

高溫好氧消化應用於下水污泥減量技術之研究

張添晉¹、鄭欽恆²、林正祥³

¹ 國立台北科技大學環境工程與管理所教授

² 國立台北科技大學環境工程與管理所碩士

³ 祥勝綠色科技股份有限公司總經理

摘要

台灣下水污泥量隨污水下水道用戶接管普及率上升而增加，其特性為有機質含量高。本研究利用歐、美、日等先進國家已開發之好氧高溫菌污泥減量技術，進行下水污泥高溫好氧消化減量特性之研究。

高溫好氧污泥減量技術其分解污泥主要可分為兩個步驟：(1) 一部份之污泥迴流至高溫好氧反應槽，藉由高溫性細菌產生之水解酶，將結構複雜之大分子分解成容易被微生物利用之小分子，提高污泥之可生物降解性質；(2) 當被分解成較小分子之污泥，再迴流至曝氣槽時，利用活性污泥中微生物分解及礦化，達成污泥分解之目的。

本研究採用 S-TE process 高去除效率之特點，進行高溫好氧消化應用於下水污泥減量特性之研究，本實驗分成兩部份進行，第一部份先將下水污泥給予預先加熱 60~65°C 及機械攪拌後，使細胞內有機質釋出，提高後續高溫好氧消化之效率，研究對污泥內微生物細胞壁之破碎效率；第二部份為進入高溫(65°C)好氧消化階段，將污泥以高溫性細菌好氧消化。經由本實驗結果得知第一部份污泥預熱最佳加熱溫度 60°C~65°C，將污泥經過預熱 60°C 及機械攪拌破碎 360 分鐘後，污泥中溶解性 COD 值較未經過機械破碎之溶解性 COD 值為高，其顯示機械攪拌破碎具有破碎之效果；第二部份高溫好氧消化，批次消化 5 天之 SS、VSS 及 COD_{ss} 去除效率分別可達到 53.7%、64.3% 及 63.3%，半連續消化 9 天之 SS、VSS 及 COD_t 去除效率分別可達到 30.2%、50.4% 及 24.8%，結果顯示本實驗於污泥破碎及高溫好氧消化均有良好之效果。

關鍵詞：下水污泥、加熱及機械攪拌破碎、高溫好氧消化

一、前言

近年來台灣為了強化國際競爭力，提升生活品質及維護生態永續，已將污水下水道建設列入 2008 年十大建設之一，為國家發展重要指標。因此為配合政府政策，目前政府自辦下水道建設者有 53 處，另 36 處則以 Build-Operate-Transfer (BOT) 方式辦理，屆時國內未來所產生之污泥量將以倍數成長，可預期需解決污泥問題刻不容緩，應提早規劃處理與處置方法，以避免未能妥善處理而造成二次污染，且污泥衛生掩埋

場地難尋之困擾，因此污泥減量及資源化是必要的趨勢。

本研究利用高溫菌減量技術作為下水污泥之減量方法，此技術在歐美及日本均已相當成熟且被廣泛地使用。在歐美為從 1960 年研發至今之自發性高溫好氧污泥處理技術 (Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion, ATAD)，於日本則從 1997 年由神鋼環境株式會社研發之可溶化酵素污泥減量技術 (Solubilization by Thermophilic Enzyme, S-TE)。此技術利用 S-TE 槽將剩餘污泥溫度保持在 60°C~70°C，高溫菌活潑增殖性最佳，且會分泌強力之可溶解性污泥酵素，將剩餘污泥中之細胞膜分解及溶化，被分解溶化後之剩餘污泥在於曝氣槽中再水解化(CO₂、H₂O 等)。高溫菌於曝氣槽中(45°C 以下)會以孢子之狀態存在，不會死亡也不會生長，且不會妨礙曝氣槽中活性污泥之生長。這些孢子將移動至沉澱槽沉澱後，隨著廢棄污泥回流到 S-TE 槽時，其活性再次活躍，重新長出嗜熱菌不需要追加菌種(Sakai, *et al.*, 2000)。此技術具有高處理效率、運轉費用低及對中溫致病菌有殺菌之效果等優點，於日本已有相當多之實廠化研究。

Sakai 等人研發一實廠化之好氧高溫菌處理技術 S-TE process，於超過 100 天之操作下，VSS 去除率為 40%，BOD 可降至 20mg/l 以下，於超過 100 天之操作中，曝氣池 SS 控制在 2,000 mg/l，並無廢棄污泥之排放(Sakai *et al.*, 2000)。Shiota 等人之研究，利用 S-TE process 處理工業廢水超過 270 天後，其總剩餘污泥之產生量減少 93%，處理後水質(不包含經迴流至 S-TE 反應槽之處理系統)比較下，其 SS 及 TOC 只有稍微上升；另外由 Sakai 等人設計一個用於處理生活污水之實際規模的運轉系統(250 m³/d)，運轉 3 年總剩餘污泥量減少 75%，估計採用 S-TE process 比較起傳統污泥處理程序可節省 30%~50%之成本(Shiota *et al.*, 2002)。

