

微波乾燥技術應用於下水污泥之可行性評估

邱毓松*、李元陞**、黃聖凱***

摘要

污泥微波乾燥技術，相較於傳統加熱技術，具備有加熱時間更短、無直接接觸加熱材料及低成本等特性可達到乾燥之目的，為普遍運用於食品乾燥保存之乾燥技術，近年國外學者開始嘗試將其應用於下水污泥乾燥技術之研發，惟目前於國內應用於下水污泥乾燥之相關成果仍不足。爰此，本文介紹微波乾燥技術作為乾燥污泥之方法，並以某水資中心之廢棄污泥餅為實驗對象，探討於不同微波能量、污泥重量、微波時間及污泥厚度等操作因子下對污泥乾燥速率之影響。實驗結果顯示，當設定微波能量為 800W，污泥 40 克(污泥厚度 0.5 公分)，微波時間 9 分鐘時，可使污泥含水率自 80% 降至 25%；而當進一步將污泥質量提高至 240 克，於前述相同操作條件下，微波 9 分鐘即可使污泥含水率自 80% 降至 49.6%，12 分鐘內使污泥含水率降至 40% 以下，顯示良好乾燥成效。再經計算其微波過程中之能量損耗，以 800W/240 克(微波功率/污泥重量)條件下，相較其他實驗參數條件，可展現最佳之節能成效。

*山林水環境工程股份有限公司	高級專員
**國立宜蘭大學環境工程學系	教授
***國立宜蘭大學環境工程學系	研究生

一、前言

103 年全國公共污水下水道處理系統之用戶接管率已達近 38%，於污水下水道系統之污水處理廠所產生之下水污泥，則為污水廠主要之廢棄物。目前國內 64 座之生活污水處理廠，每日產出超過 200 噸之下水污泥，未來隨公共污水下水道工程之用戶接管率增加，污水處理量與下水污泥等廢棄物亦將持續增加，故發展適用之廢棄物減量及再利用，已為未來關係污水廠整體營運之趨勢。

近年來下水污泥清除處理之法規日趨嚴格，且污泥處理成本逐漸提高，過往常見之污泥廢棄物皆有衍生其後續處置問題。如掩埋法，受限於現有掩埋場空間不足，且無新設掩埋場導致污泥清運費逐年增加，且未來恐有無處可去之虞；焚化法，則因污泥含水率太高，所需輔助燃料量大且易產生有害衍生物。此外，為減緩國內有限土地之利用，未來國內污泥處理廠將減少，掩埋場亦有使用年限及容積之限制，故未來污泥的再利用方向將會是集中在土地利用和能源化利用兩大方向邁進，採用污泥填埋的比例將會大幅度降低^[1]。

爰此，研討適用之污泥減量技術以應用於污水處理廠，將具備有未來市場前瞻性^[2]。為因應市場之需求，污泥乾燥技術於近年來已日趨成熟，但仍需視污泥來源種類，選擇最佳乾燥設備，污泥乾燥技術種類，如圖 1 所示，其中微波乾燥技術，因具備有短時間內，能以較少成本達到乾燥之目的，近年來國外已有相關學者嘗試將其應用於下水污泥乾燥技術之研發^{[4]、[5]}。

