

廢棄物類

工業區污泥與黏土共同燒結製為再生粒料之研發

林凱隆*、羅康維**、周士鈞***

摘 要

依據行政院環境保護署 105 年事業廢棄物申報量統計，全國污泥(包含無機污泥、有機污泥及有害污泥)申報量約 55 萬公噸，且多以掩埋處置為主。惟台灣地區地狹人稠，可利用的土地有限，加上現有掩埋場日趨飽和及新建掩埋場址取得不易，污泥去化管道日益困難，面對自然資源匱乏與處置場址難求之困境下，減少廢棄物的產生及資材化已成為廢棄物管理的重要方向。本研究利用工業區污泥以不同比例取代黏土原料，以燒結溫度為 850℃ 燒製成磚體後，予以破碎做為環保骨材，再以水灰比為 0.45 拌製成混凝土。由其所拌製之混凝土抗壓強度皆符合 CNS 3697 結構用輕質混凝土之規範，顯示工業區污泥燒製環保骨材不僅具有應用潛力，並可達成零廢棄、零掩埋及資源化之目標。

【關鍵字】工業污泥、資源化、掩埋、環保骨材

*國立宜蘭大學環境工程系 教授

**國立宜蘭大學環境工程系 碩士

***祐桑綠建材股份有限公司 執行長

一、前言

經濟部工業局(以下簡稱工業局)依據獎勵投資條例及促進產業升級條例於全國開發 60 處工業區，提供產業做為生產基地，並設置 39 處污水處理廠(32 處屬工業局自行操作，7 處為委外操作)，以協助廠商處理廢水問題；惟在解決廢水排放問題後，大量產生工業廢水污泥，形成新的廢棄物處理問題(行政院環保署, 2014；王景玟, 2008)。尤其污水處理廠產生之污泥特性常隨著廢水處理程序、納管廠商製程的不同或因廠商未遵守污水納管標準，造成污泥特性極大的變化與差異而增添後續處理的難度。依據行政院環境保護署(以下簡稱環保署)105 年 1 月之事業廢棄物申報量統計，當月之污泥申報量約有 55 萬公噸，其中有害污泥申報清除量約 13.6 萬公噸(占全國總量約 24.7%)，一般污泥清除量 41.4 萬公噸(占全國總量約 75.3%)(行政院環保署, 2016)。而過去工業污泥再利用技術主要包括：土地/農業利用、熔融處理技術及能源再利用等，惟土地/農業利用易造成微量重金屬之累積，熔融處理技術則較為耗能；至於能源再利用需使用熱值較高之污泥，含水率過高的污泥並不適合，故往往造成棄置的問題，造成環境之一大負荷。

本文爰針對工業區污水處理廠污泥及黏土等材料再製成為混凝土之可行性進行評估，首先針對工業區污水處理廠污泥及黏土燒結製成磚體，再破碎為粗骨材做為再生粒料，並探討粒料之基本特性，如吸水性、比重及最大粒徑等，並將再生粒料取代粗骨材，拌製成混凝土，並建立其混凝土基本工程特性，藉以評估工業區污泥燒製再生粒料之適宜性，期能符合環保署零廢棄、零掩埋及資源化之目標。

二、工業區污水處理廠現況

工業局開發管理之工業區污水處理廠共計 39 處，由於大部分工業區皆位於鐵路、交流道、港口及機場附近，對於原料及產品的集散交通均十分便利。39 處污水處理廠除龍德(兼利澤)、和平(兼美崙)及光華污水處理廠位於東部外，其餘均位於西部，其中工業區平均佔地面積最大者為彰濱工業區(包括鹿港及線西)，約 3,643 公頃，其分布如圖 1 所示。

依據環保署 105 年 1 月份事業廢棄物申報量統計資料顯示，105 年 1 月份污泥申報處理清理方式主要以處理機構 64,434 公噸(占 47.24%)最多，其次為再利用機構 47,856 公噸(占 35.08%)以及自行處理/自行再利用 24,116 公噸(占 17.68%) (行政院環保署, 2016)。

另污泥來源隨著廢水特性、處理方法及操作方式而異，依其生產方式可概分為：

- 1.浮渣：廢水中上浮之固體。
- 2.有機污泥：生物處理過程中微生物分解廢水中有機物所生成之污泥。
- 3.無機污泥：廢水中添加化學藥劑將膠體或懸浮固體凝聚而成之污泥。

在工業區之廢水中部分為添加化學混凝藥劑或沉降藥劑後再以沉澱處理，工業區之污泥來源分布如圖 2 及圖 3 所示(林錕松, 2015)。此處理方式所產生之無機污泥如下：

- 1.含金屬廢水污泥：金屬表面處理業之廢水含 Zn、Cr、Ni 及 Cu；電鍍業之廢水含 Ni、Cr、Cu、Zn 及 Ag；電池製造業廢水含有 Pb 及 Zn；金屬製品製造業之電鍍製造廢水含 Cu。此類工業廢水大多添加 NaOH 藥劑進行沉澱處理後而產生污泥。
- 2.無機混凝污泥：通常以化學機械研磨之廢水；其他部分工業含有溶解性無機物，常用之混凝藥劑以硫酸鋁、氯化鐵進行混凝沉澱處理後所產生之污泥。
- 3.氟系廢水污泥：半導體產業及光電產業之氟系廢水處理，多半以化學沉澱方式進行處理，添加鈣鹽形成氟化鈣而再以混凝沉澱進行處理後所產生之污泥。
- 4.砷系廢水污泥：化學氣相沉積製程所產生之 AsH_3 ，先以吸收處理再以氧化劑 NaOCl 進行氧化。此外砷化鎂晶圓研磨之含砷廢水，目前大多以鈣鹽、鎂鹽進行混凝沉澱處理處理後而產生污泥。
- 5.化學沉降除磷污泥：以化學沉降法除磷主要以加入多價金屬之鹽類進行處理所產生之污泥。



圖 1 39 座工業區污水處理廠分布示意圖 (王景琰, 2008)

