

南華大學科技學院永續綠色科技碩士學位學程

碩士論文

Master Program of Green Technology for Sustainability

College of Science and Technology

Nanhua University

Master Thesis

應用機械式蒸汽再壓縮技術於高鹽類廢水處理

Application of Mechanical Vapor Recompression and

Spray Drying System on the Clean Treatment of

High-Salt Wastewater

陳淑玲

She-Lin Chen

指導教授：洪耀明 博士

Advisor: Yao-Ming Hong, Ph.D.

中華民國 109 年 1 月

January 2020

南華大學  
永續綠色科技碩士學位學程  
碩士學位論文

應用機械式蒸汽再壓縮技術於高鹽類廢水處理  
Application of Mechanical Vapor Recompression and Spray  
Drying System on the Clean Treatment of High-Salt Wastewater

研究生：陳嘉玲

經考試合格特此證明

口試委員：林煒益  
林文星

洪耀明

指導教授：洪耀明

系主任(所長)：洪耀明

口試日期：中華民國 109 年 1 月 8 日

## 誌謝

感謝恩師 洪耀明 老師在碩士班的修習過程中，對於學識經驗的傳授與悉心解惑，並協助論文研究方向的确立與指導，使學生獲益良多，在此，致上最深的謝意與敬意。感謝論文口試委員 林文賜 老師、林裕益 局長於論文評審期間，以專業 豐厚之學養，對本研究提出精闢之指正與寶貴之建議，均使本論文更臻完整。感謝摯愛的父母，您的關懷與期望，永遠是我心靈上最大的支柱，謝謝您們。最後，還是最感謝我的老公、兒子，謝謝您們在我趕製論文的期間，不斷的給予關心、包容、鼓勵與體諒，是我完成這篇論文最大的動力。



## 中文摘要

焚化爐造成之空氣污染，可藉由雙級濕式洗滌塔來排除酸性氣體，但洗滌過程產出無機鹽類廢水，為使廢水達到再利用標準，須將總溶解固體(Total Dissolved Solid, TDS)濃度降低。

本研究以機械式蒸汽再壓縮技術(Mechanical Vapor Recompression, MVR)降低廢水之 TDS 濃度，並分析 MVR 處理前後之 TDS 濃度及廢水回收率，並以回收水質 TDS<500mg/L 為回收再利用標準。經分析 25 筆資料發現，原有 TDS 介於 3990 至 42100 mg/L 之間，處理後水質均可達回收再利用標準，處理效率達 99.1%，處理前 TDS 濃度越高，處理後之濃度越高。處理過程扣除蒸發量，平均回收水量 94.8%，每日可回收水量 207 噸。

**關鍵詞：**總溶解固體、機械式蒸汽再壓縮技術、廢水回收。

## **Abstract**

The air pollution caused by the incinerator can be removed by the two-stage wet scrubbing tower, which will produce inorganic salt wastewater during washing process. Total dissolved solids (TDS) of wastewater should be reduced to reach the reuse standard.

This study adopted the mechanical vapor recompression (MVR) technology to reduce the TDS concentration of wastewater. TDS concentration before/after the MVR treatment were analyzed. Recycling standard TDS <500mg / L. After analysis of 25 data, in which the original TDS was between 3990 and 42100 mg / L, the water quality after treatment could reach the recycling standard. Treatment efficiency reached 99.1%.. After deducting the amount of evaporation during the treatment process, the average recovered water ratio is 94.8%, and the daily recoverable water volume is 207 tons.

**Keywords:** total dissolved solids, mechanical steam recompression technology, wastewater recovery.

# 目錄

誌謝 .....	I
中文摘要 .....	II
ABSTRACT .....	III
目錄 .....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VII
第一章 前言 .....	1
1.1 研究動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	1
1.3 本文架構 .....	1
第二章 文獻回顧 .....	3
2.1 含鹽廢水之產生 .....	3
2.2 高鹽廢水處理技術 .....	4
2.3 MVR 的應用 .....	8
第三章 研究方法 .....	14
3.1 高鹽廢水試驗來源介紹 .....	14
3.2 MVR 處理技術 .....	15
3.3 總溶解固體濃度降低方法 .....	21
3.4 TDS 分析步驟 .....	24
第四章 結果與討論 .....	31

4.1 TDS 處理量分析 .....	31
4.2 效益評估 .....	34
<b>第五章 結論與建議 .....</b>	<b>36</b>
5.1 結論 .....	36
5.2 建議 .....	37
<b>參考文獻 .....</b>	<b>38</b>



## 圖目錄

圖 1-1 本文組織圖 .....	2
圖 2-1 蒸發濃縮-冷卻結晶處理流程示意 .....	5
圖 2-2 蒸發濃縮-熱結晶處理流程示意 .....	6
圖 2-3 旋轉薄膜蒸發器結構原理示意圖 .....	6
圖 2-4 MVR 操作技術 .....	10
圖 2-5 多效蒸發二次蒸汽全部冷凝排放 .....	11
圖 2-6 MVR 蒸發器二次蒸汽全部分收使用 .....	11
圖 3-1 焚化處理流程 .....	15
圖 3-2 版式熱交換預熱器 .....	17
圖 3-3 MVR 建廠圖 .....	22
圖 3-4 MVR 操作流程 .....	23
圖 3-5 蒸發皿 .....	24
圖 3-6 烘箱 .....	25
圖 3-7 分析天平 .....	25
圖 3-8 磁石 .....	26
圖 3-9 微量吸管 .....	26
圖 3-10 濾紙 .....	27
圖 3-11 過濾裝置 .....	27
圖 3-12 抽氣裝置 .....	28
圖 4-1 原水與處理後再生水 TDS 比較值 .....	33
圖 4-2 TDS 處理效率分析 .....	33
圖 4-3 原水回收效率 .....	34

## 表目錄

表 3-1 主設備表 .....	18
表 3-2 設計參數 .....	20
表 3-3 能量消耗設計值 .....	20
表 3-4 重覆分析相對差異百分比之規範 .....	30
表 4-1 TDS 檢測結果及處理量統計分析表 .....	31
表 4-2 焚化用水量設計值 .....	35
表 4-3 MVR 再生水效益評估 .....	35



# 第一章 前言

## 1.1 研究動機

隨著製造業的發展，增加用水量及產生廢水量大，工業廢水如直接排放，將污染土壤及水體。而廢水經處理合格達標準後，如不回收再使用，則造成水資源浪費。對於高鹽廢水，由於缺乏技術、經濟上的可行性與可靠性，大多數採取稀釋外排方法。這種方法不但造成淡水的資源浪費，而且污染物的排放總量也增加，特別是含鹽廢水的未經處理排放，勢必造成淡水水資源缺乏和土壤鹼化。因此，如何開發經濟有效的高鹽廢水脫鹽處理技術，促進高鹽廢水的資源化利用，也是解決水資源循環利用的重大問題。

## 1.2 研究目的

本研究擬以台灣中部地區某廢棄物處理中心，所採用之高鹽廢水脫鹽處理技術，此技術稱為機械式蒸汽再壓縮技術(Mechanical Vapor Recompression, MVR)，說明其方法，並評估其處理後水質 TDS 小於 500 mg/L 可做為焚化處理製程再利用及再生水回收量需達 85% 以上，達到回收再利用的效益，作為爾後解決水資源循環利用之參考依據。

## 1.3 本文架構

依研究重點本文分成五章，其內容如如圖 1-1，各章簡述如下：

第一章為前言，說明研究動機及研究目的，並概述論文架構。

第二章為文獻回顧，內容包括含鹽廢水之產生及高鹽類廢水處理技術之整理，並綜合整理相關文獻以闡述高鹽廢水處理法做詳細的說

明，並進一步分析械式蒸汽再壓縮技術方法優、缺點。

第三章為研究方法，以台灣中部地區某廢棄物理中心為例，利用MVR 技術處理焚化處理空污防制設備產生的高鹽廢水，進行處理總溶解固體(Total Dissolved Solid, TDS)效率解析，主要是驗證數值模式是否符合本研究目的及探討。內容包括試驗佈置、步驟與條件，試驗的成果包括MVR處理後，原水及再生水TDS水質數值之差異比較，了解其處理效率。同時產水水質與水資源回收水質標準相比較，便可以了解產水後水資源回收再利用之適用性。

