

112年度氣候變遷創意實作競賽

決賽作品說明書

隊伍編號	05
隊伍名稱	「膜淨」之膜術師
作品中文名稱	黃河之水天Sun來
作品英文名稱	Photo-thermal membrane distillation

參賽學校：國立台灣大學

指導老師：童國倫教授

團隊成員：葉侑叡、吳柏均、周鼎勳

目錄

一、作品摘要·····	Page 3
二、設計構想與運作說明·····	Page 4
(一)構想來源 ·····	Page 4
(二)系統運作說明·····	Page 5
三、作品說明·····	Page 8
(一)作品展示·····	Page 8
(二)作品介紹·····	Page 9
四、創作特點·····	Page11
(一)純化水技術比較·····	Page11
(二)薄膜蒸餾和逆滲透比較之優勢·····	Page12
(三)海水淡化成本比較·····	Page12
(四)其餘應用 ·····	Page13
(五)薄膜蒸餾於水處理之優點·····	Page13
五、作品應用範圍與發展潛能·····	Page14
六、工作分配·····	Page17
七、參考文獻·····	Page17
八、附錄	

一、作品摘要

我們以一種簡單、快速、低成本、可規模化的靜電噴塗方式來塗佈低價碳黑並發展具有光熱響應的薄膜蒸餾純水，其驅動、操作運行簡單，因此對於國家的水資源危機，是一項很有前景的技術，並符合 SDGs 目標 6、7、9、11 和 13。

Abstract

We have developed a simple, fast, low-cost, scalable electrostatic spray coating of low-cost carbon black and developed a thin film of distilled pure water with photothermal response, which is simple to drive, operate and run and is therefore a promising technology for the country's water crisis and meets SDGs objectives 6, 7, 9, 11 and 13.

二、設計構想與運作說明

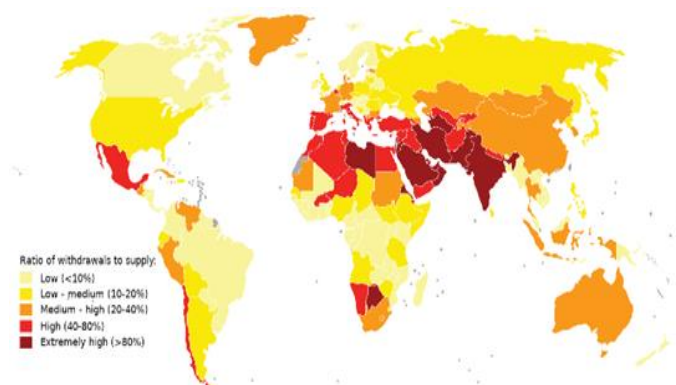
(一)構想來源

隨著世界人口數不斷上升，且全球暖化的問題加劇，淡水資源的供需顯然已在全世界中漸漸失去了平衡。水資源的節流固然重要，舉凡像是獎勵節省的用水、推廣「一水二用」等等的政策；然而，面對近年突如其來的旱災，顯然節流對於此問題已束手無策，要如何「開源」來取得更豐富且能穩定供給水資源的方式以成為了學術界中開始正視的議題之一。從地球的水圈中可以發現，海水佔了高達97%，而淡水僅僅包含了3%，顯然淡水再利用已無法滿足現今缺水的議題，若能提煉蘊藏量豐富的海水將更能有效的解決水資源缺乏的問題。因此，「海水淡化」的技術已成為了國際上的顯學之一。

全球目前已經有 150 個國家已正在發展海水淡化的技術，且超過 3 億人需要使用淡化海水來滿足其日常需求。綜觀現今海水淡化的技術，可謂百家爭鳴，而其中已蒸餾法及薄膜法最為突出，舉凡早已商業化的 multi-stage flash (MSF) distillation 以及 reverse osmosis (RO)。蒸餾法有著較高能源使用效率，且可使用低階熱源來當作驅動力，然而設備體積及佔地面積龐大；薄膜法佔地小且操作精簡，卻需要非常高階的電能以及存在著滲透壓可處理鹽度的極限。而兩者皆存在著共同的問題點，其一是能源消耗量非常大，其二是必須投入巨資來滿足高昂的運行成本。然而以當前缺水問題非常嚴重的地區，可以發現以開發中國家佔多數，對於這些國家而言，以現有技術而言，要發展海水淡化是一件天方夜譚的事情。



