

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高中組 工程學(二)科

第一名

052416

香灰再利用—以廢棄香灰製成屋瓦及人行地磚  
改善酸雨問題之研究

學校名稱：臺中市立大甲高級中等學校

作者：  高二 張心瑀  高二 林永泰	指導老師：  黃嘉男
---------------------------------	------------------

關鍵詞：酸雨、廢棄香灰、陶瓷 3D 列印

# 得獎感言

## 回首科研之路：探索與努力的跨越

當大會公布榮獲全國科展工程學科（二）第一名時，瞬間百感交集，從一開始的忐忑到驚喜以及最後的雀躍不已。回首科學研究過程中辛苦與疲憊頓時煙消雲散，彷彿之前努力的點滴，累積成就這次得來不易的佳績，之前對科研種種的迷惘，在此時得到了滿滿的肯定。

本研究動機為學校附近廟宇的香火鼎盛，看到集滿香灰的香爐，我們不禁好奇這些乘載著人民精神寄託的香灰之後會去哪裡，經過詢問廟方人員得知，少部分香灰會製成平安符讓香客保平安，而大多數的香灰則會落入河川或者垃圾車中，一開始我們只是想將廟宇製造出的廢棄物，再次回收到廟宇的建設，因此我們製作出了香灰屋瓦，並利用香灰的鹼性性質一同解決酸雨造成的環境問題。過程中在經過重重的文獻探討以及先備實驗、反覆實驗方法後，最終初步探討此想法的實驗成功時，我們和指導老師都開心不已。得知此想法的可行性後，我們也更積極的想將廢棄香灰加入更多建築材料中，達到更多元、更廣泛的應用。

在參展的過程中我們遇到了許多挫折及失敗，在實驗屢屢不達預期及毫無頭緒的情況下，感到極度不自信甚至對自我能力產生極大的懷疑，挫敗感充斥在堆疊的實驗數據中，但這些阻礙也成為了我們向前的動力，憑藉著不服輸的精神、和對科學研究的熱情及想要做出對環境友善的建材的決心，堅持了我們繼續奮鬥、克服重重困境，最終得到努力耕耘的成果，一切苦盡甘來之時，過往瓶頸皆成為了成長的養分，一次次經驗的累積使我們面對困難時無所畏懼勇於面對及解決，一路走來的經驗使我們獲益良多，不論是查詢文獻時所獲得的知識、失敗經驗中探討出導致失敗的原因，又或者是在數次實驗中找出最合適的實驗方法，在這些過程中我們更加的精進及成長，也因如此使我們在繁複的實驗中身倦心不厭，筋疲力盡卻樂在其中。

「成功需要很多人的幫助」，我們十分感謝一路上陪伴我們辛苦奔波的師長及家人，多虧有他們無私的幫助及鼓勵才成就了今日的我們，感謝指導老師細心教導我們，從臺中市科展、全國科展到現在我們準備站上國際科展的殿堂，提醒著我們沒有想到的區塊，在我們需要幫助時給出建議，使我們的實驗更加完善，並且耐心聆聽我們的演示，給出建議，讓我們的講解更加清晰，也感謝願意支持及提供香灰的廟方人員，及協助取得香灰的親朋好友，因為有你們無條件的支持

與付出，才讓我們能夠在這次全國科展工程學科的競賽中奪得佳績。



台灣康寧創新獎特優領獎



全國科學展覽會獲得第一名領獎



全國科學展覽會與指導老師合影

## 摘要

廢棄香灰處理不易且對環境有危害，廢棄香灰經定性分析後含鹼性物質  $\text{CaO}$ ，佔其成分中 50%，因此以廢棄香灰研究製成香灰屋瓦及地磚，探討其能否與酸雨酸鹼中和之可行性，我們進行多次屋瓦逕流酸雨及浸泡酸雨實驗，且台灣地區的下雨型態多為豪雨沖刷屋瓦頻率高，在實驗中觀察到香灰試片與酸雨中和效率和內含香灰比例呈現正相關，結果顯示摻入 20% 香灰所製成的屋瓦的酸鹼中和能力最適合台灣環境使用，香灰製品相較於傳統屋瓦有製程價格低、高耐用性和酸鹼中和效率高等特性，可作為屋瓦材料或地磚的新發展。製作地磚部分因發現水泥會包覆香灰陶粒，因此採用孔洞較大的陶瓷摻雜香灰進行 3D 列印，可快速製作不同環境應用之地磚。

# 壹、前言

## 一、研究動機

參觀學校附近的廟宇時，了解到大部分廢棄的香灰未經處理直接丟棄或倒入河川。香火較盛的廟宇每天可以產生 50~100 公斤的廢棄香灰。由於香灰是鹼性物質，對其對環境是否造成危害還存在疑慮。為處理大量廢棄香灰，我們考慮將其與酸性物質混合以達到中性，然後再排入自然環境。由於環境污染日益嚴重，許多工業排放物質導致雨水的 pH 值降至小於 5。因此，我們提出將廢棄香灰與屋瓦和人行地磚結合，使酸雨與自製的中性香灰屋瓦和人行地磚中和，這樣一來不僅可以解決廢棄香灰的問題，還能減少酸雨對生態系統、人類健康和建築物等的危害。

## 二、研究目的

本研究欲將廢棄香灰與陶土混和製成屋瓦及人行地磚，達到中和酸雨之效果，最後試驗製作成水泥磚以及使用 3D 列印試驗發展香灰產品之可能性，研究目的如下：

- (一) 研究不同 pH 值酸雨逕流不同比例香灰所製成香灰試片之酸鹼值影響。
- (二) 研究不同 pH 值酸雨浸泡不同比例香灰所製成香灰試片之時間與酸鹼值關係。
- (三) 研究自製屋瓦及人行地磚是否達到永續利用之效果。
- (四) 研究不同比例之自製香灰陶土與市售磚瓦之硬度比較。
- (五) 研究自製香灰陶土碎片混和水泥地磚之可行性
- (六) 研究使用陶瓷 3D 列印應用自製香灰磚瓦產品之可行性

## 三、文獻回顧

### (一) 酸雨

行政院環保署統一定義降雨水 pH 值小於 5 時稱為酸雨。對人類與動植物及生態環境影響在於酸雨對人類和動植物健康有害，可能引起呼吸系統問題和間接食用有毒金屬。同時，酸雨對生態環境和生物多樣性造成不利影響。處理大量廢棄香灰是減少酸雨危害的其

中一個方法。而對建築物來說易受酸性物質侵蝕，酸雨中含有的二氧化硫分解成氫離子及硫酸根離子，前者使建築物酸蝕，後者使建築物結構受膨脹，進而產生裂縫、結構完全被破壞、最終內部鋼筋也受酸蝕，不僅需要反覆補強受損結構，結構安全性也是一大疑慮。

## （二）香灰

據內政部統計 2022 年全臺廟宇高達 11364 間，而香火較為鼎盛的廟宇每日可產生 50 ~100 公斤的廢棄香灰，過往的處理方式多為直接丟棄或是倒入河川，且香灰為鹼性物質，溶於水時會釋出鈣及鎂離子，增加水的硬度，且破壞河川的酸鹼，對河川生態造成危害，如今環保意識抬頭，香灰可加入建築、釉藥、服飾等方面的製作。

## （三）屋瓦

屋瓦大致可分為陶土瓦、瀝青瓦、水泥瓦、彩剛瓦、琉璃瓦等，其中陶土瓦有容易取得，加入香灰製作可行性高，且較其他材質的屋瓦來說其斷面吸水性高，可以較好的與酸雨酸鹼中和、成本低的優點，因此我們選用陶土作為自製香灰屋瓦的基底。

## （四）香灰應用於建築之特性

在建築方面，香灰可作為生質灰材料及卜作蘭材料適量替代水泥，增加其工程用途，此舉不僅可降低製作成本，也可解決廢棄香灰的處理，經多方文獻研究結果整理，香灰直接添加水泥替代量到達 5% 時抗壓強度最好，量大於 5% 時抗壓強度呈下降趨勢，但在香灰替代量 5% 時，抗壓強度雖好但吸水性弱，無法達到較良好酸鹼中和效果，且香灰直接加入水泥也會造成混凝土流動性差、凝結時間縮短等工作性問題。

## （五）人行地磚

常見人行地磚多為水泥組成，再經由不同形狀的設計、骨材的大小質地、水灰比的調整，以達到不同的透水性、抗壓強度等的需求，若為粗細骨材交互填補水泥磚，透水性極差，抗壓强度高，純粗骨材則透水性佳，抗壓強度較低，純細骨材則反之。

## （六）透水性香灰陶瓷地磚

經研究結果顯示，加入廢棄陶瓷等材料的透水性混凝土地磚在吸水率、抗彎程度、抗壓強度和透水係數等方面優於標準要求。因此，我們提出將含香灰廢陶粒加入水泥磚的製作方法，實現廢物回收再利用的目的。

## （七）酸鹼中和

酸鹼中和為放熱的化學反應，酸性物質與鹼性物質中和後會產生鹽類和水。

## （八）陶瓷 3D 列印技術

陶瓷 3D 列印採用了與傳統塑膠 3D 列印相似的基礎製造方式，透過切片軟體逐層擠出土來進行列印。有幾個可以調控的變數，例如噴嘴的尺寸和土的乾燥程度。當噴嘴較大時，會擠出更多土，而當物件的尺寸和高度增加時，需選擇更大的噴頭以提供足夠的支撐。類似於一般的 3D 列印技術，陶瓷 3D 列印也可以透過切片軟體調整土的擠出量、切片高度和列印速度等參數。若混合香灰結合陶瓷土材料的多樣性，具有相當的發展潛力。

# 貳、研究設備及器材

## 一、研究設備

表 1 本研究實驗器材及其說明

名稱	pH 值檢測器	電子秤	過篩器	抵石
附註	測量溶液 pH 值	測量重量	過篩香灰	作為水泥骨材
名稱	真空煉土機	莫氏硬度檢測盒	模具	傳統屋瓦
附註	製作陶土試片	測試物體硬度	製作試片	市售屋瓦
名稱	實驗用電窯	陶土	蒸餾水	燒杯（500mL）
附註	燒製試片	自製屋瓦原料	調製酸雨	測量、盛裝溶液
名稱	陶板機	滴管	香灰	建築用砂
附註	將陶土擀成陶板	吸取溶液	自行取得	減少水泥硬化收縮
名稱	計時器	洗瓶	玻璃棒	滴定管
附註	計時用	清洗 pH 值感測器	混和溶液用	放出定量酸雨
名稱	錘子	水泥	地磚模具	陶瓷 3D 列印機
附註	敲擊用	市售地磚原料	製成地磚	列印各類型地磚



## 參、研究過程與方法

一、本實驗流程圖如下圖 1，研究過程與方法敘述如下：

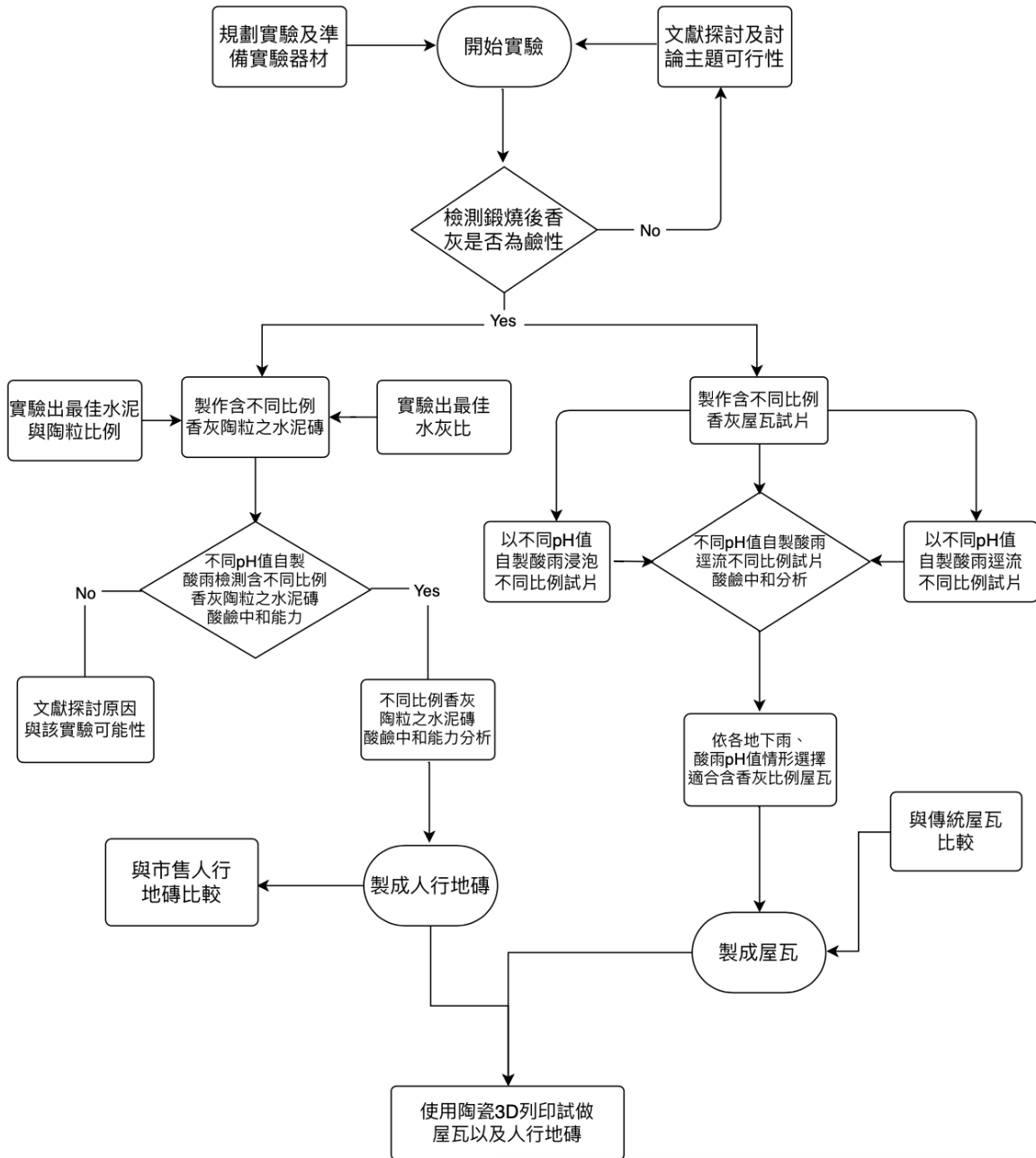


圖 1 實驗流程圖

## 二、研究方法

### (一) 實驗前準備：

#### 1、模擬台灣酸性雨——調配不同 pH 值的酸性水溶液

(1) 調配母液 (pH=0.96)：將硫酸 1.55g、硝酸 10.94g 加入血清瓶，加水至 1 公升

(2) 將母液稀釋成 pH 值為 3、4、5 之自製酸雨 (實際為 3.04、3.97、4.94)

