

廢棄物類

## 漿紙污泥灰再利用為環保高壓混凝土地磚之研發

林凱隆\*、羅康維\*\*、鄭大偉\*\*\*

### 摘 要

本研究係利用漿紙污泥灰進行資源化再利用評估，並針對漿紙污泥灰之基本材料特性及環境安全進行探討，同時評估其取代部分水泥作為環保高壓混凝土地磚之適性。首先以漿紙污泥灰粉體依不同比例(0~30%)混合取代部分卜特蘭 I 型水泥，並探討在固定水膠比為 0.38 下，探討其卜作嵐反應行為。另外，以不同粒徑大小粒料(> 16 mesh、10~16 mesh)、不同砂漿比(砂+石:水泥漿體分別為 80:20、85:15 及 90:10)，再以漿紙污泥灰粉體依不同比例(0~30%)混合取代部分卜特蘭 I 型水泥，且根據 CNS 13295 相關之規範製作環保高壓混凝土地磚。綜合上述實驗顯示，漿紙污泥灰可增加晚期抗壓強度及緻密性，故添加漿紙污泥灰於水泥漿體，具有良好膠結性質。且漿紙污泥灰中所含有的 Calcite 及 Portlandite 晶相，皆具有助於卜作嵐活性之發展，顯示漿紙污泥灰相當具有取代部分水泥作為卜作嵐材料之潛力。機械強度試驗結果顯示：機械強度隨漿紙污泥灰取代量越大有下降趨勢。磨耗損失試驗結果顯示：磨耗損失體積隨漿紙污泥灰添加量呈現正相關，且符合 CNS 13297 之磨耗損失試驗標準。綜合上述，漿紙污泥灰可取代量 10% 及 20% 之作卜特蘭 I 型水泥，並具有應用於環保高壓混凝土地磚之潛力，適合資源化並可降低環境之負荷。

【關鍵字】 漿紙污泥灰、水泥漿體、卜作嵐反應、環保高壓混凝土磚

---

- |                     |      |
|---------------------|------|
| * 國立宜蘭大學環境工程系       | 特聘教授 |
| ** 國立台北科技大學資源工程研究所  | 博士生  |
| *** 國立台北科技大學資源工程研究所 | 特聘教授 |

## 一、前言

近年來台灣地區隨著工業蓬勃發展，伴隨而來的廢棄物處理問題也逐漸浮出檯面。而循環型社會之建構成爲當今重要之時代課題，尤其在廢棄物處理回收利用方面，亦以達到「零排放」及「資源化」爲最終之目標。然而，造紙產業因製造或生產過程產生之廢水，經廢水處理廠處理後產生大量的漿紙污泥；而漿紙污泥的處理與處置問題往往出現瓶頸。根據行經濟部工業局統計指出，2020 年公告造紙產業的污泥申報量達到 40 萬公噸(行政院環保署，2020)，目前再利用方式大多以肥料化及燃料化等爲主，根據邱英嘉等人(2018)研究指出，摻配木屑、咖啡渣與稻稈粒均能提升漿紙污泥衍生燃料的熱值(約 34.35%~49.02%)與升溫速率，並降低燃料灰渣的灼燒減量(約 33.31~51.13%)(邱英嘉，2018)。Adesanya 等人(2018)指出，混合水泥中添加 18% 的漿紙污泥於 28 天時，可達到最大強度(42 MPa)，且符合歐洲標準 EN-197(Adesanya, 2018)。而國內燃料化可行處理設施仍以焚化爲主，其中會產生大量之焚化灰，惟其焚化灰富含  $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{SiO}_2$ ，具卜作嵐材料之特性，具應用之潛力，後續宜建立再利用技術。

透水混凝土是一種特殊型式的多孔混凝土，一般多使用平面澆置的版片構件上，允許雨水或其他來源的水穿過混凝土層，降低逕流量並提升地下水蓄存量。高透水性係藉由混凝土中大量連結的孔洞來達成。一般透水混凝土幾乎不含細粒料(又稱 No-Fines Concrete)，僅利用有限的水泥質膠體將粗粒料黏結，維持混凝土內部孔洞的連續性。過去，透水混凝土多應用於停車場、人行步道、輕承載區域及溫室區域。而永續發展是社會上普遍追求的目標，而透水混凝土正是永續營建的重要工程材料之一。近年來，國內各產業均以打造永續台灣爲未來努力的目標，爲有效解決水資源流失、環境生態破壞、熱島效應擴張及漿紙污泥灰處理處置問題，利用漿紙污泥灰研發高性能環保高壓混凝土磚，實具重要性及迫切性。故本研究係以漿紙污泥灰經前處理後，以漿紙污泥灰粉體依不同比例(0~30%)混合取代部分卜特蘭 I 型水泥，並探討在固定水膠比爲 0.38 下，漿紙污泥灰漿體於不同養護齡期其卜作嵐反應行為，以瞭解漿紙污泥灰與水泥間之卜作嵐反應。另外，以不同粒徑大小粒料(> 16 mesh、10~16 mesh)，再以漿紙污泥灰粉體依不同比例(0~30%)混合取代部分卜特蘭 I 型水泥，且根據 CNS 13295 相關之規範製作環保高壓混凝土磚。

## 二、漿紙污泥特性及資源化

### 2.1 漿紙污泥之質量特性

2009 至 2019 年漿紙污泥申報量如表 1 所示(行政院環保署，2020)，雖因國內造紙業外移，但漿紙污泥申報量由民國 2009 年度 35 萬公噸增加至民國 2019 年度的 39 萬公噸，呈現明顯增加的趨勢。且漿紙污泥申報量仍為最大，亟需開發再利用之處理技術(經濟部工業局，2014)。

表 1 漿紙污泥申報量

種 類	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
漿紙污泥 (R-0904)	352,075	417,529	432,432	311,529	181,061	181,873

資料來源：行政院環保署，2020單位：公噸

表 1 漿紙污泥申報量 ( 續 )

種 類	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2014 年
漿紙污泥 (R-0904)	352,075	417,529	432,432	311,529	181,061	181,873

資料來源：行政院環保署，2020單位：公噸

#### 1. 物理特性

漿、紙及紙製品製造產業於生產製程中產生之廢水，經廢水二級生物處理產生漿紙污泥，其成分隨工廠製程及生產紙類種類而異，一般主要成分為紙纖維及黏土物質(經濟部，2020)。台灣造紙業之漿紙流程：首先將原料經蒸煮熱解後，透過洗漿程序，使漿料漂白製成紙漿成品，最後，漿料製成紙張，再經裁紙、包裝後製成紙成品，如圖 1 所示(林耀聖，2013)。典型紙漿生產過程是將纖維類原料加入適量之化學調理劑(硫酸鈉、氫氧化鈉/鈣)，經由蒸煮後再以漂白劑(亞硫酸鹽類或次氯酸鹽類)增

加紙漿潔白及光澤度，最後再加入填料(白土)、染料等製成紙張成品，如圖 2 所示(張漢昌，2005)。

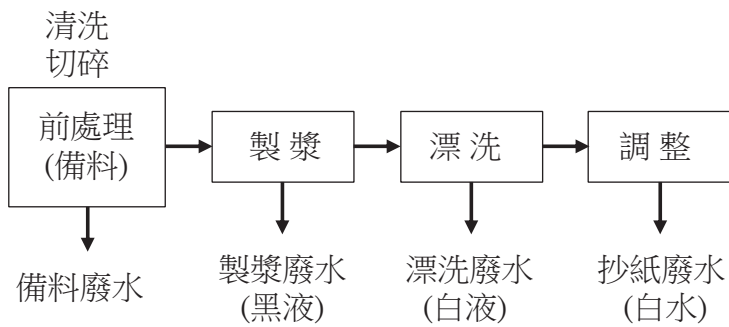


圖 1 漿紙生產流程 (林耀聖，2013)

