

台灣化學工程學會

第五十六屆理監事會

- | | | | |
|-------|-----|---------------|-----|
| 理事長： | 李篤中 | 財務委員會主任委員： | 孔祥雲 |
| 副理事長： | 陳郁文 | 會務促進委員會主任委員： | 李篤中 |
| 常務理事： | 孔祥雲 | 獎章委員會主任委員： | 呂維明 |
| | 陳寶郎 | 學術委員會主任委員： | 黃炳照 |
| 名譽理事： | 林河木 | 訓練委員會主任委員： | 李亮三 |
| 理事： | 呂世源 | 國際委員會主任委員： | 胡育誠 |
| | 林俊華 | 產業委員會主任委員： | 郭佳輝 |
| | 曹恆光 | 教育委員會主任委員： | 萬其超 |
| | 黃炳照 | 能源科技委員會主任委員： | 劉振邦 |
| | 鄭信義 | 創意活動委員會主任委員： | 吳和生 |
| 候補理事： | 陳信文 | 會誌及論文委員會主任委員： | 鄧熙聖 |
| 常務監事： | 林福伸 | 會刊及叢書委員會主任委員： | 李明哲 |
| 監事： | 周正堂 | | |
| 候補監事： | 蔡德華 | | |
| 秘書長： | 林俊雄 | | |

台灣化學工程學會會刊

- | | |
|------|---|
| 發行人 | 李篤中 |
| 總編輯 | 李明哲 |
| 副總編輯 | 周宜雄 |
| 編輯委員 | 方旭偉 李文乾 李玉郎 李秋煌 呂幸江 何啟東 周正堂
林慶炫 胡啟章 倪聖中 陳秀美 黃延吉 陳信龍 張鑑祥
童國倫 詹東曉 楊乾信 錢義隆 諶玉真 (依姓名筆劃排序) |

經理編輯 王孟菊 陳良益
發行 台灣化學工程學會

地址：10046 台北市重慶南路一段 7 號 9 樓

電話：02-2375-4456 傳真：02-2370-2221

郵政劃撥第 00038530，戶名【台灣化學工程學會】。

訂閱一年六期新台幣 900 元。（國內平郵投寄，國外郵資另加）

網址 //www.twiche.org.tw

電子信箱 twiche@twiche.org.tw

印刷 祥郁印刷有限公司

地址：108 台北市萬華區西園路二段 140 巷 6 弄 1 號

電話：02-2306-2425 傳真：02-2306-6541

E-mail：shiny.fount@seed.net.tw

目 錄

能源工程專刊

能源工程專輯前言	何啟東	1
煤化學工場節能潛力評估	賴慶智 · 鄭旭翔 · 陳丁碩 · 陳誠亮	2
微藻減碳與微藻生質能源 ····	陳慶隆 · 陳俊延 · 張嘉修 · 林志生 · 陳俊達 · 林勳佑	14
節能捕碳之薄膜分離技術的關鍵材料、製程與系統開發	李魁然 · 賴君義 · 童國倫 · 莊清榮 · 胡蓓傑	28
水泥與發電整合廠之二氧化碳捕獲成本分析	周揚震 · 陳威丞 · 徐恆文 · 柳萬霞 · 沈政憲 · 歐陽湘	37
生質精煉化學品最適化製造途徑之整合供應鏈系統決策資訊平臺	Antonis C. Kokossis · Aidong Yang · Marinella Tsakalova · 林大溱	45
應用於化石燃料重組產氫器之高性能鈀膜管製備	紀岩勳 · 林育立 · 林孟昌 · 汪俊延 · 黃金花	55
非鈀濾氫金屬薄膜開發現況與未來展望	林孟昌 · 紀岩勳 · 林育立 · 黃廷位 · 楊昌中	64
太陽能驅動薄膜蒸餾海水淡化系統之設計與操作	陳逸航 · 張煖 · 何啟東 · 張舜傑 · 洪浩嘉	86
化工專欄		
新技術報導	李秋煌	96
國內化工短訊	倪聖中	99
台灣化工學會入會／升級申請表	學 會	101
編後語	李明哲 · 周宜雄	103

能源工程專輯前言

何 啟 東

淡江大學化學工程與材料工程學系

能源是維持現今社會運作不可或缺的元素，然而基於能源之有限性與環境保護之必要性，更有效的能源利用及更高的能源轉換效率，隨著經濟的持續發展已成為無可避免的重要課題。能源工程技術的創新與開發可以協助我們具體地面對與解決這些議題。

能源工程技術之範疇涵蓋極廣，例如節能與能效提升、替代與再生能源、能源轉換程序與裝置、能量儲存技術等之開發與應用。本專輯邀請八位相關領域的專家學者，針對能源工程技術之開發，提出實務性與實用性的研究成果，包括：(1) 台灣大學化工系陳誠亮教授等在『煤化學工場節能潛力評估』一文中評估煤化學工場之節能潛力，深入探討了以雙效式冰水機取代現有單效式冰水機，對蒸汽耗用之影響及成本效益，並提出了兩種蒸汽增壓的節能設計。(2) 成功大學化工系張嘉修教授等在『微藻減碳與微藻生質能源』一文中說明了生物法之減碳技術，除了可避開地質法與化學法進行捕碳及固碳所造成環境與安全方面的爭議外，微藻減碳技術因面積需求小及所產生藻體可進行後續的生質能生產，已成為全球矚目焦點和具有商業價值之衍生品。文中詳述了由成功大學、交通大學與中鋼公司所形成的微藻團隊之研發成果。(3) 中原大學化工系賴君義教授等在『節能捕碳之薄膜分離技術的關鍵材料、製程與系統開發』一文中介紹如何開發高性能 CO₂ 捕獲模組與 O₂/N₂ 氣體分離薄膜。高性能 O₂/N₂ 分離膜材開發以具備高氣體透過性能之高分子薄膜為主，CO₂ 捕獲模組之研發則結合了膜材改質、模組研發，以及製程與系統開發三大技術平台。(4) 工業

