淡江大學化學工程與材料工程學系碩士班

碩士論文

指導教授：何啟東博士

# 太陽能平板型氣隔式薄膜蒸發器理論與實驗分析之研究

# Theoretical and experimental analysis of flat-plat solar air gap membrane distillation

研究生：王柏翔 撰

中華民國 98 年 6 月

論文名稱：　太陽能平板型氣隔式薄膜蒸發器理論與實驗分析之研究　頁數：100

校系(所)組別：淡江大學 化學工程與材料工程學系(研究所)　A 組

畢業時間及提要別：　97 學年度第 2 學期 碩士 學位論文提要

研究生：王柏翔　　指導教授：　何啟東 博士

論文提要內容：


薄膜蒸餾乃是一種海水淡化技術，用以製造純水，來供應民生與工業用水。而太陽能則是屬於無污染且無虞匱乏的潔淨能源，是目前世界各國的發展重點。本研究即是結合薄膜蒸餾與太陽能源的特點，設計一太陽能平板型氣隔式薄膜蒸發系統，此系統的特色乃是藉由吸收板收集太陽光通量並加熱工作流體，提升冷熱流體的溫度差，以提高薄膜蒸發的效率和純水產率。

本研究分別針對傳統氣隔式薄膜蒸發與新型太陽能氣隔式薄膜蒸發系統做理論模式建立，並根據不同之操作條件與設計參數作體下討論：(一) 流體進口溫度、(二)流體體積流量、(三)氣隔層之厚度、(四)太陽光之入射量等對蒸發液量之影響，並與傳統氣隔式薄膜比較。研究結果顯示，在熱流體溫度較低和流量較小時，蒸發液增加效率較高，在氣隔層厚度越薄時，純水產率較大，且入射量對增加效果也較好，當氣隔層厚度在 2.5mm 時，氣隔式薄膜蒸發系統之熱效率最好。


表單編號：ATRX-Q03-001-FM030-01

Title of Thesis Total pages:100

**Theoretical and experimental analysis of flat-plat solar air gap membrane distillation.**

*Key word*:
air gap; air gap membrane distillation; flat-plat; solar membrane distillation

Name of Institute:
Graduate Institute of Chemical and Materials Engineering, Tamkang University

Graduate date: July, 2009 Degree conferred: Master

Name of student: Po-Hsiang Wang Advisor: Dr. Chii-Dong Ho
王柏翔 何啟東 博士

Abstract:

A new design of the solar air gap membrane distillation (Solar AGMD) system is investigated theoretically and experimentally. The theoretical formulations are also developed and the resultant equations are solved by the Newton-Raphson method. The effects of the fluid inlet temperature, volumetric flow rate, air gap thickness and incident solar radiation on the heat transfer efficiency and the productivity of pure water are discussed in this study. The theoretical results indicate that the pure water productivity increases with increasing the inlet temperature of hot fluid, volumetric flow rate and incident solar radiation. Moreover, the best thermal efficiency of the solar AGMD system was obtained as the air gap thickness is 2.5 mm. A comparison of the traditional air gap membrane distillation system (AGMD) and the new solar AGMD system on the pure water productivity are also made. The results show that the solar AGMD system does the better performance than the traditional AGMD system. The experiments of the AGMD and solar AGMD systems are set up to confirm the accuracy of the theoretical predictions. The good agreement is achieved between the theoretical results and the experimental runs in the present study.

表單編號：ATRX-Q03-001-FM031-01

# 目錄


中文摘要 I

英文摘要 II

目錄 III

圖目錄 V

表目錄 VIII

第一章 緒論 1

1-1 引言 1

1-2 簡介 3

1-2-1 太陽熱能應用 3

1-2-2 海水淡化 6

1-3 研究動機與方向 9

第二章 文獻回顧 10

第三章 理論分析 12

3-1 太陽能薄膜蒸發之簡介 12

3-2 理論模式建立 14

3-2-1 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統 14

3-2-2 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統 20

3-3 熱質傳係數與物理性質 25

3-4 熱效率與蒸濾液增加效率 30

3-5 數值計算流程 31

第四章 實驗 32

4-1 傳統型氣隔式薄膜蒸發器實驗 32

4-1-1 實驗裝置與測量儀器 32

4-1-2 實驗步驟 39
4-2 太陽能氣隔式薄膜蒸發器實驗 40
4-2-1 實驗裝置與測量儀器 40
4-2-2 實驗步驟 46
4-3 實驗操作參數與設計參數 47
第五章 結果與討論 48
5-1 熱物流體積流量與溫度對純水產率之影響 48
5-2 冷物流體積流量與溫度對純水產率之影響 59
5-3 空氣間隔之層厚度對純水產率之影響 67
5-4 入射量對純水產率之影響 73
5-5 傾斜角度對純水產率之影響 77
5-6 空氣層厚度對熱效率之影響 78
5-7 操作參數對質傳係數之影響 80
第六章 結論 87
6-1 結論 87
6-2 未來研究方向 88
符號說明 89
參考文獻 94
附錄(一) 98
附錄(二) 100

# 圖目錄


圖 1 太陽能應用之範圍 5

圖 2 海水淡化技術 8

圖 3 薄膜蒸餾系統分類 8

圖 4 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統 13

圖 5 單效薄膜蒸發器通量流向圖 15

圖 6 薄膜與氣隔層質傳電阻圖 18

圖 7 冷凝板與冷流體熱電阻圖 19

圖 8 吸收板與熱流體熱電阻圖 21

圖 9 單效太陽能薄膜蒸發器通量流向圖 22

圖 10 薄膜內部質傳阻力圖 28

圖 11 傳統型氣隔式薄膜蒸發器實驗配置圖 33

圖 12 傳統型薄膜蒸發裝置分解圖 34

圖 13 鋁板渠道流動圖 34

圖 14 傳統型氣隔式薄膜蒸發實驗裝置照 35

圖 15 傳統型氣隔式薄膜蒸發實驗分解裝置照 36

圖 16 太陽能氣隔式薄膜蒸發器實驗配置圖 41

圖 17 太陽能氣隔式薄膜蒸發裝置分解圖 42

圖 18 太陽能氣隔式薄膜蒸發實驗裝置照 43

圖 19 太陽能氣隔式薄膜蒸發實驗裝置分解照 44

圖 20 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統熱物流體積流量與溫度對純水產率之影響; $V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K 54

圖 21 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流體積流量與溫度對純水產率之影響;$S_0$ =830 W/m$^2$, $V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K 55

圖 22 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流體積流量與溫度對純水

產率之影響; $S_0$ =1100 W/m$^2$, $V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K 56
圖 23 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流體積流量與溫度對蒸發液增加率之影響;$S_0$ =830 W/m$^2$, $V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K 57
圖 24 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流體積流量與溫度對蒸發液增加率之影響;$S_0$ =1100 W/m$^2$, $V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K 58
圖 25 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統冷物流體積流量與溫度對純水產率之影響;$V_w$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K 64
圖 26 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統冷物流體積流量與溫度對純水產率之影響;$S_0$=830 W/m$^2$,$V_w$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K 65
圖 27 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統冷物流體積流量與溫度對純水產率之影響;$S_0$=1100 W/m$^2$,$V_w$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K 66
圖 28 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統空氣層厚度對純水產率之影響;$V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K 71
圖 29 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統空氣層厚度對純水產率之影響;$S_0$ =830 W/m$^2$, $V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K 72
圖 30 入射量對純水產率之影;$V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K, $T_{f,i}$=298 K 76
圖 31 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統傾斜角度對純水產率之影響;$S_0$=830 W/m$^2$, $V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K,$T_{f,i}$=298 K 77
圖 32 氣隔層厚度對純水產率之影響;$S_0$=830 W/m$^2$, $V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K,$T_{f,i}$=298 K 79
圖 33 氣隔式薄膜蒸發系統氣隔層厚度與入射量對薄膜質傳係數之影響;$V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K,$T_{f,i}$=298 K 81
圖 34 氣隔式薄膜蒸發系統氣隔層厚度與入射量對氣隔層質傳係數之影;$V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K,$T_{f,i}$=298 K 82
圖 35 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流進口溫度與體積流量對

薄膜質傳係數之影響;$S_0$=830W/m$^2$,$V_f$= 0.9L/min,$T_{f,i}$= 298K 83
圖 36 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流進口溫度與體積流量對氣隔層質傳係數之影響;$S_0$=830W/m$^2$,$V_f$=0.9L/min,$T_{f,i}$=298K 84
圖 37 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統冷物流進口溫度與體積流量對薄膜質傳係數之影響;$S_0$=830W/m$^2$,$V_w$= 0.9L/min,$T_{w,i}$=323K 85
圖 38 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統冷物流進口溫度與體積流量對氣隔層質傳係數之影響;$S_0$=830W/m$^2$,$V_w$=0.9L/min,$T_{w,i}$=323K 86
圖 39 氯化鈉溶液密度對溫度之趨勢 99
圖 40 數值計算流程圖 100

TAMKANG UNIVERSITY

# 表目錄

表 1 通道設計參數與最大傾斜角 25

表 2 薄膜性質 37

表 3 實驗系統之操作變數與設計參數 47

表 4 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變熱物流體積流量與進口溫度之純水產率實驗紀錄表 50

表 5 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變熱物流體積流量與進口溫度之純水產率實驗紀錄表; $S_0$=830 W/m$^2$ 51

表 6 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變熱物流體積流量與溫度之純水產率實驗誤差表 52

表 7 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變熱物流體積流量與溫度之純水產率實驗誤差表; $S_0$ =830 W/m$^2$ 53

表 8 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變冷物流體積流量與進口溫度之純水產率實驗紀錄表 60

表 9 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變冷物流體積流量與進口溫度之純水產率實驗紀錄表; $S_0$=830 W/m$^2$ 61

表 10 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變冷物流體積流量與溫度之純水產率實驗誤差表 62

表 11 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變冷物流體積流量與溫度之純水產率實驗誤差表; $S_0$=830 W/m$^2$ 63

表 12 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變氣隔層厚度之純水產率實驗紀錄表 68

表 13 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變氣隔層厚度之純水產率實驗紀錄表; $S_0$=830 W/m$^2$ 69

表 14 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變氣隔層厚度之純水產率實

驗誤差表 70
表 15 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變氣隔層厚度之純水產率實驗誤差表; $S_0$=830 W/m$^2$ 70
表 16 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變入射量與熱物流體積流量之純水產率實驗紀錄表 74
表 17 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變入射量強度之純水產率實驗誤差 75
表 18 氯化鈉溶液密度 98

# 第一章 緒論

## 1-1 引言

地球自誕生以來，就蘊藏豐富的石油資源，隨著時代進步，工業發展越來越盛興使得這些資源逐漸被消耗，縱使大自然有恢復資源的能力，卻遠遠的趕不上人類所消耗的速度，能源危機已是現今社會的一大問題，人類已經認知到石油資源總有一天會消耗完，各國開始轉向尋找可代替之能源，而大自然中尚蘊藏著許多取之不盡的資源，如風力、地熱、和太陽能等，因此「再生能源」越來越受到重視。

再生能源是指從持續不斷地補充的自然過程中得到的通量來源，它符合環境永續發展、可生生不息、循環再利用之能源。國際能源總署(IEA)與歐盟合作，共同致力於再生能源多樣化與使用效率之發展。目前，各國正積極的研究各種再生能源的應用，包括生質能、風能、太陽光電和熱能等。根據 IEA 的資料顯示，在 2010 年歐盟各國再生能源占總能源 12%，至 2020 年可提升到 20%，IEA 中的再生能源小組認為，再生能源的效能與成本逐漸的改善，且此項技術將可提升其競爭力，預估在 2050 年時，各種不同形式的再生能源可供應約二分之一的世界能源需求。

我國沒有國外有較豐富的石油資源，無自產能源之能力，98%以上之能源都仰賴國外進口，其中化石能源占 91%，為了減少石油、燃煤等有限資源的依賴，經濟部於 1998 年召開「全國能源會議」及「全國科學技術會議」，並積極推動再生源之開發與利用。目前國內已在發展再生能源分以風力、太陽電能及熱能、生質能為主，主要用來供給電力和熱水，目前發展情形如下：

一. 風力：已在雲林麥寮等設 26 支風力發電機，總發電容量為 2.39 萬瓩，目前已與台電簽約，已完成裝置供給電量達 7.4 萬瓩，另外民間與台電等正籌設中之風力發電開發系統可供給 65 萬瓩。

二. 太陽電能：目前透過示範補助方式完成包括總統府等 74 處，總容量為 647 瓩，另外推動「陽光電城」計畫，規劃設置在台南縣高鐵沙崙站區域，以強化國內太陽光電的應用。

三. 太陽熱能：國內太陽熱水器之裝置密度已達世界第 3，未來計畫設置太陽能室內溫水游泳池，來增加太陽熱能的應用範圍。

四. 生質能：在生質能推動上，能源局與農委會合作利用休耕地種植能源作物方式，已成功發展生質柴油，已於花蓮縣豐濱鄉興建完成全國第一座「固態衍生燃料製造廠」，並與業界合作於嘉義縣民雄完成首座「生質柴油示範廠」，促使再生能源能在應用上更多元化。

TAMKANG UNIVERSITY

# 1-2 簡介

## 1-2-1 太陽熱能應用

太陽能本身就是通量形式，是世界上最豐富、最永久性的能源，它提供了人類源源不絕的通量。太陽能最大的特徵就是分布廣大，取之不盡且本身擁有光和熱的性質，也不會帶來汙染，但太陽能應用上仍有先天上之缺點，例如通量密度低，必須要有效收集，並受日夜、季節、地理及氣候因素影響，因此如何開發太陽能源的應用，來節省現有化石燃料消耗，是值得開發研究。人類早在幾百年前就懂得利用太陽能，1615 年一名法國工程師 Salamon de Caus 發明了一座太陽能操作的抽水機[1]，但隨著工業起飛及石油發現，此項能源並無持續的發展，直到歷經能源危機及工業革命後，環境持續受到汙染，能源逐漸消耗殆盡，太陽能應用又再度受到重視。

台灣本島位於東經 119°18`至 122°6`及北緯 21.5°至 25.3°，屬於亞熱帶地區，有豐富的太陽能資源，適合各種太陽能應用，各地區每年平均接受日照時數約 1000~2300 個小時，南部地區受到氣候之影響較小時，日照時數可達 2500 個小時[2]，而平均日射量約 300~800 $W/m^2$。太陽能因形式不同分為兩類:光電技術和熱能技術，而熱能技術可在區分為兩類:太陽能建築技術(solar building technologies)和太陽熱能技術(solar thermal technologies)[3]，詳細應用範圍如圖 1。

近幾年來，太陽熱能技術在一序列的研究與商業化系統，技術上越來越成熟，在工業製程上，提供流體預熱、乾燥顆粒狀及穀物類之農產品[4]，也用於葉類作物、食物或木材等乾燥。在美國每年約 41%之能源用工業上，這些能源有 60%用於工業製程上，因此太陽熱能技術應用及商業化市場更值得研究。

太陽熱能早期是應用在流體加熱上，目前用來吸收太陽熱能的有平板型和真空型集熱器，最常用之流體為空氣與水，加熱空氣用來做乾燥系統使用，加熱水可用來儲存熱能供給民生及工業上之用水。一般太陽能發電可區分為兩類，太陽能光電是利用太陽能板吸收輻射光轉換成電力，可直接供給用電或由儲存式電池經化學反應將電力儲存起來，另一種為太陽熱能驅動發電，經由集熱器將收集輻射熱在供給流體加熱形成高壓蒸氣，蒸氣帶動渦輪機產生電力，早期的太陽熱能發電系統雖然技術上可行，但成本上比傳統發電廠要高出很多，主要之成本都在集熱器部分，近年來技術越來越成熟，集熱器從中央集熱型慢慢演進到槽線集熱型和碟盤集熱型，其集熱效率提高與成本降低。台灣地處於亞熱帶區，具有發展太陽能發電之潛力，但由於台灣地小，加上人口密度高，太陽能發電廠是否可行仍是一項議題，不過國內太陽熱能熱水技術相當成熟。

國內太陽能熱水器系統自 2000 年開始實施太陽能熱水系統推廣獎勵補助，過去推廣太陽能熱水器集熱面積補助為每平方公尺 1500 元以上， 自 2009 年 1 月開始將提高至每平方公尺 2250 元以上，單位安裝密度為全球第 3，每年約設置 8 萬平方公尺，為世界第 8 大市場。至 2009 年 1 月全國共有 43 萬戶使用太陽能熱水器，累積設置已達 178 萬平方公尺，普及率約 5%，全年約可節省能源相當於 530 萬桶 20 公斤液化石油氣，可減少 35 萬噸二氧化碳排放，對於環境保效益相當不錯。

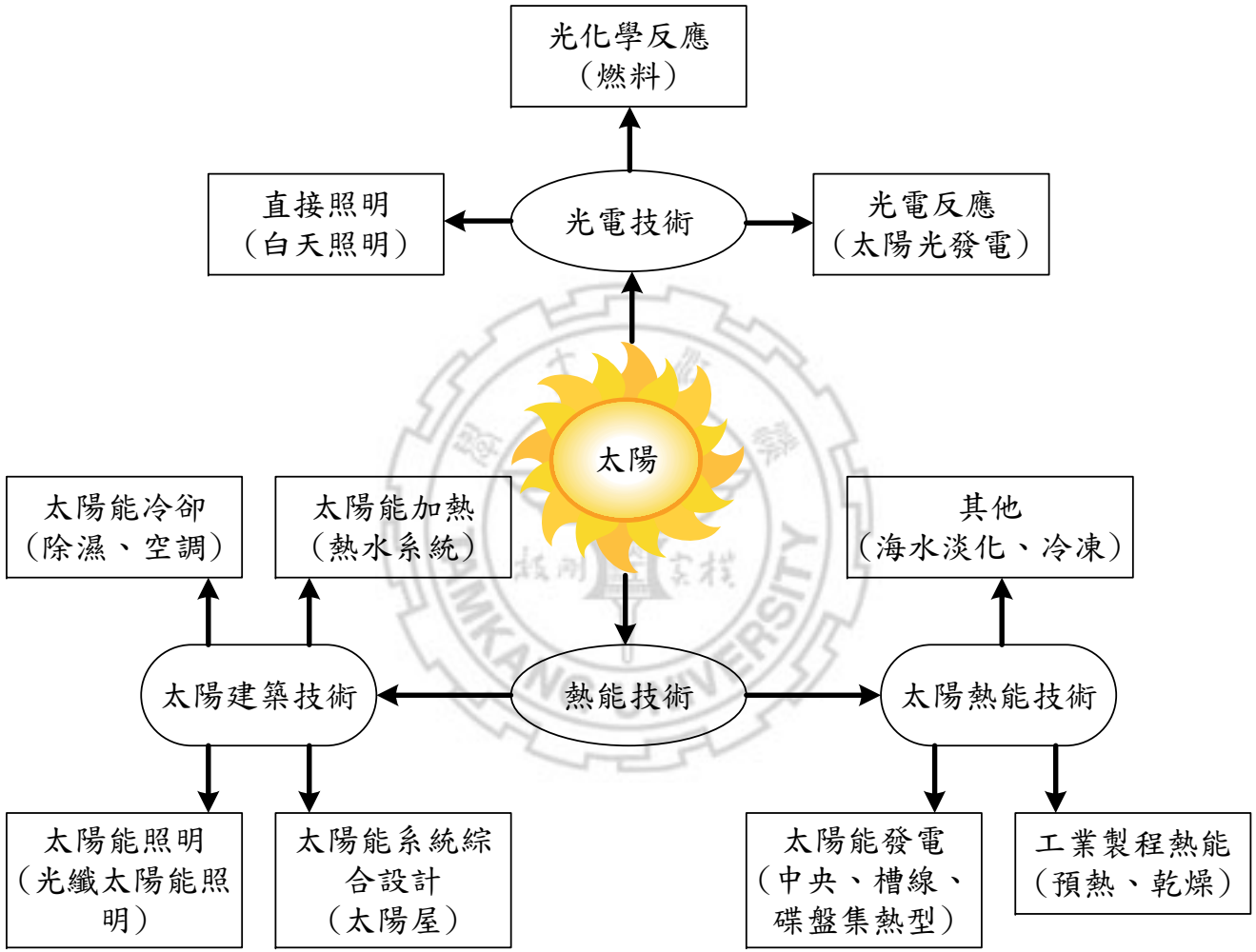

光化學反應
（燃料）
直接照明
（白天照明）
光電技術
光電反應
（太陽光發電）
太陽
太陽能冷卻
（除濕、空調）
太陽能加熱
（熱水系統）
其他
（海水淡化、冷凍）
太陽建築技術
熱能技術
太陽熱能技術
太陽能照明
（光纖太陽能照明）
太陽能系統綜合設計
（太陽屋）
太陽能發電
（中央、槽線、碟盤集熱型）
工業製程熱能
（預熱、乾燥）

圖 1 太陽能應用之範圍

### 1-2-2 海水淡化

陽光、空氣與水為人類生命不可或缺的元素，科技不斷的進步，人類的用水量逐漸的提升，但地球的淡水資源有限，目前，淡水資源取得的來源包括湖泊、河水、水庫或地下蘊藏等，然而地球的水資源分佈不均勻，隨著人口增加與工業的蓬勃發展，部分的淡水資源被受汙染，壓縮了人類可使用的水資源。

地球上蘊藏了豐富的海水資源，約占總水量 97%，但海水無法直接取代淡水使用，必須經過特殊程序取出可用的水資源，因此海水淡化技術被研究出來。海水淡化是指將水中的鹽分和礦物質去除得到淡水的程序，目前的技術可分為六大類:蒸餾、膜處理、結冰、地熱脫鹽、太陽能脫鹽與甲烷水合物結晶法，詳見圖 2，部分的淡化技術還在研究階段，目前兩種最常用的淡化技術是逆滲透和多級閃蒸，分別佔全球淡化能力的 47.2%和 36.5%。雖然目前已有許多成熟並商業化的海水淡化技術，包括多效蒸發(multi-effect evaporation)、多級閃蒸(multi- stage flash evaporation)、逆滲透(reverse osmosis)和電透析(electrodialysis)，但所產生的水量仍只占總產水量的一小部分，主要原因是這些傳統海水淡化程序，不是產水效率低就是必須投入大量的能源[5]，因此有些學者不斷的研究出新的海水淡化技術來提高產水量。目前薄膜蒸餾技術研究已逐漸成熟，它是利用疏水性的薄膜，在薄膜兩側提供一個溫度差，來產生水蒸氣通過薄膜達到分離效果。依系統不同做分類，可分為直接接觸式(direct contact membrane distillation, DCMD)、空氣間隔式(air gap membrane distillation, AGMD)、空氣掃流式(sweeping gas membrane distillation, SGMD)和真空式(vacuum membrane distillation, VMD)，如圖 3 所示。

歷經過能源危機後，再生能源越來越受到重視，其中太陽能源也

被廣泛的應用，利用太陽能進行脫鹽程序可以節省能源，對環境的污染度也較低，因此發展出太陽能蒸發器。太陽能蒸發器是利用太陽輻射來加熱吸收板上的鹽水，使其蒸發後冷凝在玻璃面蓋上，得到乾淨的純水的裝置。在 1872 年瑞典的一位工程師 Carlos Wilson 設計了一座太陽能蒸發器工廠，來提供智利北部礦場的淡水需求[6]。傳統的太陽能蒸發器純水產率較低，若要生產大量的純水，所需要的設備空間大、設備成本也較高，為了改善低產水量的問題，學著開始研究各種方法來改善產水效率和熱傳送率。

TAMKANG UNIVERSITY

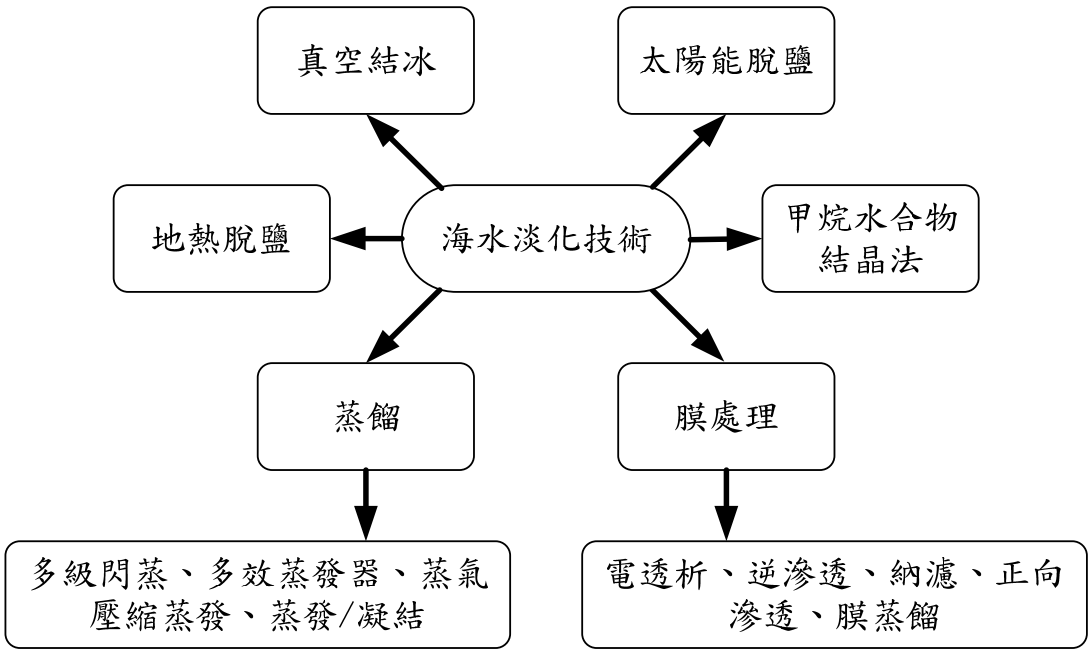



圖 2 海水淡化技術

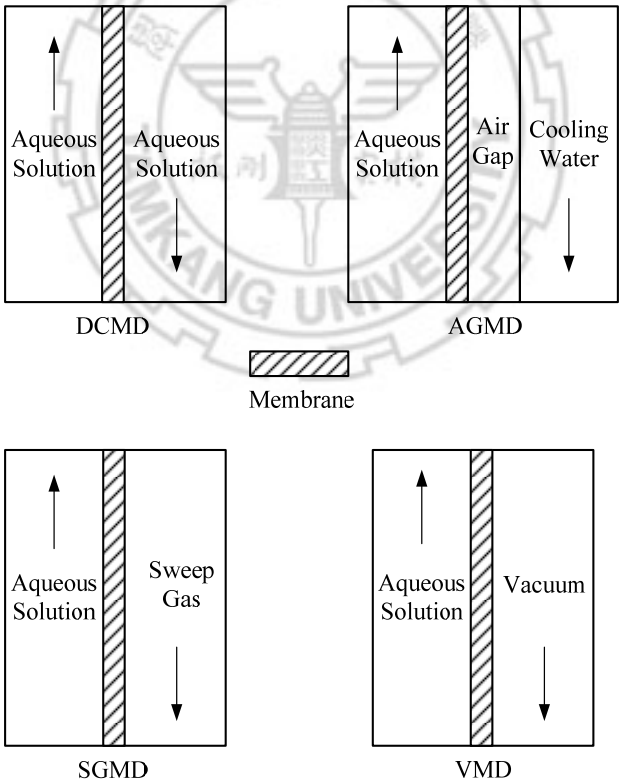



圖 3 薄膜蒸餾系統分類

## 1-3 研究動機與方向

太陽能蒸發器為海水淡化方法之一，其缺點為單位面積產水量低，設備空間大、成本較高，且玻璃面的冷凝效率較差，為了改善熱傳效率和產水量的問題，可利用薄膜來代替玻璃面，不但可以節省設備成本，還可改善熱傳效率和低產水量的問題。

本研究將傳統之太陽能蒸發器加入薄膜來加以改良，主要還是以薄膜蒸發作為主系統，在加入吸收板收集太陽輻射加以運用。以太陽能的利用方式區分系統可分為兩類，直接式系統和間接式系統，直接式系統是利用吸收板吸收輻射後直接加熱鹽水進行蒸發，而間接式系統則是先將吸收的熱能儲存在恆溫槽中，再用來加熱蒸發的流體。

本研究將探討直接式太陽能薄膜蒸發系統，以 AGMD 作為主系統和吸收板結合。本文中將建立氣隔式和直接式太陽能氣隔式薄膜蒸發系統的理論模式，並利用數值方法求解，以改變鹽水及冷卻水進口溫度、進口流量率作為操作條件，與改變設計參數調整空氣間隔厚度，來探討各項參數對產水量的影響。

# 第二章 文獻回顧

薄膜蒸餾最早是由 Findley[7,8]在 1967 年提出相關的實驗研究，論文中針對薄膜的物性、熱損失及滲透量等相關的問題做探討。而在 1979 年 Cheng et al.[9,10]提出了將複合膜應用在鹽水淡化上，目的在減少薄膜濕潤(Membrane wetting)，其疏水性薄膜材質，以聚四氟乙烯(Polytetrafluoro-ethene)及聚偏二氟乙烯(Polyvinylidene-fluoride)較適用。1998 年，Liu et al.[11]提出平板型氣隔式薄膜蒸餾系統之理論分析與實驗，在實驗中使用孔徑 1μm 之 PTFE 薄膜對不同濃度氯化鈉溶液理論與實驗分析。

2005 年，Guijt et al.[12-14]針對氣隔式薄膜蒸餾之中空纖維式薄膜蒸餾，進行了理論與脫鹽之實驗探討，在文中指出氣隔式薄膜蒸餾在氣隔層厚度為 1.5mm 時系統通量效率低於 80%以下，在 3mm 厚度下通量效率 80~90%效果較佳，文中也提到薄膜蒸餾適用於純水生產程序上，相較於同等級之逆滲透系統其成本較低。

