

廢棄物類

超音波污泥水解線上監控系統之開發

陳幸德*、朱振華*、何啟賢**、周震江***、林世專****、鄒文源*、
陳誼彰*

摘要

近年來廢棄污泥的處置引起愈來愈多的注目，由於最終處置方法(掩埋與焚化)的不理想，導致其清運處理費用激增，造成污水處理單位經營上很大的困擾。因此，廢棄污泥如何減量成為各界所重視。

污泥減量技術可分為物理、化學、生物或組合污泥水解技術等。其中，如何加速污泥水解的速率是一個很重要的限制步驟。超音波污泥水解技術已被證實可達最佳污泥水解效率，幾乎可將細胞完全破碎水解，但因所需能量問題，在實廠化是方面仍受限制。

本團隊建置了一套超音波污泥水解線上監控系統，此線上監控系統是由實驗室直接利用價格昂貴的具全光譜掃描功能的光學監測系統進行試驗，經由比對所建立的 COD 濃度標準品檢量線與污泥水解液 COD 濃度檢量線，證實超音波污泥水解液可利用單一波長 254 nm 或 282 nm 的吸光度推導出污泥水解液的 COD 濃度，再利用市售較便宜的單一波長分光光度計進行系統的建置，可大幅降低實廠使用的初設費用，有利於未來的技術推廣。

【關鍵字】超音波、污泥水解、監控系統

*工業技術研究院材料與化工研究所 研究員

**達盛機械工程股份有限公司 特助

***長江龍環保工程股份有限公司 董事長

****長江龍環保工程股份有限公司 副總經理

一、前言

一般而言，污泥水解機制是指將微生物細胞壁利用物理方式(如：研磨、珠磨、超擾流、超音波或加熱)、化學方式(如：加鹼、加酸或氧化劑等)或生物方式(如：酵素)等加以破壞，以喪失其保護功能，使微生物細胞壁內細胞質中含有的碳水化合物、脂質、蛋白質和無機離子等物質釋出到溶液中。因此，溶液中的化學需氧量(chemical oxygen demand, COD)濃度與電導度會增加^[1]，然而，隨著水解時間的增加，有機物濃度並不一定會隨之增加，其一是因為水解效率的限制，其二是水解產物受到破壞，因此，如何有效地監控水解過程中水解產物的變化，變成污泥水解的重要關鍵。

以超音波為例，超音波污泥水解技術已被證實可達最佳污泥水解效率^[2]，幾乎可將細胞完全破碎水解，超音波除了可以破壞污泥的細胞壁外，因超音波可產生自由基，還可將水解產物繼續氧化，然而，水解產物的氧化不為本技術的最終目的，因此，如何監控水解程序乃是發展超音波的關鍵技術。

由於污泥水解後造成 COD 與電導度的變化，因此，利用 COD 與電導度的即時監控技術應可作為超音波污泥水解的控制技術。現今雖有商品化的 COD 自動監測設備，但大部分皆因價格高昂且測物多具專一性，故現場水質監測分析之應用性有限。但以現行技術而言，光學分析具有量測快速、污染較少的優點，適合用來發展即時監測技術，因此，本研究希望藉其特性建立一套超音波污泥水解程序之水質自動監測系統，未來可應用此系統於實廠使用，將可大幅減少超音波污泥減量所消耗的電量。

二、線上監測技術

鑒於線上監測技術常用於水質水量的自動監測，且相關設備亦不少，因此，如欲開發污泥水解的線上監測技術，可自現今水質與水量自動監測技術開發汲取經驗，從中擷取可用的技術，並應用於污泥水解的線上監測。

2.1 市售水質與水量量測設備比較

一般水質量測的項目包含水溫、pH、電導度、ORP、化學需氧量(COD)、生物需氧量、總有機碳、溶氧、濁度與懸浮固體等，其中水溫、pH、電導度、ORP 都是以電化學的方式進行量測。溶氧除了以傳統電化學的量測方式以外，近年來亦發展出以冷光物質包覆感測器的技術來量測。另外，氨之量測主要為加入試藥後量測波長 645 nm 至 655 nm 的吸光度後，以比色法的方式量測而得^[3]。

對於水量的量測設備主要分為水位與流量兩種，一般水位量測設備大多利用接觸式感測元件來測得水位，包括浮筒式、水壓式、電容式及探測式等，另一種為非接觸式感測元件，常見者為超音波式；而一般流量量測設備其量測原理與方法較廣泛，但大部分量測原理都與流體性質有關，包括差壓式、電磁式、渦流式、容積式及超音波式。

水質與水量自動監測之目的在於提供有效、即時且完整的水質特性資訊，以供廢水自動控制及自動化之用。目前設置於廢水處理廠之水質量測設備，從量測方法來看，大部分多採接觸式量測，如設置環境惡劣則易造成量測設備感測器損壞，量測品質不穩定，故維護方面需定時清理或更換感測器；從量測方法來看，若設備需加藥量測，則必須定期更換添加藥物，對於量測後水樣必須進一步處理，不僅需額外維護及藥材費用且增加環境負荷；從量測項目來看，大多數監測設備僅有單一水質量測項目，缺乏整合多水質項目之量測；從監測功能來看，除利用電極量測方式外，一般量測設備都需反應及量測時間，無法即時提供量測之水質資訊，有失水質自動監測之目的。