技術研究院綠能與環境研究所周揚震博士等在『水泥與發電整合廠之二氧化碳捕獲成本分析』一文中介紹了應用鈣迴路系統於水泥與發電整合場之 CO₂ 捕獲成本，並探討在該系統中建置常壓及高壓水合反應設備對捕獲成本之影響。(5) 東海大學化工系林大溱教授在『生質精煉化學品最適化製造途徑之整合供應鏈系統決策資訊平臺』一文中介紹。(6) 清華大學材料科學與工程學系黃金花教授等在『應用於化石燃料重組產氫器之高性能鈇膜管製備』一文中介紹了結合薄膜分離法之重組產氫器技術，並使用複合膜方式改善鈇膜氫氣滲透率與機械強度。此外，更進一步將之應用於化石燃料重組產氫系統，提升了轉化率與能源效率，並達成節能減碳的目的。(7) 工業技術研究院綠能與環境研究所林孟昌博士等在『非鈇濾氫金屬薄膜開發現況與未來展望』一文中針對非鈇膜之合金濾氫膜之開發現況進行概略性的介紹，並對非鈇膜合金濾氫膜未來開發方向提供了具體建議。(8) 淡江大學化材系何啟東教授等在『太陽能驅動薄膜蒸餾海水淡化系統之設計與操作』一文中，以綠色程序設計為導向，整合太陽能熱能與薄膜蒸餾海水淡化模組，設計太陽能輔助加熱海水淡化系統，並進行最適化設計與可操作度分析。

本專輯共邀請八位能源工程領域專家來撰寫相關性文章，內容包含了回顧性與原創性之論文。本人在此由衷的感謝八位教授及其研究團隊對於本專輯的賜稿。希望藉由專輯報導，能引發讀者對能源工程技術及相關研究發展之興趣，並能有助於能源工程技術的前瞻性發展。

太陽能驅動薄膜蒸餾海水淡化系統 之設計與操作

陳逸航* 張煖 何啟東 張舜傑 洪浩嘉
淡江大學化學工程與材料工程學系

一、簡介

溫室效應的影響，造成全球氣候變遷，至使部份地區水資源匱乏。為有效解決此問題，結合太陽熱能驅動薄膜蒸餾海水淡化之技術，近年來成為研究之重點^[1]。薄膜蒸餾依其產生淡水之薄膜兩端驅動力，可分為：溫度差—以直接接觸式薄膜蒸餾 (DCMD)^[2]與氣隔式薄膜蒸餾 (AGMD)^[1]為代表；壓力差—以真空式薄膜蒸餾 (VMD)^[3]為代表。El-Bourawi *et al.*^[4]比較各種類型式薄膜蒸餾海水淡化之優缺點，但未針對系統之設計與操作進一步的分析。本研究分別針對直接接觸式與真空式薄膜蒸餾模組進行探討，以不同驅動力之太陽能輔助薄膜蒸餾海水淡化系統，進行分析其設計與可操作度區域，有效為此兩種驅動力之薄膜蒸餾海水淡化系統，定義其可操作度。

