

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	100001
參展科別	工程學
作品名稱	碳紙 / 聚乙二醇複合材料應用於太陽蒸發器及 抗鹽之研究

就讀學校	臺北市立麗山高級中學
指導教師	洪維松 方湘儀
作者姓名	鄧歲澤 朱芮甯

關鍵詞	<u>海水淡化、光熱薄膜蒸餾技術、光熱材料</u>
-----	---------------------------

作者簡介



大家好，我們是來自麗山高中的鄧歲澤和朱芮甯。過去兩年半的專題研究中，我們聚焦於「利用光熱薄膜蒸餾技術進行海水淡化」，開發新型光熱薄膜以提升海水淡化效率，並回應聯合國永續發展目標（SDGs）。

研究過程充滿挑戰，包括實驗設計、技術調整與數據分析，但也讓我們學會如何面對挫折並找到創新解決方案。我們曾代表學校赴日參加Science Edge科展，榮獲英文組第三名，並舉辦雙語成果發表，進一步提升了跨文化交流與科學溝通的能力。

這次研究讓我們深刻體會到團隊合作的重要性，也更加堅定將科學研究應用於實際，為社會與環境帶來更多可能的影響。未來，我們期望將科學研究結合實際應用，推動技術進步，為水資源永續發展帶來正向影響。

2025 年臺灣國際科學展覽會
研究報告

區別： 北區

科別：工程學科

作品名稱：

碳紙 / 聚乙二醇複合材料應用於太陽蒸發器及抗鹽之研究

關鍵詞：海水淡化、光熱薄膜蒸餾技術、光熱材料

編號：

目錄

中文作品名稱.....	3
英文作品名稱.....	3
中文摘要.....	4
英文摘要.....	4
壹、前言.....	5
一、研究動機.....	5
二、文獻回顧.....	7
三、研究目的.....	8
四、研究問題.....	8
貳、研究方法與過程.....	9
一、實驗材料.....	9
二、實驗器材.....	9
三、實驗方法.....	10
參、研究結果與討論.....	15
肆、結論與應用.....	22
伍、參考資料.....	24

中文作品名稱

碳紙 / 聚乙二醇複合材料應用於太陽蒸發器及抗鹽之研究

英文作品名稱

Carbon Paper / PVA Composite Solar Evaporation and Anti Salt

中文摘要

本研究旨在開發一款新型薄膜，利用創新的光熱薄膜蒸餾技術進行海水淡化。薄膜的製作是利用碳紙浸泡於不同濃度的聚乙烯醇（PVA）溶液中，形成一面疏水、一面親水的雙性薄膜。通過實驗比較各種薄膜的通量、鹽回溶、光熱效應等性能差異，從中找出最優的製膜方式，以提升該技術的可行性和效率。研究目標是增加淡水產量，同時減少能源消耗和成本負擔。此項技術符合聯合國可持續發展目標（SDGs）中的第 6 項（清潔水和衛生）與第 7 項（可負擔且清潔的能源）。本研究最終希望推動這項技術的廣泛應用，進一步走入市場，為水資源的永續發展做出貢獻。

英文摘要

This study develops a novel membrane using photothermal membrane distillation for seawater desalination. By immersing carbon paper in polyvinyl alcohol (PVA) solutions of varying concentrations, a dual-functional membrane with hydrophobic and hydrophilic sides is created. Experimental comparisons of flux, salt rejection, and photothermal performance identify the optimal fabrication method to increase freshwater yield while reducing energy and costs. This technology supports the UN Sustainable Development Goals, specifically Goal 6 (Clean Water) and Goal 7 (Affordable and Clean Energy), with the aim of enabling sustainable global water resources.

壹、前言

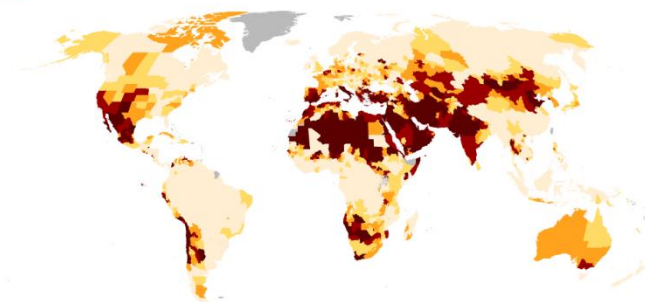
一、研究動機

水是人類生活中不可或缺的資源，然而全球面臨的水資源短缺問題日益嚴重，尤其是淡水資源的不足成為了一大挑戰。根據世界氣象組織（WMO）於 2021 年 11 月 29 日發布的《全球水資源狀況報告》，全球大部分地區變得更為乾燥，現有約 36 億人每年至少面臨一個月的用水不足，預估至 2025 年這項數值將增加至 50 億人以上。雖然台灣的降雨量相對豐富，但由於河川短、流速快且降雨分布不均等問題，台灣的水資源經常面臨短缺的情況。由於上述原因台灣仍然被歸類為缺水國家，許多其他國家也面臨類似的困境。

目前雖然有多種方法可暫時解決缺水問題，但這些方法均存在一定的缺陷。例如，過量抽取地下水可能導致地層下陷或土壤液化，建造水庫則可能引發泥沙淤積和土地破壞等環境問題。這些問題使本研究決定利用海水進行淡化，以增加可利用的水資源，並減少對地下水的依賴。海水作為一種穩定且可持續的資源，能在一些缺水問題突出的國家及台灣中南部的乾季期間，提供水源。

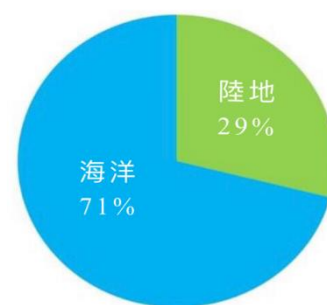
全球各省/州/區基準水壓力

低(<10%) 高(40-80%)
低到中(10-20%) 極高(>80%)
中到高(20-40%) 無數據



（圖一）全球基準水壓力[1]

