

第 2 屆大專校院綠色化學創意競賽成果報告書

組別： 大專組； 研究組

隊伍名稱：磷魂吸附法

主題：添加含鈣物質進行下水污泥灰中磷之回收

目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	III
表目錄.....	IV
摘要.....	1
壹、動機.....	1
貳、目的.....	2
參、設備及器材.....	3
一、實驗樣品.....	3
(一)下水污泥灰樣品.....	3
(二)大理石.....	4
二、實驗用器材.....	4
(一)、小型粉碎機.....	4
(二)、分析篩.....	5
三、分析之儀器.....	5
(一)X-射線螢光分析(XRF).....	5
(二)X-射線繞射分析(XRD).....	6
(三)感應耦合電漿原子放射光譜分析儀(ICP-OES).....	7
(四)掃描式電子顯微鏡(SEM-EDX).....	8
肆、過程或方法.....	9
伍、結果.....	10
一、樣品之分析.....	10
(一) XRF 之分析.....	10
(二) XRD 之分析.....	11
二、實驗之結果.....	12

(一) 大理石顆粒之添加量影響	12
(二) 大理石顆粒批次添加方式之影響	13
(三) 添加大理石顆粒之反應時間影響	14
(四) 添加大理石顆粒之攪拌速度影響	15
(五) 大理石顆粒之批次添加次數影響	16
(六) 下水污泥灰添加大理石轉換之結晶型態分析	17
(七) 磷回收後之大理石顆粒之電子顯微鏡分析	18
陸、討論	20
柒、結論	21
捌、參考資料及其他	22

圖目錄

圖 3.1 下水污泥灰樣品.....	3
圖 3.2 大理石	4
圖 3.3 小型粉碎機.....	4
圖 3.4 分析篩	5
圖 3.5 X-ray 螢光分析儀(XRF).....	5
圖 3.6 X-ray 繞射分析儀(XRD)	6
圖 3.7 感應耦合電漿原子發射光譜分析儀(ICP-OES).....	7
圖 3.8 掃描式電子顯微鏡(SEM-EDX)	8
圖 4.1 添加大理石顆粒進行磷回收之流程圖.....	9
圖 4.2 下水污泥灰之結晶型態分析結果.....	11
圖 4.3 大理石顆粒添加量對下水污泥灰中磷回收率之影響.....	12
圖 4.4 批次添加大理石顆粒對下水污泥灰中磷回收率之影響.....	13
圖 4.5 添加大理石顆粒之反應時間對下水污泥灰中磷回收率之影響.....	14
圖 4.6 添加大理石顆粒之攪拌速度對下水污泥灰中磷回收率之影響.....	15
圖 4.7 大理石顆粒之批次添加次數對下水污泥灰中磷回收率之影響.....	16
圖 4.8 添加大理石後之下水污泥灰結晶型態圖.....	17
圖 4.9 磷回收前之碳酸鈣顆粒之 SEM-EDX 圖	18
圖 4.10 磷回收後之碳酸鈣顆粒之 SEM-EDX 圖.....	19

表目錄

表 4.1 下水污泥灰及大理石顆粒之元素組成(XRF 分析分析結果).....	10
---	----

摘要

台灣下水污泥每年產生約 54,860 噸，目前焚化處理亦屬於國內最主要之處理方法，經焚化處理後磷含量可濃縮至 8%–15%，以此估算可得 4,388-8,229 噸的磷資源相當於我國每年氮、磷、鉀之化學肥料進口量約 16%-30%。

於常溫下添加大理石顆粒於下水污泥灰中攪拌後，取出大理石顆粒，即可回收下水污泥灰中的磷，經 138 批次回收處理後，可回收下水污泥灰中 76% 的磷。此方法利用大自然界中，現有之含鈣物質(如:大理石)回收磷，操作簡單且流程簡單亦不繁瑣，且不會產生廢水或廢棄物等環境問題；亦可回收磷，且不浪費磷資源，可達到磷資源循環之目的，對環境並不造成影響及破壞。可滿足防廢、再生、保安、節能、低毒及思危等綠色化學之觀念。

壹、動機

磷是地球上所有生物生長所不可或缺的营养元素之一;但磷與碳及氮的循環不同，在人工開採或天然侵蝕後，最終歸宿是深海的沉積層中，而沉入深海的磷只有少部分可通過魚類或海鳥返回陸地，因此磷在生物圈中大部分是單向流動，可說是一種難以循環的寶貴資源[1]。

磷的應用相當廣泛，農業上可用於生產肥料、動物飼料，工業上亦為磷酸、火藥的製造及半導體製程等所需的元素。近年來，由於全球人口快速的成長，對磷的需求也逐漸增加。且磷的來源幾乎全都仰賴國外進口，不像水資源般已有成熟的回收再利用技術，亦不像化石燃料般已有許多再生能源可以替代。且根據文獻指出全世界的磷礦蘊藏量，若不考慮無法開採與沒有經濟效益的礦藏，以目前的使用速度來看，僅剩 50-100 年[2] [3]。未來對於磷資源的需求也會更為提高，如何確保磷資源的來源與穩定供給，是目前最重要的課題。

都市生活污水中的磷，主要來自於含磷有機物、合成洗滌劑、化肥農藥以及各類動物的排泄物，經過污水處理廠處理後，大部分被去除而進入下水污泥中，因此下水污泥含有相當程度的磷。根據營建署的調查報告指出[4]，台灣的下水污泥產生量年約 54,860 噸，目前焚化處理亦屬於國內最主要之下水污泥處理之方法，且根據文獻[5-7]指出，經焚化處理後下水污泥灰中磷含量可濃縮至 8%–15%，以文獻值估算台灣可得 4,388-8,229 噸之磷資源相當於我國

每年氮、磷、鉀之化學肥料進口量約 16%-30%。

若能將磷從下水污泥灰中進行回收將可促進磷資源的循環再利用。目前文獻之方法大多都是使用強酸、強鹼之方法[8-12]。亦有文獻[13-16]指出氧化鈣亦可與下水污泥灰中的磷進行反應，使磷的型態改變。

貳、目的

本研究嘗試添加大自然界中就有之含鈣物質(如大理石等)進行下水污泥灰中磷之回收，達到環保之目的，而不使用強酸、強鹼之化學藥劑進行下水污泥中磷之浸漬，以防下水污泥中之重金屬溶出，亦會造成後續廢水處理之問題。