圖一、地球水圈比例



圖二、全球各地缺水分布

(二) 系統運作說明

1、工作原理

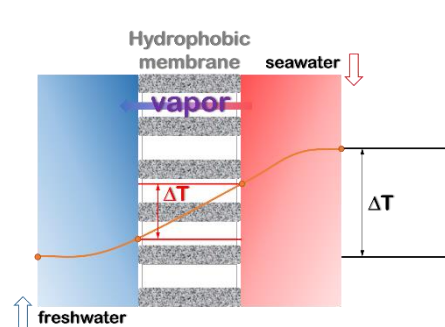
既然現有技術遇到了瓶頸，尋找新技術也當成為未來發展的目標。而蒸餾法和薄膜法兩種方法各有優缺點，那麼能不能整合兩道程序的優點，各取所長而發展出另一項新技術呢？「薄膜蒸餾」--一個嶄新的新技術開始問鼎於海水淡化的市場。

薄膜蒸餾(如圖三示意圖)結合了薄膜與蒸餾兩大主軸，其利用高疏水性的多孔薄膜作為熱端(進料端)及冷端(產水端)的介面。進料端(海水)先於外源加熱到一定溫度後，因兩側蒸氣壓差異(溫度梯度)使水蒸氣分子穿過薄膜後，於產水端(超純水)冷凝而使鹽水達到分離的目的。這項技術繼承了薄膜法中佔地面積小的優勢以外，由於薄膜兩側的驅動力不再需要抵抗海水的高滲透壓，因此當處理高濃度的鹵水時能耗上更具主宰性的地位。這樣看似完美的技術，然而正準備要朝向商業化邁進時，卻遇到了更致命性的問題--「溫度極化現象」。在圖三中可以發現，由於流體經過固體介質的邊界層效應，使得薄膜兩端實際的溫度差小於冷熱端液體的溫度差。溫差是薄膜蒸餾的驅動力，換句話說，更小的溫度差意味著水蒸氣透過的速率會降低，造成通量大幅度的下降。這個溫度極化的問題，隨著規模的放大会造成更嚴重的影響，也正是薄膜蒸餾邁入商業化最大的枷鎖。

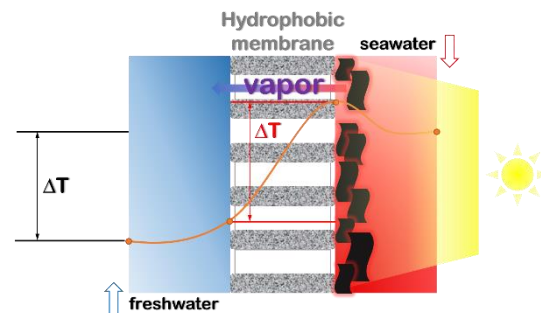
Politano et al.(2017)首次提出直接利用 UV 光來加熱薄膜表層，並整合薄膜蒸餾的技術來進行新穎的光熱海水淡化技術。其將銀奈米粒子共摻於 PVDF 高分子中，並以非溶劑誘導相轉換(NIPS)而形成 Ag/PVDF 的複合薄膜。由於銀奈米粒子具有 plasmonic resonance 的性質，並於紫外光波段具有強吸收峰，因此最後成功解決了薄膜表面溫度極化的問題，且水通量也有大幅度的提升。然而，從現實面的角度評析，UV 光的來源在地球上並不容易取得，在應用面上並沒有那麼具有前景。若是要放大規模，勢必得需要更大的人造光源，此時我想著地球上最多的光源不就是太陽嗎？如果能成功利用太陽光進行海水淡化，勢必能對世界產生巨大的影響。

正當我思索著如何將太陽光轉為熱能時，煩惱的思緒湧上心頭，讓我決定去海邊走走。當我走在炙熱的沙灘上享受海風吹拂，正當要投入大海的懷抱時，「啊！好燙」原來是我踩到了佈滿黑色碎石堆的沙坑中。一時氣憤之下捧一把海水倒入沙坑中，就繼續往大海奔去。正當我沿著原路回來時，水竟然全部都消失了，只剩下閃閃發光的鹽結晶沉積於黑色的石頭上。此時正值研究低潮期的我靈光一閃，開始幻想著如果能把薄膜表面塗成黑色，並將其持續照射陽光，那麼原本因為邊界層使得溫度極化的問題，是否就能如魚得水的解決了？沒想到這樣的癡人說夢，

