

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

聚光太陽電池模組溫度量測分析與預測試技術建立

The Development of Temperature Measurement and Prediction
Methods for High Concentration Photovoltaic Module

計畫編號：1022001INER023

受委託機關(構)：國立屏東科技大學

計畫主持人：王耀男

聯絡電話：08 7703202 ext 7456

E-mail address：yanwang@mail.npust.edu.tw

核研所聯絡人員：林聰得

報告日期：102 年 11 月 29 日

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
壹、計畫緣起與目的.....	1
貳、研究方法與過程.....	12
一、 聚光型太陽能模組落塵量監測與對發電量之影響	12
二、 HCPV 模組溫度模擬與實驗驗證.....	15
參、主要發現與結論.....	17
一、 自然落塵量影像數據分析	17
(一) 監控落塵 CMOS 影像處理與數據分析	17
(二) 不同季節 CMOS 落塵監測結果.....	19
二、 落塵對模組功率之影響	25
三、 HCPV 模組電池溫度差異模擬與實驗驗證.....	33
四、 結論.....	36
肆、參考文獻.....	39

中文摘要

本計畫利用小體積無鏡頭CMOS感測器架設於太陽能模組上方，運用影像處理方法開發可攜式微粒子監測器，長時間監控空氣中沉積於聚光型太陽能模組之落塵量及沉積模式，同時量測懸浮微粒沉積於模組表面對模組發電效率的影響，並推算出最佳的模組清洗週期，以提升發電效率。計畫中並利用數值模擬及實驗驗證方法來探討模組中各電池之溫度差異性。由實驗量測的結果顯示，一般狀態下落塵對模組的轉換效率之影響約3%，大的降雨會清洗部份的落塵，小降雨會增加模組表面的落塵量。太陽能電池模組中不同位置之溫度以中央的電池溫度為最高，上下兩端的溫度較低，在一般風速1 m/s下電池最高溫與最低溫之溫差約10°C，實驗結果與數值模擬之趨勢相穩合。於本計畫所開發之無鏡頭CMOS影像處理及落塵量量測技術可用於即時監控懸浮微粒於模組表面沉積模式及進行模組效率之評估，電池工作溫度模擬方法之數值模擬之結果與量測結果相吻合，可用於預測太陽能電池的工作溫度、效率評估及改善太陽能電池的效率。

關鍵字:無鏡頭、數值模擬、落塵、模組效率

英文摘要

In this study, we developed a portable lens-free CMOS microparticle detector that integrates the image processing for real time suspension dust monitor. The CMOS microparticle detector is mounted on the HCPV module for real time suspension dust monitor and receives the air suspended particulate deposition information on the HCPV module. The research results reveal the particulate deposition model and influence of dust accumulation to the HCPV performance. The solar cell efficiency decreases due to the dust deposition on the HCPV module surface and the efficiency decreases as a function of dust coverage area on the HCPV module surface. The module efficiency decreases 3% in the normal condition. The dust accumulates on the HCPV module lens's surface increasing in the drizzle condition and decreasing in the heavy rain condition. Moreover, the operating cell temperature on the cell module is investigated by the CFD and validated by the experiment. The temperature difference on the HCPV module is about 10°C in the wind speed 1 m/s.

Keywords: lens-free, dust, CFD, module efficiency

壹、計畫緣起與目的

在當前經濟，社會，及環境對於能源生產，供應和消耗的趨勢中，呈現前所未有的發展情況[1]。其包含：

1. 目前的溫室氣體的排放量前所未見。
2. 到2050年，大氣中的二氧化碳濃度將達到380ppm，高於避免嚴重的氣候變化的影響安全限制的350ppm[2]。
3. 在過去的一個世紀，地球溫度上升了0.7°C和海平面上升20厘米。
4. 國際能源機構（IEA）預計，到2030年增加了50%的能源需求。
5. 在過去的 30 年中因為化石燃料燃燒產生的二氧化碳排放量超過過去 200 年的排放量。

基於上述的問題，在全世界人口及經濟不斷的成長下，人們對於能源日益增長的需求將高於對能源安全的關注[3]。解決這個問題的方法是使用潔淨的如太陽能，風能，地熱能等再生能源，其中以太陽能最為豐富，因為太陽一天所提供的能量可以滿足地球 20 年的需求。

2000 年以來，全球光伏（PV）容量以每年平均 40% 的速度增長，全世界太陽能光伏產業出貨量從 2000 年~300 MW 至 2008 年成倍增長~7GW，歐盟公布的「2012 年太陽能電池現況報告」（PV Status Report 2012），2009 年全球太陽能電池產能為 11.5 GW 至 2011 年的 35 GW，較 2010 年成長 35%。iSuppli 研究報告指出，全球太陽能系統安裝量由 2010 年底的 21GW，至 2011 年的 27 GW，2011 年總安裝量達 70 GW(如圖 1 所示)[4]。預計到

2050 年，全年光伏裝機容量將代表全球發電容量的 11%，這將減少 3 千兆噸的二氧化碳排放量從大氣中，而歐洲在 2011 年新安裝電力設備機組共計 38.3GW，佔其中太陽能發電佔 21.5GW(56%)，風力發電 9.4GW(25%)，綠色再生能源共佔 81%(如圖 2 所示)，由此可見綠能為未來能源發展策略的首要選擇，其中又以太陽能發電為大宗[5]。

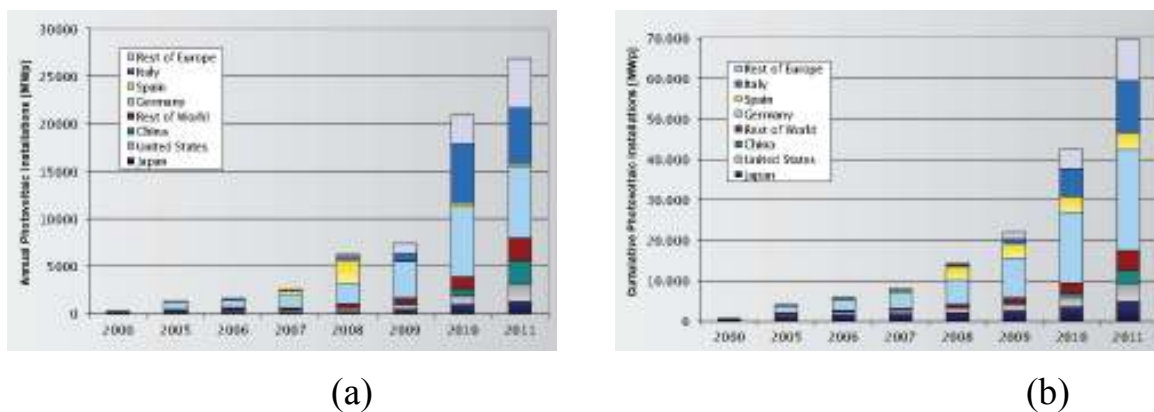


圖1 2000年至2011年(a) PV的安裝量與 (b) PV累積的安裝量

依據 2012 年太陽能電池現況報告在 2011 年，全球光伏(PV)產業的生產量達 37 GW，2012 年約為 31 GW(IMS research)，其中中國和台灣的產量高達 65%，前四大太陽能電池製造基地分別為中國、台灣、歐洲和日本。至 2015 年，全球光伏(PV)產業的生產量將達 119 GW，屆時中國的產量將佔 61.1%，而台灣將佔 14.3%，歐洲及日本將佔 5.5%，(如圖 3 所示)。

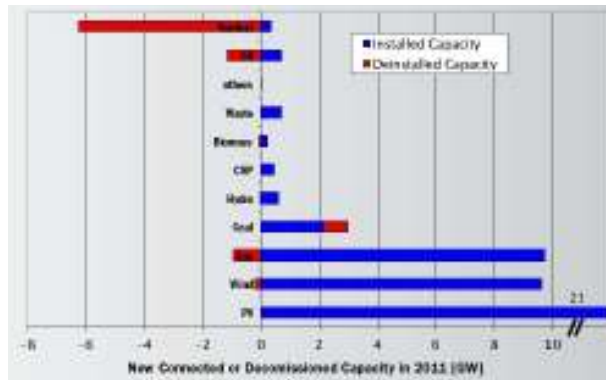


圖2 2011年歐洲新建能源設施之發電量

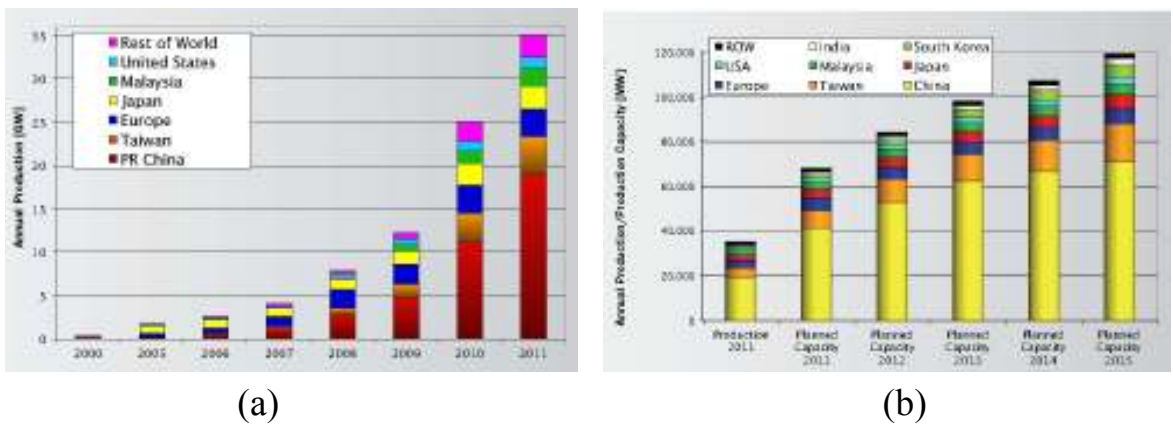


圖3 全世界(a) 2000年至2011年PV產能與 (b) 2011至2015年PV產能預估

光伏能源技術非常廣泛，包含矽，薄膜和聚光型（CPV）太陽能電池。在每年全球太陽能市場中，矽太陽能電池模組約佔 85%-90%，薄膜太陽能電池模組佔 10-15%，CPV 太陽能模組佔不到市場的 1%，在 2010 年所發布的產業報告中指出，目前在全世界營運的聚光型太陽能電池 CPV 容量為 21 MW。圖 4(a)為矽太陽能電池與多接面太陽能電池效率的評估，其中 1987 年矽太陽能電池的效率約為 26.5%，至目前為止其效率變動不大；相較之下多接面太陽能電池的效率以指數型成長，其效率依聚光倍數與聚光

的形態而定，在 2009 年八月，3 接面太陽能電池在 364 倍聚光下的效率為 41.6%，預估到 2013 年其效率將超過 45%，因為聚光型太陽能電池具有高效率之特點，多接面太陽能電池的效率可達到 39%，圖 4(b)為不同太陽能技術的聚焦比對電池效率之影響。隨著效率的提升可以大幅降低發電成本，目前聚光型太陽能電池的最低的安裝成本為\$3.05 美元/W，和平均發電的電力成本為 0.14 元/kWh，因此，CPV 發電成本與傳統能源電力仍是新興市場最有潛力與競爭力。