#### 2、配製實驗用香灰試片——製作含香灰 5%、10%、20% 屋瓦試片

(1) 將 50g、100g、200g 香灰分別加入 950g、900g、800g 陶土、利用真空煉土機將香灰與陶土均勻混和，並利用線鋸將混入香灰之陶土等量切割

(2) 以電窯燒製到 1100°C 使其達到燒結

表 2 配製香灰試片的過程

步驟	圖示	說明
1		將向附近廟宇取來的廢棄香灰進行兩次的過篩(100 號篩)，去除在放置中可能累積的雜質。
2		使用真空練土機以不同比例將陶土和香灰均勻混和。
3		使用線鋸將混入香灰之陶土條等量切割成實驗所需大小。

(二) 實驗設計和檢測方法：

1、未鍛燒及鍛燒香灰 pH 值檢測

- (1) 將 95g 水加入 5g 未鍛燒香灰，在攪拌均勻後，使用 pH meter 測量其 pH 值。
- (2) 將 95g 水加入 5g 鍛燒香灰（經過攝氏 1100 度鍛燒），攪至均勻後使用 pH meter 測量 pH 值。
- (3) 紀錄數據，觀察以不同方法處理的香灰，其酸鹼值上的差異與外觀上變化。

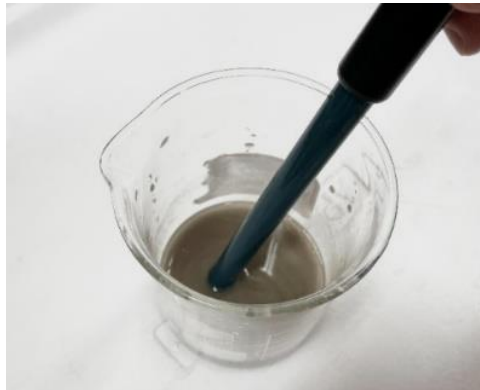


圖 2 以 pH meter 檢測香灰的酸鹼值

2、模擬酸雨逕流實驗

- (1) 將自製 pH 值為 3.04、3.97、4.94 的酸雨加入滴定管中，以固定的流量和流速，來模擬台灣在梅雨季節的雨勢。
- (2) 將自製不同比例香灰屋瓦試片（5%、10%、20%）傾斜放入燒杯中並墊高。
- (3) 以固定的流量和流速對屋瓦試片進行雨天逕流模擬，並測量其溶液的 pH 值。



圖 3 模擬酸雨逕流實驗裝置



圖 4 模擬酸雨逕流圖

### 3、模擬在酸雨浸泡的環境下，中和酸性物質的能力和速率

- (1) 將 110 mL 的自製酸雨溶液倒入燒杯。
- (2) 將含香灰 5%、10%、20% 燒結完成的屋瓦試片放入燒杯，使其浸泡在不同濃度的酸性溶液。
- (3) 每 10 分鐘觀察酸雨與香灰屋瓦試片酸鹼中和後的 pH 值，共觀測 2 小時。



圖 5 模擬酸雨浸泡

### 4、測試屋瓦反覆使用情形——重複以酸性溶液試驗後以烈日曝曬

- (1) 將實驗 3 使用過的含香灰屋瓦試片經自然風、日照風乾曬乾。
- (2) 再將乾燥後的香灰屋瓦試片再次進行模擬酸雨 (pH=3) 浸泡實驗。
- (3) 每 10 分鐘觀察酸雨與香灰屋瓦酸鹼中和後的 pH 值，每次觀測時長為 2 小時。



圖 6 自然風乾、日照曝曬之屋瓦實驗示意圖

### 5、測試屋瓦耐用性——新製香灰屋瓦與常溫使用一年後的香灰屋瓦比較

- (1) 將新製含香灰 5%、10%、20% 屋瓦試片進行模擬酸雨 (pH=3) 浸泡實驗，每 10 分鐘觀察底部水溶液之 pH 值，共計 2 小時。
- (2) 再將放置 1 年含香灰 5%、10%、20% 屋瓦試片進行模擬酸雨 (pH=3) 浸泡實驗，每 10 分鐘觀察底部水溶液之 pH 值，共計 2 小時。

(3) 觀察以廢棄的香灰燒製而成的屋瓦是否因長時間的使用失去中和酸性的能力。

## 6、自製屋瓦與市售屋瓦硬度測試與外觀比較

(1) 將含香灰 5%、10%、20% 屋瓦試片與市售屋瓦進行莫氏硬度測試

(2) 自製香灰屋瓦與市售屋瓦進行外觀比較



圖 7 莫氏硬度檢測盒



圖 8 自製香灰屋瓦圖

## 7、最佳水灰比測試

(1) 以水灰比 0.38、0.48、0.58、0.68、0.78 製成水泥試片觀察其外觀及耐用性質

(2) 選擇最佳製成人行地磚之水灰比

表 3 水泥水灰比測試

水灰比	0.38	0.48	0.58	0.68	0.78
圖示					
耐用性	脆弱易碎，硬度明顯不足	脆弱易剝離，硬度明顯不足	硬度達標	硬度達標吸水性不佳	硬度達標吸水性不佳
外觀	龜裂嚴重	龜裂嚴重	無明顯缺陷	粉狀水泥析出	粉狀水泥析出
最佳選擇	X	X	✓	X	X

## 8、自製水泥人行地磚與酸鹼中和能力測試

(1) 將含香灰 5%、10%、20% 試片敲碎成顆粒狀製成水泥材中之骨料

(2) 測試自製香灰人行地磚之滲透率及酸鹼中和能力



圖 9 地磚測試透水性裝置

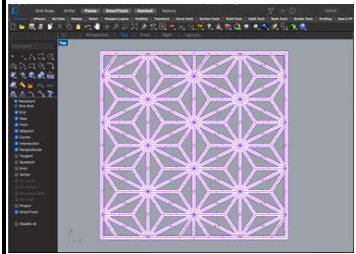
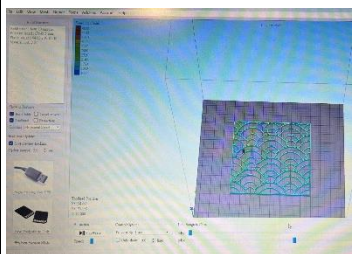



圖 10 敲碎香灰試片

### 9、3D 列印建模與切片

- (1) 使用 Rhino 這套軟體進行所需香灰產品的建模。
- (2) 使用 Dimplify3D 作為切片軟體將 stl 檔案轉成 gcode 再放到 3D 列印機進行列印。

表 4 3D 列印建模與切片過程

	步驟一	步驟二	步驟三
圖示			
說明	Rhino 介面	Simplify3D 介面	3D 列印機

## 肆、研究結果

### 一、未鍛燒及鍛燒香灰 pH 值檢測：

製作香灰磚瓦需要高溫燒製，故需先檢測香灰燒至高溫後的 pH 值，確保加入香灰成建材後，其仍保有鹼性性質，可與酸雨作酸鹼中和反應。

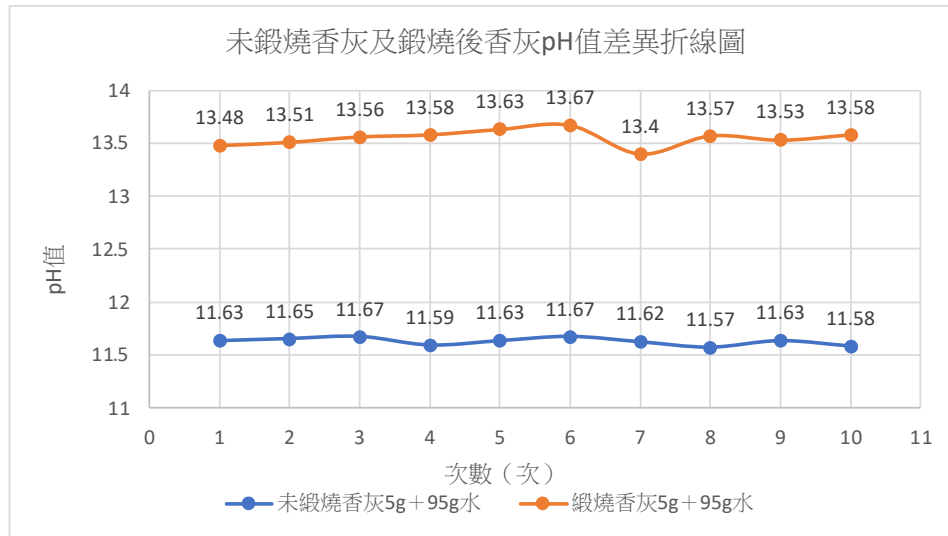


圖 11 未鍛燒香灰及鍛燒後的香灰 pH 值的變化折線圖

根據實驗結果可以得知，對比兩者數據，未鍛燒香灰 pH 值平均為 11.62，鍛燒香灰 pH 值平均為 13.55，鍛燒後香灰 pH 值不僅沒有降低，甚至比未鍛燒香灰 pH 值高，由此可知將香灰加入陶土在燒結後仍可保持其強鹼性質，與酸雨進行酸鹼中和反應。

## 二、模擬酸雨逕流實驗：

為了模擬下雨時雨水從磚瓦表層流過的情況，探討含香灰建材對於流下雨水酸鹼值的變化及影響，同一 pH 值酸雨、同一含香灰濃度試片重複 5 次與酸雨酸鹼中和，測其酸雨 pH 值變化，確保數據準確

表 5 香灰 5%、10%、20%試片逕流 pH=3.04 酸雨 50mL

pH=3.04	1	2	3	4	5	平均	標準差
含香灰 5%	3.59	3.78	3.96	3.49	3.73	3.71	0.1806
含香灰 10%	4.67	4.81	4.13	4.66	4.23	4.50	0.3001
含香灰 20%	5.37	5.12	5.03	5.09	4.98	5.11	0.1508

表 6 香灰 5%、10%、20%試片逕流 pH=3.97 酸雨 50mL

pH=3.97	1	2	3	4	5	平均	標準差
含香灰 5%	4.81	5.01	5.23	4.63	4.71	4.878	0.2427
含香灰 10%	5.01	4.93	5.15	5.31	4.87	5.054	0.1774
含香灰 20%	6.13	6.25	6.09	5.94	5.95	6.072	0.1300

表 7 香灰 5%、10%、20%試片逕流 pH=4.94 酸雨 50mL

pH=5.04	1	2	3	4	5	平均	標準差
含香灰 5%	5.72	5.15	5.46	5.12	5.23	5.336	0.2526
含香灰 10%	5.83	5.24	5.41	5.53	5.37	5.476	0.2233
含香灰 20%	6.27	6.21	6.29	6.03	6.11	6.182	0.1100