Alklaibi 和 Lior[15,16]對氣隔式薄膜蒸餾做二維理論探討，文中指出熱流體溫度為影響蒸餾液量主要條件。2006 年，Alklaibi 和 Lior[17]利用薄膜蒸餾之二維理論模式針對直接接觸式和氣隔式膜薄蒸餾之質傳阻力做分析比較，結果指出熱流體之溫度和氣隔層厚度為氣隔式膜薄蒸餾之質傳阻力主要影響變因。

2007 年 Gazagnes et al.[18]將疏水性陶瓷膜應用在薄膜蒸餾上，與高分子薄膜相比較下，在相同之蒸餾液量下，陶瓷膜所需要之溫度驅動力較大。2008 年 Feng et al.[19]則利用奈米纖維薄膜應用在氣隔式薄膜蒸餾上。

太陽能應用於海水淡化，早期研究為太陽能蒸發器。有關太陽能蒸發器之研究，在 1961 年 Lof et al.[20]對太陽能蒸發器提出完整之理論分析，1969 年 Cooper[21]利用暫態程序模擬太陽能蒸發器之數值分析。對於改變系統的設計，能有效的改善太陽能蒸發器產水效率，Bloemer et al.[22]在 1965 年提出，調整冷凝玻璃面蓋的設計，來增加水蒸氣與外界的熱傳送效率，進而提高產水效率，在 1984 年 Delyannis 與 Delyannis [23]也提出了 V 型玻璃面蓋研究，1986 年 Tiwari et al.[24]、Mukheriee 與 Tiwari[25]將面蓋改為雙斜式玻璃面蓋。於 1980 年，田臨文[26]針對太陽能蒸發器效率之研究，1987 年，陳志芳[27]改良了太陽能蒸發器效率，加入了通風系統，文中指出通風式太陽能蒸發器效率在低日射量提升較明顯。

近年來，有許多學著開始研究太陽能驅動之薄膜蒸餾，2003 年 Koschikowski et al.[28]利用集熱器收集太陽能加熱流體經由氣隔式薄膜蒸餾系統產生純水。2005 年 Ding et al. [29]利用集熱器串連多級薄膜蒸餾模組。2007 年 Chen 和 Tu[30]等人針對集熱器串連薄膜蒸餾做理論分析。2008 年 Banat 和 Jwaied [31]針對太陽能結合薄膜蒸餾作通量分析，Qiblawey 和 Banat [32]針對太陽能應用在海水淡化做完整之介紹。

# 第三章 理論分析

## 3-1 太陽能薄膜蒸發之簡介

本研究所探討的對象為太陽能平板型氣隔式薄膜蒸發系統，與傳統的氣隔式薄膜蒸發不同的地方在於系統中加入了吸收板來吸收太陽能輻射加熱流體，提高蒸發效率，系統如圖 4

本研究之目的是利用吸收板加熱流體，來提高薄膜蒸發之純水產率，並探討各種操作變因、設計參數對純水產率的影響。本研究之熱流流體使用氯化鈉水溶液，配置濃度為 3.5%，約為海水之濃度，系統為傾斜使得濾液容易收集，熱流流體由通道下方進入通道，令流體填滿整個通道，增進流體與吸收板的熱交換效率，冷凝水之流向與熱流體相同，吸收板上方則加裝一層玻璃面蓋來減少吸收板與外界之熱損失。

本研究之理論推導是以氣隔式薄膜蒸發系統作為基礎，再加入吸收板與玻璃面蓋，此理論模型分別針對玻璃面蓋、吸收板、冷凝板、薄膜及冷、熱流體作通量平衡，利用所推導出之方程式，可求得各層之溫度分佈，進而計算出濾液量與熱效率。本研究中所探討之操作變因包含冷熱流體體積流率、冷熱流體進口溫度、太陽入射量，設計參數為氣隔層之厚度。其中吸收板面積為 0.1 $m^2$，為了使吸收板與流體熱交換效率提高，降低溫度極化效應，通道設計為 2 mm， 系統側邊和底板與外界絕熱。

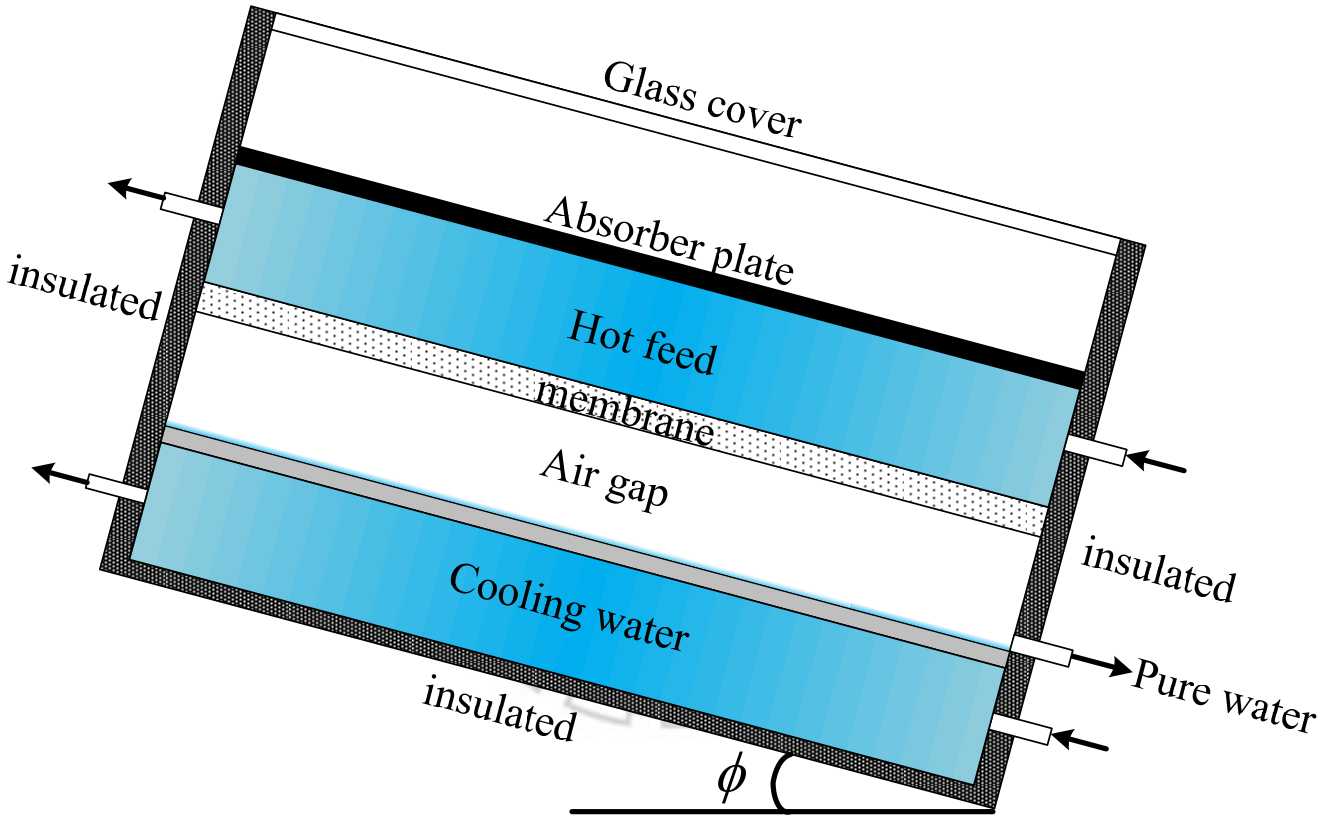



圖 4 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統

## 3-2 理論模式建立

針對傳統氣隔式與太陽能氣隔式薄膜蒸發系統理論模式推導中，做出以下之假設：

(1) 忽略吸收板對薄膜的輻射能

(2) 忽略吸收板之軸向溫度分佈

(3) 流體流動過程中之各種物理性質視為常數

(4) 蒸氣在冷凝板上冷凝形成薄薄的水層，並馬上流出

(5) 系統在穩定狀態下操作

(6) 假設底板和側邊與外界絕熱

### 3-2-1 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統

(1)熱流通道流體

$$\frac{\rho_w V_w Cp_w}{BL}\left(T_{w,i}-T_c\right)=Q_{c1}+\frac{\rho_w V_w Cp_w}{BL}\left(T_{w,o}-T_c\right) \tag{1}$$

其中$\rho_w$、$V_w$與$Cp_w$為熱流體之密度、體積流量與熱容量，$B$、$L$為通道之寬度與長度，$T_c$、$T_{w,i}$與$T_{w,o}$分別為玻璃面蓋溫度和熱流體進口、出口溫度，$Q_{c1}$為熱流體與薄膜之熱對流通量，表示如下

$$Q'_{c1}=h_1\left(\overline{T}_w-T_{m1}\right) \tag{2}$$

將式(1)整理成

$$\left(\frac{h_1}{2}+\frac{\rho_w V_w Cp_w}{BL}\right)T_{w,o}-\frac{h_1}{2}T_{m1}-\frac{\rho_w V_w Cp_w}{BL}T_{w,i}=0 \tag{3}$$

其中$\overline{T}_w=\dfrac{T_{w,i}+T_{w,o}}{2}$

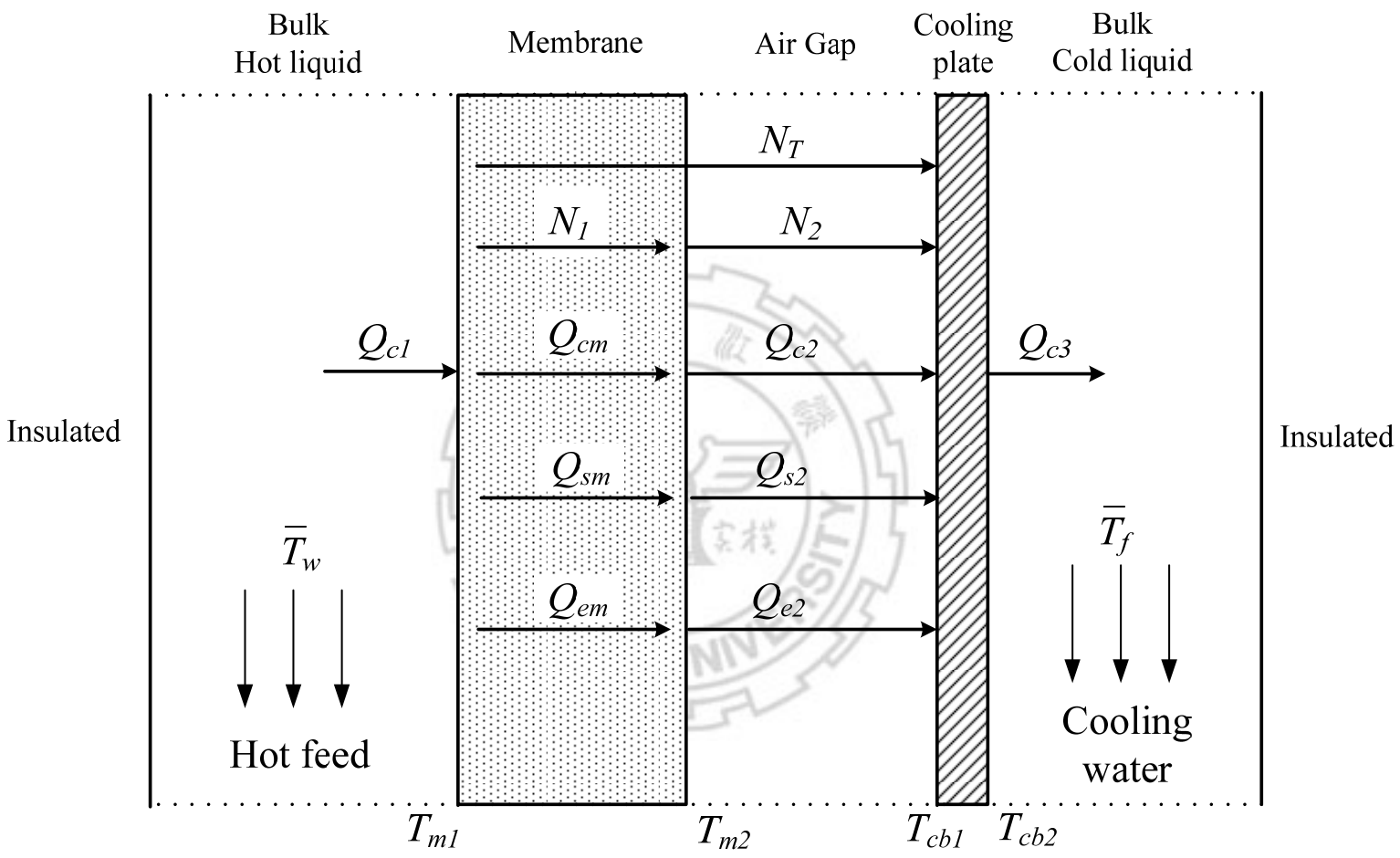



圖 5 單效薄膜蒸發器通量流向圖

(2)疏水性薄膜 (蒸氣於薄膜處產生)

$$Q_{c1} = Q_{em} + Q_{cm} + Q_{sm} = Q_{e2} + Q_{c2} + Q_{s2} \tag{4}$$

其中$Q_{em}$、$Q_{sm}$與$Q_{cm}$為薄膜內潛熱、顯熱與熱傳導熱傳送通量，$Q_{e2}$、$Q_{s2}$與$Q_{c2}$為氣隔層中之潛熱、顯熱與熱對流熱傳送通量，可表示如下

$$Q_{c1} = h_1\left(\overline{T}_w - T_{m1}\right) \tag{5}$$

$$= N_1\lambda + k_m(T_{\mathrm{m1}} - T_{\mathrm{m2}}) + N_1 Cp_v\left(T_{m1} - T_{m2}\right) \tag{6}$$

$$= N_2\lambda + U_2\left(T_{\mathrm{m2}} - T_{cb1}\right) + N_2 Cp_g\left(T_{m2} - T_{cb1}\right) \tag{7}$$

其中$N_1$與$N_2$分別為薄膜內與其隔層之質量流通量，$T_{m1}$、$T_{m2}$與$T_{cb1}$分別為薄膜與熱流體交界溫度、薄膜與氣隔層交界溫度、與冷凝板溫度。式(6)中$k_m$為薄膜熱傳導係數，考慮薄膜與膜孔洞之熱傳導，假設水蒸氣充滿孔洞，則$k_m$可表示如下

$$k_m = \frac{\varepsilon k_v + \left(1 - \varepsilon k_m\right)}{\delta_m} \tag{8}$$

將式(5)和式(6)整理成

$$h_1\left(\overline{T}_{\mathrm{w}} - T_{\mathrm{m1}}\right) - N_1\lambda - \frac{\varepsilon k_{\mathrm{a}} + \left(1 - \varepsilon k_{\mathrm{m}}\right)}{\delta_m}\left(T_{\mathrm{m1}} - T_{\mathrm{m2}}\right) - N_1 Cp_v\left(T_{m1} - T_{m2}\right) = 0 \tag{9}$$

將式(6)和式(7)整理成

$$h_1\left(\overline{T}_{\mathrm{w}} - T_{\mathrm{m1}}\right) - N_2\lambda - U_2\left(T_{\mathrm{m2}} - T_{cb1}\right) - N_2 Cp_g\left(T_{m2} - T_{cb1}\right) = 0 \tag{10}$$

考慮空氣間隔中自然對流和熱傳導同時發生，式(10)中的$U_2$值為總熱傳係數，以阻力串聯來表示

$$U_2 = h_g + \frac{k_g}{H_g} \tag{11}$$

假設空氣間隔中氣體為理想氣體，為蒸氣與空氣混合，式(11)中$k_g$和$h_g$分別為氣體之熱傳導係數和自然對流係數，熱傳導係數表示如下

$$k_g = X_{vap}k_v + \left(1 - X_{vap}\right)k_a \tag{12}$$

式(12)中$k_v$和$k_a$分別為水蒸氣和空氣之熱傳導係數，$X_{vap}$為水蒸氣莫爾分率，可表示如下

$$X_{vap} = \frac{P_{vg}}{P_T} \tag{13}$$

其中$P_{vg}$為氣隔層平均溫度$\overline{T}_g$下的水蒸氣壓，平均溫度以氣隔層側薄膜溫度和冷凝底板溫度平均表示

$$\overline{T}_g = \frac{T_{m2} + T_{cb1}}{2} \tag{14}$$

式(6)中$N_1$為水蒸氣通過薄膜之質量流通量，表式如下

$$N_1 = C_m\left(P_{m1} - P_{m2}\right) \tag{15}$$

式(15)中$C_m$為薄膜質傳係數，$P_{m1}$和$P_{m2}$分別為在$T_{m1}$和$T_{m2}$下水蒸氣壓。熱流流體為鹽類與水之混合物，考慮非理想雙成份混合，因此熱流端之水蒸氣壓須加入修正因子，表示如下

$$N_1 = C_m\left(x_{water}a_{water}P_{m1} - P_{m2}\right) \tag{16}$$

其中$x_{water}$為水之莫爾分率，$a_{water}$為水在鹽水溶液下之活性係數，本論文中所使用之鹽類為氯化鈉(NaCl)，式(16)中之$a_{water}$採用 Lawson 和 Lloyd[33]提到 Schofield 經由實驗求得之經驗式

$$a_{water} = 1 - 0.5x_{NaCl} - 10x_{NaCl}^2 \tag{17}$$

式(7)中$N_2$為水蒸氣通過靜止空氣層之質量流通量，表式如下

$$N_2 = C_g\left(P_{m2} - P_{cb1}\right) \tag{18}$$

式(18)中$C_g$為氣隔層中之質傳係數，式(16)與式(18)和總質量流通量關係式如下

$$N_1 = N_2 = N_T = C_T\left(x_{water}a_{water}P_{m1} - P_{cb1}\right) \tag{19}$$

其中$C_T$為總質傳係數，由質傳電阻圖顯示如下，則$C_T$可表示如下

$$C_T = \left( \frac{1}{C_m} + \frac{1}{C_g} \right)^{-1} \tag{20}$$

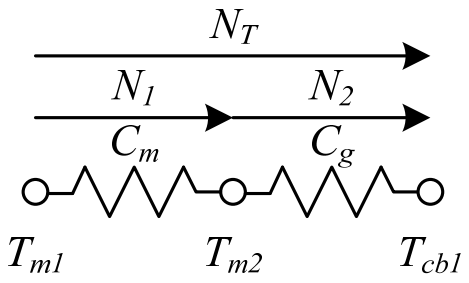



圖 6 薄膜與氣隔層質傳電阻圖

將式(19)代入式(6)、式(7)取代 $N_1$ 和 $N_2$ 變成

$$h_1\left(\overline{T}_{\mathrm{w}} - T_{\mathrm{m1}}\right) - N_T\lambda - \frac{\varepsilon k_{\mathrm{a}} + (1-\varepsilon k_{\mathrm{m}})}{\delta_m}(T_{\mathrm{m1}} - T_{\mathrm{m2}}) - N_T Cp_v\left(T_{m1} - T_{m2}\right) = 0 \tag{21}$$

$$h_1\left(\overline{T}_{\mathrm{w}} - T_{\mathrm{m1}}\right) - N_T\lambda - U_2\left(T_{\mathrm{m2}} - T_{cb1}\right) - N_T Cp_g\left(T_{m2} - T_{cb1}\right) = 0 \tag{22}$$

(3)冷凝底板 (水氣於冷凝底板處凝結)

$$Q_{e2} + Q_{c2} + Q_{s2} = Q_{c3} \tag{23}$$

其中 $Q_{c3}$ 為冷凝板與冷流體之熱對流通量，表示如下

$$Q_{e2} = N_2\lambda \tag{24}$$

$$Q_{c2} = U_2\left(T_{\mathrm{m2}} - T_{cb1}\right) \tag{25}$$

$$Q_{s2} = N_2 Cp_g\left(T_{m2} - T_{cb1}\right) = N_T Cp_g\left(T_{m2} - T_{cb1}\right) \tag{26}$$

$$Q_{c3} = h_3\left(T_{\mathrm{cb2}} - \overline{T}_f\right) \tag{27}$$

冷凝板的 $\delta_p$ (厚度)為 1cm，因此考慮冷凝板內部熱傳導，熱電阻示意圖如圖 7

$$h_3\left(T_{cb2} - \overline{T}_f\right) = \left( \frac{\delta_p}{k_p} + \frac{1}{h_3} \right)^{-1} \left(T_{cb1} - \overline{T}_f\right) \tag{28}$$

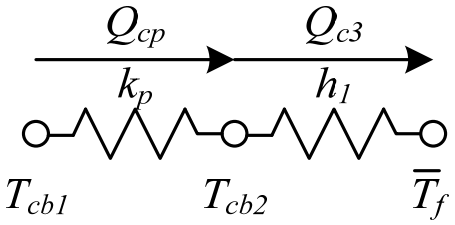



圖 7 冷凝板與冷流體熱電阻圖

式(28)中$\delta_p$、$k_p$、與$h_3$分別為冷凝板之厚度、熱傳到係數、與冷柳體之熱對流係數。將式(28)代入式(23)中並整理成

$$N_T\lambda - U_2\left(T_{\mathrm{m2}} - T_{cb1}\right) - N_T Cp_g\left(T_{m2} - T_{cb1}\right) + \left(\frac{\delta_p}{k_p} + \frac{1}{h_3}\right)^{-1}\left(T_{cb1} - \overline{T}_f\right) = 0 \quad (29)$$

(4)冷流體

$$Q_{c3} = \frac{\rho_f V_f Cp_f}{BL}\left(T_{f,o} - T_{f,i}\right) \quad (30)$$

其中$\rho_f$、$V_f$與$Cp_f$為冷流體之密度、體積流量與熱容量，$T_{f,i}$與$T_{f,o}$分別為冷流體之進口、出口溫度，$Q_{c3}$可表示如下

$$Q_{c3} = h_3\left(T_{\mathrm{cb2}} - \overline{T}_f\right) \quad (31)$$

$$\overline{T}_f = \frac{T_{f,i} + T_{f,o}}{2} \quad (32)$$

將式(28)代入式(30)中並整理成

$$\overline{T}_f = \frac{\dfrac{h_3 k_p}{h_3\delta_p + k_p}T_{cb1} + \dfrac{2\rho_f V_f Cp_f}{BL}T_{f,i}}{\dfrac{2\rho_f V_f Cp_f}{BL} + \dfrac{h_3 k_p}{h_3\delta_p + k_p}} \quad (33)$$

將式(33)代入式(29)冷凝板之通量平衡中可變成

$$N_T\lambda - \left(U_2 + N_T Cp_g\right)\left(T_{\mathrm{m2}} - T_{cb1}\right) + \left(\frac{\delta_p}{k_p} + \frac{1}{h_3} + \frac{BL}{2\rho_f V_f Cp_f}\right)^{-1}\left(T_{cb1} - T_{f,i}\right) = 0 \quad (34)$$

將式(33)中之冷凝水平均溫度$\overline{T}_f$展開整理成冷流體出口溫度方程式

$$T_{f,o}=\frac{\dfrac{h_3k_p}{h_3\delta_p+k_p}T_{cb1}+\left(\dfrac{2\rho_fV_fCp_f}{BL}-\dfrac{h_3k_p}{h_3\delta_p+k_p}\right)T_{f,i}}{\dfrac{2\rho_fV_fCp_f}{BL}+\dfrac{h_3k_p}{h_3\delta_p+k_p}} \tag{35}$$

## 3-2-2 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統

太陽能氣隔式薄膜蒸發是以傳統氣隔式薄膜蒸發系統加入吸收板板之系統，其通量傳送機制可看圖 8

**(1)** 玻璃面蓋之通量平衡

$$\alpha_gS_0+Q_{c0}+Q_{r0}=Q_{cs}+Q_{rs} \tag{36}$$

其中$S_0$與$\alpha_g$為入射量與玻璃面蓋吸收度，$Q_{c0}$與$Q_{r0}$為玻璃面蓋與大氣之熱對流與熱輻射之通量傳送，$Q_{cs}$與$Q_{rs}$為玻璃面蓋與吸收板間之熱對流與熱輻射之通量傳送，表示如下

$$Q_{c0}=h_0\left(T_{p1}-T_c\right) \tag{37}$$

$$Q_{r0}=\frac{\sigma\left(T_{p1}{}^4-T_c{}^4\right)}{1/e_p+1/e_c-1} \tag{38}$$

$$Q_{cs}=h_s\left(T_c-T_s\right) \tag{39}$$

$$Q_{rs}=e_c\sigma\left(T_c{}^4-T_s{}^4\right) \tag{40}$$

$\sigma$、$e_p$、與$e_c$分別為波茲曼常數、吸收板與玻璃面蓋之放射率，$h_0$與$h_s$分別為玻璃面蓋與吸收板和大氣之熱對流係數，$T_{p1}$、$T_c$、與$T_s$分別為吸收板溫度、玻璃面蓋溫度與大氣溫度。將式(36)整理成

$$T_c=\frac{\alpha_gS_0+h_0T_{p1}+h_sT_s+F_{pc}\sigma\left(T_{p1}{}^4-T_c{}^4\right)-\sigma e_c\left(T_c{}^4-T_s{}^4\right)}{h_0+h_s} \tag{41}$$

**(2)** 吸收板

$$\alpha_p \tau_g S_0 = Q_{c0} + Q_{r0} + Q_{c1} + Q_{r1} \tag{42}$$

其中

$$Q_{c0} = h_0 \left( T_{p1} - T_c \right) \tag{43}$$

$$Q_{r0} = \frac{\sigma \left( T_{p1}{}^4 - T_c{}^4 \right)}{1/e_p + 1/e_c - 1} \tag{44}$$

$$Q_{c1} = h_1 \left( T_{p2} - \overline{T}_w \right) \tag{45}$$

$$Q_{r1} = \frac{\sigma \left( T_{p2}{}^4 - T_{m1}{}^4 \right)}{1/e_p + 1/e_m - 1} \tag{46}$$

流體間之熱對流通量，$Q_{r1}$ 為吸收板對薄膜之熱輻射通量。吸收板的 $\delta_p$ (厚度)為 1cm，因此考慮吸收板內部熱傳導，熱電阻示意圖如圖 9

$$h_1 \left( T_{p2} - \overline{T}_w \right) = \left( \frac{\delta_p}{k_p} + \frac{1}{h_1} \right)^{-1} \left( T_{p1} - \overline{T}_w \right) \tag{47}$$

忽略吸收板對薄膜的幅射通量 $Q_{r1}$，並將式(47)代入式(43)整理成

$$T_{p1} = \frac{\alpha_p \tau_g S_0 + \left( \dfrac{h_1 k_p}{k_p + h_1 \delta_p} \right) \overline{T}_w + h_0 T_c - F_{pc} \sigma \left( T_{p1}{}^4 - T_c{}^4 \right)}{h_1 + h_0} \tag{48}$$

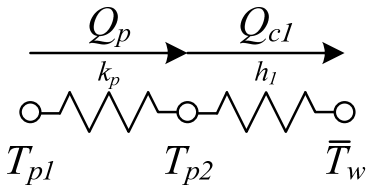



圖 8 吸收板與熱流體熱電阻圖

$\alpha_p$ 與 $\tau_g$ 分別為吸收板之吸收率、玻璃面蓋穿透率，$Q_{c1}$ 與吸收板與熱

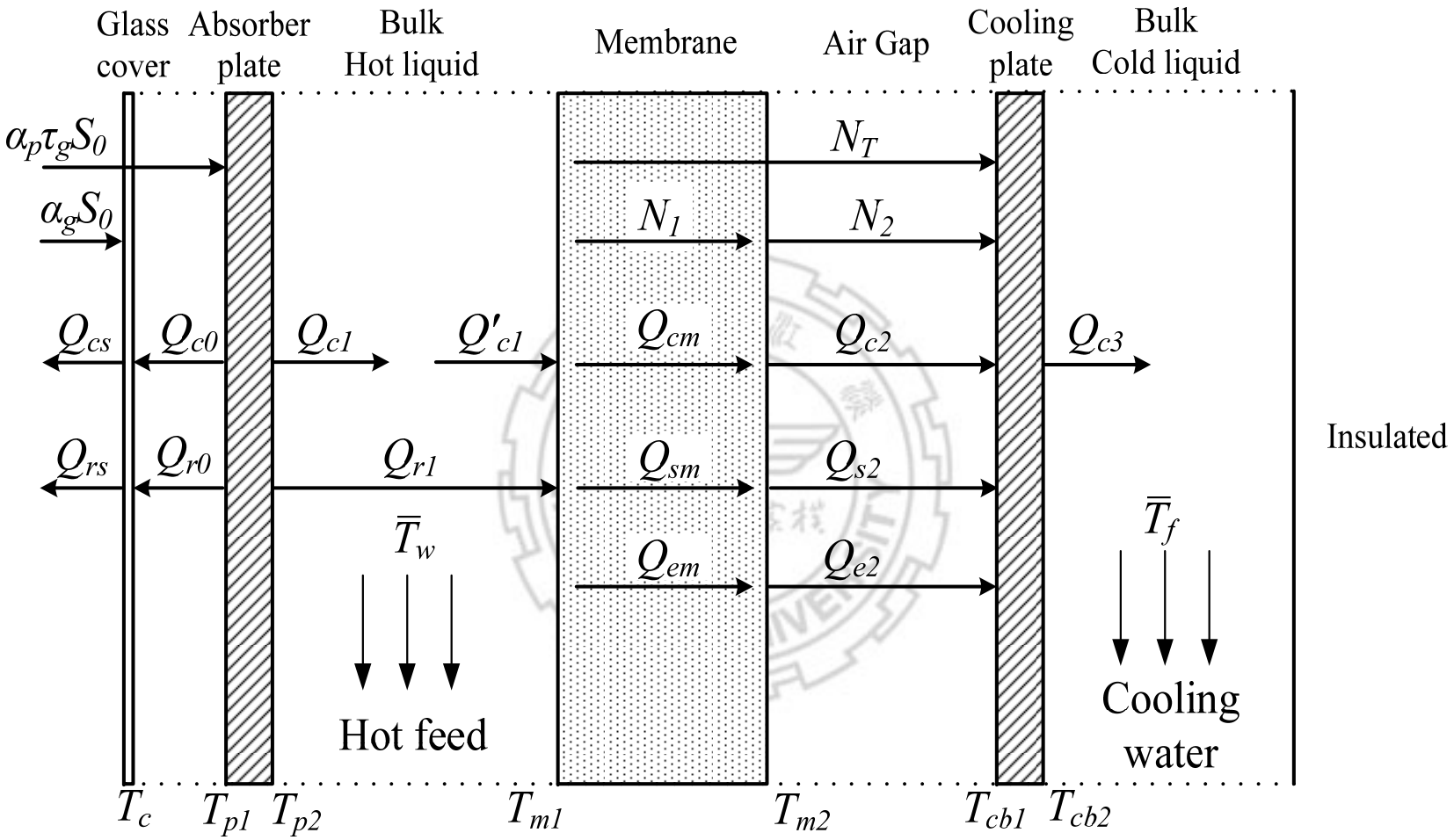



圖 9 單效太陽能薄膜蒸發器通量流向圖

**(3)** 熱流通道流體

$$Q_{c1}+\frac{\rho_w V_w Cp_w}{BL}\left(T_{w,i}-T_c\right)=Q'_{c1}+\frac{\rho_w V_w Cp_w}{BL}\left(T_{w,o}-T_c\right) \tag{49}$$