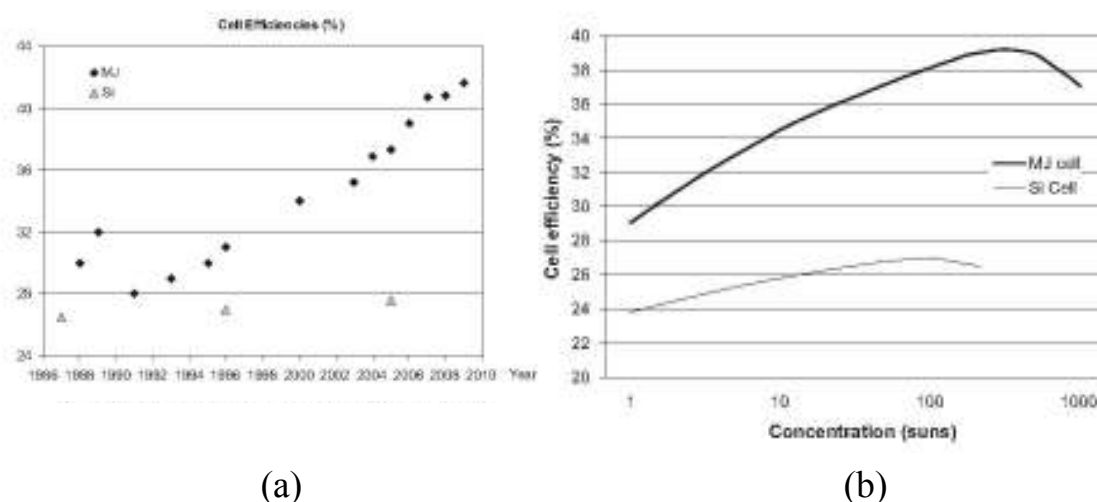


圖 4(a) 矽太陽能電池與多接面太陽能電池效率評估(b)不同聚焦比對電池效率之影響

CPV 系統由一個簡單的小太陽能電池和聚光的光學元件所組成。利用低成本的光學元件和小體積的太陽能電池取代大面積而且昂貴的太陽能電池來降低發電成本為聚光型太陽能電池的主要特徵，另外聚光型太陽能電池具有較高的轉換效率，也就是相較於其他光伏技術，高聚光比太陽能系統需要較少的土地就可以產生相同的電力，在使用同樣的土地面積下，可

以產生更多的電力。聚光型太陽能電池系統依照太陽輻射入射到太陽能電池具光的比例來區分，此比例表示太陽光聚焦的倍數，因此，將聚光型太陽能電池系統區分為三類，其分別為低聚焦太陽能電池 1~40X (LCPV)、中度聚焦太陽能電池 40~300X (MCPV)、高聚焦太陽能電池 300~2000X (HCPV) 三類，分別說明如下：

1:低聚光比太陽能電池 (LCPV)：

系統的聚光比低於 40X，這類的系統使用矽太陽能電池，只需要被動散熱就可以維持其性能，由於具有較大的接受角度，不需要高精度的太陽能追日系統。

2:中聚光比的太陽能電池 (MCPV)：

系統的聚光比適用範圍在 40-300 X，這類的系統使用多結電池，並可能需要主動冷卻，因為太陽能電池的溫度增加時，會導致其轉換效率下降。高精度的追日系統能取得最大的太陽光照射照度。

3:高聚光光伏 (HCPV)：

這些系統的聚光比範圍為 300-2000X，這些系統需要一個大容量的散熱片，高精度的最與系統和高性能的多結太陽能電池，因此，其成本非常高。高聚光比太陽能電池需要效率非常高的多接面太陽能電池。在 2009 年 8 月由 Spectrolab 和夏普在太陽能電池效率為 41.6%和 35.6%。從理論上，多結太陽能電池的效率可以達到 87%。通過使用這些高性能高聚光太陽能電池，模組效率可達 30%以上[6]，圖 5 為碟式及菲涅爾式聚光型太陽能模組。



(a)



(b)

圖 5 (a)碟式及(b)菲涅爾式聚光型太陽能模組

溫度控制對於太陽能電池非常重要，因為溫度的上升會造成開路電壓的下降，也就是太陽能電池輸出功率下降，特別是在聚光型的太陽能電池。聚光型太陽能電池會將太陽光聚光數百倍甚至上千倍，因此其溫度將會明顯的上升，溫度的上升不僅會造成發電效率的降低且會對太陽能電池的壽命產生影響。在聚光型太陽能電池中，電池的效率與聚焦的倍數有相當大的相關性，其效率隨著聚焦的倍數的增加而達到最高的效率，超過此聚焦的倍數其效率便會下降，其主要的原因為的串連電阻限制效率。影響太陽能效率的因素如表 1 所示，主要包含溫度、太陽的入射角度、老化、下雪、遮避及灰塵等，其中以灰塵及溫度影響為最大[7]。以下說明灰塵對效率之影響。

由於現在的空氣品質惡化受到懸浮顆粒影響相當嚴重[8-10]，空氣中的懸浮微粒可以直接從人類和自然的活動過程中產生，或在大氣中聚集產生，例如硫氧化物 (SO_x)，揮發性有機化合物 (VOC) 的氧化物，氮 (NO

x) 和氨 (NH₃) 等。除一般所監控量測者(如引進天然氣家庭和工業部門，更換舊的乘客實施汽車，引進的氣動力城市公交車等，許多城市地區如台灣西部城市、希臘首都雅典都存在高濃度之粒狀污染物。高濃度之粒狀污染物 (PM) 可以細分為灰塵的固體或液體 (如建築中所稱的粒狀物)，飛灰，煙塵，氣溶膠等均受到市中心的監測站所監控。但即使有許多關於光化學和 PM 的空氣污染科學研究，空氣污染仍然是一個相當嚴重和多方面相關的問題。

表 1 影響太陽能電池效率的因素

Effect	Range
Temperature	1%–10%
Angle of incidence	1%–5%
Ageing	5% over lifetime
Soil and dirt	0%–15%
Snow	Location dependent
Partial shading	Location dependent
Diodes and wiring	3%

嚴重的空氣污染除對人體健康、水生和陸地生態系統產生不良的影響外，並對空氣污染所造成的範圍內的物件(例如汽車，建築物，機器等)由於灰塵沉積在其表面上而導致侵蝕或從表面降解。此外，該存在的灰塵可能會對太陽能相關之 PV[11]和太陽能集熱器[12]的性能產生負面影響。空氣污染對於太陽能相關技術所產生的效率衰減問題，多年前由執行太空任務能源提供的研究人員所提出。對於灰塵在 PV 上面堆積造成的效率損失主題上有相關的研究中[13,14]，根據以前城市空氣污染物在 PV 表面上沉積顆粒對光伏發電的能量產生率的影響的實驗及研究結果有關，研究中試圖開發

一個相關對應的理論模型來模擬自然粒狀污染物沉積的狀況下，沉積顆粒對光伏發電的能量產生率的影響。在正常的情況下，在太陽能電池模組表面所沉積的灰塵是會經由雨水沖刷洗滌而去除，但全球也有很多地方在乾燥的季節持續相當長的時間。例如，在希臘，特別是在城市雅典乾旱的季節可能會持續約三至五個月（包括夏季），經由實驗研究，在城市中太陽能電池面板表面上灰塵沉積會導致的操作性能的降低。灰塵的效應與太陽能電池設廠站的地點有關，也就是說，落塵量與光伏系統安裝區域的空氣污染有相當大的關係存在。基於這個原因，利用在城市和其他環境中常遇到的空氣污染物類型來進行實驗，其分別為碳酸鈣、紅土、以及不完全燃燒的飛灰。碳酸鈣（ CaCO_3 ）主要是由於土木建築活動中所形成，紅色的土壤主要來自沙漠跨國界轉移的灰塵，而飛灰含碳主要來源於煙的不完全燃燒（H / C）在熱電站或從車輛排放排出的廢氣。需要注意的是研究中所使用的污染物並不包含特定的尺寸的顆粒（只指定污染物粒徑的範圍），因此，在大氣中實驗的條件可以更接近自然的 PV 表面的灰塵沉積。

由效率的觀點而言，太陽輻射強度的變化為影響太陽能模組輸出效率減少的主要因素，其減少的功率輸出可高達 15%，另外，影響太陽能電池模組輸出的其他參數包含溫度、入射角度、老化、土壤和灰塵、下雪、遮蔽的陰影等，其影響的範圍如前表 1 所示，最重要的其中包括太陽電池模組溫度的升高，以及光伏面板的表面的土壤和污垢積累[15,16]。雖然落塵的效果是先天的站點特定的因素，即依賴於局部條件，例如空氣污染存在

下的頻率、降雨，風速，濕度等，而空氣污染物的類型通常包含兩類，第一個是由微粒物質（PM）的高濃度的主要衍生自燃燒化石燃料和工業過程。第二個來源為陽光的化學反應的一系列氮氧化物（NO_x），的烴（C_xH_x），一氧化碳（CO），臭氧（O₃），有機硝酸鹽，其它的參數如地形（四面環山的盆地），逆溫，低風速和長期乾旱更增加在城市空氣污染物的濃度，此外，在強烈的陽光和高溫期間有利於形成光化學煙霧。

根據近年來的研究資料顯示，空氣污染對光伏電池板和太陽能集熱器的正常操作產生相當大的影響[17,18]，太陽能系統因為灰塵顆粒可能會大大影響的性能表現，其主要原因也是因為灰塵的存在會影響反射及遮蔽太陽的入射光以及影響太陽能電池冷卻造成表面溫度的差異。上述的結果會造成太陽能電池電流強度和電壓輸出顯著的變化，導致預期發電（或效率）減少及每年的收入相當大損失。經由 Letin 等人 [19]的研究顯示，固態的懸浮微粒在太陽能電池模組的沉積時會造成太陽能電池的老化，太陽能電池的老化對於等效並聯電阻和串聯電阻有強烈影響，並導致光伏面板填充因子（FF）的降低[20]。另外，太陽能電池安裝的傾斜角度對於自然降塵在太陽能電池表面的沉積及輸出的電壓也有相當大的影響，研究結果顯示粒子的沉積量與太陽能電池面板的傾斜角度有直接正比的關係。為了量化灰塵沉積對於太陽能電池模組效率的影響，研究中顯示其效率降低可達到 15% [21]。雖然研究中指出，模組效率也降低與安裝的地點有很大的關係[22]，即主要取決於太陽電池模組安裝當地的氣候條件以及地形因素和兩者的結

合。特別是粒子存在區域的濕度、降雨量、環境溫度和太陽輻射在各安裝地區之間差別很大，所以很難利用一個定性和定量的方式來評估其對太陽效率的影響。例如，高濕度會引起 PV 面板上露點層的形成，其意味著較大量附著的灰塵被會在 PV 板的表面上沉積[23]。經由從市區空氣污染，灰塵和嚴重惡化固體顆粒（主要是化石燃料燃燒的產品和建築有關的活動）沉積在面板的表面，即使是 PV 暴露到空氣污染大氣中 2 個月期間不清洗，也會導致輸出功率降低 6.5%。

在目前研究中對於灰塵污染物評估/監控和成分的研究非常少的。大多數研究往往忽略風向和風速變動的影響以及太陽能收集器安裝方向特性對於灰塵堆積的影響，但風向和風速為影響落塵累積的重要因素。在少數情況下，測量清洗和未清洗太陽能系統的穿透率（灰塵堆積）是在不同的時間進行，將會導致實驗的結果不一致，且利用灰塵本身的性質/特徵成份(大小，粗或細，積累率和填充率)進行的研究與實驗數量也非常少，而塵土堆積的特性會隨著不同的位置的改變，如一般的研究沒有考慮到灰塵累積的特點，研究的結果適用性將受到限制。為了解自然降塵的性質與特點（光學，大小，幾何形狀，靜電的行為），大多數實驗研究的灰塵堆積均採用模擬人工灰塵，另外有研究考量不同環境條件下，植被類型，建築環境和氣候灰塵的本質特性和電化學性能上的沉積行為，而一般數學模型的研究須考量塵埃粒子幾何體上的沉積行為的影響，但一般研究中都假設灰塵顆粒的幾何形狀為完美的球形。

