

奈米碳球於太陽光電熱能系統領域之應用與分析

*高至誠^{1,2}、洪振森²

¹南臺科技大學電機工程系、²南臺科技大學半導體與光電工程系

摘要

太陽光電熱能系統可在有限屋頂面積下同步產生電能與熱能，提升太陽能的整體利用效率。為評估奈米碳球作為此類系統集熱材料之可行性與效益，本研究建置並驗證以奈米碳球為吸熱層之太陽光電熱能系統。奈米碳球與 EVA 經加熱混合製成 CNC 集熱膜層；結構分析結果顯示 CNC 與 EVA 可於膜層中共存，但隨膜厚增加，可能出現 CNC 於厚度方向分布不均或成分梯度之現象。當膜厚 ≥ 0.9 mm 時，CNC 膜層光吸收率 $> 70\%$ ，方能滿足太陽光電熱能系統基本需求。我們採用厚度 2.5 mm、面積 0.3 m²（其上配置 0.125 m² 太陽能電池）的 CNC 集熱膜層製造太陽光電熱能系統，在戶外 9 小時自然光照測試下，可讓水溫提升 11.8°C。測量時間內太陽光入射能量為 1217.2 Wh，水體獲得熱能 823 Wh，對應熱轉換效率 67.6%；同時太陽能電池輸出電能 62.08 Wh，使系統整體轉換效率達 72.7%。未來可由膜厚、電池面積佔比與有效受光面積進行參數最佳化，以提升熱、電輸出效益。

關鍵詞：奈米碳球、太陽光熱光電、集熱膜、能量轉換

Application and Performance Analysis of Photovoltaic-Thermal System Based on Carbon Nanocapsules

Chih-Cheng Kao^{*,1,2}, Jen-Sen Hung²

¹Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

²Department of Semiconductor and Electro-Optical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

Photovoltaic-thermal (PVT) systems enable the simultaneous generation of electricity and heat within limited rooftop space, thereby improving the overall utilization efficiency of solar energy. In this study, we developed a PVT system using carbon nanocapsules (CNCs) as the photothermal absorbing material to evaluate its feasibility and performance. Photothermal collectors were fabricated by thermally mixing CNCs with ethylene-vinyl acetate (EVA). Structural analyses confirmed the coexistence of CNCs and EVA; however, increased film thickness resulted in non-uniform CNC distribution and potential through-thickness compositional gradients. Films with thickness ≥ 0.9 mm exhibited optical absorptance exceeding 70%, satisfying basic PVT application requirements. A prototype PVT system employing a 2.5 mm-thick CNC film (collector area: 0.3 m²) coupled with photovoltaic cells (total PV area: 0.125 m²) was evaluated under outdoor conditions over a 9-h period. The system increased the water temperature by 11.8°C. With a total incident energy of 1217.2 Wh, the system produced 823 Wh of thermal energy, corresponding to a thermal efficiency of 67.6%, and 62.08 Wh of electrical energy, yielding an overall energy conversion efficiency of 72.7%. These results demonstrate the potential of CNC-based PVT

Received: Jan. 19, 2026; first revised: Feb. 24, 2026; accepted: Mar. 2026.

Corresponding author: C.-C. Kao, Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan 710301, Taiwan.

systems for efficient solar energy harvesting. Future work will focus on optimizing film thickness, PV area fraction, and effective illuminated area to further enhance system performance.

Keywords: Carbon nanocapsules, Photovoltaic-thermal system, Thermal collector, Energy conversion

壹、前言

近年來，由於二氧化碳排放量持續增加，全球暖化已成為嚴重議題，並可能對天氣型態造成顯著影響。臺灣位於太平洋西部，是亞洲受極端天氣影響最嚴重的國家之一。每年有超過 10 個颱風挾帶強風豪雨侵襲本島，造成重大損失。2009 年，莫拉克颱風是臺灣有紀錄以來最致命的颱風，侵襲臺灣時帶來驚人的降雨量，引發土石流並摧毀小林村，造成 400 多人罹難。這類極端天氣如今已成為臺灣社會最重要的公共議題之一。為了降低二氧化碳排放，我國政府決定逐步終止核能發電，提升太陽能、風能等綠色能源的使用比率。臺南市年日照時數高達 2180 小時，能滿足太陽能相關應用研究的需求，非常適合發展並推廣各項與綠色能源相關的技術。

太陽能應用目前可概分為兩大類：光伏技術 (Photovoltaic, PV) 與太陽熱能／光熱技術 (Photothermal, PT)。前者將太陽能轉換為電能 [1–4]，後者則轉換為熱能 [5–8]。若將兩者整合為太陽光電熱能系統 (Photovoltaic Thermal, PVT)，即可同時產生電能與熱能，並透過熱管理降低太陽能電池操作溫度，進而提升發電效率，因此成為近年重要的研究方向之一 [9–14]。早期 PVT 系統的發展多聚焦於提升光伏效率，並透過與集熱模組整合來進行熱管理與能量回收。以分層式 PVT 結構為例，上層為 PV 發電層；其下配置水冷／水道層作為主要換熱介質；再下層則為 PT 吸收層 (光熱吸收層)。在此架構中，流經水道的水同時吸收兩部分熱量：一為 PV 在發電過程中所產生並向下傳導的廢熱，二為下層 PT 吸收層所吸收的太陽能熱。因而系統除可降低 PV 操作溫度以減緩效率劣化外，亦能獲得溫度較高的熱水，進一步供家庭熱水或工業製程等熱能需求使用。除此之外，亦有研究採用將 PT (光熱吸收/集熱) 層直接設置於 PV 下方的構型，使 PV 所產生的廢熱可藉由層間導熱傳遞至 PT 層進行回收，並可同時利用穿透 PV 的剩餘光能提升熱輸出。PVT 研究可追溯至 1970 年代中期，惟距離大規模商業化仍有一段距離，主因之一在於系統成本偏高，使工業與住宅端導入不易。為提升整體效能與系統可行性，研究者亦探討將 PV 與多種強化集熱或聚光設計整合，例如鰭片式吸收器、拋物面聚光器，以及聚光型太陽光電熱能系統 (Concentrated Photovoltaic Thermal, CPVT) 等；然而相關商業原型機目前仍在持續開發中。