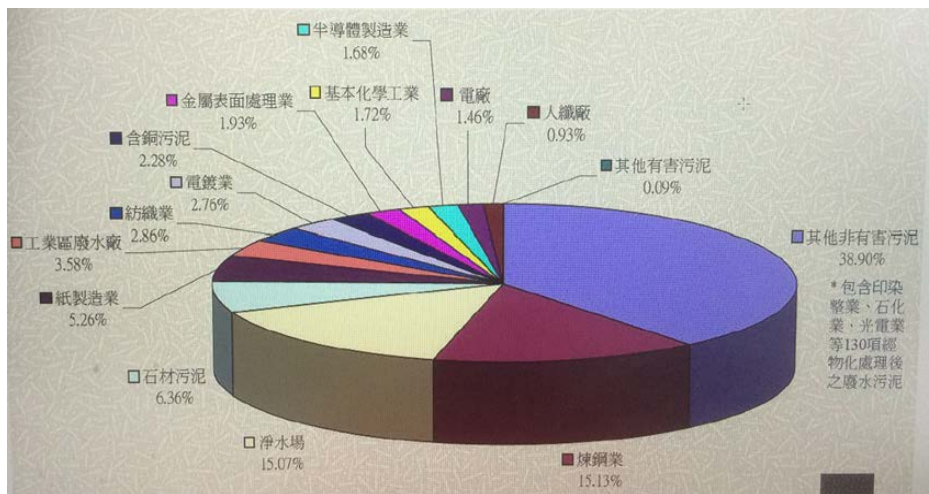


圖 2 工業區之無機性污泥來源(林錕松, 2015)

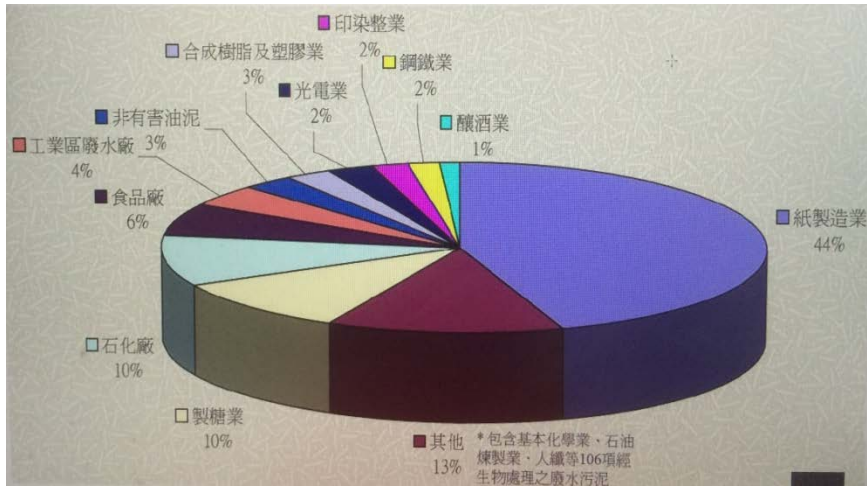


圖 3 工業區之有機性污泥來源(林錕松, 2015)

以化學組成而言，工業區污水處理廠污泥組成仍以 SiO_2 、 Al_2O_3 與 Fe_2O_3 為主。如表 1 所示。其中 3 處污水處理廠污泥之該三大組成，約占整體 25~65%，且與磚用黏土之主要成分相近，故工業區污水處理廠污泥有做為磚用黏土替代原料之潛力，不僅能解決因不當棄置所造成的環境衝擊，亦可達到資源有效利用之目的。

表 1 工業區污水處理廠污泥與磚用黏土之化學組成比較
(祐桑綠建材股份有限公司, 2013)

化學組成	北部某工業區污水處理廠廢水污泥	工業局所轄某工業區污水處理廠污泥	中部某工業區污水處理廠廢水污泥	磚用黏土
SiO_2 (%)	12.90	25.99	5.28	61.95
Al_2O_3 (%)	43.54	22.08	17.96	16.95
Fe_2O_3 (%)	7.44	16.92	2.16	9.27
CaO (%)	2.65	4.45	1.52	0.45
MgO (%)	0.59	1.33	0.44	-
K_2O (%)	0.55	1.19	-	0.14

三、工業區污水處理廠污泥資源化技術

將工業廢水污泥視為再利用資源，利用其組成中富含鈣、矽、鋁及鐵等氧化物特性取代黏土，燒製成具高經濟價值之建築應用材料，已是國際上先進國家處理污泥的方法之一，亦為先進之清潔生產技術。污泥的處理與處置主要以「減量化」、「安定化」、「無害化」及「資源化」為基本原則，其中「資源化」已是未來處理發展的趨勢，國外目前對污泥多元化利用及可行性進行相當多的探討。研究發現，污泥具有多種再利用途徑，大致上可將其應用技術歸納成土地/農業利用、建材利用及能源利用等（經濟部工業局, 2007），其主要應用之資源化技術、產生之產品及適用之污泥特性彙整如表 2，說明如下：

1. 土地/農業利用

污泥經滅菌、堆肥或厭氧消化等程序，可製成肥料及土壤改良劑，供農業生產及土地施用。堆肥化之污泥必須符合安全規範再使用(鄭長和, 2004)，而一般重金屬含量較低的污泥若含有氮、磷、鉀與大量有機成分則可做為肥料原料。在土地利用上施用污泥的方式有：直接方式(撒佈在土地上)、間接方式(經過腐熟堆肥或熱乾燥等處理)(鄭淑芬, 2008)，其處理流程如圖 4 所示。

(1)堆肥(Composting)

係將動、植物或礦物材料(含廢棄物質)置於發酵槽內，以污泥調整水分、植種等程序，主要目的是製造穩定的有機物質，並減少臭味產生及殺死病原菌與寄生蟲，並將有機型態之氮與磷轉變為無機型態，無機型態的氮與磷較容易被農作物吸收(鄭長和, 2004)。

(2)土壤改良(鄭淑芬, 2008)

土壤改良材必須考慮污泥的特性，並掌握土壤物理特性(例如粒徑、透水性及三相構造)，如做為肥料施用則需調查土壤化學特性(例如 pH、全氮量、磷及鉀等元素)。若污泥中含腐化有機物量高，並含高濃度的氮與磷，則有很好的土壤調節性能，可施用於農地。但須考量污泥中的重金屬濃度，是否會危害植物。植物對重金屬的吸收量受陽離子交換能力(Cation Exchange Capacity, CEC)、pH 值、污泥量、污泥成分、