由上面的文獻探討可知，目前聚光型太陽能電池的發展在效率的改善方面存在下列的問題，其包含（一）落塵對於模組效率的影響（二）無法判別自然落塵之數量與型態（三）何時為清洗太陽能模組之最佳時機，以提高太陽能電池模組的效率。核研所於聚光型太陽能模組的效率估算與監控在太陽能電池模組系統品質驗證中扮演相當重要的角色，據聚光型太陽能模組系統品質驗證之應用角色，擬發展預測太陽能電池模組上落塵量之預測及監控方法，以推斷出最佳模組清洗周期，以提升太陽能電池模組的發電量。主持人在 98 年至 101 年共四年獲得核能所計畫的支持，對於聚光型太陽能電池的數值模擬、溫度與溫度係數量測已經建立相當的能量。今年將利用直接量測落塵量之方法，直接監控落塵的數量及型態，可直接量測落塵對發電量的影響，並建立 HCPV 上落塵的量測技術。

貳、研究方法與過程

為達成建構空氣中懸浮微粒與落塵量之關係、落塵量對於聚光型太陽能模組發電之影響以及太陽能電池工作溫度之差異性預測，本計畫主要分為兩個部分，其中包含 (a) 利用 CMOS 的直接量測落塵量的數量以及落塵量的特性，其中包含落塵量的大小尺寸、形狀等，並探討落塵量對於聚光型太陽能電池發電量影響。(b) 利用計算流體力學模擬與實驗驗證的方法，預測模組中電池溫度的最大差異。

一、聚光型太陽能模組落塵量監測與對發電量之影響

在聚光型太陽能模組上方落塵量數量的量測部份，主要是利用影像處理的方法在進行落塵量即時量測，在量測上主要是利用 CMOS 為監測工具，搭配影像處理軟體的達到落塵量數量的即時監控以及落塵量尺寸大小之判定，此 CMOS 為監測工具具有體積小、重量輕之優點，其搭配影像處理的方法具有相當高的準確性，遠比一般利用空氣中懸浮微粒推估的方式，更具有實際上的量測效果。在影像處理及資料擷取部份擬利用自行架設的 CMOS 檢測平台以及自行撰寫的資料收集及判斷程序來完成，最後利用 DAQ 把拍攝的影響利用用 LabVIEW 圖控程式加以收集並進行分析。

實驗架構主體是利用高解析度、低成本 CMOS 光感應晶片，檢測架構如圖 6 所示，將 4 組 CMOS 光感應器置於同一水平面上並組成一個陣列，是整個結構方便架設在聚光型模組安裝的追日系統上並與聚光型模組的聚光鏡安置在同一平面上。具 USB 介面之 CMOS 系統可輕易的與電腦

LabVIEW 圖控程式作結合，傳輸出之影像在程式中以儲存圖片方式，再透過 Vision 至影像後處理去除掉眾多干擾因子，得到最佳清晰圖像，落塵量的資訊最後以顯微鏡同視場方式加以確認，以得到完成的落塵量在時間上與本身的特性，整體實驗檢測系統架構如圖 6 所示。

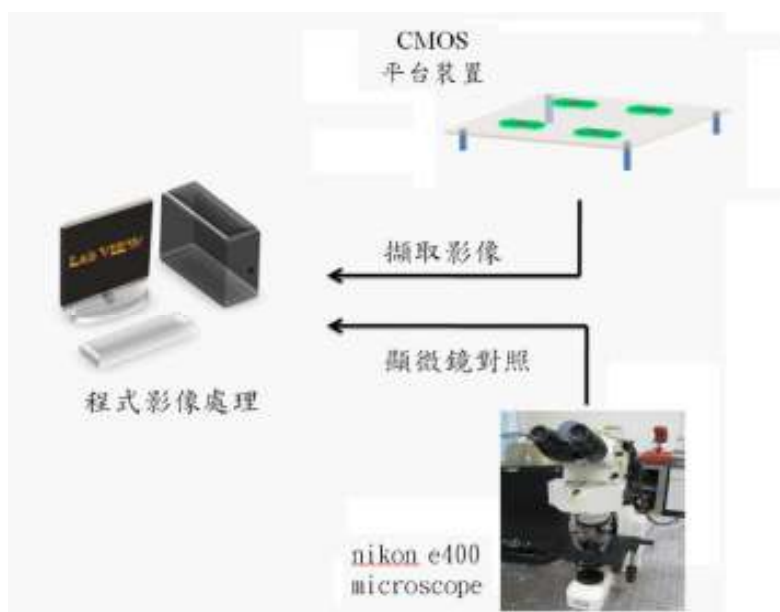


圖 6 檢測系統架構圖

在聚光型太陽能模組發電量的搭配，包括硬體和軟體兩個方面，在硬體部分最重要的有 III-V 族太陽能電池與追日系統(圖 7(a))與 AC/DC 逆轉器所構成的測試平台，為確實監控太陽能電池模組上的落塵量，實驗中擬將 CMOS 檢測平台架設於追日系統上，利用此架設方法可以使 CMOS 檢測平台與聚光型太陽能模組同步運行，可以同時檢測到模組上所累積的落塵量以及相對的發電量，聚光型太陽能模組架設圖以及 CMOS 檢測平台架設圖如圖 7(b)所示。發電量的量測儀器包含電壓量測、電流量測和可變負載等

儀器。其中，在可變負載、電壓量測與電流量測這三個部份，則是使用雙極性電源電表；而在軟體方面，規劃使用 LabVIEW 圖控式程式語言，作為落塵量影像擷取、標準量測程序控制和儀器量測數據擷取，並計算受測元件開路電壓、短路電流密度、填充因子(F.F.)、效率(η)、串聯電阻、並聯電阻等特性參數，藉此來分析所累積的落塵量對於發電效率特性之影響。測量儀器目的在於量測太陽能光伏系統之運作情形，確保系統之功能運作無誤。而且所採用的監測儀表為數位式電表，具有可與電腦作通訊連線的功能，將所監測的數據透過電腦傳輸介面 RS485 傳送給監控電腦作資料處理分析、儲存，監測參數。



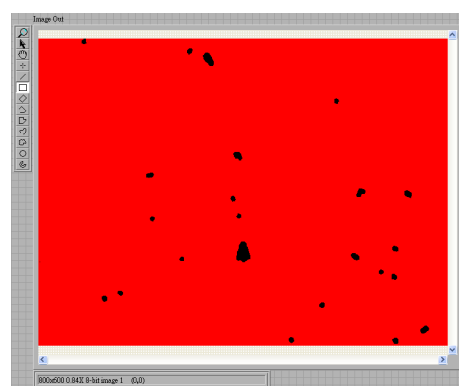
圖 7 (a) 聚光型太陽能模組與追日系統 (b) 測試落塵量的 CMOS 模組

影像擷取是利用 Vision Acquisition 程式原件擷取 CMOS 訊號，透過 USB 使程式能順利讀取到 CMOS 光感應器所得到之影像，之後寫入一儲存功能，使所需影像以圖片方式存取自所設定資料夾。由於 LabVIEW 程式在 CMOS 上所擷取數位影像圖片皆為 RGB 32 位元彩色影像，其包含亮度 (Brightness)、對比度 (Contrast)、伽瑪 (Gamma) 資訊，必須先經過影像處理程

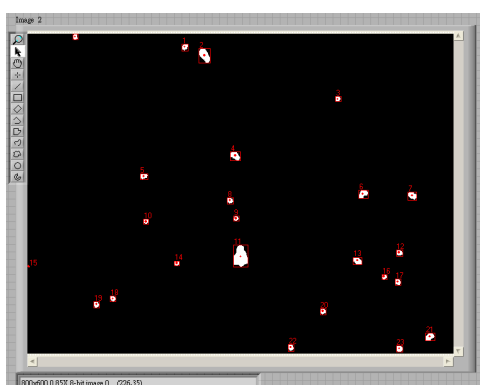
序，使影像自動計數分析提升準確率，並透過減少影像雜訊、增強對比度、影像銳化、影像轉換、形態學等原理做為影像處理之依據，影像處理的程序如圖 8 所示。



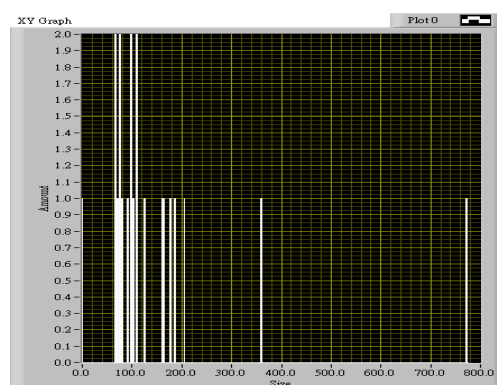
(a)



(b)



(c)



(d)

圖8 (a) 落塵在CMOS上之成像 (b) 圖片之影像處理 (c) 落塵量計數 (d) 落塵量粒徑尺寸統計

二、HCPV 模組溫度模擬與實驗驗證

在 HCPV 模組溫度模擬中利用 CFD 推估 HCPV 模組中電池組之最高與最低之溫度差異。由於 HCPV 模組各電池中溫度的差異會導致效率的降

低，研究中使用計算流體力學的方法模擬 HCPV 模組間各電池的溫度差異，以求得各電池的最高溫度，並利用埋入電池間的熱電偶進行量測，並將實驗結果與模擬結果進行比對驗證，以確認模擬方法之準確性。

參、主要發現與結論

一、自然落塵量影像數據分析

(一) 監控落塵 CMOS 影像處理與數據分析

研究中利用無鏡頭圖 CMOS 監控模組表面之落塵量，再經由二值化處理後計算落塵所覆蓋的面積及判斷落塵尺寸的大小。經由實驗結果顯示，圖 9(a)為放置第 2 天 CMOS 拍攝到的影像，圖 9 (b)為二值化處理後影像，落塵覆蓋率佔總面積 1.7%，圖 9(c)為落塵粒子大小計數圖，其中落塵的尺寸以 250~350 像素(顆粒直徑 25 μm ~30 μm)覆蓋率最高。圖 10(a)為放置第 6 天 CMOS 拍攝到的影像，圖 10 (b)為二值化處理後影像，落塵覆蓋率佔總面積 5.2%，圖 10(c)為落塵粒子大小計數圖，其中落塵的尺寸以 250~350 像素(顆粒直徑 25 μm ~30 μm)覆蓋率最高。

圖 11(a)為放置第 10 天(降雨前)CMOS 拍攝到的影像，圖 11 (b)為二值化處理後影像，落塵覆蓋率佔總面積 3.9%，圖 11 (c)為落塵粒子大小計數圖，其中落塵的尺寸以 250~350 像素(顆粒直徑 25 μm ~30 μm)覆蓋率最高。圖 12(a)為放置第 11 天(降雨後)CMOS 拍攝到的影像，圖 12 (b)為二值化處理後影像，落塵覆蓋率佔總面積 1.3%，圖 12 (c)為落塵粒子大小計數圖，其中落塵的尺寸以 250~350 像素(顆粒直徑 25 μm ~30 μm)覆蓋率最高。經由 CMOS 影像處理可得知，晴天時可快速累積灰塵，且落塵顆粒直徑 4 成以上都介於 25 μm ~30 μm 左右，集中降雨可有效的沖刷落塵。