其中 $\rho_w$、$V_w$ 與 $Cp_w$ 為熱流體之密度、體積流量與熱容量，$T_{w,i}$ 與 $T_{w,o}$ 分別為熱流體進口、出口溫度，$Q_{c1}$ 為吸收板與熱流體之熱對流通量，$Q'_{c1}$ 為熱流體與薄膜之熱對流通量，表示如下

$$Q_{c1}=h_1\left(T_{p2}-\overline{T}_w\right) \tag{50}$$

$$Q'_{c1}=h_1\left(\overline{T}_w-T_{m1}\right) \tag{51}$$

$T_{p2}$ 為吸收板與熱流體交界溫度，$T_{m1}$ 為薄膜與熱流體交界溫度，$\overline{T}_w$ 為熱流體平均溫度，將式(47)帶入式(49)整理成

$$\frac{h_1 k_p}{h_1\delta_p+k_p}T_{p1}-\left(\frac{2h_1k_p+h_1^2\delta_p}{h_1\delta_p+k_p}+\frac{\rho_w V_w Cp_w}{BL}\right)\overline{T}_w+h_1T_{m1}-\frac{2\rho_w V_w Cp_w}{BL}T_{w,i}=0 \tag{52}$$

**(4)** 疏水性薄膜（蒸氣於薄膜處產生）

$$h_1\left(\overline{T}_{\mathrm{w}}-T_{\mathrm{m1}}\right)+\frac{\sigma\left(T_{\mathrm{p2}}{}^4-T_{\mathrm{m1}}{}^4\right)}{1/e_{\mathrm{p}}+1/e_{\mathrm{m}}-1} \tag{53}$$

$$=N_T\lambda+k_m(T_{\mathrm{m1}}-T_{\mathrm{m2}})+N_T Cp_v\left(T_{m1}-T_{m2}\right) \tag{54}$$

$$=N_T\lambda+U_2\left(T_{\mathrm{m2}}-T_{cb1}\right)+N_T Cp_g\left(T_{m2}-T_{cb1}\right) \tag{55}$$

$Cp_v$ 為水蒸氣之熱容量，$N_T$ 為總質傳通量，忽略吸收板對薄膜的輻射能，將式(53)和式(54)整理成

$$h_1\left(\overline{T}_{\mathrm{w}}-T_{\mathrm{m1}}\right)-N_T\lambda-\frac{\varepsilon k_{\mathrm{a}}+(1-\varepsilon k_{\mathrm{m}})}{\delta_m}(T_{\mathrm{m1}}-T_{\mathrm{m2}})-N_T Cp_v\left(T_{m1}-T_{m2}\right)=0 \tag{56}$$

將式(54)和式(55)整理成

$$h_1\left(\overline{T}_{\mathrm{w}}-T_{\mathrm{m1}}\right)-N_T\lambda-U_2\left(T_{\mathrm{m2}}-T_{cb1}\right)-N_T Cp_g\left(T_{m2}-T_{cb1}\right)=0 \tag{57}$$

**(5)** 冷凝底板 (水氣於冷凝底板處凝結)

$$Q_{e2}+Q_{c2}+Q_{s2}=Q_{c3} \tag{58}$$

其中

$$Q_{e2}=N_2\lambda \tag{69}$$

$$Q_{c2}=U_2\left(T_{\mathrm{m2}}-T_{cb1}\right) \tag{60}$$

$$Q_{s2}=N_2Cp_g\left(T_{m2}-T_{cb1}\right)=N_TCp_g\left(T_{m2}-T_{cb1}\right) \tag{61}$$

$$Q_{c3}=h_3\left(T_{\mathrm{cb2}}-\overline{T}_f\right) \tag{62}$$

$h_3$ 為冷流體之熱對流係數，$T_{cb1}$ 為冷凝板與氣隔層之交界溫度，$\overline{T}_f$ 為冷流體平均溫度，與 2-1.1 薄膜蒸發系統一樣整理成

$$N_T\lambda-\left(U_2+N_TCp_g\right)\left(T_{\mathrm{m2}}-T_{cb1}\right)+\left(\frac{\delta_p}{k_p}+\frac{1}{h_3}+\frac{BL}{2\rho_fV_fCp_f}\right)^{-1}\left(T_{cb1}-T_{f,i}\right)=0 \tag{63}$$

**(6)** 冷凝水

$$Q_{c3}=\frac{\rho_fV_fCp_f}{BL}\left(T_{f,o}-T_{f,i}\right) \tag{64}$$

其中

$$Q_{c3}=h_3\left(T_{\mathrm{cb2}}-\overline{T}_f\right) \tag{65}$$

$$\overline{T}_f=\frac{T_{f,i}+T_{f,o}}{2} \tag{66}$$

與 2-1-1 薄膜蒸發系統一樣整理成

$$T_{f,o}=\frac{\dfrac{h_3k_p}{h_3\delta_p+k_p}T_{cb1}+\left(\dfrac{2\rho_fV_fCp_f}{BL}-\dfrac{h_3k_p}{h_3\delta_p+k_p}\right)T_{f,i}}{\dfrac{2\rho_fV_fCp_f}{BL}+\dfrac{h_3k_p}{h_3\delta_p+k_p}} \tag{67}$$

## 3-3 熱質傳係數與物理性質

在太陽能薄膜蒸發系統中，在吸收板與外界間放置一玻璃面蓋減少吸收板與外界的熱交換，此封閉空氣層考慮吸收板與面蓋之間的自然熱對流，並且會受到傾斜角度不同而影響，自然對流之熱傳係數藉由學者 Hollands[34]所提出的密閉傾斜面的 Nusselt-Rayleigh 數的實驗公式得到:

$$Nu_0 = \frac{h_0 H_a}{k_a}$$

$$= 1 + 1.44\left[1 - \frac{1708}{Ra_0 \cos\phi}\right]^+ \left(1 - \frac{1708\sin(1.8\phi)^{1.6}}{Ra_0 \cos\phi}\right) + \left[\left(\frac{Ra_0 \cos\phi}{5830}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right]^+ \quad (68)$$

式(68)中 $k_a$ 為空氣的熱傳導係數，$Ra_0$ 為 Rayleigh number 可表示如下

$$Ra_0 = \frac{gH_0^3 \beta_a \Delta T}{\nu_a \alpha_a} = \frac{gH_0^3 \beta_a \left(T_{p1} - T_c\right)}{\nu_a \alpha_a} \quad (69)$$

式(69)中的$[\ ]^+$定義成:

$$[x]^+ = \frac{(|x| + x)}{2} \quad (70)$$

式(69)中 $\nu_a$ 、$\alpha_a$ 和 $\beta_a$ 分別為空氣的動黏度、熱擴散係數和熱膨脹係數，$H_0$ 為密閉區間的高度，此公式適用範圍可由表 1 計算得到，$L$ 為密閉區間長，$\phi^*$ 為是用最大傾斜角度。本論文中密閉區間高為 2 cm，長為 20 cm，因此適用範圍傾斜角度 $0 < \phi < 60°$ 。

表 1 通道設計參數與最大傾斜角

| $L/H_0$ | 1 | 3 | 6 | 12 | $>12$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $\phi^*$ | 25° | 53° | 60° | 67° | 70° |

玻璃面蓋與外界大氣應流動所產生的對流熱傳係數$h_s$，主要是受大氣風速影響，藉由陳氏[27]提及之經驗式來計算如下

$$h_s = 4.8 + 3.3V \tag{71}$$

式(71)中$V$意指外界之空氣流動速度，其單位為$m \cdot \sec^{-1}$。

通道中流體流動狀態可利用雷諾數來判斷，在本文中矩形通道雷諾數(Reynolds number) $\mathrm{Re}_w$、$\mathrm{Re}_f$定義為

$$\text{熱流體通道：}\ \mathrm{Re}_w = \frac{\rho_w v_w D_e^w}{\mu_w} \tag{72-a}$$

$$\text{冷流體通道：}\ \mathrm{Re}_f = \frac{\rho_f v_f D_e^f}{\mu_f} \tag{72-b}$$

其中$v_f$和$v_f$為矩形通道之平均速度，可定義為

$$\text{熱流體通道：}\ v_w = \frac{V_w}{H_w B} \tag{73-a}$$

$$\text{冷流體通道：}\ v_f = \frac{V_f}{H_f B} \tag{73-b}$$

其中相當管徑(equivalent diameter) $D_e$，可定義為

$$D_e^w = \frac{4H_w B}{2(H_w + B)} \tag{74-a}$$

$$D_e^f = \frac{4H_f B}{2(H_f + B)} \tag{74-b}$$

對於熱、冷流體流進入系統後，熱流體流經通道內之吸收板、薄膜間，冷流體流經冷凝底板、底板之間，所需計算之對流熱傳係數$h_1$和$h_3$，依據雷諾數Re範圍不同做計算。本研究中理論分析之流體流動考慮層流狀態，根據 Gryta 和 Tomaszewska[35]在文中對薄膜蒸餾做熱傳分析，選擇較適用於層流之經驗式來計算對流熱傳係數，此經驗式適用範圍$\mathrm{Re} < 2100$

$$Nu = 4.36 + \frac{0.036\,\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}\left(\frac{D_e}{L}\right)}{1 + 0.011\left[\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}\left(\frac{D_e}{L}\right)\right]^{0.8}} \tag{75}$$

AGMD 系統中，蒸氣通過薄膜後，在薄膜與冷凝底板間以熱傳導和自然熱對流做熱量傳輸，其中自然熱對流係數$h_{gc}$會受到傾斜角度影響，可藉由 Arnold et al.[36]所提出的密閉傾斜面向下加熱的實驗公式計算

$$Nu_g = \frac{h_g H_g}{k_g}$$

$$= 1 + \left[0.197\left(\frac{L}{H_g}\right)^{-\frac{1}{9}} Ra_2^{\frac{1}{4}} - 1\right]\sin\phi \tag{76}$$

其中$L$為薄膜蒸發器的長度。假設氣氣隔層中氣體為理想氣體，且物理性質都視為常數，則式(76)中的$Ra_2$值可表示成

$$Ra_2 = \frac{gH^3\beta_g}{\nu_g\alpha_g}\left[\left(T_{m2} - T_{cb}\right) + \frac{P_{m2} - P_{cb1}}{2.65P_T - P_{m2}}T_{m2}\right] \tag{77}$$

在薄膜蒸發中，蒸氣通過薄膜的模式可分為三種: (1) Knudsen diffusion model; (2)Molecular diffusion model; (3)Poiseuille flow model; 數學模式表示如下

Knudsen diffusion: $$C_K = 1.064\frac{r\varepsilon}{\tau\delta_m}\left(\frac{M}{RT}\right)^{0.5} \tag{78}$$

Molecular diffusion: $$C_M = \frac{1}{Y_{\ln}}\frac{D\varepsilon}{\tau\delta_m}\frac{M}{RT} \tag{79}$$

Poiseuille flow: $$C_P = 0.125\frac{r^2\varepsilon}{\tau\delta_m}\frac{MP_m}{\eta RT} \tag{80}$$

在本研究中所使用薄膜材料為聚四氟乙烯(PTFE)和聚丙烯(PP)的複

合膜，考慮之過膜模式為 Knudsen diffusion 與 Molecular diffusion 串聯，質傳阻力如圖 10

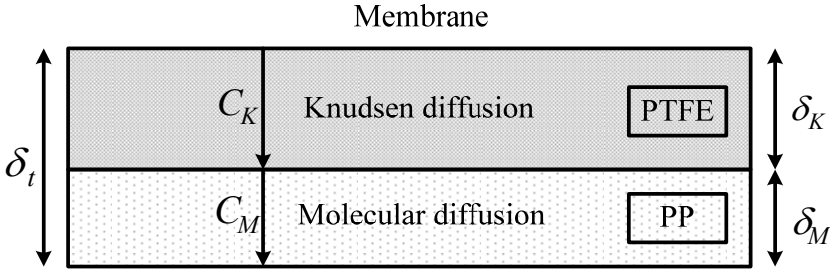



圖 10 薄膜內部質傳阻力圖

在複合膜中，蒸氣以 Knudsen diffusion 通過第一層 PTFE 薄膜，再以 Molecular diffusion 通過 PP 層，因此過膜總質傳係數可寫成

$$C_m = \left( \frac{1}{C_K} + \frac{1}{C_M} \right)^{-1} \tag{81}$$

其中

$$C_K = 1.064 \frac{r\varepsilon}{\tau \delta_K} \left( \frac{M}{R\overline{T}_m} \right)^{0.5} \tag{82}$$

$$C_M = \frac{1}{Y_{\ln}} \frac{D_{wa}^m \varepsilon}{\tau \delta_M} \frac{M}{R\overline{T}_m} \tag{83}$$

$\delta_K$ 和 $\delta_M$ 分別為 PTFE 和 PP 薄膜厚度，$D_{wa}^m$ 為薄膜中之擴散係數，利用雙成份氣體擴散係數[37]表示如下

$$D_{wa} = \frac{0.00143 T^{1.75}}{P_T \left[ 2\left( \frac{1}{M_w} + \frac{1}{M_a} \right)^{-1} \right]^{0.5} \left( \dot{v}_w^{1/3} + \dot{v}_a^{1/3} \right)^2} \tag{84}$$

其中 $M_w$、 $M_a$、$\dot{v}_w$ 及 $\dot{v}_a$ 為空氣與水之分子量與分子擴散體積， 可將式(84)表示成

$$D_{wa}^m = 1.19 \times 10^{-9} \overline{T}_m^{1.75} \tag{85}$$

其中$\overline{T}_m$為薄膜平均溫度，可表示為$\overline{T}_m = \dfrac{T_{m1} + T_{m2}}{2}$，式(82)、(83)中之$\tau$為薄膜曲折度，可以表示成

$$\tau = \frac{1}{\varepsilon} \tag{86}$$

蒸氣通過薄膜後在氣隔層中以 Molecular diffusion 的方式作質量傳送，質傳係數$C_g$可以表示成

$$C_g = \frac{1}{Y_{\ln}} \frac{D_{wa}^g}{H_g} \frac{M}{R\overline{T}_g} \tag{87}$$

式(87)中之$D_{wa}^g$為氣隔層中之擴散係數，與式(85)一樣可以表示成

$$D_{wa}^g = 1.19 \times 10^{-4} \overline{T}_g^{1.75} \tag{88}$$

$\overline{T}_g$為氣隔層平均溫度，可表示為$\overline{T}_g = \dfrac{T_{m2} + T_{cb1}}{2}$

在本研究中，熱流體的溫度為操作變因之一，在此理論推導中考慮氯化鈉水溶液之密度會隨溫度變化而改變，於固定濃度 3.5%下，氯化鈉水溶液與溫度關係可表示如下，詳細推導可看附錄(一)

$$\rho_w = 840.27 + 414.12\left(\frac{\overline{T}_w}{T_R}\right) - 227.32\left(\frac{\overline{T}_w}{T_R}\right)^2 \tag{89}$$

其中$\overline{T}_w$為平均溫度，參考溫度$T_R = 273.15$

## 3-4 熱效率與蒸濾液增加效率

本研究中之熱效率計算，針對氣隔式薄膜蒸發與太陽能氣隔式薄膜蒸發做計算與比較，計算公式如下

$$\eta_t = \frac{Q_L}{Q_L + Q_C} \times 100\% \tag{90}$$

其中

$$Q_L = N_T \lambda \tag{91}$$

$$Q_C = U_2 \left( T_{\mathrm{m2}} - T_{cb1} \right) + N_T Cp_g \left( T_{m2} - T_{cb1} \right) \tag{92}$$

本研究中之蒸濾液增加效率計算，針對傳統氣隔式與太陽能氣隔式薄膜蒸發之濾液量做計算與比較，計算公式如下

$$I_N = \frac{N_S - N_A}{N_A} \times 100\% \tag{93}$$

其中　$N_A$:傳統氣隔式薄膜蒸發濾液量

$N_S$:太陽能氣隔式薄膜蒸發濾液量

## 3-5 數值計算流程

以太陽能薄膜蒸發為例，首先輸入系統參數($L$、$W$、$H_0$、$Cp\ldots$)，及操作條件($S_0$、$V_w$、$V_f$、$T_{w,i}$、$T_{f,i}\ldots$)，吸收板溫度$T_{p1}$先利用實驗測得當作初始條件，代入式(41)利用疊代求得玻璃面蓋溫度$T_c$，再帶入式(52)、(56)、(57)、(63)中，並利用數值方法 Newton Raphson 解 4 條聯立方程式，可求得熱流流體出口溫度($T_{w,o}$)、薄膜兩側溫度($T_{m1}$、$T_{m2}$)及冷凝底板溫度($T_{cb1}$)，將$T_{cb1}$代入式(67)可求得冷流流體出口溫度，再利用式(48)可求得新的$T_{p1}^{*}$，再代回最初之方程式疊代，計算至絕對誤差小於$10^{-6}$後，及可求出所需之薄膜側邊溫度及流體進出口溫度，最後再代入濾液量、熱效率及濾液量增加效率方程式，$N_T$、$\eta_t$和$I_N$及為所求，詳細計算流程圖可看附錄(二)。

# 第四章 實驗

本實驗之系統為氣隔式薄膜蒸發器與太陽能氣隔式薄膜蒸發器，利用氯化鈉溶液模擬海水，來進行海水淡化實驗，取得實驗值來驗證理論模型正確性。

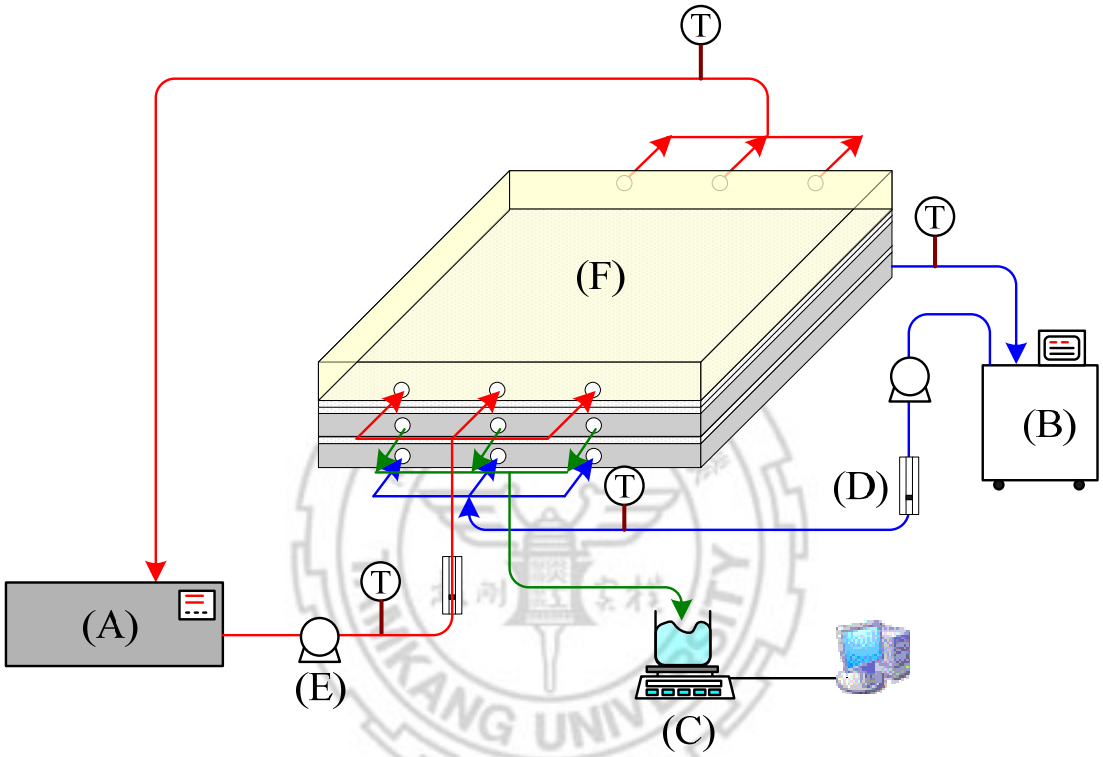
## 4-1 傳統型氣隔式薄膜蒸發器實驗

### 4-1-1 實驗裝置與測量儀器

本實驗為傳統型氣隔式薄膜蒸發系統，實驗裝置可分為五個部份:(1)氣隔式薄膜蒸發器;(2)冷、熱恆溫槽;(3)流體運輸裝置與流量計;(4)大氣溫度控制;(5)溫度測定器;(6)電子天平及周邊設備;(7)其他輔助設備;詳細裝置配置如圖 11 所示，茲分別簡述如下:

(1) 傳統型氣隔式薄膜蒸發器

本實驗系統之氣隔式薄膜蒸發器，整體系統如圖 12 所示，頂板為壓克力板，尺寸為長 0.31 m、寬 0.26 m，厚度為 0.03 m，下層為兩塊鋁板，分別為冷凝板與底板，尺寸為長 0.31 m、寬 0.26 m，厚度為 0.01 m，頂板與底板在兩側 3 cm 處挖一條渠道，如圖 13 所示，其尺寸為長 0.25 m、寬 1.2 cm、高 0.5 cm，而冷凝板只需在一側挖相同尺寸的渠道，此渠道為冷、熱流體的進出口和蒸發液的出口。利用墊片置入板與板之間來形成熱流體通道、冷凝水通道、和氣隔層，冷、熱流體通道所使用的墊片厚度為 $2\times10^{-3}$ m，氣隔層墊片依照實驗變因使用的厚度有 $2\times10^{-3}$ m、$5\times10^{-3}$ m、和 $1\times10^{-2}$ m 三種，薄膜放置在熱流體通道和氣隔層墊片之間。在薄膜和氣隔層墊片之間置入一




(A) Hot fluid thermostat
(B) Cold fluid thermostat
(C) Beaker and electronic balance
(D) Flow meter
(E) Pump
(F) Membrane distillation module

圖 11 傳統型氣隔式薄膜蒸發器實驗配置圖

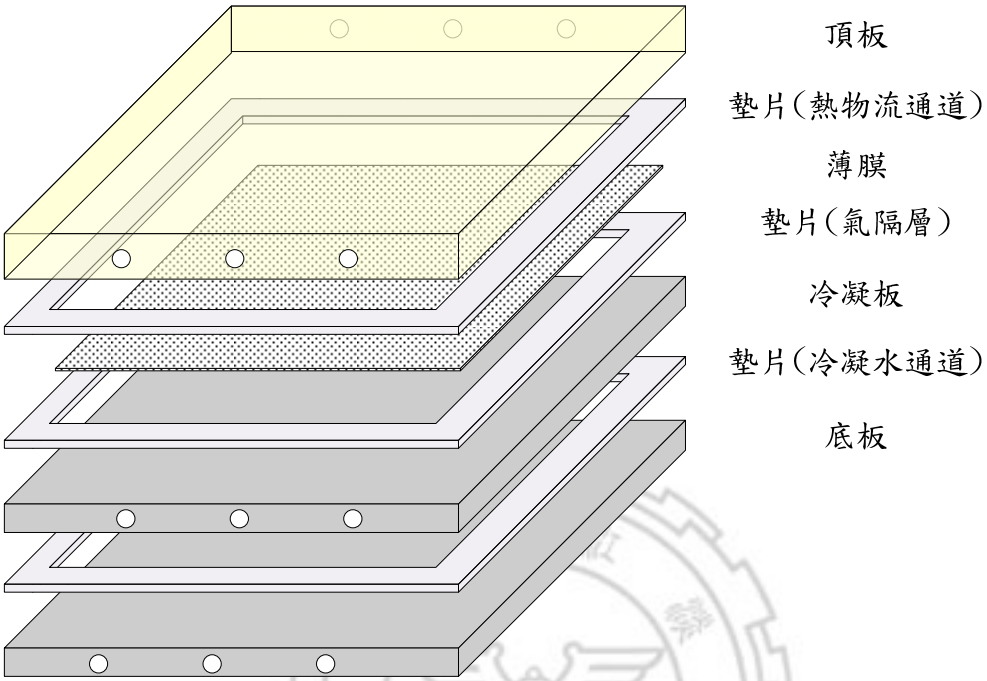



圖 12 傳統型薄膜蒸發裝置分解圖

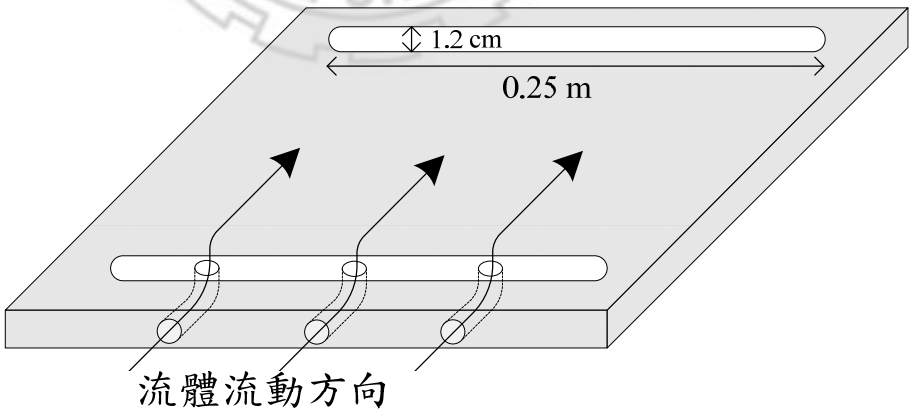



圖 13 鋁板渠道流動圖

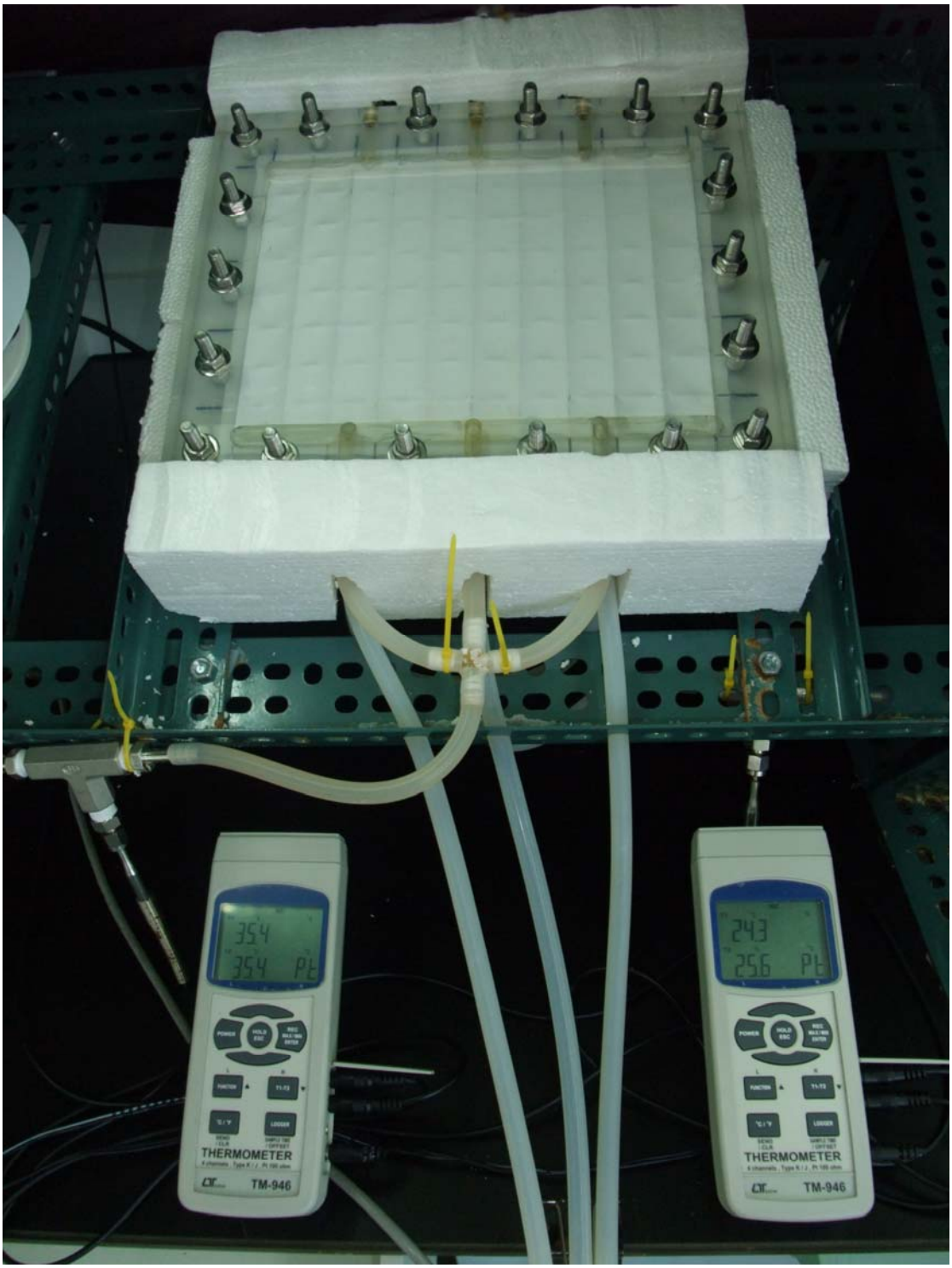



圖 14 傳統型氣隔式薄膜蒸發實驗裝置照

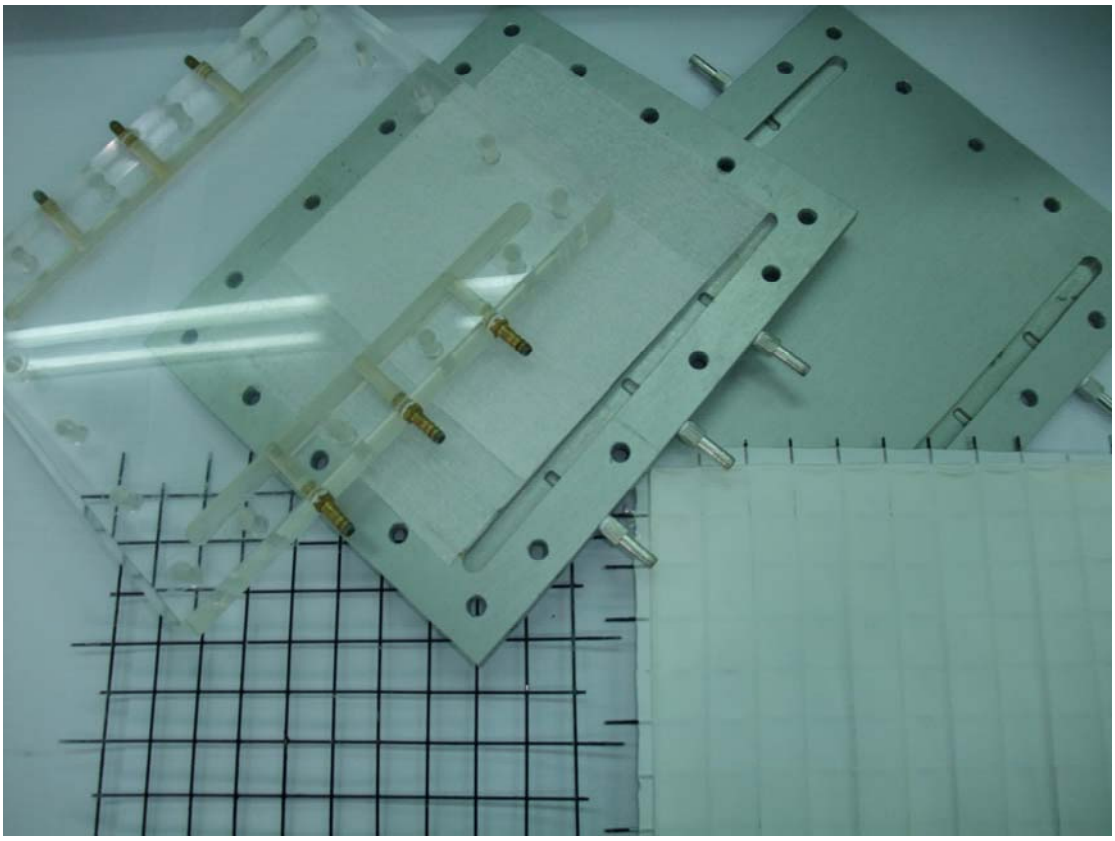


圖 15 傳統型氣隔式薄膜蒸發實驗分解裝置照

支撐架，支撐架為鐵鍍鋅的方格網，線的厚度為 $1.6\times10^{-3}$ m，用來支撐薄膜防止薄膜下陷造成氣隔層高度改變。實驗中所使用的薄膜為疏水性薄膜，由 ADVANTEC 製造的複合膜，材質為聚四氟乙烯(PTFE)和聚丙烯(PP)的複合膜，薄膜性質如表 2:

表 2 薄膜性質

| Membrane | | PTFE with Supported PP Net |
|---|---|---|
| Pore size(μm) | | 0.20 |
| Bubble Point | MPa | ≧0.097 |
| | Psi | ≧14.1 |
| Flow Rate | Acetone(mL/min/cm$^2$) | 61.4 |
| | Air(L/min/cm$^2$) | 4.5 |
| Porosity(%) | | 72 |
| Maximum Operating Temperature(℃) | | 120 |
| Water Break Through | MPa | 0.28 |
| | Psi | 40.0 |
| Thickness(μm) | | 130 |

(2) 冷、熱恆溫槽

此實驗利用 DENG YNG 公司的冷、熱恆溫槽，其產品型號分別為 D-650 和 G-50，分別用來控制冷卻水和熱流體的進口溫度。

(3) 流體運輸裝置與流量計

實驗中利用 ASTK 製的轉矩控制馬達和 US-62 組合型調速器來運輸流體，利用調整轉速來達到較穩定的流體輸出。流量控制是利用 FONG-JEI 所製作的 2 L/min 流量計。

(4) 大氣溫度控制

大氣溫度利用實驗室冷氣機來控制，將溫度固定在室溫 25℃。

(5) 溫度測定器

本實驗在蒸發器系統中分別測得熱流體及冷卻水的進口、出口溫

度，共測量四個點，每點置入一隻 PT-type 之熱電偶式數位溫度探針，並連接 LT Lutron 製的型號 PM946 的溫度計來測得溫度。

(6) 電子天平及周邊設備

實驗所使用的電子天平是 Precisa 製造，型號為 BJ 610C，利用燒杯收集蒸發液，並放置在電子天平上，將電子天平連接電腦以便紀錄資料。

(7) 其他輔助設備

實驗中為了避免熱能損失，利用保麗龍將蒸發器與外界隔絕。

TAMKANG UNIVERSITY

### 4-1-2 實驗步驟

本實驗主要探討系統在不同進口溫度、進口質量流率及不同氣隔層高度之下，得到濾液量之實驗值與理論模型計算之理論值間的正確性與誤差。其實驗步驟如下:

(1) 配置 3.5 wt%鹽水溶液 15 L 倒入進料容器中，接上進出口圓管，並放入熱恆溫槽中。

(2) 將熱恆溫槽和冷恆溫槽注入水至 8~9 分滿，並開啟恆溫槽之電源。

(3) 將蒸發器冷凝底板的出口對準燒杯，並放置在電子秤上。

(4) 確認電子秤是否與電腦軟體連線。

(5) 開啟輸送泵浦，並調整流量至設定值。

(6) 調整恆溫槽設定溫度，使流體進出口溫度符合設定條件。

(7) 待進出口溫度達穩定，記錄流體進出口溫度與蒸發液量。

(8) 改變操作條件(進口流量、進口溫度)，重複步驟(5)~(7)。

(9) 改變設計參數(空氣間隔厚度)，重複步驟(5)~(8)。

(10) 實驗結束，關閉輸送泵浦、恆溫槽電源開關。

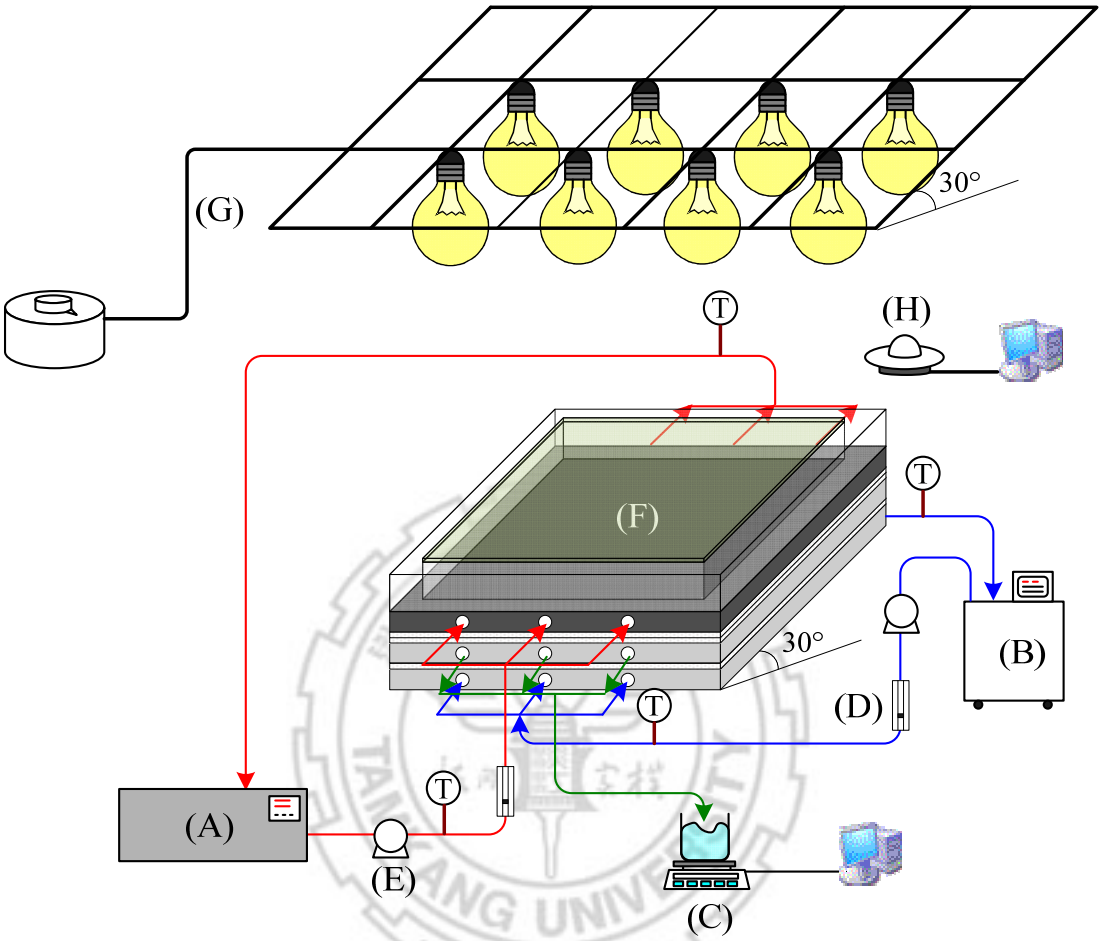
# 4-2 太陽能氣隔式薄膜蒸發器實驗

## 4-2-1 實驗裝置與測量儀器

在本實驗中，針對 3.1 的薄膜蒸發系統，加入太陽能板，來進行太陽能氣隔式薄膜蒸發系統實驗，並利用燈泡來模擬太陽光。此實驗目的是藉由太陽能板吸收太陽能光，直接加熱熱流體，來提升蒸發效率。實驗中所使用的設備與測量儀器和 3.1 大略相同，改變了蒸發器模組及加入了二個部份為:(1)太陽能氣隔式薄膜蒸發器;(2)人照光源與周邊設備;(3)入射儀測定儀;(4)其他輔助設備，配置圖如圖 14 所示，茲分別簡述如下:

(1) 太陽能氣隔式薄膜蒸發器

太陽能氣隔式薄膜蒸發器系統與 3.1 相似，整體系統如圖 15 所示，將上層壓克力板改成吸收板，吸收板為經過陽極處理的鋁板，尺寸為長 31cm、寬 26cm，厚度為 1cm，吸收板朝上面均勻塗上一層黑色玻璃漆，吸收度為 0.9，由台灣太陽能源科技工業股份有限公司製造。吸收板上多一層壓克力框，外尺寸為長 31cm、寬 26cm，內尺寸為長 25cm、寬 20cm，厚度為 2cm，在壓克力框上加上玻璃面蓋，減少吸收板對外界的熱量損失，面蓋尺寸為長 25.5cm、寬 20.2cm，厚度為 0.3cm，玻璃穿透率經由實驗測得為 0.9。




(A) Hot fluid thermostat
(B) Cold fluid thermostat
(C) Beaker and electronic balance
(D) Flow meter
(E) Pump
(F) Membrane distillation module
(G) Transformer and infrared lamps
(H) Pyranometer sensor

圖 16 太陽能氣隔式薄膜蒸發器實驗配置圖

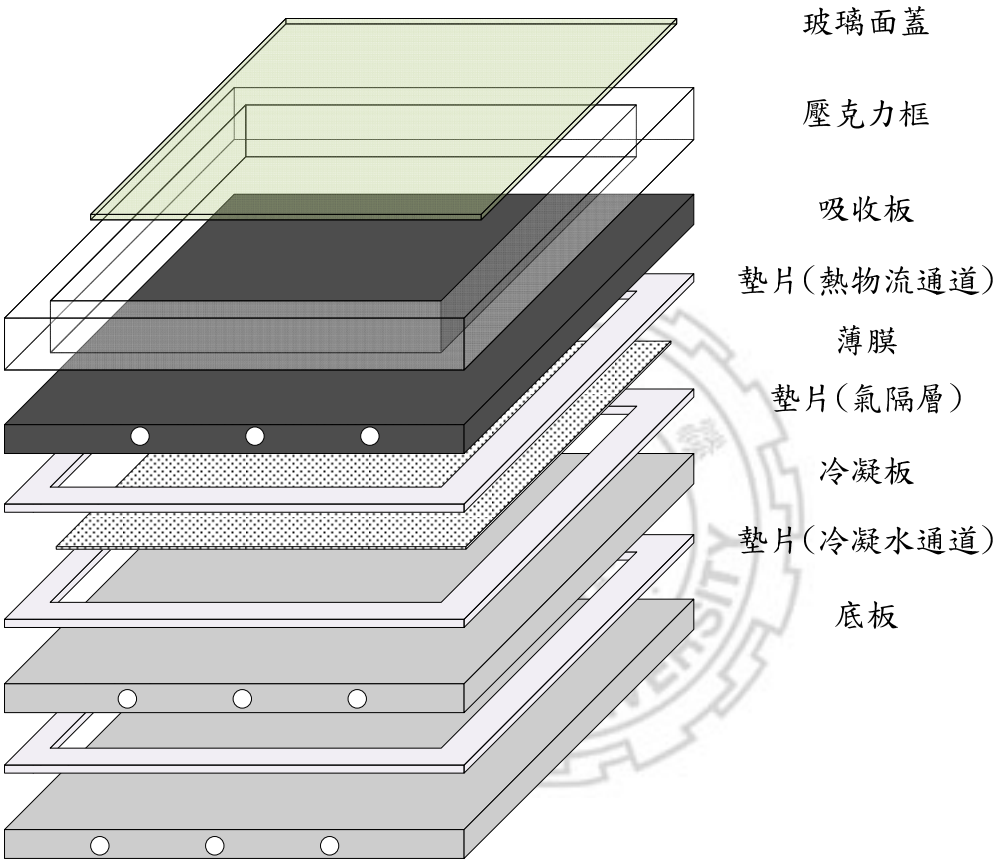



圖 17 太陽能氣隔式薄膜蒸發裝置分解圖

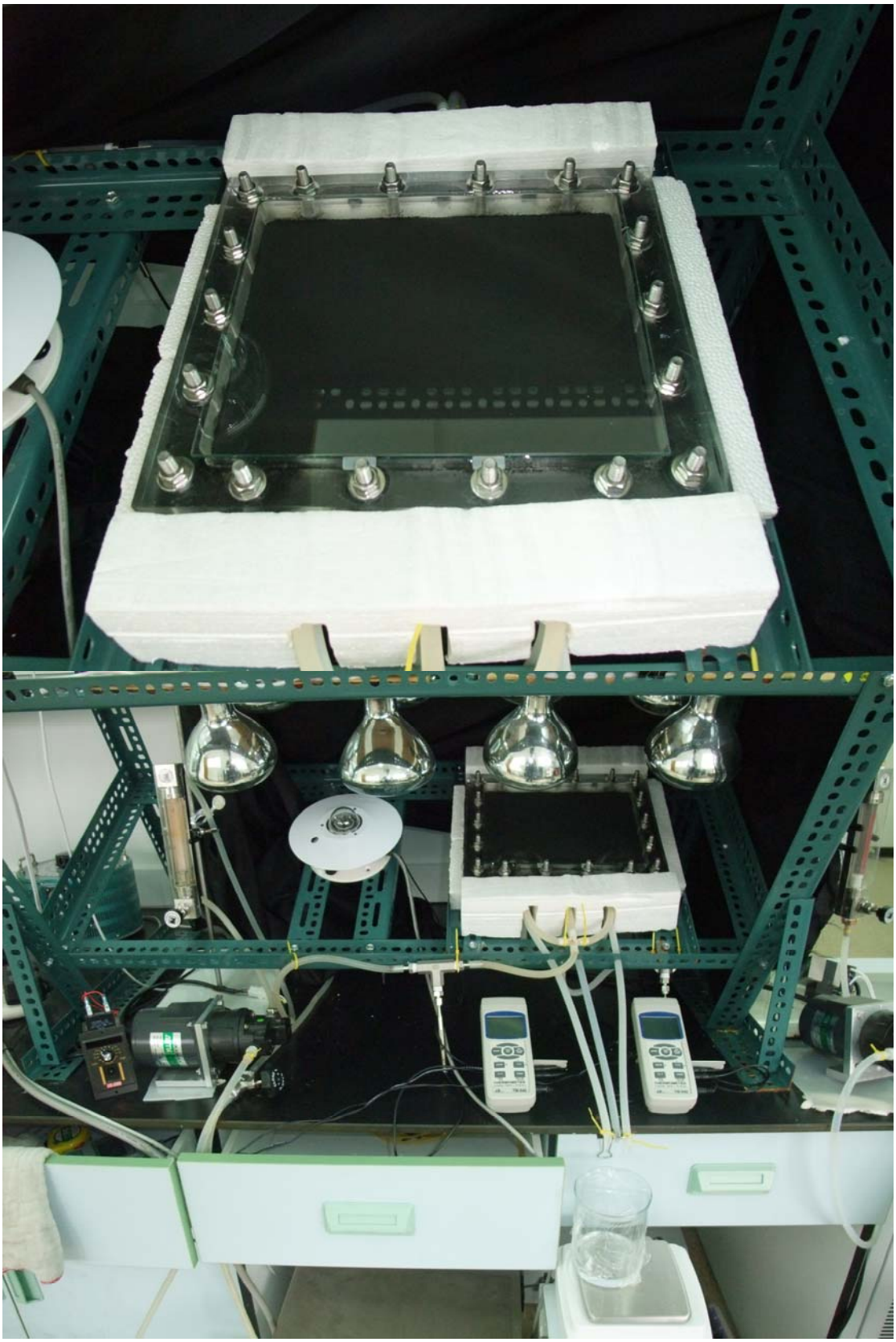


圖 18 太陽能氣隔式薄膜蒸發實驗裝置照

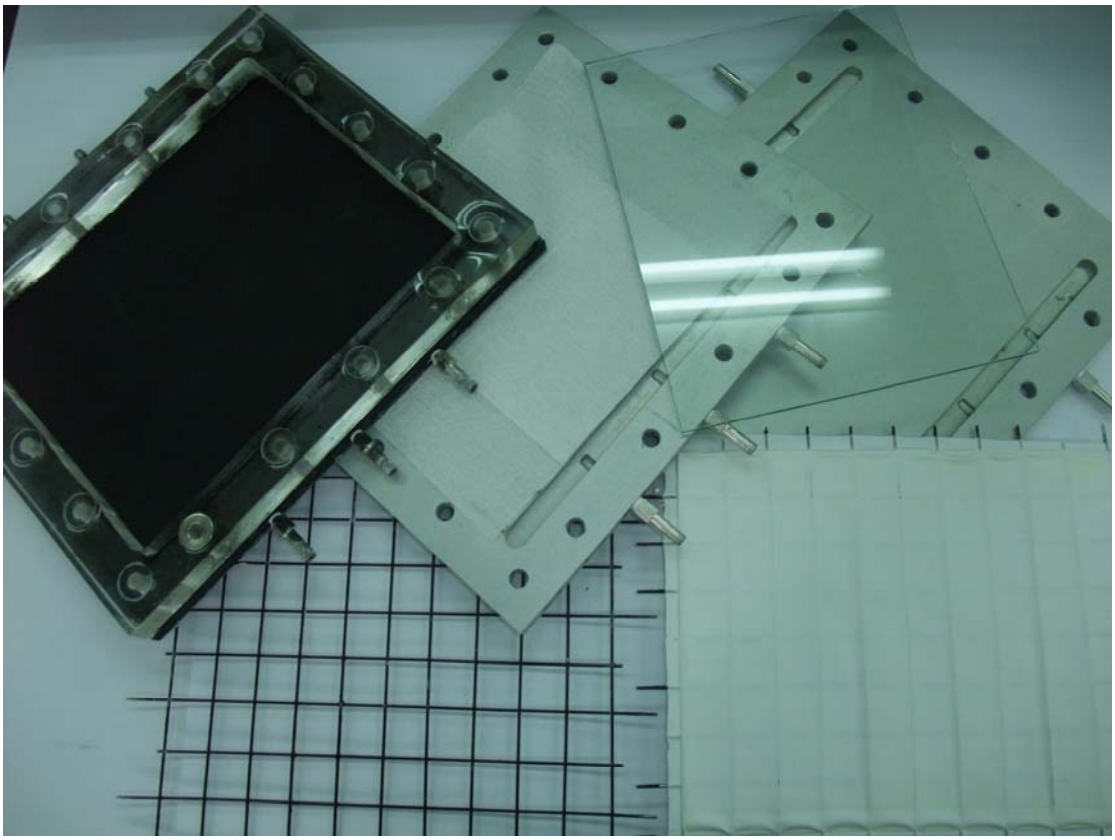


圖 19 太陽能氣隔式薄膜蒸發實驗裝置分解照

(2) 人照光源與周邊設備

實驗利用 8 顆之乾燥用紅外線燈泡來模擬太陽光源，單顆 110V，125W，佑盛工業股份有限公司製造，每四顆串連成一條迴路，每條迴路接設有活動式開關及單一變壓器來改變入射量強度。

(3) 入射儀測定儀

入射儀測定儀以美製 The Eppley Laboratory Inc., The Precision Spectral Pyranometer, Model PSP 連接同廠牌 Campbell Scientific CR800 Datalogger，此 Datalogger 利用 RS232 連接埠與電腦連線，並利用公司附上之 PC200W 軟體來讀取數據。

(4) 其他輔助設備

實驗中為了讓熱流體填滿整個通道及蒸發液流出方便，利用角鋼架使蒸發器傾斜，模擬光源則架設在角鋼上，角鋼架由 8 隻 0.5 m、2 隻 0.6 m、2 隻 0.85 m、及 4 隻 1 m 角鋼所組成，模擬光源架設於蒸發器上 16cm 處。利用黑布圍繞在角鋼周圍，降低外部光源、風速及內部光散射影響。

### 4-2-2 實驗步驟

本實驗主要探討系統在不同光源入射量、傾斜角度、進口溫度、進口質量流率及不同氣隔層高度之下，得到濾液量之實驗值與理論模型計算之理論值間的正確性與誤差。其實驗步驟如下:

(1) 調整角鋼至所需要的傾斜角度。

(2) 配置 3.5 wt%鹽水溶液 15 L 倒入進料容器中，接上進出口圓管，並放入熱恆溫槽中。

(3) 將熱恆溫槽和冷恆溫槽注入水至 8~9 分滿，並開啟恆溫槽之電源。

(4) 將蒸發器冷凝底板的出口對準燒杯，並放置在電子秤上。

(5) 確認電子秤和入射儀是否與電腦軟體連線。

(6) 開啟變壓器電源，調整變壓器使燈泡照度到達設定值。

(7) 開啟輸送泵浦，並調整流量至設定值。

(8) 調整恆溫槽設定溫度，使流體進出口溫度符合設定條件。

(9) 待進出口溫度達穩定，記錄流體進出口溫度與蒸發液量。

(10) 改變操作條件(進口流量、進口溫度)，重複步驟(6)~(9)。

(11) 改變設計參數(傾斜角度、空氣間隔厚度)，重複步驟(6)~(10)。

(12) 實驗結束，關閉輸送泵浦、恆溫槽電源開關與變壓器電源。

## 4-3 實驗操作參數與設計參數

在本實驗中，調整不同之操作條件包括入射量強度和冷、熱物流體積流量與進口溫度，設計參數方面則是改變氣隔層厚度，其詳細條件如表 3 所示。在實驗中，根據不同之操作條件與設計參數，可測量冷、熱物流體積流量與進出口溫度，利用電子秤量測蒸發液，入射量強度則利用變壓器調整，並經由入射儀量測紀錄。

表 3 實驗系統之操作變數與設計參數

| | |
|---|---|
| 入射量強度, $S_0$ (W/m$^2$) | 830、1100 |
| 熱物流體積流量, $V_w$ (L/min) | 0.3、0.5、 0.7、0.9 |
| 冷物流體積流量, $V_w$ (L/min) | 0.3、0.5、 0.7、0.9 |
| 熱物流進口溫度, $T_{w,i}$ (K) | 308、313、318、323、328 |
| 冷物流進口溫度, $T_{f,i}$ (K) | 288、293、298 |
| 氣隔層厚度, $H_g$ (mm) | 2、4、10 |

# 第五章 結果與討論

本研究中探討傳統氣隔式薄膜蒸發與太陽能氣隔式薄膜蒸發，針對兩種系統做理論分析，並利用實驗來驗證理論模式之正確性。本研究中配置 3.5%之氯化鈉水溶液，約與海水濃度相同，來當作工作熱流體，並針對不同的操作條件、設計參數對純水產率作探討。實驗中所使用之墊片在裝設過程會受到壓縮，而氣隔層厚度變動對本實驗之純水產率影響很大，因此先將實驗裝置架設後，測量氣隔層之墊片厚度，再利用此厚度來解理論模式，並對純水產率做探討。

## 5-1 熱物流體積流量與溫度對純水產率之影響

本研究針對熱物流體積流量與溫度對純水產率之影響，操作條件固定氣隔層厚度為 4mm，冷物流之進口溫度控制在 298 K，流量控制在 0.9 L/min，改變熱物流體積流量、溫度與入射量對純水產率之影響並與傳統氣隔層薄膜蒸發做比較。在本研究蒸發液增加率定義為

$$I_N = \frac{N_S - N_A}{N_A} \tag{94}$$

$N_A$:傳統氣隔式薄膜蒸發純水產率

$N_S$:太陽能氣隔式薄膜蒸發純水產率

而理論與實驗誤差值百分比擇定義如下:

$$Error(\%) = \left| \frac{N_{Theo.} - N_{Exp.}}{N_{Exp.}} \right| \times 100\% \tag{95}$$

$N_{Theo.}$:薄膜蒸發純水產率之理論值

$N_{Exp.}$:薄膜蒸發純水產率之實驗值

表 4 與表 5 分別為傳統型 AGMD 與太陽能 AGMD 在入射量 $S_0$=830 W/m$^2$ 下改變熱物流體積流量與進口溫度之實驗之結果，由表 4 來看傳統型 AGMD 純水產率隨著體積流量增加而增加，而由表 5 實驗結果來看，太陽能 AGMD 在熱物流進口溫度 313 K，純水產率隨著體積流量增加而減少，在熱物流進口溫度 328 K，純水產率增加趨勢較明顯。表 6 與表 7 為實驗結果與理論比較之誤差值，誤差值表示如式(95)，由誤差值來看，在進口溫度較高時實驗與理論之誤差比小，而進口溫度較低時誤差值比較高，在熱流體積流量為 0.9 L/min 時誤差值較大，但整體誤差值都小於 10%。

圖 20 為傳統氣隔式薄膜蒸發之理論，圖 21 和圖 22 分別為太陽能氣隔式薄膜蒸發在入射量為 830 W/m$^2$ 與 1100 W/m$^2$ 下之理論趨勢，由圖 20 探討熱流體積流量對純水產率趨勢圖可以觀察出，熱流體流量之影響在熱流體低溫時影響較不明顯，隨著進口溫度升高，純水產率會隨者熱流體積流量升高而增加，圖 21 與圖 22 加裝吸收板並加入射量操作條件之趨勢和圖 20 趨勢相同。圖 21 中將實驗點與理論趨勢做比較，其實驗與理論之趨勢相符合，但在熱物流進口溫度低時誤差較大。

圖 23 和圖 24 為純水產率增加率在不同入射量之趨勢圖，從純水產率增加率之趨勢圖中可得知，在熱流體低溫時，對於蒸發液的提升效果較佳，而在低流量時，熱流體停留在系統中較久，接觸吸收板之時間較長，從吸收板獲得熱量較多，因此在低流量時對蒸發液增加之效果比高流量較佳。

表 4 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變熱物流體積流量與進口溫度之純水產率實驗紀錄表

| air gap(mm) | $V_w$(L/min) | $V_f$(L/min) | $T_{w,i}$(K) | $T_{w,o}$(K) | $T_{f,i}$(K) | $T_{f,o}$(K) | $N_A$(kg/m$^2$h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 0.3 | 0.9 | 312.9 | 312.6 | 298 | 298.4 | 0.456 |
| | 0.5 | 0.9 | 312.9 | 312.6 | 297.9 | 298.8 | 0.492 |
| | 0.7 | 0.9 | 313.1 | 312.6 | 298.1 | 298.6 | 0.487 |
| | 0.9 | 0.9 | 312.9 | 312.1 | 298 | 298.6 | 0.496 |
| 4 | 0.3 | 0.9 | 318 | 317.6 | 298 | 298.7 | 0.738 |
| | 0.5 | 0.9 | 317.9 | 317.4 | 298 | 298.8 | 0.798 |
| | 0.7 | 0.9 | 318 | 317.1 | 298.1 | 298.9 | 0.797 |
| | 0.9 | 0.9 | 317.9 | 316.5 | 298 | 298.7 | 0.799 |
| 4 | 0.3 | 0.9 | 322.9 | 321.2 | 298.1 | 298.7 | 1.241 |
| | 0.5 | 0.9 | 322.9 | 321.7 | 298.1 | 298.8 | 1.206 |
| | 0.7 | 0.9 | 323 | 322 | 298 | 298.5 | 1.264 |
| | 0.9 | 0.9 | 323 | 322.1 | 298 | 298.5 | 1.231 |
| 4 | 0.3 | 0.9 | 328 | 327.1 | 297.9 | 299.5 | 1.496 |
| | 0.5 | 0.9 | 327.9 | 326.7 | 297.9 | 299.6 | 1.606 |
| | 0.7 | 0.9 | 328 | 326.4 | 298 | 299.6 | 1.665 |
| | 0.9 | 0.9 | 327.9 | 325 | 298 | 299.4 | 1.731 |