二、理論分析

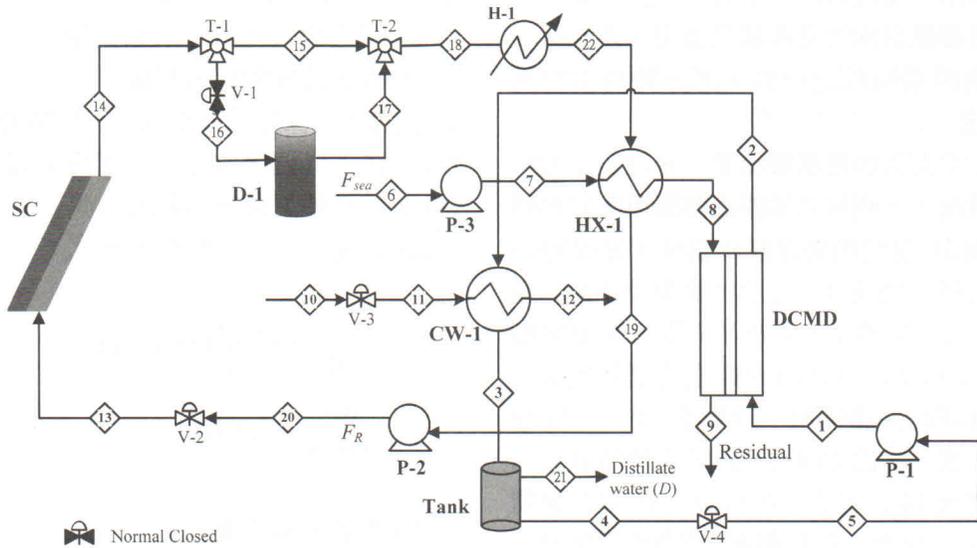
2-1 系統描述

2-1-1 直接接觸式薄膜蒸餾 (DCMD) 系統描述

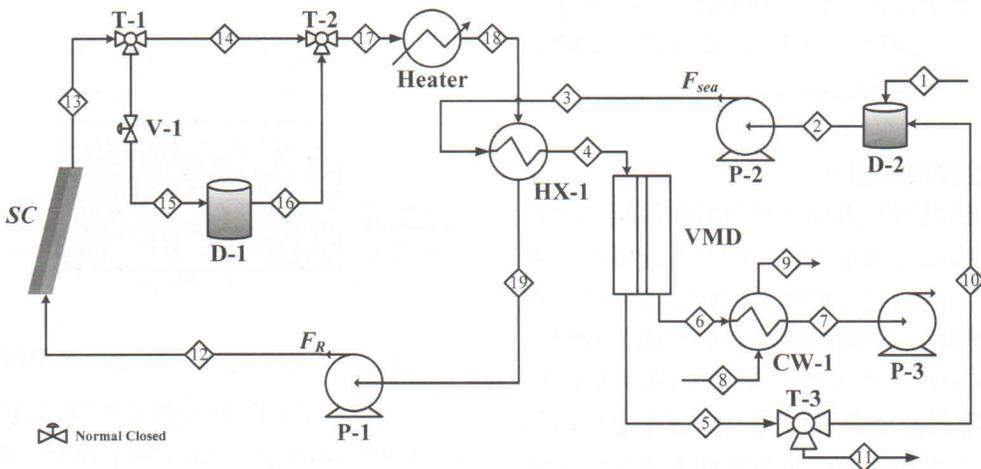
此節所探討之太陽能驅動薄膜海水淡化系統，所包含內部之單元有太陽能集熱器、儲熱槽、熱交換器及直接接觸式薄膜等單元

(如圖 1 所示)。將圖一之系統分成兩部份探討。以熱交換器 (HX-1) 作為分界點，右半部為直接接觸式薄膜蒸餾海水淡化系統，海水由右側泵 (P-3) 進入物流 7，接著再進入熱交換器管側獲得太陽熱能，使海水溫度上升至指定溫度後，通入至直接接觸式薄膜，通入之海水於直接接觸式薄膜蒸餾模組的左側逐漸蒸氣化。由於薄膜表面為疏水性多孔薄膜材質 (PP 膜)，液態流體無法通過薄膜孔洞，唯利用蒸氣的形式才可進入薄膜孔洞。因此在薄膜兩側所提供溫度差異，造成水蒸氣壓差而產生傳輸現象，通過薄膜之蒸氣在薄膜另一側冷凝，由物流 2 流出，再進入冷凝器使溫度冷卻至 35°C，由桶槽將淡化水溢流分離，其餘的水再進入泵 (P-1) 作為循環，以達海水淡化目的，剩餘海水則由物流 9 排出。

左半部主要為加熱循環流體，在達到淡水產能穩定情況下，太陽能集熱器所吸收熱能達到物流 22 之設定溫度。如隨時間獲得過多能量時，由物流 14 透過分流裝置 (V-1 閥)，將部分流體經由物流 16 進入至儲熱槽 (D-1)，目的為儲存白天由太陽能提供過多能量供應夜晚使用。儲熱槽 (D-1) 採取溢流方式，物流 16 與物流 17 之體積流量相同，物流 15 與溢流物流 17 經由三通閥



圖一 太陽能驅動直接接觸式薄膜蒸餾海水淡化系統流程圖 (DCMD)



圖二 太陽能驅動真空式薄膜蒸餾海水淡化系統流程圖 (VMD)

(T-2) 混合後，若未達到設定溫度時，藉由電加熱器提供熱源，使物流 22 達到設定溫度，再進入熱交換器殼側 (HX-1)，將能量傳至冷海水側，再經由物流 19 進入泵 (P-2) 加壓後，由物流 13 再進入太陽能集熱器形成加熱循環流程。

2-1-2 真空式薄膜蒸餾 (VMD) 系統描述

圖二為太陽能驅動真空式薄膜蒸餾海水淡化系統，如同直接接觸式薄膜蒸餾系統一

樣，此系統可分為兩部份。以熱交換器 (HX-1) 為分界點，右半部為真空式薄膜蒸餾海水淡化系統，此時海水由右側泵 (P-2) 進入物流 3，於熱交換器管側中獲得太陽熱能使溫度上升，接著通入真空式薄膜蒸餾模組，此時海水於真空式薄膜蒸餾模組的左側產生蒸氣化，藉由真空幫浦抽氣產生負壓，使水蒸氣由物流 6 抽出，在模組外部加以冷凝，以達到海水淡化目的。濃縮後

之海水由於溫度較高，故設計一回流裝置，將部分濃縮海水回流與較低溫海水做混合，以達到能量回收之目的。部分物流由物流 11 排出。

左半部為加熱循環流體，在設定產能為定值情況下，利用太陽能集熱器所吸收熱能使物流 18 達到所需之設定溫度，當獲得過多能量時，物流 13 透過分流裝置 (V-1 閥)，將部分流體導入物流 15 進入至儲熱槽 (D-1)，以儲存白天太陽熱能之過剩能量，以供應夜間操作使用。儲熱槽 (D-1) 採取溢流方式，物流 15 與物流 16 之體積流量相同。物流 14 與溢流之物流 16，經由三通閥 (T-2) 混合後，若未達所需之設定溫度時，需藉由電加熱器提供熱源。物流 18 達到設定溫度後，再進入熱交換器殼側 (HX-1)，將能量傳至冷海水側，再經由物流 19 進入泵 (P-1) 加壓後，由物流 12 再進入太陽能集熱器形成加熱循環流程。

2-2 理論模式建立

本研究針對兩種不同薄膜蒸餾模組與太陽能驅動結合海水淡化系統之各設備建立數學模式，內部之主要單元包括：太陽能集熱器、儲熱槽、熱交換器、直接接觸式薄膜蒸餾 (DCMD) (真空式薄膜蒸餾 (VMD))，利用質能平衡方程式，模擬並建立各設備尺寸大小、設備成本及操作成本分析，使用化工程序模擬軟體 Aspen Custom Modeler® (ACM) 進行內部數值求解，以模擬兩種不同型式薄膜模擬之整廠運作狀態。

2-2-1 太陽能集熱器模組及數學模式

太陽能集熱器屬於系統中重要設備，從圖三可知，具有一層吸收板，其材質為提高輻射熱能吸收率的銅管。流體以單向強制對流方式流過，太陽輻射熱能經由吸收板傳遞至內部流體，使流體溫度提升。