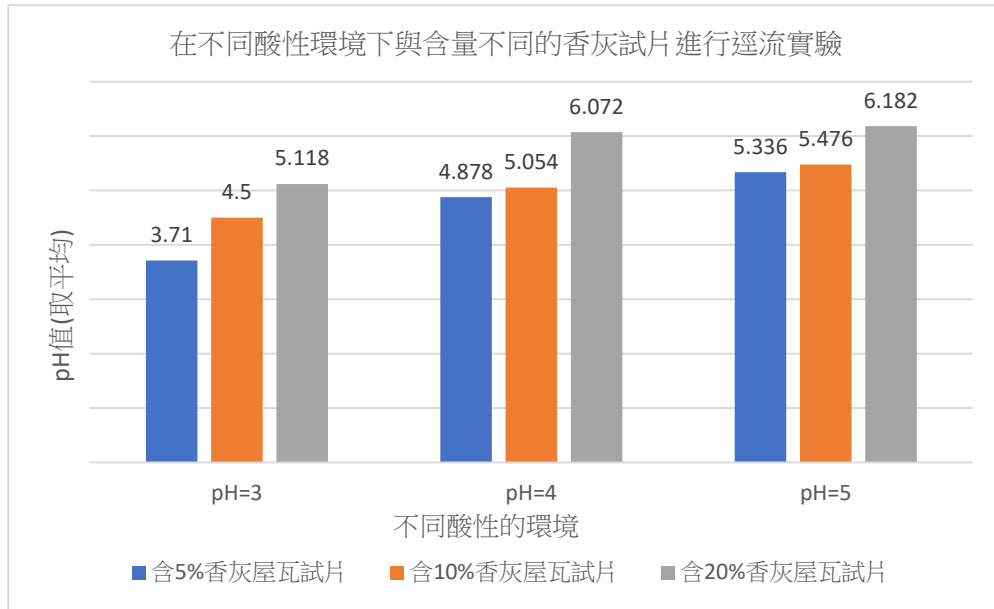


圖 12 自製香灰試片與酸雨逕流中和之 pH 值

根據實驗數據折線圖得分析，可得知香灰屋瓦可與酸雨進行酸鹼中和反應，酸雨流經香灰屋瓦後 pH 值皆有提升，且添加香灰量越多，pH 值在相同時間下上升幅度越顯著，但在酸雨 pH 值 3.97~5.04 區間，添加香灰 5%、10%與酸雨酸鹼中和後平均值相近，20%酸鹼中和後平均值則與 5%、10%有較大的落差，但也趨於平緩，故得知在下雨型態多為豪雨，雨水沖刷屋瓦的地區，含 20%香灰屋瓦為最佳選擇，含越少香灰之屋瓦，與酸雨中和能力不顯著。

### 三、模擬酸雨浸泡實驗：

探討屋瓦對於浸泡雨水酸鹼值的變化及影響，同一 pH 值酸性溶液、同一含香灰濃度屋瓦試片重複 5 次，確保數據準確。為模擬日常生活中經大雨後所致的屋瓦積水的情況，在燒杯中放入乾燥試片後倒入酸雨開始實驗，觀察並紀錄 pH 值隨酸雨浸泡後的時間變化。



(一) 含不同比例香灰試片浸泡 pH=3.04 酸雨

1. 含 5%香灰試片 (pH=3.04 酸雨) :

表 8 pH=3.04 酸雨與 5%香灰試片中和數據表

次數 浸泡時間	1	2	3	4	5	平均值	標準差
0min	3.04	3.04	3.04	3.04	3.04	3.040	0
10min	3.81	3.66	3.46	3.64	3.54	3.622	0.1323
20min	4.33	4.41	4.15	4.56	4.43	4.376	0.1509
30min	4.81	4.87	4.62	5.04	4.82	4.832	0.1502
40min	5.37	5.40	4.96	5.43	5.07	5.246	0.2154
50min	5.64	5.77	5.55	5.66	5.70	5.664	0.0808
60min	5.60	5.58	5.63	6.30	6.27	5.876	0.3739
70min	6.32	5.97	6.02	6.33	6.53	6.234	0.2343
80min	6.38	6.56	6.47	6.60	6.84	6.570	0.1732
90min	6.45	6.50	6.67	6.57	6.91	6.620	0.1819
100min	6.50	6.53	6.71	6.63	6.92	6.658	0.1684
110min	6.51	6.62	6.75	6.71	7.03	6.724	0.1943
120min	6.54	6.61	6.75	6.79	7.04	6.746	0.1932

2. 含 10%香灰試片 (pH=3.04 酸雨) :

表 9 pH=3.04 酸雨與 10%香灰試片中和數據表

次數 浸泡時間	1	2	3	4	5	平均值	標準差
0min	3.04	3.04	3.04	3.04	3.04	3.040	0
10min	3.45	3.42	3.50	4.00	4.11	3.696	0.3312
20min	4.69	4.07	4.13	4.93	4.97	4.558	0.4321
30min	5.68	5.32	5.09	5.60	5.71	5.480	0.2669
40min	6.10	6.09	6.10	6.13	5.99	6.082	0.0535
50min	6.41	6.13	6.28	6.56	6.29	6.334	0.1607
60min	6.60	6.53	6.57	6.52	6.48	6.540	0.0463
70min	6.85	6.90	6.88	6.81	6.76	6.840	0.0561
80min	7.02	7.05	7.07	6.96	6.93	7.006	0.0594
90min	7.15	7.20	7.16	7.07	7.01	7.118	0.0766
100min	7.24	7.29	7.27	7.20	7.08	7.216	0.0832
110min	7.35	7.42	7.40	7.35	7.30	7.364	0.0472
120min	7.39	7.47	7.40	7.38	7.32	7.392	0.0535

3. 含 20%香灰試片 (pH=3.04 酸雨) :

表 10 pH=3.04 酸雨 20%香灰試片中和數據表

次數 浸泡時間	1	2	3	4	5	平均值	標準差
0min	3.04	3.04	3.04	3.04	3.04	3.04	0
10min	4.90	4.32	4.47	4.65	4.58	4.584	0.2161
20min	5.34	5.35	5.44	5.54	5.80	5.494	0.1891
30min	5.64	5.90	5.86	5.96	6.00	5.872	0.1404
40min	6.33	6.45	6.28	6.45	6.42	6.386	0.0770
50min	6.29	6.58	6.29	6.56	6.66	6.476	0.1738
60min	6.42	6.58	6.43	6.53	6.70	6.532	0.1156
70min	6.78	6.6	6.53	6.82	6.72	6.690	0.1220
80min	6.93	6.91	6.77	6.91	7.08	6.920	0.11
90min	6.97	6.95	6.89	6.92	7.07	6.960	0.0685
100min	7.12	7.15	7.13	7.15	7.18	7.146	0.0230
110min	7.23	7.21	7.24	7.28	7.41	7.274	0.0801
120min	7.32	7.3	7.35	7.35	7.53	7.370	0.0919

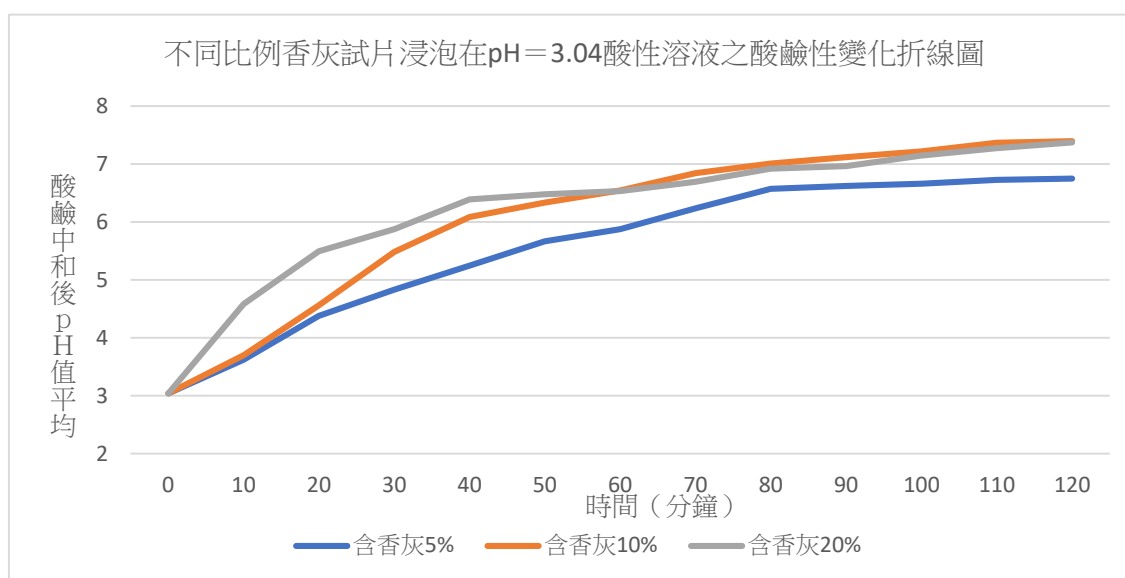


圖 13 自製香灰試片與 pH=3.04 的酸性溶液中中和之 pH 變化

自製香灰試片與 pH=3.04 酸雨中和反應，初期上升幅度以含香灰 20%為最佳，但在浸泡 60 分鐘後趨於平緩與 10%重疊。

(二) 含不同比例香灰試片浸泡 pH=3.97 酸雨

1. 含 5% 香灰試片 (pH=3.97 酸雨) :

表 11 pH=3.97 酸雨 5% 香灰試片中和數據表

次數 浸泡時間	1	2	3	4	5	平均值	標準差
0min	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	0
10min	4.77	4.83	5.06	5.08	5.19	4.986	0.1781
20min	5.37	5.45	5.4	5.57	5.36	5.43	0.0857
30min	5.57	5.55	5.64	5.59	5.72	5.614	0.0680
40min	5.81	5.77	5.82	5.88	6.01	5.84	0.0936
50min	5.54	5.84	5.92	5.92	6.08	5.86	0.1989
60min	6.59	6.44	6.45	6.46	6.57	6.502	0.0719
70min	6.75	6.73	6.74	6.73	6.83	6.756	0.0421
80min	6.83	6.85	6.83	6.81	6.92	6.848	0.0426
90min	7.09	7.07	7.04	7.03	7.11	7.068	0.0334
100min	7.18	7.2	7.17	7.18	7.26	7.198	0.0363
110min	7.34	7.33	7.29	7.29	7.35	7.32	0.0282
120min	7.6	7.5	7.7	7.62	8.52	7.788	0.4153

2. 含 10% 香灰試片 (pH=3.97 酸雨) :

表 12 pH=3.97 酸雨 10% 香灰試片中和數據表

次數 浸泡時間	1	2	3	4	5	平均值	標準差
0min	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.970	0
10min	4.86	5.31	5.43	5.11	5.2	5.182	0.2162
20min	5.41	5.53	5.82	5.51	5.63	5.58	0.1552
30min	5.48	5.67	6.09	5.93	5.74	5.782	0.2357
40min	5.62	5.72	6.21	6.37	6.13	6.01	0.3241
50min	5.74	5.93	5.84	5.95	6.23	5.938	0.1832
60min	5.96	6.4	6.57	6.93	6.55	6.482	0.3508
70min	6.93	6.71	6.93	7.01	6.85	6.886	0.1134
80min	7.12	6.86	7.18	7.15	7.1	7.082	0.1277
90min	7.3	7.13	7.6	7.4	7.18	7.322	0.1876
100min	7.54	7.45	7.38	7.58	7.46	7.482	0.0788
110min	7.27	7.44	7.51	7.35	7.47	7.408	0.0970
120min	7.5	7.77	7.65	7.64	7.75	7.662	0.1075

3. 含 20%香灰試片 (pH=3.97 酸雨):

表 13 pH=3.97 酸雨 20%香灰試片中和數據表

次數 浸泡時間	1	2	3	4	5	平均值	標準差
0min	3.97	3.97	3.97	3.97	3.97	3.970	0
10min	5.25	5.50	5.66	5.43	5.41	5.450	0.1488
20min	5.74	5.76	5.80	5.77	5.55	5.724	0.0996
30min	5.89	5.93	6.00	5.91	6.00	5.946	0.0512
40min	6.11	6.08	6.16	6.21	6.30	6.172	0.0870
50min	6.20	6.31	6.37	6.36	6.42	6.332	0.0834
60min	6.62	6.62	6.68	6.66	6.76	6.668	0.0576
70min	6.90	6.89	6.95	6.92	6.97	6.926	0.0336
80min	6.99	6.91	6.98	7.01	7.06	6.990	0.0543
90min	7.16	7.08	7.17	7.15	7.19	7.150	0.0418
100min	7.30	7.24	7.35	7.33	7.39	7.322	0.0563
110min	7.40	7.38	7.45	7.38	7.50	7.422	0.0521
120min	7.81	8.00	8.10	7.67	7.79	7.874	0.1730