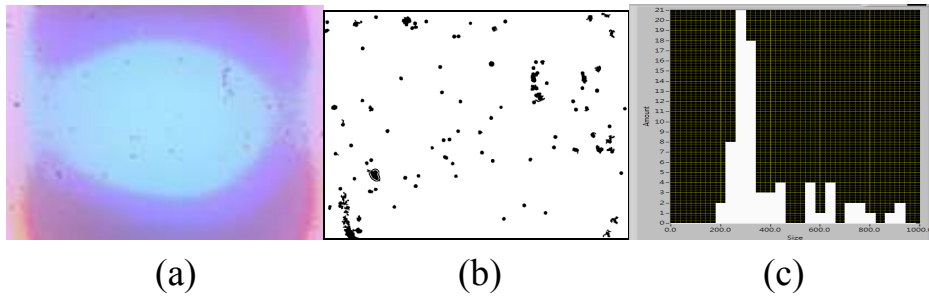


圖 9 CMOS 放置 2 天影像處理數據圖

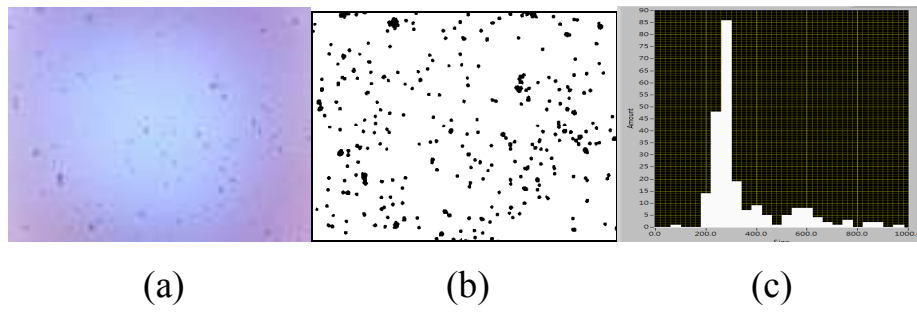


圖 10 CMOS 放置 6 天影像處理數據圖

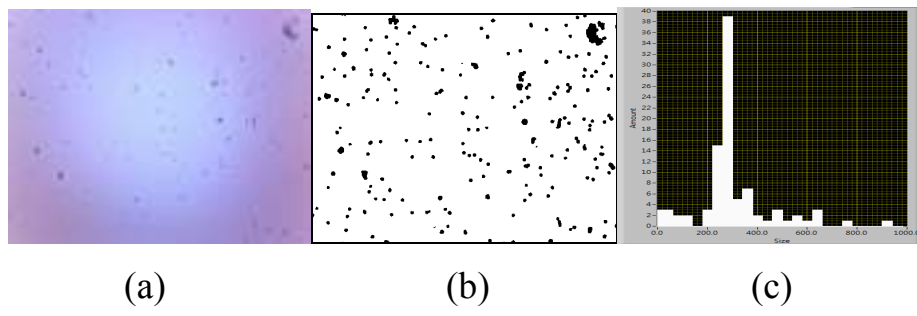


圖 11 CMOS 放置 10 天影像處理數據圖

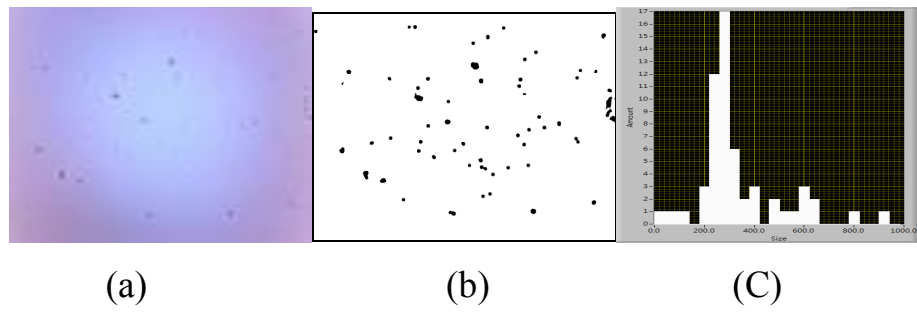
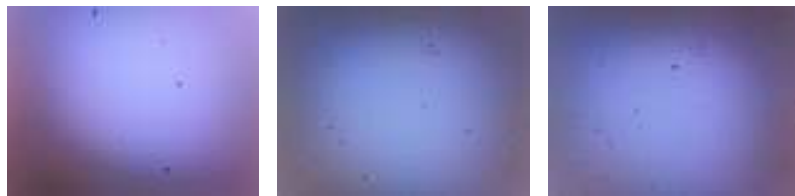


圖 12 CMOS 放置 11 天影像處理數據圖(降雨後)

(二) 不同季節 CMOS 落塵監測結果

1. 夏季落塵量之監測結果:

圖 13 為夏季落塵量之監測結果，圖 13 (a) 與圖 13 (d)分別為第 1 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 0.3%；經過颱風登陸與降雨 6.5 mm 後，圖 13 (b) 與圖 13 (e)為第 5 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 1.0% ；經過降雨 9.5 mm 後，圖 13 (c) 與圖 13 (f)為第 6 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 1.3% ；經過降雨 5 mm 後，圖 13 (g) 與圖 13 (j)為第 8 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 1.3% ；圖 13 (h) 與圖 13 (k) 為第 9 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，當天無降雨，落塵覆蓋率為 2.5% ；圖 13 (i) 與圖 13 (l) 為第 10 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，當天無降雨，落塵覆蓋率為 4.3%，推估可能是夏季經常降雨，使得大氣中的懸浮微粒數量較少，導致夏季降雨能緩慢抑制落塵的殘留。



(a)

(b)

(c)

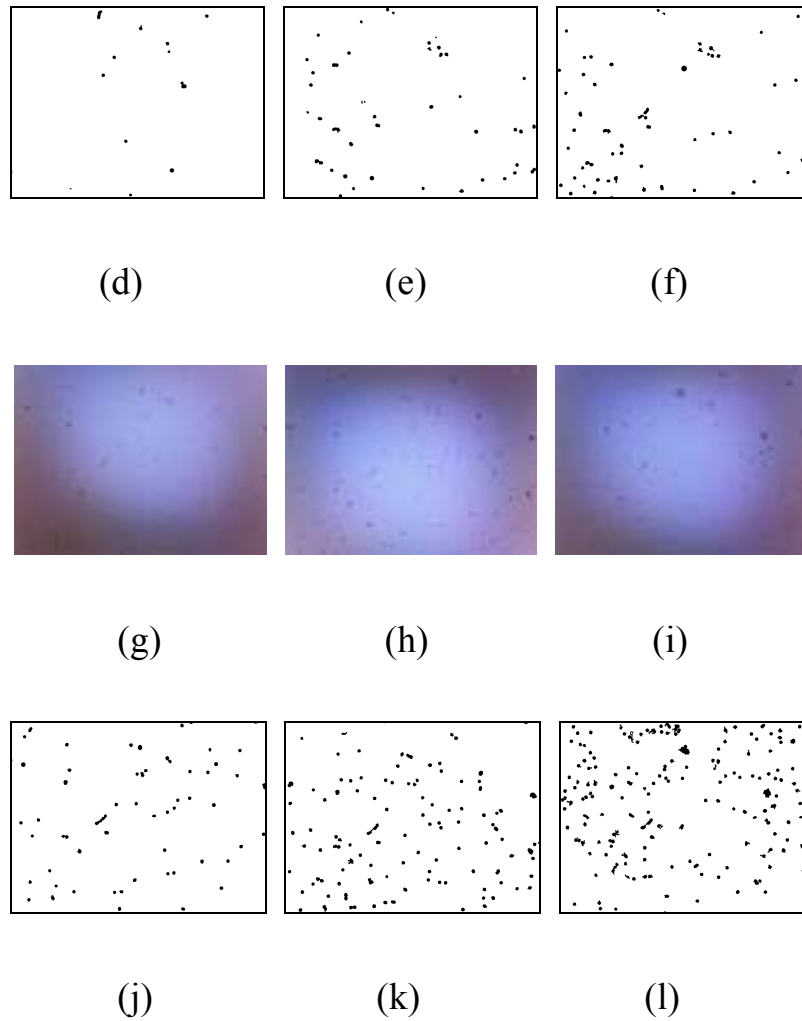


圖 13 夏季 CMOS 落塵影像二質化處理圖

2. 秋季落塵量之監測結果

圖 14 (a)與圖 14 (d)分別為第 1 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 2.24%；經過降雨 6.5 mm 後，圖 14 (b) 與圖 14 (e) 為第 7 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 7.7% ；經過降雨 0.5 mm 後，圖 14 (c) 與圖 14 (f) 為第 8 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 4.3% ；經過降雨 2 mm 後，圖 14 (g) 與圖 14 (j) 為第 10 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率

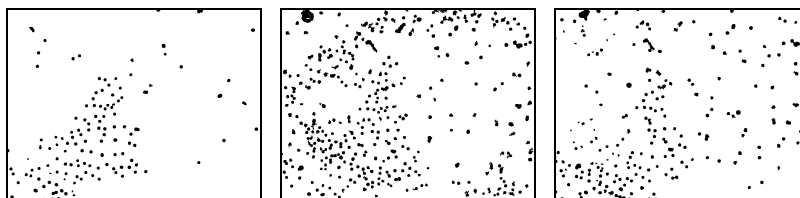
為 5.4% ；經過降雨 247.5 mm 及沙塵暴後，圖 14 (h) 與圖 14 (k) 為第 18 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 10.1% ；經過降雨 1 mm，圖 14 (i) 與圖 14 (l) 為第 28 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 9.1%，顯示出天氣不穩定及沙塵暴使落塵覆蓋率大增的情形。



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)



(g)

(h)

(i)

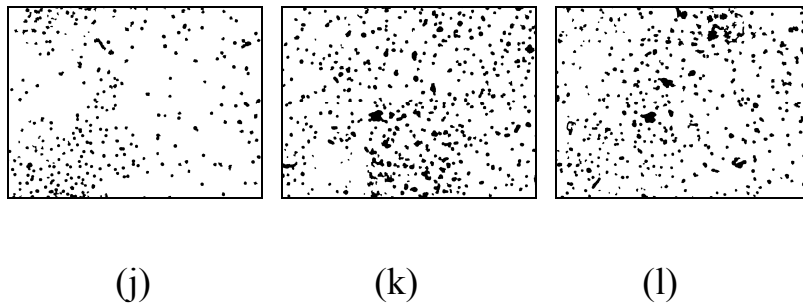


圖 14 秋季 CMOS 落塵影像二質化處理圖

3. 冬季落塵量之監測結果

圖 15 (a)與圖 15 (d)分別為第 1 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 9.1%；圖 15 (b) 與圖 15 (e)為第 2 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 9.8% ；經過降雨 3.5 mm 後，圖 15 (c) 與圖 15 (f)為第 3 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 10.6% ；圖 15 (g) 與圖 15 (j)為第 4 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 10.3% ；圖 15 (h) 與圖 15 (k)為第 5 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 11.9% ；經過降雨 0.5 mm，圖 15 (i) 與圖 15 (l)為第 6 天 CMOS 監測影像圖與二值化處理之結果圖，落塵覆蓋率為 11.1%，顯示出冬季少降雨使落塵覆蓋率增加的情形。