PVT 的研究中，吸熱材料為提升系統熱輸出與整體效率的關鍵之一。碳大量存在於地球環境中，亦是生物體的重要組成元素，因此碳材料來源廣泛且易於取得。碳材料的結構多由 sp^2 碳鍵結所主導，形成以六碳環 (six-membered rings) 為基本單元的平面網絡，並可透過層狀堆疊、捲曲以及缺陷的引入，發展出不同尺度的立體形貌。依其結晶性與維度可概略分為：結晶性較低的非晶質碳 (如碳黑)，以及具較高結晶性的碳同素異形體，例如零維的富勒烯、一維的碳奈米管與碳纖維、二維的石墨烯與三維的石墨等。奈米碳球 (Carbon Nanocapsules, CNC) 為近年備受關注的奈米碳材料，通常由多層同心包覆的石墨化 (類石墨) 碳殼層所構成，呈現「洋蔥狀 (onion-like)」之球中球結構，粒徑約 1–100 nm，其尺度可與奈米碳管直徑相當。其內部可為中空型 (hollow nanocapsules)，亦可能為金屬填充型 (metal-filled nanocapsules) [15]。在微結構上，殼層以六碳環為主，並在曲率較大的區域引入五碳環 (five-membered rings) 以形成封閉曲面；碳原子多為 sp^2 構造。由於其多層殼層結構與多壁碳奈米管相近，亦可將奈米碳球視為徑長比接近 1 的顆粒狀碳奈米結構。此類多層石墨化殼層使奈米碳球具備良好的導熱性、導電性、機械強度與化學穩定性；此外，其外層碳殼亦可進行表面改質，以提升在溶劑中的分散性並增加與基材的界面親和力。綜合而言，奈米碳球在耐候性與熱傳/界面工程等面向具優勢，具有應用於太陽光熱 (PT) 或 PVT 吸熱層之潛力。

我國南部日照條件良好，具備發展太陽光電與太陽光熱系統之優勢。以矽基太陽能電池而言，其可將入射太陽光中部分波段的能量轉換為電能；而太陽光熱系統則透過吸收太陽輻射並以熱的形式回收能量，

用於提供生活熱水或其他熱負載。然而受限於屋頂可用面積與建置成本，多數住戶在經濟考量下往往僅能擇一安裝 PV 或太陽能熱水器。此情況使得同一屋頂在實際運轉時，常只能回收太陽能的一部分能量，仍有相當比例以熱散失等形式未被有效利用。另一方面，目前市面上仍相對缺乏可同時提供電力與熱水、且具備良好成本效益的商業化整合產品。基於上述背景，本研究擬整合太陽能熱水器與矽太陽電池 (PV)，並以奈米碳球作為吸熱材料，設計、製作與評估太陽光電熱能系統 (Photovoltaic Thermal, PVT)，以期在有限屋頂面積下同時獲得電能與熱能，提升太陽能利用效率。

貳、實驗方法

本文所使用之CNCs係依據文獻 [16] 所述方法製備。我們將奈米碳球 (CNC) 與 EVA (乙烯-醋酸乙烯酯共聚物，台聚UE3330) 加熱混合後製備 CNC 薄膜；薄膜中 CNC 的含量約為 800–1200 ppm。由於 EVA 為既有太陽能電池封裝之常用材料，本研究在不改變原材料體系與製程架構下，僅添加 CNC 來製作吸熱層以提升集熱功能。為探討 CNC 膜層厚度對性能之影響，本研究製作 A、B、C 三組試片，其厚度分別為 0.4 mm、0.9 mm 與 2.5 mm。在結構分析方面，使用 X 射線繞射儀 (XRD；Bruker D2 PHASER)、拉曼光譜儀 (Raman；Renishaw inVia Raman Microscope) 及傅立葉轉換紅外光譜儀 (FTIR；Thermo Nicolet) 進行量測；膜層之光學吸收特性則以紫外-可見-近紅外分光光譜儀 (UV-Vis-NIR；Hitachi U-4100) 分析。

本研究之 PVT 裝置自上而下之結構依序為：玻璃蓋板、空氣保熱層 (空氣層)、玻璃隔板、水流層、太陽能電池層、CNC 集熱膜層、支撐鋁板及 PC 板，如圖 1 所示。兩層玻璃厚度皆為 0.3 cm，水流層厚度為 0.7 cm。本裝置採用額定功率 30 W 之單晶矽太陽能電池，並與 CNC 集熱膜層以層壓方式整合為一體化模組；模組總面積約 0.3 m²，其中太陽能電池受光面積為 0.125 m²。由於太陽能電池僅覆蓋部分集熱區域，未被電池覆蓋區域之入射輻射仍可由下方 CNC 集熱膜層吸收，並將所獲熱量傳遞至水流層，以提供水流加熱所需之熱能。空氣保熱層與水流層皆以矽膠片作為間隔支撐件 (spacer)，以維持層間間距與結構穩定性。其中，空氣層之設置旨在使水流層避免與外界流動空氣或雨滴直接接觸，以降低對流及外界擾動造成之熱損失，進而提升保溫效果。水流層則用於吸收 PVT 膜層所累積之熱量；水體流經該層後，經由外部管路輸送至 60 L 儲水桶，以達成熱能回收與儲存。