參、設備及器材

一、實驗樣品

(一)下水污泥灰樣品

本研究使用的下水污泥樣品由臺北市政府工務局衛生下水道工程處所轄之迪化污水處理廠所提供。迪化污水處理廠下水污泥的產生與一般污水處理廠類似，先將污水流過細攔污柵，過濾掉較大的物質，例如：樹葉、樹枝等大型物質，再流入初級沉澱池去除具漂浮性和沉澱性之固體，之後再流入深槽曝氣池，進行生物處理，經過處理後再流入二級沉澱池沉澱污泥，達到污水和污泥分離之目的，污水則再流入淨水流程進行處理；污泥經沉澱後，將有一部份的污泥再迴流至深槽曝氣池中再反覆利用，而另一部份的污泥則直接流入污泥濃縮機，減少污泥的體積，再送至污泥脫水機，進行污泥脫水。脫水後之下水污泥再送至迪化污水處理廠內全國唯一的污泥乾燥機，於 105°C 下進行乾燥處理，此污泥乾燥機主要用途為去除下水污泥中剩餘之水分，達到完全去除水分之目的。

將下水污泥於 950°C 焚化 2 hr 後形成下水污泥灰，將其研磨並使用 100 mesh (150 μm) 篩網過篩，於 105°C 烘箱乾燥後，供本研究使用，如圖 3.1 所示。



圖 3.1 下水污泥灰樣品

(二)大理石

將大理石顆粒樣品敲碎後，使用 50 mesh (297 μm) 的篩網進行過篩，使大理石顆粒樣品的粒徑介於 0.3-1 mm 之間，同時反覆使用去離子水進行水洗，再將殘留在篩網上的大理石顆粒樣品置於 105°C 的烘箱乾燥，供下水污泥灰中磷回收使用，如圖 3.2 所示。

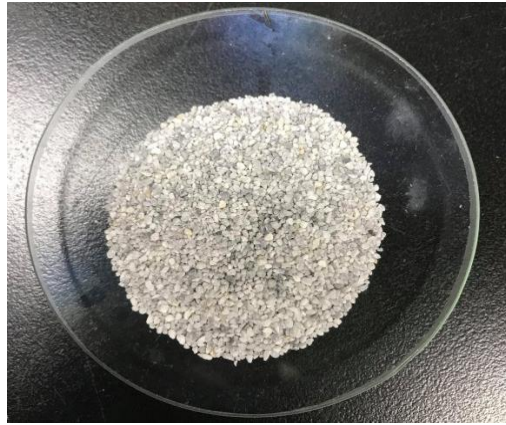


圖 3.2 大理石

二、實驗用器材

(一)、小型粉碎機

本研究利用之小型粉碎機是由 CHAN CHENG 所製造，其型號為 KL-006，如圖 3.3 所示。主要是藉由高速刀片搭配 25000~30000RPM 轉速，可讓物料短時間細化，其用於粉碎下水污泥灰之使用。



圖 3.3 小型粉碎機

(二)、分析篩

本研究利用之篩網是參照 CNS386 試驗篩規範，使用 50、100 號篩網(孔徑為 0.297 mm、0.149mm)，如圖 3.4 所示。其篩網使用金屬線以直角編織(平織)，用於測定大理石及下水污泥灰樣品粒徑進行篩分。



圖 3.4 分析篩

三、分析之儀器

(一)X-射線螢光分析(XRF)

本研究利用之 X-ray 螢光分析儀(X-Ray Fluorescence, XRF)是 TechMax 公司所製造，其型號為 SEA6000VX，如圖 3.5 所示。其原理係利用 X 光或其他激發源照射待分析樣品，樣品中的元素之內層電子被擊出後，造成核外電子的躍遷，在被激發的電子返回基態的時候，會放射出特徵 X 光；不同的元素會放射出各自的特徵 X 光，具有不同的能量或波長特性。

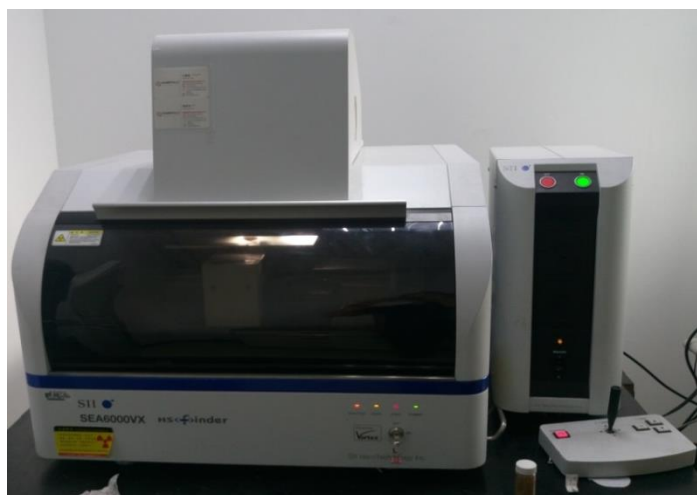


圖 3.5 X-ray 螢光分析儀(XRF)

(二)X-射線繞射分析(XRD)

本研究利用德國製造之 X-ray 繞射分析儀(X-ray diffraction, XRD)進行原料之晶相分析，其型號為 BRUKER – D2 Phaser，如圖 3.6 所示。其原理是根據布拉格定理(Bragg Diffraction) $2d \sin\theta = n\lambda$ ，利用 X 光以 θ 角撞擊物質內部，由於不同物質具有不同晶格特性，其內部 K 層電子反射 2θ 角為該物質之特定波長，以判定其結晶相。繞射後之數據再以 MDI 公司製作之 JADE 5.0 軟體，與 International Centre for Diffraction Data (ICDD) 資料庫(PDF-2, 2016)進行結晶相之比對。



圖 3.6 X-ray 繞射分析儀(XRD)

(三)感應耦合電漿原子放射光譜分析儀(ICP-OES)

本實驗使用之感應耦合電漿原子發射光譜分析儀(Inductively Coupled Plasma- Optical Emission spectrometer, ICP-OES)，如圖 3.7 所示，由美國 PerkinElmer 出產，型號為 Optima 8000，用於液態樣品之元素分析，可同時偵測多種元素，主要部分包括進樣系統、電漿放射及光學系統三部份，氬氣通常用來產生電漿，ICP-OES 的偵測極限可達 ppm 至 ppb 等級。