本模式主要引用 Chang *et al.*^[5]所建立理論模組，將流體與吸收板能量變化分別計

算。模式假設及質能平衡方程式如下所示：

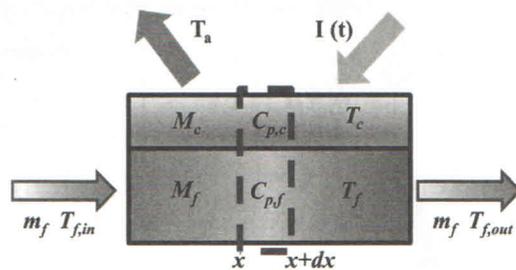
- (1) 忽略吸收板內銅管所佔面積，其日照的面積等於吸收板的面積。
- (2) 流體溫度保持在 95°C 以下，且無相變化。
- (3) 流體在各個吸收管內流速皆相同。
- (4) 系統流體對外界無熱能散失。

(a) 太陽能吸收板能量平衡式：

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{A_{sc}U}{M_c C_{p,c}} \left(\frac{BI(t)}{U} + T_a(t) - T_c \right) - \frac{A_{sch}}{M_c C_{p,c}} (T_c - T_f) \quad (1)$$

(b) 流體能量平衡式：

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = -L \frac{m_f}{M_f} \frac{\partial T_f}{\partial x} + \frac{A_{sch}}{M_f C_{p,f}} (T_c - T_f) \quad (2)$$



圖三 太陽能集熱器結構示意圖

太陽能吸收板對流體的熱傳導係數 (k)，並利用納塞數 (Nu) 與雷諾數 (Re)，計算熱對流係數 (h)，物理參數設定如表一。

$$k = -0.3838 + 5.254 \times 10^{-3} T_f - 6.369 \times 10^{-6} T_f^2 \quad (3)$$

$$h = \frac{k \cdot Nu}{2b_f} \quad (4)$$

其中納塞數 (Nusselt number) 與雷諾數

(Reynolds number) 關係式如下所示：

$$Nu = 5.385 + 0.148Re \frac{b_f}{L_{sc}} \quad (Re < 2550) \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (6)$$

表一 太陽能集熱器物理參數設定

物理參數，符號(單位)	數值
集熱器長寬比， L_{sc}/W_{sc}	14
集熱器通道高度， h_{sc} (cm)	0.01
流體通道高度， h_f (cm)	0.01
金屬吸收板比熱， $C_{p,c}$ (J/kg-K)	460
加熱流體比熱， $C_{p,f}$ (J/kg-K)	4180
集熱器吸收係數， B	0.8
總括熱傳係數， U (W/m ² -K)	4
水力直徑， D_h (cm)	1.99

2-2-2 儲熱槽模組及數學模式

由於太陽能日照輻射為系統干擾變數，因此使用儲熱槽儲存過剩之日照熱能，其操作可使海水淡化系統之操作時間增長。槽內使用水作為循環流體，設定初始溫度為 50°C。模式假設如下所示：

- (1) 儲熱槽內流體無相變化發生。
- (2) 系統為完全絕熱。

儲熱槽質量與能量平衡方程式分別為：

(a) 質量平衡式：

$$\frac{dM}{dt} = m_{f,in} - m_{f,out} \quad (7)$$

(b) 能量平衡式：

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{m_f(T_1 - T_w) + m_{f,in}(T_2 - T_w)}{M} \quad (8)$$

2-2-3 熱交換器模組及數學模式

太陽能驅動薄膜蒸餾海水淡化系統中，

熱交換器可傳送太陽熱能予薄膜蒸餾系統之熱海水側之流體。本研究採用冷熱流體逆流管殼式熱交換器。將熱交換器內之熱流體與冷流體作能量平衡，其模式假設如下所示：

- (1) 系統操作溫度範圍小，假設 C_p 為定值。
- (2) 熱交換器內之冷熱物流無相變化發生。
- (3) 系統為絕熱操作。

冷熱流體比熱假設為 4180 (J/kg-K)。總括熱傳係數考量冷熱物流對熱對流與熱交換器管壁之熱傳導為 280 (W/m²-K)。針對熱交換器之熱流體與冷流體能量平衡式如下所示：

(a) 熱流體能量平衡式：

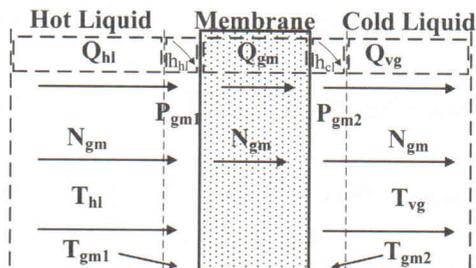
$$\frac{\partial T_{hl}}{\partial t} = L \frac{m_{f,hl}}{M_{hl}} \left(\frac{\partial T_{hl}}{\partial x} \right) - \frac{A_{HX} U}{M_{hl} C_{p,hl}} (T_{hl} - T_{cl}) \quad (9)$$

(b) 冷流體能量平衡式：

$$\frac{\partial T_{cl}}{\partial t} = L \frac{m_{f,cl}}{M_{cl}} \left(\frac{\partial T_{cl}}{\partial x} \right) - \frac{A_{HX} U}{M_{cl} C_{p,cl}} (T_{hl} - T_{cl}) \quad (10)$$

2-2-4 直接接觸式薄膜模組 (DCMD) 數學模式

直接接觸式薄膜蒸餾模組，以多孔性薄膜隔開冷熱流體，藉由薄膜兩側介面之溫差所造成蒸氣壓差，產生蒸氣狀態之水傳輸。



圖四 直接接觸式薄膜結構示意圖

本研究採用 Chang *et al.* [6] 已建立直接接觸式薄膜蒸餾模組之一維模式，針對垂直於薄膜之截面，模式中考量了在熱流體、薄膜、冷流體之質傳與熱傳，包括相變化之熱效應。這些效應如圖四。模式中假設如下：