PVT 裝置架設於南臺科技大學 Q 棟頂樓，於自然日照條件下進行曝曬測試並量測儲水溫度之變化。太陽輻射照度、水溫與太陽能電池輸出分別採用記憶式太陽能功率計 (Lutron SPM-1116SD)、記憶式四視窗溫度計 (Lutron TM-947SD) 以及太陽能電池分析儀 (PROVA 218) 進行量測。量測設定方面，太陽輻射照度與水溫皆由儀器設定為每 1 分鐘自動記錄一次；太陽能電池輸出則由人工每 10 分鐘記錄一次。

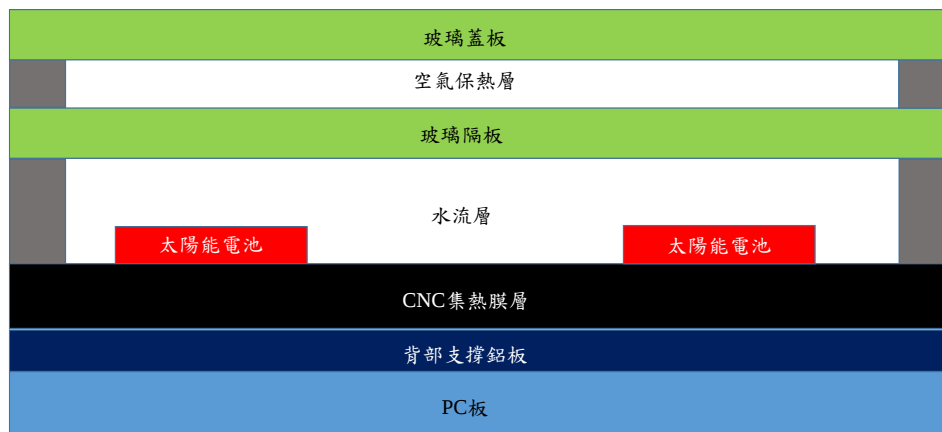


圖1 PVT裝置示意圖

參、結果與討論

一、CNC膜層結構與光學特性分析

A (0.4 mm)、B (0.9 mm) 與 C (2.5 mm) 三組試片之 XRD 量測結果如圖 2 所示。由圖可見，三組試片的主要繞射峰位於約 21.5° 與 23.4° ，並於約 43° 出現微弱訊號；此外，A 試片在約 29° 尚可觀察到額外繞射峰。根據文獻記載， 21.5° 與 23.4° 可分別對應 EVA 的 (110) 與 (200) 結晶面，顯示薄膜中存在 EVA 的結晶結構 [17]；而約 29° 與 43° 則可與石墨的 (002) 與 (100) 結晶面有關，顯示樣品中具有石墨結晶 [18]。由上述結果可知，本研究製備之複合膜具有 EVA 結晶結構，且可觀察到 CNC 所對應之石墨結晶訊號。此外，厚度較高的 B 與 C 試片，其石墨結晶 (002) 對應之繞射峰強度明顯低於 A 試片。由於本研究採用反射式 XRD，其有效取樣深度主要集中於材料近表面區域，因此上述差異可能與 CNC 在厚度方向存在分佈不均有關。此結果亦顯示，即使經充分攪拌，所製備之 CNC/EVA 複合膜仍可能存在垂直方向之成分梯度。

