

LED 光源之再生能源應用與發展

Application and Development of LED Lighting in Renewable Energy

周榮源

Rong-Yuan Jou

隨著化石能源儲量的日益減少及環境污染的不斷惡化，尋找清潔的可再生能源來替代現有的化石能源，是人類急需解決的一項緊要任務。只有當再生能源所產生的廢棄物能被處理時，我們才真的能夠永續生存。氫氣是替代石化燃料的最好選擇，由於氫氣燃燒後的產物是水，不會造成環境的負荷，可謂是最乾淨的燃料。在所有已知生物系統中，光合菌是最有效率之氫氣生產者，其亦可將二氧化碳當做培養之碳源。因此，以光合菌之最佳培養條件為基礎下，設計具長壽命、高光電轉換效率而節能省電、無紫外線、不易損壞的固態元件 LED 燈源之光生物反應器，利用這些生物特性及物理性質，來進行益生菌培養條件之優化，不僅可以保護生態環境，亦可達到改善全球暖化現象之目的⁽¹¹⁾。本文主要是以農業生物科技與能源科技中：(1) 光合菌產氫、(2) 植物工廠、(3) 微生物燃料電池等技術應用於解決能源問題或開發再生能源為主要研究範圍，闡述在這三大技術中 LED 光源與光機交互作用研究之應用與重要性，以及在技術發展與設備商品化過程中常遇到的問題。為落實各項技術之可行性，本文以機械設計工程角度來思考 LED 光源在能源上之應用，並積極尋求與產業進行密切產學合作，朝向自主設備技術建立與開發目標努力。

With the worsening of the dwindling reserves of fossil energy and environmental pollution, looking for clean, renewable energy sources to replace existing fossil fuel, is a crucial task for the human need to be resolved. Only when the waste generated by the renewable energy can be processed before we can really live sustainably. Hydrogen is the best alternative to fossil fuels, and will not cause the load on the environment, can be described as the cleanest fuel because water is the only by-product of hydrogen combustion. In all known biological systems, photosynthetic bacteria are the most efficient producers of hydrogen, and also carbon dioxide can be carbon sources for culture. So based on the best culture conditions of the photosynthetic bacteria, photobioreactor designs using LED light source with features of long life, high conversion efficiency and energy saving, no UV, difficult to damage of solid state components, using these biological characteristics and physical properties to the optimization of the conditions of the probiotic culture, not only to protect the ecological environment, but also to achieve the purpose to improve the global warming phenomenon⁽¹¹⁾. In this paper, topics of photosynthetic bacterial hydrogen production, plant factory, and microbial fuel cell which are technologies related to agricultural biotechnology and energy technology are addressed to illustrate how to solve the energy problem or the development of renewable energy in these categories. Moreover, the main scope of the study on the application and importance of the interaction studies in these three technologies LED light source with light machine; can be divided into two major themes: First, the measurement of liquid light intensity; environment for the growth of photosynthetic photon flux density (PPFD) measurements. In addition, because in the progress of technology development and commercialization of equipment, the following difficulties are often encountered: the scale-up of production processing; generated heat removing in process; reactor (tank) optimal design; and environmental monitoring and automation, etc. To assess the technical feasibility,

viewpoints of mechanical design engineering are proposed to be the considerations of the LED light source in the energy applications, and actively seek close industry-university cooperation with the industry, to achieve the final goal of establishing domestic equipment technology and development capability.

一、緒論

再生能源指的是來源無所匱乏的能源，要讓人類能在球上永續發展，再生能源是必須的，然而僅使用再生能源並不保證能夠永續生存，這是因為再生能源會仍會產生污染或是製造廢棄物 (例如太陽電池中所使用的重金屬)，只有當再生能源所產生的廢棄物能被處理時我們才真的能夠永續生存。目前，人們所使用的再生能源技術包括太陽能、風能、地熱能、水力能、潮汐能、海洋熱能轉換、生質能⁽¹⁾。自然界本身擁有的碳循環系統可以吸收空氣中的二氧化碳，然後這些二氧化碳再被植物、土壤、海洋和其他自然過程給重新釋放出來如圖 1⁽²⁾。陸地、海洋和大氣是三個大碳庫 (carbon

pool)，陸地生態系統複雜充滿不確定性，因此陸地碳平衡成了重要的議題⁽³⁾。隨著化石能源儲量的日益減少及環境污染的不斷惡化，尋找清潔的可再生能源來替代現有的化石能源，是人類急需解決的一項緊要任務。

生物炭 (biochar) 的形成過程對減緩全球暖化是有益的。製造生物炭是一種固定二氧化碳可行的方式，不僅固化了樹木和作物內已吸收的二氧化碳，產物生物炭保存在土壤中，幾千年都不會發生變化，生產可再生能源的同時，還提高了土壤肥力，提高農作物產量。生物炭是在低氧環境下，透過熱裂解將木材、草、玉米稈或其他農作物廢物碳化而製成的。如圖 2 所示，生物炭的孔洞結構十分容易聚集營養物質和有益微生物，使土壤變得肥

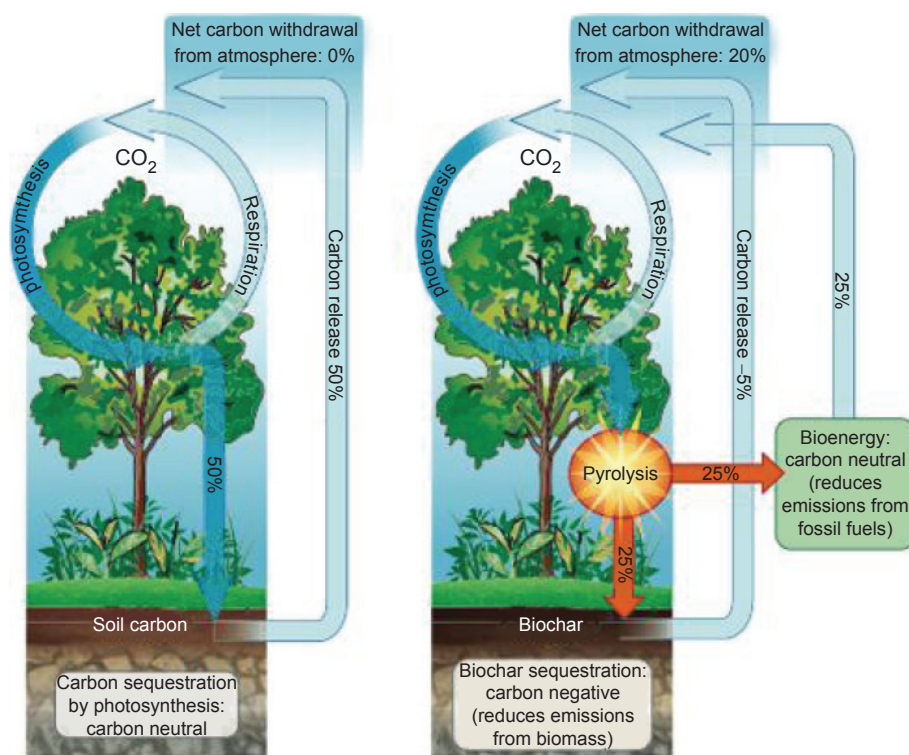


圖 1. CO₂ 循環系統⁽²⁾。

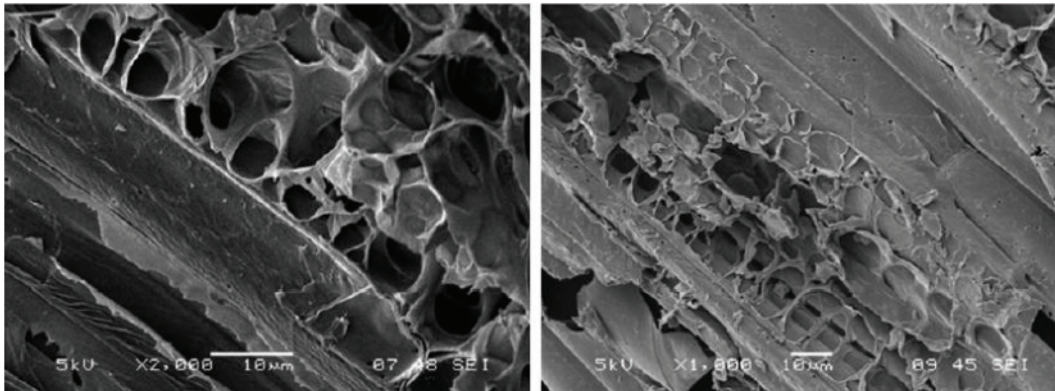


圖 2.
350 °C 與 700 °C
製成的生物炭的孔
隙⁽⁴⁾。

沃，利於植物生長，在提高土壤肥力的同時讓肥料有效性更具持續性。將碳固定在生物群內，而非讓它排放到空氣中。且生物炭除了具備的土壤改良功能外，其生產過程中產生的一些副產品更是具有很高的經濟價值。生產過程中生物體大約 1/3 轉化為生物炭，1/3 轉化為可用於燃燒發電的合成氣，還有 1/3 則形成原油替代品生質油。生物炭的這些特性，使我們能夠同時解決氣候變化危機、能源危機，以及食品和水資源危機⁽⁴⁾。

生物質熱解 (pyrolysis of biomass) 是指生物質在沒有氧化劑 (空氣、氧氣、水蒸氣等) 存在或只提供有限氧的條件下加熱到逾 500 °C，通過熱化學反應將生物質大分子物質 (木質素、纖維素和半纖維素) 分解成較小分子的燃料物質 (固態炭、可燃氣、生物油) 的熱化學轉化技術方法。生物質熱解的燃料能源轉化率可達 95.5%，將生物質能量最大限度的轉化為能源產品，物盡其用，而熱解也是燃燒和氣化必不可少的初始階段⁽⁵⁾。熱解反應基本過程可以分為乾燥階段、預熱解階段、固體分解階段和煨燒階段。從化學反應的角度對其進行分析，生物質在熱解過程中發生了複雜的熱化學反應，包括分子鍵斷裂、異構化和小分子聚合等反應。木材、林業廢棄物和農作物廢棄物等的主要成分是纖維素、半纖維素和木質素。從物質遷移、能量傳遞的角度對其進行分析，在生物質熱解過程中，熱量首先傳遞到顆粒表面，再由表面傳到顆粒內部。熱解過程由外至內逐層進行，生物質顆粒被加熱的成分迅速裂解成木炭和揮發分。其中，揮發分由可凝氣體和不可凝氣體組成，可凝氣體經過快速凝結可以得到生物油。一次裂解反應生成生物質

炭、一次生物油和不可凝氣體。在多孔隙生物質顆粒內部的揮發分將進一步裂解，形成不可凝氣體和熱穩定的二次生物油。同時，當揮發分氣體離開生物顆粒時，還將穿越周圍的氣相組分，在這裡進一步裂化分解，稱為二次裂解反應。生物質熱解過程最終形成生物油、不可凝氣體和生物質⁽⁵⁾。

利用廢棄生質原料生產氫氣的整合系統概念是利用含澱粉或纖維素的農業廢棄物，先經過微生物或酵素水解系統把複雜的有機質水解成小分子糖類，再進入暗發酵系統，把糖類轉變成有機酸與醇類，同時產生氫氣。最後，由光發酵系統把有機酸轉化成二氧化碳，並產生氫氣。產生的氫氣經過簡單的純化裝置 (如以氫氧化鈉吸收二氧化碳) 提高氫氣純度，並利用於氫氣燃料電池產生電力。由於暗發酵系統產生的有機酸可被一些厭氧微生物利用，因此可產生額外的電流，應用微生物燃料電池系統可產生額外的電力或氫氣 (須施加外部電壓)。整個整合系統產生的二氧化碳，可藉由藻類或微藻類系統吸收以增加藻體，並可應用於生產其他生質能源 (如生質柴油、生質酒精、燃料油等)、健康食物或做為再生資源⁽⁶⁾。

本文主要是以農業生物科技與能源科技中：(1) 光合菌產氫、(2) 植物工廠、(3) 微生物燃料電池等技術應用於解決能源問題或開發再生能源為主要研究範圍，闡述在這三大技術中 LED 光源與光機交互作用研究之應用與重要性；主要可分為兩大主題：(1) 液體中光強度 (light intensity) 量測方法、(2) 生長環境中光合量子通量密度 (photosynthetic photon flux density, PPFD) 量測方法。此外，在技術發展與設備商品化過程中常遇