發射光譜分析法的基本原理，是利用每一元素均具有特定的能階，且原子自基態被提升至激發態後，激發態的原子再回到基態的過程中，放出之能量相當於此能階差的光，故可經由量測這些發射光譜及光譜強度，進行化學元素組成的判定，可對各元素進行定性及定量分析。



圖 3.7 感應耦合電漿原子發射光譜分析儀(ICP-OES)

(四)掃描式電子顯微鏡(SEM-EDX)

本研究之微觀影像分析是利用 JEOL 公司生產之熱游離式掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope – Energy-dispersive X-ray Spectroscopy, SEM-EDX)，型號為 JSM-6510LV，如圖 3.8 所示。其工作原理係利用高能量之電子束掃描試體表面，利用正偏訊號收集器將二次電子產生之能量轉換成訊號，方能產生影像加以觀測。



圖 3.8 掃描式電子顯微鏡(SEM-EDX)

肆、過程或方法

本實驗流程圖如圖 4.1 所示，探討不同大理石顆粒添加量、反應時間、攪拌速度及批次添加方式對下水污泥灰中磷回收效果之影響。於常溫 25°C 下，添加不同含量的大理石顆粒(25 wt%、50 wt%、100 wt%、150 wt%、200 wt% 及 300 wt% 等)，於不同反應時間(1 min、2.5 min、5 min、10 min、15 min 及 20 min)，以及不同攪拌速度(27 rpm、65 rpm、132 rpm)，從下水污泥灰中回收磷，並探討大理石顆粒不同批次添加量(12.5 wt%、25 wt%、50 wt%、100 wt% 及 300 wt%)及批次添加次數對下水污泥灰中回收磷之影響。

本階段之實驗方法如下：取 2 g 下水污泥灰至 50 mL 燒杯中，加入 40 mL 去離子水，再添加大理石顆粒，進行攪拌反應。反應完成後使用 100 mesh (150 μ m) 篩網過篩，取出篩網之上大理石顆粒並進行水洗後，利用王水將其溶解，以感應耦合電漿原子發射光譜儀(ICP-OES) 分析其中之磷含量，計算回收至大理石顆粒之磷回收率，並使用 SEM-EDX 分析回收磷後之大理石顆粒表面顯微構造。

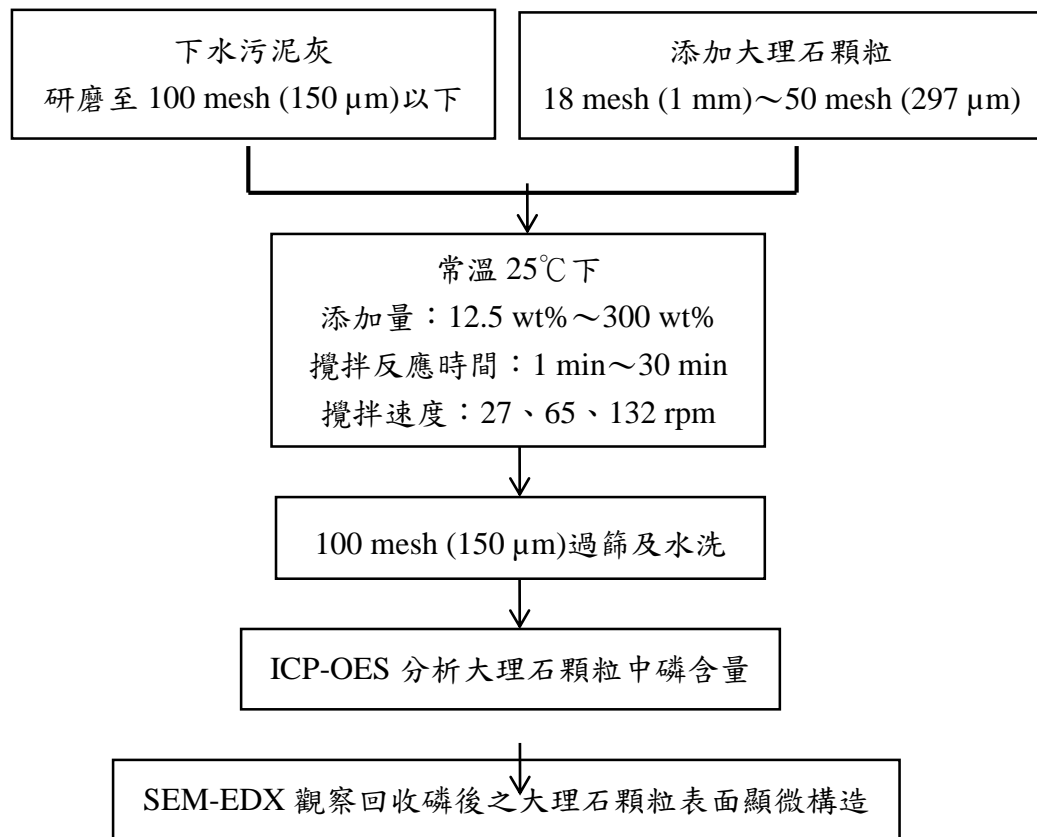


圖 4.1 添加大理石顆粒進行磷回收之流程圖

伍、結果

一、樣品之分析

(一) XRF 之分析

本研究之下水污泥灰樣品及大理石顆粒樣品之組成分析如表 3.1 所示。XRF 分析結果顯示下水污泥灰主要含有 Si、Fe、Al、Ca、P 及 K 等元素，其中 P 含有 8.39 wt%，而大理石顆粒主要含有 Ca、Si、Fe、K 等元素，不含磷。

表 4.1 下水污泥灰及大理石顆粒之元素組成(XRF 分析分析結果)

元素	下水污泥灰	大理石顆粒
	含量 wt (%)	
Si	36.4	16.4
Al	16.3	-
Fe	15.4	5.47
Ca	12.2	74.5
P	8.39	-
K	4.37	1.93

(二) XRD 之分析

本研究之下水污泥灰樣品之結晶型態分析結果如圖 4.2 所示。由 XRD 分析結果顯示原始下水污泥灰中結晶型態主要有四種，包括二氧化矽(SiO_2)、氫氧磷酸鐵($\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$)、偏磷酸鈣(CaP_2O_6)及磷酸鋁(AlPO_4)等。由分析結果得知原始下水污泥灰中的無機磷，以氫氧磷酸鐵、偏磷酸鈣及磷酸鋁的型態存在。