作物種類及品系等影響。

由於重金屬在土壤內的移動性甚低，其造成的污染多為長期累積所致，故需監測土地中(特別是農地)之重金屬含量，以免導致農林作物遭受污染，或經生物濃縮累積作用，對人體健康產生危害。

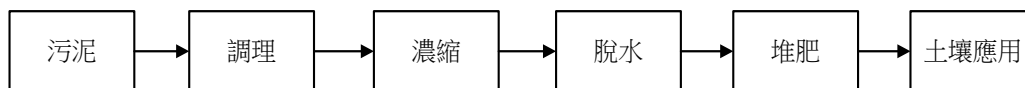


圖 4 土地利用技術

2. 建材利用

(1) 燒結(Sintering)處理技術(張君偉, 2000)

燒結處理係藉由黏土(Clay)、頁岩(Shale)及無機添加劑等材料與廢棄物，經由混拌或造粒成型後，於室溫下進行陰乾後，再移入燒結溫度為 200~1,100°C 的環境中進行煅燒，其原理為未燒結之顆粒具有表面能量，在高溫下其顆粒表面原子具動能時會往能量低的方向移動，而造成頸部成長以降低其能量，並藉由不同路徑移動，產生晶格擴散現象，進而使得試體結構越趨緻密化。

(2) 熔融處理技術

熔融為具有可完全破壞、封存有害物質之安全且可行技術(鄭淑芬, 2008)，在日本已廣泛應用於廢水、淨水及下水污泥之處理。熔融處理一般分為燃料式及電熱式兩種，燃料式以燃油為主要燃料，再以助燃空氣直接或間接加熱；電熱式則利用通電產生電弧或通電於加熱棒以提高溫度進行熔融，其原理係將污泥與矽酸鹽玻璃混合，於 1,350°C 之高溫下進行熔融處理(沈政儒, 2005)。當整個熔融程序完成時，藉降溫以形成可被再利用的產物-爐渣(Slag)(鄭淑芬, 2008)，其處理技術流程如圖 5 所示。

110 工業區污泥與黏土共同燒結製為再生粒料之研發

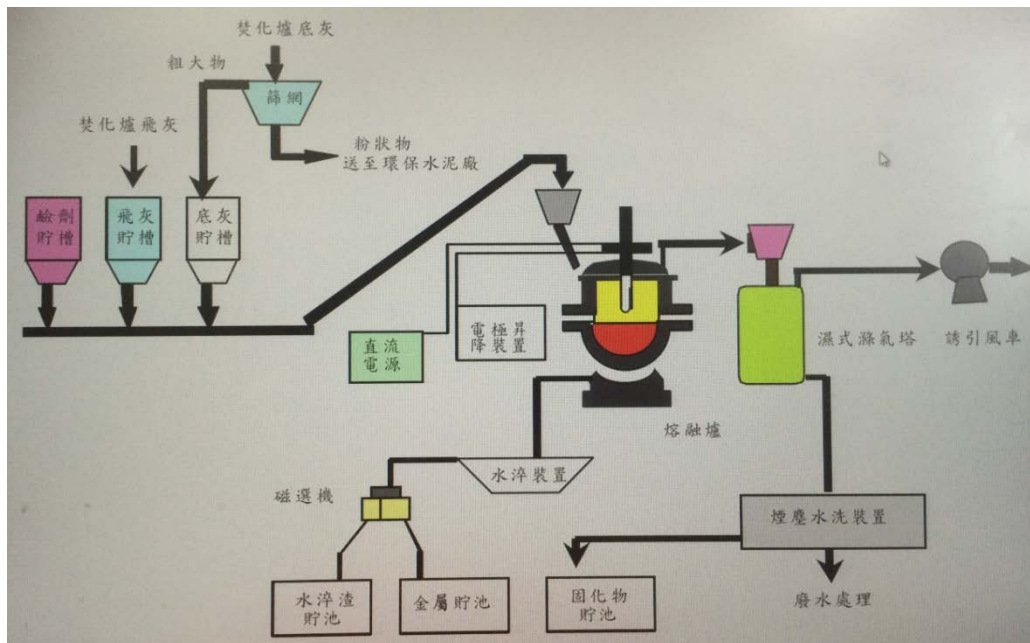


圖 5 熔融處理技術(何春松, 2003)

3. 能源利用

傳統上污泥大多以生物處理程序進行處理，廢棄物本身若含有可發酵的有機物質時，則可進行生物處理程序。好氧及厭氧消化處理均可應用，而厭氧處理可回收有用氣體(甲烷， CH_4)且省能源，其應用範圍較為普遍(鄭淑芬, 2008)，其厭氧反應如圖 6 所示。此外，污泥亦可以焙燒技術進行處理，其將污泥置於惰性或氮氣環境，以 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 下的操作溫度加熱而改變其性質，經由焙燒處理後之污泥能有效降低水分含量並有效提高熱值，以便做為替代燃料使用。目前國內以焙燒技術處理之污泥多屬漿紙污泥、紡織污泥(吳宜璵, 2014)，其處理技術如圖 7 所示。

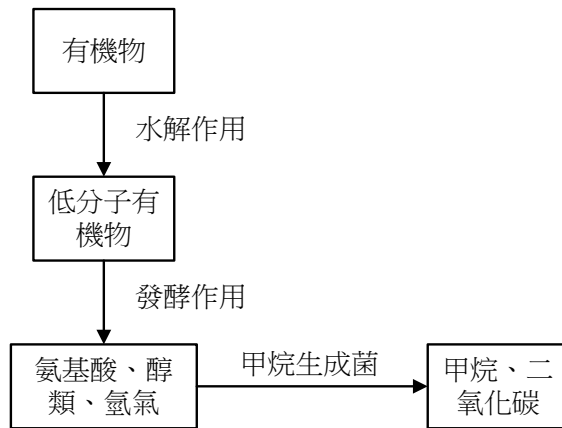


圖 6 厭氧消化處理(鄭長和, 2004)