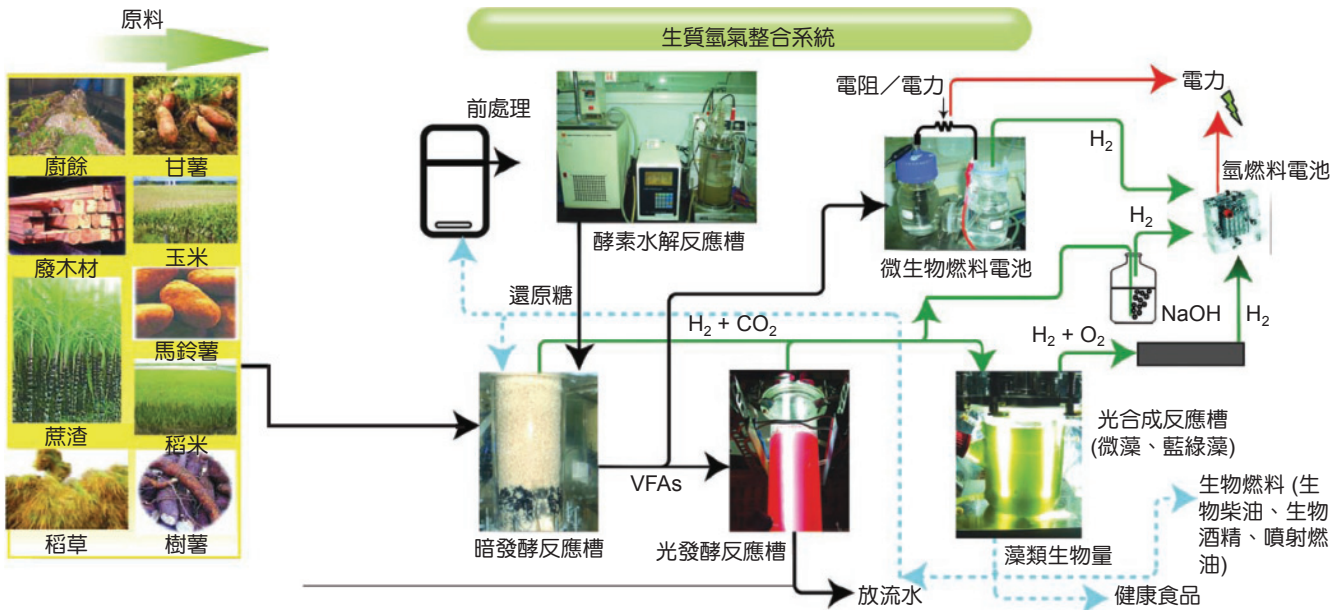


圖 3. 利用廢棄生質原料生產氫氣的整合系統概念圖⁽⁶⁾。

到以下問題：(1) 製程放大生產、(2) 產熱移除、(3) 反應 (器) 槽最佳化設計、(4) 環境監控與自動化等困難。為落實各項技術之可行性，本文以機械設計工程角度來思考 LED 光源在能源上之應用，並積極尋求與產業進行密切產學合作，朝向自主設備技術建立與開發目標努力。

二、LED 光源之再生能源應用

本文主要介紹 LED 光源在三種再生能源之應用，包括：(1) 光合菌產氫與光反應器、(2) 植物工廠、(3) 微生物燃料電池等。以下將分別針對上述三項技術之現況、應用與未來發展作回顧。

1. 光合菌產氫與光反應器

海洋面積約占地球面積 70%，是人類賴以生存和發展的資源寶庫。海洋中生存著種類多、分布廣的海洋藻類，其總量佔據海洋植物的 90%。海藻 (algae or seaweeds) 屬低等隱花植物，根據藻類學家 Dawson 的分類，海洋中藻類品種達 15000 餘種。微藻 (microalgae) 一般是指那些在顯微鏡下才能辨別形態的微小藻類，常見的比如小球藻、螺旋藻、鹽藻、紫球藻與與魚腥藻等。根據微藻的生長

環境可分為水生微藻、陸生微藻和氣生微藻三種生態類群，水生微藻又有淡水生和海水生之分。微藻適應性強，易於在實驗室環境下培養，因此首先在微藻中發現了一系列具有抗炎、抗菌、抗腫瘤、防心血管疾病活性的物質。上世紀 80 年代以來，隨著細胞工程的進展，大型海藻開始吸引人們的關注。大型海藻是生長在潮間帶或潮下帶岩礁上、具有假根、可固著生長的多細胞藻類，有 250 屬，迄今被人類廣為利用的大型海藻 (macroalgae) 主要有紅藻門 (如紫菜、石花菜、江籬等)，褐藻門 (如海帶、裙帶菜、馬尾藻等)，綠藻門 (如石莖、礁膜、松藻等) 三大類和少量藍藻門，其中有經濟價值的海藻約有 100 餘種。基於「急遽惡化的全球性溫室效應」、「高漲的國際原油價格」及「大量糧食作物用於生質能源開發導致糧價逐步高升」等多項問題，讓利用微藻培養用於二氧化碳減量與產製生質能源 (biofuel) 的研究成為全球生物能源注目焦點⁽⁷⁾。2007 年，美國能源部 NREL 重啟藻類生質能源的研究工作，其構想是在「發電廠」與「污水處理廠」周圍設置藻類養殖池或培養的光生物反應器 (photobioreactor, PBR)，將工廠排放出的二氧化碳與可再利用水源導入池中或反應器中，不僅可以減少工業界的二氧化碳排放量且可再利用水資源

(甚至於是污水處理)，又可透過藻類的光合作用將之轉化成生物質 (biomass)，進而再轉化成生質能源，以達到符合環保、減碳與水資源循環再利用的目的。同樣構想也可利用在重工業工廠、畜牧場、垃圾掩埋場、焚化爐所排放之二氧化碳。水資源的再利用也可用於畜牧場與工業園區等污水處理廠(8)。

氫氣是替代石化燃料的最好選擇，由於氫氣燃燒後的產物是水，不會造成環境的負荷，可謂是最乾淨的燃料。因此，氫氣被科學家認為是取代石油世紀的主要能源。氫氣產生的方法主要可分為三大類，分別為熱化學法 (thermochemical method)、電化學法 (electrochemical method) 及生物法 (biological method)。生物法產氫係指不同微生物參與生物產氫系統，如藻類和光合細菌在內的光合生物或兼性厭氧和專性厭氧的醱酵產氫細菌。目前生物法產氫技術主要可分成三類：(1) 暗醱酵法 (dark fermentation)、(2) 光醱酵法 (photo fermentation)、(3) 光合作用 (photosynthesis)。其中生物產氫程序只需在常溫、常壓下進行，且不需額外提供大量能源，將含有再生能源的資源回收利用，使資源再利用而不會形成浪費，也可以減少環境的負擔，而且開闢一條擁有無窮利用性且可恢復能量來源的道路 (Das and Veziroglu, 2001)。生物產氫的程序詳如圖 4⁽⁹⁾ 所示，包含光合作用、光醱酵

與暗醱酵三種，其中光合作用產氫乃微細藻類藉由吸收太陽光之能量，於厭氧 (anaerobic) 條件下進行水之生物光解作用 (biophotolysis)，在氣相產生氫氣與氧氣。光醱酵與暗醱酵以有機質為電子提供者，藉由需光源 (光合細菌) 或不需光源細菌 (厭氧細菌)，將有機質分解成更小之分子，並將系統伴隨產生之電子分別經由固氮酵素 (nitrogenase) 與產氫酵素 (hydrogenase) 的作用下將電子傳送給水中之電子接受者 (electron acceptor) H^+ 而產生氫氣。另外，所產生之氫氣也可利用燃料電池進行發電 (Levin *et al.*, 2004)，有助於推升「氫經濟時代」的發展 (Claassen and de Vrije, 2005)⁽¹⁰⁾。

光合菌 (photosynthetic bacteria, PSB) 是地球上最早出現具有原始光合成體系的原核生物，以光作為能源，並以二氧化碳或有機物質作為碳源，而能營養繁殖的微生物。光合菌廣泛分布於自然界中，在有水分的環境下，只要有微量的光存在，不論其環境嗜氧性或厭氧性，均可生存繁殖，是一種生命力極強的菌體，並且有多種異養功能 (heterotrophic function)、固氮、脫氮、固碳、硫化物氧化等)，另外光合菌可以降低有機質含量 (包含 BOD、COD) 去除硫化氫，並且可以分解大氣中的二氧化碳，可有改善全球暖化現象，故光合菌極具產業開發之價值⁽¹¹⁾。在所有已知之生物系統中，光合菌是最有效率之氫氣生產者，其亦可將二氧化碳當做培養

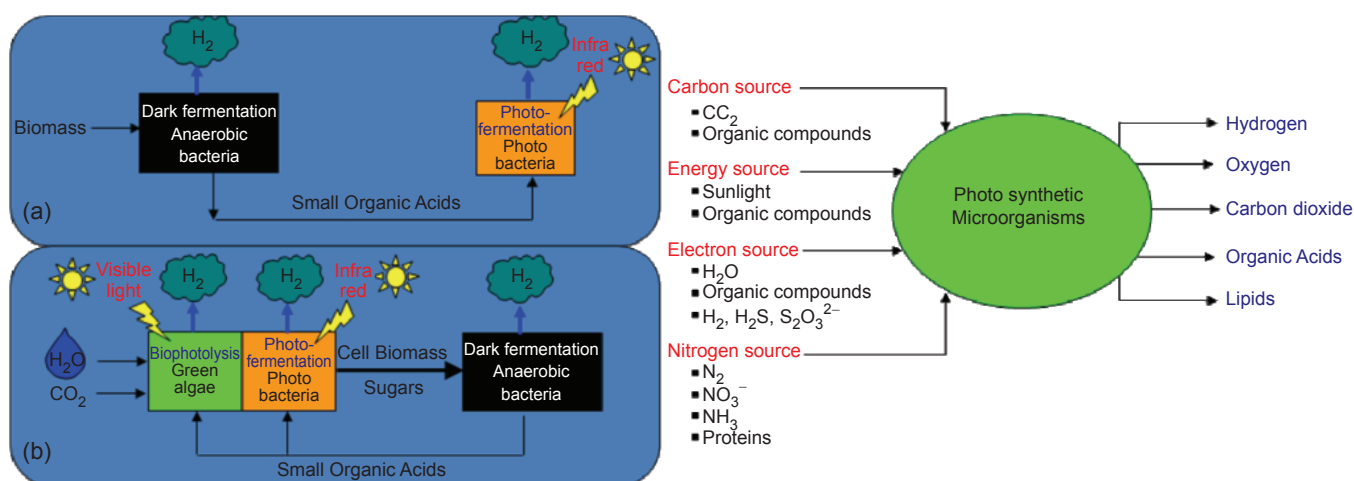


圖 4. 三種生物產氫的程序：光合作用 (photosynthesis)、光醱酵 (photo fermentation) 與暗醱酵 (dark fermentation)⁽⁹⁾。

之碳源，因此以發展光合菌之最佳培養條件之基礎下，設計具長壽命、高光電轉換效率而節能省電、無紫外線、不易損壞的固態元件本質的 LED 燈源之光源生物反應器，利用這些生物特性及物理性質，來進行益生菌培養條件之優化，不僅可以保護生態環境，亦可達到改善全球暖化現象之目的⁽¹¹⁾。傳統培養光合菌的方式為多採用白熾燈或自然太陽光照，其中白熾燈長時間培養光合菌耗電量大，而自然太陽光照會因天氣變化而使培養條件不穩定，因這兩種培養方式應用於培養光合菌並不理想，因此可將其光源改成 LED 燈，其優勢為長壽命、高光電轉換效率而節能省電、無紫外線、不易損壞的固態元件本質、發光體小而具高設計與應用彈性、瞬間開關反應等特性，可以提供連續性的光源與穩定的培養條件，如此一來不僅可以降低生產成本，且可以符合目前全球節能減碳之發展。近年來，隨著白光 LED 技術發展迅速，僅從發光效率這一指標來看，已經達到了節能燈的兩倍，遠遠超過了白熾燈和鹵素燈。

培養藻類的反應器需要能提供充足的光線，因此此類反應器稱為光生物反應器。依反應器的外形與設計原理，目前所發展的主要微藻光生物反應器歸納成管道光生物反應器 (tubular photobioreactor)、平板式光生物反應器 (flat plate photobioreactor) 及圓柱型光生物反應器 (column photobioreactor)。在管道光生物反應器中又分成多種形式，例如直徑小而平行排列的管道系統、螺旋管式或繞圈管式管道系統；圓柱型光生物反應器則可區分成垂直式 (有些並非呈 90° 角的垂直地面) 與臥式 (即大直徑橫臥平行於地面的圓柱形反應器) 兩種⁽⁸⁾。光合生物反應器的設計和應用對將來工業化產氫製程有非常密切而重要的關係。光能量是光合細菌生長和產氫的能量來源，是光合細菌生存的基本前提。光合細菌依靠自身光合色素來捕獲光能，並進行將光能轉化為化學能的光合磷酸化過程。光照形式、光源類型以及光照強度對光合細菌產氫體系有著顯著影響。目前關於光照條件的研究主要集中在以下幾方面⁽¹²⁾：

(1) 光合菌在不同光照強度下的生長和產氫特性：不同光合細菌菌種對光照強度的要求不同，但

是眾多學者研究表明過高和過低的光照強度並不利於產氫。

- (2) 光合菌在黑暗和光照條件交替進行下的生長和產氫特性：Wakayama 將光暗條件按 30 分鐘進行交替轉換獲得了 22 L/m² d 的高產氫量，這時同條件下每 12 小時交替轉換的 2 倍。
- (3) 光合菌在自然光照與人工光照下條件交替進行下的生長和產氫特性：Pietro Carlozzi 設置自然光和人工控光對光照和黑暗交替循環下對產氫特性進行對比試驗，結果顯示自然交替循環狀態下最大光轉化效率是人工控制最大光轉化效率的 1.32 倍。說明自然形式光源是光合菌生長和產氫的最佳光源形式。
- (4) 光源分布方式的研究：按照光源分布方式分為內置光源、外置光源和光源內外結合分布。