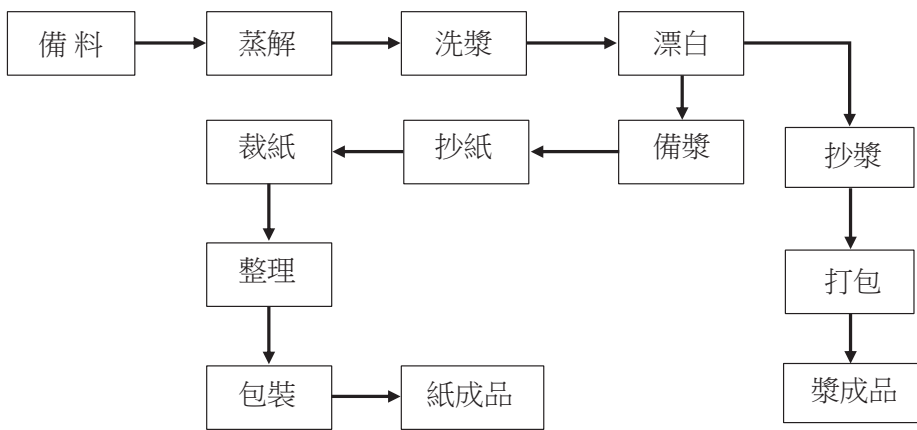


圖 2 造紙製漿典型流程及其廢水 (張漢昌，2005)

以下針對國內外有關漿紙污泥之物理性質文獻進行彙整與探討，如表 2 至 3 所示。

漿紙污泥：

歐洲曾評估 20 種造紙與紙板產業的初始污泥，其性質隨工廠製程及生產紙類種類而差異很大，但可歸類為高灰分污泥(> 30% dry weight)與低灰分污泥(< 30% dry weight)等兩類(Jesús, 2008)。劉任卿(2007)指出，漿紙污泥可燃成分含量為

83.20%，水分含量為 12.2%、灰分含量 4.60%，熱值為 1,880 kcal/kg，因可燃成分高達 83.20%，且水分含量為 12.2%，致使熱值較高；而 pH 為 5.13。Wan 等人(2008)表示，漿紙污泥成分水分含量達 63.47%，揮發性物質含量為 21.88%、灰分為 10.22%、固定碳為 4.43%，熱值為 607 kcal/kg。

Zhang 等人(2010)指出，漿紙污泥水分為 67.8%、灰分為 21.5%、可燃分為 10.7%，而熱值高達 3,736 kcal/kg，為煤的 1/2 熱值，其 pH 為 5，屬弱酸性。蔡孟原(2018)指出，漿紙污泥揮發性物質含量為 41.59%、固定碳為 23.16%，熱值為 1311 kcal/kg。而邱英嘉(2018)指出，漿紙污泥灰分含量 52.85%、揮發性物質含量為 24.71%、固定碳為 22.44%，熱值為 1797 kcal/kg。

表 2 漿紙污泥之物理性質

資料來源	水分 (%)	灰分 (%)	可燃分(%)		熱值 (kcal/kg)	pH 值
			揮發性物質(%)	固定碳(%)		
劉任卿 (2007)	12.2	4.60	83.20		1880	5.13
Wan 等人 (2008)	63.47	10.22	21.88	4.43	607	-
Zhang 等人 (2010)	67.80	21.50	10.70		3736	5
蔡孟原 (2018)	65.20	57.00	41.59	23.16	1311	-
邱英嘉 (2018)	-	52.85	24.71	22.44	1797	-

資料來源：本研究整理，2020

2. 化學特性

漿紙污泥之元素組成：針對漿紙污泥之元素組成進行文獻探討，如表 3 所示。劉任卿(2007)表示，漿紙污泥主要成分為 C 及 O，比例分別高達 30.56% 及 63.02%，

其餘成分為 H 為 5.53%、N 為 0.65% 及 S 為 0.12%。Wan 等人(2008)指出，漿紙污泥主要成分為 C 及 O，分別占 8.75%、15.73%，其餘 H 為 0.35%、N 為 0.35%、S 為 0.22%、Cl 為 0.02%，係由於其固定碳含量極低，以至於 C 元素含量相對較低。Zhang 等人(2010)表示，漿紙污泥主要成分為 C 及 O，分別占 40.03%、29.8%，H 為 5.17%、N則為 3.28%。蔡孟原(2018)表示，漿紙污泥主要成分為 C 及 O，分別占 18.45%、13.27%，H 為 2.10%、N 則為 0.82%。

表 3 漿紙污泥之元素組成

資料來源	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cl (%)
劉任卿 (2007)	30.56	5.53	63.02	0.65	0.12	-
Wan 等人 (2008)	8.75	1.25	15.73	0.35	0.22	0.02
Zhang 等人 (2010)	40.03	5.17	29.8	3.28	-	-
蔡孟原 (2018)	18.45	2.10	13.27	0.82	0.16	0.02

資料來源：本研究整理，2020

2.2 漿紙污泥的資源化方式及處理處置趨勢

1. 漿紙污泥的資源化方式

依據經濟部及農委會公告再利用管理辦法中，公告之污泥資源化方式：漿紙污泥由於污泥中具有纖維可隔熱的特性可作為保溫材料及防火建材中之原料，且因燃燒穩定適合做為磚瓦窯或水泥窯或鍋爐輔助燃料使用(林耀聖，2013)。

2. 漿紙污泥處理處置趨勢

本研究針對漿紙污泥資源化之相關文獻彙整如表 4 所示，並簡要摘錄相關學者的

#### 40 漿紙污泥灰再利用為環保高壓混凝土地磚之研發

研究材料、方法論，研究成果及應用途徑，如表 4 所示：

- (1)肥料化：主要處理趨勢為堆肥與有機肥，可應用於有機肥料與土壤改良劑，其中以堆肥為可行的發展趨勢，且因有機污泥中富有豐富的腐植質與肥份，以及因技術性低可有效肥料化，但需取得肥料登記證。
- (2)材料化與資材化：主要處理趨勢為道路及管線工程應用、燒結及水泥窯煅燒，分別應用於路基回填材料與瀝青混凝土、粒料與污泥磚及環保水泥。因含水率高之污泥將提高處理成本，而降低材料化與資源化之可行性。因缺乏競爭性，應發展高值化利用之技術。Adesanya 等人(2018)指出，混合水泥中添加 18% 的漿紙污泥於 28 天時，可達到最大強度(42 MPa)，且根據歐洲標準 EN-197，可將其混合水泥可分為 CEM III C 和 32.5 N 型水泥(Adesanya, 2018)。
- (3)燃料化：主要處理趨勢為厭氧消化、混燒及廢棄物衍生燃料(Refuse Derived Fuel, RDF)共燃，分別應用於沼氣與沼渣再利用、蒸氣電力，國內燃料化可行處理設施仍以焚化為主。惟高含水率污泥易降低燃燒效率，且國外採用厭氧共消化後再製成 RDF 較為可行。劉任卿(2007)指出，3 種紙漿污泥之可燃分為 83~88%，碳及氫元素含量 20~45%，其生質燃料磚熱值效應為 7.6~106.3%(劉任卿，2007)。陳世強(2011)指出，漿紙污泥、植種菌及營養鹽濃度分別添加 50%、25% 及 12.5%，最大產氫量 181.18 mL；當營養鹽濃度 6.25%~18.75% 時，微生物產氫能力有提升趨勢，但當濃度大於 18.75%，其產氫效率不升反降(陳世強，2011)。