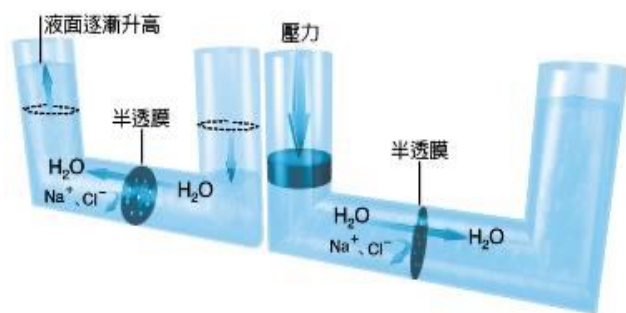
地球表面海洋和陸地佔比



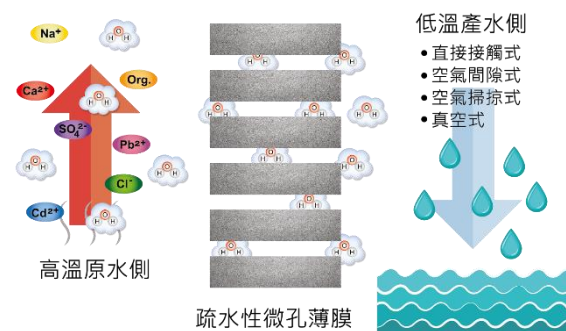
（圖二）地球表面海洋和陸地占比
（作者繪製）

起初，本研究考慮使用逆滲透技術（如圖三）進行海水淡化。逆滲透的原理是利用滲透作用，將清水和鹽水置於一管中，並以半透膜隔開。當在鹽水一側施加壓力時，水便會由滲

透壓高的地方流向滲透壓低的地方。然而，根據查詢的文獻顯示，自行製作逆滲透裝置不僅技術要求高，且需耗費大量金錢與時間。此外，逆滲透過程中產生的鹵水若未經專業處理，將會對環境造成危害。更重要的是，所使用的半透膜易受到生物污染及沉積物的侵蝕，需定期清理，這進一步增加了成本。因此，本研究決定不採用逆滲透技術。



(圖三) 逆滲透原理示意圖[2]



(圖四) 薄膜蒸餾原理示意圖[3]

近年來，許多研究人員意識到需要用新興技術替代逆滲透，並研發出薄膜蒸餾技術（如圖四），作為有效的解決方案。該技術利用廢熱轉換為可用的淡水資源，其原理為將海水加熱，使水蒸發為水蒸氣，然後通過薄膜冷凝成淡水。相較於逆滲透，薄膜蒸餾技術具備較低的能源消耗，且不需昂貴的電力資源。然而，此項技術尚未大量商業化，仍面臨溫度極化現象和低能量轉化效率等問題，因而舊有的薄膜技術仍需改良。

本研究選擇採用創新的光熱薄膜蒸餾技術，此技術相較於傳統薄膜蒸餾技術，使用當前流行的再生能源作為加熱來源。利用碳紙這項材料增加吸熱，提升光熱效應，使得加熱的部分由海水轉變為薄膜本身，從而減少了溫度極化現象與能量轉化效率低的問題，同時將薄膜浸泡於聚乙烯醇（PVA）溶液中，使得製作出的薄膜一面輸水，一面親水，進而讓親水面薄膜可以將部分海水吸入薄膜，有助於水的蒸發及鹽的回溶，減少薄膜的堵塞及提高淡水的產量。研究目標是通過這項技術降低能源消耗並提高產水量，並探討薄膜浸泡不同濃度的聚乙烯醇（PVA）溶液，找出最佳的製膜方法。希望透過這項研究使海水淡化技術更加普及，改善台灣及其他地區的缺水問題，並為實現水資源的永續發展做出貢獻。

二、文獻回顧

（一）光熱薄膜蒸餾技術 [4][5][8]：

「光熱薄膜蒸餾技術」是由傳統薄膜蒸餾技術改良而來的一種創新方法。薄膜蒸餾技術本質上是一種熱驅動的膜分離過程，依靠疏水性薄膜兩側的蒸氣壓差來引導水分子從高溫端經由薄膜孔隙進入低溫端並凝結成液體。相較於傳統的逆滲透脫鹽技術，薄膜蒸餾具有多項優勢，包括對處理液濃度的影響較小、可於常壓或低壓下操作、高純度產水、高水回收率以及可以整合廢熱或再生能源等特點，因此在水資源、環境與化工領域的應用上備受重視。

然而，薄膜蒸餾技術仍面臨溫度極化和能量轉化效率低等挑戰。為了解決這些問題，本研究在傳統薄膜蒸餾基礎上引入太陽能技術，利用奈米光子在薄膜表面產生光熱效應，有效緩解溫度極化現象。這項技術不僅較傳統方式節能，亦具潛力推廣至資源和能源相對匱乏的發展中國家，為解決全球水資源短缺問題提供可行的解決方案。

（二）光熱材料[7]：

在薄膜蒸餾技術中使用光熱材料能有效提升水的產量與純淨度。根據文獻調查，光熱材料的分類主要依其光熱轉化機制劃分為三大類：

1. 金屬奈米粒子（如銀、金奈米粒子）：當入射光的頻率與電子振動頻率相符時，會產生表面電漿子共振，生成熱電子。
2. 無機半導體（如 MoS_2 、 Fe_3O_4 ）：當入射光能量大於材料的能隙時，電子會從價帶躍遷至傳導帶，形成電子-電洞對，隨後返回價帶時以熱能形式釋放多餘能量。

3. 傳統碳材料（如碳黑、石墨烯）：電子吸收入射光後，從 π 軌道躍遷至 π^* 軌道，最終從 LUMO 返回 HOMO 時釋出熱能。

由此可見，光熱材料範疇廣泛，從無機材料到有機材料皆有所涵蓋。然而，從應用角度而言，多數無機材料價格昂貴，且合成過程繁複，難以達到工業化要求；有機材料雖具成本優勢，但熱穩定性較差，在光熱應用中仍需克服挑戰。