卻開啟了研究的另一趟旅程--「奈米光子光熱薄膜蒸餾(Nanophotonics-enabled solar membrane distillation, NESMD)」(見上圖四)。在這項新穎的技術中，我們將傳統薄膜蒸餾所使用白色疏水 PVDF 基材，以具工業化潛力的靜電噴塗方式塗佈一層非常薄的碳黑層，並於執行薄膜蒸餾的測試時持續以太陽光模擬器照射薄膜表面。結果發現，這層碳黑層大幅減低了溫度極化的問題，不僅沒有造成水蒸氣額外的質傳阻力，由於表面持續發熱甚至獲得了更高的產水率。此外，這些一顆顆碳黑奈米粒子所形成的微/奈米結構因為蓮葉效應也使得薄膜達到超疏水的特性，因此具有極高的鹽類阻絕率。太陽能一直以來都是地球上無盡又潔淨的能源，結合同樣取之不盡的海水，就能大量生產生活中可使用的水資源。尤其是在許多開發中國家，特別是電力和水資源皆匱乏的區域，相信有朝一日這項光熱海水淡化技術一定能「發光發熱」！



圖三、薄膜蒸餾程序



圖四、新穎光熱薄膜蒸餾程序

2、操作說明

利用微孔疏水性薄膜，將兩邊不同溫度的溶液或流體分隔開，薄膜兩側不同蒸氣壓形成質傳驅動力，蒸氣分子從較高溫的進料端經過薄膜孔道傳送到滲透端，再藉由冷流體或其它冷卻裝置而冷凝並收集。

影響薄膜蒸餾效能之因素由以下

(1) 模材的選擇 (多孔, 厚度夠薄, 不可有濕潤現象)

當進料端壓力高於 Liquid entry pressure of water (LEP); 液體貫穿膜材

$$LEP = \frac{2\beta \cos\theta}{r}$$

(r : 接觸液體之表面張力, θ : 膜材與液體之接觸角)

(2) 流體特性 (膜兩側流體溫度、流速、濃度、黏度)

