

廢(污)水處理類

零液體排放之技術應用與發展

李岳陽*、范振軒**、許國恩***、侯嘉洪****

摘 要

在臺灣水資源短缺的情況下，零液體排放（Zero Liquid Discharge, ZLD）技術可達到水資源的最大利用，減少具污染風險的廢水體積。目前常見零液體排放技術以逆滲透設備由廢水中提取淨水，剩餘濃縮水引入加熱濃縮設備蒸發回收淨水，最後於結晶器中結晶。在不排放廢水的同時，零液體排放技術產出的淨水可全數再利用，固體結晶則可回收有價成份或委外處理。

現今，結合薄膜及電化學之水處理方式，可降低零液體排放技術之建置及運轉成本。如薄膜電容去離子技術，以低操作電壓、高產水率達到低能耗的淨水與濃縮效果；而薄膜蒸餾技術，則利用膜兩側溫度差，使廢水中的水分以水蒸氣的形式與其他污染物分離。隨著技術發展，零液體排放更具普及於業界的潛力，進一步提升水資源的利用效率。

【關鍵字】零液體排放（ZLD）、水回收、廢水濃縮技術、資源再生

*	國立臺灣大學環境工程學研究所	碩士生
**	水科技與低碳永續創新研發中心	博士兼副執行長
***	財團法人中興工程顧問社	高級研究員
****	國立臺灣大學環境工程學研究所	教授
****	水科技與低碳永續創新研發中心	執行長

一、前言

臺灣為降雨量豐沛的海洋島嶼，然而，近年來的極端氣候致使豐枯水期之雨量差異增加，淡水資源的供給量受地區及季節而有極大不同。於此同時，水庫淤積、產業升級等多重因素，使缺水問題更加嚴重，因此推動節水及水回收再利用刻不容緩。

目前臺灣之廢污水回收產業中，針對工業廢水的回收，以分離技術將低污染之廠內用水（如洗滌塔、冷卻水等）或高價值廢水（如含金、銀等有價金屬廢水等）再處理後回收至製程重複使用。民生污水則在經過都市污水處理廠處理後，部份放流水經砂濾後，可作為環境景觀用水或其他生活次級用水等回收水使用，另有再經逆滲透法等薄膜處理技術之再生水，可供工業製程使用。

為更進一步減少水資源的消耗，零液體排放（Zero Liquid Discharge, ZLD）技術使用多道濃縮及分離程序，目標將水全數回收再利用，不再排放液態廢水，以減少廢水排放時對環境的衝擊，同時最大化水資源的利用效率。

現今較為成熟之零液體排放技術主要使用逆滲透設備先行濃縮廢水，再透過加熱濃縮設備將廢水加熱至沸點，以蒸發方式取出純水。隨著純水的提取，廢水中的物質濃度亦會逐漸升高。在其接近物質飽和濃度時，採用結晶設備產生固體結晶。其中，加熱濃縮設備所需能源龐大，建設及運行成本花費甚鉅，難以吸引業者採用，造成零液體排放技術於業界的普及率低。

隨著電化學及薄膜技術的進步，現已發展出多種低能耗方式濃縮廢水。藉由整合各濃縮技術之優點與適用濃度範圍，可取代以加熱蒸發方式濃縮廢水的程序。降低能源的使用及減少操作成本，增加業者投資零液體排放系統的誘因。

本文列舉零液體排放技術之優勢，介紹常見的零液體排放技術，並針對具有零液體排放特性之新興技術進一步討論。並探討各技術間之應用潛力及目前面臨的挑戰。

二、零液體排放之優勢

零液體排放技術擁有幾項優勢，如圖 1 所示，在臺灣水資源供給依季節變化存在風險，尤其近年氣候變遷造成梅雨、颱風降水減少，使得旱季更加延長，對於水資源的供給穩定更是一大隱患。在此情形下，建立零液體排放系統，使用廠內回用的再生水作為生產用水，可降低對於自來水或抽取地下水的依賴，並提升生產的穩定性及可靠度不受水資源供給情形影響。

零液體排放策略在節約用水的同時也完全避免廢水的排放，於工業區中之工廠，可減低廢水進入工業區污水處理廠所需之納管費用；非於工業區之工廠，除可減少水污費用外，也避免廢水排放時造成的污染影響周圍環境。若廢水中含有有價值之成份，也可利用濃縮技術加以收集回收，於達成零液體排放的同時也能促進循環經濟，減少資源之浪費。