表 5 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變熱物流體積流量與進口溫度之純水產率實驗紀錄表; $S_0$=830 W/m$^2$

| air gap(mm) | $S_0$(W/m$_2$) | $V_w$(L/min) | $V_f$(L/min) | $T_{w,i}$(K) | $T_{w,o}$(K) | $T_{f,i}$(K) | $T_{f,o}$(K) | $N_S$(kg/m$^2$h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 831 | 0.3 | 0.9 | 313 | 315.8 | 297.9 | 299 | 0.606 |
| | 831 | 0.5 | 0.9 | 313.1 | 315.2 | 298 | 299 | 0.556 |
| | 810 | 0.7 | 0.9 | 313.1 | 314.4 | 298 | 299 | 0.560 |
| | 830 | 0.9 | 0.9 | 313 | 314.4 | 298 | 299 | 0.531 |
| 4 | 856 | 0.3 | 0.9 | 318.1 | 320.2 | 298 | 299.4 | 0.868 |
| | 816 | 0.5 | 0.9 | 318 | 319.6 | 297.9 | 299.3 | 0.919 |
| | 833 | 0.7 | 0.9 | 318 | 319.5 | 298.1 | 299.4 | 0.914 |
| | 869 | 0.9 | 0.9 | 318.1 | 319.4 | 297.9 | 299.3 | 0.882 |
| 4 | 844 | 0.3 | 0.9 | 323 | 324.4 | 298 | 299.8 | 1.306 |
| | 860 | 0.5 | 0.9 | 323 | 323.5 | 298 | 299.7 | 1.344 |
| | 841 | 0.7 | 0.9 | 323 | 323.7 | 298 | 299.9 | 1.279 |
| | 840 | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.8 | 298 | 299.8 | 1.275 |
| 4 | 840 | 0.3 | 0.9 | 328 | 327.5 | 297.9 | 299.8 | 1.602 |
| | 837 | 0.5 | 0.9 | 328 | 328.5 | 297.9 | 299.9 | 1.664 |
| | 838 | 0.7 | 0.9 | 328 | 328.8 | 298 | 541 | 1.695 |
| | 840 | 0.9 | 0.9 | 328.1 | 329.3 | 298 | 300.1 | 1.710 |

表 6 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變熱物流體積流量與溫度之純水產率實驗誤差表

| $T_{w,i}$ (K) | $V_w$ (L/min) | $N_A$(kg/m$^2$h) Theo. | $N_A$(kg/m$^2$h) Exp. | Error (%) |
|---|---|---|---|---|
| 313 | 0.3 | 0.534 | 0.456 | 17.22 |
| | 0.5 | 0.560 | 0.492 | 13.87 |
| | 0.7 | 0.573 | 0.487 | 17.63 |
| | 0.9 | 0.580 | 0.496 | 17.01 |
| 318 | 0.3 | 0.796 | 0.738 | 7.88 |
| | 0.5 | 0.843 | 0.798 | 5.65 |
| | 0.7 | 0.865 | 0.797 | 8.58 |
| | 0.9 | 0.879 | 0.799 | 9.99 |
| 323 | 0.3 | 1.104 | 1.241 | 11.00 |
| | 0.5 | 1.181 | 1.206 | 2.06 |
| | 0.7 | 1.219 | 1.264 | 3.51 |
| | 0.9 | 1.243 | 1.231 | 0.91 |
| 328 | 0.3 | 1.461 | 1.496 | 2.34 |
| | 0.5 | 1.580 | 1.606 | 1.61 |
| | 0.7 | 1.641 | 1.665 | 1.45 |
| | 0.9 | 1.678 | 1.731 | 3.02 |

表 7 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變熱物流體積流量與溫度之純水產率實驗誤差表; $S_0$ =830 W/m$^2$

| $T_{w,i}$ (K) | $S_0$(W/m$_2$) | $V_w$ (L/min) | $N_S$(kg/m$^2$h) Theo. | $N_S$(kg/m$^2$h) Exp. | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 313 | 831 | 0.3 | 0.610 | 0.606 | 0.78 |
| | 831 | 0.5 | 0.609 | 0.556 | 9.38 |
| | 810 | 0.7 | 0.608 | 0.560 | 8.55 |
| | 830 | 0.9 | 0.608 | 0.531 | 14.62 |
| 318 | 856 | 0.3 | 0.887 | 0.868 | 2.20 |
| | 816 | 0.5 | 0.902 | 0.919 | 1.87 |
| | 833 | 0.7 | 0.909 | 0.914 | 0.52 |
| | 869 | 0.9 | 0.914 | 0.882 | 3.57 |
| 323 | 844 | 0.3 | 1.212 | 1.306 | 7.21 |
| | 860 | 0.5 | 1.252 | 1.344 | 6.84 |
| | 841 | 0.7 | 1.272 | 1.279 | 0.50 |
| | 840 | 0.9 | 1.285 | 1.275 | 0.81 |
| 328 | 840 | 0.3 | 1.585 | 1.602 | 1.06 |
| | 837 | 0.5 | 1.664 | 1.664 | 0.04 |
| | 838 | 0.7 | 1.704 | 1.695 | 0.55 |
| | 840 | 0.9 | 1.729 | 1.710 | 1.09 |

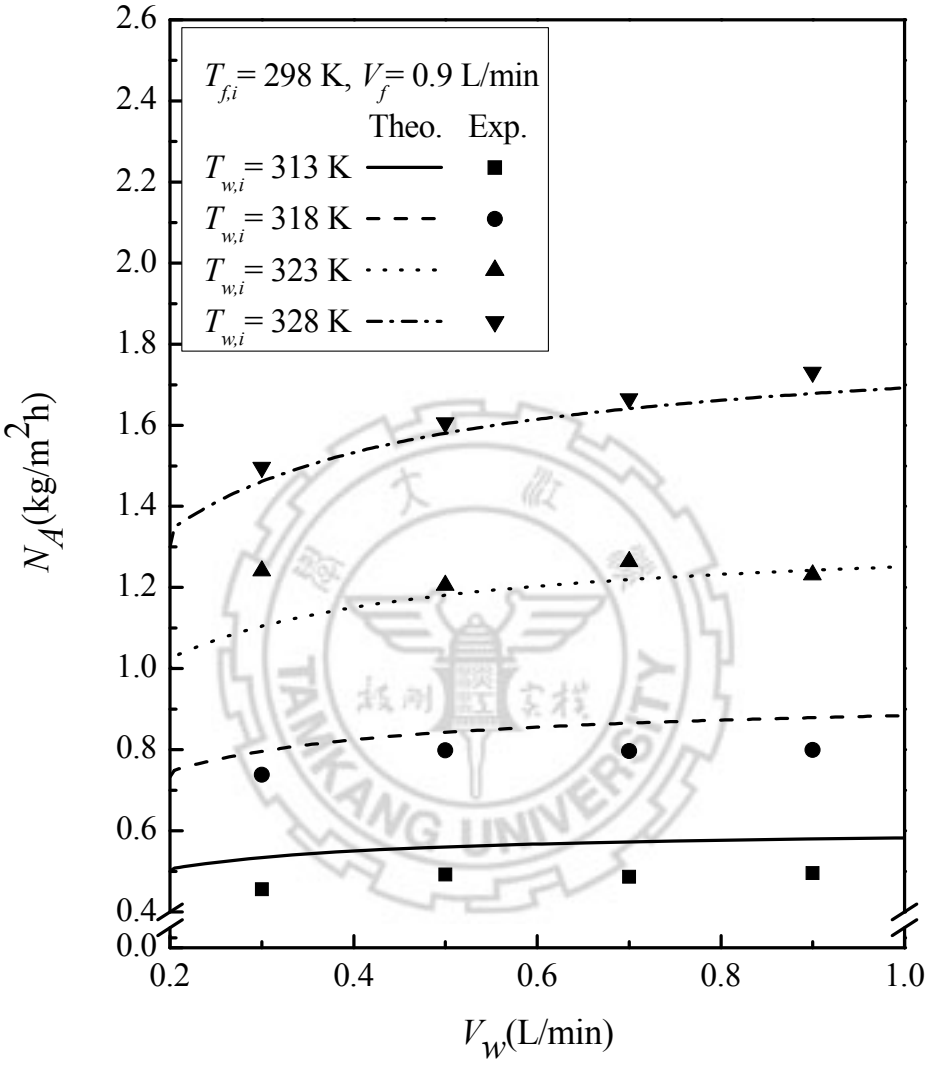



圖 20 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統熱物流體積流量與溫度對純水產率之影響; $V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K

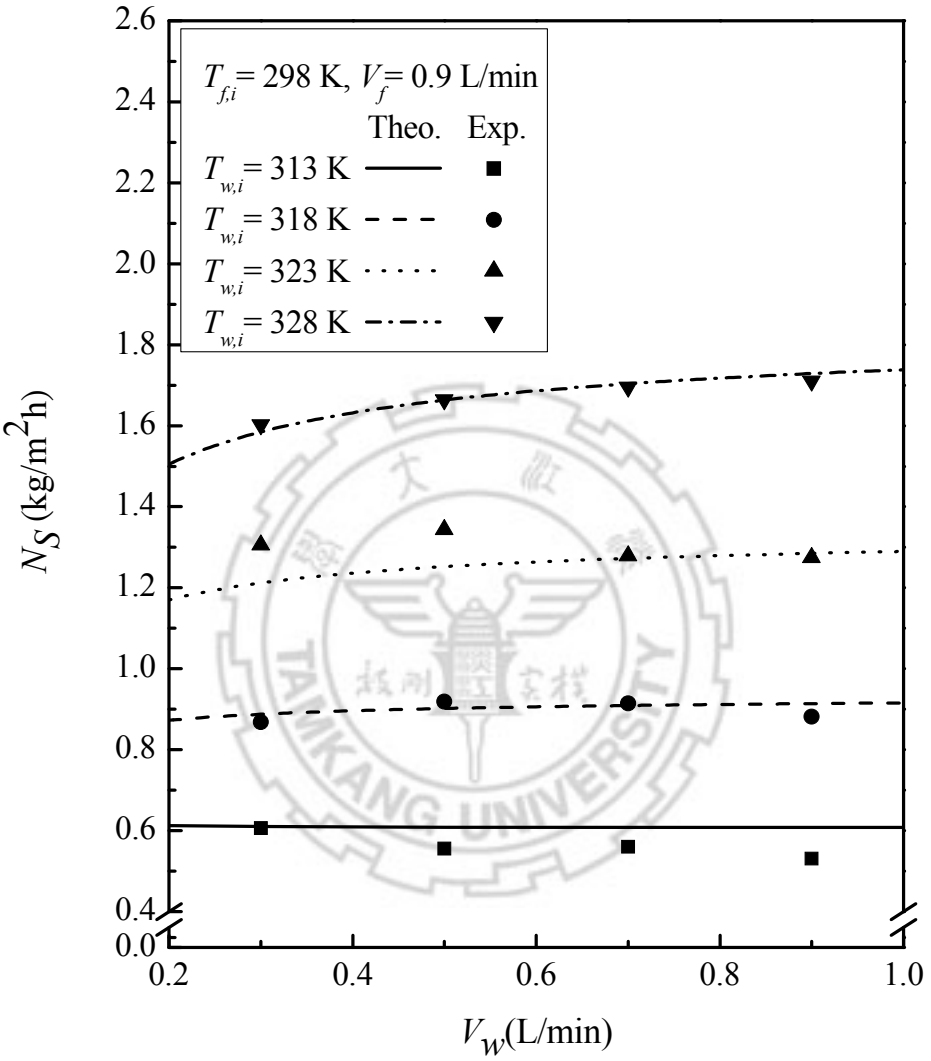



圖 21 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流體積流量與溫度對純水產率之影響;$S_0$ =830 W/m$^2$, $V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K

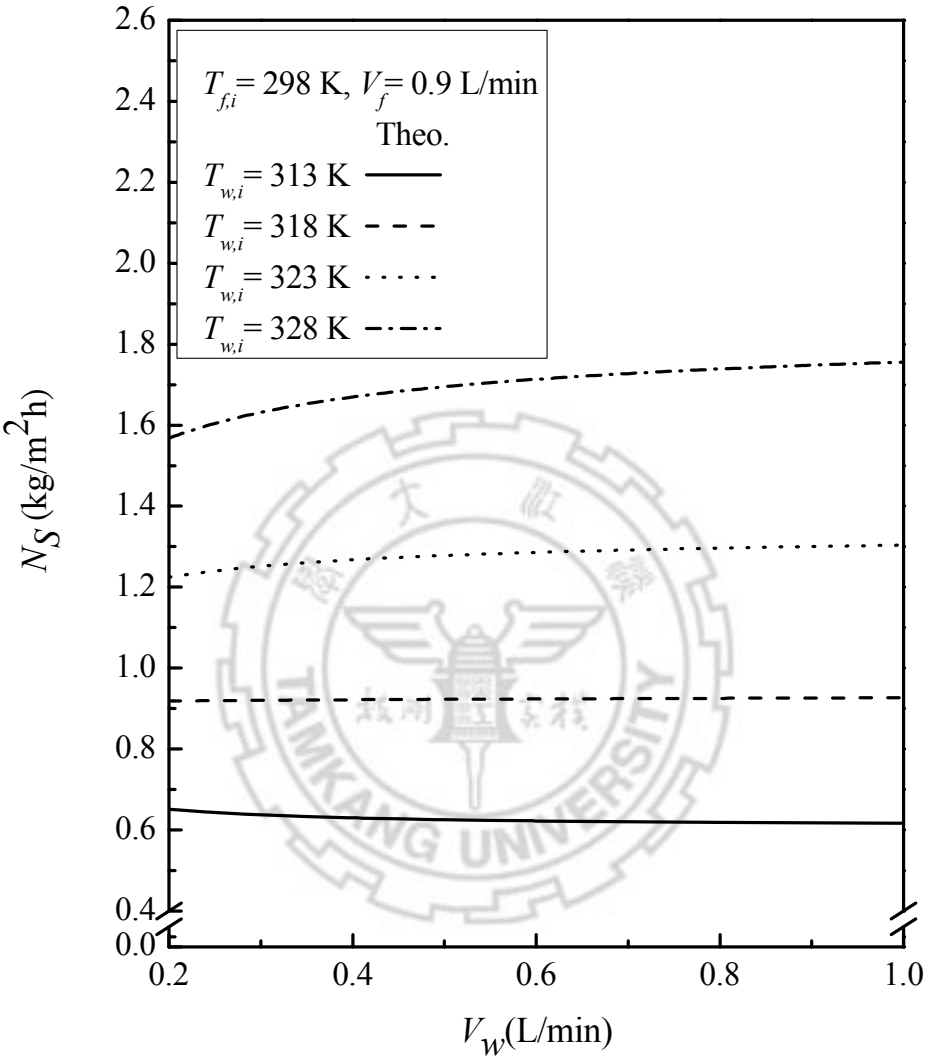



圖 22 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流體積流量與溫度對純水產率之影響; $S_0$ =1100 W/m$^2$, $V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K

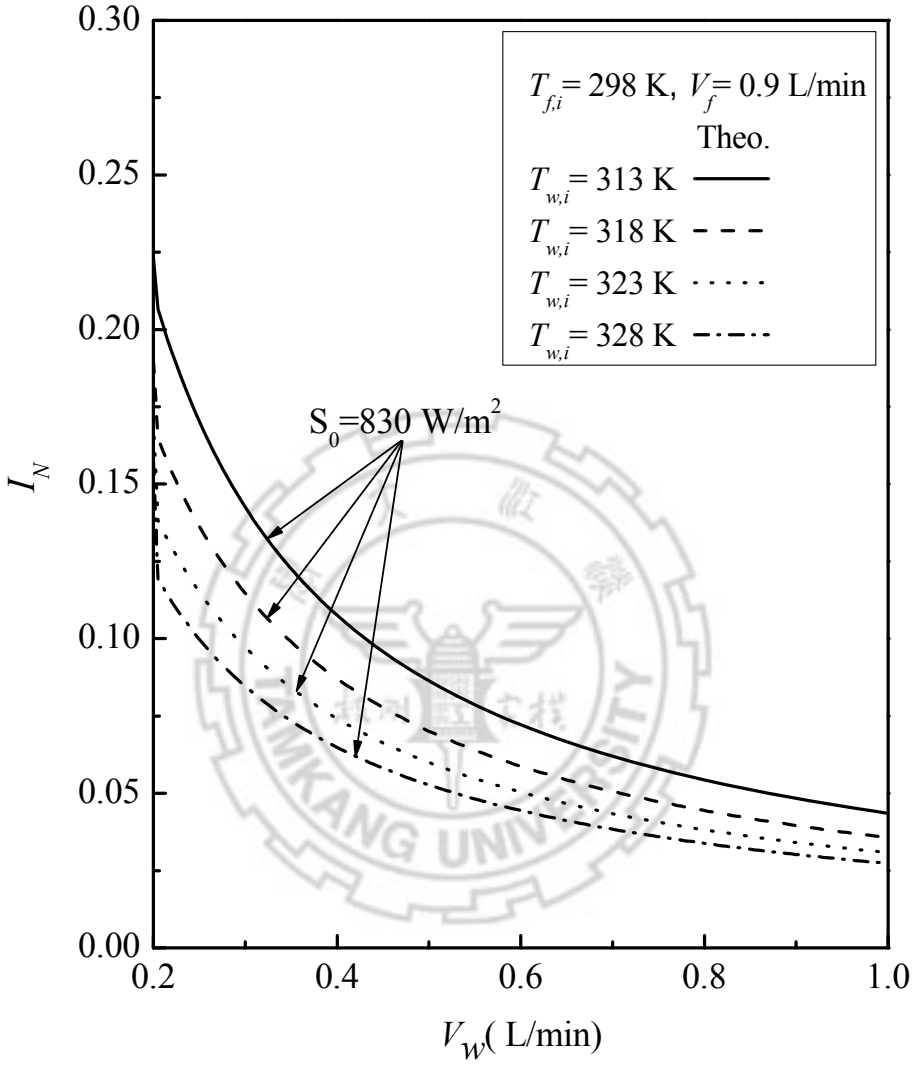



圖 23 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流體積流量與溫度對蒸發液增加率之影響;$S_0$ =830 W/m$^2$, $V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K

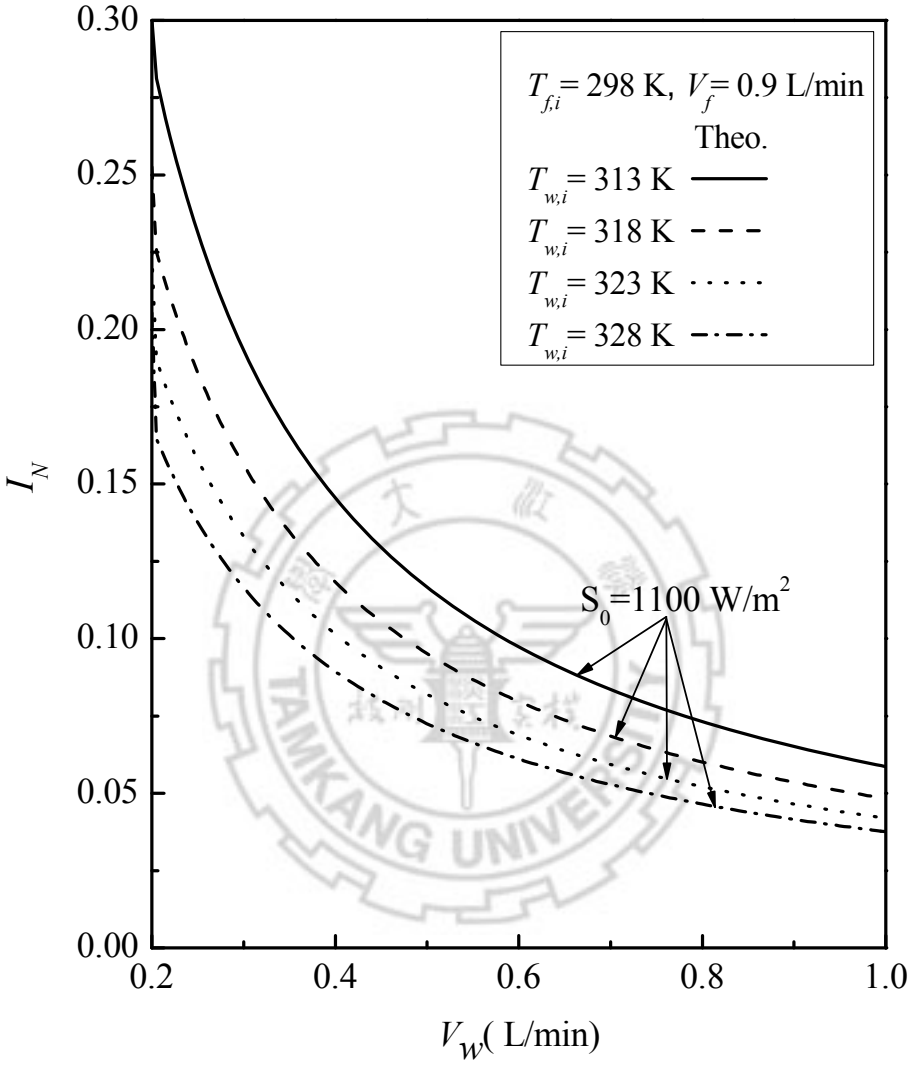



圖 24 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流體積流量與溫度對蒸發液增加率之影響;$S_0$ =1100 W/m$^2$, $V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K

## 5-2 冷物流體積流量與溫度對純水產率之影響

針對冷物流改變操作條件探討部分，固定熱流體之進口溫度為 50 ℃，體積流量為 0.9 L/min，改變之操作條件有 1.9 mm 及 4 mm 氣隔層厚度，冷物流之進口溫度與體積流量。

表 8 與表 9 分別為傳統型 AGMD 與太陽能 AGMD 在入射量 $S_0$=830 W/m$^2$ 下改變冷物流體積流量與進口溫度之實驗值，實驗結果顯示，增加冷物流體積流量和降低冷物流進口溫度，其純水產率會增加。表 10 與表 11 為實驗值與理論值之誤差，誤差值由式(95)計算，冷物流進口溫度較高時誤差值較小，進口溫度在 288 K 時誤差值較大。

圖 25 為傳統氣隔式薄膜蒸發，圖 26 及圖 27 分別為入射量在 830 W/m$^2$ 與 1100 W/m$^2$ 之趨勢，由圖 25 觀察趨勢發現，冷物流之體積流量改變對純水產率之響影甚小，降低冷物流之進口溫度對純水產率之增加效果較好，在氣隔層厚度較薄時，改變體積流量所提升純水產率比氣隔層較厚時所提升之效率較佳，圖 26 及圖 27 加裝吸收板後之趨勢圖 25 相同。將圖 25、圖 26 與圖 27 做比較後可發現，無論對於太陽能薄膜蒸發或傳統薄膜蒸發系統，改變冷物流之操作條件對純水產率增加效果均不明顯。圖 26 中亦顯示，改變冷物流操作條件之實驗趨勢與理論相符合。

表 8 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變冷物流體積流量與進口溫度之純水產率實驗紀錄表

| air gap (mm) | $V_w$ (L/min) | $V_f$ (L/min) | $T_{w,i}$(K) | $T_{w,o}$(K) | $T_{f,i}$(K) | $T_{f,o}$(K) | $N_A$ (kg/m$^2$h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 0.9 | 0.3 | 323 | 323.9 | 298 | 303.1 | 1.315 |
| | 0.9 | 0.5 | 323 | 323.7 | 298 | 301.4 | 1.360 |
| | 0.9 | 0.7 | 323 | 323.8 | 298 | 300 | 1.368 |
| | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.8 | 298 | 299.8 | 1.301 |
| 4 | 0.9 | 0.3 | 323 | 323.7 | 293 | 298.6 | 1.468 |
| | 0.9 | 0.5 | 323 | 323.6 | 293 | 296.5 | 1.545 |
| | 0.9 | 0.7 | 323.1 | 323.5 | 293 | 295.7 | 1.546 |
| | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.4 | 292.9 | 294.8 | 1.566 |
| 4 | 0.9 | 0.3 | 323 | 323.4 | 288 | 295.5 | 1.556 |
| | 0.9 | 0.5 | 323 | 323.4 | 288 | 292.4 | 1.610 |
| | 0.9 | 0.7 | 322.9 | 323.4 | 287.9 | 291 | 1.662 |
| | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.6 | 288.1 | 290.4 | 1.664 |
| 1.9 | 0.9 | 0.3 | 323 | 318.4 | 298 | 302.1 | 1.974 |
| | 0.9 | 0.5 | 323 | 318.3 | 298 | 300.9 | 2.061 |
| | 0.9 | 0.7 | 323 | 318.2 | 298 | 300.2 | 2.051 |
| | 0.9 | 0.9 | 323.1 | 318.3 | 297.9 | 299.6 | 2.142 |
| 1.9 | 0.9 | 0.3 | 322.9 | 318.4 | 293 | 298.6 | 2.355 |
| | 0.9 | 0.5 | 323 | 318.2 | 293 | 296.7 | 2.329 |
| | 0.9 | 0.7 | 323 | 318.3 | 292.9 | 295.8 | 2.376 |
| | 0.9 | 0.9 | 323.1 | 318.4 | 293 | 295.2 | 2.366 |
| 1.9 | 0.9 | 0.3 | 323 | 318.2 | 288 | 292.5 | 2.438 |
| | 0.9 | 0.5 | 323.1 | 318.2 | 288 | 291.7 | 2.498 |
| | 0.9 | 0.7 | 323 | 318.3 | 288.1 | 290.9 | 2.582 |
| | 0.9 | 0.9 | 323 | 318.3 | 288 | 290.2 | 2.606 |

表 9 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變冷物流體積流量與進口溫度之純水產率實驗紀錄表; $S_0$=830 W/m$^2$

| air gap (mm) | $S_0$ (W/m$_2$) | $V_w$ (L/min) | $V_f$ (L/min) | $T_{w,i}$ (K) | $T_{w,o}$ (K) | $T_{f,i}$ (K) | $T_{f,o}$ (K) | $N_S$ (kg/m$^2$h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 814 | 0.9 | 0.3 | 323 | 323.9 | 298 | 303.1 | 1.315 |
| | 832 | 0.9 | 0.5 | 323 | 323.7 | 298 | 301.4 | 1.360 |
| | 836 | 0.9 | 0.7 | 323 | 323.8 | 298 | 300 | 1.368 |
| | 840 | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.8 | 298 | 299.8 | 1.301 |
| 4 | 844 | 0.9 | 0.3 | 323 | 323.7 | 293 | 298.6 | 1.468 |
| | 854 | 0.9 | 0.5 | 323 | 323.6 | 293 | 296.5 | 1.545 |
| | 832 | 0.9 | 0.7 | 323.1 | 323.5 | 293 | 295.7 | 1.546 |
| | 831 | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.4 | 292.9 | 294.8 | 1.566 |
| 4 | 825 | 0.9 | 0.3 | 323 | 323.4 | 288 | 295.5 | 1.556 |
| | 824 | 0.9 | 0.5 | 323 | 323.4 | 288 | 292.4 | 1.610 |
| | 836 | 0.9 | 0.7 | 322.9 | 323.4 | 287.9 | 291 | 1.662 |
| | 833 | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.6 | 288.1 | 290.4 | 1.664 |
| 1.9 | 822 | 0.9 | 0.3 | 323 | 323.5 | 298 | 303.6 | 2.126 |
| | 854 | 0.9 | 0.5 | 322.9 | 323.4 | 298 | 302.2 | 2.181 |
| | 830 | 0.9 | 0.7 | 323 | 323.3 | 298 | 301.3 | 2.203 |
| | 834 | 0.9 | 0.9 | 323.1 | 323.4 | 298 | 300.7 | 2.313 |
| 1.9 | 864 | 0.9 | 0.3 | 323 | 323.3 | 293 | 299.6 | 2.567 |
| | 823 | 0.9 | 0.5 | 322.9 | 323.4 | 293.1 | 298.2 | 2.551 |
| | 842 | 0.9 | 0.7 | 323 | 323.3 | 293 | 297.3 | 2.573 |
| | 863 | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.3 | 293 | 296.5 | 2.563 |
| 1.9 | 825 | 0.9 | 0.3 | 323 | 323.4 | 288 | 294.5 | 2.609 |
| | 826 | 0.9 | 0.5 | 323.1 | 323.5 | 288.9 | 293.4 | 2.653 |
| | 833 | 0.9 | 0.7 | 322.9 | 323.4 | 288.1 | 292.1 | 2.703 |
| | 829 | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.5 | 288 | 291.2 | 2.706 |

表 10 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變冷物流體積流量與溫度之純水產率實驗誤差表

| Air gap (mm) | $T_{f,i}$ (K) | $V_f$ (L/min) | $N_A$(kg/m$^2$h) Theo. | $N_A$(kg/m$^2$h) Exp. | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 298 | 0.3 | 1.216 | 1.143 | 6.45 |
| | | 0.5 | 1.231 | 1.183 | 4.13 |
| | | 0.7 | 1.238 | 1.223 | 1.29 |
| | | 0.9 | 1.243 | 1.231 | 0.91 |
| | 293 | 0.3 | 1.332 | 1.333 | 0.05 |
| | | 0.5 | 1.344 | 1.362 | 1.26 |
| | | 0.7 | 1.350 | 1.358 | 0.53 |
| | | 0.9 | 1.354 | 1.381 | 1.96 |
| | 288 | 0.3 | 1.418 | 1.462 | 3.03 |
| | | 0.5 | 1.428 | 1.470 | 2.86 |
| | | 0.7 | 1.433 | 1.481 | 3.26 |
| | | 0.9 | 1.435 | 1.504 | 4.55 |
| 1.9 | 298 | 0.3 | 1.996 | 1.974 | 1.08 |
| | | 0.5 | 2.040 | 2.061 | 1.00 |
| | | 0.7 | 2.061 | 2.051 | 0.52 |
| | | 0.9 | 2.074 | 2.142 | 3.16 |
| | 293 | 0.3 | 2.207 | 2.355 | 6.26 |
| | | 0.5 | 2.246 | 2.329 | 3.56 |
| | | 0.7 | 2.264 | 2.376 | 4.72 |
| | | 0.9 | 2.275 | 2.366 | 3.84 |
| | 288 | 0.3 | 2.369 | 2.438 | 2.82 |
| | | 0.5 | 2.401 | 2.498 | 3.87 |
| | | 0.7 | 2.416 | 2.582 | 6.43 |
| | | 0.9 | 2.424 | 2.606 | 6.98 |