表 4 漿紙污泥國內外文獻彙整

作者/年度	材 料	處理程序或 實驗方法	研究成果	應用 途徑
劉任卿 (2007)	廢棄太空包 亞麻粒片板 稻稈 漿紙污泥 紙渣污泥 綠泥	<ul style="list-style-type: none"> <li>●氣乾稻稈、亞麻粒片板、廢棄太空包等 3 種材料，以磨粉機磨成木粉，並經篩網 40/60 篩選得之試材作為試料。</li> <li>●紙漿污泥、紙渣污泥及綠泥則未經研磨，氣乾脫水後備用。固化規格及條件如下 40 mm(L)*38mm(W)*35 mm (T)、初期壓力：134.5 kgf/cm<sup>2</sup>。溫度 130℃；持壓 7 min。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●木質類可燃分為 74~79%，及碳、氫化學元素含量為 61~66%；3 種紙漿污泥可燃分為 83~88%，碳及氫元素含量為 20~45%；體積回彈率以綠泥最大，其 5 者較小且相當；尺寸回彈率以厚度及寬度方向變化為最大；硬度及抗壓強度以木質類較高。</li> <li>●生質燃料磚熱值效應，廢棄太空包(25.1~112.6%)、亞麻粒片板廢料(48.2~105.6%)、稻稈 (25.0~145.3%)、紙漿污泥(7.6~106.3%)、紙渣污泥(7.8~127.8%)及綠泥(3.8~127.8%)。</li> </ul>	生質 燃料 磚
曾宇亭 (2017)	紡織污泥 漿紙污泥	<ul style="list-style-type: none"> <li>●在升溫速率 20℃/min、最終溫度 200℃ 及持溫 30 min 之焙燒條件。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●固態產物之熱值達到一定焙燒反應溫度(紡織污泥為 200℃，漿紙污泥為 250℃)後會開始逐漸下降，而在熱裂解反應溫度下，其熱值皆會低於純污泥之熱值，導致能源產率及單位體積發熱量會下降。</li> <li>●漿紙污泥有較高的活化能，隨紡織污泥增加後，可有效降低漿紙污泥之高活化能，顯示紡織污泥有降低熱裂解活化能之功效。</li> </ul>	生質 燃料
Wan et al. (2008)	RDF 煙煤 漿紙污泥 廢輪胎	<ul style="list-style-type: none"> <li>●使使用每小時燃燒 130 噸/小時燃料的流體化床，探討代替鍋爐中傳統燃料的可行性。</li> <li>●流體化床規格與條件(3.8*7.7 m；溫度 538℃；熱壓力 140 kg/cm<sup>2</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●增加 RDF-5 混燒的比例，使 SO<sub>x</sub> 及 NO<sub>x</sub> 隨著比例而下降，但在飛灰及底灰中 CO、燒失量、戴奧辛則呈現反向趨勢。</li> <li>●在部分取代混燒 RDF-5，二噁英排放量和 Cl 含量呈現相反的趨勢。</li> <li>●所有排放結果均符合環境法規的要求，甚至低於 30%。</li> </ul>	輔助 燃料

作者/年度	材 料	處理程序或 實驗方法	研究成果	應用 途徑
邱英嘉 (2018)	木屑 咖啡渣 稻稈粒 漿紙污泥	●漿紙污泥分別與木屑、咖啡渣及稻稈粒的乾基摻配比例分別為 70:30、80:20、70:30。	●摻配木屑、咖啡渣與稻稈粒均能提升漿紙污泥衍生燃料的熱值(約 34.35%~49.02%)與升溫速率，並降低燃料灰渣的灼燒減量(約 33.31~51.13%)。 ●摻配木屑與稻稈粒之漿紙污泥衍生燃料，分別提高揮發性物質燃燒溫度(ITVM)約 3~8°C 與 11~19°C，同時提高固定碳燃燒溫度(ITFC，即著火溫度)約 14°C。 ●而摻配咖啡渣之漿紙污泥衍生燃料，能提高 ITVM 約 6~8°C 與降低 ITFC 約 4~6°C。	輔助 燃料
陳奕瑞 (2020)	漿紙污泥 廢棄稻稈	●以氣化試驗求得最佳氣化參數條件，並依配比設計以固定最終溫度 800°C、升溫速率 10°C/min 進行共氣化試驗。	●紙容器漿紙污泥有較高之平均活化能為 59.20 Kcal/mol，主要反應區間於 276-386°C 及 396-476°C，紙容器漿紙污泥與廢棄稻稈摻混(比例50:50)後，平均活化能為 41.24 Kcal/mol，降低近 20 Kcal/mol。	輔助 燃料
許智偉 (2010)	漿紙污泥 牛糞 豬糞 稻殼	●通氣式堆肥槽容積 1 m <sup>3</sup> ，進行好氧堆肥使堆肥材料穩定化。 ●堆肥材料經好氧堆肥後，根據 30 天後蚯蚓生長的狀況，觀察堆肥中具有完整蚯蚓生長循環(卵包、幼蚓、無環帶蚯蚓及成蚓(有環帶蚯蚓)，為適合蚯蚓生長的基質。	●不同初始蚯蚓植入密度下，漿紙污泥混合牛糞，最佳操作植入條件為初始蚯蚓密度為 4.5 kg/m <sup>2</sup> 及蚯蚓餵食負荷為 1.33 kg-feed/kg-worm/day。 ●不同通氣條件下，漿紙污泥混合豬糞及稻殼最佳操作植入條件為初始蚯蚓密度為 4.5 kg/m <sup>2</sup> 、蚯蚓餵食負荷為 1.51 kg-feed/kg-worm/day 及通氣量為 0.04 L-air/min/L-compost。 ●好氧堆肥及蚯蚓處理後之完熟堆肥，具緊密、外觀溼潤且黏稠結構，堆肥的營養元	堆肥

作者/年度	材 料	處理程序或 實驗方法	研究成果	應用 途徑
			素及重金屬含量符合雜項堆肥規範的要求。	
Zhang et al. (2010)	漿紙污泥 污水污泥	<ul style="list-style-type: none"> <li>●漿紙污泥與污水污泥以 105°C 烘乾 12 h 進行近似分析，熱重分析儀在氮氣環境下加熱測得重量損失。</li> <li>●操作條件：功率 1.1 Kw、流量 15 L/min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●反應爐由 400°C 升溫至 500°C，H<sub>2</sub> 產量由 1.5 mol/kg 明顯增至 14.5 mol/kg；三成分析顯示水分 67.8%、可燃分 10.7%、灰分 21.5%。</li> <li>●污泥水分有利提高 H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 產生，元素分析碳含量 40.3%、氧 29.8%、氮 5.17%、氮 3.28%，</li> <li>●二次紙漿混合漿紙污泥具更佳 H<sub>2</sub> 產出，能源潛力比污水污泥更好。</li> </ul>	氣態 能源
陳世強 (2011)	漿紙污泥 厭氧醱酵產 氫之出流液 營養鹽	<ul style="list-style-type: none"> <li>●以漿紙污泥與不同比例植種菌種及營養鹽添加方式進行批次試驗，在 41±1°C 之恆溫室環境下進行共醱酵試驗，以造紙產業經二級處理之漿紙污泥為基質，及取自厭氧醱酵產氫之出流液與漿紙污泥，經混合馴養後作為菌種來源，並添加出流液作為營養鹽。</li> <li>●探討以共醱酵促進漿紙污泥產氫之情形，並建立以產氫為指標之最適化條件。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●漿紙污泥、植種菌及營養鹽濃度分別添加 50%、25% 及 12.5%，最大產氫量 181.18 mL。</li> <li>●共醱酵試驗中，不同植種菌的濃度條件下，伴隨營養鹽濃度增加，對共醱酵系統產氫有顯著影響。營養鹽濃度 6.25%~18.75% 時，微生物產氫能力有提升趨勢，但當濃度大於 18.75%，其產氫效率不升反降。</li> <li>●過量的高濃度營養鹽會對微生物的生長及活性有抑制的影響。</li> <li>●當低營養鹽/植種菌條件時，對於微生物的活性及生長有較佳情形。</li> </ul>	氫氣
羅勻聘 (2020)	漿紙污泥 廢車破碎殘 餘物 (ASR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●控制當量比、氣化溫度(700°C)、廢車破碎殘餘物摻混比例(0%~15%)等條件。</li> <li>●探討漿紙污泥與廢車破碎殘餘物共同</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ASR 比例為 10%時，氫氣、一氧化碳比例分別為 4.91 vol.%及 2.06 vol.%，而添加廢車破碎殘餘物比例增加至 15%，前述產氣組成分別增加為 4.80 vol.% 及 2.62 vol.%。</li> </ul>	共同 氣化