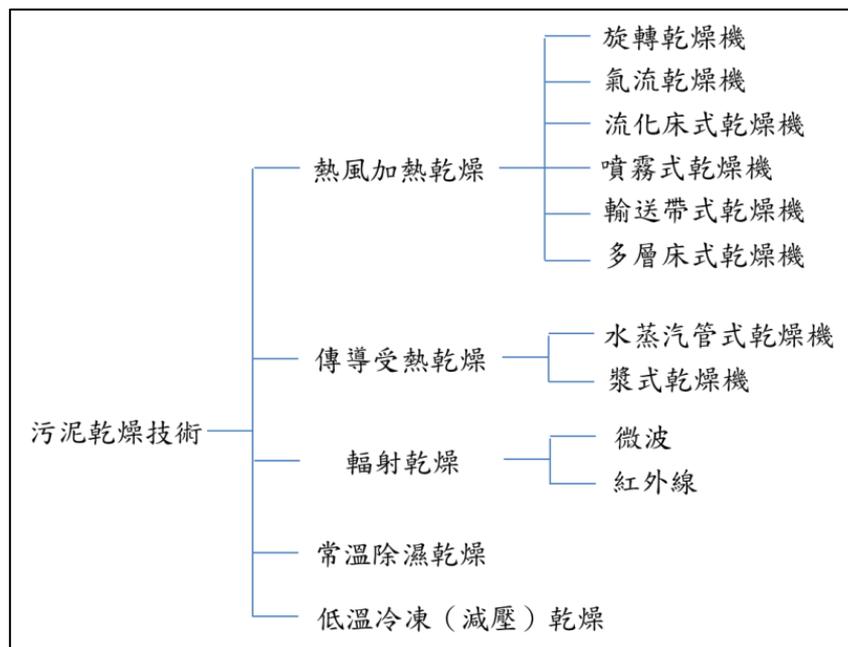


圖 1、污泥乾燥技術分類^[3]

本文以某水資中心為研究對象，統計其近 3 年平均污水量為 10,204 CMD，平均廢污泥餅清運量 800 噸/年以上、污泥含水率約 80%。目前廢污泥餅處理方式以掩埋為最終處置，其支出費用將達 300 萬元/年，未來亦將隨污泥清運費提高而逐年增加。為有

效降低水質中心污泥含水率，以減少其污泥產出體積、降低廢污泥清運量及費用，以及資源化前置作業等功能，本研究嘗試運用微波乾燥技術，探討於不同微波乾燥參數下，包含微波能量、污泥重量、微波時間及污泥厚度等，分析其污泥乾燥效能，藉以作為未來水質中心增設污泥乾燥設施之參考。

二、 實驗材料與方法

1. 實驗材料：乾燥試驗設備-微波反應器

本研究以輻射乾燥中微波加熱法進行下水污泥乾燥效能之探討。微波是介於高頻與遠紅外線之間的電磁波，波長為 0.001~1m，頻率為 300~300,000 MHz。微波能量涉及相當高的頻率或是波長在微米範疇，故普遍常將微波傳輸當作波傳送現象，故亦可稱為微波 (MICROWAVE) [6]。當以微波照射下水污泥，其電磁場方向和大小會隨時間作週期性變化，污泥內極性水分子隨著高頻的電場變化，使分子產生劇烈的轉動，發生摩擦轉化為熱能，使污泥整體均勻升溫迅速達到乾燥的目的。微波反應器如圖 2 所示。



圖 2、微波反應器

2. 實驗材料：乾燥檢測儀器-水分分析儀

採用 400W 鹵素燈和 SRA(Secondary Radiation Assist)結構輻射熱組合，達到高速均勻測定時，可縮短測試時間，僅需 2 分鐘即可達到 200°C 熱度。其分析原理為於尚未開啟熱源時，先測得樣品質量(X1)；爾後再開啟輻射熱源，水分逐漸喪失，促使天平中樣品質量隨之逐漸減小，待質量不再變化時，測得其質量為 X2，前後質量差(X2-X1)即為含水量。水分分析儀如圖 3 所示。



圖 3、水分分析儀

3.實驗方法說明

本實驗以某水資中心經污泥脫水機後的下水污泥為試驗樣品。首先將脫水後之污泥餅均勻放置承載器皿，利用可調式功率微波反應器進行污泥微波乾燥，待污泥乾燥後，再定時利用自動化水分分析儀，批次檢測污泥含水率，於短時間內即可精確測得樣品含水率。

為探討不同微波參數條件對下水污泥乾燥之效能差異，本研究參考文獻^[4]中相關微波影響因子及其範圍，設定一系列參數包括污泥重量、微波功率、微波時間及污泥厚度等進行實驗分析，各項實驗參數及其設定條件如表 1 所示。

表 1、實驗設計參數表

參數項目	參數設計值
污泥重量	40 克、80 克、160 克、240 克
微波功率	400 W、600 W、700 W、800W
微波時間	9 分鐘
檢測時間	0、3、6、9 分鐘 (每 3 分鐘測定 1 次)
污泥厚度	不固定、固定 0.5 cm
含水率	80%降至 40%