水位或流量之量測設備主要考量係為接觸式量測問題，由於在惡劣環境下量測，易使量測設備損壞與量測品質不佳。另一個考量重點在於量測之流體性質，包括容忍壓力、溫度、密度、黏度、電導度等，其限制量測設備之量測範圍及量測準確度，如渦輪及渦流式流量計不適於量測高黏度液體；電磁式流量計僅適用於非導電性之管壁；至於超音波流量計，則因傳播媒體而有不同，例如有氣泡存在時，超音波容易產生反射及擾射^[4]。

綜合以上幾點，從經濟面、應用面及環境面來看，利用光學頻譜與數位影像分析方法建立水質與水量自動監測系統，其建置成分相對低、操作維護簡單且不會造成環境二次污染^[5]。

2.2 光學頻譜分析原理與方法

利用光譜分析方法所建立的水質自動監測系統，其主要以水質之紫外光及可見光之吸收光譜做為量測依據，再利用水質於吸收光譜之頻譜特性及 Beer-Lambert 定律為基礎，依序定性及定量出水質成分及濃度。以下針對光學頻譜種類與應用、吸收光譜分析原理、方法及應用說明。

2.2.1 光學頻譜種類與應用

光學頻譜為複色光(含不同波長或頻率)透過介質或散色器後，波長經光色散現象，並依波長順序產生連續或不連續之彩色光帶，其分析方法基於電磁輻射多種能量的轉變，一般光譜方法如圖 1 及表 1 所示。若分析其吸收光能所導致的光譜變化，稱為吸收光譜分析；若分析其回歸激態所釋放的電磁射線，因過程不同又可分為發射與散射光譜分析，其光譜分類及應用整理如表 2 所示。

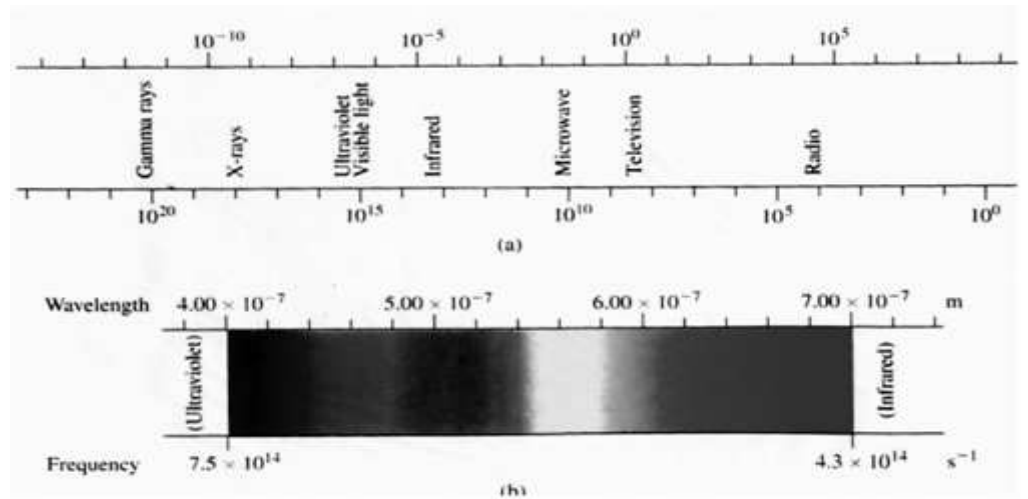


圖 1 光學頻譜方法圖^[6]

表 1 一般光學頻譜方法表^[7]

光譜分析法型式	一般波長範圍	一般波數範圍	量子化躍遷型式
γ -射線發射	$0.005 \overset{\circ}{\text{Å}}$ 至 $1.4 \overset{\circ}{\text{Å}}$	-	原子核
X-射線吸收，發射， 螢光，繞射	$0.1 \overset{\circ}{\text{Å}}$ 至 $100 \overset{\circ}{\text{Å}}$	-	內層電子
真空紫外光吸光	10 nm 至 180 nm	10×10^6 至 5×10^4	鍵結電子
紫 外 光 可 見 光 吸 收、發射和螢光	180 nm 至 780 nm	5×10^4 至 1.3×10^4	鍵結電子
紅外光吸收和 拉曼散射	0.78 nm 至 300 μm	1.3×10^4 至 3.3×10^4	轉動/振動的分子
微波吸收	0.75 nm 至 3.75 mm	13 至 27	分子的轉動
電子自旋共振	3 cm	0.33	磁場中電子自旋
核磁共振	0.6 m 至 10 m	1.7×10^{-2} 至 1×10^3	磁場中電子核自旋

表 2 光學頻譜種類與應用^[3]

光譜分類	光譜種類	光譜特性與應用
波長區域	紫外光譜	分子中某些價電子吸收了一定波長的電磁波，由低能級躍近到高能級而產生的一種光譜，其波長範圍約為 180 nm 至 400 nm。
	可見光譜	一般人眼睛可感知的電磁波，其波長範圍約 400 nm 至 780 nm。其結合紫外光譜對無機或有機的定性及定量有廣泛應用，其範圍包含化學及臨床實驗室，近年更用於農業及廢水水質的成分分析。
	紅外光譜	具有很強的熱效應，並易於被物體吸收，通常被做為熱源，透過雲霧能力比可見光強，在通訊、探測、醫療、軍事等方面有廣泛的用途。可分為近紅外光區(NIR)、中紅外光區(MIR)及遠紅外光區(FIR)。
產生方式	發射光譜	物體本身自行發光而形成的光譜稱為發射光譜。其光譜形式可分為線狀光譜、帶狀光譜及連續光譜 3 種。
	吸收光譜	光透過某物質時被該物質特定成分吸收，造成連續其波長吸收程度改變，稱為吸收光譜。
	散射光譜	分子受到外在能量激發，分子中的原子產生振動並釋放出能量而形成之光譜稱為散射光譜。其散射光中除有與激發光波長相同的彈性成分稱為瑞利散射，若比激發光波長長的和短的成分則為拉曼散射。
產生本質	原子光譜	原子以某種方式從基態提升到較高的能態時，原子內部的能量增加，而多餘能量將被以光的形式發射所產生之光譜稱為原子光譜。其因原子能態的變化是非連續量子性，所產生的光譜亦由一些不連續的亮線所組成，故又稱做線狀光譜。
	分子光譜	分子的電子態之間的躍遷中，其振動躍遷和轉動躍遷過程中所產生之光譜稱為分子光譜。因其光譜形成密集，故又稱做帶狀光譜。