作者/年度	材 料	處理程序或 實驗方法	研究成果	應用 途徑
		氯化反應過程，合成氣及產氣組成特性、產物分佈特性、產能效率及重金屬排放分布特性之影響。	<ul style="list-style-type: none"><li>●添加 ASR 比例從 10% 增加至 15%，氣體平均熱值從 1.93 MJ/Nm<sup>3</sup> 增加至 2.50 MJ/Nm<sup>3</sup>，冷燃氣效率從 22.67% 增加至 37.81%。</li><li>●添加比例為 5% ASR 時，一氧化碳及甲烷組成比例分別為 2.99 vol.% 及 1.79 vol.%，添加 ASR 比例增加至 15%，一氧化碳及甲烷分別增加為 3.45 vol.% 及 2.10 vol.%。氣體平均熱值隨著添加 ASR 比例增加，從 1.64 MJ/Nm<sup>3</sup> 增加至 1.83 MJ/Nm<sup>3</sup>，冷燃氣效率從 0.17% 增加至 0.29%。</li><li>●實廠規模之氯分佈特性結果顯示，添加 0~15% ASR 比例，氯含量主要分佈於固相當中，均約為 98% 以上。此外，根據戴奧辛毒性當量濃度分析結果，氯化爐之濃度較高，約為 6.129 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>，皆符合法規標準(0.5 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>)。</li></ul>	
Araujo and Monteiro (2006)	巴西土壤 漿紙污泥 木材廢料	<ul style="list-style-type: none"><li>●土壤取自巴西，經 2 mm 篩網篩分土壤樣品，漿紙污泥 1:1 混合木材廢料，以曝氣法曝氣 90 天進行生產堆肥。</li><li>●未經處理漿紙污泥與堆肥應用，探討土壤微生物量及活性。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>●未經處理污泥產率 6.4 t/ha，由堆肥處理產率 19 t/ha，在 28°C 孵育 60 天，每天抽樣微生物之活性。</li><li>●在 15、30、60 天後評估土壤微生物，污泥經由處理後應用於堆肥明顯增加微生物量及其活性。</li><li>●60 天後經堆肥處理之污泥在土壤微生物量及其活性明顯增加，而未經處理污泥則未受到顯著影響。</li></ul>	堆肥
Garg et al. (2006)	漿紙污泥 土壤	<ul style="list-style-type: none"><li>●廢棄物、牛糞與堆肥混合物比例為 6:3:1，保持水分含</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>●蚯蚓堆肥中氮、磷、鉀的比例明顯增加，pH 值和有機碳總量則下降，總氮含量</li></ul>	蚯蚓堆肥

作者/年度	材 料	處理程序或實驗方法	研究成果	應用途徑
		<p>量 55~60%，進行三重複試驗。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●在 0、20、40、60、80 及 100 天，探討不同廢棄物對於蚯蚓堆肥的影響。</li> </ul>	<p>4.4~5.8 倍明顯成長，其增加順序漿紙污泥 = 工業廢棄物 &gt; 農業殘渣 &gt; 廚房垃圾。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●以不同混合比例，有機磷含量增加 1.4~6.5 倍，有機碳含量減少最高為廚房垃圾 2.2 倍、其次工業廢棄物 1.7 倍、漿紙污泥 1.5 倍，農業殘渣 3 倍，顯示蚯蚓堆肥適合分解不同類型有機廢棄物。</li> </ul>	
Balasubramani et al. (2006)	漿紙污泥水泥	<ul style="list-style-type: none"> <li>●漿紙污泥用於建築材料。</li> <li>●漿紙污泥乾燥及破碎，並以 212 微米進行篩分。</li> <li>●砂漿立方體模具大小為 70.6 × 70.6 × 70.6 mm。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●混合水泥中未能滿足結構應用所需的強度，非結構強度和其他性能皆符合印度國家標準局材料要求。</li> <li>●部分取代高達 30% 可應用在非結構性材料。</li> </ul>	地板瓷磚/路面塊/磚塊
吳浚璋 (2019)	淨水污泥 漿紙污泥	<ul style="list-style-type: none"> <li>●控制蒸氣壓力 0.9 MPa、反應時間 8 小時，控制鈣矽比 (0.33~1.51) 及調濕養護 (室溫 25℃ 及濕度 70%) 14 天。</li> <li>●日夜光暗循環 (日夜各 12 小時) 及濕度條件 (白天: 65% 及夜晚: 75%) 培養 28 天。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●在控制鈣矽比 1.51 及調濕養護之條件下，材料特性除符合輕質化材料之體密度 (1.00 g/cm<sup>3</sup>) 及視孔隙率為 (60.44%) 之要求外，具有最佳之抗壓強度，材料之抗壓強度可達 41 kg/cm<sup>2</sup> 以上，符合相關高壓蒸氣養護輕質氣泡混凝土之產品規範。</li> <li>●輕質化材料表面之青黴菌覆蓋率，以未塗佈試體之 20.96% 與內摻混之 21.82% 最高，而塗佈二氧化鈦 0.1% 試體，具有最佳的抗菌效果，青黴菌覆蓋面積僅約 3.34%。</li> </ul>	輕質化材料 抗菌特性

資料來源：本研究整理，2020

### 三、實驗材料與方法

本研究探討漿紙污泥灰再資源化之方法，以因應實際之要求及解決龐大數量漿紙污泥灰之處理處置問題。本研究利用漿紙污泥灰經前處理後，探討其卜作嵐反應行為。再以漿紙污泥灰粉體依不同比例(0~30%)混合取代部分卜特蘭 I 型水泥，製作環保高壓混凝土地磚，並了解其工程性質，進而提供使用漿紙污泥灰之可行性及實廠化之參考

#### 1. 實驗原理

卜作嵐反應(Pozzolanic Reaction)定義為水泥水化後的氫氧化鈣，侵蝕卜作嵐材料粉體的表面，使其溶出矽鋁離子，且在卜作嵐材料表面逐漸形成矽鋁酸鹽水化產物，CSH 也會隨齡期與鈣矽比的轉換，從 I 型轉換成 II 型，最後在晚期 90 天時，大量的矽鋁酸鹽水化產物填充系統中的孔隙以達到緻密化，其原理如圖 3 所示。

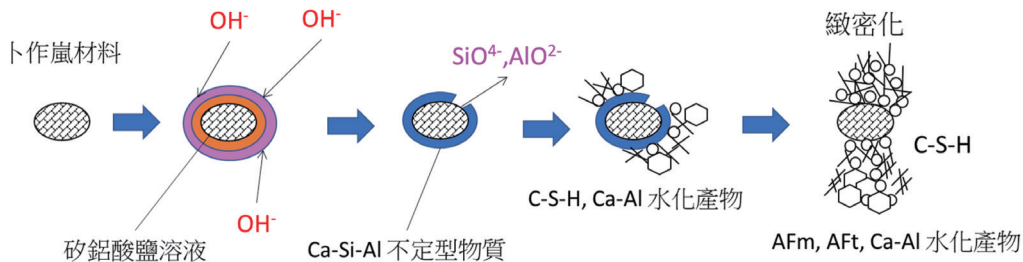


圖 3 卜作嵐反應原理 (黃兆龍，1997)

#### 2. 實驗流程

本研究之試驗分為兩部份，首先將漿紙污泥灰經前處理後，以漿紙污泥灰粉體依不同比例(0~30%)混合取代部分卜特蘭 I 型水泥，並探討在固定水膠比為 0.38 下，漿紙污泥灰漿體於不同養護齡期，探討其卜作嵐反應行為，以瞭解漿紙污泥灰與水泥間之卜作嵐反應。其實驗流程如圖 4 所示。另外，將不同粒徑大小粒料(> 16 mesh、10~16 mesh)，再以漿紙污泥灰粉體依不同比例(0~30%)混合取代部分卜特蘭 I 型水

泥，且根據 CNS 13295 相關之規範製作環保高壓混凝土磚，並設定不同配比(砂+石:水泥漿體)為 80:20、85:15 及 90:10，製作成 5 cm(L) × 5 cm(W) × 5 cm(H)之正方試體及15 cm(L) × 5 cm(W) × 5 cm(H)之長方試體於齡期為 7、14 及 28 天時，分別進行抗壓強度及抗彎強度試驗，藉以與一般高壓混凝土磚試體進行比較，以探討漿紙污泥灰應用於高壓混凝土磚對力學性質之影響。其實驗流程如圖 5 所示。