二、方法與步驟

2.1 方法與步驟

由 Marjoleine、Young-Kee Kim 及 Bougrier 之研究，將污泥以熱解、機械、臭氧等方法給予污泥前處理，使其污泥膠羽破碎，以利破碎污泥微生物之細胞壁，使其細胞內有機物釋出至污泥液相中，且經過前處理後，其內之碳化物可被微生物轉化的更快且更佳。故本實驗利用加熱及機械攪拌破碎做為前處理，觀察對污泥中細胞壁是否具有破碎效率，再將經過破碎後之污泥進入高溫好氧消化，提升後續之消化效率。

本研究實驗採兩部份操作，第一部份為污泥破碎實驗，先將污泥以不同溫度 40°C、50°C、60°C 及 80°C 加熱，找出最適之加熱溫度，再進行機械攪拌破碎，觀察對污泥之破碎程度；第二部份為進行高溫好氧消化實驗，實驗污泥取自內湖污水廠終沉池之廢棄活性污泥，以高溫菌於 60~65°C 好氧狀態下進行消化，以批次與半連續消化操作，其分別為：(1)批次消化: 將植種污泥 10 公升加入消化槽，再加入廢棄活性污泥 10 公升作為實驗污泥，消化五天。(2)半連續消化: 將植種污泥 12 公升加入消化槽，再加入廢棄活性污泥 6 公升作為實驗污泥。每 24 小時先排出消化污泥 6 公升，再投

入 6 公升新鮮廢棄活性污泥，消化九天。

2.2 實驗設備

1. 污泥加熱器

本加熱器如圖 1 所示，以 YIHDERN 加熱設備加熱污泥。

2. 機械攪拌破碎機

污泥機械攪拌破碎機如圖 2 所示，其組成元件由：(1) 1/2Hp 離心機(2)文氏管(3) 桶槽(4)壓力表，其為將儲存桶內之污泥經過 1/2Hp 離心機攪拌後再通過文氏管，將污泥持續循環攪拌，可於污泥好氧高溫菌消化前，將污泥達到破碎之效果，以提高後續好氧高溫菌消化效率。

3. 污泥高溫消化設備

本實驗高溫消化設備如圖 3，為高溫好氧消化時，於 36 公升消化槽內之污泥會間歇經過 1/2 hp 離心機及文氏管，1/2 hp 離心機運轉量為 6 L/min，間歇循環時間比為運轉 2 分鐘停止 10 分鐘；本實驗為處於好氧狀態下，其曝氣設備包含曝氣機與文氏管曝氣，文氏管曝氣量為 2 L/min；污泥加熱則由恆溫水浴加熱器控制熱水流至 36 公升消化槽內之不銹鋼加熱管加熱污泥；污泥進料則由隔膜幫浦加藥機進行污泥進料。