國內之放流水標準近年來多次加嚴，對產業帶來巨大的壓力和挑戰，但這也是推動產業轉型的契機。為了達到新的排放標準，許多企業開始投資引入符合新規範的廢水處理設備。若能藉著產業升級之機會，建立零液體排放系統，即可一次性解決廢水排放問題。同時，隨著世界環保意識的抬頭，國外已有許多企業開始採用零液體排放之管理策略，來減少廢污水對當地環境的衝擊，提升企業環境保護及永續發展的形象。

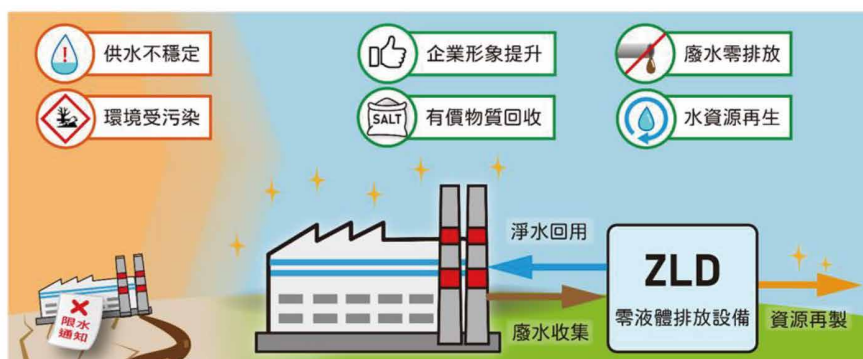


圖 1 零液體排放技術之優勢

三、傳統零液體排放處理方式

零液體排放技術先以濃縮單元提高水中各類成份，如鹽類離子、有機物、揮發性氣體等之濃度，再以分離技術分離。目前常用的濃縮方式有逆滲透濃縮及加熱濃縮，分離方式則使用結晶器分離晶體及溶液。數種目前使用的技術如下所示：

3.1 逆滲透 (Reverse Osmosis, RO)

逆滲透設備以泵浦提供高壓，強迫進流水中的水分由高濃度側穿透半透膜至低濃度側，達到濃縮之效果。隨著濃縮液之濃度增加，施加的壓力也必須增加，才可以驅使水分滲透過薄膜，因此薄膜最高能耐受的壓力為本方法中最重要的操作指標。在逆滲透系統中，因流體頻繁接觸薄膜表面，經常受到水中之鈣、鎂等離子沉積影響造成堵塞，導致濃縮效率降低，故進流水仍需進行軟化前處理或依靠在線清洗藥劑及抑垢劑以避免堵塞。受限於耐受壓力，逆滲透方法最高僅能使總溶解固體量達到至 75 g/L 左右 (Tong et al., 2016)，後續仍需更進一步濃縮，但因相較於加熱濃縮程序具有較低能耗之優勢約 3.7~8 kWh/m³ 出流水 (Al-Karaghoul et al., 2013)，因此作為熱處理之預濃縮步驟，可以降低運轉成本。

3.2 機械蒸氣再壓縮 (Mechanical Vapor Recompression, MVR)

機械蒸氣再壓縮設備為一高效率之加熱濃縮裝置。此裝置使用高溫高壓蒸氣透過薄管式或平板式熱交換器加熱進流水，使進流水汽化產生水蒸氣，此蒸氣經氣液分離後再經過壓縮機加壓產生高溫，作為前述加熱之熱源。收集濃縮後之殘餘液並泵送回設備之進流水入口重新加熱使之內循環，可不斷提取廢水中之水分，水回收率可達到 90% 至 98%，並達到高度濃縮 (約為 250 g/L) 之效果，產出之淡水也相當於純水等級。因進行濃縮步驟涉及到相變化，所需之能耗較 RO 系統高，約為 28~39 kWh/m³ 出流水 (McGinnis et al., 2013)，但與其他同類型濃縮系統 (如多級閃蒸、多效蒸發等) 相比，MVR 系統具有能耗優勢，為零液體排放處理系統中常採用之濃縮設備。

3.3 結晶器 (Crystallizer)