以下針對幾種主要光合反應器之設計原理與應用及以計算流體動力學 (CFD) 進行模擬分析上的問題^(13, 14)，做一簡單說明：

(1) 氣舉式光生物反應器 (Air-Lift bioreactor)

氣舉式反應槽最早之應用主要是在大規模微生物製程上，單細胞蛋白質生產即是。在過去幾年，氣舉式反應槽已在許多不同的領域中應用，尤其在微生物的生長過程中，有助於避免細胞損壞。若以傳統的葉片攪拌式反應槽處理，除了葉片形式、液體粘度、溫度以及生物特性等皆需要大量的動力來源外，又為了防止槽內流體打滑，降低混合效果等都需在槽內設置大量的擋板以增加液體阻力以達到混合需求，但是這一些的裝置都會對細胞產生極大的傷害以及物料殘存清洗不易之問題。反觀氣舉式反應槽在對生物製程上有著限制較少的優點，它在氣、液、固三相中有著極為簡單的流動特性，是傳統反應槽所無法取代的。部分已在醱酵工廠和廢水處理廠中應用。這類反應器具有結構簡單、不易染菌、溶氧效率高及能耗低等優點，目前世界上最大型的通氣發酵槽即是採用氣舉環流式，其體積可高達 3000 噸⁽¹⁵⁾。

氣舉式反應槽有多種類型，常見的有氣舉環流式、鼓泡式、氣體噴射式等均是，其工作原理是把無菌空氣通過噴嘴或噴氣孔噴射進入發酵液中，通

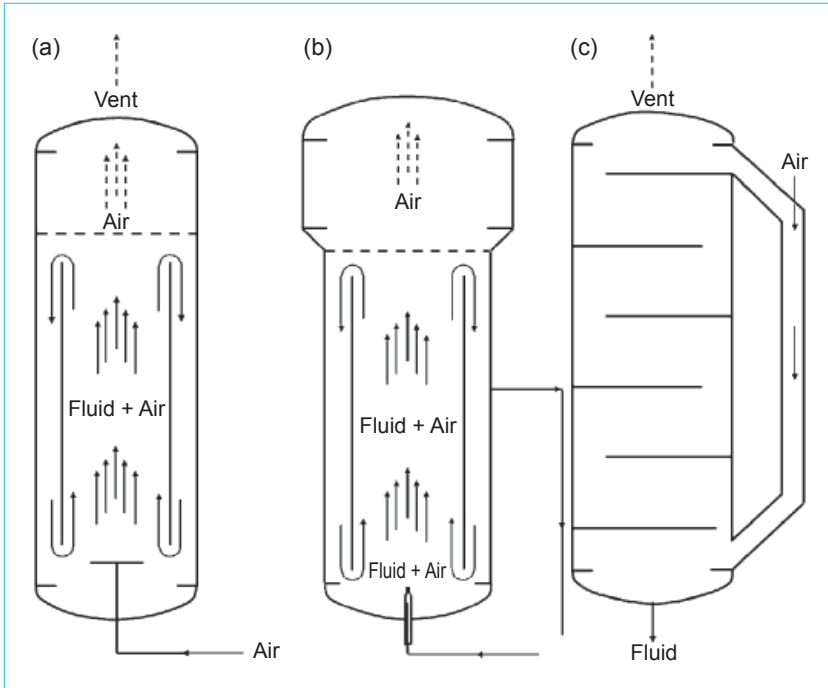


圖 5. (a) 氣舉式內環流發酵槽、(b) 氣液雙噴射氣舉環流發酵槽、(c) 多層分氣片的塔式氣舉發酵槽⁽¹⁵⁾。

過氣液混合物的湍流作用，而使空氣泡分割細碎，同時由於形成的氣液混合物密度降低因而向上移動，而氣體含率小的發酵液則下沉，形成循環流動呈現混合與溶氧傳送。在生物工業大量應用的氣舉式內環流發酵槽、氣液雙噴射氣舉環流發酵槽設有多層分氣片的塔式氣舉發酵槽的結構，詳如圖 5 所示，過濾空氣都皆採用高壓高流量泵噴射進入。因氣舉環流反應器內沒有攪拌器，且有定向循環流動，故具有甚多優點：(1) 反應溶液分布均勻、(2) 較優之溶氧速率和溶氧效率、(3) 對生物細胞損傷小、(4) 傳熱性優等⁽¹⁵⁾。

影響氣舉環流式發酵槽特性的主要結構及操作參數包含細長比、導流管高度與反應器高度之比、導流管直徑(內徑 I. D) 與反應器直徑比、導流管頂部和底部與上端板和下端板的距離、通氣速率、循環時間、平均循環雷諾數、平均循環速度等。文獻⁽¹⁶⁾針對氣泡塔反應器 (bubble column reactor) 之流場分類 (flow regimes) (圖 6 及圖 7)、含氣量關係式 (gas hold-up correlations) 及質傳係數之關係式 (mass transfer coefficient correlations) 做了詳細之回顧。

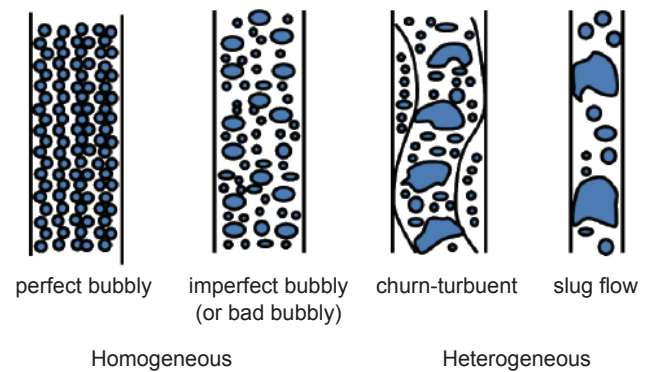


圖 6. Schematic of possible flow regimes in bubble columns⁽¹⁶⁾.

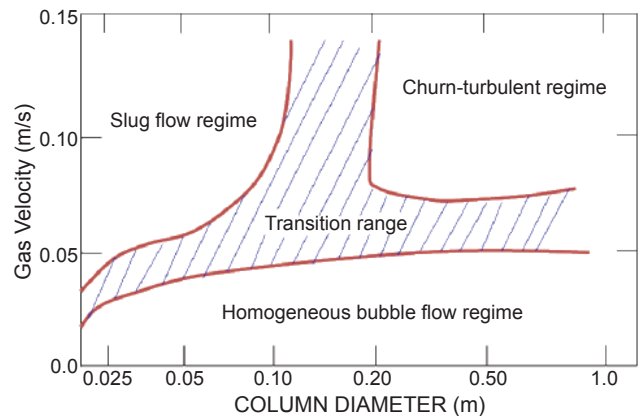


圖 7. Flow regime map for bubble columns⁽¹⁶⁾.

(2) 連續攪拌式反應器 (Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR)

攪拌式醱酵槽乃是利用機械攪拌方式以提高醱酵槽之質傳效能，增加醱酵液中的溶氧量，去營造出一個適合好氣性微生物生長的環境。傳統的攪拌槽是一個由攪拌翼組及數片擋板所構成的攪拌系統，所需的空氣通常由槽底之氣體分散器 (sparger) 通入槽中，藉由攪拌翼的旋轉與擋板的配合使氣泡及流體均勻分布於醱酵槽中，故其具有高氣液質傳能力及流體混合佳等特性。此外，為保溫或去除醱酵熱通常必須在槽體外裝設套層 (jacket)。必要時則在槽內裝設冷卻管 (cooling coil)，並視發熱量之多寡來決定冷卻管的長度。而冷卻管除可冷卻醱酵液保持其系統恆溫之外，亦可做槽內醱酵液滅菌時通蒸氣之用。此類反應器獨特之處為反應物與產物分別連續地輸入與輸出，在混均勻混合情況下，槽內濃度與出流水濃度相等。CSTR 反應器之溫度控制優於其它反應器，因反應器內物料有效攪拌可確保溫度均勻，並可將局部熱點消除。CSTR 的攪拌過成具有下列優點：(1) 可以微生物與廢水污泥 (或基質) 接觸良好，促進生化反應；(2) 防止浮渣生成；(3) 使反應生成物自液相轉到氣相而溢出，操作方便與製造費用較低廉；(4) 可使進料的物質與反應器內原有的反應物均勻混合，使反應器內濃度保持一定。基於以上優點，因此 CSTR 反應器廣泛應用於生物醱酵產氫程序上。CSTR 反應器應用在生物醱酵產氫上也具有一些缺點，如顆粒污泥不易形成、低水力停留時間 (HRT) 操作下 (< 4 小時) 容易發生菌體洗出之現象等，皆會影響生物產氫表現⁽¹⁰⁾。大部分之暗醱酵反應器都以 CSTR 為主，並以葡萄糖、蔗糖或是澱粉等為限量碳源進行生物產氫。然而 CSTR 在操作上有些缺點並不利於生物產氫。一般來說，CSTR 對環境之變化比較敏感 (如：pH、HRT)。同時，CSTR 操作在高進料速率下 (或低 HRT)，容易發生 Biomass 洗出之現象。這些缺點皆會造成操作的不穩定性及限制產氫的表現，因此如何在高進料速率下保持系統中之生物濃度，似乎就成為了增加產氫穩定及速率的關鍵。固定化方法已經成功的應用生物產氫上，可增加系統在高進料速率下的 Biomass 濃度與產氫穩定度。固

定化細胞可以促進顆粒菌的生成，這些顆粒菌的產生能夠大大的提升系統的產氫表現與 Biomass 濃度。圖 8 所示為 CSTR 系統範例⁽¹⁷⁾。

(3) 整合型反應器 (Solar-Energy-Excited Optical Fiber Photobioreactor)

文獻^(18, 19)開發一套新穎的光纖光生物反應器進行光醱酵產氫，如圖 9 所示。由於傳統的光纖材料屬於端點發光，該研究利用表面改質製備側光光纖，並將側光光纖插入光生物反應器作為內部光源，以促進光源效率與分布。在單一光源的測試，使用鹵素燈當作光源可以得到較佳的光合產氫效能，其總產氫速率以及氫氣產率分別為 8.68 mL/L/h 以及 1.09 mol H₂/mol HAc。此外，藉由適當的光源組合可提升光醱酵產氫效率，結合雙光源之結果顯示，結合內部光源 (OF-MH) 以及外部光源 (HL) 可將總產氫速率以及氫氣產率分別提升至 17.24 mL/L/h 以及 2.22 mol H₂/mol HAc。

2. 植物工廠 (Plant Factory)

植物工廠的概念最早是由日本提出來的。根據日本植物工廠學會的解釋，植物工廠是通過設施內高精度環境控制實現農作物周年連續生產的系統，即是利用電腦對植物生育的溫度、濕度、光照、二氧化碳濃度以及營養液等環境條件進行自動控制，

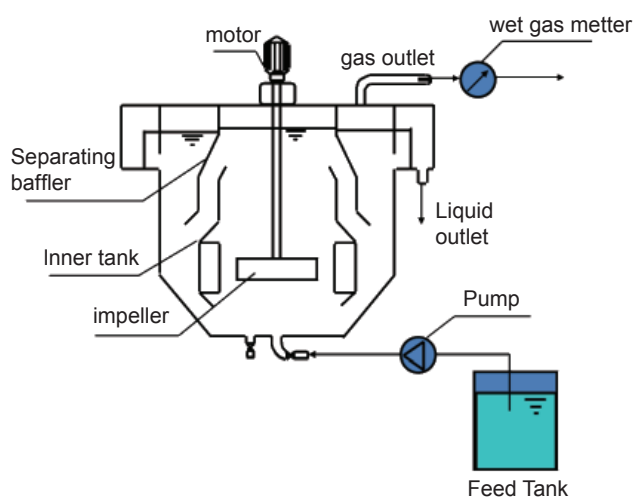


圖 8. Schematic diagram of the CSTR biohydrogen production system⁽¹⁷⁾.