圖 1 污泥加熱器

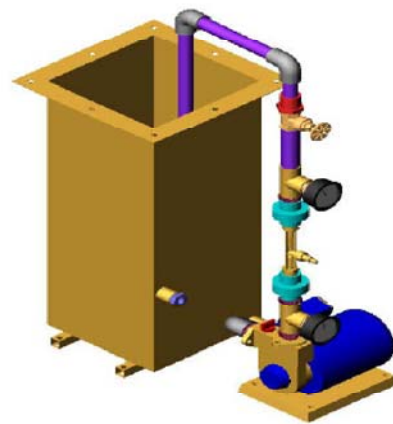


圖 2 污泥破碎攪拌機

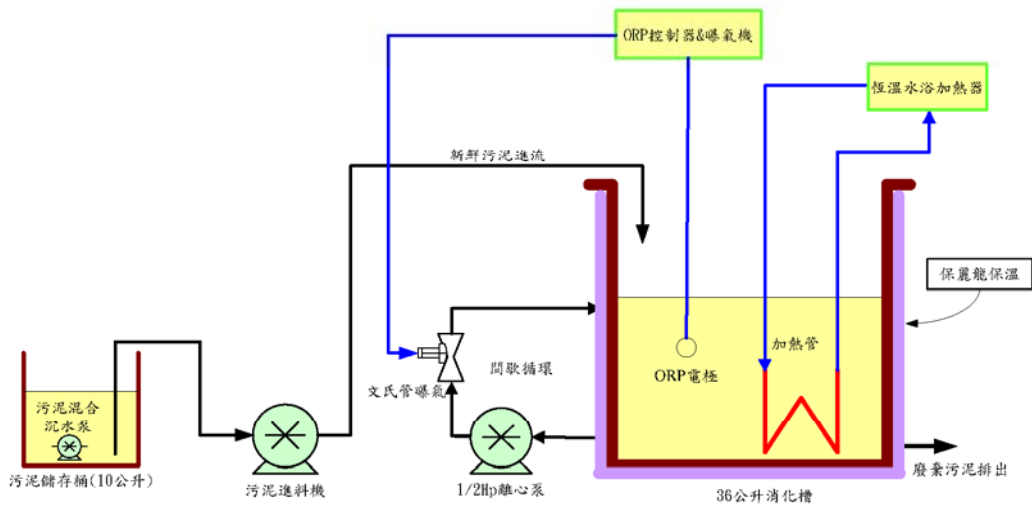


圖 3 本實驗 36 公升高溫菌污泥消化設備

三、結果與討論

3.1 內湖污水處理廠之揮發性有機物成份比例變化

內湖污水處理廠廢棄活性污泥之有機物成份比例如圖 4 及圖 5，分別為 VSS/SS 及 VSS/TS，於 2007 年 2 月以前有機物比例成份範圍皆在 40%~50%之間，於 2007 年 2 月以後污泥性質有所改變，有機物成份之比例範圍介於 50%~60%之間。污泥中 VSS 之成份比例主要跟污泥齡有關，若污泥齡較老之情況下，有機物成份也隨之降低。本實驗主要為去除污泥中之生物可解有機物 BVSS，故去除生物可分解有機物以 VSS 去除效率表示，所以由圖 4 及圖 5 中顯示之 VSS 比例與本實驗具有直接之關係。

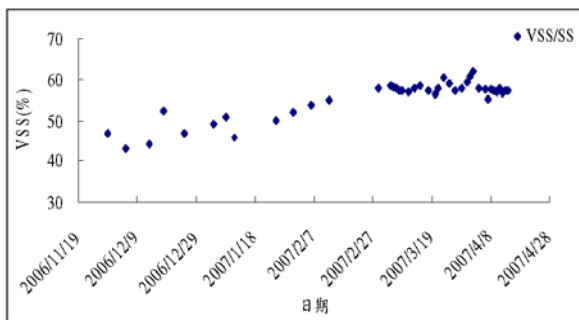


圖 4 內湖污水處理廠 VSS/SS 比例圖

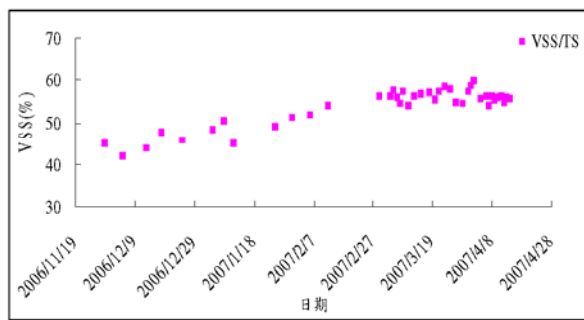


圖 5 內湖污水處理廠 VSS/TS 比例圖

3.2 污泥預先處理破碎效率

3.2.1 污泥之熱處理溶出效率

污泥加熱處理為將其膠體結構破壞及使其細胞內有機物質釋出，本研究參考 Young-Kee Kim 之研究，分別取 250 毫升污泥置於三角錐瓶中並且於瓶口塞入矽膠塞防止水分蒸發，於水浴加熱之方法加熱，並且將污泥分別以不同溫度 40°C、50°C、60°C

及 80°C 並持續加熱 30 分鐘，觀察溶解性 COD 之變化趨勢，溶解性 COD 濃度越高表示加熱溫度對污泥之膠體結構及生物細胞壁破壞效果越好。將污泥於不同溫度 40°C、50°C、60°C 及 80°C，持續加熱 30 分鐘，其溶解性 COD 釋出量分別為 125、326、922 及 1,690 mg/L，由圖 6 所示，隨著加熱溫度升高，其污泥之菌體也隨著被破壞，細胞壁碎片及有機物等物質被釋出，造成 COD 也會隨著溫度持續上升。