結晶器可將固體及液體分離，為達成零液體排放過程中不可或缺的設備，結晶器將接近飽和濃度之進流廢水不斷在結晶器內循環，同時藉由加熱蒸發或降溫減低溶解度等方式，使溶液達到過飽和狀態，再於液體內添加晶種使結晶形成並於結晶器下方排出。單位能耗約為 52 至 66 kWh/m³ 出流水 (Tong et al., 2016)。因結晶器主要以高鹽、高溫之廢水作為進流溶液，且結晶形成時易造成堵塞，除了需要採用高單價之鈦金屬或不銹鋼作為熱交換器之材料，且經常需要維護。因此，於結晶設備之前處理過程必須儘可能的減少廢水體積與濃縮，降低設計結晶設備的處理量，以減少結晶器之設置及運轉成本。

四、新興濃縮技術

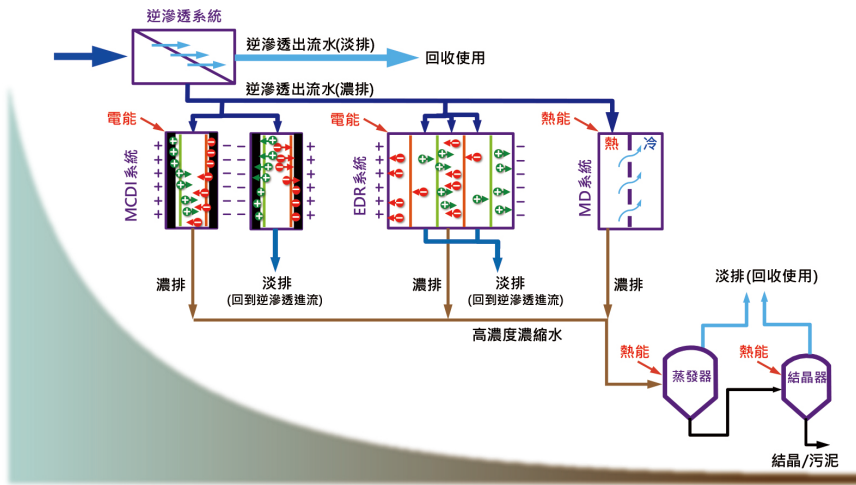


圖 2 結合新興濃縮技術之零液體排放系統

在現有零排放技術所需的能源中，供給廢水濃縮的驅動力所消耗的部份占相當大比例，運用的熱源也普遍需由燃料或電能轉換，操作所需之能源成本高昂。目前有數種新興濃縮技術具有低能耗、低成本特性，或可運用工廠內之低溫廢熱作為熱源。同時，因其可在較低的操作壓力、溫度下運行之特點，有助於減低設備相關零部件的購

置成本及耗損。

新興濃縮技術可取代傳統加熱濃縮設備，或縮小加熱濃縮設備所需的設計處理量。如圖 2 所示，數種新興濃縮之技術列舉如下：

4.1 薄膜電容去離子技術 (Membrane Capacitive Deionization, MCDI)

薄膜電容去離子技術為一低能耗濃縮技術。此技術使用高比表面積之多孔性碳材作為電極（如碳氣凝膠、活性碳、奈米碳管等），再於兩側正負電極表面分別披覆陰離子交換膜與陽離子交換膜，2 個交換膜之間有一流道供水流通過，如圖 3 所示。脫鹽時於極板兩側施加直流電壓，促使水中離子受電場吸引，通過離子交換膜後被吸附於碳電極，產出淡水。離子交換膜可提升濃縮效果同時增加電流使用效率。脫鹽一段時間後，電極會達到吸附平衡，此時反轉電極極性，即可將所儲存之離子釋出，使出流濃度比原進流水高，產出濃縮水。藉由連續之吸、脫附過程，可將水中之離子富集，提升濃度並降低廢水體積。

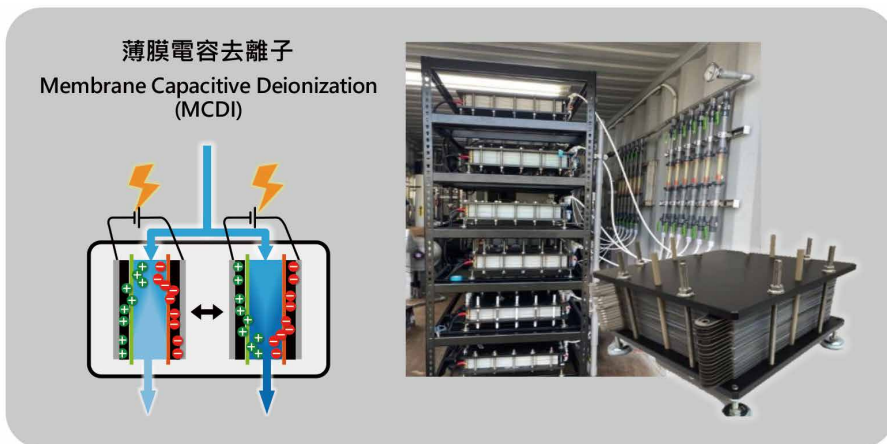


圖 3 薄膜電容去離子技術

因薄膜電容去離子技術施加的電壓位於 1.2 V~2.0 V 之間，具有高電流使用效率、高吸附容量、高產水率、再生程序無需化學添加等特性 (Chen et al., 2022)，在半鹽