第四章為結果與討論，將建立經MVR處理系統處理後水質之解析，其建立之方法是經由連續操作過程，找出處理效率因子，做為未來處理高鹽類廢水選擇參考。

第五章為結論與建議，主要將上述各章之結果綜合歸納，並提出未來可以繼續研究之方向。



圖 1- 1 本文組織圖

## 第二章 文獻回顧

本章將從含鹽廢水產生原因及危害，進一步說明去除含鹽廢水技術，最後詳細說明 MVR 技術。

### 2.1 含鹽廢水之產生

高鹽廢水是指含有機物和 TDS 的質量大 3.5% 的廢水。在這類廢水中，除了含有有機污染物，還含有大量可溶性的無機鹽，如  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等。有關含鹽廢水包括含鹽生活污水、含鹽工業廢水和其它的含鹽廢水，根據含鹽廢水的來源可以將含鹽廢水分為 (李等，2014)：

- (1) 食品加工，海產品、奶製品加工、肉類加工及發酵等排放大量的高濃度無機鹽。
- (2) 海水直接利用過程中排放出的廢水，海水直接利用廣泛用於，工業冷卻水，如：電力、鋼鐵、化工、機械、紡織、食品等行業。
- (3) 用作工業生產用水，在化工、印染、造紙、建材和農藥等行業的某些生產工藝中，海水可以直接作為生產用水，例如電廠把海水作為冷卻水、城市生活用水、用於沖洗道路和廁所，消防以及游泳娛樂等方面。
- (4) 化工生產、化學反應不完全或化學反應副產物，尤其染料、農藥等化工產品生產過程中產生的大量高 COD、高鹽有毒廢水。
- (5) 廢水處理，在廢水處理過程中，水處理劑及酸、鹼的加入帶來的礦化，以及部分淡水回收而產生的濃縮液，都會增加可溶性鹽類的濃度，形成所謂的難於生化處理的“高鹽度廢水”。

由上可見，這含鹽廢水較普通廢水對環境有更大的污染。

## 2.2 高鹽廢水處理技術

高鹽廢水除鹽技術可為：焚燒、蒸發、蒸餾、離子交換、電滲析、逆滲透、電去離子和電吸附，其原理、發展及應用現狀，分析如下(李等，2014)：

### 2.2.1 焚燒處理

採用直接焚燒的方法進行處理。是將高鹽廢水呈霧狀噴入高溫燃燒爐中，使水霧完全汽化，廢水中的有機物在爐內氧化分解成為二氧化碳、水及少許無機物灰分。文獻(李等，2014)指出， $COD \geq 100000 \text{mg/L}$ 、熱值 $\geq 2500 \text{kcal/kg}$  的有機高鹽廢水或有機成分質量分數高於 10% 的有機高鹽廢水採用焚燒法處理較其他方法更加經濟、合理。

但此有機高鹽廢水焚燒前先以過濾方式去除廢水中的懸浮物及採用加熱等方法降低廢水黏度，以防止噴嘴堵塞並提高廢液霧化效率，且在燃燒時需要補充輔助燃料。另對工業廢水進行酸鹼中和處理以防止酸腐蝕設備、濃度過高的鹼出現污垢。在焚燒階段，焚燒溫度需要根據高鹽廢水物性設定，及需控制焚燒時間、通入氣體量等因素，以達到最佳的焚燒效率。焚燒通常會產生含  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  和  $\text{HCl}$  等的污染性氣體。因此，對產生的煙氣需進行去污處理，達空氣污染排放標準後才可排放。

### 2.2.2 蒸發濃縮-冷卻結晶技術

蒸發濃縮-冷卻結晶技術是通過蒸發，使高鹽廢水濃縮，最後對濃縮液進行冷卻，從而使高鹽廢水中可溶性鹽類物質結晶分離出來的技術。該技術能使部分鹽類物質分離出來，得到結晶鹽類化合物，而結晶母液則需要返回至前面蒸發工段進行再循環蒸發濃縮處理，其處理流程如圖 2.1。(李等，2014)

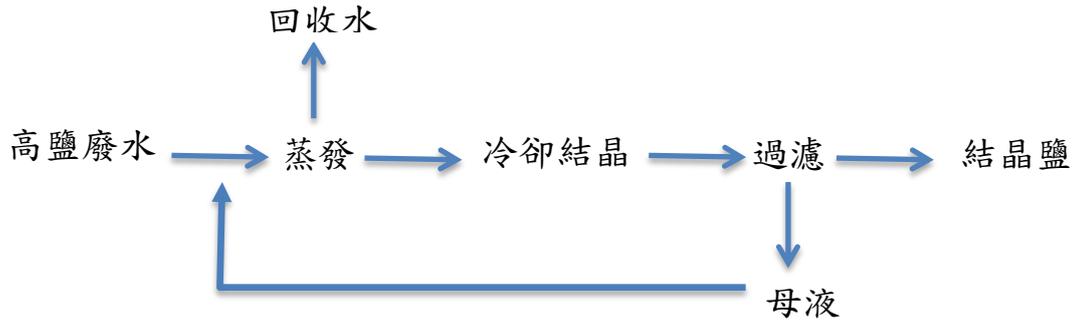


圖 2-1 蒸發濃縮-冷卻結晶處理流程示意

處理方式適用於高鹽廢水中 COD 相對較低、所含鹽類的溶解度相對溫度變化敏感的高鹽廢水，通過控制結晶溫度，可能得到比較純淨的結晶鹽。

其缺點也是顯而易見的，當廢水中鹽類相對的溫度變化不敏感時，例如，廢水中所含主要鹽類為氯化物時，採用冷卻結晶方式進行鹽的分離，效率很低。

此外，在冷卻結晶技術中，會有大量冷卻母液需要返回到前段處理流程再次加熱蒸發、濃縮處理。這樣，會導致整個處理流程長、能源耗用高，處理效率較低。

### 2.2.3 蒸發-熱結晶處理技術

在蒸發-熱結晶技術流程中，首先將高鹽廢水進行蒸發、濃縮，隨後利用旋轉薄膜蒸發器，對高鹽廢水濃縮液進行繼續加熱，使其進一步蒸發、濃縮，形成過飽和鹽液。最後，通過冷卻，使過飽和鹽液溫度降低至 40 鹽以下，得到鹽泥，從而實現高鹽廢水中可溶性鹽類物質的徹底分離。其中，關鍵設備是旋轉薄膜蒸發器，其結構原理示意圖如圖 2-2 所示。(李等，2014)

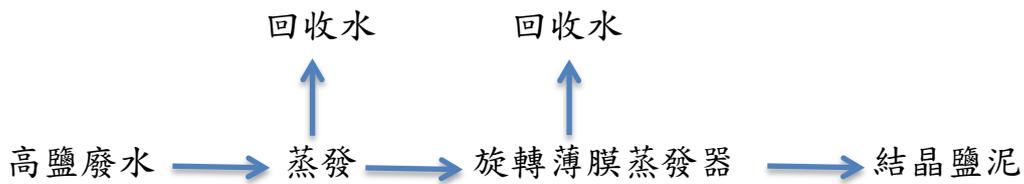


圖 2-2 蒸發濃縮-熱結晶處理流程示意

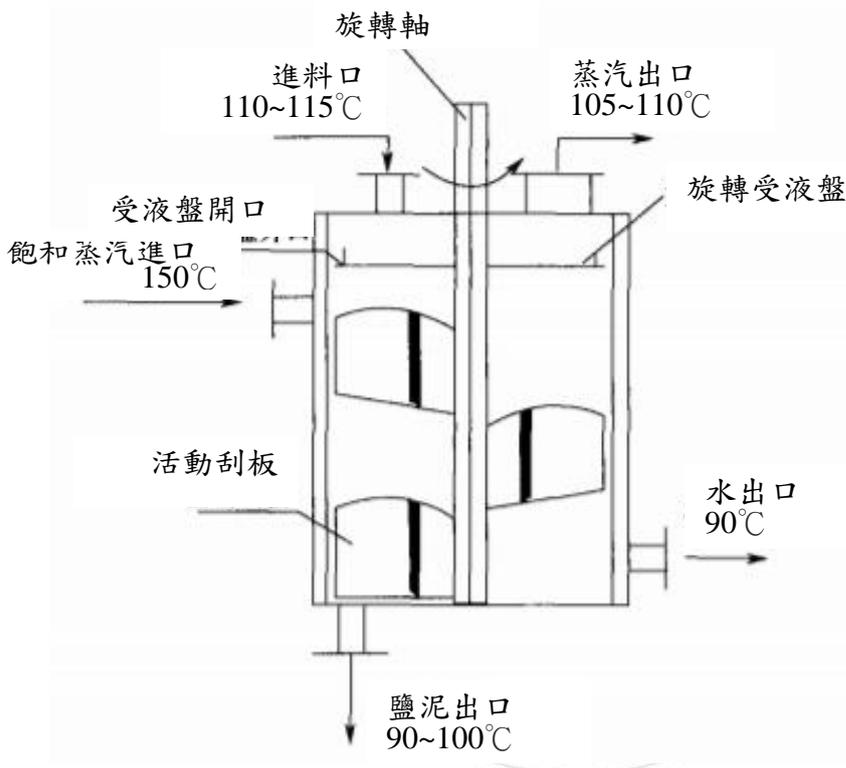


圖 2-3 旋轉薄膜蒸發器結構原理示意圖

圖片來源：鄭賢助、戴艷&謝敏(2009)，高濃度含鹽化工廢水蒸發脫鹽回收處理的試驗研究，北京大學。

由圖 2-3 可見，在旋轉薄膜蒸發器的內部，裝有一個帶旋轉軸的受液盤和刮板，高溫的高鹽濃縮液由進料口進入受液盤後，隨著旋轉拋散至蒸發器四壁並受熱蒸發，形成鹽泥。其中，蒸汽由蒸發器上端的蒸汽出口排出。在此進程中，旋轉軸上的刮板將鹽泥刮下來，從蒸發器下端出口排出。為確保旋轉薄膜蒸發器的防腐性