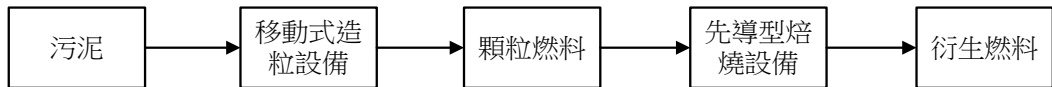


圖 7 焙燒處理技術(行政院環境保護署環境檢驗所委託研究, 2013)

表 2 工業廢水污泥資源化技術及用途

資源化方式	資源化技術	資源化產品	備註
土地/農業利用	堆肥	有機質肥料、培養土	污泥需含有高有機質成分，且金屬含量低
	土壤改良	—	
建材利用	燒結	人工骨材、紅磚、透水磚等	再製產品應注意是否會導致膨脹之問題
	熔融	地磚釉陶、卜作嵐材料、水泥	
能源利用	厭氧消化	甲烷、氫氣、電力	含有熱值較高之污泥
	焙燒	衍生燃料	漿紙污泥及紡織污泥為主

資料來源：本研究整理

四、實驗材料與方法

本研究探討工業區污水處理廠污泥燒結再資源化之方法，以因應實際之要求，並解決數量龐大之工業區污水處理廠污泥之處理處置問題。本研究利用工業區污水處理廠污泥及黏土燒製再生粒料。另外，將再生粒料取代混凝土之粗粒料級配，拌製成混凝土試體，以了解其工程性質，進而提供使用再生粒料之可行性及實廠化之參考。

4.1 實驗原理

燒結(Sintering)定義為粉末間加熱至坯體內接近主要成分的熔點時，粉末間會以各種擴散方式促使顆粒間互相緊密黏在一起，達到堅固化、緻密化、再結晶化及結合等過程，以產生高強度之燒結體，其原理如圖 8 所示。

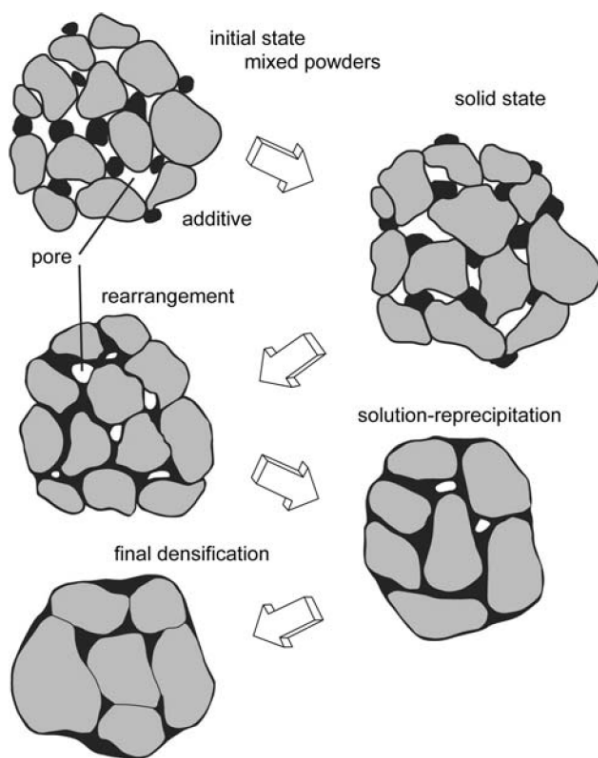


圖 8 燒結原理(Randall, 2009)

4.2 實驗材料

- 1.中部某工業區污水處理廠廢水污泥：為台中某工業區污水處理廠所取得之污泥，簡稱 TCH 污泥。
- 2.中部某工業區污水處理廠廢水污泥：為台中某工業區污水處理廠所取得之污泥，簡稱 TC 污泥。
- 3.中部某污水處理廠廢水污泥：為台中某水資源回收中心所取得之污泥，簡稱 FT 污泥。
- 4.粗骨材：本研究採用蘭陽溪出產之粗粒料，符合 CNS486 及 CNS487 之規範值，最大粒徑為 19 mm。
- 5.細骨材：本研究採用蘭陽溪出產之細粒料，符合 ASTM C33 之規範值，細度模數為 2.82。
- 6.水泥：本研究所採用之水泥為某水泥公司生產之普通卜特蘭第 I 型水泥，符合 CNS 61 之水泥規格。
- 7.拌合水：本研究以自來水為拌和水，符合 CNS 3090 混凝土用水相關規定。

4.3 實驗方法

實驗流程如下：

- 1.工業區污水處理廠污泥及黏土採樣基本性質分析。
- 2.將污泥與黏土經加壓成形後，經高溫爐進行燒結，如圖 9 所示。
- 3.燒結體再以破碎等方式，控制粒徑大小，製備再生粒料(以 1"及 3/8 號篩之粒徑，用以取代標準混凝土之粗骨材)，如圖 10 所示。
- 4.再生粒料之基本特性 (乾搗單位重、吸水率、空隙率、洛杉磯磨耗率及比重)。
- 5.再生粒料取代一般混凝土之粗骨材，並選定之水灰比為 0.45，灌製漿體，並分析其工程特性，如圖 11 所示。