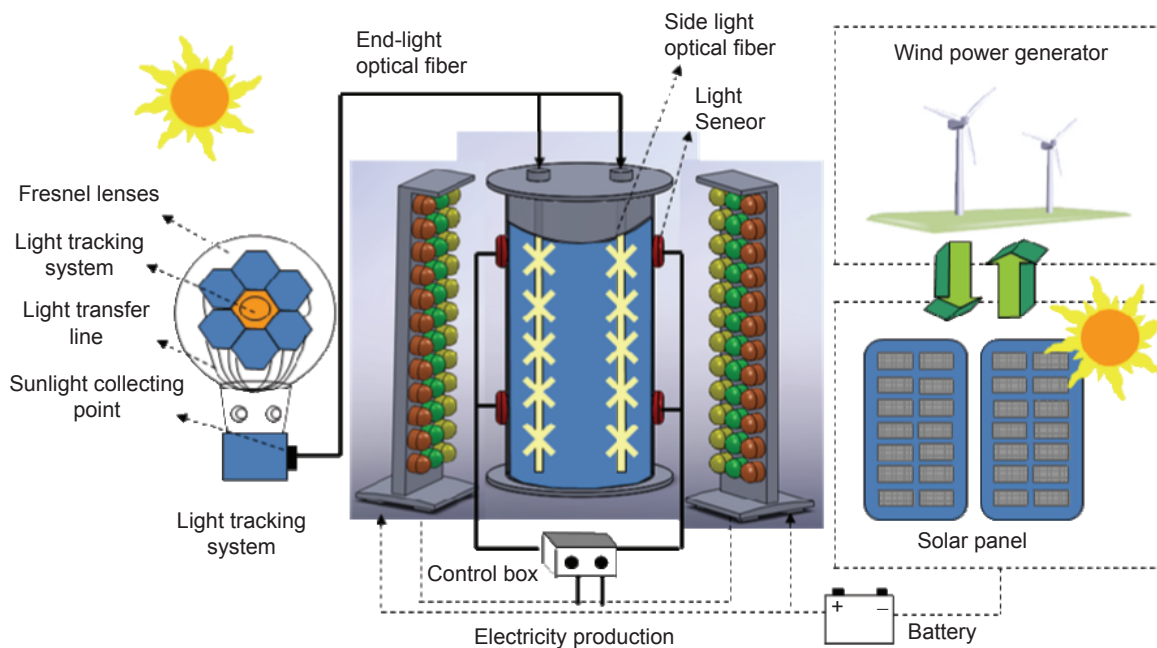


圖 9. Schematic description of the solar-energy-excited optical fiber photobioreactor system with an internal light source (optical fiber excited by sunlight collecting system) and a multi-LED light source using the electricity generated by a solar panel and wind power generator⁽¹⁹⁾.

使設施內植物生育不受或很少受自然條件制約的省力型生產。植物工廠生產的物件包括蔬菜、花卉、水果、藥材、食用菌以及一部分糧食作物等。植物工廠依託在設施園藝、建築工程、環境控制、材料科學、生物技術、資訊學和電腦（網路通訊、人工智慧、類比與控制）等學科的基礎上知識與技術密集的集約型農業生產方式、是現代生物技術、環境工程、機械傳動、自動化控制等高新技術綜合集成的產物。關於植物工廠的分類，因所持的角度不同，其劃分方式也各異。從建設規模上可分為大型（1000 m² 以上）、中型（300 至 1000 m²）、和小型（300 m² 以下）三種；從生產功能上可分為種苗植物工廠和商品菜（果、花）植物工廠；從其研究物件的層次上又可分為以研究植物體為主的植物工廠、以研究植物組織為主的組織培養植物工廠以及以研究植物細胞為主的細胞培養植物工廠。目前，比較習慣的分類方法是按照植物生長中最重要的條件之一——光能的利用方式不同來劃分，共有三種類型，即太陽光利用型、人工光利用型、太陽光和人工光並用型。其中狹義的植物工廠是指人工光利用型，而廣義的植物工廠則包括了這三種類型⁽²⁰⁾。

光是植物生長發育的重要環境因子，地球上植物發育所需的光源主要來自於太陽輻射，其光譜由無線電波，遠、中、近紅外線，可見光，紫外線（A、B、C），X 射線以及極短的宇宙射線等組成，是一個連續的光譜。由於植物對光具有選擇性吸收的特徵，其光合作用和自營轉化僅僅利用其中的一部分有效光。隨著科學技術的進步以及農業與生物產業的快速發展，植物對有效光的利用已經突破單純依靠太陽光的限制，人工光源代替或補充自然光源的不足已經成為環境控制農業的重要手段。LED 具有高光電轉換效率、使用直流電、體積小、高耐震、壽命長、波長固定與低發熱等優點，相較於目前普遍使用的螢光燈或高壓鈉燈而言具有：(1) 光量可調整、(2) 光質 (light quality, 如紅／藍光比例或紅／遠紅光比例等) 可調整、(3) 冷卻負荷低、(4) 可提高單位面積栽培量等優點^(21, 22)，因此對氣密性良好有環控的農業生產環境如太空農業，植物組織培養室或植物生長箱等是一種非常適合的人工光源。在太陽輻射電磁波中有三區段的輻射對植物生長發育有決定性的影響，除了可見光（380 至 780 nm）外，尚有紫外線（UV；100 至 380 nm）和

紅外線 (780 至 105 nm)。此主要是由於植物的三套受光系統所致，葉綠素 a、b 吸收紅光與藍光進行光合作用，類胡蘿蔔素吸收 450 nm 波長引起屈光性以及高能量光形態發生，光敏素吸收 660、730 nm 波長控制許多形態發生的反應。植物是唯一能夠把太陽光能量轉化為質量的生物，植物的光合作用是地球上一切生命的基礎。光合作用需要波長範圍在 400 至 700 nm 之間 (可見光部分) 的光，但是光對植物的影響除了提供光合作用所需之外，尚包括光週期的調節。另外，光質 (紅、藍光比例，紅、遠紅光比例等) 對植物的型態發生亦有決定性的影響^(21, 22)。

LED 光源在植物生長上的應用包括：(a) 光週期調控 (photoperiodism)、(b) 光合作用補光 (photosynthesis)、(c) 光質影響 (photomorphogenesis)。由於 LED 晶粒發光光譜可分為多種波段，且可藉由螢光粉調配而取得所需的波域，且 LED 可藉由電流控制得到所需光強度，因此以 LED 作為植物特殊用途照明，不論在效率或功效都將比用傳統光源具有優勢，因傳統光源一般都為全波域，若以此日光燈為光源，需要加一濾片過濾而取得所需特定波域光，這將減少光的利用率且對於被過濾光源將有可能會轉化成熱形式。對於水中生物，如光合菌，亦需藉由特定波長光源進行光合作用，當此生物於一定深度的水中就會有光照不足現象，因此若要以人工光源照射，需考慮光源於水中的安全性與耐候性，因 LED 光源可小電壓電流驅動且耐候性佳，並可針對水中生物的生理周期而調變光度，且對於光合菌、紅藻、綠藻等生物的培養，可以針對生物特性提供特定波長的光源以避面非必要生物的滋長，因此 LED 在此方面將可提供較佳品質的光源。利用 LED 燈替代傳統日光照射，用以培養光合成菌，能夠有效縮短培養週期，且達到節能減碳的效果，達到可持續發展之目的。對氣密性良好有環控的農業生產環境如太空農業，植物組織培養室或植物生長箱等是一種非常適合的人工光源 (Barata *et al.*, 1992; Bula *et al.*, 1994; Hoenecke *et al.*, 1992; Eiichi *et al.*, 1997)。基於光量與成本的考量，動物生產上尚無應用 LED 的先例，但使用其他人工光源則已頗為普及。在昆蟲防

治上應用 LED 應是近期界可以看到的應用。目前國內台灣大學生物產業機電學系方煒教授等多位先進已致力於 LED 在生物產業上的應用研究許多年，並已獲得豐碩成果^(21, 22)。

3. 微生物燃料電池 (Microbial Fuel Cell, MFC)

在生質能源中，科學家試圖開發微生物燃料電池，利用微生物作為催化劑進行氧化還原反應產生電能。微生物燃料電池是藉由微生物的催化作用，將化學能轉化成電能的一種裝置。一般含有兩個槽體，分別為陽極槽、陰極槽，並以質子交換膜相隔，其中陽極為厭氧槽、陰極為好氧槽。微生物燃料電池槽內的微生物將基質降解後，會釋放質子和電子。電子經由外部迴路到達陰極，而質子將通過質子交換膜到陰極，在陰極槽內電子、質子與氧結合產生水。簡單的說，微生物燃料電池的運作是利用陽極周圍之微生物新陳代謝所產生之能量 (Ieropoulos *et al.*, 2005)。微生物燃料電池之所以可以將化學能轉變成電能是利用陰、陽極之間的兩個耦合反應。如圖 10 所示，第一個耦合反應發生在陽極。當微生物行氧化代謝反應時，接受電子的電子稜呈還原態，而當將電子傳送到電極上後，馬上又恢復氧化態。第二個耦合反應，則是陰極電極行還原反應。電極會接受從陽極傳來的電子和質子，與液相中的氧形成水 (Park *et al.*, 2002; Zeikus *et al.*, 2003)^(23, 24)。

影響微生物燃料電池性能的因素包括：陽極槽內氧化燃料的速率、電子傳送到電極的速率、外電阻、質子傳送以及氧在陰極的反應等 (Gil *et al.*, 2003; Chang *et al.*, 2004; Jang *et al.*, 2004)。文獻⁽²⁵⁾回顧了七種有關之光合微生物燃料電池 (photosynthetic microbial fuel cells, PMFC) 之特點，詳如圖 11 所示。文獻⁽²⁶⁾的目標是要發展攜帶式微生物燃料電池，以自發的氣泡導引機制排放二氧化碳並產生流動以輔助電子的傳遞，使系統在能量轉換效率與操作壽命上都能有大幅度的提升。微生物燃料電池的陽極以酵母菌為觸媒催化葡萄糖的反應，並利用傳遞媒介將電子輸送到電極表面；陰極則使用鐵氰化鉀—亞鐵氰化鉀循環與氧

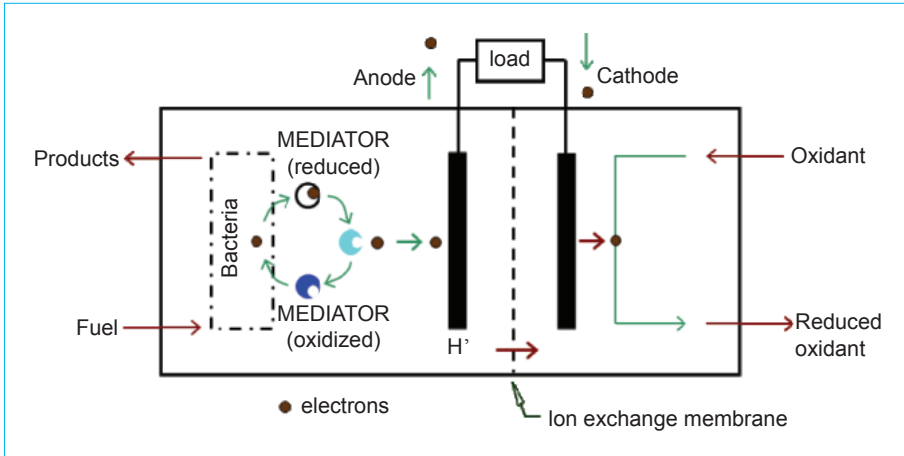


圖 10. 微生物燃料電池之示意圖 (Reference: A. K. Shukla et al. 2004)^(23, 24)。

氣、質子及電子反應，形成完整的反應迴路。在能量的輸出上，單電池開路電壓可達 0.37 V，60 分鐘內平均體積能量輸出可達 $32.16 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ ，操作壽命最長可達 4 小時，過程中電流輸出從 $120 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 衰退至 $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。除此之外，本研究並成功的製作出由六個單元組合而成的電池堆，總驅動電壓為 1.75 V，且具備驅動發光二極體的能力。文獻⁽²⁷⁾以光合細菌 (*rhodospseudomonas palustris*) 為生物觸媒進行光合微生物燃料電池開發與研究，研究的項目包括 (1) 電極改質 (modified electrode) 之影響、(2) 介電質 (mediator) 型態之探討、(3) 光合微生物電池於黑暗下或不同光照強度進行化學異營或光合異營之電池效能比較。研究結果得知，改質電極方面，使用奈米碳管石墨板電極分析電池效能可得到最大功率密度為 3.26 mW m^{-2} ，其中最大的功率輸出分別為粗糙化石墨板的 7.4 倍、石墨板的 12.7 倍、不衫板的 108 倍。文獻⁽²⁸⁾研究光合菌 *rhodospseudomonas sphaeroides* 在微生物燃料電池模組系統的發展潛力。以碳紙為微生物陽極基材，並以具生物相容性之導電性單體 (pyrrole) 與其單體衍生物 (4-(3-pyrrolyl)butyric acid) 形成導電性共聚高分子以修飾碳紙表面，並固著微生物於電極上。SEM 表面觀察與電化學分析儀檢測法可用來比較不同聚合時間對導電性高分子膜厚度的影響及對於微生物燃料電池功率與電流輸出的差異，以聚合時間為 3 小時之共聚導電性高分子為陽極之微生物燃料電池系統為最佳，鹽橋系統中可達 $280 \text{ mW}/\text{m}^3$ 之最大功率輸出。以燃料電池之電流密度與功率密

度之效能來判斷材料對系統的影響，亦比較鹽橋系統與質子交換膜系統之效能，並利用極化曲線與交流阻抗分析儀量測燃料電池內阻抗的變化。質子交換膜系統之效能明顯優於鹽橋系統，可有 $1800 \text{ mW}/\text{m}^3$ 之最大功率輸出。由於除了光合微生物燃料電池之外，其他微生物燃料電池與光源強度無直接關係，本文僅簡單介紹至此，不再進一步討論。