2.2.2 吸收光譜定性及定量方法

不同物質的分子、原子和原子團(特定官能基或發色團)造成不同吸收光譜，因此可利用光譜特定吸收波長來鑑別有機物及其結構，達到定性廢水成分之目的，如圖 2 所示；根據 Beer-Lambert 定理，其成分吸光度大小正比於液體吸光分子的數量(溶液濃度)及吸光液體的厚度(光徑長度)，如式 1 所示，同一成分其濃度愈高，所造成之吸光度也愈高，因此可利用吸收頻譜之吸光度，達到定量廢水濃度之目的，如圖 3 所示。

$$A = abc \tag{1}$$

其中，A：吸光度(ABS)；a：莫耳吸光係數；b：光徑長度；c：溶液濃度。

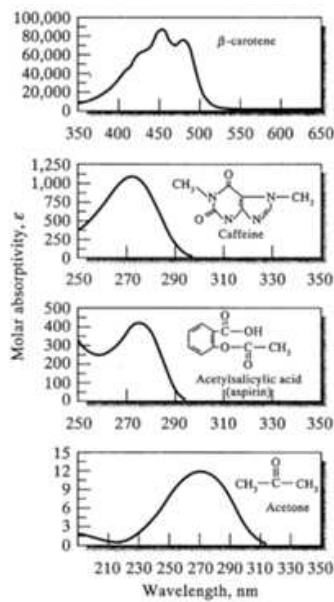


圖 2 吸收光譜定性分析圖^[6]

2.2.3 紫外光及可見光譜於水質量測之應用

目前對於光譜分析之方法，以數學方法與統計方法為主。以數學方法而言，利用單一波長或多波長，以一次微分法、二次微分法、解旋法、正規化、面積法及積分法等方法，分析頻譜資料找出不同成分及物質所形成之特徵波長，去除其他物質之干擾，再以其波長運算該成分之濃度，其整理如表 3 所示。

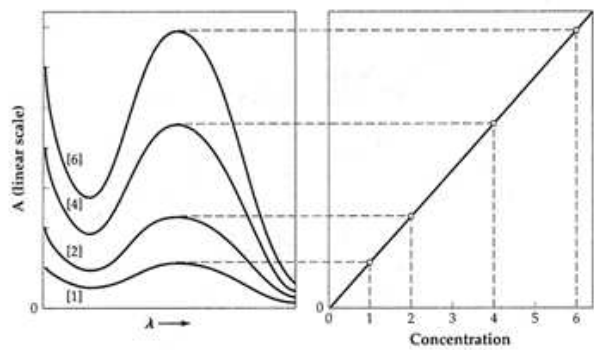


圖 3 吸收光譜定量分析圖^[6]

表 3 光譜分析方法與應用-數學方法^[3]

項目	方式	波長 (nm)	應用範圍	作者
TOC	單一波長	254	生活污水	Dobbs et al., 1972 ^[8]
	Integrated adsorption	250~350	海水	Foster et al., 1971 ^[9]
	雙波長	254、350	生活污水	Matsché et al., 1996 ^[10]
	解旋(deconvolution)	205~330	都市廢水、工業廢水	Khorassani et al., 1999 ^[11]
COD	單一波長	254	生活污水、工業廢水	Mrkva et al., 1975 ^[12]
	雙波長	254、350	生活污水	Matsché et al., 1996 ^[10]
	解旋(deconvolution)	205~330	都市廢水、工業廢水	Khorassani et al., 1999 ^[11]
	正規化(Normalization)	200~350	都市廢水	Vaillant et al., 2002 ^[13]
BOD	單一波長	280	農場廢水	Brookman, 1997 ^[14]
NOM	面積法	250~350	自來水	Wang et al., 2001 ^[15]
糖份	單一波長	268	葡萄酒	Roig et al., 2003 ^[16]
Phenol	二次微分	250~300	廢水	Hawthorne et al., 1984 ^[17]
	單一波長	268	工業廢水	Roig et al., 2003 ^[18]
硝酸鹽 氮	雙波長	220、275	飲用水	環保署公告方法 ^[19]
	解旋	205~330	都市污水	Thomas et al., 1996 ^[20]
	二次微分	185~270	實驗室標準品	Suzuki et al., 1987 ^[21]
		190~250	廢水	Ferree et al., 2001 ^[22]
		214	人工海水、純水	Nagashima et al., 1985 ^[23]