能，可選用 316 不銹鋼、石墨或鈦合金等優良防腐、耐溫、傳熱性能好的材料進行加工。

蒸發-熱結晶技術的創新在於：採用薄膜蒸發方式，處理含鹽的黏稠濃縮液，其蒸發效率高，容易使含鹽濃縮液達到過飽和，有利於鹽類物質持續不斷地從黏稠液中分離出來，從而實現了鹽類物質分離的連續化，並且無母液返回再次循環加熱，能耗較低。由此，該技術對高鹽廢水中所含鹽類物質無特殊要求，能實現對所有高黏度、高鹽度廢水的高效、連續處理，並能夠實現鹽類物質的 100% 分離。目前，該處理技術已成功用於酸性高鹽廢水的回收處理。

#### 2.2.4 耐鹽菌生化處理

港榮水務(2017)認為高鹽廢水所含鹽類物質多為  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等鹽類物質，雖然這些離子都是微生物生長所必需的营养元素，在微生物的生長過程中起著促進酶反應，維持膜平衡和調節滲透壓的重要作用。但鹽濃度過高，離子強度大，會造成質壁分離、細胞失活，使一般微生物難以在其中生長、繁殖。在高濃度的鹽水中生長繁殖的微生物，對生化進水中的鹽分濃度要求相當高的水平，需有穩定的鹽分濃度，否則微生物將會大量死亡。缺點耐鹽菌生化對處理水質要求苛刻，在於高鹽的毒害和抑制作用，生物法難以處理高鹽度廢水。

#### 2.2.5 膜技術除鹽

黃文鑑及王春鎮(2007)認為薄膜過濾技術，初期多用在海水淡化提供飲用水，而後漸被應用於處理各種工業廢水，目前國內應用薄膜處理廢水之實廠操作經驗，仍屬缺乏，主因是受限膜組操作成本高於傳統處理，然對於性質複雜之高污染性廢水，在現有程序無法勝任之際，薄膜技術仍有發展的潛力。文獻中以 RO 薄膜處理

過程發現常容易因膜阻塞(fouling)而減低 RO 處理功效或降低 RO 操作壽命，因此在 RO 膜進水前進水之水質控制相當重要，採用薄膜程序進行水處理過程中，一旦產生薄膜阻塞而未適時處理，將會造成產水量降低、出水水質變差且縮短薄膜使用壽命等問題，導致操作成本增加。膜技術處理設備價格昂貴，易堵塞、易污染、最後產生的濃縮液無法處理。

### 2.2.6 電解除鹽

含氯化鈉的廢水電解，是以離子膜法或隔膜法，是極板電解進行，是否解決極板的問題、安全的問題、後續處理的問題等，含其他鹽類的廢水電解更是無法處理，其劣勢是只能處理廢水中的含鹽類，且電解方式通常會因為有機物的問題而無法電解。

### 2.2.7 MVR 蒸發器

顧承真等(2014)認為機械式蒸氣再壓縮系統(Mechanical Vapor Recompression System, MVR)是二十世紀九十年代末開發出來的一種新型高效節能蒸發設備，它利用蒸發器中產生的二次蒸氣，經壓縮機壓縮，將壓力、溫度升高，熱焓增加，然後送到蒸發器的加熱室當作加熱蒸氣使用，使料液汽化，而加熱蒸氣本身則冷凝成水。除鹽是利用先進的 MVR 蒸發器通過蒸發濃縮對廢水中的鹽進行回收，在過程中利用本身的二次蒸汽作為熱源，節約了能源和降低了運行成本。該技術是目前處理高含鹽廢水最有效、最經濟的技術。

## 2.3 MVR 的應用

機械蒸汽再壓縮 (MVR)蒸發技術是繼多效蒸發技術、蒸汽噴射壓縮技術之後的第三代節能蒸發技術。目前 MVR 蒸發系統已經成功

地應用於海水淡化、中草藥濃縮、化工污水處理、食品工業中產品的濃縮結晶等相關領域並取得了顯著的節能效果。開發高效、節能減排的化工單元設備是未來工業化發展的趨勢。

### 2.3.1 理論基礎

依據波義耳定律（Boyle's Law），定量的氣體，壓力與體積成反比，體積愈小、壓力愈大。推導而出，即  $PV/T=K$ ，其含義是一定質量的氣體的壓力 $\times$ 體積 $\div$ 溫度為常數（資料來源：維基百科），也就意味著當氣體的體積減小，壓力增大時，氣體的溫度也會隨即升高；根據此原理，當稀薄的二次蒸汽在經體積壓縮後其溫度會隨之升高，從而實現將低溫、低壓的蒸汽變成高溫高壓的蒸汽，進而可以作為熱源再次加熱需要被蒸發的原液，從而達到可以循環回收利用蒸汽的目的。

如圖 2-4 所示，當 119°C 預熱原液後進入加熱器經熱交換後，其所產生之二次蒸汽再由蒸汽壓縮機加壓增溫至 130°C，再利此蒸汽回送至加熱器，如此可持續維持加熱器的溫度在 119°C，另產生之 130°C 冷凝水可用於預熱原液，在理想狀況下可不用提供熱源，即可維持加熱器溫度，達到節省能的效果。

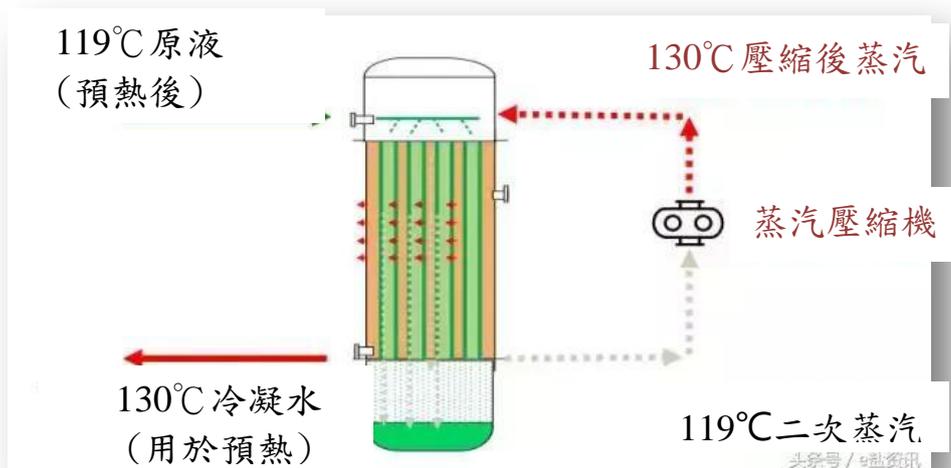
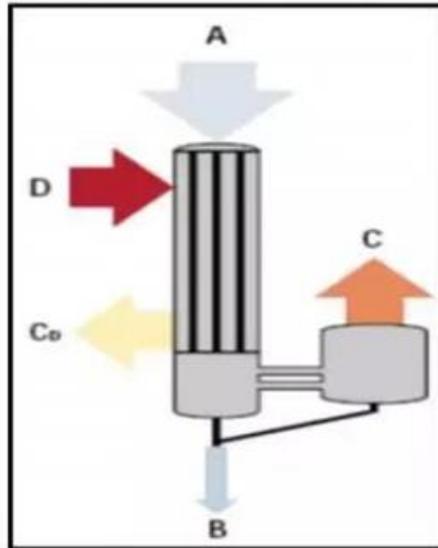


圖 2-4 MVR 操作技術

(圖片來源：2017-10-23 由 e 鹽資訊 發表于科學原文網址：  
<https://kknews.cc/science/begx5y.html>)