水、低鹽度溶液的淡化程序中，操作所需之能源成本低於 RO 系統，約為 $0.1\sim 3 \text{ kWh/m}^3$ 。在低初始鹽度之廢水中設置 MCDI 裝置，可以減少 RO 設備之負荷，減低能源消耗。

4.2 倒極式電透析 (Electrodialysis Reversal, EDR)

倒極式電透析以電場驅動水中帶電離子之提濃，為一低能耗之濃縮技術。在電透析模組中，兩側電極板中間交錯放置陽離子交換膜及陰離子交換膜，進流水則於各膜間之流道流動，如圖 4 所示。施以直流電壓於兩電極板間，可使得進流水中之離子受電極板吸引，依照其電性通過離子交換膜，則可將出流水分為濃、淡兩股水流，達到濃縮分離水中帶電離子之效果。倒極式電透析系統會在運作期間定時反轉極板電性，使得離子流動方向改變，以減少膜表面之堵塞、避免結垢問題產生。

倒極式電透析技術能將濃水之鹽度提升至 100 g/L (Oren et al., 2010)，因其不涉及溫度變化及相變化，電能消耗僅 MVR 的 $1/3$ ，約 $7\sim 15 \text{ kWh/m}^3$ 出流水 (Korngold et al., 2009, Loganathan et al., 2015)，可作為替代 MVR 之濃縮設備，適用於含有大量鹽類離子的廢水。

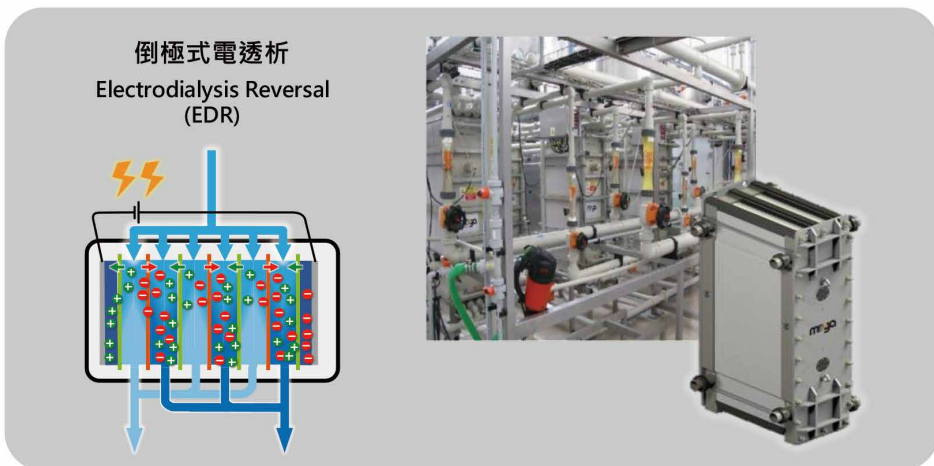


圖 4 倒極式電透析技術 (Novasep, 2023)

4.3 薄膜蒸餾 (Membrane Distillation, MD)

薄膜蒸餾設備為一新興的薄膜濃縮技術。進流水流經薄膜蒸餾設備中多孔性疏水薄膜之高溫原水側，而低溫淨水側則通以冷水或抽取真空、空氣掃流等方式，使得薄膜兩側產生蒸氣壓差，如圖 5 所示。此時進流水中因溫差所產生之水蒸氣會穿透薄膜，並於低溫淨水側達到冷凝與淡水回收。而高溫原水側之廢水則被濃縮，產出高濃度之出流水。由於廢水之流動方向與薄膜平行，因此具有低結垢潛勢的特點。