三、液體中光強度量測方法

水面上方的日光 (sunlight) 與天光 (skylight) 的總輻射能量穿透進入水面以後在不同深度下的光強度稱為水中光強度。環境水體生態的監測與應用上，通常是以測量可見光波長範圍 (400 至 700 nm) 內的總輻射能量 (total irradiance) 為代表，在此波段範圍內的總能量是水體中浮游植物進行光合作用的有效能量 (photosynthetic active radiation, PAR)。水中光強度的資料在水體生態的環境影響評估上是一項重要因子⁽²⁹⁾。可見光強度的單位一般用莫耳 (mol)、愛因斯坦 (Einstein, E)、量子 (quanta) 或是光子 (photons) 的單位來表示： $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $\mu\text{E s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $\text{quanta}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $\text{photons}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。不同單位的相互關係如下， $1 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2} = 1 \mu\text{E}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2} = 6.022 \times 10^{17} \text{ quanta}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2} = 6.022 \times 10^{17} \text{ photons}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

水中光強度的強弱受到水分子本身、無機懸浮顆粒、浮游植物及其碎屑物顆粒、以及溶解性有機物，對入射光的吸收與散射效應所影響。一

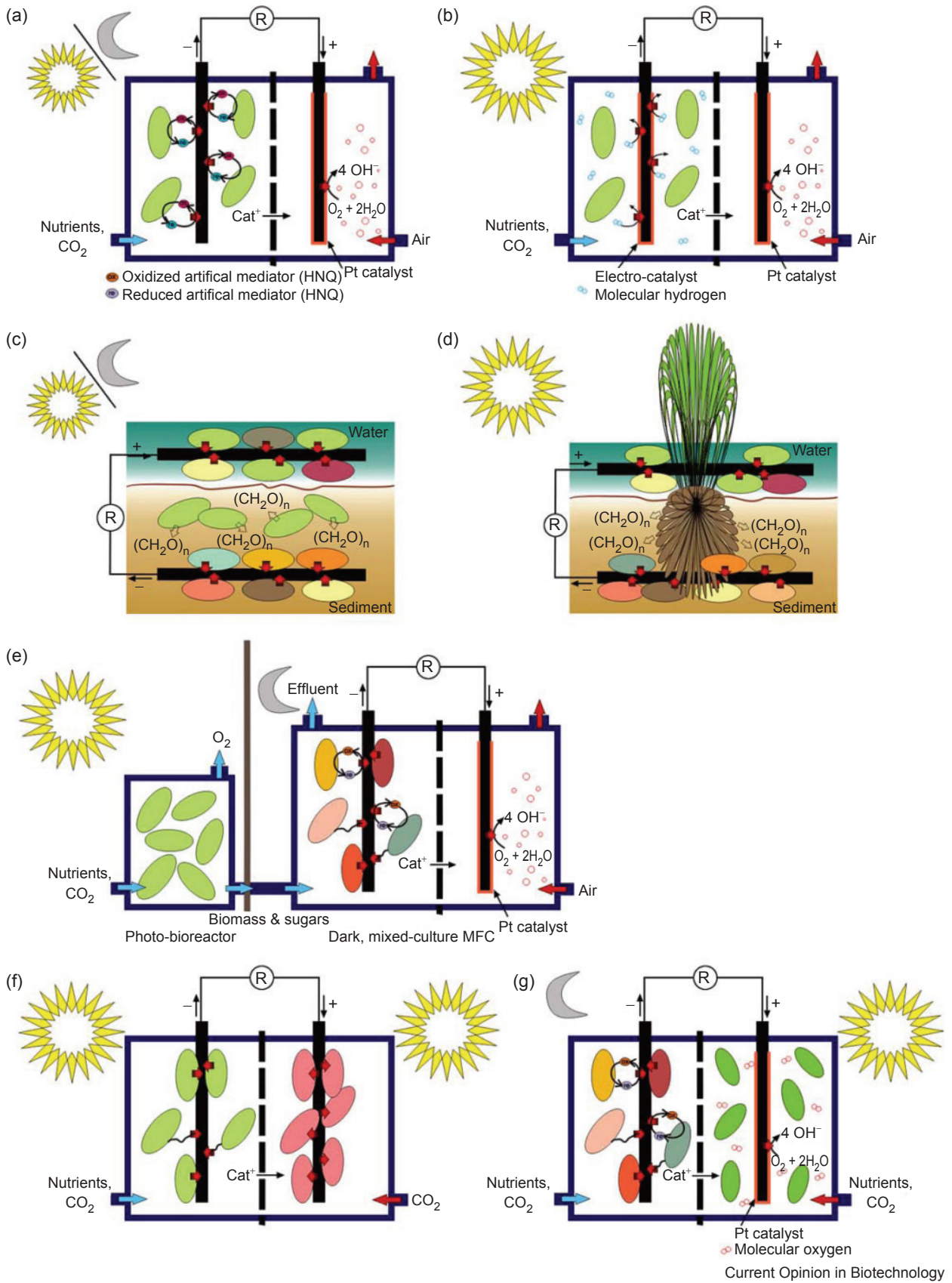


圖 11. 七種光合微生物燃料電池 (photosynthetic microbial fuel cells; PMFC) 之示意圖⁽²⁵⁾。

一般而言，當水面上之光合作用有效能量進入水體後，其強度會隨著深度增加而呈現指數衰減的情形，此水中光強度隨深度衰減情形可以使用一個所謂的平均光衰減係數 (mean downwelling attenuation coefficient for downward irradiance of PAR, K_d)，以及光衰減方程式作為量化指標。光衰減係數值的變化可做為瞭解水中浮游植物可以利用的可見光能量多寡，或是水中浮游植物可以進行光合作用的深度，稱之為有光層深度 (euphotic depth, Z_e)。未受陸源物質影響的自然水體中，懸浮顆粒 (主要成份為浮游植物及其碎屑物顆粒) 的濃度愈高，則光的衰減係數值就愈大，有光層的深度會愈淺⁽²⁹⁾。

測量水中光強度的儀器，依其用來接收入射光能量偵測計的構造形狀可分為平面式、半球形及球形等三種 (圖 12)。平面式與半球形接收器可接收到離接收器中心點往上的垂直線上角度 65 度範圍內的所有光，亦即光的有效接收角度為 130 度，平面式的接收器亦稱之為 2p cosine irradiance collector (圖 12(a))，半球形式的接收器亦稱之為 2p scalar irradiance collector (圖 12(b))，球形接收器可接收到的有效角度較大約為 170 度，該類型的接收器亦稱之為 4p scalar irradiance collector (圖 12(c))。這三種型式的接收器在同一時間同一地點所接收到的光強度，以球形接收器測量到的光強度最高，其儀器下放速度依儀器操作說明書而定。三種接收器測量到的光強度並無一定的互換公式，但是同一水體中平均光衰減係數的測量結果則相似⁽²⁹⁾。

通常光線在水中隨深度或傳遞距離的衰減是根據朗伯特—比爾定律 (Lambert-Beer law) 的水下光傳遞公式，也就是光在傳遞時是以一個指數函數進行衰減，然而與實測相比，所測得的曲線往往會跟

理論有所偏差，造成偏差的主因是由於朗伯特—比爾定律在成立前有一些假設，例如入射光要單一波段且為平行光，介質為均勻且非散射體系等^(30, 31)。在不同水深下，光傳遞之衰減係數也會有所不同⁽³²⁾。水體的光學性質可以分為兩類，一為固有光學性質 (inherent optical properties, IOP)，意指只與傳遞介質有關，而與外在光場無關之光學性質，此外外顯光學性質 (apparent optical properties, AOP) 為與傳遞介質、介質週遭光場相關的光學特性⁽³³⁾。(1) 式為朗伯特—比爾定律的水下光傳遞公式，其中 I_z 是傳遞距離 z 時之強度； I_0 是光源強度； c 為總衰減係數⁽³⁰⁾，

$$I_z = I_0 e^{-cz} \quad (1)$$

IOP 是分析光在水中傳遞的重要參數，它可以表示光在水中傳遞的行為，但是 IOP 並不能表示任一光源在水中所呈現的能量分布。因此我們需要透過光源的分析，結合 IOP，才能得到實際能觀察比較的資料。

一狹窄平行單一波段的光束入射一極小體積 ΔV 的水體，厚度為 Δr ，入射光的光譜輻射功率為 $\Phi_i(\lambda)$ ， λ 表示為此光束的波長，在經過此一介質後，部分能量被吸收，此一吸收部份的能量表示為 $\Phi_a(\lambda)$ ，又 $\Phi_b(\lambda)$ 表示為光束在此一極小距離的介質中，所散射的能量。 $\Phi_t(\lambda)$ 表示穿透介質，朝原方向行進的能量。假設沒有非彈性散射的發生，沒有任何光子在散射的過程中發生波長的轉變，依據能量守恆，可得式 (2)⁽³⁰⁾：

$$\Phi_i(\lambda) = \Phi_a(\lambda) + \Phi_b(\lambda) + \Phi_t(\lambda) \quad (2)$$

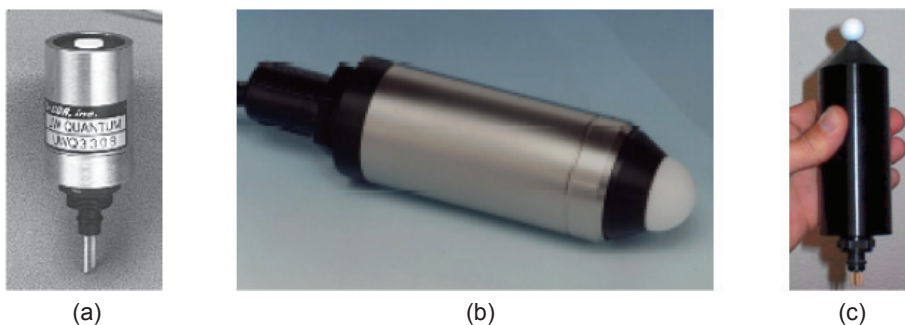


圖 12. 不同型式的可見光光強度偵測計。(a) 美國某公司生產之平面式偵測計、(b) 美國某公司生產之半球形式偵測計、(c) 英國某公司生產之球形形式偵測計。

依據以上定義，可以將光譜吸收率 (spectral absorptance) $A(\lambda)$ 、光譜散射率 (spectral scatterance) $B(\lambda)$ 以及光譜透射率 (spectral transmittance) $T(\lambda)$ ，定義為式 (3)、(4) 與 (5)⁽³⁰⁾：

$$A(\lambda) = \Phi_a(\lambda)/\Phi_i(\lambda) \quad (3)$$

$$B(\lambda) = \Phi_b(\lambda)/\Phi_i(\lambda) \quad (4)$$

$$T(\lambda) = \Phi_t(\lambda)/\Phi_i(\lambda) \quad (5)$$

$A(\lambda)$ 、 $B(\lambda)$ 、 $T(\lambda)$ 分別代表光束吸收、散射與穿透的比率。另外，本文中亦將會使用到的光學名詞及其定義整理如下：

1. 光通量 (luminous flux) 為光在單位時間內發出的能量，若光輸出能量 Q ，時間為 t ，則光通量 F 為 (6) 式，單位為流明 (lm)。

$$F = \frac{dQ}{dt} \quad (6)$$

2. 光強度 (luminous intensity) 定義為點光源於單位立體角 (solid angle) $d\Omega$ 發出的光通量。將空間中一區域朝球心方向投影在半徑 r 的球面上，投影的面積為 dA_1 ，此區域的立體角為 (7) 式，單位為 sr (steradian)。而光強度 I 為 (8) 式所示，單位為 lm/sr 或稱為 cd。

$$d\Omega = \frac{dA_1}{r^2} \quad (7)$$

$$I = \frac{dF}{d\Omega} \quad (8)$$

3. 照度 (illuminance) 定義為單位面積接收到的光通量。假設被照射的單位面積為 dA_2 ，其照度 E 為 (9) 式，單位為 lm/m^2 或稱 lux。

$$E = \frac{dF}{dA_2} \quad (9)$$

此外，由於在光度學和輻射學上測量以及表示的單

位會有些許不同，表 1 為輻射學和光度學計量之比較表。

一般平均餘弦 (average cosine) 的理論定義是指光的傳輸方向相對於某一指定方向，一般是相對於 Z 軸正向夾角餘弦的平均值。平均餘弦提供了水下光場分布角度結構的相關訊息。在僅有吸收，沒有散射的介質中，光場的角度分布不會隨傳輸距離的增加而發生改變，亦是在各個深度上都具有相同的平均餘弦值。但事實上，海水中因懸浮粒子的存在使海水具有明顯的散射。因此，光束在海水中傳遞時，隨著傳輸距離、散射次數的不同，光場的角度分布會有明顯的變化。傳輸距離越長，散射次數越多，光場的漫射分布特徵就越明顯。光場的平均餘弦 $\bar{\mu}$ 定義^(34, 35)：

$$\bar{\mu} = \int_{4\pi} \beta(\theta) \cos\theta \cdot d\Omega \quad (10)$$

$$\bar{\mu} = \int_0^{2\pi} 2\pi\beta(\theta) \cos\theta \sin\theta \cdot d\theta \quad (11)$$