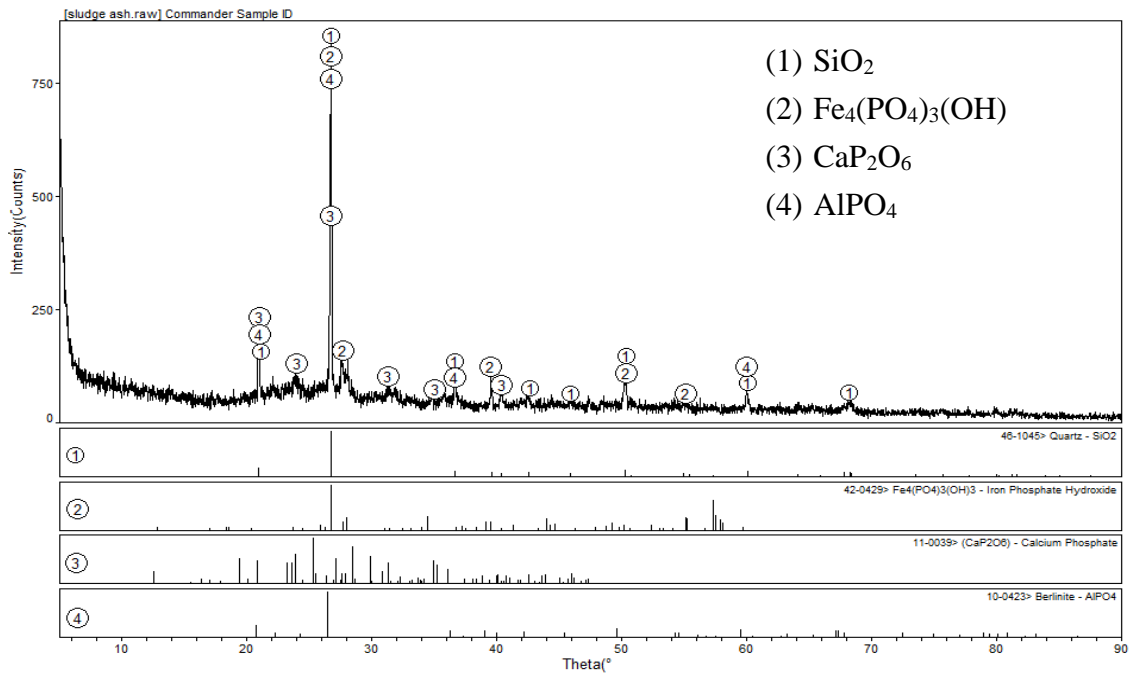


圖 4.2 下水污泥灰之結晶型態分析結果

二、實驗之結果

(一) 大理石顆粒之添加量影響

於反應溫度 25°C、反應時間 30 min、固液比 50 g/L，攪拌速度 65 rpm 下，大理石顆粒添加量對於下水污泥灰中磷回收率之影響如圖 4.3 所示。

隨著碳酸鈣顆粒添加量的增加，回收至碳酸鈣顆粒中的磷回收率亦逐漸增加。當碳酸鈣顆粒添加量為 50 wt% 以上時，磷回收率趨於穩定，維持在 6.48% 左右。

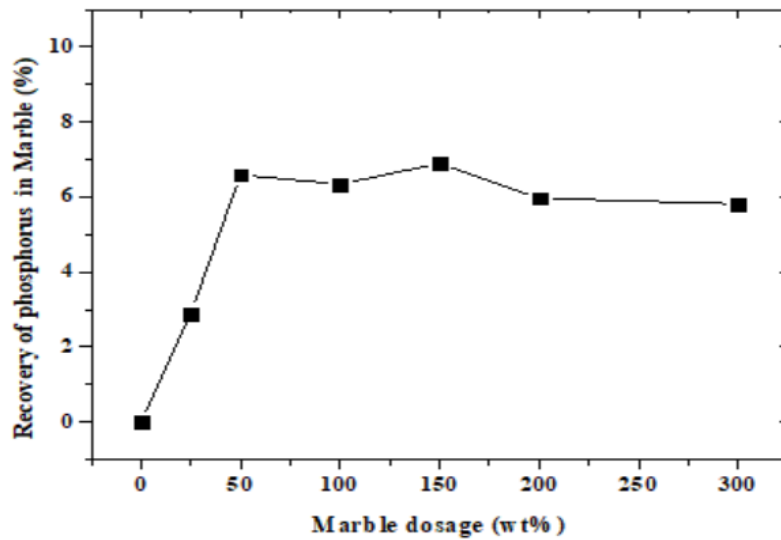


圖 4.3 大理石顆粒添加量對下水污泥灰中磷回收率之影響

(實驗條件：反應溫度 25°C，反應時間 30 min，固液比 50 g/L，攪拌速度 65 rpm)

(二) 大理石顆粒批次添加方式之影響

於反應溫度 25°C、反應時間 5 min、固液比 50 g/L、攪拌速度 65 rpm 下，大理石顆粒添加總量固定時，批次添加方式對於下水污泥灰中磷回收率之影響如圖 4.4 所示。

大理石顆粒添加總量固定為 300 wt% 時，隨著批次添加量減少、批次添加次數增加，磷回收率呈現上升趨勢。批次添加量 300 wt% 進行 1 批次添加時，磷回收率為 5.72%；批次添加量 25 wt% 進行 12 批次添加時，磷回收率提高至 7.56%。

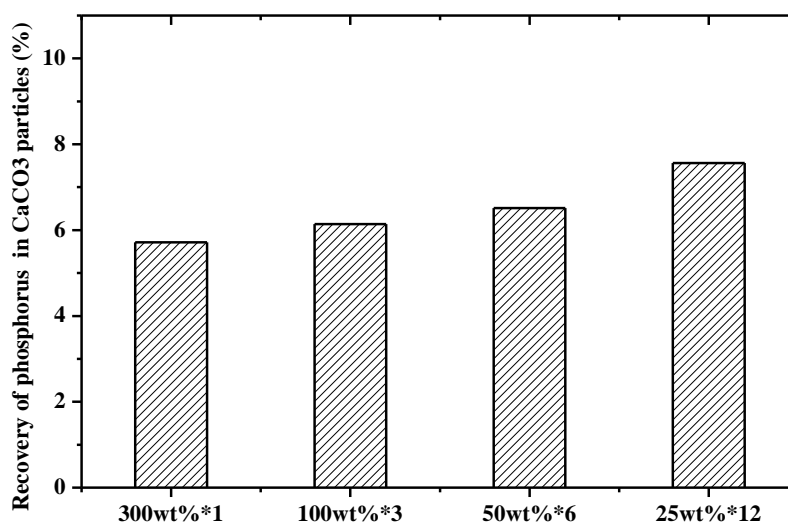


圖 4.4 批次添加大理石顆粒對下水污泥灰中磷回收率之影響

(實驗條件：反應溫度 25°C，反應時間 5 min，固液比 50 g/L，攪拌速度 65 rpm)