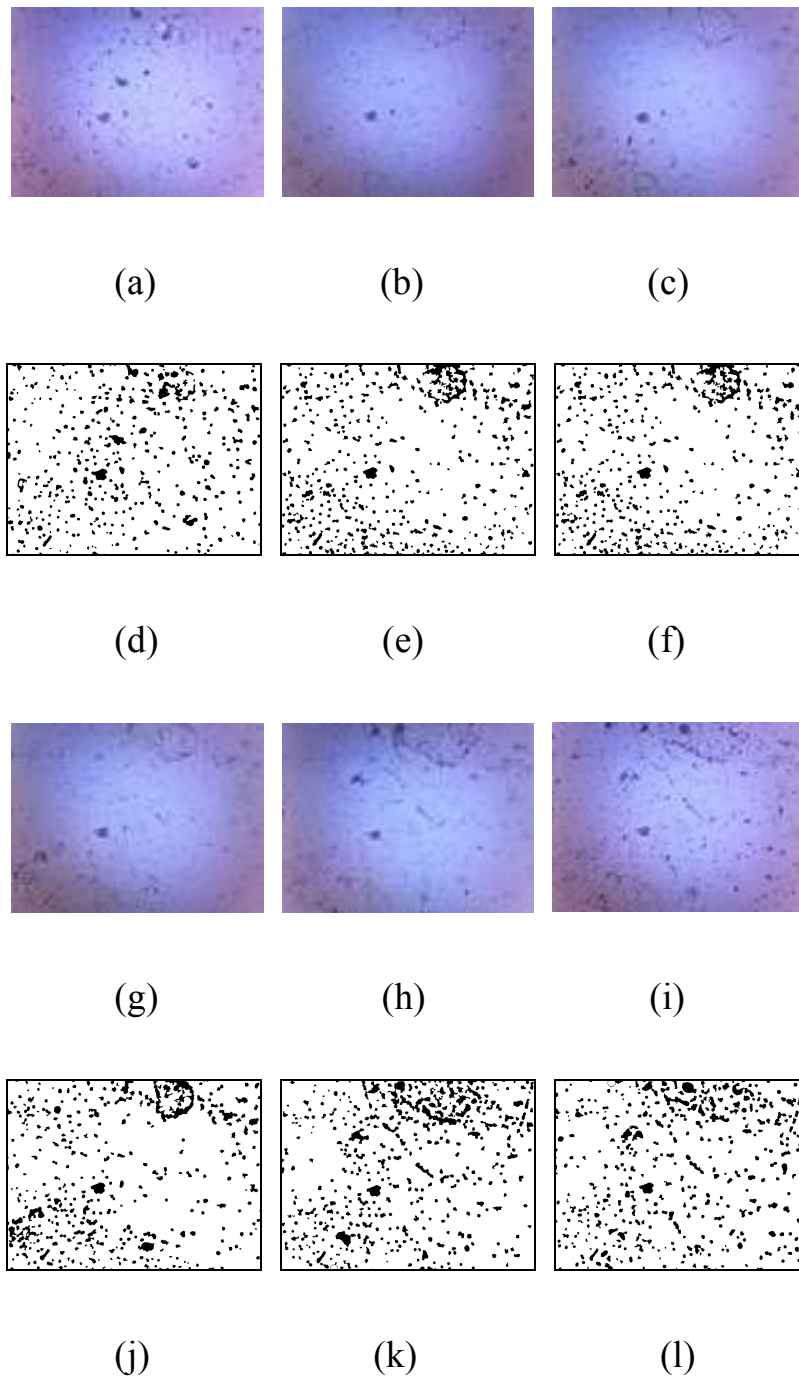


圖 15 冬季 CMOS 落塵影像二質化處理圖

研究中結合日降雨量與日落塵量，可觀查出降雨與落塵之間的關係，夏季降雨量少，落塵量累積的慢，冬天呈現出的趨勢則相反。

- (a)、(d)得知，夏季時落塵趨勢圖及降雨量圖，夏季午後陣雨頻繁，落塵量緩慢增加，一個月最高達 138000 像素，面積覆蓋率 7.2%。
- (b)、(e)入秋時單日降雨量增加，一日內最高達 330 mm，但落塵量無明顯下降趨勢介於 120000~140000 像素之間，面積覆蓋率約 6~7.5%。
- (c)、(f)冬季時落塵趨勢圖及降雨量圖，當月降雨量少，落塵量劇增，約半個月內最高達 290000 像素，面積覆蓋率約 15.1%。

圖 16 為夏季到冬季落塵量與降雨量趨勢圖，上述利用 CMOS 感測器長時間監控夏、秋、冬三季節內的落塵量變化，整合影像數據結果與氣象資料得知各個季節的落塵量趨勢，夏天雨量多，落塵量緩慢累積，，冬季雨量少，且沙塵暴使空氣品質變差，空氣中懸浮粒子多，使得灰塵可以快速累積，但遇有集中降雨，聚集在透鏡上的落塵容易受降雨沖刷。

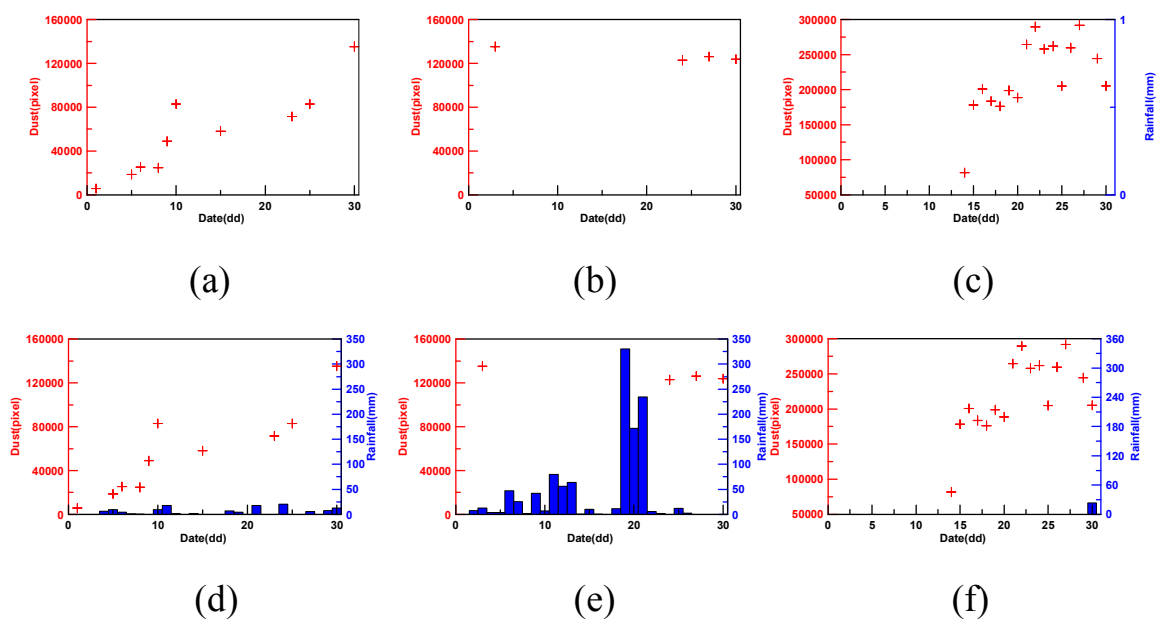


圖 16 夏季到冬季落塵量與降雨量趨勢圖

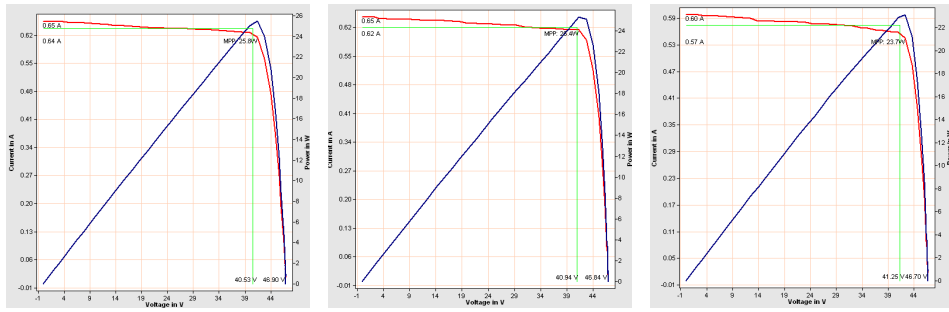
二、落塵對模組功率之影響

在自然環境中影響 HCPV 模組效率輸出的因素相當多，如光照度、風速、溫度、擺放角度、雲層的飄移、透鏡的透光率等等。在實驗量測過程中，天候因素無法控制，也就是環境因素皆不是恆定值(常數)。所以數據的收集是利用三組出廠時輸出工率相當的 HCPV 模組，將其分為實驗組及對照組，架設在同一個追日系統上，以每天為同一個環境進行實驗比較。三組模組分別為(1)對照組-定時清潔模組一組、(2)實驗組-短期在自然環境下擺放模組一組，在自然環境下長期擺放模組一組，利用 PVPM 1000C40 手持式量測系統連續量測三組 HCPV 模組的 IV 曲線，所附的參考照度計量測即時的日照度、CMOS 感測器拍攝當天的落塵量來完成實驗。

經由實驗結果顯示，圖 17 為日照度 660 W/m^2 所量測到的 IV 曲線圖，其中(a)為每天清潔的模組，(b)為短期置放未清潔的模組，(c)為長期置放未清潔的模組，其量測結果分別為：

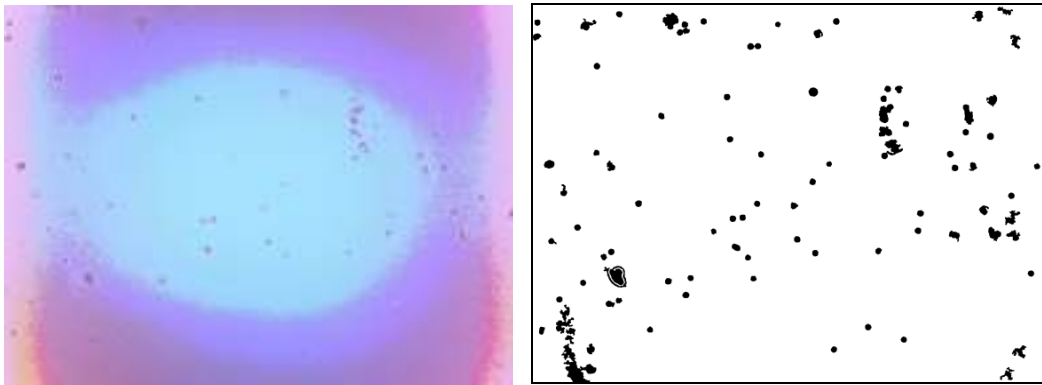
- (a) 定時清潔模組： $P_{\text{mpp}} = 25.8 \text{ W}$
- (b) 放置第 9 天模組： $P_{\text{mpp}} = 25.4 \text{ W}$
- (c) 放置第 65 天模組： $P_{\text{mpp}} = 23.7 \text{ W}$

圖 18 為架設 CMOS 感測器 4 天所拍攝影像圖及二值化處理圖，落塵覆蓋率佔總面積 1.7%，圖 19 為定時清潔的模組與放置 9 天的模組、放置 65 天的模組效率比較圖，長久放置有效率變差的趨勢。



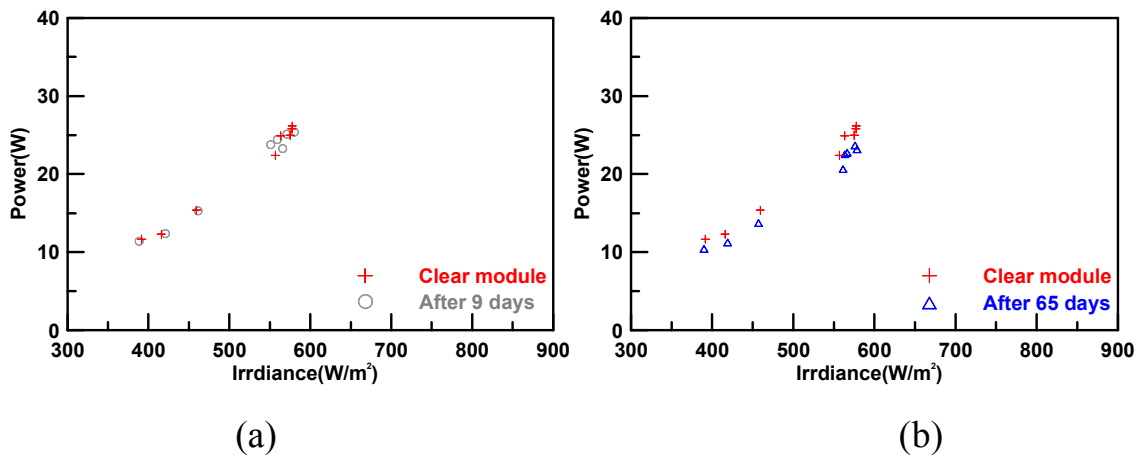
(a) (b) (c)