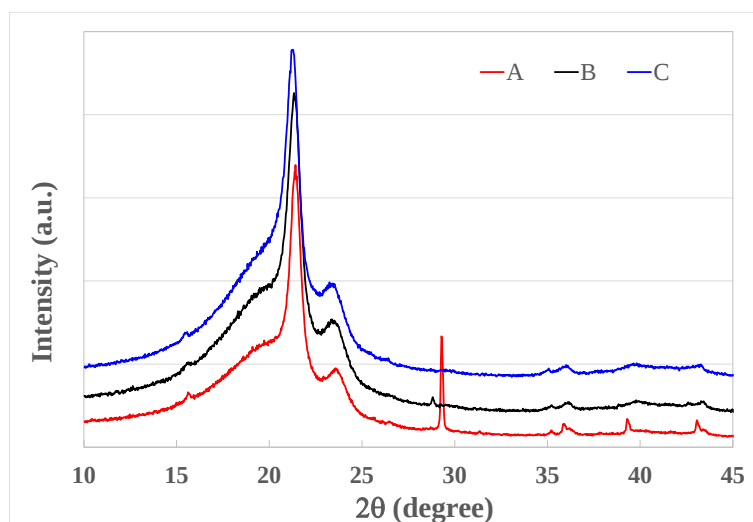


圖2 不同厚度CNC膜層之XRD分析結果

我們也使用拉曼光譜儀分析 CNC 膜層之結構特性，結果如圖 3 所示。拉曼光譜中可觀察到五個主要波峰，分別位於 1296 cm^{-1} 、 1370 cm^{-1} 、 1400 cm^{-1} 、 1440 cm^{-1} 與 1535 cm^{-1} 。其中， 1296 cm^{-1} 、 1400 cm^{-1} 與 1440 cm^{-1} 可歸因於 EVA 分子鏈段之振動訊號；文獻指出 1296 cm^{-1} 與 EVA 中乙烯鏈段 (PE-like) 及醋酸乙烯酯鏈段 (PVAc-like) 相關，而 1400 cm^{-1} 與 1440 cm^{-1} 則主要與乙烯鏈段之振動有關 [19]。此外， 1370 cm^{-1} 的訊號通常稱為碳材料的 D band，與石墨結構中的非晶/缺陷 (例如 sp^2 碳網路中的結構缺陷、邊界或無規則排列) 相關 [20]； 1535 cm^{-1} 則為 G band，源自石墨化 sp^2 結構之晶格振動模態，為石墨化碳結構的特有訊號。而碳結構的結晶程度，可由 D 峰與 G 峰峰值強度比值 (I_D/I_G) 來評估。另一方面，隨膜層厚度增加， I_D/I_G 呈上升趨勢，代表厚膜樣品於量測區域的碳結構更趨無序 (非晶)；此趨勢亦與 XRD 中較厚試片之石墨結晶 (002) 繞射峰強度降低的現象相一致。這些結果非常可能與 CNC 膜在厚度方向存在成分或微結構分佈不均有關，使得較厚試片近表面區域的石墨層狀堆疊較低、缺陷程度較高，進而導致 (002) 峰強度下降且 I_D/I_G 增加。舉例而言，膜厚增加時，成膜與固化所需時間通常也會拉長，使得較大、堆疊較完整的 CNC 碳團聚體 (較像石墨層狀結構者) 在材料仍未完全固化前，較容易往下沉並在底部累積。相對地，靠近膜表面的區域可能就以較小、較分散的 CNC 顆粒為主，因此在以表面為主的反射式 XRD 量測中，會觀察到石墨 (002) 繞射峰強度降低。另一方面，小顆粒因為邊緣比例較高、缺陷相關的訊號較明顯，其拉曼 D band 相對增強，因而使 I_D/I_G 呈上升趨勢。

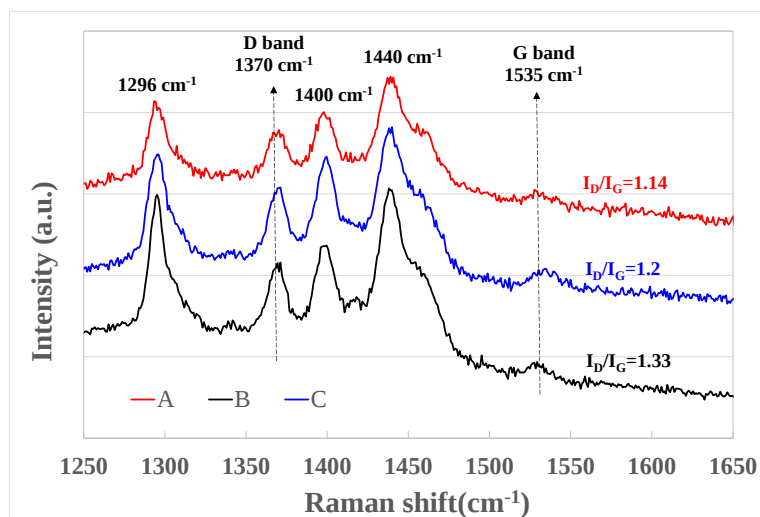


圖3 不同厚度CNC膜層之Raman分析結果

圖 4 為 FTIR 分析結果。光譜中可觀察到多個吸收峰，其中 2920 與 2850 cm^{-1} 可歸因於脂肪族 C-H 伸縮振動，1740 cm^{-1} 則與 C=O 伸縮振動有關；而 1464 cm^{-1} 附近之吸收峰對應 CH_2/CH_3 的 C-H 變形振動，~1022 cm^{-1} 則與 -C-O-C- 中 C-O 的伸縮振動有關 [21]。亦有文獻指出，1375–1465 cm^{-1} 的吸收帶可歸因於脂肪族 C-H 的彎曲 (變形) 振動；而 700–900 cm^{-1} 的區域則包含多個吸收帶，主要與芳香環 C-H 的面外彎曲振動相關，且會隨著芳香環上取代程度 (取代型式) 不同而呈現差異 [22]。綜合上述特徵峰可知，這些數據顯示膜層中 EVA 確實存在，並與前述 XRD 與 Raman 分析結果一致。