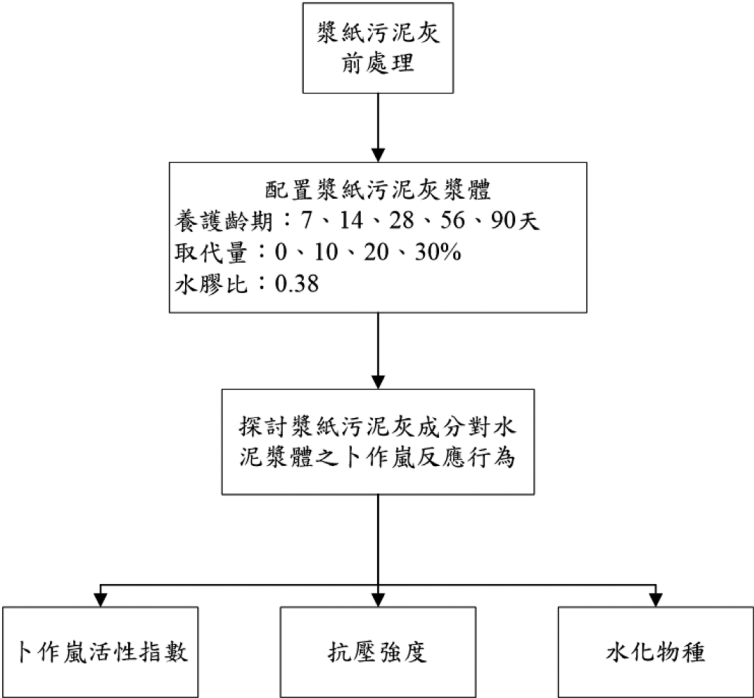


圖 4 漿紙污泥灰漿體流程圖



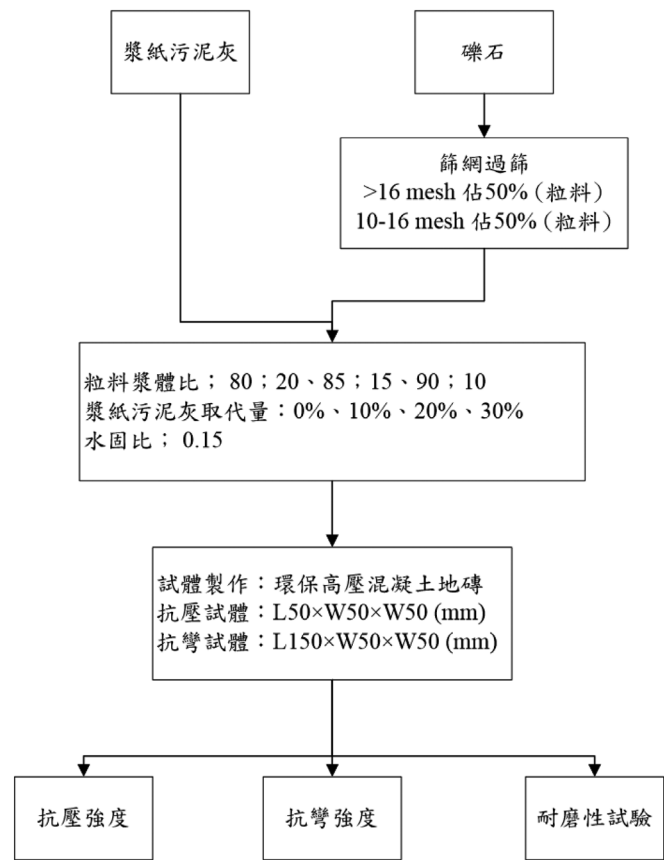


圖 5 環保高壓混凝土地磚流程圖

## 四、結果與討論

### 1. 基本材料特性

表 5 為漿紙污泥灰之基本特性。由表可知，漿紙污泥灰其細度為 439 m<sup>2</sup>/kg，pH 為 11.67，可能係由於漿紙污泥灰中含有大量的 CaO 而導致，係屬強鹼性物質，於水泥漿體混合後可填充孔隙，經由水化後，可與水泥中 Ca(OH)<sub>2</sub> 鹼活化產生卜作嵐反應，生成水化產物 CSH 及 CAH。此外，卜作嵐活性指數為 116%，為良好的卜作嵐材料。在三成分實驗得知，漿紙污泥灰之水份為 1.18%；而灰份為 88.98%；在可燃份方面，為 9.84%。



表 5 材料基本性質分析結果

樣 品	細度 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	pH (1:20)	含水率 (%)	灰份 (%)	可燃物 (%)	卜作嵐活性 指數(%)
Pulp Sludge Ash	439	11.67	1.18	88.98	9.84	116

本研究使用 XRF 螢光分析儀測定材料之化學組成，分析結果如表 6 所示。由表可知，漿紙污泥灰的主要成分  $\text{CaO}$  為主，而水泥的主要成分為  $\text{CaO}$ ，因此兩者的化性質有相似之處；其次為  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，則是卜作嵐材料之必要成分之一。根據文獻指出， $\text{SiO}_2$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  能促進水泥漿體早期強度之發展(林耀聖，2013；謝政平，2013)；另外用 X-Ray 繞射儀(XRD)分析其漿紙污泥灰之物種晶相顯示，漿紙污泥灰其主要以 Calcite 及 Portlandite( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )晶相為主(圖 6)。根據 Frias 等人研究指出，當漿紙污泥透過高溫煅燒後會導致 Calcite 及 Portlandite 晶相峰值強度的增加，進而提升其卜作嵐材料之反應活性(Frias, 2015)。

表 6 材料之化學組成

樣 品	$\text{SiO}_2$ (%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{CaO}$ (%)	$\text{MgO}$ (%)	$\text{SO}_3$ (%)	$\text{K}_2\text{O}$ (%)
Pulp Sludge Ash	14.70	14.80	1.29	63.30	2.99	1.12	0.18

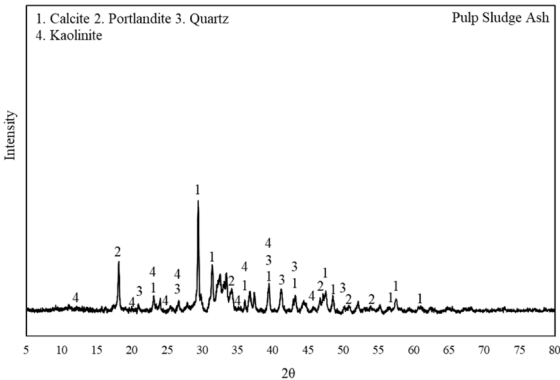


圖 6 漿紙污泥灰之 XRD 圖

本實驗原料之重金屬檢測主要以 Pb、Cr、Cu、Zn、Cd 及 Ni 為主。表 7 為原料之重金屬總量及溶出試驗結果。由表得知，漿紙污泥灰中之重金屬以 Zn 含量為最多 (270 mg/kg)，Cu 為 17.9 mg/kg 次之，而 Pb 等重金屬含量為 4.29 mg/kg。而溶出試驗結果顯示，原料之毒性溶出程序(Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP) 值均合乎法規標準，符合一般事業廢棄物要求，故可直接資源化再利用。

表 7 原料之重金屬總量及溶出試驗結果

樣 品	Pb	Cr**	Cu*	Zn	Cd***	Ni***
Total Metal(mg/kg)						
Pulp Sludge Ash	4.29	N.D.	17.86	270.00	N.D.	N.D.
TCLP(mg/L)						
Pulp Sludge Ash	0.06	N.D.	0.19	0.11	N.D.	N.D.
法規值	5.00	5.00	15.00	-	1.00	-

\*Cu 之偵測極限 < 0.020 mg/Kg；\*\*Cr 之偵測極限 < 0.016 mg/Kg；\*\*\*Cd 之偵測極限 < 0.014 mg/Kg；\*\*\*Ni 之偵測極限 < 0.014 mg/Kg