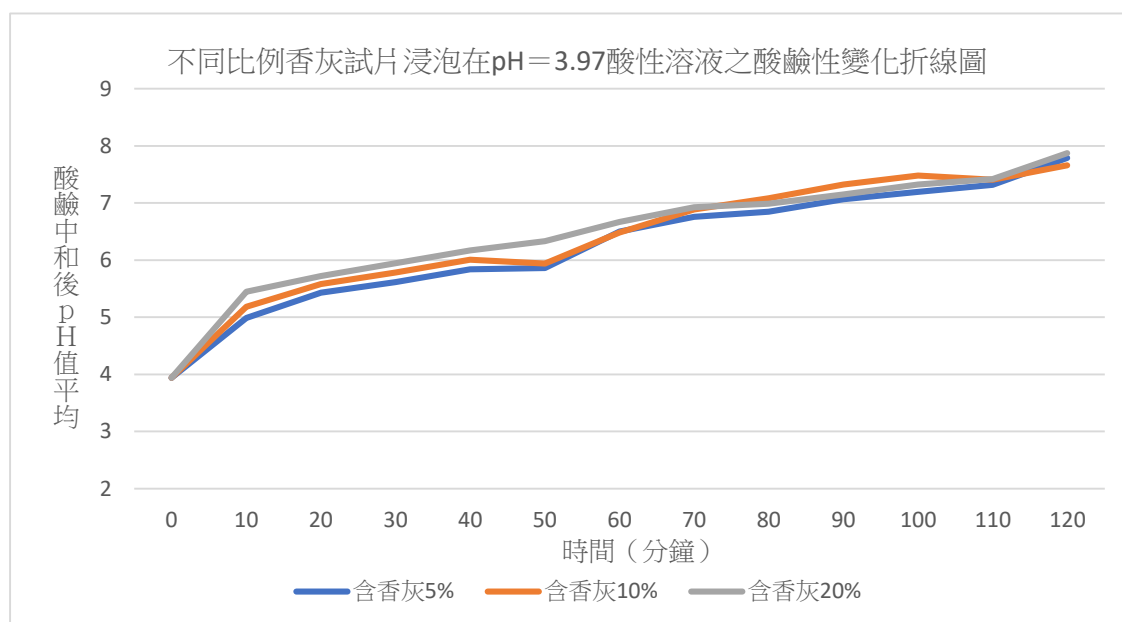


圖 14 自製香灰試片與 pH=3.97 酸性水溶液中中和之 pH 變化

自製香灰試片與 pH=3.97 酸雨中和反應，初期上升幅度以含香灰 20%為最佳，但在浸泡 70 分鐘後趨於平緩且 10%漸高於 20%。

(三) 含不同比例香灰試片浸泡 pH=4.94 酸雨

1. 含 5% 香灰試片 (pH=4.94 酸雨) :

表 14 pH=4.94 酸雨 5% 香灰試片中和數據表

次數 浸泡時間	1	2	3	4	5	平均數	標準差
0min	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.940	0
10min	5.48	5.89	5.75	5.80	5.72	5.728	0.1528
20min	6.04	6.17	6.57	6.08	6.06	6.184	0.2214
30min	6.59	6.99	6.77	6.63	6.51	6.698	0.1884
40min	6.64	7.05	6.95	6.92	6.97	6.906	0.1563
50min	6.77	7.16	6.99	6.98	7.05	6.990	0.1423
60min	6.93	7.21	6.99	7.08	7.15	7.072	0.1141
70min	7.01	7.24	7.04	7.07	7.23	7.118	0.1089
80min	7.15	7.28	7.12	7.05	7.26	7.172	0.0967
90min	7.28	7.31	7.36	7.11	7.54	7.300	0.1547
100min	7.43	7.42	7.50	7.39	7.63	7.474	0.0960
110min	7.49	7.53	7.56	7.42	7.67	7.534	0.0923
120min	7.65	7.58	7.73	7.62	7.78	7.672	0.0816

2. 含 10% 香灰試片 (pH=4.94 酸雨) :

表 15 pH 值=4.94 酸雨 10% 香灰試片中和數據表

次數 浸泡時間	1	2	3	4	5	平均值	標準差
0min	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.940	0
10min	5.76	5.92	5.77	6.10	6.03	5.916	0.1520
20min	6.32	6.33	6.69	6.37	6.41	6.424	0.1529
30min	5.73	6.37	6.00	6.23	6.44	6.154	0.2905
40min	6.43	6.56	6.47	6.54	6.21	6.442	0.1398
50min	6.92	6.83	6.75	6.76	6.89	6.830	0.0758
60min	6.80	6.93	6.81	6.91	6.65	6.820	0.1113
70min	7.01	6.71	7.00	7.21	7.51	7.088	0.2956
80min	7.14	7.13	7.25	7.25	7.32	7.218	0.0810
90min	7.46	7.25	7.43	7.30	7.24	7.336	0.1026
100min	7.63	7.67	7.81	7.70	7.26	7.614	0.2088
110min	7.64	7.55	7.54	7.70	7.61	7.608	0.0661
120min	7.73	7.77	7.75	8.07	7.84	7.832	0.1393

3. 含 20% 香灰試片 (pH=4.94 酸雨):

表 16 pH 值 = 4.94 酸雨 20% 香灰試片中和數據表

次數 浸泡時間	1	2	3	4	5	平均值	標準差
0min	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.940	0
10min	6.12	5.83	6.50	6.38	6.32	6.230	0.2624
20min	6.53	5.86	6.68	6.52	6.67	6.452	0.3393
30min	6.64	6.03	6.94	6.64	6.01	6.452	0.4130
40min	6.72	6.17	7.01	6.68	6.43	6.602	0.3172
50min	6.74	6.57	7.15	6.78	6.67	6.782	0.2206
60min	6.88	6.90	7.14	6.87	6.93	6.944	0.1119
70min	6.92	7.20	7.26	7.01	7.10	7.098	0.1379
80min	7.17	7.51	7.58	7.27	7.36	7.378	0.1684
90min	7.42	7.75	7.63	7.42	7.48	7.540	0.1454
100min	7.77	8.00	7.72	7.59	7.67	7.750	0.1547
110min	7.81	8.26	7.86	7.77	8.03	7.946	0.2015
120min	7.92	8.41	7.97	7.82	8.24	8.072	0.2446

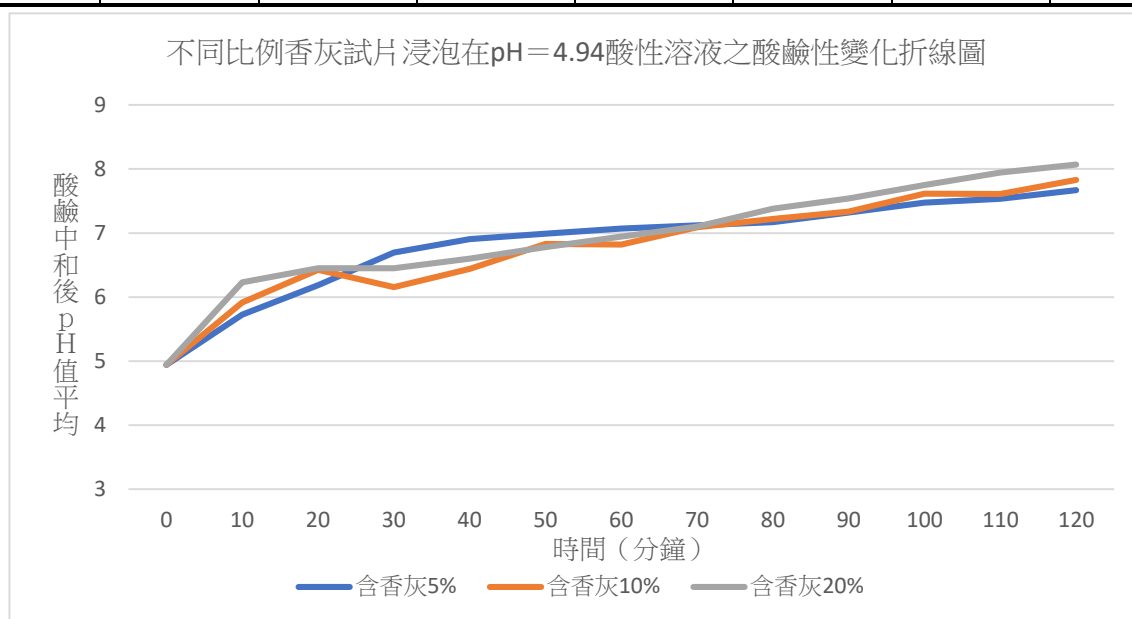


圖 15 自製香灰試片與 pH=4.94 酸性溶液中和之 pH 變化

自製香灰試片與 pH=4.94 酸雨中和反應，初期上升幅度以含香灰 20% 為最佳，但在浸泡 30 分鐘時，5% 高於 20% 高於 10%，在 70 分鐘時恢復正常且由以上數據可得知酸雨的中和效果會因浸泡時間越長而增加，酸雨 pH 值越高整體圖表 pH 值上升曲線越趨緩，並且面對不同 pH 值之酸雨皆能控制上升至 pH=7 上下成長趨勢逐漸緩慢。

#### 四、測試香灰陶土反覆使用情形——重複以酸性溶液試驗後以烈日曝曬：

為檢測香灰陶片在使用後是否能重複使用且與酸雨酸鹼中和之功效不減，採用自然乾燥後再次測試其與酸雨酸鹼中和之能力。本實驗使用 pH=3.04 自製酸雨，重複 3 次，進行 3 組數據的對比將自製香灰陶片片浸泡於 pH=3.04 酸雨中兩小時後拿出，以自然風、曬乾屋瓦完全乾燥，再次放入 pH=3.04 酸雨觀測其是否依舊能中和酸雨。