流速上升，溫度極化與濃度極化；溫度上升，蒸氣壓上升

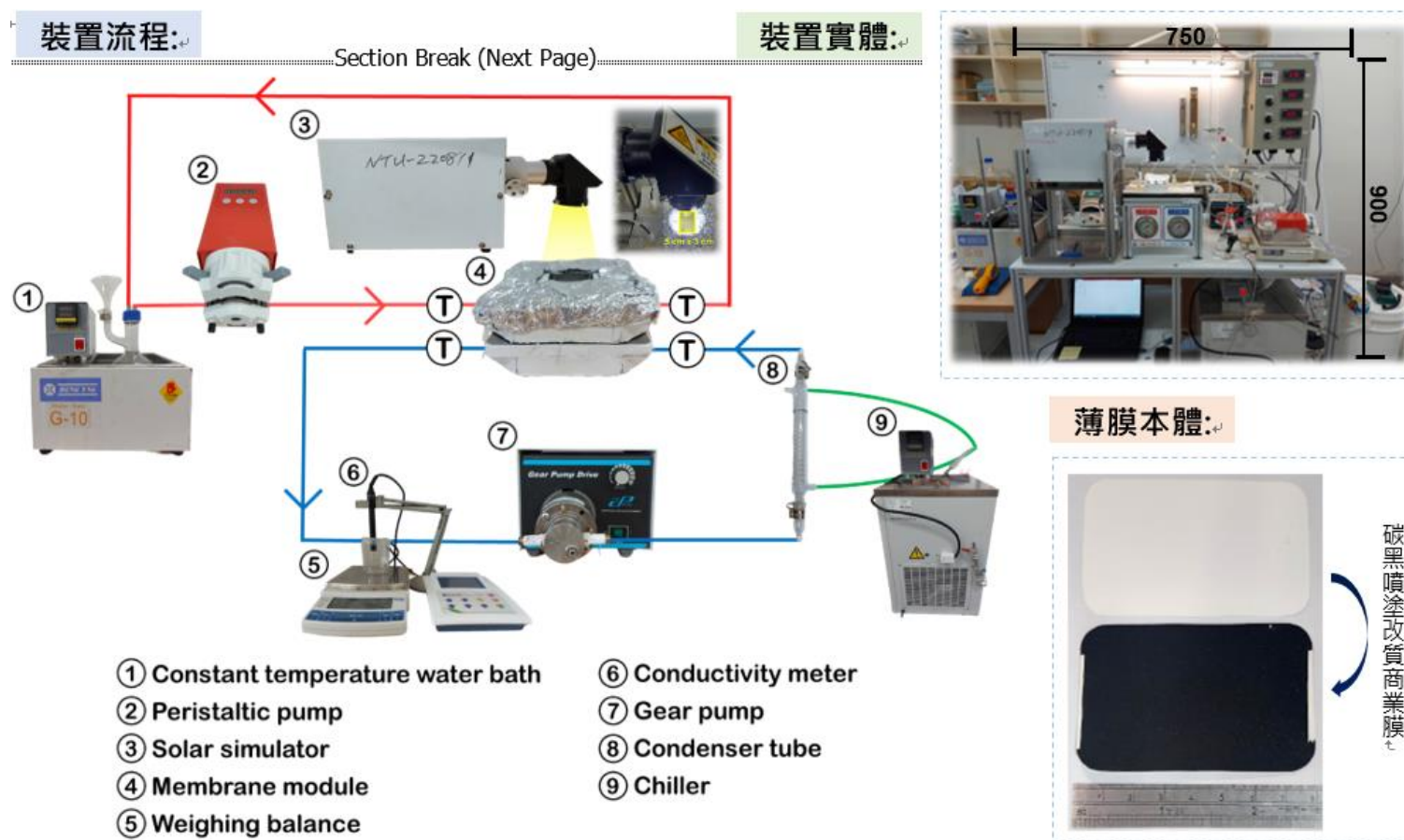
操作因素有 模材設計、溫度差、流速

此**模材設計**以生質能進行光熱薄膜的製作以達到永續，減少氣候變遷，利用一顆太陽光強度，可讓工廠廢水或海水都可薄膜特性來達到較高的**溫度差**。

在此裝置只需打開 pump，來**控制流速**，形成熱水和冷水端的流動。以方便應用於各個地點。

三、作品說明

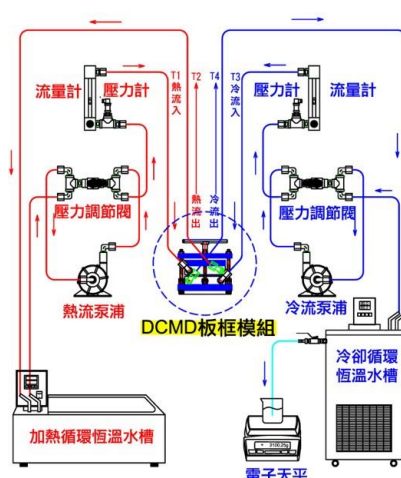
1、作品展示



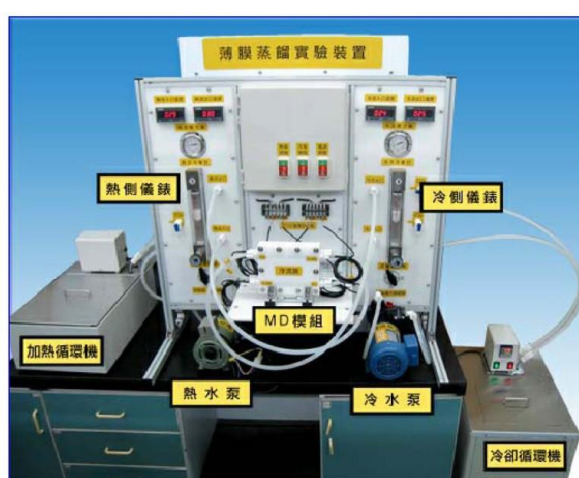
2、作品介紹

在這項新穎的技術中，其主要目的是為了推廣到開發中國家，解決未來全世界水資源不均以及缺水危機的嚴重議題。為了因應低碳排的政策，因此我們使用了非常綠色且潔淨的太陽能來驅動且大幅降低淡化水資源所需的能耗;另一方面，廢輪胎的議題也層出不窮，秉持著循環經濟的口號，我們利用輪胎中富含的碳黑將其高值化，大規模的製成具光熱響應的薄膜，應用於光熱薄膜海水淡化。