圖 17 日照度 660 W/m^2 所量測的 IV 曲線圖



(a) (b)

圖 18(a) CMOS 監測影像圖(b)二值化處理之結果圖



(a) (b)

圖 19 效率比較圖 (a)定時清潔的模組與放置9天的模組 (b)定時清潔的模組與放置65天的模組

圖 20 為日照度 800 W/m^2 ，所量測到的 IV 曲線圖，其中(a)為每天清潔的模組，(b)為短期置放未清潔的模組，(c)為長期置放未清潔的模組，其量測結果分別為：

- (a) 定時清潔模組： $P_{\text{mpp}} = 30.5 \text{ W}$
- (b) 放置第 13 天模組： $P_{\text{mpp}} = 30.3 \text{ W}$
- (c) 放置第 10 週模組： $P_{\text{mpp}} = 27.4 \text{ W}$

圖 21 為架設 CMOS 感測器 8 天所拍攝影像圖及二值化處理圖，落塵覆蓋率佔總面積 5.2%

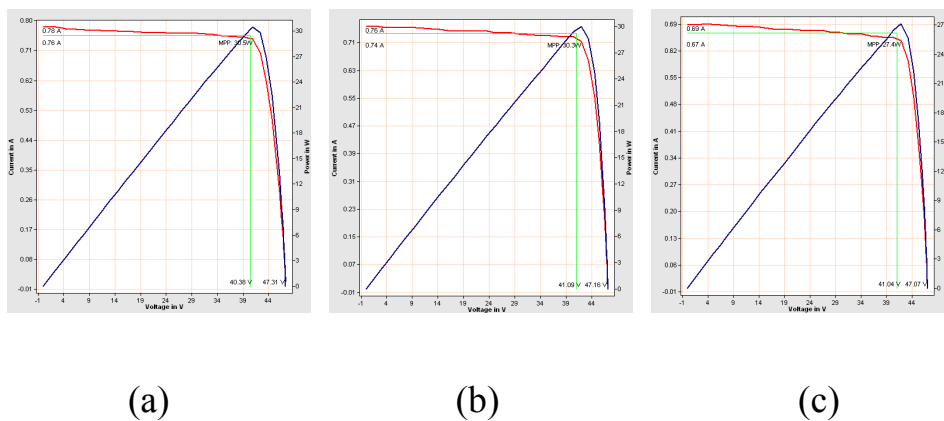


圖 20 日照度 800 W/m^2 ，所量測的 IV 曲線圖

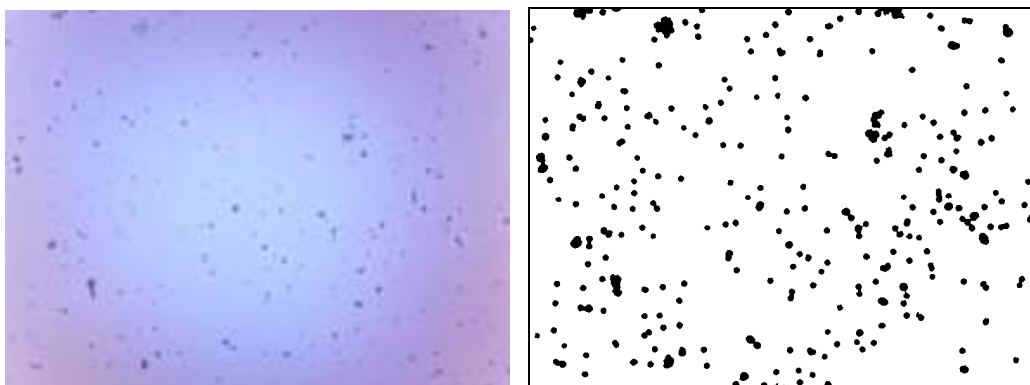


圖 21(a) CMOS 監測影像圖(b)二值化處理圖

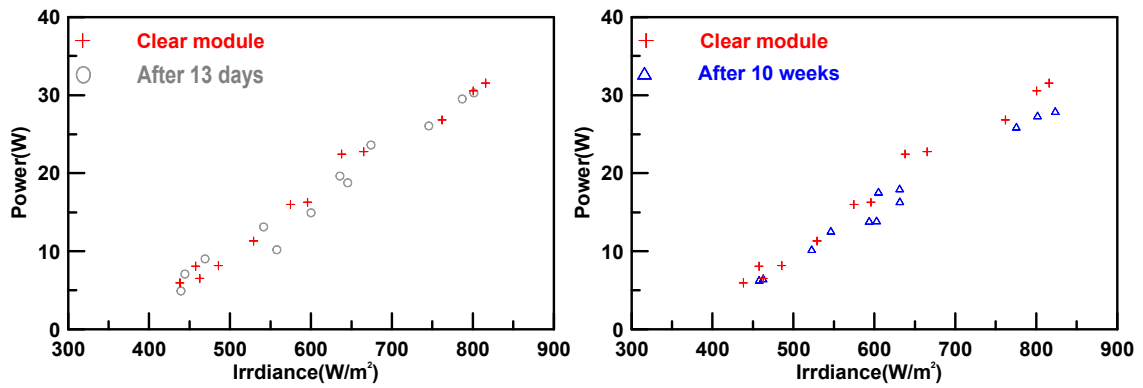
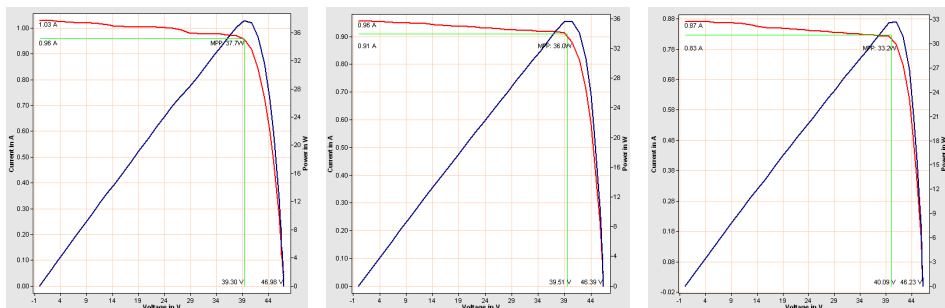


圖 22 模組效率比較圖 (a)定時清潔的模組與放置 13 天的模組 (b)定時清潔的模組與放置 10 週的模組

圖 23 為日照度 680 W/m^2 ，所量測到的 IV 曲線圖，其中(a)為每天清潔的模組，(b)為短期置放未清潔的模組，(c)為長期置放未清潔的模組，其量測結果分別為：

- (a) 定時清潔模組: $P_{\text{mpp}} = 37.7 \text{ W}$
- (b) 放置第 17 天模組: $P_{\text{mpp}} = 36.0 \text{ W}$
- (c) 放置第 73 天模組: $P_{\text{mpp}} = 33.2 \text{ W}$

圖 24 為架設 CMOS 感測器 12 天所拍攝影像圖及二值化處理圖，落塵覆蓋率佔總面積 3.9%



(a)

(b)

(c)

圖 23 日照度 680 W/m^2 所量測到的 IV 曲線圖

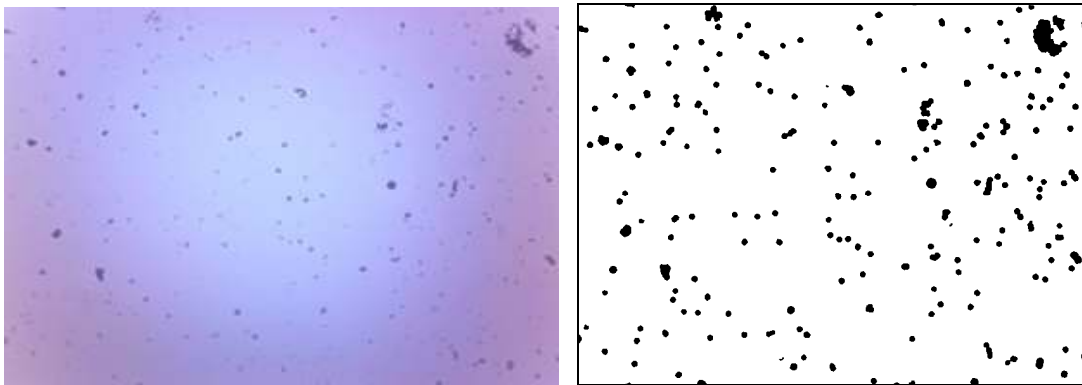


圖 24 集中降雨前(a) CMOS 監測影像圖 (b)二值化處理之結果圖

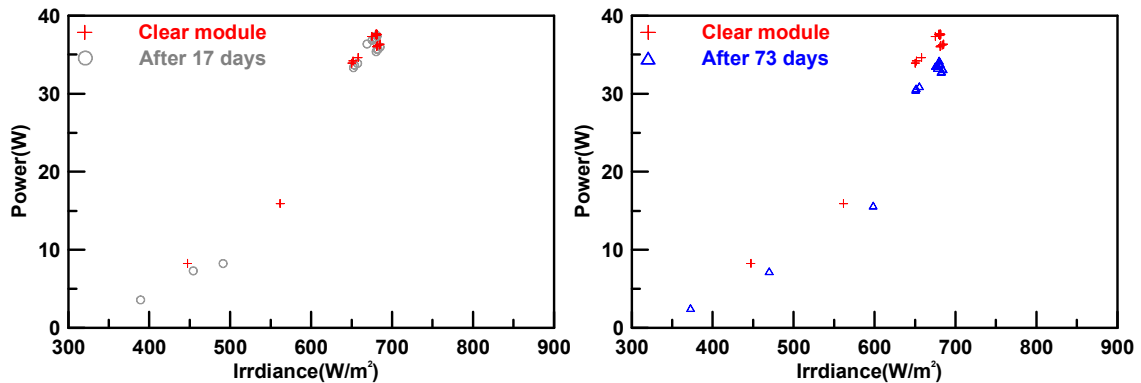
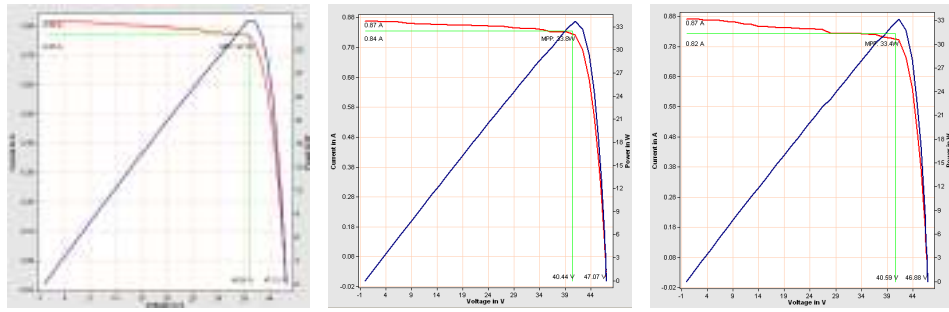


圖 25 模組效率比較圖 (a)定時清潔的模組與放置 17 天的模組 (b)定時清潔的模組與放置 73 天的模組

圖 26 為日照度 600 W/m^2 ，所量測到的 IV 曲線圖，其中(a)為每天清潔的模組，(b)為短期置放未清潔的模組，(c)為長期置放未清潔的模組，其量測結果分別為：