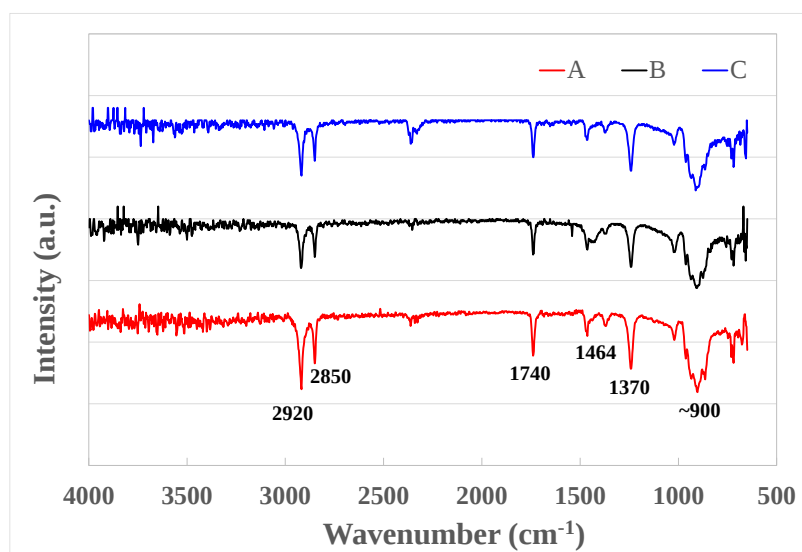


圖4 不同厚度CNC膜層之FTIR分析結果

圖 5 顯示 CNC 膜之吸收光譜。A、B、C 三組膜於 400–1100 nm 波段之平均吸收率分別為 $31.5\% \pm 1.5\%$ 、 $69.2\% \pm 3.3\%$ 與 $89.3\% \pm 3.7\%$ (同一試片三位置取樣)。隨波長增加，三者吸收率皆呈現小幅下降趨勢。另一方面，膜厚增加可明顯提升整體吸收能力，其中 2.5 mm 的 C 試片平均吸收率接近 90%，而 0.9 mm 的 B 試片約為 70%；相較之下，A 試片吸收率偏低。綜合上述結果，當膜厚達 0.9 mm (含) 以上時，整體吸收表現較佳，更適合作為太陽光熱吸收層。由於本研究目標在於驗證 CNC 膜作為吸熱層之可行性，後續 PVT 光熱轉換效益實測採用吸收表現最佳且最具代表性之 C 試片 (2.5 mm) 作為評估對象，以在有限的模組製作與量測資源下，優先取得「最佳吸收膜厚條件」對系統輸出的實際效益。

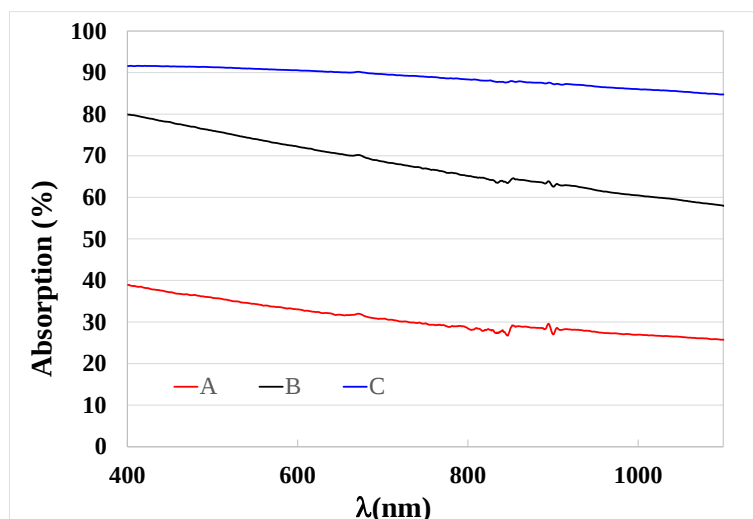


圖5 不同厚度CNC膜層之吸收光譜

二、PVT裝置實測

PVT 裝置架設於南臺科技大學 Q 棟頂樓，並於自然日照條件下進行約 9 小時之曝曬測試；測試期間以迷你沉水馬達 (DC 6 V，1 W，IP68；最大揚程 0.55 m) 全程運轉，將水循環輸送回儲水桶 (管路為裸管、儲水桶外側以泡棉保溫包覆)。儲水桶內水溫隨時間之變化如圖 6 所示。本研究分別量測儲水桶高水位 (距桶頂約 10 cm) 與低水位 (距桶底約 10 cm) 之水溫，以觀察桶內溫度分布與混合情形。圖 6 插圖為試驗當日太陽照度隨時間之變化，可見部分時段因雲層遮蔽造成照度短暫下降，進而影響加熱速率。由圖 6 可知，高水位水溫整體隨曝曬時間增加而上升。起始水溫約 32.1°C；於 0–100 分鐘期間，受日照照度波動影響，水溫呈現小幅起伏；於 100–350 分鐘期間，水溫則呈穩定上升趨勢。約在 400 分鐘時，高水位水溫達到最高約 44.5°C。此外，桶內低水位水溫於約 425 分鐘時與高水位水溫趨於一致，顯示桶內溫度逐漸均勻，其平衡水溫約為 43.9°C。換言之，經太陽曝曬後，水溫由 32.1°C 上升至約 43.9°C，溫度提升約 11.8°C。此外，雖當天天氣晴朗，但由圖 6 插圖可知，本次測試之實際日照強度峰值約僅 700 W/m²，相較於夏季正午常見可接近 1000 W/m² 的峰值照度仍偏低。另一方面，本研究採用 60 L 儲水桶，而 PVT 整體受光面積僅約 0.3 m²，單位時間內可輸入至水體之有效熱量受限，導致整體水溫提升幅度較小。因此，在評估 PVT 系統效益時，除水溫提升幅度外，仍應以能量轉換效率作為主要分析指標。

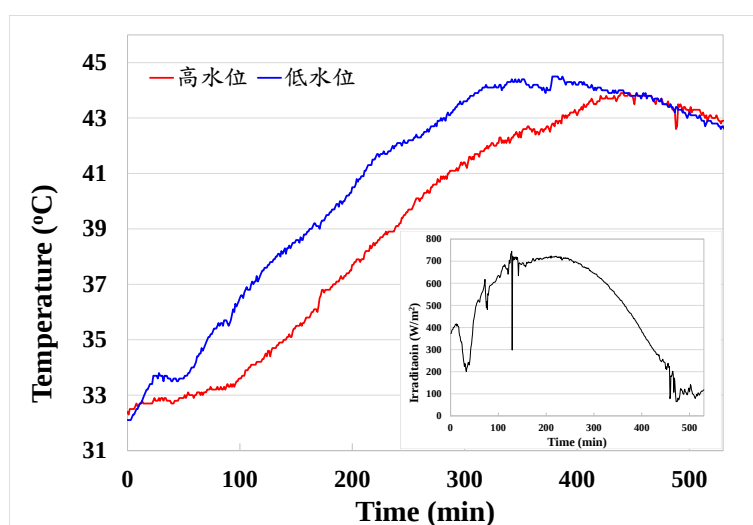


圖6 PVT裝置於太陽曝曬下，儲水桶內水溫變化圖

在計算轉換效率的部分，我們使用以下公式。

$$E_{Total} = P_{sun} \times A_{PVT} \times \Delta Time \quad (1)$$

其中， E_{Total} 為 PVT 裝置取得之太陽能量 (Wh)， P_{sun} 為太陽照度 (W/m^2)， A_{PVT} 為裝置面積 (m^2)， $\Delta Time$ 為曝曬時間 (h)

$$E_{water} = m_{water} \times c \times \Delta Temp \times \frac{1}{3600} \quad (2)$$