### 2.3.2 單效蒸發及雙效或三效蒸發生蒸汽與 MVR 之比較

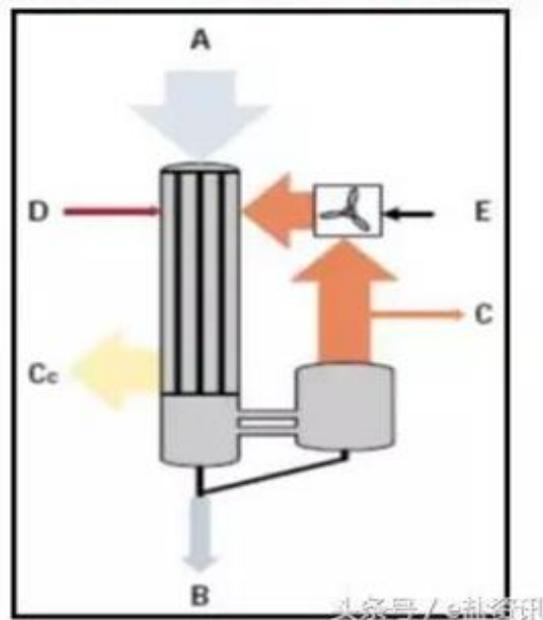
一般蒸發中需要大量冷卻水冷卻二次蒸汽的熱量使之冷凝，然後冷卻水的熱量再通過冷卻塔冷卻將熱量釋放到大氣中，不但消耗新鮮蒸汽，同時冷卻塔消耗大量循環水以及電能（泵）運行，造成三重浪費熱蒸氣。單效蒸發其生蒸汽在系統內只使用了一次，雙效或三效蒸發生蒸汽在系統內使用了兩次或三次如圖 2-5 所示。MVR 機械式蒸汽再壓縮裝置，是將蒸發系統內產生的二次蒸汽通過壓縮機做功，提高蒸汽熱焓，循環進行加熱蒸發，充分利用系統內二次蒸汽及冷凝水的餘熱，節能效果突出不用新鮮蒸汽，MVR 與多效蒸發器的最大的差別在於，MVR 二次蒸汽一直在系統內循環使用，所以可認為其能量沒有被浪費如圖 2-6 所示。



A 原液 B 濃縮液 C 二次蒸汽 Cc 冷凝水 D 生蒸汽

圖 2-5 多效蒸發二次蒸汽全部冷凝排放

(圖片來源：2017-10-23 由 e 鹽資訊 發表于科學原文網址：  
<https://kknews.cc/science/begx5y.html>)



A 原液 B 濃縮液 C 二次蒸汽 Cc 冷凝水 D 生蒸汽 E 蒸汽壓縮機

圖 2-6 MVR 蒸發器二次蒸汽全部分收使用

(圖片來源：2017-10-23 由 e 鹽資訊 發表于科學原文網址：  
<https://kknews.cc/science/begx5y.html>)

### 2.3.4 單效蒸發及雙效或三效蒸發生蒸汽能耗比較

根據二次蒸汽是否用作另一蒸發器的加熱蒸汽，可將蒸發過程分為單效蒸發和多效蒸發。若前一效的二次蒸汽直接冷凝而不再利用，稱為單效蒸發。若將二次蒸汽引至下一蒸發器作為加熱蒸汽，將多個蒸發器串聯，使加熱蒸汽多次利用的蒸發過程稱為多效蒸發。資料來源：2017/04/09 來源：化工 707 原文網址：

<https://read01.com/322z7N.html><https://read01.com/322z7N.html>

單效蒸發、雙效蒸發、多效蒸發及 MVR 蒸發器的能量消耗比較如表 2-1。MVR 消耗的是電能，生蒸汽的消耗在進料必須達到蒸發溫度，需要的蒸汽僅僅用來預熱物料，故 MVR 蒸發器消耗蒸汽量為零，且消耗的能量比其他蒸發器低，其各效蒸發消耗能量為 MVR 蒸發器 5.6 至 17.8 倍。

表 2-1 蒸發器耗能比較

蒸發器種類	消耗蒸汽量	消耗的能量 (kwh/噸)	MVR 與其他各效蒸 發器能量比 (以最大耗能比)
單效	1.1	794~800	17.8
雙效	0.57	412~450	10.0
三效	0.4	289~320	7.1
四效	0.3	217~250	5.6
MVR 蒸發器	0	12~45	-

資料來源：2016-08-02 由 水世界中國城鎮水網 發表于微水會第 30 期 MVR 蒸發器在高鹽水行業的應用及案例介紹 原文網址：  
<https://kknews.cc/news/almlng.html>

## 第三章 研究方法

### 3.1 高鹽廢水試驗來源介紹

台灣中部地區某廢棄物處理中心(簡稱：處理中心)焚化處理設施，為了妥善處理酸性氣體故採用乾式及濕法除酸，濕法除酸添加液態 NaOH，以便與酸性廢氣進行酸鹼中和，洗滌後的廢水略呈鹼性，此水體主要的標的物為總溶解固體 (TDS)，其濃度約 30,000~50,000 mg/L，鹽類的主要成分在陰離子方面應是氯 (Cl)、硫酸根 (SO<sub>x</sub>)，陽離子應是鈉(Na) 居多，氯(Cl)、硫酸根 (SO<sub>x</sub>) 的濃度可達數千至數萬 ppm，其它重金屬離子濃度普遍偏低並直接可符法令限值，少部分為其它雜質如 COD 等，預估每年將產出 35,000~45,000 公噸。

該廢水原經廢水廠處理至符合工業區之納管標準後納管處理，規劃將該類廢水回收使用，設計可回收重量百分比約 85% 左右原本需排棄的廢水，再生所得之乾淨水體可循環利用於處理中心之焚化製程中。其焚化處理製程所需用水量 冷却塔 2700~3000 公斤/小時、急冷塔 7000~7500 公斤/小時及雙級濕式洗滌塔 5000~6000 公斤/小時，如圖 3-1 所示。



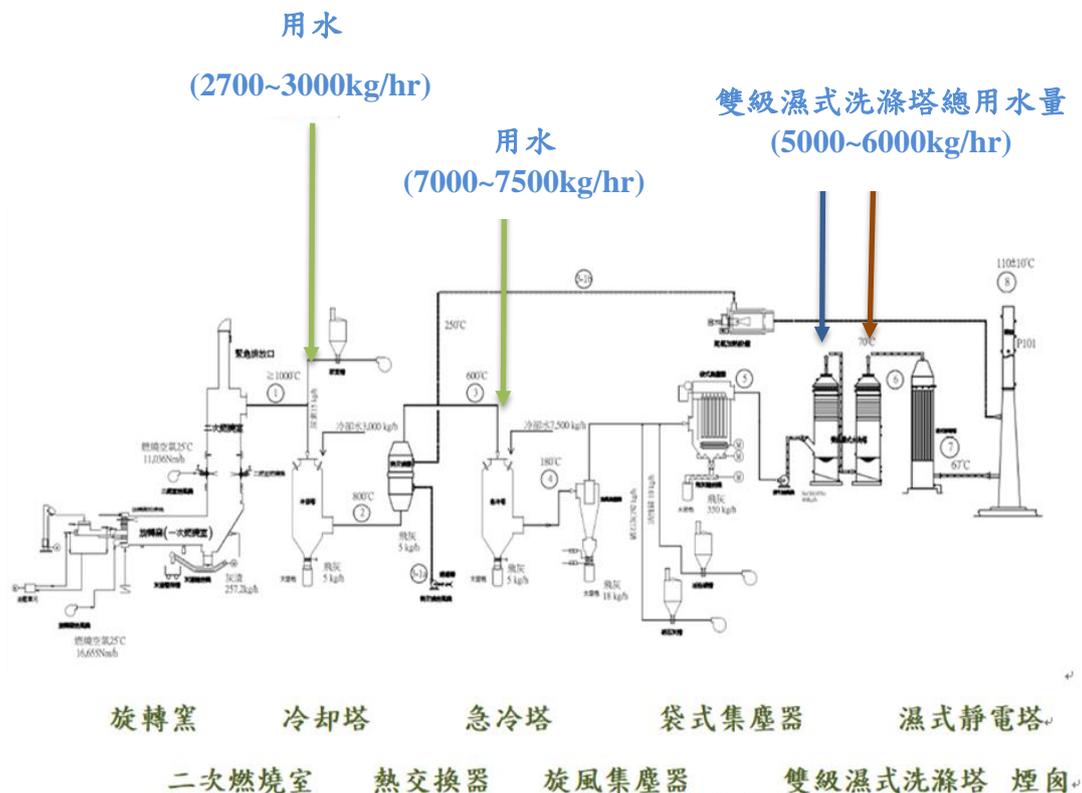


圖 3-1 焚化處理流程

### 3.2 MVR 處理技術

處理中心採用「降膜式機械蒸汽再壓縮循環蒸發」技術，該技術是在 MVR 的基礎上，採用降膜式蒸發，並在蒸發器下部設置濃鹽水循環泵，在濃鹽水首次經過蒸發器未達到所需濃度時，可通過循環泵打到蒸發器頂部再次循環，直至達到所需濃度。該技術採用單效蒸發器可以達到多效蒸發的效果。