三、 結果與討論

1.各污泥重量於不同微波強度下之含水率變化(污泥厚度不固定)

下水污泥厚度不固定(介於 0.3~0.5 cm)，分別以 400W、600W、700W 及 800W 之微波功率下，檢測污泥重量於 40 克、80 克 160 克及 240 克下之污泥含水率變化，各污泥含水率變化趨勢如圖 4 所示。實驗結果顯示，隨微波功率提升，污泥含水率能快速降解；然而，當隨污泥重量提升，污泥含水率降解速率趨緩，其中當污泥重量提升至 240 克時，微波功率 800W 下，9 分鐘時污泥含水率僅由 80%降至 65%，乾燥效能有限。

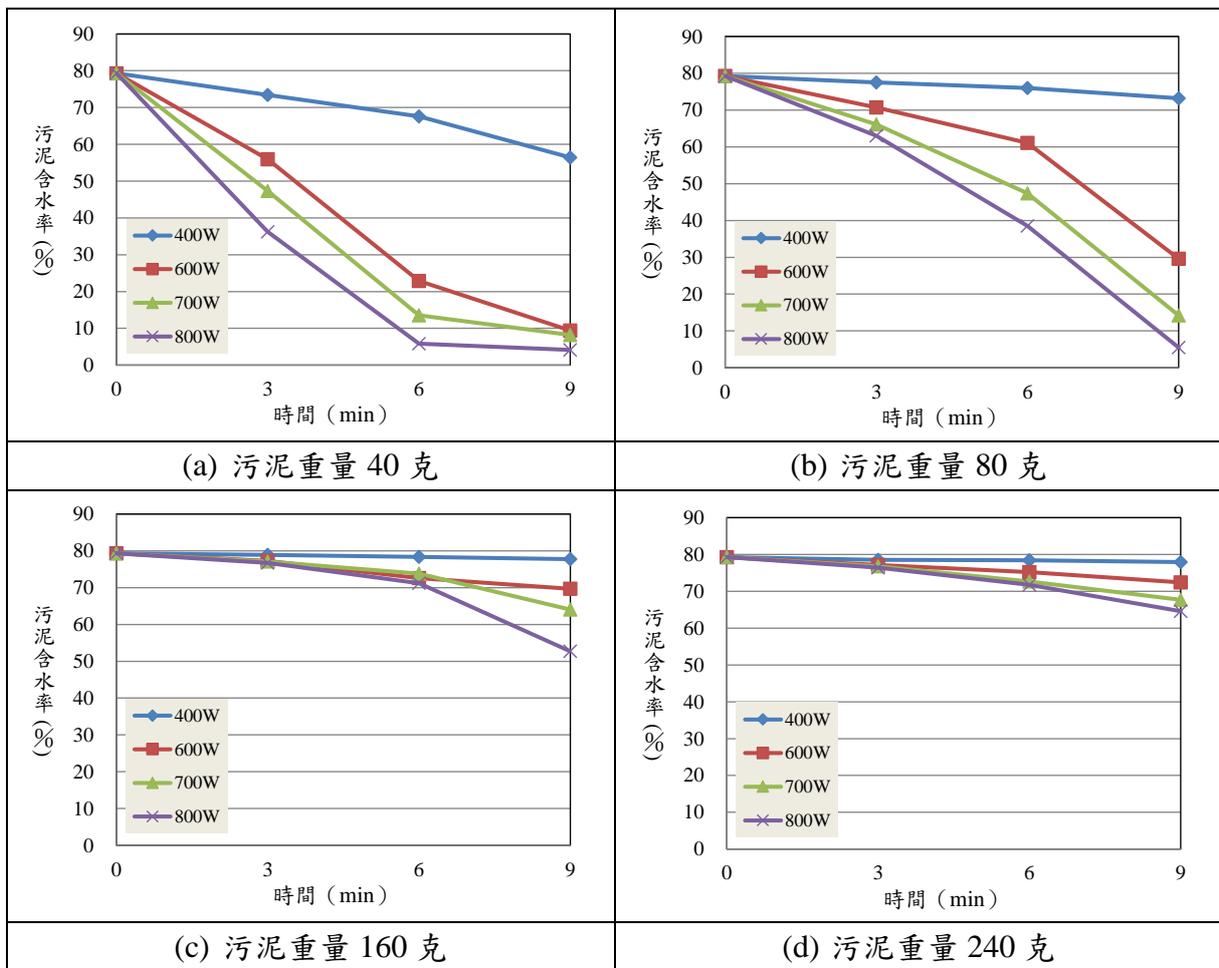


圖 4、各污泥重量於不同微波強度下之含水率變化(污泥厚度不固定)