(三) 添加大理石顆粒之反應時間影響

於反應溫度 25°C、大理石顆粒批次添加量 25 wt% 進行 12 批次添加、固液比 50 g/L、攪拌速度 65 rpm 下，反應時間對於下水污泥灰中磷回收率之影響如圖 4.5 所示。

大理石顆粒批次添加量 25 wt% 進行 12 批次添加時，當反應時間介於 1~5 min 時，隨著反應時間增加，磷回收率呈上升趨勢，當反應時間為 5 min 時，磷回收率為 7.56%。但當反應時間超過 5 min 以上時，磷回收率則下降。其原因推測為當反應時間過長時，大理石顆粒相互碰撞摩擦，粒徑變小，導致表面已吸附磷的大理石顆粒，於過篩時隨下水污泥灰通過篩網，無法留置於篩網上，故磷回收率下降。

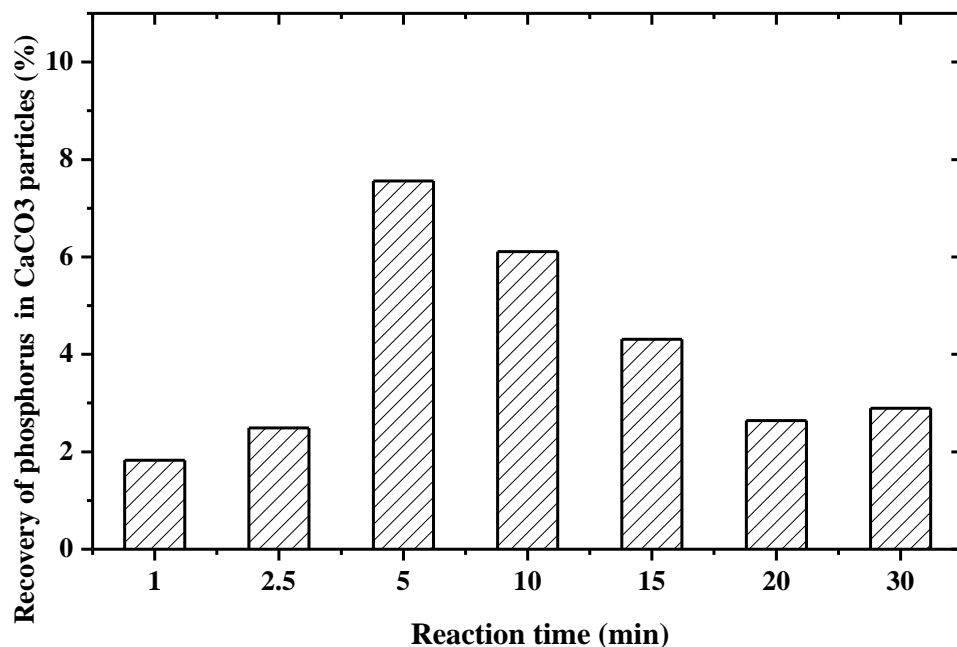


圖 4.5 添加大理石顆粒之反應時間對下水污泥灰中磷回收率之影響

(實驗條件：反應溫度 25°C，大理石顆粒批次添加量 25 wt% 進行 12 批次添加，
固液比 50 g/L，攪拌速度 65 rpm)

(四) 添加大理石顆粒之攪拌速度影響

於反應溫度 25°C、大理石顆粒添加量 25 wt% 進行 1 次添加、反應時間 5 min、固液比 50 g/L 下，攪拌速度對於下水污泥灰中磷回收率之影響如圖 4.6 所示。

當攪拌速度從 27 rpm 增加至 65 rpm 時，磷回收率從 0.33% 上升至 0.51%。當攪拌速度增加至 132 rpm 時，磷回收率趨於穩定，維持在 0.56% 左右。

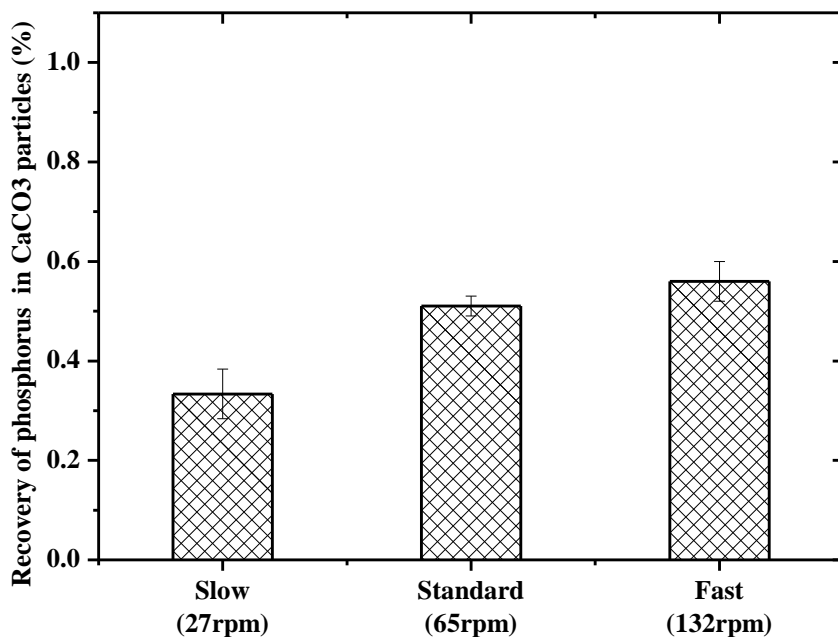


圖 4.6 添加大理石顆粒之攪拌速度對下水污泥灰中磷回收率之影響
(實驗條件：反應溫度 25°C，大理石顆粒添加量 25 wt% 進行 1 次添加，
反應時間 5 min，固液比 50 g/L)

(五) 大理石顆粒之批次添加次數影響

於反應溫度 25°C、大理石顆粒批次添加量 25 wt%、反應時間 5 min、固液比 50 g/L、攪拌速度 65 rpm 下，批次添加次數對於下水污泥灰中磷回收率之影響如圖 4.7 所示。