三、研究目的

本研究目的在於找出效能最好的薄膜製作方式及所浸泡的聚乙烯醇（PVA）溶液濃度，使光熱薄膜蒸餾技術在進行海水淡化時能提高水的產量、減少能源的消耗，同時將鹽進行回溶。對於此實驗本研究會藉由對不同的膜進行多次的長時間測試與比較，並且確保實驗的再創性。期許最終這項技術得以成功運用至生活中，並將此研究反映在水資源的永續發展下。

四、研究問題

- （一）探討不同濃度親水層所製作出薄膜應用於光熱薄膜蒸餾的效能
- （二）利用薄膜溫度去比較各薄膜的吸熱能力
- （三）探討已淡化的水是否符合國際飲用水標準
- （四）觀察所製之薄膜是否能在無光照的情況下，將薄膜上的鹽進行回溶

貳、研究方法與過程

一、實驗材料（作者繪製）

	英文名稱	中文名稱
碳紙	Carbon paper	
<i>PVA</i>	Polyvinyl alcohol	聚乙烯醇
C_2H_5OH	Ethanol	酒精
C_3H_6O	Acetone	丙酮

二、實驗器材

本研究實驗器材包含：鹵素燈、燒杯、電子秤、加熱攪拌器、烘箱



（圖五）實驗裝置圖實際照片（作者拍攝）

三、實驗方法

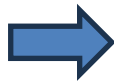
(一) 製膜方式 (圖片皆由作者拍攝)

1. 乾式成膜

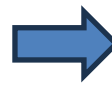
(1) 噴塗



將碳紙固定



噴槍噴塗
角度 30 度噴塗 15 秒

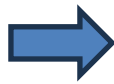


烘箱 60 度
烘乾 1 小時

(2) 浸泡

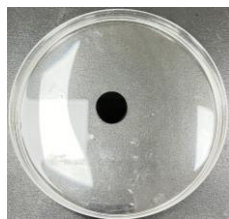


浸泡 PVA 溶液
10 分鐘

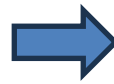


烘箱 60 度
烘乾 1 小時

(3) 潤濕 30 分鐘後浸泡 10 分鐘



在酒精中潤濕
30 分鐘

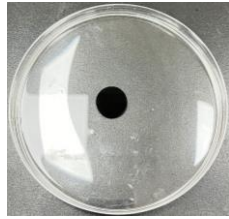


浸泡 PVA 溶液
10 分鐘



烘箱 60 度
烘乾 1 小時

(4) 潤濕 30 分鐘後浸泡 30 分鐘



在酒精中潤濕
30 分鐘



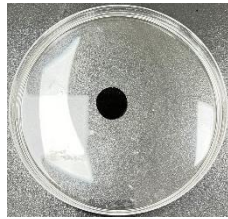
浸泡 PVA 溶液
30 分鐘



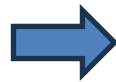
烘箱 60 度
烘乾 1 小時

2. 濕式成膜

(1) 潤濕 30 分鐘後浸泡 PVA 10 分鐘再浸泡丙酮 1 小時



在酒精中潤濕
30 分鐘



浸泡 PVA 溶液
10 分鐘



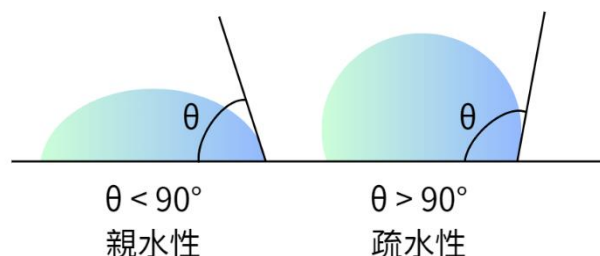
浸泡丙酮
1 小時



烘箱 60 度
烘乾 1 小時

（二）薄膜測試

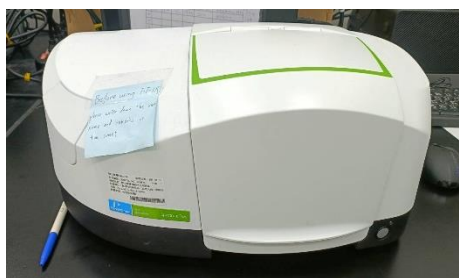
在本實驗中需要一面疏水性且一面親水性的薄膜，原因是疏水性薄膜可防止膜表面吸附水分，且具有較高的通透性，使蒸汽更容易通過薄膜，提高蒸餾效率，而親水性薄膜可以吸收一部份海水至薄膜內部，有利於水蒸發及鹽回溶。本實驗中所使用的碳紙即為疏水性材料，故我們將其底部浸泡於聚乙烯醇（PVA）溶液中，使薄膜底部變為親水性。為了測試薄膜是否為一面為疏水性且另一面為親水性，本實驗進行了接觸角的實驗，所謂的接觸角就是當滴水於薄膜上後，液體表面在接觸點的切線與薄膜表面之間形成的角度，若此角度小於 90 度，則此薄膜為親水性，反之若大於 90 度，則為疏水性。



（圖六）親水性與疏水性示意圖， θ 為接觸角（作者繪製）

（三）官能基鑑定

為了確認碳紙是否成功改質，我們採用傅里葉變換紅外光譜（FTIR）技術進行分析，以檢測薄膜表面是否含有 PVA 官能基。FTIR 是一種常用的光譜分析技術，可通過紅外光照射樣品並測量其分子振動模式來辨識特定的化學鍵與官能團。PVA 官能基的特徵吸收峰可以在紅外光譜圖中清楚地顯示出來，從而提供改質成功的證據。藉由確認特徵吸收峰的存在，我們能有效證明 PVA 已成功附著於碳紙薄膜表面，達到改質目的。



（圖七）傅里葉變換紅外光譜儀實際照片（作者拍攝）

（四）通量測定

在薄膜鑑定完後，本研究將進行通量測定，通量（Flux）是指液體穿過薄膜單位面積的速率，通量越大則代表此薄膜效能越佳，在本研究中，通量將作為各組薄膜效能的比較指標，單位為 $L/M^2 \times hr$ ，以 SI 制表示為 $kg/m^2 \times s$ 。

$$Flux \left(\frac{L}{M^2 \cdot hr} \right) = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot A^2}$$