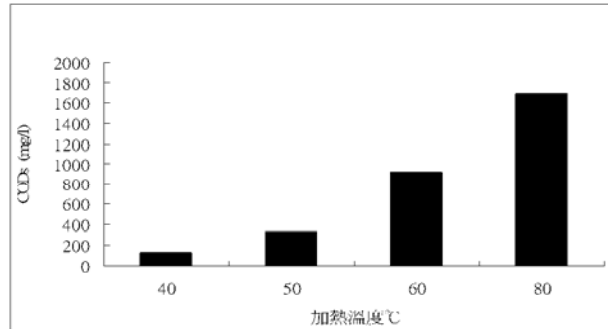


圖 6 污泥於不同溫度加熱 30 分鐘之 COD 變化量

當污泥於加熱 30 分鐘時隨著溫度上升，對於有機物釋出，使溶解性 COD 隨溫度上升而增加之趨勢。另外如圖 7，當污泥於 25°C、40°C、60°C、80°C、90°C 及 100°C 下持續加熱 60 分鐘，在 60°C 的有機物溶出率達到 16.8% 皆高於其他之不同加熱溫度，其次為 100°C 之有機物溶出率為 13.95%，80°C 及 90°C 之有機物溶出率分別為 11.88% 及 12.24%，效率最差即為在常溫 25°C 與 40°C 下加熱，有機物溶出率分別為 0.46% 與 1.92%。60°C 持續加熱 60 分鐘其溶解性 COD 溶出比例高於其他溫度之主要原因，為過高之加熱溫度使蛋白質在加熱過程中會隨時間增加使部份蛋白質凝固，而導致溶解性 COD 下降。將圖 7 之 COD 溶出率取最佳之加熱溫度 60°C，並且持續加熱分別為 0、0.5、1.0、2.0、3.0 及 4.0 小時，由圖 8 所示，其 60°C 熱處理之溶解性 COD 增加量隨著加熱時間越久，溶解性 COD 之量也越高，對於污泥於加熱 60°C 之情況下，對其膠體結構及細胞壁破壞，使溶出生物細胞內有機物質釋出，對於後續消化有直接之影響。

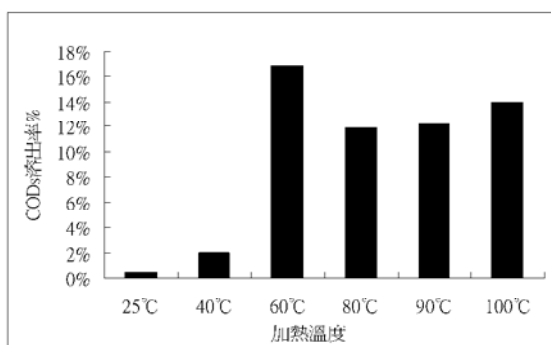


圖 7 污泥於不同溫度加熱 60 分鐘之 COD 溶出率

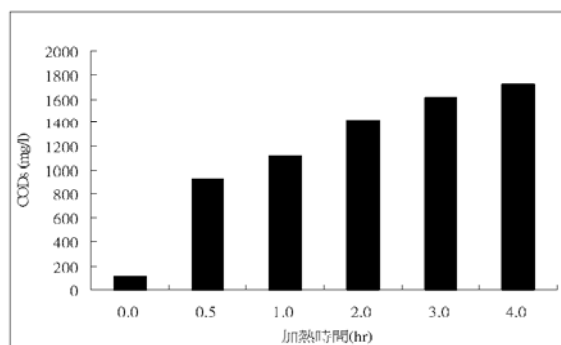


圖 8 污泥於 60°C 持續加熱 4 小時之 COD 變化量

3.2.2 污泥機械攪拌破碎效之溶出效率

本實驗將污泥分為經過加熱 60°C、機械攪拌(實驗組)與僅加熱 60°C(對照組)，將

此兩組污泥持續進行 360 分鐘，比較精過機械攪拌是否具有其破碎效果，如圖 9 及 10，此兩組在 0 分鐘及 360 分鐘之溶解性 COD 濃度分別為 65mg/l 及 2419mg/l 與 65mg/l 及 1421mg/l，實驗組在 360 分鐘內有機物溶出比例最高到達 15%，比起對照組在 360 分鐘內有機物溶出比例最高僅有 8.8%。由此實驗可知，污泥經過機械攪拌破碎，對污泥確有其破碎之效果。

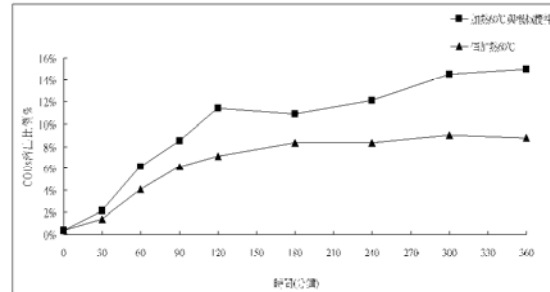
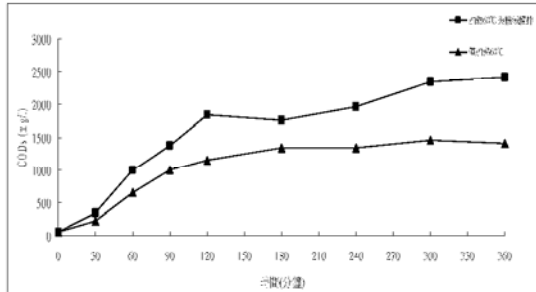