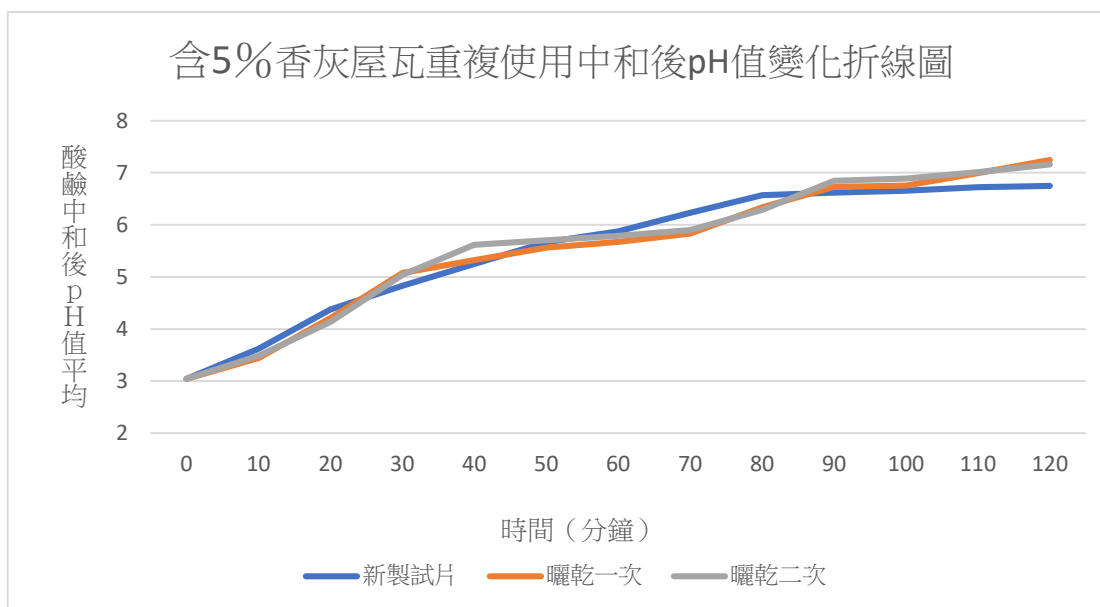


圖 16 5%香灰試片重複使用中和效果折線圖

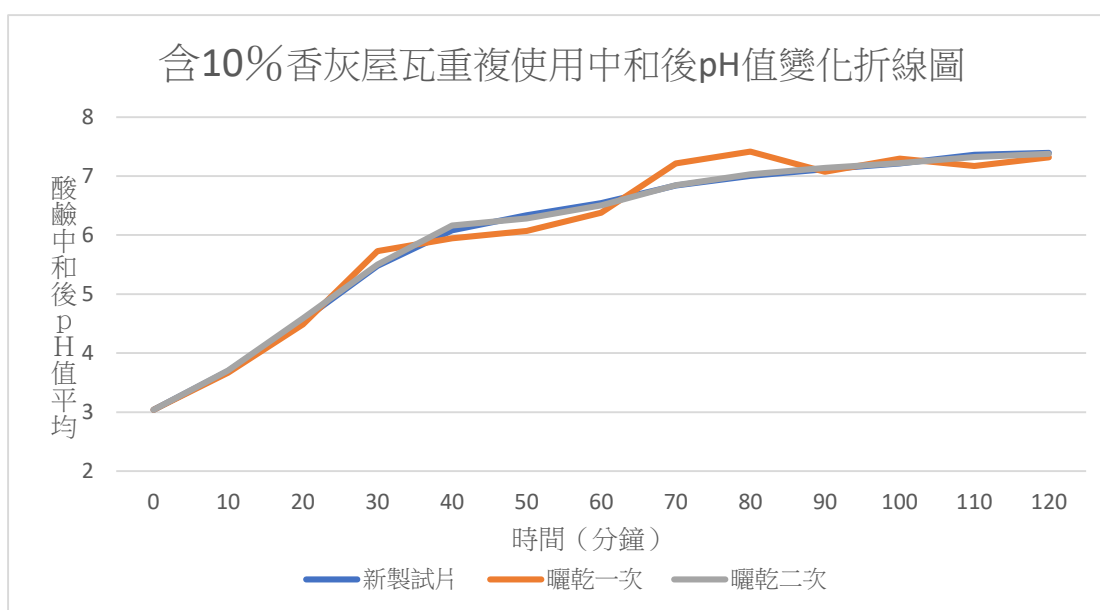


圖 17 10%香灰試片重複使用中和效果折線圖

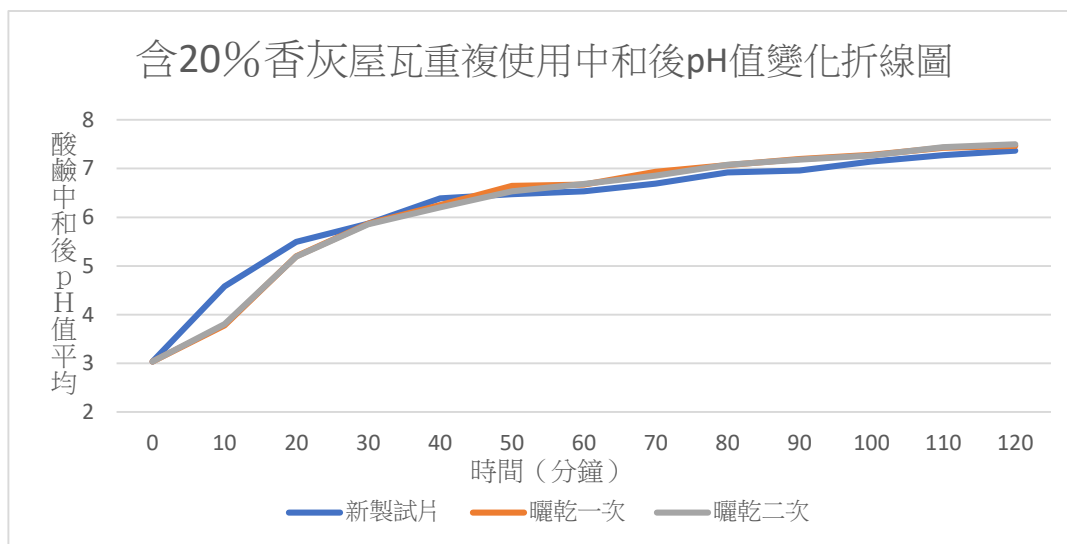


圖 18 20% 香灰試片重複使用中和效果折線圖

根據圖 16、17、18 可得知自然風、曬乾後，pH 值曲線對照實驗圖表並無太大差異，因此可推知香灰屋瓦自然乾燥後並不會影響其中和酸雨的效果，下雨過後，也仍能保持原有的鹼性性質達到我們預期的效果，能長久的中和酸雨降低酸雨對環境的危害。

#### 五、測試屋瓦耐用性——新製香灰屋瓦與常溫使用一年後的香灰屋瓦比較：

試比較新製屋瓦與在常溫下室外經日曬雨淋放置一年的屋瓦，觀察記錄香灰屋瓦經過長時間烈日的曝曬和台灣雨季的影響之後是否仍有中和酸性雨水的功能，長期下來是否適合作為建材使用。根據實驗將自製香灰屋瓦放置一年後外觀並無龜裂、斑駁之跡象，且再以 pH=3.04 的自製酸性水溶液模擬遇到酸雨時，也能夠有效的中和酸性水溶液，與新製的香灰試片比較，中和酸性水溶液的能力並沒有減弱可得知自製香灰屋瓦能長久性使用。

表 17 經一年在室外受日曬雨淋香灰屋瓦外觀比較圖

	新製香灰屋瓦	經日曬雨淋放置一年香灰屋瓦
外觀		



六、自製屋瓦與市售屋瓦硬度測試與外觀比較：

我們透過實驗得知自製屋瓦，是否能與市售屋瓦媲美，本實驗使用莫氏硬度計，分別測量自製屋瓦與市售屋瓦硬度。透過實驗自製不同比例香灰屋瓦與市售屋瓦皆經過正長石（硬度 6）測試後出現明顯的刮痕，在此之前兩屋瓦皆無任何磨損，由此可得知在屋瓦裏頭添加 20% 的香灰，並不會因為混合香灰的多寡與混合香灰後而變得脆弱、易損，硬度規範也可與市售屋瓦比擬。

表 18 對於含香灰量不同的香灰試片進行莫氏硬度測試




	含 5% 香灰試片	含 10% 香灰試片	含 20% 香灰試片
圖示			
最大莫氏硬度	6	6	6

表 19 莫氏硬度測試實驗觀察紀錄表

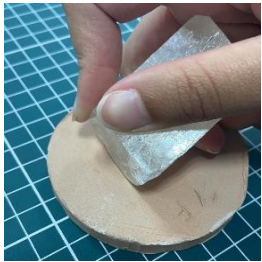


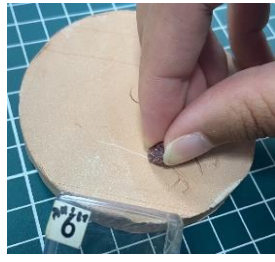
礦物	方解石	螢石	磷灰石	正長石
圖示				
硬度	3	4	5	6
外觀	無刮痕	無刮痕	無刮痕	有明顯刮痕



圖 19 傳統屋瓦（左）與自製香灰屋瓦（右）外觀比較

表 20 傳統屋瓦與自製香灰屋瓦外觀表

性質 \ 屋瓦	傳統屋瓦	自製香灰屋瓦
莫氏硬度	6	6
是否上釉	是	否（保留中和酸性特性）
吸水性	否	否
對環境影響	色彩多元美化環境	減緩因酸雨導致土壤酸鹼不平衡
永續發展價值	無	廢棄物二次利用

### 七、將香灰陶土碎片製成人行地磚實驗：

欲根據一般市售人行地磚為雛形，將不同比例香灰陶土碎片混入水泥中製成水泥製品，並使其酸鹼中和能力不受影響，且有良好的滲水率，達到友善環境的效果。

#### （一）、自製香灰陶土碎片混和水泥製成地磚—第一版


表 21 模擬市售人行地磚為雛型調整砂石比(重量比)

	砂：石	水灰比	結果	圖示
操作	2：0 1.5：0.5 1：1 0.5：1.5 0：2	0.58	添加建築用砂的地磚， <b>滲水率極差。</b> <b>酸鹼中和能力幾乎全無。</b> 顆粒過大影響表面平整度。	

實驗結果：添加建築用細沙使石粒中縫隙被細沙填滿，導致水無法滲透，滲水率不佳，顆粒大小適中能使整體結構更加堅固，表層也較為平整。

(二)、自製香灰陶土碎片混和水泥製成地磚—第二版


表 22 調整水泥與骨料比例(重量比)得出最佳地磚參數

	水泥：骨料	水灰比	結果	圖示
操作	1：1 1：2 1：3 1：4 1：5	0.58	1：1、1：2 石頭含量較少， 滲水率差，1：4 滲水率最佳 1：5 石頭比例過多造成結構不 穩定，易崩壞。 <b>酸鹼中和能力皆不足</b>	

實驗結果：骨料添加過少則水泥會填充入骨料中空隙使其滲透效果較差，若添加過多則水泥無法完全黏著眾多的骨料，使其結構易崩塌損壞，且製作失敗率提高，所有香灰陶土碎片皆在混和水泥時在表層均勻裹上水泥，導致香灰骨料無法直接與酸雨接觸發生反應，酸鹼中和能力大幅減弱。

(三)、自製香灰陶土碎片混和水泥製成地磚—第三版

表 23 將自製香灰陶土碎片附著在水泥地磚表面

	水泥：抵石	水灰比	結果	圖示
操作	1：4	0.58	表層自製香灰陶土碎片在脫模、遇水、 移動時皆會有碎屑掉落的情況。 <b>酸鹼中和能力佳</b> 但表層不平整。	

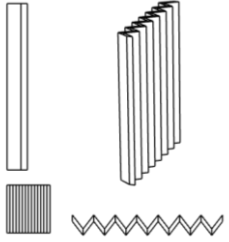
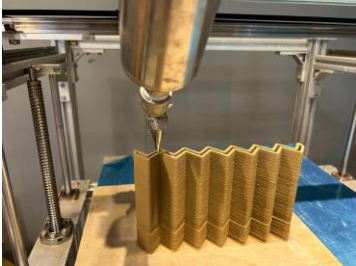
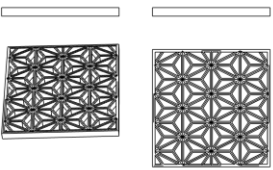
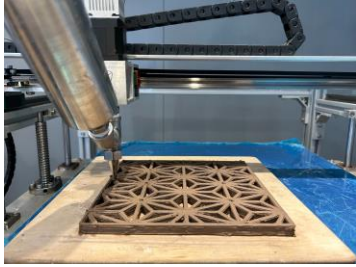
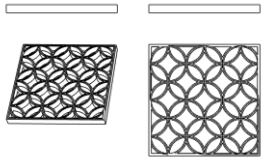
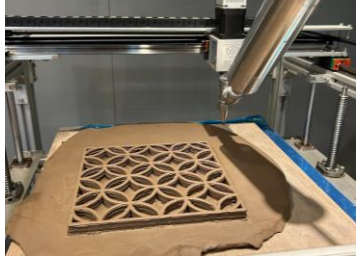
實驗結果：在表層沾黏一層香灰陶土碎粒能有效提高其酸鹼中和效果，不過在使用過程中碎粒會有脫落情形，使其酸鹼中和能力受限於一定的時效性，並且在沾黏碎粒後，表層會較不平整。

八、使用 3D 列印技術製造香灰磚瓦之可行性分析：

(一)、3D 列印因可快速製作原型、彈性設計、低成本製造等優點因此可以幫助我們產出混合香灰的產品用以測試是否能真正的解決香灰過剩並製作出好的產品。我們使用 rhino


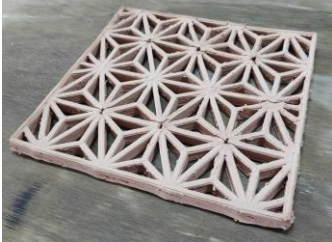

這套軟體外掛的 **grasshopper** 幫助快速建模出我們所需要的模型，且我們依照可能的需求分成了三種類型的模型用以未來討論以及應用。

表 24 三種類型模型特性一覽表

	模型平面圖	列印過程	設計應用理念
類型一： 曲型中空結構			作為屋瓦結構使用中空的結構增加雨水逕流時的接觸面積，達到多次酸鹼中和之效果，也可以減少製造材料，分散受力增加使用壽命。
類型二： 麻葉結構			作為地磚透過鏤空結構分散受力，可鋪在少下雨但土壤酸性的環境，藉由土壤與鏤空的部分水分交換時達到酸鹼中和改善土質的效果。
類型三： 錢紋結構			將地磚下面預先桿一塊土板。作為地磚使用，中間孔洞聚集雨水，下方土板增加雨水停留在磚上時間使酸鹼中和效果更好。

實驗結果：在列印完成之後，將之放兩三天直至完全風乾之後就可以進窯燒製，為確保陶瓷裡仍然有孔隙可使酸雨吸附，我們燒製到 1100°C，以下是燒製後的樣式：

表 25 燒製完成一覽表

	類型一：曲型中空結構	類型二：麻葉結構	類型三：錢紋結構
燒製完成			

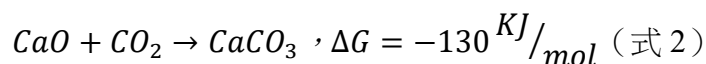
使用 3D 列印機做為香灰相關產品的快速製作是完全沒有問題的，日後更可以因應不同應用方面做不同的建模，使使用方向更加廣闊。

## 伍、討論

### 一、廢棄香灰燒結前後酸鹼值差異：

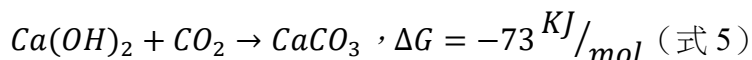
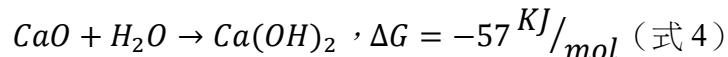
觀察實驗結果數據時發現，廢棄香灰在燒結前後，其酸鹼值式有些微的差異，欲探討其可能的原因。香灰經過國立台灣工藝發展中心檢驗定性分析之後得知主要成分  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  等.....其中，在香灰中  $\text{CaO}$  的含量最為多，約佔整體香灰的 50%，上網查其藥性得知可溶於水  $\text{pKa}=12.8$ ，水溶液呈鹼性。

我們發現經高溫燒結後的香灰，酸鹼值較未燒結的香灰還要來的高，意即燒結後的香灰鹼性較強，由於廢棄香灰中主要成分為  $\text{CaO}$ ，因此我們針對此成分進行更深入的探討，上網查詢相關的反應式：



而在上網查相關文獻之後，空氣中的二氧化碳濃度假設為 0.035%，帶入計算，得：  
 $\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln K = -130000 - 8.314 \times 298 \times \ln(0.00035) = -110.28 \text{ KJ/mol} \quad (\text{式 3})$

然而一般  $\text{CaO}$  在空氣中也會跟空氣中的水氣產生一連串的反應，反應式如下：



在高中化學課裡，我們可以簡單的知道自由能若小於 0，則反應為自發反應，所以我們推定高溫燒結後的香灰，酸鹼值較未燒結的香灰還要來的高的原因是來自第二個反應式，原因為少量  $\text{CaO}$  會跟在空氣中的  $\text{CO}_2$  反應形成  $\text{CaCO}_3$ （難溶於水）；而高溫燒結的這個過程則是第一反應式的逆反應，藉由額外提供的熱能讓  $\text{CaCO}_3$  分解成  $\text{CaO}$  和  $\text{CO}_2$ ，所以燒製後的香灰溶於水其酸鹼值較未燒製香灰溶於水所測得的還要高。