隨著批次添加次數增加，回收至大理石顆粒中的磷回收率亦逐漸增加，經過 138 批次回收處理後，可回收下水污泥灰中 76% 的磷。

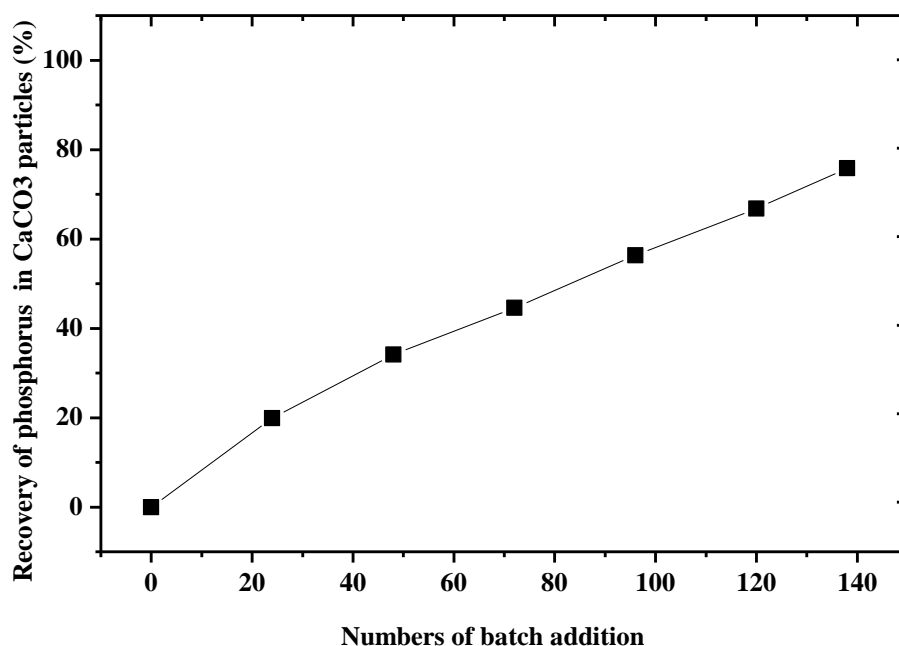


圖 4.7 大理石顆粒之批次添加次數對下水污泥灰中磷回收率之影響

(實驗條件：反應溫度 25°C，大理石顆粒批次添加量 25 wt%，反應時間 5 min，攪拌速度 65 rpm，固液比 50 g/L)

(六) 下水污泥灰添加大理石轉換之結晶型態分析

前述於各種反應條件下添加大理石後下水污泥灰中結晶型態分析結果如圖 4.8 所示。根據 XRD 分析結果顯示，於反應溫度 25°C、大理石添加量 25 wt%、反應時間 5 min 後之下水污泥灰之主要結晶型態為：磷酸鋁(AlPO_4)、碳酸鈣(CaCO_3)、二氧化矽(SiO_2)、三氧化二鐵(Fe_2O_3)及焦磷酸鈣($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$)等。

與原始下水污泥灰中的結晶型態相比較(圖 4.2)，添加大理石後，下水污泥灰中磷之主要結晶型態從偏磷酸鈣(CaP_2O_6)、氫氧磷酸鐵($\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$)等，轉換成焦磷酸鈣($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$)、三氧化二鐵(Fe_2O_3)。

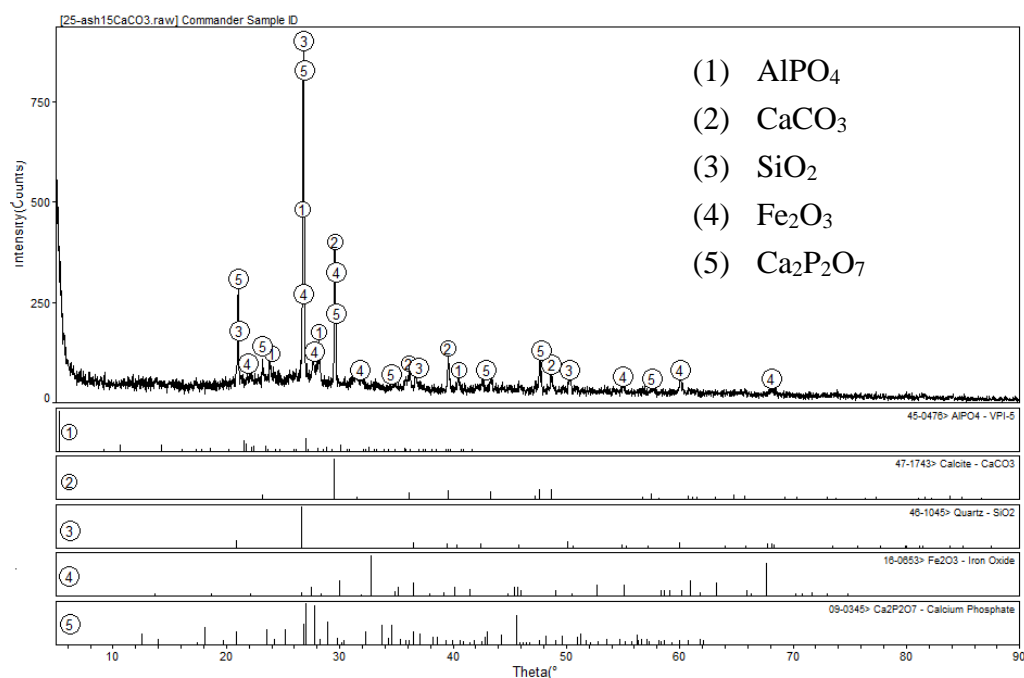


圖 4.8 添加大理石後之下水污泥灰結晶型態圖

(實驗條件：反應溫度 25°C，大理石添加量 15 wt%，反應時間 0.5 hr，固液比 50 g/L)

(七) 磷回收後之大理石顆粒之電子顯微鏡分析

利用電子顯微鏡分析磷回收前後之大理石顆粒之微結構，如圖 4.9 及圖 4.10 所示。磷回收前之大理石顆粒呈塊狀，大小不一，大塊大理石顆粒表面平滑，部分小塊大理石顆粒附著於大塊大理石顆粒上。

磷回收後之大理石顆粒，對其表面進行點分析之結果，較小塊狀物上含有磷。根據 4.4.4 節添加大理石進行下水污泥灰中磷型態轉換之結晶型態分析結果，經轉換後的磷灰石磷，大部分以焦磷酸鈣的形態存在，故推測回收至大理石顆粒之磷可能以化學吸附方式吸附於大理石顆粒表面上。