惟因廢水中成分複雜以致干擾程度嚴重，故多以統計方法為主，包括多重線性迴歸(Multiple linear Regression, MLR)、修正部份最小平方迴歸(Modified Partial Least Squares Regression, MPLSR)、倒傳遞類神經模式分析(Artificial Neural Network, ANN)、主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)等數種，其中，石門水庫以近 13 年來之水質資料，選取數種水質配合類神經網路架構來進行訓練、驗證並量測懸浮固體濃度，再進一步修正類神經網路模式架構，使其可對懸浮固體濃度作動態即時預測^[24]。另外，在廢水處理部分，尤氏^[25]利用類神經網路運算建立 CFSBR 之水質推估，針對廢水中之磷酸鹽、亞硝酸鹽氮及硝酸鹽氮進行推估，均可獲得 $R^2 > 0.9$ 以上之推估結果，皆可見出其相關性。

三、超音波污泥水解線上監控系統

為使超音波硬體的使用更具效率，本研究結合水質檢測技術，進行超音波污泥水解的線上監控系統整合。所使用的污泥來自某工業區聯合污水廠之活性污泥的濃縮污泥，其有機比例達 80%。由於污泥水解後，細胞內的有機質會流出細胞體外，致使溶液中的溶解性 COD 濃度與電導度提高，因此，本計畫結合 COD 線上檢測技術與電導度儀器設備，建立超音波污泥水解線上即時監控技術，如圖 4 所示，此方法可避免超音波的過度使用，造成能量的浪費。

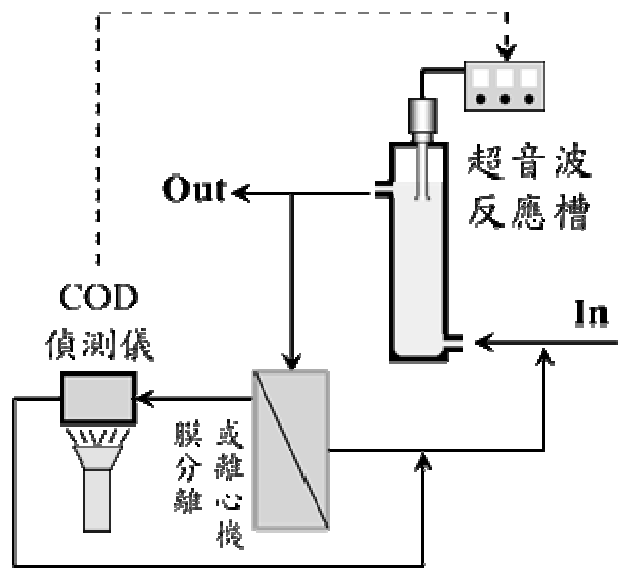


圖 4 結合線上 COD 監測設備與超音波污泥水解系統之示意圖

本研究所採用之 COD 線上即時監測技術是利用 UV/VIS 光學頻譜方法，根據光學原理(Beer - Lambert law)，並建立 COD 的光譜水質資料庫，找出特徵波長，建立水中 COD 定性及定量演算法，發展一套水質即時監測系統，各階段工作如下：

3.1 監測系統建置

建立 COD 檢量線的光學監測系統所使用的光源為 D2000 燈源(Ocean Optics)，光譜儀為 USB2000+(Ocean Optics)，再利用電腦連接光譜儀(可量測不同波長之吸光度)，以電腦安裝的 Ocean Optics 軟體進行分析水樣中的光源變化。用以量測水解污泥的吸光度單元，可置入已盛裝水解污泥(離心後上澄液)的石英管進行吸光度的量測，由於 SS 會干擾吸光度的量測，因此，水解污泥需先經過離心後，再取上澄液進行吸光度分析，若為連續監測，可連接自製的 flow cell 進行吸光度的量測，整體設備全貌如圖 5 所示。

3.2 建立 COD 標準濃度檢量線

本計畫利用鄰苯二甲酸氫鉀(KHP)所配置 COD 之標準品，經過光譜掃描所得原始數據如圖 6 所示(ABS 為吸光度，由光譜儀量測。本文係探討由 ABS 量測以推估 COD 濃度，而污泥水解會造成 COD 濃度增加，因此，藉由量測 ABS 可間接表

示污泥水解的效果)，再將每個量測結果進行迴歸分析，在波長 268.13 nm 可得出最佳的 R^2 為 0.9996，其 COD 標準濃度檢量線圖形如圖 7 所示。

3.3 建立污泥水解液資料庫及檢量線

以實際水解污泥經離心後取上澄液，先分析 COD 濃度，再利用全波段光譜掃描水樣，所得結果如圖 8 所示。由圖 8 可發現，在 COD 濃度不超過 598 mg/L 時，其 COD 濃度與 ABS 的變化皆有明顯的差別，但是當 COD 濃度大於 598 mg/L 時，其吸光度值的變化不顯著，此 COD 濃度應為本裝置濃度偵測上限。

將上述結果利用迴歸分析後整理如表 4，表 4 顯示在不同 COD 濃度範圍(0-420 mg/L、0-598 mg/L 以及 0-971 mg/L)之 $R^2 > 0.8$ 的波長範圍以及最大的 R^2 值，在 COD 濃度 0 ~ 420 mg/L 之間，其最大 R^2 為 0.937，波長超過 243 nm 以上之 R^2 皆可高於 0.8；在 COD 濃度 0 ~ 598 mg/L 之間，其最大 R^2 為 0.934，波長超過 247 nm 以上之 R^2 皆可高於 0.8；在 COD 濃度 0 ~ 971 mg/L 之間，其最大 R^2 為 0.809，波長超過 272 ~ 292 nm 以上之 R^2 皆可高於 0.8。