圖 9 污泥加熱至 60°C 經機械攪拌破碎 360 分鐘對於細胞中有機物釋出濃度

圖 10 污泥加熱至 60°C 經機械攪拌破碎 360 分鐘對於細胞中有機物釋出效率

3.3 污泥批次進流消化

3.3.1 污泥批次消化時間對於減量效率之影響

批次好氧高溫消化實驗 A 之 SS 及 VSS 濃度變化與去除率由圖 11 及圖 12 所示，起始濃度為 14,470 mg/L 及 5,760 mg/L，經過五天之消化其曲線呈現逐漸下降之趨勢，第五天 SS 及 VSS 之濃度與去除率分別為 9,460 mg/L、3,050 mg/L 及 34.6%、47%，分解速率分別為 41.8 mg/L/h 及 22.6 mg/L/h。VSS/SS 由起始之 39.8% 降至 32.2%。COD 之濃度變化趨勢與去除率，由圖 13 及圖 14 所示，COD_t 及 COD_{ss} 之起始濃度為 11,186 mg/L 及 9,396 mg/L，經過五天之消化其曲線呈現逐漸下降之趨勢，第五天 COD_t 及 COD_{ss} 之濃度與去除率分別為 8,235 mg/L、6,675 mg/L 及 26.4%、29%。(COD_{ss}=COD_t-COD_s)

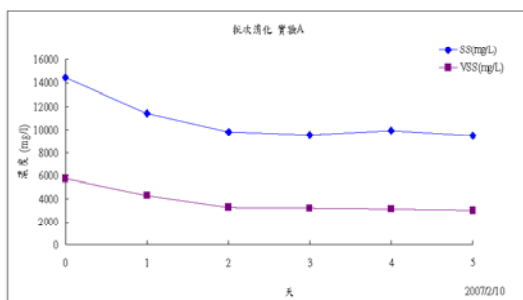


圖 11 實驗 A，高溫 65°C 下好氧批次消化 5 天 SS、VSS 濃度變化

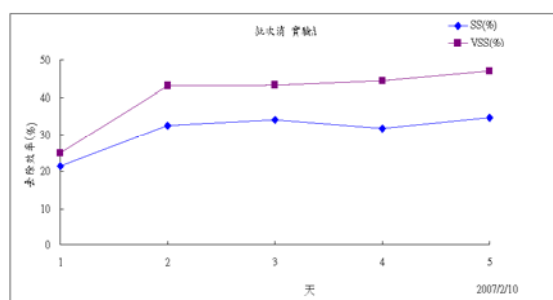


圖 12 實驗 A，高溫 65°C 下好氧批次消化 5 天 SS、VSS 去除效率

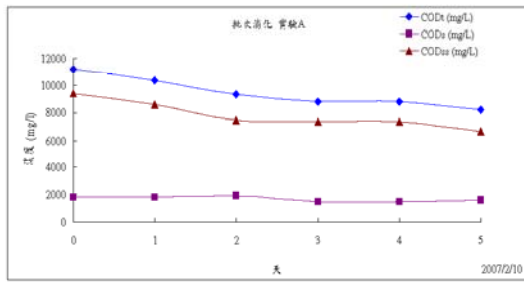


圖 13 實驗 A，高溫 65°C 下好氧批次消化 5 天 COD_t、COD_{ss} 濃度變化

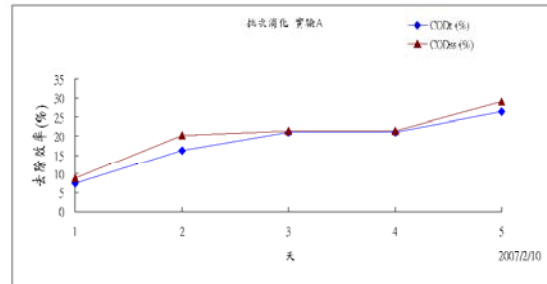


圖 14 實驗 A，高溫 65°C 下好氧批次消化 5 天 COD_t、COD_{ss} 去除效率

批次好氧高溫消化實驗 B 之 SS 及 VSS 濃度變化與去除率由圖 15 及圖 16 所示，SS 及 VSS 之起始濃度為 6,875 mg/L 及 3,750 mg/L，經過五天之消化其曲線呈現逐漸下降之趨勢，第五天 SS 及 VSS 之濃度與去除率分別為 3,180 mg/L、1,340 mg/L 及 53.7%、64.3%，分解速率分別為 30.8 mg/L/h 及 20.1 mg/L/h。VSS/SS 由起始之 54.5% 降至 42.1%。COD 之濃度變化趨勢與去除率，由圖 17 及圖 18 所示，COD_t 及 COD_{ss} 之起始濃度為 5,715 mg/L 及 5,067 mg/L，經過五天之消化其曲線呈現逐漸下降之趨勢，第五天 COD_t 及 COD_{ss} 之濃度與去除率分別為 3,100 mg/L、1,860 mg/L 及 45.8%、63.3%。