2. 漿紙污泥灰水泥漿體性質分析

表 8 為漿紙污泥灰之水泥漿體抗壓強度發展情形。結果顯示，當養護齡期為 7 天時，純水泥漿體之抗壓強度為 54 MPa，而當養護齡期為 28 天時，純水泥漿體之抗壓強度提升至 65.1 MPa。在養護初期，水泥漿體之抗壓強度隨漿紙污泥灰取代量增加而有降低之趨勢，顯示漿紙污泥灰具有延緩早期水化反應；然而養護齡期 28 天後，漿紙污泥灰之水泥漿體抗壓強度發展趨勢增強，當漿紙污泥灰取代量為 10% 時，其抗壓強度發展為 65.3 MPa；而當取代量為 30% 時，其抗壓強度發展為 44.1 MPa，可能由於稀釋效應致使漿體中缺乏足夠氫氧化鈣進行卜作嵐反應，因此，強度發展遠低於其他水泥漿體。當齡期大於 56 天後，漿紙污泥灰取代量為 10% 之漿體其抗壓強度 (71.3 MPa)高於 OPC 抗壓強度(67.5 MPa)，顯示漿紙污泥灰水泥漿體因晚期卜作嵐反應有助於強度之增加(Villa, 2009)。並且根據 Frias 等人研究指出，漿紙污泥灰中所含

有的 Calcite 及 Portlandite 晶相皆具有助於卜作嵐活性之發展，進而提升漿紙污泥灰水泥漿體之晚期強度發展(Frias, 2015)。

表 8 漿紙污泥灰水泥漿體之抗壓強度發展

漿紙污 泥灰取 代量 (%)	抗壓強度(MPa)									
	7 天		14 天		28 天		56 天		90 天	
	抗壓 強度	相對 標準 偏差	抗壓 強度	相對 標準 偏差	抗壓 強度	相對 標準 偏差	抗壓 強度	相對 標準 偏差	抗壓 強度	相對 標準 偏差
OPC	54.01	0.03	57.84	0.04	65.07	0.06	66.61	0.02	67.48	0.07
10	51.45	0.04	55.64	0.05	65.34	0.09	69.47	0.03	71.32	0.08
20	43.69	0.05	47.20	0.02	54.61	0.06	55.89	0.09	56.32	0.05
30	40.03	0.04	40.83	0.13	44.09	0.05	45.93	0.04	51.27	0.10

圖 6 為養護齡期為 7~90 天時之 OPC 水泥漿體之 XRD 分析結果。從 XRD 分析結果顯示，無論何種齡期下之水泥漿體，係以  $\text{Ca(OH)}_2$  為最顯著的水化產物。另外，養護齡期為 7 天時，OPC 漿體於  $26.13^\circ\sim35.19^\circ$  區域之間有水化產物 C-S-H ( $\text{Ca}_6\text{Si}_3\text{O}_{12}\cdot\text{H}_2\text{O}$ )寬廣之繞射峰出現，惟繞射峰強度不甚明顯；另外，隨齡期發展單礦物  $\text{C}_2\text{S}$  與  $\text{C}_3\text{S}$  會持續水化生成  $\text{Ca(OH)}_2$  與 C-S-H 膠體。根據 Zeng 等人指出，隨著養護齡期的增加其  $\text{C}_2\text{S}$  及  $\text{C}_3\text{S}$  峰值會下降(Zeng, 2010)；而 Kourounis 研究結果發現，矽酸鈣晶相繞射峰值會在養護晚期時會有明顯下降(Kourounis, 2007)，因此， $\text{C}_3\text{S}$  及  $\text{C}_2\text{S}$  繞射峰有逐漸減弱之趨勢；然而養護齡期為 56 天時仍有部分未產生反應之  $\text{C}_3\text{S}$  單礦物存在。當水化反應初期，漿紙污泥灰漿體取代量為 10% 時，主要繞射峰係以  $\text{C}_3\text{S}$  ( $29.22^\circ, 29.45^\circ, 32.48^\circ, 34.32^\circ$ )、 $\text{C}_2\text{S}$  ( $31.93^\circ, 32.19^\circ, 32.48^\circ, 41.24^\circ$ )、 $\text{Ca(OH)}_2$ ( $17.97^\circ, 34.02^\circ, 46.96^\circ, 50.73^\circ$ )及 CSH ( $26.13^\circ\sim35.19^\circ$  broad diffusion peak)等

繞射峰為主。當養護齡期為 90 天時，漿紙污泥灰漿體取代量為 10% 之水泥漿體，則  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  繞射峰有減少之現象，係因經由卜作嵐反應消耗部分  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  鹼活化漿紙污泥灰漿體粉體表面產生 C-A-S-H 所致，故  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  繞射峰則有降低之現象。

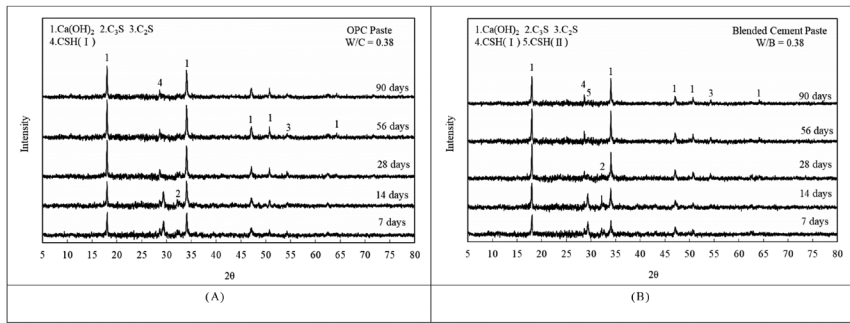


圖 6 漿紙污泥灰水泥漿體之 XRD 圖 (A)OPC；(B) 取代量 10%

3. 環保高壓混凝土地磚之抗壓強度試驗

表 9 為粒料漿體比 80:20、85:15 及 90:10、漿紙污泥灰取代量 10%、20% 及 30% 之環保高壓混凝土地磚抗壓強度及比強度值。結果顯示，當養護齡期為 7 天時，對照組之抗壓強度為 95.4 kgf/cm<sup>2</sup>，而當養護齡期為 28 天時，對照組之抗壓強度提升至 122.8 kgf/cm<sup>2</sup>；當齡期為 28 天時，漿紙污泥灰取代量為 10%、20% 及 30% 之環保高壓混凝土地磚其抗壓強度分別為 116.4 kgf/cm<sup>2</sup>、85.6 kgf/cm<sup>2</sup> 及 84.4 kgf/cm<sup>2</sup>，並與對照組之 28 天抗壓強度相比其強度值為 94.8%、69.7% 及 68.7%；由上述可得知，粒料漿體比為 80:20 之環保高壓混凝土地磚其抗壓強度，隨漿紙污泥灰取代水泥比例越高，則抗壓強度有下降之趨勢，係由於取代量過高時使得水泥量受到稀釋而無法產生較多水化產物，因此，於養護早期時，漿紙污泥灰水泥漿體其 C-S-H 水化產物減少。

當養護齡期為 7 天時，與粒料漿體比 80:20 之環保高壓混凝土地磚對照組相比，抗壓強度下降為 35.52 kgf/cm<sup>2</sup>；而當養護齡期為 28 天時，對照組之抗壓強度則為 75.4 kgf/cm<sup>2</sup>，係由於當粒料漿體比增加時導致其水泥漿體含量下降進而影響環保高壓混凝土地磚膠結特性，導致無法產生較多水泥水化產物來提升其抗壓強度；當齡期為

28 天時，漿紙污泥灰取代量為 10%、20% 及 30% 之環保高壓混凝土磚之 28 天與對照組抗壓強度相比其強度值為 63.4%、48.1% 及 41.1%。

另外，當粒料漿體比 90:10 於養護齡期為 7 天時，當漿紙污泥灰取代量為 10%之環保高壓混凝土磚其抗壓強度為 6.67 kgf/cm<sup>2</sup>，當養護齡期為 28 天時，則發展到 14 kgf/cm<sup>2</sup>；於養護齡期為 7 天時，當漿紙污泥灰取代量為 20% 之環保高壓混凝土磚其抗壓強度為 5.33 kgf/cm<sup>2</sup>，當養護齡期為 28 天時，則發展到 10.9 kgf/cm<sup>2</sup>；於養護齡期為 7 天時，漿紙污泥灰取代量為 30% 之環保高壓混凝土磚其抗壓強度為 5 kgf/cm<sup>2</sup>，而於養護齡期為 28 天時，則抗壓強度發展到 10.4 kgf/cm<sup>2</sup>，其強度比則為 (與對照組 28 天抗壓強度相比)88%、77.8% 及 71.5%。