- (a) 定時清潔模組: $P_{\text{mpp}} = 34.1 \text{ W}$
- (b) 放置第 18 天模組: $P_{\text{mpp}} = 33.8 \text{ W}$
- (c) 放置第 74 天模組: $P_{\text{mpp}} = 33.4 \text{ W}$

圖 27 為架設 CMOS 感測器 12 天所拍攝影像圖及二值化處理圖，落塵覆蓋率佔總面積 1.3%



(a) (b) (c)

圖 26 日照度 600 W/m²，所量測的 IV 曲線圖

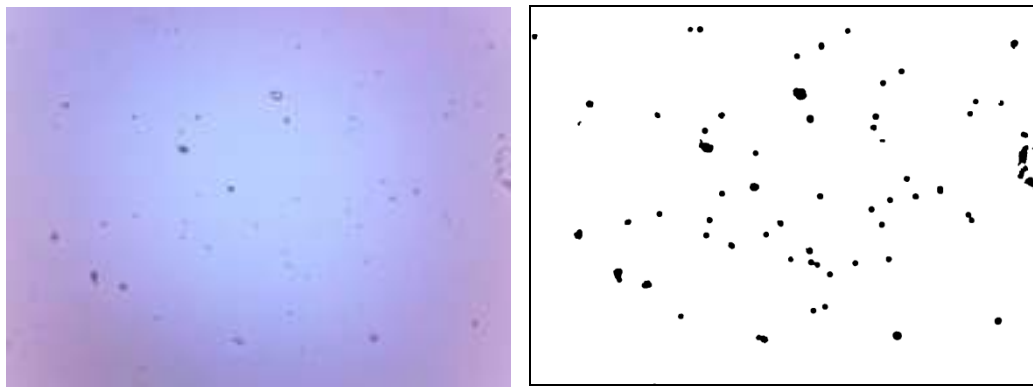


圖 27 集中降雨後(a) CMOS 監測影像圖(b)二值化處理之結果圖

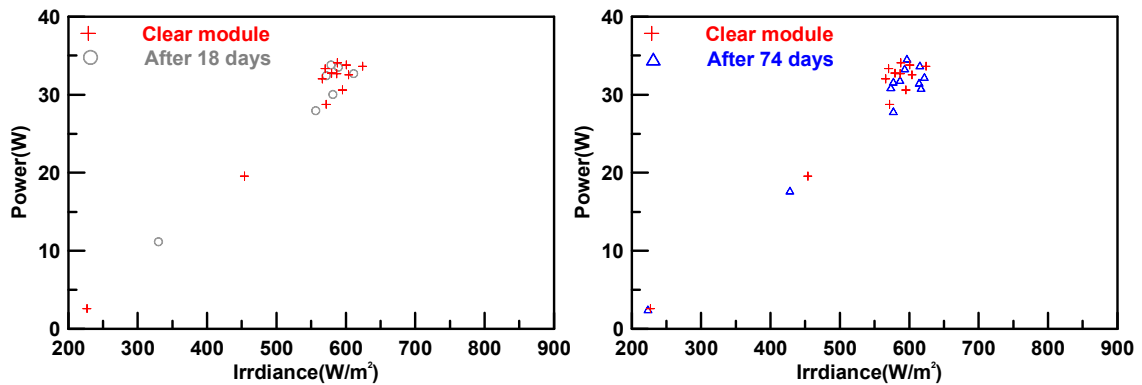


圖 28 模組效率比較圖(a)定時清潔的模組與放置 18 天模組 (b)定時清潔的模組與放置 74 天的模組

圖 24 為降雨前，當天 CMOS 監測影像圖二值化處理之結果圖-落塵覆蓋率佔總面積 3.9%，經過集中降雨後，圖 26 為二值化處理之結果圖的落塵覆蓋率變為佔總面積 1.3%。比較降雨後圖 27(a)與圖 27 (b)與降雨前的圖 24(a) (b)之落塵量，可看出降雨後放置 18 天與 73 天的實驗組模組量測數據點，有往對照組的輸出功率拉近的趨勢。亦即降雨可以清除部份的落塵。圖 28 為模組效率比較圖，圖 28 (a)為定時清潔的模組與放置 18 天模組之效率比較，圖 28 (b)定時清潔的模組與放置 74 天的模組效率比較。由圖中可以得知，短期內落塵對效率的影響較小，長期放置對模組的效率有明顯的差異。

圖 29(a) 為兩個月一般狀況下模組之功率與照度之量測結果，圖 29(b) 為兩個月颱風季節狀況下模組之功率與照度之量測結果。由圖所知在自然環境下量測光照度與太陽能電池模組輸出功率的效率圖，可以發現有定期清潔的模組(紅圓形)，比沒定期清潔的模組(藍正方形)，效率有較佳的輸出。

實驗中，相當多的參數皆會變動，但模組的效率是出廠時就決定的，兩組(實驗組與對照組)皆相當，所以依此觀念，利用 COMS 感測器量測到的落塵，來導入沾附在 Fensnel lens 上灰塵覆蓋率，驗證落塵與效率的關係，反之，有一組乾淨的基準數據為依據，來量測自然環境下光照度與輸出，可反推灰塵的覆蓋率，得知當地的落塵量。透鏡上原本有灰塵的模組，可透過量測到的落塵量，回推無灰塵狀態下的效率之公式：

$$\text{HCPV 輸出功率(W)/光照度(W/m}^2\text{)*((1-落塵覆蓋率%)*透鏡面積(m}^2\text{))}$$

表 2 是利用公式，導入未定期清潔模組的輸出效率值，使未清潔模組回復以清潔的狀態(誤差效率為表中與乾淨模組效率相差值%)，與定期清理組作比較，可得知兩組的效率輸出差異最高為 0.7%。

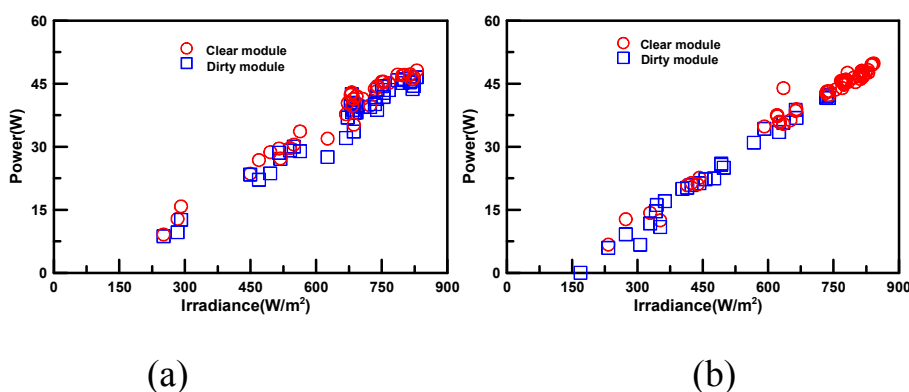


圖 29 光照度與太陽能電池模組輸出功率的效率圖，(a)第一階段(b)第二階段

表 2 利用灰塵覆蓋率推估 HCPV 模組的效率

次數	Pixel	覆蓋率 (%)	覆蓋面積 (m ²)	Clear module Eff(%)	Dirty module Eff(%)	預測 Eff(%)	預測與量測相差值 (%)
1	48873	2.32	0.0053	24.12	23.73	24.29	0.17
2	70408	3.35	0.0077	25.52	24.97	25.84	0.31
3	99327	4.72	0.0108	22.29	21.27	22.32	0.03
4	110619	5.26	0.0121	23.15	21.95	23.17	0.02
5	127046	6.04	0.0139	23.12	22.39	23.83	0.71
6	100000	4.76	0.0109	24.23	22.54	23.67	0.56
7	56169	2.67	0.0061	25.46	24.39	25.06	0.39
8	241799	11.51	0.0265	24.03	21.77	24.60	0.57
9	245597	11.70	0.0269	22.66	20.36	23.06	0.40

三、HCPV 模組電池溫度差異模擬與實驗驗證

研究中利用計算流體力學(CFD)模擬不同仰角角度下下模組的熱傳情形進行了一系列的模擬，光照度 850 W/m^2 ，環境溫度為 25°C 無風條件下，角度 0° 、 30° 、 60° 、和 90° 的四種不同的角度電池最高溫與最低溫的溫差如圖 30 與表 3 所示，根據模擬之結果，溫度之差異性不大，其不同角度間最大溫差約在 2°C 。

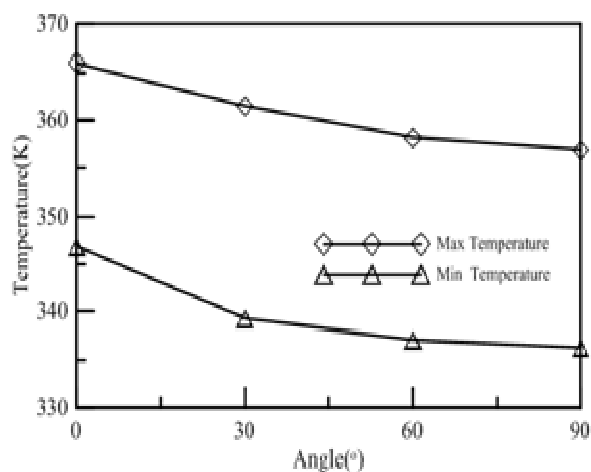


圖 30 不同角度最高溫度與最低溫度模擬結果

表 3 不同角度的量測溫度統計表

仰角角度	cell 最高溫度(K)	cell 最低溫度(K)	最高溫與最低溫溫差(K)
0°	366.00	346.87	19.13
30°	361.50	339.27	22.23
60°	358.20	337.14	21.06
90°	356.90	336.33	20.57

上述結果只考慮無風條件下。然而，在自然環境中，高聚光型太陽能模塊暴露風從各種不同的速度及方向，因此，研究中考慮不同風速下電池間之溫度差異，不同風速下電池間之溫度差異模擬結果如圖 31 所示。當風速在 0.5~3 m/s 時，最大的溫差約為 10.5°C~14°C 左右，其統計結果如表 4 所示。

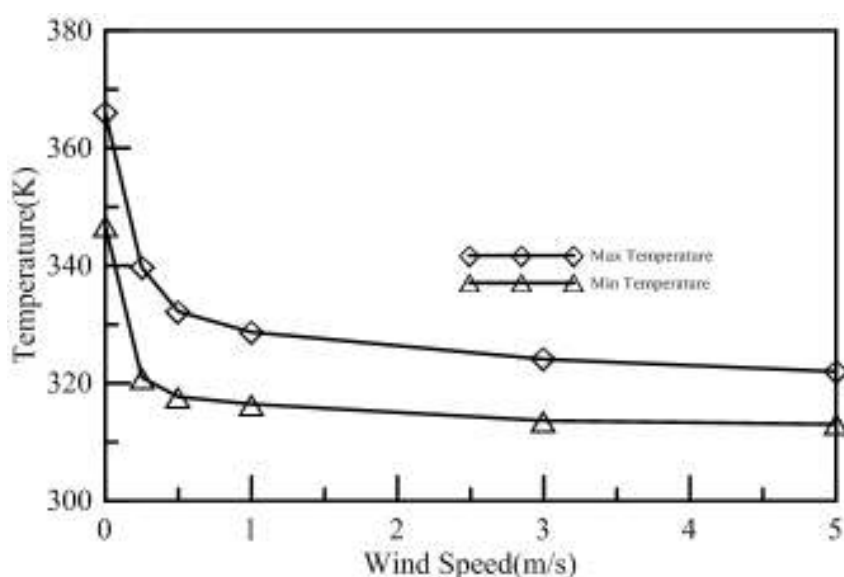
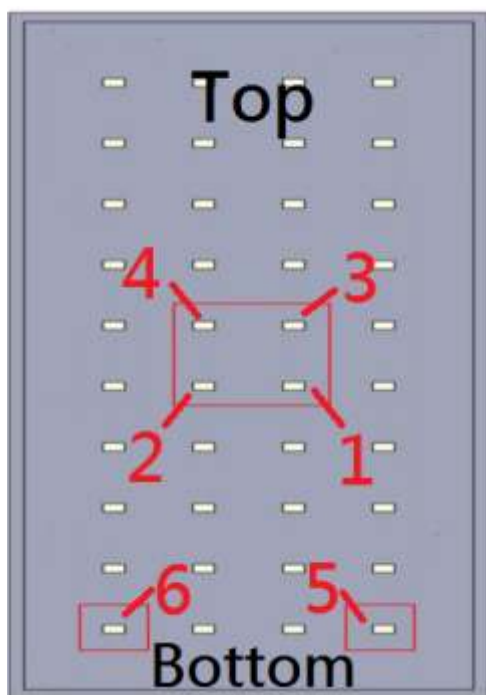