薄膜蒸餾實驗系統流程圖



薄膜蒸餾實驗系統設備說明圖



圖五、薄膜蒸餾流程圖及說明圖

奈米光子光熱蒸餾繼承了傳統薄膜蒸餾本身的程序，一端利用蠕動幫浦進料預熱的海水，另一端則使用齒輪泵循環乾淨的純水。同時，於薄膜模組的上方具有一個 5 cm x 3 cm 的石英玻璃(幾乎全光譜波段透光)，讓太陽光源能有效的照射到薄膜表層。在系統運行的過程中，薄膜受到太陽光的照射而溫度上升，因而加熱流經薄膜表層的海水;水相較於鹽類因蒸氣壓較低而形成蒸氣穿過多孔的薄膜，並於另一側低溫循環水中冷凝收集。在測試的過程中我們也發現在較低流速的情況下，於薄膜的滯留時間增加，因此更能使太陽光有效率的加熱海水，進而使通量增加更顯著。從能耗的角度面思考，意味著幫浦不需要耗費大量的電能來提供水壓，因此這項技術對於高階電能的依賴性相比於傳統的海水淡化技術有著大幅度下降的前景，對於要建置在能源及水資源皆匱乏的區域中，可說是非常具有邁入商業化的競爭力。

這項技術還有另一大重點就是薄膜的設計。為了降低薄膜端的製造成本，我們使用了價格非常低廉的碳黑作為奈米光子的來源，相比於像是金銀奈米粒子、二維材料等等具高度價值性的光熱材料相比，在成本與效能上的考量是最

佳的選擇。至於要如何將碳黑改質於商業的薄膜基材上，經過多方嘗試後，我們利用了一種新穎、可規模化及低成本的靜電噴塗方式來製作光熱薄膜。靜電噴塗是一種利用電壓差來驅動的塗布技術，溶液於極細的尖端噴嘴受到毛細現象及庫倫靜電力而形成泰勒錐，具有了穩定的噴塗結構。靜電噴塗除了製造的手法非常快速，短短幾分鐘內即可形成大片的薄膜之外，過程中不需要耗費大量的溶劑等等額外的資源，因此相比於其他薄膜製備的手法成本上相當具有優勢。

總結來說，在未來水資源越缺乏的區域，卻也是能源越缺乏的區域。淡水資源的稀少性勢必得向大海要水喝，然而現行的海水淡化技術不僅能耗高、成本高之外，大量的電力消耗意味著更高的碳排放，與國際間低碳的目標背道而馳。因此我們相信研發出的這項奈米光子光熱蒸餾技術，對於未來嚴重的水情，定能綻放出嶄新的一道光。

這項看似容易的技術，然而在研究的過程中卻遇到了不少的問題，除了要兼顧系統本身來達到最佳的節能設計及運作參數外，膜的製作也要同時考量到成本以及規模化的潛力。舉例來說，在系統的架設方面，模組的設計曾經是我們的絆腳石之一。當高度透光性的石英玻璃換成具有些微濾光性且厚度較厚的壓克力板，由於光強度固定但照射到膜上的實際強度減少，因此產水量掉至原本的三分之二。此外，由於系統是藉由溫差來當驅動力，設計上必須使管件、模組等等達到高度絕熱的特性；在薄膜製作的考量上，我們也曾經嘗試過塗布像是價格高昂的石墨烯等等的二維材料來提供光熱特性。雖然由於材料本身的高吸光性，因而可以獲得稍高的產水率，但就實際商業化的應用面來說，當膜的面積放大到工廠的規模時可能反而失去了成本優勢的競爭力。靜電噴塗的參數最佳化也是一大面臨的難題之一，簡單快速的噴塗卻必須經由電壓、進料流量、噴塗距離等等一系列的嘗試過後才可品嚐甜美的果實。在發展出這項高度創新的奈米光子光熱蒸餾技術中，我們的確遇到了不少的困境，但是卻也發現了更多的突破點。