### 二、選擇合適比例的香灰屋瓦試片：

逕流實驗中，得出結論為含 20% 香灰屋瓦對於在短時間接觸定量（總量為 50 mL）的酸性溶液是可以達到短時間酸鹼中和效果，使用滴定管進行定量，且以滴定管的旋轉閥來控制滴定速率。速率上我們控制在每 1 秒滴下 1 滴，計算實驗時長，如下：

$$\text{滴定管滴出 } 20 \text{ 滴} = 1 \text{ mL}, 20 \text{ }^{sec}/\text{mL} \times 50 \text{ mL} = 1000 \text{ sec} \quad (\text{式 6})$$

實驗長度我們控制在 1000 秒，完成定量定速的模擬下雨情形，本次所模擬的實驗環境是在 1000 秒裡累積降下了 50 mL 的雨水，而台灣的下雨型態多為豪雨，在雨水沖刷屋

瓦的地區，含 20%香灰屋瓦為最佳選擇，在同樣時間中和酸性水溶液得速率最高；反之如果天氣型態多為多下毛毛雨類型雨，可使用含 10%的香灰屋瓦即可，詳細情形可以參考各地降雨類型與酸雨 pH 值來選擇適合濃度香灰屋瓦。

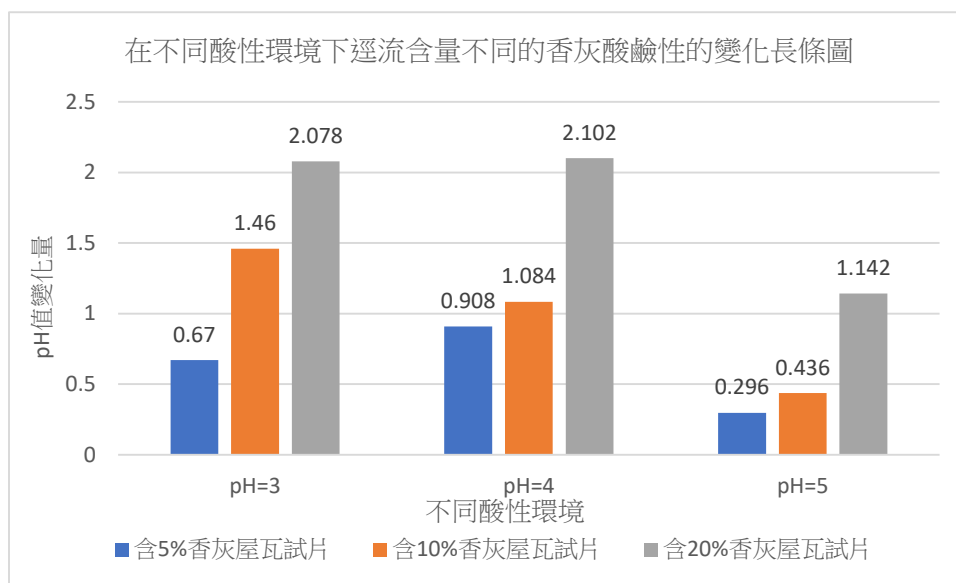


圖 20 在不同酸性環境下逕流含量不同的香灰酸鹼性的變化長條圖

### 三、探討雨勢大小對自製香灰屋瓦的影響：

台灣所處位置特殊，在夏、秋兩季經常有颱風造訪，無論是否有掠過台灣上空，其周圍的氣流挾帶著豐厚的水氣，往往造成台灣當地發布陸上警報和豪雨警報，而我們本次實驗中以廢棄香灰燒結成屋瓦，探討當颱風來臨帶來的雨量和雨勢能否有效的中和掉其中的酸性物質。雨勢大小我們無法直接地用眼睛來做判斷，因此我們可以透過中央氣象局對雨量分級的定義，來判斷這波雨勢的大小以及是否可能造成周圍環境的危害，於是根據中央氣象局對雨量分級的介紹我們統整了以下表格：

表 26 統整雨量分級和對應的相關警戒事項

名稱	雨量	相關危害警戒	
大雨	80mm/24hr 以上或 40mm/1hr 以上	可能發生積水淹水、落石、坍方	
豪雨	豪雨	200mm/24hr 以上或 100mm/3hr 以上	容易發生山洪爆發、土石流、落石
	大豪雨	350mm/24hr 以上或 200mm/3hr 以上	可能有崩塌的危險，易發生土石流，淹水面積擴大、崩塌
	超大豪雨	500mm/24hr 以上	大規模山洪暴發、土石流、坍方

對此，我們想更深入的了解我們以廢棄香灰自製的屋瓦可以承受多大的雨勢侵襲，因此進一步地計算我們所設計的逕流實驗，藉由定量的酸性水溶液，來換算中央氣象局對應的雨量分級表。我們用一直徑約為 10cm 的圓柱狀容器來觀測在這固定面積中，可以承受多大的雨勢，以下是我們的計算、換算過程：

$$\frac{50(mL)}{\frac{1000}{60}(min)} = \frac{X}{60(min)} , X = 180mL ; \text{ (式 7)}$$

$$\frac{180(mL)}{1(hr)} = \frac{Y}{24(hr)} , Y = 180 \times 24 = 4320mL \text{ (式 8)}$$

$$\text{圓柱底面積} : 5cm \times 5cm \times \pi = 78.54cm^2 \text{ (式 9)}$$

$$\text{柱高} : 4320 \div 78.54 = 55(cm) \text{ (式 10)}$$

我們模擬的雨勢經過計算之後得知在 24 小時裡，觀測累積雨量到達 550mm，若比照中央氣象局對雨量分級的定義我們模擬的雨勢已達超大豪雨等級。在重複實驗下，以廢棄香灰燒結成的屋瓦並無損壞之跡象，且仍保持著良好的中和酸性溶液的特性，因此，我們可以判定本實驗自製屋瓦無論是在綿綿細雨的梅雨季亦或者是在夏秋交界的颱風季，都能夠安全使用無虞。

#### 四、廢棄香灰與陶土混合製成屋瓦燒結溫度的探討：

燒結溫度差異會影響中和酸性水溶液的能力，以廢棄香灰製成的屋瓦在燒製時溫度若過高可能使屋瓦產生玻璃化現象，則酸雨不易與屋瓦裡頭的香灰進行酸鹼反應，會降低屋瓦原先設計的巧思；但如若燒製溫度過低（約為 900 度），則經由實驗中以莫氏硬度檢測法來檢測屋瓦，發現硬度較不足，且表面較容易吸收水分，所以選擇合適的燒製溫度來燒結香灰屋瓦是非常重要的。

經過幾次的實驗，我們認為以 1100 度燒製出來的香灰屋瓦，無論是在硬度還是防水性都是其他溫度燒成裡最佳的，並且觀察屋瓦外觀，並沒有發現有玻璃化的情形，

#### 五、廢棄香灰與陶土混合之比例探討：

含 5%、10%、20% 香灰屋瓦試片皆有一定程度的酸鹼中和能力，初期反應時酸雨 pH 值上升幅度較大，反應至 70-80 分鐘後，反應變為平緩，推測應為屋瓦與固定流速的酸性水溶液逐漸達到酸鹼動態平衡。

經過預備實驗，我們發現香灰參雜的比例跟最後燒製出來的試片硬度存在著一定的關連性，我們將香灰的含量配製到佔整體的 30%，但是在燒結出來之後經由莫氏硬度檢測法來檢測屋瓦硬度，發現莫氏硬度最高只有到達 4，而相較於只添加 20%的香灰所燒製成的屋瓦片莫氏硬度最高接近 6，因此最後我們實驗裡僅使用到最多添加 20%的香灰屋瓦試片，以利後續實驗進行。

## 六、3D 列印香灰產品探討

使用 3D 列印出的香灰產品成型良好。惟類型二的麻葉結構在乾燥之後開裂，推測原因是因為加入香灰後因比例較高失去土本來的黏度所以在收縮時與木板摩擦就容易開裂，可以看到類型三的金錢紋結構在下面黏一塊土板之後變成一個整體，增加整體抗應力的能力與黏度所以沒有開裂，日後若要列印鏤空結構應調整切片高度讓結構更緊密。也需要將列印完的產品進行實際上的使用與狀況探討，以期達到真正使用的目的。

## 七、未來展望：

- 1.目前我們做出硬度不輸於市售瓦片的自製酸雨瓦片，未來可以以此為發想找到與香灰一樣同為廢棄物的物質，例如稻殼灰，運用其性質，進行二次利用。
- 2.將香灰混入陶土中並且降低香灰比例製成屋瓦，且添加增加其硬度的材料製成地磚，並實驗香灰、稻殼灰不同混和比例 pH 值的變化圖並得出最佳的香灰、稻殼灰比例，並探討其硬度製成地磚的可行性。
- 3.尋找其他合適的孔洞材料，藉由高溫或化學方法將廢棄香灰鑲嵌進去，開發新興材料，解決酸雨或者其他對環境產生危害的酸性物質。
- 4.將列印出香灰產品進行實際的應用以及改良：除了對改善環境的效用以及與美化外也希望可以開發出更多不同應用面向的香灰陶瓷產品，期許可以將研究持續發展。



## 陸、結論

根據這研究目的及實驗調查發現，我們將結論列點整理如下：

- 一、本實驗測試不同 pH 值酸雨逕流香灰試片皆能有效地提高酸雨的 pH 值，若在下雨型態多為豪雨，雨水沖刷屋瓦的地區，含 20%香灰屋瓦為最佳選擇。
- 二、不同比例的香灰瓦片皆能在 2 小時內中和不同 pH 值之酸雨，若在多下毛毛雨類型雨地區可使用含香灰 5%陶土所製成屋瓦即可。
- 三、本次自製香灰試片皆能達到重複中和酸雨的效果，且根據台灣本地的酸雨狀況，使用香灰比例 5%之香灰試片製成屋瓦就有卓越的中和酸雨效果。
- 四、本次自製屋瓦皆能達到重複中和酸雨的效果，且自製屋瓦硬度不亞於市售屋瓦的硬度，經過使用一年的屋瓦依舊堅固，質地上也沒有改變，並且將廢棄香灰再利用製成屋瓦有效達到友善生態環境的作用。
- 五、若將香灰陶土與水泥結合製成水泥建材，則濕水泥會將香灰陶土表面覆蓋，使其酸鹼中和能力大受影響，未達成本實驗所期望之效果，但若將「陶瓷廢料」替代水泥中骨材部分製成普通建材，則是有效廢物利用之辦法。
- 六、3D 列印的確有其製造優勢，可快速的產出多樣的香灰產品，並可以依照所需環境建模爾後進行修正與產出。

## 柒、參考文獻資料

Yan zhou, Shansuo zheng, Liuzhuo chen, & Bin wang. (2021, December) . *Experimental Investigation into the Seismic Behavior of Squat Reinforced Concrete Walls Subjected to Acid Rain Erosion*.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221007579#preview-section-abstract>

Xie, S., et al. (2004) . "Investigation of the effects of acid rain on the deterioration of cement concrete using accelerated tests established in Laboratory." *Atmospheric Environment* 38 (27) : 4457-4466.

Chen, K.-F., et al. (2020) . "Human health-risk assessment based on chronic exposure to the carbonyl compounds and metals emitted by burning incense at temples." *Environmental Science and Pollution Research*: 1-13.

Sourav Ray, Mohaiminul Haque, Md. Nazmus Sakib, Ayesha Ferdous Mita, M.D. Masnun Rahman, Bibhas B. Tanmoy(2021)."Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review".<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221004253>.

Habeeb Lateef Muttashar(2020)."Construction & Building Materials - CEMENT".[https://www.researchgate.net/publication/342492206\\_Construction\\_Building\\_Materials\\_-CEMENT](https://www.researchgate.net/publication/342492206_Construction_Building_Materials_-CEMENT).