蒸發廢水所需的熱量由蒸汽冷凝和冷凝水冷卻所釋放的熱能提供，運行過程中消耗的只是驅動裝置內的水泵、蒸汽泵運轉和裝置控制系統所需要的電能。該技術是目前處理高含鹽污水最有效、最經濟的技術。另外濃鹽水循環泵強制液體循環，可以降低結垢和結晶堵塞的程度。

### 3.2.1 原理及技術

#### (a)降膜濃縮蒸發

降膜蒸發是將廢水自降膜蒸發器加熱室上管箱加入，經液體分佈及成膜裝置，均勻分配到各換熱管內，並沿換熱管內壁呈均勻膜狀流下。在流下過程中，被殼程加熱介質加熱汽化，產生的蒸汽與液相共同進入蒸發器的分離室，汽液經分離進而達到濃縮成效，熱源由蒸汽鍋爐提供。

#### (b)管式強制循環濃縮蒸發

管式強制蒸發器是通過一台循環泵將液體在列管中循環，在高於正常液體沸點下加熱至過熱，進入分離器後，液體的壓力迅速下降導致部分液體閃蒸。蒸發產生的二次蒸汽進入下一效蒸發器加熱或進入冷凝器冷凝。濃縮液通過出料泵送出系統，帶結晶功能設計的蒸發器則由出料泵將漿料送至鹽分離器，在鹽分離器內進行固液分離，亦即大部分的鹽類由此結晶析出，然廢水中含有雜質可能影響系統平衡，為確保鹽類結晶析出正常故需將部分濃縮液外排至系統

#### (c)機械蒸汽再壓縮技術

機械式蒸汽再壓縮蒸發器利用蒸發器中產生的二次蒸汽，經壓縮機壓縮，壓力、溫度升高熱焓增加，然後送到蒸發器的加熱室當作加熱蒸汽使用，使料液維持沸騰狀態，而加熱蒸汽本身則冷凝成水。

(d)版式預熱器( Razzaghi, M., & Spiering, R. (2002))

- 1.版式換熱器在循環的壓降非常低，同時提供較高的傳熱係數。
- 2.通過在給定框架中增加更多的表面積或板，可以調節熱通量。
- 3.板框設計的冷凝側為自由排水，壓降低，同時保持較高的傳熱係數。
- 4.高效的熱傳遞係數使表面溫度非常接近兩種流體溫度，從而降低了結垢的風險。
- 5.高流體速度導致低結垢，並使固體通過交換器時保持均勻懸浮。
- 6.板框設計沒有固有的熱點或冷點，從而降低了結垢或結垢形成。
- 7.由於沒有足夠的時間達到平衡並生成水垢污染物，因此流體停留時間短，可降低發生沉澱的風險。

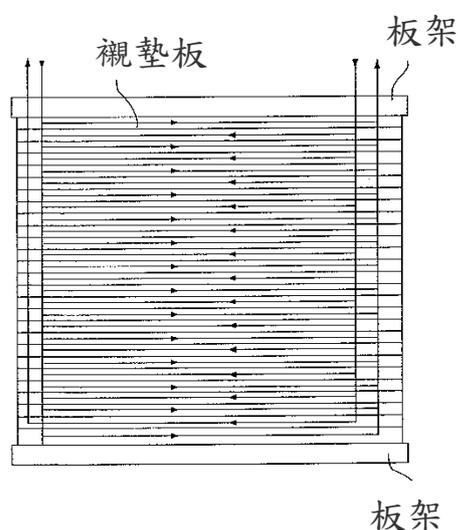


圖 3-2 版式熱交換預熱器

圖片來源：Razzaghi, M., & Spiering, R. (2002). *U.S. Patent No. 6,375,803*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

### 3.2.2 處理設備

MVR 主設備配置、處理能力及功能詳表 3.1;設計參數詳表 3-2 ;  
 能量消耗設計值如表 3.3。

表 3-1 主設備表

設備名稱	數量	規 格	處理能力及功能說明
柴油蒸氣鍋爐	1	蒸發量：1T/H 額定工作壓力：1.0 Mpa 耗油量（柴油）：69 L/H 鍋爐效率：93% 設備電力：4.3 Kw 尺寸：1730×1479×2310 (mm) 重量：1850 kg 設計熱值：539,000 kcal	產生蒸氣，提供熱量。
一效加熱器	1	垂直管殼式 換熱面積：525m <sup>2</sup> 換熱管：Ø38×12,000 (mm) 殼體：Ø1,100×5	電式加熱器主要提供熱量作為氣液分離使用，一效加熱器換熱面積 > 525 m <sup>2</sup> 、二效加熱面器換熱面積 > 460 m <sup>2</sup> 。
二效加熱器	1	垂直管殼式 換熱面積：460m <sup>2</sup> 換熱管：Ø32×6,000 (mm) 殼體：Ø1,400×6	
一效蒸發室	1	殼體：Ø 1,510 mm×2,000 mm	待處理的廢水經加熱後送入蒸發器內進行氣液分離。
二效蒸發室	1	殼體：Ø 2,630 mm×5,500 mm	
冷凝器	1	管殼式 換熱面積：29m <sup>2</sup> 換熱管：Ø25×4,000 (mm) 殼體：Ø500 mm×4	蒸發後的水汽屬乾淨之再生水在冷凝器中釋放熱量並凝結成液體，換熱面積 > 29 m <sup>2</sup> 。
預熱器	1	版式 換熱面積：35 m <sup>2</sup>	待處理的廢水在此利用餘熱先行提高溫度以利後續蒸發，換熱面積分別為 35 m <sup>2</sup> 、6 m <sup>2</sup> 。
預熱器	1	版式 換熱面積：6 m <sup>2</sup>	
貯罐	5	包含冷凝水罐(316 不銹鋼)、母液罐(FRP)、晶漿罐(搪瓷)、冷水罐(搪瓷)	五個貯罐分別暫存收集冷凝水、濃稠回流液、結晶固體析出之空間，依其需求不同的容器材質。
蒸氣壓縮機	1	離心式 葉輪：TC4 蝸殼：316 L	加壓低熱值蒸氣使其提供昇為具較高熱之蒸氣循環使用。

(資料來源：台灣中部地區某廢棄物處理中心營運文件變更申請書暨  
第二套焚化處理設施試運轉報告)



圖 3-2 MVR 設備現場圖示

表 3-2 設計參數

內 容	項 目	設計參數
處理量	蒸發量	9 t/h
進料條件	進料流量 (Kg/h)	~ 10000
	進料溫度 (°C)	~ 25
	進料濃度(% TS)	~8
	物料溫升 (°C)	≤ 10 (按出料濃度計)
出料條件	出晶量 (Kg/h)	750~800
	出料溫度 (°C)	30~35
	出料晶漿濃度 (°C)	10~55
	外排母液 (L/h)	≥ 400
	冷凝水 TDS (mg/L)	≤ 250
運行條件	蒸汽供應 (Kg/h)	~600
	冷却水供應(t/h)	~27
	蒸發溫度 (°C)	90

(資料來源：台灣中部地區某事業廢棄物處理中心 MVR 含鹽廢水蒸發結晶系統技術協議書)

表 3-3 能量消耗設計值

項 目	單 位	參 數
蒸汽消耗量 0.7MPa	Kg/h	600 ± 10%
循環冷水水 (溫度：<32°C)	t/h	27+54
機械密封水 (溫度：常溫)	t/h	5
壓縮空氣 0.4~0.6 MPa，常溫	Nm <sup>3</sup> /min	0.5
裝機電容量	KW	708±10%

(資料來源：台灣中部地區某事業廢棄物處理中心 MVR 含鹽廢水蒸發結晶系統技術協議書)

### 3.3 總溶解固體濃度降低方法

利用應用機械式蒸汽再壓縮技術處理高鹽類廢水如圖 3-1 所示，處理 TDS 濃度 30,000~50,000mg/L 的廢水，處理後濃度為 TDS 小於 500mg/L，為達該處理中心焚化廠製程用水再利用標準。