表 11 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變冷物流體積流量與溫度之純水產率實驗誤差表; $S_0$=830 W/m$^2$

| Air gap (mm) | $S_0$ (W/m$^2$) | $T_{f,i}$ (K) | $V_f$ (L/min) | $N_S$(kg/m$^2$h) Theo. | $N_S$(kg/m$^2$h) Exp. | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 814 | 298 | 0.3 | 1.216 | 1.143 | 6.45 |
| | 832 | | 0.5 | 1.231 | 1.183 | 4.13 |
| | 836 | | 0.7 | 1.238 | 1.223 | 1.29 |
| | 840 | | 0.9 | 1.243 | 1.231 | 0.91 |
| | 844 | 293 | 0.3 | 1.332 | 1.333 | 0.05 |
| | 854 | | 0.5 | 1.344 | 1.362 | 1.26 |
| | 832 | | 0.7 | 1.350 | 1.358 | 0.53 |
| | 831 | | 0.9 | 1.354 | 1.381 | 1.96 |
| | 825 | 288 | 0.3 | 1.418 | 1.462 | 3.03 |
| | 824 | | 0.5 | 1.428 | 1.470 | 2.86 |
| | 836 | | 0.7 | 1.433 | 1.481 | 3.26 |
| | 833 | | 0.9 | 1.435 | 1.504 | 4.55 |
| 1.9 | 822 | 298 | 0.3 | 1.996 | 1.974 | 1.08 |
| | 854 | | 0.5 | 2.040 | 2.061 | 1.00 |
| | 830 | | 0.7 | 2.061 | 2.051 | 0.52 |
| | 834 | | 0.9 | 2.074 | 2.142 | 3.16 |
| | 864 | 293 | 0.3 | 2.207 | 2.355 | 6.26 |
| | 823 | | 0.5 | 2.246 | 2.329 | 3.56 |
| | 842 | | 0.7 | 2.264 | 2.376 | 4.72 |
| | 863 | | 0.9 | 2.275 | 2.366 | 3.84 |
| | 825 | 288 | 0.3 | 2.369 | 2.438 | 2.82 |
| | 826 | | 0.5 | 2.401 | 2.498 | 3.87 |
| | 833 | | 0.7 | 2.416 | 2.582 | 6.43 |
| | 829 | | 0.9 | 2.424 | 2.606 | 6.98 |

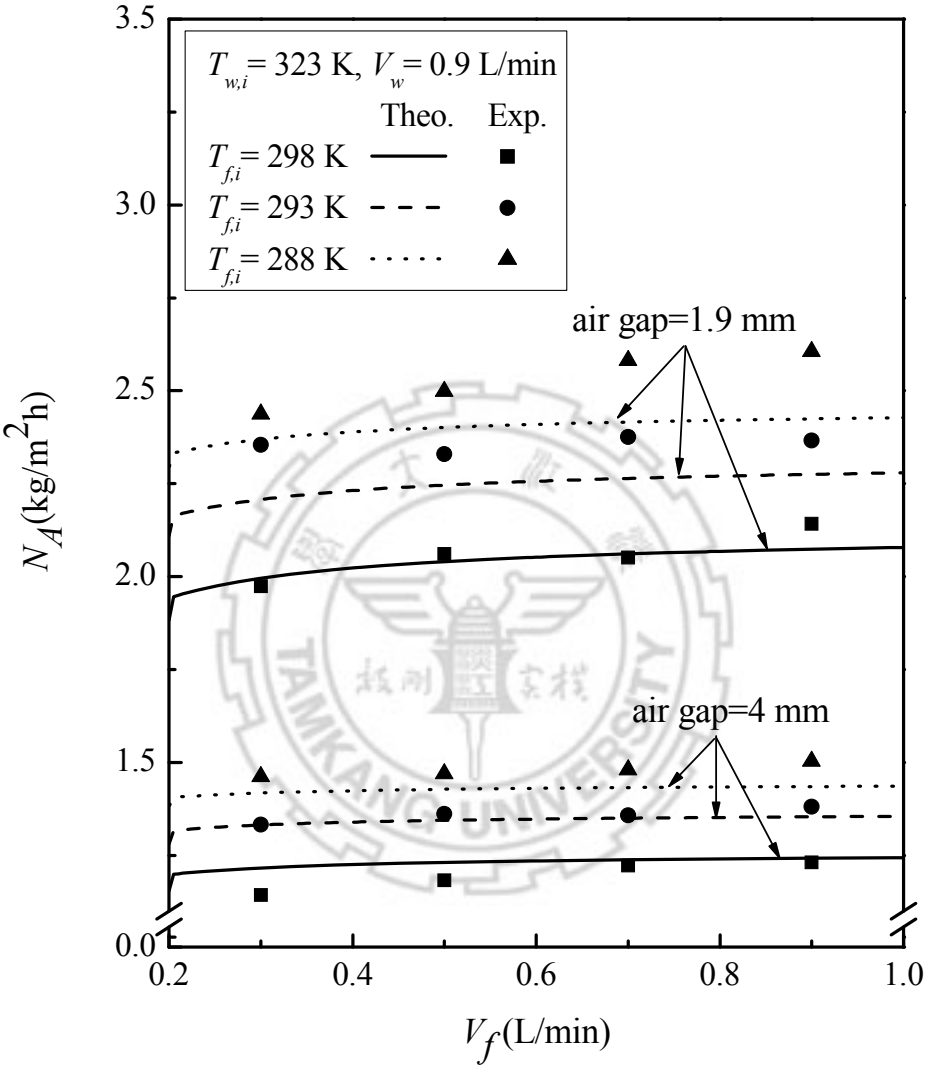



圖 25 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統冷物流體積流量與溫度對純水產率之影響;$V_w$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K

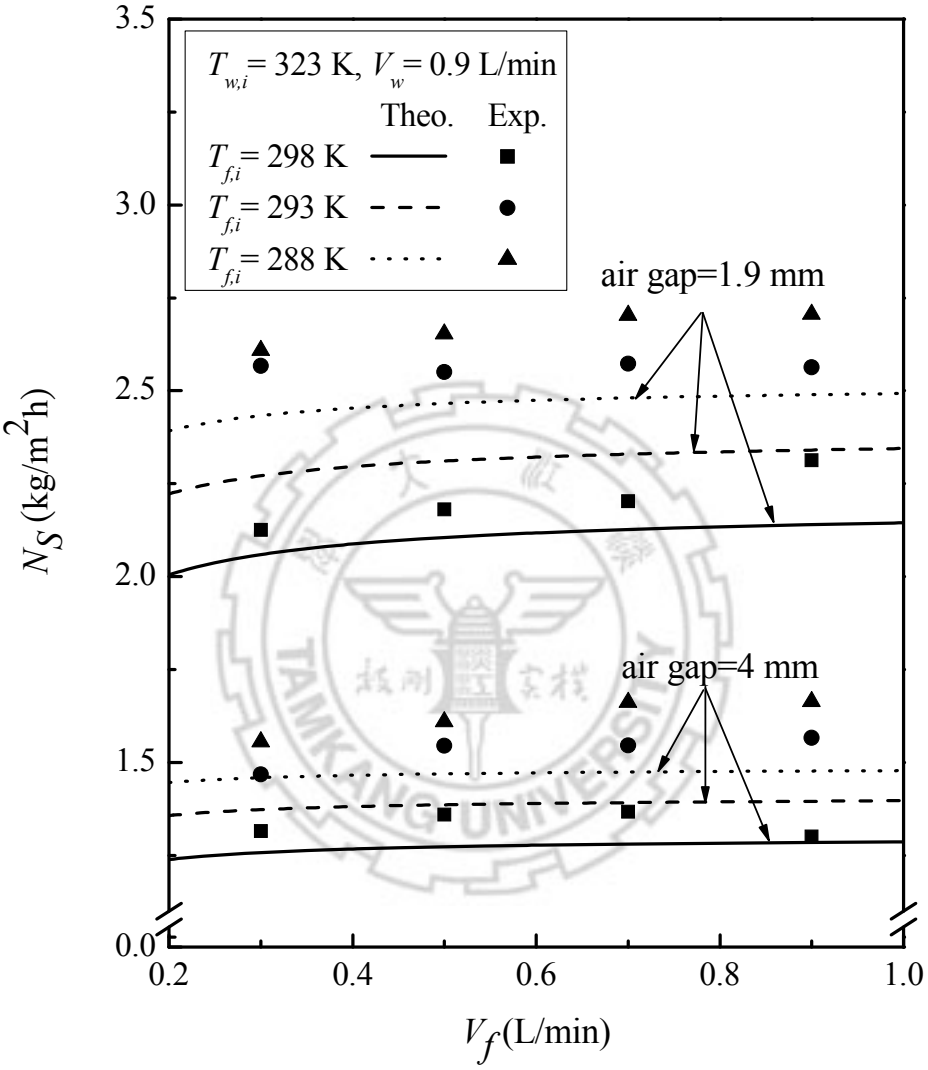



圖 26 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統冷物流體積流量與溫度對純水產率之影響;$S_0$=830 W/m$^2$,$V_w$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K

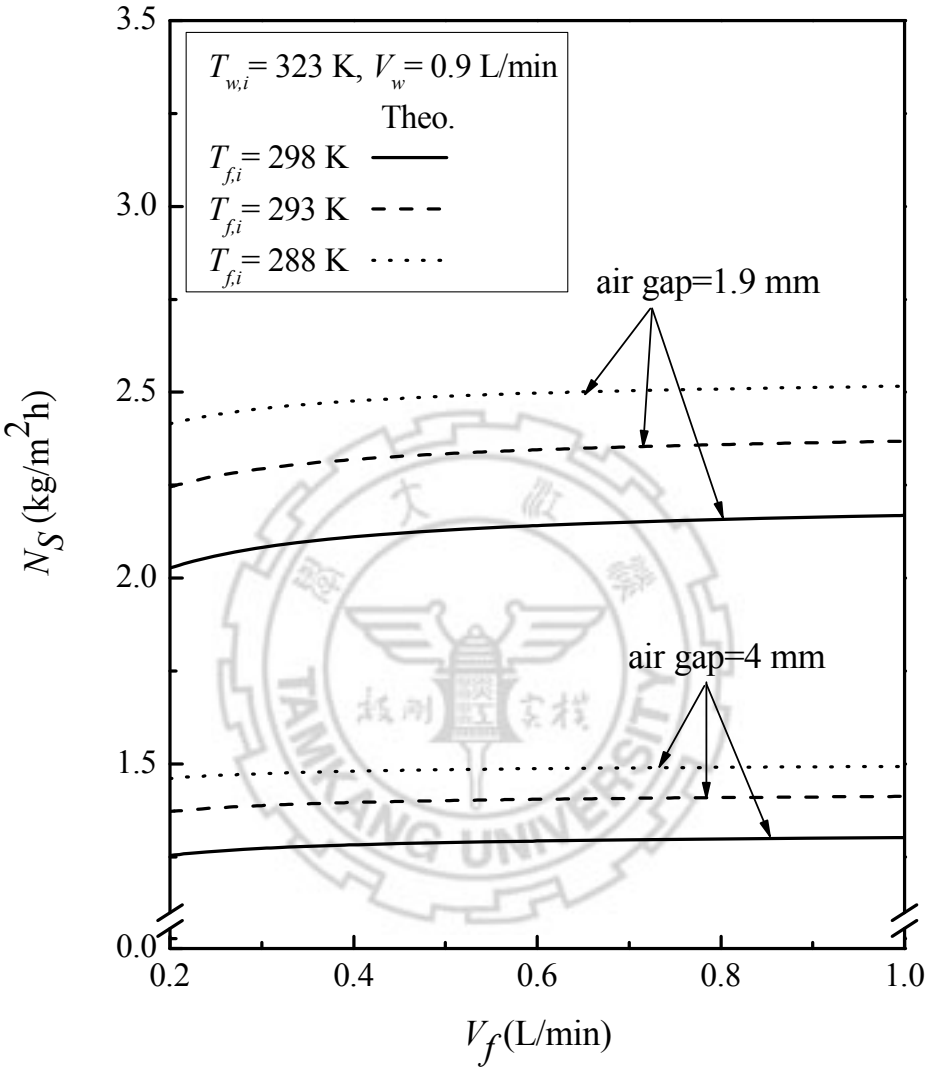



圖 27 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統冷物流體積流量與溫度對純水產率之影響;$S_0$=1100 W/m$^2$,$V_w$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K

## 5-3 空氣間隔之層厚度對純水產率之影響

氣隔層之厚度是氣隔式薄蒸發中決定純水產率大小之重要變因，此部分控制冷流體進口溫度 298 K，冷物流、熱物流體積流量固定在 0.9 L/min，對氣隔層之厚度與熱流體之溫度做探討。

表 12 與表 13 分別為傳統型 AGMD 與太陽能 AGMD 在入射量 $S_0$=830 W/m$^2$ 下改變氣隔層厚度之實驗值，由實驗值來觀察，純水產率隨氣隔層厚度變薄而增加，隨熱流進口溫度提升，純水產率也越大。表 14 與表 15 為實驗與理論誤差值，由式(95)計算誤差值，在熱流體溫度較低時，誤差值較大，整體誤差值小於 10%。

圖 28 為傳統氣隔式薄膜蒸發，圖 29 為入射量 830 W/m$^2$ 之趨勢，由圖 28 來觀察，當氣隔層變厚時純水產率會減少，氣隔層越薄，純水產率越大，在圖中取一氣隔層厚度 2mm 處，溫度 328 K 下之斜率比 308 K 來的大，這說明了當熱流體溫度較高時，氣隔層厚度越薄對蒸發量之影響會越大。由圖 29 觀察實驗與理論值，純水產率之實驗值隨氣隔層變厚而變少之趨勢與理論相符合。

表 12 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變氣隔層厚度之純水產率實驗紀錄表

| air gap(mm) | $V_w$(L/min) | $V_f$(L/min) | $T_{w,i}$(K) | $T_{w,o}$(K) | $T_{f,i}$(K) | $T_{f,o}$(K) | $N_A$(kg/m$^2$h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.9 | 0.9 | 0.9 | 308 | 307.7 | 298 | 298.6 | 0.558 |
| 1.9 | 0.9 | 0.9 | 318 | 317.3 | 298 | 299.3 | 1.453 |
| 1.9 | 0.9 | 0.9 | 328 | 326.5 | 298.1 | 300 | 2.687 |
| 4 | 0.9 | 0.9 | 308 | 307.9 | 297.9 | 298.2 | 0.322 |
| 4 | 0.9 | 0.9 | 317.9 | 316.5 | 298 | 298.7 | 0.799 |
| 4 | 0.9 | 0.9 | 327.9 | 325 | 298 | 299.4 | 1.731 |
| 10 | 0.9 | 0.9 | 308 | 308 | 298 | 298.2 | 0.149 |
| 10 | 0.9 | 0.9 | 318.1 | 317.8 | 298 | 298.6 | 0.420 |
| 10 | 0.9 | 0.9 | 327.9 | 327.3 | 298.1 | 299.1 | 0.858 |

表 13 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變氣隔層厚度之純水產率實驗紀錄表; $S_0$=830 W/m$^2$

| air gap(mm) | $S_0$(W/m$_2$) | $V_w$(L/min) | $V_f$(L/min) | $T_{w,i}$(K) | $T_{w,o}$(K) | $T_{f,i}$(K) | $T_{f,o}$(K) | $N_S$(kg/m$^2$h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 825 | 0.9 | 0.9 | 308 | 309.4 | 298.1 | 299.3 | 0.577 |
| 1.9 | 823 | 0.9 | 0.9 | 318 | 318.5 | 298 | 300 | 1.595 |
| | 829 | 0.9 | 0.9 | 328 | 327.3 | 298 | 301.2 | 2.837 |
| | 833 | 0.9 | 0.9 | 308 | 309.3 | 297.9 | 298.6 | 0.333 |
| 4 | 869 | 0.9 | 0.9 | 318.1 | 319.4 | 297.9 | 299.3 | 0.882 |
| | 840 | 0.9 | 0.9 | 328.1 | 329.3 | 298 | 300.1 | 1.710 |
| | 830 | 0.9 | 0.9 | 308 | 310.3 | 298 | 300 | 0.152 |
| 10 | 840 | 0.9 | 0.9 | 318 | 319.8 | 298 | 298.5 | 0.399 |
| | 833 | 0.9 | 0.9 | 328 | 329.4 | 298 | 298.7 | 0.858 |

表 14 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統改變氣隔層厚度之純水產率實驗誤差表

| Air gap (mm) | $T_{w,i}$ (K) | $N_A$(kg/m$^2$h) Theo. | $N_A$(kg/m$^2$h) Exp. | Error (%) |
|---|---|---|---|---|
| 1.9 | 308 | 0.593 | 0.558 | 6.23 |
| | 318 | 1.496 | 1.453 | 2.91 |
| | 328 | 2.742 | 2.687 | 2.05 |
| 4 | 308 | 0.338 | 0.322 | 5.01 |
| | 318 | 0.879 | 0.799 | 9.98 |
| | 328 | 1.678 | 1.731 | 3.02 |
| 10 | 308 | 0.151 | 0.149 | 1.48 |
| | 318 | 0.404 | 0.420 | 3.86 |
| | 328 | 0.801 | 0.858 | 6.62 |

表 15 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變氣隔層厚度之純水產率實驗誤差表; $S_0$=830 W/m$^2$

| Air gap (mm) | $S_0$ (W/m$_2$) | $T_{w,i}$ (K) | $N_S$(kg/m$^2$h) Theo. | $N_S$(kg/m$^2$h) Exp. | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.9 | 825 | 308 | 0.631 | 0.577 | 9.38 |
| | 823 | 318 | 1.552 | 1.595 | 2.74 |
| | 829 | 328 | 2.819 | 2.837 | 0.66 |
| 4 | 833 | 308 | 0.360 | 0.333 | 8.08 |
| | 869 | 318 | 0.914 | 0.882 | 3.56 |
| | 840 | 328 | 1.729 | 1.710 | 1.09 |
| 10 | 830 | 308 | 0.161 | 0.152 | 6.21 |
| | 840 | 318 | 0.421 | 0.399 | 5.55 |
| | 833 | 328 | 0.827 | 0.858 | 3.64 |

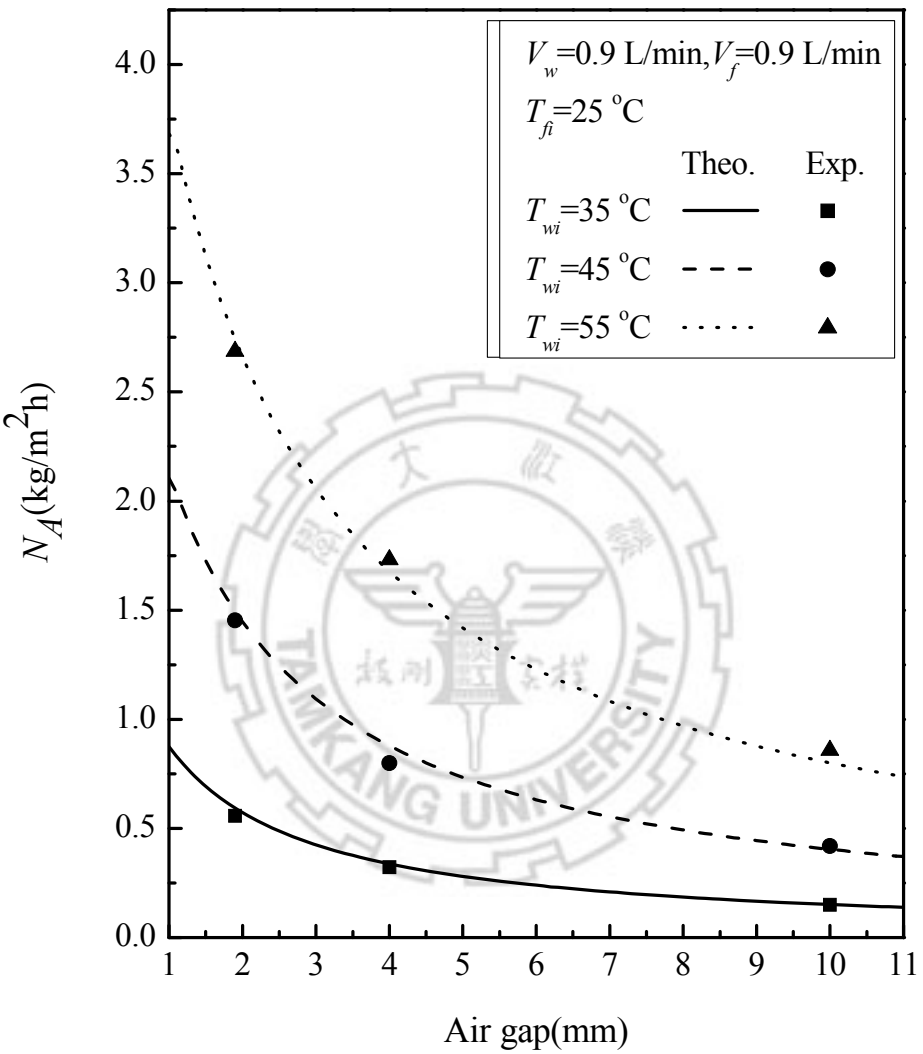



圖 28 傳統型氣隔式薄膜蒸發系統空氣層厚度對純水產率之影響;

$V_w = V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K

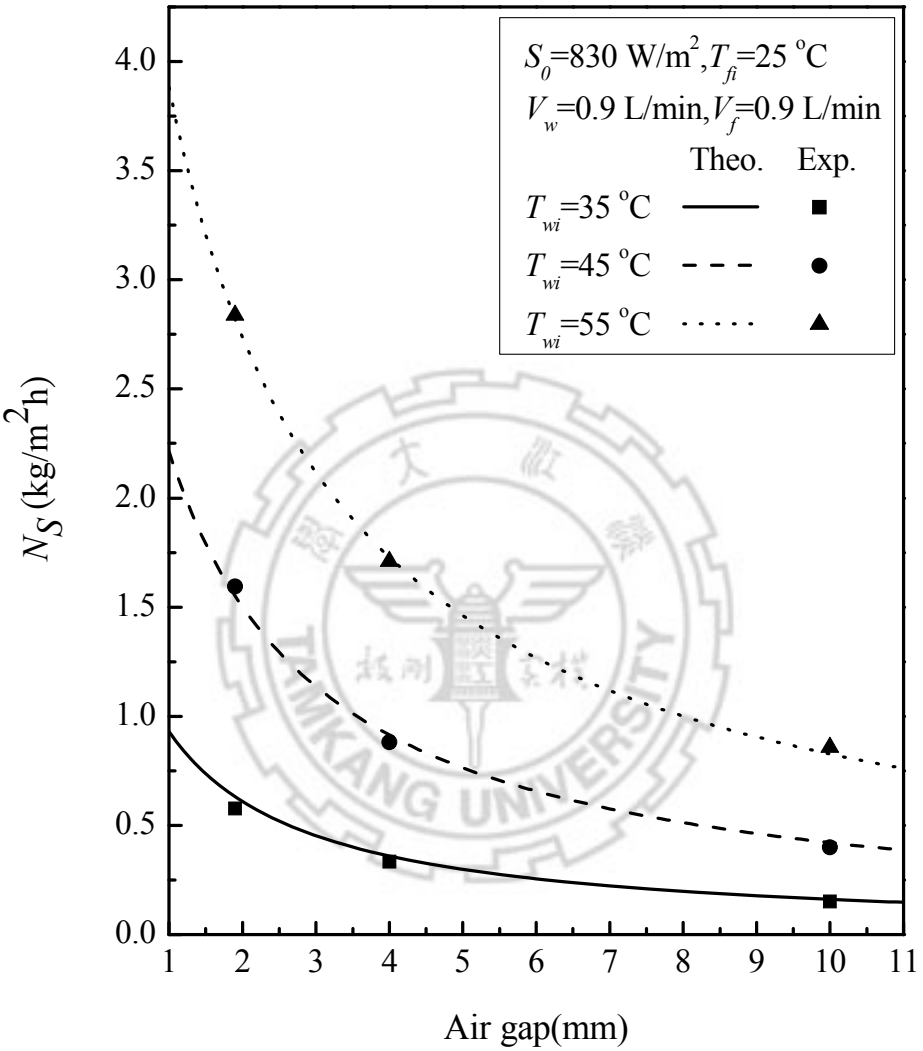



圖 29 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統空氣層厚度對純水產率之影響;

$S_0$ =830 W/m$^2$, $V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{f,i}$=298 K

## 5-4 入射量對純水產率之影響

熱物流進口溫度控制在 323 K，冷物流進口溫度 298 K，冷物流、熱物流體積流量為 0.9 L/min。表 16 為實驗之結果，由實驗結果觀察，加入吸收板後對於純水產率有提高效果，在 $S_0$=1100W/m$^2$ 與氣隔層厚度 1.9mm 下，純水產率不受熱物流體積流量影響，在 $S_0$=830W/m$^2$ 取氣隔層厚度 1.9mm 與 4mm 做比較，在厚度 1.9mm 下純水產率在低熱物流體積流量增效果比厚度 4mm 增加效果較好。表 17 為實驗與理論之誤差表，由式(95)計算誤差值，在 $S_0$=1100W/m$^2$ 與氣隔層厚度 4mm 下之誤差值較大，而整體之誤差值小於 10%。

圖 30 為改變入射量對純水產率影響之趨勢圖，由圖 30 觀察出入射變大對純水產率增加是有效果的，對於太陽能式與傳統式氣隔式薄膜蒸發來說，純水產率隨熱物流體積流量增加而變大，此趨勢在較薄氣隔層時更明顯，在熱物流體積流量較小時，對純水產率之增加效果較好比高流量佳。圖 30 中實驗與理論之趨勢比較，實驗趨勢變化較理論趨勢為平緩，比較傳統氣隔式薄膜蒸發與太陽能氣隔式薄膜蒸發之純水產率提升之趨勢較為符合。

表 16 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變入射量與熱物流體積流量之純水產率實驗紀錄表

| air gap (mm) | $S_0$(W/m$_2$) | $V_w$(L/min) | $V_f$(L/min) | $T_{w,i}$(K) | $T_{w,o}$(K) | $T_{f,i}$(K) | $T_{f,o}$(K) | $N_S$ or $N_A$ (kg/m$^2$h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.9 | 813 | 0.3 | 0.9 | 323 | 323.1 | 298 | 299.6 | 1.871 |
| | 871 | 0.5 | 0.9 | 323 | 323.3 | 298 | 299.3 | 1.950 |
| | 849 | 0.7 | 0.9 | 323 | 323.6 | 298 | 299.6 | 2.022 |
| | 833 | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.1 | 297.9 | 299.5 | 2.026 |
| 1.9 | 1117 | 0.3 | 0.9 | 323 | 325.3 | 298 | 300 | 2.075 |
| | 1101 | 0.5 | 0.9 | 323 | 324.7 | 298 | 300.3 | 2.076 |
| | 1119 | 0.7 | 0.9 | 323 | 324.5 | 298 | 299.3 | 2.051 |
| | 1091 | 0.9 | 0.9 | 323 | 324 | 298 | 299.5 | 2.073 |
| 4 | 844 | 0.3 | 0.9 | 323 | 324.4 | 298 | 299.8 | 1.306 |
| | 860 | 0.5 | 0.9 | 323 | 323.5 | 298 | 299.7 | 1.344 |
| | 841 | 0.7 | 0.9 | 323 | 323.7 | 298 | 299.9 | 1.296 |
| | 840 | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.8 | 298 | 299.8 | 1.291 |
| 4 | 1123 | 0.3 | 0.9 | 323 | 324.3 | 298 | 299.7 | 1.366 |
| | 1115 | 0.5 | 0.9 | 323 | 324.1 | 298 | 299.6 | 1.387 |
| | 1113 | 0.7 | 0.9 | 323.1 | 325 | 298 | 299.8 | 1.424 |
| | 1096 | 0.9 | 0.9 | 323 | 323.6 | 298 | 299.7 | 1.460 |
| 4 | AGMD | 0.3 | 0.9 | 322.9 | 321.2 | 298.1 | 298.7 | 1.241 |
| | | 0.5 | 0.9 | 322.9 | 321.7 | 298.1 | 298.8 | 1.206 |
| | | 0.7 | 0.9 | 323 | 322 | 298 | 298.5 | 1.264 |
| | | 0.9 | 0.9 | 323 | 322.1 | 298 | 298.5 | 1.231 |

表 17 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統改變入射量強度之純水產率實驗誤差

| 入射量 | Air gap (mm) | $V_w$ (L/min) | $N_S$ or $N_A$ (kg/m$^2$h) Theo. | $N_S$ or $N_A$ (kg/m$^2$h) Exp. | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 830 | 1.9 | 0.3 | 1.894 | 1.871 | 1.20 |
| | | 0.5 | 2.026 | 1.950 | 3.92 |
| | | 0.7 | 2.096 | 2.022 | 3.62 |
| | | 0.9 | 2.140 | 2.026 | 5.60 |
| | 4 | 0.3 | 1.212 | 1.306 | 7.18 |
| | | 0.5 | 1.252 | 1.344 | 6.81 |
| | | 0.7 | 1.272 | 1.296 | 1.79 |
| | | 0.9 | 1.285 | 1.291 | 0.44 |
| 1100 | 1.9 | 0.3 | 1.950 | 2.075 | 6.02 |
| | | 0.5 | 2.065 | 2.076 | 0.55 |
| | | 0.7 | 2.125 | 2.051 | 3.64 |
| | | 0.9 | 2.164 | 2.073 | 4.38 |
| | 4 | 0.3 | 1.252 | 1.366 | 8.38 |
| | | 0.5 | 1.278 | 1.387 | 7.83 |
| | | 0.7 | 1.292 | 1.424 | 9.30 |
| | | 0.9 | 1.300 | 1.460 | 10.92 |
| AGMD | 4 | 0.3 | 1.104 | 1.241 | 11.00 |
| | | 0.5 | 1.181 | 1.206 | 2.06 |
| | | 0.7 | 1.219 | 1.264 | 3.51 |
| | | 0.9 | 1.243 | 1.231 | 0.91 |