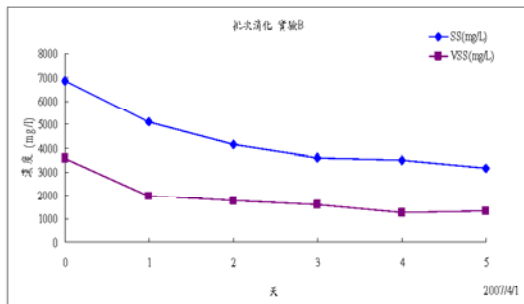


圖 15 實驗 B，高溫 65°C 下好氧批次消化 5 天 SS、VSS 濃度變化

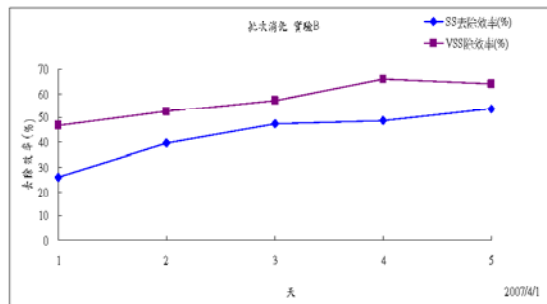


圖 16 實驗 B，高溫 65°C 下好氧批次消化 5 天 SS、VSS 去除效率

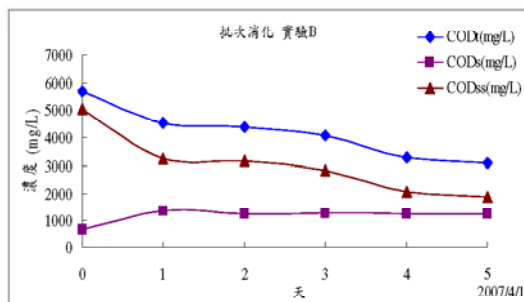


圖 17 實驗 B，高溫 65°C 下好氧批次消化 5 天 COD_t、COD_{ss} 濃度變化

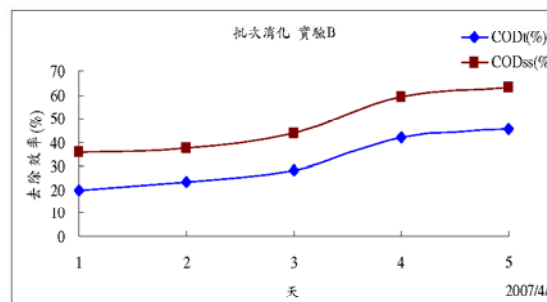


圖 18 實驗 B，高溫 65°C 下好氧批次消化 5 天 COD_t、COD_{ss} 去除效率

由以上兩個批次實驗可知，實驗 A 與實驗 B 批次消化污泥分解效率比較，實驗 A 所採用之污泥為 2007 年 2 月份由內湖污水處理廠取得，實驗 B 所採用之污泥為 2007 年 4 月份由內湖污水處理廠取得，此兩月份污泥之 VSS 成份有所變化，2 月份之 VSS

比例在 40%~50%左右，4 月份 VSS 比例上升至 50%~60%左右；實驗 A 與實驗 B，VSS 去除率分別為 47%與 64.3%，因此本研究對於污泥有機物之去除效率，認為與取得污泥中有機物成份變化有相對之關係。

3.4 污泥半連續進流消化

3.4.1 污泥半連續消化時間對減量效率之影響

本實驗將利用半連續消化 9 天，將污泥於完全均勻混合之狀態下，每天固定投入與排出 1/3 之新鮮廢棄活性污泥與消化污泥，探討每天固定給予微生物基質，其半連續流之消化效率。

高溫好氧半連續消化之投入污泥與排出污泥之 SS 及 VSS 濃度變化圖，如圖 19 所示，起始(第 0 天)植種污泥 SS 及 VSS 濃度為 3,180 mg/L 及 1,340 mg/L，VSS/SS 為 42%；起始(第 0 天)投入污泥 SS 及 VSS 濃度為 8,710 mg/L 及 5,030 mg/L，VSS/SS 為 57.7%；其每天投入污泥之 VSS/SS 平均在 51%左右，每天排出污泥之 VSS/SS 平均在 37%左右。其每天投入污泥與排出污泥 COD_t 之濃度變化圖，由圖 20 所示，起始(第 0 天)植種污泥之 COD_t 濃度為 3,100 mg/L；投入污泥 COD_t 濃度控制在 5,200 mg/L~8,000 mg/L 左右。