2.各污泥重量於不同微波強度下之含水率變化(污泥厚度固定於 0.5 cm)

有鑑於污泥厚度不一，恐造成污泥乾燥效能差異，且厚度亦為影響去除含水率因子之一，本研究嘗試將下水污泥固定於脫水後下料最高值 0.5 cm，再分別以 400W、600W、700W 及 800W 之微波功率下，檢測污泥質量於 40 克、80 克 160 克及 240 克下之污泥含水率變化，各污泥含水率變化趨勢如圖 5 所示。實驗結果與前述污泥厚度不固定者相近，隨微波功率提升，污泥含水率降解速率快速；隨污泥重量提升，污泥含水率降解速率則明顯趨於緩慢。

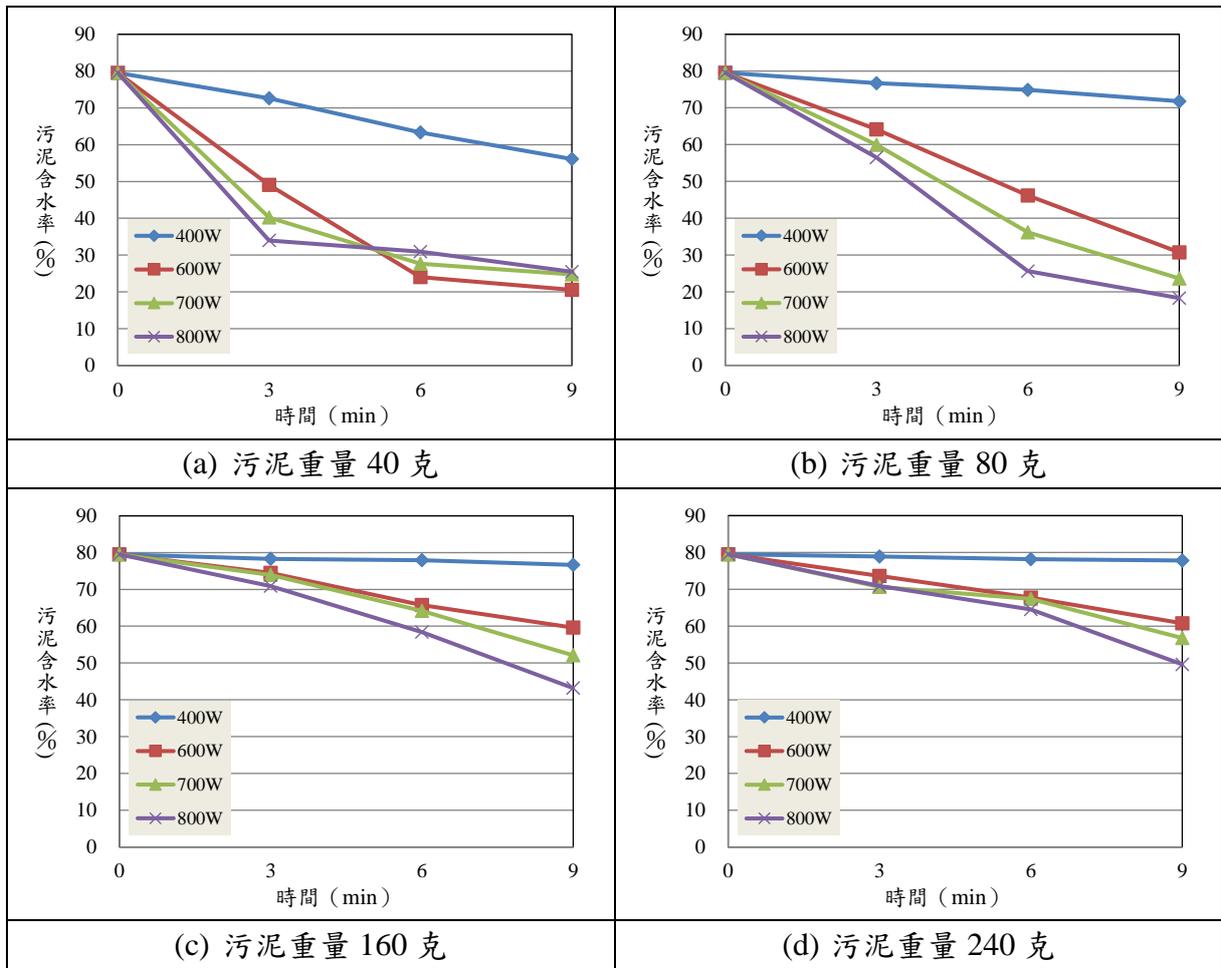


圖 5、各污泥重量於不同微波強度下之含水率變化(污泥厚度固定 0.5 cm)

3. 各污泥重量微波過程所耗能源分析

本實驗以污泥含水率降至 40% 為目標，分析各污泥重量(厚度固定 0.5 cm)於不同微波功率操作下，污泥含水率降至 40% 以下之時間及耗費能量。於本實驗中，原試驗設定參數為 9 分鐘，每 3 分鐘測一次含水率，如超過 9 分鐘，各功率之各重量含水率未能降至 40%，則以每分鐘測 1 次，直至含水率降至 40% 以下為止，其實驗結果如表 2 所示。此外，有鑒於各項實驗之污泥重量未一致，如直接比對其所耗能量恐有失偏頗，故本研究再依各實驗結果統一轉換為於 240 克之污泥質量下，其污泥含水率降至 40% 之耗能計算，轉換公式如式 1。

$$\text{能量(J)} = \text{功率(W)} * \text{時間(S)} * (\text{240 克} / \text{實測重量}) \quad (\text{式 1})$$

表 2、各操作條件下污泥含水率降至 40%所需之時間及能量分析表

實驗項目	微波功率 (W)	污泥重量 (g)	時間 (分)	時間 (秒)	能量 (J)	240 克污泥之含水率降至 40%之能量計算(J)