Q ：累積流量（ L ）

t ：經過時間（ hr ）

A ：膜面積（ M^2 ）

本研究將碳紙裁切成直徑 2.2 公分的圓片，與燒杯杯口大小一致。實驗中，燒杯內添加 8 毫升的待淡化溶液，在一太陽光強度下進行照射，每組測試時間為預熱 20 分鐘，實驗時長一小時。通量測定過程中，將觀察電子秤上減少的重量，作為蒸發量的數據。

（五）鹽回溶測試

為了評估薄膜在失去光照後是否具備將鹽結晶重新溶解的能力，本實驗將光熱薄膜放置於 20 wt% 高濃度鹽水的環境中進行三小時的光照後，靜置於無光照的陰涼地帶，以模擬光源中斷後的回溶情況。實驗過程中，每隔一小時共進行四小時，對薄膜表面的結晶動態進行拍攝與記錄，並觀察鹽結晶的形成、逐步回溶的過程與速率。

（六）蒸發源區分測試

為了證明水分的蒸發確實是由薄膜部分造成，而非來自薄膜與燒杯杯壁之間的蒸發，本研究進行了一項測試。該測試中保留了與原實驗相同的模式，但故意移除了薄膜，從而使水分完全依賴光照加熱進行蒸發。在這一過程中，水的蒸發不再受到薄膜的影響。這種設計可以幫助確認薄膜對水分蒸發的實際貢獻，並通過比較有無薄膜的蒸發情況，進一步了解薄膜在光熱蒸發過程中的角色和重要性。

（七）國際飲用水測定

為了驗證本研究所進行的海水淡化是否有效，我們收集了淡化後的海水樣本，並使用離子層析儀（IC）對其內部的金屬離子含量進行測試。測試結果將與世界衛生組織（WHO）制定的水質標準進行比較，以確保淡化水的安全性和適用性，從而確認本研究的淡化技術是否達到預期效果。