本半連續消化實驗之 SS、VSS 及 COD_t 之除效率由圖 21 可知，第 1 天之 SS 及 COD_t 去除效率為負值，其原因為起始(第 0 天)之污泥尚處於不穩定階段，而導致第 1 天去除效率產生負值；本實驗之 SS、VSS 及 COD_t 平均去除效率分別為 30.2%、50.4% 及 24.8%。

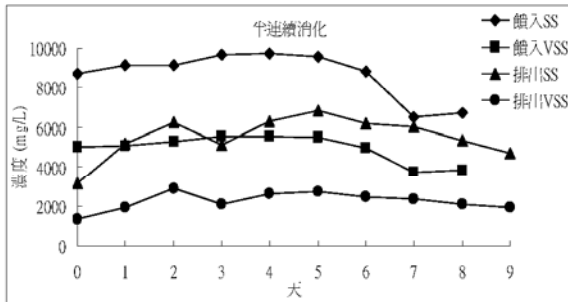


圖 19 高溫好氧半連續進流消化投入污泥與排出污泥之 SS 及 VSS 濃度變化圖

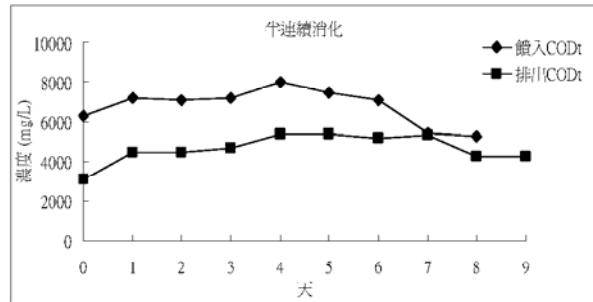


圖 20 高溫好氧半連續進流消化投入污泥與排出污泥之 COD_t 濃度變化圖

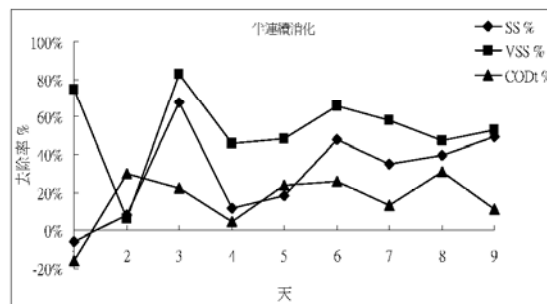


圖 21 高溫好氧半連續進流消化之 SS、VSS 及 COD_t 去除效率

3.5 綜合討論

本研究比較超音波、臭氧及本研究之機械攪拌破碎效率，如表 1 所示，為各方法之 COD_s 溶出濃度。本研究在破碎 360 分鐘，COD_s 溶出濃度為 2,419 mg/L；臭氧投入量為 0.1 g O₃/g SS，COD_s 溶出濃度為 1,870 mg/L；超音波破碎由 5 分鐘至 20 分鐘，COD_s 溶出濃度可達 6,331 mg/L。由此比較可知，對於污泥破碎最佳之方法為超音波破碎。高溫消化以 Milenko Roš、Sakai 及本研究比較，如表 2 所示，批次消化與半連續消化之 VSS 去除效率均是以本研究之去除效率較佳，批次消化及半連續消化之 VSS 去除率分別為 64.3% 及 50.4%。

表 1 超音波、臭氧及本研究對污泥破碎效率之比較

破碎方法	使用條件		COD _s					作者/年份	
	頻率	時間(min)	5	15	20				
超音波	0.768 W/mL	COD _s (mg/L)	2,581	7,059	8,912				Fen wang et al./2005【28】
	0.1 g O ₃ /g SS	COD _s 變化量	256 mg/L → 2,126 mg/L					王氏、孙氏 /2005【35】	
加熱 60°C 及機械攪拌破碎(本研究)	加熱 60°C 與機械攪拌	時間(min)	0	60	120	240	360		
		COD _s (mg/L)	65	998	1,843	1,958	2,419	本研究/2007	

表 2 高溫好氧消化 VSS 去除效率之比較

作者	消化條件	VSS 去除效率%	年份
Milenko Roš	批次消化 消化溫度 50°C、消化天數 17 天	VSS 去除率為 62.3%	2002【57】
	半連續消化 消化溫度 50°C、消化 10 天	第 5 天 VSS 去除率為 29.7% 第 10 天 VSS 去除率為 48.2%	
Sakai	實廠化 S-TE process，超過 100 天之操作下 消化溫度 65°C 消化天數 5 天	VSS 去除率為 40% VSS 去除率為 64.3%	2000【45】
本研究	批次消化 消化溫度 65°C 消化天數 9 天	VSS 平均去除效率為 50.4%	2007