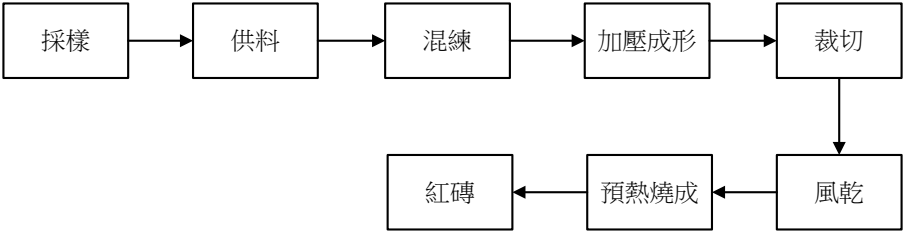


圖 9 紅磚生產流程



圖 10 環保骨材

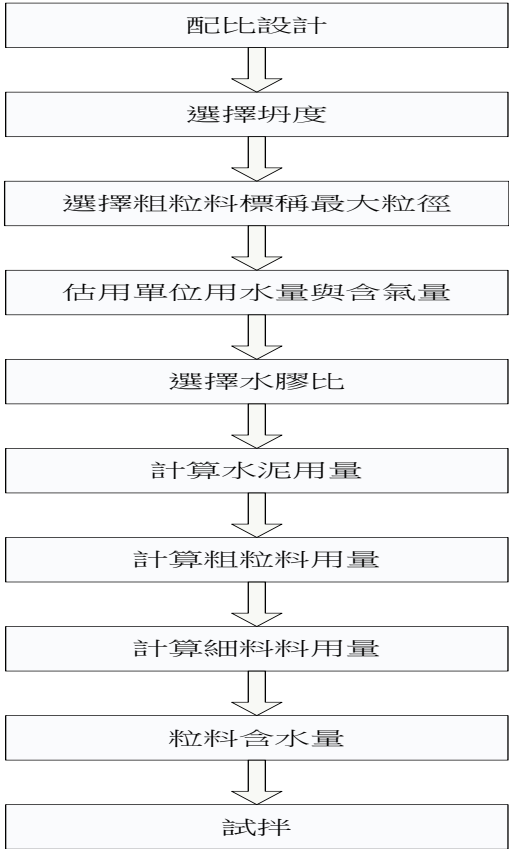


圖 11 ACI 211.1 試拌配比設計法流程圖

本研究之試驗分為 2 部分，首先將工業區污泥(取代量為 10%、20% 及 40%)與黏土均勻混合後，燒製成紅磚並破碎後，對其進行篩分析，採用介於 1" 及 3/8 號篩之粒徑，用以取代標準混凝土之粗骨材，並設定水灰比為 0.45 (用水量為 214 kg/m^3 ，混凝土之空氣含量為 2.5%)，製作成 $10 \text{ cm}(\Phi) \times 20 \text{ cm}(\text{H})$ 之圓柱試體；另於齡期為 7、28 及 56 天時，分別進行抗壓強度試驗，藉以與一般混凝土試體進行比較，探討環保骨材應用於混凝土對力學性質之影響。

五、結果與討論

5.1 基本材料特性

表 3 為本實驗採用材料之基本性質分析結果，包括 pH 值測定、三成分分析及燒失量 (Loss on ignition, 縮寫為 LOI)。在 pH 值方面，黏土之 pH 值為 7.37，呈中性；TCH 污泥之 pH 值為 9.64，呈鹼性；FT 污泥及 TC 污泥其 pH 值分別為 6.38 及 5.16，呈酸性。在三成分與燒失量等實驗得知，在水分(Moisture)方面，以 TC 污泥之水分為 73.42% 為多，TCH 污泥之水分為 71.36% 次之；在灰分(Ash)方面，各污泥皆大於 10%，而以 FT 污泥之灰分 14.66% 最高，TC 污泥 12.97% 次之；在可燃分(Combustible)方面，FT 污泥之可燃份佔 19.05% 最高、TCH 污泥之可燃分 16.50% 次之、黏土之可燃分為 5.70% 最小；在燒失量方面，三廠污泥皆大於 80%，以 TC 污泥燒失量 88.91% 最高，而黏土之燒失量 8.68% 為最小。

表 3 材料基本性質分析結果

Sample	PH 值 (1:20)	水分 (%)	灰分 (%)	可燃分 (%)	LOI (%)
Clay	7.38	21.18	73.12	5.70	8.68
FT Sludge	6.38	66.3	14.66	19.05	85.85
TCH Sludge	9.64	71.61	11.89	16.50	86.40
TC Sludge	5.16	73.42	12.97	13.61	88.91

表 4 為材料之化學組成。表中顯示黏土主要以 SiO_2 成分居多，為 66.6%， Al_2O_3 次之為 20.5%；FT 污泥主要以 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 及 SO_3 為主，分別為 22.5%、36.0%、10.1 及 14.8%；TCH 污泥主要以 Fe_2O_3 為 24.4%、 Al_2O_3 為 21.4% 居多；TC 污泥主要以 SiO_2 、

SO₃及 Fe₂O₃成分居多，分別為 21.2%、15.4%及 33.2%。

表 4 材料之化學組成

Sample	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
Clay	65.1	20.3	6.35	0.07	0.19	1.51	—	3.75
FT Sludge	22.5	7.2	36.0	10.1	1.5	14.8	—	0.9
TCH Sludge	14.6	21.4	24.4	6.3	10.0	14.6	—	0.7
TC Sludge	21.2	9.6	33.2	8.1	1.8	15.4	—	0.4

表 5 為原料之重金屬總量及溶出試驗結果。由表得知，黏土中之重金屬總量以 Pb 為最多(165.4 mg/kg)，Cr 為 44.5 mg/kg 次之；而 Cu、Zn 等重金屬總量分別為 38.6 mg/kg 及 26.3 mg/kg。FT 污泥之 Zn 含量最高，其總量為 1,421.5 mg/kg，Ni 為 174.3 mg/kg 次之；TCH 污泥之重金屬以 Cr 與 Zn 為主，其總量分別為 2,467.2 mg/kg 及 1,902.9 mg/kg，而 Ni 及 Cu 等重金屬含量分別為 1,495.9 mg/kg 及 1,430.7 mg/kg；TC 污泥之重金屬含量以 Zn 及 Cu 為主，分別為 2,113.7 mg/kg 及 2,597.4 mg/kg。另溶出試驗結果顯示，原料之 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，亦與文獻指稱以高溫燒結處理之方式能有效封存及安定有害之重金屬物質相合(鄭淑芬, 2011)。

表 5 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)						
黏土	165.4	44.5	38.6	26.3	N.D.	N.D.
FT 污泥	N.D.	N.D.	98.2	1,421.5	7.6	174.3
TCH 污泥	N.D.	2,467.2	1,430.7	1,902.9	N.D.	1,495.9
TC 污泥	55.5	N.D.	2,597.4	2,113.7	N.D.	39.1
TCLP (mg/L)						
黏土	0.1	N.D.	0.2	0.5	N.D.	N.D.
FT 污泥	N.D.	N.D.	0.2	3.3	0.01	0.8
TCH 污泥	N.D.	1.4	2.2	2.0	N.D.	8.1
TC 污泥	N.D.	N.D.	5.0	2.4	N.D.	1.6
法規值	5.0	5.0	15.0	-	1.0	-