如同前面反覆提到的，奈米光子光熱蒸餾技術的研究主軸並不是要完全取代 RO 等等已高度商業化且技術成熟的傳統技術，而是考量到真正缺水的國家反而是經濟發展稍差、能源也較匱乏的區域，這些地方要如何獲得低價又乾淨的淡水資源是一大考量點，且又不會花費過多的電力於水資源上。我們也測試了接近實際的條件下(一個太陽光強度、3.5 wt% NaCl、日照時數 10 hrs)，不供應任何外加的電源與熱源，產水量一天於每平方米可高達 60 公升，已絕對可以滿足民生用水的需求。為了更證明這項技術的潛在應用性，我們以下將和傳統的技术做比較，來說明其非常具有商業化的潛力。

四、創作特點

(1) 純化水技術比較

一項技術是否能成功商業化，除了本身程序的可行性及穩定性，最重要的考量點莫過於成本了。在創造相同的產量時，又能有效降低成本，正是技術突破所面臨的考驗，因此我們以成本做為首要考量。總成本包含資本成本及運營成本，MSF 的設備體積非常巨大，考量到架設的費用以及所需的土地面積，需要非常龐大的資本成本。RO 的設備系統很複雜，雖然佔用空間較小，但資本成本也偏高。而 NESMD 設備操作簡單，資本成本可大幅降低。營運成本主要考慮到實際運作時，持續消耗的支出，在此海水淡化程序中主要為能耗。

	能耗(度/立方公尺)	
	電能	熱能
MSF	2.5-5	40-120
RO	3-6	0
NESMD	1.5-4	4-40

表一、MSF、RO、NESMD 運轉的能耗

在這三種技術中，MSF 是最為耗能的，雖然 NESMD 在熱能需求大於 RO 膜，但熱能取自於太陽，因此並不需要任何花費，相比之下，在能耗的成本是低於 RO 膜的，除此之外，產生的熱也可以循環再利用，創造的價值遠勝於另外兩種技術。

因此加總起來，NESMD 作為海水淡化程序，總成本將會是最低的。而且材料使用的是廢棄輪胎回收而得的碳黑，價格低廉，因此製造薄膜時所需的成本很低，每平方公尺的膜只需要大約 20 元。目前海水淡化的成本為每噸 20 元，如果能實際應用 NESMD 的技術，成本必然會大幅減少，預計可以降低成每噸 5 元。接著考慮其他影響海水淡化效能的因素，可以發現 NESMD 相比重統計數是相當具有競爭力的。

綜合以上各項初步評估的數據及結果，與其他傳統技術相比，NESMD 除了在海水淡化的費用可以降低許多，而且使用的能源是低階的能源，在使用上相當的省能。因此我們認為在未來，無論是在水資源缺乏的開發中國家，抑或是電力昂貴的地區，NESMD 在海水淡化上都相當具有前景，能有效的解決水資源的問題。

表二、MSF、RO、NESMD 各項特質比較

	MSF	RO	NESMD
能量來源	廢熱、再生能源	電能	廢熱、再生能源
能源使用效率	中	低	極高
能耗	極高	高	低
產水品質	高	中	極高
可處理鹽度範圍	高	中	高
積垢	不易	易	中
占地面積	高	低	低
總成本	高	中	低

(2)MD 和 RO 相較之優勢

對含離子或非揮發性分子之廢液，MD 產水純度高於傳統 RO 程序：例如對於含一價鹽之溶液，RO 無法有效去除，而 MD 則皆可近 100%去除

可使用低價能源：太陽能與工廠廢熱等

水回收率高：可達 80%以上

MD 之進料較不需複雜的前處理

製程廢液溫度高於 50 °C，RO 模組一般無法承受

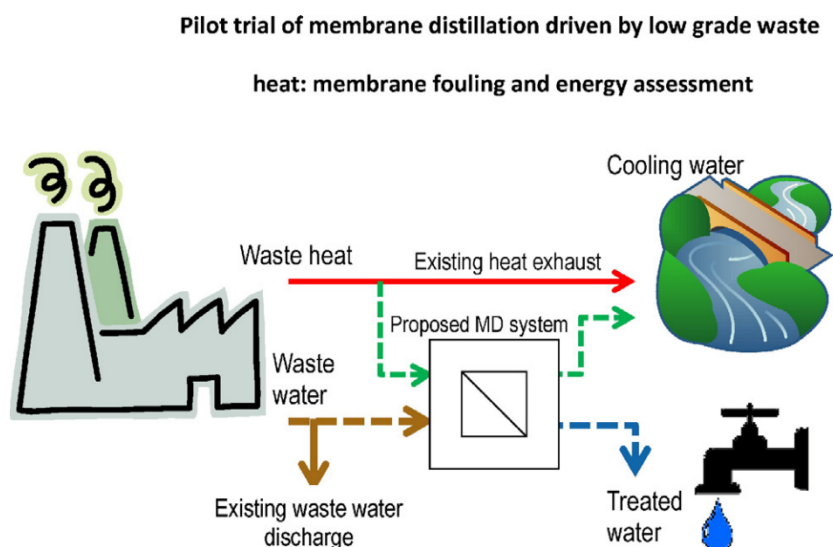
(3)海水淡化成本比較 (Desalination, 187 (2006))