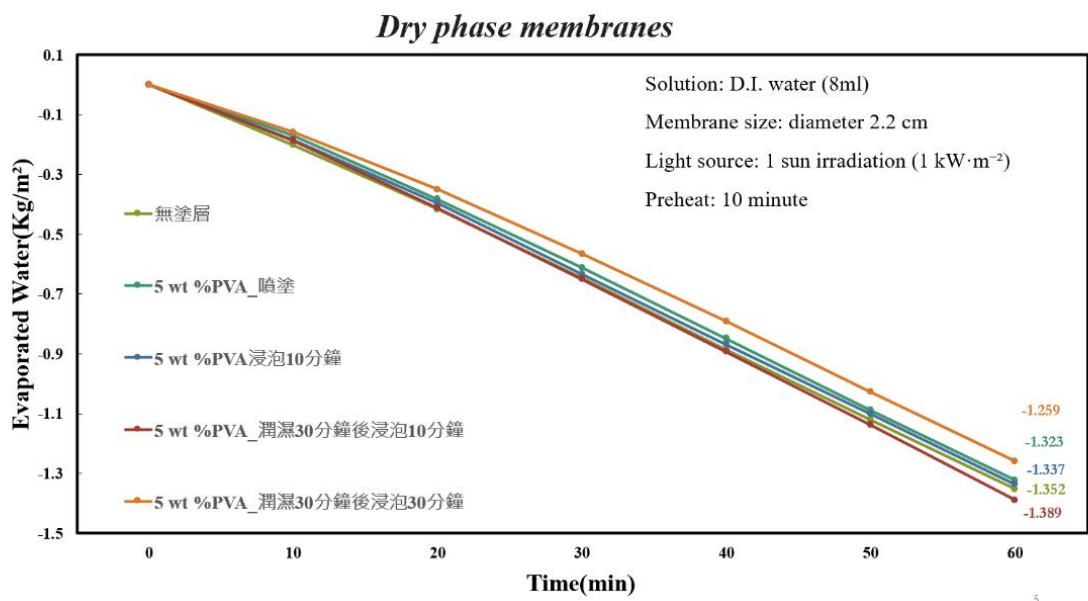
參、研究結果與討論

一、研究結果

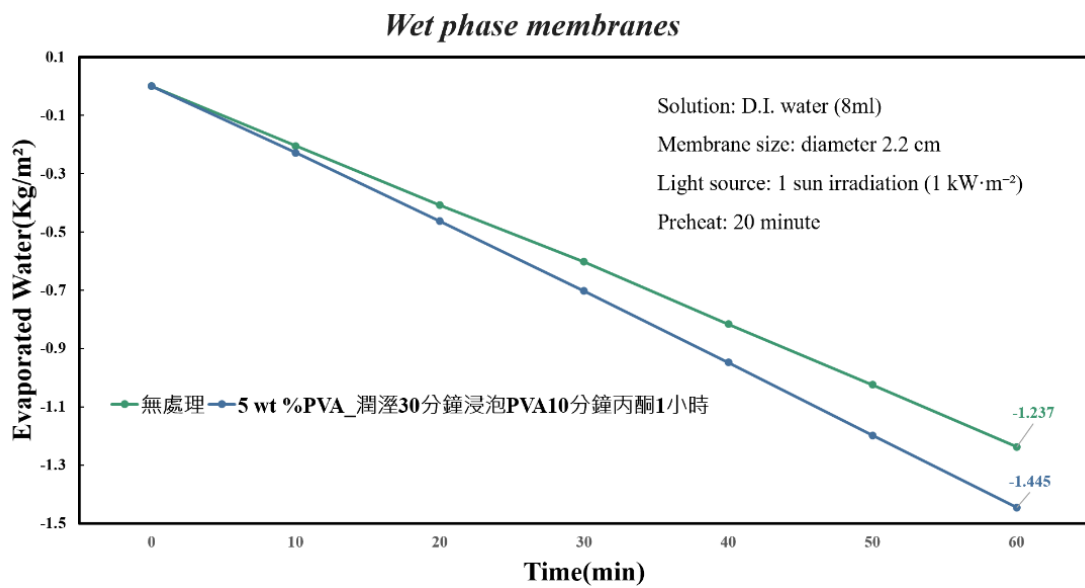
（一）製膜方式

從（圖八）中可以觀察到，經乾式成膜方法改質的薄膜與未經處理的薄膜在性能上相差無幾，而濕式成膜（圖九）所產生的薄膜則展現出顯著的效能提升。本研究經參考文獻後推測，乾式成膜製程速度較慢，導致薄膜孔隙相對較小，因此水分子穿透性較差，影響其蒸餾性能；相較之下，濕式成膜製程速度較快，產生的薄膜孔隙較大，有助於水分子的通透，進而提升薄膜效能。因此，本研究後續將採用濕式成膜法以優化薄膜製備過程。

而在乾式製膜的部分，從（圖八）可見，薄膜在浸泡 PVA 溶液 30 分鐘的效能低於浸泡 10 分鐘的情況。實驗過程中發現，因浸泡時間過長，薄膜吸附了過多 PVA 溶液，造成表層疏水膜的輕微損壞，從而影響了性能表現。因此，本研究在後續實驗中將採用浸泡 PVA 溶液 10 分鐘的製膜方法，以達到更穩定的薄膜效能。



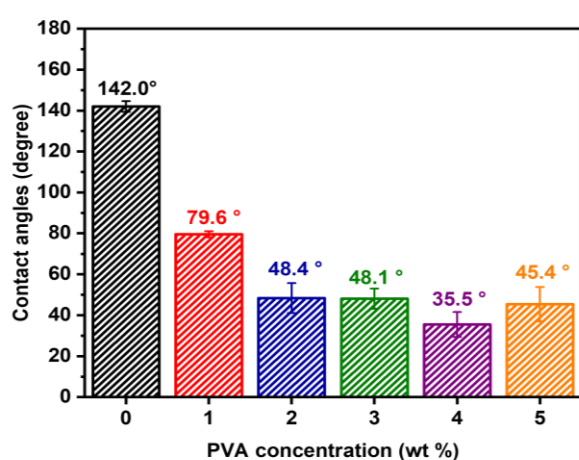
(圖八) 乾式成膜方法所作之薄膜效能 (作者繪製)



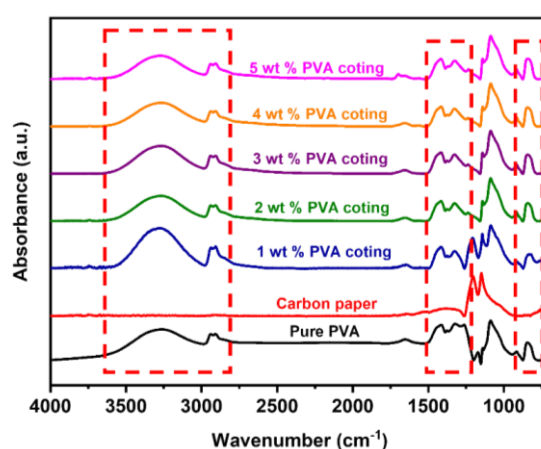
(圖九) 濕式成膜方法所作之薄膜效能 (作者繪製)

（二）接觸角測試

本實驗所需的薄膜需具備一側疏水性、另一側親水性的特性，因此本研究透過觀察薄膜的接觸角來驗證改質的成功性。從（圖十）中可以觀察到，所製備的薄膜隨著浸泡液濃度的增加而顯現出逐漸增強的親水性。然而，當濃度達到 5 wt%時，薄膜的親水性出現回升。本研究推測，此現象可能是由於 5 wt%的 PVA 塗層過厚，阻礙水分子順利通過，從而影響親水性的提升效果。



（圖十）各薄膜水接觸角數據（作者繪製）



（圖十一）各薄膜 FTIR 測試圖（作者繪製）

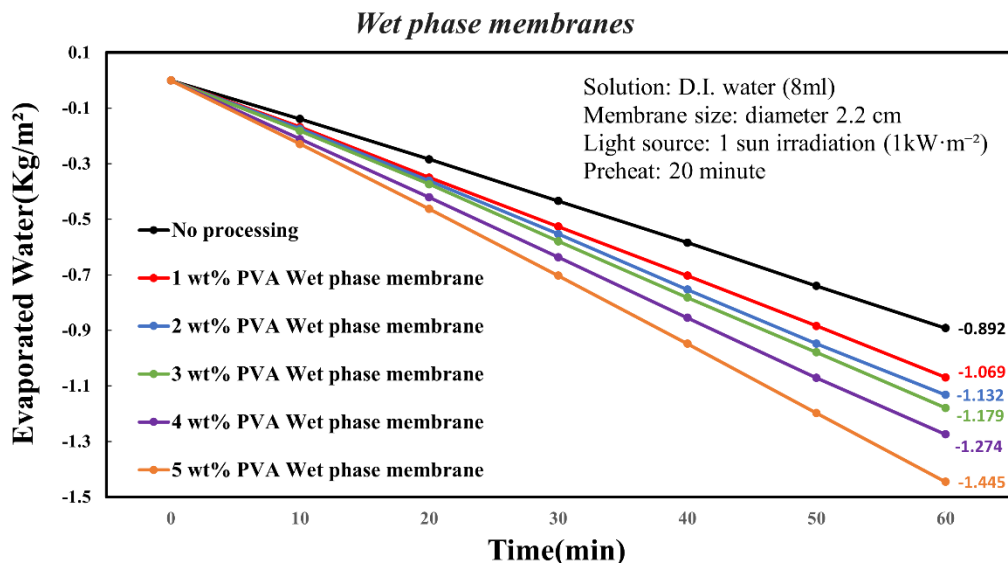
（三）FTIR 測試

為了進一步驗證碳紙是否成功改質，本研究採用了傅里葉變換紅外光譜（FTIR）技術來確認各薄膜上是否存在官能基。從（圖十一）中可以看出，與未改質的碳紙相比，各薄膜的虛線圈起部分均顯示出明顯的聚乙烯醇（PVA）官能基的特徵吸收峰，這進一步證實了本實驗成功地實現了對碳紙的改質。