*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

5.2 環保骨材之基本特性

表 6 為本研究所使用環保骨材的基本特性，本研究使用之河砂乾搗單位重為 1,548 kg/m³，與文獻相符。另外，含 10%FT 污泥之環保骨材其乾搗單位重為 866 kg/m³，隨著污泥添加量增至 20%時，環保骨材之乾搗單位重變為 796 kg/m³，由此可知乾搗單位重與污泥添加量呈現負相關；至於使用污泥製成之環保骨材之吸水率則呈大幅上升的趨勢，以 FT 污泥為例，添加量 10%污泥之環保骨材吸水率為 17.98%；而添加量 20%污泥之環保骨材吸水率為 20.57%；另添加 10%-20%之 TCH 污泥環保骨材其吸水率範圍為 16.38-16.84%；另外添加 TC 污泥之環保骨材其吸水率為 17.46-20.38%。由上述結果得知，添加工業區污泥所燒製之環保骨材空隙率均符合規範。

表 6 環保骨材基本性質

骨材樣品	乾搗單位重 (Kg/m ³)	吸水率 (%)	空隙率 (%)	洛杉磯磨耗 率(%)	比重 (SSD)
River Sand	1,548	1.44	42.53	22.5	2.65
FT 10	866	17.98	45.70	89.42	1.96
FT 20	796	20.57	46.51	94.83	1.89
TCH 10	845	16.84	47.46	94.93	1.95
TCH 20	756	16.38	52.31	95.28	1.91
TC 10	840	17.46	46.63	72.82	1.95
TC 20	816	20.38	45.74	65.42	1.90

5.3 混凝土之初始表面吸水率

本研究係探討以不同污泥取代量，及環保骨材取代不同比例(10%、20%及 40%)之天然粗骨材，對混凝土初始表面吸水率之影響。滲透指數呈現自身的耐久性質量的措施，耐久性混凝土的質量可分為低，中或高滲透性/吸收的基礎上測得的滲透指數，以表 7 為參考值。以 56 天齡期環保骨材混凝土試體進行試驗其結果如表 8 所示。由表可知，對照組依量測時間分別為 10、30 及 60 分鐘，其表面吸水率分別為 0.75、0.53 及 0.41mL/m²s。而 FT10 環保骨材取代是為 10%之混凝土，依量測時間為 10、30 及 60 分鐘時，其表面吸水率分別為 0.75、0.64 及 0.50 mL/m²s，而 FT20 環保骨材取代是為 20%之天然骨材時，混凝土依量測時間為 10、30 及 60 分鐘時，其表面吸水率分別為 1.05、0.69 及 0.53 mL/m²s。

TCH10 環保骨材取代是為 10%、20%及 40%之混凝土其表面吸水率，如表 8 所示。由表可知，TCH 10 環保骨材取代是為 40%時，混凝土依量測時間為 10、30 及 60 分鐘，其表面吸水率分別為 2.24、1.26 及 0.80 mL/m²s。TCH20 環保骨材取代量為 10%、20%及 40%時其混凝土之表面吸水率變化，如表 8 所示。由表可知，TCH20 環保骨材取代是為 10%混凝土時，依量測時間為 10、30 及 60 分鐘時，其表面吸水率分別為 0.88、0.52 及

0.38 mL/m²s。

TC10 環保骨材取代是為 10%、20% 及 40% 之混凝土其表面吸水率，如表 8 所示。由表可知，TC10 環保骨材取代為 20% 時，當混凝土表面吸水率之量測時間為 10、30 及 60 分鐘時，分別為 1.40、0.78 及 0.46 mL/m²s。而 TC20 環保骨材取代為 40% 時，當混凝土表面吸水率之量測時間為 10、30 及 60 分鐘時，其表面吸水率分別為 1.88、1.08 及 0.70 mL/m²s。

本實驗配比的初始表面吸水率皆具有高滲透性。由表 8 可看出當環保骨材取代天然骨材增加時，其表面吸水率會隨著取代量增加而有所增加。

表 7 混凝土滲透指標(祐桑綠建材股份有限公司, 2013)

時間 (min)	混凝土滲透指標 ISA (mL/m ² s)		
	低	中	高
10	<0.25	0.25~0.50	>0.50
30	<0.17	0.17~0.35	>0.35
60	<0.07	0.10~0.20	>0.20

表 8 環保骨材之混凝土其初始表面吸水率

Sample	骨材取代量 (%)	初始表面吸水速率 (mL/m ² s)		
		10 min	30 min	60 min
OPC	100	0.75	0.53	0.41
FT10	10	0.75	0.64	0.50
	20	1.12	0.68	0.51
	40	1.70	1.16	0.83
FT20	10	1.00	0.92	0.65
	20	1.05	0.69	0.53
	40	1.80	1.18	0.83
TCH10	10	1.06	0.95	0.78
	20	1.20	0.76	0.56
	40	2.24	1.26	0.80
TCH 20	10	0.88	0.52	0.38
	20	1.50	0.76	0.57
	40	1.48	0.98	0.67
TC10	10	1.10	0.66	0.47
	20	1.40	0.78	0.46
	40	2.36	1.36	0.85
TC 20	10	0.78	0.58	0.45
	20	1.50	1.21	1.03
	40	1.88	1.08	0.70

5.4 混凝土之超音波試驗

混凝土係由粗、細骨材與膠結料所組合而成之非均質複合材料，因此內部存在著界面與缺陷。超音波波速的檢測係屬非破壞性檢測，可用以評估混凝土內部之均勻性與緻密性，超音波波速有時被用來檢核結構中混凝土的品質，當波速大於 4 km/s 判定為品質良好，小於 3 km/s 則為品質不良(Hobbs, 1998)。

添加 FT 環保骨材之混凝土，其超音波波速值在 3,450~4,360 m/s 之間；添加 TCH 環保骨材之混凝土，其超音波波速值在 3,400~4,340 m/s 之間；添加 TC 環保骨材之混凝土，其超音波波速值在 3,560~4,210 m/s 之間，各齡期之超音波波速值雖接近，但可看出超音波波速隨著養護齡期越長，其波速越快，當齡期為 28 天後，則試驗值增加較為平緩。另