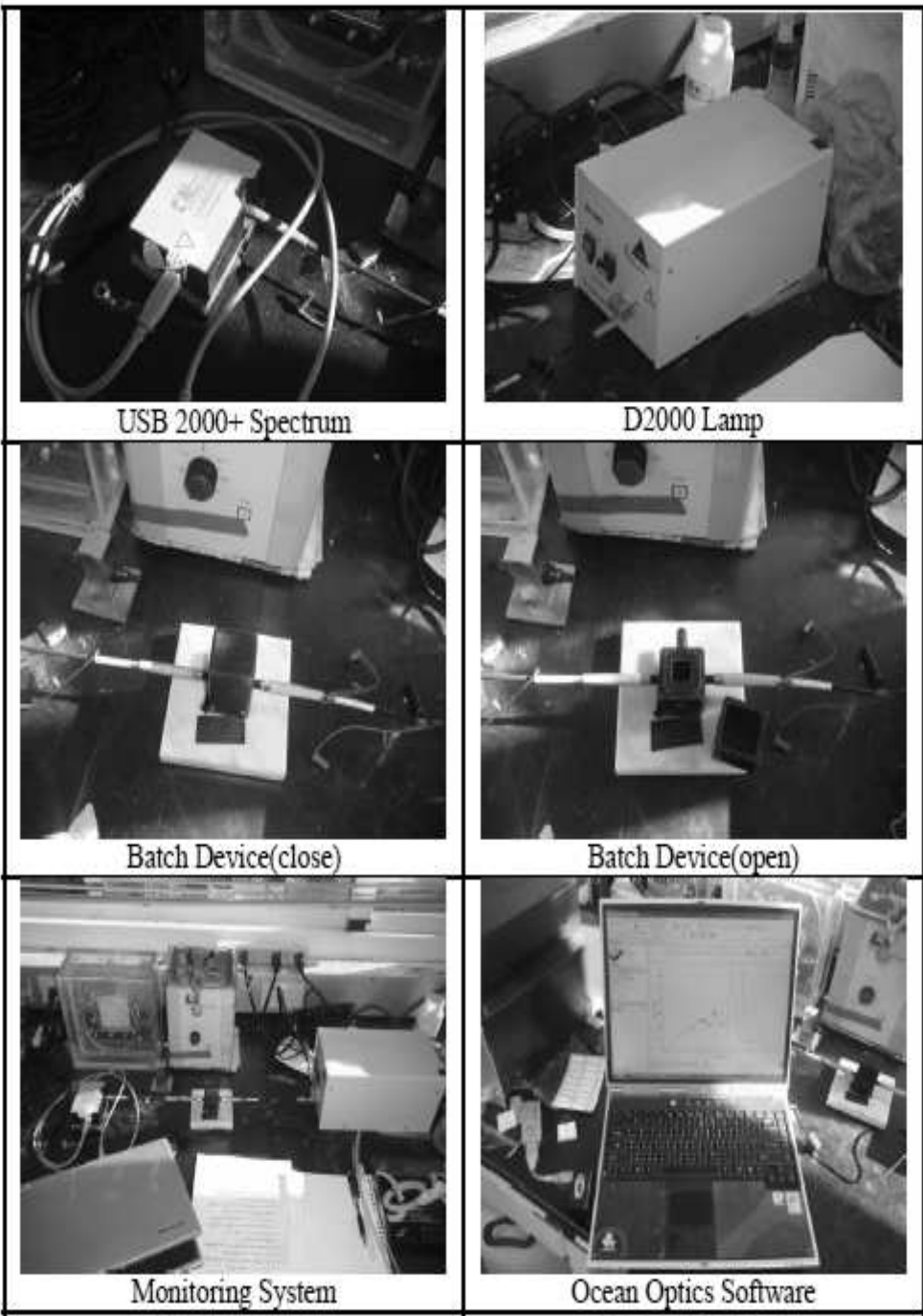


圖 5 光學水質分析系統設備全貌

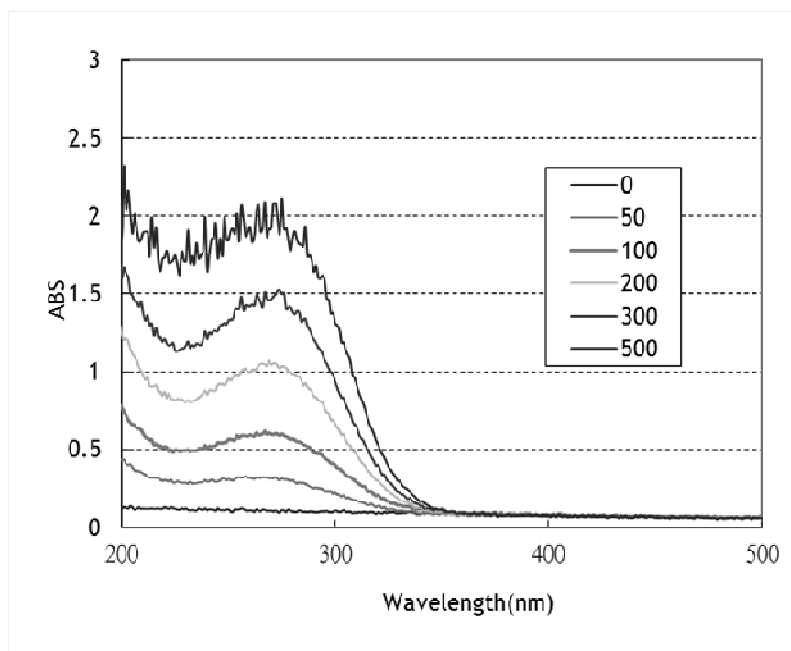


圖 6 COD 標準濃度光譜掃描結果

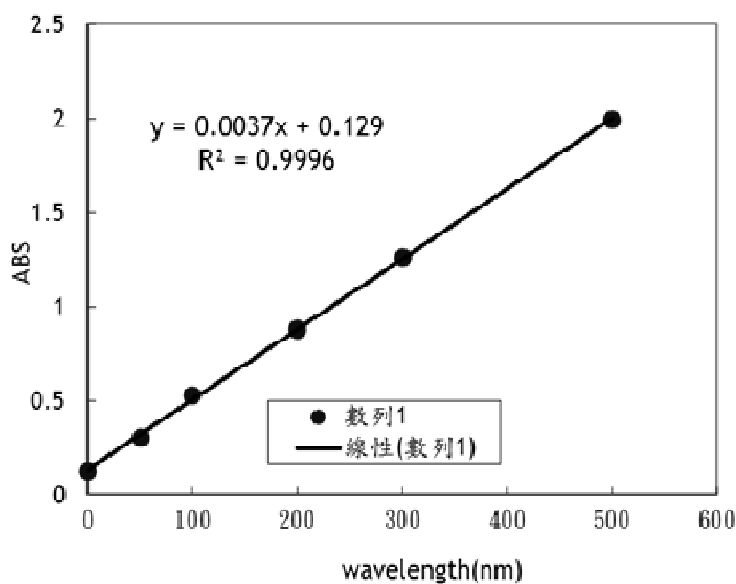


圖 7 COD 標準濃度檢量線

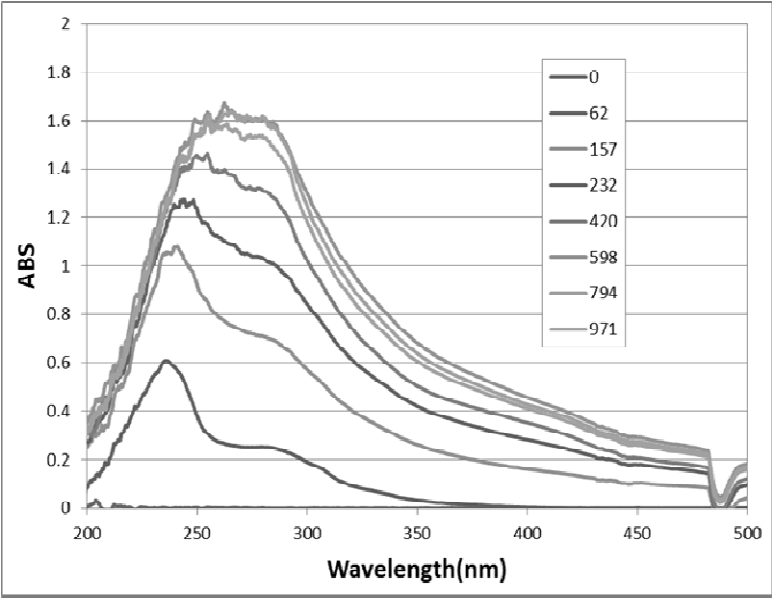


圖 8 污泥水解液全波段光譜掃描結果

表 4 污泥水解液全波段光譜掃描迴歸分析結果比較

項目	COD 濃度 (mg/L)		
	0 ~ 420	0 ~ 598	0 ~ 971
波長(nm) ($R^2 > 0.8$)	>243	>247	272 ~ 292
R^2 Maximum	0.937	0.934	0.809

此外，為考慮符合現有利用光學法量測 COD 濃度所採用的波長為 254 nm 與 282 nm，因此，將上述光譜掃描結果在波長為 254 nm 與 282 nm 所得之污泥水解液 COD 濃度與 ABS 圖解示意，如圖 9 與圖 10 所示，二圖之 R^2 皆高於 0.9，此結果已符合現行法規規範(環保署規定光學法檢測 COD 之 R^2 需高於 0.8)，未來在實際應用時，應可採用單一波長(254 nm 或 282 nm)量測吸光度，即可推估 COD 濃度。