其中 $\beta(\theta)$ 是海水散射相位函數， θ 是散射角。簡單來說，平均餘弦的物理意義主要在表現海水中光場角度分布結構的量。當一束準直光束入射至海水中時，初始光束具有相同的傳輸方向，其平均餘弦值為 1。隨著傳輸距離的不斷增加，光束歷經多次散射的機率越來越大，平均餘弦值越來越小，最終將趨近於零，也就是光場趨於漫射分布。依此現象，本文對輻射傳輸方程式做漫射近似，亦為均勻分布的假設。另外，透過平均餘弦可以建立光束吸收係數 a 和向下垂直衰減係數 $K_E(z)$ 之間的關係。根據 Gershun 方程式：

$$K_E(z) = \frac{a}{\bar{\mu}(z)} \quad (12)$$

故在海水中任一深度 z 處的垂直衰減係數 $K_E(z)$ ，可由該處的平均餘弦 $\bar{\mu}(z)$ 與海水的吸收係數 a 計

表 1. 輻射學與光度學計量比較表。

輻射學計量 (單位)	Flux (W)	Intensity (W/sr)	Radiance ($\text{W}/\text{m}^2\text{sr}$)	Irradiance (W/m^2)
光度學計量 (單位)	Luminous flux (lm)	Luminous intensity ($\text{lm}/\text{sr} = \text{cd}$)	Luminance ($\text{lm}/\text{m}^2\text{sr} = \text{nit}$)	Illuminance ($\text{lm}/\text{m}^2 = \text{Lux}$)

算而得。利用此衰減係數，水下光傳遞的強度變化便可寫成⁽³⁰⁾：

$$I_z = I_0 e^{-K_E(z)z} \quad (13)$$

無論在氣舉式光生物反應器 (air-lift bioreactor) 或是連續攪拌式反應器 (continuously stirred tank reactor, CSTR) 等光生物反應器 (photobioreactor, PBR) 中，皆存在著氣液兩相或氣液固三相等多相流問題，且流動狀態多為紊流，因此為求得其流場與光強度之交互作用，通常藉助計算流體動力學 (CFD) 來分析。板式光生物反應器 (圖 13) 是一種重要的封閉式光生物反應器，該種光生物反應器主體為一四邊形的透明的箱體，高度和寬度可以進行適當的調整，以氣體作為混合動力。其突出的優點是高的面積／體積比，光強分布均勻，產量高。目前的研究大多是對一特定的平板光生物反應器研究其安裝角度、光照強度、平板厚度以及培養密度等因素對微藻產量、細胞生理特性的影響以及它們之間彼此的關係，而對平板式光生物反應器內混合強度對微藻生長影響的研究較少，或者，雖然對混合強度的影響進行了考察，但是並沒有考察不同光照條件下混合強度的影響的不同。光強在培養液中基本上按照指數規律衰減，培養密度愈高，衰減速率愈快，當培養密度高於 3.0 g/L 時，光照穿透距離不超過 0.5 cm，因此在光生物反應器內部沿著光線傳播的方向會形成明顯的光區和暗區。混合強度的增加可以有效地促進藻細胞在光區與暗區之間的置換傳遞，藻細胞接受的平均光照強度會隨之增加。而且當藻細胞的置換頻率達到一定的數值時，光合作用會發生「閃光效應」，藻細胞對光能的利用率升高，面積產量增加。培養密度比較低時，光生物反應器內部光區、暗區不明顯，因此混合引起的「閃光效應」不大，此時混合主要起強化物質傳遞的作用。混合強度過大，藻細胞所受的剪切作用亦會增大，同室內培養相似，面積產量隨著混合強度的升高呈現先升高後下降的趨勢。可以推斷，培養密度愈高，混合強度的增加對面積產量的提高作用愈大⁽³⁶⁾。迄今為止，大多數研究者還只是側重於光合菌的研製、探索多相光合作用過程的反應機理和反應歷程，而對光反應器數學模型的研究很少涉

及，特別是光反應的推動力—光強在反應器床層中的分布和波動規律一直未引起足夠重視。在流化床中光強分布與隨機波動是這一新型光化學反應器的固有現象，它與光反應器數學模型的建立及反應器設計、放大與優化等密切相關。

在一定條件下，LED 輻射光源的光衰減與微藻細胞濃度及光傳播的距離間的關係可由朗伯特—比爾定律表達。光衰減 $At = \ln(I_0(\lambda)/I(\lambda)) = Ka(\lambda) \cdot P \cdot C$ ，式中 P 是光傳播的距離， $Ka(\lambda)$ 為特定波長時的衰減係數， C 為細胞濃度。光衰減 (At) 與細胞濃度和光照表面垂直方向上傳播距離均成正比。光衰減隨藻細胞濃度與光傳播距離而變化影響光吸收效率是工程化高效反應器設計需要重視的關鍵問題之一。尤其是高密度微藻的培養過程。由於 LED 製造工藝決定其光散射角很小，光輻射傳播方向是垂直方向發光，光聚集度高、穿透性強，當藻細胞的濃度控制在一定範圍內，就能減少藻體間的相互遮光效應及散射現象，從而有效地控制光衰減對高細胞密度培養的影響⁽³⁷⁾。本文將光視為光量子流，結合朗伯特—比爾定律和計算流體動力學模擬，擬建立平板反應器 (plate reactor) 及柱體反應器 (cylindrical reactor) 兩種形狀 (詳如圖 13 所示) 之兩相及三相光反應器中光強分布的數學模型，並通過實驗測定反應器中的光強分布。

假設在反應體系內光被溶劑 (或介質)、溶質 (或反應物與生成物) 和光催化劑吸收且不產生積累，則光通量可表示為

$$\Phi = Ir_0 \quad (14)$$

液—固流化屬於散式流化，一定液速下反應器各處液含率均勻相等，根據擬流體模型假設，將液、固兩相流體分別連續介質化，即將每一相都看作是充滿整個流場的連續介質，兩相共存並按各自的運動規律運動，分散顆粒連續介質化後具有與液體相對應的物理參數，如吸光係數等。二維反應器在外部平行光源照射下，光子在反應器內傳播時一部分被液相吸收，一部分被固 (或氣) 相流中的流化顆粒 (氣泡) 吸收，這兩部分光子的吸收均為物理吸收，遵循朗伯—比爾吸收定律。忽略光在軸向的散射，光強在反應器中的分布主要受液含率 (或固含率) 和

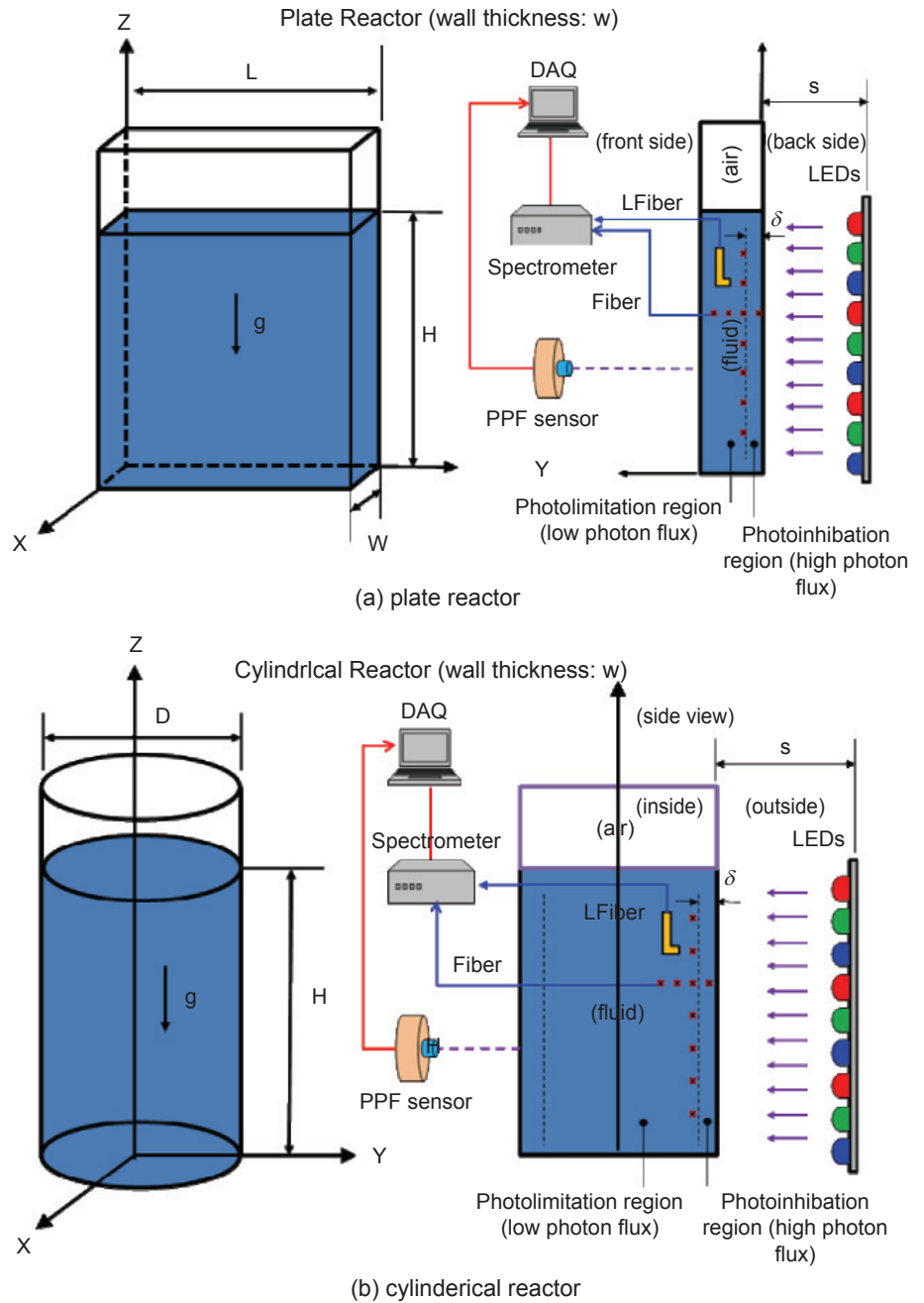


圖 13. 兩種主要反應器幾何示意圖與量測示意圖。

光程長度的影響。穩態操作條件下光強分布方程為

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I(1 - \varepsilon_s) - \alpha_s \varepsilon_s I \quad (15)$$

其中 $\varepsilon_l + \varepsilon_s = 1$ 、 $\varepsilon_l = (E + \varepsilon_0)/(1 + E)$ 、 $E = (L - L_{mf})/L_{mf}$ ， ε_l 為液相含率， ε_s 為固相含率， E 為液固流化床膨脹比， L 為液固流化床床層高度 (m)， L_{mf} 為初始流化床床層高度 (m)。將上述關係代入式 (15)，由邊界條件 $x = 0$ 時 $I = I_0$ ，積分得：

$$\begin{aligned} I &= I_0 \exp \left\{ - \left[\alpha_l \frac{L - (1 - \varepsilon_0)L_{mf}}{L} + \alpha_s \frac{(1 - \varepsilon_0)L_{mf}}{L} \right] x \right\} \\ &= I_0 \exp \left\{ - \left[\alpha_l + \frac{(\alpha_s - \alpha_l)(1 - \varepsilon_0)L_{mf}}{L} \right] x \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

三相流化床體系包含氣、液、固三相，氣泡作為分散相分布於液、固相中，固體顆粒又分散於液相中。氣泡分布對反應器中光強分布的影響很大，由於壁面效應，氣泡在反應器中的分布是不均勻的，

因此需要考慮氣含率沿反應器徑向的不均勻分布。將氣泡作為一相，液相和固相作擬均相處理並作如下假設：(1) 氣泡中不含固體顆粒、(2) 液固擬均相中液含率均勻分布，可用液固流化床中有關參數來描述。同樣，根據擬流體模型假設，將氣、液、固三相流體分別連續介質化，計入氣泡內氣體對光子的物理吸收，應用朗伯-比爾定律的微分形式，穩態操作條件下三相流化床中光強分布方程可表示為

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha_1 I(1 - \varepsilon_g) \varepsilon_1' - \alpha_s I(1 - \varepsilon_g) \varepsilon_s' - \alpha_g I \varepsilon_g \quad (17)$$

式中 $\varepsilon_1 + \varepsilon_s + \varepsilon_g = 1$ 。設液固擬均相中的相對液含率和固含率分別為 ε_1 和 ε_s ，則各種相含率間滿足以下關係 $\varepsilon_1 + \varepsilon_s = 1$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_s(1 - \varepsilon_g)$, $\varepsilon_s = \varepsilon_s(1 - \varepsilon_g)$ 。三相流化床中氣含率在徑向滿足拋物線分布⁽⁹⁾，二維流化床中氣含率的徑向分布可由下式表示：

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{g,\max} - C \left(\frac{x}{D} - 0.5 \right)^2 \quad (18)$$