- (1) 多孔性疏水薄膜內均為氣相，且膜內充滿水氣與空氣。
- (2) 熱流體與冷流體均為塞狀流 (plug flow)，流動方向的橫切面具均勻之溫度、速度與組成。且與薄膜間之熱傳與質傳可以用膜理論 (film theory) 描述，並使用關聯式決定熱、質傳係數。
- (3) 液態傳至介面上的質量流率等於汽化質量之質量流率。
- (4) 系統無壓損。

統御方程式如下所示：

(a) 質量與能量通量

$$N_{gm,w} = \frac{k_{gm}}{RT_{gm,avg}} (P_{gm1} - P_{gm2}) \quad (11)$$

$$Q_{hl} = h_{hl} (T_{hl} - T_{gm1}) \quad (12)$$

$$Q_{N,hl} = N_{hl,w} C_{p,hl} (T_{hl} - T_{gm1}) \quad (13)$$

$$h_{vap,gm1} = N_{hl,w} \Delta H_{vap,w} \quad (14)$$

$$Q_{gm} = [\epsilon h_m + (1 - \epsilon) h_{mem}] (T_{gm1} - T_{gm2}) \quad (15)$$

$$Q_{cl} = h_{cl} (T_{gm2} - T_{cl}) \quad (16)$$

$$Q_{N,cl} = N_{cl,w} C_{p,cl} (T_{gm2} - T_{cl}) \quad (17)$$

$$h_{vap,gm2} = N_{cl,w} \Delta H_{vap,w} \quad (18)$$

(b) 質量與能量平衡

$$N_{hl,w} = N_{gm,w} \quad (19)$$

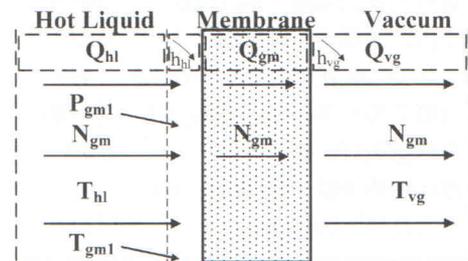
$$N_{cl,w} = N_{gm,w} \quad (20)$$

$$Q_{gm} = Q_{hl} + Q_{N,hl} - h_{vap,gm1} \quad (21)$$

$$Q_{gm} = Q_{cl} + Q_{N,cl} + h_{vap,gm2} \quad (22)$$

2-2-5 真空式薄膜模組 (VMD) 數學模式

真空式薄膜蒸餾模組是以多孔性薄膜隔開熱流體與真空層，藉由多孔性薄膜兩側介面之壓力差，使得蒸氣狀態之水通過疏水性薄膜，進入真空層後，藉由真空幫浦抽出，在外部進行冷凝形成淡水。



圖五 真空式薄膜結構示意圖

本研究採用 Lawson 和 Lloyd [3] 建立之理論模式，針對熱流體、薄膜及真空端建立質能平衡及相變化之熱效應，這些效應如圖五。其模式主要假設如下所示：

- (1) 流道方向之熱傳量遠小於橫向薄膜之熱傳量，因此忽略流道方向之熱傳量。
- (2) 熱流體與冷流體均為塞狀流，在流動方向的橫切面具均勻之溫度、速度與組成。薄膜間之熱傳與質傳可以用膜理論描述，利用關聯式決定熱、質傳係數。
- (3) 真空式薄膜蒸餾模組為絕熱操作。
- (4) 多孔性疏水薄膜內均為氣相，且膜內充滿水氣與空氣。
- (5) 液態傳至介面上的質量流率等於汽化質量之質量流率。
- (6) 薄膜蒸餾內之流體流動忽略壓損。

統御方程式如下所示：

(a) 質量與能量通量

$$N_{gm,w} = \frac{\Delta P}{\delta_m R T_{gm,avg}} \left([K_0 \frac{8RT_{vp}}{\pi M_{vp}}]^{0.5} + B_0 \frac{P_{gm}}{\mu} \right) \quad (23)$$

$$Q_{hl} = h_{hl} (T_{hl} - T_{gm1}) \quad (24)$$

$$Q_{hl,w} = N_{hl,w} C_{phl} (T_{hl} - T_{gm1}) \quad (25)$$

$$h_{vap,gml} = N_{hl,w} \Delta H_{vap,w} \quad (26)$$

$$Q_{gm} = [\epsilon h_m + (1 - \epsilon) h_{mem}] (T_{gm1} - T_{gm2}) \quad (27)$$

(b) 質量與能量平衡

$$N_{hl,w} = N_{hm,w} \quad (28)$$

$$Q_{gm} = Q_{hl} + Q_{N,hl} - h_{vap,gml} \quad (29)$$

2-3 論模式驗證

為確認所建立之薄膜蒸餾模組之數學模式正確性，本研究引用 Lawson 與 Lloyd^[2,3] 文獻中所提供之實驗設備尺寸、薄膜資料、操作條件進行模式驗證，比較模擬數據與文獻之實驗結果後可發現相當吻合。

三、最適化設計

3-1 設計變數

Luyben^[7]提出之設計自由度分析方法，分析程序內總方程式與總變數，利用以下方程式找出設計自由度 (N_D)：

$$N_D = N_{variables} - N_{equations} \quad (30)$$

根據以上方程式計算出 VMD 與 DCMD 系統均需決定 5 個設計自由度。

3-2 目標函數

分析兩系統之自由度，得知各有 5 個自由度需被決定，在此設定為最適化設計變數。太陽能驅動海水淡化系統之設計，最適化目標函數為：最低年總成本為目標。為達成此目標，將選定 5 個設計自由度 (F_{sea} , F_{sc} , $F_{R1}(P_v)$, A_{SC} , A_{MD})，以進行最適化設計，此程序中考量工作流體在被加熱至高溫時產生沸騰現象，故限制太陽能集熱器出口溫度上限設為 95°C，以及設置系統產能固定於 2000 kg/hr，而 VMD 系統多考量濃縮海水之熱能再利用以及不使用額外冷凝水之成本，故限制排放海水濃度及真空端出口溫度上限為 0.45 wt% 和 45°C。其數學表示式如下：