薄膜蒸餾法可產出最高 200 g/L 濃水 (Tong et al., 2016)，但不適用於具有揮發性物質或界面活性劑的廢水。此方法之能耗雖與前述之蒸氣再壓縮濃縮器相近，約為 22~67 kWh/m³ 出流水 (Meindersma et al., 2006)，但因操作溫度不需達到液體之沸點，因此即使是工廠產生的廢熱、使用過之蒸氣都可作為薄膜蒸餾的熱能來源，因此適合產生廢熱且具水處理需求之產業採用。



圖 5 薄膜蒸餾技術 (Memsys, 2023)

五、有價資源之循環再生

零液體排放系統將目標廢水不斷地濃縮，直到所有水分都被回用，僅剩餘固體結晶為止。在此過程中，水中各成份濃度皆被提升，有助於提升回收有價金屬時的效率。

例如化學沉澱法在低濃度時，需添加大量藥劑並產生多餘低純度污泥；而濃縮後之廢水進行化學沉澱，產生出的污泥純度及價值則可獲得提升。

因此，在零液體排放流程中增設適當之回收裝置，如選擇性離子交換樹脂或化學沉澱 (Bello et al., 2021)，可以回收廢水中的有價金屬，如鎳、銅等，從而在實現零液體排放的同時創造更大的效益。另外，在結晶設備產出的鈉鹽、鉀鹽、鈣鹽等結晶，也具有循環再利用的價值，實現資源最大化的利用，減低對有價金屬等稀有資源的需求，降低對環境的負擔。

六、零液體排放之挑戰與展望

各項濃縮技術之進步使零液體排放所需的能源成本降低。如圖 6 及表 1 所示，可依照廢水之水質情形、鹽類濃度及能源供給條件，進而整合多項濃縮技術的最適宜操作範圍，以最少的能源達到最佳之濃縮效果。

然而，達到零液體排放所需之能耗仍相當可觀，為了避免因採用零排放技術而增加的能源消耗導致溫室氣體排放量上升，結合再生能源操作並減少對傳統能源的依賴，可避免造成環境的負面影響。此外，利用離峰用電或供電充裕的時段操作，也是降低能源成本及對電網負荷的方法。

臺灣目前已有數家採用零液體排放技術之業者，如桃園市友達光電龍潭廠於 2016 年開始採用零液體排放技術，現已藉由 RO、EDR 及熱蒸發等技術達成每日 18,000 噸廢水全數回收 (友達光電, 2023)。而彰化縣及臺南市的 2 座新設工業區則承諾未來達成零液體排放 (朱敬平等, 2017)，可見政府對於零液體排放之重視，以及業者於零排放領域所投入之成果。