根據翟慰宗(2011)研究指出，紅磚之超音波波速約為 1,880 m/s，低於天然骨材，故再生粗骨材取代量越大時，混凝土超音波波速值則較低(翟慰宗, 2011)，與本研究之結果相當。

表 9 環保骨材之混凝土之超音波波速關係表

樣品	骨材取代量 (%)	超音波波速 (m/s)			波速百分比(%) (以全天然骨材 56 天之波速作基準)	
		7 天	28 天	56 天	28 天	56 天
河砂	100	3,890	4,380	4,550	92.26	100.00
FT10 環保骨材	10	3,820	3,900	4,360	85.71	95.82
	20	3,880	3,980	4,120	87.47	90.55
	40	3,540	3,660	3,720	80.44	81.76
FT20 環保骨材	10	3,830	4,230	4,300	92.97	94.51
	20	3,820	3,900	4,070	85.71	89.45
	40	3,450	3,740	3,810	82.20	83.74
TCH10 環保骨材	10	3,860	3,940	4,140	86.59	90.99
	20	3,950	3,950	4,100	86.81	90.11
	40	3,630	3,770	3,820	82.86	83.96
TCH 20 環保骨材	10	4,220	4,290	4,340	94.29	95.38
	20	3,400	4,050	4,130	89.01	90.77
	40	3,680	3,800	3,880	83.52	85.27
TC10 環保骨材	10	3,970	4,050	4,200	89.01	92.31
	20	3,830	3,990	4,080	87.69	89.67
	40	3,640	3,720	3,810	81.76	83.74
TC 20 環保骨材	10	4,000	4,100	4,210	90.11	92.53
	20	3,940	4,120	4,200	90.55	92.31
	40	3,560	3,780	3,890	83.08	85.49

5.5 混凝土之強度指標

本研究嘗試以強度指標量化方式，評估環保骨材替代天然骨材之強度貢獻。而強度指標(R)是指由 $R = f / q$ 。其中 f 為混凝土抗壓強度，而 q 是天然粗骨材的所占之比例，Rn 則代表天然粗骨材強度貢獻，因此具體定義與天然骨材混凝土的強度比如下式所示：

$$R_r = R_b - R_n$$

122 工業區污泥與黏土共同燒結製為再生粒料之研發

R_r 是環保骨材對強度貢獻量； R_b 表示單位骨材強度的貢獻； R_n 為單位天然骨材強度的貢獻。

具體的強度比【 k 】，可以被定義為： $k = R_b/R_n$ ；當 k 大於 1 時，為強度降低，小於天然骨材。此外，骨材貢獻強度為 P ， $P=100(R_r/R_b)$ ，表示環保骨材總量對於混凝土的強度貢獻和被定義為取代天然骨材時具一個積極貢獻度；當 P 為正值時，顯示環保骨材總量對於取代天然骨材為積極貢獻度，負值則反之。

含 FT 環保骨材之混凝土抗壓強度在 28 及 56 天時，具體定義指標的結果如表 10 所示。當以 FT10 環保骨材取代量為 10%、20% 及 40% 時，其強度比為 0.99、0.92 及 1.00；以 FT20 環保骨材取代量為 10%、20% 及 40% 時，其強度比為 0.94、0.88 及 1.09。而從骨材強度貢獻為值 P_{56} 來看，可發現當配比 FT10A20 及 FT10A40， P_{56} 分別為 8.21 及 5.85，顯示其骨材強度貢獻較佳。

TCH 污泥環保骨材之混凝土其抗壓強度在 28 及 56 天測試的具體定義指標的結果如表 10 所示。當以 TCH10 環保骨材取代量為 10%、20% 及 40% 時對強度貢獻量 P_{56} 為 9.99、12.34 及 25.64；以 TCH20 環保骨材取代量為 10%、20% 及 40% 之天然骨材其環保骨材對強度貢獻量 P_{56} 為 6.15、3.66 及 14.61。而從骨材強度貢獻 P_{56} 來看，可發現以配比 TCH10A20、TCH10A40、TCH20A10、TCH20A20 及 TCH20A40 之 P 值分別為 12.34、25.64、6.15、3.66 及 14.61，顯示其骨材強度貢獻較佳。

TC 污泥骨材之混凝土其抗壓強度在 28 及 56 天測試的具體定義指標的結果如表 10 所示。以 TC10 環保骨材取代量為 10%、20% 及 40% 時其骨材強度貢獻 P_{56} 分別為 -7.36、0.97 及 18.58；TC20 環保骨材取代量為 10%、20% 及 40% 時其骨材強度貢獻 P_{56} 分別為 -6.53、-3.01 及 13.21。

表 10 環保骨材之混凝土其比強度分析

Series	q	R _b	R _r	K	P ₂₈	P ₅₆
OPC	100	0.47	0.00	1.00	0.00	0.00
FT10A10	90	0.46	0.00	0.99	-0.91	-1.43
FT10A20	80	0.43	-0.04	0.92	-8.78	8.21
FT10A40	60	0.47	0.00	1.00	0.13	5.85
FT20A10	90	0.44	-0.03	0.94	-5.88	3.26
FT20A20	80	0.41	-0.06	0.88	-13.91	-9.25
FT20A40	60	0.50	0.04	1.09	7.86	16.23
TCH10A10	90	0.46	-0.01	0.99	-1.09	9.99
TCH10A20	80	0.50	0.03	1.06	6.09	12.34
TCH10A40	60	0.59	0.12	1.27	20.98	25.64
TCH20A10	90	0.48	0.02	1.04	3.75	6.15
TCH20A20	80	0.44	-0.02	0.95	-5.49	3.66
TCH20A40	60	0.51	0.04	1.09	8.05	14.61
TC10A10	90	0.42	-0.04	0.90	-10.63	-7.36
TC10A20	80	0.46	-0.01	0.98	-1.83	0.97
TC10A40	60	0.53	0.07	1.14	12.55	18.58
TC20A10	90	0.41	-0.06	0.88	-13.60	-6.53
TC20A20	80	0.44	-0.03	0.94	-5.99	-3.01
TC20A40	60	0.53	0.07	1.15	12.75	13.21