直接接觸式薄膜蒸餾系統 (DCMD)：

$$\text{Minimize}_{x \in \Omega} (\text{TAC})$$

$$\Omega = \{F_{sea}, F_{sc}, F_{R1}, A_{SC}, A_{MD}\} \quad (31)$$

subject to

$$T_{sc,out} < 95^\circ\text{C}, \quad D = 2000 \text{ kg/hr}$$

真空式薄膜蒸餾系統 (VMD)：

$$\text{Minimize}_{x \in \Omega} (\text{TAC})$$

$$\Omega = \{F_{sea}, F_{sc}, P_v, A_{SC}, A_{MD}\} \quad (32)$$

subject to

$$T_{sc,out} < 95^\circ\text{C}, \quad T_{vac,out} < 45^\circ\text{C}$$

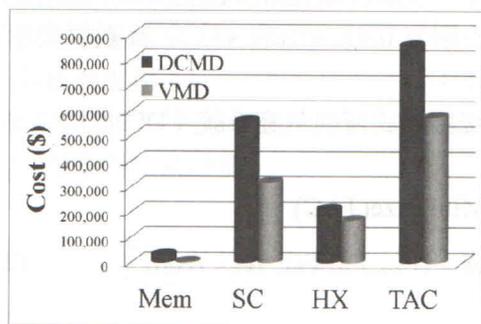
$$C_{NaCl} < 0.45\%, \quad D = 2000 \text{ kg/hr}$$

(33)

3-3 最適化結果

本研究利用 ACM 模擬軟體中之序列二次規劃可行路徑最適化法，進行最適化求解。在不同日照強度下 (100-1000 W/m²) 求得 DCMD 與 VMD 於日照強度 500 W/m²

的情況下，無須額外使用電加熱器，可得最低年總成本 \$857,990 和 \$576,359。比對兩種薄膜蒸餾模組各自之設備成本，結果顯示 DCMD 之太陽能吸收板及熱交換器面積均大於 VMD，導致 DCMD 之成本較 VMD 高，如圖六所示。原因為兩系統之主要驅動力不同所造成設備成本之差異，DCMD 為溫度所驅動，需大量能量以維持薄膜兩側之溫差，而 VMD 為壓力所驅動，且有熱回收機制，使得海水所需熱交換量較 VMD 少，故太陽能吸收板與熱交換器無需太大的面積。



圖六 DCMD/VMD 主要設備成本及最低年總成本比較

四、控制架構

4-1 控制設計

為有效控制利用變化巨大之太陽能做為薄膜蒸餾之加熱能量，在此使用 Chen, *et al.*^[1]所提出之 AGMD 薄膜蒸餾海水淡化系統之控制架構，將太陽能吸收板出口做分流設計，將部分流體經控制閥進入熱儲存桶與之混和，使用三個一階溫度訊號傳送器，每個傳送器設定 30 秒之延遲時間，以模擬實際量測速度，並使用 PI 控制器對控制閥進行動態控制，避免進入熱交換器之流體溫度過高。此熱儲存桶於夜晚時可接續供應熱能使系統於整天做連續操作。但由於夜晚時熱儲存桶之流體經熱交換後回流至原儲存桶，使

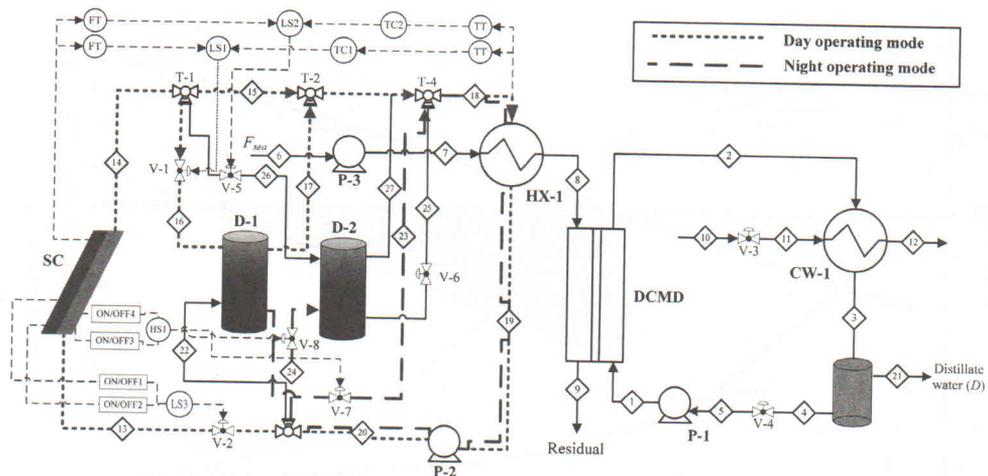
原桶槽溫度下降，故設計回流之流體導入另一桶槽，可使原桶槽保持一定溫度。兩系統之控制設計如圖七 (a), (b) 所示。