根據邊界條件，當 $x = 0$ 或 $x = D$ 時氣含率 $\varepsilon_g = 0$ ，可解得 $C = 4\varepsilon_{g,\max}$ ，則氣含率分布方程可簡化為

$$\varepsilon_g = 4\varepsilon_{g,\max} \left(1 - \frac{x}{D} \right) \frac{x}{D} \quad (19)$$

床層中心最大氣含率可由床層平均氣含率確定：

$$\bar{\varepsilon}_g = \frac{\int_0^D \varepsilon_g dx}{D} = \frac{2}{3} \varepsilon_{g,\max} \quad (20)$$

液固擬均相中的相對液含率可用液-固流化床中有關參數來表示： $\varepsilon_1 = (E + \varepsilon_0)/(1 + E)$ 。將以上各式代入式 (17)，並根據邊界條件 $x = 0$ 時 $I = I_0$ ，積分得：

$$I = I_0 \exp \left[-\alpha_1 \left(x - 2\varepsilon_{g,\max} \frac{x^2}{D} + \frac{4\varepsilon_{g,\max}}{3} \frac{x^3}{D^2} \right) \frac{L - (1 - \varepsilon_0)L_{mf}}{L} + \alpha_s \left(x - 2\varepsilon_{g,\max} \frac{x^2}{D} + \frac{4\varepsilon_{g,\max}}{3} \frac{x^3}{D^2} \right) \frac{(1 - \varepsilon_0)L_{mf}}{L} + \alpha_g \left(2\varepsilon_{g,\max} \frac{x^2}{D} - \frac{4\varepsilon_{g,\max}}{3} \frac{x^3}{D^2} \right) \right] \quad (21)$$

若令

$$K_1 = \frac{\alpha_1 [L - (1 - \varepsilon_0)L_{mf}]}{L + \alpha_s \left[\frac{(1 - \varepsilon_0)L_{mf}}{L} \right]} \\ K_2 = \frac{2\varepsilon_{g,\max} \alpha_1 [L - (1 - \varepsilon_0)L_{mf}]}{(DL)} + \frac{2\varepsilon_{g,\max} \alpha_s (1 - \varepsilon_0)L_{mf}}{(DL) - 2\varepsilon_{g,\max} \alpha_g D^{-1}} \\ K_3 = \frac{4\varepsilon_{g,\max} \alpha_1 [L - (1 - \varepsilon_0)L_{mf}]}{(3D^2L)} + \frac{4\varepsilon_{g,\max} \alpha_s (1 - \varepsilon_0)L_{mf}}{(3D^2L) - 4\varepsilon_{g,\max} \alpha_g} \quad (22)$$

則式 (21) 可簡化為

$$I = I_0 \exp(-K_1 x + K_2 x^2 - K_3 x^3) \quad (23)$$

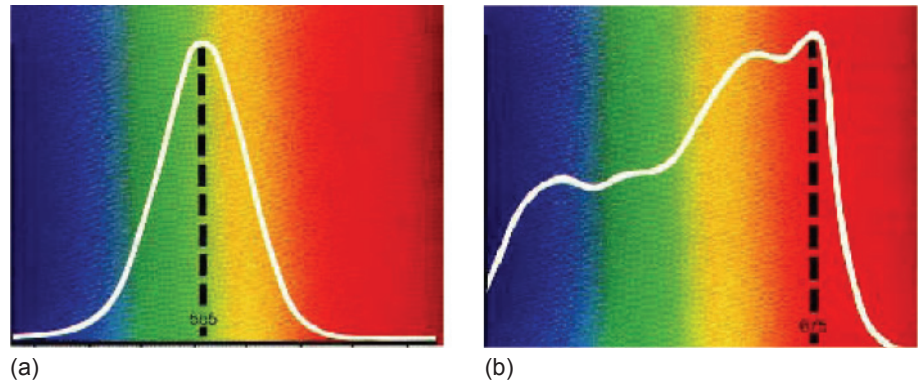
本文參考文獻⁽³⁷⁾之光強度數學模型與計算流體動力學 (CFD) 模擬，來建立朗伯特-比爾定律在靜態、氣泡、攪拌、擾流、生長條件下之光源強度分布之實驗量測設備與量測方法及 LED 光源與不同流體及操作條件下之光/機交互作用關係，改善原有以光源平均強度為主之試誤法為主之設計方法，以提高未來光反應器設計之準確性。

四、生長環境中光合量子通量密度量測方法

光強度、光質與光照時間三者對植物影響所及的反應包括：光合作用、葉綠素的合成、趨光性、光敏素參與的反應、光週性等。對動物影響所及的反應包括：泌乳量、產蛋率、增肉量等。植物的生長、發育和光合作用不僅受光強度的控制，同時也受光質的控制。此外照光的時間亦有所影響，因此造成光控制植物生長發育相當複雜的過程。植物利用可見光行光合作用，利用紅外光，特別是 700 至 800 nm 控制植物形態的發育

圖 14.

(a) 人類眼睛之比視感度曲線、(b) 植物體對光線之敏感度曲線⁽³⁸⁾。



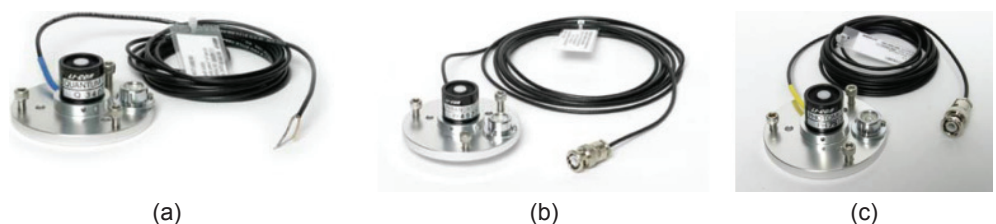
(morphogenesis)，而紫外線可被生物蛋白質吸收引起傷害。這些反應的產生主要是經過三個主要接光系統 (receptor system)。葉綠素吸收近於 660 nm 波長進行光合作用，光敏素 (phytochrome) 吸收 660、730 nm 波長控制許多形態發生的反應。而類胡蘿蔔素 (carotenoid) 吸收 450 nm 引起屈光性 (tropism) 以及高能量光形態發生 (high-energy photomorphogenesis)。波長在 300 至 400 nm 的紫外光與 700 至 800 nm 的近紅外線 (遠紅光) 會影響作物的生化反應及其外觀。在 400 至 700 nm 的光線與光合作用有很密切的關係，此光帶的光稱為光合作用有效光 (photosynthetically active radiation, PAR)。吾人有興趣的是 PAR 範圍內光子的數量而非 PAR 範圍內光之照度，所以較佳之測量應是量測光合作用光子通量 (PPF)，此為單位時間內落到單位面積的平面上波長範圍在 400 至 700 nm 的光子的數量，其常用單位為 $\mu\text{mol}/(\text{sm}^2)$ 或 $\mu\text{E}/(\text{sm}^2)$ 。使用的感測器為光量子感測器 (quantum sensor)。光量的多寡除了以光量子數 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) 表示之外，尚有照度 (lux) 與光能 (W/m^2)。感測器亦分為此三大類。照度感測器 (photometric sensor) 用來量可見光 (380 至 780 nm)，使用單位為 lux ($\text{lux} = \text{lumen}/\text{m}^2$) 或燭光 ($\text{fc} = \text{lumen}/\text{ft}^2$)。照度感測器一

般並不在溫室中使用，因為係依據人眼對光線的比視感度曲線而設計出來 (圖 14，波峰為 555 nm)，植物體對光線的敏感度則有另一曲線 (圖 14(b)，波峰為 675 nm)，兩者不同⁽³⁸⁾。

輻射感測器 (pyranometer，或稱日射計 (solar meter))，可用以量測來自太陽與其它所有來自天空之輻射，其量測之波長範圍較廣，視廠牌不同，常見的有 400 至 1100 nm、320 至 4200 nm 及 280 至 2800 nm，其量測的為此波長範圍內的能量，單位為 W/m^2 。日射計之主要感測元件為熱電堆 (thermopile) 或光電池 (photo cell)。熱電堆由特殊之熱偶線堆積製成，藉溫差產生電壓差，準確度高，但非常昂貴。Eppley 公司之 pyranometer 為熱電堆應用之代表，其量測之波長範圍為 280 至 2800 nm。光電池係藉光電效應引起之電流產生電場，以電流輸出。光電池之反應光譜為 400 至 1100 nm，LI-COR 公司之 pyranometer 為光電池應用之代表。以上三種感測器的誤差範圍一般在 $\pm 5\%$ 。光強度部分可量測直射、散射 (加光追蹤擋光器)、全輻射、淨輻射 (含上下兩側) 的光量。常見光感測儀器如圖 15 所示。表 2 所示為三種 LI-COR 光度計之量測單位及波長範圍。⁽³⁹⁾較進階的設備內含光柵可量測光譜中各小波段，並允許透

圖 15.

(a) LI-190、(b) LI-200、
(c) LI-210。



感測器種類	量測項目	量測單位	波長範圍
LI-190	光量子 (Photosynthetic Photon Flux Density; PPF)	$\mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$	400–700 nm
LI-200	日輻射感測器 (Pyranometer; solar radiation)	W m^{-2}	400–1100 nm
LI-210	光照感測器 (Photometric; illuminance)	lux	380–770 nm

表 2.
三種 LI-COR 光度計
之量測單位及波長範
圍。



圖 16. 可攜式光譜儀 (AvaSpec-2048)。

過軟體進行運算，求出各不同波段，譬如：藍光 B (400 至 500 nm)、紅光 R (600 至 700 nm)、遠紅光 FR (700 至 800 nm)、PAR (400 至 700 nm) 等的累積光量子數或輻射能或照度值。圖 16 所示為荷蘭 Avantes 公司的 AvaSpec-2048 型光譜儀，採用對稱式光路設計，焦距 75 mm，包括光纖接頭 (標準 SMA 接口，也可以選擇其它類型的接口)、準直鏡、衍射光柵、聚焦鏡和 Sony ILX554B 型 2048 像素線陣 CCD 探測器，波長範圍 200 至 1100 nm，最高分辨率 0.04 nm，提供 USB1.1 或 USB2.0 接口、RS-232 接口和 I/O 數字／模擬接口。

五、結語

本文緣起於協助輔導產學合作廠商進行花蓮縣政府「花蓮縣環保科技園區研究發展計畫-LED 燈作為光合菌生產達到節能減碳效果之先期研發計畫」之研究成果為基礎。前項產學合作計畫⁽⁴⁰⁾主要目的在於探討如何應用 LED 燈於光合菌培養以解決光源問題，並進行連續式生產降低生產成本，如圖 17 所示。研究結果顯示，光合菌光源以紅光 LED 為最佳表現，最佳波長在 650 至 950 nm。使用新型光反應器不僅節省發酵時間，使用 LED 燈發酵之成本並不比傳統型昂貴，而且效率要更高。在連續生產的菌數皆可達標準濃度以上，並且透過田間試驗，包括西瓜田間與養豬廢水等現場試驗，其效果都相當不錯，未來在生產模式商業化之後，將有相當正面的效益，尤其是在改善農民收入方面。在固定二氧化碳上，500 噸光合菌可固定二氧化碳約 17887 公斤之二氧化碳。菌種培養光源改成 LED 燈，其優勢為長壽命、高光電轉換效率，而節能省電，無紫外線、不易損壞的固態元件本質、發光體小，而具高設計與應用彈性、瞬間開關反應等特性，可以提供連續性的光源與穩定的培養條件，如此一來，不僅可以降低生產成本，且可符合

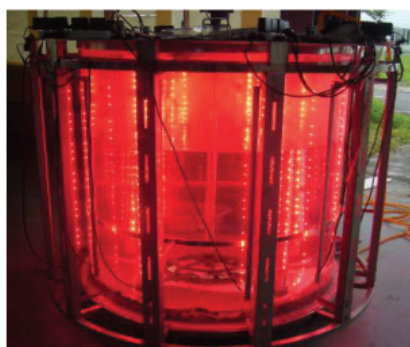
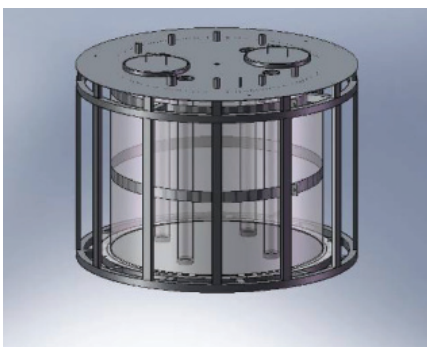


圖 17.
新型光反應器設計圖 (LED 燈
源內建 16 根置入發酵槽體內
(共 288 個紅光 LED)，外圍側
掛 12 根 LED 燈管 (共 216 個
紅光 LED)，最大容量為 1000
公升)⁽⁴⁰⁾。