其中， E_{water} 為水體吸收能量 (Wh)， m_{water} 為水的質量 (Kg)，

c 為水的比熱 ($4186 J / Kg ^\circ C$)， $\Delta Temp$ 為水溫差 ($^\circ C$)， $\frac{1}{3600}$ 代表 $1 J = 1/3600 Wh$

$$\eta_{thermal} = \frac{E_{water}}{E_{Total}} \quad (3)$$

其中， $\eta_{thermal}$ 為 PVT 裝置熱轉換效率 (%)， E_{water} 為水體吸收能量 (Wh)， E_{Total} 為 PVT 裝置取得之太陽能量 (Wh)

$$E_{PV}^{out} = P_{max} \times \Delta Time \quad (4)$$

其中， E_{PV}^{out} 為太陽電池總輸出電能 (Wh)， P_{max} 為太陽電池最大功率 (W)， $\Delta Time$ 為曝曬時間 (h)

$$\eta_{PV} = \frac{P_{max}}{P_{sun} \times A_{PV}} = \frac{E_{PV}^{out}}{E_{PV}^{in}} \quad (5)$$

其中， η_{PV} 為太陽電池光電轉換效率 (%)， P_{max} 為太陽電池最大功率 (W)， P_{sun} 為太陽照度 (W/m^2)， A_{PV} 為太陽電池面積 (m^2)， E_{PV}^{out} 為太陽電池總輸出電能 (Wh)， E_{PV}^{in} 為太陽照射在太陽電池上方的總能量 (Wh)

由於本研究中太陽能電池佔比約 42%， $A_{PV} = 0.42 \times A_{PVT}$ ， $E_{PV}^{in} \approx 0.42 \times E_{Total}$

$$\eta_{device} = \frac{E_{water} + E_{PV}^{out}}{E_{Total}} \quad (6)$$

其中， η_{device} 為 PVT 裝置整體轉換效率 (%)， E_{water} 為水體吸收能量 (Wh)， E_{PV}^{out} 為太陽電池總輸出電能 (Wh)， E_{Total} 為 PVT 裝置取得之太陽能量 (Wh)

如前所述，本研究 PVT 裝置受光面積為 $0.3 m^2$ ，曝曬時間約 9 小時。在使用式 (1) 計算 E_{Total} 時，我們可以取 9 小時平均輻照度(圖6插圖)，或是直接將圖6插圖之太陽照度隨時間變化曲線進行面積積分取得 $P_{sun} \times \Delta Time$ 之乘積。如此可得出 E_{Total} 為 1217.2 Wh。而由式 (2) 可計算，當水量為 60 L、水溫上升 $11.8^\circ C$ 時，水體吸收之熱能 E_{water} 約為 823 Wh。再由式 (3) 則可估得 PVT 裝置熱轉換效率 $\eta_{thermal}$ 為 67.6%。此外，需特別說明本裝置總受光面積為 $0.3 m^2$ ，其中 $0.125 m^2$ 為太陽能電池覆蓋區域，面積佔比約 42%；此覆蓋比例將影響入射輻射在光電轉換與光熱轉換之分配，以及模組內部之熱傳路徑，進而影響整體熱轉換表現。

至於太陽電池之發電量評估，理想情況下可建置儲能與資料擷取系統，於太陽曝曬期間連續量測並累積輸出電能，以直接取得總發電量。然而受限於設備與資源，本研究改以太陽能分析儀進行量測，並由人工以 10 分鐘為間隔記錄太陽能電池之輸出參數 (電壓、電流與功率)。此處我們以第 190 分鐘之量測結果為例，其 I-V、I-P 曲線如圖 7 所示，橫軸為電流，紅色曲線為電壓，藍色曲線為功率 ($P=I \times V$)。圖中可觀察到開路電壓 (V_{oc}) 為 9.786V，短路電流 (I_{sc}) 為 2.099A；最大功率輸出點 (Maximum Power

Point, MPP) 則位於 $V_{\max} = 6.94\text{V}$ 、 $I_{\max} = 1.763\text{A}$ ，對應最大功率 $P_{\max} = 12.23\text{W}$ 。此時自然條件下的太陽照度為 710 W/m^2 ，因此可直接由式 (5) 得出此時間節點之瞬時太陽電池光電轉換效率 $\eta_{PV} = 13.7\%$ (以外側太陽照度為基準)。考量太陽電池上方尚有兩層強化玻璃與水層造成之透光損失，電池表面實際陽光照度將低於外側量測值；因此，上述瞬時效率仍屬合理範圍且具競爭力。