#### (a) 進料

經焚化處理程序之雙級濕式水洗塔所產生的廢水，先經由進料泵、電磁流量計及自動調節閥進入兩段熱交換器進行物料加熱處理，熱源由 1 噸蒸氣鍋爐提供，預熱至 90~96°C 後進入降膜蒸發設備，鍋爐產生之廢氣導至噴霧乾燥塔隨本系統最終由排放管道(P103)排放。MVR 操作流程如圖 3-2。

#### (b) 第一次蒸發分離

第 I 效加熱器屬於強制降膜式，物料在 I 效加熱器內料液經由加熱器頂部的佈料器均勻的分佈到列管內壁，料液呈膜狀向下流動，在流動過程中料液與加熱器殼程的加熱蒸汽不斷換熱並蒸發，當料液進入加熱器底部的初分離腔後閃蒸蒸發，進行第一次氣液分離，大部分料液排出，少量的料液及料液產生的所有二次蒸汽進入分離器，在分離器續加熱蒸發。

#### (c) 第二次蒸發分離

第 II 效加熱器屬於管式強制循環式，在 II 效加熱器內受熱，料液經由循環泵作用，廢水在換熱管內自下而上高速流動，減緩管壁結垢，在流動過程中料液與加熱器殼程的加熱蒸汽不斷換熱並蒸發，料液進入分離器後在分離器內與二次蒸汽閃蒸，進行氣液分離，分離出的料液通過強制循環泵，繼續在 II 效強制循環加熱、蒸發，過飽和後

產生的晶體通過尾端析鹽、增稠，後由出料泵送出至稠厚器進行稠厚及固液分離；II效出料送來的晶漿液，在稠厚器停留足夠時間，消除過飽和度並澄清，上部清液溢流至清液罐，增稠的物料通過離心機進行固液分離，清液送回清液罐和溢流清液混合後送回 II 效繼續蒸發、結晶，固相則排出系統。然廢水中含有雜質可能影響系統平衡，為確保鹽類結晶析出正常故需將部分濃縮液外排至系統平穩。



圖 3- 3 MVR 建廠圖

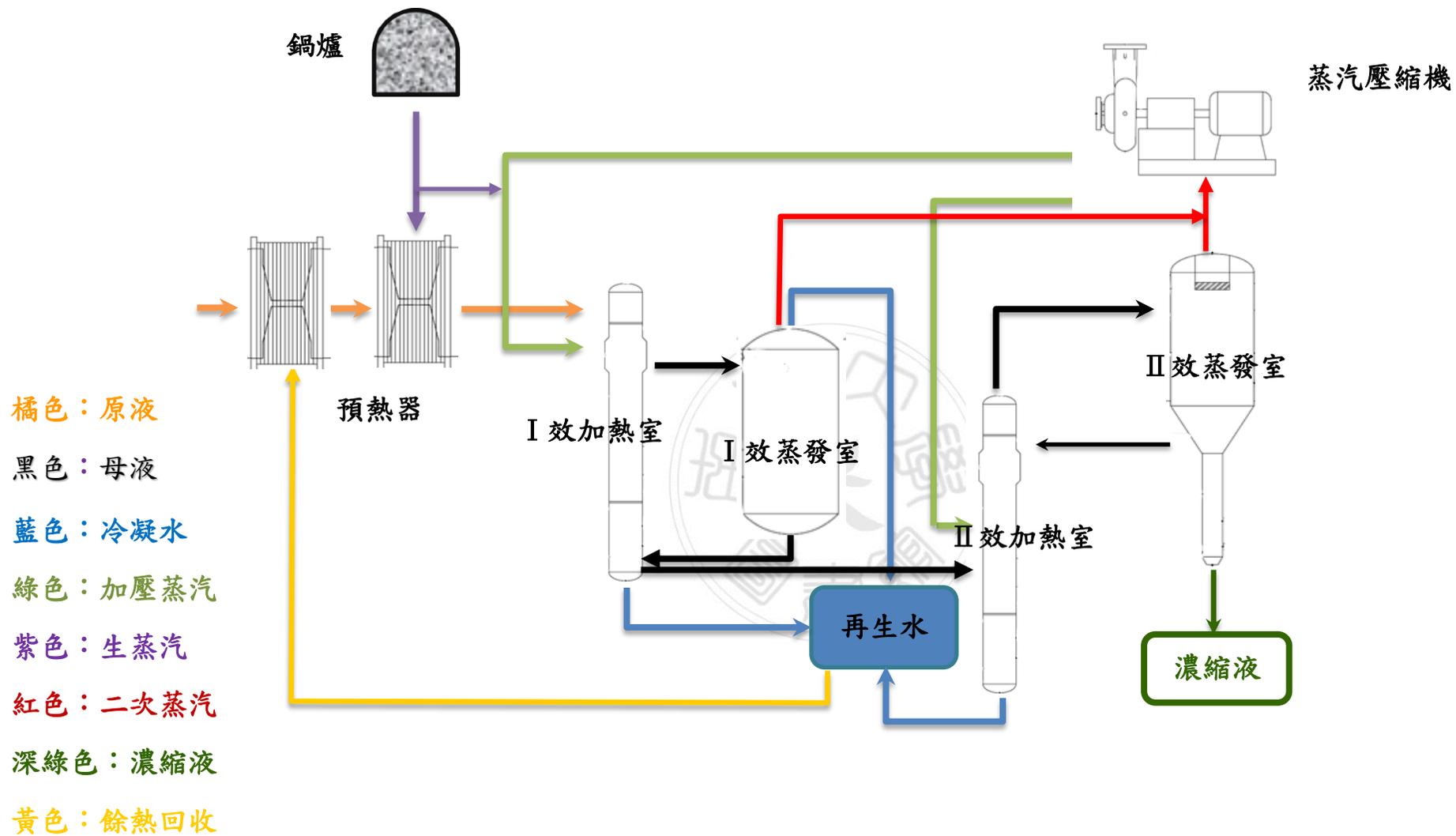


圖 3-4 MVR 操作流程

## 3.4 TDS 分析步驟

### 3.4.1 分析方法來源

行政院環境保護署公告「水中總溶解固體及懸浮固體檢測方法—103~105°C 乾燥(NIEA W210.58A)」。

### 3.4.2 方法概要

將攪拌均勻之水樣以玻璃纖維濾片過濾，取濾液置於已知重量之蒸發皿中，移入 103~105 入之烘箱蒸乾至恆重，所增加之重量即為總溶解固體重。

### 3.4.3 適用範圍

本方法適用於飲用水、飲用水水源、地面水體、地下水、放流水、廢(污)水及海域等水質中總固體、懸浮固體及總溶解固體(總溶解固體量或總溶解固體物)之測定。

### 3.4.4 使用設備

- 1.蒸發皿：陶瓷 100 mL。



圖 3-5 蒸發皿

2.烘箱：能控溫在 103~105 能。



圖 3-6 烘箱

3.分析天平：能精稱至 0.1 mg。



圖 3-7 分析天平

4.鐵氟龍被覆之磁石。



圖 3-8 磁石

5.微量吸管



圖 3-9 微量吸管

6.玻璃纖維濾片：Whatman grade 934AH。



圖 3- 10 濾紙

7.過濾裝置：磁式過濾漏斗。

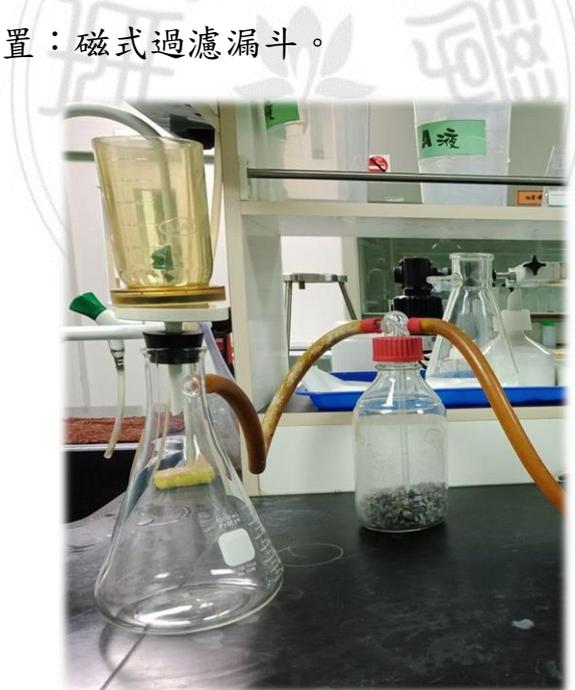


圖 3- 11 過濾裝置

## 8.抽氣裝置。



圖 3- 12 抽氣裝置

### 3.4.5 試劑

試劑水：去離子水。

### 3.4.6 樣品保存

採樣時須使用抗酸性之玻璃瓶或塑膠瓶，以免懸浮固體吸附於器壁上，分析前均應保存於4℃保存之暗處，以避免固體被微生物分解。採樣後儘速檢測，最長保存期限為7天。分析時應將樣品回復至室溫再行取樣。