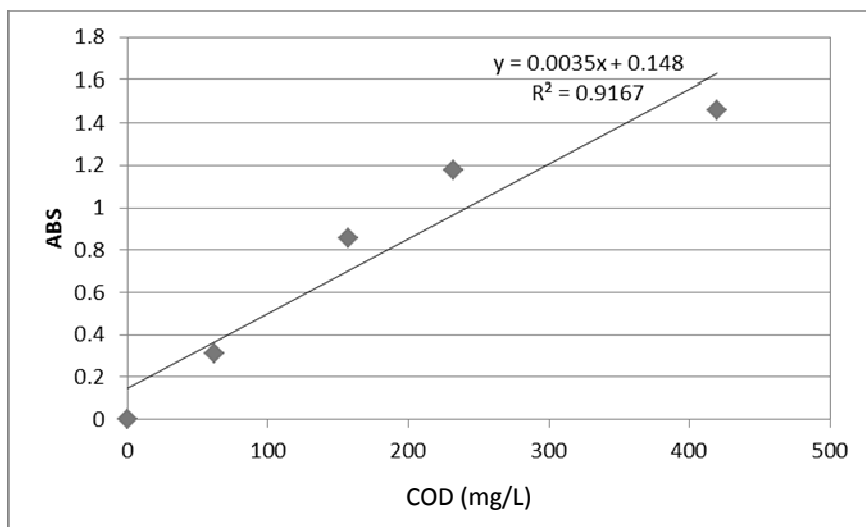


圖 9 波長 254nm 之污泥水解液 COD 濃度檢量線

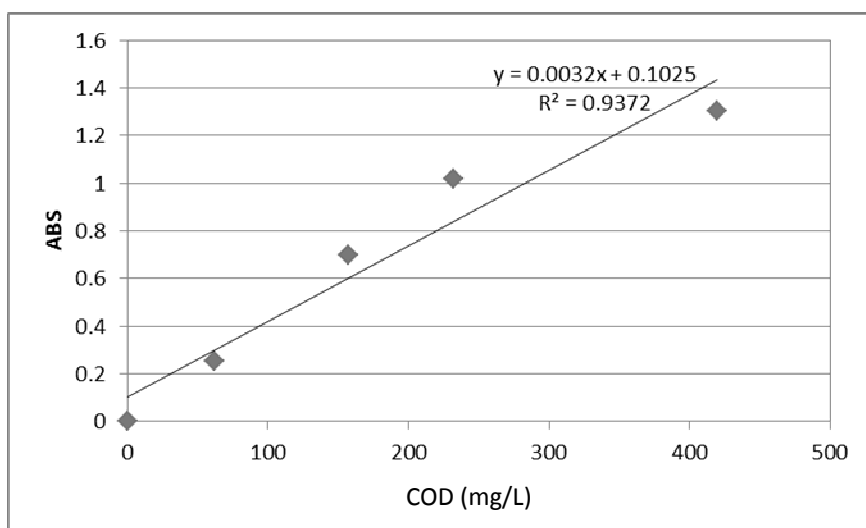


圖 10 波長 282nm 之污泥水解液 COD 濃度檢量線

3.4 超音波污泥水解線上監控系統之建置

根據上述實驗證實，利用單一波長 254 nm 或 282 nm 可量測污泥水解液的 COD 濃度，然而，其量測水樣之 COD 濃度無法超過 500 mg/L，但是，若超音波處理時

130 超音波污泥水解線上監控系統之開發

間太長(超過 5 分鐘)，其實際污泥水解後的 COD 濃度有可能高於 1,000 mg/L，因此，監測系統需要再加裝稀釋裝置，以防止量測的 COD 濃度太高。根據上述結果，建立以分光光度計為監測基礎的污泥水解的線上監控系統流程圖，如圖 11 所示。只要利用內部迴流方式，採用過濾器將污泥水解液 SS 去除，澄清液再進入分光光度計量測吸光度值，同時在迴流管線設置電導度電極，以量測污泥水解液的電導度值，上述吸光度與電導度皆提供 PLC 判斷污泥水解的效果，若吸光度換算之 COD 濃度超過 500 mg/L，則啟動稀釋泵浦進行水樣之稀釋，以降低量測樣本之 COD 濃度。根據上述流程圖，組裝實際相關的閥體及泵浦，整個污泥水解線上監控系統最後完成圖如圖 12 所示。