表三、薄膜蒸餾及逆滲透純水生產價值估算

	Memstill®		Memstill®		RO	RO
	Fuel fired	Co-gener.	Waste heat		Min.	Stand.
Energy costs						
Heat (MJ/m ³)	231	231	139	139	-	-
(Costs in \$/GJ)	(1.30)	(0.50)	(0.50)	(0.10)		
Electricity (kWh/m ³)	0.75	0.75	0.75	0.75	2.5	4.5
Heat costs (\$/m ³)	0.30	0.12	0.07	0.01	-	-
Electricity costs (\$/m ³)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.10	0.18
Fixed costs						
Hardware, excl. membranes (\$/m ³ .day)	165		165		750	1024
Module costs (\$/m ³ .day)	214		233		35	49
Hardware costs (\$/m ³ .day)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.23	0.32
Module costs (\$/m ³ .day)	0.11	0.11	0.12	0.12	0.02	0.03
Auxiliary costs						
O&M, chemicals, filters etc. (\$/m ³ .day)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10
Water costs total (\$/m ³)	0.54	0.35	0.31	0.26	0.45	0.63

(4)其餘應用

除了海水淡化外，還可以以電廠廢熱進行薄膜蒸餾產水



圖七、以電廠廢熱進行薄膜蒸餾產水之示意圖

(5)薄膜蒸餾於水處理之優點

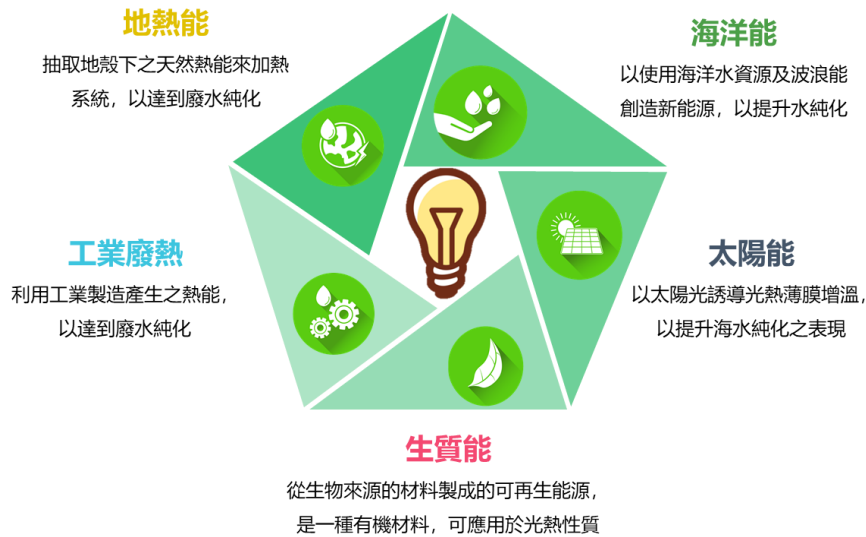
1. 高產水品質 (High water purity)
2. 高水回收率 (High water recovery)
3. 低結垢 (Less susceptible to fouling)
4. 高鹽及其它離子阻擋率 (Potential of very high salt separation factors)
5. 低前處理需求 (Less chemicals for pre-treatment are required)
6. 可利用低階能源 (Low quality energy is easily incorporated) (Waste heat and solar heat))
7. 低溫及低壓操作 (Low pressure and Low Temperature required)
8. 設備及操作方式簡單 (Simple operation and device)