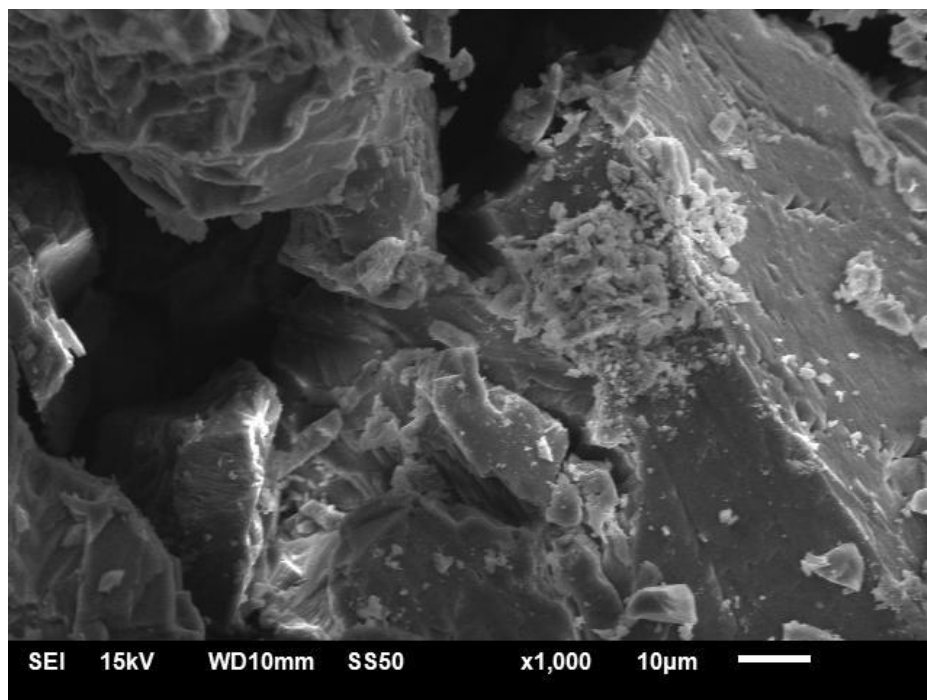


圖 4.9 磷回收前之碳酸鈣顆粒之 SEM-EDX 圖

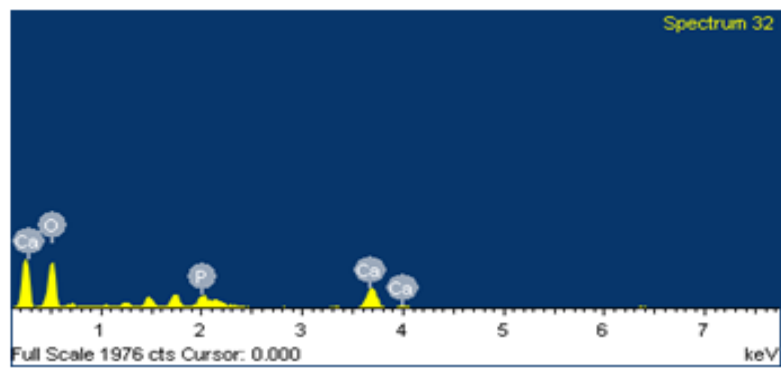
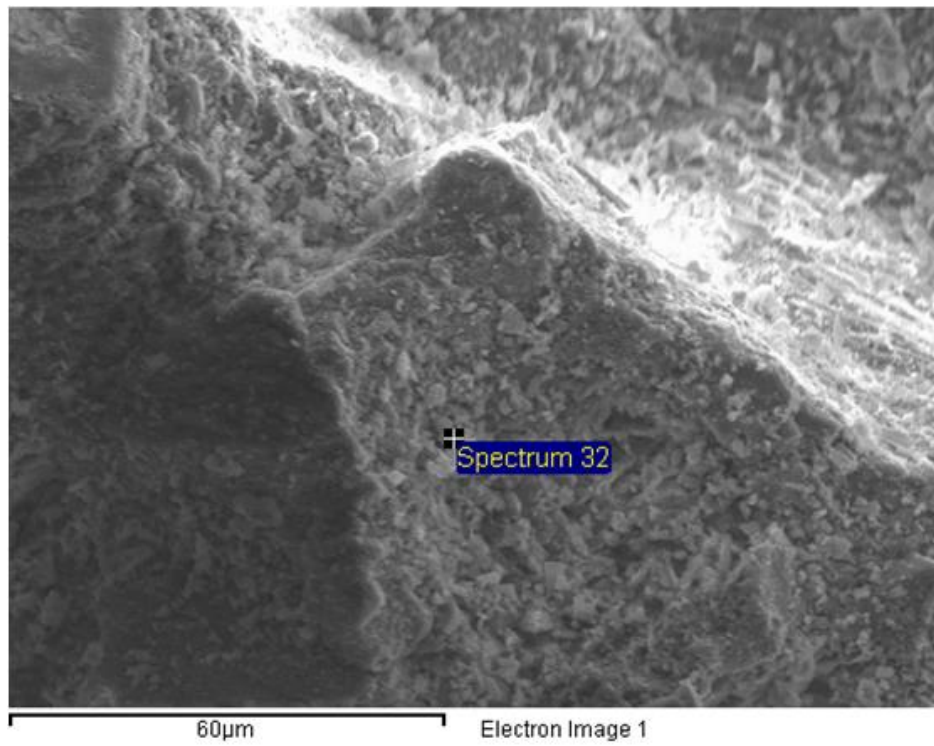


圖 4.10 磷回收後之碳酸鈣顆粒之 SEM-EDX 圖

陸、討論

本實驗結果顯示，於常溫下添加大理石顆粒於下水污泥灰中攪拌後，取出大理石顆粒，即可回收下水污泥灰中的磷。惟當大理石顆粒添加量為 50 wt% 以上時，磷回收率未隨著碳酸鈣顆粒的增加而增加，其原因推測為當大理石顆粒過多時，於攪拌過程中，大理石顆粒相互碰撞摩擦，粒徑變小，導致表面已吸附磷的大理石顆粒，於過篩時隨下水污泥灰通過篩網，無法留置於篩網上，故磷回收率無法提升。後續採用批次添加之方式，提高大理石顆粒從下水污泥灰中回收磷的效果。隨著批次添加次數增加，回收至大理石顆粒中的磷回收率亦逐漸增加，經 138 批次回收處理後，可回收下水污泥灰中 76 % 的磷。於批次方法中所使用之大理石亦可重複使用。藉由 XRD 結果顯示，添加大理石於下水污泥灰中時，亦可使磷之形態改變；並以 SEM 點分析結果顯示，亦發現經 P 存在於大理石之表面上。根據上述綜合之結果，添加大理石於下水污泥灰中，大理石可與磷反應，吸附於大理石表面，藉由分離大理石之方式可成功取得下水污泥中的磷。