4-2 控制器參數

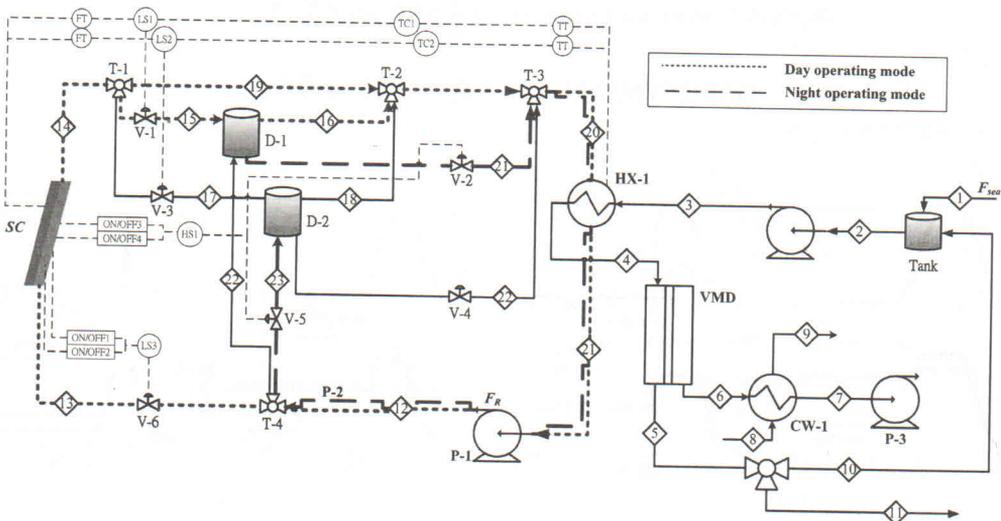
本研究兩系統均使用自動調協變異法 (Auto-tuning variation, ATV)，來求出最終增益及震盪頻率，接著利用 T-L 控制器參數調協法則，求出 PI 控制器之增益值與積分時間。DCMD 所求得增益值為 7.2 (%/%)；積分時間為 246.84 (sec)；VMD 之增益值為 24.8 (%/%)；積分時間 225.93 (sec)。

4-3 操作度比較

由最適化設計點進行全日操作，發現兩系統當日照強度隨時間上升，太陽能板出口溫度會超出 95°C，使系統內流體產生汽化現象，將危害到系統設備之安全，故降低原有設計點溫度，使系統進入可操作區域。當設計點溫度降低時，會使系統總成本提高，主要原因為熱交換器面積增加。如將兩系統之總成本皆設定提高 2%，進行動態模擬比較，結果如圖八所示。DCMD 之出口設計溫度降至 76°C，太陽能出口最高溫度降至為 84°C，VMD 系統則為 66°C 與 79°C。圖八之操作區域圖 (陰影部分)，可觀察出 VMD 之操作區域較 DCMD 大。此原因為太陽日照強度能隨時間增加而遞增，循環流體所獲得能量不斷增加，最終使吸收板最高出口溫度超出 95°C，故需將兩系統之最高限制溫度降低，而 VMD 系統之主要驅動力來自於滲透端真空壓力，系統可操作於較低溫情況，太陽熱能為額外增加進料端對真空端的溫度驅動力，故將限制溫度降低 4°C 左右即可進入可操作區域。但 DCMD 系統因為薄膜兩側的溫差所造成之驅動力，高溫操作下較有利。但是當太陽能量供給過多時，DCMD 之集熱板面積較 VMD 系統大，使得



(a)



(b)

圖七 太陽能驅動薄膜蒸餾海水淡化系統控制架構流程圖 (a) DCMD, (b) VMD

循環流體溫度較易超出 95°C，故 DCMD 降低限制溫度需達 13°C 才使系統進入可操作範圍。

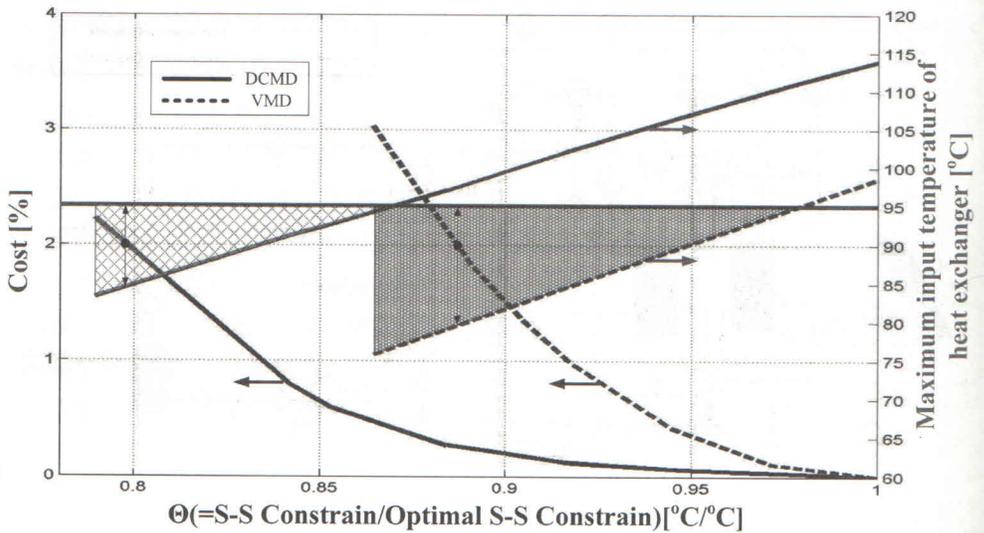
4-4 動態結果比較

由於太陽能的不可預測及不穩定性，本研究引用 Chang^[9]所提及台灣地區夏天與冬天之全日照強度分布進行動態模擬，結果如圖九所示，DCMD 在夏天全日操作下可得純水產量為 28.02 噸而 VMD 可得 32.14 噸，冬天之操作下可得 19.01 噸與 13.72 噸。