### 3.4.7 分析步驟

蒸發皿之準備：將洗淨之蒸發皿置於103~105℃烘箱中1小時，再將之取出移入乾燥器中冷卻，待其恆重後加以稱重。重複上

述烘乾、冷卻、乾燥、稱重之步驟，直至前後兩次之重量差在 0.5 mg 範圍內。將蒸發皿保存於乾燥器內備用。

將水樣先經玻璃纖維濾片過濾後，其濾液以移液管取固體含量約在 2.5~200 mg 間之水樣量於已稱重之蒸發皿中，並在烘箱中蒸乾，蒸乾過程須調溫低於沸點 2 須以避免水樣突沸。樣品移取過程中須以磁石攪勻。

將蒸發皿移入 103~105 皿烘箱內 1 小時後，再將之移入乾燥器內，冷卻後稱重。重複上述烘乾、冷卻、乾燥及稱重步驟直到恆重為止（前後兩次之重量差在 0.5 mg 範圍內）。在稱重乾燥樣品時，小心因空氣暴露及樣品分解所導致之重量改變。

### 3.4.8 結果處理

$$\text{總溶解固體} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(E - B) \times 1000}{V}$$

E：總溶解固體及蒸發皿重 (g)

B：蒸發皿重 (g)

V：樣品體積 (L)

### 3.4.9 品質管制

1. 空白樣品分析：每 10 個樣品或每批次樣品至少執行一次空白樣品分析，空白分析值應小於法規管制標準值的 5%。
2. 重複樣品分析：每個樣品必須執行重複分析，其相對差異百分比應符合表 3-4 之規範。

表 3-4 重覆分析相對差異百分比之規範

檢測範圍	容許相對差異百分比
< 25 mg / L	20%
> 25 mg / L	10%

資料來源：中華民國102年1月15日環署檢字第1020004998號公告  
NIEA W210.58A 水中總溶解固體及懸浮固體檢測方法  
—103~105°C 乾燥



## 第四章 結果與討論

### 4.1 TDS 處理量分析

利用濃度不同的 TDS 以 MVR 處理，分析 TDS 處理效率及再生水回收效率其結果，定義 TDS 處理效率(%)為

$$P_t = (C_o - C_t)/C_o$$

式中  $P_t$ =TDS 處理效率(%),  $C_o$  為原水 TDS 濃度,  $C_t$  為再生水之濃度。再生水回收效率(%)為

$$P_r = (O-U)/I$$

式中  $P_r$ =再生水回收效率(%),  $O$  為再生水量,  $I$  為進料量,  $U$  為鍋爐水量, 整理詳如表 4-1。

表 4-1 TDS 檢測結果及處理量統計分析表

原水 TDS mg/L	再生水 TDS mg/L	TDS 處理效率 %	進料量 CMD	鍋爐水量 CMD	再生水量 CMD	再生水 回收效率 %
3,990	92.5	97.7	193.79	11.59	200.73	97.6
4,530	118	97.4	184.00	12.72	180.19	91.0
5,030	5	99.9	201.18	13.32	209.83	97.7
9,010	82.5	99.1	184.92	11.85	190.62	96.7
12,600	5	100.0	200.24	13.25	207.92	97.2
13,100	5	100.0	181.86	14.93	184.34	93.2
17,500	308	98.2	114.16	24	132.061	94.7
18,400	455	97.5	203.81	9.18	206.25	96.7
19,200	228	98.8	205.56	10.61	209.08	96.6

原水 TDS mg/L	再生水 TDS mg/L	TDS 處理效率 %	進料量 CMD	鍋爐水量 CMD	再生水量 CMD	再生水 回收效率 %
19,500	100	99.5	198.88	11.03	201.95	96.0
19,500	25	99.9	132.75	8.73	140.2	99.0
21,100	192	99.1	183.4	9.46	179.82	92.9
21,200	140	99.3	187.6	13.54	192.25	95.3
21,500	242	98.9	212.06	11.09	210.59	94.1
22,100	155	99.3	121.82	8.2	124.91	95.8
22,200	40	99.8	103.72	8.62	105.78	93.7
23,400	145	99.4	165.5	24	162.862	83.9
23,500	188	99.2	104.98	6.3	105.92	94.9
25,000	87.5	99.7	176.96	12.64	177.88	93.4
25,200	265	98.9	151.7	6.21	142.18	89.6
25,800	192	99.3	147.33	10.28	151.78	96.0
26,100	122	99.5	190.4	10.36	189.92	94.3
35,700	500	98.6	180.98	13.21	191.14	98.3
38,400	508	98.7	167.79	24	184.822	95.8
42,100	20.0	100.0	184.69	15.69	197.93	98.7
平均值		99.1	平均值			94.8

比較發現，若原水 TDS 濃度高則處理後再生水之濃度也偏高，如

圖 4-1 所示。TDS 處理效率與原水 TDS 無關，平均去除率 99.1%，且皆可達 83.4% 以上如圖 4-2。原水 TDS 濃度在 40000mg/L 內其再生回收率皆可達 91% 以上，不影響其回收效率如圖 4-3。