未來各項濃縮技術將繼續隨著技術之發展與推廣應用而降低達成零液體排放所需的成本。同時，世界對於水資源之重視也勢將日益提升，因此零液體排放將會成為全球趨勢。

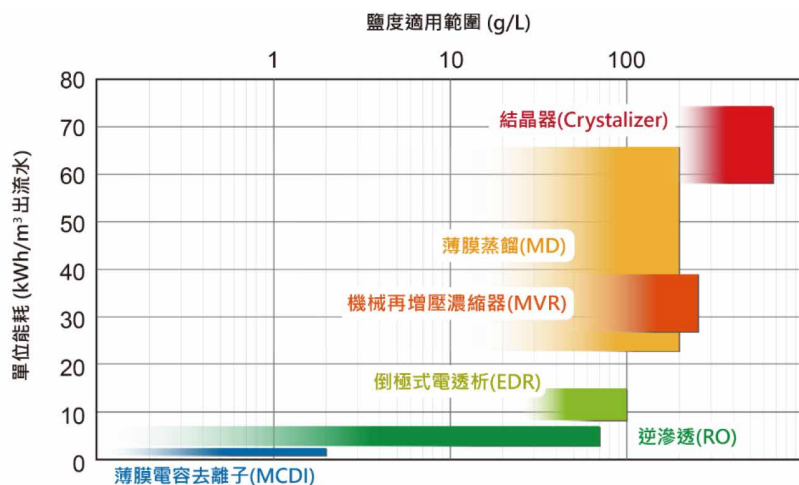


圖 6 各濃縮技術能耗及鹽度適用範圍

表 1 各項濃縮技術之比較

技術	原理	能耗 (kWh/m ³ 淡水產出)	優點	缺點
MCDI	電場驅動力 電吸附	0.1~3	<ul style="list-style-type: none"> 操作電壓低，能耗低，高產水率 掃流式流道較不易污堵 模組化設計 	<ul style="list-style-type: none"> 只能處理帶電物質 可達到的最高濃度較低
RO	滲透壓差	3.7~8	<ul style="list-style-type: none"> 技術成熟 模組化設計 	<ul style="list-style-type: none"> 膜孔易結垢或堵塞使產量降低 僅能濃縮至 75 g/L
EDR	電場驅動力	7~15	<ul style="list-style-type: none"> 可濃縮至 100 g/L 極板電性定時交換可減少膜表面結垢 模組化設計 	<ul style="list-style-type: none"> 只能處理帶電物質 高壓電流會產生不必要副產物。
MD	蒸氣壓差	22~67	<ul style="list-style-type: none"> 可濃縮至 200 g/L 產水可達純水等級 可運用廢熱作為熱能 模組化設計可擴充 	<ul style="list-style-type: none"> 低產水速率 無法阻擋揮發性污染物
MVR	加熱蒸發	28~39	<ul style="list-style-type: none"> 可濃縮至 250 g/L 技術成熟 產水可達純水等級 	<ul style="list-style-type: none"> 造價及操作成本高 非模組化設計不易擴充

(資料來源：Cheng et al, 2022、Al-Karaghoul et al., 2013、Loganathan et al., 2015、Meindersma et al., 2006、McGinnis et al., 2013)

七、結語

零液體排放系統具有完全避免廢水排放、可最大限度減少了淡水資源的使用量、提升企業形象、符合國際趨勢等優點。隨著設置及營運成本逐漸降低，政府與學界、產業界應藉此機會共同努力，輔導業者共同發展新的零液體排放技術，實現零液體排放的目標，維持水體健康，緩解目前臺灣淡水資源不足的困境，同時促進循環經濟，建立永續發展的可能性。

參考文獻

朱敬平 (2017)，廢水零排放產業現行推動概況，永續發展期刊，第 79 期，p 34-44。

友達光電 (2023)，水資源管理，<https://csr.auo.com/tw/environment/cycle/water>。

Al-Karaghoul A., and Kazmerski L. L. (2013), Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, p 343-356.

Bello A. S., Zouari N., Da'ana D. A., Hahladakis J. N., and Al-Ghouti, M. A. (2021), An overview of brine management: Emerging desalination technologies, life cycle assessment, and metal recovery methodologies, *Journal of Environmental Management*, 288, 112358.

Chen T. H., Yeh K. H., Lin C. F., Lee M., and Hou C. H. (2022), Technological and economic perspectives of membrane capacitive deionization (MCDI) systems in high-tech industries: From tap water purification to wastewater reclamation for water sustainability, *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 106012.

Cheng C. Y., Chen T. H., Chen K. Y., Ma J., Hou C. H. (2022), Redox-flow battery with four-channel architecture for continuous and efficient desalination over a wide salinity working range, *Desalination*, 534, 115783.

Korngold E., Aronov L., and Daltrophe N. (2009), Electrodialysis of brine solutions

- discharged from an RO plant, *Desalination*, 242(1-3), p 215-227.
- Loganathan K., Chelme-Ayala P., and El-Din M. G. (2015). Treatment of basal water using a hybrid electro dialysis reversal–reverse osmosis system combined with a low-temperature crystallizer for near-zero liquid discharge. *Desalination*, 363, p 92-98.
- McGinnis R. L., Hancock N. T., Nowosielski-Slepowron M. S., and McGurgan G. D. (2013), Pilot demonstration of the NH₃/CO₂ forward osmosis desalination process on high salinity brines, *Desalination*, 312, p 67-74.
- Meindersma G. W., Guijt C. M., and De Haan A. B. (2006), *Desalination and water recycling by air gap membrane distillation*, *Desalination*, 187(1-3), p 291-301.
- Novasep (2023), Industrial electro dialysis, <https://www.novasep.com/process-solutions/from-unit-operations-to-process-lines/industrial-electrodialysis-technology.html>
- Oren Y., Korngold E., Daltrophe N., Messalem R., Volkman Y., Aronov L., Weismann M., Bouriakov N., Glueckstern P., and Gilron J. (2010). Pilot studies on high recovery BWRO-EDR for near zero liquid discharge approach, *Desalination*, 261(3), p 321-330.
- Memsys Water Technonogies GmbH (2023), Products, <https://www.memsys.eu/products.html>
- Tong T., and Elimelech M. (2016) The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions, *Environmental science & technology*, 50(13), p 6846-6855.