表 9 環保高壓混凝土磚其抗壓強度值

樣 品 (砂+石:水泥漿體)	取代量 (%)	抗壓強度值(kgf/cm <sup>2</sup> )			比強度百分比(%) (以取代量為 0%、28 天之強度值作基準)	
		7 天	14 天	28 天	14 天	28 天
80 : 20	0	95.40	100.80	122.80	100.00	100.00
	10	76.00	99.78	116.40	98.99	94.79
	20	65.28	81.00	85.60	80.36	69.71
	30	40.62	76.44	84.40	75.83	68.73
85 : 15	0	35.52	68.27	75.40	100.00	100.00
	10	31.14	46.60	47.80	68.26	63.40
	20	14.70	27.73	36.27	40.63	48.10
	30	13.50	18.53	31.20	27.15	41.38
90 : 10	0	7.60	11.33	14.04	100.00	100.00
	10	6.67	11.00	12.36	97.06	88.03
	20	5.33	10.80	10.92	95.29	77.78
	30	5.00	6.00	10.04	52.94	71.51

### 4. 環保高壓混凝土地磚之抗彎強度試驗

表 10 為粒料漿體比 80:20、85:15 及 90:10、漿紙污泥灰取代量 10%、20% 及 30% 之環保高壓混凝土地磚抗彎強度及比強度值。結果顯示，當養護齡期為 7 天時，對照組之抗彎強度為  $52 \text{ kgf/cm}^2$ ，而當養護齡期為 28 天時，對照組之抗彎強度提升至  $78.6 \text{ kgf/cm}^2$ ；當齡期為 28 天時，漿紙污泥灰取代量為 10%、20% 及 30% 之環保高壓混凝土地磚其抗彎強度分別為  $77 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $64.6 \text{ kgf/cm}^2$  及  $64 \text{ kgf/cm}^2$ ，並與對照組之 28 天抗彎強度相比其強度值為 97.9%、82.2% 及 81.4%；由上述可得知，粒料漿體比為 80:20 之環保高壓混凝土地磚其抗壓強度，隨漿紙污泥灰取代水泥比例越高，則抗壓強度有下降之趨勢，係由於取代量過高時使得水泥量受到稀釋而無法產生較多水化產物，因此，於養護早期時，漿紙污泥灰水泥漿體其 C-S-H 水化產物減少。

當養護齡期為 7 天時，與粒料漿體比 80：20 之環保高壓混凝土地磚對照組相比，抗彎強度下降為  $31.9 \text{ kgf/cm}^2$ ；而當養護齡期為 28 天時，對照組之抗彎強度則為  $41.8 \text{ kgf/cm}^2$ ，係由於當粒料漿體比增加時導致其水泥漿體含量下降進而影響環保高壓混凝土地磚膠結特性，導致無法產生較多水泥水化產物以提升其抗彎強度；當齡期為 28 天時，漿紙污泥灰取代量為 10%、20% 及 30% 之環保高壓混凝土地磚之 28 天與對照組抗彎強度相比其強度值為 87.1%、59.3% 及 53.7%。另外，當粒料漿體比 90：10 於養護齡期為 7 天時，當漿紙污泥灰取代量為 10% 之環保高壓混凝土地磚其抗彎強度為  $10.8 \text{ kgf/cm}^2$ ，當養護齡期為 28 天時，則發展到  $15.8 \text{ kgf/cm}^2$ ；於養護齡期為 7 天時，當漿紙污泥灰取代量為 20% 之環保高壓混凝土地磚其抗壓強度為  $6 \text{ kgf/cm}^2$ ，當養護齡期為 28 天時，則抗壓強度發展到  $8.7 \text{ kgf/cm}^2$ ；於養護齡期為 7 天時，漿紙污泥灰取代量為 30% 之環保高壓混凝土地磚其抗壓強度為  $5.2 \text{ kgf/cm}^2$ ，而於養護齡期為 28 天時，則其抗壓強度為  $6.4 \text{ kgf/cm}^2$ ，其強度比則為(與對照組 28 天抗壓強度相比)91.3%、50.5% 及 36.9%。

表 10 環保高壓混凝土磚其抗彎強度值

樣 品 (砂+石:水泥漿體)	取代量 (%)	抗壓強度值(kgf/cm <sup>2</sup> )			比強度百分比(%) (以取代量為 0%、28 天之強度值作基準)	
		7 天	14 天	28 天	14 天	28 天
80 : 20	0	52.00	66.10	78.60	100.00	100.00
	10	50.60	63.60	77.00	96.22	97.96
	20	37.90	63.20	64.60	95.61	82.19
	30	35.40	43.60	64.00	65.96	81.42
85 : 15	0	31.93	35.50	41.80	100.00	100.00
	10	29.60	31.07	36.40	87.51	87.08
	20	17.00	21.40	24.80	60.28	59.33
	30	15.00	20.90	22.47	58.87	53.75
90 : 10	0	12.20	13.60	17.30	100.00	100.00
	10	10.80	11.70	15.80	86.03	91.33
	20	6.00	7.60	8.73	55.88	50.48
		5.20	5.80	6.40	42.65	36.99

5. 環保高壓混凝土磚之磨耗損失試驗

本研究以 CNS 13297 標準對高壓混凝土磚之磨耗損失試驗規範，經磨耗試驗後高壓混凝土磚之磨耗體積損失量不得超過 15 cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>2</sup>，且磨耗厚度平均不得超過 3 mm。

表 11 為粒料漿體比 80:20、85:15 及 90:10、漿紙污泥灰取代量 10%、20% 及 30% 之環保高壓混凝土磚其磨耗損失體積變化值。由表中得知，當養護齡期為 7 天時，對照組之磨耗所造成的體積損失為 4.82 cm<sup>3</sup>/50cm<sup>2</sup>，而當養護齡期為 28 天時，對照組之磨耗所造成的體積損失為 4.79 cm<sup>3</sup>/50cm<sup>2</sup>；當齡期為 28 天時，漿紙污泥灰取代量為 10%、20% 及 30% 之環保高壓混凝土磚其磨耗所造成的體積損失分別為



$4.29 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ 、 $4.64 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$  及  $4.60 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ；由上述可得知，粒料漿體比為 80:20 之環保高壓混凝土地磚其磨耗損失體積變化，隨漿紙污泥灰取代水泥比例越高，則體積損失有增加之趨勢，推測是因取代量過高時使得水泥量受到稀釋而無法產生較多水化產物，因此，於養護早期時，漿紙污泥灰水泥漿體其 C-S-H 水化產物減少，則環保高壓混凝土地磚之磨耗量較高。

當養護齡期為 7 天時，與粒料漿體比 80:20 之環保高壓混凝土地磚對照組相比，體積損失下降為  $4.55 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ；而當養護齡期為 28 天時，對照組之體積損失則為  $4.50 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ，係由於當粒料漿體比增加時導致其水泥漿體含量下降進而影響環保高壓混凝土地磚膠結特性；當齡期為 28 天時，漿紙污泥灰取代量為 10%、20% 及 30% 之環保高壓混凝土地磚之 28 天與對照組體積損失相比其數值為  $4.33 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ 、 $4.16 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$  及  $4.90 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ 。另外，當粒料漿體比 90:10 於養護齡期為 7 天時，當漿紙污泥灰取代量為 10% 之環保高壓混凝土地磚其磨耗損失體積為  $3.08 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ，當養護齡期為 28 天時，則發展到  $4.39 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ；於養護齡期為 7 天時，當漿紙污泥灰取代量為 20% 之環保高壓混凝土地磚其磨耗體積損失為  $4.15 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ，略高於對照組之 7 天磨耗體積損失  $3.43 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ，顯示受到環保高壓混凝土地磚膠結特性下降的影響，當養護齡期為 28 天時，則發展到  $4.39 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ；於養護齡期為 7 天時，漿紙污泥灰取代量為 30% 之環保高壓混凝土地磚其磨耗體積損失為  $3.90 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ，而於養護齡期為 28 天時，則磨耗體積損失發展到  $4.13 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ，並且根據 CNS 13297 標準對高壓混凝土地磚之磨耗損失試驗規範磨耗體積損失量不得超過  $15 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$  之標準，顯示本實驗所壓製之環保高壓混凝土地磚符合 CNS 13297 之磨耗損失試驗標準。