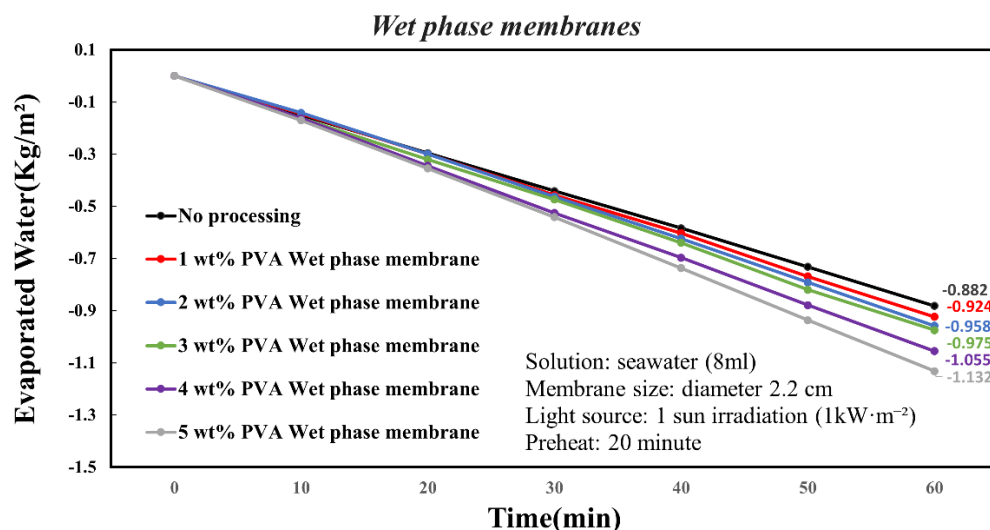
(四) 通量測定

在預熱 20 分鐘並進行一小時的實驗後可觀察到，無論是在純水或海水環境下，使用 5% PVA 濃度改質之薄膜的通量最高，隨後依據 PVA 濃度逐漸減少的薄膜通量也呈現遞減趨勢。這些結果表明，本研究成功地改質了薄膜，使其在蒸發過程中具有優良的性能。

而在海水環境中，所有薄膜的通量數據皆有所下降。根據文獻資料的查證，本研究推測這是由於鹽分顆粒沉積於薄膜孔隙，阻擋水分穿透，從而減少了海水的蒸發量。



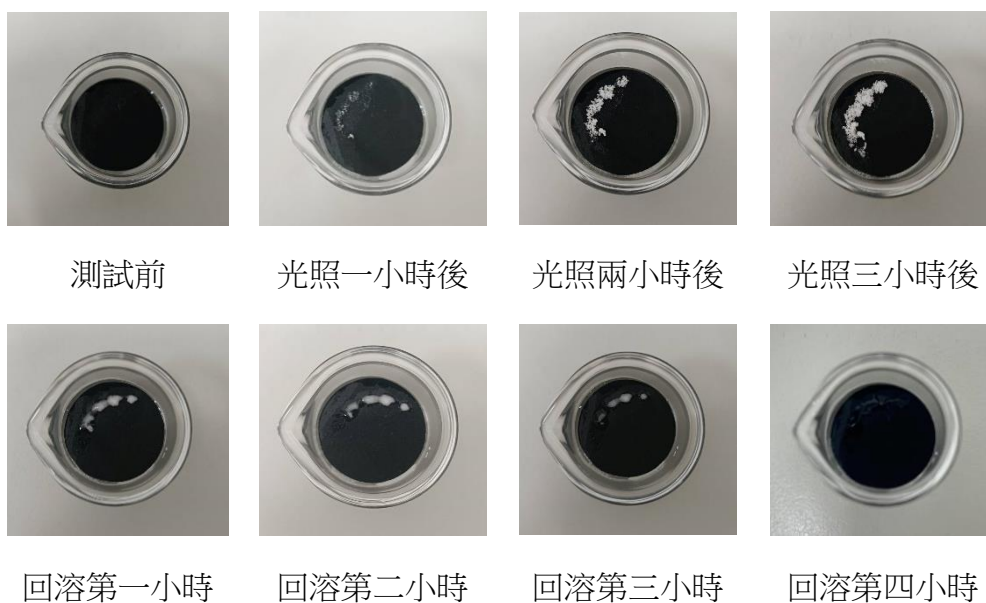
(圖十二) 純水條件下不同濃度 PVA 所製之薄膜效能比較 (作者繪製)



(圖十三) 純水條件下不同濃度 PVA 所製之薄膜效能比較 (作者繪製)