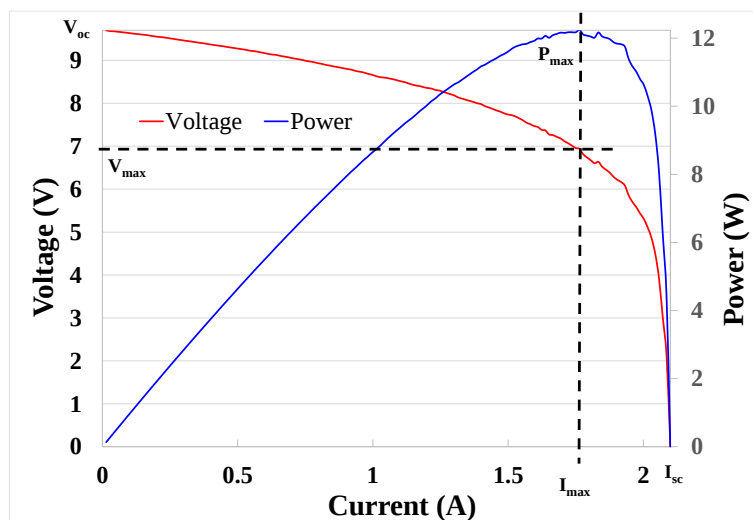


圖7 PVT裝置於太陽曝曬下，太陽電池輸出之 I-V、I-P 曲線

接著，再計算太陽能電池所輸出的總能量。以第 190 分鐘時間節點之最大輸出功率 $P_{\max} = 12.23\text{W}$ 為例，將每 10 分鐘視為一固定區間，並假設該區間內輸出功率保持穩定，可由式 (4) 得出電能輸出約 $\sim 2.04\text{ Wh}$ 。進一步將各量測時間點所對應之 10 分鐘區間電能輸出加總，即可得出太陽能電池於整段量測期間之總輸出電能 $E_{PV}^{\text{out}} = 62.08\text{ Wh}$ 。由式 (5)，則可計算出整體平均太陽光電轉換效率約為 5.1% 。本研究於第 190 分鐘 (太陽輻射照度相對較高之時段) 估算之瞬時光電轉換效率約為 13.7% ，然而整體平均太陽光電轉換效率僅 5.1% ，明顯低於瞬時效率。第 190 分鐘為本次量測期間太陽輻射照度較高之時段，使該時間點之輸出功率相對較大。若將全時段資料納入計算整體平均光電轉換效率，因照度隨時間波動且多數時段低於 710 W/m^2 (圖 6 插圖)，整體平均光電轉換效率將低於單一時間點之估算值。

已得出 E_{Total} 為 1217.2 Wh ， E_{water} 為 823 Wh ， E_{PV}^{out} 為 62.08 Wh ，則可由式 (6) 估算 PVT 裝置整體轉換效率 $\eta_{\text{device}} = 72.7\%$ ，與既有文獻結果相當 [11–12]。本研究開發的 PVT 系統除可由太陽能電池直接產生電能外，CNC 膜層可吸收太陽輻射轉為熱能；而太陽電池產生的廢熱也可經由流水層加以利用，並降低電池溫度避免因過熱導致的輸出衰減，改善整體系統穩定性。也就是說，PVT 為「熱能 + 電能」之綜合能量運用，即使在太陽照度波動或電效率受溫度等因素影響而下降的情況下，仍能有優異的總能量利用率，使 PVT 裝置維持在具競爭力的水準。然而，本研究所建置之 PVT 裝置整體能量轉換效率仍有進一步提升之空間。未來可針對 CNC 膜層厚度、太陽電池面積佔比、以及裝置有效受光面積等參數進行系統性分析與最佳化設計，以提升熱能與電能之輸出效益。

肆、結論

本研究中，先行將奈米碳球與 EVA 混合後製備 CNC 集熱膜層；並分析不同厚度膜層的結構與光學特性。XRD 可觀察到 EVA 結晶相關訊號 (21.5° 與 23.4°)，與石墨相關訊號 (約 29° 與 43°)，證實膜層中同時存在 EVA 結晶結構與碳材料之結晶特徵；然而較厚之 B、C 試片，其石墨 (002) 繞射峰強度降低，這顯示膜厚增加時可能伴隨 CNC 於厚度方向之分佈不均或成分梯度。拉曼光譜進一步觀察到

碳材料特有之 D band (1370 cm^{-1}) 與 G band (1535 cm^{-1})，且 I_D/I_G 隨膜厚增加而增長，也就是說較厚 CNC 膜層在近表面處碳具有較高的缺陷/邊界比例，並可能伴隨非晶結構增加；此結果亦與 XRD 所見石墨 (002) 峰減弱相互一致。推測膜厚增加會導致成膜/固化時間拉長，使較大且堆疊較完整的 CNC 碳團聚體較易沉降至底層，而近表面相對以較小、較分散之顆粒為主，因此在表面量測條件下石墨 (002) 峰降低；同時，小顆粒邊緣比例較高，使 D band 相對增強，導致 I_D/I_G 呈上升趨勢。FTIR 亦呈現 EVA 典型官能基吸收峰，綜合證實 CNC/EVA 複合膜之組成與結構特性。CNC 膜於 $400\text{--}1100\text{ nm}$ 範圍內的平均吸收率隨膜厚增加而顯著提升，當膜厚達 0.9 mm 以上即可獲得較佳吸收表現 (光吸收率 $>70\%$)；後續以光吸收最佳之 C 試片 (2.5 mm) 作為 PVT 光熱效益實測之吸熱層，以優先評估「最佳吸收膜厚條件」對 PVT 系統輸出的影響。系統驗證方面，PVT 裝置於自然日照下進行約 9 小時戶外測試 (受光面積約 0.3 m^2 、儲水量 60 L)，儲水溫度由 32.1°C 上升至約 43.9°C ，溫升約 11.8°C ；同時可觀察因雲層遮蔽造成之輻照度短暫下降，確實會影響升溫速率。量測期間入射太陽光照射到裝置比面的總能量 E_{Total} 為 1217.2 Wh ，水體吸收之熱能 E_{water} 約為 823 Wh ，可得出 PVT 裝置熱轉換效率 η_{thermal} 為 67.6% 。發電評估方面，第 190 分鐘估算之瞬時光電轉換效率約為 13.7% 。整段量測期間之太陽能電池總輸出電能為 $E_{\text{PV}}^{\text{out}} = 62.08\text{ Wh}$ ，可計算出整體平均太陽光電轉換效率約為 5.1% 。整體而言，所製造的 PVT 裝置，在太陽光提供總體能量 1217.2 Wh 時，供給水流 823 Wh ，太陽能電池則輸出電能 62.08 Wh ，PVT 裝置整體轉換效率為 72.7% 。本研究成功以奈米碳球開發 PVT 系統，同時產生電能與熱能，即使在日照波動或電效率受溫度影響下降時，仍能維持較高的總能量利用率。未來可針對 CNC 膜厚、太陽電池面積佔比與有效受光面積等參數進行系統化分析與最佳化，以提升熱、電輸出效益。