1	800	40	2.5	150	120,000	720,000
2	800	80	4.5	270	216,000	648,000
3	800	160	9	540	432,000	648,000
4	800	240	10	600	480,000	480,000
5	700	40	3	180	126,000	756,000
6	700	80	5.5	330	231,000	693,000
7	700	160	10	600	420,000	630,000
8	700	240	14	840	588,000	588,000
9	600	40	4	240	144,000	864,000
10	600	80	7	420	252,000	756,000
11	600	160	14	840	504,000	756,000
12	600	240	20	1,200	720,000	720,000

結果顯示，以污泥質量為 240 克之含水率降至 40%所耗費能量評估時，當以 800W/40 克(微波功率/污泥質量)之高微波功率、低污泥重量條件下，污泥含水率降解能力雖最佳，然並非最佳經濟處理成本。反之，當將操作條件設定於 800W/240 克(微波功率/污泥質量)之高微波功率、高污泥重量條件，雖含水率降至 40%以下約需 10 分鐘，但其僅需耗費 480,000 焦耳(J)，相對於其他實驗參數結果，為最具節能操作條件。

此外，本研究進一步比對各參數條件下之污泥乾燥性能，如圖 6 所示。實驗結果顯示，以高功率為例，在高功率低克數試驗，僅需 3 分鐘，含水率即可降至 30%以下，由圖中顯示 800W/40 克微波 3 分鐘後之污泥水分大多已揮發，呈現乾枯狀；而在高功率高克數試驗，經 9 分鐘後，含水率亦可降至 50%以下，此時污泥亦已明顯呈乾枯狀態。