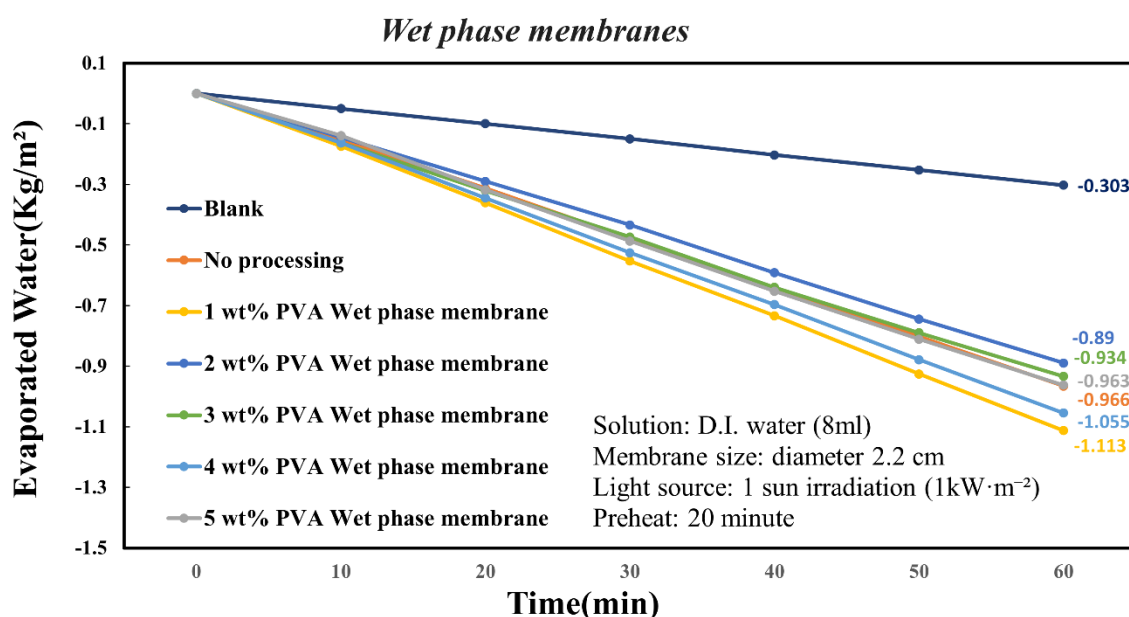
（五）鹽回溶測試（圖片皆由作者拍攝）

為了模擬薄膜在實際應用中，白天受到光照加熱、夜晚無光時是否具備鹽分回溶能力，本研究設計了此測試。在一倍太陽光強度下，將薄膜置於高濃度鹽水中照射三小時，觀察鹽結晶逐漸在薄膜表面形成。隨後，關閉光源後，鹽分子逐漸回溶，在第四小時幾乎無鹽結晶殘留於薄膜表面。結果證實本研究所製薄膜具有鹽分回溶特性，可幫助其延長使用壽命。

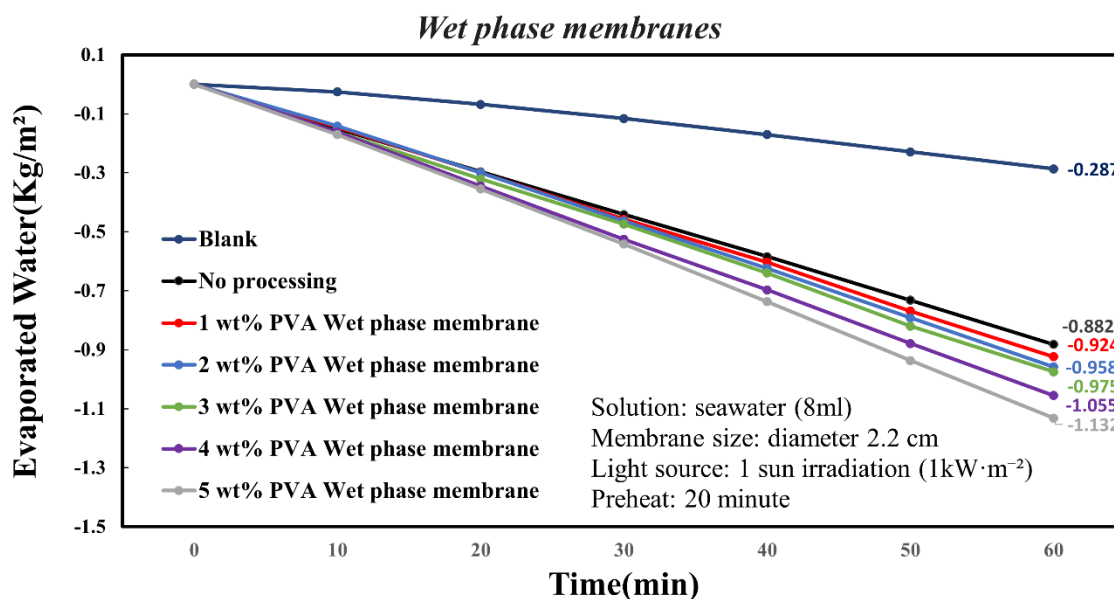


(六) 蒸發源區分測試

為了確認水分蒸發是否主要透過薄膜進行，本研究除了將薄膜裁剪至與燒杯口相同尺寸外，還設計了一項對照實驗，即在相同模式下移除裝置中的薄膜，觀察純水和海水在無薄膜情況下的蒸發量。結果顯示，無論是純水還是海水，未加入薄膜的蒸發量均遠低於加入薄膜後的數值，這證實了薄膜在蒸發過程中的確發揮了積極作用，而從杯壁與薄膜間隙所產生的蒸發量可以忽略不計。



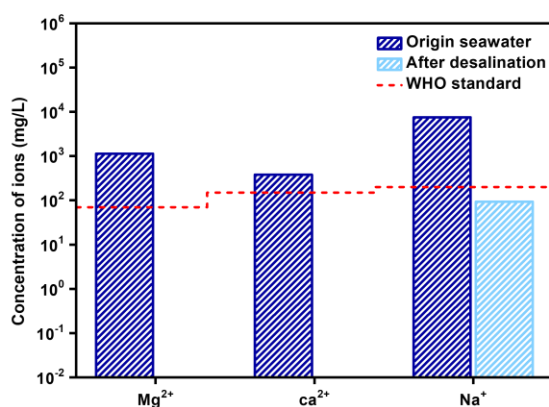
(圖十四) 純水條件下移除薄膜與不同薄膜通量的比較 (作者繪製)



(圖十五) 純水條件下移除薄膜與不同薄膜通量的比較 (作者繪製)

（七）國際飲用水測定

為了確認經淡化處理後的海水是否符合實際應用的標準，本研究將淡化後的海水樣本進行收集，並利用離子層析儀（IC）測量樣本中的金屬離子含量。隨後，將測試結果與世界衛生組織（WHO）之飲用水標準進行比較。從圖中可以觀察到，經過本研究淡化處理後的海水樣本，其各項金屬離子濃度均符合飲用水標準，顯示該技術在淡水供應上的實際應用潛力。