奈米光子光熱薄膜蒸餾(NMSED)使用傳統純化水概念，結合取之源源不絕的太陽能將無垠的大海水資源進行純化，再到光熱材料設計及最後裝置設計，有完善的系統可應用於工業規模，不論是低價位的材料、可應用於大面積製造的薄膜製造至薄膜裝置等等，都可立即應用於現實生活。傳統的純化方式需高熱高電導致氣候變遷的影響，本團隊所研發的系統，將有助於氣候變遷減緩，且加入自然解方來達到循環經濟及氣候正義，更進一步的套入的碳循環的概念。

五、作品應用範圍與發展潛能

(一)應用範圍

光熱薄膜蒸餾系統可應用非常廣泛，只要有**太陽光及廢熱系統**都可以加以應用於**半導體離子純化、海水淡化、工廠廢水純化**等等。



圖六、大自然能量誘導以提供薄膜蒸餾之海水純化

(二) 發展潛能

1.氣候變遷減緩

此團隊用類似昆蟲表面的仿生，讓膜材表面變凹凸結構，讓薄膜可長效抗污，每小時每 1 米平方產水逾 60 公升，產水量比現在海水淡化技術多 3 倍，耗能降一半。本作品透過創新系統裝置，讓更多人可以獲取水資源，對環境有極大的正面影響效果。

2.產學結合應用

除了實際應用於業界，本薄膜蒸餾系統也可成為環境教育推廣範本，作為公家機關及校園教材，增加社會大眾對於氣候變遷議題之重視，並了解簡單的改變也能對改善氣候變遷造成很大的幫助，同時培養學生的創新思考能力，提升整體附加價值。

3.功能擴充性

本設備在設計上，各個部分的組件尺寸皆可以根據需求做出變化，並無一個固定的模組，透過這樣的彈性，可以讓使用者根據需求做出不同的功能增設，並因應近年來台灣推行的智慧城市等政策方案「數位國家・創新經濟發展方案(2017-2025 年)」，本團隊的設備就增設了微電腦監測，系統以及隨時遠端偵測，了解薄膜狀況與趨勢，對水純化情況作更加精準的掌控。

商業模式-租賃

租賃之商業模式，客群為自來水公司或靠海國家，減少碳排量可用於轉售碳權或轉移至其他製程中，減少購買碳權的成本又可以有效減少碳排，達成 2050 零碳排的要求。

表四、租賃之商業模式



商業模式-買賣

上述租賃客戶同樣可以使用**買賣**之商業模式，但此商業模式還有另外的客群，若購入本作品，便可將廢水進行純化再回收，不只能自給自足，又能為環境盡一分心力，減少浪費，符合**永續經營**的精神。

表五、買賣之商業模式



六、工作分配

隊員	主要工作
周鼎勳	實驗執行
葉侑叡	海報製作、作品概念構思、作品說明書
吳柏均	資料庫建置、影片拍攝、影片腳本製作

七、參考文獻

[1] 王若杰、邱卓皓、阮坤杉 “廢棄物資源化--氮氮廢水、 廢硫酸等先進回收技術” 台積電教育訓練-資源活化與再生,2017.05。

[2] 洪添丁,「低濃度氮氮廢水處理」,環保研討會,2013。

[3] 張王冠,氮氮去除技術與案例,工業技術研究院, 2013.09。

[4] 黃文華, et al., 电动汽车 SOC 估计算法与电池管理系统的研究. 汽車工程, 2007. 29(3):p. 198-202。

[5] 傅正貴,李玫,許哲彰,王俊元,"創新氮氮廢水資源化." 科學工業園區廠務技術研討會.2016。

[6] 98 年度土壤及地下水污染整治年報-第六章 污染改善與預防，
<https://sgw.epa.gov.tw/Upload/CMS/Misc/annualreport/98%E5%B9%B4%E5%A0%B1ch6.pdf>

[7] 台灣工業的鉻污染
<http://resource.blsh.tp.edu.tw/sciencei/content/1980/00020122/0014.htm>

[8] 永華機械工業股份有限公司八德廠土壤及地下水污染整治計畫，
file:///C:/Users/user/Desktop/Ch05_%E6%B1%A1%E6%9F%93%E7%89%A9%E3%80%81%E6%B1%A1%E6%9F%93%E7%AF%84%E5%9C%8D%E5%8F%8A%E6%B1%A1%E6%9F%93%E7%A8%8B%E5%BA%A6.pdf

[9] 全國環境水質監測資訊網-地下水監測法令依據