臺灣網路科教館。酸雨。取自：<https://www.ntsec.edu.tw/LiveSupplyContent.aspx?cat=6841&a=0&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&lsid=6894>

陳姿伊 (2016)。香灰資源化於水泥基材料之工程性質。土木工程與防災科技研究所。國立高雄應用科技大學

郭姿瑩 (2016)。廢棄香灰的環境汙染與再利用之研究。第 56 屆中小學科展論文

連馨惠、王意琪、李庭安、劉珈恩 (2020)。探討酸雨對土壤性質的影響。全國科學探究競賽

茂豐 李婉諦 陳立 王義基 陳炯立(2007)。多元性廢棄物資源化於透水性混凝土磚及標準規範制定之研究。取自：<file:///C:/Users/88692/Downloads/f1316419969484.pdf>

林奕宏。卜作嵐材料之種類及應用。取自：<https://sites.google.com/site/bb9905011/2-1-bo-zuo-lan-cai-liao-de-zhong-lei-ji-fan-ying/bo-zuo-lan-fan-ying>

能源通識站。能源科技與環境，對環境的影響・酸雨。取自：<https://www.Ls-energy.hk/chi/impact-on-the-environment-acid-rain.html>

## 【評語】 052416

此作品針對生活中之廢棄品為出發點，以寺廟祭拜時的香灰作為研究發想重點，依其鹼性香灰特性與混泥土製作地磚，亦透過 3D 列印作為屋瓦，研究發想兼具新穎性，且未來亦能客製化陶瓷相關物品。難能可貴之處，為確保未來屋瓦、地磚等使用，藉由一年期的實際戶外測試確定其實用可行性，惟研究作品可多加以探討其中成分對於材料反應之學理探討，甚至在製成物品時可透過標準檢測方式確認其破壞強度，以利真正落實生活建築之標準規格用。此外此作品亦能兼具二氧化碳捕獲之優勢， $\text{CaO}$  或是  $\text{Ca(OH)}_2$  對於空氣中二氧化碳之反應後續可以延續此議題，將可對全球暖化提供其他可行碳捕獲解決方式，整體來看符合 SDGs 永續發展目標之精神。

# 作品海報



香灰再利用—以廢棄香灰製成



屋瓦及人行地磚改善酸雨問題之研究

## 研究動機

參觀學校附近的廟宇時，了解到大部分廢棄的香灰未經處理直接丟棄或倒入河川。香火較盛的廟宇每天可以產生 50~100 公斤的廢棄香灰。由於香灰是鹼性物質，對環境是否造成危害還存在疑慮。為處理大量廢棄香灰，我們考慮將其與酸性物質混合以達到中性，然後再排入自然環境。由於環境污染日益嚴重，許多工業排放物質導致雨水的 pH 值降至小於 5。因此，我們提出將廢棄香灰與屋瓦和人行地磚結合，使酸雨與自製的中性香灰屋瓦和人行地磚中和，解決廢棄香灰的問題，並減少酸雨對生態系統、人類健康和建築物等的危害。

## 研究目的

1. 研究不同 pH 值酸雨逕流不同比例香灰所製成香灰試片之酸鹼值影響
2. 研究不同 pH 值酸雨浸泡不同比例香灰所製成香灰試片之時間與酸鹼值關係
3. 研究自製屋瓦及人行地磚是否達到永續利用之效果
4. 研究不同比例之自製香灰陶土與市售磚瓦之硬度比較
5. 研究自製香灰陶土碎片混和水泥地磚之可行性
6. 研究使用陶瓷 3D 列印應用自製香灰磚瓦產品之可行性

## 研究方法

### 自製香灰屋瓦可行性檢測

鍛燒後香灰鹼性  
性質檢測

1. 香灰燒結攝氏 1100 度
2. 檢測未鍛燒與鍛燒香灰 pH 值並比較

模擬酸雨積水於屋瓦  
酸鹼中和能力

1. 配製 3 種不同 pH 值酸雨(如右上表)
2. 以三種不同 pH 值酸雨 50mL 滴定含香灰 5%、10%、20%試片
3. 流經屋瓦之酸雨 pH 值檢測

模擬酸雨逕流屋瓦  
酸鹼中和能力

1. 將含香灰 5%、10%、20%試片泡入 110mL 三種 pH 值酸雨
2. 浸泡屋瓦之酸雨 pH 值檢測 (10 分鐘檢測一次，共 2 小時)

屋瓦反覆酸鹼  
中和能力

1. 以 pH=3 酸雨 110mL 泡入含香灰 5%、10%、20%屋瓦試片，並於浸泡過後以日光曬乾，反覆數次
2. 浸泡屋瓦之酸雨 pH 值檢測 (10 分鐘檢測一次，共 2 小時)

測試屋瓦耐用性

1. 將新製及經風吹雨淋一年之香灰屋瓦泡入 pH 值=3 酸雨 110mL 中
2. 浸泡屋瓦之酸雨 pH 值檢測 (10 分鐘檢測一次，共 2 小時)

自製屋瓦與市售  
屋瓦比較

1. 以莫氏硬度檢測含香灰 5%、10%、20%屋瓦試片與市售屋瓦比較
2. 自製屋瓦與市售屋瓦外觀比較

pH 值	成分	溶質	溶劑(水)
pH=0.96 (母液)	硫酸 1.55g 硝酸 10.94g		987.51mL
pH=3.04	母液 10 mL		990 mL
pH=3.97	母液 1 mL		999 mL
pH=4.94	母液 0.1 mL		999.9 mL

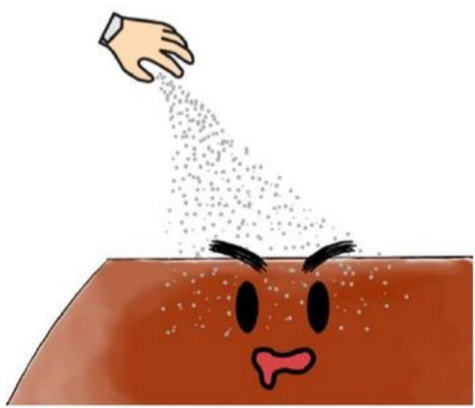


圖 1 混合香灰與陶土

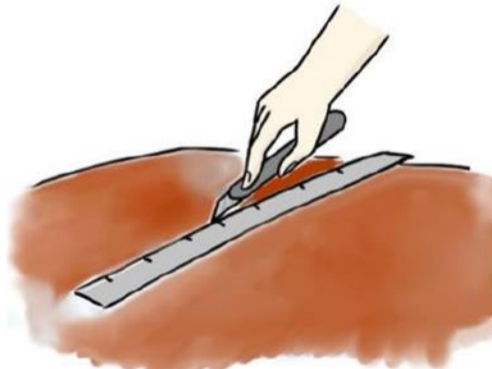


圖 2 切割

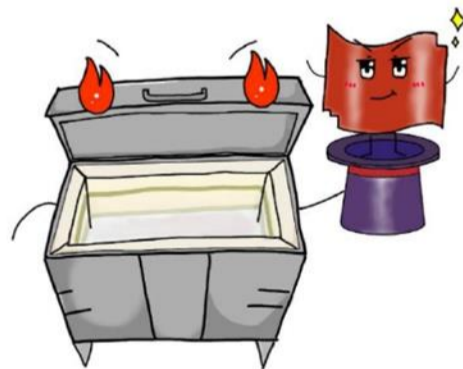


圖 3 以電窯 1100 度燒製

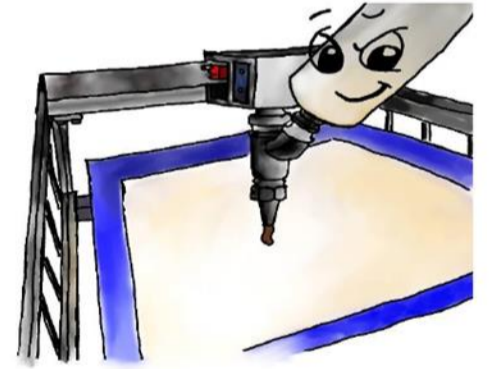


圖 4 以 3D 列印機製成不同樣式地磚和屋瓦

### 自製香灰地磚可行性檢測

香灰與水泥結合製成  
地磚可行性探討

1. 以市售人行地磚為雛型製成含 5%、10%、20%香灰水泥地磚
2. 將香灰以不同方法加入水泥地磚中，檢測其結構性是否堅固

香灰水泥地磚  
酸鹼中和能力檢測

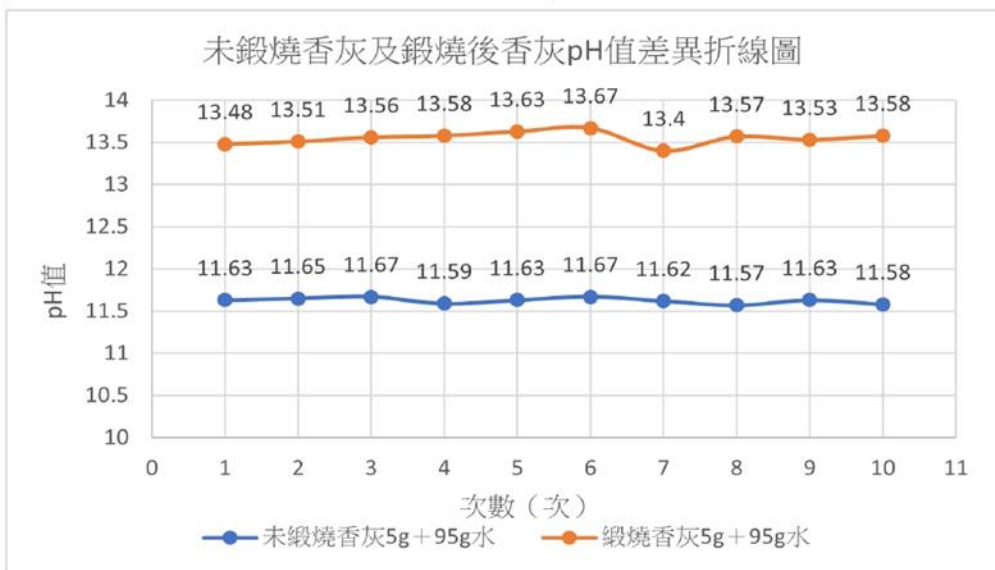
1. 將不同製作方法之含 5%、10%、20%香灰水泥地磚泡入 pH=5 酸雨
2. 比較不同製作方法之香灰地磚酸鹼中和能力