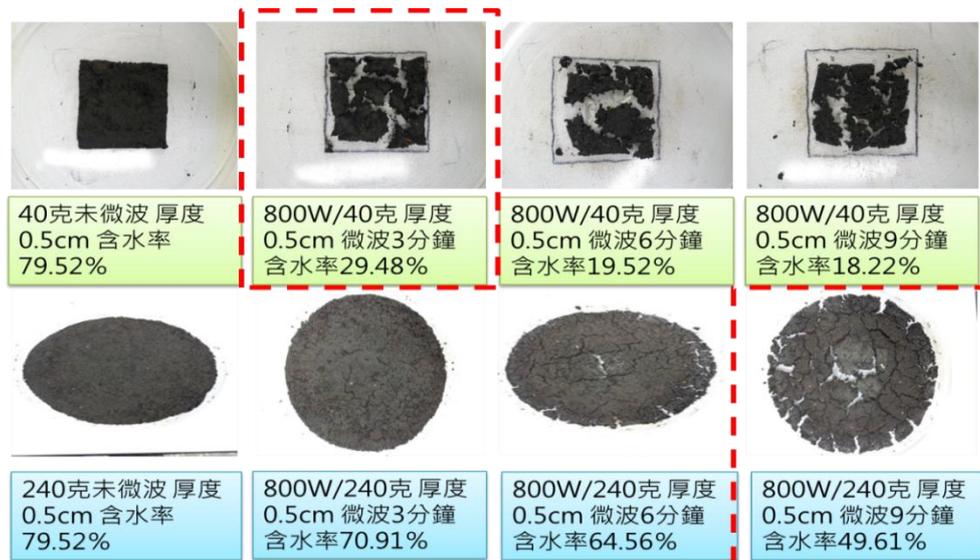


圖 6、乾燥能力試驗分析圖

4.綜合分析

綜合比對本研究各項操作參數(包括污泥重量、微波功率、微波時間及污泥厚度等)下之污泥含水率變化及耗能評估,其分析結果顯示(如圖 7 所示),如污泥處於「低污泥重量、低微波功率」或「高污泥重量、低微波功率」下之乾燥效果皆較差;反之,如提高微波功率至 800W,達到「低污泥重量、高微波功率」或「高污泥重量、高微波功率」實驗條件,則可明顯提升其污泥乾燥效果,當以 800W/40 克(微波功率/污泥重量)進行乾燥,於 3 分鐘後即可使污泥含水率降至 40% 以下;如再提高污泥重量至 240 克,亦可於 12 分鐘內使污泥含水率降至 40% 以下,污泥乾燥成效顯著。再經計算其微波過程中之能量損耗(以 240 克含水率降至 40% 所耗費能量計算),800W/240 克(微波功率/污泥重量)僅需耗費 480,000 焦耳(J),相較其他實驗參數條件,可展現最佳之節能成效。