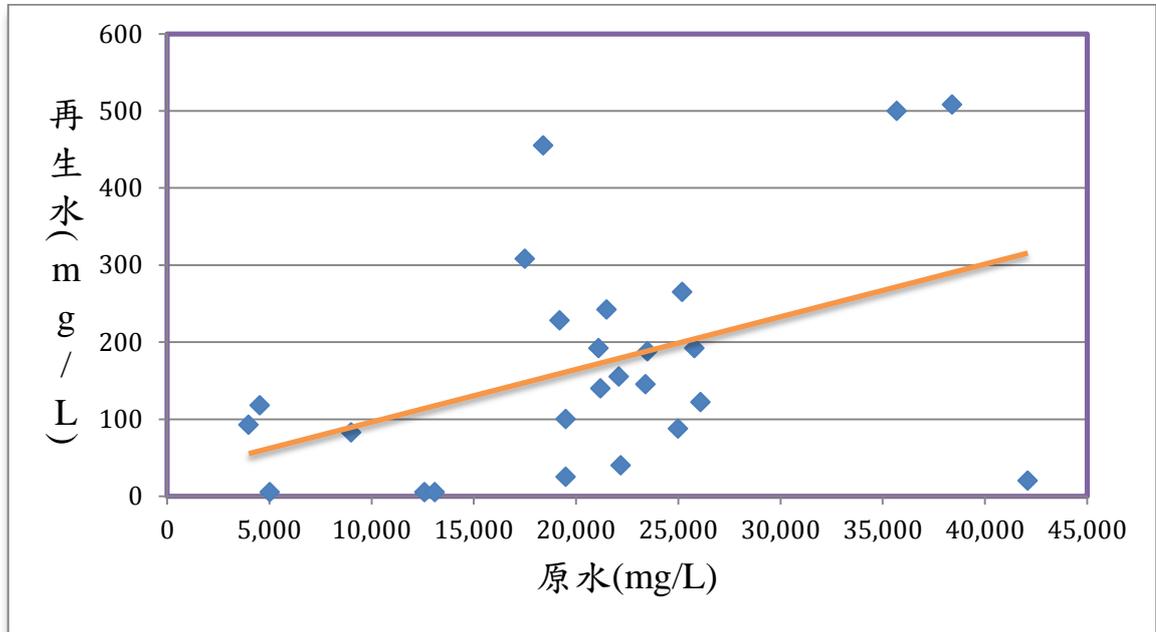


圖 4-1 原水與處理後再生水 TDS 比較值

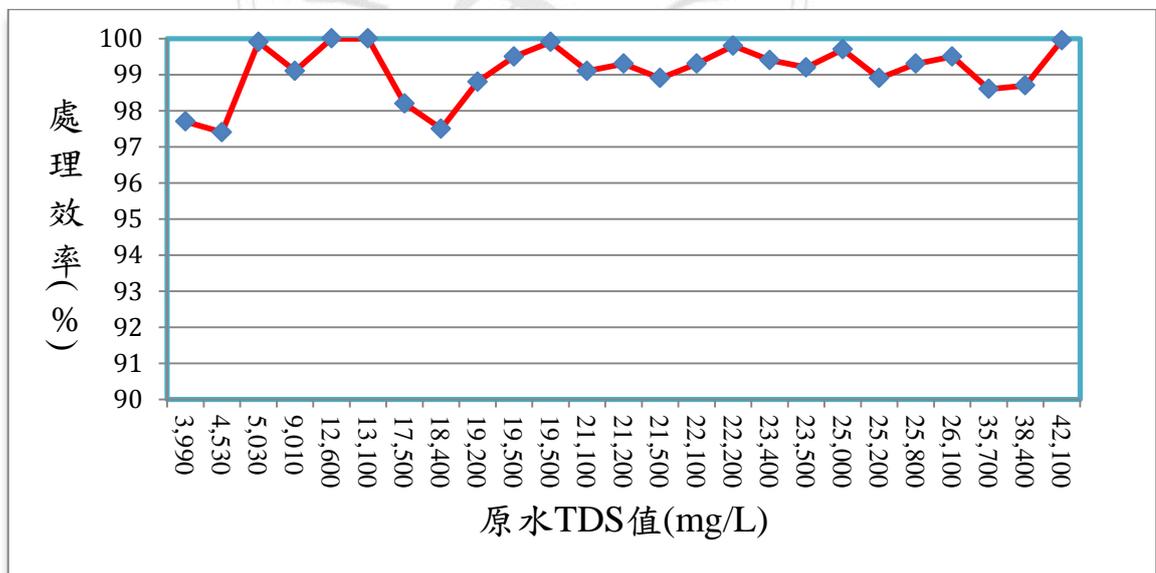


圖 4-2 TDS 處理效率分析

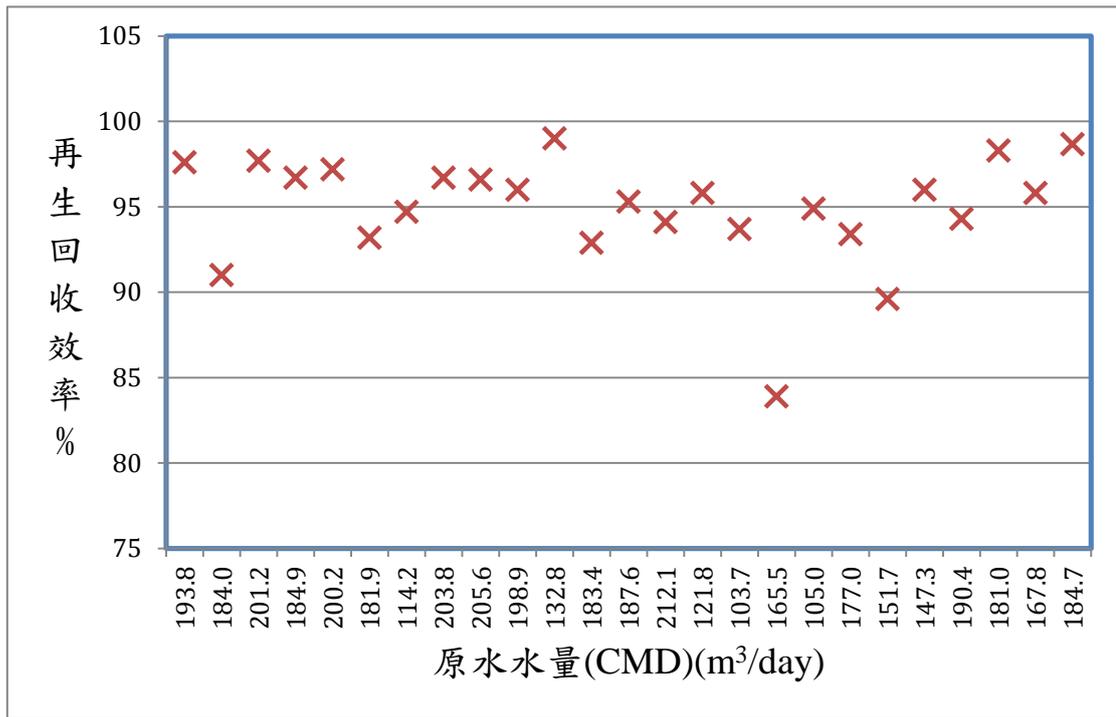


圖 4-3 原水回收效率

## 4.2 效益評估

MVR 設備自 107 年 11 月運轉迄今，綜合以上分析結果推論，原設計廢水每年 35,000~45,000 公噸；TDS 濃度 30,000~50,000 mg/L 的雙級濕式洗滌塔洗滌高鹽類廢水，原設計可回收重量百分比 85% TDS 濃度小於 500 mg/L 原本需排棄的廢水，經試驗證應用 MVR 處理高鹽類廢水 TDS 處理達成率為 99.1%，再生水回收率 94.8%，再生水回收率優於原先設計值 85%；另焚化廠每日用水量設計 396 噸如表 4-2，MVR 每日可回收 207 噸再生水供焚化製程用水量如表 4-3，對於水源日漸短缺之台灣，或可作為一項值得推廣之技術。

表 4-2 焚化用水量設計值

單 元	使用水量		
	噸/小時	小時合計	每日合計
冷卻塔	3.0	16.5 噸	396 噸
急冷塔	7.5		
雙級濕式洗滌塔	6.0		

表 4-3 MVR 再生水效益評估

實驗結果 回收效率	設計處理量	每日可回收水量
94.8%	9 噸/小時 216 噸/日	207 噸

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

本研究針對以 MVR 系統處理如圖 5-1 焚化空氣污防治之雙級濕式洗滌塔之效率評估，利用實驗分析所得數據，繪製 TDS 濃度對處理效率之影響及 TDS 對再生水的回收效率之影響。因此，針對本研究結果，歸納出下列結論：

1. 經測試驗證證明 MVR 處理 TDS 濃度 30000~50000mg/L 廢水其處理後至 500mg/L 以下，其處理效率為 99.1%，優於原先 85% 的設計值，結果顯示 MVR 可有效去除高鹽類廢水中之鹽。
2. 原水 TDS 濃度影響再生之濃度，原水濃度越高則影響處理後之再生水濃度成比。
3. 經測驗證明 MVR 其再生水回收率為 94.8%，具有長期操作穩定性，產生再生水穩定之效率。
4. 針對 TDS 濃度在 40000mg/L 以下的廢水，經由 MVR 其再生水回收率高達 99.1%，可推論 TDS 濃度在 40000mg/L 以下的廢水不影響本系統再生水回收率。



圖 5-1 MVR 建構完成圖

## 5.2 建議

1. 利用機械蒸汽再壓縮技術產製再生水資源，解決水資源缺乏的問題。
2. 可將餘熱作為熱源來產製再生水，達到廢水處理和生產再生水的作用。
3. 減少各種高鹽廢水對水資源的“鹽化”污染和對土壤造成的鹽鹼化危害。
4. MVR 對高鹽廢水能有效處置，可實現鹽與水的高效分離，是一種高效除鹽的近零排放可行技術。
5. MVR 濃縮液的結晶物，是否可回收再利用值得繼續探討。

## 參考文獻

1. 文湘華, 佔新民, 王建龍, & 錢易. (1999). 含鹽廢水的生物處理研究進展. 環境科學, 20(3).
2. 資料來源: 2017-06-08 由 港榮水務 發表于社會原文網址:  
<https://kknews.cc/society/68ze5em.html>
3. 李柄緣, 劉光全, 王瑩, 張曉飛, 劉鵬, 任雯, & 雍興躍. (2014). 高鹽廢水的形成及其處理技術進展. 化工進展, 33(2), 493-497.
4. 鄭賢助, 戴艷, & 謝敏. (2009). 高濃度含鹽化工廢水蒸發脫鹽回收處理的試驗研究 (Doctoral dissertation).
5. 黃文鑑, & 王春鎮. (2007). 薄膜處理程序應用在垃圾掩埋場滲出水回收再利用之研究. 弘光學報, (51), 153-164.
6. 徐嘉婉. (2008). 薄膜分離技術應用於水處理之案例探討.
7. 鄒小玲, 丁麗麗, 趙明宇, 任洪強, & 繆應祺. (2008). 高鹽度廢水生物處理研究 (Doctoral dissertation).
8. 雷雲, 解慶林, & 李艷紅. (2007). 高鹽度廢水處理研究進展. 環境科學與管理, 32(6), 94-98.
9. 梁林, & 韓東. (2009). 蒸汽機械再壓縮蒸發器的實驗. 化工進展, 28(S1), 358-360.
10. 顧承真, 閔兆升, & 洪厚勝. (2014). 機械蒸汽再壓縮蒸發系統的性能分析. 化工進展, 33(1), 30-35.

11. Razzaghi, M., & Spiering, R. (2002). *U.S. Patent No. 6,375,803*.  
Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