此方法利用大自然界中，現有之含鈣物質(如:大理石)回收磷，操作簡單且流程簡單亦不繁瑣，且不會產生廢水或廢棄物等環境問題；亦可回收磷，且不浪費磷資源，可達到磷資源循環之目的，對環境並不造成影響及破壞。可滿足防廢、再生、保安、節能、低毒及思危等綠色化學之觀念。

柒、結論

根據我國營建署調查報告指出，台灣的下水污泥產生量年約 54,860 噸，目前焚化處理亦屬於國內最主要之下水污泥處理之方法，且根據文獻指出，經焚化處理後下水污泥灰中磷含量可濃縮至 8%–15%，以文獻值估算台灣可得 4,388-8,229 噸之磷資源相當於我國每年氮、磷、鉀之化學肥料進口量約 16%-30%。若能將磷從下水污泥灰中進行回收將可促進磷資源的循環再利用，但文獻之方法大多都是使用強酸、強鹼之方法。

本研究嘗試添加大自然界中就有之含鈣物質(如大理石等)進行下水污泥灰中磷之回收，達到環保之目的，而不使用強酸、強鹼之化學藥劑進行下水污泥灰中磷之浸漬，以防下水污泥灰中之重金屬溶出，亦會造成後續廢水處理之問題。

於常溫下添加大理石顆粒於下水污泥灰中攪拌後，取出大理石顆粒，即可回收下水污泥灰中的磷，經 138 批次回收處理後，可回收下水污泥灰中 76% 的磷。此方法利用大自然界中，現有之含鈣物質(如:大理石)回收磷，操作簡單且流程簡單亦不繁瑣，且不會產生廢水或廢棄物等環境問題；亦可回收磷，且不浪費磷資源，可達到磷資源循環之目的，對環境並不造成影響及破壞。可滿足防廢、再生、保安、節能、低毒及思危等綠色化學之觀念。

捌、參考資料及其他

- [1] 李中光，李柏宏，劉新校，邱惠敏，「淺談廢水中除磷及磷回收技術」，桃園市大學校院產業環保技術服務團環保簡訊，第 29 期，2015。
- [2] Driver, J., Lijmbach, D., Steen, I., "Why recover phosphorus for recycling, and how?," *Environmental Technology*, vol.20(7) , 1999, pp. 652-662.
- [3] Liu, Y., Chen, J., Mol, P.J., Ayres, R.U., "Comparative analysis of phosphorus use within national and local economies in China," *Resources, Conservation and Recycling*, vol.51(2) , 2007, pp. 454-474.
- [4] 內政部營建署，下水污泥處理再利用示範驗證總顧問計畫期末報告，2014。
- [5] Biswas, B.K., Inoue, K., Harada, H., Ohto, K., Kawakita, H., "Leaching of phosphorus from incinerated sewage sludge ash by means of acid extraction followed by adsorption on orange waste gel." *Journal of Environmental Sciences*, vol. 21 , 2009 , pp.1753–1760.
- [6] Ottosen, L.M., Kirkelund, G.M., Jensen, P.E., "Extracting Phosphorous from Incinerated Sewage Sludge Ash Rich in Iron or Aluminum." *Chemosphere* vol. 91 , 2013 , pp.963–969.
- [7] Weigand, H., Bertau, M., Hübner, W., Bohndick, F., Bruckert, A., "RecoPhos: Full-Scale Fertilizer Production from Sewage Sludge Ash." *Waste Management*, vol. 33 , 2013 , pp.540–p44.
- [8] Sano, A., Kanomata, M., Inoue, H., Sugiura, N., Xu, K.-Q., Inamori, Y.H., "Extraction of raw sewage sludge containing iron phosphate for phosphorus recovery," *Chemosphere*, vol. 89 , 2012 , pp.1243-1247.
- [9] Petzet, S., Peplinski, B., Cornel, P., "On wet chemical phosphorus recovery from sewage sludge ash by acidic or alkaline leaching and an optimized combination of both," *Water Research*, vol. 46 , 2012 , pp.3769-3780.
- [10] Xu, H.C., He, P.J., Gu, W.M., Wang, G.Z., Shao, L.M., "Recovery of phosphorus as struvite from sewage sludge ash," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 24(8) , 2012 , pp.1533-1538.

- [11] Schütte, T., Niewersch, C., Wintgens, T., Yüce, S., " Phosphorus recovery from sewage sludge by nanofiltration in diafiltration mode," *Journal of Membrane Science*, vol. 480 , 2015 , pp.74-82.
- [12] Acelas, N.Y., López, D.P., Brilman, D.W., Kersten, S.R., Kootstra, A.M., " Supercritical water gasification of sewage sludge: Gas production and phosphorus recovery," *Bioresource Technology*, vol. 174 , 2014 , pp.167-175.
- [13] Han, J., Kanchanapiya, P., Sakano, T., Mikuni, T., Furuuchi, M., Wang, G., " The behavior of phosphorus and heavy metals in sewage sludge ashes." *Int. J. Environ. Pollut*, vol. 37, 2009, pp. 357-368.
- [14] Li, R.D., Yin, J., Wang, W.Y., Li, Y.L., Zhang Z.H., " Transformation of phosphorus during drying and roasting of sewage sludge," *Waste Manage*, vol. 34(7) , 2014 , pp.1211-1216.
- [15] Li, R.D., Zhang, Z.H., Li, Y.L., Teng, W.C., Wang, W.Y., Yang, T.H., " Transformation of apatite phosphorus and non-apatite inorganic phosphorus during incineration of sewage sludge," *Chemosphere*, vol. 141 , 2015, pp.57-61.
- [16] Li, R.D., Teng, W.C., Li, Y.L., Wang, W.Y., Cui, R.Q., Yang T.H., " Potential recovery of phosphorus during the fluidized bed incineration of sewage sludge," *Journal of Cleaner Production*, vol. 140 , 2016 , pp. 964-970.