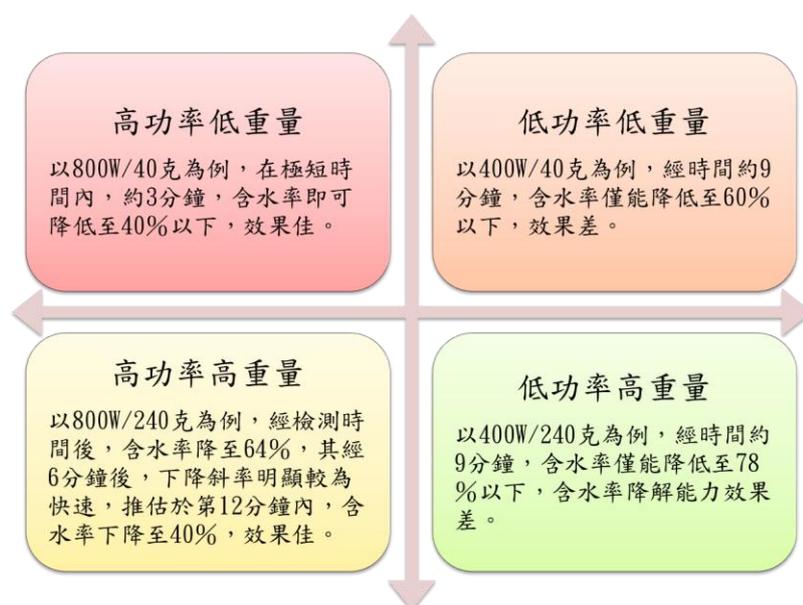


圖 7、各功率之各重量分析圖

四、 結論與建議

1.下水污泥之含水率降解性能評估

本研究以微波乾燥法為污泥乾燥技術,並以某水資中心之廢棄污泥餅為實驗對象,探討各種不同微波操作因子下對污泥乾燥速率之影響。結果顯示高微波功率、低污泥重量之含水率降解能力最佳,然並非最佳經濟處理成本,實驗結果發現當提高污泥重量至 240 克,於 12 分鐘內使污泥含水率降至 40% 以下,污泥乾燥成效顯著,再計算其微波過程中之能量損耗(以 240 克含水率降至 40% 所耗費能量計算),800W/240 克(微波功率/污泥重量)僅需耗費 480,000 焦耳(J),相較其他實驗參數條件,可展現最佳之節能成效。因此,採用高功率高重量之配比為操作條件,建議為水資中心之優先選擇。

2.應用實廠之影響因子

能量(功率)及重量大小操作條件,除直接影響污泥乾燥速率及時間,更關係整體

操作成本，而污泥厚度亦為影響去除含水率因子之一。與傳統加熱相比，微波加熱具有更短的加熱時間，且並沒有直接接觸加熱材料。然而，微波加熱具備熱點現象之缺點，當微波在於內來回反射，會出現建設性干涉與破壞性干涉。前者微波的振幅加強，形成熱點；後者微波的振幅抵消，則形成冷點^[7]。因此微波反應器如增加攪拌功能可使污泥均勻加熱，但於實驗過程中，除可燃性有機污泥外，另摻雜少量可燃性物質，將因熱點現象而造成燒結，導致熱點部分已燒焦，冷點處卻仍維持冷之狀態，進而影響污泥含水率之降解速度。故微波腔體設計成為一項控制或利用微波熱點現象之重要因子。

本研究採小功率試驗模擬推估，且為固定型態乾燥，尚未執行有攪拌及輸送功能條件之試驗，故未來放大倍數應用於實廠時，建議仍須注意部分污泥因厚度、污泥含水率不均、輸送過程停留時間等對污泥乾燥之操作效果，另亦須考量設定處理量之功率安全係數、原物料前處理等因子之影響性。

此外，目前多數污水處理廠均尚未設置完善之廢污泥乾燥設備或資源化設施，然有鑒於污泥處理費用日漸提升，尋求適用之減量或資源化設備，即成為多數污水廠操作廠商目前面臨課題之一。

微波乾燥裝置為一具備占地小、快速、簡單方便等特性之減量設備，可適用於餘裕空間有限之污水處理中心，且如某水資中心現有廢污泥餅之螺旋輸送系統，安裝微波反應器即可操作，對未來之廢棄物減量、節省廠商費用及資源化之前處理等功能，應可發揮其效益。

參考文獻

1. 李中光、劉新校、侯佳蕙 (2013.09.13), 「淺談污泥脫水及加熱乾燥技術」, 桃園縣大學產業校院環保技術服務團-環保簡訊/第 20 期。
2. 周珊珊 (2013), 「污泥減量新技術介紹」, 水之源企業股份有限公司。
3. 賴重光 (2002), 「污泥乾燥減量及妥善處理技術」, 經濟部工業局。
4. Zhenyu Chen, Muhammad T. Afzal, and Arshad Adam Salema (2014), Microwave Drying of Wastewater Sewage Sludge. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2, 282-286.
5. Klaudiusz GRÚBEL1 and Alicja MACHNICKA (2011), Impact of Microwave Disintegration on Activated Sludge. *Ecological Chemistry and Engineering*, 18, 75-82.
6. 李宜森及陳昇 (2014), 「微波原理與應用」, 國家出版社。
7. Ting-Nien Wu (2008), 「Environmental Perspectives of Microwave Applications as Remedial Alternatives」, PRACTICE PERIODICAL OF HAZARDOUS, TOXIC, AND RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT © ASCE.