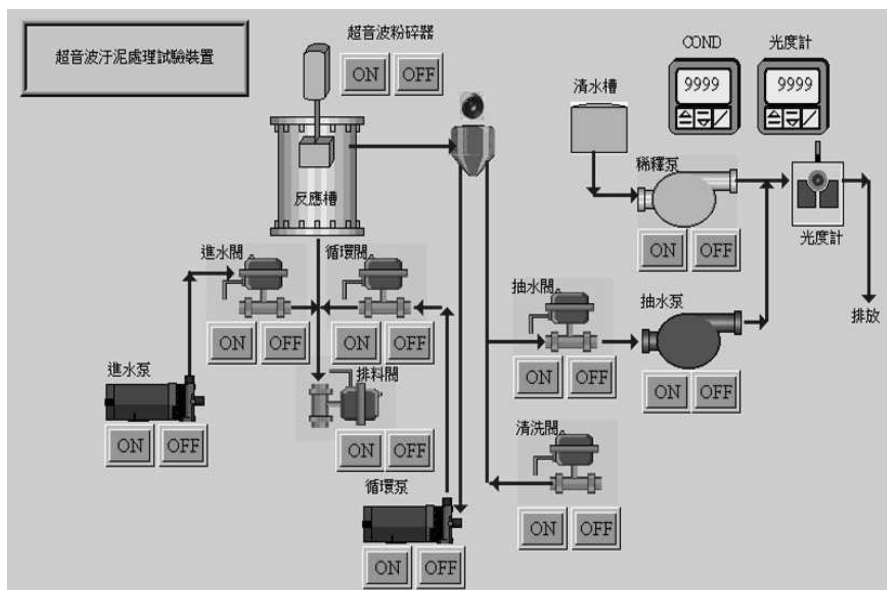


圖 11 污泥水解線上監控系統流程圖

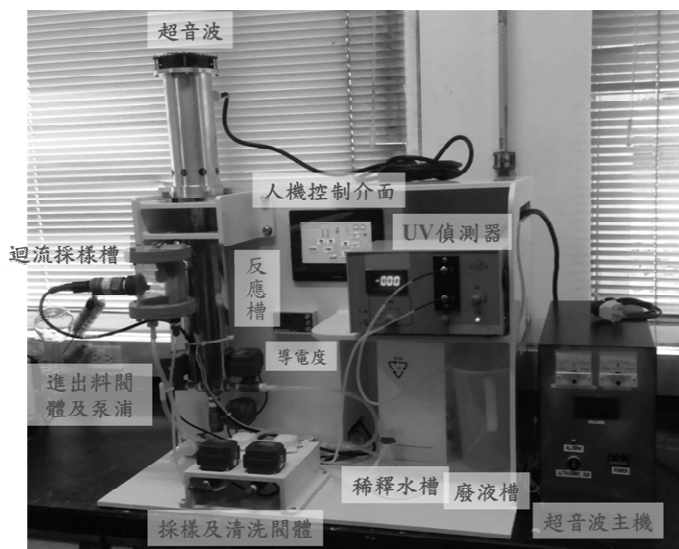


圖 12 污泥水解線上監控系統

四、結論

本研究建置的超音波污泥水解線上監控系統是由實驗室直接利用價格昂貴具全光譜掃描功能的光學監測系統進行試驗，經由比對所建立的 COD 濃度標準品檢量線與污泥水解液 COD 濃度檢量線，證實超音波污泥水解液可利用單一波長 254 nm 或 282 nm 的吸光度推導出污泥水解液的 COD 濃度，再利用市售較便宜單一波長分光光度計進行系統的建置，可大幅降低實廠使用的初設費用，有利未來的技術推廣。

五、致謝

本團隊非常感謝經濟部技術處提供業界科專計畫(102-EC-17-A-10-I1-0006)的經費補助，同時，並感謝在計畫執行過程中所有專家學者之意見與協助。

參考文獻

1. 梁鵬、郭超、黃霞，污泥水解液基質微生物燃料電池的研究，電化學，第 19 卷，第 332-335 頁(2013)。
2. Weemaes, M. P. J., and W. H. Verstraete, Evaluation of current wet sludge disintegration techniques, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 73, 83-173 (1998)。
3. 鄭禹祥，COD、SS 及流量即時自動監測系統之發展與建立，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，2007。
4. 陳映任，利用稀釋程序建立以分光光度計量測水中 COD 濃度方法之研究，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，2012。
5. 經濟部工業局，放流口線上光學 COD/SS 監測裝置開發計畫，100 年度 CITD 專案計畫結案報告，2011。
6. Douglas, A., F. James, and A. Timothy, *Principles of instrumental analysis*, Instrumental analysis, Cengage Learning Publishing, 1998。
7. 林敬二譯，儀器分析，美亞書版股份有限公司，1999。
8. Dobbs, R. A., R. H. Wise, and R. B. Dean, The Use of Ultraviolet Absorbance for Monitoring the Total Organic Carbon Content of Water and Wastewater, *Water Research*, 6, 1173-1180 (1972)。
9. Foster, P., and A. W. Morris, The Use of Ultra-Violet Absorption Measurements for the Estimation of Organic Pollution in Inshore Sea Waters, *Water Research Bergamon Press*, 5, 19-27 (1971)。
10. Matshé, N., and K. Stumwöhrer, UV Absorption as Control Parameter for Biological Treatment plants, *Water Science and Technology*, 33, 211-218 (1996)。
11. El Khorassani, H., P. Trebuchon, H. Bitar, and O. Thomas, A Simple UV Spectrophotometer Procedure for the Survey of Industrial Sewage System, *Water Science and Technology*, 39, 77-82 (1999)。
12. Mrkva, M., Automatic U.V.-Control System for Relative Evaluation of Organic Water Pollution, *Water Res.*, 9, 587-589 (1975)。

13. Vaillant, S., M. F. Pouet, and O. Thomas, Basic Handling of UV for Urban Water Quality Monitoring, *Urban Water*, 4, 273-281 (2002) 。
14. Brookman, S. K. E, Estimation of Biochemical Oxygen Demand in Slurry and Effluents Using Ultra-violet Spectrophotometry, *Water Research*, 31, 372-374 (1997) 。
15. Wang, G. S., and S. T. Hsieh, Monitoring Natural Organic Matter in Water with Scanning Spectrophotometer, *Environment International*, 26, 205-212 (2001) 。
16. Roig, B., and O. Thomas, UV monitoring of sugars during wine making *Carbohydrate Research*, 338, 79-83 (2003) 。
17. Hawthorne, A. R., S. A. Morris, R. L. Moody, and R. B. Gammage, Duvas as a real-time, Field-portable wastewater monitor for phenolics, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 19, 253-266 (1984) 。
18. Roig, B., C. Gonzalez, and O. Thomas, Monitoring of phenol photodegradation by ultraviolet spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part A*, 59, 303-307 (2003) 。
19. 環境保護署，水中硝酸鹽氮檢測方法 (NIEA W419.51A) ，
<http://www.niea.gov.tw/niea/WATER/W41951A.htm> 。
20. Thomas, O., F. Théraulaz, C. Angel, and S. Suryani, Advanced UV Examination of Wastewater, *Environmental Technology*, 17, 251-261 (1996) 。
21. Suzuki, N. and R. Kuroda, Direct Simultaneous Determination of Nitrate and Nitrite by Ultraviolet Second-derivative Spectrophotometry, *Analyst*, 112, 1077-1079 (1987) 。
22. Ferree, M. A. and R. D. Shannon, Evaluation of a second derivative UV/visible spectroscopy technique for nitrate and total nitrogen analysis of wastewater samples, *Water Research*, 35, 327-336 (2001) 。
23. Nagashima, K., M. Matsumoto, and S. Suzuki, Determination of nitrate and nitrite by using second-derivative spectrophotometry, *Anal. Chem.*, 57, 2065-2067 (1985) 。
24. 張郁麟，倒傳遞類神經網路應用於台灣北部水庫懸浮固體濃度即時分析研究，國立台灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學研究所碩士論文，2007 。
25. 尤世雄，CFSBR 水質推估公式之發展與建立，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，2006 。