性下降。

### 二、 熱處理脫墨與微觀纖維結構的關聯

1. 透過顯微鏡（研究五）觀察證實：
2. **阻隔效應**：未脫墨紙張中的碳粉顆粒嵌入纖維縫隙，阻礙了纖維間的直接接觸。
3. **工藝優化**：加熱能使碳粉樹脂軟化並剝離。「直接加熱打漿」比「先打漿再加熱」更能保護纖維長度，避免機械力在冷水狀態下對纖維造成撕裂傷，進而提升了再製品的潔白度與韌性。

### 三、 天然黏合劑（糯米漿）的結構補強與塑形機制

1. 在研究四與研究七中，50g 糯米漿表現出最佳適性：
2. **化學結合**：糯米漿富含支鏈澱粉，在乾燥過程中如同「生物膠水」將細碎纖維鎖定，使抗拉強度突破量測上限（>2612g）。
3. **立體支持力**：高黏稠度克服了濕紙漿的重力，使其能在襪模上均勻附著。糯米漿的成膜特性也降低了吸水率（表四），解決了再生紙易暈墨的問題。

### 四、 媒染劑與色彩分析（RGB/HSB）的科學意義

1. **媒染效應**：加入明礬後，杜鵑花與山黃梔的亮度（Brightness）顯著提升；而醋酸鐵則使欖仁葉呈現深邃的古樸褐色，證實金屬離子能改變植物色素的分子震盪頻率。
2. **色彩量化**：利用 RGB 紀錄原始色光，並透過 HSB 觀察色相（Hue）偏移。數據顯示秋季山黃梔（H:48-49）發色最穩定，而蝶豆花受紙漿 pH 值影響，色相常在藍與灰綠之間擺盪，證實了底紙洗滌純化的重要性。

## 柒、 結論

### 1. 確立最佳再生紙工藝流程

本研究證實「**加熱脫墨 400g-500g 高濃度紙漿控制 2%糯米漿增黏**」為生產高品質再生紙的最優路徑。此流程能製造出強度超越原影印紙（1907g）的再生紙。

### 2. 驗證天然黏合劑之優勢

糯米漿在 50g 的配比下，其黏稠度與乾燥後的結構強度均優於玉米漿，是開發立體紙藝品（如杯墊、立體瓶器）的最佳天然材料。

### 3. 實現色彩數位化管理

成功利用 RGB 與 HSB 雙系統定義校園四季植物色譜。山黃梔（秋）具有最高飽和度，欖仁葉（冬）結合鐵媒染具備最佳耐候性，為校園廢棄物轉化為高產值文創品提供了科學數據支持。

### 4. 環境永續與創客精神

本研究落實了「循環經濟」概念，將校園廢紙、落葉與舊襪子等廢棄物，透過物理與化學改良，轉化為具備「美感、強度、環保」三大特性的立體藝術品，達成零廢棄的永續目標。

## 捌、參考文獻資料

1. 松本道子著，沙子方譯，快樂的植物染，積木文化出版社。
2. Veriteco 著，陳佩君譯，植物染的春夏秋冬，積木文化出版社。
3. 馬毓秀著，陳景林審定，四季繽紛草木染，遠流出版社。
4. 起『紙』回生，臺北市第 46 屆科展，國小組，化學科。
5. 紙”要你動手做，第 53 屆中小學科學展覽會(科展群傑聽)
6. 絲絲入扣鳳織花-製紙容器融入動植物膠體之探究。  
[屏東縣第 62 屆全縣國民中小學科學展覽會-屏東縣 62 屆科展](#)

## 玖、未來期許

### 1. 工藝技術的深化與標準化

**耐候性與防潮研究：**雖然本研究成功利用糯米漿提升了立體紙藝的強度，但澱粉類黏合劑易受環境濕度影響。未來期許能加入天然植物蠟（如蜂蠟）或松香進行「施膠」優化，提升成品的防水性與耐用度，使其具備承裝乾燥物品的實用功能。

**媒染穩定性測試：**目前已初步掌握明礬、醋酸鐵等對顏色的影響。未來希望透過長時間的紫外線照射實驗，測試不同媒染劑對植物色素「耐光牢度」的貢獻，建立更持久的天然色譜。

### 2. 數位美學與精準染色的結合

**建立「四季校園色票庫」：**擴大取樣校園內更多的植物，並持續利用 HSB 與 RGB 系統進行量化分析。未來期許能開發出一套「精準配色比例表」，讓使用者能根據所需的 HSB 數值，回推植物種類與媒染劑的添加配方，達成再生紙染色的數位管理。

**異材質的跨域應用：**嘗試將優化後的立體紙漿與 3D 列印或木工結合，探索再生紙漿作為環保建築模型材料或室內裝飾元件的可能性。

### 3. 校園永續循環與社會推廣

**推動「校園零廢棄」教育方案：**本研究證實廢紙與落葉能轉化為高美感的藝術品。未來期許能將此套 SOP（標準作業程序）轉化為校園創客（Maker）課程，讓學弟妹親手參與回收、純化到創作的過程，落實環境永續教育。

**循環經濟的文創轉型：**希望這項技術能與在地文化結合，利用校園特有植物開發具代表性的紀念品或禮盒包裝，讓「廢紙再生」不再只是口號，而是兼具商業價值與環保意識的文創產業。