六、結論

本研究之結果歸納如下：FT 污泥主要化學組成為 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 及 SO_3 ；TCH 污泥其化學組成以 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等成分為多；TC 污泥主要化學組成為 SiO_2 、 Fe_2O_3 及 SO_3 ，且 TCLP 試驗均符合法規標準值，反映具資源化再利用之潛力。另據環保骨材之吸水率結果試驗顯示，使用污泥製成之環保骨材吸水率呈大幅上升的趨勢。

另依超音波波速試驗結果顯示，3 廠污泥骨材之混凝土超音波波速均會隨著養護齡期增加，波速亦隨之增加。而 FT 污泥環保骨材之混凝土配比又以 FT10A10 為最佳(95.82%)；

124 工業區污泥與黏土共同燒結製為再生粒料之研發

TCH 污泥環保骨材混凝土配比以 TCH20A10 為最佳(95.38%)；TC 污泥環保骨材混凝土配比以 TC20A10 為最佳(92.53%)。此外，抗壓強度試驗結果顯示，3 廠污泥骨材之混凝土抗壓強度皆會隨取代天然骨材的比例增加而有下降之趨勢，但隨著養護齡期增加，抗壓強度也隨之上升。

經由試驗結果顯示，本實驗所燒製之環保骨材所灌製混凝土皆符合 CNS 3697 結構用輕質混凝土之規定(齡期 28 天之抗壓強度 $>280 \text{ Kg/cm}^2$)，反映具有再利用做為環保骨材之潛力。

七、參考文獻

王景玟、鄭淑芬、劉蘭萍、林政江(2008)，工業區污水處理廠污泥資源化案例探討，綠基會通訊。

行政院環境保護署(2014)，污泥處理現況檢討及因應策略。

行政院環境保護署環境檢驗所委託研究(2013)，先導型焙燒與造粒系統技術應用與測試發展計畫。

行政院環境保護署(2006)，工業區專用下水道系統查核評比暨管理問題診斷追蹤改善計畫期末報告。

行政院環境保護署(2016)，105 年度 1 月份事業廢棄物申報量統計。

何春松(2003)，灰渣熔融技術之發展，國立臺灣大學台大工程學刊，第 84 期，p. 137-152。

沈政儒(2005)，焚化飛灰與下水污泥灰共熔之操作特性與卜作嵐材料特性之研究，國立中央大學環境工程研究所碩士論文。

吳宜璫(2014)，產業污泥衍生燃料的製造特性與燃燒行為研究，桃園創新技術學院材料應用科技研究所碩士論文。

林錕松(2015)，高科技產業污泥再利用技術與原理及案例，104 年度產服團高科技廠之廢棄物減量及再利用技術講習會。

祐桑綠建材股份有限公司(2013)，工業區污泥及廢噴砂與黏土燒製再生粒料於混凝土之研究期末報告，第 2 期。

張君偉(2000)，水洗前處理與添加劑對都市垃圾焚化飛灰燒結特性的影響，國立中央大學環境工程研究所碩士論文。

黃世芳(2011)，再生碎紅磚替代天然粗骨材產製混凝土之初步研究，朝陽科技大學營建工程系碩士論文。

黃兆龍(199)，混凝土性質與行為，詹氏書局出版，台北市。

經濟部標準檢驗局(2007)，中華民國國家標準-普通磚(CNS 382 R2002)。

經濟部工業局(2007)，工業廢棄物清除處理與資源化輔導計畫執行成果報告。

鄭長和(2004)，污泥土地施用指標污染物的篩選與風險評估，國立屏東科技大學環境工程與科學系碩士論文。

鄭淑芬(2008)，工業區污水處理廠污泥資源化之研究－燒結製磚，國立台北科技大學環境工程與管理研究所碩士論文。

鄭淑芬、劉蘭萍(2011)，工業區污水處理廠污泥資源化案例探討，綠基會通訊。

翟慰宗(2011)，磚類再生粒料混凝土高溫受熱後對抗壓強度與超音波速之影響，中原大學土木工程研究所碩士。

歐陽嶠暉、許鎮龍、藍文忠(1998)，都市污水處理廠之污泥處理與資源化再利用之研究，第 8 屆下水道技術研討會論文集，p. 19-33。

蔣本基、楊萬發、張怡怡、翁誌煌(2002)，工業區污水處理廠污泥減量及資源再利用，工業污染防治季刊，第 21 卷，第 1 期，p. 125-140。

Andreola F., Barbieri L., Karamanova E., Lancellotti I. (2008), Recycling of CRT panel glass as fluxing agent in the porcelain stoneware tile production, *Ceramics International*, 34(5): p. 1289-1295.

Etcheberria M., Vazquez E., Mari A., Barra M. (2007), Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, 37(5): p. 735-742.

Hobbs D.W. (1998), *Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Thomas Telford, London.

Katz A. (2007), Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cement and Concrete Research*, 33(5): p. 703-711.

Laursen K., White T.J., Cresswell D.J.F., Wainwright P.J., Barton J.R. (2006), Recycling of an industrial sludge and marine clay as light-weight aggregates, *Journal of Environmental Management*, 80: p. 208-213.

Mun K.J. (2007), Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete, *Construction and Building Materials*, 21: p. 1583-1588.

Poon C.S., Kou S.C., Wan H.W. (2009), Etcheberria, M., Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates, *Waste Management*, 29(8): p. 2369-2377.

Raimondo M., Zanelli C., Matteucci F., Guarini G., Dondi M., Labrincha J.A. (2007), Effect of waste glass (TV/PC cathodic tube and screen) on technological properties and sintering behaviour of porcelain stoneware tiles., *Ceramics International* , 33(1): p. 615-623.

Randall M., German P.S., Seong J.P. (2009), Review: liquid phase sintering, *J Mater Sci*, 44: p. 1-39.

Raimondo M., Zanelli C., Matteucci F., Guarini G., Dondi M., Labrincha J.A. (2007), Effect of waste glass (TV/PC cathodic tube and screen) on technological properties and sintering behaviour of porcelain stoneware tiles, *Ceramics International* , 33(1): p. 615-623.

Zimmer A. and Bergmann C.P. (2007), Fly ash of mineral coal as ceramic tiles raw material. *Waste Management*, 27(1): p. 59-68.