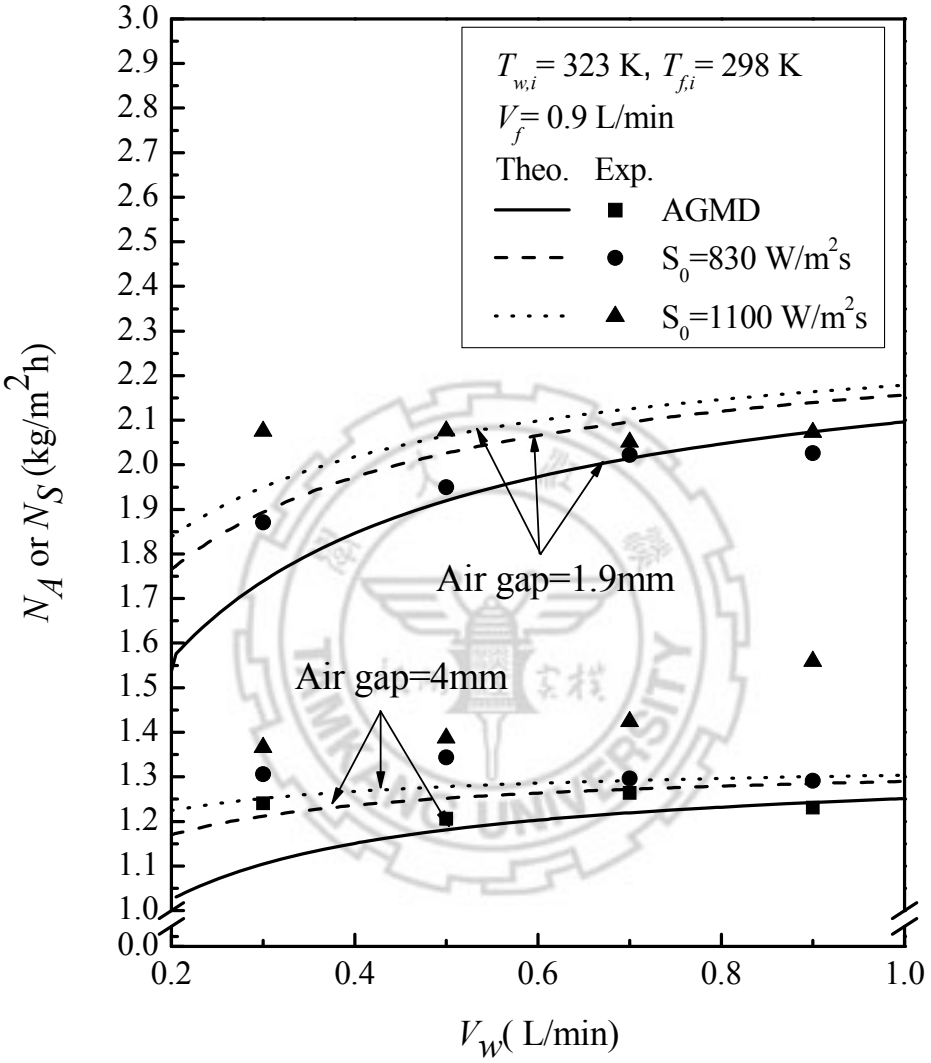



圖 30 入射量對純水產率之影;$V_w = V_f$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K,$T_{f,i}$=298 K

## 5-5 傾斜角度對純水產率之影響

熱流進口溫度控制在 323 K，冷物流溫度 298 K，冷、熱物流體積流量為 0.9 L/min，入射量控制在 830 W/m$^2$。圖 31 為改變傾斜角與氣隔層厚度之趨勢圖，從圖中觀察，在薄氣隔層厚度，變大傾斜角度能稍微提高純水產率，整體上傾斜角度之影響對純水產率的影響不大。

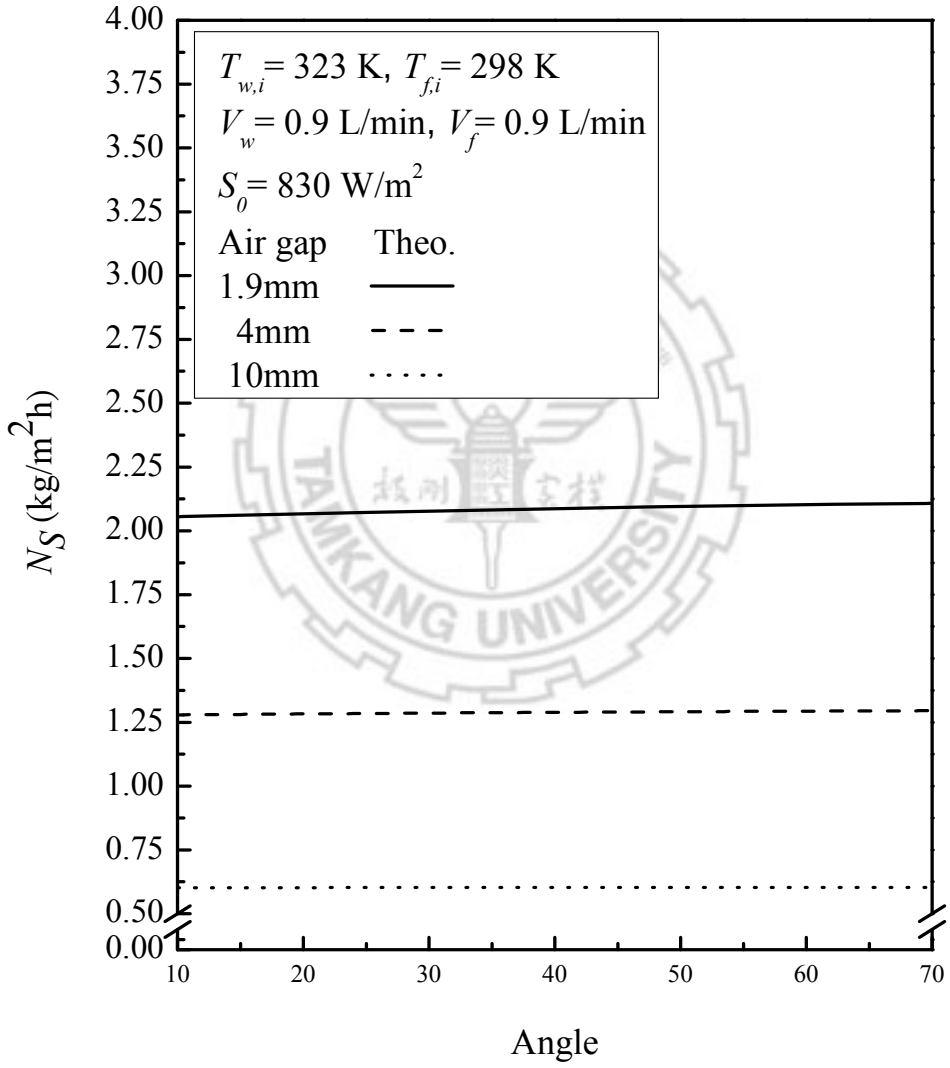



圖 31 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統傾斜角度對純水產率之影響;
$S_0$=830 W/m$^2$, $V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K,$T_{f,i}$=298 K

## 5-6 空氣層厚度對熱效率之影響

本研究針對氣隔式薄膜蒸發做熱效率之探討，其熱效率表示如下

$$\eta_t = \frac{Q_L}{Q_L + Q_C} \tag{96}$$

其中

$$Q_L = N_T \lambda \tag{97}$$

$$Q_C = U_2 \left( T_{\mathrm{m2}} - T_{cb1} \right) + N_T Cp_g \left( T_{m2} - T_{cb1} \right) \tag{98}$$

熱效率意指熱物流提供系統總熱量中，有多少熱量是供給水變成蒸氣之熱量，在薄膜蒸發系統中，熱效率越高越好。

圖 32 為熱效率之趨勢圖，熱物流進口溫度控制在 323 K，冷物流溫度 298 K，冷物流、熱物流體積流量為 0.9 L/min，從圖中可觀察出，對於傳統氣隔式薄膜蒸發與太陽能氣隔式薄膜蒸發系統來說，氣隔層之厚度為主要影響熱效率之改變，由趨勢來看，氣隔層厚度越大，熱效率越小，氣隔層變薄則熱效率變大，但氣隔層薄到一定厚度時，在持續變薄，則熱效率反而會降低，由圖看出氣隔層厚度約 2.5mm 時，其是最好的熱效率值。

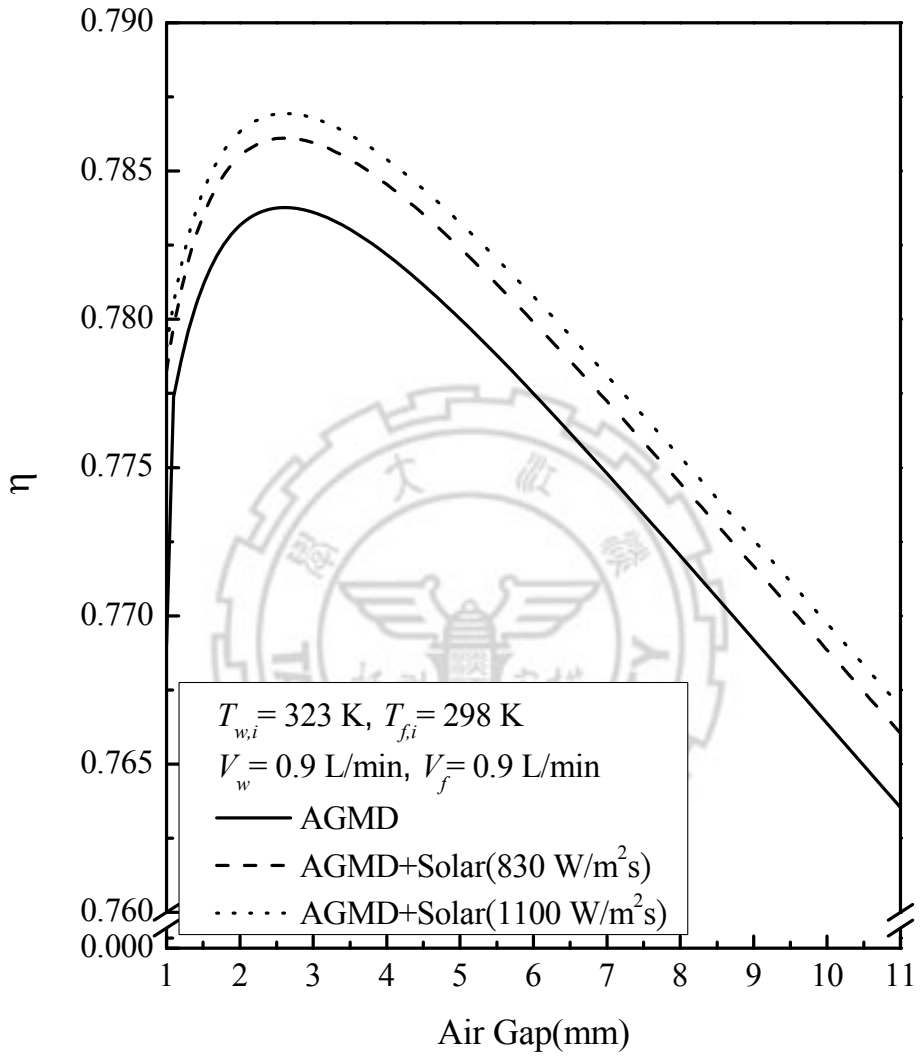



圖 32 氣隔層厚度對純水產率之影響;$S_0$=830 W/m$^2$, $V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K,$T_{f,i}$=298 K

## 5-7 操作參數對質傳係數之影響

本研究探討各種參數分別對薄膜與氣隔層質傳係數做分析，薄膜質傳係數$C_m$與氣隔層質傳係數$C_g$表示如下

$$C_m = \left[ \left( 1.064 \frac{r\varepsilon}{\tau\delta_K} \left( \frac{M}{R\overline{T}_m} \right)^{0.5} \right)^{-1} + \left( \frac{1}{Y_{\ln}} \frac{D_{wa}^m \varepsilon}{\tau\delta_M} \frac{M}{R\overline{T}_m} \right)^{-1} \right]^{-1} \tag{97}$$

$$C_g = \frac{1}{Y_{\ln}} \frac{D_{wa}^g}{H_g} \frac{M}{R\overline{T}_g} \tag{98}$$

圖 33 與圖 34 分別為氣隔層厚度與入射量對薄膜與氣隔層質傳係數之趨勢，冷、熱物流進口溫度分別固定在 298 K、323 K，體積流量為 0.9 L/min，$C_g$會隨氣隔層厚度變大而減少，但對於$C_m$卻相反，$C_m$會隨氣隔層變大而增加。入射量對$C_g$影響較小，$C_m$則會隨入射量變大而增加。

圖 35 與圖 36 為熱物流進口溫度與體積流量對薄膜與氣隔層質傳係數之趨勢，冷物流進口溫度與流體積流量為 298 K 與 0.9 L/min，入射量強度控制在 830 W/m$^2$，熱物流進口溫度對$C_m$與$C_g$都有影響，在較低溫時對兩者的影響都很小，隨著溫度升高$C_m$與$C_g$也會增加，且$C_m$增加的趨勢比$C_g$還大，而體積流量變大$C_m$與$C_g$也隨著增加。

圖 37 與圖 38 為冷物流進口溫度與體積流量對薄膜與氣隔層質傳係數之趨勢，熱物流進口溫度與流體積流量為 323 K 與 0.9 L/min，入射量強度控制在 830 W/m$^2$，$C_m$與$C_g$隨冷物流進口溫度與體積流量增加而提升，但增加之趨勢並不大。

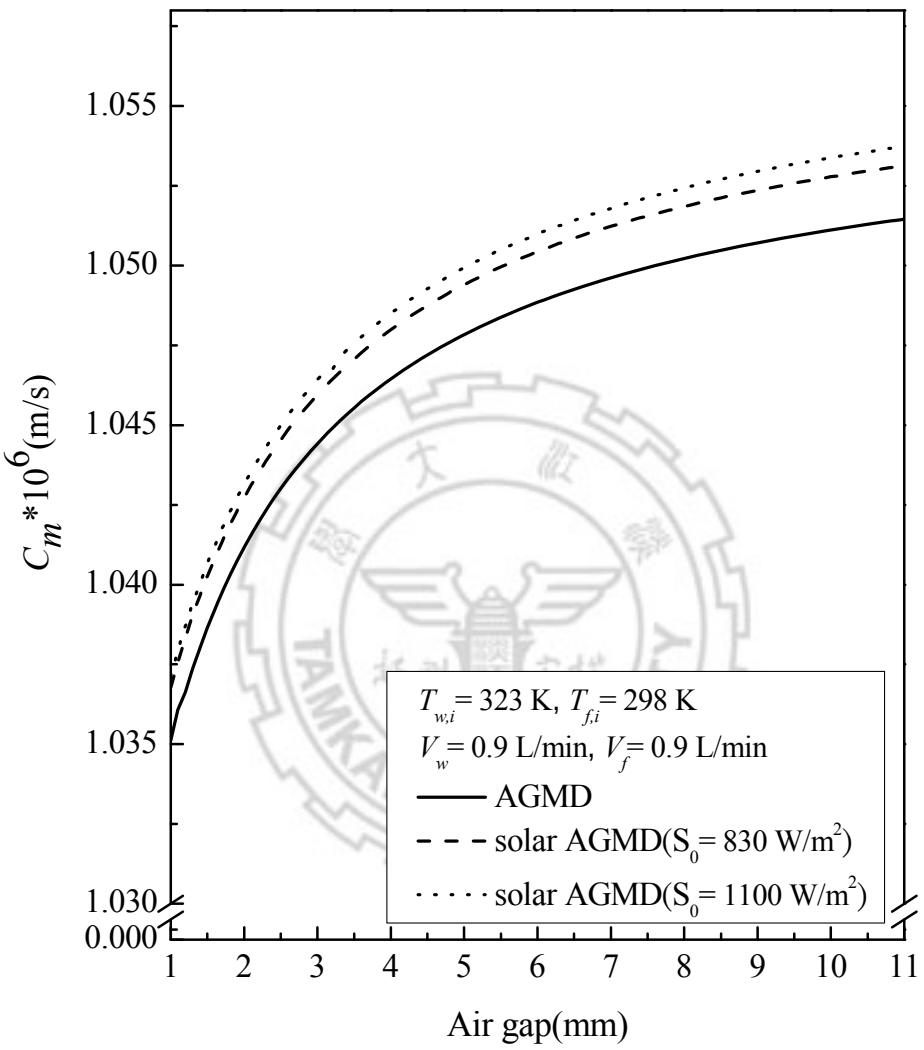



圖 33 氣隔式薄膜蒸發系統氣隔層厚度與入射量對薄膜質傳係數之影響;$V_w$ =$V_f$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K,$T_{f,i}$=298 K

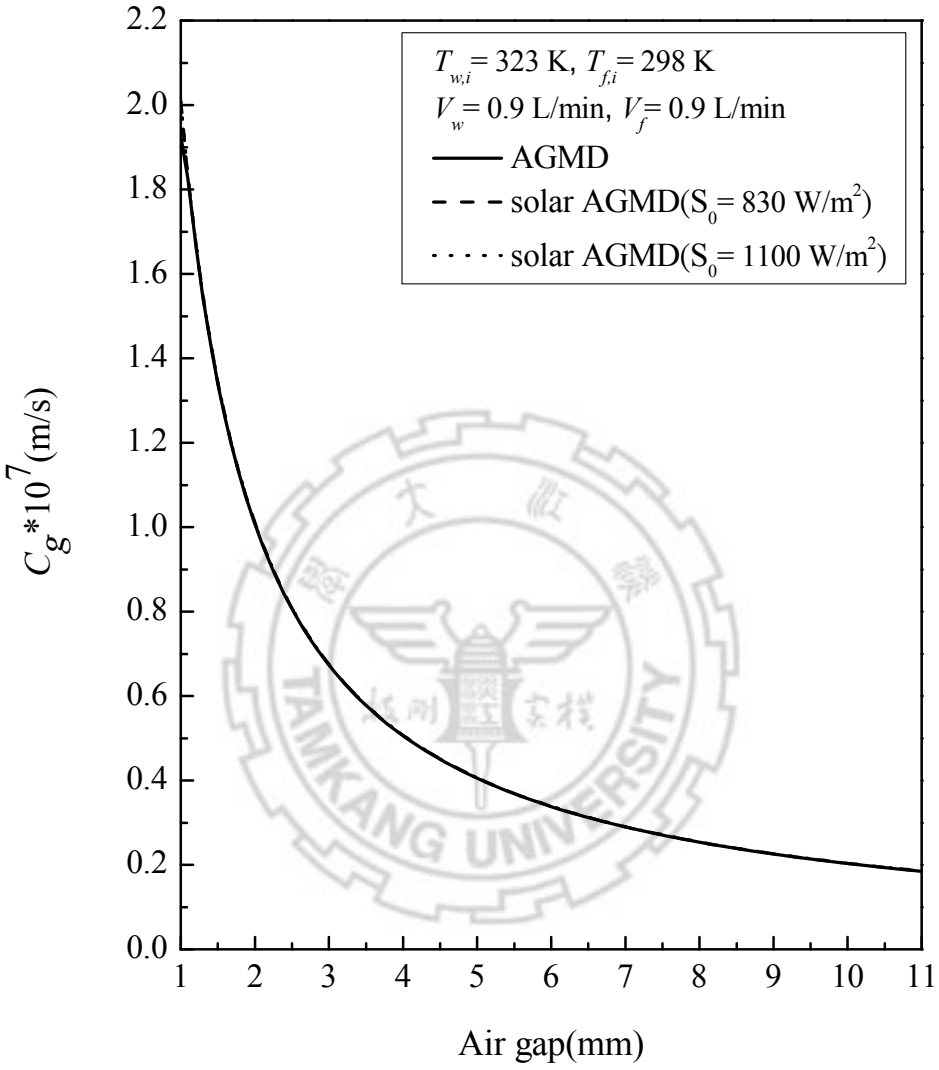



圖 34 氣隔式薄膜蒸發系統氣隔層厚度與入射量對氣隔層質傳係數之影;$V_w = V_f$=0.9 L/min,$T_{w,i}$=323 K,$T_{f,i}$=298 K

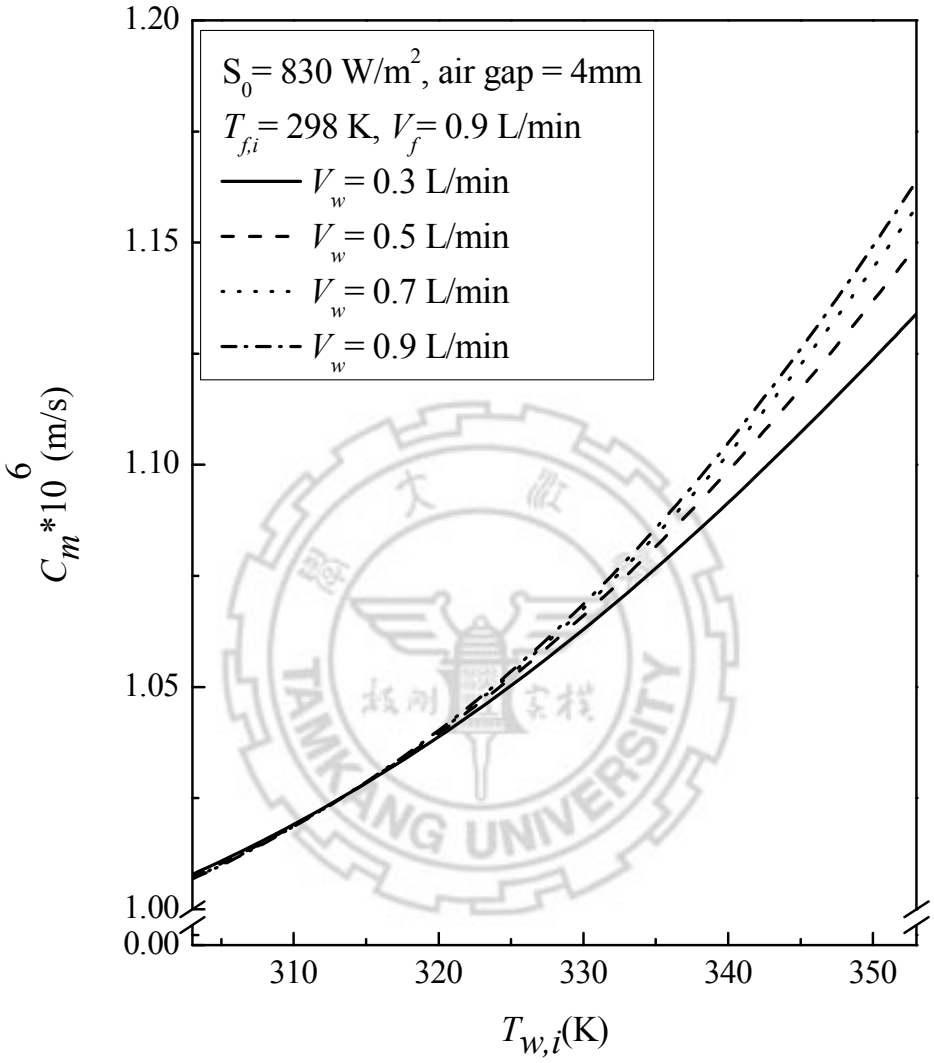



圖 35 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流進口溫度與體積流量對薄膜質傳係數之影響;$S_0$=830 W/m$^2$, $V_f$= 0.9 L/min, $T_{f,i}$= 298 K

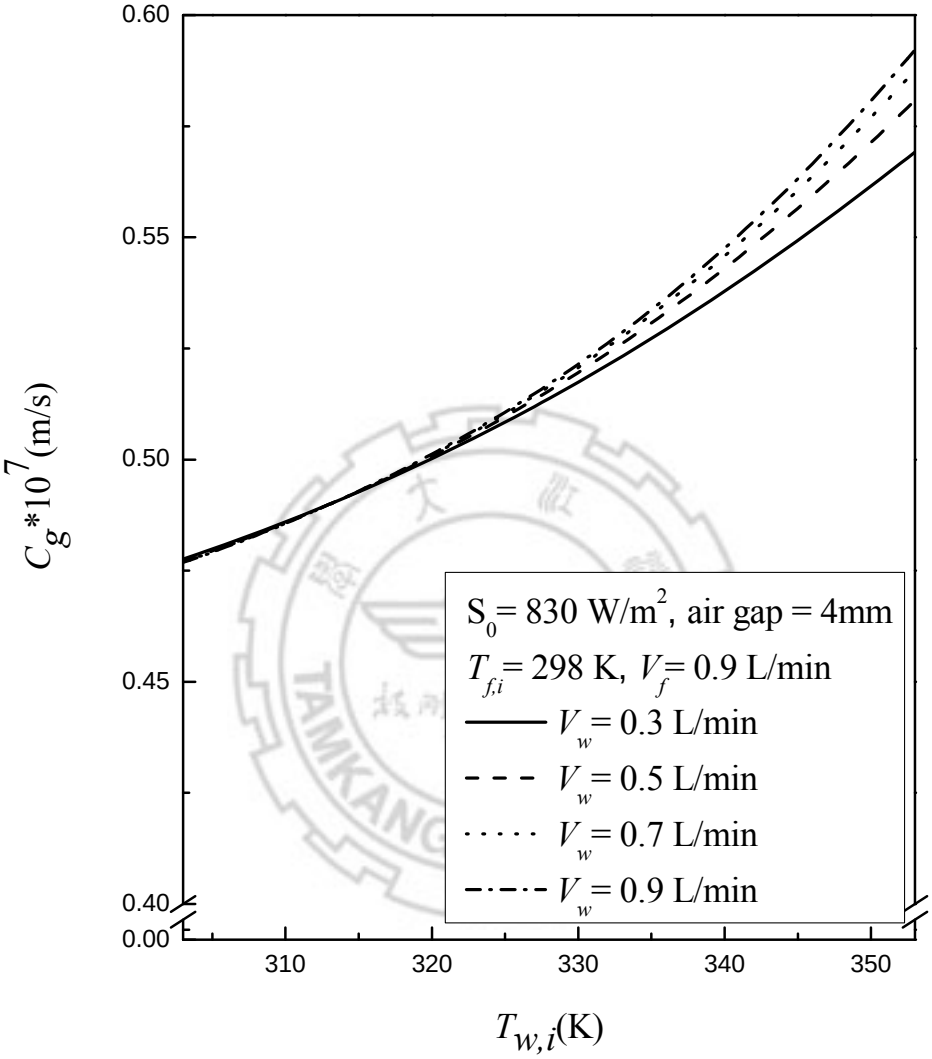



圖 36 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統熱物流進口溫度與體積流量對氣隔層質傳係數之影響;$S_0$=830 W/m$^2$, $V_f$= 0.9 L/min, $T_{f,i}$= 298 K

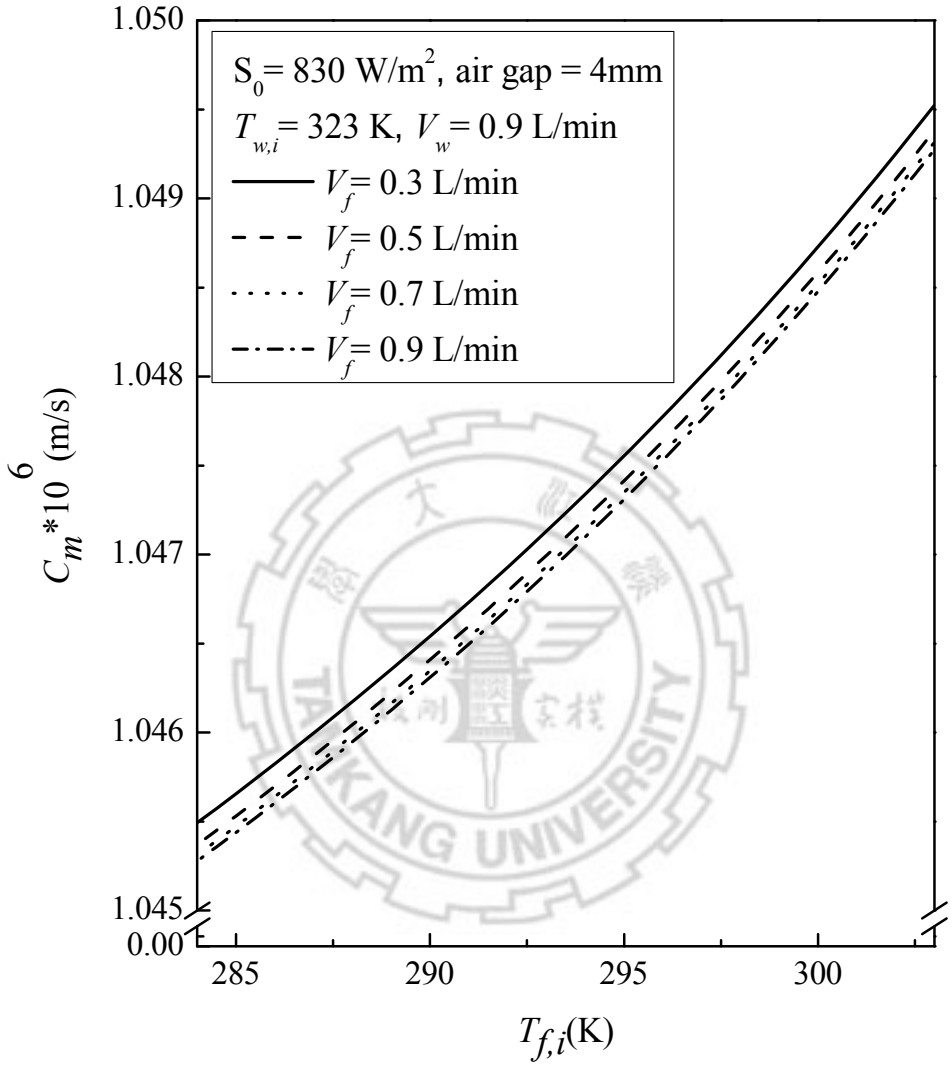



圖 37 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統冷物流進口溫度與體積流量對薄膜質傳係數之影響;$S_0$=830 W/m$^2$, $V_w$= 0.9 L/min, $T_{w,i}$= 323 K