表 11 環保高壓混凝土磚其磨耗損失表

樣 品 (砂+石:水 泥漿體)	取代量 (%)	磨耗厚度損失 (mm)			磨耗體積損失 (cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup> )		
		7 天	14 天	28 天	7 天	14 天	28 天
80 : 20	0	1.07	1.68	0.91	4.82	4.40	4.79
	10	3.18	1.91	1.56	4.23	4.64	4.29
	20	4.13	1.91	1.88	4.33	4.64	4.64
	30	2.68	1.32	1.71	4.43	4.60	4.60
85 : 15	0	2.31	3.11	1.41	4.55	4.17	4.50
	10	3.01	1.36	3.23	4.73	3.51	4.33
	20	1.57	2.06	1.20	3.62	4.22	4.16
	30	1.38	2.06	3.34	3.94	4.21	4.90
90 : 10	0	2.32	3.68	0.87	3.43	3.71	3.94
	10	5.04	3.59	5.06	3.08	4.05	4.39
	20	2.35	4.60	2.92	4.15	3.93	4.39
	30	5.48	4.11	5.18	3.90	4.75	4.13

五、結 論

漿紙污泥灰主要化學組成為 CaO(63.3%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(14.8%)及 SiO<sub>2</sub>(14.7%)，卜作嵐活性為 116%，具再利用潛力，且漿紙污泥灰水泥漿體抗壓強度顯示，當齡期大於 56 天後，漿紙污泥灰取代量為 10% 之漿體其抗壓強度(71.3 MPa)高於 OPC 抗壓強度 (67.5 MPa)，顯示漿紙污泥灰水泥漿體因晚期卜作嵐反應有助於強度之增加。

漿紙污泥灰水泥漿體之晶相分析結果顯示，當養護齡期 56 天時，漿紙污泥灰漿體取代量為 10% 之水泥漿體，則 Ca(OH)<sub>2</sub> 繞射峰有減少之現象，係因經由卜作嵐反應消耗部分 Ca(OH)<sub>2</sub> 鹼活化漿紙污泥灰漿體表面，並形成卜作嵐水化產物為 CSH 及 Gismondine 等晶相。抗壓強度試驗結果顯示，抗壓強度隨漿紙污泥灰取代量越大有

下降趨勢。當粒料漿體比為 80：20、漿紙污泥灰取代量為 10% 及 20% 之環保高壓混凝土地磚其抗壓強度為對照組之 91.03% 及 65.96%；粒料漿體比為 85：15、漿紙污泥灰取代量為 10% 及 20% 之環保高壓混凝土地磚其抗壓強度為對照組之 70.02% 及 40.63%；粒料漿體比為 90：10、漿紙污泥灰取代量為 10% 及 20% 之環保高壓混凝土地磚其抗壓強度為對照組之 97.06% 及 95.29%。磨耗損失試驗結果顯示：當粒料漿體比為 80：20、漿紙污泥灰取代量為 10%、20% 及 30% 之環保高壓混凝土地磚其磨耗損失體積分別為  $4.29 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ 、 $4.64 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$  及  $4.60 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ；粒料漿體比為 85:15、隨著漿紙污泥灰取代量由 10% 增加至 30%，其磨耗損失體積分別為 4.33- $4.90 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ，由此可知磨耗損失體積隨漿紙污泥灰添加量呈現正相關，且符合 CNS 13297 之磨耗損失試驗標準。本研究不僅可減輕漿紙污泥灰此類廢棄物之處置成本(5,000~6,000 元/噸)，亦可降低對環境之負荷，並可創造有價商品(4,000~6,000 元/噸)，達成環保署零廢棄之資材化之目標。相信未來在產、官、學界共同的推廣之下，兼具節能、環保等優點的環保高壓混凝土地磚應用在道路鋪面等工程上將是可被預期的。

## 參考文獻

行政院環保署(2020)，108 年事業廢棄物申報量統計報告。

吳浚瑋(2019)，淨水污泥與漿紙污泥煅燒灰共同製備輕質化材料之抗菌特性評估研究，國立中央大學環境工程研究所碩士論文。

林耀聖(2013)，漿紙污泥成型燃料化與灰渣卜作嵐特性研究，桃園創新技術學院環境工程研究所碩士論文。

邱英嘉、吳宜璵(2018)，漿紙污泥衍生燃料之產製及燃燒行為，桃園市大學校院產業環保技術服務團第 40 期環保簡訊。

柯意玫(2005)，日本與台灣 TFT-LCD 產業競爭優勢與國際策略聯盟之研究，淡江大學日本研究所碩士論文。

張漢昌、黃世梁(2005)，廢水污染與防治，文京出版社。

許智偉(2010)，好氧堆肥及蚯蚓處理造紙污泥之研究，國立中央大學環境工程研究所碩士論文。

陳世強(2011)，以共醱酵促進漿紙污泥產氫，國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程研究所碩士論文。

陳奕瑞(2020)，紙容器漿紙污泥與廢棄稻桿共氣化裂解之研究，國立高雄科技大學環境與安全衛生工程系碩士論文。

曾宇亭(2017)，紡織與漿紙污泥焙燒、熱裂解製作生質燃料之可行性研究，國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系碩士班碩士論文。

黃兆龍(1997)，混凝土性質與行為，詹氏書局出版，台北市。

經濟部(2014)，<http://www.moea.gov.tw/Mns/populace/home/Home.aspx>。

經濟部(2020)，工業廢棄物清理與資源化資訊網，<https://riw.tgpf.org.tw/Tech/more?id=8>。

經濟部工業局(2016)，工業廢棄物清除處理與資源化輔導計畫執行成果報告。

經濟部標準檢驗局(2020)，中華民國國家標準-高壓混凝土磚(CNS 13295)。

劉任卿(2007)，農林廢料應用於固態生質燃料磚製造之研究，國立屏東科技大學碩士論文。

謝政平(2013)，光電產業廢玻璃之卜作嵐反應特性研究，國立宜蘭大學環境工程學系碩士論文。

羅勻聘(2020)，漿紙污泥與廢棄車輛破碎殘餘物共同氣化過程產能效率與污染物排放特性之研究，國立中央大學環境工程研究所碩士論文。

Adesanya E., Ohenoja K., Luukkonen T., Kinnunen P., Illikainen M. (2018), One-part geopolymers from slag and pretreated paper sludge, *Journal of Cleaner Production*, 185: p. 168-175.

Araujo F.S.A., Monteiro R.T.R. (2006), Microbial biomass and activity in a Brazilian

- soil amended with untreated and composted textile sludge, *Chemosphere*, 64: p. 1043-1046.
- Frias M., Rodriguez O., Sanchez de Rojas M.I. (2015), Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 74: p. 37-48.
- Garg P., Gupta A., Satya S. (2006), Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study, *Bioresource Technology*, 97: p. 391-395.
- Jesús A.G., Ochoa D.A. (2008), Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries, *Resources, Conservation and Recycling*, 52: p. 965-972.
- Kourounis S., Tsvilis S., Tsakiridis P.E., Papadimitriou G.D., Tsibouki Z. (2007), Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag, *Cement and Concrete Research*, 37: p. 815-822.
- Villa R., Fernandez R., Garcia E., Villar-Cocina M. F. (2009), Pozzolanic activity and alkaline reactivity of a mordenite-rich tuff, *Microporous and Mesoporous Materials*, 126: p. 125-132.
- Wan P.H., Chang H.Y., Chien C.H., Lee T.H., Huang C.C. (2008), Emissions during co-firing of RDF-5 with bituminous coal paper sludge and waste tires in a commercial circulating fluidized bed co-generation boiler, *Fuel*, 87: p. 761-767.
- Zeng Q., Li K.F., Fen-Chong T., Dangla P. (2010), Surface fractal analysis of pore structure of high-volume fly-ash cement pastes, *Applied Surface Science*, 257(3): p. 762-768.
- Zhang L., Xu C.C., Champagne C.P. (2010), Energy recovery from secondary pulp/paper-mill sludge and sewage sludge with supercritical water treatment, *Bioresource Technology*, 101: p. 2713-2721.