圖 31 風速與溫度關係圖

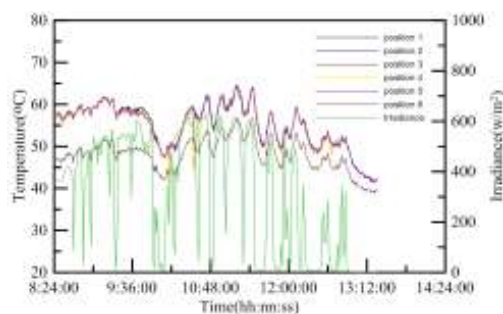
表 4 模擬風速對模組溫度的影響

風速(m/s)	cell 最高溫度(K)	cell 最低溫度(K)	最高溫與最低溫溫差(K)
0	366.00	346.87	19.13
0.25	339.70	321.00	18.70
0.5	332.20	317.70	14.50
1	328.70	316.46	12.24
3	324.09	313.65	10.44
5	322.00	313.02	8.98

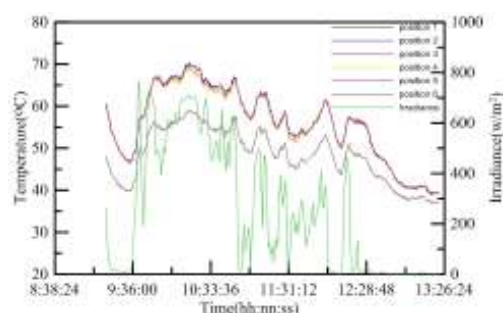
實驗驗證是利用熱電偶埋入電池內部直接量測HCPV 電池溫度,圖 32(a)為熱電偶埋設位置示意圖,量測結果顯示,在自然環境下,模組內溫度的量測結果如圖 32 (b)與圖 32 (c)所示,其內部電池最大溫差約 11°C~12°C。圖 33 為各個溫度點的量測結果與環境中風速、光照度之關係曲線,模組內最大溫差約 12°C。表 5 為所量測各光照度下所得的各點溫度與環境溫度、風速統計之統計表。



(a)



(b)



(c)

圖 32 (a)熱電偶埋設位置圖(b) 模組溫度量測曲線圖(C) 模組溫度量測曲線圖

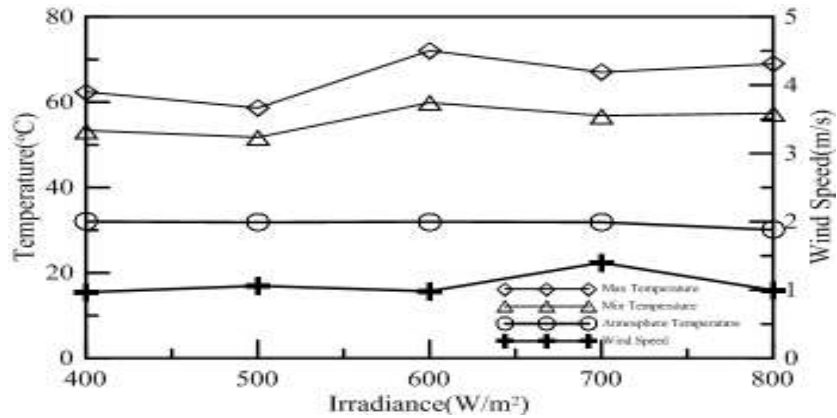


圖 33 模組中各量測點溫度與光照度、風速關係圖

表 5 實際量測模組溫度與風速之結果

光照值(W/m ²)	最高溫度(°C)	最低溫度(°C)	平均溫差(°C)	大氣溫度(°C)	平均風速(m/s)	最大風速(m/s)
800	68.94	57.37	11.57	30.08	0.99	1.92
700	67.02	56.84	10.18	31.88	1.40	2.40
600	72.06	59.87	12.19	31.99	0.98	2.30

四、結論

本計畫利用小體積無鏡頭 CMOS 感測器架設於太陽能模組上方，運用影像處理方法開發可攜式微粒子監測器，用來長時間監控大氣中懸浮微粒沉積於聚光型太陽能模組之落塵量及沉積模式，同時量測懸浮微粒沉積於模組表面對模組發電效率的影響，並推算出最佳的模組清洗週期，以提升發電效率，並利用數值模擬及實驗驗證方法來探討模組中各電池之溫度差異性。經由本計畫之執行，成功的利用無鏡頭 CMOS 感測器長時間監控大氣中懸浮微粒沉積模式，研究之結論分別為：

(一)大氣中落塵量 COMS 感測器與影像處理技術之開發：

本研究利用所開發的 COMS 感測器監控自然環境下的落塵量，並利用所開發的影像處理程式計算出的落塵總數量以及落塵的尺寸大小，並推導出 HCPV 模組於不同落塵狀態下之效率公式，歸納出屏東內埔地區針對太陽能電池-GA916A-4C 模組的灰塵覆蓋率與模組效率衰減量趨勢。落塵量在夏天與冬天對於模組的覆蓋率分別為，沉積粒子的尺寸主要集中在 25-30 μm 。

(二)落塵量對 HCPV 模組發電量的影響

HCPV 模組的輸出功率為 $\text{HCPV 輸出功率}(W) = \text{光照度}(W/m^2) * ((1 - \text{落塵覆蓋率}\%) * \text{透鏡面積}(m^2))$

(三)降雨量對於模組上落塵量與模組效率之影響

經由實驗發現下雨會沖刷或增加沾附在聚光透鏡上的落塵，小量的降雨會使落塵聚集在微小的區域，但無法使落塵脫離聚光透鏡的表面，因此對於模組的效率無法提升的效果，部份小雨會使落塵的沉積量增加但對於集中的降雨可以部分清洗模組上的落塵，大雨可沖刷落塵，使覆蓋量降低 10%~40%，因此具有提昇模組效率的效果。天候對於落塵量有相當大的影響，夏天因為多雨，空氣中的落塵會因雨水的沖刷而減少，因此，夏天落塵在模組上的沉積數量比較少，落塵在模組上的覆蓋率達到 10% 的天數約為 30 天，冬天因為降雨數量少，又有沙塵暴的影響，落塵在模組上的覆蓋率會也有增加的趨勢，落塵在模組上的沉積大約是夏天二點五倍。一般狀

態下落塵量對發電效率之影響約 3% 左右。

(四) 模組中各電池溫度分佈之差異

經由 CFD 數值模擬結果顯示，模組的溫度主要與環境的風速有關，並以模組中心之溫度最高。利用細熱電偶埋入模組相對位置的電池下方進行量測，HCPV 太陽能電池之實驗結果與模擬溫度進行比對，在一般狀態風速約於 1m/s~2m/s 時的風速，其電池之溫差約 10°C，此結果經由數值模擬與實驗驗證趨勢相吻合。

肆、参考文献

1. Trevor M. Letcher, "Future Energy: Improved, sustainable and clean options for our planet." Elsevier, 2008.
2. K. Rajeshwar, R. McConnell, S. Licht "Solar hydrogen generation toward a renewable energy future", Springer, 2008.
3. "Technology roadmap: solar photovoltaic energy," International Energy Agency, 2010.
4. JRC Scientific and Policy Reports - PV report 2012
5. Gordon R., Kinsey G., Nayaak A., Garboushian V., "30% CPV module milestone," in proceedings of the 6th International Conference on Photovoltaic Systems (CPV-6), pp171, 2010.
6. Sherif. R. A., "The Path to 1 GW of Concentrator Photovoltaics Using multi-junction Solar Cells," N. H. Karam, R. R. King, D. R. Lillington, 31 IEEE PVSC pp17-22, 2005; "multi-junction Solar Cells," Nature Photonics 2008.
7. Thevenard D. Review and recommendations for improving the modeling of building integrated photovoltaic systems. In: Proceedings of the 9th International IBPSA Conference, Montreal, Canada; 2005.
8. Fenger J. Air pollution in the last 50 years e from local to global. Atmospheric Environment 2009;43(1):13e22.
9. Kaldellis JK, Spyropoulos GC, Chalvatzis GC. The impact of Greek electricity generation sector on the national air pollution problem. Fresenius EnvironmentalBulletin 2004;13(7):647e56.
10. Ramanathan V, Feng Y. Air pollution, greenhouse gases and climate change: global and regional perspectives. Atmospheric Environment 2009;43(1).
11. Tian W, Wang Y, Ren J, Zhu L. Effect of urban climate building integrated photovoltaics performance. Energy Conversion and Management 2007;48(1):1e8.
12. Mani M, Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010;14(9):3124e31.
13. Bailey S, Landis G. The next-generation of space cells for diverse environments. In: Proceedings of the 6th European Conference on Space Power, Porto, Portugal, 2002.
14. Gaier JR, Perez-Davis ME, Marabito M. Aeolian removal of dust from photovoltaic surfaces on Mars. NASA Technical Memorandum: 102507.

Available at: <http://ntrs.nasa.gov/>; 1990. Accessed in January 2010.

15. Johansson TB, Kelly H, Reddy AKN, Williams RH. Renewable energy-sources for fuels and electricity. 1st ed. Washington: Island Press; 1992.
16. Thevenard D. Review and recommendations for improving the modeling of building integrated photovoltaic systems. In: Proceedings of the 9th International IBPSA Conference, Montreal, Canada; 2005.
17. Al-hasan Ahmat Y, Ghoneim Adel A. A new correlation between photovoltaic panel's efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface. *Sustainable Energy* 2005;24(4):187-97.
18. Soleimani EA, Farhangi S, Zabihi MS. The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran. *Renewable Energy* 2001; 24(3-4):459-68.
19. Letin VA, Nadiradze AB, Novikov LS. Analysis of solid microparticle influence on spacecraft solar arrays. In: Proceedings of the Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the Thirty-first IEEE, ISBN: 0-7803-8707-4, 2005.
20. Kaplanis S, Kaplani E. Energy performance and degradation over 20 years performance of BP c-Si PV modules. *Simulation Modelling Practice and Theory* 2011;19(4):1201-11.
21. Thevenard D. Review and recommendations for improving the modeling of building integrated photovoltaic systems. In: Proceedings of the 9th International IBPSA Conference, Montreal, Canada, 2005.
22. El-Shobokshy MS, Hussein FM. Degradation of photovoltaic cell performance due to dust deposition on to its surface. *Renewable Energy* 1993;3(6-7): 585-90.
23. Elminir HK, Ghitas AE, Hamid RH, El-Hussainy F, Beheary MM, Abdel-Moneim MK. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy Conversion and Management* 2006;47(18-19):3192-203.