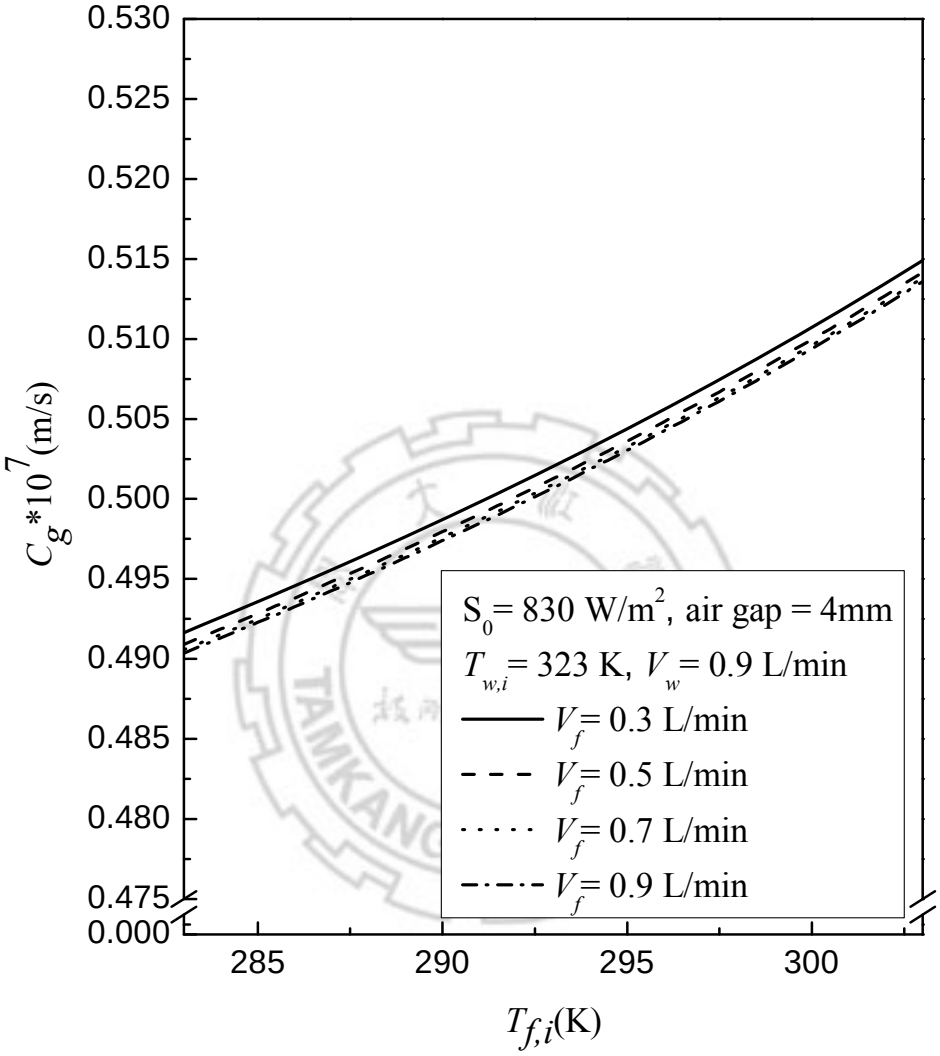



圖 38 太陽能氣隔式薄膜蒸發系統冷物流進口溫度與體積流量對氣隔層質傳係數之影響;$S_0$=830 W/m$^2$, $V_w$= 0.9 L/min, $T_{w,i}$= 323 K

# 第六章 結論

## 6-1 結論

對於本研究太陽能薄膜蒸發系統之理論分析與實驗，總括前面之結果與討論，我們可以針對此系統之結論做出幾點歸納整理

1. 在熱物流溫度較低時，熱物流體積流量改變對純水產率響小較小，隨著溫度升高，純水產率隨體積流量變大而增加之趨勢較明顯。冷卻水之溫度與體積流量對純水產率影響不大，在氣隔層較薄時冷卻水流量對純水產率影響會比厚氣隔層時大。
2. 空氣間隔層之厚度對純水產率之影響較大，隨著氣隔層變小，純水產率量變大，在較小氣隔層厚度(1mm~4mm)之間，改變氣隔層厚度對純水產率的影響會隨著熱物流之溫度越高變化越大。
3. 入射量強度之影響，在太陽能氣隔式薄膜蒸發中，當熱物流之體積流量越小，對於純水產率增加效率較好以熱物流之溫度來看，在低溫時效率較好，隨溫度上升增加效率會降低，而在氣隔層厚度方面，隨著氣隔層越小，入射量對純水產率增加效率越好。
4. 傾斜角度對於純水產率之影響並不大，當氣隔層厚度變越薄，對純水產率之影響也稍微變大，對於純水產率影響不大。
5. 對於太陽能氣隔式薄膜蒸發系統，影響熱效率包括了熱物流溫度、入射量強度和氣隔層厚度等，在溫度越高、入射量越大熱效率也會越大，但在氣隔層部分會隨著厚度變薄而熱效率增加，當厚度 2.5mm 左右熱效率最好，低於 2.5mm 後熱效率就會降低，因此最好熱效率在氣隔層厚度 2.5mm。
6. 對於薄膜質傳係數$C_m$與氣隔層質傳係數$C_g$的影響，$C_g$隨氣隔層

厚度變大而減少，$C_m$則相反隨氣隔層厚度變大而增加，而熱流體溫度與流量影響$C_m$較明顯。

## 6-2 未來研究方向

對於本研究太陽能氣隔式薄膜蒸發系統之理論分析與實驗探討扔有改進之處，在此針對未來研究之方向做出幾項規劃與建議

1. 可利用 2 維方式，推導太陽能氣隔式薄膜蒸發系統，使理論分析更為精確。
2. 可推導複合式雙效太陽能薄膜蒸發系統，例如第一效為氣隔式薄膜蒸發(AGMD)、第二效為掃流空氣式薄膜蒸發(SGMD)，來提升純水產率。
3. 改良吸收板，在吸收板處增加翅來提高吸收板與熱流體間之熱傳效率。

TAMKANG UNIVERSITY

# 符號說明

$a_{water}$ 水在氯化鈉溶液下之活性係數

$B$ 薄膜蒸發通道寬度，m

$C_g$ 氣隔層之質傳係數，s/m

$C_K$ Knudsen diffusion 質傳係數，s/m

$C_m$ 薄膜質傳係數，s/m

$C_M$ Molecular diffusion 質傳係數，s/m

$C_p$ Poiseuille flow 質傳係數，s/m

$C_T$ 薄膜蒸發總值傳係數，s/m

$Cp_a$ 空氣熱容量，J/(kg K)

$Cp_f$ 冷流體熱容量，J/(kg K)

$Cp_g$ 氣隔層之混合氣體熱容量，J/(kg K)

$Cp_v$ 蒸氣熱容量，J/(kg K)

$Cp_w$ 熱流體熱容量，J/(kg K)

$D_e^f$ 冷流體通道之水力直徑，m

$D_e^w$ 熱流體通道之水力直徑，m

$D_{wa}$ 蒸氣於空氣相之質傳擴散係數，$m^2/s$

$D_{wa}^m$ 薄膜孔洞之質傳擴散係數，$m^2/s$

$D_{wa}^g$ 氣隔層之質傳擴散係數，$m^2/s$

$e_c$ 玻璃面蓋之放射率

$e_m$ 薄膜之放射率

$e_p$ 吸收板之放射率

$F_{pc}$ 吸收板對玻璃面蓋之放射係數

$h_0$ 玻璃面蓋與吸收板間對流熱傳係數，J/ $m^2$ K s

$h_1$ 熱流體之對流熱傳係數，J/ $m^2$ K s

$h_3$ 冷流體之對流熱傳係數，J/ $m^2$ K s

$h_g$ 氣隔層之對流熱傳係數，J/ $m^2$ K s

$h_s$ 外界對流熱傳係數，J/ $m^2$ K s

$H_0$ 玻璃面蓋與吸收板間高度，m

$H_f$ 冷流體通到高度，m

$H_g$ 氣隔層高度，m

$H_w$ 熱流體通到高度，m

$k_a$ 空氣之熱傳導係數，J/ m K s

$k_g$ 氣隔層之熱傳導係數，J/ m K s

$k_m$ 薄膜之熱傳導係數，J/ m K s

$k_p$ 鋁板之熱傳導係數，J/ m K s

$k_v$ 蒸氣之熱傳導係數，J/ m K s

$L$ 薄膜蒸發通道長度，m

$M_a$ 空氣之分子量，kg/mol

$M_w$ 水蒸氣之分子量，kg/mol

$N_1$ 薄膜質傳通量，kg/$m^2$ s

$N_2$ 氣隔層質傳通量，kg/$m^2$ s

$N_A$ 傳統薄膜蒸發之濾液量，kg/$m^2$ s

$N_S$ 太陽能薄膜蒸發之濾液量，kg/$m^2$ s

$N_T$ 薄膜蒸發總質傳通量，kg/$m^2$ s

$Nu$ 流道流體納塞數

$Nu_0$ 玻璃面蓋與吸收板間納塞數

$Nu_g$ 氣隔層之納塞數

$P_{cb1}$ 冷凝板上蒸氣壓，Pa

$P_{m1}$ 薄膜與熱流體接觸面之蒸氣壓，Pa

$P_{m2}$ 薄膜與氣隔層接觸面之蒸氣壓，Pa

$P_T$ 總壓，Pa

Pr 普朗特數

$Q_{c0}$ 吸收板與玻璃面蓋之熱對流通量，J/ $m^2$ s

$Q_{c1}$ 吸收板與熱流體之熱對流通量，J/ $m^2$ s

$Q'_{c1}$ 熱流體與薄膜之熱對流通量，J/ $m^2$ s

$Q_{c2}$ 薄膜與冷凝板之熱對流通量，J/ $m^2$ s

$Q_{c3}$ 冷凝板與冷流體之熱對流通量，J/ $m^2$ s

$Q_{cm}$ 薄膜之熱傳導通量，J/ $m^2$ s

$Q_{cp}$ 冷凝板之熱傳導通量，J/ $m^2$ s

$Q_{cs}$ 玻璃面蓋與外界之熱對流通量，J/ $m^2$ s

$Q_{em}$ 薄膜內潛熱傳送通量，J/ $m^2$ s

$Q_{e2}$ 薄膜與冷凝板間潛熱傳送通量，J/ $m^2$ s

$Q_p$ 吸收板之熱傳導通量，J/ $m^2$ s

$Q_{r0}$ 吸收板對玻璃面蓋之輻射通量，J/ $m^2$ s

$Q_{r1}$ 吸收板對薄膜之輻射通量，J/ $m^2$ s

$Q_{rs}$ 玻璃面蓋對外界之輻射通量，J/ $m^2$ s

$Q_{s2}$ 氣隔層中之顯熱傳送通量，J/ $m^2$ s

$Q_{sm}$ 薄膜內顯熱傳送通量，J/ $m^2$ s

$r$ 薄膜孔洞半徑，m

$Ra_0$ 吸收板與玻璃面蓋間之瑞利數

$Ra_2$ 薄膜與冷凝底板間之瑞利數

Re 雷諾數

$\mathrm{Re}_w$ 熱流體通道雷諾數

$\mathrm{Re}_f$ 冷流體通道雷諾數

$S_0$ 吸收板之入射量，J/ $m^2$ s

$T_c$ 玻璃面蓋之溫度，K

$T_{cb1}$ 冷凝底板與氣隔層接觸面之溫度，K

$T_{cb2}$ 冷凝底板與冷流體接觸面之溫度，K

$T_{f,i}$ 冷流體進口溫度，K

$T_{f,o}$ 冷流體出口溫度，K

$\overline{T}_f$ 冷流體之平均溫度，K

$\overline{T}_g$ 氣隔層之平均溫度，K

$T_{m1}$ 薄膜與熱流體接觸面之溫度，K

$T_{m2}$ 薄膜與氣隔層接觸面之溫度，K

$T_{p1}$ 吸收板在玻璃面蓋側之溫度，K

$T_{p2}$ 吸收板與熱流體接觸面之溫度，K

$T_s$ 外界溫度，K

$T_{w,i}$ 熱流體進口溫度，K

$T_{w,o}$ 熱流體出口溫度，K

$\overline{T}_w$ 熱流體之平均溫度，K

$U_2$ 氣隔層之總熱傳係數，J/ m K s

$V$ 外界空氣之風速，m/s

$V_w$ 熱流體體積流量，L/min

$V_f$ 冷流體體積流量，L/min

$x_{vap}$ 蒸氣莫爾分率

$x_{water}$ 水之莫爾分率

$x_{NaCl}$ 氯化鈉之莫爾分率

$Y_{\ln}$ 水蒸氣之對數平均莫爾分率

# 希臘字母

$\alpha_g$ 玻璃面蓋之吸收效率

$\alpha_p$ 吸收板之吸收效率

$\beta_a$ 空氣之熱膨脹係數，1/K

$\beta_v$ 蒸氣之熱膨脹係數，1/K

$\delta_m$ 薄膜厚度，m

$\delta_K$ 努森擴散之薄膜厚度，m

$\delta_M$ 分子擴散之薄膜厚度，m

$\varepsilon$ 薄膜孔隙度

$\eta_t$ 薄膜蒸發之熱效率

$\lambda$ 汽化熱，J/kg

$\mu$ 氣體黏度，kg/m s

$\mu_w$ 熱流體之黏度，kg/m s

$\mu_f$ 冷流體之黏度，kg/m s

$\rho_w$ 熱流體密度，kg/m$^3$

$\rho_f$ 冷流體密度，kg/m$^3$

$\tau$ 薄膜曲折度

$\phi$ 傾斜度

# 參考文獻


1. 高筱爵, 張義鋒 譯著, 太陽能應之應用, 徐式基金會出版 (1980)
2. 氣候監測報告, 交通部氣象局 (2008)
3. 黃文雄, 林瓊輝 著, 我國太陽熱能發掌方向評估, 經濟部能源委員會 (1900)
4. G. Roa, I.C. Macedo, "Grain drying in stationary bins with solar heated air," *Sol. Energy*, **18**(5), 445-449 (1976)
5. SA. Kalogirou, "Seawater desalination using renewable energy sources," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **31**, 242-281 (2005)
6. ED Howe and BW Tleimat. *Fundamentals of water desalination*. in Solar Energy Engineering, Sayigh AAM eds., New York: Academic press (1977)
7. ME. Findley, "Vaporization though porous membrane," *I & EC Process Design and Development*, **6**, 226-230 (1967).
8. ME. Findley, V.V. Tanna, Y.B. Rao, and C.L. Yeh, "mass and heat transfer relation in evaporation though porous membrane," *AICHE J.*, **15**, 483-489 (1969).
9. D.Y. Cheng, "Method and apparatus for distillation," United States Patent 4265719 (1981).
10. D.Y. Cheng and S.J. Wiersma, "Composite membrane for a membrane distillation system," United States Patent 4316772 (1981).
11. G.L. Liu, C. Zhu, C.S. Cheung, C.W. Leung, "Theoretical and experimental studies on air gap membrane distillation," *Heat and Mass Transfer*, **34**, 329-335 (1998)
12. C.M. Guijt, G.W. Meindersma, T. Reith, A.B. de Haan, "Air gap membrane distillation: 1. Modelling and mass transport properties for hollow fibre membranes," *Separation and Purification Technology*, **43**,

233–244 (2005)

13. C.M. Guijt, G.W. Meindersma, T. Reith, A.B. de Haan, “Air gap membrane distillation 2. Model validation and hollow fibre module performance analysis,” *Separation and Purification Technology* , **43,** 245–255 (2005)
14. G.W. Meindersma, C.M. Guijt, A.B. de Haan “Desalination and water recycling by air gap membrane distillation,” *Desalination*, **187**, 291–301 (2006)
15. A.M. Alklaibi, Noam Lior, “Transport analysis of air-gap membrane distillation,” *Journal of Membrane Science*, **255**, 239–253 (2005)
16. A.M. Alklaibi, Noam Lior, “Comparative Study of Direct-Contact and Air-Gap Membrane Distillation Processes**,”** *Ind. Eng. Chem. Res.*, **46**, **,** 584-590 (**2007)**
17. A.M. Alklaibi, Noam Lior, “Heat and mass transfer resistance analysis of membrane distillation,” *Journal of Membrane Science*, **282**, 362–369 (2006)
18. L. Gazagnes, S. Cerneaux, M. Persin, E. Prouzet, A. Larbot, “Desalination of sodium chloride solutions and seawater wit hydrophobic ceramic membranes,” *Desalination*, **217**, 260–266 (2007)
19. C. Feng, K.C. Khulbe, T. Matsuura, R. Gopal, S. Kaur, S. Ramakrishna, M. Khayet, “Production of drinking water from saline water by air-gap membrane distillation using polyvinylidene fluoride nanofiber membrane,” *Journal of Membrane Science*, **311**, 1–6 (2008)
20. G.O.G Lof, J.A. Eibling, J.W. Bloemer, “Energy Balance in solar distillation,” *A. I. Ch. E. Journal*, **7**(4), 641 (1961)
21. P.I. Copper, “Digital simulation of transient solar still process,” *Solar Energy*, **12**, 313 (1968)
22. JW Bloemer, JR Irwin, JA Eibling, GOG Lof, “A practical basin type solar still,” *Solar Energy*, **9,** 197-200 (1965).

23.EE Delyannis and A Delyannis, “Economics of solar stills,” *Desalination*, **52**, 167-176 (1984).

24.GN Tiwari, K Mukherjee, KR Ashok, YP Yadav, “Comparison of various designs of solar stills,” *Desalination*, **60**, 191-202 (1986).

25.K Mukherjee, GN Tiwari, “Economic analyses of various designs of conventional solar stills,” *Energy Conv. Manag.*, **26**, 155-157 (1986).

26.田臨文，太陽能蒸發器效率之研究，成功大學化學工程研究所碩士論文 (1980)

27.陳志芳，通風式雙效太陽能蒸發器效率之研究，成功大學化學工程研究所碩士論文 (1987)

28.J. Koschikowski, M. Wieghaus, M. Rommel, “Solar thermal-driven desalination plants based on membrane distillation,” *Desalination*, **156**, 295-304 (2003)

29.Z. Ding, L. Liu, M.S. Bourawi, R. Ma, “Analysis of a solar-powered membrane distillation system**,”** *Desalination* , **172**, 27-40 (2005)

30.T.C. Chen, C.D. Ho, J.J. Guo, and J.W. Tu, “A Study on Membrane Distillation by a Solar Thermal-Driven System**,”** *Heat Transfer—Asian Research*, **36**(7), 2007

31.F. Banat, N. Jwaied, “Exergy analysis of desalination by solar-powered membrane distillation units,” *Desalination*, **230**, 27–40 (2008)

32.H.M. Qiblawey, F. Banat, “Solar thermal desalination technologies,” *Desalination*, **220**, 633–644 (2008)

33.K.W. Lawson, D.R. Lloyd, “Membrane distillation,**”** *Journal of Membrane Science*, **124**, 1-25 (1997)

34.K.G.T. Hoollands, T.E. Unny, G.D. Raithby, L. Konicek, “Free convection heat transfer across inclined air layers,” *J. Heat Transf.-Trans. ASME*, **98**, 189-193 (1976)

35.M. Gryta, M. Tomaszewska, “Heat transport in the membrane distillation process,” *Journal of Membrane Science*, **144**, 211-222 (1998)

36.J.N. Arnold, I. Catton, D.K. Edwards, “Experimental investigation of natural convection in inclined rectangular regions of differing aspect ratios,” *J. Heat Transf.-Trans. ASME*, **98**, 67-71 (1976)

37.R.C. Reid, J.M. Prausnitz, B.E. Poling, “The Properties of Gas and Liquid,” Fourth Edition, McGraw-Hill Book company (1988)

TAMKANG UNIVERSITY

# 附錄(一)

## 氯化鈉水溶液之密度

本研究氯化鈉溶液為 3.5%，利用內插法求出在濃度 3.5%下隨溫度變化之密度，在利用溫度對密度作回歸線

表 18 氯化鈉溶液密度

| Per Cent by Weight in Solution(%) | Density of Sodium Chloride Solutions(g/cm$^3$) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0°C | 10°C | 20°C | 25°C | 30°C | 40°C | 50°C | 60°C | 80°C | 100°C |
| 1 | 1.00747 | 1.00707 | 1.00534 | 1.00409 | 1.00261 | 0.99908 | 0.99482 | 0.99000 | 0.97850 | 0.96510 |
| 2 | 1.01509 | 1.01442 | 1.01246 | 1.01112 | 1.00957 | 1.00593 | 1.00161 | 0.99670 | 0.98520 | 0.97190 |
| 4 | 1.03038 | 1.02920 | 1.02680 | 1.02530 | 1.02361 | 1.01977 | 1.01531 | 1.01030 | 0.99880 | 0.98550 |
| 6 | 1.04575 | 1.04408 | 1.04127 | 1.03963 | 1.03781 | 1.03378 | 1.02919 | 1.02410 | 1.01250 | 0.99940 |
| 8 | 1.06121 | 1.05907 | 1.05589 | 1.05412 | 1.05219 | 1.04798 | 1.04326 | 1.03810 | 1.02640 | 1.01340 |
| 10 | 1.07677 | 1.07419 | 1.07068 | 1.06879 | 1.06676 | 1.06238 | 1.05753 | 1.05230 | 1.04050 | 1.02760 |
| 12 | 1.09244 | 1.08946 | 1.08566 | 1.08365 | 1.08153 | 1.07699 | 1.07202 | 1.06670 | 1.05490 | 1.04200 |
| 14 | 1.10824 | 1.10491 | 1.10085 | 1.09872 | 1.09651 | 1.09182 | 1.08674 | 1.08130 | 1.06940 | 1.05650 |
| 16 | 1.12419 | 1.12056 | 1.11621 | 1.11401 | 1.11171 | 1.10688 | 1.10170 | 1.09620 | 1.08420 | 1.07130 |
| 18 | 1.14031 | 1.13643 | 1.13190 | 1.12954 | 1.12715 | 1.12218 | 1.11691 | 1.11130 | 1.09930 | 1.08640 |
| 20 | 1.15663 | 1.15254 | 1.14779 | 1.14533 | 1.14285 | 1.13774 | 1.13238 | 1.12680 | 1.11460 | 1.10170 |
| 22 | 1.17318 | 1.16891 | 1.16395 | 1.16140 | 1.15883 | 1.15358 | 1.14812 | 1.14250 | 1.13030 | 1.11720 |
| 24 | 1.18999 | 1.18557 | 1.18040 | 1.17776 | 1.17511 | 1.16971 | 1.16414 | 1.15840 | 1.14630 | 1.13310 |
| 26 | 1.20709 | 1.20254 | 1.19717 | 1.19443 | 1.19170 | 1.18614 | 1.18045 | 1.17470 | 1.16260 | 1.14920 |

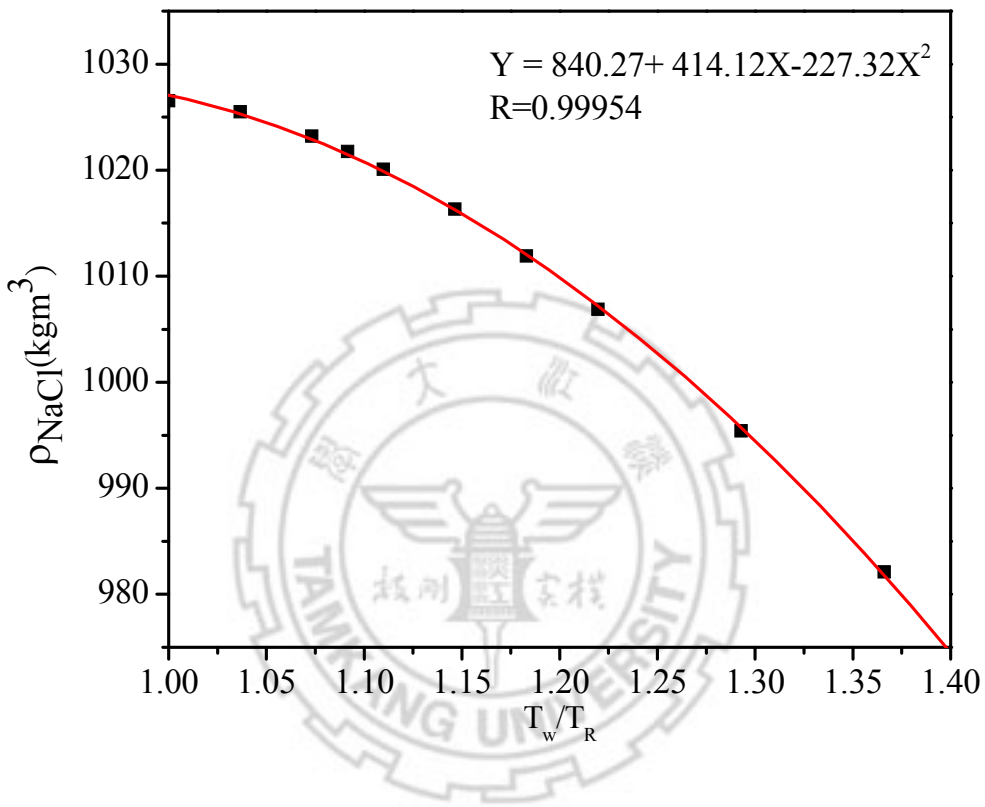



圖 39 氯化鈉溶液密度對溫度之趨勢

# 附錄(二)

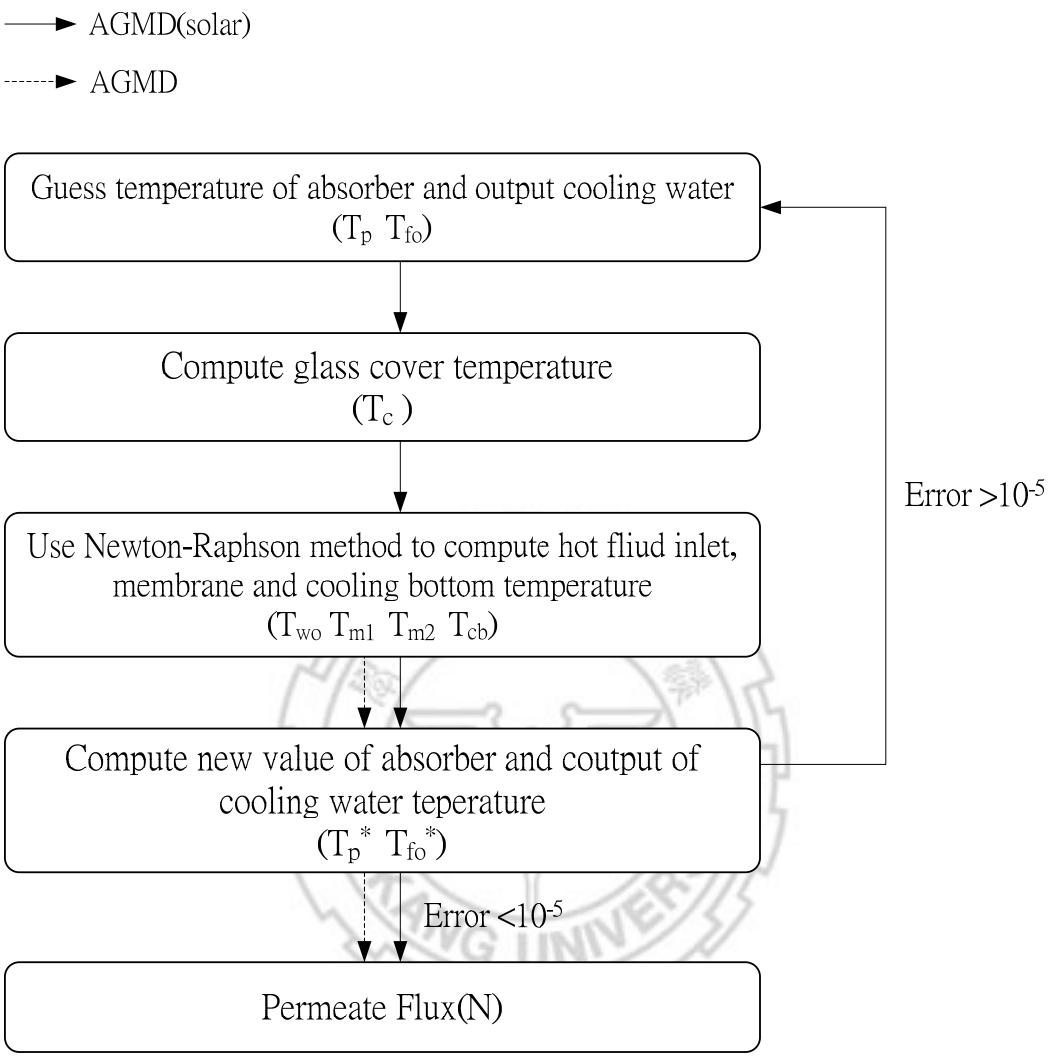



圖 40 數值計算流程圖