（圖十六）淡化後海水的金屬離子含量與 WHO 飲用水標準之比較（作者繪製）

肆、結論與應用

一、結論

本研究目的是希望透過改質碳紙，使碳紙在進行海水淡化時，能提高水的產量、減少能源的消耗，同時將鹽進行回溶。由上述實驗結果可以得出以下結論，如下所示：

- （一）濕式成膜製作方式因成膜速度快、孔洞較大，能顯著提升薄膜通量表現。
- （二）在 WCA 分析中發現 1-4 wt % PVA 濃度下，隨著濃度上升，接觸角的數值下降，親水性上升；但在 5 wt % 的濃度下因為親水層太厚會滯留水分導致接觸角些微上升。
- （三）在 FTIR 分析中可以發現 PVA 到 1-5 wt % 皆有 PVA 特徵峰，證明改質成功。
- （四）在通量測定中可以看到經過改質的薄膜，通量更好。
- （五）隨著 PVA 親水層濃度越高，所表現的純水通量越高。
- （六）在鹽回溶測試中可以證明本研究之薄膜具有回溶特性。
- （七）在國際飲用水測定中可以觀察到，本研究所淡化之水符合國際之標準

總結來說，通過對碳紙進行 PVA 改質，本研究成功提升了碳紙在海水淡化過程中的效能和鹽回溶特性。儘管 PVA 濃度過高會導致性能下降，但在適當濃度範圍內，改質碳紙展現出顯著的性能優勢。這一技術不僅為海水淡化提供了新的解決方案，還可能應用於其他需要高效水處理的領域，如工業廢水處理和可再生水資源利用。

二、應用

本研究透過改質碳紙顯著提升了海水淡化技術的效率，以下是本研究成果在實際應用中的幾個重要方向：

- （一）海水淡化技術的優化
- （二）工業廢水處理
- （三）可再生水資源的開發

本研究中開發的 **PVA** 改質碳紙，在海水淡化、工業廢水處理、能源效率提升等多個領域具備廣泛的應用潛力。它不僅能提高水處理效率，還能降低能源消耗與設備成本，為水資源管理與環保提供了更具經濟效益的解決方案。

伍、參考資料

- [1]全球水資源：三分之一人類「高度缺水」(2019 年 8 月 7 日)。BBC 。取自 <https://reurl.cc/rmkok>
- [2] 翰林雲端學院。(2012)。高中化學 - 逆滲透。
- [3] 創新水科技。(2018)。薄膜蒸餾--創新水科技研發服務網。取自 <https://reurl.cc/VNgKNR>
- [4] Lawson, K. W., & Lloyd, D. R. (1997). Membrane distillation. *Journal of membrane Science*, 124(1), 1-25.
- [5] Gostoli, C. (1999). Thermal effects in osmotic distillation. *Journal of Membrane Science*, 163(1), 75-91.
- [6] Ahmed, F. E., Khalil, A., & Hilal, N. (2021). Emerging desalination technologies: Current status, challenges and future trends. *Desalination*, 517, 115183.
- [7] Zhang, Y., Li, K., Liu, L., Wang, K., Xiang, J., Hou, D., & Wang, J. (2020). Titanium nitride nanoparticle embedded membrane for photothermal membrane distillation. *Chemosphere*, 256, 127053.
- [8] Shalaby, S. M., Kabeel, A. E., Abosheisha, H. F., Elfakharany, M. K., El-Bialy, E., Shama, A., & Vidic, R. D. (2022). Membrane distillation driven by solar energy: a review. *Journal of Cleaner Production*, 132949.
- [9] Shim, W. G., He, K., Gray, S., & Moon, I. S. (2015). Solar energy assisted direct contact membrane distillation (DCMD) process for seawater desalination. *Separation and Purification Technology*, 143, 94-104.
- [10] Shafieian, A., Roostaei, A., Behnam, P., & Khiadani, M. (2022). Performance analysis of a solar-driven integrated direct-contact membrane distillation and humidification – dehumidification system. *Energy Conversion and Management*, 274, 116479.
- [11] Zhang, X., Koirala, R., Date, A., & Jegatheesan, V. (2022). Modelling and simulation of flux prediction and salinity variation in direct contact membrane distillation for seawater desalination and brine treatment. *Desalination*, 540, 116021.

- [12] Eykens, L., Hitsov, I., De Sitter, K., Dotremont, C., Pinoy, L., Nopens, I., & Van der Bruggen, B. (2016). Influence of membrane thickness and process conditions on direct contact membrane distillation at different salinities. *Journal of Membrane Science*, 498, 353-364.
- [13] Abid, M. B., Wahab, R. A., Salam, M. A., Moujдин, I. A., & Gzara, L. (2023). Desalination technologies, membrane distillation, and electrospinning, an overview. *Heliyon*, 9(2).
- [14] AbdulKadir, W. A. F. W., Ahmad, A. L., Seng, O. B., & Lah, N. F. C. (2020). Biomimetic hydrophobic membrane: A review of anti-wetting properties as a potential factor in membrane development for membrane distillation (MD). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 91, 15-36.
- [15] Cao, S., Wu, X., Zhu, Y., Gupta, P., Martinez, A., Zhang, Y., ... & Singamaneni, S. (2021). MXene aerogel for efficient photothermally driven membrane distillation with dual-mode antimicrobial capability. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(39), 22585-22596.
- [16] World Meteorological Organization [WMO] (2022), State of Global Water Resources report (WMO-No. 1333) Retrieved from <https://library.wmo.int/records/item/68473-state-of-global-water-resources-report-2022>
- [17] 朱芮甯 黃星齊 鄧歲澤 (2023)。海水淡化－探討光熱材料對光熱薄膜蒸餾技術的影響。臺北市 112 年度中等學校學生科學研究獎助 化學科三等獎。臺北市立麗山高級中學。

【評語】 100001

這項研究探討了碳紙和聚乙烯醇（PVA）複合材料，利用創新的光熱薄膜應用在太陽蒸發器、海水淡化以及相關抗鹽方面的應用，建議進行更多的長期實驗，以確保薄膜在不同環境條件下的穩定性和耐用性。