四、結論

1. 由內湖污水處理廠取得之廢棄活性污泥，其有機物成份比例之變化，對本研究有機物去除效率也會有所影響。於 2007 年 2 月份前取得之污泥中有機物成份 VSS/SS 及 VSS/TS 介於 40%~50%，明顯偏低，2007 年 2 月份以後，污泥有機物成份 VSS/SS 及 VSS/TS 則上升介於 50%~60% 之間。
2. 污泥加熱不同溫度時，隨著加熱溫度越高，污泥之破壞效果越佳；但延長加熱時

間至 60 分鐘後，發現以加熱 60°C 之加熱溫度對污泥之破壞效率最佳；再將加熱 60°C 之污泥持續加熱 4 小時，溶解性 COD 也隨加熱時間升高，其起始濃度 115 mg/L 到終點第 4 小時上升至 1,728 mg/L。

3. 污泥僅加熱 60°C 與加熱 60°C 且經過機械攪拌破碎兩條件下之比較，結果顯示持續時間於 360 分鐘內，僅加熱 60°C 之污泥最終有機物溶出比例為 8.8%，而加熱 60°C 且經過機械攪拌破碎之污泥最終有機物溶出比例為 15%，對於此結果顯示污泥經過加熱且經機械攪拌之破碎效率較佳。
4. 污泥高溫好氧批次消化 5 天，批次消化實驗 A 之污泥取自 2007 年 2 月份之污泥，VSS/SS 由起始 39.8% 下降至 32.2%，VSS、SS 及 COD_{SS} 去除率分別為 47%、34.6% 及 29%；批次消化實驗 B 之污泥取自 2007 年 4 月份之污泥，VSS/SS 由起始 54.5% 下降至 42.1%，VSS、SS 及 COD_{SS} 去除率分別為 64.3%、53.7% 及 63.3%。由實驗 A 與實驗 B 結果顯示，批次消化污泥分解效率與污泥有機物成份比例有相對之關係。
5. 污泥高溫好氧半連續消化 9 天，每天投入污泥之 VSS/SS 平均為 51% 左右，每天排出污泥之 VSS/SS 平均為 37% 左右；半連續消化之 SS、VSS 及 COD_t 之平均去除率分別為 30.2%、50.4% 及 24.8%。

參考文獻

- [1] B. Balasundaram, S. T. L. Harrison, "Study of physical and biological factors involved in the disruption of *E. coli* by hydronamic cavitation", *Biotechnology Program*, Vol. 22, 2006, pp. 907-913.
- [2] Ursula Kepp, Ingo Machenbach, Norman Weisz, Odd Egil Solheim, "Enhanced stabilisation of sewage sludge through thermal hydrolysis – three years of experience with full scale plant", *Water Science and Technology*, Vol. 42, no. 9, 2000, pp 89–96.
- [3] Marjoleine P. J. Weemaes and Willy H. Verstraete, "Evaluation of current wet sludge disintegration techniques", *Journal of Chemical Technology Biotechnology*, Vol. 73, 1998, pp. 83-92.
- [4] Young-Kee Kim, Myung-Shin Kwak, Sang-Baek Lee, Won Hong Lee, Jeong-Woo Choi, "Effects of pretreatments on thermophilic aerobic digestion", *Journal of Environmental Engineering*, 2002, pp. 755-763.
- [5] C. Bougrier, C. Albasi, J. P. Delgenès, H. Carrère, "Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatment on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability", *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 45, 2006, pp.711-718.
- [6] M. Barjenbruch and O. Kopplow, "Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge", *Advances in Environmental Research*, Vol. 7, 2003, pp. 715–720.
- [7] Fen Wang, Yong Wang, Min Ji, "Mechanisms and kinetics models for ultrasonic waste activated sludge disintegration", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B123, 2005, pp. 145-150.
- [8] Y. Sakai, T. Fukase, H. Yasui, M. Shibata, "An activated sludge process without excess sludge production", *Water Science and Technology*, Vol. 36, no. 11, 1997, pp.163-170.
- [9] Y. Sakai, T. Aoyagi, N. Shiota, A. Akashi, S. Hasegawa, "Complete decomposition of biological waste sludge by thermophilic aerobic bacteria", *Water Science and Technology*, Vol. 42, no. 9, 2000, pp. 81-88.
- [10] N. Shiota, A. Akashi, S. Hasegawa, "A strategy in wastewater treatment process for significant reduction of excess sludge production", *Water Science and Technology*, Vol. 45, no. 12, 2002, pp. 127-134.
- [11] 王琳、孙德栋,「臭氣氧化分解污泥的試驗研究」, 中國海洋大學學報, 第 35 卷, 第 1 期, 2005, 第 83.86 頁。
- [12] Milenko Roš and Gregor Drago Zupančič, "Thermophilic aerobic digestion of waste activated sludge", *Acta Chim.*, Vol. 49, 2002, pp. 931-943.