結合 3D 列印技術  
製成地磚可行性

1. 使用 Rhino 軟體進行所需地磚等產品建模
2. Simplify3D 作為切片軟體將 stl 檔案轉成 gcode 再放到 3D 列印機進行列印

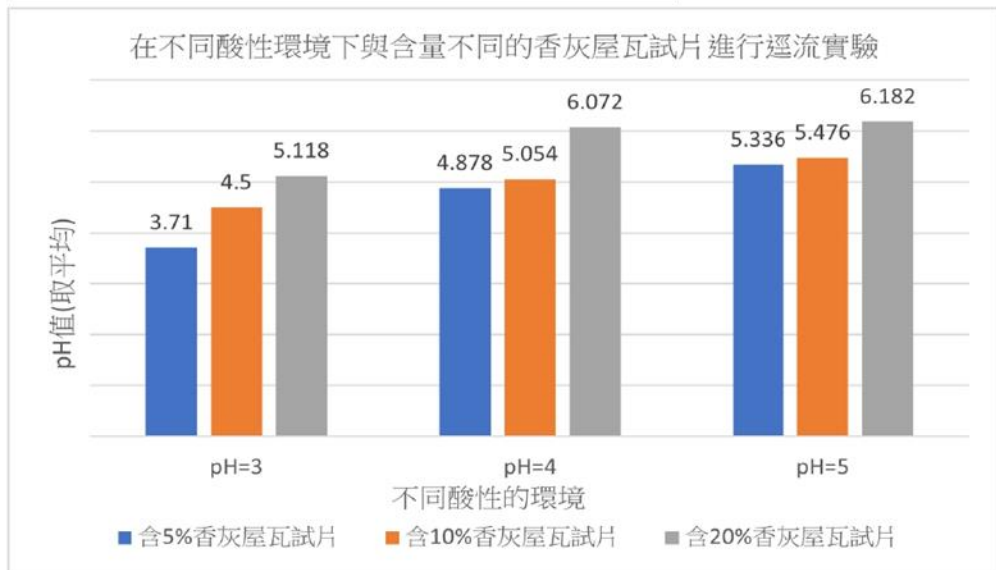
# 研究結果

## 一、鍛燒後香灰鹼性性質檢測



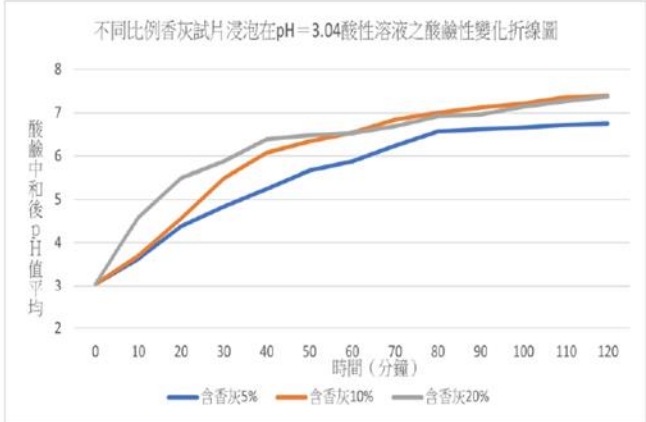
結果一：鍛燒後香灰 pH 值大於未鍛燒時香灰 pH 值

## 二、模擬酸雨逕流屋瓦酸鹼中和能力

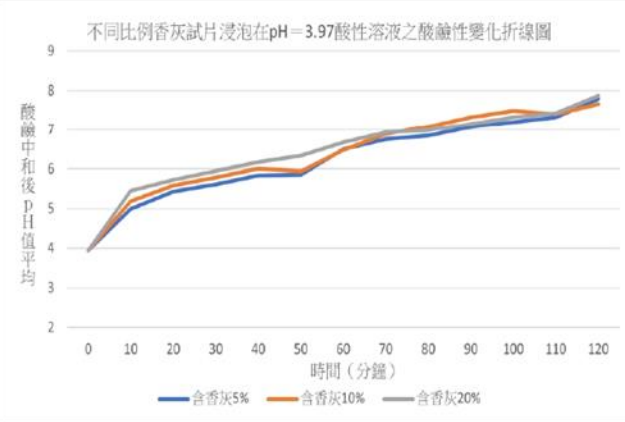


結果二：逕流時含 20% 香灰屋瓦酸鹼中和能力最佳，能接近中性

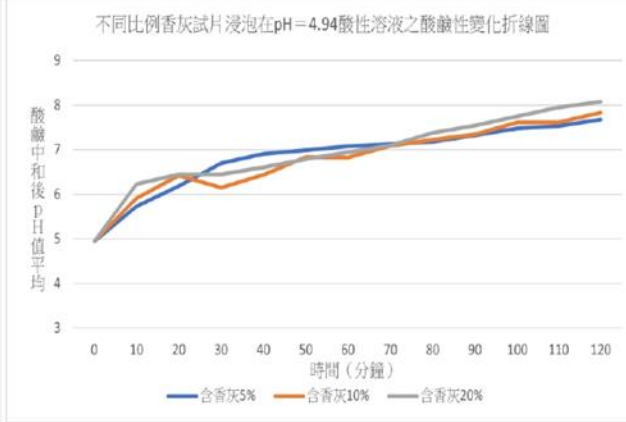
## 三、模擬酸雨積水於屋瓦



自製香灰試片與 pH = 3.04 的酸性溶液中中和

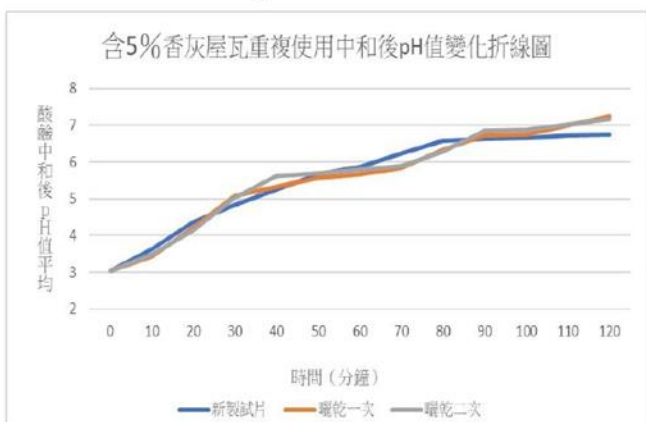


自製香灰試片與 pH = 3.97 的酸性溶液中中和

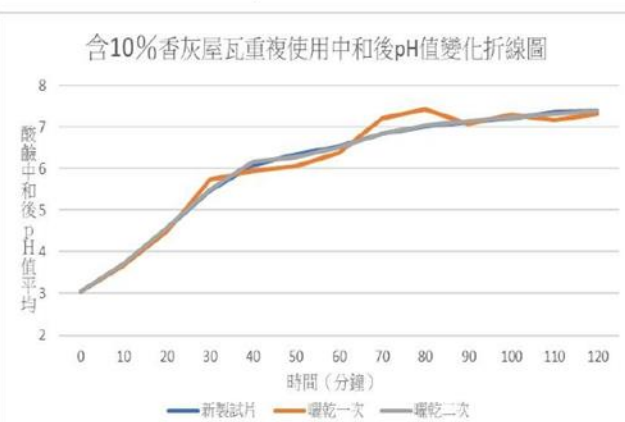


自製香灰試片與 pH = 4.94 的酸性溶液中中和

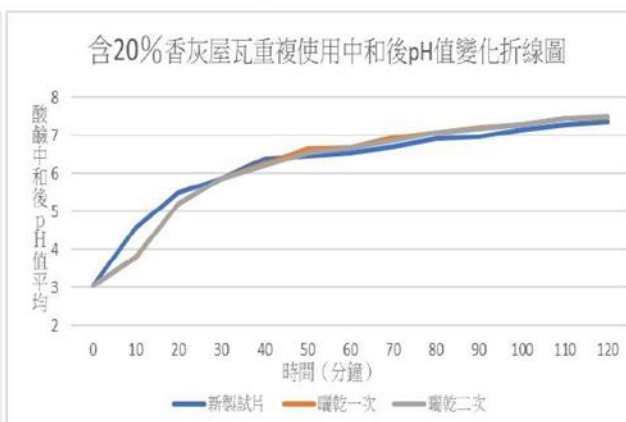
## 四、屋瓦反覆酸鹼中和能力



5% 香灰試片重複使用中和效果折線圖



10% 香灰試片重複使用中和效果折線圖



20% 香灰試片重複使用中和效果折線圖

結果三：整體而言，香灰含量越多的屋瓦，酸鹼中和能力佳。但在 pH=3.04 及 pH=3.97 與酸雨反應 70 分鐘後，含 20% 及含 10% 香灰屋瓦酸鹼中和效果無明顯差異。

結果四：不論是含 5%、10%、20% 香灰之屋瓦，曬乾一次及曬乾二次與新製試片中和效果折線幾乎重疊。

## 五、測試屋瓦耐用性

	新製香灰屋瓦	日曬雨淋放置一年香灰屋瓦
外觀		
酸鹼中和能力	香灰含量越多的屋瓦能力越佳	與新製香灰屋瓦無明顯差異

## 六、自製屋瓦與市售屋瓦比較

性質	傳統屋瓦	自製香灰屋瓦
莫氏硬度	6	6
是否上釉	是	否 (保留中和酸性特性)
吸水性	否	否
對環境影響	色彩多元美化環境	減緩因酸雨導致環境危害
永續發展	無	廢棄物二次利用

## 八、使用 3D 列印技術製造香灰磚瓦之可行性分析

	曲型中空結構	麻業結構	錢紋結構
燒製完成品			

## 七、將香灰陶土碎片製成人行地磚 (以燒製後香灰陶土碎片作為骨料)

1. 模擬市售人行地磚為雜型調整砂與骨料比(重量比)

操作	砂：骨料	水灰比	結果
	2 : 0 1.5 : 0.5 1 : 1 0.5 : 1.5 0 : 2	0.58	添加建築用砂的地磚， 滲水率極差， 酸鹼中和能力幾乎全無 顆粒過大影響表面平整

2. 調整水泥與骨料比例(重量比)得出最佳地磚參數

操作	水泥：骨料	水灰比	結果
	1 : 1 1 : 2 1 : 3 1 : 4 1 : 5	0.58	1 : 1、1 : 2 石頭含量少，滲水率差 1 : 4 滲水率最佳 1 : 5 石頭比例過多 結構不穩定易崩壞 且酸鹼中和能力皆不足

3. 將自製香灰陶土碎片附著在水泥地磚表面

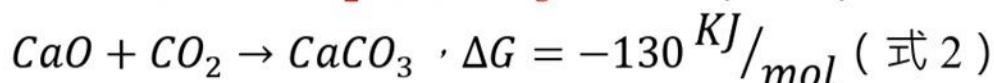
操作	水泥：碎石	水灰比	結果
	1 : 4	0.58	表層自製香灰陶土碎片 在脫模、遇水、移動時 有碎屑掉落的情況。 酸鹼中和能力佳 但表層不平整。

結果八：使用 3D 列印機做為香灰相關產品的快速製作是完全沒有問題的，日後更可以因應不同應用方面做不同的建模，使用方向更加廣闊。

## 討論

### 一、廢棄香灰燒結前後酸鹼值差異：

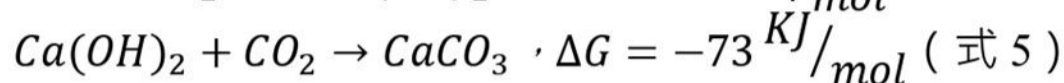
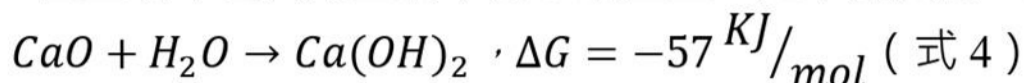
香灰經國立台灣工藝發展中心檢驗定性分析得知主要成分有  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  等.....其中  $\text{CaO}$  的含量最為多，約佔整體香灰的 50%，上網查其藥性得知可溶於水  $\text{pKa} = 12.8$ ，水溶液呈鹼性。經實驗—我們發現經高溫鍛燒後的香灰  $\text{pH}$  值較未鍛燒的香灰高，意即鍛燒後的香灰鹼性較強，由於廢棄香灰中主要成分為  $\text{CaO}$ ，因此我們針對此成分進行更深入的探討，上網查詢相關的反應式：



上網查相關文獻之後，空氣中的二氧化碳濃度假設為 0.035%，帶入計算，得：

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln K = -130000 - 8.314 \times 298 \times \ln(0.00035) = -110.28 \text{ KJ/mol} \quad (\text{式 3})$$

然而一般  $\text{CaO}$  在空氣中也會跟空氣中的水氣產生一連串的反應，反應式如下：



高溫鍛燒這個過程為式 1 的逆反應式，藉由額外提供的熱能讓  $\text{CaCO}_3$  分解成  $\text{CaO}$  和  $\text{CO}_2$

### 二、廢棄香灰與陶土混和製成磚瓦燒結溫度的探討：

混和廢棄香灰的陶製品，在燒製時溫度若過高可能使屋瓦產生玻璃化現象，則酸雨不易與陶土裡的香灰進行酸鹼中和反應；但如若燒製溫度過低（約為 900 度），以莫氏硬度檢測法來檢測屋瓦，硬度較不足，且表面較容易吸收水分。經過幾次的實驗，我們認為以 1100 度燒製出來的香灰屋瓦，無論是在硬度還是防水性都為最佳。

### 三、廢棄香灰與陶土混合之比例探討：

在實驗二反應初期酸雨  $\text{pH}$  值上升幅度較大，反應至 70-80 分鐘後，反應變為平緩，推測應為香灰與酸性水溶液逐漸達到酸鹼動態平衡。經過預備實驗，我們發現香灰參雜的比例跟最後燒製出來的試片硬度存在著一定的關連性，我們將香灰的含量配製到佔整體的 30%，發現莫氏硬度最高只有到達 4，而相較於只添加 20% 的香灰所燒製成的試片莫氏硬度最高接近 6，因此最後我們實驗裡僅使用到最多添加 20% 的香灰試片，以利後續實驗進行。

### 四、3D 列印香灰產品探討：

使用 3D 列印出的香灰產品成型良好。嘗試使用含 25% 香灰陶土時，少數結構在乾燥後開裂，推測原因是因為加入香灰後因比例較高失去土本來的黏度所以在收縮時與木板摩擦就容易開裂，若在整體結構下面黏一塊土板之後使其變成一個整體，皆能有效解決開裂問題，增加整體抗應力的能力與黏度，日後若要列印鏤空結構應調整切片高度讓結構更緊密。

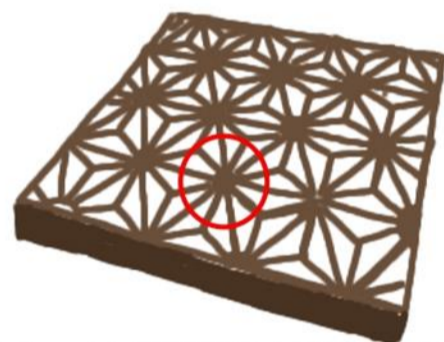


圖 5 麻葉構造易開裂處

## 結論

一、本實驗測試不同  $\text{pH}$  值酸雨逕流香灰試片皆能有效地提高酸雨的  $\text{pH}$  值，若在下雨型態多為豪雨，雨水沖刷屋瓦的地區，含 20% 香灰屋瓦為最佳選擇。

二、不同比例的香灰瓦片皆能在 2 小時內中和不同  $\text{pH}$  值之酸雨，若在下毛毛雨類型雨地區可使用含香灰 5%、10% 陶土所製成屋瓦即可。

三、本次自製香灰試片皆能達到重複中和酸雨的效果，且根據台灣本地的酸雨狀況，使用香灰比例 5% 之香灰試片製成屋瓦就有卓越的中和酸雨效果。

四、本次自製屋瓦皆能達到重複中和酸雨的效果，且自製屋瓦硬度不亞於市售屋瓦的硬度，經過使用一年的屋瓦依舊堅固，質地上也沒有改變，並且將廢棄香灰再利用製成屋瓦有效達到友善生態環境的作用。

五、若將香灰陶土與水泥結合製成水泥建材，則濕水泥會將香灰陶土表面覆蓋，使其酸鹼中和能力大受影響，未達成本實驗所期望之效果，但若將「陶瓷廢料」替代水泥中骨材部分製成普通建材，則是有效廢物利用之辦法。

六、3D 列印的確有其製造優勢，可快速的產出多樣的香灰陶瓷產品，並可以依照所需環境建模爾後進行修正與產出。



## 引註資料

Yan zhou, Shansuo zheng, Liuzhuo chen, & Bin wang. (2021, December). *Experimental Investigation into the Seismic Behavior of Squat Reinforced Concrete Walls Subjected to Acid Rain Erosion*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221007579#preview-section-abstract>

Sourav Ray, Mohaiminul Haque, Md. Nazmus Sakib, Ayesha Ferdous Mita, M.D. Masnun Rahman, Bibhas B. Tanmoy(2021). "Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review". <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221004253>.