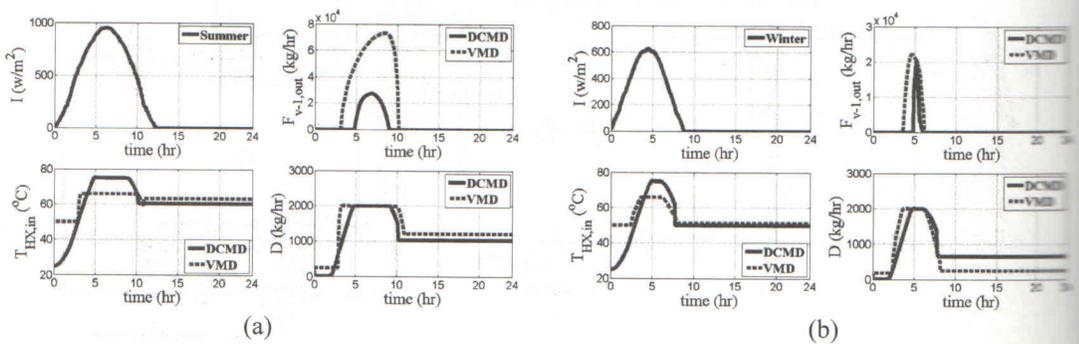
太陽能充足時，因溫度與壓力之雙重驅動力下，VMD 之產水量比 DCMD 多，但當額外供給之太陽熱能不足時，VMD 之薄膜兩側之壓力驅動力不足，使得產水量大幅減少。

五、結論

本研究利用 ACM 模擬軟體進行 DCMD 和 VMD 之模式建立與成本最適化計算，最適化年總成本於太陽能強度為 500 W/m² 之情況下，為 \$857,990 和 \$576,359。在操作設計上，如將兩系統最適化設計點之成本皆



圖八 DCMD/VMD 最適化年總成本與可操作度比較



圖九 DCMD/VMD 動態結果比較 (a) 夏天, (b) 冬天

提高 2% 進行動態模擬，兩系統均可進入可操作範圍內，且 VMD 系統之可操作範圍明顯多於 DCMD。在模擬全日操作下，DCMD 與 VMD 系統在夏天日照強度下可得總產水量為 28.02 噸和 32.14 噸，而冬天可得 19.01 噸和 13.72 噸。

六、符號說明

A 面積, m^2
 b_f 流體通道高度, cm
 $C_{p,cl}$ 冷流體比熱, $J/kg-K$
 $C_{p,f}$ 加熱流體比熱, $J/kg-K$

$C_{p,gm}$ 薄膜層比熱, $J/kg-K$
 $C_{p,hl}$ 熱流體比熱, $J/kg-K$
 F 體積流量, m^3/hr
 h 流體熱傳係數, W/m^2-K
 h_{vap} 蒸氣潛熱, $J/kmole$
 I 太陽能日照量, W/m^2
 k 熱傳導係數, $J/s-m-K$
 k_{gm} 薄膜內部質傳係數, m/s
 M 儲熱槽內質量, kg
 M_{cl} 熱交換器內冷流體質量, kg
 M_{hl} 熱交換器內熱流體質量, kg
 M_f 吸收板內流體質量, kg

$m_{f,cl}$	冷流體質量流率, kg/s
m_f	吸收板流體質量流率, kg/s
$m_{f,in}$	儲熱槽入口質量流率, kg/s
$m_{f,out}$	儲熱槽出口質量流率, kg/s
$m_{f,hl}$	熱流體質量流率, kg/s
N	莫耳通量, kmol/m ² -s
N_D	自由度
$N_{equations}$	方程式數目
N_u	納塞數 (Nusselt number)
$N_{variables}$	變數數目
P	壓力, Pa
Q	熱傳通量, kJ/m ² -s
R	理想氣體常數, Pa·m ³ /kmol·K
r_{pore}	薄膜孔徑大小, μm
Re	雷諾數 (Reynolds number)
T	溫度, K
T_f	環境溫度, °C
T_c	吸收板溫度, °C
T_{cl}	熱交換器內冷流體溫度, °C
T_f	流體溫度, °C
T_{hl}	熱交換器內熱流體溫度, °C
T_w	儲熱槽內流體溫度, °C
U	總括熱傳係數, W/m ² -K
V	流體流速, m/s
ρ	密度, kg/m ³

參考資料

- Chen, Y. H., Y. W. Li, and H. Chang, Optimal Design and Control of Solar Driven Air Gap Membrane Distillation Desalination Systems, *Applied Energy*, 100, 193 (2012).
- Lawson, K. W. and D. R. Lloyd, Membrane Distillation. II. Direct contact MD, *J. Membr. Sci.*, 120, 123 (1996).
- Lawson, K. W. and D. R. Lloyd, Membrane Distillation. I. Module Design and Performance Evaluation Using Vacuum Membrane Distillation, *J. Membr. Sci.*, 111, 120

(1996).

- El-Bourawi, M. S., Z. Ding, R. Maa, and M. Khayet, A Framework for Better Understanding Membrane Distillation Separation Process, *J. Membr. Sci.*, 285, 4 (2006).
- Chang, H., G. B. Wang., Y. H. Chen., C. C. Li., and C. L. Chang, Modeling and Optimization of a Solar Driven Membrane Distillation Desalination System, *Renewable Energy*, 35, 2714 (2010).
- Chang, H., J. S. Liao, C. D. Ho, and W. H. Wang, Simulation of Membrane Distillation Modules for Desalination by Developing User's Model on Aspen Plus Platform, *Desalination*, 249, 380 (2009).
- Luyben, W. L., Design and Control Degrees of Freedom, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 35, 2204 (1996).
- Seider, W. D., J. D. Seader., D. R. Lewin, and S. Widagdo, *Production and Process Design Principles Synthesis, Analysis, and Evaluation*, 3rd ed, John Wiley & Sons, Inc., (2010).
- Chang, T. P., Performance Evaluation for Solar Collectors in Taiwan, *Energy*, 34, 32 (2009).

化工學會網站

<http://www.twiche.org.tw/>

包括求才和求職資訊

化工會誌網站

<http://journal.chiche.org.tw/>

請多多上網

搜取最新資訊