目前全球節能減碳之發展。

然而，前述計畫成果係在中小規模之生產技術研發上之突破，該計畫於執行中尚有下列問題點待克服：

1. 因為是採用現有液態發酵槽體改裝，針對如何設置內置式低剪力葉輪攪拌，來克服氣升式反應器氣泡聚合現象，以及對液面氣泡爆破產生的衝擊力對細胞損傷之機制，與反應區內光合細菌堆積和滯留死區等問題，皆未研究建立深入之光反應器學理基礎，無法實際進行放大生產以得到最佳化結果。
2. 係利用現有 LED 光源進行光合菌生產，缺乏對其他波長光源、菌種、光源配置、光強度分析及反應器幾何設計與相關製程之研究。亦未進行槽體內光強度之數值模擬與實驗量測，無法獲得正確數據來進行深入分析。本文藉由同時考慮光反應與流場之光機交互作用傳遞現象，擬以數值模擬與實驗量測兩種方法進行研究，希望建立精確之反應器設計參數與設計模型，以無因次參數來進行大量產設計，並與實驗量測結果比對，驗證大量產數學模型之準確性，以利放大生產及後續開發其他光反應器應用時之需。
3. 光合菌光反應過程中，菌種、基質與反應器光反應環境 (流場) 三者之間存在非常複雜的生化與熱質傳交互作用問題，必須要有深入之數值模擬與實驗驗證分析研究，進而藉由數值模擬找出影響之設計參數與設計準則。如何進行深入研究分析建立光反應與流場兩者間之交互影響關係，藉由數值模擬找出反應器設計參數之影響與設計準則。因此，本文主要目的在探討 LED 光源在不同幾何形狀槽體中及不同操作 (靜態、氣泡、攪拌、擾流、生長) 條件下，其光源強度、分布與光／機交互作用效應等問題，作為將來設計新式光反應器之基礎。因為 LED 光源在不同流體 (液體、高濕) 環境下具有不同之反射、吸收及折射等效應，這些效應對 LED 在光合菌培養、植物生長及微生物發酵等應用皆有很大的影響。由前述文獻回顧中可知，目前之研究主要集中在如何利用最適 LED 光源來培養光合菌、植物或微生物等應用，針對反應器內部 LED 光強度分布、

衰減距離，特別是光機交互作用之耦合問題，仍有待進一步深入研究。因為光源在槽體內部會受到微生物、氣泡或是懸浮微粒等氣態或固態物質所造成之反射、吸收與繞射等作用之影響，反應器槽內不同位置之光強度分布是不均勻的。這個效應對光合反應製程是非常重要的問題，必須要對光強分布與光衰距離有一深入研究後，將結果應用於光反應器設計上，才能提高光反應效率並增加產氫量或發酵品質。

為了瞭解不同操作模式 (靜態、氣泡、攪拌、擾流、生長) 對光源強度、分布與光／機交互作用的影響，本研究擬分別針對批次、連續攪拌式以及 fill and draw (F/D) 等操作策略來探討各操作策略對光合菌產氫效能的影響。以板形槽 (plate reactor) 與圓筒槽 (cylindrical reactor) 兩種工業界上常用之槽體形狀為主，建立槽體內部在靜態、氣泡、攪拌、擾流、生長條件下光源強度與分布之實驗量測方法與設備，來模擬微生物培養環境及 LED 光源與不同流體及操作條件下之光／機交互作用，包括：(1) light/dark ratio、(2) 光強度模型、(3) 光分布均勻性、(4) 固、液、氣含率關係式、(5) 朗伯特一比爾定律修訂、(6) Intensity Attenuation = f (波長，濃度，反應器形狀，穿透距離 (δ 值)) 等問題，改善原有以光源平均強度為主之設計方法，以提高未來光反應器設計之準確性。未來更可將本計畫之成果運用至其他光反應器結構上，如圖 18 所示。

綜合而言，本文所建立之模擬微生物培養環境中 LED 光源強度、分布與光／機交互作用特性技術，預期可有效解決光反應器設計、光合作用發酵槽及光合 MFC 等應用上之光強度設計問題，具體重要性如下：

1. 生物法產氫技術是利用生物科技與能源科技來改善對地球環境破壞或是尋找清潔的可再生能源來替代現有的化石能源等研究議題上非常重要的技術。微藻光生物反應器與其生產系統的建立是項高度跨領域整合的生物工程，需要許多機械、工程及材料學家進行光生物反應器的設計、控制、操作分析及計算，以期大幅增加單位產能、提升 CO₂ 減量之效能、減少水資源之消耗及增加土地

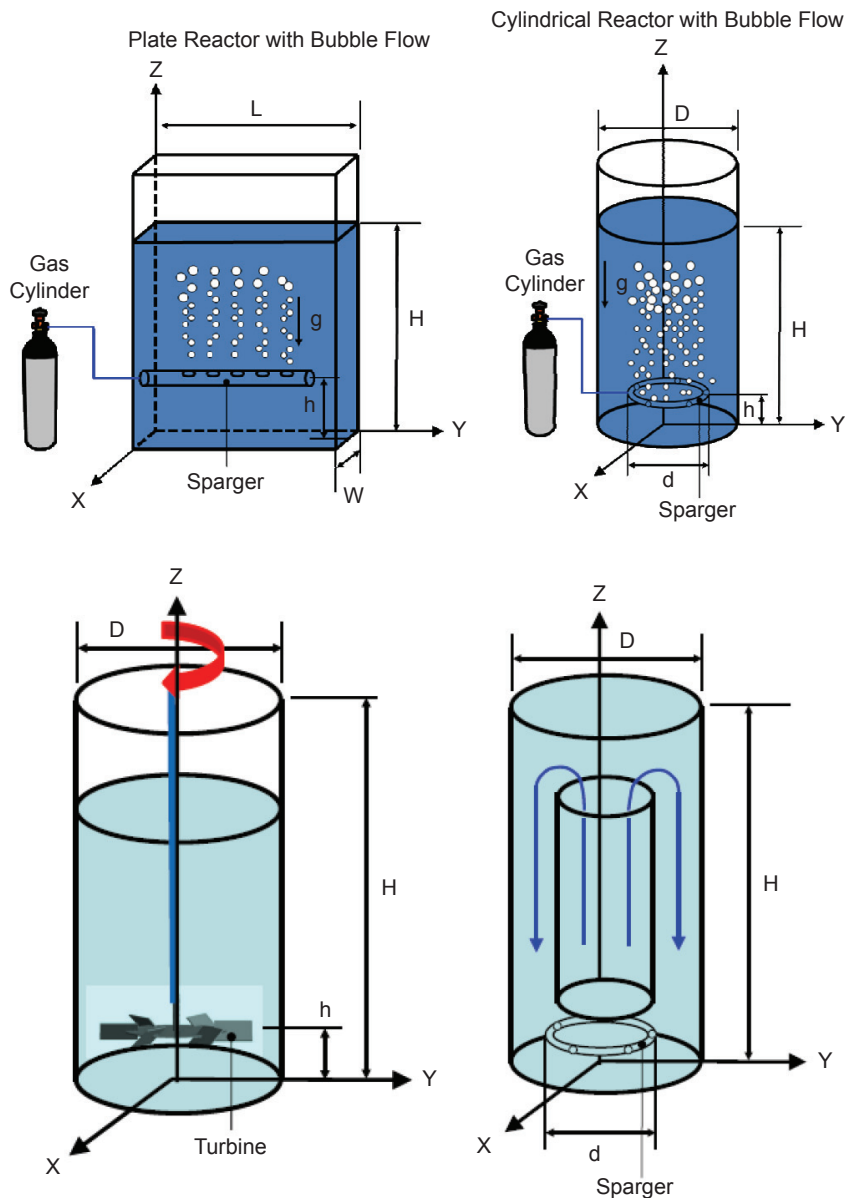


圖 18. 未來擬進行研究之光反應器結構示意圖。

運用之效率。

2. 目前之研究主要集中在如何利用最適 LED 光源來培養光合菌、植物或微生物等應用，針對反應器內部 LED 光強度分布、衰減距離，特別是光機交互作用之耦合問題，仍有待進一步深入研究。
3. 藉由同時考慮光反應與流場之光機交互作用傳遞現象，以數值模擬與實驗量測兩種方法進行比對驗證數學模型之準確性，可以建立精確之反應器設計參數與設計模型，並以無因次參數來進行放大產設計，以利放大生產及後續開發其他光反

應器 (氣舉式、CSTR、發酵、光合微生物燃料電池) 應用時之需。對於特定光生物反應器之開發與產業化，可提供我國微藻培養技術與規模量產之有效支援。

誌謝

本研究為國科會計畫編號 NSC100-2221-E-150-089- 及 NSC101-2221-E-150-052- 所提供之研究經費支持，使本研究計畫得以順利完成，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. <http://www.tri.org.tw/unfccc/main05.htm>
2. F. Harvey, *Can Biochar Help Save the World?* (2009).
3. J. Houghton, *Rep. Prog. Phys.*, **68**, 1343 (2005).
4. S. M. Haefele, K. Naklang, D. Harnpichitvitaya, S. Jearakongman, E. Skulkhu, P. Romyen, S. Phasopa, S. Tabtim, D. Suriya-arunroj, S. Khunthasuvon, D. Kraisorakul, P. Youngsuk, S. T. Amarante, and L. J. Wade, *Field Crops Research*, **98** (1), 39 (2006).
5. <http://www.gdswny.com/>
6. 「綠色能源產業旭升方案」行動計畫, 經濟部中華民國 98 年 10 月。
7. 陳思擘, 上海交通大學博士學位論文 (2008)。
8. 林志生, 邱聖壹, 農業生技產業季刊—動物與水產生技, **22**, 44 (2010)。
9. E. Eroglu, A. Melis, *Bioresource Technology*, **102**, 8403 (2011)。
10. 林祺能, 逢甲大學化學工程學系博士論文 (2006)。
11. 張志強, 國立中央大學化學工程研究所碩士論文 (2000)。
12. 安靜, 河南農業大學碩士學位論文 (2009)。
13. X. Wu and J. C. Merchuk, *Chemical Engineering Science*, **56**, 3527 (2001)。
14. J. C. Merchuk and X. Wu, *Journal of Applied Phycology*, **15**, 163 (2003)。
15. 翁義山, 大同大學生物工程研究所碩士論文 (2006)。
16. N. Kantarci, F. Borak, K. O. Ulgen, *Process Biochemistry*, **40**, 2263 (2005)。
17. J. Ding, X. Wang, X.-F. Zhou, N.-Q. Ren, W.-Q. Guo, *Bioresource Technol.*, **101**, 7005 (2010)。
18. 陳俊延, 國立成功大學化學工程學系博士論文 (2006)。
19. C.-Y. Chen, K.-L. Yeh, R. Aisyah, D.-J. Lee, J.-S. Chang, *Bioresource Technology*, **102**, 71 (2011)。
20. 楊其長, 張成波, *GREENHOUSE HORTICULTURE*, 36 (2005)。
21. 饒瑞佶, 國立臺灣大學生物產業機電工程學研究所碩士論文 (2006)。
22. 方煒, 饒瑞佶, <http://www.wretch.cc/blog/nanobiolight/6775020>
23. 余苑婷, 國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士學位論文, (2006)。
24. 黃雅妮, 國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士學位論文 (2008)。
25. M. Rosenbaum, Z. He, and L. T. Angenent, *Current Opinion in Biotechnology*, **21**, 259 (2010)。
26. 陳建州, 國立清華大學工程與系統科學系碩士學位論文 (2006)。
27. 藍祺偉, 元智大學化學工程與材料科學學系碩士學位論文 (2008)。
28. 張佑嵩, 國立成功大學化學工程學系碩士學位論文 (2008)。
29. 水中光強度檢測方法, NIEA W224.50C。
30. 趙致傑, 國立成功大學系統及船舶機電工程學系碩士論文 (2010)。
31. J. D. J. Ingle and S. R. Crouch, Prentice Hall, New Jersey (1988)。
32. 行政院環境保護署環境檢驗所, <http://www.niea.gov.tw/>
33. C. D. Mobley, San Diego, CA, 592 (1994)。
34. J. T. O. Kirk, *Applied Optics*, **38**, (15), 3134 (1999)。
35. J. T. O. Kirk, Cambridge University Press, 509 (1994)。
36. 蘇貞峰, 薛升長, 康瑞娟, 石紹淵, 叢威, 蔡昭玲, 中國生物工程雜誌, **29**(3), 51 (2009)。
37. 郝曉剛, 李洪輝, 於秋碩, 張忠林, 樊彩梅, 孫彥平, 過程工程學報 (2005)。
38. 方煒, 農業設施環境因子量測與紀錄-台大生機系九十一年度「農業感測器專業訓練班」講義。
39. 姚銘輝, 行政院農業委員會農業試驗所, **85**, 26 (2011)。
40. 花蓮縣政府「花蓮縣環保科技園區研究發展計畫-LED 燈作為光合菌生產達到節能減碳效果之先期研發計畫期末報告(先期研發案, 計畫編號: 98003)」(2011)。



周榮源先生為國立中興大學應用力學博士，現為國立虎尾科技大學機械設計工程系副教授兼系主任。

Rong-Yuan Jou received his Ph.D in the institute of application mechanics from National Chung Hsing University. He is currently an assistant professor and director in the Department of Mechanical Design Engineering at National Formosa University.