參考文獻

- [1] C. Wu *et al.*, "Highly efficient perovskite solar cells based on symmetric hole transport material constructed with indaceno[1,2-b:5,6-b']dithiophene core building block," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 43, pp. 98–103, 2020.
- [2] A. Mallik and M. Z. Hasan, "PV/T systems for renewable energy storage: A review," *World Scientific News*, vol. 96, pp. 83–95, 2018.
- [3] J. Britt and C. Ferekides, "Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency," *Applied Physics Letters*, vol. 62, pp. 2851–2852, 1993.
- [4] I. Repins *et al.*, "19.9%-efficient ZnO/CdS/CuInGaSe₂ solar cell with 81.2% fill factor," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 16, pp. 235–239, 2008.
- [5] Z. H. Wang *et al.*, "Photo-thermal performance evaluation on MWCNTs-dispersed microencapsulated PCM slurries for direct absorption solar collectors," *Journal of Energy Storage*, vol. 26, p. 100793, 2019.
- [6] H. Jia *et al.*, "Mathematical and experimental analysis on solar thermal energy harvesting performance of the textile-based solar thermal energy collector," *Renewable Energy*, vol. 129, pp. 553–560, 2018.
- [7] K.-M. Chung, C.-C. Chen, and K.-C. Chang, "Effect of diffuse solar radiation on the thermal performance of solar collectors," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 12, pp. 759–764, 2018.
- [8] C. Maurer, C. Cappel, and T. E. Kuhn, "Progress in building-integrated solar thermal systems," *Solar Energy*, vol. 154, pp. 158–186, 2017.
- [9] M. Sangeetha *et al.*, "Progress of MWCNT, Al₂O₃, and CuO with water in enhancing the photovoltaic thermal system," *International Journal of Energy Research*, vol. 44, pp. 1–12, 2019.

- [10] M. Wolf, "Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences," *Energy Conversion*, vol. 16, pp. 79–90, 1976.
- [11] F. A. Radhi *et al.*, "Experimental analysis of a photovoltaic thermal collector utilizing a novel spring insert in a micro-fin absorber tube with twisted tape, nanofluid, and nanophase change material integration," *Applied Thermal Engineering*, vol. 269, p. 126128, 2025.
- [12] R. K. Rajamony *et al.*, "Heat transfer and energy performance analysis of photovoltaic thermal system using functionalized carbon nanotubes enhanced phase change material," *Applied Thermal Engineering*, vol. 243, p. 122544, 2024.
- [13] H. A. Kazem *et al.*, "A systematic review of photovoltaic/thermal applications in heat pump systems," *Solar Energy*, vol. 269, p. 112299, 2024.
- [14] R. A. Rachmanto *et al.*, "Enhancing the efficiency of finned photovoltaic thermal collectors using Al₂O₃, CuO, and TiO₂ nanofluids: A comprehensive study on thermal and electrical performance optimization," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 43, pp. 1045–1056, 2025.
- [15] Y. Xie, Q. Huang, and B. Huang, "Preparation of high purity carbon nanospheres by the chemical reaction of calcium carbide and oxalic acid," *Carbon*, vol. 47, pp. 2292–2295, 2009.
- [16] Y. Jeng *et al.*, "Tribological properties of carbon nanocapsule particles as lubricant additive," *ASME Journal of Tribology*, vol. 136, p. 041801, 2014.
- [17] I. Ray, D. Khastgir, and B. K. Samantaray, "An X-ray diffraction study on the microstructure of blend of low-density polyethylene (LDPE) and ethylene vinyl acetate (EVA) copolymer," *Journal of Polymer Engineering*, vol. 13, pp. 29–48, 1994.
- [18] Z. Mohammed, S. Jeelani, and V. Rangari, "Effective reinforcement of engineered sustainable biochar carbon for 3D printed polypropylene biocomposites," *Composites Part C: Open Access*, vol. 7, p. 100221, 2022.
- [19] M. Glotin and M. Mandelkern, "A Raman spectroscopic study of the morphological structure of polyethylenes," *Colloid and Polymer Science*, vol. 260, pp. 182–192, 1982.
- [20] A. C. Ferrari and J. Robertson, "Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon," *Physical Review B*, vol. 61, pp. 14095–14107, 2000.
- [21] Z. Jiang *et al.*, "Evaluation of physical, rheological, and structural properties of vulcanized EVA/SBS modified bitumen," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 134, p. 44850, 2017.
- [22] B. Manoj, A. G. Kunjomana, and K. A. Chandrasekharan, "Chemical leaching of low-rank coal and its characterization using SEM/EDAX and FTIR," *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 8, pp. 821–832, 2009.